

真空  
技术  
手册

第二版

专业知识手册

2 册

# 译者序

本书译自德国普发真空于2013年出版的《The Vacuum Technology Book Volume II-Know how book》。该书是德国普发真空的真空专家长期从事真空工程工作的积累和经验总结，是从事真空工程领域工作者的一本手册和指导书。

全书共分8章，其中包括真空技术介绍；基础计算；真空设备中的机械部件；真空获得设备；真空测量设备；质谱仪与残余气体分析；泄漏检测；污染管理解决方案等，基本涵盖了真空工程的全部内容，这本书会对真空技术领域的研究，开发和工业应用将产生重要的影响。

参加本书翻译的有东北大学巴德纯、张世伟、王晓冬、刘坤教授及谢元华副教授，博士生迟小宇参加了部分文字编辑，最后由巴德纯统稿。原著中有些明显的笔误和印刷错误，凡是本次已经发现的地方，译者都直接更正过来了。对国际公认的称谓和普发真空出品的型号名称均给予保留。由于本书涉及的领域比较宽泛，给译者的翻译工作带来了很大困难和挑战，译者在翻译时业已考虑国内现有的通行译法进行了翻译。

由于译者的学识和对本书原著的理解有限，译著中的不妥之处恳请读者批评指正。

2020年10月 于东北大学



## 目录

## 真空技术及知识手册

## 1 真空技术介绍

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| <b>1.1 概述</b>          | <b>9</b>  |
| 1.1.1 真空的定义            | 9         |
| 1.1.2 真空概述             | 9         |
| <b>1.2 基本原理</b>        | <b>9</b>  |
| 1.2.1 压力的定义            | 9         |
| 1.2.2 普适气体方程           | 11        |
| 1.2.3 分子数密度            | 12        |
| 1.2.4 热运动速度            | 12        |
| 1.2.5 平均自由程            | 12        |
| 1.2.6 流动类型             | 14        |
| 1.2.7 气体流量             | 15        |
| 1.2.8 流导               | 16        |
| <b>1.3 影响现实真空系统的因素</b> | <b>18</b> |
| 1.3.1 污染               | 18        |
| 1.3.2 冷凝和蒸发            | 18        |
| 1.3.3 解吸、扩散、渗透和泄漏      | 19        |
| 1.3.4 烘烤               | 20        |
| 1.3.5 残余气体组成           | 20        |
| 1.3.6 充气保护             | 20        |

## 2 2 基础计算

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| <b>2.1 概述</b>                        | <b>22</b> |
| <b>2.2 计算</b>                        | <b>22</b> |
| 2.2.1 罗茨机组选型                         | 22        |
| 2.2.2 冷凝器模型                          | 25        |
| 2.2.3 涡轮分子泵机组                        | 27        |
| 2.2.3.1 使用涡轮分子泵组将容器排空至 $10^{-8}$ hPa | 27        |
| 2.2.3.2 使用涡轮分子泵抽吸高气体负荷               | 29        |
| <b>2.3 管道流导率</b>                     | <b>30</b> |
| 2.3.1 层流流导                           | 30        |
| 2.3.2 分子流流导                          | 30        |

## 3 3 真空设备中的机械部件

|                |           |
|----------------|-----------|
| <b>3.1 概述</b>  | <b>32</b> |
| <b>3.2 材料</b>  | <b>32</b> |
| 3.2.1 金属材料     | 33        |
| 3.2.1.1 不锈钢    | 33        |
| 3.2.1.2 碳钢     | 36        |
| 3.2.1.3 铝      | 36        |
| 3.2.2 密封材料     | 36        |
| 3.2.2.1 弹性体密封件 | 36        |
| 3.2.2.2 金属密封件  | 37        |

## 目录

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>3.3 连接</b>            | <b>38</b> |
| 3.3.1 不可拆卸的连接            | 38        |
| 3.3.1.1 焊接               | 38        |
| 3.3.1.2 铜焊、熔接和电镀         | 39        |
| 3.3.2 可拆卸的法兰连接           | 40        |
| 3.3.2.1 O 型圈密封件和凹槽       | 40        |
| 3.3.2.2 ISO-KF 法兰        | 41        |
| 3.3.2.3 ISO-K/ISO-F 法兰   | 42        |
| 3.3.2.4 CF 法兰            | 43        |
| 3.3.2.5 COF 法兰           | 44        |
| 3.3.2.6 其他法兰标准           | 44        |
| 3.3.2.7 螺钉连接             | 44        |
| <b>3.4 真空腔体</b>          | <b>47</b> |
| 3.4.1 表面工艺               | 47        |
| 3.4.2 清洁工艺               | 48        |
| <b>3.5 电极和引线</b>         | <b>49</b> |
| 3.5.1 软管和柔性连接器           | 49        |
| 3.5.2 观察窗                | 49        |
| 3.5.3 电极引线               | 49        |
| 3.5.4 其他引线               | 50        |
| <b>3.6 阀</b>             | <b>50</b> |
| 3.6.1 阀门控制器              | 50        |
| 3.6.2 角阀                 | 51        |
| 3.6.3 直通阀和隔膜阀            | 51        |
| 3.6.4 闸阀                 | 52        |
| 3.6.5 蝶阀和球阀              | 52        |
| 3.6.6 气体计量阀和气体控制阀        | 52        |
| <b>3.7 执行器和机械运动件</b>     | <b>52</b> |
| 3.7.1 工作原理               | 53        |
| 3.7.1.1 膜片波纹管密封的平移       | 53        |
| 3.7.1.2 波纹管密封的旋转         | 53        |
| 3.7.1.3 磁耦合旋转和平移         | 54        |
| 3.7.1.4 密封的弹性体旋转和平移      | 54        |
| 3.7.1.5 通过带抽吸间隙的滑动垫片进行旋转 | 54        |
| 3.7.2 准确性、可重复的精确度与分辨率    | 54        |
| 3.7.3 执行设备和特点            | 55        |
| 3.7.3.1 Z 轴精密执行器的设计特点    | 55        |
| 3.7.3.2 XY 轴精密执行器的设计特点   | 56        |
| <b>4.4 真空获得设备</b>        |           |
| <b>4.1 真空泵的工作原理和性能</b>   | <b>58</b> |
| 4.1.1 真空泵的分类             | 58        |
| 4.1.2 抽速和气流量             | 59        |
| 4.1.3 极限压力和本底压力          | 59        |
| 4.1.4 压缩比                | 59        |
| 4.1.5 串联系统的抽速            | 59        |
| 4.1.6 气镇                 | 59        |
| 4.1.7 水蒸汽耐受性/抽除水蒸汽的能力    | 60        |
| 4.1.8 密封气体               | 60        |

## 目录

|                       |           |
|-----------------------|-----------|
| <b>4.2 旋片式真空泵</b>     | <b>60</b> |
| 4.2.1 设计与工作原理         | 60        |
| 4.2.2 应用              | 61        |
| 4.2.3 产品概览            | 61        |
| 4.2.3.1 单级旋片式真空泵      | 62        |
| 4.2.3.2 双级旋片式真空泵      | 63        |
| 4.2.3.3 工作液选择         | 66        |
| 4.2.3.4 配件            | 66        |
| <b>4.3 隔膜真空泵</b>      | <b>68</b> |
| 4.3.1 设计与工作原理         | 68        |
| 4.3.2 应用              | 68        |
| 4.3.3 产品概览            | 68        |
| 4.3.4 配件              | 68        |
| <b>4.4 螺杆真空泵</b>      | <b>69</b> |
| 4.4.1 设计与工作原理         | 69        |
| 4.4.2 应用              | 69        |
| 4.4.3 产品概览            | 70        |
| 4.4.4 配件              | 70        |
| <b>4.5 多级罗茨泵的真空获得</b> |           |
| 4.5.1 设计与工作原理         | 71        |
| 4.5.2 应用              | 71        |
| 4.5.3 ACP 产品概览        | 72        |
| 4.5.3.1 风冷式多级罗茨泵      | 72        |
| 4.5.3.2 配件            | 73        |
| <b>4.6 多级罗茨泵的真空工艺</b> |           |
| 4.6.1 设计与工作原理         | 74        |
| 4.6.2 应用              | 75        |
| 4.6.3 预抽非腐蚀性气体        | 75        |
| 4.6.4 化学工艺            | 76        |
| 4.6.5 苛刻化学工艺          | 76        |
| 4.6.6 产品概览            | 77        |
| 4.6.6.1 水冷却工艺泵        | 77        |
| 4.6.6.2 配件            | 78        |
| <b>4.7 罗茨真空泵</b>      | <b>78</b> |
| 4.7.1 设计与工作原理         | 78        |
| 4.7.2 应用              | 80        |
| 4.7.2.1 前级泵选择         | 80        |
| 4.7.3 产品概览            | 81        |
| 4.7.3.1 标准泵           | 81        |
| 4.7.3.2 带磁耦合的标准泵      | 81        |
| 4.7.3.3 防爆泵           | 81        |
| 4.7.3.4 气体循环冷却罗茨泵     | 82        |
| 4.7.4 配件              | 82        |
| 4.7.5 泵               | 82        |
| <b>4.8.1 侧槽高真空泵</b>   | <b>83</b> |
| 4.8.1 设计与工作原理         | 83        |
| 4.8.2 应用              | 83        |
| 4.8.3 产品概览            | 83        |

## 目录

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <b>4.9 涡轮分子泵</b>        | <b>83</b>  |
| 4.9.1 设计与工作原理           | 83         |
| 4.9.1.1 涡轮分子泵工作原理       | 84         |
| 4.9.1.2 Holweck 级工作原理   | 86         |
| 4.9.1.3 涡轮分子泵性能数据       | 87         |
| 4.9.2 应用                | 88         |
| 4.9.3 产品概览              | 89         |
| 4.9.3.1 机械轴承涡轮分子泵       | 89         |
| 4.9.3.2 主动磁悬浮涡轮分子泵      | 90         |
| 4.9.3.3 驱动器与配件          | 90         |
| <br>                    |            |
| <b>5 真空测量设备</b>         |            |
| <b>5.1 总压测量的基本原理</b>    | <b>92</b>  |
| 5.1.1 不依赖气体的直接压力测量      | 92         |
| 5.1.2 依赖气体的的间接压力测量      | 93         |
| <br>                    |            |
| <b>5.2 应用说明</b>         | <b>95</b>  |
| 5.2.1 测量范围              | 95         |
| 5.2.2 主动式真空计            | 96         |
| 5.2.3 被动式真空计            | 96         |
| 5.2.4 组合真空计             | 96         |
| <br>                    |            |
| <b>5.3 产品概览</b>         | <b>96</b>  |
| 5.3.1 DigiLine系列        | 96         |
| 5.3.2 ActiveLine系列      | 99         |
| 5.3.3 ModulLine系列       | 100        |
| <br>                    |            |
| <b>6 质谱仪与残余气体分析</b>     |            |
| <b>6.1 介绍和工作原理</b>      | <b>102</b> |
| <br>                    |            |
| <b>6.2 扇形场质谱仪</b>       | <b>103</b> |
| 6.2.1 工作原理              | 103        |
| 6.2.2 应用说明              | 104        |
| <br>                    |            |
| <b>6.3 四极杆质谱仪 (QMS)</b> | <b>104</b> |
| 6.3.1 四级杆质量选择器          | 104        |
| 6.3.2 离子源               | 107        |
| 6.3.3 探测器               | 110        |
| 6.3.4 真空系统              | 112        |
| 6.3.5 进气系统              | 112        |
| 6.3.6 应用说明              | 113        |
| <br>                    |            |
| <b>6.4 产品概览</b>         | <b>114</b> |
| 6.4.1 普发真空质谱仪的优势        | 115        |
| 6.4.2 数据分析系统            | 116        |

## 目录

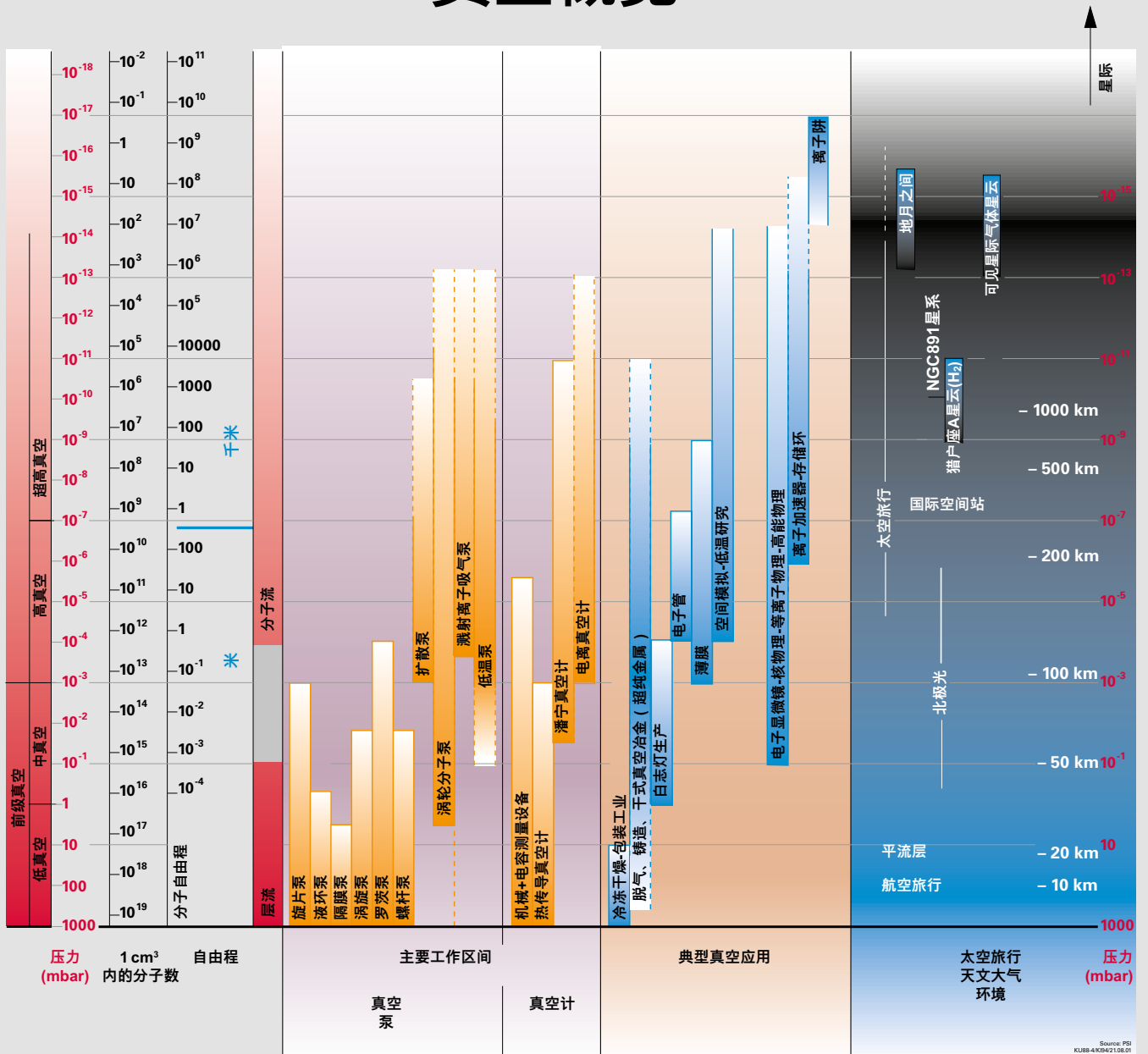
|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>7 泄漏检测</b>                     |            |
| <b>7.1 概述</b>                     | <b>118</b> |
| 7.1.1 泄漏和检漏 .....                 | 118        |
| 7.1.2 泄漏率 .....                   | 118        |
| 7.1.3 示踪气体 .....                  | 119        |
| <b>7.2 使用示踪气体进行的泄漏检测</b>          | <b>119</b> |
| 7.2.1 氦质谱检漏仪的设计 .....             | 119        |
| 7.2.2 带有石英视窗探测器的检漏仪设计 .....       | 120        |
| 7.2.3 测试方法 .....                  | 121        |
| 7.2.4 检漏仪校准 .....                 | 121        |
| 7.2.5 局部泄漏检测 .....                | 121        |
| 7.2.6 整体泄漏检测 .....                | 122        |
| <b>7.3 应用说明</b>                   | <b>122</b> |
| 7.3.1 使用氦气进行的泄漏检测 .....           | 122        |
| 7.3.2 使用检漏仪与使用四级杆质谱仪的测试结果比较 ..... | 123        |
| <b>7.4 产品概览</b>                   | <b>124</b> |
| <b>7.5 工业泄漏检测</b>                 | <b>125</b> |
| <b>8 污染管理解决方案</b>                 |            |
| <b>8.1 介绍</b>                     | <b>126</b> |
| <b>8.2 污染</b>                     | <b>127</b> |
| <b>8.3 空气分子污染(AMC)的性质</b>         | <b>128</b> |
| <b>8.4 从表面分子污染 (SMC) 到缺陷</b>      | <b>128</b> |
| <b>8.5 产品概览</b>                   | <b>130</b> |

# 1 真空技术介绍

真空专业知识

## 真空概览

$\sim 10^{-18}$  mbar at 3K  
 $\Delta \sim 3 \cdot 10^{-16}$  g/m<sup>3</sup>  
 $\Delta \sim 100$  particles/m<sup>3</sup>



Source: PSI KL884-K8A2108.01

图 1.1 : 真空概览 [1]



## 1.1 概述

### 1.1.1 真空的定义

真空的通俗定义是指空间中的压力低于大气压力时所处的状态。这些压力是由均匀分布在该空间中的气体或蒸汽产生的。

真空的标准定义是“气体在容器中的压力及粒子密度低于周围环境大气的压力密度或者压力低于300mbar。即：低于地球表面的标准大气压力。”[2]

### 1.1.2 真空概述

标准定义中规定的 300 mbar 的意义在考虑到气压公式时就变得显而易见了。由于一定面积上气柱的重量随着高度增加而减少，所以大气压力随高度上升而下降。

$$p_h = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}\right)$$

公式 1-1：气压公式

$p_h$  在高度  $h$  处的气压

$p_0$  海平面的气压 = 1,013.25 mbar 或 101,325 Pa

$g$  重力加速度 =  $9.81 \text{ m s}^{-2}$

$\rho_0$   $0^\circ\text{C}$  时海平面的空气密度 =  $1.293 \text{ kg m}^{-3}$

如果为了简化之目的，我们假设在海平面处的空气密度、重力加速度以及气压是恒定不变的，通过简化，我们得出：

$$p_h = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{8,005 \text{ m}}\right)$$

公式 1-2：数值气压公式

从公式可以解出，气体密度下降一半即  $p_h = p_0 / 2$  所对应的高度值是  $h_{1/2} = 5,548 \text{ m}$ 。换言之：高度每增加 5,548 km，气压则减半。

如果公式中的高度值用珠穆朗玛峰的高度代替，我们得到的压力为 335 mbar，或用正规的 SI（国际单位制）单位表示为 33,500 Pa 或 335 hPa。这就解释了标准定义中规定 300 mbar 作为地球表面最低气压的原因。

在本手册中，我们将 SI 单位 Pa 结合前缀(hecto)作为压力单位（百帕），这样就将符合标准的 SI 单位与欧洲常用的 mbar 数值等同起来。。

在地球表面上方约 10,000 m 的客机巡航高度处，气压已下降至 290 hPa。气象气球上升至高达 30 km 的高度，此处的压力为 24 hPa。气象卫星在高度约为 800 km 处沿太阳同步极地轨道飞行。此处的压力已经下降到约  $10^{-6}$  hPa。离地球越远，压力就会变得越低。目前发现的已知最低压力存在于星际空间。

在技术应用的范围内，压力并不是总用绝对值表述，而是对于大气压力的相对值。低于大气压的压力范围可以表示为负数或百分比。这方面的例子有液位压力计、压力表以及在气瓶、真空吸盘吊具和真空输送系统中应用的减压器。

在地球表面需要使用不同类型的真空泵来产生真空。图 1.1 中给出了最重要的真空泵和真空测量仪器的工作范围：真空概览 [1]。

## 1.2 基本原理

### 1.2.1 压力的定义

压力的定义是垂直且均匀分布作用于表面上的力与表面面积之比。

$$p = \frac{F}{A}$$

公式 1-3：压力定义：

$p$  压力 [Pa]

$F$  受力 [N];  $1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$

$A$  面积 [ $\text{m}^2$ ]

在封闭的容器中，气体颗粒进行着持续的热运动。在其与容器壁的相互作用中，原子和分子经受大量的碰撞。每次碰撞都会给容器壁施加作用力。如果封闭气体不受外界影响，无论在容器内什么地方什么方向进行测量，无数碰撞所产生的压力都是相同的。

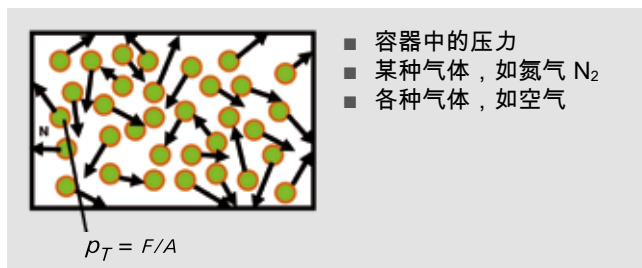


图 1.2：总压力的定义

实际上，只有一种气体的情况非常少见。不同气体组成的混合物更为常见。这些气体的每个单一成分都会产生对应的压力，该压力可进行单独测量，而与其他成分无关。由单一成分气体所产生的压力被称为分压力。在理想气体中，各种成分的分压力加起来等于总压力，且互不干扰。所有分压力之和等于混合气体的总压力。

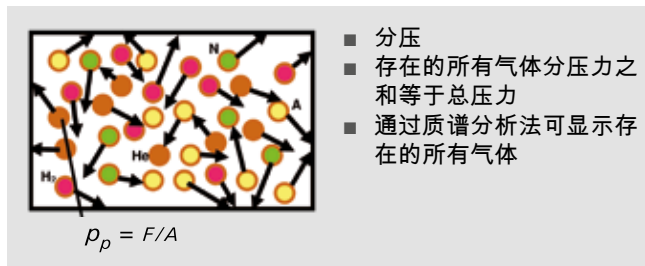


图 1.3 : 分压的定义

我们的环境空气就是一个气体混合物的例子：其分压力组成如表 1.1 [3] 所示。

| 气体类型  | 化学分子式                         | 体积 %                     | 分压 [hPa]                 |
|-------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 氮     | N <sub>2</sub>                | 78.09                    | 780.9                    |
| 氧     | O <sub>2</sub>                | 20.95                    | 209.5                    |
| 水蒸气   | H <sub>2</sub> O              | < 2.3                    | < 23.3                   |
| 氩     | Ar                            | 9.3 · 10 <sup>-1</sup>   | 9.3                      |
| 二氧化碳  | CO <sub>2</sub>               | 3.0 · 10 <sup>-2</sup>   | 3.0 · 10 <sup>-1</sup>   |
| 氖     | Ne                            | 1.8 · 10 <sup>-3</sup>   | 1.8 · 10 <sup>-2</sup>   |
| 氢     | H <sub>2</sub>                | < 1 · 10 <sup>-3</sup>   | < 1 · 10 <sup>-2</sup>   |
| 氦     | He                            | 5.0 · 10 <sup>-4</sup>   | 5.0 · 10 <sup>-3</sup>   |
| 甲烷    | CH <sub>4</sub>               | 2.0 · 10 <sup>-4</sup>   | 2.0 · 10 <sup>-3</sup>   |
| 氪     | Kr                            | 1.1 · 10 <sup>-4</sup>   | 1.1 · 10 <sup>-3</sup>   |
| 一氧化碳  | CO                            | < 1,6 · 10 <sup>-5</sup> | < 1,6 · 10 <sup>-4</sup> |
| 氙     | Xe                            | 9.0 · 10 <sup>-6</sup>   | 9.0 · 10 <sup>-5</sup>   |
| 一氧化二氮 | N <sub>2</sub> O              | 5.0 · 10 <sup>-6</sup>   | 5.0 · 10 <sup>-5</sup>   |
| 氨     | NH <sub>3</sub>               | 2.6 · 10 <sup>-6</sup>   | 2.6 · 10 <sup>-5</sup>   |
| 臭氧    | O <sub>3</sub>                | 2.0 · 10 <sup>-6</sup>   | 2.0 · 10 <sup>-5</sup>   |
| 过氧化氢  | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 4.0 · 10 <sup>-8</sup>   | 4.0 · 10 <sup>-7</sup>   |
| 碘     | I <sub>2</sub>                | 3.5 · 10 <sup>-9</sup>   | 3.5 · 10 <sup>-8</sup>   |
| 氡     | Rn                            | 7.0 · 10 <sup>-18</sup>  | 7.0 · 10 <sup>-17</sup>  |

表 1.1 : 大气的组成。所示分压是指在大气压下的压力即1,000 hPa。注意：水蒸气所表示的值是在 293 K (20°C) 时的饱和状态。二氧化碳和一氧化碳值的波动取决于时间和地点。所示的一氧化碳是大城市的峰值。其他来源是指自然的氡浓度为 5 · 10<sup>-5</sup> % 且分压为 5 · 10<sup>-4</sup> hPa。

| 压力范围       | 压力 hPa                                | 压力 Pa                                 | 数密度/cm <sup>3</sup>                  | 平均自由程 [m]                            |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 气压         | 1,013.25                              | 101,325                               | 2.7 · 10 <sup>19</sup>               | 6.8 · 10 <sup>-8</sup>               |
| 低真空 (LV)   | 300...1                               | 30,000...100                          | 10 <sup>19</sup> ...10 <sup>16</sup> | 10 <sup>-8</sup> ...10 <sup>-4</sup> |
| 中真空 (MV)   | 1...10 <sup>-3</sup>                  | 100...10 <sup>-1</sup>                | 10 <sup>16</sup> ...10 <sup>13</sup> | 10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-1</sup> |
| 高真空 (HV)   | 10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-7</sup>  | 10 <sup>-1</sup> ...10 <sup>-5</sup>  | 10 <sup>13</sup> ...10 <sup>9</sup>  | 10 <sup>-1</sup> ...10 <sup>3</sup>  |
| 超高真空 (UHV) | 10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-12</sup> | 10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-10</sup> | 10 <sup>9</sup> ...10 <sup>4</sup>   | 10 <sup>3</sup> ...10 <sup>8</sup>   |
| 极高真空 (XHV) | <10 <sup>-12</sup>                    | <10 <sup>-10</sup>                    | <10 <sup>4</sup>                     | >10 <sup>8</sup>                     |

表 1.2 : 真空技术中的压力范围

|        | Pa                     | bar                     | hPa                     | μbar                   | torr                    | micron                 | atm                     | at                      | mm WC                   | psi                     | psf                     |
|--------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Pa     | 1                      | 1 · 10 <sup>-5</sup>    | 1 · 10 <sup>-2</sup>    | 10                     | 7.5 · 10 <sup>-3</sup>  | 7.5                    | 9.87 · 10 <sup>-6</sup> | 1.02 · 10 <sup>-5</sup> | 0.102                   | 1.45 · 10 <sup>-4</sup> | 2.09 · 10 <sup>-2</sup> |
| bar    | 1 · 10 <sup>5</sup>    | 1                       | 1 · 10 <sup>-3</sup>    | 1 · 10 <sup>6</sup>    | 750                     | 7.5 · 10 <sup>5</sup>  | 0.987                   | 1.02                    | 1.02 · 10 <sup>4</sup>  | 14.5                    | 2.09 · 10 <sup>3</sup>  |
| hPa    | 100                    | 1 · 10 <sup>-3</sup>    | 1                       | 1,000                  | 0.75                    | 750                    | 9.87 · 10 <sup>-4</sup> | 1.02 · 10 <sup>-3</sup> | 10.2                    | 1.45 · 10 <sup>-2</sup> | 2.09                    |
| μbar   | 0.1                    | 1 · 10 <sup>-6</sup>    | 1 · 10 <sup>-3</sup>    | 1                      | 7.5 · 10 <sup>-4</sup>  | 0.75                   | 9.87 · 10 <sup>-7</sup> | 1.02 · 10 <sup>-6</sup> | 1.02 · 10 <sup>-2</sup> | 1.45 · 10 <sup>-5</sup> | 2.09 · 10 <sup>-3</sup> |
| torr   | 1.33 · 10 <sup>2</sup> | 1.33 · 10 <sup>-3</sup> | 1.33                    | 1,330                  | 1                       | 1,000                  | 1.32 · 10 <sup>-3</sup> | 1.36 · 10 <sup>-3</sup> | 13.6                    | 1.93 · 10 <sup>-2</sup> | 2.78                    |
| micron | 0.133                  | 1.33 · 10 <sup>-6</sup> | 1.33 · 10 <sup>-3</sup> | 1.33                   | 1 · 10 <sup>-3</sup>    | 1                      | 1.32 · 10 <sup>-6</sup> | 1.36 · 10 <sup>-6</sup> | 1.36 · 10 <sup>-2</sup> | 1.93 · 10 <sup>-5</sup> | 2.78 · 10 <sup>-3</sup> |
| atm    | 1.01 · 10 <sup>5</sup> | 1.013                   | 1,013                   | 1.01 · 10 <sup>6</sup> | 760                     | 7.6 · 10 <sup>5</sup>  | 1                       | 1.03                    | 1.03 · 10 <sup>4</sup>  | 14.7                    | 2.12 · 10 <sup>3</sup>  |
| at     | 9.81 · 10 <sup>4</sup> | 0.981                   | 981                     | 9.81 · 10 <sup>5</sup> | 735.6                   | 7.36 · 10 <sup>5</sup> | 0.968                   | 1                       | 1 · 10 <sup>-4</sup>    | 14.2                    | 2.04 · 10 <sup>3</sup>  |
| mm WC  | 9.81                   | 9.81 · 10 <sup>-5</sup> | 9.81 · 10 <sup>-2</sup> | 98.1                   | 7.36 · 10 <sup>-2</sup> | 73.6                   | 9.68 · 10 <sup>-5</sup> | 1 · 10 <sup>-4</sup>    | 1                       | 1.42 · 10 <sup>-3</sup> | 0.204                   |
| psi    | 6.89 · 10 <sup>3</sup> | 6.89 · 10 <sup>-2</sup> | 68.9                    | 6.89 · 10 <sup>4</sup> | 51.71                   | 5.17 · 10 <sup>4</sup> | 6.8 · 10 <sup>-2</sup>  | 7.02 · 10 <sup>-2</sup> | 702                     | 1                       | 144                     |
| psf    | 47.8                   | 4.78 · 10 <sup>-4</sup> | 0.478                   | 478                    | 0.359                   | 359                    | 4.72 · 10 <sup>-4</sup> | 4.87 · 10 <sup>-4</sup> | 4.87                    | 6.94 · 10 <sup>-3</sup> | 1                       |

表 1.3 : 压力单位换算表

在宇宙空间中，取决于靠近星系的程度， $10^{-18}$  hPa 以下的压力占主导地位。在地球上，已经报道技术上产生的压力低于  $10^{-16}$  hPa。低至  $10^{-16}$  hPa 的气压范围涵盖 19 个数量级。根据不同真空获得设备和测量设备所能达到的真空度，我们又把真空范围根据真空度进行了分类，如表 1.2 所示。

计量压力的单位是帕斯卡。该单位是以法国数学家、物理学家、作家兼哲学家布莱兹·帕斯卡（1623 – 1662 年）的名字命名。根据公式 1-3，SI 单位帕斯卡是由  $\text{Pa} = \text{N m}^{-2}$  组成。单位 mbar、torr 以及表 1.3 中所示的单位是实际使用中常见的。

### 1.2.2 普适气体方程式的概述

每种物质都是由原子和分子组成。根据定义，物质的量以摩尔表示。一摩尔的物质含有  $6.022 \cdot 10^{23}$  个构成粒子（阿伏伽德罗常数。这不是无量纲数值，而是具有单位  $\text{mol}^{-1}$  的物理量）。1 摩尔的定义是系统物质的量，其包含的粒子数目与 12 g 碳同位素  $^{12}\text{C}$  中所含的原子数目完全相同。

在标准状态下，即压力为 101.325 Pa 且温度为 273.15 K ( $0^\circ\text{C}$ )，一摩尔理想气体填充的体积为 22.414 升。

早在 1664 年，罗伯特·波义耳就研究压力对一定量空气的影响规律，被马略特在实验中证实。研究结果在波-马定律中表述为：

$$p \cdot V = \text{const.}$$

公式 1-4：波义耳定律 [4]

用文字表述波-马定律：一定质量的气体，在温度不变的情况下，其压力与体积成反比—压力与体积的乘积恒定不变。

百余年后，一定量的气体，其体积与温度的关系也表述为：一定量的气体，在压力不变的情况下，其体积与绝对温度成正比，即

$$V = \text{const.} \cdot T$$

公式 1-5：盖-吕萨克定律

一定量的气体受压力变化和温度变化影响的结果是

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

这仍适用于一定量的气体。一定温度和一定压力下的气体体积与物质的量成正比。我们因此可以这样书写：

$$\frac{p \cdot V}{T} = v \cdot \text{const.}$$

物质的量可以通过称重来确定。我们可以通过质量与摩尔质量之比来表示气体的量。常数 const. 在方程中对应是 1 摩尔气体，并且它被称为气体常数 R。因此，理想气体状态可描述为如下的压力、温度和体积的函数关系：

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

公式 1-6：理想气体状态一般方程 [5]

|     |        |  |
|-----|--------|--|
| $p$ | 压力     | [Pa]                                     |
| $V$ | 体积     | [m <sup>3</sup> ]                        |
| $m$ | 质量     | [kg]                                     |
| $M$ | 摩尔质量   | [kg kmol <sup>-1</sup> ]                 |
| $R$ | 一般气体常数 | [kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] |
| $T$ | 绝对温度   | [K]                                      |

物质的量也可表示为与阿伏伽德罗常数对应的分子数。

$$p \cdot V = \frac{N}{N_A} \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T \quad \text{式中 } k = \frac{R}{N_A}$$

公式 1-7：理想气体状态方程 I

|       |         |  |
|-------|---------|--|
| $N$   | 粒子数目    |  |
| $N_A$ | 阿伏伽德罗常数 | $= 6.022 \cdot 10^{23} \quad [\text{mol}^{-1}]$  |
| $k$   | 波尔兹曼常数  | $= 1.381 \cdot 10^{-23} \quad [\text{J K}^{-1}]$ |

如果等式两边同时除以体积，则我们得到

$$p = n \cdot k \cdot T$$

公式 1-8：理想气体状态方程 II

|     |       |                    |
|-----|-------|--------------------|
| $n$ | 粒子数密度 | [m <sup>-3</sup> ] |
|-----|-------|--------------------|

### 1.2.3 分子数密度

从公式 1-7 和公式 1-8 可以看出，压力与粒子数密度成正比。标准条件下单位体积内的粒子数目极大，即使在  $10^{-12}$  hPa 的压力下，每立方厘米也仍然存在有 26,500 个分子。这就是为何不可以说达到绝对真空的原因，因为即使在超高真空中也存在分子。

在宇宙空间中，逐渐地难以用单位帕斯卡来表示极低的压力，例如，低于  $10^{-18}$  hPa。这些压力范围可以更好地通过粒子数密度来表示，例如，在星际空间中，每立方米的分子数小于  $10^4$ 。

### 1.2.4 热运动速度

封闭在容器中的气体分子完全随机地相互碰撞。并在碰撞过程中相互交换能量和动量。这些碰撞导致分子的速度和/或动能形成一种特殊的分布—麦克斯韦-玻耳兹曼分布。速度分布是一个以最可几速度为峰值的钟形曲线。

$$c_w = \sqrt{\frac{2 \cdot R \cdot T}{M}} \quad \text{or} \quad c_w = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m}}$$

公式 1-9：最可几速度 [6]

平均热运动速度是

$$c_w = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad \text{or} \quad \bar{c} = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot m}}$$

公式 1-10：平均速度 [7]

下表所示为选定气体在温度为 20°C 时的平均热速度。

| 气体   | 化学符号             | 摩尔质量 [g mol <sup>-1</sup> ] | 平均速度 [m s <sup>-1</sup> ] | 马赫数 |
|------|------------------|-----------------------------|---------------------------|-----|
| 氢    | H <sub>2</sub>   | 2                           | 1,754                     | 5.3 |
| 氦    | He               | 4                           | 1,245                     | 3.7 |
| 水蒸气  | H <sub>2</sub> O | 18                          | 585                       | 1.8 |
| 氮    | N <sub>2</sub>   | 28                          | 470                       | 1.4 |
| 空气   |                  | 29                          | 464                       | 1.4 |
| 氩    | Ar               | 40                          | 394                       | 1.2 |
| 二氧化碳 | CO <sub>2</sub>  | 44                          | 375                       | 1.1 |

表 1.4：各种气体的摩尔质量和平均热速度 [8]

### 1.2.5 平均自由程

如果在房间的角落打开香水瓶，需要很长时间才可在房间的相反角落处检测到芳香气体物质。这一实验似乎与前一章节中描述的平均气体速度相矛盾。出现这种情况的原因在于气体粒子在其飞行路途中遭受大量的碰撞。平均自由程是粒子在与其它粒子进行两次连续碰撞之间可移动的平均距离。

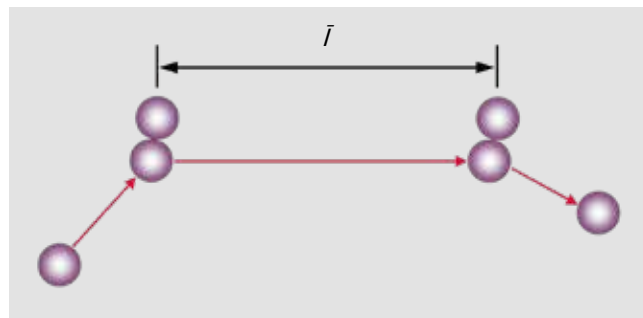


图 1.4：两次碰撞之间的平均自由程

对于同种粒子的碰撞，平均自由程由下式计算：

$$\bar{\lambda} = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot d_m^2}$$

公式 1-11：平均自由程 [9]

$$\bar{\lambda} \quad \text{平均自由程} \quad [\text{m}]$$

$$d_m \quad \text{分子直径} \quad [\text{m}]$$

从公式 1-11 可看出，平均自由程与温度成正比，与压力和分子直径成反比。在这一点上，我们将忽略学术文献中讨论的该等式进一步的变体，学术文献研究了诸如不同气体粒子直径的碰撞、气体粒子与离子或电子的碰撞以及温度影响等。

为说明平均自由程的温度依赖性，公式 1-11 经常书写为将温度作为方程右边的唯一变量。

$$\bar{\lambda} \cdot \rho = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_m^2}$$

公式 1-12：平均自由程 II

表 1.5 显示了一些气体在 0°C 时的  $\bar{l} \cdot p$  值。

| 气体   | 化学符号             | $\bar{l} \cdot p$<br>[m hPa] | $\bar{l} \cdot p$<br>[m Pa] |
|------|------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 氢    | H <sub>2</sub>   | $11.5 \cdot 10^{-5}$         | $11.5 \cdot 10^{-3}$        |
| 氮    | N <sub>2</sub>   | $5.9 \cdot 10^{-5}$          | $5.9 \cdot 10^{-3}$         |
| 氧    | O <sub>2</sub>   | $6.5 \cdot 10^{-5}$          | $6.5 \cdot 10^{-3}$         |
| 氦    | He               | $17.5 \cdot 10^{-5}$         | $17.5 \cdot 10^{-3}$        |
| 氖    | Ne               | $12.7 \cdot 10^{-5}$         | $12.7 \cdot 10^{-3}$        |
| 氩    | Ar               | $6.4 \cdot 10^{-5}$          | $6.4 \cdot 10^{-3}$         |
| 空气   |                  | $6.7 \cdot 10^{-5}$          | $6.7 \cdot 10^{-3}$         |
| 氪    | Kr               | $4.9 \cdot 10^{-5}$          | $4.9 \cdot 10^{-3}$         |
| 氙    | Xe               | $3.6 \cdot 10^{-5}$          | $3.6 \cdot 10^{-3}$         |
| 汞    | Hg               | $3.1 \cdot 10^{-5}$          | $3.1 \cdot 10^{-3}$         |
| 水蒸气  | H <sub>2</sub> O | $6.8 \cdot 10^{-5}$          | $6.8 \cdot 10^{-3}$         |
| 一氧化碳 | CO               | $6.0 \cdot 10^{-5}$          | $6.0 \cdot 10^{-3}$         |
| 二氧化碳 | CO <sub>2</sub>  | $4.0 \cdot 10^{-5}$          | $4.0 \cdot 10^{-3}$         |
| 氯化氢  | HCl              | $3.3 \cdot 10^{-5}$          | $3.3 \cdot 10^{-3}$         |
| 氨    | NH <sub>3</sub>  | $3.2 \cdot 10^{-5}$          | $3.2 \cdot 10^{-3}$         |
| 氯    | Cl <sub>2</sub>  | $2.1 \cdot 10^{-5}$          | $2.1 \cdot 10^{-3}$         |

表 1.5 : 气体在 273.15 K 时的平均自由程 [10]

使用 Table 1.5 中的值，我们现在估算氮分子在各种压力下的平均自由程：

| 压力 [Pa]            | 压力 [hPa]           | 平均自由程 [m]           |
|--------------------|--------------------|---------------------|
| $1 \cdot 10^5$     | $1 \cdot 10^3$     | $5.9 \cdot 10^{-8}$ |
| $1 \cdot 10^4$     | $1 \cdot 10^2$     | $5.9 \cdot 10^{-7}$ |
| $1 \cdot 10^3$     | $1 \cdot 10^1$     | $5.9 \cdot 10^{-6}$ |
| $1 \cdot 10^2$     | $1 \cdot 10^0$     | $5.9 \cdot 10^{-5}$ |
| $1 \cdot 10^1$     | $1 \cdot 10^{-1}$  | $5.9 \cdot 10^{-4}$ |
| $1 \cdot 10^0$     | $1 \cdot 10^{-2}$  | $5.9 \cdot 10^{-3}$ |
| $1 \cdot 10^{-1}$  | $1 \cdot 10^{-3}$  | $5.9 \cdot 10^{-2}$ |
| $1 \cdot 10^{-2}$  | $1 \cdot 10^{-4}$  | $5.9 \cdot 10^{-1}$ |
| $1 \cdot 10^{-3}$  | $1 \cdot 10^{-5}$  | $5.9 \cdot 10^0$    |
| $1 \cdot 10^{-4}$  | $1 \cdot 10^{-6}$  | $5.9 \cdot 10^1$    |
| $1 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-7}$  | $5.9 \cdot 10^2$    |
| $1 \cdot 10^{-6}$  | $1 \cdot 10^{-8}$  | $5.9 \cdot 10^3$    |
| $1 \cdot 10^{-7}$  | $1 \cdot 10^{-9}$  | $5.9 \cdot 10^4$    |
| $1 \cdot 10^{-8}$  | $1 \cdot 10^{-10}$ | $5.9 \cdot 10^5$    |
| $1 \cdot 10^{-9}$  | $1 \cdot 10^{-11}$ | $5.9 \cdot 10^6$    |
| $1 \cdot 10^{-10}$ | $1 \cdot 10^{-12}$ | $5.9 \cdot 10^7$    |

表 1.6 : 氮气分子在 273.15 K (0°C) 时的平均自由程

因在大气压下，氮分子在两次碰撞之间移动的距离为 59 nm，而在压力低于  $10^{-8}$  hPa 的超高真空下，其移动的距离为几公里。

分子数密度和平均自由程的关系可以用图 1.5 来表示。

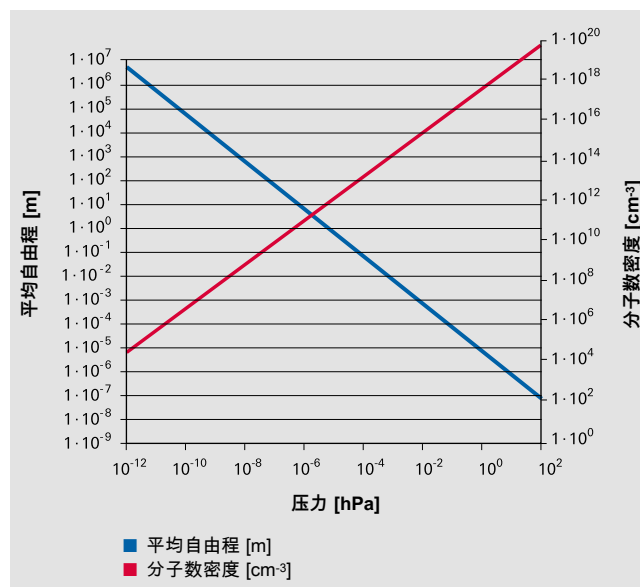


图 1.5 : 氮在温度为 273.15 K 时的分子数密度 (红色, 右边 y 轴) 和平均自由程 (蓝色, 左边 y 轴)

### 1.2.6 流动类型

平均自由程与流道直径之间的比值可用于描述流动状态。该比值被称为克努森数：

$$K_n = \frac{\bar{l}}{d}$$

公式 1-13：克努森数

$\bar{l}$  平均自由程 [m]  
 $d$  流道直径 [m]  
 $K_n$  克努森数 无量纲数

克努森数的值表征气体流动的状态并将其分配到特定的压力范围内。表1.7 给出了真空技术中各种流动状态以及其显著特性参数的概览。

各种流动状态的剖面如图 1.6 所示。

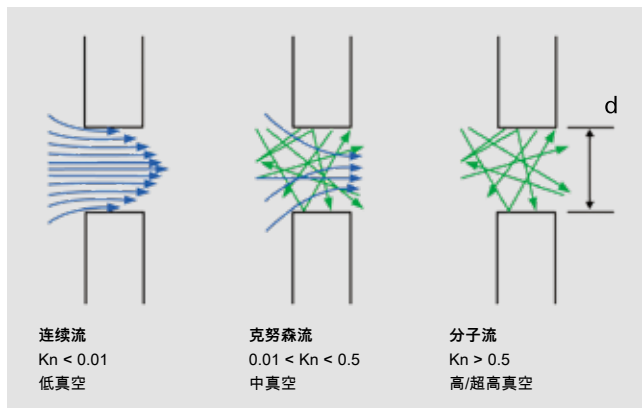


图 1.6：各种流动状态的剖面

### 低真空中的粘性流

在粘性流中，也称为连续流，气体分子间的碰撞很频繁，但与容器壁的碰撞没那么频繁。在这种情况下，气体分子的平均自由程明显小于流道的尺寸。

在粘性流的情况下，层流和紊流之间存在区别。在层流中，气体粒子保持在彼此始终平行的相同位移层上。如果流速增加，这些层将被打破，并且流体粒子以完全混乱的方式相互碰撞。这被称为紊流。粘性流这两个区域之间的边界可通过雷诺数来表示：

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta}$$

公式 1-14：雷诺数

$Re$  雷诺数 无量纲数  
 $\rho$  液体密度 [kg m<sup>-3</sup>]  
 $v$  平均流动速度 [m s<sup>-1</sup>]  
 $l$  特征长度 [m]  
 $\eta$  动力粘度 [Pa s]

$Re < 2,300$  时，为层流，当  $Re > 4,000$  时，则为紊流。在  $2,300 < Re < 4,000$  范围内，占主导地位的是紊流。层流也有可能，然而，这两种类型的流动在该范围内均不稳定。

真空的紊流仅在从大气压进行抽空操作过程中或进行快速排气时发生。在真空系统中，管道的尺寸应使湍流仅在相对较高的压力下短暂出现，因为发生在该过程中的高流阻需要所用泵产生较大的体积流量。

### 中真空中的克努森流

如果克努森数在 0.01 和 0.5 之间，这被称为克努森流。由于很多过程的压力处在中真空范围内，这种流动状态时常发生。

|                | 粘性流  | 克努森流                                | 分子流                                      |
|----------------|--|-------------------------------------|--|
|                | 低真空  | 中真空                                 | 高/超高真空                                   |
| 压力范围 [hPa]     | 10 <sup>3</sup> ...1                         | 1...10 <sup>-3</sup>                | < 10 <sup>-3</sup> or < 10 <sup>-7</sup> |
| 压力范围 [Pa]      | 10 <sup>5</sup> ...10 <sup>2</sup>           | 10 <sup>2</sup> ...10 <sup>-1</sup> | < 10 <sup>-1</sup> or < 10 <sup>-5</sup> |
| 克努森数           | Kn < 0.01                                    | 0.01 < Kn < 0.5                     | Kn > 0.5                                 |
| 雷诺数            | Re < 2,300: laminar<br>Re > 4,000: turbulent |                                     |  |
| p · d [hPa cm] | p · d > 0.6                                  | 0.6 > p · d > 0.01                  | p · d < 0.01                             |

表 1.7：各种流动状态概览

### 高真空和超高真空中的分子流

在克努森数  $Kn > 0.5$  时，分子间的相互作用几乎不再出现。占主导地位的是分子流。在这种情况下，平均自由程明显大于流道的直径。在分子流中，压力与管道直径的乘积大约  $\leq 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ hPa cm}$ 。

根据压力与管道直径的乘积，流动范围大致图形如图1.7所示。

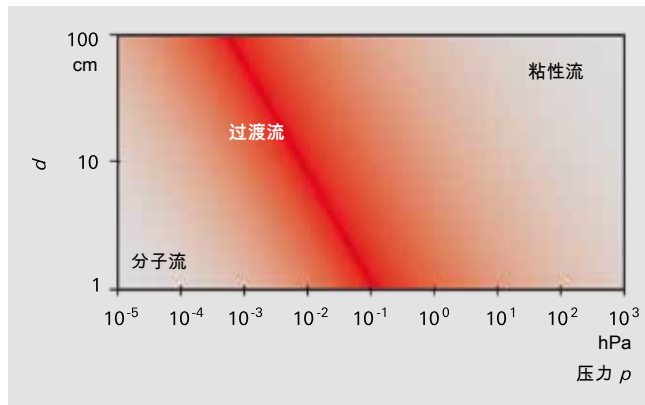


图 1.7：根据  $p \cdot d$  乘积的真空流动范围

该图形清楚地给出流态分区，同时可以发现，单纯根据压力划分流态是不可接受的，就如表1.7中。由于这种分类方法仍然被普遍使用，所以在此也加以引用。

### 1.2.7 气体流量

用理想气体方程 (公式 1-6) 除以  $t$  时间求出气体流量

$$q_{pV} = \frac{p \cdot V}{t} = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot t}$$

公式 1-15：气体流量

$q_{pV}$  气体流量 [Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>]

从方程的右边可以看出，恒定质量的流量在恒温  $T$  时被抽除。这也被称为气体气流量或  $pV$  流量。气流量是真空泵输送的气体流量。

$$q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p$$

公式 1-16：真空泵的气体流量

用气体流量除以入口压力得到体积流率，真空泵的抽速：

$$S = \frac{dV}{dt}$$

公式 1-17：体积流率或真空泵的抽速

表1.8 中给出了各种气流量单位的换算表。

|                        | Pa m <sup>3</sup> /s = W | mbar l/s             | torr l/s             | atm cm <sup>3</sup> /s | lusec             | sccm                 | slm                  | mol / s              |
|------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Pa m <sup>3</sup> /s   | 1                        | 10                   | 7.5                  | 9.87                   | $7.5 \cdot 10^3$  | 592                  | 0.592                | $4.41 \cdot 10^{-4}$ |
| mbar l/s               | 0.1                      | 1                    | 0.75                 | 0.987                  | 750               | 59.2                 | $5.92 \cdot 10^{-2}$ | $4.41 \cdot 10^{-5}$ |
| torr l/s               | 0.133                    | 1.33                 | 1                    | 1.32                   | 1,000             | 78.9                 | $7.89 \cdot 10^{-2}$ | $5.85 \cdot 10^{-5}$ |
| atm cm <sup>3</sup> /s | 0.101                    | 1.01                 | 0.76                 | 1                      | 760               | 59.8                 | $5.98 \cdot 10^{-2}$ | $4.45 \cdot 10^{-5}$ |
| lusec                  | $1.33 \cdot 10^{-4}$     | $1.33 \cdot 10^{-3}$ | $10^{-3}$            | $1.32 \cdot 10^{-3}$   | 1                 | $7.89 \cdot 10^{-2}$ | $7.89 \cdot 10^{-5}$ | $5.86 \cdot 10^{-8}$ |
| sccm                   | $1.69 \cdot 10^{-3}$     | $1.69 \cdot 10^{-2}$ | $1.27 \cdot 10^{-2}$ | $1.67 \cdot 10^{-2}$   | 12.7              | 1                    | $10^{-3}$            | $7.45 \cdot 10^{-7}$ |
| slm                    | 1.69                     | 16.9                 | 12.7                 | 16.7                   | $1.27 \cdot 10^4$ | 1,000                | 1                    | $7.45 \cdot 10^{-4}$ |
| mol / s                | $2.27 \cdot 10^3$        | $2.27 \cdot 10^4$    | $1.7 \cdot 10^4$     | $2.24 \cdot 10^4$      | $1.7 \cdot 10^7$  | $1.34 \cdot 10^6$    | $1.34 \cdot 10^3$    | 1                    |

表 1.8：各种气体流量单位换算表

### 1.2.8 流导

一般而言，真空腔体都是通过管道连接至真空泵。流阻的产生是气体分子与壁面之间的外部摩擦以及气体分子之间的内部摩擦（粘性）的结果。该流阻以压差和体积流率（或抽速）损失的形式表现出来。在真空技术中，习惯使用其倒数，管道的流导L或C（流导）代替流阻W。流导具有体积流率的单位，并且通常以 [l s<sup>-1</sup>] 或 [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>] 表示。

气体流经管道会在管道两端产生压差  $\Delta p$ 。可用以下方程计算流导：

$$C = \frac{I}{W} = \frac{q_{pV}}{\Delta p}$$

公式 1-18：流导的定义：

这一原理在形式上类似于电工学的欧姆定律：

$$R = \frac{U}{I} \text{ or } \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

公式 1-19：欧姆定律

在公式 1-18 与公式 1-19 的正式对比中， $q_{pV}$  代表流量， $1/C$  代表电阻倒数  $1/R$ ， $\Delta p$  代表电压  $U$ 。如果部件并联连接，计算各个流导之和：

$$C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

公式 1-20：并联流导

如果串联连接，将流阻（即倒数）加在一起：

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

公式 1-21：串联流导

管道和管弯头处的流导在各种流态中会有所不同。在粘性流中，它们与平均压力  $\bar{p}$  成正比，在分子流中，它们与压力无关。克努森流代表两种流态之间的过渡，流导随克努森数的变化而发生改变。

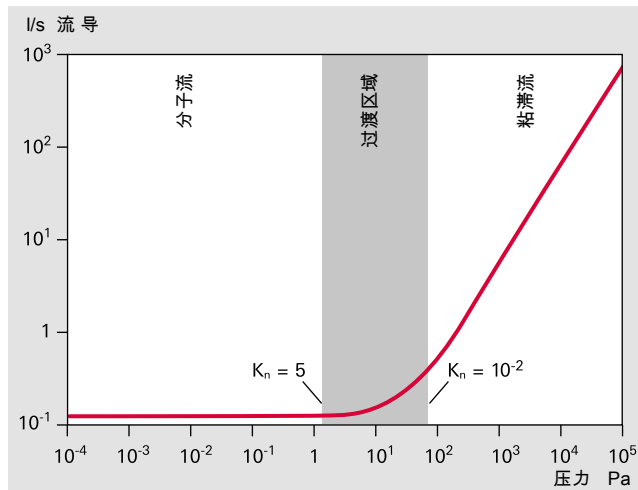


图 1.8：光滑圆形管的流导与管中平均压力的关系

可将层流流导与分子流导之和加权作为克努森流域流导的简单近似值。我们建议您参考专业文献，里面有关层流范围和分子流范围的流导精确计算，以及考虑到管入口不均匀性的流导计算。

本出版物仅限于考虑层流和分子流范围的孔口和长圆管的流导。

孔口经常是真空系统中的流阻来源。例如是在阀门和供气中的孔口，以及测量抽速测试罩中的孔板。在计算管道流阻时，管道伸入容器壁的孔口阻力也必须考虑进去。

#### 阻挡流

让我们考虑真空腔室的复压（放气）过程。当放气阀打开时，环境空气在压力  $p$  下高速流入容器。但流速不会超过声速。如果气体速度已经达到声速，那么气流量也就达到了容器放气时可以达到的最大气流量。此时气流量  $q_{pV}$  不是受容器内壁压力  $p_i$  的影响。下式适合于空气的最大流量计算：

$$q_{pV} = 15.7 \cdot d^2 \cdot p_a$$

公式 1-22：孔口阻挡流流量公式 [11]

$d$  孔口直径 [cm]  
 $p_a$  容器外部的压力 [hPa]



### 气体动态流量

如果容器中的压力上升超过了临界压力，那么气体流量开始减少，我们可依据伯努利和泊稷叶气体动力学定律对其进行计算。此时的气体流量  $q_{pV}$  和流导取决于

- 孔口的最小横截面
- 容器外部的压力
- 容器内部的压力
- 普适气体常数
- 绝对温度
- 摩尔质量
- 绝热指数 (= 恒压  $c_p$  或定容  $c_v$  条件下的比热容或摩尔热容比) [12]

### 分子流 [13]

如果一个孔口连接两个容器，且满足分子流条件（即：平均自由程远远大于容器直径），则单位时间内排出的气体量  $q_{pV}$  由下式计算

$$q_{pV} = A \cdot \frac{\bar{c}}{4} \cdot (p_1 - p_2)$$

公式 1-23：孔口流量

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| A 孔口横截面积          | [cm <sup>2</sup> ]   |
| $\bar{c}$ 平均热运动速度 | [m s <sup>-1</sup> ] |

根据公式 1-23，以下为孔口流导计算公式

$$C_{or, mol} = A \cdot \frac{\bar{c}}{4} = A \cdot \sqrt{\frac{kT}{2\pi m_0}}$$

公式 1-24：孔口流导

对于温度为 293 K 的空气，我们得出

$$C_{or, mol} = 11.6 \cdot A$$

公式 1-25：空气的孔口流导

|          |                      |
|----------|----------------------|
| A 孔口横截面积 | [cm <sup>2</sup> ]   |
| C 流导     | [l s <sup>-1</sup> ] |

该公式可用于确定入口面积为 A 的真空泵所能具有的最大抽速，在分子流条件下，泵的最大抽速根据入口面积确定。

现在让我们看看圆管道的流导吧。在层流的情况下，圆管道的流导与平均压力成正比：

$$C_{pipe, lam} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 + p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{228 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p}$$

公式 1-26：层流中的圆管流导

对于温度在 20°C 的空气，我们得出

$$C_{pipe, lam} = 1.35 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p}$$

公式 1-27：空气层流中的圆管道的流导

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| l 管长度        | [cm]                 |
| d 管直径        | [cm]                 |
| $\bar{p}$ 压力 | [Pa]                 |
| C 流导         | [l s <sup>-1</sup> ] |

在分子流态中，流导是恒定不变的，也不是压力的函数。可将其认为是管口的孔口流导  $C_{orifice, mol}$  和通过部件的传输概率  $P_{pipe, mol}$  的乘积：

$$C_{pipe, mol} = C_{orifice, mol} \cdot P_{pipe, mol}$$

公式 1-28：分子流管道流导

平均概率  $P_{pipe, mol}$  可以采用蒙特卡罗模拟方法针对不同形状管道、弯头或阀门进行编程计算。可以跟踪每个气体分子通过管件时与壁面碰撞的轨迹，进行统计算出。

以下适用于长圆管：

$$C_{pipe, mol} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d}{l}$$

公式 1-29：长圆管的传输概率

如果我们将该值乘以孔口流导（公式 1-24），则得出

$$C_{pipe, mol} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l}$$

公式 1-30：分子流态的管道流导

对于温度在 20°C 的空气，我们得出

$$C_{pipe, lam} = 12.1 \cdot \frac{d^3}{l}$$

公式 1-31：分子流态的管道流导

|       |                      |
|-------|----------------------|
| l 管长度 | [cm]                 |
| d 管直径 | [cm]                 |
| C 流导  | [l s <sup>-1</sup> ] |

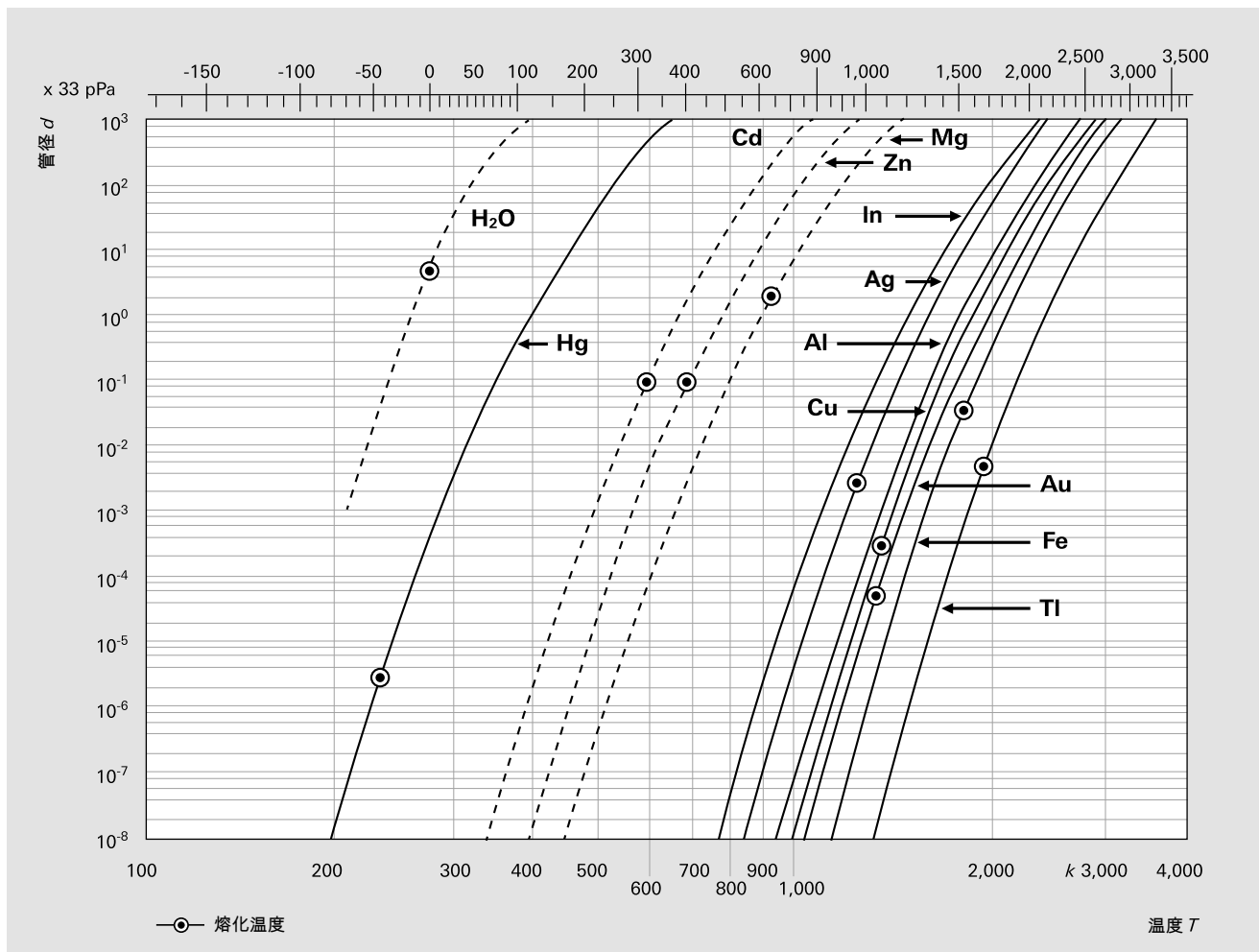


图 1.9：各种物质的蒸气压曲线 [14]

## 1.3 影响现实真空系统的因素

### 1.3.1 污染

当对真空室进行抽空时，为尽快达到所需压力，真空室必须清洁。真空系统典型的污染物包括

- 真空系统生产过程产生的残留物
  - 表面、螺丝钉和密封件上的油脂和润滑剂
- 与应用相关的污染物
  - 过程反应产物、灰尘和颗粒
- 环境相关的污染物
  - 冷凝蒸汽，特别是吸附在容器壁上的水分。

因此，在组装真空设备时必须确保部件尽可能清洁干净。真空室中安装的所有部件必须干净、无油脂。安装的所有密封也必须无油。如果不能避免使用真空润滑脂，则必须非常小心地使用真空润滑脂，总而言之，是作为润滑剂用以辅助安装，而不是用作密封剂。如果涉及到高真空或超高真空系统，在装配过程中必须佩带清洁、不掉毛、无粉尘手套。

### 1.3.2 冷凝和蒸发

所有物质都有液体、固体或气体三种状态。他们的聚集状态由压力和温度决定的。液体通过蒸发转化为气态，固体通过升华转化为气态。将液体或固体从气相分离出来称为冷凝。由于正常的环境空气中每立方米大约含有 10 g 水蒸气，所以冷凝的水蒸气存在于所有物体表面。

由于水分子的强极性，表面的吸附特别明显。天然纤维，特别是纸张，在真空条件下的干燥过程中，会有大量水分逸出。冷凝器用于分离水蒸气。甚至某些金属（镉、锌、镁）在几百摄氏度高温下也可大量蒸发。因此，应避免在设备制造中使用这些金属。

### 1.3.3 解吸、扩散、渗透和泄漏

除水之外，其它物质，如真空泵工作液也可吸附在表面。物质也可从金属壁中扩散出来，这在残余气体中可检验出来。在特别严格要求的情况下，不锈钢容器可在真空条件下烘烤，从而促使大多数挥发性成分从金属壁中释放出来。

#### 解吸

气体分子（特别是水）通过吸附和吸收粘着在真空室的内表面上，并在真空下再次逐渐解吸。在真空系统中，金属和玻璃表面因解吸所产生的放气量随覆盖率的下降和时间的推移而下降。一般假设在给定时间点  $t > t_0$  后，下降将以线性规律随时间变化，就能得到很好的近似值。 $t_0$  通常假定为一小时。

气体量因此可描述为：

$$Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t}$$

公式 1-32：解吸率

|           |                 |  |
|-----------|-----------------|--|
| $Q_{des}$ | 解吸率             | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]                 |
| $q_{des}$ | 解吸流密度<br>(特定面积) | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ] |
| $A$       | 面积              | [m <sup>2</sup> ]                                    |
| $t$       | 时间              | [s]  |

#### 带解吸的扩散

在低于 10<sup>-6</sup> hPa 的作业中，塑料，特别是密封件的表面解吸影响更大。塑料释放的主要是溶解于这些塑料内部的气体，这些气体首先必须扩散到表面。因此，随着泵停机时间的延长，从塑料中解吸出的气体相比于从金属表面而言占主导地位。虽然密封件的表面积相对较小；其解吸率随时间的下降却远远慢于金属表面解吸率的下降。作为近似值，可假定解析下降过程随时间的平方根变化。

塑料表面产生的气体因此可描述为：

$$Q_{diff} = q_{diff} \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{t_0}{t}}$$

公式 1-33：塑料的解吸率

|            |                 |  |
|------------|-----------------|--|
| $Q_{diff}$ | 扩散率             | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]                 |
| $q_{diff}$ | 扩散流密度<br>(特定面积) | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> ] |
| $A_d$      | 容器中的塑料<br>材料表面积 | [m <sup>2</sup> ]                                    |
| $t$        | 时间              | [s]  |

类似的情况也发生在压力更低的金属中，其中，氢和碳以 CO 和 CO<sub>2</sub> 的形式逸出，并可在残余气体谱中看到。在这方面，公式 1-33 也适用。

#### 渗透和泄漏

密封件，甚至金属壁，通过扩散都可被小的气体分子渗透，比如氦。

由于该过程不是时间的函数，因此导致极限压力持续增加。渗透气体量与横跨壁厚的压力梯度和材料相关的渗透常数成正比。

$$Q_{perm} = k_{perm} \cdot A \cdot \frac{p_a}{d}$$

公式 1-34：渗透量

|            |        |                                      |
|------------|--------|--------------------------------------|
| $Q_{perm}$ | 扩散率    | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $p_a$      | 容器外的压力 | [Pa]                                 |
| $d$        | 壁厚     | [m]                                  |
| $A$        | 容器表面积  | [m <sup>2</sup> ]                    |
| $k_{perm}$ | 渗透常数   | [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]    |

渗透首先在压力低于 10<sup>-8</sup> hPa 时表现出来。

用  $Q_L$  描述漏孔漏率，即通过漏孔进入真空系统的气体流量。泄漏率可定义为压力在一定容积内随时间的上升：

$$Q_L = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t}$$

公式 1-35：泄漏率

|            |            |                                      |
|------------|------------|--------------------------------------|
| $Q_L$      | 泄漏率        | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $\Delta p$ | 测量期间的压力变化量 | [Pa]                                 |
| $V$        | 容积         | [m <sup>3</sup> ]                    |
| $\Delta t$ | 测量时间       | [s]                                  |

如果以体积流率  $S$  对容器进行连续抽空，在气体流量（公式 1-16）等于泄漏率  $Q_L = S \cdot p_{eq}$  时，将会产生平衡压力  $p_{eq}$ 。

如果平衡压力  $p_{eq}$  大约是工作压力的 10%，则认为系统具有足够好的气密性。举例而言，如果要获得的工作压力为 10<sup>-6</sup> hPa 且正在使用的真空泵抽速为 100 l s<sup>-1</sup>，泄漏率应该不超过 10<sup>-6</sup> Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>。

在清洁的不锈钢容器中，能够轻松地获得  $Q_L < 10^{-9}$  Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 泄漏率。

要在给定时间段  $t$  内达到极限压力主要取决于上述的所有影响因素，以及真空泵的抽速。前提当然是取决于真空泵的极限压力。

$$Q_{des}(t) + Q_{diff}(t) + Q_{perm} + Q_L = p(t) \cdot S$$

公式 1-36：作为时间函数的极限压力

通过使用公式 1-36 以及求解与时间有关的方程，可计算在给定抽吸时间  $t$  下的各种气体流量和产生的压力。极限压力是这些压力之和。

### 1.3.4 烘烤

为获得超高真空范围 ( $<10^{-8}$  hPa) 内的压力，必须满足以下条件：

- 真空泵的本底压力应该低于所需极限压力的 10 倍。
- 真空室和部件所使用的材料必须针对最小出气量进行优化，并且具有适当等级的表面处理。
- 应该使用金属密封件（例如，CF 法兰连接或 ISO 法兰标准的螺旋挠性密封件）。
- 清洁处理是获取超高真空的必要条件，即：所有部件必须在安装前彻底清洗并必须佩戴无油脂手套进行安装。
- 设备和高真空泵必须进行烘烤。
- 在启动加热器之前，必须进行真空检漏。为此，必须使用氦检漏仪或四极杆质谱仪。

烘烤显著增加解吸率和扩散率，而且这会导致抽吸时间大大缩短。作为制造工艺的最后一个步骤，UHV 用途的腔室可在温度高达  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  时进行退火。后续烘烤温度可能达到  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。泵制造商有关高真空泵法兰最高烘烤温度的说明通常将最高温度限制为  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果在真空设备中使用热源（例如，辐射加热），则不得超过允许的辐射功率。

设备在安装完毕后投入运行。在达到  $10^{-5}$  hPa 的压力后，开启加热器。在加热过程中，每间隔 10 小时就要开启真空计并对其脱气。如果使用的是经过适当表面处理的不锈钢腔体和金属密封件，经过  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  的烘烤温度和约 48 小时的加热过程，就足以达到  $10^{-10}$  hPa 的压力范围。

烘烤应该持续进行，直至达到预期极限压力的 100 倍。然后关闭泵和真空室的加热器。在冷却后，很可能会达到所预期的极限压力。在压力低于  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa 且内表面积较大时，将优先使用气体捕集泵（钛升华泵），这种泵能以大体积流量抽出从金属中逸出的氢气。

### 1.3.5 残余气体组成

在超高真空中工作时，重要的是，在开始真空工艺之前或为了监控工艺过程，需要了解残余气体的组成。如果水的百分比 ( $m/e = 18$ ) 及碎片 OH ( $m/e = 17$ ) 含量很大，那么多是在真空室不清洁或烘烤不彻底的原因。如果氮 ( $m/e = 28$ ) 和氧 ( $m/e = 32$ ) 的-峰值之比  $\text{N}_2/\text{O}_2$  大约为 4:1，那么可以判定存在氮泄漏。

可在充分烘烤的腔室中，可以发现氢 ( $m/e = 2$ )、水 ( $m/e = 17$  和  $18$ )、一氧化碳 ( $m/e = 28$ ) 和二氧化碳 ( $m/e = 44$ )。在使用涡轮分子泵时，不会发现碳氢化合物。因为分子泵对大分子量气体具有大压缩比，它们有效地抽除在腔室之外。通过涡轮分子泵抽空的清洁容器的典型残余气体谱所图 1.10 所示。

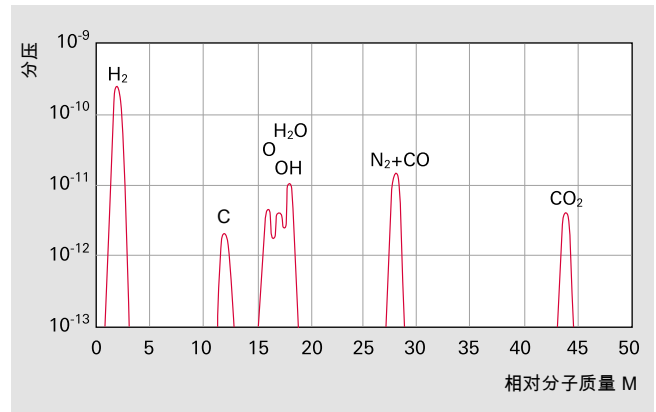


图 1.10：通过涡轮分子泵抽空容器的典型残余气体谱

有关使用质谱仪的更多信息见第 6 章“质谱仪和残余气体分析”。

### 1.3.6 充气保护

为避免不必要的污染，应该使用干燥的氮气代替空气对真空室进行充气保护。以防止水蒸气和环境空气中的其它可凝物（如溶剂蒸汽）沉积（吸附）在容器壁上。与真空腔室抽空作业相比，解吸过程都是十分缓慢的，所以每种可凝物都会延长后续的抽空时间。如果已经使用惰性气体对容器进行充气保护，那么只有在需要在容器内部进行必要作业时才打开容器。由于维修人员动作造成的对流或由于扩散，长时间打开容器将会导致环境空气中的水蒸气进入其中。



# 2 基础计算

## 2.1 概述

本部分将讨论简单的定量计算问题：

- 为在指定时间内使真空容器获得特定压力值，应该选择多大规格的真空泵？
- 高真空泵的前级泵应该为多大？
- 在抽出高负荷气体时，我需要注意什么呢？
- 管道对真空泵的有效抽速有什么影响？

显然，在此章节中无法将所有这些问题逐一进行讨论。因此，我们将使用简单的示例进行说明并估算预期结果。对于所讨论的相关具体应用，必须将其所使用的泵和部件的技术数据考虑在内。另外，参考一些特定的资料[15, 16, 17, 18, 19]有助于定量计算。

### 单位

每个物理技术参数都是由数值和单位组成的。国际单位制（符号：SI，来自法文的 *Système international d'unités*）已在世界范围内被采用，并且已经针对长度 (m)、质量 (kg)、时间 (s)、温度 (K)、物质的量 (mol)、电流 (A) 以及发光强度 (cd) 的基本值标准进行了定义。有关 SI 系统的国际法规是由国际计量局（缩写为 BIPM）制定的，并且由各个国家的计量机构在全国统一实施。

所有其它值都是由这些基本值派生出来的。除极少数情况外，本手册中使用的公式仅包含物理技术值，并不包含转换因子等。这就意味着，在用 SI 单位对数值进行计算后，结果也将使用 SI 单位表达。属于 SI 单位的有  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2} = 0.01 \text{ hPa}$ ，且  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 3.600 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 。以下所有章节中大多使用的是流行的非国际单位；然而，由于换算的原因，在适当的地方也将使用 SI 单位。统一使用 SI 单位会避免很多错误和大量的换算工作。可惜这一优势要在世界范围内获得推广还有待时日。

## 2.2 计算

### 2.2.1 罗茨泵机组的选型

在对罗茨泵组选型时，首先需要考虑到很多因素。

#### 压缩比

罗茨泵的压缩比  $K_0$  通常在 5 和 70 之间。要确定压缩比，我们首先考虑被抽除气体的体积流率和两种返流率——以返流流导  $C_R$  形式表征的气体体积流率，以及以有害空间抽速  $S_R$  形式携带返流气体流率：

$$p_a \cdot S = p_a \cdot S_0 - C_R (p_v - p_a) - S_R \cdot p_v$$

公式 2-1：罗茨泵气体负荷

- $S$  体积流率（抽速）
- $S_0$  进气侧的理论抽速
- $S_R$  返回的气体流率
- $C_R$  返流流导
- $p_a$  入口压力
- $p_v$  前级真空压力

选择  $S$  等于 0，我们得出压缩比

$$\frac{p_a}{p_v} = K_0 = \frac{S_0 + C_R}{C_R + S_R}$$

公式 2-2：罗茨泵的压缩比

#### $K_0$ 压缩比

在层流的区域内，流导返流远远大于携带返流。这样则将公式 2-2 简化为

$$K_0 = \frac{S_0}{C_R}$$

公式 2-3：层流中的罗茨泵压缩比

在分子流区域范围内，进气侧的抽速仍是很大的，但携带返流的抽速现在比流导返流大得多。因此，压缩比是：

$$K_0 = \frac{S_0}{S_R}$$

公式 2-4：分子流的罗茨泵压缩比

在层流（高压）区域内，压缩比受限于通过罗茨转子与外壳之间间隙的流导返流，由于流导与平均压力成正比，压缩比将随压力上升而减少。

在分子流范围内，排气侧的携带返流气体流量  $S_R \cdot p_v$  占主导地位并限制了低压下的压缩比。正是由于这种影响，罗茨泵的使用被限制在压力  $p_a$  大于  $10^{-4}$  hPa 的情况下。

### 抽速

罗茨泵配备了溢流阀，该溢流阀允许泵的最大压差  $\Delta p_d$  在 30 和 60 hPa 之间。如果罗茨泵与前级泵结合，必须对溢流阀开启 ( $S_1$ ) 和关闭 ( $S_2$ ) 时的压力范围进行区分。

由于两种泵（罗茨泵和前级泵）的气体气流量是相同的，所以可以用以下公式来表示：

$$S_1 = \frac{S_V \cdot p_v}{p_v \cdot \Delta p_d}$$

公式 2-5：溢流阀开启且高前级真空压力下的罗茨泵机组抽速

$S_1$  溢流阀开启时的抽速  
 $S_V$  前级泵的抽速  
 $p_v$  前级真空压力  
 $\Delta p_d$  罗茨泵排气侧和进气侧之间的最大压差

只要压差明显小于前级真空压力，泵组的抽速将只略大于前级泵的抽速。一旦前级真空压力接近压差，溢流阀就会关闭。

$$S_1 = \frac{S_0}{1 - \frac{1}{K_0} + \frac{S_0}{K_0 \cdot S_V}}$$

公式 2-6：溢流阀关闭且前级真空压力接近压差时罗茨泵机组抽速

现在让我们考虑罗茨泵在恒压下工作的特殊情况（例如，冷凝器模式）。公式 2-3 将适用于高压范围。从公式 2-1 中求出  $C_R$ ，并且忽略相对流导值  $C_R$  较小的返流抽速  $S_R$ ，我们得出：

$$S = S_0 \cdot \left[ 1 - \frac{1}{K_0} \left( \frac{p_v}{p_a} - 1 \right) \right]$$

公式 2-7：高吸入压力下的罗茨泵机组抽速

在低压力下，从公式 2-4 中解出  $S_R$ ，则我们得出

$$S = S_0 \cdot \left[ 1 - \frac{p_v}{K_0 \cdot p_a} \right]$$

公式 2-8：低吸入压力下的罗茨泵机组抽速

从公式 2-6 可以看出，如果压缩比  $K_0$  明显大于罗茨泵理论抽速  $S_0$  和前级真空抽速  $S_V$  之间的比率， $S$  趋向于  $S_0$ 。

例如，如果选择压缩比等于 40，罗茨泵抽速比前级泵抽速大 10 倍，则我们得出  $S = 0.816 \cdot S_0$

就泵组适应不同用途而言，罗茨泵的理论抽速不应该比前级泵抽速大十倍。

由于溢流阀的压差被设置为大约为 50 hPa，事实上只要压力超过 50 hPa 时，前级泵的体积流量就是有效的。例如，如果要求在指定时间内将大容器抽空至 100 hPa，则必须选择适当较大的前级泵。

我们假设一个泵组，需要在 10 分钟内将体积为  $2 \text{ m}^3$  的容器排空至压力为  $5 \cdot 10^{-3}$  hPa。要实现这一点，我们将选择可在 5 分钟内将容器抽空至 50 hPa 的前级泵。在恒定体积流量下，以下公式适用：

$$t_1 = \frac{V}{S} \ln \frac{p_0}{p_1}$$

公式 2-9：抽空时间

$t_1$  前级泵的抽空时间  
 $V$  容器体积  
 $S$  前级泵的抽速  
 $p_0$  初始压力  
 $p_1$  最终压力

通过重新整理公式 2-9，我们可计算出所需的抽速：

$$S = \frac{V}{t_1} \ln \frac{p_0}{p_1}$$

公式 2-10：计算抽速

使用以上给定的数值，我们得出：

$$S = \frac{2,000 \text{ l}}{300 \text{ s}} \ln \frac{1,000}{50} = 20 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 72 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

我们选择抽速  $S_v$  为  $100 \text{ m}^3/\text{h}^{-1}$  的 Hepta 100 型螺杆泵作为前级泵。使用相同的公式，我们估算罗茨泵的抽速将为  $61 \text{ l s}^{-1} = 220 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ，并选择抽速  $S_0 = 490 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 、溢流阀压差  $\Delta p_d = 53 \text{ hPa}$  的 Okta 500 型罗茨泵用于中真空范围。

从下表的  $p_v$  一列中，我们选择给定的前级压力，从 Hepta 100 的抽速曲线上确定对应的抽速  $S_v$ ，从而计算抽气流量：  
 $Q = S_v \cdot p_v$ 。

当溢流阀开启前级压力达到  $56 \text{ hPa}$  时，可计算得到压缩比

$$K_{\Delta} = \frac{p_v + \Delta p_d}{p_v}$$

当前级真空压力  $\leq 153 \text{ hPa}$  时， $K_0$  从图 2.1 得出。计算罗茨泵抽速有两种方法：

$S_1$  可从公式 2-5 得出，适用于已开启溢流阀的情况， $S_2$  由公式 2-6 得出，适用于已关闭溢流阀的情况。当前级压力接近差压  $p_d$  时， $S_1$  大于  $S_2$ 。在计算得到的两个抽速中，较小值往往是正确的，

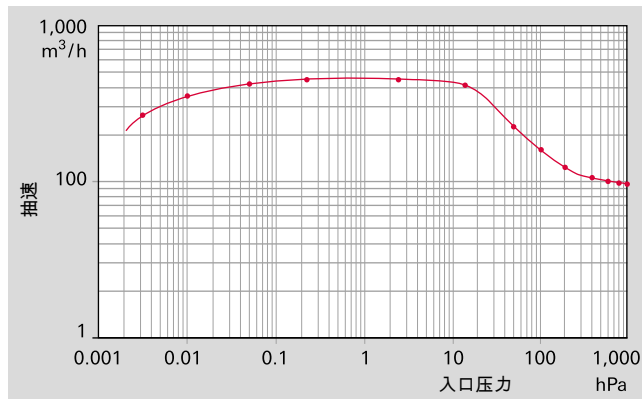


图 2.2：具有 Hepta 100 和 Okta 500 泵组的体积流量（抽速）

我们将其记为  $S_0$ 。使用以下公式获得入口压力：

$$p_a = \frac{Q}{S} : \text{图 2.2 显示了该泵组的抽速曲线图。}$$

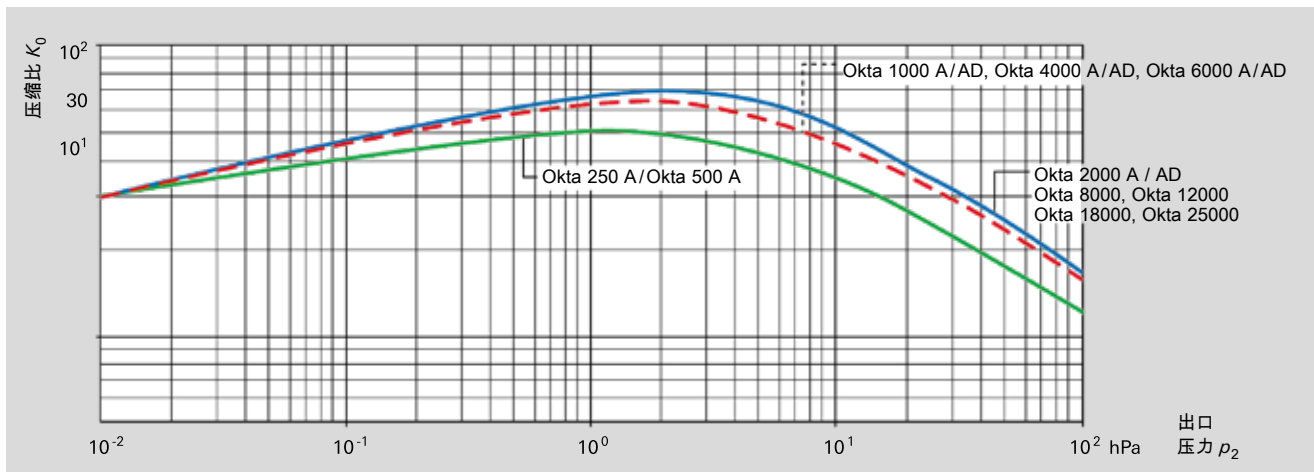


图 2.1：罗茨泵对空气的零流量压缩比

| $P_a$<br>(hPa) | $P_v$<br>(hPa) | $S_v$<br>( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | $Q$<br>( $\text{hPa} \cdot \text{m}^3/\text{h}$ ) | $K_{\Delta}$ | $K_0$ | $S_1$<br>( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | $S_2$<br>( $\text{m}^3/\text{h}$ ) | $t$<br>(h) | $t$<br>(s) |
|----------------|----------------|------------------------------------|---|--------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------|------------|
| 1,000.0000     | 1,053.00       | 90.00                              | 94,770.00   | 1.05         |       | 94.77                              |                                    | 0.00490    | 17.66      |
| 800.0000       | 853.00         | 92.00                              | 78,476.00   | 1.07         |       | 98.10                              |                                    | 0.00612    | 22.04      |
| 600.0000       | 653.00         | 96.00                              | 62,688.00   | 1.09         |       | 104.48                             |                                    | 0.00827    | 29.79      |
| 400.0000       | 453.00         | 100.00                             | 45,300.00   | 1.13         |       | 113.25                             |                                    | 0.01359    | 48.93      |
| 200.0000       | 253.00         | 104.00                             | 26,312.00   | 1.27         |       | 131.56                             |                                    | 0.00652    | 23.45      |
| 100.0000       | 153.00         | 105.00                             | 16,065.00   | 1.53         | 7.00  | 160.65                             | 321.56                             | 0.00394    | 14.18      |
| 50.0000        | 103.00         | 105.00                             | 10,815.00   | 2.06         | 13.00 | 216.30                             | 382.20                             | 0.00608    | 21.87      |
| 14.9841        | 56.00          | 110.00                             | 6,160.00  | 18.70        | 18.00 | 2,053.33                           | 411.10                             | 0.00822    | 29.58      |
| 2.5595         | 10.00          | 115.00                             | 1,150.00  |              | 36.00 |                                    | 449.30                             | 0.01064    | 38.30      |
| 0.2300         | 1.00           | 105.00                             | 105.00  |              | 50.00 |                                    | 456.52                             | 0.00670    | 24.13      |
| 0.0514         | 0.30           | 75.00                              | 22.50   |              | 46.00 |                                    | 437.39                             | 0.00813    | 29.27      |
| 0.0099         | 0.10           | 37.00                              | 3.70  |              | 40.00 |                                    | 375.17                             | 0.00673    | 24.23      |
| 0.0033         | 0.06           | 15.00                              | 0.90  |              | 39.00 |                                    | 270.42                             | 0.00597    | 21.51      |
| 0.0018         | 0.05           | 5.00                               | 0.25  |              | 37.00 |                                    | 135.29                             |            |            |

抽空时间：344.94 s

表 2.1：罗茨机组的抽速和抽空时间



### 抽空时间

腔体的抽空时间需要根据不同的阶段分别计算得出。在抽速变化强烈的区域，前级真空压力间隔划分必须较小。公式 2-9 用于确定间隔期间的抽空时间，使用  $S$  作为计算压力间隔阶段两个抽速的平均值。总抽空时间将是表 2-1 最后一列所有时间之和。

此外，真空系统的泄漏率、管道的流导和真空室中存在的蒸发液体，以及多孔材料和被污染容器壁表面的除气也会影响抽空时间。这些因素中的一部分将在第 2.2.3.1 节和第 2.3 节中进行讨论。如果上述影响存在任何未知情况，将有必要在泵组中提供适当的防护措施。

### 2.2.2 冷凝器模型

在很多真空工艺（干燥、蒸馏）中，会释放出大量的蒸汽，这些气体需要被抽出。此外，大量的泄漏空气会渗透到大型容器中，而且那些正在蒸发或干燥的物料将释放额外的空气，这些空气之前往往存在于孔隙中或溶解在液体里。

在干燥过程中，蒸气总是可以用一个能压缩水蒸气的真空泵抽除排向大气，然后冷凝。然而，该工艺具有以下缺点：

- 真空泵必须非常大
- 大量的气镇空气将被充入在蒸气中，一起抽除，会将大量的油雾从泵中帶出
- 有必要对由水蒸气和油雾产生的冷凝液进行处理，而这个处理过程非常昂贵。

蒸馏工艺使用冷凝器操作，其目的是让通过所连接的真空泵的冷凝蒸馏液尽可能的少。

让我们假设真空腔体或承载装置中装有要干燥的材料，通过加热向材料供应足够的能量，使得每小时将蒸发 10 kg 的水分。

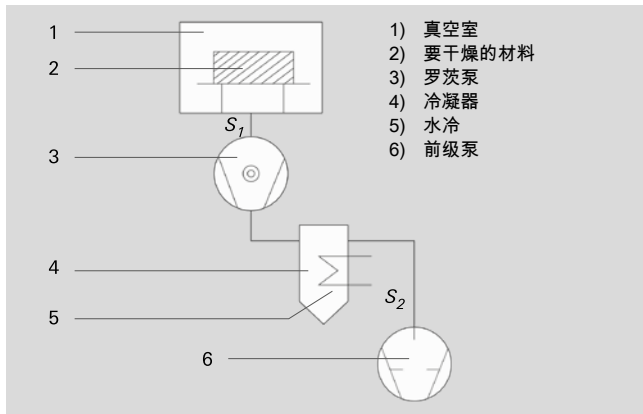


图 2.3：干燥系统（原理图）

此外，每小时将会有 0.5 kg 的空气被释放。真空室里的压力应小于 10 hPa。根据图 2.3，机组用于干燥，通过使用冷凝器能够使蒸气可以经济高效地冷凝。

待干燥物料 (2) 在真空室 (1) 中被加热。罗茨泵 (3) 将蒸汽/空气混合物抽吸到冷凝器 (4) 中，大部分蒸汽在冷凝器中冷凝。

用水对冷凝器进行冷却。温度为 25°C 的冷凝水与 30 hPa 的水蒸汽压力保持平衡。附加真空泵 (6) 抽出空气以及少量的水蒸气，并在大气压下将混合物排出。第一步是计算真空室排出的气体流量： $Q = \rho_{vc} \cdot S_1$

根据公式 1-5 的理想气体定律，我们得出

$$Q = \rho_{vc} \cdot S_1 = \frac{R \cdot T}{t} \cdot \left( \frac{m_{water}}{M_{water}} + \frac{m_{air}}{M_{air}} \right)$$

公式 2-11：抽空蒸汽的气体流量

|             |         |   |
|-------------|---------|---|
| $T$         | 进气温度    | [K]   |
| $R$         | 普适气体常数  | 8.314 kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| $t$         | 时间      | [s]   |
| $\rho_{vc}$ | 真空室中的压力 | [Pa]  |
| $m_{water}$ | 水蒸气质量   | [kg]  |
| $M_{water}$ | 水的摩尔质量  | [kg mol <sup>-1</sup> ]                     |
| $m_{air}$   | 空气质量    | [kg]  |
| $M_{air}$   | 空气的摩尔质量 | [kg mol <sup>-1</sup> ]                     |

其中：

|             |         |   |
|-------------|---------|---|
| $T$         | 进气温度    | 300 K                                       |
| $R$         | 一般气体常数  | 8.314 kJ kmol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| $t$         | 时间      | 3600 s                                      |
| $\rho_{vc}$ | 真空室中的压力 | 1000 Pa                                     |
| $m_{water}$ | 水蒸气质量   | 10 kg                                       |
| $M_{water}$ | 水的摩尔质量  | 0.018 kg mol <sup>-1</sup>                  |
| $m_{air}$   | 空气质量    | 0.5 kg                                      |
| $M_{air}$   | 空气的摩尔质量 | 0.0288 kg mol <sup>-1</sup>                 |

我们得出空气流量为 12 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 和水蒸气流量为 385 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>，总共 397 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>。除以入口压力  $\rho_{vc}$  1000 Pa，我们得出抽速  $S_1$  为 0.397 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 或 1429 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>。

当排空冷凝器时，空气分压不应超过 30%，即最大为 12.85 hPa。因此：

$$S_2 = \frac{Q_{air}}{0.3 \cdot \rho_{air}}$$

空气流量为 12 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 且压力为 1285 Pa 时，得出的抽速  $S_2$  为 0.031 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 或 112 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>。

因此，我们选择 Hepta 100 螺杆泵作为前级泵。由于其抽速稍低于计算值，该泵将只能获得稍高一点的空气分压。因此我们选择具有以下值的 Okta 2000 罗茨泵：

$$\begin{aligned} S_0 & 2065 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \\ \Delta p_d & \text{溢流阀差压为 } 35 \text{ hPa} \\ K_0 & 28, \text{ 其中 } \rho_v = 43 \text{ hPa} \end{aligned}$$

我们估计入口压力  $p_a$  为 1000 Pa 并根据公式 2-7 计算  $S_7$ 。

$$S = S_0 \cdot \left[ 1 - \frac{1}{K_0} \left( \frac{p_v}{p_a} - 1 \right) \right]$$

我们得出的抽速  $S_1$  为  $0.506 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  或  $1.822 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 。

$$\text{其中 } p_a = \frac{Q}{S_1}$$

且  $p_a$  值为 785 Pa，我们得出干燥室的入口压力，并再次使用公式 2-7 中的该数字，我们得到入口压力  $p_a = 823 \text{ Pa}$  时更精确的抽速

$$S_1 = 1.736 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}.$$

我们计算要冷凝  $10 \text{ kg h}^{-1}$  蒸汽量的冷凝器。以下适用于冷凝面积：

$$A_K = \frac{Q_{\text{water}} \cdot m_{\text{water}}}{t \cdot \Delta T_m \cdot k}$$

公式 2-12：冷凝面积的计算

|                    |           |                                      |
|--------------------|-----------|--------------------------------------|
| $A_K$              | 冷凝面积      | [m <sup>2</sup> ]                    |
| $Q_{\text{water}}$ | 特定的蒸发焓    | [Ws kg <sup>-1</sup> ]               |
| $m_{\text{water}}$ | 水蒸气质量     | [kg]                                 |
| $\Delta T_m$       | 蒸汽与冷凝面的温差 | [K]                                  |
| $k$                | 热传导系数，    | [W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ] |

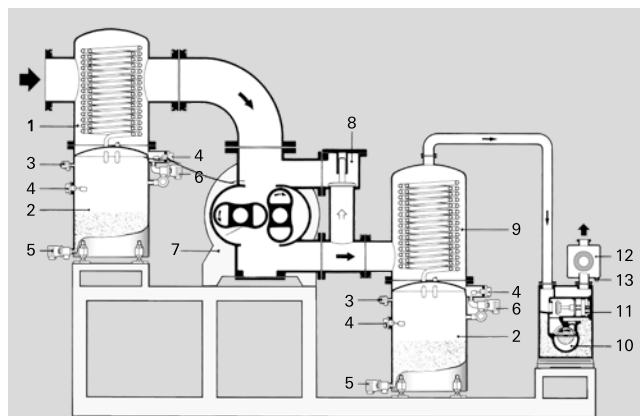
其中：

|                    |                                       |
|--------------------|---------------------------------------|
| $Q_{\text{water}}$ | $2,257 \cdot 10^6 \text{ Ws kg}^{-1}$ |
| $m_{\text{water}}$ | 10 kg                                 |
| $t$                | 3600 s                                |
| $\Delta T_m$       | 60 K                                  |
| $k$                | $400 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ |

我们得出冷凝面积  $A_K$  为  $0.261 \text{ m}^2$ 。

蒸汽以近似绝热压缩的方式被加热超过 100 K，但其在去往冷凝器的过程中重新冷却下来。因此  $T_m = 60 \text{ K}$  的假设是相当保守的。热传导系数  $k$  [20] 随惰性气体浓度的增加而显著减少，这导致冷凝面积更大。相反，由于惰性气体浓度较低，因此则可与较大的前级泵和较小的冷凝面积一起使用。应特别注意小的泄漏率，因为它们也会增加惰性气体的浓度。

更多的技术细节可从专业资料 [21] 中获得。



- |            |            |
|------------|------------|
| 1) 冷凝器     | 8) 溢流阀     |
| 2) 冷凝液储存容器 | 9) 中间冷凝器   |
| 3) 放气阀     | 10) 旋片泵    |
| 4) 浮球开关    | 11) 高真空安全阀 |
| 5) 放泄阀     | 12) 油雾过滤器  |
| 6) 切断阀     | 13) 放油塞    |
| 7) 罗茨泵     |            |

图 2.4：用于蒸汽冷凝的罗茨泵机组

为了完整性，让我们再想想干燥工艺的整个流程：压力平衡最初发生在干燥室内，这是由于蒸发的水量和干燥物料的热量以及罗茨泵的体积流量引起的。

罗茨泵将使水蒸气排入冷凝器，水蒸气在冷凝器里冷凝。由于那里以层流为主，蒸汽与待干燥物料释放的惰性气体一起进入冷凝器。

如果前级泵被关闭，整个冷凝过程将很快停止，因为蒸汽只能通过扩散达到冷凝面。随着干燥过程的进行，冷凝器中的蒸汽量减少，冷凝液减少；然而，如果惰性气体浓度减低，前级泵抽出的蒸汽浓度将趋向更大。如果冷凝器中的蒸汽压力下降到低于冷凝阈值，冷凝液就会开始再蒸发。如果冷凝液通过阀门排放到冷凝液储存容器中，且该阀门在蒸汽压力下降到冷凝压力之下时关闭，则可防止这一情况的发生。

在大型蒸馏系统中，前级泵的抽速应在冷凝率的基础上进行调节。例如，这可通过借助泵来实现，该泵可以均匀地排出从储存容器中的冷凝液。当储存容器中浓缩物液位下降到给定液位以下，前级泵的进气阀门开启并将聚集在冷凝器内的惰性气体抽出。冷凝率现在再次升高，冷凝液液位上升，前级泵的进气阀将再次关闭。这种安排意味着系统仅在冷凝率过低时抽吸，且只存在很少的冷凝液损失。

## 总结

当抽除蒸汽（干燥、蒸馏）时，主要的抽除效果可由冷凝器提供。根据压力和温度条件，可使用一个或两个冷凝器（图 2.4）。罗茨泵和前级泵之间的冷凝器更加有效，因为蒸汽以较高温度和较高压力进入冷凝器，而小的前级泵只排出了一部分蒸汽。在蒸馏过程中，通过调节前级泵抽速，可将冷凝液损失减少到最少。

上述理论原理经常用于配置罗茨泵组。图 2.5 显示了用于减少海底电缆生产所用纸材残留水分的真空解决方案。预冷凝器（未显示）主要对在高压下的第一个干燥阶段产生的水蒸气进行冷凝。中间冷凝器保护下游 BA 501 旋片泵并对主要在第二个干燥阶段中产生的水蒸气进行冷凝。

图 2.6 显示了用于变压器干燥的罗茨泵组。中间冷凝器减少了所用材料的残留水分，使其不超过下游 BA 501 旋片泵的水蒸气排气能力。



图 2.5：用于蒸汽冷凝的罗茨泵组



图 2.6：用于变压器干燥的罗茨泵组

## 2.2.3 涡轮分子泵机组

### 2.2.3.1 使用涡轮分子泵组将腔体抽至 $10^{-8}$ hPa

在 12 小时内将光亮不锈钢制成的容器排空至压力  $p_b$  为  $10^{-8}$  hPa。从第 1.3 章可看出，除纯粹的空气抽空时间外，还要将其他影响考虑在内。水蒸气和吸附气体的解吸以及密封件的放气都将会延长抽空时间。获得  $10^{-8}$  hPa 压力所需的抽空时间包括以下内容：

- $t_1$  = 前级泵达到 0.1 hPa 的抽空时间
- $t_2$  = 涡轮分子泵达到  $10^{-4}$  hPa 的抽空时间
- $t_3$  = 不锈钢表面解吸的抽吸时间
- $t_4$  = 使 FPM 密封件脱气的抽吸时间

如果本底压力  $p_b$  由通过漏孔渗透流进容器的气体  $Q_l$ ，从金属表面释放的气体  $Q_{des,M}$  和从密封件释放的气体  $Q_{des,K}$  产生的平衡压力组成：

$$p_b = \frac{Q_l}{S} + \frac{Q_{des,M}(t_3)}{S} + \frac{Q_{des,K}(t_4)}{S}$$

公式 2-13：真空系统的本底压力

|             |              |                                      |
|-------------|--------------|--------------------------------------|
| $p_b$       | 本底压力         | [Pa]                                 |
| $Q_l$       | 通过泄漏和渗透的气体流量 | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $Q_{des,M}$ | 金属表面的出气量     | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $Q_{des,K}$ | 密封件的出气量      | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] |

容器具有以下数据：

|             |               |   |
|-------------|---------------|---|
| $V$         | 容器体积          | 0.2 m <sup>3</sup>  |
| $A$         | 容器表面积         | 1.88 m <sup>2</sup>   |
| $A_K$       | FPM 密封件的密封表面积 | 0.0204 m <sup>2</sup>   |
| $Q_l$       |               | $< 1.0 \cdot 10^{-9}$ Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>               |
| $q_{des,M}$ | 不锈钢面积有关的解吸率   | $2.7 \cdot 10^{-4}$ Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> |
| $q_{des,K}$ | FPM 面积有关的解吸率  | $1.2 \cdot 10^{-3}$ Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> |

前级泵应在  $t_1$  为 180 s 的时间内将容器排空至 0.1 hPa in，而且还应该在气镇阀开启时能够实现这一压力。体积流量可以通过公式 2-9 获得：

$$S_{backing\ pump} = \frac{V}{t_1} \cdot \ln \frac{p_0}{p_1} = 10.2 \text{ l s}^{-1} = 36.8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

我们选择抽速为  $S_v = 35 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  的 Penta 35 泵。

涡轮分子泵的抽速大约应该是前级泵抽速的 10 至 100 倍，以抽空吸附在金属表面的蒸汽和气体。我们选择抽速  $S_{HV}$  为  $685 \text{ l s}^{-1}$  的 HiPace 700 泵。使用公式 2-9，我们得出

$$t_2 = \frac{V}{S_{turbopump}} \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = 2.0 \text{ s}$$

### 容器表面的解吸

气体分子（主要是水分子）吸附在真空腔体的内表面，并逐渐在真空下再次蒸发。金属表面的解吸率以  $t^{-1}$  的速度下降。时间常数  $t_0$  为大约 1 h。

使用第 1 章的公式 1-32

$$Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t_3}$$

我们计算达到本底压力所花的时间

$$\rho_{b3} = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

$$t_3 = \frac{q_{des,M} \cdot A \cdot t_0}{S \cdot \rho_{b3}} = 2.67 \cdot 10^6 \text{ s} = 741 \text{ h.}$$

计算得到的 741 小时太长，必须通过烘烤容器来缩短该过程。选择的烘烤温度要防止对温度最敏感的材料。在我们的例子中，烘烤温度受到所使用 FPM 密封件的限制，它可轻松地承受 370 K 的温度。这样，解吸速度在理论上会提高三个数量级 [22]。而且烘烤时间实际上将缩短至几个小时。

通过在真空下对容器进行退火处理或通过某些表面处理（抛光、酸洗），也可使高解吸速率得到降低。

由于很多预处理的影响发挥作用，所以不可能精确预测随时间变化的压力曲线。然而，如果烘烤温度大约为 150°C，在获得的压力高出所需本底压力 100 倍后，即可关闭加热器。在真空室冷却后，则可获得所需压力  $\rho_{b3}$ 。

### 密封件解吸

如果在温度低于  $10^{-6}$  hPa 下工作，则塑料的出气率很重要。虽然密封件的表面积相对较小，解吸仅根据第 1 章中公式 1-33 给定的因数

$$\frac{t_0}{\sqrt{t_4}}$$

降低。

其中的原因是逸出的气体不仅附着在材料表面上，而且必须从密封件内部扩散出来。因此，随着抽空时间的延长，从塑料中的解吸相比于从金属表面的脱附而言占主导地位。根据第 1 章中公式 1-33 计算塑料表面的出气率。

$$Q_{des,K} = q_{des,K} \cdot A_d \cdot \frac{t_0}{\sqrt{t_4}}$$

我们使用  $Q_{des,K} = S \cdot \rho_{des,K}$  并获得以下

$$\rho_{b4} = 10^{-8} \text{ hPa}; t_4 = 459 \cdot 10^6 \text{ s} = 1277 \text{ h.}$$

在该式中， $t_0 = 3600 \text{ s}$  且  $q_{des,K}$  值均是从 FPM 图 [23] 中查出。可以看出，冷态密封的气体解吸对抽空时间的影响与金属表面放气属于同一量级。

由于密封件内部释放出的气体向外扩散过程将确定解吸气体流量随时间的变化，所以扩散系数  $D$  对温度的依赖性将对抽空时间具有关键性影响：

$$D = D_0 \cdot \exp \left( - \frac{E_{dif}}{R \cdot T} \right)$$

公式 2-14：扩散系数 (T)

随着温度的上升，扩散系数也增加；但是它不会如金属表面解吸率那样猛增。因此，我们看到弹性体密封件因其解吸率对本底压力具有限制作用，这就是他们不适合用于超高真空的原因。

### 泄漏率和渗透率

通过漏孔进入真空系统的气体流量是恒定的，并依据指定抽速产生平衡压力：

$$\rho_{leak} = \frac{Q_{leak}}{S}$$

如果该压力小于工作压力的 10%，则认为系统足够密闭。为  $10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$  量级的泄漏率通常很容易实现，也是系统所必需的。这表明泄漏率的压力分量为  $\rho_{leak} = 1.46 \cdot 10^{-11} \text{ hPa}$ 。时不会产生干扰，可不予考虑。

通过金属壁的渗透率不会影响该示例中所需的最终压力；但是通过弹性体密封件的扩散对所选例子中的本底压力还是有限制作用的。

### 总结

清洁容器中高达  $10^{-7}$  hPa 的压力大约可在一天的时间内获得，而无需采取任何额外的措施。

如果要获得高达  $10^{-4}$  hPa 的压力，前级泵和涡轮泵的抽空时间必须加在一起。在上述情况下，这大约是 200 s。在压力小于  $10^{-6}$  hPa 时，需要涡轮分子泵具有高抽速，特别是为了抽空从金属壁解吸的水分。

如果要在几个小时内获得压力  $\rho_b$  为  $10^{-8}$  hPa，这将只可能通过另外烘烤真空容器（90 至 400°C）。在已达到所需压力的 100 倍后，关闭加热器。在真空容器冷却后，则可达到所需本底压力。

在压力小于  $10^{-8}$  hPa 时，应只使用金属密封件，以避免 FPM 密封件的高解吸率。

在压力高达  $10^{-10}$  hPa 时，可以很容易的将金属容器中的泄漏率和渗透率保持足够低。

### 2.2.3.2 使用涡轮分子泵抽吸高气体负荷

涡轮分子泵在高气体负荷下受到高应力的影响。气体摩擦加热转子。最大气体负荷受到许可的转子温度  $120^{\circ}\text{C}$  的限制。当温度高于此水平时，在不可预测的时间内会发生不可逆的转子塑性形变。

通过测量转子温度和限制最高温度，可防止抽速  $> 1,000 \text{ l s}^{-1}$  的 HiPace 系列泵出现过热。过程的精确描述允许对大量泵的转子温度进行预估，并针对安全操作和长期稳定性对操作窗口进行限定。

用于抽吸大气体负荷的涡轮分子泵的适用性可受到转子和定子设计以及精确控制泵中温度分布曲线的影响。例如，ATH-M 系列泵明确是为大气体流量和比较高的工艺压力而设计的。这些涡轮分子泵是专为半导体行业中的镀膜和干式蚀刻工艺开发的。它们在此所面临的具体挑战是抽吸腐蚀性介质、加热使用泵以防止工艺化学品或副产品的冷凝，以及高分子气体特别大的工艺气体流量。这些开发也可用在太阳能和 LED 照明行业的应用中。这些涡轮分子泵的设计也让它们可用在前级泵和涡轮分子泵之间具有高输送压力的装载气锁中以及具有高冷却水温度的工艺操作条件下。

专为实现低压而设计的真空泵因其具有较高压缩比而更适用于小分子气体的抽气，还可在限制范围内用于具有大气流量的真空过程。由于摩擦功率与圆周速度的平方成正比，所以有必要降低在高气体负荷下操作的泵的 RPM。这意味着，较高气体负荷的获得是以转速为代价，特别是以压缩比为代价。这一措施可延长泵的操作窗口。

抽吸大分子稀有气体，如氦或氖时，要特别注意。由于原子量较高，这些重型惰性气体在撞击转子时会产生大量的热。又由于其热容量特别低，它们只能传输很少的热量到定子或外壳上，这将导致转子温度很高。因此，与具有较低质量，即较高的流动性和碰撞频率的气体分子或单原子气体相比，这些气体的最大气体抽吸量相对较低。

当与过程气体一起作业时，涡轮分子泵执行两个重要功能：

- 将操作室快速排空至本底压力（通过表面和基底脱气实现清洁的初始条件）
- 在真空过程（涂料、蚀刻等）中将所需压力保持在恒定水平

操作过程中的气体流量  $Q$  和工作压力  $p_{process}$  通常是指定的，因此操作室的体积流量也是指定的。

$$S = \frac{Q}{p_{process}}$$

将在所需气体流量的基础上选择涡轮分子泵。在目录中，为各个泵指定了各种气体的最大允许气体流量。

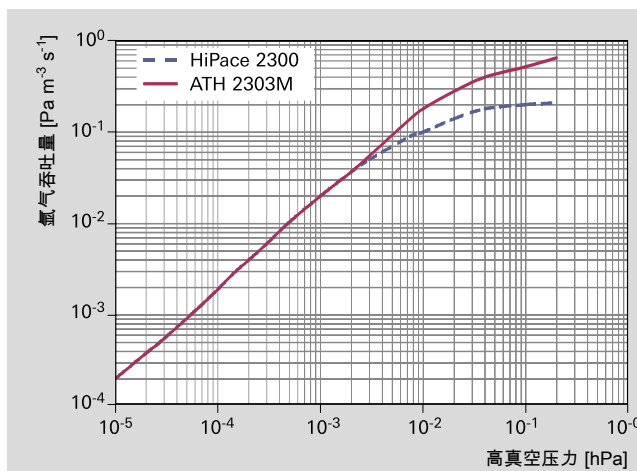


图 2.7：不同涡轮分子泵在工艺压力下的气体流量

在图 2.7 中，给出了带有 NW 250 法兰的不同涡轮分子泵的气体流量曲线图。ATH 2303 前级泵是来自半导体行业中常用的罗茨泵组。两个泵的流量必须相同，因为同一气流将连续通过两个泵：

$$S_{fore-vacuum} = \frac{Q}{p_{fore-vacuum}}$$

前级泵的选择会影响涡轮分子泵的温度平衡。如果前级泵的抽速设计刚刚能达到涡轮分子泵与其最大前级真空相对应的气体流量，则涡轮分子泵转子将会热过载。这时就应该选择具有较高抽速的前级泵，以减少气体摩擦和涡轮分子泵上的热负载。

通过 RPM 或调节阀, 可将工艺室的抽速限制为所需的水平。通过改变涡轮分子泵的转速进行压力调节是有害的, 转子高惯性会阻碍转子转速变化过快。在某些操作窗口中, 可通过调节前级泵的转速来控制压力。

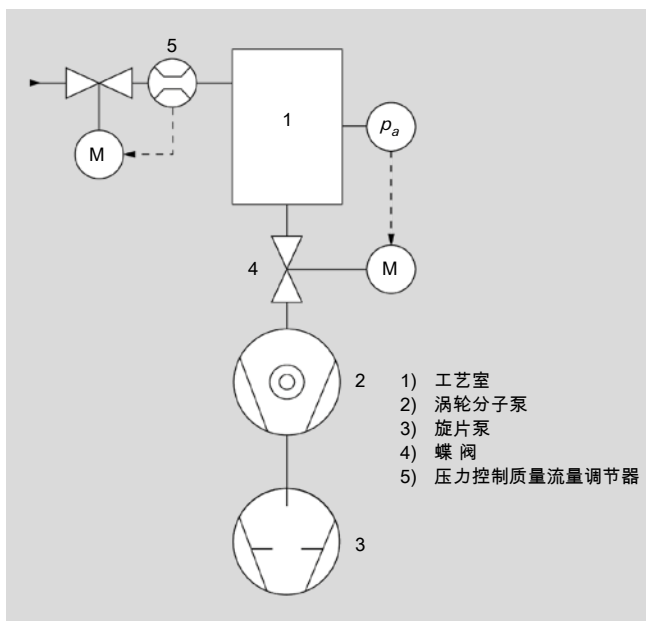


图 2.8 : 具有压力和流量调节功能的真空系统

让我们以真空工艺系统为例, 如图 2.8 所示, 并具有以下参数

$$Q = 3.0 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}, \text{ 操作气体氩}$$

$$\rho_{process} = 5 \text{ hPa}$$

$$\text{其中 } S = \frac{Q}{\rho_{process}}$$

我们获得涡轮分子泵的公称抽速为  $600 \text{ l s}^{-1}$ 。在这样高的操作压力下, 不可能达到涡轮分子泵的最大抽速。因此, 我们选择 ATH 2303 M 类型的涡轮分子泵 (2), 该泵带有一个防弹护板, 在该压力下仍然能达到超过  $800 \text{ l/s}$  的抽速, 另外选择 A 603 P 类型的前级泵。使用这样的操作泵, 我们能够到达  $3.0 \text{ Pa}$  的前级压力和  $0.24 \text{ hPa m}^3 \text{ s}^{-1}$  的气体流量。涡轮泵的最大前级压力为  $3.3 \text{ hPa}$ , 尽管使用的是热要求较高的操作气体氩, 这一配置仍是可行的。

通过质量流量调节器 (5) 允许工艺气体进入工艺室 (1)。受压力  $p_{process}$  控制的蝶阀 (4) 调节涡轮分子泵 (2) 的抽速。在操作步骤执行完后, 关闭气体供应且控制阀打开, 彻底排空操作室, 直到达到最终压力。与此同时, 将新的工件装载到操作室。了解更多有关抽吸高气体负荷以及腐蚀性和磨蚀性物质的信息, 请参看第 4.10.2 节。

## 2.3 管道流导率

在计算容器抽空时间时, 我们没有考虑罗茨泵机组和涡轮分子泵机组的管道阻力。然而, 这种忽略通常是不允许的, 因为容器和泵之间的管道也会降低有效的抽速。

### 2.3.1 层流流导

让我们看下干燥系统的泵组 (图 2.3), 并计算冷凝器和前级泵之间的压降。在这种情况下, 压力为  $4,285 \text{ Pa}$ , 在此压力下前级泵的抽速  $S_v$  为  $107 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 2.97 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , 计算出气体流量  $Q = 4,285 \cdot 2.97 \cdot 10^{-2} = 127 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。DN 63 管道的内径为  $0.07 \text{ m}$  且长度为  $2 \text{ m}$ 。两个  $90^\circ$  弯管, 每个等效长度为  $0.2 \text{ m}$ , 也考虑在内。

根据第 1 章表 1.5, 泵入口压力为  $4,285 \text{ Pa}$  且空气的  $\bar{l} \cdot \rho$  值为  $6.7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$ , 我们得到平均自由程为  $1.56 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ 。我们使用克努森数、公式 1-13 来确定流动状态, 并得出:

$$K_n = \frac{\bar{l}}{d} = 2.23 \cdot 10^{-2}$$

由于  $Kn$  小于  $0.01$ , 这导致粘滞流动。这可以是层流, 也可以是紊流。层流流导明显大于紊流的流导, 这意味着体积流量损失会很小。

对于层流, 雷诺数  $Re$  必须小于  $2,300$ 。要计算雷诺数, 我们首先确定管道中的流速  $v$ :

$$v = \frac{4 \cdot S_v}{d^2 \cdot \pi} = 8.66 \text{ m s}^{-1}$$

并且, 我们还要从大气压下的空气密度  $\rho_0 = 1,293 \text{ kg m}^{-3}$  来计算  $4,285 \text{ Pa}$  压力下的空气密度。

$$\rho = \frac{1,293 \cdot 4,285}{101,325} = 5.47 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$$

而且根据公式 1-14, 且空气动力粘度为  $18.2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 我们得出

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} = 1,820$$

即层流。

我们使用第 1 章中公式 1-26 的  $\rho_1$  来得出管道的入口流导:

$$C_{pipe, lam} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (\rho_1 + \rho_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{228 \cdot \eta \cdot l} \cdot \rho^{-}$$

我们乘以  $\Delta p = \rho_1 - \rho_2$  来得出气体流量

$$Q = C_{pipe, lam} \cdot \Delta p = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (\rho_1^2 - \rho_2^2)$$

由于  $p_2 = 4,285 \text{ Pa}$  且  $Q = 127 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ，可以直接从这些值确定  $p_1$ ：

$$p_1 = q_{diff} \cdot A_d \cdot \sqrt{p_2^2 + \frac{Q \cdot 256 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4}} = 4,287.2 \text{ Pa}$$

我们得到的压力损失仅仅为  $2.2 \text{ Pa}$ ，非常低的一个值。

管道的流导从第 1 章公式 1-18 得出：

$$C = \frac{Q}{\Delta p} = 58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ or } 58,000 \text{ ls}^{-1}$$

这为：有效体积流量

$$S_{eff} = \frac{S_v \cdot C_{pipe, lam}}{S_v + C_{pipe, lam}} = 2.9707 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

仅略低于无管道的体积流量： $S_v$  为  $2.9222 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。

### 2.3. 分子流流导

现在，让我们也考虑分子流范围内相同管道的流导。管道的直径为  $0.07 \text{ m}$  且长度为  $2 \text{ m}$ 。两个  $90^\circ$  弯管每个拉伸长度为  $0.235$  即总长度  $l = 2.47 \text{ m}$ 。根据第 1 章公式 1-30，管道阻力为：

$$L_{Rm} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l} = 1.71 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

其中，在  $T = 293 \text{ K}$  时，空气的  $\bar{c} = 471 \text{ m s}^{-1}$ 。管口的孔口流导已经考虑在内。

使用以下公式得出有效的体积流率：

$$S_{eff} = \frac{S_v \cdot L_{Rm}}{S_v + L_{Rm}} = 1.09 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ where } S_v = 2.97 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

在分子流范围内，前级泵的抽速将减少到接近三分之一。在该范围内，要特别注意泵和真空室之间的短管道要短而粗。这特别适用于涡轮分子泵，在理想情况下，涡轮分子泵是通过法兰直接连接至真空室上。

# 3 真空设备中的机械部件

## 3.1 概述

真空系统包括各种不同的部件，如腔室、泵、测量仪器、部件、阀、穿墙引线、机械手等。这些部件必须连接在一起，形成一个统一的装置，其中带配有密封件的可拆卸部件与不可拆卸部件是有区别的。以下章节描述了真空技术中使用的材料、不同类型的连接以及机械部件。表述了设计和选择过程中的注意事项。

## 3.2 材料

在真空技术中，材料的要求各不相同。根据应用、环境条件以及要实现的真空度，必须对材料进行测试以满足相关的要求。

下面列出了必须考虑的几个重要条件：

- **在整个操作温度范围内要保证足够的机械强度：**  
除了要保证其结构的完整性，还必须确保功能表面的变形不会对其功能特性造成影响。示例：真空室部件上的大气压力大约为  $10 \text{ N/cm}^2$ 。在面积为  $1 \text{ m}^2$  的表面上，将产生  $100,000 \text{ N}$  的压力。
- **高气密性：**  
每种材料基本上都是气体可渗透的。气体渗透的整个过程被称为渗透。渗透的快慢取决于材料、气体类型以及环境条件——特别是温度。使用弹性体密封件的情况下，其渗透性必须予以考虑。示例：对于 DN 500 ISO-K 的 FKM（氟橡胶）密封件，在湿度为 60% 的空气中，渗透率大约为  $4 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。因此，带有 FKM 密封件的真空系统工作压力很少会超过  $1 \cdot 10^{-8} \text{ hPa}$ 。
- **低固有蒸气压、高熔沸点：**  
固有蒸气压太高会限制最终的真空度。除了油和润滑脂的真空兼容性，在合金中，必须考虑金属固有的蒸气压或其在合金中的分压。示例：对于含锌的黄铜制品，锌在高真空中的分压被限制在最高允许温度大约为  $100^\circ\text{C}$ 。

- **清洁表面、低杂质气体含量、易脱气：**  
清洁表面是先决条件。但是，任何暴露于环境空气中的表面都会覆盖上一层吸附层。以化学或物理形式吸附在材料表面或材料间隙内的气体分子，一旦解吸（当它们从表面分离时）也是气体来源的一部分。要实现高的极限压力，必须使用具有低解吸率的材料。示例：单层吸附气体约等于  $4 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{m}^2$  的气量。设想一根直径为  $50 \text{ cm}$ ，长度为  $100 \text{ cm}$  的管子，两端封闭（表面积大约为  $2 \text{ m}^2$ ，体积大约为  $200 \text{ l}$ ），单层释放导致压力上升大约  $0.4 \text{ Pa}$  或  $4 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ 。这并没有考虑管道的实际表面积总是大于其几何面积这一实际情况。
- **抗热冲击性能好、膨胀率适应性好：**  
示例：不同热膨胀将铝密封件与不锈钢法兰组合的最高允许温度限制在  $150^\circ\text{C}$  左右。经常在过高温度之后，在冷却过程中发生密封效果恶化的情况。
- **耐腐蚀性、耐化学性：**  
示例：很多真空镀膜过程需要化学性质活泼的过程气体。因此，有必要考虑所使用的流体是否会影响部件或密封件。尤其是薄壁部件，如金属波纹管，容易受到腐蚀。如有必要，应该通过测试来确定其使用寿命。

对于特殊的应用，可能还会对材料有更多要求。一般的规则是：所需工作压力越低，对材料的要求越高，可使用的材料选择性越小。因此，特别在 UHV（超高真空）技术中，材料的选择非常重要。

### 3.2.1 金属材料

许多金属和金属合金具有高强度、易于加工和清洁、耐高温、对机械作用的敏感度低于玻璃。经济方面的考虑，如材料价格或购买难度，从根本上导致人们选择使用不锈钢、碳钢和铝合金作为机械部件材料。



### 3.2.1.1 不锈钢

在真空技术中，不锈钢是构造腔室或部件的优先材料。不锈钢在法兰连接处具有的足够强度—即使在烘烤过程中也不会对其硬度造成影响。它可以进行焊接，以保证其真空密封，其表面已充分钝化，从而为许多应用提供了足够的保护。下表列出了真空技术中常用不锈钢的化学组成和性能。

欧洲常用钢号可与 AISI (美国钢铁协会) 类似材料名称通用，如 1.4301 对应 304、1.4307 和 1.4306 对应 304L、1.4404 和 1.4435 对应 316 L 以及 1.4429 对应 316LN。不过，材料只是大约类似。真空应用的差异大多是非常微小的。然而，对于特殊要求，必须针对个别情况单独评估通用性。示例：如果某个部件需要材料 1.4301，一般必须

有相关材料证书。如果证书只显示材料 304，则未满足要求。此时，证书的授权名称很重要。如果满足相应的材料规范，制造商也可证明半成品具有相应的授权。例如，如果材料被证明是 1.4301、1.4307、304 和 304L，用途则会更加多样化。

为避免出现问题，例如在系统验收过程中，在验收半成品或部件时，必须预先明确规定材料及其证书的要求。后续证明通常是不可能的，特别是针对特殊要求：例如，由于特殊机械性能，根据 AD 2000 W2 (压力容器工作组，2000 时间表 W2，“压力容器的材料”) 或 ASME (美国机械工程师学会)，化学组成必须满足。

| 材料编号   | C [≤ %] | Cr [%]      | Ni [%]      | Mo [%]    | Other            | Si [≤ %] | Mn [≤ %] | S [≤ %]     |
|--------|---------|-------------|-------------|-----------|------------------|----------|----------|-------------|
| 1.4301 | 0.07    | 17.5 – 19.5 | 8.0 – 10.5  | –         | N ≤ 0.11         | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4305 | 0.10    | 17.0 – 19.0 | 8.0 – 10.0  | –         | N ≤ 0.11, Cu ≤ 1 | 1.0      | 2.0      | 0.15 – 0.35 |
| 1.4306 | 0.03    | 18.0 – 20.0 | 10.0 – 12.0 | –         | N ≤ 0.11         | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4307 | 0.03    | 17.5 – 19.5 | 8.0 – 10.5  | –         | N ≤ 0.11         | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4401 | 0.07    | 16.5 – 18.5 | 10.0 – 13.0 | 2.0 – 2.5 | N ≤ 0.11         | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4404 | 0.03    | 16.5 – 18.5 | 10.0 – 13.0 | 2.0 – 2.5 | N ≤ 0.11         | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4429 | 0.03    | 16.5 – 18.5 | 11.0 – 14.0 | 2.5 – 3   | N 0.12 – 0.22    | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4435 | 0.03    | 17.0 – 19.0 | 12.5 – 15.0 | 2.5 – 3   | N ≤ 0.11         | 1.0      | 2.0      | 0.015       |
| 1.4571 | 0.08    | 16.5 – 18.5 | 10.5 – 13.5 | 2 – 2.5   | Ti 5 × C ≤ 0.7   | 1.0      | 2.0      | 0.015       |

表 3.1：依据 EN 100881 第 1 部分、欧洲材料命名标准规定的不锈钢化学成分 (质量分数)

| AISI 编号 | C [≤ %] | Cr [%]      | Ni [%]      | Mo [%]    | Other         | Si [≤ %] | Mn [≤ %] | S [≤ %] |
|---------|---------|-------------|-------------|-----------|---------------|----------|----------|---------|
| 304     | 0.08    | 18.0 – 20.0 | 8.0 – 10.5  | –         | N ≤ 0.1       | 0.75     | 2.0      | 0.03    |
| 304L    | 0.03    | 18.0 – 20.0 | 8.0 – 12.0  | –         | N ≤ 0.1       | 0.75     | 2.0      | 0.03    |
| 316     | 0.08    | 16.0 – 18.0 | 10.0 – 14.0 | 2.0 – 3.0 | N ≤ 0.1       | 0.75     | 2.0      | 0.03    |
| 316L    | 0.03    | 16.0 – 18.0 | 10.0 – 14.0 | 2.0 – 3.0 | N ≤ 0.1       | 0.75     | 2.0      | 0.03    |
| 316LN   | 0.03    | 16.0 – 18.0 | 10.0 – 14.0 | 2.0 – 3.0 | N 0.10 – 0.16 | 0.75     | 2.0      | 0.03    |

表 3.2：依据 AISI (美国钢铁协会)、材料命名标准规定的不锈钢化学成分 (质量分数)

| 材料编号   | 20°C 时<br>0.2 %<br>屈服点 $R_{p0.2}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 300°C 时<br>0.2 %<br>屈服点 $R_{p0.2}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 20°C 时的抗<br>拉强度 $R_m$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 在 20°C 和<br>300°C 之间的<br>热膨胀<br>[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ] | 空气工作温度<br>[°C] | 微观结构             | 可磁化性                |
|--------|---|--|---|---|----------------|------------------|---------------------|
| 1.4301 | ≥ 190   | ≥ 110  | 500 – 700                                     | 17.0  | 300            | 奥氏体 (铁素体含量, 如适用) | 呈现 <sup>1)</sup>    |
| 1.4306 | ≥ 180   | ≥ 100  | 460 – 680                                     | 17.0  | 350            | 奥氏体 (铁素体含量, 如适用) | 呈现 <sup>1)</sup>    |
| 1.4307 | ≥ 175   | ≥ 100  | 500 – 700                                     | 17.0  | 350            | 奥氏体 (铁素体含量, 如适用) | 呈现 <sup>1)</sup>    |
| 1.4401 | ≥ 200   | ≥ 127  | 500 – 700                                     | 17.0  | 300            | 奥氏体 (铁素体含量, 如适用) | 较少呈现 <sup>1)</sup>  |
| 1.4404 | ≥ 200   | ≥ 119  | 500 – 700                                     | 17.0  | 400            | 奥氏体 (铁素体含量, 如适用) | 较少呈现 <sup>1)</sup>  |
| 1.4429 | ≥ 280   | ≥ 155  | 580 – 800                                     | 17.0  | 400            | 奥氏体              | 几乎不呈现 <sup>2)</sup> |
| 1.4435 | ≥ 200   | ≥ 119  | 500 – 700                                     | 17.0  | 400            | 奥氏体              | 几乎不呈现 <sup>2)</sup> |
| 1.4571 | ≥ 200   | ≥ 145  | 500 – 700                                     | 18.0  | 400            | 奥氏体 (铁素体含量, 如适用) | 呈现 <sup>1)</sup>    |

<sup>1)</sup> 在淬火条件下可能会略带磁性。可磁化性随应变硬化增加而增加。

<sup>2)</sup> 可能随应变硬化增加而略带磁性。

表 3.3：不锈钢特性

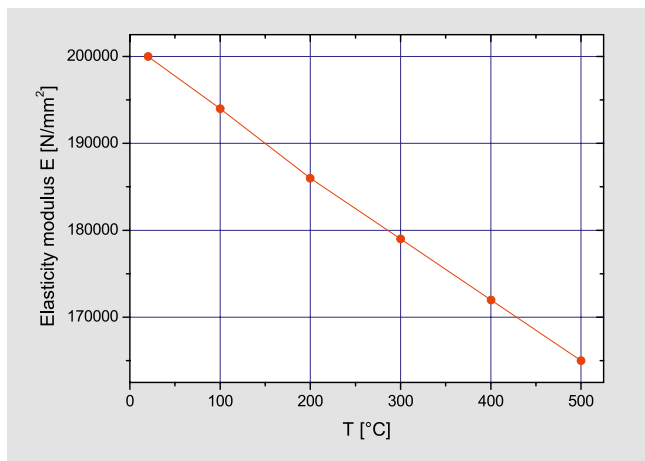


图 3.1 : 奥氏体不锈钢弹性模量的温度依赖性

不锈钢 1.4301 : 最常用的铬镍钢。优良的冷成型、焊接和抛光性。较强的抗腐蚀性, 适用于很多应用。适合于真空应用。例如, 用于法兰、管件和腔室。

不锈钢 1.4305 : 1.4301 的变体, 含硫, 以改善机械加工性 (易切削钢)。耐腐蚀性低于 1.4301。不可焊接。非常适用于真空应用。用于车削和铣削加工的零部件的, 如同心环。

不锈钢 1.4307、1.4306 : 1.4301 的低碳变体。由于碳含量低, 所以可焊接, 而不易被晶间腐蚀。强度略低于 1.4301。非常适用于真空应用。用于要求碳含量非常低的部件, 例如, CF 法兰。1.4307 正逐渐取代 1.4306, 因为高含量的铬和镍带来的利益与其如此高的购买成本不匹配。

不锈钢 1.4401 : 优良的冷成型性能。良好的焊接性和抛光性能。由于钼添加剂, 它比 1.4301 更耐非氧化酸和含氯离子的介质。非常适用于真空应用。例如, 用于阀门外壳、用在要求更多防腐保护的区域或用于家庭饮用水系统。

不锈钢 1.4404 : 1.4401 的低碳变体。由于碳含量低, 所以可焊接, 而不易被晶间腐蚀。非常适用于真空应用。在要求具有非常低的碳含量或较高的耐腐蚀性时使用, 例如, 用于半导体行业中的管件和法兰部件。

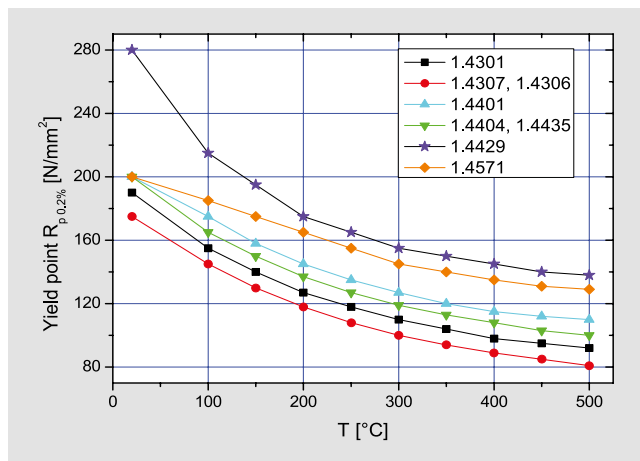


图 3.2 : 0.2% 屈服点奥氏体不锈钢的温度依赖性

不锈钢 1.4435 : 与 1.4404 相比, 较高的镍含量稳定了奥氏体结构, 降低 $\delta$ 铁素体的形成, 因此即使在焊缝区域中, 也几乎没有磁性。由于添加了钼添加剂, 它比 1.4404 更耐非氧化酸和含氯离子的介质。非常适用于真空应用, 也经常用于制药行业, 是得到受同样受巴塞尔标准 2 (BN2) 批准的, 该标准设定了更严格的分析限制并限定了允许的铁素体含量。

不锈钢 1.4429 : 特点类似于 1.4435, 但是, 由于氮含量高, 它的强度更大。这也稳定了奥氏体结构, 从而最大限度地减少 $\delta$ 铁素体的形成, 从而减少磁化。非常适用于真空应用。用于 CF 法兰, 尤其是为了清洁和消磁而在高温下进行真空退火时。1.4429 的管材和板材很少。因此, 制作腔室和部件时, 由 1.4429 制成的法兰通常与 1.4404 或 1.4307 制成的半成品结合使用。

不锈钢 1.4429 ESR : 性能与 1.4429 相同, 但由于 ESR (电渣重熔法) 处理, 其微观结构得到了改善并且具有较高的纯度。非常适用于真空应用。它被用作一种优质的 CF 法兰, 表现出很大的强度和最小的可磁化性, 并结合了较高的化学纯度和结构的均一性。

不锈钢 1.4571 : 经典的“V4A”钢, 具有高可用性。使用钛做稳定剂, 因此可焊接, 而不易被晶间腐蚀。性能与 1.4401 类似, 但是由于结构中的钛碳化物, 它仅可适度抛光而不适合于电抛光。非常适用于真空应用。例如, 用于对耐腐蚀性有更高要求的管道和设备的构建。

**ESR (电渣重熔法) :** 通过 ESR 工艺, 在可控制、可重复的条件下生产具有较高化学和结构纯度的低偏析致密不锈钢。主熔体块在 ESR 炉中进行电重熔。一电极在主块上, 另一反向电极在水冷坩埚的底部。熔渣位于两极之间, 由电阻加热到不锈钢熔化温度以上。金属液滴不断地从主块底部落下, 在与液态熔渣接触时, 可对内部的非金属杂质进行清除。当通过熔渣时, 粗大杂质几乎完全消失。剩下的是小杂质, 几乎均匀地分布在次级块上。通过 ESR 工艺净化的不锈钢具有极高密度和同质性的特点。

**奥氏体钢**具有良好的可焊性, 并且是非磁性的全奥氏体。在退火状态下, 它们的特点是, 即使在极低的温度下仍保持非常高的韧性值。它们往往具有很强的加工硬化性质, 特别是具有较高碳含量时, 部分微观结构可以转化为变形马氏体。全奥氏体钢在焊接过程中易于产生热裂纹。在许多奥氏体材料中, 其化学成分往往被调整为将焊接金属内的  $\delta$  铁素体含量提高至 10%, 这样则减少了热裂纹的形成。因此, 许多称为奥氏体的钢可在其结构中包含铁素体或马氏体含量, 这取决于它们的机械加工或热处理方式。

**可磁化性:** 全奥氏体微观结构是没有磁性的。通过先前描述的将微观结构组成部分转变为变形马氏体或  $\delta$  铁素体, 即使被指定为奥氏体的钢也会变得略带磁性。对于马氏体和铁素体, 两者都是可磁化的。通过溶液使冷加工硬化退火, 从而使马氏体减少, 甚至逆转。在微观结构中,  $\delta$  铁素体的组成部分基本上取决于铁素体形成元素铬、钼、硅和铌与奥氏体形成元素镍、碳、氮和锰之比。铁素体含量部分可通过热处理降低, 从而降低可磁化性。由于具有相同材料名称的不锈钢可在所允许的范围内具有不同的化学组成, 其可磁化性不是定量的。根据通过在 DeLong 图上标定奥氏体形成元素镍当量与铁素体形成元素铬当量, 可看出奥氏体和铁素体的含量。

在图 3.3 中, 对于某些不锈钢, 显示了铬当量和镍当量区域 (彩色矩形), 并以图标给出其平均当量。

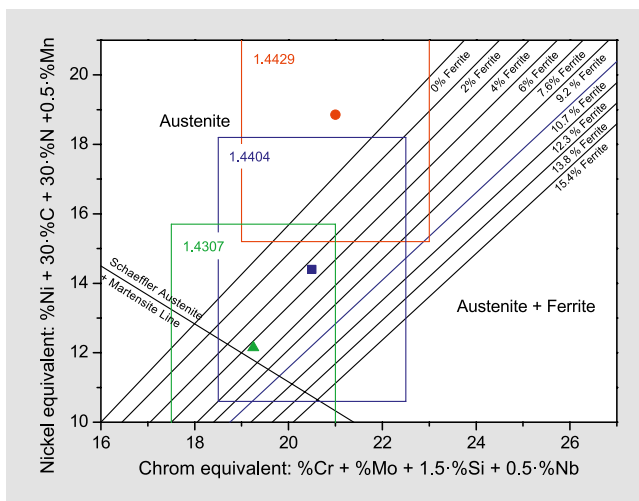


图 3.3 : De Long 图表

稳定钢含有钛和铌, 二者吸附在焊接过程中排出的碳, 从而防止碳化铬的形成。碳化铬的形成将导致晶界处的铬减损, 并可使该材料易受晶间腐蚀。对于板材厚度在 6mm 及以上的焊接结构, 应使用低碳 ( $C \leq 0.03\%$ ) 或稳定的不锈钢。碳化钛会严重影响抛光性。

**热处理:** 对于奥氏体不锈钢, 固溶退火温度大约为  $1,050^{\circ}\text{C}$ 。由于在  $600^{\circ}\text{C}$  和  $800^{\circ}\text{C}$  之间的温度范围内存在形成碳化铬的风险, 以及相比于晶间腐蚀造成的损害, 因此必须快速通过  $900^{\circ}\text{C}$  和  $500^{\circ}\text{C}$  之间的温度范围。成品真空部件可在真空环境下, 在  $950^{\circ}\text{C}$  到  $1,100^{\circ}\text{C}$  的温度范围内退火。退火时, 伴随着困在晶格间隙中的氢脱气 (低氢退火) 以及可磁化性减少 (消磁退火), 还使得表面的杂质, 特别是残余的碳氢化合物, 得以清除 (净化退火)。此外, 任何原有的碳化铬会溶解 (固溶退火), 以及因加工产生的材料应力会消失 (消应力退火)。然而, 热处理也会减少有益处的加工硬化。比如金属密封法兰, 退火时可导致不希望发生的刀口处材料硬度降低。在使用金属密封件时会发生刀刃损坏和密封件功能失效。因此, 我们建议法采用兰材料 1.4429 ESR 适用于退火处理。其硬度非常强, 能够确保刀刃足够坚韧。

**腐蚀:** 腐蚀取决于多种因素, 因此, 耐腐蚀性信息仅具有警示值, 并适用于一般信息。它本应有利于不锈钢的选择, 但不能确保, 因为它不容易适用于实际操作条件。例如, 温度和浓度的增加以及机械应力的增加和对表面的损坏, 都会加速腐蚀。而且, 氧气的缺乏可防止氧化铬钝化层再生, 因此缺乏防腐蚀保护。此外, 杂质的出现也可加速腐蚀。实际上, 最常出现的是氯离子和其它卤素离子引起的点蚀、缝隙腐蚀和应力裂纹腐蚀。因此, 钝化层局部破裂, 且局部腐蚀继续。尤其是薄壁部件, 如金属波纹管, 最容易受到此类腐蚀。如有必要, 应该通过测试确定使用寿命。此外, 冷却水对部件的危害不应低估。被水包围的表面必须充分钝化, 且冷却水必须能够满足制造商指定的要求。

### 3.2.1.2 碳钢

真空技术中可以使用的碳钢，只要无需创建和保持低于  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa 的压力，且无需防腐蚀保护。与不锈钢相比，它是价格相对低的结构材料，具有良好的可焊性，并且易于加工。然而，在使用这种类型的钢时，必须考虑 CO 的连续出气以及受空气腐蚀的倾向。在大气侧，防腐蚀保护可以通过涂漆来提供，而在真空侧，这可以通过镀镍来提供。对于容器的制造，必须慎重选择所用的钢种，特别是可焊性和气密性方面。锅炉制造方法只可在有限的程度上转移到真空容器制造上。在确定尺寸时，外部气压造成的应力必须予以考虑，且焊接必须确保真空密封。此外，所使用的工具必须与加工不锈钢所使用的工具严格分开，以避免污染不锈钢。这对于储存和运输软钢和不锈钢同样适用。软钢通常用于法兰连接的紧固件，其中表面往往被镀锌、镀镍或镀铬，以保护它们免受腐蚀。

### 3.2.1.3 铝

铝主要用于低、高真空范围，通常使用铝合金，特殊情况下，也使用纯铝。诸如 ISO-KF 快接管件之类的部件通常由铸造铝合金制成，带有重新加工的法兰面。在选择材料时，必须考虑收缩率和孔隙率。用于定心环和配套密封环时，部件由棒料制成。对于用作密封垫或密封线的金属密封件，退火的铝硅合金是首选。

铝的蒸气压很低，在熔点为  $660^{\circ}\text{C}$  时仅为  $6 \cdot 10^{-9}$  hPa 左右。热膨胀系数大、导热系数高以及氧化铝层稳定使铝难以焊接。有出现气孔和裂缝的风险，非常容易扭曲变形。焊接前均匀加热会降低这些风险。然而，实际上，这通常是不可能的。

铝不可磁化。在某种程度上，铝法兰连接仅可用于金属密封的 UHV 连接，因为它们的硬度通常太低。虽然目前已经开发出了特殊的双金属法兰，包括铝底座和不锈钢板，或具有坚韧密封面的铝法兰，但由于价格相对较高、加工性能存在一定风险以及应用性有限等，导致它们的应用并不成功。为了提高它们的抗磨损性，例如，用于洁净室中，或为了增加防腐蚀保护，铝表面往往作阳极化处理。这导致厚度增加几个微米、且存在多孔氧化层，这在真空应用中适用性非常有限。气体分子逐渐沉积在此类表面上，产生较高的解吸率。此外，表面区域的气体分子可在密封件下形成通道，造成泄漏。有各种可用的阳极处理。在决定是否使用此类方法时，必须考虑局限性，并权衡利益。

### 3.2.2 密封材料

#### 3.2.2.1 弹性体密封件

弹性体密封件基本上都具有透气性。气体渗透的整个过程被称为气体渗透，而且取决于材料、气体类型和环境条件——特别是温度。此外，弹性体受到出气的影响。在真空中的弹性体，出气率逐渐下降，并且在足够长的排空时间后，渗透占主导地位，并且在恒定的环境条件，有恒定的气体速率穿过密封件。渗透和出气取决于扩散。气密性高致使出气慢，导致渗透气流开始稳定前需要很长时间。该时间可以长达几百个小时，这通过烘烤的方法可大大缩短。如果真空系统没有主要气源，例如，由于解吸或泄漏，弹性密封件可在很大程度上决定最终压力。例如：材料 FKM（含氟弹性体）对空气具有低透气性。对具有 DN 500 ISO-K 公称通径的密封件，湿度为 60% 的大气渗透率大约是  $4 \cdot 10^{-7}$  Pa · m<sup>3</sup>/s。因此，在具有 FKM 密封件的真空系统中，大约  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 的工作压力很难实现。

如使用得当，弹性体密封件可重复使用多次。它们要求几 N/mm<sup>2</sup> 的接触力，但是对于尺寸足够大的 O 型圈，作用在法兰上的大气压力，就已经超过了该值。由于不良的贮存条件或不当的搬运，弹性体密封件可改变其性能。必须避免的因素有：UV 辐射、氧、臭氧、高温、水分、溶剂或过大的变形。为维护其性能，在贮存过程中，我们推荐以下环境条件：

- 温度范围：5°C 到 25°C
- 避免温度波动
- 湿度：约 65%
- 阴暗贮存区域或不透光容器
- 无化学药品的环境

在使用过程中，由于周期性负载、长期在变形状态下使用、高温或老化，它们会失去一部分弹性。如果它们使用时间过长，甚至还可以变脆。因此，弹性体密封件必须定期更换。由于操作条件各不相同，关于耐久性，不可作一般性说明。如果各操作条件下使用的弹性体没有经验数据，则其使用寿命可能需要通过实验来确定。

| 简要说明 | 基本弹性体  | 温度范围 [°C] | 性能 <sup>1) 2)</sup>   |
|------|--------|-----------|---|
| FKM  | 含氟弹性体  | -15 至 200 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 最适合于大多数真空应用的密封材料</li> <li>■ 低透气性</li> <li>■ 优异的耐高温性</li> <li>■ 优异的抗老化性</li> <li>■ 对很多化学制品的耐化学性</li> <li>■ 一般可达到的工作压力：<math>1 \cdot 10^{-8}</math> hPa</li> </ul> |
| NBR  | 丁腈橡胶   | -25 至 120 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 良好的机械性能、抗磨损性高</li> <li>■ 耐矿物油和液压油、润滑油和气体</li> <li>■ 良好的气密性</li> <li>■ 一般可达到的工作压力：<math>1 \cdot 10^{-7}</math> hPa</li> </ul>                                     |
| CR   | 氯丁橡胶   | -5 至 120  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 与 NBR 性能类似</li> </ul>  |
| EPDM | 三元乙丙橡胶 | -50 至 130 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 耐热水和蒸汽</li> <li>■ 抗老化和臭氧性很好</li> <li>■ 优异的抗冷性</li> <li>■ 抗氧化剂性很好</li> <li>■ 不抗脂族和芳族烃及矿物油产品</li> <li>■ 一般可达到的工作压力：<math>1 \cdot 10^{-7}</math> hPa</li> </ul>     |
| VMQ  | 硅橡胶    | -55 至 200 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 极好的耐高温性，但不可与热水或蒸汽相互转换</li> <li>■ 优异的抗冷性</li> <li>■ 相对高的透气性</li> <li>■ 一般可达到的工作压力：<math>1 \cdot 10^{-6}</math> hPa</li> </ul>                                     |

<sup>1)</sup> 此信息仅具有指导性意义，并适用于一般信息。它们应有助于弹性体的选择，但不能确保可行，因为它们不容易适用于实际操作条件。

<sup>2)</sup> 所示工作压力是以经验为基础，因为它们可以在精心设计的真空系统中实现。在某些情况下，这些压力值可上升，也可下降。

表 3.4：弹性体的性能

### 3.2.2.2 金属密封件

对于具有高温或低温、较长使用寿命、高辐射负载的应用且只要很低的渗透率很重要，必须使用金属密封件代替弹性体密封件。经常用于金属密封件的材料有铜和铝，在某些情况下，甚至是银和金，在冷冻技术中主要为铟。金、银和铟主要用作线型密封件，而铝还用作成形密封垫。也有弹性金属涂层密封件。

金属密封件需要高接触压力。在装配过程中，它们产生塑性变形，因此只能使用一次。其硬度应小于法兰硬度，以使其适应其微观结构，以创造金属超高真空密封连接。确定螺丝钉或紧固件尺寸的方法是，在各种操作模式下，都必须保证每 1 mm 的密封长度上的接触力高达 600 N/mm。

对于不锈钢制成的 ISO-KF 和 ISO-K/ISO-F 法兰，所用的金属密封件具有菱形截面（铝边封条）。使用退火铝硅合金制成，将要求接触力 100 N/mm 密封长度。由于铝和不锈钢的热膨胀系数不同，最高使用温度限制在 150°C 左右。在过高温度后，在冷却过程中会发生密封效果下降的情况。

铜与奥氏体不锈钢具有相同的热膨胀。铜垫片用作扁平密封件（CF 法兰）或线型密封件（COF 法兰）。它们必须是无氧铜，即使用铜的质量 OF（无氧）或 OFHC（无氧高电导率）。如果不使用无氧铜，可能存在的氧会在热处理过程中（如在烘烤过程中）与氢发生反应。这会导致所谓的“氢脆”，其中所产生的水可以通过破坏微观结构来导致泄漏。CF 法兰的扁铜密封件要求接触压力至少为 200 N/mm 密封长度。其最高允许的空氣操作温度为 200°C。凭借银涂层，最高温度可增加至 450°C。退火的铜密封件需要较低的接触压力。它们特别适用于观察窗，以便在装配过程中保持尽可能小的应力。

| 材料  | 接触力/长度 [N/mm] <sup>1)</sup> | 最高温度 [°C] <sup>1)</sup> |
|-----|-----------------------------|-------------------------|
| FKM | 2 – 10                      | 200                     |
| 铝   | 30 – 200                    | 150                     |
| 铜   | 150 – 600                   | 450                     |
| 铟   | 约 7                         | 100                     |
| 金   | 100 – 500                   | 800                     |

<sup>1)</sup> 此信息仅具有警示值，并仅作为一般信息。根据不同的操作条件和密封件设计，这些值会有所不同，特别是不同寻常的应用。

表 3.5：密封材料的对比

### 3.3 连接

#### 3.3.1 不可拆卸的连接

在真空技术中，不可拆卸的连接通过焊接、钎焊或熔接或通过钎焊后的金属化或烧结实现。近年来，耐真空粘合剂也已经用于连接不涉及 UHV 技术应用中的部件。所选连接技术必须设计得当，适用于机械强度、温度和变交热负载以及所需气密性相关的要求。在真空技术中，频繁使用材料配对，如金属对金属、玻璃对玻璃、玻璃对金属、金属对陶瓷和玻璃对陶瓷。对于金属最经常的连接方式是焊接和钎焊。在玻璃设备，单个玻璃部件通过熔接接合。通过熔接或金属化和熔接或钎焊实现的金属和玻璃连接用于 UHV 兼容、可烘烤的观察窗。最常见的金属和陶瓷连接方式是通过金属化或烧结实现的，例如，用于真空电流引线。

##### 3.3.1.1 焊接

在真空设备中，低碳钢和不锈钢部件通常采用焊接用于容器和连接件。此外，也可对铝部件采用焊接。为确保所产生的焊缝是真空密封的，有必要使用无裂缝和无空隙的适当材料以及表面光滑无油脂的材料。另外有时候还需要使用与非真空应用所采用的正常焊接连接不同的特殊的几何设计。只要在工程方面有可能，就必须提供内焊缝，以避免真空侧间隙和裂缝，即所谓的潜在泄漏或虚漏。如果不可能提供内焊缝，则焊缝必须一直延长至真空侧。必要时，可采用大气侧补充焊缝，以增加机械稳定性。在该连接中，重要的是，补充焊缝不能是连续的，要留出空隙便于泄漏检测，必要时需保证没有空气夹杂杂质。

真空部件和腔室的焊接需要专门的知识，焊接人员必须具有专业资格。通常情况下，焊接公司通过独立测试机构对焊工进行定期检验并记录。此外，焊接程序测试应包含对各种焊接材料和各种焊接几何图形的测试，由受过专门训练的焊接人员，例如焊接工程师或技术人员，陪同进行焊接作业并对工作进行评估。

焊接的高温和相对的快速冷却可改变材料的特性。例如，在焊接奥氏体不锈钢过程中结构的改变可增加可磁性或导致铝焊接过程中出现气孔和热裂缝（这在第 3.2.1.1 节“不锈钢”和第 3.2.1.3 节“铝”中已经提到过）。另外，焊接区域的高残余应力会导致部件变形，所以必须将该应力保持在尽可能低的水平。如果像密封面这样的功能区域受到影响，必须对其进行返工。如果不能返工，这会导致损失整个工件。然而，可采取各种焊接措施来防止该情况的发生，包括选择合适的焊接方法结合合适的焊缝几何形状和焊接顺序、焊前准备和焊后处理，而不仅仅是凭借焊工的资历和经验。

在真空技术中，经常使用钨电极惰性气体保护焊 (TIG)。此外，也使用其它类型的气体保护金属电弧焊作为特殊的方法，如用于薄壁部件的微等离子体焊接或者用于管道部件的轨道焊接。明显更为精细的机器程序是激光焊接和电子束焊接。两者都适用于精密部件和深焊缝。对于大型铝阀壳体的焊接，采用摩擦搅拌焊接，这是一种精细的机器程序，具有低焊接变形。

钨极惰性气体保护焊 (TIG) 不需要熔化电极，且可直接焊接连接件，而无需任何额外的材料。如需要产生额外的焊缝，例如，出于稳定性原因，则可使用焊材。该方法的其它优点是几乎无飞溅，无渣形成和多功能性：不锈钢、铝和铜也可以进行 TIG 焊接。如果考虑到焊接速度，需要高质量的焊缝，则 TIG 是首选。



图 3.4：激光焊缝的横截面图像

激光束焊接，或简称为激光焊接，其特点是焊接速度快、热变形低。激光的高集中能量输入产生狭窄的焊接区，并限制了热区的范围。承重结构的薄膜以及深而窄的焊缝可通过设置焦点宽度和激光强度来产生。通过这种方式，可设计腔室部件而无需额外的焊缝，或焊接法兰环可深入穿透焊接至管端，而无需对密封面几何形状进行精细的重新加工。在一定程度上，接头处的大缝隙宽度可实现一定程度的缩合。此时，只使用部分的额外材料。缺点是投资成本高。

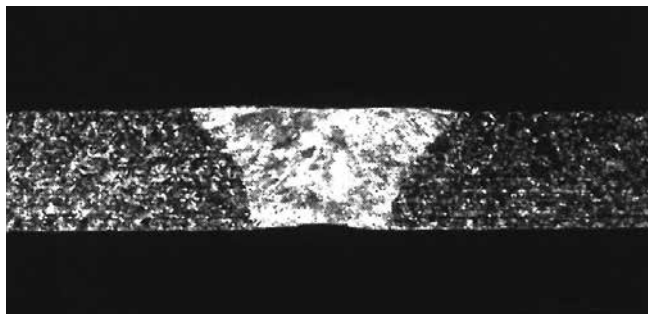


图 3.5 : WIG 轨道焊缝的横截面图像

轨道焊接是一种全机械化惰性气体焊接过程，其提供稳定的高接缝品质，因为电弧是在机械引导下环绕管件或圆形部件，该系统的费用高于 TIG 焊接。一种轨道焊接钳只能涵盖有限的管径范围。不同外径的管子也需要适合的装置来夹住管子。

在电子束焊接过程中，被加速、聚焦的电子为焊接区提供所需的能量。为了防止电子的散射和吸收，该方法是在高真空中进行。这也使得焊接高反应性材料成为可能。该系统的高成本和可能需要装备建设的焊前准备通常导致该方法价格高，并且其用途主要限制在连接部件上。

在奥氏体不锈钢焊接后，必须再次形成金属性光滑表面，因此甚至可形成无中断的氧化铬钝化层。例如，惰性气体保护（包括用于根基）防止表面在温度超过 600°C 发生尺寸的变化。彻底冲洗后的机械或化学表面处理去除表面的褪色，并清洁部件。

### 3.3.1.2 钎焊、熔化和电镀

除了焊接，钎焊过程也可用于连接金属。在钎焊温度高于 600°C 的钎焊接头几乎只用在真空技术中。为了在钎焊时无需高腐蚀性助焊剂，这通常涉及高蒸气压，以及为了获得无氧化物、高强度接头，钎焊过程在真空中进行或在干净的情

性气体环境中进行。软焊料往往不适合真空应用。它们一般不能被烘烤，具有较小的机械强度，并且除了具有较低蒸气压的锡之外，经常含有具有高蒸气压的其它合金成分。类似于真空焊接，是在满足以下要求时选择真空钎焊连接：精心清洁的表面、小心形成的焊接缝隙、使用具有低蒸气压的无气焊料、焊料良好的流动性和润湿性（间隙填充）

、焊料明确定义的熔合区以及钎焊和基础材料之间的低反应性。标准的钎焊合金可分为两大类：基于贵金属（主要是银）的钎焊合金和基于镍的钎焊合金。基于贵金属的结构化低熔点钎焊合金远比高熔点镍基合金更昂贵。因此，如果这在技术上是可行的且如果较高的处理温度是可接受的，则使用镍基合金是首选。部件之间的排列以及它们之间的焊料间隙必须与钎焊过程相匹配。根据所用焊料的性质、钎焊温度以及部件的热膨胀率，焊料间隙（室温下）通常为 0.03 至 0.1mm。至于何时应该使用焊接以及何时应该使用钎焊的问题，不能以概括、广泛的方式回答。除非在无法实现焊接的情况下，否则，如果在一个批次中同时产生尽可能多的连接点，钎焊是有优势的。

熔化过程主要用于玻璃设备以及玻璃对金属的连接。玻璃对金属的熔化在真空密封电流馈通的生产中、可烘烤的观察窗以及真空规的生产中特别重要。为熔化玻璃到金属的过渡，选择材料的方式必须是这些材料的热膨胀系数在广泛的温度范围内尽可能地相互类似。由于情况通常并非如此，已经为所谓的非匹配玻璃金属密封件开发了众多的特殊合金。它们以焊接层的形式为观察窗的玻璃和不锈钢之间提供弹性接触。熔化方式难以用于石英玻璃，因为它具有非常低的热膨胀系数，这是金属和金属合金难以实现的。

陶瓷对金属连接用于高度可烘烤、高度绝缘的电流馈通。除用于高性能发射管和陶瓷真空室的生产外，这些还用于物理大规模研究的粒子加速器。陶瓷连接，例如氧化铝（92% 至 98%  $Al_2O_3$ ），被预金属化，这些点与金属连接。在该连接中，确保薄金属层（钼或钽）与陶瓷基板产生无空隙和无气孔的全面连接特别重要。对于引入电极的生产，镍层随后被镀到钎焊的金属帽上，然后将电导体焊接在上面。

### 3.3.2 可拆卸的法兰连接

真空系统的各个部件，如真空室、阀、测量仪器等，相互直接连接或通过管件或弹性元件连接。部件之间可拆卸的接口必须是真空密封的。然而，在配置真空系统中，应该尽可能少地使用可拆卸连接件，因为它们比不可拆卸连接件带来更为频繁的潜在漏点。

不锈钢、铝和钢制成的法兰部件可用作连接元件。不锈钢制成的金属软管比厚壁橡胶或热塑性塑料更适用于制作活动式连接件。它们是低真空及以上范围内绝对的必需品。

从低真空到高真空范围，具有 DN 10 至 DN 50 公称尺度的 ISO-KF 法兰连接用于可拆卸的连接，对于 DN 63 至 DN 1000 的较大公称尺寸，使用 ISO-K 和 ISO-F 法兰。超高真空兼容的可拆卸连接为公称尺寸 DN 16 至 DN 400 的 CF 法兰连接，相应公称通径 DN 400 至 DN 800 的法兰为 COF 法兰。

#### 3.3.2.1 O 型圈密封件和凹槽

当真空技术部件可拆卸地进行连接时，必须使用密封件防止外界空气流入真空。为防止这种情况，应根据不同的应用范围和压力范围选用不同类型的密封件。

O 型圈是所有密封件中最频繁使用的。它们具有不同的材料，弹性体的肖氏硬度范围通常在 65 至 80 Shore A。单位 Shore A 作为可塑性量度标准用于软弹性体。在同样的作用力下，数字越高，变形率越低。作为良好的真空密封件，O 型圈的适用性源自其适应于啮合表面细微凹凸的能力。O 型圈表面必须不泄漏油脂或滑石粉、光滑、无裂缝、无刮痕。该圈应该无缝冲压，冲压工具的分界点应该在圈直径的水平面上，并可通过研磨去除。

O 型圈可涂上一层低蒸气压油脂薄膜（硅润滑脂、矿物油基或全氟聚醚基润滑脂），具体取决于所讨论的应用。真空润滑脂抚平密封面和 O 型圈表面上小的不平整，从而提高密封效果，特别是在变形率低的情况下。此时，应该注意润滑脂的蒸气压随温度大幅上升，而且蒸气压应保持在所需工作压力之下。此外，必须检查润滑脂的成分或少量的烃类是否与应用兼容。在干式安装的情况下，必须特别注意表面质量、啮合表面的清洁度以及密封材料。另外，变形率不应太小，以确保 O 型圈与密封面之间的美好接触。

O 型圈的线径通常为 2 至 12 mm。在英制区域，很多连接的直径为 5 mm 和 5.33 mm。一般而言，O 型圈用作静态密封。如果涉及到动态应力，应该使用专为此目的而制造的精密 O 型圈或备选的机械密封件或径向轴密封圈。

除了与定心环或密封垫圈结合使用外，O 型圈也可用作轴向或径向槽。在大多数情况下，通常通过使用一个扁平法兰和一个凹槽法兰结合的方式将 O 型圈置于凹槽和冲压法兰之间。必须仔细标注凹槽的尺寸。这没有普遍接受的尺寸。O 型圈供应商的尺寸表中所列尺寸只是用于定向的参考值。用户必须根据每个具体应用和适用性（例如，通过测试）对其进行检查。由于外部影响，如温度、压力或与所用流体的反应，弹性体会发生膨胀、收缩、硬化，甚至可以产生裂缝。在选择弹性体和凹槽时，必须考虑这一情况。此外，在每个操作条件下，密封效果必须足够好，以确保 O 型圈不会过度压缩。如果由于 O 型圈体积增大，凹槽过满，会损坏 O 型圈，或者甚至扭曲法兰。

对于静态密封，5 mm 线径的最大压缩比应为 25% 左右。直径越小，压缩比越大，直径越大，压缩比越小。实际上，小于 15% 的压缩，特别是干式安装，可导致密封效果不足。变形力主要是由线径和弹性体硬度决定的。要将直径为 5.33 mm 的 O 型圈压缩 20%，对于硬度为 70 Shore A 的，每毫米密封长度需要 5 N 的力，对于硬度为 80 Shore A 的，每毫米需要 7 N 的力。

为了便于装配，选择的 O 型圈凹槽直径通常稍大于 O 型圈的直径。这可以使 O 型圈在装配过程保持在凹槽内。橡胶圈的长度可安全地拉伸 5%。最大伸展量取决于材料和操作条件。

可使用具有梯形或类似横截面的弹性体密封件，例如，用于阀座、盖和真空室的门。应该标注梯形开口的尺寸，以使 O 型圈在插入时不被损坏，另一方面，在阀板被抬起或当打开腔门时，O 型圈不会被拉出。此外，当出现巨大的接触力，例如，对于大型腔门，梯形凹槽必须允许足够的空间用于变形的 O 型圈，以使变形保持在限制内。

对于密封螺丝钉来说，例如加注油螺塞或放油塞，必须在角位置安装 O 型圈。螺纹在其上端具有 45° 的凹槽，O 型圈安装在该凹槽中，然后通过螺丝钉表面进行压缩。密封件应进行润滑，所以在紧固时不会受到损坏。而且，安装空间必须大于 O 型圈的体积。

在真空技术中，尽可能避免扁平垫片与平面密封相结合。因为这样需要一个很强的接触力，以便密封材料能够对所有不平整的表面进行填充。如果使用扁平垫片，往往会发生局部密封面循环凸起的，例如，CF 法兰与 FKM 扁平垫片组合。



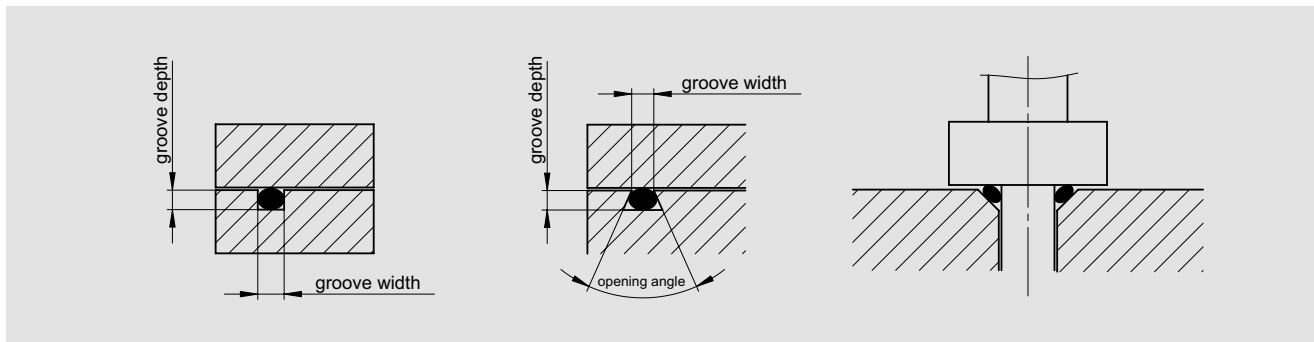


图 3.6 : 矩形槽、梯形槽和角位置上的 O 型圈密封件

### 3.3.2.2 ISO-KF 法兰

ISO-KF 小型法兰部件在 DIN 28403 和 ISO 2861 中进行了描述，公称通径为 DN10 至 DN50。连接适合高达  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 的压力，且可用于高达 1,500 hPa 的过压。如果采用金属密封件，压力范围可扩大到小于  $1 \cdot 10^{-9}$  hPa。这需要特别大的接触压力，必须使用专门的金属密封件夹具。

ISO-KF 连接包括两个对称法兰和一个 O 型圈密封件，通过内部或外部定心环定位和支撑（图 3.7）。密封所需压力由夹紧环产生，该夹紧环位于锥形收紧区域上方，并使用蝶形螺钉紧固。这样无需任何工具就可以进行快速、高效的装配和拆卸。法兰在任何方向均可围绕其主轴进行对准。

在座板上安装 KF 法兰，需要使用爪夹或壁夹（图 3.8）作为夹紧元件。在爪夹和壁夹的产品说明中可找到座板上的小孔尺寸。

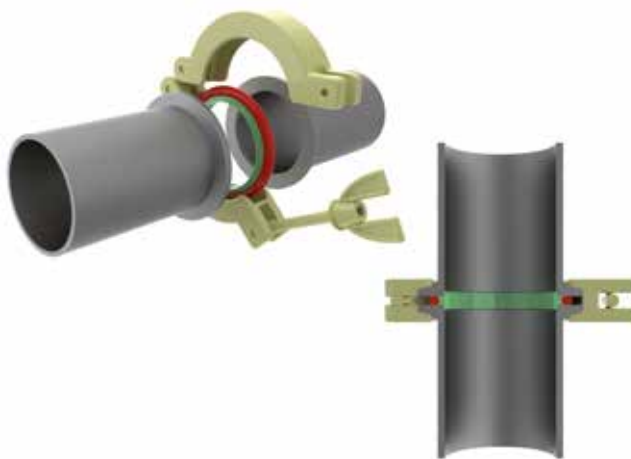


图 3.7 : 具有定心环和夹紧环的 ISO-KF 连接

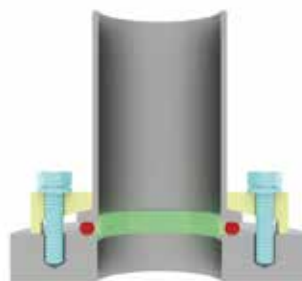


图 3.8 : 安装在座板上具有定心环和爪夹的 ISO-KF 法兰

## 3.3.2.3 ISO-K/ISO-F 法兰

**ISO-K 夹紧法兰部件和 ISO-F 固定法兰部件** 在 DIN 28404 和 ISO 1609 中进行了描述，ISO-K 法兰公称通径为 DN 10 至 DN 630，ISO-F 法兰为 DN 10 至 DN 1000。连接适合高达  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 的压力，且可用于高达 1,500 hPa 的过压。凭借金属密封件，压力范围可扩大到小于  $1 \cdot 10^{-9}$  hPa。金属密封件需要较强的接触力。该接触力由螺纹法兰连接件提供。如果使用夹紧螺丝，在必要时必须增加其数量。

ISO-K 和 ISO-F 组成包括两个对称法兰和一个 O 型圈，通过内部定心环定位和支撑，而且还通过外部环支撑。密封所需的接触压力通过双爪夹（图 3.9）或螺丝钉（图 3-13）产生。

凭借 ISO-K 法兰，法兰背面的环形外缘可以防止夹紧螺丝滑动。法兰在任何方向上均可围绕主轴进行对准。爪夹用于将 ISO K 法兰安装在座板上。根据定心环是否搁置在座板（图 3.10）或 O 型圈是否位于座板（图 3.11），使用不同高度的爪夹。或者，可使用螺栓环将 ISO-K 法兰固定在座板上（图 3.12）。

ISO-F 法兰具有固定的螺栓孔圈，孔圈大小取决于公称通径。法兰可与围绕主孔轴的钻孔间距对齐。ISO-F 法兰可通过螺栓连接到座板上。可使用定心环或座板上带密封套的 O 型圈作为密封件。

可使用螺栓环将 ISO-K 法兰安装到 ISO-F 法兰上（图 3.14）。要安装螺栓环，将其套在 ISO-K 法兰上，然后将卡簧放入 ISO-K 法兰的外缘凹槽中。法兰可在任意方向围绕主轴进行对准。

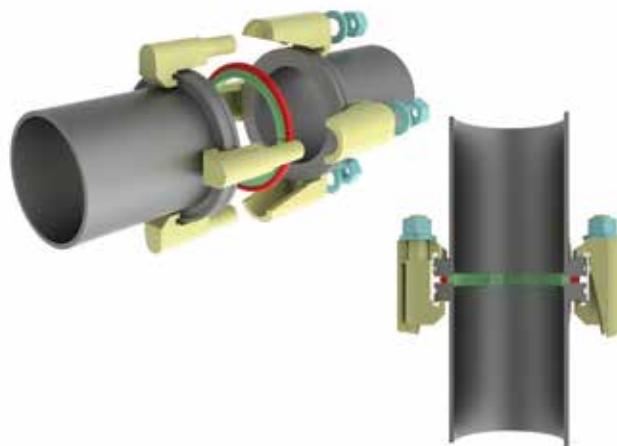


图 3.9：具有定心环和双爪夹的 ISO-K 连接

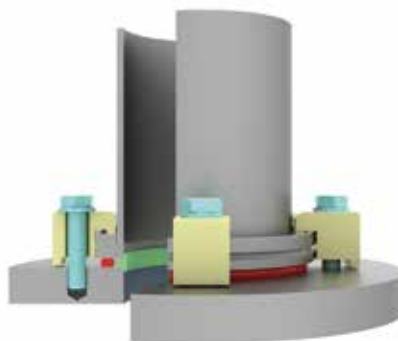


图 3.10：安装在座板上具有定心环和爪夹的 ISO-K 法兰

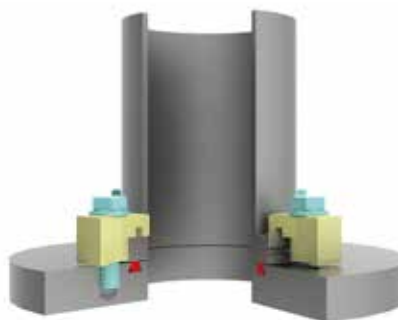


图 3.11：安装在座板上具有 O 型圈螺母和爪夹、用于具有密封槽底板的 ISO-K 法兰

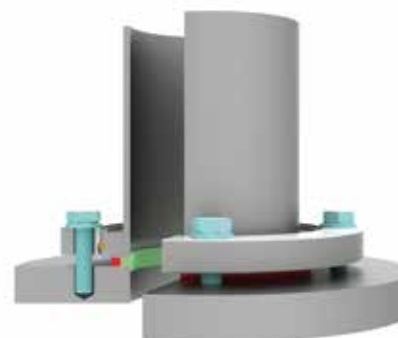


图 3.12：安装在座板上具有定心环、螺栓环和螺丝钉的 ISO-K 法兰

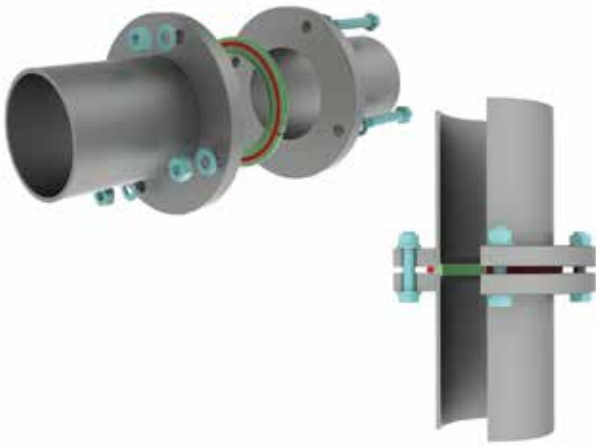


图 3.13 : 具有定心环和螺丝钉的 ISO-F 连接

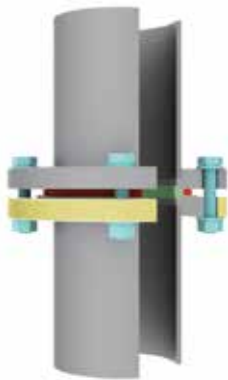


图 3.14 : 安装在具有定心环和螺丝钉的 ISO-F 法兰上、具有螺栓环的 ISO-K 法兰

### 3.3.2.4 CF 法兰

在 ISO 3669 中对公称通径为 DN 16 至 DN 250 的 CF 法兰进行了描述，并在 ISO/TS 3669-2 中对公称通径为 DN 10 至 DN 400 的 CF 法兰进行了详述。除了上述标准，真空市场上还有制造商或用户提供的其他变体。对于公称通径在 DN 250 之下的，它们是通用的。更大公称通径不常见，而且彼此相差很大。如果对兼容性有疑问，应该对尺寸进行相互比较。

CF 法兰专为 UHV 应用而设计，可烘烤温度高达 450°C 且适用于小于  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa 的压力。对材料的要求比较高。CF 法兰几乎全部由不锈钢制成，通常具有较低的碳含量。材料 1.4307 足以用于很多应用中。对于较高的要求，如要求具有高强度或低可磁化性，推荐使用优质不锈钢 1.4429 ESR。对于铝腔室上的应用，开发了特殊的双金属法兰，其包括铝基底和不锈钢表面或具有硬化表面密封区域的铝法兰。但实际上，由于价格相对较高、加工性能严格以及可烘烤性能非常有限，因此它们的应用通常都不太成功。

CF 连接包括带有切口的两个对称法兰，一个浅槽中心的金属扁平垫片，以及足够数量的能够提供所需高接触压力的螺丝钉，（图 3.15）。法兰上的径向凹槽用于松开法兰，且有助于泄漏检测，因为可直接将氦喷涂在密封面上。除了必须全部与钻孔位置对准的固定法兰外，还存在一种转动凸缘法兰的设计，以便可在任意方向围绕其主轴进行对准。

无氧铜 OFCH（无氧高流导率）通常用作密封件材料，温度超过 200°C 时采用镀银设计。在装配过程中，法兰切口被压入封闭的密封盘中。在外切口上发生挤压，同时在内切口上进行切割操作。冷变形受到外部垂直法兰壁的限制，因此在边界层产生非常高的压力。在高压下，将微观结构铜调整到切口使其填补小的表面瑕疵，从而形成金属超高真空密封连接。以前用的铜垫片不能重复使用。对于压力高达约  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa，FKM 制成的密封件可以多次使用。

在装配过程中，最初要将螺丝钉完全均匀的进行紧固以避免任何应力。随后按顺序紧固螺丝钉，若干步骤后，一步一步，直到铜以超高真空密封方式连接到密封面。烘烤时，加热和冷却应该平稳，不应太快。法兰连接处的温度变化将会形成应力，由此可能会导致部件的损坏，如对玻璃元件的损伤，或者可能导致泄漏。

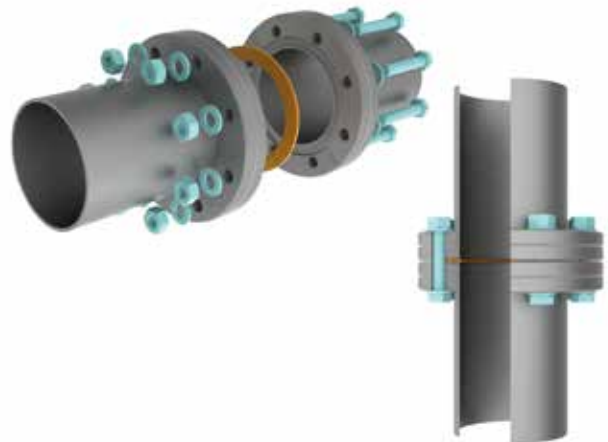


图 3.15 : 具有扁平铜垫片和螺丝钉的 CF 连接

### 3.3.2.5 COF 法兰

COF 法兰用于超高真空系统的大公称通径连接中。它们可烘烤，适合压力高达约  $1 \cdot 10^{-12}$  hPa。它们不是标准化的，因此与其他型号法兰结合时，必须测试其兼容性。它们通常由含碳量低的不锈钢制成，如可能，采用锻造工艺。

COF 连接包括一对不同外形（公、母）的法兰，一个线型密封件和足够数量的螺丝钉，它们提供所需的高接触压力（图3-16）。法兰可围绕主孔轴与钻孔间距对准。从无氧铜 OF（无氧）焊接而成的线圈作为密封材料。

在装配过程中，将密封件紧紧插入“公”测的切口。两种型材的密封面将铜环包围。在切口上发生挤压。冷流动受到“公”法兰垂直内壁的限制，因此在边界层产生非常高的压力。在高压下，微观结构的铜调整到切口并填补小的表面瑕疵，由此产生金属超高真空密封连接。以前用过的铜线不能重复使用。对于压力不高于达约  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 时，可以使用 FKM 制成的密封件。它们通常不能重复使用，但可以进行快速安装，比如在系统调平需要频繁安装法兰时。

在安装过程中，最初要完全均匀的对螺丝钉进行紧固，以避免任何应力，这很重要。接着，应按顺序对螺丝钉进行紧固，若干步骤后，一步一步，直到将铜以超高真空密封方式连接到密封面。烘烤时，必须确保加热和冷却平稳，不要太快。法兰连接上的温差将导致产生应力，可能引发泄漏。

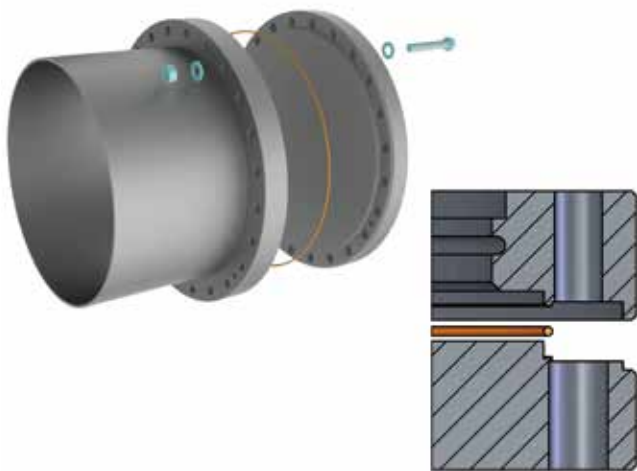


图 3.16：具有铜线和螺丝钉的 COF 连接

### 3.3.2.6 其他法兰标准

除所列真空法兰之外，目前使用的其它法兰标准有很多，例如，在工业和过程工程中，但不如真空技术中那样广泛。通常情况下，它们表面粗糙，专为平面密封而设计。对于在真空和超压下操作的系统，真空法兰只能在有限范围内使用。为此，使用根据 EN 1092-1 标准的法兰。为设计适合真空的法兰，密封面必须重新加工；例如，将具有 O 型圈槽的法兰与具有平滑密封面的法兰配对使用。因此，必须遵守压力容器和管道的相关法定规定。

### 3.3.2.7 螺丝钉

在金属密封连接中，螺丝钉的重要性不能低估。螺丝钉在破裂前也有应用限制。未正确安装的螺丝钉存在潜在的泄漏风险源，尤其是循环热应力。

安装螺丝钉时，有两个重要的机械性因素必须考虑：抗拉强度  $R_m$ ，其描述的是拉伸应力，超出该应力会导致螺丝钉断裂；屈服点  $R_{p0.2}$ ，表示超出该应力，张力首次保持不变然后会逐渐变小，同时导致螺丝钉伸长。这表示弹性和塑性范围之间的过渡。螺丝钉不应受到高于 0.2% 屈服点  $R_{p0.2}$  应力的影响。因此，螺丝钉拧紧力矩的参考值应处于 0.2% 屈服点值的 90% 范围内。

钢制螺丝钉在室温下的抗拉强度和屈服强度可在规格中的强度等级下找到，即两位数组合。第一位数  $1/100$  [N/mm<sup>2</sup>] 表示抗拉强度。两个数相乘得出屈服点为  $1/10$  [N/mm<sup>2</sup>]。示例：强度等级 8.8， $R_m = 8 \cdot 100$  N/mm<sup>2</sup> = 800 N/mm<sup>2</sup>， $R_{p0.2} = 8 \cdot 8 \cdot 10$  N/mm<sup>2</sup> = 640 N/mm<sup>2</sup>。

在不锈钢螺丝钉的命名指示了材料质量和抗拉强度。它们是：A 表示奥氏体，1 至 5 表示合金类型和强度等级：-70 表示应变硬化或 -80 表示高强度。强度等级等于  $1/10$  N/mm<sup>2</sup> 的抗拉强度。示例：规格 A2-70，A2 等于奥氏体，合金类型 2，70 等于  $R_m = 70 \cdot 10$  N/mm<sup>2</sup> = 700 N/mm<sup>2</sup>。

所用螺母应至少具有与螺丝钉相同的强度。对于钢螺母，一个数字表示，测试张力等于  $1/100$  [N/mm<sup>2</sup>]。示例：数字 8 等于  $R_m = 800$  N/mm<sup>2</sup>。对于不锈钢螺丝钉，必须使用具有相同或更高材料质量和性能等级的螺母。警告：高度小于螺丝钉直径 0.8 倍（扁平设计）的螺母具有有限的承重能力。

| 螺丝钉类型       | 0.2% 屈服点 $R_{p,0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 抗拉强度 $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | 材料                          |
|-------------|---|---------------------------------|-----------------------------|
| 不锈钢, A2-70  | 450                                       | 700                             | 不锈钢, 1.4301, 1.4303, 1.4307 |
| 不锈钢, A4-80  | 600                                       | 800                             | 不锈钢 1.4401                  |
| 钢, 强度等级 8.8 | 640                                       | 800                             | 碳钢, 淬火和回火                   |

表 3.6 : 室温下螺丝钉的材料和机械特性

为确定拧紧力矩和预应力, 有必要了解螺丝钉连接的摩擦系数  $\mu_{total}$ 。由于各种不同的表面和润滑条件, 不可能提供可靠的值。分散性太大。所以只能提供摩擦系数的分布范围。要确定正确的扭矩, 建议在操作条件下进行测试。

通过使用润滑剂可以减少摩擦系数, 但是, 分布范围仍然很大。应注意, 较小的摩擦系数产生较低的最大扭矩。因此: 使用润滑剂 → 摩擦系数  $\mu_{total}$  下降 → 需要或可以施加较小扭矩。

对于不锈钢螺丝钉, 螺纹中和支撑面上的摩擦值比回火钢螺丝大得多。摩擦值的分布范围也更大 (高达 100% 以上)。由于边缘压力高, 它们也往往会被卡住。在这种情况下, 可以使用润滑剂来协助。或者, 可以使用镀银的螺丝钉或螺母。

| 螺丝钉     | 螺母      | $\mu_{total}$ 无润滑 | $\mu_{total}$ 有 MoS <sub>2</sub> 膏 | $\mu_{total}$ 脂润滑 |
|---------|---------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| A2 或 A4 | A2 或 A4 | 0.23 – 0.50       | 0.10 – 0.20                        | –                 |
| 钢, 电解镀锌 | 钢, 电解镀锌 | 0.12 – 0.20       | –                                  | 0.10 – 0.18       |

表 3.7 : 不锈钢和镀锌钢螺丝钉的摩擦系数

### 螺丝钉在高温下的性能

在高温下使用螺丝钉时, 必须注意, 抗拉强度和屈服点会降低。此外, 蠕变应变或耐热性必须作为评估机械强度的基础予以考虑。因此, 屈服强度仅作为指导信息。对于关键或安全相关的应用, 必须考虑其它机械参数及所有影响因素。

| 螺丝钉类型       | 0.2% 屈服点 $R_{p,0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ] 在以下温度下 |        |        |        |        |
|-------------|--|--------|--------|--------|--------|
|             | 20°C   | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C |
| 不锈钢, A2-70  | 450  | 380    | 360    | 335    | 315    |
| 不锈钢, A4-80  | 600  | 510    | 480    | 450    | 420    |
| 钢, 强度等级 8.8 | 640  | 590    | 540    | 480    | –      |

表 3.8 : 直径 ≤ M24 的不锈钢和钢螺丝钉对 0.2% 屈服点的温度依赖性

如果通孔螺丝钉连接通过螺母旋转来拧紧, 在螺栓中将会产生张力, 并且在板之间会产生同样大小的压缩力。结果导致螺丝钉被拉长, 部件被压缩。通过螺丝钉的伸长, 产生预应力。部件压缩产生夹紧力, 而且在连接上, 无任何附加力与预紧力大小相同。

在螺丝钉拧紧过程中, 接触面之间产生摩擦。随着预紧力的增加, 螺纹与螺母的接触面之间的摩擦力矩增大。最大预紧力代表摩擦力矩之和以及总拧紧力矩的大部分。通过润滑螺丝钉 (小的摩擦系数), 摩擦率较低, 因此在相同的拧紧力矩下, 螺丝钉产生较高的预应力。应注意, 润滑螺丝钉最大允许的拧紧力矩要低于没有润滑的螺丝钉。

预紧力和扭矩导致螺丝钉中产生张应力和扭应力。在计算螺丝钉负载时, 必须同时考虑这两种影响。该计算的一种替代方法是表格, 如 VDI 准则 2230 中所示。如果 90% 利用 0.2% 屈服点可接受, 那么在这里可以找到不同摩擦系数最大允许的拧紧力矩和相关预应力。然而, 该信息仅代表用于参考的非约束值。对于关键或安全相关的应用, 螺丝钉计算可能需要的所有影响因素必须予以考虑。从不锈钢和钢螺丝钉表格中的摘录内容如下。

| 尺寸和质量      | 最大拧紧力矩 [Nm], $\mu_{total} =$ |      |      |      |      | 最大预紧力 [Nm] $\mu_{total} =$ |      |      |      |      |
|------------|------------------------------|------|------|------|------|----------------------------|------|------|------|------|
|            | 0.10                         | 0.14 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.10                       | 0.14 | 0.20 | 0.30 | 0.40 |
| M4, A2-70  | 1.7                          | 2.2  | 2.6  | 3.0  | 3.3  | 2.97                       | 2.73 | 2.40 | 1.94 | 1.60 |
| M4, A4-80  | 2.3                          | 2.9  | 3.5  | 4.1  | 4.4  | 3.96                       | 3.64 | 3.20 | 2.59 | 2.13 |
| M5, A2-70  | 3.4                          | 4.2  | 5.1  | 6.1  | 6.6  | 4.85                       | 4.47 | 3.93 | 3.19 | 2.62 |
| M5, A4-80  | 4.6                          | 5.6  | 6.9  | 8.0  | 8.8  | 6.47                       | 5.96 | 5.24 | 4.25 | 3.50 |
| M6, A2-70  | 5.9                          | 7.4  | 8.8  | 10.4 | 11.3 | 6.85                       | 6.31 | 5.54 | 4.49 | 3.70 |
| M6, A4-80  | 8.0                          | 9.9  | 11.8 | 13.9 | 15.0 | 9.13                       | 8.41 | 7.39 | 5.98 | 4.93 |
| M8, A2-70  | 14.5                         | 17.8 | 21.5 | 25.5 | 27.6 | 12.6                       | 11.6 | 10.2 | 8.25 | 6.80 |
| M8, A4-80  | 19.3                         | 23.8 | 28.7 | 33.9 | 36.8 | 16.7                       | 15.4 | 13.6 | 11.0 | 9.10 |
| M10, A2-70 | 30.0                         | 36.0 | 44.0 | 51.0 | 56.0 | 20.0                       | 18.4 | 16.2 | 13.1 | 10.8 |
| M10, A4-80 | 39.4                         | 47.8 | 58.0 | 69.0 | 75.0 | 26.5                       | 24.8 | 21.7 | 17.5 | 14.4 |
| M12, A2-70 | 50                           | 62   | 74   | 88   | 96   | 29.1                       | 26.9 | 23.7 | 19.2 | 15.8 |
| M12, A4-80 | 67                           | 82   | 100  | 117  | 128  | 38.8                       | 35.9 | 31.5 | 25.6 | 21.1 |
| M16, A2-70 | 121                          | 150  | 183  | 218  | 237  | 55.0                       | 50.9 | 44.9 | 36.4 | 30.0 |
| M16, A4-80 | 161                          | 198  | 245  | 291  | 316  | 73.3                       | 67.9 | 59.8 | 48.6 | 40.0 |

所有的数据均为室温下的近似值—见 VDI 2230。

对于六角螺丝钉 (ISO 4014 和 4017)、内六角螺丝钉 (ISO 4762) 和螺母 (ISO 4032), 标准螺纹在 90% 利用 0.2% 屈服点  $R_{p0.2}$ 。

表 3.9 : 不锈钢螺丝钉最大拧紧力矩和产生的最大预紧力

| 尺寸和强度等级  | 最大拧紧力矩 [Nm] |      |      | 最大预紧力 [kN] $\mu_{total} =$ |      |      |
|----------|-------------|------|------|----------------------------|------|------|
|          | 0.10        | 0.12 | 0.14 | 0.10                       | 0.12 | 0.14 |
| M4, 8.8  | 2.6         | 3.0  | 3.3  | 4.5                        | 4.4  | 4.3  |
| M5, 8.8  | 5.2         | 5.9  | 6.5  | 7.4                        | 7.2  | 7.0  |
| M6, 8.8  | 9.0         | 10.1 | 11.3 | 10.4                       | 10.2 | 9.9  |
| M8, 8.8  | 21.6        | 24.6 | 27.3 | 19.1                       | 18.8 | 18.1 |
| M10, 8.8 | 43          | 48   | 54   | 30.3                       | 29.6 | 28.8 |
| M12, 8.8 | 73          | 84   | 93   | 44.1                       | 43.0 | 41.9 |
| M16, 8.8 | 180         | 206  | 230  | 82.9                       | 80.9 | 78.8 |

所有的数据均为室温下的近似值—见 VDI 2230。对于六角螺丝钉 (ISO 4014 和 4017)、内六角螺丝钉 (ISO 4762) 和螺母 (ISO 4032), 标准螺纹在 90% 利用 0.2% 屈服点  $R_{p0.2}$ 。

表 3.10 : 强度等级 8.8 的钢螺丝钉的最大拧紧力矩和产生的最大预紧力

如果将螺丝钉拧入盲孔, 在螺纹孔末端产生封闭的中空空间。在真空下排空此类封闭空间的速度非常缓慢, 且会导致长时间的排气, 这与泄漏的表现方式相同。因此, 它也被称为虚漏。在高真空特别是 UHV 条件下, 这种类型的封闭空间应尽量避免, 如无法避免, 则必须将其排空。

另一种是真空螺丝钉, 可提供轻松的排气方式。其核心已经钻孔 (脱气孔)。螺丝头区域还具有径向铣槽 (脱气减少), 螺丝钉连接的贯穿孔区域通过该铣槽排空。螺丝钉的机械参数不适用于真空螺丝钉, 因为排气口导致机械弱化。

### 3.4 真空腔体

真空系统的核心是真空腔体，它是针对具体应用量身定做的。它包括应用并将其可靠地与外部分离或防止环境受内部流程影响。不论是并非需要高真空环境的干燥过程，或者是需要在中或高真空环境下进行的等离子体过程，以及需要在高真空环境下进行的表面研究：它们的真空腔体都同样必须始终承受与大气的机械压力差。

欧盟标准规定真空容器不受任何基于设计和计算的具体准则的限制。它们不是压力设备（压力设备指令 97/23/EC 适用于具有内部压力大于 500 hPa 的部件），而且根据机械指令 2006/42/EC 它们也不属于机器。然而，它们必须以安全可靠的方式进行设计、计算和生产，并在交付前进行测试。

圆柱管、球体、平板或模具配件的壁厚的计算，如盘形端盖，可使用 AD-2000 手册进行。AD 2000 规定实际上是“压力容器工作委员会”设计制定的，用于对压力容器的计算，但也描述“外部过压”的负载条件。在这里，您将发现，例如，计算所需壁厚的方程包括圆柱管的“弹性屈曲”或“塑性变形”等。

由于矩形腔室或类似设计，必须检查表面偏转和出现的张力。如果它们过高，必须增加壁厚或对该区进行局部加固，如通过额外的焊接肋板。为此，可以使用采用有限元法 (FEM) 执行机械计算的程序来优化腔室设计。除允许的机械应力外，也有必要检查在“外部大气、内部真空”的负载条件下，密封面是否互相保持平整。如果密封面歪曲，可能发生泄漏，阻碍腔室的使用。



图 3.17：具有冷却剖面和水冷法兰的 EUV 光源室

腔室的基本形状通常由应用决定。对于腔体，如可能，应该选择圆柱管，它有利于物料的投放和系统的稳定性。对于较小的公称通径，管端可采用平底封闭；较大直径应该通过盘形端盖来密封，以限制材料用量和腔室的重量。示例：直径为 600 mm 的腔室需要平底，大约是盘形底壁厚的三倍。具有端盖的主法兰允许进入腔室，门铰链的使用提高了易用性。外部的腔室支脚确保了稳定性，吊环螺钉或起重卸扣可实现安全运输。

如果腔室要进行回火或内部热源导致腔室盖过热，必须提供腔室冷却系统。这可通过焊接冷却剖面或大面积垫板冷却（图 3.18）或甚至作为双层容器来实现。



图 3.18：具有垫板冷却的空间模拟室

通常情况下，根据实验或过程，在用户和设计师之间的交流中设计腔室。单独定制腔室的另一选择是标准的真空室。这些是预配置的基础结构，可通过自由可选的端口予以补充。与完全定制的真空室相比，它们更加快速、实惠。

#### 3.4.1 表面工艺

先前章节中已涵盖“材料选择”和“焊接”主题。真空室和部件的内表面是在高真空和超高真空下实现工作压力的重要因素。必须在该条件下进行加工，以最小化有效表面，并产生具有最小解吸率的表面。

真空室和部件的表面往往是在焊接和机械加工后经过精细玻璃珠喷砂的。具有有限直径的高压玻璃珠被吹到表面上。密封面不能被喷砂，所以在喷砂过程中要将其盖住。这个过程对表面起封闭作用，使表面精确平整光滑，去除近表层粘附物，如色斑，并产生装饰性的外观。要喷砂的表面必须清洁、无油脂，砂砾介质必须定期更换，特别是在改变材料类别时，如铁素体和奥氏体不锈钢。

**研磨**用于消除宏观粗糙度，使其无氧化皮、水垢或划痕。这应该在清洁、无油、无油脂的表面上进行，并且磨料不应被加工到表面里。根据初始粗糙度和要去除的层厚度，应该分几个步骤进行研磨，采用越来越细的颗粒，并使用横磨方法（即：交替研磨方向）。研磨通常是随后表面处理（如电抛光）的准备步骤。研磨产生视觉上统一的印象。凭借已经相对光滑、酸洗的表面，研磨可以产生更多的装饰效果，而且还可以增大表面积。

**刷光**用于焊缝的后处理。所用刷子必须由不锈钢制成，并且不得受到其他物质的污染，保证无异物被带到表面上。这同样适用于抛光。抛光或磨损可能不增加到表面上和/或然后必须完全去除。有效的表面积不得通过微观粗糙来增加。

**酸洗**是清洁表面的一种有效方法。杂质和大约 1 至 2  $\mu\text{m}$  厚的表层被溶解。相关酸洗参数，如酸洗剂浓度、温度或酸洗时间，必须严格遵守，以避免过度酸洗。酸洗后，必须集中冲洗，以去除酸洗液的所有残余物。酸洗过程只能略微改变表面粗糙度。

**电抛光**是金属选择性阳极通过使用 DC 电源溶解到电解液中。在这种情况下，通常去除表面 12 至 15  $\mu\text{m}$  的颗粒，以产生结晶的纯净表面。为均匀地去除表面，必须频繁地制造适合于部件的电极。这使得过程变得复杂起来。此外，CF 密封面必须被覆盖保护，因为作为边缘，电场强度局部增大，从而导致材料去除增加。在 UHV 用户中，该过程是有争议的。对氢进入表面或通过电解液残余物进入表面上进行了讨论。如酸洗一样，在电抛光后，必须彻底冲洗部件。此外，在这之后应进行泄漏测试，因为焊缝区域的物质被去除了。根据先前条件，电抛光可以减少一半的表面粗糙度。

### 3.4.2 清洁工艺

清洁表面是真空技术中的先决条件。必须去除表面上的所有杂质，以使其在真空条件下不解吸、不产生气体负荷或沉积在部件上。

最初的预处理是必需的，例如，用高压清洗器，以去除粗污垢。随后，将在多腔室超声波中清洗部件。首次清洁是在超声波条件下使用特殊的清洁剂进行，对表面进行清洁和脱脂。污物沾有表面上的表面活性剂，并粘着在清洗液中。清洗液的 pH 值必须调整到适合于腔室材料的范围。在其它清洗液中，清洁剂通过预冲洗、然后用热去离子水彻底冲洗才能完全去除。在这之后，必须在高温、无尘、无烃空气中快速完成干燥。大型腔室使用蒸汽或高压清洗器与特殊的清洗剂进行清洗。然后，必须使用热的去离子水再次清洗数次，最后在高温空气中进行快速干燥。

清洁后，真空侧表面必须只能佩戴清洁、不起毛的手套触摸。所用包装为 PE 塑料薄膜，且密封面和刀刃轮廓用 PE 帽保护。

已清洁部件表面仍然有出气源。在 UHV 下，明确吸附的水分子和贮存在空气中的烃痕是残余气体的最大来源。为有效地去除表面的这些物质，对 UHV 腔室进行加热。在压力小于  $1 \cdot 10^{-6}$  hPa 的连续排空下，部件通常加热到 150°C 至 300°C 约 48 小时。

以物理吸附或化学吸附方式粘着在表面的外来原子，通过这些过程获得热能量，它们凭借这些热量挣脱吸附键并从表面释放。从表面释放的分子必须通过真空泵从系统中去除。在冷却后，获得的最终压力已经下降了几个量级。如果腔室被破空，表面会再次附着分子。使用干燥氮气作为破空充入气体并简短暴露于大气中并不能完全防止表面上凝水，只能减少它。为在容许的抽空时间内达到最终压力，小于  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa，再次烘烤是不可避免的。



## 3.5 部件和封接件

真空系统具有很多单个部件，必须这些部件进行组装以形成一个完整的单元。使用可拆卸的真空密封法兰连接，部件可直接连接或通过真空部件，如管件或软管连接。有很多可用的标准部件，其主要由不锈钢制成，但也有铝制成的。真空交叉连接点可由管件制成，如弯头、三通或十字接头件，适配元件提供由真空法兰到管线或 VCR 连接的过渡，变径管或转接件使改变公称通径或法兰系统成为可能。

如果安装空间有限，应安装尽可能少的法兰连接；如果使用标准部件无法实现所需的过渡和连接，则使用定制部件。从最简单的长双头螺纹短节，直至高度复杂极其特殊的解决方案。

### 3.5.1 软管和柔性连接器

柔性连接最简单的形式是塑料软管。较大的公称通径通过镶嵌的金属螺线增强，防止收缩。两端套在软管接头上并用喉箍固定。由于真空中的塑料出气，此类软管应仅用于低、中真空应用。对于压力大于  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa 的，金属软管是必要的。它们以同心轴的形式从薄壁管冷成形，并被焊接到法兰连接上，以对它们进行严实密封。退火的波纹软管在变形后通过退火消除应力，因此具有较低的恢复力矩。然而，变形导致进一步的冷加工，并根据变形的程度，它再次省略了应力消除退火。薄壁波纹软管是非常灵活的，容易变形。

波纹软管在真空下收缩。因此，柔性连接器可以用作膨胀节。根据轴向压缩量和液压横截面，产生轴向力，并被传递到法兰连接上。大的公称通径产生巨大的张力，这在设计时必须予以考虑。波纹软管主要用于连接一个空间中的两个法兰，而弹簧波纹管用于轴向补偿或振动吸收。其外形非常灵活，因为其以  $\Omega$  波的形式压缩。

薄膜波纹管是由焊接在一起的单个薄片制成。在短安装长度上，可实现长的轴向行程和大的弯曲角度。由于薄片的刚性，只有通过相对多的膜对形成 S 型轮廓，横向偏移才有可能。

### 3.5.2 观察窗

视镜主要用于观察真空室的内部，包括过程。因此，一般使用合适厚度的硼硅酸盐玻璃，通过弹性体密封件安装进观察窗法兰（ISO-KF、ISO-K 和 ISO-F）中。对于 UHV 应用和高温，玻璃金属化并与焊唇焊接（熔凝石英或蓝宝石玻璃）或熔化（Kodial 玻璃）以补偿热膨胀。它们被焊接和严实密封到观察窗法兰的焊唇上。为使应力最小化，CF 观察窗应仅装有退火铜密封件。此外，加热和冷却必须平稳，不应太快。

如果视窗也用作电磁波的传输，其传输范围和光学质量必须予以考虑。一英寸和两英寸带有 FKM 垫片的视镜玻璃架，允许在真空法兰中安装光学眼镜。视窗挡板能防止或减少对视窗的污染，例如在涂层过程中。



图 3.19：带玻璃-金属熔合的 CF 多重视窗

### 3.5.3 电极引线

设计电极引线的一个主要因素是要保证所要求的电流容量和电压，以及必须满足真空气密性和耐温性的要求。具有有机绝缘材料的引线只能用于较低电压。树脂浇注引线被普遍用于中等电流负载和中等温度下。关于绝缘电阻，具有玻璃-金属熔合的引入电极适用于高电压，弱电电极适用于电子设备。

具有陶瓷绝缘的电极比玻璃提供更大的机械稳定性和耐温性。此外，陶瓷（如氧化铝）可以绝缘的方式生产，适合于高电压。这就是陶瓷电极在高电压和高性能方面优于玻璃电极的原因。只有在最严格的电学、热学和真空技术要求下，才应考虑刚性金属-陶瓷连接。

通常必须考虑，较高温度降低电绝缘效果，也降低了导体的载流容量。除非另有说明，否则电气数据是指室温。而且，最大工作电压适用于压力小  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa 的真空。在较高压力下，具有较高电压差的导体之间的小间隙可导致气体放电和火花放电。压力范围在  $1 \cdot 10^{-3}$  hPa 附近时，高电压差导体之间必须提供合适的间隙。或者，用浇注树脂的灌封或由玻璃或陶瓷管制成的护罩在这方面可以起到作用。

电气穿壁插头可作为电极引线使用，因为多个电极具有一个插头或一个电极具有同轴连接器。有专门用于高电压或电流、或在狭窄空间安装多个传送通道的电传输件。



图 3.20：具有陶瓷绝缘铜线导体的电极

### 3.5.4 其它引线

**热电偶引线** 热电偶引线传输低热电电压并且必须适合于所使用的热电偶。热电偶导线对的材料必须与热电偶的材料完全相同或至少是兼容的，以便实现对热电电压的中性传输。弹性体密封的馈穿件也可用于绝缘热电偶并及使用 O 型圈对真空密封套进行密封的场合。

**用于液体的引线件** 用于液体的引线件是具有焊接开口通管的法兰，或 Swagelok® 或 VCR 配件管。双壁层套管可用于携带传输冷热流体，其中载流管与法兰是绝热的。

**绝缘子** 提供部分电流隔离。严实密封和焊接至法兰连接的陶瓷可根据绝缘距离的长度分隔高 kV 范围的大电位差。

管用两个连续排列的弹性体 O 型圈玻璃和金属管真空密封夹紧。

## 3.6 阀

除了作为真空技术中典型的阻断元件和在设计产品中必须考虑的一般技术要求外，真空系统中的阀还受到特殊要求的约束。

在配置和选择真空阀时，必须考虑最小的压差和分子流范围内部件的高流阻。此外，阀体和阀座要求最小的泄漏率。阀中移动部件真空侧的润滑剂必须适合于所需的压力和温度范围，或者尽可能避免整体暴露在高或超高真空中。最小的有害（死）空间和大流导很重要，特别是在分子流范围内。

机械驱动元件导入必须以满足有关气密性以及压力和温度范围要求的方式设计。根据质量要求，弹性体密封件（如轴封）可用于压力范围高于  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa 的较低真空要求；而薄膜或弹簧波纹管用于小于  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa 的压力范围。此外，如果适当设计的话，用金属波纹管密封的阀可以烘烤。带有弹性密封件的壳体、阀板或法兰的阀可用于高达  $1 \cdot 10^{-8}$  hPa 的压力。安装位置通常是在阀门关闭时大气压正好作用于阀板之上，从而增加闭合力。

**全金属阀**，其中所有密封件由金属制成，适合于 UHV 应用和较高的烘烤温度，但是它们经常需要较高的闭合力以进行密封。软金属（铜或特殊合金）用作密封材料。除闭合力较高外，还必须考虑到密封件的使用寿命较短。

在真空技术领域中有各种不同类型的阀用于不同的应用；这些阀以其设计或功能命名。

### 3.6.1 阀门控制器

阀门驱动方式各种各样。较小公称通径的阀可通过电磁铁和线圈进行电磁开启。它们一般用弹簧力关闭。对于较大的阀，所需线圈非常大并产生大量的热。在线圈通电流后，保持电流可通过内部电子控制装置减少，以防止驱动器过热。尽管如此，尺寸大于 DN 40 的阀极少通过电磁供电。

用气动操作阀，使用空气压力进行驱动。所需控制压力通常在范围 0.4 至 0.8 MPa。气动气缸将其运动传输到阀板。如果一个方向通过压缩空气操作，相反方向用弹簧复位，这种驱动器被称为“单作用气动”。如果两个方向都需要压缩空气，则被称为“双作用气动”。如果气动驱动器磁头上直接有压缩空气入口和出口的电磁控制阀，则为电控气动驱动器。这里，空气压力必须施加且必须通过开关具有控制电压（通常为 24 V DC）的控制阀来控制。对于常规的气动驱动器，电磁阀一般也用于控制压缩空气。但是，举例而言，它是位于机柜内，或者如果连接了很多阀，它位于容纳控制阀的所谓阀终端上。如果控制失效，具有复位弹簧的阀会恢复到设定的阀位置，这通常是有益的。“常闭”和“常开”设计之间是有区别的，其中标准是常闭位置。除此之外，可通过电动机对阀进行操作。如果设计许可，阀板停留在中间位置也是可以的。

大多数阀都具有“开/关”光学位置指示器，它指示阀的位置。对于自动化过程，获取实际的阀位置反馈信息是有用的或者甚至是必要的，这与开关状态无关。为此，阀配备了直接指示阀板位置的阀位置指示器。它指示故障，如压缩空气故障或控制阀故障。

### 3.6.2 角阀

角阀的特点是高气密性、坚固耐脏，适合于工业应用。入口和出口法兰在铝或不锈钢壳体上正交相对。图 3.21 显示了波纹管密封角阀的设计。梯形或 O 型圈形状的弹性体密封件位于阀板上。阀板压合在阀座上，以关闭阀。由于机械驱动元件位于真空范围之外，可以毫无问题地对其进行润滑。角阀可与所有常见的法兰类型一起使用，可分为手动、气动、电控气动和电磁驱动设计。

对于 UHV 应用，有 FKM 或铜（全金属设计）制成的严实密封阀体和阀座密封件。

### 3.6.3 直通阀和隔膜阀

直通阀的设计基本上与上述角阀相同。除了它们的入口和出口是位于同一轴线内。由于其设计，直通阀的流阻通常高于类似的角阀。

隔膜阀用作较小公称通径的阀门。隔膜对阀座内外实现了密封。

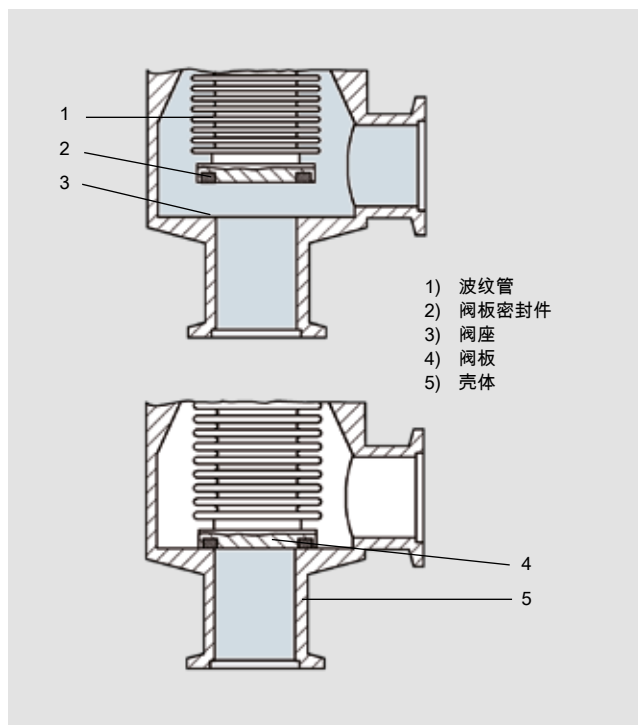


图 3.21：波纹管密封角阀

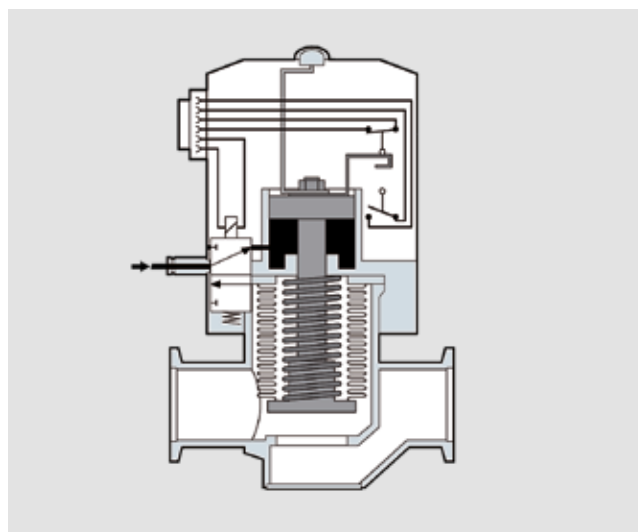


图 3.22：具有电动气动驱动的直通阀

### 3.6.4 闸阀

上述阀只能开通一部分公称横截面，而闸阀在开放的位置提供自由通道。兼之安装高度低，具有大流导，从而在使用真空泵过程中损失最小。

闸板，通常是双向设计，来回移动，以对这些阀进行开关。在关闭位置，两个元件被迫分开并通过球装置压合在密封面上。根据阀门移动的方向区分止回阀、梭阀和旋片式阀。而大多数闸阀因其特殊设计可针对 0.1 MPa 的压差密封在闸板上，它们只能在闸板上存在低压差时打开。

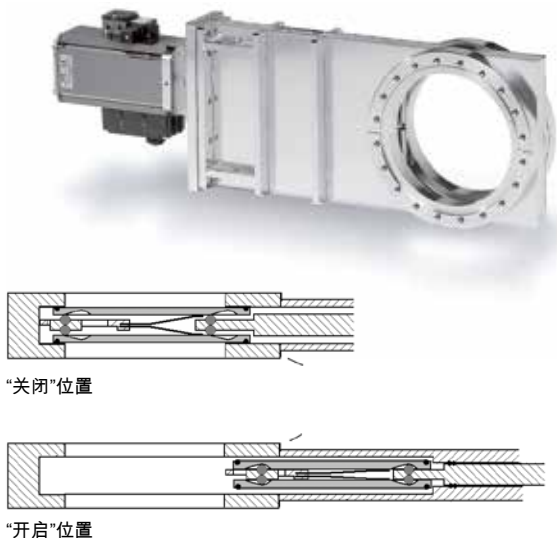


图 3.23 : UHV 闸阀

### 3.6.5 蝶阀和球阀

蝶阀的密封件安装在阀板的圆周上。阀板围绕轴旋转，其横向通过圆形阀体运行。阀板保留在阀开启的位置。该阀是短设计、具有低流阻，因为门几乎开放了整个横截面。

球阀是非常坚固的阀门，具有自由通道，真空度可达约  $1 \cdot 10^{-5}$  hPa。中间有孔的球通过万向球形接头（通常由 PTFE 制成）在两侧进行旋转支撑和密封，球形接头中间也有孔。当孔在气流的方向上，整个横截面被开通。应注意，球阀在关闭时含有一个封闭的空间

在 3 向设计中，球孔是“L”或“T”形状的。由于孔的尺寸，三个孔口在切换时可能重叠。

### 3.6.6 气体计量阀和气体控制阀

气体计量阀用于精确控制气体进入真空的入口流量，例如，维持或设置一定的压力。它们通常按照针型阀原理工作。通过转动主轴，间隙被释放，且该开口和长度提供流导。气体流量取决于主轴旋转并以特性曲线表示。阀位置可从刻度上读取并可重复设置。

气体控制阀为电动可控计量或比例阀，其中阀开口尺度随施加的线圈电流的增加而不断增大，直到达到最大开口。与线圈电流有关的体积流量在特性曲线上显示。控制阀通过控制单元进行操作或直接通过外部控制器进行操作。它们用于压力或流量控制的自动化过程。

对于 UHV 条件下的低流量，例如，用于质谱仪应用，有可烘烤的全金属气体计量和气体控制阀，它们用陶瓷板密封在金属座上。



图 3.24 : UHV 全金属气体计量阀

## 3.7 执行器和机械运动件

研究和工业生产中很多真空过程需要在排空区域移动样品或部件。是包括三维空间坐标方向的直线位置变化和绕轴旋转，可以是单个运动或多个运动类型相互之间的组合。

执行器和机械贯通件允许真空中的平移和旋转，其驱动器位于大气侧且运动以真空密封的方式传输。根据相应的真空和应用条件，使用几种不同的操作和传输原理。金属膜和弹簧波纹管、特殊的弹性体密封件、磁耦合系统或差动泵密封件可用作密封元件。

具有两个中空式法兰连接和一个中空通道的设计被称为操纵器，在真空密封法兰中安有执行器的部件被称为机械贯通件。后者的特点是结构紧凑。多个操纵器相互之间可以组合和扩展。此外，机械贯通件可与其连接，以便将各种类型的运动传输到真空中，从而提供各种运动任务的解决方案。而且，其它贯通零部件可连接至入口法兰，例如，用于电力或流体，这些可通过操纵器直接引导到应用中。

操纵器的法兰，特别是具有较大公称通径时，会承受相当大的大气压力。因此，在操纵器设计过程中，必须非常强调其固有刚性，以保证法兰在抽空时是稳定的。根据外部负载和内在部件的其它负载进行专门的设计，可带来高精度运动传输。内置部件必须能够经受烘烤，以确保在 UHV 范围的使用。

### 3.7.1 工作原理

在选择合适的操纵器或机械实施时，用户应该了解基本原理，以能够评估有关其任务适合性的技术参数。

#### 3.7.1.1 膜片波纹管密封的平移

薄膜波纹管是由许多单个薄片焊接在一起制成。凭借小的弹性刚度，轴向拉伸是非常灵活的。波纹管确保严实密封的金属外壳，且适合于最高的 UHV 要求。

波纹管的选择和设计是根据所需的运动任务，并考虑操作条件：使用寿命（运动周期数）、工作温度、烘烤温度、压力差。使用材料 316L，寿命可达 50 万次运动周期；使用更有弹性但可磁化的材料 350AM，寿命高达 1000 万次运动周期。

在指定周期数内，膜片波纹管是免保养的。在其达到计算的运动周期后，需要更换。它们不适用于有灰尘和泥土的环境。

膜片波纹管用在 Z 轴、XY 轴和 XYZ 轴的高精度操纵器中，以及端口校准和波纹管旋转密封件中。

在烘烤带有膜片波纹管的装置时，重要的是确保均匀加热。应避免加热带直接放在膜片波纹管上。它们会导致强烈的局部加热，因为膜片波纹管具有较低的质量和较小的热传导面积。最好使用温度控制加热套，虽然是更加精细的选择。

#### 3.7.1.2 波纹管密封的旋转

所谓的香蒲结构的摆动原理能够使用波纹管传输旋转运动，即：在真空和大气之间传递严实密封隔离的旋转运动。

图 3.25 显示了此类贯通件的设计。倾斜的传动轴 (1)，其末端连接在曲柄销 (3) 上，带动在真空中旋转的传动轴 (4)。严实的密封是由只做摆动运动而不做旋转运动的波纹管密封件 (2) 来实现的。主动轴和从动轴都由不锈钢球轴承支撑，其上覆盖了真空适用的干式润滑层。

干式润滑不仅增加使用寿命和可行的最大速度，而且防止滚珠在高温烘烤过程中被卡住。除干式润滑外，带有陶瓷滚珠的混合轴承也可用于 UHV 应用，其高昂的价格使其仅适合于最高标准的应用。另外，对于能够耐受少量有机物的高真空应用，轴承也可用真空适用的油脂润滑。

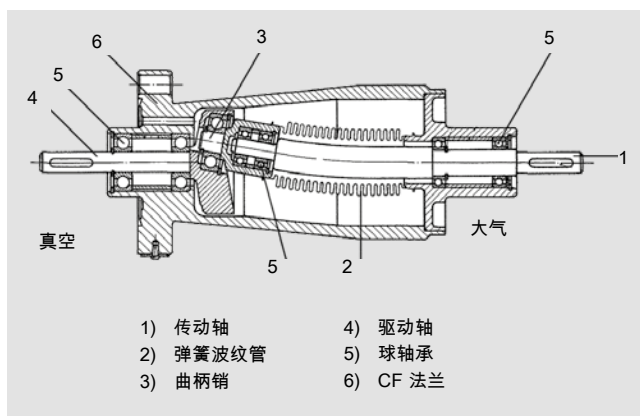


图 3.25：波纹管密封的 UHV 旋转式连接

### 3.7.1.3 磁耦合旋转和平移

磁耦合用于严实的旋转或直线运动密封件。其包括一个位于外部的永磁体阵列，用来驱动也带有磁铁的转子在真空中做旋转/平移运动。两个部件之间通过薄壁管实现完全真空密封。内外转子磁铁之间的距离应该尽可能小，以便使其相互之间的耦合力尽可能大。内部转子连接至要移动的应用，外部磁转子靠手动移动或通过电机驱动。内部轴承使用适用于真空的干式润滑进行润滑。

通常情况下，使用高性能的稀土磁铁，比如钕钴磁铁。它们能获得尽可能高的耦合强度，同时具有优异的耐高温性，如在烘烤过程中的高温。此类磁耦合系统适合于 UHV 应用。虽然大部分磁场被屏蔽了，但磁场线的分散是无法完全避免的。因此，用户必须检查其应用是否足以抵抗残余磁场。

凭借磁耦合系统，可实现旋转和直线运动以及旋转/直线的同时传递。可传输的位移力和扭矩受到磁铁数量及其排列的限制。所能达到的精度取决于要移动物质的质量。磁场充当两个耦合搭档之间的弹簧。外力和扭矩越高，内外转子之间的位置偏差越大。与最大允许值相比，如果外力和力矩比较低，则可精确地传输运动。

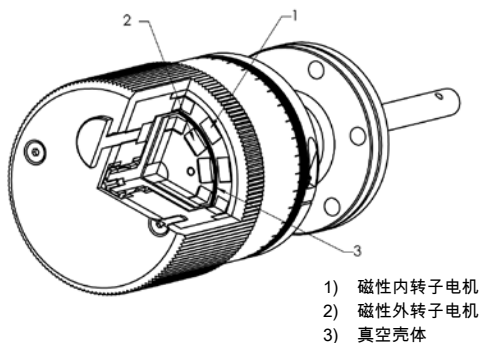


图 3.26：磁耦合的 UHV 旋转式连接件

#### 3.7.1.4 密封的弹性体旋转和平移

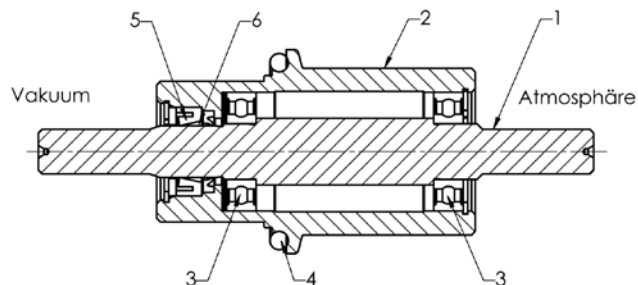
对于承受动态应力的真空适用密封件，使用特殊的弹性体密封件，其往往由 FKM（含氟弹性体）材料制成。壳体、密封件和驱动器轴之间限制尺寸的调整必须谨慎进行，同样也适用于表面处理的设计与实现。

为了应对频繁的运动以及增强密封效果，弹性体密封件必须在运动接触点处进行润滑，从而减少摩擦、防止过早磨损，以及校正表面上的细微不平整。选择合适的真空润滑脂或油，除了考虑最高的操作和烘烤温度外，还必须考虑其它特性，特别是蒸气压。

弹性体贯通密封件只可部分烘烤。此外，必须检查成分中含有的润滑脂或少量的有机物是否与应用兼容。在考虑这些局限性时，如果对真空质量上的要求不是很高，弹性体机械密封件则可用于替代那些功能原理更优越的昂贵设备。

采用通轴的连续执行器的优势是大气侧的驱动器直接连接到真空侧应用，而在。没有定位误差作或载荷误差。根据执行器轴的尺寸和安装，也可移动较大的负载。

凭借弹性体密封件，可实现旋转和直线运动以及旋转与直线同时运动的密封。



- 1) 轴
- 2) 壳体
- 3) 带槽球轴承
- 4) O 型圈
- 5) 径向轴密封环
- 6) 真空润滑脂箱

图 3.27：弹性体密封的旋转式连接件

#### 3.7.1.5 通过带抽吸间隙的滑动垫片进行旋转

制造具有自由通道和法兰且彼此可自由旋转的操纵器的唯一方法是用滑动垫片。由于滑动垫片单独不能提供 UHV 密封隔离，所以将多个垫片进行串联排列，并对中间间隙抽真空。通常是三个特殊的 PTFE 滑动垫片串联成一组安装。对于第一个间隙，用一个前级泵就够了。如果内部要求 UHV 条件，需要用额外的中间抽空，并将高真空泵与其连接。

### 3.7.2 准确性、可重复的精确度与分辨率

操纵器和机械贯通件有很多不同的任务。它们的范围从具有指定速度的连续直线和旋转运动到精确定位任务。运输样品进行分析，在操作室之间移动系列产品或在其测量点移动位置测量头——此类任务通常只需要精确度在 0.1 到 1 mm 之间。其它定位过程需要最准确、可重复精确度仅为几微米，或者对于扫描之类任务，最佳分辨率为 1  $\mu\text{m}$ 。

为了能够正确识别操纵器或机械贯通件的选择要求，了解以下定义以及设备性能和错误来源很重要。

**准确性（精确度）**描述所希望的位置和实际达到位置之间的偏差。从一个位置开始，从刻度上人工读取或通过电机驱动，在某个位置上结束由定义的刻度移动数或电机节距来确定。

因此，准确性由多种因素决定。如果没有准确的声明，这里有一些方面需要经常考虑：刻度读数有多准确？轮移动有多准确？电机分度的步长有多大？运动准确地遵循电机分度吗？此外，导轨和驱动器部件的特性对准确性来说是关键：螺距误差和主轴驱动器作用有多大？与线性导程的理想情况之间的偏差有多大？此外，附件或外部负载的空气压力导致驱动器和导向单元变形。如果操纵器不能确保足够的稳定性，可移动法兰在排空过程中向连接法兰倾斜。

**可重复精确度**描述，可以多次达到某个位置的偏差。最好高于或等于精确度，因为并不是所有错误都有记录。例如，与部件作用不一样，主轴螺距误差或导程偏差不会产生任何影响。

**分辨率**描述运动的最小可能增量。导程误差或导引精确度也不会产生任何影响。在这里，最小可读刻度或电机的最小增量是关键。对这个的要求是，导向和驱动单元遵循规范。例如，因为部件有弹性，同时其静摩擦与动摩擦不同，就涉及到滑动摩擦副的回弹（粘滑效应），这种影响可以决定分辨率。循环球式系统（滚珠丝杠）不受这种影响，并且对于苛刻的定位任务，它们比滑动单元更可取。

### 3.7.3 执行设备和特点

操纵器和机械贯通件可进行简单或复杂的机械设计。因此，应密切观察，相应的设备是否满足有关准确性、耐久性和保养方面的要求，以及是否符合人体工程学的可操作性。

#### 3.7.3.1 Z 轴精密执行器的设计特点

与传统的梯形和公制螺丝驱动器或滑动导轨相比，具有轴驱动器和导向的循环球（滚珠丝杠）系统的使用具有几个显著的优势。由于其摩擦小，循环球系统具有高效率，且其较大的公称通径特别有利。尽管外部负载高（如真空状态下的压力差），它们允许用适度的操作力轻松进行行程调整。先前描述的粘滑效应不存在了，因此，可提供非常精细的分辨率，且不会出现很大的启动转矩，启动转矩使得操作更困难且尤其对电机驱动器具有不利影响。这样也没有必要设置连接电机的减速齿轮了。另一个优势是非常低的磨损水平，在不产生油脂污染的洁净环中，通过高品质、长期高温润滑脂的初始润滑将几乎可以无限期地持续下去，并无需保养。

耐弯曲导向体对精确度有很大影响。选择不锈钢制成的稳定 U 型结构具有更大的刚性、用料更少重量更轻。在 U 型内部，导轨被螺丝固定在背板上。与无法得到支撑、自由运行的轴导向相比，型轨具有低变形结构，甚至在重负载下，在全行程范围内，实现符合所有空间轴的精确调整。

波纹管单元通常是充分利用行程 10,000 次而设计的。波纹管的互换性确保仍然可以使用高品质导向和驱动机构的操纵器。



图 3.28 : Z 轴精密执行器

### 3.7.3.2 XY 轴精密执行器的设计特点

XY 轴精密操纵器的设计特点是非常稳定的设计，这代表重量、尺寸和稳定性之间的平衡。其承重基本结构是抗扭的且是由铝合金制成的，其表面进行阳极氧化，从而得到持久的保护。

精密交叉滚动轴承导轨保证了使用寿命与最大精确度。两个轴通过带有大驱动鼓的微米螺丝钉手动制动。它具有非常好的刻度可读性，确保设置简单且符合人体工程学设计，从而产生高分辨率。

围绕波纹管单元的间隙允许装配加热套，从而能对其进行均匀的加热。而且，波纹管单元易于更换，因此在配置的周期数已用尽后，可进行更换。



图 3.29 : XY 轴精密执行器





# 4 真空获得设备

## 4.1 真空泵的工作原理和性能

### 4.1.1 真空泵的分类

真空泵分为气体输送泵和气体吸附或捕集泵。气体输送式真空泵可以连续使用，而气体吸附真空泵具有有限的气体吸收能力，并且必须在一定的过程时间间隔进行再生。

气体输送泵，分为容积式真空泵和动量传递真空泵。容积泵将密封空间中的气体排到大气或下级泵中。动量传递泵通过机械驱动或蒸汽射流在运动方向对气体进行加速来抽出气。

气体吸附真空泵通过吸气或在合适温度冷凝气体的方式将气体吸附到特别的活性表面上。吸附泵通过蒸发和/或升华或溅射不断地产生纯净的吸气面。如果要抽出的气体粒子在与吸气面进行相互作用之前在离子泵中被电离了，则它们在溅射清洁吸气面的同时被溅射的材料掩盖。非蒸散型吸气剂 (NEG) 包括高反应性的合金，其主要由锆或钛组成，并且具有非常大的比表面积。气体可以通过微孔渗透到吸气材料的深层内部，并在那里结合成稳定的化合物。

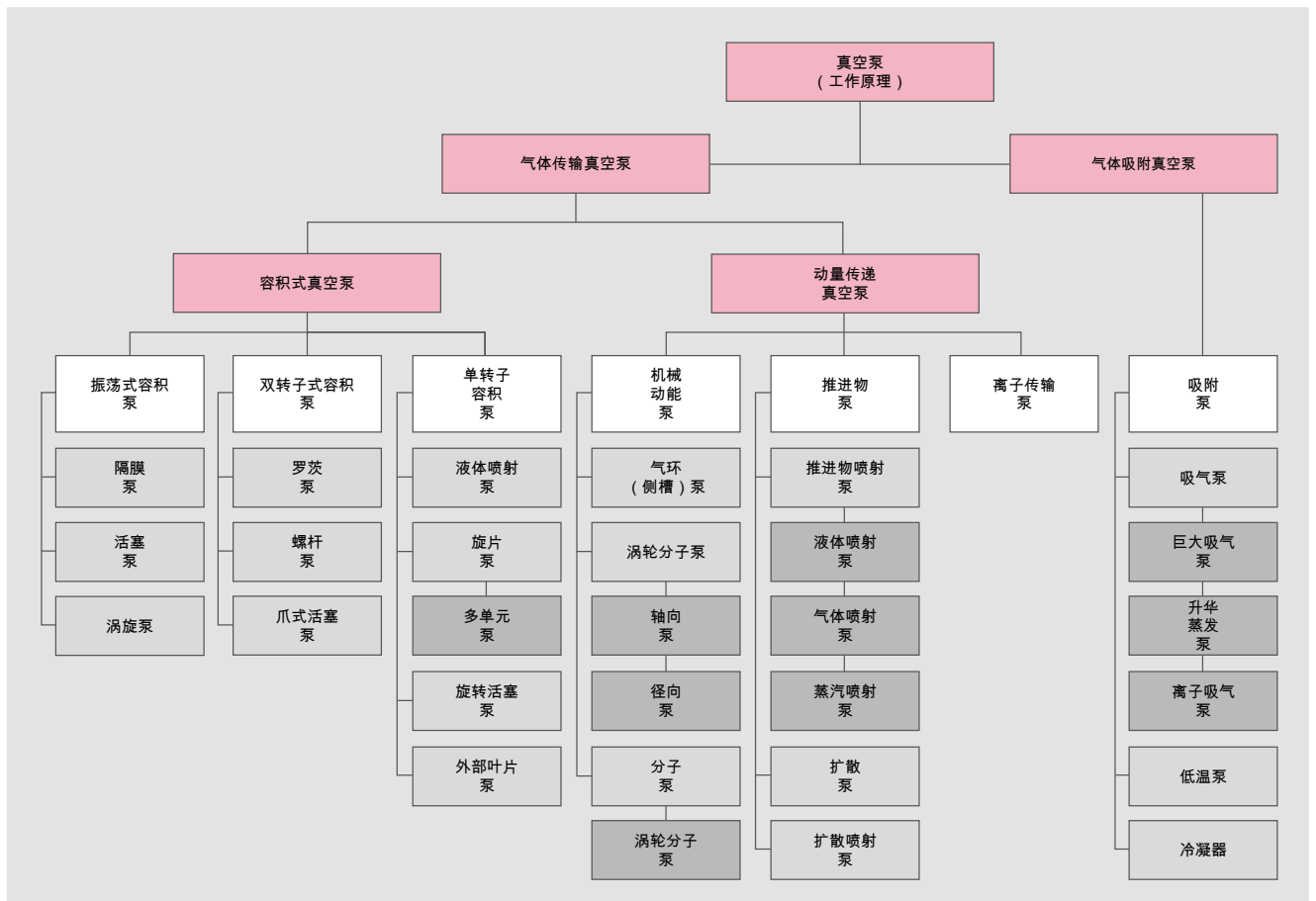


图 4.1 : 真空概览

#### 4.1.2 抽速和气流量

$$\text{抽速 } S_0 = \frac{dV}{dt}$$

(公式 1-17) 是通过真空泵入口横截面的平均体积流量。在抽气特征图中, Y 轴上显示的是体积流率或抽速, X 轴上显示的是入口压力。由泵几何形状决定的, 泵可达到的最大抽速被称为额定抽速。抽速的测定在基本标准 ISO 21360-1:2012 中进行了说明。抽速以单位  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  表示。单位  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$  也是常用单位。

$$\text{气流量 } q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p$$

(公式 1-16) 作为入口压力函数, 表示真空泵中的气体流量。它以  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  或  $\text{hPa} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} = \text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  表示。如果抽气系统由气体容积泵组成, 所有串联连接的泵都具有相同的气流量。

#### 4.1.3 极限压力和本底压力

极限压力  $p_e$  是在无气体进入的限定条件下由盲板法兰连接的真空泵渐进的最低压力。在极限压力下, 泵的抽速将为零, 因为只有其自身的返流损失将被抽出。极限压力是理论值。现在用本底压力代替极限压力。获得本底压力的条件在标准 ISO 21360-1:2012 中有规定。由于必须在指定时间内获得本底压力, 其通常高于极限压力。

#### 4.1.4 压缩比

排气压力  $p_{outlet}$  与进气压力  $p_{inlet}$  之间的最大压力比被称为压缩比。

$$K_0 = \frac{p_{outlet}}{p_{inlet}}$$

公式 4-1: 压缩比

在盲法兰连接入口的情况下, 压缩比 (由于零流量, 被称为  $K_0$ ) 通过出口侧压力测量而得到, 前提是出口不是恒定的大气压。

#### 4.1.5 串联系统的抽速

真空泵具有抽速  $S_0$  和压缩比  $K_0$ 。泵通过缝隙具有返流损失, 返流流率为  $C_R$ 。设入口压力为  $p_{inlet}$  且排气压力为  $p_{outlet}$ 。抽速为  $S_b$  的前级泵被连接到出口侧。例如, 罗茨泵机组或涡轮分子泵机组。

抽速为  $S$  的整个机组抽出的气体量

$$q_{pV} = p_{inlet} \cdot S = p_{outlet} \cdot S_b = S_0 \cdot p_{inlet} - C_R (p_{outlet} - p_{inlet})$$

公式 4-2: 机组的气体流量

对于返流流率  $C_R$ , 适用以下公式, 其中  $C_R \ll S_0$

$$C_R = \frac{S_0}{K_0}$$

公式 4-3: 返流流率

且对于实际压缩比

$$K = \frac{p_{outlet}}{p_{inlet}} = \frac{S}{S_V}$$

公式 4-4: 实际压缩比

使用以上公式, 可以得出两级泵系统的抽速  $S$  为

$$S = \frac{S_0}{1 - \frac{1}{K_0} + \frac{S_0}{K_0 \cdot S_V}}$$

公式 4-5: 抽速递推公式

该公式也可以用作多级泵串联系统的递推公式, 其中最后一级泵抽速  $S_b$  和中间泵的  $K_0$  和  $S_0$ 。

#### 4.1.6 气镇

空气或其他非冷凝气体通过某种方式被允许进入真空泵, 该方式被称为气镇。如果泵内存在相应温度下无气镇会冷凝的蒸汽, 则气镇使出口阀在蒸汽冷凝前打开, 且蒸汽与镇流气体一起被排出。大气以及所选惰性气体被用作镇流气体。气镇的使用会略微增加真空泵所能达到的本底压力。因此, 对于气镇真空泵, 同时规定有气镇和无气镇的本底压力。

### 4.1.7 水蒸汽耐受性/水蒸汽的能力

水蒸汽耐受性  $p_W$  是真空泵在正常环境条件下 ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 1,013\text{ hPa}$ ) 可连续吸入和对应的蒸气。它可从给定温度下的抽速、气镇流量、相对湿度和饱和蒸气压计算得出。

$$p_W = \frac{q_{pV, ballast} \cdot (p_S - p_a)}{S \cdot (\alpha \cdot p_0 - p_S)}$$

公式 4-6：水蒸汽耐受性

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| $p_W$             | 水蒸汽耐受性         |
| $q_{pV, Ballast}$ | 气镇流量           |
| $S$               | 泵的抽速           |
| $p_S$             | 水蒸气在排气温度的饱和蒸气压 |
| $p_a$             | 空气中水蒸气的分压      |
| $p_0$             | 大气压            |
| $\alpha$          | 修正系数，无因次       |

修正系数将打开出口阀所需压力高于大气压的这一事实考虑在内。在我们的例子中，可以将 $\alpha$ 假定为1.1。

水蒸汽耐受性具有的压力大小，以 hPa 表示。

DIN 28426 描述了使用间接方法来确定水蒸汽耐受性。水蒸汽耐受性随泵的排气温度上升而增加，且随气镇流量  $q_{pV, Ballast}$  的增加而增加。其在较高环境压力下减少。

在无气镇的情况下，出口温度小于  $100\text{ }^\circ\text{C}$  的真空泵不能抽出即使少量的纯净水蒸气。如果水蒸气在无气镇的情况下被泵吸入，冷凝物将溶解在泵油中。因此，本底压力将会上升，冷凝物可能会导致泵体腐蚀破坏。

排水蒸气能力是真空泵在环境条件 ( $20\text{ }^\circ\text{C}$  和  $1,013\text{ hPa}$ ) 下可以连续吸入和抽出水蒸气的最大水量。

$$q_{m, water} = p_W \cdot S \cdot M \cdot (RT)^{-1}$$

公式 4-7：抽水蒸气能力

|                |        |
|----------------|--------|
| $q_{m, water}$ | 抽水蒸气能力 |
| $M$            | 水的摩尔质量 |
| $R$            | 一般气体常数 |
| $T$            | 绝对温度   |

抽水蒸气的能力以  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$  表示。因此，它是水蒸气质量流率。通常用于在公式中的  $c_W$  表示抽水蒸气的容量。

### 4.1.8 密封气体

当抽取腐蚀性气体时，存在气体可能破坏泵部件的风险。为了避免该危险，敏感部件必须用连续的惰性气体流保护起来。因此，泵体内设有特殊的进气系统，凭借该系统，气体在规定的位流入泵系统。在涡轮分子泵中，主要是轴承和电机舱需要保护。在电机舱中吸入密封气体能够避免侵蚀性气体与润滑剂或轴承中的腐蚀敏感成分发生化学反应以及防止灰尘和粒子进入润滑剂腔、与润滑剂混合。使用密封气体可以保护电机及防止粒子进入和导致轴与紧急轴承接触，也建议免润滑的涡轮分子泵使用

除轴承密封气体外，干式前级泵也有净化气体注入嘴可注入泵内。净化气体流量使用校准喷嘴上游的压力调节器或流量调节器（质量流量控制器或 MFC）进行调节，以及通过压力传感器和开关进行监控。

## 4.2 旋片式真空泵

### 4.2.1 设计与工作原理

旋片式真空泵是油密封的旋转式容积泵。泵系统包括壳体 (1)、一个偏心地安装的转子 (2)、在离心力和弹力作用下径向移动的叶片 (3) 以及入口和出口 (4)。入口阀 (如配置) 被设计为真空安全阀，该阀在泵运行过程中始终处于打开状态。工作室 (5) 位于壳体内，并受到定子、转子和叶片的限制。偏心安装的转子和叶片将工作室分为具有可变容积的两个独立腔。当转子转动时，气体流入扩大的吸入室直至其被第二个叶片封住。封闭气体然后进行压缩，直到出口阀冲破大气压力而开启。出口阀是油封的。

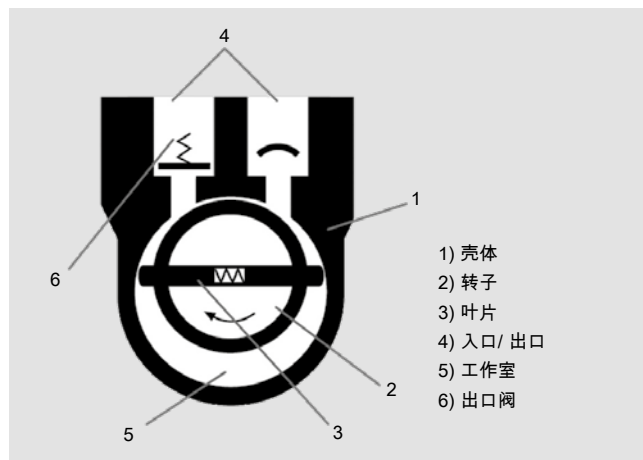


图 4.2：旋片式真空泵的工作原理

当阀打开时，少量的油进入吸入室，不仅能够对其进行润滑，而且能够将叶片与壳体（定子）密封开来。

在使用气镇的情况下，一个孔向外侧打开，让气体流入前侧的密封吸入室。因此，在气体压缩阶段，在相对低的压缩量下达到打开出口阀所需的压力。这使得蒸汽开始冷凝前排出气体/蒸汽混合物。在操作过程使用气镇达到的最终压力高于无气镇操作所达到的压力。

#### 工作液、油

泵油，也称为工作液，在旋片式真空泵中泵油有多个作用。它润滑所有运动部件，填充出口阀下的死空间以及缩小入口和出口之间的间隙。它压缩叶片和工作室之间的间隙，此外还通过热传递确保最佳温度平衡。

#### 多级泵

旋片式真空泵是有单级泵和两级泵之分。双级泵比单级泵实现相对更低的极限压力。此外，气镇对极限压力的影响较低，因为气镇仅允许在高压级使用。

#### 真空安全阀

根据所涉及的泵类型，旋片式真空泵可能配备真空安全阀。真空安全阀在有意或意外停泵的情况下将泵与真空室隔离，并使大气对泵系统进行充气，防止油液进入真空室中。在开启泵后，一旦泵中的压力达到真空室中的压力，它稍作延迟后打开。

#### 4.2.2 应用

旋片式真空泵可广泛用于整个低、中真空范围。单级或双级泵都可以使用，这取决于所涉及的压力范围。如果要抽除的介质不会在泵工作压力和大气压下冷凝，理想运行条件始终存在。

#### 蒸汽

在压缩阶段可全部或部分在泵中冷凝的蒸汽还必须在蒸馏和干燥过程中被抽出。在这种情况下，打开气镇阀有助在无冷凝的情况下通泵来排出蒸汽。然而，蒸气抽出能力并不总是足以防止冷凝。冷凝物与油的混合将导致极限压力增加，并降低工作液的润滑能力。这些因素可导致泵内发生腐蚀。在排空蒸汽前，泵必须用气镇预热至少半个小时。较高温度的工作液会减少冷凝。减少冷凝的其他方法包括获得尽可能低的出口压力及单独排出冷凝物。为此，应在入口和出口侧使用油分离器。必须使用油雾过滤器和垂直排气管防止出口处的背压。如有有萃取系统，应将出口与其连接。

#### 灰尘、粒子和化学物质

在一定的限制条件内，过滤器和分离器可以保护真空泵不受磨损和腐蚀。装有聚酯纤维 (SAS) 或环氧树脂玻璃微纤维 (DFT) 滤芯的分离器能够过滤粘附灰尘。活性炭过滤器 (FAK) 粘附无机蒸汽，滤芯填充物是可更换的。

流入的碳氢化合物（油蒸汽）可在加热催化阱 (URB) 中进行催化焚烧，并在沸石阱 (ZFO 或 ST) 中吸收各种蒸汽。当达到饱和时，可通过烘烤它们使其再生。冷凝物可收集在分离器 (KAS 或 CT) 中，并手动排出。化学除油过滤器 (OFC) 借助集成在旋片式真空泵中的油泵清理泵油。

在气体抽气量大且使用气镇操作时，油雾被夹带出泵。可以假设气体流量为  $100 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$  时的油损为 4 ml。油蒸汽可以在油雾过滤器 (ONF 或 OME) 中进行分离，并通过特定的回油管道 (ORF 或 ODK) 返回到泵的油循环系统之中。

然而，如果尽管有气镇和上述配件，同样被抽出的物质以化学方法与泵油反应或具有极低的蒸气压以致无法避免泵中出现冷凝时，则应该选择不同类型的前级泵。

#### 4.2.3 产品概览

普发旋片式真空泵提供单级和双级版本。其抽速和可达到的最终压力取决于电源频率。

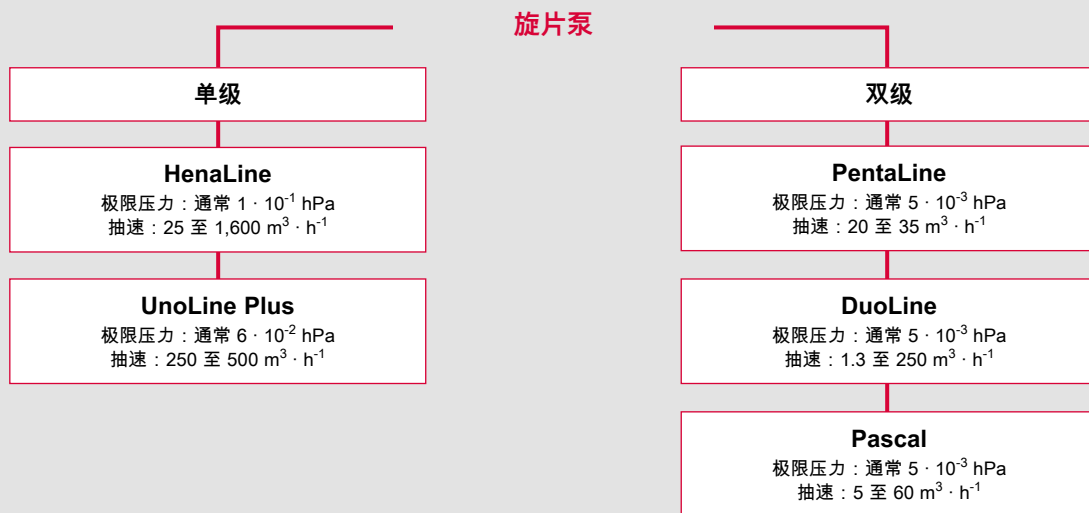


图 4.3 : 普发旋片式真空泵

#### 4.2.3.1 单级旋片式真空泵

##### HenaLine

HenaLine 单级油封旋片式真空泵具有 25 至 1,600  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的抽速, 并具有低至 0.3 hPa 的极限压力。它们可普遍用于很多工业和研究环境。它们可作为独立泵进行工作, 也可集成到机组中。使用适当的配件, 这些泵也适合于最恶劣操作条件下的应用, 即: 在高入口压力以及循环模式下工作。油雾过滤器、回油系统和真空安全阀都作为标准部件集成在一起。除防止对大气环境的污染外, 它们还保护泵和系统。气镇阀可以排出水蒸气和其他过程蒸汽。Hena i 系列泵专为具有较低最终压力的分析应用而开发。

##### UnoLine Plus

UnoLine Plus 泵可以用于工业应用。这些旋片泵具有工作可靠, 既可以单独使用, 也可作为普发罗茨泵的前级泵。可以实现极限压力接近  $6 \cdot 10^{-2}$  hPa。这些泵采用水冷方式, 对灰尘和污垢极不敏感。它们配备了油再生系统。冷凝物污染物和灰尘粒子可从工作液中分离, 收集在蒸汽分离器后被排出。可调节冷却水控制器使 UnoLine Plus 泵可以保持所需的工作温度。这些泵配备了气镇, 以进行蒸汽排空。

| HenaLine  |  |         |  |
|-----------|--|---------|--|
| 型号        | 抽速                                     | 极限压力    | 应用   |
| Hena 25   | 25 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 0.3 hPa | 电子束焊接、白纸灯泡制造、表面涂层、真空干燥、泄漏检测、冶金、气体回收、气载应用、模拟室 |
| Hena 40   | 40 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 0.3 hPa |  |
| Hena 40i  | 40 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 0.2 hPa |  |
| Hena 60   | 63 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 0.3 hPa |  |
| Hena 60i  | 63 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 0.2 hPa |  |
| Hena 100  | 100 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | 0.3 hPa |  |
| Hena 200  | 200 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | 0.3 hPa |  |
| Hena 250  | 250 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | 0.3 hPa |  |
| Hena 300  | 300 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | 0.3 hPa |  |
| Hena 400  | 400 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | 0.3 hPa |  |
| Hena 630  | 630 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | 0.3 hPa |  |
| Hena 1000 | 1,000 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 1.0 hPa |  |
| Hena 1600 | 1,600 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 0.7 hPa |  |

表 4.1 : HenaLine 性能数据 (所有数据是指 50 Hz 条件下运行)

| UnoLine Plus |                                      |                       |                           |
|--------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 型号           | 抽速                                   | 极限压力                  | 应用                        |
| BA 251       | 250 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ hPa | 适合所有工业应用, 如冶金、变压器干燥、涂层、化学 |
| BA 501       | 500 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $6 \cdot 10^{-2}$ hPa |                           |

表 4.2 : UnoLine Plus 性能数据 (所有数据是指 50 Hz 条件下运行)

### 4.2.3.2 双级旋片式真空泵

双级旋片式真空泵适合于压力低至  $10^{-3}$  hPa 的低、中真空范围内的应用。采用气镇时排出冷凝蒸汽。

#### PentaLine

PentaLine 系列泵最显著的特点是其创新的驱动理念。这些泵通过电子控制式无刷直流电动机供电，该电动机的转子直接位于泵系统的转子轴之上。通过电子逆变器为这些泵提供交流电。使用选择开关，可选择两个电压范围 100-120 伏和 200 – 240 伏。它们的优势包括高效率，比传统旋片式真空泵的能源消耗低 25% 至 50%，且泵无同轴端的密封间隙。如果暂时不需要泵体发挥其最大性能，泵的 RPM 可减少到待机模式，还会节省能源 50%。基于新的驱动理念，可避免在泵体较冷时启动机器产生的高启动电流，即使使用了异步电动机也无法避免。除上述气镇方法外，PentaLine 泵可使用

温度控制进行操作，以增加水蒸汽抽出能力使用 PLC 兼容接口或远程连接，实现“泵开启”、“待机开启”和“增强的水蒸汽抽出开启”功能模式。

#### DuoLine

DuoLine 旋片式真空泵可根据泵的大小采用交流或直流电动机供电。除标准模式外，也提供以下设计：磁耦合泵（Duo M 系列）和耐腐蚀气体泵，有磁耦合和非磁耦合泵（Duo MC 系列）。

#### Duo M 系列

M 系列泵配备了磁耦合，具有严格的密封性。这种无磨损密封概念对泵进行了严格的密封，使它们既清洁又环保。磁耦合使维护最小化，明显节省保养费用。

| PentaLine |                                      |                               |                       |
|-----------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| 型号        | 抽速                                   | 极限压力                          | 应用                    |
| Penta 20  | $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 涡轮分子泵机组、分析、工业应用、研发、涂层 |
| Penta 35  | $34 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                       |

表 4.3 : PentaLine 性能数据

| DuoLine |  |                               |                 |
|---------|--|-------------------------------|-----------------|
| 型号      | 抽速                                     | 极限压力                          | 应用              |
| DUO 1,6 | $1.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 涡轮分子泵站，分析、研发、涂层 |
| DUO 3   | $2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| DUO 6   | $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| DUO 11  | $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| DUO 35  | $32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| DUO 65  | $62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| DUO 125 | $115 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| DUO 255 | $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |

表 4.4 : DuoLine 性能数据

| Duo M 系列  |  |                               |                          |
|-----------|--|-------------------------------|--------------------------|
| 型号        | 抽速                                     | 极限压力                          | 应用                       |
| DUO 1,6 M | $1.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 涡轮分子泵站、分析、研发、涂层、非爆炸性有毒气体 |
| DUO 3 M   | $2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 6 M   | $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 11 M  | $9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 35 M  | $32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 65 M  | $62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 125 M | $115 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 255 M | $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |

表 4.5 : Duo M 系列的性能数据

### Duo MC 系列

MC 系列泵适用于腐蚀性气体的抽出。与标准泵相反，它们具有特殊的气镇阀，惰性气体可通过该阀进入泵体。此外，该泵配备了特殊的旋片，该旋片尤其耐化学腐蚀。MC 系列中所有腐蚀性气体泵可用于使用耐化学腐蚀的 F4 或 F5 (全氟聚醚) 工作液的操作。Duo MC 系统泵尤其适合于抽出有毒气体，因为密封严格的磁耦合可防止气体的泄漏。

### Pascal

Pascal 系列中抽速在  $5$  至  $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的旋片式真空泵内设有交流或直流电动机。入口和出口法兰可垂直或水平连接。除标准范围外，也可提供具有强制润滑和两种不同防腐蚀性气体的 I 系列泵。

### SD 系列

旋片式真空泵 SD 系列专为抽非腐蚀性气体而设计。自润滑 (抽速达  $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) 供排气处的排油量最少。在长期操作过程中，泵的低温能够将最终压力下的油蒸汽返流减少到最低。

正如同抽速达  $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  一样，该泵轴封可直接更换，而无需拆卸泵体，因此现场保养非常容易。

### I 系列

I 系列泵配备了强制润滑。与 SD 系列相比，这提高了水蒸汽抽出能力。强制润滑使 I 系列可以实现非常低的噪音水平和低振动。

### C1 系列

由于 FPM 密封件和氧化铬涂层轴以及壳体、旋片、轴套和视窗使用特殊材料，C1 系列中的强制润滑泵特别适合于腐蚀性气体的抽出。本系列中两个最大的机型还集成了油过滤器和油液套管冲洗装置。

C1 系列配有矿物油。

| Duo MC 系列 |                                      |                               |                          |
|-----------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 型号        | 抽速                                   | 极限压力                          | 应用                       |
| DUO 20 MC | $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 腐蚀性气体抽出、化学实验室、非爆炸性有毒气体抽出 |
| DUO 35 MC | $32 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |
| DUO 65 MC | $62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                          |

表 4.6 : Duo MC 系列的性能数据

| Pascal SD 系列 |                                      |                               |                 |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 型号           | 抽速                                   | 极限压力                          | 应用              |
| 2005 SD      | $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 工业应用、分析、研发、泄漏检测 |
| 2010 SD      | $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| 2015 SD      | $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| 2021 SD      | $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| 2033 SD      | $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |
| 2063 SD      | $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                 |

表 4.7 : Pascal SD 系列的性能数据

| Pascal I 系列 |                                      |                               |             |
|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| 型号          | 抽速                                   | 极限压力                          | 应用          |
| 2005 I      | $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 分析、研发、干燥、蒸馏 |
| 2010 I      | $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |             |
| 2015 I      | $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |             |
| 2021 I      | $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |             |

表 4.8 : Pascal I 系列的性能数据



## C2 系列

C2 系列泵也配备了强制润滑。这些泵的防腐蚀性气体措施、泵具有轴承润滑、用于工作液脱气的中性气体冲洗以及特殊旋片材料的使用使其优于 C1 系列。该系列中两个最大的泵也配备了油压力传感器和油温传感器。有了这种防腐蚀性气体设备，Pascal C2 泵特别适合于半导体制造中蚀刻和涂层工艺中的使用。

C2 系列配有全氟化的工作液。

| Pascal C1 系列 |                                      |                               |                             |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 型号           | 抽速                                   | 极限压力                          | 应用                          |
| 2005 C1      | $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 腐蚀性气体应用、化学实验室、预抽和传输室化学应用、杀菌 |
| 2010 C1      | $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2015 C1      | $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2021 C1      | $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2033 C1      | $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2063 C1      | $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |

表 4.9 : Pascal C1 系列的性能数据

| Pascal C2 系列 |                                      |                               |                             |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 型号           | 抽速                                   | 极限压力                          | 应用                          |
| 2010 C2      | $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ | 涂层、半导体 (CVD、等离子刻蚀、注入)、抽出纯净氧 |
| 2015 C2      | $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2021 C2      | $21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2033 C2      | $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |
| 2063 C2      | $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ |                             |

表 4.10 : Pascal C2 系列的性能数据

| 油类型      | 描述                             | 可实现的极限压力                | 应用   | HenaLine, UnoLine Plus, DuoLine, PentaLine, OktaLine                               | Pascal |
|----------|--------------------------------|-------------------------|--|--|--------|
| P3       | 标准应用的矿物油<br>极低蒸气压              | $< 1 \cdot 10^{-3}$ hPa | 空气、非腐蚀性气体、惰性气体                                 | ■  |        |
| A120     | 无添加剂的一般用途矿物油，用于<br>50 Hz 的多用途油 | $< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa | 空气、非腐蚀性气体、惰性气体；高粘性                             |  | ■      |
| D1       | 标准应用和特殊应用的二酯油                  | $< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa | 空气、非腐蚀性气体、惰性气体、氧、轻度腐蚀性有机溶剂                     | ■  |        |
| A155     | 有机酯基合成油                        | $< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa | 烃类蒸汽、NH <sub>3</sub> 、R134a、致冷剂；抗氧化、耐聚合（少量沉积物） |  | ■      |
| F4<br>F5 | 特殊应用的全氟聚醚                      | $< 1 \cdot 10^{-3}$ hPa | 氧、臭氧、卤素、有机和无机溶剂、HCl、BF <sub>3</sub> 、HF        | 用于 $< 20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 的泵<br>用于 $< 20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 的泵 |        |
| A113     | 全氟聚醚合成油                        | $< 5 \cdot 10^{-3}$ hPa | 氧、臭氧、卤素、有机和无机溶剂、耐腐蚀性气体能力强、适合于等离子刻蚀             |  | ■      |
| A119     | 无添加剂的一般用途矿物油，用于<br>60 Hz 的多用途油 | $< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa | 空气、非腐蚀性气体、惰性气体；低粘性，因此在低温下具有良好的启动性能             |  | ■      |
| A121     | 具有抗氧化添加剂的双蒸矿物合成油               | $< 3 \cdot 10^{-3}$ hPa | 在大气压下循环启动，适用于高温和高压，耐酸性和有机蒸汽；不适合用于等离子刻蚀         |  | ■      |
| A102     | 具有抗乳化剂的矿物油                     | $< 3 \cdot 10^{-2}$ hPa | 油水分离（抗乳化性）、水蒸气干燥和抽出、冷冻干燥                       |  | ■      |
| A111     | 有添加剂的碳氢化合物抗乳化矿物油               | $< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa | 气体循环和气体回流；氧化敏感（不适合于大气压下的频繁循环）                  |  | ■      |
| A200     | 温度稳定的矿物合成油                     | $< 2 \cdot 10^{-3}$ hPa | 耐腐蚀性气体和电离等离子体；少量返流                             |  | ■      |
| A300     | 无添加剂的双蒸馏白色矿物油                  | $< 5 \cdot 10^{-3}$ hPa | 高抗腐蚀性气体和电离等离子体；耐卤素和路易斯酸；少量返流                   |  | ■      |

表 4.11：前级泵和罗茨泵用油类型

#### 4.2.3.3 工作液选择

由于工作液与被抽吸的介质接触，其容易受到被抽介质的影响。因此，工作液应根据不同的应用单独选择。普发真空提供各种类型的工作液，适合于所有主要的应用。泵体都是按照某一种类型的工作液进行设计的。只有在使用普发真空建议使用的工作液时，才能保证目录中指定的旋片式真空泵达到极限压力。制造商不接受因使用其他工作液所造成的损害责任。不同类型的油不得混合。一些油不能相混合，因为这样有可能对泵系统造成损害。

#### 4.2.3.4 配件

##### 灰尘分离器 (SAS 或 DFT)

如果过程产生灰尘，必须在泵的上游安装灰尘分离器，因为粒子会导致磨损增加并堵塞润滑油路。可提供各种类型灰尘分离器接口，以适合于连接法兰。

##### 凝结液分离器 (KAS 或 CT)

在抽空蒸汽时，冷凝物可在真空系统的入口和出口管道中形成，并可导致对泵体的腐蚀以及对润滑剂的性能造成不利影响。为保护泵不受这些冷凝物的影响，我们建议在入口和出口管道中安装凝结油分离器。

**油雾分离器 ( ONF 或 OME )**

油雾分离器，也称为油雾过滤器，安装在旋片式真空泵的出口处。防止空气受到泵排放的油雾的污染，油雾的多少取决于工作压力。油雾分离器包括一个圆柱形滤芯和一个塑料或铝制壳体以及一个集油室。

**回油系统 ( ORF 或 ODK )**

回油系统的目的是收集和返回雾状的泵油。它们用于所有涉及到从旋片式真空泵中排放大量工作液的应用，特别是在高压应用或频繁启动操作中。回油系统的使用降低了运营成本，提高了过程稳定性，尤其是在氟和核技术中使用特殊油液时。油雾分离器将油收集在一个容器里，然后返回到真空泵中。

**沸石阱 ( ZFO 或 ST )**

采用沸石阱吸附防止烃从旋片式真空泵返流到真空部件或入口侧的容器中。吸附剂可通过烘烤使其再生。再生间隔时间取决于所涉及的工艺。

**催化阱 ( URB )**

催化阱防止单级或两级旋片式真空泵的烃返流。通过在250°C的工作温度下催化裂解烃以形成CO<sub>2</sub>和水蒸气。此间允许通过周期性排气进入反应室的氧可以再生。这意味着再生间隔与所涉及的工艺无关。直接将陷阱安装在入口和/或在单级旋片式真空泵上使用需要水冷。

**活性炭过滤器 ( FAK )**

如果涉及更多的化学物质，则使用活性炭过滤器。这些化学物质包括硫化氢、氟化物、汞、氨、氧化硫、亚硝气以及蒸汽溶剂、酸和碱性溶液。活性炭过滤器配有初始填充物。该初始填充物可更换。填充物的使用寿命取决于所涉及的工艺。

**机械和化学油过滤器 ( OFM、OFC 或 DE )**

化学油过滤器接入到旋片式真空泵的油循环系统中。该油过滤器滤掉工艺中进入工作液里的灰尘或微粒状物质。此外，化学油过滤器吸附油中的腐蚀性物质。这减少了泵磨损，并提高了使用寿命。

**氮冷阱 ( KLF 或 LNT )**

氮冷阱接入到真空系统和旋片式真空泵之间。它们冷凝工艺气流中可冷凝的介质。以这种方式，可以有效地保护旋片式真空泵不受化学物质或溶剂的腐蚀。这些阱可提供标准的铝或耐腐蚀的不锈钢。冷却液的使用和使用寿命取决于具体的应用。

在排空低温容器时，冷阱可保护真空室，防止旋片式真空泵的工作液蒸汽返流进入真空室。

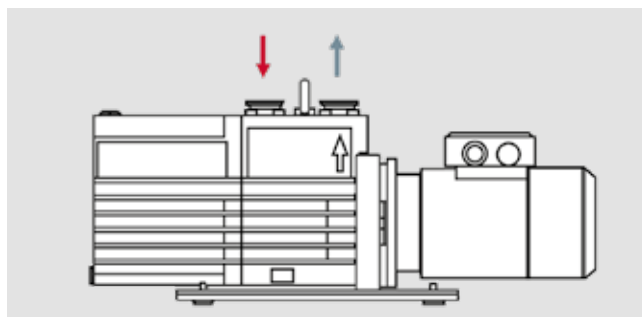
**自动气镇阀 ( AGB )**

自动气镇阀是手动气镇的电气、远程控制版。其包括一个电磁阀（在无电流时关闭），它允许供给的气体进入泵的高压力级。自动气镇阀可连接至中性气体源。如果使用频繁或泵需远距离操控，则应使用自动气镇阀。

**油位监测 ( OLS )**

油位监测设备直接安装在油箱和视窗之间的旋片式真空泵上。如果需要监测大量的泵或泵安装在难以进入的操作环境中，则油位监测系统可方便地监测泵油位。

对于所选的泵类型，可提供监测旋片式真空泵一个或多个操作参数的运行监控单元。包括油压力、油位、工作液的温度以及出口温度。



| 入口侧配件  | 工艺和监控配件  | 出口侧配件  |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 灰尘分离器</li> <li>■ 沸石阱</li> <li>■ 催化阱</li> <li>■ 冷凝阱</li> <li>■ 活性炭过滤器</li> <li>■ 液氮冷阱</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 机械和化学油过滤器</li> <li>■ 自动气镇阀</li> <li>■ 油位监测、油压监测、油温监测</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 油雾分离器</li> <li>■ 回油装置</li> <li>■ 冷凝阱</li> </ul> |

图 4.4 : 旋片式真空泵配件

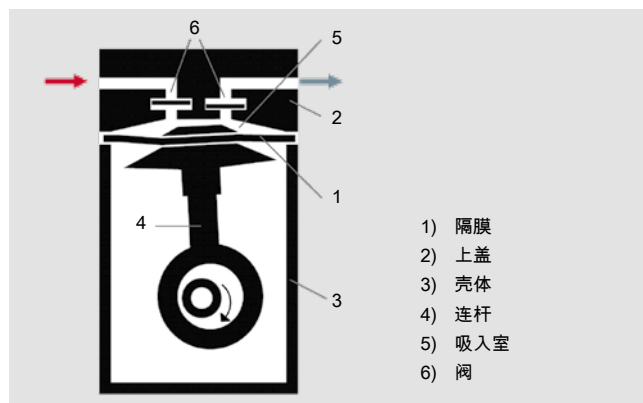


图 4.5 : 隔膜式真空泵的工作原理

## 4.3 隔膜真空泵

### 4.3.1 设计与工作原理

隔膜真空泵是干式真空泵。曲轴驱动的连杆(4)移动在上盖(2)和壳体(3)之间张紧的隔膜(1)。上盖和隔膜之间的空间形成吸入室(5)。隔膜泵需要入口阀和出口阀(6)以实现目标气体排量。由弹性体材料制成的压力控制断流阀构成此阀。由于吸入室通过各隔膜与驱动器严密密封开来,泵介质不会受到油的污染,侵蚀性介质也不会腐蚀机械结构。出口阀和吸入室之间的固定空间产生一个受限的压缩比,这意味着,单级泵就可实现约 70 hPa 的极限压力。串联连接的多级泵实现 0.5 hPa 的极限压力成为可能。更低的压力无法实现,因为不再有足够的力用于打开口阀。隔膜泵的原理特别适合于大约  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  的低抽速情况。

### 4.3.2 应用

其无烃的吸入室使隔膜泵特别适合作为具有 Holweck 涡轮分子泵的前级泵。甚至两级隔膜泵可实现极限压力大约为 5 hPa。对于 Holweck 涡轮分子泵的前级泵,这已足够了。清洁真空特别适用于分析和研发应用。由于无气镇,隔膜泵也不能抽出水蒸气。即使高真空设备壁解吸的少量水蒸气也可以使隔膜泵的极限压力急剧上升。然而,一些隔膜泵配备了气镇阀,该阀根据专利方法操作。为此,允许气体进入两级隔膜泵第一级和第二级之间的连接通道,而且这通过一个小孔与第一级的吸入室连接。

如果大量的水分聚集且使用无气镇的隔膜泵,则必须在上游连接合适的分离器或冷阱,以防止在泵中形成大量的冷凝物。但是极限压力将会增高。

### 4.3.3 产品概览

普发的隔膜泵在其极限压力、抽速和其抽吸腐蚀性气体的稳定性上各不相同。这类泵的抽速在  $3$  和  $160 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  ( $0.25$  至  $9.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) 之间。两级泵可实现极限压力低于 4 hPa,四级泵可实现极限压力低于 0.5 hPa。其抽速和可达到的最终压力取决于电源频率。

具有涂层隔膜和耐腐蚀壳体的耐腐蚀性气体泵适用于抽吸腐蚀性气体。

泵的命名方式以  $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$  表示抽速以及以数字表示泵的级数。腐蚀性气体泵在其型号命名上以字母 C 作为后缀。

| 隔膜泵         |  |                        |  |
|-------------|--|------------------------|--|
| 型号          | 抽速                                     | 极限压力                   | 应用   |
| MVP 003-2   | $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $\leq 7.0 \text{ hPa}$ | 小型涡轮分子泵站(使用 HiPace 10 和 HiPace 80 比较适合)、移动分析设备、氦气检漏仪再生 |
| MVP 006-4   | $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $\leq 2.0 \text{ hPa}$ | 小型涡轮分子泵站(使用 HiPace 10 和 HiPace 80 比较适合)、移动分析设备         |
| MVP 015-2   | $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $\leq 3.5 \text{ hPa}$ | 涡轮分子泵站、泄漏探测器、研究实验室、分析和化学应用                             |
| MVP 015-4   | $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $\leq 0.5 \text{ hPa}$ |  |
| MVP 030-3   | $1.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $\leq 2.5 \text{ hPa}$ |  |
| MVP 040-2   | $2.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $\leq 4.0 \text{ hPa}$ |  |
| MVP 070-3   | $3.8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $\leq 1.0 \text{ hPa}$ | 要求无烃真空的腐蚀性气体应用   |
| MVP 070-3 C | $3.4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $\leq 1.5 \text{ hPa}$ |  |

表 4.12 : 隔膜泵的性能数据

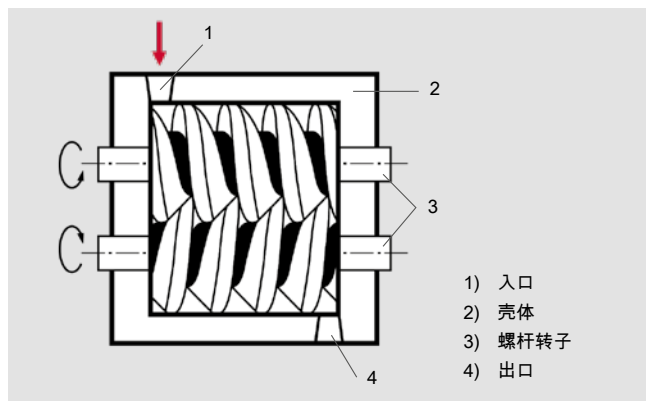


图 4.6：螺杆泵的工作原理



图 4.7：HeptaDry 转子

#### 4.3.4 配件

以下配件适用于隔膜泵：

- 旋入式法兰和法兰适配器
- 净化气体连接件
- 前真空继电器箱
- 电源包和标准安装导轨
- 涡轮分子泵驱动器连接电缆

## 4.4 螺杆真空泵

### 4.4.1 设计与工作原理

两个平衡轴承支撑的相互啮合螺杆转子 (3) 具有同步相反的螺杆并在将其围住的圆柱形壳体 (2) 内无接触地反向旋转，所有这些一起构成一个多级泵。由于两个转子的反向旋转，密封在每个螺旋中的容积随着转子向出口 (4) 推进。该泵在入口 (1) 或出口处都没有阀门。当排气容积达到出口开口处时，压力与大气压平衡。这意味着环境空气流入排气容积，然后随着转子转动再次排放。这种脉冲气流产生高耗散能并使泵发热。通过内部压缩方式可最小化耗散能量。这种内部压缩可通过减少出口方向的螺距来实现。壳体和转子之间的间隙以及转子之间的间隙决定了螺杆泵可实现的极限压力。当转子与另一转子啮合时产生的几何形状和间隙配置也显著影响极限压力。

由于脉冲气流产生的耗散能量在出口侧使泵发热，这个精确的位置上需要冷却。壳体和转子之间的间隙是造成热转子和冷却的壳体的原因。产生的热量和温度是入口压力的函数。在高入口压力（接近大气压）时温度最低，因为此时几乎没有进行任何压缩工作且抽出空气足以将泵的热量传出去。此外，高气体流量也防止气体在末级中振荡。在极限压力 ( $p < 1 \text{ hPa}$ ) 下的操作过程中，大气冲击在出口区域产生较高的温度，由于没有气体通过泵，因此没有热量被传送到泵外。

HeptaDry 泵是干式螺杆泵，具有内部压缩。螺杆转子具有可变螺距的对称几何形状。这些泵没有带有控制孔的端板；相反，气体在大气压下轴向排出。由于内部压缩，脉冲气体量较低。

这将导致耗电量降低、操作无噪音、泵内温度均匀分布以及冷却水耗量降低。这使得这些泵极具成本效益，且其设计坚固耐用。

### 4.4.2 应用

近年来，水冷螺杆泵和下节中描述的多级罗茨泵已经越来越多地取代先前在高抽速段 ( $100 - 600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) 中占主导地位的油润滑旋片式真空泵。

螺杆泵的优势包括：

- 在气体抽气腔内没有润滑剂
- 被泵送介质无任何污染
- 无工作液处理问题
- 因内部压缩而产生的较高效率
- 在 1 和 1,000 hPa 之间几乎恒定的抽速。
- 良好的液体和灰尘耐受性
- 罗茨泵理想的前级泵

这使得 HeptaDry 螺杆泵非常适合于化学应用或产生灰尘的工艺，如用于晶体生长或产生大量的冷凝物的工艺中。

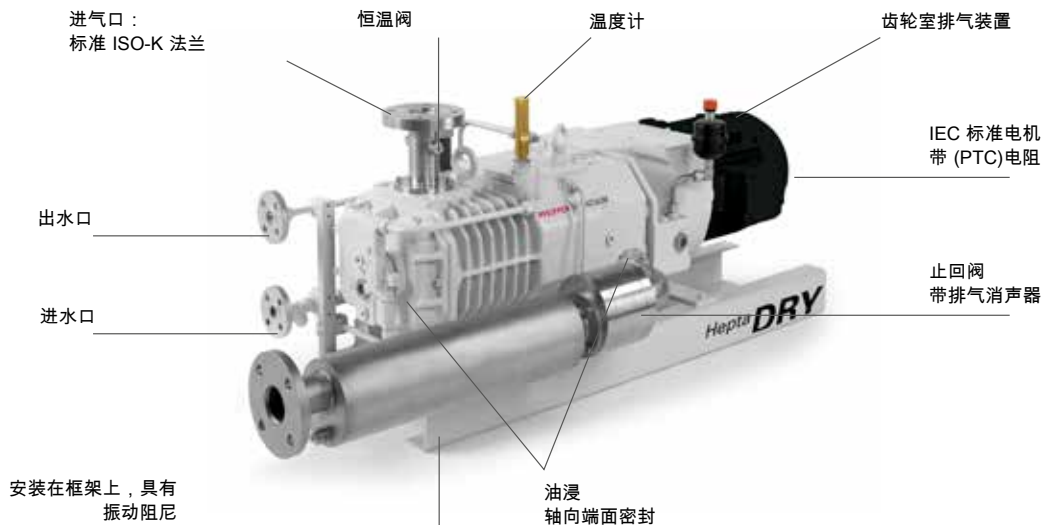


图 4.8 : 具有连接和配件的 HeptaDry

在恒温冷却中，水流量将取决于以下参数：入口压力、气体类型、转速和泵大小。由于水冷却，几乎没有热被耗散到大气中。这减少了空气调节系统的热负荷并降低其能量消耗。

螺杆泵的应用概述：

- 干燥、冷冻干燥
- 电子束焊接
- 冶金
- 涂层
- 预抽
- 化学应用

#### 4.4.3 产品概览

HeptaDry 是干式螺杆泵，用于要求高体积流量的低、中真空范围。该产品系列的抽速范围从 100 到 600  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。可实现低于 0.1 hPa 的极限压力。其抽速和可达到的最终压力取决于电源频率。

不管所涉及的是什么型号，HeptaDry 泵可在其特定工作范围内连续操作。由于泵内各个密封空间之间的返流越来越强，其有效抽速在  $p < 1$  hPa 的压力范围内下降。对于抽速在高压下的下降也有着类似的原因，因为在这种情况下，气体通过内部压缩到压力超过大气压，且返流因高压差而显著增加。

与泵一起的标准设备包括：入口滤网、带恒温阀和温度计的水流冷却器、消声器，带止回阀和带减震器的框架式设计。该泵由适合于 50 和 60 Hz ( 3,000 或 3,600 rpm ) 的三相、温度监控异步电动机驱动。

#### 4.4.4 配件

灰尘分离器 (SAS) 可用作螺杆泵的配件。可提供各种类型，以适合于泵上的连接法兰。  
D1 类型二酯油用作工作液。

| HeptaDry 系列 |                                      |                                      |                         |                         |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 型号          | 50 Hz 时的抽速                           | 60 Hz 时的抽速                           | 50 Hz 时的极限压力            | 60 Hz 时的极限压力            |
| Hepta 100 P | 110 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 130 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa | $< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa |
| Hepta 200 P | 220 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 265 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa | $< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa |
| Hepta 300 P | 320 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 410 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa | $< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa |
| Hepta 400 P | 350 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 420 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa | $< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa |
| Hepta 600 P | 525 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 630 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-2}$ hPa | $< 1 \cdot 10^{-2}$ hPa |

表 4.13 : HeptaDry 性能数据

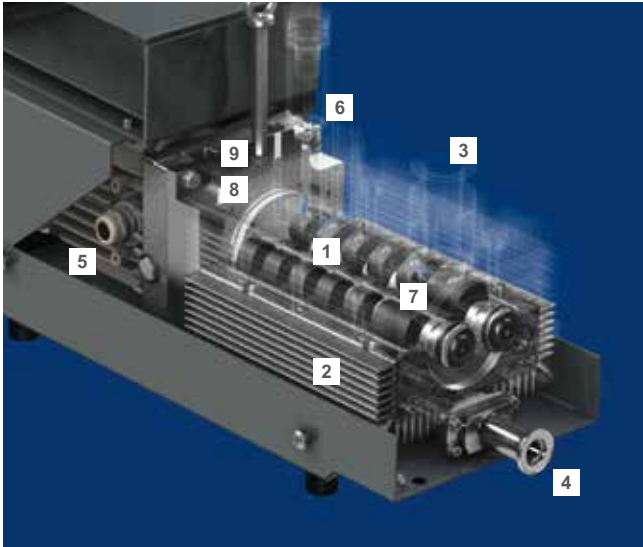


图 4.9：风冷式多级罗茨泵的工作原理

## 4.5 多级罗茨泵的真空获得

### 4.5.1 设计与工作原理

单级和多级罗茨泵属于容积式干式真空泵的范畴。它们也被称为罗茨泵或罗茨鼓风机。本章描述的多级罗茨泵属于ACP范围（阿迪克森清洁泵）。

在一个泵中，两个同步反向旋转的转子(1)在单个壳体中非接触旋转（图 4.9）。该转子具有8字形结构，且相互之间有狭窄间隙。有四到六对转子位于转子轴上。每个转子腔通过带有吸/排气口的定子盘与其他转子分离开来。输送的气体从入口(3)被抽到出口(4)。

一个轴由电机(5)驱动。另一轴通过齿轮箱中的同步齿轮(6)同步进行。润滑仅限于齿轮箱和低压和高压处的轴承(9)，其与吸入室(7)通过轴封(8)密封开来。

由于吸入室中无摩擦，罗茨真空泵可在高达 6,000 rpm 的高转速下操作。转子质量围绕轴线对称分布还产生完美的动态平衡，这意味着，尽管其转速很高，泵的运行却极为安静。

### 4.5.2 应用

ACP 范围内的干式、风冷式多级罗茨泵基于设计和性能参数，通常可直接替代同抽速范围内的油润滑旋片式真空泵。

多级罗茨泵的优势包括：

- 在气体抽气腔区域没有润滑剂
- 无油或粒子污染
- 无工作液处理问题
- 具有长期稳定的恒定真空参数
- 因易损件的最小数量而实现的高可靠性
- 具有一相或三相变频器恒定工作参数
- 风冷、无安装费用和水冷操作成本
- 可针对高入口压力连续运行
- 长维修间隔产生低运营成本
- 采用变频器的遥控选择
- 因可调节 rpm、降低的噪音水平、能源利用和电源输入而理想地适用于更多应用
- 最小泄漏率
- 涡轮分子泵和罗茨泵理想的前级泵
- 认证符合 UL/CSA 和 SEMI S2 要求

### 蒸汽

如果没有额外的措施，由于其相对较低的工作温度，使用无油泵则有泵内发生冷凝的危险。与旋片式真空泵类似，多级罗茨泵装有气镇阀，以增加泵的水蒸汽耐受性和抽出水蒸汽的能力。泵内形成冷凝物增加了极限压力，导致腐蚀，且最坏情况下，将导致泵故障。

在无气镇的情况下，ACP 泵可输送水分含量高达 5% 的介质。使用标准的泵气镇，水蒸汽耐受性为 10 hPa 且抽水蒸汽的能力为  $100 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在特殊泵版本（CV，可冷凝蒸汽）增加气镇量，可实现水蒸汽耐受性约为 100 hPa，水蒸汽的抽出能力为 700 至  $1,000 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ，这取决于环境温度

至于旋片式真空泵：在排空蒸汽前，泵体必须用气镇预热至少半个小时。较高温度的泵体减少冷凝。减少冷凝的其他方法包括获得尽可能低的出口压力及单独排出冷凝物。必须使用垂直排气管道防止出口处的背压。如有有萃取系统，应将出口与其连接。

### 灰尘和粒子

如果没有对大粒子物质的进入进行控制，在最坏情况下，ACP 系列多级罗茨泵可堵塞并彻底损坏。为此，在舍尘工艺或如玻璃制造中，在进气侧安装过滤器以防止造成破坏

### 腐蚀性气体

ACP 系列泵不适合于抽空大量的腐蚀性气体。在这方面多级罗茨泵可用于半导体、太阳能和涂层行业中的腐蚀性气体工艺（见第 4.6 节）。然而，ACP 系列泵至少可用于处理少量的腐蚀性气体。在这种情况下，使用具有惰性气体净化的泵，其中，采用惰性气体保护轴承，且工艺气体通过在一个泵腔中引入惰性气体进行稀释。

### 泄漏率

其高气密性能够保证多级罗茨泵的长期使用以及昂贵气体的循环使用（ $^4\text{He}$ 、 $^3\text{He}$ 、同位素标记气体）成为最佳解决方案。

### 轻气体和高真空

多级罗茨泵通过出口阀以防止蒸气和氧气扩散回到吸入室，这在抽出腐蚀性气体应用中会导致泵内发生化学反应。如果需要产生真空以防止轻气体聚集和回流扩散，在应用中，必须定期将该阀打开（如通过气镇）。

即便排气处的粗真空或气镇的使用就足以抽出连续的氦气体流量，如在蒸发器低温恒温器中，几乎与氦或空气具有相同的功能。

在载气禁止使用的应用中（如在闭环回路应用中），泵出口处必须有真空。

### 4.5.3 ACP 产品概览

ACP 是风冷、干式多级罗茨泵，应用于低、中真空范围。该产品的抽速范围从 14 到  $37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。可实现低于 0.1 hPa 的极限压力。其抽速和可达到的最终压力取决于通过变频器选择的转速。

不管所涉及的是什么型号，ACP 泵可在其特定工作范围内任何压力下连续操作。

通过在泵的不同位置增加气镇或密封气体，ACP 泵进行不同的配置和优化适用广泛的应用范围。

#### 4.5.3.1 风冷式多级罗茨泵

表 4.14 中显示的版本可配置三相或单相电源连接。不论电源电压和频率如何，所有的泵都配有变频器。

#### 4.5.3.2 配件

##### 粒子过滤器 (IPF)

如果存在过程相关的粉尘和粒子，泵必须配有上游粒子过滤器，以防止泵堵塞。可提供各种类型，以适合于泵上的连接法兰。有效过滤网孔为  $25 \mu\text{m}$ 。根据要求，可提供其他过滤器类型和网孔尺寸。

风冷式多级罗茨泵的配置

| 型号     | 标准版本 |       |             | 适用于腐蚀性气体的“G”版本 | 适用于可冷凝介质的“CV”版本 |             |
|--------|------|-------|-------------|----------------|-----------------|-------------|
|        | 无气镇  | 手动气镇阀 | 带入口过滤器的永久气镇 |                | 手动气镇阀           | 带入口过滤器的永久气镇 |
| ACP 15 | ■    | ■     | ■           | ■              |                 |             |
| ACP 28 | ■    | ■     | ■           | ■              | ■               | ■           |
| ACP 40 | ■    | ■     | ■           | ■              | ■               | ■           |

表 4.14：风冷式多级罗茨泵的可能配置

风冷式多级罗茨泵

| 型号        | 抽速                                   | 有/无*气镇的极限压力                     | 应用  |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------------|---|
| ACP 15    | $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$   | 非腐蚀性气体、氩、涡轮分子泵的前级泵                            |
| ACP 28    | $27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$   |   |
| ACP 40    | $37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$   |   |
| ACP 15    | $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ | 湿度 > 5% 的标准应用或腔室壁的解吸，低温泵再生                    |
| ACP 28    | $27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ |   |
| ACP 40    | $37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ |   |
| ACP 15 G  | $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ | 预抽室和传输室、涡轮分子泵的前级泵、腐蚀性气体浓度低的过程气体、含尘过程气体、氧和氧化介质 |
| ACP 28 G  | $27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ |   |
| ACP 40 G  | $37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ |   |
| ACP 28 CV | $27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ | 干燥、蒸馏、有蒸发流体的应用                                |
| ACP 40 CV | $37 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}^*$ |   |

表 4.15：风冷式多级罗茨泵的性能数据



### 消声器 (ES)

出口侧的消声器 ES 25S 降低了泵的噪音水平，特别是在接近大气压的高工作压力下。它对接近极限压力下泵的噪音水平无任何影响。

### 声音保护罩 (NRC 和 SEK)

声音保护罩降低了 ACP 泵的声压水平，即使在工作压力接近极限压力时。NRC 型罩将声压降低了约 5 到 6 dB(A) 并将最高环境温度限制在 35 °C。SEK 型罩将声压降低了约 10 dB(A) 并将最高环境温度限制在 30 °C。

## 4.6 多级罗茨泵的真空工艺

在半导体行业中，微电子元件构建在单晶体的平面上。在生产过程中，具有特定电性能（绝缘子、导体和具有一定导电性能的层）的涂层被应用在彼此的顶部。由于相邻层的不同性能，创造了诸如晶体管、电容器、电阻器等电子元件。

真空技术在集成电路生产过程中用于许多不同的工艺，如掺杂半导体基体材料、建立层、结构以及在分析中。生产在无尘室中进行。真空泵直接无尘室或在无尘室下方单独泵楼（地下一层）中的生产系统上使用。

操作过程对所用的泵有不同的要求。无腐蚀性、毒性或可冷凝介质的工艺可使用没有特别配备用于处理腐蚀性气体的泵进行操作。这些工艺包括

- 预抽室和传输室
- 无反应性气体环境的金属 PVD（物理气相沉积）
- 离子注入机（光束线和终端站）
- 在真空或惰性气体环境下的退火（烘烤晶体缺陷）
- 晶圆检测

所使用的泵（L 系列）在第 4.6.3 节中进行了描述。在无尘室中直接使用泵意味着，连泵的地下室的前真空管道和所需的任何加热不仅可以省掉，而且可减少流阻损失以及可实现具有高过程稳定性的可重复安装。

中等应用环境可以涉及到易于冷凝但不产生粒子的腐蚀性化学品。这种类型的应用包括不同的工艺，如氧化、灰化

- RTP（快速热加工；在具有高等级、使用卤素灯照明的高温过程中进行的晶圆加工）
- 多晶硅、铝或钨的干蚀刻
- 离子注入机（源）
- 某些 CVD 工艺

所使用的泵（P 系列）在第 4.6.4 节中进行了描述。出于安全原因，且由于靠近废气净化系统，泵通常安装在地下室。

最苛刻的工艺（苛刻工艺、H 系列泵）使得有必要处理粒子、高腐蚀性化学物质或反应副产品和化学物质或易于冷凝的反应副产品。此类工艺的例子有：

- 氮化钛的 MOCVD（金属有机化学气相沉积）
- 电介质的各向同性干蚀刻
- 二氧化硅的 HDP CVD（高密度等离子体化学气相沉积）
- 二氧化硅的 SACVD（亚常压化学气相沉积）
- 二氧化硅的 SACVD HARP（亚常压化学气相沉积，高纵横比工艺）

涡轮分子泵（见第 4.9.3.2 节）和干泵组合有时也用于这些工艺。

先前提到的用于 P 和 H 系列的工艺使用具有以下性质的化学物质，例如

- 高毒性，如砷化氢 (AsH<sub>3</sub>) 或磷化氢 (PH<sub>3</sub>)
- 高腐蚀性，如等离子体活化氟化氮 (NF<sub>3</sub>)、六氟化硫 (SF<sub>6</sub>)、氟碳等
- 高氧化性能，如等离子体活化的氧或臭氧
- 金属有机物化学物质，例如硅酸四乙酯 (TEOS)、三甲硅烷基氨 (TSA)

在定义长期稳定性和拥有最低成本可行解决方案时，一定要具备广博的真空技术和真空工艺技术知识。例如，这包括对泵体工作温度的定义，以防止因低温产生的冷凝、以及在过高温下形成粉末或化学物质在泵体中滞留时间过长而造成的泵堵塞。此外，精确控制温度模式通常不仅是泵本身所必需的，而且是生产设备、前级真空管道和排气管道所必需的。

太阳能行业和显示器制造中的真空工艺通常类似于半导体行业中所用的工艺。在这些行业领域，由于涂层的表面较大，但是气体流量较高，故要求泵具有相应的高抽速。

作为一个例子：在太阳能行业中，钝化表面的抗反射层和氮化硅层在等离子 CVD 工艺中被应用于太阳能电池，以更好地获得太阳光转化率。这些不仅沉积在所需底面上，而且沉积在真空室壁上。当壁上积累的层不再允许受控的真空工艺时，工艺室必须进行清洗。这通过带有强氧化剂  $\text{NF}_3$  的原位等离子清洗来实现。如果泵体（在这种情况下为 AD 73KH，见第 4.6.5 节）在过低的温度下操作，如图 4.10 所示，则反应产物六氟硅酸铵将沉积在泵内。理想的过程控制不仅包括一个与过程兼容的泵和一套经过尝试和测试的工作参数，而且还包括：

- 加热的前真空管道，以防止该部位出现冷凝
- 在垂直前真空管道的情况下，防止物体落入泵体的保护装置（例如，在垂直下端具有盲板法兰且与泵具有水平出口的 T 形件）
- 防止粒子堆积的软启动阀
- 用于泵在高温下连续操作（即在前真空管道上进行保养工作的过程中）的泵入口处的切断阀
- 前真空管道中的检漏口，尽可能靠近前级泵。泄漏会导致二氧化硅粒子的形成。
- 泵和排气净化系统之间的加热排气管道
- 排气净化系统



图 4.10：在温度过低的罗茨泵中六氟硅酸铵  $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$  的冷凝

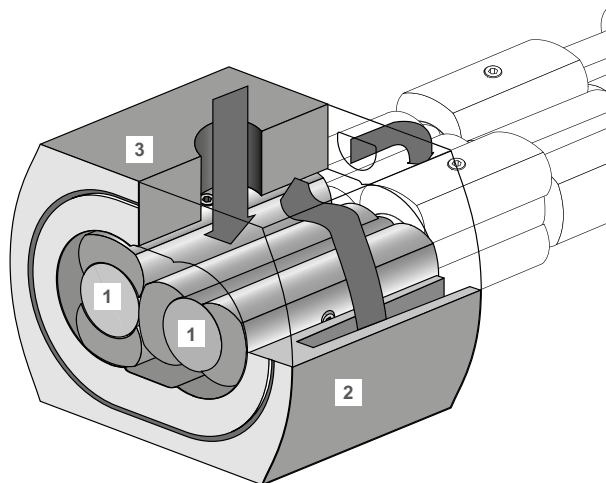


图 4.11：多级罗茨泵的工作原理

#### 4.6.1 设计与工作原理

如先前章节中所描述的泵一样，本节中描述的罗茨真空泵属于在技术上容积式干泵的范畴。在本节中，我们讨论适用于腐蚀性工艺的泵以及源自这些用于预抽室和传输室的泵。

在该泵中，两个同步反向旋转的转子 (1) 在单个壳体 (2) 中非接触旋转 (图 4.11)。该转子具有 8 字形结构，且相互之间由窄间隙分离开。有四到六对转子位于转子轴上。每个转子腔通过带有排气口的定子盘与其他转子分离开。输送的气体从入口 (3) 被抽到出口。垂直泵送方向在流程泵中始终很重要。因此，各级之间的空间可用作粒子的排出通道。这避免泵堵塞的最佳方式。

由于吸入室中无摩擦，罗茨真空泵可在高达 6,000 rpm 的高转速下操作。转子质量围绕轴线对称分布还产生完美的动态平衡，这意味着，尽管其转速很高，泵的运行却极为安静。

为了避免化学物质在泵和消声器中冷凝，可通过调节冷却水流量或通过具有加热套的电加热进行加热。如果出口消声器分开配置，这需要一个额外的加热套。将出口消声器直接集成在泵体上不仅通过省掉一个额外的加热器来降低能耗成本，而且还使安装更容易。

#### 4.6.2 应用

适用于腐蚀性气体的多级罗茨泵的优势包括：

- 通过调节温度、净化气体流量和转速对相关真空工艺进行理想的调节
- 在气体抽气腔内没有润滑剂
- 无工作液处理问题
- 高可靠性和系统正常运行时间
- 长维修间隔、低能耗和冷却水与冲洗气体介质消耗低，因此具有较低的运行成本
- 占用空间小，具有良好的集成性和节能性
- 丰富的控制选项，本地或远程控制，集成在一个监控网络中
- 最小泄漏率
- 在腐蚀性工艺中是涡轮分子泵和罗茨泵理想的前级泵
- 符合 UL/CSA 和 SEMI S2 认证要求

#### 灰尘和粒子

流程泵接触从工艺室和前真空管道被输送到泵中的粒子。此外，泵本身内副产物反应的冷凝可能产生的粒子和沉淀物必须也能容忍。理想情况下，通过使用可调节加热和控制温度模式，可避免粒子和沉积物的形成。通过在垂直方向抽吸，任何从泵级中掉出的粒子保留在下一级的排污口通道中。在接下来的排气和随后的抽空之后，粒子将通过气体被排入到紧接着的下一级中。此排除机构将生成的 98% 以上的粒子从入口排出到出口。这意味着，可在泵出口处提供一个中央排气净化系统，它不仅捕捉和处理过程化学物质，而且捕捉和处理粒子。在腐蚀性、毒性和可冷凝介质的真空解决方案中是可能的，就可避免进气侧上使用高保养阱和过滤器。

#### 腐蚀性气体

P 和 H 系列的多级罗茨泵专为半导体、太阳能和涂层行业中腐蚀性气体过程而设计。金属转子和定子以及泵的弹性体材料均是由高度耐腐蚀材料制成的。

#### 泄漏率

高气密性以及防止气体通过止回阀从周围空气或排气净化系统回扩的性能使得多级罗茨泵成为腐蚀性气体应用的完美解决方案。封装电机也是防漏概念的一部分。

#### 4.6.3 预抽非腐蚀性气体

ACP 120 是水冷式多级罗茨泵的入门级机型。ACP 系列泵不适合于抽空大量的腐蚀性气体。然而，ACP 系列泵至少可用于处理少量的腐蚀性气体。在这种情况下，使用惰性气体，其中，采用惰性气体幕保护轴承，且工艺气体通过在泵级中引入惰性气体进行稀释。

ACP 120 即可作为独立泵工作也可与罗茨泵组合作为 ACG 600 泵组进行工作，该泵站是工业应用的理想解决方案，且受益于半导体行业腐蚀性气体版本设计。ACP/ACG 泵通过其无摩擦设计非常适合于清洗过程。它们实现了优异的长期稳定性和长的维护间隔。



图 4.12 : ACP 120

半导体行业的锁泵在其命名中用“L”代表“预真空锁”。与上述的 ACP 120 相比，它们配备了壳体 and 调节器。不管电源电压和频率如何，变频器确保了整体性能参数的稳定性。

L 系列泵装有运行时间计数器、状态灯，并可在本地和远程控制模式中任一模式下进行操作。

入口和出口法兰装在泵的后部以及输入输出接口处，这使其可连接至半导体生产设备的控制单元。串行接口可任选用于启动该泵，例如，要连接至监控网络。水冷却和可选的节能选项连接也位于泵的后部（见图 4.13）。

集成在泵壳中的可选节能选项（节能，ES）将泵耗电量减少了 50%。因此，操作者的运行成本显著降低。除节能之外，A 100 L ES 可实现极限压力为  $7 \cdot 10^{-4}$  hPa。噪音水平也降低了 3 dB(A)。

通过保持泵的表面不受约束，单元也可堆叠起来，因此最大限度地减少在半导体晶圆厂无尘室或地下室中所占的空间。得益于其最小占用空间、可堆叠性，即使在大气压下的高抽速、节能选项、低极限压力和高可靠性与长期稳定性组合，L 系列是所有预抽过程的理想解决方案。

低的最终压力和降低了的噪音水平使其对分析和研发应用极具吸引力。

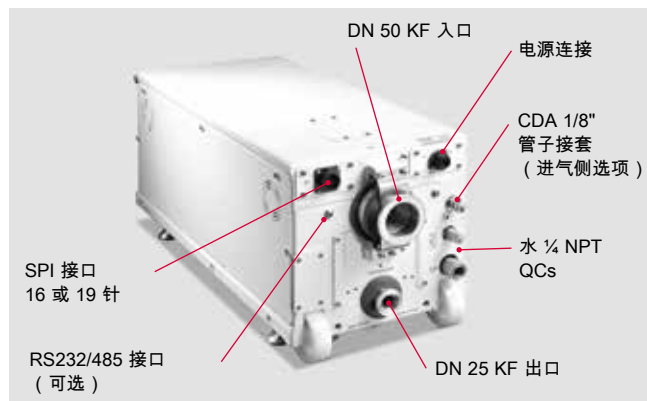


图 4.13：100 L 后侧的连接口

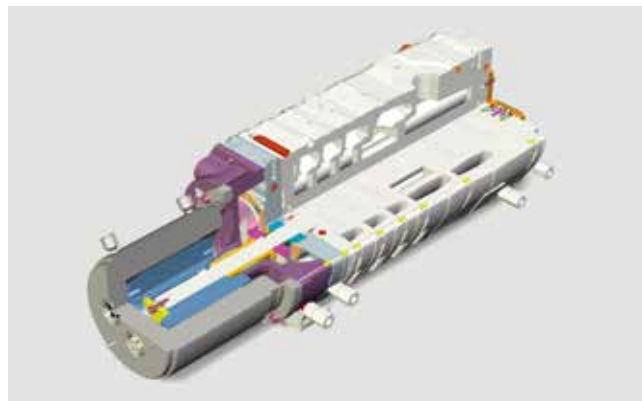


图 4.14：203 H 的横截面图

#### 4.6.4 化学工艺

在涂层工艺中，特别是半导体生产和太阳能行业中，如本章介绍中所说明的一样，真空泵的耐蚀性具有重要的意义。除工艺兼容性外，占用空间小和低运行成本是特别重要的泵性能参数。与先前型号相比，P 系列通过降低达 53% 的电源输入满足了这些要求，同时保持相同的占用空间。

该泵系列是基于 A 103 P 干式真空泵。我们已采用了该系列的两个型号并辅以罗茨泵用于工艺压力范围内提高了抽速和气体流量。由于 A 103 P 的六级设计和节能电机，电源输入保持在低水平。A 103 P 的六级设计降低了各级之间的差压，也降低了泵的电源输入。除六级外，大型进气级和高转速代表高抽速和低极限压力。

将消声器直接安置在泵体上形成紧凑的设计，并通过泵体对消声器直接加热而无需额外的加热套实现了节约能源。温度控制和连续检测整个泵的受热是必要的，以防止反应副产物的冷凝。

由于 P 系列的待机选项，不仅泵使用较少的冷却水，而且还减少过程操作之外的冲洗气体消耗，这导致运行成本的降低。

广泛的活化和控制选项不仅允许手动控制模式，还允许通过系统控制和监控网络连接进行控制。重要参数可直接输出并导致用于统计评估。

P 系列符合 CE 和 SEMI S2 要求。

#### 4.6.5 苛刻化学工艺

工艺的持续发展，特别是在半导体和太阳行业中，对所用真空泵不断地提出新的要求。基于多级罗茨泵的可靠技术，普发真空凭借其 H 系列为这些行业领域中的苛刻工艺提供完美的解决方案。与先前泵解决方案相比，过程压力下的气体流量、粒子耐受性和耐冷凝性已显著提高。

与 P（用于一般工艺）系列泵一样，H 系列（用于苛刻工艺）泵配备了温度控制和惰性气体冲洗系统。但是，用于优化工艺调节的参数范围比 P 系列泵更广。

该泵系列是基于 A 203 H 大干式真空泵。我们已采用了该系列的另外三个型号并辅以罗茨泵用于过程压力范围内提高了抽速和气体流量。由于使用了特殊材料，这些泵的腐蚀性气体设备使其还可使用强氧化剂，如  $\text{NF}_3$ 。该泵宽泛的温度范围使其能够适应各种不同的工艺，如低温下的钨沉积或高温下的氮化物沉积。高效的电机产生低压力下的能源节约，并因其高扭矩，在泵停机后能提供良好的再启动性能。

得益于它们相同的接口和相同的连接，A3H 系列型号可与 P 系列泵理想兼容。这意味着，如果现有生产设备上发生工艺改变，通过更换泵，使用最小的安装工作就可获得优化的泵解决方案。

使用第三级罗茨辅助 A 1803 H 型号，可提供紧凑、极其强大的抽气系统，具有最大抽速，适合于 CVD 工艺。AD 73 KH 在干式真空泵上采用变频控制的罗茨泵，罗茨泵在其本身的框架内具有额定抽速  $4,500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于模块化结构，



图 4.15 : 1503 H 工艺泵组

## 4.6.6 产品概览

### 4.6.6.1 水冷却工艺泵

ACP 120 / ACP 120 G 的抽速和最终压力可通过将其与罗茨泵组合而实现进一步增加。优化的机组可用于更大容器的抽空。

为电源频率为 50 Hz 标准所提供的技术数据不超过  $1 \text{ m}^3$ 。A 203 H 和 A 1803 H 型泵的特殊版本适合于被抽容器体积高达  $50 \text{ m}^3$ 。

安装很容易，且系统中的各个泵可单独取出，并在维修工作进行的情况下进行保养。进气侧的罗茨泵变频器允许在宽泛的气体流量范围对工艺参数进行调整，并允许各种不同的过程气体。

普发真空不断关注行业各个领域工艺的动态发展，并在未来将继续提供优化的泵解决方案以满足这些需求。在第 8 章“污染管理解决方案”中给出了初步概述。

适用于非腐蚀性应用的多级罗茨泵

| 型号         | 抽速                                    | 有/无净化气体的极限压力  | 应用   |
|------------|---------------------------------------|---|--|
| ACP 120    | $95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $3 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$                       | 体积达 $1 \text{ m}^3$ 的预抽室和传输室、非腐蚀性气体、惰性气体、低温泵再生、抽出非腐蚀性气体涡轮分子泵的前级泵 |
| ACP 120 G  | $95 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | $9 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ with 35 slm purge gas |  |
| A 100 L    | $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $6.6 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$                     |  |
| A 100 L ES | $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $7 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$                       |  |

表 4.16 : 非腐蚀性应用的水冷式多级罗茨泵的性能数据

适用于腐蚀性应用的多级罗茨泵

| 型号       | 抽速                                    | 有/无净化气体的极限压力   | 应用                                    |
|----------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| A 103 P  | $120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $6.5 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$<br>$2.6 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ with 20 slm purge gas | 干蚀刻 (氧化物和聚酯)<br>灰化<br>剥离<br>RTP<br>注入 |
| A 603 P  | $480 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $5 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$<br>$2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ with 20 slm purge gas     |                                       |
| A 1003 P | $900 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$<br>$1 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ with 20 slm purge gas     |                                       |

表 4.17 : 腐蚀性应用的 P 系列水冷式多级罗茨泵的性能数据

适用于腐蚀性应用的多级罗茨泵 ( 苛刻工艺 )

| 型号       | 抽速                                      | 有/无净化气体的极限压力   | 应用  |
|----------|---|--|---|
| A 203 H  | $130 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | $6 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$<br>$5 \cdot 10^{-1} \text{ hPa}$ with 50 slm purge gas | 金属蚀刻<br>CVD (PECVD, SACVD, LPCVD)<br>ALD<br>取向附生<br>干蚀刻 |
| A 803 H  | $600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$   | $1 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$<br>$1 \cdot 10^{-2} \text{ hPa}$ with 50 slm purge gas |   |
| A 1503 H | $1,100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$<br>$9 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ with 50 slm purge gas |   |
| A 1803 H | $1,650 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$<br>$9 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ with 50 slm purge gas |   |
| AD 73 KH | $4,700 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $8 \cdot 10^{-4} \text{ hPa}$<br>$3 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ with 50 slm purge gas |   |

表 4.18 : 腐蚀性应用的 H 系列水冷式多级罗茨泵的性能数据 ( 苛刻工艺 )

#### 4.6.6.2 配件

##### 地震托架套件

地震托架套件使泵能够固定在其操作位置上，并防止因地震产生的位移以及防止前真空管道脱落。

##### 遥控

遥控允许在泵的集成存储器上设置和保存泵参数。泵参数可实时显示。

##### 接口

泵和系统控制之间可配置定制接口，以提供到生产设备控制单元的连接。

##### 冷却水连接

泵的冷却水连接和连接冷却水管道的适当快卸接头耦合可提供黄铜和不锈钢版本，以提供最好的耐腐蚀性。

所列配件不一定适用于本节所描述泵的所有型号。根据要求，可提供其他配件，如用于其他接口、电气安全、连接或安全运送的配件。

## 4.7 罗茨真空泵

### 4.7.1 设计与工作原理

的工作原理。在罗茨真空泵中，两个同步反向旋转的转子(4)在壳体中非接触旋转(图4.16)。该转子具有8字形结构，且相互之间以及与转子之间由窄间隙分离开。其工作原理类似于具有双齿齿轮的齿轮泵，该泵将气体从入口(3)送到泵出口(12)。一个轴由电机(1)驱动。另一轴通过齿轮箱中的一对齿轮(6)同步转动。润滑仅限于两个轴承和齿轮箱，它们通过具有压缩环的迷宫密封(5)与吸入室(8)密封开来。由于吸入室中无摩擦，罗茨真空泵可在高转速(1,500 – 3,000 rpm)下操作。无往复运动质量还能提供无故障的动态平衡，这意味着，罗茨真空泵尽管其具有高转速，但运转极其安静。

### 设计

转子轴轴承安排在两个侧盖中。它们在一侧被设计为固定轴承，在另一侧被设计为可动(松动)轴承，以对应壳体和转子之间不平衡热膨胀。通过飞溅圆盘将油甩到轴承和齿轮中进行润滑。标准版本上驱动轴外端浸入密封油中、FPM 径向轴密封环密封。为保护轴，密封环在保护套内，该保护套在磨损后可更换。如果与外部之间需要进行严密密封，泵还可通过永磁体耦合方式驱动。该设计泄漏率  $Q_l$  小于  $10^{-6} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ 。

### 泵受热性能

由于罗茨泵没有内部压缩或排气阀，当吸入室打开时，气体回流到吸入室，然后必须按出口压力再排放。由于这种影响，特别是在入口和出口之间存在高压差的情况下，产生高能量耗散，这导致泵在低气体流量下显著变热，而低气体流量只能传送少量的热。与壳体相比，旋转罗茨转子相对难以冷却，因为它们实际上是真空绝热的。因此，它们的膨胀比壳体厉害。为防止接触或咬粘，最大可能的压差以及耗散能量通过溢流阀(7)进行限制。该阀连入口侧和泵直通通道的压力侧。在超过最大压差且最大压差允许较大或较少部分的进气从压力侧流回到入口侧时(这取决于抽气量)，重力式阀板打开。由于受限于压差，标准罗茨泵不能向大气压排放，而需要前级泵。然而，带有溢流阀的罗茨真空泵甚至可在大气压下与前级泵一起开启，从而在一开始就增加其抽速。这缩短了排空时间。

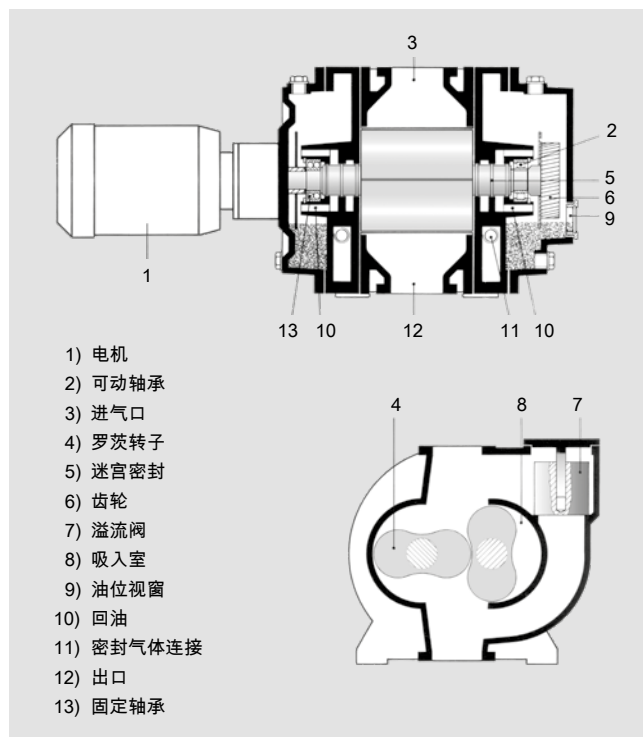


图 4.16：罗茨泵的工作原理

## 前级泵

单级或双级旋片泵或外部叶片泵用作油润滑前级泵。螺杆泵或多级罗茨泵可用作干式前级泵。诸如此类的泵组合可用于在低、中真空范围内要求高抽速的所有应用。液环泵也可用作前级泵。

## 气体循环冷却罗茨泵

为使罗茨真空泵在大气压下工作，有些型号是气冷的且没有溢流阀（图 4.17）。在这种情况下，从出口法兰（6）流经冷却器（7）的气体被允许再次进入吸入室（4）。这种人为产生的气体流量使泵冷却，使其能够对着大气压缩。通过罗茨转子控制气体的进入，因而无需任何额外的阀。即使在极限压力下操作时，也没有热超载的可能性。

图 4.17 显示了气体循环冷却罗茨真空泵的横截面。气体流动方向自上而下是垂直的，从而使液体或固体粒子夹带在入口流中向下流动。在第一阶段中，吸入室（3）通过转子（1）和（2）的旋转打开。气体通过入口法兰（5）流入吸入室，压力为  $p_1$ 。在第二阶段中，吸入室（3）沿着入口法兰和压力法兰方向被封闭住。冷却气体的入口开口（4）通过第三阶段的转子旋转而被打开。气体充入吸入室（3）达到出口压力  $p_2$ ，并且气体被推向压力法兰。最初，吸入体积并未随着罗茨转子的旋转运动而发生改变。气体通过流入的冷却气体进行压缩。罗茨活塞现在继续旋转（第四阶段），且该运动推动现在已经压缩的气体经过冷却器（7）到排出侧（第五阶段），压力为  $p_2$ 。

气冷罗茨泵可在 130 至 1,013 hPa 的入口压力范围内使用。由于吸入室内没有润滑剂，它们不排出任何雾气或污染物。将两个此类泵串联连接可使极限压力降低至 20 到 30 hPa。当与其他罗茨真空泵组合使用时，极限压力可以降低至中真空范围。

## 抽速和压缩比

抽速和压缩比是罗茨泵的特征性能。理论抽速  $S_{th} = S_0$  是泵在无反压力下抽出的体积流量。在无气体抽出（入口法兰关闭）操作时的压缩比  $K_0$  取决于出口压力  $p_2$  抽速范围从  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  到几千  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。典型的  $K_0$  值在 10 和 75 之间。

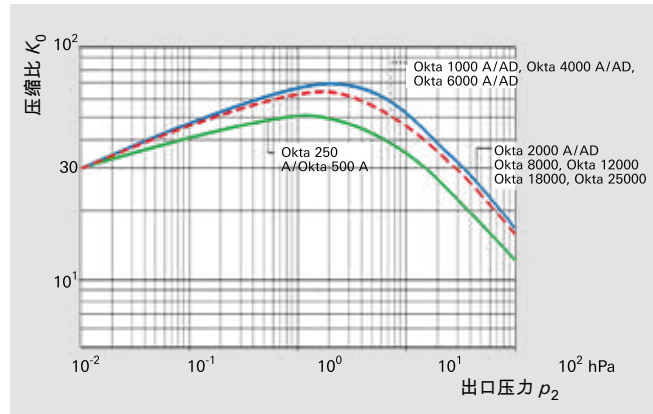


图 4.18：罗茨泵空载空气压缩比

压缩比受到两方面的不利影响：

- 转子和壳体之间间隙的返流
- 通过转子表面吸附而沉积在出口侧并在转向吸入侧后又重新解吸的气体。

在出口压力为  $10^{-2}$  至 1 hPa 的情况下，分子流在密封间隙中占主导地位，由于其低流导，这导致少量回流。然而，通过吸附和脱附返回的气体体积与泵送的气体体积相比相对较高，降低了压缩比。

在 1 至 10 hPa 范围内， $K_0$  是最高的，泵密封间隙在低入口压力下分子流仍然占主导地位，因此回流较低。由于通过吸附的气体输送不是压力的函数，它远没有通过抽速输送的气体流量来得重要。

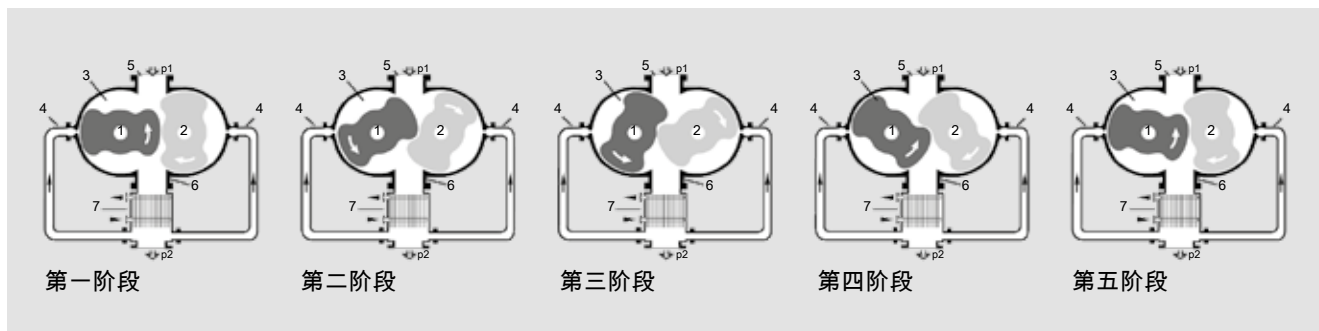


图 4.17：气冷罗茨泵的工作原理

在压力超过 10 hPa 时，间隙中出现层流且间隙流导显著增加，这导致压缩比下降。这种影响在气冷罗茨泵中特别明显，该泵实现的压缩比仅约为  $K_0 = 10$ 。

间隙宽度对压缩比具有重大影响。然而，由于转子与壳体不同的热膨胀，它们不得低于一定的最小值，以避免转子和定子接触。

#### 4.7.2 应用

由于其低压缩比，罗茨泵必须始终作为泵组合进行操作，用于产生真空。它们可实现的最终压力将是所选前级泵极限压力产生的结果。由于存在通过吸附的气体返流，在范围低于  $10^{-4}$  hPa 下使用罗茨泵不再可行。具有不同前级泵罗茨泵机组的抽速和极限压力表现如图 4.19 所示。该曲线清楚地表明，这种泵组合的抽速上升了 8 倍，其极限压力相对于前级泵下降了 15 倍。

##### 4.7.2.1 前级泵选择

###### 旋片泵

如果因工艺对功能产生不利影响的可能性不大，则旋片式真空泵是罗茨真空机组最具成本效益的前级泵。在恒定抽速下，旋片式真空泵在广泛的压力范围内具有极限压力大约为  $p < 1$  hPa。在气镇阀开启时，罗茨真空机组实现的极限压力大约为  $10^{-2}$  hPa。使用这些类型的泵站，可抽出水蒸气以及很多溶剂蒸汽和气体具有足够高蒸汽压且没有化学分解泵油的其他蒸汽。其中的例子包括醇类、卤代烃类以及光的正构烷烃等。

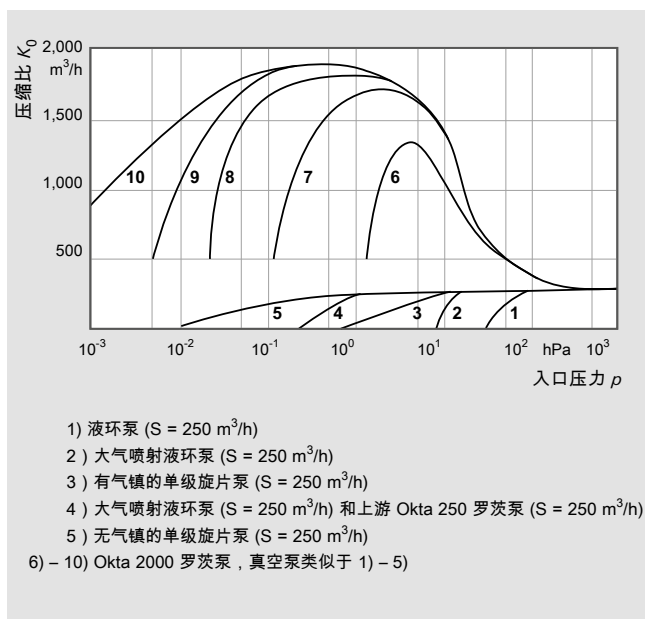


图 4.19：使用 Okta 2000 和各种前级泵机组抽速

###### 液环真空泵

液环真空泵是抽出蒸汽的合适解决方案，而此类蒸汽以化学方式侵蚀和分解前级泵油或具有如此低的蒸汽压以致无法避免前级泵内发生冷凝，尽管有气镇。然而，它们只能实现通过工作液蒸汽压对应的极限压力。如果使用  $15^\circ\text{C}$  的水，液环真空泵预计的极限压力约为 20 hPa，然而已经在气蚀范围内工作。气蚀在接近泵极限压力时发生。工作液在进气侧蒸发，且蒸汽气泡突然在压力侧破灭。长此以往会破坏泵。通过供气无气蚀操作的液环泵实现的极限压力约为 25 至 30 hPa，罗茨泵和液环泵组合实现的极限压力约为 1 hPa。在抽空对环境有害的物质时，液环真空泵不应与淡水一起使用。在这种情况下，必须提供封闭的循环系统来使合适的工作液经过冷却了，以交换压缩热。

###### 使用气体喷射装置的液环真空泵

罗茨真空泵、气体喷射装置和液环真空泵组合实现 0.2 hPa 的极限压力。如果需要实现较低的压力，必须在上游连接附加的罗茨真空泵。

###### 气体循环冷却罗茨真空泵

由于罗茨真空泵在技术上是干式泵，所以建议无液封吸入室时使用该泵。

它们的应用包括：

- 萃取和压缩低温恒温器上的氦
- 萃取和压缩  $\text{SF}_6$
- 各种各样工艺中各种气体和蒸汽的清洁回收，如蒸馏
- 抽空分子筛等
- 在闭环系统中抽空和循环有毒物质
- 抽空体积非常大的容器

使用气冷罗茨泵的罗茨机组可配置各种不同的入口特征构造。在极端情况下，在 1,000 hPa 至  $10^{-3}$  hPa 的整个压力范围内可以实现基本恒定的抽速，且各个泵级可按 2:1 至 3:1 的比率来选择。然而，要实现这一点，罗茨真空泵必须配备相应强大的电机，并且必须提供向大气侧的出口阀，而不是溢流阀。



## 螺杆泵

凭借 HeptaDry 螺杆泵，在技术上可提供完整产品线的干式泵，其提供抽速范围为  $100$  至  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。作为独立泵（也见图 4.4），它们在低、中真空中涵盖了广泛的压力范围。由于其内部压缩，它们可在  $0.1$  至  $1,000 \text{ hPa}$  整个入口压力范围内以相对低的驱动电力连续进行工作。在与 Okta-Line 罗茨泵组合使用时，甚至可实现  $5 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$  的极限压力。

## 多级罗茨泵

ACP 范围内的多级罗茨泵实现了紧凑型机组，抽速高达  $285 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。将 ACP 前级泵与罗茨泵组合使用，可实现最终压力高达  $5 \cdot 10^{-3} \text{ hPa}$ 。

罗茨泵站的腐蚀性气体版本在第 4.6 节中进行了描述。

### 4.7.3 产品概览

可提供很多不同版本的罗茨泵：

- 带轴封环和铸铁壳体的标准泵
- 带磁耦合和铸铁壳体的严格密封标准泵（M 系列）
- 带轴封环（G 系列）或磁耦合的气体循环冷却罗茨泵
- 用于潜在爆炸危险环境和爆炸气体排量的罗茨泵（ATEX 系列）

#### 4.7.3.1 标准泵

标准泵的特征性能数据如表 4.19 所示。这些性能数据也适用于所有其他系列。最大差压是溢流阀产生的结果。在 ATEX 系列中，最大差压小于其他系列，以便满足 ATEX 准则规定的温度要求。这些泵的壳体由灰铸铁制成，且在  $100 \text{ kPa}$  的超压下经过测试。大气侧的密封件包括径向轴密封环。标准泵的特点是其坚固、紧凑的设计以及高压比，这产生高速的泵组合，即使是使用小型前级泵；从而能够提供短的抽空时间。垂直的流动方向使该泵对灰尘和液体极不敏感。

#### 4.7.3.2 带磁耦合的标准泵

M 系列可用于对密封有最严格要求且要求最长维修间隔的工艺。该系列的大部分与标准系列相同，但是，其特点是额外的严格密封的磁耦合代替了径向轴密封环。这意味着采用它在操作中基本无磨损。泵的整体泄漏率小于  $1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。这排除了油泄漏的可能性，过程气体和环境之间也不存在任何交换。M 系列标准泵适合于 Table 4.19 中显示的所有应用。此外，这些泵还可用于抽吸有毒气体的工业/化学应用以及超洁净气体应用：例如，用于半导体行业中的 CVD 和 PVD 工艺或排空预抽/传输室以及用于平板显示器的生产。M 系统可提供的大小范围从  $250 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  到  $6,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

#### 4.7.3.3 防爆泵

ATEX 系列可用于存在潜在爆炸危险环境中的工艺，或用于排空爆炸气体。

ATEX 系统可提供抽速范围从  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  到  $4,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。它们是 PTFE 密封的且由 GGG 40.3 球墨铸铁制成。它们符合 94/9/EC 类别 3G 组 IIB 温度等级 T3 X 的防爆要求。

一般而言，泵的安全操作需要额外的措施和/或部件，如：启动和关闭程序、特殊的前级泵、阻火防止器和压力传感器。整个系统的设计和操作必须符合相应的防爆法规。

#### 4.7.3.4 气体循环冷却罗茨泵

气体循环冷却罗茨泵可在无前级泵的情况下进行操作。大的压力范围和非常高的差压是该类型泵的理想操作条件。在高差压下可连续操作，因为通过压缩加热了的气体在压力侧冷却并部分反回到吸入室。这使得其在与气体冷却器结合使用的情况下适合于在大气压下操作。气体循环冷却罗茨泵可提供从  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ （ $18.5 \text{ kW}$  驱动电源）一直到  $8,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ （ $200 \text{ kW}$  驱动电源）的抽气能力。

| 罗茨泵 OktaLine |  |        |       |  |
|--------------|--|--------|-------|--|
| 型号           | 额定抽速                                     | 最大差压   | 最大压缩比 | 应用   |
| Okta 250     | $290 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 75 hPa | 50    | 工业/化学应用：如油再生、变压器干燥、钢液脱气、冷冻干燥、泄漏检测系统、冶金、包装行业、电子束焊接。 |
| Okta 500     | $560 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$    | 75 hPa | 50    |  |
| Okta 1000    | $1,180 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | 45 hPa | 63    |  |
| Okta 2000    | $2,155 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | 35 hPa | 70    |  |
| Okta 4000    | $4,325 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | 25 hPa | 63    |  |
| Okta 6000    | $6,485 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | 20 hPa | 63    |  |
| Okta 8000    | $8,370 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  | 27 hPa | 70    |  |
| Okta 18000   | $18,270 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 10 hPa | 70    | 大面积涂层：如光伏、磨损保护、光学镀膜<br>研发：如加速器、模拟室。                |

表 4.19：OktaLine 性能数据

#### 4.7.4 配件

配件用于 OktaLine 系列罗茨泵。

以下各种油可用作润滑剂，用于润滑齿轮和轴承（Table 4.11）：

- 矿物油 P3 (0.5 l 至 200 l 容器)
- 全氟聚醚 F5 (0.5 l 至 50 l 容器)
- 二酯油 D1 (0.5 l 至 200 l 容器)

警告：不同类型的油不得混合。泵在交货时就配有这些油类型中的一种。

由于很多罗茨泵是安装在机组中，所以可根据需要集成以下配件：

- 电力调节器
- 温度和压力测量仪器
- 压力调节系统
- 热交换器和冷凝器
- 用于室内和室外安装的隔音罩
- 消声器
- 灰尘分离器
- 冲洗装置
- 隔振装置
- 液体分离器
- 齿轮室排空装置
- 密封气体供应装置

#### 测量连接

在多个罗茨泵的情况下，可在泵的入口和压力侧使用测量连接。要实现这一点，现有锁紧螺丝可更换成小的 ISO KF 法兰活接头。这使得可连接适当的温度传感器和压力传感器，用于监测泵。

#### 密封气体连接

当抽吸溶剂或反应性气体时，存在润滑剂因气体冷凝而显著变稀的风险。反应性气体也可侵蚀齿轮箱的部件。通过允许密封气体进入工作空间与齿轮室之间的区域可避免大部分风险。惰性气体，主要是氮气 (N<sub>2</sub>) 用作密封气体。

#### 齿轮室排空装置

当罗茨真空泵站必须在短周期时间（快速抽空）内达到一定压力的所有工艺情况下，通过油分离器在每个齿轮室内以独立真空泵的方式抽空罗茨泵的齿轮室是可行的。这防止气体从齿轮室流出并流入吸入室，从而能够更快地达到所需工作压力。所需工作压力将决定是否可将齿轮室连接至罗茨泵的前级真空侧。

#### 冲洗装置

冲洗装置可用于在吸入室有沉积物形成的过程。该装置的设计可根据具体要求与客户进行单独协调。标准泵的冲洗装置要求使用密封气体，防止冲洗液体达到轴承或齿轮室。

#### 表面保护

如果要泵送的介质是腐蚀性的，可为与产品接触的部件提供耐用的表面保护。等离子聚合物薄膜层系统包括一个粘接剂层、一个防腐蚀保护层和一个非粘性涂层。层的厚度小于 1 μm。根据要求，吸入室可被磷酸化、使用氮排空以及进行真空密封，以便提供短期表面保护，如用于仓储和运输。

#### 密封件

罗茨真空泵出厂配置 FKM 制成的 O 型圈。对于特殊的应用，所有的泵都可配置具体的 O 型圈或相应应用要求的密封件。

#### 4.7.5 泵

普发真空可提供带有油润滑的单级和两级旋片泵以及干式泵选项的标准罗茨泵。

除标准泵外，普发真空的真空系统还有其他设计的泵（罗茨泵和涡轮分子泵）。

| OnTool Booster     |                                       |                               |        |              |
|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------|--------------|
| 型号                 | 抽速                                    | 底压                            | 压缩比    | 应用           |
| OnTool Booster 150 | $130 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | $1 \cdot 10^{-5} \text{ hPa}$ | $10^8$ | 预抽、涡轮分子泵的前级泵 |

表 4.20 : OnTool Booster 的性能数据

## 4.8 侧槽高真空泵

### 4.8.1 设计与工作原理

侧槽高真空泵的工作范围从大气压到高真空范围。该泵是侧槽泵（压力范围 1,000 至 5 hPa，层流）与 Holweck 级（压力范围 5 至  $10^{-5}$  hPa，过渡流和分子流）。

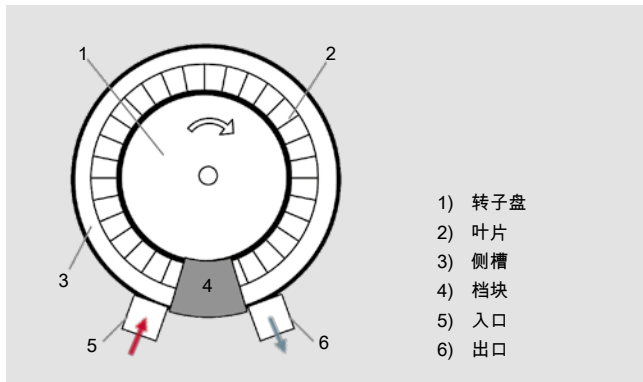


图 4.20 : 侧槽真空泵的工作原理

侧槽真空泵的泵系统（图 4.20）包括一个转子盘（1），其具有分布在外周和环状工作室上的叶片（2），以及侧槽（3）。侧槽通过档块（4）在这一点收窄至圆盘外形。通过旋转转子叶片产生的涡旋流从入口流动到出口产生泵送作用。这导致入口（5）和出口（6）之间的压差。通过将多个泵级串联连接可获得较低的极限压力。

当压力在 1 和 20 hPa 之间时，泵离开层流范围，且 Holweck 级负责气体的抽出。

为适应侧槽泵级仍然相当高的压力，Holweck 通道在真空侧很小且间隙很窄。在吸入侧使用较大的通道横截面，以提高抽速。

### 4.8.2 应用

侧槽真空泵特别适合于产生清洁高真空。其全干式工作，因为它仅在大气侧有一个油润滑轴承。它非常适合于快速排空预抽室或传输室，因为无需任何前级泵或旁路管道。该泵可用作独立泵，也可用作涡轮分子泵的前级泵。由于狭窄间隙，不能泵送腐蚀性气体、冷凝物和颗粒物。

### 4.8.3 产品概览

普发真空将提供 OnTool Booster 150 干式侧槽高真空泵。

## 4.9 涡轮分子泵

### 4.9.1 设计与工作原理

普发真空于 1958 年由 W. Becker 博士开发涡轮分子泵并获得专利。涡轮分子泵属于动量真空泵的范畴。它们的设计类似于涡轮机的设计。多级、具有叶片的涡轮状转子在壳体内旋转。涡轮机或压缩机的叶片被统称为叶片装置。转子盘之间插入具有类似几何形状的叶片定子盘。

### 轴承

通过两个球轴承安装涡轮分子泵转子轴需要将两个球轴承都安排在前级真空侧，因为轴承中有润滑剂。这导致较大质量转子受单边（悬臂）支撑。

混合轴承支撑就转子动力学而言在这方面有优势。混合轴承是指单一泵中使用两个轴承的概念。在这种情况下，油润滑球轴承安装在前真空侧上轴的端部，且高真空侧配备了免维护和无磨损的永磁轴承，其将转子置于径向中心位置。润滑前真空侧轴承的油置于油池内。小型安全轴承布置在磁轴承转子内。在正常工作期间，轴颈在该轴承内自由旋转。如果存在强劲的径向冲击，安全轴承则稳定转子转动。如果转子失去平衡，轴两端的轴承将比浮动轴承的情况下产生显著较低的轴承振动力。高真空侧的磁轴承对振动完全不敏感。因此，只有非常小的振动力被传输到壳体上。而且，这无需悬臂概念中较大的两个轴承，其较大尺寸限制了转速。

法兰直径尺寸超过 100 mm 的大型泵另外使用被称为 5 轴磁轴承的轴承 [24]。通过距离传感器和电磁体实现的数字电气控制使转子悬浮。涡轮转子运动的自由度可连续监控并实时调整。转子与壳体之间无机械接触将泵产生的振动保持在低水平。转子围绕其自身的惯性轴线自转。由于一侧涂层或腐蚀（如在等离子刻蚀中）产生的任何不平衡可在较大的限制内抵消。

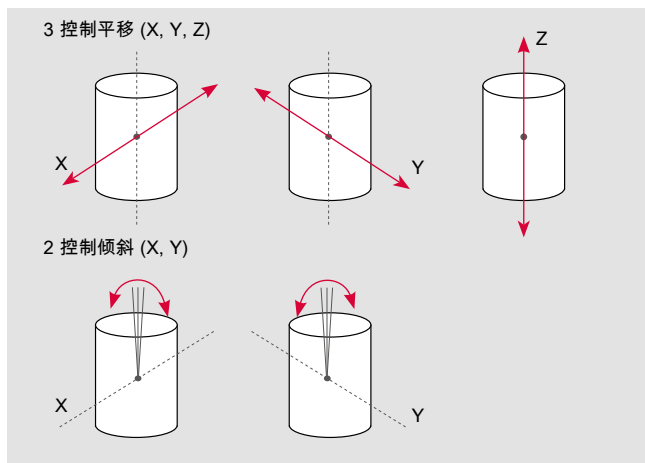


图 4.21 : 涡轮转子的自由度

除前级真空侧无油外，无磨损和免维护是另一个优势。在停电的情况下，通过泵的旋转能量为磁轴承供电。这使得停电可以很容易地桥接数分钟。如果停电持续时间较长，通过使用集成的安全轴承，转子将以非常低的速度安全停止。在系统故障期间，安全轴承使转子减速，以避免对泵造成任何损坏。

#### 电动机与驱动器

能够提供旋转频率高达 1,500 Hz (90,000 rpm) 的无刷直流电动机用于驱动转子。这使得叶片速度是泵送气体所必需的。

如今，驱动器通常都是直接连接到泵上。电源是 24、48 或 72 伏的直流电，通过外部电源包或集成在泵的电子单元中的电源包产生电流。

#### 4.9.1.1 涡轮分子泵工作原理

包括转子和定子叶片排列的泵送作用是基于将动量从快速旋转的叶片传输给被泵送的气体分子。与叶片碰撞的分子被吸附在叶片上，然后在一段时间后再次离开叶片。在该过程中，叶片速度被加到分子热运动速度上。为确保由叶片传输的速度成分不因与其他分子碰撞而损失，分子流必须在泵中占主导地位，即：平均自由程必须大于叶片间距。

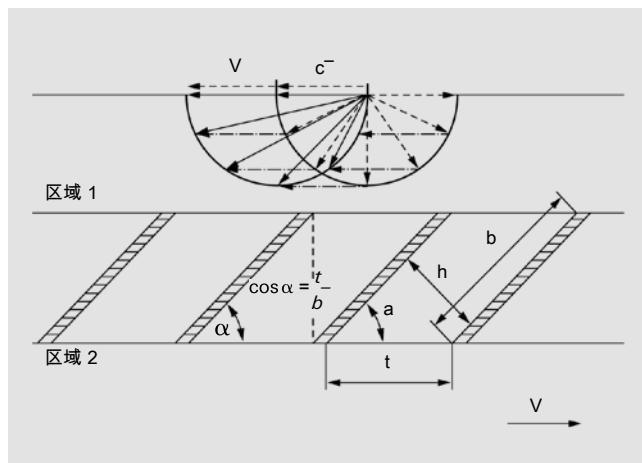


图 4.22 : 涡轮分子泵的工作原理

在动量泵的情况下，在泵送气体时出现反压力；这导致回流。抽速以  $S_0$  表示。体积流量随压力增加而减少，并在最大压缩比  $K_0$  时达到 0 值。

#### 压缩比

以  $K_0$  表示的压缩比可根据 Gaede 公式进行估计 [25]。以下适用于外观密实的叶片结构 (图 4.22)：

$$K_0 = \exp \left[ \frac{1}{g} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \cdot \frac{v}{\bar{c}} \right]$$

公式 4-8 : 涡轮分子泵的压缩比

$\bar{c}$  平均分子速度 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$v$  圆周速度 [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

几何关系取自图 4.22。系数  $g$  在 1 和 3 之间 [26]。从方程中明显可以看出， $K_0$  随叶片速度  $v$  以及以指数方式增加，因为

$$\bar{c} \sqrt{= \frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}} \quad (\text{公式 1-10})$$

因此，例如，氮的压缩比明显高于氢的压缩比。

#### 体积流量 (抽速)

抽速  $S_0$  与入口面积  $A$  和叶片的平均圆周速度  $v$ ，(即转速)成正比。考虑到叶片角度  $\alpha$ ，结果：

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{4} \cdot A \cdot v \cdot \sin 2\alpha$$

公式 4-9 : 涡轮分子泵的抽速

考虑到法兰入口流导

$$C_{Ef} = \frac{\bar{c}}{4} \cdot A \quad (\text{公式 1-24})$$

以及最佳叶片角度为  $45^\circ$ ，根据以下公式，得出重气体（分子重量  $> 20$ ）涡轮分子泵近似有效抽速  $S_{eff}$ ：

$$S_{eff} = \frac{S_0 + L_{Ef}}{S_0 \cdot L_{Ef}} = \frac{A \cdot v}{4 \cdot \left[ \frac{v}{\bar{c}} + 1 \right]}$$

公式 4-10：涡轮分子泵的有效抽速

用有效抽速除以最上层圆盘有叶片的入口表面积并考虑叶片厚度堵塞的面积与系数  $d_f \approx 0.9$ ，得出使用氮的涡轮分子泵的具体抽速，例如（图 4.23 中的曲线）：

$$S_A = \frac{S_{eff}}{A} = \frac{d_f \cdot v}{4 \cdot \left[ \frac{v}{\bar{c}} + 1 \right]}$$

公式 4-11：具体抽速

在图 4.23 中，Y 轴上绘制的是单位面积抽速，以  $l \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$  为单位，X 轴上绘制的是平均叶片速度  $v = \pi \cdot f \cdot (R_a + R_i)$ 。从该点垂直向上移动，与曲线交叉点显示的是泵的最大单位面积抽速  $S_A$ 。用该值乘以入口盘有叶片的表面积： $A = (R_a^2 - R_i^2) \cdot \pi$ ，求出泵的抽速，并把它与目录信息进行比较。

图 4.23 中所绘制的点是普发真空在所示泵测量值的基础上确定的。远远高于绘制曲线的点实际上是不可能的。

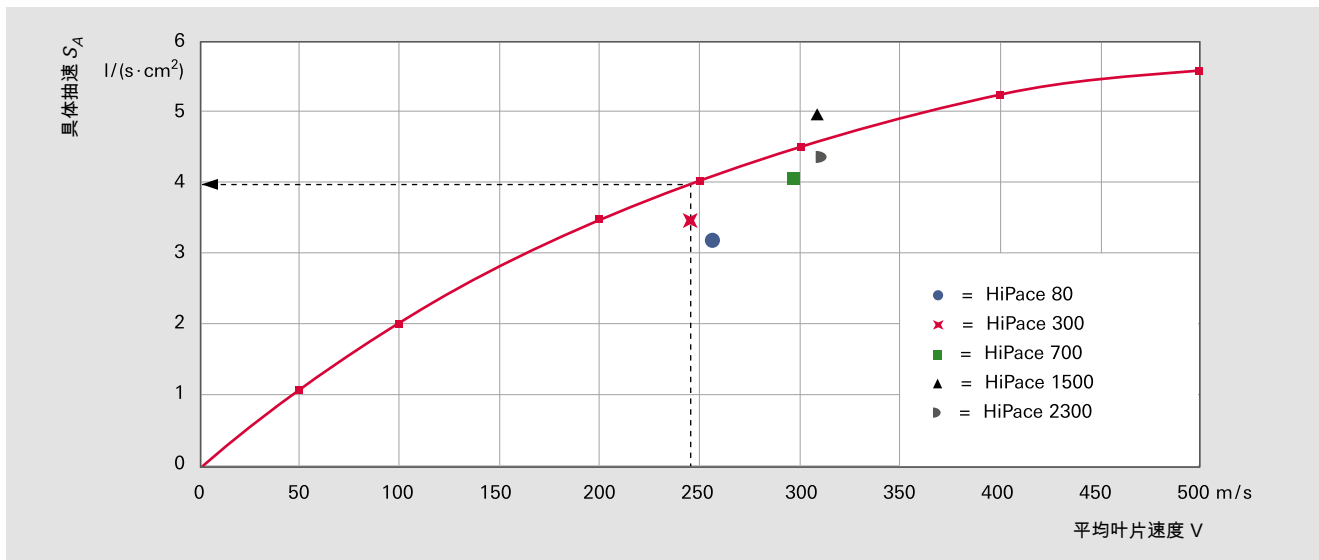


图 4.23：特定涡轮分子泵的抽速

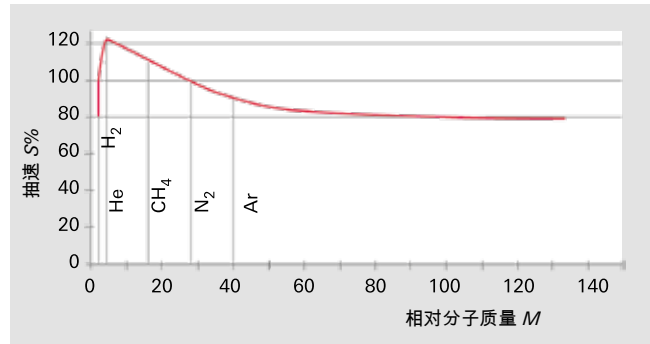


图 4.24：相对分子质量的抽速

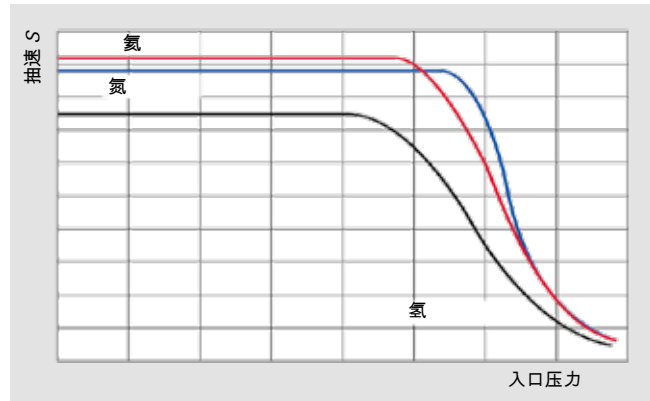


图 4.25：入口压力的抽速

因而所确定的抽速仍然没有说明有关轻型气体的值，如氢。如果涡轮分子泵专为低极限压力而设计，则使用具有各种叶片角度的泵级组合对氢具有最大抽速。这将使泵产生针对氢（约 1,000）和氮产生足够的压缩比，由于氮在空气中高分压，它应该为  $10^9$ 。在纯粹涡轮分子泵的情况下，由于其分子流，需要的前级真空压力大约为  $10^{-2}$  mbar。

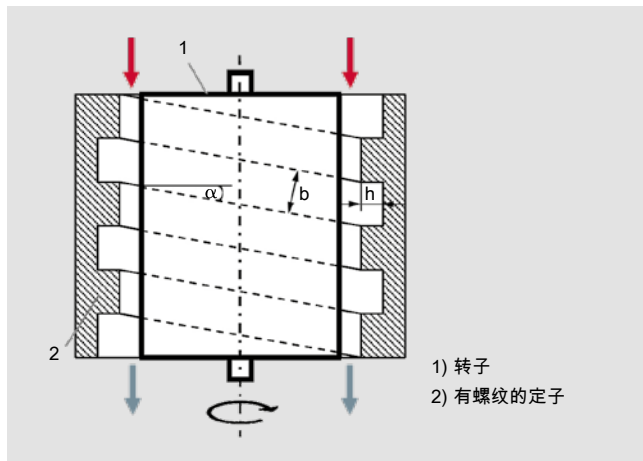


图 4.26 : Holweck 级的工作原理

#### 4.9.1.2 Holweck 级工作原理

Holweck 级 (图 4.26) 是多级 Gaede 类型的分子泵, 具有螺旋形泵通道。由于转子的旋转, 进入泵通道的气体分子接收到通道方向的牵引速度。回流损失的出现是因为挡板之间的间隙, 该挡板将 Holweck 通道彼此隔离并将其与转子隔离。间隙的宽度必须保持较小, 以减少回流。绕定子 (2) 中螺旋形通道旋转的圆柱形套筒 (1) 用作 Holweck 级。将定子安排在转子的内外使得两个 Holweck 级很容易集成在同一泵内。这意味着, 被抽出的气体通过定子通道被输送到转子的外部, 然后通过另外的定子通道被输送到转子的内部, 直到它们通过收集通道被输送到前级泵。一些现代涡轮分子泵具有几个这样的“折返”Holweck 级。

Holweck 级的抽速  $S_0$  等于:

$$S_0 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot v \cdot \cos \alpha$$

公式 4-12 : Holweck 级的抽速

其中,  $b \cdot h$  是通道横截面,  $v \cdot \cos \alpha$  是通道方向的速度分量。

压缩比因通道长度  $L$  和速度  $v \cdot \cos \alpha$  以指数方式增长[4]:

$$K_0 = \frac{v \cdot \cos \alpha \cdot L}{c \cdot g \cdot h} \text{ with } 1 < g < 3$$

公式 4-13 : Holweck 级压缩比

使用该公式计算得到的值在实际 Holweck 级中无法实现, 因为从相邻通道经过挡板的回流急剧降低了压缩比, 而且这种影响没有考虑在公式 4-13 内。

为使极限压力在 0.5 和 5 hPa 之间以隔膜泵为前级建立涡轮分子泵系统, 涡轮分子泵目前配备了 Holweck 级。这些类型的泵被称为涡轮拖动泵。由于涡轮分子泵的高压缩比而只需低抽速就能获得低的本底压力, 排气通道, 特别是通道高度以及转子之间的间隙可以保持得极小, 从而仍然在 1 hPa 范围内提供分子流。同时, 这使氮的压缩比增加了所需的  $10^3$  数量级。从图 4.27 中可以看出, 压缩比曲线向较高压力移动了大约 10 的二次幂。

对于专为大气体流量而设计的涡轮分子泵, 提供了折中方案, 其中涉及到气体抽气量、前真空兼容性以及颗粒耐受性, 且 Holweck 级中间隙距离增大了。

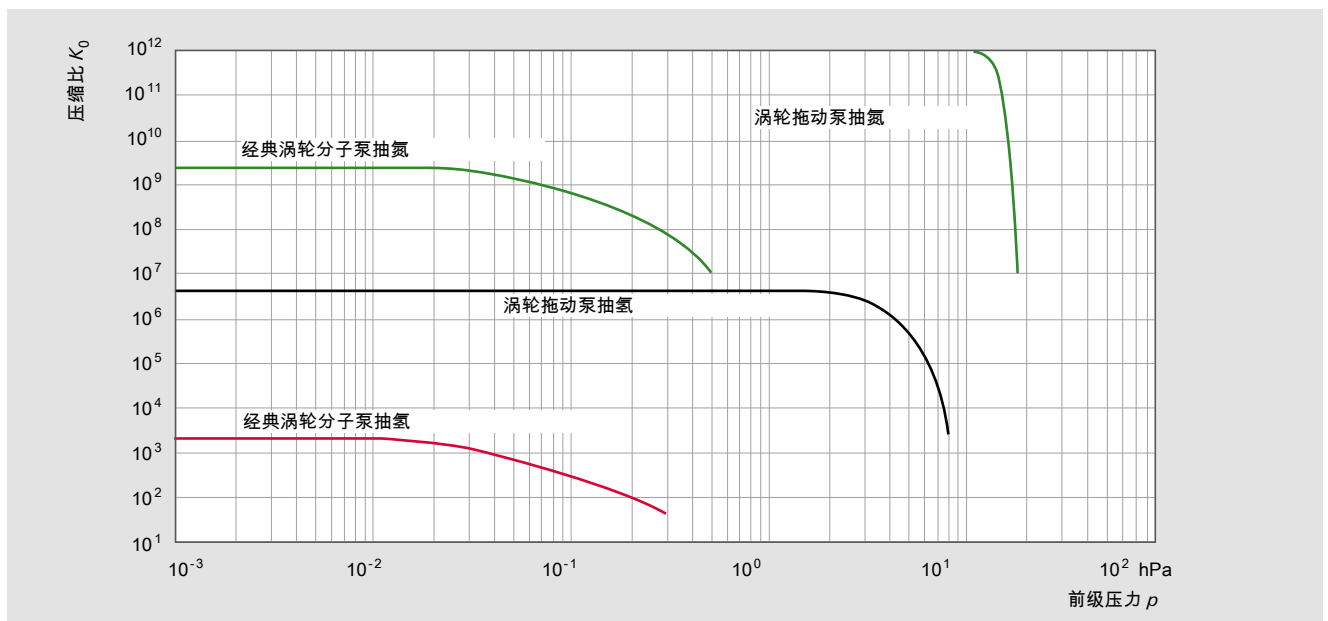


图 4.27 : 纯涡轮分子泵和涡轮牵引泵的压缩比

### 4.9.1.3 涡轮分子泵性能数据

#### 气体负荷

可用涡轮分子泵抽出的气体负荷

$$q_{pV} = S \cdot p = \frac{dV}{dt} \cdot p \quad (\text{公式 1-16}),$$

在恒定体积流量范围内与压力成正比增长。在抽速曲线的下降段中，最大抽出的气体负荷可继续上涨，但他们取决于前级泵大小。最大允许的气体负荷也取决于泵的温度（冷却和/或加热的泵）和所涉及的气体类型。抽出惰性气体是有疑问的，因为它们在撞击转子时产生大量的耗散能量，且由于其低比热，只有很少的热量可耗散给壳体。

制造商对转子温度的测量能够对气体类型有关的工艺提出建议，以便安全操作涡轮分子泵。涡轮分子泵的技术数据规定了氢、氦、氮、氩和  $\text{CF}_4$  在公称 rpms 下最大允许的气体负荷。转速降低允许更高的气体流量。

抽速  $> 1,000 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$  的 HiPace 系列泵配备了转子温度监控装置，防止其自身过热。

#### 临界前级压力

临界前级压力是指涡轮分子泵前级真空侧的最大压力，在该压力下，泵的压缩比减少。通过在进气侧无进气的情况下增加前级压力，根据 ISO 21360-1:2012 测定压缩比，作为压缩比测定的一部分来确定该值。在涡轮分子泵的技术数据中，最大临界前级压力始终是针对氮来规定的。

#### 本底压力、极限压力、残余气体

对于真空泵，极限压力和本底压力是有区别的（也见第4.1.3节）。虽然泵必须在测量指南中规定的条件下在规定时间内达到本底压力  $p_b$ ，但是极限压力  $p_e$  可大幅降低。在 HV 范围内，使用金属密封件在清洁条件下烘烤 48 小时后达到本底压力。对具有铝壳体泵的底压的规定是实现压力无需烘烤，且使用清洁的 FKM 密封件。

腐蚀性气体版本的泵具有较高的解吸率，由于转子表面的涂层，这可暂时导致较高的本底压力。

用前级压力除以压缩比得出极限压力。

$$p_e = \frac{p_v}{K_0}$$

公式 4-14：极限压力

是否达到极限压力将取决于设备和泵的大小与清洁度以及烘烤条件。在极端烘烤（超过  $300^\circ\text{C}$ ）后，在残余气体中将只发现  $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ 。这些是溶解在测试罩金属中并连续逸出的气体。清洁、烘烤设备的典型残余气体光谱如图 4.28 所示。

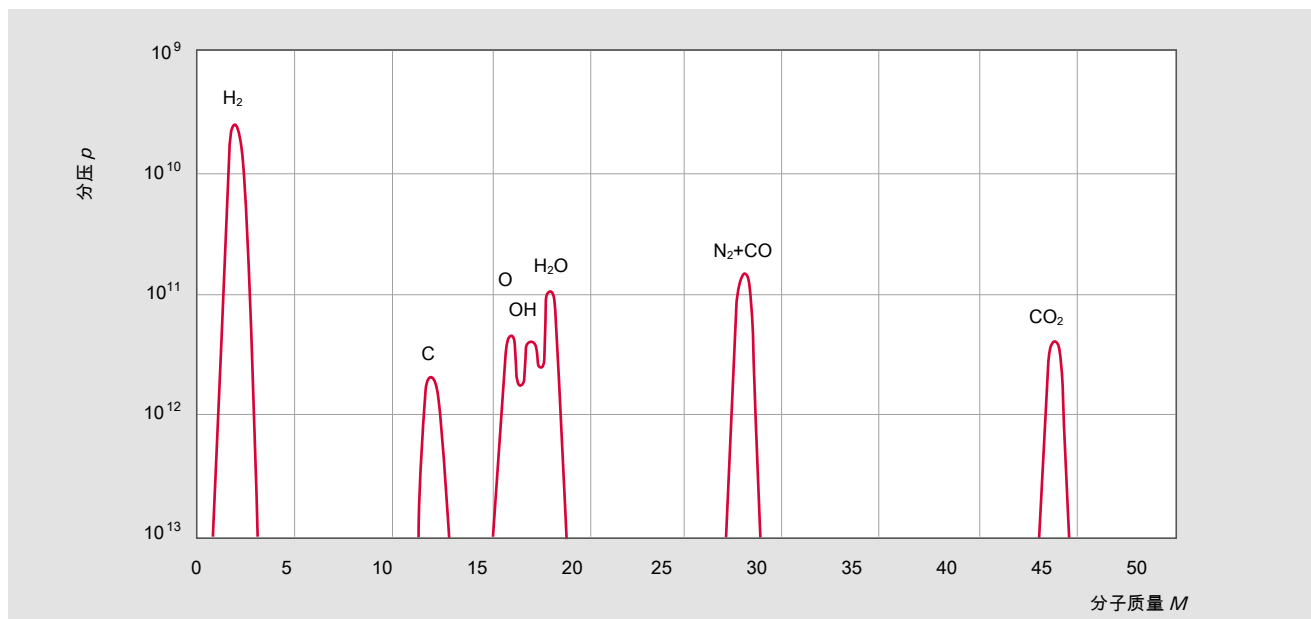


图 4.28：典型的 UHV 残余气体光谱（涡轮分子泵）

在使用前级泵时，气镇应定期打开，以防止氢在前真空区域积聚。在很多情况下，实际极限压力由涡轮分子泵高真空侧解吸条件及其抽速决定的，而不是泵的压缩比。

#### 4.9.2 应用

##### 产生清洁真空

涡轮分子泵适合于在  $10^{-3}$  至  $10^{-10}$  hPa 的范围内产生清洁真空。得益于其高压比，它们使油封泵入口区域的油远离被抽容器。具有不锈钢外壳和 CF 法兰的型号可烘烤。这使得这些泵非常适合于要求实现超高真空的研发应用。

涡轮分子泵可用于排空使用旋片泵作为前级泵的大型容器。如果是涡轮拖动泵，两极隔膜泵就可以作为前级泵；然而，由于其低抽速，它们将花费很长时间来抽空较大的容器。该泵组合的气体流量也将受到隔膜泵的极大限制。但是，该组是干式泵极具成本效益的解决方案。它通常用于差动排气质谱仪及其他分析或研发应用。如果前级泵区域需要较高的抽速，我们建议使用 ACP 系列的多级罗茨泵，或者对于半导体或太阳能行业的化学真空工艺，建议使用具有过程能力的前级泵。

包括一个前级泵和一个涡轮分子泵的机组无需阀门。这两种泵同时打开。只要前级泵已经达到必要的前级真空，涡轮分子泵就很快加速到额定速度，并凭借其高抽速快速排空容器，使压力  $p < 10^{-4}$  hPa。短时间的停电可通过转子的高转速进行弥补。在停电时间较长的情况下，如果转速下降到最低速度以下，泵体和容器可自动排气。

在排空容器中发挥作用的影响在第 2 章中进行了描述。泵大小以及抽空时间的计算也在该章进行了描述。

##### 排空预抽室

当在真空工艺中传送要处理的工件时，排空预抽室绝对需要清洁搬运。如果这些工件从大气压条件下进入，该腔室必须通过旁路管道进行预排空。运行的涡轮分子泵然后通过阀连接前级泵和腔室。

##### 分析应用

如今在很多情况下，将质谱仪用在分析仪中。液体通常在真空系统的进气室被注入并蒸发。在几个阶段中，压力下降，各个腔室通过孔彼此隔离。由于每个腔室必须被抽空，通过前级泵与涡轮分子泵的巧妙组合，经涡轮分子泵上的分流结构进行气体流量的分配。特别修改的、带有分流结构的涡轮分子泵用于一系列应用。除第 4.9.3 节中描述的 SpitFlow 50 之外，可以提供客户特定的解决方案。

氦气检漏仪也配备了涡轮分子泵。在这种情况下，经常使用逆流原理（见第 7.2.1 节）；即：质谱仪位于泵的高真空侧。由于涡轮分子泵对氦压缩比低于氮或氧，该泵担当氦选择性过滤器的作用。

##### 在真空工艺中具有高气体负荷的泵

涡轮分子泵在抽吸真空工艺的高气体负荷时，提供两大优势。它在每个工艺步骤开始时产生清洁真空，然后可以在无任何有害回流的情况下抽空工艺气体。在第二个步骤中，其主要目的是保持真空过程应该运行所需的一定压力。在该过程中，气体流量和工作压力将由所涉及的应用来决定；即：将在一定的气体流量下抽吸一定的体积流量。而且，在改变工件时应该可以快速实现清洁中间真空。由于这些是相互矛盾的要求，必须选择适用于所需气体流量、有足够尺寸的涡轮分子泵和所需的中间真空。将通过入口阀（如蝶阀）来调节过程压力。如何选择这种类型泵的例子如第 2 章所示。技术数据中规定的最大允许气体负荷应理解为允许的连续负荷。这适用于根据规格保证足够冷却以及因此前级压力被调节到最大临界前级压力以下。

##### 抽吸腐蚀性和磨蚀性物质

在抽吸腐蚀性气体时，必须采取措施保护电机/轴承区域和转子，特别是防止它们受到腐蚀。要实现这一点，与腐蚀性气体接触的所有表面要么有涂层，要么由能够经受这些气体侵蚀的材料制成。允许规定的惰性气体流通过特殊的密封气体阀进入前级真空的电机/轴承区域。气体从这里流经迷宫密封进入前级真空区域，与腐蚀性气体混合，并通过前级泵与腐蚀性气体一起被抽出。如果泵具有钟形转子（如 ATH M 系列），Holweck 级内的密封气体也可充当对流冷却气体，并通过降低温度增加可使用的时间。即使在非腐蚀性但含尘的过程中，密封气体也能有效地保护轴承和电机区域。



涡轮转子叶片应该会积累灰尘；这可能需要维修和更换转子。还应注意，预计沉积物可以在泵内形成，这将缩短维修间隔。尤其是，必须确保泵内的沉积物不与带水分的腐蚀性物质发生反应。因此，应该只用干燥惰性气体对泵进行排气，而且在需要维修时，泵应该装有密封的前级真空和高真空法兰。适用于这些应用的涡轮分子泵要么是无 Holweck 级的经典涡轮分子泵，要么是有 Holweck 级的涡轮分子泵，后者将是临界前级压力和粒子耐受性之间的一个折中方案。通过增大 Holweck 级中转子与定子之间的间隙，可减少 Holweck 级中灰尘沉积导致的转子堵塞。例如，在 ATH M 系列涡轮分子泵中，在具有粒子含量的溅射应用中经过长期操作后，在靠近前级真空法兰的收集槽中主要发现的是非粘附灰尘。Holweck 级仍然是清洁的，且泵保持运行。

#### 4.9.3 产品概览

作为涡轮分子泵的领先制造商，普发真空在其产品组合中提供机械轴承和主动磁悬浮轴承。用户将在我们的产品组合中发现专为高气体流量或低极限压力而设计的型号以及具有最小振动或附加分流 (SplitFlow) 的泵。

##### 4.9.3.1 机械轴承涡轮分子泵

如果 HiPace® 涡轮分子泵在前级真空侧具有油润滑球轴承，在高真空侧具有永磁体轴承，则以下涡轮分子泵系列之间是有区别的：

- 带 ISO-K 法兰的 HiPace®：HiPace 涡轮拖泵，具有 Holweck 级，用于产生标准应用的高真空
- 带 CF 法兰的 HiPace®：HiPace 涡轮拖泵，具有 Holweck 级，用于产生超高真空



图 4.29：标准 HiPace 涡轮分子泵

- HiPace® Plus：带有 Holweck 级的 HiPace 涡轮拖泵，具有减少的杂散磁场和超低振动水平
- HiPace® P：经典的涡轮分子泵，适用于含尘的应用
- HiPace® C：带有涂层和密封气体系统的经典涡轮分子泵，适用于腐蚀性气体应用

表 4.21 包含具有混合轴承的标准泵的特性。所有其他系列都是在这些标准型号上进行的改进，基本上具有相同的特点。

带 ISO-K 法兰的标准泵的本底压力是： $p_b < 1 \cdot 10^{-7}$  hPa。在烘烤后，带 CF 法兰的泵实现本底压力  $p_b < 5 \cdot 10^{-10}$  hPa。

| HiPace 涡轮分子泵 |                           |                          |                                |  |
|--------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------------|--|
| 型号           | 抽速                        | 压缩比                      | 气体吞吐量*                         | 应用   |
| HiPace 10    | 11.5 l · s <sup>-1</sup>  | 3.0 · 10 <sup>7</sup>    | 0.37 hPa · l · s <sup>-1</sup> | 分析应用、泄漏探测器、气体流量控制系统、白炽灯和荧光灯制造                  |
| SplitFlow 50 | 53 l · s <sup>-1</sup>    | > 1.0 · 10 <sup>8</sup>  | 1.8 hPa · l · s <sup>-1</sup>  |  |
| HiPace 60 P  | 64 l · s <sup>-1</sup>    | > 1.0 · 10 <sup>6</sup>  | 9.2 hPa · l · s <sup>-1</sup>  |  |
| HiPace 80    | 67 l · s <sup>-1</sup>    | > 1.0 · 10 <sup>11</sup> | 1.3 hPa · l · s <sup>-1</sup>  | 分析应用、研究和开发、真空镀膜、半导体制造                          |
| HiPace 300   | 260 l · s <sup>-1</sup>   | > 1.0 · 10 <sup>11</sup> | 5.0 hPa · l · s <sup>-1</sup>  |  |
| HiPace 400   | 355 l · s <sup>-1</sup>   | > 1.0 · 10 <sup>11</sup> | 6.5 hPa · l · s <sup>-1</sup>  |  |
| HiPace 700   | 685 l · s <sup>-1</sup>   | > 1.0 · 10 <sup>11</sup> | 6.5 hPa · l · s <sup>-1</sup>  |  |
| HiPace 800   | 790 l · s <sup>-1</sup>   | > 1.0 · 10 <sup>11</sup> | 6.5 hPa · l · s <sup>-1</sup>  |  |
| HiPace 1200  | 1,250 l · s <sup>-1</sup> | > 1.0 · 10 <sup>8</sup>  | 20 hPa · l · s <sup>-1</sup>   | 玻璃镀膜、太阳能电池的制造、表面处理、CVD、PVD/溅射、离子注入、等离子体物理、空间模拟 |
| HiPace 1500  | 1,450 l · s <sup>-1</sup> | > 1.0 · 10 <sup>8</sup>  | 20 hPa · l · s <sup>-1</sup>   |  |
| HiPace 1800  | 1,450 l · s <sup>-1</sup> | > 1.0 · 10 <sup>8</sup>  | 20 hPa · l · s <sup>-1</sup>   |  |
| HiPace 2300  | 1,900 l · s <sup>-1</sup> | > 1.0 · 10 <sup>8</sup>  | 20 hPa · l · s <sup>-1</sup>   |  |

\*) 气体流量取决于驱动器。

表 4.21：HiPace® 针对氮选定的性能数据

## 4.9.3.2 主动磁悬浮涡轮分子泵

表 4.22 包含带有 5 轴主动磁悬浮轴承的涡轮分子泵的特性。

这些泵可用作：

- 带 ISO-K 或 ISO-F 法兰的 HiPace® M：HiPace® 涡轮拖动泵，具有 Holweck 级，用于产生标准应用的高真空
- 带 CF 法兰的 HiPace® M：HiPace® 涡轮拖动泵，具有 Holweck 级，用于产生超高真空
- ATP M：无 Holweck 级的经典涡轮分子泵，具有轻气体的高压缩比，粒子耐受性高
- ATH M 和 MT：有 Holweck 级的涡轮拖动泵，带密封气体系统和加热，适用于腐蚀性气体应用

## 4.9.3.3 驱动器与配件

提供各种控制器、显示器和驱动器以及广泛的配件用于在不同应用中的涡轮分子泵。

下面所使用的编号是基于图 4.31。

涡轮分子泵 (1a) 通常配有一个连接的驱动器 (1b)。例如，直流电源来自带显示控制单元 (2b) 的插入式电源模块 (2a)。也可提供内置电源单元。USB 变流器 (5b) 也可用于将 PC (5a) 连接至 RS-485 接口，以执行编程和切换功能或传输状态显示。Profibus DP 和 DeviceNet 变流器允许泵连接至系统控制器。使用外部信号通过遥控器插件也可执行主要的切换功能。此外，一些状态显示可从继电器输出。

除了操作装置，各种配件也可用于特殊应用。

一些 DCU 电源单元能够连接真空表，以显示压力以及涡轮分子泵上的信息。



图 4.30：ATH M 磁悬浮涡轮分子泵

在前级泵继电器箱 (6) 的辅助下，DCU 电源 (2a) 可以转换为系统控制器，该控制器可同时开启涡轮分子泵 (1a) 和前级泵。

对于高气体负荷，可连接风扇 (4) 或水冷 (3) 来冷却泵。

如果 RPM 下降到给定速度以下，电动排气阀 (8) 则对涡轮分子泵进行排气。在短时间停电的情况下，排气阀将保持关闭，以维持真空。然后，在电源电压恢复时，泵将立即重启。但是，这需要一个带有安全阀的前级泵，该泵将在停电时自动关闭。

对于 UHV 应用，加热器 (9) 可连接到泵上，在达到预选转速后，该加热器自动开启，在转速减少时自动关闭。

| 磁悬浮涡轮分子泵       |                           |                        |                              |   |
|----------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|---|
| 型号             | 抽速                        | 压缩比                    | 气体吞吐量*                       | 应用  |
| HiPace 300 M   | 255 l · s <sup>-1</sup>   | > 1 · 10 <sup>11</sup> | 28 hPa · l · s <sup>-1</sup> | 分析、真空镀膜、研发  |
| ATH 500 M / MT | 520 l · s <sup>-1</sup>   | > 2 · 10 <sup>7</sup>  | 67 hPa · l · s <sup>-1</sup> | 半导体、真空镀膜、研发   |
| HiPace 700 M   | 685 l · s <sup>-1</sup>   | > 1 · 10 <sup>11</sup> | 13 hPa · l · s <sup>-1</sup> | 分析、真空镀膜、研发  |
| HiPace 800 M   | 790 l · s <sup>-1</sup>   | > 1 · 10 <sup>11</sup> | 13 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 1603 M     | 1,370 l · s <sup>-1</sup> | > 6 · 10 <sup>8</sup>  | 67 hPa · l · s <sup>-1</sup> | 半导体、真空镀膜、研发：玻璃镀膜、太阳能电池的制造、表面处理、CVD、PVD/溅射、离子注入、等离子体物理 |
| ATH 1600 MT    | 1,370 l · s <sup>-1</sup> | > 5 · 10 <sup>8</sup>  | 67 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 2303 M     | 1,950 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 67 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 2300 MT    | 1,950 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 67 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATP 2300 M     | 1,850 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 37 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 2800 M     | 2,150 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 84 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 2800 MT    | 2,150 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 84 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 3200 M     | 2,700 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 84 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |
| ATH 3200 MT    | 2,700 l · s <sup>-1</sup> | > 1 · 10 <sup>8</sup>  | 84 hPa · l · s <sup>-1</sup> |   |

\*) 气体流量取决于驱动器。

表 4.22：磁轴承涡轮分子泵对氮的性能数据



1a) 涡轮分子泵

1b) TC 400 驱动器

2a) DCU 电源

2b) DCU 002

3) 水冷

4) 空气冷却

5a) PC

5b) USB 变流器

6) 前级泵继电器箱

7a) 密封气体节流阀

7b) 密封气体阀

8) 放空阀

9) 加热器

图 4.31 : 涡轮分子泵配件的例子 (适用于 HiPace 300)

具有匹配流量的电磁密封气体阀 (7b) 以及各种尺寸的泵密封气体节流阀 (7a) 可用于腐蚀性气体泵。

欲了解更多详细信息，请参考我们产品目录中的第 3.1 节“涡轮分子泵”。

# 5 真空测量设备

## 5.1 总压测量的基本原理

压力被定义为每单位面积的受力大小： $p = F/A$  (公式 1-3)，其中  $F$  表示受力大小， $A$  表示受力面积。压力的 SI 单位是  $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ 。其他压力常用单位有： $1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$  and  $1 \text{ Torr} = 133,322 \text{ Pa}$ 。如果通过施加在物体面积上的力的大小来测量压力，则压力测量与气体种类无关。在普发真空智能手机应用程序中心 (visit [www.pfeiffer-vacuum.cn](http://www.pfeiffer-vacuum.cn)) 中可找到真空技术中所有常用压力单位的转换工具。

在受力基础上的压力测量，在压力低于  $1 \text{ hPa}$  时达到其极限，因为此时所施加的力太小。因此，必须使用其他方法测量。例如，可通过测量封闭空间中气体的导热系数，或者可以电离气体分子并测量电极之间的离子电流。因此，根据气体属性来确定压力大小的这些间接测量方法，因气体种类而不同。

在真空技术中，没有任何一种单一的测量方法能够涵盖整个压力范围。因此，有必要使用不同的传感器。压力传感器的选择标准是基于各种条件的，如：

- 要检测的压力范围
- 气体组成：惰性或腐蚀性
- 所需精度和可重复性
- 环境条件，如放射性

### 5.1.1 不依赖气体种类的直接压力测量

在使用膜片真空计的情况下，可根据压力定义进行压力测量。压力  $p$  被施加在具有限定面积  $A$  的膜片上，并依据压力的大小使膜片变形。使用传感器对膜片的变形程度进行测量；在最简单的情况下，变形将会机械的传输给在压力盘上移动的指针。压阻或电容传感器接收压力信号并将其转换成电信号。

### 压电膜片真空计

一个简单且效果强大的方式是使用压阻传感器。设计如图 5.1 所示。应变阻力已经在其中扩散的膜片被安置在具有参考压力  $p_0$  的真空空间上方。膜片变形所测量的阻力变化为压力。该传感器的特点是对气体冲击的不敏感性及其高精度。

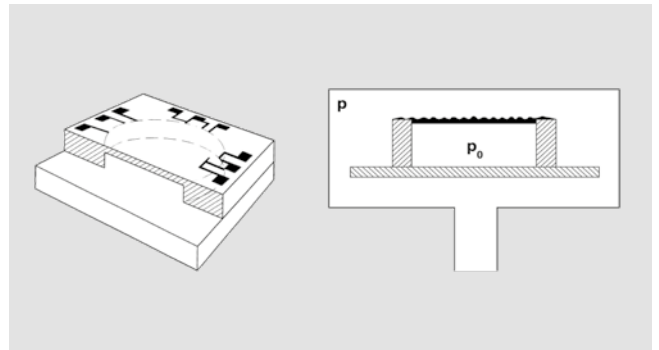


图 5.1：膜片式真空计的设计

### 电容式膜片真空计

在电容式真空计 (图 5.2) 中，将对膜片变形程度进行测量，并以其衡量平板电容器的电容变化，该变化是通过在具有压力  $P_0$  的通气良好的真空空间中的膜片和固定参考电极形成的。该膜片组由具有真空金属化涂层的陶瓷或不锈钢组成。该方法和具有不同敏感程度的膜片可用于执行四十年的测量。测量下限是  $10^{-5} \text{ hPa}$ 。

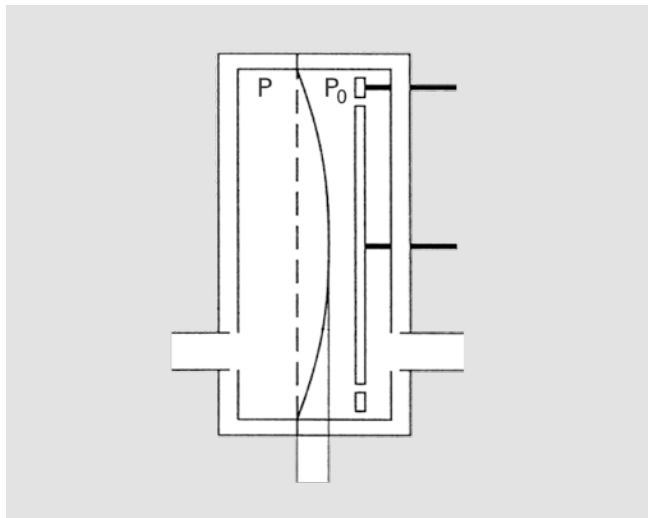


图 5.2：电容式膜片真空计的设计

缺点有：

- 由于温度影响，电容器极板之间的间隙会发生变化
- 低温下作用在膜片上的力将逐渐减小

通过已知温度漂移的电子补偿或通过可使传感器保持在恒定温度的集成加热器可将温度造成的影响最小化。通过使用陶瓷膜片材料可进一步减少温度的影响；此外，陶瓷膜片还为电容式真空计带来优异的耐腐蚀性能。

#### 磁悬浮转子计

磁悬浮转子计 (SRG)，即所谓的气体摩擦计，用于校准目的。球体被磁力悬浮在真空中并使其快速旋转，此时给驱动器断电。由于气体摩擦，可从旋转频率减少计算气体的压力。在分子流范围内，这些装置测量的压力  $p > 10^{-7}$  hPa。装置的校准只依赖于球体，这意味着经校准的球体可作为传递标准。这些真空计不适合于真空工艺，因为随着压力下降，测量过程所需的时间增加。

#### 5.1.2 依赖气体的间接压力测量

随着压力的下降，需要越来越多的仪器用于测量作用在膜片上减少的力。通过测量气体属性而间接提供压力信息的测量原理使真空计的设计相对容易些。对于高真空和超高真空环境来说，通过压力定义来工作的真空计是无法实现的，因为作用在膜片上压力不足。

当考虑真空下的间接压力测量时，以粒子数密度作为出发点是个不错的想法。根据理想气体状态方程： $p = n \cdot k \cdot T$  (公式 1-8)，粒子数密度在恒定温度下与压力成正比。在真空技术中用于测量压力所采用的两种现象是通过压力计测量区域中所含气体的热和电传导。每个气体粒子均具有一份传导特性，因此，很容易想象密度及其压力对传导具有一定程度的影响。由于气体原子或分子具有不同的特性，特别是在大量聚集的情况下，基于该传导现象的压力测量所提供的读数取决于气体的种类。

#### 皮拉尼 (热传递) 真空计

皮拉尼真空计利用压力  $p$  小于 10 至 100 hPa 左右时的气体导热系数。管内同心张紧的金属丝 (通常为钨丝) 由通过金属丝的电加热到 110°C 和 130°C 之间的恒定温度。周围气体将热量消散到管壁上。在分子流范围内，热传递与分子数密度成正比，从而与压力成正比。如果金属丝温度保持恒定，其热量输出将是压力导致的结果。然而，它不会是压力的线性函数，因为通过金属丝的热辐射也将影响热量输出。

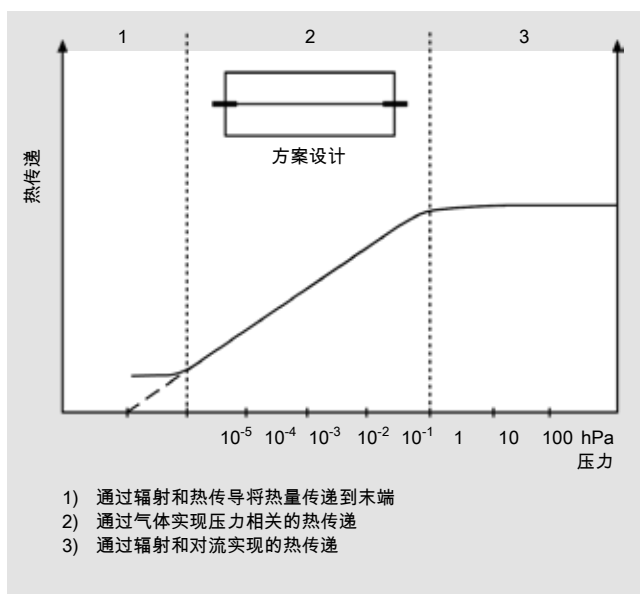


图 5.3：皮拉尼真空计的工作原理

缺点有：

- 从大约 10 hPa 到气压 (限制取决于气体类型) 的 (层流范围) 范围内导热系数将不再是压力的函数。
- 在压力低于  $10^{-4}$  hPa 时，气体的导热系数相对于通过金属丝末端的热传递将相对较低，因而不再影响金属丝的热量输出。因此，测量限制大约在  $10^{-4}$  hPa。
- 热辐射也将把一部分热量输出传递到管壁上。

图 5.4 显示了在  $10^{-4}$  hPa 和大气压之间各种气体的不同特性。虽然从氮和空气仍然可以看出良好的线性度，但是轻 (He) 和重 (Ar) 气体的曲线却显示出了显著的偏差。对于皮拉尼真空计，操作手册中给出了氮等效压力转换为所测量气体压力的修正系数。这些系数可在控制和显示设备中输入，该设备将自动指示正确的转换压力。此修正仅适用于图 5.4 所示特性曲线的线性部分。

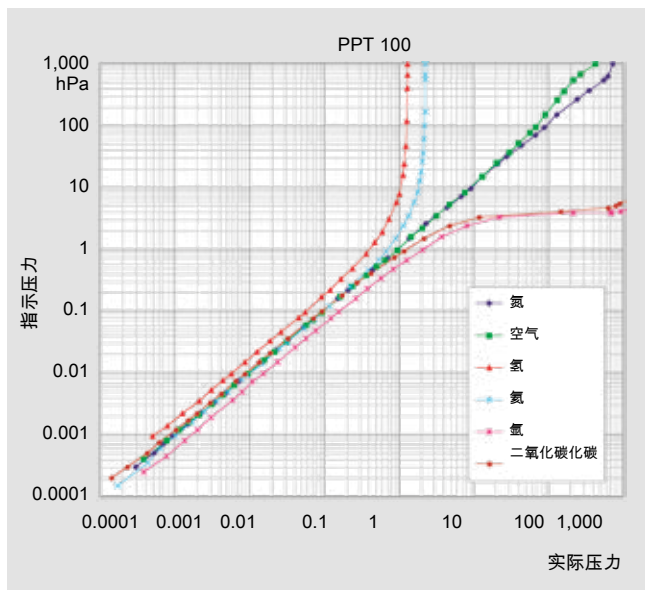


图 5.4: 皮拉尼真空计曲线

#### 冷阴极电离真空计

冷阴极电离真空计基本上只包括两个电极，一个阴极和一个阳极，在这两极之间通过串联电阻施加高压。带负电荷的电子通过磁场发射离开阴极，以高速从阴极向阳极移动。当电子通过该路径时，它们电离中性气体分子，这触发气体放电。所测气体放电电流 (图 5.5) 是压力的参数。但是，在直线电子轨迹的情况下，只有少量分子被电离，这将导致在大约 1 hPa 下气体的灵敏度较低且气体放电中断。有一种设计可以避免该缺陷，即是 Hobson 和 Redhead 反置磁控管 [28]。金属针 (阳极) 被旋转对称的测量室 (阴极) 所包围 (图 5.5)。轴向磁化的圆柱形永磁环置于测量室外部，以在室内产生磁场。

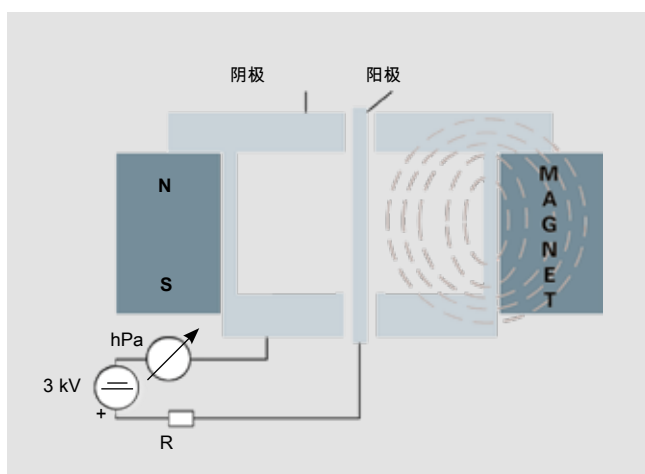


图 5.5: 反置磁控管的设计

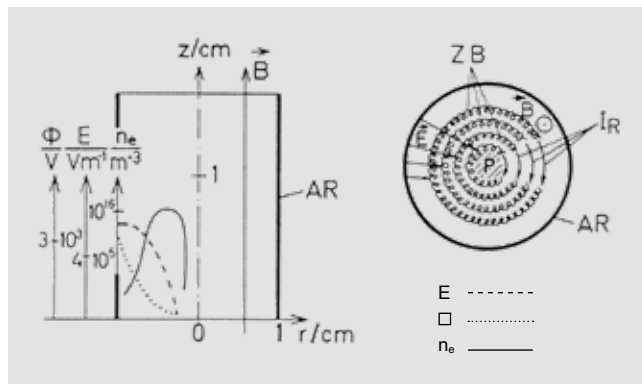


图 5.6: 反置磁控管的工作原理

电子以螺旋轨迹通过磁场 (图 5.6)。以这种方式延伸的电子路径增加了与气体分子碰撞的概率，并确保产生足够的离子来维持气体放电，即使在压力低于 1 hPa 的情况下。由于各种气体不同的电离概率，压力读数将取决于所涉及的气体类型。例如，氦指示的压力将低于空气所指示的压力。

冷阴极真空计在以下条件下很容易受到污染：

- 如果设备在压力  $p$  大于 0.1 hPa 时被激活。
- 如果真空计经常在中真空范围内的氩气环境下使用。氩经常用于溅射系统中。由于与离子碰撞，这导致阴极的溅射，从而还导致真空计出现短路和故障。
- 如果在含有烃类的残余气体环境中操作。

气体也吸附在阴极表面。这将产生伪测量信号的抽动效应。

在真空系统中安装真空计时，有必要将磁场考虑在内，因为它会干扰敏感设备，特别是在它们使用在电子或离子光学系统时。

#### 热阴极电离真空计

在这种情况下，凭借加热阴极辅助产生电子。图 5.7 显示了 Bayard-Alpert 真空计的设计 [27]。细金属丝布置在圆柱形、格子状的阳极中间；该金属丝用作离子收集器。在阳极和阴极之间施加大约 100 V 的电压。这使所有发射的电子向阳极加速。发射电流在阳极电路中测量，这可以通过阴极热量输出进行设置。在其飞向阳极的途中，电子与气体分子发生碰撞。飞向收集器的离子与阳极具有相同电势。

所测收集器电流是压力的函数。由于发射电流与离子电流成正比，所以它可用于设置真空计的灵敏度。

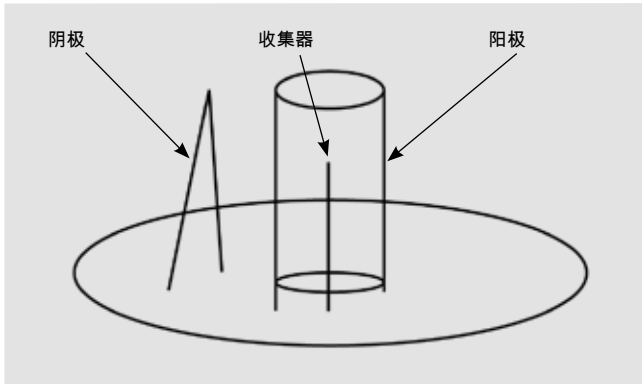


图 5.7 : Bayard-Alpert 真空计的设计

使用 Bayard-Alpert 真空计，压力测量可精确到  $1 \cdot 10^{-10}$  hPa。测量误差来自传感器的抽气效应和以下两种现象：

- **X-射线韧致辐射**：撞击阳极罩的电子导致放射X-射线，其中一部分射线撞击收集器。该 X-射线导致收集器发射光电子，并流向阳极。产生的光电子电流增加并虚增了压力相关的收集器电流。因此，选择的收集器金属丝应尽可能的细，以使其只收集非常少的 X-射线辐射。因此，测量下限也被称为 X-射线限制。
- **ESD 离子**：ESD (电子诱导脱附) 是指附着在阳极罩上的气体分子通过电子解吸和电离。这些离子也增加了与压力成比例的离子电流。

热阴极电离真空计也提供气体种类有关的压力信号。然而，测量结果比使用冷阴极电离真空计 (通常为  $\pm 25\%$ ) 获得结果更加精确 (通常为  $\pm 10\%$ )。因此，Bayard-Alpert 真空计通常用作真空计校准的基准计。

## 5.2 应用说明

选择和安装真空计时，必须考虑其特性和真空测量的特性：

- 由于真空室中存在潜在的压力梯度，恰当选择安装位置。
- 表面和密封材料呈现脱气现象。因此真空计可指示的压力高于真空室压力。连接法兰因此应该尽可能的短，且密封件数量减少到最小。
- 电离真空计具有抽气效应，因此指示的压力低于真空室中的实际压力。
- 冷阴极真空计具有固有的溅射效应，这在中真空范围内与重型气体 (如氩) 一起抽空时尤为明显。这可导致不一致和不准确的读数。
- 当烃类存在时，电离真空计受到有机分子分解产物的污染。如同溅射效应一样，读数可以被干扰或不一致。
- 必须选择电离真空计的开关点，以避免因上述现象导致的污染。
- 强磁场和电场会影响真空计的性能。尤其对于电离真空计而言。
- 为能够产生超高真空，必须对真空设备，包括真空计进行烘烤。必须遵守技术要求中规定的最大烘烤温度和条件。

如果受到污染，冷阴极真空计需要拆卸和清洗。使用其它测量原理的真空计，通常可以更换传感器。应该谨记，真空计会受到一定程度的磨损和污染，因此每隔一段时间就需要更换。由于操作条件范围广泛，因此不可能提供更换间隔的统一建议。

### 5.2.1 测量范围

纯机械刻度盘 (弹簧压力或波登管压力计) 用在 1,000 – 1 hPa 的压力范围；然而，这些真空计仅提供有限的精度，且只能在安装点直接读取。膜片真空计 (压电传感器或电容式传感器) 用于获得更精确的测量并用于远程显示读数。

皮拉尼热传导真空计用于 10 hPa 和  $10^{-4}$  hPa 之间的测量。特殊的“高压”的热阴极电离真空计在压力  $p < 10^{-2}$  hPa 时也可以使用。

冷阴极电离真空计或 Bayard-Alpert (B-A) 电离真空计用于压力小于 $10^{-3}$  hPa 的测量, 后者用于清洁的条件和严格精度要求的情况下使用。使用两个或更多传感器组合来涵盖使用过程中的整个压力范围也是个不错的想法。

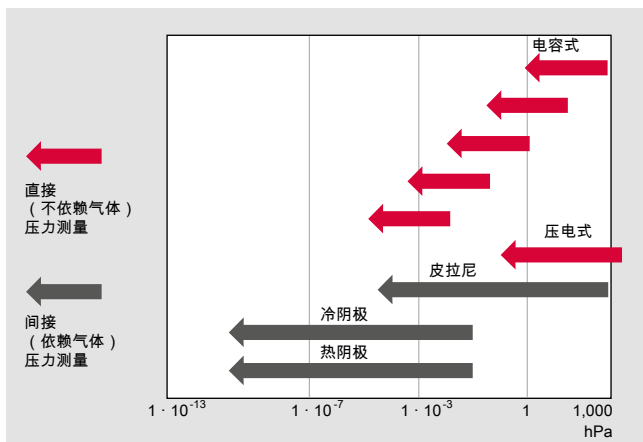


图 5.8 : 压力测量范围和测量原理

如果使用膜片真空计和皮拉尼真空计, 则需产生压力开关点以仅在压力足够低的情况下才激活电离真空计, 从而保护它们不受到污染或不被阴极加热烧坏。因此, 我们还提供带自动切换的组合传感器, 如下所述。

### 5.2.2 主动式真空计

主动式真空计将传感器本身与紧凑型电子控制和计算单元相结合, 该传感器将机械压力值转化为电信号。它们通过标准数字接口以模拟测量信号 (0 – 10 V) 或数值形式指示所测的压力。它们还必须配有直流电源 (通常为 24 V)。显示测量值的电源也可用作主动式真空计。

| 设计  | 名称               |
|---|------------------|
| 真空传感器通过电缆连接至所需的电源和计算单元; 传感器与电子单元之间由电源线传递传感器特定的信号  | 真空计<br>被动式真空计传感器 |
| 真空传感器和电子单元集成在一个壳体中, 具有标准电源电压 (通常为 24 V DC) 的电源; 压力信息以模拟输出信号 (通常为 0 – 10 伏) 或标准数字接口 (RS-485, Profibus, DeviceNet) 形式输出 | 主动式真空计<br>测量变送器  |

表 5.1 : 主动式和被动式真空计

### 5.2.3 被动式真空计

被动式真空计没有集成的电子单元。它们通过电缆连接至控制单元; 控制单元提供电源以及所测数据的计算和显示。控制单元通常也配备了模拟电压输出、数字接口和切换点的继电器触点。

### 5.2.4 组合真空计

组合传感器将两个传感器结合在同一测量单元, 并具有以下优势:

- 相比于单个传感器更广泛的测量范围
- 两个传感器只输出一个测量值
- 对灵敏的高真空计进行整体保护, 避免其在过大压力下被激活
- 只需一个连接法兰

各个系列提供的信息中描述了各种组合。

## 5.3 产品概览

### 系列

普发真空以单个传感器或组合传感器的形式提供主动式真空计, 被动式真空计作为单个传感器。提供具有不同电气接口的三大产品系列和传感器电子设备。

#### 5.3.1 DigiLine 系列

DigiLine 范围中的主动式真空计通过串行 RS-485 或现场总线接口提供其压力信号。它们配有 24 VDC。不同应用选项如图 5.9 所述。

使用 DPG 202 电源单元最多可操作两个真空计及显示其压力值。DPG 202 具有连接 PC 的 USB 接口。DigiLine 真空计的信号也可直接通过 PLC 或 PC 处理并通过 DokuStar Plus 软件显示。

DigiLine 真空计的可选版本提供 Profibus-DP 和 DeviceNet 现场总线标准接口。这使得这些真空计很容易集成到设备控制系统的现场总线网络中, 通过使用较少的布线和电缆以及快速初始启动, 使其具有所有已知的节约成本优势。

另一个选择是具有额外模拟输出和切换点的 DigiLine 真空计。模拟输出可用于诸如设置变送器的本底压力显示之类的任务, 该变送器链接至中央控制系统。切换点允许提供硬连线的安全功能。



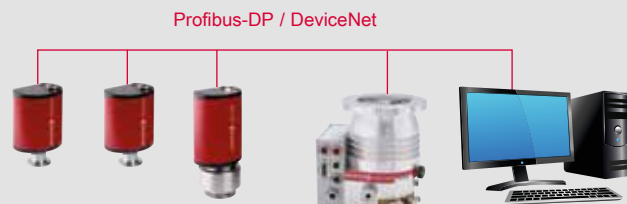
| 真空计                   | 真空<br>hPa<br>型号 | 压力范围       |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|                       |                 | 超高真空       |            |           |           | 高真空       |           |           |           | 中真空       |           | 低真空       |        |        |        |        |
|                       |                 | $10^{-11}$ | $10^{-10}$ | $10^{-9}$ | $10^{-8}$ | $10^{-7}$ | $10^{-6}$ | $10^{-5}$ | $10^{-4}$ | $10^{-3}$ | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ | $10^0$ | $10^1$ | $10^2$ | $10^3$ |
| <b>DigiLine</b>       |                 |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 单独压电式真空计              | CPT 200         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 压电式/皮拉尼真空计            | RPT 200         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼真空计                | PPT 200         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼/冷阴极真空计            | MPT 200         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼/Bayard-Alpert 真空计 | HPT 200         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| <b>ActiveLine</b>     |                 |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 压电式真空计                | APR 250         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | APR 260         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | APR 262         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | APR 265         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | APR 266         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | APR 267         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 电容式温度补偿真空计            | CMR 361         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 362         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 363         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 364         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 365         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 电容式温度控制真空计            | CMR 371         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 372         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 373         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 374         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | CMR 375         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼/电容式真空计            | PCR 280         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼真空计                | TPR 280         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | TPR 281         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 冷阴极真空计                | IKR 251         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | IKR 261         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | IKR 270         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼/冷阴极真空计            | PKR 251         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | PKR 261         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 热阴极真空计                | IMR 265         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼/Bayard-Alpert 真空计 | PBR 260         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| <b>ModuLine</b>       |                 |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 皮拉尼真空计                | TPR 010         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | TPR 017         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | TPR 018         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
| 冷阴极真空计                | IKR 050         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |
|                       | IKR 060         |            |            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |        |        |        |        |

表 5.2 : 真空计选择指南

根据测量原理，测量范围边际处的读数可能不是很准确。

### ■ 现场总线解决方案

用于统一系统控制概念的总线系统。具有 Profibus 或 DeviceNet 接口的主动式真空计。多达 126 个子单元。



### ■ 定制的数字解决方案

数据直接读入 PLC 或 PC ( DokuStar Plus 软件 )。多达 32 个装置；多达 16 个可寻址的真空计



### ■ 定制数字/模拟解决方案

通过具有 TPG 261、TPG 262 或 TPG 256 A 的接口实现中央数字化数据采集和附加的本地显示



### ■ 综合解决方案

使用 DPG 202 显示器的一个或两个真空计操作。  
数据可读入 PLC 或 PC。



图 5.9 : DigiLine 应用概念

主动式 DigiLine 真空计具有以下优势：

- 从  $5 \cdot 10^{-10}$  至 2,000 hPa 的压力范围涵盖整个真空范围
- 可自由组合部件
- 得益于数字信号的安全数据传输
- 压力值进行数值传输，所以无需任何曲线校正或转换
- Profibus-DP 和 DeviceNet 现场总线接口
- 数据可以直接在 PC 使用 DokuStar Plus 软件进行分析
- 便于调节的遥控
- 防护等级 IP54 和 DIN M12 连接器组件用于在恶劣环境中可靠的运行

主动式 DigiLine 单传感器真空计可以压膜系统 **CPT 200** (2,000–1 hPa) 和皮拉尼系统 **PPT 200** (1,000– $10^{-4}$  hPa) 的形式提供。

DigiLine 系列可提供以下具有组合传感器的真空计：

- **压电式皮拉尼组合 RPT 200。**  
由于用于压力  $p > 10$  hPa 的皮拉尼真空计的导热系数影响与压力无关，所以膜片真空计用于压力  $p > 10$  hPa 的情况。这为整个测量范围从 1,200 至  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa 提供了良好的精度，使得该真空计能够精确控制过程，如腔室排气。
- **皮拉尼冷阴极组合 MPT 200。**  
该组合涵盖压力范围从 1,000 至  $5 \cdot 10^{-9}$  hPa。冷阴极测量传感器的气体放电由使用皮拉尼传感器测量的压力启动。使用该方法防止冷阴极在过大压力下被意外激活，从而避免污染。
- **皮拉尼/Bayard-Alpert 组合 HPT 200。**  
这涵盖压力范围从 1,000 至  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa。由皮拉尼传感器监控的压力防止热阴极真空计在过高温度下工作，并防止热阴极烧坏。这能够实现非常长的阴极使用寿命。

### 5.3.2 ActiveLine系列

ActiveLine 系列包括三种控制单元和八个主动式真空计，具有 0 – 10 伏模拟输出。所有发射机都配备了相同的连接器组件，因此可以在控制单元上使用相同的测量电缆进行操作。测量电缆可提供 1 到 50 米的标准长度。

主动式压电真空计 **APR** 具有六个型号，涵盖从 5.5 MPa (55 bar) 至 10 Pa (0.1 mbar) 五个测量范围。

电容式膜片真空计 **CMR** 可提供温度补偿和温度调节两个版本，每个都从 1100 hPa –  $10^{-5}$  hPa 具有五个测量范围。使用具有不同额定值 (满量程 = F.S.) 的膜片产生以下类别：

- 1,000 hPa F.S. 压力范围 1,100 至  $10^{-1}$  hPa
- 100 hPa F.S. 压力范围 110 至  $10^{-2}$  hPa
- 10 hPa F.S. 压力范围 11 至  $10^{-3}$  hPa
- 1 hPa F.S. 压力范围 1.1 至  $10^{-4}$  hPa
- 0.1 hPa F.S. 压力范围 0.11 至  $10^{-5}$  hPa

来自普发真空这些陶瓷技术真空计在很多应用中具有可靠的业绩记录，特别是在腐蚀性应用中。

对于在显微技术中的使用，其常用单位为 Torr 和 mTorr，电容式膜片真空计 **CCR** 可以 Torr 提供额定值：

- 1,000 Torr F.S. 压力范围 1,332 至  $10^{-1}$  hPa
- 100 Torr F.S. 压力范围 133 至  $10^{-2}$  hPa
- 10 Torr F.S. 压力范围 13.3 至  $10^{-3}$  hPa
- 1 Torr F.S. 压力范围 1.33 至  $10^{-4}$  hPa
- 0.1 Torr F.S. 压力范围 0.13 至  $10^{-5}$  hPa

CCR 系列具有 D-Sub 连接器组件，且其电源和输出电压可与其他商业电容式变送器兼容。然而，由于这些特点，它们不能使用 ActiveLine 控制单元进行操作。

具有两种主动式皮拉尼真空计 **TPR** 用于 1,000 hPa 至  $5 \cdot 10^{-5}$  hPa 的中真空范围和三种主动式冷阴极真空计 **IKR** 测量范围在  $10^{-2}$  至  $5 \cdot 10^{-11}$  hPa 之间，这使得单传感器 ActiveLine 发射机的范围很完美。

TPR 皮拉尼真空计也可以连接到 DCU 机组显示控制单元，从而无需额外费用就提供压力读数。

主动式热阴极真空计 **IMR 265** 传感器中的电极 (阳极、阴极、收集器) 彼此之间的间隙设计的极小。因此，即使在压力  $p < 10^{-2}$  hPa 时，分子流仍占主导地位，从而可以测量那里的离子电流。该变送器的另一个优势是，与 Bayard-Alpert 设计相比，对污染具有较低的敏感性，这使得它非常适合于控制主要在较低中真空范围的真空工艺。

可提供以下具有组合传感器的主动式真空计：

- 电容式膜片皮拉尼组合真空计 **PCR 280** 用于压力范围 1,500 至  $5 \cdot 10^{-4}$  hPa；高效的皮拉尼传感器与膜片传感器组合在粗真空范围内很准确
- 皮拉尼冷阴极组合真空计 **PKR 251** 和 **261** 用于压力范围 1,000 至  $5 \cdot 10^{-9}$  hPa；是稳健传感器的理想组合，适用于范围广泛的真空应用
- 皮拉尼/Bayard-Alpert 组合真空计 **PBR 260** 用于压力范围 1,000 至  $5 \cdot 10^{-10}$  hPa；与皮拉尼传感器提供的热阴极灯丝的安全性相结合，在高、超高真空范围内提供理想的压力测量

ActiveLine 真空计具有以下优势：  
涵盖整个真空范围

- 三种控制单元 **TPG 261**、**TPG 262** 和 **TPG 256 A** 用于所有要求配置的一个、两个或六个测量仪
- 具有自动真空计识别的控制单元防止安装错误
- 可使用任何控制单元操作每一个真空计
- 通过为所有真空计使用相同标准的电缆而易于布线



图 5.10 : ActiveLine 应用概念

### 5.3.3 ModulLine系列

ModulLine 系列包括三种被动式皮拉尼真空传感器 TPR 用于压力范围  $1,000$  至  $8 \cdot 10^{-4}$  hPa 和三种冷阴极真空传感器 IKR 用于压力范围  $5 \cdot 10^{-3}$  至  $10^{-11}$  hPa。由于这些真空传感器不包含任何电子设备，所以它们适合于在高辐射环境中使用。可用的电缆选择范围较大，这使得控制单元可安装在远离使用真空传感器的位置。

具有以下特点的 TPG 300 可用作控制单元：

- 模块化设计，适用于各种测量板
- 可插入两个测量板以及带继电器输出的 RS-232/RS-485 接口板
- 可连接的真空传感器多达四个
- 可进行现场总线连接



图 5.11 : 用于 ModulLine 传感器的 TPG 300 控制单元



真空测量设备

# 6 质谱仪与残余气体分析

## 6.1 介绍和工作原理

质谱法是最流行的分析方法之一。质谱仪通过在真空下测量分压来分析化学物质的组成。

### 质量与电荷

- 总压是给定混合气体中所有分压之和
- 为确定气体某个成分的分压，必须从混合物中分离出来进行测量
- 这需要对混合物进行事先分离
- 这在质荷比  $m/e$  的基础上实现

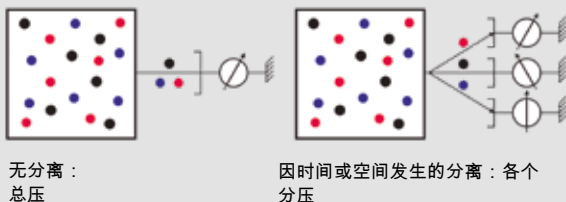


图 6.1：总压和分压测量

这一分析通常在研发领域和日常生活用品的生产中进行。

- 研究与开发
  - 催化研究
  - 药物开发
  - 新材料开发
- 监控生产流程
  - 在冶金中
  - 在化学合成中
  - 在半导体生产中
  - 在表面处理技术中
- 轨迹和环境分析
  - 气溶胶和污染物监测
  - 药检
  - 法医分析
  - 同位素分析以确定来源

- 以下领域中的产品分析
  - 化工行业
  - 高纯度气体生产
  - 制药
  - 汽车（电源）行业（泄漏检测）
  - 食品质量保证

质谱仪用于分析气体。如果固体或液体物质在上游进气系统中蒸发，同样也可对其进行分析。通过在真空中将气体抽空至本底压力（分子流范围）以及通过电子轰击对其进行电离，从而达到稀释的目的。由此产生的离子根据其荷质比在质量过滤器中进行分离。

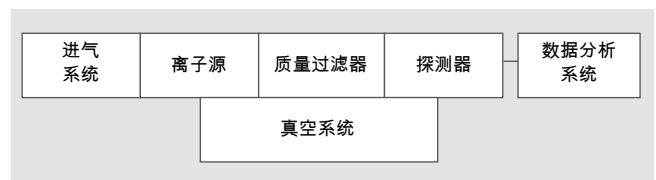


图 6.2：质谱仪的组成部分

图 6.2 显示了质谱仪系统典型的组成部分。

- 例如，允许待分析的物质经由毛细管或计量阀通过进气系统进入真空室，然后
- 使用真空系统将其抽空至系统的工作压力。

实际分析仪置于真空中并由以下部分组成：

- 离子源，电离中性气体粒子，该气体粒子然后在质量过滤器中根据其荷质比  $m/e$  进行分离。
- 在离子已经离开分离系统后，使用法拉第探测器或二次电子倍增器 (SEM) 测量离子电流。电流是相应气体分子分压的度量标准或者是可能在离子源中已经产生的碎片的度量标准。
- 数据分析系统 处理在探测器辅助下所测量的离子电流，并以各种形式呈现这些电流。如今，数据分析软件程序能够支持用户分析质谱。

质谱仪因各种可用版本的不同而有所差异。主要区别在于分离系统。目前广泛使用的有以下四种质量过滤器：

- 扇形场设备利用磁场的偏转作用移动电荷载体。
- 飞行时间质 (TOF) 谱仪利用相同能量分子速度的不同达到分离目的。
- 在离子阱，离子轨迹受到高频场的影响。
- 四极杆质谱仪利用运动离子在高频场中的共振（类似于离子阱）。

我们的讨论将限于扇形场质谱仪和四极杆质谱仪，因为这是真空技术领域中使用最广泛的质谱仪。

## 6.2 扇形场质谱仪

由于其简单、坚固的设计，扇形场质谱仪用于氦气检漏仪。它们的质量范围限制在  $2u$ （氢分子）和  $4u$ （氦原子）之间。这使得可以构建小型、紧凑但非常强大的质谱仪。

### 6.2.1 工作原理

扇形质谱仪的工作原理如图 6.3 所示。

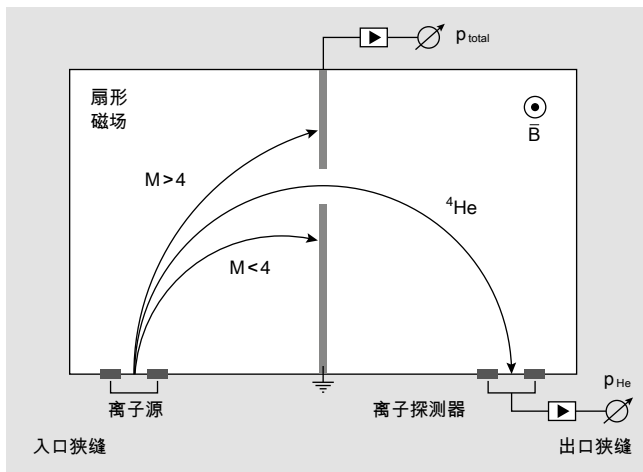


图 6.3：180° 扇形场质谱仪的工作原理

中性气体粒子在离子源中通过电子碰撞（图 6.4 a）进行电离。由此产生的离子具有质量  $m$  与电荷  $q$ ，电子通过电势梯度  $U$  移向扇形磁场，同时产生动能，

$$E_{kin} = q \cdot U = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

公式 6-1：动能

即它们以

速度  $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$  通过扇形场。在这里，电荷是相同的，

电子的速度以及通过一定距离所需的时间取决于其质量的大小。这是飞行时间质谱仪分离质量的原理。在扇形场质谱仪中，离子在均匀磁场中飞行路径为圆形，洛伦兹力与速度和磁场垂直，作用在移动离子上。

$$F = q \cdot v \cdot B$$

公式 6-2：洛伦兹力

在半径为  $r$  的圆形路径上，洛伦兹力等于向心力。

$$q \cdot v \cdot B = m \cdot v^2 / r$$

公式 6-3：力的平衡

这用于计算路径的半径

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad \text{并使用公式 6.1} \quad r = \sqrt{\frac{2mU}{qB^2}}$$

公式 6-4：路径半径

用于泄漏探测器的扇形场质谱仪配备了永磁体，该永磁体提供恒定磁场，在图 6.3 中，其位置与图像平面垂直。质谱仪以这样的方式调节：单电荷氦离子首先通过孔口，然后通过出口狭缝，最后撞击探测器。所有其它分子无法通过狭缝并重新进行中和。测量的氦离子电流与氦分压成正比。从公式 6-4 中可以看出，通过加速电压  $U$  可以改变路径的半径。实际上，使用不仅仅限于偏转  $^4\text{He}$ ，而且还限于将  $m/e$  之比为 2:3 的离子向出口狭缝偏转，以便检测气体氢和  $^3\text{He}$ 。

在泄漏检测中，为获得氦测试气体的高检测灵敏度，扇形场质谱仪装有灵敏探测器。直接的金属收集器（法拉第杯）不再符合现在的要求，所以现代的泄漏测试仪结合了微通道板，其结构非常紧凑，具有高增益和低噪声。这些在两侧均具有金属涂层的玻璃微通道板具有大量的细微通道，这些通道以很微小的角度一直通向端面（图 6.4 b），且其内表面也有涂层。如果离子撞击该表面，则触发二次电子雪崩，且通过施加在板上的电压向探测器加速。

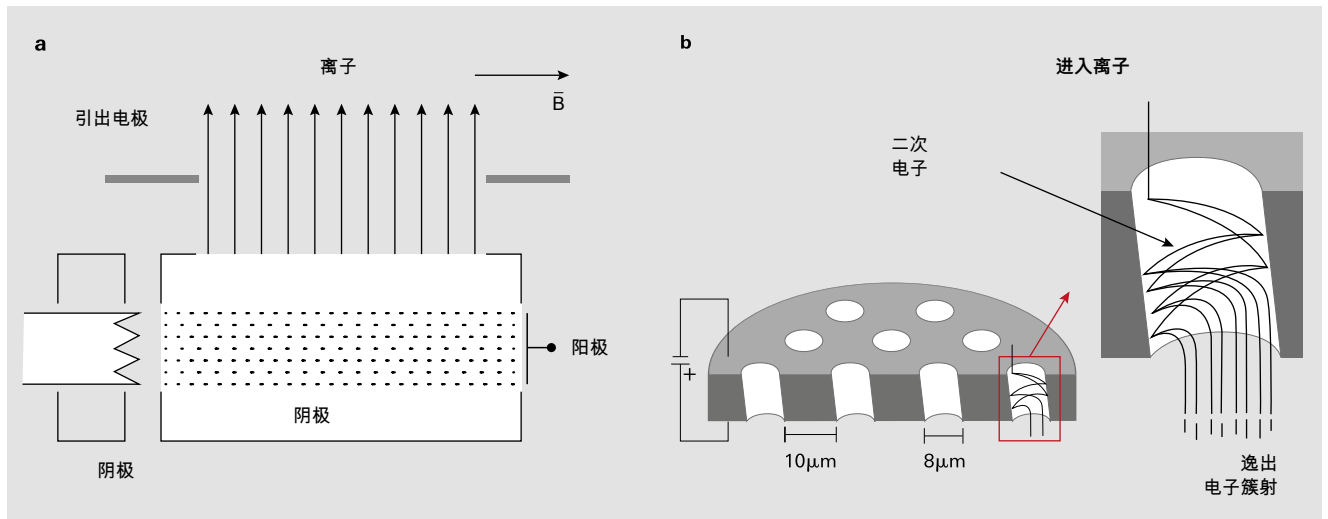


图 6.4 : 扇形场质谱仪 : (a) 离子源, (b) 探测器

根据公式 6-4, 轨迹半径与磁场成反比。永磁体的可用材料对磁场强度有限制。这导致氦质谱仪典型的半径为 10 cm 的量级。为确保离子轨迹不受到碰撞的妨碍, 平均路径长度必须大约是相同的数量级。因此, 氦扇形场质谱仪的最大连续工作压力大约为  $10^{-5}$  hPa。

### 6.2.2 应用说明

检测氦气的扇形场质谱仪现在集成在具有自动控制真空系统的泄漏检测仪里。因此, 操作者不必担心质谱仪的功能能力。我们提请您注意内表面的清洁对保持高检测灵敏度的重要性。

- 当有散射离子撞击时, 沉积物可以导致局部空间电荷。这些电荷使氦离子路径发生偏转, 并减少达到探测器的离子数量。
- 微通道板上的沉积物减少二次电子的产率, 并因此降低了放大因子。

虽然可以简单地清扫质谱仪的内壁, 但受污染的微通道板必须更换。物体和设备保持清洁极其重要, 以保持仪器的高检测灵敏度。

## 6.3 四极杆质谱仪 (QMS)

### 6.3.1 四级杆质量过滤器

四极杆质谱仪的过滤系统包括四个平行排列成正方形的杆。Figure 6.5 中指定了 (+) 或 (-) 的每对相反杆彼此连接在一起。在两对杆之间, 施加由直流部分  $U$  和振幅为  $V$ 、频率为  $f = \omega/2\pi$  的交流部分组成的电压 :

$$U_{\text{quad}} = U + V \cdot \cos \omega t$$

公式 6-5 : 四级杆偏转电压

在此, 只提供工作原理的简单现象描述。如需更详细的描述, 请参考专题文献 [29, 30, 31]。

理想的四级场需要具有双曲剖面的杆。然而, 在实际应用中, 使用圆柱形杆, 杆半径等于场半径  $r_0$  的 1.144 倍 (场半径的定义参考图 6.5)。四极电场在杆之间形成。不同质量的离子以大约相等的能量被轴向注入杆系统, 并以匀速移动通过杆系统。所施加的四级场在 X 和 Y 轴方向偏转离子, 导致离子通过质量过滤器围绕 Z 轴勾勒出螺旋轨迹。如果轨迹振荡的振幅小于场半径  $r_0$ , 则离子到达探测器; 如果振幅超过该值, 则离子将在杆或周围表面上放电, 并不会通过过滤器。

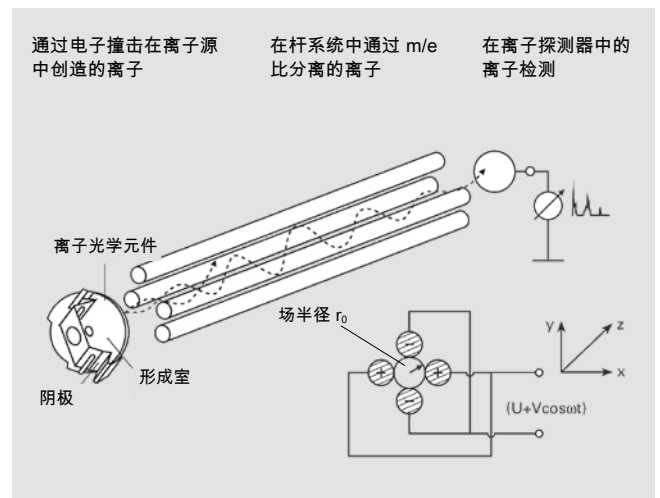


图 6-5 : 四级杆质谱仪的工作原理



要解答运动方程，引入两个无因次变量  $a$  和  $q$ ，其结合了四级杆参数（直流电压  $U$ 、交流振幅  $V$ 、场半径  $r_0$ 、角频率  $\omega = 2\pi f$ ）和离子参数（电荷  $Q = z \cdot e$ 、质量  $m = M \cdot m_u$ ）。

$$a = \frac{8 \cdot Q \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

公式 6-6：稳定性参数  $a$

$$q = \frac{4 \cdot Q \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}$$

公式 6-7：稳定性参数  $q$

凭借这种简化，获得马修微分方程；其算法在数学中是众所周知的，它们可用于计算具有振荡幅度  $r_{max} < r_0$  的稳定轨迹的范围，该范围用于稳定参数  $a$  和  $q$  的配对，该参数位于图 6.6 中两条限制曲线形成的三角形之下。在该范围之外的所有解导致振荡幅度增加，从而导致四级杆过滤器杆上的离子中和。用这两个方程相除得出： $a/q = 2U/V$ 。这是质量过滤器所谓负载线的斜率。

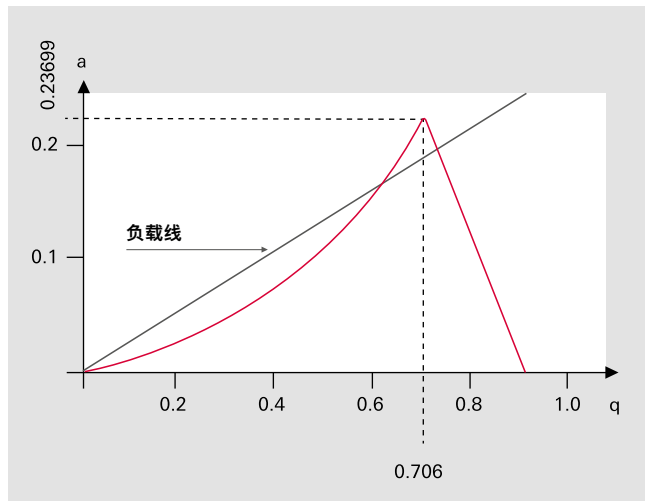


图 6.6：四级杆过滤器的稳定性图表

在界限处，负载线与峰值相交，峰值： $a_p = 0.237$  和  $q_p = 0.706$ 。

四级杆过滤器显然仅适用于电压

$$\text{比 } \frac{U}{V} = \frac{a_p}{2 \cdot q_p} < 0.1678,$$

即：负载线与稳定性范围相交。参数  $a$  和  $q$  在三角形之内、在负载线之上的所有离子将到达探测器。

引入比率  $m_u/e$ ，其是原子质量单位  $m_u = 1.6605 \cdot 10^{-27}$  kg 和基本电荷  $e = 1.6022 \cdot 10^{-19}$  A·s ( $m_u/e = 1.0365 \cdot 10^{-8}$  kg A<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) 之比，并用该比率乘以相应离子的无因次质量数  $M$  求出稳定性三角形（具有常数  $k_U = 1.2122 \cdot 10^{-8}$  kg A<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> 和  $k_V = 7.2226 \cdot 10^{-8}$  kg A<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>）顶点的电压  $U_p$  和  $V_p$  满足以下条件：

$$U_p = k_U \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

公式 6-8：稳定性条件 U

$$V_p = k_V \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

公式 6-9：稳定性条件 V

稳定性条件显示，在固定频率下，四级杆过滤器处的电压与质量成正比，而且使用不同的电压振幅获得线性质量比例。

切断直流电压， $U = 0$ ，则所有离子轨迹，其中  $q < 0.905$ ，将是稳定的；根据公式 6-3，这些将是全部质量，其中

$$M > \frac{k_H \cdot V}{r_0^2 \cdot f^2}$$

公式 6-10：高通条件

其中  $k_H = 1.0801 \cdot 10^7$  A s kg<sup>-1</sup> 是一个常数。因此，过滤器在该操作模式中充当高通滤网。由于 RF 振幅  $V$  增加，不断加重类型的离子变得不稳定，从轻质量开始，从而被分离开来。该操作模式产生积分谱，并允许进行总压测量。

离子注入条件是通过过滤器传输离子的关键。离子必须在尽可能靠近杆系统中心的区域进入四级杆，并理想地平行于杆轴移动。

场直径（杆之间的距离）越大，四级杆越长（杆长度），则越容易满足这些条件。此外，杆尺寸变大大可使几何精度（制造公差）更容易保证。

第 6.1.4.1 中描述了普发真空离子源具有高电离率，从而实现高灵敏度。

在实际操作中，其比率  $U/V$  激活作为质量数的原因，激活方式使实际分辨率  $M/\Delta M$  不保持恒定，而是线宽  $\Delta M$  保持恒定。这意味着，分辨率与质量数成正比增加。由于公式 6-9 ( $V$  与  $M$  成正比)，四级杆（与扇形场质谱仪相反）产生线性质量比例。

QMS 的重要特性之一在于其所需的 RF 功率。如果  $C$  用于指定系统的整体电容，且  $Q$  用于指定电源电路的质量因数，则所需的 RF 功率会增加

$$N_{RF} \approx \frac{C}{Q} \cdot M^2 \cdot f^5 \cdot r_0^4$$

公式 6-11：RF 功率

具有高功率  $f$  和  $r_0$ 。场半径  $r_0$  的放大将减少所发生的相对机械公差，从而产生改善的行为。实质上，选择的  $f_0$  和  $r_0$  尽可能的大是有利的。然而，根据公式 6-11，由于 RF 功率相应增加，这是有限制的。虽然延长杆系统允许较低的操作频率，生产装置的尺寸不应该超过某些实际尺寸。

所需质量范围和所需分辨率是由过滤器尺寸和所选操作频率来约束的。具有 6、8 和 16 mm 杆直径的设备和适当匹配的电子可用于满足大多数要求。

以下是有关分辨率和机械精度之间关系的简要介绍。让我们考虑在稳定性图表顶点工作的四级杆质量过滤器；即具有高分辨率。以下方程式 6-8：

$$U = 1.2122 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

适用于直流振幅，公式 6-9

$$U = 7.2226 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot M \cdot r_0^2 \cdot f^2$$

适用于直流振幅。在这里， $M$  表示离子质量， $r_0$  表示场半径， $f$  表示过滤器工作的频率。我们理想化地假设电压  $U$  和  $V$  以及频率  $f$  可以设置并保持“如描述的那样精确”。

$$\text{从这得出的结果是：} M = c_k \cdot \frac{1}{r_0^2}$$

( $c_k$  是常数) 及以下区别、除以  $M$  和测定值、 $r_0$  导致的过滤器散射是：

$$\frac{dM}{M} = \frac{2 \cdot \Delta r_0}{r_0}$$

公式 6-12：散射

让我们假设场半径  $r_0$  在质量过滤器长度上改变  $dr_0 = 0.03 \text{ mm}$ 。现在让我们考虑这种改变对不同尺寸两种质量过滤器散射的影响。为获得最佳传输，质谱仪上设置的分辨率（我们选择： $\Delta M/M = 1/100$ ）必须大于  $r_0$  波动产生的散射。对于场半径为 3 mm 的过滤器，这导致  $dM/M = 2 \cdot 0.03 \text{ mm} / 3 \text{ mm} = 0.02$ ，即：由于不完善的几何形状妨碍所需分辨率导致的散射。对于较大场半径为 12 mm 的过滤器，这导致  $dM/M = 2 \cdot 0.03 \text{ mm} / 12 \text{ mm} = 0.005$ ，几何形状没有妨碍所需的分辨率。换言之：如果两个过滤器均已将分辨率设置为  $\Delta M/M = 0.01$ ，则在第一种情况中，大多数离子将不能够穿过过滤器。在第二种四级杆过滤器较大的情况下，所有离子都能够穿过过滤器。

虽然这种简化的误差计算不会考虑对传输造成的所有影响，但是它确实表明了以下几种基本关系：

- 场半径必须保持显著高于过滤器整体长度的 1%，这取决于所选的质量范围。场半径的波动会导致传输损耗。
- 所选杆系统的尺寸越大，绝对机械公差的影响将越低。
- 在质量范围内应对邻近的质量进行区分，质量越高，对于质量过滤器相对精度的要求就会越严格。

#### 总结

四级杆质量过滤器是用于正负离子的动态质量过滤器。质量比例与所施加的 RF 电压振幅呈线性关系。质量分辨率可以借助直流电压  $U$  和高频电压振幅  $V$  之比方便地进行电设置。由于其尺寸小、重量轻，四级杆质谱仪既适合于作为纯粹的残余气体分析仪，在较高质量设计中，也适合作为气体分析的传感器。

### 6.3.2 离子源

在气体可在质量过滤器中进行分析之前，它们首先必须在离子源中通过电子撞击进行电离（图 6.6）。电子从电加热的阴极（金属丝）中发射出来。在阳极和阴极之间施加电压，从而使电子加速。存在于阳极和阴极之间形成空间里的中性气体分子通过电子之间的碰撞发生电离，形成单个和多个正离子。碰撞电子的能量对将要形成的离子数量和类型都有显著影响。

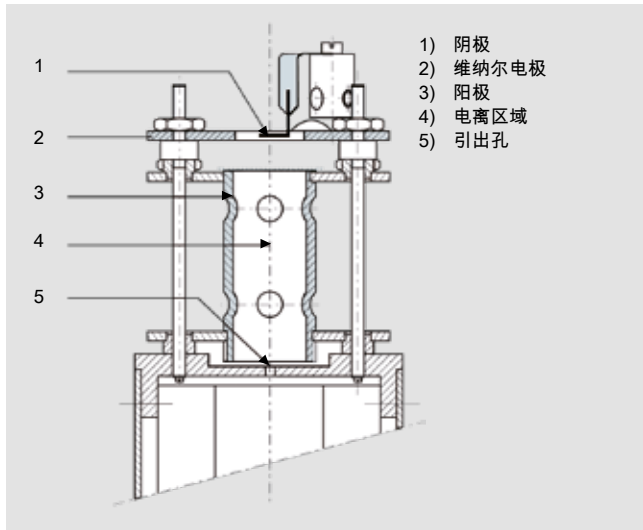


图 6.6：轴向离子源的截面图

中性粒子的电离在 10 和 30 eV（表观电势）之间最小的电子能量时开始。随着电子能量上升（加速电压），形成的离子数量快速增加，最多达到 50 至 150 eV，这取决于所涉及的气体类型，然后随着能量的继续上升而缓慢减少。由于离子的产量，且质谱仪的灵敏度因此应尽可能地大，通常使用 70 和 100 eV 之间的电子能量。

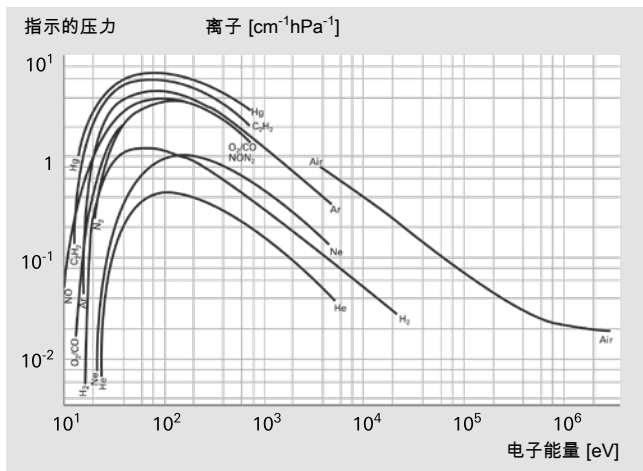


图 6.7：电离是电子能量的函数

气体成分 K 的离子电流  $I_{K^+}$  可以从以下关系中计算得出：

$$I_{K^+} = i \cdot l_e \cdot s \cdot p_K$$

公式 6-13：离子电流

其中：

$i$  = 电子电流（发射电流），单位 A

$l_e$  = 电子平均路径长度，单位 cm

$s$  = K 截面上的微分电离影响因子，单位  $1/(\text{cm} \cdot \text{hPa})$

$p_K$  = 气体成分 K 的分压，单位 hPa

当电离复杂分子时，会形成许多类型的离子。除了单个和多个带电子的离子，(ABC<sup>+</sup>, ABC<sup>++</sup>)碎片离子也会出现。

- ABC<sup>+</sup> 2e<sup>-</sup>
- ABC<sup>++</sup> + 3e<sup>-</sup>
- AB<sup>+</sup> + C + 2e<sup>-</sup>
- BC<sup>+</sup> + A + 2e<sup>-</sup>
- A<sup>+</sup> + BC + 2e<sup>-</sup>
- C<sup>+</sup> + AB + 2e<sup>-</sup>
- B<sup>+</sup> + A + C + 2e<sup>-</sup>

除了这些类型之外，也可能形成复合离子，如 AC<sup>+</sup>。各个类型离子的出现及其相对频率是一定类型分子的特性，并在识别分子中作为重要的辅助手段，因此将其作为定性气体分析中的一种辅助手段。图 6.8 显示了在电子能量为 70 eV 时记录的简单分子 CO<sub>2</sub> 的碎片离子分布（分裂图型或碎片图型）。

离子源和最佳金属丝材料的选择是基于测量任务所规定的要求。应用通常离子源要求会相互矛盾。为了达到最佳的效果，离子源必须与测量任务需求相一致。这导致不同类型离子源的开发，这些离子源几乎都可以配备由铼 (Re)、钨或铪化铱 (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Ir) 制成的阴极。在 UHV 范围或铼 (Re) 蒸汽压在其中具有干扰影响的应用中，钨 (W) 阴极是优选。然而，由于钨/碳/氧循环导致钨阴极的脆性，必须加以考虑；即由于 W<sub>2</sub>C 的形成。如今，越来越多地使用铪化铱来代替过去使用的纯金属阴极。这些阴极的优势是其显著降低的工作温度和对空气侵入的相对不敏感性。因此，使用这些阴极的优选领域是对温度敏感物质的分析（例如，有机金属化合物）或是对含有高浓度氧气的气体混合物中污染物的分析。

下文在离子源属性和应用领域的基础上描述了各种离子源。

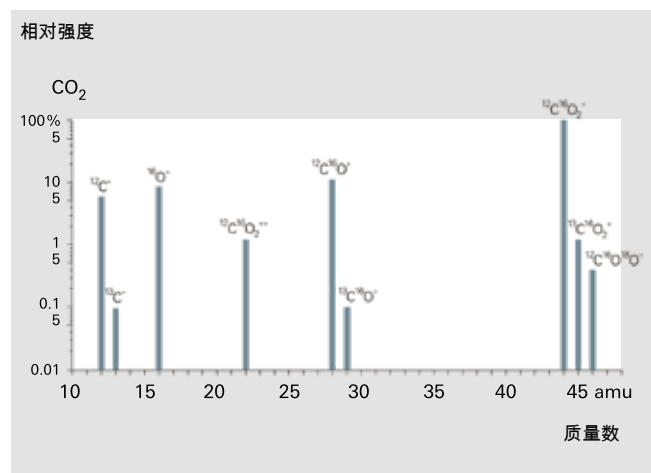


图 6.8：CO<sub>2</sub> 的碎片离子分布

| 材料                                | 温度       | 适用气体   | 备注   |
|-----------------------------------|----------|--|--|
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ir | 1,300 °C | 惰性气体、空气/O <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> | 使用卤素会缩短使用寿命，对高浓度 O <sub>2</sub> 不敏感，从 O <sub>2</sub> 或 H <sub>2</sub> O 环境中产生 CO / CO <sub>2</sub>       |
| W                                 | 1,800 °C | 惰性气体、H <sub>2</sub> 、卤素、氟利昂                              | 使用 O <sub>2</sub> 应用时缩短使用寿命，从 O <sub>2</sub> 或 H <sub>2</sub> O 环境中产生 CO / CO <sub>2</sub> ，C 会导致金属丝脆性增强 |
| Re                                | 1,800 °C | 惰性气体、烃类、H <sub>2</sub> 、卤素、氟利昂                           | 由于材料蒸发，金属丝使用寿命大约三个月，与烃类一起使用  |

表 6.1 : 金属丝材料及其用途

所有离子源的共同特点是它们可以连接至高达 150 V 的电势。这避免了因 EID 离子导致的信号背景，( EID = 电子碰撞解吸，也称为：ESD = 电子诱导脱附 )。稍后将详细说明该技术。

### 轴向离子源

该离子源的特点是极其坚固的机械设计和高灵敏度。由于其开放式结构，它主要用于高真空系统中的残余气体分析。图 6.6 显示了轴向离子源的示意图。阴极 (1) 布置在维纳尔电极 (2) 中的孔内，并在一侧与该电极相连。被阳极 (3) 加速的电子在形成区域 (4) 中电离气体分子。正离子通过引出孔 (5) 到达质量过滤器。由于其相对开放的结构，通过解吸和表面反应，只有轻微的数据偏差。

### 网格离子源

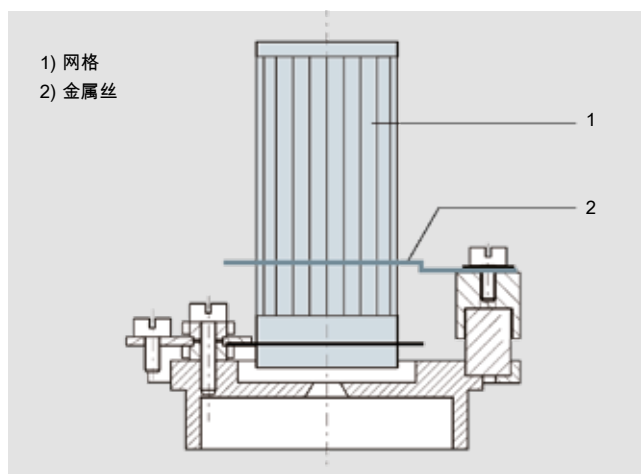


图 6.9 : 网格离子源

网格离子源用于检查 UHV 或者甚至 XHV 应用中的残余气体。其极其开放的结构和材料的选择确保了非常低的内部气体释放。该离子源配备了两个可同时加热脱气的钨丝。如果在低于 10<sup>-11</sup> hPa 的压力下执行工作，特别是为此目的，应使用已经充分脱气的杆系统。在低于 10<sup>-10</sup> hPa 压力范围内的测量可能受到所谓的 EID ( 电子碰撞解吸 ) 影响产生离子的数据偏差。[32]。这些 (H<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, F<sup>+</sup>, Cl<sup>+</sup>) 离子直接通过表面的电子碰撞进行解吸，通常具有高产额。EID 离子来自 UHV 设备前期的吸附涂层或离子源，通常具有几个 eV 的初始能量。此属性通过仔细选择场轴电压来加以利用，以抑制相对于来自气相、具有能量大约为 100 eV 离子的 EID 离子 ( 图 6.10 )。

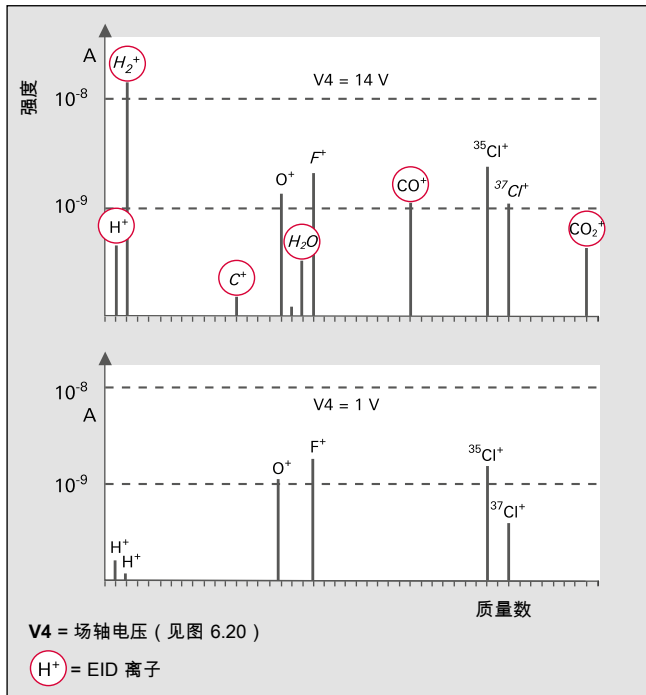


图 6.10 : EID 离子的识别

## 交叉束离子源

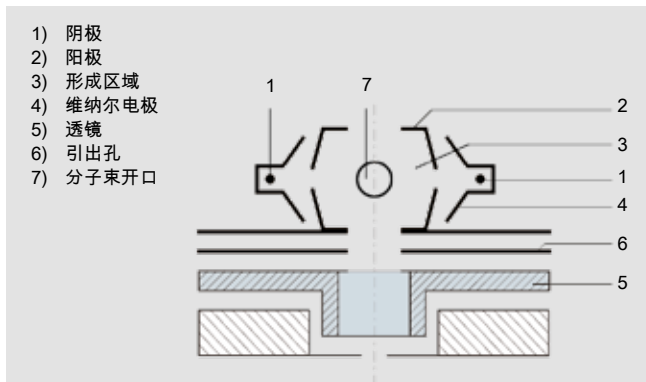


图 6.11 : 交叉束离子源

交叉束离子源 (图 6.11) 允许垂直和平行于系统轴分子束直接通行。系统使用预先选定的能量 (0 – 120 eV) 从左侧或右侧金属丝 (1) 将电子发射到形成区域 (3)。金属丝电势处的维纳尔圆柱电极 (4) 能够防止电子散射到环境中去。由于电子能量可在较宽的范围内进行设置, 所以该离子源可用于确定表观电势。交叉束离子源非常精确地保持离子以射入状态进入质量过滤器。交叉束离子源用于诊断捆绑式分子束。在该过程中, 分子束垂直于投影平面轴射入形成区域 (图 6.11)。在通过离子源 (7) 后, 非电离中性气体分子引导进入泵中或进入冷阱中进行冷凝。具有这种类型离子源的质谱仪也用作分子束外延的“速度计”。

## 密闭式离子源

上述离子源也可用在密闭式版本中。如果只提供少量的样气或如果残余气体产生的信号背景需要有效地被抑制, 则使用密闭式离子源。在这种结构中, 进气系统 (如加热毛细管) 和离子源必须相互匹配。通过离子源的流导, 流入的气体体积将确定形成区域中的压力, 该压力可以是周围真空室中压力的倍数。现在, 将通过举例的方式使用轴向离子源说明其工作原理。

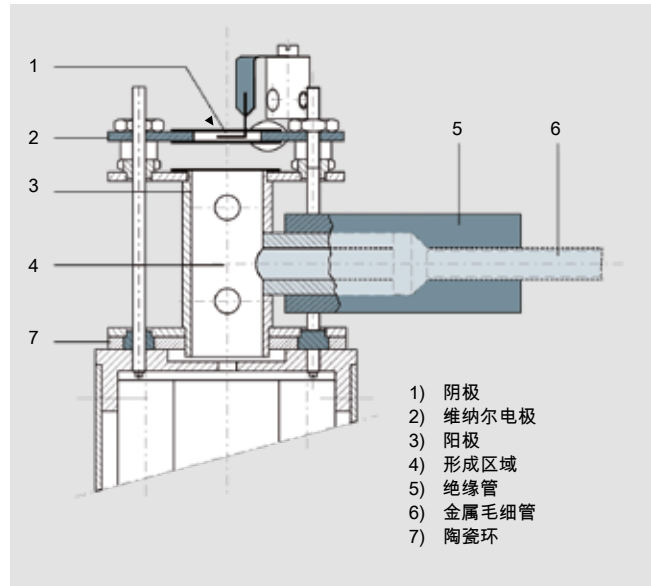


图 6.12 : 密闭式轴向离子源

将待分析的气体直接通过处于低电势的金属毛细管 (6) 和绝缘管 (5) 引入到形成区域 (4)。由垫圈 (7) 提供绝缘。真空室流导大约为 1 l/s。

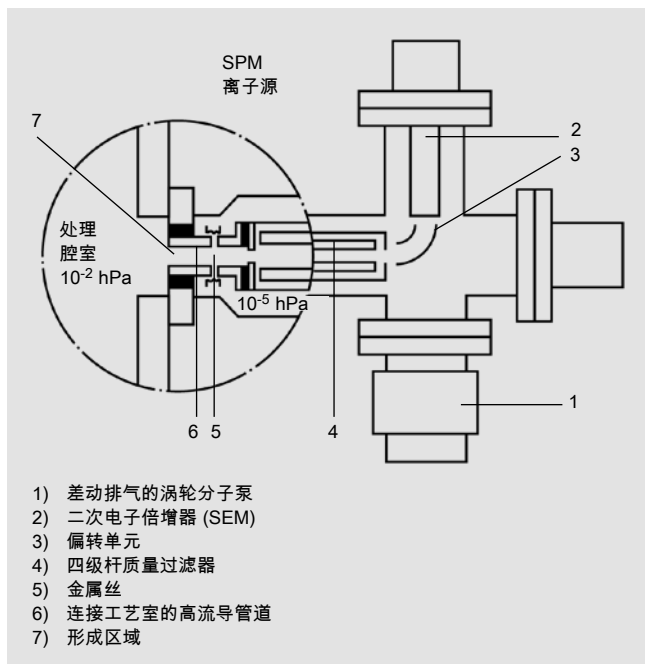


图 6.13：SPM 离子源

### 溅射工艺监控器 (SPM) 离子源

在该离子源中，形成区域 (7) 与工艺室直接相连。分析仪配备了小型分子泵 (1)，该泵站也将阴极空间 (5) 抽空至大约  $10^{-5}$  hPa。电子通过小孔从低压侧射入形成区域 (7)，以便电离气体。由此形成的离子通过低压侧的小开口被引入到质量过滤器。该离子源为溅射工艺中检查气体组成提供两个关键优势。一方面，分析在高达三个数量级以上的离子源压力下进行；即：真空室中可以承受较高的工艺压力。另一方面，热金属丝不与溅射工艺直接接触。这避免了热阴极在敏感工艺中造成的污染。

### 标准的 PrismaPlus 离子源

普发真空的 PrismaPlus 质谱仪配备了这一功能强大、高度灵敏的离子源。它是一种特别适合于残余气体分析的离子源。它的设计类似于网格离子源，具有两个阴极，从而保证了操作的可靠性。可同时提供开放式版本和密闭式版本，密闭式版本的进气口在轴向方向。



图 6.14：PrismaPlus 离子源

这里描述的所有离子源均通过电子碰撞方式进行电离。离子源可分为两类：

- 如果待分析气体所处的高真空  $< 1 \cdot 10^{-4}$  hPa 时，则使用开放式离子源。
- 封闭式离子源用作分析应用中，例如，在只提供少量样气或减少质谱仪真空系统的背景影响时。

封闭式离子源与差动排气系统 (图 6.13) 结合使用，以便分析压力较高的气体。

### 6.3.3 探测器

按照质荷比在杆系统中分离的离子可以使用各种类型的探测器以电气方式进行检测：

- 通过法拉第杯使用静电计放大器直接测量离子电流
- 使用具有单独倍增器电极、离散设计的二次电子倍增器 (SEM)
- 通过连续二次电子倍增器 (C-SEM)

探测器选择主要基于检测灵敏度、检测速度和信号噪声比有关的要求。然而，它也将受到其它应用特定要求以及空间要求的制约，这些特定要求涉及到稳定性、耐热性和耐化学性等。

### 法拉第杯

在最简单的情况下，离子撞击法拉第收集器 (法拉第杯)，它们在此失去了电荷。

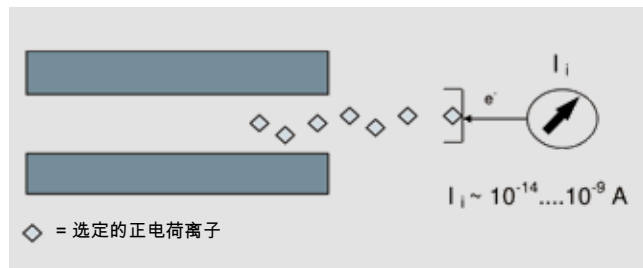


图 6.15：法拉第杯的工作原理

通过灵敏的电流电压变换器 (静电计放大器)，所产生的电流被转换成与离子电流成正比的电压。带有法拉第杯的静电计放大器的灵敏度通常是  $K = 10^{-4} \text{ A/hPa}$  数量级。电流放大器的输入电阻  $R$  必须非常高。凭借典型的接线电容  $C$ ，这导致时间常数  $\tau = R \cdot C$  在范围  $0.1 \text{ s} < \tau < 100 \text{ s}$  之内。根据时间常数、在  $1 \cdot 10^{-16}$  和  $1 \cdot 10^{-14} \text{ A}$  之间的测量限制，数量级为  $p_{min} = 10^{-10} \text{ hPa}$  的最小分压可以被检测到。对于总压在  $10^{-8} \text{ hPa}$  以下的 UHV 系统，通常是这样。

除其简单、坚固的设计之外，法拉第探测器的特点是其长期的稳定性和耐高温的能力。为保持较小的时间常数及避免其它干扰影响，静电计放大器直接连接至分析仪，且其输出信号被直接提供给数据分析系统。这就是法拉第杯存在于所有普及真空质谱仪中的原因。然而，它只适合于检测正离子。

如果要测量极其小的离子电流或需要极其高的测量速度，则使用物理前置放大器，即所谓的二次电子倍增器。

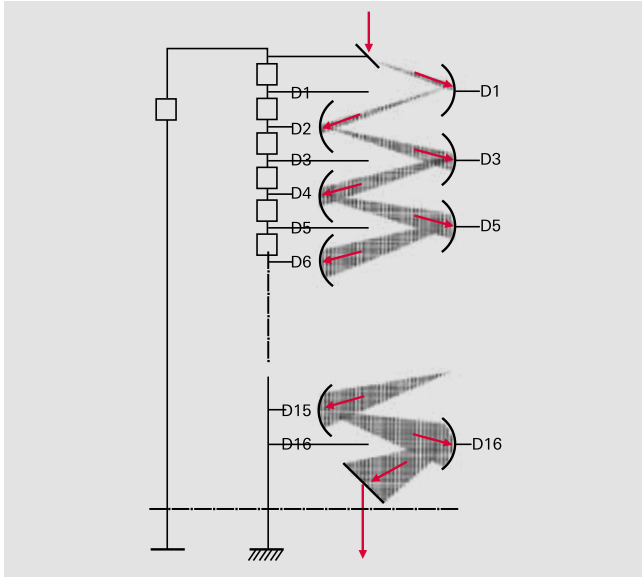


图 6.16 : 二次电子倍增器 (SEM)

### 二次电子倍增器 (SEM)

图 6.16 显示了此类倍增器 (SEM = 二次电子倍增器) 的典型结构。圆柱形金属片 (倍增器电极) 具有能够提供低级别电子逸出功的涂层。根据其动能，离子或电子在撞击该层后产生多个二次电子。经过多个阶段单离子处产生电子雪崩。在倍增器电极之间施加大约 100 V 的正电压，以加速电子。通过电阻串联向倍增电极之间供应高电压 (大约 1,000 – 3,000 V)，两个电极分别连接至该电压分接头，按照这种方式安排技术实施。高电压正极接地，以保持逸出电子处于接近地电势的状态。这些类型的安排产生  $10^7$  的电流放大因子。

二次电子倍增器通过法拉第杯提供以下优势：

- 它极大地增加了仪器的灵敏度，提供灵敏度增加高达  $K = 10 \text{ A/hPa}$ 。
- 这意味着，使用下游静电计放大器可以在更短的时间间隔内扫描较低的分压。
- 信噪比显然高于静电计放大器，这意味着，检测限制可下降几个数量级。这仅在高度放大条件下在 SEM 中也能实现较低暗电流 (噪音水平)。灵敏度的单纯增加价值不大。

然而，SEM 也有缺点：

- 其放大率会因污染或活性层中的化学变化而发生改变。
- 产生碰撞离子 (大约 1 到 5 个电子) 的电子数 (转换因子) 取决于离子能量 (质量甄别)。

放大率受到这些因素的影响而改变。因此，必须时常对 SEM 进行校准。通过改变高电压可以很容易地对放大率进行调整。通过给第一个倍增器电极提供力求等于各个离子能量的独立高电压，可以保持转换因子恒定不变。

凭借二次电子倍增器的辅助，可快速的进行测量。从表 6.2 中可以看出，其测量速度明显高于使用法拉第杯的测量速度。

除了作为电流放大器操作外，离散倍增器电极 SEM 也适合作为离子计数器。使用该配置，可以获得每 10 秒 1 个离子的极低计数率。高计数率也是可能的，与作为电流放大器相比能够产生非常广泛的动态范围。

|                | PrismaPlus            | 使用 SEM 217 的 HiQuad   | 使用 SEM 218 的 HiQuad   |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 探测器            | 法拉第/C-SEM             | 法拉第/SEM               | 法拉第/具有转换倍增极的 SEM      |
| 法拉第杯最大压力       | $10^{-3} \text{ hPa}$ | $10^{-4} \text{ hPa}$ | $10^{-4} \text{ hPa}$ |
| SEM、C-SEM 最大压力 | $10^{-5} \text{ hPa}$ | $10^{-5} \text{ hPa}$ | $10^{-5} \text{ hPa}$ |
| 最大测量速度/ $\mu$  | 2 ms                  | 125 $\mu\text{s}$     | 125 $\mu\text{s}$     |
| 烘烤温度 (最大)      | 300 °C                | 400 °C                | 400 °C                |
| 计数操作           | 否                     | 是 (可选)                | 是 (可选)                |
| 正离子检测          | 是                     | 是                     | 是                     |
| 负离子检测          | 否                     | 是                     | 否                     |

表 6.2 : 探测器及其属性

在计数模式中，SEM 的速度限定了动态范围的上限。使用 20 ns 的脉冲宽度，非线性在每秒  $10^6$  开始。鉴于其脉冲宽度，SEM 一定适合作为计数器。

所有二次电子倍增器的共同点是，它们被限制在低于  $10^{-5}$  hPa 的压力下操作。在高于这些压力时，倍增器电极上的水分子层会在操作中高温分解，从而导致过早老化。由于涉及高电压，可能损坏 SEM 的气体放电可在压力  $p > 10^{-5}$  hPa 时发生。

#### 连续二次电子倍增器 (C-SEM)

C-SEM (图 6.17) 由内部涂有导电层的玻璃管组成，该导电层具有高电阻和低电势。给该导电层施加高压，以使整个管长度获得均匀电压梯度。四级杆系统的离子按确定路径被发送到转换倍增器电极，并产生触发管内电子雪崩的二次电子。在放大电压为 2,500 V 时，获得  $10^6$  的电流放大因子。

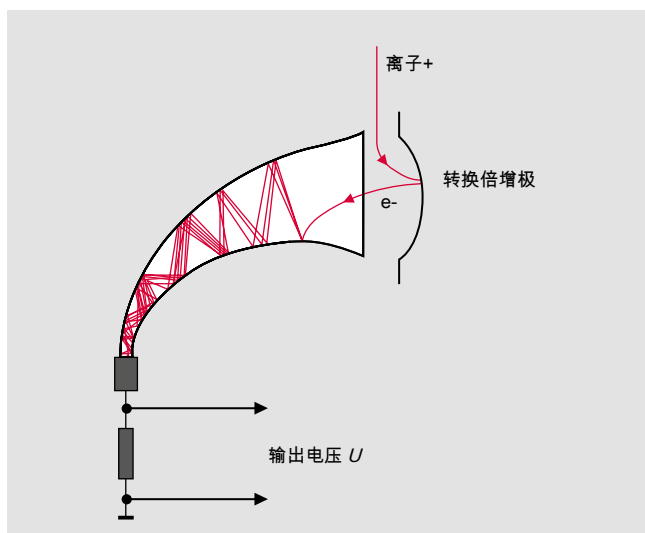


图 6.17 : 连续二次电子倍增器 (C-SEM) 的工作原理

在此处也一样，放大率和暗电流控制信号噪音比，且  $10^6$  的最大电流/暗电流之比是电流放大因子。得益于 C-SEM 相对于四级杆轴稍微偏移的布置，法拉第杯以及 C-SEM 可以在分析仪中彼此相邻使用，在必要时可以从一个探测器切换到另一个探测器。

#### 6.3.4 真空系统

离子必须能够穿过四级杆过滤器，而不与中性气体粒子碰撞。在压力  $p < 10^{-4}$  hPa 时获得的平均自由程是操作四级杆质谱仪所必需的。这需要具有压力监测功能的合适泵站。为进行具有最佳灵敏度的气体分析，不仅低本底压力是必要的，而且残余气体应只包含源自设备壁解吸的不可避免的分压。使用涡轮牵引泵，这种类型的残余气体光谱和本底压力可达到最佳 (图 4.27)。附加的总压计防止质谱仪在过高压时通电。在建立此类系统时，必须注意进气口、阀、泵和测量仪器的适当安排，以避免不利流动条件产生的测量误差。真空工艺在高压下运行的过程中，通常需要一个用于对测量系统进行抽空的独立泵。带有涡轮牵引泵和隔膜泵的小型机组可作此用途。

#### 6.3.5 进气系统

待分析的气体通常必须从大气压下降到低于质谱仪 (MS) 工作压力的压力。由质谱仪监测的许多真空技术工艺发生在  $p > 10^{-4}$  hPa 的压力范围内。因此，四级杆质谱仪的基本条件是根据特殊的应用配备合适的进气系统。可使用各种减压程序，这取决于所涉及的压力梯度。

气体混合物应该允许进入质谱仪而无需混合，如条件允许：

- 在压力  $p > 10$  hPa 时，压力通过 (可加热的) 毛细管降低，其中，层流占主导地位，具有下游进气阀。在某些情况下，需要通过额外的泵来降低压力。
- 在压力  $p < 10$  hPa 时，使用节流孔和质谱仪降低压力，并使用涡轮分子泵对质谱仪进行差动排气。
- 在压力  $p < 10^{-4}$  hPa 时，质谱仪可以直接安装在具有开放式离子源的工艺室中。

如果使用节流孔降低压力，其气体类型相关的流导被泵抽气管道的流导抵消，这意味着 QMS 中的浓度反映了真实的气体成分。



| 进气系统    | 压力范围                             | 产品示例  | 特点   |
|---------|----------------------------------|---|--|
| 无减压     | $10^{-12}$ 至 $10^{-4}$ hPa       | PrismaPlus QMG 220、<br>HiQuad QMG 700                 | 开放结构的离子源允许系统中来自任何地方的气体出现在电离室空间之中                                 |
| SPM 离子源 | $10^{-9}$ 至 10 hPa               | PrismaPlus SPM 220、<br>HiQuad SPM 700                 | 分析溅射工艺的特殊离子源。该系统直接在溅射压力为 $10^{-2}$ hPa 无需减压的情况下分析气体。             |
| 毛细管入口   | 100 至 1,100 hPa，<br>取决于毛细管长度和下游孔 | OmniStar、<br>ThermoStar、<br>进气系统 GES 020<br>和 GES 010 | 差动排气进气系统、低质量甄别、不适合不同的样品压力  |
| 孔口      | 0.01 至 10 hPa，由于孔径<br>的缘故        | PrismaPlus HPA 220                                    | 直径为 0.01 至 0.5 mm 的孔，简单、坚固的设计，质量甄别、可能凭借不同的孔径改变入口压力，不适合于快速变化的气体成分 |
| 计量阀     | 0.1 至 1.000 hPa                  | PrismaPlus HPA 220、<br>气体计量阀 UDV 040、UDV<br>146       | 计量阀适合于测量范围非常宽广的进气口，差动排气阀也允许快速变化的气体成分分析                           |
| 压力调节进气口 | $10^{-3}$ 至 1,000 hPa            | 带 RVC 300 的 EVR 016、<br>带压力调节入口的 OmniStar             | 差动排气口系统，包括带调节阀和压力测量的控制回路、相对大的固定空间、响应慢                            |

表 6.3：进气系统及其属性

### 6.3.6 应用说明

质谱仪分析因真空应用不同而呈现非常小的变化。上述具有加热毛细管的进气系统用于压力范围高达大气压的气体析。

气流可以直接被引导到密闭式离子源，以减少真空环境的背景噪音。气体束穿过交叉束离子源，射入真空泵冷阱之中。

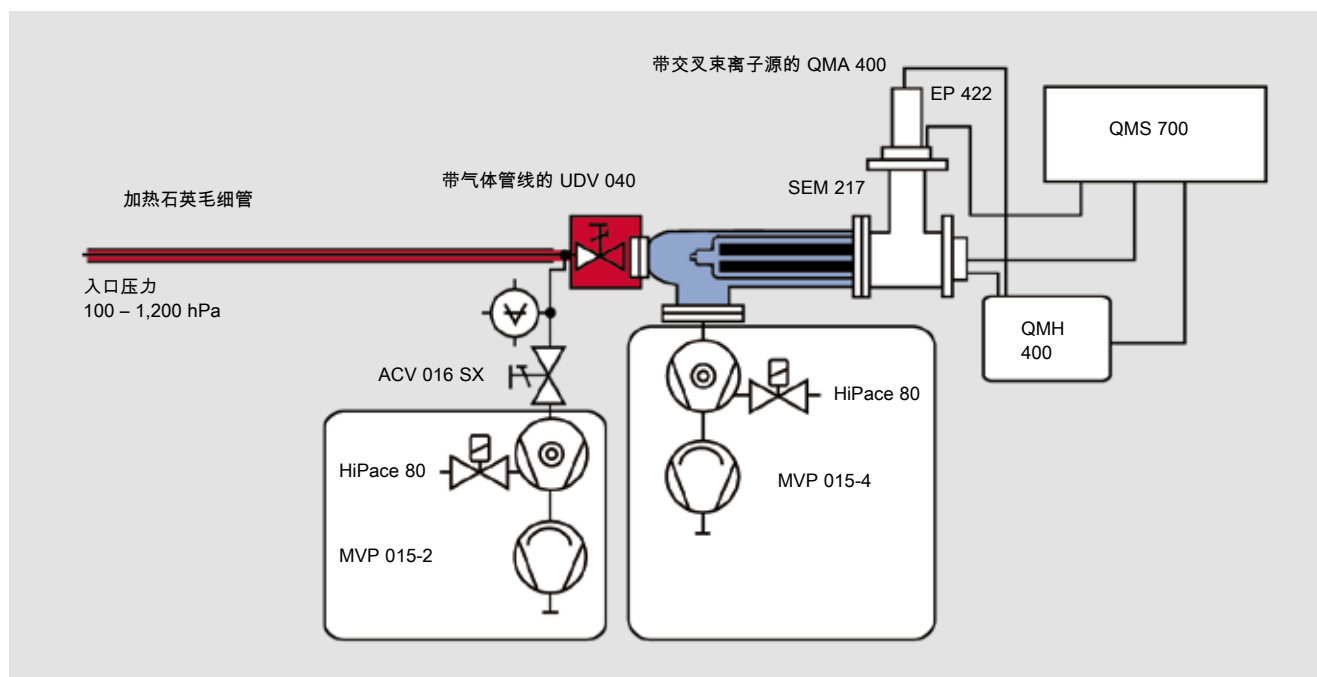


图 6.18：具有进气系统和交叉束离子源的 QMS

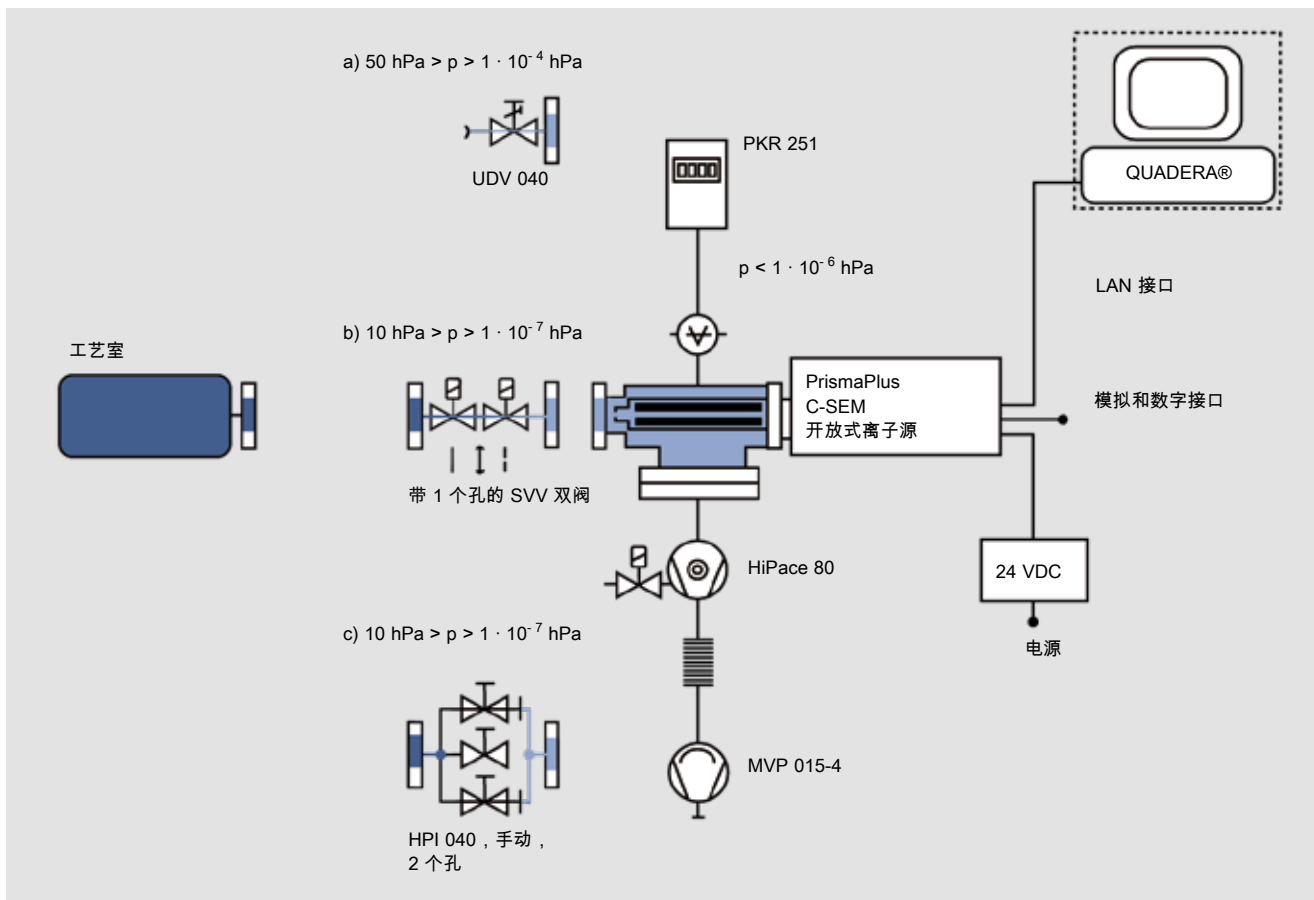


图 6.19 : 具有不同进气口的差动排气 QMS

如果压力范围  $p < 10$  hPa (蚀刻、溅射或其他涂层工艺)，则允许气体通过孔或阀进入质谱仪。涡轮泵被连接到测量系统，用于降低压力。有专门的版本适用于腐蚀性气体。

在极低压力下，特别是在 UHV 范围内，使用开放式离子源，其具有特别小的表面积，因此具有低出气率（网格离子源）。由于气体密度低，垂直于四级杆轴布置的二次电子倍增器 (SEM) 必须用作探测器。为改善信噪比，抽空流入中性粒子的涡轮泵被连接到 SEM 的反面。

二次粒子质谱法 (SIMS) 代表一种特殊情况。在该过程中，粒子被发射到表面上，而该表面反过来释放带正电荷或负电荷的二次离子。这些都是由 QMS 直接检测而无需离子源。上一节中所描述的测量装置也用在该情况下。

## 6.4 产品概览

普发真空提供两种基本的质谱仪型号：

- 紧凑型 PrismaPlus，具有 6 mm 直径的杆系统，长度为 100 mm，以及
- 高分辨率 HiQuad，质量过滤器直径为 8 mm 和 16 mm，长度为 300 mm。

### PrismaPlus

这是一个紧凑型设备，其整个电子装置被连接到分析仪，且可以拆下来进行烘烤。PrismaPlus 提供以下功能：

- 质量范围 100、200 和 300 u
- 法拉第杯和 C-SEM 可用作探测器
- 可以配备各种离子源和金属丝
- 分析仪可以在高达 300°C 的温度下烘烤

PrismaPlus 可用作独立设备，也可以集成到模块和分析系统中。

### HiQuad

这些设备提供最高的精度，并具有以下特点：

- 不同的型号涵盖质量范围 1-16 u、1-128 u、1-340 u、1-300 u、1-512 u、1-1,024 u 和 1-2,048 u。
- 不同的质量过滤器具有杆直径：6 mm、8 mm 铝、8 mm 不锈钢和 16 mm 铝

- 上述所有离子源几乎都可以与分析仪相结合。
- 有用于分析中性粒子以及正负离子 (SIMS) 的离子光学元件。
- 所有类型的探测器，即：法拉第杯、法拉第杯和 SEM、法拉第杯和 C-SEM 以及离子计数器，可提供各种配置。
- 这些质谱仪可以凭借输入/输出模块集成到分析系统。

### 模块

模块是特殊的过程监控或气体分析设备，其配备了各种进气系统并连接到用于排空分析仪的干式涡轮牵引泵机组：

- HPA 220 高压分析仪，基于 PrismaPlus。过程压力可达 50 hPa，提供手动和自动进气系统
- SPM 220 溅射工艺监控器，基于 PrismaPlus。通过各种进气口选项，过程压力可达  $10^{-2}$  hPa 或 10 hPa
- SPM 700 溅射工艺监控器，基于 HiQuad。与 SPM 220 具有相同的过程压力
- EPD 700 用于在气相蚀刻时检测正离子，基于 HiQuad。过程压力可达  $10^{-2}$  hPa

### 台式质谱仪

普发真空具有基于 PrismaPlus 的完整系统，用于在大气压下分析气体。优化的进气系统使用封闭式离子源，以获得最大的检测灵敏度。

- **OmniStar GSD 320 O** 具有加热和温度调节进气系统，用于在大气压下的定量气体分析。
- **ThermoStar GSD 320 T** 经设计与热重分析仪耦合。使用石英毛细管，允许高温样气进入。惰性石英表面防止表面反应，因此避免了测量结果的误差。

这些设备或其元件由 OEM 客户在完整设备中进行安装，其可能具有广泛的附加功能，如待分析物质的上游处理（如气溶胶的蒸发）或供应校准气体混合物进行自动校准。

#### 6.4.1 普发真空质谱仪的优势

普发真空离子源的电势曲线如图 6.20 所示。加热电子发射阴极具有大约 20 V 的电势。维纳尔电极通常被连接至阴极的正极，并防止电子在离子源附近散射。阳极电势 V2 为 80 V 的有效金属丝使电子减速进入形成区域 (100 V)，它们在其中电离进入的中性气体分子。离子通过孔在电势 V5 为 -150 V 时加速，并再次由聚焦电极减速至 V3 = 80 V。喷射孔在离子进入质量过滤器之前再次使其加速，并由场轴电势 V4 = 85 V 在能量大约为 15 eV 时使其减速（形成区域和场轴之间的差值）。

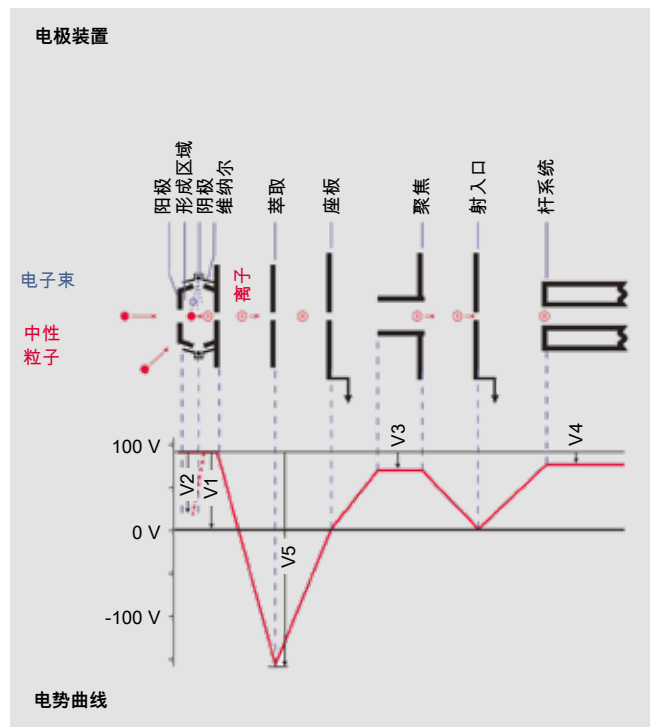


图 6.20：电偏压离子源中的电势曲线

普发真空 PrismaPlus 和 HiQuad 质谱仪的特点是其如上所述的电偏压离子源和其场轴技术。

#### 电偏压离子源

在许多四极杆质谱仪中，阴极接地，甚至有负电势。阴极（金属丝）使发射的电子加速到形成区域（阳极），它们在这里电离中性气体粒子，这些电离了的粒子之后被抽出到质量过滤器之中。在这样的磁场条件下，电子也可以撞击真空中的其他表面，它们在这里触发 EID（电子碰撞解吸）离子。这会导致不理想的背景噪音，如果腔室中有高密度表面，在金属丝通电时，也会导致相当大的气体解吸。

普发真空离子源具有正电势（大约 100-150 V）。从该离子源发射的电子被所有具有较低电势（如接地）的表面排斥，从而使电子远离这些表面，避免触发可造成干扰的 EID 离子。

### 场轴技术

在离子源中形成的离子以高动能向质量过滤器加速。因此，离子不会受到周边或 RF 边缘场的影响，并以最初高能量向质量过滤器移动。即使没有前置过滤器，离子射入四级场的理想条件可以由该方式获得，这与其它需要使用前置过滤器的质谱仪不一样。质量过滤器本身适当地偏向场轴电压，这使离子在进入过滤器后再次减速至约 15 eV 的动能。为场轴电压两倍的该能量和离子质量确定离子的速度，从而确定其在质量过滤器中的飞行时间。由此产生的有利射入条件导致离子在宽广的质量范围内通过质量过滤器的高穿透率，从而保证系统的高灵敏度。

### 二次电子倍增器的直角排列

普发真空质谱仪的另一个优势是二次电子倍增器 (SEM) 的排列，其相对于过滤器轴偏移 90° (90 度离轴 SEM，图 6.21)。

如果 SEM 被布置在轴方向，在质量过滤器后，所有碰撞粒子 (中性粒子、离子、电子、光子) 将产生二次电子，从而增大了背景信号。为防止这种情况，从过滤器排出的离子被偏转 90 度，然后向 SEM 第一倍增极加速。中性粒子和光子通过电偏转单元时没有发生任何偏转，且电子偏转的程度比离子大得多。这意味着，允许通过过滤器的所有离子几乎都会撞击 SEM，这显著提高了信号噪音比。

除了极少数特殊型号，所有 HiQuad 分析仪都配备了这种技术。

在 PrismaPlus 中，提供一个 C-SEM 作为电流放大器。同样，在这种情况下，离开质量过滤器的离子稍稍偏向 C-SEM，并与不需要的粒子分离。

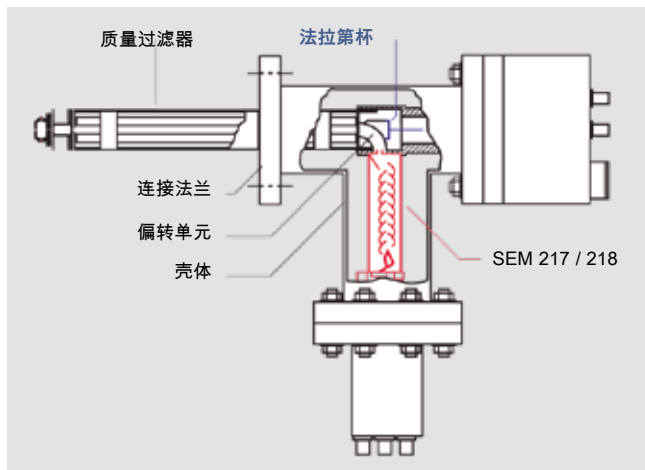


图 6.21 : 90° 轴向 SEM

### 质量甄别

撞击转换倍增极每个离子产生的二次电子数量取决于离子质量、能量与类型 (原子或分子离子)。转换率与质量有关。这种影响被称为质量歧视，使用离散设计的 SEM 没有使用 C-SEM 的效果明显。在离子撞击转换倍增极之前将其加速到高能可以减少质量歧视。

### 总结

稳定的 RF 电源和精密机械过滤器都是必要的，以使用预选的质量分辨率实现宽广质量范围内的最大可能传输。适当选择了场轴技术的偏压离子源以及 SEM 的 90 度离轴排列大大提高了信号噪音比。凭借被施加了高压的倍转换倍增极，可以减少 SEM 或 C-SEM 中的质量歧视。

以下属性使四级杆质谱仪有别于其他设计：

- 尺寸紧凑、重量轻
- 质量与 RF 电压振幅之间的线性关系
- 高灵敏度
- 信号噪音比大
- 测量速度与重复率高
- 宽广的动态范围 (可达 10 个数量级)
- 安装方向无限制
- 无磁场干扰

凭借这些优势，四级杆质谱仪已经成为最广泛使用的质谱仪。

### 6.4.2 数据分析系统

四级杆质谱仪在短时间内提供了适合在 PC 上显示和储存的大量信息。这就是为什么普发真空质谱仪上的电气控制装置只具有基本控制和显示元件。QUADERA® 软件用于控制目的并在 PC 上显示、分析及保存数据。

普发真空的 QUADERA® 质谱仪软件是与 PrismaPlus 和 HiQuad 设备一起使用的模块系统。PC 可以通过以太网与质谱仪进行通信，这意味着质谱仪与电脑之间的电缆长度就不重要了。

为执行特定的测量任务，PC 将参数记录传输到质谱仪，以便对设备进行设置。在测量期间或之后读出的数据被传输到电脑上进行分析、显示或保存。

典型的显示格式为：

- 具有可调节质量范围的质谱以及浓度的线性或对数坐标轴
- 按时间顺序的分压趋势显示
- 柱状图，以减少数据数量

典型的测量任务，如残余气体分析或泄漏检测，可以预编程，也可使用鼠标点击启动。

如果要执行定量分析，必须预先校准质谱仪。如涉及重复的过程，随后定量分析校准，这些过程可以使用VSTA（Visual Studio 应用程序工具）进行编程。不需要编程技能，因此预先设计的模块可用于此目的。

为解决复杂的测量任务，QUADERA® 软件中提供包含几个频繁出现的气体和化合物碎片离子分布的库。然而这些及从光谱库获得的其它分布仅可作为指导值，因为它们受到各种参数的影响，如电离能、温度或质量分析仪的传输特性。

在分析含有多种气体成分的混合物中，不同来源、相同质量数的离子电流重叠问题是经常发生的。强度完全由一种气体成分产生所对应的质量数（例如，氩的质量数为 40，氧的质量数为 32，二氧化碳的质量数为 44 和水的质量数为 18）。

如果存在其他质量数，检测到的离子流整体强度由不同气体成分各种碎片离子浓度的重叠来决定。根据待分析混合气体中的组成和浓度比，必须为所涉及的测量任务制定适当的算法和校准程序。在应用具有非重叠部分混合气体进行定量气体分析之前进入，必须针对所有重叠的质量数确定每个气体成分的校准因子。然后，这些气体的浓度和/或分压可由矩阵计算来确定。QUADERA® 质谱仪软件执行矩阵计算，并且提供气体特定的必要校准例程。

# 7 泄漏检测

## 7.1 概述

### 7.1.1 泄漏和检漏

在无损伤测试中，泄漏被定义为孔、多孔区域、气体能渗透区域或测试样品壁中不同的结构，气体因压力或浓度不同可以通过壁的一侧逸出到另一侧。[33]用更简单的术语表示，漏点即一个个的小孔，气体或液体通过该小孔从压力较高侧流向压力较低侧。孔的几何形状是未知的。这意味着，测试仪不知道泄漏是以光滑的圆形通道还是以裂缝或缝隙形式出现的。假设和计算只能是针对理想几何形状而进行的。由于泄漏通道的实际几何形状通常是未知的，所以只有将计算出的值假设为泄漏率的上限。说明：之前参考的欧洲标准 DIN 1330-8 采用术语“泄漏率”。鉴于可读性，我们将继续在本手册中采用较常见的术语“泄漏率”。

泄漏可以是无害的泄漏，如滴水的水龙头。那些涉及侵蚀性介质或有毒物质逸出的泄漏会有更严重的后果。美国挑战者号航天飞机在 1986 年遭受的事故也是由于火箭固体燃料上的 O 型圈故障和热燃烧气体的泄漏。

任何技术产品，如果出现泄漏，都将无法运行或无法按照预期时间运行。

如：

- 冰箱中的制冷剂循环系统
- 汽车中的空气调节系统
- 汽车轮胎
- 汽车油箱或加热油箱
- 化学或制药工业中的处理系统。

在很多情况下，生产过程中机器和系统的密封性是制造产品品质保证的必要前提条件。

回到泄漏的原始定义，我们发现，不可能完全防止物质流经外壁而泄漏。因此，术语“致密”是对相应机器、设备或容器的要求，且必须对其进行相应地量化。

### 7.1.2 泄漏率

让我们以 4 升容积的自行车内胎为例。它已充气至压力为 3 bar (1000 hPa)，在无任何额外充气的情况下，30 天后最大压力损失应为 1 bar (1 000 hPa)。

在 1.3.3 中已经定义了泄漏率：(公式 1-35)。

$$Q_L = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t}$$

|            |           |                                      |
|------------|-----------|--------------------------------------|
| $Q_L$      | 泄漏率       | [Pa m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ] |
| $\Delta p$ | 测量期间的压力变化 | [Pa]                                 |
| $V$        | 体积        | [m <sup>3</sup> ]                    |
| $\Delta t$ | 测量时间间隔    | [s]                                  |

或者为了说明：如果内压在 1 秒钟增加或减少 1 Pa，体积为 1 立方米容器的泄漏率是 1 Pa m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>。有关与其它常用单位的换算，请参考表 1-8 或我们的应用程序。

插入我们自行车内胎的值，然后得出允许的泄漏率

$$Q_L = \frac{1 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{30 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$$

我们发现，具有该泄漏率的自行车内胎非常致密。通过众所周知的气泡测试方法，可以发现这些类型的泄漏率 (图 7.1)。

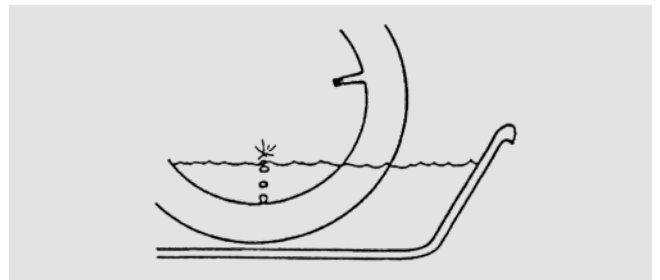


图 7.1：自行车内胎上的气泡泄漏测试

现在，让我们以十年允许损耗 10 g 制冷剂的冰箱为例。我们使用的制冷剂是 R134a (1,1,1,2-四氟乙烷)，分子量为  $102 \text{ g mol}^{-1}$ 。因此，允许的损耗约为  $224 \text{ Pa m}^3$ 。这导致允许的泄漏率为

$$Q_L = \frac{224 \text{ Pa m}^3}{10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3.600 \text{ s}} = 7,1 \cdot 10^{-7} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$$

这些类型的泄漏率只能通过非常灵敏的测量方法（如使用质谱法和大气中不存在的测试气体）来定位和量化。

### 7.1.3 示踪气体

用于泄漏检测的测试气体（也称为示踪气体）应该满足以下条件：

它们应该

- 对人类、动物和环境 无毒
- 不取代空气，因为危险情况，如窒息，可能会发生。
- 是惰性的，即反应迟缓，且应该没有化学反应，也不是易燃的
- 如果可能，不存在于空气中。只有使用环境空气中以最小浓度存在的气体，才可能检测到最小的泄漏
- 不易弄错成其它气体
- 通过测试漏率可量化

示踪气体氦满足所有这些要求。作为稀有气体，它不会发生化学反应。它在大气中只有 5 ppm，因此即使最小的泄漏也能检测出来。由于它比空气轻，所以不会对健康造成危害。使用质谱法，一种高度灵敏、非常有选择性的分析法（见第 6.1 和 7.2 节），可实现特殊的检测。也有很多设计为扩散泄漏或流量泄漏的商用泄漏测试。

几乎没有任何其它测试气体满足上述标准，95% 氮和 5% 氢的混合气体是个例外。在与空气宽广的混合范围内具有爆炸性的可燃性氢气在稀释到一定程度后，其混合物既无爆炸性也不可燃，因此用作测试气体很安全。相同的质谱法探测器也可以用作氢气的灵敏度测试。由于氢气在所用分析技术中具有较高的背景信号，其达不到与测试气体氦相同的检测灵敏度，但是它远远超过了压力衰减法的检测灵敏度。

## 7.2 使用示踪气体进行的泄漏检测

普发真空采用基于质谱仪和石英视窗传感器的泄漏探测器来检测示踪气体的存在。质谱仪对混合气体进行电离，并在其质荷比的基础上分离出所需的示踪气体。石英视窗传感器是基于轻型气体通过石英膜的选择性渗透。

### 7.2.1 氦质谱检漏仪的设计

四级杆质谱仪的工作原理如第 6.1.2 节所示。这些装置单纯用作残余气体分析仪或工艺气体分析仪以及泄漏检测仪。用于在较高压力下分析混合气体的进气系统（包括泄漏检测）如第 6.1.2.5 所述。基于四级杆质谱仪的气体分析系统可以用作多气体泄漏探测器。

扇形质谱仪的工作原理如第 6.1.1 节所示。

图 7.2 中所示泄漏探测器的质谱仪单元也只在低于  $10^{-4} \text{ hPa}$  的压力下工作。在泄漏探测器中，压力由泄漏探测器的泵系统产生和维持。这不需要任何操作员介入。

具有质谱分析仪的泄漏探测器的设计如图 7.3 中的示意图所示。

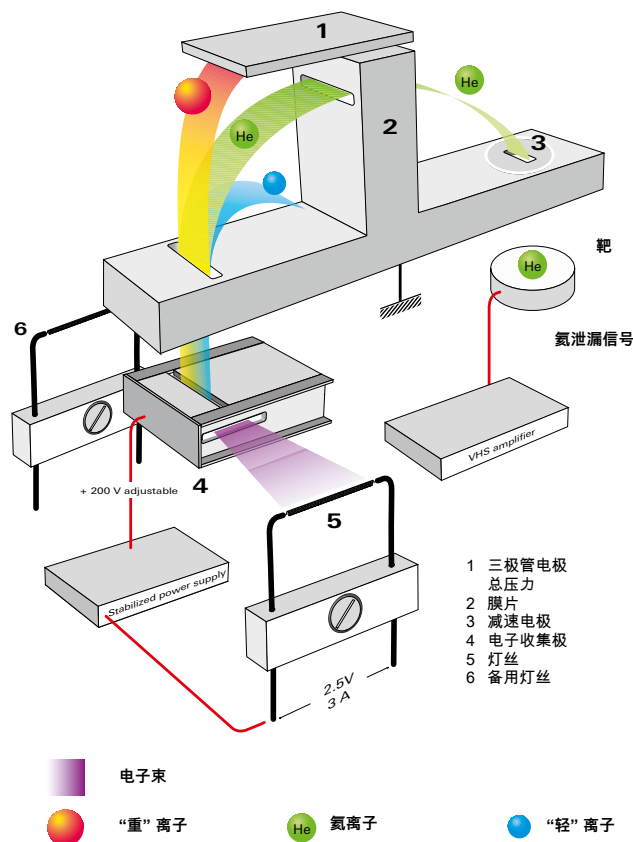


图 7.2：扇形质谱仪的工作原理

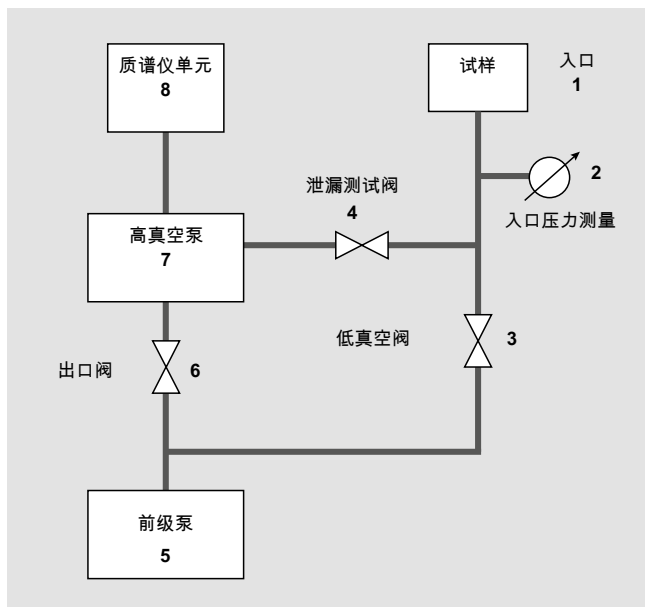


图 7.3：一般检漏的流程图

质谱仪（质谱仪单元（8）），用于质量 2、3 和 4（对应测试气体  $H_2$ 、 $^3He$  和  $^4He$ ，连接至涡轮分子泵（高真空泵（7））的入口法兰。前级泵通过排气阀（6）抽空涡轮分子泵。测试样本（在 DIN EN 1330-8 也被称为“测试对象”）在阀（3）打开时通过入口被抽空。阀（6）和（3）连接的方式是，涡轮分子泵所需的前级真空压力总是优于测试样本的抽空。一旦试样已被抽空，它可以通过阀（4）被连接至涡轮分子泵的前级真空或中间级泵，这取决于有关的压力范围。现在将测试气体喷射到试样的外部，并连同周围空气一起通过泄漏渗入试样中。残余气体中的测试气体通过涡轮分子泵经由阀（3）和（6）向泵送方向相反的方向流动，流入质谱仪单元，并在这被检测出来。涡轮分子泵对空气和轻型测试气体氦有不同的压缩比（相差多个数量级）。

虽然涡轮分子泵的高压缩比保持空气远离质谱仪，但轻气体以相对较高的分压抵达这里。涡轮分子泵从而充当氦和氢的选择性过滤器。这就是为什么即使在压力  $< 10 \text{ hPa}$ （对于某些设备来说稍高）时质谱仪也能够检测出试样中的氦和氢的缘故。高真空泵（4）中的中间各级和不同运行速度以指数形式影响压缩比，可以覆盖氦气分压的几个数量级，从而在  $1$  到  $10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$  之间的逆流泄漏率范围。必须在泄漏探测器最高灵敏阶段主流中的试样和探测器中实现  $10^{-2} \text{ hPa}$  几次幂范围中的压力（通过阀（4）进气）。

由于上游涡轮分子泵，质谱仪总是在非常低的总压下工作，从而得到很好的保护，免受污染和破坏。

### 7.2.2 带有石英视窗探测器的检漏仪设计

质谱探测器通过在磁场或电场中进行电离来分离混合气体，而石英视窗探测器利用气体不同的渗透性能。

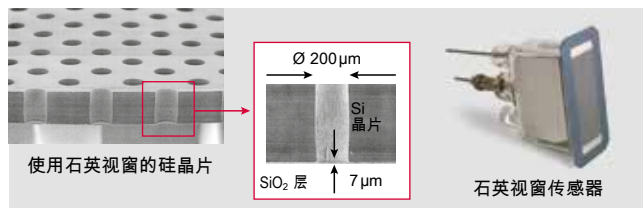


图 7.4：石英视窗传感器的工作原理

示踪气体被传送到加热膜片的石英表面。石英膜片的载体层包括有几千个孔的硅晶片，所有进入气体的原子和分子可以通过这些孔到达石英膜片。分离本身发生在石英膜片上，膜片只能允许氦穿过，其他气体则不能穿过。膜片的厚度和温度是氦测试气体渗透性的影响因素。在气体已经穿过膜片后，已经进入的示踪气体被电离，且离子电流是泄漏率的度量标准。

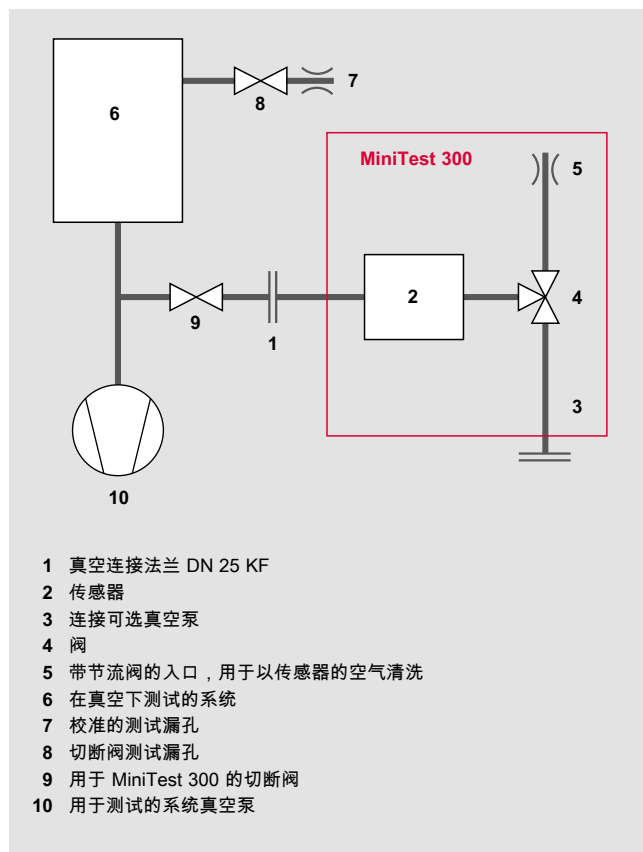


图 7.5：系统上 MiniTest 石英视窗泄漏探测器的系统示意图



该装置通过真空连接法兰 (1) 连接至待测试的系统 (6)。连接 (3) 可以选择地连接至附加的真空泵上。为准备泄漏测试, 该泵可以抽空该装置的真空系统, 而切断阀 (9) 仍关闭。

该切断阀 (9) 在测试时打开。可选的泵在较高系统压力下可以产生减少传感器响应时间的气体流量。

传感器 (2) 测量真空中氦的分压。系统上的泄漏检测(7) 用于确定响应时间和校准装置。

为保护传感器及在强信号后清洗装置, 可以进行自动清洗。阀 (4) 打开, 使用大气简单地清洗带有节流阀 (5) 和传感器的入口。

### 7.2.3 测试方法

用于检测泄漏的测试程序取决于试样的类型和所需的测试结果。标准 DIN EN 1779 中制定了下列标准 [34]:

- 将在高压下还是在真空中测试试样?
- 在选择测试方法中, 在实际适用试样时, 应选择的可能方法是否考虑到所遇到的压力梯度。
- 仅对试样的一部分还是整体进行测试?
- 应该执行用于查找泄漏位置的局部泄漏检测还是应该执行为保证质量而通常确定试样泄漏率的整体泄漏检测?

泄漏探测器配备了两种操作方法:

- 真空方法, 试样被抽空且氦从外部施加在试样上。
- 吸枪方法, 工件充有高压  $p > 100$  hPa 的测试气体, 且工件中漏出的测试气体通过吸枪阀被吸入到泄漏探测器中, 从而被检测出来。

### 7.2.4 检漏仪校准

检漏仪必须进行校准, 以确定泄漏率。这使用商用的标准漏孔来实现, 其在限定条件下产生已知的可重复测试气体速率。商用泄漏检测以有或无测试气体储气罐的渗透泄漏或毛细管泄漏的形式提供。泄漏探测器通常配备有氦储罐的渗透泄漏。对于校准, 通常通过内置的适当工作循环自动执行校准。

为获得精确的测量, 每次使用前都应该校准装置。为测试使用附加真空泵的大型测试样本, 使用外部测试漏是有利的。测量精度可以取决于测试漏孔连接的位置。因此, 有必要考虑真空区域内的流动条件。使用外部测试漏孔也有利于确定最大的响应时间。

### 7.2.5 局部泄漏检测

局部泄漏检测用于确定试样中的泄漏位置。

在真空方法中, 试样 (容器) 被连接至泄漏探测器, 并使用喷枪将氦喷洒到可疑区域上。如果试样中的压力是在分子流范围内, 即  $< 10^{-3}$  hPa, 测试速度将取决于试样的体积和氦测试设置的有效抽速。试样越小或所用泄漏探测器或辅助泵的抽速越大, 就越快获得结果。在较高压力下, 尤其是在大于 1 hPa 的层流范围内, 显示的速度会慢得多, 并将受到泄漏探测器前级泵抽速的约束。

在吸枪方法中, 根据图 6, 试样 (3) 充有高压的测试气体。吸枪探头 (2) 被连接到泄漏探测器的测试气体连接上。从试样泄漏点逸出的测试气体可以使用探头进行检测。



图 7.6: 使用吸枪和真空方法的局部泄漏检测

使用局部泄漏检测可以确定各个泄漏点。然而, 却无法确定所有泄漏量。这就是该方法对于为质量保证目的提供GO/NO GO 指示只具有有限适用性的原因。

|      | 吸枪<br>泄漏检测  | 真空<br>泄漏检测   |
|------|---|--|
| 方法   | 测试对象充满<br>测试气体                                    | 使用氦喷吹  |
| 机械强度 | 针对高压  | 针对来自真空<br>外部的气压<br>(压差1000 hPa)                    |
| 检测限制 | $< 1 \cdot 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ |

表 7.1: 使用吸枪和真空方法的局部泄漏检测

### 7.2.6 整体泄漏检测

整体泄漏检测用于确定总泄漏率，即试样中所有泄漏的总泄漏率。这里也可以使用真空方法和吸枪方法。

在累计真空方法中（根据 DIN EN 1779 的方法 A1，图 7.7 右手侧），试样（如真空系统）被抽空，且周围空间充满限定量的测试气体。周围外壳可以是塑料薄膜或硬质容器。重要的是，将试样暴露于限定量的测试气体中，从而得出泄漏处测试气体浓度并得出可靠的定量结论。

当对封闭的测试对象进行测试时（根据 DIN EN 1779 的方法 B6，图 7.7 左手侧），试样充满氦气，并将其置于封闭的真空容器中。通过泄漏探测器确定逸出的测试气体，对其进行量化。

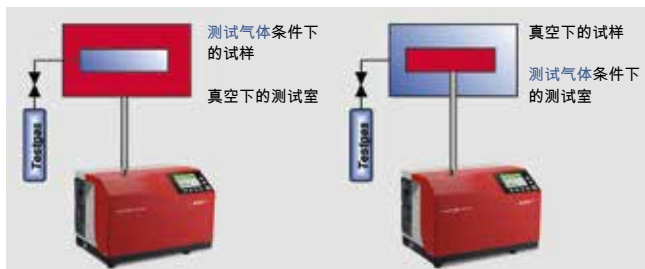


图 7.7：使用真空方法的整体泄漏检测

在吸枪方法中，试样充满测试气体（根据 DIN EN 1779 的方法 B3，图 7.8），并被置于封闭容器中。与前述方法相反，该容器不要求被抽空，并可以保持在大气压下。这意味着，对装置的要求没有前述方法中那样严格。逸出的气体被收集在封闭的外壳中，并需要在测试过程中充分混合（如使用风扇），以确保分析室中存在均匀的测试气体浓度。泄漏探测器的吸枪探头用于确定测试气体浓度是否增加，从试样中逸出的测试气体收集在封闭的外壳中。该方法的检测限度由封闭外壳中封闭空间里的测试气体浓度和额外增加的测试气体浓度来确定。这意味着，该方法比真空下的累积法慢很多，且其使用通常限于具有有限部分气流量的小型试样。

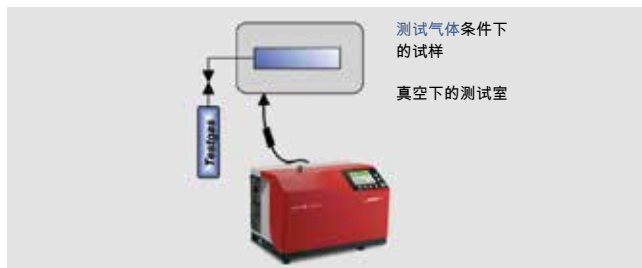


图 7.8：使用吸枪方法的封闭对象整体泄漏检测

在我们的泄漏检测纲要中包含了使用测试气体进行泄漏测试的方法和程序的完整描述。

### 7.3 应用说明

在使用氦气开始进行泄漏检测过程之前，用户必须明确以下几个基本问题：

- 试样的耐压性如何？
- 耐压性是否有适宜的方向性以及试样在实际应用中所遇到的压力梯度是否可以模拟？
- 只需确定泄漏的位置还是需要对其进行量化？
- 是否应该确定试样的整体泄漏率？如果需要，可接受的最大泄漏率是多少？
- 什么样的参考液体适合于显示的泄漏率？
- 适用于多大的测试压力？
- 是否有需要考虑的任何安全问题？

在回答这些问题的基础上，才能从第 7.2.4 和 7.2.5 节所示的方法中选择适当的测试方法。

|      | 吸枪泄漏检测  | 真空泄漏检测   |  |
|------|---|--|--|
| 方法   | 累积检测，将逸出气体收集在封闭气罩或腔室中                                       | 高压下的试样，测量真空室中逸出的测试气体                               | 真空下的试样，测量从封闭气罩逸出到试样中的测试气体                          |
| 机械强度 | 针对测试气体的高压   | 针对测试气体的高压  | 针对来自真空外部的气压（压差 1 000 hPa）                          |
| 速度   | 慢   | 快  | 快  |
| 检测限制 | 主要在 $> 1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ 情况下使用 | $< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ | $< 5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$ |

表 7.2：使用吸枪和真空方法的整体泄漏检测

### 7.3.1 使用氦气进行的泄漏检测

在进行局部泄漏检测或整体泄漏测试之前，必须对泄漏探测器进行校准。集成在普发真空泄漏探测器中的氦气泄漏孔正是用来对其进行校准的。校准程序在泄漏探测器启动时开始或自动开始，并根据固定软件协议运行。校准后，泄漏探测器就可以使用了。

用户不断了解装置的状态并通过视觉显示和声音信号对泄漏率进行测量。凭借声音信号，信号音频频率随泄漏率的变化而上升。用户可以通过编程阈值确定发出声音信号的时间。视觉信号可以在有关装置控制面板上读取或在有线或无线遥控装置上读取。这使得泄漏检测可以仅由一人执行。

在使用氦气作为测试气体时，必须始终遵守以下要求：

- 氦气比空气轻。所以在大气中使用氦气时，泄漏检测过程应该始终在试样最高点处开始。这防止氦气在泄漏点上升到当前进行测试的上方导致发射虚假信号。然而，氦气流体的上升可以被空气中中断。在洁净室中，从天花板到地板的层流运动工作方向是相反的。
- 不应喷吹过量的测试气体，因为这可以增加氦气在环境空气中的浓度。这导致泄漏探测器的背景信号增加以及测试中的灵敏度越来越低。
- 如果所用泄漏探测器或辅助泵的前级泵是油润滑的，则氦气聚集在前级泵的排气空间，并溶解在油中，而且可以从该点扩散回到高真空区域。在检测到高泄漏率后，在前级泵中使用气镇可以有助于将聚集的氦气从泵系统中排出，并降低指示的背景信号。

在真空方法中，有必要产生足够低的真空，以允许在最大灵敏度下操作泄漏探测器。否则，泄漏探测器将仍然指示从抽环境空气中的残余氦气。

因此，对于大型检测试样，必须经常使用具有高抽速的附加真空泵（辅助泵）。在这种情况下，泄漏探测器应该直接连接至大型真空泵泵口，即与辅助泵并联。

当辅助泵运行时，必须使用标准漏孔通过测量限定系统的部分流量比，以确定泄漏率。只有通过测量，才可能可靠地指出辅助泵抽空的逸出测试气体比例以及在泄漏探测器中可以检测到的比例。

当使用吸枪探头工作时，容器中的压力必须至少高于环境压力 100 hPa。由于空气中有自然氦含量，吸枪方法的灵敏度低于真空方法的灵敏度。而且，泄漏探测器对流入氦气的延迟反应也必须予以考虑。响应时间也取决于所用吸枪探头的长度。

使用氦气或其它测试气体的泄漏测试不一定必须使用标准的特性参数来进行。转换是可能的，例如，对于各种气体、气体与液体、不同压力条件、质量泄漏率和体积泄漏率之间的转换等。

### 7.3.2 使用检漏仪与使用四级杆质谱仪的测试结果比较

四级杆质谱仪主要用于分析混合气体的组成。它们需要高真空范围内的测试压力。质谱仪几乎可以与任何示踪气体一起使用，因为它们的使用并不依赖于经典的示踪气体氦气。残余气体分析仪无需任何特殊的测试气体就可以检测真空系统中的泄漏。它们分析空气中气体的质量。

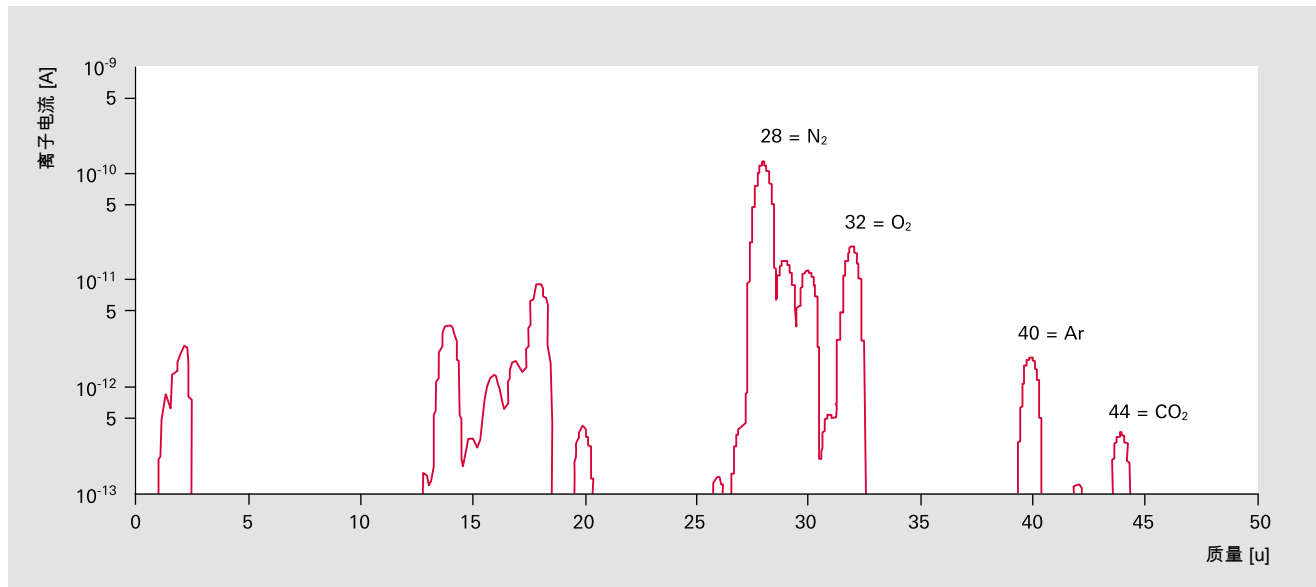


图 7.9：有空气泄漏时的接收器质谱

用于示踪气体氦气的检漏仪目前没有在四级杆质谱仪的基础上设计的。它们具有更大的工作可靠性和长期稳定性以及结果和数据解读更容易量化，这些特性导致：在扇形磁场质谱仪基础上的上述所有质谱检漏仪主要用于此目的。

具有基于石英视窗传感器的检漏仪也用于不需要高灵敏度质谱检漏仪的应用。具有石英视窗传感器的装置使在非常高的测试压力和高水蒸气接触下工作成为可能。

|       | 检漏仪  | RGA/QMS                   |
|-------|--|---------------------------|
| 泄漏，定位 | 是  | 是                         |
| 泄漏，定量 | 是  | 否                         |
| 泄漏，虚漏 | 否  | 是                         |
| 渗透    | 可进行粗略估计，渗透与解吸之间没有区别  | 是，数据解读是可能的                |
| 解吸    |  | 是，有关解吸气体的结论               |
| 测试压力  | 高  | 低                         |
| 检测限制  | $5 \cdot 10^{-13} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$<br>(扇形场 MS)<br>$5 \cdot 10^{-9} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$<br>(石英视窗探测器) | 离子电流取决于杆系统和探测器            |
| 一般    | 定量泄漏率测量可能  | 定性仪器，定量复杂，需要更多专业知识，提供更多信息 |

表 7.3：检漏仪和四级杆质谱仪的比较

## 7.4 产品概览

质谱仪和气体分析仪产品如第 6 章所述。

普发真空拥有最广泛的氦气检漏仪。如表 7.4 所示。

广泛的产品组合允许针对所选择的特定应用而专门设计的装置。最重要的特点是：

- **MiniTest**：定位真空系统中的泄漏检测，即使在绝对压力高达 200 hPa 和高水蒸气接触下。重量仅为 5 kg，具有广泛半径的无线遥控，仅需一位操作员检测大型真空系统中泄漏的理想解决方案。
- **ASM 310**：使用全面集成泵系统，用于真空和吸枪测试的最小和最轻检漏仪。由于质谱检漏仪而实现的优异检测灵敏度。
- **ASM 340**：整合我们所有生产基地综合经验的最新普发真空检漏仪。强大的泵系统和与 ASM、HLT 系列检漏仪向下兼容性使其成为最全面的检漏仪。
- **ASM 182 系列**：配备了强大的泵系统，这些是工业环境或大容量真空系统中灵敏定量泄漏检测的理想选择。
- **ASM 380**：专为半导体行业和涂层系统开发的。超薄的设计使其在生产机械之间狭窄的过道中可以移动和操作。即使与辅助泵一起使用，高氦气抽速仍能保证其无与伦比的灵敏度，无油和无颗粒前级泵使其适用于洁净室的使用。

|         | 便携式      |         | 多用途     | 高性能                      |         |                          | 工作站      | 模块化    | 吸枪        |
|---------|----------|---------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|----------|--------|-----------|
|         | MiniTest | ASM 310 | ASM 340 | ASM 182 T<br>ASM 182 TD+ | ASM 380 | ASM 192T<br>ASM 192T 2D+ | ASM 1002 | ASI 30 | ASM 102 S |
| 石英视窗传感器 | ■        |         |         |                          |         |                          |          |        |           |
| 扇形场 MS  |          | ■       | ■       | ■                        | ■       | ■                        | ■        | ■      | ■         |
| 真空方法    | ■        | ■       | ■       | ■                        | ■       | ■                        | ■        | ■      |           |
| 吸枪方法    |          | ■       | ■       | ■                        | ■       | ■                        | ■        | ■      | ■         |
| 集成的测试漏  |          | ■       | ■       | ■                        | ■       | ■                        | ■        | ■      |           |

表 7.4：普发真空检漏仪

- **ASM 192 系列**：这些固定使用的控制台装置非常适用于大容量部件中的灵敏泄漏检测。
- **ASM 1002**：测试开放式和封闭式部件的工作站。ASM 1002 是检测小型密封部件的理想选择。其简单的操作使其具有较高的用户友好性，并允许在红绿灯原理上的视觉信号识别。
- **ASI 30**：用于集成在探测器系统中的模块化检漏仪。得益于其范围广泛的接口，它可以使用各种信号进行控制，且可用作任何其他品牌现有检漏模块的替代品。
- **ASM 102 S**：便携式 19" 套管的纯吸枪检漏仪。ASM 102 S 专为移动式吸枪检漏仪而设计，广泛应用在如在航空和航天工业以及管道施工中。

## 7.5 工业泄漏检测

普发真空系统组件为汽车、能源、包装、制冷和空调行业中广泛应用以及很多其他应用构建了客户专用的泄漏探测器。这些系统同样也适用于集成在生产线中或用于单个测试站中。它们消耗最少的测试气体实现较高的检测量，而且也是前期开发和大量系列测试的灵活装置。

我们建立的定制测试气体回收装置反映了我们致力于资源节约的理念。

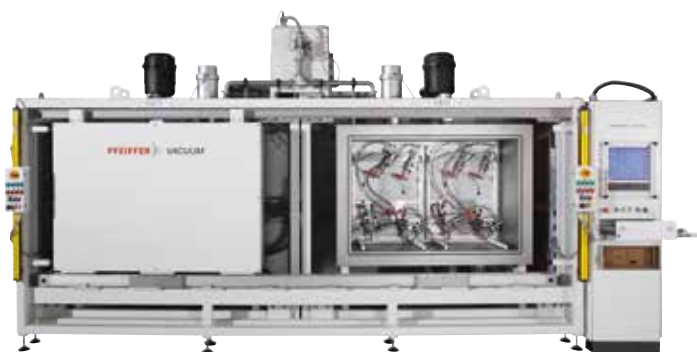


图 7.10：制冷剂软管的泄漏测试装置



图 7.11：氮气回收装置

# 8 污染管理解决方案

## 8.1 介绍

在半导体制造业中，如集成电路的生产过程，许多关键的工艺步骤都是基于真空技术的。在硅加工过程中使用真空技术有几个原因：

- 真空允许对条件进行控制，因为它排除了硅晶片中的环境气氛，如反应气体和粉尘。
- 真空允许硅和氧化硅的异性蚀刻，这是对硅晶片表面形成图案的基本工艺步骤。
- 几种基于真空的工艺允许所有类型的绝缘薄层和具有可控性的导电膜沉积在硅晶片上。

最新研发的集成电路由固体硅制成，其最大的特点是由于每个设备集成部件数量的不断增加和图案尺寸的不断缩小，使得部件的性能也得到不断的提高。在集成电路的开发过程中，戈登·E·摩尔曾预言，自 20 世纪 60 年代起，电路性能大约每两年翻一番，这就是著名的摩尔定律 [35]。经过了世纪之交，集成电路的最小结构（如微处理器和随机存储器）从 1970 年的  $10\ \mu\text{m}$  减少到  $0.1\ \mu\text{m}$ ，摩尔定律得到了充分的体现。在此期间，硅晶片的尺寸从 1" 直径增加到 300 mm (~12")，提高了生产量并降低了成本。

通过引入 300 mm 技术，所谓临界尺寸，截止到此文本撰写时（即 2012 年）已经从 150 nm 缩小到 22 nm。凭借 300 mm 的晶圆尺寸，生产技术也从开放式盒子（图 8.2 左侧）转变到封闭式小环境，即：在生产现场中晶圆通过封闭式盒子里从一个工艺设备传送到另一个工艺设计中（FOUP = 前端开启式晶圆传送盒，图 8.2，右侧）。



图 8.2：使用盒子（左）和 FOUP（右）的晶圆传送

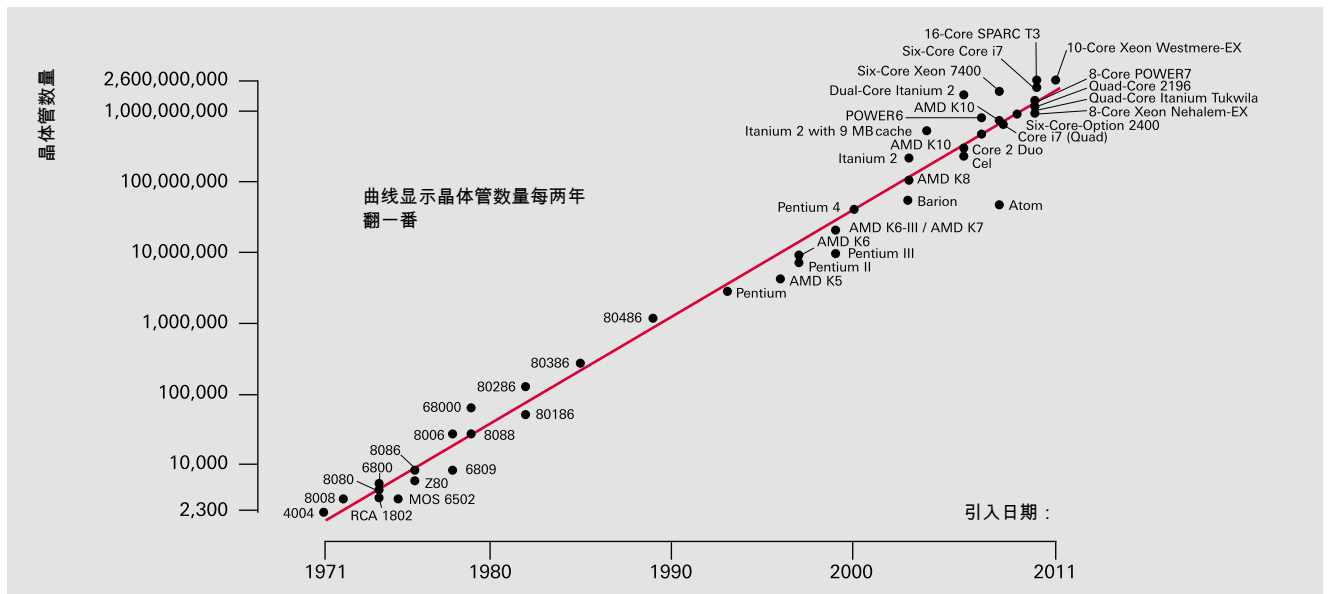


图 8.1：摩尔定律（由 Intel 和 AMD 微处理器中的晶体管数量记录）

## 8.2 污染

灰尘是小尺寸器件集成电路生产的天敌。在开发集成电路的过程中，已经开发了有效的方法来消除生产环境中的灰尘。如有尺寸与电路结构元件相当的灰尘颗粒（临界尺寸，CD）或更大的灰尘颗粒意外进入设备中，会引发很多问题。22 nm 的硅结构只包括 41 个 Si 原子。根据这一标准，不仅颗粒构成了挑战，甚至分子造成的污染也成为越来越大的挑战。这些污染被称为空气分子污染 (AMC)。从开放式盒子到封闭式 FOUP 的转变大大降低了颗粒的污染，但同时也增加了 AMC 影响。

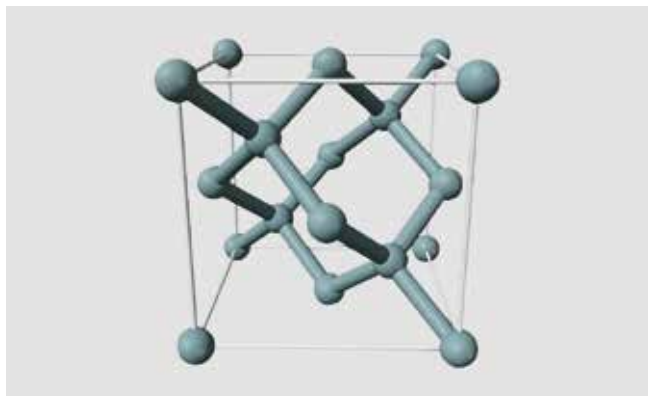


图 8.3 : 类金刚石的硅晶体结构

在 FOUP 内部环境中，AMC 有两个主要来源。最主要来源是每个工艺步骤后存储在 FOUP 中的晶圆。最后一道工序中的副产物从其表面释放并可以被 FOUP 的高分子材料吸收或重新吸附在其他晶圆表面上。第二来源是 FOUP 的出气，出气来源于聚合物主体或其他晶圆和/或其他工艺先前吸附的副产物。由于聚合物具有吸附气体的高能力，所以 FOUP 具有其已携带晶圆的“记忆”。与这些 AMC 来源相比，良好控制的洁净室内的空气污染可以忽略不计。

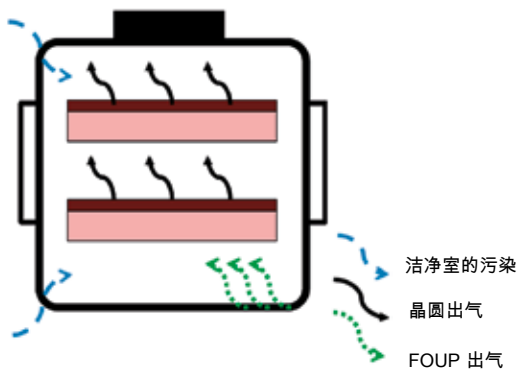


图 8.5 : FOUP 中的 AMC 来源

晶圆表面上的来自环境空气、从周围表面释放的或来自上一道工序步骤的分子可以与大气中的气体反应，形成微小的反应产物群，这在晶圆等待下一道工序步骤的等待时间内有增加的趋势。分子污染的核心通常是半导体制造中所使用的很多化合物。国际半导体技术蓝图 (ITRS) 已经确立了会引起晶圆缺陷的 AMC 名单 [36]。该名单包括无机和有机酸、碱、硫化物和挥发性有机化合物，详情参见图 8.4。

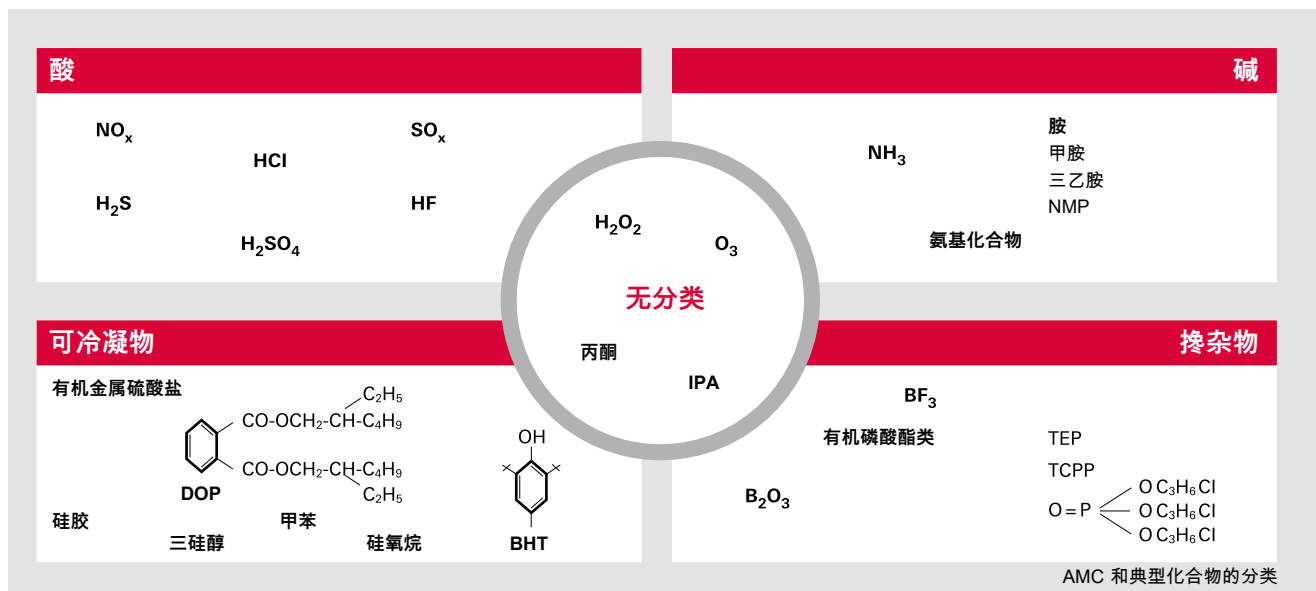


图 8.4 : 空气分子污染 AMC 的分类

### 8.3 空气分子污染(AMC)的性质

在大气压和环境温度下,约含有  $10^{15}$  个原子/cm<sup>2</sup> 的固体表面每秒每平方厘米接收  $10^{23}$  [37] 的外来气体分子和原子。这意味着,在纳秒内,该表面将会覆盖上一些气体分子层。分子粘着在表面的概率在很大程度上取决于其性质和该表面的性质与形貌。但是即使在 ppbv 范围(体积的十亿分之几,即  $10^{-9}$ ) 内的微量反应副产物,其以  $10^{14} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  的速率撞击表面,如果粘着系数高的话,也将会在几秒内覆盖表面。

空气分子可以是极性或非极性的。在非极性分子中,电荷对称分布,正电荷和负电荷的中心重合。这方面的例子有氮气 N<sub>2</sub> 或 CO<sub>2</sub> 分子。这些分子通过弱范德华力保持在固体表面上,具有范围通常在热能量  $RT \approx 2.5 \text{ kJ/mol}$  和约  $20 \cdot RT$  之间的结合能。极性分子,电荷不对称分布,造成永久性偶极动量。在极性分子的例子中有水 H<sub>2</sub>O 和用于半导体蚀刻工艺的无机酸,如 HF 和 HCl。极性分子的结合能量较高,例如,对于 Si(100) 表面上的 H<sub>2</sub>O 大约为  $138 \text{ kJ/mol}$ 。这些分子可能与表面发生化学反应,形成进一步反应的核心。

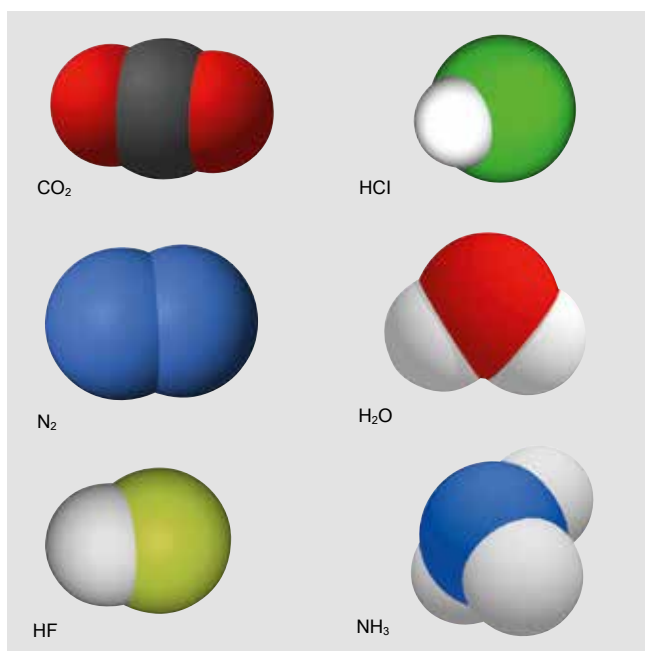


图 8.6 : 空气中极性和非极性分子

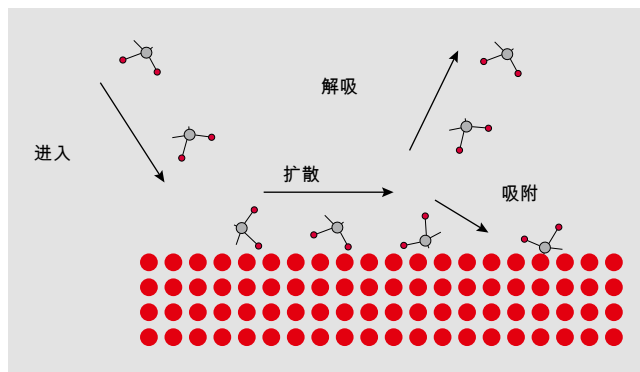


图 8.7 : 表面上的气体固体相互作用

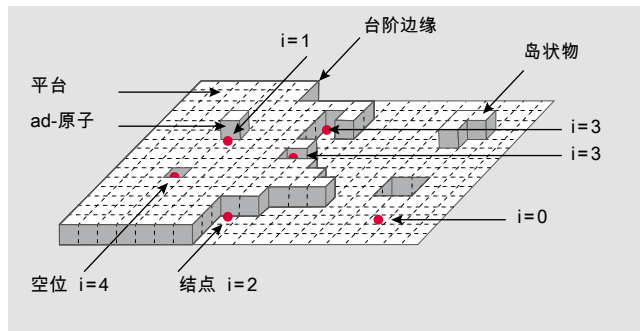


图 8.8 : 表面位置

### 8.4 从表面分子污染 (SMC) 到缺陷

固体表面与气体之间平面上的相互作用不同现象如图 8.7 所示。气体分子撞击在固体上,沿表面扩散,并从其上解吸或吸附在表面。固体表面是主体材料与外部世界之间的边界。由于原子或分子最后一层待定的悬空键,所以该表面的能量高于主体材料。每个待定的悬空键就是一个潜在的吸附点。表面的自由能取决于材料粘着的性质,即金属、离子或共价键。从良好有序的晶体表面到多晶和无定形聚合物材料,吸附点数量逐渐增加。任何不规则性都会增加吸附点的数量。

水蒸气对表面处理有特殊的作用。在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $50 \%$  的相对湿度时,空气中含有  $16 \text{ hPa}$  ( $1.58 \%$ ) 的水蒸气。任何表面接收的水分子流量大约为  $5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。在大约  $200 \text{ ns}$  内,单层水分子可以覆盖 Si(100) 表面。由于水分子的极性性质,第一层将紧密地结合到表面上,并形成水分子与水分子紧密结合的附加层,产生堆叠的水分子层。与暴露于大气条件下的表面接触的酸分子将与水分子相遇,以促进进一步的反应。

如果将其暴露足够长的时间,任何能够将水吸入主体的材料,如塑料或弹性体,都将变得饱和。

FOUP 由聚合物材料制成,如聚碳酸酯(PC)、聚醚醚酮(PEEK)以及丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)。在环境条件下,这些材料分别可以吸附  $0.12 \%$ 、 $0.5 \%$  和  $0.7 \%$  的水分,产生  $6 \text{ l}$ 、 $25 \text{ l}$  和  $35 \text{ l}$  的水蒸气。光致抗蚀剂掩模也是聚合物材料,也将吸附水分。



在等离子条件下，表面接收气体分子、高能离子和活性粒子流量。离子有助于解吸蚀刻副产物，并通过建立表面缺陷提高蚀刻速率。蚀刻后，表面完全充满活性粒子。在使用  $\text{Cl}_2 + \text{HBr}$  化学作用的复晶砂蚀刻中，已出现 1.5 至 2.5 nm 的卤化层 [38]。在蚀刻后，晶圆表面将释放副产物和活性分子至 FOUP 的封闭环境中，此外，还提供水蒸气，以促进化学反应。

从吸附和解吸过程的原理，可以通过下面形式得出  $\theta$

$$\theta = \frac{p \cdot C}{1 + p \cdot C}$$

公式 8-1：表面覆盖

其中， $p$  是压力，且  $C = C(T)$  为温度函数。这被称为 Langmuir 吸附等温线/等压线。平衡覆盖  $\theta_{eq}$  将在一组给定的压力和温度下确立。图 8.9 中给出了  $\theta$  形式  $p$  和  $T$  的依赖关系。其显示，通过低压和高温可以实现固体表面的低覆盖率。

吸附和解吸是动态的过程。非极性分子因其较低的结合能而具有更快的脱附速率。每个离开表面的非极性分子会提供新的吸附点。该新的吸附点可以被具有更强结合能和更低解吸率的极性分子占据。随着时间的推移，表面上的极性分子浓度将增加，从而增加缺陷积聚的概率，这是 AMC D 剂量的结果：

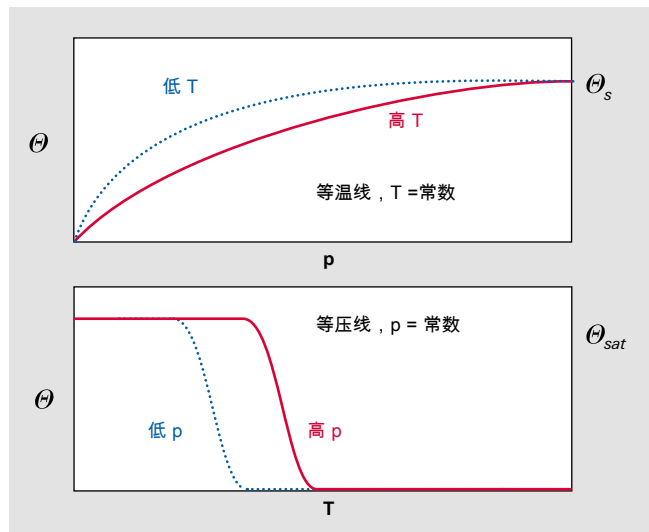


图 8.9：蚀刻后的表面

离子随着时间的推移，表面的极性分子浓度将增加，这也增加了缺陷形成的概率，这是 AMC 剂量的结果：

$$D = c_{AMC} \cdot \Delta t$$

公式 8-2：污染剂量

其中， $c_{AMC}$  是空气分子污染物的浓度， $\Delta t$  是晶圆表面在晶圆传送盒中暴露于大气环境的时间。

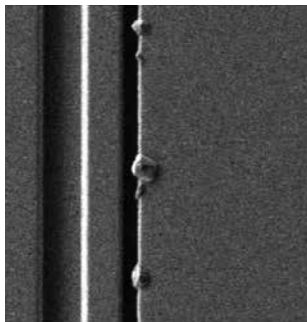


图 8.10：晶圆模型边缘的晶体生长

SMC 是等待时间内晶体生长的起源。晶圆等待下一道工序的时间越长，它们接收的活性极性分子剂量越高，从而晶体生长的概率增加，随后将产生缺陷和产量损失。

## 8.5 产品概览

剂量概念导致必须采取措施，避免 AMC 产生的缺陷：

- 减小压力
- 增加温度
- 降低接触时间

由于等待时间是保证晶圆加工灵活性所必需的制造要求，所以减少缺陷的正确方法是在升高的温度下使 FOUP 和晶圆在真空中出气，从而增加产量。为获得 AMC 的控制，关键是要在 FOUP 内部对其进行监控，而且，由于受到动态过程的支配，所以必须在生产环节中进行监控。普发真空提供了 **APA 302 Pod** 分析仪作为 AMC 分析的适宜工具。APA 302 在两分钟于 ppbv 级别上提供有关总酸量、总胺量、挥发性有机化合物和水蒸气总量的信息。可以使用空 FOUP 或载有晶圆的 FOUP 完成测量。

一旦已分析 AMC 且已确定其对产量的影响，则必须采取适当的措施来改善情况。为此，普发真空提供了 **APR 4300 Pod** 再生器作为在单次运行中净化多达四个 FOUP 的有效工具。这项专利机器是基于本章所提出的物理和化学气体表面相互作用的见解。Pod 分析仪遵循图 8.11 所描述的真空工艺。在大约五分钟的第一个真空调节步骤中，达到了工作压力。随后的净化工艺解吸在表面形成的 AMC，在最后一个步骤中，从晶圆传送盒返回至大气压。

APR 4300 Pod 再生器通过将产量提高 7% 已经证明了其效率。半导体制造将出现新的挑战，而且，空气分子污染的剂量将变得越来越重要。因此，必须对关键生产步骤之间气压传输的替代方式进行开发。在未来解决方案中，真空将确实发挥越来越大的作用。

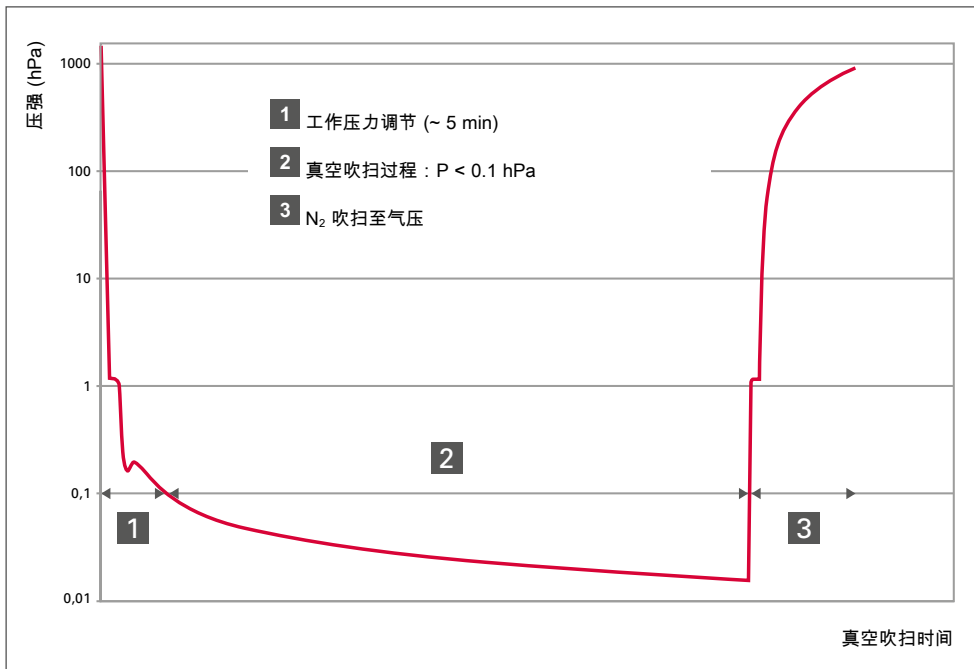


图 8.11 : Pod 再生器流程周期



## 图索引

### 1 真空技术介绍

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 图 1.1 :  | 真空概览  | 8  |
| 图 1.2 :  | 总压力的定义  | 9  |
| 图 1.3 :  | 分压的定义   | 10 |
| 图 1.4 :  | 两次碰撞之间的平均自由程  | 12 |
| 图 1.5 :  | 氮在温度为 273.15 K 时的分子数密度 (红色, 右边 y 轴) 和平均自由程 (蓝色, 左边 y 轴) | 13 |
| 图 1.6 :  | 各种流动状态的剖面   | 14 |
| 图 1.7 :  | 根据 $p \cdot d$ 乘积的真空流动范围                                | 15 |
| 图 1.8 :  | 光滑圆管管的流导与管中平均压力的关系                                      | 16 |
| 图 1.9 :  | 各种物质的蒸气压曲线  | 17 |
| 图 1.10 : | 通过涡轮分子泵抽空容器的典型残余气体谱                                     | 20 |

### 2 基本计算

|         |                                      |    |
|---------|--------------------------------------|----|
| 图 2.1 : | 罗茨泵的对空气零流量压缩比                        | 24 |
| 图 2.2 : | 使用 Hepta 100 和 Okta 500 的机组体积流率 (抽速) | 24 |
| 图 2.3 : | 干燥系统 (原理图)                           | 25 |
| 图 2.4 : | 用于蒸汽冷凝的罗茨泵组                          | 26 |
| 图 2.5 : | 用于蒸汽冷凝的罗茨泵组                          | 27 |
| 图 2.6 : | 用于变压器干燥的罗茨泵组                         | 27 |
| 图 2.7 : | 不同涡轮分子泵工艺压力下的气体流量                    | 29 |
| 图 2.8 : | 具有压力和流量调节功能的真空系统                     | 30 |

### 3 真空中的机械部件

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 图 3.1 :  | 奥氏体不锈钢弹性模量的温度依赖性                        | 34 |
| 图 3.2 :  | 0.2% 屈服点奥氏体不锈钢的温度依赖性                    | 34 |
| 图 3.3 :  | De Long 图表                              | 35 |
| 图 3.4 :  | 激光焊缝的横截面图像                              | 39 |
| 图 3.5 :  | WIG 轨道焊缝的横截面图像                          | 39 |
| 图 3.6 :  | 矩形槽、梯形槽和角位置上的 O 型圈密封件                   | 41 |
| 图 3.7 :  | 具有定心环和夹紧环的 ISO-KF 连接                    | 41 |
| 图 3.8 :  | 安装在座板上具有定心环和爪夹的 ISO-KF 法兰               | 41 |
| 图 3.9 :  | 具有定心环和双爪夹的 ISO-K 连接                     | 42 |
| 图 3.10 : | 安装在座板上具有定心环和爪夹的 ISO-K 法兰                | 42 |
| 图 3.11 : | 安装在座板上具有 O 型圈螺母和爪夹、用于具有密封槽底板的 ISO-K 法兰  | 42 |
| 图 3.12 : | 安装在座板上具有定心环、螺栓环和螺丝钉的 ISO-K 法兰           | 42 |
| 图 3.13 : | 具有定心环和螺丝钉的 ISO-F 连接                     | 43 |
| 图 3.14 : | 安装在具有定心环和螺丝钉的 ISO-F 法兰上、具有螺栓环的 ISO-K 法兰 | 43 |
| 图 3.15 : | 具有扁平铜垫片和螺丝钉的 CF 连接                      | 43 |
| 图 3.16 : | 具有铜线和螺丝钉的 COF 连接                        | 44 |
| 图 3.17 : | 具有冷却剖面和水冷法兰的 EUV 光源室                    | 47 |
| 图 3.18 : | 具有垫板冷却的空间模拟室                            | 47 |
| 图 3.19 : | 带玻璃-金属熔合的 CF 视窗                         | 49 |
| 图 3.20 : | 具有陶瓷绝缘铜线导体的电极                           | 50 |
| 图 3.21 : | 波纹管密封角阀                                 | 51 |
| 图 3.22 : | 具有电动气动驱动的直通阀                            | 51 |

|                 |  |     |
|-----------------|--|-----|
| 图 3.23 :        | UHV 闸阀   | 52  |
| 图 3.24 :        | UHV 全金属气体计量阀                                     | 52  |
| 图 3.25 :        | 波纹管密封的 UHV 旋转式连接                                 | 53  |
| 图 3.26 :        | 磁耦合的 UHV 旋转式连接                                   | 54  |
| 图 3.27 :        | 弹性体密封的旋转式连接                                      | 54  |
| 图 3.28 :        | Z 轴精密执行器   | 55  |
| 图 3.29 :        | XY 轴精密执行器  | 56  |
| <br>            |  |     |
| <b>4 真空获得设备</b> |  |     |
| 图 4.1 :         | 真空泵概览  | 58  |
| 图 4.2 :         | 旋片式真空泵的工作原理                                      | 60  |
| 图 4.3 :         | 普发旋片式真空泵   | 62  |
| 图 4.4 :         | 旋片式真空泵的配件  | 67  |
| 图 4.5 :         | 隔膜式真空泵的工作原理                                      | 68  |
| 图 4.6 :         | 螺杆泵的工作原理   | 69  |
| 图 4.7 :         | HeptaDry 转子                                      | 69  |
| 图 4.8 :         | 具有连接和配件的 HeptaDry                                | 70  |
| 图 4.9 :         | 风冷式多级罗茨泵的工作原理                                    | 71  |
| 图 4.10 :        | 过低温度下罗茨泵中六氟硅酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ 的冷凝 | 74  |
| 图 4.11 :        | 多级罗茨泵的工作原理                                       | 74  |
| 图 4.12 :        | ACP 120  | 75  |
| 图 4.13 :        | A 100 L 后侧的连接口                                   | 76  |
| 图 4.14 :        | A 203 H 的横截面图                                    | 76  |
| 图 4.15 :        | A 1503 H 工艺机组                                    | 77  |
| 图 4.16 :        | 罗茨泵的工作原理   | 78  |
| 图 4.17 :        | 气冷罗茨泵的工作原理                                       | 79  |
| 图 4.18 :        | 罗茨泵的空载压缩比  | 79  |
| 图 4.19 :        | 使用 Okta 2000 和各种前级泵机组的抽速                         | 80  |
| 图 4.20 :        | 侧槽真空泵的工作原理                                       | 83  |
| 图 4.21 :        | 涡轮转子的自由度   | 84  |
| 图 4.22 :        | 涡轮分子泵的工作原理                                       | 84  |
| 图 4.23 :        | 特定涡轮分子泵的抽速                                       | 85  |
| 图 4.24 :        | 相对分子质量的抽速  | 85  |
| 图 4.25 :        | 入口压力的抽速  | 85  |
| 图 4.26 :        | Holweck 级的工作原理                                   | 86  |
| 图 4.27 :        | 纯涡轮分子泵与涡轮牵引泵的压缩比                                 | 86  |
| 图 4.28 :        | 典型的 UHV 残余气体光谱 (涡轮分子泵)                           | 87  |
| 图 4.29 :        | 标准 HiPace 涡轮分子泵                                  | 89  |
| 图 4.30 :        | ATH M 磁悬浮涡轮分子泵                                   | 90  |
| 图 4.31 :        | 涡轮分子泵配件的例子 (适用于 HiPace 300)                      | 91  |
| <br>            |  |     |
| <b>5 真空测量设备</b> |  |     |
| 图 5.1 :         | 膜片式真空计的设计  | 92  |
| 图 5.2 :         | 电容式膜片真空计的设计                                      | 93  |
| 图 5.3 :         | 皮拉尼真空计的工作原理                                      | 93  |
| 图 5.4 :         | 皮拉尼真空计的曲线  | 94  |
| 图 5.5 :         | 反置磁控管的设计   | 94  |
| 图 5.6 :         | 反置磁控管的工作原理                                       | 94  |
| 图 5.7 :         | Bayard-Alpert 真空计的设计                             | 95  |
| 图 5.8 :         | 压力测量范围和测量原理                                      | 96  |
| 图 5.9 :         | DigiLine 应用概念                                    | 98  |
| 图 5.10 :        | ActiveLine 应用概念                                  | 99  |
| 图 5.11 :        | ModulLine 传感器的 TPG 300 控制单元                      | 100 |

## 6 质谱仪与残余气体分析

|          |                          |     |
|----------|--------------------------|-----|
| 图 6.1 :  | 总压和分压测量                  | 102 |
| 图 6.2 :  | 质谱仪的组成部分                 | 102 |
| 图 6.3 :  | 180° 扇形场质谱仪的工作原理         | 103 |
| 图 6.4 :  | 扇形场质谱仪: (a) 离子源, (b) 探测器 | 104 |
| 图 6.5 :  | 四级杆质谱仪的工作原理              | 104 |
| 图 6.6 :  | 四级杆过滤器的稳定性图表             | 105 |
| 图 6.6 :  | 轴向离子源的截面图                | 107 |
| 图 6.7 :  | 电离是电子能量的函数               | 107 |
| 图 6.8 :  | CO <sub>2</sub> 的碎片离子分布  | 107 |
| 图 6.9 :  | 网格离子源                    | 108 |
| 图 6.10 : | EID 离子的识别                | 109 |
| 图 6.11 : | 交叉束离子源                   | 109 |
| 图 6.12 : | 密闭式轴向离子源                 | 109 |
| 图 6.13 : | SPM 离子源                  | 110 |
| 图 6.14 : | PrismaPlus 离子源           | 110 |
| 图 6.15 : | 法拉第杯的工作原理                | 110 |
| 图 6.16 : | 二次电子倍增器 (SEM)            | 111 |
| 图 6.17 : | 连续二次电子倍增器 (C-SEM) 的工作原理  | 112 |
| 图 6.18 : | 具有进气系统和交叉束离子源的 QMS       | 113 |
| 图 6.19 : | 具有各种进气口的差动抽气 QMS         | 114 |
| 图 6.20 : | 电偏压离子源中的电势曲线             | 115 |
| 图 6.21 : | 90° 轴向 SEM               | 116 |

## 7 泄漏检测

|          |                        |     |
|----------|------------------------|-----|
| 图 7.1 :  | 自行车内胎上的气泡泄漏测试          | 118 |
| 图 7.2 :  | 扇形质谱的工作原理              | 119 |
| 图 7.3 :  | 一般检漏仪的流程图              | 120 |
| 图 7.4 :  | 石英视窗传感器的工作原理           | 120 |
| 图 7.5 :  | MiniTest 石英视窗检漏仪的系统示意图 | 120 |
| 图 7.6 :  | 使用吸枪和真空方法的局部泄漏检测       | 121 |
| 图 7.7 :  | 使用真空方法的整体泄漏检测          | 122 |
| 图 7.8 :  | 使用吸枪方法的封闭对象整体泄漏检测      | 122 |
| 图 7.9 :  | 有空气泄漏时的接收器质谱           | 123 |
| 图 7.10 : | 制冷剂软管的泄漏测试装置           | 125 |
| 图 7.11 : | 氮气回收装置                 | 125 |

## 8 污染管理解决方案

|          |                                    |     |
|----------|------------------------------------|-----|
| 图 8.1 :  | 摩尔定律 (由 Intel 和 AMD 微处理器中的晶体管数量记录) | 126 |
| 图 8.2 :  | 使用盒子 (左) 和 FOUP (右) 的晶圆传送          | 126 |
| 图 8.3 :  | 类金刚石状硅晶体结构                         | 127 |
| 图 8.4 :  | 空气分子污染 AMC 的分类                     | 127 |
| 图 8.5 :  | FOUP 中的 AMC 来源                     | 127 |
| 图 8.6 :  | 空气中极性和非极性分子                        | 128 |
| 图 8.7 :  | 表面上的气体固体相互作用                       | 128 |
| 图 8.8 :  | 表面位置                               | 128 |
| 图 8.9 :  | 蚀刻后的表面                             | 129 |
| 图 8.10 : | 晶圆模型边缘的晶体生长                        | 129 |
| 图 8.11 : | Pod 再生器过程循环                        | 130 |

## 表索引

|                   |                 |  |    |
|-------------------|-----------------|--|----|
| <b>1 真空技术介绍</b>   | <b>表 1.1 :</b>  | 大气的组成 . . . . .  | 10 |
|                   | <b>表 1.2 :</b>  | 真空技术中的压力范围 . . . . .                                   | 10 |
|                   | <b>表 1.3 :</b>  | 压力单位换算表 . . . . .                                      | 10 |
|                   | <b>表 1.4 :</b>  | 各种气体的摩尔质量和平均热速度 . . . . .                              | 12 |
|                   | <b>表 1.5 :</b>  | 气体在 273.15 K 时的平均自由程 . . . . .                         | 13 |
|                   | <b>表 1.6 :</b>  | 氮分子在 273.15 K (0°C) 时的平均自由程 . . . . .                  | 13 |
|                   | <b>表 1.7 :</b>  | 各种流动状态概览 . . . . .                                     | 14 |
|                   | <b>表 1.8 :</b>  | 各种气体流量单位换算表 . . . . .                                  | 15 |
| <b>2 基本计算</b>     | <b>表 2.1 :</b>  | 罗茨泵机组的抽速和抽空时间 . . . . .                                | 24 |
| <b>3 真空中的机械部件</b> | <b>表 3.1 :</b>  | 依据 EN 10088 第 1 部分、欧洲材料命名标准规定的不锈钢化学成分 (质量分数) . . . . . | 33 |
|                   | <b>表 3.2 :</b>  | 依据 AISI (美国钢铁协会)、材料命名标准规定的不锈钢化学成分 (质量分数) . . . . .     | 33 |
|                   | <b>表 3.3 :</b>  | 不锈钢特性 . . . . .  | 33 |
|                   | <b>表 3.4 :</b>  | 弹性体的性能 . . . . .                                       | 37 |
|                   | <b>表 3.5 :</b>  | 密封材料的对比 . . . . .                                      | 38 |
|                   | <b>表 3.6 :</b>  | 室温下螺丝钉的材料和机械特性 . . . . .                               | 45 |
|                   | <b>表 3.7 :</b>  | 不锈钢和镀锌钢螺丝钉的摩擦系数 . . . . .                              | 45 |
|                   | <b>表 3.8 :</b>  | 直径 ≤ M24 的不锈钢和钢螺丝钉对 0.2% 屈服点的温度依赖性 . . . . .           | 45 |
|                   | <b>表 3.9 :</b>  | 不锈钢螺丝钉最大拧紧力矩和产生的最大预紧力 . . . . .                        | 46 |
|                   | <b>表 3.10 :</b> | 强度等级 8.8 的钢螺丝钉的最大拧紧力矩和产生的最大预紧力 . . . . .               | 46 |
| <b>4 真空获得设备</b>   | <b>表 4.1 :</b>  | HenaLine 性能数据 (所有数据是指 50 Hz 条件下运行) . . . . .           | 62 |
|                   | <b>表 4.2 :</b>  | UnoLine Plus 性能数据 (所有数据是指 50 Hz 条件下运行) . . . . .       | 62 |
|                   | <b>表 4.3 :</b>  | PentaLine 性能数据 . . . . .                               | 63 |
|                   | <b>表 4.4 :</b>  | DuoLine 性能数据 . . . . .                                 | 63 |
|                   | <b>表 4.5 :</b>  | Duo M 系列性能数据 . . . . .                                 | 63 |
|                   | <b>表 4.6 :</b>  | Duo MC 系列性能数据 . . . . .                                | 64 |
|                   | <b>表 4.7 :</b>  | Pascal SD 系列性能数据 . . . . .                             | 64 |
|                   | <b>表 4.8 :</b>  | Pascal I 系列性能数据 . . . . .                              | 64 |
|                   | <b>表 4.9 :</b>  | Pascal C1 系列性能数据 . . . . .                             | 65 |
|                   | <b>表 4.10 :</b> | Pascal C2 系列性能数据 . . . . .                             | 65 |
|                   | <b>表 4.11 :</b> | 前级泵和罗茨泵用油类型 . . . . .                                  | 66 |
|                   | <b>表 4.12 :</b> | 隔膜泵性能数据 . . . . .                                      | 68 |
|                   | <b>表 4.13 :</b> | HeptaDry 性能数据 . . . . .                                | 70 |
|                   | <b>表 4.14 :</b> | 风冷式多级罗茨泵的配置 . . . . .                                  | 72 |
|                   | <b>表 4.15 :</b> | 风冷式多级罗茨泵的性能数据 . . . . .                                | 72 |
|                   | <b>表 4.16 :</b> | 非腐蚀性应用的水冷多级罗茨泵的性能数据 . . . . .                          | 77 |
|                   | <b>表 4.17 :</b> | 腐蚀性应用的 P 系列水冷多级罗茨泵的性能数据 . . . . .                      | 77 |
|                   | <b>表 4.18 :</b> | 腐蚀性应用的 H 系列水冷多级罗茨泵的性能数据 (苛刻工艺) . . . . .               | 77 |
|                   | <b>表 4.19 :</b> | OktaLine 性能数据 . . . . .                                | 81 |
|                   | <b>表 4.20 :</b> | OnTool Booster 性能数据 . . . . .                          | 83 |
|                   | <b>表 4.21 :</b> | HiPace® 针对氮气选定的性能数据 . . . . .                          | 89 |
|                   | <b>表 4.22 :</b> | 磁轴承涡轮分子泵针对氮气的性能数据 . . . . .                            | 90 |
| <b>5 真空测量设备</b>   | <b>表 5.1 :</b>  | 主动式和被动式真空计 . . . . .                                   | 96 |
|                   | <b>表 5.2 :</b>  | 真空计选择指南 . . . . .                                      | 97 |

|              |         |                        |     |
|--------------|---------|------------------------|-----|
| 6 质谱仪与残余气体分析 | 表 6.1 : | 金属丝材料及其用途 .....        | 108 |
|              | 表 6.2 : | 探测器及其属性 .....          | 111 |
|              | 表 6.3 : | 进气系统及其属性 .....         | 113 |
| 7 泄漏检测       | 表 7.1 : | 使用吸枪和真空方法的局部泄漏检测 ..... | 121 |
|              | 表 7.2 : | 使用吸枪和真空方法的整体泄漏检测 ..... | 122 |
|              | 表 7.3 : | 泄漏探测器和四级杆质谱仪的比较 .....  | 124 |
|              | 表 7.4 : | 普发真空检漏仪 .....          | 124 |

## 公式索引

|          |           |                        |    |
|----------|-----------|------------------------|----|
| 1 真空技术介绍 | 公式 1-1 :  | 气压公式 .....             | 9  |
|          | 公式 1-2 :  | 数值气压公式 .....           | 9  |
|          | 公式 1-3 :  | 压力定义 .....             | 9  |
|          | 公式 1-4 :  | 波义耳定律 .....            | 11 |
|          | 公式 1-5 :  | 盖吕萨克定律 .....           | 11 |
|          | 公式 1-6 :  | 理想气体状态一般方程 .....       | 11 |
|          | 公式 1-7 :  | 理想气体状态方程 I .....       | 11 |
|          | 公式 1-8 :  | 理想气体状态方程 II .....      | 11 |
|          | 公式 1-9 :  | 最可几速度 .....            | 12 |
|          | 公式 1-10 : | 平均速度 .....             | 12 |
|          | 公式 1-11 : | 平均自由程 .....            | 12 |
|          | 公式 1-12 : | 平均自由程 II .....         | 12 |
|          | 公式 1-13 : | 克努森数 .....             | 14 |
|          | 公式 1-14 : | 雷诺数 .....              | 14 |
|          | 公式 1-15 : | 气体流量 .....             | 15 |
|          | 公式 1-16 : | 真空泵的气体流量 .....         | 15 |
|          | 公式 1-17 : | 真空泵的体积流量或抽速 .....      | 15 |
|          | 公式 1-18 : | 流导的定义 .....            | 16 |
|          | 公式 1-19 : | 欧姆定律 .....             | 16 |
|          | 公式 1-20 : | 并联流导 .....             | 16 |
|          | 公式 1-21 : | 串联流导率 .....            | 16 |
|          | 公式 1-22 : | 孔口阻挡流量公式 .....         | 16 |
|          | 公式 1-23 : | 孔口流量 .....             | 17 |
|          | 公式 1-24 : | 孔口流导 .....             | 17 |
|          | 公式 1-25 : | 空气的孔口流导 .....          | 17 |
|          | 公式 1-26 : | 层流中的圆管流导 .....         | 17 |
|          | 公式 1-27 : | 空气层流中的圆管流导 .....       | 17 |
|          | 公式 1-28 : | 分子流管道流导 .....          | 17 |
|          | 公式 1-29 : | 长圆管的传输几率 .....         | 17 |
|          | 公式 1-30 : | 分子流管道流导 .....          | 17 |
|          | 公式 1-31 : | 20°C空气时分子流态管道的流导 ..... | 17 |
|          | 公式 1-32 : | 解吸率 .....              | 19 |
|          | 公式 1-33 : | 塑料的解吸率 .....           | 19 |
|          | 公式 1-34 : | 渗透 .....               | 19 |
|          | 公式 1-35 : | 泄漏率 .....              | 19 |
|          | 公式 1-36 : | 作为时间函数的极限压力 .....      | 20 |



## 2 基本计算

|           |                           |    |
|-----------|---------------------------|----|
| 公式 2-1 :  | 罗茨泵气体负荷                   | 22 |
| 公式 2-2 :  | 罗茨泵的压缩比                   | 22 |
| 公式 2-3 :  | 层流中罗茨泵的压缩比                | 22 |
| 公式 2-4 :  | 分子流中罗茨泵的压缩比               | 23 |
| 公式 2-5 :  | 溢流阀开启时前级真空压力下罗茨泵机组的抽速     | 23 |
| 公式 2-6 :  | 溢流阀关闭时前级真空压力接近差压下罗茨泵机组的抽速 | 23 |
| 公式 2-7 :  | 高吸入压力下罗茨泵机组的抽速            | 23 |
| 公式 2-8 :  | 低吸入压力下罗茨泵机组的抽速            | 23 |
| 公式 2-9 :  | 抽空时间                      | 23 |
| 公式 2-10 : | 计算抽速                      | 23 |
| 公式 2-11 : | 抽空蒸汽的气体流量                 | 25 |
| 公式 2-12 : | 冷凝表面积的计算                  | 26 |
| 公式 2-13 : | 真空系统的本底压力                 | 27 |
| 公式 2-14 : | 扩散系数 (T)                  | 28 |

## 4 真空获得设备

|           |              |    |
|-----------|--------------|----|
| 公式 4-1 :  | 压缩比          | 59 |
| 公式 4-2 :  | 机组的气体流量      | 59 |
| 公式 4-3 :  | 返流流导         | 59 |
| 公式 4-4 :  | 实际压缩比        | 59 |
| 公式 4-5 :  | 抽速递推公式       | 59 |
| 公式 4-6 :  | 水蒸汽耐受性       | 60 |
| 公式 4-7 :  | 抽水蒸气的能力      | 60 |
| 公式 4-8 :  | 涡轮分子泵的压缩比    | 84 |
| 公式 4-9 :  | 涡轮分子泵的抽速     | 84 |
| 公式 4-10 : | 涡轮分子泵的有效抽速   | 85 |
| 公式 4-11 : | 具体抽速         | 85 |
| 公式 4-12 : | Holweck 级抽速  | 86 |
| 公式 4-13 : | Holweck 级压缩比 | 86 |
| 公式 4-14 : | 极限压力         | 87 |

## 6 质谱仪与残余气体分析

|           |           |     |
|-----------|-----------|-----|
| 公式 6-1 :  | 动能        | 103 |
| 公式 6-2 :  | 洛伦兹力      | 103 |
| 公式 6-3 :  | 力平衡       | 103 |
| 公式 6-4 :  | 路径半径      | 103 |
| 公式 6-5 :  | 四级杆偏转电压   | 104 |
| 公式 6-6 :  | 稳定性参数 $a$ | 105 |
| 公式 6-7 :  | 稳定性参数 $q$ | 105 |
| 公式 6-8 :  | 稳定性条件 U   | 105 |
| 公式 6-9 :  | 稳定性条件 V   | 105 |
| 公式 6-10 : | 高通条件      | 105 |
| 公式 6-11 : | RF 功率     | 106 |
| 公式 6-12 : | 散射        | 106 |
| 公式 6-13 : | 离子电流      | 107 |

## 8 污染管理解决方案

|          |      |     |
|----------|------|-----|
| 公式 8-1 : | 表面覆盖 | 129 |
| 公式 8-2 : | 污染剂量 | 129 |

## 文献索引

- [1] Paul Scherrer Institut, Villigen, CH
- [2] DIN 28400-1, Edition: 1990-05, Title (German): Vakuumtechnik; Benennung und Definitionen; Allgemeine Benennungen.
- [3] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 667
- [4] G. M. Barrow, G. W. Herzog (edited), Physikalische Chemie Teil 1: Atome, Moleküle, Kerne, 5th Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 2 ff
- [5] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 17
- [6] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 23
- [7] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 25
- [8] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, Table 17.5, p. 667
- [9] Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin 1988, p. 38
- [10] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, Table 17.6, p. 668
- [11] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 84
- [12] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 83
- [13] Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin 1988, p. 132
- [14] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 690
- [15] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 7<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden
- [16] Christian Edelmann, Vakuumphysik, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin 1988
- [17] Jobst H. Kerspe, Vakuumtechnik in der industriellen Praxis, 3rd Edition, expert Verlag, Renningen 2003
- [18] John F. O'Hanlon, A user's guide to vacuum technology (3<sup>rd</sup> Edition), Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, 2003
- [19] J. Delafosse, G. Mongodin, Les calculs de la technique du vide, Société française des ingénieurs et techniciens du vide, 1961
- [20] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 272

- [21] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 273 ff
- [22] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 150
- [23] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, p. 638
- [24] G. Schweitzer, H. Bleuler, A. Traxler, Active Magnetic Bearings, vdf Hochschulverlag AG, 1994
- [25] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, pp. 327–331
- [26] Karl Jousten (publisher), Wutz Handbuch Vakuumtechnik, 9<sup>th</sup> Edition, Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden, pp. 321–325
- [27] Bayard, R. T. and. D. Alpert, Rev. Sci. Instr. 21 (1950) p. 571
- [28] Hobson and Redhead, Can. J. Phys. 36 (1958) p. 271
- [29] Dawson, Peter H., Quadrupole Mass Spectrometry and Its Applications, American Institute of Physics (1997)
- [30] Gross, Jürgen H., Mass Spectrometry: A Textbook, Springer (2011)
- [31] Fachbericht Balzers BG 800003, Das Funktionsprinzip des Quadrupol-Massenspektrometers (1990)
- [32] Redhead, P. A., Hobson, J. P. and Kornelsen, E. V., The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum, Chapman & Hall, London (1968)
- [33] DIN EN 1330-8:1998-7 Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 8: Begriffe der Dichtheitsprüfung
- [34] DIN EN 1779:1999-10: Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Kriterien zur Auswahl von Prüfmethode und -verfahren
- [35] G. E. Moore: Cramming more components onto integrated circuits. In: Electronics. 38, no. 8, 1965, pp. 114–117
- [36] <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>;  
see: Yield Enhancement
- [37] P. González et al.: FOUPs Polymers Against AMCs: The HF Case, Future Fab international, issue 42
- [38] Jin, Weidong, Study of Plasma-Surface Kinetics And Feature Profile Simulation of Poly-Silicon Etching in Cl<sub>2</sub>/HBr Plasma, M.I.T., Dept. of Chemical Engineering

## 刊头

普发真空有限公司  
2021年1月  
如有变更，恕不另行通知  
价格：¥80.00  
真空技术手册，第二卷：PI 0355 PEN  
第 2 部分—知识手册：PI 0355\_2 PEN

### 图片来源

普发真空有限公司：产品图片及图纸

### 产品照片

Michael Gleim, Industriefotografie, 35452 Heuchelheim, 德国

### 出版者和内容负责方

普发真空有限公司  
德国阿斯拉尔  
柏林大街 43 号，35614  
T +49 6441 802 0  
F +49 6441 802 1202  
[www.pfeiffer-vacuum.cn](http://www.pfeiffer-vacuum.cn)

### 印刷：

上海永富印务有限公司，青浦区赵巷镇崧春路199弄150号