

# 薄膜物理与技术

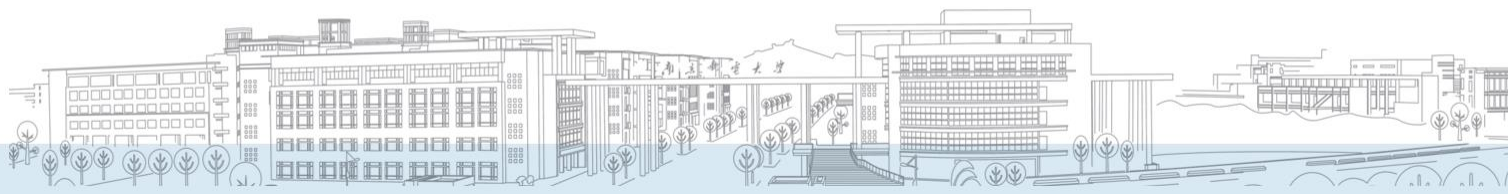
---

主讲：宋春元

教5-311

E-mail: [iamcysong@njupt.edu.cn](mailto:iamcysong@njupt.edu.cn)

材料科学与工程学院





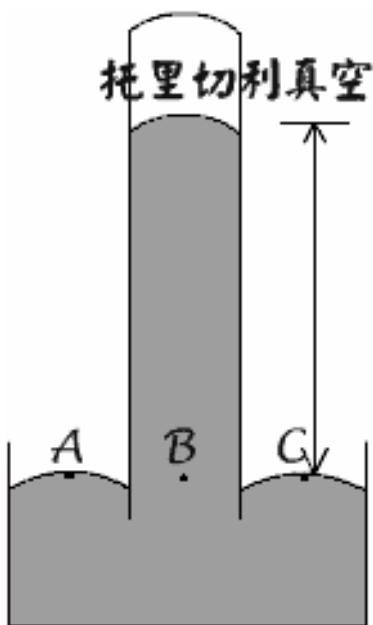
# 第一章 真空技术基础

- 1.1 真空的基本知识
- 1.2 稀薄气体的基本性质
- 1.3 真空的获得
- 1.4 真空的测量

### 真空与薄膜材料与技术有何关系？

- ➡ 几乎所有的现代薄膜材料制备都需要在真空或较低的气压条件下进行  
→ 都涉及真空下气相的产生、输运和反应过程；
- ➡ 了解真空的基本概念和知识，掌握真空的获得和测量技术基础知识  
→ 是了解薄膜材料制备技术的基础！

### 1.1 真空的基本知识



中学物理内容：1643年 托里切利 (Torricelli) 著名的大气压实验  
→ 为人类首次揭示了 **真空** 这个**物理状态**的存在！

➡ 管内水银柱上方空间内，因已排除空气的存在而形成真空 (**托里切利真空**)

图中A、B、C三点压力相等，A、C点：大气压；B点：水银柱产生的压力

➡ 换句话说：**可用水银柱产生的压力 作为 大气压力 的量度！**

→ 把高度为760 mm的水银柱所产生的压力定义为1个大气压 (1 atm)

→  $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$  !

**结果：得到了“真空”的物理存在和大气压的定义与量度依据！**



### 1.1.1 真空的定义及其度量单位

**概念：**利用外力将一定密闭空间内的气体分子移走，  
使该空间内的气压小于 1 个大气压，  
则该空间内的气体的物理状态就被称为**真空**。

**绝对真空是不存在的！**

**注意：**真空，实际上指的是 → 一种低压的、稀薄的气体状态，  
→ 而不是指“没有任何物质存在”！

因此，真空可分为

- 宇宙(自然)真空：宇宙空间内存在的真空
- 人为真空：利用真空设备获得的容器内真空

**现代真空技术的极限：**每  $\text{cm}^3$  空间内仅有数百个气体分子 →  
对应气压  $\approx 10^{-12} \text{ Pa}$



### 1.1.1 真空的定义及其度量单位

➡ 真空的实质：一种低压气体物理状态

→ 真空度采用气体压强表征 → 真空度的单位 = 气体压强的单位

➡ 注意：真空度和气压的意义相反 → 真空度↑ 意味着 气压↓

法定计量单位

➡ 主要单位制

{	国际单位制 (MKS制, 即SI制) → $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$
	厘米克秒制 (CGS制) → $1 \text{ bar} = 10^6 \text{ dyne/cm}^2$
	英制 (FPS制) → $1 \text{ PSI} = 1 \text{ lbf} / \text{in}^2$
	毫米汞柱制 (mmHg制) → $1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg} = 1/760 \text{ atm}$

➡ 换算基础：  $1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne} = 0.225 \text{ lbf}$

$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg (torr)} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.013 \text{ bar}$

标准大气压定义？



### 1.1.1 真空的定义及其度量单位

#### 标准大气压定义

目前标准大气压定义：0 °C，水银密度  $\rho = 13.59509 \text{ g/cm}^3$  ；  
重力加速度  $g = 980.665 \text{ cm/s}^2$  ；

时，760 mm水银柱所产生的压强为1标准大气压，用atm表示，则：

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 760 \text{ mm} \times 13.59509 \text{ g/cm}^3 \times 980.665 \text{ cm/s}^2 \\ &= 1013249 \text{ dyn/cm}^2 \\ &= 101324.9 \text{ Pa} \approx 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

在此基础上，可以导出压强的非法定单位与帕之间的关系.



### 1.1.1 真空的定义及其度量单位

➡ 不同真空度单位制间的换算关系：

法定计量单位

	torr/mmHg	Pa	bar	atm	PSI
1 torr (1 mmHg)		$1.333 \times 10^2$ ( $1.013 \times 10^5 / 760$ )	$1.333 \times 10^{-3}$ ( $1.013 / 760$ )	$1.316 \times 10^{-3}$ ( $1 / 760$ )	$1.9337 \times 10^{-2}$
1 Pa	$7.501 \times 10^{-3}$ ( $760 / 1.013 \times 10^5$ )		$10^{-5}$	$9.869 \times 10^{-6}$ ( $1 / 1.013 \times 10^5$ )	$1.4504 \times 10^{-4}$
1 bar	$7.501 \times 10^2$	$10^5$		$9.869 \times 10^{-1}$	$1.4504 \times 10^1$
1 atm	760.0	$1.013 \times 10^5$	1.013		$1.4696 \times 10^1$
1 PSI	51.7149	$6.8948 \times 10^3$	$6.8948 \times 10^{-2}$	$6.8046 \times 10^{-2}$	

说明：1、mmHg是人类使用最早、最广泛的压强单位；

1958年为纪念托里切利，用托（torr）代替了mmHg：1 torr = 1 mmHg

2、早期的真空度计量常以 torr 或 mbar 为单位；

目前随着标准化进程的推进，SI（MKS）制单位应用日渐广泛

→ 真空度用 Pa 作单位



## 1.1 真空的基本知识

### 1.1.2 真空度的划分

气态空间近似为大气状态，分子以热运动为主，分子之间碰撞频繁。低真空，可以获得压力差而不改变空间的性质。（如吸尘器、抽滤）

区域 物理特性	低真空	中真空	高真空	超高真空	极高真空
压力范围/Pa	$10^5 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-9}$	$< 10^{-9}$
气体分子密度 (个/cm <sup>3</sup> )	$10^{19} \sim 10^{16}$	$10^{16} \sim 10^{13}$	$10^{13} \sim 10^9$	$10^9 \sim 10^5$	$< 10^5$
平均自由程/cm	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10$	$10 \sim 10^5$	$10^5 \sim 10^9$	$> 10^9$
气流特点	1. 以气体分子间的碰撞为主 2. 粘滞流	过渡区域	(1) 以气体分子与器壁的碰撞为主 (2) 分子流 (3) 已不能按连续流体对待	分子间的碰撞极少	气体分子与器壁表面的碰撞频率较低
平均吸附时间	气体分子以空间碰撞为主			气体分子以吸附停留为主	

中真空，气体分子数更少，几近于零。气体分子入射固体表面的频率已经很低，可以保持表面洁净。适合分子尺寸加工及纳米科学的研究。吸附停留为主。入射固体表面的分子数达到单分子层所需的时间也较长，可以获得纯净表面。（薄膜沉积、表面分析...）

以可





### 1.1.3 气体与蒸气 气态的两种形式

**临界温度**：对于每一种气体都有一个特定的温度，高于此温度，气体无论如何压缩都不会液化，这个温度称为该气体的临界温度。

温度**高于临界温度**的气态物质称为**气体**，**低于临界温度**的气态物质称为**蒸气**。

实际应用中，通常以室温标准来区分气体和蒸气。

表1-2各种物质的临界温度。P3

常见物质的临界温度：

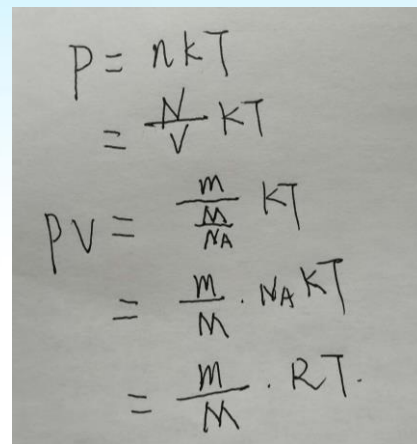
空气  $-140^{\circ}\text{C}$ ；氧气  $-118^{\circ}\text{C}$ ； 氮气  $-267.8^{\circ}\text{C}$

酒精  $243^{\circ}\text{C}$ ； 水  $374.2^{\circ}\text{C}$ ； Fe  $3700^{\circ}\text{C}$

## 1.2 稀薄气体的性质

### 1.2.1 理想气体定律 (一定质量的气体)

理想气体状态方程:  $P = nkT$  或  $PV = \frac{m}{M}RT$



$$\begin{aligned} P &= nkT \\ &= \frac{N}{V}kT \\ PV &= \frac{m}{\frac{M}{N_A}}kT \\ &= \frac{m}{M} \cdot N_A kT \\ &= \frac{m}{M} \cdot RT \end{aligned}$$

式中:  $n$  — 分子密度 (个/ $m^3$ );

$P$  — 气体压强 (Pa);

$V$  — 气体体积 ( $m^3$ );

$M$  — 气体分子量 (kg/mol);

$k$  — 玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;

$T$  — 气体温度 (K);

$m$  — 气体质量 (kg);

$R$  — 普适气体常数,  $R = N_A \cdot k = 8.314$  J/mol·K;

$N_A$  — Avogadro常数,  $6.02 \times 10^{23}$  个/mol;

(1) 波义耳定律

$T$  恒定

$$PV = C \quad (C \text{ 为常数})$$

(2) 盖吕萨克定律

$P$  恒定

$$V = CT$$

(3) 查理定律

$V$  恒定

$$P = CT$$

$$P = nkT \Rightarrow n = \frac{P}{kT} \rightarrow \text{Avogadro 定律:}$$

一定温度、压力下, 各种气体单位体积内含有的分子数相同。

气体分子密度

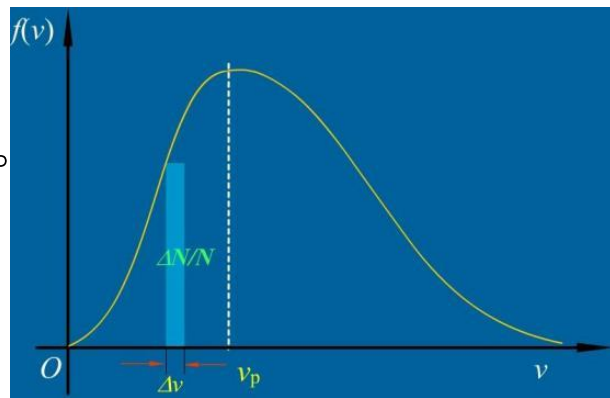
## 1.2.2 气体分子的速度分布

在平衡状态时，分布在任一速度区间 $v \sim v+dv$ 内，分子的几率，满足麦克斯韦-波尔兹曼分布：

$$\frac{dN}{N} = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-mv^2/2kT\right) v^2 dv$$

$N$ 容器中气体分子总数， $m$ 为气体分子质量， $T$ 为温度。

$m$ 确定，温度确定， $\frac{dN}{N} = f(v)dv$



$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-mv^2/2kT\right) v^2$$

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1$$

**物理意义**是：速率在 $v$ 附近的单位速率区间的分子数占分子总数的百分比；或者说一个分子的速率在速率 $v$ 附近单位速率区间的概率。因此，也叫做分子速率分布的概率密度。

### 1.2.2 气体分子的速度分布

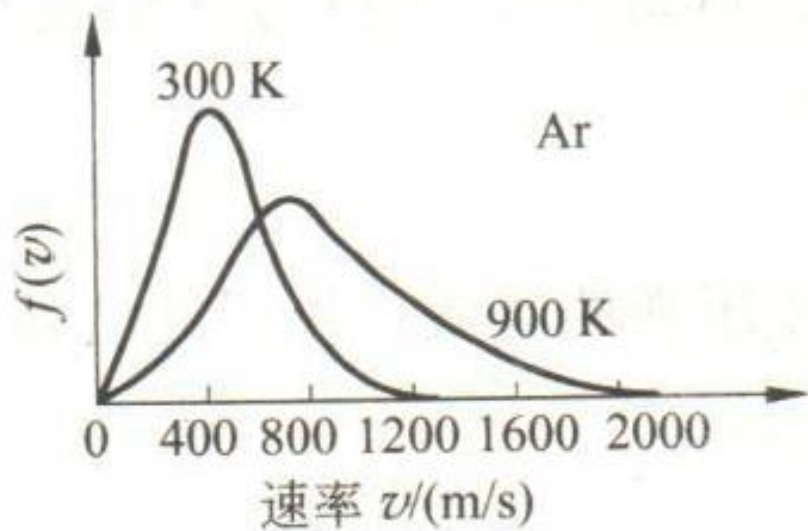


图 1-2 麦克斯韦速率分布曲线

- ◆ 平衡温度越低，曲线越陡，分子按速率分布越集中；
- ◆ 温度越高，曲线越平缓，分子按速率分布越分散。

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = \int_0^{\infty} \frac{dN}{N} = 1$$

### 1.2.2 气体分子的速度分布

#### 讨论速度分布

物理意义是：若把利用概率求平均值，对于连续型随机变量，若分布函数为 $P(X)$ ，则统计平均值定义为：  
 $V_m$ 所在的区间内的  
 为最概然速率。

$$\bar{x} = \int x \rho(x) dx$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = 1.41 \sqrt{\frac{RT}{M}}$$

图 1-4 气体分子的特征速率

#### 3. 均方根速率

#### 计算分子平均动能

$$v_r = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 1.73 \sqrt{\frac{RT}{M}}$$

$$v_r : v_a : v_m = 1.225 : 1.128 : 1$$



### 1.2.2 气体分子的速度分布

例1. 计算400K温度下氧气的方均根速率、平均速率和最可几速率。

#### 1. 最可几速率

$$v_m = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = 1.41\sqrt{\frac{RT}{M}}$$

#### 2. 平均速率

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 1.59\sqrt{\frac{RT}{M}}$$

#### 3. 均方根速率

$$v_r = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 1.73\sqrt{\frac{RT}{M}}$$

$$M = 32 \times 10^{-3} \text{ kg} / \text{mol}$$

$$R = NA \cdot k = 8.314 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{K}$$



## 1.2.3 气体分子的自由程 ( $\lambda$ )

每个气体分子在与其它气体分子连续2次碰撞之间运动的路程。

平均自由程 ( $\bar{\lambda}$ ) : 气体分子自由程的统计平均值。

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} \xrightarrow{P = nkT} \lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P} \Rightarrow \lambda \cdot P = \text{const.}$$

(种类和温度一定)

$\sigma$ —分子直径； $n$ —分子密度

空气

薄膜技术中最常用的真空度为 $10^{-4}\text{Pa}$ ,  
自由程大约是66米。即使再差,  $10^{-3}\text{Pa}$ , 自  
由程大约是6.6米。

$P=10^{-3}\text{Pa}$ 时,

$\lambda \approx 667\text{cm} = 6.67\text{m}$





### 1.2.4 碰撞次数与余弦散射定律(气体分子与表面的相互作用)

包括：气体分子跟器壁表面的碰撞，也包括反射或被吸附。

气体吸附：

- ◆ 气体吸附就是固体表面俘获气体分子的现象：分为物理吸附和化学吸附。
- ◆ 物理吸附靠分子间的相互吸引引起的，任何气体在固体表面均会发生，吸附后容易脱附。
- ◆ 化学吸附在较高温度下发生，只有当气体与固体表面原子接触生成化合物时才能产生吸附作用，气体不易脱附。

气体脱附：是气体吸附的逆过程。

影响因素：气体的压强、固体的温度、固体表面吸附气体的密度以及固体本身的性质如光洁程度、清洁度等



### 1.2.4 碰撞次数与余弦散射定律

#### 入射频率

入射频率  $\nu$  (入射通量或碰撞次数) : **单位时间**, 在**单位面积**的器壁上**发生碰撞**的气体分子数

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a$$

赫兹—克努曾公式

描述气体热运动重要公式



$$P = nkT \quad v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

$$\nu = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

$$\nu \propto P$$

( $m, T$  确定)

$$P = 1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}, \quad T = 27^\circ \text{C}$$

$$\nu \approx 3.7 \times 10^4 \text{ 个}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$$



### 1.2.4 碰撞次数与余弦散射定律

衬底完全被一层分子覆盖所需时间：

$$t = \frac{N}{\nu} = \frac{N \sqrt{2\pi MRT}}{N_A P}$$

N为表面原子密度

常温常压下，洁净表面被杂质完全覆盖所需时  
 $3.5 \times 10^{-9}$  s，而在 $10^{-8}$  Pa的高真空中，这一时间为10h。  
所以在薄膜制备技术中获得和保持适当的真空度是很重要的。



**例1**，求 $0^{\circ}\text{C}$ ， $P = 1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 氧气，

1) 气体分子密度；2) 分子平均速度；3) 平均自由程；4) 碰撞次数；5) 固体表面形成形成单分子层的时间；6) 每分钟成膜厚度。

(已知 $0^{\circ}\text{C}$ 氧气分子直径 $3.6 \times 10^{-8}\text{cm}$ ，单分子层分子数 $8.7 \times 10^{14}\text{个}/\text{cm}^2$ )

解： (1) 气体分子密度  $n = \frac{P}{kT} \quad (3.5 \times 10^{16} \text{个}/\text{m}^3)$

(2) 分子平均速度

$$v_a = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8 \times 8.31 \times 273}{3.14 \times 32 \times 10^{-3}}} \\ = 4.3 \times 10^2 (\text{m/s}) = 4.3 \times 10^4 (\text{cm/s})$$

(3) 平均自由程

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P} \quad (51\text{m})$$



### 4) 碰撞次数

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{1}{4} n v_a = \frac{1}{4} \times 3.5 \times 10^{16} \times 4.3 \times 10^2 = 3.8 \times 10^{18} (\text{分子} / m^2 \cdot s) \\ &= 3.8 \times 10^{14} (\text{分子} / cm^2 \cdot s)\end{aligned}$$

### 5) 固体表面形成单分子层的时间

$$t = \frac{N}{\nu} = \frac{N \sqrt{2\pi MRT}}{N_A P} \quad (2.3 \text{ s}) \quad \text{若 } P = 1.3 \times 10^{-8} \text{ Pa}, \quad t = 2.3 \times 10^4 \text{ s}$$

### 6) 每分钟成膜厚度

$$\tau = \frac{60}{t} \times \sigma \quad (9.5 \text{ nm/min})$$



表 1-3 几种常用气体的性质

气体	化学符号	摩尔质量 $M/10^{-3}\text{kg}$	分子质量 $m$ $\text{ms}/10^{-23}\text{g}$	平均速度 $v_a/$ $(\times 10^4 \text{cm/s}, 0^\circ\text{C})$	分子直径 $d/$ $(\times 10^{-8} \text{cm}, 0^\circ\text{C})$	平均自由程/ $\bar{\lambda} (\text{cm} \cdot \text{Pa}, 25^\circ\text{C})$	在 $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 时			
							碰撞次数/ $(\times 10^{14}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$	形成单分子层的时间/s	单分子层分子数/ $(\times 10^{14} \text{个}/\text{cm}^2)$	厚度/ $(\text{nm}/\text{min})$
氢	$\text{H}_2$	2.0	0.3	16.9	2.8	1.2	15.1	1.0	15.3	16.3
氧	$\text{O}_2$	32	5.3	4.3	3.6	0.72	3.8	2.3	8.7	9.5
氩	$\text{Ar}$	40	6.6	3.8	3.7	0.71	3.4	2.5	8.6	8.7
氮	$\text{N}_2$	28	4.7	4.5	3.8	0.67	4.0	2.0	8.1	11.3
空气		29	4.8	4.5	3.7	0.68	4.0	2.1	8.3	10.8
水蒸气	$\text{H}_2\text{O}$	18	3.0	5.7	4.9	0.45	5.0	1.1	8.3	26.8
一氧化碳	$\text{CO}$	28	4.7	4.5	3.8	0.67	4.0	2.0	8.0	11.5
二氧化碳	$\text{CO}_2$	44	7.3	3.6	4.7	0.45	3.2	1.7	5.3	16.8

## 1.2.4 碰撞次数与余弦散射定律

### 反射情况

理论与实验研究证明了如下的余弦定律。

碰撞于固体表面的分子，它们飞离表面的方向与原入射方向无**关**，并按与表面法**线**方向成 $\theta$ 角的余弦**进**行分布。

一个分子在离**开**其表面**时**，**处**于立体角 $d\omega$ 中的几率**为**

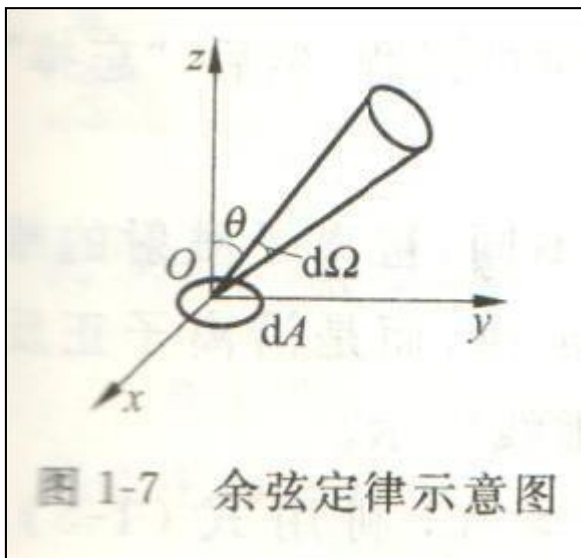


图 1-7 余弦定律示意图

$$dp = \frac{d\omega}{\pi} \cdot \cos \theta$$





### 1.2.4 碰撞次数与余弦散射定律

余弦定律（又称克努曾定律），重要意义在于：

□ 它**揭示**了固体表面**对**气体分子作用的另一个方面，即分子原有的方向性**彻底**“消除”，均按余弦定律散射。

□ 分子在固体表面上要停留一定的**时间**，**这是**气体分子能够与固体**进行**能量**交换**和**动量交换**的先决条件，**这一点**有重要意义。



### 1.2.5 真空在薄膜制备中的作用

想要得到高纯度的薄膜，就必须尽量在较高真空度的环境下，或是在不会与薄膜材料产生反应的氩气等的惰性气体中进行。

- (1) 避免被蒸发分子或原子与气体分子发生碰撞；
- (2) 避免被蒸发分子或原子与气体分子发生反应。

**特例：**也有故意让原料气体和其它气体发生反应而产生新的性质优良的材料的情形，这种称为反应性溅镀或是反应性蒸镀。



### 1.3.1 气体的流动状态

- ◆ 高真空时，气体分子除与容器壁碰撞外，几乎不发生气体分子间的相互碰撞。这种气体流动状态称为**分子流动状态**。分子流动状态的特点是气体分子的平均自由程超过了气体容器的尺寸或与其相当。
- ◆ 气压较高时，气体分子的平均自由程很短，气体分子相互碰撞极为频繁。这种气体流动状态称为**气体的粘滞流动状态**。粘滞流动状态物理机理复杂。
- ◆ 低速流时，粘滞流动处于**层流状态**。
- ◆ 气体流速较高，各种气体流动方向间不再能保持相互平行的状态，而呈现出一种旋涡式的流动形式。流动气体中出现一些低气压的漩涡，流动路径上的任何微小阻碍都会对流动产生很大影响，这种流动状态称**滞留状态**。

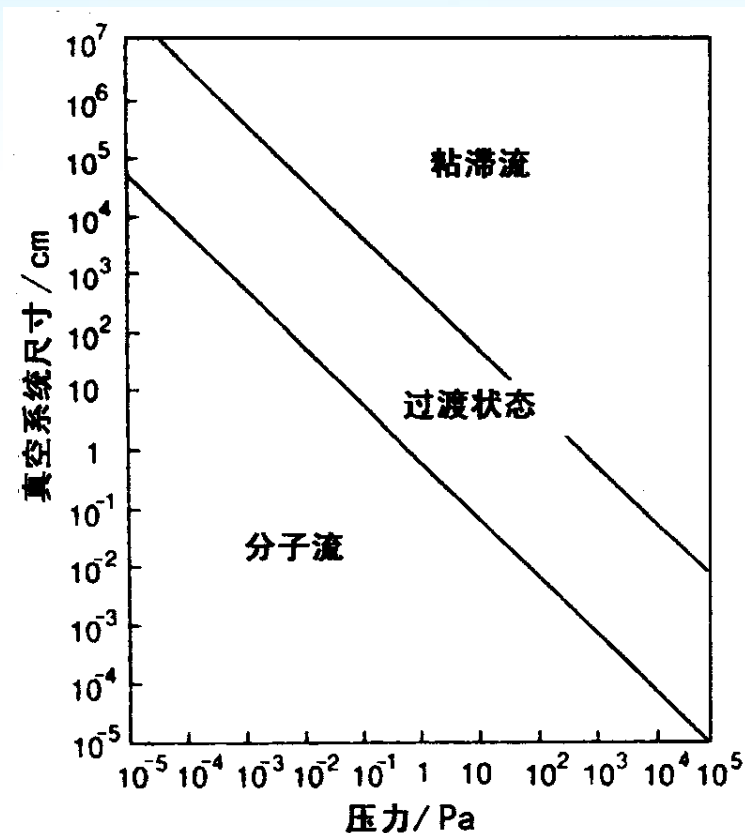
### 1.3.1 气体的流动状态

气体流动可按克努森准数来划分：

$$K_n = D/\lambda$$

D为容器尺寸； $\lambda$ 为平均自由程

- \* 分子流状态： $K_n < 1$
- \* 中间状态： $K_n = 1 \sim 110$
- \* 粘滞流状态： $K_n > 110$



气体流动状态与真空系统尺寸和气体压力之间的关系



**真空的获得：**就是所谓的“**抽真空**”！

→ 利用各种真空泵把容器内的空气抽出，使其内部压强保持在  $<1 \text{ atm}$  的特定压强范围！

目前常用获得真空的设备有：**各种真空泵 (Pump)**

- |                   |   |  |
|-------------------|---|--|
| ➤ <b>旋转式机械真空泵</b> | } | 属于气体 <b>传输泵</b> ，即 <b>通过</b> 气体吸入并排出 <b>真空泵</b> 从而达到排气的目的  |
| ➤ <b>油扩散泵</b>     |   |  |
| ➤ <b>复合分子泵</b>    |   |  |
| ➤ <b>分子筛吸附泵</b>   | } | 属于气体捕 <b>获泵</b> ，即 <b>通过</b> 各种吸气材料特有的吸气作用将被抽气体吸除，以达到所需真空。 |
| ➤ <b>钛升华泵</b>     |   |  |
| ➤ <b>溅射离子泵</b>    |   |  |
| ➤ <b>低温泵</b>      |   |  |

不需要油作为**介质**，又称为**无油泵**



### 极限真空（极限压强 $P_u$ ）和抽气速率

——是表示真空泵性能的两个重要参数。**极限压强**是**该系统**所能达到的**最低压强**；**抽气速率**是在**规定压强**下**单位时间**抽出气体的**体积**，它决定抽真空所需要的**时间**。

理论上，一个系统所能达到的真空度：

$$P = P_u + \frac{Q}{S} - \frac{V}{S} \cdot \frac{dP_i}{dt}$$

$P_u$ -真空泵的极限真空（Pa）， $Q$ -泵内各种气源漏气率（Pa·L/s）， $S$ -泵的抽气速率（L/s）， $V$ -真空室体积（L）， $P_i$ -被抽空间气体的分压强（Pa）， $t$ -时间（s）



### 1.3.2 真空的获得

#### 真空泵的分类及常用工作压强范围

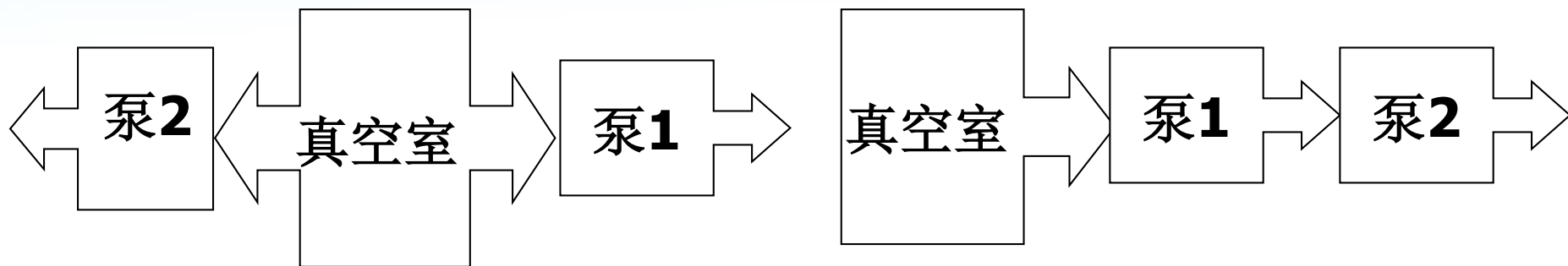
气体 输 运 泵	旋片式机械泵 (Rotary Pump)	单级: $10^5 \sim 1$ Pa 双级: $10^5 \sim 10^{-2}$ Pa
	罗茨泵 (Booster Pump / Roots Pump)	$10^3 \sim 10^{-1}$ Pa
	油扩散泵 (Diffusion Pump)	$1 \sim 10^{-6}$ Pa
	涡轮分子泵 (Turbomolecular Pump)	$1 \sim 10^{-8}$ Pa
	。 。 。	
气体 捕 获 泵	溅射离子泵 (Ion Pump)	$10^{-3} \sim 10^{-11}$ Pa
	钛升华泵 (Titanium Sublimation Pump)	$10^{-3} \sim 10^{-11}$ Pa
	低温冷凝泵 (Cyro Pump)	$10^{-4} \sim 10^{-11}$ Pa
	吸附泵 (Sorption Pump)	$10^2 \sim 10^{-3}$ Pa
	。 。 。	

**说明:** 从大气压力开始抽气, 没有一种真空泵可以涵盖从1 atm到 $10^{-8}$  Pa的工作范围  
→ 真空泵往往需要多种泵组合构成复合抽气系统  
→ 实现以更高的抽气效率达到所需的高真空!



### 泵组合

从图表中可以看出，没有一种泵能直接从大气一直工作到超高真空。因此常常将几种泵组合使用，实现预定真空。



并联可以提高抽速

串联可以提高极限真空度

例如：

油封机械泵 + 油扩散泵 ——  $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{Pa}$

吸附泵 + 溅射离子泵 + 钛升华泵 ——  $10^{-6} \sim 10^{-9} \text{Pa}$

机械泵 + 复合分子泵 —— 获得超高真空

前级泵

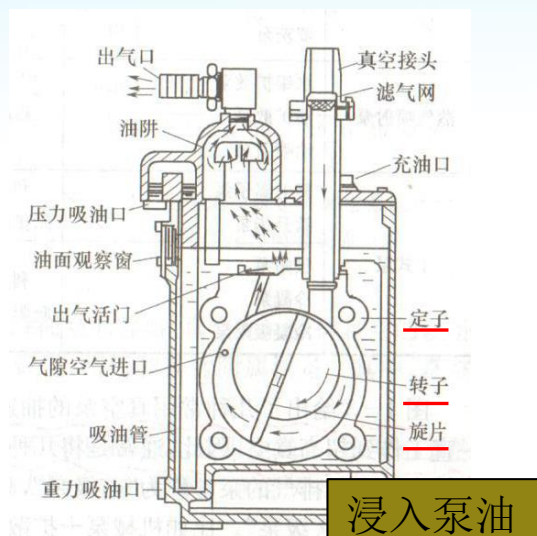
次级泵

## 1.3 真空的获得

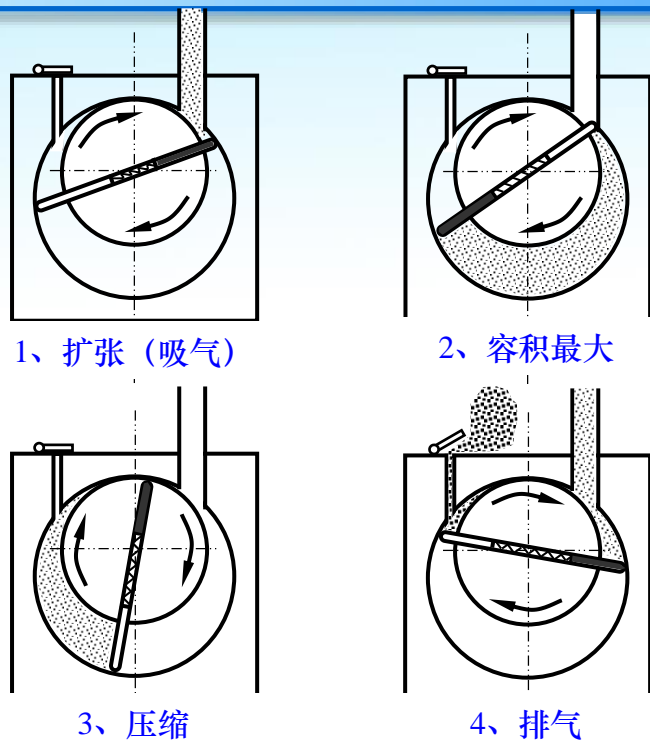
### 1.3.1 旋片式机械泵 (Rotary Pump)



(a) 外观



(b) 内部结构



(c) 工作原理

**机械泵:** 利用机械运动部件转动或滑动形成的输运作用获得真空的泵。

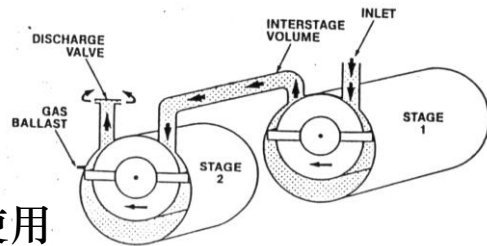
**分类:** 旋片式 (最常见)、定片式、滑阀式

**运转模式:** 吸气 → 压缩 → 排气 (不断循环)

**基本特点:** 需加真空油 (密封用); 可从大气压开始工作;  
真空度要求低 → 可单独使用; 真空度要求高 → 作为 **前级泵** 使用

**工作区间:** 单级:  $10^5 \sim 1$  Pa; 双级:  $10^5 \sim 10^{-2}$  Pa

**优、缺点:** 结构简单、工作可靠; 有油污染的问题 (油饱和蒸气压要低)。



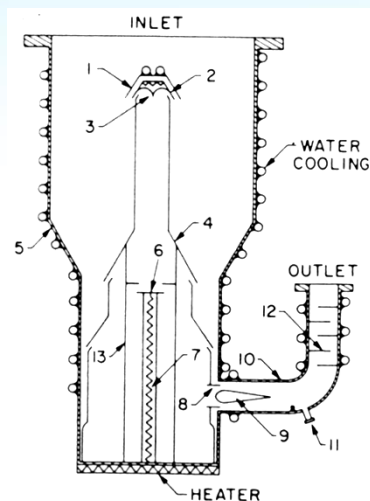
双级机械泵示意图

## 1.3 真空的获得

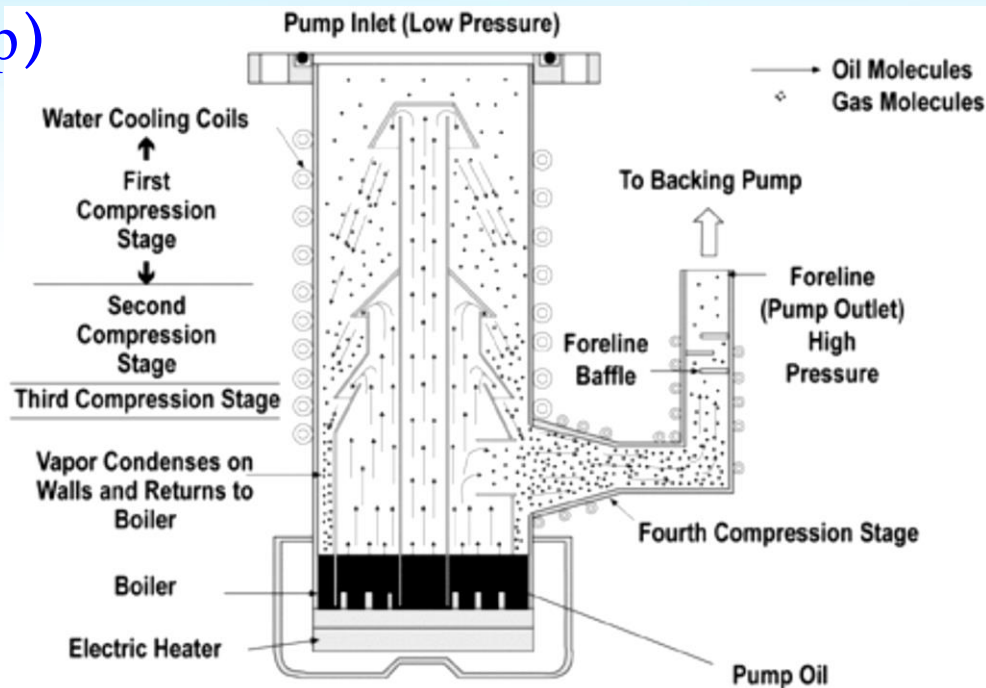
### 1.3.2 油扩散泵 (Diffusion Pump)



(a) 外观



(b) 内部结构



(c) 工作原理

#### 工作原理:

- 1) 将真空油加热到高温蒸发状态 (约 $200^{\circ}\text{C}$ ) ;
- 2) 让油蒸汽分多级向下定向高速喷出;
- 3) 大量油滴通过撞击将动能传递给气体分子;
- 4) 气体分子向排气口方向运动, 并在动压作用下排出泵体;
- 5) 油气雾滴飞向低温介质冷却的泵体外壁, 被冷却凝结成液态后返回泵底部的蒸发器。

**工作区间:**  $1\sim 10^{-6}$  Pa (因此需要前级机械泵提供1 Pa的出口压力)

**优点:** 1) 造价较低的高真空泵方案; 2) 没有机械运动部件。

**缺点:** 油蒸汽回流有可能污染真空系统 (不宜在分析仪器和超高真空场合使用) 。必须与机械泵联用

#### 真空油历经循环:

蒸发 → 喷射 → 碰撞 → 冷凝 → 回流

射流速度  $200\text{m/s}$



### 1.3.2 油扩散泵 (Diffusion Pump)

#### 泵油要求:

- ◆ 化学**稳**定性好 (无毒、无**腐**蚀)
- ◆ **热**稳定性好 (高温不分解)
- ◆ 抗氧化
- ◆ **较**低的**饱**和蒸气压 (小于等于 $10^{-4}\text{Pa}$ )
- ◆ 工作**时**应有尽可能高的蒸气压



## 1.3 真空的获得

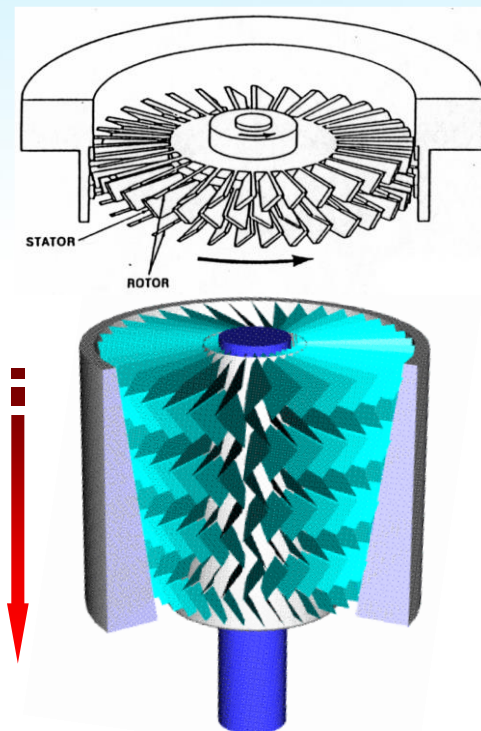
### 1.3.3 涡轮分子泵 (Turbomolecular Pump)



(a) 外观



(b) 内部结构



定子、转子交互布置

(c) 工作原理

#### 工作原理:

- 1) 泵内交错布置转向不同的多级转子和定子;
- 2) 转子叶片以20k~60k r/min的高速旋转;
- 3) 叶片通过碰撞将动能不断传递给气体分子;
- 4) 气体分子被赋予动能后被逐级压缩排出。

#### 动量传输作用

工作区间:  $1 \sim 10^{-8}$  Pa

也需前级泵提供1 Pa的出口压力, 但可提供更高真空度

优

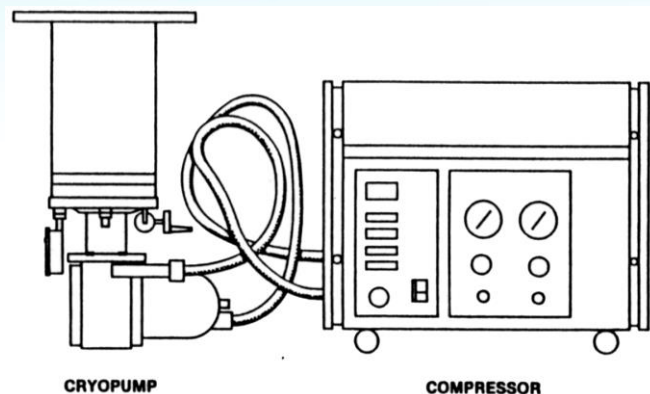
点: 无油、抽速较高。

缺

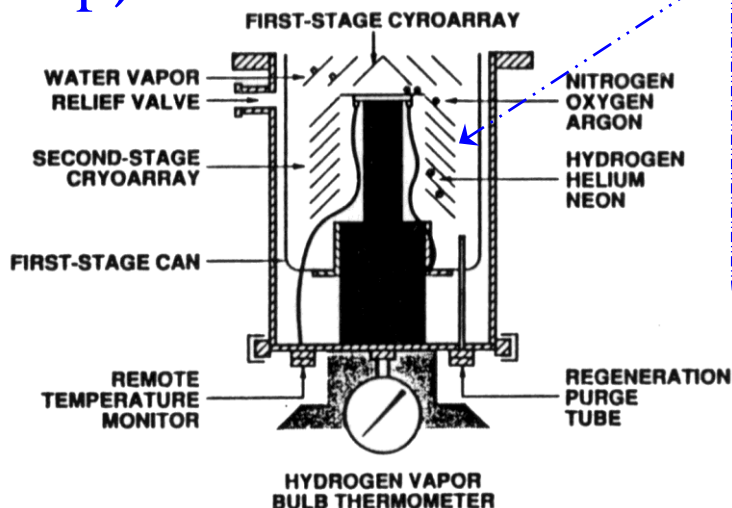
点: 1) 抽取低原子序数气体能力较差;  
2) 造价高; 3) 不易维护。

## 1.3 真空的获得

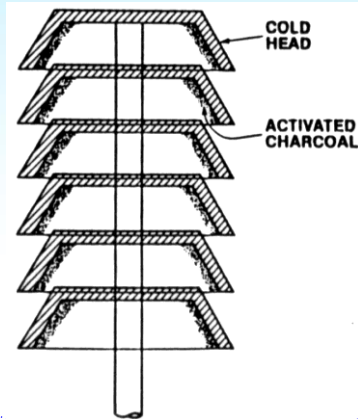
### 1.3.4 低温吸附泵 (Cryopump)



(a) 外观



(b) 内部结构



多级深冷头示意图

**工作原理：** 利用20K以下的超低温表面来凝聚气体分子以实现抽气。

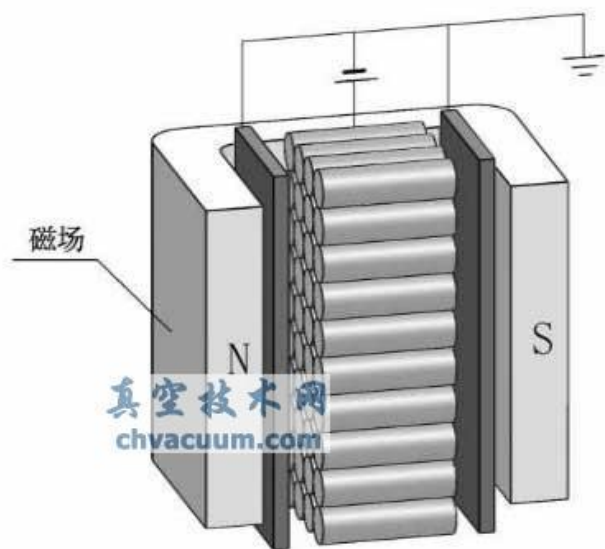
- 1) 初级冷头 (外侧温度 = 50~80 K) : 吸附 水气、CO<sub>2</sub> 等;
- 2) 多级深冷头 (T < 20 K) : 外侧光滑金属表面 → 吸附 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar;  
内侧活性炭表面 → 吸附 H<sub>2</sub>、He、Ne

**工作区间：** 10<sup>-4</sup>~10<sup>-11</sup> Pa

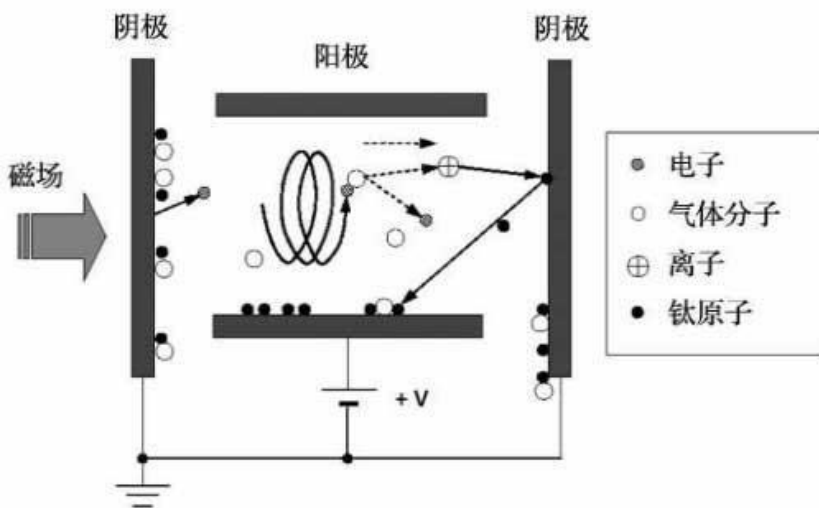
**优点：** 可实现目前最高的极限真空度：10<sup>-11</sup> Pa。

**缺点：** 1) 属于捕获泵的一种，使用要求高，需要外加冷源（液氮、液氦或制冷机）；  
2) 需要“再生”处理。

### 1.3.5 溅射离子泵



(a) 离子泵结构图



#### ■ 工作原理:

依靠高压阴极发射出的高速电子与残余气体分子相互碰撞后引起气体电离放电，而电离后的气体分子在高速撞击阴极时又会溅射出大量的Ti原子。由于Ti原子的活性很高，因而它将以吸附或化学反应的形式捕获大量的气体分子并在泵体内沉积下来，实现超高真空的获得。

#### ■ 工作参数:

实际抽速：决定于泵体口径和阴极高压

工作范围：  $10^{-3}$ - $10^{-8}$  Pa

#### ■ 特点与使用

与旋片机械泵和分子泵配合使用，需要抽预真空( $10^{-6}$  Pa)；无油污染；超高真空洁净系统；价格昂贵。





### 1.4 真空的测量

- 与真空环境获得方法密切相关的是真空的测量技术，根据真空度（气体压力）的范围的不同，其测量方法和原理也各不同；
- 在真空技术中待测气体压强都很低，要直接测量其压强是极不容易的。因此，都是利用测定在低气压下与压强有关的某些物理量，经变换后再确定其容器中的压强，从而得到容器的真空度；
- 任何具体物理特征，都是在某一压强范围内变化比较显著。因此，任何方法都有其一定的测量范围，即真空计的“量程”；
- 目前，还没有有一种真空计能够测量从大气压到 $10^{-10}\text{Pa}$ 的整个范围真空度。



## 1.4 真空的测量 真空测量元件常被称为真空规.

表 1-5 几种真空计的工作原理与测量范围

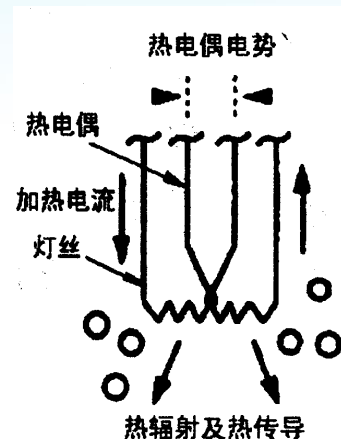
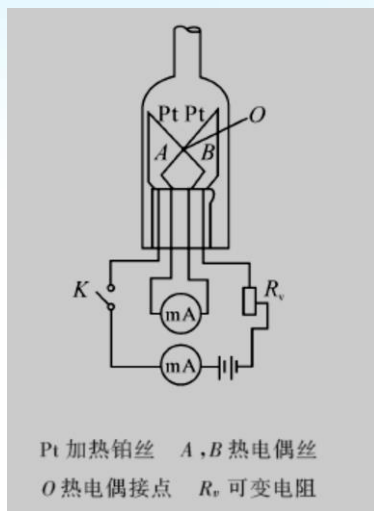
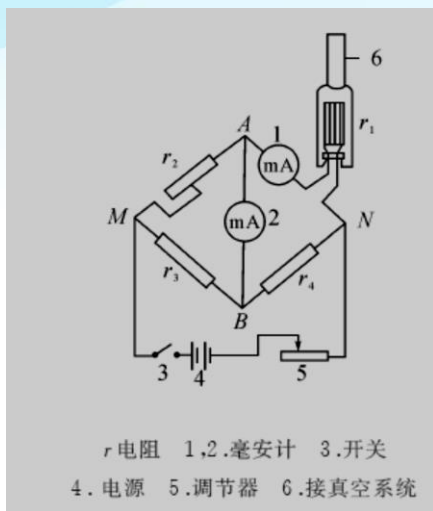
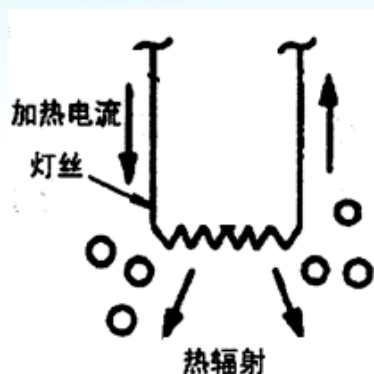
名称	工作原理	测量范围/Pa
U形管压强计(油)	根据液柱高度差测定大气压强	$10^4 \sim 10^{-2}$
U形管压强计(水银)		$10^5 \sim 10^2$
皮喇尼真空计	气体分子热传导	$10^2 \sim 10^{-2}$
电阻真空计		$10^4 \sim 10^{-2} (10^{-3})$
热偶真空计		
热阴极电离真空计	利用热电子与残余气体分子的电离作用	$10^{-1} \sim 10^{-5}$
舒茨真空计		$10^2 \sim 10^{-2}$
B-A型真空计		$10^{-1} \sim 10^{-8}$
Extract真空计		$10^{-1} \sim 10^{-10}$
潘宁放电真空计	磁场中气体电离与压强有关	$1 \sim 10^{-5}$
磁控管真空计		$10^{-4} \sim 10^{-10}$
$\alpha$ 射线电离真空计	利用 $\alpha$ 射线与残余气体分子的电离作用	$10^5 \sim 10^{-2}$
气体放电管	气体放电与压强有关的性质	$10^3 \sim 1$
克努曾真空计	利用热量所产生的分子的动量差	$10^{-1} \sim 10^{-5}$
黏滞性真空计	利用气体的黏滞性	$10^1 \sim 10^{-3}$
麦克劳真空计	由压缩操作的液柱高度差测定压强	$10^2 \sim 10^{-2}$
布尔登真空计	利用电气或机械方法测定压力差所造成的弹性形变来测定压强	$10^5 \sim 10^3$
隔膜真空计(机械式)		$10^5 \sim 10^{-2}$
隔膜真空计(电气式)		$10^5 \sim 10^{-2}$



### 1.4 真空的测量

- 真空测量技术分为低真空和高真空测量，常用的有三种方法：
  1. 热偶真空规和皮拉尼真空规
  2. 电离真空规
  3. 薄膜真空规

## 1.4.1 真空测量技术-热偶规或皮拉尼规



$$Q = Q_1 + Q_3$$

辐射 气体

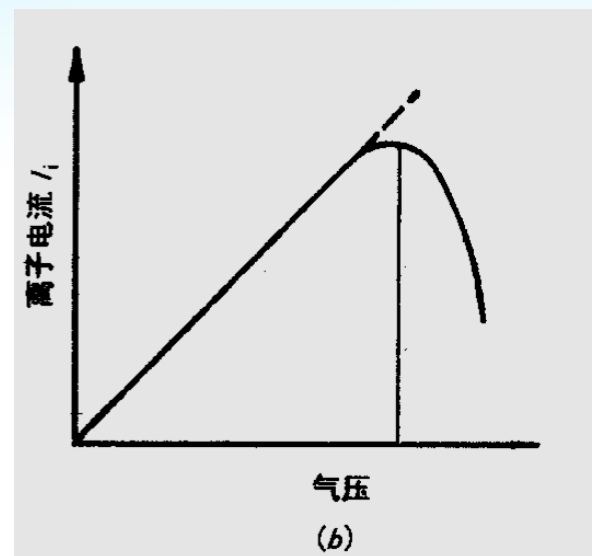
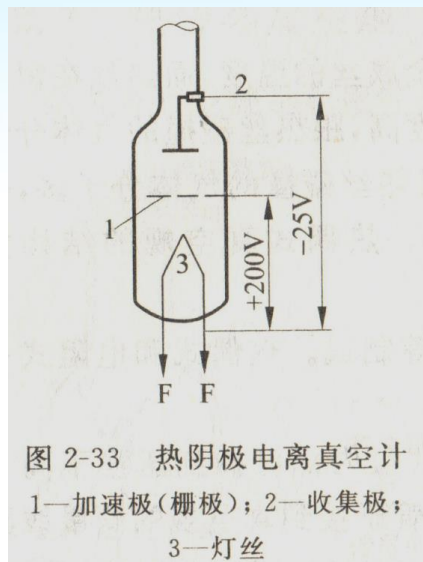
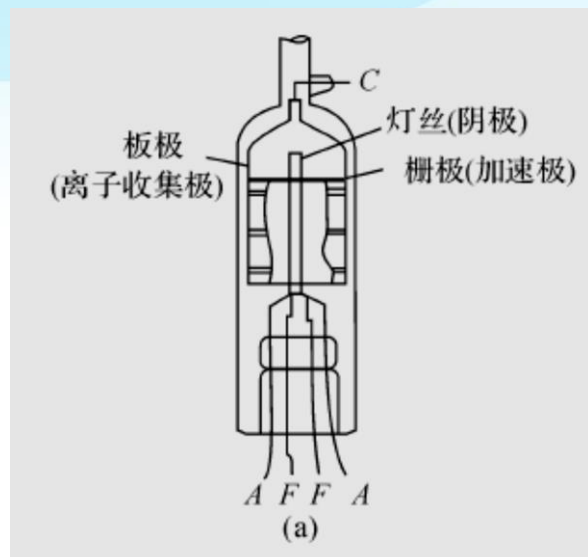
低气压环境，气体传导的热量与气体压力成正比。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

辐射 传导 气体

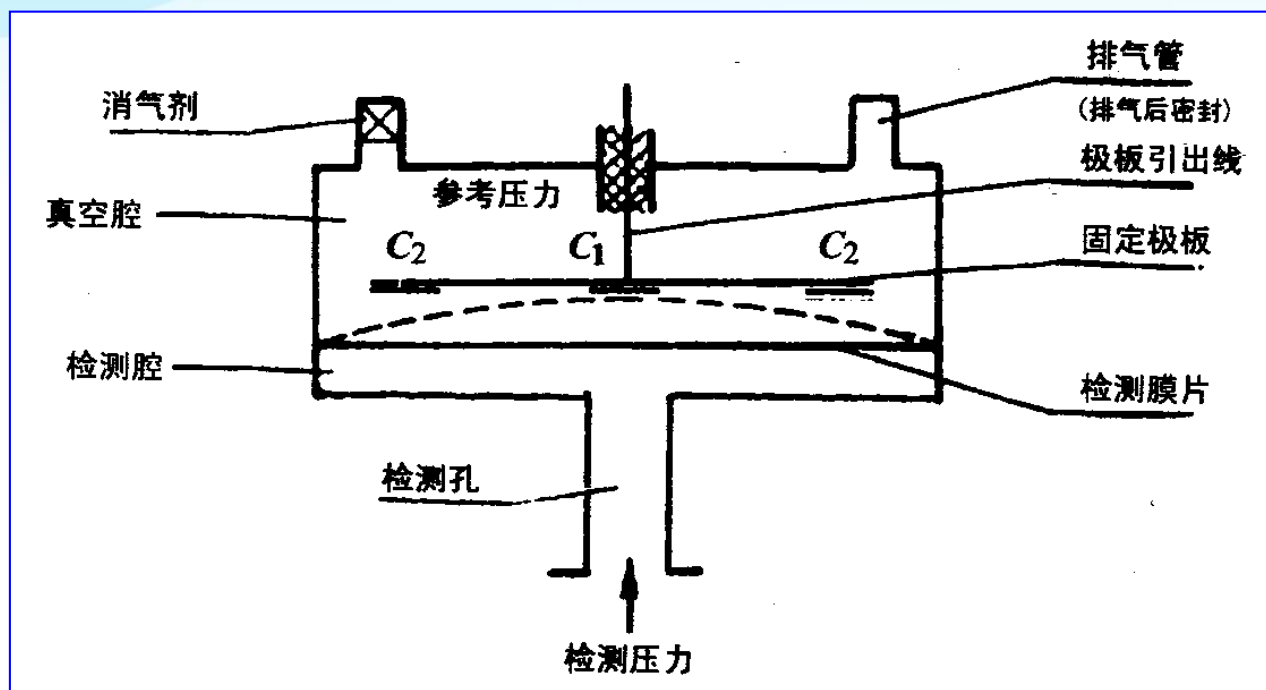
- 皮拉尼工作原理：通过测量热丝的**电阻**随温度的变化实现对真空度的测量。
- 热偶规工作原理：通过**热电偶**测出热丝温度的变化实现对真空度的测量。
- 测量范围：皮拉尼  $10^2$ - $10^{-2}$ Pa；热偶规  $10^4$ - $10^{-2}$ Pa
- 特点与使用：都属低真空测量，仪器结构简单，使用方便。

## 1.4.2 真空测量技术-电离真空规



- 在热阴极电离真空计规管中，由具有一定负电位的高温阴极灯丝发射出来的电子，经阳极加速后获得足够的能量，在气体中与分子碰撞时，可以引起分子的电离，产生正离子与电子。由于电子在一定的飞行路程中与气体分子碰撞的次数，正比于气体分子的密度（单位体积中的分子数） $n$ ，也就是正比于气体的压力 $P$ ，因此电离碰撞所产生的正离子数也与气体压力成正比。利用收集极将正离子接受起来，根据所测离子流的大小来指示气体压力的大小。

### 1.4.2 真空测量技术-薄膜真空规

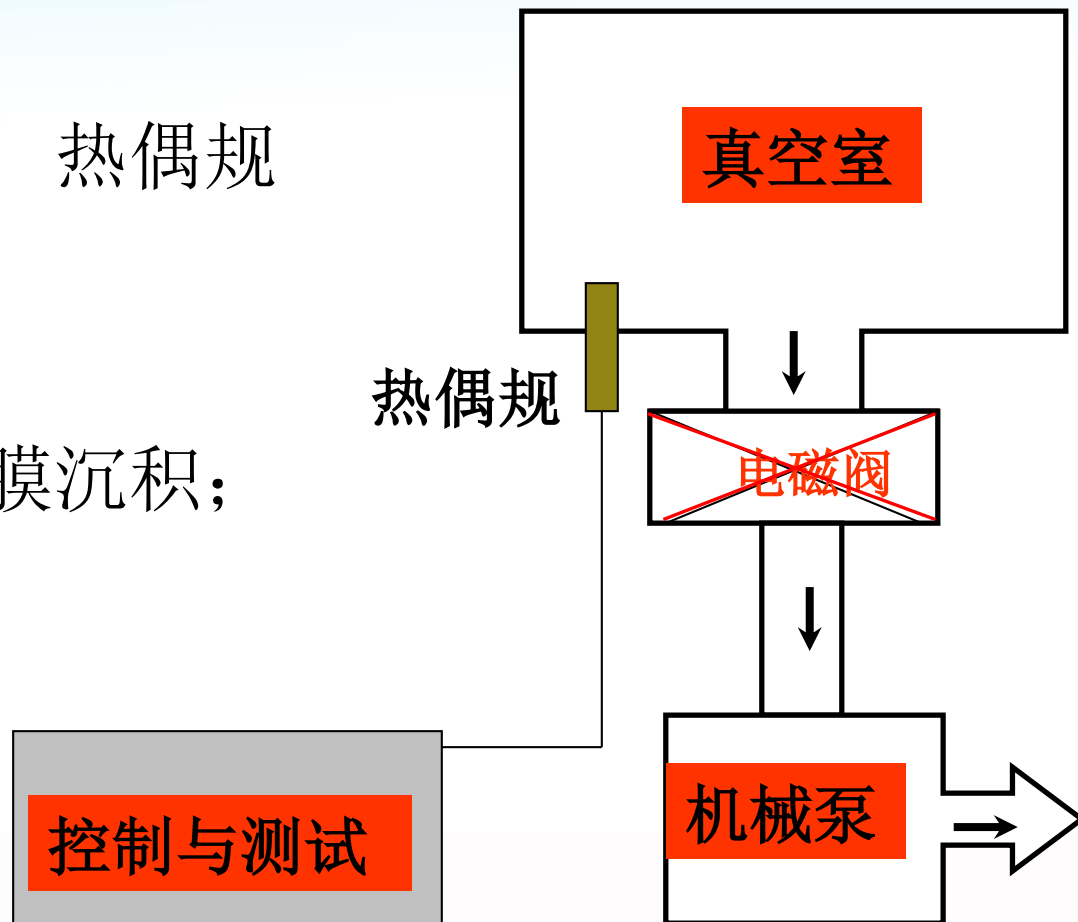


- **工作原理：**通过薄膜在气体压力差下产生机械位移，测量电极间电容，对气压进行绝对测量，测量结果与气体种类无关。
- **测量范围：**  $10^{-3} - 100\text{Pa}$  ( $10^{-3}\text{ Pa}$ 相当于薄膜位移为一个原子尺寸大小)



### (1) 低真空系统

- 系统组成：  
真空室；机械泵；热偶规
- 应用  
低压化学气相薄膜沉积；  
真空包装等





### (2) 高真空系统

- 系统组成:

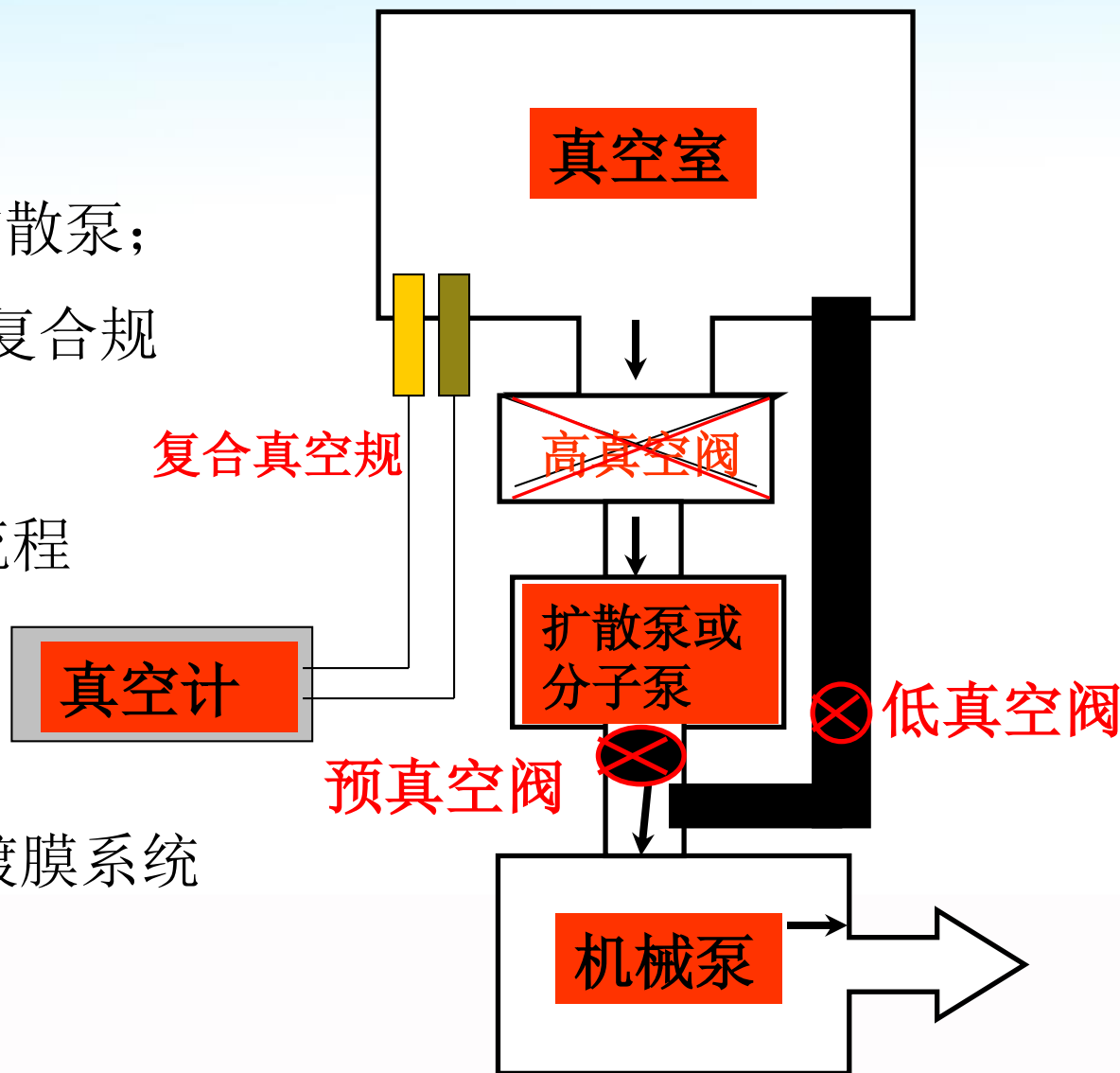
真空室； 分子泵或油扩散泵；

机械泵； 热偶电离复合规

- 获得高真空的操作流程

- 应用

溅射沉积和蒸发等镀膜系统



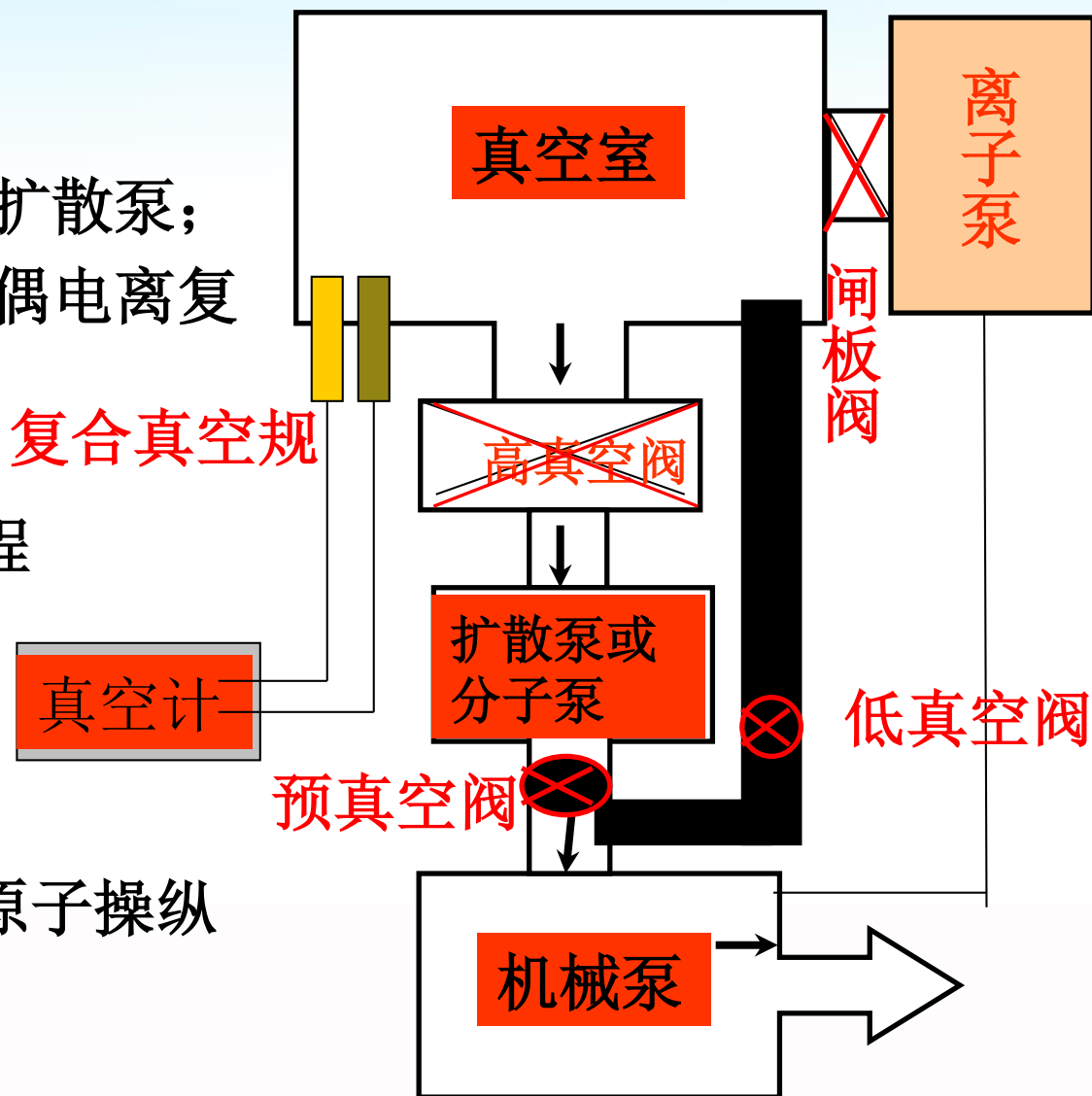
### (2) 超高真空系统

- 系统组成:

真空室；分子泵或油扩散泵；  
机械泵；离子泵；热偶电离复合真空规

- 获得高真空的操作流程

- 应用：表面，界面及原子操纵





## 真空系统建立纲要

- \* 根据系统真空度的要求，确定选用单级泵，还是多级级联泵。
- \* 根据系统真空度的要求，采用不同的真空管件接口密封配件。如O型胶圈，无氧铜圈，银圈或金圈等。
- \* 根据真空室大小，选择各泵的抽速及型号。
- \* 真空管件要尽可能的短，即真空室越靠近各泵体越好。
- \* 真空管件的截面积要求尽量的大，即管道越粗越好



## 本章小结

- \* **概念** 最可几速度、平均速度、均方根速度、平均自由程等
- \* **换算** 常用压强单位的换算
- \* **分类** 真空区域的划分、真空计、各种真空泵
- \* **原理** 机械泵、扩散泵、分子泵的工作原理，真空计的工作原理



## 本章思考题

- \* 1、什么是真空？列出最常见的真空单位？并描述5种真空范围；
- \* 2、描述旋片式机械泵、油扩散泵、涡轮分子泵和溅射离子泵的工作原理；
- \* 3、描述测量高、低真空的电离规和热偶规工作原理；



1.  $1 \text{ atm} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Pa} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ bar} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mmHg} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Torr}$ 。

2. 标准大气压是如何定义的？以Pa为单位求出标准大气压的数值。

3. 求 $0^\circ\text{C}$ 时空气分子的均方根速率及一个大气压下的平均自由程。  
(空气摩尔质量 $29\text{g/mol}$ ，平均直径 $3.74 \times 10^{-10}\text{m}$ )

4. 求 $0^\circ\text{C}$ ， $P = 1.3 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 氧气，

1) 气体分子密度；2) 分子最可几速率、平均速度、均方根速率；3) 分子平均动能；4) 平均自由程；5) 对器壁的碰撞频率；

( $0^\circ\text{C}$ 氧气分子平均直径 $3.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$ )