

## 第一章 真空技術

### 簡介

薄膜為人工製造，非自然界平衡態的產物。

除電鍍膜，無電鍍膜，有機薄膜外，大部份的薄膜皆是以物理或化學的方法，將欲做成薄膜的物質，分解為原子、分子或其少數個的集合體 (cluster)，使其在基板上結合或凝結而成。

在此過程，若前述原子、分子或其 cluster 與大氣共存存在，則會發生下述情況：

- (1) 大氣中的氣體原子會阻止前述原子、分子或其 cluster 直進，不易形成均勻平坦的薄膜。
- (2) 空氣中的氣體原子或分子介入薄膜中，破壞薄膜的純度。
- (3) 空氣中的活性原子或分子與薄膜物質形成化合物。
- (4) 使欲做成薄膜的物質，分解為原子、分子或 cluster 之裝置，與空氣中的原子或分子反應，形成化合物，無法發揮其正常功能。

及其他問題。故有必要將前述物質分解使成原子、分子或其 cluster 之步驟到此些原子、分子凝結於基板上之過程皆在無大氣之狀態下進行。

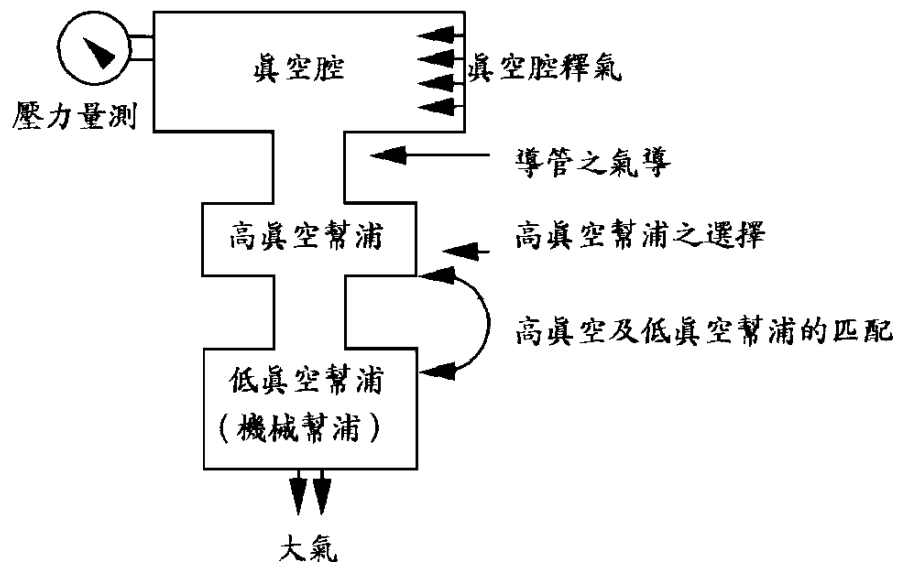
因此需將前述製備薄膜之裝置放在一容器內(註：此容器稱真空腔)，而於製備薄膜前，將容器中的空氣分子排除(註：此過程稱排氣)，排除氣體之裝置稱真空泵浦。若容器內之氣壓低於一大氣壓，則稱容器內之狀態為真空。量度容器內壓力值之工具稱真空計。若欲使真空腔內之壓力達到某一特定值，則需對氣體特性，導管內氣體流動之行為，真空計及真空泵浦之種類及功能有一概略了解，才能選擇適當之真空系統組合，以得到所要之特定壓力值。

除此之外，真空腔內之各種表面吸附之氣體將持續釋出，使得真空腔內之壓力不易下降，此釋氣為影響抽氣時間及真空腔內最終壓力的主要原

因，因此原子及分子於表面的吸附及退附行為是另一需進一步了解的主題。

本章將針對真空排氣系統及原子及分子的吸附行為作一介紹。

## 第一節 真空排氣系統



圖一 真空排氣系統

圖一為一真空排氣系統的簡圖，為了解真空排氣系統，我們將依序介紹：

- (1) 氣體動力論
  - (2) 壓力量測
  - (3) 真空泵浦
  - (4) 真空腔
- 及(5)釋氣。

### 1.1 氣體動力論

#### 1.1.1 單位

(i) 壓力單位：

SI單位系統      1 Pa (Pascal) = 1N/m<sup>2</sup>

cgs單位系統      1 dynes/cm<sup>2</sup> = 1/10 Pa = 10<sup>-6</sup>bar  
(1 bar = 750.06mm Hg)

英制單位系統      1 psi (pounds/in<sup>2</sup>) = 51.715 mm Hg

(ii) 常用真空壓力單位：

1mm Hg = 101,325/760 N/m<sup>2</sup> (∵ 1 大氣壓 = 101,325 N/m<sup>2</sup>)

1Torr = 1mm Hg

1micron = 1μ = 10<sup>-3</sup> mm Hg

但近年來，有漸用 Pa 為常用真空壓力單位之趨勢，1Pa = 7.5m Torr。

(iii) 低壓力下氣體量 (quantity of gas)

q = PV，常用單位為      1 micron.liter

1 mm.cuft

1 mm.liter

表一 單位立方公分之分子數

$T(^{\circ}K)$	$P_{-b}(\text{Torr})$	$P_{mm}(\text{Torr})$	$n$
273.2	$1.013 \times 10^6$	760	$2.69 \times 10^{19}$
298.2	$1.013 \times 10^6$	760	$2.46 \times 10^{19}$
273.2	$1.33 \times 10^3$	1	$3.54 \times 10^{16}$
298.2	$1.33 \times 10^3$	1	$3.24 \times 10^{16}$
273.2	1.00	$7.5 \times 10^{-4}$	$2.65 \times 10^{13}$
298.2	1.00	$7.5 \times 10^{-4}$	$2.43 \times 10^{13}$

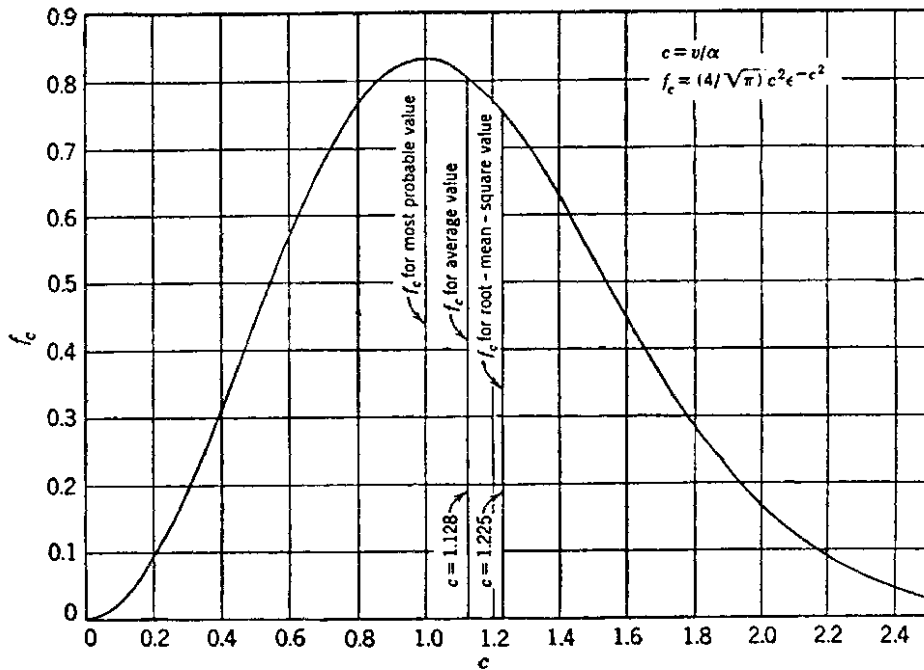
1.1.2 氣體速度

於0°C，1大氣壓下，任何種類的氣體1莫耳皆佔有22.4l之體積，且此一莫耳氣體係由  $6.03 \times 10^{23}$  個分子組成，這些分子各自有其運動速度及方向，但就全體看來，在穩定狀態常滿足某一定分佈律，此即

馬克斯威爾-波茲曼分佈 (Maxwell-Boltzman Distribution)，其分佈函數 (distribution function)  $f_{x,y,z}$  為

$$f_{x,y,z} = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-m(x^2 + y^2 + z^2)/(2kT)},$$

其函數形式如圖二所示。



圖二 馬克斯威爾-波茲曼分佈律之山形曲線。曲線  $f_c$  表隨機速度的分佈函數， $c$  係以機率最大的速度  $v_\alpha$  來表示。

而  $v_\alpha$  (機率最大的速度) =  $\left( \frac{2RT}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$

$v_a$  (平均速度) =  $\left( \frac{8RT}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}}$

$v_r$  (方均根速度  $v_{rms}$ ) =  $1.0854 v_a$

以上  $R$  為氣體常數， $T$  為氣體溫度 ( $^{\circ}K$ )， $m$  為分子量。

### 1.1.3 $\lambda$ 射頻度 (particle Flux)

單位時間內，由一假想平面之一邊衝撞至此單位假想平面之氣體

分子數目，稱λ射頻度。此λ射頻度F與該處的氣體分子密度n成正比，而分子速度增大的話，往假想平面的衝撞次數亦增多，理論上可得

$$F = \frac{n}{4} v_a \stackrel{\text{理想氣體}}{\approx} \frac{P}{(2\pi mkT)^{1/2}}$$

$$= 3.51 \times 10^{22} \frac{P(\text{Torr})}{(\text{mT})^{1/2}} \text{ 個原子 / 秒} \cdot \text{平方公分},$$

部份氣體或蒸氣的質量、速度及λ射頻度資料表列於表二。

表二 部份氣體或蒸氣的質量、速度及其λ射頻度

氣體或蒸氣	質量 (克)	$10^{-4} v_a$		$10^{-17} \epsilon$
		0°C	25°C	
H <sub>2</sub>	2.016	16.93	17.70	11.23
CH <sub>4</sub>	16.04	6.005	6.273	3.981
H <sub>2</sub> O	18.02	5.665	5.919	3.756
N <sub>2</sub>	28.02	4.542	4.745	3.011
O <sub>2</sub>	32.00	4.252	4.442	2.819
Ar	39.94	3.805	3.976	2.523
CO <sub>2</sub>	44.01	3.624	3.787	2.403
Cl <sub>2</sub>	70.91	2.856	2.984	1.893
Xe	131.3	2.099	2.193	1.392

$v_a$  = 平均速度，單位為平方公分·秒<sup>-1</sup>

$\epsilon$  = 於0°C、1 Torr時的λ射頻度，單位為(平方公分·秒)<sup>-1</sup>

#### 1.1.4 平均自由程

分子雖小，但仍有其體積，在飛行期間，分子彼此衝撞，因而改變方向和速度，再與下一分子衝撞。兩次連續衝撞之間的飛行距離的平均值稱平均自由程(mean free path)。根據詳細計算，得到以下結果：

$$L(\text{平均自由程}) = \frac{1}{\sqrt{2}(\pi\delta^2)n} = \frac{0.707}{\sigma n} \doteq 2.331 \times 10^{-20} \frac{T}{P(\text{Torr})\delta^2} (\text{公分}),$$

其中

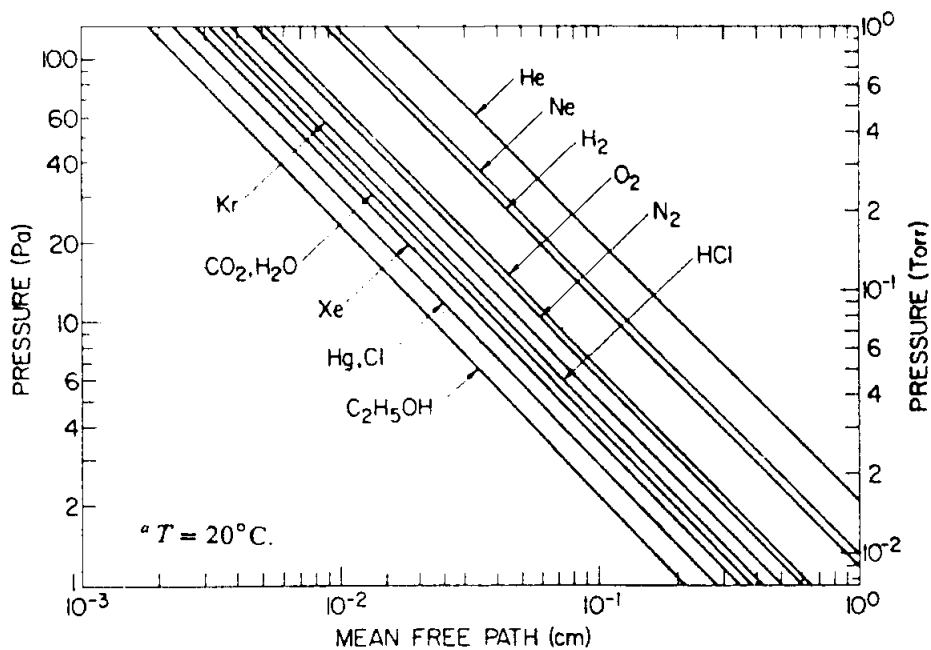
$\delta$  : 分子直徑

$\sigma = \pi \delta^2$  : 碰撞截面積

前述氣體之各項性質，表列於表三，而部份氣體的平均自由程與壓力間的關係示於圖三，於不同真空氣壓領域，氣體之各種物理特性示於表四。

表三 各種氣體之平均速度，分子半徑及平均自由程

	分子量 (克)	平均速度 $v_a$ ( $10^4$ cm/s)於 0°C	分子半徑 $u$ ( $10^{-8}$ cm)於0°C	平均自由程 $L$ ( $10^{-3}$ cm) 於25°C, 1Torr
氫	2.016	16.93	2.75	9.31
氦	4.003	12.01	2.18	14.72
水蒸氣	18.02	5.665	4.68	3.37
一氧化碳	28.01	4.543	(3.80)	(5.00)
氮	28.02	4.542	(3.78)	(5.01)
空氣	(28.98)	4.468	3.74	5.09
氧	32.00	4.252	3.64	5.40
氫	39.94	3.805	3.67	5.31
二氧化碳	44.01	3.624	4.65	3.34
水銀	200.6	1.698	(5.11)	2.66



圖三 部份氣體於20°C時，平均自由程與壓力間的關係

表四 氣體在室溫下於不同真空氣壓領域之物理特性

	粗略真空	中度真空	高真空	超高真空
氣壓 (torr)	760 ~ 1	1 ~ 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> ~ 10 <sup>-6</sup>	< 10 <sup>-6</sup>
質點密度 (分子數/cm <sup>3</sup> )	10 <sup>19</sup> ~ 10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup> ~ 10 <sup>13</sup>	10 <sup>13</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	< 10 <sup>9</sup>
平均自由程 (cm)	< 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> ~ 10	10 ~ 10 <sup>5</sup>	> 10 <sup>5</sup>
與氣壁碰撞率 (次/cm <sup>3</sup> s)	10 <sup>23</sup> ~ 10 <sup>20</sup>	10 <sup>20</sup> ~ 10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup> ~ 10 <sup>13</sup>	< 10 <sup>13</sup>
互撞率 (次/cm <sup>3</sup> s)	10 <sup>29</sup> ~ 10 <sup>23</sup>	10 <sup>23</sup> ~ 10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	< 10 <sup>9</sup>
表面單層吸附時間 (s)	< 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup> ~ 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> ~ 100	> 100
氣流形式 (D: 容器管徑)	黏滯流 L << D	肯德深流 L ~ D	分子流 L >> D	分子流 L >> D

### 1.1.5 氣體流(Gas Flow)

#### 1.1.5.1 肯德深數(Knudsen's number)

壓力降低的話，平均自由程增長，而L與氣體所在之裝置的尺寸大小關係，將決定氣體流的特性。亦即若氣體流系統的特性尺寸(或橫截面直徑)為d，定義肯德深數K<sub>n</sub>為

$$K_n \equiv \frac{L}{d}$$

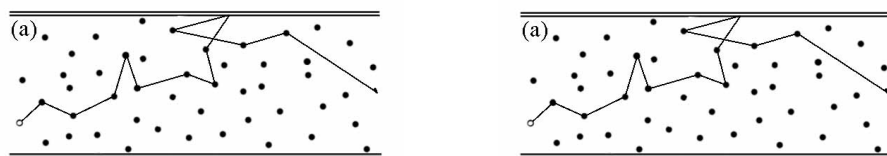
則K<sub>n</sub>值與1之關係，可決定氣體流的特性。

##### (a) 粘滯流領域(viscous flow region, K<sub>n</sub><<1)

L遠小於裝置的尺寸，則氣體分子間的衝撞次數將多於分子與壁的衝撞次數，如圖中(a)所示。

##### (b) 分子流領域(molecular flow region, K<sub>n</sub>>>1)

L遠大於裝置的尺寸，則氣體分子與壁的衝撞次數將多於分子間的衝撞次數，如圖中(b)所示。



圖四 氣體流系統中，分子與分子間碰撞及分子與壁衝撞的情況：(a)黏滯流領域，(b)分子流領域

(c) 過渡流領域(transition flow region,  $K_n \sim 1$ )

L與裝置尺寸大小相仿，氣體分子間的碰撞次數與分子和壁間的衝撞次數差不多。

1.1.5.2 雷諾數(Reynold's number)

一般情況下，氣體本身質量密度( $\rho$ )、速度(v)、黏滯係數( $\eta$ ，單位：克/秒·公分)及其所在裝置的尺寸大小(d)，將影響氣流形式，在 $K_n \ll 1$ 的情況下，還可以進一步將氣流區分為平滑流動的平滑流及產生旋渦的亂流，並以雷諾數區分。對圓管的氣體流系統而言，可定義雷諾數Re為

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{v\rho d}{\eta} \\ &= \frac{4m}{\pi k T \eta} \cdot \frac{Q}{d} \end{aligned}$$

其中Q(flow rate或稱throughput)為單位時間內 $\rho$ 的氣體量變化值。

1.1.5.3 氣導(Conductance)

氣體在真空系統中流動，其流動的量及流動的難易程度，可定量的以氣流通量及氣導值描述，而氣導值的倒數則為管路阻抗，以下分別簡述。

(a) 氣流通量(throughput, flow rate)

代表符號為Q，其定義為在某一特定的溫度下，每單位時間內通過真空系統的某一部份(如管路等)的斷面上氣體的数量。

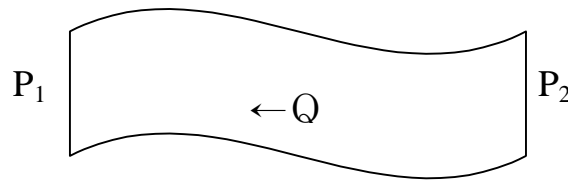
$$Q = P \cdot \frac{dv}{dt} \left( \frac{\text{Torr} \cdot \ell}{\text{sec}}, \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{sec}} \right)$$

(b) 氣導

其定義為在穩定狀態時，在單位壓力差(unit pressure difference)下的氣流通量。可以C表示。

即

$$C = \frac{Q}{P_2 - P_1} \quad (\ell/s, m^3/s)$$



(c) 管路阻抗 (impedance)

管路阻抗定義為氣導的倒數，以W表示，亦即

$$W = \frac{1}{C} \quad (s/\ell, s/m^3),$$

1.1.5.4 黏滯流 (Viscous Flow)

黏滯流中處理最詳細，也最熟悉的就 Poiseuille 流，這是已經發展完全，流經擁有圓的橫截面的長直管中的平滑流體，Poiseuille 方程式為：

$$Q = \frac{\pi d^4}{128\eta\ell} (P_2 - P_1) \cdot \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right),$$

而此流體之氣導為

$$C = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{\pi d^4}{128\eta\ell} \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right),$$

$$= 1.06 \times 10^6 \frac{d^4}{\ell} \cdot \left(\frac{P_1 + P_2}{2}\right) (\ell/sec) \quad (0^\circ C \text{ 之空氣}),$$

對圓柱形的導管而言，若氣流未發展完全，單位長度之氣導值，將較 Poiseuille 情況之氣導值小。

1.1.5.5 流經噴喉之氣流

氣體在噴喉，流速加快，壓力減低，當壓力 P 低於臨界壓力 P\* 時，氣流成為音速。臨界壓力 P\* 值可以下式表示

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = 0.5283 \quad | \quad \text{air},$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v},$$

P<sub>0</sub>：噴喉前之壓力。

1.1.5.6 分子流

分子流係指 $K_n > 1.0$ 之情況，但導管橫截面及導管表面性質對氣流的影響，目前尚未完全了解。以下僅就部份情況作一介紹。

(a) 穿過小孔(orifice)

穿過小孔之氣體量

$$Q = \frac{v}{4}(n_2 - n_1)A \cdot kT \approx \frac{v}{4}A(P_2 - P_1),$$

其中1表管1，2表管2，A為小孔之橫截面積， $n_1$ 及 $n_2$ 為管1及管2中之氣體密度，因此小孔之氣導值

$$C = \frac{Q}{P_2 - P_1} = \frac{v}{4}A。$$

(b) 氣體於無窮長管中流動


當導管長度 $l$ 大於橫截面直徑 $d$ 之20倍時，即 $l > 20d$ ，此導管可稱為無窮長。

對無窮長圓導管而言，其氣導為

$$C = \frac{\pi}{12} v \frac{d^3}{l}$$

$$= 121 \frac{d^3}{l} \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (\text{對 } 0^\circ\text{C} \text{ 的空氣而言}),$$

對無窮長的方導管，其氣導值為

$$C = \frac{2}{3} v \frac{a^2 b^2 k'}{(a+b)l},$$


$K'$ 值與 $b/a$ 之比值有關，列表於下

b/a	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
$K'$	1.1	1.12	1.13	1.17	1.29	1.44

(c) 任意長度之導管

Dushman針對短管的問題，開發一結合小孔氣導值及一截管長為 $l$ 之導管的氣導值的和的解，亦即

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_{tube}} + \frac{1}{C_{orifice}},$$

$$\begin{aligned} \text{當 } \frac{l}{d} \rightarrow 0 \quad C_{\text{tot}} &\rightarrow \frac{v}{4} A \\ \frac{l}{d} \rightarrow \infty \quad C_{\text{tot}} &\rightarrow \frac{\pi}{12} v \frac{d^3}{l} \circ \end{aligned}$$

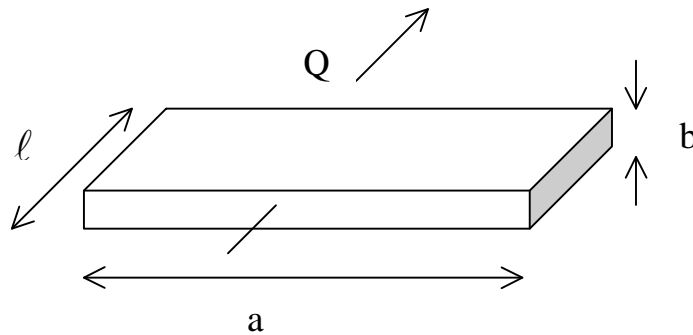
上式並無理論根據，但於極端情況下，上式可給予正確答案，因此仍被採用。

此問題處理上的困難，在於進入導管的氣體，與管壁碰撞後，可能被反射出導管。對圓導管而言，Clausing計算出氣導值為

$$C = \frac{v}{4} A \cdot K,$$

K無單位，但為  $l/d$  之函數，其函數關係示於圖 3。

而對下圖任意長度之方管而言，其氣導值為



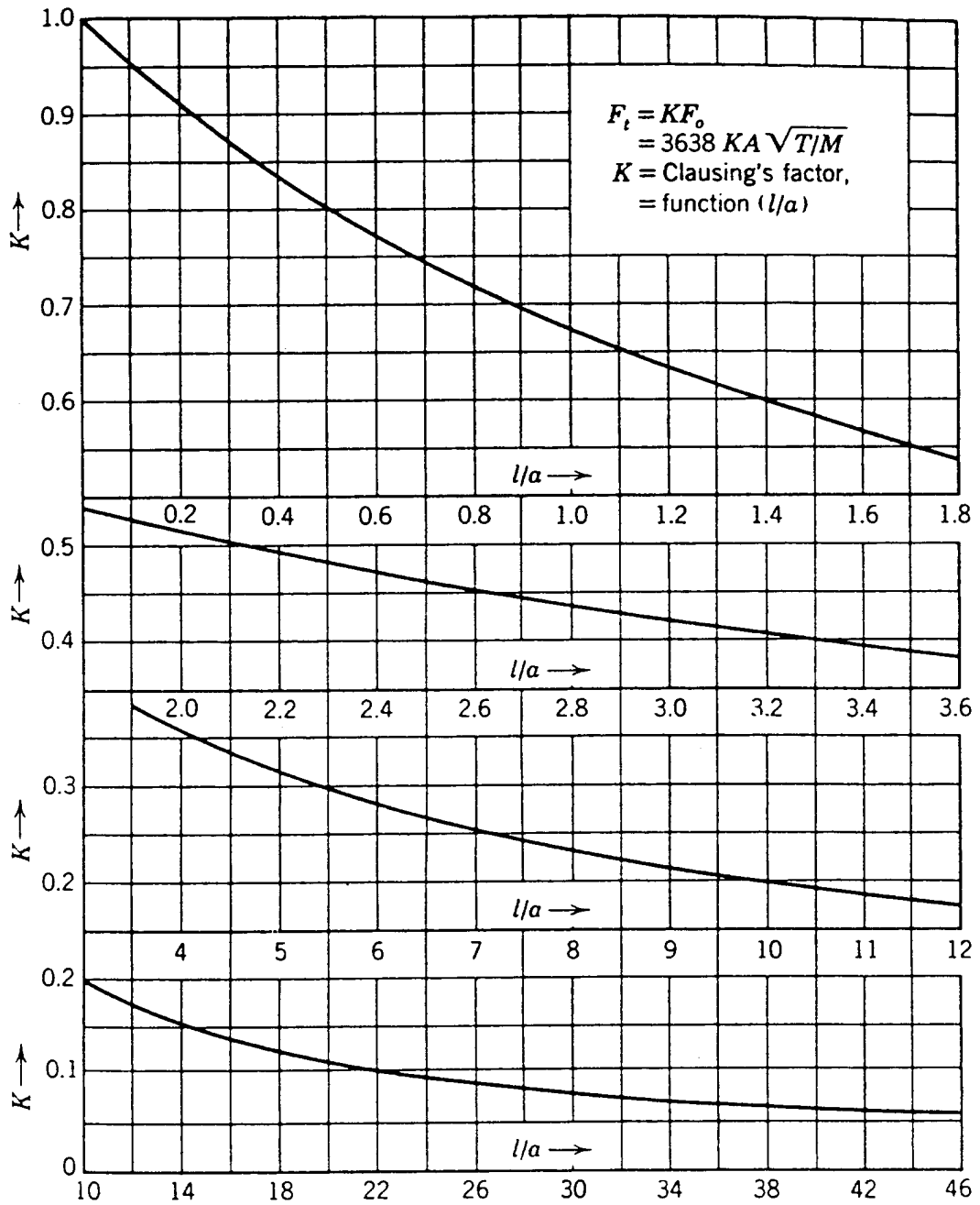
$$= 3.668 \times 10^4 K a b \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1} \quad (\text{對 } 25^\circ\text{C} \text{ 之空氣而言}),$$

其中  $T$  為溫度， $m$  為莫耳重量 (g/mole)。

Clausing指數  $K$  為  $l/b$  之函數，其關係列於表 3。

表 3 橫截面積為長方形的導管之 Clausing指數  $K$  與  $l/b$  之關係

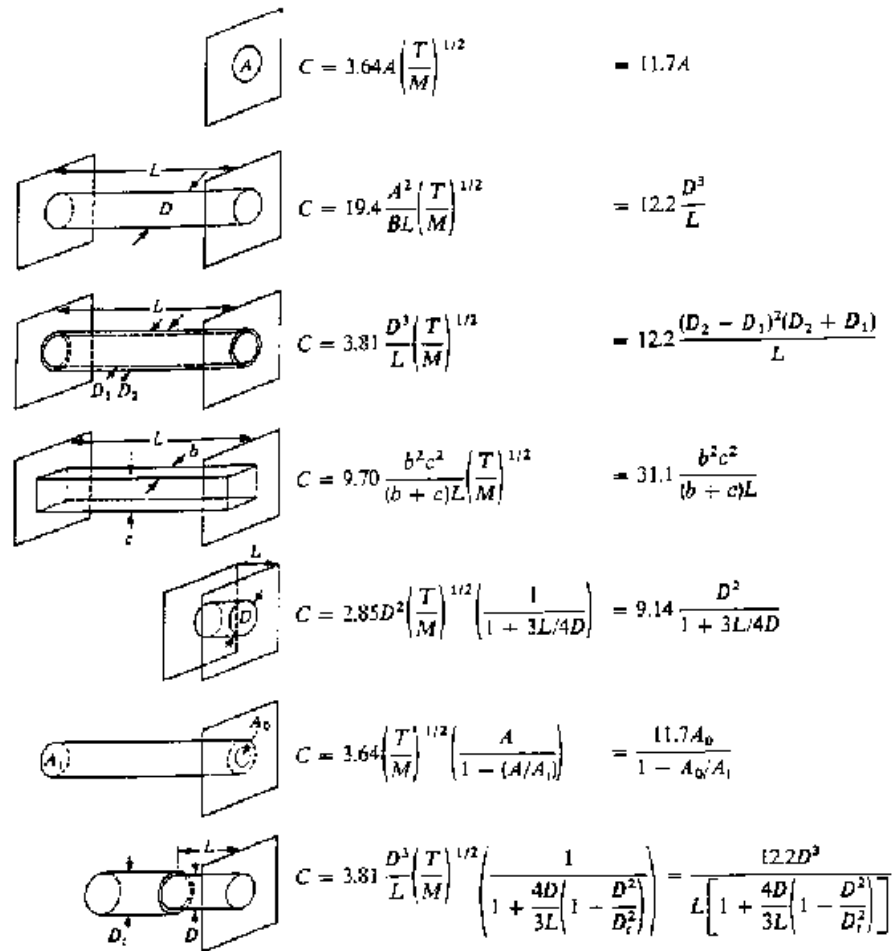
$l/b$	$K$	$l/b$	$K$
0	1.000	1.50	0.6024
0.1	0.9525	2.00	0.5417
0.2	0.9096	3.00	0.4570
0.4	0.8362	4.00	0.3999
0.8	0.7266	5.00	0.3582
1.0	0.6848	10.00	0.2457
		$\infty$	$\frac{b}{l} \ln \frac{l}{b}$



圖三 Clausing指數K繪成  $l/a$  的函數圖

(d) 其他結構

圖六為空氣在分子流領域，25°C時，於各種不同幾何形狀之導管中流動時之氣導值。



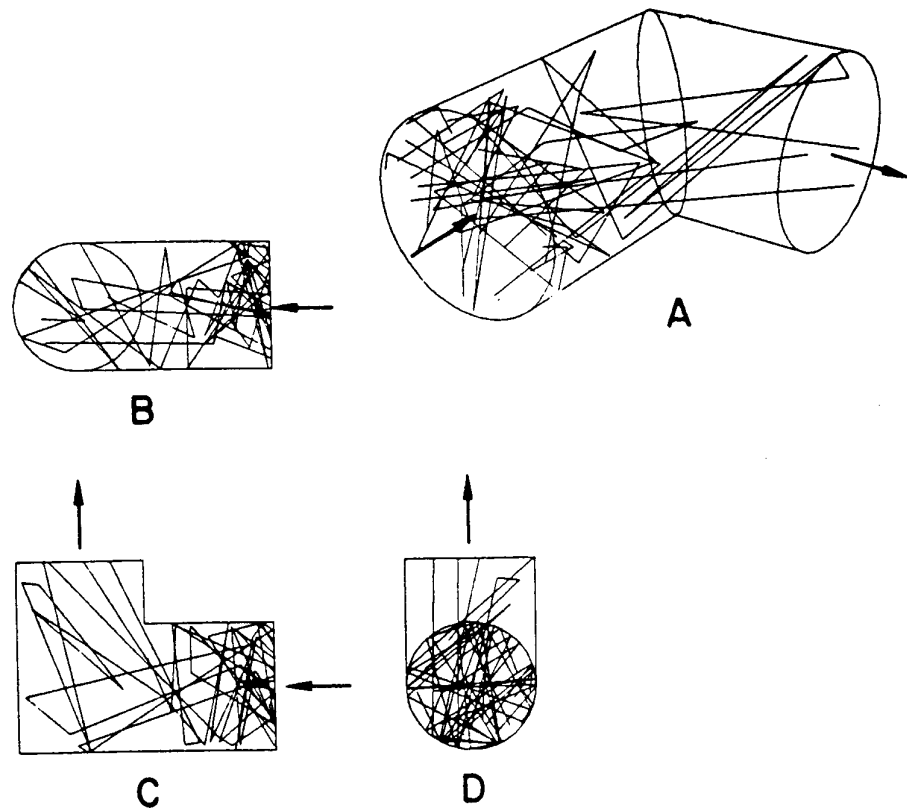
圖六 於25°C時，空氣在分子流領域於各種不同幾何形狀之導管中流動時之氣導值。

(e) 複雜結構

蒙地卡羅法為處理複雜結構唯一有效的方法。蒙地卡羅法利用電腦在一大群隨機選擇的氣體分子中，追蹤各別分子的軌跡，其解與選擇的分子軌跡的數目有關。圖九為一蒙地卡羅法示意圖。

對一系列獨立的真空元件而言，若氣體進入元件端的狀況是完全隨機，則依真空元件組接方式不同，而有不同之表示法：

(i) 真空元件串聯



圖九 電腦圖示在分子流領域進入導管肘臂的15個分子的軌跡

若總氣導值為  $C_T$ ，則

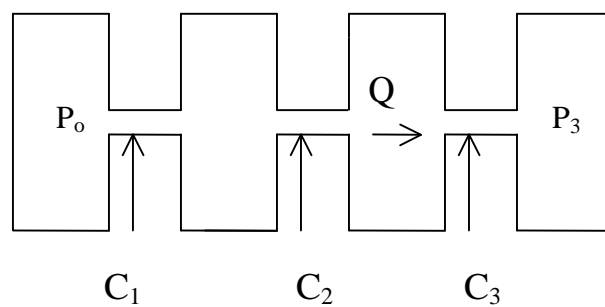
$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \dots \circ$$

(ii) 真空元件並聯

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \circ$$

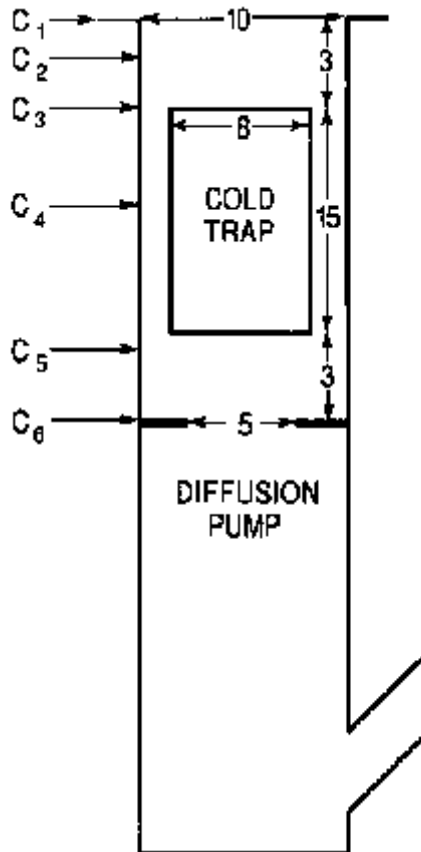
(iii) 密閉系統

如下圖之密閉系統，若總氣導值為  $C_T$



$$\begin{aligned} \text{則 } C_T &= \frac{Q}{P_0 - P_3}, \\ \Rightarrow \frac{1}{C_T} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \end{aligned}$$

以圖八之冷捕捉組合(cold trap assembly)為例，總氣導來自以下各項之貢獻：



圖八 冷捕捉組合圖

$$\begin{aligned} C_1 &= 10\text{cm直徑之導管口之氣導值} \\ &= 11.7A = 11.7\pi(5)^2 = 919\text{升/秒}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= 3\text{cm長導管之氣導值} \\ &= 12.2D^3/L = 12.2(10)^3/3 \\ &= 4065\text{升/秒}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_3 &= \text{環狀口之氣導值} \\ &= 11.7A_{\text{ann}} = 11.7(0.25)\pi(10^2 - 8^2) = 331\text{升/秒}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_4 &= \text{環狀管之氣導值} \\ &= 12.2 \frac{(D_2 - D_1)^2 (D_2 + D_1)}{L} \\ &= \frac{12.2(10 - 8)^2 (10 + 8)}{15} = 58.6\text{升/秒} \end{aligned}$$

$$C_5 = C_2 = 4065\text{升/秒},$$

$$\begin{aligned} C_6 &= \text{導管及擴散泵浦接口之氣導值} \\ &= 11.7 \frac{AA_0}{A - A_0} = \frac{11.7\pi(2.5)^2\pi 5^2}{\pi(5^2 - (2.5)^2)} = 303\text{升/秒}, \end{aligned}$$

因此

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{C_i},$$

$$C_{\text{total}} = 40\text{升/秒}$$

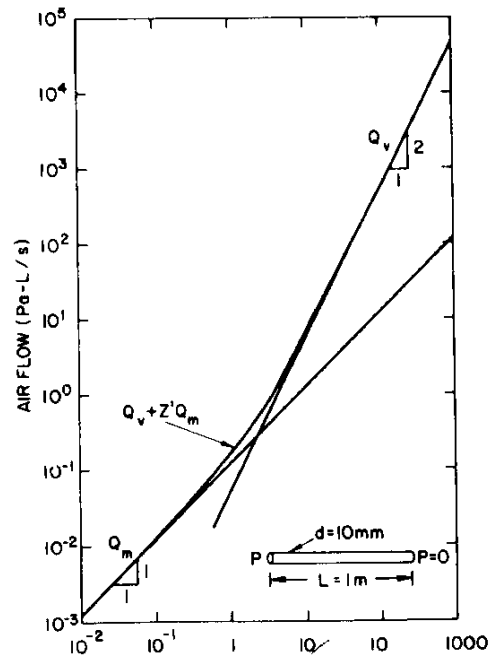
### 1.1.5.7 過渡流

此領域之氣流理論尚未發展完全。最簡單的處理方式是估計

$$Q = Q_{\text{viscous}} + Z'Q_{\text{molecular}}$$

對長圓導管而言， $Z'$ 為導管橫截面直徑 $d$ 及管長 $L$ 的函數。

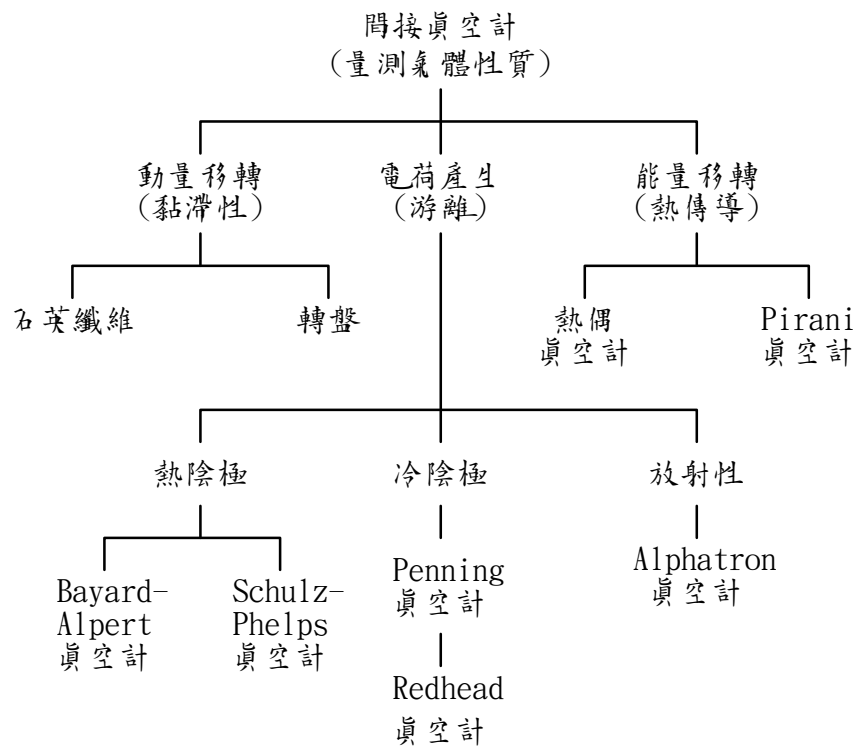
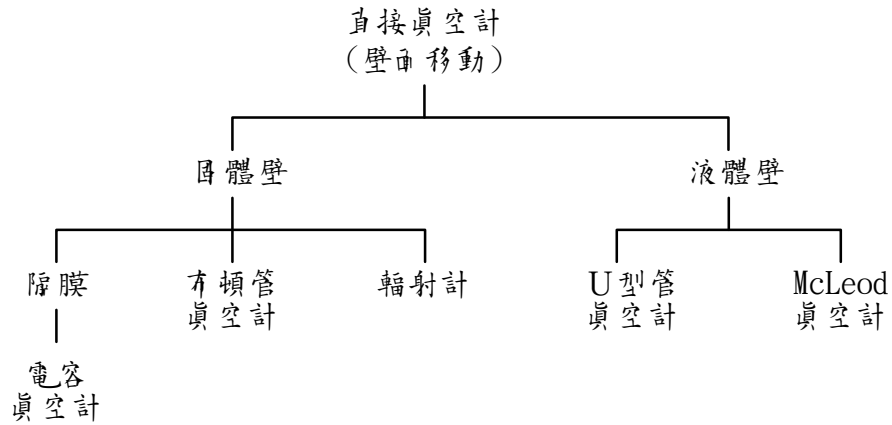
若 $Q_{\text{viscous}}$ 及 $Q_{\text{molecular}}$ 之值正確，則以上式及 $Z'$ 值計算 $Q$ 值，與實際值不會相去太遠。圖九為利用此關係式得到的氣流率 $Q$ 值的示意圖。



圖九 氣體在分子流、過渡流及黏滯流領域，流經一長導管之氣流率

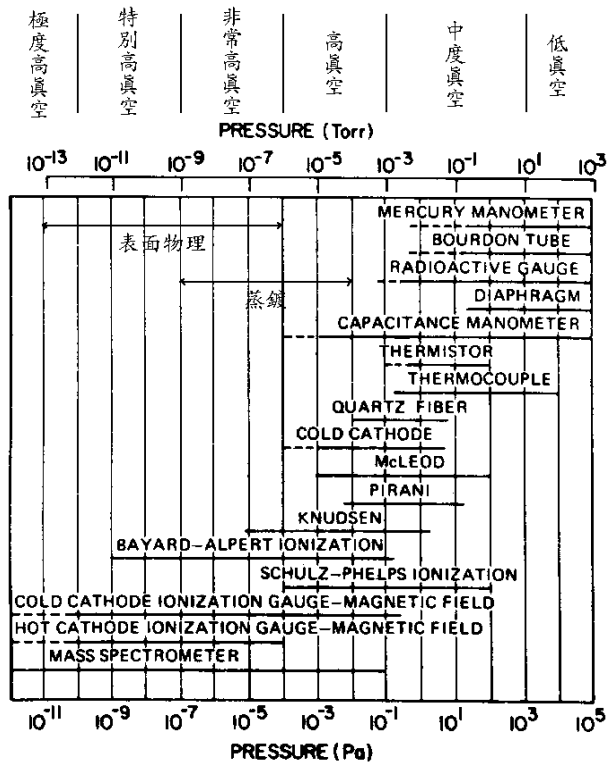
## 1.2 壓力量測

低壓下之壓力量測工具稱為真空計，真空計依其操作原理不同，可區分為直接真空計及間接真空計等二類，直接真空計為採用壁面受壓力移動的方式偵測壓力值，所量測壓力值為真實壓力值與氣體種類無關，間接真空計量測氣體性質，再換算成壓力值，顯示的壓力值與氣體種類或真空計幾何形狀有關。真空計分類見下圖。



各真空計正常運作的壓力範圍不同，如圖十所示。各真空計依其運作壓力範圍，靈敏度及操作原理的不同，也有其各自不同的應用領域。薄膜製程及研究中，使用最多的真空計為熱偶真空計，電容真空計及 Bayard-Alpert 離子真空計。

以下將依序介紹前述三種真空計及冷陰極離子真空計。



圖十 各種真空計的正常運作壓力範圍

1.2.1 電容真空計(Capacitance manometer)

電容真空計的一大優點是量測真實絕對的壓力值，藉著隔膜의 彎曲或偏移(圖十一)造成電容的不平衡，此不平衡量可轉換為一與壓力成正比的電壓訊號。

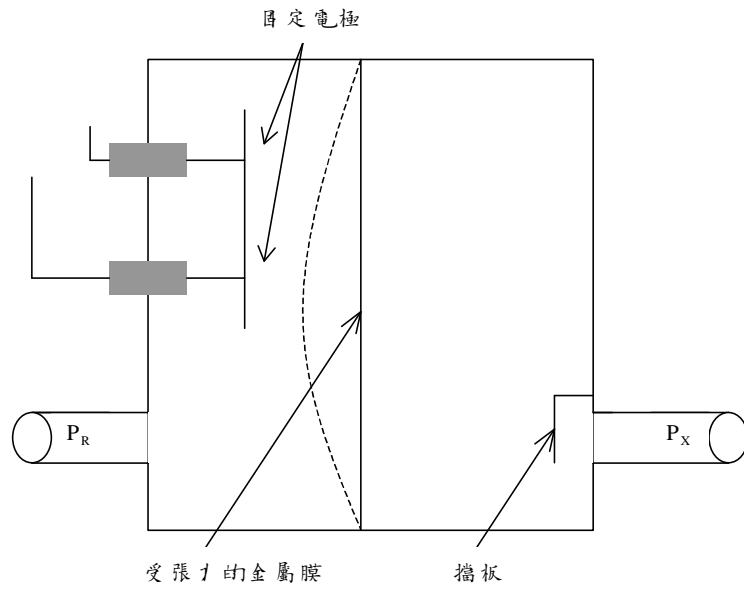
典型電容真空計的壓力量測範圍為1 torr到 $10^{-4}$  torr。

1.2.2 熱偶真空計(thermocouple gauge)

圖十二為典型熱偶真空計的壓力量測頭，其操作原理為：

- (i) 定電流流過熱燈絲，以加熱燈絲。
- (ii) 燈絲熱量藉真空中氣體傳導出去，而使燈絲冷卻(註：壓力越高，熱傳越好)。
- (iii) 燈絲中心之熱電偶量測燈絲溫度，而連接熱電偶之微伏特計刻度已校對為壓力單位。

熱偶真空計量測之壓力值與氣體의熱傳導能力有關，因此壓力

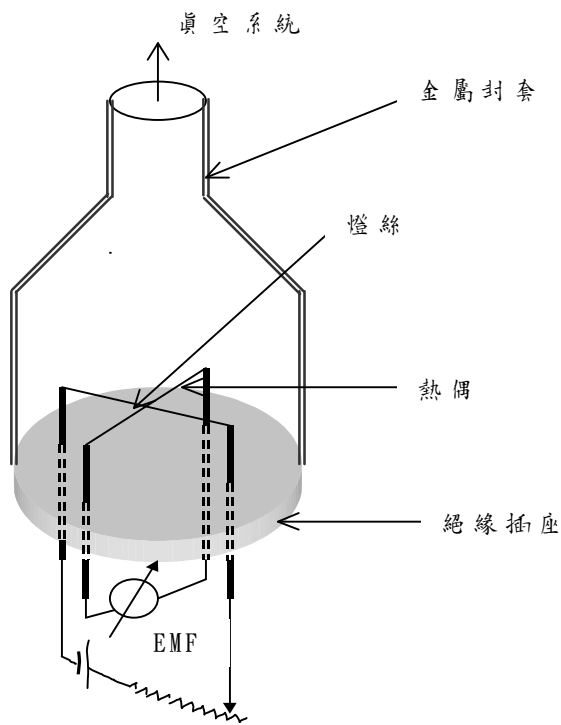


圖十一 單邊電容真空計壓力量測頭組合

量測值與氣體種類有關，如圖十三所示。

熱偶真空計之壓力量測範圍為 $10^{-3}$ 到10 torr。

### 1.2.3 Bayard-Alpert離子真空計

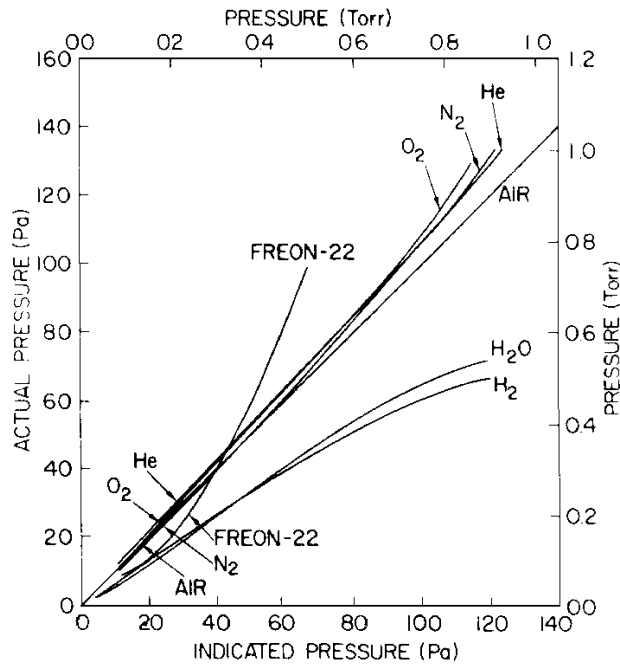


圖十二 熱偶真空計

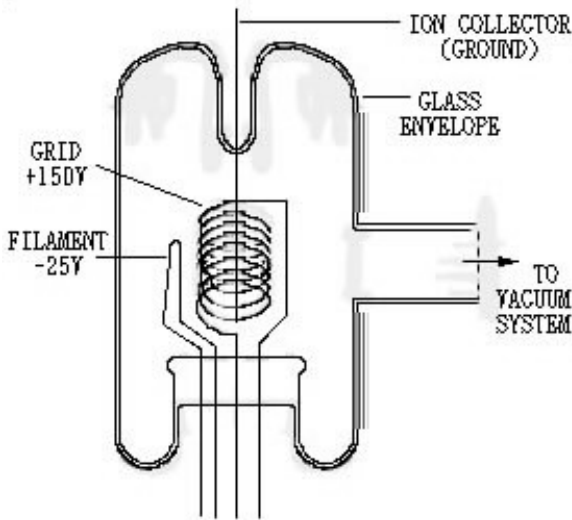
### Bayard-Alpert

離子真空計為一量測“質點密度”的真空計，其壓力量測頭見圖十四，操作原理為：

- (i) 燈絲放出電子。
- (ii) 電子受柵極正電位吸引，加速運動到螺旋線圈中。
- (iii) 電子撞擊氣體



圖十三 熱偶真空計壓力校對曲線



圖十四 Bayard-Alpert離子真空計

分子，使其游離。

(iv) 離子收集端收集離子。

Bayard Alpert離子真空計對不同氣體之相對靈敏度列於表六。

一般常用 Bayard-Alpert 離子真空計，壓力量測可低至  $10^{-1}$  torr。

### 1.2.4 冷陰極離子真空計 (cold-cathode ionization gauge)

冷陰極離子真空計如圖十五所示，其操作原理為：

- (i) 陰極產生的電子被陽極吸引，加速向陽極運動。
- (ii) 在磁場作用下，電子進行螺旋運動，穿過陽極環後，被另一陰極排斥。

表六 Bayard-Alpert離子真空計  
對不同氣體之相對靈敏度

氣體	相對靈敏度
H <sub>2</sub>	0.42-0.53
He	0.18
H <sub>2</sub> O	0.9
N <sub>2</sub>	1.00
O <sub>2</sub>	0.8-0.9
Ar	1.2
Hg	3.5
Aceton	5

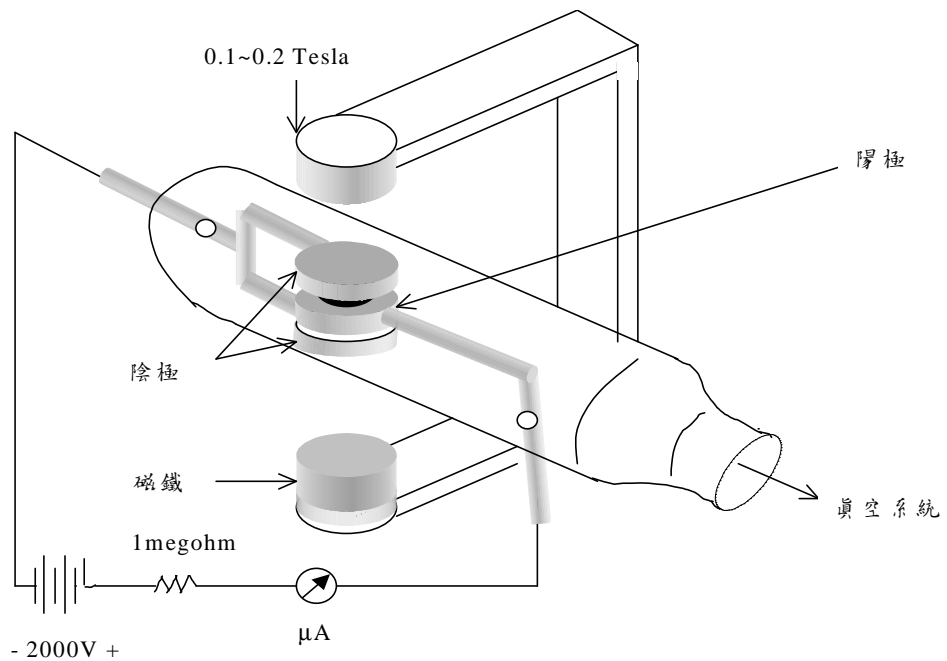
- (iii) 電子因而來回振盪，直至撞擊陽極環為止，在此區時，電子亦會撞擊氣體分子，使其游離，游離的陽離子撞擊陰離，形成離子流。
- (iv) 離子流與電子流形成之總電流量即可

反應真空壓力。

冷陰極真空計之壓力量測範圍為 $10^{-2} \sim 10^{-6}$  torr。

### 1.3 真空泵浦

真空泵浦為一有除去氣體機能的裝置。依其排除氣體的方式可區



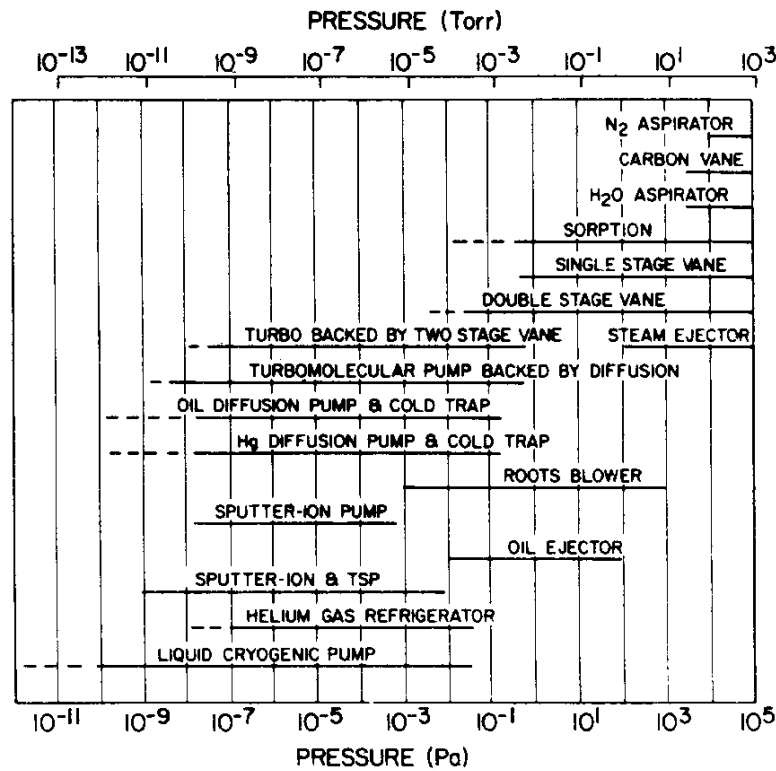
圖十 冷陰極離子真空計

分為三大類：(i)將真空裝置中的氣體輸送到較高壓力的外部而排出及(ii)捕捉真空中的氣體。但若依其排除氣體的原理，又可進一步區分為三大類：(i)氣體輸送係經由一階或多階的壓縮，例機械泵浦，(ii)氣體經由動量移轉而被局限引導並輸送，例擴散泵浦，渦輪分子泵浦等及(iii)氣體被束縛在大的低溫表面上，隨後並可經由加熱而釋出，例吸附泵浦等。除以上三大類外，某些泵浦結合二種或多種原理以排除多種氣體或運作於較大的壓力範圍。

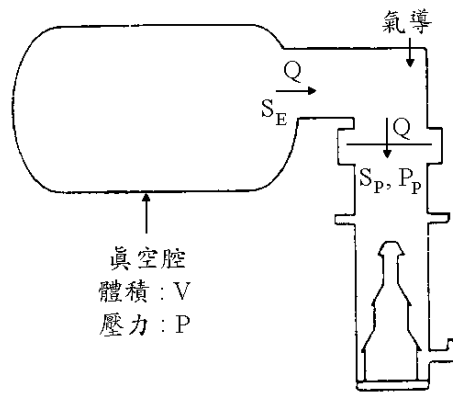
真空泵浦依其正常操作的壓力範圍又可區分為(i)低真空泵浦 (fore-pumps, roughing pumps)，運作於黏滯流範圍(ii)高真空泵浦 (high vacuum pumps)，運作於分子流範圍。各泵浦操作壓力範圍見圖十六。真空泵浦使用時，其性能的要點在於：

(a) 排氣速度 (pumping speed)

排氣速度(S)為單位時間內排除的氣體體積或單位時間內氣體



圖十六 真空泵浦操作壓力範圍



輸送穿過某一平面的氣體體積，單位為升/分或升/秒，亦即

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

主層中，

$$C = \frac{Q}{P - P_p}$$

$$Q = S_E P = S_p P_p$$

$$\Rightarrow C = \frac{Q}{Q/S_E - Q/S_p}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{S_E} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}$$

由上式可知， $S_E$ 及 $S_p$ 亦可視為氣導，且 $S_E \leq S_p$ 。又在某一壓力範圍內，若排氣速度與壓力值無關，則真空腔內氣體量變化量

$$-V \frac{dP}{dt} = SP$$

$$\Rightarrow P \propto \exp\left(-\frac{St}{V}\right)$$

亦即排氣時間與排氣速度有關。

### (b) 壓縮比 (compression ratio)

壓縮比(K)為出壓與入壓之比值，即

$$K = \frac{\text{出壓}}{\text{入壓}}$$

壓縮比將限制真空泵浦排氣所能到達之最低壓力。

以下依序介紹各種真空泵浦。

## 1.3.1 低真空泵浦

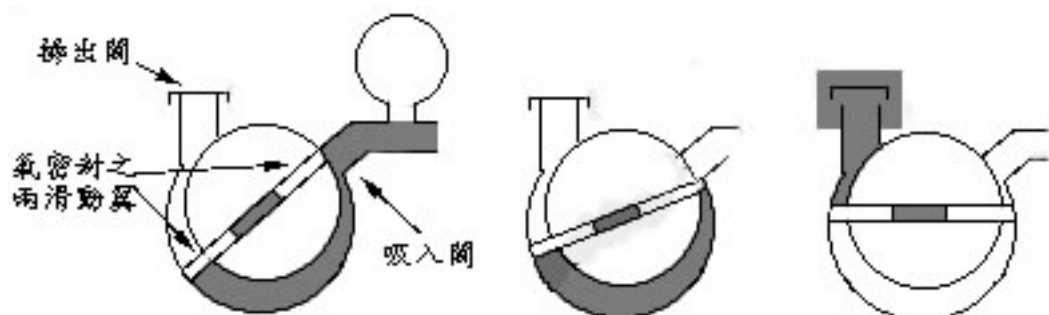
常用的低真空泵浦計有油封式的機械泵浦及相搭配的不用油封的魯式送風機型泵浦，以下依序介紹。

### 1.3.1.1 油旋轉泵浦

### 1.3.1.1.1 旋轉翼型 (rotary vane pump)

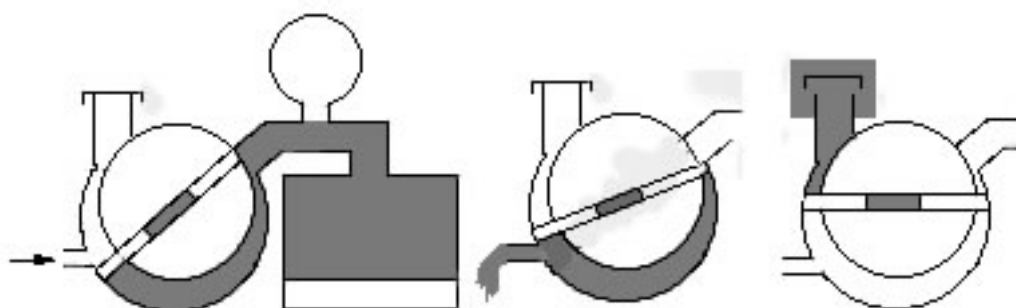
旋轉翼型是最常用的泵浦，由轉子 (rotor) 與兩滑動翼組成，滑動翼被彈簧壓著於外殼，排氣過程見圖十七，可單獨從大氣壓排氣到  $10^{-2}$  或  $10^{-3}$  torr。

在排氣時，水蒸氣、酒精等凝縮性氣體在泵浦中液化，常殘



圖十七 無噴氣閥之旋轉翼型油旋轉泵浦之排氣過程

留油中，因此在排出化學活性氣體或有機物時，前述物質不只會使油劣化，也會腐蝕泵浦的外殼、轉子、閥等，欲改善此問題，可加裝噴氣閥 (gas ballast) 成噴氣型，如圖十八所示。在壓縮過程



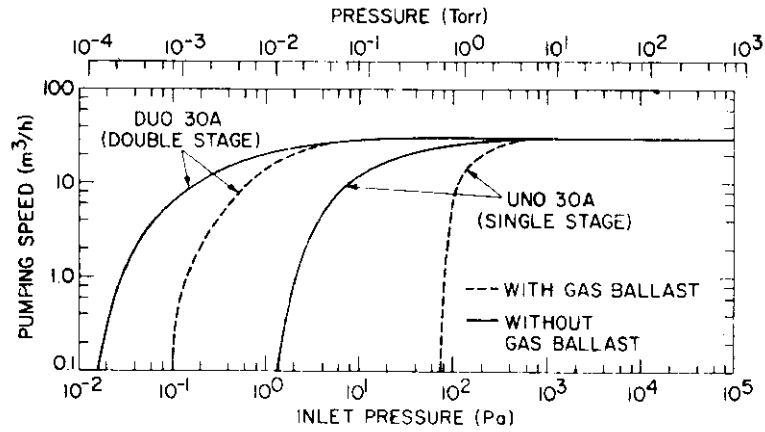
圖十八 加裝噴氣閥之旋轉翼型油旋轉泵浦之排氣過程

的途中，強制將空氣導入壓縮室，使排氣閥於到達蒸氣露點前即打開。且泵浦的作動溫度設定偏高。

旋轉泵浦之理論排氣速度為轉子旋轉所能排除的幾何學容積

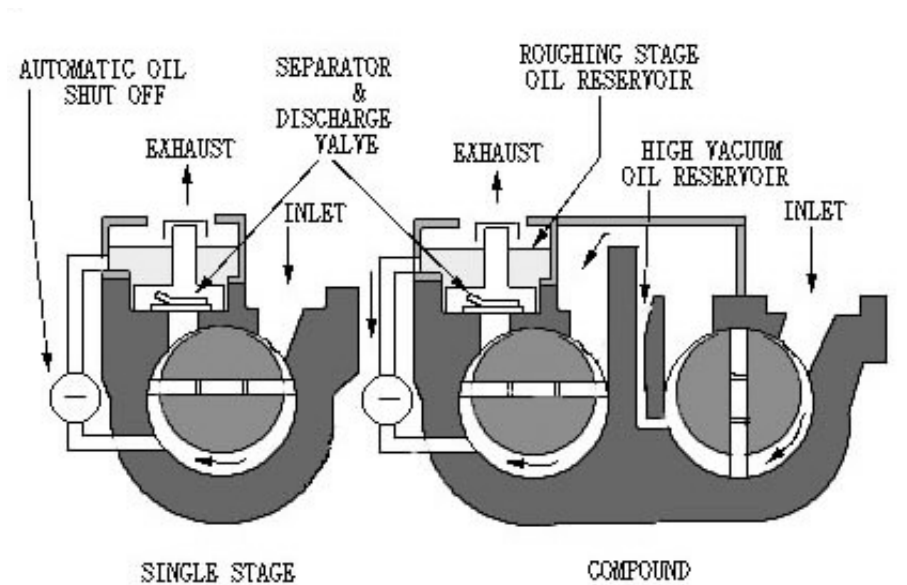
乘單位時間的旋轉數。

旋轉翼型之實際排氣速度則與壓力有關，如圖十九所示。



圖十九 旋轉翼型油旋轉泵浦之排氣速度曲線圖

此外，一段式泵浦到達壓力較高，而串列二段式泵浦(圖二十)，則可達較高真空(壓力約低二個指數,見圖十九)。

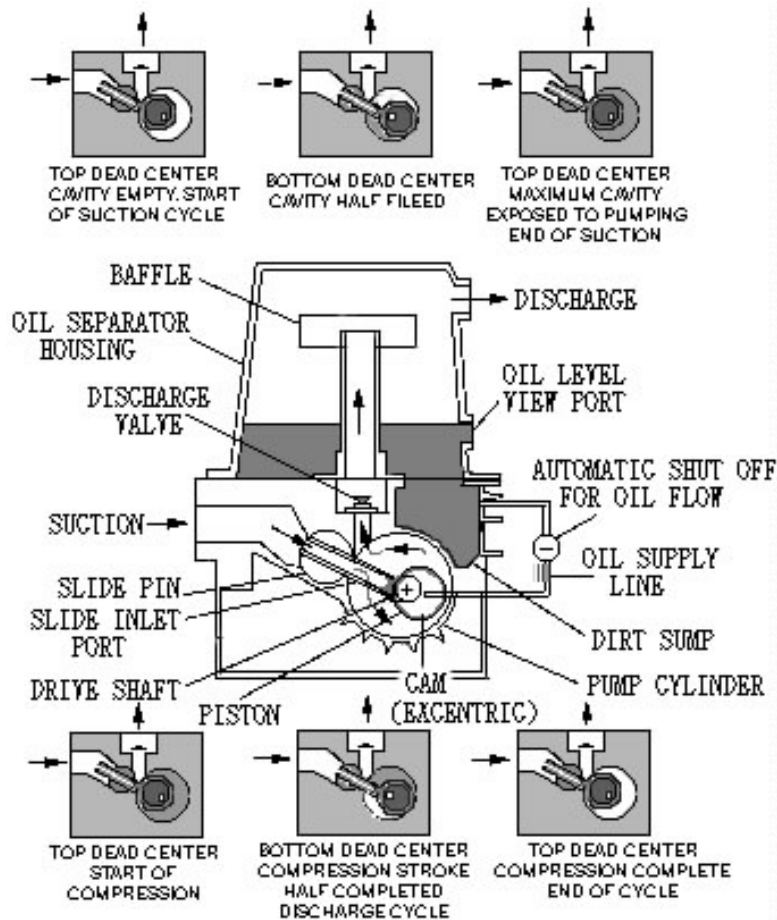


圖二十 一段式及串列二段式旋轉翼型油旋轉泵浦

### 1.3.1.1.2 搖動活塞型(rotary piston pump)

搖動活塞型是在轉子外圍設滑缸，附有滑動板與吸入閥，都

隨著轉子的旋轉而吸入、壓縮、排出氣體，排氣過程見圖二十一。此形泵浦適用於大型機。

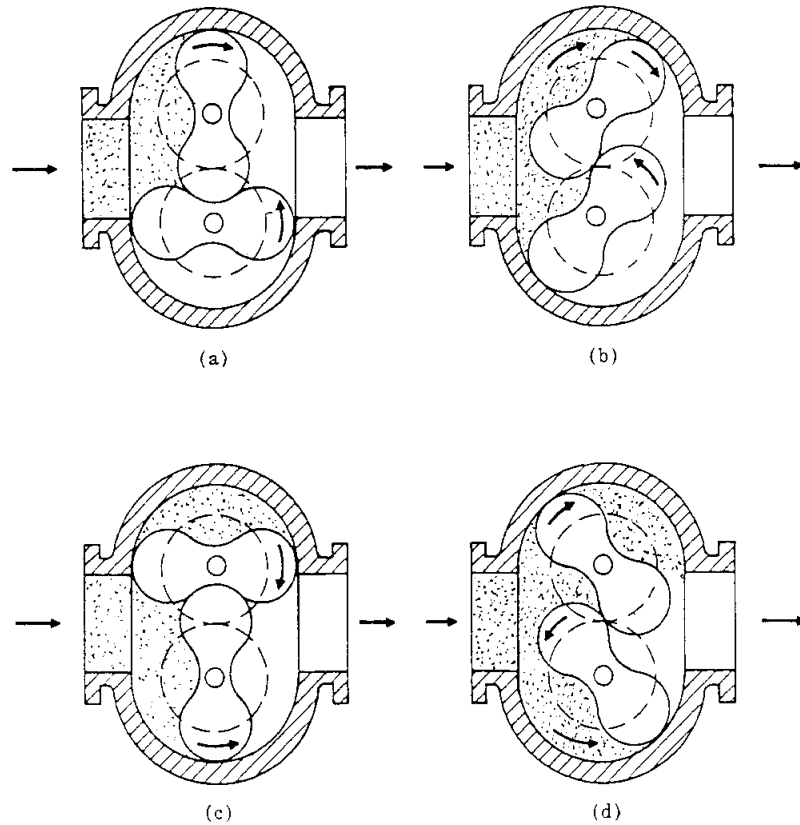


圖二十一 搖動活塞型油旋轉泵浦操作原理

### 1.3.1.2 魯式送風機型泵浦 (roots blower pump)

魯式送風機型泵浦可視為二齒的齒輪泵浦，兩個轉子在反方向高速(3000~3500rpm)同步旋轉，高速旋轉的轉子將氣體從吸入口往排出口送出，如圖二十二所示。

魯式送風機型泵浦無法單獨使用，一般是與油旋轉泵浦串聯使用，以在中度真空領域，能以較高排氣速度達到較低壓力(見圖二十三)。



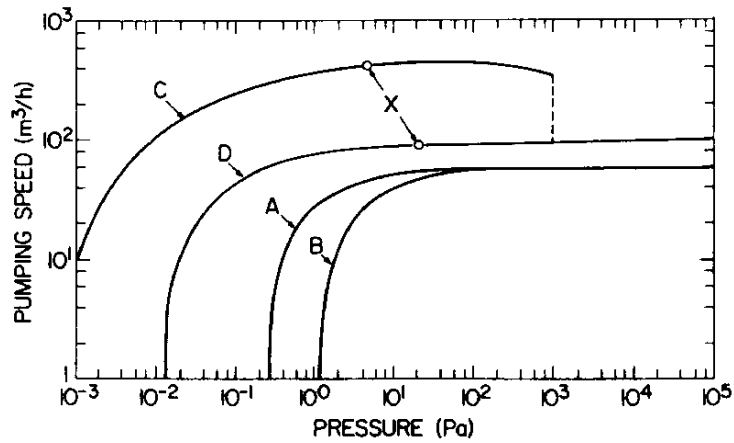
圖二十二 旋式送庫機型泵浦排氣過程

### 1.3.2 高真空泵浦

#### 1.3.2.1 擴散泵浦 (diffusion pump)

擴散泵浦是一種蒸氣噴流泵浦(見圖二十四), 藉著氣體與蒸氣流碰撞的動量移轉來輸送氣體(見圖二十三)。這是高真空泵浦中最廣為使用的一種泵浦。

擴散泵浦係以高分子量的液體如水銀(汞)或矽油(Silicone oil)等在低壓力下加熱沸騰, 其蒸氣呈分子流狀態, 以超音速衝過噴嘴, 並與氣體分子碰撞, 使氣體分子得到一向下的動量分量而向下運動至前段手臂( fore arm), 蒸氣最終碰撞水冷卻之幫浦壁, 並於幫浦壁上凝結而掉落至下方油槽, 再經加熱器加熱沸騰而展開再一次的循環。

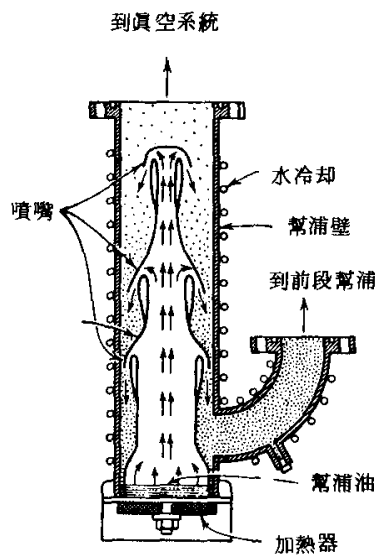


圖二十三 魯式送庫機型泵浦與油旋轉泵浦組合的排氣速度：(a)Leybold RUTA 60魯式泵浦與S60旋轉翼型泵浦組合；(b)僅S60；(c) Leybold WS500魯式泵浦與DK100搖動活塞型泵浦組合；(d) 僅DK100

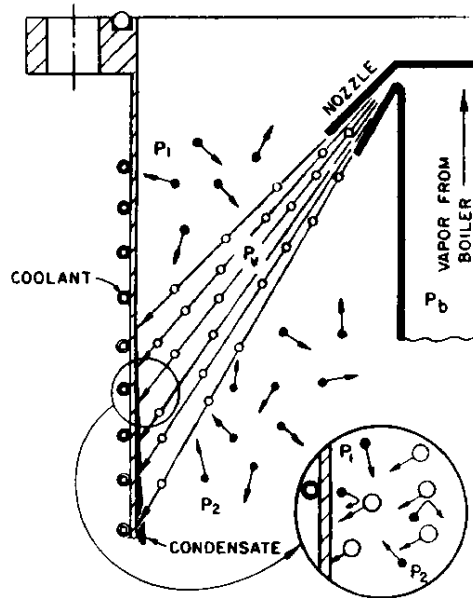
擴散泵浦的排氣速率大致正比於口徑的平方，並與壓力有關，如圖二十六所示。

排氣速率並與氣體種類有關（見圖二十七），一般輕氣體之壓縮比較低，如圖二十七所示。

擴散泵浦的一大缺點是油氣回流(back streaming)的問題，油氣回流是指部份蒸氣分子與被排的氣體分子碰撞而散回真空系



圖二十四 三階不分噴(nonfractionating)式擴散幫浦

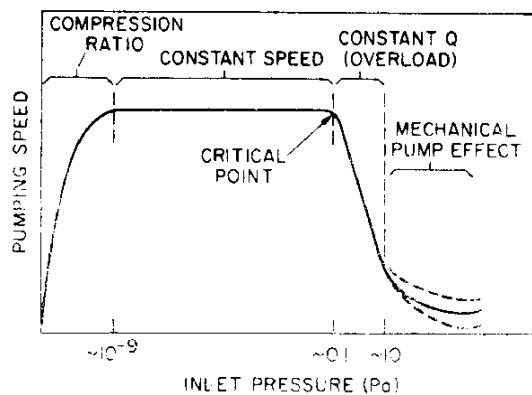


圖二十三 單階擴散泵浦之示意圖。空圈：蒸氣噴流分子，實圈：氣體分子。

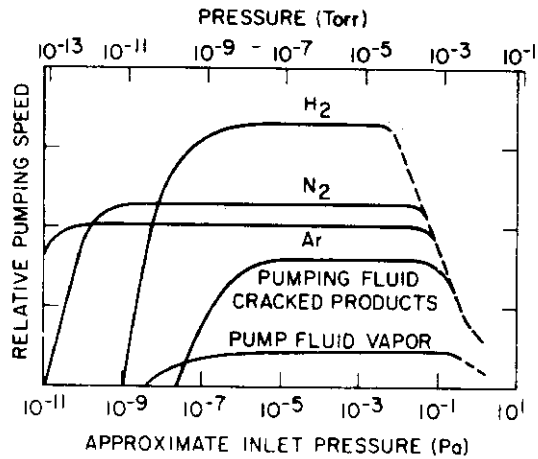
統中的現象，解決方法是於擴散泵浦入口部前加裝冷凝阻擋 (cooling baffle) 或蒸氣捕捉陷阱 (trap)，但前二裝置會影響排氣速率。

### 1.3.2.2 渦輪分子泵浦 (turbomolecular pumps)

渦輪分子泵浦構造頗似渦輪機(見圖二十八)，轉子上裝著刻

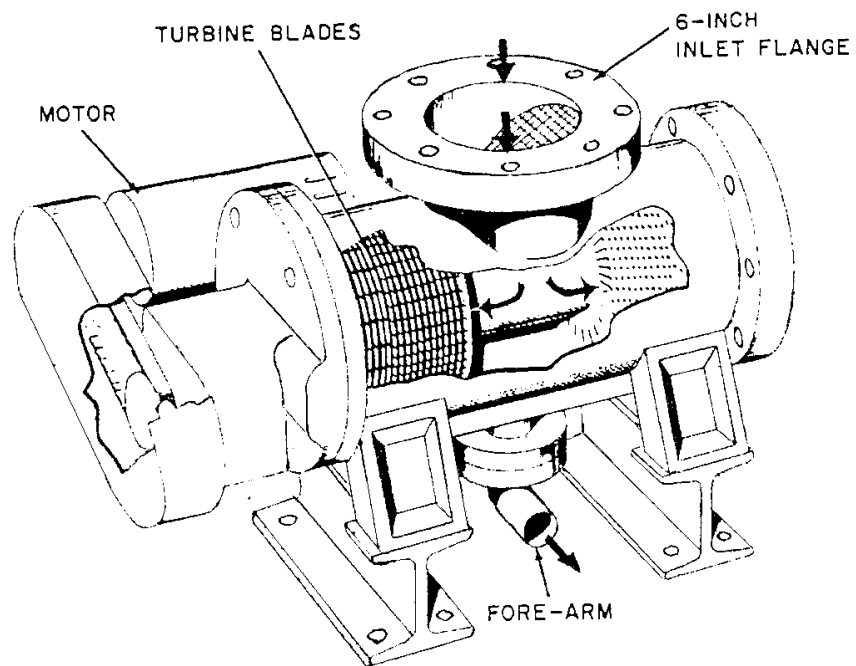


圖二十六 擴散幫浦針對某一特定氣體之排氣曲線圖，區分為四個明顯的區域：(1)壓縮比極限效應；(2)正常操作區—排氣速率維持常數；(3)第一個超負荷區—氣流通量幾乎為一定值；及(4)機械泵浦效應

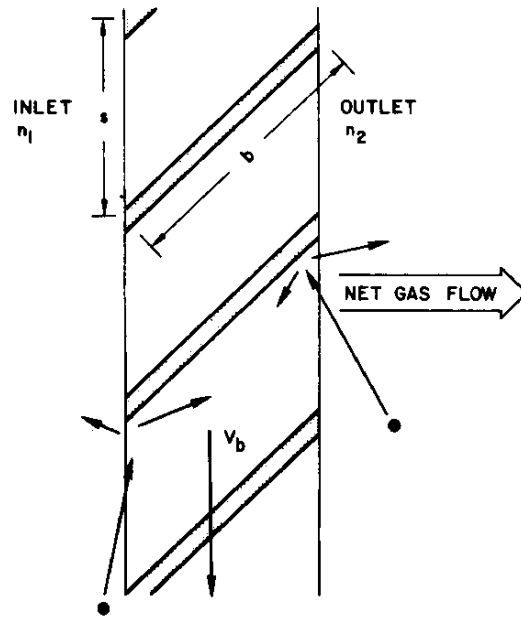


圖二十九 擴散幫浦針對各種不同氣體之排氣表現

有斜槽(葉片)的金屬圓盤，氣體分子衝撞高速旋轉的圓盤時，在某一定向獲得動量(見圖二十九)，而發生氣體流。此幫浦圓盤轉速很高，約24,000~60,000rpm，運作於分子流領域，因此在入口部圓盤斜槽較疏而在出口部圓盤斜槽較密，如圖三十所示，最終壓力可達 $10^{-9}$ 到 $10^{-10}$  torr。



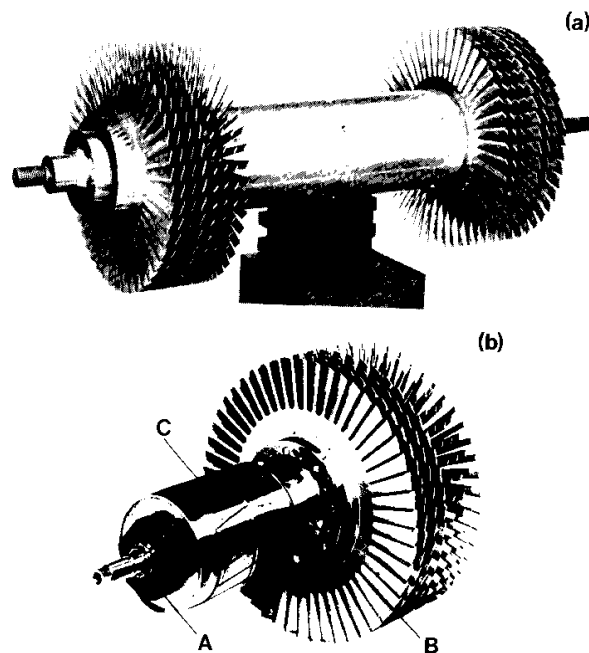
圖二十八 渦輪分子幫浦



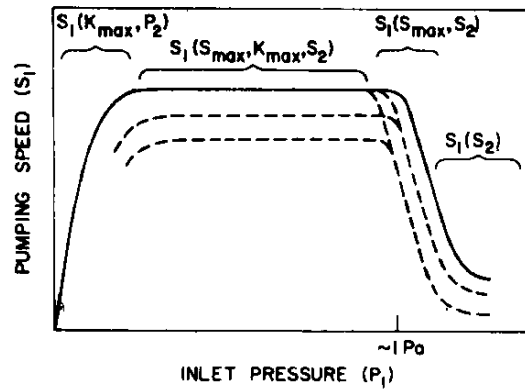
圖二十九 渦輪分子泵浦中一刻有扁平斜槽金屬圓盤之橫截面

渦輪分子泵浦的排氣速率與壓力有關，如圖三十一所示。

渦輪分子泵浦對輕的氣體而言，其排氣速率較重的氣體略高（見圖三十二），雖然在零流量狀況下，輕的氣體之壓縮比較小，



圖三十 典型渦輪分子泵浦的轉子：(a)雙端形狀，多為水平型；(b)單端形狀，多為垂直型。端點A及中心B為軸承，C為一般感應式馬達



圖三十一 渦輪分子泵浦在其工作領域中，控制排氣速率的參數

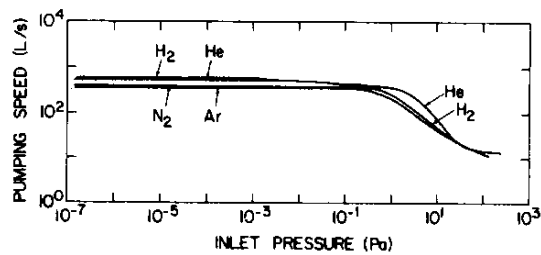
如圖三十三所示。

渦輪分子泵浦與擴散泵浦在高真空及中度真空時之運作壓力範圍相似，但渦輪分子泵浦較擴散泵浦有較多優點：

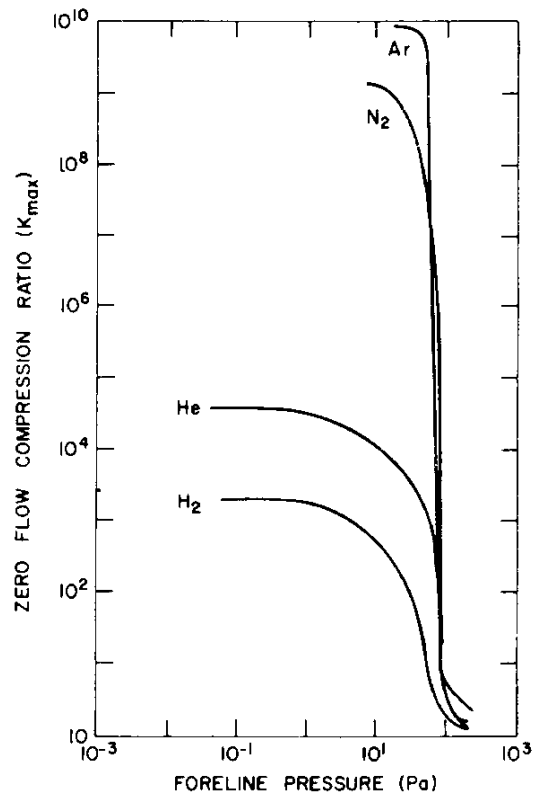
- (1) 無油氣回流，
- (2) 到達壓力較低，
- (3) 氣壓縮比大，
- (4) 高排氣速率，
- (5) 體積小，
- 及(6) 較不需維護。

### 1.3.2.3 鈦昇華泵浦 (titanium sublimation pump)

鈦昇華泵浦為除氣劑離子泵浦的一種。除氣劑離子泵浦是利用化學吸附(chemisorption)作用以抽除氣體的泵浦，可作為除氣劑



圖三十二 Pfeiffer TPU-400型渦輪分子泵浦針對四種不同氣體之量測排氣速率



圖三十三 Pfeiffer TPU-400型渦輪分子泵針對四種不同氣體在零流量時之量測壓縮比

的物質很多，但可用作真空泵者不多，實際用作抽高真空的除氣劑，應具備下列諸要求：

- (1) 永久與氣體結合，以化學吸著性為最佳。
  - (2) 能與多種氣體結合。
  - (3) 在真空儀器的操作溫度下，除氣劑的蒸氣壓很低，而且所吸附的氣體不會放氣，但在高溫時就可立即放氣。
  - (4) 與氣體結合成的固態物質的蒸氣壓很低，即使加熱也不會氣化。
  - (5) 吸氣能力強，亦即每克除氣劑所能吸收的氣體公升數要大。
- 除氣劑內部吸收氣體所賴的運動方式為擴散，因此增高除氣劑溫度，將可大量吸收氣體。

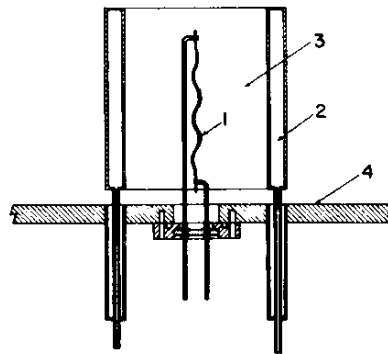
除氣劑泵浦負荷能力與其操作的氣壓有關，通常操作時的氣

壓約低，抽氣速率越高而且泵浦的壽命也愈長。

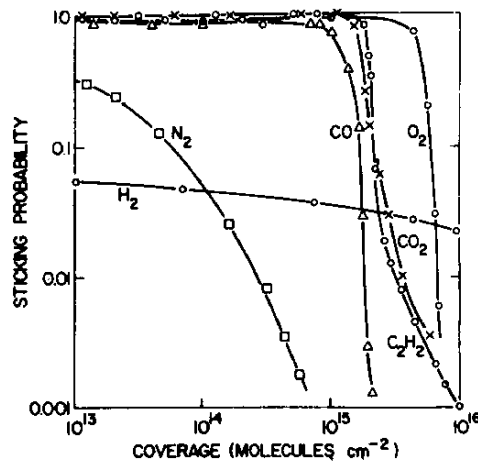
鈦昇華泵浦（見圖三十甲）為除氣劑離子泵浦中，最常使用的泵浦，其操作原理為：

- (1) 電流流經鈦絲，
- (2) 鈦昇華並鍍覆在鄰近的泵浦壁上，
- (3) 活性氣體即被新鍍覆的鈦表面捕捉，鈦表面係以水或液態氬冷卻。

不同氣體的黏滯係數並不相同，如圖三十乙及表九所示，鈍性氣體如氬、氙等，完全無法用鈦昇華泵浦排氣，至於水氣，則



圖三十甲 鈦昇華泵浦基本型的簡圖：(1)鈦合金燈絲；(2)冷卻庫；(3)鈦鍍覆；(4)真空壁



圖三十乙 室溫下，純氣體在蒸鍍的清潔鈦薄膜上的吸附特性

表九 鈦薄膜上氣體代換的優先順序

被排除氣體	被代換氣體				
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub>			N	N	N
N <sub>2</sub>		Y		N	N
H <sub>2</sub>		Y	Y		N
CO		Y	Y	Y	N
O <sub>2</sub>		Y	Y	Y	Y

會分解為氫及氫原子，再分別被排除。

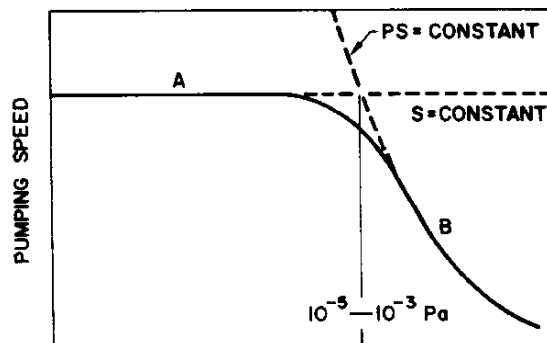
鈦昇華泵浦的排氣速率與壓力有關如圖三十六所示。

### 1.3.2.4 離子泵浦 (ion pumps)

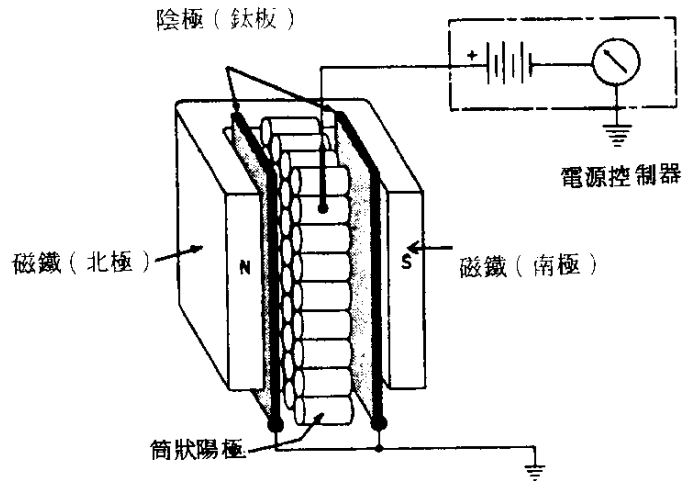
空氣中的少量氣體如氫、氦、氬、氖等無法（或較難）用鈦昇華泵浦排氣，這些氣體含量雖少，卻足以使一個系統無法抽到超高真空。為解決此問題，可考慮將前述氣體電離成為離子再以高電壓將其吸入陷阱或送到前段泵浦排出。此種泵浦稱為離子泵浦，其中最常見的型式為濺散離子泵浦。

濺散離子泵浦在構造上有各種不同的設計，最普通的標準型式如圖三十七及三十八所示，其操作原理為：

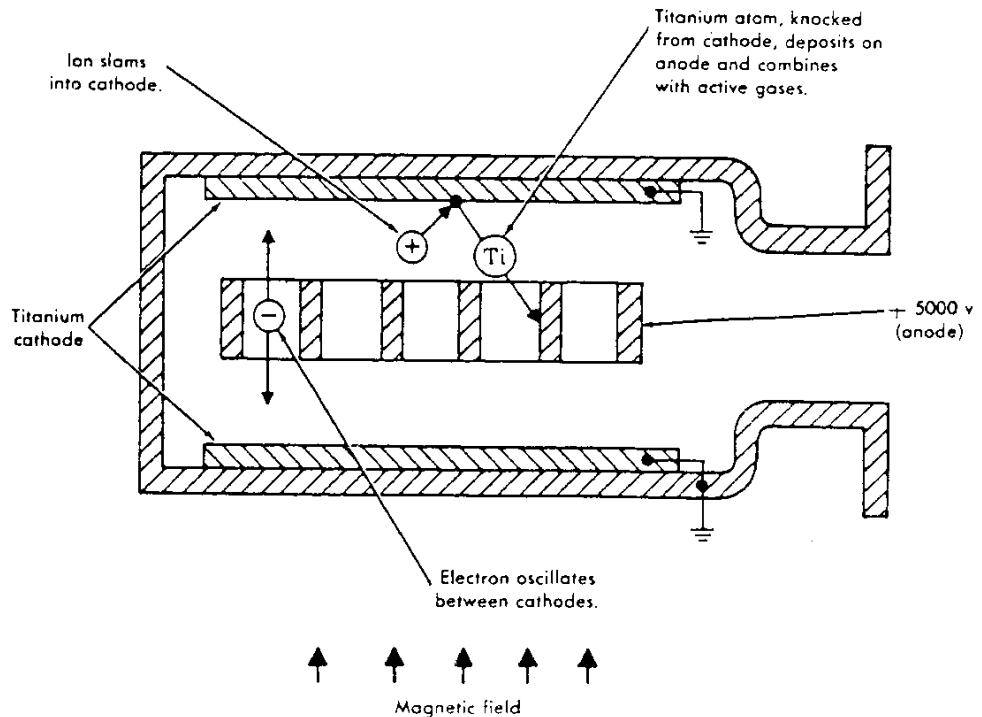
- (1) 真空高壓放電產生高速電子。



圖三十六 鈦昇華泵浦的排氣速率特性圖：(a)速率由除氣劑面積、黏滯係數、氣體種類及入口端氣導值決定；(b)速率由壓力及昇華率決定



圖三十九 濺散離子泵浦



圖三十八 濺散離子泵浦橫截面示意圖

- (2) 電子自陽極運動時受磁場磁力的影響作螺旋運動而折返陰極，但又受陰極的推力，因此往返於正負極間振盪。此作用主要增加電子與氣體分子的碰撞機會，因而可以產生更多的離子。
- (3) 產生的正離子受高壓電的吸引，以高能量自負極(鈦板)碰撞，

而將鈦原子濺散出。

- (4) 正離子陷埋入陰極鈦的原子空隙中被吸附。
- (5) 鈦原子被濺散出後，將氣體分子吸附而附到陽極上。
- (6) 部份未被離子化的氬氣及鈍性氣體被吸著物質(getter)的碰撞帶到陽極被捕捉，後到的鈦就覆蓋其上，以阻止其逃逸。
- (7) 複雜的氣體分子與電子碰撞而分解，如  $\text{CH}_4$  分解成 C 及  $\text{H}_2$ ，碳為固體可沈積在泵浦中，氫則如上法被捕捉。

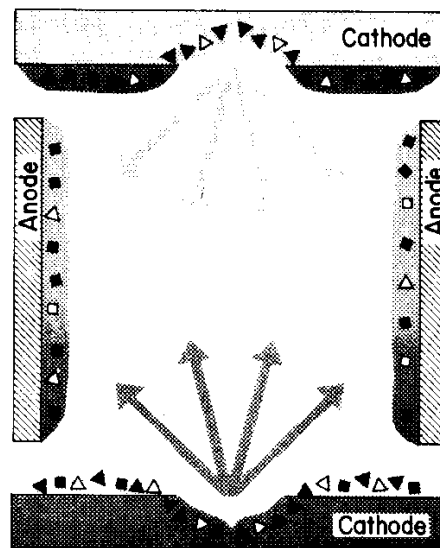
濺散離子泵浦排氣的部份實例示於圖三十九。

濺散離子泵浦應用多種原理排氣，因此操作壓力範圍較廣，為  $10^{-4}$  到  $10^{-11}$  Torr。

濺散離子泵浦有許多優點及少數缺點，各為：

優點：

- (1) 泵浦完全封閉，不用前段泵浦。
- (2) 不需冷卻劑，但真空度達到  $10^{-5}$  torr 以上，泵浦會自動冷卻到與房間的溫度相平衡。
- (3) 不需泵浦油，可得清潔真空。



圖三十九 濺散離子泵浦之 Penning 胞中濺鍍及排氣的示意圖：■化學活性氣體以中性質點陷埋；▲化學活性氣體陷埋前先離子化；□鈍性氣體以中性質點陷埋；△鈍性氣體陷埋前先離子化

- (4) 在 $10^{-5} \sim 10^{-8}$  torr 下，抽氣速率幾乎為一定值。
- (5) 壽命長。於 $10^{-5}$  torr 下操縱，可使用約5,000小時 $\approx$ 7個月，  
於 $10^{-6}$  torr 下操縱，可使用約50,000小時 $\approx$ 5年8個月。
- (6) 室溫時，泵浦不會放氣，即使電源中斷，也不會放氣。

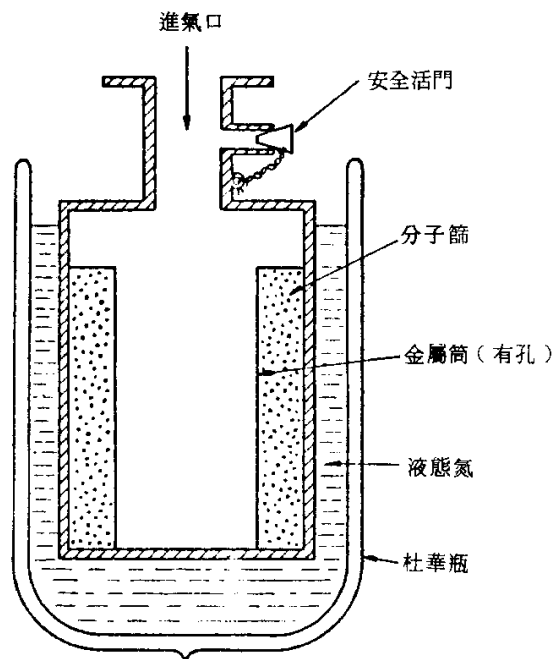
缺點：

- (1) 不適用於真空系統中，有大量氣體產生的工作。
- (2) 不適用於常開閉到大氣壓力的真空系統。
- (3) 不適用於低真空系統。
- (4) 對鈍性氣體，抽氣效率差。

### 1.3.2.5 吸附泵浦 (sorption pump)

吸附泵浦是以多孔性物質，藉物理吸附除去氣體的泵浦。

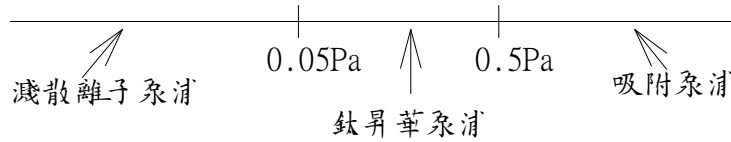
吸附泵浦多採用以液態氮冷卻之高容量人造沸石 (artificial zeolite) 分子篩 (molecular sieve) 冷凝表面，以吸著除去氣體，如圖四十所示。



圖四十 吸附幫浦

人造沸石可加熱除去其部水分子而不使其晶體結構崩潰，如此將留下原子大小的小孔，其大小約在 $3 \times 10^{-8}$ 到 $10^{-7}$ 公分的直徑左右。

吸附泵浦的一大優點是，可在沒有油氣污染的情況下，由大氣壓一直排氣至 $10^{-3}$  Torr。吸附泵浦、鈦昇華泵浦及濺鍍離子泵浦通常以次頁圖方式搭配使用。



### 1.3.2.6 冷凍泵浦 (cryogenic pumps)

冷凍泵浦是將氣體分子限制、捕捉在冷表面上的泵浦。

氣體在固態時蒸氣壓很低，因此將氣體凝結成固體，理論上可得高真空。但各種氣體之凝固溫度不同，見表八及九，於液態氦溫度(-

表八 一般氣體的熔點及沸點

氣體	熔點(°C)	沸點(°C)
氬 (Ar)	-189.3	-186
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	-	-78
一氧化碳 (CO)	-207	-192
溴	-7.3	58.8
氫	-102	-34
氟	-223	-187
氯	-272	-268.8
氫	-259	-252.7
氬	-157	-153
氖	-249	-245.9
氦	-210	-195.8
氬	-219	-183
氬	-111.8	-109

195.8°C或77K)下，成為固體之氣體有氬、氬、氫(但氫之蒸氣壓高)，成為液體之氣體有氬(但氬之蒸氣壓高~760 torr)、氬(氬之蒸氣壓亦高)，而仍為氣相的氣體有氬、氬及氬，亦即許多氣體在此溫度下仍不會凝結，因此液態氦僅能作為冷凝蒸氣捕捉陷阱。由表

九可知，大部份物質在液態氦溫度皆已凝結，因此冷凍泵浦可使用液態氦冷卻表面，一般冷凍泵浦的構造比較簡單，其要求為冷卻面大及對外界之熱絕緣要好，圖四十一為典型的冷凍泵浦橫截面簡圖。

一般冷凍表面之捕捉行為可分為三大類：

#### (1) 冷凝(cryocondensation)

表九 物質於液態空氣及液態氦溫度時之蒸氣壓 (torr)

物質	液態空氣溫度 (-190°C)	液態氦溫度 (-268.8°C)
氫	500	10 <sup>-90</sup>
二氧化碳	10 <sup>-7</sup>	-
一氧化碳	760	10 <sup>-94</sup>
氮	-	760
氧	-	10 <sup>-6</sup>
汞(水銀)	10 <sup>-32</sup>	-
氬	350	10 <sup>-104</sup>
氖	-	10 <sup>-26</sup>
氦	760	10 <sup>-81</sup>
機械泵浦油	10 <sup>-35</sup>	-
水	10 <sup>-22</sup>	-

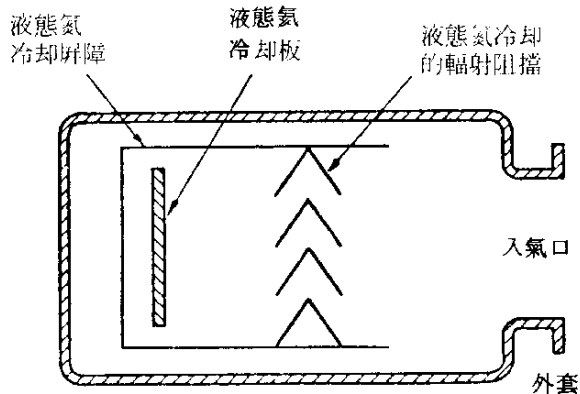
質點被吸引到凝結位置 (condensation site)，停留一段時間後，其熱運動將使其退附(desorb)而再度成為氣相。

(2)冷吸附(cryosorption)

利用凡得瓦力將氣體限制，捕捉在冷表面上，可吸附數層。

(3)冷捕捉(cryotrapping)

某氣體分子或原子吸附到另一多孔之凝結氣體中。



圖四十一 典型之冷凍泵浦橫截面簡

冷凍泵浦的到達

壓力  $P_{ult}$  為

$$P_{ult} = P_s \left( \frac{T_c}{T_s} \right)^{1/2}$$

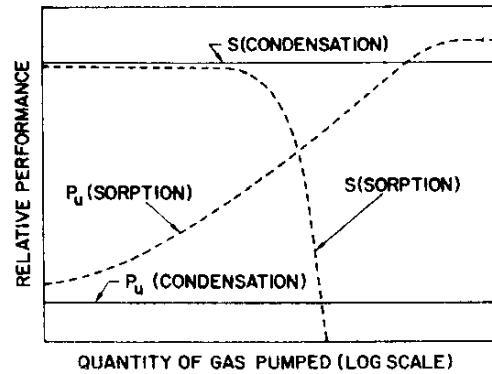
其中  $P_s$  為冷凝泵浦之飽和蒸氣壓，或冷吸附泵浦時由吸附等溫線得到之壓力值， $T_c$

為真空腔溫度， $T_s$  為冷表面之溫度，如果  $T_c = 300K$ ，而  $T_s = 15K$ ，則  $P_{ult} = 4.47P_s$ 。由於氫及氦在液態氦溫度時之蒸氣壓偏高，因此  $P_{ult}$  亦較高，亦即冷凍泵浦對氫及氦的排氣效率較差，這也是冷凍泵浦的缺點。

冷凍泵浦又可分為冷凝泵浦及冷

吸附泵浦等二種，二種泵浦之可到達壓力及排氣速率與排除之氣體量有關(見圖四十二)。

冷凍泵浦一般搭配液態氦冷卻之分子篩泵浦使用，以在低壓下進行粗排氣。



圖四十二 冷凝泵浦及冷吸附泵浦之排氣速率及到達壓力隨排除氣體量的相對變化情形

### 1.3.3 阻板與捕捉陷阱

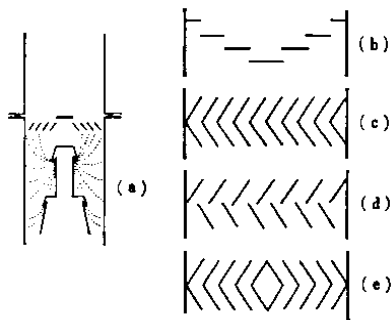
阻板與捕捉陷阱是排除凝縮性蒸氣的零件。

#### 1.3.3.1 阻板(baffle, 亦翻成阻擋)

阻板的目的是遮蔽飛來的凝縮性蒸氣，有時以水或液態氦冷卻，也有的是在常溫下使用。

阻板主要應用於：

- (1) 擴散泵浦的吸入口部(見圖四十三(a))，可將擴散至高真空部的蒸氣凝結。



圖四十三 各型阻板橫截面示意圖

- (2) 低溫泵浦的低溫表面之前，以
  - (i) 將飛入低溫面的氣體分子預冷與
  - (ii) 對低溫面遮熱(見圖四十一)。

阻板設計需成光學上完全遮蔽的構造，如圖四十三(b), (c), (d),

(e)所示。

### 1.3.3.2 捕捉陷阱(trap, 亦翻成闌)

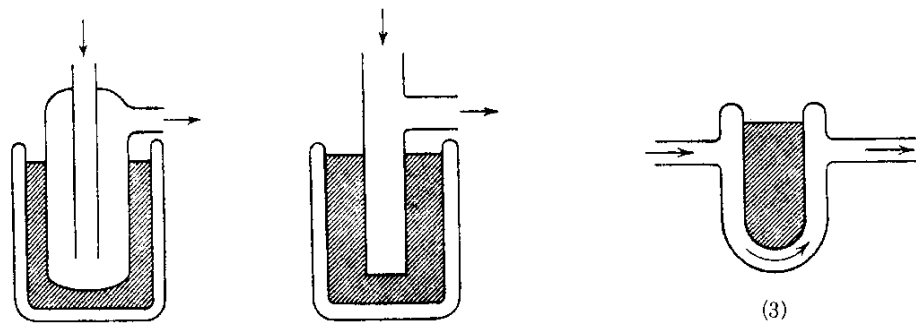
捕捉陷阱是利用冷卻、吸附現象，減少某特定氣體的分壓。捕捉陷阱於真空裝置中，並不用於特定場所，它可插入泵浦的吸入口附近，真空槽外部、配管途中...等，部份捕捉陷阱簡圖示於圖四十四及四十五。

### 1.3.4 真空系統

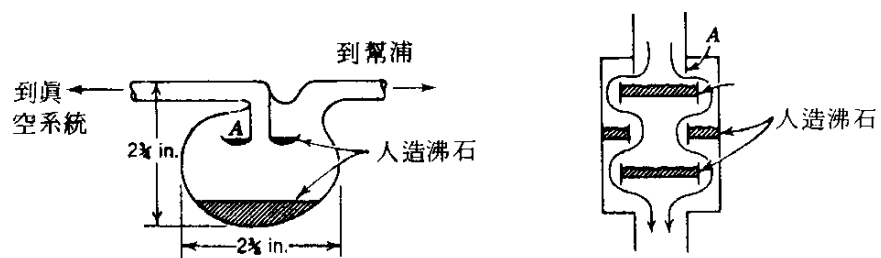
真空系統於薄膜領域中，視不同應用，可分為高真空系統，超高真空系統及高流量系統等三類。

#### 1.3.4.1 高真空系統

高真空系統可應用於多種不同的工作，例蒸發或凝結材料以形成薄膜層，為達到此目的，其系統內部壓力需低到能符合以下



圖四十四 各型冷凝捕捉陷阱之橫截面示意圖



圖四十五 各型吸附捕捉陷阱之橫截面示意圖

兩個條件：

- (1) 蒸發之原子(或分子)平均自由程需長到在其運動到基板前，不與其他原子或氣體分子進行碰撞。
- (2) 蒸發之原子與真空中之殘存原子入射至基板的數目比值非常大。

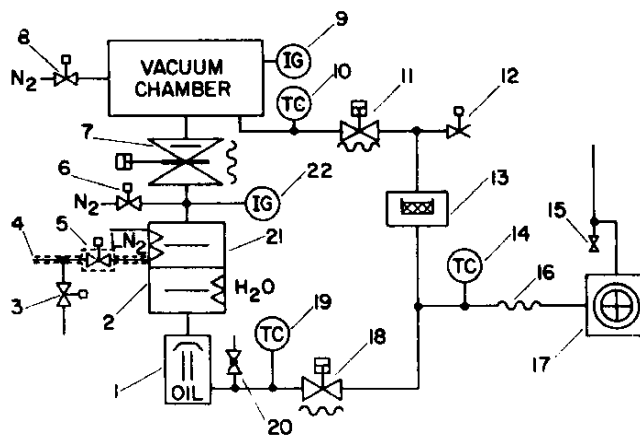
此節討論之高真空系統係指底壓(base pressure或稱殘存壓力 residual pressure)為 $10^{-7} \sim 10^{-8}$  torr者，而鍍膜過程之壓力為低於 $10^{-5} \sim 10^{-6}$  torr者。

### 1.3.4.1.1 擴散泵浦系統

圖四十六為一範例，此系統之主要元件為擴散泵浦，陷阱，門栓活門(gate valve)及機械幫浦等。

### 1.3.4.1.2 渦輪分子泵浦系統

此系統一般分為兩大類，第一類為具有一分障之粗抽管路，第二類為真空腔直接經由分子泵浦粗抽。



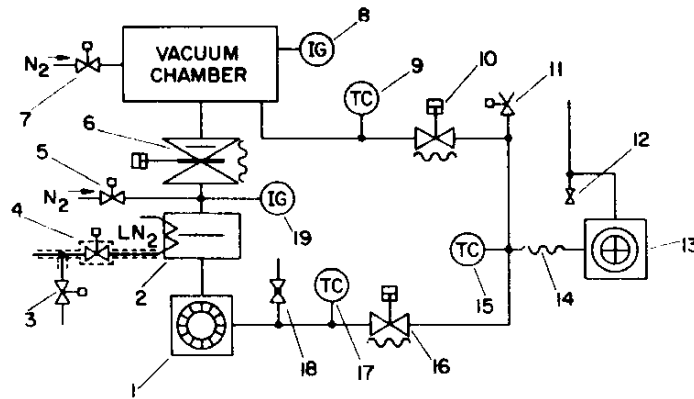
圖四十六 擴散泵浦系統: (1) 擴散泵浦; (2) 部份水阻擋; (3) 液態氬洩漏閥; (4) 液態氬入口; (5) 液態氬添加閥; (6) 擴散泵浦清靜氣體入口; (7) 彈簧封閉高真空閥(門栓活門); (8) 真空腔洩漏閥; (9) 真空腔離子真空計; (10) 真空腔熱偶真空計; (11) 粗排氬閥; (12) 機械幫浦洩漏閥; (13) 粗排氬管路陷阱; (14) 粗排氬管路熱偶真空計; (15) 凝結性氣體蒐集貯槽; (16) 振動隔離彈簧; (17) 機械幫浦; (18) 前置管路閥; (19) 前置管路熱偶真空計; (20) 測漏口; (21) 液態氬捕捉陷阱; (22) 擴散泵浦離子真空計

在此系統中，前段泵浦之大小需使得最接近前段泵浦之葉片的氣體流維持在分子流或過渡流區域。

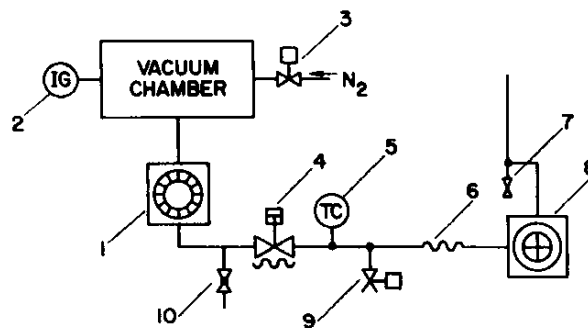
典型系統裝置圖見圖四十七及四十八。

渦輪分子泵浦系統使用時有許多應注意事項列於表十。

### 1.3.4.1.3 濺鍍離子泵浦系統



圖四十七 第一類渦輪分子泵浦系統: (1) 渦輪分子泵浦; (2) 液態氬捕捉陷阱; (3) 液態氬洩漏閥; (4) 液態氬添加閥; (5) 渦輪分子泵浦洩漏閥; (6) 彈簧封閉高真空閥 (門栓活門); (7) 真空腔洩漏閥; (8) 真空腔離子真空計; (9) 真空腔熱偶真空計; (10) 粗排氬閥; (11) 機械泵浦洩漏閥; (12) 凝結性氣體蒐集貯槽; (13) 機械泵浦; (14) 振動隔離彈簧; (15) 粗排氬管路熱偶真空計; (16) 前置管路閥; (17) 前置管路熱偶真空計; (18) 測漏口; (19) 渦輪分子泵浦離子真空計



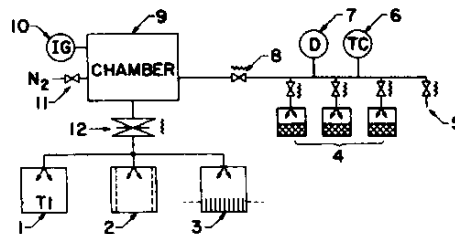
圖四十八 第二類渦輪分子泵浦系統: (1) 渦輪分子泵浦; (2) 真空腔離子真空計; (3) 真空腔洩漏閥; (4) 機械泵浦隔離閥; (5) 前置管路及機械泵浦熱偶真空計; (6) 振動隔離彈簧; (7) 凝結性氣體蒐集貯槽; (8) 機械泵浦

表十 渦輪分子泵浦(tmp)操作時的注意事項

須進行事項	不可做的事
定期更換機械油	使用尺寸過小的前置泵浦
機械泵浦洩漏至大氣	液態氬捕捉陷阱洩漏至大氣
tmpd 高真空部洩漏	洩漏時運入冷卻水
維持真空腔於分子流	無冷卻水故障保護時使用tmp
檢查機械泵浦油面高度	與真空下關閉tmp
檢查機械泵浦皮帶	在低於最高轉速下使用tmp

濺鍍離子泵浦如圖四十九所示。若採用圖中所示之三階吸附泵浦，第一階泵浦壓力可達 3000 至 5000 Pa，第二階可達 15 Pa，第三階可達 0.1Pa，當壓力降至 0.5Pa 時，可開啓鈦昇華泵浦，而當壓力降到 0.05Pa 時，即可開啓濺鍍離子泵浦。此泵浦使用時的部份注意事項列於表十一。

1.3.4.1.4 冷凍泵浦系統

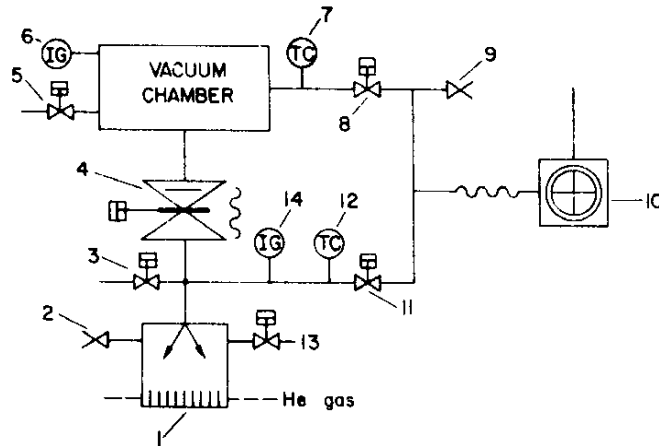


圖四十九 濺鍍離子泵浦系統：(1) 鈦昇華泵浦；(2) 濺鍍離子泵浦；(3) 排除凝結性氣體之液態氬冷卻列；(4) 低真空吸附泵浦；(5) 吸氣或碳葉低真空泵浦連接口；(6) 熱偶真空計；(7) 隔膜真空計；(8) 粗排氣閥；(9) 工作腔；(10) 離子真空計；(11) 真空腔洩漏閥；(12) 高真空閥

表十一 濺鍍離子(s-i)泵浦操作時的注意事項

須進行事項	不可做的事
於 $10^{-4}$ Pa 穩態下操作s-i泵浦以展延壽命	阻擋吸附泵浦安全洩漏口
真空腔洩漏至大氣前關閉s-i泵浦閥門	於高壓下排除大量氬氣
更換鈦絲時清除鈦金屬片	設定在高電流開啓泵浦
吸附泵浦烘烤完全	高壓下開啓泵浦
依序使用吸附泵浦	

冷凍泵浦系統如圖三十所示，一般需加水冷阻擋、室溫阻擋等以阻擋熱流，此些阻擋將減低排氣速率(註：此些阻擋皆未示於圖三十中)。冷凍泵浦系統使用時的部份注意事項列於表十二。



圖三十 冷凍泵浦系統：(1) 冷凍泵浦表面；(2) 壓力紓解閥；(3) 沖洗氣體注入口閥；(4) 高真空閥；(5) 真空腔洩漏閥；(6) 離子真空計；(7) 熱偶真空計；(8) 粗排氣閥；(9) 機械泵浦洩漏閥；(10) 機械泵浦；(11) 粗排氣閥；(12) 熱偶真空計；(13) 洩漏閥；(14) 離子真空計

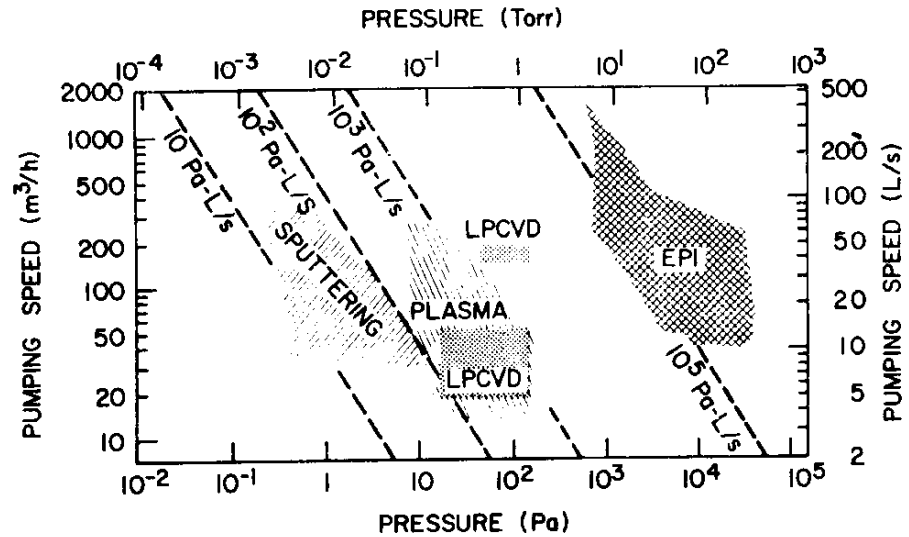
表十二 冷凍泵浦操作時的注意事項

須進行事項	不可做的事
高壓時切換以避免氣體回流	阻擋安全洩漏口
定期更換油吸附卡夾	於吸附階段允許油氣吸附
以氣體清洗使再生完全	以氬氣洩漏
排氣列與阻擋間加入熱源	濃縮危險性氣體

### 1.3.4.2 高流量系統

並非所有薄膜鍍覆製程，都需要高真空或超高真空的環境，事實上，部份最常使用的製程，卻是在中度或低度真空及需要高氣體流量的情況下進行，部份目前產業上使用的製程的壓力—排氣速率範圍示於圖三十一。

#### 1.3.4.2.1 高真空系統



圖三十一 針對部份需要使用中度、低度真空及氣體流的薄膜成長，鍍覆及蝕刻製程的壓力—排氣速率範圍

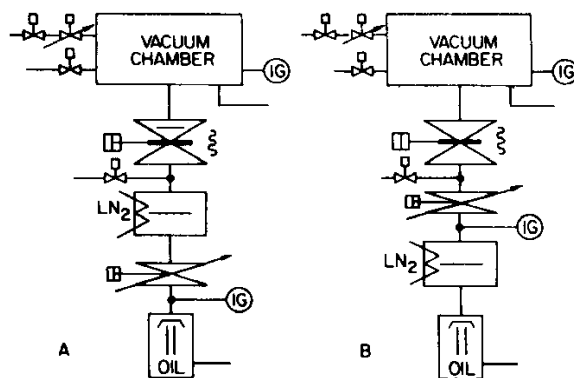
高流量之高真空系統可分為(1)擴散泵浦系統(圖三十二)及(2)分子泵浦系統(圖三十三)等二大類。

### 1.3.4.2.2 低及中度真空系統

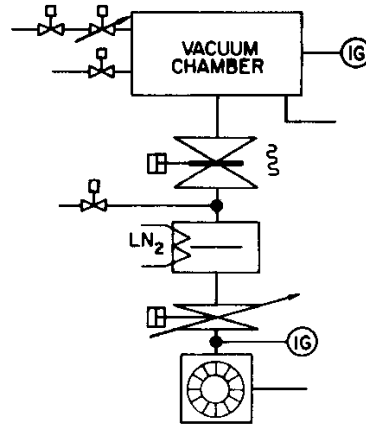
在此僅簡介排除反應性氣體的中度真空系統(圖三十四)及其製程步驟(圖三十三)。

### 1.3.5 經濟考量

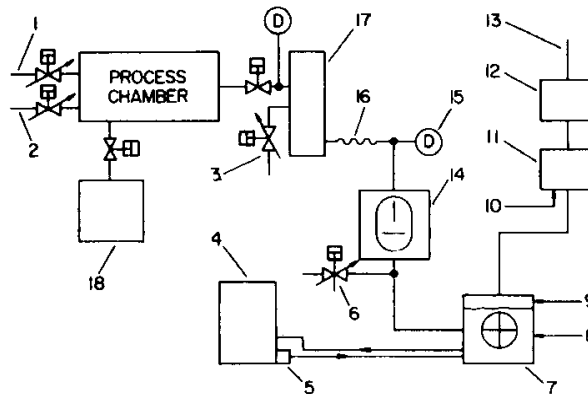
真空泵浦的選擇，除前述各項技術功能的考慮外，亦須考慮泵浦價格，亦即單位排氣量的泵浦價格，見圖三十六。



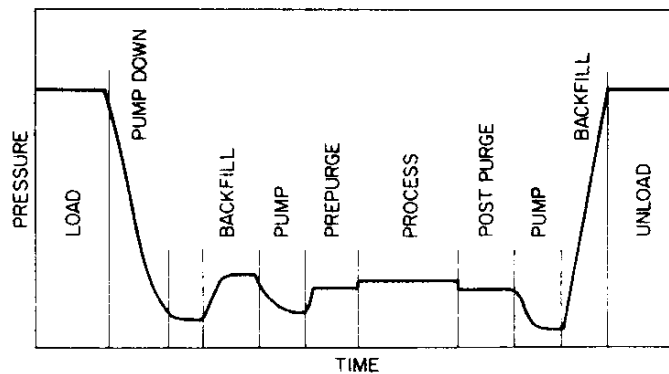
圖三十二 高流量擴散泵浦系統：(a) 節流閥位於液態氮捕捉陷阱及泵浦間；(2) 節流閥位於液態氮捕捉陷阱及真空腔間



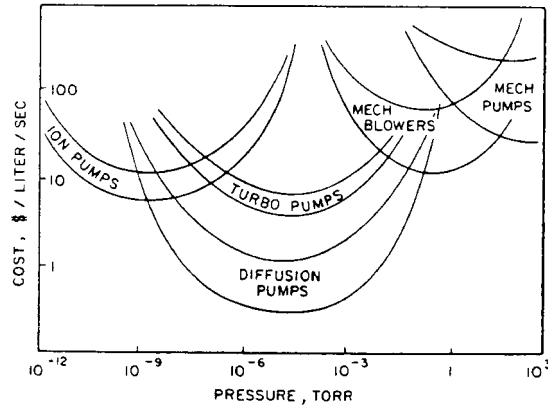
圖三十三 分子泵系統配件裝置



圖三十四 排除反應性氣體的中度真空高流量系統: (1) 製程氣體注入口; (2) 沖洗氣體注入口; (3) 沖洗氣體注入口; (4) 外接油槽; (5) 油濾網; (6) 粗排氣管路清洗氣體; (7) 搖動活塞型泵浦; (8) 噴氣閥; (9) 油槽沖洗; (10) 蒸汽濾網沖洗; (11) 蒸汽濾網; (12) 廢棄物清洗裝置; (13) 排至大氣之排氣管路; (14) 唇式送壓機型泵浦; (15) 隔膜真空計; (16) 振動隔離彈簧; (17) 微粒濾網; (18) 輔助高真空泵浦



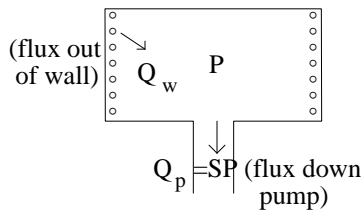
圖三十五 典型的中等真空反應性氣體系統的製程步驟



圖三十六 各型泵浦最經濟使用的壓力範圍

### 1.4 真空腔(vacuum chamber)

考慮下圖真空腔排氣，



volume = V  
 surface area = A  
 1 torr - liter =  $3.53 \times 10^{19}$  molecules at 273K

$$-V \frac{dP}{dt} = SP - Q_w,$$

如果 S 及  $Q_w$  都是常數，則

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) + \frac{Q_w}{S},$$

其中時常數  $\tau_0 = V/S$ ，當時間 t 大於幾個時常數時， $Q_w/S$  將決定真空腔內的平衡及壓力值。

在排氣初期，t 很小時，

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right),$$

因此可由上式估計真空腔排氣初期之壓力變化值。當時間 t 超過數個時常數  $\tau_0$  時， $Q_w/S$  將取代而決定真空腔內壓力值，並延長排氣時間。當壓力低於  $10^{-4}$  到  $10^{-5}$  torr 時，壓力 P 成為

$$P(t) = \frac{Q(t)}{S}$$

影響系統排氣率的是釋氣率，而非泵浦的排氣速率。

### 1.5 釋氣 (outgassing)

真空腔內可能釋氣的來源有多種，如圖三十七所示，依釋氣機構分類，可分為四類：

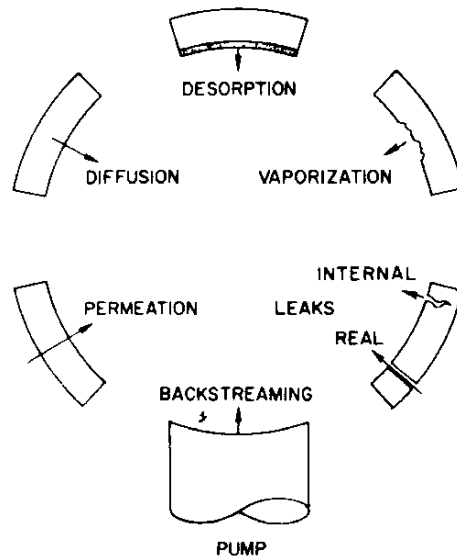
#### (1) 蒸發 (vaporization)

固相的原子或分子會因熱激發而成為氣相，材料蒸氣壓是選擇真空腔內使用材料的最基本考慮因素，一般選擇蒸氣壓小的物質作為真空腔使用材料，例金屬、玻璃、陶瓷等。

#### (2) 熱退附 (thermal desorption)

熱退附是指吸附於真空腔內部壁上的氣體或蒸氣因熱刺激而釋放 (thermally-stimulated release) 的現象。此現象是一般真空排氣至高真空及超高真空時，最主要造成真空腔內部壓力上升的氣體的來源。

真空腔排氣時，最麻煩的氣體就是束縛能約為1eV的氣體，因為此時氣體的停留時間與排氣及鍍膜所需花費的時間相仿。水氣的束縛能約為1eV，因此成為真空排氣及鍍膜時，最麻煩的氣體。



圖三十七 真空腔內可能的釋氣來源

熱退附釋氣對真空腔內部壓力的貢獻隨時間遞減。釋氣氣流率 $Q_w$ 一般表示成

$$Q_w = qA$$

其中 $q$ 為特定釋氣率(Specific outgassing rate)， $A$ 為表面積，由實驗得知，隨著吸附氣體逐漸釋放完，特定釋氣率將隨時間漸減，且遵循以下關係

$$q = q_0(t_0/t)^n,$$

$q_0$ 為開始高真空釋氣時的釋氣率， $n$ 與材質有關，如圖三十八所示。因此在此釋氣區域，真空腔內壓力將依下式漸減，

$$p(t) = \frac{Aq_0(t_0/t)^n}{S}。$$

### (3) 擴散

被材料捕捉於其內的分子，擴散到材料表面，並藉著退附的動作而釋出，但因擴散過程較退附過程緩慢，因此成為限制速率的過程(rate-limiting process)，並稱此種釋出氣體的動作為擴散。

### (4) 滲透(permeation)

滲透為一三階段過程：

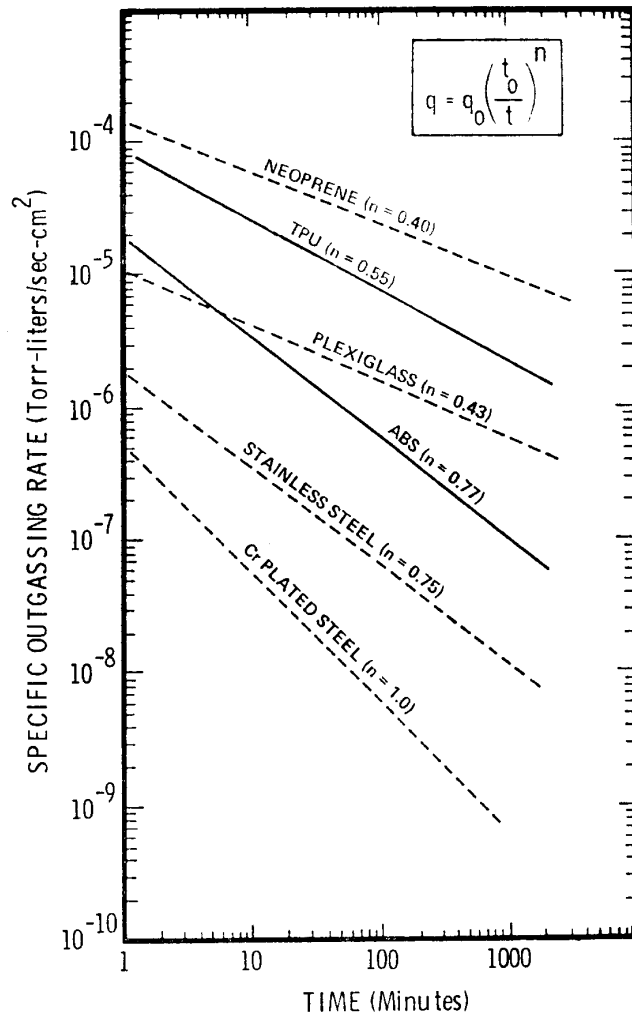
- (i) 氣體吸附於真空腔外壁，
- (ii) 吸附氣體擴散穿過腔壁到內壁，
- (iii) 氣體由內壁退附。

穩態時的滲透就像一微小漏氣，決定真空腔排氣所能達到的最終壓力值。幾種不同材料的滲透率示於圖三十九。

以上各種釋氣機構及體積排氣，對真空腔內壓力的貢獻，與時間有關，其關係如圖六十所示。

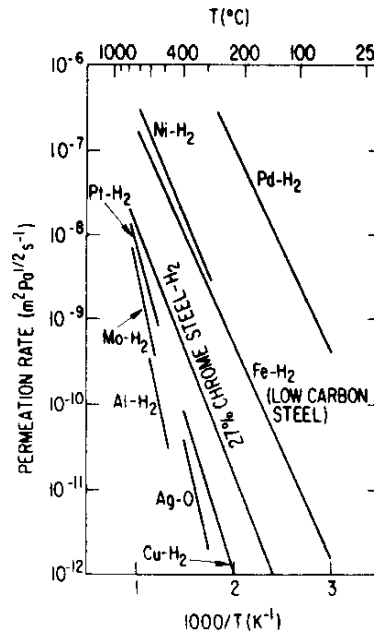
為減低釋氣對真空腔內真空度的影響，實際上可注意下列數點：

- (1) 玻璃及鋸製系統曝露於大氣中一段時間後，可堆積一百層左右的水氣分子。



圖三十八 各種不同材料於20°C時的特定釋氣率

- (2) 橡皮氣密墊對大氣的氣體而言，有高的滲透率，因此於超高真空系統中，需使用金屬密封。
- (3) 不銹鋼為一優良的真空腔結構材料，因為它不生鏽，而且表面的氧化層可阻止釋氣的發生。
- (4) 所有的橡皮及大部份的高分子，會如海棉般吸收水氣。
- (5) 烘烤真空腔壁是達到超高真空的一般方法，此法非常有效因為擴散及退附為熱激發的過程，由表十三 316L 不銹鋼在不作排氣、烘烤條件下的釋氣率可看出烘烤的作用。(註：系統在200°C的溫度下，於1秒內排除的分子數目與20°C下，1天24小時排除的分子數



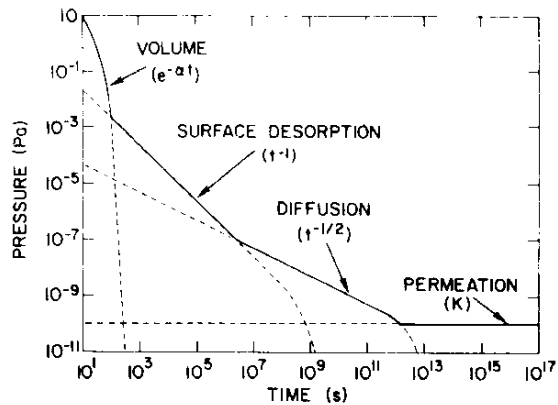
圖三十九 各種不同金屬材料隨溫度變化的滲透率

目相斥)。

(6) 真空腔中典型的殘存氣體為  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  及  $N_2$  等，這些氣體到鍍覆表面的氣流(flux)為

$$R = 3.51 \times 10^{22} P(MT)^{-1/2} \text{ 分子 / 平方公分} \cdot \text{秒},$$

其中  $P$  的單位為托釐， $M$  為分子重量，單位為克， $T$  為溫度，單位為  $K$ ，假設黏滯係數為 1，在  $10^{-6}$  torr 之壓力下，將有  $1 \text{ \AA}/\text{sec}$  的殘存氣體鍍覆率。



圖六十 真空腔排氣時之速率限制步伐

表十三 316L不銹鋼在真空排氣、烘烤條件下的釋氣率

試片	表面處理方式	釋氣率 ( $10^{-10}W/m^2$ )				
		H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	Ar	CO <sub>2</sub>
A	真空下排氣 75小時	893	573	87	-	13
	於150°C下真空烘烤50小時	387	17	6	-	0.4
B	於400°C、27,000Pa之氮氣下2小時	600	253	-	123	-
	於150°C下真空烘烤20小時	5.2	0.09	0.4	0.51	-
C	於400°C、2,700Pa之氮氣下2小時	0	20	13	8.7	-
	於150°C下真空烘烤20小時	-	16	52	19	-

(7) 在烘烤的過程中，務必確定所有真空腔壁皆同時加熱。

參考資料：

- (1) S. Dushman, “Scientific Foundation of Vacuum Technique”, Wiley, New York (1949)
- (2) J.F. O'Hanlon, “A User's Guide to Vacuum Technology”, Wiley, New York (1989)
- (3) G.L. Weissler and R.W. Carlson, “Methods of Experimental Physics, Vol.14, Vacuum Physics and Technology”, Academic Press, New York (1979)
- (4) M. Ohring, “The Materials Science of Thin Films”, Academic Press, New York (1992)
- (5) 蘇青森, “真空技術”, 東華書局(1990)
- (6) 中山勝矢, “真空技術實務”, 復漢出版社(1986)