

Chapter 5 真空系統與計算

- * 5.1 真空系統
- * 5.2 真空系統管路氣導的計算
- * 5.3 管路氣導的計算公式
- * 5.4 薄壁上孔道的氣導
- * 5.5 管路中空氣以外其他氣體的氣導
- * 5.6 真空系統有效抽氣速率
- * 5.7 抽氣速率損失
- * 5.8 氣體分子的平均自由動徑
- * 5.9 氣體分子間平均碰撞率
- * 5.10 單分子層附著時間

1

第一節 真空系統

- * (vacuum system)
- * 通常指內部為真空的裝置或器具
- * 真空系統可分為
 - * 靜態
 - * 動態
- * 本書將以動態系統為討論的內容

2

動態系統 & 靜態系統

- * Dynamic system
- * 又稱為可開閉系統 (openable system)
- * 系統經常用真空幫浦維持所需的真空度
- * 原則上動態真空系統包含有下列各部分：
 - * 真空室
 - * 真空幫浦
 - * 真空計
 - * 閥
 - * 導引
 - * 其他
- * Static system 又稱為封閉系統 (Closed system)
- * 系統被抽真空達一預定壓力後即予封閉而不再抽真空
- * 靜態系統無抽真空的幫浦，亦無測真空壓力的真空計

3

真空室 & 真空幫浦

- * 任何利用真空進行工作的系統均有一真空室
 - * 除鐘罩 (bell jar) 形真空室外，大多數真空室均有可供工作件進出的門，鐘罩則係將罩與底盤分離而放置或取出工作件
- * 有些真空室設有可觀察內部的視窗，以及可供裝設真空分件 (vacuum component) 的通口 (port)
- * 動態真空系統至少應有一真空幫浦 (vacuum pump) 用來抽真空
- * 幫浦的數量及型式隨真空系統的設計而不同，幫浦可經管路連接至真空室，亦可直接接於真空室

4

真空計 & 閥

- * 真空系統中的壓力由真空計 (vacuum gauge) 測定，真空計多裝於真空室的通口上，但亦有裝設在幫浦抽氣系統上
 - * 如管路上或幫浦上
- * 真空系統常裝有可開閉的閥 (valve) 在系統各位置
 - * 如在幫浦出口的隔斷閥 (isolation valve)，管路連接至通口，其他真空分件或幫浦處的連通閥 (connection valve)，代替真空室門的門閥 (gate valve)
 - * 進氣系統上裝的流量控制閥 (flow control valve) 及節流閥 (throttle valve)

5

導引

- * 導引 (feedthrough) 係將電流，電壓，電波，機械動作如旋轉，直線運動，角位移等，以及冷熱等媒介質導入真空系統的裝置
- * 導引的共同特徵為由真空系統外界大氣壓力下進入真空系統的內部，故氣密為最重要的特徵
- * 通常導引多裝在真空室的通口，但亦有裝於其他部位者

6

第二節 真空系統管路氣導的計算 複合真空管路的總氣導

- * 包含多個相連接的幫浦及真空分件等而各具氣導
 - * 串聯真空管路的總氣導
 - * 並聯真空管路的總氣導
 - * 複合真空管路總氣導計算例

7

串聯真空管路的總氣導

- * 真空管路，真空分件，及真空幫浦等依次連接，其中的氣流為互相直接流通，此即串聯真空管路
- * 串聯真空管路的總氣導可比照電阻電路的計算如下：
 - * 電阻電路的電導與電阻相當於真空管路的氣導與阻抗
 - * 在串聯電阻電路的總電阻為電路上各個電阻的和，而總電導為總電阻的倒數，故真空管路的總阻抗為真空管路上各個阻抗的和，而總氣導為總阻抗的倒數

8

並聯真空管路的總氣導

- * 比照電阻電路並聯電阻電路的總電導為各個電路上電導的和，而總電阻為總電導的倒數
 - * 故並聯真空管路的總氣導為各個支真空管路上氣導的和，而總阻抗為總氣導的倒數

9

複合真空管路總氣導計算例1

- * 包含有粗略真空抽氣管路A與高真空抽氣管路B
- * 高真空抽氣管路中
 - * 一擴散幫浦
 - * 一冷卻阻擋
 - * 一冷凝陷阱
 - * 二真空閥
- * 其各部分的阻抗為R至R，而所有的連接管路的阻抗則以R表示
- * 粗略真空抽氣管路包含一真空閥，一路持幫浦，及一連接至主抽氣幫浦間的油氣過濾器其阻抗分別用R，R，與表示

10

複合真空管路總氣導計算例2

- * 整個複合真空管路系統用一滑翼迴轉幫浦來抽真空
- * 計算複合真空管路從滑翼迴轉幫浦抽氣口a點至真空室抽氣口b點的總氣導，可比照如圖所示的複合電阻電路計算如下：

粗略真空抽氣管路 A 的總氣導： $R_A = R_7 + R_8 + R_9$

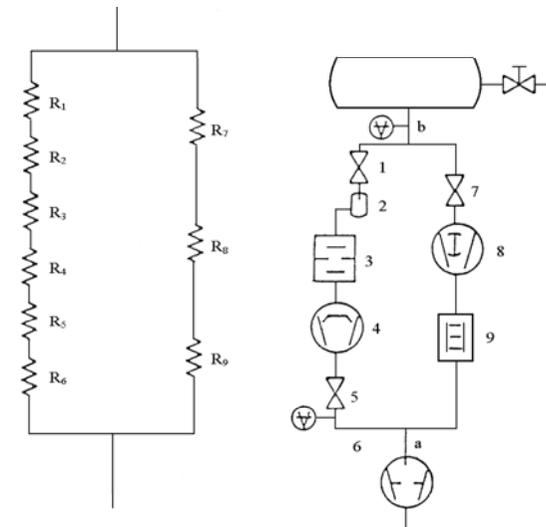
高真空抽氣管路 B 的總氣導： $R_B = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$

複合真空管路的總氣導： $C_t = C_A + C_B = 1/R_A + 1/R_B$

總阻抗： $R_t = 1/C_t$

11

複合真空管路總氣導計算例



12

第三節 管路氣導的計算公式

- * 管路 (pipeline) 包括不同尺寸的圓形斷面管及非圓形斷面管
- * 管路的氣導與管路中的氣流形態及溫度有關，亦與氣體の種類有關
- * 公式多係假定管路係在室溫293 K (20°C) 及其中氣體為空氣

13

管路氣導介紹

- * 圓形斷面管
- * 非圓形斷面管
- * 任何形狀斷面的管路的氣導

14

圓形斷面管---長管

- * 長管
 - * 一般所稱的長管原則上符合的條件為：
 - * $L \geq 10d$
 - * 適用於所有氣流範圍的通式
 - * $C = 135d^4 \bar{P}/L + 12.1d^3/L \cdot (1 + 192\bar{P}d)/(1 + 237\bar{P}d)$
 - * 在黏滯流範圍 ($d < 0.6$ 毫巴·厘米)
 - * $C = 135d^4 \bar{P}/L$
 - * 在分子流範圍 ($d < 0.013$ 毫巴·厘米)
 - * $C = 12.1d^3/L$

15

圓形斷面管---短管

- * 短管
 - * 一般所稱的短管原則上符合的條件為：
 - * $L \approx d$
 - * 室溫293 K及空氣的情況：
 - * 分子流範圍 ($\bar{P}d < 0.013$ 毫巴·厘米)
 - * 將管長加 $4d/3$ 作為有效管長 (effective length) 以代替長管的氣導公式的L，即：
 - * $C = 12.1d^3/(L + 4d/3)$

16

圓形斷面管---彎管

* 彎管

* 管路需要變換方向時則用彎管 (bend) 其兩端接直管即達彎曲的目的

* 90° 彎管

* 有效管長作為總管長用直管的公式來計算，而有效管長係以下式來估算

$$L_{total} < L_{eff} < L_{total} + 4nd/3$$

* 非90° 彎管

* 若彎管並非90°，而係一彎曲角，其長度的修正為以管長加 $4nd/270$ 作為有效管長

$$L_{total} < L_{eff} < L_{total} + 4nd\theta/270$$

17

非圓形斷面管

* 長方形斷面管

* 長方形斷面管的短邊為a 厘米，長邊為b 厘米，管長為L 厘米，斷面面積Aab厘米，管內氣體的平均壓力為 (毫巴)

* 在黏滯流範圍 (d0.6 毫巴·厘米)，室溫293 K及空氣的情況可用下式計算氣導C：

$$C = 195 (A^2/L) Y \bar{P} \quad \text{公升/秒}$$

18

任何形狀斷面的管路的氣導

* 長管

* 管長為L 厘米，斷面面積為A 厘米，斷面的週長 (circumference) 為U 厘米，則氣導為：

$$C = (8/3\sqrt{\pi}) (\sqrt{2kT/m}) (A^2/UL)$$

$$\text{或 } C = (34.4/\sqrt{\pi}) (\sqrt{TM}) (A^2/UL)$$

* 短管

* 亦可將短管視為一長管加一孔道，即：

短管的阻抗 $R =$ 長管的阻抗 $R_L +$ 孔道的阻抗 R_A

或用氣導表示則 $1/C = 1/C_L + 1/C_A$

19

第四節 薄壁上孔道的氣導 任何形狀斷面的孔道

* 黏滯氣流範圍

* 分子氣流範圍

* 利用孔道的氣導計算短管氣導

20

黏滯氣流範圍

- * 在黏滯氣流範圍（ $d < 0.6$ 毫巴·厘米），假定為 293 K 室溫的空氣，則孔道的氣導為一相當複雜的公式，茲簡化寫成：

$$C = F1/F2 \text{ 公升/秒}$$

- * F1及F2代表函數如下：

$$F1 = 76.6 (P_2/P_1)^{0.72} [1 - (P_2/P_1)^{0.258}]^{1/2} A$$

$$F2 = 1 - (P_2/P_1)$$

21

分子氣流範圍

- * 在分子氣流範圍（ $d < 0.013$ 毫巴·厘米），絕對溫度TK，任何莫耳質量為M的氣體，面積為A 厘米的任何形狀孔道的氣導公式如下：

$$C = 3.64 A (T/M)^{1/2} \text{ 公升/秒}$$

- * 假定T為室溫293 K，氣體為空氣，則上式變為僅與孔道的斷面積有關的公式：

$$C = 11.6 A \text{ 公升/秒}$$

22

利用孔道的氣導計算短管氣導

- * 在分子流範圍，絕對溫度TK，任何莫耳質量為M的氣體，斷面為任何形狀短管的氣導可由長管及孔道的公式求得如下：

$$C = 3.64 \sqrt{\pi} \sqrt{TIM} A / (3UL / 16A + 1)$$

23

第五節 管路中空氣以外其他氣體的氣導

- * 一般考慮不同氣體的方法係用修正因子（correction factor）來作修正
- * 以下為各種氣體在20°C相對於空氣在管路氣導的修正因子：

氣體	黏滯氣流	分子氣流
空氣	1.0	1.0
氧氣	0.91	0.947
氮氣	1.05	1.013
氫氣	0.92	2.64
氫氣	2.07	3.77
二氧化碳	1.26	0.808
水蒸氣	1.73	1.263

24

第六節 真空系統有效抽氣速率

- * 真空幫浦的抽氣速率 S_0 ，真空系統的抽氣口處的抽氣速率，稱為有效抽氣速率（effective pumping speed） S_{eff} ，以及兩者間的總氣導 C 有以下的關係：

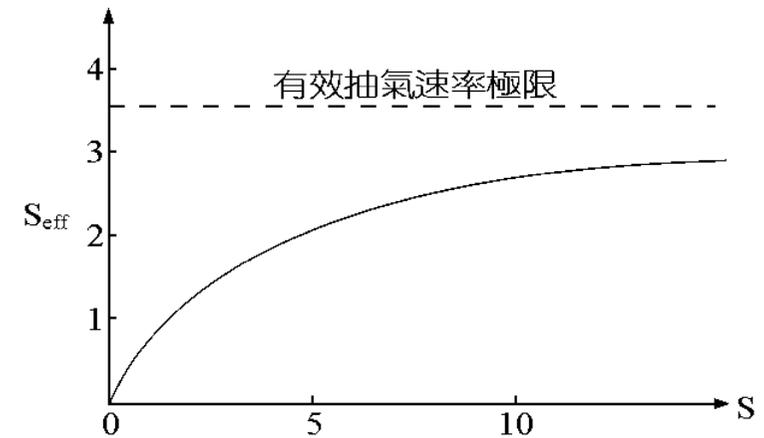
$$1/S_{eff} = 1/C + 1/S_0$$

- * 分析幫浦的抽氣速率與氣導的值比較可知：

$$S_0 \gg C : S_{eff} \rightarrow C$$

25

有效抽氣速率對幫浦抽氣速率曲線



26

第七節 抽氣速率損失

- * 抽氣速率損失（pumping loss） L_s 代表因為有阻抗使有效抽氣速率損失的百分比，其定義為：

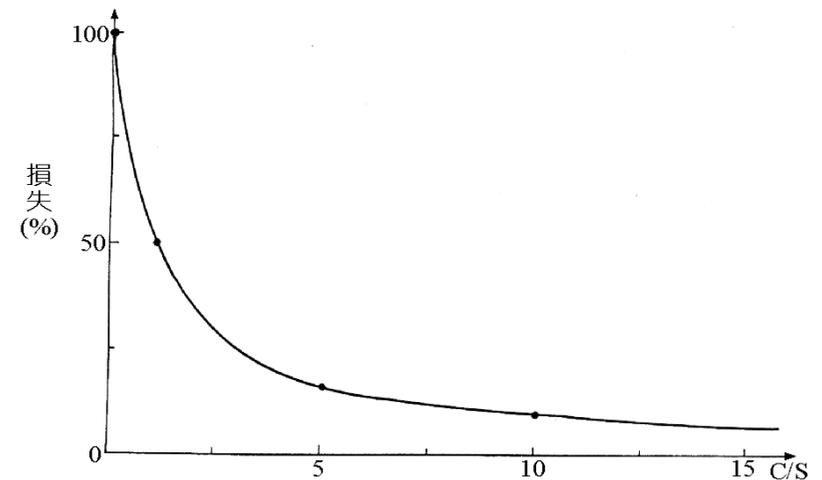
$$L_s = (S_0 - S_{eff})/S_0$$

- * 代入有效抽氣速率的公式，可得

$$L_s = S_0 \cdot R / (1 + S_0 \cdot R) = S_0 / (S_0 + C)$$

27

抽氣速率損失曲線



28

第八節 氣體分子的平均自由動徑

氣體的平均自由動徑公式

* 任何氣體分子之平均自由動徑

* 若氣體分子半徑為 r ，單位體積內的氣體分子數為 n ，在溫度 T K時氣體分子之平均自由動徑為：

$$\lambda = 1/[\sqrt{2}\pi n(2r)^2]$$

$$\lambda = 3.11 \times 10^{-20} T/[\sqrt{2}P(2r)^2]$$

* 空氣分子的平均自由動徑

* 平均自由動徑的公式多以空氣及室溫293K的情況來計算，故以空氣分子的平均直徑為 3.76×10^{-8} 厘米代入上式可得：

$$\lambda = 6.45 \times 10^{-3}/P$$

29

第九節 氣體分子間平均碰撞率

* (average collision, rate) Z 為單位時間內氣體分子之間互相碰撞的次數

* 此碰撞率與氣體分子的平均自由動徑及氣體分子的平均速率有關，可以下式表示：

$$Z = v_{ave} / \lambda$$

* 代入理想氣體定律，則可得：

$$Z = 1.87 \times 10^{24} pr^2 / (MT)^{1/2}$$

30

第十節 單分子層附著時間

* (mono-molecular layer time) 簡稱單層時間 (mono layer time) 為在潔淨固體表面上附著一層氣體分子所需的時間

* 此單層時間取決於單位時間內氣體分子碰撞在固體表面單位面積上的分子數

* 氣體分子撞擊率

* 單層時間公式

31

氣體分子撞擊率

* (impingement rate) Φ ，亦稱為分子通量 (molecular flux) 為單位時間內氣體分子碰撞在固體表面單位面積上的分子數

* 氣體分子撞擊率的公式為：

$$\Phi = nv_{av} / 4$$

$$= n[2kT/(\pi m)]^{1/2} / 2$$

* 代入理想氣體定律可得：

$$\Phi = 2.635 \times 10^{22} [p/(MT)^{1/2}]$$

32

單層時間公式

- * 單分子層附著時間可由氣體分子撞擊率以及被附著的固體表面的性質導出如下：

$$t_{mono} = \Phi_m / (\Phi \cdot f)$$

- * Φ 可以下式估算：

$$\Phi_m = 1/(2r)^2$$

- * 黏著機率為0與1間的數值，假定f1及氣體為空氣，則

$$t_{mono} = 3.2 \times 10^{-6}/p \text{ 秒}$$