Chapter 2 真空中的氣體與氣流

- 2.1 氣體與真空壓力
- 2.2 部分壓力與總壓力
- 2.3 真空中的氣流形態
- 2.4 真空區分
- 2.5 真空有關的氣體理論

第一節 氣體與真空壓力

氣體分子運動與氣壓

- 真空壓力，簡稱為氣壓或壓力
  - 真空中氣體分子施於器壁或任何固體表面單位面積上的力
- 氣體分子的力
  - 來自氣體分子運動的動能
- 氣體分子的動能
  - 來自溫度
  - 與氣體分子的質量有關
- 在一定體積的容器內，相同數量的氣體分子溫度愈高則氣壓愈高

永久氣體

- permanent gas
- 在常溫不會凝結成液體或固體的氣體
  - 常溫：其範圍為人類自然環境中最低至最高的溫度
- 包含如氮，氧，氬，氖，氦，氫等元素（element）氣體
  - 以地球上現在的溫度變化來看，即使最冷的地方，永久氣體仍然為氣態（gaseous state）
- 若將其溫度降低至人為的超低溫，例如液態氦溫度4.8K，則除氦氣為液態外，所有的氣體均會變成固體
  - 若以此觀點來看，此些氣體被稱為永久氣體並不恰當

氣態物質

- gaseous matter
- 包含：
  - 永久氣體
  - 化合物氣體
  - 蒸氣（vapour）

蒸氣與蒸氣壓

- 蒸氣壓
  - 物質變成氣態施於周圍空間的壓力稱為蒸氣壓
- 飽和蒸氣壓
  - saturated vapour pressure：物質變成氣態與凝回液或固態的量成平衡時的蒸氣壓
    - 水的蒸氣壓
    - 液體的蒸氣壓

水的蒸氣壓

- 水在不同溫度下的飽和蒸氣壓

T℃	P（托爾）	P（毫巴）
100	760	1013
50	93	124
25	24	32
0	4.8	6.4（冰點）
−40	0.1	0.133
−78.5	5×10^{-4}	6.667×10^{-4}（乾冰）
−196	1×10^{-24}	1.33×10^{-24}（液態氮）

液體的蒸氣壓

- 常用的液體在20℃的飽和蒸氣壓

液體	蒸氣壓（毫巴）
苯（benzene）	99.5
乙醇（ethyl alcohol）	58.5
甲醇（methyl alcohol）	128
丙酮（acetone）	246.4
松節油（turpentine）	5.87
純水（pure water）	23.3
四氯化碳（CCl_4）	121.3

固體材料的蒸發率

- 固體材料因為蒸發而逐漸減少，此種隨時間減少的量
- Evaporation rate
- 蒸發率與蒸氣壓有關，隨物質不同而異
  - 固體元素在真空中的蒸發率
  - 無機材料的蒸發率
  - 材料的線蒸發率

固體元素在真空中的蒸發率

- 固體元素由其表面單位面積單位時間蒸發的量可由下式估算

$$W = 5.8 \times 10^{-2} \times P \times \eta \times \sqrt{M/T}$$

- W代表蒸發率，單位為克/（平方厘米・秒）
- η為不凝結因子（non-condensation factor），其值在0與1之間
  - 金屬的約等於1，但有些元素如碳則可能小於1

無機材料的蒸發率

- 固體無機材料由其表面單位面積單位時間蒸發的量可由下式估算

$$W = \mathrm{P} \times \sqrt{M} / (17.14 \times \mathrm{T})$$

- 上式的符號與單位同於固體元素的公式

材料的線蒸發率

- 通常固體係從表面蒸發，故亦可以單位時間從表面蒸發掉的厚度來表示固體蒸發的速率
- linear evaporation rate
- 常用的單位為厘米/年
- 線蒸發率隨溫度上升而增加，因物質的不同而異
  - 在10^{-9}毫巴的真空中，要達到固體材料的線蒸發率為10^{-5}厘米/年，不同種金屬及半導體所需的溫度
  - 固體材料的線蒸發率提高至10^{-3}厘米/年，則需要的溫度為

在10^{-9}毫巴的真空中，要達到固體材料的線蒸發率為10^{-5}厘米/年，不同種金屬及半導體所需的溫度

元素	溫度
Cd	38℃
Zn	71℃
Mg	127℃
Li	149℃
Ag	477℃
Al	549℃
Cu	627℃
Au	660℃
Fe	711℃
Ni	804℃
Ti	921℃
Mo	1382℃
W	1871℃
Ge	660℃
Si	788℃

若固體材料的線蒸發率提高至10^{-3}厘米/年，則需要的溫度

元素	溫度
Cd	77℃
Zn	127℃
Mg	177℃
Li	210℃
Ag	588℃
Al	682℃
Cu	760℃
Au	804℃
Fe	899℃
Ni	938℃
Ti	1071℃
Mo	1627℃
W	2149℃
Ge	804℃
Si	921℃

第二節 部分壓力與總壓力

- 一般所稱容器內的氣体壓力係指總壓力，即並未特別指明是否單一種氣体分子或者有多種氣體分子混合的氣體的壓力
- 部分壓力
  - 混合氣體在容器中各成分的氣體或蒸氣其單獨對該容器所施的壓力
  - （partial pressure），亦有簡稱為分壓
- 總壓力
  - 混合氣體在容器中各成分的氣體或蒸氣總合對該容器所施的壓力
  - total pressure
    - 總壓力各部分壓力的總和

第三節 真空中的氣流形態

- 真空系統中的壓力從一大氣壓力開始下降，在最初的階段真空系統中的氣體被幫浦抽出時有如一般的流體呈氣流（gas flow）狀態
- 若壓力愈來愈低時，則此種氣流的狀態漸漸轉變成氣體分子運動狀態，此時氣流形態實質上已非「流」的形態

氣體分子的平均自由動徑

- mean free path
- 常用來解釋氣流形態的參數
- 氣體分子在運動時各個分子在碰撞其他分子前所行走的距離的平均值稱為氣體分子的平均自由動徑
- 簡單估算氣體分子的平均自由動徑的公式如下：

$$\lambda = [\,6.45 \times 10^{-3}\,] / p \quad \text{厘米}$$

黏滯性氣流

- 抽真空必經過從大氣壓力開始逐漸壓力下降的抽氣階段
- 最初的階段的氣流形態稱為黏滯性氣流（viscous flow）

黏滯性氣流的特徵

- 黏滯性氣流亦簡稱為黏滯流
- 特徵為：
  - 氣體分子之間有互相碰撞的作用
  - 每一氣體分子的運動受其周圍氣體分子的限制
  - 氣體分子之間有摩擦力（即黏滯性）
  - 氣流的方向與氣體分子運動的方向一致，故此氣流為連續流

黏滯性氣流的條件

- 不同的氣流形態的條件，可用氣體分子的平均自由動徑的大小來界定
- 黏滯性氣流的條件為：
  - 氣體的平均自由動徑儀器的主要尺寸
    - 或 λ《d
  - 一般多用下式來判斷
    - d/λ＞100
    - pd＞0.6毫巴．厘米（空氣在20℃時的平均自由動徑 ）

過渡氣流

- 真空系統維持連續被抽氣，氣體的壓力下降至氣流形態改變成一部分氣流已轉變成下述的分子氣流而剩下的部分仍維持在黏滯性氣流。此氣流範圍稱之為過渡氣流（transition flow），簡稱為過渡流
- 此氣流的情況頗為複雜，除非真空系統必須在此壓力範圍操作而且需要精確控制其壓力變化外，因為真空系統中的壓力很快經過此範圍而進入下一範圍

過渡氣流的條件

- 此氣流的條件為
  - 氣體的平均自由動徑與儀器的主要尺寸相當
    - 或$d \fallingdotseq \lambda$
  - 判斷的條件為
    - $2 < d / \lambda \leqq 100$
    - $1.3 \times 10^{-2} < pd \leqq 0.6$毫巴・厘米
      （在 20℃的空氣 ）

分子氣流

- 當真空系統中氣體分子完全呈自由任意運動（random motion）的形態
- molecular flow
- 簡稱為分子流的範圍
- 分子氣流的條件
  - 氣體的平均自由動徑≫儀器的主要尺寸
    - 或$\lambda \gg d$
  - 一般多用下式來判斷
    - $2d / \lambda$
    - $pd \leqq 1.3 \times 10^{-2}$毫巴・厘米（在20℃的空氣 ）

分子氣流的特徵

- 氣體分子完全自由向各方向任意運動
- 氣體分子之間無互相作用
- 氣體分子相遇時為彈性碰撞，碰撞作用遵循動能守恆與動量守恆定律
- 氣體分子與容器器壁碰撞的機會較互相之間碰撞的機會為大
- 氣體分子漫步到真空幫浦而被抽入其中為抽氣的機制

第四節 真空區分

- 粗略真空
  - 粗略真空（Rough Vacuum，簡稱RV）
  - 壓力範圍：1000~1 毫巴； 氣流形態： 黏滯流
- 中度真空
  - 中度真空（Medium Vacuum，簡稱MV）
  - 壓力範圍： $1 \sim 10^{-3}$毫巴；氣流形態：過渡流
- 高真空
  - 高真空（High Vacuum，簡稱HV）
  - 壓力範圍：$10^{-3} \sim 10^{-7}$毫巴；氣流形態：分子流
- 超高真空
  - 超高真空（Ultra High Vacuum，簡稱UHV）
  - 壓力範圍：10^{-7}毫巴以下；氣流形態：分子流

第五節 真空有關的氣體理論

- 理想氣體定理
- 波義耳定理
- 氣體動力學
- 氣體擴散定理

理想氣體假定的條件

- 氣體符合理想氣體假定的條件
  - (A)氣體分子運動為向各方向任意運動
  - (B)氣體分子之間無互相作用的力
  - (C)氣體分子相遇時為彈性碰撞，碰撞作用遵循動能守恆與動量守恆定律
  - (D)氣體分子的總體積較容器的容積小到可以忽略
  - (E)氣體分子運動遵循分子動力學理論

理想氣體定理

- ideal gas law
- $p=nkT$
- 若真空系統的體積為V，而其中的總氣體分子數為N，則n=N/V
  - $pV=N\,k\,T$
- 若此N個氣體分子的莫耳數（number of mole）為N
  - $p\,V=N_M\,R\,T$

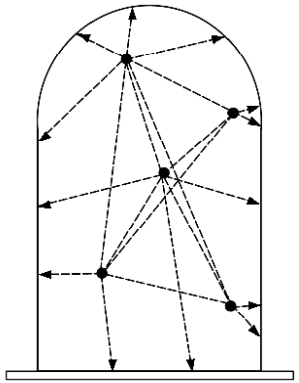

圖 2.1　理想氣體想像圖

波義耳定理

- 波義耳定理公式
  - $p_0V_0=p_fV_f$
  - $p\,V=$常數
- 波義耳定理的限制
  - 此定理並不適用於蒸氣
    - 蒸氣加壓後有凝結成液體或固體的現象，故蒸氣的體積在壓力未達到飽和蒸氣壓前係遵循波義耳定理，但在壓力已達到飽和蒸氣壓時蒸氣的體積突然大為減小較上式計算的結果相差甚遠

氣體動力學

- 氣體動力學的主要內容：
  - 氣體動力學討論氣體分子運動的機制，包括氣體分子的動能或速度與溫度及壓力的關係
  - 氣體分子運動的速率分布係遵循 Maxwell-Boltzmann 的分布定理
  - 氣體分子的速率的公式的推導

氣體分子的速率公式

- 最可能速率（most probable speed）

$$v_0 = (2kT/m)^{\frac{1}{2}}$$

- 平均速率（average speed）

$$v_{av} = 2v_0 / \sqrt{\pi}$$

- 均方根速率（root-mean-square speed）

$$v_{rms} = (3/2)^{\frac{1}{2}} v_0$$

氣體擴散定理

- 氣體擴散定理的主要內容
  - gas diffusion law
    - 氣體對氣體的擴散
    - 氣體對固體的擴散
  - 氣體分子運動傾向於由高濃度的區域流向低濃度的區域
  - 兩種不同的氣體放在同一容器內，氣體會互相擴散最後達到在容器內任何位置氣體的相對濃度均相同

氣體擴散公式

- 氣體擴散入固體通常均以菲克定理（Fick's law）來敘述
- 在穩定狀態下，氣體的濃度沿X方向的變化公式

$$Q = -D_1 (dc/dx)$$

- 在未達到穩定狀態時，氣體的濃度隨時間變化，氣體擴散的公式

$$D_1 (d^2c/dx^2) = (dc/dt)$$

$$D_1 = D_0 e^{[-H/(jR_0T)]}$$