

古基典熱力學問題詳解
基本原理解

G · J · 范怀伦 原著
R · E · 桑塔格

曉園出版社
世界图书出版公司

熱物理學問題詳解

8

C. 基特爾 H. 克羅默 原著
臺大物理系 86 年畢業生班 譯著

曉園出版社
世界圖書出版公司

内 容 简 介

本书是 G.J.范怀伦 R.E.桑塔格著“Fundamentals of Classical Thermodynamics”一书的问题详解

古典热力学基本原理问题详解

G.J.范怀伦 R.E.桑塔格 原著

李广齐 译著

晓 园 出 版 社 出 版

世界图书出版公司北京分公司重印

(北京朝阳门内大街 137 号)

北 京 中 西 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992 年 5 月 重印 开本 850×1168 1/32
1992 年 5 月第一次印刷 印张 15.5

印数: 0,001—1,600

ISBN: 7-5062-1170·X/O·28

定价: 11.90 元

世界图书出版公司通过中华版权代理公司

购得重印权 限国内发行

研習理工的同學，都有一種認識，那就是：一本書的習題往往是該書的精華所在，藉着習題的印證，才能對書中的原理原則澈底的吸收與瞭解。

有鑒於此，曉園出版社特地聘請了許多在本科上具有相當研究與成就的人士，精心出版了一系列的題解叢書，為各該科目的研習，作一番介紹與鋪路的工作。

一個問題的解答方法，常因思惟的角度而異。曉園題解叢書，毫無疑問的都是經過一番精微的思考與分析而得。其目的在提供對各該科目研讀時的參考與比較；而對於一般的自修者，則有啓發與提示的作用。希望讀者能藉着這一系列題解叢書的幫助，而在本身的學問進程上有更上層樓的成就。

古典熱力學基本原理問題詳解

(目 錄)

第二章	基本觀念與定義	1
第三章	純質之性質	9
第四章	功與熱	31
第五章	熱力學第一定律	53
第六章	熱力學第二定律	111
第七章	熵	119
第八章	不可逆性與有用性	195
第九章	動力循環與冷凍循環	215
第十章	熱力關係	283
第十一章	混合物與溶液	333
第十二章	化學反應	385
第十三章	相平衡與化學平衡導論	429
第十四章	流經噴嘴與輪葉流路之流動	471

第二章 基本觀念與定義

- 2.1 一穩定力 5 kN 作用在 20 kg 質量上，此質量的加速度為何？

解 $\therefore F = ma$

$$\therefore a = \frac{F}{m} = \frac{5 \times 10^3}{20} = 250 \text{ m/s}^2$$

- 2.2 二仟莫耳的雙原子氮氣密封在一容器內。現一 1 kN 之力加速此系統，忽略容器的質量，加速度為何？

解 N_2 分子量為 28

$$\therefore m = 2 \times 10^3 \times 28 = 56000 \text{ g} = 56 \text{ kg}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1 \times 10^3}{56} = 17.86 \text{ m/s}^2$$

- 2.3 “標準”重力加速度（在海平面及 45 度緯度）為 9.80665 m/s^2 ，求由“標準”重力作用在 50 kg 質量的力。

解 $F = mg = 50 \times 9.80665$
 $= 490.3325 \text{ N}$

- 2.4 在重力加速度為 9.65 m/s^2 地方，地球對 100 kg 質量的吸引力為何？

解 $F = mg = 100 \times 9.65 = 965 \text{ N}$

- 2.5 在 $g = 9.70 \text{ m/s}^2$ 處，以橫樑天平秤 1 仟克質量。讀數將為何？若以標準重力（見習題 2.3）校正過的彈簧秤來秤此質量。將得什麼讀數？

解 用天平秤（beam balance）讀數為 1 kg。

$$F = mg = 1 \times 9.7 = 9.7 \text{ N}$$

用彈簧秤（spring scale）其讀數為：

$$\frac{F}{g_s} = \frac{9.7}{9.80665} = 0.989 \text{ kg W}$$

- 2.6 在 10000 m 之高度（此處 $g = 9.778 \text{ m/s}^2$ ）以在海平面校正過之彈簧秤來“秤”某一物體。彈簧秤的讀數為 10 kg，此物體的質量為何？

解 $F = 10g_s = mg$

2 古典熱力學基本原理問題詳解

$$\Rightarrow m = \frac{10g}{g} = \frac{10 \times 9.80665}{9.778} = 10.03 \text{ kg}$$

- 2.7 一 25 kg 鋼槽，容量為 250 L 裝滿液體水。需要多少力使此組合系統加速 2 m/s^2 ？假設水的密度為 1000 kg/m^3 。

解 $250 \text{ L} = 0.25 \text{ m}^3$

$$m = 25 + 0.25 \times 1000 = 275 \text{ kg}$$

$$F = ma = 275 \times 2 = 550 \text{ N}$$

- 2.8 氣體包含於一附有活塞的垂直汽缸內，如圖 2.6 所示。外界的大氣壓力為 1 bar 活塞面積為 500 mm^2 ，若內部的氣體壓力為 125 kPa ，活塞的質量為何？假設標準重力加速度。

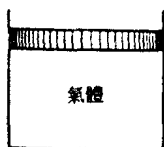
解 $500 \text{ mm}^2 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$F = \Delta P a = mg$$

$$\Rightarrow m = \frac{\Delta P a}{g} = \frac{(125 \times 10^3 - 10^5) \times 5 \times 10^{-4}}{9.80665}$$

$$= 1.275 \text{ kg}$$



- 2.9 假使一軌道太空站，其由旋轉太空站所引起的人工重力為 2 m/s^2 站中 75 kg 的人重量多少？

解 $F = ma = 75 \times 2 = 150 \text{ N}$

- 2.10 壓力計之讀數為 1.65 MPa ，當地氣壓計讀數為 94 kPa ，求測得的絕對壓力。

解 $P_{abs} = 1.65 \text{ MPa} + 94 \text{ kPa} = 1.65 \text{ MPa} + 0.094 \text{ MPa}$
 $= 1.744 \text{ MPa}$

- 2.11 用來測量真空之水銀壓力計的柱高為 700 mm，當地的氣壓計讀數為 95 kPa。求測得的絕對壓力。假設水銀密度為 13600 kg/m^3 ？

$$\begin{aligned} \text{解 } P &= P_0 - \rho g L \\ &= 95000 - 13600 \times 9.80665 \times 0.7 \\ &= 95000 - 93359.308 \\ &= 1640.692 \text{ Pa} \end{aligned}$$

- 2.12 一壓力計中裝有密度 800 kg/m^3 的液體。若兩柱之高度差為 406 mm。所示之壓力差為何？若含有密度為 13600 kg/m^3 水銀的壓力計測得同樣的壓力差，則柱的高度差將為何？

$$\begin{aligned} \text{解 } \Delta P &= \rho g L = 800 \times 9.80665 \times 0.4 \\ &= 3138.128 \text{ Pa} \\ &= 3.14 \text{ kPa} \\ \Delta P &= \rho_{\text{Hg}} g \times L_{\text{Hg}} \\ \Rightarrow L_{\text{Hg}} &= \frac{\Delta P}{\rho_{\text{Hg}} g} = \frac{3138.128}{13600 \times 9.80665} = 0.02353 \text{ m} \\ &= 23.53 \text{ mm} \end{aligned}$$

- 2.13 用水銀柱量測戶外一實驗裝置中 200 kPa 之壓力差。此地區冬天最低溫為 -15°C ，夏天最高溫為 35°C 。當量測此一已知壓力差時，夏天與冬天相比，水銀柱高度差為何？假設標準重力加速度。以下為水銀密度之數值。

$T^\circ\text{C}$	Density, kg/m^3
-10	13620
0	13595
10	13570
20	13546
30	13521

$$\begin{aligned} \text{解 } \rho_{-15^\circ\text{C}} &= 13595 + \frac{15}{10} \times (13620 - 13595) \\ &= 13632.5 \text{ kg/m}^3 \\ L_{\text{冬}} &= \frac{\Delta P}{\rho_{-15^\circ\text{C}} g} = \frac{200 \times 10^3}{13632.5 \times 9.80665} = 1.496 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{35^\circ\text{C}} &= 13546 + \frac{35-20}{30-20} \times (13521 - 13546) \\ &= 13508.5 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$L_{\text{夏}} = \frac{\Delta P}{\rho_{35^\circ\text{C}} g} = \frac{200 \times 10^5}{13508.5 \times 9.80665} = 1.510 \text{ m}$$

$$\text{高度差爲 } L_{\text{夏}} - L_{\text{冬}} = 1.510 - 1.496 = 0.014 \text{ m} = 14 \text{ mm}$$

- 2.14 一實驗裝置放於飛行在 2000 m 高度的飛機中， $g = 9.75 \text{ m/s}^2$ 。以水銀壓力計算出通過孔口壓力降來測量裝置中的氣流，如圖 2.7 所示。壓力計之高度差讀數為 250 mm，當地溫度為 -10°C （見習題 2.13），壓力降為多少 kPa？

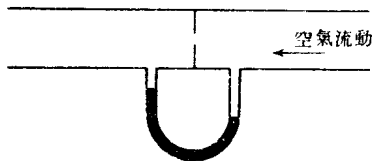


圖 2.7

解 由題 2.13 知 $\rho_{-10^\circ\text{C}} = 13620 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned}\Delta p &= \rho g L = 13620 \times 9.75 \times 0.25 = 33198.75 \text{ Pa} \\ &= 33.2 \text{ kPa}\end{aligned}$$

- 2.15 在密封水槽中的水面高於槽底 40 m。水面上的空間壓力為 120 kPa 水之密度為 1000 kg/m^3 ，在槽底的水壓力為何？

解 $P = P_0 + \rho g L$

$$= 120 \times 10^3 + 1000 \times 9.80665 \times 40$$

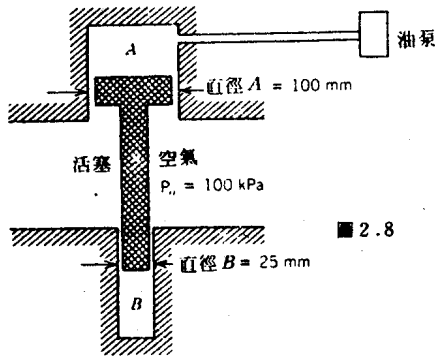
$$= 120000 + 392266 = 512266 \text{ Pa}$$

$$= 512.266 \text{ kPa}$$

- 2.16 兩氣缸 A 與 B 以具有兩不同直徑之活塞相連，如圖 2.8 所示。氣缸 B 裝有氣體，而氣缸 A 中的油壓力被一液壓泵抽升至 300 kPa。活塞質量為 10 kg。求氣缸 B 中的壓力。

解 $A_A = \frac{\pi}{4} (0.1)^2 = 0.007854 \text{ m}^2$

$$A_B = \frac{\pi}{4} (0.025)^2 = 0.000491 \text{ m}^2$$



$$F = P_A A_A + mg = P_B A_B + P_0 (A_A - A_B)$$

$$\Rightarrow P_B = \frac{1}{A_B} [P_A A_A + mg - P_0 (A_A - A_B)]$$

$$= \frac{1}{0.000491} [300 \times 10^3 \times 0.007854 + 10 \times 9.80665 - 100 \times 10^3 (0.007854 - 0.000491)]$$

$$= 3498913.4 \text{ Pa}$$

$$= 3.5 \text{ MPa}$$

- 2.17 一枚準過的特定鉑對鉑 - 鉑熱電偶使用在 2.11 節中與 IPTS - 68 所討論有關所述的範圍 3 的溫度範圍。當校準時，熱電偶在銻、銀和金的凝固點的電動勢讀數分別為 5552，9147 和 10333 微伏 (microvolt)。設多項式關係為：

$$EMF = C_0 + C_1 T + C_2 T^2$$

求以此熱電偶為量度而得 7500 微伏之讀數時的溫度。

$$\text{解 } EMF_{(\text{microvolts})} = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$5552 = C_0 + C_1(630.74) + C_2(630.74)^2$$

$$9147 = C_0 + C_1(961.93) + C_2(961.93)^2$$

$$10333 = C_0 + C_1(1064.43) + C_2(1064.43)^2$$

$$\text{解得 } C_0 = -2431.535$$

$$C_1 = 12.458$$

$$C_2 = -4.378 \times 10^{-4}$$

$$7500 = C_0 + C_1 T + C_2 T^2$$

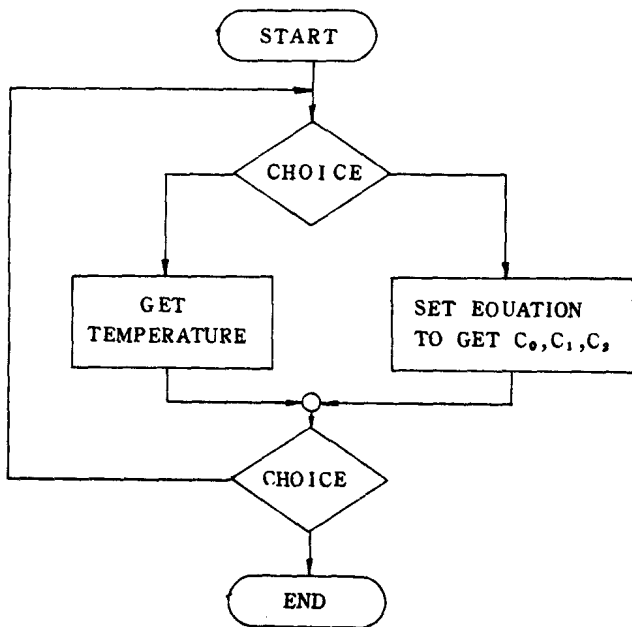
$$= -2431.535 + 12.458T - 4.378 \times 10^{-4} T^2$$

$\Rightarrow T = 27633.18^{\circ}\text{C}$ (不合) 或 820.89°C

故溫度為 820.89°C

2.18 寫一電腦程式解在習題 2.17 中所討論的熱電偶量度問題，其中任三組的刻度讀數為已知，且結果為具有可用在刻度範圍內任何溫度的特定係數的多項式方程式。

設計此程式為一隨時可做不同熱偶或同熱偶的不同電動勢之溫度求取，並可為其他程式之一部分。其流程如下表：



其程式如後：

```

10000 S=C0^2+C1^2+C2^2
10300 IF S>0 GOTO 14500
10600 CLS
10900 PRINT"Please input three sets of EMF and temperature."
11200 FOR I=1 TO 3
11500 PRINT:PRINT I;" : ";
11800 INPUT E(I),T(I)
12100 NEXT I
12400 C2=(T(2)-T(1))*(E(3)-E(1))-(T(3)-T(1))*(E(2)-E(1))
12700 C2=C2/(T(3)-T(1))/(T(2)-T(1))/(T(3)-T(2))
13000 C1=(E(2)-E(1))/(T(2)-T(1))-(T(2)+T(1))*C2
13300 C0=E(1)-T(1)*C1-T(1)^2*C2
13350 PRINT"C0=";C0;" C1=";C1;" C2=";C2
13600 BS="aaa"
13900 PRINT:PRINT:PRINT"what value of EMF do you have ?"
14200 INPUT EMF
14500 T1=(-SGR(C1^2-4!*(C0-EMF)*C2)-C1)/2!/C2
14550 T2=(SGR(C1^2-4!*(C0-EMF)*C2)-C1)/2!/C2
14800 IF NOT(BS="aaa") THEN RETURN
14850 PRINT"The temperatures are : ";T1;" ";T2
15100 PRINT"Want to find another temperature ? (Y/N)";
15400 INPUT AS
15700 IF AS="Y" OR AS="y" GOTO 13900
16000 PRINT:PRINT"Want to try for another material ? (Y/N)";
16300 INPUT CS
16600 IF CS="Y" OR CS="y" GOTO 10600
16900 END

```

RUN

Please input three sets of EMF and temperature.

1 : ? 5352,630.74

2 : ? 9147,961.93

3 : ? 10333,1064.43

C0=-2431.535 C1= 12.45793 C2=-4.378262E-04

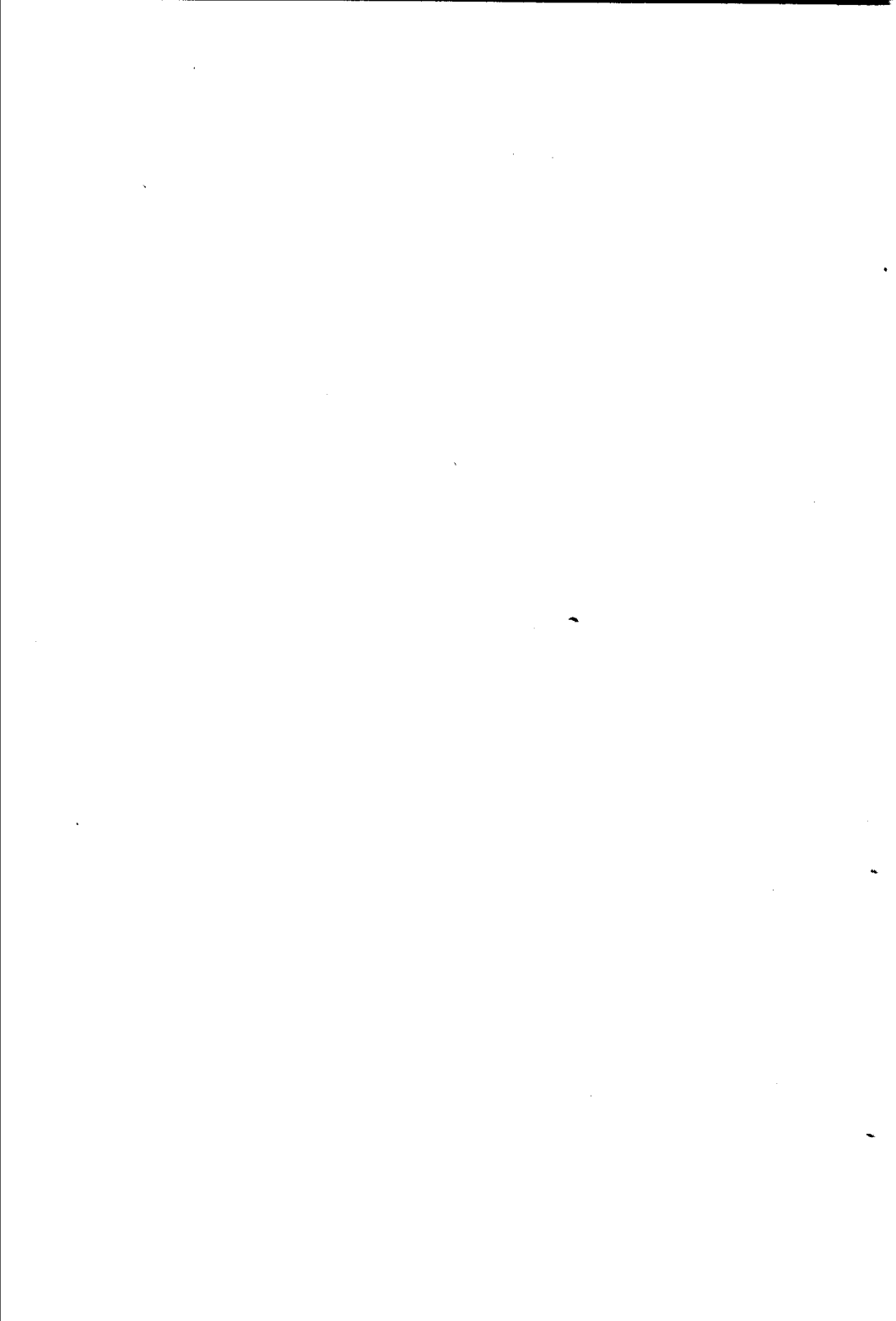
What value of EMF do you have ?

? 7500

The temperatures are : 27633.18 820.8886

Want to find another temperature ? (Y/N)? nn

Want to try for another material ? (Y/N)? n



第三章 純質之性質

3.1 設一圓氣球的直徑為 5 m，當地周圍情況為壓力 100 kPa 及溫度 20°C

(a) 求此氣球排開空氣之質量和莫耳數。

(b) 在 100 kPa 及 20°C 氣球充滿氦氣，求氣球中氦氣之質量及莫耳數。

$$\text{解 (a) } n_{\text{air}} = \frac{PV}{RT} = \frac{100 \times 10^3 \times \frac{4}{3} \pi \cdot 5^3}{8.3144 \times 10^3 \times (20 + 273.15)}$$

$$= 21.482 \text{ Kmole}$$

$$m_{\text{air}} = n_{\text{air}} \times M_{\text{air}} = 21.482 \times 10^3 \times 28.9$$

$$= 6208298 \text{ g} = 620.8298 \text{ kg}$$

$$\text{(b) } n_{\text{He}} = \frac{PV}{RT} = \frac{100 \times 10^3 \times \frac{4}{3} \pi 5^3}{8.3144 \times 10^3 \times (20 + 273.15)}$$

$$= 21.482 \text{ K mole}$$

$$m_{\text{He}} = n_{\text{He}} \times M_{\text{He}} = 21.482 \times 10^3 \times 4.003$$

$$= 85992.45 \text{ g}$$

$$= 85.99245 \text{ kg}$$

3.2 在 100°C 的氬氣裝於附有無摩擦活塞的垂直汽缸。活塞的質量 5 kg 及直徑 100 mm，氣缸的外圍壓力為 97 kPa。若汽缸體積為 2 L，求汽缸內氬氣的質量。

$$\text{解 } R_{\text{Ar}} = 0.20813 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 208.13 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$P = 97000 + \frac{5 \times 9.80665}{\frac{\pi}{4} (0.1)^2} = 103243.1 \text{ Pa}$$

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(103243.1) \times (2 \times 10^{-3})}{(208.13) \times (100 + 273.15)}$$

$$= 0.0026587 \text{ kg}$$

$$= 2.6587 \text{ g}$$

3.3 空氣裝於附有無摩擦活塞及一組止擋的垂直汽缸內，如圖 3.11 所示。

活塞截面積為 0.2 m^2 ，在內空氣起初為 200 kPa 及 500°C ，然後因傳熱至外界因而空氣冷卻。

(a) 當活塞達到止擋時，汽缸內空氣的溫度為何？

(b) 冷卻繼續進行到溫度達到 20°C 為止，在此狀態之壓力為何？

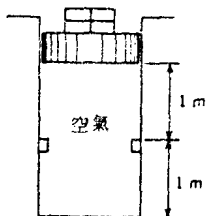


圖 3.11

解 (a) $V_1 = 0.2 \times 2 = 0.4 \text{ m}^3$

$$T_1 = 500^\circ\text{C} = 773.15^\circ\text{K}$$

$$P_1 = P_2 = 200 \text{ kPa}$$

$$V_2 = 0.2 \times 1 = 0.2 \text{ m}^3$$

$$mR = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \Rightarrow T_2 = \frac{V_2}{V_1} \cdot T_1$$

$$\Rightarrow T_2 = \frac{0.2}{0.4} \times 773.15 = 386.575^\circ\text{K}$$

$$= 113.425^\circ\text{C}$$

(b) $V_3 = V_2$, $T_3 = 20^\circ\text{C} = 293.15^\circ\text{K}$

$$mR = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \Rightarrow P_3 = \frac{T_3}{T_2} \times P_2$$

$$\Rightarrow P_3 = \frac{293.15}{386.575} \times 200 = 151.67 \text{ kPa}$$

- 3.4 在一精密天平上稱一抽空的內徑為 150 mm 之空心金屬球的重量，然後再稱充滿至 875 kPa 的未知氣體。兩者重量相差 0.0025 kg 室溫為 25°C ，假設此氣體為純質，其為何種氣體？

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.15}{2} \right)^3 = 1.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{875000 \times 1.77 \times 10^{-3}}{8.3144 \times (25 + 273.15)} = 0.625 \text{ mole}$$

$$M = \frac{m}{n} = \frac{0.0025}{0.625} = 0.004 \text{ kg/mole} = 4 \text{ g/mole}$$

查表 A.8 知此氣體為 He

- 3.5 一真空泵用來在液體氦池上方抽成真空，流入真空泵之容積流率為 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，真空泵的進口壓力為 20 Pa 及溫度為 -30°C ，進入泵之氦氣的質量流率為何？

$$\text{解 } R_{\text{He}} = 2.07703 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 2077.03 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$m = \frac{PV}{RT} \Rightarrow \dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \dot{m} &= \frac{20 \times 2.5}{2077.03 \times (-30 + 273.15)} = 9.9 \times 10^{-5} \text{ kg/s} \\ &= 0.00594 \text{ kg/min} \\ &= 0.3564 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

- 3.6 開始將氣球放氣，放時以閥連接充滿 1 MPa 氦氣的槽，周圍溫度為 20°C ，現打開閥，氣球在等壓（等於周圍壓力， 100 kPa ）下充氣，直到形成 $D_1 = 2 \text{ m}$ 的球形為止。超過此尺寸，氣球材料的彈性使內在壓力為

$$P = P_0 + C(D - D_1)^2$$

此氣球慢慢放至內在壓力 400 kPa ，此時的最後直徑為 4 m ，在此過程中所有溫度維持 20°C ，求將此氣球充氣的氦氣槽的最小體積。

$$\text{解 } m_1 = m_2 = m, \quad T_1 = T_2 = T$$

當 V_1 最小時 $P_2 = 400 \text{ kPa}$

$$P_1 V_1 = mRT = P_2 V_2 = P_2 \left[V_1 + \frac{4}{3} \pi \left(\frac{4}{2} \right)^3 \right]$$

$$\Rightarrow 10^5 V_1 = 400 \times 10^3 \left[V_1 + \frac{32\pi}{3} \right]$$

$$\Rightarrow V_1 = \frac{64\pi}{9} = 22.34 \text{ m}^3$$

- 3.7 一剛性容器 A 與一圓形彈性氣球 B 連接，如圖 3.12 所示。二者皆裝着周圍溫度為 25°C 之空氣。容器 A 之容積為 0.1 m^3 及初壓力為 300 kPa

，氣球之起始直徑為 0.5 m 及內在壓力為 100 kPa，現打開連接 A 與 B 之閘並繼續開著。假設氣球內之壓力直接正比於其直徑，且空氣之末溫度為處處均勻為 25°C，求系統內之末壓力及氣球的最後容積。

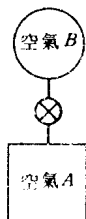


圖 3.12

$$\text{解 } V_{B1} = \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{0.5}{2} \right)^3 = 0.0654 \text{ m}^3$$

$$m_{B1} = \frac{P_{B1} V_{B1}}{RT_1} = \frac{100 \times 10^3 \times 0.0654}{0.287 \times 10^3 \times (25 + 273.15)}$$

$$= 0.0765 \text{ kg}$$

$$m_{A1} = \frac{P_{A1} V_{A1}}{RT_1} = \frac{300 \times 10^3 \times 0.1}{0.287 \times 10^3 \times (25 + 273.15)}$$

$$= 0.351 \text{ kg}$$

$$m_2 = m_{A2} + m_{B2} = m_{A1} + m_{B1} = 0.0765 + 0.351$$

$$= 0.4275 \text{ kg}$$

$$P_2 = P_{A2} = P_{B2}, T_2 = T_{B2} = T_{A2} = T_1 = 298.15^\circ \text{K}$$

$$P_B \propto D_B \text{ 且 } V_B \propto D_B^3 \text{ 故 } V_B \propto P_B^3$$

$$\text{故 } \left(\frac{P_2}{P_{B1}} \right)^3 = \frac{V_{B2}}{V_{B1}} \Rightarrow V_{B2} = V_{B1} \left(\frac{P_2}{P_{B1}} \right)^3$$

$$P_2 V_2 = P_2 (V_A + V_{B2}) = m_2 RT_2$$

$$\Rightarrow P_2 \left[0.1 + 0.0654 \times \left(\frac{P_2}{100 \times 10^3} \right)^3 \right] = 0.4275 \times 287 \times 298.15$$

$$= 36580.768$$

$$\text{用嘗試錯誤法得 } P_2 = 1.38 \times 10^5 \text{ Pa} = 138 \text{ kPa}$$

$$V_{B2} = 0.0654 \times \left(\frac{138}{100} \right)^3 = 0.172 \text{ m}^3$$

3.8 假設下列已知狀態之物質有理想氣體之行為合理嗎？

(a) 30°C, 3 MPa 之氮。