

初等熱力學

原著者：R M. Russell

譯述者：林 顯 揚

科技圖書股份有限公司

這是一本經過濃縮的熱力學教本。

附有甚多例題與習題，使讀者容易吸收消化。最適用作職校、機工科或五專非機工科的教本。

本公司經新聞局核准登記
登記證局版臺業字第1123號

書名：初等熱力學
原著者：RM. Russell
譯述者：林顯揚
發行人：趙國華
發行者：科技圖書股份有限公司
臺北市博愛路185號二樓
電話：3110953
郵政劃撥帳號15697

六十八年二月初版 特價新臺幣55元

緒 言

熱力學爲工程科學中的一部，爲習工科各系學生的基本必修課程。因其具有重要性，常被列爲各種考試的必考科目。目前各大專院校所授的熱力學大都採用原文本，不但研讀費時，而且包含內容廣泛，不易卒讀，坊間雖有中譯本若干本，亦因其艱深頗難領悟。要一本簡要易悟的中文書，實屬必需。茲根據英國克萊地朋克技術學院 R, M, Russell 所編的熱力學要義一書全部譯出，並酌予改編，使能符合本國的需要。本書經過濃縮，僅得一百八十頁，但其內容已將熱力學重點網羅齊全。全書共分二十二章，有關熱力學問題的解答與運用，則以 128 個例題 39 個問題將其逐一詳答，使讀者能在短期內瞭解如何運用熱力學的原理到實際應用上去。此爲本書的特色。因其簡單扼要可作爲高職，專科學生的輔導或教科用書，以補救目前艱深繁重教科書的研究困難問題。此爲本公司提供本書的主要目標。幸垂察焉。

科技圖書公司編譯部謹誌

目 錄

第 一 章	熱與溫度	1
第 二 章	熱與膨脹	3
第 三 章	物質的組成	12
第 四 章	壓 力	15
第 五 章	氣體定律	17
第 六 章	單位與比熱	27
第 七 章	相的改變	35
第 八 章	熱力學	44
第 九 章	流體的能量	47
第 十 章	非流動行程	51
第 十 一 章	氣相系統非流動行程概述	62
第 十 二 章	液體與蒸汽的性質	78
第 十 三 章	蒸汽系統非流動行程	82
第 十 四 章	穩定流動系統	93
第 十 五 章	節 流	104
第 十 六 章	蒸汽原動力廠	110
第 十 七 章	蒸汽引擎	123
第 十 八 章	汽油引擎	133
第 十 九 章	等壓循環	151
第 二 十 章	笛塞爾循環	157
第 二 十 一 章	內燃引擎試驗	163
第 二 十 二 章	燃 料	175

2 初等熱力學

附 錄 蒸 汽 表.....	175
1. 飽和水及水蒸汽性質表：溫度表.....	175
2. 飽和水及水蒸汽性質表：壓力表.....	178
3. 過熱及過臨界水蒸汽性質表.....	181

第一章 熱和溫度

1.1 概 說

熱 (heat)，是能量的一種形態。

溫度 (tmperature)，是顯示熱的程度或表示熱的強度。

爲了測量溫度，我們必需用物質的某些性質來表示它。在這種情況下，以下的幾種性質是很重要的：

(a) 膨脹 (expansion)：液體的膨脹或氣體的膨脹，可作爲測量溫度的工具。

(b) 電阻 (electrical resistance)：當金屬線被加熱時，它的電阻會增加；此種特性可用來測量溫度。

(c) 熱電動勢 (thermo-electromotive force)：如果連接兩根不同的金屬線的兩端，使構成一個完全的迴路，當一個連接點的溫度異於另一個連接點時，一個電動勢將在此迴路上產生。這電動勢恰與兩端連接點的溫度差成正比；因此，這一特性也可用來測量溫度。

1.2 定 點 (Fixed Points)

通常，溫度是用裝有液體的玻璃管的溫度計來測量。製造這種儀

2 初等熱力學

器，至少需要可以準確重複出現的兩個定點；在這兩個定點間，劃分成所期望的兩個定點；在這兩個定點間，劃分成所期望的溫度比例尺。

下定點 (the lower fixed point)，(冰點)，是純冰在 760 毫米水銀柱絕對壓力下溶解的溫度。

上定點 (the upper fixed point)，(沸點)，是純水在 760 毫米水銀柱絕對壓力下沸騰的溫度。

在攝氏溫度尺，冰點是記作 0° ，沸點記作 100° 。

第二章 熱與膨脹

2.1 固體的膨脹 (Expansion of solid)

在固態時，物質是由許多非常微小而行動受到靜電力限制的粒子集合而成的。這些粒子被靜電力束縛在一起，可是它們仍能作有限度的運動。每一粒子（或分子）在一固定位置振動着。當固體的溫度增加時，分子振動的幅度也跟着增加；這就形成了固體的膨脹。

膨脹在某些工程的進程序中被廣泛的利用，例如，在緊密裝配或某些形式的恒溫器。可是，在另一方面它却能產生人們不希望的效果，例如，引擎活塞的膨脹，蒸汽管的膨脹等等。

2.2 線膨脹 (Linear expansion)

考慮一根長度為 l 的實心直棒。當被加熱 θ 度時，這直棒將膨脹 $\alpha l \theta$ 的長度；此處 α 是直棒構成物質的一個常數。 α 通常稱為線膨脹係數 (coefficient of linear expansion)。它被定義為；當溫度增高 1 度時，單位長度所膨脹的量”。這一係數嚴格來講，對某一已知物質並非一個常數。它是隨溫度的變異而不同的。像木材是依木材的纖維方向而有所不同。在鹽、金屬與合金的晶體中，這係數又依軸向或縱向的膨脹與側向或橫向的膨脹不相同。

例題 2.1 一個內徑 $1.995m$ 的鋼環，套在一個外徑 $2.000m$ 的圓筒。如果在裝配時，鋼環與圓筒的徑向相差為 $1mm$ 。問鋼環必

4 初等熱力學

需加熱升高多少溫度？取 $\alpha = 11.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

解 直徑的增加量必需為

$$(2.000 - 1.995) \times 1000 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 7 \text{ mm}$$

需要昇高的溫度為

$$7 / (2000 \times 11.7 \times 10^{-6}) ^\circ\text{C} = 299 ^\circ\text{C}$$

2.3 面膨脹 (Superficial expansion)

考慮圖 2-1 所示矩形平板的膨脹。

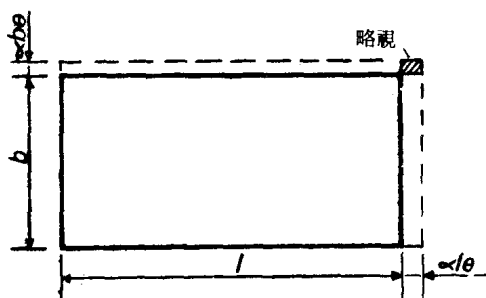


圖 2-1

原來面積 $A = lb$

增加 ΔS 的面積 $= b\alpha l\theta + l\alpha b\theta$

$$= 2\alpha lb\theta$$

$$= 2\alpha A\theta$$

面膨脹係數 (coefficient of superficial expansion, β)
被定義為每單位面積每升高溫度 1 度時的面積增加量。

今面積的增加量 $= \beta A\theta$ ，故得面膨脹係數 $\beta = 2\alpha$

例題 2.2 在溫度 15°C 時，在銅板中間穿一直徑 200 mm 的圓孔。當這被穿孔的銅板加熱至 200°C 時，問此圓孔的面積為若干？已知銅的線膨脹係數為 $16.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

解 穿孔的原來面積

$$= \frac{1}{4} \pi \times 200^2 \text{ mm}^2$$

$$= 31415 \text{ mm}^2$$

加熱後穿孔的增加面積

$$= \beta A \theta = 2 \alpha A \theta$$

$$= 32.2 \times 10^{-6} \times 31415 (200 - 15) \text{ mm}^2$$

$$= 193 \text{ mm}^2$$

最終的穿孔面積

$$= 31415 + 193 \text{ mm}^2$$

$$= 31608 \text{ mm}^2$$

2.4 體膨脹 (Cubical expansion)

考慮圖 2-2 所示矩形固體的膨脹。

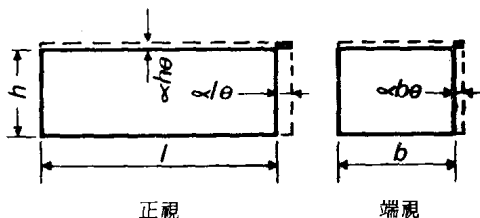


圖 2-2

原來體積 $V = lbh$

增加的體積 $\Delta V = dh\theta lb + \alpha b\theta lh + \alpha l\theta bh$

$$= 3\alpha lbh\theta$$

$$= 3\alpha V\theta$$

此處 γ = 體膨脹係數 (coefficient of cubical expansion)，被定義為每單位體積每升高溫度一度時的體積增加量。

今體積的增加量 $\Delta V = \gamma V \theta$,

故得體膨脹係數 $\gamma = 3\alpha$

例題 2.3 試以溫度 θ_1 時的密度 (ρ_1) 及線膨脹係數 (α) 來表示溫度 θ_2 時的密度 (ρ_2) 算式。

解 因 $\rho = m / V$

此處 m = 體積 V 的質量

故得 $V = m / \rho$

$$\therefore (m / \rho_2) = (m / \rho_1) [1 + 3\alpha (\theta_2 - \theta_1)]$$

$$\therefore \rho_2 = \rho_1 / [1 + 3\alpha (\theta_2 - \theta_1)]$$

例題 2.4 一根長 1 m 的鋼棒，從 15°C 加熱至 100°C 時，膨脹了 1.035 mm。(a) 一塊由上述物質構成的矩形鋼塊其尺寸為 $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 20\text{mm}$ ，當受溫度由 15°C 升高至 515°C 時，試求①表面積的增加；②體積的增加。(b) 一根由上述物質構成的直尺，在 15°C 時刻上正確的刻劃。問這根直尺在 75°C 時，所量得的結果會產生若干百分數誤差？

解 題中的物質 (鋼) 的線膨脹係數為

$$\alpha = 1.035 / [1000 (100 - 15)] / ^\circ\text{C}$$

$$= 12.17 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

(a) 鋼塊的總表面積為

$$A = 2 [100 \times 50 + 100 \times 20 + 50 \times 20] \text{mm}^2$$

$$= 16000 \text{mm}^2$$

表面積的增加量為

$$\Delta S = 2 \times 12.17 \times 10^{-6} \times 16000 (515 - 15) \text{mm}^2$$

$$= 194.5 \text{mm}^2$$

$$\text{鋼塊的總體積} = 100 \times 50 \times 20 \text{mm}^3$$

$$= 100000 \text{mm}^3$$

體積的增加量為

$$\Delta V = 3 \times 12.17 \times 10^{-6} \times 100000 (515 - 15) \text{mm}^3$$

$$= 1825 \text{mm}^3$$

(b) 15°C 時 1 mm 的刻劃，在 75°C 時將成為 $1 +$

$12.17 \times 10^{-6} \times 60 \text{ mm}$ ，亦即在 75°C 時為 $1 + 730 \times 10^{-6} \text{ mm}$ 。

因此，引起的誤差，將為 $0.00073 \times 100\% = 0.073\%$ 。

此直尺在 75°C 時所量得的讀數，將比正確的尺寸小 0.073% 。

2.5 液體的膨脹 (Expansion of liquids)

大部份的液體，它的（體積）膨脹係數不是一定的，隨着溫度的不同而改變。膨脹係數的不同，其最顯著的例子可從觀察水的膨脹而

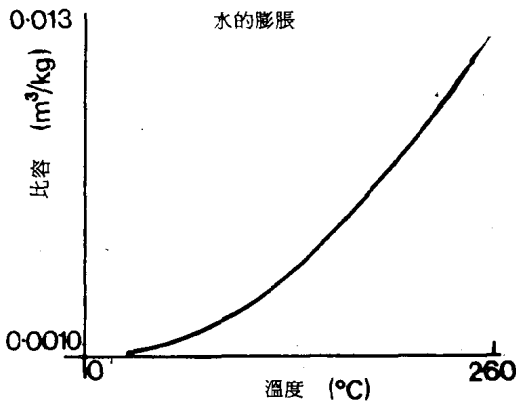


圖 2-3

獲知。如果水從 0°C 開始加熱，它的體積將逐漸減小；直到 4°C 為止。過了 4°C 以後，它開始以另一不同的變率膨脹。在 4°C 至 40°C 之間，它的膨脹係數幾乎是 40°C 至 100°C 之間的膨脹數的一半。超過 100°C ，它的膨脹係數近乎常數，亦即，比容 (specific volume) 對溫度而言，幾乎以相等比率增加。

2.6 外觀膨脹 (Apparent expansion)

當容器中的液體被加熱後，因為容器本身受溫度升高而增大，所以液體的膨脹範圍不能顯著的被察覺到。液體的膨脹係數，基於它的外觀的體積增加，將為 $\gamma_l - \gamma_v$ ，此處註腳 l 代表液體， v 代表容器。

例題 2.5 於 0°C 時，1 升甘油的質量為 1.260 kg 。已知甘油的膨脹係數為 $0.00053 / ^\circ\text{C}$ 。試估計 4.536 升甘油在 100°C 時的質量。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad & 1 \text{ 升甘油在 } 0^\circ\text{C} \text{ 時的質量} = 1.260\text{ kg} \\ & \text{於 } 100^\circ\text{C} \text{ 時，此相同質量的甘油將佔有} \\ & 1(1 + 0.00053 \times 100) \text{ 升} = 1.053 \text{ 升} \\ & \text{在 } 100^\circ\text{C} \text{ 時，甘油的密度，} \\ & = 1.260 / 1.053\text{ kg/l} \\ & = 1.196\text{ kg/l}。 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{故 } 4.536 \text{ 升甘油具有} \\ & 1.196 \times 4.536\text{ kg} = 5.425\text{ kg} \text{ 的質量。} \end{aligned}$$

例題 2.6 一個玻璃球，在 0°C 時有 10 ml 的容量。設在此溫度下充滿水銀，並用一根內徑 0.4 mm 的玻璃管與玻璃球連通。當玻璃球與水銀均被加熱至 50°C 時，問水銀在玻璃管中將升高多少？但水銀的線膨脹係數 = $0.00018 / ^\circ\text{C}$ ，玻璃的線膨脹係數 = $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad & \text{水銀的膨脹量} \\ & = 0.00018 \times 10 \times 50\text{ ml} \\ & = 0.09\text{ ml} \\ & \text{玻璃球增加的容積} \\ & = 27 \times 10^{-6} \times 10 \times 50 \\ & = 0.0135\text{ ml} \\ & \text{進入管子之水銀體積} \end{aligned}$$

$$= 0.09 - 0.0135 \text{ ml}$$

$$= 0.0765 \text{ ml}$$

$$= 76.5 \text{ mm}^3$$

管中水銀昇高的高度

$$= 76.5 / (0.7854 \times 0.4^2)$$

$$= 608 \text{ mm}$$

另一解法。用水銀的外觀膨脹係數，

$$(0.00018 - 0.000027) / ^\circ\text{C}$$

$$= 0.000153 / ^\circ\text{C}$$

管中水銀上昇的高度爲

$$0.000153 \times 10 \times 50 / [0.7854 \times (0.04)^2]$$

$$= 608 \text{ mm}$$

問題 1.1 如果上題中的管子亦如玻璃球同被加熱，問水銀將上昇多少高度？

答 水銀上昇的高度

$$= 608 \text{ mm} / [1 + 18 \times 10^{-6} \times 50]$$

$$= 608 \text{ mm} / 1.0009 \doteq 607 \text{ mm}$$

(管子同被加熱，對水銀高度的改變，可以忽略)

例題 2.1 一個密封的玻璃球裝些水銀。在 0°C 時，玻璃球內有 10 ml 的空間充滿空氣，當溫度升高至 40°C 時，空氣的體積成爲 9.8 ml 。試求在 0°C 時，水銀所佔的體積。設玻璃的線膨脹係數爲 $7.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，水銀的體膨脹係數爲 $1.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。

解 於 0°C 時，水銀的體積 = $x \text{ ml}$

在 0°C 時，玻璃的容積 = $(x + 10) \text{ ml}$

在 40°C 時，水銀的體積成爲

$$x(1 + 1.8 \times 10^{-4} \times 40) \text{ ml}$$

同時，球的容積爲

$$(x + 10)(1 + 3.72 \times 10^{-6} \times 40) \text{ ml}$$

故得成立

$$(x + 10)(1 + 0.000864)$$

$$\begin{aligned}
 &= x(1 + 0.0072) + 9.8 \\
 \text{或 } &1.000864x + 10.00864 \\
 &= 1.0072x + 9.8 \\
 \therefore &x(1.0072 - 1.00864) \\
 &= 10.000864 - 9.8 \\
 \therefore &x = 0.20864 / 0.006336 \\
 &= 32.9 \text{ ml}
 \end{aligned}$$

在 0°C 時，水銀的體積 = 32.9 ml

例題 2.8 一鋼製毛細管，在 0°C 時充滿水銀。將其加熱至 300°C 然後又冷卻至 0°C 。問最後存於管中的水銀佔管長的若干倍。取鋼的線膨脹係數為 $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；水銀的（體積）膨脹係數為 $1.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。

解 令 V_1 = 在 0°C 時，管中水銀的體積，亦即管子的容積。

在 300°C 時，管的容積為：

$$V_1(1 + 3 \times 12 \times 10^{-6} \times 300) = 1.0108V_1$$

令 V_2 代表後來在 0°C 時管中水銀的體積，得成立

$$\begin{aligned}
 1.0108V_1 &= V_2[1 + 1.8 \times 10^{-4} \times 300] \\
 &= 1.054V_2
 \end{aligned}$$

$$\therefore V_2 = 1.0108V_1 / 1.054 = 0.96V_1$$

所以，最後管中的水銀佔管長的 0.96 倍。

2.7 氣體的膨脹 (Expansion of gases)

氣體最顯著的特性是，它可以充滿任何包圍它的容器。它的壓力與溫度，能配合着存在空間的大小而自動調整。所以，當考慮由於溫度的升高所引起的氣體膨脹，我們必須使氣體的膨脹過程在等壓下發生。

我們可以發現，液體的膨脹，較固體的膨脹為大。在等壓下，氣體的膨脹更大。所有氣體均具相同的膨脹係數。當在 0°C 時，為

$1/273/^{\circ}\text{C}$ 。

爲了完全了解氣體的行爲，物質的基本組成是有研究的必要。

第三章 物質的組成

3.1 概 說

物質並非一連續的整體，而是由許多分離而微小的粒子所組成。這些粒子稱為分子（molecules）。這一假說，稱為物質的分子理論（molecular theory of matter）。此一假說的根據，可由如下的觀測而得知：

- (a) 一氣體可擴散到另一氣體中。
- (b) 墨水在水中擴散。
- (c) 氣體的體積因受壓縮而減小。

（如果在粒子間沒有空間存在，氣體將不可能有此現象發生）。

雖然，分子表現了它的組成物質的所有特性，可是它本身仍是由更微小的部份所組成，稱為原子（atoms）。當然，一個分子可能由一個原子所構成；但是大部份的分子是由兩個或更多相同或相異的原子所構成。水蒸汽的分子，是由兩個相同的氫原子與一個氧原子所構成。一個氫分子是由兩個相同氫原子所構成。組成分子的原子，由強力束縛在一起。

在某些情況，當不同物質的分子互相接觸時，它們相互交換原子而形成新的物質。這一重新排列的過程）稱為化學反應（chemical reaction），它可能同時產生熱（例如在燃燒的過程）。

一個原子含有一微小但是濃密的內部，稱為核子（nucleus）。幾乎原子的全部質量都集中在該處。原子並含有許多圍繞核子運行