

基本熱力學

張萬賜編著

臺灣中華書局印行

基本熱力學

張萬賜編著

臺灣中華書局印行

中華民國六十四年十一月四版

基本熱力學(全一冊)

平裝一冊基本定價貳元柒角正
(郵運滙費另加)

編著者

張萬賜

發行人

臺灣中華書局股份有限公司代表
熊鈺生

本書局登

臺北市重慶南路一段九十四號
行政院新聞局局版

記證字號

臺業字第捌叁伍號

印刷者

臺灣中華書局印刷廠

發行處

臺北市重慶南路一段九十四號

郵政劃撥帳戶：三九四二號

Chung Hwa Book Company, Ltd.
94, Chungking South Road, Section 1,
Taipei, Taiwan, Republic of China



符號及其代表意義

A = 面積，平方呎 (Ft^2)

a = 加速度，呎每秒每秒 (Ft / sec^2)

b = 一係數。

c = 一係數。

C_p = 定壓比熱， Btu 每磅 (Btu / lb)。

C_v = 定容比熱， Btu 每磅 (Btu / lb)。

C_n = 多次方過程 ($pv^n = C$ 過程) 比熱， Btu 每磅 (Btu / lb)。

D = 密度，磅每立方呎 (lb / ft^3)。

d = 直徑，呎或吋。

E_p = 位能，呎-磅 ($ft-lb$)。

E_k = 動能，呎-磅 ($ft-lb$)。

e_t = 熱效率，%。

e = 效率，%。

F = 力量，磅 (lb)。

g = 重力加速度，32.2 呎每秒每秒 (ft / sec^2)。

H = 熱焓， Btu 。

HR = 熱耗率， Btu / KWH 。

h = 熱焓， Btu 每磅 (Btu / lb)。

J = 焦耳常數，亦即熱工當量 = 778 呎磅每英制熱單位 ($ft-lb / Btu$)。

$K = C_p / C_v$ ，即比熱比。

ln = 自然對數。

M = 分子量。

m = 質量，磅。

n = 多次方過程之常數。

psf = 磅每平方呎壓力，(lb / ft^2)

$psfa$ = 磅每平方呎絕對壓力。

$psfg$ = 磅每平方呎表壓力。

psi = 磅每平方吋，(lb/in^2)。

$psia$ = 磅每平方吋絕對壓力。

$psig$ = 磅每平方吋表壓力。

P = 壓力， $psi, psf, psia, psfa, psig, psfg$ 。

Q = 熱量， Btu 。

Q_{in} = 輸入之熱量， Btu 。

Q_{out} = 排出之熱量， Btu 。

Q_c = 輸入之熱量， Btu 。

Q_r = 排出之熱量， Btu 。

Q_A = 可用能量， Btu 。

R = 氣體常數， $ft-lb/lb-^{\circ}R$ 。

R_u = 通用氣體常數 = 1,545。

$\overline{RH}$ = 相對濕度，%。

r = 壓縮比。

s = 行程距離。呎 (ft)

S = 焓， $Btu/^{\circ}R$ 。

$\overline{SH}$ = 濕度比，每磅乾燥空氣中含水蒸汽量磅。

SR = 耗汽率，磅蒸汽每瓩小時 (lb/KWH)。

T = 絕對溫度， $^{\circ}R$ 。

T_c = 循環之冷源絕對溫度， $^{\circ}R$ 。

T_h = 循環之熱源絕對溫度， $^{\circ}R$ 。

t = 溫度，華氏或攝氏 $^{\circ}F$ ($^{\circ}C$)。

U = 總內能， Btu 。

u = 內能， Btu 每磅 (Btu/lb)。

V = 總體積，立方呎 (ft^3)。

v = 比容，立方呎磅 (ft^3/lb)。

v_m = 分子體積，立方呎每模爾 ($ft^3/mole$)。

V = 速度，呎每秒 (ft/sec) 。

W = 機械功，呎-磅 ($ft-lb$) 。

W_f = 流動功，呎-磅 ($ft-lb$) 。

w = 重量，磅 (lb) 。

x = 蒸汽乾度，%。

y = 蒸汽中含水份，%。

基本熱力學目錄

第一章	基本概念與定義	1
第二章	熱力學第一定律	13
第三章	理想氣體	18
第四章	理想氣體之過程	32
第五章	熱力學第二定律及卡諾循環	47
第六章	理想氣體熵的變化	61
第七章	不可逆過程	75
第八章	理想內燃機循環	87
第九章	空氣壓縮循環及空氣壓縮機	104
第十章	定流能量方程式	119
第十一章	氣渦輪機循環	131
第十二章	混合氣體的性質	145
第十三章	能源與燃燒	157
第十四章	蒸汽與水之性質	174
第十五章	蒸汽過程	189
第十六章	蒸汽循環	209
第十七章	汽輪機概論	237
第十八章	冷凍循環	262
第十九章	氣體與水汽之混合氣體	275

第一章 基本概念與定義

1.1 熱力學定義

熱力學是物理科學之一部門，研究能的各型態變化，研究由一型態之能變為另一型態之能之很多定律。例如研究熱能變成功能之過程，電能變成熱能之過程及任何化學反應等。

熱力學之由來可能是很早以前人們想研究熱機的效率而來。熱機是一種將熱能轉變為機械能的機器，為人類提供動力。如汽車發動機 (Automobile Engine)，飛機噴射引擎 (Jet Engine)，火力電廠之汽輪機 (Steam Turbine) 等。

1.2 何謂物質 (Matter)

為完全明瞭能之重要性，吾人須先對物質有一觀念，物質有質量且佔有空間，不管其性質及構造如何，物質都有某些永久性及不變性。

物理學上，物質之定義為物質乃由很多無數之分子所構成。

物質可分為三大類：固態，液態和氣態。

固態物質有一定形狀且具有相當之剛性，需要甚大的力量才能使其變形。

液態物質分子間結構無一定形狀，它會到處遊動，但分子之間仍有足夠大的力量將分子限於一定容體內，其容器是什麼形狀它就是什麼形狀。

物質沒有一定形狀亦無一定之體積，其分子具有較大之運動自由到處飛散者，謂之氣態物質。氣體可以很容易地被壓縮，液體則僅能微被壓縮（近於不可以壓縮）。

1.3 能 (Energy)

吾人很難給能下一很明確之定義，但日常生活裡所遇到的動作，所接觸到的冷熱無不與能有很大的關係。通常一般科學家認能為可做機械工作的一種能力。

一顆放在懸崖頂上之石頭並不會做功，而僅具有位能，然而一旦被推下則開始向地面自由落下，即具有與起始靜止時不同形態之能。

能可分為兩大類：儲能與變能。

1.4 儲能 (Stored Energy)

物體由於位置之高低所具有的能就是位能 (Potential Energy)。如成熟的蘋果在高樹枝上則具有位能，箭未射出去時拉彎之強弩亦具有一種儲位能 (Stored Potential Energy)。

運動中的物質所具有的能稱為動能 (Kinetic Energy)。每一個走動中的人都有動能，一顆高速飛出槍口的子彈具有相當大的動能，所以它才能貫穿鋼板。

如圖 1-1 一個物體 M ，重 w 磅，由地面被吊到距地面 S 呎高處，其所具有之位能為； $E_p = wS$ 。假使將繩子割斷使其自由落下，則愈近地面其位能愈小，接觸地面時位能為零。而動能在高位置未落下時為零，開始動時則已有動能，愈接近地面時速度愈大動能就愈大，這就是說明位能可變為動能。

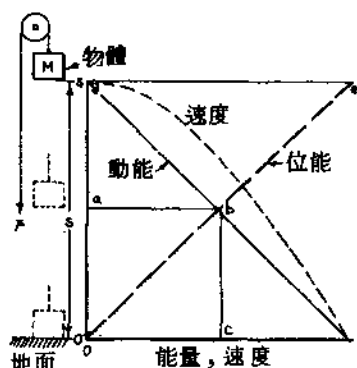


圖 1-1

$$E_K = \frac{wV^2}{2g} Ft - Lb$$

式中 E_K 為動能 $Ft - Lb$

V 為速度 Ft/sec

g 為重力加速度 Ft/sec^2

w 為物體之重量 Lb

位能差 $\Delta E_p = w \Delta S = w (S_2 - S_1)$ 呎-磅

$$\text{動能差 } \Delta E_K = E_{K2} - E_{K1} = \frac{wV_2^2}{2g} - \frac{wV_1^2}{2g}$$

$$= \frac{w}{2g} (V_2^2 - V_1^2) \text{ 呎-磅}$$

例 1-1；假設一顆剛離開槍口的子彈速度為 1200 呎/秒，子彈重量為 0.125 磅，試求其動能？

$$[\text{解}] \quad E_K = 0.125 \times \frac{1200^2}{64.34} = 2797 \text{ 呎-磅}$$

1.5 內能 (Internal Energy)

前例物體自由落下將撞擊地面靜止前位能變為零，動能達到最大，撞擊靜止後速度降至零，動能必定亦降至零。

$$V = 0 \quad E_K = 0$$

消失的動能到何處去？假使用很精密儀器測量物體底面及被撞擊之地面溫度，吾人會稍感覺得比未打到之前為高。撞擊產生熱，此熱謂之內能。動能已變為內能。

內能為一種儲蓄在物質內部的能。這種能使物質內的分子作繼續不斷的運動，這種能量的大小與物質的溫度發生一定的關係，而與其他的性質無關。內能難以直接求得絕對數值，而僅能求物質內能之變化。

u Btu/lb 單位內能

$U = w u$ Btu w 磅物質之內能

內能變化 $\Delta u = u_2 - u_1$ 或 $\Delta U = U_2 - U_1$

1.6 溫度 (Temperature)

碰觸物體而有冷與熱的感覺是吾人日常生活的經驗，為明確區別冷與熱需要有一定標準尺度。

如一根鐵絲經加熱後，其長度會增長，所以決定物質之熱能 (Thermal state) 可以由物質在一定壓力下體積之脹縮來決定。通常所用之溫度計如酒精經染成紅色注入真空狀態玻璃毛細孔，又如水銀溫度計就是利用此原理。

一件熱物體與冷物體接觸則熱物體逐漸變得較冷，而冷物體顯得變暖，到最後兩物體熱態相等而感覺兩物體冷暖相同，此謂之熱平衡。由此經驗得結論；

當 A 物體與 B 物體熱平衡，而 A 物體又與 C 物體在熱平衡狀態，則 B 物體亦與 C 物體處於熱平衡狀態，就是說 B，C 兩物體相接觸不會有熱傳導的現象。

上述任何兩物體都有相同的特性，即是與第三物體成熱平衡的特性，此特性謂之溫度。

物體之溫度可認為由此物體傳熱到另物體之能力之熱能，溫度為分子動能之衡量，簡言之，溫度就是物質冷熱的程度。

在工程上，有兩種常用之溫度單位如圖 1-2；一為華氏 (Fahrenheit)，另一為攝氏 (Centigrade)。華氏之冰點 (Ice Point) 為 32 度，沸點 (Boiling Point) 為 212 度，在攝氏則為零度和 100 度。

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{F}$$

變攝氏度為華氏度；

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32$$

變華氏度為攝氏度；

$$t_C = (t_F - 32) \frac{5}{9}$$

例 1-2；將攝氏 20 度 (20°C)

變為華氏

(解) $t_F = \frac{9}{5} \times 20 + 32 = 68^\circ\text{F}$

華氏 68 度

例 1-3；將華氏 140 度 (140°F) 變為攝氏

(解) $t_C = (140 - 32) \frac{5}{9} = 60^\circ\text{C}$ 。攝氏 60 度

然在熱力學之計算上，常用另兩種單位謂絕對溫度，如圖 1-2，以絕對零度為起點而計算。

K (Kelvin) 用於攝氏單位之絕對溫度單位；

$$T_K = t_C + 273.16$$

R (Rankine) 用於華氏單位之絕對溫度單位；

$$T_R = t_F + 459.69$$

1.7 壓力 (Pressure)

每單位面積上所受的力量謂之壓力。基本單位為磅 / 平方吋 (*Psi*) 或公斤 / 平方公分 (*Kg/cm²*)。

$$1 \text{ Kg/cm}^2 = 14.2 \text{ Psi}$$

壓力又有絕對壓力及表壓力之分，通常壓力表所指示的是表壓力，絕對壓力為大氣壓力與表壓力之和。

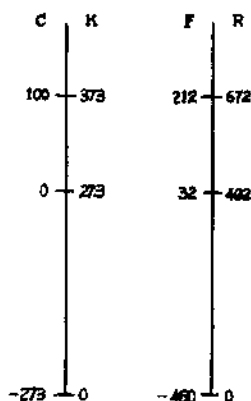


圖 1-2

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge}$$

壓力低於大氣壓力者謂之真空 (Vacuum)。由圖 1-3，可以看出絕對壓力與表壓力，真空的關係。

絕對壓力 = 大氣壓力 - 真空

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vac}$$

絕對壓力單位為； $PSIA$ (英制)

ATA (公制)

大氣壓力可用大氣壓力表來測量，普通都用充滿水銀之玻璃管倒懸過來，如圖 1-4。

一標準大氣壓為 76 公分水銀柱 (CM Hg)。

$$\begin{aligned} 76 \text{ Cm Hg} &= 29.92 \text{ In Hg} \\ &= 14.7 \text{ Psia} = 1 \text{ ATM} \end{aligned}$$

$$1 \text{ Cm Hg} = 0.193 \text{ Psi}$$

$$1 \text{ In Hg} = 0.491 \text{ Psi}$$

例 1-4；一壓力表讀數為 15 磅 / 平方吋 (Psi) 當時之大氣壓為 14.7 Psia，試求其絕對壓力？

〔解〕 $P_{abs} = 15 + 14.7 = 29.7 \text{ Psia}$

例 1-5；一壓力表指示為 20 Psig，大氣壓表指示為 74 Cm Hg，試求其絕對壓力？

〔解〕 74 Cm Hg 大氣壓力 $P_{atm} = 74 \times 0.193 = 14.3 \text{ Psia}$

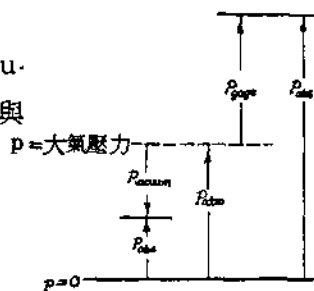


圖 1-3

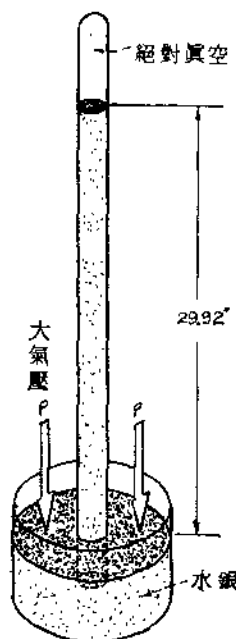


圖 1-4

$$P_{abs} = 20 + 14.3 = 34.3 \text{ Psia}$$

例 1-6 ; 真空表指示 10 in Hg , 而當時大氣壓為 29.4 in Hg , 求其絕對壓力 ?

$$\begin{aligned} \text{〔解〕 } P_{abs} &= 29.4 - 10 = 19.4 \text{ in Hg}_{abs} \text{ 或 } 0.491 \times 19.4 \\ &= 9.54 \text{ Psia} \end{aligned}$$

1.8 比容與密度 (Specific Volume and Density)

密度為單位體積內所含有的重量。

$$\text{密度 } D = \frac{\text{重量 } (w)}{\text{體積 } (V)} \quad (lb/ft^3) \text{ 磅 / 立方呎}$$

比容為密度之倒數，即每單位重量所佔之體積，比容視物質而定。熱力學中在討論到氣體時通常使用比容，而不用密度，因為這樣比較方便。

$$\text{比容 } (v) = \frac{\text{體積 } (V)}{\text{重量 } (w)} \text{ 立方呎 / 磅 } (ft^3/lb)$$

1.9 功 (Work)

一個力量加到一件物體如果該物體並未移動，我們說這個力量並沒有做功，反之，如果該物體因這個力量而移動，我們說這個力量做了功。

$$\text{功} = \text{力} \times \text{位移}$$

$$W = F \cdot S$$

式中 W = 功 $ft-lb$ (呎磅) 或 $kg-m$

F = 力 lb 或 kg (磅或公斤)

S = 力的位移 ft 或 m (呎或公尺)

例 1-7 ; 將 200 磅之物體自地面提高 10 呎，試求其所需要的功？

〔解〕 $W = 200 \times 10 = 2,000$ 呎磅

假設一往復式唧筒在 1 與 2 之間作往復運動，其壓力與體積變化之關係曲線如圖 1-5 所示。唧筒面積為 A 平方呎 (ft^2)，假定唧筒正由 a 移向 b ，距離為 dx ，當時唧筒所做之功為 dW 。

$$dW = P A dx$$

$A dx$ 為唧筒自 a 移至 b 所橫過之微分體積 dV

$$\therefore dW = P dV$$

我們將圖 1-5 之壓力 (P) 與容積 (V) 之關係曲線橫座標上之 V 分成很多細微等分，乘以各等分所量出之壓力 P 則得各微小等分之面積。然後將全部微小面積加起來就等於曲線下所有之面積，此面積即為氣體所做的功 (Work)。微分方程為

$$W = \int_1^2 P dV$$

例 1-8；一氣體自 100 Psia 壓力， 0.2 ft^3 體積。依 $PV = c$ 定律曲線膨脹到最後體積變為 0.6 ft^3 ，(假設沒有摩擦損失，即可逆過程)，試求該氣體膨脹時所做之功？

$$\text{〔解〕 } W = \int_1^2 P dV = c \int_1^2 \frac{dV}{V} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{故 } W = 100 \times 144 \times 0.2 \times \ln \frac{0.6}{0.2} = 3162 \text{ ft} \cdot \text{lb}$$

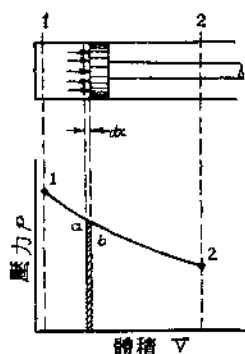


圖 1-5

1.10 熱能 (Heat)

前面會提到兩個溫度不相同的物體放在一起，一個漸漸變冷，另

一漸漸變熱，最後熱平衡而溫度相等。當中必有能之轉換，由熱的傳到冷的，此謂之熱能。

欲升高某物質的溫度所需之熱量與物質之重量成正比。在大氣壓下加熱一磅水使其升高華氏一度，所需之熱量為 $1 B.T.U.$ 。在大氣壓下加熱一克的水使其升高攝氏一度，所需之熱量為 1 Cal (卡) 。

熱的傳遞方式有三種；(一)傳導 (Conduction)，(二)對流 (Convection)，(三)輻射 (Radiation)。

(一)傳導 熱自火爐內耐火磚向外流出爐外壁就是一個例，或手拿一支鐵棒之一端，而另一端予以加熱後，緩慢的手會感覺得熱起來，這就是熱經鐵棒傳導而來。即熱能藉物質本身傳遞而來。

(二)對流 由於物質自高溫的地方流動到低溫的地方。

(三)輻射 中間無任何物質或流動物質。熱依輻射而傳遞。

1.11 比熱 (Specific Heat)

比熱為每單位質量的物質溫度昇高一度所需的熱能。它是將熱能與溫度聯繫起來的一種特性。比熱也隨物質狀態之不同而變化，且對於氣體來講通常又有定壓比熱 (Constant Pressure specific heat C_p)，及定容比熱 (Constant volume specific heat C_v) 兩種之分。前者測定於定壓變化過程中，而後者測定於定容變化過程中。在定容變化過程中，熱能完全加入到氣體之內，增加其溫度 (當然同時也增加其壓力，容後述之)。但在定壓過程中，熱能除了增高其溫度之外，還要使氣體膨脹做功，因此需要較多的熱能來昇高到同等量的溫升。

一理想氣體之 C_p 與 C_v 的關係如下：

$$C_p/C_v = k$$

$$C_p - C_v = R/J$$

$$J = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb} / \text{B.T.U.}$$

k = 常數，視氣體而定，通稱比熱比。

R = 氣體常數。

$$= \frac{1545}{\text{分子量}} \quad \text{Ft-lb/lb-}^{\circ}\text{R}$$

比熱單位為 $B.T.U./\text{lb-}^{\circ}\text{F}$

下表是幾種常見氣體之比熱及其常數

	情 況	C_p	C_v	k	R	$v^{ft^3/lb}$
空 氣	室內情況	0.240	0.171	1.4	53.34	13.2
CO ₂	室內情況	0.202	0.156	1.3	34.88	8.7
蒸 汽	1 Psia 300 °F	0.446	0.336	1.33	85.58	452.3

1.12 熱焓 (Enthalpy)

物質所含的總熱能謂之熱焓，與該物質的溫度，壓力，比容有關，通常以下列公式表示：

$$H = U + \frac{PV}{J} \quad B.T.U$$

式中 H = 總熱焓 $B.T.U$

U = 總內能 $B.T.U$

P = 壓力 $\text{lb/ft}^2 \text{ abs. (psfa)}$

V = 容積 ft^3

$$h = u + \frac{Pv}{J}$$

式中 h = 單位熱焓 $B.T.U./\text{lb}$

u = 單位內能 $B.T.U./\text{lb}$

P = 壓力 $\text{lb/ft}^2 \text{ abs. (psfa)}$