

大學用書選譯

學 力 熱

李 毓 漢 合 譯
張 岩

教 育 部 出 版
正 中 書 局 印 行



0414.1
4

2

✓

大學用書選譯

熱

力

學

教育部出版
正中書局印

李 張
George A. Hawkins 著
毓 漢
岩 合
譯

✓

版權所有



翻印必究

中華民國六十四年三月臺七版

大學用熱力學
書選譯

THERMODYNAMICS

全一冊 基本定價 精裝三元六角
平裝二元五角

(外埠酌加運費滙費)

著者	George A, Hawkings
譯者	李毓漢・張岩
出版者	敎育部
發行人	黎元譽
發行印刷	正中書局

(臺灣臺北市泰安街一巷三號)

海外總經銷 集成圖書公司
(香港九龍油麻地北海街七號)

海風書店
(日本東京都千代田區神田神保町一丁目五六番地)

東海書店
(日本京都市左京區田中門前町九八番地)

新聞局出版事業登記證 局版臺業字第〇一九九號(4610)興
(1000)

符 號

本教科書採用美國標準協會與化學工程學會所發佈之 ASA Z10.4—1943 與 ASA Z10.12—1946 公報爲準則，以求符號之劃一。常有一符號代表數種不同之變值，本書中此種符號於同一方程式出現時，另加註號俾能區別。參閱下列符號表希望避免混淆。

拉丁字母符號

- a 直線加速度
- a 郝爾郝斯功函數 $\mu-T_s$
- a 范德瓦氏常數
- A 亞美加單位
- A 面積
- A 最大功函數， $U-TS$
- b 范德瓦氏常數
- B 常數
- B 絕熱體積係數
- c_n 一般比熱
- c_v 等容比熱
- c_p 等壓比熱
- C 分量
- C 壓縮因數
- C 常數
- C_n 一般分子比熱
- C_v 等容分子比熱
- C_p 等壓分子比熱
- D 直徑
- E 一般能量
- F 自由度

- F 力
 g 重力加速度
 g 比自由能函數 $h-T_s$
 G 自由能函數 $H-T_R$ ，又名 函數
 h 熱導係數
 h 比熱焓， $u + pv/J$
 I 慣性矩
 J 熱功當量
 k 比熱比， $k = c_p/c_v$
 k 熱導
 K 擴散係數
 L 長度
 m 質量
 M 分子量
 n 複膨脹指數
 N 一般數值
 N 分子數
 N 磅分子量數
 p 壓力，絕對，表或部份
 P 相數
 q 傳熱率
 Q 熱量
 r 壓縮比
 R 特殊氣體常數
 R_u 萬能氣體常數
 s 比熵
 S 熵
 t 溫度，華氏 F ，或攝氏 C
 T 絕對溫度 R ，或 K
 u 比內能

U	內能
U	熱傳遞之總係數
v	比容基於單位重量
v_m	比容基於單位質量
v_N	比容基於分子量
V	容積
V	速度
V_a	聲速
w	流量 (重量)
W	幅射線束密度
W	重量, 作用於質量之重力
W	功 (功與重量同在一方程式中, 註號 K 表示功, W_k)
$W_{z/a}$	絕對或比濕度
x	(磅) 分子量分數值
x	汽體乾度
X	壓縮段數

希臘字母符號

α	可壓縮係數, $-(1/v_0)(\partial v / \partial p)_T$
α	幅射吸收率
β	工況係數
β	容積係數或體膨脹係數, $(1/v_0)(\partial v / \partial T)_p$
γ	比重, 單位容積重量
Δ	定量差符號, 例如, $\Delta = p =$ 壓力差
θ	放射率
η	效率
θ	壓力比
μ	效力黏度與絕對黏度
ρ	密度, 單位容積質量
ρ	幅射反射率

δ 司包常數

τ 輻射

ϕ 相對濕度

ω 角速度

特 殊 符 號

N_{Ma} 馬克值或係數

N_{Nu} 那賽值或係數

N_{Pr} 卜蘭值或係數

N_{Re} 雷諾值

目 錄

符 號

1. 基本觀念.....	1
2. 熱力學第一定律.....	23
3. 固體、液體與氣體.....	38
4. 理想或完全氣體.....	52
5. 實際氣體狀況方程式.....	69
6. 氣體比熱.....	89
7. 運用表值計算汽體性質.....	104
8. 不流動理想氣體之無摩擦或可逆變化.....	115
9. 熱力學第二定律與加諾循環.....	135
10. 可用能、無用能與熵.....	153
11. 理想氣體與汽體諸可逆過程中熵之變化.....	172
12. 理想氣體與汽體之混合物.....	182
13. 燃燒.....	224
14. 流經噴嘴及噴口之氣與汽體.....	245
15. 內燃機諸理想循環.....	289
16. 空氣壓縮機與空氣機.....	306
17. 氣渦輪及噴氣推進.....	328
18. 汽體循環.....	347
19. 機械冷凍.....	371
20. 一般熱力方程式.....	388
21. 熱傳遞之簡介.....	450

第一章 基本觀念

1.1 熱力學

熱力學(Thermodynamics)者係研究能(Energy)之觀念，各種能相互轉變之定律，及應用不同介質影響變換的一種科學。

回溯熱力學源於熱機效率之考核，然今日則不僅限於工程方面，譬如，運用熱力學定律，化學家和物理學家，獲得分析研究物質之穩定性，分餾，及結晶諸問題之能力。

1.2 工程熱力學

工程熱力學者係研討熱(heat)與功(work)及兩者間相互變換為主的一部科學。由熱變功不僅被工程師所公認，即一般人現在亦認為是事實。例如汽車引擎，係由化學能(Chemical energy)變成熱能，再由部份熱能變功之機械。該種機械為燃料與空氣之混合物於高溫時燃燒所生成之能，一部份變功，其剩餘者在低溫傳入冷卻水中及隨廢氣排出。憑藉熱力學中定律，可預計其變功之能量，故了解熱變功之基本關係，對工程讀者極為重要，俾使讀者研究設計最有效實用機械的方法。

1.3 物質

欲了解能之義意，必先考慮物質之觀念，物質具有質量且佔有空間，因物質佔有空間即足以考慮其普通性質，故無須再深究其本性，而本節討論則首重其具有永恒不變之事實，並不論其本性及其結構如何。

物質可分為固體，液體，及氣體。由研究之進展已知物質並非連續體，係大量之質點稱謂分子所組成，且分子間有極小之距離。氣體的質點稱曰分子，以不同之速率在空間運動，並不斷相互碰撞。

固體物質需巨大外力始能變更形狀，所以固具有相當剛性(rigidity)。

液體物質無一定形狀，而分子間具有足夠力量，維持一定體積，故液體形狀隨容器決定。

氣體物質，即無一定形狀，亦無一定體積，其分子活動遠較液體，固體為自由。液體具壓縮性，而氣體較易於壓縮。

1.4 能

物質運動時，其特性較靜止時有所不同，如停留在懸崖上的石塊不能做功，一旦被推落懸崖，便產生運動現象。又如蒸汽流經渦輪(turbine)時，所做的功為一種效應。能的定義即為產生效應的能力，所產生的效應或為功，或呈他種狀態，就本節所論可分為兩大類；儲能和轉變能。

1.5 儲能

儲能為物質不論其動與不動均含於本身內者。

物質因其位置所具之能列為位能(potential energy)，例如打樁機頭自某一基準面上昇，其新位置對基準面而言具有能，若機頭落回原位置，可將樁打入地內，是故，能可產生效應。又如張開之弓，儲有射箭之能，亦可列入儲位能。

物質因其運動所儲具的能謂之動能(Kinetic energy)，每一運動物體，均具動能，例如以高速離開槍口的子彈，有大量的動能足可貫穿鋼板。

轉動中的飛輪所具的能稱曰轉動能(rotational energy)，轉動能有時被認為動能者，而本書則分別考慮。

1.6 內能(分子系統中之儲能)

元素，原子，與分子

通常組成一切物質的基本個體謂之元素，計九十餘種。元素為普通方法不能分解之物質，例如鐵，炭，硫，氧和氫，因不能分解而列為元素。但食鹽可被分為鈉與氯，故非元素也。元素乃構成普通物質之基本單位，係由不可見之更小質點所謂原子構成。因之元素之性質以原子之大小，重量，形狀，與排列為依據。

在某些方面不同元素的原子有相似的地方，例如所有原子可能具有一般相似的形狀與結構，其結構為一載正電之核，周圍環繞載負電太陽。

的質點，即電子。一般而言，電子環繞原子核之情形，有如行星之繞

由原子羣形成之分子爲另一重要質點型。然而，分子有時爲單原子，如單原子氣體氫，氦等。

原子能與分子能

研討熱力學時，工程師需明悉內能之函義。內能即分子系統如氣體，液體，與固體之儲能。

分子世界中含有大量之極小實體，稱之爲分子。在任何角落中運動，最初呈極端混亂情形。例如氣體中有大量分子到處以槍彈速率彼此碰撞。又空氣中億萬數量之分子，不斷碰擊吾人身體，所生之效應被稱爲大氣壓力(atmospheric pressure)。起初認爲無定律可說明原子之運行，因每一事之發生均爲機遇問題。自從統計定律成立後，可預測此大量分子之行動。此等定律無法研究單一分子之運動，恰似人壽保險公司統計的平均值，不能決定某一生命之長短。熱力學定律皆可證明爲或然率定律。

因分子具質量與運動，則分子與原子運動所具之能量，應予以考慮。一單獨氣體分子，以已知速度做直線運動之動能，等於質量與速度平方乘積之半。此能量與汽車以已知速度運動相似。本節中動能一詞，用於分子系統時，即分子做直線運動形成之儲能。

分子動能與溫度成正比，溫度越高，動能越大。溫度降低，分子動能減少，最後迄於所謂絕對零度時，分子運動停止，其動能變爲零。

分子亦可轉動一如直線方向之運動，故分子亦具轉動能。此轉動能係以分子慣性矩與角速度爲依據，等於慣性矩與角速度平方乘積之半。分子轉動能與飛輪轉動所儲之能相似。

分子具移動與轉動能外，組成分子之原子尙具振動能。因原子在平衡狀態中振動，而具振動能。原子振動能之討論甚爲複雜，已超出本書之範圍，學者需讀完高等物理學與物理化學後，始得明瞭振動能在原子中儲存的事實。

已知系統的分子活動範圍，受分子間作用力所限制，分子越密集，彼此間作用力越大，因之其活動的自由亦越小。指出分子在氣體與液體中，有如人在鄉村與都市繁華區之活動範圍。分子在氣體中佔

廣擴之空間，可自由活動而無甚干擾。在液體中空間較狹小，故其活動受鄰近分子影響頗巨。在固體中更形擁擠，單獨分子的自由更少。

分子在碰撞鄰近分子前，所行之平均距離，即為平均自由行程 (mean free path)。氣體之平均自由行程，較液體或固體者為大。平均自由行程越大，分子間作用力之影響越小。氣體所佔容積，遠較其單獨分子容積之總和為大。壓縮後全部容積減小，但分子間仍具相當距離，由是可了解氣體之壓縮性。

熱力學中，限制分子運動之力，所形成之位能，係內儲位能。分子系統之儲位能，可比如宇宙中，約束行星在其現有位置之力，所產生之能。

氣體分子所具之能量

氣體可視為一團彼此相距很遠之分子。分子在亂動中彼此相撞，反跳，並改變運行方向。分子以不同速度運行，其平均值約為每秒鐘四分之一哩。

某種情形下，氣體分子除直線運動外，尚有轉動及其原子振動現象。故氣體中之儲內能，可等於移動，轉動，振動之動能，及分子間位能之總和。

液體分子所具之能

如前所論，液體分子之活動空間比氣體分子小。故單獨分子活動，受分子間作用力之影響較顯著。液體中之自由行程遠較氣體中為小。當液體汽化時，部份分子達至液面，因約束力而不逸出。僅具最大速度之分子，可勝過液體分子間作用力，而脫離液面。單位時間自液面逸出之分子數，依數種因素而定，其一為溫度。液面上活動之分子，尚可部份返回液體。當逸出之分子與返回之分子數相等時，即為平衡狀況。

儲內能既為分子所具之儲能。通常在液體中，具有移動，轉動之動能，及約束力所生之位能。

固體分子所具之能量

固體或結晶體中，其晶體結構單元，普通多為原子。雖某種晶體中，分子保持原來個體，但為避免混淆起見，討論固體仍沿用分子一

詞，氣體分子之自由較固體分子爲大，固體大部份係整齊排列之晶體，有如牆中均勻分佈之磚。固體分子中之原子常做格(lattice)狀排列，其中約束力甚巨，致使分子無移動與轉動，僅餘原子在平衡位置之振動。就一般而言，分子在固體中已失去單獨性，因保持格狀結構之力阻止其偶然運動。所以固體分子單獨活動所具之內能，或儲能，等於原子之振動能及約束力所生之位能。

摘 要

一分子系統所具之能量，係移動，轉動，振動之動能，與位能所組成。通常工程師無須將分子系統之全部能量分爲各種不同部份。因此，全部能量名之爲內能。且僅等於已知分子系統所具之儲能。符號 u 與 U 將用以分別代表比內能與內能。比內能爲單位重量或質量物質所具之能量，“內能變化”一詞用以代表其所具之儲內能變化。

1.7 溫度

接觸熱體或冷體之感覺乃日常經驗，爲建立準確鑑別熱體與冷體的方法，“熱態”(thermal state)一名詞需先介紹並討論之。熱體與冷體可謂其熱態有所不同，各種物質的熱態應如何衡量？此一問題則應時而生，爲答覆此問題需引用某些已熟知的現象。例如一鋼棒置於爐中之變化，其長度增加，因之物體熱態變化在等壓情況下可以其容積求得。基於此種事實，多年來普通溫度計利用水銀柱之增減，以度量物體之熱態。物質尚有與熱態有關的其他性質，均可用以衡量熱態。例如聯接兩不同金屬，利用其電阻改變或所生之電動勢(e.m.f.)均可衡量熱態。

凡熱體與冷體相接觸，熱體變冷而冷體變熱。最後以達到兩物體呈同等熱態爲止，即是以手觸之兩者均呈同樣溫暖的感覺，此最後的相同狀態稱爲熱平衡狀態。由此可得結論，若一物體 A 與其他兩物體 B 及 C 成熱平衡，則物體 B 與 C 必成熱平衡。若不如此，則無平衡狀態存在，將與日常經驗相違。因之兩物體 B 及 C 無須實際接觸即可藉第三物體 A (溫度計)而衡量。在使 B 物體與標準物體 A 做熱態比較之先，必須決定 A 物體熱態之適當範圍。假定 A 物體爲一水銀溫度計，在標準大氣壓下，先置於熔化的冰槽內，而後再放入沸水中，在

此兩種情形水銀柱的高度，將玻璃管上刻以標記，並將此兩標記間分為 180 等份（每等份為一度），最低的標記定為 32，則最高標記為 212，物體 A 之刻度已定，當與物體 B 接觸時，觀測水銀柱之變化，即可決定物體 B 的熱態。若 A 與 B 接觸之時間足夠確定成平衡狀態，如水銀柱頂端於 90 分劃，則知 B 物體的熱態，較物體 A 在標準大氣壓力與熔化冰相接觸時之熱態，高 58 分劃。由比較可決定種種熱態，以溫度一詞表示之，90 分劃可稱為溫度 90 度，此溫度標在標準大氣壓力下，熔冰與沸水溫度，分別為 32 度與 212 度。上述之溫度測量儀器（溫度計），由具有刻度的玻璃管和水銀組成。結論為同溫度之兩物體，必成熱平衡或具相同的熱態。溫度係度量物體態之標準，藉此可決定物體使熱至另一物體的能力。

理想或完全氣體之熱態，以分子的動能決定。根據動力學原理，其溫度與分子動能成正比，關於理想氣體之研究及溫度與分子動能之關係，本書以後諸節討論之。

1.8 溫度標

廣被工程師界採用之兩種溫度標 (temperature scale)，為攝氏

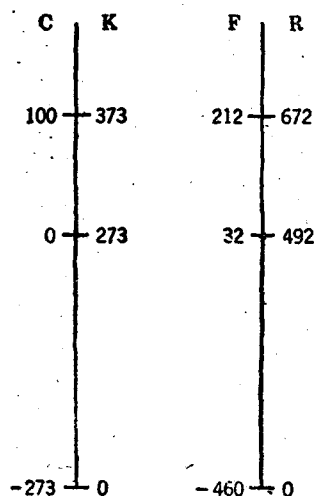


圖 1-1 各種溫度標之比較

C 與華氏 F。見圖一，在水點與蒸汽點間，攝氏與華氏指標各分為 100 和 180 等份。攝氏溫標之熔水點與沸水點為 0 與 100，而華氏則為 32 與 212。故攝氏與華氏溫標之換算頗為簡單。下列即為溫標互換之公式

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32 \quad (1.1)$$

由華氏溫度變攝氏溫度

$$t_C = (t_F - 32) \frac{5}{9} \quad (1.2)$$

例題 1.1 將 20°C 換算為華氏。

$$t_F = \left(\frac{9}{5} \cdot 20 + 32 \right) = 68 F$$

例題 1.2 將 140 F 換算為攝氏。

$$t_C = (140 - 32) \frac{5}{9} = 60 C$$

1.9 絕對溫度

絕對零度可認為是最低的溫度。絕對零度的觀念係依照氣體溫度與愷氏(Lord Kelvin)熱力學溫標而產生。據觀察之結果，絕對零度為 -273.16°C 或 -459.69°F 。絕對溫度的物理定義將予本書後節討論之。以絕對零度為基點，零度以上之溫度為絕對溫度(圖1)，在熱力學之工程計算中甚為方便。K係表示攝氏溫標的絕對溫度，R係表示華氏溫標的絕對溫度。圖1.1所示為不同溫度之圖解。已知華氏溫度為求其絕對溫度R應加459.69，此公式為

$$T_R = t_F + 459.69 \quad (1.3)$$

攝氏絕對溫標之公式為

$$T_K = t_C + 273.16 \quad (1.4)$$

上兩式中， T 為絕對溫度， t 為華氏攝氏溫度。459.69及273.16兩值，在本書中之計算，取其近似值460及273。

例題1.3 若一氣體的絕對溫度為580R，計算相當華氏若干度？

應用公式1.3

$$t = 580 - 460 = 120^{\circ}\text{F}$$

例題1.4 相當 -60°C 時之絕對溫度為若干？

自公式1.4可得

$$T = -60 + 273 = 213^{\circ}\text{K}$$

1.10 比容與比重

通常氣體所佔容積，既其總容積，以符號 V 代表之。容積之單位為立方呎，立方吋，立方厘米。比容(Specific volume)為物質單位量所佔之容積，以符號 v 表示之。其單位為立方呎每磅(重量)，立方呎每磅(質量)，立方呎每磅分子量或他種單位。“比”字的意義為物質之單位量。本書中比容所採用的工程單位多為立方呎磅(重量)與立方呎每磅分子量。

物質的比重(Specific weight)，係單位容積的重量，以符號表之。若比容基於物質的單位重量，則比重等於比容的倒數。

1.11 壓力

壓力係垂直作用於一已知單位面積上之力(磅/平方吋，克/平方厘米等)。理想氣體之分子系統，壓力依已知容積中分子數目與其速

度而定。

壓力分爲相對與絕對兩種。相對壓力又稱表壓力，通常以表壓計 (Bourdon gage) 測量之。此儀表有一橢圓斷面之曲管，管之一端固定，如 1.2 圖所示，另一端係封口，以連槓機構接於指針。當管口接於有壓力之流體時，橢圓斷面有變圓之趨勢，曲管伸直，牽動連槓使指針旋轉。施於管中壓力小於大氣壓時，曲管斷面變扁，曲度增加。指針移動之距離刻成度數。未接壓力流體之前，管內外均爲大氣壓力。其刻度爲零。用於測量低於大氣壓力之儀表稱爲真空計 (Vacuum gage)。

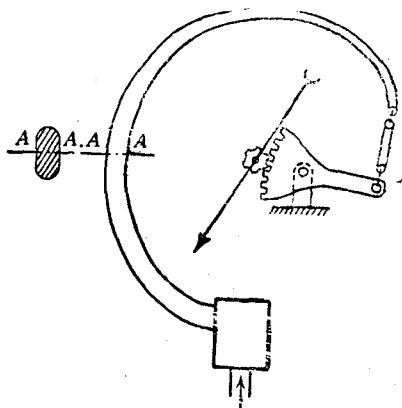


圖 1.2 Bourdon 壓力表之略圖

欲定壓力之標準，需有一絕對壓力標度，可不受大氣壓力變化之影響。其零度爲完全真空時之壓力。

絕對零度以上之任意壓力稱爲絕對壓力。表壓力係大氣壓力以上之壓力。真空壓力爲大氣壓力以下之壓力。圖 1.3 爲各種壓力之圖解。

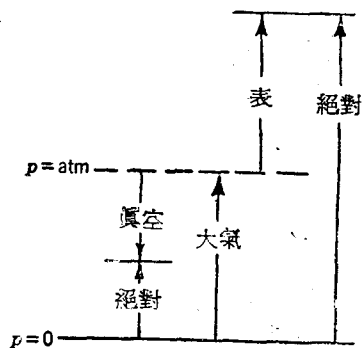


圖 1.3 表 絕對與真空壓力

故計算絕對壓力之簡單關係式如下：

$$p_{\text{absolute}} = p_{\text{atmospheric}} + p_{\text{gage}} \quad (1.5)$$

$$p_{\text{absolute}} = p_{\text{atmospheric}} - p_{\text{vacuum}}$$

大氣壓力通常以氣壓計 (barometer) 測量。氣壓計爲一端對口之玻璃管，中注水銀，塞着他端倒置水銀槽中，移去管塞，水銀柱下降，

與大氣壓力平衡爲止。水銀柱上部壓力接近零度，故水銀柱之高可求得大氣壓力。

例題 1.5 氣壓計之水銀柱 (Hg) 高 76cm，試求大氣壓力每平方吋之磅數。水銀在 32 F 時，密度為 13.5951g/cm³。

計氣壓計玻璃之斷面積為 A 平方厘米，則水銀柱重等於

$$W = 76(13.5951)A \text{ grams} = 1032(A) \text{ grams}$$

作用於面積 A 之壓力等於

$$p = \frac{W}{A} = 1032 \text{ g/cm}^2$$

使用下列換算中，上值可化為絕對壓力每平方吋磅數 (psia)

$$454 \text{ grams} = 1 \text{ lb}$$

$$2.54 \text{ cm} = 1 \text{ in.}$$

$$p = \frac{1032[\text{grams}](2.54)^2[\text{cm}^2][\text{lb}]}{[\text{cm}^2][\text{in.}^2]454[\text{grams}]} = 14.696 \text{ psia}$$

下列兩換算率於計算大氣壓力時極為有用

$$1 \text{ cm Hg} = 0.193 \text{ psi}$$

$$1 \text{ in. Hg} = 0.491 \text{ psi}$$

例題 1.6 用換算率解 1.5 題。

$$p = 76(0.193) = 14.696 \text{ psia}$$

例題 1.7 Bourdon 壓力表讀數為 15 psig，當氣壓計壓力為 14.7 psia 時，求絕對壓力。

$$p = 15 + 14.7 = 29.7 \text{ psia}$$

為簡化單位寫法，以 psia 表示絕對壓力每平方吋磅數。並以 psig 表示表壓力。

例題 1.8 Bourdon 壓力表讀數為 20 psig，當氣壓計水銀柱高 74 cm 時，求絕對壓力。

水銀 74 cm 之壓力等於

$$p = 74(0.193) = 14.3 \text{ psia}$$

絕對壓力等於

$$p = 20 + 14.3 = 34.3 \text{ psia}$$

例題 1.9 當大氣壓力為 29.4 吋水銀柱時，真空計為水銀柱 10 吋，求絕對壓力。