

工程熱力學

馬承九 編著

(上冊)

SI

工程熱力學

馬承九 編著

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

中華民國七十年八月初版

中華民國七十三年再版

工程熱力學 上冊

內政部註冊版權內台著字第壹捌零陸肆號

基本定價伍元



編著兼
發行人

馬承九

通訊處

台南市勝利路二六二巷四號

經售

三民書局

印刷者

開陽堂印刷廠

台北市重慶南路一段六十一號
郵政劃撥儲金戶第九九九八號
台南市富強路第二三四號之卅

初版序言

本書係介紹工程熱力學基本概念，所關常見工程問題大部涉及，可供工學院大學部每週講演四小時兩學期授課之用。亦可作高等熱力學預修課本，更可作工廠工程師參考手冊，若每週講演不為四小時，可參照實際情況作適當之增或刪。

書中所用單位係依最近國際標準 SI 制，尚有極少數因公式來源或資料所限仍沿用英制，惟書後備有 SI 制與英制互相換算表可資彌補，願再版時可全採 SI 制。

本書付印出版悉賴邱澄彬教授鼎力運籌擘劃，並對書中內容提供殊多極具價值之建議及指正，更煩曾桂雄先生分神校稿及協助試教，且作不少指正，所有書中插圖及計算表格均勞張華明先生辛苦繪製，以上三先生為本書付出極多寶貴時光將使本書付之棗李，一併致謝。

稿成後雖曾作相當時間之試教，遇有錯誤當即改正，無如著者才疏學淺，仍不免掛一漏萬，尚希讀者不吝指教。

馬承九敬識

時在民國七十年三月

於國立成功大學機械系

章節目錄

第一章 基本觀念 (Basic Conceptions).....	1
§ 1-1 熱 (Heat)	1
§ 1-2 熱力或壓力 (Pressure).....	5
§ 1-3 熱度或溫度 (Temperature)	11
§ 1-4 熱力學熱工學 (Thermodynamics and Heat Power Engineering).....	15
§ 1-5 壓力測計 (Pressure Measurement).....	15
§ 1-6 熱度 (溫度) 的測定 (Measurment of Temperature)	
§ 1-7 容積 (Volume).....	21
§ 1-8 內能 (Internal Energy).....	26
§ 1-9 流功, 焓及動焓 (Flow work, Enthalpy and Kenthalpy)	36
§ 1-10 熱容量及熱容量間之關係 (Thermal Capacities and their interrelations)	39
§ 1-11 物質的熵 (Entropy).....	
§ 1-12 定質物質的外功 (Work of fixed mass).....	53
§ 1-13 海姆霍次函數及吉卜斯函數 (Helmoltz function and Gibbs function)	54
第二章 物質本性, 熱力系統及可逆性 (Characteristics, Thermodynamic systems and Reversibility)	61
§ 2-1 物質本性面 (Property Surfaces of matter).....	61
§ 2-2 濕汽, 昇化及冷液的熱力特性 (Thermodynamic properties of wet vapor, Sublimation and Compressed liquid)	70
§ 2-3 物質特性面的常見投影圖及等值線 (General Projections of property surface and Constant property	

line of matter)	75
§ 2-4 熱力系統 (Thermodynamic systems)	79
§ 2-5 閉式熱力系統 (Closed system)	80
§ 2-6 穩流熱力系統 (Steady Flow system)	82
§ 2-7 非穩流系統 (Unsteady Flow system)	92
§ 2-8 機械系統之平衡及可逆性 (Equilibrium and Reversibility of Mechanical system)	95
§ 2-9 含熱系統變化之平衡及可逆性 (Equilibrium and Reversibility of thermodynamic system)	97
§ 2-10 傳熱系統之可逆性 (Reversibility of Heat transfer)	101
§ 2-11 熵增定律 (Law of Entropy Increase)	104
第三章 變化過程 (Processes)	112
§ 3-1 氣體閉式系統等壓變化過程 (Constant pressure process of gases for closed system)	112
§ 3-2 氣體穩流系統等壓變化過程 (Constant pressure process of gases for steady flow system)	115
§ 3-3 氣體非穩流系統等壓變化過程 (Constant pressure process of gases for Unsteady flow system)	116
§ 3-4 汽體閉式系統等壓變化過程 (Constant pressure process of Vapor for closed system)	117
§ 3-5 汽體穩流系統等壓變化過程 (Constant pressure process of Vapor for steady flow system)	119
§ 3-6 汽體非穩流系統等壓變化過程 (Constant pressure process of Vapor for unsteady flow system)	120
§ 3-7 氣體閉式系統等容變化過程 (Constant volume process of Gases for closed system)	121
§ 3-8 氣體穩流系統等容變化過程 (Constant volume process of Gases for steady flow system)	122
§ 3-9 氣體非穩流系統等容變化過程 (Constant Volume process of Gases for unsteady flow system)	123
§ 3-10 汽體閉式系統等容變化過程 (Constant volume process	

of vapor for closed system).....125

- § 3-11 汽體穩流系統等容變化過程 (Constant volume process of vapor for steady flow system)126
- § 3-12 汽體非穩流系統等容變化過程 (Constant volume process of vapor for Unsteady flow system)127
- § 3-13 氣體閉式系統等溫變化過程 (Constant temperature process of Gases for closed system).....127
- § 3-14 氣體穩流系統等溫變化過程 (Constant temperature process of Gases for steady flow system)130
- § 3-15 氣體非穩流系統等溫變化過程 (Constant temperature process of Gases for Unsteady flow system)131
- § 3-16 汽體閉式系統等溫變化過程 (Constant temperature process of vapor for closed system).....132
- § 3-17 汽體穩流系統等溫變化過程 (Constant temperature process of vapor for steady system)134
- § 3-18 汽體非穩流系統等溫變化過程 (Constant temperature process of vapor for unsteady flow system).....135
- § 3-19 氣體閉式系統多相變化過程 (Polytropic process of gases for closed system)136
- § 3-20 氣體穩流系統多相變化過程 (Polytropic process of Gases for steady flow system).....140
- § 3-21 汽體閉式系統多相變化過程 (Polytropic process of vapor for closed system)142
- § 3-22 汽體穩流系統多相變化過程 (Polytropic process of vapor for steady flow system)144
- § 3-23 氣體閉式系統等熵變化過程 (Isentropic process of Gases for closed system).....145
- § 3-24 氣體穩流系統等熵變化過程 (Isentropic process of Gases for steady flow system).....147
- § 3-25 汽體閉式系統等熵變化過程 (Isentropic process of vapor for closed system).....149

§ 3 - 26 汽體穩流系統等熵變化過程 (Isentropic process of vapor for steady flow system)	150
§ 3 - 27 可逆變化結論 (Conclusion of Reversible processes)	152
§ 3 - 28 不可逆變化過程 (Irreversible processes)	155
§ 3 - 29 汽體超飽和變化或過冷變化過程及其他不穩情況 (Supersaturation or undercooling of vapor and other metastable states)	160
第四章 混合氣及汽氣混合物 (Gas Mixture and vapor-gas mixture)	171
§ 4 - 1 混合氣之基本特性 (Fundamental properties of gas mixture)	171
§ 4 - 2 混合氣重量分析及體積分析 (Gravitational analysis and Volumetric analysis of gas mixture)	177
§ 4 - 3 氣汽混合物 (Gas-Vapor mixture)	184
§ 4 - 4 濕度圖線 (Psychrometric chart)	191
§ 4 - 5 空氣調濟及其他 (Air condition and applications) ..	192
第五章 流體機械 (Fluid Machineries)	208
§ 5 - 1 理論噴嘴 (Theoretical Nozzle)	208
§ 5 - 2 音速及馬赫數 (Acoustic Velocity or Sonic Velocity and Mach Number)	216
§ 5 - 3 氣體在漸縮及漸擴流管中之流動 (Gas Flow within convergent and divergent Duct)	219
§ 5 - 4 有摩擦的噴嘴 (Nozzle with friction)	223
§ 5 - 5 輪機基本原理 (Basic Principle of turbines)	227
§ 5 - 6 流體壓縮機 (Compressor)	235
第六章 燃燒及化學平衡 (Combustion and chemical Equilibrium)	258
§ 6 - 1 燃燒 (Combustion)	258
§ 6 - 2 燃燒能量和燃氣溫度 (Combustion heat and combustion temperature)	261

§ 6-3	平衡及化學平衡 (Equilibrium and chemical Equilibrium).....	267
-------	---	-----

§ 6-4	有化學平衡的燃燒溫度 (Combustion temperature with chemical Equilibrium).....	274
-------	--	-----

第七章 一般熱力方程式 (General thermodynamic equations).... 288

§ 7-1	馬克斯威爾方程式 (Maxwell Equations).....	288
-------	-----------------------------------	-----

§ 7-2	物質熵的一般方程式 (General Equation of Entropy).....	291
-------	--	-----

§ 7-3	物質內能的一般方程式 (General Equation of Internal Energy)	295
-------	--	-----

§ 7-4	物質熱容量一般方程式 (General Equation of thermal capacities of substance)	296
-------	--	-----

§ 7-5	物質焓的一般方程式 (General Equation of Enthalpy).....	300
-------	---	-----

§ 7-6	海姆霍次及吉卜斯函數的一般方程式 (General Equation of Helmholtz and Gibbs functions)	301
-------	--	-----

§ 7-7	克來波阮方程式 (Clapeyron Equation)	303
-------	------------------------------------	-----

§ 7-8	真氣狀態方程式 (State Equation of Real gas)	305
-------	--	-----

§ 7-9	溫德華氏方程式及畢梯——布雷奇曼方程式 (Van der Waal Equation and Beattie-Bridgeman Equation).....	313
-------	---	-----

§ 7-10	乾空氣特性表用法 (Use of dry air table)	323
--------	---------------------------------------	-----

§ 7-11	真氣能量特性方程式 (Energy properties of real gas).....	327
--------	--	-----

第八章 卡諾循環及可用性 (Carnot cycle and available Energy)..... 335

§ 8-1	循環 (Cycle)	335
-------	------------------	-----

§ 8-2	卡諾循環 (Carnot cycle).....	337
-------	--------------------------	-----

§ 8-3	卡諾熱泵循環 (Heat pump carnot cycle).....	344
-------	--------------------------------------	-----

§ 8-4	可逆變化的可用能 (Available Energy of Reversible process)	346
-------	---	-----

第九章 氣體動力循環 (Gas Power cycle)..... 352

§ 9-1	鄂圖循環 (Otto cycle)	352
-------	-------------------------	-----

§ 9-2	狄賽爾循環 (Diesel cycle)	359
-------	----------------------------	-----

§ 9-3	雙燃循環或史都特循環 (Dual combustion cycle or stuart cycle)	363
§ 9-4	司特令循環 (Stirling cycle)	366
§ 9-5	艾瑞生循環 (Ericsson cycle)	371
§ 9-6	布瑞登循環 (Brayton cycle)	373
§ 9-7	實際布瑞登循環 (Actual Brayton cycle)	376
§ 9-8	改良布瑞登循環 (Improved Brayton cycle)	382
§ 9-9	噴射推進循環 (Jet propulsion cycle)	393
第十章 汽體動力循環 (Vapor Power cycle)		406
§ 10-1	朗肯循環 (Rankine cycle)	406
§ 10-2	再熱朗肯循環 (Reheating Rankine cycle)	410
§ 10-3	復水式朗肯循環 (Regenerative Rankine cycle)	414
§ 10-4	現代動力廠 (Modern Power Plant)	422
第十一章 複式動力循環及雙汽動力循環 (Compound power cycle and Binary Vapor cycle)		430
§ 11-1	COSAG循環 (Combination of steam turbine and Gas turbine cycle)	430
§ 11-2	CODAG循環 (Combination of Diesel and Gas turbine cycle or Free-piston Engine cycle)	442
§ 11-3	雙汽循環 (Binary Vapor cycle)	447
第十二章 造冷工程 (Refrigeration)		453
§ 12-1	概論 (Introduction)	453
§ 12-2	汽體造冷循環 (Vapor Refrigeration cycle)	454
§ 12-3	造冷規格 (Refrigeration Specifications)	461
§ 12-4	冷媒 (Refrigerants)	463
§ 12-5	閃變室造冷 (Flash chamber Refrigeration)	466
§ 12-6	真空造冷 (Vacuum Refrigeration)	470
§ 12-7	乾冰 (Dry Ice)	472

§ 12-8	氣體造冷 (Gas Refrigeration)	474
§ 12-9	低溫造冷 (Cryogenics)	477
§ 12-10	吸收式造冷 (Absorption Refrigeration)	480
第十三章 氣體動力學簡介 (Introduction to Gasdynamics).....		487
§ 13-1	等熵流動概說 (Introduction to Isentropic flow).....	487
§ 13-2	氣體在等斷面管中有熱交換流動 (Diabatic flow of gas in constant area duct)	494
§ 13-3	斜震波 (Oblique Shock)	498
§ 13-4	正震波 (Normal Shock)	503
第十四章 熱傳簡介 (Introduction to Heat transfer).....		508
§ 14-1	概說 (Introduction)	508
§ 14-2	平板傳導式熱傳 (Conduction of Flat plate)	509
§ 14-3	圓管傳導 (Conduction through cylindrical wall) ...	513
§ 14-4	牛頓冷卻定律 (Newton's law of cooling).....	515
§ 14-5	熱交換器 (Heat exchangers)	520
§ 14-6	強迫對流熱傳 (Forced convection)	525
§ 14-7	輻射熱傳 (Radiant Heat transfer).....	529
§ 14-8	熱管 (Heat pipe)	533

第一章 基本概念 (Basic Conceptions)

§ 1-1 熱 (Heat)

討論熱力學之初，讓我們先對熱作一相當的瞭解。據物理學者對諸多物質細微觀察之後告訴我們，普天之下的萬物都是集合諸多不同的分子所構成。而且發現這諸多不同的分子都在晝夜不息的作相當規律的運動着。大體上這些規律的運動可歸納為三種。第一種運動是各分子作直線往復的運動，其間便有各分子間相互正直撞擊現象。第二種運動是各分子各自依它的座標軸所作的旋轉運動。第三種運動便是各分子所作高頻率的顫動，以上三種是每箇分子都同時在進行的。每分子所以能同時作這三種規律的運動的原因當歸究是物質的本能，幾乎是無法解釋的！也許是若干年前萬物形成時而俱來，信神的朋友也許會解釋為這本能是由於神的賜與。不信神的朋友也許認為這本能是直接或間接由太陽的能轉換而來。如是看來，這問題和『先有雞或有雞蛋』的問題同樣難以確定，但依事實證明不能否認物質分子確有這三種規律運動的本能！這本能在後天上尚可以應用人們的智慧直接或間接的去轉換或改變。總而言之，物質分子都必有先天的運動本能。經由後天人為的改變而以上述三種運動方式表達出來。

單就分子的往復直線運動而論，若把分子看作具完全彈性的剛體。當它們集合起來都同時作直線往復等速運動時，難免相互間不發生撞擊情事。如這相互間的撞擊是相互傾斜的，則撞擊前後分子直線運動的方向會有所改變。於是分子便不會在原在的位置作直線往復運動，而要移到另外一處去。可見各分子相對位置隨時有所改變，相互間也有了撞擊摩擦，為避免它們相對位置的改變及相互間的摩擦。它們應該是正直撞擊，撞擊期間各分子相互傳遞動能。待它們各分子動能相同時，可以說這物質是在熱平衡狀態。設每分子的質量都為 m ，各分子直線運動的線速都為 C ，則每箇分子作直線運動的動能為 $\frac{1}{2}mc^2$ 。則物質 n 箇分子的總直線運動的動能 $K.E.$ 為

$$K.E = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{1}{2}mc^2 \right) \dots\dots\dots (1-1)$$

如果物質分子直線運動方向和正直座標軸 (Rectangular Coordinates) 成

2 工程熱力學

傾斜狀態，而有 θ 及 ϕ 的斜度，如第 1—1 圖所示，可將 C 分爲沿 x ， y ， z 座標方向的三分速。分別爲 C_x ， C_y ，及 C_z 。於是每分子直線運動的動能 $\frac{1}{2}mC^2$ 可畫分爲：

$$\frac{1}{2}mC^2 = \frac{1}{2}mC_x^2 + \frac{1}{2}mC_y^2 + \frac{1}{2}mC_z^2$$

..... (1-2)

那麼構成物質 n 箇相同分子的總動能爲：

$$(K.E.) = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{1}{2}m_i C_{ix}^2 + \frac{1}{2}m_i C_{iy}^2 + \frac{1}{2}m_i C_{iz}^2 \right) \dots (1-3)$$

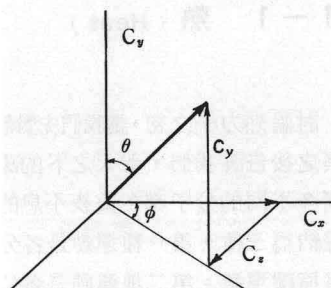


圖 1—1

物質分子的旋轉運動以構成分子的原子數不同而不同。常見的雙原子分子所作旋轉可分析爲圍繞正直座標中的兩箇軸旋轉及以自身原子的連接棒的中心旋轉。或則同時沿三正直座標旋轉，設分子的慣性矩爲 I ，它的旋轉角速度爲 ω ，則它的旋轉動能 $(KE)_r$ 爲 $\frac{1}{2}I\omega^2$ 。如果分子同時圍繞正直座標軸的三軸旋轉。沿 x 軸的角速度爲 ω_x ，沿 y 軸的爲 ω_y 及沿 z 軸的爲 ω_z ，則諸多分子的旋轉動能可書之爲：

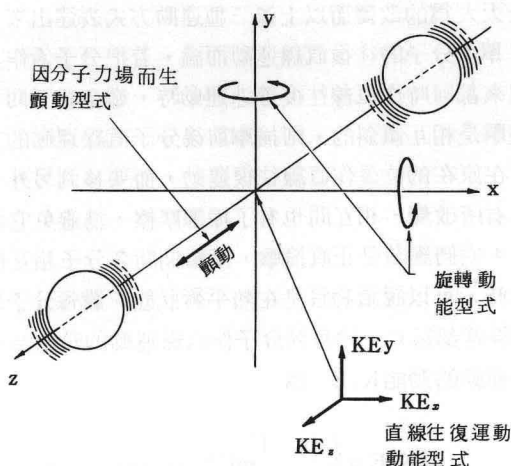


圖 1—2

$$\begin{aligned}
 (K.E.)_r &= \sum_1^n \left(\frac{1}{2} I \omega^2 \right) \\
 &= \sum \left(\frac{1}{2} I_x \omega_x^2 + \frac{1}{2} I_y \omega_y^2 + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2 \cdots \cdots \cdots (1-4) \right)
 \end{aligned}$$

第 1—2 圖所示為雙原子分子沿 x 及 y 座標軸旋轉及沿 z 軸發生往復顫動情形。

也是物理學者歷久對物質細微觀察之後告訴我們，以上物質分子三種運動中以直線往復直線運動的動能 $(K.E.)_t$ 佔全部運動的絕大部分，分子的旋轉運動能 $(K.E.)_r$ 佔極小部分，而且除非物質在極高溫度時不會發生值得考慮的顫動動能。在一般工程力學中縱是旋轉動能也忽略不計。也就是僅考慮物質分子的往復直線運動的動能。

以上所論物質分子三種動能的總和便是物質所有的“熱”。換言之，“熱”是物質分子運動動能的總和。將旋轉動能及顫動動能都忽略不計時，物質分子往復直線運動的動能 $(K.E.)_t$ 便是物質所含有的熱量。這些物質分子運動不是憑人們的肉眼所直接觀察得到，也不是用一般普通儀錶所能計量得到，但確確實實是可以高度精密儀器和高度技術計測得到的。如是說來，“熱”不是虛無飄渺的抽象東西，而是相當具體的事實。再以上所引證的各種動能的計算公式看。它們並不含聲，光，色，味，嗅，形狀及尺度的因素在內。所以可知“熱”是無聲，無光，無色，無味，無嗅，無一定形狀，無重量和無一定尺寸的東西。但“熱”所相當的分子動能確實可以計測和計算的。

當物質分子直線運動速度 C 旋轉運動 ω 及顫動頻率都比較大時，可以說物質所含的熱比較多，反而言之，物質分子運動速度較低時，物質所含的熱比較少。真的物質分子停止運動時，可以說物質不再含有熱量。這時候物質的諸多分子相互緊緊相靠。分子間也不再有空隙存在，也就是說當物質諸多分子緊緊相靠而沒分子空隙時，物質不再擁有熱量，也便是物質各種熱相關的特性都等於零。

物質擁有的熱並不是永遠是沒改變的。不論用什麼方法，祇要使用的方法能改變物質分子運動速度，便都是改變物質擁有的熱和與熱相關的物質特性。在改變物質熱的諸多方法中不外乎天然的和人為的兩種。例如太陽是一箇分子運動速度的分子集合體。太陽表面所接觸的氣體會漸次的層層將太陽分子運動動能傳遞到地球表面上的各種物質。因而地球表面上的萬物才有熱，因從太陽到地球表面的傳熱阻礙不免有改變，而使地球上萬物質所擁有的熱不免也有改變。這是屬於

4 工程熱力學

天然方法以改物質所擁有的熱能，再如相傳之古時代有燧人氏鑽木取火的故事，他是利用旋轉的鑽頭撥動木頭的局部分子，使被撥動的木頭分子運動速度提高，也即是使撥動的木頭含有較多的熱量和較高的溫度。待到被撥動木頭含有足夠熱量而可使木頭分子和它附近空氣中的氧氣發生較快的氧化化學反應時。即便是所謂之燃燒，即俗稱的火。這是人爲方法改變物質所擁熱量。再如將一塊分子運動速度較低的固體冰投入到分子運動速度較高的熱水中。當這兩種分子運動速度不同的物質發生直接接觸時，它們分子間會發生相互的直線撞擊。在撞擊中兩者的分子相互傳遞分子動能。會使冰的分子運動速度及動能逐漸升高，同時會使熱水分子的運動速度及動能降低，待到它們的分子運動速度及動能相同時，稱爲它們達到熱的平衡狀態。總結果是原來的冰接收熱水給予的熱量而擁有較原先爲多的熱量。同時原來的熱水經傳去一部熱量後而降低了它原有熱量。這也是用人爲方法使物質擁有熱增加或降低。甚而對物質急速的搞擊也能改變物質分子的運動速度，也便是能改變物質所擁有的熱，在兩箇物件表面相互接觸而使它們發生相對的摩擦，在兩件接觸面的分子運動速度都會加速。那接觸表面上便擁有較多的熱量。諸如此類的人爲方法以使物質含熱增減。不勝枚舉，但都可證明物質擁有的熱是確可以改變的。也證明熱不是空虛神祕的玩藝。

熱既是可以計測又可以計算，所以它應該有相當單位的。可是爲了能在工程中方便而實際應用起見，對計量物質所含的熱量並不能時時拜託物理學者用極精密儀器去測定物質分子的運動速度 C 之後，再去計算它的含熱量，所以實際應用的是用實驗法。這實驗法也是必須萬衆共議而共同遵守的。早先共議共守的熱單是“卡”(Calorie)。便是取一公克的水在1大氣壓力下施予熱量使它溫度升高攝氏1度所需的熱量。意思是凡對任何物質施予的熱量相當於1公克水在1大氣壓力下溫度升高1度攝氏的熱量都叫做1卡。相當於1千公克水在大氣壓力下溫度升高1度攝氏的叫做千卡，多以Kcal符號代表。或相當1公克水在大氣壓力下溫度升高1千度攝氏的也叫做千卡。最近國際標準協會又復訂定新的國際標準SI。其中熱單位爲焦耳(Joule)簡寫爲j。焦耳相當於 2.3885×10^{-1} 卡，即書之爲：

$$1 \text{ j} = 2.3885 \times 10^{-1} \text{ cal} \cdots \cdots \cdots (1-5)$$

有時候熱單位也用瓩小時(Kwh)，或馬力小時(Psh)。英制國家以往沿用英熱單位(BTU)作爲熱單位，它是使1磅重的水在大氣壓力下溫度上升

1 度華氏溫度所需的熱量。有時也用公尺公斤 (mK_p) 或呎磅 ($\text{Ft} - \text{lb}$) 為單位。不過在 SI 標準制中僅以焦耳 j 為標準熱量單位，即以 $1 j$ 為基準去比較物質含熱量的多少。在全世界尚未全部採納 SI 制熱量單位之前，上述中的其他標準熱單位仍在使用的。為便於互相換算起見。如下表 1—1 所例：

表 1—1 熱量單位換算表

	$J = 10^7 \text{erg}$	mK_p	$\text{Kcal}_{15}^{\circ*}$	
$1 J = 10^7 \text{erg}$	1.0000	0.109716	2.3892×10^{-4}	
1mK_p	9.80665	1.0000	2.3430×10^{-3}	
1Kcal_{IT}	4186.8	426.935	1.00031	
1PSh	2647796	270000	632.61	
1B.T.U.	1055.056	107 5857	0.252074	
1Kwh	3600000	367097.8	860.11	

	Kcal_{IT}	Kwh	PSh	B.T.U.
$1 J = 10^7 \text{erg}$	2.38846×10^{-4}	2.77778×10^{-7}	3.77673×10^{-7}	9.47817×10^{-4}
1mK_p	1.34228×10^{-3}	2.72407×10^{-6}	3.70370×10^{-6}	9.29491×10^{-3}
1Kcal_{IT}	1.0000	1.16300×10^{-3}	1.58111×10^{-3}	3.96832
1Kwh	859.845	1.0000	1.35962	3412.14
1PSh	632.416	0.735499	1.0000	2509.43
1BTU	0.251996	2.93071×10^{-4}	3.98466×10^{-4}	1.0000

* 所註 15° 為在 15°C 時的情況

△所註 IT 為國際標準的意思。

在英制國家中目下尚有採用呎磅作熱單位的。它和國際標準 SI 中焦耳 (J) 的換算為

$$1 J = 1 / 1.356 \quad \text{呎磅} \dots\dots\dots (1-5)$$

或 $1 \text{呎磅} = 1.356 \quad \text{焦耳} (J) \dots\dots\dots (1-6)$

§ 1—2 熱力或壓力 (Pressure)

熱力便是俗稱的壓力。它是由於物質分子運動時撞擊到容器或量具單位面積

上的垂直力量。

當物質的諸多分子作往復直線運動時，它的運動速度 C 既有大小又有方向。方向是四面八方都是的。一般是用向量線代表。而向量是可以挪移的。若是把這諸多向量挪移使它們通過同一箇座標原點。便成為自那原點向各方發射的一群輻射線。如第 1-3 圖所示。當物質諸多分子在熱平衡狀態時。各向量的大小相同。但方向則不一樣。可是那諸多方向作均勻分佈。如是可知第 1-3 圖中各向量的外包面將為一箇球面。設 n_r 代表向量總數目及球面的半徑為 r 。則每單位球面積貫穿的向量數為 $n_r / 4\pi r^2$ 。因每一向量並不僅代表一箇物質分子，而是代表很多同向量的分子。設每向量代表的物質分子數為 n_{rm} 。則單位球面積上所貫穿的分子數將 $n_r n_{rm} / 4\pi r^2$ 。事實上這諸多分子 $n_r n_{rm}$ 是均勻分佈在物質的容器中。由是可知這諸多分子都會撞擊到容器的壁面上。 $n_r n_{rm}$ 便是容器中容納的物質分子總數 N 。

設自上述的球面上截取部分微小面積 dA' 。如第 1-4 圖所示。則該微小球面面積 dA' 為：

$$\begin{aligned} dA' &= r d\theta \cdot r \sin\theta d\phi \\ &= r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad \dots\dots\dots (1-7) \end{aligned}$$

貫穿這 dA' 面積諸向量的方向包括 $\theta \rightarrow \theta + d\theta$ 及 $\phi \rightarrow \phi + d\phi$ 。貫穿 dA 球面的分子數 $N_{\theta+\frac{d\theta}{2}, \phi+\frac{d\phi}{2}}$ 即在容器中 dA' 面正直撞擊分子數為：

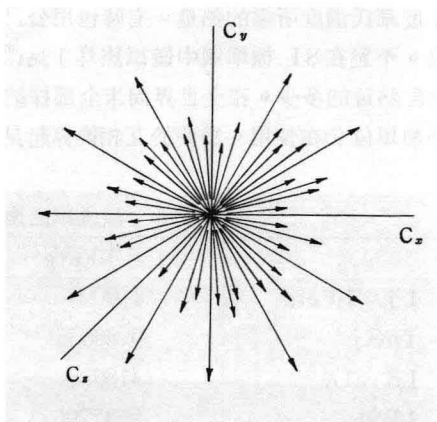


圖 1-3

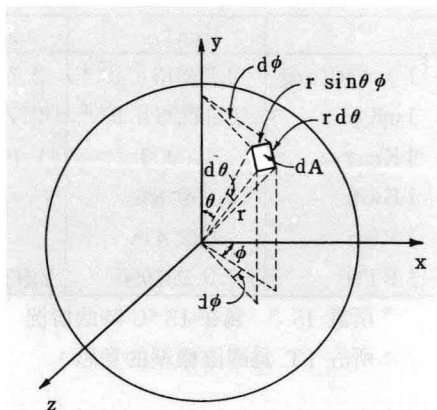


圖 1-4