

工程熱力學

孫可宗編譯

龍門聯合書局出版

工程熱力學

孫可宗編譯

★版權所有★

龍門聯合書局出版
上海南京東路61號101室
中國圖書發行公司總經售

1953年5月初版 印數0001-2000册

新定價 20,000

序

熱力學是研究熱能與他種能之間關係的科學，其應用範圍甚廣。工程熱力學所研究的主要對象是熱能與機械能間互變的規律，而為動力工程學生及幹部所必須掌握之基礎知識。本書內容偏重常用概念及實用理論，不貪多涉雜，其目的在使初學者及自修者不致有萬花撩亂之感，而能夠易於掌握基本原理並能夠加以應用。因此，每段理論之後，皆附有例題，每章之後，附有習題。書後附錄可幫助習題解算之用。

本書內容大多取材於 Hawkins: Thermodynamics 並參照該課程新教學提綱加以增節編成，可作動力工程系及專科教材之用。如每週上課二次（每次 90 分鐘），一學期可以授完。如欲自修者，僅需具有基本的微積分學知識，即可順利自學完成。

所用名詞，大多是採用前國立編譯館編定的及劉仙洲先生編訂的“機械工程名詞”，亦有少數名詞根據中國科學院審查意見而修改的和自行擬定的。

原稿承趙國華先生於百忙中，代為改制校閱，謹表無限謝意。

限於學識及政治水平，如有不當之處，希望讀者及專家來信指正。

孫可宗誌於北京機械化農業學院

一九五三年二月

符 號

符 號

a	加速度(線)
A	面積
f	常數
c_n	比熱(一般的)
c_v	定容比熱
c_p	定壓比熱
C	常數
C_n	分子熱(一般的)
C_v	定容分子熱
C_p	定壓分子熱
D	直徑
F	力
g	重力加速度
h	焓(單位重量的)
I	慣性矩
J	熱功當量
k	比熱比值 [$k = c_p/c_v$]
L	長度
m	質量(物質多少的度量)
M	分子量
n	一般膨脹的指數
n	單位時間的轉數
n	模耳數
p	壓力(絕對的或表的), 和分壓力
q	傳熱率
Q	熱量

r	壓縮比
R	氣體常數, 用於方程式 $pv = RT$
s	熵(單位重量的)
S	總熵
SH	比濕
t	溫度度數(華氏或攝氏)
T	絕對溫度度數(耶氏或喀氏)
u	內能(單位重量的)
U	總功能
v	單位重量的容積
V	總容積
V	速度
w	單位重量或質量所作的功
W	總功
W	重, 作用於質量的重力
x	蒸氣的乾度
x	級的數目

希臘符號

α	熱膨脹係數
β	性能係數
β	壓力對於溫度的增加係數
γ	比重(單位容積的重量)
Δ	差別的表示符號例如 $\Delta p =$ 壓力差
η	效率
ρ	密度(單位容積的質量)
φ	相對濕度
ω	角速度

目 錄

序

符號

1. 基本概念	1
2. 熱力學第一定律	22
3. 固體, 液體和氣體	33
4. 理想氣體	44
5. 氣體的比熱	58
6. 蒸氣性質表的使用法	70
7. 理想氣體和蒸氣的無摩擦絕流變化	77
8. 卡諾循環與熱力學第二定律	95
9. 可用能, 不可用能和熵	109
10. 理想氣體和蒸氣的熵之變化	124
11. 理想氣體和蒸氣的混合體	134
12. 氣和蒸氣通過噴管和噴口的流動	161
13. 內燃機的理想循環	186
14. 空氣壓縮機與空氣引擎	204
15. 氣輪機和噴射推動	225
16. 蒸氣循環	238
17. 機械製冷	256
附錄 I. 附表	
1. 飽和水蒸汽性質表(以溫度為準)	270
2. 飽和水蒸汽性質表(以壓力為準)	271
3. 壓縮液(水)和過熱水蒸汽性質表	274

(iii)

4. 飽和水銀蒸氣表	282
5. 氨蒸氣飽和性質表	283
6. 二氧化碳 (CO ₂) 蒸氣飽和性質表	283
II. 附錄圖	
1. 蒸汽莫里耳圖(袋)	
2. 水蒸汽的溫熵圖(插頁)	
3. 氨(NH ₃)之溫熵圖	284
4. 二氧化碳(CO ₂) 溫熵圖	285

第 一 章

基 本 概 念

1-1. 熱力學.

熱力學這門科學研討能的概念,支配能的形式轉變規律,和用於產生能之轉變的各種介質。

熱力學最初起源於熱機效率的研究。但今日熱力學的應用,已不僅限於熱機的範圍。例如化學家及物理學家已能應用熱力學的定律,分析物質的穩定、分餾、和結晶等問題。

1-2 工程熱力學.

工程熱力學主要是研究熱與功及二者間互相變換的科學。在今日熱可轉變為功的事實,不僅工程師知之,即一般人亦皆知之。汽車的發動機便是熱變為功的一個實例。在此種機器中,燃料與空氣的混合體,因燃燒而得高溫度,所放出的熱能,一部分轉變為功,其餘部分的熱能在較低的溫度,放給冷卻水及隨廢氣排出,最後皆入於大氣。根據熱力學的定律,從一定量的熱能中,預測有多少熱能可以變化為功。故一工科學生要能設計最有效率且實際能做到的裝置,首先對於熱變為功的基本定律要有透澈的了解,這是一個必需的而且重要的先決條件。

1-3. 物質.

為對於能的意義能夠有充分的認識,須先考慮物質的概念。物質的定義是:有質量並佔有空間的就是物質。現在並不需要深究物質的

本性是什麼，它的結構是怎樣的等等；只需認清物質的佔有空間，具有質量，和相當的恆久性等事實就很夠了。

物質可分為固體、液體、及氣體等。經研究後發現物質並不是一個完全連續的整塊物體，而由大量的微粒所組成，此種微粒名叫分子，分子與分子間隔有空虛的空間。這些稱做分子的微粒們，在物質所佔的空間中，以各種速度運動着，並且不斷地互相碰撞。

凡需要大力才能改變其形狀的物質，就是固體的物質，故固體具有相當大的剛性。

當物質的分子間，以相當大的力結攏在一起而能保持一定的容積，並以一自由表面包圍着的，稱做液體的物質，或簡稱液體。液體的外形，一定與盛它的容器的形狀相同。

倘物質既沒有一定的形狀，又沒有一定容積，這種物質稱為氣體。氣體分子的運動，較之液體及固體的，有更大的自由。氣體易被壓縮，而液體只有極輕微的壓縮性。

1-4. 能。

當物體運動時，即具有一種新的性質，此為靜止時所沒有的。例如靜止在崖上的石塊本來不會做功，但如一旦被推過崖邊後，它就變成爲運動的物體，並且能夠造成效果。當蒸汽通過汽輪機時，就能夠作功，因而產生效果。能的定義就是造成效果的能力。所造成的效果，可能是功，也可能以他種形式表現出來。能可以分爲兩大類：貯蓄能和轉移能。

1-5. 貯蓄能。

貯蓄能是物質本身所具有的能，此能的根源或由於它的組合狀態，或由於它的運動。

凡物質由於它的位置而具有的能，稱為位能。打樁工人將重錘舉高超過某一基準面後，該錘對於基準面具有能。因重錘落回原位置時能夠打樁入地，即為該能的效果。箭射出前的彎着的弓，所貯蓄的能，即為貯蓄的位能。

物體因本身的運動而具有的能，稱為動能。凡是運動着的物體都具有動能。以高速度離開槍口的子彈，具有大量的動能，可由它的能夠貫穿鋼板的事實證明之。

轉動中的飛輪所具有的能，是貯蓄的轉動能。在有些書中，轉動能亦稱為動能，但在本書中，動能一詞只指移動的能。轉動的能並不包括在內。

1-6. 內能(分子系的貯蓄能)。

元素、原子、和分子

一般說來，任何物體皆由元素構成，元素共有九十二種。在普通情形下，不能使元素再行分解。如鐵、碳、硫、氧、及氮等從來沒有再分解過，故可稱為元素。食鹽不是一個元素，因為它能分解成爲氯和鈉。元素可看作構造物質用的材料。各種元素都是由很小的看不見的質點所謂原子者組成。某一元素的性質，即由其原子的大小、重量、形狀及排列情形等所決定。

從很多方面看，各種元素的原子是相似的。例如各種原子可能皆有相同的形狀，它們的結構，一般地也是相同的。原子的結構，包括帶有正電的原子核，繞着它迴轉着的是一些帶負電荷的微粒，稱為電子。電子們繞着原子核的轉動，可以說和行星們繞着太陽的轉動相似。

另一種極重要的微粒，是由若干個原子集結而成的，叫做分子。也有某些物質的分子，僅含有一個原子，例如單原子氣體的氫。

原子和分子的貯蓄能

讀者於學習熱力學時，對於內能一詞，需要有明確的概念。內能就是氣體、液體、或固體一類的分子系所貯蓄的能。

分子的領域內包含着大量極微小的個體，這就是分子。在此含有大量極小個體的領域中，到處都在運動。貿然一看，以為這必是一個混亂世界。例如，在一氣體內，數量極大，且極微小的分子們，以子彈般的高速，衝來撞去，並互相撞擊。大氣中億兆的分子不停地撞擊我們身體，成為所謂大氣壓力。這樣的最初印象，常使我們錯誤地以為分子的運動是偶然的，亂動的，沒有規律加以約束的。但是根據統計力學的定律，可以推定大量分子行動的狀況，雖然這些定律，不可能告訴我們個別分子的運動，正如某一個人的壽命並不能從一般人的平均壽命統計數字來決定一樣。

因為分子有質量有速度，故分子及原子有動能。一個氣體分子以一定速度作直線運動時所具有的動能，等於它的質量與速度平方乘積的一半。這個動能正如一輛汽車以一定速度沿直道而駛所有的動能一樣。以上所述動能一詞，當應用於分子系統時，則為分子由於作直線運動而具有的貯蓄動能。

分子的動能是與它的溫度成正比的，溫度愈高，動能愈大。若溫度降低，則分子的動能就減小。當溫度降低至某一定值，則分子的動能將為零，即分子停止作直線運動，此時的溫度稱為絕對零度。

分子除作直線運動外，也可能有轉動。分子若有轉動，就具有轉動能。轉動能的大小，係由慣性矩及角速度二量所決定，即等於慣性矩與角速度平方乘積的一半。一分子所有的轉動能，正如一轉動中的飛輪所具有的一樣。

分子除具有上述的移動能和轉動能外，組成分子的原子還可能有

振動能。原子對於其平衡位置作振動，則具有振動能。討論原子的振動能是很複雜的，不在本書範圍內。但原子振動貯蓄能在研究高等物理學及物理化學時，就要考慮到。

一定分子系內的各分子，是受個別與個別分子間及一羣與一羣分子間的引力而被限制着的。各分子愈緊密的組合，它們之間的引力也愈大，於是它們也就更有運動的自由。愛立芝氏指出氣體中的分子與液體中分子分佈情況的比較，和偏僻鄉間的人口與城市出租公寓區的人口分佈的比較相類似。氣體的分子佔有甚大的空間，分子與其他分子相距甚遠，故能有相當自由的運動，不受如何的干阻。液體的分
子，相距較近，故其運動已很受周圍分子的影響。固體中的分子相距更近，故各分子運動的自由更小。

一分子運動時，於碰撞另一分子前所行的距離，通常稱為平均自由路程。氣體的平均自由路程最大，液體的次之，固體的最小。平均自由路程愈大，分子間作用力的影響愈小。氣體所佔的容積，較之其分子本身實際所佔的容積，是極大的。故壓縮之，其容積會減小。在容積減小後，分子間的距離依然是很大的。由此可以明白氣體的壓縮性。

由分子間限制分子運動的作用引力所得的位能，在熱力學中，稱為內貯位能。分子系的內貯位能，可以與宇宙中使各天體能保持一定位置的相互引力所發生的位能相比擬。

氣體分子的貯蓄能

所謂理想氣體可以想像為一種分子與分子間相距極遠的分子組合體。這些分子向不同方向運動，互相撞擊，跳回之後再向新方向運動。各分子的速度不等，其平均速度每秒約為 400 米。^①

① 此速度約在 0°C 時(參看 4-12 節末尾之表)。

氣體分子除有直線運動外，在一定情況下，可能還有轉動，分子中的原子，也可能發生振動。故氣體分子系的貯蓄內能等於移動、轉動、振動三種動能的和，再加上分子間引力所發生的位能。

液體分子的貯蓄能

前面已經指出液體分子間的距離較氣體的為小，故其分子間互相作用的引力也較大，以致對於各分子的運動有顯著的影響。液體分子的平均自由路程較氣體的小得很多。當液體自液面蒸發時，因為受分子間作用力的限制，到達液面的許多分子，並不能全部離開液面，僅是那些速度甚大足以克服分子間作用力的分子，才能衝離液面。能夠逃離液面的分子數目，由溫度決定。液面上的分子亦有重行撞入液體的。當由一液體表面逃出的與撞入的分子數目彼此相等時，就成為平衡狀態。貯蓄內能就是分子們的貯蓄能。通常液體的內能等於分子的移動能和轉動能再加上由於分子引力的位能。

固體分子的貯蓄能

在各種真正的固體或結晶固體中，結構的單位通常不是分子，而是原子；但也有某些形式的結晶體仍保持分子個體的形式。為求一致，以免概念混雜起見，在固體的討論中，仍以分子為討論對象。氣體分子運動的自由，若與固體的比較，是太大了。大多數的固體可以認為如結晶體般規律地排列而成，就如同牆磚的有秩序地排列相似。固體分子中原子的排列，常稱之為格架。結晶格架中束縛力之大，足以使分子的移動及轉動不能發生。原子僅可在它的靜止位置附近振動。可以說固體中的分子，已失去好動的個性。拘束格架在一起的力，阻止分子發生運動。固體的貯蓄能或內能等於於原子的振動能及由於束縛力而起的位能二者的和。

總 結

一分子系的能，可能包括移動、轉動、振動等動能，和由於分子間引力的位能。工程師並不需要知道分子系所有能的各部分，只要知道它的能的總值就夠了。因此以後將稱一分子系所有的總貯蓄能為內能。內能的變化就是指一分子系由某一初態至另一末態分子們貯蓄能的變化。

1-7. 溫度。

我們日常接觸着冷的熱的物體所發生的感覺，已經是不足為奇的經驗了。為建立一些方法以便精密地區別一個熱體和一個冷體，茲介紹熱態這個名詞，並加以討論。現在只可以說，熱體的熱態，是與冷體的熱態不相同的。隨即發生一問題，即各種不同物體的熱態，如何決定呢？欲回答這個問題，需要利用幾種習見的觀察結果。例如一鋼棒放入火爐後，它的長度會增加。故當壓力保持不變時，一物體熱態的變化，是可以由該物體容積的變化決定的。一般的溫度計普遍地應用水銀柱的膨脹或收縮，以測定一物體的熱態。其他的物體性質，只要是由熱態決定的，也可用以決定熱態。例如電阻的變化，或二種不同金屬接頭所產生的電動勢等。

當一熱體與一冷體接觸時，熱者漸冷，而冷者漸熱。最後此二物體的熱態達到相同的情況，即用手試之，有相同的感覺。這種最後相同的情況，稱為熱的平衡。由此，可得結論：若物體 A 與二個物體 B 及 C 皆成熱的平衡，則物體 B 和 C 間，亦必互成熱的平衡。假使不如此，將不可能達到一般的熱的平衡，顯然地是違背日常經驗的，故上述的結論是正確的。根據這個定律才可能用第三物體 A ，如一溫度計，去比較二物體 B 和 C 的熱態，而不需要將 B, C 二物體直接接觸。於比較物體 B

及標準物體 A (如溫度計) 以前, 須決定 A 物體熱態的適宜範圍。假設物體 A 為水銀溫度計, 即盛水銀的玻管, 在標準大氣壓力下, 先放於正在溶化的冰中, 再放於沸騰的水中。在每一情況下, 均在玻管外面畫一刻度, 以記載水銀的容積。並將這兩個刻度間的長度, 分為 100 個等分, 且以 0 標低的刻度, 100 標高的刻度。現在 A 物體已經有了標度, 可將 B 物體與之接觸, B 物體的熱態, 可由觀察水銀柱的高度得到。假使 A 與 B 二物體於接觸相當長的時間後, 水銀柱的高度停止在刻度 30 處, 我們就可以說, B 物體的熱態, 與大氣壓力下和冰水接觸的 A 物體的熱態比較, 高出了 30 個刻度。溫度一詞可以適用於這樣比較得來的熱態。上述的刻度 30 可以稱為一特定標度上的溫度 30, 此種標度以大氣壓力下冰點為 0 度, 沸點為 100 度, 並且這個標度是刻劃在內裝水銀柱的玻璃管上的。故得結論: 在同溫度的二物體, 必定在熱的平衡狀態, 即有相同的熱態。溫度是物體熱態的量度, 以此確定一物體傳熱至另一物體的能力。

理想氣體的熱態, 由分子們的動能決定; 事實上理想氣體的溫度與分子們的動能成比例。關於理想氣體, 以及其溫度與分子們動能間的關係, 將於第四章中詳細討論之。

1-8. 溫度的標度。

工程界中普遍使用的溫度標度有兩種, 即攝氏和華氏, 見圖 1-1。攝氏的標度, 將標準大氣壓力下水的冰點與沸點間長度分為 100 個等分, 以冰點為零, 以沸點為 100。華氏標度則分此長度為 180 等分, 以冰點為 32, 以沸點為 212。

華氏與攝氏二種度數間換算的關係式為

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32. \quad 1-1$$

$$t_C = (t_F - 32) \frac{5}{9}. \quad 1-2$$

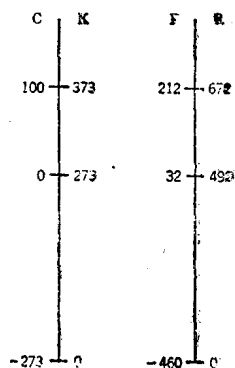


圖 1-1.

例題 1-1. 變 20°C 爲華氏度數。

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

例題 1-2. 變 140°F 爲攝氏度數。

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

1-9. 絕對溫度.

從前許多科學家曾經思考過溫度的絕對零度,或可能達到的最低溫度問題。絕對零度概念,實與氣體溫度標度及愷爾文爵士的熱力學溫度標度相一致。觀察家們已得的結果爲絕對零度應在 -273.13°C 或 -459.63°F 。絕對零度的物理意義容後說明之。工程上關於熱力學計算,採用絕對零度爲基點的絕對溫度(見圖 1-1)是方便的,且常常是需要的。用攝氏標度計的絕對溫度,以符號 K 表之。用華氏計的絕對溫度,用符號 R 表示。攝氏絕對溫度的標度單位稱爲愷爾文氏度,華氏的稱爲郎肯氏度。各種溫度標度相互間的關係,如圖 1-1 所示。欲將華氏度數變爲絕對溫度數(R),可就所給溫度加 459.63 得之,以式表之爲

$$T_R = t_F + 459.63. \quad 1-3$$

攝氏與愷爾文氏(K)度數間的關係式爲

$$T_K = t_C + 273.13. \quad 1-4$$

這些關係式中的 T 表絕對溫度, t 表華氏或攝氏溫度。數值 459.63 及 273.13 在本書中,將以其近似值 460 及 273 代之。

例題 1-3. 若一氣體的絕對溫度爲 580°R , 求相當的華氏度數。

(解) 用式 1-3,

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

例題 1-4. 相當於 -60°C 的絕對溫度爲何?

(解) 用式 1-4,

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

1-10. 比容.

通常某定量氣體所佔的容積,稱爲總容積,單位爲長度的立方,例

如併或立方米。單位重量氣體所佔的容積，稱為比容，它的單位是每公斤立方米，(立方米/公斤)。從分子的觀點看，比容就是總重量有 1 公斤重的那些個分子們所佔的容積。

1-11. 壓力。

壓力是加於或分佈於一面上的力，以單位面積上的力(力/面積)計算。一分子系(例如氣體)的壓力，是由各分子的速度和一定容積內分子的數目所決定的。

通常說到的，或量得的壓力，若不是相對的，就必是絕對的，二者必居其一。將這兩種壓力的區別分清楚後，就不致於發生錯誤。相對壓力，是對於大氣壓力而言，通常用一包登壓力表量之，故亦稱表壓力。此種壓力表為一金屬製的彎管，橫斷面或橢圓形，一端固定，如圖 1-2 所示，另一端封閉並以一連動桿系連動一迴轉的指針。當壓力高於大氣

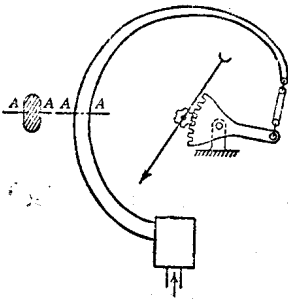


圖 1-2.

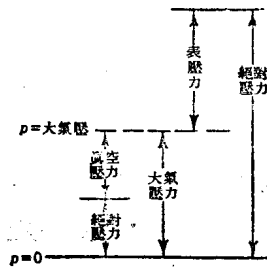


圖 1-3.

的流體通入該管後，橢圓斷面有變圓的趨勢，彎管亦因之稍為伸直。於是封閉端的運動，經桿系的傳動，使指針轉動。若壓力低於大氣壓的流體通於該管，則管的橢圓斷面將變為更加狹長，管的彎度增加，封閉端的運動方向與前相反，指針亦然。指針下有一分度盤，可直接讀出壓力的數值。當該表與大氣壓力相通時，管內外的壓力相等，可以調節分度

盤的位置使此時的讀數爲零。專用於量低於大氣壓力的包登表，通常稱爲真空表

爲求得量度壓力的標準，需要建立絕對壓力的標度，它不受大氣壓力昇降的影響。壓力的絕對零值僅於完全真空時存在。

凡是在壓力的絕對零值以上量得的壓力，稱爲絕對壓力。若壓力是以大氣壓力爲起點而量得的，就是表壓力。若壓力是自大氣壓力向下量得的，爲真空壓力。各種壓力間的關係如圖 1-3 所示。以式表之爲

$$p(\text{絕對}) = p(\text{大氣}) + p(\text{表}) \quad 1-5$$

或

$$p(\text{絕對}) = p(\text{大氣}) - p(\text{真空})$$

大氣壓力通常用氣壓計量之。這種壓力表通常爲一根裝滿水銀的長玻璃管，一端封閉，另一端亦暫時封閉，倒插於小的水銀槽中。使暫時封閉的那端，沒入於槽內水銀液面之下。打開封閉端的塞後，管中的水銀柱將降低至一定高度，其時大氣壓於槽內水銀液面上的力，正好托住水銀柱的重。因爲水銀柱上玻璃管內空間的壓力約等於零，故由水銀柱的高度，可以決定大氣壓力。

例題 1-5. 氣壓計的讀數爲 76 厘米的水銀柱。求用(公斤/方厘米)爲單位的大氣壓力。水銀在 6°C 時的密度爲 13.5951 克/立方厘米。

(解) 設氣壓表玻璃管的斷面積爲 A 平方厘米 (cm^2)，則水銀柱的重爲

$$W = 76(13.5951)A \text{ 克。}$$

其壓力爲

$$p = \frac{W}{A} = 76(13.5951) = 1032 \text{ 克/方厘米。}$$

或

$$1.032 \text{ 公斤/方厘米。}$$

於計算大氣壓力時，下列關係式甚爲有用：

$$1 \text{ 厘米水銀柱} = 0.0136 \text{ 公斤/方厘米。}$$

例題 1-6. 某包登表的讀數爲 1.02 公斤/方厘米，其時氣壓計的讀數爲 1 公斤/方厘米，求絕對壓力。

(解)
$$p = 1.02 + 1 = 2.02 \text{ 公斤/方厘米。}$$

在本書中凡是說及壓力而未指明係何種壓力的，皆指絕對壓力；表壓力或真空壓力等皆