

熱 力 學

(上 冊)

工 程 熱 力 學

編	著	王	補	宣
校	閱	潘	承	孝

上 海 中 外 書 局 出 版

編號：0012 25K P.510 定價：¥ 39.000

版權所有 不准翻印

編著人	王	補	宣
校閱人	潘	承	孝
出版人	盛	際	唐

責任編輯：錢震之 校對：曹洪琛

1952年1月發排(同康)

1952年9月付印(洪興)

1952年9月初版

上海造1—1500冊

出版者

中外書局

上海中山東一路十八號

經售處

外埠分局及全國各大書局

莊 序

過去工程書籍，寥若晨星，其原因有下列幾種：(1)工程譯名，頗費斟酌；(2)各級學校，尤其是大學，皆採用西文課文；(3)出版業惟利是圖，大學教本銷路有限，致使有志於編譯工作者類都裹足不前；(4)在以留學鍊金爲升官發財的終南捷徑的教學制度之下，教者學者皆不重視中文教本。

解放後，祖國工業建設，突飛猛進，需要大批幹部，而培養大批幹部，則必須採用中文教本，方可免去文字之隔閡，使學者易於瞭解教材內容。同時，客觀環境既已改善，上述種種原因亦已消除淨盡。目下各大學工程教材，暫時的辦法是編印中文講義，永久的辦法便是編印中文教本，方可以配合課程改革的精神，來滿足教學上的需要。

工程熱力學爲熱力工程的基本科學，亦即學習動力工程所必修的課程。王補宣同志以其在國內外鑽研此科的心得，和所蒐集的資料，截長補短，悉心編著，並採用公制，結合實際，詳舉例題，且於北京大學工學院機械系教授該課時，將其程序及進度疊加修改，脫稿後曾請天津大學潘承孝先生詳予審閱，認爲內容充實，堪作工科熱力學教材。王同志編寫此書，正切合當前高等學校工程教材的需要，於工程教學上可有一定的貢獻，願書數語，附於書末。

莊前鼎 於清華大學 1952年5月26日

李 序

工程熱力學是動力機械工程主要基礎的一科。要想學習蒸汽動力，內燃動力，造冰，暖室，調風等專業知識，就必須先在工程熱力學方面打好根底，要從這門學科裏建立起明確的基本概念，並且進一步培植關於熱力分析的能力，使這種概念和分析能力在若干熱力工程的一般性問題上得到運用和鍛鍊。

在目前大學和專門學校的動力機械工程科系裏，我們亟需能符合這種要求的工程熱力學教本。這個教本不僅要有健全的理論基礎，切合實際的例證，和富於啓發性的習題，更迫切地還應該採用我們本國的工業標準制度。惟有在整個學習過程中，熟練地使用這個制度，才能夠在工業上應用時做到心中有數，學用一致。

王補宣同志十年來對於工程熱力學致力學習，悉心鑽研，在國內外學校中，對有關名著如 Keenan, Zemansky 各書，都有深入的研究和體會，結合我國實際需要，編出這本“工程熱力學”。在合時的中文教材極端貧乏的情況下，這本書的出版，必然有它一定的貢獻，因為它是爲了上述的目的而編寫，而且能夠滿足這個目的。這是值得着重地向讀者介紹的。

在這本書的內容中，對於主要的部份和補充性、說明性的部份都很清楚地區分開來，這對於教學，對於學習，都給予很大的方便。

在人民教育向着集體主義教學發展的今天，任何一個教本，一種教材，爲了更好的爲讀者服務，要從各方面不斷地吸取經驗和意見，及時地改進它的內容。因此，希望讀者暨使用這本書作教本的同志們，多多提出寶貴的意見，使這本書在不斷地提高中發揮更多更大的效用。

李岱山 於北京大學 1952, 6, 16

自序

晚近我國各大學工程熱力學所用教本，幾都採用 Barnard, Ellenwood 與 Hirshfeld 三氏合著“熱工學”(1926 第三版)之第一篇，即以中文出版之是門課本而論，亦大率根據於此。惟就著者歷年教學經驗所得，深感原書說理空泛，內容枯澀，對於初學者尤少啓發，致有囫圇吞棗之弊。爲謀授受雙方在進度上均能感到適當起見，無論在理論與實際方面，似應根據新資料儘量補充並更改原有程序之必要。爰將多年來所收集的資料，貫徹實際疊加整理，利用授課與工作餘暇，著成此書。

本書說理力主淺顯詳明，排列程序務求繁簡合度。各章均配合理論，多舉實例，且不厭求詳，反覆講解，庶幾內容不落偏枯而免跡近抽象。書末特輯習題百五十三則，供作綜合性之複習，其中有較爲難解者，均有適當提示，以資啓發。凡已具普通物理與微積分之基本認識者，於習讀本書時循序漸進，當不致有索解艱澀之感。

全書計共二十章。上册十章，係由著者現在國立北京大學工學院教授“工程熱力學”一科之教材編寫而成，並陸續將原稿中之過詳過略及編列次序不甚適合之處再加訂正。除加強熱力學基本理論之闡述外，旨在說明熱機所用流體之熱力性質，熱力變遷，以及熱機循環之分析，並在第九章內用蒸汽機爲例，詳釋真實熱機各種性能和效率之意義。此外，舉凡有關圖表理論，壓氣，煖氣，通風調氣與機力製冷之概念及其初步分析，亦統在啓示之列。下册十章將深入討論壓氣製冷，燃燒與內燃機分析，輪機分析，圖表之測製，並適當介紹傳熱原理，物理化學平衡之條件，溶液理論，相律，以及其他有關資料在工程上之應用。

此書爲適應今後需要，已全部改用公制，所採數據亦均儘量使之合

乎時宜，必要時並附註資料來源。

上册直接備大學工科學生修習“工程熱力學”一科之用。按照中央教育部‘課改’方案所規定之每週授課四小時，自修五小時（包括溫課，作習題與閱讀例題），討論一小時（着重例題之講解），每學期實際上課十八週，則全部教材一學期可以授完。如進度合適，於最後一、二週內尚可酌量時間選定傳熱原理之適當教材。又書內，凡涉及較深入之理論，或僅列供參考，作為輔助解釋之用者，均以較小字體排印，不必在上課時間內詳予講解。在操作比較簡略課程如“熱力工程”（一）之教本時，每週授課三小時，則第三章，第五章，第六章，第九章與第十章均可擇要講授之。下册可供進一步選習“高等熱力學”一科之用。全書亦可備作大學理科“熱力學”一科之主要參考書，俾可明瞭理論與實用之相配合。

關於教材之選擇及編列，雖經精心考究，缺陷之處仍恐難免，尚祈國內專家不吝惠予指正。

、本書承天津大學教務長潘承孝教授於百忙中詳為校閱，清華大學機械系主任莊前鼎教授及北京大學工學院機械系主任李西山教授惠賜序文，謹誌感謝！又，書成出版，適值家嚴七秩誕辰，特附識於此以留紀念。

王補宣 於國立北京大學工學院

一九五二年五月

目 錄

第一章 緒論	1-23
1. 熱力學和工程熱力學	1
2. 功與能	1
3. 熱與能	2
4. 熱力學之範圍和限度	4
5. 熱力體系	7
6. 熱機, 工質, 和循環之意義	8
7. 溫度在熱力學中的重要性	9
8. 熱容量, 比熱, 及熱之單位	13
9. 壓力, 流體功, 流動功, 功率, 及其所採用之工程單位	17
10. 物態	21
第二章 熱力學第一定律	24-53
1. 熱功當量	24
2. 熱力學第一定律	25
3. 熱力學第一定律之應用於孤立體系	26
4. 簡單能量方程式	27
5. 內能之性質	28
6. 熱含或焓	34
7. 運動體系與熱力學第一定律	36
8. 熱力學第一定律之應用於開口體系	37

9. 穩定流動及其通用能量方程式.....39
10. 穩定流動能量方程式和波諾利公式.....44
11. 熱力學第一定律之應用示例.....45

第三章 熱力學第二定律 54-103

1. 熱力學第一第二兩定律之個別範圍.....54
2. 熱與功之變換.....55
3. 熱力平衡之意義.....57
4. 可逆性與可逆過程.....58
5. 卡諾循環及其可逆性.....62
6. 單熱源熱機與第二類永動機.....67
7. 熱力學第二定律.....69
8. 卡諾定理.....71
9. 愷爾文熱力溫度標.....72
10. 克勞修斯不等式.....77
11. 熵之定義和特徵.....81
12. 熵之增升原理.....85
13. 熵與不可用能.....88
14. 能之遞降原理.....93
15. 熵和騷動.....99

第四章 理想氣體104-142

1. 引論104
2. 波義耳定律和查理定律 105
3. 阿伏加德羅 定律107
4. 理想氣體 之形態方程式109

5. 焦耳定律	112
6. 理想氣體之比熱	116
7. 理想氣體之內能和焓	118
8. 理想氣體之分子理論簡說	120
9. 理想氣體之等熵過程	125
10. 理想氣體之多變過程	129
11. 理想氣體之等溫過程	139
12. 理想氣體之不可逆絕熱過程	140

第五章 真實氣體 143-196

1. 通說	143
2. 真實氣體之等溫曲線	147
3. 凡得瓦爾方程式	150
4. 簡化形態方程式和對比態定律	157
5. 通用壓縮因數圖	162
6. 其他形態方程式	164
7. 焦耳——愷爾文效應	171
8. 真實氣體之比熱	177
9. 真實氣體之焓和內能	189
10. 真實氣體之熵	192

第六章 單質態之變化及其蒸發氣圖表之運用 197-250

1. 蒸發氣簡釋	197
2. 集態之變換	197
3. 蒸發和沸騰	200
4. 單質壓容圖	201

5. 單質壓溫圖	205
6. 單質二相混合物之性質	206
7. 三相點	209
8. 形態立體面	211
9. 單質溫熵圖	213
10. 單質之 <u>耶伯斯</u> 原面或熱力面	215
11. <u>莫理耳</u> 圖	218
12. <u>克拉貝洪</u> 方程式	219
13. 蒸發氣圖表之運用	224
14. 壓縮或冷卻液體之性質	240
15. 液體和蒸發氣之偏穩定狀態	243
16. 蒸發氣之熱力過程	246

第七章 理想熱機循環 251-293

1. 引論	251
2. <u>史透林</u> 回熱循環	256
3. <u>愛利克松</u> 回熱循環	259
4. <u>鄂圖</u> 循環或 <u>包德洛沙</u> 循環	260
5. <u>笛塞爾</u> 循環	269
6. <u>薩伯梭</u> 循環或半 <u>笛塞爾</u> 循環	274
7. <u>白雷登</u> 循環或 <u>焦耳</u> 循環	278
8. <u>阿特金生</u> 循環	281
9. <u>華爾坎</u> 循環或集成循環	286
10. 氣體循環總論	288

第八章 理想熱機循環(續) 294-338

1. 蒸發氣之 <u>卡諾</u> 循環.....	294
2. 蒸發氣循環與蒸發氣機循環.....	295
3. <u>郎肯</u> 循環.....	297
4. 不完全膨脹與不膨脹循環.....	303
5. 再熱循環.....	307
6. 回熱循環.....	312
7. 再熱回熱循環.....	327
8. 二流體循環.....	329
9. 撤汽循環與功熱副產品.....	333
10. 動力廠循環總論.....	334

第九章 往復式蒸汽機之熱力分析與真實熱機之

效率和性能..... 339-377

1. 蒸汽機簡說.....	339
2. 示功器與示功圖.....	344
3. 蒸汽機汽缸中蒸汽可用能之消耗.....	347
4. 減輕汽缸凝結之補救法.....	360
5. 協定示功圖與功圖因數.....	364
6. 制動功率與機械效率.....	372
7. 真實熱機之效率與性能.....	373

第十章 氣體與蒸發氣之混合物..... 378-436

1. 引論.....	378
2. <u>道爾頓</u> 定律.....	378
3. <u>耶伯斯</u> 定理與 <u>耶伯斯</u> —— <u>道爾頓</u> 定律.....	381

4. 理想氣體混合物之性質.....	384
5. 理想氣體之混合過程.....	391
6. 真實氣體混合物.....	401
7. 氣與蒸發氣之混合物.....	406
8. 空氣與水汽之混合物.....	408
9. 混合物之等熵變化.....	418
10. 空氣與水汽混合物之穩定流動.....	423

附錄.....	437-441
---------	---------

第一表 飽和蒸汽表.....	437-438
第二表 飽和及過熱蒸汽表.....	插表
第三表 碳酸氣飽和蒸發氣表.....	439
第四表 氮飽和蒸發氣表.....	440
第五表 亞硫酸氣飽和蒸發氣表.....	441
附 圖 蒸汽莫理耳圖.....	插圖

習題.....	442-465
---------	---------

索引.....	466-472
---------	---------

人名.....	466
名詞.....	467

第一章 緒論

1. 熱力學和工程熱力學 就字義言,可以概見:“熱力學”(Thermodynamics)者,乃研究熱(Heat)和力兩大現象間相互關係之一種科學。倘細究其內容,亦確與此二者直接或間接有關,因熱和力各為“能”(Energy)轉移時的表現,而就目前所知,各種能均可互相變換:種種能可變為熱,熱亦可轉變為他種能。故就廣義言之,熱力學者,係研究熱能(Thermal Energy)對於他種能,如機械能,電能,化學能及生物能等的關係之科學。如此,熱力學範圍,實牽涉太廣。當專就工程方面言,普通僅限於研究熱能與機械能或通常所謂“功”之間的關係,以及相關工作物性質之變化;對於此種熱力學,有時另稱之為“工程熱力學”。

2. 功與能 着力點沿力之方向移動一段距離時,謂之完成一定的機械功,習慣上簡稱之為“功”(Work)。功的多少,以所加力之大小與沿加力方向移動距離之乘積表之。除機械功外,實際上尚可有其他形式之功,例如電功即係所加電動力(Electromotive force)和通過電流之乘積。概言之,廣義的功為“綜合力”(Generalized Force)或名“強度因數”(Intensity Factor)和“綜合距離”或名“容量因數”(Capacity Factor)之乘積。

凡擁有質量(Mass)並佔據空間的物體或部份物質,當其物態(State)發生變化時,如能產生功或與之相當的其他效果,即稱該物體或該部份物質含有一定的“能”。換言之,能為某物體或某部份物質所具作功或對外表現效果之能力。於是,能亦可有各種不同形式:產生電功之能力謂之電能;產生機械功者,謂之機械能;餘則依此類推。故

“能”的單位與“功”相同，可直接或間接表成力和距離兩單位之乘積。或謂“功”為“能”轉移時對外所表現之效果，有時還稱之為“轉移能”(Transient Energy)。

物體或某部物質所儲能量，不外後述三項：(一)分子組織和原子排列所儲“內能”(Internal Energy)，亦稱“稟能”(Intrinsic Energy)，包括分子運動之移動(Translation)和迴轉動能，原子與原子間因分子碰擊所生“振動能”(Vibrational Energy)，以及分子與分子間凝集力和原子與原子間化合力所組成的勢能；(二)物體位置高低所含“位能”(Potential Energy)；和(三)物體運動之動能(Kinetic Energy)，包括轉動時所具“迴轉能”(Rotational Energy)。總稱之為物體或物質內部的“蘊儲能”(Stored Energy)。

一物體所含之能，與一物體所具運動之性質相同，完全係相對的比較；倘不假定一種人為的標準，則一物體所含之能，無法給出其絕對數量。

3. 熱與能 關於“熱”的本性，在1850年以前，有兩種不同理論：一為“微塵說”(Corpuscular Theory或Caloric Theory of Heat)，亦稱“唯質說”，謂熱為一種具有質量的極稀薄流體，名之曰“熱素”(Calorie)。物體得之則熱，失之則冷；加多時則溫度高，體積增加，減少時則溫度低，體積縮小。至1798年，倫福特氏(Count Rumford 即 Benjamin Thompson) 觀測在鑽大炮時所起鉋屑，發生大量之熱，且物體並不因溫度升高而增加重量；1799年，戴維氏(Sir H. Davy)用兩塊冰互相摩擦而彼此溶解。兩氏遂據以斷定：“熱”可由機械動作而產生，與唯質說不符，故又另倡“唯能說”以代之，認熱為對外轉移的一種能量，係來自物體分子運動之動能，是為現代“熱之動力理論”(Dynamic Theory of Heat)的開始。

1842年，梅逸氏(J. R. Mayer)假定氣體被壓縮時所產生熱量與

壓縮時所消耗之“功”相當，首先試測“熱之功當量”(Mechanical Equivalent of Heat)。1843年，焦耳氏 (J. P. Joule) 正式歸納實驗結果，證明由機械功所產生熱量與所耗費之功成正比例，並測定熱功當量爲：每消耗 772 呎磅之機械功，所生熱量可使 1 磅水升高華氏 1° (詳見下章)。接着，1847年，海爾姆霍滋氏 (H. Von Helmholtz) 正式發表“能量不滅”原理；1849至1850年湯姆遜氏 (James Thomsen) 愷爾文氏 (Lord Kelvin, 卽 Sir W. Thomson), 和克勞修斯氏 (R. Clausius) 先後用實驗證實 1824 年所發表的卡諾 (S. Carnot) 理論，成立熱力學第二定律；於是，“熱”被確認為“能”之一種矣。

能量不滅原理，推廣之，實卽熱力學第一定律；與熱力學第二定律，均係歸納自然現象所得之結論，二者相互爲用，組成現代熱力學之基礎，此爲研究熱之動力理論的一種方法。另一面卽所謂“熱之分子理論”(Molecular Theory of Heat)，自蒲郎克氏 (M. Planck) “量子學說”(Quantum Theory) 創建後，亦漸趨明確。依照此一理論，任何物質均由分子和原子所組成，分析物體能量時，可以每一分子爲自由個體，然後用力學觀點分析之。此時分析對象，已深入物體內部，並不僅限於對外“效果”(或統稱之爲現象)，故不復有所謂“能量消散”之可能(詳見第三章)。於是，熱能者，可視作分子運動的動能和分子與分子間相互勢能之總和。如此，物體內部分子運動速率愈低，吾人觸之卽生冷的感覺，如設法加入“能量子”(Quanta)，使分子運動增加，吾人觸之卽生熱的感覺。當冷熱二物體相接觸時，接觸處熱物體之分子衝動冷物體分子，前者速度漸增，後者速度漸減，徐徐傳達，冷熱漸趨平均。在固體中，分子運動係一種往復的振動，溫度高時，速度與振幅均大；反之則速度與振幅均小。因之，物體將隨溫度之升降而起漲縮現象。若溫度更高，則分子運動加劇，至振動力勝過各分子間凝集力之一部時，物體勢將無法保持其固有物態，被迫由固態變爲液態，或就結晶體 (Crystal-

line)言：常溫時，原子均按一定晶體架(Lattice)排列，溫度漸升，各原子將沿應有位置作往復簡諧振動，其振幅和頻率均隨溫度增加；是即固體吸收外熱，內儲為原子振動能；最後，溫度達到“熔點”(Melting Point)時，繼續自外加熱，振幅將無限增大至晶體架不能忍受，終至被毀，於是晶體熔成液體。若再加熱，使分子振動力完全勝過分子間凝集力時，則物體又由液態變為氣態，故物態變換時所吸收或放出“潛熱”(Latent Heat)，可想像成分子或原子排列發生變動時，所起化學能的得失；或潛熱之被吸收，乃用以改變內部排列所需克制之內功。又所謂化學能者，常指物體起化學變化時，內部儲能之改變；此種能量當其表現於外時，都成為熱，故化學能每可視作熱能中的一種形式。例如燃料與炸藥中所蓄之能即為“化學位能”(Chemical Potential)。

機械能轉移時，將產生或吸收相當之機械功。同理，熱能轉移時，即發生傳熱現象(詳見另章)。換言之，熱為一種轉移能，故熱亦可與機械能和化學能以外的他種能如電能等相交換。

4. 熱力學之範圍和限度(註一) 熱力學的主旨，在根據歸納日常經驗所得的兩大基本定律，分析有關各種能之間的變換現象。1906年，南恩斯特氏(W. Nernst)復倡新的熱定理，後經蒲郎克(M. Planck)法奧勒(R. H. Fowler)和葛根海(E. A. Guggenheim)諸氏冠以“熱力學第三定律”之尊稱。惟其適用範圍究不如第一第二兩定律之廣泛可靠，且第三定律亦從第二定律演繹所得，實為在適當情況下第二定律的一種重要補充。利用第一第二兩基本定律，配合比較簡明的數學步驟，使吾人可以推演一組對於工程，物理，和化學上具有重要啓示性的結果。

雖則，熱力學之實用價值，如以後各章所將分別處理者，已屬無庸置疑，但應用熱力學者，必須牢記熱力學幾種本質上的限制。熱力學

(註一) 參閱 P. W. Bridgman: "The Nature of Thermodynamics"(1941 版)。

所研究者，僅限於一物體或某部物質因內部發生變化時，對外界所生之反響；換言之，熱力分析之對象，並未深入物體內部，其與所牽涉物質內部分子和原子組織，或發生化學變化時所產生應變的自然機構，固屬無關。因之，欲藉純熱力學原理以推論與此種組織或變化境遇相關的物性時，則甚難獲致精確。熱力分析之運用，在啓示各種可被直接或間接觀測的物性間之相對關係，但設無分子運動說，統計力學 (Statistical Mechanics)，量子學說，和戴拜愛——黑格爾理論 (Debye-Hückel Theory) 等爲之相輔，或藉實驗以作測量，則熱力學本身將無從估計各該物性的確實數據，是則熱力學之應用，必須建立於歸納事實之基礎者，其理明矣。

上段所述，未免過於抽象，爲求進一步之說明，可另用淺顯事例，以作比喻。物體之自斜面下滑，稍具力學常識者，咸知此物運動時，將受斜面摩阻力 (Friction) 之阻擾，至摩阻力之大小，在普通力學中都認定與滑塊所加諸斜面的正向壓力 (Normal Pressure) 有關，並稱摩阻力與該正向壓力之比爲滑塊與斜面間的“摩阻係數” (Coefficient of Friction)，其數值可由實驗測定，不在力學本身範圍考慮之列。不僅如此，克制摩阻力，需要相當摩阻功，即摩擦生熱，謂之“能的散逸” (Dissipation of Energy)。但利用原子物理 (Atomic Physics) 之觀點，則此滑塊可想像成若干原子或分子所組成桁架 (Truss)，忍受一重力方向之作力和另一與滑動反方向之斜面切力。於是，所謂“能的散逸”，即係使桁架變形所應克制之“內功”，蘊儲而爲熱能。用每一原子或分子，即桁架每一接頭處爲個體，應可計算出力之分佈和傳熱路線；然後據以製造標本，用實驗方法證實之，倘所得結果，不合實際，則需另行改變想像中的桁架組織。二者方法雖異，其對外總效應則同，蓋以原子物理所分析結果，亦不應脫離事實也。惟在一般力學或所謂牛頓系力學 (Newtonian Physics) 所處理者，僅限於表面，即承認摩擦