

苏联高等学校教学用书

工程热力学 及传热学基础

A. И. 維尼克 著

严家驊 张正荣 译

冶金工业出版社

72.54
2074

苏联高等教学用书

工程热力学及传热学基础

A.И. 維尼克 著

数理科学博士 A.A. 古赫曼教授 校

严家驊 张正荣 译

苏联高等教育部审定为

冶金高等学校教学用参考书

冶金工业出版社

本书叙述工程热力学及传热学基础。书中介绍了苏联及国外科学的最新成就。其中引入了不可逆过程的热力学部分。对基本概念的研究、对所研究的现象物理本质的分析及对理论的实际应用都给予特别的注意。

本书供非动力专业大学生之用。

А. П. Вейник

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ
Металлургиздат (Москва 1956)

— * —

工程热力学及传热学基础

严家驊 张正荣 译

— * —

冶金工业出版社出版 (北京市灯市口甲45号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第093号

冶金工业出版社印刷厂印 新华书店发行

— * —

1959年9月第一版

1959年9月北京第一次印刷

印数2,512册

开本830×1168·1/32·360,000字·印张14¹²/₃₂·插页16·

— * —

统一书号15062·1790 定价1.80元

目 录

序	1
緒論	2

第一部分 工程热力学

引言	5
----------	---

第一篇 热力学基本概念

第一章 能量守恒与轉換定律	9
§ 1 热力学基本特点	9
§ 2 能量守恒与轉換定律	10
第二章 热力学研究方法	16
§ 3 系統的内能	16
§ 4 热力学第一定律	19
§ 5 系統的状态参数	24
§ 6 准靜态过程	35
§ 7 焓	38
§ 8 状态和过程的图形表示	44

第二篇 工质的热力学

§ 9 問題的含意	47
第三章 气体的热力学	49
§ 10 状态方程式	49
§ 11 理想气体的性質	54
§ 12 混合气体	68
§ 13 等容过程	76
§ 14 等压过程	81
§ 15 等溫过程	85
§ 16 絕热过程	90
§ 17 多变过程	97

§ 18	压气机	105
§ 19	卡諾循环和绝对温标	112
§ 20	逆向卡諾循环	119
§ 21	热力学第二定律	122
第四章	蒸汽的热力学	146
§ 22	蒸汽的 $v-p$ 图和 $s-T$ 图	146
§ 23	蒸汽的 $s-i$ 图	160
§ 24	蒸汽图表	162
§ 25	蒸汽状态变化的基本过程	164
第五章	气流的热力学	172
§ 26	基本关系式	172
§ 27	绝热流动	174
§ 28	摩擦的作用	183
§ 29	节流	185
§ 30	流道截面的影响	186

第三篇 热机的热力学

第六章	活塞式发动机	202
§ 31	内燃机	202
§ 32	各循环的比较	213
§ 33	蒸汽机	217
第七章	涡轮机	219
§ 34	燃气轮机	219
§ 35	蒸汽轮机	225
第八章	喷射发动机	228
§ 36	空气喷射发动机	228
§ 37	液体喷射发动机	230
第九章	增加热力设备效率的方法	231
§ 38	概說	231
§ 39	热能的联合利用	234
§ 40	双汽循环	236

第二部份 传热学基础

前言	239
----------	-----

第四篇 固体中的热传播

§ 41 基本概念	242
§ 42 傅立叶定律	245
第十章 稳定状况下的热传播	248
§ 43 平壁内的热传播	248
§ 44 圆筒壁内的热传播	251
§ 45 球壁内的热传播	254
§ 46 形状不规则的壁	256
§ 47 传热系数	261
§ 48 通过平面壁的传热	263
§ 49 通过圆筒壁的传热	271
§ 50 通过球壁的传热	272
§ 51 通过形状不规则壁的传热	272
第十一章 固体温度场的微分方程式	275
§ 52 导热微分方程式的推导	275
§ 53 导热方程式的物理意义和导温系数	279
§ 54 论导热微分方程式的解法	280
第十二章 相似理论	284
§ 55 问题的提出	284
§ 56 相似的本质	288
§ 57 相似准则	292
§ 58 实验数据的整理方法	303
§ 59 模化	306
第十三章 不稳定情况下的热传播	309
§ 60 形状简单的物体	309
§ 61 任意形状的物体	322
第五篇 物体表面上的热交换	
§ 62 问题的含意	332
第十四章 接触热交换	334

§ 63	流体中热量轉移的进程	334
§ 64	相似准則	337
§ 65	自由运动	352
§ 66	强迫运动	356
§ 67	溫度因素	360
§ 68	热交换和流动阻力之間的关系	365
§ 69	气体高速流动时的热交换	371
§ 70	集态改变时的热交换	376
第十五章	輻射换热	390
§ 71	輻射的基本定律	390
§ 72	物体之間的輻射换热	398
第十六章	复杂换热	400
§ 73	一般情况	400
§ 74	确定复杂换热条件下的放热系数	400
	第六篇 热交换理論在金属工艺中的某些应用	
§ 75	問題的含意	403
第十七章	强化金属的加热	404
§ 76	前言	404
§ 77	計算方法	404
第十八章	鑄件的冷却	408
§ 78	总述	408
§ 79	鑄件在非金屬鑄型中的冷却	410
§ 80	金屬鑄型中的鑄件冷却	415
附录:		
I.	干飽和水蒸汽 (按溫度)	421
II.	干飽和水蒸汽 (按压力)	424
III.	过热水蒸汽	432
IV.	金屬和合金的物理性質	446
V.	非金屬材料的物理性質	448
VI.	輻射系数 C 的值	449
VII.	水蒸汽的 $s-i$ 图 (附于書末)	插頁
	参考文献	452

序

本書的量及內容都符合于高等工業學校非動力專業的教學大綱。

與通常採用的敘述次序不同，在工程熱力學中，作者同時引入了熵的概念及其它熱力學參數。從方法學的及教學法的觀點看來，應該認為這樣的熱力學結構是更適當的，因為一開始就使學生習慣於充分應用熱力學方法，這會有好處。在介紹了功的概念及熱力學第一定律以後再敘述熵是不正確的，這會使學生造成關於熵的特殊性及其在熱力學參數體系中的特殊地位的想法。除此以外，這在很大的程度上使對熵的物理意義及作用的理解變得複雜而困難。

為了不造成運用本書時的困難，作者遵從百餘年來已形成的傳統習慣，在本教程中引用克勞修斯《經典》系統的敘述，這個系統至今還用來當作構成熱力學第二定律方法學上的基礎(§21)。與此同時，作者認為有必要在本書中對這個系統在哲學上的及物理學上的缺點給予批判。

在敘述傳熱學時，作者力圖將這門不久以前才形成的學科在工程事業的各個方面，特別在各種生產工藝中的廣泛流傳的情況反映出來。因此，作者列舉傳熱學在金屬工藝這一重要知識領域內的應用來結束本書。在本書的第二部分中，對相似理論給予很大的注意，將它有機地穿插在傳熱學各章中。

作者對 A. A. 古赫曼教授深致謝意，他的作用遠遠超出了通常的科學顧問；作者也深深感謝 И. Н. 蘇西金工程師，在校閱原稿時，他的幫助特別可貴。

作者還感謝 М. П. 吳卡洛維奇教授、B. C. 茹柯夫斯基教授、B. A. 基列林教授、С. И. 高斯捷林教授、A. B. 累考夫教授及 A. C. 雅斯特爾任斯基教授，他們看過這本書的原稿，並且提出很多幫助改進本書的寶貴意見。

緒 論

恩格斯用下面的話說明了熱及能量由一種形式等量地轉變為另一種形式這種固有特性的應用對人類社會發展的作用：《…人們只是在學會了摩擦取火以後，才第一次使某種無生命的自然力替自己服務》^①。從那時起《…這個在意義方面幾乎不可衡量的巨大發現…》^②有機地走進了人類的生活。

人們很久就企圖知道並解釋熱現象。不止一次地更改關於熱的本質的觀念。第一個將熱看作物質運動形態的普遍概念是M. B. 羅蒙諾索夫(1711—1765年)提出的。他十分清楚地說出了這樣的觀念：熱是一種最小質點(微粒)的運動形態。羅蒙諾索夫在十八世紀中葉就已經確定了熱運動和機械運動的統一性。他在自己的著作《論冷熱的成因》^③中寫道：《如所周知，運動引起熱：雙手摩擦會發熱，木材會着火，用砂石擊鋼時會發出火花，鐵受到頻繁而猛烈的鍛打時會灼熱；當它們停止時熱便減少，而已得到的火便熄滅。其次物體在加熱時，或者變為不能覺察的粒子分散在空氣中，或者化為灰燼，或者破壞了粒子的結合而溶解。再次，熱促進物體的誕生、生存、成長、發酵、腐爛，而冷阻止它們。從這一切，很顯然，在運動中具有充分的熱的基礎。因為任何運動不能離開物質而進行，那就必須在任何物質運動中形成充分的熱的基礎》^④。

其次，《…熱在於物質內部運動…》。因此羅蒙諾索夫確定了熱的本質概念的基本特徵，這個概念符合於近代物質動力學理論。

① 恩格斯：“自然辯證法”，人民出版社1955年版，第83頁。

② 同上。

③ M. B. 羅蒙諾索夫：“論冷熱的成因”。

④ M. B. 羅蒙諾索夫：“論冷熱的成因”。

M.B. 罗蒙諾索夫断然地摒棄了热素学說。热素学說在他那时的有关热的学說中占着統治地位，它是用无重量的、不会消灭的流質的重新分配来解释热、电等各种物理现象这一总观念的局部形式。在上述的著作中，M.B. 罗蒙諾索夫写道：《在我們的时代里，热的成因用某种特殊的物质来解释，很多人称这种特殊物质为发热物质，另外一些人称它为以太，而某些人甚至称它为初級的火》。接着写道：《从所有这一切，我們作出結論：不能認為物体的热的产生是由于某种专为此用的稀薄物质濃縮的結果》^①。

但是最初的热现象的数量規律正是在热素学說的基础上建立起来的。

到十八世紀末、十九世紀初，自然科学积累了一系列无法用热素学說来解释的事实。

如龙福特于1798年指出，在炮筒鉆孔时，基本金屬和切屑的比热是相同的，因此用所生成的切屑具有較小的比热来解释摩擦时发出的热量是不正确的。Г. 戴維于1799年用摩擦的办法使两块处在溫度低于零度的介質中的冰融解了。由于这些实验，确定了运动是热的直接成因。

在1840年，И. 焦耳开始了广泛的实验，以建立运动时所消耗的功和摩擦結果所生成的热之間的数量关系。他确定了在摩擦时得到的热量永远和所消耗的功成正比。

十九世紀中叶，最終地定出了能量守恒与轉換定律，它确定了热是物质运动形式之一。1842年 P. 迈耶对热现象和机械现象定出了能量守恒与轉換定律，而在1847年，Г. 赫姆厚茨概括了这一规律，将它推广到其它现象。結果出现了热的力学理論，这理論逐渐发展为物质的分子动力理論。

热的理論在 C. 卡諾、P. 克勞修斯和 B. 湯姆逊的著作中得

① M.B. 罗蒙諾索夫：“論冷热的成因”。

到繼續发展。P. 克劳修斯、B. 湯姆逊、Л. 道尔顿、A. 並佛加德罗、Л. 鮑尔茲曼、M. 斯莫儒霍夫斯基和其他人对物质分子动力学理論的发展作出了很多貢獻。

祖国的学者对热的研究有很大成就。应该指出 M. B. 沃卡多夫 (1871年) 的教程。在这教程中, 在俄国第一次闡述了热的力学理論基础。И. A. 維西涅格拉茨基 (1876年)、H. H. 毕洛哥維 (1885—1899年) 和其他学者对气体的分子动力学理論进行了重要的研究。在热的理論方面, 以 A. Г. 斯篤莱多維 (莫斯科大学) 和 M. П. 阿万那留斯 (基輔大学) 为首的俄罗斯物理学家的的工作是十分富有成果的, 伟大的化学家 Л. И. 門捷烈夫的工作也是这样——他們詳細地研究了物质的临界状态。伟大的十月社会主义革命以后, 在苏联成立了专门的科学研究所: Г. M. 克尔日讓諾夫斯基动力研究所、Ф. Э. 捷尔任斯基全苏热工研究所、波尔宗諾夫中央鍋爐透平研究所等。这些研究所的人員对热学的发展作出了很多的貢獻。在近年来的科学成就中, 必須指出苏联物理学家在热的电动力学理論方面的研究。

现在, 热作为微粒运动形式的概念是完全确定了。

热在工程和生活中应用得最广泛。可以指出两种根本不同的利用热的方法——动力的和工艺的。

在作动力的利用时, 热用来轉变为机械功。

在作工艺的——直接的——利用时, 热用来改变各种物体的性质。改变物体的热状态, 可以使它們熔化、凝固、改变结构、改变机械的、化学的和物理的性质等等。两种利用热的方法——动力的和工艺的——都包括生产、排送 (传送) 和热的直接利用过程。

工程热力学研究热轉变为功的过程, 传热学研究热的直接利用过程。本書就来闡述这两門学科的基础。

第一部分 工程热力学

引 言

热力学最初是以热机理論基础学說的形式組成的。

热力学及其方法的形成时期，决定这門科学在物理知識体系中的地位是作为关于热和功相互轉換的规律的学問，这也反映在它的名称中（热力学一語来源于两个希腊字：thermós——热和dynamikos——力）。但是在此后的发展过程中，热力学远远超出了最初的范围。近代热力学的特点是：广泛包括各种物理性质的现象，以及应用領域繁多。目前很有成效地应用着热力学方法来研究物理性质完全不相似的现象，例如化学变化和相的轉變、原电池的功、磁热效应、毛細管效应、輻射过程。当然，热力学方法在研究所有这些不相类似的物理现象中富有成效，这不是單純的偶然性。热力学之所以通用于建立极不相同的物理量之間的关系，是由于它仅仅根据了一个自然定律——能量守恒与轉換定律，这个定律是最普遍的自然定律。正因为如此，热力学才包括了那么多不同的现象，并使我們能找出說明这些现象的各种物理量之間的必要的数量关系。

近代热力学的对象是研究物质的某些普遍性质，当自然界物体相互作用时，这些性质在能量轉換过程中被揭示出来。

因此，热力学是这样一門科学，它研究能量的不同形式（也就是物质运动的不同形态）在相互轉換过程中的数量关系。

在求解和分析任何一个問題时，热力学都基于能量守恒与轉換定律。用热力学方法来檢驗理論結構的正确性，实质上就是使我們对现象本质的概念符合于能量守恒与轉換定律。所以，能够

利用热力学方法得出的結論，就具有特別的可靠性。

热力学經過困难而曲折的道路才达到现在的状况。

應該認為年輕的法兰西工程师沙齐·卡諾 (1796—1832年) 在1824年发表他的札記《論火的动力及發揮此力量的机器》的时候是热力学作为独立的科学的誕辰。在这份量不多的研究中，包含了一系列对热力学发展具有头等意义的卓越成果。卡諾在研究热机理論基础时所获得的某些結果，对全部热力学具有根本的意义。

然而在卡諾理論結構的基础中，对热机作功的本質有着不正确的理解。他認為热机所作的机械功，不是由于消耗了一部分加入热机的热量，而是由于全部热量（在卡諾的理論中它的量是不变的）从較热的物体（热源）传給了較冷的物体（冷源）。《动力的发生不是由于蒸汽机中热素的消耗，而是由于从热物体向冷物体的热素传递》 [17] ①。

这样的理解和十八世紀末及十九世紀初占着統治地位的、認為热的本質是不生不灭的实体（热素）的观念相符合。

虽然卡諾对热机中作功过程的实质有着不正确的理解，但是他也获得了某些直到现今仍然有效的正确結果。

恩格斯这样評論卡諾的功績：《他差不多已經探究到問題的底蘊，而阻碍他完全解决这个問題的，并不是事实的材料不足，而只是一个先入为主的錯誤理論》②。这里指的是热素学說。

在十九世紀中叶，終於确定了物質运动形态这一概念。肯定地確認：在热机中，不是全部加給发动机的热量都轉变为功，而仅仅是热量的一部分，那剩下的一部分热量散失了；并且还確認：在轉变为功的热量和所获得的功之間有着严格相当的关系。

因此，有必要按新的理論來說明那些早已为卡諾所获得的宝

① 方括弧中的数字和書后的参考文献目录中的序号相符。

② 恩格斯：“自然辯証法”，人民出版社1955年版，第85頁。

貴結果。必須按照新的觀點，將那些結果引導到熱的本質。P. 克勞修斯在1850—54年的最初著作中，着手修改了卡諾的觀點。

在一個很長的時期中，認為克勞修斯不僅成功地解決了擺在熱力學發展道路上的全部問題，而且還將熱力學向前推進了。似乎他已經給卡諾所得到的結果找到了正確而嚴密的根據，並把符合於熱的本質的新觀點的內容安插在那些結果中了。

克勞修斯所研究的熱力學系統，長時間地被認為是經典性的。這個系統的特点是：它被分成兩個基本《定律》：《第一定律》——能量守恆與轉換定律（適用於熱現象和力學現象）；以及《第二定律》——熵增加定律，這個定律，按其實質來說，就是自然界發展的單向性原因。這一熱力學系統目前仍然保持着。

但是克勞修斯觀點的繼續發展（他本人已經從自己原來的想法中作出了全部最後結論），不可避免地導致像克勞修斯所說的自然界必陷於蛻化和《熱死》這樣一個十分錯誤的關於自然界發展規律的普遍結論。

恩格斯在《自然辯證法》一書中揭出了克勞修斯唯心主義的錯誤。恩格斯指出：將熱力學第二定律理解為普遍的原理，是和熱力學第一定律相抵觸的，因為第二定律斷定了能量在質上的蛻化，斷定了能量失去它的最重要的性質——轉換——的本能。

在反對克勞修斯關於世界熱死思想的鬥爭中，著名的德國物理學家Л. 鮑爾茲曼（1844—1906年）的著作起了很大的作用。他對熱力學第二定律作了統計力學上的闡明。鮑爾茲曼保留了克勞修斯熱力學系統的物理內容，但是指出了第二定律的局限性，並指出世界熱死理論是毫無根據的。

鮑爾茲曼的卓越繼承者是出色的物理學家M. 斯摩儒霍夫斯基（1872—1917），他確定了第二定律不適用於一系列的分子現象。因此，被看作是普遍原理的熱力學第二定律動搖了。

許多其他學者也對熱力學基本原理進行了分析、批判和重新審查。

俄罗斯热力学家 H.H. 西辽尔的研究，是不依賴克劳修斯《經典》系統的新热力学系統的第一部作品。他的研究，按热力学內容來說是精采的，不过在作者的哲学观点方面应加严厉的批判。但是这部在 1897 年出版的作品，以及西辽尔以后的研究，在当时很不出名。

后来循着这一条道路的有德国物理学家 K. 卡拉多道利。他的 1909—1925 年間的作品在專門的文献中曾被广泛地刊登。

由西辽尔开头的热力学系統在 T.A. 阿芳納謝娃的著作中 (1925—1928 年) 得到了邏輯上很完善的最終形式。阿芳納謝娃最重要的著作之一是 1928 年問世的《不可逆性、单向性和热力学第二定律》的研究。

西辽尔-卡拉多道利-阿芳納謝娃的热力学系統，沒有克劳修斯《經典》热力学系統所特有的缺陷。在这个系統中，基本原理的发展不依賴第二定律，这里采用了某种別的假設来代替第二定律。

还可以不受历史傳統的影响給出更加簡單的热力学基础的系統，1947 年 A.A. 古赫曼在他的著作《論热力学基础》 [12] 中提出了这样的系統。在古赫曼的系統中，摒棄了将特殊的假設和定律带进热力学的必要性，而在别的系統中，是要靠这些假設和定律来奠定像熵这样重要的概念的。按古赫曼的意见，熵可以直接引入热力学，不需要任何論証，只要凭历来利用这个热力学参数的富有成效的經驗。

在我們这門短短的課程中，过分詳細地討論奠定热力学基础的方法是不恰当的。我們试图在这門課程中用最簡單、最易懂，但同时又是够严密的形式来闡明这些困难的問題。

第一篇 热力学基本概念

第一章 能量守恒与轉換定律

§ 1 热力学基本特点

全部近代自然科学，都以这种或那种形式依据能量守恒与轉換定律。对于热力学，这定律是作为其建立基础的唯一的数量定律。热力学作为科学，它的基本特点就在于此。

热力学不需要任何假設来补充能量守恒与轉換定律，因而这就赋予它的結論以特别的可靠性。

在热力学中，这基本的自然定律采取了非常独特的形式（这形式正表示了定律的特点）：对于一切不同的物质运动形态（在热力学中从数量方面来研究）具有单一的能量度量法則的表达形式。

这就允許用同样的简单方法研究在物理本质上最不不同的现象——热的、机械的、化学的、电的及其它的现象。

按照本教程的任务，在其中只研究热与功相互轉換的理論，而对上述的复杂綜合现象，不用热力学方法来研究。热-功的轉換，在实用上有着特别广泛的传播，因而引起人們最大的注意。普通热力学中研究热-功相互作用理論的这篇称为工程热力学。

热力学的另一特点是：它只研究物质的宏观性质——此性质描写由极大数量的粒子所組成的物体。与此相适应，热力学只运用宏观自然界的概念（如温度、压力及其它，它們可以直接測量或由測得数值計算），而完全不研究如运动速度及分子数目、电子的动能等概念，即不研究微观自然界的概念。

这并不意味着热力学忽略了研究物质微观結構所得到的知識。要知道，任何宏观概念，归根到底，是可以研究微观自然

界效果的基础上加以解释的。例如对于最简单的物体——理想气体——压力可以直接在分子运动这一概念的基础上计算出来，并因而归结为微观结构的量——分子的数目及其速度等等。所以，热力学非常广泛地利用着微观物理方面的知识（例如在这样一个重要问题上：实际物质物理性质的研究），而微观物理研究的结果，又总是用热力学方法加以检验，也就是检验一下所得到的结果，和能量守恒与转换定律符合到怎样的程度。

因此，两种研究方法，两个观点系统——宏观的与微观的，相互补充并彼此充实，但却各别地存在。

抛开作为总效应基础的微观过程，单单讨论说明这些总效应的宏观过程也永远是正确的，只要被研究物质的容积，和基本粒子的大小及它们之间的距离比较起来还足够大。在这些条件下，允许将所研究的物体不当作许多单独基本粒子的总和，而当作连续介质。这样观察现象所得到的知识，是与我们对物质微观结构的观念无关的。

§ 2. 能量守恒与转换定律

《在对每一场合的特定的条件下，任何一种运动形态都能够而且不得不直接或间接地变成其它任何运动形态》^①。

恩格斯的这句话，包含着到目前为止最完全、最深刻的能量守恒与转换定律的本质定义。其中直接表达了能量守恒与转换定律中最重要的实质——各种物质运动形态相互转换的无限可能性（和必要性）以及在一切实转换中运动的永恒性。

经过漫长而艰难的自然知识的发展道路，终于建立了能量守恒与转换定律。最初建立了这个定律的第一部分，说明物质和运动在量上的不变性。只是很久以后，才从守恒的想法过渡到转换时守恒的想法。

① 恩格斯：“自然辩证法”，人民出版社1955年版，第187页。