

中等專業學校教學用書

热力学及传热原理

王 振 时 著



国防工业出版社

54
6

中等专业学校教学用书

热力学及传热原理

王振时 著

国防工业出版社

本書是按內燃機專業的中等技術學校學生的需要知識而編成的。主要參考了 А. М. Литвич (陳學俊譯) 的“熱工學底理論基礎”及 С. Н. Шорин 的“熱的傳遞”。並考慮到中等技術學校學生的接受情形。

本書的主要內容是氣體的熱力性質及內燃機的循環，它所占的篇幅亦較多。水蒸汽的性質及其循環僅介紹了一些基本概念及其應用。傳熱學原理部分所占篇幅亦較少。特別是在相似原理部分，減少了很多數學式子，着重說明相似原理的概念及其如何應用在模型試驗方法上。

本書共分三章，第一章是研究氣體的性質及其過程及循環。熱力學第一定律是研究氣體的變化過程，熱力學第二定律研究氣體的循環過程。關於氣體熵的介紹，着重地指出它所以是一個參數的原因，及溫焓圖的應用。本書減少了在一般熱工書籍上用無數卡諾循環來說明熵的數學理論。每個部分都舉有很多計算例題。

第二章為水蒸汽。除研究水蒸汽的性質及過程循環以外，還研究了蒸汽及氣體的流動過程。

第三章為傳熱原理。

熱力學及傳熱原理

王振時 著

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第074號

北京新中印刷廠印刷 新華書店發行

850×1168 1/32 · 5 3/8 印張 · 139,000 字

一九五七年五月第一版

一九五七年五月北京第一次印刷

印數：1—6,500冊 定價：(10)0.95元

目 录

緒 論

§ 1. 发展动力与經济建設	1
§ 2. 工程热力学及傳热原理	2
§ 3. 热能的本质	3
§ 4. 能的轉变与能量不灭定律	4
§ 5. 热与功的單位	4
§ 6. 研究热力学的方法	5

第一章 气 体

一、气体状态的热力参数

§ 1-1 工質	7
§ 1-2 理想气体与实际气体	7
§ 1-3 气体的热力参数	9
§ 1-4 气体状态方程式的一般形式	14

二、理想气体的基本定律

§ 1-5 气体动力論及其基本方程式	14
§ 1-6 波以耳-馬略特定律	16
§ 1-7 給呂薩克定律	16
§ 1-8 理想气体的特性方程式	17
§ 1-9 阿佛加德罗定律	18
§ 1-10 公斤-分子——莫尔	19
§ 1-11 通用气体常数	21
§ 1-12 实际气体对于理想气体特性方程式的偏差	22

三、混 合 气 体

§ 1-13 混合气体的概念	23
§ 1-14 道尔頓定律	24
§ 1-15 混合气体的組成	25
§ 1-16 混合气体的特性方程式	27

§ 1-17	分压力的計算	29
§ 1-18	在不同压力和不同溫度时气体的混合	30
四、热力学第一定律		
§ 1-19	热与功之間的当量	31
§ 1-20	气体的內能	32
§ 1-21	气体的膨脹功及其图示	33
§ 1-22	热力学第一定律	35
§ 1-23	可逆过程与不可逆过程	36
五、气体及混合气体的比热		
§ 1-24	比热与热量的概念	38
§ 1-25	单原子、双原子及多原子气体的比热	40
§ 1-26	气体的等容比热与等压比热及其相互关系	40
§ 1-27	比热与溫度的关系	43
§ 1-28	混合气体的比热	47
六、气体状态变化过程		
§ 1-29	气体过程的研究	48
§ 1-30	等容过程	49
§ 1-31	理想气体的內能	50
§ 1-32	等压过程	51
§ 1-33	气体的焓	53
§ 1-34	等温过程	54
§ 1-35	絕热过程	58
§ 1-36	絕热过程与等温过程, 等压过程的比較	63
§ 1-37	各种过程中, 热量, 內能变化及功的变换图	65
§ 1-38	多变过程	66
§ 1-39	多变过程中气体比热的确定	68
§ 1-40	多变指数的求法	69
七、热力学第二定律		
§ 1-41	循环 (或封閉过程)	72
§ 1-42	理想气体的卡諾循环	73
§ 1-43	反向卡諾循环	76
§ 1-44	热力学第二定律	77
§ 1-45	气体的熵	78
§ 1-46	熵焓图 (T-S图)	81

II

§ 1-47	T-s 图中的气体过程	81
§ 1-48	T-s 图中的循环过程	83
§ 1-49	回热循环	85
§ 1-50	孤立体系中熵的增加和能级的降低	86
八、内燃机循环		
§ 1-51	内燃机的工作原理	88
§ 1-52	等容燃烧循环	89
§ 1-53	等压燃烧循环	92
§ 1-54	混合燃烧循环	96
§ 1-55	燃气涡轮发动机循环	100
§ 1-56	喷气发动机的工作原理	104
§ 1-57	活塞式空气压缩机的工作过程	105
§ 1-58	活塞式压缩机的实际循环	108
§ 1-59	多级压缩机的工作过程	109

第二章 水 蒸 汽

一、水蒸汽的基本性质

§ 2-1	水蒸汽的概念及其产生	113
§ 2-2	水和水蒸汽的热量和内能	115
§ 2-3	水蒸汽表	117

二、水蒸汽的状态变化过程

§ 2-4	水蒸汽的图解表示	118
§ 2-5	水蒸汽的变化过程	119

三、蒸汽动力装置的理想循环

§ 2-6	饱和蒸汽的卡诺循环	123
§ 2-7	郎肯循环	123
§ 2-8	梅逸循环	125
§ 2-9	单位耗汽量	125
§ 2-10	高压及高温蒸汽	126

四、流动与节流

§ 2-11	气体或蒸汽的流动	127
§ 2-12	流动过程中的外功	128
§ 2-13	流动过程中的气体膨胀功	129

§ 2-14	絕热流动过程的流速及流量	130
§ 2-15	理想气体的絕热流动过程	132
§ 2-16	每秒流量 G 与 $\frac{P_2}{P_1}$ 的关系	133
§ 2-17	拉伐尔噴管	137
§ 2-18	噴管中有摩擦时的流动	137
§ 2-19	扩散过程	138
§ 2-20	流动中的节流作用	139
§ 2-21	节流过程的图解	141

第三章 傳 热 原 理

§ 3-1	热的傳遞	143
§ 3-2	热傳遞的种类	143
一、穩定状态的热傳导		
§ 3-3	溫度場	144
§ 3-4	傅利方程式。导热系数	146
§ 3-5	經過平面壁的热傳导公式	147
§ 3-6	經過圓柱壁的热傳导公式	149
二、热的对流		
§ 3-7	热的对流概念及其研究方法	150
§ 3-8	相似原理	152
§ 3-9	流体在自由流动时的交热	154
§ 3-10	流体在强迫流动时的交热	155
§ 3-11	傳热系数	156
§ 3-12	通过平面壁傳热的計算公式	158
§ 3-13	通过圓柱壁給热及傳热的計算公式	159
三、热的輻射		
§ 3-14	热輻射的基本概念	161
§ 3-15	斯蒂芬-波次曼定律	162
§ 3-16	蘭波特定律	163
§ 3-17	克希荷夫定律	163
§ 3-18	物体間輻射傳热的計算	164
§ 3-19	气体和蒸汽的輻射	165

熱力學及傳熱原理

緒 論

§ 1. 發展动力与經濟建設

我国正在从新民主主义社会逐步过渡到社会主义社会的过渡时期。党在过渡时期的总路綫与总任务，是要逐步实现国家的社会主义工业化，建設偉大的社会主义社会；将来还要为建設幸福的共产主义社会而奋斗。在国家进行大規模的經濟建設中，动力的发展是起着重要的作用的。不論是工业、农业、运输事业以及人民日常生活等各方面，都需要大量的动力来維持与发展。尤其是当現代的生产过程逐渐趋向于机械化与自动化的时候，动力的发展更具有特別重大的意义。

一切的动力，都是以各种不同形式的能量蘊藏于自然界中，如燃料、水力、风力等等。这些能量往往不能被直接利用，必須依靠人类的創造設法轉变为最适合于某种目的的能量，才能發揮作用。例如把燃料燃燒得到热能以后，才可以加热各种物体。还可以利用一种热机将燃料的热能轉变为机械能，来为人类服务：开动飞机、汽車、拖拉机、机器、輪船等。而依靠其他原动机的作用亦可以将水力，风力轉变为机械能来为人类服务。近几年来，由于技术的高度发展，更找到了利用太阳輻射热的方法；而新型的能量——原子能的和平利用，更为近代技术发展开辟了光輝前途。但按照目前的技术水平及經濟观点来看，一般动力的来源，大多取自燃料的能量，如煤、石油等等。故热力工程对于祖國的經濟建設，仍旧起着很重大的作用。

§ 2. 工程热力学及傳热原理

利用各种特制机器，从热能轉变而成的机械能又可以轉变为电能；而电能亦可以重新轉变为热能、机械能、化学能或其他形式的能量。由此可見，各种能量之間是有着密切的科学关系。我們要想很好地利用各种能量，就必须充分了解各种能量之間的关系及其轉变的規律。

研究热能与其他能量相互关系的科学通称为**热力学**。而專門研究热能与机械能相互轉变关系的科学才是本課程所研究的**工程热力学**。

在应用热能时，常常需要依靠冷热物体之間的热傳遞。研究物体間热量傳遞速度的科学称为**傳热原理**。亦是本課程內容之一。

工程热力学及傳热原理，常常簡称**热工原理**。这門科学的基础是在十八世紀中叶由俄国的天才科学家罗蒙諾索夫所奠定。十九世紀許多俄国科学家如門德里业夫、基尔毕切夫等更繼續发展了他的工作；同时欧洲科学家如梅逸、焦耳、湯姆遜、卡諾等亦确定了許多实验与理論。于是热工原理的內容更加充实。然而热工原理得到最大的发展應該归功于苏联。在傳热原理方面，苏联的科学家們創立了精确的相似定理，作为模型試驗理論的基础。因此解决了許多重要热傳遞問題，而使鍋爐与各种热交換器的設計得到更合理更經濟的要求。苏联在这方面所获得的成就，远远超过了各資本主义国家。

我国的热工科学并不后人，早在公元后千年左右，我們对于热力的利用，已有許多創造，如隋唐时代的劈雷炮、火箭，南宋时代的走馬灯等。但由于封建政治的統治，科学不可能得到鼓励，这些偉大的創造，沒有得到任何发展。自中国人民取得胜利以后，科学才被重視，解放以来已有惊人的发展。为了配合大規模的經濟建設，保証第一个五年計劃的胜利完成，創造社会主义建設的条件，在全国範圍內，已有計劃地建立大批的專門动力学院，大学，及专科学校等，并組織了各种专业，如汽車发动机专

业，航空发动机专业，蒸汽动力厂专业等等。关于热工科学的研究，完全学习了苏联的先进科学，这是我国热工科学将不断发展的开始，发展的快慢及其应用的完善与否，将直接影响着祖国的建设前途。

工程热力学及传热原理是动力机械工程的重要基础。要想学习各种发动机的专业知识，就必须先在这门科学方面打好根基，树立明确的基本概念，以便运用到将来内燃机的知识上去。

§3. 热能的本質

关于热能的本質，在十八世紀流傳着一種“熱素”的理論。按照“熱素論”的說法，熱是一種無重量的物質，稱為“熱素”，它既不能產生亦不能消滅。又認為“熱素”只能由較熱的物體流到較冷的物體。熱的物體含有較多的“熱素”，冷的物體含有較少的“熱素”。當時這個理論對於物體因摩擦而生熱的現象始終無法解釋。

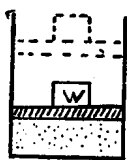
俄國的天才科學家羅蒙諾索夫，就在那時首先批判了“熱素”的理論。按照他的意見，熱是物質微粒的一種運動形式。物體溫度升高的原因就是由於這種運動。在十八世紀末及十九世紀初，由於實驗材料的逐漸累積，羅蒙諾索夫的見解更加得到發展，公認熱為一種能量，是來自物質微粒的一種運動，並確立了被傳遞的熱量與功之間的普遍關係與當量。

根據近代關於物質構造的學說，更創立了物質動力論，即分子運動學說。按照此理論，任何物質均由不斷地無規則地運動着的分子及原子所組成。羅蒙諾索夫當時所稱的物質微粒，從近代學說觀點來看，就是組成物質的分子或原子。從物質動力論及羅蒙諾索夫關於熱現象的理論基礎，就可以確定：熱是比機械運動更為複雜的一種運動形式。功轉變為熱的現象就是從有規則的機械運動轉變為無規則的分子或原子的運動，即所謂熱運動。摩擦生熱的現象就是這種轉變過程。

§ 4. 能的轉变与能量不灭定律

在物理現象中，能量是不生不灭的，只能从一种形式轉变为另一种形式。这是我們所熟知的能的轉变与能量不灭定律。这个定律是自然界各种現象的綜合，亦是大量实验的总结。例如人将重物举高，則物体位能增加，但人本身消耗了能量；若物体自由落下，則物体位能逐渐减少，而物体的动能則逐渐增加。物体在此变化过程中，位能的增加，并非无中生有，而是消耗了人的能量；物体位能的减少，并非无影无踪地消失，而是轉变为动能。

再举一例，气缸中气体膨胀推动活塞将重物 W 举起，此时，气体的热能轉变为物体的位能。若将重物往下压缩气体，則气体温度升高，此时，物体的位能又轉变为气体的热能。如果没有外界对气缸产生傳热等作用，則整个过程中，能量保持不变，只是由位能轉变热能或热能轉变为位能而已。



此定律可以这样说：在自然現象中，能量既不能消灭，亦不能創造，它仅是由一种形式轉变为另一种形式。也可以这样说：一物体系統状态发生变化时，如果外界的作用没有，則在变化过程中，此系統的总能量必保持不变，而仅是由某种形式轉变为另一种形式（如机械能，热能，化学能，电能，以及其他）。

此定律的基本內容首先由罗蒙諾索夫在陈述他的物質不灭定律时提出，一百年后梅逸和赫尔姆霍斯才作出該定律的整个叙述。

§ 5. 热与功的單位

从 § 3 知道热是能量的一种，功与能的单位是一致的，故功、能、热的单位都可以一致。但早在热能概念尚未确立以前，热量單位都用卡路里、仟卡，沿用至今，已成习惯。

热与功是物体間傳遞能量的二种表现方式。第一种方式，我們已在力学中知道得很多，即一个物体对另一个物体作功的方式，在这种方式里，物体能量的增加，等于加在該物体上的功。功是用

L 来表示，在通常的計算里，以物体所作的功为正值；而以物体所得到的功为負值。在工程单位制度里（即实用单位制度），功的单位是用公斤-公尺、馬力-小时；而在绝对单位制度里（或称物理单位制度），則用尔格、焦耳、仟焦耳、仟瓦-小时等。

第二种能量傳遞的方式就是热能的傳遞。在这种方式里，物体沒有做功，而是傳遞热量从一个物体到另外一个物体。热量用 Q 表示，其单位在热力学中常用仟卡（或大卡）。根据正确的定义，1 仟卡是 1 公斤的蒸餾水从 19.5°C 升高到 20.5°C 时所需要的热量。

在一般的气体变化过程中，往往二种能量傳遞方式同时存在。这种情况，将放在后面几章中詳述。

由于热与功的單位應該一致，故列成表 1，提供仟卡，公斤-公尺，仟瓦-小时，馬力-小时各單位間的数量关系，便于今后的換算。

表 1

功热單位換算表

	仟 卡	公斤-公尺	仟瓦-小时	馬力-小时
1 仟卡	1	427	0.00116	0.00158
1 公斤-公尺	0.00234	1	0.00000272	0.0000037
1 仟瓦-小时	860	367200	1	1.36
1 馬力-小时	632	270000	0.735	1

§ 6. 研究热力学的方法

为了研究物体的热力学性質及其状态的变化过程，必須知道表示物体状态各参数（如温度，压力，比重等）間的关系，这种关系能从实验里或从物质动力論的分析中得到。因此热力学的研究往往用两种方法同时进行。

第一种方法是实验方法，从实际实验中观察物体所发生的現象做出結論，确立一些基本定律，这种方法是以前能量的轉变关系及傳遞方法为基础。

第二种方法是从理論上去分析，根据有关物质构造的理論，

來說明整个物体的热力性質，建立各种定律。

这两种方法的結合在研究热力学的过程中能收到良好的成果。罗蒙諾索夫在研究时就是坚持这种观点的，他曾說：“由观察建立理論，通过理論来矫正观察，这是尋求真理的最好方法”。毛主席曾以更为广泛的哲学形式教导了我們：“通过实践而发现真理，又通过实践而証实真理和发展真理。从感性認識而能動地发展到理性認識，又从理性認識而能動地指导革命实践，……这就是辯証唯物論的全部認識論。”^①因此在研究热力学定律时，应当用辯証唯物論的观点，把定律所指出的与周圍現象密切地联系起来，而不能把定律中所指出的結論空想地应用到尚未被驗證的那些方面去，以免引起錯誤的結論。例如热力学第二定律将告訴我們关于热自高温物体到低温物体的傳遞原理。唯心的科学家就空想地把它推到宇宙上去，就得到了一个謬誤的結論，說宇宙間最后各个天体間的一切溫度差将消灭，而宇宙将陷入一个完全均勻的溫度分布状态中，所謂“宇宙的热的死亡”。

① “毛澤东选集”第一卷 人民出版社 1951年版 295~296頁。

第一章 气 体

一、气体状态的热力参数

§ 1-1 工 質

在发动机里，热能转变为机械能是利用一种媒介物质来实现的。这种媒介物质称为工质。

由于气体在受热时具有最大的膨胀能力，气体物质最适宜于作为工质。固体与液体被加热时，膨胀能力很小，故不宜用作工质。

最常用的工质是空气、燃烧后的燃气及水蒸汽。

§ 1-2 理想气体与实际气体

根据近代的物质构造学说，一切物体都是由微粒即分子及原子所组成；这种微粒是在不断地作无规则运动，前面已经谈过，这种运动形成物体的热能，因此称为热运动。

分子运动时，或者互相接近或者互相离开；分子之间有分子引力存在，其大小决定于分子间的距离。从分子间不同的距离及不同的分子引力，物体都以三种集合状态存在，即固体，液体及气体。

在固体内，分子（或原子）间的距离最接近，而分子引力为最大。这种物体状态中，分子并不作直往前的运动，而是围绕其平衡位置作微小的振动。

固体加热时，可以转变为液体状态。此时分子间的距离通常是增加，分子引力则减小；同时分子已可以作有限的运动。但是分子之间仍有相当大的引力，因此不能作直往前的运动，而是在其周围分子的作用范围内运动。因此可以说液体中，分子是围绕着一个可动的平衡位置而振动，同时又进行着分子间的相对移动。

液体繼續被加热时，可以轉变为气体。此时体积就有显著的增加，分子間的距离增大，分子引力亦就繼續减小。当体积很大时，分子引力很小，不能对分子运动起作用，因此分子就作直往前的运动。当分子碰撞时，又发生旋轉的运动，而組成分子的原子則还是进行着振动。

在气体中，分子引力与其他物态比較起来是很小的。当气体接近液体状态时，分子引力較大，由于不断地加热，即距离液体状态愈来愈远，分子引力就愈来愈小。

各种气体在相同条件下，离开液体状态的程度是不同的。例如在大气压力下，氮到 -196°C 时轉变为液体，水蒸汽在 100°C 就可以变成水。因此氮在大气压力及室内温度时距离液体状态很远，而水蒸汽在相同的压力下及較高的温度 100°C 时仍旧接近于液体状态。此时氮的分子引力很不显著，而水蒸汽的分子引力則大得多了。

温度增加及压力减低(或使体积增大)时，气体分子間的引力就会减小。气体体积是指气体分子运动时所占据的全部容积，亦即分子与分子之間的空间与分子本身体积之和。当体积增加时，分子本身的体积始終不变，而比起气体整个体积来就非常的小。故在温度較高及压力較低的时候，分子本身的体积可以略而不計，这对于气体性质的研究，就减少了复杂性。

理論上研究气体的性质，如要考虑气体分子間的引力及分子本身的体积是非常复杂的。为了研究的方便，必須假想出一种气体，这种气体完全没有分子引力，而且分子本身又是許多沒有体积的質点。特称之为理想气体。虽然这种气体不存在于自然界中，但具有很大的实际意义，因为在工程里，所碰到的气体近似于理想气体。其分子引力及分子本身的体积都很微小，可以略去不計，也不致使有关的計算的精确度誤差过大。

仅仅水蒸汽是一个例外，这种气体在热工中表現着两种状态。在一种情况中，水蒸汽是組成混合气体的一部分，例如燃料在鍋爐中燃燒或在发动机的气缸內燃燒而产生的混合气体，都含

有此种水蒸汽。在这种情况下，水蒸汽的温度很高，压力很小，可以当作理想气体来研究。还有在大气中的水蒸汽亦属于这一类。

在另一种情况中，水蒸汽用做蒸汽机的工质。这种水蒸汽接近于液体状态，故不能利用理想气体的那些定律及法则。在热力学中，这种情况的水蒸汽通常是不放在理想气体一起研究，而放在实际气体中研究。

凡不可以略去分子引力及分子本身体积的气体，称为实际气体。关于像水蒸汽那样实际气体的计算将放在第二章中讨论。

§ 1-3 气体的热力参数

某物体系统在一定状态时，此状态可以用几个数量表示出来。例如在力学中，每质点在一定状态时，此状态可以用相对位置，速度等数量表示出来。在气体中，气体状态可以由体积、压力、温度等数量来表示。凡是能表示一物体系统的状态的数量叫做参数。在研究气体状态时，就必须首先叙述几个参数。表示气体热力状态数量的叫做气体的热力参数。气体的基本热力参数是温度，压力和比容。

温度 温度这一概念是由于度量物体冷热程度而产生的。根据温度，可以判断一物体能否传热于另外一个物体。如果两物体接触时，热从第一个物体传递到第二个物体，则第一个物体的温度 t_1 比第二个物体的温度 t_2 高，即 $t_1 > t_2$ 。如两物体间无传热现象，则两物体的温度称为相同，即 $t_1 = t_2$ 。根据这样的原则，就可以用比较的方法把温度测量出来。在工程上，温度是用国际百度温标 ($^{\circ}\text{C}$) 来度量。百度温标的 0° 是水的冰点，而 100° 则是水的沸点。

在热力学中，常采用绝对温标 ($^{\circ}\text{K}$)。绝对温标的 0° 称为绝对零度，是在水的冰点以下 273° 即 -273°C 。用绝对温标计算的温度叫做绝对温度用 T 表示。它高于百度温标 273 度，因此，

$$T = t + 273. \quad (1-1)$$

两种温标中每度的量是相等的，不同的是读数的起点，所以

两种温度的差数是一样的。

$$T_2 - T_1 = t_2 - t_1. \quad (1-2)$$

根据气体分子动力学论，理想气体内的分子可以自由地以很大速度向前运动。每个分子具有动能，其大小决定于分子的速度与质量。在一定温度下，气体的分子各有其不同的速度，但根据理论的分析，该气体的分子平均速度还是不变的。温度升高，则平均速度亦随之增大，即平均动能亦增加。由此可知，表示气体冷热程度的温度就是气体分子运动的平均动能之度量标准。

根据气体分子动力学论的基本原理，可以得出温度与分子平均动能间的数学关系如下：

$$\frac{m\omega^2}{2} = BT. \quad (1-3)$$

式中 $\frac{m\omega^2}{2}$ —— 每个气体分子的平均动能；

T —— 绝对温度；

B —— 比例常数。

当分子运动静止时， $\frac{m\omega^2}{2} = 0$ ，则 $T = 0$ （绝对零度）所以在

绝对零度时，分子运动已完全停止。唯有原子的振动而已。

压力 气体的压力是由于亿万个气体分子不断地与容器壁碰撞的结果。单个分子的撞击，我们无法测量，因此只能用理论的计算，得出撞击的平均结果。气体压力就是代表这个平均的结果。

压力是用每单位面积上的作用力来度量，其方向垂直于作用面。在热力学里，压力的单位是公斤/公尺²，但在实际应用中，这个压力的单位太小，故工程上测量压力都采用公斤/公分²，称为**工程气压**或简称**气压**。所以，

$$1 \text{ 工程气压 (或气压) } = 1 \text{ 公斤/公分}^2 = 10^4 \text{ 公斤/公尺}^2.$$

在物理学里，常常以海平面上大气的平均压力作为一个大气压力；它相当于 760 公厘水银柱高的压力。这种大气压力称为物