

高等学校教学用书



工程热力学

A. M. 李特文著

高等教育出版社

高等学校教学用书



工 程 热 力 学

(修訂本)

A. M. 李特文 著
宁 槐 徐华舫 译

高等教育出版社

本書系根据苏联国立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1956 年增訂第三版的李特文 (А. М. Лытвин) 所著“工程热力学” (Техническая термодинамика), 将过去龙门書局出版的原書第二版譯本重新修訂的。內容和旧版比較变动很大, 删除和重新編排了某些章节並另外增加了一些旧版中没有的章节。新增的有叙述計算理想气体絕热过程的新方法、用熵确定能量損失的方法、对理想气体流动的影响的轉換定律以及某些其他章节。例題及習題的数量也都有很大的減縮, 并且单独地編排在本書的最后一章中。原書經苏联高等教育部多科性工学院及机器制造高等学校主管司审定为高等工业学校教学参考書。

本書旧版中譯本由北京航空学院宁槐、徐华紡翻譯。按新版修訂的工作因原譯者无暇, 由我社約請祝世华同志負責进行。

工 程 热 力 学

A. M. 李特文著

宁 槐 徐华紡譯

高等教育出版社出版 北京宣武門内承恩寺7号
(北京市书刊出版业营业許可証出字第054号)

商务印书館上海厂印刷 新华书店发行

統一書号 15010·595 开本 787×1092 1/16 印張 20 7/8 插頁 2
字數 483,000 印數 1—5,000 定价(4) 2.60

1957 年 1 月第一册新 1 版 (共印 3,000)

1957 年 1 月第二册新 1 版 (共印 1,800)

1957 年 1 月第三册新 1 版 (共印 1,500)

1959 年 2 月合訂第 1 版(修訂本) 1959 年 3 月上海第 1 次印刷

第三版序言

本書初版于1938年問世,第二版于1947年問世。在过去这段時間內,本書被推荐作为动力高等工业学校热力工程专业的教科書,以及作为許多科学研究所和高等工业学校热工方面研究生的教学参考書籍。

1953年,本書中譯本在中华人民共和国出版。

在准备本書第三版时,作者面临着两个任务:一个是在新版中要考虑到在第二版問世后的十年內热力工程方面的进展,另一个是尽可能縮減本書的篇幅。这两个互相矛盾的要求給作者带来了一系列的困难。

为了完成头一个任务,作者在本書中增加了第二版所沒有的一些章节。在这些章节中,首先应该指出的是叙述計算理想气体絕热过程的新方法的那一节。这些新的計算方法,由于燃气輪机和噴气式發动机获得了广泛运用而成为十分需要的了。为了进行这些計算,作者部分地节录了全苏热工研究所(BTH)于1953年和1955年所頒布的一些表格的資料作为本書的附录。增加了講述計算理想气体絕热过程的新方法这一节以后,就不得不使本書的編排有些改变,这表現在先介紹熵这个概念,再講述热力学第二定律。不过,如此作法也只是对理想气体而言的,因为这样做起来很簡單而且对于作者所提出的任务——在研究絕热过程的时候,叙述跟采用新技术有关的最簡單而且是最准确的新計算方法——來說,这也是完全足够的。同时,將課程作这样安排,就已經有可能在头一次論及气体状态变化过程时,利用 T - s 綫圖来全面叙述这些过程,而不必等到論及热力学第二定律和介紹熵这个概念后,再回过头来研究这个問題。这兒所提出的課程安排方式(略加改变)作者已經在“普通热工学”教程(С. Я. 閻尔尼茨基和 Я. М. 魯宾斯坦主編的集体著作^①)的两个版次中采用过了,并且已証明是完全正确的。在某些高等工业学校,例如在莫斯科航空学院的教学大綱中,也是这样安排課程的。但是,为了在用其他方式安排这門課程时也能利用本書起見,作者将有关理想气体的熵的全部資料都編在独立的两节 § 4-8 与 § 4-9 中,但此时就应该把这两节挪到 § 6-6 以后再来学习。在 § 6-6 中,我們以热力学第二定律为基础引入了实在气体的熵这个参数,这正是苏联高等教育部頒布的教学大綱所要求的。

在新加到本書內的其他材料中,应该指出的是所謂用熵确定能量損失的方法,对理想气体流动的影响的轉換定律以及某些其他章节。

为了完成第二个任务,作者首先將本書正文全部看了一遍,删除了所有的重复部分,縮減了代数演算(只要这样作并不影响对課文的理解),并且还省略了一些对所論題目沒有直接关系的証明。在所有上述情况下,作者都指出了补充的参考書籍,在那些書籍中讀者可以找到有关問題的詳尽研討,如果有这方面需要的話。

① 中譯本已由高等教育出版社出版。

在縮減本書內容時，作者也考慮到在培養熱工技術人員方面所發生的一些變化情況。在前幾年，熱工專業把熱物理方面和工程方面結合在一起；而現在這兩專業則有很大的差別。本書旨在滿足高等工業學校工程方面熱工專業的教學大綱。因此，部分地刪節了有關說明熱力過程分子運動實質的材料的數學內容以及某些其他章節。

例題及習題的數量也都有很大的減縮，現在只保留了那些直接說明原理本身的例題，這是因為考慮到學生可以利用一些習題集[參考書籍 0-1 及 0-2]的緣故。本版與前兩版不同，所有例題及習題都單獨編在本書的最后一章內，不過這些例題和習題應在學習有關章節時同時加以利用。

在敘述熱機諸循環時，作者力求把所講材料僅局限於問題的热力學方面，亦即在所有地方都只研究理想循環及有內部損失的循環。這兩種循環都可用解析法研究，也可借助於 T_s 稜圖用圖解法研究。至於用本書所有關係式與系數來計算燃料消耗量這一方面的全部材料，則將在以後的有關課程中詳細討論，因而本書略而不談。

書中所有插圖都已重新繪制。

本書可作為高等工業學校許多不同專業的教學參考書，其中有些專業在使用本書時可將部分材料略去不講。

本書有一部分材料雖然也包括在現行教學大綱中，但在初讀本書時則可略去不看，這些材料我們用小號字來排印。

熱工研究所教授、技術科學博士 А. М. 魯賓斯坦與莫斯科動力學院教授、技術科學博士 Л. Л. 基姆羅特在審閱本書時提出很多寶貴意見；技術科學副博士 Л. И. 高爾東副教授仔細校訂了本書，作者謹向他們致以深切的謝意。

作 者

目 录

第三版序言

緒論	1
第一章 工質及其基本計算法	3
§ 1-1. 在热机中热能轉变为机械能的过程	3
§ 1-2. 基本概念及定义	5
§ 1-3. 气体状态諸参数	7
§ 1-4. 理想气体的性質	11
§ 1-5. 理想气体的混合气体	18
§ 1-6. 实在气体的性質	23
第二章 热力学第一定律	29
§ 2-1. 研究方法及其基本定义	29
§ 2-2. 气体功的計算法	35
§ 2-3. 能量守恒与能量轉換定律, 热力学第一定律	36
§ 2-4. 能量的單位	37
§ 2-5. 热力学第一定律的解析表达式	38
第三章 气体的比热	41
§ 3-1. 定义及基本关系式	41
§ 3-2. 气体的比热与計算热量的方法	42
§ 3-3. 混合气体的比热	46
第四章 热力学第一定律在气体状态的物理变化过程上的应用	47
§ 4-1. 气体状态变化的过程	47
§ 4-2. 內能, 理想气体的热力学第一定律方程	48
§ 4-3. 气体状态变化的定压过程	50
§ 4-4. 气体的热焓(焓)	53
§ 4-5. 气体状态的定温变化过程	55
§ 4-6. 气体状态变化的絕热过程(在 $c_v = \text{常数}$ 的情况下)	57
§ 4-7. 气体状态变化的多变过程($c_n = \text{常数}$)	60
§ 4-8. 理想气体的焓, Ts 綫圖	66
§ 4-9. 理想气体絕热过程的表格計算法与圖解計算法	71
第五章 热力学第一定律在气体状态的化学变化过程上的应用	75
§ 5-1. 基本概念及定义	75
§ 5-2. 反应的热效应($v = \text{常数}$ 与 $p = \text{常数}$), 燃料的發热量	76
§ 5-3. 盖斯定律	78
§ 5-4. 基尔希霍夫定律	79
第六章 热力学第二定律	81
§ 6-1. 热力学第二定律的各种說法	81
§ 6-2. 封閉过程或循环, 热效率	85
§ 6-3. 卡諾循环	88
§ 6-4. 逆向卡諾循环	91
§ 6-5. 卡諾定理	92

§ 6-6. 熵	93
§ 6-7. 概括性卡诺循环	96
§ 6-8. 热工温度标度	99
§ 6-9. 不可逆过程熵的变化, 耗散系统的熵	100
§ 6-10. 工作能力, 能量损失的计算	103
§ 6-11. 用统计法确定气体的状态, 气体分子在空间的分布, 熵的物理意义	107
§ 6-12. 按分子运动理论来看不可逆过程及热力学第二定律, “热能死态”	113
第七章 热力学第二定律应用于化学反应	117
§ 7-1. 基本概念及定义, 化学反应的热力学可逆性	117
§ 7-2. 化合力, 反应的有用功	120
§ 7-3. 质量作用定律	122
§ 7-4. 季布斯-黑尔姆霍茨方程, 奈恩斯特热能定律, 热力学第三定律	126
第八章 水蒸汽	130
§ 8-1. 确定物质物理性质的热力学方法	130
§ 8-2. 水蒸汽是实在气体, 水蒸汽表	135
§ 8-3. 汽化及沸腾, 定压蒸发过程; 水蒸汽的 $p-v$ 线图	136
§ 8-4. 水蒸汽状态参数的计算	139
§ 8-5. 水蒸汽的温熵 ($T-s$) 及焓熵 ($i-s$) 线图	147
§ 8-6. 水蒸汽状态变化的过程	150
§ 8-7. 克拉贝隆-克劳修斯方程	154
§ 8-8. 物态法则	156
第九章 湿空气	158
§ 9-1. 基本定义	158
§ 9-2. 水分含量, 比重	160
§ 9-3. 气体常数, 湿空气的热焓	162
§ 9-4. 湿空气的 Id 线图	163
§ 9-5. 空气的绝热加湿, 湿温度表的温度	164
第十章 气体在流动中的状态变化	167
§ 10-1. 流动气体的基本关系式, 影响的转换定律	167
§ 10-2. 计算理想气体外射时速度与每秒流量的方法	172
§ 10-3. 气体的最大流量及临界速度	174
§ 10-4. 水蒸汽的外射流动	178
§ 10-5. 考虑到阻力的外射流动	180
§ 10-6. 节流	181
§ 10-7. 气体或蒸汽的混合	187
第十一章 内燃机的循环	194
§ 11-1. 理想循环的热效率及线图	194
§ 11-2. 循环特性数对循环热效率的影响	200
§ 11-3. 内燃机的诸理想循环的比较	201
第十二章 气体及蒸汽的压缩	205
§ 12-1. 活塞式压气机的工作	205
§ 12-2. 叶轮式压气机	208
§ 12-3. 蒸汽引射压缩机	210
第十三章 燃气轮机设备的循环	214
§ 13-1. 燃气轮机装置的定压 ($p = \text{常数}$) 加热循环	214
§ 13-2. 提高燃气轮机热效率的方法	220

§ 13-3. 燃气轮机装置的定容($v = \text{常数}$)加热循环	221
§ 13-4. 喷气式发动机的循环	223
第十四章 蒸汽动力设备的循环	226
§ 14-1. 最简单蒸汽动力设备的循环(郎肯循环)	226
§ 14-2. 蒸汽轮机中的实际过程	234
§ 14-3. 回热循环, 极限回热循环的热效率	237
§ 14-4. 分汽次数有限的回热循环的热效率, 锅筒供水的最适宜温度	241
§ 14-5. 蒸汽的再热循环	243
§ 14-6. 两汽循环	250
§ 14-7. 热化	255
第十五章 制冷设备的循环	261
§ 15-1. 压缩空气制冷设备	261
§ 15-2. 压缩蒸汽制冷设备	265
§ 15-3. 汽流喷射压汽式及吸收式制冷设备	268
第十六章 例题及自习题	271
§ 16-1. 例题	271
§ 16-2. 自习题	300
参考书籍	310
附录	312

緒 論

在十八世紀後半葉的初期，人類長遠以來企圖製造的萬能發動機被創造出來了，所謂萬能發動機，是指不固定在一定的地方（液壓發動機就是以固定在一定地方為其特徵的），而能不斷地把產生的機械能傳給工廠各裝置的那種發動機[參考書籍 1-1，第 277 頁]。在俄國波爾祖諾夫（И. И. Ползунов）（1723-1766），以及稍後一些，在英國瓦特（1736-1819）設計了第一批蒸汽機；在這種發動機中，機械能是從燃料燃燒時所發出的熱量而獲得的。

於是，開始用機械能來傳動工廠的各裝置（工具機）。

這樣就產生了第一批熱機。在以後，人們致力於設計一種內燃機；其中燃料的燃燒是在本身的气缸中進行的，而在蒸汽發動機方面出現了很快就獲得大大發展的蒸汽輪機（拉伐爾，1845-1913）。

近幾年來，燃气輪機在工業上得到了利用，在燃气輪機中特別是噴氣式發動機，廣泛應用於運輸方面。

熱機的出現，保證了以各種不同燃料的形式蘊藏在自然界中的大量動力資源得以廣泛地用來獲得機械能。這些燃料是：煤，石油，頁岩，泥煤，天然氣以及其他等等。

由於最近科學上的成就，一種新的能量——原子能（核子能）——正在獲得廣泛應用，這種能量是原子核分裂時得到的。

在整個十九世紀年代里，工業上利用的主要是由熱機產生的機械能。這種能量要遠距離傳遞是很困難的，因此利用它就顯得很不方便。為傳遞機械能用的傳動裝置是十分笨重的，並且由於摩擦損失很大，因而也是很不經濟的；不僅如此，傳動裝置的作用範圍也還有很大的限制。

熱能與熱機在使用方面獲得飛躍的進展，是二十世紀里的事，隨着這種飛躍的進展出現了電機，並且得到極為廣泛的利用。電機把機械能變為電能。由於電能便於輸送，因此對於把能量傳遞給工具機這一點來說，電能是一種比機械能更為方便的能量。

由於在自然界蘊藏着各種大量的燃料以及在設計變熱能為機械能與變機械能為電能的機器方面所獲得的巨大成就，使得巨型熱電站得到了極為迅速的發展；在熱電站中就是把熱能變為機械能，然後又把機械能變為電能的。

利用熱能以獲得機械能，這是物理學家長久以來所注意的事，也是堅忍不拔的研究的對象。

在十八世紀上半葉，科學界早已把熱量看作是一種沒有重量的、不可消滅也不可創造的特殊物質——熱素。最早反對熱素理論的學者之一是天才的俄國學者羅蒙諾索夫（М. В. Ломоносов）[參考書籍 1-2]。他確立了普遍的守恆原則，這個原則叫做羅蒙諾索夫定律 [參考書籍 1-2，第 341 頁]。

羅蒙諾索夫關於熱現象性質的研究成果幾乎經歷了 100 年才得以具體化；在十九世紀中葉，

由于对热现象以及对热机工作的观察,通过一些学者的努力,确立了热力学第一定律及热力学第二定律,这些学者主要是:罗彼尔特·梅耶(Роберт Майер),卡诺(Карно),克劳修斯(Клаузиус),亥姆霍兹(Гельмгольц),汤姆逊(Томсон)等。热力学第一定律与热力学第二定律为研究热能与机械能的转换这门课程——工程热力学——奠定了基础^①。

随着时间的变迁,工程热力学所研究问题的范围扩展到把化学性质的问题也包括进去了,例如燃烧、溶液等问题。

因此,工程热力学研究化学能、热能、机械能以及其他各种能量彼此间的转换情况,主要着眼于这些转换在技术问题方面的应用。

作为一门科学的课程,工程热力学可以叙述得在形式上是很严密的。这种叙述方法就是利用数学式子来研究热力学的两个定律,这两个定律纯粹是根据实验方法确立的。但是,实验数据还不足以认识各现象的物理本质。实验方法,或者也称为现象论的方法(феноменологический метод),有很多方便的地方;但其缺点是:它把研究人员常常引到方法论方面不正确的方向上去。由于从物质结构这一角度出发,研究了物质的性质及热力学两定律,因此在物理学方面对它们有了科学上有根据的了解。只有在这时,热力学两定律才具有以前形式上叙述时所没有的那种显明性。分子运动理论的发展,作为对自然界所作实验性研究的补充,就促使人们揭露了各种现象的内在情况,确定了它们的内部关系及相互关系并且确定了发生这些现象的必然性,同时给出了预言这些现象的可能性。

根据以上所述,在工程热力学中,所有热力工程的计算都是用热力学两个定律来进行的,而在介释物质性质及热力学两定律的实质时,都要利用有关物质结构的资料。*后面一点在本书中谈得相当肤浅而很简要,它只满足本书所提出的目的^②。

① 这门科学的最初名称为热的机械理论[参考书籍 1-3]。

② 根据严格而深入的关于物质结构的资料并利用特殊的数学工具——或然率理论——循序地构成热力学的结果,近年来就产生了一门所谓统计热力学。

第一章 工質及其基本計算法

§ 1-1. 在熱機中熱能轉變為機械能的过程

在蘇聯，在社會主義計劃經濟的條件下，電能基本上是在巨型的區域熱電站生產出來的，這些熱電站則建立在開采燃料的地區。同時，從經濟上來考慮，在各個企業及各個城市里建立中小型熱電站常常是合理的。

在絕大多數情況下，在發電站中安裝着蒸汽熱機，也就是安裝着這樣一種發動機，它利用水蒸汽作為工質，借助於這種工質使熱能變為機械能。

在運輸式的設備（或稱為非固定式的設備，如汽車、飛機、無線電設備等）中，基本上是利用另一種型式的热機，這就是內燃機。在這種熱機中，用來完成使熱能轉變為機械能的过程的工質是一種氣態物體。這種氣態物體是燃料燃燒所得的產物，是一種混合氣體，主要由氮、二氧化碳、水蒸汽和氧組成。

現在，我們大致談一下在這兩種發動機中熱能轉變為機械能的过程，以便將來對這個問題作詳細的探討。

內燃機的主要部份為氣缸 1（圖 1-1），在氣缸中有一個活塞 2。當發動機工作時，活塞作往復平移運動，由於這一運動并借助於連桿 3 和曲柄 4，就使發動機的軸 5 轉動。利用某種方法可以把軸和工作機器（機床、泵、鼓風機、發電機以及其他機器）聯結起來。

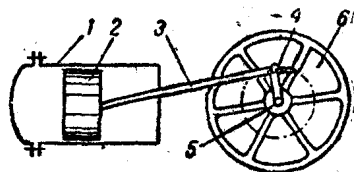


圖 1-1.

1—氣缸；2—活塞；3—連桿；
4—曲柄；5—軸；6—飛輪。

用某一種方法將空氣和燃料所組成的可燃混合氣體送入氣缸蓋與活塞頂之間那一部分氣缸中。這種混合氣體燃燒的結果，得到氣態產物；這種氣態產物就是這類熱機中所用的工質。氣缸中所形成的氣體，其溫度和壓力大大地高於周圍介質的溫度和壓力，因此這種氣體就具有作功的能力，例如：它可舉起重物，可使任何機器——機床、通風機、鼓風機——的軸旋轉，可使軋鋼機運動。對於這樣的氣體，我們說，它具有能量。氣體在氣缸中膨脹，向右推動活塞（圖 1-1）。這時，氣體的能量通過曲柄連桿機構傳給飛輪 6。這個飛輪裝在發動機的軸上，用來使軸轉動均勻。活塞的逆向運動是靠飛輪所儲存的部分能量來完成的。

每經一定的時間間隔，可燃混合氣體即被送入氣缸中并在其中燃燒起來，這樣一來，活塞的往復平移運動是在連續不斷地進行着，因而軸的旋轉運動也在連續不斷地進行。飛輪從氣體那里所得到的能量的剩余部分通過某種方法傳遞給各種機械（機床、通風機等）或發電機，以便能直接加以利用。

現在我們回過來研究一下蒸汽動力設備的工作情況。

燃料在汽鍋 2 的爐子 1 (圖 1-2) 內燃燒, 這種燃料多半是煤塊狀或煤灰狀的固體燃料。煤灰是用專用粉碎機將煤塊磨碎而成的。

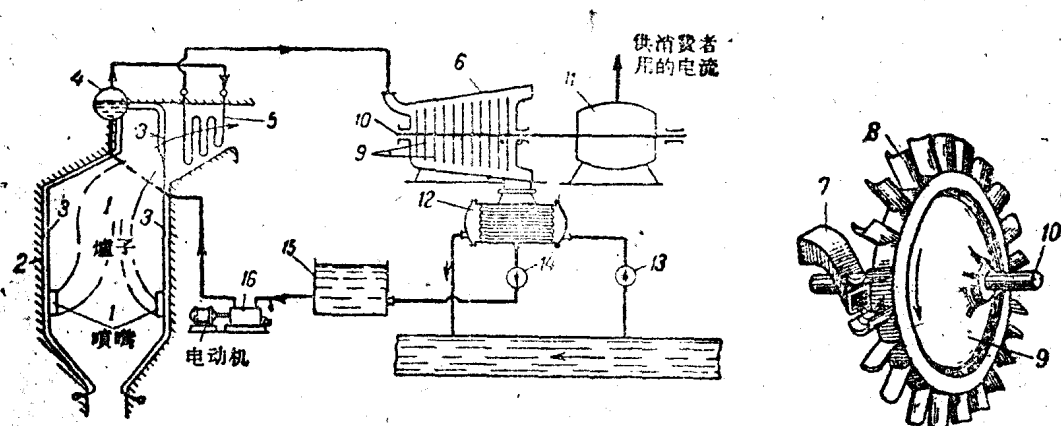


圖 1-2.

1—爐子; 2—汽鍋; 3—沸水管; 4—汽水筒; 5—過熱器; 6—汽輪機; 7—噴管; 8—葉片; 9—盤;
10—軸; 11—發電機; 12—冷凝器; 13、14 及 16—泵; 15—供水槽。

煤灰是通過一種特殊設備——燃燒嘴——用空氣吹到爐子裏去的。

燃燒時, 燃料的化學能轉變為熱能, 熱能的傳遞介質是燃料燃燒後的气態產物。

所得到的高溫氣體沿着汽鍋的沸水管 3 的外壁流動, 水從汽鍋的汽水筒 4 流到沸水管內, 而在其中循環。水獲得熱量後就變為蒸汽, 蒸汽沿沸水管上升並通入到汽水筒的上半部。蒸汽從這裡沿管子流到蛇形管 5 內, 蛇形管安置在鍋爐中燃料燃燒後熱產物所流經的地方。在這裡蒸汽被過熱, 亦即蒸汽的溫度比起它在汽水筒內的溫度來得更高。因此, 在其中產生過熱情況的蛇形管就叫做過熱器, 而這時的蒸汽則叫做過熱蒸汽。在過熱器的出口處, 蒸汽的壓力和溫度比周圍介質(空氣)的壓力和溫度來得更大。因此, 這種蒸汽也和前述設備內的气体一樣, 它具有作功的能力, 亦即它具有能量。

蒸汽從汽鍋的過熱器 5 出來後, 進入汽輪機 6 內。在這裡, 蒸汽通過漸縮噴嘴或噴管 7 (噴管之一已單獨在圖上示出) 而膨脹, 使自己的容積增加; 這時它的壓力和溫度都降低了, 但流動速度則大大增加, 這樣, 蒸汽就从噴管流出並具有動能。高速蒸汽流到彎曲葉片 8 上, 葉片安裝在盤 9 上, 而盤又固定在軸 10 上(軸上安裝有盤和葉片的那一部分單獨在圖上示出)。

在每一個盤上, 蒸汽的動能傳遞給葉片, 於是葉片連同盤和軸一起轉動。使軸旋轉的能量叫做機械能, 它是由蒸汽的動能產生的。

發電機 11 與汽輪機裝在同一根軸上。發電機的轉子靠沿軸傳來的機械能轉動起來, 於是產生了旋轉磁場, 在定子的線圈中因而產生了電能; 這電能傳給稱為發電機母線的不絕緣金屬導線, 並沿着導線通到最鄰近的用戶或進入用以提高電壓的變壓器。所得到的高壓電流進入高壓電力網, 並沿着這個電力網而通到遙遠的用戶中去。這樣, 電能从發電廠到用戶可傳遞數百公里。

蒸汽作完了使軸轉动的功以后,就从汽輪机进入冷凝器 12。在冷凝器的管子内部,泵 13 从河里或任一其他水源(泊、湖)里所吸上来的水在流动着。

水把管子外面的蒸汽的热量吸收以后,蒸汽就凝結成水。冷凝用的水离开冷凝器又回到河中去,而由蒸汽变成的水,这时叫做冷凝水,先用泵 14 引入到供水槽 15 内,然后用泵 16 使水流經圖上所沒有示出的預热器,再引入到鍋爐的汽水筒中。水由汽水筒进入到沸水管,并重复以前所經過的路程。

我們可以看出,上述两种热机的类型是不相同的。它們并不是本書的研究对象。我們从参与这两类热机工作的气体的行为来看,就可从这两类热机当中發現一些共同的特点和一些不同的特点。这些共同的特点使我們有可能研究热能轉变为机械能的现象,而不去考虑这现象到底發生在哪一种發动机里;至于那些不同的特点我們以后将分別加以研究。

在上述两种情况中,气体和蒸汽的膨胀过程是共同的。在活塞式發动机中,膨胀过程發生在活塞从起始位置移到終了位置的那一段时间内。

这时,气体重心的位移以及气体运动的速度都是不大的,因此可以說,气体的这种膨胀过程是發生在气体可見运动(有別于气体分子的不可見运动)不存在的时候。当气体膨胀發生在汽輪机的噴管中的时候,那就会出现另外一种情况。水蒸汽进入噴管时,它的速度比較低(25—50 公尺/秒),而在离开噴管时,它的速度就非常大(500—1200 公尺/秒,或者还要大些)。因此,在这种情况下,水蒸汽膨胀發生在水蒸汽可見运动存在的时候。正因为如此,气体的这种膨胀情况的各个方面将是特別研究的对象。

§ 1-2. 基本概念及定义

从研究热机的工作可以看出,在發动机里,热能不断地轉变为机械能是靠輔助物質来实现的,这种物質叫做工質。

就物理性質來說,气态物質是最合适的工質,因为在固、液、气三种物态中,气态的特征是膨胀能力最大。

在自然界中,凡是我們看得見的并可用簡易办法度量的物体,都是大的物体,或所謂宏观物体。宏观物体的运动能就是机械能。

一切大物体都是由微小粒子——分子——組成的,而分子又由原子組成。这些看不見的、而又不能用普通方法度量的物体叫做微观物体。

气态物質的分子处在不断的、不規則的运动中;彼此时而接近,时而分离,并且在經常碰撞着。这种运动便是热能的本質。这种运动的特性决定于物体的热力状态,这是因为它可以从一系列现象(蒸發、热傳导、融化)去推断。因此,分子的不規則运动叫做热力运动。

分子之間有內聚力在作用。

在分子的不規則运动中,沒有一个方向可以說是主要的。由于大量的气体分子进行不規則运动的結果,气体获得如下性質:

(1) 气体給予容器四壁的压力是到处相等的;

(2) 气体均匀地佈滿它所佔有的全部容积。

对于混合气体來說，第二个性質可以这样来叙述：如果彼此之間不能起化学作用的某几种气体放在同一容器里，則由于热力运动的結果，它們必混成一种均匀的混合气体。

如果按气体分子所包含的原子数目来分类，則气体可分为單原子气体、双原子气体、三原子气体及多原子气体。

分子的成份可以用它的化学公式來說明。

在热力工程計算上，分子的最重要特性是它的分子量。分子量就是組成分子的全部原子的原子量的总和。原子量和分子量是一些抽象数字，它們代表原子和分子的質量。

在三种物态中，气态是我們这里最感兴趣的。关于气体性質的理論研究，如考虑到它分子之間的內聚力以及分子本身的体积，那就非常复杂了。由于我們对于分子之間內聚力的实質缺乏研究，要找出气体分子行为的規律来是很难的。这方面由实验获得的数学关系，也很复杂。因此，在科学上首先研究分子之間沒有內聚力的那种假想的气体，并将它的分子当作沒有体积的質点来看待。这样的气体叫做理想气体。

理想气体的研究，有很大的实际意义。这一点是可以确信的，如果我們注意到实在气体中內聚力及分子体积所起作用的話。我們知道，处在不同物态——固态、液态、气态——的物体，其分子之間的內聚力及分子間的距离是各不相同的。

在固体里，原子与原子之間彼此挨得最近，而內聚力最大。这里，原子不作平移运动，仅在它的平均位置附近振摆。液体的內聚力就小一些；这时候分子已有平移运动，但这种运动，由于分子之間的距离很短而受到很大的限制。

物体由液态轉变为气态之后，它的体积，因而也是它分子之間的距离，就大大增加，而內聚力則减小，而且气态离液态愈“远”，这种变化也愈强。同一气体，分子間的內聚力將随温度的增加及压力的下降而减小。無論是温度增加或者是压力降低都会使气体的体积增大，因而分子間的距离增大，这就使內聚力减小。同时，分子本身体积和气体分子运动所占的体积比起来，其作用也就减小了。气体运动所占的体积叫做气体的体积。

当气态物質离开液态相当远时，它分子間的內聚力及分子本身的体积，因为很微小，都可以略去不計。这时的气体，按其性質來說，已經相当于所謂的理想气体了。这就是我們可以把每一种自然界中实际存在的，可以略去它微小內聚力以及分子本身体积的气体称为理想气体的根据。

由上述可知，当温度愈高、压力愈小的时候，这种假設就愈正确。所以，当任何一种实在气体的压力趋于零($p \rightarrow 0$)，体积趋于无限大($v \rightarrow \infty$)时，也就是当該气体趋于極限状态时，它就成为理想气体。

关于能否把某种状态下的某种气体当作理想气体看的问题，决定于計算所需要的精确程度。

在热力工程計算里，热力工程上所遇到的一切气体，除水蒸汽外，都可以認為是理想气体。在本書中所碰到的水蒸汽有两种状态。在第一种情形下，水蒸汽是燃料燃燒之后所成的混合气体中的組成部份。那时水蒸汽的温度很高而压力很低，因此可以把它当作理想气体看待。根据同样的理由大气中所包含的水蒸汽也常常当作理想气体看待。

在另一种情况下,水蒸汽是在蒸汽发动机里用作工质,或在热交换器里充作热能的傳遞介质。这里,它和液态是相当接近的,因此,决不能把它当作理想气体看待。由此可见,自然界中实际存在的气体,凡是分子之间的内聚力及分子本身的体积不能略去的,我們叫做实在气体。

在十九世纪中叶,在科学中所确立的物质分子运动理论指出了理想气体諸定律的内在联系及这些定律的适用范围。有了这一理论以后,这些定律才得到统一起来,因为它们都是从同一个原理引伸出来的。这个原理就是所谓的气体运动理论的基本方程。将力学定律应用于分子运动,即可推导出这一方程,其形式如下[参考书籍 1-3 和 1-4, 第 19—23 页]:

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \frac{mw^2}{2}, \quad (1-1)$$

式中 p —气体压力;

n —分子浓度或气体每单位体积中所包含的分子数;

m —分子质量;

w —分子的均方根速度,它是由下式得到的:

$$w = \sqrt{\frac{w_1^2 + w_2^2 + \cdots + w_k^2 + \cdots + w_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n w_k^2}{n}}, \quad (1-2)$$

式中 $w_1, w_2, \cdots$ 代表气体各分子的速度。

公式(1-1)中的 $\frac{mw^2}{2}$ 为分子平移运动的平均动能。按其含义,分子平移运动的平均动能可用下式表示:

$$\epsilon = \frac{\frac{mw_1^2}{2} + \frac{mw_2^2}{2} + \cdots + \frac{mw_k^2}{2} + \cdots + \frac{mw_n^2}{2}}{n} = \frac{m \sum_{k=1}^n w_k^2}{2n}.$$

将公式(1-2)得到的 $\sum_{k=1}^n w_k^2$ 值代入上式得:

$$\epsilon = \frac{mw^2}{2}. \quad (1-3)$$

这一公式证明了引用均方根速度这个概念是正确的,因为利用这一量就可很容易地算出分子平移运动的平均动能的值。

因此,公式(1-1)说明了:气体的压力在数值上等于气体单位体积内分子平移运动的平均动能的三分之二。

§ 1-3. 气体状态諸参数

对应于物体的每一状态,表征这一状态的量都具有完全确定的数值。在这些量中,那怕只有一个量的数值发生变化,都意味着物质状态的变化。这些量我們叫做气体状态的函数或参数。在热力学中,除了这些参数以外,也还有其他一些量,用来表征物体由一个状态转变为另一个状态所经历的过程。

在这一节中,我們將介绍几个状态参数,其他的状态参数将留待本書有关章节去研究。

溫度 由于分子太小以及分子的數目太多，因此分子的热力运动不能用簡單而直接的方法来測量。为了从数量上說明分子的热力运动，分子运动理論把分子平移运动的平均动能和理想气体絕對溫度这个概念連系起来，并确定这两者是成正比的。

根据分子运动理論的观念，在同一溫度下，气体各分子的运动速度是各不相同的，但絕對溫度表徵分子平移运动的平均动能。因此，絕對溫度这个概念是对全部分子而言的，它不是对某一个分子或某一小群分子而言。

根据上面所述，我們可以确定理想气体的平均动能与气体絕對溫度之間的关系式如下：

$$\frac{mw^2}{2} = BT, \quad (1-4)$$

式中 T 代表絕對溫度， B 代表比例常数，其他符号与上节所用者相同。

从上式看出，当 $w=0$ 时（理想气体的这种状态是不可能达到的），絕對溫度即取零值。

我們要指出：分子运动理論所确立的分子平移运动的动能与气体絕對溫度之間的关系式（1-4），和溫度的一般概念是一致的，在物理学里，溫度是表示物体的冷热程度的。

假定，我們把两种彼此不起化学作用的物体放在一起。接触之后，在接触面上这两种物体的分子彼此碰撞，并有能的交換，这正像在同一物体（气体）内部，分子彼此互撞时所發生的情况一样。具有动能較大的分子把一部份能量交給与它相遇的动能較小的分子。因为每一物体之各个分子具有各种不同的速度及动能，所以，在接触面上，一个个碰撞的結果，能量时而从一物体傳給另一物体，时而相反。但如果第一物体的平均动能大于第二物体的話，那末这样碰撞的总結果，甚至在很短的时间內，就会把热能由第一物体傳給第二物体，而不会作反方向的傳遞。

可以証明（对气体來說証明最易），两个物体相接触时，如果仍旧取一定时间內的总結果的話，那末只有到两个物体內部分子的平移运动的平均动能相等时，即要到

$$\frac{m_1 w_1^2}{2} = \frac{m_2 w_2^2}{2}$$

时，能量的傳遞才停止。式子的左項和右項代表第一个物体和第二个物体內部分子的平移运动的平均动能。

两物体的这种状态叫做**热力平衡**。拿这样两罐气体来看：为了避免混合，气体之間加上一層薄薄的固体間壁来將它們分开，并假定这两种气体达到了热力平衡（自然也是在有間壁存在的情况下）。这两种气体的性質、压力和所占的体积等等都可以互不相同，但热力平衡并不因此而遭到破坏，只要这两种气体的平移运动的平均动能相等就行。这就証明，热力平衡的条件归根結底就是絕對溫度相等。絕對溫度我們用公式（1-4）来求出。

如果气体种类相同，那么热力平衡条件就簡單化了。假定气体种类相同，这时候 $m_1 = m_2$ ，于是平衡条件便成为 $w_1 = w_2$ ，即使同一种气体达到热力平衡的必要和充分的条件就是气体的均方根速度相等。

我們每人所熟知的对于溫度的一般概念，即对于物体冷热程度的一般概念，也是根据在溫度有差別时，热能由一个物体傳給另一物体，以及在溫度相等时，达成热力平衡这样的观念而得出的。如果使两个物体接触，彼此之間沒有热交往，那我們就認為这两物体一样热，即溫度相同。

这样一来,温度的这种概念和那种概念就完全取得一致,也就是说,在温度的一般概念下,如果两个物体具有相同的温度,那么,在上述的温度概念下,即把温度定义为分子平移运动的平均动能的量度时,这两个物体也是具有相同的温度。

如果有可能用简单方法把分子平移运动的平均动能度量出来,那就可以直接用这种能量的数值来判断物体的冷热程度和在这方面将两物体加以比较,而不必借助于假拟的量——温度来表示了。

这里所说的是温度与理想气体分子的平移运动之间的关系。后面关于温度与分子运动之间的这种关系还要详细研究(参看第2-1节)。

树立了温度的概念之后,产生了一连串测量温度的问题,也就是将不处在热力平衡的两个物体的温度加以比较的问题。这一类的问题归结为怎样在实际上计算温度,起点在哪里,比例尺是多大;这些都是温度表的课题。

压力 气体分子运动理论把气体的压力看作是分子撞击容器内壁的结果。分子是如此之多(因而撞击也非常之频繁),以致我们不可能看见它每次撞击,只能观察全部撞击的平均结果;气体压力也就是这种平均结果。压力的作用方向总是垂直于容器内壁的。

气体压力 p 是以作用在单位面积上的力来衡量的。设 F 表示作用在面积 S 上的力,则

$$p = \frac{F}{S}. \quad (1-5)$$

如果在公式(1-1)中取 $n=0$, 则 $p=0$; 因此在这个公式中压力 p 的值是从压力等于零的值起算的,所以这个压力叫做绝对压力。这个压力可用图1-3所示的仪器来度量。它是一根玻璃管,管子一端封闭,一端打开,管内倒入某种液体,例如水银。在玻璃管左边的一支管子内整个充满了水银;这就是说大气压力大于水银柱 H 的压力。

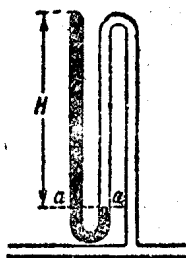


图 1-3.

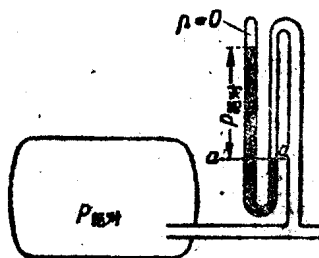


图 1-4.

现在我们将仪器连接在充满气体的容器上(图1-4)。设这时左边一支管子内的水银下降,而右边的一支管子内的水银上升。这表明容器内气体压力小于水银柱 H 的压力(图1-3),也小于大气压。只有这些较小的压力才可以用这种仪器来度量。容器中气体的压力作用在面积 $a-a$ 的右边,而高为 H 的水银柱的压力则作用在左边。在左边一支管子内,水银的上部形成水银蒸汽,但其压力很小,可以认为在水银上部空间内的压力等于零。因此,水银柱 H 可用来量度容器中的气体压力,这个压力值是从零压力起算的,也就是说这一水银柱可量度容器内气体的绝对压力。