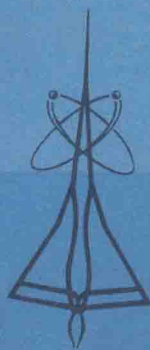


航空高等院校教材

工程热力学

赵承龙编



航空专业教材编审组

工 程 热 力 学

赵 承 龙 编



航空专业教材编审组

内 容 简 介

本书共分八章。前三章主要阐述热力学基本概念和热力学第一、第二定律,着重介绍状态方程、能量方程及熵方程和它们的应用。第四到第八章是前三章基本内容的扩展和应用,主要有气体流动、热力循环与能量转换、实际气体与水蒸气、混合气体与湿空气以及有化学反应的热力系统等内容。在附录中还对热力学新发展的不可逆过程热力学作了简介。每章配有小结、复习思考题及习题。本书全部采用国际单位制。

本书可作为高等学校航空动力专业或一般内燃动力专业的教科书,也可供其他专业工程技术人员参考。

工 程 热 力 学

赵 承 龙 编

*

航空专业教材编审组出版

南京航空学院印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张 18.625 476.8千字

1984年2月第一版 1984年2月第一次印刷 印数: 0,001—1,200册

统一书号: 23126j 定价: 1.91元

前 言

本书主要根据航空高等院校动力类专业的《工程热力学》教学大纲，并参考了教育部1980年印发的高等工业学校动力类《工程热力学教学大纲》（草案）精神编写的。

全书共分八章。前三章主要阐述热力学基本概念和两个定律，着重介绍状态方程、能量方程及熵方程。第四到第八章是前三章基本内容的扩展和应用。附录不可逆过程热力学简介是作为热力学新发展的一个侧面的反映。每章配有小结提要、复习思考题及习题。带“*”号内容可根据学时及专业要求灵活掌握取舍。

本书在编写过程中主要注意到以下几方面：

- (1) 以能量及能量转换为主线，把各章有机地贯穿起来。
 - (2) 突出三个基本方程即状态方程、能量方程及熵方程，并注意其应用。
 - (3) 把工质的流动情况和相对静止情况统一起来，以流动为主，把相对静止作为流动的一种特殊情况来处理。
 - (4) 考虑到与前修课普通物理学、普通化学的衔接问题。一般采用在概括总结前修课内容的基础上，渗进新的内容。力争做到既照顾到科学内容的系统性，又避免简单地重复。
 - (5) 全部采用国际单位制（SI制）。部分章节适当说明我国工程中目前尚在使用的公制。此外，编写中还参考了国内、外有关书籍，力图对当前先进科学知识在书中有所反映。
- 本书由清华大学孟桂荣、张学学同志主审，在此深表谢意。
- 限于水平，书中有不妥和错误之处，希读者批评指正。

赵 承 龙

于南京航空学院

1982年10月

主 要 符 号

a	音速	$\bar{V}$	速度
B	大气压力	W	功; 热力学几率
c	比热	w	单位质量作的功
d	直径; 含湿量	x	湿蒸汽干度; 离介度
e	单位质量的总能量	Z	压缩因子
F	面积; 自由能	z	高度
f	比自由能; 回热度	(μR)	通用气体常数
G	自由焓	(μc_p)	定压千摩尔比热
g	质量成分; 比自由焓	(μc_v)	定容千摩尔比热
H, h	焓、比焓		希 腊 字 母
k	比热比	α	热膨胀系数; 余气系数
m	质量	β	压缩系数
M	马赫数	γ	重度
N_0	亚佛加德罗常数	ε	压缩比;
n	千摩尔数; 多变指数	η	效率
p	压力	λ	定容升压比
Q, q	热量及单位质量的换热量	ρ	密度; 加热膨胀比
R	气体常数	μ	分子量
R_μ	通用气体常数	μ_i	焦-汤系数
r	容积成分; 汽化潜热	ϕ	相对湿度
S, s	熵、比熵	σ	总压恢复系数
T	绝对温度	π	增压比
t	摄氏温度	τ	时间
U, u	内能、比内能		
V, v	容积、比容		

目 录

绪论	(1)
§ 0—1 能量及能源	(1)
§ 0—2 工程热力学研究对象及主要内容	(2)
§ 0—3 工程热力学的研究方法	(3)
§ 0—4 单位制	(3)
第一章 基本概念	(6)
§ 1—1 热力系统	(6)
§ 1—2 实际气体与完全气体	(7)
§ 1—3 功与热量	(8)
§ 1—4 热力状态	(10)
§ 1—5 热力过程	(21)
§ 1—6 热力循环	(24)
小结提要	(26)
复习思考题	(26)
习题	(27)
第二章 热力学第一定律及能量方程	(30)
§ 2—1 一般平衡关系式	(30)
§ 2—2 连续方程	(32)
§ 2—3 能量方程	(33)
§ 2—4 几种常用的能量方程	(38)
§ 2—5 过程的能量分析	(48)
§ 2—6 几种典型情况分析	(58)
小结提要	(72)
复习思考题	(74)
习题	(75)
第三章 热力学第二定律及熵方程	(80)
§ 3—1 几种循环的性质	(80)
§ 3—2 热力学第二定律两种说法	(85)
§ 3—3 卡诺定理及其应用	(87)
§ 3—4 不可逆过程中的熵产	(94)

§ 3—5 熵方程·····	(99)
§ 3—6 工质的作功能力·····	(104)
* § 3—7 熵的统计意义·····	(111)
小结提要·····	(113)
复习思考题·····	(114)
习题·····	(116)
第四章 气体流动 ·····	(119)
§ 4—1 基本方程·····	(119)
§ 4—2 几个物理量概念·····	(120)
§ 4—3 一元定熵流动·····	(126)
§ 4—4 气体在喷管、扩压管中定熵流动·····	(128)
§ 4—5 有摩擦的绝热流动·····	(134)
§ 4—6 叶轮机中的气体流动·····	(136)
§ 4—7 有热量交换的气体流动·····	(145)
小结提要·····	(149)
复习思考题·····	(149)
习题·····	(150)
第五章 热力循环与能量转换 ·····	(153)
§ 5—1 分析循环的步骤和方法·····	(153)
§ 5—2 活塞式定容、定压及混合加热循环·····	(157)
§ 5—3 流动工质的定压加热循环——布雷敦 (Bragton) 循环·····	(162)
§ 5—4 可归属于布雷敦循环的其他发动机循环·····	(169)
§ 5—5 流动工质的定容加热循环·····	(173)
§ 5—6 斯特林 (Stirling) 循环·····	(175)
§ 5—7 空气制冷循环·····	(176)
§ 5—8 热、电能量直接转换装置·····	(178)
小结提要·····	(180)
复习思考题·····	(181)
习题·····	(182)
第六章 实际气体及水蒸气 ·····	(185)
§ 6—1 实际气体状态方程·····	(185)
§ 6—2 热力学一般关系式·····	(190)
§ 6—3 物性量关系式·····	(194)
§ 6—4 熵、内能及焓的一般关系式·····	(201)
§ 6—5 水蒸气·····	(204)
小结提要·····	(210)

复习思考题	(212)
习题	(213)
第七章 混合气体及湿空气	(215)
§ 7—1 混合气体的基本概念和性质	(215)
§ 7—2 混合过程	(222)
§ 7—3 湿空气	(227)
小结提要	(238)
复习思考题	(238)
习题	(239)
第八章 有化学反应的热力系统	(241)
§ 8—1 一般概念和定义	(241)
§ 8—2 热力学第一定律用于有化学反应的系统	(244)
§ 8—3 热力学第二定律用于有化学反应的系统	(248)
§ 8—4 平衡常数 K_p 计算方法	(253)
§ 8—5 燃烧温度	(255)
小结提要	(264)
复习思考题	(265)
习题	(265)
附录一 不可逆过程热力学简介	(267)
§ A—1 引言	(267)
§ A—2 通量与力	(267)
§ A—3 熵产率与力、通量之间的关系	(269)
§ A—4 翁沙格 (Onsager) 定理	(270)
§ A—5 非平衡定态	(271)
§ A—6 最小熵产率的态	(272)
§ A—7 生物学中的应用举例	(273)
附录二 图和表	(274)
I、气体常数 R 的数值表	(274)
II、气体真实定压比热表	(274)
III、气体平均定压比热表	(275)
IV、空气的焓、内能表	(277)
V、饱和蒸汽表 (按压力排列)	(278)
VI、饱和蒸汽表 (按温度排列)	(279)
VII、过热蒸汽表	(280)
VIII、水蒸气的焓—熵图	(283)

Ⅸ、某些物质在标准状况下的生成焓、生成自由焓及绝对熵数据表·····	(285)
X、某些物质在标准状况下的燃烧热·····	(286)
Ⅺ、某些燃烧产物的焓温表·····	(287)
主要参考书 ·····	(288)

绪 论

§ 0—1 能 量 及 能 源

运动是物质的存在方式，是物质本来具有的属性。自然界里所发生的一切现象或过程，都是和各种不同形式的物质运动相联系的。物质运动的具体形式不同，也就表现为不同形式的能量。例如组成物体的大量分子的有序定向运动表现为机械能；而无序的分子运动则表现为热能。电荷的运动表现为电能；……因此，物质运动具体形式的差别就是各种能量形式差别的前提，“能量”也就可以用来表示物质的运动，作为物质运动的公共度量。

物理学中，把一个物体能够作功说成它具有能量，有时简称为能。人在日常生活和生产活动中，每时每刻都在利用各种能量，例如热能、机械能及电能等。

能源是能够转换成机械能、热能、电能等各种能量的资源。自然界的能源，按其形成条件可分为两大类：一类是自然界中以天然的形式存在的能量资源，也就是天然能源。又叫做“一次能源”，如原煤、原油、天然气、太阳能等。另一类是由一次能源直接或间接转换为其他种类和形式的能源，也就是所谓人工能源。又叫做“二次能源”，如焦炭、汽油、煤气、电力、热水等。

一次能源按其成因还可以进一步分为以下几个方面：

（一）地球本身蕴藏的能源，例如地球内部的地热能，地壳中储藏的核燃料所包含的原子能等都属于这一方面。

（二）来自地球以外天体的能源。这里“天体”主要指的是太阳，当然也包括其它天体。水能、风能、波浪能、海洋温差能都是靠太阳辐射作用产生的。植物的化学能，是通过“光合作用”由太阳辐射能转化来的。矿物燃料如原煤、原油及天然气等都是由古代生物沉积在地下的化石演变而成的，而古代生物的能量都来源于太阳辐射能。

（三）地球与其他天体相互作用的能源，如潮汐能。

能源是人类从事各种经济活动的原动力，是生产力发展的重要标志。几千年来人类一直顽强地同自然界作斗争，为获得新的能源而奋斗。人类在认识和利用能源方面有过四次重大的突破，这就是火的发现，蒸汽机的发明，电能的问世及原子核能的开发。上述每一次重大突破都对经济和科学技术的发展起了很大的推动作用；反过来，科学技术和经济越发展，对能源的需要也不断地增长。

关于能源及其转换和利用情况，可从图 0—1 得到了解。通常人们实际用量最大的三种能量形式是热能、机械能和电能。目前电能的获得，多数情况是由其他各种能源先变为热的形式，然后通过热机转换为机械能再变为电能使用。当然，采用其他直接转换的方式也是可以的，如燃料电池、热离子能量转换器、太阳能电池以及磁流体发电等。这些新型发电方式目前正在研制，并已取得很大进展，有的已付诸实用。

能源问题举世瞩目。从整个世界来说，能量资源的消耗急剧增长，而储藏量有限，例如

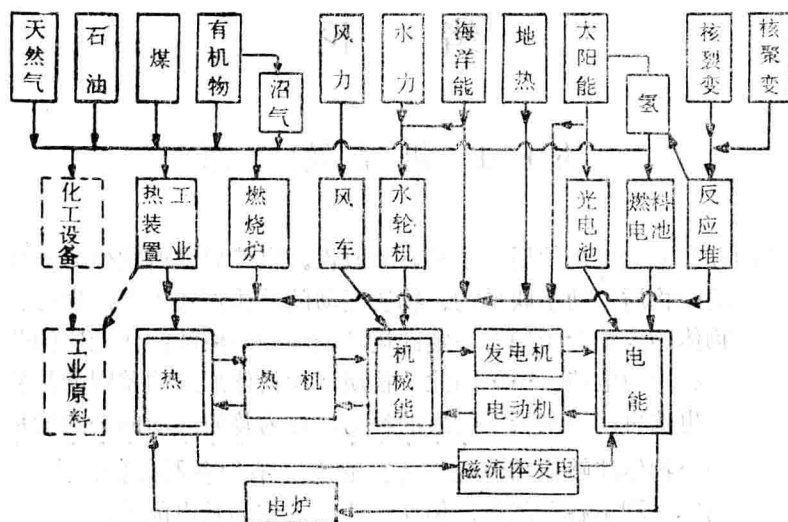


图0-1 能源及其转换和利用

世界石油和天然气按目前的消耗速度大约只能维持三十到五十年，据估计再隔十年左右，能源供需矛盾将更趋紧张，同时随着耗能增加，还带来一个污染问题。为了改变这种局面，世界各国都在研究开发新能源。

解决能源问题的途径不外乎两条：一是开源，二是节流。开源就是开发新能源资源，节流就是节约使用能源。目前这两个方面的工作已积极展开，尤其是当前的节能工作已在某些方面取得了一定的效果。

节能与开源要靠强大的科学技术，工程热力学是一门涉及到热能、机械能及其转换的学科，它所讨论的内容与有效地和经济地使用能源有着密切的联系。所以在学习本课程时，对能源问题必须要有充分的认识，这正是本节讲授的目的。

§ 0—2 工程热力学研究对象及主要内容

热力学是一门研究关于能量及其转换的科学。工程热力学是热力学一个分支，它主要研究的对象是热能与机械能之间转换规律和方法，以及提高转换效率的途径。因为热能一般由燃料燃烧而来，所以工程热力学也要讨论有关化学能与热能转换问题。工程热力学研究的主要内容包括下列几个方面：

- (一) 热能与机械能转换所遵循的基本规律。
- (二) 提高热能利用经济性的途径。
- (三) 热能转换为机械能是通过一定的工作物质来实现的，这种工作物质简称为工质。由于工质的性质对能量转换有着密切的关系，因此对工质的热力学性质的研究，也是工程热力学一个相当重要的内容。

(四) 有关化学反应过程的能量转换及分析计算。

此外,本书还对近年来热力学新出现的某些问题如不可逆过程热力学,将在附录中作简要的介绍,作为常识性的了解。

§ 0—3 工程热力学的研究方法

对于热现象的研究,有两种主要的研究方法:

(一) 宏观的研究方法(又叫热力学方法)。

它是从日常经验或实验出发,进行直接观察,最后总结出原理、定律来,并运用逻辑推理导出许多推论,再以实践进一步验证这些推论是否正确。热力学第一定律、第二定律就是通过人类长期在实践中所总结出来的基本原理,由它所引出的许多结论又被长期以来的实践考验所证实,这就是客观的研究方法。这种方法的特点在于不依赖物质结构的任何假设,而是对宏观物体的宏观性质直接观察的结果,所以该方法具有高度的可靠性和普遍性。这里所谓宏观物体,是指由大量运动着的粒子(分子、原子等)所组成的物体,在研究时把它当作一个整体(连续体)看待。这里所谓宏观性质,是指代表大量粒子平均行为的物理量,如压力、温度等。正由于这种方法忽视物质的具体构造,因而不能深入研究现象的本质,也就不能阐明其本质的物理意义。

(二) 微观的研究方法(又叫统计热力学方法)。

它是从物质内部结构出发,用统计的方法推算出它的宏观性质,最后仍以宏观实验结果作为检验。这种方法的特点在于把工质处于平衡时的宏观性质作为大量粒子某种微观量的统计平均值的函数。例如温度就是分子移动动能统计平均值的某一函数。这种方法涉及到物质内部结构,因而能更深刻地反映现象的本质。但对物质结构假设的正确与否,决定了这一方法否可靠性和普遍性的程度。此外,这种方法需要用到许多繁琐的数学分析,所以不如宏观方法简便。

实际上宏观方法和微观方法都是研究同一对象的两种不可缺少的方法,它们各有优点,也各有不足之处,如把两者按照研究的要求适当结合起来,相互补充,将收到相辅相成之效。根据工程热力学的特点和要求,本书将以宏观方法为主,对某些概念辅以微观解释,以便能进一步理解这些宏观现象的物理意义。

§ 0—4 单 位 制

在研究有关热现象问题时,不论是分析计算或是实验测定,都不可避免地要涉及到许多物理量的单位问题。目前许多国家都决定采用国际单位制。我国也正式规定逐步采用国际单位制。因此,本书主要采用国际单位制,但也考虑到到目前我国工程技术中使用单位的过渡现状,在某些内容中也适当提一下工程单位以及两种单位的换算关系。

国际单位制是世界公认的比较先进的单位制,它是1960年第十一届国际计量大会通过的,其国际代号为SI。国际单位制规定了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的

量及光强度等七种物理量作为基本单位，其他物理量的单位可通过相应的定义、定律或公式用基本单位的组合形式来表示，称为导出单位。现将有关几个单位与工程制单位对照列表如表 0—1。

表 0—1 SI 及工程制几个基本单位及导出单位表

物 理 量	SI		工 程 制	
	基 本 单 位	导 出 单 位	基 本 单 位	导 出 单 位
长 度	米 m		米 m	
时 间	秒 s		秒 s	
温 度	开 K		开 K	
质 量	千克(公斤)kg			质量单位 $\frac{\text{kg}_f \text{s}^2}{\text{m}}$
力		牛顿 $\text{N} \left(\frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} \right)$	千克力(公斤力) kg_f	
压 力		帕 $\text{Pa} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)$		压力单位 $\frac{\text{kg}_f}{\text{m}^2}$
能量或功		焦耳 $\text{J}(\text{Nm})$		千卡或 kcal 公斤米 $\text{kg}_f \text{m}$
功 率		瓦 $\text{W}(\text{J/s})$		公斤米 秒 $\frac{\text{kg}_f \text{m}}{\text{s}}$

这里需要注意的是：在 SI 里，质量是基本单位，用千克表示，它等于国际千克原器的质量。而力是导出单位，由牛顿第二定律可有

$$\text{力} = \text{质量} \times \text{加速度}$$

即为 $1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ kg s}^2/\text{m}$ ，它表示对 1 kg 质量使其产生 1 m/s^2 加速度所作用的力，这时称为 1 牛顿的力。而在工程制里，情况恰相反，力是基本单位，它定义为：在纬度 45° 的海平面上（即重力加速度等于 9.80665 m/s^2 的地方），千克原器（即 SI 质量单位的千克原器）所受到的重力定为千克力（ kg_f ）。工程制里的质量单位是导出单位，它是根据牛顿第二定律给出为

$$\text{质量} = \frac{\text{力}}{\text{加速度}}$$

即作用 1 kg_f 的力，使其产生 1 m/s^2 加速度时这个物体所具有的质量，定为工程制质量单位 $\text{kg}_f \text{s}^2/\text{m}$ 。

现分析两种单位制之间关于质量和力的两种单位换算关系。上述千克原器就 SI 来说，质量是 1 kg ，而按工程制质量单位推算，因原器受到的重力是 1 kg_f ，而加速度为 $g \text{ m/s}^2$ ，所以它具有 $1/g$ 工程制质量单位 $\text{kg}_f \text{s}^2/\text{m}$ 。于是两种单位制之间质量单位换算关系为

$$1 \text{ kg}(\text{SI}) = \frac{1}{g} \frac{\text{kg}_f \text{s}^2}{\text{m}} (\text{工程制}) \quad (0-1)$$

或

$$1 \frac{\text{kg}_f \text{s}^2}{\text{m}} (\text{工程制}) = g \text{ kg}(\text{SI}) \quad (0-2)$$

在工程制里千克原器受到的重力是 1 kg_f ，而在 SI 里原器受到的重力应为 $1 \text{ kg} \times g \text{ m/s}^2 = g \text{ N}$ ，可有

$$1 \text{ kg}_f (\text{工程制}) = g \text{ N}(\text{SI}) \quad (0-3)$$

或

$$1 \text{ N}(\text{SI}) = \frac{1}{g} \text{ kg}_f (\text{工程制}) \quad (0-4)$$

第一章 基本概念

在研究热能与机械能相互转换的问题时，要涉及到一些基本概念，如系统、状态、过程、循环等等。本章在普通物理学已讲述的基础上，有重点地加以复习，并在某些内容上适当加以扩大和提高，以达到承前启后的目的。

§1—1 热力系统

在具体分析热力学问题时，首先要把所研究对象的范围加以划定，这样才有可能弄清所研究的对象与其相联系的外在物之间能量交换和质量交换的关系，也才有可能掌握对象参与变化时各物理量所遵循的规律。

所划定作为热力分析对象的那一部分叫作热力系统，简称系统。系统以外的任何东西都叫作外界。系统和外界的分界面叫作系统的边界。通过边界，系统和外界之间可以有能量交换和质量交换。系统的边界可以是实际物体的边界，有时为了某种需要也可以是人为虚构的假想边界；边界可以是固定不变的，也可以随系统内部所发生的变化而迁移。与外界没有质量交换的系统叫作闭口系统或封闭系统。闭口系统与外界之间可以有能量的交换。例如，取活塞与气缸壁所包围的气体为系统（图1—1），这时气体的实际边界就是系统的边界，而且随着活塞的移动，边界也发生相应的改变。由于系统与外界之间没有质量的交换，所以这是一个封闭系统。通过活塞的移动，系统与外界之间可以有功的交换，同时通过气缸壁也可以有热量的交换，因而系统与外界可以有能量的交换。封闭系统又叫作控制质量系统，这意味着系统包含的质量不变。

当系统与外界之间有质量交换时，这个系统就叫作开口系统。通常研究一种所谓控制容积系统（简称控制体），就是选取某一确定的空间作为系统，如图1—2所示。气体流过叶片，这时取控制体边界1221在空间中固定不变，而外界和系统之间有质量交换，同时通过边界还可以有热量和功的交换。

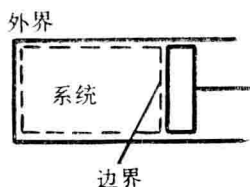


图1—1 闭口系统

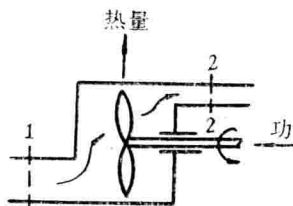


图1—2 开口系统

系统总是处于和周围外界的相互作用之中，但是这种相互作用对不同的系统来说，在强度上会有很大的差别。设想当系统与周围外界的相互作用无限削弱，便得到孤立系统的概

念。孤立系统与外界不发生任何相互作用（没有质量和能量的交换）当然，孤立系统和其他在物理中常见的某些概念（如刚体）一样，是一种抽象的概念，但事实表明，对于客观事物适当划分系统范围，可以接近这种情况。例如，把系统和所联系的外界有关物体合在一起划为一个大系统，则这个大系统就很接近孤立系统。这些概念非常广泛而又有效地用于工程实践中。

系统如何划分要根据客观具体情况和主观要求加以选取，同一热力学问题，也可有不同的划定系统方法，例如分别具有不同温度的两个物体相接触，由于高温物体向低温物体传热，最后它们的温度逐渐趋于一致。对于这个问题，如果为了得知两物体总的变化结果，可以把两物体都划到系统中来，这时系统和外界各自的能量都不发生变化，而过程只在系统内部进行。如果为了得知一物体对另一物体传递的能量，则把其中一个物体划为系统，而另一物体成为外界，这样就把两物体之间传递的能量关系突出来了。又如对于工质处于流动情况，通常划为开口系统来分析，但由于某种需要，也可采用闭口系统进行分析。以涡轮为例就可以有两种划分系统的方法，其一采用控制体法（开口系统），见图 1—3 中粗实线所包围的空间就是系统，这时气体进入系统，接着在系统内部把它转变为叶片旋转的轴功输出，最后从涡轮出口排出系统。其二，划成控制质量系统（闭口系统），见图 1—3 中虚线围成的小系统。假想观察者就站在这个系统之上与该系统一同流动前进（也可理解为把参考座标放在系统之上），则系统对观察者而言，处于相对静止且为闭口系统，叶片是作为外界的一部分与系统发生作用，系统中的气体作用到叶片上的力，使其转动而把功输出去。以上两种系统划法虽然不同。但对同一物理量的分析总结果是一样的。由此可见系统的划定方法不是固定的，但选取是否适当，常常会影响解题的难易程度，通过以后各章的应用及实际解题就能体会到这一点。

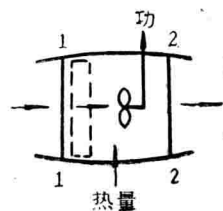


图1—3 系统的划法

§ 1—2 实际气体与完全气体

在热机中，工质一般是气体或蒸汽。

对于远离凝聚态的气体，通常认为它接近理想气体。所谓理想气体是指这样一种微观模型的气体：它由完全弹性的分子组成，在分子之间没有相互作用力，而且分子本身不占有体积，即把分子看成是一些不具有体积的质点。然而实际的气体，分子间的相互作用力和分子本身的体积都是存在的。所以，实际的气体都不是理想气体，但在某种条件下比较接近理想气体。例如在室温及常压下的 O_2 、 N_2 、空气等，就很接近理想气体。因为这时的状态距离它们的凝聚状态较远，从而分子之间的距离比较大，相互作用力很小，分子本身所占的体积比起整个系统的容积来说，可以忽略不计，象这样处于高温、低压的实际气体（或说成远离凝聚态的实际气体），一般可以当作理想气体看待。由此，可以认为理想气体是处于某种极限情况（压力趋于零，容积趋于无限大）的实际气体，或者说无限远离凝聚态的实际气体就成为理想气体。

这里需要说明一下, 在气体力学中, 常用“完全气体”一词代替“理想气体”, 这是为了避免与“理想流体”术语的混淆, 本书今后也采用“完全气体”这一术语, 以便与后续课气体力学保持一致。

§ 1—3 功 与 热 量

系统与外界之间通过边界有着能量的传递。能量从一个物体到另一个物体的传递, 一般可由两种方式来实现。

能量传递的第一种方式是作功。例如封闭系统在压缩或膨胀过程中和周围介质(外界)之间, 由于力的作用产生位移而作功。设系统反抗外力 Y 发生微小位移 dx (图1—4), 所作的微元功为

$$\delta W = Y dx = p_{res} F \cdot dx = p_{res} dV \quad (1-1)$$

这里 p_{res} 是外界的压力, F 是移动的边界的面积, V 是系统的容积, dV 是微元变化过程中系统容积的改变量。这种由于系统容积改变而作的功叫容积改变功, 简称为容积功。通常规定: 系统向外界作功为正, 外界向系统作功为负。由式(1—1)看出(压力 p_{res} 为正值), 当工质膨胀时, $dV > 0$, 系统向外作功, 恰为正值; 而当工质被压缩时, $dV < 0$, 系统作出负功, 即外界向系统作功。用符号 W 表示容积功。

如果过程中始终保持系统的压力 p 与外界压力 p_{res} 相等, 即 $p = p_{res}$, 则微元容积功可表为

$$\delta W = p dV \quad (1-2)$$

这里 p 和 V 均是系统中工质的性质——压力和容积。当系统的容积由 V_1 变化为 V_2 时, 系统所作的功可由式(1—2)积分即得

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-3)$$

在物理学中已经讲过, 容积功可以在压力和容积组成的 $p-V$ 坐标图(图1—5)上, 用过程曲线 1—2 与 V 轴所包围的面积 12341 来表示。

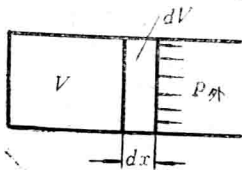


图1—4 容积功

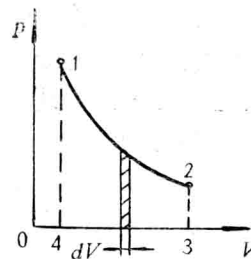


图1—5 容积功图示

容积功是系统与外界之间在压力作用下, 由于系统容积改变所产生的机械形式功。系统还可以在其他形式力的作用下作出其他形式的功。例如在电力作用下所作的电功。