

Engineering Thermodynamics

高等学校“十一五”精品规划教材

工程热力学

主 编 王 丽

副主编 杨晓宏 董英斌



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

工 程 热 力 学

主 编 王 丽

副主编 杨晓宏 董英斌



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是高等学校“十一五”精品规划教材,是考虑到 21 世纪我国高等教育课程改革要减少理论教学学时,增加实践教学学时的需要而编写的。

本书共十一章,主要讲述热力学基本概念、基本定律、工质的热力学性质、热力过程和热力循环的分析和计算。本书编写时按照“必需、够用”的原则,强调热力学基本理论和基本概念的论述,力求简明、深入浅出,注重培养读者应用基础理论分析和解决工程实际问题的能力。每章都配有知识要点、思考题和习题,书后还附有常用的各种图表。本书有相应的电子教案,可以提供给教师和读者作为参考。

本书可作为高等工科院校热能与动力工程专业、建筑环境与设备专业、过程装备与控制工程专业以及油气储运专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学 / 王丽主编. — 北京:中国水利水电出版社, 2010.7
高等学校“十一五”精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7720-6

I. ①工… II. ①王… III. ①工程热力学—高等学校—教材 IV. ①TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第140960号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 工程热力学
作 者	主编 王丽 副主编 杨晓宏 董英斌
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 374千字 1插页
版 次	2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	29.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

工程热力学是能源、动力、化工、机械、航空航天工程等学科的技术基础课，对工科学生科技素质的培养起着重要作用。本书遵循第一次全国普通高等学校教学工作会议精神，考虑到 21 世纪我国高等教育课程改革要减少理论教学学时、增加实践教学学时的需要，在作者长期教学与教改实践的基础上，按照国家教育部最新制定的多学时“工程热力学课程教学基本要求”而编写的。

本书共十一章，主要讲述热力学基本概念、基本定律、工质的热力学性质、热力过程和热力循环的分析和计算。本书编写时按照“必需、够用”的原则，突出实用，强调热力学基本理论和基本概念的论述，力求简明、深入浅出，注重工程应用及热力学分析方法的训练，培养读者应用基础理论分析和解决工程实际问题的能力。每章都配有知识要点、思考题和习题，书后还附有常用的各种图表以方便读者使用。

本书采用国际单位制。书中的名词术语、单位均符合国家标准。

本书由北京石油化工学院热能与动力工程系王丽担任主编，内蒙古工业大学的杨晓宏、华北水利水电学院的董英斌担任副主编。王丽编写绪论、第一章、第二章和第三章；河南理工大学的孙志君、陈小砖分别编写第四章和第六章；北京石油化工学院的李爱琴、苏小陶分别编写第五章和第十章；华北水利水电学院的董英斌编写第七章和第八章；内蒙古工业大学的杨晓宏编写第九章和第十一章。

感谢北京石油化工学院吴立志教授对本书进行了仔细的审阅并提出了宝贵的意见。

本书的编写得到了北京石油化工学院精品课程建设基金的资助。在编写过程中也得到了相关院校领导和教师的大力帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免会有疏漏和不妥之处，恳请各位专家、老师和广大读者批评指正。本书有相应的电子教案，可以提供给教师和读者作为参考。若有需求，请与编者联系。联系方式：wangli@bipt.edu.cn

编 者

2010 年 6 月

主要符号说明

A	截面积, m^2	p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压, Pa
c	比热容 (质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	P	功率, W
c_s	声速, m/s	q	比热量, J/kg
c_f	流动速度, m/s	q_m	质量流量, kg/s
c_p	比定压热容 (质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Q	热量, J
c_v	比定容热容 (质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_{p,m}$	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	s	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_{v,m}$	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	S	熵, J/K
d_0	汽耗率, kg/J	$S_{f,Q}$	热熵流, J/K
d	含湿量, kg/kg (干空气)	$S_{f,m}$	质熵流, J/K
E	总能 (储存能), J	S_g	熵产, J/K
E_k	宏观动能, J	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
E_p	宏观势能, J	T	热力学温度, K
E_x	焓, J	T_s	饱和温度, K
$E_{x,Q}$	热量焓, J	u	比热力学能, J/kg
$E_{x,U}$	热力学能焓, J	U	热力学能, J
$E_{x,H}$	焓焓, J	v	比体积, m^3/kg
h	比焓, J/kg	V	体积, m^3
H	焓, J	w	比体积变化功, J/kg
I	做功能力损失, J	w_i	质量分数
m	质量, kg	W	体积变化功, J
M	摩尔质量, kg/mol	W_i	内部功, J
M_a	马赫数	W_{net}	循环净功, J
n	多变指数	W_t	技术功, J
p	对压力, Pa	x	干度
p_0	大气压力, Pa	x_i	摩尔分数
p_b	环境压力或背压力, Pa	z	压缩因子
p_e	表压力, Pa	α	抽气量
p_i	分压力, Pa	γ	质量热容比 (比热比)
p_s	饱和压力, Pa		汽化潜热, J/kg

ϵ	制冷系数	c	卡诺循环
	压缩比	C	压气机
η_c	卡诺循环热效率	cr	临界点参数
η_i	循环热效率	in	进口参数
ρ	密度, kg/m^3	iso	孤立系统
φ	相对湿度	out	出口参数
φ_i	相对湿度	rev	可逆过程
a	湿空气中干空气的参数	v	湿空气中水蒸气的参数

目 录

前言

主要符号说明

绪论	1
第一节 能源及热能的利用	1
第二节 能量转换装置工作过程简介	2
第三节 工程热力学的研究对象及研究方法	4
第四节 工程热力学的主要内容及学习方法	4
第一章 基本概念	6
第一节 热力系统	6
第二节 状态及基本状态参数	7
第三节 平衡状态和状态参数坐标图	12
第四节 准平衡过程与可逆过程	13
第五节 过程功与热量	15
第六节 热力循环	19
知识要点	21
思考题	21
习题	22
第二章 热力学第一定律	24
第一节 热力学第一定律的实质	24
第二节 储存能	24
第三节 闭口系统的能量方程式	26
第四节 开口系统的能量方程式	28
第五节 稳定流动能量方程式及其应用	31
知识要点	37
思考题	38
习题	38
第三章 理想气体的热力性质	41
第一节 理想气体状态方程	41
第二节 气体的比热容	42

第三节	理想气体热力学能和焓的计算	47
第四节	理想气体的熵	48
知识要点		50
思考题		51
习题		51
第四章	理想气体的热力过程	54
第一节	热力过程分析概述	54
第二节	定容、定压、定温和绝热过程	55
第三节	多变过程	63
第四节	压气机的热力过程分析	70
知识要点		76
思考题		77
习题		78
第五章	热力学第二定律	81
第一节	热过程的方向性与热力学第二定律表述	81
第二节	卡诺循环与卡诺定理	82
第三节	熵的导出及熵方程	87
第四节	热力学第二定律数学表达式	89
第五节	熵参数的基本概念	94
知识要点		98
思考题		99
习题		100
第六章	气体动力循环	102
第一节	动力循环分析方法	102
第二节	活塞式内燃机动力循环	103
第三节	活塞式内燃机各种理想循环的比较	113
第四节	燃气轮机装置循环	114
知识要点		121
思考题		121
习题		121
第七章	实际气体及水蒸气	124
第一节	实际气体的基本性质	124
第二节	实际气体状态方程式	125
第三节	对应态原理和通用压缩因子图	130
第四节	热力学一般关系式	133
第五节	水蒸气的汽化与饱和	135
第六节	水蒸气的定压发生过程	137
第七节	水蒸气热力性质图表	139

第八节 水蒸气热力过程	144
知识要点	146
思考题	147
习题	147
第八章 蒸汽动力循环	150
第一节 朗肯循环	150
第二节 再热循环	158
第三节 回热循环	160
第四节 新型动力循环介绍	166
知识要点	170
思考题	171
习题	171
第九章 气体与蒸汽流动的热力分析	174
第一节 气体与蒸汽一元稳定流动基本方程	174
第二节 声速和马赫数	176
第三节 促使流动过程热力参数改变的条件	177
第四节 喷管中气体的流动特性	179
第五节 气体流速和流量的计算	182
第六节 绝热节流	188
知识要点	190
思考题	191
习题	192
第十章 制冷循环	194
第一节 逆卡诺循环	194
第二节 空气压缩制冷循环	195
第三节 蒸汽压缩制冷循环	198
第四节 制冷剂的热力性质	200
第五节 热泵循环	201
知识要点	202
思考题	202
习题	203
第十一章 理想混合气体和湿空气	204
第一节 分压定律与分体积定律	204
第二节 混合气体的成分描述	206
第三节 理想混合气体热力性质的计算	208
第四节 湿空气的状态及基本状态参数	212
第五节 湿空气的焓与焓湿图	215
第六节 湿空气的基本热力过程	218

知识要点	222
思考题	223
习题	223
附录	225
附表 1 各种压力单位的换算关系	225
附表 2 常用气体的某些基本热力性质	225
附表 3 常用气体在理想气体状态下的摩尔定压热容与温度的关系	226
附表 4 常用气体在理想气体状态下的平均比定压热容	226
附表 5 常用气体的平均比定压热容的直线关系式	227
附表 6 空气在理想气体状态下的热力性质	228
附表 7 饱和水和干饱和蒸汽表 (按温度排列)	229
附表 8 饱和水和干饱和蒸汽表 (按压力排列)	230
附表 9 未饱和水和过热蒸汽表	231
附图 2 R134a 的压焓图	234
附图 3 湿空气的焓湿图	235
参考文献	236

绪 论

第一节 能源及热能的利用

一、能源

能源是指能为人类生产生活提供所需能量的物质资源，是人类赖以生存和发展所需的动力来源，是发展生产和提高生活水平的重要物质基础，在国民经济建设与社会发展中一直起着极其重要的作用。我国能源资源较为丰富，但人均占有量并不富足，能源利用技术水平与发达国家仍有较大差距，能源资源和环境已成为我国国民经济发展的突出制约因素，从可持续发展角度来看，我国在能源方面的基本国策为“开发和节约并重”。作为一个能源科技工作者或从业人员，要认识到节能是我们的责任，任重而道远。

迄今为止，自然界中已为人们发现、可资利用的能源有风能、水能、太阳能、地热能、海洋潮汐能、核能和化学能等，这些能源称为一次能源。一次能源有些可以直接加以利用，但通常需要经过适当加工转换后才能利用，这些由一次能源加工转换后的能源称为二次能源，如热能、机械能和电能。因此，能源的利用过程实质上是能量的传递和转换过程，各种能源间的转换过程如图 0-1 所示。

由图 0-1 可见，热能是一种被广泛利用的能量形式，大多数一次能源往往需要转换成热能的形式而加以利用。据统计，经过热能形式而被利

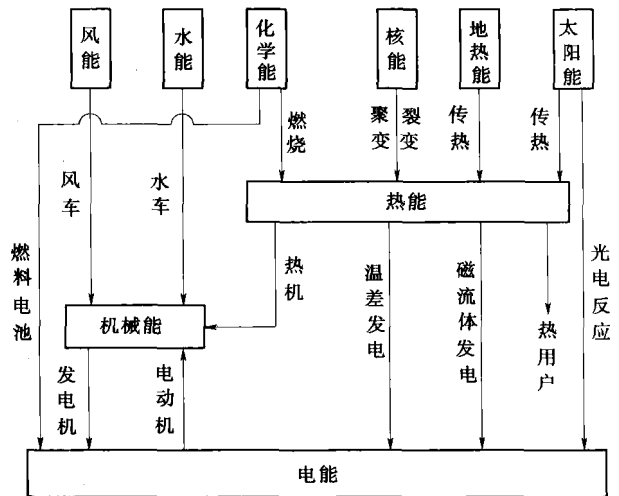


图 0-1 能源间的转换过程示意图

用的能量在我国占 90% 以上，世界其他国家平均超过 85%。因此，热能的开发利用和研究对于人类生产生活以及社会发展有着重要的意义。

二、热能的利用

热能利用有两种基本方式。

- (1) 直接利用：将热能直接用于加热物体，如加热、干燥、采暖等。
- (2) 间接利用：将热能通过各种动力装置转换成机械能或者电能等其他形式的能量加

以利用，如热力发电厂、船舶、车辆、飞机等热动力装置都属于此类。

将热能通过各种动力装置进行机械能或电能的转换涉及到转换效率问题。早期的蒸汽机热效率只有 $1\% \sim 2\%$ ，目前燃气轮机装置的热效率大约只有 $20\% \sim 30\%$ ，内燃机为 $25\% \sim 35\%$ ，较为先进的大型热力发电机组热效率约为 40% 。如何提高热能有效利用率以节约能源并减少对环境的热污染，是一个十分重要而且紧迫的问题。工程热力学正是有关研究热能及其转换规律的一门学科，因而对于热能从业者来说，这是一门十分重要的专业基础课。

第二节 能量转换装置工作过程简介

热能的转换和利用离不开各种热能转换装置。在本节中将对内燃机、蒸汽动力装置、压缩制冷装置中能量转换过程进行简单的介绍，以便于读者从这些装置中了解能量转换的基本规律以及共同特性。

一、内燃机工作过程

内燃机是 19 世纪末期开始出现的一种热动力装置，其主要特点是燃料在气缸内燃烧，所产生的燃气直接推动活塞做功，带动工作机器。根据燃料可以分为汽油机、柴油机等。现以图 0-2 汽油机为例说明其工作过程。

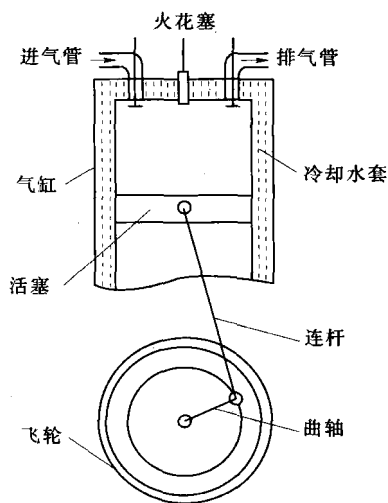


图 0-2 汽油机示意图

首先，活塞下行，进气阀打开、排气阀关闭，雾化汽油和空气的混合气体进入气缸。当活塞到达最低位置后，进气阀关闭，吸气完成。然后活塞改变运动方向而向上移动，使缸内气体受到压缩，气体温度和压力不断升高。压缩终了，火花塞将燃料点燃。燃料迅速燃烧产生的燃气在缸内膨胀，向下推动活塞做功。当活塞再次上行时，排气阀打开、进气阀关闭，将做功后的废气排向大气。

这样，气缸内气体不断重复压缩、燃烧、膨胀、排气过程，周而复始地工作，不断地将燃料的化学能转变为热能进而转换为机械能。

二、蒸汽动力装置工作过程

蒸汽动力装置是最早得到应用的一种热动力装置，至今仍是一种极其重要的动力设备。简单的蒸汽动力装置主要由锅炉、汽轮机、冷凝器和水泵组成，其热力系统简图如图 0-3 所示。

燃料在锅炉内燃烧产生高温烟气，将燃料的化学能转变为烟气的热能，烟气的热能通过传热将锅炉中的水加热成水蒸气，水蒸气经过热器进一步提高温度。高温高压的过热蒸汽进入汽轮机，经汽轮机内喷嘴降压提速形成一股高速气流，气流冲击转轮上的叶片使转轮旋转，从而通过转轮转轴输出机械能。做功后的蒸汽在冷凝器中放热凝结成水，再由水

泵送回锅炉。如此循环，工作物质水经过升压、吸热、膨胀、放热等过程，不断地将燃料的化学能转变为机械能，进而带动发电机转变为电能。

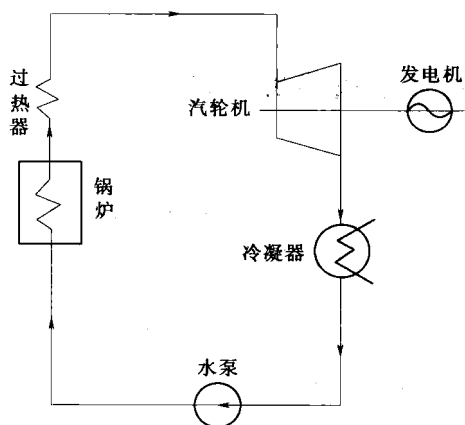


图 0-3 蒸汽动力装置热力系统图

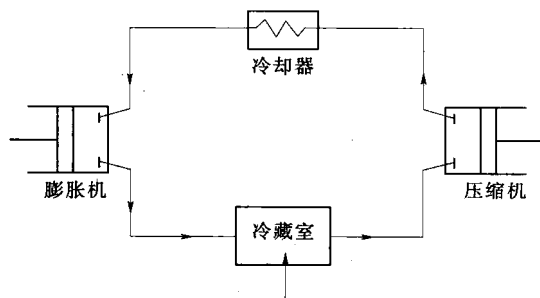


图 0-4 压缩空气制冷装置热力系统图

三、压缩制冷装置工作过程

上面介绍的两种能量转换装置是将热能转变为机械能。在工程上还有另一类能量转换装置，它们是以消耗机械功来实现热能由低温物体向高温物体转移，这类装置称为制冷装置或热泵。

图 0-4 是压缩空气制冷装置热力系统图。从冷藏室出来的低温低压空气在压缩机中被压缩，压力和温度升高，温度高于大气环境温度。在冷却器中，空气被冷却到常温，空气向大气放热。在膨胀机中，空气膨胀对外做功，温度和压力降低，温度低于冷藏室温度。然后空气进入冷藏室吸热，完成循环。

由此可以看出，空气经过压缩、放热、膨胀、吸热过程，不断地消耗外部机械功，将热量不断地由冷藏室传送至大气，实现了热量由低温向高温的传递。

四、能量转换装置的共同特性

上述几种能量转换装置的结构和工作方式虽然各不相同，但可以发现它们存在如下共性。

(1) 要实现能量转换，必须借助某种物质作为工作介质，称之为工质。因为工质要不断地进出装置，因而要求作为工质的物质应具有膨胀性和流动性，通常用气体或液体，如水、燃气和空气等。

(2) 要实现能量转换，工质都必须经过压缩、吸热、膨胀、放热等热力过程，即能量转换是在工质状态不断变化的过程中实现的。

(3) 能量转换需要有两个温度不同的热源，即高温热源和低温热源，来与工质进行热量传递，完成吸热和放热过程。

(4) 能量转换是在周而复始的循环中完成的。为构成循环，动力装置中从高温热源吸收的热量只有一部分转变为机械能；制冷装置中要将热量从低温热源传到高温热源，则需要消耗功。

能量转换装置中发生的主要过程是能量的转换和热量的传递,如何提高能量转换效率、合理设定有利的转换条件以设计出经济的能量转换装置,这需要掌握热能与机械能相互转换的规律,这正是工程热力学所要研究的内容。

第三节 工程热力学的研究对象及研究方法

一、研究对象

人类很早就在生产和生活中利用了各种热现象,但直到 19 世纪中叶才认识到热的本质。在相继确立了热力学第一定律和热力学第二定律之后,才以两定律为理论构架形成了一门完整的学科——热力学,随着科学技术的发展,热力学也日趋壮大,应用范围也日益广泛,涉及化工、冶金、冷冻、空调、低温、超导、电磁以及生物等各个领域。

工程热力学是热力学的一个分支,属于应用科学的范畴,着重研究与热能工程有关的热能与机械能相互转换的规律以及热能的有效利用。

二、研究方法

热力学有两种研究方法,即宏观研究方法和微观研究方法。

宏观研究方法也是工程热力学的主要研究方法,以热力学第一定律和热力学第二定律为基础,研究物体的宏观性质和现象。

微观研究方法是从分子角度解释一些现象发生的原因,应用统计法则和概率法则来进行研究。在工程热力学中,有时引用气体分子运动理论和统计热力学的基本观点和研究成果对一些性质和现象作辅助解释,帮助理解宏观现象的物理本质。

第四节 工程热力学的主要内容及学习方法

一、主要内容

作为一门研究热能与机械能相互转换规律及热能有效利用的学科,工程热力学的主要内容包括下面三部分。

(1) 能量转换的基本原理,即热力学第一定律和热力学第二定律,是热能与机械能相互转换的客观规律,是分析问题的依据和基础。

(2) 常用工质的热力性质,理想气体和实际气体以及理想气体混合物热力性质。工质是能量转换的载体,只有充分了解了相关性质,才能对利用工质实施的能量转换过程进行分析和研究。

(3) 各种热工设备的工作过程分析。应用热力学定律,结合工质性质,对工程上常见的能量转换装置的工作过程和循环进行分析和计算以及循环影响因素分析。

二、学习方法

从上面主要内容可以看出,工程热力学理论性强、概念多、公式多,各部分内容交叉渗透,运用灵活;而且研究对象为气体,运动较为复杂。刚开始接触时会觉得比较难,但工程热力学由于发展历史长,体系完善,且以物理和数学为基础,为便于掌握,给出如下

学习建议。

- (1) 要按顺序逐步加深, 夯实基础, 逐个完成学习目标。
- (2) 学习中主动思考, 多问为什么, 多看几本参考书, 多归纳总结。
- (3) 要重视习题, 通过独立练习培养抽象能力和分析问题的能力, 加深对概念的理解, 掌握解题规律。
- (4) 认真对待实验, 积极参与课堂讨论。

第一章 基本概念

基本概念构成了工程热力学的独特研究方法的基础。为了描述能量转换过程中工质的变化行为，需要明确工程热力学中基本概念的含义。随着课程的展开，更需要学会熟练使用这些概念来分析问题。学习本章应重点注意：① 工程热力学中的一些基本术语和概念，包括热力系、平衡状态、准平衡过程、可逆过程、循环等；② 状态参数的特征以及基本状态参数的定义和单位；③ 热量和功的概念和过程量的特征。通过本章学习，应能运用系统参数进行可逆过程功和热量的计算。

第一节 热力系统

一、系统与外界

为了进行分析，首先应明确研究对象。在热力学分析中，这种根据研究需要人为选取的某些物质或划定的某个确定空间的物质称为热力学系统，简称热力系或系统。系统以外的所有物质统称为外界或环境。系统与外界的分界面称为边界。根据具体问题，边界可以是真实的、也可以是假想的；可以是固定的，也可以是移动的；还可以是这几种边界的组合。如图 1-1 所示，取气缸活塞内封闭气体为系统时，系统与气缸内壁间的边界是固定的，系统与活塞内壁间的边界是移动的；如图 1-2 所示，当取汽轮机中的工质为系统时，工质与汽轮机壁面间存在真实的界面，而汽轮机进口和出口截面则是虚构的界面。

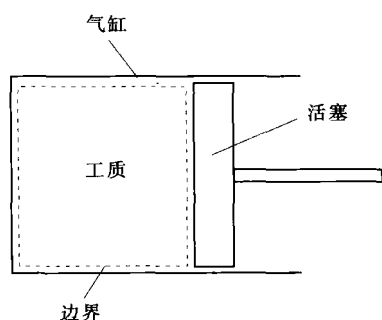


图 1-1 闭口系统

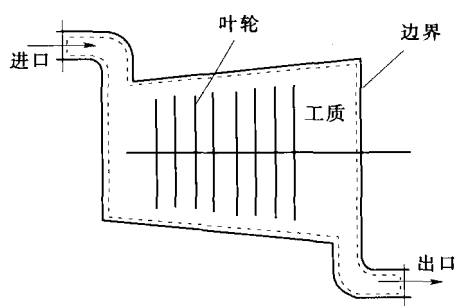


图 1-2 开口系统

二、热力系分类

系统与外界间质量迁移和能量传递都是通过边界来完成的，因而常根据系统与外界进行能量和质量交换的情况将热力系统分成不同类型。

1. 闭口系统和开口系统

按热力系统与外界是否进行物质交换可将系统分为闭口系统和开口系统。

闭口系统——系统与外界间无物质交换，如图 1-1 所示的系统即为闭口系统。由于系统内包含的物质质量保持不变，也称为控制质量系统。常用控制质量法来研究。

开口系统——热力系统与外界间有物质交换，如图 1-2 所示的系统，有物质穿过边界。这种系统内包含的物质质量是可以变化的。开口系通常总是取一相对固定的空间来分析，亦将其称为控制容积系统，用控制容积法来研究。

2. 绝热系统和孤立系统

绝热系统——热力系与外界间没有热量交换。事实上，任何系统都或多或少地与外界间存在热交换，绝热系统只是当系统与外界间交换的热量很少可以忽略不计时的一种简化。

孤立系统——系统与外界间既无能量交换也无质量交换，所有作用都发生在系统内部。显然，孤立系统必然是绝热系统和闭口系统，但绝热系统、闭口系统却不一定是孤立系统。当然，在自然界中绝对孤立的东西也是不存在的，只是有时候为研究方便，将非孤立热力系统连同与之相互作用的外界一起看作孤立系统。

此外，根据系统内部工质所处的状况也可将系统分成不同类型，如单元系（由单纯组成的物质组成的系统）和多元系（包含两种以上物质的系统）、均匀系（各部分物理、化学性质相同）和非均匀系（各部分具有不同的性质）、单相系（由单一物相组成）和多相系（由两个相以上组成的系统）等。

热力学系统的选取，取决于分析问题的需要及分析方法上的方便。系统的选取对研究问题的结果并没有影响，但与解决问题的复杂程度有关。大多数热工设备皆为开口系统，但有时可将其划分为一段时间下的闭口系统将问题简化，如内燃机在气缸进、排气阀关闭时气体膨胀或压缩过程可看作闭口系统内工质的膨胀或压缩。

三、简单可压缩系统

在绪论中提到，能量转换是借助可压缩工质的状态连续变化来实现。在工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统——由可压缩流体（蒸汽、空气或燃气等）组成，系统与外界间只交换热量和一种可逆的体积变化功（压缩功或膨胀功）。

第二节 状态及基本状态参数

一、状态和状态参数

在能量转换设备中，需要借助工质的压缩、吸热、膨胀、放热等一系列变化过程才能实现。在过程中，工质物理性质不断变化，因而要对热力系统进行分析，必须能对工质所处状况进行描述。在热力学中把热力系统在某一瞬间所呈现的宏观状况称为状态，用以描述热力系统状态的宏观物理量称为状态参数。

通常系统由工质组成，因而系统的状态和状态参数也就是工质的状态和状态参数。

二、状态参数的特性

用来描述系统所处状态的状态参数一旦确定，工质的状态也就确定，状态参数变化，