



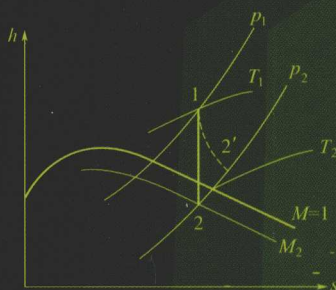
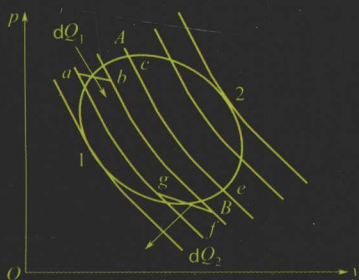
高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

GONGCHENG RELIXUE

工程热力学

谭羽非 主编 廉乐明 主审



化学工业出版社

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材

工程热力学

谭羽非 主编
廉乐明 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容根据教育部热工课程教学指导委员会制定的工程热力学(30~40学时)教学基本要求确定,同时也适当反映科学技术的新进展。

本书从工程实际出发,以宏观观点来研究物质的热力性质、能量转换的规律和方法以及有效合理利用热能的途径。书中主要讲述热力学的基本概念、基本定律以及气体和蒸气的性质、过程和循环。对基本概念、基本定律、过程计算、循环分析等主要内容都作了较详细的论述,并有计算例题穿插配合。每章末还附有适量的思考题和习题,并附有习题答案,便于自学和检查,力求帮助读者能较好地分析这些内容的基本原理及相互关系,掌握分析热工问题的方法,培养思考问题的灵活性以及提高解决实际问题的能力。对某些章节的内容略超过《课程教学基本要求》的范围,适当作一些扩充和拓宽,一则是教师有选择的余地,二则适应不同专业不同学时及不同层次的需要。

本书除满足建筑环境与设备工程专业教学用书外,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/谭羽非主编. —北京:化学工业出版社,
2010.6

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材
ISBN 978-7-122-08416-3

I. 工… II. 谭… III. 工程热力学-高等学校-教材
IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 077216 号

责任编辑:陶艳玲

装帧设计:尹琳琳

责任校对:顾淑云

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张13½ 字数342千字 2010年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00元

版权所有 违者必究

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材

编审委员会名单

(姓氏笔画排序)

顾 问：马最良 傅忠诚

主 任：李永安

副主任：李念平 陈振乾

委 员：	丁云飞	马良涛	王 璞	王智伟	方修睦	卢 军
	冉春雨	付祥钊	白 莉	丛晓春	刘冬华	刘伟军
	刘建龙	刘艳华	苏 成	李九如	李小华	李永安
	李百战	李念平	杨晚生	连之伟	张永泉	张吉光
	张国强	张增凤	陈振乾	周孝清	郑万兵	孟庆林
	侯根富	徐正坦	曹子栋	符永正	彭世尼	董 惠
	解国珍	廉乐明	谭羽非			

本书编写人员

主 编 谭羽非

副 主 编 罗 勇 王海涛

参编人员 张云峰 吕 静 胡明江

主 审 廉乐明

前 言

本书内容根据教育部热工课程教学指导委员会制定的工程热力学(30~40学时)教学基本要求确定,同时也适当反映科学技术的新进展。书中主要讲述热力学的基本概念、基本定律以及气体和蒸气的性质、过程和循环,并有计算例题穿插配合。每章末还附有适量的思考题和习题,书后附有习题答案,便于自学和检查。

全书共分12章,第1章重点介绍系统、平衡、状态参数、可逆过程、循环、热量和功等基本概念;第2章介绍理想气体及其混合物的性质;第3章介绍热力学第一定律及工程应用,第4章介绍气体的热力过程与气体压缩,这两章是全书热力过程分析及计算的理论基础;第5章重点阐述热力过程的方向性与不可逆性,熵的概念及其物理意义;第6章介绍研究物质热力性质不可缺少的基本关系式;第7章介绍水蒸气的一般概念及各种图表的应用;第8章介绍湿空气性质;第9章讲述气体和蒸气流动;第10章介绍动力和制冷循环;第11章介绍化学热力学基础;第12章是为拓宽学生能源科学方面的知识,介绍了新能源的开发及建设。

本书从工程实际出发,以宏观观点来研究物质的热力性质、能量转换的规律和方法以及有效合理利用热能的途径。对基本概念、基本定律、过程计算、循环分析等主要内容都作了较详细的论述,力求帮助读者能较好地分析这些内容的基本原理及相互关系,掌握分析热工问题的方法,培养思考问题的灵活性以及提高解决实际问题的能力。对某些章节的内容略超过《课程基本要求》的范围,适当作一些扩充和拓宽,一则是教师有选择的余地,二则适应不同专业不同学时及不同层次的需要。在保证学科系统性与完整性的基础上,努力提高教材的科学性、先进性、启发性、实用性和适用性,同时也注意适当反映热工科技的新进展。本书除满足建筑环境与设备工程专业教学用书外,也可供有关工程技术人员参考。

全书均采用国际单位制。但考虑到目前使用的仪表及参考书,仍有使用其它单位制的,因此,在本书附录中列出各种单位制的换算表。

本书的绪论、第6章、第11章和附录由谭羽非编写;第1章、第8章由王海涛编写;第2章、第3章、第4章由罗勇编写;第5章和第10章由张云峰编写;第7章、第12章由吕静编写;第9章由胡明江编写。全书由哈尔滨工业大学谭羽非教授承担主编和统稿工作。本书承哈尔滨工业大学廉乐明教授细致审阅,谨致谢意。

由于编者学术水平及教学经验所限,书中难免有不妥之处,我们怀着感激的心情希望读者及兄弟院校使用本书的师生们提出宝贵的意见。

编 者
2010年3月

目 录

0 绪论	1
0.1 工程热力学的发展简史	1
0.2 能源的分类及利用	1
0.3 工程热力学的研究对象及主要内容	2
0.4 工程热力学的主要研究方法	2
0.5 工程热力学常用的计量单位	3
第1章 基本概念	5
1.1 热力系统	5
1.1.1 定义	5
1.1.2 热力系统的分类	5
1.2 热力状态和状态参数	6
1.2.1 热力状态与状态参数	6
1.2.2 基本状态参数	7
1.3 平衡状态及状态参数坐标图	9
1.3.1 平衡状态	9
1.3.2 状态参数坐标图	10
1.4 热力过程和循环	10
1.4.1 准平衡过程	10
1.4.2 可逆过程	11
1.4.3 热力循环	12
1.5 功和热量	13
思考题	15
习题	15
习题参考答案	16
第2章 理想气体及其混合气体的热力性质	17
2.1 理想气体状态方程式	17
2.2 理想气体的比热容	19
2.2.1 比热容的定义及单位	19
2.2.2 定容比热容和定压比热容	19
2.2.3 理想气体的定值比热容、真实比热容和平均比热容	20
2.3 理想混合气体的性质	23
2.3.1 理想气体的分压力 and 道尔顿分压力定律	23
2.3.2 理想气体的分容积和阿密盖特分容积定律	23

2.3.3 理想气体混合物的成分表示法及换算关系·····	24
2.3.4 混合气体的折合分子量与折合气体常数·····	25
2.3.5 总压力与分压力的关系·····	25
2.3.6 混合气体的比热容·····	25
思考题·····	26
习题·····	26
习题参考答案·····	27
第3章 热力学第一定律 ·····	29
3.1 系统的储存能·····	29
3.1.1 热力学能·····	29
3.1.2 外储存能·····	30
3.1.3 系统的总储存能·····	30
3.2 系统与外界传递能量的形式·····	31
3.2.1 闭口系统与外界传递的能量·····	31
3.2.2 开口系统与外界传递的能量·····	31
3.2.3 焓及其物理意义·····	32
3.3 闭口系统能量方程·····	33
3.3.1 闭口系统能量方程表达式·····	33
3.3.2 热力学第一定律在循环过程中的应用·····	34
3.3.3 理想气体热力学能变化的计算式·····	34
3.4 开口系统能量方程·····	36
3.5 开口系统稳态稳流能量方程·····	38
3.5.1 稳态稳流能量方程的表达式·····	38
3.5.2 技术功·····	39
3.5.3 理想气体焓变计算式·····	39
思考题·····	41
习题·····	41
习题参考答案·····	43
第4章 理想气体的热力过程及气体压缩 ·····	45
4.1 研究理想气体热力过程的任务与方法·····	45
4.2 基本热力过程·····	46
4.3 多变过程·····	54
4.4 压缩机的理论压缩轴功·····	59
4.4.1 单级活塞式压气机工作原理·····	59
4.4.2 单级活塞式压气机理论压气轴功的计算·····	60
4.5 多级压缩及中间冷却·····	62
4.5.1 多级活塞式压气机的工作过程·····	63
4.5.2 级间压力的确定·····	63

思考题	66
习题	66
习题参考答案	68
第5章 热力学第二定律	69
5.1 热力学第二定律的实质与表述	69
5.1.1 自发过程的方向性	69
5.1.2 热力学第二定律的表述	70
5.1.3 两种表述的等价性证明	71
5.2 卡诺定理和卡诺循环	71
5.2.1 正卡诺循环	72
5.2.2 逆卡诺循环	73
5.2.3 卡诺定理	74
5.3 状态参数熵	75
5.3.1 状态参数熵的导出	75
5.3.2 热力学第二定律的数学表达式	77
5.3.3 不可逆绝热过程分析	78
5.4 熵方程	79
5.4.1 闭口系统的熵方程	80
5.4.2 开口系统的熵方程	80
5.4.3 稳定流动系统	81
5.5 孤立系统熵增原理与做功能力损失	82
5.5.1 孤立系统的熵增原理	82
5.5.2 熵增原理的实质	83
5.6 热力学第二定律对工程实践的指导意义	84
5.6.1 为热机的高效节能运行提供理论指导	84
5.6.2 为预测实际过程进行的方向、判断平衡状态提供理论判据	84
5.6.3 为能源的节约及合理用能提供理论指导	85
思考题	85
习题	86
习题参考答案	86
第6章 热力学一般关系式	88
6.1 二元连续函数的数学特性	88
6.2 简单可压缩系统的基本关系式	89
6.2.1 四个基本关系式	89
6.2.2 麦克斯韦关系式	90
6.2.3 热系数	91
6.3 熵、焓、热力学能和比热容的微分方程式	93
6.3.1 熵方程	93

6.3.2 焓方程	94
6.3.3 热力学能的微分方程式	95
6.3.4 比热容的微分关系式	95
6.3.5 热量的微分方程式	96
6.4 克拉贝龙方程	97
思考题	99
习题	99
习题参考答案	100
第7章 水蒸气	101
7.1 水的饱和状态	101
7.1.1 蒸发和沸腾	101
7.1.2 饱和状态	101
7.1.3 临界点和三相点	101
7.2 水蒸气的定压发生过程	102
7.3 水蒸气的相变参数图和热力性质表	103
7.3.1 水蒸气热力性质表	103
7.3.2 水蒸气的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图	104
7.3.3 水蒸气的 $h-s$ 图	104
7.4 水蒸气的热力过程	106
思考题	108
习题	108
习题参考答案	109
第8章 湿空气	110
8.1 湿空气和干空气	110
8.1.1 湿空气成分及压力	110
8.1.2 饱和空气与未饱和空气	110
8.1.3 湿空气的分子量及气体常数	111
8.2 湿球温度	111
8.3 湿空气的热力性质	112
8.3.1 湿空气的压力和温度	112
8.3.2 湿空气的湿度	112
8.3.3 湿空气的含湿量(比湿度)	113
8.3.4 湿空气的比体积	113
8.3.5 湿空气的焓	114
8.4 湿空气的焓湿图	114
8.4.1 焓湿图的构造	114
8.4.2 焓湿图的使用	115
8.5 湿空气的热湿处理过程	116

8.5.1 加热过程	116
8.5.2 冷却过程	116
8.5.3 绝热加湿过程	117
8.5.4 湿空气的混合	117
思考题	119
习题	119
习题参考答案	120
第9章 气体和蒸汽的流动	121
9.1 一维绝热流动的基本方程	121
9.2 定熵流动的基本特性	123
9.2.1 气体流速变化与状态参数间的关系	123
9.2.2 管道截面变化的规律	124
9.3 喷管中流速及流量计算	126
9.4 扩压管	134
9.5 具有摩擦的流动	135
9.6 绝热节流	139
思考题	140
习题	141
习题参考答案	142
第10章 蒸汽动力循环与制冷循环	144
10.1 蒸汽动力基本循环	144
10.1.1 朗肯循环	144
10.1.2 朗肯循环的能量分析及热效率	144
10.1.3 提高朗肯循环热效率的基本途径	145
10.2 回热循环与再热循环	147
10.2.1 回热循环	147
10.2.2 再热循环	148
10.3 热电循环	149
10.4 空气压缩致冷循环	150
10.5 蒸汽压缩制冷循环	152
10.6 蒸气喷射制冷循环	154
10.7 吸收式制冷循环	155
10.8 热泵	155
思考题	156
习题	156
习题参考答案	157
第11章 化学热力学基础	158
11.1 概述	158

11.2 热力学第一定律在化学反应中的应用	161
11.2.1 具有化学反应的热力学第一定律表达式	161
11.2.2 反应热与反应热效应	162
11.3 反应热与反应热效应的计算	163
11.3.1 生成焓	163
11.3.2 定温下反应热效应的计算	165
11.3.3 非定温下反应热的计算	166
11.3.4 理论燃烧温度	168
11.4 热力学第二定律在化学反应中的应用	169
11.5 化学平衡及平衡常数	170
11.6 化学反应定温方程式	172
11.7 热力学第三定律	173
思考题	173
习题	174
习题参考答案	174
第12章 能源的合理利用及新能源简介	176
12.1 概述	176
12.2 能源的合理利用	177
12.2.1 能量的梯级利用	178
12.2.2 低品位能的合理利用	178
12.3 新能源	179
12.3.1 太阳能	179
12.3.2 生物质能	182
12.3.3 风能、地热能、海洋能、氢能	183
思考题	186
附录	187
附表1 单位换算表	187
附表2 常用气体的某些基本热力性质	188
附表3 某些常用气体在理想气体状态下的定压比热容与温度的关系式	188
附表4 某些常用气体在理想气体状态下的平均定压比热容 $\bar{c}_{p0} \Big _0^T$	188
附表5 某些常用气体在理想气体状态下的平均定容比热容 $\bar{c}_{v0} \Big _0^T$	189
附表6 空气在理想气体状态下的热力性质表	190
附表7 饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按温度排列)	192
附表8 饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按压力排列)	194
附表9 未饱和水与过热水蒸气的热力性质表	196
附图1 水蒸气焓熵图	200
附图2 湿空气焓湿图	201
参考文献	202

0 绪 论

热力学是研究热能和其它形式能量间转换之间关系的一门基础科学。能量是物质运动的量度,因此,也可以说热力学是研究物质运动和其它各种运动形态之间相互转换规律以及热运动对物质性质影响的一门科学。工程热力学是热力学的普遍理论在工程上的具体应用,属于热力学的工程分支。它以热力学基本理论为主线,主要研究能量转换,特别是热能转化为机械能的规律和方法,围绕能源开发利用和节能,寻求提高热能利用率的有效途径。

0.1 工程热力学的发展简史

从18世纪末到20世纪初开始,随着蒸汽机在生产中的广泛使用,如何充分利用热能来推动机器做功成为重要的研究课题。1798年,英国物理学家伦福德通过炮膛钻孔实验开始对功转换为热进行定量研究。1824年,法国工程师卡诺发表了“关于火的动力研究”的论文,提出了卡诺定理和卡诺循环,他通过对自己构想的理想热机的分析指出,热机必须在两个热源之间工作,同时给出了热机的最高效率。卡诺的论文发表后,没有马上引起人们的注意。过了十年,法国工程师克拉佩隆把卡诺循环以解析图的形式表示出来,并用卡诺原理研究了汽液平衡,导出了克拉佩隆方程。1842年,德国工程师迈耶,提出了热与机械运动之间相互转化的思想。1847年,德国的科学家赫姆霍兹发表了“论力的守恒”一文,全面论证了能量守恒和转化定律,即热力学第一定律。1843~1848年间,英国物理学家焦耳以确凿无疑的定量实验结果为基础,论述了能量守恒和转化定律。焦耳的热功实验是热力学第一定律的实验基础,根据热力学第一定律热功可以按当量转化,而根据卡诺原理热却不能全部变为功,当时不少人认为二者之间存在着根本性的矛盾。1850年,德国物理学家克劳修斯进一步研究了热力学第一定律和克拉佩隆转述的卡诺原理,发现二者并不矛盾,并据此提出热力学第二定律。克劳修斯在1854年给出了热力学第二定律的数学表达式,1865年提出“熵”的概念。1851年,英国物理学家开尔文提出了热力学第二定律的另一种说法。1853年,他把能量转化与物系的内能联系起来,给出了热力学第一定律的数学表达式。

热力学第一定律和第二定律的确立,奠定了工程热力学的理论基础,并最终在19世纪中叶形成了“工程热力学”这门学科。工程热力学形成至今,在能源、动力、机械、化工、冶金、空调、制冷、超导等各个领域得到了广泛的应用。近几十年来,随着现代科学技术的进步,特别是可再生能源利用技术、新能源开发、自然资源的循环利用等一系列新课题的提出,推动了工程热力学学科的迅速发展,其理论体系日趋完善,已成为科技进步不可或缺的基础理论支撑。

0.2 能源的分类及利用

能源是指提供各种能量的物质源。按能量的来源,可分为以下几类。

一次能源:直接取自自然界,不用转换可直接利用的能量和资源,包括:煤、原油、天

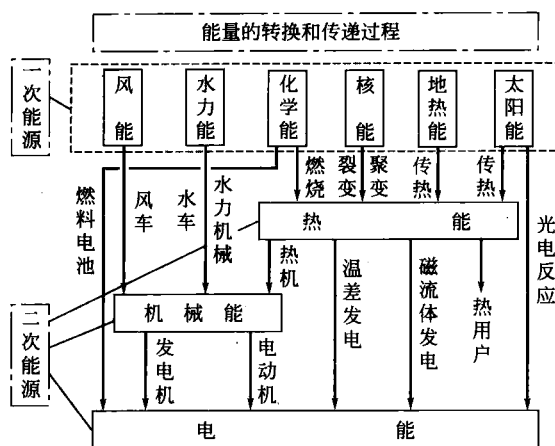


图 0-1 几种典型能量的转换和传递过程

然气、核能、太阳能、水力、风力、潮汐能、地热等。

二次能源：由一次能源经过转换以后得到的能源，例如：电能、机械能等。

能源的利用有直接利用方式和间接利用两种方式。

直接利用：将热能直接用于加热物体，以满足烘干、采暖、熔炼等需求。如秸秆燃烧、地热采暖、太阳能加热水等过程均是热能是直接利用。

间接利用：通过各种热能动力装置将热能转换成机械能或者转换成电能加以利用，为人类的日常生活、工农业生产及交

通运输提供动力，如各种发电机等。

不同类型的能源之间通过热机等装置可以实现相互的转换和传递，图 0-1 给出了几种典型能量的转换和传递过程。

0.3 工程热力学的研究对象及主要内容

工程热力学属于应用科学（工程科学）的范畴，是工程科学的重要领域之一。是从工程的观点出发，研究物质的热力性质、能量转换的规律和方法以及提高能量转换效率的途径。将热力学基本理论应用于工程实际，对不同的过程和循环进行分析和计算，探讨影响能量转换的规律及提高转换效果的途径。通过对热力系统、热力平衡、热力状态、热力过程、热力循环和工质的分析研究，设计计算和分析各种动力装置、制冷机、热泵空调机组、锅炉及各种热交换器，改进和完善这些装置，提高热能利用率。因此工程热力学基础理论是设计计算和分析各种动力装置、制冷机的理论基础。

工程热力学的主要内容包括下列三部分。

- ① 反映工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。
- ② 常用工质的热力性质。
- ③ 根据热力学基本定律，结合工质的热力性质，分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环，阐明提高转换效率的正确途径。

0.4 工程热力学的主要研究方法

工程热力学的主要研究方法是指热力学的宏观研究方法。这种宏观研究方法的特点是：根据热力学的两个基本定律，运用严密的逻辑推理，对物体的宏观性质和宏观现象进行分析研究，而不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。所以，热力学是热学的宏观理论。与此对照，热学的微观理论是统计物理学。统计物理学从物质的微观结构出发，依据微观粒子的力学规律，应用概率理论和统计平均的方法，研究大量微观粒子（它们构成宏观物体）的运动表现出来的宏观性质。

热力学和统计物理学在对热现象的研究上相辅相成。由于热力学不涉及物质的微观结构,因而用热力学方法无法获得物质的具体性质,而统计物理学则由于深入热现象的本质,可使热力学理论获得微观机理上的说明,因而可揭示宏观性质的微观决定因素,从而在理论上起到指导作用。

像其它学科一样,在工程热力学中也普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。这种略去细节、抽出共性、抓主要矛盾的处理问题的方法,在进行理论分析时特别有用。这种科学的抽象,不但不脱离实际,而且总是更深刻地反映了事物的本质。

0.5 工程热力学常用的计量单位

在工程热力学中涉及比较多的物理量。近年来,世界各国逐步采用统一的国际单位制(简称 SI),以避免由于单位制不同而引起的混乱现象和烦琐的换算。我国也以国际单位制为基础制定了“中华人民共和国法定计量单位”,于 1984 年颁布执行。因此,本教材采用我国法定计量单位。考虑到目前的实际情况,对工程单位制也作了适当的介绍。

国家法定计量单位中给出了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度共七个基本单位。工程热力学中各常用物理量牵涉的基本单位有五个,即长度、质量、时间、热力学温度和物质的量。

国家法定计量单位比较科学合理,各导出单位和基本单位的关系式中的系数都等于 1,因此换算简单。表 0-1 和表 0-2 分别给出了工程热力学中常用的国家法定计量单位的基本单位和导出单位。

表 0-1 国家法定计量单位的基本单位(部分)

量	单位名称	单位符号	量	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文] ^①	K
质量	千克(公斤) ^②	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s			

① 圆括号中的名称与它前面的名称是同义词。

② 去掉方括号时为单位名称的全称。

表 0-2 国家法定计量单位的导出单位(部分)

量	单位名称	单位符号	其它 SI 单位的表示
力	牛[顿]	N	$\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$
功、热量、能[量]	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
压力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
功率	瓦[特]	W	J/s
比热力学能、比焓	焦[耳]每千克	J/kg	J/kg
比热容、比熵	焦[耳]每千克开[尔文]	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

在工程单位制的基本单位中,长度用米(m);时间用秒或小时(s或h);力用公斤力(kgf)。

工程单位制中的公斤力 (kgf) 和国际单位制中的牛顿 (N) 之间的关系如下 ($F=ma$):

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times 9.80665\text{m/s}^2=9.80665\text{N}$$

9.80665m/s^2 是标准重力加速度。所以, 在标准重力场中, 重量为 1kgf 的物质, 其质量正好是 1kg。

关于压力、能量和功率的各种单位之间的换算关系可查阅相关书籍。

第 1 章 基本概念

本章讨论了热力系统的选取、工质状态的描述、状态与状态参数的关系、热力过程和循环以及过程量、功与热量等基本概念，为后续内容奠定基础。

1.1 热力系统

选取热力系统的目的就是明确研究对象所包含的内容以及它与周围事物的相互关系。

1.1.1 定义

从实际的热力现象中人为地提取作为热力学分析研究对象，称为热力系统。如图 1-1 所示，汽缸中虚线包围的气体就是我们的研究对象，汽缸内的气体便是热力系统。

和力学中选取分离体一样，热力学常把所要研究的对象从周围的物体中分割出来，被一定的分界面包围，系统以外的周围物体叫外界，系统与外界的分界面叫做边界。

热力系统与外界可以有能量和物质交换但必须通过边界，所以在没有确定热力系统的状况下，讨论能量和物质交换是没有意义的。

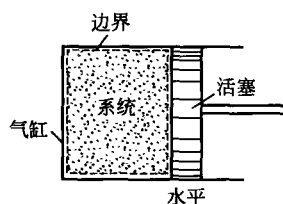


图 1-1 闭口系统

1.1.2 热力系统的分类

热力系统是根据热力系统和外界的相互作用来划分的。

(1) 闭口系统和开口系统

按是否有物质交换来划分热力系统，可分为以下 2 种。

闭口系统：热力系统与外界没有任何物质交换的系统。如图 1-1 是闭口系统的实例。可见闭口系统中的质量是恒定的，因此当取固定质量作为研究对象时，也称该闭口系统为控制质量系统，边界为控制边界，系统与外界进行能量交换，必须通过边界。

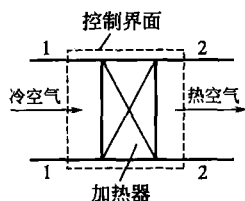


图 1-2 开口系统

开口系统：与外界有物质交换的热力系统。如图 1-2 的冷空气被加热的过程。开口系统中的质量是可以变化的，但工程上这种变化一般在固定空间内实现，所以开口系统也称为控制容积系统。

(2) 绝热系统

系统与外界之间没有热量传递的系统，称为绝热系统。但绝对的绝热系统是不存在的，工程为了使实际问题简化，常常将系统与外界传递的热量小到可以忽略不计时，即认为是绝热系统。例如：水蒸气流经汽轮机的喷管，并在其中进行能量交换，因其平均流速很高，经历的时间很短，几乎来不及与外界交换热量，可以认为是绝热系统。

(3) 孤立系统

系统与外界不发生任何能量传递和物质交换的系统，称为孤立系统。图 1-3 是由闭口系