

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI  
GAOZHUAN  
SHIWU  
GUIHUA JIAOCAI

# 热工学理论基础

刘学来 宋永军 金洪文 合编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为高职高专“十五”规划教材。本书结合高职高专教学的特点，紧紧围绕着高职高专应用型人才培养目标进行编写。在编写过程中注重理论联系实际，强调应用，并遵循学习者认知规律，精选内容。教材充分体现“应用性、实用性、综合性、先进性”的原则。全书分为两篇，分别为工程热力学和传热学。工程热力学主要内容包括：热力学第一、第二定律，气体的热力性质和热力过程，水蒸气，湿空气，动力循环，热力循环；传热学主要内容包括：导热，对流换热，热辐射，质交换等。

本书主要作为供热通风与空调工程专业的教材，也可作为函授和自考辅导教材或供相关专业人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

热工学理论基础/刘学来, 宋永军, 金洪文编. —北京: 中国电力出版社, 2004  
高职高专“十五”规划教材  
ISBN 7-5083-1700-9

I. 热… II. ①刘…②宋…③金… III. 热工学—高等学校: 技术学校—教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 037944 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2004 年 7 月第一版 2006 年 7 月北京第二次印刷  
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 23.5 印张 543 千字 2 插页  
印数 3001—5000 册 定价 36.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 序

随着新世纪的到来,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。新世纪新阶段的新任务,对我国高等职业教育提出了新要求。我国加入世界贸易组织和经济全球化迅速发展新形势,也要求高等职业教育必须开创新局面。

高职高专教材建设是高等职业教育的重要组成部分,是一项极具重要意义的基础性工作,对高等职业教育培养目标的实现起着举足轻重的作用。为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,进一步推动高等职业教育的发展,加强高职高专教材建设,根据教育部关于通过多层次的教材建设,逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系的精神,中国电力教育协会会同中国高等职业技术教育研究会和中国电力出版社,组织有关专家对高职高专“十五”教材规划工作进行研究,在广泛征求各方面意见的基础上,制订了体现高等职业教育特色的高职高专“十五”教材规划。

高职高专“十五”规划教材紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展编写工作。基础课程教材注重体现以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点;专业课程教材着重加强针对性和实用性。同时,“十五”规划教材不仅注重内容和体系的改革,还注重方法和手段的改革,以满足科技发展和生产实际的需求。此外,高职高专“十五”规划教材还着力推动高等职业教育人才培养模式改革,促进高等职业教育协调发展。相信通过我们的不断努力,一批内容新、体系新、方法新、手段新,在内容质量上和出版质量上有突破的高水平高职高专教材,很快就能陆续推出,力争尽快形成一纲多本、优化配套,适用于不同地区、不同学校、特色鲜明的高职高专教育教材体系。

在高职高专“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家电力公司、中国电力企业联合会、中国高等职业技术教育研究会、中国电力出版社、有关院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222)

中国电力教育协会

# 前 言

本书是在新的高职高专教材编写领导小组的组织下,按照供热通风与空调工程专业高职高专的培养目标与基本要求,根据供热通风与空调工程专业高职高专“热工学理论基础”课程教学基本要求编写的。

本书共分两篇:工程热力学和传热学。在内容取舍和结构编排上,充分吸收同类教材的经验并充分考虑高职高专的特点,对工程热力学和传热学的基本概念、基本定律以及基本方法做了简单明了的阐述,力求做到深入浅出、简明扼要。对提高热能的利用效率和能源的可持续性发展等问题也做了一定深度的叙述。同时强调结合供热通风与空调工程专业的特点,既注重加强理论教学,又兼顾基本技能的训练,以便使学生在掌握基本理论和基本方法的基础上,获得解决实际问题的初步能力。

为了使学生更好地理解 and 掌握所学内容,抓住各部分的重点,本书每章都附有小结以突出各章的重点;在各章的后面均列有针对性习题,并对各章的主要内容都编制了例题。在例题和习题的编写上,着眼于专业要求,强调专业实用性,并注意了例题和习题的质量,适当减少了习题数量。全书按 104 学时的教学内容编写。

本书采用法定单位,在书后附有各种常用单位的换算表。本书第二十章作为选学内容,各学校可以根据自己对学生的培养要求自行确定是否讲授。

本书承请山东建筑工程学院戎卫国教授主审,并对初稿提出了许多宝贵意见和建议,对本书质量的提高有很大帮助,在此谨致以深切的感谢。

本书绪论、第一~六章、第十九章由山东建筑工程学院刘学来编写,第七~十三章由黑龙江建筑职业技术学院宋永军编写,第十四~十八章、第二十章由长春工程学院金洪文编写,全书由山东建筑工程学院刘学来统稿。

限于编者水平,加之时间仓促,书中难免会有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003.10

# 主要符号

- A* 温度波振幅, °C  
*a* 范德瓦尔数,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^6 / \text{kmol}^2$ ; 热扩散率,  $\text{m}^2 / \text{s}$   
*b* 范德瓦尔常数,  $\text{m}^3 / \text{kmol}$   
*C* 辐射系数,  $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$   
*c* 速度,  $\text{m} / \text{s}$ ; 质量比热,  $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$   
*c<sub>s</sub>* 音速,  $\text{m} / \text{s}$   
*c'* 余隙百分比; 容积比热,  $\text{kJ} / (\text{Nm}^3 \cdot \text{K})$   
*c<sub>p</sub>* 定压比热,  $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$   
*c<sub>v</sub>* 定容比热,  $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$   
*d* 直径,  $\text{m}$ ; 含湿量,  $\text{g} / \text{kg}$  (*d*·*a*)  
*E* 能量、储存能,  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$ ; 辐射力,  $\text{W} / \text{m}^2$   
*e* 单位质量能量、储存能,  $\text{J} / \text{kg}$ ,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*E<sub>k</sub>* 动能,  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$   
*e<sub>k</sub>* 单位质量动能,  $\text{J} / \text{kg}$ ,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*E<sub>p</sub>* 位能 (势能),  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$   
*e<sub>p</sub>* 单位质量位能 (势能),  $\text{J} / \text{kg}$ ,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*F* 力,  $\text{N}$ ; 表面积  
*f* 摩擦系数; 截面积,  $\text{m}^2$   
*G* 质流量,  $\text{kg} / \text{s}$   
*g* 质量成分; 重力加速度,  $\text{m} / \text{s}^2$   
*I* 辐射强度,  $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{sr})$   
*H* 高度,  $\text{m}$   
*h* 单位质量焓,  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$   
*J* 有效辐射,  $\text{W} / \text{m}^2$   
*K* 热能利用系数 (率); 传热系数,  $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{°C})$   
*L* 长度,  $\text{m}$   
*M* 质量,  $\text{kg}$ ; 分子量  
*Ma* 马赫数  
*m* 质量,  $\text{kg}$   
 $\dot{m}$  质量流量,  $\text{kg} / \text{s}$   
*N* 分子数目  
*NTU* 传热单元数  
*n* 摩尔数; 多变指数  
*P* 功率,  $\text{W}$ ,  $\text{kW}$   
*p* 压力,  $\text{Pa}$   
*p<sub>b</sub>* 当地大气压,  $\text{MPa}$   
*p<sub>H</sub>* 真空度,  $\text{Pa}$   
*Q* 热量,  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$   
 $\Phi$  热流量,  $\text{W}$   
*q* 单位质量传递热量,  $\text{J} / \text{kg}$ ,  $\text{kJ} / \text{kg}$ ; 热流密度,  $\text{W} / \text{m}^2$   
*R* 气体常数,  $\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 热阻,  $\text{°C} / \text{W}$   
*R<sub>0</sub>* 通用气体常数,  $\text{J} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$   
*r* 半径,  $\text{m}$ ; 容积成分  
*S* 位移, 距离,  $\text{m}$ ; 熵,  $\text{kJ} / \text{K}$   
*s* 单位质量熵 (比熵),  $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$   
*T* 热力学温度,  $\text{K}$ ; 周期,  $\text{s}$ ,  $\text{h}$   
*t* 摄氏温度,  $\text{°C}$   
*U* 内能,  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$ ; 周边长度,  $\text{m}$   
*u* 单位质量内能 (比内能),  $\text{J} / \text{kg}$ ,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*V* 容积,  $\text{m}^3$   
*v* 比容,  $\text{m}^3 / \text{kg}$   
*W* 膨胀功,  $\text{J}$ ,  $\text{kJ}$   
*w* 单位质量传递膨胀功 (容积功),  $\text{J} / \text{kg}$ ,  $\text{kJ} / \text{kg}$ ; 速度,  $\text{m} / \text{s}$   
*W<sub>f</sub>* 流动功,  $\text{kJ}$   
*w<sub>f</sub>* 单位质量流动功,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*W<sub>s</sub>* 轴功,  $\text{kJ}$   
*w<sub>s</sub>* 单位质量轴功,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*W<sub>t</sub>* 技术功,  $\text{kJ}$   
*w<sub>t</sub>* 单位质量技术功,  $\text{kJ} / \text{kg}$   
*x* 摩尔成分; 干度  
*z* 高度,  $\text{m}$   
*α* 换热系数,  $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ ; 吸收率

$\beta$  临界压力比; 气压机增压比; 容积膨胀系数; 肋化系数  
 $\gamma$  比热比; 汽化潜热, J/kg  
 $\delta$  厚度, m  
 $\Delta$  差值  
 $\epsilon$  角系数 (热湿比); 发射率; 换热器效能  
 $\epsilon_1$  制冷系数  
 $\epsilon_2$  制热系数 (供热系数)  
 $\zeta$  能量损失系数  
 $\eta$  效率  
 $\eta_d$  扩压管效率  
 $\eta_n$  喷管效率  
 $\eta_t$  循环效率

$\kappa$  等熵指数  
 $\theta$  过余温度,  $^{\circ}\text{C}$  或 K  
 $\lambda$  导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; 射线波长, m,  $\mu\text{m}$   
 $\lambda_v$  容积效率  
 $\mu$  动力粘度,  $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$   
 $\mu_J$  绝热节流系数  
 $\xi$  延迟时间, s, h; 热能利用率  
 $\nu$  运动粘度 (动量扩散系数),  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\rho$  密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 发射率  
 $\rho_{\text{vap}}$  绝对湿度,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\tau$  时间, s, h; 剪应力, Pa; 透射率  
 $\varphi$  相对湿度; 辐射角系数  
 $\omega$  分子运动速度, m/s; 角速度, rad/s

# 目 录

序  
前言  
主要符号  
绪论

## 第一篇 工程热力学

引言	4
<b>第一章 气体的性质</b>	<b>5</b>
第一节 热力系统	5
第二节 工质的热力状态及其基本状态参数	6
第三节 热力平衡状态及状态方程	10
第四节 理想气体的状态方程	10
第五节 理想气体的比热	13
第六节 混合气体	19
小结	24
习题	24
<b>第二章 热力学第一定律</b>	<b>26</b>
第一节 热力过程	26
第二节 系统储存能	28
第三节 系统与外界能量交换	29
第四节 闭口系统能量方程	33
第五节 开口系统能量方程	35
第六节 稳定流动能量方程及应用	37
小结	41
习题	41
<b>第三章 理想气体的热力过程</b>	<b>44</b>
第一节 热力过程的一般分析方法	44
第二节 气体的基本热力过程	46

第三节 多变过程 .....	54
小结 .....	57
习题 .....	58
<b>第四章 热力学第二定律 .....</b>	<b>60</b>
第一节 热力循环 .....	60
第二节 热力学第二定律 .....	62
第三节 卡诺循环及卡诺定律 .....	63
第四节 熵与熵方程 .....	67
第五节 孤立系统的熵增原理 .....	71
小结 .....	75
习题 .....	76
<b>第五章 水蒸气 .....</b>	<b>79</b>
第一节 水蒸气的产生过程 .....	79
第二节 水蒸气图表 .....	82
第三节 水蒸气的基本热力过程 .....	87
小结 .....	91
习题 .....	92
<b>第六章 湿空气 .....</b>	<b>94</b>
第一节 湿空气的性质 .....	94
第二节 湿空气的焓湿图 .....	101
第三节 湿空气的热力过程 .....	105
小结 .....	109
习题 .....	110
<b>第七章 气体和蒸汽的流动 .....</b>	<b>112</b>
第一节 绝热稳定流动基本方程 .....	112
第二节 定熵流动的基本特性 .....	114
第三节 通过喷管的流速及流量计算 .....	116
第四节 绝热节流 .....	122
小结 .....	123
习题 .....	124
<b>第八章 蒸汽动力循环 .....</b>	<b>126</b>
第一节 朗肯循环 .....	126



第二节	再热循环	131
第三节	回热循环	134
第四节	热电循环	136
	小结	138
	习题	138
<b>第九章</b>	<b>气体压缩与制冷循环</b>	<b>140</b>
第一节	气体的压缩	140
第二节	蒸汽压缩式制冷循环	147
第三节	其他形式制冷循环	151
第四节	热泵	155
	小结	157
	习题	157

## 第二篇 传 热 学

引言	159	
<b>第十章</b>	<b>导热的理论基础</b>	<b>165</b>
第一节	导热基本概念	165
第二节	傅里叶定律	166
第三节	导热系数	167
第四节	导热过程的数学描述	169
第五节	导热过程的单值性条件	172
	小结	174
	习题	174
<b>第十一章</b>	<b>稳态导热</b>	<b>175</b>
第一节	平壁的稳态导热	175
第二节	圆筒壁的稳态导热	178
第三节	肋片的稳态导热	181
第四节	接触热阻	185
第五节	二维稳态导热问题	186
	小结	187
	习题	188

<b>第十二章 非稳态导热</b> .....	189
第一节 非稳态导热的概念 .....	189
第二节 周期性变化边界条件下非稳态导热 .....	190
小结 .....	194
习题 .....	194
<b>第十三章 导热问题的数值解</b> .....	196
第一节 导热方程的离散 .....	196
第二节 稳态导热问题的数值计算 .....	197
第三节 非稳态导热问题的数值计算 .....	201
小结 .....	203
习题 .....	203
<b>第十四章 对流换热基础</b> .....	205
第一节 概论 .....	205
第二节 边界层 .....	207
第三节 边界层换热方程组 .....	209
第四节 相似理论 .....	215
小结 .....	220
习题 .....	221
<b>第十五章 单相流体的对流换热</b> .....	224
第一节 自然对流换热 .....	224
第二节 流体受迫运动时的换热 .....	232
小结 .....	244
习题 .....	244
<b>第十六章 沸腾与凝结对流换热</b> .....	247
第一节 沸腾换热 .....	247
第二节 凝结换热 .....	251
小结 .....	257
习题 .....	258
<b>第十七章 辐射换热</b> .....	260
第一节 辐射换热的基本概念 .....	260
第二节 热辐射的基本定律 .....	262

第三节	辐射换热量的计算	269
第四节	气体辐射	277
小结		284
习题		285
<b>第十八章</b>	<b>传热过程</b>	<b>287</b>
第一节	复合换热	287
第二节	通过平壁的传热	288
第三节	通过圆筒壁的传热	290
第四节	通过肋壁的传热	291
第五节	传热的增强与减弱	293
小结		298
习题		299
<b>第十九章</b>	<b>换热器</b>	<b>301</b>
第一节	换热器的基本类型与构造	301
第二节	平均温度差	306
第三节	换热器的热计算	311
小结		319
习题		319
<b>* 第二十章</b>	<b>质交换概论</b>	<b>321</b>
第一节	质交换的基本方式及基本概念	321
第二节	质扩散基本定律	322
第三节	对流质交换和对流换热的类比	328
小结		332
习题		332
<b>附录</b>		<b>334</b>
附录 1	各种单位制常用单位换算	334
附录 2	饱和水与饱和水蒸气表 (按温度排列)	335
附录 3	饱和水与饱和水蒸气表 (按压力排列)	337
附录 4	未饱和水与过热蒸气表	339
附录 5	在 0.1MPa 时的饱和空气状态参数表	345
附录 6	干空气的热物理性质 ( $p = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ )	347
附录 7	饱和水的热物理性质	348
附录 8	干饱和水蒸气的热物理性质	349

附录 9	几种饱和液体的热物理性质 .....	350
附录 10	几种油的热物理性质 .....	351
附录 11	各种材料的密度、导热系数、比热容及蓄热系数 .....	351
附录 12	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系 .....	353
附录 13	常用材料表面的法向发射率 $\epsilon_n$ .....	353
附录 14	不同材料表面的绝对粗糙度 $K_s$ .....	354
附录 15	双曲函数表 .....	354
附录 16	高斯误差补函数的一次积分值 .....	355
附录 17	容积式换热器技术参数 .....	355
附录 18	螺旋板换热器技术参数 .....	356
附录 19	板式换热器技术性能表 .....	357
附录 20	浮动盘管换热器技术性能表 .....	358
附图 1	水蒸气焓熵图 .....	插页
附图 2	湿空气焓湿图 .....	插页
附图 3	氨 ( $\text{NH}_3$ , R717) 的 $\lg P - h$ 图 .....	360
附图 4	氟利昂 - 134a ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ , R134a) 的 $\lg P - h$ 图 .....	361
附图 5	氟利昂 - 22 ( $\text{CHCl}_2\text{F}_2$ , R22) 的 $\lg P - h$ 图 .....	362
<b>参考文献</b>	.....	<b>363</b>

# 绪论

能源是人类生存不可缺少的物质基础之一，人类社会的文明史与人类开发利用能源的广度、深度紧密相连。

能源是指提供各种有效能量的物质资源。自然界中可被人们利用的能源主要有煤、石油、天然气等天然矿物燃料的化学能。在我国就目前探明的煤炭、石油储量及产量，均居世界各国的前列，但是就人均能源占有量来讲，却远远低于世界人均占有量，并且我国目前能源的利用率较低。随着生产的发展和人民生活水平的提高，在今后相当长的时期内，能源的供需关系将处于非常紧张的状态。针对这种状况，提高能源利用率，节约能源，减少燃料消耗是世界各国长期的战略任务。另一方面，新能源的开发利用（诸如风能、水力能、太阳能、地热能、原子能等）也是极为重要的。但是在这些能源形式中，除风能和水利能是以机械能的形式直接提供的能量外，其他则主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用。可见能量的利用过程实际上是能量的传递和转换过程。据统计，世界上经过热能形式被人们利用的能量平均超过 85%，而我国则有 90% 以上的是热能，因此热能的开发、利用对人类社会的发展有着重要的意义。

## 第一节 热能及其利用

煤、石油、天然气等燃料通过燃烧，这些燃料的化学能便转换为热能，被人类所利用，这也是人类所获得热能的最基本的方法。对于热能的利用可分为两种基本方式，一种是热能的直接利用，即将热能用于直接加热，如采暖、烘干、熔化、蒸煮、冶炼等，这些直接加热过程，必须是在各种加热设备或热交换器中完成。另一种是热能的间接利用，即将热能转换为其他形式的能量加以利用，如将热能转化为机械能，进而转化为电能为人类社会各方面提供动力。

在工农业生产的各部门以及人们的日常生活中，热能被广泛地利用。在供热、通风与空调工程中热能利用的设备有很多。锅炉设备是供热工程的热源，在锅炉中，煤、石油、天然气等燃料燃烧释放出大量的热能，然后这些热能在锅炉中传递给水，并且产生一定压力和温度的水蒸气（或热水），这些携带一定热能的水蒸气可以在生产过程中起加热、加湿等作用。在热电厂或火力发电厂中，锅炉所产生的高温高压水蒸气，通过汽轮机将热能转换为电能，同时将一部分做过功的乏汽用于供热。

在通风、空调系统中，为使空气达到一定的温度要求，常需要用水蒸气或热水将空气加热，或用低温冷冻水将空气冷却。这些加热或冷却过程常在各种热交换器中完成，而这都属于热能的直接利用。产生低温冷冻水的制冷装置是通风空调系统的冷源。常用的冷源有压缩

式制冷系统、吸收式制冷系统等，而这些制冷系统都具有将热能从低温物体转移到高温物体的作用，从而实现制冷过程，产生冷冻水。

在当今科技条件下，人们已经开始把原子内部蕴藏的巨大能量通过原子裂变反应释放出来，并加以和平利用。人们还在努力地将太阳能、地热能转化为动力，供人们利用。热能通过热能动力装置转换为机械能的效率较低，即使是大型蒸汽动力装置的热效率也仅仅是略超过40%。因此寻求更直接的热—电转换是科学工作者一直努力追求的目标。

能源的开发利用一方面为人类社会的发展提供了必须的能量，另一方面也造成了对自然环境的破坏和污染。与能源开发利用密切相关的温室效应、酸雨、核废料辐射、臭氧层破坏等等，都对地球的生态系统造成了极为严重的威胁。因此人们正以极大的热情关注节能、可再生能源的开发，努力在满足人类社会对能量需求的同时不破坏或少破坏自然环境，实现可持续发展，为后代子孙留下一片生存空间。

## 第二节 热工学理论的发展

热现象是人类最早广泛接触的自然现象之一，但是直到18世纪初，在欧洲由于采煤、纺织、航海等产业的发展，产生了对热机的巨大需求，这样就促使了热学的发展。1763—1784年间，英国人瓦特（James Watt, 1736~1819）对当时用来带动煤矿水泵的原始蒸汽机做了重大改进，且研制成功了应用高于大气压的蒸汽和配有独立凝汽器的单缸蒸汽机，提高了蒸汽机的热效率。此后，蒸汽机被交通、纺织、冶金等部门广泛采用，使生产力得到了极大的提高，同时也大大促进了社会生产力的发展，并开拓了使用矿物质燃料的新途径。

蒸汽机的发明和应用，刺激和推动了热力学的理论研究，促成了热力学及传热学的建立和发展。1928年，卡诺（Sadi Carnot, 1796~1832，法国人）提出了卡诺定律和卡诺循环，指出热机必须工作于不同温度的热源之间，并提出热机最高效率的概念，这在根本上阐明了热力学第二定律的基本内容。但是由于受当时基础理论的限制，卡诺没有能够正确地证明热力学第二定律。在卡诺研究地基础上，1850~1851年间，克劳修斯（Rudolf Clausius, 1822~1888）和汤姆逊（Villian Thomson，也就是开尔文，Lord Kelvin, 1824~1907）分别独立地从热量传递和热量转变成功量的角度提出了热力学第二定律，阐述了热传递过程的方向性。

1850年，焦耳（James Prescott Joule, 1818~1889）在他的关于热功相当实验的总结论文中，以各种精确的实验结果使能量守恒与转换定律（即热力学第一定律）得到了充分的验证。1851年，汤姆逊把能量这一概念引入热力学。

热力学第一定律的建立宣告第一类永动机的破灭（即不消耗能量的永动机），热力学第二定律的建立，则宣告了第二类永动机梦想的破灭（即只从一个热源吸热，并能连续做功，而不引起其他变化的永动机）。这两个定律奠定了热力学的理论基础。

传热学则是从热的一般学说的基础上发展起来的。人们对热机的研究发现，减少各种热损失，改善热量传递过程，也是提高热机效率的重要方面。同时在机械制造、建筑、制冷、冶炼等领域中，都涉及到热量的传递。这样以来，有关传热问题的研究进展就变得很快，相继提出了对流换热的牛顿冷却定律、导热的傅里叶定律以及辐射换热的四次方定律等等。进

人 20 世纪, 传热学在理论上、研究方法上都获得了迅速发展, 使传热学很快成为一门独立的学科。

由于热能广泛而大量的利用, 燃料消耗量日益增加, 燃料的供需矛盾日趋明显。同时, 燃料燃烧放出大量的污染物, 对人类生存的环境构成严重的污染。因此如何提高能源利用率、开发利用新能源、减少有害物质的排放量等等问题的研究, 都将大大推动热工学理论的发展, 并为之增添新内容。

### 第三节 热工学理论基础的研究对象及主要内容

热工学理论基础是研究热能利用规律和方法的学科。其包括物质的热力性质, 热能与机械能的相对转化规律, 热量传递规律等等, 其具体内容分为工程热力学和传热学两大部分。

工程热力学部分的主要内容包括:

(1) 基本概念与基本定律, 如热力系统、热力平衡状态及状态参数、热力学第一定律、热力学第二定律等等, 这些基本概念和基本定律是全部工程热力学的基础。

(2) 能量的转化过程, 特别是热能转化为机械能是由工质的吸热、膨胀、排热等状态变化过程来实现的, 因此过程以及循环的分析研究、计算方法是工程热力学的重要内容。

(3) 常用工质的性质, 对其状态变化过程有着极重要的影响。

传热学部分的主要内容包括:

(1) 导热。导热的基本概念、基本定律、稳态导热和非稳态导热的求解。

(2) 对流换热。对流换热的基本概念, 对流换热过程的物理和数学模型的建立, 一般求解方法, 相似理论基础及对流换热过程的求解 (包括单相流体和集态改变时对流换热的经验公式的选择和使用)。

(3) 辐射换热。辐射换热的基本概念及基本定律, 物体间辐射换热的一般计算及气体辐射。

(4) 传热过程及换热器。传热过程的分析计算, 换热器概述及一般计算, 传热过程的强化。

(5) 传质学的基本概念和基本理论。

可见, 热工学理论基础所包含的内容很广泛, 是研究热能利用所必须的技术基础, 是现代科学的主要基础理论学科之一, 是供热通风与空调工程的一门重要的技术基础课, 是后续各课程, 如供热工程、工业通风、空气调节、锅炉与锅炉房设备、空调用制冷技术等的基础。学好热工学理论基础, 是学好这些专业课, 乃至进一步研究热力工程中的各种问题, 有效合理地利用能源, 不断提高能源利用率的必要前提。

学好热工学理论基础首先要掌握学科的主要线索——研究热能转化为机械能的规律、方法, 怎样提高转化效率和热能利用的经济性, 热能的传递形式及传递规律, 如何减弱和增强热量的传递。其次是在深刻理解基本概念的基础上运用抽象和简化的方法抽象出各种具体问题的本质, 应用热工学基本定律和基本方法进行分析研究。最后还必须注重习题、实验等环节, 通过习题等环节可以培养抽象、分析问题的能力, 通过实验可以得到验证问题的方法, 并加深对基本概念的理解和认识。

# 第一篇 工程热力学

## 引 言

工程热力学属于应用科学的范畴。它是从工程技术的观点出发，来研究热能与其他能量形式之间的转换关系及工质的热力性质。它采用宏观的研究方法，以从无数实践中归纳总结出来的热力学第一定律和第二定律作为分析推理的依据，把物质看作连续的整体，对其宏观现象和宏观过程进行研究。由于宏观分析不涉及物质内部结构，因此分析推理的条理清晰，其研究结果具有高度的可靠性和普遍性，适宜于工程上应用。而对于那些与微观结构有关的宏观现象的本质及其内在原因的解释，则需要依靠微观的研究方法——即统计热力学的研究方法。

工程热力学是各种动力装置、制冷装置、热泵空调机组、锅炉及各种热交换器进行分析和计算的理论基础。其主要内容大致可分为两个方面：基本理论部分和基本理论的应用部分。

基本理论部分包括工质的性质、热力学第一定律及热力学第二定律等内容。基本理论的应用部分主要是将热力学基本理论应用于各种热力过程。对气体和蒸汽的流动、制冷循环、动力循环等进行热力分析及计算，探讨影响能量转换效果的因素以及提高利用效率的途径和方法等。



# 第一章

## 气体的性质

本章就热力工程中热能与机械能的转换、热能的传递过程、工质的状态及状态的变化、热力研究方法等讨论热力系统、工质的状态及状态参数、热力过程、热力循环、功和热等有关概念。

### 第一节 热力系统

在研究工程热力学问题时，常常将研究的对象从周围的物质中分离出来，人们把分离出来的研究对象称为热力系统，或简称为系统。分离系统与周围物质的分解面，称为边界。边界的作用是确定研究对象，将系统与外界分割开来。边界以外与系统相互作用的物质，称为外界或环境。系统与外界的相互作用，通常通过功量、热量和物质的交换进行。

系统的边界可以是真实存在的，也可以是假想的；可以是固定不动的，也可以是移动变化的。如图 1-1 所示，当我们研究气缸内的气体进行热量与功量转化问题时，气缸内的气体就是热力系统，活塞的左端面及气缸的部分内壁面就是边界，很显然该系统的边界是真实的。

如图 1-2，一个真空的容器，当与外界连通的阀门打开时，外界的气体在气压的作用下就流入容器，直至其内部的气压与外界气压平衡为止。如果把大气中流入容器的那部分气体用一个假想的边界从大气中划分出来，则容器内壁与假想的边界所包围的空气就是我们研究的热力系统。当阀门打开后，随着气流流入容器，假想的边界受外界气压的压缩，是逐渐缩小的，当然整个系统也随之缩小。

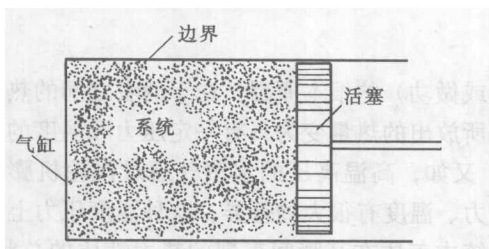


图 1-1 热力系统

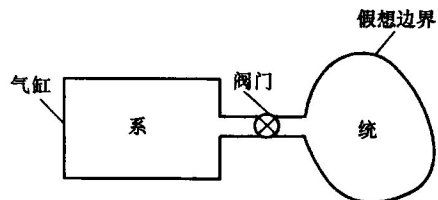


图 1-2 边界可变形系统

在热力过程中，系统与外界之间通过边界可以进行能量的传递（如功量和热量），也可