



21st CENTURY
实用规划教材

21世纪全国高等院校

大机械系列 实用规划教材

汽车系列



热工基础

主 编 于秋红



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内容简介

21 世纪全国高等院校大机械系列实用规划教材·汽车系列

热工基础

主 编：于秋红

副主编：鞠晓丽 黄盛珠 张兆营



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

· 本书可作为高等院校机械类专业及相关专业的教材，也可供从事机械工作的工程技术人员参考。
· 本书可作为高等院校机械类专业及相关专业的教材，也可供从事机械工作的工程技术人员参考。
· 本书可作为高等院校机械类专业及相关专业的教材，也可供从事机械工作的工程技术人员参考。

内 容 简 介

热工基础是讨论热功转换、热能的合理利用及热量传递规律的一门课程。热工基础知识是工科各类专业人才应具备的基本知识,掌握合理用能的基本知识和理论是一个新世纪复合型人才所必需的重要素质。

本书分为工程热力学和传热学两部分。工程热力学部分包括基本概念、热力学基本定律、常用工质的热物理性质、基本热力过程、典型热力循环分析及热能的合理利用;传热学部分包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程与换热器的基本概念及基本计算方法。

本书参照《热工课程教学基本要求》编写,可作为非能源动力类各专业本科生教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础/于秋红主编. —北京:北京大学出版社, 2009. 2
(21世纪全国高等院校大机械系列实用规划教材·汽车系列)
ISBN 978-7-301-12399-7

I. 热… II. 于… III. 热工学—高等学校—教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083333 号

书 名: 热工基础

著作责任者: 于秋红 主编

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-12399-7/TH·0031

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 430 千字

2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

21 世纪全国高等院校大机械系列实用规划教材·汽车系列

专家编审委员会

主任委员 崔胜民

副主任委员 (按拼音排序)

江浩斌 王丰元 杨建国 赵桂范

委员 (按拼音排序)

韩同群 姜立标 林 波 凌永成

刘瑞军 刘 涛 刘占峰 鲁统利

罗念宁 肖生发 谢在玉 于秋红

张京明 张黎骅 赵立军 赵又群

前 言

热工基础主要研究热功转换、热能合理利用和热量传递规律。随着我国社会经济的飞速发展,能源需求量快速增长,能源资源紧缺以及缺乏高效洁净转换利用已成为制约我国经济发展的关键问题。因此,节能降耗、保护环境是每一个工程技术人员的责任。热工基础几乎是渗透到现代工程技术各个领域内的一门技术基础课,是各专业实际应用中不可缺少的重要组成部分,掌握合理用能的基本知识和理论是新世纪复合型人才应具备的重要素质。

本书参照《热工课程教学基本要求》,并结合哈尔滨工业大学(威海)热工基础教学大纲,针对非能源动力类、非热工类各专业的应用特点,同时参考国内已有的同类教材、国外原版教材及相关文献编写。可作为非能源动力类、非热工类各专业的教学及参考之用。

本书保持了传统热工基础的内容体系,由两部分构成,即工程热力学部分和传热学部分。每一部分在保持原有体系的基础上,均根据一般性和实用性加以精选。所选例题、思考题和习题,力求使其具有代表性、启发性和灵活性。为了使读者更好地掌握每章内容,每章后面均有小结及思考题和习题,书末附有习题参考答案,便于读者自学。

本书较适宜的授课学时为 50 学时左右,各章的参考教学学时数见下表。

章 次	建议学时	章 次	建议学时
绪论	2	第 7 章 动力装置循环	4
第 1 章 基本概念	2	第 8 章 制冷循环	2
第 2 章 热力学第一定律	4	第 9 章 热量传递的基本方式	2
第 3 章 理想气体的性质与热力过程	4	第 10 章 导热	4
第 4 章 热力学第二定律	4	第 11 章 对流换热	8
第 5 章 实际气体的性质及热力学一般关系式	2	第 12 章 辐射换热	5
第 6 章 水蒸气和湿空气	2	第 13 章 传热过程与换热器	5

本书第 1 章至第 4 章由于秋红编写,第 5 章至第 8 章、第 13 章由鞠晓丽编写,第 9 章至第 11 章由黄盛珠编写,第 12 章由张兆营编写。本书在编写过程中得到哈尔滨工业大学(威海)热能与动力工程系老师的帮助和支持,在此深表谢意!

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 11 月

目 录

主要符号	1	3.3 理想气体混合物	36
绪论	3	3.3.1 理想气体混合物的基本定律	37
第1章 基本概念	6	3.3.2 理想气体混合物的成分	37
1.1 热力系	6	3.3.3 混合气体的折合摩尔质量和折合气体常数	38
1.2 状态及状态参数	7	3.4 理想气体的热力过程	39
1.2.1 平衡状态	7	3.4.1 理想气体的基本热力过程	40
1.2.2 基本状态参数	7	3.4.2 多变过程	45
1.3 状态方程及参数坐标图	9	3.5 压气机的热力过程	48
1.4 准静态过程与可逆过程	10	3.5.1 单级活塞式压气机的工作过程	48
1.5 功量与热量	11	3.5.2 单级活塞式压气机的理论耗功	49
1.5.1 功量	11	3.5.3 余隙容积的影响	49
1.5.2 热量	12	3.5.4 多级压缩、级间冷却	50
1.6 热力循环	13	3.6 气体在喷管中的流动	52
小结	14	3.6.1 喷管中的稳定流动基本方程	52
思考题	15	3.6.2 喷管截面的变化规律	54
习题	15	3.6.3 喷管中气体流速及流量计算	55
第2章 热力学第一定律	17	小结	57
2.1 热力学第一定律的实质	17	思考题	58
2.2 热力系统的储存能	17	习题	59
2.3 闭口系统的能量方程	18	第4章 热力学第二定律	63
2.4 开口系统的稳定流动能量方程	19	4.1 热力学第二定律	63
2.4.1 稳定流动与流动功	19	4.1.1 热力过程的方向性	63
2.4.2 稳定流动能量方程	20	4.1.2 热力学第二定律的表述	63
2.5 稳定流动能量方程的应用	22	4.2 卡诺循环与卡诺定理	64
小结	24	4.2.1 卡诺循环	64
思考题	25	4.2.2 卡诺定理	65
习题	25	4.3 熵及孤立系统熵增原理	66
第3章 理想气体的性质与热力过程	28	4.3.1 熵的导出	66
3.1 实际气体和理想气体	28		
3.2 理想气体的热力性质	29		
3.2.1 理想气体状态方程	29		
3.2.2 理想气体的比热容	30		
3.2.3 理想气体的热力学能、焓和熵	34		

4.3.2 不可逆过程熵的变化	68	6.5.3 湿空气的焓	103
4.3.3 孤立系统熵增原理与做功 能力损失	69	6.6 湿空气的焓湿图和基本热力 过程	104
4.4 焓参数的基本概念	72	6.6.1 湿空气的焓湿图	104
4.4.1 焓的定义	72	6.6.2 湿空气的基本热力 过程	105
4.4.2 热量焓	72	小结	107
小结	73	思考题	107
思考题	73	习题	108
习题	74	第7章 动力装置循环	109
第5章 实际气体的性质及热力学一般 关系式	76	7.1 蒸汽动力装置循环	109
5.1 实际气体的状态方程	76	7.1.1 朗肯循环	110
5.1.1 理想气体状态方程应用于 实际气体的偏差	76	7.1.2 朗肯循环的热效率	110
5.1.2 范德瓦耳方程	77	7.1.3 蒸汽参数对朗肯循环的 影响	112
5.1.3 其他状态方程	79	7.1.4 提高蒸汽动力装置循环热 效率的途径	113
5.2 对比态原理与通用压缩因子图	81	7.2 活塞式内燃机循环	115
5.2.1 对比态原理	81	7.2.1 活塞式内燃机的实际 循环	116
5.2.2 通用压缩因子图	82	7.2.2 活塞式内燃机的理想 循环	117
5.3 热力学一般关系式	84	7.3 燃气轮机循环	120
5.3.1 主要数学关系式	84	7.3.1 燃气轮机的组成及工作 过程	120
5.3.2 焓、熵及热力学能的一般 关系式	85	7.3.2 定压加热理想循环	121
小结	88	小结	122
思考题	89	思考题	122
习题	89	习题	123
第6章 水蒸气和湿空气	91	第8章 制冷循环	125
6.1 概述	91	8.1 概述	125
6.1.1 蒸发与沸腾	91	8.2 蒸汽压缩制冷循环	127
6.1.2 饱和状态	92	8.2.1 理论循环	127
6.2 水蒸气的定压产生过程	92	8.2.2 性能指标	128
6.2.1 预热阶段	93	8.3 其他制冷循环	129
6.2.2 汽化阶段	93	8.3.1 吸收式制冷循环	129
6.2.3 过热阶段	93	8.3.2 热电制冷循环	131
6.3 水蒸气表和焓熵图	95	8.4 热泵循环	131
6.3.1 水蒸气表	95	8.5 汽车空调系统简介	132
6.3.2 水蒸气焓熵图	96	小结	134
6.4 水蒸气的基本热力过程	98	思考题	134
6.5 湿空气的性质	101	习题	134
6.5.1 未饱和湿空气和饱和湿 空气	101		
6.5.2 绝对湿度、相对湿度和 含湿量	101		

第 9 章 热量传递的基本方式	136
9.1 导热	136
9.2 热对流	137
9.3 热辐射	138
9.4 传热过程简介	140
小结	141
思考题	142
习题	142
第 10 章 导热	144
10.1 导热理论基础	144
10.1.1 导热基本概念	144
10.1.2 导热基本定律	145
10.1.3 热导率	146
10.1.4 导热微分方程及其单值 性条件	149
10.2 稳态导热	154
10.2.1 平壁的稳态导热	154
10.2.2 圆筒壁的稳态导热	157
10.2.3 肋片的稳态导热	159
10.2.4 接触热阻	164
10.3 非稳态导热	165
10.3.1 一维非稳态导热问题的 分析解	166
10.3.2 集总参数法	173
小结	176
思考题	176
习题	176
第 11 章 对流换热	179
11.1 概述	179
11.1.1 牛顿冷却公式	179
11.1.2 对流换热的影响 因素	180
11.1.3 对流换热的主要研究 方法	181
11.2 对流换热的数学描述	182
11.2.1 对流换热微分方程组及 其单值性条件	182
11.2.2 边界层理论与对流换热 微分方程组的简化	186
11.3 外掠等壁温平板层流换热分析解 简介	190
11.3.1 对流换热特征数关 联式	190
11.3.2 外掠平板层流换热分析 结果	192
11.4 对流换热的实验研究方法	195
11.4.1 相似原理	195
11.4.2 相似原理指导下的实验 研究方法	200
11.5 单相流体强迫对流换热特征数 关联式	203
11.5.1 管内强迫对流换热	203
11.5.2 外掠壁面强迫对流 换热	210
11.6 自然对流换热	215
11.6.1 自然对流换热的数学 描述	216
11.6.2 大空间自然对流换热 特征数关联式	220
11.7 凝结与沸腾换热	224
11.7.1 凝结换热	224
11.7.2 沸腾换热	229
11.7.3 热管的工作原理	231
小结	233
思考题	233
习题	234
第 12 章 辐射换热	236
12.1 热辐射的基本概念	236
12.1.1 吸收、反射与透射	236
12.1.2 灰体与黑体	237
12.1.3 辐射强度	238
12.1.4 辐射力	239
12.2 黑体辐射的基本定律	239
12.2.1 普朗克定律	239
12.2.2 斯忒藩-玻耳兹曼 定律	240
12.2.3 兰贝特定律	242
12.3 实际物体的辐射特性与基尔霍夫 定律	243
12.3.1 实际物体的发射 特性	243
12.3.2 实际物体的吸收 特性	245
12.3.3 基尔霍夫定律	246

12.4 辐射换热的计算方法	247	13.2 换热器	268
12.4.1 角系数	247	13.2.1 换热器的种类	268
12.4.2 黑体表面之间的辐射 换热	252	13.2.2 平均温差	271
12.4.3 漫灰表面之间的辐射 换热	252	13.3 换热器的热计算	276
12.5 遮热板原理	257	13.3.1 热计算的基本理论	276
12.6 太阳辐射	259	13.3.2 平均温差法	276
小结	261	13.3.3 效能-传热单元数法	277
思考题	262	小结	282
习题	262	思考题	282
第 13 章 传热过程与换热器	265	习题	282
13.1 传热过程	266	习题答案	284
13.1.1 通过平壁的传热过程	266	附录	288
13.1.2 通过圆筒壁的传热过程	267	附录 A 附表	288
13.1.3 通过圆筒壁的传热过程	267	附录 B 附图	328
13.2 传热系数	267	参考文献	330
13.3 传热过程的计算	267		
13.4 传热过程的计算	267		
13.5 传热过程的计算	267		
13.6 传热过程的计算	267		
13.7 传热过程的计算	267		
13.8 传热过程的计算	267		
13.9 传热过程的计算	267		
13.10 传热过程的计算	267		
13.11 传热过程的计算	267		
13.12 传热过程的计算	267		
13.13 传热过程的计算	267		
13.14 传热过程的计算	267		
13.15 传热过程的计算	267		
13.16 传热过程的计算	267		
13.17 传热过程的计算	267		
13.18 传热过程的计算	267		
13.19 传热过程的计算	267		
13.20 传热过程的计算	267		
13.21 传热过程的计算	267		
13.22 传热过程的计算	267		
13.23 传热过程的计算	267		
13.24 传热过程的计算	267		
13.25 传热过程的计算	267		
13.26 传热过程的计算	267		
13.27 传热过程的计算	267		
13.28 传热过程的计算	267		
13.29 传热过程的计算	267		
13.30 传热过程的计算	267		
13.31 传热过程的计算	267		
13.32 传热过程的计算	267		
13.33 传热过程的计算	267		
13.34 传热过程的计算	267		
13.35 传热过程的计算	267		
13.36 传热过程的计算	267		
13.37 传热过程的计算	267		
13.38 传热过程的计算	267		
13.39 传热过程的计算	267		
13.40 传热过程的计算	267		
13.41 传热过程的计算	267		
13.42 传热过程的计算	267		
13.43 传热过程的计算	267		
13.44 传热过程的计算	267		
13.45 传热过程的计算	267		
13.46 传热过程的计算	267		
13.47 传热过程的计算	267		
13.48 传热过程的计算	267		
13.49 传热过程的计算	267		
13.50 传热过程的计算	267		
13.51 传热过程的计算	267		
13.52 传热过程的计算	267		
13.53 传热过程的计算	267		
13.54 传热过程的计算	267		
13.55 传热过程的计算	267		
13.56 传热过程的计算	267		
13.57 传热过程的计算	267		
13.58 传热过程的计算	267		
13.59 传热过程的计算	267		
13.60 传热过程的计算	267		
13.61 传热过程的计算	267		
13.62 传热过程的计算	267		
13.63 传热过程的计算	267		
13.64 传热过程的计算	267		
13.65 传热过程的计算	267		
13.66 传热过程的计算	267		
13.67 传热过程的计算	267		
13.68 传热过程的计算	267		
13.69 传热过程的计算	267		
13.70 传热过程的计算	267		
13.71 传热过程的计算	267		
13.72 传热过程的计算	267		
13.73 传热过程的计算	267		
13.74 传热过程的计算	267		
13.75 传热过程的计算	267		
13.76 传热过程的计算	267		
13.77 传热过程的计算	267		
13.78 传热过程的计算	267		
13.79 传热过程的计算	267		
13.80 传热过程的计算	267		
13.81 传热过程的计算	267		
13.82 传热过程的计算	267		
13.83 传热过程的计算	267		
13.84 传热过程的计算	267		
13.85 传热过程的计算	267		
13.86 传热过程的计算	267		
13.87 传热过程的计算	267		
13.88 传热过程的计算	267		
13.89 传热过程的计算	267		
13.90 传热过程的计算	267		
13.91 传热过程的计算	267		
13.92 传热过程的计算	267		
13.93 传热过程的计算	267		
13.94 传热过程的计算	267		
13.95 传热过程的计算	267		
13.96 传热过程的计算	267		
13.97 传热过程的计算	267		
13.98 传热过程的计算	267		
13.99 传热过程的计算	267		
13.100 传热过程的计算	267		

主要符号

拉丁字母

- a ——热扩散率, m^2/s
 A ——面积, m^2
 b ——宽度, m
 c ——比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 声速、光速, m/s
 c_f ——流速, m/s
 c_p ——比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 c_v ——比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 C_m ——摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
 d ——含湿量, kg/kg (干空气); 直径, m
 e ——比总能量, J/kg
 E ——总能量, J ; 辐射力, W/m^2
 E_k ——宏观动能, J
 E_p ——宏观位能, J
 e_x ——比焓, J/kg
 E_x ——焓, J
 $E_{x,H}$ ——比焓焓, J/kg
 $E_{x,H}$ ——焓焓, J
 $e_{x,Q}$ ——比热量焓, J/kg
 $E_{x,Q}$ ——热量焓, J
 f ——阻力系数; 频率 Hz
 F ——作用力, N
 g ——重力加速度, m^2/s
 h ——比焓, J/kg ; 高度, m ; 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 H ——焓, J ; 高度, m
 I ——做功能力损失, J
 J ——有效辐射, W/m^2
 k ——传热系数; $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 l ——长度, m ; 特征长度, m
 m ——质量, kg
 M ——摩尔质量, kg/mol
 n ——物质的量, mol ; 多变指数; 折射率
 p ——绝对压力, Pa
 p_b ——大气压力, Pa
 p_c ——表压力, Pa
 p_i ——混合物组元的 i 分压力, Pa
 p_v ——真空度; 水蒸气分压力, Pa
 p_s ——饱和压力, Pa
 P ——功率, W
 q ——比热量, J/kg ; 热流密度, W/m^2
 q_m ——质量流量; kg/s
 Q ——热量, J
 r ——汽化潜热, J/kg ; 半径, m
 R ——摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 热阻, K/W
 R_g ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 s ——比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 管间距, m
 S ——熵, J/K ; 形状因子
 t ——摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_d ——露点温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_w ——湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_s ——饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
 T ——热力学温度, K ; 周期, s
 u ——比热力学能, J/kg ; 速度, m/s
 U ——热力学能, J
 v ——比体积, m^3/kg ; 速度, m/s
 V ——体积, m^3
 V_m ——摩尔体积, m^3/mol
 V_c ——余隙容积, m^3
 w ——比膨胀功, J/kg
 w_i ——混合物组元 i 的质量分数
 w_s ——比轴功, J/kg
 w_t ——比技术功, J/kg
 w_f ——比流动功, J/kg
 w_{net} ——比循环净功, J/kg
 W ——膨胀功, J
 W_s ——轴功, J
 W_t ——技术功, J

W_f ——流动功, J
 W_{net} ——循环净功, J
 x ——干度; 笛卡儿坐标
 x_i ——混合物组元 i 的摩尔分数
 y, z ——笛卡儿坐标
 希腊字母
 α ——抽气量; 体积系数, K^{-1} ; 吸收比
 β ——肋化系数
 γ ——比热容比
 δ ——厚度, m
 ϵ ——压缩比; 制冷系数; 发射率
 ϵ ——供热系数
 η ——效率; 动力粘度, $Pa \cdot s$
 κ ——绝热指数
 θ ——过剩温度, K 或 $^{\circ}C$; 平面角, rad
 λ ——升压比; 波长, m 或 μm ; 热导率, $W/(m \cdot K)$
 π ——增压比
 ν ——运动粘度, m^2/s

ρ ——密度, kg/m^3 ; 预胀比; 反射比
 φ ——相对湿度; 平面角, rad
 φ_i ——混合物组元 i 的体积分数
 Ω ——立体角, sr

特征数

$Bi = \frac{hl}{\lambda}$ ——毕渥数
 $Fo = \frac{a\tau}{l^2}$ ——傅里叶数
 $Gr = \frac{ga\Delta t l^3}{\nu^2}$ ——格拉晓夫数
 $Nu = \frac{hl}{\lambda}$ ——努塞尔数
 $Pr = \frac{\nu}{a}$ ——普朗特数
 $Re = \frac{ul}{\nu}$ ——雷诺数
 $St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{h}{\rho u c_p}$ ——斯坦顿数

绪 论

能源、材料、信息是国民经济发展的三大支柱。能源的开发和合理利用是整个社会可持续发展的源泉。掌握和了解能源的基本知识,不仅对能源动力专业人员,而且对机械、材料、环境建筑、工业企业管理等专业人员也是十分必要的,因为学科的交叉、综合已成为当代能源科学发展的一个基本趋势和特征。

1. 能源及其利用

所谓能源,是指提供能量的物质资源,由自然界提供的能源有风能、水能、太阳能、地热能、燃料的化学能、原子能及海洋能等。能源可以根据来源、形态、性质等进行分类。

(1) 按照来源分,可分为来自地球本身的能量。如地热能和原子能;来自地球以外的太阳能及间接地来自太阳能的风能、水能等;来自地球和其他天体的相互作用而产生的能源,如潮汐能等。

(2) 按照形态分,可分为一次能源和二次能源。如煤炭、石油、天然气、水能、风能、海洋能等属于一次能源,即在自然界以自然形态存在、可以直接开发利用的能源;由一次能源经过加工转换的能源称为二次能源,如电力、煤气、汽油、甲醇等。

(3) 按照实用程度和技术分,可分为常规能源和新能源。常规能源指技术比较成熟、开发时间较长、被广泛利用的能源,如煤炭、石油、天然气等;新能源是指技术尚不成熟、未被大规模利用或在研究开发阶段的能源,如太阳能、地热能、潮汐能和生物质能等。

(4) 按照对环境的污染程度来分,可分为清洁能源和非清洁能源。如太阳能、风能、水能对环境无污染或污染很小,被称为清洁能源;而对环境污染较大的能源被称为非清洁能源,如煤炭、石油、天然气等。

此外,还有其他分类方法和标准。

能源的利用与社会发展密切相关。从古代能源利用的薪柴时期到 18 世纪能源利用的煤炭时期,再到 20 世纪的石油时期,每一次能源结构的变化都促进了工业的迅速发展以及世界经济的发展,能源的利用极大地促进了人类社会的发展。能源的开发和利用水平体现了一个国家国民经济的发展水平。

能源在促进人类社会发展的同时,也在转换和利用中给环境带来了严重污染。如温室效应、酸雨的形成,煤燃烧产生的粉尘、 SO_2 、 NO_x ,臭氧层的破坏,等等。这些污染对人体健康和生产都会造成严重危害和巨大损失,因此我国的能源建设要坚持走可持续发展的道路,合理利用能源,解决能源利用与环境相互协调的难题,即大幅度提高能源利用率和降低污染,并大力开发对环境污染小的新能源。

能量的利用过程实质是能量传递和转换的过程。人类利用的主要能源中,除水能和风能是机械能外,其余都是直接或间接向人类提供热能形式的能量。如太阳能和地热能是直接的热能,燃料的化学能则是通过燃烧将化学能释放变为热能的。可见,热能是人类利用

自然界能源资源的一种最主要的能量形式。目前,以热能形式提供的能量占能源总量的比例相当大,我国在90%以上,因此热能的开发利用对人类社会的发展有着重要意义。热能利用有两种基本方式,直接利用是指直接用热能加热物体,这种利用方式中,热能的能量形式不发生变化,如取暖、烘干等;间接利用是指把热能转换为机械能或通过发电机转换成电能,在热能的间接利用中,热能的能量形式发生了变化。

我国能源资源丰富,但是人均占有量远低于世界平均水平,而目前我国的单位产值的能耗却是发达国家的数倍。我国的热能利用技术和水平与发达国家相比还有很大差距,要使我国国民经济走可持续发展的道路,合理用能与节约能源是当务之急。为了更加有效、更加经济地利用热能,促进国民经济的发展,需要掌握有关能量转换规律和热量传递基本规律方面的知识,提高热能利用水平。

2. 热工基础研究对象、内容和方法

热工基础是研究热能利用的基本原理和规律,以提高热能利用经济性为主要目的的一门学科,由工程热力学和传热学两部分组成。热能间接利用所涉及的热能和机械能的转换属工程热力学范畴;热能直接利用所涉及的研究热量传递规律的学科属传热学范畴。

工程热力学研究对象主要是能量转换,特别是热能转换成机械能的规律和方法,以及提高转换效率的途径。主要包括:研究能量转换的客观规律,即热力学第一定律与热力学第二定律,这是工程热力学的理论基础;研究工质的热力性质和热力过程;应用热力学基本定律研究各种热工设备的工作过程,提出提高能量利用经济性的途径和措施,这是研究热能和机械能转换的一个重要目的;研究热工设备涉及的化学和物理问题。

热力学的研究方法有两种:宏观研究方法和微观研究方法。宏观研究方法是以热力学第一定律和热力学第二定律等基本定律为基础,针对具体问题采用抽象、概括、理想化简化处理的方法,抽出共性,突出本质,建立合适的物理模型,通过推理得出可靠和普遍适用的公式,解决热力过程中的能量转换问题。宏观研究方法有它的局限性,由于不涉及物质的微观结构,因而不能说明热现象的本质及其内在原因。微观研究方法是从物质的微观结构出发,研究热现象的规律的方法。在对物质的微观结构及微粒运动规律作某些假设的基础上,应用统计学方法,将宏观物理量解释为微观量的统计平均值,从而解释热现象的本质。由于存在某些假设,所得理论结果往往不够精确。工程热力学主要采用宏观研究方法。

传热学研究由温差引起的热能传递规律。凡是有温差存在的地方就有热量自发地从高温物体向低温物体传递的现象。自然界和各种生产技术领域处处存在温差,因此热量的传递是生活和生产中一种非常普遍的现象。

传热学的研究方法主要有理论分析、数值模拟和实验研究。理论分析法是依据基本定律对热传递现象进行分析,建立合理的物理模型和数学模型,用数学分析方法进行求解;对于难以用理论分析法求解的问题,可采用数值计算和计算机进行求解;对于复杂的传热问题无法用上述两种方法求解时,必须采用实验研究法。实验研究法是传热学最基本的研究方法。

热工基础以能量利用和转换规律、热量传递规律为主线,系统阐述能量利用和转换过

第1章 基本概念

教学提示：工程热力学中的基本概念是研究工程热力学的基础。对于这些基本概念，一开始就必须予以重视，正确理解它们的含义，这样才能在后续的学习中学会利用它们分析和解决问题。

教学要求：掌握热能转换研究所涉及的基本概念和术语，其重点是掌握状态参数的特征、分类和基本状态参数；掌握热量和功量的特征；掌握可逆过程的体积变化功和热量的计算及其在状态参数坐标图上的表示。

1.1 热 力 系

工程热力学研究热能和机械能的转换，能实现这一转换的机器统称为热力发动机，简称热机，如内燃机、蒸汽轮机装置等。实现热能和机械能转换的媒介物质称为工质，如燃气、水蒸汽等。

分析研究任何现象，首先应明确研究对象。工程热力学中，为了研究问题的需要，以人为划定的一个或多个任意几何面所围成的空间作为研究对象，这种空间内物质的总和称为热力系统，简称热力系或系统。热力系以外的物质称为外界，热力系与外界的交界称为边界。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。如图 1.1 所示是气缸活塞机构，若取气缸中的气体为热力系，则气体和气缸壁间构成的边界是真实的，气体和活塞内表面构成的边界为移动的。如图 1.2 所示的汽轮机，若取汽轮机中的蒸汽为热力系，蒸汽和汽轮机之间即为实际边界，而进、出口处则为假想的边界。

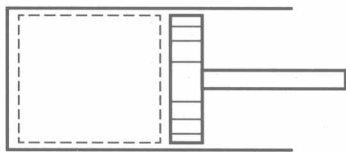


图 1.1 闭口系统示意图

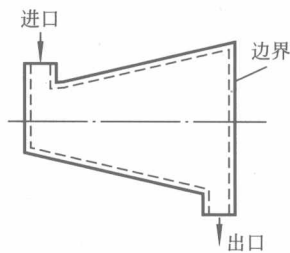


图 1.2 开口系统示意图

根据热力系统与外界之间的能量和物质交换情况，热力系统可分为各种不同的类型。

(1) 闭口系统：系统与外界无物质交换，如图 1.1 所示。当工质进出气缸的阀门关闭时，气缸内的工质就是闭口系统。由于系统的质量始终保持恒定，所以也常称闭口系统为控制质量。

(2) 开口系统：系统与外界有物质交换，如图 1.2 所示。运行中的汽轮机就可视为开口系统，在运行过程中，有蒸汽不断地流进流出。由于开口系统是一个划定的空间范围，所以开口系统又称控制容积。

(3) 绝热系统：系统与外界无热量交换。

(4) 孤立系统：系统与外界既无能量(功、热量)交换又无物质交换。

(5) 简单可压缩系：热力系由可压缩流体构成，与外界只有可逆体积变化功的交换。工程热力学讨论的大部分系统都是简单可压缩系。

此外，也可按系统内部状况的不同，将系统分为均匀系、非均匀系，单元系、多元系等。

严格地讲，自然界中不存在完全绝热或孤立的系统，工程上的绝热或孤立系统是抓住事物的本质，突出主要因素而得到的接近于绝热或孤立的宏观假定。

1.2 状态及状态参数

热能在热机中转换成机械能的过程中，工质的物理特性随时在变化，或者说，工质的宏观物理状态随时在变化。工质在热力变化过程中的某一瞬间所呈现的宏观物理状态称为热力学状态。用于描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数，如温度、压力等。状态参数具有点函数的性质，它的值取决于给定的状态，与变化过程中所经历的中间态或路径无关，状态参数的这一特性表现在数学上是沿闭合路线的积分等于零。

1.2.1 平衡状态

一个热力系在不受外界影响的条件下(重力场除外)，系统的状态参数不随时间而变化的状态称为平衡状态。实现平衡状态必须同时具备了热的平衡和力的平衡，即组成热力系统的各个部分之间没有热量的传递，也没有相对位移。如果系统内存在化学反应，还要包括化学平衡。可见，只有在系统内或系统与外界之间一切不平衡的作用都不存在时，系统的一切宏观变化方可停止，此时热力系统所处的状态才是平衡状态。

1.2.2 基本状态参数

工程热力学中常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓、熵等，其中压力、温度、比体积可以直接用仪器测量，使用最多，称为基本状态参数。

1. 压力

单位面积上所受的垂直作用力称为压力(即压强)，用符号 p 表示，即

$$p = \frac{F}{A}$$

式中， F 为垂直作用于面积 A 上的力。分子运动学说把气体的压力看做是大量气体分子撞击器壁的平均效果。

1) 绝对压力、表压力和真空度
工质的真实压力称为绝对压力，用 p 表示，一般用如图 1.3(a)、图 1.3(b)所示的测

量微小压力的 U 形管压力计或如图 1.3(c) 所示的弹簧管式压力计测量。压力计本身处于某种环境压力下(通常是大气环境), 因此压力计所测得的压力是工质的真实压力(或绝对压力)与环境介质压力之差, 称为表压力, 用 p_e 表示; 或真空度, 用 p_v 表示。

当绝对压力高于环境压力 p_b 时, 则

$$p = p_b + p_e \quad (1-1)$$

当绝对压力低于环境压力 p_b 时, 则

$$p = p_b - p_v \quad (1-2)$$

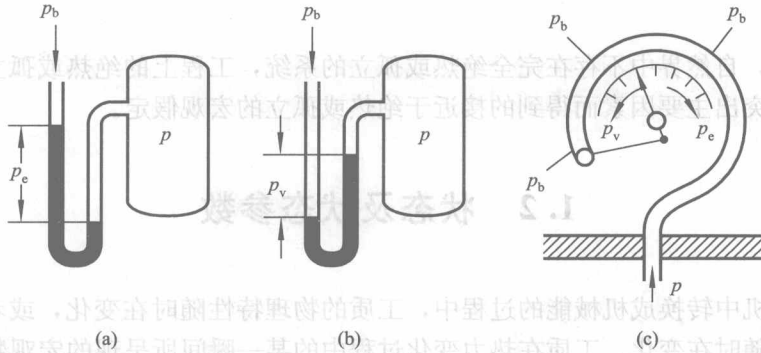


图 1.3 压力测量示意图

环境压力随测量时间、地点变化而不同, 可用压力计测定。即使绝对压力不变, 表压力和真空度也会因环境压力变化而变化。因此, 作为工质状态参数的压力是绝对压力。工程计算中, 如果被测工质的绝对压力远高于环境压力, 可将环境压力视为常数, 如大气压力可近似地取为 0.1MPa; 若被测工质的绝对压力较低, 就必须按当时当地环境压力的具体数值计算。

2) 压力单位

在国际单位制中, 压力的单位为 Pa(帕), $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上, 因 Pa 的单位太小, 常用 kPa(千帕)和 MPa(兆帕)作为压力的单位, 并有

$$1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$$

工程上用到的其他单位制的压力单位有 bar(巴)、mmHg(毫米汞柱)、mmH₂O(毫米水柱)、atm(标准大气压)、at(工程大气压)等, 它们与帕之间的换算关系为
 $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$, $1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa}$, $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.8\text{Pa}$, $1\text{atm} = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$, $1\text{at} = 0.98 \times 10^5\text{Pa}$

2. 温度

温度是物体冷热程度的标志。从微观上看, 温度标志物质分子热运动的激烈程度。关于温度概念的建立以及温度的测量是以热力学第零定律(或称热平衡定律)为依据的。热力学第零定律表述为: 如果两个物体中的每一个都分别与第三个物体处于热平衡, 则这两个物体彼此也处于热平衡。其中第三个物体可用做温度计, 即当温度计与被测的物体达到热平衡时, 温度计所指示的温度就是被测物体的温度。

进行温度测量需要有温度的数值表示方法, 即需要建立温度的标尺或温标。国际单位制采用热力学温标作为基本温标, 用这种温标确定的温度称为热力学温度, 用符号 T 表