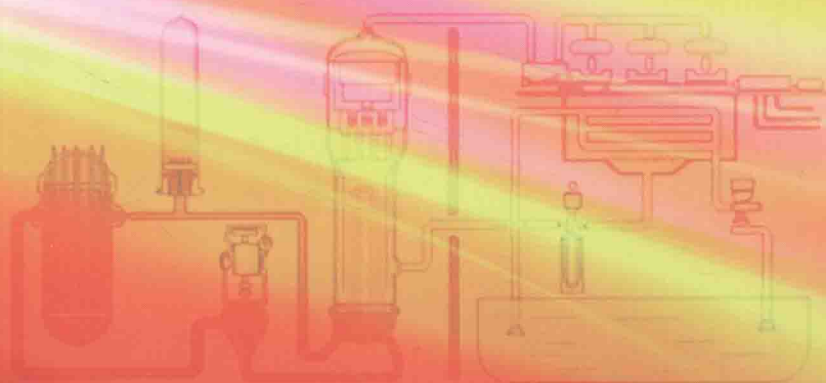


普通高等教育“十二五”规划教材

工程热力学

GONGCHENG RELIXUE

周 艳 苗展丽 李 晶 编著
李庆领 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工程热力学

GONGCHENG RELIXUE

周 艳 苗展丽 李 晶 编著
李庆领 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容主要分为基本概念、基本定律、工质性质、热力过程及循环四个方面。注重对基本理论的阐述,注意适当反映科学技术的新进展,注重理论联系实际,力求将学科所涉及的理论知识简单明了、深入浅出地展开,达到易学易懂的目的。各章附有大量例题、思考题及习题,内容从易到难,注重与实际生产生活相联系。书后附有习题参考答案及必要的热工图表及相关工质的热力性质表。全书采用我国法定计量单位。

本书可作为普通高等学校能源动力类、机械类、油气储运类、土建类等各专业工程热力学课程的教材,亦可供相关领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学 / 周艳, 苗展丽, 李晶编著. —北京:
化学工业出版社, 2014. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-20951-1

I. ①工… II. ①周… ②苗… ③李… 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 (2014) 第 128341 号

责任编辑: 刘俊之 王清颖
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 颜克俭
装帧设计: 韩 飞

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 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 383 千字 2014 年 10 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: 29.80 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

能源作为人类社会生产与生活中不可缺少的动力，其开发利用亦不是亘古至今一成不变的，随着社会生产力的不断发展，人类对能源的利用深度和广度在不断发展和扩大。能源的开发利用一方面为人类社会的发展提供了必需的能量，另一方面也造成了对自然环境的破坏和污染，能源问题成为世界性的危机和挑战。

能源可呈多种形式，而在所有的能源形式中，热能是最易得且使用最方便的形式之一。

热能的利用通常有两种基本形式：一种是直接利用，如在冶金、化工等工业上和生活上的应用；另一种是间接利用，将热能转化为机械能或电能，为人类社会的各方面提供动力。

热力学就是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是热力学的工程分支，它从工程应用的角度研究热能和机械能之间相互转换的规律，并以提高能量的有效利用率为目的。掌握工程热力学的基本原理，必将为能源、动力、机械、航空航天、化工、生物工程及环境工程等领域内的深入研究打下坚实的基础。

热力学所涉及的领域很多，包括动力的产生——发动机、电厂等；也涉及一些驱动系统，如航行器、火箭等；同时也对可再生能源的利用，如燃料电池、太阳能加热系统、地热系统、风能、海洋能等中的能量转换过程进行研究；并且涉及流体压缩和运动如风机、泵、压缩机等，以及供热通风与空调工程如制冷系统、热泵等；热力学也在低温工程，如气体分离及液化和生物医学应用等方面展现出其生命力。

工程热力学课程主要包括以下四个方面的内容。

（1）概念及定义

例如热力系统、状态参数及过程量、准静态过程及可逆过程、热机等。

（2）常用工质的物性及关系式

例如理想气体及实际气体的性质、状态参数之间的关系及相关定律，水蒸气的相关性质及其物性参数表等。

（3）热力学基本定律

主要包括热力学第一定律及第二定律。

（4）过程与循环

例如准静态（准平衡）过程、可逆过程等的特征，过程中基本状态参数之间的关系，过程与外界进行的能量交换等。热力循环、包括卡诺循环、奥托循环、狄塞尔循环、布雷顿循环等，循环过程及其循环热效率，影响循环的主要因素等。

本书对上述内容由浅入深，从基本理论到实践应用进行了介绍和分析。主要由周艳、苗展丽、李晶编写，张晓光、贺彦进行了部分内容的编写，宫园园、辛旋、范夕燕、王莉、范静雯对本书的编写提供了很多素材，并协助完成了本书的录入及校验工作。全书由李庆领教授主审。

本书在编写过程中，由于作者水平和掌握的材料所限，难免有不足和欠妥之处，恳请广大读者给予批评指正。

编者

2014年6月

目录

CONTENTS

0 绪论 1

- 0.1 人类热能利用简史 1
- 0.2 热力学发展简史 2
- 0.3 热力学及涉及领域 4
- 0.4 工程热力学的主要研究内容及方法 4

1 基本概念 6

- 1.1 热能在热机中转变成机械能的过程 6
 - 1.1.1 热能动力装置 6
 - 1.1.2 内燃机主要部件及工作过程 6
 - 1.1.3 蒸汽动力装置的主要部件及工作原理 7
 - 1.1.4 两种热机的异同 7
 - 1.1.5 制冷装置和热泵装置 8
- 1.2 热力系统 8
 - 1.2.1 热力系统、外界、边界 8
 - 1.2.2 热力系统的分类 9
- 1.3 工质的热力学状态及其基本状态参数 9
 - 1.3.1 状态及状态参数 9
 - 1.3.2 温度 10
 - 1.3.3 压力 11
 - 1.3.4 比体积及密度 13
- 1.4 平衡状态、状态方程式、坐标图 13
 - 1.4.1 平衡状态 13
 - 1.4.2 状态方程 14
 - 1.4.3 状态参数坐标图 14
- 1.5 工质的状态变化过程 15
 - 1.5.1 准平衡过程 15
 - 1.5.2 可逆过程和不可逆过程 15
- 1.6 过程功和热量 16
 - 1.6.1 过程功 16

- 1.6.2 可逆过程的功 16
- 1.6.3 有用功 17
- 1.6.4 过程热量 18
- 1.7 热力循环 19
 - 1.7.1 热力循环 19
 - 1.7.2 正向循环 19
 - 1.7.3 逆向循环 20

2 理想气体的性质 24

- 2.1 理想气体的概念 24
- 2.2 理想气体状态方程式 24
 - 2.2.1 理想气体的状态方程 24
 - 2.2.2 摩尔气体常数 25
- 2.3 理想气体的比热容 27
 - 2.3.1 比热容的定义 27
 - 2.3.2 定压热容和定容热容的关系 27
 - 2.3.3 比热容的计算方法 27
- 2.4 理想气体的热力学能、焓和熵 31
 - 2.4.1 热力学能和焓 31
 - 2.4.2 状态参数熵 S 31
- 2.5 理想气体混合物 34
 - 2.5.1 理想气体混合的基本定律 34
 - 2.5.2 混合气体的成分 35
 - 2.5.3 混合理想气体的比热容、热力学能和焓 36

3 热力学第一定律 41

- 3.1 热力学第一定律的实质 41
- 3.2 热力学能和总能 41
 - 3.2.1 热力学能 41
 - 3.2.2 外部储存能 42
 - 3.2.3 总能 42

3.3	热力学第一定律的基本能量方程式	43
3.3.1	热力学第一定律的普遍表达式	43
3.3.2	闭口系统的能量方程式	43
3.4	开口系统的能量方程式	46
3.4.1	推动功和流动功	46
3.4.2	焓	46
3.4.3	开口系统能量方程	47
3.5	稳定流动能量方程	48
3.5.1	稳定流动的定义	48
3.5.2	稳定流动的能量方程	48
3.5.3	稳定流动能量方程分析	48

4 理想气体的热力过程 56

4.1	研究热力过程的目的及一般方法	56
4.1.1	研究热力过程的目的	56
4.1.2	热力过程研究的内容及方法	57
4.1.3	分析理想气体热力过程的一般步骤	57
4.2	基本热力过程	57
4.2.1	定容过程	58
4.2.2	定压过程	59
4.2.3	定温过程	60
4.2.4	绝热过程	62
4.3	多变过程	64
4.3.1	多变过程的过程方程	64
4.3.2	多变过程中状态参数的变化	65
4.3.3	多变过程的能量分析	65
4.3.4	多变过程的特征及图示	66
4.3.5	过程综合分析	67

5 热力学第二定律 72

5.1	热力学第二定律	72
5.1.1	自发过程的方向性	72
5.1.2	热力学第二定律的表述	73
5.2	可逆循环分析及其热效率	74
5.2.1	卡诺循环	74

5.2.2	正向卡诺循环	74
5.2.3	逆向卡诺循环	75
5.2.4	概括性卡诺循环	75
5.2.5	多热源的不可逆循环	76
5.3	卡诺定理	76
5.3.1	卡诺定理的表述	76
5.3.2	卡诺定理的综合分析	76
5.4	热力学第二定律的数学表达式	79
5.4.1	克劳修斯不等式	79
5.4.2	熵及热力过程的热力学第二定律数学表达式	80
5.4.3	相对熵及熵变量计算	82
5.5	孤立系统熵增原理	84
5.5.1	孤立系统的熵增原理	84
5.5.2	熵增原理的实质	86
5.6	熵方程	88
5.6.1	闭口系的熵方程	89
5.6.2	开口系统的熵方程	89
5.6.3	稳定流动系统	89

6 实际气体的性质及热力学一般关系式 94

6.1	理想气体状态方程用于实际气体的偏差	94
6.2	范德瓦耳方程和 R-K 方程	95
6.2.1	范德瓦耳方程	95
6.2.2	R-K 方程及其他方程	96
6.3	对应态原理与通用压缩因子图	97
6.3.1	对应态原理	97
6.3.2	通用压缩因子图	98
6.4	维里方程	99
6.5	热力学能、焓和熵的一般关系式	100
6.5.1	熵的一般关系式	100
6.5.2	热力学能的一般关系式	100
6.5.3	焓的一般关系式	100
6.6	比热容的一般关系式	101
6.6.1	比热容的表达式及作用	101
6.6.2	比定压热容 c_p 及定容热容 c_v 的关系	101
6.6.3	比定压热容 c_p 和比定容热容 c_v 的比	102

[7] 水蒸气和湿空气 103

- 7.1 饱和温度和饱和压力 103
 - 7.1.1 汽化和凝结 103
 - 7.1.2 饱和状态 103
 - 7.1.3 临界点 104
 - 7.1.4 三相点 104
- 7.2 水的定压加热汽化过程 104
- 7.3 水和水蒸气的状态参数 105
 - 7.3.1 零点的规定 105
 - 7.3.2 当压力为 p 时水和水蒸气的参数 106
- 7.4 水蒸气表和图 107
 - 7.4.1 水蒸气表 107
 - 7.4.2 $T-s$ 图 109
 - 7.4.3 $h-s$ 图 110
- 7.5 水蒸气的基本过程 110
- 7.6 湿空气 112
 - 7.6.1 湿空气的概念 112
 - 7.6.2 湿空气的状态参数 112
- 7.7 湿空气的焓湿 ($h-d$) 图及其应用 115
- 7.8 湿空气的基本过程及其应用 117
 - 7.8.1 加热或冷却过程 117
 - 7.8.2 绝热加湿过程 117
 - 7.8.3 冷却去湿过程 118

[8] 气体和蒸汽的流动 121

- 8.1 绝热稳定流动的基本方程式 121
 - 8.1.1 稳定流动 121
 - 8.1.2 稳定流动中的基本方程式 121
- 8.2 促使流速改变的条件 124
 - 8.2.1 力学条件 124
 - 8.2.2 几何条件 124
- 8.3 喷管的计算 125
 - 8.3.1 流速的计算 125
 - 8.3.2 临界流速及临界压力比 126
 - 8.3.3 流量的计算 127
 - 8.3.4 喷管形状的选择与

尺寸计算 127

- 8.4 有摩擦的绝热流动 131
- 8.5 绝热节流 131

[9] 压气机的热力过程 136

- 9.1 单级活塞式压气机的工作原理和理论耗功量 136
 - 9.1.1 活塞式压气机的工作原理 136
 - 9.1.2 压气机的理论耗功 137
- 9.2 余隙容积的影响 137
 - 9.2.1 余隙容积对生产量的影响 138
 - 9.2.2 余隙容积对理论耗功的影响 138
- 9.3 多级压缩和级间冷却 138
- 9.4 叶轮式压气机的工作原理 144
 - 9.4.1 工作原理 144
 - 9.4.2 叶轮式压气机的热力学分析 145

[10] 动力循环 149

- 10.1 分析动力循环的一般方法 149
- 10.2 活塞式内燃机的实际循环 150
 - 10.2.1 活塞式内燃机实际循环的简化 150
 - 10.2.2 活塞式内燃机的理想循环 152
 - 10.2.3 活塞式内燃机各种理想循环的热力学比较 155
- 10.3 燃气轮机装置的循环 157
 - 10.3.1 燃气轮机装置简介 157
 - 10.3.2 燃气轮机装置定压加热理想循环——布雷顿循环 158
 - 10.3.3 燃气轮机装置的定压加热实际循环 160
 - 10.3.4 提高燃气轮机热效率的其他措施 161
- 10.4 朗肯循环 163

10.4.1	工质为水蒸气的 卡诺循环	163
10.4.2	朗肯 (Rankine) 循环	164
10.4.3	有摩阻的实际循环	166
10.4.4	蒸汽参数对循环 的影响	167
10.4.5	提高蒸汽动力循环效率的 其他措施	168

11 其他新型动力循环 174

11.1	燃气-蒸汽联合循环	174
11.1.1	余热锅炉型联合循环	175
11.1.2	排气补燃型联合循环	175
11.1.3	加热锅炉给水型 联合循环	176
11.1.4	增压燃烧锅炉型 联合循环	176
11.1.5	注蒸汽燃气循环 (陈式循环)	177
11.2	卡林纳循环	177
11.3	湿空气透平循环	178
11.4	整体煤气化联合循环	180
11.5	磁流体发电联合循环	183

12 制冷循环 185

12.1	概况	185
12.2	空气压缩制冷循环	186
12.3	蒸汽压缩制冷循环	188
12.4	制冷剂	190
12.4.1	对制冷剂的热 力学要求	190
12.4.2	环境保护对制冷剂提出 的新要求	190
12.5	吸收式制冷循环	191
12.6	热泵	192

附录	194
附录 1 饱和水和饱和蒸汽的热力性质 (按温度排列)	194

附录 2 饱和水和饱和蒸汽的热力性质 (按压力排列)	195
附录 3 水和过热蒸汽的热力性质	197
附录 4 一些常用气体的摩尔质量和临界 参数	202
附录 5 理想气体的平均比定压热容	203
附录 6 低压时一些常用气体的比热容 ..	204
附录 7 一些气体在理想气体状态的比 定压热容	205
附录 8 一些常用气体 25℃、100kPa 时的比热容	206
附录 9 气体的平均比定压热容的直线 关系式	207
附录 10 空气的热力性质	207
附录 11 气体的热力性质	209
附录 12 氨 (NH ₃) 饱和液和饱和蒸汽的 热力性质	210
附录 13 过热氨 (NH ₃) 蒸汽的热力 性质	211
附录 14 氟利昂 134a 的饱和性质 (温度 基准)	213
附录 15 氟利昂 134a 的饱和性质 (压力 基准)	214
附录 16 过热氟利昂 134a 蒸汽的热力 性质	215
附录 17 0.1MPa 时饱和空气的状态 参数	217
附录 18 一些物质在 25℃ 时的燃烧焓 ..	218
附录 19 一些物质的标准生成焓、标准 吉布斯函数和 25℃、100KPa 时的绝对熵	218
附录 20 一些反应的平衡常数 K_p 的对数 (lg) 值	219
附录 21 水蒸气焓-熵 $h-s$ 图	220
附录 22 湿空气的焓湿图	221
附录 23 氨的压焓图	221
附录 24 R12 的压焓图	222
附录 25 R134a 的压焓图	222

参考文献	223
------------	-----

[0] 绪论

0.1 人类热能利用简史

能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源，可呈多种形式。在所有的能源形式中，热能是最易得且使用最方便的形式之一。亘古至今，能源作为人类社会生产与生活中不可缺少的动力，其开发利用亦不是一成不变的，随着社会生产力的不断发展，人类对能源的利用深度和广度在不断发展和扩大。

在人类发展史上，从原始社会到当今瞬息万变的高科技时代，人类已经历了4个利用能源的阶段：柴草时期、煤炭时期、石油时期和多元化新能源时期。

(1) 柴草时期

从原始社会直到18世纪漫长的历史年代，草木作为取火燃料一直是最主要的能源。虽然当时已有畜力、风力、水力等“新能源”的发现和利用，但规模很小。这一时期，人类开始并逐步熟练掌握人工取火技术。火的使用增加了人类的食物来源，扩大了人类的活动范围，在制造铁器、陶器等生产和生活用品方面起了重大作用，促进了人类社会的发展。人们把这个漫长的能源发展的历史阶段称为柴草时期或木柴时期。这个阶段人类可利用的能源种类贫乏，所用能源的方法也是落后的，生产力发展水平亦很低。

(2) 煤炭时期

随着生产的发展、人口的增长，人们开始努力去发现和寻找新的能源。经过漫长的找寻，人们终于发现了一种能燃烧的矿石——煤，并开始把它用作能源。

16世纪末到17世纪后期，英国的采矿业，特别是煤矿，已发展到相当规模，随之也产生了大量以煤为原料动力的机械设备，如英国的萨弗里、纽科门等，致力于“以火力提水”的探索和试验。萨弗里制成世界上第一台实用的蒸汽提水机，在1698年取得名为“矿工之友”的英国专利。纽科门及其助手卡利在1705年发明了大气式蒸汽机，用以驱动独立的提水泵，被称为纽科门大气式蒸汽机。1765年，瓦特发明了带冷凝器的单向式蒸汽机，1782年他又发明双向式蒸汽机（图0-1）。

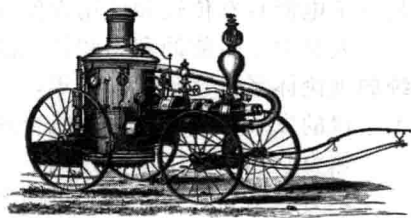


图0-1 瓦特发明的蒸汽机

1785年，蒸汽机开始被用于毛纺业，1789年被应用于毛织业。得益于蒸汽机的使用，1766~1789年，英国的纺织品产量在20多年内增长了5倍。第一次工业革命始于英国的机械创

新,而蒸汽机的改良和广泛使用,则将工业革命推向了一个高峰,也带动了煤炭开采和利用的爆发式增长。

1861年,煤炭在世界一次能源消费结构中只占24%,1920年则上升为62%,此后,世界能源进入了“煤炭时代”。20世纪30年代以后,随着发电机、汽轮机制造技术的完善,输变电技术的改进,特别是电力系统的出现以及社会电气化对电能的需求,火力发电进入大发展时期。煤炭在世界能源中的主导地位一直保持到20世纪60年代。

(3) 石油时期

如果说钢铁是近代工业经济的筋骨,那么石油就是近代工业经济的血液。随着科技、经济的发展,石油在一次能源结构中的比例开始不断增加,并于20世纪60年代超过煤炭。人类正式进入石油时代是在1967年,这一年石油在一次能源消费结构中的比例达到40.4%,而煤炭所占比例下降到38.8%。第一次世界大战以前,石油主要被用于照明,在第一次世界大战中,由于石油燃烧效能高、轻便,对于军队战斗力的提高具有重大战略意义。20世纪20年代,由于石油成为内燃机的动力,石油需求和贸易迅速扩大。但是化石能源带来的环境问题越来越严重,人类不得不去寻找更清洁的新能源。

(4) 多元化新能源时期

随着社会突飞猛进的发展,能源需求量也成倍增加。世界上的常规能源——煤、油、气资源告急并逐渐枯竭。能源的开发利用一方面为人类社会的发展提供了必需的能量,另一方面也造成了对自然环境的破坏和污染,能源问题成为世界性的危机和挑战。人类开始深入地研究能源问题和能源开发,以实现第三次能源变革——即以石油为主要能源逐步向多元化能源结构过渡,开始了对核能、太阳能、海洋能、生物质能等的开发与利用。并从社会、经济、环境等多角度全方位研究开发,增强能源的可持续性,这一变革在相当多的国家和地区已取得了进展和成功。能源开发的这一时期还刚刚起步,将持续较长的时期,今后也将有更多的新能源被人类所认识、开发和利用。

0.2 热力学发展简史

热现象是人类最早接触的自然现象之一,热能是人类最早利用的能源形式。热能的利用通常有两种基本形式:一种是直接利用,如在冶金、化工等工业上和生活上的应用;另一种是间接利用,如将热能转化为机械能或电能,为人类社会的各方面提供动力。

直接用热能加热物体,为生产工艺和生活服务固然重要,然而,间接使用热能,使之转换为机械能或者电能,以机械能或者电能的形式向人类提供动力或电,意义更为重要。特别是由于电能具有传输和使用方便等许多优点,所以一般常将热能转换为电能的形式使用。

人类对于热能的利用和认识经历了漫长的岁月,但是当时人们对热现象的认识未形成系统的理论体系,直到近300年,人类对于热的认识才逐步形成了一门学科,特别是热力学四大定律的发现,为人类对热能合理科学利用提供了理论基础。

热力学的四大定律简述如下。

热力学第零定律——如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡(温度相同),则它们彼此也必定处于热平衡。

热力学第一定律——能量守恒与转换定律在热现象中的应用。

热力学第二定律——说明了热能向高级能转换过程是有条件、有方向,有限度的。

热力学第三定律——绝对零度不可能达到,但可以无限趋近。

法国物理学家卡诺(Nicolas Leonard Sadi Carnot, 1796~1832)从理论的高度上对热

机的工作原理进行研究,1824年他在其名著《谈谈火的动力和能发动这种动力的机器》中指出了热机中最本质的东西:热机必须工作于两个热源之间,才能将高温热源的热量不断地转化为有用的机械功,明确了“热的动力与用来实现动力的介质无关,动力的量仅由最终影响热量传递的物体之间的温度来确定”。卡诺运用理想模型的研究方法,构思卡诺可逆热机(卡诺热机),指明了循环工作热机的效率有一极限值,而按可逆卡诺循环工作的热机所产生的效率最高,提出了作为热力学重要理论基础的卡诺循环和卡诺定理,从理论上解决了提高热机效率的根本途径。但由于受到热质说的束缚,使他当时未能完全探究到问题的根源。

德国物理学家、医生迈耶(Julius Robert Mayer, 1814~1878)在其论文《论力的量和质的测定》及《论无机性质的力》中,表述了物理、化学过程中各种力(能)的转化和守恒的思想。迈耶是历史上第一个提出能量守恒定律并计算出热功当量的人。但1842年发表的这篇科学杰作当时未受到足够重视。

1843年英国杰出的物理学家焦耳(James Prescott Joule, 1818~1889)在其论文《论磁电的热效应及热的机械值》中,强调自然界的能是等量转换、不会消灭,哪里消耗了机械能或电磁能,总在某些地方能得到相当的热。焦耳先后用不同的方法做了400多次实验,得出结论:热功当量是一个普适量,与做功方式无关,为能量守恒与转换定律提供了无可置疑的证据。

1847年,德国物理学家亥姆霍兹(Hermann von Helmholtz, 1821~1894)从理论上把力学中的能量守恒原理推广到热、光、电、磁、化学反应等过程,揭示其运动形式之间的统一性,它们不仅可以相互转化,而且在量上还有一种确定的关系。能量守恒与转化使物理学达到空前的综合与统一。将能量守恒定律应用到热力学上,就是热力学第一定律。

热力学第二定律是在能量守恒定律建立之后,在探讨热力学的宏观过程中得出的一个重要的结论。

1850年,德国物理学家克劳修斯(Rudolph Julius Emmanuel Clausius, 1822~1888)从热量传递的方向性角度提出了热力学第二定律的表述:热量不可能自发地、不花任何代价地从低温物体传向高温物体,他还首先提出了熵的概念。1851年,英国物理学家开尔文(Lord Kelvin, 1824~1907)从热功转换的角度提出了热力学第二定律的另一种说法:不可能从单一热源取热,使之完全变为有用功而不产生其他影响;或不可能用无生命的机器把物质的任何部分冷至比周围最低温度还低,从而获得机械功。

1877年,奥地利物理学家玻尔兹曼(Ludwig Edward Boltzmann, 1844~1906)发现了宏观的熵与体系的热力学概率的关系。1906年,德国物理化学家能斯特(Walther Hermann Nernst, 1864~1941)根据对低温现象的研究,得出了热力学第三定律,人们称为“能斯特热定理”,有效地解决了计算平衡常数问题和许多工业生产难题。

德国物理学家普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858~1947)利用统计理论指出:各种物质的完美晶体在绝对零度时熵为零。1911年普朗克提出了对热力学第三定律的表述,即“与任何等温可逆过程相联系的熵变,随着温度的趋近于零而趋近于零”。

通常将热力学第一定律及第二定律作为热力学的基本定律,但有时增加能斯特定理当作第三定律,又有时将温度存在定律当做第零定律。

纵观热力学的发展简史,热力学理论促进了热动力机的不断改进和发展,而人类生产实践又不断为热力学的前进提供新的驱动力。近代科学技术的发展向热力学提出了新的课题,如等离子发电、燃料电池等能量转换新技术,环保型制冷工质研究,以及物质在超高温、超高压和超低温、超低真空等极端条件下的性质与规律等。古老的热力学不仅在传统领域继续保持着青春活力,而且也必将在解决高新技术领域的新课题中扮演十分重要的角色。

0.3 热力学及涉及领域

热力学就是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是热力学的工程分支,它从工程应用的角度研究热能和机械能之间相互转换的规律,并以提高能量的有效利用率为目的的学科。掌握工程热力学的基本原理,必将为能源、动力、机械、航空航天、化工、生物工程及环境工程等领域内的深入研究打下坚实的基础。

热力学所涉及的领域很多,包括动力的产生——发动机、电厂等;也涉及一些驱动系统,如航行器、火箭等;同时也对可再生能源的利用,如燃料电池、太阳能加热系统、地热系统、风能、海洋能等中的能量转换过程进行研究;并且涉及流体压缩和运动如风机、泵、压缩机等,以及供热通风与空调工程如制冷系统、热泵等;热力学也在低温工程,如气体分离及液化和生物医学应用等方面展现出其生命力。

0.4 工程热力学的主要研究内容及方法

(1) 工程热力学的主要研究内容

工程热力学课程主要包括了以下几个方面的内容,它们主要是以下几方面。

① 概念及定义 例如热力系统,状态参数及过程量,准静态过程及可逆过程、热机等。

② 常用工质的物性及关系式 例如理想气体及实际气体的性质、状态参数之间的关系及相关定律,水蒸气的相关性质及其物性参数表等。

③ 热力学第一定律和热力学第二定律 主要包括热力学第一定律及第二定律的实质及其作用。

④ 过程与循环 例如准静态(准平衡)过程、可逆过程等的特征,过程中基本状态参数之间的关系,过程与外界进行的能量交换等。热力循环,包括卡诺循环、奥托循环、狄塞尔循环、布雷顿循环等,分析循环过程及循环热效率,影响循环的主要因素等。

(2) 工程热力学的研究方法

工程热力学的研究方法主要有宏观方法,即经典热力学方法(macroscopic point of view——classical thermo)及微观方法,即统计热力学方法(microscopic point of view——statistical thermo)。

宏观研究方法是工程热力学主要应用的方法,该方法的特点是以热力学第一定律、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、理想化和简化的方法,抽出共性,突出本质,建立分析模型,推导出一系列有用的公式,得到若干重要结论。由于热力学基本定律的可靠性以及它们的普适性,所以应用热力学宏观研究方法可以得到可靠的结果。但是,由于它不考虑物质分子和原子的微观结构,也不考虑微粒的运动规律,所以由之建立的热力学宏观理论并不能说明热现象的本质及其内在的原因。

应用微观研究方法的热力学被称为微观热力学,也称为统计热力学。气体分子运动学说和统计力学认为,大量气体分子的杂乱运动服从统计法则和概率法则,应用统计法则和概率法则的研究方法就是微观的研究方法。由于它从物质是由大量分子和原子等粒子所组成的事实出发,将宏观性质作为在一定宏观条件下大量分子和原子的相应微观量的统计平均值,利用量子力学和统计方法,将大量粒子在一定宏观条件下一切可能的微观运动状态予以统计平均,来阐明物质的宏观特性,导出热力学基本规律,因而能阐明热现象的本质,解释“涨

落”现象。由于统计热力学对分子微观结构的假设是近似的，尽管运用了复杂的数学运算，但所求得的结果往往不够精确。

工程热力学主要应用热力学的宏观方法，但有时也引用气体分子运动理论和统计热力学的基本观点及研究成果。随着近代计算机技术的发展，计算机越来越多地介入工程热力学的研究中，成为一种强有力的工具。

学好工程热力学，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、方法以及怎样提高转化效率和热能利用的经济性；其次是在深刻理解基本概念的基础上运用抽象简化的方法抽出各种具体问题的本质，应用热力学基本定理和基本方法进行分析研究；再次是必须是重视习题、实验等环节，培养抽象和分析问题的能力。

[1]

基本概念

1.1 热能在热机中转变成机械能的过程

1.1.1 热能动力装置

从燃料中得到热能，以及利用热能得到动力的整套装置（包括辅助设备），统称热能动力装置。根据所用工质的不同，热能动力装置又可分为燃气动力装置和蒸汽动力装置两大类。燃气动力装置中的典型系统有内燃机、燃气轮机等。蒸汽动力装置的典型系统包括凝汽式发电厂、热电厂、核电厂、低温余热发电系统等。

1.1.2 内燃机主要部件及工作过程

内燃机是应用极为广泛的往复式动力机械，主要工作部件有汽缸、活塞。其工作主要包括吸气、压缩燃烧、膨胀、排气等四个过程。燃料和空气的混合物在汽缸中燃烧，释放出大量热能，使燃气的温度、压力比外界介质高很多而具备做功能力。燃气在汽缸中膨胀做功，推动活塞，通过曲柄连杆机构传给装在内燃机曲轴上的飞轮并转变成飞轮的动能。飞轮的转动带动曲轴，向外做出轴功，同时完成活塞的逆向运动，排出废气，为下一轮进气做好准备。



图 1-1 内燃机的工作原理

在这一往复运动的过程中，通过转换得到的机械能除了部分作为带动活塞逆向运动所需的能量外，其余部分均传递给工作机械加以利用。此外，排出的废气把一部分燃料化学能转换来的热能排向环境大气。其工作过程如图 1-1 所示。

1.1.3 蒸汽动力装置的主要部件及工作原理

蒸汽动力装置是由锅炉、汽轮机、冷凝器、泵等组成的一套热力设备。燃料在锅炉中燃烧，使化学能转变为热能，加热锅炉中的水，使之成为过热蒸汽。此时蒸汽的温度、压力比外界介质高很多而具备做功能力。当它被导入汽轮机后，蒸汽推动叶片，使轴做功。做功后的乏汽从汽轮机进入凝汽器，凝结成水，并再由泵送入锅炉。如此周而复始，通过锅炉、汽轮机、凝汽器等不断把燃料中的化学能转变而来的热能中的一部分转变成功，另一部分则排向环境介质。其工作过程如图 1-2 所示。

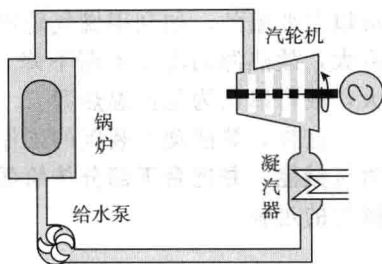


图 1-2 蒸汽动力装置系统

核电站蒸汽动力装置的构成和工作过程与上述普通的蒸汽电厂动力装置比较，主要区别在于用反应堆取代了蒸汽锅炉，如图 1-3 所示。其二回路的工作介质（如水）在蒸汽发生器中吸收反应堆中产生的热能，成为具有做功能力的蒸汽，然后膨胀、排热、压缩、进行循环。

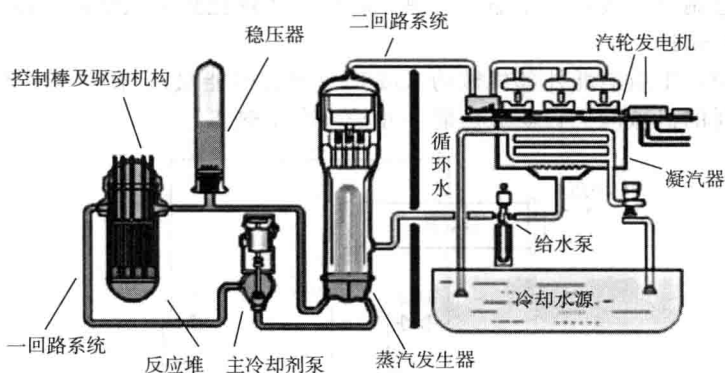


图 1-3 压水堆核电站蒸汽动力装置

1.1.4 两种热机的异同

工程热力学并不深入研究各种热机的具体结构和各自的特性，而是抽取所有热机共同问题进行探讨。从上面的讨论中可以看到，在各类热能动力装置中，虽然所使用的工作介质不同，但其工作介质同样经历吸热、膨胀、排热过程，才能把热能源源不断地转变为功。因此可总结燃气动力装置与蒸汽动力装置的异同点如下。

(1) 相同点

- ① 无论哪一种动力装置，总是用某种媒介物质从某热源获取热能，从而具备做功能力并对机器做功，最后又把余下的热能排向环境介质。
- ② 吸热、膨胀做功、排热对任何一种热能动力装置都是共有的。

(2) 不同点

- ① 活塞式内燃机的燃烧、膨胀、压缩过程在汽缸内进行；蒸汽式动力装置的燃烧、膨胀、冷凝等过程分别发生在不同的设备里。

② 活塞式内燃机中, 气体的膨胀过程发生在气体无宏观运动的状况下; 蒸汽动力装置中, 气体的膨胀过程发生在有宏观运动的状况下。

将实现热能和机械能相互转化的媒介物质称为工质, 工质从中吸取热能的物质称为热源或高温热源, 接受工质排出热能的物质称为冷源或低温热源。热源和冷源可以是恒温的, 也可以是变温的。如利用燃气轮机高温排气作热源在余热锅炉里加热水, 由于其热容量不是无穷大, 故热源的温度不断下降, 是变温热源; 将大气环境作为冷源时, 由于其热容量非常大, 故可以认为是恒温热源。

这样, 热能动力装置的工作过程可被概括为: 工质自高温热源吸热, 将其中一部分转化为机械能, 并把余下部分传给低温热源, 并利用工质的循环不断地完成上述将热能转化为机械能的过程。

1.1.5 制冷装置和热泵装置

制冷装置和热泵装置消耗外部能量 (如机械能、电能或热能等), 以实现热能由低温物体向高温物体的传递。如图 1-4 是单级压缩蒸气制冷装置简图, 由电动机带动的压缩机把从蒸发器 (冷库) 吸热气化的制冷剂压缩, 使其温度、压力升高, 然后进入冷凝器向环境介质放热, 并冷凝成液体, 再在节流阀内降压, 进入冷库蒸发器, 气化吸热完成循环。所以制冷机消耗外功, 通过制冷剂吸热、压缩、放热、膨胀, 实现把热能从低温物体 (冷库) 向高温物体 (环境介质) 输送。

在制冷装置中, 工质消耗外部机械功 (或其他形式的能量), 使热能由低温热源向高温热源转移, 所消耗的机械能也转换成热能一并排向高温热源。

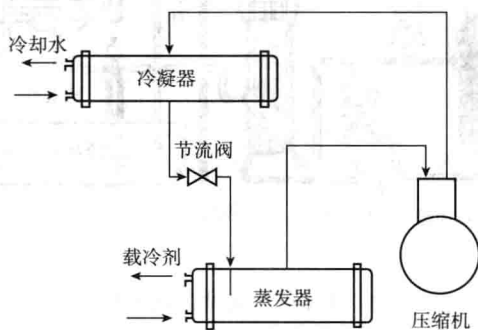


图 1-4 单级压缩蒸气制冷装置

1.2 热力系统

1.2.1 热力系统、外界、边界

热力学中常把要分析的对象从周围物体中分离出来, 研究它与周围物体的能量和物质的传递。这种被人为分离出来作为热力学分析对象的有限物质系统叫做热力系统, 简称系统, 简言之, 热力系统就是具体指定的热力学研究对象。将与热力系统有相互作用的周围物体统称为外界, 而系统和外界之间的分界面被称为边界。边界可以是实际存在的, 也可能是假想的。在前一节中, 当取汽轮机中工质作为热力系统时, 工质和汽轮机之间存在着实际的边界, 而进出口前后或出口前后的工质之间却并无实际的边界。此外也可人为地设想一个边界把系统中的工质和外界分离开来。系统和外界之间的边界可以是固定不动的, 也可有位移和变

形,例如:当取内燃机汽缸中工质(燃气)作为热力系统时,工质和汽缸壁之间的边界是固定不动的,但工质和活塞之间的边界却可移动不断改变位置。

1.2.2 热力系统的分类

一般根据热力系统和外界能量和物质交换情况,热力系统主要有以下几种。

① 一个热力系统如果和外界只有能量交换而无物质交换,则该系统称为闭口系统。闭口系统内无质量交换,其内质量保持恒定不变,所以又称控制质量系统。对于闭口系统,常用控制质量法来研究。

② 一个热力系统和外界不仅有能量交换而且有物质交换,称为开口系统。开口系统通常总取一相对固定容积,又称为控制容积系统,对其常用控制容积法来研究。

区分闭口系统和开口系统的关键是有没有质量越过了边界,并不是系统的质量是不是发生了变化。例如进入储水池中的水量与离开储水池中的水量一样,此时储水池中水的总量保持不变,但该储水池系统为开口系统,而非闭口系统。

③ 当热力系统和外界无热量交换,称为绝热系统(绝热系)。

绝热系是从系统与外界热交换的角度考察系统,不论系统是开口系还是闭口系,只要系统与外界没有热量交换,就是绝热系。取保温瓶里面的水为系统,可视为闭口绝热系。取集中供暖系统的一段保温性能良好的管子为系统,可视为开口绝热系。

④ 当一个热力系统和外界既无能量交换又无物质交换时,称为孤立系统(孤立系)。孤立系统的一切相互作用都发生在系统内部。孤立系必定是绝热的,但绝热系不一定是孤立系。

热力系统的划分要根据具体要求而定。例如,对于蒸汽动力循环系统,如果忽略泄漏、排污、散热等,整个系统为闭口系,而对于每一个子系统而言,例如锅炉系统、汽轮机系统等均为开口系,而汽轮机系统为开口绝热系。

在热力工程中,最常见的热力系统是由可压缩流体(如水蒸气、空气、燃气等)构成。热力系若与外界的可逆功交换只有体积变化功(膨胀功或压缩功)一种形式,这种系统称为简单可压缩系统。工程热力学中讨论的大部分系统均是简单可压缩系统。描述简单可压缩系的独立状态参数只需2个。

1.3 工质的热力学状态及其基本状态参数

1.3.1 状态及状态参数

工质在热机中只有经历了如吸热、膨胀、放热等热力过程才能完成将热能转变为机械能的工作。在这些过程中,工质的物理特性会随时发生改变,人们把工质在热力变化过程中的某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力学状态,简称状态。

例如,可用压力和温度作为一组相互独立的状态参数来描述处于密闭或开放空间内空气的状态。在工程热力学中将描述工质所处宏观物理状况的物理量称为状态参数,当描述工质状态的参数其中一个或多个发生变化,则系统的状态就发生了变化,状态参数一旦确定,工质的状态也就确定了。状态参数具有如下特征。

(1) 单值性

对于某个给定的状态,只能用一组确定的状态参数去描述,反之的一组数值确定的状态参数只能用于描述一个确定的状态。