

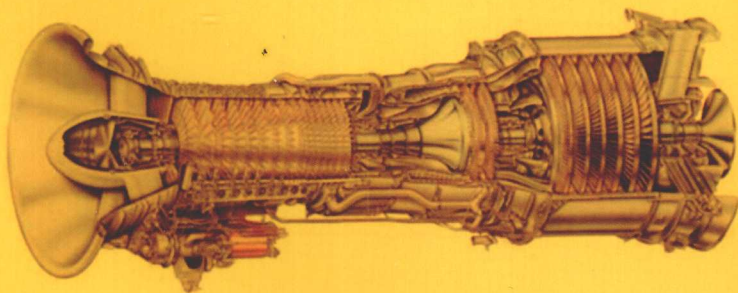


普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

工程热力学

王承阳 王炳忠 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

工程热力学

王承阳 王炳忠 编著

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书共分 11 章, 包括绪论, 基本概念, 热力学第一定律, 气体和蒸气的性质及热力过程, 热力学第二定律, 实际气体的性质及热力学一般关系式, 气体与蒸汽的流动——可压缩流体流动的热力学分析, 动力循环, 制冷循环, 湿空气及其热力过程, 化学热力学基础。

本书可供热能与动力工程或能源与动力工程专业、新能源科学与工程专业、建筑环境与设备专业以及相关专业的本科学生使用, 也可供动力、能源等相关领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/王承阳, 王炳忠, 编著. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 9

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7298-6

I. ①工… II. ①王… ②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(2016)第 219108 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区高祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7298-6

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2016 年 9 月第 1 版, 2016 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16.75 印张; 405 千字; 256 页

38.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

对于能源动力类专业来说,工程热力学相当于语言专业的语法课。不学语法也可以学好语言,但要成为语言学家,不学语法是万万不行的。同样,要成为能源动力领域的高端人才,必须学好工程热力学。

工程热力学是能源动力类专业的第一门专业课,是专业教学的重点,也是最难点。作者从事工程热力学课程教学30余年,烙印深刻,感悟良多,也不敢说完全把握了此门课程的精髓。随着时代的发展,能源动力工程不再限于电厂热能动力、内燃动力等领域,而是深入所有行业所有生产经营过程。节能减排作为全社会的共识,需要全社会的共同努力。东北大学的能源动力类各专业一直有着自己的鲜明特色,几代从事工程热力学教学的教师为此付出了大量的心血和努力,不断改革并调整教学内容与教学方法,力图在有限的学时内,既完整保持工程热力学课程通用体系、内容及深度,又充分联系和结合后续特色课程,以保证学生获得完整和全面的知识结构。本教材这一编写思路,力争使其成为一本重基础、宽口径、有特色的教科书。

本教材有别于以电厂热能动力或其他为中心内容的工程热力学教材,力求强化基础,弱化但明确应用。基础方面,注意与普通物理的衔接,把热力学的公理化体系较为完整地呈现给学生,并增加基本的多元复相理论,以结合混合工质和合金应用;应用方面,动力工程理论浅尝辄止,更注重热力学理论在工业系统中的拓展与灵活运用。本课程的目标不是让学生掌握某种动力设备或流程的设计方法,而是充分消化吸收热力学思考问题的视角、方法,具体的设计能力由后续专业课程来培养。

本书由王承阳(东北大学)、王炳忠(海军工程学院青岛分院)编写,王炳忠完成气体与蒸汽的流动、制冷循环和热泵、化学热力学基础等章的编著,其余由王承阳编著。全书由王承阳统稿,王炳忠负责习题的验算。谢兴同学在收集资料,整理热力学数据方面做了很多工作,在此向他表示感谢。

由于水平所限,很多扩展知识没有充分展开,不妥之处希望读者给予指正。

作 者

2016年4月25日

目 录

1 绪论	1
1.1 能源的利用与生产力的发展	1
1.2 热能的转换与利用	2
1.3 工程热力学的研究对象及主要内容	5
1.4 热力工程和工程热力学的发展简史	6
1.4.1 热机的历史	6
1.4.2 温度的测量	7
1.4.3 量热学的发展	7
1.4.4 热传导理论	7
1.4.5 热的本质	8
1.4.6 热力学第一定律	8
1.4.7 热力学第二定律	9
1.4.8 热力学第三定律	9
1.5 工程热力学的研究方法和学习方法	10
1.6 单位制	11
复习思考题与习题	13
2 基本概念	14
2.1 热力学系统	14
2.2 工质的热力学状态及其基本状态参数	16
2.2.1 热力学状态与状态参数	16
2.2.2 基本状态参数	17
2.2.3 平衡状态	19
2.2.4 状态方程式与状态参数坐标图	20
2.2.5 相空间	21
2.3 工质的状态变化过程	22
2.3.1 准静态过程（准平衡过程）	22
2.3.2 可逆过程	23
2.3.3 功和热量	23
2.3.4 热力循环	25
复习思考题与习题	26

3 热力学第一定律	28
3.1 热力学第一定律的内容	28
3.1.1 热力学第一定律	28
3.1.2 热力学能	29
3.2 热力学第一定律的表达式	30
3.3 稳定流动能量方程	31
3.4 热力学第一定律的具体应用	36
3.4.1 锅炉和各种换热器	37
3.4.2 汽轮机和燃气轮机等动力机械	37
3.4.3 压气机、泵与风机	38
3.4.4 管道	38
3.4.5 节流	38
3.4.6 涡轮机叶轮	38
3.5 企业热平衡	39
3.5.1 企业热平衡	39
3.5.2 热平衡的原则方法	39
3.5.3 热平衡的技术指标	41
复习思考题与习题	43
4 气体和蒸气的性质及热力过程	46
4.1 理想气体状态方程	46
4.1.1 经验定律	46
4.1.2 理想气体状态方程	47
4.1.3 分子运动论	48
4.2 理想气体的比热容	51
4.2.1 比热容的定义	51
4.2.2 理想气体的比热容	52
4.2.3 比定压热容和比定容热容 (定压比热和定容比热)	52
4.2.4 比热容的变化问题	54
4.3 理想气体的热力学能、焓和熵	57
4.3.1 理想气体的热力学能	57
4.3.2 理想气体的焓	57
4.3.3 理想气体的熵	58
4.4 理想气体混合物	58
4.4.1 混合气体的折合摩尔质量和折合气体常数	59
4.4.2 质量分数 w_i 、摩尔分数 x_i 和体积分数 φ_i 的换算关系	59
4.4.3 道尔顿分压定律和阿麦加分体积定律	60
4.4.4 理想气体混合物的比热容、热力学能、焓和熵	60

4.5 水和水蒸气的相变	62
4.5.1 水和水蒸气的定压加热过程	62
4.5.2 水的相变与临界点、三相点	63
4.6 水和水蒸气的热力性质	65
4.6.1 水和水蒸气热力性质的特征	65
4.6.2 水和水蒸气热力性质图表	66
4.7 理想气体的热力过程	73
4.7.1 研究热力过程的目的及一般方法	73
4.7.2 定容过程	73
4.7.3 定压过程	75
4.7.4 定温过程	76
4.7.5 绝热过程	78
4.8 理想气体热力过程综述	79
4.8.1 多变过程	79
4.8.2 过程综述	81
4.9 水蒸气的热力过程	85
复习思考题与习题	87
5 热力学第二定律	90
5.1 热力学第二定律	90
5.1.1 自然过程的方向性	90
5.1.2 热力学第二定律的表述	91
5.2 卡诺循环和卡诺定理	92
5.2.1 卡诺循环	93
5.2.2 卡诺定理	94
5.2.3 循环的平均吸热温度和平均放热温度	96
5.2.4 极限回热循环——概括性卡诺循环	96
5.3 状态参数熵	97
5.3.1 状态参数熵的导出	97
5.3.2 不可逆过程熵的变化	98
5.4 孤立系统熵增原理	100
5.4.1 可用能	100
5.4.2 孤立系统熵增原理	101
5.5 焓分析	102
5.5.1 焓	102
5.5.2 自然环境与环境状态	103
5.5.3 焓的各种形式	104
5.6 熵的统计意义	107
5.6.1 热力学概率与熵	107

5.6.2 对称和吉布斯公式	109
5.6.3 涨落、对称破缺与自组织现象	110
复习思考题与习题	113
6 实际气体的性质及热力学一般关系式	117
6.1 实际气体	118
6.1.1 气体分子间的相互作用力	118
6.1.2 实际气体与理想气体的偏差	119
6.2 实际气体的状态方程式	122
6.2.1 范德瓦尔方程	122
6.2.2 范德瓦尔方程的分析	123
6.2.3 实际气体状态方程的一般热力学特征	125
6.2.4 其他实际气体状态方程	126
6.2.5 对应态原理与通用压缩因子图	127
6.2.6 维里方程	129
6.3 热力学一般关系式	129
6.3.1 特性函数、麦氏关系及热系数	129
6.3.2 热力学一般关系式	132
6.4 多元复相系统浅窥	134
复习思考题与习题	135
7 气体与蒸汽的流动——可压缩流体流动的热力学分析	138
7.1 稳定流动的基本方程	138
7.1.1 连续性方程	138
7.1.2 能量方程	139
7.1.3 过程方程式	139
7.1.4 音速方程	139
7.2 促使流速改变的条件	141
7.3 喷管与扩压管的计算	143
7.3.1 流速的计算	143
7.3.2 临界压力比	143
7.3.3 流量的计算	144
7.4 背压变化时喷管内流动现象简析	147
7.4.1 收缩喷管	147
7.4.2 缩放喷管	147
7.5 摩擦阻力与传热的影响	149
7.5.1 摩擦阻力对绝热流动的影响	149
7.5.2 传热对等截面管内稳定流动的影响	149
7.6 绝热节流	150

7.7 气体压缩机的热力过程	152
7.7.1 单级活塞式压气机的工作原理	152
7.7.2 单级活塞式压气机所需的功	153
7.7.3 余隙容积的影响	154
7.7.4 多级压缩与中间冷却	155
复习思考题与习题	157
8 动力循环	160
8.1 内燃动力循环	161
8.1.1 四冲程内燃机的工作原理	161
8.1.2 内燃机的理论热力循环及性能指标	162
8.1.3 汽车发动机的动力经济性能指标	164
8.1.4 斯特林发动机及其循环	165
8.2 燃气轮机装置循环	167
8.2.1 燃气轮机装置的工作原理	167
8.2.2 定压加热理想循环——布莱顿循环	168
8.2.3 定压加热实际循环	169
8.2.4 提高燃气轮机装置循环热效率和实际效率的措施	170
8.3 蒸气动力循环	173
8.3.1 朗肯循环：蒸气动力装置的理论循环	173
8.3.2 改进朗肯循环热效率的方法	175
8.3.3 热电联合生产	180
8.3.4 复合循环以及其他新型循环	182
8.4 能量的直接转换	183
8.4.1 热电转换	183
8.4.2 燃料电池	184
复习思考题与习题	185
9 制冷循环	189
9.1 制冷与热泵	189
9.2 相变制冷	190
9.2.1 蒸气压缩制冷循环	190
9.2.2 吸收式制冷循环	194
9.2.3 气流引射式制冷循环	195
9.2.4 吸附式制冷	196
9.2.5 绝热去磁制冷	196
9.3 气体膨胀制冷	197
9.3.1 空气绝热膨胀制冷循环	197
9.3.2 气体节流膨胀制冷	199

9.3.3 斯特林制冷循环	200
9.4 其他制冷方法	200
9.4.1 热电制冷	200
9.4.2 热声制冷	201
9.4.3 气体涡流管制冷	203
9.5 制冷剂	203
9.5.1 对制冷剂热力性质的要求	204
9.5.2 制冷剂命名	204
9.5.3 环境问题与制冷剂替代	205
9.5.4 载冷剂与蓄冷剂	206
复习思考题与习题	208
10 湿空气及其热力过程	209
10.1 湿空气及其状态参数	209
10.1.1 湿空气	209
10.1.2 绝对湿度	210
10.1.3 湿空气的饱和状态	210
10.1.4 相对湿度	211
10.1.5 湿空气的含湿量	212
10.1.6 湿空气的焓	213
10.2 湿空气的焓湿图与变化过程	214
10.2.1 湿空气的焓湿图	214
10.2.2 湿空气的变化过程	215
10.3 湿空气理论的应用	217
10.3.1 冷却塔的热湿过程	217
10.3.2 热泵干燥过程	219
复习思考题与习题	220
11 化学热力学基础	222
11.1 热力学第一定律	222
11.1.1 化学反应系统	222
11.1.2 化学反应系统中的热力学第一定律	223
11.1.3 盖斯定律	224
11.2 反应热与反应热效应的计算	225
11.2.1 生成焓	225
11.2.2 非标准状态下反应热效应与反应热的计算	225
11.2.3 理论燃烧温度	226
11.3 热力学第二定律	226
11.3.1 化学反应方向判据与平衡条件	226

11.3.2 化学平衡与平衡常数	227
11.4 热力学第三定律	228
11.4.1 能斯特热定理	228
11.4.2 绝对零度不可能达到	229
复习思考题与习题	229
附录	231
附表1 常用气体的摩尔质量、气体常数和临界参数	231
附表2-1 常用气体在理想气体状态的比热容	232
附表2-2 常用气体在理想气体状态的平均摩尔定压热容	234
附表3-1 常见液体、固体和食品的性质(液体)	235
附表3-2 常见液体、固体和食品的性质(固体)	236
附表3-3 常见液体、固体和食品的性质(食品)	237
附表4-1 饱和水与水蒸气的热力性质(按温度排列)	237
附表4-2 饱和水与水蒸气的热力性质(按压力排列)	239
附表4-3 过热水蒸气的热力性质	242
附表4-4 未饱和水(压缩液态)的热力性质	248
附表4-5 饱和冰与饱和蒸气的热力性质	249
附表5-1 制冷剂 R134a 饱和液体与饱和蒸气的热力性质(按温度排列)	250
附表5-2 制冷剂 R134a 饱和液体与饱和蒸气的热力性质(按压力排列)	251
附表5-3 制冷剂 R134a 过热蒸气的热力性质	252
附表5-4 一些常见的燃料和烃类的热力性质	255
参考文献	256

“工程热力学课程是热工类及机械类动力机械等专业的一门重要技术基础课。

工程热力学是研究热能有效利用以及热能和其他能量转换规律的科学。本课程的主要任务是,使学生掌握热力学的基本规律,并能正确运用这些规律进行热工过程和热力循环的分析。在本课程的教学过程中还应注意培养学生的逻辑思维能力。”

——引自《高等工业学校工程热力学教学基本要求(参考学时范围:55~70学时)》

1

绪 论

1.1 能源的利用与生产力的发展

人类社会的发展是和社会生产力的发展密切相关的,而社会生产力的一个重要组成部分就是为生产过程提供原动力的能源与动力工程。

能源是人类生存和发展的重要物质基础。人类社会和社会生产力的发展过程在历史上与人类利用能源的发展过程是一致的。在从类人猿逐渐进化到人的过程中,人类学会了使用火。农耕时代人们分散使用薪柴、人力、畜力、风力和水力。18世纪蒸汽机的发明和改进是人类第一次大规模地使用能源,为生产提供了一种强有力的动力,推动了生产飞速发展,掀起了历史上著名的“工业革命”,彻底改变了原来自然经济的小生产方式,奠定了工业化生产的牢固物质基础。19世纪电力的使用在工业生产中也是革命性的事件,它奠定了现代化自动化大生产的基础,改变了原来的劳动密集型的生产方式,同时它所带来的远距离即时通信技术对于生产、流通、资金以及生活方式的冲击和改变也是惊人的。20世纪70年代能源危机则从另一方面促进了社会发展,后工业化社会或者信息社会就是这一发展的结果。在不远的未来,化石燃料必将枯竭,新能源也会随之崛起,这将给人类社会带来什么样的变革,已经成为人们热衷的话题。目前国际上常以能源的人均占有量、人均消费量、生产和消费构成、利用率及其对环境的影响等来衡量一个国家或地区的现代化程度。

能源是国民经济发展的原动力。随着国民经济的发展,对能源的需要量日益增加,如果能源的供给赶不上经济发展的需要,将会出现能源危机,从而影响社会经济的稳定和发展。保障能源供给,应当从供应和消费两个方面入手,即开源节流。我国的能源方针就是开发与节约并举,把节约放在首位。节约能源,即提高能源利用过程中的有效利用程度,减少能源的无效浪费是热能与动力工程的主要目标之一。

进入21世纪后,能源紧缺和环境危机的形势越来越严峻,我国经济多年来高速发展导致能源需求高速提升,促使节约能源、减少污染物排放成为国民经济建设的每一个领域

都必须正视的重大责任。“十一五”规划明确提出把万元产值能耗（单位 GDP 能耗）降低 20%，“十二五”规划进一步要求把重点行业万元产值能耗再降 20%。形势发展迫使热能与动力工程不仅要在能源转换与利用领域发挥作用，而且要深入国民经济建设的所有领域，在促进能源节约、减少污染物排放方面发挥理论指导作用。

热能与动力工程的理论和方法是人类在能源转换与利用的工程实践中发展起来的。社会生产的各种工艺过程无不伴随有能量的转换、传输和/或变化，所以即使不把能源节约作为主要目的，热能与动力工程理论和方法也在工业工艺过程中发挥着重要的指导作用。

1.2 热能的转换与利用

运动是物质存在的基本形式，能量则是运动的基本属性。人类社会和自然界的一切运动都伴随着能量的时间转换、空间转换和形式转换。工程热力学的主要工作内容之一就是探索和掌握有关能量形式转换的规律。能量有六种主要存在形式：机械能、热能、电能、辐射能、化学能和核能。

所谓能源，就是储存有能量的物质，是人类从中获取能量的资源。煤、石油、天然气都是我们熟知的能源，核裂变和核聚变、太阳光（辐射）都能给我们提供能量，所以是能源。此外，各种自然过程，如风、流水、波浪、潮汐和地震等也包含能量，所以也是能源。热能是人类使用最广泛的能源形式。自然界存在的能源称为一次能源，包括石油、天然气、煤炭、水力、核能、天然气水合物、风力、太阳能、地热能、生物质能、海洋热能、波浪能、潮汐能，等等。其中石油、天然气、煤炭、水力、核能等作为常规能源几乎占了人类所用能源的全部，世界各国还在大力推进风力、太阳能、天然气水合物等新能源的利用。

热能是人类使用最广泛的能源形式（图 1-1）。在上述能源中，几乎所有的能源都要转化成热能才能为我们使用，或者再转化成其他形式的能量予以利用。所以热能转换和利用技术是能源利用的核心技术。广义的热能转换包括热能与其他形式能量之间的形式转换，也包括热能在时间（储存）、空间（输送）以及载体（换热）上的转换。关于能量形式转换基本规律方面的知识体系是工程热力学，关于热能等能量在时间和空间方面转换的基本规律知识体系是工程流体力学、传热传质学；关于热能的具体利用技术方面则有以工程热力学、流体力学、传热学理论为通用基础的热工设备制造与运行技术。燃烧学专门讨论煤、石油、天然气等燃料燃烧释放热能的规律与技术，是热力学、流体力学、传热传质学理论在燃料燃烧研究中的具体应用。

热能的形式转换可称为热能的间接利用，热能的利用也因此分为两种形式：热能的直接利用和间接利用（动力利用）。

热能的直接利用就是直接加热被加热

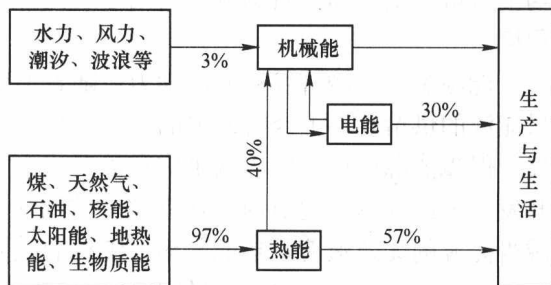


图 1-1 热能在能源利用中的重要地位

对象,使之获得和保持高于环境温度的状态(图1-2)。采暖是在寒冷的冬季通过加热使建筑物内保持适宜人们生活和工作的温度,钢铁冶金需要加热到熔融状态下进行,石油需要加热至气化后在不同温度下凝结而分馏出汽油、柴油等产品,建材制造、化工生产、纺织印染与造纸生产、食品加工、机械制造乃至农业的反季节生产等都具有大量的需要加热的工艺过程。

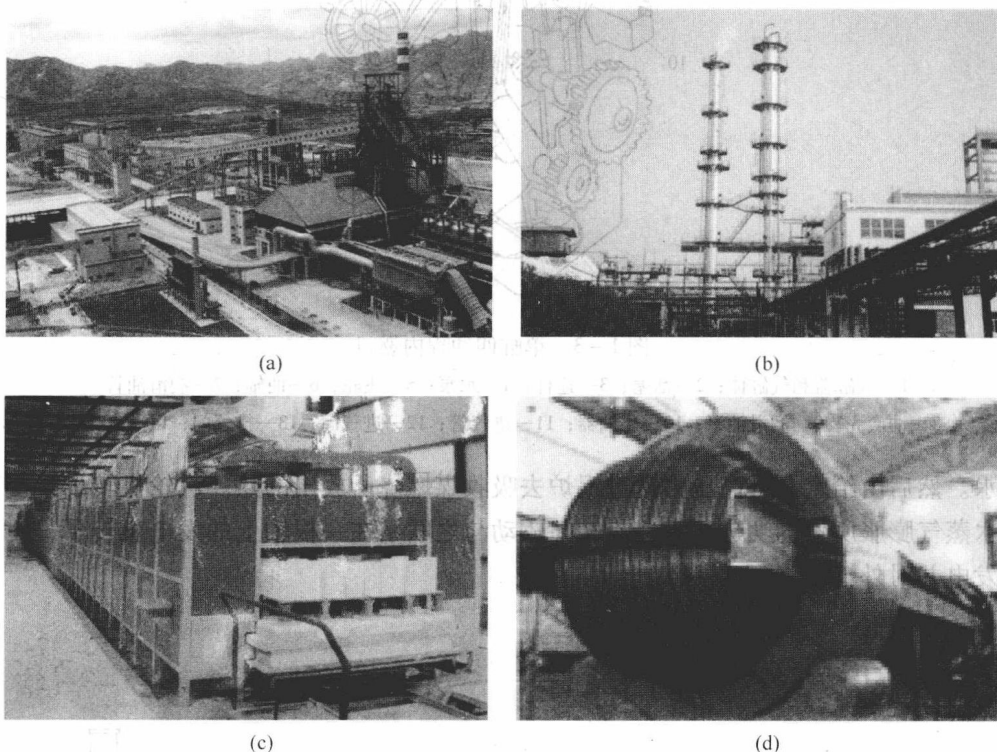


图1-2 热能直接利用的典型设备

(a) 高炉; (b) 分馏塔; (c) 隧道窑; (d) 换热器

热能的间接利用就是将热能转变成机械能(工程上习惯称之为动力, power), 然后通过发电机转变成电能或直接驱动交通运输工具、工程机械等。与社会进步相适应, 热能的这种利用方式在能源利用总量中所占比例越来越高。将热能转换成为机械能的设备统称为热力发动机, 简称热机。平时人们谈起发动机往往专指汽车等交通运输工具所使用的发动机, 其实火力发电厂占了热机总容量(总功率)的大部分。

汽车使用内燃机作为驱动动力。内燃机的核心部件是气缸-活塞。内燃机工作时, 气缸-活塞组成的封闭体内吸入新鲜空气, 空气与喷入气缸的燃油充分混合燃烧, 放出大量的热使缸内气体的温度大幅度提高, 膨胀的气体强力推动活塞使之运动, 运动动能通过机械机构传递给车轮, 从而驱动汽车行驶(图1-3)。

火力发电是将煤送进锅炉炉膛中燃烧, 燃烧产生的热用来加热作为发电媒介物质的高压水, 水吸热后气化成为水蒸气, 并且温度升高。高温高压的水蒸气在汽轮机中膨胀做功, 压力、温度降到很低的程度后排出汽轮机, 低温低压的水蒸气在凝汽器中放热并回复

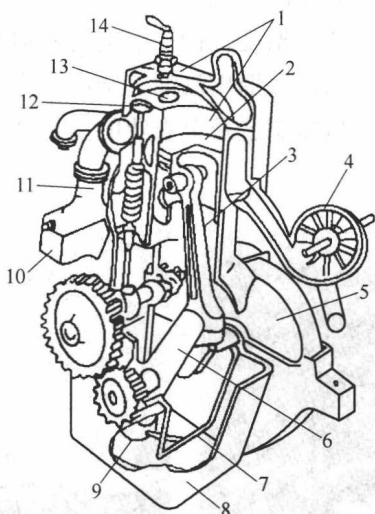


图 1-3 单缸四冲程内燃机

1—气缸盖和气缸体；2—活塞；3—连杆；4—水泵；5—飞轮；6—曲轴；7—润滑油管；
8—油底壳；9—润滑油泵；10—化油器；11—进气管；12—进气门；13—排气门；14—火花塞

成为水。然后由给水泵升高压力送进锅炉去吸收煤燃烧所放出的热。汽轮机转子接受高温高压水蒸气膨胀所作的功进行高速旋转并驱动与之联结在一根轴上的发电机转子，使得发电机发电并对外输出（图 1-4）。

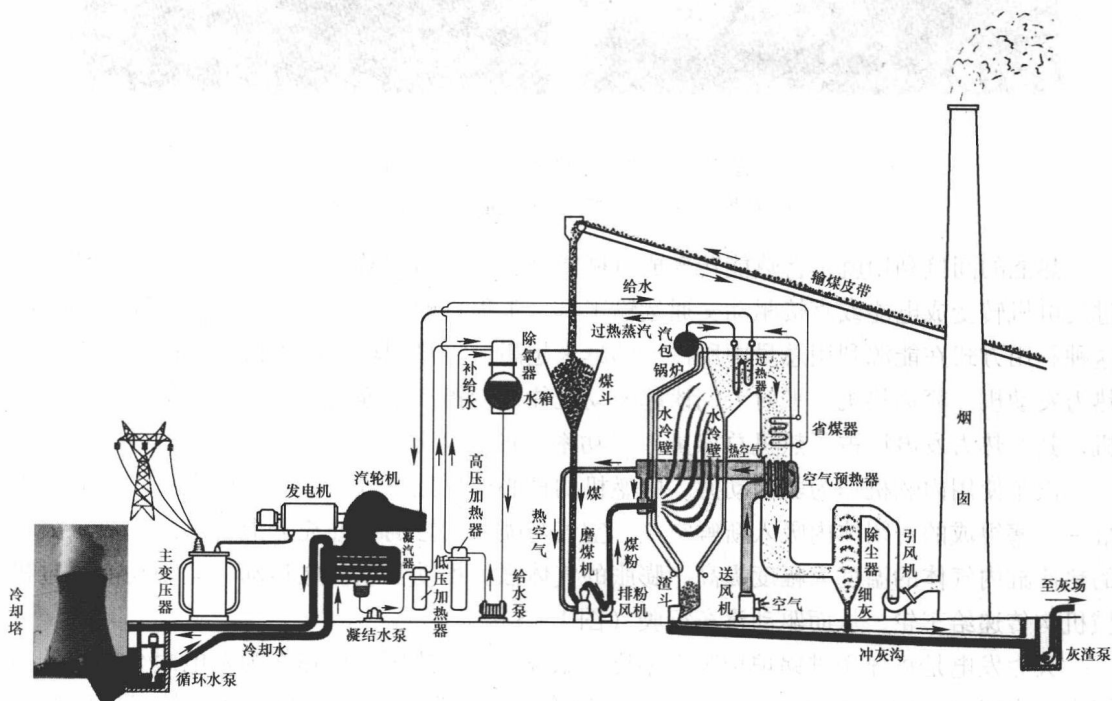


图 1-4 热力发电过程

能源利用一方面为人们的生产生活提供了驱动力,另一方面伴随着能源的开发利用,特别是化石燃料的燃烧,带来了许多全球性的和区域性的环境问题。如地球生物圈系统的熵产增加导致部分生态系统(耗散系统)崩溃(即荒漠化和物种灭绝等);CFC(氯氟烃)制冷剂导致臭氧层破坏, CO_2 导致温室效应;汽车发动机和航空发动机有害废气排放;燃煤导致悬浮颗粒物和 SO_x 污染等问题。

1.3 工程热力学的研究对象及主要内容

如何更有效、更持久、更清洁地利用能源,是热能与动力工程所面临的首要的、最重要的课题。但如果仅仅从能源利用的观点来看待热能与动力工程,则会大大束缚热能与动力工程学者的思维,限制热能与动力工程的发展。利用热能与动力工程的基础理论——工程热物理解决各种工业工艺过程与自然过程中有关热的问题是热能与动力工程领域另一类重要课题。如化工、冶金、建筑等工业工艺过程热的利用,地质运动、天体运动中的热的作用,以及生命体中的流体流动、能量传递和作用,等等。

工程热物理学是研究能量在热、功以及其他相关形式之间进行转化、传递和利用过程中的基本规律及其应用的一门应用基础学科,其主要内容包括四个方面:工程热力学、流体力学、传热传质学和燃烧学。其中流体力学主要研究在各种力的作用下,流体本身的静止状态、运动状态以及流体与固体之间有相对运动时的相互作用和流动规律。传热学研究热量在温度差的作用下从高温处向低温处传递和转移的规律与机理。燃烧学研究燃料燃烧现象和机理及其控制技术,燃烧现象受与其相关的流动、传热、传质和反应热力学控制,因而燃烧学研究结合了热力学、流体力学和传热传质学的研究手段并综合成为反应动力学研究方法。

工程热力学研究热能与其他形式能量(主要是机械能)的转换规律以及影响转换的各种因素。其基本任务是从工程观点出发探讨能量有效利用的基本方法。无论是热能转化为机械能或电能的热动力设备,还是热能直接利用于工艺上的加热过程,都要研究如何提高热能利用的效率,减少热能利用中的损失,以提高热能利用的经济性。

随着全球范围内的能源紧缺和环境危机持续恶化,在社会经济的所有领域,以工程热力学理论为指导,全面分析生产过程中各个层面的能源利用与转换关系,进而优化生产过程,可以达到节约能源、减少污染物排放的目标。目前具有代表性的显著成果有复杂流程工业的能源系统综合利用(系统节能)、多种能源互补与多联产的综合能源系统(总能系统)、集成和集中式能源系统与分布式能源系统,等等。

事实上,工程热力学理论起源于蒸汽机发明后,人们需要了解和掌握热能转换成机械能的机理,并借此改善热机性能。但目前其发展与应用已经不限于能源利用与转换,而是广泛渗透到所有涉及能源转换的工业工艺过程中。而当人们熟练掌握热力学理论与分析方法后,又惊异地发现热力学理论体现出与其他科学理论(尤其是牛顿力学)不同的世界观和方法论。

工程热力学迄今的发展包罗万象,其清晰的脉络表明其基本出发点仍然是热能与机械能的转换。所以我们学习工程热力学的理论和分析方法,仍然从关于热能与机械能转换的分析出发。在分析热能与机械能转换机理方面,工程热力学的主要内容包括以下三方面:

(1) 基本概念和基本定律。工程热力学从这些基本概念和基本定律出发,按照一定的逻辑关系和推理,建立起整个工程热力学大厦。热力学的思想体现在这些基本概念和基本定律之中,人们以此从热力学的视角认识自然和世界。

(2) 热力过程和热力循环的分析研究及其计算方法。热能与机械能转换等能量转换过程,是通过工质的吸热、膨胀、放热、压缩等状态变化过程以及由这些热力过程组合而成的热力循环来实现的。

(3) 常用工质的热物理性质。工质(work fluid)是能量转换过程的媒介物质,工质进行的热力过程和热力循环可实现热能与机械能的相互转换。工质应具有流动性,可以容易地在不同设备之间或设备的不同部分之间转移;工质应具有膨胀性,可以通过体积的变化而作功。

工程热力学在分析热能与机械能转换机理的时候,不考虑温差传热、运动摩擦等不可逆影响因素,从而得到理想条件下热能与机械能转换最佳效果,并以此作为实际热能与机械能转换技术的努力目标。但是温差传热、运动摩擦等不可逆因素的影响并不是独立的,而是同热能与机械能转换机理强烈耦合在一起的,具有明显的动力学(dynamics)特征。所以,有人称不考虑温差传热、运动摩擦等不可逆影响因素的平衡热力学理论(equilibrium thermodynamics theory)为热静力学(thermostatistics)。从20世纪二三十年代开始,平衡热力学理论陆续被突破,昂色格发展了近平衡状态的不可逆热力学理论,普利高津发展了远离平衡状态的耗散结构理论,80年代开始又出现了以Bejan为代表的关于传热和流体流动的熵分析理论,以及尚不被普遍认可的有限时间热力学、热动力学,等等。

作为热力学的一个分支,相平衡理论在化工、冶金、热处理等领域得到重大应用,甚至到20世纪80年代初,还是冶金行业纯理论研究的主要方向(冶金物理化学学科)。之后,冶金反应动力学(实际是传热传质学和流体力学理论在冶金过程中的应用)得到长足的发展,与冶金热力学(相平衡理论)共同支撑起冶金工程学科的理论大厦。

1.4 热力工程和工程热力学的发展简史

1.4.1 热机的历史

公元前130年,埃及人Heron制作了Heron机(图1-5),依靠喷射蒸汽的反推力旋转。在中国,走马灯是最原始的热机。走马灯何时出现已不可考,但不晚于公元1000年。其上有平放的叶轮,下置燃烛或灯,其产生的热气上升带动叶轮旋转,这正是现代燃气涡轮的工作原理。中国许多古籍都有关于走马灯的记述,如南宋周密《武林旧事·卷二·灯品》:“若沙戏影灯,马骑人物,旋转如飞。”和南宋范成大《上元纪吴中节物俳谐体三十二韵》:“映光鱼隐现,转影骑纵横。”

1695年,法国人Denis Papin第一个发明了有汽缸有活塞的蒸汽机,用来提水和推磨;英国人Thomas Savery也制作出了类似的机器。1705—1706年,Thomas Newcomen制造了比

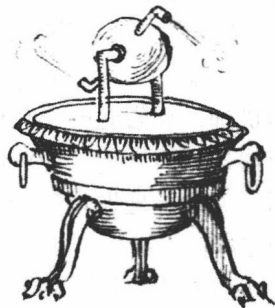


图1-5 Heron机