



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国石油和化学工业优秀出版物（教材奖）一等奖

工程热力学

毕明树 戴晓春 冯殿义 马连湘

第3版
★★★★★



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国石油和化学工业优秀出版物（教材奖）一等奖

工 程 热 力 学

第3版

毕明树 戴晓春 冯殿义 马连湘



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书自出版以来受到了有关教师和学生的好评，第二版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，荣获了中国石油和化学工业优秀出版物一等奖。主要内容有热力学基本概念、热力学基本定律、工质的热力性质、工质的热力过程、气体与蒸气的流动、节能热力学分析基础、热力循环、溶液热力学与相平衡基础、热化学与化学平衡等，书后附有必要的图表以备查用。全书以热力学基本定律为主线，以工质的热力性质和热力过程为基础，引入当今热力工程领域的科技新成果，讨论热能与其他形式能相互转换的规律及合理用能的分析方法。强化对学生分析和解决工程实际问题的能力的培养，激发学生的科技创新兴趣。全书采用法定计量单位。

第3版保持了原版的风格，增加了“气体与蒸气的流动”的章节，主要阐述气体与蒸气在流经一些形状特殊的管道（如喷管、节流阀）过程中热力状态参数、流动速度与管道截面变化间的关系以及能量转化关系，同时整合了原版中的相关内容。

本书配有辅助教材《工程热力学学习指导》，辅以各章重点难点讲解与习题解答等，有利于学生提高学习效果，尤其是对参加工程热力学科目研究生入学考试的学生颇有益处。

本书是过程装备与控制工程相关本科专业的核心课教材，也可作为机械类其他专业教材，还可供有关技术人员作参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学/毕明树等编. —3 版. —北京: 化学工业出版社, 2016. 2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-25890-8

I. 工… II. ①毕… 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 (2015) 第 306590 号

责任编辑: 程树珍
责任校对: 宋 玮

装帧设计: 史利平

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: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 470 千字 2016 年 3 月北京第 3 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

过程装备与控制工程专业核心课程教材编写委员会

组织策划人员（按姓氏笔画排列）：

丁信伟（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会副主任委员兼化工装备教学指导组组长）

吴剑华（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

涂善东（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

董其伍（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

蔡仁良（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

编写人员（按姓氏笔画排列）：

马连湘 王良恩 王淑兰 王 毅 叶德潜

刘敏珊 闫康平 毕明树 李 云 李建明

李德昌 张早校 吴旨玉 陈文梅 陈志平

肖泽仪 林兴华 卓 震 胡 涛 郑津洋

姜培正 桑芝富 钱才富 徐思浩 黄卫星

黄有发 董其伍 廖景娱 魏新利 魏进家

主审人员（按姓氏笔画排列）：

丁信伟 施 仁 郁永章 蔡天锡 潘永密 潘家祯

审定人员（按姓氏笔画排列）：

丁信伟 吴剑华 涂善东 董其伍 蔡仁良

前 言

本书自出版以来受到了有关教师和学生的好评，获批普通高等教育“十一五”国家级规划教材，荣获了中国石油和化学工业优秀出版物一等奖。

在总结近年来教学研究与改革成果并收集本书使用者和过程装备与控制工程专业教学指导委员会的意见和建议的基础上，编者提出了本次教材修改方案。根据过程装备与控制工程专业课程体系，考虑到与其他课程内容的有效衔接，本次修订增加了“气体与蒸气的流动”的内容，主要阐述气体与蒸气在流经一些形状特殊的管道（如喷管、节流阀）过程中热力状态参数、流动速率与管道截面变化间的关系以及能量转化关系，同时整合了原版中的相关内容。

全书共分10章。绪论概括了本课程的性质、研究对象、主要内容及研究方法。第1章介绍系统、状态及状态参数、可逆与不可逆过程、循环等基本概念。第2章介绍热力学第一和第二定律。第3章介绍工质的热力性质，包括理想气体和实际气体的性质与计算方法、水蒸气与湿空气的一般概念及各种图表的应用。第4章介绍工质的热力过程，包括理想气体、蒸汽、湿空气的基本热力过程与工程实际中常见的工质在绝热节流装置、压气机、膨胀机、锅炉、汽轮机中的热力过程。第5章介绍主要气体和蒸气在喷管稳定流动以及节流过程中热力状态参数、流动速度与管道截面变化间的关系和能量转化与传递问题。第6章介绍焓的概念与分析方法，讨论了焓分析方法和熵分析方法的区别与联系及其适用性。第7章介绍热力循环，包括蒸汽动力循环、气体制冷循环、蒸气压缩制冷循环、吸收式制冷循环、喷射制冷循环、热泵循环和气体液化循环。第8章介绍溶液热力学基础和相平衡；第9章介绍化学热力学基础和化学平衡。为方便学习和计算，附录提供了各种单位制的换算表、常见工质热力性质表和图。

本书仍保持了原版的特色和体系，注重对基本概念和基本参数或方程的理解和运用，强化对学生分析和解决工程实际问题的能力的培养，增强科学性、启发性和教学适用性，激发学生的科技创新兴趣。

本书由大连理工大学毕明树、辽宁工业大学戴晓春、冯殿义、青岛科技大学马连湘修订。修订过程中得到了部分教师和学生、过程装备与控制工程专业教学指导委员会的大力支持，在此表示衷心感谢。也借此机会，向本书第1版编者大连理工大学王淑兰教授、福州大学王良恩教授和主审人大连理工大学蔡天锡教授、审定人沈阳化工学院吴剑华教授致以诚挚的敬意。

限于编者学术水平及教学经验，书中难免仍有不妥之处，竭诚希望读者批评指正。

编 者

2015年10月

第 1 版 序

按照国际标准化组织的认定 (ISO/DIS 9000 : 2000), 社会经济过程中的全部产品通常分为四类, 即硬件产品 (hardware)、软件产品 (software)、流程性材料产品 (processed material) 和服务型产品 (service)。在新世纪初, 世界上各主要发达国家和我国都已把“先进制造技术”列为优先发展的战略性高技术之一。先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”是指以流体 (气、液、粉粒体等) 形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群, 它通常是由一系列的过程机器和过程设备, 按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统, 再配以必要的控制仪表和设备, 即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料, 让其在装置内部经历必要的物理化学过程, 制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备 (如塔、换热器、反应器与储罐等) 与单元过程机器 (如压缩机、泵与分离机等) 二者的统称为过程装备。为此, 有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面: ①过程原理与技术的创新; ②成套装置流程技术的创新; ③过程设备与过程机器——过程装备技术的创新; ④过程控制技术的创新。于是把过程工业需要实现的最佳技术经济指标: 高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平, 确保该产业在国际上的竞争力。

过程装备技术的创新, 其关键首先应着重于装备内件技术的创新, 而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分, 它们互为依托, 相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外, 这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别, 前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息科学技术科学等, 而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息科学技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来, 教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化, 面向世界, 面向未来”的思想为指针, 在广泛调研研讨的基础上, 分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在的问题和未来的发展, 向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书, 于 1998 年 3 月获得教育部的正式批准, 设立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机, 教学指导委员会制订了“高等教育面向 21 世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”, 要求各院校从转变传统教育思想出发, 拓宽专业范围, 以培养学生的素质、知识与能力为目标, 以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点, 重组课程体系, 在加强通用基础理论与实践环节教学的同时, 强化专业技术基础理论的教学, 削减专业课程的分量, 淡化专业技术教学, 从而较大幅度地减少总的授课时数, 以增加学生自学、自由探讨和发展的空间, 以有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础, 因此组织编写面向 21 世纪的 6 种迫切需

要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，还编写了6种选修课程教材。教学指导委员会明确要求教材作者以“教改”精神为指导，力求新教材从认知规律出发，阐明本课程的基本理论与应用及其现代进展，做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。新教材的编写实施主编负责制，主编都经过了投标竞聘，专家择优选定的过程，核心课程教材在完成主审程序后，还增设了审定制度。为确保教材编写质量，在开始编写时，主编、教学指导委员会和化工出版社三方面签订了正式出版合同，明确了各自的责、权、利。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套教材中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养，但是由于我们目前对教学改革的研究深度和认识水平所限，必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会

副主任委员兼化工装备教学指导组组长

大连理工大学 博士生导师

丁信伟教授

2001年3月于大连

第1版前言

随着教学内容和课程体系改革的深入,过程装备与控制工程专业的主要专业技术基础课之一“工程热力学”的内容也须作相应调整。本书是按全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会化工装备教学指导组1999年度扩大工作会议上讨论通过的《工程热力学课程教学大纲》编写而成的。

由于热力学内容抽象、公式繁多,适用条件各异,往往使初学者眼花缭乱,尤其是那些历来喜欢依靠公式解决问题的学生,经常因公式使用不当而弄错,有时甚至造成基本概念的混乱。这也使某些学生对热力学不感兴趣,甚至厌烦。我们主张,学生在学习时应主要弄清基本概念,培养在对系统进行分析中运用基本原理的能力。为此,本书力图不做或少做繁琐的公式推导,重视对基本概念和基本参数或方程的理解和运用。力求注重理论联系实际,例题大多为身边或过程装备领域的实际问题,使学生掌握处理实际问题的方法。实践表明,采用这种学习方法的学生并不觉得工程热力学难学,相反,他们获得了分析和解决工程实际问题的工具。

在内容方面,本教材将精选内容,加大推陈出新的力度。大幅精减传统内容,增加新方法,贯彻少而精、博而通的原则。第一,本书抓住最基本的热力学基础知识,以热力学第一定律和热力学第二定律为主线,以工质的热力性质和热力过程为基础,介绍了对工程实际过程和装备的热力学分析方法;第二,本书考虑了“过程装备与控制工程”专业本科生后续课程(如化工原理、化工机械、成套装置等)的需要,选择了相应的内容;第三,本书考虑了化工过程与装备领域对热力学的需求,介绍了几种实际热力装置(设备)的热力学原理;第四,介绍了节能技术中正在兴起的㊞分析方法和热经济学方法。

与一般《工程热力学》比较,本书增加了溶液热力学基础知识、气体液化循环、㊞分析基础、典型化工装备的热力过程分析等内容,强化了热力循环、热化学和化学平衡在化工过程中的应用等内容;删去了篇幅较大的内燃机和燃气轮机循环以及与流体力学重复的气体与蒸汽流动等部分内容。

在体系编排上,本书将热力学第一和第二定律编排为一章,以加深学生对一个问题两个方面的理解;按工质的热力性质、热力过程编排章节,以强调理想气体、实际气体、蒸气和湿空气的区别与联系;将工质的热力循环排为一章,以加强学生对基本定律的理解与运用,学会对实际问题进行抽象、简化和分析的方法,将烟分析基础单列一章,以使树立合理用能的观点,掌握节能分析原理并在后续章节中得以应用;将溶液热力学基础及相平衡基础和热化学与化学平衡分别单列成章,以重视它们的特殊性。本教材始终强调系统研究方法的重要性,尤其在后几章里,有意提供一些较长的需要综合分析的例题和习题,培养学生综合运用理论的能力,贯彻“授人以鱼,不如授人以渔”的思想。

每章开头有内容提要与学习要求,结尾有小结。每章均配有思考题和习题。既有考察单一概念的小型习题,也有考查学生综合分析问题能力的较大的习题。

本书由毕明树主编，蔡天锡主审，吴剑华审定。绪论、第2、3、4、5、6章由毕明树编写，第1章由王淑兰编写，第7章由王良恩编写，第8、9章由马连湘编写。鉴于编者水平有限，经验不足，不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2001.3

第2版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是以第1版为蓝本，根据时代发展和课程改革的要求，在总结近年来教学研究与改革成果，并分析教师和学生反馈意见的基础上修订而成的。

本书共分8章。第1章介绍系统、状态及状态参数、可逆与不可逆过程、循环等基本概念；第2~第5章是热力过程分析及计算的理论基础；第6章介绍热力循环，包括蒸汽动力循环、气体制冷循环、蒸气压缩制冷循环、吸收式制冷循环、喷射制冷循环、热泵循环和气体液化循环，此章属于实际应用；第7章介绍溶液热力学基础和相平衡；第8章介绍化学热力学基础和化学平衡。为方便学习和计算，附录提供了各种单位制的换算表、常见工质热力性质表和图。

本书保留了第1版的特色，注重对基本概念和基本参数或方程的理解和运用，力求避免抽象的说教和繁杂的公式推导，强化全局观念；同时也基本保留了第1版的体系，以热力学基本定律为主线，以工质的热力性质和热力过程为基础，引入当今热力工程领域的科技新成果，阐述实际热力过程和装备的分析方法，强化对学生分析和解决工程实际问题能力的培养，激发学生的科技创新兴趣。

本书力求吸收国内外相关教材的长处，结合过程装备与控制工程专业的特点与需求，提高教材的思想性、科学性、启发性、先进性和教学适用性。整合并增减了第1版部分章节的内容，使教材内容更加连贯，易教易学。对于已采用第1版教材进行教学的教师，如果继续使用第2版教材，不但不会增加工作量及教学难度，而且会使教学过程更加顺畅。

本书全面纠正了第1版表达上的不妥之处，增加了工程热力过程实际装置和结构插图，增加或更新了部分热力过程分析图，以增强学生对热力过程的感性认识，弥补教学内容过于抽象的不足。

每章开头有内容提要与学习要求，结尾对重点内容进行小结。每章不但配有理清概念的思考题，引导学生进行更深层次的思考，还配有考察单一概念的小型习题和培养学生统筹运用基本原理分析问题能力的综合性习题。

本书采用了国家公布的法定计量单位制。

本书由大连理工大学毕明树、辽宁工业大学冯殿义、青岛科技大学马连湘修订。修订过程中吸纳了使用过本书第1版部分教师和学生的意见和建议，在此表示衷心感谢。也借此机会，向本书第1版编者大连理工大学王淑兰教授、福州大学王良恩教授和主审人大连理工大学蔡天锡教授、审定人沈阳化工学院吴剑华教授致以诚挚的敬意。

限于编者学术水平及教学经验，书中难免仍有不妥之处，竭诚希望读者批评指正。

编 者

2007年12月

目 录

绪论	1	3.9 纯物质相变区的状态及参数 坐标图	59
0.1 本课程的性质	1	3.10 湿空气	64
0.2 热能及其利用	1	小结	68
0.3 工程热力学的研究对象及主要 内容	2	思考题	70
0.4 热力学的研究方法	2	习题	70
1 基本概念	4	4 气体与蒸气的热力过程	72
1.1 热力系统	4	4.1 理想气体的热力过程	72
1.2 热力状态	5	4.2 蒸气的热力过程	80
1.3 热力过程	10	4.3 湿空气的热力过程	83
小结	13	4.4 压气机中的热力过程	85
思考题	14	4.5 往复式膨胀机中的热力过程	94
习题	14	4.6 锅炉生产蒸汽热力过程	98
2 热力学基本定律	15	4.7 蒸汽轮机中工质膨胀热力过程	103
2.1 热力学第一定律的实质	15	小结	108
2.2 能量的传递形式	15	思考题	109
2.3 封闭系统的能量方程	19	习题	110
2.4 敞开系统的能量方程	20	5 气体与蒸气的流动	112
2.5 稳定流动能量方程	21	5.1 稳定流动的基本方程	112
2.6 热力学第二定律的实质	25	5.2 管内流动的基本特征	114
2.7 卡诺循环	27	5.3 喷管的计算	117
2.8 多热源的可逆循环	28	5.4 摩擦对绝热流动的影响	125
2.9 熵与克劳修斯不等式	30	5.5 绝热节流	126
2.10 孤立系统熵增原理	34	小结	130
小结	36	思考题	132
思考题	38	习题	133
习题	38	6 焓分析基础	135
3 气体与蒸气的热力性质	40	6.1 焓和熵的基本概念	135
3.1 理想气体及其状态方程	40	6.2 焓值的计算	136
3.2 热容、内能和焓	40	6.3 焓损失	141
3.3 理想气体内能、焓和比热容	42	6.4 焓方程	144
3.4 理想气体的熵	45	6.5 焓效率与热效率	144
3.5 理想气体的混合物	47	6.6 热经济学思想简介	149
3.6 实际气体与理想气体的偏离	51	小结	150
3.7 对比态定律与普遍化压缩因子	52	思考题	151
3.8 实际气体的状态方程	55	习题	151

7 热力循环	152	附录	242
7.1 蒸汽动力循环	152	附表 1 单位换算表	242
7.2 制冷循环	165	附表 2 理想气体状态下的千摩尔比定压 热容与温度的关系式	243
7.3 热泵供热循环	175	附表 3 常用气体的主要物理参数表 ...	243
7.4 气体液化循环	181	附表 4 气体的平均比定压质量热容 ...	244
小结	184	附表 5 气体的平均比定容质量热容 ...	245
思考题	185	附表 6 空气的热力性质表	246
习题	185	附表 7 氧的热力性质表	249
8 溶液热力学与相平衡基础	187	附表 8 氮的热力性质表	250
8.1 自由能和自由焓	187	附表 9 氢的热力性质表	252
8.2 热力学性质之间的基本关系式 ...	191	附表 10 二氧化碳的热力性质表	253
8.3 偏摩尔性质与化学位	193	附表 11 一氧化碳的热力性质表	254
8.4 理想溶液和稀溶液	196	附表 12 水蒸气的热力性质表 (理想气体状态)	255
8.5 逸度与活度	200	附表 13 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度排列)	256
8.6 相平衡	201	附表 14 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力排列)	257
小结	214	附表 15 未饱和水与过热蒸汽表	259
习题	216	附表 16 几种物质的标准生成焓、标准 生成自由焓	265
9 热化学与化学平衡	218	附表 17 几种物质的燃烧焓和汽化焓 (101325Pa, 25℃)	265
9.1 化学反应过程的热力学第一 定律	218	附表 18 化学平衡常数的对数值 $\lg K_p$	265
9.2 化学反应的热效应	219	附表 19 某些理想气体在 101.325kPa 下的绝对熵	266
9.3 理论燃烧火焰温度	224	参考文献	278
9.4 化学平衡	225	主要符号	279
9.5 化学反应进行的方向和限度	230		
9.6 化学平衡的影响因素	231		
9.7 热力学第三定律	234		
9.8 化学反应的可逆过程	235		
9.9 离解与离解度	237		
小结	238		
思考题	240		
习题	240		

绪 论

0.1 本课程的性质

本课程是过程装备与控制工程专业核心课程之一，也是工科学生学习和掌握节能技术的热力学原理及分析方法的入门课程。本课程的任务是使学生掌握热力学基本定律和基本理论，熟悉工质的基本性质和实际热工装置的基本原理，学会对工程实际问题进行抽象、简化和以能量方程、熵方程、焓方程为基础的分析方法，为进一步开发和应用节能技术奠定基础。

过程装备与控制工程专业的任务就是结合过程改造旧的或开发新的高效、节能的过程装备。在这个过程中，本课程在以下几方面起到极为重要的作用。

① 在物性数据关联方面，如状态方程、相平衡、焓值计算中发挥着极为重要的作用，因任何装备的改造与开发需要一个以此为依据建立的数据库。

② 在节能分析方面发挥着越来越重要的作用。过去的所谓节能只是以热力学第一定律为基础，消灭跑冒滴漏实现低水平的节能。新的节能分析方法和热经济学分析方法能通过改善装备流程或结构实现高水平的节能，这是改造旧装备和开发新装备的直接依据。

0.2 热能及其利用

人类在生产或日常生活中，需要各种形式的能量。自然界中以自然形态存在的可资利用的能源称为一次能源，如风能、水力能、太阳能、地热能、燃料化学能、核能等。这些能量，有些可以以机械能的形式直接被利用，有些需经过加工转化后才能利用。由一次能源加工转化后的能源称为二次能源。各种能源及其转换和利用情况大致如图 0-1 所示。

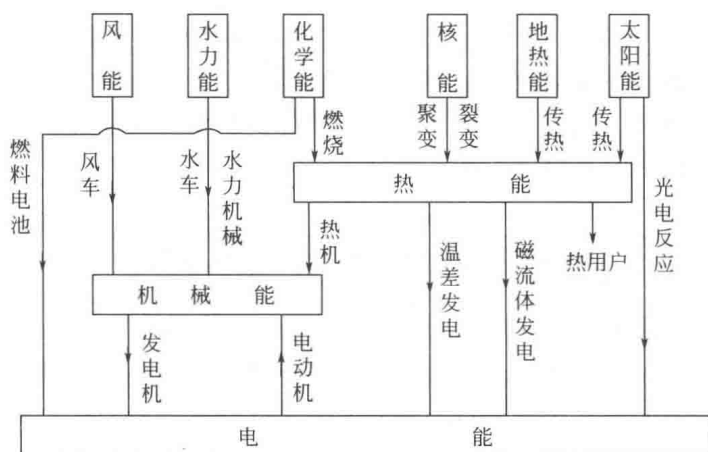


图 0-1 能量利用情况

由图 0-1 可见,热能是由一次能源转换成的最主要形式,而后再由热能转换成其他形式的能量而被利用。据统计,经热能这个环节而被利用的能量在世界上占 85% 以上。

热能的利用通常有以下两种基本形式:其一是热能的直接利用,即直接利用热能加热物体,诸如蒸煮、烘干、采暖、冶炼等;其二是热能的动力利用,即通过各种热能动力装置将热能转化成机械能或电能而被利用,从而为工农业生产、交通运输、人类日常生活等提供动力。这是现代工农业及科技文化的基础。然而,热能的利用率却较低,早期的蒸汽机的热效率只有 1%~2%,当代各种动力装置及热电厂的热效率也只有 40% 左右。因此,深入分析、研究并掌握热能与其他形式能的高效转换对人类社会的发展具有十分重要的意义。

0.3 工程热力学的研究对象及主要内容

自从 19 世纪中叶确立了热力学第一、第二定律以来,热力学已逐步发展成为严密的、系统性较强的学科,它主要研究热能和其他形式能间的相互转换以及能量与物质特性之间的关系。如合成氨,净化后的合成气体经压缩机压缩后引入合成塔;加温预热后,在触媒的作用下,氮气与氢气发生化学反应生成氨,并放出热量,出塔的氨气经冷凝后送入贮罐。在这个过程中,首先是压缩机输出机械功,并把它转化为气体的压力能(气体压力升高);然后对合成反应放出的热量进行回收利用,实现化学能向热能的转变;氨的液化过程则又是通过冰机把机械能转化为低温热能的过程。

在这些能量转化过程中有以下几点值得注意。

① 能量间的转换要服从热力学基本定律。热力学第一和第二定律是热力学的理论基础。其中第一定律从数量上描述了热能与机械能间相互转换的关系;第二定律从质量上描述了热能与机械能的差别以及能量转换的方向、条件与限度。

② 这些转换过程都是借助特定的工质(工作介质)实现的,不同的工质具有不同的性质,能量转换条件及结果也有差异,因此必须研究工质的热力性质。

③ 能量间的转换是通过各种设备(压缩机、合成塔等)实现的,能量装置的设计过程首先要进行装置的能量衡算,因此对典型过程及循环进行热力分析与计算是工程热力学的重要内容。

④ 过程装备内常常伴有化学反应和相变化,因此,溶液热力学与相平衡基础、化学热力学与化学平衡基础也是本课程的重要内容。

⑤ 对以上过程的用能分析。传统的能量分析方法是以前热力学第一定律为基础建立起来的,存在很多不足之处。近年来兴起的焓分析方法是以热力学第一和第二定律为基础,依据能质蜕变原理建立起来的,概念直观,方法简便,分析结果对用能实践具有指导意义。所以焓分析基础是本门课程的新兴内容。

0.4 热力学的研究方法

原则上,热力学有两种不同的研究方法,即宏观研究方法和微观研究方法。

经典热力学采用宏观研究方法,把组成物质的大量粒子作为一个整体,用宏观物理量描述物质的状态及物质间的相互作用。热力学基本定律就是通过对大量宏观现象的直接观察与实验总结出来的普遍适用的规律。热力学的一切结论也是从热力学的基本定律出发,通过严密的逻辑推理而得到的,因而这些结论也具有高度的普遍性和可靠性。这些结论为工业实践提出了努力方向。

当然,在处理实际问题时,必须采用抽象、概括、简化及理想化等方法,抽出问题的共性及主要矛盾,而略去细节及次要矛盾。例如将高温气体视为理想气体,将高温烟气及大气环境视为恒温热源,既可使计算大为简化而又可保证工程上必要的准确性;在分析各种循环时,把实际上都是不可逆的过程理想化为可逆过程,突出问题的本质,而后再按实际中的不可逆程度予以校正,同时也提出了实际过程中需改进的关键及目标。究竟哪些分析与计算可采用简化与抽象,简化到什么程度,需依所涉及问题的具体情况而定。

热力学的宏观研究方法,由于不涉及物质的微观结构和微粒的运动规律,所以建立起来的热力学理论不能解释现象的本质及其发生的内部原因。另外,宏观热力学给出的结果都是必要条件,而非充分条件。例如,由氢和氮合成氨时,按宏观热力学,在低温下有最大的平衡产量。但在低温下,反应速率极慢,工业中无法实现,而必须在较小平衡产量的高温下进行。当然,这个热力学结果为人们寻求使反应在低温下进行的催化剂指出了方向。宏观热力学中的可逆过程功也只是给出了一个功的极限值,不能给出做功的速率。

热力学的微观研究方法,认为大量粒子群的运动服从统计法则和或然率法则。这种方法的热力学称为统计热力学或分子热力学。它从物质的微观结构出发,从根本上观察和分析问题,预测和解释热现象的本质及其内在原因。这种方法已受到越来越多的重视,也取得了显著效果,如用它推导流体 p - V - T 关系及液相活度系数等。

热力学的微观研究方法对物质结构必须采用一些假设模型,这些假设的模型只是物质实际结构的近似描写,因此其很多结论与实际还相差较大。这是统计热力学的局限性。

目前,在化工装备及过程领域,实际应用的仍是经典热力学。因此,本书主要介绍经典热力学,仅在个别场合辅以必要的统计解释。

了解了热力学的研究方法,也就相应地确定了本课程的学习方法。学习经典热力学应注意以下几方面。

① 本课程的主线是研究热能与机械能之间相互转换的规律、方法以及提高转化效率和热能利用经济性的途径,各基本概念、理论、方法都是为这条主线服务的。学习时必须时刻抓住这条主线。

② 注意掌握应用基本概念和基本理论分析处理实际问题的基本方法,学会利用“抽象”和“简化”实际问题的方法。

③ 提高工程意识。处理工程实际问题的方法是多种多样的,其答案也只有更好,没有最佳。学习本课程,在基本概念扎实的基础上,要开动脑筋,从不同角度出发去处理各个具体问题。

④ 注意弄清各参量的物理意义,不要被眼花缭乱的公式所吓倒。依靠套用数学公式的方法来处理热力学问题是难免出错的。

1

基本概念

内容提要 本章主要讨论热力系统、热力状态及状态参数、热力过程等基本概念。这些概念在本课程中，几乎随时都会遇到，对它们必须有一个正确的理解。

基本要求 ①掌握热力系统的基本概念与分类；②掌握热力状态的基本概念和状态参数的特性；③熟悉压力、温度和比体积的基本概念；④掌握准静态过程和可逆过程的基本概念；⑤熟悉热力循环。

1.1 热力系统

分析任何现象时，首先要明确研究对象。分析热现象时也不例外。通常，人为地由一个或几个几何面围成一定的空间，把该空间内的物质作为研究对象，然后研究它与其他物体的相互作用。这种作为研究对象的某指定范围内的物质称为热力系统，简称系统或体系。系统之外的物质称为外界。系统与外界之间的分界面称为边界或控制面。边界可以是具体存在的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是运动着的或尺寸和形状都是变化的。例如：在讨论气缸里的气体时，如果假定边界位于气缸的外部，则系统就包括气缸以及气缸里的气体；如果假定边界为气缸的内壁，则系统只由气体本身组成。又如以酒精灯加热一杯水；若取水作为系统，则作为界面的杯面是真实的、固定的，而水与空气的边界是移动的；若取部分水作为系统，则水与水的边界就是假想的。随着研究者所关心的问题不同，系统的选取可不同，系统所包含的内容也可不同，以方便解决问题为原则。系统选取的方法对研究问题的结果并无影响，只是解决问题时的繁杂程度不同。

系统与外界通过边界交换能量或质量。按系统与外界之间是否存在质量交换，系统可分为封闭系统和敞开系统，如图 1-1 所示。封闭系统（简称闭系）是指与外界仅有能量交换而无质量交换的热力系统。因系统内质量不变，所以，有时也把闭系称为控制质量系统。敞开系统（简称开系）是指与外界既有能量交换又有质量交换的热力系统。通常，敞开系统是一个相对固定的空间，故敞开系统有时也称为控制容积系统。应该指出，封闭系统与敞开系统可以相互转化。如图 1-2 所示，取气缸内的气体为系统，则系统可以吸热，可以推动活塞做功

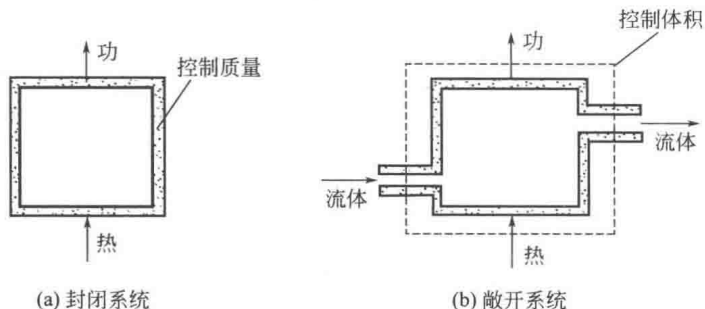


图 1-1 封闭系统与敞开系统

功，但只要关闭进出口阀门，即没有气体进入或流出系统，该系统就是闭系。而如果打开进、出口阀，取 1—1 截面与 2—2 截面之间的气体作为系统，则气体不断地从 1—1 截面流入系统，推动活塞做功后，又不断地从 2—2 截面流出系统，即系统与外界有质量交换，也有能量交换，故该系统是敞开系统。

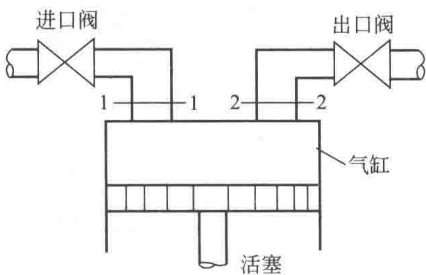


图 1-2 闭系与开系的相互转化

按系统与外界进行能量交换的情况，可分为简单热力系统、绝热系统和孤立系统。简单热力系统是指与外界只交换热量和一种形式的功的热力系统。例如，气缸内气体吸热且只做膨胀功，则气缸内气体即为简单热力系统。绝热系统是指与外界没有热量交换的热力系统。孤立系统是指系统与外界既无能量交换也无质量交换的热力系统。可见，孤立系统一定是封闭系统，也一定是绝热系统；但反之则不成立。

值得指出，严格的绝热系统和孤立系统是不存在的。然而，如果某些实际热力系统与外界的传热量，与以其他形式交换的能量相比，可以忽略不计，则该系统可视为绝热系统。同样，若系统与外界在各方面的作用都很微弱，则可视为孤立系统。通常，把非孤立系统与相关的外界合在一起取为孤立系统。这样的系统是从实际中概括出来的抽象概念，从而使某些研究得到简化。

按系统内工质状况可有以下几种系统：如果热力系统内的工质由单一组分的物质组成，则该系统称为单组分系统；如果热力系统内的工质由多种不同组分的物质组成，则该系统称为多组分系统；如果热力系统内部各部分化学成分和物理性质都均匀一致，则该系统称为均匀系统；如果热力系统由单相物质所组成，则该系统称为单相系统；如果热力系统由两个以上的相所组成，则该系统称为多相系统。可见，均匀系统一定是单相系统，反之则不然。

1.2 热力状态

1.2.1 状态及状态参数

热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为系统的状态。用以描述系统所处状态的宏观物理量称为状态参数。状态参数分为基本状态参数和导出状态参数。基本状态参数是指可以直接测量的状态参数，如压力、温度和比体积。导出状态参数是指由基本状态参数间接算得的状态参数，如内能、焓、熵等。下面首先介绍一下基本状态参数，其他状态参数，将在以后各章中逐步介绍。

(1) 压力 是指沿垂直方向上作用在单位面积上的力。对于容器内的气态工质来说，压力是大量气体分子作不规则运动时对器壁单位面积撞击作用力的宏观统计结果。压力的方向总是垂直于容器内壁的。

在中国法定计量单位中，力的单位是牛顿 (N)，面积的单位是平方米 (m^2)，故压力的单位是 N/m^2 ，称为帕斯卡，符号是帕 (Pa)。历史上几种常用压力单位间的换算关系参见附表 1。

作为描述工质所处状态的状态参数，压力是指工质的真实压力，称为绝对压力，以符号 p 表示。但压力通常由压力计（压力表或压差计）测量，如图 1-3 所示。

压力计的指示值为工质绝对压力与压力计所处环境绝对压力之差。一般情况下，压力计处于大气环境中，受到大气压力 p_0 的作用，此时压力计的示值即为工质绝对压力与大气压力之