



高等学校教材

工程热力学

■ 毕明树 主编



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

工程热力学

毕明树 主编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学/毕明树主编. —北京: 化学工业出版社,
2001.5
高等学校教材
ISBN 7-5025-1795-2

I. 工… II. 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 (2001) 第 07566 号

高等学校教材

工程热力学

毕明树 主编

责任编辑: 程树珍

责任校对: 马燕珠

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社

教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787×960 毫米 1/16 印张 21 $\frac{3}{4}$ 插页 1 字数 386 千字

2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-1795-2/G·461

定价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

按照国际公约的约定,社会经济过程中的全部产品通常分为三类,即硬件产品(hardware)、软件产品(software)和流程性材料产品(processed material)。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，以加强学生自学、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定了正式出版合同，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

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,学生在学习中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焓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、焓分析基础、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气流动等部分内容。

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，将焓分析基础单列一章，以使学生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，也有考察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

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 潘家桢

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

内 容 简 介

本书各章在取材上注重理论联系实际,突出工程观点,侧重过程装备与控制工程专业的需要。其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、烟分析基础、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。全书以能量方程、熵方程和烟方程为主线,讨论热能与其他形式能量相互转换的规律及合理用能的分析方法。全书采用我国法定计量单位。

本书可作为过程装备与控制工程专业的教材,也可供有关学生或技术人员作参考资料。

目 录

绪论	1
0.1 本课程的性质	1
0.2 热能及其利用	1
0.3 工程热力学的研究对象及主要内容	2
0.4 热力学的研究方法	3
1 基本概念	4
1.1 热力系统	4
1.2 热力状态	7
1.3 热力过程	13
小结	17
思考题	18
习题	18
2 热力学基本定律	20
2.1 热力学第一定律的实质	20
2.2 能量的传递形式	21
2.3 封闭系统的能量方程	26
2.4 敞开系统的能量方程	26
2.5 稳定流动能量方程	29
2.6 热力学第二定律的实质	33
2.7 卡诺循环	35
2.8 多热源的可逆循环	37
2.9 熵与克劳修斯不等式	39
2.10 孤立系统熵增原理	45
小结	48
思考题	49
习题	50
3 气体与蒸气的热力性质	52
3.1 理想气体及其状态方程	52
3.2 热容、内能和焓	53
3.3 理想气体内能、焓和比热容	54

3.4	理想气体的熵	58
3.5	理想气体的混合物	60
3.6	实际气体与理想气体的偏离	66
3.7	对比态定律与普遍化压缩因子	67
3.8	实际气体的状态方程	71
3.9	纯物质相变区的状态及参数坐标图	76
3.10	湿空气	82
	小结	87
	思考题	89
	习题	90
4	气体与蒸气的热力过程	92
4.1	理想气体的热力过程	92
4.2	蒸气的热力过程	102
4.3	湿空气的热力过程	105
4.4	气体与蒸气的绝热节流过程	109
4.5	压气机中的热力过程	111
4.6	往复式膨胀机中的热力过程	118
	小结	123
	思考题	124
	习题	125
5	焓分析基础	127
5.1	焓和焓的基本概念	127
5.2	焓值的计算	128
5.3	焓损失	134
5.4	焓方程	136
5.5	焓效率与热效率	137
5.6	热经济学思想简介	143
	小结	144
	思考题	145
	习题	145
6	热力循环	147
6.1	蒸汽卡诺循环	147
6.2	朗肯 (Rankine) 循环	148
6.3	朗肯循环的改进	157
6.4	热电联供循环	160

6.5	压缩空气制冷循环	160
6.6	蒸气压缩制冷循环	162
6.7	制冷剂	167
6.8	吸收式制冷循环的工作原理	169
6.9	蒸汽喷射制冷循环的工作原理	170
6.10	气体液化循环	171
	小结	174
	思考题	176
	习题	176
7	溶液热力学与相平衡基础	178
7.1	自由能和自由焓	178
7.2	热力学性质之间的基本关系式	182
7.3	偏摩尔性质与化学位	185
7.4	逸度与逸度系数	187
7.5	稀溶液	197
7.6	理想溶液	201
7.7	非理想溶液（真实溶液）	203
7.8	相平衡	211
	小结	228
	习题	231
8	热化学与化学平衡	234
8.1	化学反应过程的热力学第一定律	235
8.2	化学反应的热效应	236
8.3	燃烧热与生成热	239
8.4	理论燃烧火焰温度	243
8.5	化学平衡	245
8.6	化学反应进行的方向和限度	250
8.7	化学平衡的影响因素	251
8.8	热力学第三定律	256
8.9	化学反应的可逆过程	257
8.10	离解与离解度	260
	小结	261
	思考题	263
	习题	263
9	典型装备热力过程介绍	266

9.1 工业锅炉简介	266
9.2 工业汽轮机简介	272
9.3 热管简介	277
9.4 热泵技术简介	284
小结	291
附录	294
附表 1 单位换算表	294
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	295
附表 3 常用气体的主要物理参数表	296
附表 4 气体的平均比定压质量热容	298
附表 5 气体的平均比定容质量热容	299
附表 6 空气的热力性质表	300
附表 7 氧的热力性质表	303
附表 8 氮的热力性质表	304
附表 9 氢的热力性质表	306
附表 10 二氧化碳的热力性质表	307
附表 11 一氧化碳的热力性质表	308
附表 12 水蒸气的热力性质表 (理想气体状态)	309
附表 13 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度排列)	310
附表 14 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力排列)	311
附表 15 未饱和水与过热蒸汽表	313
附表 16 几种物质的标准生成焓、标准生成自由焓	319
附表 17 几种物质的燃烧焓和汽化焓 (101325Pa, 25℃)	319
附表 18 化学平衡常数的对数值 $\lg K_p$	319
附表 19 某些理想气体在 101.325kPa 下的绝对熵	320
附图 1 气体压缩因子	323
附图 2 实际气体 Z_0 及 Z_1 图	326
附图 3 水蒸气焓-熵 ($h-s$) 图	插页
附图 4 氨的压-焓 ($p-h$) 图	327
附图 5 HFC134a 的压焓 ($p-h$) 图	328
附图 6 湿空气的焓 (温) -湿图	329
附图 7 空气的温-熵 ($T-s$) 图	330
参考文献	331
主要符号	333

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、烟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。

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。

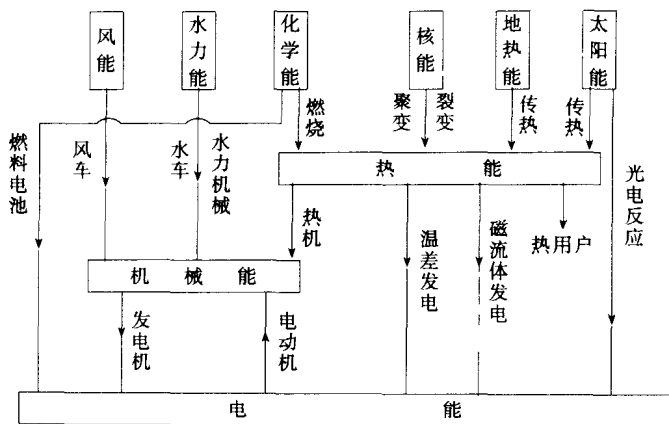


图 0-1 能量利用情况

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学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门课程的重要内容。

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。