



教育部高等学校轻工与食品学科教学指导委员会推荐教材

[高校教材]

热工基础与造纸节能

(第二版)

刘秉钺 主编

THERMO DYNAMICAL ENGINEERING BASIS
AND SAVING ENERGY
ON PULPING AND PAPERMAKING



中国轻工业出版社

教育部高等学校轻工与食品学科教学指导委员会推荐教材

热工基础与造纸节能

(第二版)

刘秉钺 主编

王志敏 侯庆喜 韩 卿 刘秉钺 编著

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

热工基础与造纸节能/刘秉钺主编. —2 版. —北京: 中国轻工业出版社, 2010. 1

教育部高等学校轻工与食品学科教学指导委员会推荐教材
ISBN 978-7-5019-7086-5

I. 热… II. 刘… III. ①热力学 - 高等学校 - 教材②传热学 - 高等学校 - 教材③造纸工业 - 节能 - 高等学校 - 教材 IV. TK122 TS78

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 129034 号

内 容 简 介

本书介绍了水蒸气的性质, 动力循环, 汽轮机; 锅炉设备以及燃料、水质, 锅炉的传热、通风, 锅炉的运行、效率和锅炉的选择; 还介绍了能源的消费和资源状况, 我国的能源对策和节能的意义及途径。对太阳能、生物质能及其他新能源也作了介绍。对热泵的原理、设备组成和使用实例也进行了说明。对使用蒸汽为动力的一般节能措施作了介绍, 着重结合制浆造纸工艺过程, 介绍了化学制浆节能、高得率制浆节能、打浆和抄纸节能、碱回收节能以及制浆造纸节能的新技术: 中浓技术、膜分离技术、溶剂制浆、生物技术和二次热的概念。

本书是教育部高等学校轻化工程专业 (造纸方向) 教学指导分委员会推荐的特色教材, 可供大中专院校轻化工程专业的学生作为选修课教材使用, 也可供从事制浆造纸生产的工程技术人员、企业管理人员及能源工作者参考。

责任编辑: 林 媛 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 锋尚设计
版式设计: 王培燕 责任校对: 李 靖 责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2010 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 17

字 数: 435 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-7086-5 定价: 36.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

70997J1X201ZBW

前 言

现代工业的任何生产过程都离不开动力,而提供大量的经济性很高的动力对于发展生产具有十分重要的意义。尤其在当前能源紧缺的情况下,提高能量的有效利用,节约燃料就更为迫切。

制浆造纸工业是消耗能量很大的行业之一,工艺生产过程不仅需要大量的动力,而且还需要参数不等的热能,所以作为工艺技术人员、管理干部、技术工人掌握一定的热工基础知识及其节能的方法和途径是十分必要的。另外,能源的节约,特别是二次能源的充分利用,需要有全局概念,不仅对制浆、抄纸、化学品回收能够熟练掌握,而且还能够对动力的生产,蒸汽锅炉、汽轮机、生物质锅炉及二次热有充分的了解,才能够通盘考虑,切实做到最大限度的发挥能源效率。

制浆造纸节能将会在污染控制之后,成为制约造纸发展的一个重要环节,系统的学习有关热工和节能的知识不仅对轻化工程(造纸方向)的学生是必须的,而且对推动行业的节能减排也是非常及时和需要的。

国外未见到与本书类似的教材,国外有关造纸方面的书籍介绍了热电联产和造纸节能的知识,但没有关于热工、锅炉和汽轮机的相关知识。国内外有许多关于热工、锅炉和汽轮机的教材,作为轻化工程专业的学生没有必要学习这么多。1994年,由中国轻工业出版社出版的《热工基础与造纸节能(第一版)》较好地解决了轻化工程专业对热工、锅炉、汽轮机等基本知识与制浆造纸专业知识和造纸节能的良好结合。经过大连工业大学和齐齐哈尔大学的十余年的使用,积累了一点经验也发现了一些问题。这次再版,我们力争克服缺点。通过本课程的学习,使学生能树立正确的能源意识,建立清洁生产的观念,对于指导毕业设计、毕业论文和就业将起到积极的作用。

近年来,节能减排成为我国的一件大事,已经有不少学校把开设“热工与节能”课程列为轻化工程专业的选修课程。《热工基础与造纸节能(第一版)》教材已经不能适应当前形势的需要。经过十多年的时间,造纸行业和动力供应已经发生了巨大的变化,所以需要进行修订和改编。教育部高等学校轻化工程专业教学指导分委员会已于2008年10月推荐该教材为特色教材(轻化工程教分委字[2008]2—8—2号)。

本书由编写《热工基础与造纸节能(第一版)》工作的大连工业大学刘秉钺教授主编并撰写第4章造纸厂的节能;第1章工业企业蒸汽动力装置和附表由齐齐哈尔大学王志敏教授编写;第2章锅炉设备由天津科技大学侯庆喜教授编写;第3章能源及能源的节约由陕西科技大学韩卿教授编写。

第一版教材简略地介绍了热力学和传热学的基本知识,考虑到在化工原理和物理化学等教材中已经比较详细的作了讲授,所以第二版删去了这部分内容。本书只保留了水蒸气的性质。本书较为详细地介绍了锅炉设备及有关知识,对几种动力循环及汽轮机也作了介绍。为了适应能源政策的发展,对能源的概况和新能源的开发给予了较多篇幅的介绍。对以蒸汽为动力或热源的一般节能措施作了概述,还介绍引荐了热泵的节能效果。

第一版的造纸厂节能措施,已经大大的落后于时代的发展。第二版作了较大篇幅的修改

补充，将近些年出现的制浆造纸节能的新工艺、新措施作了比较概括的介绍。

本教材的参编者都尽可能的收集了国内外有关锅炉、汽轮机、新能源、清洁生产、节能减排等方面的知识和成果，并尽可能地吸收到教材中。但由于学时的限制，本教材的篇幅限制，因而有些机理、应用、设计计算等方面的内容未能编入；或虽已经编入，但论述不细或不够充分。本书编写组的成员，经过一年多的努力，克服了许多困难，按时完成了本书的编著任务，但其中还难免存在问题。我们衷心希望各位专家和广大师生对本书提出宝贵的意见和建议，以便再版时进一步修正和完善。

编著者

2009年4月

目 录

绪论	1
第1章 工业企业蒸汽动力装置	5
1.1 水蒸气	5
1.1.1 水蒸气基本知识	5
1.1.2 水蒸气定压汽化过程	9
1.1.3 水蒸气状态参数的确定	12
1.1.4 水蒸气焓熵图	13
1.1.5 水蒸气热力过程	19
1.2 动力循环简介	21
1.2.1 朗肯循环	21
1.2.2 再热循环	28
1.2.3 回热循环	30
1.2.4 热电循环	33
1.2.5 工业企业蒸汽动力装置	35
1.3 汽轮机	37
1.3.1 汽轮机工作原理	37
1.3.2 汽轮机级的类型及特点	39
1.3.3 汽轮机主要部件	41
1.3.4 汽轮机中的损失和效率	42
1.3.5 汽轮机的运行和调节	43
1.3.6 汽轮机的优缺点及发展趋势	43
参考文献	45
第2章 锅炉设备	46
2.1 锅炉设备基本知识	46
2.1.1 锅炉发展概况	46
2.1.2 锅炉用途和分类	47
2.1.3 锅炉设备组成	49
2.1.4 锅炉工作过程	50
2.1.5 锅炉工作特性	51
2.1.6 锅炉型号	52
2.2 锅炉用燃料及燃烧	53
2.2.1 燃料组成成分	53
2.2.2 燃料成分表示	54
2.2.3 煤的燃烧特性及类别	55
2.2.4 燃料燃烧过程	56

2.2.5 燃料燃烧的必要条件	57
2.3 水质处理	58
2.3.1 锅炉给水的水质要求	59
2.3.2 锅炉给水的水质处理	60
2.3.3 锅炉给水处理的新进展	62
2.4 锅炉的传热和蒸汽的产生	64
2.4.1 锅炉传热	64
2.4.2 锅炉水循环	66
2.4.3 汽水分离	67
2.5 燃烧设备——炉子	67
2.5.1 炉子的分类	67
2.5.2 层燃炉	68
2.5.3 室燃炉	71
2.5.4 沸腾炉	73
2.5.5 炉子的热强度	75
2.6 锅炉的辅助受热面及通风、消烟除尘	76
2.6.1 锅炉的辅助受热面	76
2.6.2 锅炉的通风	79
2.6.3 锅炉的消烟除尘	80
2.7 锅炉设备运行的经济性及安全性	83
2.7.1 锅炉热平衡组成	83
2.7.2 锅炉的热效率	84
2.7.3 锅炉的热损失及减少热损失途径	85
2.7.4 锅炉设备的安全运行	87
2.8 锅炉的选择	88
2.8.1 锅炉容量的确定	89
2.8.2 锅炉工作压力的确定	89
2.8.3 锅炉类型及台数的选择	90
参考文献	90
第3章 能源及能源的节约	91
3.1 能源概述	91
3.1.1 能源的分类	91
3.1.2 能源消费及资源状况	94
3.1.3 能源对策	98
3.1.4 节能的意义及途径	102
3.2 新能源的开发利用	104
3.2.1 太阳能及其利用技术	104
3.2.2 生物质能及其应用	110
3.2.3 其他能源及利用	117
3.3 合理利用能源的原则	125

3.3.1 中国能源消费现状	126
3.3.2 合理利用能源的原则	127
3.4 热泵	128
3.4.1 热泵基本知识	128
3.4.2 热泵的工作原理及应用	131
3.4.3 热泵工质及主要设备	137
3.4.4 热泵系统常用的热源	144
3.4.5 热泵系统的应用及实例	144
3.5 加强热能管理, 节约用汽	147
3.5.1 蒸汽的使用特性	147
3.5.2 蒸汽的输送	148
3.5.3 蒸汽的选用原则	149
3.5.4 蓄热器	150
3.5.5 加强管理, 防止漏汽	153
3.5.6 加强保温, 减少散热损失	154
3.5.7 设备加盖, 减少表面散热	155
3.5.8 加强给水处理, 减少排污热损	155
参考文献	156
第4章 造纸厂的节能	157
4.1 造纸厂节能概述	157
4.1.1 造纸工业能源构成	157
4.1.2 造纸工业能源消耗	157
4.1.3 造纸厂节能综合分析	160
4.1.4 中国造纸工业节能展望	161
4.2 制浆工艺的节能	162
4.2.1 原料的贮存和备料	162
4.2.2 间歇式蒸煮的节能技术	163
4.2.3 间歇蒸煮的改进节能	165
4.2.4 连续蒸煮节能	171
4.2.5 制浆车间其他节能技术	173
4.3 高得率制浆的节能	176
4.3.1 磨石磨木浆的节能	176
4.3.2 预热木片磨木浆的热回收	179
4.3.3 化学热磨木片磨木浆	181
4.3.4 碱性过氧化物机械浆	184
4.3.5 几种杨木化机浆磨浆能耗比较	187
4.4 打浆和抄纸工艺的节能	190
4.4.1 打浆系统的节能	190
4.4.2 造纸机网部生产节能	194
4.4.3 纸机压榨部节能	199

4.4.4 纸机干燥部节能	203
4.4.5 变频控制及在纸机上的节能应用	204
4.5 碱回收工艺节能	206
4.5.1 黑液蒸发系统节能	206
4.5.2 黑液燃烧系统节能	212
4.5.3 白泥回收系统节能	218
4.5.4 非传统式苛化技术	221
4.6 造纸工业节能新技术	223
4.6.1 中浓技术的应用	223
4.6.2 膜分离技术在节能中的应用	227
4.6.3 生物技术	229
4.6.4 溶剂制浆	233
4.6.5 制浆造纸厂的二次热及其利用	236
参考文献	246

绪 论

直到目前为止,在人类利用能源的长期历史进程中,利用最多的仍是热能。燃料燃烧把化学能转变为热能,广泛应用于生产和生活。热能的利用不外乎两种方式:一种是直接利用,把热能用于直接加热物料;另一种是间接利用,把热能转换成为机械能,或再转换成为电能。热能利用的实质是能量的转换和热量的传递,其中就包含着热能利用的上述两种方式。

1. 热工学

热工学可认为是热能工程学的简称。它所研究的是工程技术中如何合理而有效地利用热能,它是一门技术科学,它的建立和发展又与热工技术的发展紧密相关。

人类在长期的生产实践中逐步认识和掌握了热能利用的规律,使之有效地为自己服务。同时,正是由于热能的利用,对人类文明和社会生产力的发展也起了非常重大的推动作用。

“摩擦生火第一次使人支配了一种自然力”(恩格斯《反杜林论》),这是人类利用热能的开始。从此,人类可以利用火来煮熟食物、取暖和照明,可以用火来冶炼矿石,获得金属,用以制造劳动工具,使农业生产得到迅速发展。但是,当时人类只能把草木燃料中的化学能转变为热能,却不会把火所产生的能量转换成为动力以代替或减轻人们的体力劳动。直到18世纪中叶,热能的利用还仅局限于作为加热的能源。

1794年,英国人詹姆斯·瓦特(James Watt)在前人研制的基础上制成较为良好的热机——蒸汽机。蒸汽机的广泛使用,是热能利用技术的一个飞跃。摩擦生火完成了从机械能到热能的转换,而蒸汽机则成功地使热能转换成机械能。从此,提供热能的燃料也能提供动力,大大地推进社会生产力的发展,导致第一次工业革命的到来,同时也推动了能量转换等热工理论的研究。

热工学主要包括两大方面:热力学和传热学。

热力学是研究有关能量、特别是热能的性质和规律(主要是转换规律)的科学。

传热学是研究热量在传递过程中有关规律的科学。热能在转换和传递过程中,必须遵守热力学第一、第二定律和传热的3个基本定律。

能量的转换和传递是通过必要的设备和一定的媒介物质来实现的。设备就是各种热机、换热器、冷凝器、蒸发塔、干燥箱、烘缸等,统称为热工设备,媒介物质就是载能体,如水蒸气、烟气、空气和水等,统称为工质。

在现代工业中,任何部门的生产过程都是由许多基本过程组织起来的,这个生产过程的生产水平也就决定于这些基本过程的生产水平。在这些基本过程中,动力工业占有极重要的地位,它供应生产所必需的原动力。因此,它是工业中任何生产过程所必备的基本过程之一。没有动力,就不可能进行任何生产,要提高生产力,就必须有大量的和经济性很高的动力作保证。

2. 能源概述

能源是一个国家经济增长和社会发展的基础,能源与经济的增长存在着密切的关系。目前,我国正处在工业化和城镇化的重要发展阶段,国民经济发展对能源需求巨大,经

济快速增长必然会带动能源消费的快速增长。能源是经济发展和人民生活标准提高的关键，一个国家在能源阶梯上所处的位置，代表了它在社会发展中所达到的水平。

能源是指煤炭、原油、天然气、电力、焦炭、煤气、热力、成品油、液化石油气、生物质能和其他直接或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源。可见，能源是一种呈多种形式的且可以相互转换的能量的源泉。简单地说，能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。自然界的能源可以从不同的角度划分为不同的种类。

根据能源产生的方式可分为一次能源和二次能源。一次能源是指从自然界取得的未经任何改变或转换的能源，如煤、石油、天然气、水能、风能、太阳能等。其中，煤、石油和天然气是当今世界一次能源的 3 大支柱，它们构成了全球能源家族结构的基本框架。另外，一次能源小家族中也列入了像太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能以及核能。二次能源是指由一次能源经过加工或转换成的其他种类和形式的能源，如电力、各种石油制品、焦炭、煤气、热能等。

根据能源是否可再利用，可分为可再生能源和不可再生能源。可再生能源是指可重复再生，永续利用的一些能源。这些能源大都直接或间接来自太阳，包括太阳能、水能、风能、生物质能、波浪能，核裂变增殖反应堆，核聚变能和地热能也算作可再生能源。不可再生能源是指那些不可重复再生的能源，如煤炭、石油、天然气等石化能源。

根据能源消耗后是否造成环境污染可分为污染型能源和清洁型能源。污染型能源包括煤炭、石油等；清洁型能源包括水力、电力、太阳能、风能以及核能等。

根据利用状况，能源又可分为常规能源和新型能源。常规能源是指在现阶段的科学技术水平条件下，被广泛利用的一次能源，包括一次能源中的可再生的水力资源和不可再生的煤炭、石油、天然气等资源。新能源是相对于常规能源而言的，是目前尚未广泛利用而正在积极研究以便推广利用的一次能源，如太阳能、风能、海洋能、地热能、氢能；还有将甲醇、酒精、二甲醚等醇类、醚类化工产品也算新能源的。

随着世界经济的持续发展和世界人口的不断增长，世界能源消费总量也在不断地增长。100 多年来，世界范围能源消费增长的趋势见表 1。

表 1 世界能源消费增长趋势

年份	能源消费量 /10 ⁹ t 标准煤	总人口/ 10 ⁹ 人	人均能源消费量 /(t/人)	能源消费 增长倍数	人均增长 倍 数
1900	7.75	15.71	0.493	1	1
1925	15.65	19.65	0.796	2.02	1.61
1950	25.65	24.86	1.032	3.31	2.09
1975	82.54	40.45	2.041	10.65	4.14
2001	146.29	61.00	2.398	18.88	4.86
2006	155.41	63.77	2.437	20.05	4.94

在消耗的能源中，主要是煤、石油、天然气等常规能源。以 2006 年为例，世界一次能源消耗量为 155.41 亿 t 标准煤，其中，石油占 36.84%，天然气占 23.67%，煤炭占 27.17%，核能占 6.10%，其他能源占 6.22%。能源问题对于各国来说不仅是个经济问题，也是个生存问题。1973 年中东战争期间，能源危机席卷整个资本主义世界，造成巨大的经

济损失。美国由于缺少 1.16 亿 t 标准煤的能源,生产减少了 930 亿美元;日本缺少了 0.6 亿 t 标准煤的能源,生产减少了 485 亿美元。由此可见,由于能源不足造成的经济损失,往往是能源本身的 20~60 倍。因此日本及欧洲、美洲地区的一些资本主义国家,在不断受到能源危机冲击的情况下,对能源的合理利用,节省能源十分重视,都采取了强制性的措施。日本、美国颁布了能源法,并根据世界经济形势,能源的蕴藏、生产等情况,拟订了能源政策及相应措施。

3. 我国能源形势及政策

我国能源资源总量比较丰富,但人均占有量却远远低于世界平均水平。据《BP 世界能源统计 2005》的数据表明,全球石油储量可供生产 40 多年,天然气可供应 67 年,煤炭可以供应 164 年。但作为我国能源结构主体的煤炭,其探明储量将在 81 年内采光,石油资源将在 15 年内枯竭,天然气资源也将在 30 年内用尽,其时间表均早于全球化石能源枯竭速度。随着我国工业化和城镇化推进,能源资源需求总量还会增加,经济发展面临的资源约束矛盾将长期存在。节约能源资源,大力促进能源资源的高效利用和循环利用,是缓解能源资源约束矛盾的根本出路。

“十五”以来,我国能源供求形势发生了重大变化。能源需求出现了前所未有的高速增长态势。2005 年,全国的能源消费总量在 2000 年的 13.03 亿 t 标准煤的基础上增加了近 71%,达到了 22.24 亿 t 标准煤,在短短的 5 年时间里其能源消费增量超过了改革开放头 20 年(1981—2000 年)的总和。其中,煤炭产量在 2000 年 9.8 亿 t 的基础上翻了一番多,超过了 21.9 亿 t,石油进口量在 2000 年 0.7384 亿 t 的基础上增加了 0.6977 亿 t,达到了 1.4361 亿 t,电力装机容量在 2000 年 3.19 亿 kW 的基础上,增加了 1.89 亿 kW,达到了 5.08 亿 kW、全社会用电量在 2000 年的基础上增长了 83.7%,达到了 24747 亿 kWh,平均年增长 12.9%。尽管如此,从 2002 年起,全国电力供需难以平衡,出现了较大范围的缺电现象,2003 年先后有 21 个省拉闸限电,2004 年夏季,拉闸限电的省市扩大到 24 个。电力工业的火电平均利用小时数也在逐年提高,近几年已达 5500 h 以上。发电用煤也在 2000 年的基础上翻了一番超过了 10 亿 t。所有这些增长都远远超出了人们的预料(至少比国际和国内能源机构的预测结果提前到来了 10 年),引起了国际社会的广泛关注。“十五”期间这种能源供求关系的重大变化,使能源发展的前景具有更大的不确定性,也对今后 20 年我国能否继续以“能源翻一番支持经济翻两番”的目标提出了严峻挑战。

我国早在 1980 年就确定了“开发与节约并重,近期把节约放在优先地位”的能源发展总方针。1986 年,国务院发布了《节约能源管理暂行条例》,有关部门陆续制定了产业政策、节能技术政策大纲、主要用能产品的效率或能耗标准、生产过程中耗能较高产品的单位产品能耗限额,以及固定资产投资工程项目的可行性研究报告中应当包括合理用能的专题论证等规定。1997 年 11 月 1 日,第八届全国人民代表大会第二十八次会议通过了《中华人民共和国节约能源法》,以法律的形式确立了全社会节约能源,规定了节能管理,合理使用能源,节能技术进步和相关的法律责任,这是我国第一部对能源节约的法律。十届全国人大常委会第三十次会议通过了新修改的《节约能源法》,并于 2008 年 4 月 1 日起正式施行。这些方针和法规的颁布和实施,对于促进节能工作的开展发挥了积极的作用。

2006 年 8 月 6 日发布的“国务院关于加强节能工作的决定”,使社会各个行业开始认识到节能工作的重要性和紧迫性。该决定强调应该用科学发展观的思想统领节能工作,加快构建节能型产业体系,着力抓好重点领域(钢铁、有色金属、煤炭、电力、石油化工、化工、

建材)的节能,大力推进节能技术进步,提出的主要目标是到“十一五”期末,万元国内生产总值(按2005年价格计算)能耗下降到0.98 t标准煤,比“十五”期末下降20%左右。重点行业主要产品单位能耗总体达到或接近本世纪初国际先进水平。这个决定的提出,体现了国家对当前国内节能工作的强调和重视。

2007年4月27日,温家宝总理在全国节能减排工作电视电话会议上发表了“高度重视、狠抓落实,进一步加强节能减排工作”的讲话,提出遏制高耗能、高污染行业过快增长,是推进节能减排工作的当务之急,也是当前宏观调控的紧迫任务;并要加快淘汰落后的生产能力;全面实施节能减排重点工程,大力发展循环经济,全面推行清洁生产;强化节能减排监督管理力度等政策。这是我国走向绿色经济、循环经济的必由之路。

2007年6月3日,国务院又发布了《节能减排综合性工作方案》,对有关节能减排的政策,激励和约束机制都做出了明确的规定和要求。这也是实行节能减排工作的重要依据和最终目标。

2007年8月26日,国家发展和改革委员会主任马凯又做了《关于节约能源保护环境工作情况的报告》。公布上半年节能减排指标完成情况,并布置下半年节能减排工作重点和政策措施。

从这些政策可以看出,节能是各个行业扩大发展的大趋势,自“十一五”规划纲要制定以来,节能工作就成了走可持续发展之路、大力发展循环经济的关键所在。造纸行业作为耗能大户,应该在节约能源的方向上做出更多的努力。

改革开放以来,我国能源资源利用效率有所提高,但与世界先进水平相比仍存在较大差距。目前,日本、美国、德国的能源利用率分别为57%,50%,40%,全球平均值也达33%,而我国只有32%,比以上3国分别低25%,18%,8%。假如再乘上32.1%的能源开发率,则我国能源系统的总效率只有10.3%,还不到发达国家的一半。这表明,我国常规能源的90%左右在开采、加工、输送、储存和终端使用的全过程中逐级损失和浪费了。我国的能源利用率低,意味着产品单耗高。目前,我国主要产品的单耗比起发达国家高出40%左右。另外,还意味着国家产值能耗高。表2是有关国家单位标准煤所产生的国内生产总值(GDP)的比较表。

表 2

每千克标准煤产生的 GDP

单位:美元

中国	日本	法国	韩国	印度	世界平均值
0.36	5.58	3.24	1.56	0.72	1.86

由表2可明显看出,我国的单位能耗所创造的产值是非常低的,日本、法国、韩国、印度和世界平均值分别是我国的15.5、9、4.3、2、5.17倍。这充分说明,我国的节能潜力是非常大的,在目前科技条件下,我国的宏观节能潜力达3.5~4.0亿t标准煤。

节能减排是中国政府“十一五”期间宏观调控的重要内容。虽然造纸行业没有列入“高能耗、高污染”的6大行业中,但节能减排仍是造纸行业一项重要和紧迫的工作,也是一项必须承担的社会责任。在“十一五”的头一年,造纸行业并没有实现计划目标,这将给后来的工作带来很大的压力。面对如此严峻的形势,我们要有强烈的危机感和紧迫感。

第 1 章 工业企业蒸汽动力装置

1.1 水 蒸 气

水蒸气是水的气态物质，由于来源广泛，易于获取，价格低廉且无毒无味，在相变、载热过程中污染甚小，具有比热容大、载热能力强等特点，所以在热功能量转换中得到广泛的使用。在制浆造纸企业中，水蒸气的应用也非常广泛，各种设备所用的电力是水蒸气在汽轮机中膨胀做功将水蒸气的热能转变成机械能再带动发电机发电获得的；工艺过程需要的热量也都是由水蒸气提供的。水蒸气用于换热通常称为热流体，作为热工设备的媒介通常称为工质。

作为工质来讲，水蒸气在任何压力下，处于液态和气态时的温度变化应该讲是不大的，即易于发生相变，其性质更接近距液相较近的实际气体。所以，在研究水蒸气时不能沿用理想气体的性质和状态方程式，而需要根据使用范围从水和蒸汽热力性质图及表中查取有关参数。所以本节主要介绍水蒸气产生的一般原理、水和水蒸气状态参数的确定、水蒸气图表的结构和应用以及水蒸气热力过程中功和热量的计算。

各种不同物质的蒸汽，在物理性能上虽各不相同，但其在热力性质的变化规律上是类似的。本章对水蒸气的热力性质及过程的讨论对其他物质的蒸汽有普遍的指导意义。

1.1.1 水蒸气基本知识

1.1.1.1 水的状态及状态参数

水和其他物质一样，当所处的温度和压力不同时，其所处的状态也不一样。图 1-1 是水的状态图（相图），图中有 3 条线，2 个特殊点。3 条线把状态图分为了 3 个区，反映了水的 6 种状态即每两条线分别划出了 3 个相区：固相、液相和气相。当水所处的温度和压力描述的状态点落在哪个区时，说明这个温度和压力下，水的状态就是哪个区反映的状态。如图 1-1 中的 E 点，说明在这个状态下水为液态。如果状态点落在 3 条线上，说明水处于两相共存的状态，AD、AB、AC 分别代表气固、液固、气液共存的状态；两个特殊点 A 和 C 中，一个是三相点，一个是临界点。A 为三相点，水在这点所处的状态是气、液、固 3 相共存，其温度和压力为：

$$T_A = 273.16 \text{ K } (0.01^\circ\text{C})$$

$$p_A = 0.000611\ 659 \text{ MPa}$$

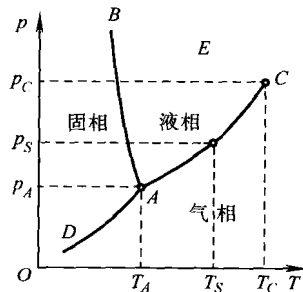


图 1-1 水的相图

C 点为临界点，当温度超过 T_c 时，液相不可能存在，而只可能是气相。 T_c 称为临界温度，与临界温度相对应的压力 p_c 称为临界压力。临界点的具体数值为：

$$T_c = 647.14 \text{ K } (373.99^\circ\text{C})$$

$$p_c = 22.064 \text{ MPa}$$

$$V_c = 0.003106 \text{ m}^3/\text{kg}$$

水蒸气在热力设备中，必须通过吸热、膨胀、排热等过程才能完成将热能转变为机械能的工作。在这些过程中，水蒸气的物理特性随时在起变化，或者说，水蒸气（在热力学中称为工质）的宏观物理状况随时在变化。工质在热力变化过程中的某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力学状态，简称状态。工质的状态常用一些宏观物理量来描述。这种用来描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数。在工程热力学中常用的状态参数有 6 个，即压力、比体积、温度、热力学能、焓和熵。其中压力、比体积和温度可以直接测量，也比较直观，称为基本状态参数。下面逐一介绍这 6 个状态参数。

(1) 压力。压力是指单位面积上承受的垂直作用力：

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中 p —— 压力

F —— 垂直作用力

A —— 面积

气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁碰撞的结果。根据式 (1-1) 计算的压力是气体的真正压力，称为绝对压力。国际单位制为 Pa（帕），并由于“Pa”这个单位过小，工程中也常用 MPa 作单位。

由于测量压力的仪表通常总是处于大气环境中，因此不能直接测得绝对压力，而只能测出绝对压力和当时当地的大气压力的差值，要注意换算。换算方法《化工原理》等书籍中有介绍，这里不再赘述。

(2) 比体积。比体积就是单位质量的物质所占有的体积：

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-2)$$

式中 v —— 比体积

V —— 体积

m —— 质量

比体积的倒数称为密度 (ρ)。密度是单位体积的物质所具有的质量：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-3)$$

比体积的单位为 m^3/kg ；密度的单位为 kg/m^3 。

(3) 温度。温度表示物体的冷热程度。对于气体，温度可以用分子平均移动能的大小来表示，即

$$\frac{\overline{m \bar{c}^2}}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (1-4)$$

式中 $\bar{m}$ —— 分子的平均质量

$\bar{c}$ —— 分子的均方根移动速度

$\frac{\overline{m \bar{c}^2}}{2}$ —— 分子平均移动能

k —— 波尔兹曼常数 ($k = 1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

T —— 热力学温度

国际单位制中采用热力学温标，也叫开尔文温标或绝对温标，用 T 表示，单位为 K（开

尔文)。摄氏温标或百度温标用 t 表示, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度)。它们之间的换算关系如下:

$$t = T - T_0 \quad (1-5)$$

式中, $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 。

显然, 摄氏温标的每 1°C 和开尔文温标的每 1 K 是相等的, 只是摄氏温标的零点比开尔文温标的零点高出 273.15 K 。

(4) 热力学能。热力学能是指组成热力系的大量微观粒子本身具有的能量 (不包括热力系宏观运动的能量和外场作用的能量)。所以, 热力学能应该包括分子的动能、分子力所形成的位能、构成分子的化学能和构成原子的原子能等。由于在热能和机械能的转换过程中, 一般不涉及化学变化和核反应, 从而后两者的能量不发生变化, 因此在工程热力学中通常只考虑前两者, 即

$$\text{热力学能} \begin{cases} \text{分子的动能} (U_k) \\ \text{分子力所形成的位能} (U_p) \end{cases}$$

对于气体, 分子动能包括分子的移动能、转动能和分子内部的振动能。

单位质量物质的热力学能称为比热力学能 (有时也将比热力学能简称为热力学能):

$$u = \frac{U}{m} \quad U = mu \quad (1-6)$$

式中 u —— 比热力学能

U —— 热力学能

m —— 质量

在国际单位制中, 热力学能的单位为 J , 比热力学能的单位为 J/kg 。

(5) 焓。焓是一个组合的状态参数:

$$H = U + pV \quad (1-7)$$

式中 H —— 焓

U —— 热力学能

p —— 压力

V —— 体积

单位质量物质的焓称为比焓 (有时也将比焓简称为焓);

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \quad H = mh \quad (1-8)$$

焓的单位与热力学能一样, 在国际单位制中是 J , 比焓的单位是 J/kg 。

(6) 熵。熵是一个导出的状态参数。对简单可压缩均匀系 (即只有两个独立变量或自由度的均匀的热力系), 它可以由其他状态参数按下列关系式导出:

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} \quad S = \int \frac{dU + pdV}{T} + S_0 \quad (1-9)$$

单位质量的物质的熵称为比熵 (有时也将比熵简称为熵):

$$ds = \frac{dS}{m} = \frac{du + pdv}{T} \quad s = \frac{S}{m} = \int \frac{du + pdv}{T} + s_0 \quad (1-10)$$

式 (1-9) 和 (1-10) 中: S 、 s 分别为熵、比熵; S_0 、 s_0 分别为熵常数、比熵常数。

在国际单位制中, 熵的单位为 J/K , 比熵的单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

在研究实际的热力系统时, 为了简化计算过程, 抽象出一个理想化的热力过程即可逆过程。可逆过程满足如下条件:

- ①传热时热力系内部、热力系与外界之间不存在温度差；
- ②膨胀时（或压缩时）热力系内部、热力系与外界之间不存在压差；
- ③不存在机械摩擦。

对于这样的过程：

$$ds = \frac{\delta q_{re}}{T} \quad \Delta s = \int_1^2 \frac{\delta q_{re}}{T} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明，在可逆微元过程中，热力系与外界交换的微元热量 δq_{re} 除以换热时热力系的绝对温度 T 所得的商值，即为热力系状态参数熵的微变量 ds ，显然热力系在可逆过程中吸热 $\delta q_{re} > 0$ ，则 $ds > 0$ ，即熵增；若为可逆放热过程，因为 $\delta q_{re} < 0$ ，则 $ds < 0$ ，即熵减；若外界在可逆过程无热量交换（绝热），则热力系熵值保持不变。

1.1.1.2 水的气液平衡状态

在工程热力学中，研究热能向机械能转换的过程中，常涉及水的液态和气态的互相转变。所以在这里特意讨论一下水的气液平衡关系。水由液态转变为气态的过程称为汽化，反之，由气相转变为液相的过程称为凝结（液化）。从微观上看汽化和凝结过程总是同时进行的，如图1-2所示。假定有一容器，灌进一定量的水（不装满），然后设法将留在容器中水面上方的空气抽出并将容器封闭。空气抽出后，水面上方不可能是真空状态，而是充满了水蒸气（由水汽化而来）。因为容器中水的分子在作不停息的热运动。水面附近动能较大的分子有可能挣脱其他分子的引力离开水面变成水蒸气的分子。同时也有液面上空间内的蒸汽分子碰撞回到液面，凝成液态水。液态水的温度越高，分子运动越剧烈，水面附近动能较大的分子挣脱水面变成蒸汽的分子数越多。如果容器空间没有其他气体，当容器空间中水蒸气分子逐渐增多，液面上蒸汽压力也将逐渐增大，水蒸气的压力越高，亦即水蒸气密度越大，水蒸气的分子与液面碰撞越频繁，变为水分子的水蒸气分子数也越多。到一定状态时，这两种方向相反的过程就会达到动态平衡。此时，两种过程仍在不断进行，但宏观结果是状态不再改变。这种液态水和蒸汽处于动态平衡的状态称为饱和状态。处于饱和状态的蒸汽称为饱和蒸汽，液态水，称为饱和水。此时，气、液相的温度相同，称为饱和温度，用 t_s 表示；蒸汽的压力称为饱和蒸汽压力，用 p_s 表示。饱和蒸汽的特点是在一定容积中不能再含有更多的蒸汽，即蒸汽压力与密度为对应温度下的最大值。

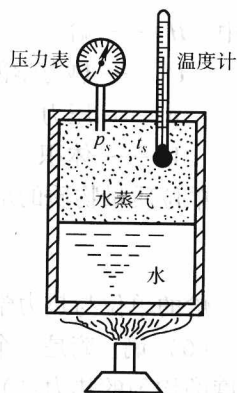


图1-2 水的气液平衡过程

若温度升高并且维持一定值，则汽化速度加快，空间内蒸汽密度亦将增加。当增加到某一确定数值时，在液态水和蒸汽间又建立起新的动态平衡，此时蒸汽压力对应于新的温度下的饱和压力。一定的饱和温度总是对应着一定的饱和压力；一定的饱和压力也总是对应着一定的饱和温度。饱和温度越高，饱和压力也越高。由实验可以测出饱和温度与饱和压力的关系，图1-1中的曲线AC示出的就是这种关系，可见临界温度是最高的饱和温度；临界压力是最高的饱和压力。

水的气液平衡状态即饱和状态，是相对平衡状态，当系统条件和外界条件不变化时，它将保持这种状态不变化。但当条件变化时，它的状态将会发生变化，直到在新条件下重新达到平衡为止。常见的有以下几种：