



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

热能与动力工程基础

王承阳 编著

RENENG YU DONGLI

GONGCHENG JICHU



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

71

热能与动力工程基础

王承阳 编著

北京
冶金工业出版社
2010

TK11-43

Wk.8

内 容 提 要

本书介绍了热能与动力工程领域的基本理论和应用概况,内容包括能源及能源利用的概况、热能与动力工程专业领域所涉及的各个方面、热能利用的理论基础、主要能源设备与装置的原理和技术发展状况、能源与环境问题的密切关系与对策等。

本书可作为高等学校非热能动力类专业的能源利用类课程的教材,也可供能源动力类专业学生课外阅读以解除各学校自身特色以外的本专业的全貌,也可作为相关科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力工程基础/王承阳编著. —北京:冶金工业出版社,2010.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5024-5137-0

I. ①热… II. ①王… III. ①热能—高等学校—教材
②动力工程—高等学校—教材 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 004589 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 马文欢 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5137-0

北京印刷一厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 1 月第 1 版,2010 年 1 月第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16; 12.75 印张; 338 千字; 191 页; 1-2500 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

党的十六届五中全会提出,“十一五”末期我国单位 GDP 能源消耗要比“十五”末期的降低 20% 左右。这个目标要靠全国人民的共同努力才能实现,而不仅仅是能源领域工作者的任务。为此,掌握科学用能的基本理论和方法应当是每个工程师必备的基本素质,对材料、冶金等非能源动力类专业的工科学生进行这方面知识培养成为当务之急。从 2003 年起,东北大学在材料与冶金学院“尖子班”中开设了“热能工程导论”课,进行这方面知识的传授,效果良好,计划予以推广。本书就是为了适应这一需要而编写的。

本书试图以比较浅显易懂的语言将热能与动力工程领域的基本理论和应用的全景展示给本领域以外的学生和科技工作者,使他们了解能源及能源利用的概况,认识和了解热能与动力工程专业领域所涉及的方方面面,了解和掌握热能利用的理论基础,了解主要能源设备与装置的原理和技术发展状况,了解能源与环境问题的密切关系与对策。

本书共分 9 章。第 1 章简单而全面地论述了国内外所面临的能源问题;第 2 章和第 3 章按照学科分类介绍了热能与动力工程领域内各个子学科及其发展方向的主要内容和最新技术前沿,具有较强的科普性;第 4 章简单讲述了流体力学和传热学的最基本的原理,即热能直接利用的理论基础;第 5 章介绍了主要的热能利用设备的原理、结构;第 6 章则针对热功转换的热力学原理和设备进行了简述,其中比较强调能源利用的第二定律原理;第 7 章专门介绍热功逆向循环装备——制冷机与热泵的原理和结构;第 8 章讨论了能源利用对环境造成的污染,也讨论了热能工程原理在环境污染治理工作中的应用;第 9 章则专门探讨了工业工艺过程中热物理理论的应用,是专门针对材料、冶金等工业工艺类专业学生的需要而编写的。

本书不仅强调有效、持久、清洁地利用能源是热能与动力工程领域所面临的首要课题,也指出利用工程热物理理论解决各种工业工艺过程和自然过程中有关热的问题也是本学科的重要课题。

本书还适合愿意全面了解专业学科状况的热能与动力工程专业的本科生和研究生阅读,有助于他们在各学校专业特色的基础上拓宽视野,加深对专业的

热爱。

在本书编写与教学实践过程中,我的同事李宝宽、李娟、周清、荣军和王芳提供了许多有价值的帮助和建议,沈阳经济技术开发区热电有限公司曹亚明总工程师提供了电厂和锅炉方面的有关资料,在此表示感谢。

由于作者的工作领域和学识有限,而热能与动力工程专业学科范围相当广泛,几乎涵盖国民经济的方方面面,教材中有的知识点写得比较生硬、粗浅,这些遗憾需要通过读者的批评和帮助才能逐渐弥补,作者将在教学过程中不断完善,希望未来修订时能有比较大的改观。

王承阳
2009年10月
于东北大学

目 录

1 能源概论	1
1.1 能源与人类社会的发展	1
1.2 能源的分类	1
1.3 能源的评价	2
1.4 1973 年以来世界与中国的能源状况	3
1.4.1 世界能源状况	4
1.4.2 中国能源状况	8
2 热能与动力工程的研究方向(上)	12
2.1 专业与学科	12
2.2 热能与动力工程专业(动力工程及工程热物理学科)的研究内容	13
2.3 工程热物理学科(080701)	14
2.3.1 工程热力学	14
2.3.2 流体力学	15
2.3.3 传热传质学	17
2.3.4 燃烧学	18
2.3.5 多相流动与传热传质	19
2.3.6 热物理测试技术	20
2.4 热能工程学科(080702)	20
2.4.1 电厂热能动力工程	20
2.4.2 建筑热物理技术	21
2.4.3 换热器技术	22
2.4.4 新能源和可再生能源技术	22
2.4.5 冶金热能工程	26
2.4.6 能量贮存技术	28
2.4.7 农村能源	29
2.5 动力机械及工程学科(080703)	30
2.5.1 内燃机	30
2.5.2 汽轮机及其辅机	31
2.5.3 航空发动机与燃气轮机	35
2.5.4 舰船动力装置	37
2.5.5 锅炉	40
2.5.6 新型动力技术	41

2.5.7 余热与余压利用	45
3 热能与动力工程的研究方向(下)	47
3.1 流体机械及工程学科(080704)	47
3.1.1 流体机械内部流动机理	47
3.1.2 流体机械及系统的优化设计与可靠性分析	49
3.1.3 流体工程中噪声与振动的机理和控制	52
3.1.4 真空技术	52
3.1.5 气力、液力输送	53
3.1.6 工程渗流	54
3.1.7 非牛顿流体流动的工程应用	55
3.2 制冷及低温工程学科(080705)	56
3.2.1 低温技术	56
3.2.2 气体液化及分离设备与系统	56
3.2.3 冻结和冻干过程机理	58
3.2.4 低温绝热技术	59
3.2.5 冷量储存及输送技术	60
3.2.6 制冷及低温技术的广泛应用	60
3.3 化工过程机械学科(080706)	62
3.3.1 流程工业中的传热设备及节能技术的研究	62
3.3.2 化工单元传质设备和相分离设备研究	63
3.3.3 化工过程用泵、压缩机等流体机械的研究与监控	63
3.3.4 压力容器及管道的设计、制造和安全保障的技术研究	63
3.4 动力工程与工程热物理学学科新的增长点	65
3.4.1 工业生态学	65
3.4.2 电磁流体力学(材料工艺过程中的热物理问题)	67
3.4.3 能源战略与政策研究	68
3.4.4 生态环境与生命系统中的热物理研究	69
3.4.5 大气运动与大气的传热传质作用	69
3.4.6 火灾科学的理论与实验研究	71
4 热能直接利用的理论基础	73
4.1 流体力学基础	73
4.1.1 基本概念	73
4.1.2 流体静力学	75
4.1.3 流体动力学	76
4.2 传热学的基本理论	82
4.2.1 导热	82
4.2.2 导热系数	82

4.2.3	导热微分方程式	83
4.2.4	初始条件及边界条件	83
4.2.5	对流和对流换热	84
4.2.6	对流换热的数学描写	84
4.2.7	对流换热的边界层	85
4.2.8	管槽内强制对流湍流换热的实验关联式	86
4.2.9	热辐射的概念	87
4.2.10	热辐射的基本定律	88
4.2.11	辐射换热的计算	91
4.2.12	传热过程和传热系数	93
5	热能的直接利用	95
5.1	锅炉	95
5.1.1	烟管锅炉和水管锅炉	96
5.1.2	层燃炉	96
5.1.3	室燃炉	98
5.1.4	循环流化床锅炉	99
5.2	换热器	101
5.2.1	换热器的分类	101
5.2.2	板类换热器的基本结构	101
5.2.3	管类换热器的基本结构	104
5.2.4	管壳式换热器	105
5.3	工业窑炉	107
5.3.1	火焰炉	107
5.3.2	电炉	108
5.3.3	膛式炉窑	110
5.4	工业加热	112
5.4.1	红外加热	112
5.4.2	蒸汽加热	113
5.4.3	其他介质加热	115
6	能源动力转换与热力学基础	117
6.1	热力学第一定律和热力学第二定律	117
6.2	孤立系统熵增原理	118
6.2.1	熵流与熵产	118
6.2.2	可用能	119
6.2.3	孤立系统熵增原理	120
6.2.4	热能利用的能量梯级利用原理	121
6.2.5	存在物理学与演化物理学	122

6.3	地球生物圈、熵与人类活动	123
6.4	动力机械	126
6.5	热力发电厂	127
6.5.1	热力发电厂的基本循环	127
6.5.2	实际的热力发电厂热力系统(热力循环)	128
6.5.3	电厂的热经济性指标	130
6.5.4	热力发电厂的技术发展方向	131
6.6	汽车发动机	132
6.6.1	四冲程内燃机的工作原理	132
6.6.2	内燃机的理论热力循环及性能指标	134
6.6.3	汽车发动机的动力经济性性能指标	136
6.6.4	内燃机的排气净化	137
6.6.5	车用内燃机的技术进展	139
7	制冷与热泵	140
7.1	制冷机与热泵	140
7.2	蒸气压缩制冷循环	141
7.2.1	蒸气压缩制冷循环	141
7.2.2	制冷剂	142
7.2.3	制冷剂命名	143
7.2.4	制冷压缩机	143
7.2.5	制冷压缩机的技术发展趋势	144
7.3	其他制冷循环	146
7.3.1	吸收式制冷循环	146
7.3.2	气流引射式制冷循环	147
7.3.3	空气压缩制冷循环	148
7.3.4	热电制冷	149
8	热能与环境	153
8.1	各种能源对环境的影响	153
8.1.1	煤	153
8.1.2	石油和天然气	154
8.1.3	核能	154
8.1.4	能源获取过程中的环境问题	156
8.2	区域性能源环境问题	157
8.2.1	SO _x	157
8.2.2	NO _x	157
8.2.3	悬浮颗粒物	158
8.2.4	HC	158

8.2.5	CO	159
8.2.6	二噁英	159
8.2.7	热污染	159
8.2.8	噪声污染	160
8.2.9	放射性污染	161
8.3	全球性能源环境问题	161
8.3.1	温室效应	161
8.3.2	酸雨	162
8.3.3	大气臭氧层的破坏	162
8.4	环境影响评价	163
8.4.1	环境影响评价的内容和要求	163
8.4.2	环境影响评价的典型案件	164
8.5	改善能源环境状况的措施	164
8.5.1	清洁能源行动	165
8.5.2	清洁燃烧技术	165
8.5.3	CFCs 替代	166
8.5.4	节能节水	167
8.6	污染转移与排放权贸易	168
8.7	环境问题中的热物理	169
8.7.1	大气、水体中污染物运动与流体力学	170
8.7.2	污染物转化的热物理机理	174
9	工业工艺过程中的热物理问题	180
9.1	冶金工业的加热工艺	180
9.1.1	焙烧、煨烧	180
9.1.2	金属加热工艺	181
9.1.3	烧结与焦化	183
9.2	计算流体力学在冶金中的应用	184
9.2.1	冶金中计算流体力学的研究概况	185
9.2.2	冶金流体力学研究中所面临的问题	185
9.2.3	计算流体力学的作用	186
9.3	硅酸盐工业热工过程	187
9.3.1	陶瓷的烧成过程	187
9.3.2	水泥	188
9.3.3	玻璃的熔制过程	188
9.4	本章结语	189
	参考文献	190

1 能源概论

1.1 能源与人类社会的发展

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。农耕时代人们分散地使用薪柴、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,推动了生产力的飞速发展,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的物质基础。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讯技术对于生产、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年代的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,新能源也会随之发展,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,能源的需求量日益增加,如果能源的供应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进展。

1.2 能源的分类

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空间转换和形式转换。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、潮汐和地震等等也包含能量,所以也都是能源。地球上的能源归纳起来,大致可分为三类(见表1-1):

(1) 来自地球以外的天体的能量。最主要的是太阳辐射能,煤、石油等化石燃料归根结底都是来自于太阳能。此外,还有其他天体发射到地球上的各种宇宙射线的能量,以及随陨石和太空飘尘落到地面的能量(这些能量中没有月亮什么事,月光是月面反射的太阳光),与太阳能相比,微乎其微。

(2) 地球本身内部蕴藏的能量。主要是核能和地下热能(地球内部的热量,既有地球出生时的遗迹,也有地球内部核衰变所产生的)。

表 1-1 根据能源来源进行的分类

第一类 来自地球以外的 天体的能量	太阳辐射能	煤、石油、天然气、油页岩、草木燃料、沼气和由于光合作用而固定的太阳辐射能 风、流水、波浪、海流(洋流) 海洋热能 直接的太阳辐射
	宇宙射线、流星和其他星际物质带进地球的能量	
第二类 地球本身内部蕴藏 的能量	地球热能	地震、火山活动 地下热水和地热蒸汽 热岩层、岩浆
	原子能(核能)	铀、钍、镭、氡等等
第三类 由于地球和其他天体相互 作用而产生的能量	潮汐能	

(3) 由于地球和其他天体相互作用而产生(主要是月-地作用)的能量。如潮汐能等就属于这类能量。

通常把自然界中自然存在的能源称为一次能源(crude energy resources),包括石油、天然气、煤炭、水力、核能、风力、太阳能、地热能、生物质能、天然气水合物、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。由其他形式能源转换(制取或变化)而来的能源称为二次能源(secondary energy resources)。电能、汽油、柴油、煤油、重油、渣油、酒精、火药、焦炭、洗精煤、煤气、石油气(炼化产品)、压缩空气(风)、蒸汽甚至软化水等等均为二次能源。

一次能源的资源性,决定了它们所具有的战略性和重要性。一次能源可以划分为常规能源和新能源两类,煤、石油、天然气、水力和核能等在社会生产生活中大规模使用的能源被称为常规能源,而其他目前利用规模很小但很有长期利用前景的太阳能、风能等等则称为新能源(在 20 世纪 80 年代,核能还被列为新能源,进入 90 年代以后,核能逐渐被纳入常规能源范围)。煤、石油、天然气等化石燃料(它们都是由远古时期的动植物遗体变化而来,故称为化石燃料)和核能随着人们的利用而逐渐减少,称为非再生能源,其他能源可以随着太阳辐射或潮汐作用而不断再生补充,故称为可再生能源,可再生能源还具有低污染或无污染的特点,所以又称为清洁能源(由于天然气中含碳、硫比较少,燃烧产物中 SO_x 和 CO_2 的相对量比石油和煤少得多,而且容易彻底燃烧,较少出现像煤和石油产品那样不完全燃烧而产生的污染,故天然气目前也称为清洁能源或清洁燃料,但天然气的清洁与可再生能源的清洁不可同日而语)。

1.3 能源的评价

实施一项工程,建设一个项目,都涉及如何使用能源,即确定能源利用方案。从能源利用的角度看,各种能源各有优缺点,因此要进行能源利用评价。评价能源利用性能的技术指标主要有:

(1) 能流密度。指利用某种能源时,在一定空间或面积内实际获得的能量或功率。显然,如果某种能源能流密度太小,就很难大规模利用。

(2) 开发费用和设备价格。各种能源的勘探、开采、运输、利用都需要人力物力的投入,一般以单位功率或单位能量的费用 and 价格进行计算、比较和评价。

(3) 存储性能和供应连续性。指能源不使用时是否可以储存,使用时是否能够保证连续地、充足地供给。

(4) 运输费用与损耗。指远距离输送所产生的比较可观的费用与损耗,例如晋、陕、蒙的煤炭运往东南沿海,中东的石油运往世界各地,西北、西南的电力输往东南沿海等等。

(5) 环境污染。环境污染是与能源利用成正比的,但不同的能源对环境产生的污染程度不同,不同的能源利用方式对环境产生的污染程度也不同。一般把对环境污染轻微的能源称为清洁能源。

(6) 存储量。这是相当重要的指标,直接影响区域能源生产与消费结构和能源政策。例如,我国的能源储量中煤炭占绝大多数,这就决定了我国的能源结构是以煤炭为主,而西方各国则是以石油和天然气为主。

(7) 能源品位。能够直接变成机械能或电能的能源,品位要比必须先经过热能形式再转化成机械能或电能的能源的品位高。其划分依据是热力学第二定律。

1.4 1973 年以来世界与中国的能源状况

国际社会真正开始关注能源问题肇始于 1973 年的石油危机^①。1973 年第四次中东战争期间,阿拉伯产油国联合委内瑞拉等石油输出国组织^②(Organization of Petroleum Exporting Countries, OPEC, 欧佩克)成员国采取减产、禁运、提价、国有化和增加本国在石油垄断企业中的股权等措施,打破外国公司对石油价格的垄断,夺取石油标价权,在一定程度上保护了本国石油资源,改变了本国经济的贫穷状况。期间石油价格提高三倍,给世界经济(主要是发达国家的经济)造成了强烈的冲击,引发了一次相当规模的经济危机。尔后 OPEC 多次提高石油价格,到 1978 年 4 月 1 日,每桶原油价格达到 14.452 美元(1 桶 = 158.98 L)。

中国关注能源问题则起始于 1978 年开始改革开放,进行大规模经济建设的时候。当时,中央把实现四个现代化的具体目标确定为从 1981 年到 2000 年的 20 年里,在不断提高经济效益的前提下,使全国工农业生产总值翻两番,达到人均 800 ~ 1000 美元。但是,就当时我国的单位产值能耗水平、能源生产和消费总量、能源的资源贮存量等方面来看,到 2000 年不可能提供总量高达 2.4 Gt 标准煤(ton coal equivalent, tce. $\approx 29.31\text{GJ}$)的能源供给,而预计最多仅能生产出一半即 12 亿吨标准煤的能源。只能翻一番的能源需要支持产值翻两番,因此,党中央提出了“开发与节约并重,近期以节约为主”的能源政策,掀起了一场节能降耗的浪潮,并取得了瞩目的成就。仅以钢铁工业为例,1981 年到 2000 年的 20 年间吨钢综合能耗(标煤)从 2.040 t 降为 1.180 t,其

① 第二次世界大战时纳粹德国对罗马尼亚油田和巴库油田的抢夺、日本对东南亚石油资源的抢夺等都已经体现了石油问题的重要性,甚至改变了战局的走向。但那时还仅仅是军事战略层次的问题,并没有提升到全球经济的层次,因而也未引起除了军事家之外的广泛关注。

② 石油输出国组织是 1960 年 9 月 14 日,由伊拉克政府邀请伊朗、科威特、沙特阿拉伯和委内瑞拉等四国代表为对付西方石油公司企图再次降低石油标价,在巴格达举行会议时决定成立的,以后陆续又有阿尔及利亚、厄瓜多尔、加蓬、印度尼西亚、利比亚、尼日利亚、卡塔尔和阿拉伯联合酋长国参加,总部设在奥地利首都维也纳,其最高权力机构是石油输出国组织大会,又称“部长级会议”,每年至少开会两次。另设专门机构经济委员会,协助协调国际石油价格。该组织的主要宗旨是:协调和统一成员国的石油政策,维护各成员国的利益,设法确保国际市场石油价格的稳定;确保生产国获得稳定的收入,有效地节约地正常向需油国家供应石油,并使它们在石油业的投资中得到公平的收入。

中 75 家大中型企业已经降至 0.916 t^①。2005 年 9 月,中国共产党十六届五中全会按照“十六大”对 21 世纪头 20 年全面建设小康社会的总体部署,提出了“十一五”时期经济社会发展的主要目标:在优化结构、提高效益和降低消耗的基础上,实现 2010 年人均国内生产总值比 2000 年翻一番;资源利用效率显著提高,单位国内生产总值能源消耗比“十五”期末降低 20% 左右……

1.4.1 世界能源状况

1.4.1.1 目前的资源与消费结构

到 2001 年末,世界煤炭剩余可采储量为 984.453 Gt^②。其中,80% 分布在亚太、北美和俄罗斯,中南美地区最少,仅占 2.3%,中东非洲共占 5.8%。储量排在前 10 位国家的总储量为 893.823 Gt,占世界的 90.8%,其中美国占世界总量的 25%,列第 1 位,中国占 11.6% (114.5 Gt),列第 3 位。

到 2001 年末,世界石油剩余可采储量为 143 Gt。其中,2/3 位于中东地区,为 93.4 Gt;其他地区均不足 10%。储量排在前 10 位国家的总储量为 119 Gt,占世界的 83.2%,其中沙特阿拉伯占世界总量的 25% (36 Gt),列第 1 位,中国占 2.3% (3.3 Gt),列第 11 位。

到 2001 年末,世界天然气剩余可采储量为 $155.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中,70% 位于俄罗斯和中东地区,其他地区均不足 10%。储量排在前 10 位国家的总储量为 $117.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占世界的 75.8%,其中俄罗斯占世界总量的 32.9% (俄罗斯自己统计为 45%),列第 1 位,中国占 0.9% ($1.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$),列第 18 位。

到 2001 年末,世界一次能源消费量(标煤)为 9.1248 Gt。3/4 由北美、亚太和欧洲地区消费。消费量排在前 10 位国家的总消费量为 5.8354 Gt,占世界的 63.9%,其中美国一次能源消费占世界总量的 25%,列第 1 位,中国占 9.2% (0.8397 Gt),列第 2 位。

人均能源消费量(2004 年数据,标准油):世界平均水平为 1.63 t/a^③,美国列第 1 位,人均 8.02 t/a,日本人均 3.82 t/a,中国为人均 1.08 t/a。

表 1-2 和表 1-3 列出了一些国家能源构成和消费量的有关情况。

表 1-2 各国能源构成比较

国名	石油	天然气	煤炭	水电	核能
(1977)					
美国	43	29	21	5	2
日本	75	3	15	5	2
英国	47	14	35	1	3
法国	64	9	17	8	2
联邦德国	49	13	35	1	2
中国	22	3	71	4	0
世界平均	44	18	30	6	2

① 2003 年能耗(标煤)更进一步降至 770 kg,其中宝山钢铁公司的吨钢综合能耗仅为 675 kg。同期日本钢铁工业的吨钢综合能耗为 656 kg。

② 关于世界能源方面的数据十分混乱,例如这组数据是作者在 2003 年夏得到的,而 2005 年《中国能源报》上一篇文章引用《2004 年 BP 世界能源统计》时谈到:“截止到 2003 年底,世界煤炭剩余可采储量为 9844.5 亿吨。”但是数据的量级是没有问题的。

③ 吨标准油/年 (toe/a):其中,吨标准油 (toe, ton oil equivalent),也可译成吨油当量。1 吨油当量 = $10.486 \times 10^6 \text{ kcal} = 1.498 \text{ 吨标准煤} = 43.906 \text{ GJ}$, a: annual, per year。

续表 1-2

国名	石油	天然气	煤炭	水电	核能
(1997)					
美国	39.5	26.5	24.6	1.4	8.0
俄罗斯	22.1	51.3	19.5	2.3	4.8
日本	52.6	11.6	17.7	1.6	16.5
德国	40.2	20.9	25.5	0.5	12.9
法国	37.6	12.8	5.4	2.4	41.8
英国	36.1	34.3	18.0	0.2	11.3
中国	20.5	1.9	75.4	1.8	0.4
印度	31.9	8.5	56.2	2.4	1.0
世界平均	39.9	23.2	27.0	2.6	7.3

表 1-3 世界主要国家一次能源消费量(标准油)构成(2000年)^[1]

Mt

国名	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计
美国	897.6	582.4	565.3	179.6	62.4	2287.3
法国	94.9	35.7	13.8	94.0	16.4	254.8
德国	129.8	71.5	84.9	38.4	5.9	330.5
英国	77.9	86.4	36.9	19.3	1.8	222.3
中国	230.1	22.1	493.7	3.8	55.0	804.7

1.4.1.2 世界能源结构调整及需求变化分析

21 世纪世界能源的需求量仍将继续增长,能源开发结构将由石油主导型发展为多元共生型,可再生能源将迅速发展。由于能源结构调整和变化的周期较长,因此,在相当长的一段时期内,世界能源形势表现出下述特征:

(1) 传统的矿物燃料仍将是较长一段时期内能源生产消费的主体。世界能源需求(标煤)在 2020 年将接近 20 Gt,任何一种新能源在短期内都无法满足如此巨大的能源需求,而矿物燃料的资源目前依然较为丰裕,价格也相对低廉。据估计按目前的开发利用强度和回收率,矿物燃料仍可供全世界使用 100~200 年(见表 1-4)。矿物燃料开发利用的技术也比较成熟,并已经系统化和标准化,而建立一套适合新能源开发利用的新技术体系尚需要较长一段时间。

表 1-4 世界能源资源概况(世界能源委员会 1992 能源资源调查)

项目	无烟煤	烟煤(年限)	石油(年限)	天然气(年限)	总储量
标准量/PJ	19841141	4582845(209)	5639794(45)	5004802(52)	34578702
实物量	710897 Mt	328284 Mt	134697 Mt	$128.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$	
比重/%	57.2	13.3	16.2	14.5	100

(2) 能源开发利用所造成的环境问题日趋严重。

(3) 能源生产消费结构将出现多元化趋势,特别是可再生能源和核能将会发挥较大的作用。目前,可再生能源提供了世界所需能源的 20% 以上,其中 14% 是生物质能,6% 是水能。预计今后水电和柴薪的消费量每年将增加 10%。核能也将成为发电最有希望的潜在能源之一。天然气消费的高速增长期已经到来,并在许多领域替代着煤炭和石油。地热发电、风力发电和光伏电池则以较高的速度持续稳定地增长。

1992 年,联合国工业发展组织、国际原子能机构、国际应用系统分析研究所和石油输出国组

织在第 15 届世界能源委员会上对未来能源需求趋势作了预测,见表 1-5。

表 1-5 2050 年世界能源需求预测(长期控制 CO₂ 排放/不控制 CO₂ 排放)

项 目	能源需求(标准油)/Gt	所占比例/%
总 量	18.1/21	
石 油	5.4/5.8	230/28
煤 炭	4/5	22/24
天然气	5/6.1	28/29
水能、核能	3.7/4.1	20
CO ₂ 排放量(亿吨碳)	130/150	

根据世界能源大会(WEC)与国际应用系统分析研究所(IIASA)1995 年对 21 世纪世界能源发展所做的预测,预计发达国家由于价格影响和对环境问题的关注,能源的需求增长将可能减缓,有些国家和地区还有可能下降,新能源和可再生能源的开发将引起重视,并继续在降低能耗和利用替代能源上努力。发展中国家由于人口和经济增长迅速,能源需求量增长较快。到 2050 年,发展中国家的人口将有可能达到 90 亿,能源消费量将提高 2~5 倍,这将导致发展中国家在全球的总能耗份额由 1990 年的 1/4 增加到 21 世纪中叶的大约 2/3。如印度对石油产品的需求可能从 1985 年的 33.44 Mt 增加到 75.88 Mt,增长 1 倍多。

1.4.1.3 世界能源发展的变革趋势及其特点

(1) 世界能源已步入一个新的变革期。能源是人类社会生产生活的动力,现代社会的发展与繁荣,与能源的发展变革息息相关。近 30 年来,“石油危机”的发生和现代工业带来的一系列环境问题,使人们对不可再生矿物能源储量的有限性及其使用的局限性有了更深刻的认识。有限的资源和有限的空间环境,迫使人们在合理利用常规能源及寻求可再生新能源方面进行了积极探索与研究。世界能源已步入一个新的变革时期。据有关资料预测,这次变革大体将经历两个阶段。在第一阶段,以天然气、煤层气等气体能源为主体,以液化煤、气化煤等传统矿物能源的洁净化技术和核裂变技术为两翼,将共同构成世界能源消费的主体。然后逐步过渡到以核聚变及可再生能源为主的第二阶段。

(2) 高新技术成果在能源工业迅速推广应用,使整个能源工业正在由低技术向高技术过渡。目前,几乎所有新技术革命的重大成就都已迅速地渗透到能源勘探、开发、加工、转换、输送、利用的各个环节。如以计算机为核心的现代设计、制造、监控、管理、信息处理系统和自动控制系统;各种高性能合金、工程塑料、合成树脂、高性能复合结构材料、光纤等新材料的广泛应用;利用微生物探矿、控制有害物质含量和对煤炭用细菌脱硫的各种研究与工业性试验;利用航天技术进行资源普查、处理危险事故,建立高效率、高能量太阳能发电站等等。能源产量的增长越来越依靠科学技术进步。

(3) 能源产品正在向洁净化、精细化、高质量化、多元化方向发展,常规能源的开发、加工、转换、输送和综合利用技术将会出现显著进展和重大突破。为了扩大煤炭的应用,煤的地下气化、流化床燃烧技术以及煤的气、液化工作正在得到高度重视。

(4) 节能新产品和新技术不断涌现。许多国家在提高劳动生产率,改进生产工艺,应用节能新产品、新技术、新材料、新工艺等方面积极努力,储能技术上的突破引人注目。

(5) 各种新能源和可再生能源的开发利用得到普遍的重视。

(6) 能源开发利用的模式面临着历史性变革。有关专家曾将人类能源开发利用的模式概括为以下四种:

1) 在较低水平上的可持续使用模式。这一模式是指人类在进入工业化时代以前,能源消耗

还比较少,尽管也存在局部的能源短缺和环境破坏,但总体上未产生全球性的能源与环境问题,人类能源的开发和利用还限制在较低水平上的可持续发展阶段。

2) 对廉价能源毫不节制的消耗模式。工业革命之后,人类对能源的开发和利用有了巨大的变化,大规模开发利用煤炭以及价格低廉的石油有力地支持了一大批工业化国家的复兴和一批新兴工业化国家的兴起。这一时期人类对能源的开发和利用可以说是掠夺性的,给全球生态环境造成了无可挽回的损害。只不过这种损害被世界经济的空前繁荣与工业化带来的物质文明所掩盖。

3) 节制开发和珍惜使用模式。1973 年和 1979 年两次石油危机,导致了世界性的经济危机,人类意识到矿物燃料总会有枯竭的那一天。工业化国家开始节省能源、提高效率并积极寻求替代能源。

4) 环境容量要求人类对自己的能源开发消费行为加以限制的模式。人们对气候变化持续关注,从而意识到能源与环境协调发展的重要性。如果人类不对毫无节制的能源开发消费行为加以控制,环境资源将先于能源资源而枯竭。因此,对能源的利用应该首先限制在环境容量允许的范围之内,否则发展将难以为继。

可见,资源短缺特别是各类不可再生资源的日渐枯竭和日益严重的生态环境问题是人类能源开发利用的两大限制性因素。据统计,在近代工业化革命短短的一二百年中,工业生产增长了 50 倍,矿物燃料的消耗增加了 30 倍。更重要的是:人类创造物质财富能力的 80% 是在 20 世纪 50 年代之后产生的,人类消耗矿物燃料能力的 60% 也是在 20 世纪 50 年代以后产生的。如果人类能源开发利用的模式不尽快改变,其后果将是灾难性的。

1.4.1.4 世界能源发展对社会经济的影响分析

世界能源发展不断变革的趋势,对经济社会的各个方面将会产生重要影响,并可能引起社会生产和生活方式的重大调整与急剧变革。

(1) 引起世界经济重心的转移。据预测,到 2030 年,石油占世界能源总供应量的比重将下降到 1/3。届时,一个多能互补、较为均衡的能源结构将会出现,新的能源供需格局将对世界各国经济的发展和人民生活质量的改善,对国际贸易以至世界政治经济都将产生重大影响,新的经济中心和新的地缘政治格局将会出现。

(2) 触发新的产业革命。在工业化和近代科技发展的全部历史中,以煤炭代替柴薪的第一次能源变革,促进了蒸汽动力的广泛应用,曾引起了以纺织技术、矿冶技术为突破的产业革命;以石油在能耗比重中剧增为标志的第二次能源变革,引起了电力、化工、内燃机、合成材料、电子计算机、宇航等新兴工业发展的产业革命。以气体燃料和可再生能源发展为标志的第三次能源变革,伴随着世界进入了信息化社会。

(3) 引起地区经济结构的重大调整 and 变化。新能源的崛起,传统能源在开发、利用及深度加工技术上的突破,能源开发重心的逐步转移,环境质量、社会服务质量、生活质量的高标准要求都有可能改变一个国家或地区的能源结构,并进而使其经济结构也发生较大的变化,触发各种新兴产业的出现。

(4) 引起能源工业劳动方式和劳动就业结构的变化。随着信息技术、微电子技术等在能源工业中的普遍推广,能源工业的劳动生产方式将可能发生较大变化,人才智力结构将发生变更,脑力劳动所占比重将会显著增加,简单体力劳动的比重将明显下降。

(5) 能源工业的生产经营方式和生产组织形式将发生变革。高技术的普遍推广应用,使能源工业将可能以自动化的遥控监测方式和高效能的信息处理方式等一系列全新的生产组织管理系统来取代现行的管理模式。各种跨行业、跨部门、跨地区的集团化、综合性公司将会出现,闭合性循环生产将使资源得到最大限度的合理利用。