



高等学校“十三五”规划教材

能源概论



陈 砾 严宗诚 方利国 编著



化学工业出版社



高等学校“十三五”规划教材

能源概论



陈 砾 严宗诚 方利国 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《能源概论》(第二版)从常规能源、新能源与可再生能源、节能与储能三个方面,向读者全面介绍能源科学知识。在综述我国及全球能源形势的基础上,分别对煤炭、石油、天然气和电力四种常规能源的形成机理、性质、勘探与开采、加工转换和利用技术等展开论述;对核能、太阳能、生物质能、风能、地热能、海洋能和氢能的特点、资源量、利用原理与技术及研究进展作了介绍;以节能基本理论及工业、建筑、民用、交通等高耗能行业作为切入点阐述了节能技术,并对储能技术作了简要介绍。在编写过程中,作者充分兼顾各类专业背景的读者群,力求用通俗的论述使读者了解和掌握能源科学的基本原理和方法。

《能源概论》(第二版)可作为普通高等学校各专业本科生或高等职业技术学校各专业高职生能源类通识课的教学用书,也可供非能源专业科技人员参考,或作为能源知识的普及读本。

图书在版编目(CIP)数据

能源概论/陈砺,严宗诚,方利国编著.—2版.—北京:
化学工业出版社,2018.6
ISBN 978-7-122-32021-6

I. ①能… II. ①陈…②严…③方… III. ①能源-概论
IV. ①TK01

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第079924号

审图号:GS(2018)5880号

责任编辑:徐雅妮

文字编辑:任睿婷

责任校对:宋玮

装帧设计:王晓宇

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 装:中煤(北京)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数502千字 2019年1月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 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:48.00元

版权所有 违者必究

前言

时光荏苒,《能源概论》自2009年问世,至今已过去近十年。在这十年里,全球能源体系发生了重大而深刻的变化。主要体现在以下四个方面:

一是能源清洁低碳发展成为大趋势。2015年12月12日,《联合国气候变化框架公约》近200个缔约方一致同意通过《巴黎协定》,形成了人类社会应对全球气候变化的共识,为2020年后全球应对气候变化行动作出了安排。在这个大背景下,各国纷纷制定能源转型战略,提出更高的能效目标,制定更加积极的低碳政策,推动可再生能源发展,加大温室气体减排力度。

二是世界能源供求关系发生深刻变化。以页岩油气技术突破为代表,世界能源供应结构发生了重大变化,新能源与可再生能源技术逐渐走向成熟,能源多极供应的新格局正在形成,供应能力不断增强。而受到经济发展放缓的影响,主要耗能国家能源消费总量趋于稳定甚至下降,全球能源供需矛盾得到缓解。

三是世界能源技术创新进入活跃期。近十年,能源新技术与现代信息、材料和先进制造技术深度融合,常规能源的勘探、开采和利用技术水平不断提高,太阳能、风能、新能源汽车技术不断成熟,大规模储能、氢燃料电池、第四代核电、海洋能、可燃冰等技术有望突破,能源利用的新模式、新业态、新产品日益丰富。

四是世界能源走势面临诸多不确定因素。国际社会利益冲突导致的各类矛盾频发,政治、经济等因素交织使能源走势的不确定性增加。

作为大学生的通识课教材,《能源概论》(第二版)在保持原有特色和主要内容的基础上,对全书的结构和内容作了调整,增加了核能、储能技术和页岩气等章节,对电力输配、天然气水合物等内容进行了扩展,对全书中的时效性数据进行了更新,将各类技术进展补充至相应章节,使读者对能源形势有正确的认识,对各类能源利用技术有基本了解。

《能源概论》(第二版)的修订工作由陈砺和严宗诚完成。陈砺编写了第6章,对第1章、第7~16章进行了审核和修订。严宗诚编写了第17章,对第2~5章进行了审核和修订。全书由陈砺统稿。胡丽华、杨婵媛、尚晓燕参与了资料收集和校对工作。在编写过程中,编者参考了大量文献资料,在此对这些文献资料的作者表示感谢。

由于编者水平有限,虽经努力,但疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2018年4月于广州

第一版前言

能源是人类社会向前发展的重要物质基础。经过长期的演变，人类形成了以煤炭、石油和天然气等不可再生能源为主体的能源体系，它为人类文明的建立和社会的发展做出了重要贡献。然而，随着这些能源蕴藏量的下降以及人类对能源需求量的增加，现有的能源体系受到了严峻的挑战。人们迫切需要利用现代科学技术，提高能源的使用效率，开发新能源，逐步过渡到以可再生能源为主体的可持续的能源体系。

能源涉及各行各业，涉及千家万户，涉及每一个人。在全民中普及能源知识，既可提高国民的科学素养，又可提高国民科学使用能源的水平。许多高等院校面向全体学生开设能源类课程就是一个很好的做法。本书编写的目的就在于为这类课程提供一本合适的教材，即作为普通高等学校各专业本科生或高等职业技术学校各专业高职生能源类通选课的教学用书，同时，也可作为能源知识的普及读本。

能源科学综合性强，涉及自然科学、人文和社会科学的各个领域，包含了从宇宙观到微观的各个尺度。本书从常规能源、新能源与可再生能源、节能三个方面，向读者全面介绍了能源科学知识。在编写过程中，作者充分兼顾各类专业背景的读者群，用通俗的论述使读者了解和掌握能源科学的基本原理和方法。

常规能源是目前支撑人类社会向前发展的主要能源，在未来相当长的时期内，仍将扮演重要的角色。本书从常规能源的形成机理、性质、勘探与开采、加工转换和利用技术等方面展开论述。

新能源与可再生能源种类繁多，虽然目前在能源消费体系中所占的份额还不小，利用技术也还有许多难点未被攻克，但它们是能源发展的新方向，是能源学科研究的前沿和重点。本书介绍了这类能源各自的特点、资源量、利用原理、利用技术以及研究进展。

节能被称为继煤炭、石油、天然气和水电的第五大能源，在能源科学中占有独特而重要的地位，本书从节能基本理论、工业、建筑、民用、交通等方面阐述了节能技术及其进展，并向读者介绍了许多简单实用的节能技巧。

本书还列举了大量参考文献和相关网站，方便读者自学及查阅。

本书由陈砺、王红林、方利国编写，共15章。其中第1章、第6~11章由陈砺编写，第2~5章由王红林编写，第12~15章由方利国编写，全书由陈砺统稿。董新法对书稿提出了宝贵的意见；成贝贝、王丽、付文、杨慧、李凯欣、包莹玲、马振、李沫林、伍沛亮、罗渚草、梁剑斌等参与了本书的资料收集、文本输入和校对工作；在本书的编写过程中，作者参考了大量文献资料，在此对这些文献资料的作者一并表示感谢。

由于编者水平有限，时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2009年1月于广州

目录

第1章 绪论	1	1.3 中国能源可持续发展	11
1.1 能源	1	参考文献	15
1.2 能源现状	7		

第一篇 常规能源

第2章 煤炭	17	作用	61
2.1 煤炭在我国能源结构中的地位 ..	17	参考文献	65
2.2 煤的形成	18	第4章 天然气	66
2.3 煤的组成结构与品质	19	4.1 天然气在未来能源格局中的重要	
2.4 煤的开采与运输	23	地位	66
2.5 煤的燃烧和污染	27	4.2 天然气的性质	71
2.6 煤的洁净技术	29	4.3 天然气的开采和运输	74
2.7 煤炭液化	33	4.4 天然气的应用	80
2.8 煤的气化	34	4.5 天然气化工	87
2.9 煤的综合利用	38	4.6 天然气水合物	91
参考文献	40	4.7 页岩气	99
第3章 石油	42	参考文献	105
3.1 石油的形成	42	第5章 电能	106
3.2 石油的性质	44	5.1 电能是最优质的二次能源	106
3.3 石油的勘探与开采	46	5.2 火力发电	107
3.4 石油的炼制	50	5.3 水力发电	113
3.5 石油产品	54	5.4 电力输配	120
3.6 石油化工产业在国民经济中的		参考文献	128

第二篇 新能源与可再生能源

第6章 核能	129	第7章 太阳能	143
6.1 核反应	129	7.1 太阳及太阳能	143
6.2 核反应堆	131	7.2 太阳能光热利用技术	146
6.3 核电站	135	7.3 太阳能光电利用技术	157
6.4 核安全	140	7.4 太阳能光化结合	161
参考文献	142	参考文献	161

第 8 章 生物质能	163	第 11 章 海洋能	215
8.1 生物质及生物质能	163	11.1 海洋及海洋能	215
8.2 能源植物	168	11.2 潮汐能	217
8.3 生物质气体燃料	174	11.3 潮流能	219
8.4 生物质液体燃料	183	11.4 波浪能	221
8.5 生物质固体燃料	189	11.5 温差能	223
参考文献	192	11.6 盐差能	223
第 9 章 风能	193	11.7 海流能	224
9.1 风及风能	193	参考文献	225
9.2 风力发电	200	第 12 章 氢能与燃料电池	226
9.3 风能的其他应用	205	12.1 氢的制备与纯化	226
参考文献	207	12.2 氢的储存与运输	230
第 10 章 地热能	208	12.3 燃料电池	231
10.1 地热及地热能	208	12.4 氢能的其他应用	237
10.2 地热能的利用	210	参考文献	237
参考文献	214		

第三篇 节能与储能篇

第 13 章 节能概论	238	15.4 建筑及民用节能技术案例 分析	289
13.1 节能的定义及分类	238	参考文献	291
13.2 节能的层次及准则	240	第 16 章 交通节能技术	292
13.3 节能技术的理论基础	241	16.1 交通节能概论	292
参考文献	248	16.2 汽车节能	294
第 14 章 工业节能技术	249	16.3 火车节能	302
14.1 工业节能概述	249	16.4 船舶节能	303
14.2 工业通用节能技术	252	参考文献	304
14.3 工业通用设备节能技术	262	第 17 章 储能技术	305
参考文献	271	17.1 抽水蓄能	305
第 15 章 建筑及民用节能技术	272	17.2 电池储能	307
15.1 建筑节能概述	272	参考文献	314
15.2 建筑节能技术	273		
15.3 民用节能技术	283		

人类的进化发展史，是一部不断向自然界索取和利用能源的历史。在人类的历史长河中，技术的重大进步、经济的迅速发展，都与能源的利用息息相关。从 18 世纪欧洲的蒸汽机工业文明，到 19 世纪以内燃机驱动的可移动机械，再到 20 世纪下半叶新能源和可再生能源的绿色风潮，每一次能源的变革都意味着人类文明大踏步地向前迈进。

合理、高效地利用能源，使人类文明可持续地高速发展，是我们共同追求的目标。

1.1 能源

1.1.1 能量与能源

自然界中可以直接或通过转换提供某种形式能量的资源称为能源 (energy sources)。能源是一类非常重要的物质，是人类进行生产和赖以生存的重要物质基础，也是社会发展的重要物质基础。

(1) 能量

能量是量度物体做功能力或物质运动的物理量。根据物质运动的不同形式，能量可分为机械能、热能、电能、辐射能、化学能和核能等相应的形式。能量有六种基本属性，即状态性、可加性、转换性、传递性、做功性和贬值性。其中转换性与传递性是能量利用中最重要属性，这两个属性使得人类在不同的地点得到所需形式的能量成为可能。

不同形式的能量可以在一定的条件下相互转换，转换过程服从能量守恒和转换定律，这就是能量的转换性。能量转换设备或转换系统是实现能量转换的必要条件，如燃煤发电过程，煤所含的化学能通过燃烧这种化学反应转换为热能，热能通过燃气轮机、汽轮机等热机转换成机械能，机械能通过发电机转换成电能。在这个转换过程中，燃烧器（例如锅炉）、热机和发电机为转换设备，由它们组成的燃煤发电机组为转换系统。

能量的传递性是能量的又一重要属性，能量的利用通过能量传递得以实现。能量在“势差”的推动下完成传递，如热量传递推动力为温度差、流体流动的推动力为位差或压力差、电流推动力为电位差、物质扩散的推动力为浓度差等。从生产的角度来说，能量传递性保证了各种工艺过程、运输过程和动力过程的实现，为其提供推动力。能量通过各种形式的传递后，最终转移到产品中或散失于环境中。

(2) 能源

能源是能量的来源或源泉，包含有化石能源（煤炭、石油、天然气等）、水能、核能、

电能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能、氢能等基本形式。

能源是人类赖以生存的物质基础，与社会经济的发展和人类的生活息息相关，开发和利用能源资源始终贯穿于社会文明发展的全过程。在长期的生产实践中，人类逐步建立了一门研究能源发展变化规律的科学——能源科学。能源科学以社会学、经济学、人口学、物理学、化学、数学、生物学、地理学、地质学、工程学等科学的理论为指导，研究能源技术中共性的理论问题，以揭示能源技术的一般规律。

(3) 能源的单位

能源的单位与能量的单位相同，常用单位有焦耳 (J)、瓦时 (W·h)、卡 (cal) 和英热单位 (Btu) 等。按照《中华人民共和国法定计量单位》的规定，J 和 W·h 是法定单位，cal 和 Btu 是非法定单位。各种能源单位之间可以通过表 1-1 相互换算。

表 1-1 能源单位换算

千焦 (kJ)	千瓦·时 (kW·h)	千卡 (kcal)	马力·时 (hp·h)	公斤力·米 (kgf·m)	英热单位 (Btu)	英尺·磅力 (ft·lbf)
1	2.77778×10^{-4}	2.38846×10^{-1}	3.776726×10^{-4}	1.01927×10^2	9.47817×10^{-1}	7.37562×10^2
3600	1	859.846	1.359621	3.67098×10^5	3412.14	2.65522×10^6
4.1868	1.163×10^{-3}	1	1.58124×10^{-3}	426.936	3.96832	3088.03
2.647796×10^3	735.499×10^{-3}	632.415	1	270000	2509.63	1952913
9.80665×10^{-3}	2.724069×10^{-6}	2.34228×10^{-3}	3.703704×10^{-6}	1	9.29487×10^{-3}	7.23301
1.05506	2.93071×10^{-4}	2.51996×10^{-1}	3.98466×10^{-4}	1.075862×10^2	1	778.169
1.35582×10^{-3}	3.76616×10^{-7}	3.23832×10^{-4}	5.12056×10^{-7}	1.38255×10^{-1}	1.28507×10^{-3}	1

能源的种类不同，计量单位也不同。为了求出不同的热值、不同计量单位的能源总量，以便进行统计和比较，必须建立一类统一的单位。由于各种能源在一定条件下都可以转化为热，所以选用热量作为核算的统一单位。在能源领域的实际工作中，习惯上使用煤当量（亦称标准煤、标煤、标准煤当量）和油当量（亦称标准油、标油、标准油当量）作为能源的单位。煤当量用符号 ce (coal equivalent) 表示，油当量用符号 oe (oil equivalent) 表示，它们与热量的换算迄今尚无国际公认的统一标准。我国规定，1kg 标准煤当量 (kgce) 的发热量为 29.27MJ (7000kcal)，1kg 标准油当量 (kgoe) 的发热量为 41.82MJ (10000kcal)。同理有吨煤当量 (tce)，吨油当量 (toe)，百万吨煤当量 (Mtce)，百万吨油当量 (Mtoe)，可进行相应的换算。

在能源科学领域，常常会涉及数量非常巨大的能源，为了表示方便，通常在能源基本单位前加词冠，国际单位制中常用的词冠如表 1-2 所列。

表 1-2 能源领域常用的词冠

幂	词冠	国际代号	中文代号
10^{24}	尧它(yotta)	Y	尧
10^{21}	泽它(zetta)	Z	泽
10^{18}	艾可萨(exa)	E	艾
10^{15}	拍它(peta)	P	拍
10^{12}	太拉(tera)	T	太
10^9	吉珈(giga)	G	吉
10^6	兆(mega)	M	兆
10^3	千(kilo)	k	千

(4) 能源的量与质

热力学第一定律从数量上揭示了进出体系能量之间的关系，其表述为：

$$\text{体系中累积的能量} = \text{进入体系的能量} - \text{离开体系的能量} \quad (1-1)$$

世上的任何过程，小到一个设备上的能量变化，大到一个国家、地区的能源生产、供应和消费都遵循这一规律。热力学第一定律也被称为能量守恒定律。能源平衡通常指某一地区或系统在一定时期内能源投入与产出之间的平衡，是能源工作的重要组成部分。按范围进行划分的能源平衡有：国家能源平衡、地区能源平衡、部门能源平衡、企业能源平衡等；按对象有综合能源平衡和单项能源平衡；按能源种类有煤炭平衡、石油平衡、天然气平衡、水能平衡、热能平衡等各种一次能源平衡或二次能源平衡。对于小系统或单个设备，这类工作通常称为能量平衡，如果以热能为计算基准，则称为热平衡。能源平衡的结果可用表格、能流图等形式表示。通过能源平衡，可以计算出一系列能源利用指标和参数，为能源工作者摸清能耗状况、掌握用能水平、加强能源科学管理、做好节能减排工作和制定能源规划提供科学依据。

人类利用能源的本质是利用其能量做功。根据热力学第二定律，能量不但有数量的大小，而且有质量的高低。如机械能、电能可以完全转变为功，而热能只有部分做功能力。做功能力强的能源被称为高品位能源，反之称为低品位能源。如机械能、电能是高品位能源，接近环境状态的热能是低品位能源。种类相同而状态不同的热能品位是不同的，如高温高压水蒸气的品位比低温低压水蒸气高。能量虽然在数量上守恒，但在传递、转换和使用过程中，由于存在各种不可逆因素，总会伴随着能量的损失，即品位的降低，或者说做功能力的下降，最终达到与环境完全平衡的状态而失去做功能力，成为废能，这就是能量的贬值性。要定量地研究能源做功能力的大小，可以通过有效能、能质系数等指标实现。

1.1.2 能源的分类

能源的种类繁多，人们从研究、利用和开发能源的角度出发，根据能源的特点和相互关系，按一定的规则将它们进行分类。下面介绍几种常见的分类法。

(1) 来源分类法

按能源的形成或来源可将能源划分为三大类。

第一类为来自地球外天体的能源，如太阳能及宇宙射线。这里所指的太阳能，也称为广义太阳能，泛指所有来自太阳的能源。除了太阳的直接辐射外，还包括经各种方式转换而形成的能源，如经生物质转化而形成的各种生物质能和化石能源，如煤炭、石油、天然气、油页岩等；经空气或水转化形成的风能、水能、海洋能等。这类能源是目前人类利用的主要能源。第二类为地球本身蕴藏的能源，如地热能和核能。地热能的形式有地热水、岩浆以及地震、火山等。第三类是地球和其他天体相互作用而产生的能源，如由于月球对地球的引力产生的潮汐能。

(2) 一、二次能源分类法

一次能源是指自然界中现实存在，或由于自然条件变化而产生的，并没有经过人为加工转换的能源，又称天然能源。如原煤、原油、天然气、天然铀矿、木柴、水能、风能、太阳能、海洋能、地热能等均属这类能源。

在生产和生活中，由于工作需要、便于输送或使用等原因，把一次能源经过一定的加工或转换，使之转换成符合使用条件的能源，习惯上将其称为二次能源，又称人工能源。如汽

油、柴油、重油等各类石油制品，电力，焦炭，煤气，水蒸气，燃料酒精，人工沼气等都属于二次能源。

(3) 可再生能源与非再生能源分类法

可再生能源是指在一个相当长的时间范围内，自然界可连续再生并有规律地得到补充的一次能源。常见的可再生能源有：太阳能、生物质能、水能、风能、海洋能、地热能等。

非再生能源指那些不能连续再生、短期内无法恢复、可耗尽的一次能源。如煤炭、石油、天然气、核燃料铀等都是经过自然界亿万年演变形成的有限量能源，它们不可重复再生，最终可被用尽。

(4) 常规能源与新能源分类法

按利用技术的成熟程度可将能源分为常规能源和新能源。常规能源是指已经大规模生产和广泛利用的、技术比较成熟的能源。如煤炭、石油、天然气、水力能等一次能源，以及煤气、焦炭、汽油、酒精、电力、蒸汽等二次能源。

而那些正在研究和开发，尚未大规模应用的能源则称为新能源。如太阳能、风能、生物质能、海洋能、地热能、氢能等都属于新能源。

新能源是在不同历史时期和科学技术水平条件下，相对于常规能源而言的。随着煤炭、石油、天然气等常规能源储量的不断减少，新能源将成为世界新技术革命的重要内容，成为未来世界持久能源系统的基础。

(5) 燃料能源与非燃料能源分类法

燃料能源是用作燃料使用，主要通过燃烧形式释放热能的能源。根据其来源可分为矿物燃料（如石油、天然气、煤炭等），核燃料（如铀、钍等），生物燃料（如木材、秸秆、沼气等）和化学燃料（甲醇、酒精、丙烷、铝、镁等）。根据其形态可分为固体燃料（如煤炭、木材等），液体燃料（如汽油、酒精等），气体燃料（如天然气、沼气等）。燃料能源的利用途径主要是通过燃烧将其中所含的各种形式的能量转换成热能，是人类的主要能源。

非燃料能源无需通过燃烧而直接向人类提供能量。如太阳能、风能、水力能、海洋能、地热能等。非燃料能源所含有的能量形式主要有机械能、光能、热能等。

(6) 化石能源与非化石能源分类法

化石能源（有时也称为化石燃料、矿物能源、矿物燃料等），指天然矿物源中含有能量的物质，它们所含的能量可通过化学或物理过程得到释放。化石能源可以是固态、液态或气态的物质，如煤炭、石油、天然气和各种核燃料等。非化石能源指除化石能源以外的其他能源。化石能源是目前支撑人类能源体系的主要能源，由于其具有不可再生性，将逐渐枯竭，最终由非化石能源中的可再生能源所替代。

(7) 商品能源与非商品能源分类法

商品能源具有商品的属性，是作为商品经流通环节而消费的能源。主要包括市场上出售的煤炭及其制成品、石油产品、天然气、电力等。

不作为商品交换的能源称为非商品能源。常指来源于植物、动物的能源，如农业、林业的副产品秸秆、薪柴等，人畜粪便及其产生的沼气，太阳能、风能或未并网的小型电站所发出的电力等。这类能源由使用者自己生产、加工和利用，在发展中国家农村地区的能源消费中占有很大的比重。

(8) 含能体能源与过程能源分类法

有些物质本身含有能量，如煤炭、石油、天然气、氢气、生物质等，在把这些物质

进行运输和储存的同时,也将能量进行了运输和储存。这类能源称为含能体能源或载体能源。

另一类能源是由于提供能量的物质运动所产生的,如水力能、风能、潮汐能、电能等。这类能源称为过程能源,其特点是不能直接储存。

(9) 清洁能源与非清洁能源分类法

按能源在生产和使用过程中对环境的影响,可将能源分为清洁能源和非清洁能源。清洁能源不对环境造成损害或损害程度较小,如太阳能、水能、风能等。而像煤炭、石油等能源对环境损害程度较大,称为非清洁能源。

除了对能源的整体分类外,通常还将能源按其固有的特性进行划分,主要有以下几种。

替代能源,指具有高效、环境友好、经济和来源广泛特点的,用于替代以往和目前大量使用的低效率能源的能源品种。随着科学技术和社会生产力的发展以及能源资源储备和结构的变化,替代能源将不断出现,原有的替代能源被新的替代能源所替换,这是人类社会进步的必然结果。人类历史上已出现了多次大规模的能源消费结构的更替和变化,如18世纪起以煤炭替代薪柴,20世纪初以石油、天然气替代煤炭,随着化石能源资源储量的变化,煤炭、核能将逐渐成为新的替代能源,最终将以太阳能等可再生能源为基础建立持久的能源体系。

垃圾能源,利用生物技术和化学方法将垃圾中所蕴藏的能量转变成热能或电能等形式提供的能源。垃圾中含有有机物和可燃物,可通过焚烧将其转变为热能,也可利用发酵产生可燃气体,垃圾提供的热能可用于发电提供电能或供用户直接使用。利用垃圾能源,可以化害为利,变废为宝。

终端能源,即到达用户供其使用的能源。这些能源通常经过开采、精制、输送、储存和分配等过程最终成为终端使用的能源。

1.1.3 人类文明与能源

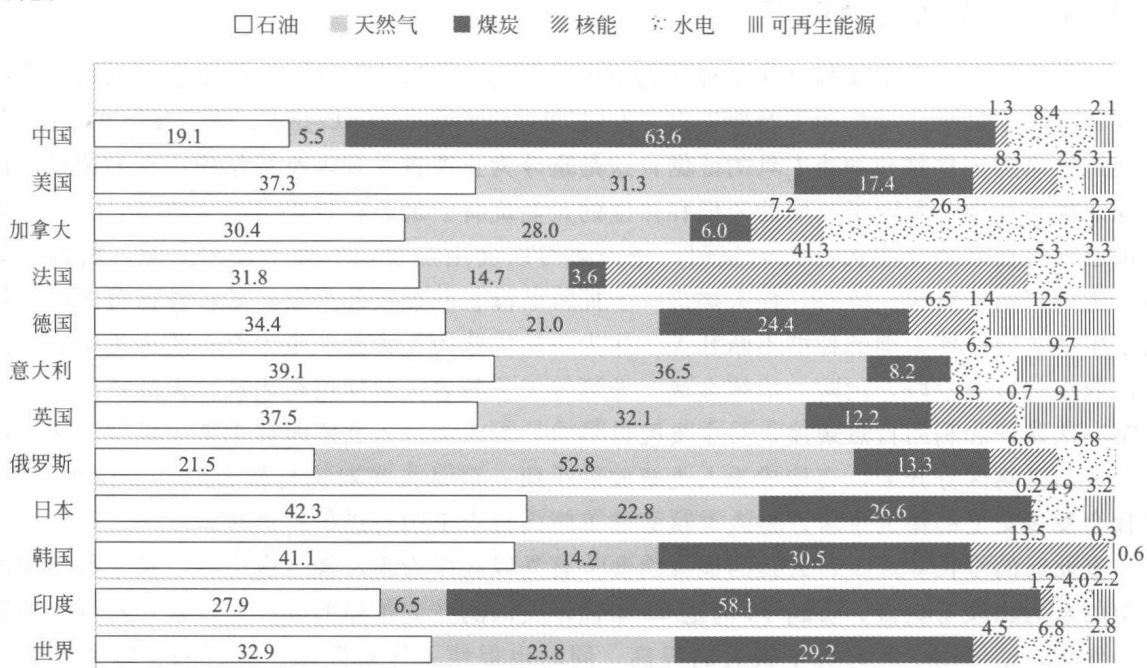
人类有意识地利用能源是从发现和利用火开始的。在远古时代,人们学会了利用火和保存火种,后来又进一步发明了摩擦生火。2004年,考古学家在以色列发现了人类在79万年前使用火来加工食物和制造工具的证据,这是迄今为止考古发现人类最早使用火的记录。而在周口店遗址中,发现了成层的灰烬和伴生的大量烧骨、烧石,说明北京人在50万~60万年前已经有控制地使用火。火的使用,使人类可以食用熟食,扩大了食物来源,增强了体质。火可照明、取暖、驱兽,使人类进一步征服了漫长的黑夜和严寒,减少被猛兽攻击,扩大了生活领域,使人类的种群不断壮大。作为一种生产力,火是从事生产、改进工具、提高生产效率的有效手段,制陶、冶炼金属、酿酒等工艺随着火的使用而出现。火的使用,是人类第一次认识和利用自然规律,自主支配自然力,为人类进入文明时代创造了条件,从而最终把人与动物区分开来,直接成为人类解放的手段。这是人类对抗自然界的一个伟大胜利,是社会发展史上的伟大革命,是人类从必然王国向自由王国迈进的一大步。

在此后的漫长岁月中,人类的能源消费一直是以薪柴为主,辅以畜力,以及逐渐使用的简单的水力和风力机械。直到18世纪60年代,英国的产业革命的兴起,特别是蒸汽机的发明和使用,使劳动生产力有了很大的提高,同时也促使了煤炭勘探、开采和运输业的大发展。人类的能源消费结构完成了从以薪柴为主到以煤炭为主的转变,这在后来被称为能源消费结构的第一次大转变。1860~1920年,世界煤炭产量由136Mtce增至1250Mtce,增加了

8.2 倍。1920 年煤炭占世界能源构成的 87%，跃居第一位。这一转变使人类的生活和文化水平得到了极大提高，甚至从根本上改变了人类社会的面貌。

石油、天然气资源的开发和利用，开始了人类能源利用的又一新时代。1876 年，德国人奥托设计制造了第一台四冲程汽油内燃机，取得了内燃机技术的第一次突破。与蒸汽机相比，内燃机具有体积小、重量轻、效率高等许多突出的优点，更适合在移动式机械上使用。进入 20 世纪，随着第一次世界大战的爆发，对汽车、坦克、轮船及飞机的需求量大增，使这类技术得到了迅猛的发展。从 20 世纪 20 年代开始，石油、天然气的消费量逐渐上升。到 20 世纪 50 年代，随着石油勘探和开采技术的提高，中东、美国和北非相继发现了巨大的油气田，加上石油炼制技术的提高，各种成品油的价格低廉，供应充足。这些因素促使人类的能源消费结构发生了第二次大转变，即从以煤炭为主到以石油、天然气为主的转变。到 1959 年，石油和天然气在世界能源构成中的比重，由 1920 年的 11% 上升到 50%，首次超过煤炭而占第一位，煤炭的比重则由 87% 下降到 48%。1986 年，世界一次能源总消费量为 10810Mtce，其中石油占 38%，天然气占 20%，煤炭占 30%，水电占 7%，核电占 5%。这次转变极大地促进了世界经济的繁荣，创造了历史上空前的物质文明，人类进入了高速发展的快车道。

到目前为止，全球各主要能源消费大国及世界平均的能源消费结构仍处于该状态中。图 1-1 为《BP 世界能源统计 2015》公布的世界能源消费结构。可以看出，石油、天然气两种能源占全世界能源消费总量的 56.7%，美国为 68.6%，俄罗斯为 74.3%。当然，能源的消费结构是根据各国的资源条件等情况而定的，中国、印度等国家由于煤炭资源相对丰富，仍维持以煤炭为主。图 1-2 为近一个世纪以来世界能源消费结构的变化情况。由图中可以看出，进入 21 世纪以来，随着石油、天然气储量的减少和洁净煤利用技术的日趋成熟，石油、天然气的消费量有所下降，而煤炭的消费量出现回升，但能源的消费结构并没有发生大的变化。



各种能源占全世界能源消费总量比例/%

图 1-1 2015 年世界能源消费结构

两次能源消费结构的大转变，将人类从原始落后的以天然可再生能源为基础的简单机械动力装置时代带入了以煤炭、石油和天然气等不可再生能源为基础的热能装置时代，传统的工业文明比起原始的农耕文明发展速度快，但对大自然的索取量大大增加，可持续性差。在经济高速发展、人类文明程度迅速提高的同时，许多负面效应也相继显现。能源消费量的持续增长给环境带来的压力日益严重，温室效应、环境污染、化石能源枯竭、生态环境破坏等，已成为威胁人类生存和发展的严重问题。如何使能源利用和环境保护相协调，维持人类社会的可持续发展，是摆在人类面前的共同任务。从20世纪70年代开始，人类的能源消费结构开始进入一个新的转变期，即从以石油、天然气为主向以可再生能源为基础的持久、稳定的能源系统转变。这个转变将经历一个漫长的过程，大约需要上百年的时间。在这期间，随着石油、天然气蕴藏量的减少，煤炭、核能可能会重新成为主力能源，但最终将被可再生能源所取代。

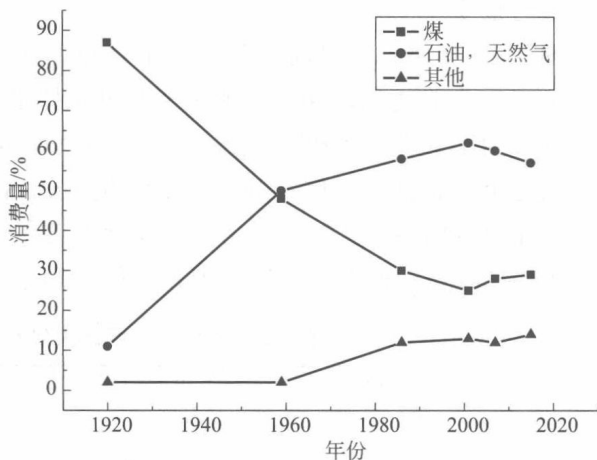


图 1-2 世界能源消费结构变化图

1.2 能源现状

地球拥有十分丰富的能源资源，除了化石能源外，还有太阳能等充足的可再生能源。随着勘探和开采技术的提高，化石能源的剩余可采储量有了适度提高，加上人类节能意识的加强，现有化石能源可满足人类相当长一段时间的能源需求。在可以预见的将来，不存在核发电所需的铀资源短缺的问题。可再生能源数量巨大，利用前景非常广阔，随着技术的进步，其应用水平将不断提高，应用范围将不断扩大，可为人类提供充足的清洁能源。

1.2.1 资源状况

(1) 石油

到2015年底，全球探明的石油剩余可采储量为 $239.4 \times 10^9 \text{t}$ 。按地区划分，可采石油主要位于中东地区，储量为 $113.2 \times 10^9 \text{t}$ ，约占世界总量的47.3%。按国家划分亦极不均匀，排名前10位的国家储量为 $210.7 \times 10^9 \text{t}$ ，约占世界的88.0%。其中，剩余可采储量最多的国家是伊拉克，为 $46.2 \times 10^9 \text{t}$ ，约占世界总量的19.3%。中国石油剩余可采储量为 $2.5 \times 10^9 \text{t}$ ，占世界的1.04%，列世界第14位。

(2) 天然气

到2015年底，全球探明天然气剩余可采储量为 $186.9 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。天然气较集中地分布在中东和欧洲及欧亚地区。这两个地区的剩余可采储量占世界总量的70%以上，其他地区均不足10%。世界排名前10位的国家储量为 $148.6 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占世界的79.5%。伊朗排名世界第一，其剩余可采储量为 $34.0 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占世界的18.2%。中国天然气剩余可采储量为 $3.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占世界的2.03%，列世界第11位。

(3) 煤炭

到 2015 年底, 世界煤炭剩余可采储量为 8915.31 亿吨, 主要分布在欧洲及欧亚地区、亚太地区 and 北美地区, 这三个地区剩余可采储量占世界总量的 90% 以上, 中南美地区最少, 仅占世界的 1.6%。世界排名前 10 位的国家储量为 7774.15 亿吨, 占世界的 87.2%。排名第一的是美国, 其剩余储量为 2371.47 亿吨, 占世界总量的 26.6%。中国煤炭剩余可采储量为 1145 亿吨, 占世界的 12.8%, 列世界第 3 位。

表 1-3 所列为世界各地三大化石能源剩余可采储量比例。

表 1-3 世界各地三大化石能源剩余可采储量比例

地区	石油/%	天然气/%	煤炭/%
北美	14.0	6.8	27.5
中南美	19.4	4.1	1.6
欧洲及欧亚地区	9.1	30.4	34.9
中东	47.4	42.8	3.7
非洲	7.6	7.5	—
亚太	2.5	8.4	32.3
世界总计	100	100	100

表 1-4 所列为世界三大化石能源剩余可采储量前十位国家的储量比例。

表 1-4 世界三大化石能源剩余可采储量前十位国家的储量比例

国家	石油/%	国家	天然气/%	国家	煤炭/%
伊拉克	19.3	伊朗	18.2	美国	26.6
委内瑞拉	17.7	俄罗斯	17.3	俄罗斯	17.6
沙特	15.7	卡塔尔	13.1	中国	12.8
伊朗	9.3	土库曼斯坦	9.4	澳大利亚	8.6
科威特	6.0	美国	5.6	印度	6.8
俄罗斯	6.0	沙特阿拉伯	4.5	德国	4.5
阿联酋	5.8	阿联酋	3.3	哈萨克斯坦	3.8
美国	3.2	委内瑞拉	3.0	乌克兰	3.8
利比亚	2.8	尼日利亚	2.7	南非	3.4
尼日利亚	2.2	阿尔及利亚	2.4	印度尼西亚	3.1
总计	88.0	总计	79.5	总计	91.0

(4) 新能源

① 核能 截至 2013 年 1 月 1 日, 世界已查明常规铀资源量为: 可采成本小于 130 美元/kg 铀的资源量约 562.90 万吨; 可采成本小于 80 美元/kg 铀的资源量约 177.72 万吨; 可采成本小于 40 美元/kg 铀的资源量约 68.29 万吨。世界铀资源主要分布在澳大利亚、尼日尔、哈萨克斯坦、加拿大、纳米比亚、俄罗斯、南非、巴西、中国、乌克兰、蒙古等国, 铀资源量均在 10 万吨以上, 合计占世界铀资源量的 98.5%。我国铀资源量占世界 3.5%。

② 水能 全世界江河的理论水能资源为 48.2 万亿度/年, 技术上可开发的水能资源为 19.3 万亿度。我国的江河水能理论蕴藏量为 6.91×10^8 kW, 每年可发电超过 6 万亿度, 可开发的水能资源约 3.82×10^8 kW, 年发电量 1.9 万亿度。水能是清洁的可再生能源, 但与全世界能源需要量相比, 水能资源仍很有限, 即使把全世界的水能资源全部利用, 也不能满足其需求量的 10%。

③ 太阳能 太阳的能量是以电磁波的形式向外辐射的, 其辐射功率为 3.8×10^{23} kW。

地球接受到太阳总辐射量的 22 亿分之一，即有 1.73×10^{14} kW 到达地球大气层的上缘。太阳辐射能在穿越大气层时发生衰减，最后约有一半的能量到达地球表面，即 8.65×10^{13} kW，这个数字相当于目前全世界发电总量的几十万倍，但目前人类利用的太阳能仅为其中很小的部分。到达我国的太阳辐射能量约为 1.8×10^{12} kW。

④ 生物质能 地球上每年通过光合作用固定的碳约为 2×10^{11} t，含能量 3×10^{18} kJ，相当于目前世界总能耗的 10 倍以上。

⑤ 风能 据估计，全球的风能总量约为 2.74×10^{12} kW，其中可利用的风能约为 1.46×10^{11} kW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。我国风能总量约为 3.2×10^9 kW，可利用的风能为 2.53×10^8 kW。

⑥ 地热能 地球内部蕴藏的热量约为 1.25×10^{28} kJ，从地球内部传到地面的地热总资源约为 1.45×10^{23} kJ，相当于 4.95×10^{15} t 标准煤燃烧时所放出的热量。如果把地球上储存的全部煤炭燃烧时所放出的热量作为 100 来计算，那么，石油的储量约为煤炭的 8%，目前可利用的核燃料的储量约为煤炭的 15%，而地热能的总储量则为煤炭的 17000 万倍。

⑦ 海洋能 海洋能通常是指海洋本身所蕴藏的能量，包括潮汐能、潮流能、波浪能、温差能、盐差能和海流能等形式的能量，不包括海底储存的煤、石油、天然气和天然气水合物，也不含溶解于海水中的铀、锂等化学能源。海洋是一个巨大的能源转换场，据估计，海洋能中可供利用的能量约为 70 多亿千瓦，是目前全世界发电能力的十几倍。据初步统计，全球及我国各类海洋能储量情况如表 1-5 所列。

表 1-5 各类海洋能资源状况

类别	潮汐能	波浪能	温差能	盐差能	海流能
全球总储量/ $\times 10^8$ kW	17	20	100	20	—
我国可开发能量/ $\times 10^8$ kW	1.1	0.23	1.5	1.1	0.3

1.2.2 消费与需求

据统计，全世界 2015 年一次能源总消费量达到 13147.3 Mtoe，其中北美、亚太、欧洲及欧亚地区是主要的消费地区，它们的消费量占世界总量的 84.7%。各地区能源消费量占世界的比例如表 1-6 所示。

表 1-6 世界各地能源消费比例

地区	石油/%	天然气/%	煤炭/%	核能/%	水电/%	一次能源/%
北美	23.9	28.1	11.1	37.1	16.9	21.3
中南美	7.5	5.0	1.0	0.8	17.1	5.3
欧洲及欧亚地区	19.9	28.8	12.2	45.3	21.8	21.6
中东	9.8	14.1	0.3	0.1	0.7	6.7
非洲	4.2	3.9	2.5	0.4	3.0	3.3
亚太	34.7	20.1	72.9	16.3	40.5	41.8
世界总计	100	100	100	100	100	100

中国是世界消耗一次能源最多的国家，一次能源消费量为 3014.0 Mtoe，占世界的 22.9%。美国消耗的一次能源占世界的 17.3%，排在世界第 2 位。表 1-7 所列为主要耗能国家的能源消费比例。

表 1-7 主要耗能国家能源消费比例

国家	石油/%	国家	天然气/%	国家	煤炭/%
美国	19.7	美国	22.8	中国	50.0
中国	12.9	俄罗斯	11.2	印度	10.6
印度	4.5	中国	5.7	美国	10.3
日本	4.4	伊朗	5.5	日本	3.1
俄罗斯	3.3	日本	3.3	俄罗斯	2.3
巴西	3.2	沙特	3.1	南非	2.2
韩国	2.6	加拿大	2.9	韩国	2.2
德国	2.5	德国	2.1	德国	2.0
法国	1.8	英国	2.0	波兰	1.3
意大利	1.4	意大利	1.8	澳大利亚	1.2
总计	56.3	总计	60.4	总计	85.2

国家	核能/%	国家	水电/%	国家	一次能源/%
美国	32.6	中国	28.5	中国	22.9
法国	17.0	加拿大	9.7	美国	17.3
俄罗斯	7.6	巴西	9.1	印度	5.3
中国	6.6	美国	6.4	俄罗斯	5.1
韩国	6.4	俄罗斯	4.3	日本	3.4
加拿大	4.0	挪威	3.5	加拿大	2.5
德国	3.6	印度	3.2	德国	2.4
乌克兰	3.4	日本	2.4	韩国	2.1
英国	2.7	瑞典	1.9	伊朗	2.0
瑞典	2.2	法国	1.4	法国	1.8
总计	86.1	总计	70.4	总计	64.8

图 1-3 为《BP 世界能源统计 2016》公布的 1990~2015 年世界一次能源消费量分布图。从图中可以看出，2005 年到 2015 年这十年间，世界一次能源消费量约增长了 20.2%。在三大能源中，煤炭的增长量最大，为 26.6%；天然气次之，增长了 24.7%；石油增长量最小，

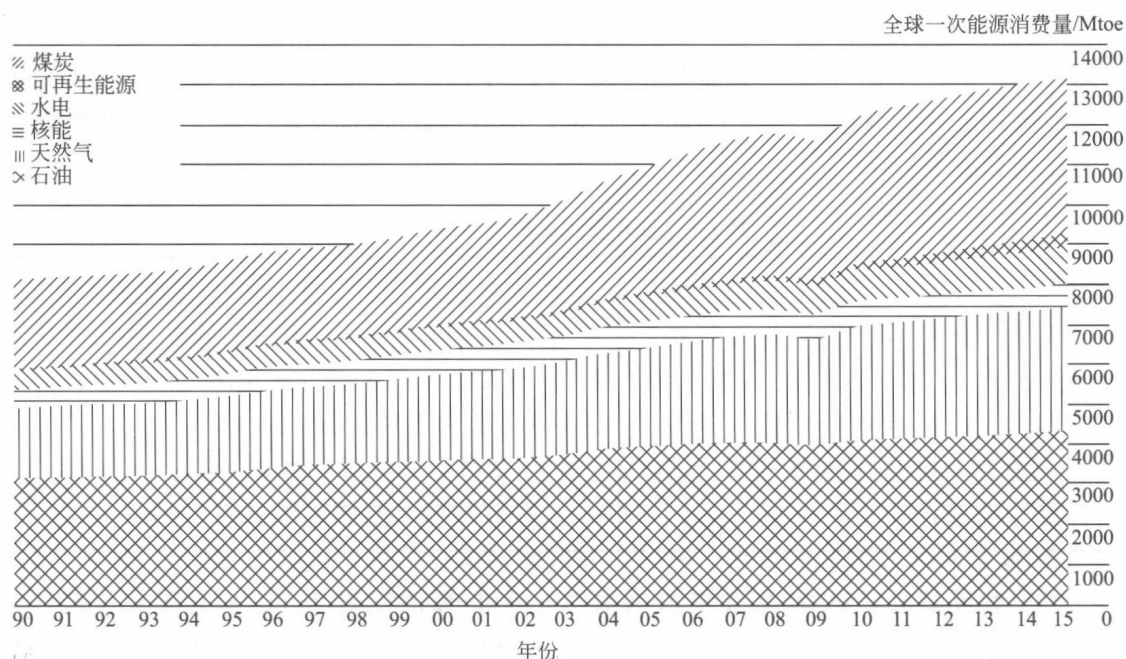


图 1-3 1990~2015 年世界一次能源消费量分布