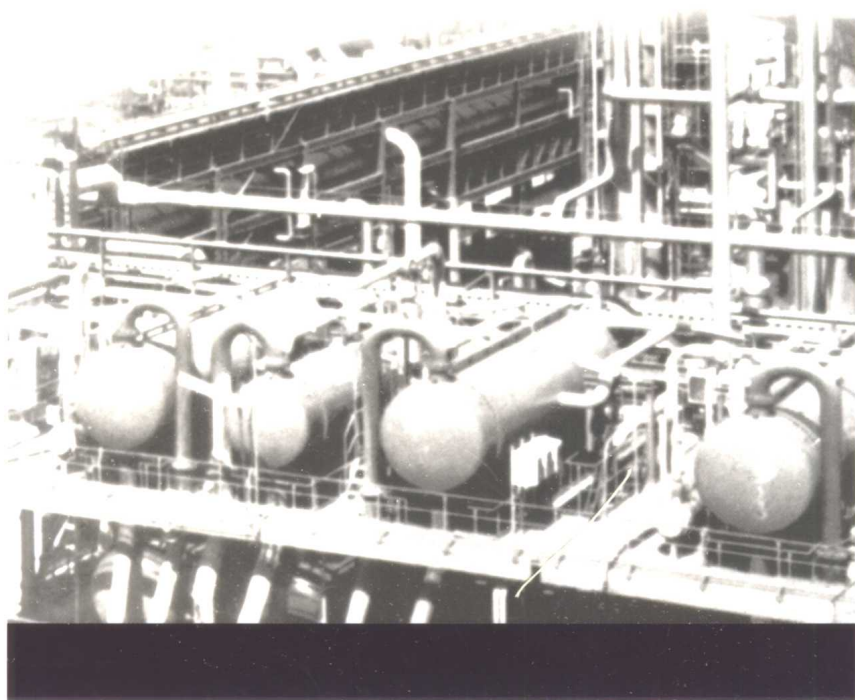


俞珠峰 主编

# 洁净煤技术发展及应用



**Chemical Industry Press**



化学工业出版社

# 洁净煤技术发展及应用

俞珠峰 主编

杜铭华 吕文斌 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

洁净煤技术发展及应用/俞珠峰主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 5  
ISBN 7-5025-5421-1

I. 洁… II. 俞… III. 煤-燃烧-净化-技术-中国  
IV. ①TK227.1②TQ53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 037996 号

---

**洁净煤技术发展及应用**

俞珠峰 主编

杜铭华 吕文斌 副主编

责任编辑: 郑叶琳 李建斌 郑宇印

文字编辑: 廉 静

责任校对: 陈 静

封面设计: 蒋艳君

\*

化学工业出版社出版发行  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话: (010) 64982530  
[http:// www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

\*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14½ 字数 348 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5421-1/TQ·1968

定 价: 38.00 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

中国有丰富的煤炭资源和悠久的煤炭开发历史。当前煤炭在我国的一次能源消费结构中占 2/3 以上，是我国的主要能源。但是，煤炭在开发利用中排放出大量的污染物和温室气体，严重地破坏了人类赖以生存的美好家园——地球。摆在我们面前的紧迫任务是，控制煤炭开发和利用中造成的污染，有效降低温室气体排放强度，使煤炭成为生态环境和社会可以接受、经济上合理、能保证供应的能源。这一点是能够做到的，靠的是洁净煤技术。

为解决 20 世纪 80 年代初美国和加拿大两国边境的酸雨问题，美国于 1986 年率先推出“洁净煤技术示范计划 (CCTP)”，引起国际社会的普遍重视。洁净煤技术的开发应用，使当时世界第一产煤和消费大国——美国的生态环境得到显著好转。

中国洁净煤技术是指在煤炭开发和利用中，旨在减少污染和提高效率的加工、燃烧、转化和污染控制等新技术的总称，其核心是减少污染和提高效率。中国洁净煤技术发展以煤炭洗选为源头，以煤炭高效洁净燃烧与发电为核心，以加大煤炭转化、优化终端能源结构和控制污染为主要内容。

结合中国的实际情况，发展洁净煤技术的主要目标：一是全过程减排污染，重点是减排  $\text{SO}_2$ 、TSP 及  $\text{NO}_x$ ；二是提高煤炭利用效率，节约煤炭，减排  $\text{CO}_2$ ；三是强化煤炭转化，改善能源终端消费结构，促进能源安全问题的解决。发展洁净煤技术是实施中国可持续发展能源战略的必然要求和现实选择。

洁净煤技术是发展中的技术。20 世纪末，美国在总结洁净煤技术和技术创新的基础上，提出“21 世纪展望”计划，又把减排  $\text{CO}_2$  作为重要内容。

我国从 20 世纪 90 年代初提出发展洁净煤技术，国家陆续出台了一系列促进洁净煤技术发展的法规和政策，已有不少技术得到产业化应用，一些技术正处于工业示范或研究开发阶段，但也有一些技术滞后于市场需求和环境需求，迫切需要加快发展。

本书从中国能源需求出发，通过与国际经验的比较，论述了我国洁净煤技术的相关政策，全面系统地介绍了中国各项洁净煤技术的基础知识和发展状况。结合我国能源和环境需求，进行了各项洁净煤技术的市场前景、环境效益、经济效益和今后发展方向分析。书中还针对某些技术介绍了典型案例。其内容深入浅出，通俗易懂，资料丰富翔实，涵盖了我国洁净煤技术研究的最新进展和研究成果，是从事我国能源管理、能源研究、煤炭利用技术开发研究的广大管理人员、研究人员、院校师生及关心洁净煤技术发展的各方面人士了解国内外洁净煤技术发展、把握洁净煤技术发展动向的有益读本，也是各地区、各企业选择发展适合洁净煤技术的参考资料。希望该书的出版为我国洁净煤技术的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士  
中国能源研究会理事长  
中国煤炭工业协会会长

范维金

2003 年 11 月

## 前 言

中国以煤炭为主要一次能源的状况在未来相当长时间内不会改变。洁净煤技术作为提高煤炭利用效率、减少环境污染的重要手段,在中国正受到各界越来越多的关注。为了满足各界人士全面了解洁净煤技术的需要,本书从世界能源及中国能源的发展出发,阐述了中国发展洁净煤技术的必要性;系统介绍了洁净煤技术国内外发展现状,分析了中国洁净煤技术发展中存在的问题;对各项洁净煤技术进行了环境、经济评价和市场分析;对中国目前可重点发展的技术提出了建议。

本书主要内容包括煤炭加工技术(煤炭洗选、配煤、型煤、水煤浆技术);洁净燃烧与发电技术(超临界发电、循环流化床燃烧、增压循环流化床燃烧联合循环、整体煤气化联合循环发电、低 $\text{NO}_x$ 燃烧器、先进的中小型燃煤工业锅炉);煤炭转化技术(煤炭气化、煤炭液化、燃料电池、多联产系统);污染物控制和再资源化技术(烟气净化技术、煤层气技术、煤矸石综合利用技术、粉煤灰综合利用技术、矿井水资源化利用技术)。书中还针对各项技术介绍了典型案例。

本书主编俞珠峰,副主编杜铭华、吕文斌。吴立新、余洁、吕欣、陈贵锋、张永刚、姜英、李荫重、宁成浩、肖云汉、赵丽凤等人参加了本书的编写。全书由杜铭华审定。

由于洁净煤技术涉及专业面广、跨度大,限于作者的知识水平和能力,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003年11月

## 内 容 提 要

本书全面系统地介绍了中国洁净煤技术的基础知识、整体发展状况和各项技术的基本情况,是了解中国能源及能源结构调整方向的有益读本。有利于读者比较系统地了解国内外各项洁净煤技术的发展历程、现状、趋势、市场前景、环境和经济效益,了解中国洁净煤技术当前发展重点及最新进展。

本书可供从事能源管理的各级管理人员,从事洁净煤技术研究开发工作的工程技术和研究人员,煤炭生产、加工、利用的企业及大专院校相关学科的教师学生等阅读参考,为各地区、企业选择合适的洁净煤技术提供参考。

## 主 编 简 介

俞珠峰,女,研究员,中国矿业大学(北京)在读博士,浙江萧山人。现任煤炭科学研究总院煤化工分院副院长,煤炭工业洁净煤工程技术研究中心副主任。兼任中国能源研究会副秘书长、理事,中国煤炭学会理事,中国煤炭学会煤炭加工利用专业委员会理事。国家清洁能源行动专家。

长期从事洁净煤技术和清洁能源研究。主持完成“中国洁净煤技术发展及对策研究”、世界银行“非电力行业洁净煤技术发展政策研究”、美国能源基金会“开发利用洁净煤技术的政策研究”等课题。参与完成“中国后续能源发展战略研究”、“中国电力‘十一五’发展计划”、“关于节约和代用燃料油对策”、“SO<sub>2</sub>减排合理技术经济途径及综合效益评估”等国家或中国工程院重点项目研究。

已在国内外发表“洁净煤技术是中国清洁能源技术的重点领域”、“中国可持续发展与洁净煤技术”等文章 50 余篇,并参与出版《动力煤优质化工程及其技术经济综合评价》、《中国资源利用战略研究》等论著 4 部。

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 中国能源生产及消费情况                | 1  |
| 1.1 世界能源现状及发展趋势                  | 1  |
| 1.2 中国能源发展现状                     | 13 |
| 1.2.1 中国能源资源                     | 13 |
| 1.2.2 中国能源生产与消费状况                | 20 |
| 1.3 中国能源生产和消费存在的问题               | 27 |
| 1.4 中国未来能源需求                     | 33 |
| 1.5 中国必须发展洁净煤技术                  | 40 |
| 第 2 章 洁净煤技术总体介绍                  | 42 |
| 2.1 洁净煤技术及领域                     | 42 |
| 2.2 国外推动洁净煤技术发展的经验               | 43 |
| 2.2.1 美国——能源政策与环境政策结合, 推动洁净煤技术发展 | 43 |
| 2.2.2 欧盟——严格的环境要求促进了洁净煤技术发展      | 45 |
| 2.2.3 日本——煤炭政策和环境政策促进了煤炭技术的开发和应用 | 46 |
| 2.3 中国洁净煤技术发展相关政策                | 48 |
| 2.3.1 技术政策                       | 49 |
| 2.3.2 环境政策及手段                    | 50 |
| 2.3.3 相关的激励政策及措施                 | 51 |
| 2.4 目前洁净煤技术发展中存在的问题与障碍           | 55 |
| 第 3 章 提高煤炭质量的技术——煤炭洗选加工技术        | 59 |
| 3.1 煤炭洗选技术                       | 59 |
| 3.1.1 煤炭洗选的定义、分类及作用              | 59 |
| 3.1.2 国外选煤技术发展现状                 | 60 |
| 3.1.3 国内选煤技术发展现状                 | 61 |
| 3.1.4 市场前景及环境、经济分析               | 64 |
| 3.1.5 有关选煤今后发展的建议                | 67 |
| 3.2 动力配煤技术                       | 67 |
| 3.2.1 概述                         | 67 |
| 3.2.2 国外配煤技术发展现状                 | 68 |
| 3.2.3 国内配煤技术发展现状                 | 70 |
| 3.2.4 市场前景及环境、经济分析               | 72 |
| 3.2.5 今后发展方向                     | 74 |
| 3.3 型煤技术                         | 74 |
| 3.3.1 型煤技术的定义及分类                 | 74 |
| 3.3.2 国外型煤技术发展现状                 | 75 |

|            |                               |     |
|------------|-------------------------------|-----|
| 3.3.3      | 国内型煤技术发展现状                    | 75  |
| 3.3.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 77  |
| 3.3.5      | 今后发展方向                        | 79  |
| 3.4        | 水煤浆技术                         | 80  |
| 3.4.1      | 水煤浆技术的特点和用途                   | 80  |
| 3.4.2      | 国外水煤浆技术的发展现状                  | 81  |
| 3.4.3      | 国内水煤浆技术的发展现状                  | 82  |
| 3.4.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 84  |
| 3.4.5      | 今后发展方向                        | 86  |
| <b>第4章</b> | <b>洁净燃烧与发电技术</b>              | 87  |
| 4.1        | 超临界发电                         | 87  |
| 4.1.1      | 概述                            | 88  |
| 4.1.2      | 国外超临界发电技术发展现状                 | 88  |
| 4.1.3      | 国内超临界发电技术发展现状                 | 90  |
| 4.1.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 91  |
| 4.1.5      | 今后发展方向                        | 93  |
| 4.2        | 循环流化床锅炉                       | 93  |
| 4.2.1      | 循环流化床锅炉燃烧技术的原理及特点             | 93  |
| 4.2.2      | 国外循环流化床锅炉技术发展现状               | 94  |
| 4.2.3      | 国内循环流化床锅炉技术发展现状               | 95  |
| 4.2.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 97  |
| 4.2.5      | 今后发展方向                        | 99  |
| 4.3        | 增压流化床燃烧联合循环发电                 | 100 |
| 4.3.1      | 概述                            | 100 |
| 4.3.2      | 国外增压流化床联合循环发电技术发展现状           | 102 |
| 4.3.3      | 国内增压流化床联合循环发电技术发展现状           | 102 |
| 4.3.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 103 |
| 4.4        | 整体煤气化联合循环发电                   | 104 |
| 4.4.1      | 整体煤气化联合循环发电及特点                | 104 |
| 4.4.2      | 国外整体煤气化联合循环发电技术发展现状           | 105 |
| 4.4.3      | 国内整体煤气化联合循环发电技术发展现状           | 106 |
| 4.4.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 107 |
| 4.4.5      | 今后在中国的发展方向                    | 107 |
| 4.5        | 低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术          | 107 |
| 4.5.1      | 低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术的定义、分类及作用 | 108 |
| 4.5.2      | 国外低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术发展现状    | 110 |
| 4.5.3      | 国内低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术发展现状    | 110 |
| 4.5.4      | 市场前景及环境、经济分析                  | 112 |
| 4.5.5      | 今后发展方向                        | 112 |
| 4.6        | 几种先进发电技术的综合评价                 | 113 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 4.7 中小型燃煤工业锅炉技术 .....         | 114 |
| 4.7.1 中小型燃煤工业锅炉技术的分类及作用 ..... | 114 |
| 4.7.2 国外先进燃煤工业锅炉发展现状 .....    | 116 |
| 4.7.3 国内中小型燃烧工业锅炉发展现状 .....   | 116 |
| 4.7.4 市场前景及环境、经济分析 .....      | 118 |
| 4.7.5 今后发展方向 .....            | 121 |
| <b>第5章 煤炭转化技术</b> .....       | 123 |
| 5.1 煤炭气化 .....                | 123 |
| 5.1.1 煤炭气化的定义、分类及作用 .....     | 123 |
| 5.1.2 国内外煤炭气化发展现状 .....       | 125 |
| 5.1.3 市场前景及环境、经济分析 .....      | 134 |
| 5.2 煤炭液化 .....                | 138 |
| 5.2.1 煤炭液化的定义、分类及作用 .....     | 138 |
| 5.2.2 国外煤炭液化发展现状 .....        | 139 |
| 5.2.3 国内煤炭液化发展现状 .....        | 143 |
| 5.2.4 市场前景及环境、经济分析 .....      | 144 |
| 5.2.5 今后发展方向 .....            | 146 |
| 5.3 燃料电池 .....                | 147 |
| 5.3.1 燃料电池的定义、分类及作用 .....     | 147 |
| 5.3.2 国内外燃料电池发展现状 .....       | 147 |
| 5.3.3 市场前景及环境、经济分析 .....      | 152 |
| 5.3.4 今后发展方向 .....            | 153 |
| 5.4 多联产系统 .....               | 154 |
| 5.4.1 多联产系统的定义、分类及作用 .....    | 154 |
| 5.4.2 国外多联产系统发展现状 .....       | 155 |
| 5.4.3 国内多联产系统发展现状 .....       | 156 |
| 5.4.4 市场前景及环境、经济分析 .....      | 156 |
| 5.4.5 今后发展方向 .....            | 157 |
| <b>第6章 污染物控制和再资源化技术</b> ..... | 158 |
| 6.1 烟气净化技术 .....              | 158 |
| 6.1.1 烟气净化技术概况 .....          | 158 |
| 6.1.2 国内外烟气脱硫技术发展现状 .....     | 163 |
| 6.1.3 国内外烟气除尘技术发展现状 .....     | 167 |
| 6.1.4 国内外烟气脱硝技术发展现状 .....     | 168 |
| 6.1.5 市场前景 .....              | 168 |
| 6.1.6 今后发展方向 .....            | 169 |
| 6.2 煤层气技术 .....               | 170 |
| 6.2.1 概述 .....                | 170 |
| 6.2.2 国外煤层气技术发展现状 .....       | 171 |
| 6.2.3 国内煤层气技术发展现状 .....       | 172 |

|                  |                                     |            |
|------------------|-------------------------------------|------------|
| 6.2.4            | 市场前景及环境、经济分析 .....                  | 174        |
| 6.2.5            | 今后发展方向 .....                        | 175        |
| 6.3              | 煤矸石综合利用技术 .....                     | 175        |
| 6.3.1            | 概述 .....                            | 175        |
| 6.3.2            | 国外煤矸石综合利用技术发展现状 .....               | 178        |
| 6.3.3            | 国内煤矸石综合利用和技术发展现状 .....              | 179        |
| 6.3.4            | 市场前景及环境、经济分析 .....                  | 185        |
| 6.3.5            | 今后发展方向 .....                        | 186        |
| 6.4              | 粉煤灰综合利用技术 .....                     | 187        |
| 6.4.1            | 概述 .....                            | 187        |
| 6.4.2            | 国外粉煤灰综合利用技术发展现状 .....               | 188        |
| 6.4.3            | 国内粉煤灰综合利用技术发展现状 .....               | 189        |
| 6.4.4            | 市场前景及环境、经济分析 .....                  | 192        |
| 6.4.5            | 今后发展方向 .....                        | 193        |
| 6.5              | 矿井水资源化利用技术 .....                    | 194        |
| 6.5.1            | 矿井水的来源、分类及其所造成的污染及危害 .....          | 194        |
| 6.5.2            | 国外矿井水资源化利用技术发展现状 .....              | 199        |
| 6.5.3            | 国内矿井水资源化利用技术发展现状 .....              | 199        |
| 6.5.4            | 市场前景及环境、经济分析 .....                  | 199        |
| 6.5.5            | 今后发展方向 .....                        | 200        |
| <b>第7章</b>       | <b>中国洁净煤技术发展对策建议 .....</b>          | <b>202</b> |
| 7.1              | 洁净煤技术发展的政策建议 .....                  | 202        |
| 7.2              | 洁净煤技术发展的技术建议 .....                  | 203        |
| 7.2.1            | 针对煤炭四大用户的洁净煤技术发展建议 .....            | 203        |
| 7.2.2            | 分层次发展各项技术的建议 .....                  | 205        |
| 7.2.3            | 近期技术发展重点建议 .....                    | 206        |
| 7.3              | 有关洁净煤技术发展的专项建议 .....                | 206        |
| 7.3.1            | 全面提高动力煤质量的专项建议 .....                | 206        |
| 7.3.2            | 全过程实施 SO <sub>2</sub> 减排的专项建议 ..... | 214        |
| 主要缩略语和单位说明 ..... |                                     | 215        |
| 参考文献 .....       |                                     | 217        |

## 第1章 中国能源生产及消费情况

能源是支持社会发展和经济增长的重要物质基础和生产要素，充足稳定的能源供应不仅为工业提供动力，为农业提供保障，推动技术进步，保障国民经济的发展，而且还促进人民生活质量的改善，创造众多就业机会，促进人类社会的发展和进步。而世界经济的快速发展，又促进了能源的开发和利用技术水平的提高，两者既相互促进，又相互制约。

按开发和制取方式，能源可分为一次能源和二次能源。一次能源是指以现存的形式存在于自然界中的能源，包括化石能源（煤炭、石油、天然气等）、核燃料、可再生能源（太阳能、风能、地热、生物质能、海洋能、潮汐能等）等。二次能源是指人们在生产活动中，出于便于输送和使用，提高能源效率或环境保护的考虑，将一次能源加工转换而成的能源产品，如电力、煤气、焦炭、柴油、汽油、液化石油气 LPG 等。

当今世界一次能源生产和消费以化石能源为主导，以可再生能源和新能源为补充，化石能源占一次能源的 90% 以上。世界化石能源消费又以煤炭、石油和天然气为主。在 2002 年世界一次能源消费结构中，石油占 37%、煤炭占 26%、天然气占 24%、核能和水电分别占 7% 和 6%。随着世界经济的不断发展，关于谋求经济、社会、资源、环境与发展协调有序和可持续共进的呼声越来越高，强调清洁能源/技术和可再生能源的替代已逐步成为一种发展趋势。

中国一次能源消费结构与世界的情况有很大不同，2002 年中国一次能源消费结构为煤炭占 70.7%、石油占 17.2%、天然气占 3.2%、水电占 8.9%。有关机构预测，要满足 2020 年国民经济翻两番的需求，届时中国一次能源消费将增加一倍左右，一次能源消费结构将约为：煤炭占 60%~61%、石油占 26%~28%、天然气占 6%~7%、水电与核电占 4%~6%。

在国际社会越来越重视能源环境，越来越强调能源与经济协调发展的情况下，为什么中国还要以煤炭为主要的一次能源？为什么要加强发展洁净煤技术？面对大量煤炭低效利用引起的环境压力，石油进口依存度不断增加引起的石油安全考虑及清洁能源/技术替代过程中的能源经济思考，中国应该如何应对快速经济发展中能源需求的不断增加？如何解决能源与社会经济的可持续发展问题？洁净煤技术在此当中可起到什么样的作用？要了解和搞清这些问题，先要对世界能源和中国能源的发展现状与发展趋势做一个背景性的了解。

### 1.1 世界能源现状及发展趋势

#### (1) 世界化石能源资源丰富

能源资源及可开发利用的数量是相对而言的，是随着科学技术的发展而扩大的。能源储量是总资源的一部分，包括经济储量、次经济储量和和其他储量（见图 1-1）。能源探明储量是指在现有条件下已测定的可经济开采的储量。

就全球而言，一次能源资源是丰富的。有关国际机构的统计数据表明，近年来世界能源资源量在不断增大，主要原因是随着科学技术的不断发展，能源勘探技术水平提高，勘探确定程度增加，同时能源开采技术水平的提高和开采成本的下降，使能源可采程度不断加大，资源中经济可采部分（即可采储量）增加。

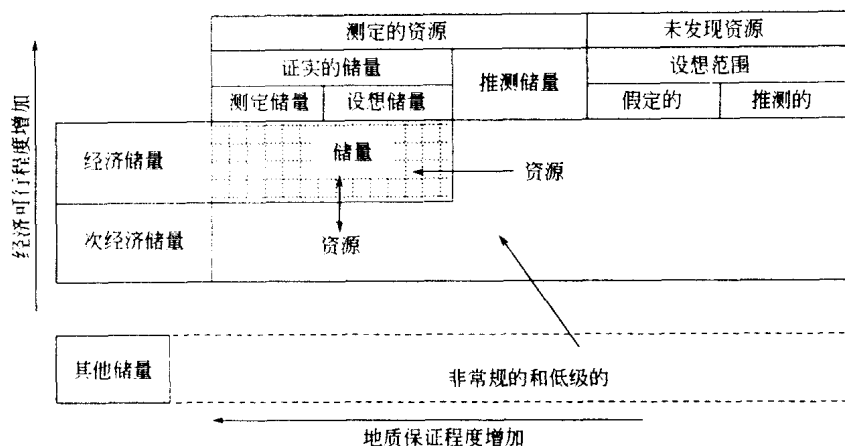


图 1-1 能源资源分类原则

《世界能源评述》(UNDP1999) 资料显示, 世界化石能源资源量为 3404Gtoe ( $10^9$  吨标准油), 总储量为 1660Gtoe。在化石能源中, 石油储量为 328Gtoe, 其中常规石油 145.5Gtoe, 非常规石油 182.4Gtoe; 天然气储量为 332Gtoe, 其中常规天然气 140.5Gtoe, 非常规天然气 191.4Gtoe; 煤炭储量 1000Gtoe, 即煤炭是储量最为丰富的化石能源, 其资源量大于石油和天然气的总和 (见表 1-1)。该数据比 20 世纪 70 年代公布的资源量要大许多, 其中石油储量要比二十几年前数据增长约 50%, 天然气储量增长一倍以上。

表 1-1 世界一次能源储量和资源量

单位: Gtoe

|     |     | 消 费 量       |        | 储 量     | 资 源 量   | 其他埋藏     |
|-----|-----|-------------|--------|---------|---------|----------|
|     |     | 1960~1997 年 | 1997 年 |         |         |          |
| 石油  | 常规  | 112.38      | 3.19   | 145.54  | 144.55  |          |
|     | 非常规 | 6.58        | 0.21   | 182.42  | 334.95  | 1785.71  |
| 天然气 | 常规  | 54.19       | 1.86   | 140.54  | 278.12  |          |
|     | 非常规 | 0.69        | 0.11   | 191.40  | 257.19  | 380.95   |
|     | 水合物 |             | —      | —       | —       | 18571.43 |
| 煤炭  |     | 140.24      | 2.39   | 999.86  | 2389.48 | 2880.95  |
| 合 计 |     | 313.88      | 7.76   | 1659.76 | 3404.29 | 23619.04 |

注: 摘自《世界能源评述》UNDP 等, 1999。

据国际能源组织 WEC 预测, 随着科技学术的发展和勘探成本的降低, 化石能源可采储量可能进一步增加, 国际石油价格的上升将刺激勘探范围扩大、勘探程度的加深。

国际能源机构 IEA 认为目前发现的石油储量仅为实际量的 80% 左右。在世界范围内, 不存在能源危机的问题, 但随着常规石油和天然气的日益开采完结, 能源的开采成本会上升, 这意味着在数十年后能源的价格有可能会进一步升高。

2003 年 6 月英国石油公司 BP 发布《2002 年世界能源统计年评》, 数据显示, 世界石油可采储量在 142700Mt, 折合 216900Mtce ( $10^8$  吨标准煤); 天然气可采储量在 1557800 亿立方米, 折合 210300Mtce; 煤炭可采储量在 984450Mt, 折合 703200Mtce。石油、天然气和煤炭的储采比分别为 40.6、60.8、204, 即按照目前已探明的能源储量和能源开采速度, 在世界范围内, 常规石油还可以利用 40 年, 常规天然气还可以利用 60 年, 煤炭还可以利用 204

年（见表 1-2）。

表 1-2 2002 年世界一次能源储量前 10 位的国家（年末可采储量）

| 石油/Mt |              | 天然气/亿立方米 |               | 煤炭/Mt |              |
|-------|--------------|----------|---------------|-------|--------------|
| 沙特    | 36000(86.0)  | 俄罗斯      | 475700(81.2)  | 美国    | 249990(252)  |
| 伊拉克   | 15200(>100)  | 伊朗       | 230000(>100)  | 俄罗斯   | 157010(>100) |
| 科威特   | 13300(>100)  | 卡塔尔      | 144000(>100)  | 中国    | 114500(82)   |
| 阿联酋   | 13000(>100)  | 沙特       | 63600(>100)   | 印度    | 84400(235)   |
| 伊朗    | 12300(73.8)  | 阿联酋      | 60100(>100)   | 澳大利亚  | 82090(243)   |
| 委内瑞拉  | 11200(74.0)  | 美国       | 51900(9.6)    | 德国    | 66000(317)   |
| 俄罗斯   | 8200(21.9)   | 阿尔及利亚    | 45200(56.3)   | 南非    | 49510(221)   |
| 利比亚   | 3800(59.4)   | 委内瑞拉     | 41900(>100)   | 乌克兰   | 34150(412)   |
| 美国    | 3800(10.8)   | 尼日利亚     | 35100(>100)   | 哈萨克斯坦 | 34000(464)   |
| 尼日利亚  | 3200(32.8)   | 伊拉克      | 31100(>100)   | 波兰    | 22160(138)   |
| 世界总计  | 142700(40.6) | 世界总计     | 1557800(60.8) | 世界总计  | 984450(204)  |

注：1. 表中（ ）内的数字为储采比。

2. 水电和核电按火电站转换效率 38% 折算热当量。

来源：《2002 年 BP 世界能源统计年评》，2003.6。

在世界范围内，化石能源的储藏是丰富的，但对于各国来讲，情况千差万别。BP 公司的统计结果表明，世界一次能源的地域分布极不均匀，储量在前 10 位的国家，集中了世界上约 90% 的煤炭、84% 的石油和 76% 的天然气（见表 1-2）。

1) 煤炭 主要储藏地在北半球，北纬 30°~70°是地球重要的含煤带，世界上已发现的地质储量在 5000 亿吨以上的煤田大部分分布在这一带。美国、俄罗斯、中国、印度、澳大利亚、德国、南非、乌克兰、哈萨克斯坦、波兰 10 个国家集中了世界上 90.8% 的煤炭可采储量。其中美国的煤炭可采储量占世界总量 25.4%。中国的煤炭可采储量占世界总量 11.6%，居世界第 3 位。

2) 石油 从现有世界石油探明储量看，陆上石油蕴藏量约为海底的 3 倍。从地区上看，中东和墨西哥-加勒比海地区是两个突出的油区，目前世界上已探明的石油储量约 2/3 集中在这两个地区。据勘探，东半球现有储量是西半球的 5 倍，占世界储量的 80% 以上，其中中东地区的储量是西半球的 3.6 倍。沙特、伊拉克、科威特、阿联酋、伊朗、委内瑞拉、俄罗斯、利比亚、尼日利亚 10 个国家集中了世界上 84.0% 的石油可采储量。中国的石油资源居世界第 11 位，占世界石油可采储量的 1.8%。

3) 天然气 世界上天然气储量分布范围很广，但主要集中在前苏联和中东地区，这两个地区天然气储量约占世界总量的 70%。俄罗斯、伊朗、卡塔尔、沙特、阿联酋、美国、阿尔及利亚、委内瑞拉、尼日利亚、伊拉克 10 个国家集中了世界上 75.7% 的天然气可采储量。中国的天然气资源居世界第 21 位，占世界天然气可采储量的 1.3%。

能源资源分布的不均匀性，决定了各国必须依据本国资源条件、经济条件和能源利用技术水平来确定本国的能源消费结构。

## （2）世界能源开发利用的三次变革

纵观人类社会的发展，世界经济对一次能源的需求经历了由薪柴到煤炭、由煤炭到石油、由石油到寻找石油替代品的三次变革，表现出对能源的需求由对总量需求到对品种和结

构需求，再到对能源质量需求的不断变化。

18 世纪下半叶蒸汽机的发明和使用，使煤炭成为生产动力。工业化的推进，增加了对煤炭的需求。据统计，1860~1920 年，世界煤炭由 136Mtce 增长到 1250Mtce，煤炭在世界一次能源消费结构中的比例由 24% 增长到 87%。在此期间，煤炭取代薪柴等成为主要能源，促使世界能源开发利用发生了第一次大变革，促进了产业革命的出现，使世界进入煤炭时代。

20 世纪以后，随着内燃机、柴油机的发明和广泛应用，石油化工得到快速发展。世界范围内石油开发利用的数量和规模急剧上升，到 20 世纪 60 年代，石油在世界一次能源消费结构中首次超过煤炭而居第一位。由此，世界开始了石油时代，促进世界能源开发利用发生了第二次大变革。

20 世纪 70 年代由于发生多次石油危机，人们开始对于石油枯竭的担忧，使得廉价石油所维持的以石油为主体的世界能源结构发生了变化。世界范围内为了经济发展而不加限制地大量消耗煤炭和石油，带来了严重的负面效应，如环境污染、酸雨、破坏生态、引起疾病、诱发温室效应等，人们越来越担心这种发展的后果及地球与人类的未来。1972 年 6 月，联合国在瑞典召开第一次“人类与环境会议”，通过著名的《人类环境宣言》，提出“只有一个地球”的口号。“可持续发展”的理念逐步得到国际社会的共识，既要推动经济、社会的发展，又要保护环境，使经济社会发展与资源环境保护相协调的持续发展，引起国际社会的广泛关注。因此，从 20 世纪 80 年代起，国际上开始积极推进节能，提高效率，积极寻求替代能源，具有较大资源潜力的气体能源和各类可再生能源得到较快的发展，在世界一次能源消费中天然气所占比例迅速上升。这意味着世界上能源开发利用第三次大变革的开始。

20 世纪末期至 21 世纪初期，由于世界石油价格的飙升及中东地区围绕石油战争的进行，国际上对于能源安全及能源经济的考虑明显增加，各国政府均采取对策，进行本国能源储备、能源结构及能源政策的调整。实施能源多样化，节约能源，提高清洁能源的比例，发展清洁能源利用技术，降低能源成本，保护能源环境已逐步成为国际社会的共同做法。但由于各国资源条件、经济条件及能源利用水平的现状不同，各国确立的能源消费结构及能源政策仍有很大的区别，其中发达国家与发展中国家之间的区别更大。

表 1-3 1971~2000 年世界各国 GDP

单位：10 亿美元（1995 年价）

| 国 家     | 1971  | 1973  | 1980  | 1985  | 1990  | 1995  | 1999  | 2000  |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 美国      | 3583  | 4005  | 4772  | 5563  | 6521  | 7338  | 8645  | 9009  |
| 日本      | 2236  | 2619  | 3304  | 3885  | 4936  | 5292  | 5554  | 5688  |
| 德国      | 1441  | 1574  | 1829  | 1967  | 2270  | 2458  | 2603  | 2680  |
| 法国      | 873   | 961   | 1154  | 1255  | 1473  | 1553  | 1703  | 1756  |
| 英国      | 672   | 747   | 798   | 885   | 1041  | 1127  | 1256  | 1294  |
| 意大利     | 589   | 647   | 823   | 895   | 1030  | 1097  | 1171  | 1205  |
| 中国      | 104   | 115   | 164   | 274   | 396   | 700   | 964   | 1040  |
| 加拿大     | 280   | 316   | 403   | 462   | 532   | 579   | 663   | 693   |
| 韩国      | 79.1  | 93.2  | 149   | 217   | 342   | 489   | 568   | 618   |
| 印度      | 122   | 124   | 160   | 208   | 283   | 364   | 463   | 482   |
| OECD 总计 | 11904 | 13367 | 16130 | 18288 | 21797 | 23898 | 26713 | 27675 |
| 世界总计    | 14066 | 15814 | 19589 | 22206 | 26402 | 29289 | 32913 | 34199 |

来源：《能源政策研究》，2003.6 期。

### (3) 世界一次能源消费现状

近二十几年来,世界经济快速增长,2000年世界GDP总量达到341990亿美元,是1980年的1.75倍,年均增长2.8%。经济发展居世界前10位国家的GDP总值均有不同程度的增长,其中以中国的增长速度为最快,年均增长9.7%;美国GDP年均增长3.2%,高于世界平均值(见表1-3)。

由于世界经济增长、人口增长及世界人均能源消费量增加等因素,近二十几年来世界一次能源消费总量持续增长见图1-2。2001年世界一次能源消费总量达9128Mtoe(10<sup>6</sup>吨标准油)(约13053Mtce),比1979年增长31.3%,年均增长率达1.6%,远低于世界经济的发展速度。其中石油和天然气占一次能源消费总量的比例迅速上升,分别由1979年的31.24%、12.82%上升到38.4%、23.7%,煤炭占一次能源消费总量的比例则由1979年的49.68%下降为24.70%(见表1-4)。

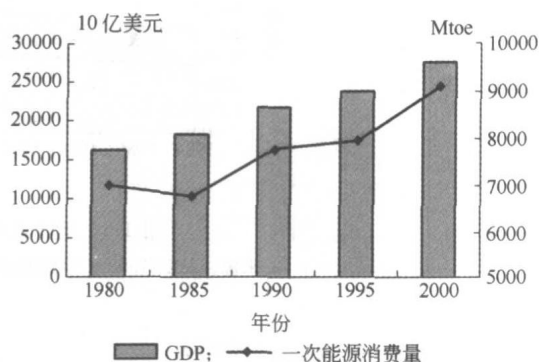


图 1-2 世界经济及能源增长

数据来源:《能源政策研究》,2003.6期

表 1-4 世界一次能源消费构成

单位: %

| 年 份  | 消费总量/Mtoe | 煤 炭   | 石 油   | 天 然 气 | 水 电  | 核 电  |
|------|-----------|-------|-------|-------|------|------|
| 1979 | 6953      | 49.68 | 31.24 | 12.82 | 4.24 | 1.55 |
| 1984 | 6754.6    | 30.3  | 29.5  | 19.6  | 6.7  | 3.9  |
| 1989 | 7748.6    | 27.8  | 38.3  | 21.3  | 7.0  | 5.6  |
| 1994 | 7923.8    | 27.2  | 40.0  | 23.0  | 2.5  | 7.2  |
| 1997 | 8387.6    | 27.0  | 39.9  | 23.2  | 2.6  | 7.3  |
| 2001 | 9127.8    | 24.7  | 38.4  | 23.7  | 6.5  | 6.5  |

来源:《2000年BP世界能源统计年评》。

近二十几年,世界化石能源消费以天然气增长最快,年均增长率为4.1%;石油增长其次,年均增长率为2.2%;煤炭所占比例虽然下降不少,但由于世界煤炭消费总量的大幅度上升,其消费总量仍有所上升(见图1-3)。世界范围内天然气利用快速发展的主要原因是,天然气作为清洁的化石燃料,在商业价值方面具有吸引力(世界上同等发热量的天然气与煤炭的价格比低于中国天然气与煤炭的价格比);新建的天然气联合循环电厂干净,运行成本已开始降低,在北美、欧洲等地区得到迅速使用。

在世界一次能源消费中,经济合作与发展组织(OECD)国家占消费总量的一半以上。随着近些年经济的发展,发展中国家能源消费量迅速增加,在世界能源消费中所占的比例越来越大(见图1-4)。

另据《2002年BP世界能源统计评论》统计数据公布,2002年世界一次能源消费总量在2001年的基础上,又增长2.6%,达到9405Mtoe,超过了过去十年的年均增长率。世界一次能源消费快速增长的主要原因是由于中国2002年一次能源消费猛增的拉动,如果不考虑中国一次能源消费的增长,世界一次能源消费增长不足1%。

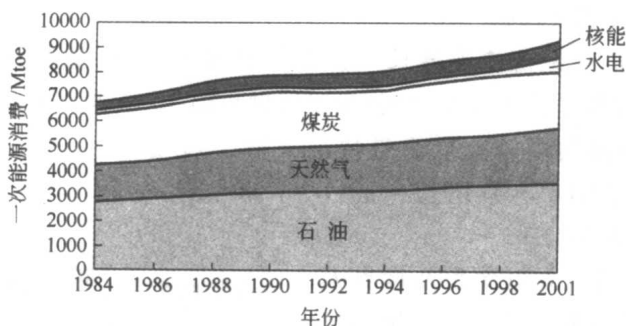


图 1-3 近十几年世界一次能源消费

来源：《IEA1998 世界能源评述》、《能源政策研究》2003.4 期

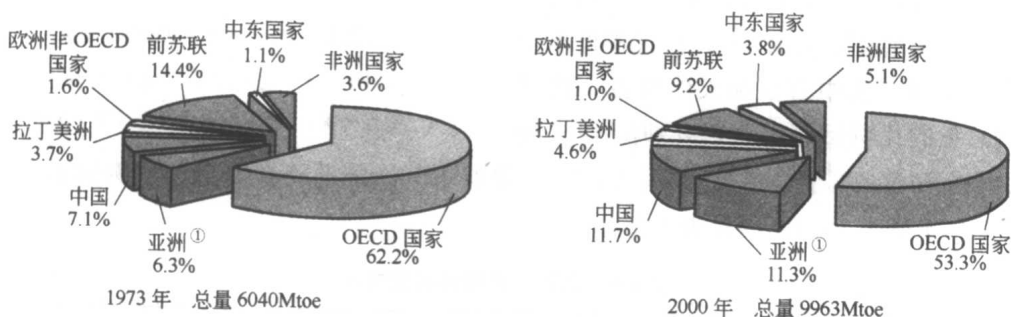


图 1-4 按地区划分的世界一次能源消费

① 不包括中国

来源：《IEA2002 年世界能源评述》

表 1-5 2002 年世界一些国家和地区一次能源消费情况

单位：Mtoe

| 国家和地区 | 能源消费总量      | 煤 炭        | 石 油        | 天 然 气      | 核 能      | 水 电      |
|-------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| 美国    | 2293.0(100) | 553.8(24)  | 894.3(39)  | 600.7(26)  | 185.8(8) | 58.2(3)  |
| 中国    | 997.8(100)  | 663.4(66)  | 245.7(25)  | 27.0(3)    | 5.9(<1)  | 55.8(6)  |
| 俄罗斯   | 640.2(100)  | 98.5(15)   | 122.9(19)  | 349.6(55)  | 32.0(5)  | 37.2(6)  |
| 日本    | 509.4(100)  | 105.3(21)  | 242.6(48)  | 69.7(14)   | 71.3(13) | 20.5(4)  |
| 德国    | 329.4(100)  | 84.6(25)   | 127.2(39)  | 74.3(23)   | 37.3(11) | 5.9(2)   |
| 印度    | 325.1(100)  | 180.8(56)  | 97.7(30)   | 25.4(8)    | 4.4(1)   | 16.9(5)  |
| 英国    | 220.3(100)  | 36.5(17)   | 77.2(35)   | 85.1(39)   | 19.9(9)  | 1.7(<1)  |
| 韩国    | 205.8(100)  | 49.1(24)   | 105.0(51)  | 23.6(11)   | 27.0(13) | 1.2(1)   |
| 巴西    | 177.5(100)  | 12.0(7)    | 85.4(48)   | 12.3(7)    | 34.0(2)  | 64.4(36) |
| 伊朗    | 116.2(100)  | 0.8(1)     | 53.2(46)   | 61.1(52)   | —        | 1.1(1)   |
| 亚太地区  | 2717.8(100) | 1183.5(44) | 991.6(36)  | 297.3(11)  | 118.0(4) | 127.7(5) |
| 世界合计  | 9405.0(100) | 2397.9(26) | 3522.5(37) | 2282.0(24) | 610.6(7) | 592.1(6) |

注：括号内数值为该种能源占一次能源消费总量的百分比。

来源：《2002 年 BP 世界能源统计年评》。

2002 年世界一些国家和地区的一次能源消费量及消费结构分别见表 1-5 和图 1-5 所示。分析 2002 年世界一次能源消费情况，发现各类一次能源均呈现不同程度的增长。其中煤炭

消费增长最为强劲，比 2001 年增长 6.9%，主要是由于中国煤炭消费增长的拉动，北美地区煤炭消费增长为 1.5%，而欧洲和前苏联地区煤炭消费分别出现 1% 和 7.8% 的负增长；石油消费比 2001 年略有上升，增长 0.2%，达到 7574.7 万桶/日，主要是由于亚太地区对石油的需求由 2001 年的减少 0.5% 转为增长 1.5%，国际油价在中高价位持续徘徊，在很大程度上抑制了世界石油消费的增长；天然气消费增长 2.8%，达到 35355 亿立方米，主要是美国和亚太经合组织

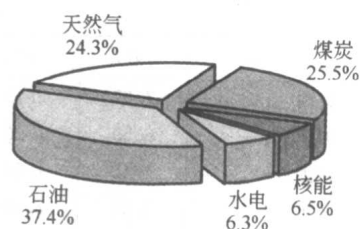


图 1-5 2002 年世界一次能源消费结构

国家的天然气需求大增；核能和水电增长适度，分别增长了 1.6% 和 1.4%，亚太地区是核能增长最快的地区，北美和拉美水电分别增长 10.4% 和 4.6%，弥补了欧洲地区下降的 9.9%。

2002 年世界能源消费中，消费量居前 10 位的国家为美国、中国、俄罗斯、日本、德国、印度、英国、韩国、巴西和伊朗，10 个国家消费了世界上 58.3% 的能源。美国是世界上最大的能源消费国家，2002 年能源消费量占世界能源消费总量的 24.4%，近 1/4。中国是世界上第二大能源消费国，2002 年一次能源消费占世界总量的 10.6%。

在世界能源消费总量居前 10 位的国家中，能源消费结构以石油为主的国家有沙特、韩国、日本、巴西、美国、德国，分别在一次能源消费结构中占 56%、51%、48%、48%、39%、39%，以石油生产国或经济发达国家为主；以天然气为主的国家为阿尔及利亚、俄罗斯、伊朗、英国，分别占一次能源消费结构的 70%、55%、52%、39%，同样为石油生产国或经济发达国家；以煤炭为主的国家有中国、印度，分别占一次能源消费总量的 66% 和 56%，均为煤炭生产国和发展中国家。可见各国能源消费结构完全由本国的资源条件和经济条件所决定，纵观世界上其他国家，情况同样如此，即世界上以石油和天然气为主要一次能源的国家或为发达国家，或为生产国。

按一次能源品种分析，在世界一次能源消费中，煤炭消费量居前 6 位的国家为中国、美国、印度、日本、俄罗斯、德国。中国的煤炭消费总量居世界第 1 位，占世界煤炭消费总量的 27.7%。美国的煤炭消费总量居世界第 2 位，占世界煤炭消费总量的 23.1%。中、美两国煤炭消费总量之和超过世界煤炭消费总量的一半。

在世界一次能源消费中，石油消费量居前 6 位的国家为美国、中国、日本、俄罗斯、德国、韩国。美国是世界上最大的石油消费国，占世界石油消费总量的 25.4%，超过 1/4。中国的石油消费量居世界第 2 位，占世界石油消费总量的 7.0%。

在世界一次能源消费中，天然气消费量居前 6 位的国家为美国、俄罗斯、英国、德国、韩国、日本、伊朗。美国作为世界上最大的天然气消费国，天然气消费占世界天然气消费总量的 26.3%，同样超过 1/4。中国的天然气消费居世界第 18 位，占世界天然气消费总量的 1.2%。

#### (4) 世界人均能源消费与单位 GDP 能源消费

随着世界经济的增长，工业和生活用能不断增加，世界人均能源消费量不断上升。2000 年世界平均人均能耗为 1.50toe/人，比 1971 年的 1.31toe/人增长 14.5%。发展中国家人均能耗的增长速率很快，而发达国家的人均能耗增长量更快（见表 1-6）。