

21世纪可持续能源丛书

洁净煤技术

姚强等编著

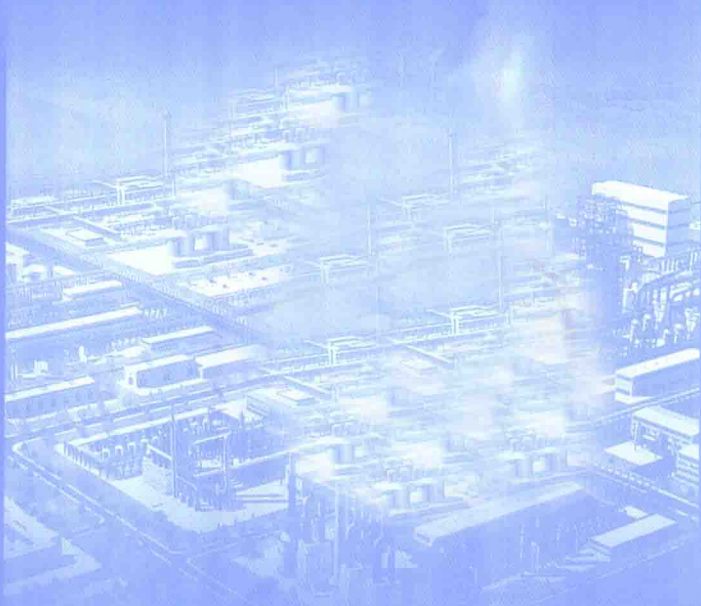


化学工业出版社

21世纪可持续能源丛书

洁净煤技术

姚强 陈超 编著



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/姚强等编著. 北京: 化学工业出版社,
2005.1

(21世纪可持续能源丛书)

ISBN 7-5025-6030-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 083215 号

21 世纪可持续能源丛书

洁净煤技术

姚强等编著

责任编辑: 陈志良

责任校对: 李林 崔世芳

封面设计: 于兵

*

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>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 20 $\frac{1}{2}$ 彩插 2 字数 365 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6030-0/TK·8

定 价: 42.00 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

能源是人类社会存在与发展的物质基础。过去 200 多年，建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的能源体系极大地推动了人类社会的发展。然而，人们在物质生活和精神生活不断提高的同时，也越来越感悟到大规模使用化石燃料所带来的严重后果：资源日益枯竭，环境不断恶化，还诱发了不少国与国之间、地区之间的政治经济纠纷，甚至冲突和战争。因此，人类必须寻求一种新的、清洁、安全、可靠的可持续能源系统。

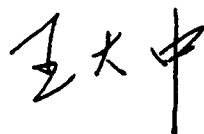
我国经济正在快速持续发展，但又面临着有限的化石燃料资源和更高的环境保护要求的严峻挑战。坚持节能优先，提高能源效率；优化能源结构，以煤为主多元化发展；加强环境保护，开展煤清洁化利用；采取综合措施，保障能源安全；依靠科技进步，开发利用新能源和可再生能源等，是我国长期的能源发展战略，也是我国建立可持续能源系统最主要的政策措施。

面临这样一个能源发展的形势，化学工业出版社组织了一批知名学者和专家，撰写了这套《21 世纪可持续能源丛书》是非常及时和必要的。

这套丛书共有 11 册，以每一个能源品种为一册，内容十分广泛、丰富和充实，包括资源评价，新的工艺技术特性介绍，开发应用中的经济性和环境影响，还涉及到推广应用和产业化发展中的政策和机制等。可以说，在我国能源领域中，这套丛书在深度和广度上都达到了较高的学术水平和实用价值，不仅为能源工作者提供了丰富的能源科学技术方面的专业知识、信息和综合分析的政策工具，而且也能使广大读者更好地了解当今世界正在走向一个可持续发展的、与环境友好的能源新时代，因此值得一读。

我们期待本丛书的出版发行，在探索和建立我国可持续能源体系的进程中作出应有的贡献。

中国科学院院士



2004 年 7 月 8 日

前 言

进入 21 世纪, 煤作为一种能源, 究竟是否还会像 20 世纪一样占有这样重要的地位, 回答是肯定的, 至少在前 50 年是如此。煤作为在 20 世纪给人们带来严重污染的能源, 是否能够寻找一种洁净的利用方式, 而大大减少对环境的严重污染? 这就是本书想告诉大家的, 答案当然也是肯定的。

国内外介绍洁净煤技术方面的书有相当多, 主要都是给专业人员看的, 本书试图以一般的读者为对象, 用最小的篇幅来介绍洁净煤技术的概貌, 第 1 章讲的是煤在能源中的地位及在使用中存在的主要问题, 以便为洁净煤技术的提出打下一个基础, 在后面的章节中分别介绍了有关的洁净煤技术的基本原理, 发展与应用。内容包括在燃烧前的煤炭净化技术。包括煤炭的洗选和加工转化技术, 如煤的物理与化学净化、配煤和型煤技术, 这是第 2 章的主要内容。第 3 章主要介绍在燃烧过程中控制污染物排放的洁净煤燃烧技术, 主要是指低 NO_x 燃烧技术、循环流化床燃烧技术和水煤浆技术, 这当然不全, 但反映了最主要的发展状况。第 4 章专门介绍燃烧后的烟气净化技术。主要有包括烟气脱硫技术、烟气脱硝技术、颗粒物控制技术和以汞为主的痕量重金属控制技术。第 5 章与第 6 章是煤炭的转化包括煤气化技术和煤炭液化技术。煤的主要利用方式还是发电, 所以各种洁净煤发电技术构成了洁净煤技术的核心部分, 各章节的内容都与此相关。在第 7 章中专门介绍一些发电的最新技术, 主要的技术尚在发展之中, 但很快会成为洁净煤发电技术的主流, 包括超超临界机组、以联合循环为基础的各种新型发电技术如增压流化床燃烧联合循环、整体煤气化联合循环、以及与燃料电池结合的联合循环系统等。最后一章试图

谈一个目前令人十分困扰但必须面对的燃煤带来的 CO₂ 问题，并介绍一种新的以 CO₂ 的分离、回收和填埋为核心的污染物近零排放燃煤技术，就此来看是洁净煤技术的未来的主要发展方向。

由于作者自己工作经历的关系，对于煤的先进燃烧技术和烟气净化技术、煤的先进发电技术等介绍略为详细一些，其他的内容就以一般的介绍为主。作者在清华大学与浙江大学两所国内主要从事洁净煤技术研究的学校工作，有机会接触同事们的许多研究工作，他们的工作成果对于我编写这一本普及性的书是很重要的。同时在 2001~2004 年参与科技部有关洁净煤技术高技术研究发展计划（863）的有关工作，有幸与国内很多从事洁净煤技术的专家，特别是更广的领域的专家们学习，使我对洁净煤技术的各项技术有了一个初步的了解，这些了解与对发展的理解反映在这本书中。

在此，特别要对与我共同工作的各位同事表示深切的谢意，没有他们长期在这个领域的工作和积累，我不可能在这一领域有知识增长的机会。也要感谢国家各个部委，特别是国家科技部在洁净煤技术方面的支持，并使我参与了其中部分的研究工作，为国家的洁净煤技术做一些基础性的研究工作是我最大的愿望。化学工业出版社出版这套丛书是一个有远见的和建设性的工作，对于我国的能源科技普及和提高我国的整体国民科技素质将会起到良好的作用。

由于自己研究与理解的水平有限，可能有不当之处，还请大家多提宝贵意见。

姚 强

2004 年 6 月 10 日于清华园

内 容 提 要

本书是《21世纪可持续能源丛书》之一。

我国是煤炭的消费大国，煤炭在可持续能源中地位重要，但在煤炭转化及利用过程中引起污染问题也十分突出，因此当前煤的清洁利用受到世界各国的广泛关注，本书即用最小的篇幅全面介绍了洁净煤技术的全貌。

书中首先讨论了煤在可持续能源中的地位及在使用中存在的问题，进而讲述了燃烧前的煤炭净化技术；燃烧过程中控制污染物排放的洁净燃烧技术及发展状况；燃烧后的烟气净化技术，如脱硫技术、脱硝技术、颗粒物控制技术、痕量重金属控制技术；并介绍了包括煤气化、液化的煤转化技术。

煤的主要利用方式是发电，所以各种洁净煤发电技术构成了洁净煤技术的核心；书中专门介绍了一些煤洁净发电的最新技术，虽然主要的技术尚在发展中，但很快会成为洁净煤发电技术的主流，这包括超超临界机组、以联合循环为基础的各种新型发电技术，如增压流化床燃烧联合循环、整体煤气化联合循环以及与燃料电池结合的联合循环等。

本书的对象为一般读者，可供关心能源和燃煤技术的科技人员、管理人员参考，对想进入这一专业领域的人员，也可以作为一本入门的参考书。

目 录

第 1 章 煤炭利用与环境问题	1
1.1 世界煤炭资源及其地位	1
1.2 中国煤炭资源及其地位	5
1.2.1 中国能源资源的基本状况	5
1.2.2 中国煤炭的资源状况	6
1.2.3 中国煤炭目前生产和消费状况	7
1.2.4 中国煤炭需求与生产预测	9
1.3 煤炭燃烧排放引起的环境问题	10
1.3.1 煤炭利用的途径	10
1.3.2 二氧化硫污染与酸雨	13
1.3.3 氮氧化物与光化学雾污染	18
1.3.4 燃烧颗粒物污染	19
1.3.5 燃煤产生的其他污染物	21
1.4 洁净煤技术	21
第 2 章 煤的净化技术	23
2.1 煤炭净化技术的发展	23
2.2 煤炭的物理净化法	25

2.2.1	跳汰法	26
2.2.2	重介质选煤	28
2.2.3	浮游选煤	30
2.2.4	典型的选煤工艺	30
2.3	煤炭的化学净化法	32
2.4	煤炭的微生物净化法	36
2.5	煤净化产生的废弃物及其利用技术	38
2.5.1	煤矸石	39
2.5.2	煤泥	39
2.6	配煤与型煤技术	40
2.6.1	配煤技术	40
2.6.2	型煤技术	41
第3章	煤的先进燃烧技术	45
3.1	燃煤锅炉的低 NO_x 燃烧技术	45
3.1.1	燃煤锅炉 NO_x 的生成机理	46
3.1.2	燃煤锅炉的低 NO_x 燃烧技术	49
3.1.3	低 NO_x 燃烧技术	59
3.2	循环流化床燃烧技术	61
3.2.1	循环流化床燃烧技术概述	61
3.2.2	循环流化床燃烧技术基本原理及特点	63
3.2.3	循环流化床锅炉的污染控制	75
3.2.4	循环流化床燃烧技术的发展与展望	80
3.3	水煤浆燃烧技术	84
3.3.1	水煤浆概述	84
3.3.2	水煤浆的特性	85
3.3.3	水煤浆的制备	86
3.3.4	水煤浆的燃烧	88
3.3.5	水煤浆的应用	90
3.3.6	水煤浆的发展历史及前景	96
第4章	燃煤烟气净化技术	99
4.1	烟气净化基本原理	99

4.2	颗粒物的脱除技术	102
4.2.1	颗粒物脱除的基本原理	102
4.2.2	颗粒物脱除技术的分类	103
4.2.3	机械除尘技术	105
4.2.4	湿式除尘技术	106
4.2.5	静电除尘技术	108
4.2.6	袋式除尘技术	115
4.2.7	电袋一体化除尘技术	124
4.3	烟气脱硫技术	125
4.3.1	烟气中硫的来源及存在形式	126
4.3.2	烟气脱硫技术概述	126
4.3.3	烟气脱硫的基本原理和常用脱硫剂	128
4.3.4	湿法烟气脱硫工艺	133
4.3.5	干法/半干法烟气脱硫技术	144
4.3.6	我国烟气脱硫技术发展现状及前景分析	149
4.4	烟气脱硝技术	151
4.4.1	NO _x 脱除技术概述	151
4.4.2	选择性非催化还原脱硝技术 (SNCR)	152
4.4.3	选择性催化还原脱硝技术 (SCR)	155
4.4.4	湿式烟气脱硝技术	157
4.5	同时脱硫脱硝技术	158
4.5.1	电子束氨法和脉冲电晕法	158
4.5.2	活性炭加氨吸附法	160
4.5.3	NOXSO 工艺	160
4.5.4	SNOX 工艺	162
4.5.5	SNRB 工艺	162
4.5.6	氧化铜法	163
4.5.7	湿式 FGD 加金属螯合物法	164
4.6	燃煤电站锅炉重金属和汞排放的控制技术	165
4.6.1	燃煤电站锅炉的重金属污染	165
4.6.2	燃煤锅炉汞的污染	169
4.6.3	燃煤锅炉燃烧中汞的形态和排放	170
4.6.4	燃煤锅炉汞排放的控制技术	172

第5章 煤的气化技术 178

5.1 概述	178
5.1.1 煤气化的定义和实质	178
5.1.2 煤气化的基本原理	179
5.1.3 煤气化的分类	181
5.1.4 影响煤气化效果的几个因素	183
5.1.5 煤气的种类	185
5.1.6 煤炭气化的基本工艺流程	186
5.2 移动床气化法及其典型气化炉	187
5.2.1 常压移动床气化法概述	187
5.2.2 典型的常压移动床气化炉介绍	191
5.2.3 加压移动床气化法以及典型气化炉	193
5.2.4 典型的加压移动床气化炉	195
5.3 流化床气化法及其典型气化炉	197
5.3.1 流化床气化法原理	198
5.3.2 典型的流化床气化炉介绍	199
5.4 气流床气化法及其典型气化炉	203
5.4.1 气流床气化法原理	203
5.4.2 典型的气流床气化炉	204
5.5 其他气化法	209
5.5.1 熔融床气化法	210
5.5.2 煤的地下气化法	212
5.6 煤气的净化和加工	214
5.6.1 脱除酸性气体	214
5.6.2 CO变换	217
5.6.3 煤气甲烷化	218

第6章 煤的液化技术 221

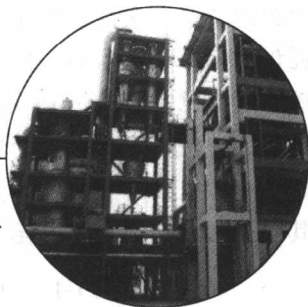
6.1 煤液化的意义和相关概念	221
6.2 煤的直接液化技术	223
6.2.1 煤直接液化的基本原理	223
6.2.2 煤直接液化的一般工艺过程	224

6.2.3	几种典型的直接液化工艺	225
6.2.4	煤直接液化技术的关键因素	235
6.2.5	直接液化产物的特点	238
6.2.6	我国的煤直接液化技术	239
6.3	煤的间接液化	240
6.3.1	FT合成法的基本原理及工艺	241
6.3.2	几种间接液化的典型工艺	246
6.3.3	间接液化技术的产物特点	251
6.4	煤制备其他液体燃料	252
6.4.1	煤制甲醇的典型工艺	252
6.4.2	甲醇转化成汽油 (MTG)	254
6.4.3	煤制二甲醚的典型工艺	255
第7章 洁净煤发电新技术		258
7.1	超超临界发电 (USC) 技术	259
7.1.1	超超临界机组的关键因素	260
7.1.2	超超临界机组的发展历史及前景	261
7.2	燃气-蒸汽联合循环原理	263
7.2.1	燃气-蒸汽联合循环的基本原理	263
7.2.2	燃气-蒸汽联合循环的基本形式	265
7.3	整体煤气化联合循环 (IGCC) 技术	269
7.3.1	整体煤气化联合循环 IGCC 技术的基本原理	269
7.3.2	典型的 IGCC 示范工程	270
7.3.3	IGCC 的主要特点及影响因素	273
7.3.4	IGCC 的发展过程及趋势	275
7.4	燃煤增压流化床 (PFBC) 锅炉联合循环技术	276
7.4.1	PFBC 的基本形式	276
7.4.2	典型的 PFBC 电站系统	278
7.4.3	PFBC 的特点及影响因素	280
7.4.4	PFBC 的发展历史及趋势	281
7.5	整体煤气化-燃料电池 (IGMFC) 联合循环技术	284
7.5.1	燃料电池的基本原理	284
7.5.2	整体煤气化-燃料电池 (IGMFC) 联合循环	286

7.6 整体煤气化湿空气联合循环 (IGHAT) 技术	288
第 8 章 洁净煤技术的发展与前景展望	290
8.1 国际上洁净煤技术的发展	290
8.1.1 美国洁净煤技术的发展	290
8.1.2 欧共体与日本的洁净煤发展计划	292
8.1.3 中国洁净煤技术的发展	293
8.2 二氧化碳与全球气候变暖	294
8.3 煤基近零排放多联产系统	297
8.3.1 CO ₂ 的排放控制技术	298
8.3.2 多联产系统的意义	302
8.3.3 煤基近零排放多联产系统的发展	305
参考文献	313

第 1 章

煤炭利用与环境问题



煤作为一种能源，人类已经使用了很长时间，但作为人类的基本能源需求，即照明、取暖的资源 and 提供完成工农业和运输等需求的动力的来源，则是进入 19 世纪以后的事。在这之前使用的所有形式的能源都是可再生的。1800 年，世界煤炭的产量约为 1 500 万吨，而到 1900 年已超过了 7 亿吨。世界依赖于煤炭的高峰在 20 世纪初来临，在当时提供了世界能源消费中的 90%；此后，石油资源的发现在一定程度上缓解了世界对煤炭的依赖。

然而煤的使用，却带来了严重的生态环境问题，20 世纪重大的大气环境污染事件，如酸雨、臭氧减少、全球气候变暖、光化学烟雾污染、城市煤烟雾等，都与燃煤相关（见彩图 1）。大气中的主要污染物，二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、烟尘、颗粒物、有机污染物、重金属的主要来源都是煤的燃烧，这些污染物对人类健康和生态环境造成了不可逆转的损害。

20 世纪 70 年代，发生了严重的石油危机，人们开始思考过度依赖于石油和煤炭造成的环境问题。如何在煤炭开发、利用过程中减少对环境的危害，同时能从煤炭这一传统的“不清洁”能源获得“清洁”的气体与液体燃料，成为全世界能源科技工作者追求的目标。“洁净煤技术”这一概念也就由此产生了。通过 30 年的努力，已经形成了许多成熟的洁净煤技术，这些技术正在使人们重新认识煤作为基础能源的价值。本章就是介绍这一过程的基本状况，并为后续章节展开对各项“洁净煤技术”的介绍打下基础。

1.1 世界煤炭资源及其地位

能源在人类生活和生产中是必不可少的，任何产品都离不开能源，因此能源发展水平在一定程度上代表了国家的经济发展水平，表 1-1 为从 1965~2002 年世界能源消费的增长情况。可以看出，世界能源消费的增长与经济的增长趋

势是完全一致的。表 1-2 为 2001 年和 2002 年世界前十位国家和各地区的一次能源消费量和全世界消耗的总量，可以看出，在全球 94.05 亿吨油当量的总消耗量中，石油占据第一位，达 37.45%；煤炭为 25.50%；天然气为 24.26%；矿物燃料总达 87.21%；核能占 6.49%；水电占 6.30%。矿物燃料占有绝对重要的地位，而除石油之外，煤炭是第二位重要的能源。从国家和地区来看，这一分布也很不平衡，世界前十位国家消耗的能源占全球能源消耗的 64.5%，其中美国一个国家就消耗了全球 1/4 的能源。

表 1-1 1965~2002 年世界能源消费的增长情况

年份	单位:百万吨油当量										2001 年 增长率 /%	2002 年占 全世界的 比例/%
	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2001	2002		
美国	1 323.6	1 650.2	1 691.6	1 813.2	1 766.5	1 966.2	2 119.1	2 314.3	2 250.9	2 293.0	1.9	24.4
加拿大	116.3	156.4	187.0	218.2	235.2	248.0	275.2	289.7	285.9	288.7	1.0	3.1
北美	1 464.6	1 840.4	1 929.6	2 109.5	2 092.9	2 315.8	2 504.2	2 738.3	2 670.5	2 715.4	1.7	28.9
中、南美	111.3	144.7	187.5	247.5	270.9	321.1	385.0	450.4	448.7	448.2	-0.1	4.8
法国	114.8	155.5	171.6	190.9	195.8	219.0	235.7	254.8	258.2	258.0	-0.1	2.7
德国	256.4	309.7	319.9	355.7	358.9	349.8	333.1	330.5	335.7	329.4	-1.9	3.5
俄罗斯	—	—	—	—	823.8	873.0	668.1	636.0	638.7	640.2	0.2	6.8
英国	196.8	216.9	203.1	201.7	202.3	211.5	214.4	224.0	226.0	220.3	-2.5	2.3
欧洲	1 681.6	2 143.9	2 503.9	2 834.9	3 023.1	3 205.0	2 778.0	2 818.4	2 845.3	2 829.5	-0.6	30.1
中东	56.6	72.8	95.6	136.3	204.3	257.6	329.2	385.5	396.5	403.1	1.6	4.3
非洲	58.7	73.6	98.2	141.4	191.7	222.9	246.1	277.9	284.7	291.0	2.2	3.1
中国	182.4	233.4	337.7	426.9	559.2	685.8	893.6	765.7	833.6	997.8	19.7	10.6
印度	52.9	64.9	82.1	102.9	136.9	193.4	252.3	312.0	314.2	325.1	3.4	3.5
日本	149.2	281.4	329.9	357.8	370.2	435.3	493.8	515.9	514.8	509.4	-1.1	5.4
韩国	6.4	14.3	22.6	38.6	52.7	90.3	148.6	191.1	195.9	205.8	5.0	2.2
亚太地区	489.2	741.0	963.2	1 177.9	1 422.1	1 828.4	2 325.8	2 421.7	2 519.6	2 717.8	7.9	28.9
全世界	3 862.0	5 016.4	5 778.0	6 647.5	7 205.0	8 150.8	8 568.3	9 092.2	9 165.3	9 405.0	2.6	100.0

注：表 1-1~表 1-5 资料来源：“BP 2003 Statistical Review of World Energy”。

表 1-2 2001 年和 2002 年世界前十位国家和地区的一次能源消费量和全世界消耗的总量 单位: 百万吨油当量

国家 和地区	消费量											
	年 份											
	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2002	2002	2002	2002	2002	2002
	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计
美 国	896.1	578.2	545.9	183.2	47.6	2250.9	894.3	600.7	553.8	185.8	58.2	2293.0
加拿大	88.7	74.5	30.3	17.4	75.0	285.9	89.7	72.6	30.7	17.0	78.6	288.7
全北美	1068.2	687.8	583.0	202.6	129.0	2670.5	1064.9	711.2	591.5	205.0	142.4	2715.4
南美与中美	218.8	88.0	19.5	5.1	117.2	448.7	214.8	88.2	17.8	4.7	122.7	448.2
法 国	95.5	37.7	11.6	95.5	17.9	258.2	92.8	38.5	12.7	98.9	15.0	258.0
德 国	131.6	74.6	85.0	38.7	5.8	335.7	127.2	74.3	84.6	37.3	5.9	329.4
俄罗斯	122.3	335.4	110.2	31.0	39.8	638.7	122.9	349.6	98.5	32.0	37.2	640.2
英 国	77.3	86.7	40.3	20.4	1.5	226.0	77.2	85.1	36.5	19.9	1.7	220.3
全欧洲和欧亚大陆地区	930.5	920.7	523.3	276.1	194.9	2845.3	925.2	939.5	506.1	280.0	178.9	2829.5
全中东	206.4	180.6	8.0	—	1.5	396.5	207.4	185.1	8.4	—	1.9	403.1
全非洲	116.5	58.7	89.2	2.6	17.9	284.7	118.6	60.7	90.6	2.9	18.5	291.0
中 国	232.2	25.0	518.7	4.0	53.7	833.6	245.7	27.0	663.4	5.9	55.8	997.8
印 度	96.7	24.5	172.5	4.3	16.3	314.2	97.7	25.4	180.8	4.4	16.9	325.1
日 本	247.5	71.1	103.0	72.7	20.4	514.8	242.6	69.7	105.3	71.3	20.5	509.4
韩 国	103.1	20.8	45.7	25.4	0.9	195.9	105.0	23.6	49.1	27.0	1.2	205.8
全亚太地区	976.7	283.7	1020.1	114.6	124.2	2519.6	991.6	297.3	1183.5	118.0	127.7	2717.8
全世界	3517.1	2219.5	2243.1	601.0	584.7	9165.3	3522.5	2282.0	2397.9	610.6	592.1	9405.0

我们再来看能源资源的储量状况, 表 1-3 列出了世界石油和煤炭已探明的可经济开采储量, 可以看出, 石油至今已探明的经济可采量为 1 427 亿吨, 而煤则为 9 844.53 亿吨。石油的平均储采比为 40.6 年, 而煤炭的平均储采比为 204 年。因此, 石油不可能长期占据能源消费中的第一位, 预计在 21 世纪中叶, 如果人类无法找到大规模的替代能源的话, 人类又必须重新依赖于煤炭作为最主要的能源。

表 1-3 世界石油和煤炭已探明的可经济开采储量 (2002 年底)

石油(亿吨)			煤炭(亿吨)		
储量	年开采量	储/采比(年)	储量	年开采量	储/采比(年)
1 427	35.57	40.6	9 844.53	48.33	204