



# 洁净煤技术

Clean Coal Technology

郑楚光 主编

华中理工大学出版社

# 洁净煤技术

郑楚光 主编

华中理工大学出版社

## 内 容 提 要

洁净煤技术覆盖了煤炭开发利用的全过程,它是既能降低动力耗费,又能创造友好生态环境的崭新一代煤炭利用技术。本书纵览了世界各国洁净煤技术的发展状况,综述了最新的研究成果。本书可作为能源、煤炭、电力、化工、工程热物理等专业的高等院校本科生和研究生的教材或教学参考书,也可以供相关领域从事煤炭转化和利用、煤炭发电、燃烧科学与技术的科研管理人员参考。

## 序 言

能源、环境是当今世界所面临的两大严峻的现实问题。经济的发展在很大的程度上是取决于动力供应的规模和可靠性。世界范围内的石油和天然气的储藏量是有限的,以今天的消耗水平,不敷使用(30~40)年;再生能源是常规能源的补充,但决不能替代常规能源;核聚变能在今后的50年内还不可能有效地大面积推广;而煤炭由于其资源的丰富和价格的相对稳定,已成为或必将成为动力生产的首选燃料。但煤炭作为一种低品位的能源,目前对它的利用效率还很低;此外,煤炭还是一种肮脏的低品位能源,在其开采、运输、转换和利用的各个环节中都会对生态环境造成很大的危害,是最大的污染源之一。以中国为例:据历年的资料估算,煤燃烧过程所排放的主要大气污染物,如粉尘、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等,总量约占整个燃料燃烧排放量的96%。其中燃煤排放的SO<sub>2</sub>占各类污染源(燃料燃烧源、工业废气源、流动源)总排放量的87%(占燃料燃烧排放量的93%);排放的粉尘占总排放量的60%(占燃料燃烧排放量的99%);排放的NO<sub>x</sub>占总排放量的67%(占燃料燃烧排放量的87%);排放的CO占总排放量的71%(占燃料燃烧排放量的87%);排放的CO<sub>2</sub>占总排放量的85%。显然,这种状况已经成为对社会和经济持续发展的严重制约。可见在煤炭的高效利用,降低污染方面,世界面临着严峻的挑战。

近年来,世界各发达国家争相制定和实施了以“高效转换、控制污染以及向发展中国家输出先进燃煤技术和装备”为目标的‘洁净煤技术’(CCT)计划。例如,美国就投入了51亿美元,欧共体投入数亿欧洲货币单位,日本、澳大利亚也已相继启动实施‘洁净煤技术’项目。这些计划的根本目标是利用一些崭新的技术来解决世界对煤炭需要的不断增长和加强环境保护之间的矛盾,它的实施将在跨越科研开发和工业应用的界线方面迈出关键的一步,它将成为下一世纪煤炭利用中既能同时降低动力耗费,又能创造友好生态环境的崭新技术。

中国既是一个产能的大国,也是一个耗能大国。此外还有着中国自己所特有的能源构成,与以石油、天然气、核电为主要一次能源的工业发达国家有着极大的差异。中国以煤为主的能源构成(占总能耗的75%)在今后向相当长的时期内都不会改变。作为一个以煤为主要能源需求的发展中大国,在煤炭资源的高效清洁利用技术方面,无疑具有很大的市场优势和开发机遇。另外,在开发提高煤的燃烧,尤其是劣质煤的燃烧稳定性、高效率以及低污染排放的技术方面,作出了大量很具特色的工作。

以高效和低污染排放为特征的‘洁净煤技术’是新一代的煤炭利用先进技术,它代表了煤炭利用的未来。它的提出既反映了中国现实国民经济发展的紧迫需要,也完全符合国家能源转换、环境保护的长远政策。除此,它还将改变人们对煤炭利用的传统观念,对能源学科乃至相关学科的发展起到极大的推动作用。

总结‘洁净煤技术’的最新发展、加强‘洁净煤技术’研究开发、探讨‘洁净煤技术’的原理和发展‘洁净煤技术’的理论,都是十分紧迫的任务,也是撰写本书的目的。

本书成稿以后,承蒙武汉水利电力大学唐必光教授的认真校阅和热情指导;另外,东南大学的徐益谦教授也曾提供了不少有价值的资料,在此一并表示深切的谢意。

本书由郑楚光主编,并撰写了第一、二、三、四、六、七章和第十四章;第八、九章由陆继东撰

写;第十、十一、十二、十三章由周英彪撰写;晏蓉撰写了第五章;华中理工大学煤燃烧国家重点实验室的部分研究生参加了资料的收集工作。

近年来,洁净煤技术发展如火如荼,有关文献资料浩如烟海,撰写者们若管中窥豹,难免挂一漏十,加之学识浅薄,疏漏不当之处,在所难免,诚望同行指正。

作者  
1996.12

# 目 录

## 第一章 能源与环境

1.1 能源的现状与展望 .....	(1)
1.1.1 世界能源的现状 .....	(1)
1.1.2 世界能源展望 .....	(5)
1.2 世界的环境问题 .....	(7)
1.2.1 环境与环境科学 .....	(7)
1.2.2 燃烧排放与酸雨污染 .....	(9)
1.2.3 全球气候变暖与能源工业 .....	(13)
1.2.4 臭氧层的破坏与燃烧排放 .....	(18)
1.2.5 燃烧粉尘与碳氢化合物的排放 .....	(23)
1.3 大气污染的标准和法规 .....	(24)
1.3.1 法规 .....	(24)
1.3.2 国际大气污染法规综述 .....	(25)
1.3.3 国际大气污染法规 .....	(27)
1.3.4 中国 .....	(33)

## 第二章 洁净煤技术在国内外的的发展

2.1 美国的洁净煤技术 .....	(36)
2.1.1 CCT 计划的目标 .....	(36)
2.1.2 CCT 计划的意义 .....	(36)
2.1.3 CCT 计划的应用前景 .....	(37)
2.1.4 美国 CCT 计划的项目征集 .....	(38)
2.1.5 CCT 计划的资金 .....	(38)
2.1.6 CCT 计划的环境标准 .....	(38)
2.1.7 CCT 计划的项目范围 .....	(39)
2.1.8 CCT 计划的进展 .....	(39)
2.2 欧共体的洁净煤技术研究与发展计划 .....	(41)
2.2.1 背景和目标 .....	(41)
2.2.2 APAS 洁净煤计划 .....	(42)
2.2.3 洁净煤技术的研究与开发的 Joule I 计划(一卷) .....	(43)
2.2.4 洁净煤技术的研究与开发的 Joule I 计划(二卷) .....	(45)
2.3 世界主要工业国家的洁净煤技术 .....	(47)
2.3.1 德国的火力发电 .....	(47)
2.3.2 日本热力发电技术的发展以及高效燃煤电站的展望 .....	(50)
2.3.3 法国 .....	(55)
2.3.4 澳大利亚 .....	(59)

2.3.5 意大利国家电气委员会(ENEL)降低污染排放的计划 .....	(62)
---------------------------------------	------

### 第三章 洁净煤技术是中国能源的未来

3.1 中国的能源生产、消费与展望 .....	(65)
3.2 中国的煤炭资源与供需 .....	(68)
3.2.1 中国的煤炭资源 .....	(68)
3.2.2 中国动力煤供需现状及展望 .....	(74)
3.2.3 中国动力煤的灰分、硫分和发热量 .....	(75)
3.2.4 动力煤供需现状及展望 .....	(78)
3.3 中国煤炭的利用效率及其污染 .....	(78)
3.3.1 人均占有量少、利用效率低下 .....	(78)
3.3.2 煤炭利用与生态环境恶化 .....	(80)
3.4 中国的生态环境状况 .....	(82)
3.5 中国的洁净煤计划 .....	(84)

### 第四章 煤燃烧过程中的污染排放

4.1 粉尘与烟雾 .....	(87)
4.1.1 微粒粉尘 .....	(87)
4.1.2 煤燃烧中细微粒子形成机理 .....	(88)
4.1.3 烟雾 .....	(89)
4.2 硫的氧化物 .....	(91)
4.3 氮氧化物 .....	(94)
4.3.1 热力氧化氮的生成机理 .....	(95)
4.3.2 快速氧化氮的生成 .....	(95)
4.3.3 燃料 $\text{NO}_x$ 的生成 .....	(96)
4.3.4 氮氧化物的危害 .....	(97)
4.4 氧化亚氮 .....	(98)
4.4.1 大气中 $\text{N}_2\text{O}$ 的来源 .....	(98)
4.4.2 化石燃料燃烧中 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放 .....	(99)
4.4.3 FBC 中 $\text{N}_2\text{O}$ 生成与分解机理 .....	(101)
4.4.4 $\text{N}_2\text{O}$ 多相生成与分解 .....	(103)
4.4.5 $\text{N}_2\text{O}$ 生成与分解机理的模拟研究 .....	(105)
4.5 二氧化碳 .....	(106)
4.6 煤燃烧过程中的微量重金属元素的排放和控制 .....	(108)
4.6.1 重金属对人体健康的危害 .....	(108)
4.6.2 原煤中痕量元素的分布特征 .....	(109)
4.6.3 煤燃烧过程中痕量重金属元素的分布、排放及迁移 .....	(111)
4.6.4 燃煤电厂排放颗粒物中重金属形态的研究 .....	(112)
4.6.5 重金属排放的控制 .....	(114)

## 第五章 煤的清洁转换

5.1	中国煤炭洗选加工	(117)
5.1.1	动力煤洗选在国民经济中的地位和作用	(117)
5.1.2	中国动力煤洗选的现状和与世界先进水平的差距	(118)
5.2	选煤技术	(120)
5.2.1	选煤方法	(120)
5.2.2	煤的洗选脱硫	(120)
5.3	先进的物理洗煤方法	(121)
5.3.1	先进物理分选工艺	(121)
5.3.2	浮选脱硫	(124)
5.3.3	干法分选	(125)
5.4	化学方法精选煤炭	(125)
5.4.1	方法	(125)
5.4.2	Gravimelt 工艺	(126)
5.5	煤的生物脱硫	(127)
5.5.1	生物脱硫的优点	(127)
5.5.2	脱硫细菌的研究	(127)
5.5.3	存在的问题及努力的方向	(128)
5.6	超纯煤的制备	(129)
5.6.1	研制超纯煤的机理和方法	(129)
5.6.2	超纯煤中杂质的脱除	(130)
5.6.3	物理法制超低灰精细煤	(130)

## 第六章 先进的常规燃煤技术

6.1	煤粉燃烧稳定技术	(132)
6.1.1	煤粉钝体燃烧器	(132)
6.1.2	稳燃腔燃烧器	(132)
6.1.3	夹心风燃烧器	(133)
6.1.4	双通道自稳燃式煤粉燃烧器	(133)
6.1.5	火焰稳定船式燃烧器	(133)
6.2	低 NO <sub>x</sub> 燃烧技术	(135)
6.2.1	空气分级燃烧技术	(135)
6.2.2	烟气再循环燃烧技术	(136)
6.2.3	煤粉浓淡分离燃烧技术	(137)
6.2.4	燃料分级(或再燃)燃烧法	(138)
6.2.5	低 NO <sub>x</sub> 旋流燃烧器	(139)
6.3	高浓度煤粉燃烧技术	(140)
6.3.1	高浓度给粉技术	(141)
6.3.2	燃烧器浓缩技术	(142)



6.3.3	浓缩器浓缩技术 .....	(144)
-------	---------------	-------

## 第七章 污染防治技术

7.1	除尘 .....	(148)
7.2	脱硫 .....	(150)
7.2.1	高烟囱排放 .....	(150)
7.2.2	燃烧前脱硫 .....	(151)
7.2.3	炉内脱硫 .....	(153)
7.2.4	常规烟气脱硫技术 .....	(155)
7.2.5	等离子体烟气脱硫技术 .....	(167)
7.2.6	海水脱硫 .....	(174)
7.2.7	煤的微波脱硫 .....	(184)
7.3	脱硝 .....	(187)
7.3.1	低 NO <sub>x</sub> 燃烧技术 .....	(188)
7.3.2	化学喷射 .....	(188)
7.3.3	烟气脱硝 .....	(189)
7.3.4	燃煤锅炉的 NO <sub>x</sub> 控制 .....	(192)
7.3.5	燃油及燃气锅炉的 NO <sub>x</sub> 控制 .....	(197)
7.3.6	最新进展 .....	(198)
7.4	同时脱除烟气中的 NO <sub>x</sub> 和 SO <sub>2</sub> .....	(200)
7.4.1	电子束(E-Beam)辐照方法 .....	(200)
7.4.2	液态排渣多级煤燃烧技术(TRW) .....	(201)
7.4.3	降低 NO <sub>x</sub> 和 SO <sub>x</sub> 的联合干烟气处理系统 .....	(205)
7.4.4	活性炭附加 NH <sub>3</sub> 的吸附法 .....	(206)
7.4.5	臭氧法 .....	(207)
7.5	二氧化碳的控制与治理 .....	(208)
7.5.1	提高能源的转换效率 .....	(208)
7.5.2	减少和回收二氧化碳排放的新技术 .....	(209)
7.5.3	脱除 CO <sub>2</sub> 的气体放电技术 .....	(211)
7.5.4	二氧化碳的存放和处理 .....	(212)

## 第八章 流化床燃烧技术

8.1	流态化——特殊的煤炭燃烧方式 .....	(215)
8.1.1	特殊的气固流动形态——流态化 .....	(215)
8.1.2	显著的发展优势 .....	(216)
8.2	快速发展的流化床燃烧技术 .....	(217)
8.3	燃煤流化床锅炉的大型化 .....	(218)
8.3.1	鲁奇(Lurgi)型循环流化床锅炉 .....	(218)
8.3.2	Pyroflow 型循环流化床锅炉 .....	(222)
8.3.3	F-W 型循环流化床锅炉 .....	(224)

8.4 增压流化床燃烧技术 .....	(227)
---------------------	-------

## 第九章 先进的电力生产系统

9.1 联合发电循环的热力学原理 .....	(230)
9.2 整体煤气化联合循环(IGCC) .....	(232)
9.3 流化床燃烧联合循环(FBC-CC) .....	(235)
9.3.1 常压流化床燃烧联合循环(AFBC-CC) .....	(235)
9.3.2 增压流化床燃烧联合循环(PFBC-CC) .....	(237)
9.4 其它形式的燃煤联合循环 .....	(240)
9.4.1 增压液态排渣燃烧循环(PCS-CC) .....	(240)
9.4.2 整体煤气化增湿空气轮机循环(IG-HAT) .....	(241)
9.4.3 整体气化燃料电池(IG-FG) .....	(242)
9.4.4 磁流体发电联合循环(MHD-CC) .....	(243)

## 第十章 煤炭气化

10.1 煤炭气化技术 .....	(245)
10.1.1 煤炭气化方法的分类 .....	(245)
10.1.2 煤炭气化的应用及其发展 .....	(246)
10.2 移动床气化工工艺 .....	(247)
10.2.1 混合发生炉煤气的生产工艺 .....	(247)
10.2.2 水煤气的生产工艺 .....	(250)
10.2.3 常压两段炉气化 .....	(251)
10.2.4 加压气化 .....	(252)
10.3 流化床气化工工艺 .....	(253)
10.3.1 流化床气化的基本特点 .....	(253)
10.3.2 温克勒炉气化法 .....	(254)
10.3.3 其它流化床气化法 .....	(254)
10.4 气流床气化工工艺 .....	(256)
10.4.1 气流床气化的基本特点 .....	(256)
10.4.2 K-T 法 .....	(256)
10.4.3 Shell/Prenflo 煤炭气化技术 .....	(257)
10.4.4 德士古法 .....	(257)
10.5 熔融床气化 .....	(258)
10.5.1 熔渣气化工工艺 .....	(259)
10.5.2 熔盐气化工工艺 .....	(259)
10.5.3 熔铁气化工工艺 .....	(260)
10.6 煤的地下气化方法 .....	(260)

## 第十一章 煤的液化

11.1 煤炭液化的分类、环境特性和发展 .....	(261)
----------------------------	-------

11.1.1	煤炭液化方法的原理和分类	(261)
11.1.2	煤炭液化产品的环境特性	(261)
11.1.3	煤炭液化工艺的发展与展望	(262)
11.2	煤炭直接液化	(262)
11.2.1	德国煤直接液化工艺——IG 法	(263)
11.2.2	溶剂精炼煤法	(264)
11.2.3	埃克森供氢溶剂(EDS)法	(266)
11.2.4	氢煤(H-Coal)法	(267)
11.2.5	两段催化液化法	(268)
11.2.6	煤油共炼法	(269)
11.3	煤炭间接液化	(269)
11.3.1	费-托合成法	(269)
11.3.2	甲醇转化法(Mobil 法)	(271)

## 第十二章 水煤浆技术

12.1	水煤浆简介	(273)
12.1.1	水煤浆技术的主要特点	(273)
12.1.2	水煤浆的物理特性	(273)
12.1.3	水煤浆的燃烧特性	(274)
12.2	水煤浆的制备技术	(274)
12.2.1	水煤浆的制备过程简介	(274)
12.2.2	煤炭成浆性能、粒径级配和添加剂	(276)
12.3	水煤浆的燃烧	(277)
12.3.1	水煤浆的雾化特性	(277)
12.3.2	水煤浆的燃烧喷嘴	(277)
12.3.3	水煤浆燃烧的环境特性	(278)
12.4	水煤浆的贮运技术	(279)
12.4.1	水煤浆的贮存技术	(279)
12.4.2	水煤浆的运输技术	(280)
12.5	水煤浆技术研究开发现状	(280)
12.5.1	国外水煤浆技术工业发展简况	(280)
12.5.2	中国水煤浆技术工业发展简况	(281)

## 第十三章 燃料电池

13.1	燃料电池简介	(283)
13.1.1	燃料电池基本原理	(283)
13.1.2	燃料电池的分类与发展	(283)
13.1.3	燃料电池发电的优点	(287)
13.2	磷酸型燃料电池(PAFC)和固体氧化物电解质燃料电池(SOFC)简介	(287)
13.2.1	磷酸型燃料电池(PAFC)	(287)

13.2.2	固体氧化物电解质燃料电池(SOFC)	(289)
13.3	熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)	(289)
13.3.1	概述	(289)
13.3.2	典型熔融碳酸盐燃料电池的组成结构及制备简介	(290)
13.3.3	熔融碳酸盐燃料电池发电	(291)

## 第十四章 美国洁净煤计划示范工程

14.1	1992年年底已完成的项目	(295)
14.1.1	喷钙(石灰石)分级燃烧器示范项目的延伸和冷侧示范技术	(295)
14.1.2	控制(炉内)硫、氮及灰排放的先进旋风燃烧室	(297)
14.1.3	循环流化床示范项目	(298)
14.2	第一批启动项目(CCT-I)	(301)
14.2.1	煤质特性专家系统	(301)
14.2.2	烟气再燃和喷射吸收剂技术	(301)
14.2.3	Tird PFBC 示范工程	(303)
14.2.4	煤炭先进转换技术	(304)
14.2.5	York 郡能源公司热电项目	(305)
14.3	第二批启动项目(CCT-II)	(307)
14.3.1	IGCC 燃烧工程的改造计划	(307)
14.3.2	SNOX 烟气清洁示范项目	(308)
14.3.3	PFBC 装置示范项目	(309)
14.3.4	旋风炉中控制 NO <sub>x</sub> 生成的煤粉再燃示范装置	(311)
14.3.5	SOX-NOX-ROX BOX 烟气净化示范工程	(312)
14.3.6	焦炉煤气(COG)清洁系统改造技术	(314)
14.3.7	水泥窑炉烟气回收清洗器	(315)
14.3.8	先进的烟气脱硫示范工程	(317)
14.3.9	墙式燃烧锅炉的一种先进燃烧示范技术	(319)
14.3.10	对 CT-121 FGD 过程进行改进应用的示范工程	(320)
14.3.11	用选择性催化还原技术控制燃烧高硫煤锅炉 NO <sub>x</sub> 排放的示范工程	(321)
14.3.12	一种先进低 NO <sub>x</sub> 排放切向燃烧技术的 180MW 示范工程	(322)
14.4	第三批启动项目(CCT-III)	(325)
14.4.1	液化甲醇的商业示范	(325)
14.4.2	10MW 烟气悬浮吸收脱硫示范工程	(326)
14.4.3	Healy 电厂的洁净煤技术项目	(328)
14.4.4	全尺寸低 NO <sub>x</sub> 燃烧器改造的示范工程	(329)
14.4.5	受限区域离散烟气脱硫示范工程	(330)
14.4.6	高炉煤粉喷射系统的示范项目	(331)
14.4.7	PCFB 示范项目	(332)
14.4.8	ENCOAL 煤的适度气化技术	(334)
14.4.9	墙式燃烧锅炉烟气再燃及低 NO <sub>x</sub> 燃烧器	(335)

14.4.10	LIFAC 喷钙脱硫示范工程 .....	(337)
14.4.11	烟气脱硫脱硝净化系统的商业示范 .....	(338)
14.4.12	整体干式 NO <sub>x</sub> /SO <sub>2</sub> 排放控制系统 .....	(340)
14.4.13	Tampa 的 IGCC 项目 .....	(340)
<b>14.5</b>	<b>第四批启动项目(CCT-IV) .....</b>	<b>(342)</b>
14.5.1	自清洗煤——一种净化大气的综合方法 .....	(342)
14.5.2	Milliken 清洁煤技术示范项目 .....	(343)
14.5.3	Pinon Pine IGCC 电站 .....	(345)
14.5.4	Toms Creek IGCC 示范项目 .....	(346)
14.5.5	175MW 墙式燃烧锅炉控制 NO <sub>x</sub> 细微煤粉再燃技术 .....	(348)
14.5.6	脉动燃烧在蒸汽煤气化中的应用示范 .....	(349)
14.5.7	Warrick 电站的 CANSOLV 法烟气脱硫示范 .....	(351)
14.5.8	Wabash River 煤气化改造项目 .....	(352)
<b>14.6</b>	<b>第五批启动项目(CCT-V) .....</b>	<b>(354)</b>
14.6.1	Camden 清洁能源项目 .....	(354)
14.6.2	Calvert 城的先进能源项目 .....	(354)
14.6.3	生产清洁能源的 COREX-CPICOR 集成工艺 .....	(355)
14.6.4	Warren 电厂的 EFCC 示范项目 .....	(355)
14.6.5	Easton 公用事业公司的清洁煤内燃机技术示范项目 .....	(355)

# 第一章 能源与环境

1980年3月通过的《世界自然资源保护大纲》开宗明义地指出：“地球是宇宙中唯一已知可以维持生命的星球”；“人类寻求经济发展及享用自然界丰富的资源，必须符合资源有限的事实及生态系统的支持能力，还必须考虑到子孙后代的需要。”；“我们的时代有两个显著的特点。第一个特点是：人类的几乎是无限的建设与创造能力是相等于同样巨大的破坏与毁灭力量。第二个特点是：所有的行动都具有全球性的相互关系，及全球为之承担责任的结果。”与联合国的其它文件宣言一样，这些简捷、生动、庄重、准确的语言，描绘了当今世界在能源和环境方面所面临的严峻现在和未来。

## 1.1 能源的现状与展望

### 1.1.1 世界能源的现状

#### 1. 能源分类

能源是历史发展和社会进步的物质基础，它直接关系到国民经济繁荣和人民生活的改善。以便于利用的形式提供数量充足而价格合理的能源，是近代工业社会必要的基本条件，可以说人均能源的消耗量是衡量现代化国家人民生活水平的主要标准之一。但必须认识到，人们大量消耗能源的结果，不仅使环境保护要付出巨大的代价，而且还引起了地球上化石能源供给能维持多久的问题。

对能源的分类有多种多样，如一次能源和二次能源，常规能源和新能源，可再生能源和不可再生能源等(图 1.1)。

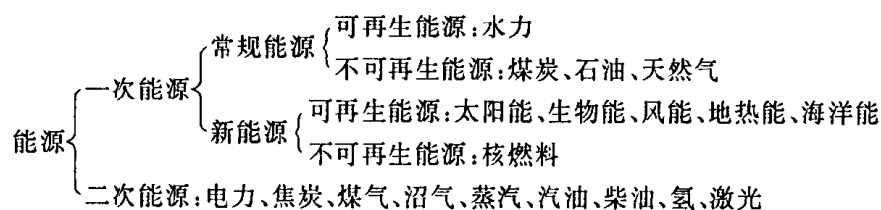


图 1.1 能源分类

根据能源消费后是否造成环境污染，又可分为污染型能源和清洁型能源。煤炭和石油类能源等都是污染型能源，电力和太阳能等则是清洁型能源。

#### 2. 世界能源资源统计

世界能源大会 1995 年版《能源资源调查》汇编了世界各国各种能源最近资源调查和 1993 年能源产量的统计数据。

**煤炭** 世界各国煤炭探明可采储量：烟煤和无烟煤 519.4Gt，次烟煤 197.1Gt，褐煤 315.1Gt，合计 1031.6Gt。1993 年产量分别为：3.169Gt，0.374Gt，0.931Gt，合计 4.474Gt。储采比 230 年。

**石油** 世界各国石油探明可采储量：原油 138.3Gt，天然气液 2.4Gt，合计 140.7Gt。1993

年产量 3.197Gt。储采比 44 年。

**天然气** 世界各国天然气探明可采储量共 14.1Tm<sup>3</sup>。1993 年毛产量 0.2485Tm<sup>3</sup>,净采量 0.217657Tm<sup>3</sup>。储采比 57 年。

**核能** 32 个国家铀资源探明可采储量:小于 80 美元/kg 的 1.53Mt 铀,(80~130)美元的 0.7Mt 铀,合计 2.23Mt 铀。前苏联、中国、印度等 9 国还拥有 1.44Mt。1993 年铀产量 32171t。30 个国家或地区 1993 年共有核电站装机容量 358GW,年发电量  $2.17 \times 10^{12}$  kW·h。

**水能** 世界各国共计:理论水能蕴藏量  $3.5 \times 10^{13}$  kW·h/y,技术可开发水能资源  $1.46 \times 10^{13}$  kW·h/y,经济可开发水能资源  $0.9 \times 10^{13}$  kW·h/y。1993 年共有水电装机容量  $7.2 \times 10^8$  kW,发电量  $2.38 \times 10^{12}$  kW·h/y。

**薪柴、泥炭及沼气** 世界各国可产木材的林地  $3.249 \times 10^9$  ha,薪柴年产量 1.36Gt,折合 0.475Gt 油当量,供世界总能源的 5%。世界各国泥炭地共  $4.14 \times 10^8$  ha,探明可采泥炭储量 31.8Gt,1993 年产量 17.94Mt。各种废弃物可回收能源  $23284 \times 10^{15}$  J/y。各种沼气可供世界能源约定 2%。

**太阳能** 美国、日本、欧洲等国太阳能电池 1994 年产量 60MW。美国、乌克兰等 5 国现有太阳能电池 370MW。

**地热** 41 个国家或地区 1993 年共有地热电站 9980MW,年发电量  $4.71 \times 10^{10}$  kW·h。直接利用地热 8780MW,年供热能  $3.58 \times 10^{10}$  kW·h。

**风能** 38 个国家 1993 年共有风机 3520MW,预计 2002 年将达到 10000MW。

**潮汐能** 法国、加拿大、中国、俄罗斯已建潮汐电站,共计装机容量 260MW,年发电量  $6 \times 10^8$  kW·h。

各种能源发电(包括建设和生产用能)每百万千瓦时产生的 CO<sub>2</sub>:煤电为 954t,油电为 820t,气电为 484t,地热电为 57t,小水电为 8t,核电为 7.8t,风电为 7.4t,光电池为 5.4t,大水电为 3.1t。

表 1.1 1994 年末世界化石燃料探明可采储量

煤炭/Gt		石油/Gt			天然气/Tm <sup>3</sup>			
世界总计		1043.86	世界总计		137.3	世界总计		14.1
1	前苏联	241.0	1	沙特	25.7	1	前苏联	5.6
2	美国	240.56	2	伊拉克	13.4	2	伊朗	2.1
3	中国	114.5	3	科威特	13.3	3	卡塔尔	0.71
4	澳大利亚	90.94	4	阿联酋	12.7	4	阿联酋	0.53
5	德国	80.07	5	伊朗	12.2	5	沙特	0.53
6	印度	69.95	6	委内瑞拉	9.3	6	美国	0.46
7	南非	55.33	7	前苏联	7.8	7	委内瑞拉	0.37
8	波兰	42.1	8	墨西哥	7.3	8	阿尔及利亚	0.36
			9	美国	3.8	9	尼日利亚	0.34
			10	中国	3.3	10	伊拉克	0.31
						11	中国	0.17

化石燃料是大自然赋予人类的财富,它的总储量是有限的,消耗的结果,必然是枯竭。

### 3. 一次能源资源及消费

英国石油公司的《1995年世界能源统计评论》,给出了1994年末世界化石燃料探明可采储量的最新数据(表1.1),中国1994年末石油探明剩余可采储量为3.3Gt,人均只有2.75t,仅为世界平均值的11%。

世界能源系统处于石油时代向石油天然气时代转化的过程,石油天然气作为全球主要能源还将维持相当长的时期。半个世纪以来,世界煤炭比例呈下降趋势,石油一直占据主导地位。1950年煤炭在世界能源结构中仍占57.7%,1970年这一比例下降到30.5%,1993年进一步下降到27.5%,而石油在1993年世界一次能源结构中的比例仍占40%(参见表1.2)。

表 1.2 (1950~1993)年世界能源结构的变化

Mt,(×100)	1950	1960	1970	1980	1990	1993
煤炭供应量	1009.75,(57.7%)	1329.4,(46%)	1479.25,(30.5%)	1802.71,(28.3%)	2192.19,(27.3%)	2146.1,(27.5%)
石油供应量	542.5,(31%)	1092.42,(37.8%)	2361.95,(48.7%)	3095.82,(48.6%)	3099.58,(38.6%)	3121.6,(40%)
天然气供应量	169.75,(9.7%)	410.38,(14.2%)	902.1,(18.6%)	1267.63,(19.9%)	1734.48,(21.6%)	1787.12,(22.9%)
水电供应量	28,(1.6%)	57.8,(2%)	101.85,(2.1%)	146.51,(2.3%)	538.01,(6.7%)	195.1,(2.5%)
核电供应量	0,(0%)	0,(0%)	4.85,(0.1%)	57.33,(0.9%)	465.74,(5.8%)	554.084,(7.1%)
能源供应总量	1750	2890	4850	6370	8030	7804

从世界各国发展趋势来看,工业化国家无一例外地采用了以油、气燃料为主的能源政策。工业化国家的能源结构中油、气比例高于世界平均水平。逐渐减少固体燃料的比例,是世界各国提高能源效率,降低能源系统成本,提供优质能源服务的必然选择。经济合作与发展组织(OECD)国家的一次能源结构中煤炭比例均小于30%,其中能效高的法国、意大利、日本等国比例更低,仅分别占6.1%、8.1%和17.1%(表1.3)。

表 1.3 1994年一次能源消费及构成

国家	总消费量 /×10 <sup>8</sup> t 标准煤	消费结构/×100				
		石油	天然气	煤炭	核电	水电
美国	28.980	39.8	26.3	24.3	8.6	1.0
前苏联	14.304	23.1	49.3	21.0	4.5	2.1
俄罗斯	9.494	24.5	50.4	19.0	3.8	2.3
中国	12.2737	15.7	1.9	75.0	0	5.6
日本	6.836	56.2	11.3	17.1	14.1	1.3
德国	4.76	40.6	18.3	28.9	11.7	0.5
法国	3.3314	39.0	11.9	6.1	40.0	3.0
加拿大	3.179	35.7	28.5	11.2	12.5	12.1
英国	3.111	37.7	28.2	23.2	10.6	0.3
印度	3.034	31.8	7.4	57.3	0.6	2.8
意大利	2.144	61.5	27.2	8.5	0	2.7
韩国	1.926	63.1	5.6	19.7	11.2	0.3
南非	1.360	19.8	0	77.2	2.7	0.2
波兰	1.351	15.5	8.6	75.6	0	0.2
世界总计	113.179	40.1	23.0	27.2	7.2	2.5



据世界银行《1995年世界发展报告》统计,世界各国1993年商品能源消费和GDP国民生产总值,以及1980~1993年发展情况,兹对1993年GDP值在2000亿美元以上的18个主要国家列于表1.4。(1980~1993)年GDP平均年增长率,世界各国平均为2.9%,最高的为中国9.6%,韩国9.1%,印度5.2%,日本4.0%。同期商品能源消费平均年增长率,最高的为韩国9.5%,印度6.7%,中国5.1%,巴西3.7%。据这两项增长率计算的(1980~1993)年能源消费弹性系数表明,墨西哥、巴西、阿根廷、印度、韩国等发展中国家都超过1.0,中国的为0.53,相对比较低。1993年能源进口值占商品出口值的百分比,印度、韩国、日本、美国、西班牙、巴西等国都超过10%。1993年人均能源消费,世界各国平均为1421kg油当量,最多的为美国7918kg,加拿大7821kg;最少的为印度242kg,中国632kg,巴西666kg。1993年每kg燃料生产的GDP值,世界各国平均每3.1美元,最高的为瑞士9.4美元,日本9.3美元;最低的为俄罗斯0.5美元,中国0.6美元。

表 1.4 世界主要国家能源和经济发展近况

序号	国家	1993年 GDP /亿美元	(1980~ 1993)年 GDP年增 率/×100	(1980~ 1993)能源 消耗年增 率/×100	(1980~ 1993)能源 消费弹性 系数	1993年能 源进口占 商品出口 /×100	1993年 人口 /万人	1993年 人均能源 消费 /kg	1993年 每 kg GDP /美元
1	美国	62599	2.7	1.4	0.52	13	25780	7918	3.1
2	日本	42142	4.0	2.7	0.68	14	12450	3642	9.3
3	德国	19108	2.6	0.0	—	7	8070	4170	5.7
4	法国	12517	2.1	2.0	0.95	9	5750	4031	5.4
5	意大利	9914	2.2	1.5	0.68	9	5710	2697	6.4
6	英国	8190	2.5	1.0	0.40	6	5790	3718	4.4
7	西班牙	4786	3.1	2.9	0.94	13	3950	2373	5.1
8	加拿大	4775	2.6	1.5	0.58	4	2880	7821	2.4
9	巴西	4442	2.1	3.7	1.76	11	15650	666	4.9
10	中国	4256	9.6	5.1	0.53	6	117840	623	0.6
11	墨西哥	3435	1.6	3.1	1.94	4	9000	1439	2.7
12	韩国	3308	9.1	9.5	1.04	18	4410	2863	2.6
13	俄罗斯	3294	-0.5	—	—	—	14870	4438	0.5
14	荷兰	3092	2.3	1.3	0.57	8	1530	4533	4.5
15	澳大利亚	2894	3.1	2.3	0.74	6	1760	5316	3.1
16	阿根廷	2556	0.8	1.1	1.38	3	3380	1351	5.6
17	瑞士	2322	1.9	1.8	0.95	4	710	3491	9.4
18	印度	2254	5.2	6.7	1.29	36	89820	242	1.2
	全世界	231126	2.9	—	—	—	550150	1421	3.1

#### 4. 电力

电力是由一次能源转换而得的优质二次能源,它可以很方便地转化为机械能、热能、磁能、光能、化学能,是最现代化的动力,是现代化生产和高新技术产业发展的重要物质基础。所以,工业化国家在其经济发展中,都把发展电力工业放在十分重要的地位。

尽管石油、天然气在一次能源的结构中占有重要位置,但煤终究是世界上最丰富的燃料(表1.5),可以预料,煤的应用将会不断增长。在欧洲,乃至世界,大约有40%的电力供应来自