

中国洁净煤技术

CLEAN COAL TECHNOLOGIES OF CHINA

主编 曹征彦



中国物资出版社

8151
525

中国洁净煤技术

顾 问：叶 青
主 编：曹征彦
副 主 编：汪肇平 沈嘉龙
主 审：王中安

中国物资出版社

前 言

为配合中国洁净煤技术“九五”计划和 2010 年发展规划的实施，国家洁净煤技术推广规划领导小组组织国内部分从事洁净煤技术工作的有关专家编写了《中国洁净煤技术》一书。该书系统地介绍了我国洁净煤技术、国外洁净煤技术的现状与发展趋势，并针对我国国情提出了许多宝贵建议。该书力求深入浅出，通俗易懂，是目前国内仅有的一本系统介绍洁净煤技术的专著。

本书撰稿人均是我国洁净煤技术推广各相关领域的技术权威，其中绝大多数人还被国家洁净煤技术推广规划领导小组聘为顾问专家，对我国洁净煤技术发展的政策有较深入的了解，能较好地把握技术的发展动向，使本书具有较高的权威性。本书适合从事洁净煤技术研究开发工作的工程技术人员、洁净煤技术相关的决策和政策研究人员、从事中国洁净煤技术市场研究的人员，以及大专院校相关学科的教师学生参考。

参加本书编写工作的有许定峰（第一章）、陈清如、安振连（第二章）、沈嘉龙、沈涛（第三章）、郝凤印（第四章）、张绪祎（第五章）、章名耀、李大骥、蔡宁生（第六章）、舒惠芬（第七章）、王溥（第八章）、谢可玉、应幼菊（第九章）、吴春来、张碧江（第十章）、衣宝廉（第十一章）、吴立新（第十二章）。全书由王中安审稿。

由于洁净煤技术尚处于研究发展阶段，加上编写时间匆促和水平所限，敬请读者批评指正。

编委会

1997. 7. 7

序

中国科学院
能源研究所

中国的经济自改革开放以来取得了高速增长，能源的生产和消费也相应增加较快。虽然我国的人均能源消费水平尚很低（1996年为1.13吨标煤/人），只相当于欧洲的四分之一，美国的十分之一。但以总量计，我国目前已成为世界第二大能源生产和消费国，其中煤炭消费量已连续十年居世界第一位。自1993年开始，我国重又成为石油净进口国，国内石油产量的增长不能满足国内石油消费增长的需要，能源保障问题愈显突出。大量能源的使用，特别是以煤为主的能源消费结构，造成了严重的环境污染问题。因此，我国能源的发展也面临着巨大的挑战。

1996年3月，全国人大八届四次会议通过了我国国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标纲要。根据该“纲要”，“九五”期间我国国民生产总值的增长速度为年均8%，2001～2010年平均约为7%左右，仍维持在较高的增长水平。这就要求能源工业要适应国民经济增长的需要，逐步缓解瓶颈制约，坚持开发和节约并举，把节约放在首位。同时大力调整能源生产和消费结构，推广先进技术，提高能源生产效率，坚持能源与环境协调发展。因此，增强能源保障能力和加强环境保护，是“九五”和到2010年能源发展的两大主要任务。

促进能源供应安全，提高能源保障能力，将体现在两个方面，即：一方面由于我国人均能源消费水平还很低，总需求的增长不可避免，需增加供应能力；另一方面，要处理好石油的供应保障

问题。我国是以煤为主要能源资源的国家，增加能源供应的主要来源还将是煤炭，同时要研究将煤炭转化为代油燃料或油品的问题。

我国目前消费的商品能源几乎 95% 是化石能源，其中又以煤炭为主体，水能和其它可再生能源的商业化开发还处在较低水平，在总能源消费中的比重很难在较短的时间内有较快增加。煤炭是我国化石能源资源的主体，而且分布广，开发条件较容易，是我国能源的基础。因此，在相当长的时期内，无论是从需求还是从供应的来源上分析，煤炭仍将是我国能源的主体，预计到 2010 年能源总消费中煤炭仍会占三分之二。

由此可以看出，如何以清洁、高效的方式（或技术）开发和利用巨量的煤炭，即尽快开发和应用洁净煤技术，以达到经济和社会的可持续发展，是中国能源发展必须面对的问题。

中国是一个发展中国家，经济基础比较薄弱，保护环境和促进发展两个问题都比较突出，在发展洁净煤技术的思路需要考虑中国能源的具体情况。这主要表现为：

①煤炭的用户结构特点。发达国家煤炭消费几乎全部集中在发电和冶金行业。而中国几乎各行各业，包括居民生活均大量使用煤炭，用于发电的煤炭还不到 40%，因此发展洁净煤技术要考虑多种行业的不同情况和优先顺序。

②煤炭质量差异。我国的煤炭入洗率还很低，目前不足 20%，而国外几乎全部入洗。

③我国不但已有巨大的煤炭消费量（存量），而且每年还有大量的新增煤炭消费（增量）。

根据这些特殊情况，我国洁净煤技术应当包括煤炭洗选加工（洗煤、型煤、水煤浆）、煤炭转化（气化、液化、燃料电池）、煤炭燃烧（循环流化床、加压硫化床、整体煤气化联合循环）、污染排放控制与废物处理（烟气净化、粉煤灰利用、煤矸石处理）以及煤层气开发利用等技术领域。洁净煤技术的发展要根据“提高

煤炭利用效率，减少环境污染，促进经济发展”的宗旨，“九五”要将洁净煤技术的推广应用重点放在目前对我国的环境造成严重污染的主要环节，主要包括洗煤、型煤、烟气脱硫、煤渣处理等。争取在短时期内实现煤烟型污染有显著改善，煤炭利用效率有显著提高。

与此同时，要选择一批能在“九五”后期或下世纪初实现商品化推广的先进技术，包括加压流化床锅炉（PFBC）、大容量循环流化床锅炉（CFB）、工业型煤、先进脱硫技术等工程试验示范；针对洁净煤技术领域内技术起点高，对长远的能源结构和产业技术有重大影响的技术，包括煤炭气化、液化、整体煤气化联合循环（IGCC）等，加快研究开发和技术跟踪，为下个世纪的工程示范和商业化应用做好技术准备。

我国政府对洁净煤技术的开发和推广应用非常重视。根据国务院的指示，1995年，由国家计委牵头，成立了以国家计委为组长单位，国家科委和国家经贸委为副组长单位，煤炭部、电力部、内贸部、机械部、化工部、建设部、冶金部、中国科学院、国家教委和国家环保局等为成员单位的国家洁净煤技术推广规划领导小组。领导小组自成立后即开展了我国洁净煤技术发展规划的编制工作。同时，由于推广洁净煤技术无论在政策上，还是技术上，都需要进行深入的研究。为此，领导小组在各成员单位的推荐下，聘请了部分国内洁净煤技术各相关领域的知名专家作为领导小组的顾问专家组的成员，为洁净煤技术及政策研究提供咨询服务。

为了宣传洁净煤技术，介绍洁净煤技术的知识，国家洁净煤技术推广规划领导小组主编了《中国洁净煤技术》一书。本书既有技术方面的深度，又较好地把握了政策和我国洁净煤技术的发展方向，相信必将对我国洁净煤技术的发展做出积极的贡献。

目 录

第一章 开发推广洁净煤技术，促进能源与环境协调发展	(1)
第一节 我国能源发展现状及展望	(1)
第二节 发展洁净煤技术的必要性	(2)
第三节 国内外洁净煤技术发展现状	(3)
一、美国“洁净煤技术示范计划 (CCTP)”	(3)
二、欧共体与日本的洁净煤发展计划	(7)
三、我国洁净煤技术现状	(8)
第四节 我国洁净煤技术的发展方向	(15)
一、煤炭洗选	(16)
二、型煤	(17)
三、水煤浆	(17)
四、循环流化床发电技术	(17)
五、加压流化床发电技术	(17)
六、整体煤气化联合循环发电技术	(18)
七、煤炭气化、液化技术	(18)
八、烟气净化技术	(18)
第二章 选煤	(19)
第一节 概述	(19)
一、选煤的定义、分类及意义	(19)
二、国内外选煤发展的历史和现状	(20)
第二节 跳汰选煤	(23)
一、跳汰选煤基本原理	(23)
二、跳汰选煤设备	(26)

三、跳汰机的入料与操作工艺	(31)
第三节 重介质选煤	(33)
一、重介质选煤的基本原理	(33)
二、重介质选煤设备	(34)
三、重介质选煤的影响因素	(39)
第四节 浮游选煤	(41)
一、浮游选煤的基本原理	(41)
二、浮选设备	(43)
三、浮选工艺因素	(47)
第五节 湿法选煤工艺流程	(49)
一、炼焦煤选煤流程	(49)
二、动力煤选煤流程	(49)
三、选煤主要辅助作业	(49)
第六节 空气重介质流化床干法选煤	(55)
一、空气重介质流化床分选的基本原理	(55)
二、空气重介质流化床干法选煤设备与工艺	(55)
三、空气重介质流化床干法选煤的技术要点	(57)
第七节 其它选煤方法	(59)
一、斜槽分选机	(59)
二、螺旋分选机	(60)
三、摇床	(62)
四、电选	(63)
第八节 选煤的社会经济效益	(65)
第九节 今后选煤发展的重点	(68)
一、选煤新技术开发研究	(68)
二、常规选煤	(69)
第三章 型煤技术	(71)
第一节 发展型煤技术是适合我国国情的 有效而实用的技术途径	(71)

一、发展洁净煤技术，是当今节约能源与保护环境的主导技术	(71)
二、发展型煤技术能扩大煤炭资源利用	(72)
三、发展型煤技术可推动技术进步	(72)
第二节 型煤的定义和分类	(73)
一、型煤的定义	(73)
二、型煤的分类	(73)
第三节 民用型煤	(75)
一、我国民用型煤发展过程	(75)
二、民用煤的范围	(76)
三、民用蜂窝煤的节能环保效益显著	(76)
四、典型民用型煤生产线	(76)
第四节 工业锅炉用型煤	(86)
一、发展工业锅炉型煤的必要性	(86)
二、工业锅炉型煤的特点	(87)
三、我国工业锅炉用型煤的发展概况	(87)
四、“七五”国家科技攻关“工业型煤开发” 课题的简要介绍	(91)
五、工业锅炉型煤的两种不同工艺	(94)
六、“八五”期间工业锅炉型煤推广形势及存在问题	(104)
第五节 工业燃气用造气型煤.....	(107)
一、燃气用造气型煤的来由.....	(107)
二、煤气化原理.....	(108)
三、发生炉煤气的分类.....	(113)
四、混合发生炉煤气生产原理.....	(115)
五、燃气用造气型煤的质量要求及优点.....	(116)
六、燃气用气化用煤的现状.....	(117)
第六节 合成氨造气型煤.....	(119)

一、半水煤气生产原理·····	(120)
二、合成氨造气型煤的发展情况·····	(122)
三、合成氨造气型煤的几种成型技术·····	(125)
四、合成氨造气型煤的新发展·····	(129)
第七节 型焦及配型煤炼焦·····	(131)
一、冷压型焦·····	(131)
二、热压型焦·····	(139)
三、配型煤炼焦·····	(147)
第八节 铁炭型煤炼铁·····	(149)
第四章 水煤浆技术 ·····	(153)
第一节 水煤浆技术的主要内容及工业应用范围·····	(154)
一、水煤浆技术的主要内容及其科技术语说明·····	(155)
二、水煤浆技术在工业应用上的分类·····	(156)
三、水煤浆系统技术的主要内容·····	(157)
第二节 国内外水煤浆技术发展的历史和现状·····	(158)
一、国外水煤浆技术·····	(158)
二、我国高浓度水煤浆技术发展情况·····	(160)
第三节 水煤浆技术的基本原理及其关键技术·····	(164)
一、水煤浆制备原理及其关键技术·····	(164)
二、关于水煤浆燃烧应用的基本原理及有关技术·····	(171)
三、环境保护分析·····	(185)
四、储运技术·····	(191)
第四节 国内水煤浆生产试验的示范工程情况·····	(195)
一、以水煤浆代油中小型工业锅炉热电联供的 示范工程—北京造纸一厂示范工程·····	(195)
二、白杨河燃油电厂改烧水煤浆示范工程·····	(196)
三、绍兴轧钢厂水煤浆示范工程—连续四年全烧水煤浆情 况·····	(198)

第五节 对水煤浆系统技术的初步评价·····	(202)
一、对水煤浆技术“成熟度”的初步分析·····	(203)
二、对水煤浆环保特性的初步分析·····	(205)
三、对水煤浆节能特性的初步分析·····	(205)
四、水煤浆技术应用的代油与原煤及煤泥浆 代煤经济的分析·····	(207)
五、目前水煤浆技术发展中存在的主要问题 及其原因·····	(210)
六、水煤浆技术在我国的发展前景及建议·····	(211)
第五章 洁净燃烧技术 ·····	(219)
第一节 概述·····	(219)
一、洁净燃烧技术所涉及的领域·····	(219)
二、实现高效洁净燃烧·····	(220)
三、由相关技术构成的大系统·····	(220)
第二节 洁净燃烧技术的国内外发展历史及现状·····	(221)
一、循环流化床燃烧技术·····	(221)
二、煤气—蒸汽联产技术·····	(223)
三、整体煤气化联合循环发电技术 (IGCC) ·····	(223)
第三节 洁净燃烧技术原理及特点·····	(224)
一、流化床与循环流化床燃烧·····	(224)
二、煤气、蒸汽联产·····	(228)
三、部分气化联合循环发电·····	(229)
四、整体煤气化联合循环·····	(230)
第四节 洁净燃烧技术的工艺及设备·····	(230)
一、循环流化床燃烧 (CFBC) ·····	(230)
二、煤气、蒸气联产 (CFBG-C) ·····	(233)
三、部分气化联合循环发电·····	(234)
四、整体煤气化联合循环 (IGCC) ·····	(235)
第五节 社会经济及环境效益市场分析·····	(235)

一、循环床锅炉·····	(235)
二、煤气、蒸气联产·····	(236)
三、部分气化联合循环发电·····	(237)
四、整体煤气化联合循环发电技术 (IGCC) ·····	(237)
第六节 尚处于研究开发阶段的技术·····	(238)
一、循环床锅炉·····	(238)
二、煤气、蒸汽联产·····	(238)
三、部分气化联合循环·····	(238)
四、整体煤气化联合循环发电技术 (IGCC) ·····	(238)
第七节 洁净燃烧技术发展还存在的问题·····	(239)
一、循环床锅炉·····	(239)
二、煤气、蒸汽联产·····	(239)
三、部分气化联合循环发电·····	(239)
四、整体煤气联合循环 (IGCC) ·····	(239)
第六章 增压流化床燃烧 (PFBC) 技术 ·····	(241)
第一节 概述·····	(241)
第二节 增压流化床燃烧联合循环 (PFBC-CC) 发电技术的原理和类型·····	(243)
一、增压鼓泡流化床 (PBFB) ·····	(243)
二、增压循环流化床 (PCFB) ·····	(244)
三、第二代 PFBC-CC ·····	(245)
第三节 PFBC-CC 的关键技术 ·····	(247)
一、环境排放指标控制, 即 SO_2 和 NO_x 的控制 ···	(247)
二、煤在增压流化床中的燃烧技术·····	(247)
三、压力条件下加入煤和添加剂·····	(247)
四、热灰、渣的压力排放、冷却、输送·····	(247)
五、PFBC 锅炉床内受热面的抗磨损、抗腐蚀及 受热面的合理设计·····	(248)
六、高水平的高温除尘·····	(248)

七、高温除尘后燃气中含尘量的在线检测·····	(248)
八、燃气轮机叶片的抗腐蚀、抗磨损·····	(248)
九、热燃气管道和透平上的沉积物的防治·····	(248)
十、PFBC 锅炉和燃气轮机的负荷调节和过程控制 ·····	(248)
十一、煤在增压状态下的干馏和局部气化技术·····	(248)
十二、高温低热值煤气的燃烧技术·····	(248)
十三、PFBC-CC 系统的经济合理性的设计和配置 ·····	(248)
第四节 PFBC 技术发展的各个阶段 ·····	(248)
一、实验室规模研究阶段·····	(248)
二、中间试验（工业化试验）阶段·····	(255)
三、商业示范阶段·····	(261)
第五节 PFBC 与几种煤的高效清洁发电技术的比较 ·····	(267)
一、提高电站效率的代价·····	(267)
二、除 NO _x 、SO ₂ 的设备投资和运行费用·····	(268)
第六节 PFBC 技术的发展展望 ·····	(272)
第七章 烟气净化 ·····	(275)
第一节 燃煤电厂锅炉烟尘的净化 ·····	(275)
一、烟气净化技术的国内外状况·····	(276)
二、各种除尘器的原理及特点·····	(277)
三、高效除尘器的采用所带来的环境效应·····	(283)
第二节 燃煤电厂硫氧化物的净化 ·····	(284)
一、燃煤电厂烟气中硫氧化物的来源及生成量·····	(284)
二、烟气脱硫技术的国外情况·····	(285)
三、国内火电厂脱硫试验研究和应用概况·····	(289)
第三节 各种烟气脱硫的工艺路线 ·····	(292)
一、烟气脱硫工艺的基础原理·····	(292)

二、国外已实现工业应用的脱硫工艺·····	(293)
第四节 燃煤电厂氮氧化物 (NO _x) 的净化·····	(301)
一、国内外烟气脱 NO _x 技术·····	(301)
二、大气中 NO _x 的形成及控制技术·····	(302)
第八章 粉煤灰综合利用技术·····	(315)
第一节 粉煤灰及其组成·····	(315)
一、粉煤灰的组成与形态·····	(315)
二、粉煤灰的颗粒组成·····	(316)
第二节 粉煤灰利用状况与历史·····	(318)
一、粉煤灰利用的沿革·····	(318)
二、我国粉煤灰排放和利用量的统计·····	(321)
三、各主要国家粉煤灰排放量与利用率·····	(321)
第三节 我国粉煤灰利用的几个主要途径·····	(322)
一、粉煤灰混凝土·····	(322)
二、粉煤灰烧结砖·····	(327)
三、粉煤灰陶粒及陶粒混凝土·····	(329)
四、蒸养石灰—粉煤灰砌块·····	(331)
五、粉煤灰水泥·····	(334)
六、粉煤灰加气混凝土·····	(336)
七、粉煤灰在筑路工程中的应用·····	(337)
第四节 粉煤灰利用的前景与途径的几点看法·····	(339)
一、粉煤灰在墙体材料的利用·····	(340)
二、围填造地是沿海高密度电力地区的必由之路 ·····	(340)
三、发展高附加值高技术利用, 以此来补充“大用量” 利用·····	(340)
四、农用及其他用途的开发, 也将会是一个新的 方向·····	(341)
五、面对洁净煤技术的发展, 开辟	

新的灰渣利用技术.....	(341)
第九章 煤炭气化.....	(343)
第一节 煤炭气化的重要意义.....	(343)
一、城市煤气和管道煤气的生产.....	(344)
二、作化工合成用原料气.....	(344)
三、作冶金工业用的还原气（和氢气）及钢铁、机械 和建筑等工业部门用的燃料气.....	(344)
四、为煤炭液化提供氢气.....	(344)
五、为先进的发电过程提供洁净的煤气.....	(344)
第二节 煤炭气化的基本原理.....	(345)
一、煤炭气化的基本原理.....	(345)
二、煤炭气化的其他方法及煤气热值.....	(347)
第三节 煤炭气化的原则流程.....	(348)
一、原料准备.....	(349)
二、煤气的生产.....	(352)
三、变换.....	(352)
四、煤气的净化和精炼.....	(352)
五、甲烷的合成.....	(353)
第四节 煤炭气化方法的分类.....	(354)
一、以原料的形态为主进行分类.....	(354)
二、以入炉煤的块度为主进行分类.....	(354)
三、以气化过程的操作压力为主进行分类.....	(354)
四、以气化介质为主进行分类.....	(354)
五、以排渣方式为主进行分类.....	(354)
六、以气化过程的供热方式进行分类.....	(354)
七、以入炉煤在炉内的过程动态进行分类.....	(354)
八、以固体煤和气化介质的相对运动方向 进行分类.....	(354)
九、以反应的类型为主进行分类.....	(355)

十、以过程的阶段性（或炉筒的结构形式）为主 进行分类.....	(355)
十一、以过程的操作方式为主进行分类.....	(355)
第五节 固定床、流化床和气流床基本原理.....	(355)
第六节 固定床煤炭气化.....	(357)
一、常压固定床气化.....	(358)
二、加压固定床气化.....	(361)
三、液态排渣鲁奇炉（BGL/Lurgi）.....	(363)
第七节 流化床煤炭气化.....	(367)
一、温克勒气化法.....	(367)
二、高温温克勒（HTW）气化炉.....	(370)
三、KRW 气化炉.....	(371)
四、U—Gas 煤气炉.....	(372)
第八节 气流床煤炭气化.....	(374)
一、K—T 粉煤气化法.....	(375)
二、涡流式粉煤气化法.....	(379)
三、德士古（Texaco）气化法.....	(381)
四、道化学公司法.....	(382)
五、谢尔（Shell）气化法.....	(384)
六、普兰福（PRENFLO）气化法.....	(386)
七、GSP 气化法.....	(388)
第九节 煤炭气化方法的选择.....	(392)
第十节 IGCC 系统中煤气化工艺的选择.....	(392)
一、固定床煤气化技术的分析评价.....	(393)
二、流化床煤气化技术的分析评价.....	(393)
三、气流床煤气化技术的分析评价.....	(394)
四、综合比较.....	(396)
五、三种典型煤气化方法的 IGCC 工艺流程图.....	(398)
第十一节 250MWIGCC 示范厂和 Shell 煤气化工艺	

.....	(400)
一、IGCC 示范厂的构成和总工艺	(400)
二、Buggenum IGCC 示范厂气化工工艺的选择及 Shell 气化工工艺.....	(402)
三、示范厂运行结果及前景.....	(407)
第十二节 330MW 的 IGCC 示范厂及 Prenflo 气化工 工艺.....	(408)
一、为 Puertollano 示范工程所进行的气化工试验 和成绩.....	(408)
二、西班牙 Puertollano IGCC 示范厂主要技术指标 及规模.....	(409)
第十三节 燃煤发电技术比较及相应经济评估.....	(413)
一、已建成的或建设中的几个 IGCC 电厂情况比较	(413)
二、几种燃煤技术的综合比较, IGCC 环保性能, 环保性能比较, 污染排放与标准比较.....	(413)
三、几种燃煤发电技术发电成本比较.....	(416)
第十章 煤炭液化.....	(419)
第一节 煤炭液化概述.....	(419)
第二节 煤炭直接液化技术.....	(419)
一、历史和现状.....	(419)
二、煤炭直接液化技术原理和特点.....	(421)
三、煤炭直接液化工艺.....	(428)
第三节 煤炭间接液化.....	(441)
一、历史和现状.....	(441)
二、间接液化的基本原理.....	(443)
三、间接液化工艺流程.....	(445)
四、FT 合成反应器	(448)
第四节 煤炭液化的经济效益和社会效益.....	(450)