

中国工程院咨询研究报告

中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究

谢克昌 / 主编

第 5 卷

先进清洁煤燃烧与气化技术

岑可法 等 / 编著



科学出版社

中国工程院咨询研究报告

中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究

谢克昌 / 主编

第 5 卷

先进清洁煤燃烧与气化技术

岑可法 等 / 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》丛书之一。

本书在系统调研国内外先进清洁煤燃烧与气化技术基础上提出了其发展战略及政策建议；按照存在问题及解决方案、典型案例分析、发展趋势与路线、具体措施建议的思路，对煤粉燃烧技术、循环流化床燃烧技术、工业锅炉燃烧技术、煤与生物质混合燃烧与气化技术、煤的气化技术、以发电为主的煤热解气化分级转化及灰渣综合利用技术、富氧燃烧及 CO₂ 回收减排技术、化学链燃烧与气化和水煤浆燃烧等其他低污染燃烧与气化技术、煤炭地下气化技术 9 个技术方向开展战略咨询研究，并提出适用于我国国情的可大规模工业应用的关键技术的近、中期发展思路。

本书可为我国先进清洁煤燃烧与气化技术的政策及科技发展提供决策依据，适合作为煤清洁高效利用相关领域的科研人员、业界人士及管理人士的参考书使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进清洁煤燃烧与气化技术/岑可法等编著. —北京: 科学出版社, 2014. 10

(中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究/谢克昌主编; 5)

“十二五”国家重点图书出版规划项目 中国工程院咨询研究报告

ISBN 978-7-03-040336-0

I. 先… II. 岑… III. ①清洁煤—燃烧 ②清洁煤—煤气化 IV. TD942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 063538 号

责任编辑: 李 敏 张 震 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张: 30 1/4

字数: 710 000

定价: 220.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



中国工程院重大咨询项目

中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究 项目顾问及负责人

项目顾问

- 徐匡迪 中国工程院 十届全国政协副主席、中国工程院主席团名誉主席、原院长、院士
- 周 济 中国工程院 院长、院士
- 潘云鹤 中国工程院 常务副院长、院士
- 杜祥琬 中国工程院 原副院长、院士

项目负责人

- 谢克昌 中国工程院 副院长、院士

课题负责人

- | | | |
|-------|---------------------|-----|
| 第1课题 | 煤炭资源与水资源 | 彭苏萍 |
| 第2课题 | 煤炭安全、高效、绿色开采技术与战略研究 | 谢和平 |
| 第3课题 | 煤炭提质技术与输配方案的战略研究 | 刘炯天 |
| 第4课题 | 煤利用中的污染控制和净化技术 | 郝吉明 |
| 第5课题 | 先进清洁煤燃烧与气化技术 | 岑可法 |
| 第6课题 | 先进燃煤发电技术 | 黄其励 |
| 第7课题 | 先进输电技术与煤炭清洁高效利用 | 李立涅 |
| 第8课题 | 煤洁净高效转化 | 谢克昌 |
| 第9课题 | 煤基多联产技术 | 倪维斗 |
| 第10课题 | 煤利用过程中的节能技术 | 金 涌 |
| 第11课题 | 中美煤炭清洁高效利用技术对比 | 谢克昌 |
| 综合组 | 中国煤炭清洁高效可持续开发利用 | 谢克昌 |

本卷研究组成员

组 长

岑可法 浙江大学 院士，本卷总执笔人

副组长

郑楚光 华中科技大学 教授，本卷主要执笔人

骆仲泱 浙江大学 教授，本卷主要执笔人

潘伟平 华北电力大学 教授

成 员

倪明江 浙江大学 教授，本卷主要执笔人

姚 强 清华大学 教授

徐明厚 华中科技大学 教授

金保昇 东南大学 教授，第 8、10、11 章执笔人

吴少华 哈尔滨工业大学 教授

周劲松 浙江大学 教授，第二篇执笔人

王辅臣 华东理工大学 教授，第 5、10、11 章执笔人

王善武 上海工业锅炉研究所 高工，第 3、10、11 章执笔人

林其钊 中国科技大学 教授，第 3、10、11 章执笔人

房倚天 中国科学院山西煤炭化学
研究所 研究员

吕俊复 清华大学 教授

周 昊 浙江大学 教授，第 1、10、11 章执笔人

陈汉平 华中科技大学 教授，第 4 章执笔人

周俊虎 浙江大学 教授

曹 晏 美国西肯塔基大学 副教授

丘纪华 华中科技大学 教授

陈 刚 华中科技大学 教授

孙绍增 哈尔滨工业大学 教授

祝建坤 清华大学 高工

刘泰生 东方锅炉股份有限公司 教授级高工

王 军 东方锅炉股份有限公司 高工

张建文	上海锅炉厂有限公司	教授级高工
邵国桢	上海锅炉厂有限公司	教授级高工
王凤君	哈尔滨锅炉厂有限公司	高工
王伟	哈尔滨锅炉厂有限公司	高工
王智化	浙江大学	教授
黄镇宇	浙江大学	教授
杨卫娟	浙江大学	副教授
张彦威	浙江大学	副教授
赵虹	浙江大学	教授
王飞	浙江大学	教授
杨建国	浙江大学	副研究员
任涛	浙江大学	研究生
杨玉	浙江大学	研究生
刘建成	浙江大学	研究生
孔俊俊	浙江大学	研究生
程乐鸣	浙江大学	教授，第 2、10、11 章执笔人
施正伦	浙江大学	研究员
吕清刚	中国科学院工程热物理研究所	研究员
张世红	华中科技大学	教授
聂立	东方锅炉股份有限公司	教授级高工
张彦军	哈尔滨锅炉厂有限公司	教授级高工
肖峰	上海锅炉厂有限公司	教授级高工
孙献斌	西安热工研究院	研究员
杨冬	西安交通大学	副教授
何心良	上海工业锅炉研究所	教授级高工
沈士兴	上海工业锅炉研究所	高工，第 3、10、11 章执笔人
杜坤杰	上海工业锅炉研究所	高工，第 3、10、11 章执笔人
陈义良	中国科技大学	教授
叶桃红	中国科技大学	副教授
赵平辉	中国科技大学	副教授
朱祚金	中国科技大学	副教授
朱旻明	中国科技大学	副教授
唐志国	中国科技大学	副教授
胡慧庆	中国科技大学	研究生
肖钢	浙江大学	副教授

严建华	浙江大学	教授
池涌	浙江大学	教授
袁克	南通万达锅炉股份有限公司	教授级高工
陆胜勇	浙江大学	教授，第4章执笔人
余春江	浙江大学	副教授，第4章执笔人
张军营	华中科技大学	教授
向军	华中科技大学	教授
姚洪	华中科技大学	教授
陈雪莉	华东理工大学	副教授，第5、10、11章执笔人
代正华	华东理工大学	副教授
李伟锋	华东理工大学	副教授
王勤辉	浙江大学	教授，第6、10、11章执笔人
方梦祥	浙江大学	教授，第6章执笔人
王树荣	浙江大学	教授
曹之传	淮南矿业(集团)有限责任公司	教授级高工
赵海波	华中科技大学	教授，第7、10、11章执笔人
周志军	浙江大学	教授，第7、10、11章执笔人
郑瑛	华中科技大学	教授
高林	中国科学院工程热物理研究所	副研究员
柳朝晖	华中科技大学	教授
陈健	清华大学	教授
刘练波	中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司	博士
施耀	浙江大学	教授
肖睿	东南大学	教授，第8、10、11章执笔人
刘建忠	浙江大学	教授，第8、10、11章执笔人
程军	浙江大学	教授，第8章执笔人
仲兆平	东南大学	教授
钟文琪	东南大学	教授
黄亚继	东南大学	教授
张帅	东南大学	研究生
王晓佳	东南大学	研究生
张锴	华北电力大学	教授
陈宏刚	华北电力大学	教授

滕 阳	华北电力大学	研究生
常 剑	华北电力大学	研究生
陈 峰	新奥气化采煤有限公司	博士，第 9、10、11 章执笔人
刘洪涛	新奥气化采煤有限公司	研究生
赵 娟	新奥气化采煤有限公司	研究生
潘 霞	新奥气化采煤有限公司	研究生
王媛媛	新奥气化采煤有限公司	研究生
姚 凯	新奥气化采煤有限公司	研究生
杜立民	浙江大学	副教授
汪建坤	浙江大学	副教授
梁晓晔	浙江大学	研究生
郭志航	浙江大学	研究生
游 卓	浙江大学	研究生
胡 昕	浙江大学	研究生
周 凡	浙江大学	研究生
龚玲玲	浙江大学	研究助理

序 一

近年来，能源开发利用必须与经济、社会、环境全面协调和可持续发展已成为世界各国的普遍共识，我国以煤炭为主的能源结构面临严峻挑战。煤炭清洁、高效、可持续开发利用不仅关系我国能源的安全和稳定供应，而且是构建我国社会主义生态文明和美丽中国的基础与保障。2012年，我国煤炭产量占世界煤炭总产量的50%左右，消费量占我国一次能源消费量的70%左右，煤炭在满足经济社会发展对能源的需求的同时，也给我国环境治理和温室气体减排带来巨大的压力。推动煤炭清洁、高效、可持续开发利用，促进能源生产和消费革命，成为新时期煤炭发展必须面对和要解决的问题。

中国工程院作为我国工程技术界最高的荣誉性、咨询性学术机构，立足我国经济社会发展需求和能源发展战略，及时地组织开展了“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”重大咨询项目和“中美煤炭清洁高效利用技术对比”专题研究，体现了中国工程院和院士们对国家发展的责任感和使命感，经过近两年的调查研究，形成了我国煤炭发展的战略思路和措施建议，这对指导我国煤炭清洁、高效、可持续开发利用和加快煤炭国际合作具有重要意义。项目研究成果凝聚了众多院士和专家的集体智慧，部分研究成果和观点已经在政府相关规划、政策和重大决策中得到体现。

对院士和专家们严谨的学术作风和付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。

徐匡迪

2013年11月6日

序 二

煤炭是我国的主体能源，我国正处于工业化、城镇化快速推进阶段，今后较长一段时期，能源需求仍将较快增长，煤炭消费总量也将持续增加。我国面临着以高碳能源为主的能源结构与发展绿色、低碳经济的迫切需求之间的矛盾，煤炭大规模开发利用带来了安全、生态、温室气体排放等一系列严峻问题，迫切需要开辟出一条清洁、高效、可持续开发利用煤炭的新道路。

2010年8月，谢克昌院士根据其长期对洁净煤技术的认识和实践，在《新一代煤化工和洁净煤技术利用现状分析与对策建议》（《中国工程科学》2003年第6期）、《洁净煤战略与循环经济》（《中国洁净煤战略研讨会大会报告》，2004年第6期）等先期研究的基础上，根据上述问题和挑战，提出了《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》实施方案，得到了具有共识的中国工程院主要领导和众多院士、专家的大力支持。

2011年2月，中国工程院启动了“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”重大咨询项目，国内煤炭及相关领域的30位院士、400多位专家和95家单位共同参与，经过近两年的研究，形成了一系列重大研究成果。徐匡迪、周济、潘云鹤、杜祥琬等同志作为项目顾问，提出了大量的指导性意见；各位院士、专家深入现场调研上百次，取得了宝贵的第一手资料；神华集团、陕西煤业化工集团等企业在人力、物力上给予了大力支持，为项目顺利完成奠定了坚实的基础。

“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”重大咨询项目涵盖了煤炭开发利用的全产业链，分为综合组、10个课题组和1个专题组，以国内外已工业化和近工业化的技术为案例，以先进的分析、比较、评价方法为手段，通过对有关煤的清洁高效利用的全局性、系统性、基础性问题的深入研究，提出了科学性、时效性和操作性强的煤炭清洁、高效、可持续开发利用战略方案。

《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》丛书是在10项课题研究、1项专题研究和项目综合研究成果基础上整理编著而成的，共有12卷，对煤炭的开发、输配、转化、利用全过程和中美煤炭清洁高效利用技术等进行了系统的调研和分析研究。

综合卷《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》包括项目综合报告及10个课题、1个专题的简要报告，由中国工程院谢克昌院士牵头，分析了我国煤炭清洁、高效、可持续开发利用面临的形势，针对煤炭开发利用过

程中的一系列重大问题进行了分析研究，给出了清洁、高效、可持续的量化指标，提出了符合我国国情的煤炭清洁、高效、可持续开发利用战略和政策措施建议。

第1卷《煤炭资源与水资源》，由中国矿业大学（北京）彭苏萍院士牵头，系统地研究了我国煤炭资源分布特点、开发现状、发展趋势，以及煤炭资源与水资源的关系，提出了煤炭资源可持续发展的战略思路、开发布局和政策建议。

第2卷《煤炭安全、高效、绿色开采技术与战略研究》，由四川大学谢和平院士牵头，分析了我国煤炭开采现状与存在的主要问题，提出了以安全、高效、绿色开采为目标的“科学产能”评价体系，提出了科学规划我国五大产煤区的发展战略与政策导向。

第3卷《煤炭提质技术与输配方案的战略研究》，由中国矿业大学刘炯天院士牵头，分析了煤炭提质技术与产业相关问题和煤炭输配现状，提出了“洁配度”评价体系，提出了煤炭整体提质和输配优化的战略思路与实施方案。

第4卷《煤利用中的污染控制和净化技术》，由清华大学郝吉明院士牵头，系统研究了我国重点领域煤炭利用污染物排放控制和碳减排技术，提出了推进重点区域煤炭消费总量控制和煤炭清洁化利用的战略思路和政策建议。

第5卷《先进清洁煤燃烧与气化技术》，由浙江大学岑可法院士牵头，系统分析了各种燃烧与气化技术，提出了先进、低碳、清洁、高效的煤燃烧与气化发展路线图和战略思路，重点提出发展煤分级转化综合利用技术的建议。

第6卷《先进燃煤发电技术》，由东北电网有限公司黄其励院士牵头，分析评估了我国燃煤发电技术及其存在的问题，提出了燃煤发电技术近期、中期和远期发展战略思路、技术路线图和电煤稳定供应策略。

第7卷《先进输电技术与煤炭清洁高效利用》，由中国南方电网公司李立浃院士牵头，分析了煤炭、电力流向和国内外各种电力传输技术，通过对输电和输煤进行比较研究，提出了电煤输运构想和电网发展模式。

第8卷《煤洁净高效转化》，由中国工程院谢克昌院士牵头，调研分析了主要煤基产品所对应的煤转化技术和产业状况，提出了我国煤转化产业布局、产品结构、产品规模、发展路线图和政策措施建议。

第9卷《煤基多联产技术》，由清华大学倪维斗院士牵头，分析了我国煤基多联产技术发展的现状和问题，提出了我国多联产系统发展的规模、布局、发展战略和路线图，对多联产技术发展的政策和保障体系建设提出了建议。

第10卷《煤炭利用过程中的节能技术》，由清华大学金涌院士牵头，调研分析了我国重点耗煤行业的技术状况和节能问题，提出了技术、结构和管理三方面的节能潜力与各行业的主要节能技术发展方向。

第11卷《中美煤炭清洁高效利用技术对比》，由中国工程院谢克昌院士牵头，对中美两国在煤炭清洁高效利用技术和发展路线方面的同异、优劣进行了深入的对比分析，为中国煤炭清洁、高效、可持续开发利用战略研究提供了支撑。

《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》丛书是中国工程院和煤炭及相关行业专家集体智慧的结晶，体现了我国煤炭及相关行业对我国煤炭发展的最新认识和总体思路，对我国煤炭清洁、高效、可持续开发利用的战略方向选择和产业布局具有一定的借鉴作用，对广大的科技工作者、行业管理人员、企业管理人员都具有很好的参考价值。

受煤炭发展复杂性和编写人员水平的限制，书中难免存在疏漏、偏颇之处，请有关专家和读者批评、指正。



2013年11月

前 言

本课题由岑可法院士领衔课题负责人，郑楚光教授、骆仲泱教授、潘伟平教授为课题组副组长。参加专家来自国内长期从事先进清洁煤燃烧与气化技术的研究、开发与装备制造、技术应用的 20 多家知名高校、科研机构与企业。本课题选择先进煤粉燃烧技术、循环流化床燃烧技术、先进的工业锅炉燃烧技术、煤与生物质混合燃烧与气化技术、煤的先进气化技术、以发电为主的煤热解气化半焦燃烧分级转化及灰渣综合利用技术、富氧燃烧及 CO₂ 回收减排技术、化学链燃烧与气化和水煤浆燃烧等其他低污染燃烧与气化技术、先进煤炭地下气化技术 9 个技术方向开展战略咨询研究。

通过研究我们认为，煤炭利用应遵循“科学发展、战略需求、自主创新、重点突破”的重要原则，体现以下先进理念。

1) 煤不单是能源，还是重要的资源。因此，煤的利用技术应该是分级转化综合利用、多级联产、烟气及煤炭灰渣近零排放，而且是有中国特色的新技术。

2) 结合我国的国情和特色，发电以用煤为主，近几十年来不会改变。因此，清洁煤分级转化技术，不仅要能用于新设计发电机组，还要对现有的 7 亿 kW 以上的现存煤发电机组也有可能因地制宜利用，较大幅度提高这些现有机组的节能减排效率，提高其产值和劳动生产率。

3) 煤的燃烧、煤的气化和煤的分级转化为目前煤利用过程中 3 种主要的转化方式。煤燃烧发电时燃烧效率高、造价低，但污染排放高、发电效率低，煤气化发电时煤的转化效率较低，造价成本高；但发电效率高，环保效率高。以煤的部分裂解气化制高级油品、半焦发电、灰渣综合利用为主要特点的煤分级转化技术，与现有煤燃烧与煤气化技术相比，在能耗、环保以及经济性方面具有优越性，可以跨越式提高煤炭利用效率、环境效益和经济性，有望改变现有煤炭利用方式，促进传统产业的升级改造。

4) 未来发展我国先进清洁煤燃烧与气化技术，除积极完善高效、低污染、适合我国国情的各种先进煤燃烧与气化技术的开发与应用外，更应建立煤分级转化技术创新体系，通过出台产业政策促进其推广应用，打造适合我国国情的煤炭利用新模式，从而推动形成煤分级转化战略性新兴产业链，来解决我国煤炭的高效、洁净利用问题。

通过调研表明，煤的燃烧技术向大型化、清洁、高效、清洁燃料替代方

向发展,煤的气化技术向大型化、高效率和环境友好方向发展;而将煤的燃烧与气化相结合形成新型煤炭转化方式,即煤的分级转化,有利于进一步提高煤炭综合利用与减排效率。传统燃煤方式忽视了煤的资源属性,将煤炭完全作为燃料燃烧,导致煤炭综合利用水平和效益不高。煤分级转化是基于“煤炭既是能源又是资源”的理念提出的煤炭转化利用的全新方向,可提高煤炭发电的综合效益,改变煤炭单一用于发电的产业结构;可形成基于煤炭资源化利用发电的新产业链,并缓解我国油气等资源的紧缺状况;对于改变和优化国家煤电产业结构、循环经济和节能减排具有重要意义。

采用技术经济比较和全生命周期分析表明,以煤的部分裂解气化制高级油品、半焦发电、灰渣综合利用为主要特点的煤分级转化综合利用技术,在能耗、环保以及经济性方面具有优越性。本书也分析了先进煤炭燃烧与气化技术的发展战略与目标,指出我国应积极发展先进煤粉燃烧技术、循环流化床燃烧技术、先进的工业锅炉燃烧技术、煤与生物质混合燃烧与气化技术、煤的先进气化技术、富氧燃烧及 CO_2 回收减排技术、先进煤炭地下气化技术、化学链燃烧与气化和水煤浆燃烧等其他低污染燃烧与气化技术。

根据“科学发展、战略需求、自主创新、重点突破”原则,研究认为,我国发电以用煤为主(每年约18亿t),今后新建机组宜采用清洁燃烧(超超临界)、完全气化(整体煤气联合循环发电系统IGCC)和煤分级转化综合利用等技术,现有电厂可采用超超临界结合煤分级转化技术进行低成本提效改造;兼顾 CO_2 减排问题积极发展富氧燃烧等技术,但应首先考虑低成本减排。今后我国需要发展高效、低污染、适合我国国情的未来先进清洁煤燃烧与气化技术,重点发展煤分级转化综合利用技术,以循环经济的全新模式新建或改造燃煤电厂,以推动我国煤炭转化利用相关产业的产业结构升级转型。

我国今后发展先进煤燃烧与气化技术的战略目标如下:

1) 到2020年,实现300~600MWe基于循环流化床技术的分级转化综合利用商业化应用,在较小的投资下,提高机组发电效率和煤炭利用效率。努力实现8%左右的电力动力生产用煤采用煤炭热解气化半焦燃烧分级转化技术进行综合利用,预计每年可制取相当于约210亿 m^3 天然气或相当于约1700万t原油的油气替代产品。发展富氧燃烧与先进大型煤气化技术等以 CO_2 减排为特点的煤燃烧与气化技术,分别实现日处理3000t煤气化炉示范以及300MWe富氧燃烧示范;

2) 到2030年,发展基于煤粉燃烧技术的煤炭热解气化半焦燃烧分级转化、多联产及污染物和灰渣资源化利用相关关键技术,实现超超临界结合煤粉分级转化工程应用。该阶段预计可实现25%左右的电力动力生产用煤采用

煤炭热解气化半焦燃烧分级转化技术进行综合利用，预计每年可制取相当于约 675 亿 m^3 天然气或相当于约 5400 万 t 原油的油气替代产品；以 CO_2 减排为特点的低成本煤燃烧与气化技术得到规模化应用。

通过课题研究，先进煤燃烧与气化技术发展的保障措施及建议如下：

- 1) 推动煤炭分级转化综合利用技术示范与应用；
- 2) 出台政策鼓励先进煤燃烧与气化技术示范与应用，减少燃烧煤耗；
- 3) 设立重大科技专项进行关键技术攻关，促进煤炭清洁高效开发利用；
- 4) 建立产—学—研—用联合培养机制，加强煤炭利用产业创新人才培养。

作 者

2013 年 12 月

目 录

第一篇 先进清洁煤燃烧与气化技术发展现状与趋势分析

第 1 章 先进煤粉燃烧技术	(3)
1.1 先进的煤粉燃烧技术	(3)
1.2 存在的突出瓶颈问题及其解决方案	(5)
1.3 煤粉燃烧的战略环境	(7)
1.4 煤粉燃烧技术的知识产权分析	(11)
1.5 煤粉燃烧技术的未来发展趋势	(18)
第 2 章 循环流化床燃烧技术	(23)
2.1 CFB 燃烧技术的现状及问题	(23)
2.2 与同等级 PC 锅炉比较分析	(32)
2.3 CFB 锅炉技术应用前景及发展趋势	(47)
第 3 章 先进的工业锅炉燃烧技术	(50)
3.1 工业锅炉行业和技术发展现状	(50)
3.2 存在突出瓶颈问题及解决方案	(57)
3.3 典型案例分析、关键技术突破与工艺技术途径选择	(60)
3.4 知识产权分析	(63)
3.5 新型技术未来发展趋势	(70)
3.6 未来可行典型技术全生命周期评价	(74)
第 4 章 煤与生物质混合燃烧与气化技术	(77)
4.1 技术发展现状	(77)
4.2 存在突出瓶颈问题及解决方案	(89)
4.3 典型案例分析、关键技术突破与工艺技术途径选择	(95)
4.4 知识产权分析	(108)
4.5 新型技术未来发展趋势	(110)
第 5 章 煤的先进气化技术	(111)
5.1 技术发展现状	(111)
5.2 存在的突出瓶颈问题及解决方案	(129)
5.3 典型案例分析、关键技术突破与工艺技术途径选择	(132)
5.4 知识产权分析	(143)
5.5 新型技术未来发展趋势	(144)
第 6 章 以发电为主的煤热解气化半焦燃烧分级转化及灰渣综合利用技术	(151)

6.1	背景和意义	(151)
6.2	煤热解气化燃烧分级转化技术	(154)
6.3	灰渣综合利用技术	(178)
6.4	裂解产物深加工技术	(183)
6.5	基于循环流化床燃烧技术的煤热解气化燃烧分级转化利用的技术与经济分析	(199)
6.6	热解气化燃烧分级转化技术的关键技术及瓶颈问题	(208)
6.7	知识产权分析	(213)
第7章	富氧燃烧及 CO₂回收减排技术	(221)
7.1	技术发展现状	(221)
7.2	技术存在的突出瓶颈问题及解决方案	(233)
7.3	典型案例分析	(241)
7.4	知识产权分析	(253)
7.5	富氧燃烧技术经济评价	(254)
第8章	化学链燃烧与气化、水煤浆燃烧等其他低污染燃烧与气化技术	(266)
8.1	化学链燃烧技术	(266)
8.2	化学链气化技术	(279)
8.3	水煤浆代油燃烧技术	(292)
8.4	催化燃烧技术	(317)
第9章	先进地下煤气化技术	(322)
9.1	地下煤气化技术发展现状	(322)
9.2	存在突出瓶颈问题与解决方案	(330)
9.3	典型案例分析、关键技术突破与工艺技术途径选择	(332)
9.4	知识产权分析	(339)
9.5	新型技术未来发展趋势	(342)

第二篇 先进清洁煤燃烧与气化技术发展战略及政策建议

第10章	发展战略及路线图	(349)
10.1	未来技术发展趋势综述	(349)
10.2	未来可行技术方案分析	(351)
10.3	未来可行典型技术方案比较分析	(357)
10.4	发展技术战略与技术路线图	(407)
第11章	具体措施与建议	(433)
11.1	推动煤炭分级转化综合利用技术示范与应用	(433)
11.2	循环流化床燃烧技术发展建议	(433)
11.3	先进的工业锅炉燃烧技术发展建议	(434)
11.4	煤先进气化技术发展建议	(435)
11.5	富氧燃烧及 CO ₂ 回收减排技术发展建议	(436)
11.6	化学链燃烧与气化技术发展建议	(437)