

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11卷

中美煤炭清洁高效利用技术对比

李文英 易 群 谢克昌 / 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 11 卷

中美煤炭清洁高效利用技术对比

李文英 易 群 谢克昌 / 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。

中美两国都是能源消费大国,由于煤炭利用而引发的各种矛盾是制约各自可持续发展的潜在因素,但双方在煤炭清洁高效利用技术的需求上有共同点。本书针对中美两国煤炭资源的需求与供给,结合资源、生态、环境、气候变化等方面展开讨论;在对提高煤炭资源开发、利用效率和降低污染物、温室气体排放等论述的基础上,重点就煤的清洁高效综合利用技术进行了对比分析,研究结论将对两个主要能源消费国的煤炭清洁高效开发利用和减少碳排放,应对全球环境气候变化产生积极的作用。

本书可供煤炭能源领域战略规划政府部门、生产单位、相关科研部门、大专院校研究人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中美煤炭清洁高效利用技术对比 / 李文英, 易群, 谢克昌编著. —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; 11)

“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 978-7-03-036147-9

I. 中… II. ①李…②易…③谢… III. 煤炭工作—无污染技术—对比研究—中国、美国 IV. X784

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 293016 号

责任编辑: 李 敏 周 杰 张 震 / 责任校对: 朱光兰

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: 8 1/2

字数: 200 000

定价: 80.00 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

顾问

周济	中国工程院	院长、院士
杜祥琬	中国工程院	原副院长、院士

组长

谢克昌	中国工程院	副院长、院士
-----	-------	--------

副组长

李文英	太原理工大学	教授
-----	--------	----

成员

黄其励	东北电网公司	学部主任
彭苏萍	中国矿业大学(北京)	院士
徐大懋	中国广东核电集团有限公司	院士
刘科	神华科学技术研究有限责任公司	副院长
张玉卓	神华集团有限责任公司	院士、董事长
张庆庚	赛鼎工程有限公司	董事长兼总经理
孙启文	兖矿集团有限公司	副总经理、总工程师
郑楚光	华中科技大学	教授
许世森	中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司	院长、教授级高工
冯杰	太原理工大学	教授
易群	太原理工大学	讲师
卢建军	太原理工大学	教授
郝艳红	太原理工大学	副教授、博士生
吴彦丽	太原理工大学	博士生

Michael Wang	Argonne National Laboratory (ANL, DOE)
--------------	--

Jin Wang	Argonne National Laboratory (ANL, DOE)
----------	--

J. E. Hunt	Argonne National Laboratory (ANL, DOE)
------------	--

D. C. Carroll	Gas Technology Institute (gti)
P. J. Globbs	Zero Emission Energy Plants (ZEEP)
J. Vilja	Pratt & Whitney Rocketdyne (PWR)
P. Neeta	Pratt & Whitney Rocketdyne (PWR)
A. K. Darby	Pratt & Whitney Rocketdyne (PWR)

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,创造性地提出了以安全、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浯院士牵头,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

能源对我国经济、社会的发展起着基础性的重要支撑作用。近年来,随着经济的快速发展,我国能源消费始终保持2亿 tce 左右的年增长量。由于“相对富煤、缺油、少气”的化石能源赋存特点,煤炭在我国一次能源的生产和消费中一直占70%左右的比例。而且在未来相当长的时期内,煤炭在能源结构中的主体地位也不会改变,根据《中国可持续能源发展战略》预测,到2050年煤炭能源比例仍为50%。

资源和环境问题已经成为影响我国可持续发展的主要因素。我国煤炭资源的总体净化程度低,商品煤的平均灰分在22%左右,电煤的平均灰分则高达28%,远高于发达国家平均灰分(<8%)的要求。利用效率低是我国煤炭消费的另一个大问题,综合效率仅为36%,比发达国家低10%;原煤直接燃烧是我国煤烟型大气污染的主要原因,中国工程院的研究结果表明,我国烟尘排放量的70%、二氧化硫排放量的85%、氮氧化物排放量的60%、二氧化碳排放量的85%都来自煤炭燃烧。

控制煤炭资源的开发利用强度,发展清洁、高效、绿色开采技术,提高煤炭资源的利用效率,控制我国碳排放水平,既是我国社会可持续发展的需要,也是积极应对国际气候变化的重要措施。2009年哥本哈根会议召开前,中国政府宣布到2020年单位国内生产总值温室气体排放量比2005年下降40%~45%的行动目标,并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。2011年南非德班会议前夕,中国发表应对气候变化白皮书:到2015年,单位国内生产总值二氧化碳排放比2010年下降17%,单位国内生产总值能耗比2010年下降16%,非化石能源占一次能源消费比重达到11.4%,新增森林面积1250万 hm^2 ,森林覆盖率提高到21.66%,森林蓄积量增加6亿 m^3 ,充分彰显了中国政府推动低碳发展、积极应对气候变化的决心。

煤是美国最丰富的化石燃料,作为一种低成本的能源维持着美国的能源安全 and 经济稳定。据美国能源信息署(EIA)统计,目前美国电力生产的50%来自煤炭,约为10亿 t/a,相当于每天1000万桶的石油进口量,预计到2030年,这一比例将上升到57%,而整个电力需求届时也将会增加39%。美国目前煤炭储量为2670亿 t,占世界总储量的27%,可供美国使用200多年,煤炭对美国能源安全的重要性不言而喻。为了能更加环保和减少温室气体排放、更加高效地利用储量丰富的煤炭资源,自2001年以来,美

国政府已投入 22 亿美元，将“洁净煤技术”从研发阶段向示范阶段和市场化阶段推进。

因此，如何实现煤炭的清洁高效利用，发展先进的煤炭利用技术，有效缓解甚至解决能源安全问题、环境问题，是中美两国未来煤炭能源利用的战略重点。中美两国政府着重于煤炭清洁高效利用技术的研发内容，主要包括以下几个方面：新型洁净煤燃烧技术、先进燃烧发电技术、煤清洁高效转化技术、污染物控制与净化技术。

新型清洁煤燃烧技术：化学链燃烧技术和 O_2/CO_2 富氧燃烧技术作为最清洁的煤燃烧技术还处在研究、示范阶段。循环流化床燃烧技术作为唯一的工业化燃烧技术目前在中美两国应用较为广泛，但是 CO_2 排放严重、与锅炉联合发电效率低的问题制约了其进一步的发展。

先进燃烧发电技术：①超超临界发电技术机组在中美两国具有较大发展空间和市场前景，目前中国超超临界发电机组约占火力发电机组的 30%，最大的机组规模为 1000MW。美国有 169 台超临界机组（其中多数为超超临界机组），占燃煤机组的 70% 以上，占总装机容量的 25.22%，其中单机容量介于 500~800MW 占 60%~70%，最大的机组规模为 1300MW。②整体煤气化联合循环（integrated gasification combined cycle, IGCC）发电技术是中美两国清洁煤炭技术方面的重点发展内容之一。中国目前仅有的华能“绿色煤电”商业示范 IGCC（带 CCS）项目已完成第一阶段工程，除燃气轮机采取联合供货外，该项目的设计和设备的完全国产化，标志着中国在 IGCC 技术建设和开发方面已经走到世界前列。此外，大唐国际、中电投、华电、国华、神华集团等企业也将 IGCC 发电项目列入了各自的发展规划中。美国已建（在建、拟建）的 IGCC 电站工程共 68 个^①，按照 2008 年“未来发电”（Future Gen）项目重组方案，计划同时建造多座具有碳捕获与封存（CCS）功能的大规模 IGCC 示范电厂。每座示范电厂计划装机容量不得小于 300MW，同时每座电厂每年至少能够捕获和封存 CO_2 的量是重组前的 2 倍，环保效果不得低于原计划的标准，计划在 2015~2016 年建成投运。可见，中美两国对 IGCC 的发展和应用都相当重视。③基于煤气化的多联产系统是将 IGCC 发电和煤化工技术耦合的能源系统。目前，世界上唯一进行成功商业化示范运行的多联产系统是中国兖矿集团的煤基甲醇-电-乙酸多联产系统。国内有关科研单位和企业分别提出了符合各自发展特点的、多种形式的多联产工艺路线，并已开始进行系统集成研究，计划到 2015 年前后实现初

① 上海科学技术情报研究所. 2010. 整体煤气化联合循环（IGCC）技术走向成熟. <http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?Id=6708>.

级系统的工业应用,并逐步向先进系统发展。美国政府计划在2015~2020年完成电力、氢、液体燃料生产和 CO_2 分离的先进多联产系统的商业化示范。

煤清洁高效转化技术:①煤直接制油技术在中国已经有商业示范,神华集团自主研发的煤制油项目目前已能达到100万 t/a 规模。美国的H-COAL工艺20世纪80年代进行了600 t/d 的规模试验,HTI工艺在1995年进行了3 t/d 的规模试验^①。目前,国外煤直接液化试验装置已经全部停止运转或拆除,部分相对成熟的技术处于封存和储备状态,已经完成的最大工业试验装置规模为处理煤量600 t/d 。②在煤间接制油技术方面,中国已经具有了建设十几万吨级规模示范装置的技术储备,在关键技术、催化剂研究开发方面拥有自主知识产权。据业内专业人士介绍,到2020年中国煤制油产业将形成5000万 t 的产能规模。国外目前已经工业化的煤间接液化技术只有南非SASOL的费托(F-T)合成技术和荷兰Shell公司的SMDS技术,Mobil公司的MTG合成汽油技术也具有一定可靠性^②。③在煤制烯烃方面,美国环球油品公司(UOP)的MTO工艺、中国科学院大连化学物理研究所的DMTO工艺、中国石油化工股份有限公司的SMT0工艺都取得了较好的业绩。国内已拥有60万 t/a 煤制烯烃工业示范工程。UOP公司与尼日利亚甲醇公司签署了商业化技术许可协议,将MTO技术与烯烃裂解装置联合,生产130万 t/a 的丙烯和乙烯,计划在2012年建成。④中国目前已有全球首套20万 t/a 煤制乙二醇工业示范装置。该装置采用 CO 气相催化合成草酸酯和草酸酯催化加氢合成乙二醇工艺,具有全套自主创新知识产权。当前煤制乙二醇技术还不成熟、不完整,主要存在催化剂稳定性、产品质量、规模放大等问题。

污染物控制与净化技术:主要集中在脱硫、脱硝、烟尘排放控制、汞排放控制,以及温室气体排放控制方面。从中美脱硫和脱硝技术对比来看,中国脱硫、脱硝技术要略优于美国,但脱硫脱硝一体化技术中国还没有应用,美国已成功应用到电厂生产中。在烟尘控制方面,中美两国大多采用静电式除尘器进行燃煤机组的除尘,在严格排放限制下会选择布袋式除尘。美国对汞排放的要求较为严格,截至2010年6月,美国已经有169个机组安装了或者计划安装汞污染控制设备。国内对汞的排放控制技术研究才刚刚起步,还没有完全成熟的技术进入商业应用,但是已经制定了相关的法律法规。对温室气体的控制,尤其 CO_2 的排放,是中美两国共同关注的焦点。中国对CCS尤其是CCUS技术相当重视,2008年已经确定重点研究减缓温室气体排

① 张扬健.2011.发达国家煤制油基本处于储备阶段.中国石化,(01):30。

② 王光彬.2009.煤间接液化技术及发展前景.当代化工,38(01):69-71。

放技术,包括 CO_2 捕集、利用与封存技术,目前已经有多家电厂企业进行了相关的示范工作。2010 年 12 月,美国提出 CCS 技术示范路线图,该路线图聚焦于为燃煤发电系统提供具有成本效益的先进 CCS 技术,重点关注高效、经济的解决方案,以快速实现商业化。美国政府计划在 2016 年左右有 5~10 个商业规模的 CCS 示范项目上线。但是,现阶段 CCS 的可靠性、经济性与环境安全性有待提高、验证。

煤炭清洁高效利用技术的发展,也促进了燃气轮机制造技术、选煤技术、型煤技术、水煤浆技术等相关产业的发展。

结合目前中国煤炭清洁高效利用技术发展现状,需要推进煤炭清洁利用重点工程的建设,一些关键技术瓶颈需要突破,主要集中在:煤气化技术的改进、化学链燃烧载氧体的选择、反应器的设计、化学链燃烧系统的设计和优化。 O_2/CO_2 富氧燃烧技术锅炉改造、燃烧机理等研究、高温脱硫催化剂的开发制备,适用于不同热值的燃气轮机改造技术、低能耗高效率 CO_2 分离技术、安全可靠的 CO_2 封存技术方案,以及高超超临界发电用高温材料的制造等。

根据相关清洁煤炭利用技术未来的发展规划,一些重点工程及技术的应用和发展路线(现阶段至 2030 年)也已提出,主要集中在:超超临界(高超超临界)发电技术发展路线图,包括从超超临界技术高温材料到高超超临界发电技术的过渡发展;IGCC 发展路线图主要基于煤气化技术、化学链燃烧技术、 O_2/CO_2 富氧燃烧技术、高温脱硫技术及 CCS 技术等在内的不同阶段发展、时间空间模式;煤基多联产系统发展路线是结合 IGCC 的发展,进一步根据能源布局、能源需求规划的不同时间、空间的多维度路线图。

目前,中国已在超超临界发电技术方面取得了重大突破,自主研发了 1000MW 发电机组并投入应用,机组效率为 45.4%,供电煤耗 283.2g/(kW·h)。2010 年 7 月,中国启动了 700℃ 超超临界燃煤发电技术创新联盟,该联盟的宗旨是有效整合各方资源,攻克技术难题,提高中国的超超临界发电机组的技术水平,实现超超临界燃煤发电技术的自主化。与 600℃ 超超临界发电技术相比,700℃ 超超临界燃煤发电技术的供电效率可提高到 48%~50%,煤耗可再降低 40~50g, CO_2 排放将减少 14%。早在 20 多年前,美国的超超临界发电机组单机容量就已达到 1300MW,全美国共有 7 台。目前,国外的超超临界机组的单机容量发展目标仍维持在 1000MW,参数为 30MPa、625℃,并正在向更高水平发展。美国 700℃ 超超临界发电技术和设备的研发时间表:2015 年完成各项研究项目,2017 年建设示范电厂。美国正在组织一项发展

更高参数的超超临界发电机组的研究项目——“760℃”计划^①，目标是将超超临界机组的主蒸汽温度提高到760℃水平，压力为38.5 MPa，这将大大提高超超临界机组效率，热效率高于55%，CO₂和其他污染物排放量比亚临界机组少30%。

中国华能集团“绿色煤电”IGCC（带CCS）示范工程已经完成了一期工程，预计整个工程完成后，其除尘效率为99.99%，脱硫效率为99%，全厂效率为48%。具有中国自主知识产权的神华煤直接液化制油技术更是处于世界领先水平，达到百万吨/年的规模。煤间接液化制油技术百万吨级装置也正在进行工业示范。兖矿集团煤基甲醇-电多联产系统的成功示范运行，标志着我国多联产技术迈向了世界前沿。在IGCC技术方面，美国Wabash River和Tampa IGCC电站早在20世纪就已经投入商业示范运行，为美国IGCC的建设和发展积累了大量的经验，目前在建和拟建的IGCC还有60多座。其部分技术引进了中国技术，如在建的美国宾夕法尼亚州未来能源Good Spring IGCC，引进了华能自主研发的两段式干粉煤气化技术。

根据中美两国目前煤炭清洁高效清洁利用技术现状和发展思路，本书指出两国未来合作的重点工程，主要包括超超临界/高超超临界发电技术、IGCC（CCS）发电技术和煤基多联产技术合作与开发。

本书作为《中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究》丛书的第11卷，专门针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性、优劣性进行了较深入的对比分析研究，对中国煤炭清洁高效可持续开发利用整体战略研究提供了参考和支撑。

冯杰、郝艳红、吴彦丽对本书部分内容做了补充和完善。在完稿过程中和付梓之际，特别感谢中国工程院能源与矿业工程学部黄其励、倪维斗、岑可法、岳光溪、张玉卓等院士的指教和修正。由于时间紧、水平所限，虽求本书高质量完成，但不足之处定会不少，真诚希望读者不吝赐教，作者将不胜感激。

感谢中国工程院咨询项目“中美煤炭清洁高效利用技术咨询项目”（编号：2011-XZ-22）和“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”（编号：2011-ZD-7-11-2）的资助。

作者

2012年12月

^① 周一工，徐炯，胡晓初，等. 2011. 大力发展清洁高效的超临界、超超临界发电技术. 装备机械，(01): 2-6.

目 录

第1章 煤炭清洁高效利用技术	(1)
1.1 中国和美国在煤炭清洁高效利用技术领域合作的可能性和必要性	(1)
1.2 美国在煤炭清洁高效利用技术方面的发展思路	(3)
1.3 煤炭清洁高效利用技术的规模、产量及工业化水平	(10)
1.4 煤炭清洁高效利用技术工程科技发展趋势	(45)
第2章 煤炭清洁高效利用技术研发的重点和突破点	(46)
2.1 煤炭清洁高效利用的相关产业技术现状	(46)
2.2 煤炭清洁高效利用的重点工程与关键技术	(52)
2.3 煤炭清洁高效利用技术发展路线图	(74)
第3章 煤炭清洁高效利用技术在工程科技领域的预期收益	(77)
3.1 现有煤炭清洁高效利用技术应用效益	(77)
3.2 规模化煤炭清洁高效利用技术应用预期收益	(88)
第4章 中美煤炭清洁高效技术领域的合作分析与建议	(103)
4.1 煤炭清洁高效利用技术合作的优先技术	(103)
4.2 煤炭清洁高效利用技术合作的重点/重大工程建议	(109)
参考文献	(112)

1.1 中国和美国在煤炭清洁高效利用技术领域合作的可能性和必要性

中国是一个相对富煤、贫油、少气的国家,在已探明的化石能源储量中,煤炭占 96.14%,石油、天然气仅占 3.86%。中国煤炭资源丰富,并且容易大规模获取,比石油和天然气具有明显的资源优势,且其作为能源的投资少、周期短、效率高。长期以来形成的以煤为主的能源结构,为中国经济的快速发展提供了强有力的保障。

随着中国国民经济的快速发展,能源消费大约每年增长 2 亿 tce,对煤炭的需求也在大幅度增长,2011 年我国煤炭产量 35.2 亿 t,约占一次能源生产总量的 78.6%;煤炭消费总量 35.7 亿 t,约占一次能源消费总量的 72.8%。煤炭生产和消费总量同比分别增加 2.1 和 1.9 个百分点。2011 年 2 月 22 日,国家统计局发布数据称,初步核算,2011 年中国能源消费总量 34.8 亿 tce,比上年增长 7.0%;煤炭消费量增长 9.7%;原油消费量增长 2.7%;天然气消费量增长 12.0%;电力消费量增长 11.7%。“十二五”中国的能源结构的调整目标是,到 2015 年,煤炭在能源消费中的比重从 2009 年的 70% 下降到 63%,天然气、水电、核能及其他非化石能源的比重从目前水平分别上升到 8.3%、9% 和 2.6%^①。

2010 年中国石油消费量达 4.49 亿 t,进口 2.39 亿 t,2010 年中国石油对外依存度已超过 55%,据国际能源机构的预测,2020 年中国石油对外依存度将达 68%;2010 年天然气消费量达 1100 亿 m³,进口液化天然气(LNG) 934 万 t,首次进口管道气 44 亿 m³,2010 年中国天然气对外依存度超过 15%^②。石油和天然气安全日益严峻。一旦出现石油或天然气危机,煤炭就是唯一可以作为替代燃油或燃气的原料。因此煤炭在中国能源安全中扮演的角色不可替代。

煤炭具有能源和资源二重性,煤炭不仅可以作为能源,也是化学品的重要资源保障,大约 60% 的化学品原料来自煤炭,中国已成为世界上最大的煤制化学品生产国,煤制合成氨、甲醇和电石产量位居世界第一^③。

但是,由煤炭的不合理开采和利用方式的落后造成的资源和环境问题已成为制约中国可持续发展的主要因素。传统的煤炭开发和利用技术极大地污染了人们赖以生存的环境。

① 中国经济报告. 2011. 如何推进中国能源结构调整. http://www.Cqcoal.Com/news/n01/45713_1.html。

② 国家能源局. 2011. 2010 年能源经济形势及 2011 年展望. http://www.nyj.ndrc.gov.cn/ggtz/t20110128_393339.html。

③ 中国煤炭工业协会. 2010. 煤炭科技“十二五规划”(征求意见稿)。