

“十二五”
国家重点图书

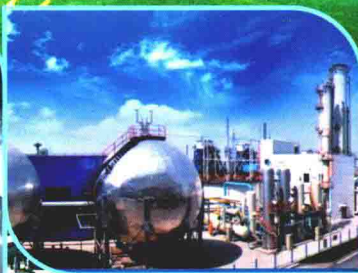
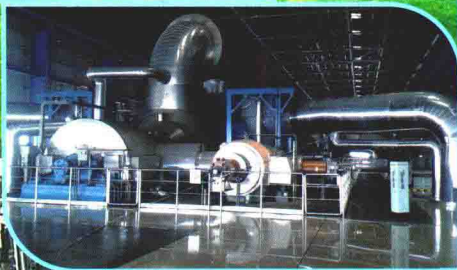


21世纪可持续能源丛书

洁净煤技术

(第二版)

卓建坤 陈超 姚强 编著



化学工业出版社

“十二五”
国家重点图书



21世纪可持续能源丛书

洁净煤技术

(第二版)

卓建坤 陈超 姚强 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

洁净煤技术/卓建坤, 陈超, 姚强编著. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2015. 10
21 世纪可持续能源丛书
ISBN 978-7-122-24843-5

I. ①洁… II. ①卓… ②陈… ③姚… III. ①清洁煤-技术 IV. ①TD942

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 179844 号

责任编辑: 戴燕红
责任校对: 蒋 宇

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限公司
装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 23 $\frac{1}{2}$ 字数 416 千字 2016 年 1 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

第二版序

20 世纪末，随着人类社会发展对能源可持续供应的迫切需要，出现了“可持续能源”的理念，并受到全世界人们的关注。

21 世纪以来，能源更是渗透到了人们生活的每个角度，成为影响全球社会和经济发展的第一要素。目前中国已经成为全球能源生产与消费的第一大国，能源与经济的关系、能源与环境的矛盾、能源与国家安全等问题日显突出。因此，寻找新型的、清洁的、安全可靠并可可持续发展的能源系统是广大能源工作者的历史使命。

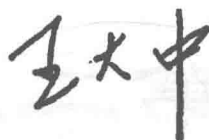
2005 年，化学工业出版社出版了“21 世纪可持续能源丛书”，受到我国能源工作者的广泛好评；时隔 8 年，考虑到能源形势的变化和新技术的出现，又准备出版“21 世纪可持续能源丛书”（第二版），的确是令人高兴的事情。

“21 世纪可持续能源丛书”（第二版）共 12 册，仍然以每一个能源品种为一个分册，除对原有的内容做了更新，补充了最新的政策、技术和数据等外，增加了《储能技术》《节能与能效》《能源与气候变化》3 个分册。丛书第二版包括了未来能源与可持续发展的概念、政策和机制，各能源品种的资源评价、新工艺技术及特性以及开发和利用等；新增加的 3 个分册介绍了最新的储能技术，能源对环境与气候的影响以及提高能源效率等，使得丛书内容更加广泛、丰富和充实。

由于内容的广泛性和丰富性，以及参加编写的专家的权威性，本套丛书在

深度和广度上依然保持了较高的学术水平和实用价值，是能源工作者了解能源政策及信息、学习先进的能源技术和广大读者普及能源科技知识的不可多得的好书。

让我们期待这套丛书的出版发行，能为我国 21 世纪可持续能源的发展作出贡献。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '王大中' (Wang Dazhong).

中国科学院院士
2013 年 11 月 6 日

第一版序

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，还涉及推广和应用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

王大中

2004年7月8日

感谢一章

第二版前言

离本书第一版出版时间刚好过去了十年。十年时间中国各个方面都发生了深刻的变化，而煤炭在一次能源中的比例从当年的 70% 降到了 64%，仍是我国最重要的一次能源。这十年也是我国洁净煤技术发展的黄金十年，使得我国的洁净煤技术的发展逐渐赶上世界的先进水平。然而经济的高速发展和高达 40 亿吨煤的年消费量，对我国的环境、能源安全以及国际政治等问题造成了沉重的负担。尤其 2011 年开始频频出现的雾霾天气成为我国公众主要关注的环境问题，而煤炭燃烧在其中的贡献超过了 50%。在 2014 年 APEC 北京峰会期间，中国政府承诺在 2030 年前碳排放量达到峰值，届时煤炭的消费量将仍然占 50% 左右，正在进行的以安全、清洁、高效和低碳为核心的能源革命无法离开煤的清洁高效利用，洁净煤技术的地位越发显得突出和重要。

21 世纪初的洁净煤技术发展在中国，中国的洁净煤技术应用水平代表着世界的先进水平。因应上述的变化，本书第二版中大篇幅增加了介绍中国的洁净煤技术发展的情况和相应工程案例。其中，第一章针对煤炭在能源结构中的地位重新进行了梳理，尤其从能源安全、大气环境、气候变暖和重金属污染控制治理等方向更新了我国近十年来的最新进展。针对燃烧前的煤炭净化技术，分级分选工艺的大规模应用，促进了我国原煤入选率持续提高。第二章针对上述变化，对主要选煤设备的技术和应用均作相应的更新。在第三章中，详细描述了我国的低氮燃烧技术、循环流化床燃烧技术的研发和应用水平及在国际上的先进地位；同时，虽然水煤浆在燃煤锅炉应用中已遇到发展瓶颈，但在水煤浆气化中的应用却逐渐提高。所以，在第三章中仍然保留了该部分技术内容并

体现上述变化。而针对燃煤污染物排放控制技术，第四章的修订反映了我国脱硫、脱硝技术的发展和变化，并因应雾霾综合治理的需求，针对 $PM_{2.5}$ 、重金属的控制，以及超低排放所采用到的技术，在第四章中均增加相应的章节内容。煤化工技术在近十年获得了蓬勃发展，在我国出现了引进、自主研发齐头并进的局面，产学研一体化的结果促进了我国煤化工技术的研发和产业化水平的提高，第五章中增加了我国的几种典型煤气化技术，第六章增加了我国煤炭直接和间接液化的技术、催化剂、示范工程。超（超）临界技术的发展和應用直接促进了我国燃煤发电供电煤耗处于世界领先水平，使得我国在 700°C 先进超超临界发电的研发上有了追赶世界先进水平的机会和可能，绿色煤电 250MWe 整体煤气化联合循环（IGCC）的成功投运，结束了我国在 IGCC 研发和应用方面的空白，因此，第七章的大篇幅修订体现了上述的技术发展。在第八章中，针对洁净煤技术的发展和前景进行了展望，以全球气候变暖和 CO_2 减排目标为导向，对 CO_2 的捕集、运输、埋存和利用技术（CCS），以及由此延伸的近零排放技术的研发和工业示范进行了详细的描述，同时体现了洁净煤技术的各部分之间的有机联系，和在控制 CO_2 排放、大气环境治理方面的协同效果。

近十年来，作者在清华大学建立的颗粒与燃烧工程研究小组，坚持煤的清洁燃烧、污染物排放控制技术方向的研究，完成了 973 项目“燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术的基础研究”，以及正在实施 973 项目的“化石燃料燃烧排放 $PM_{2.5}$ 源头控制技术的基础研究”，并通过多项国家 863、支撑计划，以及担任中美清洁能源研究中心洁净煤技术研究联盟的中方首席科学家，开展以 CO_2 减排为目标的先进发电技术、CCUS（碳捕集、利用与封存）等技术的研究和发展战略研究。作者有幸参与了国家“十五”、“十一五”和“十二五”规划工作，并在 863 计划中担任洁净煤技术和能源领域专家的工作，并参加能源科技发展战略研究和洁净煤技术发展战略研究工作，有机会向国内外洁净煤技术的各方面专家学习，与他们就许多问题进行探讨和争论，这些争论和讨论让我对许多问题有了更深入的认识。这些工作为本书的修订提供了坚实的基础。

在此，感谢我的科研小组团队成员的共同努力，感谢清华大学煤清洁燃烧国家工程研究中心的李慧娜工程师对本书数据采集和更新进行了深入细致的工作，也感谢化学工业出版社对本书再版的耐心指导和全力支持。最后特别要对与我共同工作的各位同事表示深切的谢意，也要感谢国家相关部委。

由于自己研究与理解的水平有限，当有不少问题以及不确之处，期待着听到读者们的真知灼见。

姚 强

2014 年 12 月 30 日于清华园

第一版前言

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等。第 5 章与第 6 章是煤炭的转化，包括煤炭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

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 中国煤炭生产和消费现状	8
1.2.4 中国煤炭需求预测	9
1.3 煤炭燃烧排放引起的环境问题	11
1.3.1 煤炭利用的途径	11
1.3.2 二氧化硫污染与酸雨	11
1.3.3 氮氧化物与光化学雾污染	16
1.3.4 燃烧颗粒物污染	18
1.3.5 燃煤产生的其他污染物	21
1.4 洁净煤技术	22
第 2 章 煤炭净化技术	23
2.1 煤炭净化技术的发展	23
2.2 煤炭的物理净化法	24
2.2.1 重介质选煤	26

2.2.2	跳汰法	27
2.2.3	浮游选煤	29
2.2.4	干法选煤	30
2.2.5	典型的选煤工艺	31
2.3	煤炭的化学净化法	33
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	39
2.5.1	煤矸石	39
2.5.2	煤泥	40
2.6	配煤与型煤技术	41
2.6.1	配煤技术	42
2.6.2	型煤技术	43
第3章 煤的先进燃烧技术		48
3.1	燃煤锅炉 NO_x 的生成机理及其低 NO_x 燃烧技术	48
3.1.1	燃煤锅炉 NO_x 的生成机理	49
3.1.2	燃煤锅炉的低 NO_x 燃烧技术	52
3.2	循环流化床燃烧技术	66
3.2.1	循环流化床燃烧技术概述	66
3.2.2	循环流化床燃烧技术基本原理及特点	68
3.2.3	循环流化床锅炉的污染控制	81
3.2.4	循环流化床燃烧技术的发展与展望	86
3.3	水煤浆燃烧	89
3.3.1	水煤浆概述	89
3.3.2	水煤浆的特性	90
3.3.3	水煤浆的制备	91
3.3.4	水煤浆的燃烧	93
3.3.5	水煤浆的应用	96
3.3.6	水煤浆的发展历史及前景	100
第4章 燃煤烟气净化技术		103
4.1	烟气净化的基本原理	104
4.2	颗粒物的脱除技术	106
4.2.1	颗粒物脱除的基本原理	106

4.2.2	颗粒物脱除技术的分类	107
4.2.3	机械除尘技术	108
4.2.4	湿式除尘技术	109
4.2.5	静电除尘技术	112
4.2.6	袋式除尘技术	118
4.2.7	多场耦合 PM _{2.5} 脱除技术	127
4.3	烟气脱硫技术	132
4.3.1	烟气中硫的来源及存在形式	133
4.3.2	烟气脱硫技术概述	133
4.3.3	烟气脱硫的基本原理和常用脱硫剂	136
4.3.4	湿法烟气脱硫工艺	141
4.3.5	干法/半干法烟气脱硫技术	150
4.3.6	我国烟气脱硫技术发展现状及前景分析	156
4.4	烟气脱硝技术	158
4.4.1	NO _x 脱除技术概述	158
4.4.2	选择性非催化还原脱硝技术	159
4.4.3	选择性催化还原脱硝技术	161
4.4.4	湿式烟气脱硝技术	164
4.5	同时脱硫脱硝技术	165
4.5.1	电子束氨法和脉冲电晕法	165
4.5.2	活性炭加氨吸附法	167
4.5.3	NOXSO 工艺	167
4.5.4	SNO _x TM 工艺	168
4.5.5	SNRB 工艺	169
4.5.6	氧化铜法	170
4.5.7	湿式 FGD 加金属螯合物法	171
4.6	燃煤电站锅炉重金属和汞排放的控制技术	171
4.6.1	燃煤电站锅炉的重金属污染	171
4.6.2	燃煤锅炉汞的污染	176
4.6.3	燃煤锅炉燃烧中汞的形态和排放	177
4.6.4	燃煤锅炉汞排放的控制技术	180

第 5 章 煤的气化技术

5.1	概述	186
-----	----------	-----

5.1.1	煤气化的定义和实质	186
5.1.2	煤气化的基本原理	188
5.1.3	煤气化的分类	189
5.1.4	影响煤气化效果的几个因素	190
5.1.5	煤气的种类	192
5.1.6	煤炭气化的基本工艺流程	193
5.2	移动床气化法及其典型气化炉	194
5.2.1	常压移动床气化法	195
5.2.2	典型的常压移动床气化炉	198
5.2.3	加压移动床气化法	201
5.2.4	典型的加压移动床气化炉	203
5.3	流化床气化法及其典型气化炉	206
5.3.1	流化床气化法	206
5.3.2	典型的流化床气化炉	208
5.4	气流床气化法及其典型气化炉	211
5.4.1	气流床气化法	211
5.4.2	典型的气流床气化炉	213
5.5	其他气化法	219
5.5.1	熔融床气化法	219
5.5.2	煤的地下气化法	222
5.6	煤气的净化和加工	224
5.6.1	脱除酸性气体	224
5.6.2	CO 变换	227
5.6.3	煤气甲烷化	228
5.7	我国煤气化技术的发展	230
5.7.1	多喷嘴对置式水煤浆加压气化技术	231
5.7.2	分级供氧和水冷壁水煤浆气化技术	232
5.7.3	TPRI 两段干煤粉气化炉	234
5.7.4	干煤粉加压气化航天炉	235
5.7.5	熔聚气化技术	235

第 6 章 煤的液化技术

6.1	煤液化的意义和相关概念	237
6.2	煤的直接液化技术	238

6.2.1	煤直接液化的基本原理	239
6.2.2	煤直接液化的一般工艺过程	240
6.2.3	几种典型的直接液化工艺	241
6.2.4	煤直接液化技术的关键因素	251
6.2.5	直接液化产物的特点	255
6.2.6	我国的煤直接液化技术	255
6.3	煤的间接液化	258
6.3.1	FT 合成法的基本原理及工艺	259
6.3.2	几种间接液化的典型工艺	264
6.3.3	间接液化技术的产物特点	269
6.3.4	我国煤间接液化技术	270
6.4	煤制备其他液体燃料	271
6.4.1	煤制甲醇的典型工艺	271
6.4.2	甲醇转化制汽油	273
6.4.3	煤制二甲醚的典型工艺	274
6.4.4	我国的煤制其他液体燃料技术	276
第 7 章 洁净煤发电技术		280
7.1	超超临界发电技术	281
7.1.1	超超临界机组的关键因素	282
7.1.2	超超临界机组的发展历史及前景	284
7.2	燃气-蒸汽联合循环基础	287
7.2.1	燃气-蒸汽联合循环的基本原理	287
7.2.2	燃气-蒸汽联合循环的基本形式	288
7.3	整体煤气化联合循环	293
7.3.1	IGCC 的基本原理	293
7.3.2	典型的 IGCC 示范工程	294
7.3.3	IGCC 的主要特点及影响因素	297
7.3.4	IGCC 的发展过程及趋势	299
7.4	燃煤增压流化床锅炉联合循环	301
7.4.1	PFBC 的基本形式	301
7.4.2	典型的 PFBC 电站系统	303
7.4.3	PFBC 的特点及影响因素	305
7.4.4	PFBC 的发展历史及趋势	306

7.5	整体煤气化-燃料电池联合循环	309
7.5.1	燃料电池的基本原理	309
7.5.2	整体煤气化-燃料电池联合循环介绍	310
7.6	整体煤气化湿蒸汽联合循环	313
第8章	洁净煤技术的发展与前景展望	317
8.1	国际上洁净煤技术的发展	317
8.1.1	美国洁净煤技术的发展	317
8.1.2	欧盟与日本的洁净煤技术的发展	319
8.1.3	中国洁净煤技术的发展	320
8.2	二氧化碳与全球气候变暖	321
8.3	碳捕集与封存技术	325
8.3.1	CO ₂ 捕集技术	326
8.3.2	CO ₂ 封存技术	335
8.3.3	碳捕集与封存技术发展的意义	338
8.4	煤基近零排放多联产系统	339
8.4.1	多联产系统的意义	340
8.4.2	煤基近零排放多联产系统的发展	343
参考文献	353