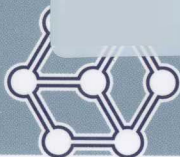


“十一五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤化工概论

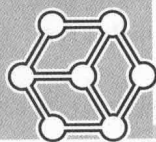
谢克昌 赵 炜 编著

WEI HUAGONG GAILUN



化学工业出版社

“十一五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤化工概论

谢克昌 赵 炜 编著

常州大学图书馆
藏书章



化学工业出版社

· 北京 ·

MEIHUAGONG GAILUN

本书以煤的转化反应为主线,以煤的转化技术分章节,阐述煤化工的基本原理,构筑煤化工的总体轮廓。全书共分 10 章,第 1 章是以煤转化为主的能源转化概论;第 2 章介绍与煤的反应和反应性密切相关的煤的物理和化学性质;第 3 章到第 7 章为煤化学转化最主要的一些基础反应及与这些反应相关的技术、工艺和设备;第 8 章专门介绍了煤转化过程中的催化;第 9 章介绍了煤转化过程中的环境和资源问题;第 10 章阐述了现代煤化工与煤的清洁高效利用的关系。

本书适合从事煤化工科研、应用的技术人员阅读,也可供相关专业大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤化工概论/谢克昌,赵炜编著. —北京:化学工业出版社,2012.5

“十一五”国家重点图书

(现代煤化工技术丛书)

ISBN 978-7-122-13511-7

I. 煤… II. ①谢…②赵… III. 煤化工-概论
IV. TQ53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 025018 号

责任编辑:路金辉 靳星瑞 孙绥中
责任校对:吴 静

装帧设计:王晓宇

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:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 311 千字 2012 年 10 月北京第 1 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:46.00 元

版权所有 违者必究

《现代煤化工技术丛书》编委会

主任: 谢克昌 中国工程院副院长, 中国科协副主席, 中国工程院院士
李勇武 中国石油和化学工业联合会会长

委员 (以姓氏汉语拼音排序):

陈清如 中国工程院院士, 中国矿业大学教授
房鼎业 华东理工大学教授
俸培宗 化学工业出版社社长
高晋生 华东理工大学教授
金 涌 中国工程院院士, 清华大学教授
李大尚 赛鼎工程有限公司, 国家级设计大师
李文英 太原理工大学教授, 长江学者特聘教授
李永旺 中国科学院山西煤炭化学研究所研究员
李勇武 中国石油和化学工业联合会会长
李 忠 太原理工大学教授
倪维斗 中国工程院院士, 清华大学教授
潘正安 化学工业出版社总编辑
邱介山 大连理工大学教授, 长江学者特聘教授
孙启文 兖矿集团有限公司副总经理, 煤液化及煤化工国家重点
实验室主任, 研究员
王辅臣 华东理工大学教授, 国家“973”项目首席科学家, 长
江学者特聘教授
谢克昌 中国工程院副院长, 中国科协副主席, 中国工程院院士
应卫勇 华东理工大学教授
于遵宏 华东理工大学教授
张庆庚 赛鼎工程有限公司董事长兼总经理, 教授级高级工程师
张玉卓 神华集团有限责任公司总经理, 中国工程院院士

《现代煤化工技术丛书》编写人员

丛书主编：谢克昌

各分册编写人员：

《煤化工概论》 谢克昌 赵炜 编著

《煤炭气化技术》 于遵宏 王辅臣 等编著

《气体净化分离技术》 上官炬 常丽萍 苗茂谦 编著

《煤的等离子体转化》 吕永康 庞先勇 谢克昌 编著

《煤的热解、炼焦和煤焦油加工》 高晋生 主编

《煤炭直接液化》 吴春来 编著

《煤炭间接液化》 孙启文 编著

《煤基合成化学品》 应卫勇 编著

《煤基多联产系统技术及工艺过程分析》 李文英 冯杰 谢克昌 编著

《煤基醇醚燃料》 李忠 谢克昌 编著

《煤化工过程中的污染与控制》 高晋生 鲁军 王杰 编著

《煤化工设计基础》 张庆庚 李凡 李好管 编著

总序

2008年,中国的煤炭产量高达27.93亿吨,是1978年6.18亿吨的4.52倍,占2008年世界煤产量的42%,而增量占世界的80%以上。

多年来,在中国的能源消费结构中,煤约占70%,另外两种化石能源石油和天然气分别约占20%和3.5%;中国的电力结构中,燃煤发电一直占主导地位,比例约为77%;中国的化工原料结构中,煤炭占一半以上。中国煤炭工业协会预计到2010年全国煤炭需求量在30亿吨以上,而中国科学院和中国工程院通过战略研究预计,到2050年,煤在中国的能源消费结构比例中仍将高居首位,占40%以上,这一比例对应的煤量为37.8亿吨,比2010年的需求量多26%。由此可见,无论是比例还是数量,在较长的时期内以煤为主的能源结构和化工原料结构很难改变。

事实上,根据2008年BP公司的报告,在化石能源中,无论是中国还是世界,煤的储采比(中国45,世界133)都是石油的2倍左右。因此,尽管煤在世界的能源消费结构中仅占28%,低于石油的36%,但“煤炭在未来50年将继续是世界的主要能源之一”(英国皇家学会主席Martin Rees,路透社2008年6月10日);“越来越多的化学制品公司正在将煤作为主要原料”(美国《化工新闻》高级编辑A. H. Tullo, 2008年3月17日)。

但是,由于煤的高碳性和目前利用技术的落后,煤在作为主要能源和化工原料的同时也是环境的主要污染源。据中国工程院的资料,2006年,我国排放的 SO_2 和 NO_x 的总量达4000万吨以上,源于燃煤的比例分别为85%和60%,燃煤排放的 CO_2 和烟尘也分别占到总排放量的85%和70%。至于以煤为原料的焦炭、电石等传统煤化工生产过程,除对大气污染外,其废水、废渣对环境的影响也十分严重。据荷兰环境署统计,2006年中国的 CO_2 排放量为6.2Gt,而2007年又增加了8%。虽然我国的人均 CO_2 排放量远低于美国等发达国家,但由于化石能源的碳强度系数高[据日本能源统计年鉴,按吨(煤)计算:煤排放2.66t CO_2 ,石油排放2.02t CO_2 ,天然气排放1.47t CO_2]和我国较长时期仍以化石能源为主(中国科学院数据,到2050年,化石能源在中国能源结构中占70%,其中煤40%、石油20%、天然气10%),和其他污染物一样, CO_2 的排放与治理也必须高度重视并采取有效措施。

煤炭的上述地位和影响,对世界,特别是对中国,无疑是一种两难选择。可喜的是,“发展煤化工,开发和推广洁净煤技术是解决两难的现实选择”已成为人们的共识并取得重要进展。遗憾的是,在石油价格一度不断飙升的情况下,由于缺乏政策引导、科学规划,煤化工出现了不顾原料资源、市场需求、技术优劣等客观条

件盲目发展的势头。为此，笔者将 20 余年来对煤化工科学发展积累的知识、实践、认识和理解编撰成《煤化工发展与规划》一书，于 2005 年 9 月由化学工业出版社出版发行。与此同时，作为我国化学化工类图书出版之“旗舰”和科技图书出版之“先锋”的化学工业出版社，在原化工部副部长谭竹洲、李勇武的指导下，极具战略眼光，决定在全国范围内组织编写《现代煤化工技术丛书》（以下简称《丛书》），出版社诚邀笔者担任该《丛书》主编，成立了由笔者和李勇武会长（中国石油和化学工业联合会）为主任的编委会，并于 2006 年 4 月 18 日在太原召开《丛书》第一次编写会议。就在编委会紧锣密鼓地组织、协调、推荐作者，确定内容、审定大纲的不到两年间，国内的煤化工又有了强势的发展和规划。据有关方面的粗略统计，2007 年全国煤制甲醇生产、在建、计划产能总计达 6000 万吨，2008 年实际产量 1126.3 万吨；2008 年二甲醚产能约 410 万吨，实际产量 200 万吨；直接和间接液化法“煤制油”的在建和计划产能也超过千万吨；技术尚未成熟的煤制低碳烯烃、醇、醚等化工原料在建和计划项目也此起彼伏，层出不穷。煤化工这种强势的发展与规划不仅面临着市场需求和技术成熟度的有力挑战，而且还受到原料煤、水资源、环境容量等条件很大限制，其中尤以水资源为甚。美国淡水研究权威、太平洋研究所所长称：“当水资源受到限制和污染，或者经济活动不受限制而且缺乏恰当的管理时，严重的社会问题就可能发生。而在中国，这些因素的积聚将产生更为严重、复杂的水资源挑战。”按现行技术，煤制甲醇、二甲醚、油（间接液化）的单位产品水耗（t/t）分别为 15、22、16。虽然，大量的温室气体排放来源于化石能源无节制的使用，特别是燃煤发电和工业锅炉，但目前的煤化工产品生产工艺过程排放的温室气体也不容忽视，英国《卫报》网站说“用煤生产液体燃料的过程所产生的温室气体是常规石油燃料的两倍以上”。至于传统的煤化工产品生产技术，还对原料煤有苛刻的要求，如固定床造气需要无烟块煤或焦炭，而焦化和电石生产的原料煤是焦煤和肥煤，但这些优质煤种的保有储量仅占煤炭资源保有总量的 16.9%（无烟煤）和 3.7%（焦煤和肥煤）。

针对上述情况，2009 年 2 月 19 日，国务院提出“停止审批单纯扩大产能的焦炭、电石等煤化工项目，坚决遏制煤化工盲目发展的势头”，并要求石化产业的调整振兴必须“技术创新、产业升级、节能减排”。这使得煤化工的发展必须要以提高能效、减少能耗、降低排放为目标进行科学规划、优化选择、合理布局。但是，由于成煤物质和成煤年代等差异所导致的煤的复杂性和煤化学工程的学科特性，煤化工具有基础研究学科交叉、工程开发技术复杂、规模生产投资巨大的显著特点。这些特点对以煤气化为基础，以一碳化学为主线，以优化集成为途径，生产各种替代燃料和化工产品的现代煤化工尤其突出。要做到煤化工产业的科学规划、健康发展就必须全面了解、充分把握这些特点。

应运而生的《现代煤化工技术丛书》正是为满足这一需求，力求通过分册组成合理、学术实用并举、集成精粹结合、内容形式统一的编撰，体现现代煤化工的特点；希冀通过对新技术、新工艺、新产品的研究、开发、应用的指导作用，促进煤

化工产业的技术进步；期望通过提供基础性、战略性、前瞻性的原理数据、可靠信息、科学思路推进煤化工产业的健康发展。为此，在选择《丛书》编撰者时，优先考虑的是理论基础扎实、学术思想活跃、资料掌握充分、实践经验丰富的分领域技术领军人或精英。在要求《丛书》分册编写时，突出体现“新、特、深、精”。新，是指四新，即新思路、新结构、新内容和新文献；特，是有特色，即写法和内容都要有特色，与同类著作相比，特色明显；深，是说深度，即基础论述要深，阐述规律要准；精，是要成为精品，即《丛书》不成“传世”之作，也要成业界人士的“案头”之作。

根据上述指导思想和编写原则，《丛书》由以下分册组成。

1. 《煤化工概论》(谢克昌、赵炜编著)：以煤的转化反应为主线，以煤的转化技术分章节，阐述煤化工的基本原理，提供煤化工的总体轮廓。

2. 《煤炭气化技术》(于遵宏、王辅臣等编著)：在工艺过程分析、气化过程原理论述的基础上，比较各种气化过程的优劣，给出自主创新的煤炭气化实例。

3. 《气体净化分离技术》(上官炬、常丽萍、苗茂谦编著)：以气化煤气净化与分离的科学和技术问题为基础，比较各种净化工艺与技术，以解决现存问题，提供最佳技术选择。

4. 《煤的等离子体转化》(吕永康、庞先勇、谢克昌编著)：作为煤的非常规转化的重要组成，以多年的实验工作为基础，介绍等离子体应用于煤转化的主要技术。

5. 《煤的热解、炼焦和煤焦油加工》(高晋生主编)：以煤的热解为主线，将热解、炼焦和煤焦油加工有机结合，通过新技术的阐述，推动传统煤化工的革新。

6. 《煤炭直接液化》(吴春来编著)：以扎实的理论知识和丰富的实践经验为基础，提出直接液化用煤、生产工艺的优选原则，实现理论性和应用性的并重。

7. 《煤炭间接液化》(孙启文编著)：在介绍费托合成反应基础理论、技术发展的基础上，重点对核心问题——催化剂和反应器的研发做详细阐述。

8. 《煤基合成化学品》(应卫勇编著)：开发煤基合成化学品的新产品、新技术是现代煤化工的重要组成。面向企业，以阐述煤基化学品的生产技术、工艺和应用为主。

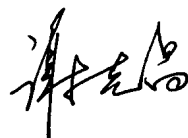
9. 《煤基多联产系统技术及工艺过程分析》(李文英、冯杰、谢克昌编著)：以煤气化为基础的多联产是公认的煤洁净高效利用的主要技术途径，通过非多联产和多联产过程的分析给出多联产的创新优化实例。

10. 《煤基醇醚燃料》(李忠、谢克昌编著)：作为重要的车用替代燃料，结合国内外的实践，重点介绍甲醇、二甲醚和乙醇燃料的性质、制备和应用。

11. 《煤化工过程中的污染与控制》(高晋生、鲁军、王杰编著)：在客观分析煤化工过程对环境污染的基础上，通过该过程中有害元素的迁移与控制论述，介绍主要污染物的净化、减排和利用技术。

12. 《煤化工设计基础》(张庆庚、李凡、李好管编著): 煤化工新技术、新工艺的产业化离不开整体考虑和合理设计, 而设计基础来源于全面的知识和成功的实践。

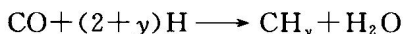
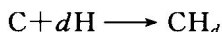
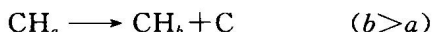
由以上《丛书》各分册的简介可以看出, 各分册独立成册, 却内涵相连, 各分册既非学术专著, 又非设计手册, 但发挥之作用却不仅在于科研、教学之参考, 更在于应用、实践之指导。鉴于中国石油和化学工业联合会、化学工业出版社对这套《丛书》寄予厚望, 国家新闻出版总署将其列为国家“十一五”重点图书, 身居煤化工“冷热不均”却舍之不得, 仍拼搏奋斗在第一线的诸位作者深感责任重大, 均表示要写成精品之作, 以飨读者。但因分册内容不同, 作者情况有别, 《丛书》难以整体同时问世, 敬请读者原谅。“纵浪大化中, 不喜亦不惧”, 煤化工的发展道路可能有起有伏, 坎坷不平, 但其在中国的地位与作用如同其理论基础和基本原理一样难以撼动, 在通过洁净煤技术, 实现高碳性的煤炭低碳化利用, 并与可再生能源一起, 促进低碳经济发展的进程中, 现代煤化工必将发挥不可替代的作用。诚望这套立意虽高远、内容难全面、力求成经典、水平限心愿的《丛书》能在煤化工界同仁的“不喜亦不惧”中, 成为读者为事业不懈追求的忠实伙伴。



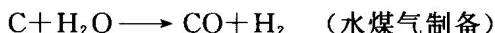
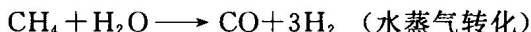
2009年9月9日

前言

无论是包括煤的直接液化、焦化及焦油加工、电石乙炔化工在内的传统煤化工和作为能源利用的煤燃烧,还是以煤气化为龙头,以一碳化学为基础,合成各种替代液体燃料及化工产品的现代煤化工都离不开煤及煤的衍生物与氢气、氧气、水蒸气等物质的化学反应。尽管煤化工以目标产品分类有煤制气体燃料(煤气化、煤制替代天然气)、煤制液体燃料(直接液化、间接液化、甲醇制汽油、通过中低温热解的液体燃料、合成低碳醇等)、煤制甲醇及其衍生化学品(二甲醚、低碳烯烃、丙烯、芳烃、醋酸/醋酐等)、煤制其他产品(合成氨、焦/半焦、电石、氢气、乙二醇等)以及煤转化联产燃料及化学品等有不同的技术路线,但它们的核心仍然是煤的各种化学转化反应。煤化工的实质是碳加工,碳加工的实质是改变含碳原料(主要指化石能源)中的 H/C 比,改变 H/C 比的途径靠以下 4 个反应:



而使煤的转化发生重大改变有可能成为洁净能源和高附加值化学品则是通过下面 4 个吸热反应得以实现:



上述考虑是本书的编撰依据,即以煤的转化反应为主线,以煤的转化技术分章节,阐述煤化工的基本原理,构筑煤化工的总体轮廓。作为此套《现代煤化工技术丛书》的第一分册,作者拟以这一编撰原则体现丛书“新、特、深、精”的特点。

本书共分 10 章。第 1 章是以煤转化为主的能源转化概论。第 2 章介绍与煤的反应和反应性密切相关的煤的物理和化学性质。第 3 章到第 7 章为煤化学转化最主要的一些基础反应及与这些反应相关的技术、工艺和设备,包括煤的热解、煤与氢的反应、煤与氧的反应、煤与氧和水蒸气的反应和煤气的重整与转化。为掌握提高煤转化反应速率和目标产品收率的基本知识,第 8 章专门介绍了煤转化过程中的催化。由于煤中有害元素在煤转化过程中的迁移、变换和释放对环境所造成的污染,对其认识和控制的概况构成了第 9 章的主要内容。一方面由于禀赋特点是能源资源的主要提供者,另一方面因为技术落后又是环境生态的主要污染源,煤炭对中国而言无疑是一种两难选择,“加强煤的清洁高效利用”已越来越成为国人的共识和努

力方向。那么，煤化工，特别是现代煤化工与煤的清洁高效利用是什么关系，能否通过现代煤化工实现煤的低碳化利用，第 10 章从理论和实践上回答了这些问题，也是本分册的一处精华所在。

基于 30 余年在煤化工领域的科研教学、战略咨询积累的知识和实践、认识和理解而编撰的这本《煤化工概论》，希望用较少的文字和图表体现作者的编撰思路，满足读者的殷切需求，但由于煤化工界同仁科研成果的不断涌现，现代煤化工的快速发展，为及时反映这些现状和趋势，尽管有意延缓了付梓成书的时间，拉长了通常写作的周期，但由于水平所限，作者的希望或许仅能停留在一种美好的设想，好在有其他分册的支撑而不致使整套丛书失色。

最后，对给予作者多年关心、支持的同仁，对本分册所参考文献、资料的作者和对本书出版付出努力的编辑表示衷心感谢！

谢克昌

2012. 2 北京

目 录

第 1 章 能源转化概论

1.1 能源的转化和利用	2
1.1.1 能源的分类	2
1.1.2 能源的转换和转换效率	4
1.1.3 化石燃料资源和利用	9
1.1.4 化石能源的生产和消费	13
1.2 煤炭在工业中的应用	15
1.3 煤化工与煤转化利用技术	17
1.3.1 燃烧和发电	17
1.3.2 焦化 (coking)	19
1.3.3 煤的气化 (gasification)	20
1.3.4 煤间接液化	22
1.3.5 煤直接液化	23
1.3.6 煤基—碳化工	23
1.3.7 煤转化利用集成技术	25
1.4 洁净煤技术及其范畴	27
参考文献	28

第 2 章 煤的物理和化学性质

2.1 煤的基本化学特征	31
2.1.1 煤的物理性质	31
2.1.2 元素组成	32
2.1.3 工业分析	35
2.1.4 煤的岩相学特征	39
2.1.5 煤阶	41
2.2 煤种的分类指标	42
2.2.1 自由膨胀序数	42
2.2.2 烟煤黏结指数 $G_{R.L}$ (罗加指数)	43
2.2.3 胶质层厚度	44
2.2.4 奥亚膨胀度	45

2.2.5 透光率·····	45
2.2.6 发热量·····	45
2.3 煤的分类·····	47
2.3.1 硬煤国际分类·····	47
2.3.2 我国煤的分类·····	48
2.4 影响煤转化的特性·····	50
2.4.1 反应活性·····	50
2.4.2 热稳定性·····	51
2.4.3 机械强度·····	52
2.4.4 结渣性·····	53
2.4.5 熔融性和灰黏度·····	53
2.5 煤的特性对转化的适应性·····	54
2.5.1 炼焦用煤·····	55
2.5.2 气化用煤·····	55
2.5.3 炼油用煤·····	55
2.5.4 燃料用煤·····	55
参考文献·····	56

第 3 章 煤的热分解

3.1 煤热解的化学基础·····	57
3.1.1 热解理论·····	58
3.1.2 煤在热解过程中的化学反应·····	59
3.1.3 煤热解动力学·····	61
3.1.4 煤热解产物·····	64
3.2 影响煤热解的因素·····	64
3.2.1 煤化程度的影响·····	64
3.2.2 煤粒径的影响·····	65
3.2.3 传热的影响·····	66
3.3 热解过程中表面结构的变化·····	66
3.4 煤热分解的工业应用：焦炭的生产·····	67
3.4.1 炼焦用煤的性质指标要求·····	67
3.4.2 炼焦过程·····	68
3.4.3 焦化技术的改进和发展方向·····	72
3.4.4 焦化新技术·····	74
3.5 煤焦油的生产和深加工·····	79
3.5.1 煤焦油中蒸馏馏分的分割·····	80
3.5.2 焦油蒸馏工艺·····	80

3.5.3 煤焦油加工发展方向	86
3.6 焦炉煤气的生产与利用	87
3.6.1 焦炉煤气的加工利用	87
3.6.2 焦炉煤气的利用现状	88
3.6.3 焦炉煤气利用途径	88
3.6.4 粗苯精制	91
参考文献	92

第 4 章 煤与氢的反应——加氢过程

4.1 煤与氢的反应	94
4.2 煤加氢过程的化学原理	95
4.2.1 实质	95
4.2.2 加氢的反应条件	96
4.2.3 加氢催化剂	96
4.3 煤直接液化	97
4.3.1 液化的基本原理	97
4.3.2 液化反应过程	98
4.3.3 煤质与煤的液化特性	100
4.3.4 液化过程中溶剂和溶剂的作用	102
4.3.5 催化剂	104
4.3.6 煤炭加氢液化工艺	105
4.4 煤的加氢热解和气化制备高热值煤气	113
4.5 煤化工中的液相气相加氢处理	115
4.5.1 液化油的提质加工	116
4.5.2 煤焦油加氢	117
4.5.3 焦化粗苯加氢	117
参考文献	120

第 5 章 煤与氧气的反应——煤燃烧

5.1 化学基础	121
5.1.1 物料燃烧过程的概述	123
5.1.2 煤燃烧过程的反应和动力学	123
5.2 燃烧方法及其工程应用	126
5.2.1 燃烧过程的主要控制参数	127
5.2.2 燃烧装置的基本性能要求	129
5.3 燃烧方式与设备	130

5.3.1	煤的层状燃烧	131
5.3.2	煤粉燃烧	133
5.3.3	旋风燃烧锅炉	133
5.3.4	流化床燃烧(FBC)	135
5.3.5	几种燃烧设备的优缺点	137
5.3.6	提高煤的燃烧效率的途径	137
5.3.7	工程燃烧研究的重点	138
5.3.8	煤炭燃烧新技术研究	138
5.4	煤燃烧技术发展展望	138
	参考文献	139

第 6 章 煤与氧气和水蒸气的反应——中低热值煤气的生产

6.1	煤气化的化学基础	141
6.1.1	气化反应性	141
6.1.2	煤气化反应性的主要决定因素	141
6.1.3	煤气化反应和反应动力学	144
6.2	煤气化方法概述	146
6.2.1	气化用煤的性质及指标要求	146
6.2.2	气化炉分类	147
6.3	工业气化炉	148
6.3.1	固定床气化炉	148
6.3.2	流化床气化炉	152
6.3.3	气流床煤气化炉	153
6.3.4	煤气化发展的总趋势	155
6.4	煤气化技术的适用性	155
	参考文献	156

第 7 章 煤气的重整与转化

7.1	煤气的化学转化	157
7.1.1	煤气转化主要反应	158
7.1.2	甲烷的重整转化机理	159
7.1.3	水煤气变换机理	161
7.1.4	甲醇合成机理	162
7.1.5	费托合成机理	162
7.2	煤气中的甲烷重整转化	163
7.2.1	传统的甲烷重整转化技术	164

7.2.2 煤化工中的甲烷转化新技术	166
7.3 煤间接液化工艺中的合成气转化	170
7.3.1 合成催化剂	170
7.3.2 合成反应器	170
7.4 煤气化制甲醇合成工艺中的合成气转化	171
7.4.1 生产方法	171
7.4.2 反应器	174
7.5 煤气的甲烷化	175
7.5.1 甲烷化技术的发展概况	175
7.5.2 甲烷化工艺步骤和技术方案	176
7.5.3 甲烷化反应器	178
7.6 一氧化碳变换制氢	178
7.6.1 CO 变换催化剂	179
7.6.2 CO 中温和低温变换流程	179
参考文献	180

第 8 章 煤转化过程中的催化

8.1 煤转化中的催化	183
8.2 煤燃烧中的催化	184
8.2.1 煤粉燃烧中的催化原理	184
8.2.2 燃烧用催化剂的活性组分	185
8.3 煤气化中的催化	186
8.3.1 煤气化中的催化原理	186
8.3.2 气化催化剂的有效组分	188
8.4 煤直接液化中的催化	188
8.4.1 煤直接液化催化原理	188
8.4.2 煤直接液化催化剂	189
8.5 焦油的液相加氢提质	189
8.5.1 催化原理及反应性	190
8.5.2 催化剂	192
8.6 一氧化碳化学中的催化	192
8.6.1 一氧化碳加氢：烃类、甲醇、低碳醇等的合成	193
8.6.2 一氧化碳催化中的金属氧化物催化	195
8.6.3 甲烷重整	195
8.7 煤转化过程中催化的共性问题	199
8.7.1 催化活性组分	199
8.7.2 非均相催化过程中的传质和扩散	199

8.7.3 煤化工对催化剂的要求	200
参考文献	201

第 9 章 煤转化过程中的环境和资源问题

9.1 煤化工过程的污染	203
9.1.1 主要污染物及其在生产过程中的来源	203
9.1.2 粉尘和烟尘污染及其控制	204
9.1.3 硫氧化物	206
9.1.4 氮氧化物	212
9.1.5 多环有机物 (POM)	213
9.1.6 微量元素	214
9.2 煤炭资源的洁净、综合利用	214
9.2.1 煤炭分选	214
9.2.2 选煤方法	215
9.2.3 高硫煤的利用途径	216
9.2.4 煤层气和矿坑抽排气资源利用	217
9.2.5 煤矸石的开发利用	218
参考文献	219

第 10 章 现代煤化工与煤的清洁高效利用

10.1 化石能源与煤	220
10.2 高碳能源的低碳化	221
10.3 煤的清洁高效利用技术	222
10.3.1 煤的安全、高效、绿色开采	222
10.3.2 煤的提质与输配技术	223
10.3.3 煤利用中的污染控制和净化技术	224
10.3.4 新型清洁煤燃烧技术	225
10.3.5 先进的燃煤发电	225
10.3.6 先进输电	226
10.3.7 煤洁净高效转化	226
10.3.8 煤基多联产	227
10.3.9 煤利用过程中的节能	228
10.4 煤化工与煤的清洁高效利用	229
参考文献	234