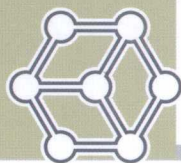


“十一五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤炭气化技术

于遵宏 王辅臣 等编著

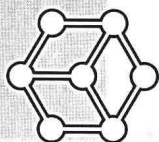
MEITAN QIHUA JISHU



化学工业出版社

本书出版得到国家973计划项目
“煤等含碳固体原料大规模高效清洁气化的基础研究”
(2010 CB 227000)的资助

“十一五”国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤炭气化技术

于遵宏 王辅臣 等编著

MEITAN QIHUA JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是现代煤化工技术丛书之一。本书立足于国内外煤气化的最新研究进展,涉及煤气化过程涉及的各项内容,既有工艺分析,又有理论研究。全书共分为10章,分别是煤气化过程分析、煤气化过程的物理化学基础、炉内射流与湍流多相流动、湍流混合及其对复杂气化反应的影响、煤的成浆特性及煤浆制备、煤气化过程中的原料输送、气化炉内熔渣流动与沉积、气流床气化过程放大与集成、煤与气态烃和生物质的共同气化、气化炉及气化系统模拟。

本书适用于从事煤转化和煤化工科研、设计生产的工程技术人员,也可供部分大专院校相关专业的师生作为专业用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤炭气化技术/于遵宏,王辅臣等编著. —北京:化学工业出版社,2010.7
(现代煤化工技术丛书)
ISBN 978-7-122-08836-9

I. 煤… II. ①于…②王… III. 煤气化 IV. TQ54

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第111798号

责任编辑:路金辉 靳星瑞

文字编辑:李 玥

责任校对:陈 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

720mm×1000mm 1/16 印张28 $\frac{3}{4}$ 字数587千字 2010年11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: 88.00 元

版权所有 违者必究

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SO₂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CO₂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CO₂排放量为6.2Gt，而2007年又增加了8%。虽然我国的人均CO₂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 CO₂，石油排放2.02t CO₂，天然气排放1.47t CO₂）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，CO₂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。”按现有技术，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的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》(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. 《煤基炭素功能材料》(邱介山编著)：在提炼炭素材料基本理论和保持技术前沿性的前提下，介绍已经工业化的技术，推荐有应用前景的新技术。

5. 《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。

6. 《煤的溶剂萃取与应用》(魏贤勇、宋志敏编著)：从分子水平上认识煤及其衍生物中有机质组成结构，突破传统煤化工的囿限，提供实现煤在温和条件下定向转化的途径。

7. 《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。

8. 《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。

9. 《煤炭间接液化》(李永旺编著)：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。

10. 《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。

11. 《煤炭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。

12. 《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。

13. 《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。

14. 《煤化工设计基础》（李凡、李大尚、张庆庚编著）：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。

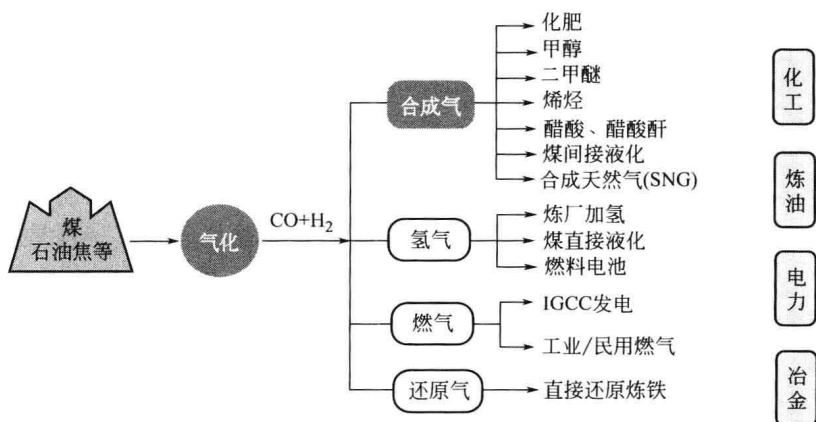
由以上《丛书》各分册的简介可以看出，各分册独立成册，却内涵相连，各分册既非学术专著，又非设计手册，但发挥之作用却不仅在于科研、教学之参考，更在于应用、实践之指导。鉴于中国石油和化学工业联合会、化学工业出版社对这套《丛书》寄予厚望，国家新闻出版总署将其列为国家“十一五”重点图书，身居煤化工“冷热不均”却舍之不得，仍拼搏奋斗在第一线的诸位作者深感责任重大，均表示要写成精品之作，以飨读者。但因分册内容不同，作者情况有别，《丛书》难以整体同时问世，敬请读者原谅。“纵浪大化中，不喜亦不惧”，煤化工的发展道路可能有起有伏，坎坷不平，但其在中国的地位与作用如同其理论基础和基本原理一样难以撼动，在通过洁净煤技术，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

煤气化是煤炭清洁高效利用的核心技术，是发展煤基大宗化学品和液体燃料合成、先进的整体煤气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）发电系统、多联产系统、制氢、燃料电池、直接还原炼铁等过程工业的基础，是这些行业发展的关键技术、核心技术和龙头技术。发展以煤气化为核心的多联产技术成为各国高效清洁利用煤炭的热点技术和重要发展方向，如下所示。



煤气化的过程实质是将难以加工处理、难以脱除无用组分的固体煤，转化为易于净化、易于应用的气体的过程，简言之，是将煤中的 C、H 转化为清洁燃料气或合成气（ $\text{CO}+\text{H}_2$ ）的过程。与煤的直接燃烧相比，气化是对煤中所蕴含的化学能的梯级利用，或者说直接燃烧以热量利用为主，产生的污染物比较多，而气化以生产合成气（ $\text{CO}+\text{H}_2$ ）为主，可充分利用煤中的有效 C、H 元素，产生的污染物比较容易脱除，例如可通过后续成熟技术将硫转化为产品硫黄。

自 19 世纪中叶德国 Siemens 兄弟最早开发煤气发生炉至今，已有 150 余年的历史，形成了固定（移动）床、流化床和气流床三种技术流派。150 多年来，煤气化技术在不断发展和完善，期间有 3 个具有里程碑意义的事件。一是在 1921 年 Winkler 发现流态化现象，开发了流化床气化反应器，即 Winkler 炉。这一技术原理的应用，引起了固体物料加工工艺的革命，不仅在煤气化和煤燃烧领域成功应用，而且在其他工业领域得到了广泛使用。二是 1947 年 K-T 粉煤气化技术的工业化，成为后来 Shell、Prenflo 粉煤加压气化技术发展的源头。三是 20 世纪 70 年代 Texaco 水煤浆加压气化技术的工业化，大大推进了大型煤气化技术的发展。随着人们对煤化工重要性的重新认识，也随着煤化工和石油化工在技术上的融合、产品上的互补，作为龙头的煤气化技术展现了广阔的市场需求，煤气化技术的研究和开发一直是煤科学领域研究的热点。

国内煤气化技术的研究和开发始于 20 世纪 50 年代。20 世纪 70 年代曾以 K-

T炉为基础，在新疆芦草沟和山东黄县开展两次粉煤气化的工业试验，均以失败告终，但也为后来者积累了丰富的经验。从“六五”计划开始，国家对煤气化技术研究开发的支持力度不断增加，于遵宏先生及其团队有幸得到国家和相关部门的支持，20多年一直从事气流床煤气化及相关领域的应用基础研究和工程化研究，开发了具有自主知识产权的多喷嘴对置式煤气化技术，得到了国内外同行和工业界的认可，已应用到10余家企业，运行和在建的气化炉40余台。编写一本煤气化方面的专著，既是国内同行对我们的期望，也是于遵宏先生生前的愿望。

于遵宏先生生前极为关注本书的编写，对大纲进行了审定，具体安排了编写计划，始终对编写工作给予指导和关心，弥留之际，仍在牵挂编写的进展。先生忘我的工作精神，执着的事业追求，对全体参编者既是鞭策，也是鼓励。谨以此书作为对先生的纪念。

华东理工大学洁净煤技术研究所的龚欣教授、于广锁教授、刘海峰教授、王亦飞教授对全书的编写提出了宝贵的意见，给予了全力支持。本书的内容主要取材于编者所在团队的科研成果和国内外其他学者发表的文献，其特点是既反映了煤气化技术领域国内外的最新进展，也包含了编者所在团队20余年在煤气化领域学术研究的积累，许多重要内容为同类专著中首次报道。

全书共分10章，在分析不同煤气化技术特点和共性的基础上，以大型煤气化技术涉及的基础理论和关键技术为主线。

第1章对煤气化过程进行了分析，比较了不同煤气化技术的共性及特殊性，简述了煤气化技术的发展方向。

第2章讨论了煤的结构及其对气化过程的影响，对煤气化过程的动力学进行了综述，通过热力学平衡计算讨论了工艺条件对气流床气化过程的影响。

第3章主要内容包括“射流-同轴受限射流-撞击流”的基本原理与计算方法，重点探讨了炉内射流与湍流多相流动的流体力学特征。

第4章讨论了湍流混合基本概念、原理及其对气化过程的影响，包括湍流混合、炉内停留时间分布特征、雾化和弥散机理等。

第5章讨论了水煤浆的成浆特性及其因素，介绍了水煤浆制备工艺和输送设备。

第6章重点介绍水煤浆原料的稳定输送与控制，探讨水煤浆管内流动规律、滑移流动现象的产生机理及其对流动特性的影响，以及粉煤密相输送过程的基本流型、规律以及粉煤物性与流动性参数之间的关系。

第7章主要介绍灰渣的熔融特性及其影响因素，探讨了熔渣在气流床气化炉水冷壁上的沉积特性。

第8章分别对水煤浆气化和煤粉加压气化过程进行分析，讨论气化炉工程放大准则和过程集成。该章还讨论了出气化炉高温合成气的热量回收与初步净化过程。

第9章分别讨论了煤与焦炉气、煤层气和天然气的共同气化，并对煤与生物质的共气化作简要介绍。

第10章着重讨论不同气化炉和气化系统的模拟方法。

本书第1章，第2章2.1、2.3节，第4章4.1、4.2、4.5节，第5章5.1、5.2节，第6章6.1节，第8章8.1~8.3节，第9章9.1~9.4节由王辅臣编写；第2章2.2节由周志杰编写；第3章和第4章4.4节由李伟锋编写；第4章4.3节由刘海峰编写；第5章5.3、5.4节，第8章8.6节由于广锁编写；第6章6.2节由郭晓镭和龚欣编写；第7章由梁钦锋编写；第8章8.4节由王亦飞编写；第8章8.5节，第9章9.5节由陈雪莉编写；第10章由代正华编写。全书由王辅臣统稿。王兴军帮助编者对书稿进行了校对，许建良和郭庆华整理了部分资料。

本书许多内容是编者所在团队20余年学术研究的结晶，这些研究得到了国家973计划、863计划、国家自然科学基金、国家攻关（支撑）计划、教育部“长江学者与创新团队发展计划”、教育部重大项目、教育部新世纪优秀人才资助计划、中国石化科技项目、上海市科委科技项目、上海市优秀学科带头人资助计划、上海市科技启明星计划、上海市曙光计划等科技和人才计划持续不断的支持。也一直得到中国石化集团公司、兖矿集团有限公司等大型企业的支持。正是这些支持，才使团队的研究思路、研究目标得以实现，在本书付梓之际，对上述单位给予的各种支持表示衷心的感谢。

国内许多专家、学者对编者所在团队的研究工作一直给予指导和支持，他们无私的帮助，促进了具有自主知识产权的煤气化技术顺利开花结果，也促进了编者所在团队的继续成长和发展。在此对他们表示衷心的感谢。

洁净煤技术研究所毕业的历届研究生和在读的研究生的论文研究工作，作为团队的研究成果被收入本书。本书编写期间，许多研究生做了大量收集文献、整理数据、绘制图表的工作，一并向他们表示谢意。

煤气化技术在快速发展，相关的科学研究工作也在不断深入。本书以气流床气化技术为主线，难免挂一漏万。也许今天由于某种因素无法实现产业化和大规模应用的气化技术，若干年后，随着科学的发展和学科的交叉融合，理论会有新的进展，原有的技术瓶颈也会被突破，现在冷门的技术，今后也许会焕发出勃勃生机。

限于编者水平，欠妥之处难免，敬请读者批评指正。

编者

2010年1月于华东理工大学

目 录

第 1 章 煤气化过程分析

1.1 煤气化工艺过程分析	1
1.1.1 推论分析与合成	1
1.1.2 功能分析	2
1.1.3 形态分析	5
1.1.4 煤炭气化过程的共性	6
1.1.5 气化与燃烧的比较	9
1.2 固定(移动)床气化工艺	10
1.2.1 固定(移动)床气化过程的工艺特点	10
1.2.2 UGI 气化工艺	11
1.2.3 Lurgi 气化工艺	12
1.2.4 BGL 气化工艺	14
1.3 流化床气化工艺	16
1.3.1 流化床气化过程的工艺特点	16
1.3.2 Winkler 气化工艺	17
1.3.3 高温 Winkler (HTW) 气化工艺	18
1.3.4 循环流化床 (CFB) 气化工艺	18
1.3.5 KBR 运输床气化工艺	20
1.3.6 灰熔聚气化工艺	21
1.4 气流床气化工艺	26
1.4.1 气流床气化过程的工艺特点	26
1.4.2 气流床气化过程层次机理模型	26
1.4.3 K-T 气化工艺	28
1.4.4 Texaco 气化工艺	28
1.4.5 E-Gas 气化工艺	30
1.4.6 GSP 气化工艺	30
1.4.7 Shell 气化工艺	32
1.4.8 Prenflo 气化工艺	34
1.4.9 Eagle (日立) 气化炉	36
1.4.10 CCP 空气气化炉	37
1.4.11 TPRI 两段干煤粉气化炉	37
1.4.12 两段分级给氧化技术	38
1.4.13 新型多喷嘴对置气化工艺	38
1.5 气化工艺的评价指标	42

1.5.1	碳转化率	43
1.5.2	冷煤气效率	43
1.5.3	合成气产出率	43
1.6	各种煤气化工艺的比较与选择	45
1.6.1	煤种适应性	46
1.6.2	合成气的处理	46
1.6.3	原料消耗	47
1.6.4	生产强度	47
1.6.5	煤气化技术选择的基本原则	47
1.7	煤气化技术的发展趋势	49
1.7.1	煤气化技术发展面临的主要问题	49
1.7.2	大型化的技术途径	49
1.7.3	高温煤气显热回收的技术途径	50
1.7.4	提高煤种适应性的技术途径	50
1.7.5	其他煤气化技术	51
	参考文献	51

第2章 煤气化过程的物理化学基础

2.1	煤的结构特性及其对气化过程的影响	54
2.1.1	煤的结构特性	54
2.1.2	煤的结构特性对气化过程的影响	60
2.2	煤气化过程动力学	62
2.2.1	煤的热解	62
2.2.2	煤气化过程中的燃烧反应	67
2.2.3	煤焦的气化反应	70
2.3	煤气化过程的热力学平衡模型	76
2.3.1	煤气化过程的独立反应的确定	76
2.3.2	气化过程的热力学平衡	79
2.3.3	热力学平衡模型的基本方程	83
2.4	气化过程的平衡计算与讨论	87
2.4.1	平衡计算结果与实际值的比较	87
2.4.2	平衡条件下工艺条件对水煤浆气化过程的影响	88
2.4.3	平衡条件下工艺条件对干煤粉气化过程的影响	93
2.4.4	气化过程中工艺条件的选择	97
	参考文献	98

第3章 炉内射流与湍流多相流动

3.1	自由射流	102
3.1.1	卷吸机理	103
3.1.2	自由射流的发展	104

3.1.3	湍流自由射流计算	105
3.2	复杂射流	108
3.2.1	同轴射流	108
3.2.2	受限射流	109
3.2.3	撞击流	112
3.3	多相湍流	115
3.3.1	多相流的基本概念	115
3.3.2	多相湍流动力学特征	116
3.3.3	多相湍流的实验研究进展	119
3.4	气化炉内多相湍流射流研究	121
3.4.1	炉内湍流流动数值模拟方法	121
3.4.2	单喷嘴受限多相射流的实验研究与数值模拟	126
3.4.3	多喷嘴对置式气化炉流场实验研究和数值模拟	129
3.4.4	Shell 气化炉流场	131
3.5	流化床气化炉内的流体流动	137
3.5.1	流化床的基本概念	138
3.5.2	流化床简化模型	139
3.5.3	流化床反应器设计的重要参数	140
3.5.4	流化床中的传质传热	142
	参考文献	144

第 4 章 湍流混合及其对复杂气化反应的影响

4.1	湍流与混合	147
4.1.1	混合机理	147
4.1.2	混合特性	148
4.1.3	湍流、混合与化学反应	151
4.2	宏观混合与微观混合	151
4.2.1	宏观混合与微观混合的相互作用	151
4.2.2	停留时间分布	152
4.2.3	浓度分布	168
4.3	高黏度液体的雾化	173
4.3.1	液体雾化的概念	173
4.3.2	雾化过程的破裂模型	180
4.3.3	雾化性能表征	183
4.4	湍流弥散	186
4.4.1	颗粒弥散基本方程	186
4.4.2	颗粒弥散过程研究与模拟	187
4.4.3	稠密气固两相同轴射流颗粒弥散特性	188
4.4.4	混合对气流床气化过程的影响	192

参考文献	197
------------	-----

第5章 煤的成浆特性及煤浆制备

5.1 概况	202
5.1.1 水煤浆的基本特性	202
5.1.2 水煤浆制备的技术基础	203
5.1.3 水煤浆的应用	204
5.2 水煤浆的成浆性及其影响因素	205
5.2.1 煤质对成浆性的影响	205
5.2.2 煤的成浆浓度经验公式	209
5.2.3 煤粉粒度分布对成浆性的影响	209
5.2.4 添加剂对成浆性的影响	216
5.3 水煤浆添加剂	216
5.3.1 分散剂及其作用机理	216
5.3.2 稳定剂及其作用机理	222
5.3.3 其他辅助剂	224
5.4 水煤浆制备工艺	225
5.4.1 制浆工艺的分类及基本过程	225
5.4.2 典型制浆工艺	226
5.4.3 制浆主要设备	230
参考文献	236

第6章 煤气化过程中的原料输送

6.1 煤浆的高压输送	239
6.1.1 水煤浆的流变特性	239
6.1.2 水煤浆输送过程	245
6.2 粉煤密相气力输送	254
6.2.1 气力输送概述	254
6.2.2 气力输送的流型与相图	256
6.2.3 粉煤气力输送的管道压降	263
6.2.4 粉煤气力输送装置的操作特性	272
6.2.5 粉煤湿含量对气力输送的影响	274
6.2.6 粉煤流动特性参数	276
参考文献	278

第7章 气化炉内熔渣流动与沉积

7.1 灰渣的熔融特性及其影响因素	283
7.1.1 灰渣熔融性	283
7.1.2 灰渣成分对灰熔点的影响	284
7.1.3 灰熔点的预测	286

7.1.4	气氛对灰熔融特性的影响	287
7.2	灰渣黏温特性及其影响因素	288
7.2.1	灰渣黏度的主要特性	288
7.2.2	几种阳离子对灰渣黏温特性影响	289
7.2.3	气氛对黏温特性的影响	291
7.2.4	黏度模型	292
7.3	煤灰在炉内的沉积和结渣过程	293
7.3.1	表面结渣过程	293
7.3.2	影响熔渣沉积的各种因素	294
7.3.3	熔渣的类型	295
7.3.4	灰渣的沉积与传热模型	295
7.4	气流床气化炉内熔渣沉积特点	297
7.4.1	渣层结构及内部温度分布	297
7.4.2	熔渣流动厚度变化模型	298
7.4.3	气流床气化炉内熔渣分布模型	298
7.5	用石蜡为模拟介质时气流床内沉积的实验研究	300
7.6	中试装置试验研究	301
	参考文献	302

第 8 章 气流床气化过程放大与集成

8.1	气流床煤气化过程的基本特征	305
8.1.1	气化过程的基本特征	305
8.1.2	气化火焰	306
8.1.3	气流床气化炉放大基本准则	310
8.2	水煤浆气化过程	313
8.2.1	水煤浆喷嘴	313
8.2.2	气化炉内的流动与反应特征	314
8.3	粉煤气化过程	318
8.3.1	粉煤气化烧嘴	318
8.3.2	GSP 气化炉流场特征	319
8.3.3	Shell 气化炉流场特征	320
8.3.4	Shell 粉煤气化炉内化学反应特征	321
8.4	高温合成气热量回收	322
8.4.1	废热锅炉	322
8.4.2	合成气激冷	325
8.5	合成气初步净化	334
8.5.1	合成气初步净化的基本工艺	334
8.5.2	新型旋风分离器流体特性与分离效率	335
8.6	多喷嘴对置式水煤浆气化技术的系统集成	339

8.6.1	备煤制浆与泵送	339
8.6.2	气流床气化炉及煤气冷却洗涤	339
8.6.3	合成气初步净化	340
8.6.4	黑水热量回收与水处理	340
参考文献		341

第9章 煤与气态烃和生物质的共同气化

9.1	煤与气态烃共气化的基本原理	345
9.1.1	CH ₄ 转化反应	345
9.1.2	煤与 CH ₄ 共气化的机理	346
9.2	固定床与流化床中煤与天然气的共气化	349
9.2.1	固定床中煤与天然气的共气化	349
9.2.2	流化床中煤与天然气的共气化	351
9.3	气流床中煤与天然气的共气化	352
9.3.1	天然气蒸汽转化工艺	352
9.3.2	天然气催化部分氧化工艺	353
9.3.3	天然气非催化部分氧化工艺	355
9.3.4	气流床中煤与天然气的共气化	363
9.4	煤与焦炉气的共气化	364
9.4.1	焦炉气的转化方法	364
9.4.2	非催化与催化部分氧化工艺比较	371
9.4.3	气流床中焦炉气与煤的共气化	372
9.5	煤与生物质共气化	373
参考文献		376

第10章 气化炉及气化系统模拟

10.1	固定床(移动床)气化炉模拟	379
10.1.1	固定床气化炉内流动及反应过程描述	379
10.1.2	固定床气化炉的数学模型	382
10.1.3	Lurgi 气化炉的一维模拟	384
10.2	流化床气化炉模拟	389
10.2.1	流化床内流动反应过程基本描述	389
10.2.2	流化床内气固两相流动模拟理论	389
10.2.3	流化床煤气化过程模型	390
10.2.4	流化床煤气化过程数值模拟	392
10.3	气流床气化炉模拟	396
10.3.1	气流床气化炉数学模型	396
10.3.2	水煤浆气化炉混合模型模拟	401
10.3.3	气流床煤气化炉数值模拟	403
10.4	气流床气化系统过程模拟	421

10.4.1	过程系统的稳态模拟技术	421
10.4.2	气流床煤气化系统描述	422
10.4.3	气流床煤气化系统模型	423
10.4.4	多喷嘴对置水煤浆气化工工艺模拟	425
10.4.5	气流床煤气化制备氢气的能耗分析	427
10.4.6	以气流床粉煤气化为基础的直接还原炼铁过程模拟	432
参考文献		437