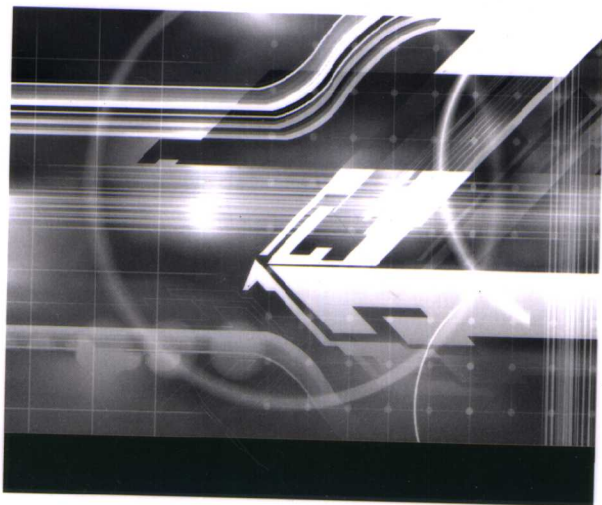


煤清洁转化新技术丛书

大规模煤气化技术

许世森 张东亮 任永强 编著



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

中国煤化工技术丛书

大规模煤气化技术

陈晋强 陈其南 陈其南 编著



Chemical Industry Press

中国石化出版社
CHINA PETROLEUM & CHEMICAL PRESS

煤清洁转化新技术丛书

大规模煤气化技术

许世森 张东亮 任永强 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

大规模煤气化技术/许世森, 张东亮, 任永强编著.
北京: 化学工业出版社, 2006
(煤清洁转化新技术丛书)
ISBN 7-5025-7945-1

I. 大… II. ①许…②张…③任… III. 煤气化-
新技术-研究 IV. TQ54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 140569 号

煤清洁转化新技术丛书

大规模煤气化技术

许世森 张东亮 任永强 编著

责任编辑: 辛 田

文字编辑: 向 东

责任校对: 顾淑云

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市海波装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 12½ 字数 330 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7945-1

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

我国是以煤炭为主要一次能源的国家，煤炭的转化利用是国家经济发展的重要支柱。而我国目前的煤炭转化过程普遍存在效率低、污染严重等问题，要实现全面、协调、可持续发展，必须大幅度提高煤炭转化的效率、并大幅度降低污染物排放，即洁净煤技术。除此之外，我国目前对进口石油的依存度高达40%以上，在国际局势复杂多变的形势下，依靠煤液化技术降低对进口石油的依存度是一条有效的途径。

洁净煤技术的范畴非常广泛，从前处理，过程中处理到后处理都有许多核心技术。其中大规模煤气化技术、煤液化技术、煤气化多联产技术和煤气净化技术是洁净煤技术发展核心技术和研究热点，这些技术的突破将带动化工、电力、煤炭等行业的发展，具有影响全局的作用。

目前这几方面技术的研究、开发和应用得到了世界各国的广泛重视，尤其是美国、日本等发达国家更是投入巨资进行研究开发。我国近几年来也非常重视这几项技术的研究、开发和推广应用，并取得了长足的进步。国家已将这些技术的研发及产业化列为“十五”乃至国家中长期科技发展规划，是未来二十年能源技术领域的主要研究方向。国内化工、电力、煤炭等行业也纷纷进行这些技术的应用、示范。国内已形成了对这些技术的巨大需求，但国内目前系统地介绍这方面技术的书籍较少，包含近几年发展动向内容及最新研究成果的书籍更少。因此，正是在这样一个国内外背景下，化学工业出版社组织编写、出版了“煤清洁转化新技术丛书”。该丛书重点介绍大规模煤气化技术、煤液化技术、煤气化多联产技术和煤气净化技术的基本原理、最新发展及工程应用，力求对读者在学

术探索、工程实践和技术决策方面有所帮助。

本丛书共四分册，包括：

《大规模煤气化技术》主要介绍能够大型化的煤气化技术，重点在干法进料气流床气化和水煤浆进料气流床气化工艺和大型流化床气化炉，介绍其技术原理和工程应用实例，为国内大型煤气化工程提供技术支持，也为广大读者介绍目前主流方向的煤气化技术。

《煤液化技术》主要以介绍直接液化和间接液化技术原理及示范工业装置为重点，突出示范装置和工业装置中的运行情况，并给予分析讨论。

《基于煤气化的多联产技术》主要介绍煤气化与联合循环发电、制液体燃料、制化工原料、 CO_2 脱除、制 H_2 、燃料电池发电等技术的综合系统的工艺原理及应用，该系统能达到综合利用效率高、污染排放少，甚至零排放。

《煤气净化技术》本书较为详细地介绍了煤气常温净化工艺和煤气高温净化技术的原理、现状、应用及发展趋势，使读者能更细致地了解这些技术并指导工程实践。

本丛书由长期从事煤化工领域的专家组织编写，内容具有很强的实用性、先进性。相信本套丛书的出版会对我国从事煤化工及相关领域的科研技术人员起到一定启发及指导帮助作用。

许世森

2005. 1

前 言

我国是一个能源大国，但又是一个人均能源资源占有量低的贫国。我国的人均能源资源占有量为全世界人均水平的 $1/2$ ，仅为美国人均水平的 $1/10$ ，而且一次能源结构中 75% 以上是煤。预计到 21 世纪中叶，甚至到 21 世纪末，我国以煤为主的能源结构将不会改变。煤的高效、清洁利用，是我国经济和社会可持续发展的战略选择，是保证我国能源稳定可靠供应以及可持续发展的重要科技基础。

在相当长的时期内，我国以煤为主的能源结构将难以改变，为了满足未来经济、社会和环境协调发展对能源的需求，煤炭的洁净利用必须以科学的发展观，依靠科技进步，走出一条兼顾高效、环保和经济的新型工业化道路。发展基于煤气化的煤基能源及化工系统是在可预见范围内最有效的技术途径，已成为能源领域科技界和企业界的共识。以煤气化为基础的能源及化工系统不仅能较好地解决煤转化过程中提高效率和降低污染物排放的问题，而且能生产液体燃料和氢等能源产品，对缓解交通能源紧张问题有重要的意义。

以煤气化为基础的能源及化工系统正在成为世界范围内高效、清洁、经济地开发和利用煤炭的热点技术和重要发展方向。煤炭的气化和液化技术、煤气化联合循环发电技术等都已得到工业应用。国内，在国家计划的支持下，通过自主研发和引进国外先进技术，也取得了相当的进展。以煤气化为基础的能源和化工系统的发展，为人们描绘了能源梯级利用、环境污染最小化、成本最低而效率最大化的前景，并预留了减排二氧化碳和通向氢能经济的技术窗口，同时也对煤气化技术提出了更高的要求。

煤气化是以煤基为能源的化工系统中最重要的核心技术和关键

设备，尽管煤气化已有 200 多年的历史，但大型煤气化技术目前仍是能源和化工领域的高新技术。早在 18 世纪末到 19 世纪初，英国已开始使用煤气，在 19 世纪后期出现了直立式干馏炉和水煤气生产工艺，这时煤气的主要用途是燃料气。20 世纪 50 年代之前，煤气化技术有了飞速的发展。而在 50 年代之后，由于石油和天然气产销量不断增长，价格低廉，煤气化技术的发展比较缓慢。70 年代石油危机的出现，工业化国家意识到石油供应的不稳定性，而且石油资源远不及煤炭丰富。为此，西方工业化国家大量投资开发大规模的煤气化新工艺，其中 Texaco、E-Gas、Shell 和 Prenflo 等大型气流床加压煤气化工艺已实现 2000t/d 工业规模的示范，并达到商业化水平。目前，大型煤气化技术被美国、德国和荷兰等少数国家所垄断，其他国家与之相比有一定的差距。

我国于 1885 年 11 月在上海建成了第一座煤制气工厂。新中国建立后，煤气化工业有所发展。20 世纪 80 年代以来，我国的煤气化工业突飞猛进，引进了一批国际上先进的水煤浆煤气化技术，并在煤化工行业得以应用，基本掌握了水煤浆煤气化技术的制造和运行技术。目前，煤化工企业正在引进 10 多套 Shell 干煤粉气化工艺设备。

在国家“八五”、“九五”攻关和“十五”863 等科技计划的支持下，通过国内企业、科研单位和高校的联合攻关，已开发出具有自主知识产权的水煤浆加压气流床气化技术、干煤粉加压气流床气化和灰融聚流化床气化技术。其中多喷嘴水煤浆气化技术已达到 1000t/d 级规模，干煤粉气化技术已进行了 36t/d 规模的中试，灰融聚流化床气化技术达到了百吨级规模，这标志着我国自主的煤气化技术正在逐步缩小与世界先进水平的差距，相信在未来几年内将迈向工业化。

煤气化主要用于以下几方面。

① 生产燃料煤气，通过选用不同的气化方法，可以制得低、中、高 3 种热值煤气，以满足钢铁工业、化学工业、联合循环发电和民用等不同对象的要求。

② 生产合成气，用作合成氨、合成甲醇和甲醚以及合成油的原料气。

③ 生产氢，煤气化制氢将是未来氢能经济的主要技术路线。

与煤燃烧相比，煤气化工艺和设备的设计、制造及运行更复杂，难度更大。本书主要介绍能够大型化的煤气化技术，重点在干法进料气流床气化、水煤浆进料气流床气化和大型流化床气化炉，介绍其技术原理和工程应用实例，为国内大型煤气化工程提供技术支持。

本书的作者作为主要技术骨干和项目负责人，完成了国家“八五”攻关项目“整体煤气化联合循环（IGCC）示范项目技术可行性研究”、国家“九五”攻关项目“IGCC 关键技术”、“十五”863计划重点项目“干煤粉加压气化技术”、国家科技部国际合作重点项目“干煤粉加压气化技术研究开发”、国家电力公司重点项目“干煤粉加压气化评价装置及加压气化特性研究”等科研及工程项目，曾与 Texaco、Shell、Krupp Uhd、Destec 等煤气化供应商进行过合作研究，也与国内的电力和煤化工企业进行过煤气化发电及煤气化制合成气工程的研究，对国内外煤气化技术的发展方向和应用情况比较了解。本书是在上述研究的基础上，结合国内外煤气化技术的实践编著而成的。

为了推动以煤气化为基础的能源、电力和化工系统的应用和发展，能使更多的煤化工和能源工作者熟悉煤气化基本理论和工艺设备，特编著本书，以供读者参考。本书力求内容全面，突出先进性和实用性，可供能源、电力、化工、机械、环保等行业的科研、教学、设计等技术人员使用。

本书共分 9 章。第 1 章、第 2 章介绍煤气化的基础理论及煤的气化性质；第 3 章介绍煤气化工艺的现状与发展趋势；第 4 章、第 5 章介绍水煤浆加压气化工艺及在电力和化工生产中的工程应用；第 6 章、第 7 章介绍干煤粉加压气化工艺及其工程应用；第 8 章介绍流化床煤气化工艺及其工程应用；第 9 章介绍移动床加压气化工艺及其工程应用。

本书前言、第3章、第6章、第7章由许世森教授执笔；第2章、第4章、第5章由张东亮教授执笔；第1章、第8章、第9章由任永强高工执笔；徐越教授和李小宇硕士分别编写了第6章和第1章的部分章节。许世森教授负责了全书的统稿。

由于水平和学识所限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

本书部分章节引用了国内外一些专家学者的宝贵经验和研究成果，对他们的卓越工作，在此致以深切敬意。

编 者

2005 年 7 月

目 录

第 1 章 煤炭气化过程基础	1
1.1 煤气化的基本化学反应	1
1.1.1 干燥	1
1.1.2 热解	1
1.1.3 气化过程中的气化反应	11
1.2 煤气化反应平衡	14
1.2.1 化学反应热效应与平衡常数	14
1.2.2 碳与氧间的化学平衡与热效应	22
1.2.3 碳与蒸汽间的化学平衡与热效应	27
1.2.4 甲烷生成反应的化学平衡与热效应	29
1.3 煤气化反应动力学基础	31
1.3.1 概述	31
1.3.2 各反应控制区的动力学特性	34
1.3.3 主要气化反应的速度控制区	42
1.4 高温、高压、高升温速率条件下的煤气化反应特性	44
1.4.1 气化反应动力学研究的历史背景	45
1.4.2 常压、高温气化反应热重试验	48
1.4.3 高温、高压、高升温速率气化反应动力学研究	53
1.5 煤气化过程的净化方法	68
1.5.1 常温湿法的粗煤气净化系统	69
1.5.2 高温干法的粗煤气净化系统	81
第 2 章 煤的气化性质	88
2.1 煤的分类和性质	88
2.2 煤性质对气化活性的影响	96

2.2.1	反应活性	96
2.2.2	黏结性	97
2.2.3	结渣性	98
2.2.4	热稳定性	99
2.2.5	机械强度	99
2.2.6	粒度分布	100
2.3	气化炉对煤适应性的综合评价	100
第3章	煤气化工艺的现状与发展趋势	102
3.1	煤气化工艺分类	102
3.1.1	按制取煤气的热值分类	102
3.1.2	按供热方式分类	103
3.1.3	按气化剂分类	103
3.1.4	按固体燃料的运动状态分类	105
3.2	煤气化技术发展概述及煤气热值和计算方法	105
3.2.1	煤气化技术发展历史	106
3.2.2	煤气的热值及计算方法	109
3.3	移动床煤气化工艺的现状与趋势	111
3.3.1	UGI 炉	111
3.3.2	Lurgi (鲁奇) 加压气化炉	112
3.3.3	液态排渣鲁奇 (BGL) 炉	114
3.4	流化床煤气化工艺的现状与趋势	114
3.4.1	流化床气化的种类	115
3.4.2	流化床煤气化的特点	115
3.4.3	几种典型的流化床煤气化炉	116
3.5	气流床煤气化工艺的现状与趋势	118
3.5.1	气流床气化的技术特点及主要影响因素	118
3.5.2	几种典型的气流床气化炉	120
3.6	各种煤气化技术的综合比较	130
3.6.1	移动床气化工工艺	130
3.6.2	流化床煤气化技术的分析评价	132

3.6.3	气流床煤气化技术的分析评价	135
3.6.4	综合比较	139
第4章	水煤浆加压气化工	145
4.1	水煤浆加压气化过程原理及特点	145
4.2	德士古煤气化工艺	147
4.2.1	美国德士古发展公司水煤浆气化技术开发历程	147
4.2.2	工艺流程特点	150
4.2.3	主要设备	154
4.2.4	操作条件	168
4.2.5	技术指标	170
4.2.6	对煤种的要求	171
4.3	E-Gas 煤气化工艺	177
4.3.1	工艺流程特点	178
4.3.2	技术指标	180
4.4	多喷嘴对置式水煤浆气化工	181
第5章	水煤浆加压气化工的工程应用	185
5.1	水煤浆加压气化工在化工生产中的应用	185
5.1.1	美国田纳西-伊斯曼化学公司气化装置	186
5.1.2	日本宇部合成氨厂气化装置	189
5.1.3	原联邦德国 SAR 气化装置	191
5.1.4	国内工业化装置介绍	193
5.2	水煤浆加压气化工在电力生产中的应用	194
5.2.1	E-Gas 在美国 Wabash River IGCC 电站的 应用	194
5.2.2	Texaco 在美国冷水 IGCC 电站的应用	205
5.2.3	Texaco 在美国 Tampa IGCC 示范电站的应用	210
5.2.4	Texaco 在炼油厂 IGCC 电站的应用	222
第6章	干煤粉加压气化工	229
6.1	干煤粉加压气化过程原理	229
6.1.1	概述	229

6.1.2	气化机理	230
6.1.3	技术特点及主要影响因素	232
6.2	K-T 煤气化工艺	234
6.2.1	工艺流程和设备	234
6.2.2	操作控制及生产指标	237
6.2.3	操作特性分析	239
6.2.4	K-T 气化炉的特点	241
6.3	Shell 煤气化工艺	243
6.3.1	开发过程	243
6.3.2	Shell 煤气化方法的典型流程	246
6.3.3	Shell 煤气化的主要特点	247
6.3.4	原料要求	248
6.3.5	气化设备	250
6.3.6	工艺及操作特性分析	255
6.3.7	煤种试验结果	261
6.3.8	环境评价	264
6.4	Prenflo 煤气化工艺	264
6.5	GSP 煤气化工艺	267
6.6	正在开发的干煤粉加压气流床煤气化工艺	278
6.6.1	西安热工研究院的干煤粉加压气化工艺	278
6.6.2	日本正在开发的气流床煤气化工艺	300
6.6.3	CGT 煤气化工艺	305
第 7 章	干煤粉加压气化工工艺的工程应用	309
7.1	干煤粉加压气化工工艺在电力生产中的应用	309
7.1.1	气化系统的特性对 IGCC 的影响	309
7.1.2	气化后工艺对气化炉选择的影响	322
7.1.3	Shell 煤气化在荷兰 Demkolec IGCC 电厂的 应用	325
7.1.4	Prenflo 气化技术在西班牙 Puertollano IGCC 电站的应用	332

7.1.5 空气气化气流床工艺在 IGCC 中应用	338
7.2 干煤粉加压气化在化工生产中的应用	342
7.2.1 生产合成氨	342
7.2.2 生产甲醇	343
7.2.3 制氢	344
第 8 章 流化床煤气化原理及其工艺	345
8.1 流化床气化过程原理及其压力的影响	345
8.1.1 流化床气化原理	345
8.1.2 压力对气化过程的影响	347
8.2 典型流化床气化工工艺	347
8.2.1 温克勒气化炉及其工艺	348
8.2.2 高温温克勒气化炉 (HTW)	354
8.2.3 灰熔聚流化床气化炉	356
第 9 章 移动床加压气化工工艺及应用	364
9.1 移动床加压气化原理	364
9.1.1 概述	364
9.1.2 原理	366
9.2 移动床加压气化工工艺	368
参考文献	375

第 1 章 煤炭气化过程基础

煤的气化是使煤与气化剂作用，进行各种化学反应，把煤炭转变为燃料用煤气或合成用煤气。

气化炉中的气化反应主要是煤中的碳与气化剂中的氧、水蒸气、二氧化碳和氢的反应，也有碳与产物以及产物之间进行的反应。

1.1 煤气化的基本化学反应

在气化炉内，煤炭经历了干燥、热解、气化和燃烧几个过程。现将各个过程逐一介绍。

1.1.1 干燥

湿煤（操作燃料）加入气化炉后，由于煤与热气流之间的热交换，煤中的水分蒸发。



1.1.2 热解

热解（pyrolysis）是煤受热后自身发生一系列物理和化学变化的复杂过程。对此过程的命名尚未统一。除热解这一名称外，习惯上长期应用“干馏”（carbonization）作传统名称，还有热分解（thermal decomposition）也常被采用。炼焦过程是典型而完整的在隔绝空气条件下的煤热解例子。由于煤是矿物质、有机大分子化合物等组成的极复杂的混合物质，受热之后所发生的变化与煤自身

的化学特性、孔隙结构以及热条件等密切相关。

煤炭气化过程中煤的热解有别于炼焦和煤液化过程中煤的热解行为，其主要区别在于：

① 在块状或大颗粒状煤存在的固定床气化过程中，热解温度较低，通常在 700°C 以下，按煤焦加工惯例，属低温热解（干馏）区段；

② 热解过程中，床层中煤粒间有较强烈的气流流动，不同于炼焦炉中自身生成物的缓慢流动，其对煤的升温速率及热解产物的二次热分解反应影响较大；

③ 在粉煤气化（沸腾床和气流床）工艺中，煤炭中水分的蒸发、煤热解以及煤粒与气化剂之间的化学反应几乎是同时并存，且在短暂的时间内完成。

1.1.2.1 煤热解过程的物理形态变化

在煤热解阶段，煤中的有机质随温度的提高而发生一系列变化，其结果为煤中的挥发分逸出，并残存半焦或焦炭。煤的热解过程大致分为 3 个阶段。

(1) 第一阶段（从室温到 350°C ）

从室温到热分解温度为干燥脱气阶段，煤的外形无变化。 150°C 前主要为干燥阶段。在 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 时，放出吸附在煤中的气体，主要为甲烷、二氧化碳和氮气。当温度达到 200°C 以上时，即可发现有机质的分解。如褐煤在 200°C 以上发生脱羧基反应， 300°C 左右时开始热解反应。烟煤和无烟煤的原始分子结构仅发生有限的热作用（主要是缩合作用）。

(2) 第二阶段（ $350\sim 550^{\circ}\text{C}$ ）

在这一阶段，活泼分解是主要特征。以解聚和分解反应为主，生成大量挥发物（煤气及焦油），煤黏结成半焦。煤中的灰分几乎全部存在于半焦中，煤气成分除热解水、一氧化碳和二氧化碳外，主要是气态烃。烟煤（尤其是中等煤阶的烟煤）在这一阶段经历了软化、熔融、流动和膨胀直到再固化。出现了一系列特殊现象，并形成气液固三相共存的胶质体。在分解的产物中出现烃类和焦油的