



“十二五”职业教育国家规划教材  
经全国职业教育教材审定委员会审定

# 煤气化生产技术

MEIQIHUA SHENGCHAN JISHU

许祥静 主编 张克峰 副主编



化学工业出版社



“十二五”职业教育国家规划教材  
经全国职业教育教材审定委员会审定

# 煤气化生产技术

## 第三版

许祥静 主编  
张克峰 副主编



化学工业出版社

·北京·

本书以煤气化生产技术为立足点,以煤化工生产岗位工作任务所需理论与实践能力的培养为主线进行编写,内容包括煤气化、煤气处理(净化、变换)、煤化工产品生产三大部分。全书分为绪论、空气分离、煤气化原理、煤气化过程生产技术、煤气净化、合成氨、甲醇、二甲醚八个章节,每章节主要内容由生产方法、工艺操作及工艺条件、典型设备、生产操作与控制等部分组成。本书中实际生产岗位操作部分内容的编写,能满足煤气化生产岗前培训的需要。

本教材主要定位于高职高专的学生,着力于培养煤化工及相关生产岗位技术应用性高职人才,并兼顾化工类中职和煤化工企业职工岗前培训的需要。可作为高职高专煤化工、应用化工、精细化工等专业教材,也可作为煤化工及相关生产企业的技术人员培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤气化生产技术/许祥静主编.—3版.—北京:化学工业出版社,2015.8

“十二五”职业教育国家规划教材  
ISBN 978-7-122-24727-8

I. ①煤… II. ①许… III. ①煤气化-生产工艺-职业教育-教材 IV. ①TQ546

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第171036号

---

责任编辑:张双进  
责任校对:宋玮

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)  
印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张17 字数429千字 2015年10月北京第3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:35.00元

版权所有 违者必究

# 高职高专煤化工专业规划教材 编审委员会

主任委员 郝临山

副主任委员 薛金辉 薛利平 朱银惠 池永庆

委员 (按姓氏汉语拼音排序)

白保平	陈启文	池永庆	崔晓立	段秀琴
付长亮	谷丽琴	郭玉梅	郝临山	何建平
李刚	李聪敏	李建锁	李云兰	李赞忠
刘军	穆念孔	彭建喜	冉隆文	田海玲
王翠萍	王家蓉	王荣青	王胜春	王晓琴
王中慧	乌云	谢全安	许祥静	薛金辉
薛利平	薛士科	薛新科	闫建新	于晓荣
曾凡桂	张爱民	张现林	张星明	张子锋
赵发宝	赵晓霞	赵雪卿	周长丽	朱银惠

# 前 言

本教材是以煤气化生产工艺操作技术为主线进行编写的，全书以现阶段煤气化企业较先进的生产操作技术为依据，结合企业的实际需求和高职高专煤化工专业的教学需要进行内容选择和序化。在内容选择上，以煤气化生产的实际生产岗位、实际生产流程、实际生产操作需要为依据，在原第二版教材基础上，以近年来煤化工技术发展所应用的新工艺、新方法、新设备为主要内容，进一步强化了煤气化生产过程的参数调节控制、生产岗位基本要求、煤气化设备的结构与操作要点和煤气化下游产品生产方法与控制技术等内容。

本书内容主要包括煤气化原理、煤气处理（净化、变换）、煤化工产品生产三大部分。全书分为绪论、空气分离、煤气化原理、煤气化过程生产技术、煤气净化、合成氨生产、甲醇生产、二甲醚生产八章，每章主要内容由生产方法、工艺操作及工艺条件、典型设备、生产操作与控制等部分组成。

本教材适用于高职高专煤化工专业的学生，通过原料煤、生产流程、煤气化控制指标参数学习，掌握煤气化生产操作技术，具备上岗操作基本能力；并兼顾化工类中职和煤化工企业职工岗前培训的需要；也适用于应用化工等相关专业，同时也能满足煤化工及各相关专业技术培训需要。

本教材由贵州工业职业技术学院许祥静主编，张克峰任副主编。第一、二、四、七章由许祥静编写，第三、六章由张克峰编写，第五章冉隆文编写，第八章由杨文渊编写。全书由许祥静统稿，由贵州工业职业技术学院厉刚副教授、李国元高级工程师主审。

本书在编写过程中，要感谢为本书提供大量技术支持的煤化工企业技术人员和笔者学院毕业的学生们。

鉴于编者水平有限，本书肯定有许多不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2015年6月

# 第一版前言

煤的气化过程是煤或煤焦与气化剂（空气、氧气、水蒸气、氢等）在高温下发生化学反应将煤或煤焦中有机物转变为煤气的过程。该过程是在高温、高压下进行的一个复杂的多相物理及物理化学过程。

由于世界各国都充分认识到能源结构必须向多元化结构发展，因此煤的综合利用的一个重要方面——煤炭气化工艺也越来越受到关注。将煤炭进行气化，利用合成气生产清洁、高效的二次能源，如用合成气生产燃料油、制甲醇燃料、二甲醚以及利用合成气作为化工合成原料，不但有效地提高了煤炭利用率，同时提高了煤炭的附加值率，合成气深加工后可增值几十甚至几百倍。这给煤炭气化工艺的发展奠定了基础。因此作为新型煤化工的一项大型而先进的单元技术——煤炭气化技术及气化产品的进一步合成利用，将成为今后煤化工发展的主要方向。

本教材是根据教育部高职高专教材建设的精神，主要定位于高职高专的学生，用以满足煤化工、化学工程与工艺专业需要，同时也能适用于煤化工及各相关专业技术培训。本教材基于煤炭气化工艺，但也考虑了新型煤化工特点，在内容上着重于对学生知识面的拓宽和实际能力的培养。本书共八章，主要内容为煤炭气化原理、工艺过程、气化过程的典型设备、合成气的净化和碳一化学及其应用技术。同时对气化的主要设备——气化炉的操作管理做了较详细的分析和说明。为了更好地实现“操作型、实用型”应用技术人才的培养目标，本书以实践性为宗旨，强调和细化实用技术的介绍。同时，为体现教材的先进性，介绍了一些即将投入生产实践的高新技术，为学生今后的发展留下了空间。

本教材由贵州科技工程职业学院许祥静、太原科技大学刘军主编。第一、第二、第八章由许祥静编写，第三、第四、第五章由刘军编写，第六章由贵州科技工程职业学院由冉隆文编写，第七章由山西综合职业学院李聪敏编写。全书由贵州科技工程职业学院许祥静统稿，河北理工大学梁英华主审。

在本书编写过程中，参考了大量的相关专著和资料，谨在此向其作者表示感谢，同时还要感谢为本书提供大量技术资料的企业和老师以及在出版过程中给予热情支持和大力帮助的单位 and 同志。

限于篇幅和学时数，对于这门传统的工业生产过程，在内容的深度和广度上必然存在一定的局限性。我们的目标是在本书课程内容上，尽可能突出煤炭气化技术发展中的先进性和实用性。但鉴于编者水平有限，本书不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2004年9月

## 第二版前言

《煤气化生产技术第二版》是在我国能源、化工产品的需求出现较高的增长速度，特别是煤化工在能源、化工领域中已占有越来越重要的地位情况下进行编写的。全书以现阶段煤气化企业较先进生产操作技术为依据，针对企业对学生能力需求和高职高专教材建设需要，对煤气化生产过程内容进行了选择。

本书以煤气化生产技术为立足点，以煤化工生产岗位工作任务所需理论与实践能力的培养为主线进行编写，主要包括煤气化、煤气处理（净化、变换）、煤化工产品生产三大部分。全书分为绪论、空分、煤气化原理、煤气化过程生产技术、煤气净化、合成氨、甲醇、二甲醚八个章节，每章节主要内容由生产方法、工艺操作及工艺条件、典型设备、生产操作与控制等部分组成。本书对实际生产岗位操作部分内容的编写，能基本满足煤气化生产岗前培训的需要。

本教材主要定位于高职高专的学生，着力于培养煤化工及相关生产岗位技术应用性高职人才，并兼顾化工类中职和煤化工企业职工岗前培训的需要。适用于煤化工、化工生产技术、应用化工等专业，同时也能满足煤化工及各相关专业技术培训的需要。

本教材由贵州工业职业技术学院许祥静主编，张克峰任副主编。第一、二、四、七章由许祥静编写，第三、六章由张克峰编写，第五章由冉隆文编写，第八章由杨文渊编写。全书由许祥静、钟春燕统稿，由贵州工业职业技术学院化工系主任厉刚、贵州水晶集团李国元高级工程师主审。

本书在第一版的基础上，根据现代煤化工技术发展和煤气化岗位操作进行编写。在编写过程中，参考了大量的相关专著和资料，谨在此向其作者表示感谢，同时要感谢的还有为本书提供大量技术支持的贵州煤化工企业技术人员和贵州工业职业技术学院毕业的学生们。

限于篇幅和学时数，对于这一门古老而又充满生命力的工业生产过程，在内容的深度和广度上必然有一定的局限性。我们的目标是在本课程内容上，尽可能突出煤气化技术的先进性和实用性。但鉴于作者水平有限，本书肯定有许多不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2010年5月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1	二、可逆式换热器 .....	37
第一节 煤气化应用展望 .....	1	<b>第四节 生产操作的具体步骤</b> .....	37
第二节 煤气化发展简史 .....	2	一、开车过程 .....	37
第三节 煤气化在新型煤化工发展中 的应用 .....	3	二、正常操作 .....	39
一、新型煤化工 .....	3	三、异常现象及处理 .....	40
二、煤气化技术的发展与应用 .....	4	<b>第五节 变压吸附的工艺技术及主要设备</b> ..	41
三、煤气化产品发展——碳一化工发展 趋势 .....	4	一、概述 .....	41
四、煤气化发展的瓶颈 .....	4	二、变压吸附的基本原理 .....	41
复习思考题 .....	5	三、变压吸附的主要设备与流程 .....	42
<b>第二章 煤气化原理</b> .....	6	复习思考题 .....	43
第一节 煤气化方法 .....	7	<b>第四章 气化过程生产技术</b> .....	44
一、气化技术 .....	7	第一节 概述 .....	44
二、地面气化技术的分类 .....	8	一、影响气化的主要因素 .....	44
第二节 煤气化原理 .....	10	二、煤气化过程的主要评价指标 .....	45
一、气化过程主要化学反应 .....	10	三、气化炉的分类及结构 .....	48
二、气化过程的物理化学基础 .....	12	第二节 移动床气化工艺 .....	49
三、煤气平衡组成的计算 .....	16	一、移动床的床层结构及温度分布 .....	49
第三节 煤的性质对气化的影响 .....	20	二、常压移动床气化工艺 .....	52
一、煤种对气化的影响 .....	20	三、加压移动床气化工艺 .....	76
二、水分含量对气化的影响 .....	23	第三节 流化床气化工艺 .....	92
三、灰分含量对气化的影响 .....	24	一、流化床气化原理 .....	92
四、挥发分对气化的影响 .....	24	二、常压流化床气化工艺 .....	93
五、硫分对气化的影响 .....	25	三、加压流化床气化工艺 .....	95
六、粒度对气化的影响 .....	25	第四节 气流床气化工艺 .....	103
七、煤的灰熔点和结渣性对气化的 影响 .....	27	一、水煤浆加料气化工艺 .....	104
八、煤的其他性质对气化的影响 .....	28	二、干粉煤加料气化工艺 .....	118
复习思考题 .....	29	三、水煤浆生产技术与干粉煤生产技术 的比较 .....	124
<b>第三章 空气分离</b> .....	30	第五节 熔融床气化工艺 .....	125
第一节 空气的组成及物理化学性质 .....	30	一、鲁麦尔熔渣气化炉 .....	125
一、空气的组成 .....	30	二、熔盐气化法 .....	126
二、空气的物理化学性质 .....	30	三、熔铁气化法 .....	127
第二节 深冷分离工艺技术 .....	31	第六节 工业上常用炉型的比较 .....	128
一、概述 .....	31	一、国内常用气化炉的型号 .....	128
二、空气分离的工艺流程 .....	31	二、三种主要制气方法的比较 .....	129
第三节 主要设备及其操作 .....	36	三、设备选择的原则和计算 .....	129
一、双级精馏塔 .....	36	复习思考题 .....	131
		<b>第五章 煤气净化</b> .....	133
		第一节 概述 .....	133



一、煤气中的杂质及其危害	133	四、氢氮比和惰性气体含量的控制	211
二、煤气中杂质的脱除方法	133	复习思考题	212
第二节 固体颗粒的清除——除尘	134	<b>第七章 甲醇生产</b>	213
一、除尘的原理及方法	134	第一节 甲醇的性质和用途	213
二、除尘的主要设备	136	一、甲醇的性质	213
第三节 一氧化碳的变换	137	二、甲醇的用途	214
一、变换反应	138	第二节 甲醇合成技术	216
二、变换催化剂	138	一、甲醇合成方法	216
三、工艺条件	143	二、合成工艺条件控制	219
四、工艺流程	143	三、甲醇合成的主要设备	221
第四节 脱硫	145	四、催化剂的选用及发展	225
一、煤气脱硫方法的分类	145	五、合成操作与控制管理	226
二、湿法脱硫	147	第三节 粗甲醇精制	232
三、干法脱硫	154	一、粗甲醇组成	232
第五节 二氧化碳的脱除	160	二、精制方法及原理	233
一、概述	160	三、精馏工艺流程	234
二、化学吸收法	161	四、精馏操作与管理（正常操作与一般故障处理）	237
三、物理吸收法	167	复习思考题	239
第六节 典型粗煤气净化工艺生产操作	182	<b>第八章 二甲醚生产</b>	240
一、一氧化碳变换的操作规程	182	第一节 二甲醚的性质和用途	240
二、低温甲醇洗工艺流程	188	一、二甲醚的性质	240
三、低温甲醇洗脱硫-脱碳操作	190	二、二甲醚的用途	240
复习思考题	192	第二节 二甲醚的合成工艺	242
<b>第六章 合成氨生产</b>	193	一、二甲醚合成生产方法	242
第一节 概述	193	二、二甲醚合成工艺条件控制	244
一、氨的物理性质与化学性质	193	三、二甲醚合成反应器及生产工艺流程	246
二、氨的用途	193	第三节 二甲醚操作与控制管理	250
三、合成氨工业的发展概况	194	一、准备程序	250
四、合成氨生产的基本过程	194	二、开车程序	252
第二节 合成氨的工艺流程	195	三、正常生产操作	252
一、氨合成的基本工艺步骤	195	四、停车程序	253
二、典型的工艺流程	197	五、常见异常工况及处理	255
第三节 工艺条件的选择	199	复习思考题	256
一、压力	199	<b>附录</b>	257
二、温度	200	附表一 饱和水蒸气中蒸汽分压和含量的关系	257
三、空间速率	201	附表二 采用不同煤种制得的混合煤气的指标	258
四、进塔气组成	201	附表三 采用不同煤种制得的水煤气的指标	259
第四节 氨合成塔	202	<b>参考文献</b>	261
一、结构特点及基本要求	202		
二、几种典型冷管式内件的分析	203		
三、冷激式氨合成塔	206		
第五节 氨合成塔的操作与控制管理	208		
一、温度的控制	209		
二、压力的控制	210		
三、循环量的控制	211		

# 第一章 绪 论

## 第一节 煤气化应用展望

当前，保障能源战略安全、转变能源消费方式、优化能源布局结构成为我国能源发展的重要的战略部署，煤作为主要能源之一，其生产与开发利用具有战略意义。按照发展循环经济的的要求，把煤炭作为重要的战略资源和基础产业，坚持节约发展，清洁发展、安全发展和环境保护，积极发展煤炭精深加工，提高煤炭工业整体水平，按照大型化、基地化、规模化、一体化、多联产要求，坚持高标准、高起点，推动煤化工产业规模迅速扩大、环保全面达标、资源综合利用。因此煤化工生产在能源、化工领域的地位继续呈上升趋势，利用丰富的煤炭资源，将煤通过气化技术获得化工原料、烯烃、氢气，生产合成氨以及甲醇、二甲醚、合成油品等洁净液体燃料。在石油资源日益匮乏的今天，将煤作为石油的替代品，是我国未来解决石油资源紧缺的重要途径，有十分广阔市场前景。

C<sub>1</sub> 化工系列生产技术的突破，煤化工发展应用领域越来越广泛，煤化工生产为企业带来较高附加值率，如煤炭发电可增值 2 倍，煤制甲醇可增值约 4 倍，甲醇进一步深加工为烯烃等化工产品则可增值 8~12 倍，因此，以煤为原料，经气化生产下游产品并获得利润，成为企业产业链发展的总趋势。据有关专家测算，当石油价格高于 40 美元/桶时，在缺油、少气、富煤的地区，使用煤化工路线生产甲醇、合成氨、烯烃、二甲醚、甲醛、尿素等化工产品，生产成本较石化路线低 5%~10%，具有较强的竞争力和较好的经济效益。2006 年年底，《煤化工产业中长期发展规划征求意见稿》提出，2006~2020 年我国煤化工总计投资 1 万多亿元。同时，我国计划在全国打造七大煤化工产业区，分别是黄河中下游、蒙东、黑东、苏鲁豫皖、中原、云贵和新疆。按规划，黄河中下游、新疆、蒙东将形成大规模甲醇、二甲醚、煤制油生产基地。同时，国家斥巨资修建四大管线，这些输送管线将确保规划中的新型煤化工能源不断地输送到需求地区。

《煤化工产业中长期发展规划征求意见稿》显示，今后煤化工的更多机会在新型煤化工，即煤制甲醇、烯烃、二甲醚和煤制油中；新型煤化工以生产洁净能源和可替代石油化工的产品为主，如柴油、汽油、航空煤油、液化石油气、乙烯、聚丙烯、替代燃料（甲醇、二甲醚）等，它与能源、化工技术结合，可形成煤炭-能源化工一体化的新兴产业。

预计到 2020 年，煤气化技术总规模可能达到约 400Mt/a。煤气化的未来长期发展将是技术多样化、国产化为支柱，以煤气化和整体煤气化联合循环发电（简称 IGCC）多联产等构成强强结合的产业结构和技术联手。

煤气化技术广泛应用于下列领域。

(1) 作为化工原料合成和燃料油合成的原料气 早在第二次世界大战时，德国等就采用费托（Fischer-Tropsch）合成工艺合成航空燃料油。随着合成气化工和碳一化学技术的发展，以煤气化制取合成气，进而直接合成各种化学品的路线已经成为现代煤化工的基础，主要包括合成氨、甲烷、甲醇、乙醚、二甲醚以及合成液体燃料等。化工合成气对热值要求不高，主要对煤气中的 CO、H<sub>2</sub> 等有效成分有要求，一般德士古气化炉、Shell 气化炉较为合

适。目前,我国合成甲醇产量的50%以上来自煤炭气化合成工艺。预计2020年煤气化消耗煤炭310Mt/a,其中,煤液化200Mt/a;煤基甲醇,100Mt/a;煤基合成氨,60Mt/a(不包括燃气发电、工业气体燃料等气化消耗)。

(2) 作为工业燃气 一般热值为 $4620\sim 5670\text{kJ}/\text{m}^3$ ,采用常压固定床气化炉、流化床气化炉均可制得。主要用于钢铁、机械、卫生、建材、轻纺、食品等部门,用以加热各种炉、窑,或直接加热产品或半成品。

(3) 作为民用煤气 一般热值为 $12600\sim 16800\text{kJ}/\text{m}^3$ ,要求CO小于10%,除焦炉煤气外,用直接气化也可得到,采用鲁奇炉较为适用。与直接燃煤相比,民用煤气不仅可以明显提高用煤效率和减轻环境污染,而且能够极大地方便人民生活,具有良好的社会效益与环境效益。出于安全、环保及经济等因素的考虑,要求民用煤气中的 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 及其他烃类可燃气体含量应尽量高,以提高煤气的热值;而CO有毒,其含量应尽量低。

(4) 作为联合循环发电的燃气 IGCC是煤在加压下气化,产生的煤气经净化后燃烧,高温烟气驱动燃气轮机发电,再利用烟气余热产生高压过热蒸汽驱动蒸汽轮机发电。用于IGCC的煤气,对热值要求不高,但对煤气净化度(如粉尘及硫化物含量)的要求很高。与IGCC配套的煤气化一般采用固定床加压气化(鲁奇炉)、气流床气化(德士古炉)、加压气流床气化(Shell气化炉)、加压流化床气化工艺等,煤气热值在 $9240\sim 10500\text{kJ}/\text{m}^3$ 。

(5) 作为冶金还原气 煤气中的CO和 $\text{H}_2$ 具有很强的还原作用。在冶金工业中,利用还原气可直接将铁矿石还原成海绵铁;在有色金属工业中,镍、铜、钨、镁等金属的氧化物也可用还原气来冶炼。因此,冶金还原对煤气中的CO含量有要求。

(6) 作煤炭气化燃料电池 燃料电池是由 $\text{H}_2$ 、天然气或煤气等燃料通过电化学反应直接转化为电的化学发电技术。目前主要有磷酸盐型(PAFC)、熔融碳酸盐型(MCFC)、固体氧化物型(SOFC)等。它们与高效煤气化结合的发电技术就是IG-MCFC和IG-SOFC,其发电效率可达53%。

(7) 煤气化制氢  $\text{H}_2$ 广泛应用于电子、冶金、玻璃生产、化工合成、航空航天、煤炭直接液化及氢能电池等领域。煤气化制氢一般是将煤炭转化成CO和 $\text{H}_2$ ,然后通过变换反应将CO转换成 $\text{H}_2$ 和 $\text{CO}_2$ ,再将富氢气体经过低温分离或变压吸附及膜分离技术,即可获得 $\text{H}_2$ 。

(8) 煤炭液化的气源 不论煤炭直接液化和间接液化,都离不开煤气化工艺。煤炭液化需要煤气化制氢,而可选的煤气化工艺同样包括移动床加压Lurgi(鲁奇)气化、加压流化床气化和加压气流床气化工艺等气化技术。

## 第二节 煤气化发展简史

煤气化是煤或煤焦与气化剂在高温下发生化学反应,将煤或煤焦中的有机物转变为煤气的过程。

煤气化发展可按进程分为四个阶段。

(1) 第一阶段 煤气化起源阶段。煤气化发展始于18世纪后半叶,用煤生产民用煤气;当时在欧洲用煤干馏的方法,生产的干馏煤气用于城市街道照明;1840年,由焦炭制发生炉煤气来炼铁;1875年,使用增热水煤气作为城市煤气。我国1934年在上海建成第一座煤气厂,用立式炉和增热水煤气炉生产城市煤气。

(2) 第二阶段 煤制油发展阶段。第二次世界大战时期,煤气化工业在德国得到迅速发展。1932年,采用一氧化碳与氢利用费-托(Fischer-Tropsch)合成法生产液体燃料获得成功。

功。1934年，德国鲁尔化学公司用此研究成果，开始创建第一个F-T合成油厂，1936年投产。1935~1945年期间，德国共建立了9个合成油厂，总产量达570kt。

南非开发煤炭间接液化历史悠久，早在1927年，南非当局注意到依赖进口液体燃料的严重性，基于该国拥有丰富的煤炭资源，开始寻找煤基合成液体燃料的新途径，1939年首先购买了德国F-T合成技术在南非的使用权。在20世纪50年代初，成立了Sasol公司，1955年建立了Sasol-I厂，1980年和1982年又相继建成了Sasol-II厂和Sasol-III厂。

第二次世界大战后，煤气化工业因石油、天然气的迅速发展减慢了步伐，进入低迷时期，煤气主要作为城市煤气、合成氨原料等，直到20世纪70年代成功开发由合成气制甲醇技术，由于甲醇的广泛用途，使煤气化工业又重新引起人们重视。

(3) 第三阶段 新生产技术（羰基合成） $C_1$  化学发展阶段。1975年，美国Eastman（伊斯曼）公司开始了合成乙酸的实验室研究，重点是开发适用的催化剂，以便在工业化生产能达到的条件下，减少副产物生成。他们采用乙酸甲酯与一氧化碳为原料羰基合成制取乙酸，并于1977年中试成功。到20世纪80年代末，由煤气化制合成气，羰基合成生产乙酸、乙醛开始大型化生产。羰基合成技术是煤制化学品的一个非常重要的突破。

(4) 第四阶段 战略与经济发展阶段。随着煤气化生产技术的进一步发展，以生产含氧燃料为主的煤气化合成甲醇、二甲醚，有广阔的市场前景。其中二甲醚不仅是合成气经甲醇制汽油、低级烯烃的重要中间体，也是多种化工产品的重要原料；甲醇除作基本有机化工原料、精细化工原料外，也可作为替代燃料应用。

煤气化是发展新型煤化工的重要单元技术，煤-电-化工联产是发展的重要方向。研究表明，煤气化技术在单元工艺（如煤气化和气体净化）、中间产物（如合成气、氢气）、目标产品等方面有很大互补性。将不同工艺进行优化组合实现多联产，并与尾气发电、废渣利用等形成综合联产，达到资源、能源综合利用的目的，能有效地减少工程建设投资、降低生产成本、减少污染物或废物排放，如F-T合成与甲醇合成联产就是较好的应用示范。

## 第三节 煤气化在新型煤化工发展中的应用

### 一、新型煤化工

传统煤化工是指煤焦化、合成氨、电石等产业，是国民经济的重要支柱产业，其产品广泛应用于农业、钢铁、轻工和建材等相关产业。由于节能减排与环境保护的日益强化，基于结构调整和技术升级的新型煤化工成为发展的重点。新型煤化工主要特点如下。

#### 1. 清洁能源是新型煤化工的主要产品

通过煤的综合利用，将一次能源转化为洁净二次能源，提高煤的利用率和附加值率。新型煤化工生产的主要产品是洁净能源和可替代石油化工产品，如柴油、汽油、乙烯原料、甲醇、二甲醚等以及其他化工产品。

#### 2. 煤炭-能源-化工一体化

以能源转化型为主的新型煤化工是未来中国能源技术发展的战略方向，依托煤炭资源，形成能源转化型和产品联产型的综合煤化工厂，如煤炭液化、煤气化-合成燃料与化工产品或电力、热力联产（IGCC）等，形成煤炭-能源-化工一体化产业。

#### 3. 高新技术及优化集成

新型煤化工生产采用煤转化高新技术，在能源梯级利用、产品结构方面对不同工艺优化集成，提高了整体经济效益。

#### 4. 环境污染得到有效治理

环境污染得到有效治理是新型煤化工的一个主要发展方向。煤化工产业的一个典型特征是大量“三废”排放，只有走科技含量高、资源消耗低、环境污染少的大型化生产路线，集中对“三废”治理，才能有效地治理和减少环境污染。

### 二、煤气化技术的发展与应用

煤气化是发展新型煤化工的重要单元技术。近年来煤气化新技术、新工艺、新设备的开发和应用，使煤气化工艺得到迅速发展，成为新型煤化工的一个重要组成部分。

#### 1. 煤气化设备

目前，新型煤化工技术开发处于世界前列，空气技术： $6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 的空分技术已经应用；气化设备从固定床向流化床、气流床、熔融床发展。古老的气化技术是利用炼焦炉、发生炉和水煤气炉气化。进入20世纪后，针对不同煤种和气体用途发展了几百种气化方法，其中以鲁奇碎煤加压气化炉、常压K-T炉、温克勒气化炉等应用最广。20世纪70年代，围绕提高燃煤电厂热效率、减少对环境的污染等技术问题，促使了气流床气化、熔融床气化生产工艺的诞生。如水煤浆加压气化技术（对置多喷嘴、多元料浆、德士古）、干粉加压气化技术（两段炉、航天炉、GSP、SHELL）、CE两段式气流床气化技术、Destec两段加压气流床气化技术、KRW气化技术、U-GAS气化（灰熔聚）技术及BG/L固定床熔渣气化技术等。

我国目前采用的煤气化技术除常压固定床煤气发生炉和水煤气发生炉外，开发和引进了水煤气两段炉、鲁奇加压气化炉和Dexaco（德士古）水煤浆气化技术、Shell（壳牌）气化技术。目前，新建厂多采用效率较高、制取煤气成分较好的加压Dexaco水煤浆气化工艺、加压干粉煤Shell气化工艺和具有自主知识产权的多喷嘴技术。

#### 2. 生产方法

煤制烯烃（DMTO）、甲醇制烯烃（FMTP、MTO）、煤制炔（MTP）、甲烷化、F-T合成、乙二醇合成技术和催化剂技术取得重大发展，神华包头60万吨/年煤制烯烃（DMTO）项目实行世界首次煤基路线烯烃生产，直接气化、间接气化技术得到发展，利用煤气化生产烯烃、液体燃料、化工产品已经从研发走向工业化生产。

### 三、煤气化产品发展——碳一化工发展趋势

碳一化工是以含有一个碳原子的物质（如CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>OH、HCHO）为原料合成化工产品或液体燃料的有机化工生产过程。碳一化工的发展，奠定了煤化工迅速发展的基础。

1923年，德国BASF公司用CO与H<sub>2</sub>在30~50MPa、300~400℃下合成甲醇取得成功，仅比合成氨晚10年，煤制甲醇是煤制含氧化合物的主要途径，称羰基合成法。羰基合成的应用，拓展了煤化工发展应用的领域。煤气化生产产品可用图1-1表示。

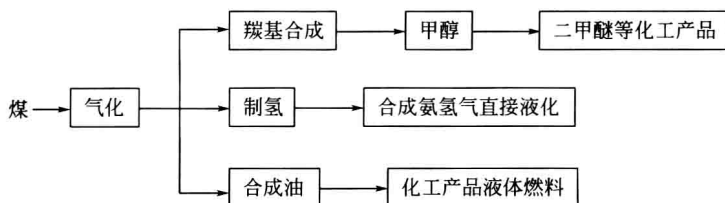


图 1-1 煤气化生产产品

### 四、煤气化发展的瓶颈

煤炭是低效、高污染的能源，将一次能源煤通过气化转化成高效洁净二次能源，让煤化

工行业获得巨大的发展机遇，同时也面临着巨大的挑战，需要迈过经济性、技术性 & 环保性三道难关，特别是一些难题急需解决。

① 耗水量巨大。煤气化生产过程需消耗大量水资源，据统计，直接法煤制油吨油水耗为 6~10t，间接法高达 10~15t；煤制甲醇吨产品耗水 11.7~20t。

② 污染严重。煤气化生产甲醇、烯烃及直接法生产油品，吨二氧化碳排放量分别为 2t、6t 和 9t；煤制油单位排污量一般为 4~4.5t，煤制甲醇为 4.5~5.5t。而天然气制甲醇吨二氧化碳排放量仅为 0.6t 左右。

③ 煤化工能源利用效率低。将煤通过煤化工生产，由一次能源转向二次洁净能源，其中煤的热能有效利用率是一个关键指标，煤的热能有效利用率统计为：煤制油 (26.9%~28.6%) < 煤制甲醇 (28.4%~50.4%) < 煤发电 (40%~45%) < 煤制合成天然气 (53%) < 煤制合成气 (82.5%)。由此可见，煤制合成气经过羰基合成甲醇，生产甲醇下游产品是煤气化的主要方向，只有对煤制甲醇及衍生物产品取得进一步发展，延长煤化工产业链条，才能使煤化工生产、煤气化生产获得更大的发展空间。

### 复习思考题

1. 煤气化产品有哪些？发展煤化工工业在我国目前有什么重要意义？
2. 在我国，煤气化技术发展方向可能会怎样？有什么特点？
3. 试说明煤气化应用的领域。
4. 煤气化发展的瓶颈有哪些？

## 第二章 煤气化原理

煤的气化过程是热化学过程，是煤或煤焦与气化剂（如空气、氧气、水蒸气、氢气等）在高温下发生化学反应，将煤或煤焦中的有机物转变为煤气的过程。该过程是在高温、高压下进行的一个复杂的多相物理及物理化学过程。通过煤气化方法，几乎可以利用煤中所含的全部有机物质，因此，煤气化生产是获得基本有机化学工业原料的重要途径。

煤气是煤与气化剂在一定条件下反应得到的混合气体，即气化剂将煤中的碳转化成可燃性气体。煤气的有效成分为一氧化碳、氢气和甲烷。

煤气组成随气化时所用的煤或煤焦的性质、气化剂的类别、气化过程条件以及煤气发生炉的结构不同而有差异。因此，在生产工业用煤气时，必须根据煤气用途来选择气化剂和气化过程操作条件，才能满足生产的需要。

煤气化主要包括四个过程，即煤的干燥、干馏、热解、还原和氧化。

### 1. 煤的干燥

煤的干燥过程受干燥温度、气流速度等因素的影响。干燥过程主要与水分蒸发温度有关。煤的干燥过程实质上是水分从微孔中蒸发的过程，理论上应在接近水的沸点下进行，但实际生产中，煤的干燥和具体的气化工艺及其操作条件又有很大的关系，例如，对于移动床气化而言，由于煤不断向高温区缓慢移动，且水分蒸发需要一定的时间，因此水分全部蒸发的温度稍大于 $100^{\circ}\text{C}$ ；而在气流床气化时，由于粉煤是直接被喷入高温区内的，几乎是在 $2000^{\circ}\text{C}$ 左右的高温条件下被瞬间干燥。

因此，增加气体流速、提高气体温度都可以增加煤的干燥速度。煤中水分含量低、干燥温度高、气流速度大，则干燥时间短；反之，煤的干燥时间就长。

煤干燥过程的主要产物是水蒸气，以及被煤吸附的少量一氧化碳和二氧化碳等。

### 2. 煤的干馏

煤是由生物经复杂生物化学作用和物理化学作用转变而成的，是含碳、氢、氧、氮和硫等元素的极其复杂的有机化合物，并夹杂一部分无机化合物。当加热时，分子键的重排将使煤分解为挥发性的有机物和固定碳。挥发分实质上是由低分子量的氢气、甲烷和一氧化碳等化合物至高分子量的焦油和沥青的混合物构成的。

就移动床来说，煤气化过程的热解从温度和工艺条件分析，基本接近于低温（ $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ ）干馏。从还原层上来的气体基本不含氧气，而且温度较高，可以视为隔绝空气加热即干馏。而对于沸腾床和气流床气化工艺，由于不存在移动床的分层问题，因而情况稍微复杂，尤其对于气流床来讲，煤的几个主要变化过程几乎瞬间同时进行。

### 3. 煤的热解

煤的加热分解除除了和煤的品位有关系，还与煤的颗粒粒径、加热速度、分解温度、压力和周围气体介质有关系。

无烟煤中的氢和氧元素含量较低，加热分解仅放出少量的挥发分；烟煤加热时经历软化为类原生质的过程，在煤颗粒中心达到软化温度以前，开始分解出挥发分，同时其本身发生膨胀。

煤颗粒粒径小于 $50\mu\text{m}$ 时，热解过程将由挥发分形成的化学反应控制，热解与颗粒大小



基本没有关系；当颗粒粒径大于  $100\mu\text{m}$  后，热解速率取决于挥发分从固定碳中的扩散逸出速率。

压力对热解有重要影响，随着压力的升高，液体烃类化合物相对减少，而气体烃类化合物相对增加。

一般来说，在  $200^\circ\text{C}$  以前，并不发生热解作用，只是放出吸附的气体，如水等；在大于  $200^\circ\text{C}$  后，才开始发生煤的热解，放出大量的水蒸气和二氧化碳，同时，有少量的硫化氢和有机硫化物放出；继续升高温度，达到  $400^\circ\text{C}$  左右时，煤开始剧烈热解，放出大量的甲烷和同系物、烯烃等，此时煤转变为塑性状态；温度达到  $500^\circ\text{C}$  时，开始产生大量的焦油蒸气和氢气，此时塑性状态的煤因分解作用的进行而变硬。

煤的热解结果生成三类分子：小分子（气体）、中等分子（焦油）、大分子（半焦）。

就单纯热解作用的气体组成而言，煤气热值随煤中挥发分的增加而增加；随煤的变质程度的加深，氢气含量增加，而烃类和二氧化碳含量减少。煤中的氧含量增加时，煤气中二氧化碳和水含量增加。煤气的平均分子量随热解的温度升高而下降，即随着温度的升高，大分子变小，煤气数量增加。

#### 4. 氧化和还原反应

煤气化过程中存在许多化学反应，既有煤和气化剂之间的反应，也有气化剂与生成物之间的反应。可以用影响化学反应平衡和化学反应速率的一般规律来讨论这些重要的煤气化反应。

首先是煤的燃烧反应，通过燃烧一部分燃料来维持气化工艺过程中的热量平衡。煤的燃烧是指煤在空气、富氧空气或氧气中，当温度达到着火点时剧烈氧化，放出大量热量的过程，完全燃烧时生成二氧化碳，而不完全燃烧时则生成一氧化碳。不论采用哪一种具体的气化工艺，产生的热量基本上用于如下几个方面：灰渣带出的热量、水蒸气和碳的还原反应需要的热量、煤气带走的热量以及传给水夹套和周围环境的热量。

其次是还原反应，包括碳和二氧化碳的反应，以及水蒸气和碳之间的反应，是制煤气的主要反应，主要生成一氧化碳和氢气。

由此可见，煤气化过程的两类主要反应即燃烧反应和还原反应是密切相关的，是煤气化过程的基本反应。

## 第一节 煤气化方法

煤气化是煤化工最重要的方法之一。煤气化已有 150 多年的历史，气化方法有 70~80 种。开发、选定新型煤气化技术，不仅是经济、合理、有效地利用煤炭资源的重要途径，也是发展煤化工的基础。

目前常采用的煤气化方法较多，根据不同的分类方式有不同的气化方法。按气化技术可分为地面气化、地下气化；根据气化剂不同可将气化分为富氧气化、纯氧气化、氢气气化、水蒸气气化，所得产品按气化剂不同分别称为空气煤气、混合煤气、水煤气和半水煤气；按给热方式可分为外热式气化、自热式气化、热载体式气化；最常见的是按气化炉的类型来分类，可分为移动床气化、流化床气化、气流床气化和熔融床气化；还可以按操作压力分为加压气化和常压气化。

### 一、气化技术

气化技术的发展已经有 150 多年的历史，许多技术已经相当成熟，并广泛应用于生产实



际，根据技术分类可分为地面气化和地下气化。

### 1. 地面气化

将煤从地下挖掘出来后再经过各种气化技术获得煤气的方法称地面气化。这类方法现被世界各国广泛采用；该方法可利用煤气化方法获得气化煤气，生产工艺也很成熟，在后面章节中将详细介绍。

### 2. 地下气化

煤炭地下气化是将未开采的煤炭有控制地燃烧，通过对煤的热化学作用生产煤气的一种气化方法。一般可用于薄煤层、深部煤层、急倾斜煤层等。这一方法有效地提高了煤炭资源的利用率，将建井、采煤、转化工艺集为一体，减少了煤炭生产过程中的危险和对环境造成的破坏。

煤炭地下气化是世界煤炭开发利用的方向之一，将常规的物理采煤变为化学采煤，把煤炭在地下燃烧气化，一次性转化为清洁的可供终端用户应用的能源与化工原料，实现地下无人、无生产设备采煤，与传统采煤和煤炭气化工艺相比，具有显著的经济、环保和社会效益。此技术可节省开采投资 78%，节约成本 62%，工效提高 3 倍以上，吨煤价值提高 10 倍

以上。且煤炭气化后灰渣留在地下，避免了传统采煤和煤炭气化造成的“三废”污染，并可减少地面下沉。

煤炭地下气化原理与地面气化相同，是煤与气化剂发生热化学作用转化为煤气的过程，如图 2-1 所示。基本过程是从地表沿煤层开掘两个钻孔 1 和 2，两钻孔底部有一水平通道 3 相连，图中 1、2、3 所包围的整体煤堆 4 为进行气化的区域。气化时，在钻孔 1 处点火并鼓入空气燃烧，此时在气化通道的一端形成一燃烧区，其燃烧面称为火焰工作面。生成的高温气体沿通道 3 向前渗透，同时把热量传给周围的煤层，随着煤层的燃烧，火焰工作面不断地向前向上推进，火焰工作面下方的折空区不断被烧剩的灰渣和顶板垮落的岩石所充填，同时煤块也可下落到折空区，形成一反应性很高的块煤区，随着系统的扩大，气化区逐渐扩及整个气化盘区的范围，并以很宽的气化前沿向出口推进，高温气体流向钻孔 2，由钻孔 2 获得焦油和煤气。

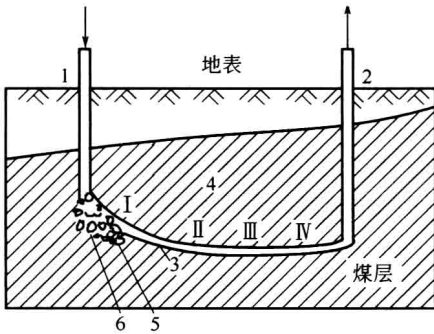


图 2-1 地下气化

- 1、2—钻孔；3—水平通道；4—气化盘区；5—火焰工作面；6—崩落的岩石  
I—燃烧区；II—还原区；  
III—干馏区；IV—干燥区

在气化过程中，气化通道 3 内由四个区来共同完成整个气化过程，即燃烧区（I）、还原区（II）、干馏区（III）和干燥区（IV）。

煤气组成为： $\varphi(\text{CO}_2)$ ，9%~11%； $\varphi(\text{CO})$ ，15%~19%； $\varphi(\text{H}_2)$ ，14%~17%； $\varphi(\text{CH}_4)$ ，1.4%~1.5%； $\varphi(\text{O}_2)$ ，0.2%~0.3%； $\varphi(\text{N}_2)$ ，53%~55%。

煤的地下气化是一种有效利用煤炭的方法，可从根本上消除煤炭开采的地下作业，将煤中可利用部分以洁净方式输出地面，残渣和废液留于地下，对环境保护与开发有很重要的意义。

## 二、地面气化技术的分类

地面气化技术是目前最常用的技术，随着新工艺、新设备、新技术的开发和利用，地面气化技术越来越成熟和完善，各种方法也都广泛推广应用到实际生产过程中。