

hetic Natural Gas Technology and Application

煤制合成天然气 技术与应用

● 张 明 主编 ● 李安学 黄新平 副主编



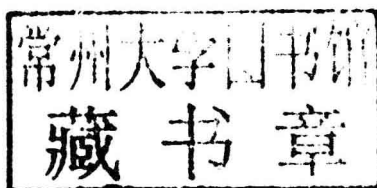
化学工业出版社

煤制合成天然气 技术与应用

Coal-based Synthetic Natural Gas
Technology and Application

张 明 主编

李安学 黄新平 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书依托我国煤制合成天然气示范项目的建设和运营经验,从工厂运行管理的角度论述了煤制天然气行业特点、工厂生产特点、产品特点、用户特点和生产调度特点,在此基础上系统介绍了煤制合成天然气工厂的原料保障、动力供应、空气分离、煤炭气化、合成气变换与净化、合成气甲烷化、天然气干燥、废水处理等环节的生产技术。其中煤气化技术是本书的重点,对固定床气化、循环流化床气化、干粉气流床气化、水煤浆气化等不同煤气化技术的发展历程、工艺流程、气化炉构成、气化参数、粗合成气组成、技术特点及应用情况分别进行了详细说明。本书还提供了煤制合成天然气示范项目建设和生产运营的第一手资料。

本书内容丰富,具有较强的实用性和新颖性,可供从事煤化工的项目建设者、设计人员、研究人员、技术开发人员、企业管理人员及生产操作人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤制合成天然气技术与应用/张明主编. —北京:
化学工业出版社, 2017.9
ISBN 978-7-122-30132-1

I. ①煤… II. ①张… III. ①天然气-生产工艺
IV. ①TE646

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 162611 号

责任编辑:傅聪智
责任校对:边涛

文字编辑:向东
装帧设计:刘丽华

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:三河市延风印装有限公司

装订:三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张38 字数975千字 2017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:198.00元

版权所有 违者必究

《煤制合成天然气技术与应用》编委会

主 编

张 明

副 主 编

李安学 黄新平

编写人员 (按姓氏笔画排列)

丁云丽	王 波	左玉邦	冯登科	刘文涛	刘利军	刘俊峰
刘彦臣	牟伟腾	杨明顺	李 渊	李安学	李自恩	李储祥
吴 枫	吴 彪	宋金城	张 明	张良行	张志明	张学亮
陈二孩	姜成旭	夏 岚	黄晓伟	黄新平	康善娇	寇志胜
韩少斐	暴广波	潘瑞峰				

前言

大唐能源化工有限公司从2009年开始组织实施两个煤制合成天然气项目，一是内蒙古大唐国际克什克腾1200万立方米^①/天（40亿立方米/年）煤制合成天然气项目（以下称克旗煤制天然气项目），于2009年8月20日获得国家发改委核准，是国家发改委核准的第一个煤制合成天然气项目，是国家示范工程，其第一系列（400万立方米/天）已实现75%以上负荷安全稳定运行，产品质量优于设计值，满足用户要求；其第二系列（400万立方米/天）工程建设已完成85%。二是辽宁大唐国际阜新1200万立方米/天煤制合成天然气项目（以下称阜新煤制天然气项目），于2010年3月5日获得国家发改委核准，是国家发改委核准的第三个煤制合成天然气项目，其第一系列（400万立方米/天）工程建设已完成80%。由于世界上只有美国大平原煤气化厂生产合成天然气，人们可获得的参考资料很少，因此大唐能源化工有限公司在组织实施以上项目过程中，大力支持科技创新，积极组织技术攻关，注重吸取经验教训，鼓励员工总结交流，经过几年的努力，已经打下了一定的基础，取得了一定的效果：博士后科研工作站、辽宁省煤制天然气工程技术研究中心、辽宁省煤制天然气工程研究中心分别于2013年和2011年在辽宁大唐国际阜新煤制天然气公司获得设立，大唐国际化工技术研究院牵头组织完成了国家“863”重点项目“煤气化甲烷化关键技术开发与煤制天然气示范工程”，据不完全统计，公司系统申请专利380余项，发表论文700余篇，出版《现代煤制天然气工厂概念设计研究》专著1部，部分成果已通过鉴定或获得奖励，多人次受邀在国际、国内会议报告交流，为煤炭清洁高效利用做出了贡献。

今天，随着人民生活水平的不断提高和大气污染治理压力的持续增大，我国天然气消费量迅速增加，对外依存度2013年已经超过30%，其后又连创历史新高。煤炭清洁高效利用是能源供给革命的核心内容，基于我国“缺油、少气、煤炭资源相对丰富”的能源结构特点，煤制合成天然气作为煤炭清洁高效利用的一种重要方式，已经成为保障能源供应安全、增加国内天然气供应量的一个重要选择，也形成了一股投资热潮。截至2016年10月，国家最早核准建设的煤制合成气项目4家，规模为151亿立方米/年，已投产的生产规模31亿立方米/年；国家发改委给予启动前期工作的煤制合成天然气项目18个，年产能802亿立方米，还有部分煤制合成天然气项目正在申报或规划之中。煤制合成天然气属新兴产业，参考资料不多，亟须系统论述煤制合成天然气生产技术的专著，以满足工程建设和生产运行需要。

基于上述情况，我们认为，大唐能源化工有限责任公司作为国内煤制合成天然气行业的先行者和实施国家示范工程的组织者，有责任、有义务进行系统思考，组织编著一部有关煤制合成天然气生产技术方面的专著，为行业提供参考。因此，我们从2014年7月开始组织相关人员，在总结克旗煤制天然气项目建设、一系列的投产运行以及阜新煤制天然气项目建

^① 本书中有关气体的单位“立方米”或“m³”，如无特殊说明均指在标准状况下的体积。

设经验基础上,参考国内外煤制合成天然气技术、项目建设和运行经验,历时2年,编著了这部《煤制合成天然气技术与应用》。

本书共十章,主要包括以下内容:

第一章绪论,概括介绍了煤制合成天然气的基本概念、生产流程、煤制合成天然气产业在国内外发展历程以及产业的特点,从技术、经济、市场三个方面分析了我国煤制合成天然气产业的发展前景,结合现行政策、行业标准、产品特性探讨了煤制合成天然气产品的应用,并对煤制合成天然气工厂生产调度特点和原则进行了探讨。

第二章原料煤的供应保障,从煤制合成天然气工厂用煤需求特点出发,简要说明了我国煤炭(褐煤)资源的特征和物化特性,进而分析了原料煤特性对气化行为造成的影响;概括了原料煤供应保障工作的主要内容,重点对采制化监控、混配及储存、运输及验收以及技术经济评价进行了详细说明。

第三章热动力系统,简要说明了热动力系统在煤化工企业中的地位和工程特点,对煤制合成天然气工厂热电站不同配置方案进行了分析,最后对全厂能效的影响因素进行了简要概括。

第四章空气分离,概括介绍了国内外空气分离技术发展现状,介绍了空气分离技术在固定床、流化床、气流床不同煤气化工艺路线上的应用情况;对空气分离技术的工艺特点、主要设备、控制系统、操作要点进行了详细说明。

第五章煤气化,简要介绍了煤气化技术的发展背景和现状,对固定床气化、流化床气化、干燥粉气流床气化、水煤浆气化等不同煤气化技术的发展、工艺流程、气化炉构成、气化参数、粗合成气组成、技术特点及应用情况分别进行了详细说明。为了能够在煤化工技术选择、生产运行管理方面给业界提供更多的参考,本章还特别编入了系统内以褐煤为原料实际应用碎煤加压气化技术、Shell粉煤加压气化技术和水煤浆气化技术的内容。

第六章合成气净化,针对煤气变换技术、净化技术、硫黄回收技术工艺特点、主要设备及应用情况分别进行了详细说明。

第七章合成气甲烷化,对合成气甲烷化的技术原理、发展历程及甲烷化催化剂进行了简要说明,对等温固定床、流化床、液相、绝热固定床等不同甲烷化工艺技术的特点和应用情况以及国内甲烷化技术开发现状、甲烷化装备进行了详细说明,最后对主要甲烷化技术进行了对比。

第八章煤制合成天然气干燥,对天然气干燥的分类、特点、检测方法进行了简要介绍,对天然气干燥工艺特点、流程指标、主要设备、操作特点、常见问题进行了阐述,并例举了天然气干燥技术在某煤制合成天然气项目上的应用情况。

第九章废水处理,简要概括了煤气化废水来源及废水特性,重点介绍了碎煤加压气化废水处理的技术特点、典型案例及在克旗煤制合成天然气项目上的示范应用情况,阐述了气化废水处理发展趋势。本章详细介绍了碎煤加压气化废水预处理技术——酚氨回收技术。

第十章煤制合成天然气示范工程建设与运行,重点从工程建设、生产运行与控制以及主要设备等方面对克旗煤制合成天然气示范工程进行了介绍。

本书主要是以大唐能源化工有限公司系统参加过煤制天然气工厂建设或运行的相关技术人员为主编著而成。全书由张明负责策划和协调,李安学、黄新平负责具体组织与统稿,丁云丽参与了书稿整理工作。参编人员除参加过煤制合成天然气工厂建设或运行的人员外,大唐多伦煤制烯烃项目和大唐呼伦贝尔化肥项目的部分人员也参与了编写,负责Shell粉煤加压气化技术和水煤浆气化技术内容。具体分工如下:第一章由李安学负责;第二章由刘利

军、康善娇、杨明顺负责；第三章由吴枫负责；第四章由姜成旭、暴广波、张学亮负责；第五章第一～五节由黄新平负责，第六节由张良行负责，第七节由张志明、陈二孩、黄晓伟负责，第八节由王波、李储祥、李自恩负责；第六章第一、二节由左玉邦负责，第三节由吴彪、宋金城负责，第四节由夏岚负责；第七章由左玉邦负责；第八章由姜成旭、李渊负责；第九章一～三节由刘俊峰、牟伟腾负责，第四节由丁云丽、韩少斐、冯登科负责；第十章第一、二节由潘瑞峰、寇志胜负责，第三节由刘彦臣负责，第四节由刘文涛负责。

在本书编写过程中，得到了大唐能源化工有限责任公司、内蒙古大唐国际克什克腾煤制天然气有限责任公司、辽宁大唐国际阜新煤制天然气有限责任公司、大唐国际化工技术研究院有限责任公司、大唐多伦煤化工有限责任公司、大唐呼伦贝尔化肥有限责任公司等单位的领导和技术人员的大力支持和帮助，在此致以诚挚的谢意！

我国煤制天然气事业正处于起步发展之中。尽管我们尽了最大努力，但由于本书所涉及的专业多、知识面广、新技术多，部分工作还存在争议，同时所有参编人员又都来自于生产和建设一线，加上水平有限，书中涉及的内容和结论会有不尽完美之处，难免会存在疏漏和不足，恳请读者批评指正，并请在使用过程中加以甄别。由于商业上的原因以及部分工作还存在很大不确定性，因此本书内容还不全面，部分数据介绍得比较简单，敬请谅解。

编 者
2017年5月

目录

第一章 绪论

第一节 基本概念	001	五、我国天然气供应和消费特点	011
一、直接煤制合成天然气技术	001	六、煤制合成天然气工厂分类	011
二、间接煤制合成天然气技术	002	七、面向城镇用户的煤制合成天然气供应链 上存在的主要矛盾	012
第二节 发展背景和发展历程	003	八、煤制合成天然气工厂调峰问题	012
一、国外煤制合成天然气产业发展的背景	003	第四节 我国煤制合成天然气产业发展 前景	013
二、我国煤制合成天然气产业发展的背景	003	第五节 煤制合成天然气产品质量特点 与应用分析	017
三、我国煤制合成天然气行业发展历程	005	第六节 煤制合成天然气工厂生产调度	023
四、部分煤制合成天然气项目概况	006	一、煤制合成天然气工厂生产调度特点	023
第三节 煤制合成天然气产业特点	008	二、生产调度原则	023
一、煤制合成天然气工厂技术特点	008	参考文献	026
二、原料煤资源特点	009		
三、煤制合成天然气工厂生产装置特点	010		
四、煤制合成天然气产品特点	010		

第二章 原料煤的供应保障

第一节 煤炭资源概述	027	第三节 原料煤特性对气化行为的 影响	036
一、我国煤炭资源特征	027	第四节 原料煤保障工作范畴	039
二、我国褐煤资源特征	028	一、原料煤产销计划制定	039
第二节 煤炭的物化特性	030	二、原料煤采制化监控	040
一、煤炭的物理和物理化学性质	030	三、原料煤混配与存储	040
（一）煤的密度	030	四、原料煤运输与验收	040
（二）煤的机械性质	030	五、原料煤保障的社会经济效益	040
（三）煤的热性质	031	第五节 原料煤的采制化监控	041
（四）煤的电性质和磁性质	032	一、全水分测定	041
（五）煤的光学性质	032	二、工业分析	042
（六）煤的润湿性	033	三、全硫测定	043
（七）煤的比表面积和孔隙率	033	四、发热量测定	044
二、煤的化学性质	033	五、灰熔融性测定	045
（一）煤的氧化	033	六、元素分析	045
（二）煤的热解	034	七、灰成分分析	046
（三）煤的加氢	035	第六节 原料煤的混配及储存	047
（四）煤的氯化	035	一、原料煤混配	047
（五）煤的磺化	035		

二、原料煤储存	051
第七节 原料煤的运输及验收	051
一、煤的运输	051
二、煤的验收	053
(一) 原料煤数量验收	053
(二) 原料煤质量验收	054

第八节 典型项目原料煤供应的技术经济 评价	056
一、混配煤的可行性及经济性分析	057
二、提高褐煤成块率的经济性分析	057
三、试烧烟煤的经济性分析	058
参考文献	060

第三章 热动力系统

第一节 热动力系统在现代煤化工企业 中的地位	061
第二节 煤制合成天然气工厂的基本情况 和工程技术特点	061
一、煤制合成天然气工厂的基本情况	061
二、工程技术特点	062
第三节 煤制合成天然气工厂热电站的配 置及与化工装置的关联	062
一、热电站的配置	062
二、热电站与化工装置的关联	062
第四节 煤制合成天然气工厂热动力系 统的配置方案	063
第五节 煤化工企业热动配置方式及 评述	065

一、“以汽(热)定电”的模式	065
二、“自供汽+外购电”的模式	066
三、热、电、化一体化高效大机组的模式	068
四、配套建设 IGCC 联合循环发电装置的 模式	068
第六节 煤制合成天然气工厂的能效 分析	070
一、大唐克旗煤制合成天然气项目的综合 能效	070
二、影响煤制合成天然气项目综合能效的 因素	070
三、煤制合成天然气升级示范项目不同热 电方案的能效比较	071

第四章 空气分离

第一节 概述	073
第二节 空气分离技术	074
一、空气分离方法	074
二、低温法分离空气的主要技术	074
(一) 透平膨胀机制冷技术	074
(二) 低温精馏技术	075
第三节 空分技术在煤化工项目上的 应用	077
一、固定床煤气化技术配套空分设备	078
二、流化床煤气化技术配套空分设备	079
三、气流床煤气化技术配套空分设备	080
第四节 主要设备	083
一、空气压缩机	083
(一) 全离心式压缩机	083
(二) 轴流+离心式压缩机	085
二、直接空冷器	085
三、分子筛纯化器	086
四、膨胀机	087

(一) 增压透平膨胀机结构	087
(二) 液体膨胀机	089
五、板式换热器	089
(一) 主换热器	089
(二) 冷凝蒸发器	090
六、低温精馏塔	091
(一) 筛板塔	091
(二) 填料塔	091
七、低温液体泵	092
(一) 往复式低温液体泵	093
(二) 离心式低温液体泵	093
八、低温液体储罐	094
(一) 高真空绝热储罐	094
(二) 真空粉末绝热储罐	095
(三) 普通粉末绝热储罐	095
第五节 控制系统	095
一、压缩机组控制	096
(一) 压缩机组防喘振控制	096

(二) 转速模块化控制	097
二、空冷器防冻控制系统	098
三、纯化系统控制	098
四、低温液体泵的自动控制系统	100
五、自动变负荷控制	100
第六节 操作要点及事故案例分析	102
一、空气分离装置的操作要点	102
(一) 机组的主要操作	102

(二) 装置的主要操作	103
二、事故案例分析	105
(一) 空气分离装置退氧操作	105
(二) 控制油压低引发机组跳车事故	105
(三) 分子筛纯化器进水事故	106
(四) 空气及污氮气管道爆裂事故	107
(五) 主冷爆炸事故	107
参考文献	108

第五章 煤气化

第一节 概述	109
一、基本概念	109
二、煤气化技术分类	110
三、煤气化技术选择	112
第二节 固定床气化技术	113
一、碎煤加压固态排渣气化技术	113
(一) 技术特征	113
(二) 鲁奇(Lurgi) 煤气化技术	114
(三) 碎煤加压固态排渣气化	122
二、碎煤加压液态排渣气化技术	129
第三节 流化床气化技术	135
一、鼓泡流化床气化技术	135
(一) 温克勒煤气化技术	135
(二) 高温温克勒煤气化技术	135
二、灰熔聚流化床气化技术	140
(一) U-gas® 气化技术	140
(二) 灰熔聚流化床粉煤气化技术	144
(三) 灰团聚流化床气化技术	147
三、循环流化床气化	148
四、输运床气化技术	148
第四节 干燥粉气流床气化技术	152
一、技术特点及主要影响因素	152
二、气流床气化工序过程	153
三、壳牌干燥粉加压气化技术	154
四、西门子干燥粉加压气化技术	161
五、航天粉煤加压气化技术	167
六、科林干燥粉加压气化技术	174
七、Prenflo 加压煤气化技术	178
八、中船重工七一一所塔型气化炉	181
九、西安热工院两段式干燥粉气化技术	184
十、SE-东方炉气化技术	187
第五节 水煤浆气化技术	191
一、技术主要特点	191

二、GE 水煤浆加压气化技术	192
三、E-Gas™ 水煤浆气化技术	200
四、多喷嘴对置式水煤浆加压气化技术	204
五、清华炉煤气化技术	211
第六节 碎煤加压气化技术的应用	217
一、概述	217
(一) 碎煤加压气化的发展历程	217
(二) 碎煤加压气化的特点	219
二、碎煤加压气化过程	220
(一) 碎煤加压气化的过程特点	220
(二) 碎煤加压气化过程分析	221
三、煤种和煤的性质对加压气化过程的 影响	228
(一) 煤种对加压气化过程的影响	228
(二) 煤的性质对加压气化过程的影响	230
四、碎煤加压气化的工艺操作条件的 影响及选定	238
(一) 气化反应温度与汽氧比	238
(二) 气化剂温度的影响与确定	239
(三) 气化操作压力的影响与确定	240
五、碎煤加压气化技术的主要指标及 工艺计算	243
(一) 生产数据统计	243
(二) 主要指标及计算	245
(三) 工艺过程计算应用	248
六、碎煤加压气化炉炉型的发展和 基本构造	256
(一) 鲁奇炉的代表炉型	256
(二) 加压气化炉的结构及附属设备	261
七、加压气化在国内的应用及发展	269
(一) 加压气化炉的引进与自主开发	269
(二) 国内气化工序流程及特点	270
八、加压气化装置的工艺管理	276

(一) 生产过程的控制内容	276	(三) Shell 煤气化工艺流程	306
(二) 气化炉的原始开车操作	277	(四) 项目 Shell 煤气化主要设备	312
(三) 气化炉短期停车后的开车	280	(五) 装置消耗指标	317
(四) 气化炉的停车	281	(六) 装置自动化水平	318
(五) 气化炉的正常操作要点	283	(七) 项目 Shell 煤气化装置问题与解决	
九、4.0MPa 加压气化炉的重点技术改进 ..	288	方案	319
十、煤气水分离过程	289	第八节 水煤浆气化技术的应用	322
(一) 煤气水的来源及组成	289	一、概述	322
(二) 煤气水分离过程及原理	290	二、褐煤介绍	323
(三) 煤气水分离流程	293	三、气化工艺过程	324
第七节 Shell 加压气化技术的应用	294	四、气化装置主要设备	326
一、概述	294	五、主要工艺技术指标	328
二、原料及质量对 Shell 气化的影响	295	六、褐煤水煤浆气化运行状况	329
(一) 煤的特性对 Shell 煤气化的影响	295	七、褐煤水煤浆气化运行分析与总结	330
(二) Shell 煤气化对煤粉的要求	296	(一) 褐煤质量对水煤浆气化的影响	330
三、Shell 煤气化的影响因素及工艺计算	297	(二) 褐煤水煤浆气化的影响因素	332
(一) Shell 煤气化的影响因素	297	(三) 温度对煤浆质量的影响	333
(二) Shell 煤气化反应过程的工艺计算 ..	298	(四) 炉砖	333
四、褐煤在 Shell 煤气化装置中的应用	301	(五) 原料煤	333
(一) 多伦煤制烯烃项目概况	301	参考文献	334
(二) 预干燥装置	303		

第六章 合成气净化

第一节 煤气变换技术	337	三、低温甲醇洗工艺	352
一、变换反应	337	(一) 林德低温甲醇洗工艺	352
二、变换催化剂	337	(二) 鲁奇低温甲醇洗工艺	353
(一) Fe-Cr 系催化剂	338	(三) 大连理工大学低温甲醇洗工艺	354
(二) Cu-Zn 系催化剂	338	(四) 赛鼎工程有限公司低温甲醇洗工艺 ..	355
(三) Co-Mo 系催化剂	339	(五) 上海国际化建工程咨询公司低温	
(四) 变换催化剂制备方法	339	甲醇洗工艺	355
(五) 变换催化剂的选择原则	339	(六) 低温甲醇洗工艺比较	356
三、煤气变换工艺流程与设备	340	四、煤制天然气项目低温甲醇洗工艺选择	357
(一) 中温变换工艺流程	340	第三节 制冷	359
(二) 中温变换串低温变换工艺流程	340	一、混合制冷	359
(三) 全低温变换工艺流程	342	(一) 混合制冷简介	359
(四) 中低低变换工艺流程	343	(二) 工艺原理	359
(五) 适用于高 CO 含量的耐硫变换工艺 ..	344	(三) 混合制冷流程	359
(六) 耐油耐硫变换工艺	346	二、吸收制冷	360
(七) 变换设备	346	三、压缩制冷	362
四、变换工艺的选择	347	(一) 丙烯压缩制冷	362
第二节 净化技术	347	(二) 氨压缩制冷	364
一、基本原理	347	四、制冷方案的选择	365
二、工艺流程与技术特点	349	第四节 硫黄回收技术	367

一、克劳斯硫回收工艺	367	四、克劳斯工艺方案的选择	372
二、克劳斯回收工艺流程	370	参考文献	375
三、克劳斯硫黄回收工艺及设备发展进程	371		

第七章 合成气甲烷化

第一节 甲烷化原理与发展历程	376	三、液相甲烷化工艺	384
一、技术原理	376	四、绝热固定床甲烷化技术	385
二、发展历程	376	(一) Lurgi 甲烷化工艺	386
第二节 甲烷化催化剂	377	(二) Davy 甲烷化技术	390
一、活性组分	378	(三) Topsøe 甲烷化技术	394
二、载体	378	(四) 其他绝热固定床甲烷化工艺	400
三、助剂	378	第四节 国内甲烷化技术开发现状	402
四、制备方法	378	第五节 甲烷化设备	404
五、催化剂还原	379	一、甲烷化反应器	404
六、催化剂失活	379	二、废热锅炉、蒸汽过热器	404
第三节 甲烷化工艺技术	380	三、循环压缩机	405
一、等温固定床甲烷化工艺	380	第六节 主要甲烷化技术比较与技术 选择建议	406
二、流化床甲烷化工艺	380	一、主要甲烷化技术对比分析	406
(一) Bureau of Mines 工艺	381	二、综合评价与技术选择建议	409
(二) 美国烟煤研究公司 Bi-Gas 项目	382	参考文献	410
(三) Comflux 工艺	383		

第八章 煤制合成天然气干燥

第一节 概 述	414	三、低温分离干燥工艺	425
一、煤制合成天然气干燥的必要性	414	第三节 干燥装置运行流程与指标	426
二、煤制合成天然气水含量的测定方法	415	一、原料气组成	426
(一) 吸收称量法	415	二、产品及特性	427
(二) 露点测量法	416	(一) 甲烷	427
(三) 图算测量法	416	(二) 氢气	428
三、煤制合成天然气干燥方法	417	(三) 二氧化碳	428
(一) 溶剂吸收法	418	三、工艺原理	429
(二) 固体吸附法	419	四、工艺流程	430
(三) 冷却法	420	五、工艺指标	431
(四) 膜分离法	421	第四节 干燥装置主要设备	431
(五) 超声速法	422	一、吸收塔	431
四、几种天然气干燥的方法及特点对比	423	(一) 吸收塔的分类	432
第二节 煤制合成天然气干燥工艺	423	(二) 吸收塔的基本结构	432
一、三甘醇干燥工艺	423	二、再生塔	434
二、分子筛干燥工艺	424	三、换热器	434
(一) 两塔流程	425	四、闪蒸罐	435
(二) 三塔或多塔流程	425	五、缓冲罐	436

六、过滤器	436
七、泵	436
第五节 操作特点及影响因素	438
一、重沸温度	438
二、吸收塔运行压力	438
三、吸收剂循环量	438
四、汽提气量	439
五、其他参数控制	439
第六节 常见问题分析	440
一、产品气水露点偏高	440
二、吸收剂消耗量过高	440
三、吸收剂裂解	441
四、吸收剂起泡	441
五、吸收剂循环管路堵塞	441

六、重沸器内吸收剂加热时温度开始降低	441
第七节 某煤制合成天然气干燥装置	
简介	442
一、装置概况	442
二、煤制合成天然气干燥系统	442
(一) 三甘醇的理化性质	442
(二) 工艺原理	443
(三) 工艺流程及说明	444
三、设备系统	445
四、公用工程系统	448
五、自控仪表系统	448
六、影响煤制合成天然气干燥系统的	
条件	450
参考文献	451

第九章 废水处理

第一节 概 述	452
一、气化废水来源	452
二、气化废水特点	452
三、气化废水处理的必要性	453
第二节 碎煤加压气化废水处理技术	454
一、碎煤加压气化废水处理技术概述	454
(一) 有价值物质回收单元	454
(二) 污水处理单元	455
(三) 污水回用处理单元	460
(四) 浓盐水处理单元	460
二、碎煤加压气化废水处理技术典型案例	461
(一) 美国大平原气化厂废水处理方案	461
(二) 南非萨索尔废水处理方案	462
(三) 中煤龙化哈尔滨煤化工有限公司	
废水处理方案	463
(四) 义马气化厂废水处理方案	463
(五) 大唐公司“活性焦吸附-生化处理”	
工艺方案	463
三、克旗项目碎煤加压气化废水处理示范	
工艺	464
(一) 预处理单元	465
(二) 污水处理单元	467
(三) 污水回用处理单元	470
(四) 浓盐水处理单元	472
第三节 气化废水处理现状与发展趋势	478
一、气化废水处理现状	478

二、气化废水处理发展趋势	479
第四节 酚氨回收	480
一、概述	480
二、几种酚氨回收流程对比	481
(一) 原民主德国引进的老工艺	481
(二) 用二异丙基醚作萃取剂的酚氨回收	
新工艺	483
(三) 用甲基异丁基酮(MIBK)作萃取剂的	
酚氨回收新工艺	485
三、煤制天然气示范项目酚氨回收技术	
简介	487
(一) 装置概况	487
(二) 废水处理基本原理	487
(三) 工艺流程及流程图	489
(四) 工艺指标	489
(五) 原材料及产品介绍	491
(六) 关键参数的控制	494
(七) 主要设备及参数	504
(八) 常见事故处理	511
四、酚回收污染物及产品的测定方法	513
(一) 总酚含量的测定方法	513
(二) 酚水中游离氨与固定氨的测定——	
蒸馏滴定法	514
(三) COD 含量的测定方法	515
(四) 粗酚的测定方法	515
参考文献	517

第十章 煤制合成天然气示范工程建设与运行

第一节 煤制合成天然气示范工程		(四) 操作参数及操作要点	541
概况	520	二、合成气变换与净化	543
第二节 工程建设	521	(一) 工艺过程及主要技术指标	543
一、工程建设概况	521	(二) 原料、产品及物料平衡	545
(一) 克旗煤制天然气项目	521	(三) 能耗分析	547
(二) 阜新煤制天然气项目	522	(四) 操作参数及操作要点	548
二、工程实施	522	三、甲烷化与干燥	550
(一) 实施阶段组织管理	522	(一) 工艺过程及主要技术指标	550
(二) 工程承包管理	523	(二) 原料、产品及物料平衡	551
(三) 勘察设计管理	523	(三) 能耗分析	552
(四) 物资采购管理	524	(四) 操作参数及操作要点	553
(五) 施工管理	524	四、废水处理与回用	554
三、试车	526	(一) 工艺过程及主要技术指标	554
(一) 试车组织机构及职责分工	527	(二) 原料、产品及物料平衡	557
(二) 主要试车时间节点	530	(三) 操作参数及操作要点	558
(三) 试车特点及做法	531	(四) 能耗分析	564
(四) 主要问题及采取的措施	531	五、节能与降耗	565
第三节 生产运行与控制	533	第四节 主要设备	568
一、煤气化与分离	533	一、煤气化与煤气水分离	568
(一) 工艺过程及主要技术指标	533	二、合成气变换与净化	575
(二) 原料、产品及物料平衡	538	三、酚回收与硫回收	586
(三) 能耗分析	540	四、甲烷化与干燥	593

绪论

天然气作为一种清洁、便捷、安全的优质能源，在世界各地越来越多的领域得到广泛应用，有效地促进了社会进步和经济发展。随着国内城镇化进程的加快、人民生活水平的提高，以及环保意识的增强，我国天然气需求量大幅增长。在从国外进口天然气的同时，基于我国“贫油、少气、煤炭资源相对丰富”的资源特点及可持续发展的要求，高碳能源低碳化清洁利用已成为我国能源利用的发展趋势，使得通过煤炭气化转化为高热值的天然气成为一项重要的战略选择。在天然气供应紧张和价格连续上涨的情况下，诸多企业进入了煤制合成天然气产业，促进了煤制合成天然气产业的发展。

第一节 基本概念

煤制合成天然气（Coal to Synthetic Natural Gas, Coal to SNG）通常被简称为煤制天然气或煤制气，是指以煤炭为原料制取的以甲烷为主要成分、符合天然气热值等标准的气体。煤制合成天然气也常被称为煤制替代天然气、煤制代用天然气（Coal to Substitute Natural Gas, Coal to SNG），也有人称为煤基合成天然气（煤基替代天然气、煤基代用天然气，Coal-based SNG），还包括以焦炉煤气、兰炭尾气等为原料制取的合成天然气^[1]。上述称法在本书中不作区分。

按照化学反应步骤的不同，煤制合成天然气技术可分为直接煤制合成天然气技术和间接煤制合成天然气技术。直接煤制合成天然气技术也被称为“一步法”煤制合成天然气技术。间接煤制合成天然气技术也被称为“两步法”煤制合成天然气技术，第一步指煤气化过程，第二步指煤气化产品——合成气（经变换和净化调整氢碳比后的净煤气）甲烷化的过程。到目前为止，在役或在建的煤制合成天然气工厂均采用间接煤制合成天然气技术。

一、直接煤制合成天然气技术

在 20 世纪 70 年代，美国 Exxon 等公司进行了煤催化气化制天然气研究，以正在进行商业化推广的 Bluegas 为例：将煤粉碎到一定粒度，与催化剂充分混合后进入流化床反应器，在催化剂的作用下与气化剂水蒸气发生反应，生成 CH_4 、 CO 、 H_2 、 CO_2 、 H_2S 等。通

过旋风分离器除去固体颗粒, 经过净化单元脱除硫化物, 经过气体分离将甲烷分离, 得到产品气 SNG (合成天然气), 流程示意见图 1-1。中国的新奥集团也进行了大量的研究, 建成了 1t/d 的中试装置并成功运行, 为实现直接煤制合成天然气技术的工业化奠定了基础。

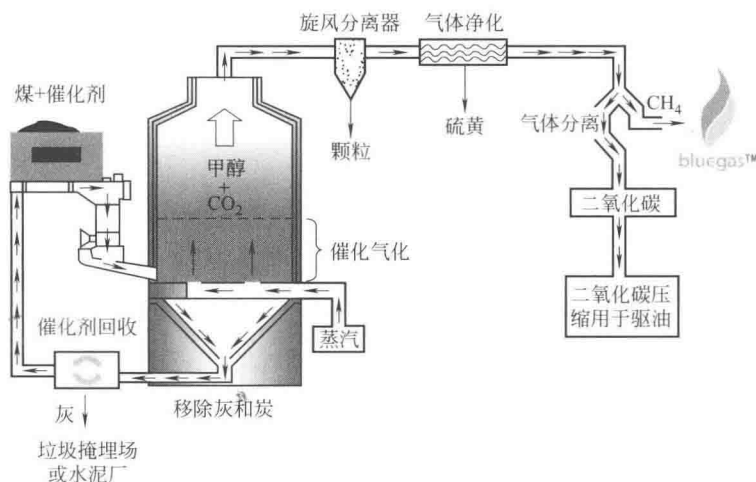


图 1-1 Bluegas 直接煤制合成天然气技术流程示意图

二、间接煤制合成天然气技术

间接煤制合成天然气过程是通过煤气化将煤转化为合成气 (主要含 CO 和 H_2) 或含一定量低碳烃的粗合成气, 粗合成气经水蒸气变换调整氢碳比 (要求 $\text{H}_2/\text{C} \approx 3.0$)、净化 (脱硫、脱碳) 后进行甲烷化反应, 得到甲烷含量大于 94% 的 SNG。间接煤制合成天然气流程示意如图 1-2 所示。



图 1-2 间接煤制合成天然气流程示意图

主要工艺单元包括:

(1) 空分 通过空气分离, 为煤气化装置提供氧气, 并为煤制合成天然气主装置的正常运行提供氮气、仪表空气、工厂空气等。

(2) 煤气化 以氧气、蒸汽为气化剂, 原料煤进入气化单元发生反应, 生产粗煤气。

(3) 粗煤气变换、冷却 经过部分变换调节粗煤气中 H_2 与 CO 的比例, 为粗煤气进入净化流程做准备。

(4) 净化 将来自变换、冷却单元的粗煤气脱除 CO_2 和 H_2S 等有害物质, 得到净化气, 达到进入甲烷化装置的标准, SNG 工厂净化单元一般采用低温甲醇洗工艺。

(5) 甲烷化 来自净化的原料气通过甲烷化反应生产甲烷。

(6) 天然气干燥和压缩 通过溶剂吸收干燥, 降低 SNG 的水含量, SNG 经过增压, 达到进入天然气管网的要求。

第二节 发展背景和发展历程

美国、英国和德国等发达国家早在 20 世纪前半叶就已开展煤制合成天然气技术研发,多数国家只作为技术储备而未投入商业运行,目前仅美国在发展煤制气项目。美国大平原煤制气厂是目前全球(除中国外)唯一一家商业化运行的煤制气工厂,该厂建于 1984 年,年产能 14 亿立方米,目前运行情况良好。

一、国外煤制合成天然气产业发展的背景

早在 150 多年前,英国成功将煤气用于路灯照明后,人类在民用、工业、发电等领域大量使用煤气。在第一次世界大战前,当时的一些大中型城市都建立了气体输送管网设施。煤气的主要成分是 H_2 、 CO 和 CH_4 , 来源于煤炉、水煤气发生炉和冶金焦炉等。因煤炭和石脑油等原料价格上涨、煤气中的 CO 易令人窒息死亡,特别是一些常规天然气矿藏的陆续发现,煤气逐渐被市场淘汰。虽然煤气已退出历史舞台,但气体燃料的便利性并没有让人类停下寻求清洁高效燃料的脚步。

1902 年, Sabatier 和 Senderens 发现利用 CO (含 CO_2) 与 H_2 可以催化合成 CH_4 , 并揭示了甲烷化反应机理,该发现掀起了甲烷化技术研发与应用热潮。甲烷化催化剂和工艺很快在合成氨和制氢工业中得到广泛应用,以脱除合成气中少量的 CO 和 CO_2 , 防止合成氨催化剂中毒。Fisher 和 Tropsch 受甲烷化技术启发,于 1926 年开发了对人类能源产业有重大意义的费托 (F-T) 合成技术(即煤间接液化制燃料油技术)。但以合成天然气为目标的甲烷化技术因反应热效应大、工艺复杂,直至 20 世纪 40 年代才得以起步发展。

20 世纪 70 年代初爆发了石油危机,美国、德国、英国、日本等国兴起了合成天然气技术研发和产业高潮,诞生了英国 ICI 石脑油制合成天然气、美国大平原煤制合成天然气等多个中试或示范项目,但仅有美国大平原煤制合成天然气项目成功建设并商业化运行。具有合成天然气产业领域里程碑意义的美国大平原厂于 1980 年开始建设,1984 年 7 月 28 日产出合格的天然气,并于同年达到设计能力。

随着 80 年代中后期石油市场回暖,除少数国家外基本搁置了合成天然气工厂建设,但各技术开发方均积极开展专利的国际布局,尤其是在煤炭资源较为丰富以及煤炭进口量较多的国家。

韩国是世界上第二大液化天然气 (LNG) 进口国。韩国浦项集团在韩国光阳地区 (Gwangyang) 建设了煤制合成天然气项目,该项目毗邻其光阳钢厂,生产得到的 SNG 将替代进口 LNG,该项目可以弥补韩国本土天然气供应的不足,增强集团整体竞争力。

二、我国煤制合成天然气产业发展的背景

1. 我国的国情促使我们寻求多渠道解决天然气供需矛盾

中国资源禀赋的特点是“贫油、少气、煤炭资源相对丰富”。在探明的化石能源储量中煤炭占 94.3%,石油天然气仅占 5.7%。《BP 2012 世界能源报告》数据表明,我国探明的煤可开采储量 1145 亿吨,占世界探明可采储量的 13.3%;石油探明储量仅 20 亿吨,占世界探明储量的 0.9%;天然气资源探明储量 3.1 万亿立方米,占世界探明储量的 1.5%。

天然气作为一种优质、高效、清洁的燃料,在世界各地越来越多的领域已逐渐取代煤炭或石油,被广泛应用于化工、发电等工业以及商业和民用等领域,有效地促进了社会进步及