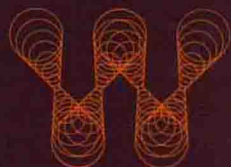


普通高等教育规划教材

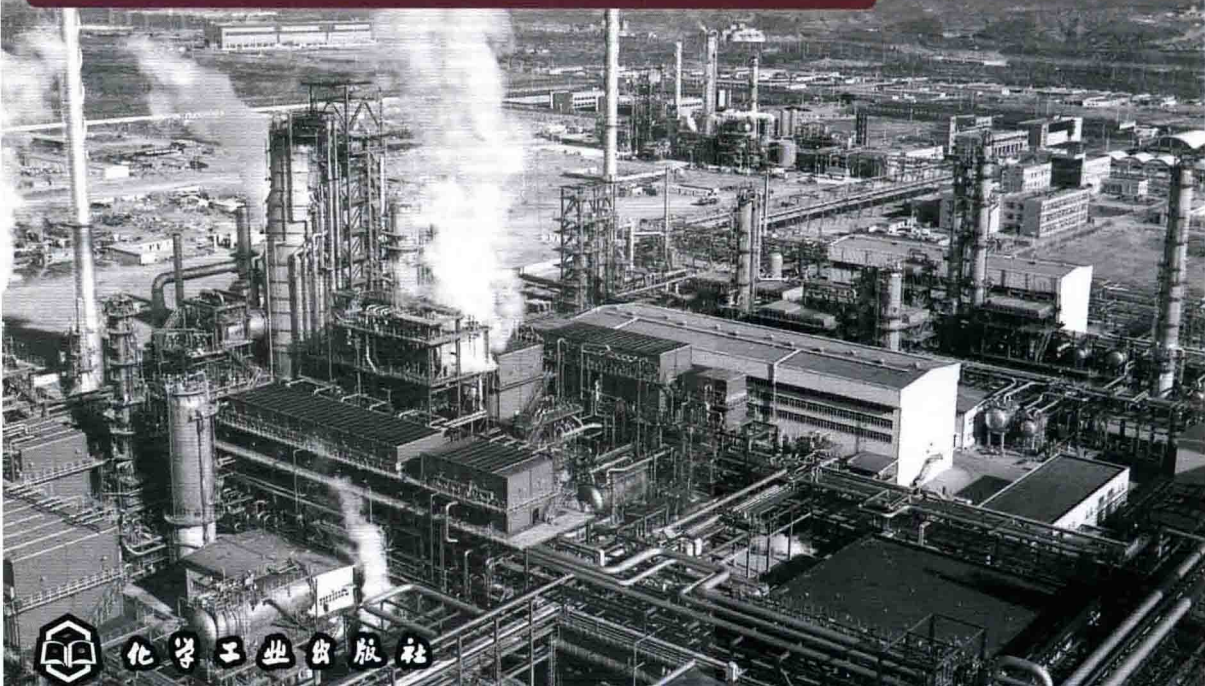
# 煤化工工艺学



鄂永胜 刘通 主编

贺凤伟 主审

MEIHUAGONG GONGYIXUE



化学工业出版社

普通高等教育规划教材

# 煤化工工艺学

鄂永胜 刘 通 主编  
贺凤伟 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要讲解煤化工生产的反应原理、生产实用工艺和主要生产设备,同时兼顾最新工艺技术的开发和应用情况。全书分九章,分别介绍了绪论、炼焦及化工产品回收、煤的低温干馏、煤的气化、煤与碳—化学、碳—化学品合成技术、煤的直接液化、洁净煤技术、煤化工生产与环境保护。

本书可作为高等学校煤化工专业学生的教材,也可供从事煤化工设计、生产、科研的技术人员及有关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

煤化工工艺学/鄂永胜,刘通主编. —北京:化学工业出版社, 2015.9  
普通高等教育规划教材  
ISBN 978-7-122-24725-4

I. ①煤… II. ①鄂…②刘… III. ①煤化工-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TQ53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第171013号

---

责任编辑:张双进  
责任校对:边涛

文字编辑:向东  
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:三河市延风印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张18 字数478千字 2015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:39.00元

版权所有 违者必究

# | 前言 |

《煤化工工艺学》一书主要讲解煤化工生产的反应原理、生产实用工艺和主要生产设备，同时兼顾最新工艺技术的开发和应用情况。其中生产实用工艺的讲解是本书的重点。

本书的编排突出了两个特点：一个是注重理论联系实际，着重讲解煤化工领域现行应用的生产工艺，如化学产品回收中脱硫的 HPF 脱硫法、粗苯精制的低温加氢工艺、低温干馏中的兰炭生产技术、神华集团的煤炭直接液化技术和甲醇制烯烃工艺等；另一个是注重对煤化工专业领域的新知识、新技术和新工艺的讲解，如煤和碳一化学的关系、甲醇制汽油等甲醇化工技术等。

全书共分九章，分别介绍了绪论、炼焦及化学产品回收、煤的低温干馏、煤的气化、煤与碳一化学、碳一化学品合成技术、煤的直接液化、洁净煤技术和煤化工生产与环境保护内容。

本书可作为高等学校煤化工专业教材，也可供从事煤化工设计、生产、科研的技术人员及有关专业师生参考。

本书由辽宁科技学院鄂永胜、刘通任主编，田景利、王强参编。其中第 1 章、第 5 章和第 6 章由鄂永胜编写，第 4 章、第 7 章和第 8 章由刘通编写，第 3 章、第 9 章由田景利编写，第 2 章由王强编写。全书由辽宁科技学院贺凤伟主审。

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，希望各位专家和读者提出批评和指正。

编者

2015 年 1 月

# 目 录

1 绪论	1
1.1 煤及煤化工	1
1.2 煤化工发展史	2
1.2.1 初创时期	3
1.2.2 全面发展时期	3
1.2.3 萧条时期	4
1.2.4 技术开发时期	4
1.3 传统煤化工与现代煤化工	4
1.4 本书简介	6
参考文献	7
2 炼焦及化学产品回收	8
2.1 概述	8
2.1.1 炼焦的发展	8
2.1.2 炼焦化学产品的组成与产率	9
2.1.3 回收与精制方法	10
2.2 煤的成焦过程	11
2.2.1 成焦过程基本概念	11
2.2.2 煤的黏结和半焦收缩	11
2.2.3 焦炉煤料中热流动态	12
2.2.4 炭化室内成焦特征	13
2.2.5 气体析出途径	13
2.3 焦炉结构	14
2.3.1 焦炉整体结构	14
2.3.2 炼焦炉的机械与设备	17
2.4 炼焦生产工艺	25
2.4.1 煤的工业分类	25
2.4.2 原料煤的特性	25
2.4.3 炼焦生产工艺	26
2.5 炼焦技术发展	27
2.5.1 改进炼焦备煤	28
2.5.2 捣固煤炼焦	29
2.5.3 成型煤	29
2.5.4 选择破碎	30
2.5.5 煤干燥预热和调湿	32
2.5.6 干法熄焦	33
2.5.7 干法熄焦与煤预热联合	34
2.5.8 预热压块分段炼焦	34
2.5.9 热回收焦炉	35
2.6 粗煤气的净化	35
2.6.1 粗煤气初步冷却	35
2.6.2 焦油和氨水分离	37
2.6.3 煤气输送	38
2.6.4 煤气脱焦油雾	38
2.6.5 煤气除萘	39
2.6.6 脱硫 (HPF 脱硫法)	39
2.6.7 氨和吡啶的回收	41
2.7 焦油回收及加工	42
2.7.1 焦油组成及主要产品用途	43
2.7.2 焦油精制前的准备	45
2.7.3 焦油蒸馏工艺流程	45
2.7.4 馏分脱酚和吡啶碱	50
2.7.5 粗酚的制取	51
2.7.6 精酚生产	51
2.7.7 吡啶精制	53
2.7.8 工业萘生产	54
2.7.9 精萘生产	55
2.7.10 粗蒽和精蒽	57
2.8 粗苯回收及精制	59
2.8.1 煤气最终冷却和除萘	59
2.8.2 粗苯吸收	61
2.8.3 富油脱苯	61
2.8.4 洗油再生	62
2.8.5 粗苯组成、产率和用途	63
2.8.6 粗苯精制	63
2.8.7 初步精馏	64
2.8.8 硫酸法精制	64
2.8.9 吹苯和最终精馏	65
2.8.10 粗苯催化加氢精制	65
参考文献	72

3 煤的低温干馏 .....	73		
3.1 煤低温干馏介绍 .....	73	3.2.4 多段回转炉热解工艺 (MRF 工艺) .....	79
3.1.1 煤低温干馏概述 .....	73	3.3 兰炭生产工艺 .....	80
3.1.2 低温干馏的历史及展望 .....	74	3.3.1 兰炭生产概述 .....	80
3.1.3 低温干馏的产品 .....	74	3.3.2 兰炭与焦炭区别 .....	81
3.2 低温干馏生产工艺 .....	75	3.3.3 兰炭生产的炉型 .....	83
3.2.1 气体热载体直立炉工艺 .....	76	3.3.4 兰炭生产工艺 .....	84
3.2.2 内热式固体热载体工艺 .....	76	参考文献 .....	86
3.2.3 外热式立式炉 .....	79		
4 煤的气化 .....	87		
4.1 概述 .....	87	4.5.4 GSP 粉煤气化法 .....	123
4.2 煤气化的基本原理 .....	88	4.5.5 德士古 (Texaco) 气化法 .....	125
4.2.1 煤气化过程 .....	88	4.6 煤气化联合循环发电 .....	128
4.2.2 基本化学反应 .....	90	4.6.1 煤炭气化联合循环发电 过程 .....	128
4.2.3 气化方法 .....	91	4.6.2 IGCC 工艺操作条件对系统 效率的影响 .....	129
4.3 固定床气化法 .....	95	4.6.3 对煤气联合循环发电工艺的 评价 .....	129
4.3.1 发生炉煤气 .....	95	4.7 煤炭地下气化 .....	130
4.3.2 水煤气 .....	99	4.7.1 地下气化的原理 .....	130
4.3.3 两段式完全气化炉 .....	103	4.7.2 地下气化方法 .....	131
4.3.4 加压气化原理与工艺 .....	105	4.7.3 影响因素 .....	132
4.3.5 加压液态排渣气化炉 .....	108	4.8 煤的气化方法的评价与选择 .....	132
4.4 流化床气化法 .....	109	4.8.1 煤气化的工艺技术和特性 .....	132
4.4.1 常压流化床气化原理 .....	110	4.8.2 原料煤对不同气化过程的 影响 .....	133
4.4.2 常压流化床 (温克勒炉) 气 化工艺 .....	110	4.8.3 过程消耗 .....	133
4.4.3 高温温克勒 (HTW) 气化法 .....	113	4.8.4 产品煤气的净化和后匹配 .....	134
4.4.4 灰团聚气化法 .....	115	4.8.5 选择气化方法的判据 .....	134
4.5 气流床气化法 .....	117	参考文献 .....	135
4.5.1 基本原理和特点 .....	117		
4.5.2 K-T 气化法 .....	117		
4.5.3 Shell 煤气化工艺 .....	121		
5 煤与碳一化学 .....	136		
5.1 概述 .....	136	5.3.1 费托合成简介 .....	152
5.2 合成气的净化 .....	137	5.3.2 费托合成原理 .....	154
5.2.1 原料气脱硫 .....	138	5.3.3 费托合成催化剂 .....	154
5.2.2 原料气变换 .....	141	5.3.4 费托合成反应器 .....	155
5.2.3 变换气中 CO <sub>2</sub> 的脱除 .....	148	5.3.5 费托合成工艺 .....	159
5.2.4 原料气的精制 .....	151	5.3.6 国内费托合成技术 .....	162
5.3 费托合成 .....	152	5.4 煤气的甲烷化 .....	163

5.4.1	煤制甲烷的发展历史	163	5.5.6	氨合成过程的基本工艺步骤	170
5.4.2	煤制甲烷基本原理	164	5.5.7	合成氨工业发展前景	172
5.4.3	催化剂	164	5.6	合成甲醇	174
5.4.4	工艺流程	165	5.6.1	合成甲醇简介	174
5.5	合成氨	167	5.6.2	甲醇合成化学反应	174
5.5.1	合成氨的催化机理	167	5.6.3	催化剂及反应条件	175
5.5.2	合成氨催化剂的组成和还原	168	5.6.4	反应器	176
5.5.3	氨合成反应的化学平衡	168	5.6.5	合成甲醇工艺流程	178
5.5.4	影响合成操作的各种因素	169	5.6.6	低温液相合成甲醇	180
5.5.5	氨合成塔	170	参考文献		182
<b>6</b>	<b>碳一化学品合成技术</b>	<b>183</b>			
6.1	二甲醚生产技术	183	6.4.3	合成气法	201
6.1.1	二甲醚生产简介	183	6.5	乙二醇的合成	202
6.1.2	二甲醚生产原理	183	6.5.1	乙二醇	202
6.1.3	二甲醚生产工艺	184	6.5.2	乙二醇的合成技术	203
6.1.4	国内二甲醚新工艺开发情况	186	6.5.3	合成气合成乙二醇未来展望	206
6.2	甲醇制烯烃	187	6.6	醋酸的合成	206
6.2.1	甲醇制烯烃简介概述	187	6.6.1	醋酸	206
6.2.2	MTO 生产原理	188	6.6.2	醋酸的合成技术	206
6.2.3	甲醇制烯烃催化剂	188	6.6.3	醋酸合成的未来展望	209
6.2.4	MTO 生产工艺流程	189	6.7	碳酸二甲酯的合成	210
6.3	甲醇转化成汽油	193	6.7.1	碳酸二甲酯	210
6.3.1	MTG 概述	193	6.7.2	生产工艺	210
6.3.2	MTG 反应原理	194	6.8	其他化合物的合成	214
6.3.3	MTG 催化剂	194	6.8.1	甲醛	214
6.3.4	MTG 反应器	195	6.8.2	甲胺	215
6.3.5	现有的 MTG 工艺路线	195	6.8.3	甲基丙烯酸甲酯	217
6.3.6	国内 MTG 一步法新工艺中试情况	198	6.8.4	甲基叔丁基醚	218
6.3.7	新西兰天然气制甲醇和汽油装置的有关情况	199	6.8.5	合成甲烷氯化物	219
6.4	乙醇的合成	200	6.8.6	合成聚碳酸酯	220
6.4.1	发酵法	200	6.8.7	羰基合成系列产品	220
6.4.2	乙烯水合法	201	6.9	碳一化学发展前景	220
			参考文献		221
<b>7</b>	<b>煤的直接液化</b>	<b>222</b>			
7.1	概述	222	7.2.2	煤加氢液化中的主要反应	224
7.1.1	煤直接液化的意义	222	7.2.3	煤加氢液化的反应产物	227
7.1.2	煤直接液化的发展概况	222	7.2.4	煤加氢液化的反应历程	228
7.2	煤直接液化的原理	223	7.3	煤直接液化工艺	229
7.2.1	煤与石油的比较	223	7.3.1	德国煤直接液化老工艺	229



7.3.2	德国直接液化新工艺	231	7.5.2	项目进展	247
7.3.3	美国溶剂精炼煤法	233	7.5.3	神华煤直接液化工艺 流程	248
7.3.4	氢煤法	235	7.5.4	神华煤直接液化工艺 特点	249
7.3.5	供氢溶剂法	237	7.5.5	神华煤直接液化项目经 济性	250
7.3.6	NEDOL 法	238	7.6	煤炭液化技术比较	251
7.3.7	两段集成液化法	239	7.6.1	不同的工艺及生产过程	251
7.3.8	煤和渣油的联合加工	240	7.6.2	对煤种的不同要求	251
7.3.9	美国 HTI 工艺	241	7.6.3	不同的产品结构	252
7.4	煤直接液化的反应器和催 化剂	242	7.6.4	对多联产系统的不同 影响	252
7.4.1	典型工艺的反应器类型	242	7.6.5	工艺选择	253
7.4.2	催化剂	245	参考文献		253
7.5	中国神华煤直接液化项目 介绍	247			
7.5.1	项目概况	247			
8	洁净煤技术	254			
8.1	概述	254	8.3.1	型煤生产方法	264
8.1.1	洁净煤技术内容	254	8.3.2	生产型煤工艺流程	265
8.1.2	洁净煤技术发展概况	255	8.3.3	型煤黏结剂	265
8.1.3	中国发展洁净煤技术的必 要性	256	8.3.4	型煤成型设备	266
8.2	煤炭洗选技术	256	8.4	水煤浆技术	267
8.2.1	煤炭洗选的必要性	257	8.4.1	水煤浆的由来及发展	267
8.2.2	煤炭洗选方法	258	8.4.2	水煤浆制备工艺及设备	267
8.2.3	洗煤厂工艺流程	259	8.4.3	水煤浆的性质及添加剂	268
8.2.4	煤炭主洗设备及发展趋势	260	8.4.4	水煤浆的应用	268
8.3	粉煤成型技术	264	8.4.5	有关水煤浆燃料的评价	269
			参考文献		269
9	煤化工生产与环境保护	270			
9.1	环境保护概述	270	9.2.4	煤燃烧过程的主要污染物	274
9.1.1	我国环境形势	270	9.3	煤化工污染的防治	274
9.1.2	环境问题的主观因素	270	9.4	煤化工的“三废”治理	275
9.1.3	煤化工与环境污染	271	9.4.1	煤化工废水治理	275
9.2	煤化工生产中的主要污染物	272	9.4.2	废气治理措施	277
9.2.1	煤制焦过程的污染物	272	9.4.3	固体废物治理措施	277
9.2.2	煤制气过程的污染物	273	参考文献		278
9.2.3	煤制油过程的污染物	274			



# 1

## 绪论



### 1.1 煤及煤化工

煤是古代植物埋藏在地下经历了复杂的生物化学和物理化学变化逐渐形成的固体可燃性矿物，是一种固体可燃有机岩，主要由植物遗体经生物化学作用，埋藏后再经地质作用转变而成，俗称煤炭。煤炭被人们誉为黑色的金子，工业的食粮，它是18世纪以来人类世界使用的主要能源之一。

煤炭是地球上蕴藏量最丰富，分布地域最广的化石燃料。据世界能源委员会的评估，世界煤炭可采资源量达  $4.84 \times 10^4$  亿吨标准煤，占世界化石燃料可采资源量的66.8%。世界煤炭可采储量的60%集中在美国(25%)、前苏联地区(23%)和中国(12%)，此外，澳大利亚、印度、德国和南非4个国家共占29%，上述7国或地区的煤炭产量占世界总产量的80%，已探明的煤炭储量在石油储量的63倍以上，世界上煤炭储量丰富的国家同时也是煤炭的主要生产国。

中国煤炭资源丰富，除上海以外其他各省区均有分布，但分布极不均衡。在中国北方的大兴安岭-太行山、贺兰山之间的地区，地理范围包括煤炭资源量大于1000亿吨以上的内蒙古、山西、陕西、宁夏、甘肃、河南6省区的全部或大部，是中国煤炭资源集中分布的地区，其资源量占全国煤炭资源量的50%左右，占中国北方地区煤炭资源量的55%以上。在中国南方，煤炭资源量主要集中于贵州、云南、四川三省，这三省煤炭资源量之和为3525.74亿吨，占中国南方煤炭资源量的91.47%；探明保有资源量也占中国南方探明保有资源量的90%以上。

“十一五”规划建议中进一步确立了“煤为基础、多元发展”的基本方略，为中国煤炭工业的兴旺发展奠定了基础。中国煤炭工业将继续保持旺盛的发展趋势，今后一个较长时期内，中国煤炭工业的发展前景都将非常广阔。

煤炭的用途十分广泛，可以根据其使用目的归纳为两大类：一类是动力煤，用于燃烧获取其中的能量，如火力发电等；另一类是煤化工用煤，主要包括气化用煤，低温干馏用煤，加氢液化用煤等，已获取清洁能源和化工产品。随着环境保护要求的日趋严格，煤化工用煤的比例正在迅速增加。

虽然现在煤化工相对于石油化工仍处于从属地位，但在今后相当长的一段时间内，由于石油的日渐枯竭，导致它必然走向衰败，而煤炭因储量巨大，加之科学技术的飞速发展，煤炭气化等新技术日趋成熟，并得到广泛应用，煤炭必将成为人类生产生活中的无法替代的能源和化工产品原料。

煤化工是以煤为原料，经过化学加工使煤转化为气体、液体、固体燃料及化学品，生产出各种化工产品的工业，是相对于石油化工、天然气化工而言的。从理论上来说，以原油和

天然气为原料通过石油化工工艺生产出来的产品也都可以以煤为原料通过煤化工工艺生产出来。

煤化工主要包括煤的气化、液化、干馏，以及焦油加工和电石乙炔化工等。见图 1-1。

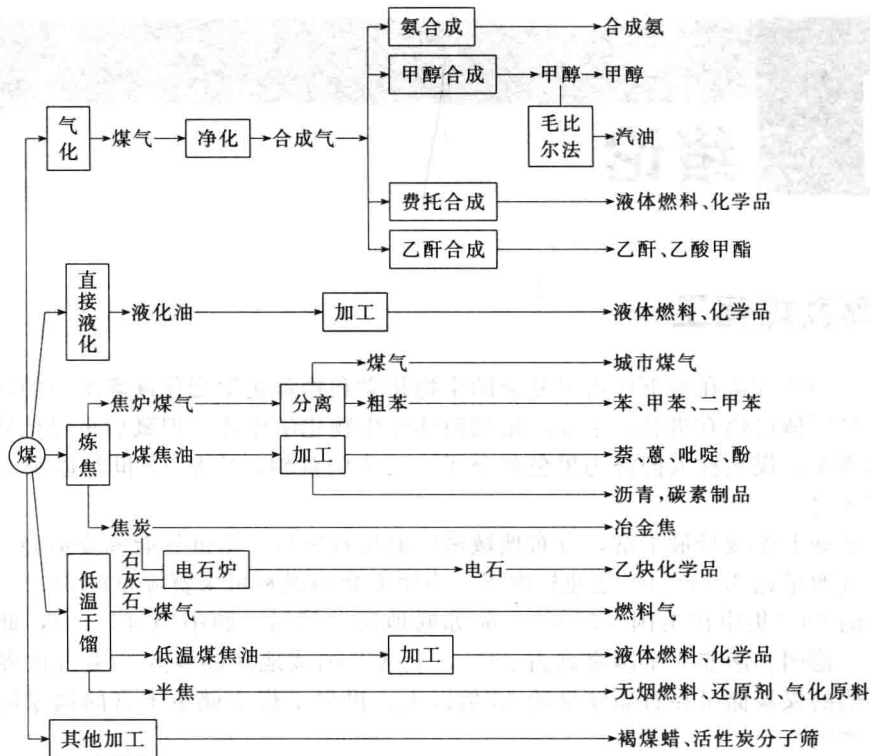


图 1-1 煤化工分离及产品示意图

在煤化工可利用的生产技术中，炼焦是应用最早的工艺，并且至今仍然是化学工业的重要组成部分。

煤的气化在煤化工中占有重要地位，用于生产各种气体燃料，是洁净的能源，有利于提高人民生活水平和环境保护；煤气化生产的合成气是合成液体燃料、化工原料等多种产品的原料。

煤直接液化，即煤高压加氢液化，可以生产人造石油和化学产品。在石油短缺时，煤的液化产品将替代天然石油。

发展运用煤化工开始于 18 世纪后半叶，19 世纪形成了完整的煤化工体系。进入 20 世纪，许多以农林产品为原料的有机化学品多改为以煤为原料生产，煤化工成为化学工业的重要组成部分。随着世界石油资源不断减少，煤化工有着广阔的前景。

## 1.2 煤化工发展史

中国是使用煤最早的国家之一，早在公元前就用煤冶炼铜矿石、烧陶瓷，至明代已用焦炭冶铁。但煤作为化学工业的原料加以利用并逐步形成工业体系，则是在近代工业革命之后。煤中有机质的基本结构单元，是以芳香族稠环为核心，周围连有杂环及各种官能团的大分子。这种特定的分子结构使它在隔绝空气的条件下，通过热加工和催化加工，能获得固体产品，如焦炭或半焦。同时，还可得到大量的煤气（包括合成气），以及具有经济价值的化

学品和液体燃料（如烃类、醇类、氨、苯、甲苯、二甲苯、萘、酚、吡啶、蒽、菲、咔唑等）。因此，煤化工的发展包含着能源和化学品生产两个重要方面，两者相辅相成，促进煤炭综合利用技术的发展。

### 1.2.1 初创时期

初创时期主要为冶金用焦和煤气的生产。18世纪中叶由于工业革命的进展，英国对炼铁用焦炭的需要量大幅度地增加，炼焦炉应运而生。1763年发展了将煤用于炼焦的蜂窝式炼焦炉，它是由耐火砖砌成圆拱形的空室，顶部及侧壁分别开有煤料和空气进口。点火后，煤料分解放出的挥发性组分，与由侧门进入的空气在拱形室内燃烧，产生的热量由拱顶辐射到煤层提供干馏所需的热源，一般经过48~72h，即可得到合格的焦炭。

18世纪末，煤用于生产民用煤气。1792年，苏格兰人W. 默多克用铁甑干馏烟煤，并将所得煤气用于家庭照明。1812年，这种干馏煤气首先用于伦敦街道照明，随后世界一些主要城市也相继采用。1816年，美国巴尔的摩市建立了煤干馏工厂生产煤气。从此，铁甑干馏煤的工业就逐步得到发展。1840年，法国用焦炭制取产生炉煤气，用于炼铁。1875年，美国生产增热水煤气用作城市煤气。1850~1860年，法国及欧洲其他国家相继建立了炼焦厂。这时的炼焦炉已开始采用由耐火材料砌成的长方形双侧加热的干馏室。室的每端有封闭铁门，在推焦时可以开启，这种炉就是现代炼焦炉的雏形。虽然焦炭是炼焦的主要目的产物，但是炼焦化学品的回收，也引起人们的重视。19世纪70年代德国成功地建成了有化学品回收装置的焦炉，由煤焦油中提取了大量的芳烃，作为医药、农药、染料等工业的原料。

第一次世界大战期间，钢铁工业高速发展，同时作为火炸药原料的氨、苯及甲苯也很急需，这促使炼焦工业进一步发展，并形成炼焦副产化学品的回收和利用工业。1925年，中国在石家庄建成了第一座焦化厂，满足了汉冶萍炼铁厂对焦炭的需要。

1920~1930年间，煤低温干馏的研究得到重视并较快发展，所得半焦可作民用无烟燃料，低温干馏焦油则进一步加工成液体燃料。1934年，在中国上海建成拥有直立式干馏炉和增热水煤气炉的煤气厂，生产城市煤气。

### 1.2.2 全面发展时期

第二次世界大战前夕及大战期间，煤化工取得了全面而迅速的发展。1923年德国发明的由一氧化碳加氢合成液体燃料的费托合成法，1933年开始工业生产，1938年产量已达590kt。1931年，F. 柏吉斯由于成功地将煤直接液化制取液体燃料，而获得诺贝尔化学奖。这种由煤高压加氢液化制取液体燃料的方法，1939年已达到1.10Mt的年生产能力。在此期间，德国还建立了大型的低温干馏工厂，以褐煤为主加入少量烟煤的压型煤砖作为原料，开发了克虏伯-鲁奇外热式干馏炉及鲁奇-斯皮尔盖斯内热式干馏炉。所得半焦用于造气，经费托合成制取液体燃料；低温干馏焦油经简单处理后作海军船用燃料，或经高压加氢制取汽油和柴油。1944年低温干馏焦油年生产能力已达到945kt。第二次世界大战末期，德国用加氢液化方法由煤及煤焦油年生产的液体燃料达4Mt，由煤生产液体燃料总量已达每年4.8Mt。与此同时，工业上还从煤焦油中提取各种芳烃及杂环有机产品，作为染料、炸药等的原料。此外，由煤直接化学加工制取磺化煤、腐植酸和褐煤蜡的小型工业，及以煤为原料制取碳化钙，进而生产乙炔从而以乙炔为原料的化学工业也获得发展。

### 1.2.3 萧条时期

第二次世界大战后，由于大量廉价石油和天然气的开采，除炼焦工业随钢铁工业的发展而不断发展外，工业上大规模由煤制取液体燃料的生产暂时中止，不少工业化国家用天然气代替了民用煤气。以石油和天然气为原料的石油化工飞速发展，致使以煤为基础的乙炔化学工业的地位大大降低。值得提出的是，南非由于其所处的特殊地理和政治环境以及资源条件，以煤为原料合成液体燃料的工业一直在发展。1955年，SASOL-I 费托合成法工业装置建成。1977年，又开发了大型流化床反应器，并先后开发 SASOL-II、SASOL-III，1982年相继建成两座规模为年产 1.6Mt 的人造石油生产工厂。

### 1.2.4 技术开发时期

1973年中东战争以及随之而来的石油大幅度涨价，使由煤生产液体燃料及化学品的方法又重新受到重视。欧美等国对此又进行了开发研究工作，并取得了进展。如在煤直接液化的方法中发展了氢煤法、供氢溶剂法(EDS)和溶剂精炼煤法(SRC)等；在煤间接液化法中发展了SASOL法，将煤气化制得合成气，再经合成制取发动机燃料；亦可将合成甲醇再转化生产优质汽油，或直接作为燃料甲醇使用。

由于石油的消耗量大，而煤的资源极为丰富，煤化工将得到进一步的发展。

中国发展“十二五”期间，国内经济结构将继续延续重化工业发展的态势，国民经济对能源消费的需求仍将保持平稳增长。预计国内以煤炭为主的能源消费格局短期难以改变，煤炭消费将基本与国民经济增长保持同步增长。

发展新型煤化工可以部分代替石化产品，对于保障国家能源安全具有重要的战略意义。我国石油、天然气对外依存度日益提高，石油进口比例已经超过50%，国家能源安全问题日益突出。随着国内石油、天然气供应的日益紧张，国内化工行业出现了向煤化工倾斜的趋势。国家在内蒙古、山西、宁夏、河南等地开展了一系列示范工程项目，支持新型煤化工的发展。其中，内蒙古是中国煤化工产业发展最快的地区之一，部分煤化工技术走在全国前列。

从总量上来看，2006年在建煤化工项目有30项，总投资达800多亿元，新增产能为甲醇850万吨，二甲醚90万吨，烯烃100万吨，煤制油124万吨。而已备案的甲醇项目产能3400万吨，烯烃300万吨，煤制油300万吨。2006年，国家发改委出台了政策并利用各种渠道广泛征求意见，以期规范和扶持煤化工产业的发展。2006年中国自主知识产权的煤化工技术也取得了很大的进展，开始从实验室走向生产。

2007年是中国煤化工产业稳步推进的一年，在国际油价一度冲击百元大关、全球对替代化工原料和替代能源的需求越发迫切的背景下，中国的煤化工行业以其领先的产业化进度成为中国能源结构的重要组成部分。煤化工行业的投资机遇仍然受到国际国内投资者的高度关注，煤化工技术的工业放大不断取得突破、大型煤制油和煤制烯烃装置的建设进展顺利、二甲醚等相关的产品标准相继出台。

## 1.3 传统煤化工与现代煤化工

煤化工从发展历程上可以分为传统煤化工和现代煤化工，其中煤焦化、煤合成氨、电石属于传统煤化工，而目前所热议的煤化工实际上是现代煤化工，主要是指煤制甲醇、煤制乙二醇、煤制天然气、煤制油、煤制二甲醚及煤制烯烃等项目。目前煤化工热的背景源于石油、天然气价格的不断上涨，使得以煤为原料的煤化工产品在生产上具备了巨大的成本优

势，从而成为相对石化产品的最具竞争力的替代产品。

现代煤化工以生产洁净能源和可替代石油化工的产品为主，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。煤炭-能源化工产业将在中国能源的可持续利用中扮演重要的角色，是今后 20 年的重要发展方向，这对于中国减轻燃煤造成的环境污染、降低中国对进口石油的依赖均有着重大意义。可以说，煤化工行业在中国面临着新的市场需求和发展机遇。

现代煤化工具备以下特点。

(1) 以清洁能源为主要产品 新型煤化工以生产洁净能源和可替代石油化工产品为主，如柴油、汽油、航空煤油、液化石油气、乙烯原料、聚丙烯原料、替代燃料（甲醇、二甲醚）、电力、热力等，以及煤化工独具优势的特有化工产品，如芳香烃类产品。

(2) 煤炭-能源化工一体化 新型煤化工是未来中国能源技术发展的战略方向，紧密依托于煤炭资源的开发，并与其他能源、化工技术结合，形成煤炭-能源化工一体化的新兴产业。

(3) 高新技术及优化集成 新型煤化工根据煤种、煤质特点及目标产品不同，采用不同煤转化高新技术，并在能源梯级利用、产品结构方面对不同工艺优化集成，提高整体经济效益，如煤焦化-煤直接液化联产、煤焦化-化工合成联产、煤气化合成-电力联产、煤层气开发与化工利用、煤化工与矿物加工联产等。同时，新型煤化工可以通过信息技术的广泛利用，推动现代煤化工技术在高起点上迅速发展和产业化建设。

(4) 建设大型企业和产业基地 新型煤化工发展将以建设大型企业为主，包括采用大型反应器和建设大型现代化单元工厂，如百万吨级以上的煤直接液化、煤间接液化工厂以及大型联产系统等。

在建设大型企业的基础上，形成新型煤化工产业基地及基地群，制砂设备。每个产业基地包括若干不同的大型工厂，相近的几个基地组成基地群，成为国内新的重要能源产业。

(5) 有效利用煤炭资源 新型煤化工注重煤的洁净、高效利用，如高硫煤或高活性低变质煤作化工原料煤，在一个工厂用不同的技术加工不同煤种并使各种技术得到集成和互补，使各种煤炭达到物尽其用，充分发挥煤种、煤质特点，实现不同质量煤炭资源的合理、有效利用。新型煤化工强化对副产煤气、合成尾气、煤气化及燃烧灰渣等废物和余能的利用。

(6) 经济效益最大化 通过建设大型工厂，应用高新技术，发挥资源与价格优势，资源优化配置，技术优化集成，资源、能源的高效合理利用等措施，减少工程建设的资金投入，降低生产成本，提高综合经济效益。

(7) 环境友好 通过资源的充分利用及污染的集中治理，达到减少污染物排放，实现环境友好。

(8) 人力资源得到发挥 通过新型煤化工产业建设，带动煤炭开采业及其加工业、运输业、建筑业、装备制造业、服务业等发展，扩大就业，充分发挥我国人力资源丰富的优势。

我国是世界上最大的煤化工生产国，煤化工产品多、生产规模较大，当前我国正处于传统煤化工向现代煤化工转型时期，以石油替代为目标的现代煤化工产业刚刚起步。由于国际市场油价高起，我国现代煤化工项目已呈现遍地开花之势，激发了富煤地区



发展煤化工产业的积极性。据了解,在煤炭资源丰富的鄂尔多斯、通辽、赤峰、阿拉善盟等地,煤化工产业开始“井喷”。神华集团煤直接液化项目、伊泰集团间接法煤制油项目、神华包头煤制烯烃项目、大唐多伦煤制烯烃项目、通辽乙二醇项目等煤化工重点项目相继建成并投产。目前,全国煤制烯烃的在建及拟建产能达2800万吨,煤制油在建及拟建产能达4000万吨,煤制天然气在建及拟建产能接近1500亿立方米,煤制乙二醇在建及拟建产能超过500万吨。这些项目全部建成之后,我国将是世界上产能最大的现代煤化工国家。

## 1.4 本书简介

本书共9章,在兼顾传统煤化工的同时注重对现代煤化工的产品、工艺技术和生产设备进行详细讲解和说明。

第1章绪论,主要介绍了煤及煤化工、煤化工发展史和现代煤化工的范畴和特点。

第2章炼焦及化学产品回收,主要内容为煤的成焦过程、焦炉结构、炼焦生产工艺、炼焦技术发展、粗煤气的净化、焦油回收及加工和粗苯回收及精制。炼焦主要产品为冶金用焦炭,副产品粗煤气经过净化可以得到净煤气,同时可以回收焦油和粗苯等化工产品。

第3章煤的低温干馏,主要内容为煤低温干馏介绍和生产工艺、兰炭生产工艺。低温干馏比较简单,条件比较温和,在经济上有一定的竞争力。低温干馏获得的半焦(兰炭)、焦油和煤气都是洁净能源和有用产品。

第4章煤的气化,主要内容有煤气化的基本原理、固定床气化法、流化床气化法、气流床气化法、煤气化联合循环发电、煤炭地下气化和煤的气化方法的评价与选择等。煤气化生产的煤气既是清洁能源,更是有机化学合成的原料气。气化方法有固定床、流化床和气流床三种,对煤制合成气的三种气化工艺和设备进行了详细说明。

第5章煤与碳一化学,主要内容有碳一化学介绍、合成气净化、费托合成、煤气的甲烷化、合成氨和合成甲醇。以煤气化得到的合成气为原料气,生产各种化工产品的方法属于最基本的碳一化学。合成气净化后可以通过费托合成生产烃类产品,也可以甲烷化生产代用天然气,还可以合成氨和甲醇等基本化工产品。

第6章碳一化学品合成技术,主要内容有二甲醚生产技术、甲醇制烯烃、甲醇转化成汽油、乙醇的合成、乙二醇的合成、醋酸的合成、碳酸二甲酯的合成、其他化合物的合成和碳一化学发展前景等。合成气制甲醇,进一步可生产二甲醚、乙烯、丙烯和汽油,也可以直接合成乙醇、乙二醇和醋酸等化工产品,这些都是典型的碳一化学品合成技术。

第7章煤的直接液化,主要内容有煤直接液化的原理、煤直接液化工艺、煤直接液化的反应器和催化剂、中国神华煤直接液化项目介绍和煤炭液化技术比较。在石油短缺时,煤直接液化可以生产人造石油,缓解石油短缺问题。中国神华是世界上唯一工业化的煤直接液化生产厂,对此工艺和设备进行了较详细的介绍。

第8章洁净煤技术,主要内容为煤炭洗选技术、粉煤成型技术和水煤浆技术等。随着环境保护要求的越来越严格,煤直接燃烧受到越来越多的限制,发展洁净煤技术对改善环境污染起着重要作用。煤炭洗选技术、粉煤成型技术和水煤浆技术是比较典型的洁净煤生产技术,对环境保护有着重要意义。

第9章煤化工生产与环境保护,主要内容为环境保护概述、煤化工生产中的主要污染物、煤化工污染的防治和煤化工的“三废”治理。本章对煤化工生产过程中产生的污染物提

出了切实可行的治理措施，有效减轻甚至避免了煤化工生产过程中对环境的危害。

### 参 考 文 献

- [1] 郭树才, 胡浩权. 煤化工工艺学. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书化工卷. 北京: 中国大百科出版社, 1987.
- [3] 中国煤化工装备行业深度调研与投资预测分析报告. 中金企信(北京)国际信息咨询有限公司, 2014.
- [4] 2010—2013年中国煤化工行业发展及未来走向分析报告. 北京中经科情经济信息咨询有限公司, 2010.
- [5] 能源史话: 煤化工发展史(一). 中外能源, 2008(01).



# 2

## 炼焦及化学产品回收



### 2.1 概述

#### 2.1.1 炼焦的发展

在选煤厂经过洗选后的精煤作为炼焦原料煤送至焦化厂。焦化厂一般由备煤、炼焦、回收、精苯、焦油五个车间组成。

煤在焦炉内隔绝空气加热到 1000℃ 左右, 可获得焦炭、化学产品和煤气。此过程称为高温干馏或高温炼焦, 一般简称炼焦。

焦炭主要用于高炉炼铁。煤气可以用来合成氨, 生产化学肥料或用作加热燃料。炼焦所得化学产品种类很多, 特别是含有多种芳香族化合物, 主要有硫酸铵、吡啶碱、苯、甲苯、二甲苯、酚、萘、蒽和沥青等。所以炼焦化学工业能提供农业需要的化学肥料和农药, 合成纤维的原料苯, 塑料和炸药的原料酚以及医药原料吡啶碱等。可见, 炼焦化学工业与许多部门都有关系, 可生产很多重要产品, 是煤综合利用行之有效的方法。

炼焦主要产品焦炭, 是炼铁原料, 所以炼焦是伴随钢铁工业发展起来的。初期炼铁使用木炭, 由于木材逐渐缺乏, 使炼铁发展受到限制, 人们才开始寻求焦炭炼铁。1735 年焦炭炼铁获得成功。

初期焦炉都是结焦和加热在一起进行的, 有一部分煤被烧掉。为了使结焦和加热分开, 缩短结焦时间, 出现了倒焰式焦炉。

由于炼焦化学产品焦油和氨找到了用途, 促进了燃烧室和炭化室完全隔开的焦炉, 即所谓副产回收焦炉的发展。燃烧室排出的废气温度很高, 此部分废热没有回收, 有的用来加热废热锅炉, 这种设有废热回收的焦炉, 叫做废热式焦炉。

为了降低耗热量和节省焦炉煤气, 由废热式焦炉进一步发展到回收废热的蓄热式焦炉。蓄热式焦炉对应每个炭化室下方有一个蓄热室, 蓄热室有蓄热用的格子砖。当废气经过蓄热室时, 废气把格子砖加热, 格子砖蓄存了热量, 当气流方向换向后, 格子砖把蓄存的热量再传给冷的空气, 使蓄存热量又带回燃烧室。

焦炉由废热式焦炉发展到蓄热式焦炉, 即具备了现代焦炉形式。由于原料煤的限制, 为了获得高产优质低消耗的炼焦产品, 近 100 年来, 世界各国出现了不同形式的炼焦炉, 其中以欧洲大陆最为发达。

中国自己开办的第一座焦化厂, 是 1914 年开始修建的石家庄焦化厂。至今中国焦化工业已伴随钢铁工业发展成煤化工领域中较大的部门, 达到了较高水平。现在中国是世界第一大焦炭生产国和出口国, 从 1993 年起中国焦炭产量居世界第一位。2005 年焦炭产量达  $2.8 \times 10^8$  t, 占世界总产量的 36% 左右。焦炭出口量占世界总出口量的 50% 以上。但是, 焦

炉大型化和装备水平低于发达国家水平。

## 2.1.2 炼焦化学产品的组成与产率

炼焦过程析出的挥发性产物，称之为粗煤气。粗煤气的产率和组成与原料煤性质和炼焦热工条件有关。

粗煤气中含有许多化合物，包括常温下的气态物质，如氢气、甲烷、一氧化碳和二氧化碳等；烃类；含氧化合物，如酚类；含氮化合物，如氨、氰化氢、吡啶类和喹啉类等；含硫化合物，如硫化氢、二硫化碳和噻吩等。粗煤气中还含有水蒸气。

粗煤气组成复杂，影响其组成和产率的因素较多。主要影响因素为炼焦温度和二次热解作用。提高炼焦温度和增加在高温区停留时间，都会增加粗煤气中气态产物产率及氢的含量，也会增加芳烃的含量和杂环化合物的含量。已知碳与杂原子之间的键强度顺序为C—O<C—S<C—N，因此在低温（400~450℃）进行煤热解，生成含氧化合物较多。氨、吡啶和喹啉等在高于600℃时，开始于粗煤气中出现。

煤热解生成的粗煤气由煤气、焦油、粗苯和水构成。由于粗苯含量少，在粗煤气中分压低，故于20~40℃，常压下不凝出。一般条件下凝结的是焦油。

煤热解温度对化学产品的影响，可用低温干馏和高温炼焦的数据加以表明。以烟煤为原料时，化学产品组成与产率比较如表2-1所示。

表 2-1 炼焦化学产品的组成与产率

产品产率	低温炼焦	高温炼焦	产品产率	低温炼焦	高温炼焦
燃气(质量分数)/%	6~8	13~15	焦油中含量(质量分数)/%		
煤气/(m <sup>3</sup> /t)	80~120	330~380	酚类	20~35	1~3
焦油(质量分数)/%	7~10	3~5	碱类	1~2	3~4
粗苯(或汽油)(质量分数)/%	0.4~0.6	0.8~1.1	萘	痕量	7~12
煤气中含量(体积分数)/%			粗苯(或汽油)中含烃(质量分数)/%		
H <sub>2</sub>	26~30	55~60	不饱和烃	40~60	10~15
CH <sub>4</sub>	40~55	25~28	脂肪烃或环烷烃	15~20	2~5
			芳烃	30~40	80~88

不同焦化厂焦炉生产的粗煤气组分没有什么差别。这是由于二次热解作用强烈，导致组分中主要为热稳定的化合物，故其中几乎无酮类、醇类、羧酸类和二元酚类。在低温干馏焦油中含有带长侧链的环烷酸和芳烃，高温炼焦的焦油则为多环芳烃和杂环化合物的混合物。低温焦油的酚馏分含有复杂的烷基酚混合物，而高温焦油的酚馏分中主要为酚、甲酚和二甲酚。低温干馏煤气中几乎没有氨，而炼焦煤气中氨含量为8~12g/m<sup>3</sup>。

煤的低温热解产品组分主要决定于原料煤性质。例如，泥炭和褐煤的低温焦油中羧酸含量可达2.5%，而烟煤的低温焦油中几乎不含有羧酸。褐煤的一次焦油中含氧化合物可达40%~45%，而烟煤的则比较少。

中国炼焦工业较发达，有较多的焦化厂。每年炼焦用煤量约3×10<sup>8</sup>t，每年应产煤气量约为800×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>，焦油量为900×10<sup>4</sup>t（含中温焦油、低温焦油），粗苯量为170×10<sup>4</sup>t，氨量为50×10<sup>4</sup>t。由于有些规模较小的焦化厂化学产品回收不完全，实际年产量还达不到上述数值。

焦化工业是萘和蒽的主要来源，它们用于生产塑料、染料和表面活性剂。甲酚、二甲酚用于生产合成树脂、农药、稳定剂和香料。吡啶和喹啉用于生产生物活性物质。高温焦油含有沥青，是多环芳烃，占焦油量的一半。沥青主要用于生产沥青焦、电极碳等。焦炉煤气可用作燃料，也可作化工原料，生产氢和乙烯。