

高等 学校 教材

郭树才 胡浩权 主编

煤化工工艺学

第三版



化学工业出版社

煤 化 工 工 艺 学

煤 化 工 工 艺 学

煤化工工艺学

第三版

中国石化出版社

高等 学校 教材

郭树才 胡浩权 主编

煤化工工艺学

第三版



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是2006年7月出版的全国高等学校能源化工(煤化工)专业教材《煤化工工艺学》(第二版)的修订本。新版书在内容上增加了相关工艺与设备的最新成果,并以近年来公布的统计公告及新标准为依据,更新了数据。

全书共分为9章,所需学时数为80学时。介绍了煤炭资源、煤的低温干馏、炼焦、炼焦化学产品的回收与精制、煤的气化、煤间接液化、煤炭直接加氢液化、煤制碳素制品、煤化工生产的污染和防治等的生产原理、生产方法、工艺计算、操作条件及主要设备等。

本书可以作为高等学校化学工艺、能源化工(煤化工)专业教材,亦可供从事能源、煤炭、化工、电力、环境保护等专业设计、生产、科研的技术人员及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤化工工艺学/郭树才,胡浩权主编.—3版.—北京:
化学工业出版社,2012.8
高等学校教材
ISBN 978-7-122-14608-3

I. ①煤… II. ①郭…②胡… 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(2012)第132002号

责任编辑:程树珍 张双进
责任校对:陈 静

文字编辑:向 东
装帧设计:张 辉

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:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张23 $\frac{1}{2}$ 字数602千字 2012年9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:42.00元

版权所有 违者必究

前 言

“煤化工工艺学”是能源化工（煤化工）专业必修的专业骨干课程。本书于1992年5月出版第一版，2006年出版第二版。第三版的编写体系仍按照第一版前言中所阐明的“煤化工工艺学教材编写大纲”的相关规定和指导思想。本书编写依据是读者已学完煤化学课程，已具有煤化学基本知识。本书以近年来公布的统计公告和新标准为依据，更新了数据；增加了相关工艺与设备的开发、设计和优化等最新成果，以更好地适应能源化工（煤化工）的发展和相关专业教学的需要。

本书的主要内容为煤化学工艺基本原理、重要工艺过程和设备以及有关煤化工工艺的最新进展。本书共9章，所需学时数为80学时，其中主要章节都更新了数据并增加了新的内容。如第5章煤的气化新增了“煤气化过程”、“催化气化反应机理”、“ICC灰熔聚气化法”、“新型多喷嘴对置气化法”、“TPRI两段干粉气化法”等小节；在煤气脱硫方面，增加了在焦炉煤气脱硫中应用较多的“HPF法”，更新了“煤气化技术的选择”等内容。第6章煤间接液化在原有基础上，增加和更新了部分内容，如“国内F-T合成技术的发展”、“SDTO和DMTO工艺”等内容。第7章煤直接加氢液化在原有基础上进行了内容调整，总体上更新了过时的数据，增加了“液化粗油的提质加工”和“神华示范项目经济测算”等内容。第9章煤化工生产的污染和防治在第二版基础上，增加了“二氧化碳减排和利用”，同时也更新了有关数据。

全书由大连理工大学郭树才、胡浩权主编。第1章、第2章及第6章由大连理工大学胡浩权修订；第3章和第4章由辽宁科技大学白金锋修订；第5章由华东理工大学吴幼青修订；第7章、第8章和第9章由华东理工大学张德祥修订。

由于水平有限，书中难免有不妥之处，希望使用本书的师生和读者多加批评指正。

编 者
2012年3月

第一版前言

全国高校化工工艺类专业教学指导委员会 1989 年天津工作会议确定了煤化工专业设“煤化工工艺学”专业课，并确定了“煤化工工艺学教材编写大纲”。该课教学时数为 80 学时，其先修课程为“煤化学”。本书是根据这些规定进行编写的。

教材内容编选本着少而精的原则，以当前生产实用工艺为重点，同时兼顾将要应用和有发展前景的技术。本书重点内容为炼焦、煤的气化和煤的液化部分，全书共分九章，包括了煤化工生产的基本内容。

本书绪论概括地介绍了煤炭资源、煤化工范畴和发展。煤低温干馏工艺条件比较温和，是高挥发分煤综合利用的有效途径，重点阐述了煤热解基本规律和特点，也侧重介绍了快速热解新工艺。炼焦是最成熟的煤综合利用工业，中国炼焦化学工业也较发达。本书重点阐述了炼焦原料煤、焦炉、炼焦新技术、焦炉传热和流体力学计算原理和方法。煤的气化内容重点突出了煤气化基本规律、计算理论和方法以及实际生产工艺与设备，煤气化工艺在工业生产中应用较广泛，本书给予了较多篇幅。煤间接液化在国外已实现大生产，重点介绍了南非的工业生产工艺；由合成气合成甲醇和醋酐也实现了大的工业生产，并可与石油化工相抗衡，因此也介绍了其必要的内容。煤直接液化虽然目前还没有实现大规模生产，但是在可以预见的将来，它必将成为人类提供洁净能源和化工原料的重要技术之一，本书阐述了煤加氢液化原理和新工艺，也讨论了研究与开发中的问题和发展前景。煤的碳素制品是新兴的煤化工领域，除了常用的重要的碳素产品外，还有碳素纤维等材料，它们是高功能性产品，将对材料工业有重要作用，本书介绍了有关的基本知识和方法。此外还设有煤化工生产的污染和防治一章，专门介绍这方面的基本知识和方法。

本书第一章至第四章及第六章由大连理工大学郭树才编写；第五章由华东化工学院任德庆编写，第七章至第九章由华东化工学院高晋生编写。全书由大连理工大学郭树才主编，天津大学郭崇涛主审。

由于编者经验不足，编写时间仓促，本书难免存在缺点和不妥之处，希望各校在使用时提出批评和指正。

编者

1991 年 5 月

第二版前言

本书于1992年5月出第一版，至今已印了7次，印数1万5千余册。为了更好地适应近年来煤化学工业发展和有关专业教学的需要，对本书修订再版。

第二版的编写体系仍按原版，原版前言中所阐明的指导思想仍是合适的。本版在原版基础上增加了工艺和设备方面的最近成就，对过时的内容做了更新。

本书共分9章，其中主要章中都增加了新的内容。如炼焦一章中增加了炼焦新技术；煤气化一章中增加了Shell和GSP气化新技术；煤间接液化一章中增加了较多新内容，有浆态床反应器和低温甲醇合成工艺等；煤直接液化一章中增加了煤直接液化在国内的新进展。修改了过时的内容。

全书仍由大连理工大学郭树才主编。

第一章、第二章和第三章由郭树才修订；第四章由大连理工大学罗长齐修订；第五章由华东理工大学曹建勤和高晋生修订；第六章由大连理工大学胡浩权修订；第七章、第八章和第九章由华东理工大学高晋生修订。

由于我们水平有限，书中难免有不妥之处，希望使用本书的师生和读者多加批评指正。

编者
2006年4月

目 录

1 绪论

1.1 煤炭资源	1
1.2 煤化工发展简史	1
1.3 煤化工的范畴	3
1.4 本书简介	4
参考文献	5

2 煤的低温干馏

2.1 概述	6
2.2 低温干馏产品	7
2.3 干馏产品的影响因素	9
2.4 低温干馏主要炉型	12
2.5 立式炉生产城市煤气	17
2.6 固体热载体干馏工艺	19
参考文献	26

3 炼焦

3.1 概述	27
3.2 煤的成焦过程	28
3.3 配煤和焦炭质量	33
3.4 现代焦炉	38
3.5 炼焦新技术	42
3.6 煤气燃烧和焦炉热平衡	50
3.7 焦炉传热基础	57
3.8 焦炉流体力学基础	64
3.9 焦炉耐火砖、砌筑和烘炉	71
3.10 型焦	74
参考文献	79

4 炼焦化学产品的回收与精制

4.1 炼焦化学产品	80
------------------	----

4.2	粗煤气分离	82
4.3	氨和吡啶的回收	86
4.4	粗苯回收	95
4.5	粗苯精制	102
4.6	焦油蒸馏	113
4.7	焦油馏分加工	122
4.8	沥青利用与加工	132
4.9	焦油加工利用进展	135
	参考文献	136

5 煤的气化

5.1	煤气化原理	137
5.2	煤的气化方法	152
5.3	固定(移动)床气化法	163
5.4	流化床气化法	194
5.5	气流床气化法	203
5.6	煤炭地下气化	218
5.7	煤的气化联合循环发电	219
5.8	煤气的甲烷化	221
5.9	煤气的净化	225
5.10	煤气化方法的分析比较与选择	236
	参考文献	238

6 煤间接液化

6.1	费托合成	240
6.2	合成甲醇	253
6.3	甲醇转化成汽油	261
6.4	甲醇利用进展	266
6.5	煤制醋酐	271
6.6	合成气两段直接合成汽油	272
	参考文献	275

7 煤炭直接加氢液化

7.1	煤直接液化的意义和发展概况	277
7.2	煤加氢液化机理	278
7.3	几种煤加氢液化工艺简介	284
7.4	煤加氢液化的影响因素	296
7.5	煤直接液化初级产品及其提质加工	304
7.6	煤直接液化的关键设备和若干工程问题	309
7.7	煤直接液化的经济性	318
	参考文献	321

8 煤制碳素制品

8.1 碳素制品的性质、种类、用途和发展	322
8.2 电极炭	324
8.3 活性炭	331
8.4 碳分子筛	338
8.5 碳素纤维	342
参考文献	347

9 煤化工生产的污染和防治

9.1 环境保护概述	348
9.2 煤化工生产中的主要污染物	349
9.3 减少煤加工利用对环境污染的政策	353
9.4 煤化工污水的处理	355
9.5 煤化工厂的烟尘治理	360
9.6 二氧化碳减排和利用	364
参考文献	367

1 绪 论

煤化学工业是以煤为原料经过化学加工实现煤综合利用的工业，简称煤化工。煤化工包括炼焦化学工业、煤气工业、煤制人造石油工业、煤制化学品工业以及其他煤加工制品工业等。

目前，化学工业中石油化工发展较快，占据主导地位，煤化工的工业生产所占比重不大。但是近年来，石油供应出现不平衡，石油产量难以满足需要量；石油储量有限，总是越用越少。因而迫使人们寻求新的能源和化工原料来代替石油，煤化工将有所发展是必然的。2004年中国已成为世界第二大原油进口国，达到 1.2×10^8 t。2010年中国的原油生产量为 2.03×10^8 t。原油进口量达到 2.39×10^8 t，对外依存度达到54%。发展包括煤制油在内的煤化工技术已成当务之急。

1.1 煤炭资源

煤是地球上能得到的最丰富的化石燃料。煤的使用年限估计在几百年，它将是替代不断下降的石油资源的可靠能源。因此，煤化学工业的发展将替代石油化学工业。

中国是世界上煤炭资源丰富的国家之一，煤炭储量远大于石油、天然气储量。根据2011年BP发表的统计数据，至2010年底，中国探明的煤炭储量约为 1145×10^8 t，占世界总量的13.3%，其中烟煤和无烟煤约占54%，次烟煤和褐煤约占46%。中国不仅有优质的炼焦煤，还有世界少见的大同、神府等优质煤，而且煤的种类较全、分布较广，其中尤以华北、西北为最，西南、华东次之。而中国的实际煤炭资源量远高于探明储量，2011年数据显示仅内蒙古自治区已探明煤炭资源量就达到 7413.9×10^8 t。

中国煤炭产量2010年达到 32.4×10^8 t（约 25.7×10^8 t标准煤），占世界煤炭总产量的48.3%；煤炭消费量 24.5×10^8 t标准煤，占世界煤炭消费总量的48.2%。

中国能源过去和现在都是以煤为主。以2010年为例，中国的一次能源消费总量为 34.74×10^8 t标准煤，占世界的20.3%。其构成比例为：煤炭70.4%；石油17.6%；天然气4.0%；水电6.7%；其他1.3%。

随着煤炭产量的逐年增长，煤炭在能源构成中的比重将进一步增加。

1.2 煤化工发展简史

煤化工的发展始于18世纪后半叶，19世纪形成了完整的煤化学工业体系。进入20世纪，许多有机化学品多以煤为原料生产，煤化学工业成为化学工业的重要组成部分。

18世纪中叶，由于工业革命的进展，炼铁用焦炭的需要量大增，炼焦化学工业应运



而生。

19世纪70年代建成有化学产品回收的炼焦化学厂。1925年中国在石家庄建成了中国第一座炼焦化学厂。

18世纪末,开始由煤生产民用煤气。当时用烟煤干馏法,生产的干馏煤气首先用于欧洲城市的街道照明。1840年由焦炭制发生炉煤气,用于炼铁。1875年使用增热水煤气作为城市煤气。

1920~1930年间,煤的低温干馏发展较快,所得半焦可作为民用无烟燃料,低温干馏焦油进一步加氢生产液体燃料。1934年在上海建成立式炉和增热水煤气炉的煤气厂,生产城市煤气。

第二次世界大战前夕和战期,煤化学工业取得了全面迅速发展。纳粹德国为了战争,开展了由煤制取液体燃料的研究和工业生产。1932年发明由一氧化碳加氢合成液体燃料的费托(Fischer-Tropsch)合成法,1933年实现工业生产,1938年产量已达 $59 \times 10^4 \text{t}$ 。1931年,柏吉斯(Bergius)成功地由煤直接液化制取液体燃料,获得了诺贝尔化学奖。这种用煤高压加氢液化的方法制取液体燃料到1939年产量已达到 $110 \times 10^4 \text{t}$ 。在此期间,德国还建立了大型低温干馏工厂,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为海军船用燃料,或经高压加氢制取汽油或柴油。1944年底低温焦油年产量达到 $94.5 \times 10^4 \text{t}$ 。第二次世界大战末期,德国用加氢液化法由煤及焦油生产的液体燃料总量已达到每年 $480 \times 10^4 \text{t}$ 。与此同时,工业上还从煤焦油中提取各种芳烃及杂环有机化学品,作为染料、炸药等的原料。

第二次世界大战后,由于大量廉价石油、天然气的开采,除了炼焦化学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断。代之兴起的是以石油和天然气为原料的石油化工,煤在世界能源构成中由 $65\% \sim 70\%$ 降至 $25\% \sim 27\%$ 。但南非却例外,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年建成萨索尔一厂(SASOL-I)。于1982年又相继建成二厂和三厂,这两个厂的人造石油年生产能力为 $160 \times 10^4 \text{t}$ 。

1973年由于中东战争以及随之而来的石油危机,使得由煤生产液体燃料及化学品的方法又受到重视,欧美等国加强了煤化工的研究开发工作,并取得了进展。例如,成功地开发了多种新的直接液化方法;在间接液化方法中除SASOL法已工业化外,还成功地开发了由合成气制造甲醇,再由甲醇转化成汽油的工业生产技术。目前,煤液化工业生产在经济上已具有竞争力。

20世纪80年代后期,煤化工有了新的突破,成功地由煤制成乙醇:煤气化制合成气,再合成乙酸甲酯,进一步进行羰化反应得乙醇。它是由煤制取化学品的一个最成功的范例,从化学和能量利用来看其效率都是很高的,并有经济效益。

由于石油储量少、用量大、价格不断上涨,煤在世界能源构成中将不断回升,必然要由煤生产气体燃料、液体燃料和化学品。基于中国油气匮乏、煤炭相对丰富的资源禀赋特点,中国煤化学工业将有所发展。特别是新型煤化工,依靠技术革新,可实现石油和天然气资源的补充及部分替代。2009年,煤制油、煤制烯烃、煤制天然气和煤制乙二醇等被国家发改委确定为重点示范发展方向。2009~2010年间,国内新型煤化工示范装置陆续建成或试车成功,开始先后进入商业化运行或长周期稳定运行。在高油价背景下,新型煤化工项目在中国掀起了投资热潮。但在工艺技术成熟度、水资源消耗、二氧化碳排放、环境承载力和能源效率等方面仍然有进一步提升的空间。

根据2011年国家统计局公布的数据,2009年中国消费煤炭 $29.58 \times 10^8 \text{t}$,中国所产煤

炭用于火力发电 $14.40 \times 10^8 \text{ t}$, 约占 48.7%, 用于炼焦 $4.37 \times 10^8 \text{ t}$, 约占 14.8%; 化学工业 $1.51 \times 10^8 \text{ t}$, 约占 5.1%; 炼焦化学工业年用煤超过 $4.3 \times 10^8 \text{ t}$, 生产冶金焦炭 $3.18 \times 10^8 \text{ t}$, 居世界首位, 化学肥料工业生产煤炭成为主要原料, 以煤为原料生产的甲醇和以电石为原料生产的氯乙烯占很高比例, 萘、蒽等产品则全部来自炼焦化学工业。煤化学工业在中国化学工业中占有十分重要的地位。发电、工业锅炉和民用煤占全部煤炭开采量的 80% 左右, 多为直接燃烧, 大多利用效率较低、污染严重。为了有效、经济和合理地利用煤, 中国需要发展煤转化技术, 实现煤的综合利用。

1.3 煤化工的范畴

煤化工是以煤为原料, 经过化学加工使煤转化为气体、液体和固体燃料以及化学品的过程。从煤加工过程区分, 煤化工包括煤的干馏(含炼焦和低温干馏)、气化、液化和合成化学品等, 见图 1-1。

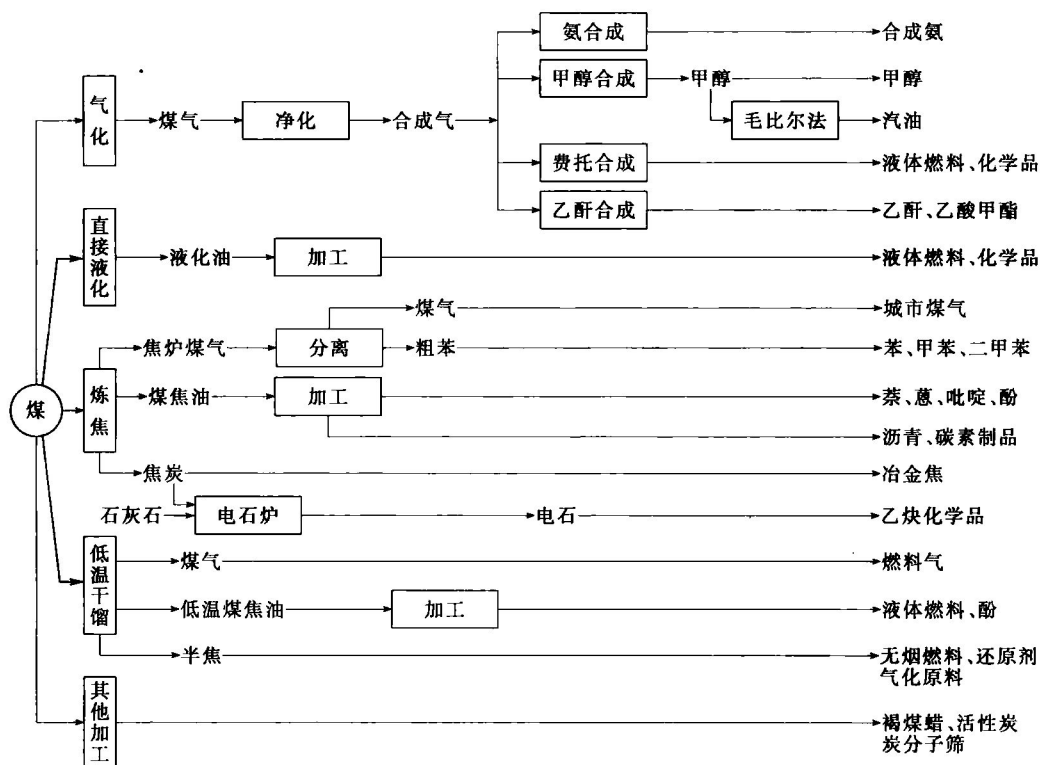


图 1-1 煤化工分类及产品示意图

煤化工利用生产技术中, 炼焦是应用最早的工艺, 至今仍然是煤化学工业的重要组成部分。炼焦主要产品是生产炼铁用焦炭, 同时生产焦炉煤气、苯、萘、蒽、沥青以及碳素材料等产品。

煤的气化在煤化工中占有重要地位, 用于生产各种燃料气, 是干净的能源, 有利于提高人民生活水平和环境保护; 煤气化生产合成气, 是合成液体燃料、甲醇、乙醛等多种产品的原料。

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。煤间接液化是由煤气化生产合成气, 再经催化合成液体燃料和化学产品, 在国外已实现大生产。近几年中国煤化



工得到快速发展, 年产 $100 \times 10^4 \text{ t}$ 油的煤炭直接液化工业示范已顺利投产, 煤间接液化已实现工业化示范。在石油短缺时, 煤的液化产品将是目前的天然石油的重要补充。

煤低温干馏生产低温焦油, 经过加氢生产液体燃料, 低温焦油分离后可得有用的化学产品。低温干馏半焦可作无烟燃料, 或用作气化原料、发电燃料以及碳质还原剂等。低温干馏煤气可作燃料气。

1.4 本书简介

本书编写依据是读者已学完煤化学课程, 已具有煤化学基本知识。本书共 9 章, 所需学时数为 80 学时。

煤化工工艺学是能源化工(煤化工)专业必修的专业骨干课, 本书的主要内容为煤化学工艺基本原理、重要工艺过程和设备以及有关煤化工工艺的最新进展。

第 1 章绪论, 主要内容为煤炭资源、煤化工发展简史和煤化工的范畴。

第 2 章煤的低温干馏, 主要内容为低温干馏原理、低温干馏主要炉型、立式(直立)炉生产城市煤气以及固体热载体干馏新工艺。低温干馏是煤分质利用的重要方法。中国高挥发分低阶煤较多, 通过低温干馏获得的焦油、煤气和半焦都是洁净能源或有用的产品, 由于低温干馏比较简单、条件比较温和, 因此在经济上竞争力较强。

第 3 章炼焦, 主要内容为煤的成焦过程、配煤和焦炭、现代焦炉、炼焦新技术、燃烧和传热以及流体力学。炼焦主要产品为冶金用焦炭。在可以预见的将来, 炼铁还要用焦炭, 所以炼焦与炼铁工业将同步发展。中国炼焦用煤较多, 部分城市生活用煤气也采用焦炉煤气。炼焦化学工业在中国已形成一个较大的行业, 近年来发展较快, 在炼焦新技术方面也有较大的发展。

第 4 章炼焦化学产品的回收与精制, 主要内容为粗煤气分离、氨和吡啶及粗苯回收、粗苯精制、焦油蒸馏和沥青加工, 粗苯精制生产苯类产品, 焦油分离精制生产酚类、萘和蒽等。这些都是有用的化工原料。沥青为焦油中的重质部分, 是生产碳素材料的原料, 有多种重要用途。煤焦油化学近年来发展较快, 提取了许多有用产品。中国的焦油化学工业也有较大发展。关于焦炉煤气脱硫部分在本章中没有提及, 见第 5 章有关脱硫部分内容。

第 5 章煤的气化, 主要内容为煤气化原理、生产燃料气的气化方法、固定床气化法、流化床及气流床气化炉型、联合循环发电、地下气化、煤气脱硫和甲烷化等。煤气化生产的燃料气是洁净能源, 利用效率高, 有利于环境保护。煤气化生产的合成气, 是有机化学合成的原料。由于原料煤性质的多样性和复杂性以及气化煤气用途不同, 发展了多种气化方法, 本章包括了气化的主要内容, 介绍了多种新的煤气化技术。新增“煤气化过程”、“催化气化反应机理”、“ICC 灰熔聚气化法”、“新型多喷嘴对置气化法”、“TPRI 两段干粉气化法”等小节, 在煤气脱硫方面, 增加了在焦炉煤气脱硫中应用较多的“HPF 法(5.9.7 小节)”, 更新了“煤气化技术的选择”等内容。

第 6 章煤间接液化, 主要内容为费托合成、合成甲醇、甲醇转化成汽油、甲醇制烯烃和煤制乙醚等。由合成气合成烃类、醇类以及化学产品是煤经过气化的间接液化过程。气化用原料煤要求较宽, 不仅可以用一些优质煤, 而且也可用一些劣质煤。利用煤气化所得到的合成气含氧的优势合成醇类及其他含氧化合物, 优于以石油为原料来合成同类产品的路线。本版在原有基础上, 更新或增加了部分内容, 如“国内 F-T 合成技术的发展”、“SDTO 和 DMTO 工艺”等内容。

第 7 章煤炭直接加氢液化, 主要内容为直接液化原理、直接液化技术发展和直接液化方

法。直接液化对原料煤有一定要求，液化产品多为芳烃。中国富产煤，有很多适合于直接液化的煤种，在天然石油出现短缺时，将用直接液化法生产人造石油。本版增加了新内容，介绍了国内进展。主要修改内容：在原有基础上进行内容调整，总体上更新了过时的数据。增加了液化粗油加工精制和神华百万吨级工业示范工程的经济评价。

第8章煤制碳素制品，主要内容为电极炭、活性炭、碳分子筛和碳素纤维的生产。由于制铝和电炉冶金工业的发展，电极炭需用量大、要求质量高，电极炭技术发展较快。活性炭有多种用途，主要用于工业污水和饮用水净化，随着环保要求的提高，煤制活性炭的需要量将逐年增加。碳素纤维有很高的强度和模量，有许多独特性能，主要用于生产高级复合材料。碳素材料是煤作为能源和化工原料之后的第三个应用领域，与煤的传统加工相比，技术上有不少突破，并发挥了煤含碳量高的优势，可带来某些产业的革命性变化。

第9章煤化工生产的污染防治，主要内容为环境保护、煤化工生产的主要污染物、减少污染的对策、污水处理以及烟尘治理。煤化工生产排放废气、污水、烟尘及废渣，其中含有危及环境的污染物。本章将结合炼焦化学生产介绍烟尘污染防治和含酚废水处理。此外，还叙述了气化生产废水的危害性与工业污水处理方法，简述了有关防治对策。本版在第二版基础上，增加了二氧化碳减排和利用的相关内容，同时也更新了有关数据。

参 考 文 献

- [1] 中国大百科全书化工卷. 北京: 中国大百科出版社, 1987: 444-456.
- [2] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. fifth Edition. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft Mbh, 1985, A7: 153-196.
- [3] Hoffman E J 著. 煤的转化. 许晓海, 郭历平译. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [4] Amundson N R, et al. Frontiers in Chemical Engineering. National Academy Press, 1988.
- [5] “十五”国家高技术发展计划能源技术领域专家委员会. 能源发展战略研究. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] BP世界能源统计年鉴, http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/china/bpchina_chinese/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/BPEnergy2011.pdf, 2011.

2 煤的低温干馏

2.1 概述

煤在隔绝空气条件下，受热分解生成煤气、焦油、粗苯和焦炭的过程，称为煤干馏（或称炼焦、焦化）。而煤热解是指煤在各种条件下受热分解的统称。煤干馏按加热终温的不同，可大致分为三种：500~600℃为低温干馏；600~900℃为中温干馏；900~1100℃为高温干馏。

煤低温干馏始于19世纪，当时主要用于制取灯油和蜡。19世纪末因电灯的发明，煤低温干馏趋于衰落。第二次世界大战前夕及大战期间，纳粹德国基于战争目的，建立了大型低温干馏厂，用褐煤为原料生产低温干馏煤焦油，再高压加氢制取汽油和柴油。战后，由于大量廉价石油的开采，使低温干馏工业再次陷于停滞状态。

煤低温干馏过程仅是一个热加工过程，常压生产，不用加氢，不用氧气，即可制得煤气和焦油，实现了煤的部分气化和液化。低温干馏比煤的气化和液化工艺过程简单，操作条件温和，投资少，生产成本低。如果主要产物半焦性能好，又有销路，煤低温干馏生产在经济上是有竞争能力的。此外，从煤的有效利用角度考虑，煤中含有不同反应性和不同结构性质的化合物，传统的煤炭利用方法是将煤在同一条件下加以燃烧、气化或液化等方式加以利用，没有考虑煤中化合物性质的差异，如果能将煤中的易挥发组分先通过干馏过程得到部分液体和气体，然后再将半焦加以进一步的利用，势必可以提高煤的利用效率，同时还可以弥补石油的短缺。

以褐煤为原料进行低温干馏，可把约3/4的原煤热值集中于半焦，而半焦质量通常还不到原煤的一半，从而使褐煤得到提质。褐煤、长焰煤和高挥发分的不黏煤等低阶煤，适于低温干馏加工。

褐煤半焦反应性好，适于做还原反应的炭料。半焦含硫比原煤低，低硫半焦做燃料有利于环境保护。

低阶煤无黏结性，有利于在移动床或流化床干馏炉中处理。最佳热解温度均随煤阶降低而降低，低阶煤开始热解温度低。

中国低阶煤储量较大，约占全部煤的55%，其中褐煤约占14%，这些低阶煤多产于西北和内蒙古地区，目前这些煤的90%用于直接燃烧。由于低阶煤含有较多的挥发分，进行低温干馏时可以回收相当数量的焦油和煤气，是低温干馏的优良原料。与煤气化或液化相比，利用了煤分子结构中含氢的潜在优势，通过低温干馏使煤中富氢部分产物以优质液态和气态的能源或化工原料产出。因而低温干馏能有效地利用资源。

蒸汽锅炉只需要由外界供给热量，提供热能的燃料可以是煤气、燃料油或半焦，所以用半焦代替煤燃烧加热锅炉，从供热角度来看应不成问题。原料煤和它的半焦相比，半焦所含污染物少于原料煤，故燃烧半焦对环境保护有利，社会效益也较好。如从提供单位热量的燃

料进行比较,煤焦油和煤气比半焦往往具有更高的经济价值,所以通过低温干馏加工,把煤转化成气、液、固态三种产物,在经济上是有效益的。

电力生产耗煤量极大,目前中国发电用煤每年约 $15 \times 10^8 \text{t}$,其增长率远比煤气化和生产发动机燃料所需煤炭的增长率快,利用低温干馏工艺从电力用煤获得焦油和煤气,半焦用于燃烧发电是经济、有效和合理地利用煤的方法。在前苏联、美国等发达国家,为此目的开发了电力用煤低温干馏新技术。煤的低温干馏在德国、波兰以及英国都有所发展。

2.2 低温干馏产品

煤低温干馏产物的产率和组成取决于原料煤性质、干馏炉结构和加热条件。一般焦油产率为 $6\% \sim 25\%$;半焦产率为 $50\% \sim 70\%$;煤气产率为 $80 \sim 200 \text{m}^3/\text{t}$ (原料干煤)。

2.2.1 半焦

低温干馏半焦的孔隙率为 $30\% \sim 50\%$,反应性和比电阻都比高温焦炭高得多。原料煤的煤化度越低,半焦的反应能力和比电阻越高。半焦强度一般不高,低于高温焦炭。半焦可用于电炉冶炼和化学反应等过程,这些用途对于燃料机械强度要求不高,半焦的块度和强度可以满足要求。

为了比较,表 2-1 列出原料为褐煤、长焰煤和气煤的半焦以及配入气煤炼得的焦炭和 $10 \sim 25 \text{mm}$ 碎冶金焦用作还原剂时的性质。

表 2-1 半焦和焦炭性质

炭料名称	孔隙率 /%	反应性(于 1050°C , CO_2) /[$\text{mL}/(\text{g} \cdot \text{s})$]	比电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}$)	强度 /%
褐煤中温焦	36~45	13.0	—	70
前苏联列库厂半焦	38	8.0	0.921	61.8
长焰煤半焦	50~55	7.4	6.014	66~80
英国气煤半焦	48.3	2.7	—	54.5
60%气煤配煤焦炭	49.8	2.2	—	80
冶金焦($10 \sim 25 \text{mm}$)	44~53	0.5~1.1	0.012~0.015	77~85

半焦块度与原料煤的块度、强度和热稳定性有关,也与低温干馏炉的结构、加热速度以及温度梯度等有关。一般移动床干馏炉用原料煤块度为 $20 \sim 80 \text{mm}$ 。

低温干馏半焦应用较广,其中可用作优质民用和动力燃料,因为半焦燃烧时无烟、加热时不形成焦油,而多数煤受热时有焦油生成,表现在一般燃料时冒黄烟。此外,半焦反应性好,燃烧的热效率高于煤。民用半焦应当有一定块度,并且应当均匀。气化用半焦用于移动床气化炉时,也要求有一定的块度。

半焦是铁合金生产的优良炭料,要求半焦的比电阻尽可能高,以保证铁合金电炉池中总电阻达到最大,节省电能。装入电炉的半焦块度可为 $3 \sim 6 \text{mm}$,比电阻为 $0.35 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$ 。

气流内热式块煤或型煤干馏炉在德国和其他国家用来生产半焦。例如在前苏联用该法生产铁合金半焦,其干馏终温达到 $700 \sim 750^\circ\text{C}$,是中温干馏。加热用的热载体为烟道气与回炉煤气的混合气体,温度为 $860 \sim 980^\circ\text{C}$ 。某厂采用当地生产的长焰煤为原料,所得半焦块度大于 16mm ,其原料煤、产品半焦以及 $10 \sim 25 \text{mm}$ 冶金焦的性质见表 2-2。

该厂原来全部采用冶金焦,将其 50% 改用半焦后,可使铁合金炉的生产能力增长 6% ,降低电耗 5.7% 。