



高职高专“十一五”规划教材

——煤化工系列教材

现代煤化工生产技术

XIANDAI MEIHUAGONG SHENGCHAN JISHU

付长亮 张爱民 主编

蔡庄红 主审



化学工业出版社



“十二五”规划教材

现代化工生产技术

现代煤化工生产技术

付国良 王瑞娟 主编

化学工业出版社



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材
——煤化工系列教材

现代煤化工生产技术

付长亮 张爱民 主编
蔡庄红 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书对现代新型煤化工的主要生产技术进行了介绍。内容包括空气深冷液化分离、煤气化技术、煤气净化技术、甲醇生产技术、二甲醚生产技术、醋酸生产技术、煤液化七章。在各章内容的选择上,结合了目前煤化工发展的现状,突出了目前使用较多的大规模空分技术、壳牌煤气化技术、德士古气化技术、鲁奇加压气化技术、耐硫宽温变换、低温甲醇洗、克劳斯硫回收、低压甲醇合成、甲醇气相脱水制二甲醚、甲醇液相羰基化制醋酸等新工艺。

本书在“理论够用,重视生产操作”的原则指导下,详细介绍了以上各工艺的发展现状、工艺原理、工艺条件、工艺流程、主要设备及生产操作,旨在为高职高专煤化工及化工专业的学生提供一本认识、学习煤化工生产操作的教材。由于较详细地介绍了各工艺的生产操作内容,本书也可作为相关煤化工企业操作人员培训的参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代煤化工生产技术/付长亮,张爱民主编. —北京:
化学工业出版社, 2009. 7

高职高专“十一五”规划教材——煤化工系列教材
ISBN 978-7-122-05728-0

I. 现… II. ①付…②张… III. 煤化工-高等学校:
技术学院-教材 IV. TQ53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 094612 号

责任编辑: 张双进
责任校对: 徐贞珍

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 19½ 字数 524 千字 2009 年 8 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: 33.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书根据高职高专《煤化工生产技术》教学大纲，并结合国内煤化工发展的趋势和特点而编写。

随着国内石油、天然气资源供应的日益紧张，整个化工行业出现了向煤化工倾斜的趋势，从而出现了现代新型煤化工。现代新型煤化工以大型清洁煤气化技术为龙头，辅以大规模空气分离技术、先进的合成气净化技术，实现了煤的清洁利用、替代燃料和化工产品的生产。为适应现代煤化工生产的需要，介绍新型煤化工的生产知识，我们联合了河南几家大型煤化工企业，精选了目前煤化工项目中广泛采用的大规模空分技术、壳牌煤气化技术、德士古煤气化技术、鲁奇加压气化技术、CO 宽温变换、低温甲醇洗、克劳斯硫回收、甲醇合成、二甲醚生产、醋酸生产、煤制油、甲醇制烯烃等生产工艺，对它们的基本原理、工艺条件、工艺流程、主要设备及生产操作要点进行了介绍。本书的内容主线为煤气化、合成气净化、甲醇及甲醇后续产品、煤液化等，而未涉及传统煤化工中的合成氨和煤焦化等内容。

本书在内容组织上突出了理论够用，重视实践的特点。对成熟的生产工艺，全部给出了生产操作的要点，除可满足全日制高职高专煤化工专业、化工专业学生的学习外，还可供有关煤化工企业员工培训参考。

本书由河南工业大学化学工业职业学院付长亮和河南煤业化工集团义马气化厂张爱民主编，参加编写的人员有：新疆轻工职业技术学院马金才、祈新萍；河南煤业化工集团义马气化厂张晓、高波；河南煤业化工集团中原大化鲁军。其中，付长亮编写绪论和第二章第一、二、三、四节；张爱民编写第二章第五、六节；鲁军编写第一章；马金才编写第三章；张晓编写第四章；祈新萍编写第五章和第六章；高波编写第七章。全书由河南工业大学化学工业职业学院蔡庄红审稿。

由于编者水平所限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2009 年 5 月

目 录

绪论	1		
一、传统煤化工和现代新型煤化工	1	四、现代煤化工的主要特点	5
二、传统煤化工向新型煤化工产业的转变	1	五、现代新型煤化工核心技术	5
三、发展现代新型煤化工的意义	3	六、课程的基本要求	6
		复习题	7
第一章 空气深冷液化分离	8		
第一节 概述	8	二、双级精馏	20
一、空分装置发展简况	8	三、空分塔的种类	21
二、空气分离的基本过程	8	四、空分塔中稀有气体的分布	23
三、空分装置类型	9	五、纯氩的制取	24
四、氧、氮的应用	9	第五节 空分流程	25
第二节 空气的净化	10	一、空分流程的演变	25
一、机械杂质的脱除	10	二、空分流程	28
二、水分、二氧化碳、乙炔的脱除	12	第六节 空气深冷分离的操作控制	30
第三节 空气的液化	15	一、空分系统的主要开车步骤	30
一、制冷的热力学基础	15	二、空分的正常操作管理	31
二、空气液化时的制冷原理	17	三、停车和升温	33
三、空气的液化循环	17	四、故障及排除方法	34
第四节 空气的分离	19	复习题	35
一、单级精馏	20		
第二章 煤气化技术	37		
第一节 煤气化概述	37	五、Shell 煤气化的操作控制	68
一、煤气的种类及成分	37	复习题	73
二、煤气化技术的分类	38	第四节 德士古水煤浆气化技术	74
三、煤气化技术的发展状况	38	一、德士古水煤浆气化的基本原理	74
四、我国的煤气化技术现状	42	二、德士古水煤浆气化工艺条件	76
五、煤气化技术发展的方向	42	三、德士古水煤浆气化工艺流程	80
复习题	43	四、德士古水煤浆气化主要设备	86
第二节 煤气化的基本原理	43	五、德士古气化的操作控制	87
一、煤的干馏	43	复习题	93
二、气化过程中的气化反应	45	第五节 鲁奇加压气化	93
三、煤气化过程常用评价指标	53	一、鲁奇加压气化概述	93
复习题	53	二、鲁奇加压气化原理	95
第三节 Shell 煤气化工艺	54	三、鲁奇加压气化操作工艺条件	97
一、Shell 煤气化基本原理	54	四、煤种及煤的性质对加压气化的影响	101
二、Shell 煤气化的主要工艺指标	56	五、鲁奇加压气化的典型流程及主要设备	107
三、工艺流程	58		
四、主要设备	65		

六、加压气化炉的开、停车、正常操作及 常见事故处理	116	一、灰熔聚气化法	124
复习题	123	二、GSP 煤气化工艺	128
第六节 其他气化技术简介	124	复习题	133
第三章 煤气净化技术	134		
第一节 概述	134	二、低温甲醇洗主要工艺参数的选择	160
一、煤气中的杂质及危害	134	三、工艺流程及主要设备	161
二、煤气杂质的脱除方法	134	四、低温甲醇洗的操作控制	166
复习题	136	复习题	169
第二节 耐硫宽温 CO 变换	136	第四节 硫回收	169
一、变换的基本原理	136	一、克劳斯硫回收简介	170
二、耐硫宽温变换的催化剂	142	二、克劳斯硫回收基本原理	171
三、耐硫宽温变换的工艺条件	147	三、克劳斯硫回收的催化剂	173
四、耐硫宽温变换的工艺流程	149	四、影响生产操作的因素	176
五、耐硫宽温变换的操作控制	153	五、工艺流程	178
复习题	157	六、克劳斯硫回收装置的生产操作	178
第三节 低温甲醇洗	157	复习题	182
一、低温甲醇洗基本原理	157		
第四章 甲醇生产技术	184	五、惰性气体含量	198
第一节 甲醇概述	184	六、甲醇合成催化剂对原料气净化的 要求	199
一、甲醇的性质与用途	184	第五节 甲醇合成的工艺流程及操作 控制	199
二、国内外生产现状	186	一、工艺流程	199
第二节 甲醇合成的基本原理	190	二、操作控制	201
一、化学平衡	190	第六节 甲醇合成反应器	203
二、甲醇合成反应的速率	191	一、对甲醇合成反应器的基本要求	203
第三节 甲醇合成的催化剂	192	二、常用甲醇合成反应器	203
一、国内外甲醇合成催化剂的发展 状况	192	第七节 甲醇的精馏	205
二、国外甲醇催化剂的生产情况	192	一、精馏的目的	205
三、国内研究开发概况	193	二、粗甲醇中的杂质	205
四、甲醇合成催化剂的工业应用	194	三、甲醇精馏的工业方法	207
第四节 甲醇合成的工艺条件	196	四、影响精甲醇质量的因素	209
一、温度	196	复习题	210
二、压力	197		
三、氢与一氧化碳的比例	197		
四、空间速度	197		
第五章 二甲醚生产技术	211		
第一节 二甲醚概述	211	二、反应速率	216
一、二甲醚的性质	211	三、影响甲醇转化率的因素	216
二、二甲醚的用途	211	第三节 甲醇气相脱水催化剂	218
三、二甲醚的生产方法	214	一、催化剂简介	218
第二节 甲醇气相脱水制二甲醚的基本 原理	215	二、JH202 催化剂的工业应用	219
一、化学平衡	215	第四节 甲醇气相脱水的工艺流程及反 应器	220

一、工艺流程	220	二、停车	223
二、反应器	221	三、故障处理	224
第五节 甲醇气相脱水的生产操作	222	复习题	225
一、开车	222		
第六章 醋酸生产技术	226		
第一节 概述	226	三、反应动力学	236
一、醋酸的性质	226	四、反应条件对生产的影响	237
二、用途	229	第四节 甲醇羰基化的工艺流程及主要	
三、生产方法	230	设备	240
第二节 甲醇羰基化催化剂	232	一、工艺流程	240
一、甲醇羰基化催化剂概况	232	二、主要设备	242
二、液相羰基铑催化剂的工业应用	234	第五节 甲醇羰基化的生产操作	244
第三节 甲醇羰基化生产醋酸的基本		一、开车	244
原理	235	二、停车	246
一、化学反应	235	三、不正常情况及处理	246
二、反应机理	235	复习题	247
第七章 煤液化	248		
第一节 概述	248	一、煤间接液化的基本原理	278
一、煤液化的意义	248	二、F-T 合成催化剂	282
二、煤液化的技术路线	249	三、F-T 合成的工艺条件	288
三、煤液化的发展历程	249	四、煤间接液化的工艺流程	290
第二节 煤直接液化	253	第四节 煤间接液化与直接液化的对比	299
一、煤与液体燃料油的区别	253	一、液化原理对比	299
二、煤直接液化的基本原理	254	二、对煤种的要求对比	299
三、煤加氢液化的溶剂	257	三、液化产品的市场适应性对比	300
四、煤直接液化的催化剂	260	四、液化工艺对集成多联产系统的影响	
五、煤加氢液化的工艺参数	265	对比	300
六、工艺流程	268	五、液化技术的经济性对比	301
七、煤液化粗油提质加工	273	六、结论	301
八、煤液化残渣的利用	277	复习题	301
第三节 煤间接液化	277		
参考文献	303		

绪 论

一、传统煤化工和现代新型煤化工

煤化工是以煤炭为主要原料生产化工产品的行业。根据生产工艺与产品的不同，主要分为煤焦化、煤气化和煤液化三条产品链，其产品链情况见图 0-1。

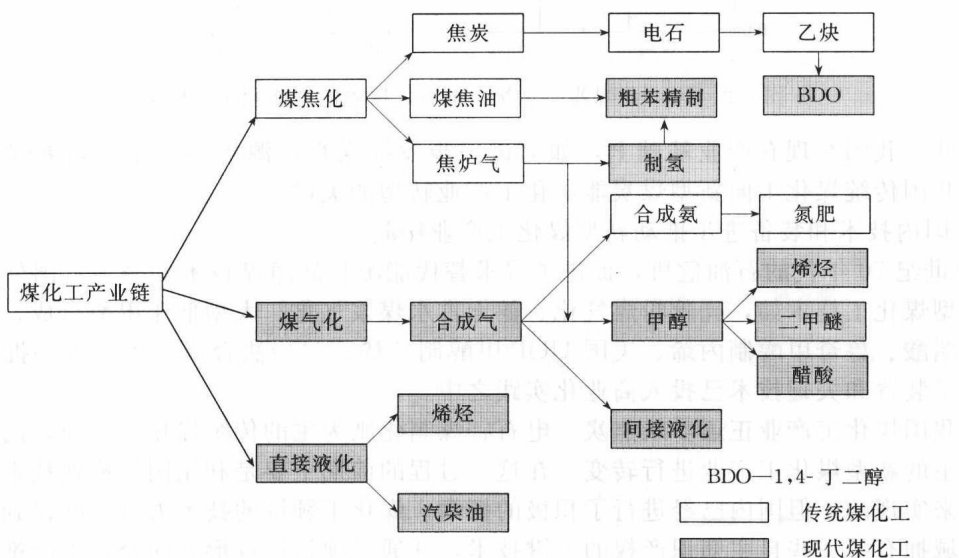


图 0-1 煤化工产品链

煤焦化及下游电石、乙炔，煤气化中的合成氨等都属于传统煤化工，而煤气化制醇醚燃料、甲醇制烯烃、煤液化则是现代新型煤化工领域。

随着高油价时代的来临，以大型煤气化为龙头的现代煤化工产业，已成为全球经济发展的热点产业，这是因为现代煤化工的能源化工一体化的产业模式，可以减少对原油资源的高度依赖，并有效解决交通、火电等重要耗能行业的污染和排放等问题。

我国的《能源中长期发展规划纲要》已经将煤化工列入我国中长期能源发展战略的发展重点。“十一五”规划纲要中也明确指出：“发展煤化工，开发煤基液体燃料，有序推进煤炭液化示范工程建设，促进煤炭深度加工转化”。在《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》中将大型煤化工成套设备列入十六项重大装备之一，其中包括煤炭液化和气化、煤制烯烃等设备。这些产业政策都将推动国内新型煤化工的迅速发展。

二、传统煤化工向新型煤化工产业的转变

1. 传统煤化工实力雄厚奠定新型煤化工产业发展基础

经过几十年的发展，我国煤化工产业已经拥有雄厚基础。2007 年我国生产焦炭 3.2 亿吨、煤焦油 840 万吨（约有 390 万吨没有回收）、电石 1482 万吨、煤制化肥约 3000 万吨、煤制甲醇 1076 万吨，均位居世界前列。

传统煤化工产业的发展对于缓解我国石油、天然气等紧缺能源供求的矛盾，促进钢铁、化工、农业等下游产业的发展，发挥了难以替代的作用。

但根据 2005 年产能和产量情况对比, 焦炭、电石行业的产能利用率处于较低水平, 属于产能过剩行业, 见图 0-2。如果考虑未来产能的释放效应, 在“十一五”期间, 煤炭、尿素也有产能过剩的趋势, 对此国家发改委已经出台了相应的产业结构调整政策, 进行了干预和引导。

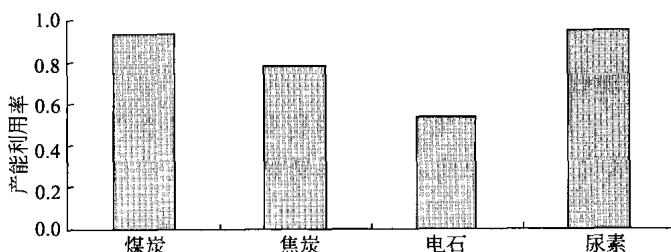


图 0-2 2005 年煤炭、焦炭、电石、尿素的产能利用率情况

因此, 我国在现有产业基础上, 如何进一步发挥煤炭资源优势, 深度拓展煤化工产业链, 是我国传统煤化工向新型煤炭能源化工产业转型的关键。

2. 国内技术和装备进步推动新型煤化工产业崛起

20 世纪 70 年代的石油危机, 促进了寻求替代能源和洁净煤技术的努力。国外具有代表性的新型煤化工技术如, 壳牌粉煤气化、德士古水煤浆气化、大型低压甲醇合成、甲醇羰基合成制醋酸、鲁奇甲醇制丙烯、美国 UOP 甲醇制乙烯、二步法合成二甲醚等一批新型规模化煤化工装置和关键技术已投入商业化实践之中。

而我国煤化工产业正逐步从焦炭、电石、煤制化肥为主的传统煤化工产业, 向石油替代产品为主的新型煤化工产业进行转变。在这一过程的前期主要是利用国外成熟技术和进口相应设备来实现的, 但国内已经进行了积极的探索, 煤化工领域的技术力量不断得到加强, 在关键领域拥有了一些自主知识产权的关键技术, 并通过项目试点形式向企业不断推广。

近年来, 在新型煤化工领域已经取得具有突破性的国产技术和装置如下。

① 多喷嘴对置式水煤浆气化技术打破了国外公司在大型煤气化技术上的垄断, 为我国新型煤化工产业的发展提供了技术支撑。

② 两段干煤粉加压气化技术是“绿色煤电”项目中的 IGCC (整体煤气化联合循环发电)、煤制油、煤化工及多联产系统的核心技术, 代表着大型煤气化发展的主要方向。

③ 中国科学院大连物化所首次将 SAPO-34 催化材料应用于甲醇制烯烃的催化过程, 并开发了相应的催化剂和与之配套的循环流化床中试技术, 利用该中试技术建成了目前世界上第一套万吨级甲醇制烯烃工业化装置。

以上关键技术的突破, 并不能说我国在煤化工领域中技术已经具有世界领先水平, 但因为国内建设项目较多, 引进技术装置较多, 通过模仿与创新, 国内技术与装置水平都得到了较快的提升, 在关键领域有所突破, 已经具有了替代效应。随着试点项目的逐步成熟, 将有效推动我国新型煤化工产业的发展。

3. 地方政府与企业积极投入新型产业

由于近年来国际市场油价高涨, 国内紧张的供求局面, 激发了企业发展煤化工产业的积极性, 并且由于煤化工是产业链条长、增值空间大、关联度高的重化工产业, 有助于提升地方经济结构, 因此, 地方政府也相当重视新型煤化工的发展规划。在他们的支持下, 有条件的企业纷纷上报项目。

全国拥有煤炭资源的地区, 如山西、内蒙古、陕西、宁夏、安徽、河南、新疆、云南、贵州、山东等省(自治区)纷纷将煤化工的发展列入地方的“十一五”规划。部分省份的煤

化工产业规划和发展目标见表 0-1。

表 0-1 部分省份的煤化工产业规划和发展目标

省区	发展规划	产业目标
山西	制定《加快发展具有山西优势的煤化工产业三年推进计划》，启动“5565”工程	2010 年将形成甲醇 450 万吨、甲醇下游产品 300 万吨、聚氯乙烯 250 万吨、煤焦油加工能力 255 万吨，煤化工投资 870 亿元
内蒙古	全力推进煤化工、煤液化、煤制油项目建设，建成我国重要的化工生产基地	到 2010 年，化工产业预计实现销售收入 1300 亿元，其中煤化工 750 亿元
河南	建设 5 大煤化工产业基地，“十一五”煤化工规划项目 72 个，重点发展甲醇、烯烃、醋酸、甲醛、二甲醚、尿素、三聚氰胺、二甲基甲酰胺、芳烃等九大主导产品	到 2010 年，煤化工产业煤炭转化能力将由 2004 年的 800 万吨提高到 1900 万吨，销售收入由 2004 年的 110 亿元增加到 600 亿元
宁夏	推出《宁东能源重化工基地总体规划与建设纲要》，确定重点发展电力、煤化工、煤炭开采三大产业	建设宁东能源重化工基地，规划占地总面积 14.28 平方公里，总投资 300 亿元
贵州	未来 5 年内规划和建设 5 个“循环经济”型的煤化工生态工业基地	预计 5 个基地煤化工生产项目总投资达 522.8 亿元，年产值可达 403 万元
陕西	陕北能源重化工基地打造 3 大产业链，规划建设 7 个产业区，形成煤、电、油、化产业链	2010 年煤制油生产能力将达到 400 万吨，煤制甲醇生产能力将达到 600 万吨，甲醇制烯烃产能将达到 100 万吨
安徽	建设煤-盐一体化、大型干熄焦、煤制甲醇及烯烃等重大工程，加快化肥原料结构调整步伐，建成我国重要的煤化工基地	到 2010 年，形成 3000 万吨原煤加工能力，其中焦炭 1000 万吨、合成油品 100 万吨、合成氨 300 万吨、甲醇 200 万吨、烯烃等煤化工衍生产品 200 万吨，建成国家级煤化工基地

从投资角度看，2008 年全国在建煤化工项目 30 项，总投资 800 多亿元，新增生产能力为甲醇 850 万吨，二甲醚 90 万吨，烯烃 100 万吨，煤制油 124 万吨。已备案的甲醇项目产能 3400 万吨，烯烃 300 万吨，煤制油 300 万吨。预计“十一五”末甲醇产能将达到 2600 万～3000 万吨；二甲醚产能将达到 770 万～1100 万吨；醋酸产能将达到 445 万～700 万吨。

三、发展现代新型煤化工的意义

我国现代煤化工业的战略价值主要在于：资源条件已经决定以煤为基础的能源格局在长期难以有实质性改变；我国石油较低的储采比已经危及能源安全，替代能源是必然选择；新兴煤化工是推动煤炭清洁利用的重要途径；由于技术提升因素可以充分利用劣质煤资源、增强经济性，促进可持续发展。

1. 资源禀赋状况决定我国能源战略以煤为基础

2005 年，我国已经成为世界第二大能源生产国和第二大能源消费国，能源消费主要靠国内供应，能源自给率为 94%。

化石燃料储量比较见表 0-2。

表 0-2 化石燃料储量比较

项 目	美国	欧盟	日本	OECD	印度	中国	世界
化石燃料可采储量							
煤/Mt	246643	39460	359	373220	92445	188600	983164
石油/Mt	3600	2224	8	10900	700	2300	161900
天然气/×10 ⁸ m ³	5.29	2.75	0.04	15.02	0.92	2.23	179.53
化石燃料人均储量							
煤/(t/人)	840	84	2.8	322	85	145	154
石油/(t/人)	12.26	4.74	0.06	9.39	0.64	1.77	25.4
天然气/(m ³ /人)	18012	5854	310	12938	844	1716	28160

由表 0-2 可见，我国煤炭、石油与天然气的总储量与 OECD（经济合作与发展组织）发达国家相比差距不大，但从人均储量看，就有了较大差距；其中煤炭资源情况与世界平均水平接近，具有相对比较优势，这决定了我国长期依赖煤炭的能源格局。

“十一五”规划已经明确我国能源发展的总体战略：“坚持节约优先、立足国内、煤为基础、多元发展，优化生产和消费结构，构筑稳定、经济、清洁、安全的能源供应体系”。从我国的能源战略可以看出，煤炭是能源产业发展的长期基础。

2. 替代石油维护能源安全

表 0-3 列出了 2004 年中国化石能源的储量和开采情况。

表 0-3 2004 年中国化石能源的储量和开采情况

化石能源	世界总探明可采储量	中国探明可采储量	中国所占比例	世界总产量	中国产量	中国所占比例	世界储采比	中国储采比
煤	$9831 \times 10^8 \text{ t}$	$1886 \times 10^8 \text{ t}$	19.1%	$55.5 \times 10^8 \text{ t}$	$21.1 \times 10^8 \text{ t}$	38%	177.4	96
石油	$1636 \times 10^8 \text{ t}$	$22 \times 10^8 \text{ t}$	1.3%	$38.95 \times 10^8 \text{ t}$	$1.8 \times 10^8 \text{ t}$	4.6%	40.6	12.1
天然气	$179.8 \times 10^8 \text{ m}^3$	$2.35 \times 10^8 \text{ m}^3$	1.3%	$2.76 \times 10^8 \text{ m}^3$	$0.05 \times 10^8 \text{ m}^3$	1.8%	65.1	47

从化石资源的储采比看，世界石油储采比在 40 左右，而中国只有 12。可以预见，如果在未来 10~20 年中仍没有大的油田被发现，石油资源匮乏的瓶颈将危及国内能源安全。

自 1993 年我国成为石油净进口国之后，由于自身的石油储量非常有限，我国石油对外依存度从 1995 年的 7.6% 不断提高。2006 年已经超过 40%，2008 年进口原油已超过 2 亿吨，依存度已接近 50%，预计到 2020 年，石油对外依存度有可能接近 60%。

我国能源资源储量总体偏紧，特别是优质石油能源资源短缺，是我国能源供应最突出的问题。因此，为了降低对进口石油的严重依赖，必然要发展以“煤代油”为核心的现代煤化工产业。

3. 清洁利用能源降低环境污染

由于我国能源消费以煤为主，污染物排放总量较大。2004 年，中国工业废气排放量 237696 m^3 ，其中燃料燃烧占 58.7%。二氧化碳排放量 2255 万吨，酸雨区 300 万平方公里，均居世界第一位。尤其是我国 SO_2 、 CO_2 排放量的 85%、烟尘的 70% 和 NO 的 60% 都来自于燃煤，因此发展洁净煤技术对于我国具有重要意义。

根据《中国洁净煤技术“九五”计划和 2010 年发展规划》属于洁净煤领域的有：

- ① 煤的加工（如洗选、型煤、动力配煤、水煤浆等）；
- ② 发电（如循环流化床锅炉、燃煤联合循环发电等）；
- ③ 煤的转化（如气化、液化、焦化、燃料电池与磁流体发电技术等）；
- ④ 污染排放控制与废弃物处理领域（如烟道气净化、电厂粉煤灰综合利用等）。

现代煤化工是发展洁净能源的重要途径之一。

传统煤化工是污染型行业，具有“煤炭-化工产品-污染排放”的单向流动特征，而现代煤化工属于洁净煤技术中煤炭转化领域。发展循环经济型煤炭能源化工，尤其是各种类型的多联产系统已经是解决环境问题的主要方向。

4. 节约资源充分利用低成本劣质煤

我国虽然煤炭资源相对丰富，但高硫、高灰的劣质煤比重较高，占 30% 以上。在这种资源现状下，如何清洁利用劣质煤，对于我国能源行业而言，是一个重要问题。

国家已经实行煤炭资源分类使用优化配置政策：炼焦煤（包括气煤、肥煤、焦煤、瘦煤）优先用于煤焦化工业；褐煤和煤化程度较低的烟煤优先用于煤液化工业；优质和清洁煤炭资源，优先用作发电、民用和工业炉窑的燃料；高硫煤等劣质煤，主要用于煤气化工业；

无烟块煤，优先用于化肥工业。

煤气化技术与煤液化技术都已经实现了对劣质煤的充分利用。例如，山西省晋城煤业集团的高硫无烟煤洁净化 10 万吨合成油示范项目，利用“三高”（高硫、高灰、高灰熔点）劣质无烟煤制造 10 万吨/年合成油项目，采用了适宜“三高”煤气化的“灰熔聚流化床粉煤气化”技术，此项技术拥有自主知识产权。

四、现代煤化工的主要特点

1. 以清洁能源为主要产品

现代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

现代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

现代煤化工根据煤种、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，现代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

现代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，形成现代煤化工产业基地及基地群。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

现代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

通过现代煤化工产业建设，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。

五、现代新型煤化工核心技术

1. 煤直接液化

煤直接液化是煤化工领域的高新技术。该技术将煤制成油煤浆，于 450℃ 左右和 10~30MPa 压力下催化加氢，获得液化油，并进一步加工成汽油、柴油及其他化工产品。该技术开发始于 20 世纪 20 年代，30~40 年代曾在德国实现工业化，70 年代国外又进行新工艺、

新技术开发, 2000 年后开发工作基本结束。国内神华集团引进国外核心技术建设示范工厂, 神华集团煤制油化工公司鄂尔多斯 100 万吨/年直接液化煤制油项目从 2008 年 12 月 31 日起运行, 产出合格油品和化工品, 将经过进一步调试以获得长周期平稳运转。

国内有关研发机构跟踪研究已有 20 多年, 目前正在开发具有自主知识产权的煤炭直接液化新工艺以及专用高效催化剂等关键技术。

2. 煤间接液化

煤间接液化是将煤气化, 并制得合成气 (CO 和 H_2), 然后通过 F-T (费托) 合成, 得到发动机燃料油和其他化工产品的过程。南非于 20 世纪 50 年代开始建设商业化工厂, 目前已形成年产 700 万吨产品的生产能力。国内对间接液化技术的开发已有 20 年的历史, 目前正在开发浆态床低温合成工艺及专用催化剂, 另外进行了引进国外技术建设工业示范厂的前期研究。

利用中科院山西煤化所技术的潞安、伊泰和神华分别建设的 16 万吨/年铁基浆态床间接液化煤制油项目, 其中潞安集团已于 2008 年 12 月抢先“出油”, 其他项目正在建设中。位于宁夏的神华集团与 SASOL 公司 1:1 合资的间接煤制油项目正在开展第二阶段可行性研究, 有望于 2009 年底开工建设。此外, 兖矿集团自主知识产权的陕西榆林 100 万吨/年间接煤制油项目也在推进之中。

3. 大型先进煤气化

煤气化是发展新型煤化工的重要单元技术。国内大型先进煤气化技术与国外相比虽有一定差距, 但近年来加快了开发速度。“十五”期间, 分别对具有自主知识产权的多喷嘴水煤浆气化、干粉气流床气化技术进行工业示范开发和放大研究。考虑国内煤种、煤质的多样性, 目前亟待研究开发适合灰熔点高、中强黏结性煤种的气化技术。

4. 一步法合成二甲醚技术

二甲醚可以代替柴油用作发动机燃料, 也可以作为民用燃料替代 LPG (液化石油气) 与以甲醇为原料两步法制取二甲醚相比, 以合成气为原料通过一步法合成二甲醚的技术具有效率高、工艺环节少、生产成本低的优点。国内正在研究开发一步法合成二甲醚技术。

5. 煤化工联产系统

煤化工联产系统是现代煤化工发展的重要方向, 联产的基本原则是利用不同技术途径的优势和互补性, 将不同工艺优化集成, 达到资源、能源的综合利用, 减少工程建设投资, 降低生产成本, 减少污染物或废弃物排放。如 F-T 合成与甲醇合成联产、煤焦化与直接液化联产等。

6. 以煤气化为核心的多联产系统

以煤气化为核心的多联产系统是现代煤化工发展的主要内容, 并有多种形式, 其要点是: 以煤 (或石油焦、渣油等) 为气化原料, 生产的煤气作为合成液体燃料、化工品及发电的原料或燃料, 通过多种产品生产过程的优化集成, 达到减少建设投资和运行费用, 实现环境保护的目的。目前, 国内正在进行多联产系统的优化集成模拟软件开发和关键技术的研究。

7. 其他先进煤化工技术

现代煤化工发展还涉及其他单元工艺技术的研发和应用, 如高效气体净化和分离技术, 大型高效合成技术, 适应不同热值的燃气轮机发电技术等。

六、课程的基本要求

本课程是理论与实践密切结合的一门学科, 不仅需要应用化学、化工原理、化工热力学和化工动力学等的基础知识, 建立完整的专业技术理论体系, 而且要用到工程的技术经济知识以处理实际问题。因此, 它不像基础科学学科那样有很明显的学科体系。对于初学者

来说，它初看起来庞杂繁琐，但只要掌握课程的规律和特点，就不是一件难事。学习时，主要应针对如下几方面：原料的选择和预处理；生产方法的选择及方法原理；设备或反应器的作用、结构和操作；催化剂的选择和使用；其他物料的影响；影响操作条件的因素和操作条件的选择；工艺流程组织；生产操作控制；产品规格和副产物的分离与利用；能量的回收和利用；不同工艺路线及流程的技术经济评比等。

由于本课程涉及的知识面广，在学习时要注意点面结合，建立起知识内容的构架，重点内容应深入细致地探究。对于典型过程，要求理解并掌握工艺原理、选定工艺条件的依据、工艺流程的确立及特点、不同反应设备的结构特点等。对于典型产品的不同原料、不同工艺路线应进行分析比较，比较其技术经济指标、能量回收利用方法、副产物回收利用和废料处理方法等，找出其各自的优缺点。由于本课程的综合性和实践性，学习中应注意培养分析问题和解决问题的能力，特别强调理论和实践相结合，应安排更多的机会适时接触生产现场。只有这样，才能把这门课学好。

复 习 题

1. 简述传统煤化工和现代煤化工分别主要包括哪些范畴？
2. 简述发展现代煤化工有哪些重要意义？
3. 现代煤化工主要有哪些特点？
4. 现代煤化工主要有哪些核心技术？

第一章 空气深冷液化分离

第一节 概 述

空气深冷液化分离装置（简称空分装置或制氧机）是利用深度冷冻原理将空气液化，然后根据空气中各组分沸点的不同，在精馏塔内进行精馏，获得氧、氮、一种或几种稀有气体（氩、氖、氦、氪、氙）的装置。氧气可用于煤气化及煤气化联合发电；氮气用于合成氨生产化肥、硝酸、塑料等。

干空气中含有的主要成分及各组分的沸点见表 1-1。

表 1-1 空气中的主要成分及沸点

组分	分子式	含量/%	沸点/℃	组分	分子式	含量/%	沸点/℃
氧	O ₂	20.95	-182.97	氪	Kr	1.08×10^{-4}	-153.4
氮	N ₂	78.09	-195.79	氙	Xe	8.0×10^{-6}	-108.11
氩	Ar	0.932	-185.86	氢	H ₂	5.0×10^{-5}	-252.76
氖	Ne	$(1.5 \sim 1.8) \times 10^{-3}$	-246.08	臭氧	O ₃	$(1 \sim 2) \times 10^{-6}$	-111.90
氦	He	$(4.6 \sim 5.3) \times 10^{-4}$	-268.94	二氧化碳	CO ₂	0.03	-78.44

另外，空气中还含有少量的烃类（C_mH_n）、氮氧化物（NO_x）和机械杂质。

一、空分装置发展简况

1891 年，德国林德公司在冷冻机械制造公司的实验室开始进行空气液化工作。1903 年，林德公司制成第一台采用高压节流制冷循环的工业制氧机，生产能力为 10m³O₂/h。开辟了低温精馏空气，工业制取氧气的工艺流程。

随后的发展主要为：在制冷循环中膨胀机的使用和改进；冻结法清除空气中的水分和二氧化碳；高效板翅式换热器的使用；应用常温分子筛吸附空气中的杂质；电子计算机自动控制；液氧泵内压缩流程取代氧压机；规整填料塔的使用等。

经过上百年的改进和发展，空分装置的操作压力从最初的高压（20MPa），发展为现今的中压和全低压（0.5MPa）；生产规模从最初的 10m³O₂/h，到现在的几万甚至十几万的制氧量。氧提取率达 99% 以上，氩提取率达 90% 以上，单位氧电耗在 0.36kW·h/m³O₂。

二、空气分离的基本过程

从原理上划分空气分离主要包括下列过程。

- ① 空气的过滤和压缩。
- ② 空气中水分和二氧化碳等杂质的清除。
- ③ 空气冷却与液化。
- ④ 冷量的制取。
- ⑤ 精馏。
- ⑥ 危险杂质的排除。

1. 空气的过滤和压缩

大气中的空气首先经过空气过滤器过滤其灰尘等机械杂质，然后在空气透平压缩机中被

压缩到所需的压力。压缩产生的热量被冷却水带走。

2. 空气中水分和二氧化碳的清除

加工空气中的水分和二氧化碳，若进入空分设备的低温区，会形成冰和干冰阻塞换热器的通道和塔板上的小孔，因而用分子筛吸附器来预先清除空气中的水分和二氧化碳。分子筛吸附器成对切换使用，一台工作的时候另一台再生。

3. 空气冷却

空气的冷却是在主换热器中进行的。在其中，空气被来自精馏塔的返流气体冷却到接近液化温度。与此同时，冷的返流气体被复热。

4. 冷量的制取

由于绝热不足造成的冷量损失、换热器的复热不足损失和冷箱中向外直接排放低温流体等因素，分馏塔需要补充冷量。分馏塔所需的冷量是由空气在膨胀机中等熵膨胀和等温节流效应而获得的。

5. 精馏

在由筛板（填料）构成的精馏塔中，气体自下而上流动，而液体自上而下流动，两流体之间进行热质交换，实现氧、氮的分离。由于氧、氮组分沸点的不同，氮比氧易蒸发，氧比氮易冷凝，气体逐板（段）通过时，氮的浓度不断增加，只要有足够多的塔板（填料），在塔顶即可获得高纯的氮气。反之液体逐板（段）下降时，氧的浓度不断增加，在下塔底部可获得富氧液化空气（液空），在上塔底部可获得高纯度氧气。

6. 危险杂质的排放

空气中的危险杂质是碳氢化合物，特别是乙炔。在精馏过程中如乙炔在液化空气和液氧中浓缩到一定程度，就有发生爆炸的可能。因此乙炔在液氧中的含量不得超过 0.1mg/kg。可通过从液氧蒸发器中连续排放部分液氧来防止碳氢化合物浓缩。另外，当在液氧蒸发器中不断抽取液氧时，也能防止碳氢化合物浓缩。

三、空分装置类型

根据冷冻循环压力的大小，空分装置分为高压（7~20MPa）、中压（1.5~2.5MPa）和低压（小于 1MPa）三种基本类型。

高压装置一般为小型制取气态产品和液态产品的装置；中压装置主要为小型制取气态产品的装置；低压装置多为中型和大型制取气态产品的装置。对于国产空分装置，一般产氧量在 20m³/h 以下和小型制取液氧、液氮的装置为高压装置；产氧量为 50m³/h、150m³/h、300m³/h 的装置为中压装置；产氧量大于 800m³/h 的装置均为低压装置。空分装置参数系列见表 1-2。

表 1-2 空分装置参数系列

产氧量/(m ³ /h)		8~20	50~150	300	800~
纯度/%	氧气	>99.2			>99.5
	氮气	>99.5			>99.99
操作压力/MPa		7~20	1.5~2.5		<1

四、氧、氮的应用

1. 氧的应用

在炼钢过程中吹以高纯度氧气，氧便和碳及磷、硫、硅等起氧化反应，这不但降低了钢的含碳量，还有利于清除磷、硫、硅等杂质。而且氧化过程中产生的热量足以维持炼钢过程所需的温度，因此，吹氧不但缩短了冶炼时间，同时提高了钢的质量。高炉炼铁时，提高鼓