

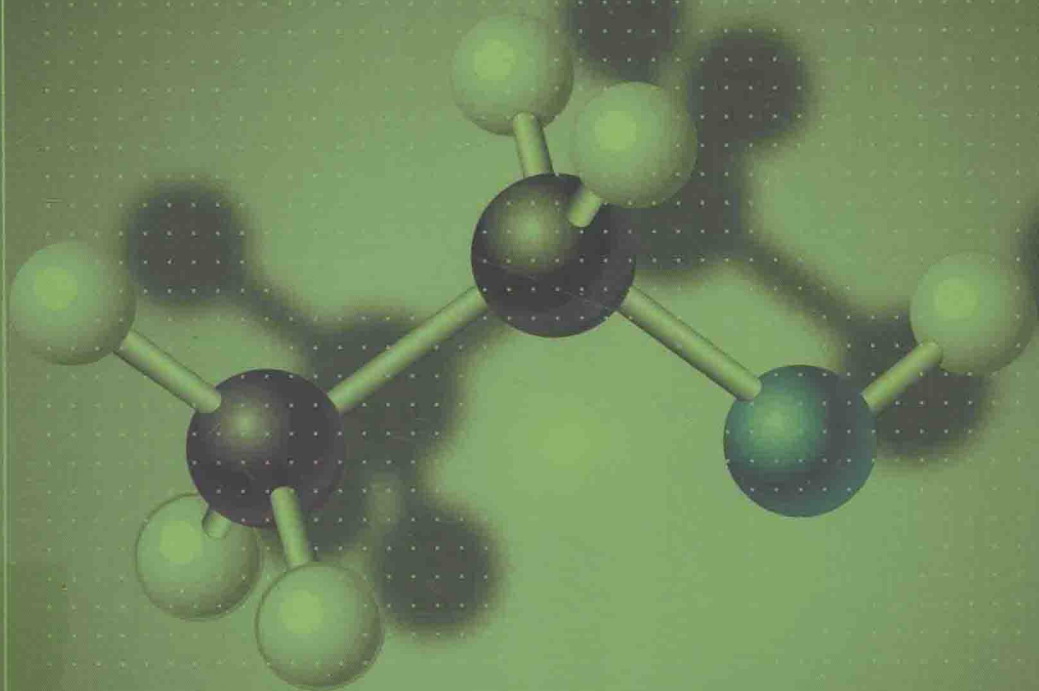


国家科学技术学术著作出版基金资助出版

煤制乙醇技术

丁云杰 等编著

Techniques for Ethanol Synthesis
from Coal via Syngas



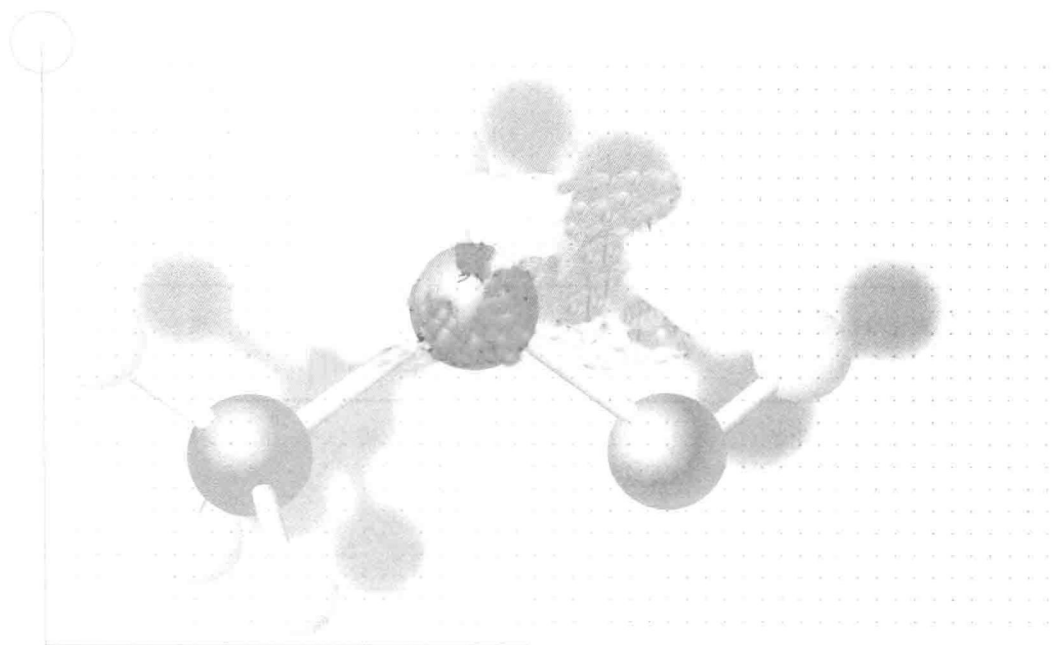
化学工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

煤制乙醇技术

丁云杰 等编著

Techniques for Ethanol Synthesis
from Coal via Syngas



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是作者根据其及其所在的研究团队三十年来从事煤经合成气制乙醇催化剂及其工艺过程研究的成果积累并结合国内外有关文献撰写的一部学术专著。书中以合成气直接合成 C_2 含氧化合物及其加氢转化为乙醇、乙酸直接加氢制乙醇和乙酸/烯烃加成酯化及其加氢制乙醇联产其他醇类的核心催化技术为主线,辅以与之相配套的工艺研究,全面、系统地介绍了煤制乙醇技术所涉及的催化剂研制、催化反应的规律和催化剂制作的原理、表征方法,以及研究前沿和发展方向。书中着重介绍了我国学者在该领域的研究与应用成果。

本书可供煤化工、石油化工和精细化工与其他高新技术领域从事开发应用研究及在厂矿企业工作的科技工作人员、工程技术人员参考,也可供高等院校相关专业研究生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤制乙醇技术/丁云杰等编著. — 北京:化学工业出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-122-19695-8

I. ①煤… II. ①丁… III. ①乙醇-生产工艺 IV. ①TQ223.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 021946 号

责任编辑:成荣霞
责任校对:宋 玮

文字编辑:王 琪
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 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张30 字数573千字 2014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:148.00 元

版权所有 违者必究

前言

Foreword

乙醇是基本有机化工原料，目前我国乙醇年产量约为 700 万吨，专家预测到 2015 年乙醇年需求量约为 850 万吨。乙醇的工业生产方法以粮食发酵法和乙烯水合法为主，我国乙醇的 90% 主要来自粮食发酵法。粮食发酵法每生产 1 吨乙醇需耗用 3 吨多玉米。

乙醇是公认的无污染车用燃料的添加剂，随着严重污染地下水源的 MTBE 车用燃料添加剂的逐步淘汰，一旦乙醇作为车用燃料添加剂在经济上可行而成为现实（当然采用新技术改变乙醇生产的原料来源，如采用该技术实现以煤炭资源为原料来生产乙醇，将大大加快乙醇作为车用燃料添加剂的进程），乙醇的需求量将是难以估量的。

乙醇是重要的溶剂和化工原料，还是理想的高辛烷值无污染的车用燃料及其添加剂。巴西多年来一直使用乙醇作为汽车燃料或燃料添加剂，近年来我国在多个省份实施了乙醇汽油的推广工作，效果是明显的。随着环境质量要求的提高，发展醇燃料和在汽油中添加醇或醚已成为改善汽车燃料的主要出路。我国人口众多，而耕地面积不足，总的来说粮食不充裕，而且石油资源相对不足，而煤炭资源相对丰富。因此，研究开发从煤炭资源出发经合成气生产乙醇技术替代传统的粮食发酵路线，对减少我国粮食的工业消耗和缓解石油资源紧缺的矛盾，以及提高人民生活水平和发展国民经济具有重要的战略意义。

中国科学院大连化学物理研究所从 1987 年起不间断地从事合成气制乙醇的研究工作，在 1996 年完成了 30 吨/年规模的工业性中试的基础上，经过十多年的不懈努力，研制出了高选择性的第二代新型催化剂以及产物后处理的加氢催化剂，并完成了实验室立升级模试。在此基础上，与江苏索普集团有限公司签订合成气制乙醇 1 万吨/年工业化示范项目，并与中国五环工程公司签订了该过程的工程化技术开发协议。该项目将依托索普公司 60 万吨/年甲醇装置的现有气源、场地和主要资金，共同进行合成气制乙醇工艺技术和示范装置及工业化装置的工程化技术的研发。并在分析示范装置运行数据的基础上，完成 50 万吨/年工业化装置的工艺软件包的编制工作。

正在开发的煤基乙醇技术路线，主要分为以下四条：①煤经合成气制 C_2

含氧化合物，再加氢转化为乙醇；②煤经甲醇羰基化制乙酸，乙酸直接加氢转化为乙醇；③二甲醚羰基化制乙酸甲酯，乙酸甲酯加氢制乙醇副产甲醇，甲醇脱水制二甲醚；④随着 MTO 商业装置不断大量建设，大量的乙烯、丙烯和丁烯将成为廉价易得的商品，因此，烯烃/乙酸加成酯化为乙酸酯，乙酸酯加氢生产乙醇联产其他醇的技术，也由于其原子经济性将具有较大的生产成本、环境等优势。

图 1 总结了煤制乙醇的主要技术路线，从合成气出发，经 Rh 基催化剂和列管式固定床反应工艺，生产出以乙醇、乙酸、乙醛和乙酸乙酯为主要组分的 C_2 含氧化合物的水溶液，经 Pd 基催化剂和列管式固定床反应工艺，将 C_2 含氧化合物的水溶液转化为乙醇和乙酸乙酯的水溶液，最后经 Cu 基催化剂和固定床反应工艺，将乙醇和乙酸乙酯的水溶液中的乙酸乙酯转化为乙醇，经初蒸馏后获得 90% 左右的乙醇水溶液，采用分子筛膜脱水技术获得纯度 99.5% 以上的无水乙醇。基于当前我国煤基甲醇羰基化制乙酸的产能大量过剩和技术的成熟度高的现状，国内研究单位经过多年努力，研发了 Pd 基乙酸加氢催化剂，将乙酸转化为乙醇和乙酸乙酯水溶液，同样，该水溶液在 Cu 基催化剂的作用下将其中乙酸乙酯转化为乙醇，采用分子筛膜脱水技术获得无水乙醇。在催化剂、工艺技术和产品分离技术等方面形成一系列具有自主知识产权的发明专利。开发出有别于美国塞拉尼斯公司的乙酸直接加氢技术，在催化剂反应性能和整个过程的能耗等方面表现出明显的优越性。现已完成了 3 万吨/年工业性试验装置的工艺软件包和基础工程设计，工业性试验装置正在建设中。由于乙酸直接加氢将乙酸中的一个氧原子转化为废水，产生大量的污水，且消耗宝贵的 H_2 ，该过程不具有原子经济性的绿色化工过程，我们还开发了烯烃与乙酸的加成酯化技术，生产乙酸酯初产品，再经 Cu 基催化剂和固定床工艺，生产乙醇联产其他高附加值的醇类产品。该过程将乙酸中 O 转化为醇类产品中

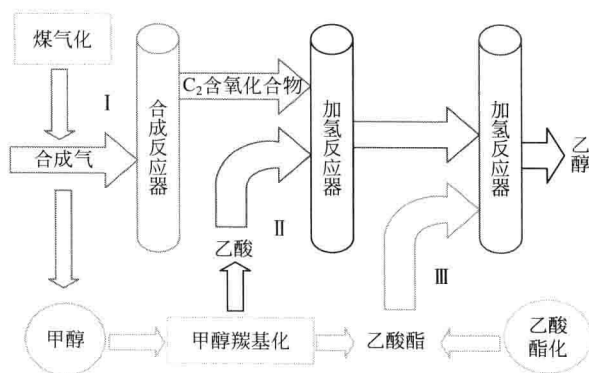


图 1 煤制乙醇的主要技术路线

—OH，实现了原子经济性的绿色化工生产的要求，我们正在开发的该技术的具
体过程有：丙烯/乙酸加成酯化及其加氢制乙醇联产异丙醇，异丙醇的生产成
本较丙烯水合技术和丙酮加氢技术有很大的成本优势，正在建设2套15万吨/年
的工业化装置；混合正丁烯/乙酸加成酯化及其加氢生产乙醇和仲丁醇，仲丁
醇脱氢生产甲乙酮。同样由于其过程的原子经济性，其甲乙酮的生产成本将有
较大的优势，现在正在改造工业化装置以生产15万吨/年的乙醇和甲乙酮。

本书共分为7章，分别以催化剂和反应工艺的研发为主线，就上述技术进
行介绍，为了本书内容的完整性，第1章增加了煤制合成气的技术。前言由
丁云杰研究员撰写；第1章由吕元研究员撰写，丁云杰研究员修改；第2章
由陈维苗副研究员撰写，丁云杰研究员修改；第3章由丁云杰研究员、陈维
苗副研究员和吕元研究员撰写，丁云杰研究员修改；第4章由朱何俊研究员撰
写、丁云杰研究员修改；第5章由严丽副研究员和王涛副研究员撰写，丁云
杰研究员修改；第6章由陈维苗副研究员、李秀杰副研究员和丁云杰研究员撰
写，丁云杰研究员修改；第7章由李砚硕研究员撰写，丁云杰研究员修改。
上述撰写者均为中国科学院大连化学物理研究所工作人员，在各自介绍的领域
内长期从事相关的催化剂和反应工艺的一线研究工作，以自身的研究工作的亲
身体会来向大家介绍煤制乙醇技术。浙江大学的沈晓红副教授对本书稿的文字
进行了修改。在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢！

丁云杰
2014年3月
于大连

目录

Contents

Chapter 01	第 1 章 合成气制造、净化及转化	1
	1.1 现代煤化工概述	1
	1.1.1 传统煤化工技术	1
	1.1.2 现代煤化工技术	5
	1.2 煤气化	6
	1.2.1 合成乙醇对原料气的要求	6
	1.2.2 煤在气化炉中的转化过程	8
	1.2.3 煤的气化性质	10
	1.2.4 气化炉及气化工艺	17
	1.2.5 地上气化不同气化工艺比较	42
	1.2.6 煤炭地下气化	44
	1.3 CO 变换	54
	1.3.1 变换反应	54
	1.3.2 工艺流程和主要设备	55
	1.3.3 变换催化剂	57
	1.4 合成气净化	59
	1.4.1 低温甲醇洗技术	60
	1.4.2 NHD 脱硫技术	64
	1.4.3 精脱硫	65
	1.4.4 CO ₂ 脱除	68
	1.4.5 硫回收技术	74
	1.5 合成气转化	78
	1.5.1 合成气制甲烷	78
	1.5.2 合成油	82
	1.5.3 合成气制乙二醇	87
	1.5.4 合成气制二甲醚	91
	参考文献	97
Chapter 02	第 2 章 Rh 基催化剂上合成气直接制 C ₂ 含氧化合物 ...	101
	2.1 引言	101
	2.2 合成气直接制乙醇等 C ₂ 含氧化合物的热力学分析	103

2.3 均相催化体系	105
2.3.1 Ru 催化剂	107
2.3.2 Ru-Co 催化体系	110
2.4 多相 Rh 基催化剂体系	113
2.4.1 Rh 催化剂	113
2.4.2 载体	115
2.4.3 助剂	133
2.5 多助剂促进的 Rh 基催化剂	135
2.5.1 日本 C1 工程研究组研发的 Rh-U-Fe-Ir/SiO ₂	135
2.5.2 大连化物所开发的 Rh-Mn-Li/SiO ₂	139
2.5.3 选择性合成乙酸的多组分催化剂体系	143
2.5.4 选择性合成乙醇的催化剂体系	148
2.6 反应机理	151
2.6.1 概述	151
2.6.2 CO 和 H ₂ 的吸附与活化	152
2.6.3 CO 的解离	154
2.6.4 C ₂ 含氧化合物中间体的形成	155
2.6.5 反应机理的理论研究	157
2.7 助剂的作用	159
2.7.1 金属(助剂)与载体相互作用	159
2.7.2 Rh-Mn-Li-Fe/SiO ₂ 催化剂制备过程中各组分相互作用	160
2.7.3 助剂作用的本质	164
2.7.4 常用助剂的作用	167
2.8 铑粒径效应	176
2.8.1 概述	176
2.8.2 调节 Rh 粒径的方法	178
2.9 硅胶性质对其负载的 Rh 基催化剂性能的影响	186
2.9.1 杂质	186
2.9.2 孔径	189
2.9.3 表面性质	192
2.10 提高 Rh 基催化剂性能的途径	199
2.10.1 形成 C ₂ 含氧化合物主要基元过程的相互影响	199
2.10.2 提高 Rh 基催化剂生成 C ₂ 含氧化合物性能的途径	200
2.10.3 催化剂制备和活化方法对其性能的影响	201
2.11 Rh 基催化剂上 CO 加氢反应动力学	205
2.11.1 工艺条件的影响	205
2.11.2 动力学研究	208
2.11.3 反应条件的选择	213
2.12 Rh 基催化剂的失活与再生	215
2.12.1 引言	215

2.12.2	催化剂的失活	216
2.12.3	催化剂的再生	217
2.13	CO ₂ 或 CO + CO ₂ 混合气加氢制乙醇	220
2.13.1	热力学分析和反应机理	220
2.13.2	催化剂体系	223
2.13.3	反应条件的影响	225
	参考文献	228

Chapter 03

第 3 章 Rh 基催化剂合成乙醇工业化研究进展..... 236

3.1	日本“C1 化学项目”合成乙醇单管试验研究	236
3.1.1	单管试验装置	237
3.1.2	合成乙醇单管试验	237
3.1.3	反应器放大的影响因素	243
3.1.4	循环气组分的影响	245
3.1.5	催化剂稳定性试验	247
3.1.6	合成气制乙醇过程流程	247
3.2	大连化学物理研究所第一代 Rh 基催化剂 30t/a 工业性中试.....	249
3.2.1	0.2L 级催化剂装量单管试验装置	249
3.2.2	合成气制 C ₂ 含氧化合物催化剂	250
3.2.3	合成气制 C ₂ 含氧化合物反应工艺	250
3.2.4	列管式固定床工业性中试装置	251
3.2.5	合成气制 C ₂ 含氧化合物催化剂放大研制	252
3.2.6	合成气制 C ₂ 含氧化合物反应工艺条件优化	252
	参考文献	253

Chapter 04

第 4 章 合成气制乙醇等含氧化合物的非 Rh 基催化剂体系..... 254

4.1	合成气制乙醇等含氧化合物的非 Rh 基催化剂	254
4.1.1	合成气直接制取乙醇等含氧化合物的过渡金属多相 催化剂	254
4.1.2	合成气合成乙醇的均相催化剂体系	259
4.1.3	合成气间接法合成乙醇的催化剂体系	260
4.2	合成气制乙醇和低碳混合醇 (C ₁ ~ C ₅ 醇)	261
4.2.1	热力学分析	262
4.2.2	合成气制备低碳醇催化剂体系	264
4.2.3	碱助剂的作用	273
4.2.4	CO 加氢生成混合醇的反应机理	275
4.2.5	甲醇同系化法制备乙醇和低碳醇	279
4.2.6	合成气合成乙醇和低碳混合醇的反应器设计	280

4.2.7 低碳混合醇工艺现状	282
4.3 合成气直接合成高碳醇	284
4.3.1 高碳醇的生产方法	284
4.3.2 合成气一步法直接合成高碳醇催化剂体系	285
参考文献	289

Chapter 05

第 5 章 合成气经甲醇羰基化及其加氢制乙醇 299

5.1 甲醇合成技术	299
5.1.1 合成气制甲醇化学	299
5.1.2 合成气制甲醇催化剂	301
5.1.3 甲醇合成工艺	306
5.2 甲醇羰基化合成乙酸技术	312
5.2.1 概述	312
5.2.2 乙酸的性质和应用	313
5.2.3 甲醇羰基化合成乙酸技术	315
5.2.4 甲醇羰基化合成乙酸合成工艺	320
5.2.5 甲醇羰基化合成乙酸的催化剂	326
5.3 乙酸加氢制乙醇技术	329
5.3.1 Ru 基加氢催化剂体系	330
5.3.2 Pd 基加氢催化剂体系	331
5.3.3 Pt 基加氢催化剂体系	332
5.3.4 其他催化体系	335
5.3.5 Pd 催化剂乙酸加氢反应动力学	337
5.3.6 乙酸加氢制乙醇工业化进展	339
参考文献	341

Chapter 06

第 6 章 合成气经甲醇羰基化及其酯化加氢制乙醇 ... 347

6.1 概述	347
6.2 乙酸酯的制备	348
6.2.1 酯化法	348
6.2.2 甲醇羰基化过程副产乙酸甲酯	359
6.2.3 甲醇羰基化合成乙酸甲酯新技术	362
6.2.4 其他制乙酸酯技术	374
6.3 乙酸/烯烃加成酯化制乙酸酯	376
6.3.1 乙酸/乙烯加成酯化制乙酸乙酯	376
6.3.2 乙酸/丙烯加成酯化制乙酸异丙酯	382
6.3.3 乙酸/丁烯加成酯化制乙酸仲丁酯	387
6.4 乙酸酯加氢制乙醇	396
6.4.1 反应网络	396

6.4.2	催化剂体系	398
6.4.3	影响 Cu 基催化剂乙酸酯加氢反应性能的因素	406
6.4.4	Cu 基催化剂乙酸酯加氢反应动力学	412
6.4.5	国内乙酸酯加氢制乙醇工业化进展	417
	参考文献	420
Chapter 07	第 7 章 煤基乙醇分子筛膜脱水技术	431
7.1	引言	431
7.2	分子筛膜简介	432
7.2.1	分子筛膜的概念	432
7.2.2	分子筛膜的合成	434
7.2.3	分子筛膜的表征	435
7.3	渗透汽化与蒸汽渗透简介	437
7.3.1	渗透汽化与蒸汽渗透的概念	437
7.3.2	分子筛膜在渗透汽化中的应用	438
7.4	分子筛膜在乙醇脱水中的应用	441
7.4.1	分子筛膜的脱水性能	441
7.4.2	操作条件的影响	447
7.5	乙醇分子筛膜脱水的工业应用	449
7.5.1	工业乙醇脱水的现状	449
7.5.2	精馏-渗透汽化耦合	450
7.5.3	经济性分析	451
7.5.4	分子筛膜工业应用现状	452
	参考文献	454
	索引	465

第1章

合成气制造、净化及转化

1.1 现代煤化工概述

煤化工是以煤为原料，经过化学反应生成化工和能源产品的工业，是煤炭深加工产业。我国是煤资源相对丰富的国家，为科学、合理和高效地利用煤炭资源，进行深加工发展煤化工是必要的。

煤炭属于低效和高污染能源。传统的煤化工是以低技术含量和低附加值产品为主导的高能耗、高排放、高污染和低效益（“三高一低”）行业。这种以粗放为主的煤化工发展方式对资源、环境付出的代价过大，已难以为继。我们应加速转变发展方式，着力推进现代煤化工的发展。

现代煤化工是指采用现代先进技术，充分挖掘和利用煤的内在固有特性中的优势，对煤进行深加工和综合利用，着重解决煤炭转化过程中高效、低污和经济三大方面问题。现代煤化工与传统煤化工的主要区别在于洁净煤技术和先进的煤转化技术以及节能、降耗、减排、治污和节水等新技术的集成应用，发展有竞争力的产品领域。

1.1.1 传统煤化工技术

以煤炭为原料经化学方法将煤炭转化为气体、液体和固体产品或半成品，再进一步加工成一系列化工产品或石油燃料的工业，称为煤炭化学工业，简称为煤化工。从技术路线来看，煤化工包括煤焦化、煤气化和煤液化三个技术路线（图 1-1）。

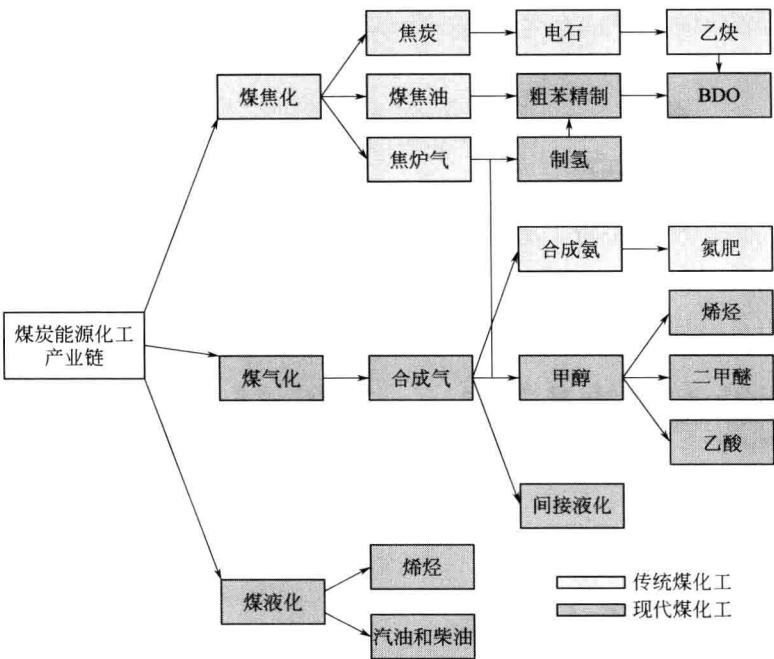


图 1-1 煤化工技术路线

现代煤化工范围主要包括甲醇和甲醇制化工产品（二甲醚、乙酸及其下游产品）、甲醇制醇醚燃料、甲醇制烯烃、煤制油（直接液化和间接液化）和多联产等。作为我国中长期能源发展战略的发展重点，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，它与能源和化工技术结合，可形成煤炭-能源化工一体化的新兴产业。

煤化工产业将在我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，这对于我国减轻燃煤造成的环境污染和降低我国对进口石油的依赖均有着重大意义。

① 我国一次能源资源存量结构的分布特点，决定了我国必须加快现代煤化工产业的发展。我国一次能源资源结构的特点是煤炭资源相对比较丰富，而石油资源相对比较贫乏。根据国家能源局公布的 2012 年统计数据，我国煤炭资源的地质理论资源量高达 5.6 万亿吨，探明保有储量约为 1.34 万亿吨，居世界第三。2011 年和 2012 年我国原煤开采量分别为 35.2 亿吨和 36.5 亿吨。煤炭资源在可预见的将来基本能够满足我国经济发展和人民生活水平提高对一次能源的需求。而与此相反，我国石油资源相对比较贫乏。国土资源部 2012 年公布的资料显示，我国目前已经探明的石油地质资源量 881 亿吨，可采资源量 233 亿吨。虽然目前我国的石油年探明地质储量继续保持较高的水平，年均 10.2 亿吨，但是，石油

资源品质变差，低渗、稠油、深水、深层资源的比重进一步增大。另外，石油消费量的增长导致我国原油需求缺口逐年增大。2010 年中国新增石油探明技术可采储量约 2.1 亿吨，不足当年消耗量的 50%。2011 年我国原油开采量 2.01 亿吨，进口量高达 2.7 亿吨。据测算，2020 年我国石油消耗量将达 6.1 亿吨，而年产量只能维持在约 2 亿吨，缺口将达 4 亿吨以上。因此，从长期看，国内石油资源远远难以满足未来经济发展和人民生活水平提高对石油资源的需求。

而通过现代煤化工技术，将我国资源储量比较丰富的煤炭转化为碳一化工产品、替代燃料（甲醇和二甲醚）、乙烯、丙烯、柴油、汽油、航空煤油和液化石油气等产品，实现对部分石油的间接替代和直接替代，是一项符合国内一次能源资源结构特点，且能有效而可行地确保我国能源供应的战略措施。

② 我国能源消费结构的加速调整和升级，要求加快现代煤化工产业的发展。从人类利用能源的发展历程看，伴随着工业化进程和经济发展水平的不断提高，世界各国的能源生产和消费结构先后经历了由薪柴向煤炭和由煤炭向石油和天然气转化的两次重大调整和升级过程。美国、日本和欧洲等国家和地区在 20 世纪 50 年代左右基本完成了这一历史进程，而发展中国家目前尚处在这种能源生产和消费结构加速调整和升级转换过程之中。我国经过改革开放几十年的发展，尤其是当前经济发展进入新一轮增长周期后，居民消费开始向汽车和住房等耐用消费品转换，以石油化工、汽车、钢铁和建材为核心的“重化工业”发展进程明显加速，经济发展对能源生产和消费结构升级调整的要求明显提高，可以说，目前我国已经跨入由煤炭向石油和天然气等优质能源生产和消费结构的快速调整和升级转换的新阶段，未来国内油气消费的迅速增长和扩大是难以扭转的发展趋势。为此，国内能源生产结构加快调整以与此相适应。因此，发展现代煤化工产业是适应我国能源消费结构升级调整和转换的客观需要。

③ 加快现代煤化工产业发展，可有效缓解我国能源生产供需之间结构性矛盾和弥补国内石油生产供需之间的巨大缺口。从当前我国一次能源生产和消费结构看，煤炭生产相对富裕，基本能够满足市场需求；而油气生产则严重不足，供求之间存在较大缺口，近年来国内石油消费高强度增长与石油产量低增长之间的矛盾十分突出，2011 年我国已探明石油储量占世界已探明石油储量的 1.3%，年开采量占世界的 5.6%，而石油消费量占世界的 9.2%。

自 20 世纪 90 年代以来，国内原油产量长期徘徊在 1.6 亿吨左右，而到 20 世纪末原油消费量就已超过 2 亿吨，年供需缺口就已超过 3000 万吨。进入 21 世纪以后，国内原油供需缺口继续扩大，到 2012 年国内石油供需缺口上升到 2.8 亿吨。而根据相关预测，要实现国内生产总值“翻两番”和全面建成小康社会的发展目标，我国石油消费量将由目前的 4.8 亿吨上升到 2020 年的 6.1 亿吨左右，而国内原油最大年产量只可达到 2 亿吨左右，供需缺口将日趋扩大。为缓解我国

能源生产供需之间的结构性矛盾，弥补国内石油生产和消费之间日趋扩大的巨额供需缺口，加快现代煤化工产业发展，将市场供应相对比较富裕的煤炭转化为市场急需和国内供需缺口较大的碳一化工产品、替代燃料（甲醇和二甲醚）、乙烯、丙烯、柴油、汽油、航空煤油和液化石油气等制品，就成为客观和现实需要的必然选择。

④ 加快现代煤化工产业的发展，有利于确保我国能源供应安全，促进经济稳定、健康发展。石油资源是对国家能源和经济安全具有举足轻重地位的重要战略性物资，未来影响我国能源供应安全的主要因素是石油产品供应状况。由于国内资源量和产量不足，21 世纪初期以来，我国石油供应对国外市场的依赖日趋加深。尽管中国已成为全球第四大石油生产国，但中国同时也是世界第二大石油消费国和第一大进口国，且国内产量仍远远不足，今后新增的石油需求量几乎全部依靠进口。自 1993 年成为石油净进口国以来，我国原油进口规模逐年扩大，到 2012 年底进口原油达到破纪录的接近 2.8 亿吨。另据预测，到 2020 年以后，我国石油消费需求的 60% 以上要依赖进口资源来满足。世界石油资源主要集中在中东地区，而近几年我国进口原油的 50% 以上也来自中东地区。由于目前中东地区政治局势不稳定，美国和日本对中东地区石油资源的加紧争夺和控制，远东石油运输的重要通道——马六甲海峡通过能力接近饱和，以及国际海盗和“9·11”后对石油海上运输的恐怖活动日益增多的态势，对我国石油供应战略安全造成了重大威胁。尽管近年来我国在进口原油渠道多元化方面取得了一些进展，建立的国家石油战略储备也能够短期内一定程度上缓解国内石油的供需矛盾，但从长期看，我国除从中东地区通过马六甲海峡通道进口石油外，其他陆上石油进口通道的建设和未来发展存在着诸多不稳定和不确定因素，难以缓解我国石油资源短缺问题。这迫使我国必须尽快采取相关应对措施，包括采取加快国内和海外石油勘探开发、实现石油进口多元化和发展石油替代产业等综合措施，以保障我国能源供应的战略安全。

⑤ 可有效减轻国际油价上涨对我国经济发展的不利影响。20 世纪 70 年代第一次国际原油危机时油价约为 30 美元/桶^①，第二次原油危机时约为 70 美元/桶，2007—2008 年期间爆发的金融危机导致原油价格冲高至 147 美元/桶。今后世界石油价格还将在高位运行，价格保守估计在 70~100 美元/桶之间波动，到下一次经济危机时，很有可能冲高至 200 美元/桶。根据国际能源组织估算，原油价格每桶上升 10 美元，中国的 GDP 增速将降低 0.8%，物价上升 0.8%。摩根斯坦利的测算结果为，国际原油价格（布伦特）每桶上涨 1 美元，中国的 GDP 增幅将损失 0.06%。据中国国家统计局测算，如果原油价格每桶上涨 10 美元，若

① 桶（石油容积单位，1 美桶=42US gal，折合 159L）。

持续一年，对居民消费价格指数的影响是0.3%~0.4%。2011年，国际油价剧烈震荡，全年上涨近10%，中国进口石油多支付了600亿美元。发展现代煤化工产业，将减轻我国经济和社会发展对国际石油的依赖程度，并可直接降低我国对国际石油的进口量。尤其是在国际油价持续上涨时期，将直接节约大量外汇支出，从而反过来（按支出法GDP计算）增加我国的净出口额和促进我国经济增长。

1.1.2 现代煤化工技术

进入21世纪以来，世界能源供应形势发生了重大变化。高油价不仅影响着普通人的生活，也影响着国家之间的政治和经济关系。我国油气资源量并不丰富，自20世纪90年代以来对石油能源的需求已进入快速增长期，目前已成为全球第二大石油消费国和第一大石油进口国，2012年我国自己开采原油2.04亿吨，进口原油2.8亿吨，进口量同比增长6.8%，对外依存度达58%。据预测到2020年，原油对外的依存度将超过60%，远远不能满足社会发展需求。保障石油类产品的供给已经成为影响我国经济长期稳定发展和能源安全的重大问题。

另外，我国煤炭资源相对丰富，据测算，我国煤炭资源的地质理论资源量高达5万亿吨，探明保有储量约为1万亿吨，在可承受的环境容量范围内，我国煤炭资源的年开采规模可在当前产量基础上继续扩大。煤炭资源在相当长的时间内能够基本满足我国经济发展和人民生活水平提高对一次能源的需求。立足国家资源特点，发展现代煤化工产业，缓解石油供求矛盾，促进经济社会平稳发展，是实施石油替代战略的必然选择。

但是，现代煤化工的产业发展面临着诸多挑战。

其一，行业需求旺盛与技术发展缓慢的矛盾突出。现代煤化工以大规模生产为特征，技术的发展需要较长时间的过程。目前，现代煤化工处于技术发展期，中科院在国家计划的支持下，有一批研发队伍长期坚持煤炭和天然气等碳一化工领域的研究，取得了世界范围内普遍认可的先进地位，一批重要技术相继完成了中试，个别项目完成了工业性试验进入商业化推广阶段（如煤制烯烃技术和煤制油技术）。但总体上，达到工业应用阶段的技术并不多。大型工业技术研发历程长、技术发展缓慢的特征在目前旺盛的行业需求形势下更加突出。没有足够多的技术方案可供选择，将会对协调布局现代煤化工产业带来不利影响。这方面，也体现在正在酝酿出台的“国家煤化工中长期发展规划”中。该规划的征求意见稿中只能根据相对成熟的甲醇、二甲醚、煤基烯烃和煤基合成油等产品进行部署，显示出对技术相对缺乏的无奈。

其二，中国要在全世界优先发展现代煤化工产业，必然更多地依赖自主的技术创新，需要在战略目标指导下确定技术的优先发展方向。目前，在高油价的带

动下，与煤化工相关的新一轮的投资和技术研发热潮正在形成，中科院也结合能源发展对现代煤化工的技术研发做出了全面的部署，几乎涵盖了所有的发展方向。从中科院作为国家级专业研究机构的定位看，这些安排无疑是正确和全面的，也代表着中国在煤化工领域的研发方向布局。国内一些高校和一些骨干企业也纷纷开展煤化工的技术研发（如清华大学、华东理工大学、兖矿集团、神华集团等），并形成产学研联盟加以促进。但是，这些方向哪些应该优先发展，并给予重点支持，哪些产品能够上升到国家规划中，并不十分明确。一些方向还存在争议，如煤制油，不同的专家甚至给出完全相反的支持或否定的结论。现代煤化工产业，一定离不开技术的发展，但并不意味着技术成熟了就一定要发展，一些技术的定位可以是战略储备性质的。现代煤化工产业的发展，不仅能促进经济的繁荣，同时兼有石油替代和促进产业结构调整的任务。因此，煤化工的发展不是孤立的，与石油化工产业和传统工业的布局密切相关，应该强调与其他行业的协调互补性，需要多维分析，从国家战略的高度，在把握全局的基础上对技术的重点发展方向给予指导。目前的现状是，相对成熟的技术很少，一批技术正处在突破的前期。近期，中科院安排了“煤制清洁燃料及大宗化学品技术”方向性项目群，这些项目的目标大部分是完成工业性试验，为准确评估技术、判断技术发展方向提供了良机。

其三，CO₂减排已经成为与煤炭利用相关的全球性焦点问题，现代煤化工的发展面临新的挑战。原理上，煤化工的目的是将煤炭转化为含碳的产品，相对于作为直接能源的利用途径，一定可以起到减排 CO₂ 的作用。另外，作为大型化工过程，也为 CO₂ 集中加工处理带来便利条件。但是，应当看到，煤化工的目的毕竟不是为了减排 CO₂，传统上，技术研发中并不将 CO₂ 当成严重的问题或技术关键加以考虑。因此，在新的形势下，如何做到兼顾 CO₂ 减排，也成为技术发展所必须考虑的重要因素。需要对各种技术进行比对分析，才能明确现代煤化工对 CO₂ 减排所起到的作用和可能的努力方向。

1.2 煤气化

煤经合成气制乙醇过程包括合成气生产、合成气转化和粗产品经多步加氢后处理等精制步骤。合成气由 CO 和 H₂ 组成，是煤间接转化制液体燃料及有机化工原料过程的中间原料。在合成气生产过程中，煤经气化生成粗合成气，再通过变换、脱硫和脱碳等净化处理，满足合成气转化工艺对合成气的杂质含量及氢碳比要求后，进入合成气转化反应器。

1.2.1 合成乙醇对原料气的要求

合成乙醇反应是一个复杂反应体系，主要包括生成乙醇、乙醛、乙酸的反应