



煤制低碳烯烃 工艺与工程

吴秀章 主编



化学工业出版社

煤制低碳烯烃工艺与工程

吴秀章 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要论述了煤制低碳烯烃工业项目主要工艺过程的基础研究、技术开发及工业实践成果。包括了化学反应、催化剂、原料和产品、反应动力学、工艺过程、热平衡和能量平衡、主要操作变量及其影响、主要设备以及环境保护等内容。本书内容完整、实用性较强,反映了当代煤制低碳烯烃技术及工程化的最新成果,具有较高的理论水平和较强的实际应用价值。

本书可供从事煤炭转化、石油化工领域的工程技术人员及高校相关专业师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤制低碳烯烃工艺与工程/吴秀章主编. —北京:化学工业出版社, 2014. 2

ISBN 978-7-122-19635-4

I. ①煤… II. ①吴… III. ①烯烃-化工生产
IV. ①TQ221. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 016880 号

责任编辑: 郑宇印 黄丽娟

责任校对: 宋 夏

文字编辑: 丁建华

装帧设计: 尹琳琳

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

787mm×1092mm 1/16 印张 39 $\frac{1}{4}$ 字数 979 千字 2014 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

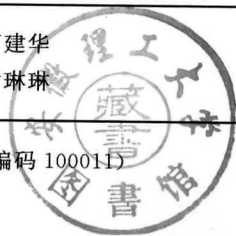
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

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



《煤制低碳烯烃工艺与工程》编委会

主 编 吴秀章

副 主 编 闫国春 胡先君 夏俊兵

编写人员 (按姓氏笔画排序):

文尧顺 卢利飞 刘洪亮

闫国春 关丰忠 孙保全

纪贵臣 吴秀章 余建良

张延斌 林华东 周 鹏

胡先君 南海明 侯宝元

夏俊兵 唐 煜 薛振欣

序

随着经济的持续快速发展，我国的能源消费继续保持较快增长的趋势，对石油化工产品的需求旺盛，促使我国油气资源不足与需求快速增长之间的矛盾日益突出。2012 年我国石油对外依存度已经接近 58%，且我国的乙烯、丙烯等基础有机化工原料主要依赖于石油炼制生产的轻油，石油供应的不足直接限制了我国乙烯工业生产能力的进一步提高。

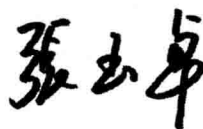
在此市场环境中，随着现代煤化工技术不断发展，推动了我国现代煤化工产业取得了举世瞩目的成绩，其中最引人注目的就是煤制低碳烯烃的工业化。

发展煤制低碳烯烃等现代煤化工，促进替代能源的发展，减少对国外石油的过度依赖，是保障我国能源安全 and 经济安全的主要举措之一。我国拥有相对丰富的煤炭资源，多年来提供了我国国民经济发展所需 2/3 以上的能源。以煤为原料，利用自主研发的新型、高效转化技术生产部分油品、化学品符合我国的国情，是能源替代战略的重要组成部分。通过科研机构、大学和企业界十多年的协作与努力，我国已经成功开发了煤炭直接液化、煤炭间接液化、煤制烯烃、煤制乙二醇等技术，并实现了相应的工业化示范工程的安全、稳定、长周期、满负荷、优化运行，成为全世界新型煤化工产业规模最大、门类最多、技术先进的国家。

在众多煤化工技术中，以煤为原料，通过煤气化制合成气、合成气制甲醇、甲醇转化制低碳烯烃的煤制低碳烯烃技术是一条全新的以煤为原料生产乙烯、丙烯基础有机化工原料的生产路线。神华集团通过六年多的艰苦努力，于 2010 年 8 月建成全世界首个煤制低碳烯烃示范工程并一次开车成功，使我国成为世界上唯一掌握煤制低碳烯烃工业化技术的国家。该示范工程近三年的运行经验表明，以煤为原料，采用先进的低碳技术，适度发展新型煤化工产业符合我国的国情，并能为国家产业转型升级、企业创新产业模式、地方提高经济发展水平做出积极贡献。神华煤制低碳烯烃示范工程建设和运营成功后，进一步催生和促进了我国煤制低碳烯烃或甲醇制低碳烯烃产业发展的热潮。为适应该形势的需要，帮助我国煤制低碳烯烃产业良性发展，基于已有技术产业化的实践经验来精炼有关煤制低碳烯烃工艺与工程的技术专著就显得恰逢其时，很有必要。

本书是第一部全面总结煤制低碳烯烃的著作，是以神华集团包头煤制低碳烯烃示范工程为主线，以国内外煤气化、合成气净化、甲醇合成、甲醇转化制低碳烯烃、烯烃分离技术等领域的研究成果和工业实践为基础，系统总结了煤制低碳烯烃全流程各个主要单元的化学理论、热力学、催化剂、动力学、工艺流程、操作参数、主要设备、环境保护等方面的技术与工程经验，并对包头煤制低碳烯烃示范工程进行了系统评价。全书内容丰富，体现了新颖性、完整性和实用性，具有很强的实践性和较高的学术水平。相信该书的出版对煤制低碳烯烃技术和产业的发展会有积极的推动作用。

神华集团公司总经理
中国工程院院士



二零一四年一月

前 言

能源是人类社会赖以生存和发展的基础，同时也是经济社会发展的重要制约因素，在国民经济中具有特别重要的战略地位，能源安全事关经济安全和国家安全。煤、石油、天然气是当今世界的主要能源，中国是仅次于美国的世界第二能源消费大国，我国的能源消费以煤炭为主；2013 年我国一次能源消费达 37.6 亿吨标准煤，其中煤炭约占 65.7%。

乙烯、丙烯是化学工业的基础原料，由于乙烯生产在石油化工基础原料生产中的地位，常将乙烯生产作为衡量一个国家石油化工生产水平的标志。最近 20 年我国乙烯工业飞速发展，2007 年乙烯生产能力达到了 998 万吨/年、产量达 1047.7 万吨/年，首次突破千万吨大关；到 2013 年底，我国的乙烯生产能力达到了 1823 万吨/年，产量为 1623 万吨/年，成为全球第二大乙烯生产大国；但我国的乙烯当量一直不能满足市场的需求，目前乙烯的对外依存度维持在 45% 左右。我国生产乙烯的原料大多是原油蒸馏生产的石脑油、轻柴油和加氢尾油等，由于我国原油的对外依存度已接近 60%，原油的不足也严重制约着乙烯工业的发展。

神华集团包头煤制低碳烯烃示范项目于 2010 年 8 月竣工投产，在全世界开辟了一条全新的生产乙烯、丙烯等低碳烯烃的生产路线。神华集团包头煤制低碳烯烃示范项目是以煤炭为原料，通过水煤浆气化制备合成气，通过合成气 CO 变换和低温甲醇洗来净化合成气，合成气催化转化合成甲醇，甲醇催化转化制低碳烯烃，烯烃分离等工艺路线来生产聚合级的乙烯、丙烯，最后通过烯烃聚合生产聚乙烯、聚丙烯等合成树脂产品。神华集团包头煤制低碳烯烃示范项目的核心工艺——甲醇制烯烃工艺技术采用了中国科学院大连化学物理研究所与中国石化集团洛阳石油化工工程公司等联合开发的 DMTO 工艺技术。该示范工程投产以来，已平稳运行了近三年的时间，各工艺单元均达到或超过了设计能力，2011 年生产聚烯烃产品 50 万吨、2012 年生产聚烯烃产品 55 万吨，2013 年生产聚烯烃产品 55.5 万吨，并取得了良好的经济效益。

在神华集团包头煤制低碳烯烃示范工程平稳运行的基础上，参与该示范工程建设和运营的工程技术管理人员共同努力，完成了系统反映煤制低碳烯烃主要工艺过程的专业著作——《煤制低碳烯烃工艺与工程》，本书的编者力求使本书达到以下几个目标：

① 新颖性，本书是第一部系统阐述煤制低碳烯烃工程的图书，要包括最新的研究成果和运行数据；

② 先进性，要全面反映居世界领先地位的神华集团包头煤制低碳烯烃示范工程的技术水平；

③ 完整性，本书要包括煤气化、合成气净化、甲醇合成、甲醇制烯烃、烯烃分离等主要工艺单元，也要包括安全、环境保护等内容，由于煤气化、合成气净化、甲醇合成等均为成熟技术，图书较多，本书中仅对与示范工程相关的技术进行了重点介绍；

④ 实用性，本书要包括理论研究、催化剂开发、工程设计和生产运营等多个层面，也要包括工程建设的全过程管理，力求对科研开发、催化剂生产、工程设计、生产运营等领域的科研工程技术人员均具有很强的实用价值；

⑤ 学术性，本书要系统详细总结国内外科研、工程设计、生产运营的成果，理论与实践相结合，要具有较高的学术水平。

本书由参与神华集团包头煤制低碳烯烃示范项目的工程技术人员共同策划、设计撰写内容、拟定章节提纲，共同撰写、审查而成。吴秀章负责了总体策划、章节分工及稿件审定，并负责了第一章、第五章、第七章的编写工作，胡先君负责了第二章、第三章的编写工作，夏俊兵负责了第四章的编写工作，闫国春负责了第六章的编写工作。文尧顺、卢利飞、刘洪亮等 14 位同志也参加了编写工作。

在本书的编写过程中，得到了中国神华煤制油化工有限公司及中国神华煤制油化工有限公司包头煤化工公司、神木化工公司、榆林化工分公司、原北京研究院的领导、专家和工程技术人员的大力支持和帮助。

本书是以神华集团包头煤制低碳烯烃示范工程为背景编写的，感谢为该示范工程建设做出重大贡献的工程设计团队和技术支持单位，特别是中国化学工程集团公司的中国天辰工程有限公司、中国五环工程有限公司、中国成达工程有限公司，中国石化集团洛阳石油化工有限公司、上海工程有限公司以及中国科学院大连化学物理研究所等；也特别感谢为该示范工程建设和生产运营做出巨大贡献的张玉卓、岳国、赵金立、陆正平、朱平、张继明、武兴彬等领导和同事。

参加本书编写的各位作者尽了最大的努力，把自己的所知、所学、所用奉献了出来，但由于所涉及的工艺过程多、领域广、理论和实践的内容也很多，同时本书所有的作者全部工作在生产管理第一线，时间紧张，加之知识面、水平有限，肯定会存在很多疏漏和不足，恳请读者批评指正。

编者
2014 年 1 月

目 录

第一章 绪论	1	(五) 可行性研究结论	28
第一节 中国的能源需求与供应	1	二、咨询单位的评估意见	28
一、中国的能源消费与结构	1	(一) 项目建设条件	28
二、未来中国能源消费预测	1	(二) 项目方案及技术可靠性	28
三、中国能源安全问题及应对措施	2	(三) 项目产品市场及竞争力	29
第二节 中国原油、低碳烯烃的需求与生产	2	(四) 煤炭及水资源利用	29
一、中国的石油需求与生产	3	(五) 热电及总图运输、土建	29
二、乙烯、丙烯等低碳烯烃的需求与生产	4	(六) 厂址及土地利用	30
三、石油替代	4	(七) 环境保护	30
第三节 中国煤炭资源与生产	5	(八) 项目投资估算及财务评价	30
第四节 煤制低碳烯烃工艺过程综述	5	(九) 国民经济评价及社会评价	30
一、煤气化及合成气净化	6	(十) 项目风险分析	31
(一) 煤炭气化	6	三、项目总体优化及技术经济评价	31
(二) 粗合成气 CO 变换	8	第七节 包头煤制低碳烯烃示范工程的建设及运行	31
(三) 粗合成气净化	9	参考文献	32
二、甲醇合成	10	第二章 煤炭气化	35
三、甲醇制低碳烯烃及烯烃分离	12	第一节 煤炭气化概论	35
(一) 甲醇制低碳烯烃	12	一、地面气化	35
(二) 烯烃分离	14	(一) 固定床气化炉	35
四、低碳烯烃后加工	16	(二) 流化床气化炉	36
(一) 乙烯的后加工	16	(三) 气流床气化炉	37
(二) 丙烯的后加工	17	二、地下气化	38
(三) 混合 C ₄ 的后加工	21	第二节 气流床气化技术	39
第五节 煤制烯烃工程安全与环境保护	22	一、Texaco 气化工艺	39
一、安全评价	22	(一) Texaco 气化工艺特点	39
(一) 安全评价结果分析	22	(二) Texaco 气化工艺流程	39
(二) 评价结论	23	二、Shell 气化工艺	40
二、环境影响评价报告	23	(一) Shell 气化工艺特点	40
(一) 环境影响评价结论	23	(二) Shell 气化炉工艺流程	40
(二) 环境保护对策与建议	26	三、GSP 气化工艺	41
第六节 煤制低碳烯烃的可行性简要分析	27	(一) GSP 气化工艺特点	41
一、可行性研究报告总论	27	(二) GSP 气化炉工艺流程	41
(一) 项目基本情况	27	四、多喷嘴对置式气化工艺	41
(二) 可行性研究报告编制原则	27	(一) 多喷嘴对置式水煤浆气化技术	42
(三) 项目建设的必要性和投资意义	27	(二) 多喷嘴对置式粉煤气化技术	44
(四) 项目范围	27	五、四种气化工艺对比情况	45
		(一) 气化炉结构的区别	45

(二) 进料方式不同	45	(七) 激冷水对气化系统的影响	82
(三) 冷却方式不同	45	三、水煤浆气化主要工艺技术指标	85
(四) 煤气化工艺参数一览表	45	四、煤气化反应过程的工艺计算	88
(五) 煤气化工艺技术对比	46	(一) 水煤浆煤气化物料衡算	88
第三节 水煤浆气化及化学	47	(二) 水煤浆煤气化能耗计算	89
一、水煤浆气化概述	47	(三) 煤气化物理化学基础	89
二、水煤浆气化化学	48	第六节 主要设备	93
(一) 水煤浆气化的化学反应	48	一、磨煤机	93
(二) 水煤浆气化的反应机理	49	(一) 棒磨机工作原理	93
第四节 原料及反应产物	54	(二) 磨煤机结构组成	94
一、水煤浆气化的原料及特性	54	二、高压煤浆泵	95
(一) 原料煤的介绍	54	三、气化炉	96
(二) 煤的质量及其对气化过程的 影响	57	(一) 气化炉工作原理	96
(三) 发热量	58	(二) 耐火砖	98
(四) 元素分析	59	(三) 烧嘴	104
(五) 可磨指数	59	四、洗涤塔	104
(六) 煤的化学活性	59	五、除氧器	105
二、水煤浆的性质及气化对其的要求	60	六、事故氮气压缩机	106
(一) 较高的浓度	60	七、煤称量给料机	106
(二) 较好的流动性	60	参考文献	107
(三) 较好的稳定性	60	第三章 合成气变换与净化	111
(四) 适宜的粒度分布	60	第一节 合成气变换与净化概述	111
(五) 适宜的 pH 值	60	一、一氧化碳变换单元	111
三、水煤浆气化中的三剂应用	61	二、低温甲醇洗单元	112
(一) 煤浆添加剂	61	三、冷冻单元	112
(二) 絮凝剂	64	第二节 一氧化碳变换的化学	114
(三) 分散剂	67	一、变换反应概述及原理	114
四、水煤浆气化的反应产物	69	(一) 变换反应热	115
(一) 煤炭气化技术的主要应用领域	69	(二) 变换反应的化学平衡	115
(二) 粗水煤气	73	二、变换反应影响因素	117
第五节 水煤浆气化工艺过程及主要工艺技 术指标	74	(一) 温度	117
一、水煤浆气化工艺流程	74	(二) 压力	117
(一) 煤浆制备单元	74	(三) 水气比	118
(二) 气化单元	75	(四) 催化剂装填量和空速	118
(三) 渣水处理单元	77	(五) 二氧化碳的影响	118
二、水煤浆气化的影响因素	78	(六) 副反应的影响	119
(一) 煤质对气化系统的影响	79	三、变换反应机理	119
(二) 助熔剂的影响	81	四、不同气化技术选择配套的变换 工艺	119
(三) 氧碳比的影响	81	(一) 水煤浆加压气化	119
(四) 煤浆浓度的影响	81	(二) Shell 粉煤加压气化	120
(五) 反应温度的影响	81	(三) 鲁奇炉加压气化	120
(六) 气化压力的影响	82	(四) 航天炉气化	121
		(五) 等温低温 CO 变换技术	121

第三节 酸性气体的脱除	122	(一) 目前国内 Fe-Cr 催化剂生产和 使用中存在的主要问题	152
一、酸性气体的脱除方法	122	(二) Co-Mo 低变催化剂的失活	152
(一) 化学吸收法	122	第五节 原料、反应产物及物料平衡	154
(二) 物理吸收法	124	一、原料的组成及特性	154
(三) 物理化学吸收法	127	二、产品的组成及特性	154
二、最为常见的几种脱除酸性气体方法及 特点	127	(一) 产品净化气	154
三、脱除酸性气体方法的选择原则	128	(二) 副产品 CO ₂	155
(一) 天然气蒸汽转化法制气脱 CO ₂ ..	128	(三) 酸性气	156
(二) 煤部分氧化法气化脱 CO ₂	128	三、一氧化碳变换及净化过程的物料 平衡	156
(三) 煤焦为原料固定床常压气化 脱 CO ₂	129	第六节 变换反应化学热力学及变换催化 剂反应动力学	158
(四) 低压气回收 CO ₂	129	一、变换反应化学热力学	158
(五) 加压煤气化同时脱脱硫 CO ₂	129	二、变换催化剂和反应动力学	158
四、低温甲醇洗	129	三、催化剂用量动力学计算	159
(一) 低温甲醇洗的吸收机理和原理 ..	130	第七节 工艺过程及主要工艺技术指标	159
(二) 主要的低温甲醇洗工艺流程	132	一、一氧化碳变换工艺	159
(三) 林德和鲁奇低温甲醇洗工艺流程 分析	133	(一) 粗水煤气的变换	159
五、压缩机制冷的工作原理	138	(二) 冷凝液回收	161
(一) 节流膨胀制冷工作原理	138	(三) 锅炉水除氧	161
(二) 离心式压缩机的工作原理	138	(四) 催化剂升温	161
(三) 汽轮机的工作原理	138	(五) 变换单元汽提系统腐蚀问题	161
(四) 离心式压缩机、汽轮机运行有关 概念	138	二、低温甲醇洗工艺	165
第四节 催化剂	140	三、冷冻工艺	169
一、高温变换催化剂	140	四、主要工艺技术指标	169
(一) 组成和性能	140	第八节 主要设备	170
(二) 催化剂的还原与氧化	141	一、变换炉	170
(三) 催化剂的中毒和衰老	142	二、变换炉进口第一水分离器	171
(四) 催化剂的维护与保养	142	三、汽提塔	173
二、低温变换催化剂	142	四、缠绕管式换热器	173
(一) 组成和性能	142	五、低温甲醇洗单元塔设备	174
(二) 催化剂的还原与氧化	143	(一) 甲醇洗涤塔	175
(三) 催化剂的中毒	143	(二) CO ₂ 产品塔	175
三、耐硫变换催化剂	143	(三) H ₂ S 浓缩塔	175
(一) K8-11HR 耐硫变换催化剂	144	(四) 热再生塔	175
(二) QCS 系列一氧化碳耐硫变换催 化剂	147	(五) 甲醇水分离塔	176
(三) 耐硫催化剂硫化及判定报废的 质量指标及更换办法	150	(六) CO ₂ 气提塔	176
四、粉煤气化高、低水气比耐硫变换 工艺	151	(七) 尾气洗涤塔	176
五、变换催化剂使用中存在的若干问题 ..	152	六、循环气压缩机	176
		七、冷冻压缩机	178
		参考文献	179
		第四章 合成气制甲醇	181
		第一节 概述	181

一、甲醇的理化性质和主要用途	182	(一) 催化剂主要物理性质	203
(一) 物理性质	182	(二) 催化剂化学组成	203
(二) 化学性质	182	(三) 催化剂的活性	203
(三) 甲醇的用途	183	(四) 催化剂的使用寿命	204
二、甲醇合成的技术简述	184	(五) 催化剂的使用条件	204
(一) 甲醇合成技术方法	184	五、催化剂的装填	204
(二) 甲醇生产技术新进展	184	(一) 催化剂的装填方法及技术要求	204
三、我国甲醇生产现状	188	(二) 装填程序、步骤	204
第二节 甲醇合成化学	189	六、铜基催化剂的还原	204
一、甲醇合成的化学反应	189	(一) 还原的原理	204
二、甲醇合成的反应机理	190	(二) 还原的方法	205
(一) 一氧化碳机理	190	(三) 还原过程组分的要求	207
(二) 二氧化碳机理	190	七、铜基甲醇合成催化剂失活	207
(三) 混合反应机理	191	(一) 甲醇合成催化剂中毒失活	207
三、甲醇合成反应热力学	192	(二) 甲醇合成催化剂热失活	211
(一) 理想气体状态甲醇合成反应热力学	192	(三) 甲醇合成催化剂阻塞失活	211
(二) 非理想气体状态甲醇合成反应热力学	193	八、催化剂的钝化	212
四、甲醇合成反应动力学及温度、压力效应	194	九、铜基催化剂的保护	212
(一) 甲醇合成反应动力学	194	(一) 硫中毒的防护	212
(二) 温度效应	194	(二) 氯中毒的防护	217
(三) 压力效应	195	(三) 羰基化合物中毒的防护	217
五、甲醇合成的化学平衡	195	(四) 有机硫的转化和脱除	218
(一) 理想气体状态甲醇合成反应的平衡常数	195	第四节 原料和反应产物	220
(二) 非理想气体状态甲醇合成反应的平衡常数	196	一、甲醇合成反应的原料	220
(三) 温度和压力对甲醇合成反应平衡常数的影响	197	(一) 合理控制原料气的组分	220
第三节 催化剂	198	(二) 原料气中惰性气体的含量	221
一、铜基催化剂的组分	199	(三) 入塔气中的甲醇含量	221
(一) 氧化铜	199	(四) 原料气中的毒物与杂质	222
(二) 氧化锌	200	二、反应产物	222
(三) 氧化铝	200	(一) 杂质的种类	222
(四) 微量杂质的影响	200	(二) 神华包头煤制烯烃项目甲醇装置反应产物	223
二、铜基催化剂的制备	200	三、结蜡问题	224
三、国内甲醇合成催化剂的发展	201	(一) 石蜡的性质和产生条件	224
(一) 南化院 C 型低压甲醇合成催化剂	201	(二) 石蜡生成的原因	225
(二) 西南化工研究设计院甲醇合成催化剂	202	(三) 结蜡现象对甲醇生产的影响	227
四、JM 催化剂	202	(四) 防护石蜡生成的措施	227
		(五) 结蜡后的处理	228
		四、MTO 级甲醇	228
		第五节 甲醇合成的工艺过程	228
		一、甲醇合成主要技术简介	229
		(一) 英国 Davy 技术	229
		(二) 德国 Lurgi 技术	231
		(三) 丹麦 Topsøe 技术	232

(四) 日本东洋技术	233	四、稳定塔	264
(五) 瑞士 Casale 技术	234	(一) 稳定塔结构上的要求	264
(六) 华东理工大学技术	237	(二) 稳定塔的结构和形式	264
(七) 杭州林达技术	237	(三) 稳定塔的种类	265
二、神华包头甲醇装置合成系统	238	五、合成气压缩机	265
(一) 合成单元	238	(一) 离心式压缩机结构	265
(二) 氢气分离单元	238	(二) 油系统	266
(三) MTO 级甲醇系统	244	(三) 干气密封	267
(四) 其他系统	244	(四) 喘振	269
第六节 操作变量及其影响因素	244	参考文献	269
一、反应温度	245	第五章 甲醇制低碳烯烃	272
(一) 温度的影响	245	第一节 甲醇制低碳烯烃概述	272
(二) 温度的控制	246	一、MTO 反应系统	273
二、反应压力	247	(一) 原料加热、汽化及过热	273
三、空速	248	(二) 反应器系统	273
四、催化剂颗粒尺寸	248	二、MTO 再生系统	274
五、其他变量的控制	249	(一) 再生器系统	274
(一) 汽包液位的控制	249	(二) 余热回收系统	274
(二) 粗甲醇闪蒸罐 V106 液位的		三、反应产物冷却和脱水系统	274
控制	249	(一) 急冷塔系统	274
(三) 稳定塔 T101 的控制	250	(二) 水洗塔系统	275
(四) 再沸器 E109 负荷和稳定塔 T101		(三) 反应水汽提塔系统	275
回流量的控制	250	第二节 甲醇制烯烃化学	275
(五) 粗甲醇排放槽		一、甲醇制烯烃的化学反应	275
V107 和粗甲醇罐 V401 的控制 ..	252	二、甲醇制烯烃的反应机理	276
(六) 预精馏塔 T301 的控制	254	(一) 烃池机理	277
(七) 精馏塔 T302 的控制	254	(二) 串联反应机理	286
(八) 泵 P305A/B 回流量的控制	256	三、甲醇制烯烃反应热力学	289
(九) 精馏塔 T302 的产品提取量和进料		(一) 基础数据及反应平衡常数	291
量的比值控制	256	(二) 热力学计算结果的分析	292
(十) 精馏塔 T302 的回流量控制	257	第三节 甲醇制烯烃催化剂	297
六、甲醇合成装置主要联锁	257	一、SAPO-34 分子筛的研究与开发	299
第七节 甲醇合成装置的主要设备	258	(一) SAPO-34 分子筛的合成步骤	299
一、甲醇合成塔	258	(二) SAPO-34 分子筛的组成	300
(一) 工艺对合成塔的要求	258	(三) SAPO-34 分子筛的结构和酸性 ..	300
(二) 甲醇合成塔的分类	259	(四) SAPO-34 分子筛的晶粒尺寸及	
(三) Davy 甲醇合成塔的基本结构	259	影响	302
二、气气换热器	260	(五) SAPO-34 分子筛合成的影响	
三、空气冷却器	260	因素	304
(一) 结构型式	261	二、SAPO-34 分子筛的测征	316
(二) 空气冷却器的基本部件	261	(一) SAPO-34 分子筛的结构	317
(三) 空气冷却器的操作和维护	263	(二) SAPO-34 分子筛的组成	317
(四) 空气冷却器操作中常见故障及		(三) SAPO-34 分子筛的孔径、孔体积	
处理	263	和比表面积	318

(四) SAPO-34 分子筛的表面酸性	318	四、甲醇制烯烃 (MTO) 反应过程的元	
(五) SAPO-34 分子筛的晶体外貌	319	素平衡	361
(六) SAPO-34 分子筛的热稳定性和水		(一) 碳平衡	361
热稳定性	320	(二) 氢平衡	362
三、MTO 工业催化剂的生产与控制	320	(三) 氧平衡	362
(一) MTO 工业催化剂的生产	320	第五节 甲醇制烯烃反应动力学	362
(二) 新鲜催化剂的含碳	327	一、MTO 反应动力学	363
(三) 新鲜催化剂的保护	328	(一) 集总动力学模型	363
四、MTO 工业催化剂的测征与评价	329	(二) 反应器模型	371
(一) 密度	329	二、MTO 的结焦失活动力学	381
(二) 比表面积和孔体积	329	(一) 基于 Voorhies 方程的动力	
(三) 磨损指数	330	学模型	382
(四) 粒度分布	330	(二) 基于 Froment 方程的机理	
(五) X 射线衍射 (XRD) 分析	331	模型	384
(六) X 射线荧光光谱 (XRF) 分析	331	第六节 甲醇制烯烃工艺过程	386
(七) 扫描电子显微镜 (SEM) 分析	332	一、MTO 代表性工艺	386
(八) 催化剂的微反活性评价	332	(一) 大连化物所 DMTO 工艺	387
(九) 催化剂碳含量	335	(二) 中石化 SMTO 工艺	390
五、SAPO-34 分子筛和催化剂的热稳定性		(三) UOP/Hydro MTO 工艺	391
与水热稳定性	336	(四) 其他 MTO 工艺	392
六、MTO 工业催化剂的应用	338	二、MTO 循环流化反应再生工艺过程	394
七、MTO 工业装置平衡催化剂	339	(一) 流态化与气固分离	395
八、MTO 催化剂的失活	340	(二) 两器循环流化反应过程	398
(一) 催化剂积炭对 MTO 反应的		(三) 催化剂不完全再生和余热回收	399
影响	340	(四) 反应气脱过热和洗涤	400
(二) 焦炭的特征与分类	341	(五) MTO 主要工艺指标	400
(三) 焦炭的生成原因	342	第七节 反应再生系统热平衡和装置能	
(四) 积炭对催化剂的影响	343	量平衡	400
(五) 影响催化剂积炭失活的主要		一、反应-再生系统热平衡	401
因素	344	(一) 反应器热平衡计算	401
(六) 延缓结焦失活影响的措施	345	(二) 再生器热平衡计算	404
(七) MTO 催化剂的永久性失活	346	(三) 拟建装置热平衡计算	406
九、MTO 催化剂的破碎与跑损	348	二、MTO 工业装置能耗计算	407
十、MTO 工业装置催化剂细粉的再		(一) 装置用能分析	407
利用	350	(二) MTO 工业装置能耗分析	409
十一、SAPO-34/ZSM-5 复合催化剂	352	(三) MTO 工业装置节能潜力分析	411
第四节 原料、反应产物及物料平衡	354	第八节 主要操作变量及其影响	412
一、甲醇制烯烃的原料及特性	354	一、反应再生系统的主要操作变量	412
二、甲醇制烯烃的反应产物	355	(一) MTO 反应的主要操作变量	412
(一) 主产物	356	(二) 催化剂再生的主要操作变量	425
(二) 副产物	357	二、急冷水洗汽提系统	429
(三) 产物中的微量杂质	358	(一) 急冷塔主要操作变量	429
三、甲醇制烯烃 (MTO) 反应过程的物		(二) 水洗塔主要操作变量	429
料平衡	360	(三) 反应水汽提塔主要操作变量	429

三、再生烟气热量回收系统	430	(一) LUMMUS 工艺	459
(一) CO 焚烧炉主要操作变量	430	(二) KBR 工艺	459
(二) 余热锅炉主要操作变量	430	(三) 惠生工艺	459
第九节 甲醇制烯烃工业装置主要设备	430	二、压缩与净化过程	461
一、反应器及辅助设备	430	(一) 压缩与净化工艺	461
(一) 反应器	430	(二) 压缩过程的离心式压缩机	462
(二) 内取热器	432	(三) 净化过程的碱洗法脱除	
(三) 反应器待生催化剂汽提器	433	酸性气体	467
二、再生器及辅助设备	434	三、产品分离流程的设置	470
(一) 再生器	434	(一) 烯烃分离装置后分离流程简述	470
(二) 外取热器	434	(二) 烯烃分离装置后分离流程设置	471
(三) 辅助燃烧室	435	四、产品中杂质脱除工艺	478
三、急冷塔	436	(一) 乙烯产品中的乙炔脱除工艺	478
四、水洗塔	436	(二) 丙烯产品含氧化合物脱除工艺	481
五、反应水汽提塔	436	(三) 原料气中的水脱除工艺	482
六、旋风分离器	437	五、烯烃分离主要技术指标	485
(一) 旋风分离器的工作原理	438	(一) 原料消耗和生产能力	485
(二) 旋风分离器型式	438	(二) 产品指标	486
七、主风机	439	(三) 乙烯损失率、丙烯回收率	486
(一) 设备概述	439	(四) 公用工程物料消耗	486
(二) 机组配置及布置	440	(五) 辅助材料、催化剂和化学品	
(三) 工艺流程设备简介	440	消耗	487
(四) 工艺设备技术数据及结构特征	440	第三节 原料气、产品及物料平衡	487
八、CO 焚烧炉及余热锅炉	441	一、烯烃分离原料气及特性	487
(一) CO 焚烧炉	441	二、烯烃分离产品及特性	490
(二) 余热锅炉	441	(一) 乙烯	490
九、开工加热炉	441	(二) 丙烯	491
参考文献	442	(三) 混合碳四	491
第六章 烯烃分离与纯化	453	(四) 混合碳五	492
第一节 烯烃分离技术概述	453	(五) 燃料气	492
一、原料气压缩系统	453	三、烯烃分离过程物料平衡	493
二、原料气净化系统	453	第四节 烯烃分离过程能耗分析	494
三、产品分离和精制系统	454	一、烯烃分离过程能耗分析	494
(一) 脱甲烷系统	454	(一) 压缩过程的热力学计算和能耗	
(二) 脱乙烷及乙炔加氢系统	455	分析	494
(三) 前脱丙烷系统	455	(二) 分离过程的计算和能耗分析	502
(四) 乙烯精馏系统	456	二、烯烃分离能耗计算及指标	511
(五) 丙烯精馏系统	456	(一) 烯烃分离能耗计算	511
(六) 脱丁烷系统	456	(二) 烯烃分离能耗指标	513
四、丙烯制冷系统	457	第五节 烯烃分离过程操作参数及操作	
(一) 制冷压缩机概述	457	技术	513
(二) 丙烯制冷工艺	458	一、主要操作参数	513
第二节 工艺过程及主要技术指标	459	(一) 丙烯制冷系统	513
一、烯烃分离典型工艺流程	459	(二) 压缩及净化系统	513

(三) 分离系统	514
二、原料气压缩系统主要操作变量及其操作技术	514
(一) 原料气压缩系统	514
(二) 原料气净化系统	516
(三) 原料气干燥系统	517
(四) 前脱丙烷系统	518
三、精馏系统主要操作变量及其操作技术	519
(一) 脱甲烷系统	519
(二) 脱乙烷和加氢系统	521
(三) 乙烯精馏系统	522
(四) 丙烯精馏系统	524
(五) 脱丁烷系统	525
四、丙烯制冷系统主要操作变量及其操作技术	526
五、烯烃分离装置主要控制回路	528
(一) 压缩机组的控制回路	528
(二) 精馏系统的控制回路	530
六、烯烃分离装置主要联锁	532
(一) 压缩机组停车联锁	532
(二) 脱丙烷塔停车联锁	533
(三) 脱乙烷塔停车联锁	533
(四) 乙烯精馏塔停车联锁	533
(五) 丙烯精馏塔停车联锁	533
(六) 脱丁烷塔停车联锁	533
(七) 乙炔加氢反应器停车联锁	533
第六节 烯烃分离装置主要设备	534
一、离心式压缩机组	534
(一) 离心式压缩机	534
(二) 蒸汽透平	536
(三) 临界转速	540
(四) 性能曲线	542
(五) 干气密封	546
(六) 润滑油系统	548
(七) 复水真空系统	548
二、精馏塔	550
(一) 塔器的分类	550
(二) 板式塔概述	551
(三) 烯烃分离主要板式塔	554
(四) 填料塔概述	561
(五) 烯烃分离主要填料塔	565
三、丙烯产品精制床	569
四、乙炔加氢反应器	569

第七节 烯烃分离装置节能和低投资技术	571
一、烯烃分离装置的节能措施	572
(一) 压缩单元的节能措施	572
(二) 分离单元的节能措施	574
二、烯烃分离装置节能技术应用前景分析	578
参考文献	579
第七章 环境保护	581
第一节 工艺装置环境保护	581
一、煤气化装置	581
(一) 采取的环境保护措施	582
(二) 水煤浆气化装置三废实际排放	582
二、合成气 CO 变换及净化装置	583
(一) 采取的环境保护措施	583
(二) CO 变换及合成气净化装置三废实际排放	584
三、甲醇合成装置	584
(一) 采取的环境保护措施	584
(二) 甲醇合成装置三废实际排放	585
四、甲醇制烯烃装置	585
(一) 采取的环境保护措施	585
(二) 甲醇制烯烃装置三废实际排放	586
五、烯烃分离装置	586
第二节 废碱液的处理	587
一、废碱液湿式氧化处理技术	588
(一) 湿式氧化处理原理	588
(二) 湿式氧化处理单元流程	588
(三) 湿式氧化处理单元进水水质	589
(四) 湿式氧化处理单元出水水质	589
(五) 湿式氧化处理单元排放尾气组成	589
二、废碱液焚烧处理技术	589
(一) 废碱液焚烧处理技术的难点	589
(二) 烟气余热回收对锅炉受热面的影响	590
三、废碱液生化处理技术	591
(一) 原理	591
(二) 技术特点	592
(三) 工艺流程简图	592
(四) LTBR 工艺进水水质	593
(五) LTBR 工艺出水水质	594
四、酸碱中和法	594
(一) 硫酸中和法	594
(二) 二氧化碳中和法	594

五、氧化法	594	(二) 生产排水水质波动	603
(一) 空气氧化法	594	(三) 事故废水	603
(二) 光氧化法	595	(四) 事故缓冲池运行情况	604
(三) 中和后氧化	595	三、污水处理装置	604
第三节 燃煤锅炉及自备电站环境保护	595	四、中水回用	605
一、除盐车站	595	第六节 全厂性固体处理	607
二、锅炉烟气除尘	596	第七节 环境监测结论与建议	608
三、锅炉烟气脱硫	596	一、结论	608
四、锅炉烟气脱硝	597	(一) 废气监测结果	608
第四节 全厂性气体处理	597	(二) 废水及地下水监测结果	609
一、酸性气处理及硫黄回收	598	(三) 厂界噪声监测结果	610
二、全厂性火炬	600	(四) 主要污染物排放总量	610
(一) 采取的环境保护措施	601	(五) 固体废物	610
(二) 全厂性火炬三废实际排放	601	(六) 公众意见调查	610
(三) 全厂性火炬噪声实际产生	602	二、建议	610
第五节 全厂性污水处理	602	第八节 二氧化碳排放	610
一、清污分流	602	一、煤制烯烃工业示范工程物料平衡	610
(一) 高污染污水处理	603	二、煤制烯烃工业示范工程碳平衡	611
(二) 低污染污水处理	603	三、煤制烯烃工业示范工程 CO ₂ 排放	
二、紧急事故池	603	分析	611
(一) 事故缓冲池概况	603	参考文献	612

第一章 绪 论

第一节 中国的能源需求与供应

煤、石油、天然气是当今世界的主要能源。能源是人类社会赖以生存和发展的基础，同时能源也是经济社会发展的重要制约因素，能源在国民经济中具有特别重要的战略地位，能源安全事关经济安全和国家安全。中国是仅次于美国的世界第二能源消费大国，我国的能源消费以煤炭为主，影响我国能源消费总量的主要驱动因素是经济发展、人口增长、产业结构调整 and 城市化水平的提高^[1]。

一、中国的能源消费与结构

1990 年以来历年的能源消费及结构如表 1-1 所示。表中数据表明伴随着经济的高速发展，我国的能源消费总量从 1990 年的 9.87 亿吨标准煤上升到 2000 年的 14.553 亿吨标准煤、再上升到 2010 年的 32.494 亿吨标准煤；我国能源消费结构特点是煤占的比例特别高，约占 70%。

表 1-1 中国能源消费及结构

年份	消费总量/亿吨标准煤	煤炭/%	石油/%	天然气/%	水电、核电、风电/%
1990	9.870	76.2	16.6	2.1	5.1
1991	10.378	76.1	17.1	2.0	4.8
1992	10.917	75.7	17.5	1.9	4.9
1993	11.599	74.7	18.2	1.9	5.2
1994	12.274	75.0	17.4	1.9	5.7
1995	13.118	74.6	17.5	1.8	6.1
1996	13.519	73.5	18.7	1.8	6.0
1997	13.591	71.4	20.4	1.8	6.4
1998	13.618	70.9	20.8	1.8	6.5
1999	14.060	70.6	21.5	2.0	5.9
2000	14.553	69.2	22.2	2.2	6.4
2001	15.041	68.3	21.8	2.4	7.5
2002	15.943	68.0	22.3	2.4	7.3
2003	18.379	69.8	21.2	2.5	6.5
2004	21.346	69.5	21.3	2.5	6.7
2005	23.600	70.8	19.8	2.6	6.8
2006	25.868	71.1	19.3	2.9	6.7
2007	28.051	71.1	18.8	3.3	6.8
2008	29.145	70.3	18.3	3.7	7.7
2009	30.665	70.4	17.9	3.9	7.8
2010	32.494	68.0	19.0	4.4	8.6

注：数据来源：《2011 中国统计年鉴》。

二、未来中国能源消费预测

陈正^[2]预测未来几十年我国能源需求结构如表 1-2 所示。尽管预测煤炭、石油等化石能