



乙烯工艺与原料

中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院 组织编写

胡杰 王松汉 主编



化学工业出版社

乙烯工艺与原料

中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院 组织编写

胡杰 王松汉 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《乙烯工艺与原料》由中国石油石油化工研究院、中国石化工程建设公司、中国寰球工程公司、中国石化北京石油化工研究院、清华大学、华东理工大学等 10 多家单位联合编写。本书介绍了近年来全球乙烯工业的演变和进展,为读者提供了乙烯原料和生产工艺的最新动态,并且以蒸汽裂解制乙烯工艺流程为主线,对原料、裂解、急冷、压缩、分离以及装置的运行与管理、控制与优化、辅助系统、安全环保等进行了详细论述。不仅阐述了乙烯工艺的基本原理和相关的理论,而且对乙烯生产的原料和各种工艺流程进行了系统分析,给出了有关工艺设计的计算方法和典型工艺数据和结论,还着重总结了消化吸收国外先进技术和自主创新方面的宝贵经验和典型企业的应用实践,全面系统地论述了近年来我国在乙烯原料多样化、轻质化,装置大型化,装备与技术成套国产化,运行优化等方面取得的诸多成就。

《乙烯工艺与原料》从乙烯原料、裂解反应、公用工程、过程控制与优化、健康安全环保等方面分五篇 17 章,对乙烯装置的相关技术做了全面系统的论述,是一部乙烯工业发展的集大成之作,填补了近年来我国在该领域的空白,是我国乙烯行业几代科技工作者智慧的结晶。本书对从事乙烯工业的科研人员、设计人员、生产技术与操作人员以及规划工作者、大专院校相关师生等都具有很好的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

乙烯工艺与原料/胡杰,王松汉主编;中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院组织编写. —北京:化学工业出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-122-30345-5

I. ①乙… II. ①胡…②王…③中… III. ①乙烯-生产工艺 IV. ①TQ221.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 181291 号

责任编辑:杜进祥 张文虎 郭乃铎
责任校对:王 静

文字编辑:向 东
装帧设计:韩 飞

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 100045)
印 装:三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 66 $\frac{3}{4}$ 字数 1673 千字 2018 年 3 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: 358.00 元

版权所有 违者必究

《乙烯工艺与原料》编审委员会

主任: 沈殿成 中国石油天然气集团公司

袁晴棠 中国石油化工集团公司

副主任: 王子宗 中国石油化工集团公司

钱 锋 华东理工大学

委员 (以姓氏笔画为序):

王子宗 中国石油化工集团公司

王江义 中国石化上海工程有限公司

王松汉 中国石化工程建设公司

王家纯 中国石化中原石化公司

尹兆林 中国石化茂名石化公司

白改玲 中国寰球工程公司

匡卓贤 中国神华煤制油化工有限公司

任立新 中国石油独山子石化公司

李 铁 中国石油吉林石化公司

李广华 中国石化工程建设公司

吴鹏鸣 中国石化扬子石化公司

沈殿成 中国石油天然气集团公司

宋健强 中国石油兰州石化公司

张玉明 中国石化镇海炼化公司

张东平 中国石油四川石化有限责任公司

张来勇 中国寰球工程公司

张明龙 中国石化扬子石化-巴斯夫有限责任公司

张绍光 中国石化齐鲁石化公司

胡 杰 中国石油天然气集团公司

袁晴棠 中国石油化工集团公司

钱 锋 华东理工大学

徐跃华 中国石油化工集团公司

康志军 中国石油大庆石化公司

韩 峰 中国石化齐鲁石化公司

《乙烯工艺与原料》编写委员会

主 编: 胡 杰 中国石油石油化工研究院
王松汉 中国石化工程建设公司

委 员 (以姓氏笔画为序):

于 强 中国石油独山子石化公司
亓荣彬 中国石油石油化工研究院
马国锋 中国石油化工集团公司
马昌峰 中国石油天然气集团公司咨询中心
王吉平 中国石化齐鲁石化公司
王红秋 中国石油石油化工研究院
王松汉 中国石化工程建设公司
王国清 中国石化北京石油化工研究院
王建明 中国石油石油化工研究院
王振维 中国石化工程建设公司
王振雷 华东理工大学
王崇明 中国石油兰州石化公司
田 亮 中国石油石油化工研究院
朱光宇 中国石油石油化工研究院
朱连勋 中国石油大庆石化公司
刘丰合 中国石化燕山石化公司
许岩峰 中国石化扬子石化公司
何 琨 中国石化上海工程有限公司
杜文莉 华东理工大学
李 琰 中国石油石油化工研究院
李文乐 中国石油石油化工研究院
李吉春 中国石油兰州石化公司
李宏冰 中国石油抚顺石化公司
李明久 中国石油四川石化有限责任公司
李金科 天华化工机械及自动化研究设计院有限公司
李炎生 中韩(武汉)石油化工有限公司
杨庆兰 中国寰球工程公司
邱 彤 清华大学
邹文楨 中国石化茂名石化公司

宋作玉 北京赛诺时飞石化科技有限公司
张 炜 中国石油化工集团公司
陈巨星 上海赛科石油化工有限责任公司
林 融 中国石化工程建设公司
季厚平 福建联合石油化工有限公司
赵百仁 中国石化工程建设公司
胡 杰 中国石油石油化工研究院
施阿小 中国石化上海石化股份公司
姜 涛 宁波富德能源有限公司
顾照杨 中国石化工程建设公司
高云忠 中沙(天津)石化有限公司
郭 新 中科(广东)炼化有限公司
曹 杰 中国石化工程建设公司
盛在行 中国石化工程建设公司
章龙江 中国石油天然气集团公司
蒋明敬 中国石化镇海炼化公司
谢 明 上海赛科石油化工有限责任公司
雷正香 中国石化工程建设公司
廖宝星 中国石化广州石化公司
谭都平 中国石油石油化工研究院

总策划: 王建明 中国石油石油化工研究院
宋作玉 北京赛诺时飞石化科技有限公司

前言

乙烯是石油化学工业的主要产品之一，乙烯装置生产的三烯（乙烯、丙烯、丁二烯）和三苯（苯、甲苯、二甲苯）是石油化学工业的基础原料。乙烯产量的高低是衡量一个国家石油化工发展水平的主要标志。

我国乙烯工业起步于 20 世纪 60 年代，经过近 60 年的发展，取得了举世瞩目的成绩。2015 年乙烯产能已突破 2000 万吨，居世界第二位，不仅如此，我国已经具备自己设计建造百万吨乙烯装置的能力，采用的技术不仅达到世界先进水平，而且拥有自主知识产权，乙烯装置的配套装备也可实现国产化生产。

为适应我国乙烯工业快速发展的需要，我们组织了数十家单位的 50 多位乙烯科研、设计和生产方面的专家和学者，包括中国工程院院士、多位国家科技进步奖、国家发明奖和国家优秀设计金奖获得者，合作编著了《乙烯工艺与原料》一书。本书以乙烯装置流程为主线，从乙烯原料、制备、分离、装置运行与管理、乙烯装置控制与优化等方面进行了论述，根据原料的不同论述了制取乙烯的不同方法，包括管式裂解炉制乙烯、甲醇制乙烯、催化裂解制乙烯、生物乙醇制乙烯、甲烷制乙烯、合成气制乙烯等，并对管式裂解炉制乙烯进行了全面系统的论述，也对乙烯装置先进控制与优化做了深入分析，编者们坚持理论与实践并重，既注重理论的阐述与分析，又认真总结自己在消化吸收国外先进技术和自主创新方面的宝贵经验，注重装置的设计和运行的紧密结合，包括全面国产化百万吨乙烯装置、我国首项自主创新的乙烯装置优化运行技术与软件、国产先进乙烯裂解炉技术、乙烯装置国产化分离重大装备等。

本书由胡杰、王松汉担任主编，于 2015 年 11 月启动，由中国石油石油化工研究院组织编写，参加的单位还有中国石化工程建设公司、中国寰球工程公司、中国石化北京化工研究院、中国石化上海工程有限公司、中国石化燕山石化公司、上海赛科石化公司、天华化工机械及自动化研究设计院有限公司等，参与的高等院校有清华大学、华东理工大学、北京化工大学和浙江工业大学等。参加本书编著的数十位专家、学者及高级工程师都具有较高学术理论水平和丰富的实践经验，他们在本书的编著中总结了自己多年来的设计、科研、生产经验，因而本书将对从事乙烯生产的科研、技术人员及设计、规划工作者，以及大专院校相关专业师生等，具有很好的参考价值。

本书编写分工如下：第一章：王红秋，胡杰，李文乐；第二章：田亮，胡杰；第三章：王红秋，姜涛，姜思远，胡杰；第四章：王国清，周丛，邱彤，张磊，田亮；第五章：王国清，邱彤，赵永华，周丛，杜文莉，张磊，方舟，李金科；第六章：赵永华，王国清，周丛，李锦辉，孙长庚，王松汉；第七章：王明耀，

李金科，何琨；第八章：赵百仁，宋作玉，王松汉；第九章：杨庆兰，辛江，孙长庚，宋磊，马超凡，张霄航，李杨天慧，吉京华，孙淑兰，黄莺，吴笛，杨桂春，苏燕兵，朱为明，孙文强；第十章：谭都平，杨庆兰，胡杰；第十一章：季凌，袁学群，蒋明敬；第十二章：白改玲，李文堂，王勇；第十三章：雷正香；第十四章：林融，王振雷，邱嘉嘉，郭建勋，杜文莉；第十五章：章龙江，马昌峰，谢明，邱彤，赵永臣，宋光，张圣夫，罗磊；第十六章：宋作玉，盛在行，王国清，何琨，赵百仁，王松汉；第十七章：胡晨，舒小芹，王雪梅，刘进龙，段波。王建明、宋作玉负责全书策划与联络。

在本书编写过程中，得到了中国神华煤制油化工有限公司匡卓贤教授级高工的大力支持和帮助，他对本书的审稿及内容的完善提出了宝贵的意见，化学工业出版社对本书的出版给予了大力支持和协助。此外，茅文星、何细藕、曾清泉、张利军、戴伟、王振维、郭敬杭、李莉、邵晨、金君素、张会军、高云忠、赵青松、马金艳等人对本书的出版也起了重要作用，在此一并进行感谢。

由于乙烯工艺复杂、设备装置较多，书中可能存在各种不足，不妥之处，望指正。

编者

2017年10月

目 录

第一章 概论 1

第一节 乙烯装置的重要性	1
第二节 世界乙烯生产状况	4
一、供需状况	4
二、装置规模	5
三、工艺与原料	6
第三节 我国乙烯生产状况	7
参考文献	9

第一篇 制取乙烯的原料及方法

第二章 裂解制取乙烯的原料 11

第一节 乙烯原料的来源和种类	11
一、天然气及油田轻烃	11
二、炼厂所提供的油品	15
三、炼厂副产的低碳烷烃	18
第二节 中国原油性质	19
一、原油的评价	19
二、中国原油性质	20
三、大庆原油	21
四、长庆原油	23
第三节 中东原油性质	26
一、沙特阿拉伯原油	27
二、科威特原油	28
三、阿曼原油	30
四、中东其他地区原油	31
第四节 俄罗斯原油性质	32
第五节 世界乙烯原料发展趋势	34

第六节 乙烯原料的选择和优化	36
一、乙烯原料的选择	36
二、乙烯原料的优化	39
三、石脑油作为乙烯原料的优化问题	43
第七节 扩大乙烯原料来源	48
一、页岩油作裂解原料	48
二、煤基石脑油	48
三、延迟焦化	49
四、加氢裂化	51
五、炼化副产品作裂解原料	52
六、炼厂催化干气的回收利用	53
第八节 裂解原料脱砷脱汞	60
一、砷及砷化物的脱除	60
二、汞及汞化物的脱除	64
参考文献	65

第三章 工业制取乙烯的方法 **67**

第一节 管式炉蒸汽裂解制乙烯	67
第二节 甲醇制烯烃	68
一、甲醇制烯烃技术概述	68
二、甲醇制烯经典型的分离工艺流程	76
第三节 催化裂解制乙烯	82
一、催化裂解反应机理	82
二、催化剂的研究和进展	82
三、催化裂解制乙烯技术的研究进展	83
第四节 生物乙醇制乙烯	84
一、纤维素乙醇产业及技术发展概况	85
二、生物乙醇制乙烯技术发展概况	85
第五节 甲烷制乙烯	86
一、甲烷氧化偶联制乙烯	86
二、甲烷无氧制乙烯	87
第六节 合成气制乙烯	87
第七节 其他乙烯生产技术	88
一、直接裂解原油的工艺	88
二、甲醇石脑油耦合制烯烃技术	89
第八节 乙烯生产路线的比较	89
一、原料	89
二、产品	90

三、投资	90
四、成本	91
五、环保	91
六、思考及建议	92
参考文献	92

第四章 乙烯原料特性及评价 94

第一节 评价裂解原料特性的主要指标	94
一、石油烃的化学组成	95
二、密度和相对密度	101
三、沸点、馏程及平均沸点	105
四、特性因数 K	108
五、黏度	109
六、折射率	113
七、氢含量和碳氢比	113
八、平均分子量	117
九、关联指数 $BMCI$	120
十、残炭值、沥青质和溴值	122
十一、硫化物	123
十二、其他杂质	125
第二节 乙烯原料实验室评价方法	125
一、烃类裂解制乙烯实验室评价方法	125
二、裂解评价实验	129
三、裂解产物的分析	131
四、数据处理	131
第三节 工业裂解炉单炉标定方法	132
一、工业裂解炉单炉标定的意义	132
二、工业裂解炉产物的标定装置	132
三、取样点的确定	132
四、样品的处理及分析	133
五、数据处理	133
六、标定结果判定依据	134
第四节 乙烯原料分子表征	136
一、乙烯裂解原料等效分子组成重构方法	136
二、基于信息熵最大化的原料等效分子组成重构优化模型	139
三、石脑油与加氢尾油原料等效分子组成预测	141
四、小结	142
参考文献	143

第二篇 裂解反应、设备及分离工艺

第五章 裂解参数及裂解反应 146

第一节 裂解反应模型	146
一、裂解反应动力学模型	146
二、裂解炉结焦模型及周期模拟	160
第二节 蒸汽裂解过程模拟	164
一、过程模型	164
二、反应模型	172
三、分子模型	182
四、石脑油裂解过程模拟示例	185
五、小结	186
第三节 共裂解	187
一、乙烷/丙烷共裂解	188
二、乙烷/丙烯共裂解	188
三、石脑油/乙烷共裂解	189
四、石脑油与轻烃及拔头油资源共裂解	191
第四节 裂解炉结焦和结焦抑制技术	193
一、烃类的热裂解结焦机理	194
二、急冷锅炉、对流段结焦	194
三、辐射段结焦	195
四、结焦抑制剂	200
第五节 燃烧器及低氮氧化物 (NO_x) 燃烧器	203
一、概述	203
二、燃料的燃烧	203
三、燃烧器类型及特点	207
四、低氮氧化物 (NO_x) 燃烧器及其运用	209
五、计算流体动力学 (CFD) 模拟	216
六、燃烧器试验	219
七、燃烧器操作维护	221
八、燃烧器故障排除	223
第六节 裂解炉热性能测试及热效率计算	224
一、裂解炉热性能测试的目的	224
二、裂解炉热性能测试的内容	224
三、裂解炉的热性能测试	224
四、裂解炉的热效率计算和测定	234
参考文献	239

第六章 裂解炉炉型及裂解炉的工艺设计 242

第一节 各种炉型的裂解炉	242
一、概述	242
二、CBL 裂解炉	249
三、SRT 型裂解炉	252
四、USC 型裂解炉	276
五、KTI GK 裂解炉.....	288
六、毫秒裂解炉	300
七、Pyrocrack 型裂解炉	302
八、HSLR 型裂解炉	307
九、HQF 裂解炉	309
十、新炉型的发展	311
第二节 裂解炉工艺设计常用的基本参数	313
一、裂解基本工艺参数	313
二、裂解深度参数	317
三、裂解炉的性能指标	321
四、裂解选择性指标	325
第三节 裂解炉辐射段炉膛传热模型	326
一、裂解炉辐射段炉膛传热模型的发展	326
二、常用的炉膛传热模型	328
第四节 裂解炉辐射段工艺设计	341
一、裂解炉辐射段技术的发展	342
二、裂解炉辐射段设计要点	349
三、辐射段工艺设计的主要内容	352
四、裂解炉辐射段的工艺计算	353
五、裂解炉工艺设计的计算程序和实例	363
第五节 裂解炉对流段的工艺设计	367
一、对流段的功能和结构发展	367
二、对流段工艺设计的基本原则	370
三、对流段工艺包设计主要内容	378
四、对流段的工艺计算	379
五、对流段工艺设计的计算实例	393
参考文献	395

第七章 急冷系统 397

第一节 裂解气急冷	397
一、概述	397
二、裂解气急冷锅炉的结构型式和参数	401

三、裂解炉和急冷锅炉清焦	418
四、急冷油和急冷水热量回收	421
五、稀释蒸汽产生系统	422
六、汽油分馏塔内重油聚合的形成与控制	428
七、常用汽油分馏塔内焦粉脱除的办法	431
八、减黏塔	432
第二节 裂解气急冷锅炉的工艺设计	432
一、概述	432
二、裂解气急冷锅炉的工艺特点	433
三、裂解气急冷锅炉的工艺计算	435
第三节 乙烯装置与热电联产组合	437
一、概述	437
二、热力学性能评价	438
三、几种热电联产发电工艺路线	438
四、裂解炉与热电联产组合	442
五、结论	445
参考文献	446

第八章 压缩系统 447

第一节 概述	447
一、裂解气压缩	447
二、脱除酸性气体	448
三、干燥	449
四、丙烯制冷	450
五、乙烯制冷	450
第二节 压缩机的热力计算	452
一、几种压缩过程	452
二、压缩机的排气温度、功率和中间冷却	456
三、真实气体压缩	463
四、压缩制冷	466
第三节 典型压缩工艺流程	469
一、五段压缩工艺流程	470
二、四段压缩工艺流程	474
三、压缩工艺参数	476
四、凝液汽提塔工艺参数及模拟计算	478
第四节 酸性气体的脱除和裂解气干燥	479
一、酸性气体杂质的来源和危害	479
二、碱洗法	480
三、长尾曹达法	487

四、黄油抑制	489
五、裂解气干燥	491
第五节 制冷系统	499
一、丙烯和乙烯制冷系统	500
二、甲烷制冷系统	505
三、复叠制冷	507
四、热泵流程	508
五、多元制冷	514
六、冷剂的过冷与过热	524
七、冷剂节流	531
八、制冷压缩机出口冷剂收集罐的设置与控制	535
参考文献	540

第九章 分离系统 541

第一节 分离流程概述	541
一、前脱丙烷前加氢流程	542
二、顺序分离流程	549
三、前脱乙烷前加氢流程	553
四、特色操作单元	559
五、采用气体裂解原料的分离流程特点	560
第二节 脱甲烷系统	561
一、概述	561
二、单塔脱甲烷	565
三、双塔脱甲烷	573
四、甲烷制冷和膨胀再压缩机系统	578
五、尾气中的乙烯回收技术	580
六、脱甲烷塔的模拟计算	582
第三节 脱乙烷系统	583
一、概述	583
二、双塔脱乙烷	584
三、顺序流程后脱乙烷工艺	586
四、前脱丙烷流程后脱乙烷工艺	589
五、隔壁精馏塔脱乙烷技术	589
六、脱乙烷塔模拟	590
第四节 脱丙烷系统	592
一、概述	592
二、不同脱丙烷塔方案的能耗	592
三、单塔脱丙烷	592
四、双塔脱丙烷	594
五、脱丙烷塔防结焦	597

第五节 乙烯和丙烯精馏	598
一、相对挥发度	598
二、乙烯精馏	600
三、丙烯精馏	605
四、丙炔和丙二烯的精馏脱除	608
第六节 脱丁烷系统	609
一、概述	609
二、脱丁烷塔	609
三、脱丁烷塔防结焦	609
第七节 乙烯装置塔器设计	610
一、塔器设计基础	610
二、乙烯装置塔器设计概论	615
三、乙烯装置中特殊塔器的设计要求	616
第八节 换热器基础知识	619
一、概述	619
二、不同类型换热器工艺设计要点	622
参考文献	634

第十章 催化反应及催化剂 **636**

第一节 概述	636
第二节 乙炔、丙炔和丙二烯的脱除	637
一、概述	637
二、乙炔、丙炔前加氢	638
三、乙炔后加氢	647
四、C ₃ 加氢	657
五、催化精馏加氢技术	661
六、绿油脱除	663
七、乙烯干燥	665
第三节 甲烷化反应及氢气纯化	665
一、甲烷化反应机理	666
二、甲烷化工艺流程介绍	667
三、用变压吸附纯化氢气	669
参考文献	672

■ 第三篇 乙烯装置辅助系统 ■

第十一章 公用工程 **675**

第一节 水系统及水平衡	675
-------------------	-----

一、乙烯装置给排水系统划分	675
二、原水系统	675
三、生产给水系统	676
四、生活给水系统	676
五、循环冷却水系统	676
六、工艺用水系统	678
七、锅炉给水系统	678
八、消防水系统	679
九、装置排水	680
十、再生水系统	680
十一、水平衡	681
第二节 电气系统	682
一、概述	682
二、电源和供配电系统	682
三、爆炸和火灾危险环境	684
四、变电所	684
五、继电保护及自动装置配置原则	687
六、供配电线路	687
七、配电	687
八、照明	688
九、防雷、接地	688
第三节 蒸汽平衡	689
一、概述	689
二、蒸汽系统的确定	690
三、蒸汽平衡计算和蒸汽系统优化	690
第四节 燃料平衡	692
一、燃料消耗	692
二、燃料平衡	693
参考文献	697

第十二章 乙烯原料与产品的储存和运输 698

第一节 概述	698
一、乙烯原料与产品的储存和运输特点及要求	698
二、乙烯原料与产品的存储方式选择以及储罐容量、规格 选取	699
三、罐区运行和维护	701
四、罐区的消防、安全、环保与职业卫生	702
第二节 大容量石脑油的储存	706
一、概述	706