

石油化工 设计手册

第三卷 >> 化工单元过程(下)

王子宗 主编



SHIYOU HUAGONG
SHEJI SHOUC



化学工业出版社

石油化工 设计手册

第三卷 >> 化工单元过程(下)

王子宗 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《石油化工设计手册》(修订版)共分四卷出版。第三卷“化工单元过程”分上下两册,上册内容有流体输送机械,非均相分离,搅拌与混合,制冷与深度冷冻,换热器,蒸发,工业结晶过程与设备设计,蒸馏;下册内容有气体吸收与解吸,液液萃取,吸附与变压吸附,气液传质设备,膜分离,干燥,化学反应器,并列举相应的实际应用实例。以指导设计人员在相应的化工单元过程设计中正确选取运用。

适合从事石油化工、食品、轻工等行业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油化工设计手册. 第三卷. 化工单元过程. 下/王子宗
主编. —修订本. —北京: 化学工业出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-122-23167-3

I. ①石… II. ①王… III. ①石油化工-化工过程-技术
手册 IV. ①TE65-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039114 号

责任编辑: 王湘民 谢丰毅
责任校对: 吴 静

文字编辑: 刘志茹 陈 雨 王湘民
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: 三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 70 字数 1805 千字 · 2015 年 10 月北京第 2 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: 298.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2015—23 号

《石油化工设计手册》(修订版) 编委会

主任委员 袁晴棠 中国石油化工集团公司科学技术委员会常务副主任, 中国工程院院士

副主任委员 王松汉 中国石化工程建设公司原副总工程师、教授级高级工程师, 第一版主编

委员 (以姓氏笔画为序)

王子宗 中国石油化工集团公司副总工程师、教授级高级工程师

王静康 天津大学教授, 中国工程院院士

孙国刚 石油大学教授

吕德伟 浙江大学教授

汪文川 北京化工大学教授

张旭之 中国石油化工集团公司原发展战略研究小组组长、教授级高级工程师

张霁明 中国石化工程建设有限公司副总工程师、高级工程师

肖雪军 中石化炼化工程(集团)股份有限公司副总工程师兼技术部主任、教授级高级工程师

罗北辰 北京化工大学教授

周国庆 化学工业出版社副总编辑、编审

施力田 北京化工大学教授

赵勇 中国石化工程建设有限公司质量安全标准部副主任、教授级高级工程师

赵广明 中国石化工程建设有限公司工厂系统室主任、教授级高级工程师

费维扬 清华大学教授, 中国科学院院士

袁天聪 中国石化工程建设有限公司高级工程师

徐承恩 中国石化工程建设有限公司, 中国工程院院士, 设计大师

麻德贤 北京化工大学教授

蒋维钧 清华大学教授

谢丰毅 化学工业出版社原副总编辑、编审

《石油化工设计手册》(修订版) 编写人员

- 主 编 王子宗 中国石油化工集团公司副总工程师、教授级高级工程师
全国勘察设计注册工程师化工专业管理委员会委员
注册化工工程师、注册咨询工程师
- 副 主 编 肖雪军 中石化炼化工程(集团)股份有限公司副总工程师兼技术部主任、教授级高级工程师
全国注册化工工程师执业资格考试专家组副组长
注册化工工程师
- 袁天聪 中国石化工程建设有限公司高级工程师
注册化工工程师

第三卷(下) 编写人员

- 第一章 潘国昌 涂晋林 吴志泉 雷志刚 代成娜
- 第二章 费维扬
- 第三章 陈 健 龚肇元 王宝林 郜豫川 李克兵 张剑锋
- 第四章 郭庆丰 潘国昌 姚克俭 孙希瑾
- 第五章 王学松
- 第六章 王喜忠 王宝和
- 第七章 吕德伟 戎顺熙 胡 鸣 袁向前 王 凯 陈丰秋 王樟茂
陈纪忠 朱学栋 陈允华 李瑞江

前言

《石油化工设计手册》第一版出版以来深受读者欢迎，对提高石化工程设计水平，产生了积极的影响。十年来，石化工程建设在装置大型化和清洁化上有了长足的进步，工程装备技术水平有了重要的进展，设计手段、方法和理念也得到了提高和提升。为适应这些变化，我们组织有关专家学者对手册进行了修编工作。

设计质量是衡量石油化工装置建设质量的一个重要因素。好的设计工具书、手册可以指导和规范设计工作，对推动石油化工技术进步和提高设计质量水平具有重要意义。

手册第一版出版后，我们收到一些读者的意见，他们坦诚地指出了书中的个别错误，也期待着在再版时能够得到修正，并进一步提高图书的内容质量。正是读者的热爱，激励着我们认真地进行再版的修编工作。

修订版的修订原则是：保持特点、充实风容，尊重原著、继承风格，在实用性、可靠性、权威性、先进性方面再下功夫，反映时代特点和要求；内容要简明扼要，一目了然，突出手册特点，提高手册的水平。手册的定位则以石油化工工艺设计人员所需的设计方法和设计资料为主要内容。

手册仍分四卷：第一卷——石油化工基础数据；第二卷——标准规范；第三卷——化工单元过程；第四卷——工艺和系统设计。

感谢参与本手册第一版编写工作的各位专家，他们有着一丝不苟、认真负责和谦虚谨慎、艰辛耕耘的精神，本次修订是在他们已获得成功的成果之上，进行再次开发。

本次手册的修订出版，得到了中国石化工程建设有限公司的大力支持。中国石化工程建设有限公司是世界知名的工程公司，近年来承担了大量的石化工厂、炼油厂、煤化工工厂的工程设计，有一大批国内知名的设计专家。参加修订工作的编者很多来自中国石化工程建设有限公司，他们经验丰富，手册内容也基本反映了编者的实践经验和与国际接轨的做法。此外，清华大学、天津大学、中国石油大学、北京化工大学、浙江大学、上海理工大学、大连理工大学、北京工商大学、河北工业大学、上海化工研究院、大连化学物理研究所、四川天一科技股份有限公司的相关专家教授在修订工作中也付出了辛勤劳动，在此一表表示感谢。

衷心希望这套手册能够成为工程设计人员实用的工具书，对提高石化工业的设计水平有所裨益。

由于编写经验不足，书中疏漏和不妥之处，敬请专家和读者不吝指正。

王子宗
2015年4月

第一版序

《石油化工设计手册》就要正式出版了。《手册》全面收集了石油化工设计工作中所需要的具体技术资料、图表、数据、计算公式和方法，详细介绍了工程设计的步骤和工程设计中应该考虑的问题，列有大量参考文献名录，注出图表、数据、公式等的出处，读者希望对有关问题深入了解时，可以很方便的去查阅相关的文献资料。手册选用的材料准确，有科学根据，图表、数据、公式等均经过严格的核实，手册收集的资料一般都经过实践检验，对那些正在科研阶段或虽已经过鉴定，但未工业化的科研成果和资料均未编入，有些方向性的新技术编入时，也都注明其成熟程度。手册充分体现了实用性、可靠性、权威性、先进性相结合，尤其突出实用性，是一套非常适合从事石油化工和化工设计、施工、生产、科研工作的广大技术人员查阅使用的工具书，也可作为大中专院校的师生查阅使用。

为编纂这套《手册》，国内 100 多位有很高学术理论水平和丰富经验的专家学者做出了极大努力，他们克服各种困难，查阅大量资料，伏案整理写作，反复修改文稿，经过五个寒冬酷暑春去秋来，终成这套《手册》。可以说《手册》是他们五年心血的结晶，《手册》是他们学识和智慧的硕果。当你阅读《手册》时请一定记住他们的名字，这是对他们最好的感谢。在《手册》出版之际，我也要向为《手册》提供资料和其他方便条件的单位和同志们表示衷心的感谢。

我相信，这套《手册》一定会成为石油化工、化工行业广大工程技术人员十分喜爱的工具书。

中国工程院院士



2001 年 8 月

第 1 版前言

石油化学工业是能源和原材料工业的重要组成部分，在国民经济中具有举足轻重的地位和作用。2000 年我国原油加工能力 2.737 亿吨/年，加工原油 2.106 亿吨，居世界第三位；乙烯生产能力 446.32 万吨/年，产量 470.00 万吨，列世界第七位。我国的石化工业已形成完整的工业体系，具有比较雄厚的实力。在石化工业发展的过程中，石化战线的设计工作者进行了大量的设计实践，积累了丰富的经验，提高了设计技术水平，亟需进行归纳整理，使其系统化、逻辑化、规范化，提供给广大设计工作者及有关工程技术人员应用。为此，化学工业出版社组织有关专家编写了《石油化工设计手册》。

这套手册已列为“十五”国家重点图书。手册共分四卷，约 900 余万字。自 1997 年开始组织，先后有 100 余人参加编写，这些作者都是具有扎实的理论功底和丰富实践经验的专家、教授。他们在编写工作的前期，仔细研究了国内外石油化工设计工作的现状，明确了指导思想，制定了编写大纲，此后多次征求有关方面的意见，并反复进行补充修改。在编写过程中，始终坚持理论联系实际、实事求是、突出实用等原则，对标准、规范、图表、公式和数据资料进行精心筛选，慎重取材。形成文稿后，又对稿件进行多次审查，重点章节经反复讨论、推敲，最后交执笔专家修定。各位专家一丝不苟、认真负责和谦虚谨慎、艰辛耕耘的精神令人钦佩。相信这套手册的出版不仅为石化广大工程技术人员提供一套重要的工具书，而且会对我国石化工业的发展有所裨益。

由于在国内第一次出版石油化工专业的设计手册，经验不足，书中疏漏和不妥之处，敬请专家和读者不吝指正。

袁晴棠 张旭之

2001 年 10 月

下册目录

第1章 气体吸收与解吸

1.1 概述	1	1.3.1 设计步骤	38
1.1.1 吸收(解吸)过程的基本概念	1	1.3.1.1 溶剂选择	38
1.1.1.1 吸收与解吸	1	1.3.1.2 操作条件的确定	38
1.1.1.2 单组分与多组分吸收	1	1.3.1.3 溶剂用量(液气比)的确定	38
1.1.1.3 物理吸收与化学吸收	1	1.3.1.4 设备选择	40
1.1.1.4 等温吸收与非等温吸收	1	1.3.1.5 塔径的确定	40
1.1.2 吸收(解吸)设备与流程	1	1.3.1.6 塔高的计算	41
1.1.2.1 吸收过程适宜条件	1	1.3.2 单相与相际传质速度方程	41
1.1.2.2 吸收设备	1	1.3.3 传质单元数与传质单元高度	44
1.1.2.3 吸收流程	2	1.3.3.1 定义	44
1.1.3 吸收(解吸)过程在石油化工中的 应用	4	1.3.3.2 传质单元数的计算	46
1.1.4 吸收过程的技术经济评价	4	1.3.4 传质系数和有效传质表面的通用 关联式	51
1.1.4.1 吸收过程的技术指标	4	1.3.4.1 Billet 模型	51
1.1.4.2 吸收过程的主要经济指标	5	1.3.4.2 SRP-II 模型	56
1.1.4.3 吸收过程的评价	5	1.3.4.3 修正的恩田(Onda)模型	59
1.2 吸收过程气液平衡	5	1.3.5 传质系数与传质单元高度的数据	61
1.2.1 气液相平衡概念	5	1.3.6 填料塔的当量高度(HETP)	68
1.2.2 气液相平衡关系式	6	1.4 阶段接触设备(板式塔)的设计计算	70
1.2.2.1 亨利定律	6	1.4.1 平衡级(理论级)方法	70
1.2.2.2 热力学平衡关系式	6	1.4.2 图解法求平衡级数	70
1.2.3 平衡数据的来源	7	1.4.3 解析法求平衡级数	71
1.2.4 由热力学关系求平衡系数	7	1.4.3.1 贫气吸收或解吸	71
1.2.5 温度与压力对平衡系数的影响	9	1.4.3.2 富气吸收	74
1.2.6 气体在电解质或非电解质水溶液中的 溶解度	10	1.4.4 多组分吸收(解吸)严格算法	76
1.2.6.1 气体在电解质水溶液中的溶 解度	10	1.4.4.1 基本方程组	76
1.2.6.2 气体在非电解质水溶液中的 溶解度	12	1.4.4.2 独立变量数及其指定	77
1.2.7 化学吸收的相平衡	12	1.4.5 级(板)效率	77
1.2.8 若干体系的气液平衡数据	15	1.4.6 利用 MS Excel 软件处理板式塔流体 力学和塔板效率数据	81
1.2.9 预测型分子热力学预测溶解度	29	1.4.6.1 流体力学数据计算	81
1.2.9.1 状态方程法	29	1.4.6.2 塔板效率数据	83
1.2.9.2 活度系数法	35	1.4.7 气液固三相流体力学和塔板效率	84
1.3 连续接触设备(填料塔)设计计算	38	1.4.7.1 气液固三相流体力学	84
		1.4.7.2 气液固三相塔板效率	86
		1.5 非等温吸收	87

1.5.1 吸收过程的热效应	87	1.7.3.1 概述	118
1.5.2 非等温吸收近似算法	88	1.7.3.2 解吸塔设计	120
1.5.3 严格算法	88	1.8 吸收过程在石油化学工业中的应用	120
1.6 化学吸收	92	1.8.1 催化裂化吸收稳定过程	121
1.6.1 概述	92	1.8.1.1 概述	121
1.6.2 化学吸收分类	93	1.8.1.2 吸收(解吸)过程的模拟	121
1.6.3 增强因子	94	1.8.1.3 吸收-解吸流程的改进	125
1.6.4 化学吸收速率	94	1.8.1.4 塔设备的设计和改进	127
1.6.4.1 一级和拟一级不可逆反应	95	1.8.2 CO ₂ 及 H ₂ S 的脱除	129
1.6.4.2 瞬间不可逆反应	97	1.8.2.1 CO ₂ 的脱除	129
1.6.4.3 化学吸收的传质模型与增强因子	99	1.8.2.2 典型工艺过程及设备设计	130
1.6.5 化学吸收过程模拟与解	101	1.8.2.3 H ₂ S 的脱除	140
1.6.6 化学吸收设备的选型与计算	103	1.8.3 SO ₂ 的脱除	140
1.6.6.1 化学吸收设备的选型	103	1.8.3.1 SO ₂ 脱除方法	140
1.6.6.2 填料吸收反应器	104	1.8.3.2 氨法脱 SO ₂ 的化学反应过程	141
1.6.6.3 板式吸收塔	112	1.8.3.3 气液平衡	141
1.7 气体的解吸	115	1.8.3.4 热效应	142
1.7.1 概述	115	1.8.3.5 氨酸法的工艺流程	142
1.7.2 物理解吸	115	1.8.3.6 工艺与设备设计参数	142
1.7.2.1 物理解吸的计算	115	1.8.3.7 氨法在电厂烟气脱硫中的应用	146
1.7.2.2 吸收蒸出(解吸)塔	116	主要符号说明	147
1.7.2.3 物理解吸的选择性	118	参考文献	149
1.7.3 有化学反应的解吸	118		

第2章 液-液萃取

2.1 概述	154	2.4.2 考虑纵向混合的萃取塔的数学模型	177
2.1.1 液-液萃取过程的特点	154	2.4.3 扩散模型及其近似解法	178
2.1.2 液-液萃取在石油化工中的应用	154	2.5 萃取设备的分类和选型	182
2.2 液-液萃取平衡及其数学模型	156	2.5.1 萃取设备的分类	182
2.2.1 分配系数和分离系数	156	2.5.2 常用萃取设备	183
2.2.2 相图	157	2.5.3 萃取塔的比较和选型	190
2.2.3 液-液萃取平衡的热力学基础	158	2.6 填料萃取塔的设计计算	192
2.2.4 液-液萃取平衡的预测——UNIFAC 方程	160	2.6.1 填料萃取塔的特点	192
2.3 液-液萃取过程的设计计算	164	2.6.2 设计计算步骤	194
2.3.1 单级萃取过程	164	2.6.3 塔径的计算	195
2.3.2 多级错流萃取和多级逆流萃取	165	2.6.4 塔高的计算	198
2.3.3 连续逆流萃取过程	167	2.6.5 设计计算举例	201
2.3.4 复合萃取	169	2.7 转盘萃取塔(RDC)的性能、设计和改进	203
2.3.5 用于复杂体系的矩阵解法	174	2.7.1 概述	203
2.4 考虑纵向混合的萃取塔的设计计算	176	2.7.2 转盘萃取塔液泛速度的计算	205
2.4.1 萃取塔内的纵向混合	176		

2.7.3 转盘萃取塔传质特性的计算	206	2.7.6 转盘萃取塔的改进	212
2.7.4 转盘塔的纵向混合	207	主要符号说明	214
2.7.5 设计计算举例	208	参考文献	215

第3章 吸附与变压吸附

3.1 吸附过程基础理论	218	3.3.3.2 运行方式分类	242
3.1.1 吸附基本原理	218	3.4 变温吸附循环工艺及其应用	243
3.1.2 物理吸附和化学吸附	219	3.4.1 变温吸附工艺	243
3.1.3 吸附热力学基础	220	3.4.2 变温吸附应用	244
3.1.3.1 吸附平衡	220	3.4.2.1 脱除或回收有机化合物	244
3.1.3.2 吸附热	224	3.4.2.2 气体中脱除或回收酸性组分	250
3.1.4 吸附动力学基础	225	3.4.2.3 低沸点气体的低温净化	254
3.1.4.1 吸附过程速度	225	3.4.2.4 干燥脱水(在第3.7节中 专述)	259
3.1.4.2 固定床吸附动态特性	226	3.5 变压吸附(pressure-swing adsorption, PSA) 循环工艺及其应用	259
3.2 吸附剂	229	3.5.1 变压吸附原理流程和特点	259
3.2.1 特性参数	229	3.5.1.1 变压吸附原理流程	259
3.2.2 常用吸附剂	230	3.5.1.2 变压吸附工艺对吸附剂的 要求	259
3.2.2.1 硅胶(silica gel, SG)(参见第 3.7节)	230	3.5.1.3 吸附塔死空间体积的重要性	261
3.2.2.2 活性氧化铝(activated alumina)	231	3.5.1.4 吸附系数和分离系数	261
3.2.2.3 活性炭(activated carbon, AC)	231	3.5.2 变压吸附工艺	261
3.2.2.4 沸石分子筛(zeolite molecular sieves, MS 或 ZMS)	232	3.5.2.1 从气相提取产品的工艺	262
3.2.2.5 碳分子筛(carbon molecular sieves, CMS 或 MSC)	234	3.5.2.2 从吸附相提取产品的工艺	267
3.2.2.6 活性碳纤维(activated carbon fiber, ACF)	235	3.5.2.3 同时从气相及吸附相提取产品的 工艺	268
3.2.2.7 浸渍活性炭(impregnated activated carbon)	235	3.5.3 变压吸附技术的应用	269
3.2.2.8 合成聚合物(synthetic polymers)	235	3.5.3.1 从富氢气体中回收和提纯 氢气	269
3.2.3 物理性质	235	3.5.3.2 从变换气中制取合成气	277
3.3 吸附分离工艺	236	3.5.3.3 空气干燥及脱除二氧化碳	279
3.3.1 吸附分离程度的判别	236	3.5.3.4 从空气中制取富氧、纯氮、 纯氧	281
3.3.2 吸附剂对气体的选择性	237	3.5.3.5 天然气净化	287
3.3.2.1 选择分离机理	237	3.5.3.6 从煤层气中浓缩甲烷	288
3.3.2.2 吸附剂与吸附质之间的相互作用 对选择性的影响	238	3.5.3.7 从混合气中提取二氧化碳	288
3.3.2.3 同种吸附剂结构对选择性的 影响	239	3.5.3.8 从混合气中提取一氧化碳	290
3.3.3 吸附分离工艺的分类	240	3.5.3.9 从工厂废气中回收有机溶剂	292
3.3.3.1 吸附剂再生方法分类	240	3.5.3.10 潜水呼吸气的净化	293
		3.5.3.11 垃圾填埋气净化回收甲烷	294
		3.5.3.12 炼油厂催化裂化干气提浓回收 乙烯	296

3.5.3.13 液相吸附分离石脑油中的芳烃	298	3.7.5.1 硅胶 (可参见第 3.2.2.1 节)	316
3.6 其它的循环吸附工艺	298	3.7.5.2 活性氧化铝 (参见第 3.2.2.2 节)	316
3.6.1 置换冲洗 (displacement-purge Adsorption, DPA) 工艺	298	3.7.5.3 分子筛 (参见第 3.2.2.4 节)	317
3.6.2 变压参数泵 (pressure swing parametric pumping) 吸附工艺	301	3.7.6 再生方法	317
3.6.3 循环区域吸附 (cycling zone adsorption, CZA) 工艺	301	3.7.7 变温吸附干燥工艺	317
3.6.4 色谱分离 (chromatographic separations) 工艺	302	3.7.7.1 TSA 干燥工艺流程	318
3.6.5 移动床 (moving bed) 吸附工艺	305	3.7.7.2 TSA 干燥装置设计原则	320
3.6.6 流化床 (fluidized bed) 吸附工艺	307	3.7.7.3 节能流程	330
3.6.7 模拟移动床 (simulated moving bed, SMB) 吸附工艺	309	3.7.7.4 转轮式干燥器	331
3.7 气体吸附干燥脱水工艺	312	3.7.8 变压吸附干燥工艺	332
3.7.1 吸附干燥的原理及意义	312	3.7.8.1 PSA 干燥工艺流程	332
3.7.2 湿气体的性质	312	3.7.8.2 PSA 干燥装置设计原则	333
3.7.2.1 绝对湿度 (ψ_a)	312	3.7.8.3 PSA 干燥、操作条件	334
3.7.2.2 相对湿度 (ψ_r)	312	3.7.9 吸附干燥的特点及适用场合	335
3.7.2.3 比湿度 (d)	313	3.8 固定床吸附塔的结构	335
3.7.2.4 露点 (t_d)	313	3.8.1 轴流塔	335
3.7.2.5 湿气体比热容 (c_H)	313	3.8.2 径流塔	336
3.7.2.6 湿气体比焓 (I)	314	3.8.3 嵌入式蜂窝状板块径流塔	337
3.7.3 干燥方法	314	3.8.4 换热型吸附塔	337
3.7.4 吸附干燥的基本原理	315	3.9 转轮吸附器 (旋转式吸附器)	338
3.7.5 常用的吸附干燥剂	316	3.9.1 TSA 转轮吸附器	339
		3.9.2 PSA 转轮吸附器	343
		3.10 反应器/吸附器	344
		参考文献	346

第 4 章 气液传质设备

4.1 概述	356	4.3.4.4 堰上液流高度	368
4.2 板式塔	357	4.3.4.5 液面梯度	370
4.2.1 板式塔的分类	357	4.3.4.6 塔板压降	370
4.2.2 塔板的结构参数	358	4.3.4.7 降液管内液层高度	374
4.3 板式塔初步设计内容及一般步骤	359	4.3.5 塔的操作极限与负荷性能图	375
4.3.1 塔径估算及板间距初选	359	4.3.5.1 塔板的操作限制	375
4.3.2 溢流区设计	360	4.3.5.2 板式塔的负荷性能图	376
4.3.2.1 降液管及其受液盘的设计	360	4.3.6 全塔设计优化	382
4.3.2.2 溢流堰的设计	363	4.3.7 板效率及塔高的确定	384
4.3.3 鼓泡区设计	364	4.3.7.1 全塔效率与板效率	384
4.3.4 流体力学性能及计算方法	365	4.3.7.2 塔高的确定	386
4.3.4.1 塔板上气液两相的接触状态	365	4.4 筛孔塔板	387
4.3.4.2 塔板上气液两相的分布状态	367	4.4.1 筛板的结构特性	387
4.3.4.3 塔板持液量	368	4.4.2 筛板塔的设计示例	388

4.5 浮阀型塔板	392	4.8.1 概述	433
4.5.1 概述	392	4.8.2 网孔塔板的结构与性能	433
4.5.2 F1 型浮阀	394	4.8.3 塔径与板间距	434
4.5.2.1 F1 型浮阀结构	394	4.8.4 板面布置	435
4.5.2.2 F1 型浮阀的排列	396	4.8.5 流体力学计算	438
4.5.2.3 塔板压降	396	4.9 垂直筛板	441
4.5.2.4 设计计算示例	396	4.9.1 概述	441
4.5.3 V-4 型浮阀	402	4.9.2 CTST 立体传质塔板的结构与特点	441
4.5.4 十字架形浮阀	402	4.9.3 立体传质塔板的流体力学性能	442
4.5.5 Nutter 浮阀	403	4.9.4 立体传质塔板的传质性能	446
4.5.6 导向组合浮阀	403	4.9.5 立体传质塔板的工程设计	447
4.5.6.1 导向组合条阀结构特点	404	4.10 无降液管塔板	448
4.5.6.2 导向组合浮阀塔板组合方式	405	4.10.1 概述	448
4.5.6.3 组合导向浮阀塔盘的结构及水 力学性能计算	405	4.10.2 穿流式栅板或筛板的塔板结构	448
4.5.7 波纹导向组合浮阀塔板	409	4.10.3 流体力学计算	449
4.5.8 ADV 微分浮阀塔板	410	4.10.4 穿流式波纹筛板	450
4.5.8.1 概述	410	4.11 多降液管塔板	454
4.5.8.2 ADV [®] 微分浮阀塔板的整体 技术	410	4.11.1 概述	454
4.5.8.3 ADV [®] 微分浮阀塔板的水力学 性能及计算方法	411	4.11.2 MD 塔板结构特点	454
4.5.9 Super V 型浮阀	412	4.11.3 流体力学性能	455
4.5.9.1 Super V 型系列浮阀塔板结构	412	4.11.4 负荷性能图	457
4.5.9.2 各型号适用范围	413	4.11.5 主要设计参数	458
4.5.9.3 Super V 型系列浮阀塔板的水力 学性能及计算方法	413	4.12 塔板结构设计——分块式塔板	459
4.5.10 微型浮阀	413	4.12.1 分块式塔板结构型式	459
4.6 固定阀型塔板	415	4.12.2 塔盘的分块	460
4.6.1 导向筛板	415	4.12.2.1 塔板分块	460
4.6.1.1 结构及特点	416	4.12.2.2 塔板分块示例	462
4.6.1.2 流体力学计算	417	4.12.3 分块式塔板结构尺寸	463
4.6.2 斜喷塔板	418	4.12.4 塔板支持件结构	465
4.6.2.1 舌形塔板	419	4.12.4.1 分块式塔板的降液管	465
4.6.2.2 斜孔塔板	423	4.12.4.2 分块式塔板的受液盘	466
4.6.3 V-0 固阀	428	4.12.4.3 分块式塔板的溢流堰	468
4.6.4 V-grid 系列固阀	428	4.12.5 塔板紧固件	468
4.6.5 微型固阀	429	4.12.6 塔板结构设计的其它考虑	473
4.7 泡罩塔板	429	4.12.6.1 折流挡板	473
4.7.1 泡罩塔板的结构	429	4.12.6.2 引流板	473
4.7.2 塔板压降	431	4.12.6.3 塔段结构改变时的降液管结构 型式	473
4.7.3 负荷性能图	432	4.12.6.4 排液孔（泪孔）	474
4.8 网孔塔板	433	4.13 填料塔	475
		4.13.1 填料塔的特点	475
		4.13.2 填料塔的结构	476
		4.13.3 塔填料的分类	476

4.13.3.1 散装填料	477	4.15.4.1 概述	543
4.13.3.2 规整填料	477	4.15.4.2 网状填料的特点与应用场合 ...	544
4.13.4 填料的几何特性	478	4.15.4.3 金属丝网填料	545
4.13.4.1 散装填料单体及填料层的几何 参数	478	4.15.4.4 塑料丝网波纹填料	547
4.13.4.2 规整填料层几何参数	479	4.15.4.5 金属板网(网孔)波纹填料 ...	548
4.13.5 填料塔的流体力学性能	479	4.15.4.6 Rombopak 填料	549
4.13.5.1 填料塔的流体力学状态	479	4.15.5 栅格填料	551
4.13.5.2 填料塔的流体力学模型	481	4.15.5.1 Glitsch 栅格填料	551
4.13.6 填料塔的传质性能	489	4.15.5.2 Sulzer 栅格填料	553
4.13.6.1 定义	489	4.15.6 我国新开发的规整填料	554
4.13.6.2 影响传质性能的因素	490	4.15.6.1 波环填料	554
4.13.6.3 填料塔传质关联式与数据	491	4.15.6.2 组片式波纹填料	554
4.13.7 填料塔的设计	493	4.15.6.3 板花填料	555
4.13.7.1 塔的工艺模拟	493	4.15.7 改进型孔板波纹填料	555
4.13.7.2 填料的选择	493	4.16 塔器选型导则	556
4.13.7.3 塔径的确定	496	4.16.1 塔器选型主要考虑因素	556
4.13.7.4 填料层高度的确定	496	4.16.2 判断气液传质设备最佳的目标	557
4.13.7.5 压降计算	497	4.16.3 板式塔和填料塔的选型原则	557
4.13.7.6 填料塔内件的设计	497	4.16.3.1 板式塔和填料塔的传质机理 ...	557
4.13.8 填料塔的气液分布与放大问题	497	4.16.3.2 板式塔和填料塔的特性比较 ...	557
4.14 散装填料的性能	499	4.16.3.3 优先选用填料塔的工况	557
4.14.1 散装填料的特点与应用场合	499	4.16.3.4 优先选用板式塔的工况	557
4.14.2 拉西环	500	4.16.3.5 综合选型	558
4.14.3 鲍尔环	500	4.16.4 板式塔的选型导则	558
4.14.4 改进型鲍尔环	503	4.16.4.1 新塔的设计	558
4.14.5 阶梯环与阶梯短环	505	4.16.4.2 旧塔的改造	558
4.14.6 扁环与梅花扁环填料	507	4.16.5 填料塔的选型导则	559
4.14.7 环鞍形填料	509	4.17 塔的内件与辅助装置	560
4.14.8 共轭环	517	4.17.1 概述	560
4.14.9 茵派克填料	521	4.17.2 填料塔的液体分布器	561
4.14.10 多鞍环填料	522	4.17.2.1 对液体分布器的基本要求	561
4.15 规整填料的性能	525	4.17.2.2 液体分布器的类型和结构	563
4.15.1 规整填料的特点与应用	525	4.17.2.3 槽式分布器	564
4.15.2 金属孔板波纹填料	525	4.17.2.4 管式分布器	568
4.15.2.1 Mellapak 填料	525	4.17.2.5 盘式分布器	572
4.15.2.2 刺孔板波纹填料	532	4.17.2.6 喷射式分布器	574
4.15.2.3 Gempak 填料	534	4.17.3 填料塔液体收集及再分布装置	574
4.15.2.4 Intalox 规整填料	537	4.17.3.1 填料层的分段	574
4.15.3 非金属板波纹填料	538	4.17.3.2 液体收集器	575
4.15.3.1 塑料板波纹填料	538	4.17.3.3 液体再分布器	575
4.15.3.2 陶瓷板波纹填料	541	4.17.4 填料支承装置	576
4.15.4 网状波纹填料	543	4.17.5 填料压板和床层限制器	578
		4.17.6 气、液进出料管	579

4.17.6.1 液体进料结构	579	4.17.7.3 填料除沫器	587
4.17.6.2 液体出料管	582	4.17.7.4 旋流板除沫器	588
4.17.6.3 气体出、入管与气体分布器	582	4.17.8 塔釜(底)结构	588
4.17.7 除雾沫器	586	4.17.9 塔的辅助装置	589
4.17.7.1 丝网除沫器	586	主要符号说明	589
4.17.7.2 折流板除沫器	587	参考文献	590

第5章 膜分离

5.1 概述	595	5.4 膜材料及制膜工艺简介	687
5.1.1 引言	595	5.4.1 膜材料	687
5.1.2 膜分离技术的发展简史	595	5.4.2 制膜工艺	689
5.1.3 膜分离过程的分类	595	5.5 膜组件及膜系统设计	691
5.2 膜分离过程及其应用	597	5.5.1 前言	691
5.2.1 压力驱动膜过程	597	5.5.2 膜组件类型	691
5.2.1.1 微孔过滤	598	5.5.2.1 板框式	691
5.2.1.2 超过滤	602	5.5.2.2 圆管式	694
5.2.1.3 纳滤	605	5.5.2.3 螺旋卷式	701
5.2.1.4 反渗透	609	5.5.2.4 中空纤维式	703
5.2.1.5 气体分离	618	5.5.2.5 各种膜组件形式的优缺点对比	706
5.2.1.6 膜萃取	626	5.5.3 膜分离系统的设计	707
5.2.2 浓差驱动膜过程	630	5.5.3.1 反渗透过程	708
5.2.2.1 渗透蒸发	630	5.5.3.2 电渗析过程	714
5.2.2.2 透析	633	5.6 集成膜分离技术	720
5.2.2.3 液膜	637	5.6.1 引言	720
5.2.2.4 膜吸收法	645	5.6.2 几种典型的集成膜分离过程模式	721
5.2.3 电驱动膜过程	649	5.6.2.1 膜分离与化学反应相结合	721
5.2.3.1 电渗析	649	5.6.2.2 膜分离与蒸发单元操作相结合	721
5.2.3.2 膜电解	657	5.6.2.3 膜分离与吸附单元操作相结合	721
5.2.3.3 双极膜电渗析	661	5.6.2.4 膜分离与冷冻单元操作相结合	721
5.2.4 热驱动膜过程	666	5.6.2.5 膜分离与催化单元操作相结合	721
5.2.4.1 膜蒸馏	666	5.6.2.6 膜分离与离子交换树脂单元操作相结合	721
5.3 浓差极化、膜污染及前处理	673	5.6.3 集成膜分离过程的应用实例	721
5.3.1 浓差极化	673	5.6.3.1 用集成膜过程对含油废水进行资源化回收利用处理	721
5.3.1.1 浓差极化形成的基本原因	673	5.6.3.2 集成膜工艺海水淡化与浓海水综合利用	722
5.3.1.2 浓差极化的危害	677	参考文献	722
5.3.1.3 减小浓差极化的方法	677		
5.3.2 膜污染	681		
5.3.2.1 膜污染的定义	681		
5.3.2.2 膜污染的起因	682		
5.3.2.3 膜污染的控制方法	683		
5.3.2.4 膜污染的清洗方法	684		
5.3.3 前处理	686		

第6章 干燥

6.1 干燥过程的基本计算和湿空气性质及湿度图	724	6.3.6.3 直接加热式转筒干燥器	787
6.1.1 干燥过程的基本计算	724	6.3.6.4 间接加热式	791
6.1.2 湿空气性质及湿度图	724	6.3.6.5 复合加热式	792
6.2 干燥器的分类和选择	724	6.3.6.6 常规直接加热式转筒干燥器的 设计参数	793
6.2.1 干燥器的分类	724	6.4 传导传热干燥器	797
6.2.2 干燥器的选择	724	6.4.1 真空耙式干燥器	797
6.3 对流传热干燥器	729	6.4.2 双锥回转真空干燥机	798
6.3.1 厢式干燥器	729	6.4.3 滚筒干燥器	798
6.3.1.1 型式	730	6.4.3.1 分类	798
6.3.1.2 设计参数	730	6.4.3.2 操作原理	799
6.3.2 气流干燥器	730	6.4.3.3 工艺流程	799
6.3.2.1 气流干燥的操作原理和特点	730	6.4.3.4 设计参数	799
6.3.2.2 气流干燥器的型式	731	6.4.4 振动流动干燥机	801
6.3.2.3 气流干燥管有关参数的确定	733	6.4.4.1 分类和操作原理	801
6.3.3 流化床干燥器	738	6.4.4.2 应用	802
6.3.3.1 操作原理及特点	738	6.4.5 旋转管束干燥机	804
6.3.3.2 单层和卧式多室流化床干燥器	739	6.4.5.1 结构及操作原理	804
6.3.3.3 振动流化床干燥器	741	6.4.5.2 干燥工艺流程	804
6.3.3.4 带搅拌的移动流化床干燥器	746	6.4.6 蒸汽管间接加热式回转圆筒干燥机	805
6.3.4 旋转快速干燥机	747	6.5 红外线干燥和微波干燥	807
6.3.4.1 操作原理、工艺流程和特点	747	6.5.1 红外线干燥	807
6.3.4.2 主要操作参数	748	6.5.1.1 红外线干燥的基本原理和特点	807
6.3.4.3 旋转快速干燥技术的应用	749	6.5.1.2 红外线干燥器的组成和应用	807
6.3.5 喷雾干燥	750	6.5.2 微波干燥	808
6.3.5.1 喷雾干燥的操作原理及流程	750	6.5.2.1 微波干燥的基本原理	808
6.3.5.2 雾化器的结构和计算	752	6.5.2.2 微波干燥的特点和应用	809
6.3.5.3 喷雾干燥塔的结构设计和尺寸估算	769	6.5.2.3 微波干燥系统的组成	809
6.3.5.4 喷雾干燥技术在工业上的应用举例	781	6.5.2.4 微波干燥过程	809
6.3.6 转筒干燥器	786	6.5.2.5 几种常用的微波干燥器	809
6.3.6.1 分类	786	主要符号说明	810
6.3.6.2 工作原理和特点	786	参考文献	811

第7章 化学反应器

7.1 气-固固定床催化反应器	813	7.1.1.3 工业气-固固定床催化反应器	813
7.1.1 气-固固定床催化反应器类型	813	7.1.2 固定床反应器数学模型	814
7.1.1.1 绝热式反应器	813	7.1.2.1 固定床反应器的基础数据	814
7.1.1.2 换热式反应器	813	7.1.2.2 气-固固定床催化反应器的数	

学模型	817	7.3.3.2 由流速分布计算叶轮排量数和 循环量数	868
7.1.3 气-固定床催化反应器选型及 设计	821	7.3.3.3 操作条件和流体的流变行为对 流型的影响	871
7.1.3.1 气-固定床催化反应器选型的 基本原则	821	7.3.3.4 从流场信息优化搅拌叶轮设计 和操作	873
7.1.3.2 气-固定床催化反应器的过 程开发	821	7.3.4 搅拌设备的功耗、排量和混合	878
7.1.3.3 绝热固定床反应器的设计	822	7.3.4.1 搅拌功率	878
7.1.3.4 换热式固定床反应器的设计	824	7.3.4.2 排量、循环量和混合的关系	889
7.1.4 固定床反应器中几个工程问题	825	7.3.5 搅拌槽的传热	893
7.1.4.1 参数灵敏度	825	7.3.5.1 概述	893
7.1.4.2 温度检测	826	7.3.5.2 热载体侧的表面传热系数	895
7.1.4.3 固定床反应器的控制	827	7.3.5.3 被搅液侧的表面传热系数	897
7.1.4.4 流体均布	827	7.3.5.4 高黏流体的刮壁式传热	906
7.1.4.5 设计中考虑的其它因素	828	7.3.6 固-液搅拌槽式反应器中的非均相 混合	910
7.2 气-液反应器	829	7.3.6.1 固-液悬浮	910
7.2.1 气-液反应器的分类及其基本特征	829	7.3.6.2 液-液分散	919
7.2.1.1 反应器中的气液两相接触 形式	829	7.3.6.3 气-液分散	925
7.2.1.2 气-液反应器的基本类型	829	7.3.7 搅拌槽的放大技术	936
7.2.1.3 常见的气液反应器的特点	830	7.3.7.1 概述	936
7.2.2 气-液反应器的选择	831	7.3.7.2 几何相似放大法	936
7.2.2.1 气-液反应过程的宏观反应速率 方程	831	7.3.7.3 非几何相似放大法	941
7.2.2.2 物理传质系数和界面积的 估算	835	7.3.7.4 关于数学模型放大	944
7.2.2.3 气-液反应器的选择原则	837	7.3.8 悬浮聚合和乳液聚合反应器	946
7.2.3 气-液反应器的设计	838	7.3.8.1 悬浮聚合的成粒机理	947
7.2.3.1 填料塔反应器	838	7.3.8.2 氯乙烯悬浮聚合反应器	954
7.2.3.2 鼓泡塔反应器	839	7.3.8.3 乳液聚合反应器	965
7.3 搅拌槽式聚合反应器的设计	847	7.3.9 溶液聚合和均相本体聚合反应器	970
7.3.1 搅拌设备概论	847	7.3.9.1 高黏流体聚合反应器的选型	971
7.3.1.1 槽体	848	7.3.9.2 苯乙烯本体聚合装置	973
7.3.1.2 叶轮	848	7.3.10 烯烃聚合反应器	982
7.3.1.3 内构件	849	7.3.10.1 三种聚烯烃工艺简述	982
7.3.2 搅拌槽式聚合反应器的选型	854	7.3.10.2 搅拌釜式烯烃聚合反应器	985
7.3.2.1 搅拌对象的性质	854	7.4 气-固定床反应器	993
7.3.2.2 叶轮的剪切-循环特性	857	7.4.1 基本类型及其特点	993
7.3.2.3 流动状态与叶轮性能的关系	859	7.4.2 工业应用	995
7.3.2.4 几种常用叶轮的特性	861	7.4.2.1 各类反应过程	995
7.3.2.5 搅拌槽式聚合反应器的进展	864	7.4.2.2 工业应用的例子	995
7.3.3 聚合反应器中的流动	867	7.4.3 流化床的流体力学特性	997
7.3.3.1 湍流域用搅拌叶轮的流场	868	7.4.3.1 颗粒的分类及其对流动态化的 影响	997
		7.4.3.2 流域和流域的过渡	998