



国家科学技术学术著作出版基金资助出版

Chemical Process Intensification
Methods and Technologies

化工过程强化

方法与技术

刘有智 等编著



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

Chemical Process Intensification
Methods and Technologies

化工过程强化 方法与技术

刘有智 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

化工过程强化技术是国内外化工界长期奋斗的目标,被列为当前化学工程优先发展的领域之一。

《化工过程强化方法与技术》是国内第一本系统论述涵盖化工过程强化的专著,由20多位知名学者历经几年的努力才得以完成。本书包含了化工过程强化方面几乎所有的重要内容。全书共分11篇:第1篇介绍超重力化工技术及系统集成;第2篇介绍混合过程强化与反应技术;第3篇介绍外场作用及强化技术;第4篇介绍新型分离强化技术;第5篇介绍新型换热装置与技术;第6篇介绍新型塔器技术;第7篇介绍反应介质强化技术;第8篇介绍微化工技术;第9篇介绍反应与分离过程耦合技术;第10篇介绍分离过程耦合技术;第11篇介绍其他过程强化技术,包括挤出反应器、旋风分离器等强化技术。

《化工过程强化方法与技术》可供化工、化学、催化、精细化工、资源、能源、环境、材料等学科领域从事基础研究和工业应用的研究人员、工程技术人员以及高校相关专业研究生、高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程强化方法与技术/刘有智等编著. —北京:化学工业出版社, 2017.3
ISBN 978-7-122-28825-7

I. ①化… II. ①刘… III. ①化工过程-研究 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第002100号

责任编辑:杜进祥 徐雅妮 丁建华

装帧设计:韩 飞

责任校对:宋 玮

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:三河市航远印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张46 字数1140千字 2017年5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



化学工程是一门重要的工程科学，是化学实验室通向化工厂的桥梁和纽带，在能源、资源、环境、国防、医药卫生等领域都有着广泛的应用。随着安全和环保要求日益提高和实现可持续发展的迫切要求，化学工程在创新过程中不断发展。化工过程强化（Chemical Process Intensification）就是国内外化学工程研究和发展的热点之一。

化工过程强化是灵活应用化学工程的理论和计算技术，通过技术创新，改进工艺流程，提高设备效率，使工厂布局更紧凑，能耗更低，三废更少。它是一类以节能、降耗、环保、安全和集约化为目标的现代化工技术，受到人们的高度关注。

由于化工过程强化研究具有多学科交叉的特点，只有化学、化工、机械和信息技术等学科的协同努力，只有理论紧密联系实际，才能不断推进化工过程强化的研究和实践，开发具有自主知识产权的新过程、新设备，实现我国化学工业绿色、低碳发展的目标。

近年来，愈来愈多的中青年学者投身于这项事业，推动了化工过程强化的方法与手段不断创新，新装置不断涌现、应用领域逐步拓宽，示范装置运行和工程化推广成果层出不穷，在节能减排和降耗增效等方面取得了一批重大成果，社会效益和经济效益显著。国内外从事化工过程强化的学者也定期召开学术交流会议、发表高水平的论文、探索新方向、推广新技术。化工过程强化技术的研究和应用方兴未艾。

本书作者们都是从事化工过程强化技术的研究人员，他们根据多年的研究、设计及工程化经验，共同编著了这本涉及化工过程强化主要领域的参考书，反映国内外化工过程强化技术的若干新发展和新成果。本书注意举例示范，注重工程化，在内容系统性和实用性的结合方面很有特点，对学术研究和工程实施均有指导意义。本书可供高等院校师生和研究设计部门专家参考，可望受到广大读者的欢迎并促进化工过程强化技术在更多领域的应用。

我很钦佩本书作者在编著的过程中所表现出的敬业精神，并预祝他们在今后的工作中取得更大的成绩。

中国科学院院士
清华大学化工系教授

费维扬



化工过程强化技术是针对现有常用设备与技术相比而言,通过采用新设备和新工艺,达到大幅度减小设备尺寸或提高产能、降低能耗及废物排放,形成高效节能、清洁、可持续发展的技术。因而,过程强化技术具有明显的平台技术、效率倍增和可持续发展特征,是解决化学工业“高能耗、高污染和高物耗”等问题的有效途径,被视为实现化工过程的高效、安全、环境友好、可持续发展的新兴技术,将会对化学工程学科发展产生具有里程碑意义的影响。由于化工过程强化涉及的领域相当广泛、强化技术的多样性和复杂性,国内外出版的书籍仅局限于某领域或某方面的过程强化,还没有系统论述覆盖化工过程强化的书籍著作。正是基于此,本书特邀了数十位该领域的专家、教授致力于本书的撰写,经过几年的集体努力,这本体现了当前化工过程强化最新发展动态和趋势的著作终于问世。

全书内容将基础研究与生产应用相融合,着重介绍在化工过程强化领域最新的研究方法、手段和研究动态,体现最新研究成果和未来的发展趋势;注重对最细的科研成果、理论研究、研究方法介绍,特别是突出工程化推广应用举例。书中主要内容所涉及的研究领域与技术,具有研究活跃、创新性强、关注度高、应用广泛的特性和重要的学术和应用价值。

本书由超重力化工技术及系统集成、混合过程强化与反应技术、外场作用及强化技术、微化工技术等 11 篇共 29 章组成,基本涵盖了化工过程强化的主要方法和涉及的领域。在各章分别介绍各种强化技术和方法,阐述当今发展和前沿动态,并详细总结了研究与开发的成果、工程化应用的成功范例以及目前存在的问题及发展方向等。全书贯穿化工过程强化支撑化工可持续发展的理念,以工程化实施的实例分析对比,阐述过程强化技术保障化工本质安全、提升产品品质、节能减排、降低成本的作用和意义,展现过程强化促环境友好、改化工形象、支撑化工可持续发展的技术潜质。全书由中北大学刘有智教授所作的绪论开头,然后是第 1 章气-液过程超重力化工强化技术,该章的折流板精馏部分由浙江工业大学计建炳教授撰写,其余部分由刘有智教授撰写;另外,刘有智教授撰写了第 2、3、4、9、16、17、26、29 章,详细介绍了超重力技术强化液-液、气-固、超重力-电化学耦合与反应等化工过程技术;沈阳化工大学吴剑华教授和刘有智教授共同完成了第 5 章静态混合器的编写;浙江大学冯连芳教授撰写了第 6 章,介绍了新型动态混合与聚合反应技术;第 7 章由南京工业大学吕效平教授详述了超声波化工技术;第 8、14、15 章由天津大学李鑫钢教授、高鑫副研究员撰写;第 10 章由太原理工大学鲍卫仁教授撰写;第 11、19 章由南京工业大学邢卫红教授撰写;山东理工大学傅忠君教授撰写了第 12 章分子蒸馏技术及应用;武汉工程大学喻九阳教授撰写了第 13 章新型换热器;第 18 章微反应器由中国科学院大连化学物理研究所陈光文研究员与尧超群副研究员撰写;第 20 章反应精馏技术由华东理工大学漆志文教授撰写;清华大学秦炜教授撰写了第 21 章反应萃取技术;天津工业大学吕晓龙教授和赵丽华博士共同完成了第 22 章、与高启君副研究员共同完成了第 23 章;北京化工大学朱吉钦教授和华东师

范大学路勇教授共同完成第 24 章规整结构催化剂及反应器；第 25 章挤出反应器由浙江大学张才亮副教授撰写；青岛科技大学李建隆教授撰写了第 27 章旋风分离器有关内容；华东理工大学王飞博士完成了第 28 章旋流分离器技术的撰写。华南理工大学张正国教授参与了本书的工作，并给予了帮助和支持。超重力化工过程山西省重点实验室的祁贵生、栗秀萍、焦纬洲、张巧玲、袁志国、高璟、申红艳、李伟伟、刘志伟、张珺、罗莹等老师参与了本书的部分工作。

十分感谢费维扬院士为本书作序，感谢国家科学技术学术著作出版基金评选和审稿的各位专家。在本书的撰写过程中参考了国内外公开出版或发表的文献，从中吸取了丰富的知识和成果，可以说没有他们的奉献和支持，本书难以问世。在此，对这些中外专家学者表示崇高的敬意和衷心的感谢！

由于化工过程强化涉及的范围宽、领域广，内容难免有遗漏，编排和归类难免有不合适的地方。限于编著者的水平、学识，难免存在不妥和不足之处，敬请读者提出宝贵意见和建议。

编著者
2016 年 10 月



绪论	1
0.1 概述	1
0.1.1 化工过程	2
0.1.2 化工过程强化	2
0.2 化工过程强化的发展及历史	3
0.3 化工过程强化的原理及方法	5
0.3.1 化工过程强化的思路及基本原理	5
0.3.2 化工过程强化的方法及分类	6
0.4 化工过程强化技术特征	7
0.4.1 平台技术特征	7
0.4.2 效率倍增特征	8
0.4.3 可持续发展特征	8
0.5 化工过程强化技术是可持续发展的新兴技术	8
0.6 化工过程强化技术展望与愿景	9
参考文献	10

第 1 篇 超重力化工技术及系统集成

第 1 章 气-液过程超重力化工强化技术

15

1.1 气-液超重力技术简介	16
1.1.1 超重力技术概述	16
1.1.2 气-液超重力装置的结构与类型	18
1.1.3 超重力技术强化气-液化工过程研究进展	23
1.2 超重力流体力学性能	27
1.2.1 液体流动形态	27
1.2.2 气相压降性能	28
1.2.3 液泛现象	29
1.2.4 停留时间	30
1.2.5 小结	30
1.3 超重力吸收	30

1.3.1 超重力吸收原理	30
1.3.2 超重力吸收工艺	31
1.3.3 超重力吸收应用	31
1.4 超重力解吸	34
1.4.1 超重力解吸原理	35
1.4.2 超重力解吸工艺	35
1.4.3 超重力解吸应用	36
1.5 超重力精馏	40
1.5.1 超重力旋转填料床精馏	40
1.5.2 超重力折流板精馏	43
1.6 超重力气-液反应	48
1.6.1 超重力气-液反应机理	49
1.6.2 超重力气-液反应工艺	49
1.6.3 超重力气-液反应应用	49
1.7 超重力直接换热	51
1.7.1 超重力换热器	51
1.7.2 超重力场中传热过程	51
1.7.3 超重力换热器特点	53
参考文献	54

第2章 液-液过程超重力化工强化技术

57

2.1 概述	57
2.2 IS-RPB 装备及技术	57
2.2.1 撞击流	57
2.2.2 IS-RPB 装置	60
2.2.3 IS-RPB 的设计原则	60
2.2.4 IS-RPB 内流体流动及混合（工作原理）	61
2.3 IS-RPB 微观混合性能	62
2.3.1 微观混合研究方法	62
2.3.2 微观混合性能对比	63
2.3.3 黏性体系对微观混合性能的影响	63
2.3.4 IS-RPB 微观混合时间的确定及对比	64
2.4 化工过程强化	64
2.4.1 乳化	64
2.4.2 萃取	69
2.4.3 液膜分离	71
2.5 反应过程强化	72
2.5.1 纳米氢氧化镁	72
2.5.2 重氮盐水解制酚	76
2.5.3 磁性纳米 Fe_3O_4	79

2.5.4 纳米零价铁	82
2.5.5 纳米 2,4-二羟基苯甲酸铜	85
2.6 发展趋势与前景	86
参考文献	87

第 3 章 气-固过程超重力化工强化技术

90

3.1 超重力多相分离	90
3.1.1 多相分离概述	90
3.1.2 超重力多相分离原理与特点	91
3.1.3 超重力多相分离性能研究	93
3.1.4 超重力湿法净化气体中细颗粒物技术应用实例	97
3.1.5 超重力除尘装置与传统除尘设备性能比较	99
3.2 离心流态化	100
3.2.1 离心流化床的工作原理	100
3.2.2 离心流化床的分类	100
3.2.3 离心流化的流体力学性能研究	103
3.2.4 离心流化床传热传质的研究	107
3.3 离心流化的工业应用前景	109
3.3.1 医药、食品行业热敏性物质的快速干燥	109
3.3.2 煤的液化	109
3.3.3 超细粉体 (Geldart C 类颗粒) 的流化	109
3.3.4 离心流化燃烧方面的研究	109
参考文献	110

第 4 章 超重力-电化学耦合与反应技术

112

4.1 概述	112
4.2 离心机改装的超重力电化学反应装置	113
4.2.1 装置结构	113
4.2.2 过程强化原理	114
4.2.3 超重力电沉积导电聚合物膜的应用研究	115
4.2.4 超重力电沉积金属薄膜的应用研究	116
4.2.5 超重力电解水的应用研究	117
4.2.6 超重力氯碱电解的应用研究	118
4.3 多级同心圆筒-旋转床 (MCE-RB) 式的超重力电化学反应装置	119
4.3.1 装置结构	120
4.3.2 过程强化原理	121
4.3.3 超重力电化学耦合氧化降解废水的应用研究	123
4.4 离心高速旋转的超重力电沉积装置	126
4.4.1 装置结构	127

4.4.2 过程强化原理	127
4.4.3 超重力电沉积 MnO_2 电极材料的应用研究	128
4.5 结语	128
参考文献	129

第 2 篇 混合过程强化与反应技术

第 5 章 静态混合器

132

5.1 概述	132
5.2 静态混合器的类型	132
5.3 静态混合器的工作原理	134
5.4 静态混合器流体力学特性	135
5.4.1 静态混合器流体力学实验研究	135
5.4.2 流体力学数值模拟	135
5.4.3 静态混合器的压降	136
5.5 静态混合器强化混合-反应性能	137
5.6 静态混合器强化传热性能	138
5.6.1 传热因子 Nu	139
5.6.2 传质系数 Ka	140
5.7 静态混合器的应用	141
5.7.1 静态混合器在制备纳米药物载体中的应用	141
5.7.2 静态混合器在超细粉体制备中的应用	141
5.7.3 静态混合器在硝化反应中的应用	141
5.7.4 静态混合器在环保领域的应用	142
5.7.5 静态混合器在混合油精炼工艺中的应用	144
5.7.6 静态混合器在酮还原反应中的应用	144
5.7.7 静态混合器在气液混合中的应用	144
5.7.8 静态混合器在脱硫中的应用	145
5.8 新型静态混合器	145
5.8.1 微型静态混合器	145
5.8.2 立交盘式静态混合器	146
5.8.3 内循环静态反应器	146
5.8.4 静态催化反应器	146
5.8.5 生物静态发酵器	147
5.8.6 复合型静态反应器	147
参考文献	148

第 6 章 新型动态混合与聚合反应技术

150

6.1 概述	150
--------------	-----

6.2 溶液聚合和液相本体聚合的工艺特点	150
6.3 高效预分散技术	151
6.3.1 快引发聚合过程中催化剂高效预分散	152
6.3.2 高活性官能团缩聚过程中单体高效预分散	153
6.4 复杂聚合物系的混合强化	155
6.4.1 变黏聚合过程的混合	155
6.4.2 高黏聚合过程的混合	157
6.5 聚合物脱挥与传质强化	160
6.6 结语	162
参考文献	162

第3篇 外场作用及强化技术

第7章 超声波化工技术

166

7.1 概述	166
7.2 超声波化工过程的基本原理	168
7.3 超声波乳化/破乳技术	169
7.3.1 概述	169
7.3.2 超声乳化与破乳的原理	170
7.3.3 超声乳化过程强化	172
7.3.4 超声破乳过程强化	172
7.4 超声波化学反应技术	177
7.4.1 概述	177
7.4.2 超声波对有机化学反应的强化	178
7.5 超声波萃取与浸取技术	182
7.5.1 概述	182
7.5.2 超声强化萃取过程	183
7.5.3 超声强化提取过程	183
7.6 超声波结晶技术	184
7.6.1 概述	184
7.6.2 超声结晶过程	184
7.6.3 超声在结晶分离技术中的应用	186
7.6.4 超声结晶的应用展望	187
7.7 超声波膜技术	187
7.7.1 概述	187
7.7.2 超声强化膜清洗	188
7.7.3 超声强化膜过滤的影响因素及其应用	190
7.8 超声波吸附/脱附技术	190

7.8.1 概述	190
7.8.2 超声强化吸附/脱附机理	191
7.9 超声波污水降解技术	192
7.9.1 超声降解污水过程机理	192
7.9.2 超声降解酚类有机废水	193
7.9.3 超声处理造纸废水	194
7.10 超声波生物污泥减量技术	195
7.10.1 超声促进生物污泥减量	195
7.10.2 生物污泥减量工业应用研究	196
7.11 超声波粉碎技术	197
7.11.1 超声粉碎的机理	197
7.11.2 超声粉碎机械的特点	197
7.11.3 超声粉碎的应用研究	197
7.12 超声波除尘技术	198
7.12.1 超声波除尘技术原理	198
7.12.2 超声波雾化除尘技术原理	198
7.12.3 超声波除尘在工程方面的应用	198
7.13 结语	199
7.13.1 超声化工技术的发展前景	199
7.13.2 超声化工技术的发展瓶颈	201
参考文献	203

第8章 微波化工技术

206

8.1 概述	206
8.2 微波化学反应与合成	208
8.2.1 微波无机合成	208
8.2.2 微波有机反应	209
8.2.3 微波聚合反应	210
8.3 微波干燥	211
8.3.1 概述	211
8.3.2 技术介绍	212
8.3.3 技术应用	213
8.4 微波加热	214
8.4.1 微波加热机理	214
8.4.2 微波加热的量子力学解释	215
8.4.3 微波加热的特点	216
8.4.4 微波热解油砂	217
8.5 微波萃取	218
8.5.1 概述	218

8.5.2 技术介绍	219
8.5.3 技术应用	220
8.6 微波蒸发	220
8.6.1 概述	220
8.6.2 技术介绍	220
8.6.3 技术应用	220
参考文献	221

第9章 磁稳定床技术

224

9.1 概述	224
9.2 磁稳定床原理与结构	225
9.3 气-固磁稳定床	226
9.3.1 气-固磁稳定床流体力学特性	226
9.3.2 磁场破碎气泡的机理	228
9.3.3 气-固磁稳定床的传热、传质	228
9.3.4 气固磁稳定床的应用	229
9.4 液-固磁稳定床	231
9.4.1 液-固磁稳定床流体力学特性	231
9.4.2 液-固磁稳定床传质特性	232
9.4.3 液-固磁稳定床的应用	233
9.5 气-液-固磁稳定床	234
9.5.1 气-液-固磁稳定床流体力学特性	234
9.5.2 气-液-固磁稳定床传质特性	235
9.5.3 气-液-固磁稳定床的应用	235
9.6 结语	236
参考文献	236

第10章 等离子体化工技术

239

10.1 概述	239
10.1.1 等离子体及其特性	239
10.1.2 热等离子体的应用	240
10.2 电弧等离子体裂解煤制乙炔	241
10.2.1 等离子体热解煤制乙炔的热力学分析	241
10.2.2 等离子体裂解煤制乙炔的实验研究	243
10.3 电弧等离子体裂解富含甲烷气制乙炔	247
10.3.1 等离子体裂解甲烷的热力学分析	247
10.3.2 等离子体裂解甲烷的实验研究	248
10.3.3 乙炔制备技术路线的分析比较	251

10.4 电弧等离子体裂解甲烷制纳米碳纤维	252
参考文献	254

第4篇 新型分离强化技术

第11章 膜分离技术及应用

258

11.1 概述	258
11.2 膜分离技术	258
11.2.1 常规膜分离技术	258
11.2.2 新型膜分离技术	260
11.3 膜分离技术的应用	261
11.3.1 水处理工业	261
11.3.2 石化工业	267
11.3.3 食品工业	271
11.3.4 医药工业	272
参考文献	272

第12章 分子蒸馏技术及应用

276

12.1 分子蒸馏理论基础	276
12.1.1 分子蒸馏技术发展	276
12.1.2 分子运动平均自由程	277
12.1.3 分子蒸馏基本原理	278
12.1.4 分子蒸馏分离过程及特点	278
12.2 分子蒸馏设备	281
12.2.1 分子蒸馏器的分类	281
12.2.2 实验室分子蒸馏设备	281
12.2.3 降膜式分子蒸馏器	284
12.2.4 离心式分子蒸馏器	285
12.2.5 刮膜式分子蒸馏器	288
12.2.6 多级分子蒸馏器	290
12.3 分子蒸馏过程	291
12.3.1 液膜内的传热与传质	291
12.3.2 热量和质量传递阻力对分离效率的影响	293
12.4 分子蒸馏的工业化应用	295
12.4.1 分子蒸馏技术的应用现状	295
12.4.2 分子蒸馏技术的工业化应用实例	301
参考文献	305

13.1 概述	308
13.2 板式换热器	308
13.2.1 基本结构	308
13.2.2 设计方法	308
13.2.3 计算方法	309
13.2.4 研究进展	309
13.2.5 相关应用	310
13.3 板壳式换热器	313
13.3.1 基本结构	313
13.3.2 研究进展	314
13.3.3 相关应用	314
13.3.4 设计计算	316
13.4 螺旋板式换热器	318
13.4.1 基本结构	318
13.4.2 基本特点	318
13.4.3 设计方法	319
13.4.4 计算方法	319
13.4.5 研究进展	324
13.4.6 相关应用	325
13.5 板翅式换热器	326
13.5.1 基本结构	326
13.5.2 研究进展	326
13.5.3 相关应用	328
13.5.4 计算方法	331
13.6 伞板换热器	333
13.6.1 基本结构	333
13.6.2 设计方法	333
13.6.3 研究进展	334
13.6.4 相关应用	334
13.7 热管换热器	335
13.7.1 基本结构	336
13.7.2 研究进展	337
13.7.3 相关应用	338
13.7.4 设计方法	340

参考文献	341
------------	-----

第6篇 新型塔器技术

第14章 新型填料技术

346

14.1 概述	346
14.1.1 国内外高效填料的发展	346
14.1.2 高效填料的分类	347
14.1.3 典型的高效填料及特性——散堆填料	347
14.1.4 典型的高效填料及特性——规整填料	349
14.1.5 其他新型高效填料	353
14.2 高效填料原理	353
14.2.1 BH型高效填料的原理及特点	354
14.2.2 BHS-Ⅱ型填料原理及特点	355
14.2.3 双曲(SQ)丝网波纹填料原理及特点	355
14.3 流体力学及传质性能分析	356
14.3.1 散堆填料的流体力学模型	356
14.3.2 散堆填料的传质研究	357
14.3.3 规整填料的流体力学模型	359
14.3.4 规整填料的传质研究	361
14.4 高效填料的应用	364
14.4.1 高效规整填料在尿素解吸塔的应用	364
14.4.2 高效填料在双氧水生产中的应用研究	366
14.4.3 BH型高效填料的工业应用	367
14.4.4 甲醇的精馏分离提纯过程	368
14.5 发展趋势	369
14.5.1 规整填料	369
14.5.2 散堆填料	370
14.5.3 结语	371
参考文献	371

第15章 新型塔板技术

377

15.1 概述	373
15.2 立体喷射型塔板	374
15.2.1 新型垂直筛板塔板 NEW-VST	374
15.2.2 梯矩形立体连续传质塔板(LLCT)	376
15.2.3 立体传质塔板(CTST)	377

15.3 复合塔板	377
15.3.1 穿流型复合塔板	377
15.3.2 并流喷射填料塔板 (JCPT)	378
15.3.3 新型多溢流复合斜孔塔板	379
15.4 浮阀类塔板	380
15.4.1 导向浮阀塔板	380
15.4.2 超级浮阀塔板 (SVT)	380
15.4.3 NYE 塔板	381
15.4.4 Triton 塔板	382
15.4.5 BJ 塔板	383
15.5 筛孔型塔板	383
15.5.1 MD、ECMD 塔板及国内开发的 DJ 系列塔板	383
15.5.2 Cocurrent 塔板	384
15.5.3 95 型塔板	385
15.5.4 一种具有机械消泡功能的新型塔板	385
15.6 穿流塔板	386
15.6.1 穿流式栅板	386
15.6.2 非均匀开孔率穿流塔板	387
15.7 高速板式塔——旋流塔板	387
15.8 隔壁塔	389
参考文献	389

第 7 篇 反应介质强化技术

第16章 离子液体

392

16.1 概述	392
16.1.1 离子液体简介	392
16.1.2 离子液体结构	393
16.1.3 离子液体性质	394
16.1.4 构效关系与分子模拟	396
16.1.5 合成方法	396
16.2 离子液体强化反应过程	398
16.2.1 强化反应过程	398
16.2.2 强化传递过程	400
16.3 离子液体的应用研究	401
16.3.1 反应过程应用	402
16.3.2 分离过程应用	405
16.3.3 储能应用	407