

国防科技图书出版基金资助

超重力化工 过程与技术

CHAOZHONGLI HUAGONG
GUOCHENG YU JISHU

刘有智 著

本书特色：

- ◆ 阐述超重力技术的产生与发展；
- ◆ 总结超重力领域的最新研究成果和精华；
- ◆ 详述了超重力在化工单元操作以及化学反应工程的研究和应用；
- ◆ 引入了大量的工程应用实例，具有较强的理论基础和工业应用指导价值。



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科技图书出版基金资助

超重力化工过程与技术

Chemical Engineering Process and Technology in High Gravity

刘有智 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

超重力化工过程与技术/刘有智著. —北京:国防工业出版社,2009.1

ISBN 978-7-118-06081-2

I. 超... II. 刘... III. 化工过程 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 189571 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 17½ 字数 323 千字

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 陈冀胜

序

超重力场被用于相间分离,无论在日常生活还是在工业应用上,都已有相当长的历史。但作为一项特定的手段用于传质过程的强化,引起工业界重视是 20 世纪 70 年代后期出现的“Higee”技术,即超重力技术。这项技术的基本原理就是利用旋转造成一种稳定的、可以调节的超重力场,以替代常规重力场,实质就是利用超重力作用强化传递与微观混合的高效多相反应与分离技术。超重力技术在化工过程中已发掘和尚潜在的功能将促进化学工程科学与技术的新发展。

山西省超重力化工工程技术研究中心自 20 世纪 90 年代初以来围绕超重力技术在各个化工过程中的应用展开了大量卓有成效的工作,取得了一系列具有国际领先或国际先进水平的研究成果,并且首次提出了用于液-液快速混合、快速反应的撞击流-旋转填料床(IS-RPB)技术,多项科技成果获省部级及以上的奖励,其中“超重力法吹脱氨氮废水”项目被列入 2002 年度国家科技成果重点推广计划,并被科技部计划发展司授予“超重力法吹脱氨氮废水示范工程”的依托单位证书。

《超重力化工过程与技术》一书全面总结了中北大学在这一领域的研究成果和精华。本书阐述了超重力技术的产生与发展,从化学工程的角度出发,详细介绍了超重力在化工单元操作以及化学反应工程领域的研究和应用,并且引入了大量的工程应用实例,将理论分析与实际应用紧密结合,具有较强的理论基础和工业应用指导价值。本书内容充实,层次分明,具有鲜明的特色,可作为化学工程及相关领域高年级本科生、研究生和科研技术人员的教材或参考书目。

本书的出版,将对人们了解和掌握这门新兴技术提供了很好的工具,将促进超重力技术在更多领域的应用,将对化学工程技术的发展起到积极的促进作用。



院士

前 言

超重力技术(Higee),作为一个全新的技术正日益受到各个领域科学工作者的重视。在地球上,自然界的很多规律都受到地球重力场的作用,作为一个极端的物理条件,超重力环境为各学科的研究注入了新的活力。虽然超重力技术的实质是离心力场的作用,但该技术与以往的传统复相分离或密度差分离有质的区别,它的核心在于对传递过程的极大强化。

化工过程强化是国内外化工界长期奋斗的目标,近年来更加引起了人们的重视。所谓的化工过程强化就是在实现既定生产目标的前提下,通过大幅度减小生产设备的尺寸、减少装置的数目等方法来使工厂布局更加紧凑合理,单位能耗更低,废料、副产品更少。广义上说,过程强化包括新装置和新工艺方法的发展。在美国等许多发达国家,化工过程强化被列为当前化学工程优先发展的三大领域之一。现在越来越多的过程强化研究人员已不满足于渐进式的变革,认为从已有设备中“挤”出百分之几的效率意义不大,而应通过化工过程强化,从设备体积、产业化周期、能耗、物耗和环保等方面入手,实现工厂生产效率的突破性进展,使21世纪化学工业的面貌出现全面的改变。超重力技术采用高速旋转的填料床来强化传热、传质过程,可望用于许多化工单元操作,实现大型塔器的小型化。相对于传统的化工过程和设备,超重力装置及工艺可大幅度提高设备效率、显著减小设备尺寸、降低能耗和减少废料的生成,并最终达到提高生产效率、降低生产成本、提高安全性和减少环境污染的目的。

本书是作者科研成果的结晶。在科研及此书撰写过程中得到许多同行和专家的鼓励和帮助。陈冀胜院士和金涌院士给予大力推荐并提出了许多宝贵建议;国家自然科学基金委、国防科工委和解放军总装备部、山西省科技厅及基金委、山西省经委技术创新处、山西省教育厅等在超重力技术研究的过程中给予了极大的支持;天脊煤化工集团的荆宏健总工程师、中国兵器集团总公司五洲工程设计研究院周瑞明设计师、化工部第二设计研究院李大尚设计师等在超重力技术工程化应用方面给予有力的指导和帮助;李裕、祁贵生、焦纬洲、栗秀萍、赵海红、袁志国等博士研究生和李艳、申红艳、章德玉等硕士研究生为本书出版付出了极大的辛苦,这里,一并衷心地表示感谢。

最值得提出的是,本书引用和参考了不少文献,从中吸取了丰富的营养,可以说没有他们的奉献,本书确实是难以问世的。在此,对这些中外专家、学者表示崇

高的敬意。作者还要感谢进行书评和审定的各位专家以及出版社的领导和同志们。

本书主要讲解了超重力技术的产生与发展,从化学工程的角度出发,详细介绍了超重力技术在化工过程及化学反应工程领域的研究和应用,并且引入了大量的工程应用实例,将理论分析与实际应用紧密结合,具有较强的理论基础和工业应用指导价值。本书内容充实,层次分明,具有鲜明的特色。可作为大学生、研究生、科研技术人员和企业工程师的教材及参考书。

作 者
2008 年 6 月

目 录

第0章 绪论	1
0.1 超重力技术概述	1
0.1.1 超重力场的基本概念	1
0.1.2 超重力场的实现	4
0.1.3 超重力技术的特点	4
0.2 超重力装置的结构与类型	5
0.2.1 逆流型旋转填料床结构及工作原理	5
0.2.2 错流型旋转填料床结构及工作原理	6
0.2.3 撞击流—旋转填料床结构及工作原理	7
0.2.4 超重力装置的主要结构与设计	8
0.3 超重力技术的发展与应用	9
0.3.1 国外研究与应用情况	9
0.3.2 国内研究与应用情况	11
0.3.3 超重力工程化应用	14
参考文献	15

第一篇 超重力场下气—液接触与反应

第1章 流体力学	20
1.1 超重力场液体流动形态	20
1.1.1 液体流动形式	20
1.1.2 液体流动模型	22
1.1.3 液膜厚度	23
1.1.4 持液量	24
1.1.5 液滴直径	25
1.1.6 平均径向速度	25
1.1.7 超重力装置中传递过程的端效应	25

1.2	超重力装置的气相压降性能	26
1.2.1	概述	26
1.2.2	气液逆流操作的气相压降	27
1.2.3	气液错流操作的气相压降	32
1.2.4	气相压降模型	39
1.3	超重力场下液泛现象	43
1.3.1	逆流超重力装置的液泛现象	43
1.3.2	错流超重力装置的液泛现象	44
	参考文献	44
第2章	传热	47
2.1	超重力换热器中冷热流体的传热与传质过程	47
2.1.1	过程传递的方向(以空气和水体系为例)	47
2.1.2	热空气直接与水换热过程的传热与传质过程分析	48
2.1.3	空气直接冷却热水的传热与传质过程分析	49
2.2	超重力换热器中传热与传质过程的计算	50
2.2.1	传热计算	50
2.2.2	热、质同时传递过程的计算	52
2.3	超重力换热器	58
2.3.1	结构及分类	58
2.3.2	传热面积	59
2.4	气液热交换模型	60
2.4.1	逆流超重力换热器传热传质模型	60
2.4.2	错流超重力换热器传热传质模型	65
2.5	影响传热效率的因素	68
2.5.1	影响因素的分析	68
2.5.2	气液间传热	69
2.5.3	传热影响因素的总结	70
	参考文献	70
第3章	吸收	73
3.1	超重力场传质理论	74
3.1.1	CO ₂ —NaOH 溶液体系反应特性分析	74

3.1.2	气液逆流接触传质特性	75
3.1.3	气液错流接触传质特性	82
3.1.4	超重力场传质模型	88
3.2	超重力场吸收实例	91
3.2.1	超重力场中净化硝烟	91
3.2.2	超重力法脱除二氧化碳体系中的硫化氢	93
3.2.3	超重力法脱除煤气中的硫化氢	98
3.2.4	超重力法吸收醋酸尾气研究	99
	参考文献	101
第4章	解吸	103
4.1	氨解吸传质速率影响因素的理论分析	103
4.1.1	氨解吸传质推动力	104
4.1.2	氨解吸传质阻力	106
4.2	超重力场吹脱氨氮废水实验	107
4.2.1	实验工艺流程	107
4.2.2	总体积传质系数理论计算	107
4.3	体积传质系数及传质单元高度实验结果分析	109
4.3.1	操作参数对体积传质系数的影响	110
4.3.2	操作参数对传质单元高度的影响	110
4.4	操作参数对氨氮吹脱率的影响	111
4.4.1	超重力因子对氨氮吹脱率的影响	111
4.4.2	气液比对氨氮吹脱率的影响	112
4.4.3	物性因素对氨氮吹脱率的影响	113
4.4.4	最适宜的氨氮吹脱工艺	113
4.5	超重力技术处理焦化氨氮废水中试研究	114
4.5.1	实验装置和工艺流程	114
4.5.2	操作参数对氨氮脱除率的影响	115
	参考文献	117
第5章	精馏	118
5.1	超重力场精馏原理及装备	118
5.1.1	超重力场精馏原理	118

5.1.2	超重力场精馏装置及流程	119
5.2	超重力场精馏过程的质量传递性能	123
5.2.1	操作参数对超重力场精馏过程传质性能的影响	124
5.2.2	不同填料的质量传递性能	127
5.2.3	不同结构转子的质量传递性能	130
5.3	超重力场精馏过程动量传递性能	132
5.4	超重力精馏技术与传统精馏技术的比较	134
	参考文献	135
第6章	脱挥	136
6.1	聚合物脱挥基础	136
6.1.1	脱挥热力学	136
6.1.2	脱挥过程的基本理论	138
6.2	超重力脱挥过程及模型	139
6.2.1	超重力脱挥过程	139
6.2.2	超重力脱挥理论模型	139
6.3	超重力法脲醛树脂脱挥实验	142
6.3.1	超重力脱挥设备及流程	142
6.3.2	工艺条件对甲醛脱除率的影响	143
6.3.3	结论	145
	参考文献	145
第7章	多相分离	147
7.1	概述	147
7.2	超重力场多相分离原理	147
7.2.1	气—固分离原理	147
7.2.2	气—液分离原理	148
7.3	超重力场气—固分离过程	149
7.3.1	各种因素对除尘率的影响	149
7.3.2	超重力除尘装置与传统除尘设备性能比较	151
7.4	超重力场气—液分离过程	152
7.4.1	硝酸磷肥含湿气体净化过程	153
7.4.2	除湿方法	154

7.4.3 工艺流程	155
7.4.4 除湿效果	156
参考文献	157
第8章 气—液反应器	158
8.1 气液反应传质基础	158
8.2 反应器特性方程	164
8.2.1 基本假设	164
8.2.2 数学模型	164
8.2.3 模型计算	164
8.3 超重力气—液反应器制备纳米氢氧化铝	166
8.3.1 基础理论	166
8.3.2 工艺流程	166
8.3.3 结果分析	167
参考文献	168

第二篇 超重力场下液—液接触与反应

第9章 微观混合	172
9.1 液—液混合机制	172
9.1.1 层流混合与湍流混合	172
9.1.2 均相与非均相液—液混合	173
9.2 撞击流—旋转填料床装置及操作	175
9.2.1 撞击流—旋转填料床	175
9.2.2 撞击流—旋转填料床设计原则	175
9.2.3 撞击流—旋转填料床内流体流动及混合	176
9.3 撞击流—旋转填料床微观混合效果测试与研究方法	177
9.3.1 微观混合效果研究方法	177
9.3.2 撞击流—旋转填料床微观混合性能测试方法	179
9.4 撞击流—旋转填料床微观混合性能研究结果	182
9.4.1 各因素对微观混合效果的影响规律	182
9.4.2 微观混合性能对比	186
9.4.3 微观混合特性对宏观混合特性的影响	187
9.5 微观混合模型	188

9.5.1	微观混合模型简介	188
9.5.2	撞击流—旋转填料床内模型的描述	189
9.5.3	模拟结果与实验结果的比较	190
	参考文献	191
第10章	萃取	193
10.1	撞击流—旋转填料床萃取原理	193
10.1.1	萃取原理	193
10.1.2	撞击流—旋转填料床萃取过程	193
10.2	撞击流—旋转填料床萃取工艺与流程	194
10.2.1	单级萃取过程	195
10.2.2	多级萃取过程	195
10.3	撞击流—旋转填料床萃取过程计算	196
10.3.1	操作线方程	196
10.3.2	撞击流—旋转填料床萃取效果的表征	197
10.3.3	撞击流—旋转填料床多级萃取过程的计算	198
10.4	撞击流—旋转填料床萃取传质性能	198
10.4.1	化学萃取过程萃取传质性能	199
10.4.2	物理萃取传质性能	203
10.4.3	撞击流—旋转填料床对萃取过程的强化	203
10.4.4	萃取传质与混合	205
10.5	撞击流—旋转填料床其他萃取特性	209
10.5.1	液体的存在形式	209
10.5.2	物料停留时间	210
10.5.3	溶剂滞留量	210
10.5.4	处理能力	210
10.5.5	适应性	211
10.6	撞击流—旋转填料床在萃取过程中的应用	211
10.6.1	处理含酚废水	211
10.6.2	浓缩醋酸	215
10.6.3	萃取铜	216
	参考文献	217

第 11 章 液膜制备与分离	219
11.1 概述	219
11.2 撞击流—旋转填料床液膜制备技术	222
11.2.1 制备原理	222
11.2.2 制备工艺	222
11.2.3 液膜特性	223
11.3 撞击流—旋转填料床液膜分离技术	223
11.3.1 分离原理	223
11.3.2 分离工艺	224
11.3.3 处理含酚废水	225
11.3.4 分离特性	233
11.4 不同制膜方法对液膜分离效果的比较	233
11.4.1 对制乳效果对比	233
11.4.2 对提取效果(脱酚率)对比	235
参考文献	236
第 12 章 液—液反应器	238
12.1 液滴间反应过程	238
12.2 液—液混合对反应的影响	240
12.2.1 流体的混合态	240
12.2.2 流体的混合态对反应过程的影响	240
12.3 相间传质系数	244
12.4 撞击流—旋转填料床反应器特征方程	244
12.4.1 基础假设	244
12.4.2 模型建立	245
12.5 微观混合特征时间	245
12.6 撞击流—旋转填料床反应器制备纳米 2,4-二羟基苯甲酸铜	247
12.6.1 理论基础	247
12.6.2 工艺说明	248
12.6.3 样品分析	249
12.7 撞击流—旋转填料床反应器制备纳米硫酸钡	251
参考文献	253

Content

Chapter 0 Introduction	1
0.1 Introduction to high gravity technology	1
0.1.1 Fundamental concept of high gravity fields	1
0.1.2 Realization of high gravity fields	4
0.1.3 Characteristics of high gravity technology	4
0.2 Structure and types of high gravity device	5
0.2.1 Structure and principle of counter-current flow rotating packed bed	5
0.2.2 Structure and principle of cross-flow rotating packed bed	6
0.2.3 Structure and principle of impinging stream rotating packed bed	7
0.2.4 Structure and design of high gravity device	8
0.3 Development and application of high gravity technology	9
0.3.1 Foreign research and application	9
0.3.2 Domestic research and application	11
0.3.3 Industrialization of high gravity technology	14
Reference	15

Part I Gas-liquid contact reaction in high gravity

Chapter 1 Hydrodynamics characteristics	20
1.1 Liquid flow conformation of high gravity fields	20
1.1.1 Liquid flow form	20
1.1.2 Liquid flow model	22
1.1.3 Liquid flow thickness	23
1.1.4 Liquid hold-up	24