



GREEN SOLVENTS  
AND ENERGY SAVING  
PROCESS

# 绿色介质 与过程节能

张锁江 主编



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 绿色介质与过程节能

张锁江 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

化工和冶金行业的节能任务艰巨,并且发展潜力巨大,该行业也是关系到我国中长期节能规划目标能否实现最为关键的产业部门之一。本书是在国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“大规模化工冶金过程节能的关键科学问题研究”的成果基础上编写完成的。着重介绍了在化工冶金过程中的介质创新、工艺单元、过程设备以及系统等不同层次形成的系列重要理论方法和技术,产生的科研成果被用以指导过程节能技术的开发,达到节能降耗目标,对实现我国工业生产的可持续发展具有重要意义。

本书可供从事化工、化学、材料、能源、环境等领域新技术开发的科技人员及相关专业和高等院校的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

绿色介质与过程节能. 张锁江主编. —北京:科学出版社,2014. 12  
ISBN 978-7-03-042864-6

I. ①绿… II. 张… III. ①化工过程-节能-研究 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第305475号

责任编辑:朱雨 杨科政 / 责任校对:刘亚琦 张凤琴

责任印制:肖兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2015年1月第一次印刷 印张:39 插页:6

字数:900 000

定价:188.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《绿色介质与过程节能》编写人员

### 第 1 章 离子液体氢键网络结构

张锁江 董 坤 姚晓倩 (中国科学院过程工程研究所)

### 第 2 章 离子液体分子模拟及分子设计\*

刘晓敏 张晓春 (中国科学院过程工程研究所)

彭昌军 (华东理工大学)

赵玉玲 (河南师范大学)

### 第 3 章 离子液体体系相平衡

彭昌军 刘洪来 (华东理工大学)

### 第 4 章 超重力过程强化及反应传递规律

徐联宾 单南南 陈建峰 (北京化工大学)

### 第 5 章 微化工技术强化及反应传递规律

赵玉潮 陈光文 (中国科学院大连化学物理研究所)

### 第 6 章 流化床结构-传递关系理论及过程强化

李洪钟 朱庆山 邹 正 (中国科学院过程工程研究所)

### 第 7 章 离子液体体系流动及传递规律

张香平 董海峰 张 欣 鲍 迪 (中国科学院过程工程研究所)

### 第 8 章 反应-反应,反应-分离耦合过程的节能原理分析:以碳酸酯制备为例

杨伯伦 伊春海 刘敬军 (西安交通大学)

### 第 9 章 反应分离耦合的非线性特征分析

杨伯伦 齐随涛 刘敬军 (西安交通大学)

### 第 10 章 多单元耦合的典型装置分析

蒋雪冬 (西安交通大学、中国科学院过程工程研究所)

王玉华 杨 宁 (中国科学院过程工程研究所)

### 第 11 章 分离过程耦合节能原理与方法

张吕鸿 李 洪 姜 斌 (天津大学)

**第 12 章 乙二醇/碳酸酯节能新过程**

成卫国 孙 剑 王金泉 石春艳 (中国科学院过程工程研究所)

**第 13 章 氧化铝/电解铝节能新过程\*\***

张 盈 陈仕谋 张军玲 (中国科学院过程工程研究所)

**第 14 章 流化床冶金节能过程**

朱庆山 李洪钟 (中国科学院过程工程研究所)

**第 15 章 炼油分离填料、设备及过程节能**

秦 娅 王小伟 毛俊义 (中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院)

隋 红 (天津大学)

**第 16 章 高温热泵/低温发电余热利用技术**

张于峰 于晓慧 张 彦 (天津大学)

\* 感谢华东理工大学卢运祥博士参加了离子液体卤键相互作用的研究工作

\*\* 感谢安阳工学院郑勇博士参加了离子液体低温电解铝的基础研究工作

## 序 一

以过程工程为基础的过程工业形成了国民经济中众多的支柱产业,这些产业通常是高能耗产业,节能任务艰巨,发展潜力巨大。张锁江研究员作为首席科学家所主持的“973”计划项目“大规模化工冶金过程节能的关键科学问题研究”(2009CB219900),开展了介质构效关系、传递强化及系统集成三个层次的具有原始创新性的基础研究,形成了化工冶金过程节能的共性理论和方法;开展了离子液体在温和转化中的应用、超重力/微反/流化床强化,以及余热利用和过程耦合系统集成的研究,建立了化工冶金节能技术研发平台;开展了乙二醇、炼油、钒钛矿、贫铁矿、余热发电等节能工艺过程的研究,建立了多项节能中试装置或示范工程,在所试验的范围内平均能耗降低 20%以上。上述研究为我国化工冶金过程节能提供了科学基础。

《绿色介质与过程节能》一书,总结了该“973”计划项目执行期间在理论和应用方面取得的研究成果,内容丰富、信息量大,对解决化工冶金行业高能耗问题具有重要指导意义,对相关行业节能技术的开发也具有重要的参考价值。



2014年8月29日

## 序 二

化工和冶金行业是我国的支柱产业,总产值约占全国工业 GDP 的 20%~30%,同时也是我国工业能耗最大的行业,其中冶金、化工的能耗分别占工业总能耗的 21.6%和 16.8%,高居全国工业能耗的第一和第二位。我国工业目前正处于产业结构调整 and 转型升级、实现绿色与可持续发展的关键时期,以典型高能耗的化工和冶金过程为对象开展节能研究不仅是国家的战略需求,也是化工和冶金学科发展的前沿。为此科技部设立了国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“大规模化工冶金过程节能的关键科学问题研究”(2009CB219900),在首席科学家张锁江研究员的带领下,来自高校、科研院所和企业的科研人员经过 5 年的勤奋工作,在基础研究和工业应用两方面都取得了国内外一流的研究成果。

该书以“绿色介质与过程节能”为书名,对上述“973”计划项目的研究成果进行了系统而详细的总结。在基础研究方面,该书分反应介质、反应与分离设备、流程系统三个层次进行了理论与阐述。反应介质以离子液体为重点开展了深入的研究,对离子液体的氢键网络结构及其构效关系有了深层次的认识,进而研制出离子液体化学负载于多种载体上的羰基化催化剂和羰基化固定床反应器,用于环氧乙烷制乙二醇的生产,同时还将离子液体作为溶剂用于三氯化铝的电解制高质铝,突显了离子液体的绿色环保节能的特点。反应与分离设备则以流化床与精馏塔为重点,同时研究了当今先进的化工过程强化技术——超重力技术和微化工技术,以及低温余热利用技术——高温热泵和低温发电技术。提出了流化床介尺度结构与“三传一反”定量关系的流化床构效关系理论并成功用于指导流化床的模拟和优化操作,为流化床的过程强化与节能提供了理论基础,同时还研究了内构件和外磁场对流化床过程强化的机理和作用,成功应用于工业设备。创立了多效精馏、热耦精馏和差压热耦合蒸馏等节能的新理论和新方法,提出了炼油的梯级蒸馏、减压深拔、节能填料、节能塔板等节能新技术,并实现了工业应用。流程系统则深入研究了反应-反应、反应-分离耦合的节能原理,多尺度系统集成的理论,建立了能量优化利用的新理论和新方法。“973”计划项目是侧重于应用导向的基础研究,因此研究人员在深入进行基础研究的同时,还尽力将基础研究的成果应用于工业生产。本书总结了部分工业应用的成果,如离子液体为催化剂制取乙二醇,流化床取代回转窑实现贫铁矿的磁化焙烧、钛精矿的氧化还原焙烧等项目成功地完成了工业中间试验,节能效果显著;应用本研究的多项分离科研成果,成功设计并建造了我国首套 800 万吨/年,直径 10.2 m 的大型常减压蒸馏装置,达到国际先进水平。高温热泵技术成功应用于天津某小区的供暖系统,低温余热发电成功取代某精馏系统的冷凝器实现了低温余热发电。

该书介绍的化工冶金节能的理论成果和应用成果代表了当前国内外的先进水平,这

些成果的推广与应用,必将对我国化工冶金行业的节能和实现转型升级起到重要的推动作用,为我国创新驱动发展的战略做出积极的贡献。该书可作为高校、科研单位以及工业企业从事化工冶金的科技人员的重要参考文献,也可作为高等学校的教学参考书,相信该书的读者一定受益匪浅。



2014年9月3日



## 前 言

我国目前面临着经济快速增长和能源资源环境有限的突出矛盾,《国家“十一五”科学技术发展规划》提出了“突破节能关键技术,为实现单位国内生产总值能耗降低 20% 的目标提供支撑”的战略目标,而要实现这一目标,则面临巨大挑战,迫切需要在全行业,尤其是在高能耗行业开展节能降耗的基础理论及工业应用研究,为我国实现可持续发展提供充足的能源保障。

化工和冶金行业是我国的基础和支柱产业,总产值约占全国工业 GDP 的 20%~30%,也是我国工业能耗最大的部门,其中冶金、化工能耗分别占工业总能耗的 21.6% 和 16.8%,居全国工业能耗的第一和第二位。因此,化工和冶金行业的节能任务艰巨,并且发展潜力巨大。以典型高能耗化工过程为对象开展节能研究不仅是国家的战略需求,也是化工、冶金及相关学科发展的前沿。国内外已对化工、冶金等高能耗行业节能技术进行了大量研究,但基本上都是针对具体行业中单个典型的高能耗设备、工艺、换热网络进行研究,局限于某一个行业内的单项节能技术研究,没有从过程的共性出发来归纳总结节能的理论和方法,特别是缺乏从分子层次来深入分析过程高能耗的主要原因及发现改进方法。此外,尚未涉及从过程耦合和生态工业的角度来进行不同行业间的系统节能研究,对工艺、过程、系统(包括不同行业间)不同层次的节能机理和关系缺乏全面深入的研究。未能形成共性的科学理论基础和前沿关键技术系列,制约成为我国过程工业节能技术发展的“瓶颈”。

本书是在国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“大规模化工冶金过程节能的关键科学问题研究”(2009CB219900)的成果基础上编写完成的。本书以占全国总能耗约一半的石油化工、冶金高耗能工业过程作为切入点,归纳、凝练过程节能的共性关键基础科学问题,通过这些关键基础科学问题的解决来指导过程节能技术的开发,目标是形成大规模、高能耗化工和冶金过程的节能新理论和新方法。

本书的研究核心分为反应、过程、系统三个层次的三个关键科学问题:①反应本征特征与介质分子结构之间的关系。创建新工艺和新路线的核心是催化介质/材料,只有建立物系本征特征与分子/介观结构之间的关系,才能有效地设计和调控新介质和新材料,研究开发温和条件下物质转化的节能新过程。②过程传递规律与结构/界面之间的关系及调控规律。单元/过程节能的关键是开发新型结构设备和强化技术,以提高反应和传递效率、减少能量消耗,需要重点解决系统反应-传递规律与场结构效应的匹配性问题,建立单元过程强化节能新方法和工程放大大规律。③多过程耦合及多尺度系统集成的理论和方法。多过程耦合节能的关键是获得能量转化、传输和耗散的规律,建立能量优化利用的新理论和新方法,实现全系统的节能降耗。

项目在执行中,紧紧围绕上述关键科学问题开展研究,获得了离子液体介质的微观结构及其对性能的影响规律,建立了若干离子液体体系的构效关系;研究了超重力、微反应

器、内构件等强化单元设备和过程的机理和机制,为过程强化节能提供科学基础;研究了反应-反应耦合、梯级分离、低温余热利用的新方法,发展了大规模体系的物质-能量集成的模型及模拟方法;开展了乙二醇、炼油、钒钛矿/贫铁矿等节能工艺过程的研究,建立了多项工业节能中试装置或示范工程。以上研究成果将为我国过程工业的节能减排提供重要的指导。

本书是由众多专家学者共同努力编写完成的,特此感谢!参与撰写人员如下(按姓氏汉语拼音排序):鲍迪、陈光文、陈建峰、陈仕谋、成卫国、董坤、董海峰、姜斌、蒋雪冬、李洪、李洪钟、刘洪来、刘敬军、刘晓敏、卢运祥、毛俊义、彭昌军、齐随涛、秦娅、单南南、石春艳、隋红、孙剑、王金泉、王小伟、王玉华、徐联宾、杨宁、杨伯伦、姚晓倩、伊春海、于晓慧、张欣、张彦、张盈、张军玲、张吕鸿、张锁江、张晓春、张香平、张于峰、赵玉潮、赵玉玲、郑勇、朱庆山、邹正。本书是在征求各位课题组负责人的基础上由项目首席科学家张锁江提出思路和提纲,并由张锁江、张香平和石春艳完成各章协调和全书的整理、统稿。

在此谨向所有参与本书编写及创作的人员表示感谢!本书难免有不足之处,敬请广大读者不吝赐教!

张锁江

2013年9月5日

# 目 录

序一  
序二  
前言

## 第一篇 离子液体的构效关系

|   |    |
|---|----|
| 第 1 章 离子液体氢键网络结构                              | 3  |
| 1.1 离子对间的氢键结构特点                               | 3  |
| 1.2 相互作用                                      | 6  |
| 1.3 电荷分布及轨道作用                                 | 10 |
| 1.4 离子簇和氢键网络结构                                | 14 |
| 1.4.1 离子簇                                     | 14 |
| 1.4.2 氢键的网络结构                                 | 17 |
| 第 2 章 离子液体分子模拟及分子设计                           | 23 |
| 2.1 离子液体的力场构建及分子动力学模拟                         | 23 |
| 2.1.1 分子力学力场                                  | 23 |
| 2.1.2 离子液体的分子模拟                               | 27 |
| 2.2 离子液体气液混合体系的分子动力学模拟                        | 33 |
| 2.3 离子液体与纤维素溶液体系的分子模拟                         | 39 |
| 2.3.1 离子液体溶解纤维素的机理研究                          | 40 |
| 2.3.2 各种因素对离子液体溶解纤维素能力的影响规律                   | 41 |
| 2.4 COSMO 模型在离子液体筛选与设计中的应用                    | 48 |
| 2.4.1 COSMO-SAC 模型预测离子液体相平衡                   | 49 |
| 2.4.2 基于 COSMO 模型筛选易促进乙腈水溶液分离的离子液体            | 51 |
| 2.4.3 基于 COSMO 模型设计捕集 CO <sub>2</sub> 气体的离子液体 | 55 |
| 第 3 章 离子液体体系相平衡                               | 59 |
| 3.1 缔合立方型状态方程                                 | 59 |
| 3.2 链流体状态方程                                   | 62 |
| 3.2.1 缔合变阱宽方阱链流体状态方程                          | 63 |
| 3.2.2 电解质型变阱宽方阱链流体状态方程                        | 67 |
| 3.3 格子流体状态方程                                  | 71 |
| 3.4 发展方向及展望                                   | 75 |
| 参考文献  | 77 |

## 第二篇 过程强化与反应传递规律

|  |     |
|--|-----|
| <b>第 4 章 超重力过程强化及反应传递规律</b> .....                            | 91  |
| 4.1 超重力技术在电化学反应过程中的应用 .....                                  | 91  |
| 4.1.1 超重力在电解水中的应用 .....                                      | 92  |
| 4.1.2 超重力在电沉积方面的应用 .....                                     | 92  |
| 4.2 超重力强化铝电沉积过程的研究 .....                                     | 93  |
| 4.2.1 引言 .....   | 93  |
| 4.2.2 超重力场下 $\text{AlCl}_3$ -BMIC 离子液体电沉积 Al 的电化学研究 .....    | 93  |
| 4.2.3 超重力场下 $\text{AlCl}_3$ -BMIC 离子液体电沉积 Al 的形貌与结构研究 .....  | 98  |
| 4.3 超重力和添加剂对铝电沉积过程的协同影响研究 .....                              | 100 |
| 4.3.1 引言 .....   | 100 |
| 4.3.2 超重力场下甲苯添加剂对 $\text{AlCl}_3$ -BMIC 离子液体电沉积 Al 的影响 ..... | 101 |
| 4.4 发展方向与展望 .....  | 105 |
| <b>第 5 章 微化工技术强化及反应传递规律</b> .....                            | 106 |
| 5.1 常压下微通道内气-液两相流动特性 .....                                   | 106 |
| 5.1.1 Y 型微通道内气-液两相流流型 .....                                  | 106 |
| 5.1.2 Y 型微通道内 Taylor 流区域的气泡与液弹长度 .....                       | 108 |
| 5.1.3 Y 型微通道内 Taylor 流区域的气泡速度与产生频率 .....                     | 111 |
| 5.2 常压下三入口枝杈型微通道内的气-液两相流动特性 .....                            | 113 |
| 5.2.1 $\text{N}_2$ -纯水体系的两相流动特性 .....                        | 113 |
| 5.2.2 空气-水体系的气-液两相弹状流区域气泡长度特性 .....                          | 115 |
| 5.2.3 $\text{N}_2$ -离子液体水溶液体系的两相流动特性 .....                   | 120 |
| 5.2.4 $\text{CO}_2$ -NaOH 水溶液体系的两相流动特性 .....                 | 123 |
| 5.3 高压下 T 型微通道内气-液两相流动特性 .....                               | 125 |
| 5.3.1 高压下气-液两相流型 .....                                       | 125 |
| 5.3.2 高压下微通道内弹状流气泡生成过程 .....                                 | 129 |
| 5.4 多通道并行气-液微反应器内流动及传质特性 .....                               | 130 |
| 5.5 微反应器内环氧丙烷与 $\text{CO}_2$ 反应合成碳酸丙烯酯的过程研究 .....            | 137 |
| 5.5.1 反应温度对 PC 收率及时空收率的影响 .....                              | 137 |
| 5.5.2 停留时间对 PC 收率及时空收率的影响 .....                              | 138 |
| 5.5.3 反应压力对 PC 收率及时空收率的影响 .....                              | 139 |
| 5.5.4 $\text{CO}_2/\text{PO}$ 摩尔比对 PC 收率的影响 .....            | 140 |
| 5.5.5 PO 中 HETBAB 浓度对 PC 收率的影响 .....                         | 141 |
| 5.6 展望 .....   | 142 |
| <b>第 6 章 流化床结构-传递关系理论及过程强化</b> .....                         | 144 |
| 6.1 引言 .....   | 144 |
| 6.2 气固鼓泡流化床结构预测模型 .....                                      | 145 |

|             |                                 |            |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 6.2.1       | 鼓泡流化床流动结构参数                     | 146        |
| 6.2.2       | 鼓泡流化床七个流动结构参数的求解                | 147        |
| 6.3         | 气固鼓泡流化床局部流动结构与传递关系模型            | 150        |
| 6.3.1       | 鼓泡流化床不均匀结构的分解-合成                | 150        |
| 6.3.2       | 鼓泡流化床动量传递的曳力系数模型                | 151        |
| 6.3.3       | 鼓泡流化床质量传递的传质系数模型                | 152        |
| 6.3.4       | 鼓泡流化床热量传递的传热系数模型                | 155        |
| 6.3.5       | 热源与热汇                           | 158        |
| 6.4         | 鼓泡流化床结构-传递关系模型的实验验证             | 158        |
| 6.4.1       | 计算机模拟和实验的方法                     | 158        |
| 6.4.2       | B类物料的实验与模拟结果对比                  | 158        |
| 6.4.3       | A类物料的实验与模拟结果对比                  | 161        |
| 6.4.4       | C类物料的实验与模拟结果对比                  | 162        |
| 6.5         | 快速流化床结构预测模型                     | 167        |
| 6.5.1       | 快速流化床的局部结构                      | 167        |
| 6.5.2       | 快速流化床的局部结构预测模型                  | 167        |
| 6.6         | 快速流化床局部流动结构与传递关系模型              | 173        |
| 6.6.1       | 快速流化床不均匀结构的分解与合成                | 173        |
| 6.6.2       | 快速流化床动量传递的曳力系数模型                | 174        |
| 6.6.3       | 快速流化床质量传递的传质系数模型                | 175        |
| 6.6.4       | 快速流化床热量传递的给热系数模型                | 176        |
| 6.7         | 快速流化床结构-传递关系模型的实验验证             | 176        |
| 6.7.1       | 计算机模拟和文献实验数据的对比                 | 176        |
| 6.7.2       | 计算机模拟和本研究实验数据的对比                | 180        |
| 6.8         | 磁场强化流化床传质与反应过程                  | 183        |
| 6.8.1       | 强化流化床传质与反应过程的途径                 | 183        |
| 6.8.2       | 磁场强化流化床传质与反应过程                  | 183        |
| <b>第7章</b>  | <b>离子液体体系流动及传递规律</b>            | <b>186</b> |
| 7.1         | 单气泡流体动力学实验研究                    | 186        |
| 7.1.1       | 实验数据计算方法                        | 187        |
| 7.1.2       | 离子液体中气泡形状                       | 188        |
| 7.1.3       | 离子液体中气泡变形关联式                    | 193        |
| 7.1.4       | 气泡上升速度                          | 196        |
| 7.1.5       | 离子液体中气泡运动的曳力系数关联式               | 199        |
| 7.2         | 多气泡流体动力学实验研究                    | 204        |
| 7.2.1       | 气泡平均直径的计算                       | 204        |
| 7.2.2       | [Bmim][BF <sub>4</sub> ]中气泡平均直径 | 205        |
| 7.2.3       | 气泡平均直径关联                        | 208        |
| <b>参考文献</b> |                                 | <b>209</b> |

### 第三篇 反应-分离多单元耦合节能

|               |  |     |
|---------------|--|-----|
| <b>第 8 章</b>  | <b>反应-反应,反应-分离耦合过程的节能原理分析:以碳酸酯制备为例</b> | 219 |
| 8.1           | 反应吸收耦合过程制备碳酸乙烯酯                        | 219 |
| 8.1.1         | 氨气在磷酸溶液中鼓泡吸收过程的多场协同分析                  | 220 |
| 8.1.2         | 数值模拟结果与讨论                              | 221 |
| 8.2           | 反应器与精馏塔外耦合法制备碳酸二乙酯                     | 223 |
| 8.2.1         | 气液相平衡计算                                | 223 |
| 8.2.2         | 实验装置及操作                                | 224 |
| 8.2.3         | 结果与讨论                                  | 224 |
| 8.3           | 过程的能耗分析                                | 228 |
| 8.3.1         | 尿素醇解法制备 DEC 的能耗                        | 229 |
| 8.3.2         | 反应分离耦合过程制备 DEC 的能耗                     | 230 |
| <b>第 9 章</b>  | <b>反应分离耦合的非线性特征分析</b>                  | 233 |
| 9.1           | 反应精馏的多场协同                              | 233 |
| 9.1.1         | 场协同理论的热力学基础                            | 233 |
| 9.1.2         | 反应精馏过程的场协同分析                           | 234 |
| 9.1.3         | 强化传递过程的场协同效应                           | 238 |
| 9.1.4         | 基于场协同分析的反应精馏非平衡级模型                     | 239 |
| 9.1.5         | 实验验证                                   | 244 |
| 9.1.6         | 结果与讨论                                  | 247 |
| 9.2           | 基于超熵产生理论的反应精馏系统多稳态分析                   | 251 |
| 9.2.1         | 引言                                     | 251 |
| 9.2.2         | 反应精馏系统的热力学模型及定态稳定性判据                   | 252 |
| 9.2.3         | 结果与讨论                                  | 257 |
| 9.3           | 反应精馏过程的多尺度分析                           | 259 |
| 9.3.1         | 多尺度模型的建立                               | 260 |
| 9.3.2         | 多尺度模型的求解                               | 263 |
| 9.3.3         | 结果与讨论                                  | 266 |
| <b>第 10 章</b> | <b>多单元耦合的典型装置分析</b>                    | 275 |
| 10.1          | 研究现状与进展                                | 275 |
| 10.2          | 鼓泡塔流体力学模型                              | 277 |
| 10.2.1        | 气含率与气泡特性                               | 277 |
| 10.2.2        | 气液两相流型                                 | 282 |
| 10.3          | 双气泡模型                                  | 284 |
| 10.3.1        | 能耗分解反稳定条件                              | 284 |
| 10.3.2        | 预测流型过渡                                 | 287 |
| 10.3.3        | 黏度和表面张力对流型的影响                          | 291 |
| 10.3.4        | 两种气泡对气液体系的控制作用                         | 293 |

|               |                            |            |
|---------------|----------------------------|------------|
| 10.4          | DBS 模型与 CFD 耦合 .....       | 299        |
| 10.4.1        | 计算流体力学模型 .....             | 299        |
| 10.4.2        | 传统的曳力模型 .....              | 300        |
| 10.4.3        | DBS 曳力模型 .....             | 304        |
| 10.5          | 鼓泡塔内传质反应的模拟 .....          | 307        |
| 10.5.1        | 模型概述 .....                 | 307        |
| 10.5.2        | 不同单气泡和双气泡模型的对比 .....       | 309        |
| 10.5.3        | 双气泡理想反应器模型与 DBS 模型耦合 ..... | 319        |
| <b>第 11 章</b> | <b>分离过程耦合节能原理与方法 .....</b> | <b>324</b> |
| 11.1          | 多效精馏 .....                 | 324        |
| 11.1.1        | 多效精馏原理 .....               | 324        |
| 11.1.2        | 多效精馏应用遵循原则 .....           | 327        |
| 11.1.3        | 多效精馏流程 .....               | 328        |
| 11.1.4        | 多效精馏应用实例 .....             | 330        |
| 11.1.5        | 多效精馏的控制系统 .....            | 333        |
| 11.2          | 热耦精馏 .....                 | 334        |
| 11.2.1        | 热耦精馏简介 .....               | 334        |
| 11.2.2        | 热耦合精馏塔的热力学分析 .....         | 336        |
| 11.2.3        | 热耦合节能蒸馏技术 .....            | 338        |
| 11.2.4        | 热耦合精馏塔的应用 .....            | 349        |
| 11.3          | 差压热耦合蒸馏技术 .....            | 353        |
| 11.3.1        | 差压热耦合蒸馏技术的基本原理 .....       | 353        |
| 11.3.2        | 差压热耦合精馏过程的改进 .....         | 354        |
| 11.3.3        | 差压热耦合精馏技术的设计与评价 .....      | 355        |
| <b>参考文献</b>   | .....                      | <b>360</b> |

## 第四篇 典型节能工艺与技术分析

|               |  |            |
|---------------|--|------------|
| <b>第 12 章</b> | <b>乙二醇/碳酸酯节能新过程 .....</b>                    | <b>371</b> |
| 12.1          | 乙二醇和碳酸二甲酯概述 .....                            | 371        |
| 12.1.1        | 乙二醇供需现状 .....                                | 371        |
| 12.1.2        | 乙二醇生产技术现状 .....                              | 373        |
| 12.2          | 反应的基本原理 .....                                | 377        |
| 12.2.1        | 环氧乙烷(EO)与二氧化碳(CO <sub>2</sub> )反应的基本原理 ..... | 377        |
| 12.2.2        | 碳酸乙烯酯水解和醇解基本原理 .....                         | 378        |
| 12.3          | 工艺创新 .....                                   | 380        |
| 12.3.1        | 水解工艺 .....                                   | 381        |
| 12.3.2        | 醇解工艺 .....                                   | 401        |
| <b>第 13 章</b> | <b>氧化铝/电解铝节能新过程 .....</b>                    | <b>425</b> |
| 13.1          | 铝酸钠溶液节能分解理论基础 .....                          | 425        |

|               |                          |     |
|---------------|--------------------------|-----|
| 13.1.1        | 拜耳法氧化铝生产过程中铝酸钠溶液分解过程效率低下 | 425 |
| 13.1.2        | 铝酸钠溶液分解过程强化进展            | 426 |
| 13.1.3        | 介质强化铝酸钠溶液分解新方法的提出        | 427 |
| 13.1.4        | 甲醇介质强化铝酸钠溶液分解的热力学基础      | 427 |
| 13.1.5        | 甲醇介质与铝酸钠溶液相互作用的反应热力学     | 429 |
| 13.2          | 介质强化解铝酸钠溶液节能新过程          | 430 |
| 13.2.1        | 甲醇用量对醇解过程的影响             | 431 |
| 13.2.2        | 分解时间对分解率的影响              | 432 |
| 13.2.3        | 分解温度对醇解过程的影响             | 432 |
| 13.2.4        | 铝酸钠溶液初始氧化钠浓度对醇解过程的影响     | 434 |
| 13.2.5        | 铝酸钠溶液初始 MR 对醇解过程的影响      | 435 |
| 13.2.6        | 搅拌速度对醇解过程的影响             | 436 |
| 13.2.7        | 硅量指数对醇解过程的影响             | 437 |
| 13.2.8        | 甲醇滴加速度对醇解过程的影响           | 439 |
| 13.2.9        | 甲醇加料方式对醇解过程的影响           | 439 |
| 13.2.10       | 溶剂甲醇浓度对醇解过程的影响           | 440 |
| 13.2.11       | 甲醇强化铝酸钠溶液分解节能新过程的综合优化验证  | 442 |
| 13.3          | 铝冶金工业研究现状                | 443 |
| 13.4          | 离子液体低温电解铝新过程             | 444 |
| 13.4.1        | 离子液体电解质及其物理化学性质          | 444 |
| 13.4.2        | 离子液体低温电解铝电极过程            | 454 |
| 13.4.3        | 铝电解理论能耗与节能分析             | 466 |
| <b>第 14 章</b> | <b>流化床冶金节能过程</b>         | 471 |
| 14.1          | 引言                       | 471 |
| 14.2          | 流化床冶金节能原理                | 472 |
| 14.2.1        | 氧化铁还原本征动力学               | 472 |
| 14.2.2        | 流态化过程强化                  | 478 |
| 14.2.3        | 未反应气体利用                  | 485 |
| 14.2.4        | 固体显热利用                   | 486 |
| 14.3          | 攀西钛精矿流化床氧化还原焙烧过程节能       | 487 |
| 14.4          | 复杂难选铁矿流化床磁化焙烧过程节能        | 490 |
| <b>第 15 章</b> | <b>炼油分离填料、设备及过程节能</b>    | 494 |
| 15.1          | 炼油梯级蒸馏                   | 494 |
| 15.1.1        | 炼油常减压蒸馏常规三塔优化流程          | 495 |
| 15.1.2        | 梯级蒸馏节能四塔流程               | 501 |
| 15.1.3        | 梯级蒸馏节能五塔流程               | 502 |
| 15.1.4        | 各流程能耗及经济评价               | 508 |
| 15.2          | 减压深拔工艺                   | 511 |
| 15.2.1        | 原油相容性                    | 511 |



|                 |                                |            |
|-----------------|--------------------------------|------------|
| 15.2.2          | 减压深拔技术进展 .....                 | 524        |
| 15.2.3          | 强化汽化减压深拔技术 .....               | 528        |
| 15.3            | 炼油设备大型化与节能 .....               | 542        |
| 15.3.1          | 节能填料 .....                     | 542        |
| 15.3.2          | 节能塔板 .....                     | 544        |
| 15.3.3          | 其他大型塔内件 .....                  | 545        |
| 15.3.4          | 大型塔内件强度核算 .....                | 547        |
| 15.3.5          | 工业应用实例 .....                   | 552        |
| <b>第 16 章</b>   | <b>高温热泵/低温发电余热利用技术</b> .....   | <b>556</b> |
| 16.1            | 研究背景 .....                     | 556        |
| 16.1.1          | 低温热能现状 .....                   | 556        |
| 16.1.2          | 低温热利用技术 .....                  | 557        |
| 16.2            | 高温热泵余热利用技术 .....               | 558        |
| 16.2.1          | 高温热泵简介 .....                   | 558        |
| 16.2.2          | 高温工质的理论分析 .....                | 560        |
| 16.2.3          | 高温热泵的实验研究 .....                | 563        |
| 16.2.4          | 工程应用 .....                     | 566        |
| 16.3            | 低温发电余热利用技术 .....               | 576        |
| 16.3.1          | 低温发电余热技术特点 .....               | 576        |
| 16.3.2          | 技术特征及水平 .....                  | 576        |
| 16.3.3          | 低温发电技术的理论体系 .....              | 578        |
| 16.3.4          | 低温发电技术的理论基础 .....              | 578        |
| 16.3.5          | 工程应用(低温余热发电与精馏系统的联合运行试验) ..... | 581        |
| <b>参考文献</b>     | .....                          | <b>585</b> |
| <b>附录 化工符号表</b> | .....                          | <b>599</b> |
| <b>彩图</b>       |                                |            |