

化学工程手册

5

化学工业出版社

化学工程手册

5

《化学工程手册》编辑委员会

化学工业出版社

内 容 提 要

《化学工程手册》共26篇,分6卷合订出版。

本卷包括颗粒及颗粒系统、流态化、气态非均一系分离、液固分离、粉碎、分级及团聚。介绍了颗粒及颗粒系统的基础理论和其他有关的知识;介绍了流态化的流动现象及在流动中的传热、传质问题,阐述了流态化的工程问题和主要的流态化工艺;介绍了气态非均一系分离的基本原理,包括气态非均一系的性质、气溶胶颗粒动力学,还介绍了分离方法和设备构造与计算;介绍了液固分离的有关知识;介绍了粉碎、分级与团聚的生产工艺与设备。

会员委员会《化学工程手册》

化学工程手册

5

《化学工程手册》编辑委员会

*

化学工业出版社出版发行

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

南杨庄装订厂装订

新华书店北京发行所经销

*

开本787×1092^{1/16}印张94^{1/8}插页1字数2,388千字

1989年10月第1版 1989年10月北京第1次印刷

印数1—8,000

ISBN 7-5025-0652-7/TQ·387

定价43.40元

《化学工程手册》卷目

- | | |
|-------|----------------|
| ● 第1卷 | 1. 化工基础数据 |
| | 2. 化工应用数学 |
| | 3. 化工热力学 |
| ● 第2卷 | 4. 流体流动 |
| | 5. 搅拌及混合 |
| | 6. 流体输送机械及驱动装置 |
| | 7. 传热 |
| | 8. 传热设备及工业炉 |
| | 9. 蒸发及结晶 |
| ● 第3卷 | 10. 传质 |
| | 11. 蒸馏 |
| | 12. 气体吸收 |
| | 13. 气液传质设备 |
| | 14. 萃取及浸取 |
| ● 第4卷 | 15. 增湿与减湿 |
| | 16. 干燥 |
| | 17. 吸附及离子交换 |
| | 18. 薄膜过程 |
| ● 第5卷 | 19. 颗粒及颗粒系统 |
| | 20. 流态化 |
| | 21. 气态非均一系分离 |
| | 22. 液固分离 |
| | 23. 粉碎、分级及团聚 |
| ● 第6卷 | 24. 化学反应工程 |
| | 25. 化工自动控制 |
| | 26. 化工系统工程 |

《化学工程手册》编辑委员会

主 任 冯伯华

副主任 陈自新

汪家鼎

李步年

蔡剑秋

苏元复

委员 (以姓氏笔划为序)

卢焕章

区灿棋

邓颂九

朱亚杰

朱自强

余国琮

时 钧

沈 复

吴锡军

林纪方

杨友麒

张洪沅

张剑秋

郑 炯

郭慕孙

傅举孚

萧成基

《化学工程手册》编辑人员

郭长生

谢丰毅

施承薇

张红兵

陈逢阳

苗延秀

苗润生

陈志良

陈丽

郭乃铎

刘小蘋

李洪勋

主编

副主编

编委

编委

编委

编委

编委

编委

编委

编委

序

化学工程是以物理、化学、数学的原理为基础,研究化学工业和其他化学类型工业生产中物质的转化、改变物质的组成、性质和状态的一门工程学科。它出现于19世纪下半叶,至本世纪二十年代,从理论上分析和归纳了化学类型(化工、冶金、轻工、医药、核能……)工业生产的物理和化学变化过程,把复杂的工业生产过程归纳成为数不多的若干个单元操作,从而奠定了其科学基础。在以后的发展历程中,进而相继出现了化工热力学、化学反应工程、传递过程、化工系统工程、化工过程动态学和过程控制等新的分支,使化学工程这门工程学科具备更完整的系统性、统一性,成为化学类型工业生产发展的理论基础,是本世纪化学类型工业持续进展的重要因素。

工业的发展,只有建立在技术进步的基础上,才能有速度、质量和水平。四十年代初,流态化技术应用于石油催化裂化过程,促使石油工业的面貌发生了划时代的变化。用气体扩散法提取铀²³⁵,从核燃料中提取钚,用精密蒸馏方法从普通水中提取重水;用发酵罐深层培养法大规模生产青霉素;建立在现代化工技术基础上的石油化学工业的兴起等等,——这些使人类生活面貌发生了重大变化。六十年代以来,化工系统工程的形成,系统优化数学模型的建立和电子计算机的应用,为化工装置实现大型化和高度自动化,最合理地利用原料和能源创造了条件,使化学工业的科研、设计、设备制造、生产发展踏上了一个技术上的新台阶。化学工程在发展过程中,既不断丰富本学科的内容,又开发了相关的交叉学科。近年来,生物化学工程分支的发展,为重要的高科技部门生物工程的兴起创造了必要的条件。可见,化学工程学科对于化学类型工业和应用化工技术的部门的技术进步与发展,有着至为重要的作用。

由于化学工程学科对于化工类型生产、科研、设计和教育的普遍重要性,在案头备有一部这一领域得心应手的工具书,是广大化工技术人员众望所趋。1901年,世界上第一部《化学工程手册》在英国问世,引起了人们普遍关注。1934年,美国出版了《化学工程师手册》,此后屡次修订,至1984年已出版第六版,这是一部化学工程学科最有代表性的手册。我国从事化学工程的科技、教育专家们,在五十年代,就曾共商组织编纂我国化学工程手册大计,但由于种种原因,迁延至七十年代末中国化工学会重新恢复活动后方始着手。值得庆幸的是,荟集我国化学工程界专家共同编纂的这部重要巨著终于问世了。手册共分26篇,先分篇陆续印行,为方便读者使用,现合订成六卷出版。这部手册总结了我国化学工程学科在科研、设计和生产领域的成果,向读者提供理论知识、实用方法和数据,也介绍了国外先进技术和发展趋势。希望这部手册对广大化学工程界科技人员的工作和学习有所裨益,能成为读者的良师益友。我相信,该书在配合当前化学工业尽快克服工艺和工程放大设计方面的薄弱环节,尽快消化引进的先进技术,缩短科研成果转化为生产力的时间等方面将会起积极作用,促进化工的发展。

我作为这部手册编纂工作的主要支持者和组织者,谨向《手册》编委会的编委、承担编

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤（力）-秒”工程制（MKfS制）。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制（SI），除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会

1979年7月

编辑说明

一、《化学工程手册》共26篇，原按篇分册印行，现分为六卷合订出版。

二、《化学工程手册》分篇单行本的编写工作始于1978年，1980年后陆续出版发行，1989年出齐。这次分卷合订本是利用原有纸型进行印刷的，对出版较早的篇章只能进行一定程度的修订，限于增补最必要的新内容，对近期出版的单行本只进行一些涉及技术内容的订正和印刷错误的勘正工作。

三、由于本手册着手编纂和出版时间较早，全书应用的是工程单位制，利用原纸型再印不能作全面修改，特在每卷附我国法定单位换算表，供读者查用。本手册修订再版时将采用法定计量单位。

四、本手册是中国化工学会、化学工业部化学工程设计技术中心和化学工业出版社共同组织的。参加手册编写和审稿工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等二十多个单位，近二百位专家。此外还有其它许多单位和人员提供资料和间接参与手册的工作。

五、囿于条件，本手册中所采用的名词术语和符号可能有不尽统一之处，内容上也可能有重复、遗漏、甚至错误的地方，印刷、装帧等方面也不尽如人意，欢迎读者提出改进意见，在修订时一一予以考虑，以使本手册更臻完善。

第19篇 颗粒及颗粒系统一

编写人 黄长雄 马兴华 李佑楚

王永安 刘淑娟 李洪钟

胡荣泽 王明星 黄延章

审校人 郭慕孙

校稿人

VI.11.8881

绪 言

随着流体流动及输送、传热设备及工艺、以及蒸馏、吸收、萃取、增湿、结晶等单元操作的发展，出现了概括其基础现象及科学的“传递过程原理”。流态化、气固或液固分离、颗粒物料的分级、固聚以及固体粉碎等工艺、技术的基础原理属“颗粒学”范畴。作为手册的一部份，“颗粒及颗粒系统”将为这项工艺、技术、提供一些共性的基本知识和信息，以利于进一步的提高和创新。

自从编写本篇的原则提出并为编委确认之后，编者因忙于科技行政等工作，久未落笔，后来又应邀出国任教。回国后，出版社建议组稿成篇。经过这些年的发展，我国从事颗粒工作的队伍已逐步成长，中国颗粒学会也已成立，于是将原来1980年提出的七章，根据能邀请到的专家改编成为目前的八章。改编包括扩展颗粒量测及颗粒数学并入了取样，此外还增加了气溶胶。

当代化工中若干前沿发展与颗粒学有关，例如材料、生化和环境。本篇不及一一搜集有关资料，易根据国内现阶段发展，仅纳入了气溶胶一章，且侧重大气和环化。在这一章中，为了更好与邻近科学结合，有意识地保留了该分支学科的术语、概念、易不强求统一到化学工程的传统范畴。这种跨学科的编写，将于手册第二版中进一步发扬。

在国际上，颗粒学为一门年轻的科学技术，提炼其中与化学工程有关的内容、撰写成手册格式，亦属鲜见。编者企图尊重历史、尊重本篇各章的作者，忠实反映专家们的见解。所损失的为严格、统一的体裁和或多或少在内容上的重复。本篇系首次努力，有不足之处望读者多多谅解。本篇内容的充实、补遗和改进，将留诸化工手册的第二版。为此，编者将特别感谢读者们对本篇的意见。

在组编本篇中，编者得到出版社的鼓励、中国颗粒学会的支持，以及黄长雄同志自始至终的帮助，特此鸣谢。

郭慕孙

1988.11.17

目 录

19. 颗粒及颗粒系统

19.1 颗粒度数据的表征	19-1	19.3 颗粒基本特征的测量	19-40
19.1.1 粒度	19-1	19.3.1 颗粒的粒度及其测量	19-40
19.1.2 粒度分布	19-3	(1) 筛分	19-40
(1) 表格形式	19-3	(2) 显微镜和图象分析	19-44
(2) 图示形式	19-4	(3) 重力沉降和离心沉降	19-46
(3) 函数形式	19-4	(4) 电阻变化法	19-51
19.1.3 平均粒度	19-6	(5) 光的散射与衍射	19-53
19.1.4 颗粒分级	19-9	(6) 表面积法	19-53
(1) 分级效率	19-9	(7) 混杂方法	19-54
(2) 细颗粒分级方法	19-11	(8) 取样和样品制备	19-54
(3) 超细颗粒分级方法	19-15	19.3.2 颗粒的密度及其测量	19-56
19.1.5 颗粒混合	19-17	(1) 颗粒密度的定义	19-56
(1) 混合原理	19-17	(2) 真密度和表观密度的测量	19-57
(2) 混合度的统计分析	19-18	(3) 松装密度和振实密度的测量	19-59
参考文献	19-23	(4) 颗粒密度的测量	19-59
19.2 颗粒的形状	19-24	19.3.3 颗粒的表面积及其测量	19-60
19.2.1 颗粒的形状——问题的提出	19-24	(1) 应用粒度数据的计算法	19-60
19.2.2 颗粒形状的定义	19-24	(2) 透过法	19-61
19.2.3 形状系数	19-25	(3) 气体的吸附法	19-62
19.2.4 形状指数	19-27	(4) 压汞法	19-66
(1) 均齐度	19-27	参考文献	19-67
(2) 方向比	19-27	19.4 散体的动态特性	19-68
(3) 体积充满度	19-27	19.4.1 引言	19-68
(4) 面积充满度	19-27	19.4.2 空隙度	19-68
(5) 球形度	19-27	(1) 等径球形颗粒的规则排列	19-68
(6) 圆形度	19-28	(2) 等径球形颗粒的随机填充	19-70
(7) 表面粗糙度	19-28	(3) 壁效应	19-72
19.2.5 Fourier分析	19-29	(4) 非球形颗粒的随机填充	19-73
(1) 导言	19-29	(5) 振动对散体空隙率的影响	19-74
(2) Fourier级数—— (R, θ) 法	19-31	19.4.3 散体的流动特性	19-74
(3) (ψ, S) 法和 (ϕ, ι) 法	19-33	(1) 休止角	19-74
19.2.6 方波函数	19-34	(2) 内摩擦角	19-75
19.2.7 纯正弦函数法	19-36	(3) 断裂角	19-78
19.2.8 分数维方法	19-37	(4) 壁摩擦角	19-78
参考文献	19-38	(5) 滑动角	19-78

(6) 散体的流动性.....	19-78	(2) 毛细管力与表面性质.....	19-144
19.4.4 散体流动的测量.....	19-85	(3) 液-液两相渗流.....	19-145
(1) 散体流量的测定.....	19-85	(4) 液固两相渗流.....	19-148
(2) 散体浓度的测定.....	19-91	19.6.4 两相互溶渗流.....	19-149
19.4.5 料位及其测量.....	19-95	(1) 概述.....	19-149
(1) 称量法.....	19-95	(2) 互溶液体的传质扩散渗流.....	19-149
(2) 电气方法.....	19-95	(3) 不同粘度的互溶液体传质 扩散渗流.....	19-151
(3) 流体力学方法.....	19-96	(4) 带吸附作用的互溶液体传质 扩散渗流.....	19-153
(4) 机械方法.....	19-96	(5) 液气两相渗流.....	19-155
(5) 能量吸收法.....	19-97	参考文献.....	19-156
(6) 光导纤维法.....	19-98	19.7 流体与散料的同时运动	19-157
19.4.6 散体的压力及其测量.....	19-99	19.7.1 引言.....	19-157
(1) 散体压力.....	19-100	19.7.2 散料的函义.....	19-157
(2) 流体压力.....	19-101	(1) 散料形状.....	19-157
参考文献.....	19-101	(2) 气泡尺寸.....	19-159
19.5 散料力学.....	19-103	(3) 液滴尺寸.....	19-160
19.5.1 引言.....	19-103	(4) 气泡和液滴的变形.....	19-161
19.5.2 散料的力学性质.....	19-104	19.7.3 基本方程.....	19-166
(1) 散料的变形及可压缩性.....	19-104	(1) 一维两相流模型.....	19-166
(2) 散料的抗剪强度、内摩擦力 和粘聚力.....	19-105	(2) 稳态界面曳力系数 C_{Ds}	19-171
(3) 散料的流动性及其测量.....	19-107	(3) 壁摩擦系数 f_w	19-177
(4) 填料的结构和特征——规则 排列和随机排列.....	19-109	(4) 其它辅助关系.....	19-179
19.5.3 静力学——应力和应变.....	19-111	19.7.4 垂直稳态流动.....	19-181
(1) 弹性平衡.....	19-111	(1) 气液两相流.....	19-181
(2) 极限平衡.....	19-117	(2) 气固两相流.....	19-185
19.5.4 动力学——移动床内的应力	19-132	19.7.5 水平流动.....	19-190
(1) 若干定义.....	19-132	(1) 流动状态.....	19-190
(2) 移动床内的应力分布.....	19-132	(2) 均匀悬浮水平流动.....	19-192
(3) 仓斗取型.....	19-134	(3) 沉积速度.....	19-193
符号说明.....	19-135	(4) 浓相气固水平流动.....	19-195
参考文献.....	19-136	19.7.6 加速度运动.....	19-197
19.6 流体通过多孔介质的流动	19-138	(1) 垂直系统中单球加速运动.....	19-197
19.6.1 颗粒与多孔介质.....	19-138	(2) 自由沉降时初始加速运动.....	19-198
19.6.2 单相流体在多孔介质中的渗流	19-139	(3) 脉动流下的加速运动.....	19-203
(1) 单相渗流基本定律及流态.....	19-139	(4) 飘浮.....	19-206
(2) 渗流理论.....	19-141	19.7.7 离心力场中颗粒的运动.....	19-207
19.6.3 两相不互溶流体渗流.....	19-144	(1) 旋转气流中颗粒的运动.....	19-207
(1) 多孔介质中两种互不溶流体 静力学.....	19-144	(2) 旋风分离器中的气固流动.....	19-209
		19.7.8 磁场下的两相流.....	19-213
		(1) 基本现象.....	19-214
		(2) 基本方程.....	19-214
		(3) 稳定性问题.....	19-216

参考文献	19-219
19.8 气溶胶	19-221
19.8.1 气溶胶的基本特征	19-221
(1) 基本特征	19-221
(2) 气溶胶粒子的浓度	19-222
(3) 气溶胶粒子的粒度谱分布	19-222
(4) 气溶胶粒子的寿命	19-224
19.8.2 气溶胶粒子的产生过程	19-225
(1) 固体液体物质的机械破碎和悬浮	19-225
(2) 气-粒转化过程	19-227
(3) 光化学烟雾	19-228
19.8.3 气溶胶粒子的化学成份	19-229
(1) 成分概率密度谱分布函数	19-229
(2) 化学成分平均浓度	19-230

(3) 化学成分平均浓度相对于粒子尺度的分布	19-231
(4) 化学成分相对浓度——富集因子的概念	19-233
19.8.4 气溶胶来源的判别和分析	19-234
(1) 化学成分质量浓度平衡法	19-234
(2) 因子分析法	19-235
19.8.5 观测实验方法	19-236
(1) 气溶胶观测仪器概述	19-236
(2) 气溶胶化学分析技术	19-238
(3) 有机物分析	19-239
19.8.6 应用	19-239
(1) 对流层气溶胶和天气	19-239
(2) 气溶胶和气候	19-240

20. 流 态 化

绪言

20.1 流态化床的流体力学特性

20.1.1 流态化现象	20-1
20.1.2 流体通过固定床的压降	20-3
(1) 压降关联式	20-4
(2) 关联式中诸参数的确定	20-5
20.1.3 临界流态化速度	20-7
20.1.4 颗粒的终端速度	20-10
20.1.5 颗粒终端速度与临界流态化速度的综合关系	20-12
20.1.6 流态化类型	20-14
(1) 散式流态化	20-14
(2) 聚式流态化	20-17
20.1.7 聚式流态化床中的气泡特性及其行为	20-19
20.1.8 国井-Levenspiel鼓泡床模型	20-23
(1) 气泡相	20-23
(2) 乳化相	20-25
(3) 气泡相与乳化相间的气体交换	20-27
(4) 用鼓泡床模型解释气体的混合	20-29
符号表	20-32
参考文献	20-33

20.2 颗粒与流体间的传热和传质

20.2.1 颗粒与流体间的传热	20-34
(1) 单个圆球的传热	20-34
(2) 固定床中的传热	20-35
(3) 流态化床中的传热	20-36
20.2.2 颗粒与流体间的传质	20-41
(1) 单个圆球的传质	20-41
(2) 固定床中的传质	20-42
(3) 流态化床中的传质	20-42
20.2.3 颗粒与流体间传热与传质间的联系	20-45
符号表	20-46
参考文献	20-46

20.3 流态化系统与壁面的传热

20.3.1 概述	20-49
(1) 总传热系数 K	20-49
(2) 平均温差 $(\Delta t)_{av}$	20-50
(3) 传热面积 A	20-52
(4) 流态化床换热器的结构分类	20-52
20.3.2 传热机理	20-54
20.3.3 流态化床与器壁换热面间的传热	20-56
(1) 影响传热的诸因素	20-56
(2) 给热系数通用关联式	20-58
20.3.4 流态化床与内部换热壁面的传热	20-61

(1) 垂直管.....	20-61
(2) 水平管给热系数的通用关联式.....	20-64
20.3.5 稀相气流输送与壁面传热.....	20-64
20.3.6 液-固流态化床与壁面的传热.....	20-65
20.3.7 计算示例.....	20-67
符号表.....	20-71
参考文献.....	20-72
20.4 流态化装置设计	
20.4.1 流态化装置的选型.....	20-74
(1) 影响床型选择的主要因素.....	20-74
(2) 各类床型的特点.....	20-75
20.4.2 影响流态化质量的因素.....	20-77
(1) 固体颗粒的性质.....	20-77
(2) 流体的性质.....	20-83
(3) 床高一直径比 L_0/D_T	20-84
(4) 内部构件.....	20-87
(5) 分布板与预分布构件.....	20-87
20.4.3 流态化操作速度.....	20-87
20.4.4 床膨胀.....	20-88
(1) 床膨胀的平均值.....	20-88
(2) 床膨胀的经验关联.....	20-88
(3) Geldart的床膨胀的估算法.....	20-90
20.4.5 颗粒的夹带和扬析.....	20-98
(1) 细颗粒的扬析.....	20-99
(2) 颗粒的夹带.....	20-110
(3) 输送分离高度TDH.....	20-122
20.4.6 装置直径和高度的确定.....	20-124
(1) 催化反应过程.....	20-124
(2) 非催化反应过程.....	20-128
(3) 旋风分离器的安放位置.....	20-129
(4) 旋风分离器系统的压力平衡.....	20-130
20.4.7 操作控制.....	20-133
(1) 颗粒粒度和组成的控制.....	20-133
(2) 压力测量.....	20-133
(3) 温度测量.....	20-134
(4) 流量测量.....	20-134
(5) 其他.....	20-134
参考文献.....	20-135
20.5 流态化装置的构件	
20.5.1 气体的分布和预分布装置.....	20-138
(1) 分布板的压降计算.....	20-143
(2) 分布板的临界压降.....	20-143
(3) 分布板的孔间距或帽间距.....	20-145
(4) 气体出分布板的速度.....	20-148
(5) 多管式气流分布器的设计.....	20-152
(6) 气体预分布器.....	20-154
20.5.2 流态化床的内部构件.....	20-160
(1) 水平构件.....	20-160
(2) 垂直构件.....	20-164
(3) 固定填料.....	20-166
(4) 水平构件和垂直构件的比较.....	20-166
20.5.3 扬析颗粒的捕集.....	20-167
(1) 内过滤器及反吹装置.....	20-168
(2) 内旋风分离器.....	20-168
20.5.4 固体的加料和卸料问题.....	20-175
参考文献.....	20-177
20.6 其它流态化系统	
20.6.1 喷动床.....	20-178
(1) 喷动床的设计.....	20-178
(2) 导向喷动床的设计.....	20-183
(3) 喷动流态化床的设计.....	20-185
(4) 喷动床的应用.....	20-186
符号表.....	20-189
参考文献.....	20-190
20.6.2 多层流态化床.....	20-190
(1) 概述.....	20-190
(2) 多层流态化床的分类及特点.....	20-190
(3) 溢流管型多层流态化床的设计.....	20-195
(4) 无溢流管多层流态化床的设计.....	20-198
(5) 固相停留时间分布.....	20-201
(6) 多层流态化床中的传热计算.....	20-203
(7) 液固多层流态化床.....	20-203
参考文献.....	20-206
20.6.3 快速流态化.....	20-206
(1) 概述.....	20-206
(2) 快速流态化流动模型.....	20-207
(3) 快速流态化速度、最小循环量 和载流点速度的计算.....	20-209
(4) 快速流态化床压降和气体扩散.....	20-210

(5) 快速流态化在工业上的应用	20-211
参考文献	20-216
20.6.4 三相流态化	20-217
(1) 概述	20-217
(2) 气-液流态化床	20-218
参考文献	20-228
20.7 颗粒的气体输送与循环系统	
20.7.1 颗粒的气力输送	20-230
(1) 概述	20-230
(2) 稀相气力输送	20-240
(3) 密相动压气力输送	20-249
(4) 密相静压气力输送	20-254
(5) 筒式气力输送	20-257
(6) 气力输送系统的主要部件	20-258
(7) 气力输送装置设计	20-264
(8) 功率计算	20-264
(9) 设计计算示例	20-264
20.7.2 颗粒的循环系统	20-283
(1) 循环系统的组成及基本概念	20-283
(2) 固体循环量	20-284
(3) 固体颗粒的向下流动	20-284
(4) 固体颗粒通过流态化床器壁的流动	20-301
(5) 气-固循环系统的计算	20-302
(6) 气-固循环系统的若干实际问题	20-309
符号表	20-312
参考文献	20-313
20.8 流态化技术的应用	
20.8.1 物理操作	20-315
(1) 苯酐的流态化冷凝	20-315
(2) 吸附	20-315
(3) 干燥	20-316
(4) 冷却	20-317
(5) 脉冲气流输送	20-318
20.8.2 合成反应	20-319
(1) 邻苯二甲酸酐(简称苯酐)	20-319
(2) 顺丁烯二酸酐	20-320
(3) 硝基苯还原制苯胺	20-321
(4) 甲醇氧化制甲醛	20-321
(5) 乙烯氧氯化制二氯乙烷	20-322
(6) 中压熔铁催化剂合成烃类	20-322
(7) 丁烯氧化脱氢制丁二烯	20-322
(8) 醋酸乙烯	20-323
(9) 丙烯腈	20-324
(10) 氯硅烷	20-325
20.8.3 烃类加工	20-325
(1) 流态化催化裂化	20-325
(2) 砂子炉热裂解	20-326
(3) 分子筛催化剂提升管催化裂化	20-326
(4) 粉煤的干馏和气化	20-327
(5) 流态化床锅炉	20-327
20.8.4 焙烧	20-328
(1) 硫铁矿焙烧	20-328
(2) 磁化焙烧	20-329
(3) 锌精矿的流态化焙烧	20-330
(4) 贫铁矿磁化焙烧	20-330
(5) 明矾石焙烧	20-331
(6) 氧化铁矿石还原	20-332
(7) 重碱流态化煅烧	20-332
(8) 石灰石煅烧	20-333
20.8.5 其他	20-334
(1) 浸取和洗涤	20-334
(2) 流态化床浸渍法制催化剂	20-335
(3) 微细氢氧化钙	20-336
(4) 二氧化锰氧化还原法制氧气	20-336
(5) 微细碳酸钙	20-336
参考文献	20-338

21. 气态非均一系分离

绪言

21.1 基本原理

21.1.1 气态非均一系的定义与分类

21.1.2 气态非均一系的性质

(1) 单个颗粒的尺寸描述

(2) 粒群颗粒的粒径分布

(3) 颗粒粒径分布的测定方法

(4) 粉体颗粒的物理性质

(5) 气态非均一系内颗粒浓度的表示

示