

清华大学学术专著

# 流态化工程原理

## Fluidization Engineering Principles

金 涌 祝京旭  
汪展文 俞芷青

主编

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 简 介

固体流态化技术是化学工程领域的一个重要分支。流化床具有非常高的传热和传质效率与大量处理颗粒的能力,因而在化工、石油加工、能源、环境保护、食品加工、药品生产等领域中得到了非常广泛的应用。与工业实践紧密相关的科研工作也由此而异常的活跃,新的科研成果和理论不断涌现。随着基础科研工作和国民经济的进一步发展,流态化技术势将在更多的领域中得到应用。

本书为第一本在固体流态化方面的中文专著,由 16 位海内外专家和知名学者集数年之精力才得以完成。作为专著,本书内容包括了流态化方面差不多所有的重要内容。全书共分 11 章:第 1 章介绍流态化现象及其发展历史;第 2 章提供有关的基础知识;第 3,4,5 章详述了气固密相流化床、循环床及顺重力场流化床的流动规律;第 6,7 章论述流化床的传热和反应器模型与放大;第 8 章描述了喷动床的基本特性;第 9 章给出了许多流化床工业应用的实例;第 10 章专门讲述流化床的实验技术及测试手段方法;第 11 章介绍液固散式流态化和气液固三相流化床的发展近况。

本书可供从事流态化工作的学者、科研人员、工程技术人员、运行和管理人员参考,也可作为高等院校化工、石油、热能及其他有关专业的教材和教学参考书。

书 名:流态化工程原理

作 者:金涌 祝京旭 等主编

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京市人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:35 字数:809 千字

版 次:2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-04773-1/O·269

印 数:0001~2000

定 价:68.00 元

## Abstract

Although fluidization as a branch of chemical reaction engineering has been studied extensively in China for over 40 years, this is the first comprehensive reference book on the subject of fluidization published in Chinese. This book is a result of the collective work of many Chinese scholars in China and overseas.

This book covers all major areas of fluidization. It starts with Prof. Y. Jin providing an overview of the fluidization phenomena and summarizing the history of its research and developments in Chapter 1. Then, a thorough review of the fundamentals of powders and on the classifications of fluidization phenomena and flow regimes is provided by Prof. J-X. Zhu and Dr. H. Zhang in Chapter 2.

Chapters 3—5 are the heaviest parts of this book, which cover the hydrodynamics of conventional, circulating and the newly developed downflow fluidized beds. In Chapter 3, Dr. Cai, in collaboration with Prof. L-S. Fan, provides an excellent overview of the flow phenomena in conventional low-velocity gas-solid fluidized beds. This chapter also presents some new in-depth analyses and interesting theories. This is followed by the longest chapter in this book, in which Dr. Bai devotes his energy to almost every aspect of circulating fluidized beds, from hydrodynamics, regimes and regime transition, high-density operation, system instability, to gas and solids mixing, modelling, binary systems and applications. In a truly collaborative work, Profs. F. Wei and J-X. Zhu, Dr. C-M. Qi and prof. Y. Jin report on recent new developments in the fast-growing area of downflow fluidization in Chapter 5. Key subjects such as hydrodynamics, heat and mass transfer, gas and solids mixing, and modelling are presented.

Chapters 6—8 cover several key areas of fluidization. Chapter 6 by Prof. J-X. Zhu, Ms. Y-L. Ma and Dr. W-Q. Luan presents a comprehensive review of heat transfer phenomena in gas-solid conventional and circulating fluidized beds, including the mechanism and theories for different modes of heat transfer. In Chapter 7, Prof. X-T. Bi surveys all important fluidized bed reactor models and provide a critical review on their application and limitations. In Chapter 8, Prof. J-X. Zhu and Dr. J. Hong provide an overview of the important aspects of spouted beds.

In Chapter 9, Prof. Z-Q. Yu summarizes the various applications of fluidized beds, with emphasis on those applications in Chinese industry. Chapter 10 by Prof. Z-W. Wang, Dr. J-H. Zhou and Prof. J-X. Zhu provides extensive details required to carry out good experiments in fluidization, with excellent reviews on experimental equipment,

measurement techniques, and instrumentation. In the final chapter, Chapter 11, Profs. Y. Zheng and J-X. Zhu highlight key findings on conventional liquid-solid and gas-liquid-solid three-phase fluidization and the new understandings associated with the recently developed high-velocity liquid-solid and gas-liquid-solid three-phase fluidized beds.

At the end of the book, several important appendices are included, listing some of the key international fluidization research laboratories, key words in fluidization in both Chinese and English, and English translations of the names of some Chinese and Japanese researchers working in the fluidization area.

# 前 言

经过数年的集体努力,这本体现了当前国际流态化工程最新发展趋势的专著终于问世了。作为编者,我们首先要感谢 16 位作者的出色工作和对我们编辑工作的支持。他们都是工作在流态化科研和生产第一线的知名学者;他们对流态化研究的杰出造诣和努力工作的态度,保证了此书的高质量。没有大家的共同努力,我们是无法完成这样一个浩大的工作的。

流态化技术的发展,从 20 世纪 20 年代第一台流化床粉煤气化炉的应用开始,至今已有 70 多年的历史。由于流化床所特有的优点,如高效的传热传质、均匀的温度场、颗粒的大处理量、很宽的操作范围等,使其在许多工业领域中都得到广泛的应用,并且仍有非常好的工业前景。国内在这方面的科研工作非常活跃,并在不少方面居世界领先水平。遗憾的是,由于种种原因,至今仍没有一本完整的中文流态化专著。这多多少少影响了我们在流态化方面的科研工作。正是基于此,我们组织了一批以清华大学和加拿大西安大略大学的学者和博士毕业生为主的写作队伍,编写了此书。

因为本书是国内这方面的重要专著,我们在力求全面、准确地阐述流态化工程的同时,还特别注意向读者介绍当前科研的发展新动向。全书共分为 11 章,几乎包括了流态化的所有领域。全书由金涌教授介绍流态化现象及其发展历史的第 1 章,与祝京旭教授和张辉博士叙述颗粒和流态化基础知识的第 2 章开头;然后是详述流体力学的 3 章;蔡平博士和范良士教授合写的有关气固传统流态化的第 3 章,白丁荣博士所写的关于循环床的第 4 章,以及魏飞教授、祝京旭教授、祁春鸣博士、金涌教授 4 人合写的叙述下行床的第 5 章;由祝京旭教授、马颖亮女士与栾文琦博士合作的第 6 章和毕晓涛教授的第 7 章分别论述了流化床中的传热现象和流化床反应器模型;祝京旭教授与洪江博士合著的第 8 章则详细地介绍了在喷动床方面的工作;俞芷青教授的第 9 章给出了许多流化床工业应用的实例;由汪展文教授、周家骅博士与祝京旭教授共著的第 10 章则专门讲述了有关实验技术及测试手段等方面的具体知识;最后,由郑莹和祝京旭教授合作的第 11 章向读者介绍了液固和气液固三相流化床的发展近况。

由于作者众多,书中的内容难免有重复的地方,为了达到给读者提供最大及最准确的信息量的目的,我们没有在这方面强求统一;在格式方面,我们尽量做到了各章间的统一。虽然我们做了最大的努力,但难免仍有一些不准确或不全面的地方,在敬请读者原谅的同时,还诚心地希望能将不足之处反馈给我们,以便今后更正。

我们十分感谢国际著名流态化专家、加拿大 British Columbia 大学的古锐思(John R. Grace)教授为此书写序言。包括本书主编之一在内的五位作者都曾在古锐思教授的指导下学习和工作,受益匪浅。

在本书的成稿过程中,唐华女士输入了第 3,4,7 三章的全部文字及第 10 章的部分文

字,马颖亮女士在作为作者之一的同时,还参与了第 5,9,10 及 11 数章的文字修改工作,在此我们一并表示感谢。

最后,我们非常非常感谢清华大学出版社的刘明华编审对此书所做的大量工作:她的耐心、细致、认真、负责的工作态度,保证了此书的顺利出版。

编 者

2000 年 5 月

## Preface

Fluidized beds have had a major impact in many countries over the last six decades for a wide range of chemical and physical processes involving solid particles. Researchers originating in China have had a very significant role in the worldwide effort to understand and apply fluidized beds. Such names as Mooson Kwauk, C. Y. Wen, L. S. Leung, L. T. Fan, W. C. Yang, Y. Jin, Z. Yu, K. Cen and L-S. Fan have contributed greatly over many decades in the fluidization literature. There has been a particular resurgence of activity within China itself since about the 1980s, and in the decade of the 1990s, the more established experts from earlier decades have been joined by a number of young and energetic researchers who are making major contributions of their own to improving the understanding of fluidization and to finding innovative ways of utilizing this technology. This effort has been facilitated by a series of national, bilateral and international conferences involving Chinese researchers. In particular, the series of China-Japan Fluidization Conferences, the 5th International Circulating Fluidized Bed Conference held in Beijing in 1996 and the 10th International Fluidization Conference held in the same city in 2001, demonstrate the viability and importance of the fluidization community in China.

The editors of this volume, Professor Zhu Jingxu of the University of Western Ontario and professors Jin Yong, Wang Zhanwen and Yu Zhiging of Tsinghua University have assembled an excellent team of contributors, widely representative of Chinese scholars working inside and outside China, for the preparation of this volume. Together they have produced a reference book which reviews in depth every major aspect of fluidization:

Gas-solid, liquid-solid and gas-liquid-solid fluidization;

Bubbling beds, turbulent beds, risers and downers, as well as spouted beds;

Theory, instrumentation, experimental results and applications.

In a number of these areas, for example in the study of downers, circulating fluidized beds, three-phase systems, fluidized bed combustion and advanced probes, Chinese scholars, ably represented by the authors of this volume, are world leaders. This book is therefore a comprehensive and welcome addition to the growing literature on this field.

In recent years, English has become the predominant language of international conferences and textbooks in many areas of science and engineering, including fluidization. This has tended to put those working in other languages at a disadvantage

when attending conferences and reading the literature. This book should therefore be of particular importance to readers whose first reading language is Chinese. It will no doubt strengthen the communications regarding fluidized beds among a major segment of the world's engineering community.

On a personal note, I am pleased to have been able to work closely with a number of those involved in putting this volume together. They are to be commended for their effort, and I wish them every success in their future endeavours in this area.

John R. Grace

Department of Chemical and Bio logical Engineering

The University of British Columbia

## 英文序言译文

在过去的六七十年里,流化床在许多国家的应用,对改进固体颗粒的多种操作过程(物理的或化学的)产生了巨大的影响。其中,中国和华裔的学者们对流化床的发展和应用起了非常重要的作用。比如郭慕荪、温锦莹、梁亮兴、范良政、杨文庆、金涌、俞芷青、岑可法及范良士等人,在过去的几十年里对流态化学科都做出了重大贡献。在中国,流态化科研工作 在 80 年代出现了一个新高潮,而到 90 年代又有一批精力充沛的青年学者加入到这个成功的队伍中来。他们的努力大大增加了人们对流态化学科的认识,创造了一系列的技术更新,并建立了一些新的应用领域。在中国召开的一系列全国、双边及国际流态化会议进一步促进和加强了这些科研实践活动。而中日流态化系列会议的召开、1996 年第五届国际循环流化床大会与 2001 年北京第十届国际流态化会议在北京的举行,更进一步表明了中国流态化界的实力和在世界舞台上的重要性。

本书的编者(加拿大西安大略大学的祝京旭教授和清华大学的金涌、汪展文、俞芷青教授等)为本书组织了一个出色的写作组。该写作组广泛代表了在中国国内外工作的中国学者。他们通过共同努力编写出了这本深入涉及到流态化的每一重要领域的参考书。内容包括了气固、液固及气液固流态化;鼓泡床、湍动床、上行床、下行床以及喷动床;流态化理论、实验仪器设备、重要技术更新及流态化的应用。

以本书作者为代表的中国学者,在本学科许多领域的研究中均处于世界最前沿,例如在下行床、循环流化床、三相系统、流化床燃烧和高效探头等方面的研究。因此,本书的出版为流态化界提供了又一本综合性很强的新参考书,必将受到广大读者的欢迎。

近年来,英语已成为各种国际会议的主要语言,也是许多科学和工程领域(包括流态化)的教科书所采用的通用语言。这给使用其他语言的学者在参加国际会议和阅读文献时造成了一些困难。因此,本书的出版将使第一阅读语言为汉语的读者受益匪浅。这将无疑大大地促进作为世界流态化界重要成员的中国流态化界的内部交流。

对我个人而言,我很高兴曾经和本书的数位作者一起共事。我十分钦佩他们在编写本书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获得更大的成功。

John R. Grace (古锐思)  
加拿大 British Columbia 大学化工系

# 目 录

第 1 章 概论 (金 涌).....	2
1-1 流态化现象 .....	2
1-2 流态化工程的研究领域 .....	6
1-3 流态化技术的发展沿革及其工业应用 .....	8
1-4 流态化技术与其他同类技术的比较及其优缺点 .....	13
符号说明 .....	14
参考文献 .....	14
第 2 章 流态化基础知识和流型分类 (祝京旭、张辉).....	17
2-1 流态化的基本特征和流化质量 .....	17
2-1-1 流化形成的条件和流态化的基本特征.....	17
2-1-2 流化质量、聚式与散式流态化 .....	18
2-1-3 床层压降与流体流速的关系、起始流化速度 .....	20
2-1-4 流化床反应器的基本结构.....	21
2-2 颗粒的基本性质和分类 .....	24
2-2-1 单颗粒的基本性质.....	24
2-2-2 单颗粒的流动行为.....	27
2-2-3 颗粒群的粒度分布与平均当量直径 .....	29
2-2-4 颗粒密度的几种定义及其测定方法 .....	31
2-2-5 颗粒群的堆积角、内摩擦角和滑落角 .....	32
2-2-6 颗粒群的机械性质 .....	33
2-2-7 颗粒性质对流化行为的影响——Geldart 的颗粒分类法 .....	36
2-2-8 应用床层塌落法对颗粒分类.....	37
2-3 流化床反应器的流型及流型转变 .....	39
2-3-1 传统低气速流态化中的流型.....	39
2-3-2 从低气速到高气速的转变.....	40
2-3-3 几种典型的流型图(相图).....	42
符号说明 .....	46
参考文献 .....	49
第 3 章 气固密相流化床 (蔡 平 范良士) .....	55
3-1 气固密相流化床的结构和主要组成部分 .....	55
3-1-1 气体分布器.....	55

3-1-2	自由空域和扩大段.....	56
3-1-3	旋风分离器和料腿.....	56
3-1-4	内部构件.....	57
3-2	气固散式流态化及其稳定性.....	57
3-2-1	气固散式流态化的一般行为.....	57
3-2-2	气固散式流态化发生的判据.....	58
3-2-3	气固散式流态化的稳定性分析及初始气泡的产生.....	59
3-3	气固鼓泡流态化.....	60
3-3-1	流化床中的单个气泡.....	60
3-3-2	流化床中单个气泡周围的流场.....	63
3-3-3	气泡与射流在分布器上的形成.....	65
3-3-4	气泡间的相互作用、聚并和破碎.....	66
3-3-5	气泡尺寸.....	68
3-3-6	气泡上升速度.....	69
3-3-7	气体在相间的分配和两相理论.....	70
3-3-8	流化床内的气泡体积分数及床层膨胀.....	72
3-4	湍动流态化.....	73
3-4-1	湍动流态化的流型特征.....	73
3-4-2	湍动流态化的定义与判别.....	74
3-4-3	向湍动流态化转变的机理和模型.....	75
3-4-4	影响流型转变的诸因素及其关联式.....	76
3-4-5	湍动流态化各操作参数的计算及其变化规律.....	83
3-5	节涌流态化.....	85
3-5-1	节涌的产生.....	85
3-5-2	单个气栓的形状和上升速度.....	85
3-5-3	连续节涌的特性.....	86
3-6	流化床自由空域内颗粒的扬析和夹带.....	86
3-6-1	扬析、夹带与沉降分离高度.....	87
3-6-2	颗粒弹射入自由空域的机理.....	88
3-6-3	计算关联式及模型.....	88
3-7	气固密相流化床的工业应用.....	90
3-8	结束语.....	90
	符号说明.....	95
	参考文献.....	97

第 4 章	循环流化床 (白丁荣).....	106
-------	------------------	-----

4-1	循环流化床装置及流型.....	106
-----	-----------------	-----

4-1-1	循环流化床装置.....	106
-------	--------------	-----

4-1-2	流型转变及流化相图 .....	108
4-1-3	气体饱和夹带 .....	112
4-2	循环流化床的操作稳定性 .....	115
4-2-1	稳定性分析 .....	115
4-2-2	噎塞现象及其判据 .....	116
4-3	循环流态化气固流动规律 .....	118
4-3-1	局部流动结构及其规律 .....	118
4-3-2	轴向流动规律 .....	126
4-3-3	径向流动规律 .....	138
4-3-4	整体流动规律 .....	146
4-4	循环流态化气固流动模型 .....	150
4-4-1	局部结构模型 .....	150
4-4-2	一维轴向流动模型 .....	151
4-4-3	环-核流动模型 .....	154
4-4-4	两维流体力学模型 .....	157
4-5	气固混合及停留时间分布 .....	157
4-5-1	气体混合及其停留时间分布 .....	157
4-5-2	固体混合及其停留时间分布 .....	161
4-6	多组分颗粒循环流态化 .....	165
4-6-1	颗粒轴向离析及操作区域 .....	165
4-6-2	空隙率轴向分布 .....	168
4-6-3	颗粒间相互作用 .....	170
4-6-4	双组分循环流化床的反应行为 .....	171
4-7	高密度循环流化床 .....	172
4-8	循环流化床的设计与放大 .....	177
4-8-1	循环系统的构成及设计应考虑的主要因素 .....	178
4-8-2	循环流化床的放大准则 .....	182
4-9	循环流化床的应用 .....	184
4-9-1	低、中温的气固非均相催化反应过程 .....	186
4-9-2	气固非催化反应过程 .....	191
4-9-3	物理过程 .....	193
	符号说明 .....	195
	参考文献 .....	201

<b>第 5 章</b>	<b>气固顺重力场流态化 (魏 飞 祝京旭 祁春鸣 金 涌)</b> .....	<b>217</b>
5-1	顺重力场循环流化床的发展与工业实践 .....	218
5-1-1	气固并流下行床研究的沿革 .....	218
5-1-2	下行循环流化床的应用 .....	220

5-2	下行床反应器的结构 .....	224
5-2-1	气固入口分布器 .....	225
5-2-2	下行床反应器主体 .....	227
5-2-3	气固快速分离 .....	227
5-3	下行床的流体力学特征 .....	229
5-3-1	下行床的流动分区 .....	230
5-3-2	轴向压力分布及轴向颗粒浓度与速度的变化 .....	232
5-3-3	局部气体速度径向分布 .....	233
5-3-4	局部颗粒速度径向分布 .....	234
5-3-5	局部颗粒浓度径向分布 .....	235
5-3-6	局部滑落速度及脉动速度的径向分布 .....	237
5-3-7	下行床与提升管中气体及颗粒之间的相互作用分析 .....	239
5-4	气固湍流流动模型 .....	241
5-4-1	传统双流体模型 .....	242
5-4-2	颗粒相动力学理论、模型及研究进展 .....	244
5-4-3	模拟结果与实验数据的对照分析 .....	251
5-5	气、固两相流动非线性动力学分析 .....	263
5-5-1	混沌分析 .....	264
5-5-2	提升管和下行床完全发展段混沌动力学分析 .....	267
5-6	气固混合 .....	273
5-6-1	轴向颗粒混合 .....	273
5-6-2	径向颗粒混合 .....	276
5-6-3	气体混合 .....	278
5-7	下行床中的传热问题 .....	280
5-7-1	下行床床层与浸入换热面的传热 .....	280
5-7-2	下行床床层中气固相间的传热 .....	281
5-8	结束语 .....	282
	符号说明 .....	283
	参考文献 .....	286

## 第 6 章 气固流化床的传热 (祝京旭 马颖亮 栾文琦)..... 294

6-1	鼓泡流化床内的传热 .....	294
6-1-1	气体与颗粒间的传热 .....	294
6-1-2	床层与传热表面间的传热规律 .....	297
6-1-3	床层与传热表面间的传热机理与模型 .....	300
6-1-4	辐射传热 .....	303
6-2	循环流化床内的传热 .....	304
6-2-1	床层与传热表面间的传热规律与影响因素 .....	304

6-2-2	传热面的设置及其作用 .....	311
6-2-3	高温操作中的辐射传热 .....	312
6-3	循环流化床内床层与壁面的传热机理与模型 .....	314
6-3-1	颗粒对流传热 .....	314
6-3-2	气体对流传热 .....	318
6-3-3	辐射传热 .....	319
6-4	传热实验的测量手段 .....	320
6-4-1	对流传热的测量 .....	320
6-4-2	辐射传热的测量 .....	322
6-5	结束语 .....	323
	符号说明.....	323
	参考文献.....	327
<b>第 7 章</b>	<b>流化床反应器的模型与放大 (毕晓涛).....</b>	<b>334</b>
7-1	统一流化床两相反应器模型 .....	334
7-2	鼓泡流化床的反应器模型 .....	335
7-2-1	鼓泡流化床的两相反应器模型 .....	335
7-2-2	鼓泡流化床的三相反应器模型 .....	338
7-2-3	典型模型计算结果与实验数据的比较 .....	339
7-2-4	内构件、分布板区及稀相空域对转化率的影响.....	342
7-3	节涌流化床的反应器模型 .....	343
7-4	湍动流化床的反应器模型 .....	343
7-5	快速流化床的反应器模型 .....	345
7-5-1	一维平推流模型 .....	345
7-5-2	环-核反应器模型 .....	346
7-5-3	颗粒团聚模型 .....	348
7-5-4	线流流动模型 .....	348
7-5-5	进、出口结构及内置构件的影响.....	349
7-6	流化床反应器的放大 .....	350
7-7	结束语 .....	351
	符号说明.....	352
	参考文献.....	354
<b>第 8 章</b>	<b>喷动床 (祝京旭 洪 江).....</b>	<b>360</b>
8-1	喷动床的基本特征 .....	360
8-1-1	喷动现象和操作范围 .....	360
8-1-2	喷动床反应器的基本结构 .....	362
8-1-3	喷动床和密相流化床的同异点 .....	363

8-2	喷动床的流动行为 .....	364
8-2-1	气、固两相的总体流动行为 .....	364
8-2-2	喷动床的起动和最小喷动速度 .....	364
8-2-3	最大喷动床高及其物理意义 .....	366
8-2-4	喷射区的直径和流动特性 .....	368
8-2-5	环隙区的两相流动 .....	370
8-2-6	喷泉区的流动行为 .....	371
8-2-7	颗粒的混合与分层 .....	372
8-3	喷动床的床型变化 .....	373
8-3-1	多喷头喷动床 .....	373
8-3-2	带引导管的喷动床 .....	374
8-3-3	喷动-流化床 .....	375
8-3-4	内循环床 .....	376
8-4	喷动床的模型与放大 .....	376
8-4-1	喷动床的流动模型 .....	376
8-4-2	喷动床的反应模型 .....	383
8-4-3	喷动床的放大规律 .....	385
8-5	喷动床的应用 .....	386
8-5-1	干燥及其他物理过程 .....	386
8-5-2	化学反应 .....	387
8-5-3	燃烧和气化 .....	387
8-5-4	细颗粒的捕集 .....	388
8-5-5	颗粒的粉碎 .....	388
	符号说明 .....	388
	参考文献 .....	390
<b>第 9 章</b>	<b>流态化的工业应用 (俞芷青)</b> .....	<b>399</b>
9-1	物理过程的应用 .....	400
9-1-1	干燥 .....	400
9-1-2	移热 .....	402
9-1-3	气力输送 .....	403
9-1-4	物料混合与分级 .....	404
9-1-5	包涂 .....	405
9-1-6	吸附 .....	407
9-2	合成反应 .....	407
9-2-1	邻苯二甲酸酐(苯酐) .....	408
9-2-2	醋酸乙烯 .....	409
9-2-3	丙烯腈 .....	410

9-2-4	丁烯氧化脱氢制丁二烯 .....	411
9-2-5	顺丁烯二酸酐(马来酸酐) .....	411
9-2-6	乙烯氧氯化制二氯乙烷 .....	411
9-3	烃类加工 .....	412
9-3-1	催化裂化 .....	412
9-3-2	催化裂化超短接触反应器 .....	412
9-3-3	重油裂化 .....	414
9-3-4	热裂解与催化裂解 .....	414
9-3-5	费-托合成 .....	415
9-4	矿石焙烧 .....	416
9-4-1	硫铁矿焙烧 .....	416
9-4-2	铁矿的预还原 .....	417
9-4-3	贫铁矿磁化焙烧 .....	417
9-4-4	氧化铝煅烧 .....	417
9-4-5	石灰石煅烧 .....	417
9-5	煤的利用 .....	419
9-5-1	煤的燃烧 .....	419
9-5-2	煤及其他有机物的气化 .....	420
9-6	核化工反应 .....	421
9-7	循环流化床的应用 .....	422
9-8	液固流化床及三相流化床的应用 .....	424
	参考文献 .....	424

## 第 10 章 流化床的实验设备和测试技术 (汪展文 周家骅 祝京旭) .....

10-1	流化床的实验设备 .....	430
10-1-1	密相流化床的基本结构 .....	430
10-1-2	二维床和半床 .....	431
10-1-3	循环流化床 .....	432
10-1-4	实验用流化床设计的一般原则 .....	433
10-1-5	流化介质及其流量测量 .....	434
10-2	各种颗粒性质的测量方法 .....	434
10-2-1	颗粒直径的测量方法 .....	434
10-2-2	颗粒密度的测量方法 .....	438
10-2-3	颗粒形状的测量方法 .....	438
10-3	流化床中各种流体力学特性的测量 .....	439
10-3-1	压力和压差的测量 .....	439
10-3-2	气泡行为的测量 .....	440
10-3-3	气样的采集及气体速度的测量 .....	443

10-3-4	颗粒浓度的测量 .....	444
10-3-5	颗粒速度的测量 .....	453
10-3-6	循环流化床中颗粒循环率的测量 .....	457
	符号说明.....	459
	参考文献.....	461

<b>第 11 章</b>	<b>液固及气液固三相流态化 (郑莹 祝京旭) .....</b>	<b>467</b>
11-1	散式流态化及液固流化操作的基本特征 .....	467
11-1-1	散式流态化的基本特征 .....	467
11-1-2	液固体系起始流化速度的关联式 .....	468
11-1-3	传统液固流化床与 Richardson-Zaki 方程.....	468
11-2	液固循环流态化 .....	469
11-2-1	液固循环流化床的基本结构 .....	470
11-2-2	液固循环流化床内的总体流动行为 .....	471
11-2-3	液固流态化体系中的流型图 .....	472
11-2-4	从低液速向循环流态化的转变 .....	473
11-2-5	轴向流动规律 .....	474
11-2-6	径向流动规律 .....	476
11-2-7	微观流动规律 .....	479
11-2-8	流动模型 .....	480
11-3	传统三相床的流动特性 .....	481
11-3-1	三相流态化的分类 .....	481
11-3-2	三相流态化的流动特征 .....	483
11-3-3	起始流态化及最小流化速度 .....	484
11-3-4	气泡及其尾涡的流动行为 .....	486
11-3-5	从气泡聚并区到气泡分散区的转变 .....	490
11-3-6	从气泡聚并区到高气速区的转变 .....	491
11-3-7	三相相含率 .....	491
11-3-8	三相床的流动模型 .....	493
11-4	循环三相流态化及高气速三相流态化 .....	496
11-4-1	高液速下的三相流化床——输送床 .....	496
11-4-2	高气速下三相流化行为的探索 .....	497
11-4-3	三相循环流态化 .....	497
11-5	液固流化床及三相流化床的应用 .....	499
11-5-1	液固流化床反应器的工业应用 .....	499
11-5-2	三相流化床在化工中的应用 .....	501
	符号说明.....	502