

 现代化学专著系列·典藏版 23

流态化过程工程导论

李佑楚 编著



科学出版社

现代化学专著系列·典藏版 23

流态化过程工程导论

李佑楚 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以理论与实际、工艺与工程相结合的方法,全面概括了化工、冶金、煤炭、石油、材料、生化、环境等工业部门的各种流态化过程的工艺技术及其发展;以国际流态化工程技术发展为背景,系统总结了流态化工程的技术发展历程及其流动、传递的基本规律和理论,特别是我国学者在这些方面的贡献;从工业应用需要出发,重点介绍流态化过程的工艺设计和技术评价、反应器设计和工程化方法等。

本书可供从事化学工程、化工冶金、煤炭利用、石油加工、生物化工、环境工程等科研人员和相关工业部门的工程技术人员以及高等院校的本科生、研究生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代化学专著系列:典藏版/江明,李静海,沈家骢,等编著. —北京:科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-051504-9

I. ①现… II. ①江… ②李… ③沈… III. ①化学 IV. ①O6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 013428 号

责任编辑:黄 海 宛 楠 / 责任校对:钟 洋
责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

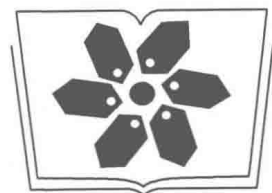
2017 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017 年 1 月第一次印刷 印张:43

字数:843 000

定价:7980.00 元(全 45 册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

序

我于 1956 年回国到中国科学院化工冶金研究所（现中国科学院过程工程研究所）工作。该所创始人、所长叶渚沛先生要我用流态化技术从我国的贫矿、共生矿、难选矿中富集和提取有用金属。当时用化工技术处理金属矿在国际上也开始不久，因此化工冶金被视为新型交叉技术和科学。通常化学工程考虑的多半是最终的产品，而化工冶金需围绕金属原矿的特征，量身订制合适的工艺流程和创造所需的特殊设备，而其产品是化学元素周期表中众所周知的金属元素。但两者的共同点是，都从事物质的物理和化学转化的工艺过程。化学工程师的特殊能力是围绕不同的原料或产品，开发高效、经济的物质的物理和化学转化过程，但需要随时适应不同的原料和产品。通过这一理解，化工冶金研究所已于 2004 年改名为过程工程研究所，以便扩展猎取研究课题的视野和输出研究成果的对象，更有效地完成中国科学院前瞻、基础和引领的使命。

工程的进步标志为其科学含量，从特殊到一般的不断总结和一般到特殊的延伸。该书的出发点定位于过程工程，将已积累的流态化学识和经验（该书第一章）延伸到有关产业（第二～七章）。最后该书总结和讨论了流态化中 4 个特殊问题（第八～十一章）。分类合适，取题精确，如此形成一个完整的流态化技术科学体系。

流态化技术往往出现为厄长工业过程中的一部分，其效果的好坏取决于两个判据：第一是技术上的可行；第二是所属的过程整体是否在采用流态化技术后经济上更合理。工程与纯科学一个大不相同的特色，是工程多了一个 $\$$ （\$ 或 €）参数及其与工程参数结合的技术经济关联。因此技术经济分析必须先行，首先要对于包含流态化技术的全工业过程进行物料、能量和化学平衡计算，绝不能在白图的基础上标榜流态化技术的优越性，甚至一步跃进到扩大实验，放大了可能的错误认识或判断。

流态化技术在民间的应用，例如，扬谷和淘金已无法追踪其起源。其工业应用可能始于用沙粒流态化床精选原煤，按密度差，煤上浮、脉石下沉。显著的化工应用为德国在第二次世界大战中的流态气化褐煤生产合成气及人造石油，为德军提供军用燃料。这些都早于现代化学工程的兴起，因此，迟至 20 世纪 40 年代才出现有关流态化的工程理论研究；化工教科书迟至 1950 年才出现有关流态化的章节。该书作者李佑楚 1962 年自天津大学毕业后到中国科学院化工冶金研究所流态化研究室工作，第一项工作是流态化磁化焙烧（弱还原）甘肃酒泉贫铁

矿，该矿含难以分解的菱铁矿，作者采用了水蒸气催化分解的方法；后在安徽马鞍山从事贫铁矿及复杂铁矿的日处理百吨级的磁化焙烧中间实验；后为攀枝花矿的快速流态化焙烧完成了从颗粒与流体物性计算流态化床轴向孔隙率分布的方法。特别是后一工作使他成为 1989 年国家自然科学二等奖“无气泡气固接触”的得主之一。1986 年李佑楚接替本人主持中国科学院化工冶金研究所流态化研究室的工作，介入了更多的应用研究。他一直遵循理论与实践相结合、分析计算先行的工作原则，从事流态化的研究，不但在书中展示这一工作原则，并列出了他在理论上的研究和一些创新见解。李佑楚于退休后的数年中主动、单枪匹马撰写该书，总结 45 年的经验，以利后人，实属可贵。

科学出版社自 1958 年起为中国科学院化工冶金研究所出版过四本流态化方面的专著，并通过其《中国科学》杂志多次刊登有关论文。在编印中一贯精耕细作，希望此次科学出版社能将该书作为精品出版。

郭慕孙

2007 年 2 月 24 日

前 言

流态化是强化流体与颗粒间接触和传递的工程技术，广泛应用于化工、冶金、石油、煤炭、材料、生化、环境等工业部门，形成了各种矿物资源综合利用、化石能源清洁转化、新型材料高效制备、生化转化污染控制的流态化过程。实践无数次证明，流态化技术的任何一次创新，都会明显地推动现行流态化工艺过程的进步和革新，取得明显的经济效益、环境效益和社会效益。

自从流态化技术大规模工业生产应用以来，经历了 80 多年的发展，流态化论文和科研报告不计其数，技术创新和发明层出不穷，流态化专著不断问世，标志着流态化由经验走向理论，由单纯技艺走向科学，逐步发展成为一门重要的工程科学，显示出旺盛的发展生命力，同时也为流态化过程的开发提供了技术保障。新世纪的经济发展面临着资源、能源、环境承受能力的挑战，用新型流态化技术改造传统工艺技术，催生高效、清洁的流态化新工艺，是经济发展的客观要求；掌握流态化过程的最新成果和工程方法，改造传统工艺技术，是从事过程工程技术人员的历史责任。然而，现已面世的流态化专著大多论述的是流态化力学特性，而涉及流态化过程工程的专著很少，即使有，也限于某一工艺过程，未见有涵盖各工业部门的不同工艺过程的专著出版，这不能不说是一个遗憾，也是一个缺陷。因而，出版一部与流态化应用相适应的流态化过程工程专著是十分必要的。

流态化过程工程涉及过程的工艺以及为实施该工艺的流态化工程技术，是一种理论联系实际、跨行业发展的工程科学。流态化技术离不开工业生产过程，工业生产过程需要流态化技术，两者彼此相互依存，相得益彰。在我国经济快速发展的新时期，流态化工程技术应该也可以为我国现代化建设发挥更大的作用，同时也会赢得自身发展不可多得的历史机遇。然而，行业的繁多、物系的庞杂、资源的不足、市场的分割，使得这种原本休戚相关的联系变得十分脆弱。另外，流态化技术的基础研究也因从业人员的知识背景不同，研究手段不同，分析方法不同，名词术语不同，工业界技术人员在这种浩瀚的文献面前常常会望而却步，使学术界与工业界的交流更加薄弱，其结果是工业生产过程得不到最新流态化工程技术的及时支持而老化，而流态化本身也会因脱离实际生产过程而丧失创新能力。强化学术界与工业界的技术交流是一种最好的解决办法，学术界面向生产，加强创新，以生产过程为本，开发生产急需的流态化新技术、新工艺和新设备，同时改进方法，做好服务，不失时机地向工业界介绍流态化技术的最新成果。编

著这本《流态化过程工程导论》就算是朝向这一解决方法的具体行动，这也是编著这本专著的意义和作用之所在。

作者有幸在郭慕孙院士领导下的中国科学院过程工程研究所工作，一直从事流态化技术的基础研究和过程开发，经历过鼓泡流态化技术的发展，进行过快速流态化技术新领域的开拓，关注着气-液-固三相流态化技术的进展，同时用流态化技术原理进行过各种不同流态化技术的非金属矿物煅烧，金属矿物的氧化、还原、氯化及其他特殊的流态化焙烧，煤和生物质流态化的热解、汽化、燃烧，石油的催化裂化和热解，以及超细无机粉末材料的制备等流态化过程工程的研究。《硫酸工业》杂志 1979 年的约稿及其所给予的高度评价，使作者备受鼓舞，也深深感受到工业界的殷切期盼。在与工业界、研究院所的广泛交流中，受益匪浅，也体味到现实中的种种困惑与无奈，这使作者感到一种责任：应该回答他们心中想问的问题，介绍他们希望认知的新领域；《科学》杂志 1991 年的约稿，引起了作者对流态化技术及其应用的回顾，深感流态化工程的作用、挑战与机遇；1999 年作者借为《中国现代科学全书（化学工艺-化工冶金篇）》撰稿之机，对中国科学院化工冶金研究所已有的化工冶金等工艺过程的研究思想和成果进行分析和概括，并参照国内外的发展现状做出评价。这些经历和积淀，为编写一本适应行业更宽、对象更广的“流态化过程工程”的专著创立了一定的基础。

本书旨在分门别类地讨论化工冶金、无机材料、煤炭加工、石油炼制、生化环境等工业生产中各种流态化过程，涉及这些过程的工艺原理、技术方案及发展趋势，介绍从过程设计、设备选型到确定最佳工艺流程的基本方法以及不同类型流态化反应器在不同工艺过程的应用及其模拟放大，为从事流态化工程科学研究和工艺过程开发的科技人员提供广泛的技术背景资料和研究流态化过程工程化所需的完整知识和方法。本书的编写特点是：

1) 注重理论联系实际。以流态化工业生产过程为重点，尽可能汇集现有的典型过程和生产经验，加强颗粒化学流体力学的基础理论，通过工程化学和流态化工程的理论分析，深入剖析工艺过程原理和技术特点，理性判断过程工程发展趋势，从便于科研与生产、科研院所与企业的交流，可帮助科研人员从生产过程的特点及其发展趋势出发，选择有关键作用的课题和研究方向进行研究开发，发展理论，同时有利于企业工程技术人员掌握和利用流态化技术的科研成果。

2) 力求理论原理统一。根据颗粒-流体系统的特点，以表观曳力两相流的理论方法观察各种不同的流态化现象，从散式流态化、聚式流态化以及新近发展的快速流态化和三相流态化，统一分析颗粒与流体相互作用的规律，使流态化过程工程在理论上具有系统性和统一性，以求内容简明扼要，表述逻辑合理，便于学术的交流和技术的比较。

3) 注重技术新颖先进。在保证理论的完整和满足应用的需要的前提下，特

别注重可有效改进现有工艺过程的流态化新过程,如当前国际前沿的快速流态化和三相流态化的流态化新过程,以促进生产技术的进步。同时也要面对传统流态化工艺过程的现实作用,适当兼蓄传统与近期的流态化工艺过程,包括我们自己未曾发表而仍有应用价值的研究资料。

4) 严格、严肃、科学、客观。广泛收集国内外流态化过程工程资料,着重流态化过程工程类型的完整,而不在于个案多少;着重原理、概念和方法,而不拘泥于具体操作和繁杂计算。严格概念定义,严肃资料筛选,科学论述贡献,客观评述分歧,指明被人们忽视或未曾注意的重要问题。

本书力图反映流态化过程工程的全貌,但有关气力输送,流态化加热、冷却、干燥等物理热过程,采用有关流态化力学特性和传递特性的基本知识就能解决,为突出重点,故不单列章节。此外,外力场下的流态化过程,如振动流化床、离心力流化床、电场流化床、磁场流化床等,因其流态化的原理有所不同而未予以收集。全书共 12 章,各章末尾给予小结和评述,并列有参考文献。

第一章介绍流态化过程工程赖以发展的流态化现象及其力学特性和传递特性,概述了流态化技术发展历程及具有标志性技术成就的流态化工业生产过程。

第二章论及非金属矿物高耗能加工的各种流态化过程,特别介绍作为基础工业原料的碳酸盐、硫酸盐、硅酸盐、含镁矿物的流态化煅烧过程的工艺原理和特点、技术方案和流程以及发展趋势。

第三章讨论了金属矿物加工的各种流态化过程,如金属矿物的氧化焙烧、还原焙烧、硫酸化焙烧、氯化焙烧、离析焙烧等过程的工艺条件、影响因素、生产过程及发展趋势。

第四章介绍了煤炭加工各种流态化过程的工艺特点和生产过程,阐述了燃煤取热和发电的沸腾燃烧、循环流化床燃烧、增压流化床燃烧等过程;分析了煤气化制合成原料气和燃料气的工艺原理和各种过程;讨论了煤的催化加氢、快速热解、加氢快速热解等直接液化过程。

第五章为石油热解和催化裂化的流态化过程,石脑油的流态化催化裂化制轻质燃料油,渣油的中、高温热解过程,重质油的流态化催化裂化制燃料油和乙烯、丙烷等低碳烃过程。

第六章是有关化学制备中的流态化过程,特别是有关细粉和超细粉物料的煅烧、易熔融物料热解等特殊流态化工艺方法,合成原料气催化合成液态烃和甲醇等 C_1 化学过程,石油烃的催化加工制有机合成单体以及单体的流态化气相聚合过程。

第七章生物转化和环境污染控制的流态化过程,特别是微生物、动植物细胞发酵培养,提取二次代谢产物如抗生素、生物酶等生物转化过程,生物酶催化如化工中发酵乙醇、发酵丁醇等生物催化过程,微生物发酵如环境保护中污水处理

等生物降解过程。

第八章介绍流态化过程的过程类型、工艺设计、设备选型、过程计算，流化床反应器及其部件的设计等工程化方法。

第九章介绍鼓泡流化床反应器的流动、混合特性，反应器模型方法和工程设计。

第十章介绍快速流化床反应器的流动、混合特性，反应器模型方法和工程设计。

第十一章介绍液-固及气-液-固三相流化床反应器的流动、混合特性，反应器模型方法和工程设计。

第十二章展望新世纪的流态化过程工程的发展趋势，指出值得开发的重要流态化过程工程。

本书涉及当前国内外广泛的流态化过程，作者也望借此表达中国科学院过程工程研究所几代流态化过程工程科学家和科研人员多年的奋斗、思考和期盼，因此在一定程度上也可以说，它是中国科学院过程工程研究所流态化与多相反应工程科学家们共同的智慧成果。

本书能在享誉国内外的科学出版社出版，是我的荣幸，我要感谢中国科学院科学出版基金委员会的热情支持和大力资助。我要感谢科学出版社领导为本书出版所做的精心组织和周密安排，感谢责任编辑黄海先生和他的同事们认真负责的工作。

中国科学院过程工程研究所名誉所长郭慕孙院士对本书的出版给予了高度的关注和支持，并不辞辛劳地亲自为本书撰写序文，使我深受感动，万分感激。同时我要感谢我所各级领导对我们工作的支持和我本人的关心，感谢我的同事们所做的种种贡献和对我的帮助。我还要感谢我的妻子沐静秋多年来对我的理解和支持，特别是在资料整理、书稿校对等方面所做的艰辛细致的工作。本书的出版还得到清华大学金涌院士的支持和举荐，作者在此表示衷心感谢。

流态化过程工程的资料是极其丰富的，限于篇幅，所选十分有限，加之是初次尝试，难免有不妥之处。同时由于作者的学术水平有限，错误在所难免，敬请批评指正，作者在此谨致衷心谢忱。

李佑楚

2006年12月于北京

目 录

序

前言

第一章 流态化过程工程及其发展	1
1.1 流态化力学特性	2
1.1.1 流态化现象	2
1.1.2 流态化类型	14
1.1.3 流体与颗粒相互作用	23
1.1.4 流态化特征参数	31
1.1.5 物料特征参数	44
1.2 流态化传递特性	46
1.2.1 流体与颗粒间的传递过程	46
1.2.2 流化床的热量传递	68
1.2.3 流化床的质量传递	87
1.3 流态化应用及其发展	89
1.3.1 标志性流态化过程	89
1.3.2 技术发展历程	95
1.3.3 经验与期待	99
1.4 小结与评述	102
参考文献	103
第二章 非金属矿流态化焙烧过程	113
2.1 碳酸盐热解	113
2.1.1 热解条件	113
2.1.2 碳酸盐热解过程	119
2.2 硫酸盐焙烧	125
2.2.1 概述	125
2.2.2 热解制酸生产过程	127
2.2.3 热解制酸联产水泥过程	129
2.3 硅酸盐煅烧	130

2.3.1 煅烧高岭土概述	130
2.3.2 煅烧工艺技术	134
2.4 硼镁矿物煅烧热解	138
2.4.1 工艺原理	138
2.4.2 工艺过程	140
2.5 硫铁矿焙烧	141
2.5.1 焙烧过程原理	141
2.5.2 流态化焙烧过程	143
2.6 小结与评述	147
参考文献	148
第三章 金属矿物流态化焙烧过程	150
3.1 氧化焙烧	150
3.1.1 全氧化焙烧	151
3.1.2 半氧化焙烧	155
3.1.3 氧化-还原焙烧	159
3.2 硫酸化焙烧	161
3.2.1 理论基础	161
3.2.2 锌精矿焙烧	164
3.2.3 铜精矿焙烧	168
3.2.4 硫化金精矿焙烧	170
3.2.5 含钴矿物焙烧	173
3.3 还原焙烧	177
3.3.1 概述	177
3.3.2 贫赤铁矿磁化焙烧	182
3.3.3 直接还原炼铁	191
3.3.4 熔态还原炼铁	197
3.3.5 氧化镍矿还原焙烧	201
3.4 氯化焙烧	203
3.4.1 概述	203
3.4.2 高钛渣氯化制四氯化钛	206
3.5 加盐焙烧	210
3.5.1 热力学基础	210
3.5.2 石煤钠化焙烧提钒	212

3.5.3 离析法焙烧	218
3.6 小结与评述	224
参考文献	225
第四章 煤能源转换流态化过程	230
4.1 煤加工利用概述	230
4.2 煤燃烧	231
4.2.1 流化床燃烧特点	231
4.2.2 流化床燃烧类型	238
4.2.3 流化床锅炉的设计	246
4.3 煤气化	249
4.3.1 碳气化热力学	249
4.3.2 煤气化动力学	253
4.3.3 煤气化过程	258
4.4 煤直接液化	265
4.4.1 煤加氢液化	265
4.4.2 煤快速热解制油	267
4.4.3 煤直接加氢烃化	274
4.5 煤综合能源过程	276
4.5.1 煤热解油、焦、能联产过程	276
4.5.2 煤热解-燃烧多联产过程	277
4.5.3 部分热解联合循环发电	279
4.6 小结与评述	279
参考文献	280
第五章 石油加工流态化过程	285
5.1 石油加工概述	285
5.2 石油裂化	286
5.2.1 裂化反应	287
5.2.2 产物组成	289
5.2.3 催化剂	289
5.2.4 裂化反应动力学	292
5.3 催化裂化过程	294
5.3.1 工艺条件	294
5.3.2 常、减压馏分油催化裂化	295

5.3.3 重质油催化裂化	298
5.4 石油裂解	305
5.4.1 催化裂解	305
5.4.2 石油热裂解	309
5.5 石油气化	316
5.5.1 工艺原理	316
5.5.2 气化产物组成预测	316
5.5.3 石油气化过程	318
5.6 小结与评述	320
参考文献	321
第六章 化学制备流态化过程	324
6.1 非催化制备过程	324
6.1.1 硼酸热解制硼酐	324
6.1.2 氢氧化铝煅烧制铝氧	329
6.2 催化合成过程	341
6.2.1 催化制备过程概述	341
6.2.2 合成气制烃类	342
6.2.3 合成气制甲醇	349
6.2.4 合成气制二甲醚	351
6.3 甲醇化学	353
6.3.1 甲醇制甲醛	353
6.3.2 甲醇制汽油	356
6.3.3 甲醇制烯烃	357
6.4 石油化工过程	358
6.4.1 有机单体的制备	358
6.4.2 有机单体的聚合	363
6.5 小结与评述	364
参考文献	366
第七章 生化与环境流态化过程	371
7.1 生化过程概述	371
7.1.1 生物类型及其培养	371
7.1.2 生物代谢及其产物	372
7.1.3 生化过程及其应用	374

7.2 细胞反应过程	374
7.2.1 生物细胞的培养	374
7.2.2 培养过程	377
7.3 酶促反应过程	384
7.3.1 生物催化概述	384
7.3.2 生物细胞或酶的固定化	387
7.4 生化反应器	389
7.4.1 气升式反应器	390
7.4.2 液固流态化反应器	391
7.4.3 三相流态化反应器	392
7.4.4 生化反应器的选型	394
7.5 生化应用过程	394
7.5.1 微生物发酵过程	394
7.5.2 酶促反应过程	401
7.6 生物降解过程	408
7.6.1 污水处理	408
7.6.2 废弃生物质转化	414
7.6.3 生物冶金	415
7.7 小结与评述	416
参考文献	417
第八章 流态化过程及反应器设计	420
8.1 流态化过程概述	420
8.2 工艺过程设计	424
8.3 流化床反应器	436
8.4 关键部件	442
8.4.1 分布板	443
8.4.2 内部构件	453
8.4.3 流化床料腿	456
8.4.4 气固分离器	466
8.5 过程测量与控制	467
8.6 过程技术经济评价	467
8.7 小结与评述	467
参考文献	468

第九章 鼓泡流态化工程	470
9.1 床层流动结构	470
9.1.1 气泡基本特征	471
9.1.2 气固两相流动	476
9.1.3 床层膨胀	477
9.1.4 扬析	480
9.2 流动模型	487
9.2.1 两相模型	487
9.2.2 气泡模型	488
9.3 床层气固混合	494
9.3.1 气体混合	494
9.3.2 固体混合	500
9.4 鼓泡流态化反应工程	504
9.4.1 非催化反应过程	505
9.4.2 催化反应过程	515
9.5 小结与述评	525
参考文献	526
第十章 快速流态化工程	534
10.1 快速流态化概述	534
10.1.1 发展历程	534
10.1.2 装置类型及操作特性	534
10.1.3 床层流动结构	540
10.1.4 快速流态化及其特点	542
10.2 床层空隙率分布	546
10.2.1 空隙率轴向分布	546
10.2.2 床层径向流动参数分布	553
10.3 气固相互作用	557
10.3.1 表观曳力系数	557
10.3.2 曳力系数分布	559
10.4 气固混合	559
10.4.1 气体混合	560
10.4.2 固体混合	563
10.5 快速流态化流动模型	564

10.5.1 气固两相流模型	565
10.5.2 环-核径向两区模型	572
10.6 快速流态化反应器设计	575
10.6.1 非催化气固反应过程	575
10.6.2 催化气固反应过程	581
10.7 小结与评述	584
参考文献	585
第十一章 液固与三相流态化工程	592
11.1 基本原理和现象	592
11.1.1 三相流化床	592
11.1.2 三相流动	594
11.2 操作类型及其流型	597
11.2.1 三相流化床操作类型	597
11.2.2 流型区划与床层结构	599
11.2.3 气泡特性	605
11.3 床层相含率	609
11.3.1 经典三相流化床	610
11.3.2 浆态流化床	612
11.3.3 三相内循环流化床	615
11.3.4 三相外循环流化床	617
11.3.5 磁场三相流态化	618
11.4 三相流化床的混合	619
11.4.1 液相返混	619
11.4.2 气体返混	622
11.4.3 固体返混	623
11.4.4 流动模型	623
11.5 三相流化床反应器设计	625
11.5.1 催化酶促反应器	625
11.5.2 生物细胞反应器	631
11.6 小结与评述	633
参考文献	634
第十二章 21 世纪流态化过程工程展望	639
12.1 工业过程新背景	639