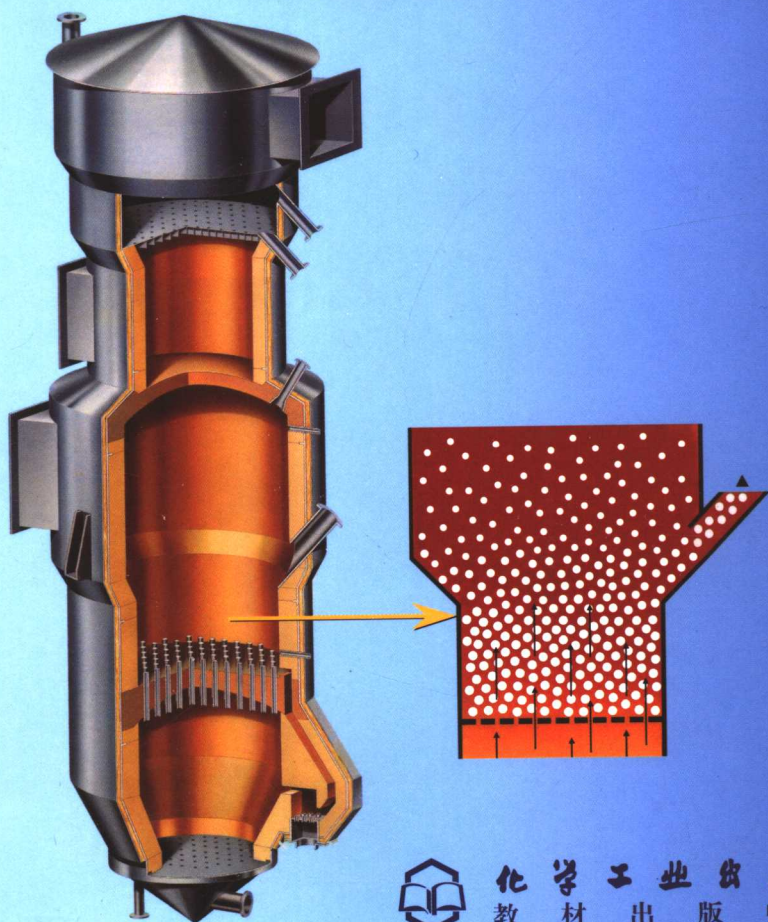


“研究生教育创新工程” 化工类研究生教学用书

流态化技术 基础及应用

吴占松 马润田 汪展文 编著



化学工业出版社
教材出版中心

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书

流态化技术基础及应用

吴占松 马润田 汪展文 编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

内容提要

流态化技术是颗粒操作的一个重要手段。流态化技术大大地简化了颗粒的加工和输送等过程,提高了效率,使其在炼油、化工、冶金、动力和医药等众多领域有着广泛的应用市场。

本书分为两篇,即流态化的技术基础和应用。基础篇主要内容包括:流态化的基本概念;流态化工艺设备的基本构成;固体颗粒特性及鼓泡床内的流动;气-固流化床的设计;其他流态化过程。应用篇主要内容包括:某些物理过程的应用;流态化燃烧;流态化技术在石油化工中的应用;流态化在煤炭气化中的应用;流态化在其他领域中的应用。

本书可作为热能、石油、化工、冶金和轻工等专业的研究生、本科生教学用书,也可作为科研、工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流态化技术基础及应用/吴占松,马润田,汪展文编
著. —北京:化学工业出版社,2006.5

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书

ISBN 7-5025-8656-3

I. 流… II. ①吴…②马…③汪… III. 流态化-应用-研究生-教学参考资料 IV. TF11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 044343 号

“研究生教育创新工程”化工类研究生教学用书

流态化技术基础及应用

吴占松 马润田 汪展文 编著

责任编辑:徐雅妮

文字编辑:丁建华

责任校对:王素芹

封面设计:尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行

教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 440 千字

2006年7月第1版 2006年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8656-3

定 价:38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

序

“化工类研究生创新人才培养模式、教学内容、教学方法和教学改革的研究”是2005年获得教育部研究生教育创新计划专项立项的研究生教育创新工程项目。该项目由天津大学牵头，清华大学、华东理工大学、浙江大学、大连理工大学、北京化工大学、南京工业大学、中国石油大学、四川大学、华南理工大学、香港科技大学和化学工业出版社等共同承担。编著系列“化工类研究生教学用书”是该项目的重要内容之一。

高质量的教学用书是培养高素质创新人才的重要基础。上述化工学科著名的高等院校发挥各自的优势，共同组织优秀的化工教育教学专家编写了本系列教学用书。我们希望本系列教学用书既有中国特色又展示国际前沿，能够为规范研究生教学、开拓研究生视野、全面提高我国化工类研究生教育水平做出贡献。

中国工程院院士、天津大学教授

王静康

2005年9月

前 言

流态化技术首先用于煤化工工业,并逐步为其他行业所借鉴,在过去70余年里,已用于炼油、化工、冶金、动力和医药等领域,可谓适用广泛。实践证明,某些工艺过程采用流态化技术之后,不仅提高了产品的产量和质量,还可以节约能源并利于环境保护。虽然不是所有的工艺过程都可以应用流态化技术,但通过其应用的广泛性和本身的一些优点可看到流态化技术的重要性。

由于生产中气-固流态化应用得最多,因此本书试图用不太多的篇幅,简明扼要、重点突出地介绍有关气-固流态化技术的基本内容和在各领域中的应用,并适当地介绍其他流态化过程。本书的编排思路是,首先介绍流态化技术所涉及的内容,希望能使读者得到全面的感性认识,然后再有重点地、分别深入介绍其中的重要部分。因此,在上篇中,首先介绍流态化的基本概念(第一章);然后介绍流态化工艺设备的基本构成(第二章);在上述的基础上,进一步介绍固体颗粒特性及鼓泡床内的流动(第三章)以及气-固流化床的设计(第四章),最后介绍一些其他流态化过程。期望通过上篇的介绍能帮助读者掌握和运用流态化技术的基本原理。在下篇中,将基本原理针对不同行业的特点加以推广应用,其所涉及的工业领域有:某些物理过程,如气力输送、造粒、干燥和换热等(第六章);流态化燃烧(第七章);石油化工(第八章);煤炭气化(第九章);物料的煅烧和焙烧(第十章)。为了帮助读者顺利掌握和运用基本技术原理,对重点内容给出了例题,希望能起到举一反三的作用。鉴于流态化一些实验和结论的局限性,本书在下篇中尽量搜集了一些工程实践的数据,注重实用,以供读者参考。但由于流态化技术本身的复杂性和涉及领域的广泛性,能否达到作者的初衷,还要由广大读者给予评价。

本书附有后记,主要是强调流态化技术的特点,说明从小型实验所得出结论的局限性,及提出某些不符合一般物理计算常规的问题,借以引起读者的特别注意,希望研究工作者和工程技术人员在今后的工作中创造出更加规范、合理的归纳实验数据的方法。同时也指出了技术基础的重要性,应尽量在基本原理的指导下,进行必要的条件试验或进行逐级放大,在化工领域尤其如此。

本书力图搜集多方面的、较新的研究成果,并注重其实际应用。然而,由于新的流态化技术在各领域中层出不穷及作者的水平所限,不足在所难免。若本书能给读者一些启发,在流态化技术研究和应用方面能有一个良好的开端,我们也就喜出望外了。

本书可供热能、石油、化工、冶金和轻工行业的工程技术人员和研究人员参考,也可以作为高等学校相关专业研究生、本科生的教学用书。

本书在编写过程中,得到了郭亮、左禹两位博士和张有贵工程师的帮助,特此表示感谢。

编著者

2006年4月于北京

目 录

上篇 基础篇

第一章 流态化的基本概念	3
第一节 流态化现象	3
一、流态化现象概述	3
二、非正常流化现象	4
三、流化质量	5
第二节 流态化技术的发展	5
第三节 流态化的分类	6
一、按流化状态分类	7
二、按流化介质分类	8
第四节 流态化在工业中的应用	9
一、物理过程中的应用	9
二、石油化工过程中的应用	14
三、燃烧和焚化过程中的应用	17
四、干馏和气化过程中的应用	17
五、煅烧和焙烧过程中的应用	18
六、生物流态化	19
第五节 流态化技术的优缺点	20
一、流态化技术的优点	20
二、流态化技术的缺点	21
参考文献	21
第二章 流态化工艺设备的基本构成	23
第一节 主体设备	23
一、壳体	23
二、气体预分布装置	23
三、气体分布板	25
四、内部构件	25
五、换热装置	26
六、床内气-固分离装置	28
第二节 辅助设备	30
一、物料的装卸	30
二、风机设备	31
三、床外气-固分离装置	31
四、颗粒流动控制机构	33
第三节 气体分布板的作用、结构及其特性	35

一、气体分布板的作用	35
二、气体分布板的结构及其特性	36
第四节 内部构件	39
一、内部构件的作用	39
二、内部构件的形式和特征	39
第五节 流化床参数的测量和实验研究	41
一、压力和储料量	42
二、床层的密度	42
三、气泡	43
四、两个并排流化床之间颗粒的输送	44
五、固体颗粒的流量	44
参考文献	46
第三章 固体颗粒特性及鼓泡床内的流动	48
第一节 颗粒物料的物性	48
一、颗粒的直径	48
二、颗粒的密度	50
三、床层空隙率	51
四、颗粒的比表面积和形状系数	51
五、休止角	52
六、颗粒的分类	53
第二节 鼓泡床中的流动特征	54
一、气泡相特征	54
二、乳化相特征	60
三、停留时间分布	62
第三节 影响流化过程的因素	65
一、颗粒粒度及其分布	65
二、颗粒粒度分布对流化特征参数的影响	66
三、颗粒粒径对壁面换热的影响	67
四、固体颗粒和流体热物性对换热的影响	67
五、颗粒的一些特殊问题	68
参考文献	68
第四章 气-固流化床的设计	69
第一节 流体通过床层的压降	69
一、流体通过固定床的压降	69
二、流化床的压降	71
第二节 临界流化速度和带出速度	71
一、临界流化速度的测定	71
二、临界流化速度的计算	72
三、带出速度	76
四、带出速度与临界流化速度之比	77
五、操作速度 u 的选择	78

第三节 膨胀比、空隙率、起伏比和夹带分离高度	79
一、膨胀比和床层空隙率	79
二、起伏比	82
三、夹带分离高度	82
第四节 分布板的计算	83
一、布气临界压降或布气临界开孔率	84
二、稳定性临界压降或稳定性临界开孔率	84
三、分布板压降和开孔率的确定	86
四、侧流型分布板缝隙的高度	87
第五节 换热器的设计	88
一、床层与换热表面之间换热的影响因素	88
二、传热过程	89
三、床层与换热表面换热的关联式	90
四、管内流体与壁面的换热系数	99
五、管壁的导热	100
第六节 非机械控制阀的设计	100
一、L 阀的设计	101
二、U 形阀的设计	101
第七节 气-固分离器的设计	103
一、旋风分离器	103
二、简易布袋除尘器的设计	109
参考文献	110
第五章 其他流态化过程	112
第一节 颗粒在管内的流动	112
一、垂直管向下卸料	112
二、移动床向下流动	114
三、流态化颗粒向下流动	115
四、颗粒垂直向上流动的操作气速	116
五、颗粒在水平管内的流动	117
六、管内充气输送的安全气速	117
七、气力输送的压降	119
八、弯管的压降	120
第二节 高速流态化	122
一、湍动流化床	122
二、快速流化床	124
三、实验情况	125
四、压降、流化速度及循环量	127
五、高速流态化实验研究进展及应用	128
第三节 喷动床	130
一、喷动床工艺参数的计算	130
二、喷动床的传热	134

三、喷动床的应用	135
第四节 三相流态化	137
一、初始流化	138
二、各相含率	139
三、气泡行为	141
四、气-液体积传质系数	143
五、浸没物体与床层的传热	144
六、三相流化床的应用	144
参考文献	146

下篇 应用篇

第六章 某些物理过程的应用	151
第一节 气力输送	151
一、气力输送的类型及设备	151
二、气力输送的几个工艺参数	152
三、稀相气力输送	155
四、密相动压气力输送	156
第二节 流化床造粒和涂敷	160
一、造粒机理	160
二、流化床造粒的操作条件	161
三、影响喷洒造粒的因素	161
四、喷嘴和黏结剂	162
五、造粒应用举例	162
第三节 干燥	166
一、湿空气	166
二、湿物料	168
三、物料衡算和热量衡算	169
四、流化床干燥器的类型	170
第四节 热交换	178
一、单层热交换器	178
二、多层热交换器	178
参考文献	180
第七章 流态化燃烧	181
第一节 流态化燃烧的评价	181
一、沸腾层锅炉	181
二、循环流化床锅炉	182
三、增压流化床锅炉	183
第二节 辅助计算	184
一、燃料的发热量	184
二、理论空气量的计算	184
三、脱硫剂的需要量	185

四、理论烟气体积的计算	185
五、实际的空气和烟气体积	186
六、物料和热量平衡计算	186
第三节 煤在流化床锅炉内的燃烧	188
一、煤种的选择	188
二、煤颗粒粒径的选择	189
三、煤颗粒燃烧的各阶段	190
四、影响流化床燃烧的因素	190
第四节 脱硫和减少氮氧化物的排放	192
一、脱硫	192
二、脱氮氧化物	196
第五节 重要部件和运行参数	198
一、布风板	198
二、操作速度和截面热负荷	200
第六节 沸腾层锅炉	201
一、沸腾层锅炉的结构	201
二、沸腾层锅炉的运行参数	202
三、沸腾层锅炉存在的问题	203
第七节 循环流化床锅炉	203
一、循环流化床锅炉的结构	204
二、物料循环系统	205
三、循环倍率	207
四、外置热交换器	207
五、旋风分离器	208
第八节 增压流化床锅炉	209
一、给煤系统	211
二、高温排渣和烟尘分离系统	212
第九节 流化床垃圾焚烧	212
一、流化床焚烧垃圾的优缺点	212
二、沸腾层焚烧炉	213
三、循环流化床焚烧炉	214
参考文献	216
第八章 流态化技术在石油化工中的应用	218
第一节 石油炼制的流化催化裂化反应器	218
一、催化裂化过程的化学反应	218
二、催化裂化催化剂	219
三、FCC 催化剂的失活和再生	219
四、FCC 装置	220
第二节 有机合成工业中的流化床反应器	224
一、邻苯二甲酸酐(苯酐)	224
二、醋酸乙烯合成	225

三、费-托合成反应器	226
四、乙烯氧氯化合成氯乙烯	227
五、丙烯腈	228
第三节 聚烯烃工业中的流化床反应器	230
一、流化床生产聚乙烯 (PE)	230
二、改进的聚乙烯流化床反应器	231
三、流化床生产聚丙烯 (PP)	232
四、多区循环反应器	233
参考文献	234
第九章 流态化在煤炭气化中的应用	235
第一节 流化床气化的评价	235
一、常压和加压流化床气化	235
二、常压和加压气流床气化	236
三、流化床气化反应过程	236
四、影响流化床气化的因素	237
第二节 流化床气化工艺	237
一、温克勒气化炉	237
二、U-gas 气化工艺	238
三、Cogas 气化工艺	240
第三节 气流床气化工艺	242
一、Foster Wheeler 气化工艺	242
二、K-T 气化工艺	243
三、德士古气化工艺	246
第四节 循环流化床气化工艺	249
一、循环流化床煤气工艺	249
二、两段式流化床煤气工艺	250
三、循环流化床蒸汽/煤气联产工艺	251
四、循环流化床气化技术的关键	252
参考文献	252
第十章 流态化在其他领域中的应用	253
第一节 流化床焙烧	253
一、流化床焙烧制取氧化铝	253
二、硫铁矿的焙烧	255
三、汞矿的焙烧	258
四、锌精矿的焙烧	258
第二节 流化床煅烧和烧结	259
一、铝土矿的烧结	259
二、石灰石、白云石的煅烧	259
三、水泥烧结	260
第三节 流化床选煤	260
一、流态化分选的特点	261

二、流化床分选设备	262
参考文献	262
附录	263
附录 1 空气鼓风机规格性能	263
附录 2 旋风分离器示例	265
附录 3 一些国家和地区燃煤锅炉污染物的排放标准	268
符号说明	269
后记	274

上 篇

基础篇

第一章 流态化的基本概念

第一节 流态化现象

一、流态化现象概述

流态化 (fluidization) 现象是指固体颗粒在流体 (气体或液体) 的作用下悬浮在流体中跳动或随流体流动的现象。在自然界中, 如河流的泥沙夹带、沙丘的自然迁移等, 从广义来说都是一种自然界的流态化现象。农业中对谷物进行的风选和矿业采金进行的浮选都是一种人工的流态化现象。除此之外, 流态化技术在工业中的应用就更加广泛。能够实现流态化过程的设备称为流化床或沸腾床, 例如流化床锅炉, 能使颗粒煤在空气中悬浮燃烧用以产生蒸汽; 流化床苯酐反应器, 利用铁钼催化剂在流化介质中悬浮, 使萘与氧反应产生邻苯二甲酸酐; 流化床干燥设备, 采用流态化方法干燥颗粒物料; 流化床气化设备, 采用流态化方法使煤炭颗粒在缺氧下燃烧产生煤气等。上述的一些工业设备由于要达到不同的目的或生产不同的产品, 虽然同属于流化床设备, 但其结构各有不同 (详见本章第四节和下篇)。

流态化现象可以由气体和固体颗粒、液体和固体颗粒以及气体与液体和固体颗粒形成, 即所谓的气-固流态化、液-固流态化和气-液-固三相流态化。其中以气-固流态化在工业中应用得最多。

在垂直容器中装入固体颗粒, 并由容器的底部经过分布板 (带有多孔的板) 通入气体 (见图 1.1)。起初固体颗粒静止不动, 此时为固定床状态, 如图 1.1 (a) 所示。随着气体量的不断增加, 当气体流速达到某一数值时, 颗粒开始松动, 此时气体的表观速度 (空塔速度) 即为起始流化速度 (临界流化速度, critical fluidized velocity), 通常以 u_{mf} 表示, 床层表现为临界流态化, 见图 1.1 (b); 继而, 随气速的增加, 床层开始膨胀并有气泡形成, 此时为流化床状态, 气泡内可能包含有少量的固体颗粒成为气泡相 (bubble phase), 气泡以外的区域成为乳相 (emulsion phase), 这种流化状态称为聚式流态化 (aggregative fluidization), 由于床层内有气泡形成所以也称为鼓泡床 (bubbling fluidization bed), 见图 1.1 (d), 如果床内没有气泡形成则称为散式流态化 (dispersed fluidization), 或称为平稳床 (smoothly fluidization bed), 见图 1.1 (c); 随着气体速度的再增加, 当达到终端速度 (terminal velocity) u_t 时, 颗粒就会被气流带出容器, 此种现象称为扬析 (elutriation), 或气力输送 (pneumatic transport of solids), 如图 1.1 (g) 所示, 最终颗粒会被气体全部带出容器。

由聚式流态化所形成的鼓泡床由于气泡的产生, 致使气-固表面接触恶化, 不利于固体颗粒表面的反应, 使得反应器的效率降低。要改善这种状况必须在反应器内设置构件, 用以破坏气泡。

当气体速度达到终端速度时, 则出现扬析现象。颗粒被带出床层后, 经一定的气-固分离设备, 将固体颗粒分离出来, 使其重新返回床层, 如此反复连续运行, 即形成循环流化床 (circulating fluidized bed, CFB)。

如果容器的截面积较小, 或其高度与直径之比相差较大, 气泡可能沿床层径向联合起

来,大到与容器的截面相等时,则会产生腾涌 (slugging),如图 1.1 (e) 所示。如果气泡沿床层轴向联合起来,贯穿整个床层时,则产生沟流 (channel flow),如图 1.1 (f) 所示。这些现象均是不正常的流态化现象,在工业规模的流化床中一般不会产生,但在实验室中有时会出现,这就给流化床的模拟放大带来一定的困难。值得提出的是,在流化床燃烧设备,特别是流化床垃圾焚烧设备中,有时煤炭或垃圾中混入了大块物料,会造成分布板上局部不流化 (死床)。在工业生产中如稍有疏忽,其后果将十分严重。下面就上述几种不正常的流态化现象加以详细介绍。

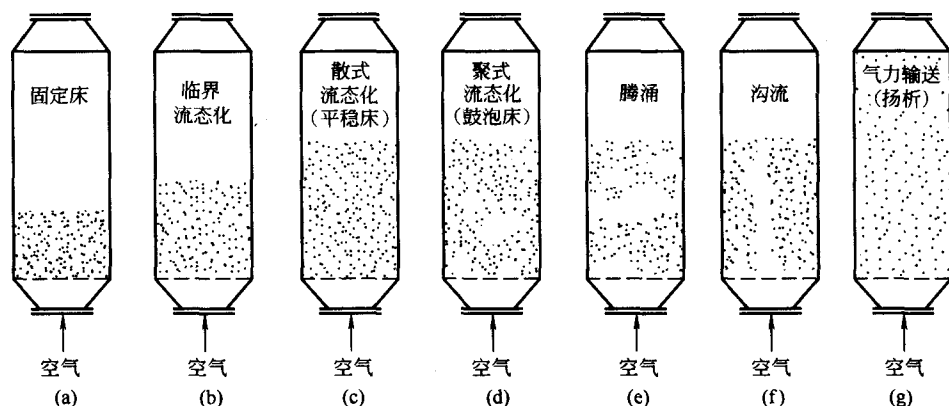


图 1.1 流态化不同阶段的状态

二、非正常流化现象

1. 腾涌

在气-固流态化中,床内气泡汇合长大,当气泡直径接近容器直径时,床内物料成活塞状向上运动,如图 1.1 (e) 所示。料层达到某一高度后崩裂,颗粒似雨淋而下,这种现象称为腾涌 (或称为气截、节涌、涌节)。

腾涌会造成床层密度极不均匀;降低催化剂的寿命和产品产量;增加固体颗粒的机械磨损和带出。另外,设备内部会受到冲击,容易损坏床内的零部件。

颗粒的性质、床层的高度、流体的速度等因素,都会影响腾涌的产生。下面几种情况容易产生腾涌:

- 床高与床径之比 (L/D) 较大时;
- 大颗粒比小颗粒容易产生腾涌;
- 在 L/D 较大时,气速增加到一定值时,就会产生腾涌,如流化催化裂化过程,催化剂颗粒平均粒径 $>100\mu\text{m}$, 气速 $>0.3\text{m/s}$, $L/D > 10$ 时就会产生腾涌。

在必须采用高床层、大颗粒物料的条件下,为消除腾涌,可以在床层内设置内部构件 (详见第二章第四节)。一般在 $L/D < 1$ 及设备较大时不易产生腾涌。

2. 沟流

在气-固流态化中,气体通过床层,其气速虽然超过临界流化速度,但床层并不流化,而是大量气体短路穿过床层,床层内形成一条狭窄通道,此时大部分床层仍处于静止状态,这种现象称为沟流,如图 1.1 (f) 所示。如沟流仅发生在床层的局部,称为局部沟流;如沟流贯穿整个床层,称为贯穿沟流。

沟流造成床层密度不均匀,有可能产生死床,在工业生产中会造成催化剂的烧结,降低

催化剂的寿命和效率，同时也降低了设备的生产强度。

颗粒的性质、流体的速度、床层的高度、设备结构等因素，都会影响沟流的产生，下面几种情况尤其容易产生沟流：

- 颗粒粒度较细且气速较低时；
- 潮湿的物料，易黏结、团聚的物料；
- 气体分布板设计得不好，通气孔过少或通过孔的气速太低。

消除沟流的有效方法是加大气速、物料预先干燥、在床内设置内部构件（详见第二章第四节）。

3. 分布板上局部不流化

分布板上局部不流化现象，很容易产生于流态化燃烧过程中。由于煤炭或垃圾是经过破碎和筛分，达到一定粒度才可送入流化床中使用，如偶然混入大块物料，或由于分布板设计缺陷，都会造成分布板上的局部不流化。由于床内温度较高，不流化区域又无风冷却，造成物料所含灰分熔化形成熔融灰渣，随着时间延长，不流化区域会不断扩大，严重者会使整个分布板结渣造成停产。这种情况出现后，清理分布板是十分困难的。唯一的解决办法是，设计良好的分布板，严格控制进料质量和床层温度。

三、流化质量

对于流化状态的好坏，通常以流化质量这一说法来描述。对于气-固两相流化床，则以流体与颗粒的混合、气-固接触状态等一系列参数来表征流化质量的好坏。

在气-固两相流化床中，气泡的生成、长大和崩裂，会引起床层密度的不均匀和床层压力的波动。大气泡的存在和运动破坏气-固两相的良好接触，会造成气体的短路，因而降低了气固加工的效果。所以通常用床层压降的波动（用应变仪进行测量或目测）、局部床层密度的变化（多用电容仪等进行测量）、床层料面起伏比等参数来评价流化状态的好坏。床层粒子的分级、温度分布、传热和传质系数的大小、流化床床身的震动等，在不同的情况下，都可以用来判断流化质量。

一般认为，流化床采用较宽的固体粒度分布、较浅的床层和较低的气速，则会出现较好的流化状态。

在流化床反应器内加设挡网、挡板等内部构件（详见第二章第四节），可以改善气相或固相停留时间分布，抑制气泡的生成和破碎气泡、强化两相接触、降低床层压力波动、减小床层料面的起伏比、使高床层操作成为可能等，都会起到提高流化质量的作用。应该指出，以上所说的表征流化质量的各参数，仅表示了流化状态某一方面的特征。例如，自由床（无内部构件流化床）较之有内部构件的流化床虽然有着更均匀的轴向、径向温度分布，但其总的反应效果却低于有内部构件的流化床。所以，孤立地认为流化状态的某一参数好就是流化质量好的看法，是不够全面的，要综合各种因素才能判断流化状态的优劣。

对于工业流化床反应器，一般以转化率的高低、收率的高低、副产物的多少等来判断流化质量的好坏。对于工业流化床燃烧器，一般以床层温度是否均匀、温度是否容易控制和排灰中含碳量的多少等来宏观判断流化质量的好坏。

第二节 流态化技术的发展

在 20 世纪初期，伴随着生产力的发展及大型工业的出现，流态化技术被用于工业生产。