

气固流态化的散式化

Particulatization of Gas-Solids Fluidization

李洪钟 郭慕孙 著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

气固流态化的散式化

Particulation of Gas-Solids Fluidization

李洪钟 郭慕孙 著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

气固流态化的散式化/李洪钟, 郭慕孙著. —北京:
化学工业出版社, 2002.10
ISBN 7-5025-4047-4

I. 气… II. ①李… ②郭… III. ①固体-流态
化-研究②气体-液化-研究 IV. TQ026

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 066509 号

气固流态化的散式化

李洪钟 郭慕孙 著

责任编辑: 张红兵

责任校对: 李 丽 吴桂萍

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话:(010)64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 8 字数 135 千字
2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-4047-4/TQ·1594
定 价: 25.00 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

前 言

流态化是化学工程科学与技术领域中一门新兴的学科，自开始至今仅半个世纪中已经得到广泛应用，例如众所周知的石油流态化催化裂化装置、循环流化床燃煤锅炉等。然而流态化的一些基本问题仍待解决。流态化一般分为聚式流态化和散式流态化两大类。聚式流态化通常出现于气固系统，其特征为气固分布不均匀，固体颗粒聚集成聚团，气体则聚集而形成气泡。此种气固不均匀分布状态大大降低了传热、传质和化学反应的速率。散式流态化一般出现于液固系统，其特征为颗粒均匀分散于液体流之中，不存在气泡与聚团，相间接触良好，热质传递与化学反应速率高。因此寻找有效的方法，将气固聚式流态化转化为散式流态化，一直是国内外科技界追求的目标。然而由于气固系统的固有特性，实现气固流态化的散式化相当困难。20世纪60~70年代，郭慕孙院士进行了稀相流态化、浅床流态化和快速流态化等无气泡气固接触的气固流态化体系的研究。上述体系中虽已无气泡，但仍有颗粒聚集体存在。而大量应用的普通气固流化床中则既存在气泡又存在聚团，亟待改进。近十余年来，随着纳米材料和超细催化剂科技的迅速发展，用于超细颗粒加工与反应的超细颗粒流化床反应器的研究与开发又成为新的研究热点。如何消除这类流化床中存在的严重颗粒聚团现象，实现“散式”流态化，成为研究的关键，也即是说，如何消灭与减小气泡与聚团，实现气固流态化的散式化势在必行。

20世纪80年代在郭慕孙院士的指导下，提出了“气固流态化的散式化”的研究课题，被列为国家自然科学基金委员会“七五”、“八五”重大项目及“九五”重点项目子课题，以及中国科学院多相反应开放实验室重点课题，进行了多年的实验研究，取得了阶段性成果，得到了国内外同行的肯定。研究成果“气固流态化的散式化理论与方法”获1999年中国科学院自然科学一等奖。

本书的目的在于将十余年的研究结果进行较系统的归纳与总结，将实现气固流态化散式化的一系列行之有效的方法介绍给读者。

本书由7章组成。第1章系统介绍了作者领导的科研小组近年来所采用的一系列行之有效的流态化质量的预测及评价理论与方法，如床层塌落法与无因次沉降时间 Θ 、光纤探头颗粒浓度测定法与床层局部不均匀指数 δ 和整体非理想指数 f_h 、双光纤探头颗粒与气泡尺寸和速度测定法、微观摄像

探头床层微观结构显示法、流态化质量判别准数 Dn 、颗粒当量比表面判据 S_c 等，从而为实验与理论研究提供了量化的基本手段。第 2 章分析了超细颗粒及黏性颗粒之间的相互作用力，介绍了文献中提出的各种作用力如范德华力、静电力、液体桥联力等的计算方法，提出了度量黏性颗粒团聚能力的自然聚团准数 Ae_n 。第 3 章描述了超细颗粒及黏性颗粒的流态化特性，提出了度量黏性颗粒在流化床中聚团能力的流态化聚团准数 Ae_f ，进而建立了预测流态化聚团尺寸的碰撞力平衡模型，并给予实验验证。第 4 章详细论述了实现气固流态化散式化的主要手段之一，颗粒设计；分别论述了原始颗粒设计与添加组分设计的原理与方法；根据实验结果，探讨了各类颗粒间“协同作用”机理，提出协同作用准数 S_y ，以量化协同作用的大小。第 5 章论述了改善流化质量的外力场方法，除着重介绍了作者所采用的纵向恒定磁场流态化及横向旋转磁场流态化的实验结果及探讨其作用机理外，也介绍了国内外有关振动场流态化、声场流态化的实验结果及作用机理。第 6 章讨论了内部构件及床型设计对改善超细及黏性颗粒流态化质量的作用，着重就快速流态化床型及孔浆式内部构件的实验结果及作用机理进行了研究。第 7 章探讨流体的性质对气固流态化质量的影响，讨论了通过流体设计实现气固流态化散式化的原理，并通过以 CO_2 为流体介质的高压流态化，及超临界流体流态化的实验结果，证明随着气体的密度与黏度的提高，气固流态化可以逐渐由聚式流态化向散式流态化过渡。

本书以大量的实验结果为依据，说明颗粒设计、外力场方法、内构件与床层设计、流体设计等是破碎与消灭气泡和聚团、实现气固流态化的散式化的有效方法；在此基础上，进一步阐明其作用机理，建立数学模型；可以指导气固流化床、尤其是超细颗粒及粘性颗粒流化床的设计与操作。本书力求通俗易懂、图文并重、理论与实践相结合，可作为从事化学反应工程、流态化技术、颗粒-流体两相流、颗粒学研究与应用的研究人员、工程技术人员的专业学术参考书，也可作为大专院校教师、研究生的教学参考书。

本书所包含的科研成果是在国家自然科学基金和中国科学院多相反应开放实验室基金的资助下完成的，作者谨此向国家给予的大力支持深表谢意！

由于作者水平所限，错误与疏漏在所难免，恳请读者批评指正。读者如能从本书中获得一点收益，当是作者最大的欣慰。

李洪钟

2000.11.1

于中国科学院化工冶金研究所

内 容 简 介

流态化是化学工程科学与技术领域中一门新兴的学科，自出现至今仅半个世纪已经得到广泛应用。流态化一般有散式流态化和聚式流态化两大类型。散式流态化通常出现于液固系统，其相接触良好，传热、传质与化学反应速率高；聚式流态化一般出现于气固系统，其特征与散式流态化相反。因此寻找有效的方法，将气固聚式流态化转化为散式流态化，一直是国内外科技界追求的目标。

本书作者将十余年的研究成果进行较系统的归纳和总结，将实现气固流态化散式化的一系列行之有效的方法介绍给读者，对改进气固流态化操作质量有一定的启迪和指导作用。

本书共分7章。分别介绍流态化质量的预测及评价理论和方法，颗粒间的相互作用力，超细颗粒及黏性颗粒的流态化特性，改善气固流态化质量的颗粒设计、流体设计、内部构件和床型设计、外力场方法等。

本书供从事化学反应工程、流态化技术、颗粒-流体两相流、颗粒学研究与应用的研究人员、工程技术人员使用，也可作为大专院校有关专业的教师、研究生的教学参考书。

目 录

第 1 章 气固流态化质量的预测和评价方法	1
1.1 气固流态化质量的理论预测	1
1.1.1 准数判据	1
1.1.2 颗粒特性判据	4
1.2 气固流态化质量的实验评价方法	9
1.2.1 床层塌落法	9
1.2.2 多功能流态化数据采集系统.....	12
1.2.3 床层局部空隙率波形分析法.....	13
1.2.4 床层整体膨胀和理想膨胀对比法.....	15
1.2.5 床层流化状态微观摄像分析法.....	16
1.2.6 双光纤床层空隙率信号相关分析法.....	19
第 2 章 超细颗粒和黏性颗粒间的相互作用力	21
2.1 颗粒物料的黏性力.....	21
2.2 黏性颗粒间各种作用力的理论计算.....	22
2.2.1 范德华力 (Van der Waals 力)	23
2.2.2 Hamaker 常数 A	23
2.2.3 静电引力.....	24
2.2.4 液体桥联力.....	25
2.3 黏性颗粒团聚能力的度量.....	25
第 3 章 超细颗粒和黏性颗粒的流态化特性	27
3.1 超细颗粒和黏性颗粒的定义.....	27
3.1.1 超细颗粒.....	27
3.1.2 黏性颗粒.....	28
3.2 超细颗粒和黏性颗粒的流态化特征.....	28
3.3 超细颗粒和黏性颗粒聚团流态化相图.....	32
3.4 超细颗粒和黏性颗粒流态化聚团尺寸的模型计算.....	32
3.4.1 流态化聚团准数 Ae_f	32
3.4.2 流态化聚团的力平衡模型.....	33
3.5 流态化聚团力平衡模型的实验验证.....	37
第 4 章 颗粒设计	38

4.1	原始颗粒设计	38
4.2	添加组分的设计	40
4.2.1	无黏性颗粒之间的组合	40
4.2.2	无黏性颗粒和黏性颗粒之间的组合	42
4.2.3	黏性颗粒和黏性颗粒之间的组合	47
4.2.4	添加量的经验估算	49
4.3	协同作用机理的探讨	50
4.3.1	聚团的微观结构和相应的流化特性	50
4.3.2	协同作用的物理模型	51
4.3.3	双组分颗粒的微观接触模型	52
第5章	外力场方法	55
5.1	振动场流态化	55
5.2	声场流态化	57
5.3	磁场流态化	59
5.3.1	磁场流化床的流动特征	59
5.3.2	C类物料在纵向恒定磁场中的流态化	61
5.3.3	C类物料在横向旋转磁场中的流态化	67
第6章	内部构件和床型设计	79
6.1	超细颗粒和黏性颗粒的快速流态化	81
6.1.1	问题的提出	81
6.1.2	实验装置和实验物料	81
6.1.3	实验发现	83
6.2	超细颗粒和黏性颗粒流化床中的内部构件	84
6.2.1	实验装置和实验物料	84
6.2.2	内部构件的种类和结构	85
6.2.3	实验方法	86
6.2.4	实验现象和结果	87
第7章	流体设计	91
7.1	流体设计的原理	91
7.2	实验设备和实验物料	98
7.3	实验结果	100
7.4	结论	104
	符号说明	105
	参考文献	109

第 1 章 气固流态化质量的预测和评价方法

气固流态化一般分为聚式流态化和散式流态化两大类。聚式流态化的特征是体系中存在气泡和聚团，颗粒在流体中分布不均匀；散式流态化的特征是体系中不存在气泡与聚团，颗粒在流体中均匀分散，如图 1-1 所示。气泡与聚团尺寸越小，则各自在气体与颗粒中所占的比率越小，越接近于散式流态化，其流化质量越好。

研究气固流态化的散式化方法，首先必须建立预测与评价气固流态化质量的理论与方法。

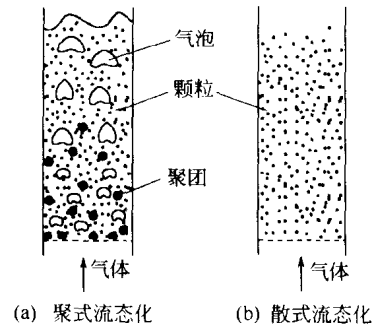


图 1-1 气固流态化的类型

1.1 气固流态化质量的理论预测

所谓预测是指在已知气体与颗粒的物性参数以及流化床操作条件的情况下，不需通过实验考察，而经计算或者查阅图表所得到的某些数据，即可预知该体系的流态化质量。

1.1.1 准数判据

为了预测某流体-颗粒体系的流态化质量，前人已经提出了若干准数作为判据^[1~8]，如表 1-1 所列。Wilhelm 和 Kwauk (郭慕孙)^[1]首先提出用最小流态化速度 u_{mf} 为特征速度的 Froude 准数 Fr_{mf} 来区分聚式与散式流态化：当 $Fr_{mf} < 0.13$ 时，为散式流态化； $Fr_{mf} > 1.3$ 时，为聚式流态化。Harrison 等人^[5]提出用流化床中球盖型气泡或液泡的稳定尺寸来划分聚式流态化与散式流态化。该理论认为当流化床中的气泡或液泡的上升速度 u_b 大于颗粒的自由沉降速度 u_t 时，气泡或液泡尾迹中的颗粒将失散，气泡或液泡将变得不稳定而遭破坏。以 $u_b = u_t$ 为条件，可以求得气泡或液泡的最大稳定尺寸 D_e 。结果发现多数气固流态化系统的 D_e 值较大， $D_e/d_p > 10$ ，但多数液固流态化系统的 D_e 值较小， $D_e/d_p \approx 1$ 。因此提出

当 $D_e/d_p > 10$ 时，为聚式流态化；当 $D_e/d_p < 1$ 时，为散式流态化。

与 Harrison 等^[5]的思路不同，Doichev 等^[3]和 Foscolo 等^[7]则不讨论何种条件下气泡（或液泡）是稳定的，而是讨论何种条件下将出现具有气泡（或

液泡) 的稳定系统。Foscolo 等^[7]认为, 当流化床中空隙扰动的传播速度 u_c 等于弹性波的速度 u_e 时, 将发生鼓泡现象。因此提出

当 $u_c \geq u_e$ 时, 为聚式流态化; 当 $u_c < u_e$ 时, 为散式流态化。

由于各位作者的实验范围所限, 这些判据的准确度及适用范围各不相同。刘得金^[8]对各判别准数的适用性进行了对比, 如图 1-2 所示。该图表明, 刘得金提出的流态化质量判别准数 Dn (Discrimination number) 更符合实验结果, 因此本章将重点介绍 Dn 准数, 见式 (1-1)。

$$Dn = \left(\frac{Ar}{Re_{mf}} \right) \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right) \quad (1-1)$$

表 1-1 聚式流态化与散式流态化的判据^[8]

作 者	判 据	判 据 值	
		散 式	聚 式
Wilhelm 和 Kwauk, 1948 ^[1]	$Fr_{mf} = \frac{U_{mf}^2}{gd_p}$	$Fr_{mf} < 0.13$	$Fr_{mf} > 1.3$
Harrison 和 Davidson, 1961 ^[5]	$\frac{D_e}{d_p} = 71.3 \left(\frac{\mu_f^2}{g d_p^3 \rho_f^2} \right) \left(\frac{\rho_p - \rho_f - \epsilon_{mf}}{\rho_p - \rho_f} \right) \left[1 + \frac{g d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f)}{54 \mu_f^2} \right]^{1/2} - 1$	$\frac{D_e}{d_p} < 1$	$\frac{D_e}{d_p} > 10$
Romero 和 Johanson, 1962 ^[6]	$R = (Fr_{mf})(Re_{mf}) \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right) \left(\frac{H_{mf}}{D_T} \right)$	$R < 100$	$R > 100$
Verloop 和 Heertjes, 1970 ^[2]	$N_{tr} = \sqrt{g d_p^3} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\mu_f} \right)$	$N_{tr} < 50$	$N_{tr} > 5000$
Doichev, 1974 ^[3]	$N_f = \sqrt{Ar \frac{\rho_b}{\rho_f}}$ $(N_f)'_{cr} = 128 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^{1.5}}{\epsilon_{mf}^2 (3 - \epsilon_{mf})}$ $(N_f)''_{cr} = 640 \frac{(1 - \epsilon_{mf})^{1.5}}{\epsilon_{mf}^2 (3 - \epsilon_{mf})}$	$N_f < (N_f)'_{cr}$	$N_f > (N_f)''_{cr}$
Foscolo 和 Gibilaro, 1984 ^[7]	$U_c = \frac{(g d_p)^{0.5}}{U_t} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right)^{0.5}$ $U_c = 0.56 n (1 - \epsilon_b)^{0.5} \epsilon_b^{n-1}$	$U_c < U_e$	$U_c > U_e$
Liu, Kwauk 和 Li, 1996 ^[8]	$Dn = \left(\frac{Ar}{Re_{mf}} \right) \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)$	$0 \leq Dn \leq 10^4$	$Dn > 10^6$

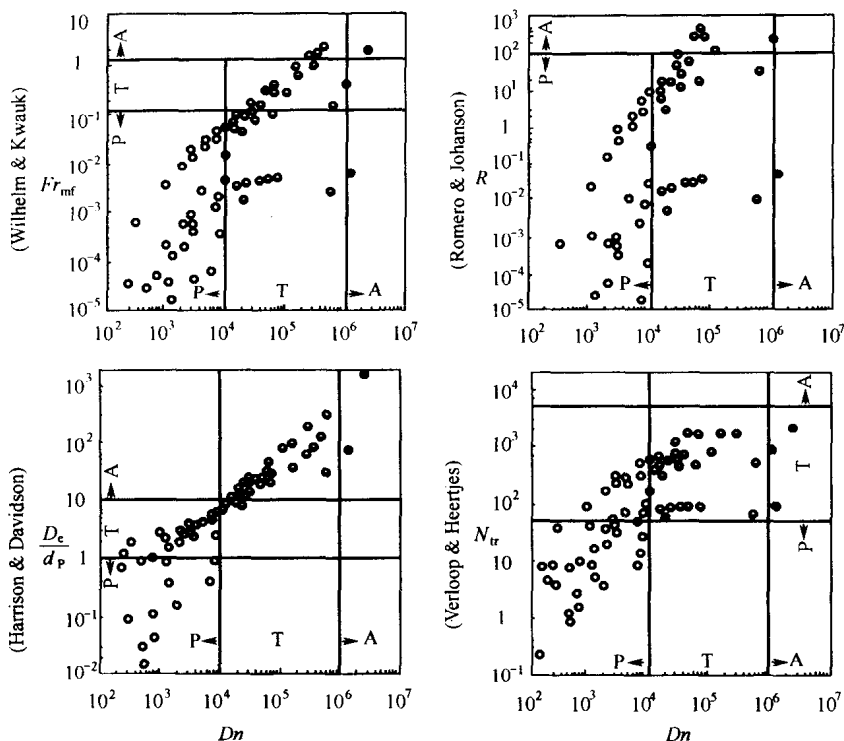


图 1-2 散式 (P)、过渡式 (T) 和聚式 (A) 流态化的准数
预测与实验观察之间的对比^[8]

图中: P 区为散式流态化, ○为实验点; T 区为过渡式流态化, ●为实验点;
A 区为聚式流态化, ●为实验点。

式 (1-1) 右端 $\left(\frac{Ar}{Re_{mf}}\right)$ 项代表颗粒和流体性质的影响, 它可以由 Wen-Yu 方程式 (1-2)^[9] 计算。

$$Ar = 1650 Re_{mf} + 24.5 (Re_{mf})^2 \quad (1-2)$$

对小颗粒 ($Re_t < 20$)

$$\frac{Ar}{Re_{mf}} = 1650 \quad (1-3)$$

对大颗粒 ($Re_t > 20$)

$$\frac{Ar}{Re_{mf}} = 1650 + 24.5 Re_{mf} \quad (1-4)$$

式 (1-1) 右端的 $\left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f}\right)$ 项代表颗粒与流体密度的影响。刘得金^[8] 对其实验数据及文献报道的数据进行了归纳, 给出的判据值见式 (1-5) ~ 式 (1-7)。

$$\text{散式流态化} \quad 0 \leq Dn \leq 10^4 \quad (1-5)$$

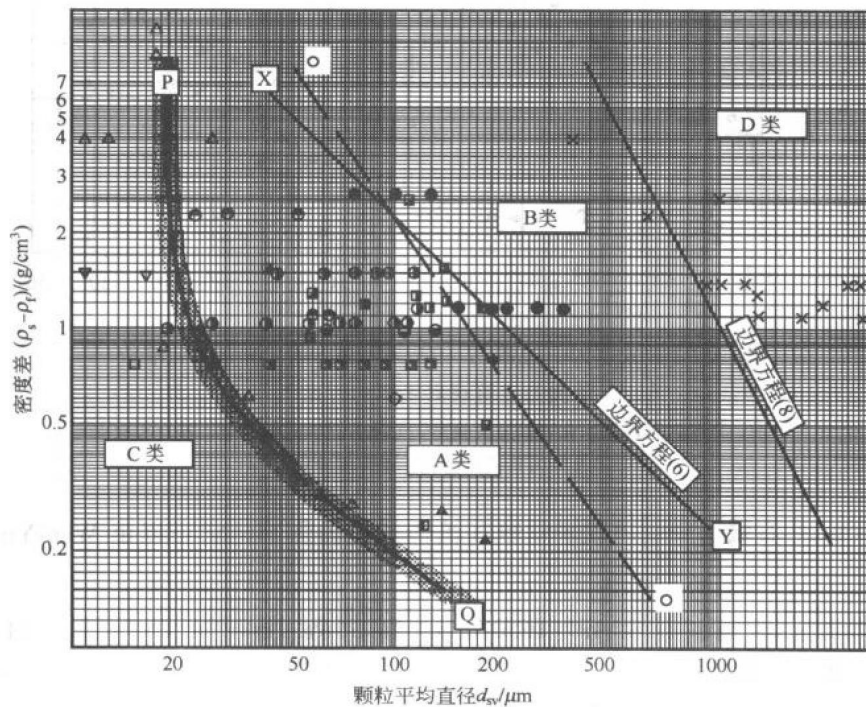
$$\text{过渡流态化} \quad 10^4 < Dn \leq 10^6 \quad (1-6)$$

$$\text{聚式流态化} \quad Dn > 10^6 \quad (1-7)$$

1.1.2 颗粒特性判据

1.1.2.1 Geldart 判据

气固流态化的特性在很大程度上取决于固体颗粒的性质，主要是颗粒粒径和密度，由此也可以粗略地预测气固体系流态化的质量。Geldart^[10]将已知的颗粒状物料按其流态化质量分为 A、B、C、D 四大类，并根据颗粒的尺寸和密度，做出了以密度差 $(\rho_s - \rho_f)$ 为纵坐标，以颗粒表面积/体积平均直径 d_{sv} 为横坐标的分类图，如图 1-3 所示。



图例

<p>C类颗粒特性 报道者</p> <p>△ Baerns</p> <p>▽ Brekken et al</p> <p>□ de Jong et al</p> <p>A类颗粒特性 报道者</p> <p>▲ Baerns</p>	<p>■ Davies et al</p> <p>■ Rietema</p> <p>■ de Jong et al</p> <p>■ Godard et al</p> <p>● Oltrogge</p> <p>● Kehoe</p> <p>◆ de Groot</p> <p>● Geldart论文^[10]</p>	<p>B类颗粒特性 报道者</p> <p>◆ de Groot</p> <p>● Geldart论文^[10]</p> <p>D类颗粒特性 报道者</p> <p>× Mathur</p>
---	--	---

图 1-3 Geldart 的颗粒物料流态化分类图 (常温、常压、空气)^[10]

图 1-3 中, A-B 的边界方程 (6) 为

$$(\rho_s - \rho_f)d_p = 225 \quad (1-8)$$

B-D 的边界方程 (8) 为

$$(\rho_s - \rho_f)d_p^2 = 10^6 \quad (1-9)$$

式中 ρ_s 、 ρ_f —— 分别为颗粒密度与流体密度, g/cm^3 ;

d_p —— 颗粒直径, μm 。

(1) A 类物料的流态化特征

A 类物料一般为小尺寸, 低密度 (小于 $1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$) 的颗粒, 如某些裂化催化剂。此类物料流化时, 在气泡产生之前已有较大膨胀, 当供气突然中断时, 床层塌落速度较慢, 相当于浓相中的表观气速, 说明颗粒之间滞留较多的非气泡形式的气体。在加大气速时, 即使出现少量气泡就会产生明显的颗粒循环与混合, 气泡的破裂与会合频繁。气泡上升速度大于颗粒间的气体速度, 浓相中的气体明显返混, 浓相和气泡之间的气体交换通量较大。由此可见 A 类颗粒的流态化质量较好。

(2) B 类物料的流态化特征

B 类物料的平均尺寸大致为 $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$, 颗粒密度范围大致为 $4 \text{ g}/\text{cm}^3 > \rho_s > 1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$, 如砂子。当气速稍高于初始流态化速度时就有气泡产生; 床层膨胀很小; 当气源突然切断时, 床层迅速塌落; 气泡上升速度高于颗粒间气体速度; 气泡尺寸随床高度与气速呈线性增加; 气泡只是并聚而很少破裂。浓相气体的返混较少, 气泡与浓相间的气体交换也少。

(3) C 类物料的流态化特征

C 类物料的主要特征是具有明显的黏性, 难以形成正常流态化状态, 常产生节涌和沟流。其产生的原因为颗粒间的黏性力大于流体施加于颗粒的曳力。黏性力的产生一般归因于非常小的颗粒尺寸、强的静电力、非常潮湿或具有黏性的物料。颗粒的混合以及床层与表面的热传递非常差, 远不如 A、B 类物料。

(4) D 类物料的流态化特征

D 类物料一般为尺寸大或非常重的颗粒。与 A、B 类颗粒不同, 气泡上升速度小于颗粒间的气体速度, 因而有气流从气泡底部进入, 从气泡顶部穿出。固体颗粒的混合较弱, 浓相气体的返混也较少, 颗粒周围的气体流型应属于湍流, 从而引起颗粒的磨损与产生的细颗粒被带出。由于颗粒的动量大, 颗粒间接触较少, 所以不能形成颗粒的团聚, 即使相对黏性较大的物料也可以实现流态化。当气体从床底中心孔口进入时, 则会形成喷泉床。

1.1.2.2 Grace 判据

Grace^[11]在收集与分析了大量非常温、非常压、非空气的流态化系统的数据的基础上,对 Geldart 的分类图进行修正,使其不仅适用于常温常压下的颗粒-空气系统,而且适用于非常温、非常压的颗粒-气体系统。经 Grace 修正后的 Geldart 分类如图 1-4 所示。

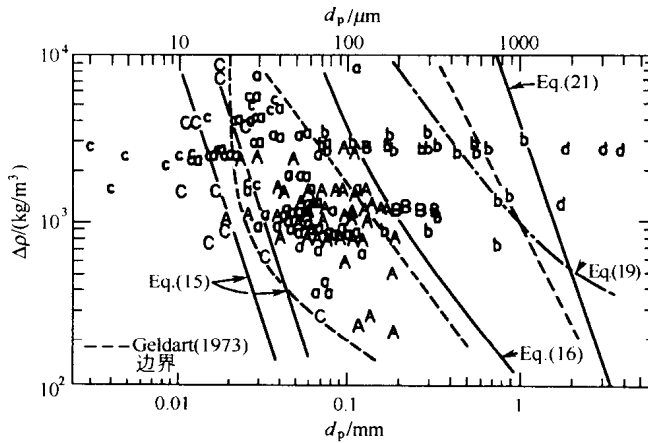


图 1-4 Grace 的颗粒物料流态化分类图^[11]
(适用于常温常压及非常温常压的颗粒-气体系统)

图 1-4 中, A-B 的边界方程 (16) 为

$$d_p^* = 101 \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right)^{-0.425} \quad (1-10)$$

式中

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_f g (\rho_s - \rho_f)}{\mu_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} = Ar^{\frac{1}{3}} \quad (1-11)$$

B-D 的边界方程(21)为

$$d_p^* = 53 \quad (1-12)$$

A-C 的边界方程(15)为

$$d_p^* = 0.68 \sim 1.1 \quad (1-13)$$

1.1.2.3 Wang-Li 判据

Wang 和 Li^[12]提出了颗粒的当量比表面 S_e 的概念。与颗粒的单位质量表面积 S_t 相当。对一个任意形成的颗粒,其表面积 S_p 可表示为

$$S_p = \alpha d_p^2 \quad (1-14)$$

其质量 M_p 可表示为

$$M_p = \beta d_p^3 \rho_p \quad (1-15)$$

故

$$S_t = \frac{S_p}{M_p} = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{1}{\rho_p d_p} \quad (1-16)$$

令

$$S_e = \frac{1}{\rho_p d_p} \quad (1-17)$$

作为判据，可以预测颗粒的流态化行为。

当物料为同种物料的 n 个不同粒径 d_{pi} 的颗粒组成时，

则

$$S_e = \frac{1}{\rho_p \bar{d}_p} \quad (1-18)$$

式 (1-18) 中

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (1-19)$$

式中， x_i 为颗粒直径为 d_{pi} 组分的质量分数。

当物料由 m 种不同密度的物料组成，每种物料又由 n 种不同粒径的颗粒组成时，则

$$S_e = \sum_{j=1}^m y_j S_{ej} \quad (1-20)$$

$$y_j = \frac{M_j}{M} \quad (1-21)$$

式中， M_j 为第 j 种物料的质量分数； M 为物料总质量。

$$S_{ej} = \frac{1}{\rho_{pj} \bar{d}_{pj}} \quad (1-22)$$

式中， ρ_{pj} 为第 j 种物料的颗粒密度； \bar{d}_{pj} 为第 j 种物料按式 (1-19) 计算的平均粒径。

在归纳文献报道的实验数据基础上，Wang 和 Li 提出如下判据。

A 类物料

$$5 < S_e \leq 25 \quad (1-23)$$

B 类物料

$$1 < S_e = 5 \quad (1-24)$$

C 类物料

$$S_e > 25 \quad (1-25)$$

D 类物料

$$S_e \leq 1 \quad (1-26)$$

上述判据适用于非黏性物料，对黏性物料的预测性较差。图 1-5、图 1-6 为 S_e 判据与实验数据的对比。由图可见，除了少数 A、C 类物料的判别与实验数据有所不符外，其余均与实验数据相符合。

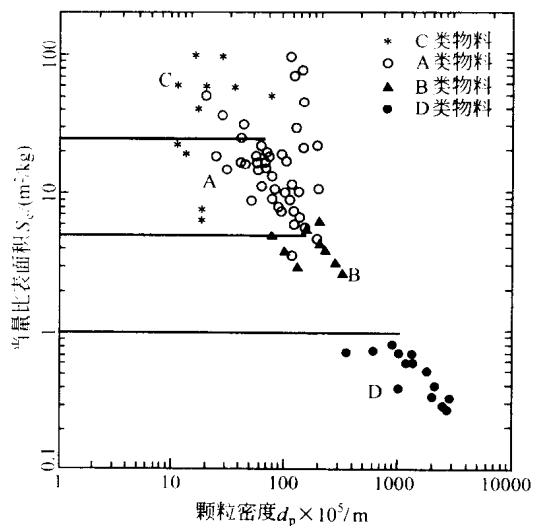


图 1-5 S_e 判据与文献数据的对比^[12]
(以粒径 d_p 为参数)

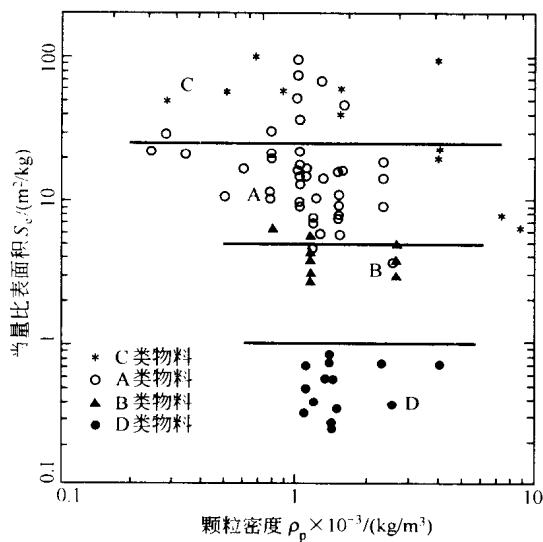


图 1-6 S_e 判据与文献数据的对比^[12]
(以颗粒密度 ρ_p 为参数)

1.1.2.4 A类与C类物料的其他便捷判别法

Geldart 等^[13]曾建议应用 Hausner 比 ρ_{bt}/ρ_{ba} (即敲装密度 ρ_{bt} 与松装密度 ρ_{ba} 之比) 来区分 A 类与 C 类物料, 其判据为

$$\text{A 类物料} \quad \frac{\rho_{bt}}{\rho_{ba}} < 1.25$$

$$\text{C 类物料} \quad \frac{\rho_{bt}}{\rho_{ba}} > 1.40$$

$$\text{A-C 过渡区物料} \quad 1.25 \leq \frac{\rho_{bt}}{\rho_{ba}} \leq 1.40$$

赵瑀等^[14]建议用休止角 θ_r 来区分 A 类与 C 类物料, 其判据为

$$\text{A 类物料} \quad \theta_r < 35^\circ$$

$$\text{C 类物料} \quad \theta_r > 40^\circ$$

$$\text{A-C 过渡区物料} \quad 35^\circ \leq \theta_r \leq 40^\circ$$

上述四种仅由颗粒特性来预测其流态化特征的判据中, 以 Grace 修正的 Geldart 判据的适用范围最广, 建议读者采用。其余判据则更为简便, 可作为初略评估的判据。

1.2 气固流态化质量的实验评价方法

理论预测目前仅能定性地预知给定的气固体系的流态化“类型”(聚式、散式、过渡态)及颗粒物料的“类别”(A, B, C, D)。要定量确定气固体系的流态化质量, 则需另由实验来测定与评价。目前常用的方法有: 床层塌落法、床层压降曲线和床层膨胀曲线分析法、床层局部空隙率波形分析法、床层整体膨胀与理想膨胀对比法、床层流化状态微观摄像分析法、双光纤床层空隙率信号相关分析法等。

1.2.1 床层塌落法

床层塌落法是目前评价气固流化质量的最为简单而有效的方法, 已被许多研究者采纳^[16,17]。通常的气固流化床由气泡相、浮化相组成, 有时也出现非流化的死区。床层塌落法是将正处于流化状态下的床层的气源突然切断, 然后记录床层高度随时间的变化, 从而在床高 z 与时间 t 的平面上, 绘制出 $z-t$ 曲线, 称塌落曲线, 如图 1-7 所示。该曲线一般由最初的气泡逸出阶段, 中间的受阻沉降阶段和最后的固相压缩阶段三部分组成。

① 气泡逸出阶段 床层塌落迅速, 与时间呈线性关系, 此阶段床高 z_1 可由式 (1-27) 描述。

$$z_1 = z_0 - u_1 t \quad (1-27)$$

式中, $u_1 = \frac{dz_1}{dt}$ 为第一阶段塌落速度。