

粉体粒度分布分维与流动性及滑石对流动性影响

Correlation of Powder's Particle Size Distribution Fractal with Flowability and the Effect of Talc on Flowability

胡小芳, 马 静, 胡大为, 林丽莹
(华南理工大学, 广州 510640)

HU Xiao-fang, MA Jing, HU Da-wei, LIN Li-ying
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

摘要: 通过粉体粒度分布分形维表征粒度分布和粉体流动性, 并研究滑石粉对不同分形维粉体的流动性的影响。结果表明, 粉体粒度分布分形维能很好的表征粉体的流动性能; 流动助剂滑石粉掺入质量分数小于 2% 时, 粒度分布分形维越小的粉体, 其流动性改善越显著; 当掺入质量分数为 3% ~ 5% 时, 各不同粒度分布分形维值粉体流动性变化平缓。

关键词: 粒度分布; 分形维; 流动助剂

中图分类号: TB44 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)02-0042-04

Abstract: Powder's particle size distribution fractal was used to denote particle size distribution and powder's flowability, action of talc on the flowability of the powders which hold different fractal dimensions was discussed. The results show that powder's particle size distribution fractal could denote the flowability of powder. After talc was adulterated into the powder, the flowability changed; when the adulteration ratio less than 2% (mass fraction), the smaller of the powder's fractal dimension is, the more remarkable the flowability changes. When adulteration ratio reaches 3% 5% (mass fraction), the flowability of powders changes smoothly.

Key words: particle size distribution; fractal dimension; gliant

粉体流动性是粉体性能的重要指标, 测定并改善粉体的流动性, 对粉体生产工艺、输送、贮存、装填等具有重要意义。现行粉体流动性测试方法主要有: 卡尔指数 (Carr Index) 法^[1]、比表面法^[2] 和 Jenike 法^[3, 4] 等。这些方法均属宏观流动性测量方法, 没有考虑粉体流动性的微观机制, 这不利于深入考察诸如颗粒分布、颗粒形态以及流动助剂等对流动性的影响情况。

研究表明, 粉体颗粒粒度分布具有分形特征^[5], 粒度分布分形维数值可描述粉体颗粒粒度分布, 可用于从微观角度表征粉体颗粒流动性; 已证实粉体粒度分布分形维数值越大, 粉体流动性越好^[6]。

本工作研究了流动助剂 (滑石粉) 对粉体流动性的影响及其与粉体颗粒粒度分布分形维的关系, 得到了一些有意义的结果。

流动助剂的作用机理较为复杂, 固体流动助剂对粉体流动性的改进主要通过颗粒表面成膜、填充颗粒凹凸等。通常操作中选择与使用流动助剂往往依赖于个人经验。本工作通过使用粉体粒度分布分形维值指导流动助剂的选择与用量, 对粉体流动性改进具有一定的意义。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

流动助剂: 滑石粉 (Talc, ≤ 200 目) 白色粉末, 无毒无味。分子式为 $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。

滑石粉是一种常用廉价流动助剂, 一般认为它通过填充颗粒表面凹凸, 降低颗粒表面粗糙度, 达到降低颗粒间的摩擦力、改善颗粒流动性的作用。

研究粉体: 五种不同粒度的黏土质粉体颗粒 (编号 A, B, C, D, E), 粉体粒度 $\leq 280\mu\text{m}$ 。

1.2 实验设备

超声波分散仪: 广州市新栋力超声电子设备有限公司。

显微研究工具: Leica 研究级偏光显微镜 (USD28500[ST2004H0803])。

图片采集: Sony 数码相机 DSG-W1, 510 万像素。

1.3 粉体颗粒粒度分布分形维数值测定方法

1.3.1 粉体粒度分布分形维数值测定数学模型

光学显微系统具有同时测量颗粒粒径和几何特征的能力, 据此, 引入颗粒的几何特征, 包括颗粒的投影

面积、最大投影直径和最小投影直径等,可计算颗粒群粒度分布分形维数。基于数字显微特点并考虑体积特征的颗粒粒度分布分形维数计算模型为^[6]:

$$\lg\left(V(\delta < \overline{d_i})/V_0\right) = 3\lg\left(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}}\right) - D\lg\left(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}}\right)$$
$$0 < D \leq 3 \tag{1}$$

其中: $\overline{d_i}$ 表示两粒级 d_i 和 d_{i+1} 间粒径的平均值; $\overline{d_{\max}}$ 为最大粒级颗粒的平均直径; V_0 表示所有颗粒的总体积; D 是粒度分布分形维数。体积 V 的计算公式按照式(2)计算:

$$V = \frac{1}{2}CS(d_{\max} + d_{\min}) \tag{2}$$

其中: C 为一常数; S 为投影面积; d_{\max} 为最大投影直径; d_{\min} 为最小投影直径。

根据(1)式,以 $\lg(V(\delta < \overline{d_i})/V_0) - \lg(\overline{d_i}/\overline{d_{\max}})$ 作图并线性拟合各数据点得到相应的直线,即可得到颗粒群粒度分布分形维数值 D 。

1.3.2 装片制作与测定

将一滴甘油滴于经处理后的载玻片上,取少量粉样散于甘油上,将盖玻片盖好后直接放置在超声波分散器上分散,然后在透射偏光显微镜上放大 100 倍(10 × 10)显微观测,每个装片取 5 个不同部位拍片,取得的图像经处理后得到粉体颗粒的几何形态参数,从而计算得到分形维数值;取各值的平均值作为相应载玻片上粉体颗粒的粒度分布分形维数值统计数据。

1.4 表征参数意义与测定方法

粉体的流动性与粒子的形状、大小、表面状态、密度、空隙率等有关,加上颗粒之间的内摩擦力和粘附力等的复杂关系,粉体的流动性无法用单一的物性值来表达。休止角是检验粉体流动性好坏的最简便的方法。

休止角:粉体堆积层的自由表面在静平衡状态下,与水平面形成的最大角度叫做休止角。它是通过特定方式使粉体自然下落到特定平台上形成的。休止角对粉体的流动性影响最大,休止角越小,粉体的流动性越好。休止角也称安息角、自然坡度角等。

休止角的测定装置由支架、漏斗、圆平板组成。将粉体样品倒入漏斗内,使样品通过漏斗落在下方圆平板上,粉体逐渐堆积,直至不能继续堆高为止。用数码相机拍摄粉体静止堆积形态,将图片导入计算机按二维图像处理获得粉体颗粒休止角。

崩溃角:给测量休止角的堆积粉体以一定的冲击,使其表面崩溃后圆锥体的底角称为崩溃角。它直观地表示了粉体的喷流特性,崩溃角愈小则喷流性愈强。测量方法:以适当力度振动圆平板(见图 1)至颗粒发

生崩溃,拍摄此时粉体静止堆积形态并按二维图像处理获得崩溃角。

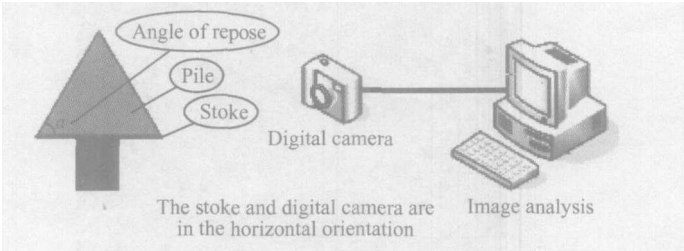


图 1 数字图像处理法测定休止角

Fig. 1 The testing method sketch map of the angle of repose

用电子天平称量 1%, 2%, 3%, 4%, 5% 的滑石粉分别掺入五种不同的粉体中,充分混合均匀,再按照上述方法测量其休止角与崩溃角。

2 数据与分析

2.1 粒度分布分形维数与流动性表征参数关系

将图片导入计算机,经设置统一灰度阈值(R120, G120, B120)后处理图像;选择统计颗粒投影面积、最大投影直径及最小投影直径,并数据导入到 Excel 中进行数据处理,得到不同粉体颗粒粒度分布分形维数值。以粉体 C 作为实例,处理过程如图 2 所示。

将采集到的粉体堆积形态图片导入计算机,采用图像处理方法,测出各个表征参数。测得的数据如表 1 所示。

表 1 粉体颗粒流动性表征参数与粒度分布分形维数值
Table 1 The flowability denotation parameters and the particle size distribution fractal value

Powder sample	A	B	C	D	E
Angle of repose / (°)	50.5	49.0	52.1	55.7	41.3
Angle of collapse / (°)	36.6	34.7	38.6	42.9	21.6
Size distribution fractal	2.7486	2.8253	2.7116	2.6754	2.9483

根据表 1 结果做粉体粒度分布分形维数值与粉体流动性的主要表征参数休止角和崩溃角的关系图见图 3。从图 3 可看出,休止角、崩溃角和粒度分布分形维数值间具有明显的相关关系,粒度分布分形维数越大,休止角、崩溃角越小,粉体的流动性越好;崩溃角与粒度分布分形维数值间的关系变化曲线和休止角与粒度分布分形维数值关系曲线形状相似。因此,说明分形维数作为粉体流动性能表征参数具有一定的普适性。

2.2 不同掺入量的滑石粉对粉体流动性的影响

通常采用添加流动助剂的方法改善粉体的流动特

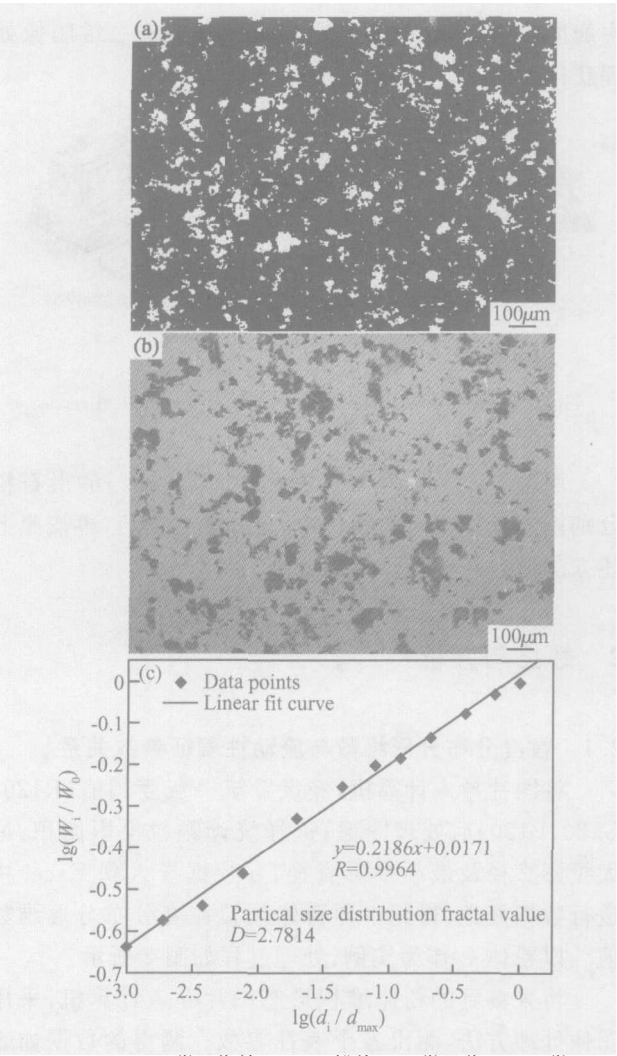


图 2 显微图像处理 (a) 粉体 C 显微图像; (b) 显微图像处理结果 (获取各特征参数); (c) 数据线性拟合 $D=2.7814$

Fig. 2 The micrographic process (a) collected digital picture of power C; (b) image process (statistic all the requiring parameters); (c) data process and gain the fractal value

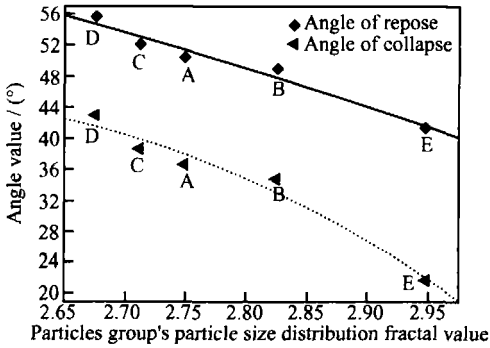


图 3 粉体颗粒群粒度分布分形维数值与表征参数关系图

Fig. 3 Correlation figure of flowability denotation parameters and particles group's particle size distribution fractal value

性,实验采用滑石作为流动助剂按照不同的质量比加入混合均匀后,按照同样的方法测试粉体的流动性表

征参数,测量结果如表 2 所示。

表 2 滑石粉对粉体流动性表征参数的影响

Table 2 The denotation parameters after adulterate talc powder						
Powder sample		A	B	C	D	E
Angle of repose / (°)						
Adulteration ratio of talc powder (mass fraction/ %)	Blank	52.1	49.0	50.5	55.7	41.3
	1	44.1	44.6	44.9	48.0	40.2
	2	42.3	42.6	42.7	44.3	39.0
	3	41.1	42.3	41.2	41.3	38.4
	4	41.4	42.5	41.4	41.9	37.8
	5	41.3	42.5	41.4	41.3	37.8
	Angle of collapse / (°)					
	Blank	38.6	34.7	36.6	42.9	21.6
	1	29.6	25.9	33.3	36.7	20.5
	2	26.1	22.3	31.6	34.2	19.2
	3	21.7	21.8	26.6	31.2	18.9
	4	20.9	22.2	26.6	30.0	18.8
	5	21.4	22.1	26.5	29.6	18.6

根据表 2 做出掺入不同质量分数的滑石粉与休止角,崩溃角的关系图如图 4 所示。

表 2 表明: 粉体掺入适量流动助剂滑石粉后其休止角与崩溃角减小明显, 粉体流动性显著增大; 但随滑石粉掺入质量分数的不断增大, 粉体颗粒的休止角与崩溃角的减小量渐小, 超过一定量后出现变大现象。

由图 4 可知: 滑石粉掺入质量分数 < 2% 时, 休止角与崩溃角的减小趋势显著, 粉体流动性得到较大改善; 随着滑石粉掺入量不断增加, 当滑石粉的掺入量为 3% ~ 5% 时, 粉体颗粒的休止角与崩溃角变化趋于平缓, 粉体流动性增大缓慢。从流动助剂的作用原理来看^[9], 助剂掺入到粉体颗粒中, 助剂微粉粒子在粉体的粒子表面填平粗糙面而形成光滑表面, 减少阻力, 减少静电力等, 改善粉体颗粒间的摩擦性能, 从而达到促进颗粒流动, 提高颗粒流动性能的目的。因此, 流动助剂的掺入会使得颗粒的休止角和崩溃角均减小, 但随着流动助剂的掺入量的增加, 助流效果会逐渐减弱, 过多的流动助剂反而增加阻力。

2.3 滑石粉对不同分形维粉体颗粒的影响

从表 1 可知不同粉体颗粒粒度分布分形维数值: $E > B > A > C > D$, 粉体流动性的好坏: $E > B > A > C > D$ 。结合不同粉体颗粒的分形维数从图 4 可看出: 滑石粉对粉体颗粒 E 的影响最小, 对 D 的影响最显著; 即滑石粉对粉体流动性的改善有较明显的效果, 尤

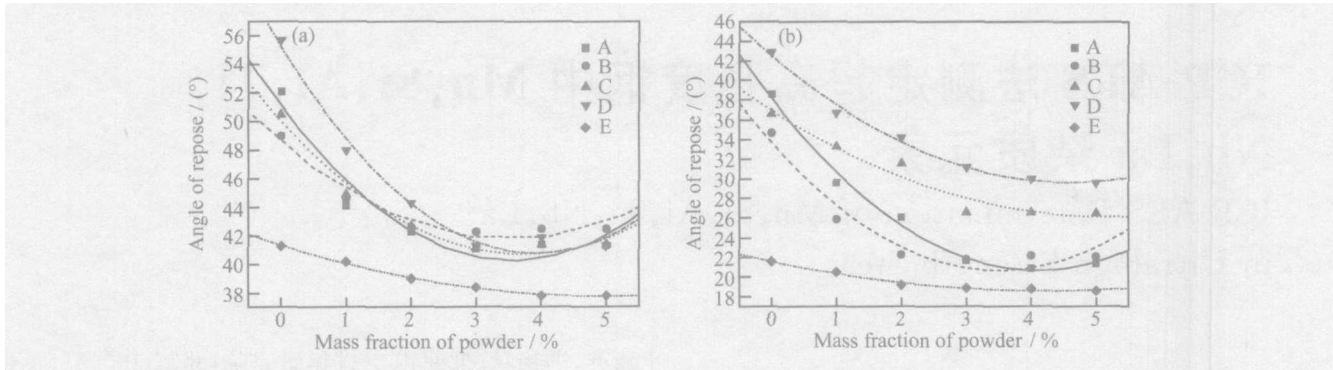


图 4 掺入滑石粉后粉体流动性表征参数的变化关系 (a) 掺入滑石粉后颗粒休止角的变化; (b) 掺入滑石粉后颗粒崩溃角的变化

Fig. 4 The change of the flowability denotation parameters after adulterate talc powder (a) the change of the angle of repose after adulterate talc powder; (b) the change of the angle of collapse after adulterate talc powder

其是颗粒群粒度分布分形维数值越小的粉体颗粒, 其流动性能的改善越显著。

3 结论

(1) 滑石粉对不同粒度分布分形维粉体流动性的改善有较明显的效果, 当滑石粉掺入质量分数 < 2% 时, 粉体颗粒的休止角与崩溃角的减小趋势显著, 粉体流动性得到较大改善; 而随着滑石粉掺入量不断增加, 当滑石粉的掺入质量分数为 3% ~ 5% 时, 粉体颗粒的休止角与崩溃角变化趋于平缓, 粉体流动性增大缓慢, 甚至使效果变差。

(2) 滑石粉对不同粒度分布分形维数值粉体流动性改善程度的关系为: 粒度分布分形维数值越大, 滑石粉对粉体流动性能的影响效果越小, 分形维数值越小的粉体颗粒, 流动性能的改善越显著。

参考文献

[1] CARR R L. Evaluating flow properties of solids[J]. Chem Eng, 1965, 72(1): 163- 167.

[2] KLOUBEK J. Investigation of porous structures using mercury reintrusion and retention[J]. J Cell Interface Sci 1994, 163(2): 10 - 18.

[3] JENIKE A W. Storage and flow of solids[J]. Utah Eng Exp Stn ull, 1964, 123(6): 192- 194.

[4] 奚新国, 张耀金. 粉体流动性能的测试研究[J]. 盐城工学院学报 (自然科学版), 2003, 16(1): 4- 7.

[5] 郁可, 郑中山. 粉体粒度分布的分形研究[J]. 材料科学与工程, 1995, 13(5): 30- 35.

[6] 胡小芳, 胡大为, 吴成宝. 多孔介质粘土颗粒群粒径分布分形维[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, (12): 21- 25.

[7] 胡小芳, 周兴求, 张福根. 定量评价水泥颗粒助磨剂的方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 82- 84.

[8] 胡庆轩, 郑怀玉, 林文娟, 等. 有机粉体流动性的测定[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(5): 11- 14.

[9] MARKUS L, KARL E. A powder on the move[J]. European Coatings Journal, 2002, 34(9): 14- 21.

收稿日期: 2005-12-20; 修订日期: 2006-03-29

作者简介: 胡小芳(1956-), 男, 教授, 博士, 长期从事无机材料及其交叉和边缘学科的理论 and 工程技术研究, 联系地址: 广州市天河区华南理工大学工业装备与控制工程学院粉体实验室(510640)。

(上接第 41 页)

果符合较好。该方法在陶瓷涂层构件的实际应用中具有重要意义。

参考文献

[1] 陈虹, 胡利明, 任卫, 等. ZrO₂ 陶瓷热障涂层的研究[J]. 中国表面工程, 2000, 4(49), 12- 18.

[2] 冯若, 姚锦钟, 关立勋. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.

[3] 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 地震资料处理中小波函数的选取研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(3): 392- 400.

[4] 曹茂森, 任青文, 刘福胜. WTTMM 法在土木工程反射波法无损检

测中的应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(11): 91- 96.

[5] 李建平. 小波分析与信号处理- 理论、应用及软件实现[M]. 重庆: 重庆出版社, 1997.

[6] 徐志辉, 林莉, 李喜孟, 等. 基于功率谱分析的表面涂层厚度超声无损测量方法[J]. 中国表面工程, 2004, 69(6): 7- 9.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50401021)

收稿日期: 2006-06-26; 修订日期: 2006-11-20

作者简介: 林莉(1970-), 女, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 目前主要从事材料无损表征与评价研究, 联系地址: 大连理工大学材料学院无损检测研究室(116023)。