

颗粒表面分维与其形状指数关系研究

胡小芳^{1,2}, 曾文雄¹, 吴成宝¹, 卢 勇¹

(1. 华南理工大学 工业装备与控制工程学院; 2. 聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 构建了颗粒表面分维测算模型, 研究了颗粒投影轮廓大小与形状指数 F 的关系。研究表明: 颗粒投影轮廓大小与形状指数 F 具有良好的线性相关性。文中还利用所构建的颗粒表面分维模型测量了 6 种碳黑颗粒的表面分维, 初步研究了颗粒表面分维与形状指数 F 之间的关系, 分析结果发现: 随着颗粒表面分维的增加, 其形状指数 F 也相应增加, 二者具有良好的相关关系。因此, 表面分维与形状指数 F 均可作为颗粒形状的定量表征, 且二者具有良好的相关性。

关键词: 颗粒; 表面分维; 形状指数

中图分类号: O189.12

文献标识码: A

文章编号: 1008-5548(2007)02-0014-04

Study on Relation Between Surface Fractal Dimension and Its Particle's Shape Index

HU Xiao-fang^{1,2}, ZENG Wen-xiong¹, WU cheng-bao¹
LU Yong¹

(1. School of Industrial Equipment and Control Engineering, 2. Key Laboratory of Polymer Processing Engineering, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The model of calculating the particle's surface fractal dimension was found, also the relationship and size of particle's projected outline and shape index F were studied. The results indicated that the size of the particle's projected outline size and shape index F have good linear correlation. It was also used the surface fractal dimension model modeled by this paper to calculating 6 kinds of black carbons' surface fractal dimension, and studied the relationship between the particle surface fractal dimension and the shape index F . The study showed that the value of the shape index F increased as the increasing of the particle's surface fractal dimension, and they are linear dependence relation. So, the surface fractal dimension and shape index can be used to characterize the particle's shape, and they are linear dependence relation.

Key words: particle; surface fractal dimension; shape index

颗粒物作为原料、介质、产物出现在工业生产、环境保护、生物医学、农业生产等领域中。在研究和工业生产过程中, 人们往往运用一些特定的术语来定性表达颗粒的形状, 比如球状、多角状、针状、片状、纤维状等, 但却无法将其代入表示颗粒的几何特征和粉体的物理性能的公式中进行计算, 因此, 还需定量地描述颗粒形状的方法。迄今, 人们常利用颗粒的各种特征粒径与其表面积、体积之间的关系来定义各种形状系数, 或与某一基准(通常是球)相比较来定义各种形状指数, 其中最常用的是圆形度、球形度、实用球形度及形状指数。由于不规则颗粒的表面积和体积不易测量, 因此颗粒球形度测量较困难, 人们常用圆形度、实用球形度以及形状指数来定量地表征颗粒物的形状。近些年, 随着分形理论在粉体工程领域的应用的不断发展, 不少工作者将分维作为表征颗粒物形状的参数, 并做了定量研究^[1-5]。本文中构建了颗粒表面分维测算模型, 并测量了 6 种碳黑颗粒的表面分维, 初步研究了颗粒表面分维与形状指数 F 之间的关系, 用于指导生产具有一定的现实意义。

1 颗粒表面分维与形状指数测算模型

1.1 颗粒表面分维测算模型构建

半径为 R 的圆, 其周长 l 为 $2\pi R$, 面积 s 为 πR^2 。二者之间的关系为:

$$(l)^{1/1} = 2\pi^{1/2}(s)^{1/2} \quad (1)$$

又边长为 a 的正方形, 其周长 l 为 $4a$, 面积 s 为 a^2 。二者之关系为:

$$(l)^{1/1} = 4(s)^{1/2} \quad (2)$$

从上面二式可看出, 标准图形(如圆和正方形)的周长 l 与其面积 s 的关系为:

$$(l)^{1/1} = (s)^{1/2} \quad (3)$$

由规则图形的周长和面积的关系, 不难推出, 不规则图形的周长与图形的标准面积的关系为:

$$(l)^{1/D_s} = (s)^{1/2} \quad (4)$$

收稿日期: 2006-06-25, 修回日期: 2006-09-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 29706005; 广东省工业攻关计划项目, 编号: 2005B10301051。

第一作者简介: 胡小芳(1957-), 男, 博士, 教授。

其中, D_L 为不规则图形的投影轮廓分维。

对于一个不规则颗粒, 当其重心处于最稳定状态时, 随着测量显微镜或扫描电镜分辨率的提高, 其精细结构不断出现, 测定该颗粒不同放大倍数条件下投影轮廓的周长和由该投影轮廓所封闭的面积 (以下简称投影面积), 二者的关系为:

$$(1/D_L) \lg(l) = k_0 + (1/2) \lg(s) \quad (k_0 \text{ 为正数常数}) \quad (5)$$

$$\lg(s) = \left(\frac{2}{D_L} \right) \lg(l) - 2k_0 \quad (k_0 \text{ 为正数常数}) \quad (6)$$

取投影轮廓周长 l 、投影面积 s 的双对数值, 绘图并拟合直线, 直线斜率为 $\frac{2}{D_L}$; 设斜率为 k , 则有:

$$D_L = \frac{2}{k} \quad (7)$$

通过上述方式得出颗粒物投影轮廓分维 D_L 后, 可以由以下公式推算出单颗粒表面分维 $D_s^{[6-8]}$:

$$D_s = D_L + 1 \quad (2 \leq D_s \leq 3) \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)有:

$$D_s = \frac{2}{k} + 1 \quad (2 \leq D_s \leq 3) \quad (9)$$

1.2 颗粒形状指数 F 测算模型

形状指数计算模型为^[9-13]:

$$F = \frac{l^2}{4 \cdot \pi \cdot s} \quad (10)$$

式中, F 为形状指数; l 为投影轮廓周长; s 为投影面积。式(3)表明, 形状指数是圆形度的倒数的平方值, 因此, $F \geq 1$; 而且 F 越偏离 1, 说明颗粒的投影轮廓偏离圆的程度越大, 越接近针状, 甚至纤维状, 其表面的锐角也越大^[13]。

2 实验

2.1 实验材料

取碳黑 N234 (广州天河聚宸贸易有限公司提供), 碳黑 N300, 碳黑 N330, 碳黑 N375, 碳黑 N550, 碳黑 N660 (CABOT 公司提供), 按多次四分法^[12, 14]取得有代表性的颗粒样品。

2.2 实验方法

2.2.1 装片制作与图像采集

将载玻片在 1%~2% 浓度的盐酸中浸泡, 除去表面杂物后用蒸馏水洗净晾干备用。将采集的颗粒样品分散到载玻片上^[15], 用最小放大倍数显微镜物镜观察样品, 并旋转载物台或者调节载物台上微动

标尺, 使单颗粒位于视场的中央, 拍摄图像; 依次从小到大的切换物镜, 调节微动旋钮使图像清晰, 拍摄单颗粒 50、80、100、160、200、320、500 倍图像; 将拍摄的图片导入计算机保存。

2.2.2 图像和数据处理

用图像分析软件 IPP (image-pro plus) 将图像锐化、设置灰度阈值等操作后, 测算同一颗粒在不同放大倍数下的“投影轮廓周长”、“投影面积”^[16], 统计后导出数据到 Excel、Origin7.5 中进行数据处理。

3 结果与讨论

3.1 规则颗粒投影轮廓大小与形状指数 F 的关系

若颗粒物的投影呈理想的正多边形、椭圆、长方形等规则图形, 则其形状指数 F 与其形状之间的关系为图 1 与图 2 所示。图 1 表明: 对于正多边形, 随其边数的增加, 其形状指数 F 减小, 呈负相关; 又, 形状指数 F 的变化, 反映了形状的复杂程度, 形状指数越小, 越接近 1, 其形状的复杂程度越小, 越接近圆形。因此, 随着正多边形边数的增加, 颗粒物的投影轮廓越接近圆, 其表面的锐角也越小^[9]。图 2 显示: 随着长方形长宽比、椭圆长短轴比值的增加, 其形状指数 F 增加, 呈正相关, 其投影轮廓偏离圆的程度越大, 越接近针状。比较图 2 中两条曲线, 还可发现, 投影轮廓为椭圆的形状指数曲线与投影轮廓为长方形的形状指数曲线有一交点, 在交点之前, 投影轮廓为椭圆的颗粒物其形状指数较投影轮廓为长方形的颗粒物的形状指数大, 偏离圆的程度也越大, 在交点之后反之。为确定该交点的坐标, 本文作者将图中数据点进行了线性拟合, 其拟合曲线方程及相关系数如表 1 所示。

联立拟合两条曲线可知, 当长方形的长宽比与

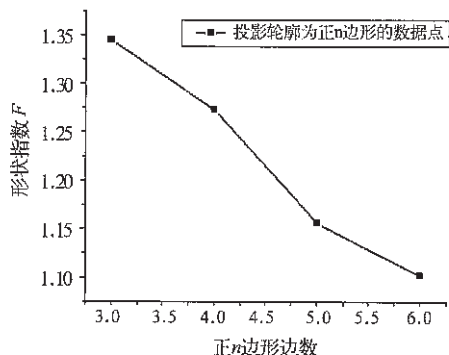


图 1 正 n 边形边数与其形状指数的关系

Fig.1 Relationship of regular polygons and their shape indices

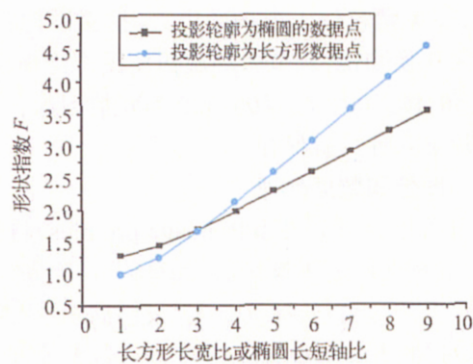


图2 长方形长宽比、椭圆长短轴比值与其形状指数的关系
Fig.2 Relationship of length/width ratio of rectangle or elliptic and their shape indices

椭圆的长短轴比值为 2.976 3 时，其形状指数值相等，为 1.732 0。由上述研究可以得出如下结论：形状指数可以作为颗粒形貌的定量表征，且形状指数与描述颗粒大小的参数如边数、长径比、长宽比具有定量的相关关系。

表 1 理想颗粒投影轮廓与颗粒形状指数的关系拟合曲
Tab.1 Fit curves of ideal particle projecting profiles and their shape indices

规则投影轮廓	拟合曲线	相关系数	备注
投影轮廓为正方形	$Y = -0.081X + 1.5975$	-0.9904	拟合曲线 1
投影轮廓为椭圆	$Y = 0.4571X + 0.3715$	0.9958	拟合曲线 2
投影轮廓为长方形	$Y = 0.2924X + 0.8617$	0.9957	拟合曲线 3

3.2 不规则颗粒投影轮廓大小与形状指数 F 的关系
一般情况下，颗粒物投影轮廓并非理想的图形，多为无规则弯曲图形。其形状指数与描述颗粒大小的参数是否符合一定的定量关系？为此，作者研究了碳黑 N234 投影轮廓大小与其形状指数 F 的关系。图 3 为碳黑 N234 颗粒的显微图像，图 4 为碳黑 N234 颗粒投影轮廓区域 Feret 最大径与 Feret 最小径比值与其形态指数 F 的关系。

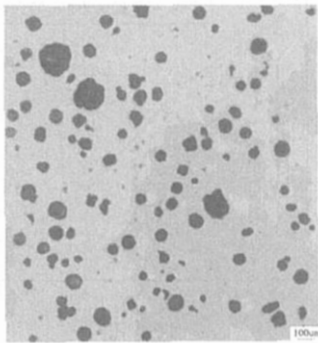


图 3 碳黑 N234 颗粒显微图像
Fig.3 Micrograph of carbon black N234 particles

由图 4 可知：碳黑 N234 颗粒投影轮廓 Feret 最大径与 Feret 最小径比值与其形态指数 F 呈线性正相关关系，拟合曲线为： $Y = 0.12467 + 0.90597 \cdot X$ ，相关系数 $R = 0.98628$ 。

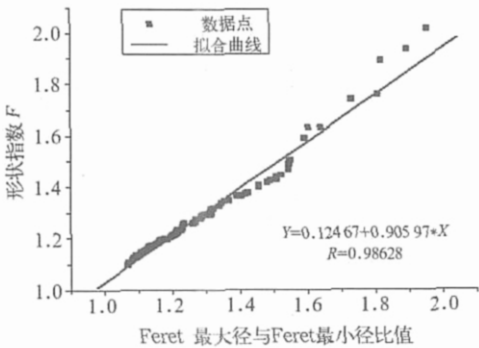


图 4 碳黑 N234 颗粒投影轮廓 Feret 最大径与 Feret 最小径比值与其形态指数的关系
Fig.4 Relationship of Feret values of carbon black N234 particle's projecting profile and their shape indices

3.3 颗粒物表面分维与其形状指数 F 的关系
为研究颗粒表面分维与形状指数 F 的关系，对 6 种碳黑各取 100 颗，分别求取其表面分维和形状指数 F，将数据列于图中，由于各种颗粒的图形相似，现仅例举碳黑 N234 的数据如图 5。由图 5 可以看出，随着颗粒表面分维的增加，其形状指数 F 增加，但二者的线性关系较差，这是由于对于具有不同表面，不同投影轮廓的不同颗粒，可能会有相同 Feret 最大径与最小径比值，因此，即使具有相同的 Feret 最大径与 Feret 最小径比值，亦不一定有相同的表面分维数。为此，取各种颗粒表面分维及其形状指数 F 的平均值，表示于图 6 中。图 6 表明：随着颗粒表面分维的增加，其形状指数 F 增加，二者具有良好的相关关系。因此，颗粒表面分维与形状指数 F 均可作

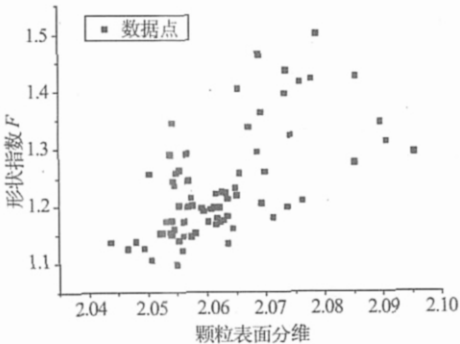


图 5 碳黑 N234 中颗粒表面分维与形状指数关系
Fig.5 Relationship of carbon black N234 particle's surface fractal dimensions and their shape indices

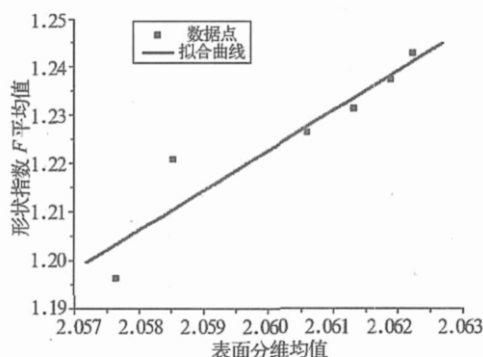


图6 6种碳黑颗粒表面分维均值与形状指数 F 均值的相互关系

Fig.6 Relationship of mean surface fractal dimension of 6 kinds of carbon black particles and their shape indices

为颗粒物形状表征,且具有良好的线性相关性。表面分维是颗粒物表面精细结构层次多少和自相似程度的表征,表面分维数越大,其自相似程度和精细结构越多,颗粒物表面凹凸就越多,其形状指数 F 也越大。

4 结 论

(1) 颗粒投影轮廓大小与颗粒形状指数 F 呈良好的线性相关;

(2) 颗粒物表面分维与其形状指数 F 亦呈良好的线性相关;

(3) 颗粒表面分维与形状指数 F 均可作为颗粒物形状的表征;

(4) 本文构建的颗粒物表面分维测算模型和测算方法,及研究工作可为评价颗粒物产品结构和质量,研究颗粒表面分维与颗粒粘附性、持水性、流动性、表面吸附性、填充性等物理性能关系提供新的简易

的处理方法,具有一定的实际应用意义。

参考文献(References):

- [1] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature [M]. New York: W H Freeman, 1983.
- [2] AVNIR D, FARIN D, PFEIFER P. Molecular fractal surface [J]. Nature, 1984(308): 261-263.
- [3] TURCOTTE D L. Fractal fragmentation model of soil aggregation [J]. J Geography Res, 1993, 91(12): 1896-1899.
- [4] TYLER SW, WHEAT SW. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. Soil Sci, 1989, 53: 987-996.
- [5] 李克.将分形维作为粉体颗粒参数的讨论[J]. 锦州师范学院学报(自然科学版), 1993(1): 66-68.
- [6] DATHE A, EINS S, NIEMEYER J, et al. The surface fractal dimension of the soil-pore interface as measured by image analysis [J]. Geoderma, 2001(27): 203-229.
- [7] 邢鹏飞, 翟玉春, 田彦文, 等. WS2 颗粒的分形特征[J]. 中国有色金属学报, 1996(6): 36-41.
- [8] 赵艳娥, 张汉谦, 吉晓华. 金属材料粗糙表面分形特性的研究进展 [J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(3): 120-123.
- [9] 张佑林, 夏家华, 黎国华, 等. 粉体颗粒的形状与分维[J]. 武汉工业大学学报, 1996, 18(4): 165-158.
- [10] 三轮茂雄. 粉体工学通论[M]. 东京: 日刊工业新闻社, 1981: 22-27.
- [11] 王奎升. 工程流体与粉体力学基础[M]. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [12] 三轮茂雄, 日高重助. 杨伦, 谢淑娴译. 粉体工程试验手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- [13] 孙宗保, 蔡健荣, 姜松. 图像处理技术在食品粒度检测中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(6): 164-166.
- [14] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [15] 王佳建, 徐宏恩. 佳木斯市大气中总悬浮颗粒的显微镜下观察 [J]. 黑龙江环境通报, 2001, 25(4): 76-79.
- [16] 胡大为, 胡小芳. 粘土颗粒群粒度分布分形维与土壤透气性关系 [J]. 华中农业大学学报, 2006, 25(2): 145-148.

中国颗粒学会超微颗粒专业委员会第五届年会暨海峡两岸纳米颗粒学术研讨会

为了及时展示、交流超微颗粒材料与技术的研究和开发方面所取得的最新成就,推动我国纳米科技更加迅速地发展,由中国颗粒学会超微颗粒专业委员会主办、武汉理工大学承办的“中国颗粒学会超微颗粒专业委员会第五届年会暨海峡两岸纳米颗粒学术研讨会”将于2007年6月18-23日在武汉召开。

会议的重点是交流、探讨本领域研究和开发中取得的成就和所遇到的问题会议期间还将安排到武汉理工大学的材料复合新技术国家重点实验室等参观考察活动。

北京 联系人: 戴遐明(专委会秘书处)

电 话: (86)-10-89796111, 89796107;

E-mail: daixm@mail.tsinghua.edu.cn

地 址: 北京市1021信箱 邮编: 102201

武汉 联系人: 邵刚勤 严春杰

电 话: (86)-27-87216912;

E-mail: gqshao@mail.whut.edu.cn

地 址: 武汉市洪山区珞狮路122号武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室

邮编: 430070