

大气中自由沉降微颗粒的形状分析

崔燕, 吴超, 阳富强, 刘辉, 李明

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 根据分形理论, 基于面积-周长法, 通过沉降对比试验, 定量表征了大气中自由沉降颗粒物的形状分形维数。通过光学显微镜获得微颗粒的几何投影图像, 借助显微图像分析软件, 探讨了颗粒物几何形态的分形特征, 确定了颗粒物形状分形维数与沉降时间的关系, 并结合大气中颗粒物的成因分析了颗粒物的特性。结果表明, 大气中沉降微颗粒的形状具有分形特性, 颗粒物形状的分形维数在 0.869~1.048 之间, 随采样时间增加, 颗粒物的粒度分形维数减小, 分形特性不明显。同时, 分析计算得知, 颗粒物的分形维数值越大, 颗粒物中细颗粒物越多。通过对大气中自由沉降颗粒物形状的定量描述, 为描述颗粒物的变化并为颗粒物间黏附力的进一步深入研究提供了新的思路、新的途径。

关键词 微颗粒; 颗粒形状; 分形维数; 粒径

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.06.003

Grain Shape Analysis of Free Settling Particles in Air

CUI Yan, WU Chao, YANG Fuqiang, LIU Hui, LI Ming

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Based on the Area-Perimeter Method, the fractal theory and the experiment results of free settling, the profile fractal dimensions of the free settling particles in air are calculated. Using optical microscope, the grain projection images of air particles are obtained. With an image analysis software, the grain shape of air particles and the relation between the profile fractal dimension and the settling time are obtained. An analysis is made for air particles with consideration of the special causes of their formation. It is shown that the grain shape of air particles exhibits a distinct fractal characteristic, which is getting more distinct when the grain is smaller. The profile fractal dimensions of the particle range from 0.869 to 1.048. The value of fractal dimension decreases with the increase of the sampling time, and the fractal characteristic is getting less distinct. It is found that the higher percentage of finer particles is associated with the higher profile fractal dimension value of particles. This quantitative description of the profile fractal distribution of free settling particles in air, provides a new way to predict the shape change of the grain and the adhesion force between particles.

Keywords particles; grain shape; fractal dimension; particle size

0 引言

颗粒的几何形状是描述颗粒几何特征的主要参数之一, 粉尘颗粒物的密度、光学性质、电学性质、力学性质、运动行为和分布特征都与粉尘的大小有关。分形理论为人们处理复杂对象提供了一个强有力的工具, 是非线性科学中的一个重要分支^[1], 分形维数能表征具有某种自相似的几何形状, 这实质上是一个描述几何形状复杂性的参数^[2]。由于很多环境系统具有自相似性, 分形理论自建立后, 就在环境科学领域得

到应用^[3]。20 世纪 80 年代, 开始应用分形理论研究大气中悬浮颗粒物的几何特征, 并取得了一些成果^[1-5], 邓昭镜和邹旭敏^[6]介绍了超微颗粒聚集体的集合特征以及生长演化诸方面呈现的分形特征; 向晓东等^[7]简述了测定粉尘分形维数的方法, 在分析凝聚尘和单一尘分形几何特征的研究基础上, 探讨了粉尘分维在除尘技术中的应用可行性; Xie 等^[8]研究了大气颗粒物的形状分形维数, Kaye 等^[9]综述了分形几何研究在有关大气颗粒物方面的应用情况; Kindratenko 等^[10]介绍了基

收稿日期: 2010-10-14; 修回日期: 2011-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974132)

作者简介: 崔燕, 博士研究生, 研究方向为粉尘粘附与清除, 电子信箱: cuiyan911@163.com; 吴超(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520001585M), 教授, 研究方向为安全与环保, 电子信箱: wuchao@mail.csu.edu.cn

于扫描电镜获得的图像得出的分形维数,将颗粒物分成飞灰和土壤灰尘两类,结果显示,根据分形分析可以确定颗粒物的来源,特别是当颗粒物的化学成分相同时。然而,用分形维数定量表征大气沉降物微颗粒方面的研究尚少。本研究以室内大气自由沉降颗粒物为例,用分形维数定量表征颗粒物的形状分形,探讨大气颗粒物的形状分形维数与颗粒物表面吸附性能之间的关系。

1 分形理论

分形维数最早由 Hausdorff 提出, Mandelbrot^[11] 将其推广形成分形几何学。Mandelbrot 认为分数维数的概念是一个可用于研究许多物理现象的有力工具,而分形几何学则能用来处理那些极不规则的形状,对不规则、无序、复杂的量进行定量评述。从分形几何的角度描写颗粒的形貌能够更真实地反映出颗粒的表面性质^[5]。由于很多环境系统具有自相似性,即其内部结构存在特征尺度,所以分形理论建立后,立即在环境科学,包括大气颗粒物研究领域得到应用^[2]。

分形理论主要通过分析颗粒的投影图像评述颗粒的几何形状。不规则的颗粒投影到平面,形成不规则的平面几何图形。颗粒形状分维 D_p 的测定从原理上可分为变尺码法和固定尺码法。其中固定尺码法包括周长-面积法、周长-最大直径法^[12-14]、计盒法^[14-15]等。本文选用固定尺码法中的周长-面积法。

周长-面积法的推导过程如下:对于形状规则的几何图形(如三角形、正方形、圆形),其周长 l 与面积 A 呈正比,即 $l \propto A^{1/2}$;对于形状不规则的几何平面,则有 $l^{1/D_p} \propto A^{1/2}$,其中 D_p 为颗粒的分形维数,即

$$l(\varepsilon) = \alpha A(\varepsilon)^{D_p/2} \quad (1)$$

作 $\lg l(\varepsilon) - \lg A(\varepsilon)$ 直线,则 D_p 为该直线斜率 K 的 2 倍,即

$$D_p = 2K \quad (2)$$

2 颗粒物形状分析试验

2.1 试验试样采集

中南大学本部位于岳麓山风景区,大气质量较好。本试验的采样地点为中南大学本部某教学楼一楼实验室,采样时间为 2010 年 3 月。采样期间记录室外天气状况、室内温度和相对湿度见表 1。

采样前,将载玻片(76.2mm×25.4×mm×1mm)在 1%~2% 浓度的盐酸中浸泡,除去表面杂物后用蒸馏水洗净烘干。将载玻片编号平放于实验室中间 1.1m 的试验台上,实验室 4 个铝合金窗两侧的两个打开 1/3,自然通风状态下采样,如图 1 所示。采样时间为第 1 天、第 3 天和第 10 天。将载玻片由 1~9 依次编号,其中编号 1,2,3 为第 1 天采样的载玻片,编号 4,5,6 为第 3 天采样的载玻片,编号 7,8,9 为第 10 天采样的载玻片。

2.2 试验仪器

试验所用仪器为显微图像分析系统(SS3300,北京泰克公

表 1 试验期间室内外气候条件

Table 1 Indoor and outdoor climate conditions during the experiment

采样日期	室内温度/°C	相对湿度/%	天气状况
2010-03-07	4~6	50~60	阴转小雨
2010-03-08	7~8	64	小雨
2010-03-09	2~5	70	阴转多云
2010-03-10	4~7	60~70	多云转晴
2010-03-11	3~7	50	晴
2010-03-12	8~15	50~60	多云
2010-03-13	10~21	67	晴
2010-03-14	15~25	46	多云转晴
2010-03-15	7~10	50	阴转晴
2010-03-16	7~8	46	晴

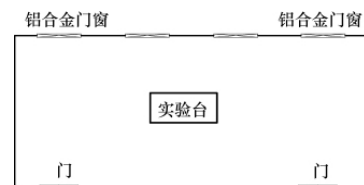


图 1 实验室布局平面示意

Fig. 1 Schematic diagram of lab layout

司),配有成像设备和图像存储器,可程式高温试验箱(HT302E,重庆汉巴公司)。

2.3 图像分析方法

将完成采样后的载玻片置于显微镜下,选取载玻片中心线上的中心区域作为观测对象分析。试验分析可测出每个微颗粒的粒径、面积、周长等参数。

2.4 试验结果与分析

综合分析相同采样时间内的不同载玻片上的颗粒物情况,统计各颗粒投影的周长和面积。对于相同日期采样的 3 片载玻片,分别用显微镜分析系统进行观测。为了清晰统计对比各取样时间内降尘数量,在 3 次采样时间内,分别选择降尘比较明显且具有代表性的载玻片作为研究对象。载玻片所观测区域颗粒的 $\lg l(\varepsilon) - \lg A(\varepsilon)$ 试验曲线,如图 2 所示。介于试验数据庞大,列出总的微颗粒数据和 1d 采样沉降微颗粒数据,如表 2、图 3 所示。

对图 2 的试验结果进行比较,根据式(2)求得沉降颗粒的形状分形维数,如表 3 所示。

由图 2、图 3 表 3 可知,本次试验所测试的大气中自由沉降颗粒物具有较好的形状分形特性,分形维数在 0.869~1.048 之间。随着沉降时间的增加,沉降颗粒数目和平均粒径增加。对于沉降 10d 的样品,相关系数较小,这可能与沉降时间增长有关。由于沉降时间增长,某些自由沉降颗粒物黏结在一起使得其粒径增大,这种黏结物与其他的单个自由沉降颗粒物相比,形状有所不同,分形特性不明显(相关系数越来越小),

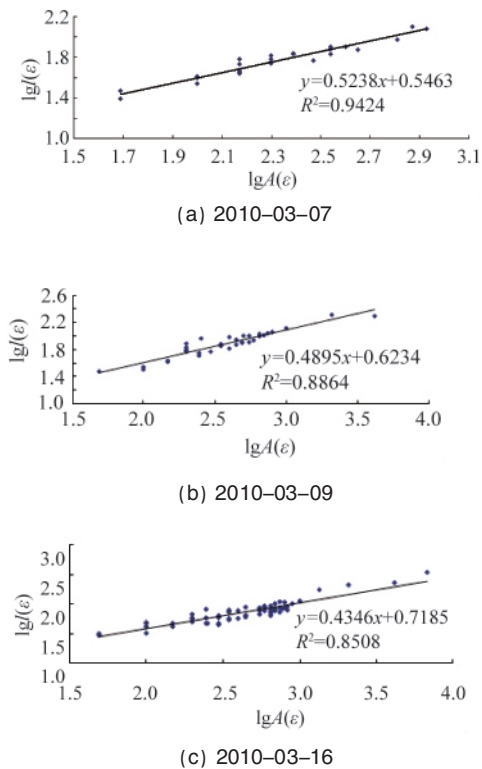


图2 1d,3d,10d 采样时间内沉降颗粒 $\lg(\epsilon)$ - $\lg A(\epsilon)$ 曲线
Fig. 2 Curve of $\lg(\epsilon)$ - $\lg A(\epsilon)$ of settling particulates according to the experimental data in 1d, 3d, 10d during the sampling time

表2 载玻片表面微颗粒分析结果
Table 2 Analysis results of micro-particles on surface of glass slide

采样时间	观测点颗粒数	最大粒径值 / μm	平均粒径值 / μm	颗粒总面积 / μm^2	颗粒总周长 / μm
2010-03-07	28	40.327	16.663	7500.00	1709.037
2010-03-09	34	52.468	17.635	14250.00	2241.163
2010-03-16	68	93.049	20.782	42450.00	5486.376

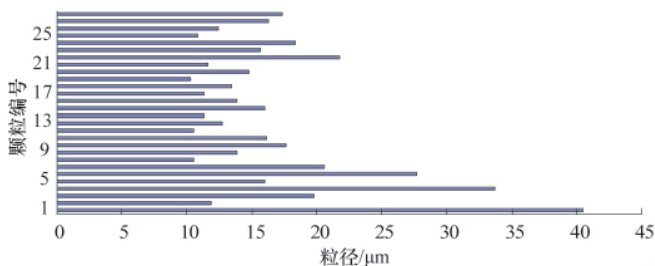


图3 第1天采样时间内颗粒沉降粒径分布
Fig. 3 Particle size distribution within 1d sampling time

因此在表征形状自相似的形状分形曲线上表现出较低的相关度。

表3 颗粒形状分形统计
Table 3 Statistical results of particle shape fractal dimension

采样时间	斜率 K	分维数 D_p	相关系数 R^2
2010-03-07	0.5238	1.0476	0.9424
2010-03-09	0.4895	0.9790	0.8864
2010-03-16	0.4346	0.8692	0.8508

另外, 通过该试验方法求得的分形维数为统计分形维数, 有别于单颗粒的自相似分形维数。试验分形维数表征的是颗粒之间的统计自相似性, 并不是严格意义上的自相似。同时, 大气中自由沉降颗粒物的数量和沉积形状等试验数据与气候状况和所在地区有紧密联系, 不同地区或不同天气情况下所测得的数据将会有所不同。

3 结论

- (1) 通过大量的试验数据, 计算出大气中沉降颗粒的分形值, 从而从试验上证明了大气中自由沉降颗粒物形状具有明显的分形特征。
- (2) 大气中自由沉降颗粒物的数量和粒径与沉降的时间有密切关系, 沉降时间越长, 平均粒径越大。本次试验 10d 样品观测区域内, 平均粒径达到 $20.782\mu\text{m}$ 。
- (3) 大气中自由沉降颗粒物的形状具有分形特性, 分形维数在 $0.869\sim 1.048$ 之间。随着沉降时间的增加, 分形特性表现得越不显著。
- (4) 本文仅通过常规统计方法和分形理论对大气中自由沉降颗粒的几何形状进行了初步的分析, 如何全面地对颗粒物的形状、大小、颗粒排列等进行分析, 进而建立其与微观力学性质之间的关系尚需更进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] Kaye B H. 分形漫步[M]. 徐新阳, 康雁, 陈旭, 等译. 沈阳: 东北大学出版社, 1994.
Kaye B H. A random walk through fractal dimensions [M]. Xu Xinyang, Kang Yan, Chen Xu, *et al.* tans. Shenyang: Northeastern University Press, 1994.

[2] 王海云. 混沌、分形学应用于环境科学的实证分析与探讨[J]. 环境技术, 2004, 22(4): 1-4.
Wang Haiyun. *Environmental Technology*, 2004, 22(4): 1-4.

[3] Harris S J, Maricq M M. Signature size distributions for diesel and gasoline engine exhaust particulate matter[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(6): 749-764.

[4] Whittaker A G, Jones T P, Shao L Y, *et al.* Mineral dust in urban air: Beijing, China[J]. *Mineralogical Magazine*, 2003, 67(2): 173-182.

[5] 杨书申, 邵龙义, 李卫军, 等. 上海市冬季可吸入颗粒物微观形貌和粒度分布[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 20-25.
Yang Shushen, Shao Longyi, Li Weijun, *et al.* *Chinese Journal of Environment Science*, 2007, 28(1): 20-25.

[6] 邓昭镜, 邹旭敏. 超微粒聚集体的分形特征[J]. 物理, 1997, 26(1): 18-22.

- Deng Zhaojing, Zou Xumin. *Physics*, 1997, 26(1): 18-22.
- [7] 向晓东, 陈宝智, 张国权. 粉尘分形几何特征及在除尘技术中的应用探讨[J]. *建筑热能通风空调*, 1999, 18(2): 14-18.
- Xiang Xiaodong, Chen Baozhi, Zhang Guoquan. *Building Energy & Environment*, 1999, 18(2): 14-18.
- [8] Xie Y, Hopke P K. Use of multiple fractal dimensions to quantify airborne particle shape[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1994, 20(2): 161-168.
- [9] Kaye B H. Applied fractal geometry and powder technology [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1995, 6: 245-253.
- [10] Kindratenko V V, van Espen P J M, Treiger B A, et al. Fractal dimensional classification of aerosol particles by computer-controlled scanning microscopy [J]. *Environment Science & Technology*, 1994, 28(12): 2197-2202.
- [11] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. San Francisco: Freeman, 1982.
- [12] 穆在勤, 龙期威. 由面积-周长关系测量的分形维数与材料韧性的关系[J]. *材料科学进展*, 1989, 3(2): 110-114.
- Mu Zaiqin, Long Qiwei. *Chinese Journal of Materials Research*, 1989, 3(2): 110-114.
- [13] 穆在勤, 龙期威, 康雁. 测量断口分形的周长-最大直径方法[J]. *材料科学进展*, 1992, 6(3): 227-231.
- Mu Zaiqin, Long Qiwei, Quan Yan. *Chinese Journal of Materials Research*, 1992, 6(3): 227-231.
- [14] 李金萍, 郑洲顺, 盖国胜, 等. 碳酸钙包覆颗粒的分形表征及维数计算[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(35): 206-207.
- Li Jinping, Zhen Zhoushun, Gai Guosheng, et al. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(35): 206-207.
- [15] 陈江峰, 王振芬, 闫纯忠. 碎屑颗粒圆度的分形描述 [J]. *煤田地质勘探*, 2002, 30(4): 16-17.
- Chen Jiangfeng, Wang Zhenfen, Yan Chunzhong. *Coal Geology & Exploration*, 2002, 30(4): 16-17.

(责任编辑 代丽)

第十二届国际岩石力学大会

时间: 2011年10月18—21日 地点: 北京

 主办: 国际岩石力学学会
 承办: 中国岩石力学与工程学会

 地址: 北京市朝阳区北土城西路19号
 中国岩石力学与工程学会 (100029)
 电话/传真: 010-82998164/82998163
 网址: www.isrm2011.com

第五届中国智能计算大会 (ICC2011)

时间: 2011年7月27—31日 地点: 南京

主办: 中国运筹学会

征文范围:

- 智能计算: 遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、进化算法、启发式算法、蚁群算法、粒子群算法、混合智能算法、免疫算法、人工智能、神经网络、机器学习、生物计算、DNA计算、量子计算、智能计算与优化、模糊逻辑、模式识别、知识发现、数据挖掘。
- 不确定系统: 随机集、模糊集、粗糙集、可信性理论、机会理论。
- 不确定理论: 不确定过程、不确定分析、不确定微分方程、不确定逻辑、不确定推理。
- 不确定规划: 随机规划、模糊规划、混合规划。
- 应用: 车辆调度问题、可靠性问题、存储问题、排序问题、选址问题、分配问题、更新问题、图像处理、电子商务、信息安全、风险分析与控制、智能加工系统、智能调度系统、智能交通系统、智能金融工程、数理金融、应用概率统计、智能信息检索、智能控制与自动化、智能通信工程等。

 通信地址: 江苏省南京市孝陵卫200号 南京理工大学理学院 (210094)
 电话: 025-84315878
 电子信箱: infcom@mail.njust.edu.cn
 会议网址: http://infcom.njust.edu.cn/conference