

文章编号:1007-9629(2023)04-0443-06

基于图像分析技术的粉煤灰颗粒形貌表征

钱潘悦¹, 龚明子², 黄斌², 姚武^{1,*}

(1. 同济大学先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 中交一公局厦门工程有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于图像分析技术, 分析了粉煤灰颗粒群的形貌特征, 提出了可量化表征颗粒群形貌的参数, 并以此作为区分粉煤灰颗粒群形貌品质的判据之一. 结果表明: 粉煤灰颗粒群的形貌特征可用不同圆度等级下的颗粒面积占比来表征, 其中 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ (圆度 $R>0.8$ 与 $R>0.5$ 颗粒的表面积比) 最能体现粉煤灰颗粒群形貌的特征差异; 当图像放大 200 倍时, 高形貌品质粉煤灰的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 可达到 10% 以上, 与非球状颗粒粉体形貌存在明显的差异.

关键词: 粉煤灰; 图像分析技术; 形貌特征; 圆度

中图分类号: TQ172

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.04.015

Morphology Characterization of Fly Ash Particles Based on Image Analysis Technology

QIAN Panyue¹, GONG Mingzi², HUANG Bin², YAO Wu^{1,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. CCCC First Highway Xiamen Engineering Co., Ltd., Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on image analysis technology, the morphological characteristics of fly ash particle groups were analyzed, and the parameters that can quantify the morphology of particle groups were proposed to be one of the criteria to distinguish the morphology quality of fly ash. The results show that the morphology characteristics of fly ash particle groups can be accurately characterized by the proportion of particle area ratio under different roundness grades, and the $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ (the ratio of particle surface area of roundness above 0.8 to that above 0.5) can best describe the morphological characteristics of particle groups. When it is at 200 times magnification and above, the $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ of qualified fly ash can exceed 10%, the fact is significantly different from that non-spherical particle powder.

Key words: fly ash; image analysis technology; morphology characteristic; roundness

水泥基材料中, 粉体颗粒的形貌特征是影响其工作性能、力学性能和耐久性性能的重要因素之一. 基于粉煤灰(FA)的形成原理^[1], 其颗粒形貌通常为球状^[2-4]. 孙抱真等^[5]按形貌将粉煤灰分为 4 类, 以研究其细度、需水量和制品强度之间的差异, 但未量化表征其颗粒形貌特征. 张令茂^[6]引入 5 种细度参数和形态系数, 研究了粉煤灰细度与需水量的关系, 但该形态系数仅间接表征粉煤灰的形貌. 郭辉等^[7]利用图像

分析仪测得粉煤灰的颗粒形貌特征并引入与内部孔结构和外部特征相关的形态参数, 该形态参数以粗糙度(某一粒级颗粒的表面积/体积比)表示颗粒形状. 郝文霞等^[8]研究了粉煤灰颗粒的圆度和填充度与水泥胶砂性能的关系, 但仅分析了圆度随粒径分布变化的规律. 上述研究均未对粉煤灰颗粒群形貌进行直接表征和统计分析. 目前, 计算机与图像传感器组合的图像分析方法^[9-10]可以有效避免颗粒形状研究

收稿日期: 2022-03-09; 修订日期: 2022-05-17

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2019YFC1906203)

第一作者: 钱潘悦(1997—), 女, 江苏泰州人, 同济大学硕士生. E-mail: qianpanyue@qq.com

通讯作者: 姚武(1966—), 男, 江苏镇江人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: yaowu@tongji.edu.cn

中存在的可用形状参数过多^[11]、缺乏公认的标准方法^[12]、手动测量和计算费时且结果分散^[13]等问题,通过数据处理软件可以对大量形貌数据进行统计分析.

本文针对应用于水泥和混凝土的粉煤灰,通过测量、统计和对比分析粉煤灰与非球状颗粒粉体的多种形貌参数,确定了适合的表征参数和放大倍率区间,可作为评定粉煤灰形貌品质的判据之一.

1 试验

1.1 原材料

原材料包括:Ⅰ级粉煤灰F1;Ⅱ级粉煤灰F2-1、F2-2、F2-3;掺有非球状颗粒粉体(NFA)的Ⅱ级粉煤灰F3;非球状颗粒粉体NF-1、NF-2、NF-3.粉煤灰与非球状颗粒粉体的含水量(质量分数,文中涉及的含量、组成等除特殊说明外均为质量分数)、细度、化学组成、烧失量和粒径均相近.根据GBT 1596—2017

《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》测得粉煤灰和非球状颗粒粉体的理化性能见表1;用LS230型激光粒度仪测得其粒径分布见图1;用Hitachi TM4000Plus型桌面扫描电子显微镜(SEM)得到其SEM照片见图2.

1.2 测试方法

用SEM及图像分析软件组合进行图像分析,SEM加速电压为15 kV,模式为Model 4,放大倍数 M 分别为40、100、200、400倍.图像分析过程中的制样方式、清晰图像获取、灰度图像二值化、数据统计原则均参考文献[14-15]进行.具体步骤为:取微量干燥粉煤灰均匀铺展于样品台导电双面胶上,在可视范围内可制得多个样品区域.结合统计学理论和试验确定最小样本数^[15],每种粉煤灰4个样本,每个样本在可视范围内取5个视场,每个视场内可获取5000~30000个粉煤灰颗粒的形貌参数,共获得20组数据.

表1 粉煤灰和非球状颗粒粉体的理化性能

Table 1 Physical and chemical characteristics of FA and NFA

| Sample | Moisture content (by mass)/% | Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) | Fineness (by mass)/% | Optimal particle size/ μm | Chemical composition (by mass)/% | | | | | |
|--------|------------------------------|---|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|-----------------|------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Si+Al+F | SO ₃ | IL |
| F1 | 0.33 | 393 | 5.40 | 8.9 | 46.98 | 30.91 | 6.87 | 84.76 | 2.04 | 1.39 |
| F2-1 | 0.15 | 455 | 20.15 | 11.8 | 33.99 | 28.12 | 13.77 | 75.87 | 1.31 | 3.39 |
| F2-2 | 0.60 | 374 | 14.75 | 7.4 | 31.17 | 19.31 | 16.98 | 67.46 | 3.01 | 0.69 |
| F2-3 | 0.52 | 426 | 17.23 | 8.9 | 43.54 | 27.66 | 9.46 | 80.65 | 1.05 | 1.21 |
| F3 | 0.43 | 538 | 15.18 | 33.0 | 44.82 | 29.28 | 11.73 | 85.83 | 0.52 | 3.19 |
| NF-1 | 0.23 | 577 | 32.20 | 25.0 | 46.50 | 16.78 | 12.30 | 75.58 | 0.72 | 5.49 |
| NF-2 | 0.36 | 368 | 17.50 | 20.7 | 39.15 | 15.90 | 18.04 | 73.09 | 0.33 | 0.52 |
| NF-3 | 0.26 | 542 | 16.50 | 20.7 | 70.52 | 15.26 | 2.54 | 88.32 | 0.34 | 1.34 |

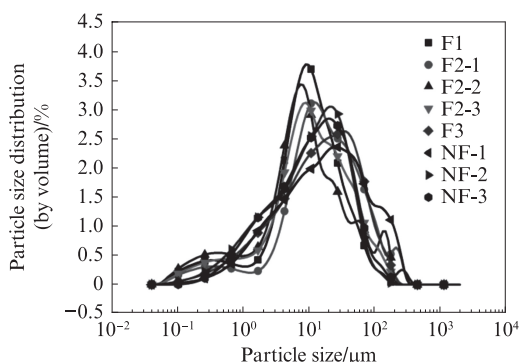


图1 粉煤灰和非球状颗粒粉体的粒径分布
Fig. 1 Particle size distribution of FA and NFA

图像分析过程的具体步骤为:先通过SEM获得原图(见图3(a))和校准图(见图3(b)),接着使用图像分析软件获得灰度图像(见图3(c)),再选取恰当的阈值将灰度图像转化为黑白二值图像(见图3(d)),最后选取所需颗粒的特征参数,利用计算机算法获得视场内颗粒的形状因子.阈值选择时,应使颗

粒边缘尽可能清晰,若颗粒团聚或被错误分开,可以通过“腐蚀膨胀”、“扩张”等辅助处理,以得到更有利于计算机识别并计算的图像.

2 结果与讨论

2.1 形状特征

粉体颗粒的形状通常用形状因子来表征,常用的形状因子有纵横比、圆度、球形度、填充度等. Wadell^[16]于1932年提出了可计算的圆度 R 和球形度 S_p 的定义:

$$S_p = s_v / S_a \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum (r_c / R_i)}{N} \quad (2)$$

式中: s_v 为颗粒等体积球体表面积; S_a 为颗粒实际表面积; r_c 为颗粒角的曲率半径; R_i 为测量平面中最大内接圆的半径; N 为颗粒角的个数.

Krumbein^[17]根据Wadell的定义提出了更快速的

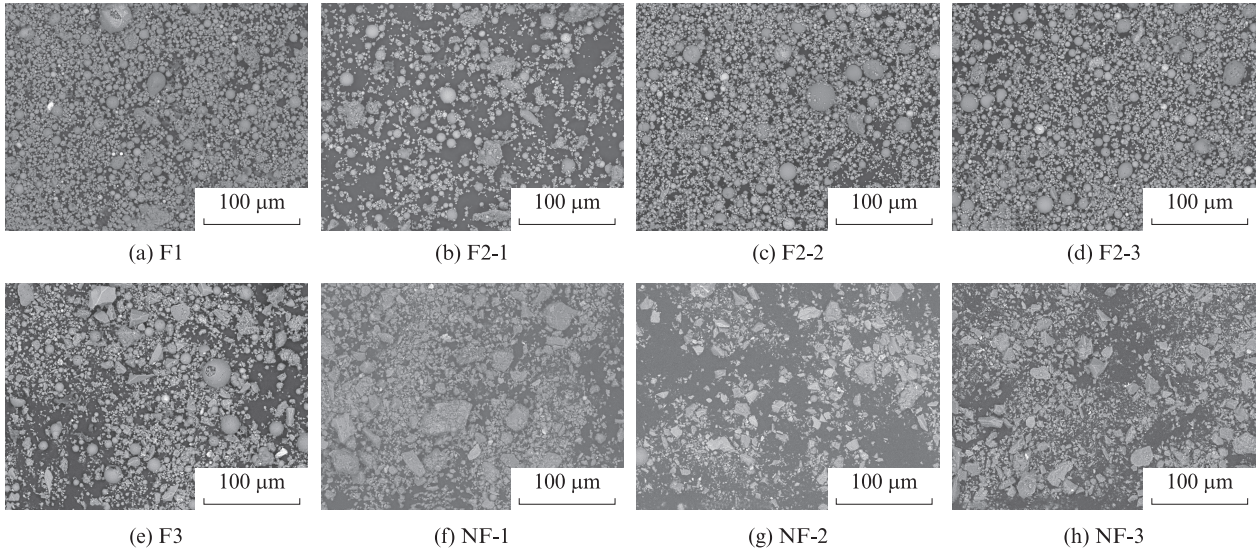


图2 粉煤灰和非球状颗粒粉体的SEM照片
Fig. 2 SEM images of FA and NFA

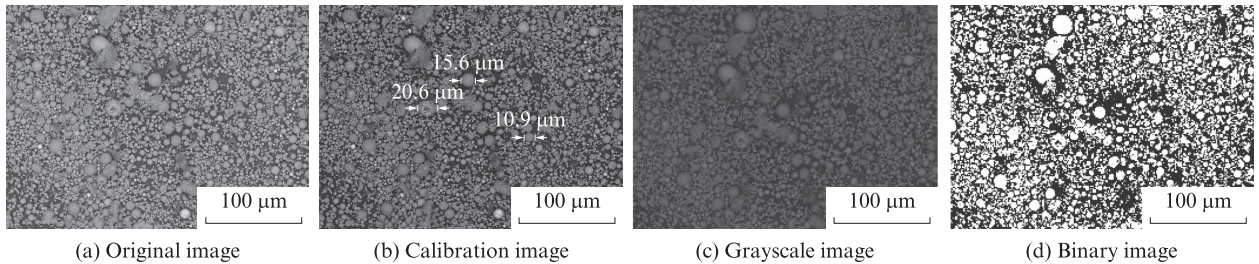


图3 图像分析过程
Fig. 3 Process of images analysis

测试方法,同时简化其计算:

$$S_p = \sqrt[3]{\frac{V_p}{V_s}} \quad (3)$$

式中: V_p 、 V_s 分别为颗粒及其外接球的体积.

在计算机图像识别技术发展下,蒋丽滢等^[18-19]在研究中进一步简化计算,得到:

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (4)$$

式中: A 为颗粒的投影面积; P 为颗粒的投影周长.

圆度所表征的颗粒形状逐渐从三维简化到二维,最终由颗粒投影的轮廓形状与圆的接近程度来表示. R 值范围为0~1, R 值越接近1,表示颗粒越接近圆形.

不同放大倍数下粉煤灰和非球状颗粒粉体的平均粒径 D_{av} 和平均圆度 R_{av} 见图4.由图4可见:相同放大倍数下,粉煤灰和非球状颗粒粉体的平均粒径相

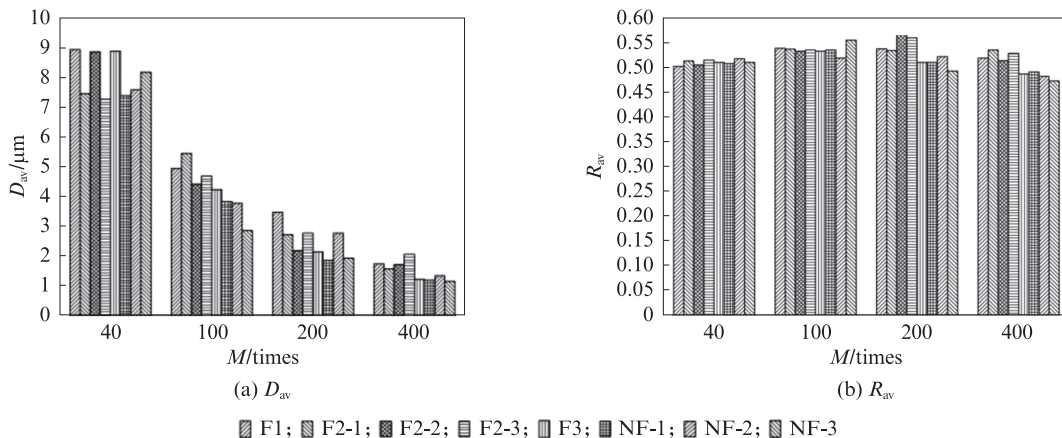


图4 不同放大倍数下粉煤灰和非球状颗粒粉体的平均粒径和平均圆度
Fig. 4 D_{av} and R_{av} of FA and NFA under different magnification times

近,这与它们的细度和粒径分布表现一致;随着放大倍数的增加,视场内大粒径颗粒数目减少,平均粒径减小,放大40、100、200、400倍下,颗粒的平均粒径分别为7~10、2~7、2~4、1~2 μm ;在所有放大倍数下,粉煤灰和非球状颗粒粉体的平均圆度均为0.4~0.6,这是由于视场内颗粒基数大,在较大的颗粒数目下其颗粒特征会被稀释.综上,从平均粒径和平均圆度结果来看,粉煤灰颗粒与非球状粉体颗粒之间没有明显的区别.

F1和NF-1的圆度分布见表2.由表2可见:视场

范围内一半左右的粉煤灰和非球状颗粒粉体的颗粒圆度在0~0.5之间,30%左右的颗粒圆度在0.6~0.7之间;圆度在0.9以上的颗粒最少,在低放大倍数或颗粒为非球状的情况下,高圆度颗粒几乎没有;当 $M=40$ 倍时,F1的平均粒径随圆度的增加而降低;当 $M=400$ 倍时,F1的平均粒径在圆度为0.7~0.8时最小,其随着圆度的增加呈现先降低后增加的趋势,此时NF-1的平均粒径均较低,与总平均粒径相近.综上,从圆度分布结果可以发现,粉煤灰与非球状颗粒粉体之间没有明显的区分.

表2 F1和NF-1的圆度分布
Table 2 Roundness distributions of F1 and NF-1

| R | F1, $M=40$ times | | | F1, $M=400$ times | | | NF-1, $M=400$ times | | |
|---------|------------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------|----------------------|---------------------|--------------|----------------------|
| | Quantity ratio/% | Area ratio/% | $D_{av}/\mu\text{m}$ | Quantity ratio/% | Area ratio/% | $D_{av}/\mu\text{m}$ | Quantity ratio/% | Area ratio/% | $D_{av}/\mu\text{m}$ |
| 0-0.5 | 51.1 | 88.7 | 11.757 | 49.1 | 86.5 | 4.859 | 55.4 | 91.9 | 1.575 |
| 0.5-0.6 | 9.7 | 3.9 | 9.144 | 10.6 | 6.3 | 2.532 | 13.2 | 4.9 | 1.203 |
| 0.6-0.7 | 30.7 | 3.8 | 4.970 | 31.6 | 2.8 | 1.986 | 27.8 | 2.7 | 0.521 |
| 0.7-0.8 | 4.1 | 2.1 | 9.254 | 5.3 | 2.1 | 0.622 | 2.4 | 0.5 | 0.961 |
| 0.8-0.9 | 4.3 | 1.6 | 6.740 | 3.3 | 2.2 | 2.238 | 1.2 | 0.1 | 0.510 |
| 0.9-1.0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.2 | 2.279 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 100.0 | 100.0 | 9.099 | 100.0 | 100.0 | 1.747 | 100.0 | 100.0 | 1.206 |

2.2 形状因子

将颗粒总表面积记为 S ;圆度为 R 的颗粒表面积记为 S_R ;圆度 R 大于0.5、0.6、0.7、0.8的颗粒表面积分别记为 $S_{R>0.5}$ 、 $S_{R>0.6}$ 、 $S_{R>0.7}$ 、 $S_{R>0.8}$.统计了粉煤灰和非球状颗粒粉体的颗粒在每个视场内不同圆度等级的面积占比,结果见图5,由图5可见:随着放大倍数的增加,各圆度等级下粉煤灰和非球状颗粒粉体面积占比的区分度逐渐增加;当 $M=40$ 倍时,各面积占比相近,粉煤灰与非球状颗粒粉体之间没有明显区别;当 $M=100$ 倍时,F2-2的面积占比最高,其他粉煤灰面积占比相近,非球状颗粒粉体的面积占比有时会高于粉煤灰,如NF-3的 $S_{R>0.5}/S$ 值与 $S_{R>0.6}/S$ 值均高于F1、F2-1和NF-3;当 $M=200$ 倍时,F2-2的面积占比最高,F2-3次高,F1、NF-1与NF-3的 $S_{R>0.5}/S$ 值和 $S_{R>0.6}/S$ 值相近,F3的面积占比值均最低;当 $M=400$ 倍时,F2-1、F2-2与F2-3最高,F1、F3与NF-2没有明显区分,其 $S_{R>0.8}/S$ 基本相等.

由图5还可见,随着放大倍数的增加,各圆度等级下的颗粒表面积 S_R 与 $S_{R>0.5}$ 之比有更明显的区分:当 $M=40$ 倍时,F1、F2-2与F2-3的 $S_{R>0.6}/S_{R>0.5}$ 、 $S_{R>0.7}/S_{R>0.5}$ 均与非球状颗粒粉体明显区分开,但各粉煤灰的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 值相近,区分不明显;当 $M=100$ 倍时,粉煤灰的 $S_{R>0.6}/S_{R>0.5}>55\%$, $S_{R>0.7}/S_{R>0.5}>$

35% , $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}>9\%$,粉煤灰与非球状颗粒粉体的 $S_R/S_{R>0.5}$ 有明显的区分,但形貌品质不佳的F3与非球状颗粒粉体没有明显的区分;当 $M=200$ 倍时,粉煤灰的 $S_R/S_{R>0.5}$ 均较高,与非球状颗粒粉体区分明显;当 $M=400$ 倍时,粉煤灰的 $S_R/S_{R>0.5}$ 的规律与 M 为200、100倍时相近.

综合粉煤灰和非球状颗粒粉体的 S_R/S 、 $S_R/S_{R>0.5}$ 可以发现:粉煤灰与非球状颗粒粉体的 S_R/S 波动较大,且两者之间没有明显的区分,这是由于总表面积 S 过大,作为分母时将稀释颗粒的圆度特征;粉煤灰和非球状颗粒粉体的 $S_R/S_{R>0.5}$ 有一定的区分,尤其是 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$,这是由于可区分的近圆颗粒增多,使得圆度更好的颗粒可以在 $S_R/S_{R>0.5}$ 上稳定体现其形貌品质.I级粉煤灰与II级粉煤灰在图像分析所得的形貌统计数据上没有明显的区分,且由于II级粉煤灰的粒径更大,其不同圆度等级下的 S_R/S 、 $S_R/S_{R>0.5}$ 反而更高.

2.3 粉煤灰的形貌品质判据

形貌品质不同的粉煤灰颗粒 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 表现出明显的区别:4种放大倍数下,粉煤灰F1、F2-1、F2-2与F2-3的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 均在7%以上,掺入非球状颗粒粉体的粉煤灰F3的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 在5%左右,非球状颗粒粉体NF-1、NF-2与NF-3样的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 均

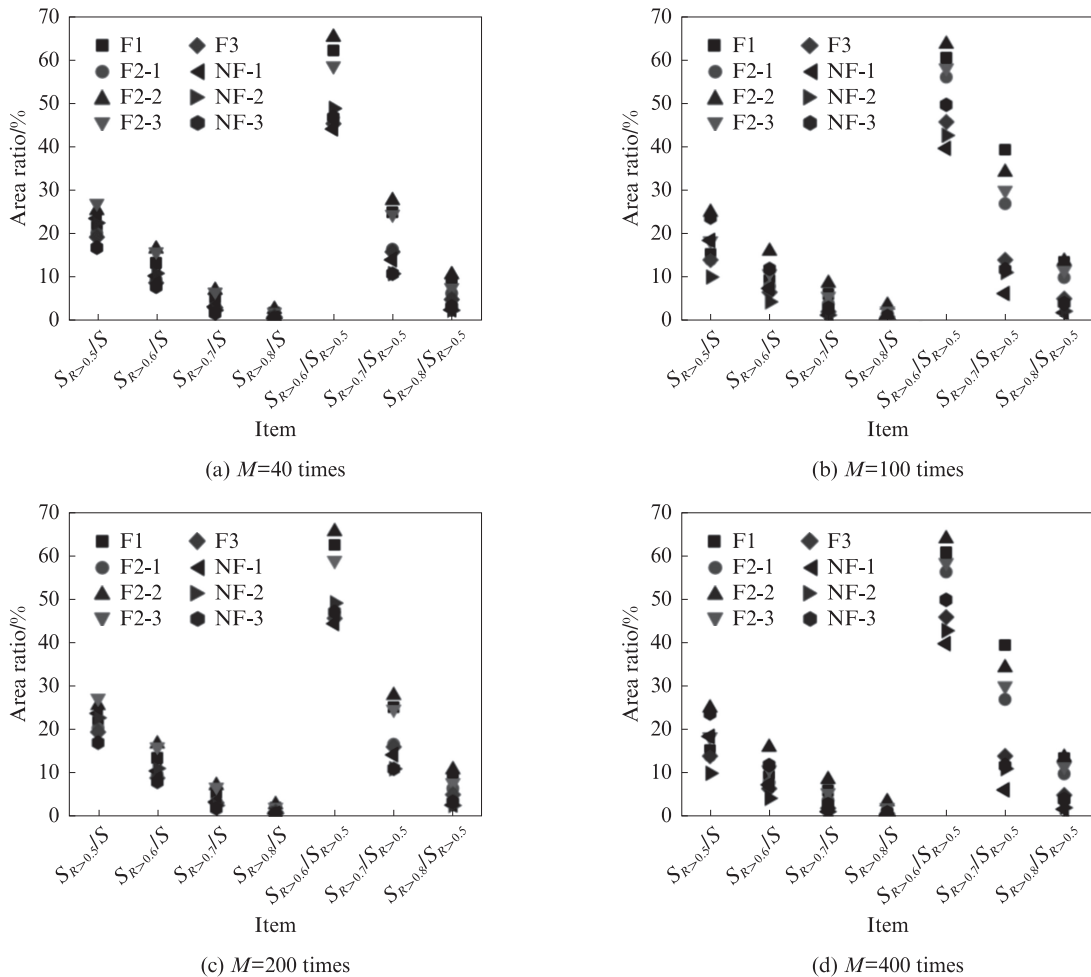


图5 粉煤灰和非球状颗粒粉体不同圆度等级下的颗粒面积占比
Fig. 5 Area ratio of FA and NFA under different roundness grades

低于5%;随着放大倍数的增加,粉煤灰的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 均明显增大,非球状颗粒粉体的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 均明显减小,粉煤灰与非球状颗粒粉体的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 区分愈加明显;当 $M=200$ 倍时,粉煤灰的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 均高于10%,掺入非球状颗粒粉体的粉煤灰 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 介于2%~10%,非球状颗粒粉体 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 低于2%;当 $M=400$ 倍时,非球状颗粒粉体的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 已低于1%。这是由于放大倍数增加,视场内颗粒数减少,使图像分析的识别能力提高。综上,当 $M=200$ 倍时,足以区分粉煤灰的形貌品质。

3 结论

(1)利用图像分析法可将不同圆度等级下的颗粒面积占比作为表征粉煤灰颗粒形貌特征的参数,而 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ (圆度 $R>0.8$ 与 $R>0.5$ 颗粒的表面积比)是最合适的指标。

(2)随着放大倍数 M 的增加,形貌品质不同的粉煤灰面积占比区分度也增加。当 $M=200$ 倍时,足以区分粉煤灰的形貌品质差异。

(3)当 $M\geq 200$ 倍时,高形貌品质粉煤灰的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 大于10%,掺入非球状颗粒粉体的粉煤灰 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 介于2%~10%,非球状颗粒粉体的 $S_{R>0.8}/S_{R>0.5}$ 低于2%。

参考文献:

[1] SARKAR A, RANO R, MISHRA K K, et al. Particle size distribution profile of some Indian fly ash-A comparative study to assess their possible uses[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(11):1221-1238.

[2] KUTCHKO B G, KIM A G. Fly ash characterization by SEM-EDS[J]. Fuel, 2006, 85(17/18):2537-2544.

[3] BENEZET J C, ADAMIEC P, BENHASSAINE A. Relation between silico-aluminous fly ash and its coal of origin [J]. Particology, 2008, 6(2):85-92.

[4] XU G, SHI X M. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 136:95-109.

[5] 孙抱真, 贾传玖, 水翠娟. 粉煤灰的颗粒形貌及其物理性质[J]. 硅酸盐学报, 1982, 10(1):64-69.

- SUN Baozhen, JIA Chuanjiu, SHUI Cuijuan. The particle morphology of pulverised fly ash (PFA) and its physical properties [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1982, 10(1):64-69. (in Chinese)
- [6] 张令茂. 粉煤灰颗粒形态的数值计算方法[J]. 硅酸盐建筑制品. 1988, 4:1-5.
- ZHANG Lingmao. A numeral calculating method of fly ash particles shape[J]. Building Energy Efficiency, 1988, 4:1-5. (in Chinese)
- [7] 郭辉, 陈志源, 沈旦申. 粉煤灰颗粒特征的量化[J]. 上海建材学院学报. 1991, 4:413-422.
- GUO Hui, CHEN Zhiyuan, SHEN Danshen. Quantization of the particle characteristics of fly ash[J]. Journal of Shanghai Institute of Building Materials, 1991, 4:413-422. (in Chinese)
- [8] 郝文霞, 张雄. 粉煤灰颗粒群特征及其与水泥胶砂性能的关系[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(3):244-249.
- HAO Wenxia, ZHANG Xiong. Study on the relationship between characteristics of particle group of fly ash and the properties of cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(3):244-249. (in Chinese)
- [9] CARTER R M, YAN Y. Measurement of particle shape using digital imaging techniques[J]. Journal of Physics Conference Series, 2005, 15:177-182.
- [10] TUNWAL M, MULCHRONE K F, MEERE P A. Image based particle shape analysis toolbox (IPSAT) [J]. Computers and Geosciences, 2020, 135:104391-104402.
- [11] BLOTT S J, PYE K. Particle shape: A review and new methods of characterization and classification[J]. Sedimentology, 2008, 55(1):31-63.
- [12] AI-ROUSAN T, MASAD E, TUTUMLUER E, et al. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5):978-990.
- [13] HRYCIW R D, ZHENG J X, SHELTER K. Particle roundness and sphericity from images of assemblies by chart estimates and computer methods [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(9):04016038-04016053.
- [14] NIE Z H, LIANG Z Y, WANG X, et al. Evaluation of granular particle roundness using digital image processing and computational geometry[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172:319-329.
- [15] 窦竞, 张雄. 用图像分析仪研究矿粉的几何特征[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(4):320-325.
- DOU Jing, ZHANG Xiong. Investigation of the geometric characteristic parameters of slag particle by the image analyzer[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(4):320-325. (in Chinese)
- [16] WADELL H. Volume, shape and roundness of rock particles[J]. The Journal of Geology, 1932, 40:443-451.
- [17] KRUMBEN W C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1941, 11:64-72.
- [18] 蒋丽滢, 韩继红, 张雄, 等. 颗粒群特征的定量体视学分析方法[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(4):325-329.
- JIANG Liying, HAN Jihong, ZHANG Xiong, et al. Quantitative stereology research in characteristics of particle group[J]. Journal of Building Materials, 1998, 1(4):325-329. (in Chinese)
- [19] KIM Y, DODBIBA G. A novel method for simultaneous evaluation of particle geometry by using image processing analysis [J]. Powder Technology, 2021, 393:60-73.

(上接第442页)

- gypsum leading to the destruction of cement paste under the external sulfate attacking[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(1):19-23. (in Chinese)
- [16] LIU Z Q, ZHANG F Y, DENG D H, et al. Physical sulfate attack on concrete lining-A field case analysis[J]. Case Studies in Construction Materials, 2017, 6:206-212.
- [17] LI Q, LI X Y, YANG K, et al. The long-term failure mechanisms of alkali-activated slag mortar exposed to wet-dry cycles of sodium sulphate[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 116:103893.
- [18] 朱效宏, 李青, 康晓娟, 等. 干湿循环硫酸盐环境下碱矿渣水泥 C(N)-A-S-H 凝胶结构演化规律[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11):2529-2537.
- ZHU Xiaohong, LI Qing, KANG Xiaojuan, et al. Nano-structural change of C(N)-A-S-H gel in alkali-activated slag pastes subjected to wetting-drying cyclic sulphate attack[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(11):2529-2537. (in Chinese)
- [19] LODEIRO G, MACPHEE D E, PALOMO A, et al. Effect of alkalis on fresh C-S-H gels. FTIR analysis [J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3):147-153.