

# 干滩表层沉积尾矿的细观几何特征研究

巫尚蔚<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 张超<sup>2</sup>, 冒海军<sup>2</sup>, 李浩然<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 为了从细观上描述干滩表层沉积尾矿的几何特征及其随沉积距离的变化, 采用显微实验和理论分析, 研究尾矿颗粒细观几何特征的描述方法, 分析尾矿细观几何特征随沉积距离的变化趋势。结果表明: 沉积尾矿的细观几何特征可以用颗粒粒径的数量频率分布图、面积频率分布图、圆形度、磨圆度和织构分维数进行描述; 35 μm 粒径是划分微米级颗粒和非微米级颗粒的界限, 2 种粒径的颗粒在几何特征上有很大差别; 尾矿沉积距离模型表明在干滩上的尾矿分布与粒径、初始矿浆流速和坡度等因素密切相关; 当沉积尾矿达到临界状态时, 临界状态应力比接近 1.4。研究结果揭示了干滩表层沉积尾矿的粒形粒径特征, 为沉积尾矿多尺度研究和分布规律提供参考。

**关键词:** 采矿工程; 尾矿; 细观结构; 图像处理; 图形分析; 沉积分布

**中图分类号:** TD 32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)04-0768-10

## Microscopic geometric characteristics of surface sedimentary tailings

WU Shangwei<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>, MAO Haijun<sup>2</sup>, LI Haoran<sup>3</sup>

(1. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** The microscopic geometrical characteristic of the surface sedimentary tailings is described in this paper. Microscopic experiment and theoretical analysis were used to research the microscopic geometric characteristics of tailings and the effect of distance on microscopic geometric characteristics. Some charts and indicators were used to describe the microscopic geometric characteristics, such as the number or area frequency distribution histogram of grain size, circularity, roundness and textural fractal dimension. Tailings grains according to their microscopic geometrical characteristics were divided into the micron-sized grains and the non-micron grains with the boundary of 35 μm. The derived formula showed that the distribution of surface sedimentary tailings was affected by the grain size, initial flow velocity, gradient, etc. The stress ratio was 1.4 when tailings reached the critical state.

**Key words:** mining engineering; tailings; microstructure; image processing; graphical analysis; sedimentary distribution

**收稿日期:** 2015-05-21; **修回日期:** 2015-07-22

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(51234004); 国家自然科学基金资助项目(51004099); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51304088)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51234004, 51004099 and 51304088)

**作者简介:** 巫尚蔚(1990-), 男, 2012年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事尾矿微观结构及多尺度科学方面的研究工作。E-mail: wushangwei2017@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0670

## 1 引言

干滩表层沉积尾矿指每次放矿结束后在干滩表面经流动、沉降和沉积形成的上覆压力可忽略不计的数米厚尾矿堆积体。尾矿的细观几何特征主要指尾矿颗粒的大小和形状。尾矿沉积受尾矿粒度、矿浆浓度、流速、放矿方法、尾矿池水位及大气降水等诸多因素影响<sup>[1]</sup>，不同沉积位置的尾矿具有不同的细观几何结构。为了更好地了解尾矿的细观结构，有必要对尾矿颗粒的几何特征进行更精细的描述。

颗粒的粒径分布对土的细观结构和宏观性质有重要影响。M. Jopony 等<sup>[2]</sup>提出了针对马来西亚 Lohan 地区铜尾矿的粒径分布函数表达式；V. Giuliano 等<sup>[3]</sup>用多种技术手段对硫铁矿的粒径进行测量，提出用 Rosin-Rammler 函数描述尾矿沉积物的粒径分布；张季如等<sup>[4]</sup>根据土壤的偏光显微镜观察结果，提出用数量分布表征土壤分形特性的方法；刘晓明等<sup>[5]</sup>发现沉积岩土粒径分布具有 2 种不同分形特征，可以用改进后的分形模型对沉积岩土粒径分布进行描述。目前针对干滩表层沉积尾矿粒径分布的研究还较少，干滩表层沉积尾矿细颗粒含量较多，采用传统粒径测量方法会低估细颗粒所占比例，不能满足尾矿细观研究的需要。

颗粒形状是另一个重要的细观参数，对于颗粒的形状表征尚无统一的定量方法。E. T. Bowman 等<sup>[6]</sup>提出采用傅里叶级数对颗粒形状进行数学描述的方法；J. C. Santamarina 和 G. C. Cho<sup>[7]</sup>的研究结果显示黏土的形状多为板状，可以从颗粒轮廓、棱角性及表面粗糙程度 3 个方面进行表述；刘清秉等<sup>[8]</sup>研究了砂土的颗粒轮廓和棱角性，在此基础上讨论了颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响；李丽华等<sup>[9]</sup>分析了沼泽黑土在 500 ~ 10 000 倍的电镜扫描图片，发现沼泽黑土颗粒呈管片状且孔隙体积超过土颗粒体积，在宏观上体现为含水率高、变形大；涂新斌和王思敬<sup>[10]</sup>对各类颗粒形态参数进行了详细的比较分析，认为参数  $S_{11}$  更适合反映颗粒的单元形态尖锐棱角。尾矿颗粒受粉碎作用和搬运作用的影响，形状与天然土有较大差别，针对干滩表层不同沉积距离尾矿颗粒形状与粒径的关系，形状与沉积距离的关系仍需进一步研究。

数字图像处理技术为岩土材料细观观测带来新的技术手段。P. L. Barnard 等<sup>[11]</sup>拍摄了美国西海岸

海滩的多处土体试样细观照片，比较了数字图像分析和传统方法测量优缺点，结果显示数字图像处理结果速度更快，准确度更高。C. Igathinathane 等<sup>[12]</sup>对天青石矿物的数字照片进行数字图像处理，提取了天青石矿物的细观特征参数，分析认为这种矿物的分布符合对数正态分布。通过对石英的电镜扫描图片进行图像分析，U. Ulusoy 等<sup>[13]</sup>对比了球磨机和棒磨机对石英形状和表面粗糙度的影响，发现不同破碎方式下产品的球形度等形状参数存在较大差异。周健等<sup>[14]</sup>对均匀粒径的重叠砂颗粒堆积体照片进行了数字处理分析，得到了砂颗粒大小形状的参数、孔隙大小形状的参数，以及砂粒间接触关系的参数。综合来看，对接触、重叠颗粒的分散、分割是图像处理的主要难题，相关的物理分离手段和数值分割技术还有待进一步研究。

在水力搬运作用下，放矿时干滩上不同沉积位置的尾矿的细观结构是不同的，其分布规律决定了坝体内尾矿材料的离散性，对尾矿库的初期设计和稳定性评价有重要影响。为研究干滩表层沉积尾矿的细观几何特征，本文采用试验研究和理论分析相结合的方法，通过对江西德兴铜尾矿的显微观测试验和细观照片的数字化处理，对表层沉积尾矿的粒径、粒形特征进行图形分析，并推导了不同粒径颗粒的最远沉积距离公式。研究结果为干滩尾矿细观结构和分布规律研究提供了参考。

## 2 表层沉积尾矿的显微观测试验

### 2.1 试验试样及试验设备

本试验采用的土样取自江西德兴铜矿 4 号坝表层干滩。该坝采用中线法堆筑，设计最大坝高 208 m，最终坝轴线上长 1 800 m，可供入库采样的干滩距离在 160 m 以上，是研究尾矿沉积规律的理想选择。取样时在干滩浅层垂直于坝轴线方向向库内设置 152 m 的采样线，在采样线设置 13 个采样点，在每个采样点剥离 10 cm 表面土后收集 30 kg 左右的沉积尾矿试样。

尾矿显微观测系统主要由 UPT200i 透反射偏光显微镜、Tucsen 显微摄像机和微型计算机构成，如图 1 所示。UPT200i 型透反射偏光显微镜采用 UCIS 无穷远色差独立校正光学系统，用于捕捉尾矿颗粒细观图像；Tucsen 显微摄像机内置 CCD 摄像头和数据采集卡，能够将连续色调的模拟图像经采样量

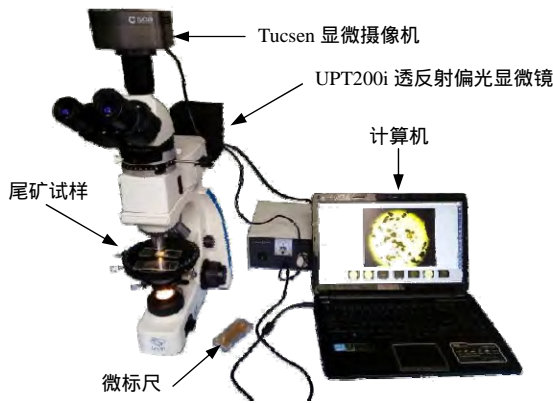


图1 试验设备  
Fig.1 Test equipment

化后转换成数字影像，并传输到计算机设备上；微型计算机是信号的接收终端和输出设备，在观测过程中起到调整细观图像成像效果的作用。

### 2.2 试验方法

由于尾矿颗粒较细，颗粒之间的团聚十分严重，需要对粉末试样进行分散，本次试验将尾矿样本用对磨的方法分散待测标本，具体操作如下：先用镊子将少许尾矿样品加入载玻片上，加入2~3滴蒸馏水后用另一载玻片进行对磨分散，待尾矿分散均匀后盖上盖玻片。将待测标本放在显微镜下观察，若不黏连颗粒没有达到80%，则重复做上述步骤，直到不黏连颗粒达到80%以上为止。按距离滩顶由近到远的顺序对采集试样的标本进行编号。分散效果如图2, 3所示，基本满足要求。

将制备好的标本放在显微镜下，对每个标本取30个视场进行拍摄，以数字图像的形式保存在磁盘中。然后用ImageJ软件进行图像增强、图像二值化、图像分割，分别统计每个视场的颗粒参数，将所有视场合并后的统计数据作为统计测量结果。为了达

到降噪的效果，去除最小 Feret 直径小于 1 μm 的数据，获得颗粒数目、矩形度、椭圆度、面积、周长、Feret 直径等细观参数。

本次试验对每个试样测量的颗粒总数都在10 000颗以上，以满足显微镜法测量对精确度的要求。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 显微图像定性分析

图3为距滩顶0.64, 152 m处试样的显微照片。照片中的尾矿颗粒按粒径可分为2种：粒径小于35 μm(划分依据见节3.2)的颗粒，在照片中显示为小黑点，在下文中称为微米级颗粒；粒径大于35 μm的颗粒，在照片中颗粒轮廓清晰可见，颗粒棱角性比微米级颗粒弱，这种颗粒在下文中称为非微米级颗粒。总体上看，尾矿颗粒的粒径分布具有不连续性，尤其是微米级颗粒和非微米级颗粒之间缺少过渡粒径。

观察发现，照片中各个尾矿颗粒的透光性存在差别，说明尾矿颗粒的成分比较复杂，在细观尺度上不能视为单一性质的材料。

在图3中可见，黑色颗粒粒径往往大于透明颗粒，且同一沉积位置上，黑色颗粒的棱角性弱于透明颗粒。这说明不同成分的颗粒在粒径、形状方面有一定区别。

对比图3(a)~(c)中3组照片，尾矿颗粒的粒径随沉积距离的增大而减小，这符合尾矿粒径沿坝轴线方向先粗后细的工程经验。但是，考虑到在实验过程中试样的分散是不均匀的，单一视场只能反映局部情况，需要对所有视场的数据进行统计和整理，以定量地对粒径、粒形进行分析。

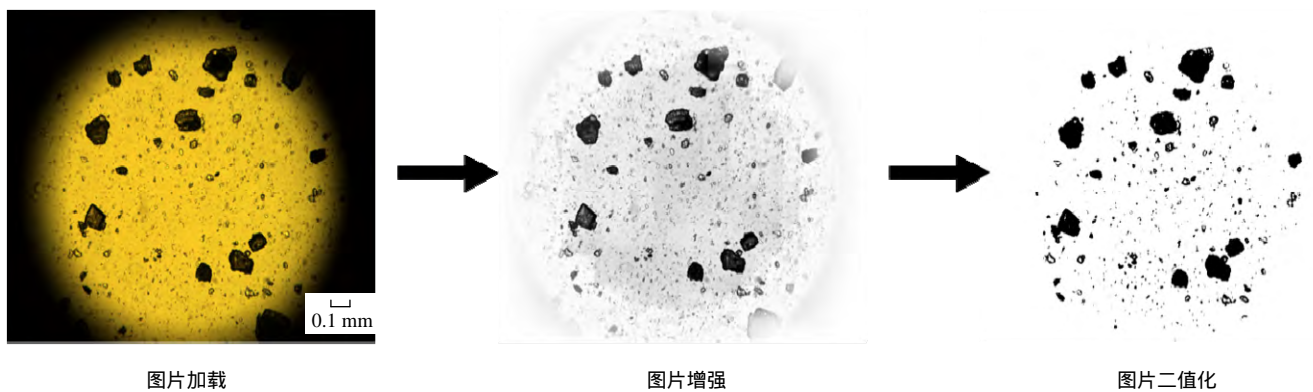
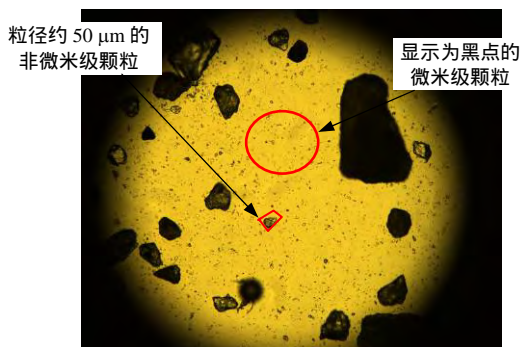
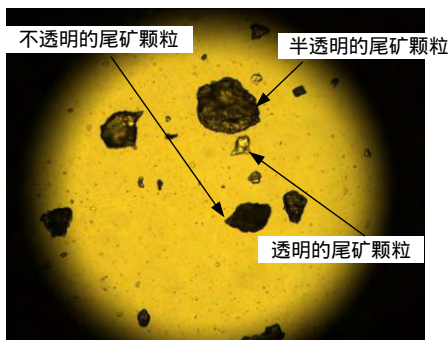


图2 数字图像处理

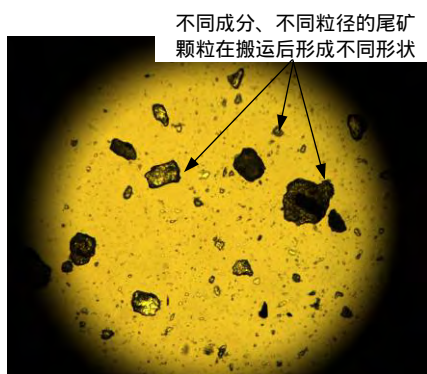
Fig.2 Digital image processing



(a) 距滩顶 0 m 处试样的显微照片



(b) 距滩顶 64 m 处试样的显微照片



(c) 距滩顶 152 m 处试样的显微照片

图 3 尾矿的显微照片

Fig. 3 Micrograph of tailings

### 3.2 干滩表层沉积尾矿的粒径分布特征

图 4 对比了数字图像显微镜测量和传统方法测量的结果。从图 4 可以看出，显微镜法和传统方法测量结果的差异主要体现在细粒尾矿含量上，显微镜法测得的细粒尾矿含量比传统方法高。这主要是因为传统方法在振筛时由于颗粒团聚、筛孔堵塞等原因，细粒尾矿颗粒残留在粗粒尾矿颗粒中，计入粗粒颗粒质量之中。

在尾矿样品中，某一粒径大小范围内的颗粒个数与颗粒总数的百分比称为数量频率，用  $f(D)$  表示。有如下关系：

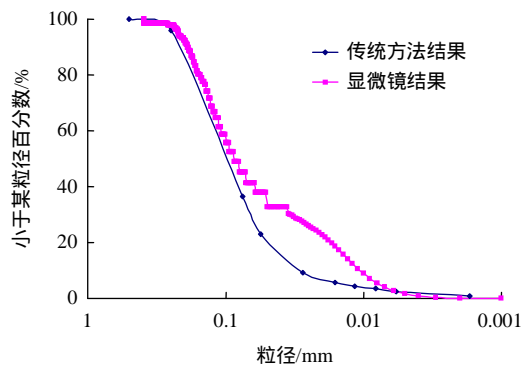


图 4 显微镜测量和传统方法测量结果的对比

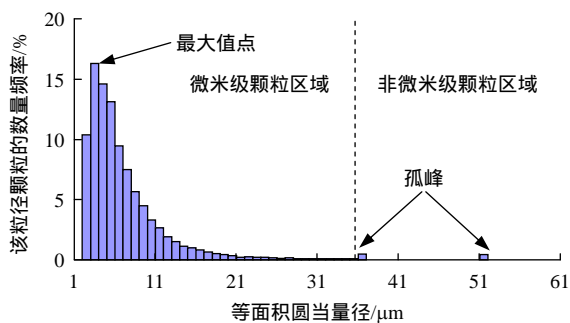
Fig.4 Comparison of the results from microscope measurement and traditional measurement

$$f(D) = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

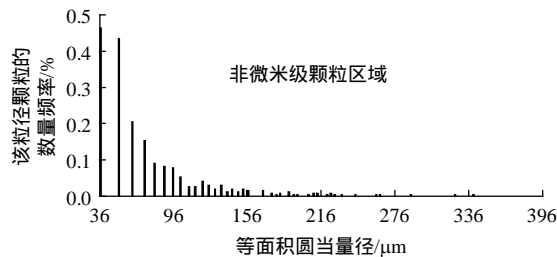
式中： $n$  为该粒径大小范围内的颗粒个数， $N$  为样品中的颗粒总数。

ImageJ 是一款开源的图像处理和软件，用 ImageJ 软件可以统计二值化图像中的颗粒数量、粒径、面积等基础信息，笔者对统计结果进行整理后绘制出图 5 所示的数量频率分布直方图，图中采用的等组距为  $1 \mu\text{m}$ 。图中的等面积圆当量径定义如下：

$$d_H = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$



(a) 微米级尾矿颗粒的分布形式



(b) 非微米级尾矿颗粒的分布形式

图 5 典型的颗粒粒径数量频率分布

Fig.5 Typical number frequency distribution histogram of particle diameter

式中： $d_H$  为等面积圆当量径， $A$  为颗粒面积。

从图 5 可以看出，微米级尾矿颗粒和非微米级尾矿颗粒各自形成 2 个峰值，最大值点位于微米级尾矿颗粒区域；微米级尾矿颗粒的数量在量级上大于非微米级尾矿颗粒，分布形状前陡后缓；非微米级颗粒区域的分布不连续，呈“孤峰”状，粒径越大，颗粒数量越少。

在显微照片中，某一粒径大小范围内的颗粒面积之和与颗粒总面积的百分比称为面积频率，用  $f(D)'$  表示。有如下关系：

$$f(D)' = \frac{A_n}{A} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $A_n$  为该粒径大小范围内的颗粒面积之和， $A$  为样品中的颗粒总面积。

颗粒粒径的面积频率分布图可以体现不同粒径颗粒所占空间的大小。干滩表层沉积尾矿的典型面积频率分布直方图如图 6 所示，对 13 组试样的粒径分布实验结果进行分析，发现可以把  $35 \mu\text{m}$  粒径作为界限，将尾矿颗粒划分为微米级颗粒和非微米级颗粒。微米级颗粒区域粒径分布连续性好，所占面积比例低，为前陡后缓的单峰形状；非微米级颗粒区域粒径分布不连续，所占面积比例高，整体上趋于“V”字型分布。

尾矿颗粒的粒径分布特点是由粉碎过程决定的。球磨机粉碎主要依靠研磨和磨削，包括研磨介质对物料的粉碎和物料相互之间的摩擦，在施力方

式上属于剪切摩擦。在这种施力方式下，破坏产生在颗粒的表面，产生大量的微米级颗粒，较粗颗粒不会完全粉碎，成为数量较少的“内核”，因此微米级颗粒数量大于非微米级颗粒。如图 7 所示，尾矿的粉碎过程符合表面粉碎模型，非微米级尾矿颗粒粒径分布和粉碎次数有关。尾矿的每次粉碎都会形成的次一级粒径的“内核”，最初的粉碎形成的“内核”粒径大、数量少，后面的形成的“内核”粒径小、数量多，造成非微米级尾矿颗粒数量频率的指数式分布。

由于水流的分选作用，干滩面上的尾矿有粗化现象，其颗粒粒径分布随沉积距离而变化，在细观结构上与入水浆体存在较大差异。为研究干滩尾矿颗粒粒径的分布与距滩顶沉积距离的关系，对不同沉积距离尾矿试样的等面积圆当量径平均值(以下称粒径平均值)、非微米级尾矿颗粒的累计面积与颗粒总面积之比(以下称细颗粒面积比)进行统计，结果如图 8 所示。从图中可以看出：干滩尾矿的粒径平均值在  $5 \sim 12 \mu\text{m}$  范围内，距离滩顶越远有减小的趋势；细颗粒面积比为  $15\% \sim 60\%$ ，随滩顶距离的增加有增加的趋势。这表明沉积尾矿的细粒含量随滩顶距离的增加而增加，与颗粒的搬运方式有关。非微米级颗粒属于推移质，以翻滚搬运为主，流速下降时容易沉积。微米级颗粒属于悬移质，以悬浮搬运为主，可长期悬浮于水中。

### 3.3 干滩表层沉积尾矿的形状特征

颗粒的形状可以从 3 个层次进行描述，第一层

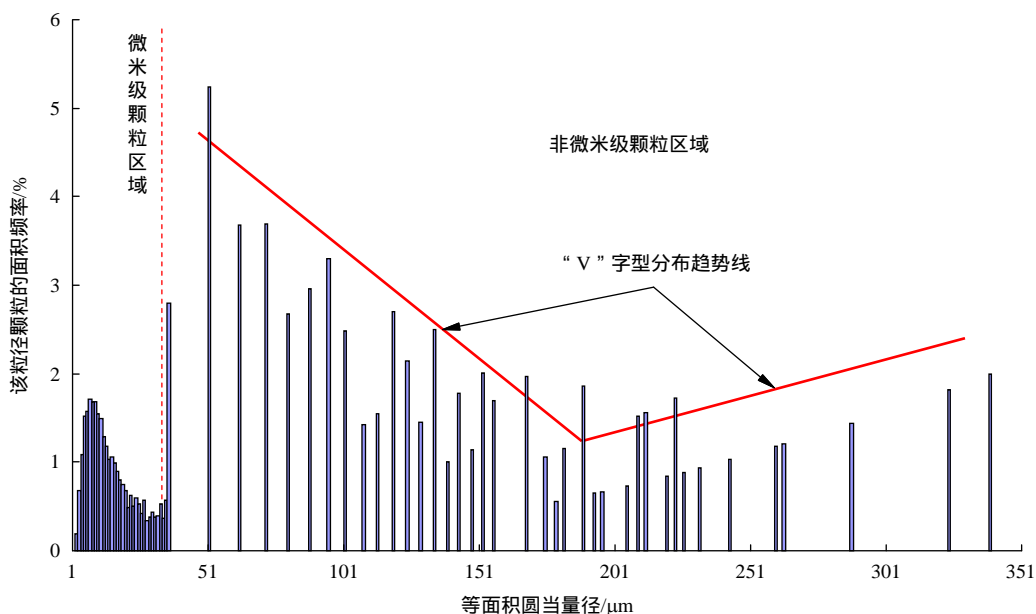


图 6 典型的颗粒粒径面积频率分布

Fig.6 Typical area frequency distribution histogram of particle diameter

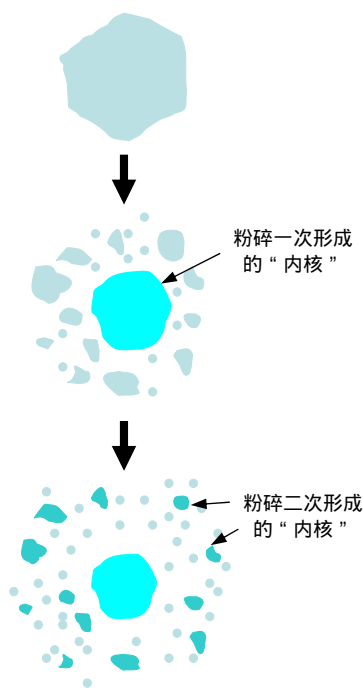
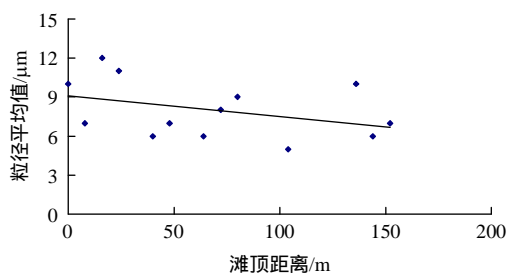
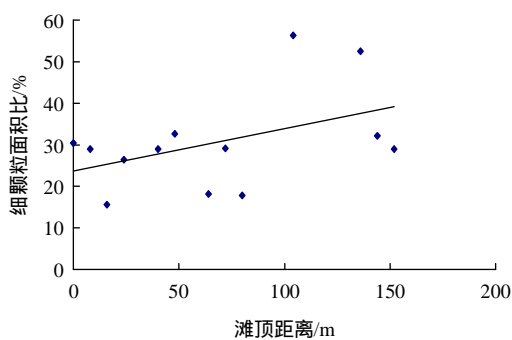


图 7 粒径分布形成过程示意图

Fig.7 Diagram of the formation of particle size distribution



(a) 粒径平均值与滩顶距离的关系



(b) 细颗粒面积比与滩顶距离的关系

图 8 颗粒粒径分布与滩顶距离的关系

Fig.8 Relationship between particle size distribution and sedimentary distance

是对颗粒整体轮廓的描述，第二层是对颗粒棱角光滑性的描述，第三层是对颗粒表面纹理的描述。本文用圆形度、磨圆度和织构分维数来分别描述颗粒

形状的这 3 个方面。

球形度描述了颗粒接近于球体的程度，用于描述颗粒整体轮廓。它的原始定义由 H. Wadell<sup>[15]</sup>提出，表达式为

$$\psi = \frac{S_n}{S} \tag{4}$$

式中： $\psi$  为球形度， $S_n$  为同体积球体的表面积， $S$  为颗粒的表面积。

二维平面中可以用圆形度描述颗粒整体轮廓<sup>[16]</sup>。圆形度描述了颗粒接近于圆形的程度，用面积和周长代替球形度定义中的体积和表面积，推导出圆形度的表达式：

$$C = \left( \frac{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{P} \right)^2 = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{5}$$

式中： $P$  为颗粒周长。

颗粒棱角光滑性用磨圆度进行描述，表达式为

$$X_v = \sum \left( \frac{r_i}{RN_r} \right) \tag{6}$$

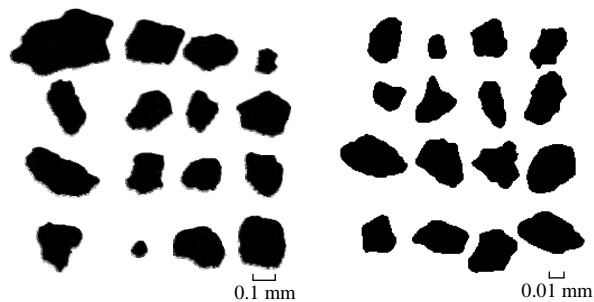
式中： $X_v$  为磨圆度， $r_i$  为棱角在颗粒最大投影面上的内接圆半径， $R$  为该颗粒轮廓内最大内接圆半径， $N_r$  为棱角个数。

计盒维数利用了 Hausdorff 维数的基本定义，用于描述颗粒纹理特征，可用于计算机计算织构分维数。其定义如下：

$$\lg N(\varepsilon) = -D \lg \varepsilon \tag{7}$$

式中： $D$  为计盒维数， $\varepsilon$  为覆盖单元尺寸， $N(\varepsilon)$  为覆盖单元数量。

为保证颗粒形状图像的准确性，避免图像分割时对颗粒形状的影响，手动选取边缘完整的颗粒进行形状分析，部分颗粒形状如图 9 所示。从图中可



(a) 非微米级颗粒的形状 (b) 微米级颗粒的形状

图 9 部分颗粒的形状

Fig.9 Shapes of some grains

以看出：(1) 尾矿颗粒近似不规则的圆形或矩形，具有一定的棱角，表面凹凸较明显；(2) 受机械破碎和搬运磨损的影响，尾矿颗粒的形状较为复杂，棱角性强的颗粒和棱角性弱的颗粒同时存在；(3) 非微米级颗粒的棱角性略强于非微米级颗粒。

不同沉积距离尾矿颗粒的圆形度分布统计结果如图 10 所示。从图中可以看出，随着粒径的增加，圆形度有下降的趋势：近滩顶端微米级尾矿颗粒的圆形度平均值为 0.74，非微米级尾矿颗粒的圆形度平均值为 0.72；远滩顶端微米级尾矿颗粒的圆形度平均值为 0.74，非微米级尾矿颗粒的圆形度平均值为 0.69。圆形度随沉积距离的变化不明显，说明在 150 m 内的搬运过程不会对尾矿整体形状轮廓产生影响。

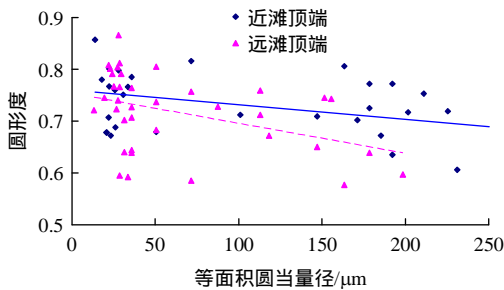


图 10 圆形度与粒径关系

Fig.10 Relationship between circularity and grain diameter

对颗粒磨圆度采用图表法进行定性分析<sup>[17]</sup>。图 11<sup>[7]</sup>为不同磨圆度和圆形度颗粒的标准颗粒，其中横坐标代表磨圆度，纵坐标代表圆形度，根据尾矿颗粒与标准颗粒的对比确定出大致的磨圆度值。图表法结果显示，干滩表层沉积尾矿的磨圆度范围为 0.3~0.7，主要集中于 0.3~0.5，圆形度范围为 0.5~0.9，主要集中于 0.7~0.9；近滩顶端的微米级颗粒磨圆度集中在 0.3 附近，随沉积距离增加磨圆

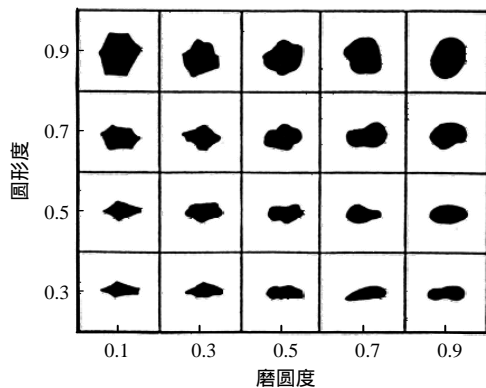


图 11 磨圆度对比图<sup>[7]</sup>

Fig.11 Comparison chart of roundness<sup>[7]</sup>

度在 0.5~0.7 范围内的颗粒增多，即磨圆度随沉积距离增加有上升的趋势；非微米级颗粒磨圆度集中在 0.5 附近，随沉积距离变化不大。以上结果证明，微米级颗粒棱角性强于非微米级颗粒，在干滩上的搬作用对棱角性的影响主要体现在微米级颗粒上。

取盒单元尺寸为 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 32, 64(像素值)，得到的  $\lg N(\varepsilon) \sim \lg \varepsilon$  曲线为一条直线，对斜率取负值得到计盒分形维数，可用于描述尾矿的纹理特征。从图 12 可以看出，分维数随着粒径的增加而增大，当粒径增加到 100 μm 后分维数变化趋于平缓，这种趋势可以用指数函数来表示。近滩顶端微米级尾矿颗粒的分维数平均值为 1.61，非微米级尾矿颗粒的分维数平均值为 1.87；远滩顶端微米级尾矿颗粒的分维数平均值为 1.59，非微米级尾矿颗粒的分维数平均值为 1.81。分维数随沉积距离有微弱变化，说明在搬运过程中颗粒表面粗糙性下降。

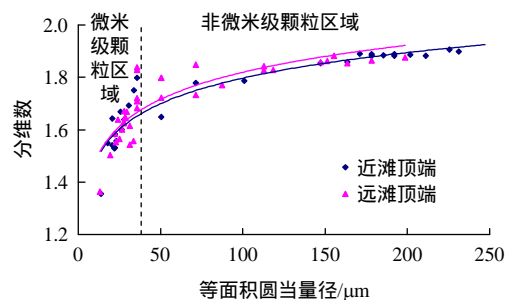


图 12 分维数与粒径关系

Fig.12 Relationship between fractal dimension and grain diameter

### 3.4 尾矿沉积距离的公式推导

从图 8 可知，距滩顶的距离越远，尾矿粒径越细。不同粒径颗粒的沉积距离决定了尾矿在干滩上的粗化程度，尾矿干滩分级效果对尾矿库的稳定性有较大影响。因此，研究不同粒径尾矿在水平方向上的沉积距离及其影响因素，对工程实践有一定指导意义。

由于机械能损失，矿浆在干滩上的流动速度不断下降，当流动速度低于某粒径颗粒的起动速度时，该粒径的颗粒与水流分离，发生沉降，在滩面上形成由粗到细的分布规律。由颗粒受力极限平衡方程和矿浆流动过程的能量守恒方程可推导沉积距离的理论计算公式。

假设矿浆在干滩上的流动满足以下条件：

- (1) 矿浆在干滩上的流动为恒定流，且不可压

缩，总流流量在流动过程中不发生变化；

(2) 作用在矿浆上的质量力只有重力；

(3) 干滩面为三角斜面，任意过流断面为渐变流；

(4) 达到分离速度前颗粒与水流速度相同，分离后对矿浆成分的影响忽略不计；

(5) 总流水头损失和流程长度、初始速度满足以下关系：

$$h_w = k_0 L v_L^2 \tag{8}$$

式中： $h_w$  为总流水头损失， $k_0$  为定值参数， $L$  为流程长度， $v_L$  为  $L$  处的矿浆流速。

在固液两相的矿浆流体中，对临界分离状态的尾矿颗粒进行受力分析，考虑颗粒在水流拖曳力、上举力和自身重力作用下平衡，建立力矩平衡方程式：

$$F_D L_D + F_L L_L = W L_w \tag{9}$$

式中： $F_D$  为拖曳力， $L_D$  为拖曳力力臂， $F_L$  为上举力， $L_L$  为上举力力臂， $W$  为颗粒重力， $L_w$  为重力力臂。又

$$F_D = C_D \alpha d_i^2 \frac{\rho v_c^2}{2} \tag{10}$$

$$F_L = C_L \alpha d_i^2 \frac{\rho v_c^2}{2} \tag{11}$$

$$W = \alpha (\gamma_s - \gamma) d_i^3 \tag{12}$$

式中： $C_D$ ， $C_L$  为拖曳力系数、上举力系数； $\alpha$  为面积系数； $d_i$  为颗粒  $i$  的等面积圆当量径； $\rho$  为清水容重； $\gamma_s$  为固体颗粒容重； $\gamma$  为矿浆容重； $v_c$  为临界分离流速。令

$$L_D = L_L = L_w \tag{13}$$

联立式(8)~(13)，得到分离流速：

$$v_c = \sqrt{\frac{2(\gamma_s - \gamma)d_i}{\rho(C_D + C_L)}} \tag{14}$$

对于在流程长度  $L$  处的矿浆，根据恒定总流伯努利方程，有

$$L i + \frac{\alpha_1 v_0^2}{2g} = \frac{\alpha_2 v_L^2}{2g} + k_0 L v_L^2 \tag{15}$$

式中： $i$  为干滩坡度； $\alpha_1$ ， $\alpha_2$  为动能修正因数； $v_0$  为初始流速。计算可得

$$v_L = \sqrt{\frac{2gLi + \alpha_1 v_0^2}{\alpha_2 + 2gk_0 L}} \tag{16}$$

结合式(14)和(16)，当  $v_L = v_c$  时粒径为  $d_i$  的颗粒会发生沉降，此时有

$$L_c = \frac{\alpha_1 \rho (C_D + C_L) v_0^2 - 2\alpha_2 (\gamma_s - \gamma) d_i}{4(\gamma_s - \gamma) g k_0 d_i - 2g \rho (C_D + C_L) i} \tag{17}$$

式中： $L_c$  为该粒径颗粒的最远沉积距离。

在工程应用中可认为：

$$L_c = M \frac{v_0^2}{(\gamma_s - \gamma) d_i} - N \tag{18}$$

式中： $M$ ， $N$  均为定值参数。

综上所述，式(17)和(18)描述了粒径为  $d_i$  的颗粒在不同的初始条件下所能达到的最远沉积距离。从该式还可以看出，在工程上采取减小矿浆流速、增大尾矿粒径、减小矿浆浓度等措施可以缩短粗粒尾矿的沉积距离，改善干滩粗化现象。该模型建立了颗粒粒径与沉积距离之间的联系，可为尾矿库数值建模时坝体内尾矿的分布规律提供参考，并在无实测数据时预测干滩尾矿分布规律。

### 4 沉积尾矿的临界状态力学性状

图 13 为沉积尾矿固结三轴压缩排水剪试验结果，应力-应变关系曲线为弱硬化型，最终达到应力不变，应变不断增大的临界状态。随着固结压力的增大，初始阶段弹性模量和峰值强度增大，硬化程度略有提高。

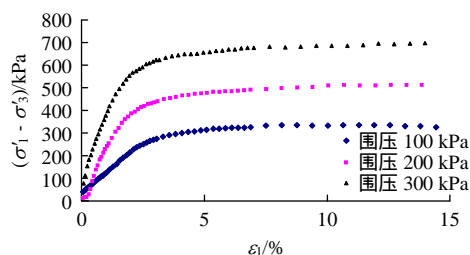


图 13 沉积尾矿应力-应变关系  
Fig.13 Stress-strain relationship of sedimentary tailings

将固结三轴压缩试验的结果反映在  $q/p - \varepsilon_1$  坐标中，如图 14 所示。从图中可以看出，临界状态应力比  $q/p$  随应变的增大而增大，3 种围压下的临界状态应力比集中于 1.4 附近。



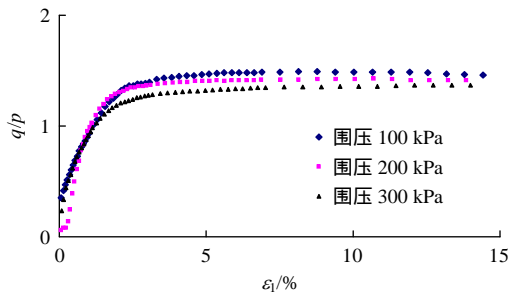


图 14 沉积尾矿的应力比 - 应变关系

Fig.14 Stress ratio-strain relationship of sedimentary tailings

图 15 为试验结果在  $p, q$  平面上的有效应力路径。从图中可以看出：(1) 试验曲线的终点落在同一条破坏线上，该破坏线可以用一条直线拟合，斜率为 1.4；(2) 围压对应力路径的形状有一定影响。在 100 和 200 kPa 围压下，应力路径带有一定凸起，围压 300 kPa 时基本服从线性。

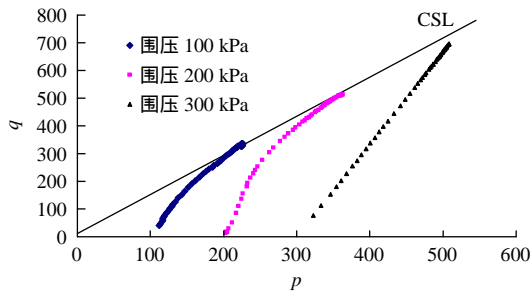


图 15 沉积尾矿的临界状态线

Fig.15 Stress-strain curves of sedimentary tailings

## 5 讨论

结合数字图像处理技术，用光学显微镜研究尾矿的微观结构，其优点是技术简单易行，成像直观，可以在较大范围内观测和统计颗粒的大小和形状，能够较准确地定量测量微观参数，具有其他微细观测技术不可代替的优势。然而，这种研究方法也存在一些技术难题。首先是待测标本必须具有代表性，要求多点取样、从堆积体内部取样，制备标本过程试样尽量保持均匀状态，并扩充标本个数和观测次数来扩大样本数量，这是保证结果可靠的前提条件。其次，尾矿材料是一种非均匀颗粒群，粒径分布范围较广，单靠数值分割技术对接触状态的颗粒进行数值分割不能解决问题，如何在制备标本时通过物理和化学方法来理想地分离颗粒，仍然是一个关键性的技术难题。再者，在测量过程需要注意测量数据的完整性、准确性和有效性，这直接决定

了细观试验的观测效果。除了增加视场数量、发展细观高清摄像技术、手动剔除无效颗粒外，主要存在的问题是在测量尾矿粒径分布时，拍摄的不同粒径颗粒不在同一平面上，会发生失焦现象，降低了成像质量和测量结果的准确性。此外，为了达到降噪的效果，本文去除了最小 Feret 直径小于  $1 \mu\text{m}$  的数据，对数据完整性有一定影响。

本试验主要针对尾矿颗粒的粒形和粒径展开研究，这是相对重要和容易获取的细观参数。要完整地解决尾矿细观几何结构问题，还要考虑尾矿的颗粒形态、孔隙分布特征、颗粒定向分布、粒间接触形式等问题，建立系统评价细观结构的方法及解决细观结构的宏观响应是未来的研究方向，诸如沉积环境、加载路径、应力历史等外部因素对细观结构的影响也有待进一步研究。此外，三维问题的研究也是发展的前沿和方向，和二维问题相比，三维颗粒的分离、成像、处理和分析都更加困难，三维颗粒图像的获取和重建是国内外研究的重要方向。

## 6 结论

(1) 沉积尾矿在细观层次上的粒径分布可以用颗粒粒径的数量频率分布图和面积频率分布图进行描述，颗粒的形状可以用圆形度、磨圆度和织构分维数进行描述。

(2) 尾矿颗粒按粒径大小可分为微米级颗粒和非微米级颗粒，界限是  $35 \mu\text{m}$ 。2 种颗粒在大小、数量、形状、沉积距离方面存在较大差异，这种粒径分布形式是由破碎、粉碎过程所决定的。

(3) 推导了干滩上粒径为  $d_i$  的颗粒在不同的初始条件下所能达到的最远沉积距离。根据结果，尾矿颗粒的沉积距离与颗粒粒径、矿浆浓度、初始流速等因素有关。

(4) 沉积尾矿在固结三轴压缩排水剪条件下的应力 - 应变关系曲线为弱硬化型，临界状态应力比接近 1.4，在  $p, q$  平面上的有效应力路径终点落在同一条直线上。

### 参考文献(References)：

[1] 李夕兵, 蒋卫东, 贺怀建. 尾矿堆积坝透镜体分布状态研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 947 - 949. (Li Xibing, JIANG Weidong, HE Huaijian. Study on distributing state of lenticle in tailings fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 947 - 949. (in Chinese))

[2] JOPONY M, USUP G, MOHAMED M. Particle size Distribution of

- copper mine tailings from Lohan Ranau Sabah and its relationship with heavy metal content[J]. *Pertanika*, 1987, 10(1): 37–40.
- [3] GIULIANO V, PAGNANELLI F, BORNORONI L, et al. Toxic elements at a disused mine district: particle size distribution and total concentration in stream sediments and mine tailings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(1): 409–418.
- [4] 张季如, 朱瑞康, 祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征[J]. *水利学报*, 2004, 4(4): 67–71.(ZHANG Jiru, ZHU Rugeng, ZHU Wenhua. Fractal features of soils characterized by grain size distribution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 4(4): 67–71.(in Chinese))
- [5] 刘晓明, 赵明华, 苏永华. 沉积岩土粒度分布分形模型改进及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8): 1 691–1 697.(LIU Xiaoming, ZHAO Minghua, SU Yonghua. Improvement and application of fractal model to size distribution of sedimentary rock and soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1 691–1 697.(in Chinese))
- [6] BOWMAN E T, SOGA K, DRUMMOND W. Particle shape characterisation using Fourier descriptor analysis[J]. *Geotechnique*, 2001, 51(6): 545–554.
- [7] SANTAMARINA J C, CHO G C. Soil behaviour: The role of particle shape[C]// *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference*. Thomas Telford: [s. n.], 2004: 604–617.
- [8] 刘清秉, 项伟, LEHANE B M, 等. 颗粒形状对砂土抗剪强度及桩端阻力影响机制试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 400–409.(LIU Qingbing, XIANG Wei, LEHANE B M, et al. experimental study of effect of particle shapes on shear strength of sand and tip resistance of driven pile[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 400–409.(in Chinese))
- [9] 李丽华, 陈轮, 高盛焱, 等. 三江平原沼泽土微观特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2 295–2 299.(LI Lihua, CHEN Lun, GAO Shengyan, et al. Study of microstructure properties of swamp soil in sanjiang plain[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2 295–2 299.(in Chinese))
- [10] 涂新斌, 王思敬. 图像分析的颗粒形状参数描述[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(5): 659–662.(TU Xinbin, WANG Sijing. Particle shape descriptor in digital image analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(5): 659–662.(in Chinese))
- [11] BARNARD P L, RUBIN D M, HARNEY J, et al. Field test comparison of an autocorrelation technique for determining grain size using a digital “beachball” camera versus traditional methods[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 201(1): 180–195.
- [12] IGATHINATHANE C, ULUSOY U, PORDESIMO L O. Comparison of particle size distribution of celestite mineral by machine vision  $\Sigma$ Volume approach and mechanical sieving[J]. *Powder Technology*, 2012, 215: 137–146.
- [13] ULUSOY U, YEKELER M, HIÇYILMAZ C. Determination of the shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations[J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(10): 951–964.
- [14] 周健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2 047–2 052.(ZHOU Jian, YU Rongchuan, JIA Mincai. Measurement of microstructure parameters for granular soil model using digital image technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2 047–2 052.(in Chinese))
- [15] WADELL H. Volume, shape, and roundness of rock particles[J]. *Journal of Geology*, 1932, 40(5): 443–451.
- [16] WADELL H. Sphericity and roundness of rock particles[J]. *The Journal of Geology*, 1933, 41(3): 310–331.
- [17] KRUMBEIN W C, SLOSS L L. *Stratigraphy and sedimentation*[M]. San Francisco: Freeman, 1963: 660.