

文章编号: 1674-599X(2020)02-0001-06

## 基于静态图像法的镍铁渣粒度分析及剪切试验

刘龙武, 龚德峰, 李俊, 谢尧, 陈海雄

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 利用静态图像法和筛分法, 分析了镍铁渣的级配特征。结合 Udden-Wentworth 粒度划分方法和 Folk-Ward 图解法, 计算了镍铁渣粒径中值、平均粒径、标准偏差、偏度和峰度。计算结果表明: 与筛分法相比, 静态图像法所测得的粗颗粒含量大于筛分法所测的, 并且细颗粒含量会偏小, 计算得到中值和平均粒径偏粗, 分选偏好, 偏度偏正, 峰度偏尖锐。基于  $\Phi$  建立的镍铁渣的粒度频率累计曲线能更好反映镍铁渣的粒径分布特征, 利用大型直剪仪进行了镍铁渣的重复直剪试验, 并对比了剪切前、后的颗粒级配, 以期镍铁渣等一些工业废渣的再利用提供借鉴。

**关键词:** 镍铁渣; 粒度分析; 静态图像法; 筛分法

中图分类号: TF644 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.001

### Particle size analysis and shear test of ferronickel slag based on the static image method

LIU Long-wu, GONG De-feng, LI Jun, XIE Yao, CHEN Hai-xiong

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The gradation characteristic of ferronickel slag was analyzed by static image method and sieving method. The median, average particle size, standard deviation, skewness and peak of particle size of ferronickel slag were calculated by the Udden-Wentworth particle size division method and the Folk-Ward graphic method. Comparing with the sieving method, the content of coarse particles measured by static image method is larger than that measured by sieving method, and the content of fine particles will be small. The median and average particle sizes are coarse, sorting preference, skewness and peak value are sharp. The accumulative curve of size frequency of nickel-iron slag based on  $\Phi$  value can satisfactorily reflect the characteristic of the particle size distribution. The repeated direct shearing test of nickel-iron slag was carried out with a large direct shearing instrument, and the particle gradation before and after shearing was compared, the result is expected to provide reference for the reuse of some industrial slag such as nickel-iron slag.

**Key words:** nickel-iron slag; particle size analysis; static image method; sieving method

镍铁渣是炼制镍铁过程中产生的一种工业废弃物。随着中国产镍技术的不断发展, 镍铁渣总排放量接近 1 亿 t<sup>[1]</sup>, 冶炼 1 t 红土镍矿将产生 0.9 t 以上的镍铁渣, 但可应用于路基填料、混凝土矿物掺合料、混凝土骨料、回收有用元素、矿山回填材料、制备微晶玻璃和地质聚合物等, 但利用率较

低<sup>[2-9]</sup>。其原因是镍铁渣的颗粒形态各异, 多呈细长和扁平的针状和片状颗粒, 且 MgO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高<sup>[1,10]</sup>, 对镍铁渣的工程性质有一定的影响。目前, 国内、外对镍铁渣的粒度分布和粒度参数研究较少见, 然而对矿物的粒度分析是在工程应用中必不可少的<sup>[11]</sup>。蔡廷禄<sup>[12-13]</sup>等人比较了一系列试验测

收稿日期: 2020-02-13

作者简介: 刘龙武(1961-), 男, 长沙理工大学教授, 博士。

试方法(如: 筛分法、沉降法、镜下测量法、数字图像法和激光法等)。筛分法原理简单、操作方便, 在实际工程上用得最多, 但它对粒径较小的颗粒无法测量。静态图像法是利用数码相机拍下显微镜下颗粒的图像后, 用计算机图像识别技术测量粒径<sup>[12]</sup>, 有耗时少、减少人为误差的优点, 然而其在土木工程中的应用鲜见<sup>[14]</sup>。为了能更好的利用镍铁渣, 作者拟采用静态图像法和传统筛分法, 系统分析镍铁渣的形态特征、粒度分布和粒度参数, 以期对镍铁渣高效利用提供新的思路。

### 1 粒度分析试验

#### 1.1 试验方法

以广东广青公司回转窑(RK)-矿热炉(EF)冶炼工艺残留的镍铁渣为研究对象, 其外观为偏黑色砾状不规则颗粒, 颗粒周围有针状突出物, 并含有一定数量的针状玻璃纤维(如图 1 所示)。按四分法从原镍铁渣堆场中取 3 个试样, 编号 1#, 2#, 3#, 作为第一组用筛分法进行分析; 将 3 个筛分完成后试样重新混合, 按四分法取得编号为 4#的试样作为第二组进行静态图像法分析。

筛分法按《公路土工试验规程》所规定的方法进行。静态图像法试验步骤为:



(a) 块状有突出



(b) 针状玻璃纤维

图 1 镍铁渣颗粒形态

Fig. 1 Shape of ferronickel slag particles

1) 取若干镍铁渣颗粒放置在显微镜载物台 2/3 视域半径之内, 放置颗粒的数量以保持颗粒之间距大于大颗粒的粒径来确定一次采样的图像。用 100 倍物镜观察图像进行平面照相, 调整曝光时间, 使

照片能达到好的效果。将采集的图像输入到电脑中, 依次进行平面照相的图像采集工作, 直至拍完 4#试样的全部颗粒。

2) 将所拍摄的照片用 Photoshop 软件处理掉阴影, 然后将作为静态图像法的分析样本, 用分析软件计算颗粒平面图像的长轴、短轴及投影面积。

3) 按等效面积计算镍铁渣颗粒的粒径, 绘制级配曲线, 得到静态图像法的粒度参数。试验流程如图 2 所示。

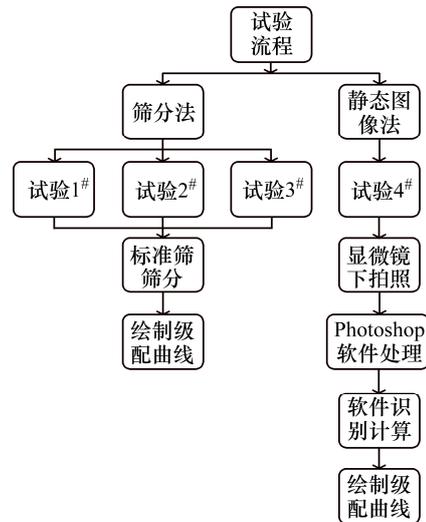


图 2 试验流程

Fig. 2 Test flow chart

#### 1.2 试验仪器

筛分法是用一套按规定孔径的标准筛, 将一定量的待测试样由粗到细依次过筛, 称出各筛上的筛余量, 再计算出各筛上的分计筛余百分率(各筛上的筛余量占试样质量的百分率)与累计筛余百分率(各个筛与比该筛粗的所有筛的分计筛余百分率之和)。筛分法适用于松散的颗粒, 其优点是原理和设备简单且易于操作。

静态图像法是利用显微镜及拍照装置拍摄样本照片, 然后用计算机图像识别技术测量粒径<sup>[12]</sup>, 进而输出粒度分布结果。优点是原理简单, 直观性强, 可观察团聚现象; 缺点是代表性较差, 有时不能反映整体样品水平。镍铁渣颗粒多为不规则状, 用静态图像法可以更加直观地了解镍铁渣的形态特征。市面上图像法仪器测量范围多在 0.4 μm~3 mm 之间, 而从图 1 中可以看出, 镍铁渣多有 3 mm 以上的颗粒。使用显微镜所拍摄的图片导入识别软件中, 该软件利用深度学习<sup>[15]</sup>的原理, 识别出照片

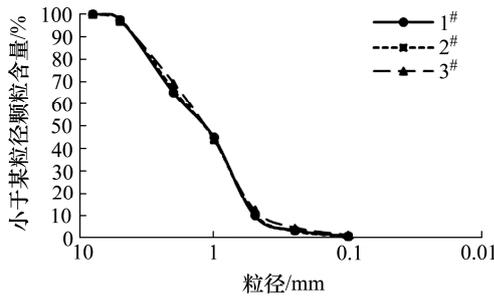
里的颗粒范围, 并计算长轴径、短轴径和投影面积, 然后输出所需要的数据。

1.3 试验结果

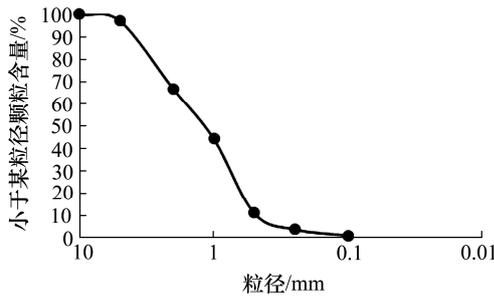
1) 3 次筛分所得级配曲线趋势相同(如图 3(a)所示), 各组分含量有较小的差别。为了更好地与静态图像法进行比较, 将所得 3 个级配曲线相同范围内的粒径含量取平均值, 得到最终的级配曲线, 如图 3(b)所示。

2) 将统计静态图像法所输出的数据按同样的粒径范围计算各组分含量, 得到静态图像法级配曲线。

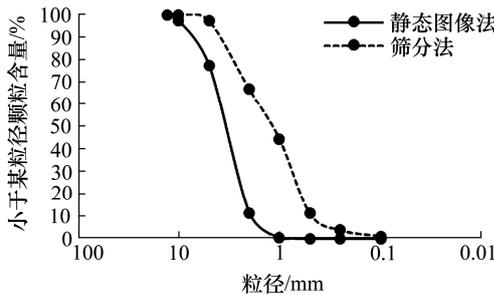
3) 筛分法和静态图像法的对比如图 3(c)所示。2 种方法图像趋势相同, 静态图像法所测得粗颗粒含量大于筛分法所测的, 这是因为 2 种方法的测试原理不同所导致的。对不规则形状的颗粒, 筛分法是以颗粒的最小尺寸通过筛孔, 测量的是其最小尺度; 而静态图像法测量的是颗粒的各个不规则面, 换算出的是相当于同体积球体的直径。



(a) 3 次筛分级配曲线



(b) 筛分法级配曲线



(c) 筛分法与静态图像法级配曲线对比

图 3 级配曲线对比

Fig. 3 Comparison of grading curves

因此, 用静态图像法测定的结果比筛分法测定的偏粗。筛分法级配曲线比较平缓粗糙, 而静态图像法级配曲线比较陡倾光滑。

1.4 结果分析

1) 根据《建设用砂(GB/T 14684—2011)》<sup>[16]</sup>, 可计算其细度模数  $M_{X1}=4.15$ ,  $M_{X4}=4.84$ 。细度模数反映的是天然砂中颗粒的粗细情况, 其  $M_X$  值均大于 3.7, 可以将镍铁渣划分为特粗砂。如将镍铁渣代砂在混凝土中使用, 需剔除较大颗粒。

2) 根据《岩土工程勘察规范(GB 50021—2001)》<sup>[17]</sup>, 其不均匀系数  $C_{u1}=3.03, C_{s1}=0.94$ ;  $C_{u4}=2.18, C_{s4}=1.06$ 。不均匀系数  $C_u$  反映的是大小不同粒组的分布情况。  $C_u$  越大, 表示粒组分布范围越广。由于  $C_u < 5$ , 因此, 镍铁渣属于级配不良。用作填料时, 应将镍铁渣进行改良, 如: 加筋处理。

3) 为了能更清楚地了解镍铁渣粒度的分布情况, 特采用 Udden-Wentworth<sup>[18]</sup> 粒级方法, 它是以 1 mm 为基数、以 2 为倍数的等比制分级。将对自然界的沉积物按直径的大小进行分级<sup>[12]</sup>。其中,  $\Phi$ <sup>[19]</sup> 是一个无量纲单位, 用来表征颗粒的大小。

$$\Phi = -\log_2(d / d_0) \tag{1}$$

式中:  $d$  为颗粒直径, mm;  $d_0$  为 1 mm。

该方法的优点: ①分界等间距; ②在作图时, 可不用对数坐标, 已经将对数等间距坐标换算成算术等间距坐标。

基于  $\Phi$  建立的镍铁渣的粒度频率累计曲线如图 4 所示。粒度参数是反映粒度特征的数据。用 MATLAB 软件在累积曲线上读值, 按 Folk-Ward 图解法<sup>[20]</sup>, 计算粒径中值  $M_d$ 、平均粒径  $M_z$ 、标准偏差  $\sigma_i$ 、偏度  $S_K$  和峰度  $K_G$ <sup>[21]</sup>。

$$M_d = \varphi_{50} \tag{2}$$

$$M_z = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \tag{3}$$

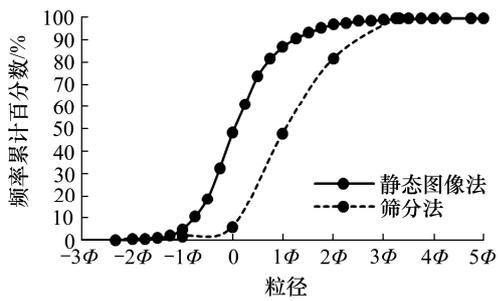
$$\sigma_i = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \tag{4}$$

$$S_K = \frac{\varphi_{84} + \varphi_{16} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_{95} + \varphi_5 - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \tag{5}$$

$$K_G = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \tag{6}$$

其中,  $\varphi_{50}$  为累积百分位为 50% 时的粒径,  $1 \Phi = 500 \mu\text{m}$ , 其他的  $\varphi$  定义类似。

平均粒径和中值表示颗粒分布的集中趋势; 标准偏差表示分选程度的参数或围绕集中趋势的离散; 偏度被用来判别粒度分布的不对称程度; 峰

图4 基于 $\Phi$ 的频率累计曲线Fig. 4 Frequency accumulation curve based on  $\Phi$ 

度是用来衡量粒度频率曲线的尖锐程度的<sup>[20]</sup>。

由式(2)~(6)计算得到的结果见表1。从表1中可以看出,筛分法测得的值和平均粒径均大于静态图像法的。其原因是:筛分法测定的是某一个粒径的范围,但小于最小筛孔直径的粒径无法测量,而静态图像法能测定每一个颗粒的粒径。这会导致筛分法测得值偏大;两者的标准偏差相差不大,均在0.70~1.00,表明分选中等(均匀程度中等);两者偏度均大于0,表明镍铁渣以较大颗粒为主,范围在0.5~2.0 mm以内;用筛分法计算的峰度为中等,用静态图像法计算的峰度为尖锐,表明用静态图像法测得的粒径范围之间增量比用筛分法测得的稍大,其原因是相邻2级筛孔的范围较大,使得曲线更加平缓。

表1 Folk-Ward 图解法计算结果

Table 1 Calculation results of Folk-Ward diagram method					
试验方法	粒径中值/ $\times\Phi$	平均粒径/ $\times\Phi$	标准偏差/ $\times\Phi$	偏度/ $\times\Phi$	峰度/ $\times\Phi$
静态图像法	0.04	0.11	0.76	0.19	1.22
筛分法	1.05	1.16	0.87	0.11	0.93

## 2 剪切试验及结果

### 2.1 试验介绍

镍铁渣属于级配不良,用作路基填料等工程时,需要改良其级配,而其级配不良在于其针状突出物较多。对现场堆放的新、旧镍铁渣的观察表明:堆放2~3 a后的旧镍铁渣,其针状玻璃纤维短且颗粒玻璃纤维突出物少,为了解镍铁渣的级配改良措施及剪切性能,设计了大面积重复剪切试验。

直剪试验试样为粒度分析原试样。其流程为:将镍铁渣试样烘干,在施加100 kPa竖向压力下预压1 h后进行剪切。剪切完成后,将镍铁渣试样拌匀,复原剪切盒,再次预压1 h。如此重复剪切4

次,一共进行5次剪切,记录对比第一次和第五次结果。剪切完成后,同样将试样进行筛分试验,并与剪切前进行对比。

采用的大面积直接剪切仪<sup>[22]</sup>进行试验研究。试样直径为152 mm,试样高度为120 mm,该大面积直接剪切仪属于拼接式结构,由水平加载系统、垂直加载系统、剪切盒及量测系统等组成。

### 2.2 剪切试验结果

剪切试验结果如图5所示。从图5中可以看出,循环剪切5次后的剪应力-位移曲线明显位于第一次剪切的剪应力-位移曲线之上。

将剪切过后的试样分成2部分,分别用静态图像法和筛分法测试其颗粒级配,结果如图6所示。

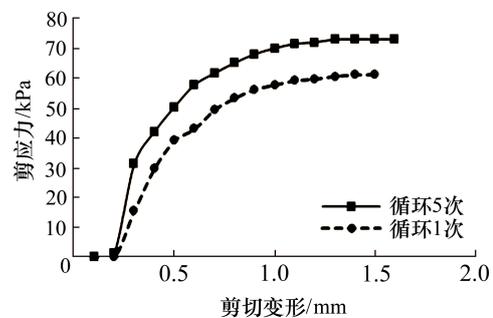
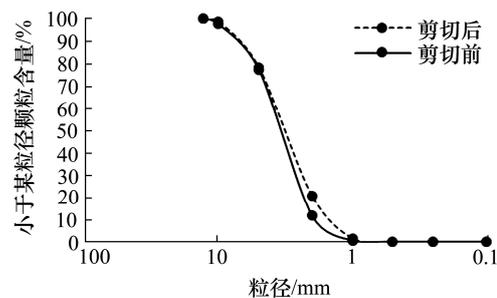
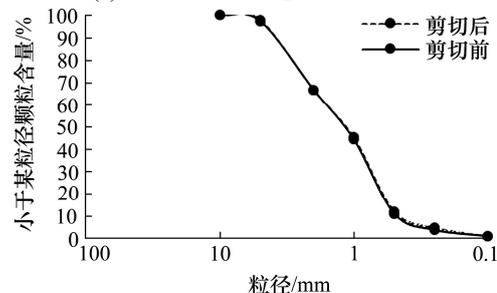


图5 循环剪切试验曲线

Fig. 5 Cyclic shear test curve



(a) 剪切前、后静态图像法对比



(b) 剪切前、后筛分法对比

图6 剪切前、后镍铁渣级配的对比

Fig. 6 Gradation comparison of ferronickel slag before and after shearing

从图 6 中可以看出, 经过多次反复剪切以后, 2 种方法所测得的颗粒级配均有改善。静态图像法中小颗粒所占比例明显提高, 而筛分法中小颗粒所占比例只有小幅度提高。因此, 多次剪切以后, 能减少镍铁渣的突出和针状纤维。将镍铁渣进行碾压处理有利于改善其级配和提高抗剪强度, 从而能更好地应用于实际工程。

### 3 结论

1) 镍铁渣属于级配不良, 如将镍铁渣代砂在混凝土中使用, 需剔除较大颗粒。将镍铁渣进行碾压处理有利于改善其级配和提高抗剪强度。

2) 基于  $\Phi$ , 建立镍铁渣的粒度频率累计曲线, 更能反映镍铁渣的粒径分布特征, 对于镍铁渣等一些工业废渣的再利用研究有一定的帮助。

3) 与筛分法相比, 静态图像法所测得粗颗粒含量大于筛分法所测的, 并且细颗粒含量会偏小。静态图像法计算的中值和平均粒径偏粗, 分选偏好, 偏度偏正, 峰度偏尖锐。因为筛分法所测范围限制, 对于粒径小于 0.075 mm 的颗粒, 无法测量, 且同一组份之间粒径相差较大。

#### 参考文献(References):

- [1] 孔令军,赵祥麟,刘广龙.红土镍矿冶炼镍铁废渣综合利用研究综述[J].铜业工程,2014(4):42-44.(KONG Ling-jun,ZHAO Xiang-ling,LIU Guang-long.Briefly discussion on studying properties and comprehensive utilization of ferronickel slag[J].Copper Engineering,2014(4):42-44.(in Chinese))
- [2] 贺炜,刘剑锋,尹平保,等.工业镍铁渣的路用特性及原位试验研究[J].岩土工程学报,2019,41(10):1809-1816.(HE Wei,LIU Jian-Feng,YIN Ping-bao,et al.Properties of industrial ferro-nickel slag for road and field experimental study[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(10):1809-1816.(in Chinese))
- [3] Li B,Huo B,Cao R,et al.Sulfate resistance of steam cured ferronickel slag blended cement mortar[J].Cement and Concrete Composites,2019,96:204-211.
- [4] Choi Y C,Choi S.Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions[J].Construction & Building Materials,2015,99:279-287.
- [5] 盛广宏,翟建平.镍工业冶金渣的资源化[J].金属矿山,2005(10):68-71.(SHENG Guang-hong,ZHAI Jian-ping.Making metallurgical slag from nickel industry a resource [J].Metal Mine,2005(10):68-71.(in Chinese))
- [6] Yang T,Yao X,Zhang Z.Geopolymer prepared with high-magnesium nickel slag:Characterization of properties and microstructure[J].Construction & Building Materials,2014,59:188-194.
- [7] Mitrašinić A M, Wolf A. Separation and recovery of valuable metals from nickel slags disposed in landfills[J].Separation Science & Technology,2015,50:2553-2558.
- [8] 王佳佳,刘广宇,倪文,等.激发剂对金川水淬二次镍渣胶结料强度的影响[J].金属矿山,2013(4):159-163.(WANG Jia-jia,LIU Guang-Yu,NI Wen,et al.Analysis of the influences of activator on performances of Jinchuan water-granulated secondary Ni slag cemented backfilling materials[J].Metal Mine,2013(4):159-163.(in Chinese))
- [9] Wang Z J,Ni W,Jia Y,et al.Crystallization behavior of glass ceramics prepared from the mixture of nickel slag, blast furnace slag and quartz sand[J].Journal of Non-Crystalline Solids,2010,356(31):1554-1558.
- [10] Komnitsas K,Zaharaki D,Perdikatsis V.Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers[J].Journal of Hazardous Materials,2009,161(2):760-768.
- [11] 成功,郑南翔,王蕾.级配对表面层沥青混合料路用性能的影响分析[J].公路工程,2017,42(5):28-31.(CHENG Gong,ZHENG Nan-xiang,WANG Lei.Analysis of influence of gradation on pavement performance of upper-layer asphalt mixture[J].Highway Engineering,2017,42(5):28-31.(in Chinese))
- [12] 蔡廷禄,贾建军,汪亚平.河口海岸和近海沉积物的粒度资料同化技术[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(1):185-193.(CAI Ting-lu,JIA Jian-jun,WANG Ya-ping.Techniques for particle size data standardization: An example form estuarine and coastal sediments[J]. Marine Geology & Quaternary Geology,2014,34(1):185-193.(in Chinese))
- [13] 吴丽,王晓伟,路兴杰,等.颗粒测试技术发展现状及应用进展[J].工业计量,2019,29(1):1-8.(WU Li,WANG Xiao-wei,LU Xing-jie,et al. Development and application

- of particle testing technology[J]. *Industrial Metrology*, 2019,29(1):1-8.(in Chinese))
- [14] 林斯瀚,许平,周陶勇.应用图像分析技术评估铁路级配道砟[J].*交通科学与工程*,2018,34(4):11-15,70.(LIN Si-han,XU Ping,ZHOU Tao-yong.Application of image analysis technology to evaluate the railway graded ballast[J].*Journal of Transport Science and Engineering*, 2018,34(4):11-15,70.(in Chinese))
- [15] 史加荣,马媛媛.深度学习的研究进展与发展[J].*计算机工程与应用*,2018,54(10):1-10.(SHI Jia-rong,MA Yuan-yuan.Research progress and development of deep learning[J].*Computer Engineering and Applications*. 2018,54(10):1-10.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 14684—2011,建设用砂[S].北京:中国标准出版社,2011.(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.GB/T 14684—2011, Construction sand[S].Beijing: Standards Press of China,2011.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国建设部.GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].北京:中国计划出版社,2009.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. GB 50021—2001, Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Planning Press,2009.(in Chinese))
- [18] Wentworth C K.A scale of grade and class terms for clastic sediment[J].*Geology*,1922,30:377-392.
- [19] McManus D A.A criticism of certain usage of the phi-notation[J]. *Journal of Sedimentary Research*,1963, 33(3):670-674.
- [20] 刘秀明,罗祎.粒度分析在沉积物研究中的应用[J].*实验技术与管理*,2013(8):20-23.(LIU Xiu-ming,LUO Yi. Application of grain size analysis in sediments research[J].*Experimental Technology and Management*, 2013(8):20-23.(in Chinese))
- [21] 陈麦雨,徐守余,张立强,等.动态图像法与镜下测量法粒度分布结果对比研究[J].*沉积学报*,2019,37(3): 502-510.(CHEN Mai-yu,XU Shou-yu,ZHANG Li-qiang,et al. Research on comparison of dynamic image analysis and thin-section measuring analysis grain-size test method[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2019,37(3):502-510.(in Chinese))
- [22] 刘韦华,刘龙武,陈海雄,等.镍铁矿渣加筋土强度试验及其路基填筑技术研究[J].*科技创新与应用*,2019(10): 134-137.(LIU Wei-hua,LIU Long-wu,CHEN Hai-xiong, et al. Study on strength test of nickel iron slag reinforced earth and its subgrade filling technology[J].*Technology Innovation and Application*, 2019(10):134-137.(in Chinese))