

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903009



采用数字图像处理的机制砂 粒度级配检测方法

蔡园园¹, 房怀英¹, 余文¹, 黄文景², 林伟端², 杨建红¹

(1. 华侨大学 机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室, 福建 厦门 361021;

2. 福建南方路面机械有限公司, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对振动筛分法存在筛网破裂和颗粒原有尺寸损坏的不足, 开发一套机制砂检测系统. 基于数字图像处理的方法, 系统提取颗粒的轮廓特征. 研究不同的等效粒径表征算法, 并采用等效椭圆 Feret 短径作为等效粒径. 对花岗岩和石灰石两种材质的机制砂进行重复性实验. 实验结果表明: 去除粉尘对降低测量误差有重要作用; 系统测量的各粒度区间的体积比与筛分法最大误差为 3.26%, 最大重复性误差为 1.80%; 细度模数与筛分法最大误差为 0.08, 最大重复性误差为 0.04; 花岗岩粒测量结果比石灰石更接近筛分法.

关键词: 机制砂; 数字图像处理; 等效粒径; 粒度级配; 筛分法

中图分类号: U 414; TP 391.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)05-0567-07

Digital Image Processing Based Particle Size Grading Measurement Method for Machine-Made Sand

CAI Yuanyuan¹, FANG Huaiying¹, YU Wen¹,
HUANG Wenjing², LIN Weiduan², YANG Jianhong¹

(1. Key Laboratory of Process Monitoring and System Optimization for Mechanical and
Electrical Equipment Fujian Province University, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian South Highway Machinery Limited Company, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Aiming at the problems of mesh rupture and particle damage in vibrating screening method, a measurement system for machine-made sand grading was developed. The contour features of particles were extracted based on the digital image processing method. Different equivalent particle size characterization algorithms were studied. The equivalent elliptical Feret short diameter was used as the equivalent particle size. The repetitive experiments on the machine-made sand of granite and limestone show that the removal of dust plays an important role in reducing the measurement error. The maximum difference of the particle size interval and the screening method measured by the system is 3.26%, the maximum repeatability error is 1.80%. The maximum bias of fineness modulus from sieving method is 0.08, and the maximum repeatability error is 0.04. The granite grain size measured by the proposed method is closer to the screening method than that of limestone.

Keywords: machine-made sand; digital image processing; equivalent particle size; particle size grading; sieving method

收稿日期: 2019-03-05

通信作者: 房怀英(1978-), 女, 副教授, 博士, 主要从事高端机制砂装备的研究. E-mail: happen@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省引导性项目(2018H0021); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01108); 福建省泉州市科技计划项目(2018C100R); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(17014080001)

巨大的市场需求使得国内天然砂资源逐年减少,为保护有限的资源,采用机制砂代替天然砂.为了符合国家标准的要求^[1],需要对机制砂的生产质量进行监测.传统检测集料粒度的方法是振动筛分法,属于接触式测量,筛分过程中,砂石产生碰撞易损坏其原有的粒度,且粒度较小的颗粒易造成筛网堵塞,筛分精度会受粒形影响,导致检测结果不准确.图像分析法采用的是非接触式测量,能准确地测量机制砂的粒度,避免砂石原有尺寸被破坏. Chen 等^[2]提出一种在线视觉测量的方法,主要测量粒径为 1~3 mm 的颗粒. Yang 等^[3]提出一种在线检测机制砂颗粒粒径粒形的装置,能实时无接触地对粗骨料颗粒进行监测. Hamzeloo 等^[4]发现以机制砂颗粒的最大内切圆直径作为粒径,测得结果与筛分法误差较小.对纳米级颗粒,主要采用激光测量其粒度^[5-6]. 对机制砂颗粒,多以等效椭圆短径作为其粒度的表征方法^[7-9]. Zheng 等^[10]介绍一种立体摄影的粒度表征方法,能测量颗粒厚度. Baptista 等^[11]提出一种新算法,评估沙质海岸中沉积物尺寸. Bagheri 等^[12]引入不规则颗粒尺寸和形状的新策略,分析体积、表面积和各种形状的描述符^[13]. 陈红等^[14]利用红绿蓝(RGB)图像,提高灰度等级和边缘灰度梯度. 吴金辉^[15]设计一种通过电容传感器测量机制砂含水率(质量分数)的方法,根据物料电容的变化,测得含水率. 陈琦^[16]发现在机制砂混凝土中,加入一定比例的石粉能明显提高混凝土的坍落度,改善混凝土的粘聚性和保水性. 然而,上述方法基本上都只研究一个参数,没有用整套的测量系统测量完整的级配料. 本文开发一种机制砂测量系统,能够同时测量机制砂不同特性参数.

1 检测系统与表征方法

1.1 测量平台

机制砂测量系统的硬件主要包括含水率检测模块、粒度粒形检测模块、除粉模块和回收模块. 含水率检测模块包括计量翻转装置和烘干装置,烘干后的机制砂由翻转装置翻转进入粒度粒形检测模块;粒度粒形检测模块包括振动给料器、分散管和暗箱,振动给料器将机制砂连续传送到分散管,使颗粒达到均匀分散的效果,通过分散管的颗粒进入暗箱中进行图像采集,暗箱包括发光二极管(LED)背光源、镜头和工业相机;回收模块回收检测完的机制砂. 检测系统的整体结构,如图 1 所示.

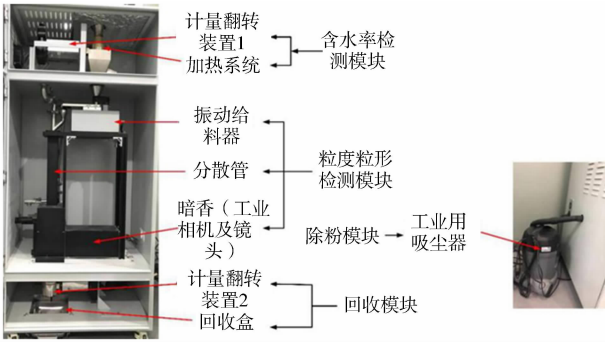


图 1 检测系统装置图
Fig. 1 Diagram of measurement system device

1.2 机制砂级配表征

依据国家标准筛分法中颗粒级配的定义,颗粒的分级是通过每个筛网中残余的质量进行分级. 机制砂在各个粒度区间 $[a_i, a_i + 1]$ (单位:mm)的分计筛余率(A)的计算式为

$$A = \frac{m}{m_t} \times 100\% = \frac{\rho V_m}{\rho V_M} \times 100\% = \frac{V_m}{V_M} \times 100\% \tag{1}$$

式(1)中: m 为各号筛上的筛余质量; m_t 为待测机制砂的总质量; ρ 为密度; V_m 为各号筛上砂的体积; V_M 为总体积.

图像分析法测量颗粒级配时,由于无法直接得出颗粒质量,对于同一物质而言,可用颗粒的等效体积间接表征颗粒质量.

1.2.1 等效粒径表征 在评价一个标准形状物体如标准圆、标准小球的大小时,只需直径这一特征参数,但对于一些不规则的颗粒,单一的参数无法真实地表征其粒径. 对于机制砂颗粒等效粒径的表征,选

取了 3 种不同的费雷特(Feret)直径算法进行研究,如图 2 所示。

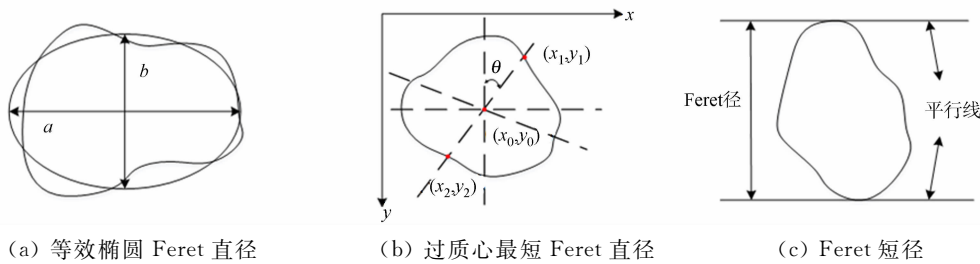


图 2 3 种不同的 Feret 径算法

Fig. 2 Three different algorithms of Feret diameter

将颗粒等效为椭圆,如图 2(a)所示。图 2(a)中:椭圆的长轴 a 为颗粒的最大 Feret 直径;短轴 b 为椭圆 Feret 短径。等效椭圆 Feret 短径(D)是与有相同面积的、长轴与最大 Feret 径相等的椭圆所对应的短轴,其计算式为

$$D = \frac{4S}{\pi \times a} \tag{2}$$

式(2)中: S 为颗粒投影面积; a 为颗粒最大 Feret 直径。

过质心的最短 Feret 径算法,如图 2(b)所示。通过颗粒的中心 (x_0, y_0) ,任何方向上的直径都称为 Feret 直径。选颗粒中垂直于 x 轴的 Feret 直径为起点,每相隔 5° 计算一次颗粒 Feret 直径。选取的 Feret 直径与颗粒相交于 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 两点,若这两点间的距离最短,则这段距离被称为过质心的 Feret 短径(X_{Feret}),其计算式为

$$X_{\text{Feret}} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{3}$$

Feret 短径算法,如图 2(c)所示。Feret 短径又称为卡尺距离,它是一种物体沿某一方向测量的尺寸。一般该度量方法被定义为两条平行线之间的距离。这两个平行面需要卡住物体,并垂直于指定的方向。在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 间选取与颗粒相切的平行线,求出平行线之间最小的距离,则为 Feret 短径。

1.2.2 投影面积 计算颗粒的投影面积需要提取颗粒轮廓,如图 3 所示。由于颗粒轮廓是由轮廓上每一个像素点中心连接而成,而实际采集到的像素点有长度和宽度,颗粒轮廓内的面积比颗粒的实际投影面积要小。颗粒轮廓内的面积,如图 4 所示。颗粒总面积,如图 5 所示。为了能够真实反映颗粒的投影面积大小,在二值图中,以直接计算颗粒所占像素点的个数作为颗粒的投影面积。

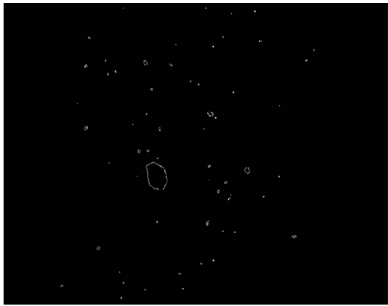


图 3 颗粒轮廓

Fig. 3 Particle contour map

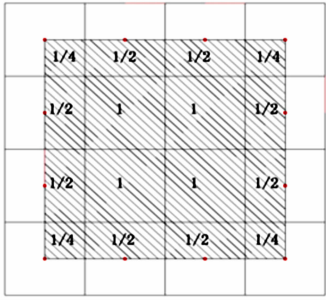


图 4 颗粒轮廓面积

Fig. 4 Area of particle contour

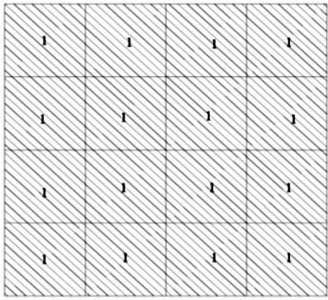


图 5 颗粒总面积

Fig. 5 Total area of particle

1.2.3 机制砂形态质量表征方法 根据国家标准^[1],机制砂的粒径等级是由方孔筛的尺寸决定的。筛分后,某号筛网上余留的颗粒质量与总质量的比值称为分计筛余率;某号筛的分计筛余率与大于该号筛的各筛分计筛余率的总和,称为累计筛余率。机制砂的细度模数(M_x)计算式为

$$M_x = \frac{(A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6) - 5A_1}{100 - A_1} \tag{4}$$

式(4)中: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ 分别为 4.75, 2.36, 1.18, 0.60, 0.30, 0.15 筛网的累计筛余率。

由于测量的机制砂需要测定含水率和含粉量(质量分数),所以在整个测量装置中添加了两个计量翻转装置,分别用来计量机制砂不同状态下的质量。将待测的机制砂倒入检测装置中,由计量翻转装置

1(图 1)称出其质量为 m_1 ,在加热系统中加热 10 min,待水分完全蒸发后,由计量翻转装置 1 再次称出其质量为 m_2 ,通过两次称出的质量差值,可以得到含水率.含水率(Z)的计算式为

$$Z = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%.$$

(5)

式(5)中: m_1 为烘干前质量,g; m_2 为烘干后的质量,g.

烘干后的机制砂进入粒度粒形检测模块进行检测,在该模块中设有除粉装置,检测完后的机制砂进入回收模块中的计量翻转装置 2,通过该装置称出其质量为 m_3 . 根据除粉前、后的质量差值可以得到机制砂的含粉量,含粉量(W)的计算式为

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100\%.$$

(6)

式(6)中: m_3 为除粉后的质量,g.

2 实验结果及分析

对于设计的机制砂粒度级配、含水率、含粉量检测系统,首先,将 3 种不同等效粒径方法与筛分法进行对比,选取最接近筛分法的等效粒径方法;其次,研究机制砂粉量去除对测量结果的影响;最后,对不同材质的机制砂进行重复性实验,验证检测系统的准确度.

2.1 不同粒度表征参数

实验所需的机制砂来自于福建省泉州市花岗岩,依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[17]进行筛分,将筛分得到的单级料依据文献[1]中国家二区曲线的标准,分别配制 M_x 为 2.8 和 2.6 的级配料,并通过实验,选择最佳粒径表征参数.

提出 3 种不同的表征等效粒径的方法,并分别对其进行实验验证,将结果与国标筛分法进行对比.不同 M_x 的机制砂粒径(l)-通过率(η)曲线,如图 6 所示.

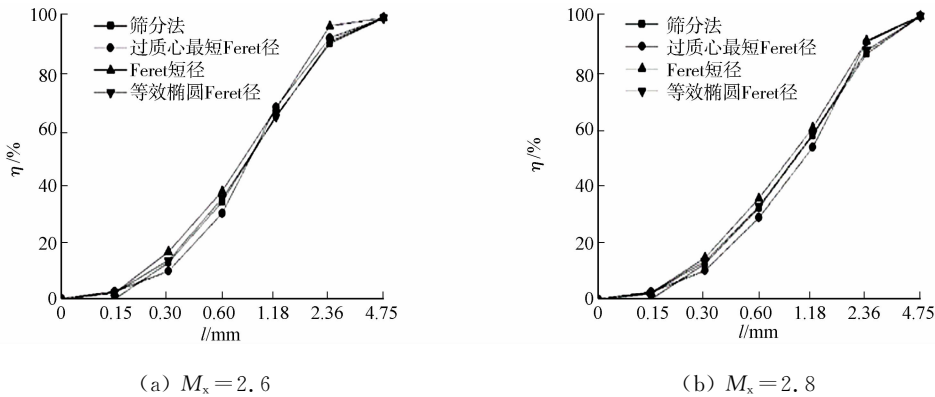


图 6 不同 M_x 的机制砂粒径-通过率曲线

Fig. 6 Machine-made sand particle size-pass rate curves for different M_x

由图 6 可知:Feret 短径算法曲线均在筛分法曲线的上方,当机制砂粒径为 2.36~4.75 mm 时,该曲线的斜率小于筛分法曲线的斜率,表明 Feret 短径算法的颗粒含量(体积分数)小于筛分法;Feret 短径与卡住颗粒两条平行线间的距离有关,且受颗粒形状影响,因此,细长形大颗粒粒径偏小; M_x 越小,粒径为 2.36~4.75 mm 的颗粒含量越少.因此,粒径区间为 2.36~4.75 mm 的颗粒粒径测量值偏小,被计算到粒径区间为 1.18~2.36 mm 中.由于 M_x 越小,影响越大,因此,相较于 M_x 为 2.8 的机制砂, M_x 为 2.6 的机制砂在粒径为 2.36~4.75 mm 时的体积分数明显偏小,而在粒径为 1.18~2.36 mm 时的体积分数明显偏大.

过质心最短 Feret 径算法在表征颗粒粒径时,小颗粒占像素点较少,造成计算结果不准确,使粒径为 0.15~0.30 mm 的颗粒含量小于筛分法;大颗粒棱角较明显.在选择质心时,受颗粒形状影响,粒径为 2.36~4.75 mm 的颗粒含量小于筛分法,而粒径区间为 0.60~1.18 mm 和 1.18~2.36 mm 的颗粒棱角并不明显,颗粒形状对结果影响较小.由于粒径区间为 0.15~0.30 mm 和 2.36~4.75 mm 的颗粒

含量变少,导致粒径为 0.60~1.18 mm 的颗粒含量变多(图 6(a)),粒径为 1.18~2.36 mm 的颗粒含量变多(图 6(b)).

等效椭圆 Feret 径算法是将颗粒等效成一个椭圆,将等效的椭圆短轴作为等效粒径.该方法减小了颗粒形状对粒径计算的影响,且计算结果最接近国家标准筛分法,所以,选用等效椭圆 Feret 径作为等效粒径的表征参数.

2.2 含粉量

在测量系统中加入除粉装置去除粉尘,通过实验检验除粉模块去除粉尘的效果,并验证去除粉尘对降低测量误差的重要性.实验的机制砂来自于福建省泉州市的花岗岩,配制 M_x 为 2.8 的级配料,在配制的过程中,人为加入粉尘颗粒($l<0.15$ mm).一组在检测过程中打开除粉装置;另外一组则关闭除粉装置.检测得到当除粉装置打开或关闭时,不同粒径区间所得颗粒的筛余结果,如表 1 所示.表 1 中: $\Delta_{\text{开}}$ 、 $\Delta_{\text{关}}$ 分别为筛分法所测结果与打开或关闭除粉装置时所测结果的误差.

表 1 除粉装置打开或关闭时的筛余结果
Tab. 1 Screening results with and without the powder removal device %

项目	l/mm					W
	2.36~4.75	1.18~2.36	0.60~1.18	0.30~0.60	0.15~0.30	
筛分法	12.00	26.00	23.00	17.80	11.20	10.00
除粉装置开	10.54	28.72	23.71	17.99	8.39	10.65
除粉装置关	9.97	27.13	24.55	20.60	14.60	1.00
$\Delta_{\text{开}}$	-1.46	2.72	0.71	0.19	-2.90	0.65
$\Delta_{\text{关}}$	-2.03	1.13	1.55	2.80	3.40	-9.00

由表 1 可知:除粉装置关闭时,仍能检测到 1% 的含粉量,这是由于粉尘分散不均匀,且易吸附在其他颗粒上,使相机采集到的真实粉尘颗粒偏少,导致识别出的粉尘($l<0.15$ mm)颗粒明显变少;除粉装置打开时,检测到机制砂的含粉量与实际含粉量误差为 0.65%.因此,打开除粉装置不仅达到了去除粉尘的目的,还使检测到的机制砂含粉量误差相对较小.

在检测颗粒含量时,除粉装置是否打开对粒径为 0.15~0.30 mm 颗粒的影响最大.对粒径区间为 0.15~0.30 mm 的颗粒,在除粉装置打开时,图像法的检测结果与筛分法所测结果的误差为 -2.90%;在除粉装置关闭时,误差为 3.40%.由此可知,关闭除粉装置会使该粒径范围的含量急剧增加,这是因为粉尘在没有去除时易汇聚成团,使得图像分析法测量时,将成团的粉尘误识别为 0.15~0.30 mm 的颗粒,从而导致该范围内的颗粒含量增多.因此,关闭除粉装置会使图像分析法测量的误差偏大,含粉量越增加,影响越明显;检测系统中加入除粉装置能够降低图像分析法测量的误差,且能有效去除粉尘.

2.3 不同材料的机制砂级配料

分别选用两种不同材料的机制砂进行实验,验证检测系统的精度和重复性.选择的机制砂来源于福建省泉州市花岗岩和山东省济南市石灰石.将机制砂配制成 M_x 为 2.8,每种砂样各 3 份,进行 3 次重复性实验,实验结果如表 2 所示.表 2 中: Δ_{max} 为 3 次实验结果与筛分法的最大误差; $\Delta_{\text{重复性}}$ 为 3 次重复性实验的误差.

由表 2 可得以下 5 点结论.

- 1) 粒径为 0.15~0.30 mm 花岗岩的颗粒含量小于筛分法,而石灰石的颗粒含量大于筛分法.这是因为花岗岩主要成分是石英,具有一定的透光性,粒径较小的颗粒在测量过程中,被光源发出的光直接穿透而没有反射至相机,所以没有采集到该颗粒的图像;而石灰石的透光性较差,颗粒轮廓呈现较明显.
- 2) 粒径大于 0.30 mm 的石灰石各粒度区间测量值基本都小于筛分法.因为石灰石颗粒形状不规则,且较细长,导致等效椭圆长轴偏长.由式(2)可知:等效椭圆 Feret 短径会偏小.颗粒粒径越小,颗粒形状越不明显,影响越小.
- 3) 粒径为 0.60~1.18 mm 和 1.18~2.36 mm 的花岗岩的颗粒含量大于筛分法,其余均小于筛分法;粒径为 0.15~0.30 mm 的石灰石的颗粒含量大于筛分法,其余基本都小于筛分法.花岗岩的 M_x 更接近筛分法,其最大误差为 0.03,石灰石的最大误差为 0.08.根据式(1),粒度区间的筛余率越大,对 M_x 影响越大.由于花岗岩大颗粒占比偏多,而石灰石小颗粒占比偏多,故花岗岩的 M_x 都大于石灰石.由于

粒径大于 0.30 mm 的石灰石的颗粒含量基本偏小,使其 M_x 明显小于筛分法.

表 2 不同材料的筛余实验结果

Tab. 2 Screening experimental results of different materials

%

项目	l/mm					W	M_x
	2.36~4.75	1.18~2.36	0.60~1.18	0.30~0.60	0.15~0.30		
筛分法	12.00	26.00	23.00	17.80	11.20	10.00	2.80
花岗岩	实验 1	8.74	29.20	24.91	17.67	8.06	11.44
	实验 2	9.37	28.97	24.70	17.64	8.13	11.19
	实验 3	10.54	28.72	23.71	17.99	8.39	10.65
	Δ_{\max}	-3.26	3.20	1.91	0.19	-3.14	1.44
	$\Delta_{\text{重复性}}$	1.80	0.48	1.20	0.35	0.33	0.79
石灰石	实验 1	11.16	25.20	21.74	17.78	13.94	10.18
	实验 2	11.35	25.02	21.36	17.54	14.65	10.08
	实验 3	12.42	24.64	21.16	17.20	14.41	10.17
	Δ_{\max}	-0.84	-1.36	-1.84	-0.60	3.45	0.18
	$\Delta_{\text{重复性}}$	1.26	0.56	0.58	0.58	0.71	0.10

4) 花岗岩和石灰石的最大重复性误差出现在粒径区间 2.36~4.75 mm,分别为 1.80%和 1.26%.因为相机采集到的颗粒信息会受颗粒下落姿态的影响,不同下落姿态提取的轮廓面积和等效粒径都不同.该区间内的颗粒较大,且自由落体下落,各面姿态差异大,故该粒径区间的重复性误差较大.

5) 花岗岩的测量值更接近筛分法,石灰石的整体值小于筛分法.与筛分法相比,花岗岩在粒径区间为 2.36~4.75 mm 测量值的误差最大,为 3.26%;重复性误差为 1.80%; M_x 误差最大,为 0.03.同样,石灰石在粒径为 0.15~0.30 mm 测量值误差最大,为 3.45%;在粒径为 1.18~2.36 mm 的重复性误差为 1.26%; M_x 误差最大,为 0.08.

3 结 论

针对振动筛分法存在筛网破裂和损坏颗粒原有尺寸的不足,设计一种机制砂检测系统,并对其进行试验,得到以下 3 点结论.

1) 不同粒度表征算法对比实验表明:采用等效椭圆 Feret 径作为机制砂颗粒的等效粒径,测量结果更加接近国家标准筛分法.

2) 含水率检测和除粉装置使待测的机制砂能够保持干燥的状态,更有利于分散管对机制砂进行分散,颗粒不会粘连而影响测量结果,同时,也排除了机制砂中粉尘对测量的干扰.

3) 实验研究了机制砂粒度测量的精度和重复性,花岗岩材料测得的细度模数 M_x 普遍大于石灰石.对于单粒度区间,与筛分法相比,其最大误差为 3.26%,最大重复性误差为 1.80%; M_x 的最大误差为 0.08,重复性误差为 0.04.由于颗粒形状的影响,花岗岩粒形较圆润,石灰石棱角较明显,所以,测得的花岗岩实验结果更接近于筛分法.

该检测系统具有检测速度快、采用非接触测量、不会破坏颗粒的原有形状等优点,能够用于制砂设备检测机制砂的质量,并在实际工程中发挥重要的作用.

参考文献:

[1] 陈家珑,周文娟,牛威,等.《建设用砂》(GB/T14684-2011)修订解析[J]. 建筑技术,2012,43(7):591-594. DOI:10.3969/j. issn. 1000-4726. 2012. 07. 004.

[2] CHEN Lumin,CHEN Zhen,FENG Ansheng. Image analysis algorithm and verification for on-line molecular sieve size and shape inspection[J]. Advanced Powder Technology,2014,25(2):508-513. DOI:10. 1016/j. apt. 2013. 08. 004.

[3] YANG Jianhong,CHEN Sijia. An online detection system for aggregate sizes and shapes based on digital image processing[J]. Mineralogy and Petrology,2017,111(1):1-10. DOI:10. 1007/s00710-016-0458-y.

[4] HAMZELOO E,MASSINAEI M,MEHRSHAD N. Estimation of particle size distribution on an industrial conveyor

- belt using image analysis and neural networks[J]. Powder Technology, 2014, 261: 185-190. DOI: 10. 1016/j. powtec. 2014. 04. 038.
- [5] 秦海青,雷晓旭,刘文平,等. 纳米硅粉颗粒粒径的测试方法研究[J]. 超硬材料工程, 2017, 29(1): 23-26. DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-1433. 2017. 01. 012.
- [6] 张春华,郭亨群,宋志华,等. 纳米碳化钨粉体的粒度表征[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 388-391. DOI: 10. 11830/issn. 1000-5013. 2010. 04. 0388.
- [7] KUMARA G, HAYANO K, OGIWARA K. Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel[J]. International Journal of Geomate Geotechnique Construction Materials and Environment, 2012, 3(1): 290-297. DOI: 10. 21660/2012. 5. 1261.
- [8] KUMARA J J, HAYANO K, KIKUCHI Y. Evaluation of area-and volume-based gradations of sand-crushed stone mixture by 2D images[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3): 774-781. DOI: 10. 1007/s12205-016-1765-x.
- [9] SULAIMAN M S, SINNAKAUDAN S K, NG S F, *et al.* Application of automated grain sizing technique (AGS) for bed load samples at Rasil River: A case study for supply limited channel[J]. Catena, 2014, 121(5): 330-343. DOI: 10. 1016/j. catena. 2014. 05. 013.
- [10] ZHENG Junxing, HRYCIWR D. Soil particle size and shape distributions by stereophotography and image analysis [J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, 42(2): 1-14. DOI: 10. 1520/GTJ20160165.
- [11] BAPTISTA P, CUNHA T R, GAMA C, *et al.* A new and practical method to obtain grain size measurements in sandy shores based on digital image acquisition and processing[J]. Sedimentary Geology, 2012, 282(1): 294-306. DOI: 10. 1016/j. sedgeo. 2012. 10. 005.
- [12] BAGHERI G H, BONADONNA C, MANZELLA I, *et al.* On the characterization of size and shape of irregular particles[J]. Powder Technology, 2015, 270: 141-153. DOI: 10. 1016/j. powtec. 2014. 10. 015.
- [13] LI Daming, LI Yangyang, WANG Zhichao, *et al.* Quantitative, SEM-based shape analysis of sediment particles in the Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(4): 67-76. DOI: 10. 1016/j. ijsrc. 2016. 05. 006.
- [14] 陈红,唐立模,陈珺,等. 基于 RGB 图像的泥沙颗粒粒径测试技术研究[J]. 泥沙研究, 2015(1): 25-29. DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2015. 01. 005.
- [15] 吴金辉. 干法制砂工艺机制砂含水量控制技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(4): 127-129. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-4539. 2017. 04. 029.
- [16] 陈琦. 石粉含量对 C30 机制砂混凝土性能的影响研究[J]. 福建建设科技, 2018, 162(5): 46-48. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-3943. 2018. 05. 011.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)