

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.08.009

基于拉普拉斯平滑算法的粗集料纹理特征评价

刘健宇^{*1}, 张海¹, 王涛¹, 张东²

(1. 贵州省公路建设养护集团有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 南京工业大学, 江苏 南京 211816)

摘要: 为了研究粗集料表面的三维纹理特征, 基于粗集料表面三维点云数据提出了改进的拉普拉斯平滑算法。为了限制拉普拉斯平滑前后点云的过度变形, 通过引入偏差限制参数控制粗集料颗粒表面的点允许移动的最大距离, 将平滑尺度限制在纹理尺度范围内。根据改进的拉普拉斯平滑算法原理, 基于粗集料在平滑前后表面积的变化幅度提出了三维纹理评价指标。采用商用蓝光三维扫描仪采集了不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料的三维点云图像。采用改进的拉普拉斯平滑算法, 研究了不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料的纹理特征。结果表明: (1) 2.36, 4.75, 9.5 mm 粒径的石灰岩集料的纹理指标都服从对数正态分布, 13.2 mm 和 16 mm 粒径的石灰岩集料纹理指标都服从正态分布, 2.36, 4.75, 9.5 mm 粒径的玄武岩集料的纹理指标都服从正态分布; (2) 在石灰岩集料中, 4.75 mm 集料的纹理指标最大, 当粒径大于 4.75 mm 时, 随着集料粒径的增大, 纹理指标的均值逐渐减小; (3) 在玄武岩集料中, 随着集料粒径的增大, 纹理指标的均值逐渐减小, 2.36, 4.75, 9.5 mm 粒径的玄武岩集料的纹理指标均值都低于石灰岩集料; (4) 在石灰岩和玄武岩集料中, 随着粒径的增大, 纹理指标的变异系数都是先增加后减小, 4.75 mm 集料纹理指标的离散性最显著。

关键词: 道路工程; 粗集料; 拉普拉斯平滑算法; 纹理; 统计分析

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 08-0057-06

Evaluation on Texture Features of Coarse Aggregate Based on Laplacian Smoothing Algorithm

LIU Jian-yu^{*1}, ZHANG Hai¹, WANG Tao¹, ZHANG Dong²

(1. Guizhou Highway Construction and Maintenance Group Co., Ltd., Guiyang Guizhou 550000, China;

2. Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China)

Abstract: In order to study the 3D texture features of coarse aggregate surface, an improved Laplacian smoothing algorithm is proposed based on the 3D point cloud data of coarse aggregate surface. To prevent the point cloud over-deformation before and after the Laplacian smoothing operation, the maximum distance allowed for the movement of the points on the surface of coarse aggregate particles is controlled by introducing a deviation limitation parameter, and the smoothing scale is limited within the texture scale range. According to the principle of the improved Laplacian smoothing algorithm, the 3D texture evaluation indicators are proposed based on the change amplitude of surface area of coarse aggregate before and after smoothing. The 3D point cloud images of different particle sized limestone aggregate and basalt aggregate are collected by commercial blue light 3D scanner. The texture features of different particle sized limestone aggregate and basalt aggregate are studied by using the improved Laplacian smoothing algorithm. The result shows that (1) The texture indicators of limestone aggregates with particle sizes of 2.36, 4.75, 9.5 mm all obey lognormal distribution. The texture indicators of limestone aggregates with particle sizes of 13.2 mm and 16 mm all obey

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目 (2021-122-006); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目 (BE2022605)

作者简介 (* 通讯作者): 刘健宇 (1976-), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 正高级工程师. (7189515@qq.com)

normal distribution. The texture indicators of basalt aggregates with particle sizes of 2.36, 4.75, 9.5 mm obey normal distribution. (2) In the limestone aggregates, the texture indicators of the 4.75 mm aggregate is the largest, and the mean texture indicators gradually decrease with the increase of aggregate particle size when the particle size is larger than 4.75 mm. (3) In the basalt aggregates, the mean texture indicators gradually decrease with the increase of particle size. The average texture indicators of basalt aggregates with particle sizes of 2.36, 4.75, 9.5 mm are all smaller than those of limestone aggregates. (4) In the limestone and basalt aggregates, the variation coefficients of the texture indicators both increase first and then decrease with the increase of the aggregate size, and the dispersion of the texture indicators of the 4.75 mm aggregate is the most significant.

Key words: road engineering; coarse aggregate; Laplacian smoothing algorithm; texture; statistical analysis

0 引言

粗集料形态包括形状、棱角和纹理,对沥青混合料的性能具有显著影响^[1-3]。纹理是粗集料的形态特征之一,属于集料颗粒的表面特性。粗集料表面越粗糙,比表面积越大,可以增加粗集料与沥青之间的接触面积,提高黏附性。粗集料纹理和沥青混合料的性能密切相关^[4-5]。Fletcher等^[6]和 Tutumluer等^[7-8]的研究发现,粗集料纹理指标越大,沥青混合料的抗永久变形的能力越高。谭忆秋和陈国明等^[9-12]研究了粗集料纹理对沥青混合料性能的影响,研究表明,随着粗集料纹理指标的增大,沥青混合料的高温性能、水稳定性和低温性能增加。因此,研究粗集料的纹理特性具有重要意义。图像处理方法是评价粗集料纹理的主要手段。Chandan等^[13]采用小波变换方法评价粗集料的纹理特征,在他们的研究中,纹理采用粗集料二维图像灰度值的变化进行表征。Masad和Button^[14]采用腐蚀—膨胀法处理粗集料二维图像,纹理采用图像经过腐蚀—膨胀处理后的面积损失率来表征。Zhou等^[15]基于粗集料颗粒CT扫描图像,采用球谐分析的方法构建了粗集料的三维纹理指标。Yang和Lourenço等^[16]采用功率谱密度函数和分形法分别研究了不同尺度的粗集料纹理,其中,毫米级尺度的纹理使用三维激光扫描仪获取,微米级尺度的纹理使用光学干涉量度仪获取。研究发现,在两种尺度上计算得到的分形维数不一致,对于毫米级尺度纹理,分形维数的误差在15%以内。Yang和Chen等^[17]通过X射线CT扫描技术重构粗集料三维图像,并采用三维图像处理方法中的Sobel-Feldman算子研究了粗集料的三维纹理特征。研究表明,与二维纹理指标相比,三维纹理指标数值大但变异性低。周兴林等^[18]通过激光轮廓仪获取粗集料表面轮廓高程数据,以多重分形理论为

基础,使用多重分形谱参数研究了粗集料的表面纹理。研究表明,多重分形谱参数与粗集料的磨光值具有较好的线性关系。

本研究引入拉普拉斯平滑算法评价粗集料的三维纹理特征。根据拉普拉斯平滑算法的原理,提出偏差限制参数将平滑尺度限制在纹理尺度范围内。采用改进的拉普拉斯平滑算法,研究了不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料的纹理特征。

1 拉普拉斯平滑算法及评价指标

1.1 拉普拉斯平滑算法

基于三维激光扫描技术,可以获取粗集料表面三维点云图像。在计算机软件中,将点云相互连接可以得到三角网格图像。网格平滑算法是对三维图像进行平滑处理的一种手段,广泛用于改善图像的视觉效果或去除图像噪音。在网格平滑算法中,拉普拉斯平滑算法是常用的方法。如图1所示,拉普拉斯平滑通过将网格的每个顶点向周围相邻点移动一定距离实现。算法如式(1)所示,其中:左边 p_i 为平滑后网格顶点坐标;右边 $p_i^{(r)}$ 为平滑前网格顶点的坐标; λ 为平滑水平,用于控制平滑程度; $L(p_i)$ 为拉普拉斯算子。拉普拉斯算子如式(2)所

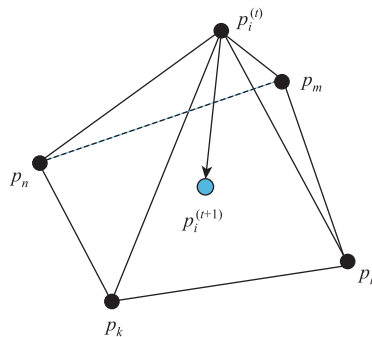


图1 拉普拉斯平滑算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of Laplacian smoothing algorithm

示,其中, N 为顶点 p_i 相邻顶点的个数; $N_i=\{k, l, m, n\}$ 。如对图像进行 t 次拉普拉斯平滑,则平滑公式可改写成式(3)。

$$p_i = p_i + \lambda L(p_i), \quad (1)$$

$$L(p_i) = \frac{1}{N} \left(\sum_{j \in N_i} p_j \right) - p_i, \quad (2)$$

$$p_i^{(t+1)} = p_i^{(t)} + \lambda L(p_i)^{(t)}. \quad (3)$$

拉普拉斯平滑算法是一种简单、快速且使用广泛的平滑算法,但会使网格模型产生收缩变形。本研究旨在通过拉普拉斯平滑算法对粗集料颗粒进行平滑处理,通过平滑前后颗粒表面积的变化表征粗集料的纹理特征。纹理是粗集料颗粒表面的微观起伏,平滑处理应被限制在纹理尺度范围内。因此,在使用拉普拉斯平滑算法处理纹理时,需要进行一定的改进。本研究提出了一个参数对平滑过程进行控制,这个参数称为偏差限制,定义为网格顶点允许移动的最大距离,如式(4)所示。其中 p'_i 为平滑后的网格顶点坐标。在本研究提出的拉普拉斯平滑算法中,偏差限制是指粗集料颗粒表面的点在平滑前后允许移动的最大距离。纹理是粗集料颗粒表面的微观起伏,其尺度范围由颗粒大小决定,偏差限制值实际上规定了纹理的尺度范围。考虑到纹理的微观属性和尺度的相对性,建议以粗集料短轴长度的百分比确定偏差限制值。在实际使用时,可以根据所需要处理的纹理尺度确定偏差限制的数值。

$$\|p'_i - p_i\| \leq D_{\max}. \quad (4)$$

根据上述算法,使用Python语言编制了计算机程序,算法的计算过程如下:

- (1) 遍历粗集料颗粒表面的点;
- (2) 计算拉普拉斯算子 $L(p_i)$;
- (3) 计算遍历点新坐标,并判断移动距离是否符合式(4);
- (4) 使用新坐标替换遍历点坐标;
- (5) 遍历结束后,保存平滑后的点云文件。

使用改进的拉普拉斯平滑算法对粗集料颗粒表面纹理进行平滑处理时,需要确定3个参数,分别是偏差限制、平滑水平和迭代次数。可以通过参数分析确定3个参数的合理数值。基于前期研究结果,本研究中偏差限制 $D_{\max}$ 取粗集料颗粒短轴长度的3%,平滑水平 λ 取1,迭代次数 t 取1。

1.2 纹理评价指标

由拉普拉斯平滑算法的原理可知,粗集料颗粒表面经过平滑操作后表面积变小。粗集料颗粒表面越粗糙,平滑后表面积减小幅度越大。基于此,可

以使用平滑前后表面积的变化幅度表征粗集料颗粒表面的纹理特性,如式(5)所示。其中,平滑前的表面积为 S_1 ,平滑后的表面积为 S_2 。

$$T = \frac{|S_1 - S_2|}{S_2}. \quad (5)$$

2 粗集料三维纹理特征评价

2.1 粗集料三维图像采集

采用商用蓝光三维扫描仪采集粗集料颗粒三维图像,扫描参数如下:相机分辨率为300万像素,单面测量范围为100 mm×75 mm,单幅测量时间小于等于1.5 s,平均采样点距为0.1 mm。粗集料三维图像采集步骤如下:(1)借助标定板,完成仪器校准,包括焦距和光圈。(2)在扫描转盘上放置粗集料,旋转扫描粗集料的上部分,然后将粗集料倒置,扫描下部分。(3)通过软件完成上下部图像的拼接,得到颗粒的三维图像。

2.2 原材料

基于拉普拉斯平滑算法,研究石灰岩集料和玄武岩集料纹理指标的统计值和概率分布,并对比分析不同粒径集料的纹理特性。石灰岩粗集料来源于贵州遵义地区,采用二级破碎工艺加工(一级破碎采用鄂式破碎机,二级破碎采用反击式破碎机)。玄武岩粗集料来源于贵州清镇地区,采用三级破碎工艺加工(一级破碎采用鄂式破碎机,二级破碎采用反击式破碎机,三级破碎采用圆锥式破碎机)。石灰岩粗集料和玄武岩粗集料的技术指标都满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求。石灰岩集料的粒径为:2.36~4.75, 4.75~9.5, 9.5~13.2, 13.2~16, 16~19 mm,玄武岩集料的粒径为:2.36~4.75, 4.75~9.5, 9.5~13.2 mm。在扫描和分析时,每种粒径粗集料的样本数为300。在后续内容中,将粒径为2.36~4.75 mm的集料简称为2.36 mm集料,其他粒径的集料依此类推。

2.3 纹理指标统计分析

表1是2.36 mm石灰岩集料纹理指标的描述性统计结果。由表1可知,纹理指标的最大值约是最小值的8.5倍。这说明纹理指标数值在较宽的范围内分布,离散性较大。

表1 2.36 mm石灰岩集料纹理指标的描述性统计结果
Tab.1 Descriptive statistical result of texture indicators of 2.36 mm limestone aggregate

统计量	个数	极差/%	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差/%
数值	300	6.2	0.83	7.03	2.07	0.52

图 2 是 2.36 mm 集料纹理指标的直方图。图 2 中直方图的横轴表示统计量的取值范围,纵轴表示统计量在直条所在的横轴范围内的取值频数。由图 2 可知,纹理指标值主要分布在 (1.3%, 1.9%], (1.9%, 2.4%] 和 (2.4%, 2.9%] 这 3 个区间内,在这 3 个区间内的比例之和约为 92%。其中,在区间 (1.9%, 2.4%] 内的比例最高,约为 43%。

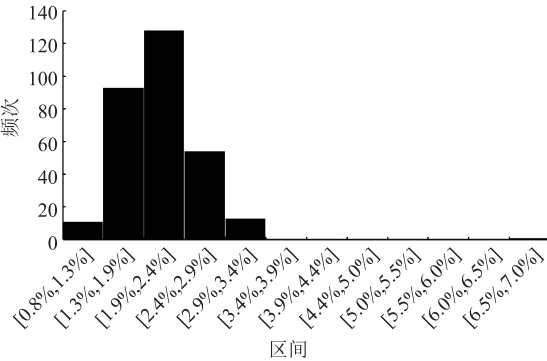


图 2 2.36 mm 石灰岩集料纹理指标直方图
Fig. 2 Histogram of texture indicators of 2.36 mm limestone aggregate

图 3 (a) 是 2.36 mm 石灰岩集料纹理指标的正态 P-P 概率图 (正态 P-P 图)。P-P 概率图是一种检验变量值是否符合正态分布 (或其他类型的分布) 的统计图。如果变量值服从正态分布 (或其他类型的分布), 则所绘制的 P-P 概率图将呈现一条从纵轴零点指向右上角的直线。由图 3 (a) 的正态 P-P 图可知, 纹理指标不服从正态分布。为了研究纹理指标的分布类型, 分别作纹理指标的 Laplace, Logistic, Lognormal, Pareto, Student, Weibull 和 Uniform 分布 P-P 概率图。如图 3 (b) 所示, 2.36 mm 石灰岩集料纹理指标近似服从对数正态分布。

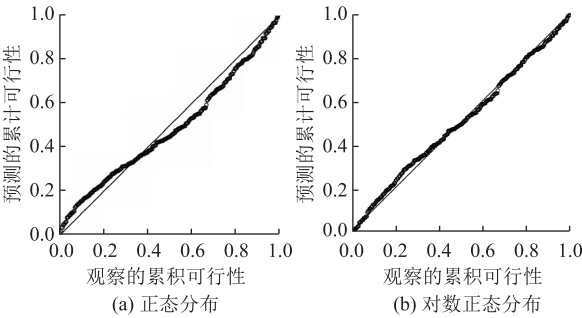


图 3 P-P 图
Fig. 3 P-P plots

使用上述方法研究了其余粒径的石灰岩集料和玄武岩集料纹理指标的统计参数和概率分布。不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料纹理指标的均值、标

准差和概率分布如表 2 所示。
表 2 不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料纹理指标的均值、标准差和概率分布

Tab. 2 Mean, standard deviation and probability distribution of texture indicators of different sized limestone and basalt aggregates				
岩性	粒径/mm	均值/%	标准差/%	概率分布
石灰岩	2.36	2.07	0.52	对数正态分布
	4.75	2.17	1.16	对数正态分布
	9.5	1.53	0.29	对数正态分布
	13.2	1.34	0.24	正态分布
	16	1.19	0.19	正态分布
玄武岩	2.36	2.01	0.41	正态分布
	4.75	1.69	0.50	正态分布
	9.5	1.37	0.34	正态分布

2.4 均值对比分析
图 4 是不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料纹理指标均值的比较。由图 5 可知: (1) 在石灰岩集料中, 4.75 mm 集料的纹理指标最大, 其次是 2.36 mm 集料; 当粒径大于 4.75 mm 时, 随着集料粒径的增大, 纹理指标的均值逐渐减小; (2) 在玄武岩集料中, 随着集料粒径的增大, 纹理指标的均值逐渐减小; (3) 2.36, 4.75 mm 和 9.5 mm 玄武岩集料的纹理指标均值都低于石灰岩集料。从两种岩性集料的纹理指标均值结果来看, 粒径大的集料纹理指标较小。这可能和集料的生产有关。粒径越小的集料, 在生产过程中经过的冲击次数越多, 导致小粒径颗粒的表面纹理越粗糙。

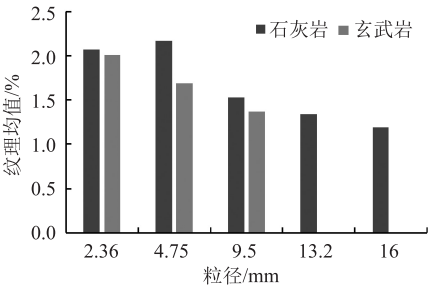


图 4 不同粒径集料纹理指标均值的比较
Fig. 4 Comparison of means of texture indicators of different sized aggregates

2.5 离散性对比分析
图 5 是不同粒径石灰岩集料纹理指标变异系数的比较。变异系数是统计量的标准差与均值的比值, 反映了统计量的离散程度。由图 5 可知: (1) 在石灰岩集料和玄武岩集料中, 随着粒径的增大, 变异

系数都是先增加后减小,其中,4.75 mm 集料纹理指标的离散性最显著;(2) 2.36 mm 石灰岩集料纹理指标的离散性大于玄武岩集料,4.75 mm 石灰岩集料纹理指标的离散性显著大于玄武岩集料,9.5 mm 石灰岩集料纹理指标的离散性小于玄武岩集料。从上述研究结果可知,集料纹理指标的离散性和集料的岩性、集料粒径有关。此外,可能还与岩石的矿物组成、节理特征和加工工艺有关。

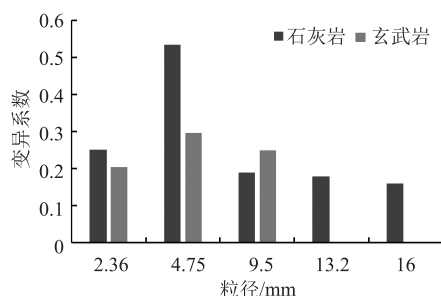


图5 不同粒径集料纹理指标变异系数的比较

Fig. 5 Comparison of variation coefficients of texture indicators of different sized aggregates

3 结论

论文根据拉普拉斯平滑算法的原理,通过引入偏差限制参数将平滑尺度限制在纹理尺度范围内。采用改进的拉普拉斯平滑算法,研究了不同粒径石灰岩集料和玄武岩集料的纹理特征。主要结论如下。

(1) 2.36, 4.75 mm 和 9.5 mm 石灰岩集料的纹理指标都服从对数正态分布,13.2 mm 和 16 mm 石灰岩集料的纹理指标都服从正态分布,2.36, 4.75 mm 和 9.5 mm 玄武岩集料的纹理指标都服从正态分布。

(2) 在石灰岩集料中,4.75 mm 集料的纹理指标最大,当粒径大于 4.75 mm 时,随着集料粒径的增大,纹理指标的均值逐渐减小。在玄武岩集料中,随着集料粒径的增大,纹理指标的均值逐渐减小。2.36, 4.75 mm 和 9.5 mm 玄武岩集料的纹理指标均值都低于石灰岩集料。

(3) 在石灰岩集料和玄武岩集料中,随着粒径的增大,纹理指标的变异系数都是先增加后减小,其中,4.75 mm 集料纹理指标的离散性最显著。

参考文献:

References:

[1] 蒋进,寇博,杨刚,等.粗集料三维棱角对沥青混合料体积指标及性能的影响[J].公路交通科技,2022,

39 (11): 8-15.

JIANG Jin, KOU Bo, YANG Gang, et al. Influence of 3D Angularity of Coarse Aggregate on Volume Indicator and Performance of Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (11): 8-15.

[2] 陈国明,谭忆秋,石昆磊,等.粗集料棱角性对沥青混合料性能的影响[J].公路交通科技,2006,23 (3): 6-9.

CHEN Guo-ming, TAN Yi-qiu, SHI Kun-lei, et al. Influence of Coarse Aggregate Angularity on Hot-mix Asphalt Properties [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 6-9.

[3] CHEN J S, SHIAH M S, CHEN H J. Quantification of Coarse Aggregate Shape and Its Effect on Engineering Properties of Hot-mix Asphalt Mixtures [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2001, 29 (6): 513-519.

[4] 张东,侯曙光,边疆.粗集料形态对沥青混合料性能的影响研究现状[J].南京工业大学学报(自然科学版),2017,39 (6): 149-154.

ZHANG Dong, HOU Shu-guang, BIAN Jiang. Review of the Effect of Coarse Aggregate Morphology on Asphalt Mixture Performances [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39 (6): 149-154.

[5] 徐冬青,张东,庄心怡,等.图像处理方法在粗集料形态评价中的应用研究进展[J].公路交通科技,2019,36 (6): 1-9.

XU Dong-qing, ZHANG Dong, ZHUANG Xin-yi, et al. Study Progress of Application of Image Analysis Methods in Evaluation of Coarse Aggregate Morphology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (6): 1-9.

[6] FLETCHER T, CHANDAN C, MASAD E, et al. Measurement of Aggregate Texture and Its Influence on Hot Mix Asphalt (HMA) Permanent Deformation [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2002, 30 (6): 524-531.

[7] TUTUMLUER E, PAN T, CARPENTER S H. Investigation of Aggregate Shape Effects on Hot Mix Performance Using an Image Analysis Approach [R]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.

[8] PAN T, TUTUMLUER E, CARPENTER S H. Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132 (7): 580-589.

[9] 谭忆秋,宋宪辉,纪伦,等.粗集料性能对沥青混合

- 料高温性能的影响 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (1): 29-33.
- TAN Yi-qiu, SONG Xian-hui, JI Lun, et al. Influence of Coarse Aggregate Performance on High Temperature Performance of Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (1): 29-33.
- [10] 陈国明, 谭忆秋. 基于粗集料表面纹理特性的沥青混合料性能研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 8-12.
- CHEN Guo-ming, TAN Yi-qiu. Asphalt Mixtures Performance Research Based on Coarse Aggregate Surface Texture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 8-12.
- [11] 陈国明. 沥青混合料中粗集料表面物理特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- CHEN Guo-ming. Study on Surface Physical Properties of Coarse Aggregate in Asphalt Mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [12] 陈国明, 周纯秀, 谭忆秋. 粗集料表面纹理的分形评定及沥青混合料性能试验 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9 (4): 1-5.
- CHEN Guo-ming, ZHOU Chun-xiu, TAN Yi-qiu. Fractal Evaluation of Surface Texture for Coarse Aggregate and Performance Test of Asphalt Mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9 (4): 1-5.
- [13] CHANDAN C, SIVAKUMAR K, MASAD E, et al. Application of Imaging Techniques to Geometry Analysis of Aggregate Particles [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, 18 (1): 75-82.
- [14] MASAD E, BUTTON J. Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000, 15 (4): 273-280.
- [15] ZHOU B, WANG J, ZHAO B. Micromorphology Characterization and Reconstruction of Sand Particles Using Micro X-ray Tomography and Spherical Harmonics [J]. Engineering Geology, 2015, 184: 126-137.
- [16] YANG H W, LOURENÇO S D N, BAUDET B A, et al. 3D Analysis of Gravel Surface Texture [J]. Powder Technology, 2019, 346: 414-424.
- [17] YANG X, CHEN S, YOU Z. 3D Voxel-based Approach to Quantify Aggregate Angularity and Surface Texture [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29 (7): 04017031.
- [18] 周兴林, 肖神清, 肖旺新, 等. 粗集料表面纹理粗糙度的多重分形评价 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (2): 29-33.
- ZHOU Xing-lin, XIAO Shen-qing, XIAO Wang-xin, et al. Multi-fractal Evaluation on Roughness of Coarse Aggregate Surface Texture [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45 (2): 29-33.

(上接第 56 页)

- LIU Qing-feng. Multi-Phase Modelling of Concrete at Meso-micro Scale Based on Multi-species Transport [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46 (8): 1074-1080.
- [19] 张成琳, 刘清风. 钢筋混凝土中氯盐和硫酸盐耦合侵蚀研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (1): 65-73.
- ZHANG Cheng-Lin, LIU Qing-feng. Coupling Erosion of Chlorides and Sulfates in Reinforced Concrete: A Review [J]. Materials Reports, 2022, 36 (1): 65-73.
- [20] MOSTOFINEJAD D, NOSOUHIAN F, NAZARI-MONFARED H. Influence of Magnesium Sulphate Concentration on Durability of Concrete Containing Micro-silica, Slag and Limestone Powder Using Durability Index [J]. Construction and Building Materials, 2016, 117: 107-120.
- [21] 付浩兵. 水泥基材料抗 TSA 侵蚀性能及机理的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- FU Hao-bing. Research on Resistance Erosion Properties and Mechanism of TSA of Cement-based Materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, China, 2014.
- [22] SOTIRIADIS K, HLOBIL M, VIANI A, et al. Physical-chemical-mechanical Quantitative Assessment of the Microstructural Evolution in Portland-limestone Cement Pastes Exposed to Magnesium Sulfate Attack at Low Temperature [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 149: 106566.
- [23] 贾洪全, 宫经伟, 王小龙, 等. 硫酸盐浓度对水泥基材料侵蚀的影响研究 [J]. 水力发电, 2020, 46 (3): 113-116.
- JIA Hong-quan, GONG Jing-wei, WANG Xiao-long, et al. Effect of Sulfate Concentration on the Erosion of Cement-based Materials [J]. Water Power, 2020, 46 (3): 113-116.