

基于油石分离的再生集料颗粒形态多尺度变化

马川义¹, 闫显亮², 吕鑫³, 张吉哲³

1. 山东高速集团, 山东 济南 250098; 2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250098;

3. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250100

摘要:为研究废旧沥青混合料(recycle asphalt pavement, RAP)再生工艺对集料颗粒形态特征的影响,采用油石分离处置技术制备再生集料,建立考虑再生集料颗粒宏观-细观-微观的多尺度评价指标体系,结合三维扫描仪和集料图像测量系统测量新集料、未处置 RAP 和再生集料颗粒的球度、针片状指数、梯度棱角性和纹理指数等4个形态评价指标,对比分析3种集料颗粒的形态特征与多尺度变化规律。结果表明:相比于新集料颗粒和未处置 RAP 颗粒,再生集料颗粒的形态特征在宏观尺度上的指标参数变化不大,在微观-细观尺度上的指标变化较大,梯度棱角性平均减小12.5%,纹理指数平均增大14.0%,3种集料的4个形态指标均符合正态分布。相比于未处置 RAP 颗粒,再生集料颗粒的球度、梯度棱角性和纹理指数的标准差均明显变小,表明油石分离处置技术对改善再生集料颗粒的宏观-微观-细观形态特征的变异性有积极作用。对 RAP 进行高掺量再生利用时,应考虑再生集料颗粒的梯度棱角性和纹理指数与混合料路用性能的关联关系。

关键词:油石分离;再生集料;多尺度评价;颗粒形态;球度;梯度棱角性;纹理指数

中图分类号:U416.03;U214.7⁺5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)02-0095-07

引用格式:马川义,闫显亮,吕鑫,等.基于油石分离的再生集料颗粒形态多尺度变化[J].山东交通学院学报,2023,31(2):95-101.

MA Chuanyi, YAN Xianliang, LÜ Xin, et al. Multi-scale variation of recycled aggregate particle morphology based on oilstone separation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(2): 95-101.

0 引言

经过大规模的公路建设周期后,我国每年有大量路段需进行养护维修,由此产生大量废旧沥青混合料(recycle asphalt pavement, RAP),传统的处理方法是 RAP 露天堆放或填埋,易造成堆放场地的环境污染。对 RAP 进行再生利用的常用处理方法是对 RAP 进行破碎筛分,筛分后的 RAP 表面裹附较多老化沥青,再生沥青混合料中新旧沥青混溶效果较差,影响沥青混合料的路用性能,制约了 RAP 的高掺量回收再利用。

集料是沥青路面建设过程中使用量最大的原材料,其颗粒形态特征影响沥青混合料内部的骨架结构和应力传递路径^[1],采用各种处置技术难免影响原有集料的颗粒形态,需系统评价再生集料的颗粒形态特征,提升 RAP 资源利用的效果,保障再生沥青混合料的服役性能。

在集料颗粒形态评价指标的研究中,研究人员建立了从二维层面到三维层面的评价指标^[2-3]。Liu 等^[4]基于二维傅立叶变换快速测量新集料的纹理,Wang 等^[5]基于傅里叶形态分析建立评价颗粒形状和棱角性的三维指标。现在多采用数字图像技术表征集料颗粒形态,Wang 等^[6]借助 AIMS 系统和 CT 扫描技术分析不同磨损程度下集料的棱角性,结果表明相比于 CT 技术,AIMS 系统可更高效地测量集料的棱

收稿日期:2023-02-16

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2020B66)

第一作者简介:马川义(1987—),男,山东莱州人,工程师,主要研究方向为沥青路面结构与材料、固废材料综合利用技术研究,E-mail:machuan yi2006@163.com。

角性。

目前国内外研究的主要对象为新集料,且常从集料颗粒宏观-细观-微观形态 3 个尺度中选择某一尺度进行评价,较少对再生集料的形态特征进行多尺度评价,同时油石分离处置技术对再生集料形态特征的影响规律尚不明晰。本文采用沥青铣刨料精细化处置装备对 RAP 进行油石分离,建立多尺度的颗粒形态评价指标体系,对再生集料的颗粒形态进行合理评价,分析精细化处置对再生集料颗粒形态特征的影响,为 RAP 的高掺量再生利用提供参考。

1 集料颗粒形态评价

集料颗粒形态评价指标大致分为宏观尺度、细观尺度和微观尺度等 3 个尺度^[7],如图 1 所示。

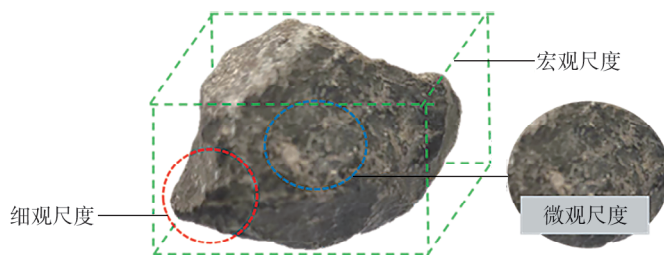


图 1 集料颗粒形态评价的 3 个尺度

1.1 集料颗粒形态评价指标

宏观形态指标主要表征集料颗粒的整体轮廓^[8],目前文献[9]只限制粗集料颗粒针片状特征,并未限定其宏观轮廓特征^[10]。可通过建立纵横比^[11]和矩形度^[12]等二维指标快速评价集料颗粒的宏观形态特征,但损失了部分维度信息。也可建立针片状指数、形状因子、球度和形状等三维指标^[13-15],但难以快速精准测量三维指标所需的集料颗粒轮廓参数。

细观形态指标主要表征集料颗粒边缘棱角的分布情况,可采用等效椭圆和凸包理论方法衡量集料颗粒的棱角性^[16-17],再采用数字图像处理技术和 CT 扫描技术建立精确评价指标^[18-19],但测量过程繁琐,成本较高。

微观形态指标主要表征集料颗粒表面的形态特征,可采用分形维数研究集料颗粒表面纹理^[20],可采用功率谱法、方差法、结构函数法和盒子计数法。

宏观尺度方面选择球度 α_{DS} 和针片状指数 α_{FER} 为评价指标,细观和微观方面分别选择梯度棱角性 α_{GA} 、纹理指数 α_{TX} 为评价指标。

1.2 集料颗粒形态测量方法

集料颗粒形态特征的测量方法主要分为传统人工测量和基于数字图像处理测量:传统测量结果易受操作人员影响,误差较大;数字图像处理方法可准确测量集料颗粒形态^[21],测量技术包括动态图像分析、电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机扫描、集料颗粒电子分析系统、粗集料形态特征分析系统、集料图像分析、三维光学扫描、X 射线断层扫描、集料微观纹理激光检测,其中单摄像机可测量二维形态指标,多摄像机可实现三维形态指标的测量,X 射线断层扫描可组合多幅二维图像进行三维集料重构,但其重构精度依赖扫描次数,成本较高。采用多摄像机图像处理方法的三维光学扫描技术测量集料颗粒形态较便捷,准确度较可靠,成本较有优势。

采用三维光学扫描仪测量集料颗粒形态的宏观形态参数时,2 个摄像头呈一定夹角采集被蓝光照射的集料颗粒图像,再结合图像处理技术解算公共区域内像素点的三维坐标,实现集料颗粒的三维重构^[22],如图 2 所示。

在集料颗粒的三维重构阶段,三维扫描仪对颗粒表面进行圆滑处理,丧失表面局部纹理等信息,影响

集料颗粒微观-细观形态参数的准确性,因此采用集料图像测量系统(aggregate image measurement system, AIMS)测量集料颗粒的 α_{GA} 和 α_{TX} 。以集料颗粒轮廓切线方向的变化率表征棱角性,基于小波分析中的短高频基函数和长低频基函数分别量化集料颗粒表面细节纹理与粗略纹理,建立表征集料颗粒表面纹理的 α_{TX} , 所得结果较精确。

2 再生集料颗粒形态评价

2.1 再生集料制备

通常对 RAP 只进行铣刨-破碎-筛分后直接使用,预处理较简单。为提高新旧沥青的混溶效果,保障再生沥青混合料的路用性能,对 RAP 进行油石分离的精细化处置,将 RAP 处理为再生集料和富油细集料。

采用沥青铣刨料精细化处置装备对 40 kg RAP 进行 30 min 的油石分离,获得再生集料,如图 3c)所示。再生集料的表观相对密度、表干相对密度、含水率和吸水率等指标的室内测试结果如表 1 所示,各指标均满足文献[23]要求。

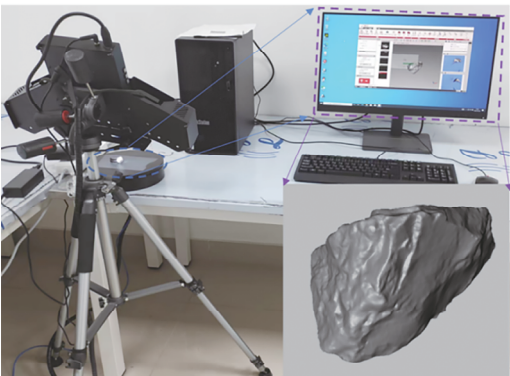


图 2 集料颗粒的三维重构示意图

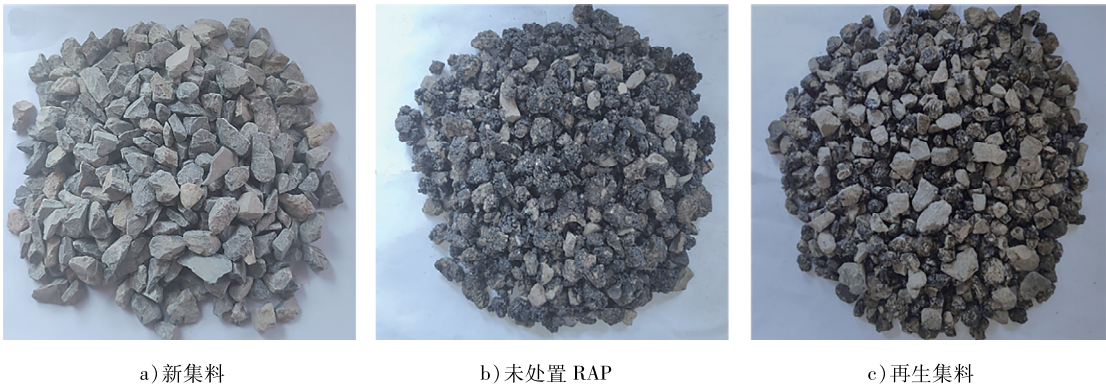


图 3 RAP 处置效果对比图

表 1 再生集料的性能指标

项目	老化沥青质量分数%	表观相对密度	表干相对密度	含水率/%	吸水率
测试结果	1.23	2.727	2.710	0.145	0.368
规范要求		≥2.500		≤3.000	≤3.000
试验方法	化学抽提法	T 0304	T 0304	T 0305	T 0307

2.2 再生集料形态的多尺度评价

选取新集料、未处置 RAP 和再生集料各 100 粒进行分析,对再生集料的颗粒形态进行多尺度评价,分析精细化处置对再生集料形态特征的影响。

2.2.1 多尺度评价试验方法

选择 α_{DS} 和 α_{FER} 2 个指标分析再生集料颗粒的宏观形态特征,测量步骤为:清洗、晾干再生集料颗粒;对再生集料颗粒表面喷涂白色显影剂,便于后续图像扫描,保证三维扫描效果;采用三维扫描仪测量再生集料颗粒的轮廓尺寸,旋转台每次旋转 60°,扫描单个再生集料颗粒 6 次,保证再生集料颗粒的多维扫描图像顺利拼接;将集料颗粒三维重构图像导入后处理软件,统计得到集料颗粒轮廓的长边、中边和短边数据。

集料颗粒宏观形态指标的计算公式为:

$$\begin{cases} \alpha_{DS} = \sqrt[3]{\sqrt{D_S \times D_1} / \sqrt[3]{D_L}} , \\ \alpha_{FER} = D_L / D_S \end{cases} \tag{1}$$

式中: D_L 、 D_1 、 D_S 分别为集料颗粒最小包围盒的长边、中边、短边长度。

选择 α_{GA} 和 α_{TX} 2 个指标评价再生集料颗粒的微、细观形态特征,具体测量步骤为:清洗、晾干再生集料颗粒;将再生集料颗粒逐颗摆放在 AIMS 相应规格的托盘凹槽中,关上暗箱门板扫描 3 次,第 1 次用于定位各再生集料颗粒的相对位置,第 2 次通过摄像机测量获得集料颗粒的 α_{GA} ,第 3 次扫描通过顶视灯和显微镜获得集料颗粒的表面纹理数据;在 AIMS 中计算集料颗粒微、细观形态指标。

集料颗粒微、细观形态指标的计算公式为:

$$\begin{cases} \alpha_{GA} = 3 \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| (n - 3) \\ \alpha_{TX} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y) 2) / 3N \end{cases} , \tag{2}$$

式中: θ_i 为第 i 个边点的方向角度, θ_{i+3} 为第 $i+3$ 个边点的方向角度, n 为边点的总数, D 为分解函数, N 为小波系数的总数, (x,y) 为变换域内系数位置。

不同集料颗粒的 α_{DS} 、 α_{FER} 、 α_{GA} 和 α_{TX} 等 4 个指标的平均值如表 2 所示。

表 2 不同集料 4 种形态指标的平均值

集料类型	$\overline{\alpha_{DS}}$	$\overline{\alpha_{FER}}$	$\overline{\alpha_{GA}}$	$\overline{\alpha_{TX}}$
新集料	0.67	2.26	3 736.54	443.09
未处置 RAP	0.68	2.78	3 668.91	587.95
再生集料	0.70	2.57	3 208.48	670.59

由表 2 可知:相较于未处置 RAP,再生集料颗粒在宏观形态上变化较小,其中 $\overline{\alpha_{DS}}$ 增大 2.9%, $\overline{\alpha_{FER}}$ 减小 7.6%;在微-细观尺度上相关评价指标变化较大,其中 $\overline{\alpha_{GA}}$ 减小 12.5%, $\overline{\alpha_{TX}}$ 增大 14.0%。原因是在对 RAP 进行抛丸喷磨处置时,在外力作用下,部分结团的 RAP 裂解,集料颗粒整体的 α_{FER} 小幅下降;经过抛丸喷磨处置后,集料颗粒表面出现较明显的打磨痕迹, α_{TX} 增大,但对集料颗粒的梯度棱角性产生一定破坏。

2.2.2 宏观形态特征评价

将表征颗粒宏观形态的 α_{DS} 和 α_{FER} 2 个指标进行直方图统计分析,结果如图 4 所示。

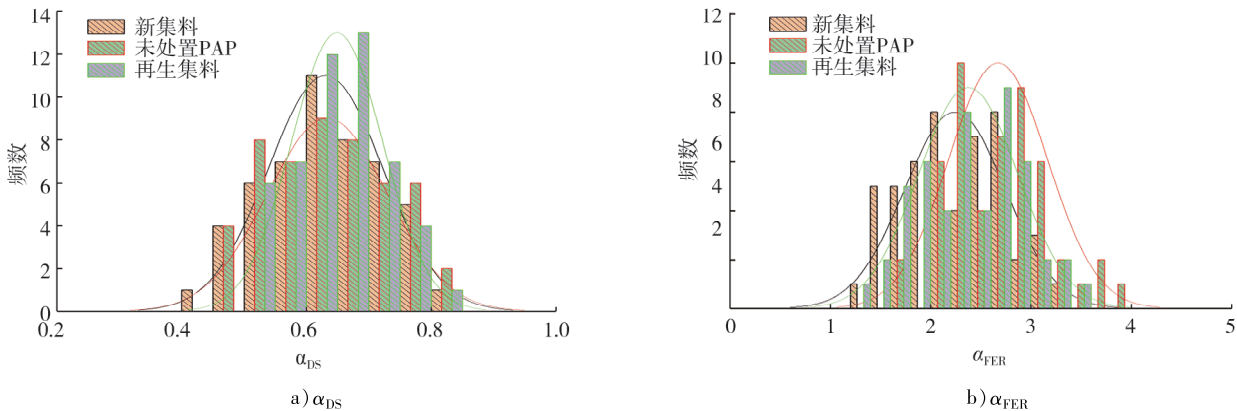


图 4 再生集料宏观形态指标的直方图

由图 4 可知:3 种集料颗粒的 2 个指标均符合正态分布,相比于新集料颗粒和未处置 RAP 颗粒,再生集料颗粒 α_{DS} 的分布曲线更陡峭,原因是经过油石分离处置后,原集料颗粒的球度变异性得到明显改善;

再生集料颗粒的 α_{FER} 直方图与新集料颗粒较接近,前者 α_{FER} 的标准差在新集料颗粒和未处置 RAP 颗粒间,原因是油石分离处置过程中,一些结团的 RAP 发生裂解,再生集料颗粒整体的针片状情况得以改善。

2.2.3 微、细观形态特征评价

将表征颗粒微、细观形态特征的 α_{GA} 和 α_{TX} 2 个指标进行直方图分布分析,如图 5 所示。

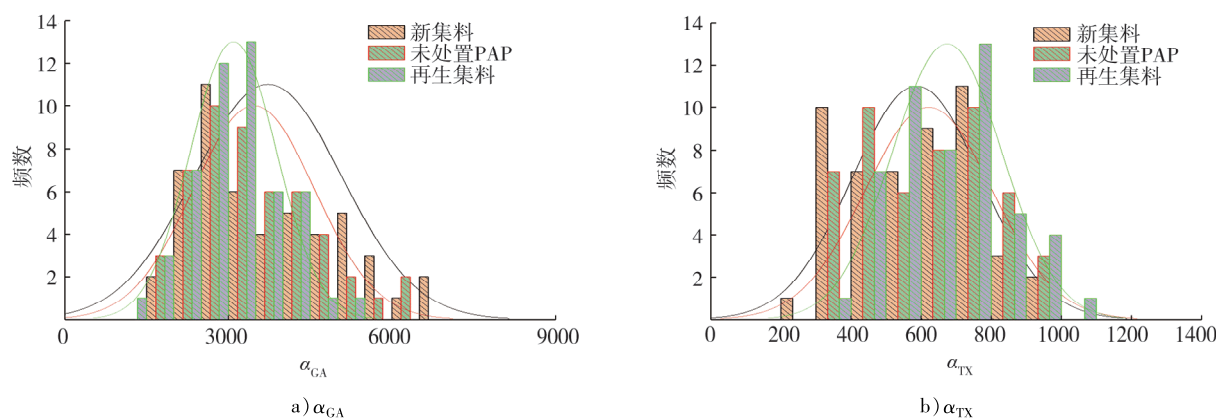


图5 再生集料微-细观形态指标的直方图

由图 5 可知:再生集料颗粒的 α_{GA} 呈非标准正态分布,比新集料颗粒和未处置 RAP 颗粒的分布区间整体偏左,说明 RAP 油石分离处置技术对集料颗粒的局部梯度棱角性产生负面影响,可能影响再生沥青混合料的路用性能;再生集料颗粒 α_{TX} 的分布区间整体偏右,纹理指数为 400~500 的集料颗粒占比相较于未处置 RAP 颗粒减小 52.94%,纹理指数为 800~1200 的集料颗粒占比相较于未处置 RAP 颗粒增大 21.05%,表明 RAP 油石分离处置技术增加了再生集料颗粒的表面纹理。

因此,相较于新集料颗粒和未处置 RAP 颗粒,油石分离技术明显改善再生集料颗粒在宏观-微观层面的形态特征,但对集料细观层面的梯度棱角性产生负面影响。相比于未处置 RAP 颗粒,再生集料颗粒的 α_{DS} 、 α_{GA} 和 α_{TX} 的标准差均明显变小,3 个指标的离散程度有所改善,表明油石分离技术对改善再生集料的宏观-微观-细观特征有积极作用。

3 结论

采用油石分离技术处置 RAP 制备再生集料,建立考虑再生集料颗粒宏观-细观-微观的多尺度评价指标体系,对比新集料、未处置 RAP 和再生集料的颗粒形态特征,分析油石分离技术对集料颗粒形态特征的影响规律。

1)采用油石分离技术处置 RAP 后再生集料老化沥青质量分数明显减小,各项物理指标满足规范要求。

2)建立再生集料颗粒形态多尺度评价指标体系,采用三维光学扫描仪测量再生集料颗粒的宏观形态参数,采用集料图像测量系统分析集料的微-细观形态参数,测量方法较便捷可靠。

3)相比于新集料颗粒和未处置 RAP 颗粒,再生集料颗粒在微-细观尺度上变化较大,纹理指数平均增大 14.0%,梯度棱角性平均减小 12.5%,表明对 RAP 进行再生利用时需关注集料颗粒的梯度棱角性损失情况。再生集料颗粒的球度、针片状指数、梯度棱角性和纹理指标等 4 个形态指标均符合正态分布,油石分离技术对改善再生集料颗粒的宏观-微观-细观特征有积极影响,相比于未处置 RAP 颗粒,再生集料颗粒的球度、梯度棱角性和纹理指数的标准差均明显变小。

参考文献:

- [1] 唐海柱. 沥青混合料粗集料简化骨架构建与内应力路径识别[D]. 广州:广州大学,2022.

- TANG Haizhu. Simplified skeleton construction and identification of internal stress paths for coarse aggregates in asphalt mixtures[S]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [2] 崔喆,张生瑞. 基于CT图像的集料三维棱角性计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2017,17(5):39-49.
CUI Zhe, ZHANG Shengrui. Computational method of 3D aggregate angularity based on CT images[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017,17(5):39-49.
- [3] SU D, YAN W M. Quantification of angularity of general-shape particles by using Fourier series and a gradient-based approach[J]. Construction and Building Materials, 2018,161:547-554.
- [4] LIU Y, GONG F Y, YOU Z P, et al. Aggregate morphological characterization with 3d optical scanner versus X-ray computed tomography[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017,30(1): 04017248.
- [5] WANG L B, WANG X R. Unified method to quantify aggregate shape angularity and texture using Fourier analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 498-504.
- [6] WANG H N, WANG C H, BU Y, et al. Correlate aggregate angularity characteristics to the skid resistance of asphalt pavement based on image analysis technology[J]. Construction and Building Materials, 2020,242(C): 118150.
- [7] XIE X G, LU G Y, LIU P F, et al. Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement[J]. Construction and Building Materials, 2017,139:1-8.
- [8] 张开银,崔树森,李松,等. 集料形态特性对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2021,43(6):41-46.
ZHANG Kaiyin, CUI Shusen, LI Song, et al. Research on skid resistance of asphalt pavement based on aggregate characteristics[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021,43(6):41-46.
- [9] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面再生技术规范:JTG/T 5521—2019[S]. 北京:人民交通出版社, 2019.
- [10] 纪伦,李俊,张磊,等. 沥青混凝土中粗集料形貌特征分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019,51(3):61-67.
JI Lun, LI Jun, ZHANG Lei, et al. Analysis of the morphology characteristics of coarse aggregate in asphalt concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019,51(3):61-67.
- [11] 王文真,申爱琴,郭寅川,等. 基于图像分析的粗集料形状特征参数及分布规律[J]. 公路交通科技, 2020,37(1): 25-31.
WANG Wenzhen, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Shape feature parameters and distribution rule of coarse aggregate based on image analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020,37(1):25-31.
- [12] 李洛克,刘海明,张镇国,等. 路用集料三维形貌的定量表征方法研究[J]. 公路交通科技, 2021,38(2):16-23.
LI Luoke, LIU Haiming, ZHANG Zhenguo, et al. Study on quantitative characterization method of 3D morphology of road aggregate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021,38(2):16-23.
- [13] 袁海. 集料表观形态与沥青混合料性能相关性分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2019,32(3):64-69.
YUAN Hai. Analysis of correlation between aggregate apparent morphology and asphalt mixture performance[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition), 2019,32(3):64-69.
- [14] 尹海鹏,李有堂,黄华. 基于几何形态学影响的集料建模及评价方法[J]. 西南交通大学学报, 2022,57(6):1184-1192.
YIN Haipeng, LI Youtang, HUANG Hua. Modeling and evaluation of aggregate based on influence of geometry morphology[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022,57(6):1184-1192.
- [15] 耿超. 基于图像处理的集料形态特征定量评价[J]. 公路交通科技, 2018,35(12):42-47.
GENG Chao. Quantitative evaluation of morphological feature of aggregate based on image processing[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018,35(12):42-47.
- [16] 赵振军. 粗集料棱角性的评价方法及对混合料性能影响研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
ZHAO Zhenjun. Study on the evaluation method of coarse aggregate angularity and its influence on the road performance of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [17] 朱洪洲,谭祺琦,范世平,等. 基于图像技术的沥青混合料微观结构研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021,40(10):97-110.
ZHU Hongzhou, TAN Qiqi, FAN Shiping, et al. Research progress of bituminous mixture meso-structure based on image technology[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2021,40(10):97-110.
- [18] 金灿,李守国,汪培松,等. 基于X-ray CT图像的集料形状表征方法[J]. 交通科技与经济, 2018,20(6):66-69.

- JIN Can, LI Shouguo, WANG Peisong, et al. Preliminary study on aggregate shape characterization based on X-ray CT imaging[J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2018, 20(6): 66–69.
- [19] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 1–66.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research·2020[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 1–66.
- [20] 王凤, 肖月, 崔培德, 等. 集料形态特征对沥青混合料性能影响规律的研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(17): 95–107.
WANG Feng, XIAO Yue, CUI Peide, et al. Review on the characterization of aggregate morphology and its influence on asphalt mixture properties[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(17): 95–107.
- [21] 郭美虹. 基于图像处理技术的粗骨料形状特性分析及其应用[D]. 烟台: 烟台大学, 2020.
GUO Meihong. Shape characteristics analysis of coarse aggregate based on image processing technology and its application[D]. Yantai: Yantai University, 2020.
- [22] 陈甲康, 高俊锋, 汪海年, 等. 集料图像测量系统(AIMS II)的评价指标研究与合理性验证[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2019, 36(9): 100–105.
CHEN Jiakang, GAO Junfeng, WANG Hainian, et al. Research on evaluation index and rationality of aggregate image measurement system(AIMS II)[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2019, 36(9): 100–105.
- [23] 中华人民共和国交通部, 交通部公路科学研究院. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

Multi-scale variation of recycled aggregate particle morphology based on oilstone separation

MA Chuanyi¹, YAN Xianliang², LÜ Xin³, ZHANG Jizhe³

1. Shandong Hi-Speed Group, Jinan 250098, China;

2. Shandong Provincial Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250098, China;

3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250100, China

Abstract: In order to study the influence of recycled asphalt pavement (RAP) regeneration process on the morphology characteristics of aggregate particles, the recycled aggregate is prepared by oil stone separation and disposal technology, and a multi-scale evaluation index system considering macro-meso-micro scale of recycled aggregate particles is established. Combined with the three-dimensional scanner and aggregate image measurement system(AIMS) to measure the sphericity, needle-like index, gradient angularity and texture index of new aggregate, untreated RAP and recycled aggregate. The morphological characteristics and multi-scale variation of three kinds of aggregate particles are compared and analyzed. The results show that, compared with the new aggregate and untreated RAP particles, the morphological characteristics of recycled aggregate particles do not change much at the macro scale, but change greatly at the micro-meso scale. The gradient angularity decreases by 12.5% on average, and the texture index increases by 14.1% on average. The four morphological indexes of the three aggregates accord with normal distribution. Compared with untreated RAP particles, the standard deviation of sphericity, gradient angularity and texture index of recycled aggregate are significantly smaller. It shows that the oil stone separation and treatment technology has a positive effect on improving the variability of macro-micro-microscopic morphological characteristics of recycled aggregate particles. When recycling RAP with high dosage, the association between the gradient angularity and texture index of recycled aggregate particles and the pavement performance of the mixture should be considered.

Keywords: oil stone separation ; recycled aggregate; multi-scale evaluation; particle morphology; sphericity; gradient angularity; texture index

(责任编辑:王惠)