

RAP 精细化处置工艺设备和工艺参数对 颗粒形态的影响规律

张文武¹, 范秀泽², 胡学亮¹, 胡巍³, 王珊珊¹, 张吉哲², 姚占勇²

1. 山东高速集团, 山东 济南 250098; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250001;

3. 滨州市交通运输综合执法支队, 山东 滨州 256600

摘要:为改善沥青混合料回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)性能,提高 RAP 利用率,减少 RAP 精细化处置技术对集料颗粒形态的影响,研究再生集料颗粒形态的定量表征,采用三维扫描与集料图像测量系统(aggregate image measurement system, AIMS)测量相结合的技术手段,研究不同工艺参数对再生集料针片状指数、球度、梯度棱角性和纹理指数指标的影响规律,综合分析关键影响因素。结果表明:随主轴转速增大或处置时间延长,再生粗集料的梯度棱角性减小,纹理指数和球度增大。再生粗集料的针片状指数随主轴转速增大而减小,随处置时间的延长先减小后回升。提高主轴转速或延长处置时间, RAP 针片状指数、球度、梯度棱角性和纹理指数的标准差均明显减小,表明精细化处置工艺可改善再生集料宏观-细观-微观形态特征的变异性。

关键词: RAP; 精细化处置; 多尺度评价体系; 针片状指数; 球度; 梯度棱角性; 纹理指数

中图分类号: U416.217; U415.52⁺8

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2025)01-0053-08

引用格式: 张文武, 范秀泽, 胡学亮, 等. RAP 精细化处置工艺设备和工艺参数对颗粒形态的影响规律[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(1): 53-60.

ZHANG Wenwu, FAN Xiuzhe, HU Xueliang, et al. The influence of RAP fine treatment process equipment and process parameters on particle morphology[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(1): 53-60.

0 引言

我国高等级公路已由大规模建设期转为建养并重期,道路维修、改建过程中产生大量沥青混合料回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)^[1],如不妥善处理,不仅浪费大量不可再生的石油资源,而且占用土地、破坏生态环境^[2-3],如何对 RAP 进行高效再生利用已成为公路行业亟待解决的问题^[4-5]。常规再生工艺下, RAP 表面裹附老化的沥青胶结料,在短暂拌和过程中,新、旧沥青难以充分融合,严重制约 RAP 的高掺量回收利用^[6]。

为解决 RAP 再生利用率较低的问题,采用 RAP 精细化处置技术对沥青铣刨料进行油石分离,通过精细化筛分得到富油细集料与贫油粗集料^[7]。在精细化处置过程中, RAP 精细化处置装备冲击再生集料表面,影响再生集料的颗粒形态。集料颗粒形态特征影响沥青混合料内部的骨架互锁结构和内摩擦力^[8-9],影响沥青路面的路用性能和服役寿命。按空间尺度,通常将集料的形态特征划分为表面纹理、棱角性和轮廓形状^[10-11]:表面纹理反映颗粒的表面形貌,属于集料的微观特征,影响集料-沥青的界面强度;棱角性属于集料的细观特征,代表颗粒的边缘锐度,在一定程度上影响沥青混合料的颗粒嵌挤与抗永

收稿日期:2023-07-20

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2020B66)

第一作者简介:张文武(1981—),男,山东济宁人,高级工程师,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, E-mail:544818480@qq.com。

久变形能力^[12-13];宏观形态特征反映集料的轮廓形状,影响沥青混合料的体积性能(如空隙率、矿料间空隙率、沥青饱和度)和高温稳定性。需准确表征再生粗集料的形态特征,评价精细化处置工艺对再生集料颗粒形态的影响,工程中再生粗集料的性能评估和预测才能更全面、更准确。

在集料形态测量方法方面,随现代图像处理技术的发展,已由人工测量向数字图像处理技术转变,以解决传统试验方法精度低、耗时长、工作量大的问题。为建立准确的形态特征评价指标,采用三维形态测量手段,利用 X 射线断层扫描组合多幅二维图像进行三维集料重构^[14]。Wang 等^[15]采用综合成像系统和 X 射线断层扫描集料获取断层图像,通过三维重构评价颗粒大小、形状、棱角性和纹理,建立颗粒形态特性与沥青混合料抗滑性能间的相关性。受现有技术限制,高精度三维重构作业计算量大,电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)设备昂贵,有严格的安全和辐射控制要求。三维激光扫描技术以其安全、便捷的优势成为研究热点^[16]。Liu 等^[17]采用三维光学扫描仪识别集料的三维形状。Pan 等^[18]、Huang 等^[19]采用三维激光扫描技术评估沥青混合料中破碎和未破碎集料的表面特性,与试验结果的相关性良好。三维光学扫描技术可准确评价集料颗粒三维形态特征,可有效表征集料的宏观形态。集料细观形态的表征手段较少,采用三维光学扫描技术进行三维重构时,需对扫描模型进行表面平滑处理,可能丢失部分局部信息。集料图像测量系统(aggregate image measurement system, AIMS)可精确表征集料细观-微观形态,AIMS 可在短时间内测量粒径从 μm 级到 mm 级的颗粒,扫描范围较广,可测量较大范围的颗粒形态。目前研究的主要对象为新集料,对再生集料的形态特征研究较少, RAP 精细化处置工艺对再生集料形态特征的影响规律尚不明确。

本文采用 RAP 精细化处置装备对 RAP 进行油石分离,采用三维光学扫描技术和 AIMS 测量再生集料的针片状指数、球度、梯度棱角性和纹理指数,通过针片状指数和球度表征再生集料的宏观特征,梯度棱角性表征细观特征,纹理指数表征微观特征,建立再生集料宏观-细观-微观多尺度评价体系,分析不同精细化处置工艺参数对再生集料颗粒形态的影响规律,为再生粗集料性能评价和优化提供指导,以期 RAP 的高掺量再生利用提供有力支撑。

1 再生集料形态特征评价方法

1.1 基于三维扫描仪的宏观形态特征评价

再生集料的宏观形态主要指集料的外轮廓特征,选择针片状指数和球度评价再生集料的宏观形态特征,采用高精度工业级三维扫描仪测量集料的宏观形态特征,包括长轴、中轴和短轴长度,该设备工作原理是通过全金属扫描仪上呈一定夹角的 2 个摄像头采集被蓝光照射的物体图像,采用图像处理技术解算公共区域内像素点的三维坐标,对集料进行三维重构。

采用针片状指数描述再生粗集料的针片状特征,针片状集料质量分数较大会造成沥青混合料压实困难,影响沥青路面的服役性能,针片状指数

$$F_{\text{ER}} = D_{\text{s}}/D_{\text{L}},$$

式中 D_{s} 、 D_{L} 分别为集料颗粒最小包围盒的短轴、长轴长度。

采用球度描述再生粗集料的不规则程度,可有效避免二维数字图像信息缺失和传统测量粗集料形状特征参数不准确的问题,球度

$$D_{\text{sp}} = \sqrt[3]{D_{\text{s}}D_{\text{w}}} / \sqrt[3]{D_{\text{L}}^2},$$

式中 D_{w} 为集料颗粒最小包围盒的中轴长度。

1.2 基于 AIMS 系统的细观-微观形态特征评价

选择梯度棱角性和纹理指数评价再生集料的细观-微观形态特征。AIMS 由图像采集模块、运行系统和数据分析系统组成,工作原理是通过集料托盘将集料依次旋转至相机工作范围内扫描 3 次,通过图像处理获取集料轮廓图像,表征集料的尺寸和局部棱角性,采用显微镜获得集料的纹理图像和高度信息。

采用梯度棱角性表征再生粗集料的细观棱角特征,以水平轴上粒子边界点棱角向量平均倾斜度表征

棱角性,集料外部轮廓凸出部分的锐度越大,集料边缘相邻梯度向量的角度差别越明显,梯度棱角性越大。梯度棱角性

$$G_A = \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| / \left(\frac{n}{3} - 1 \right),$$

式中: θ_i 、 θ_{i+3} 分别为第 i 个边点、第 $i+3$ 个边点的方向角度, n 为边点总数。

采用 Masad 纹理指数表征微观纹理,在 AIMS 中采用小波变换法量化集料表面纹理,通过短高频基函数和长低频基函数分别捕获集料表面细节纹理信息与粗略纹理信息,将 3 个方向小波系数的平方和定义为纹理指数,公式为:

$$T_x = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N [D_{i,j}(x,y)]^2 / (3N),$$

式中: D 为分解函数; N 为小波系数的总数; i 为小波系数的 3 个方向, $i=1,2,3$; j 为小波系数的序号, $j=1 \sim N$; (x,y) 为变换域内系数位置。

多尺度形态颗粒评价体系操作简单,数据精度高。

2 RAP 精细化处置技术

2.1 RAP 精细化处置设备

通常对沥青铣刨料简单破碎后直接使用,集料表面裹附大量沥青胶结料,存在大量团聚体,材料均质性较差,限制 RAP 的性能。借鉴抛丸喷磨工艺原理,采用细集料喷磨(石打石)和螺旋叶片切削(铁打石)的协同作用,自主研发 RAP 精细化处置装备,实现贫油粗集料与富油细集料的有效分离,RAP 精细化处置装备外观结构如图 1 所示^[2]。

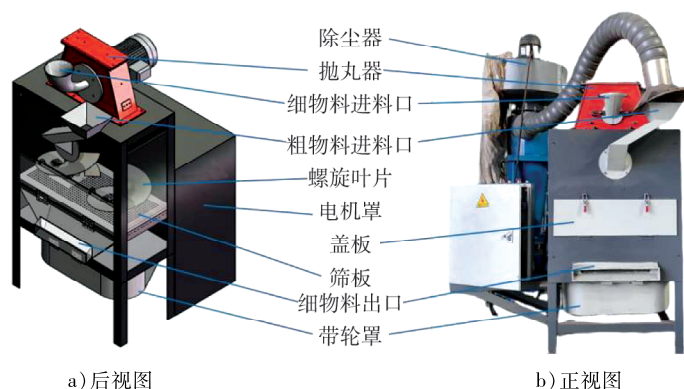


图 1 RAP 精细化处置设备外观结构

该设备工作原理是采用粒径为 2.36~4.75 mm 的富油细集料以较高的线速度冲击处理腔内粗粒铣刨料表面,处理腔内的螺旋叶片带动粗粒铣刨料翻动,粗粒铣刨料得到充分处置,多次循环作用后,有效剥离粗粒铣刨料表面的老化沥青。工作流程主要分为 4 步。

1) 样机工作时,开启进料口端盖,沥青铣刨料经粗料进料口进入抛磨处置箱体内部,待堆料高度完全高于螺旋叶片的顶端时关闭进料口端盖。

2) 开启抛丸器与驱动装置的电源,将一定粒径的富油细集料作为抛丸均匀置于抛丸器进料口内,喷磨箱体上部的铣刨料表面。

3) 在旋转叶片作用下,箱体内部物料不断翻转剥离,实现沥青铣刨料在工作区域内循环。富油细集料的碰撞喷磨能打散粗粒铣刨料中的团聚体。经过滤板筛分,符合条件的分散体随抛丸一起落入防尘袋,作为下一次抛丸备用。

4) 到设定抛磨时间后,关闭设备电源,打开正面的挡料板,取出箱体内部已处理好的粗铣刨料。

为验证 RAP 精细化处置设备的可行性,选用山东省某高速公路改扩建工程产生的中面层铣刨料,未

处理的铣刨料表面被沥青胶结料裹覆,形成黑色胶团,经 RAP 精细化处置设备处理后,RAP 表面黑色胶团显著减少,集料表面沥青膜剥离,集料和老化沥青有效分离,RAP 处置效果如图 2 所示。



图 2 RAP 处置效果图

2.2 RAP 精细化处置工艺

为分析精细化处置工艺对再生集料颗粒形态的影响,选用粒径为 2.36~4.75 mm 的 RAP 作为抛丸,单次处理铣刨料 40 kg。RAP 老化沥青粒径在 0~5 mm、>5~10 mm、>10~20 mm 的质量分数分别为 5.87%、4.23%、4.74%。设计 5 组试验方案处置 RAP,采用燃烧炉法分析不同工艺参数下的集料老化沥青质量分数,如表 1 所示。处理后 0~5 mm 粒径再生细集料的沥青质量分数明显增大,均不小于 7.40%,而 5~10 mm 和>10~20 mm 粒径再生粗集料的老化沥青质量分数明显减小,均小于 2.20%。

表 1 处置后各档 RAP 老化沥青质量分数

处置方案	主轴转速/ ($\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$)	处置时间/ min	老化沥青质量分数/%		
			0~5 mm	>5~10 mm	>10~20 mm
1	20	30	7.46	2.15	2.08
2	40	30	7.67	1.72	1.86
3	60	30	8.18	1.48	1.45
4	60	15	7.67	1.78	1.69
5	60	45	8.20	1.35	1.33

3 再生集料形态特征影响分析

通过三维光学扫描技术和 AIMS 获取再生粗集料的针片状指数、球度、梯度棱角性和纹理指数,将其结果进行正态分布拟合,分析不同精细化处置工艺参数对再生集料颗粒形态特征的影响。正态分布中的位置参数 μ 为平均值,描述再生粗集料形态特征数据的集中趋势位置;尺度参数 σ 为标准差,描述再生粗集料形态特征数据分布的离散程度。

3.1 主轴转速对再生集料形态特征的影响

研究精细化处置 30 min,主轴转速分别为 20、40、60 rad/min 对再生粗集料形态特征的影响规律,处置后的再生粗集料分别为 RAP-20、RAP-40、RAP-60。不同主轴转速下再生粗集料的宏观形态参数如图 3 所示。由图 3 可知:针片状指数和球度均满足正态分布特征;RAP 的平均针片状指数比新集料增大 11.16%,原因是 RAP 中存在团聚现象,扁长形集料颗粒在再生粗集料中的占比较大;随主轴转速增大,处置后再生粗集料的平均针片状指数比 RAP 分别减小 10.40%、13.76%、14.87%,表明精细化处置工艺可有效减小再生粗集料中扁长形颗粒占比;RAP 的平均球度比新集料大 5.00%,主轴转速对再生粗集料的平均球度影响较小,表明 RAP 精细化处置是集料表面的微损伤处置工艺,不会导致集料过度磨圆。

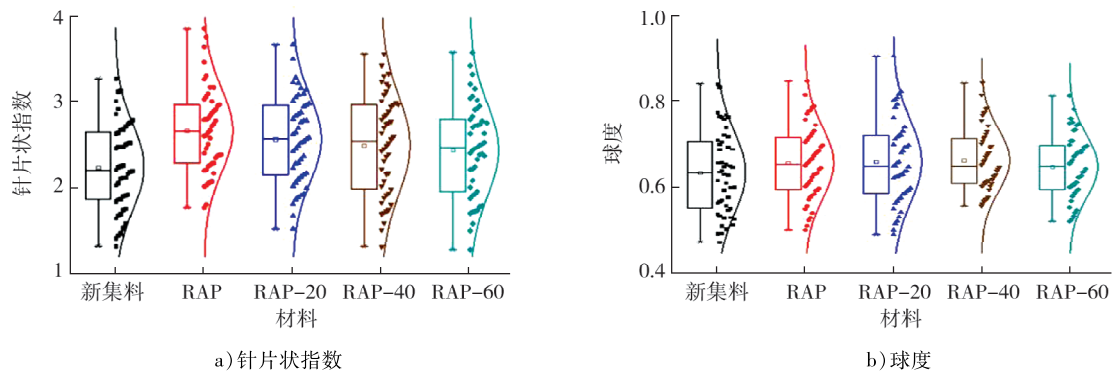


图3 精细化处置 30 min 时不同主轴转速下再生粗集料的宏观形态参数

不同主轴转速下再生粗集料的细观-微观形态参数如图4所示。由图4可知,梯度棱角性和纹理指数均满足正态分布特征。RAP的梯度棱角性比新集料减小6.94%,原因是长期服役过程和铣刨过程对集料的棱角性均产生较大负面影响。随主轴转速增大,再生粗集料的平均梯度棱角性比RAP分别减小3.79%、5.96%、10.85%,表明主轴转速大于40 rad/min后,精细化处置工艺对集料棱角性的负面影响加剧。确定最优主轴转速为40 rad/min。

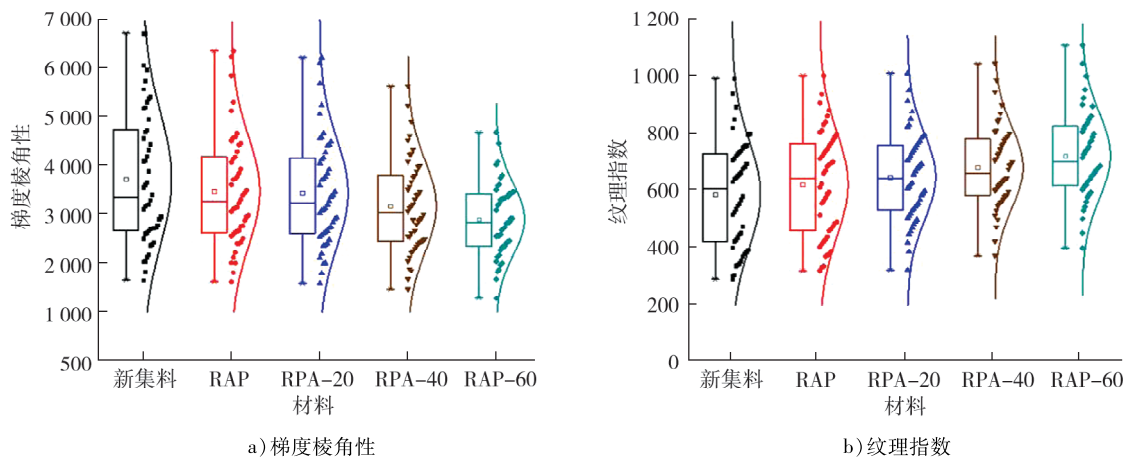


图4 精细化处置 30 min 时不同主轴转速下再生粗集料的细观-微观形态参数

随主轴转速增大,处置后再生粗集料的纹理指数比RAP分别增大5.65%、7.31%、15.56%,主轴转速大于40 rad/min后,再生粗集料纹理指数增速明显加快,原因是主轴转速加快,导致处理腔内粗集料颗粒间的翻转和运动进一步提高,集料颗粒间及螺旋叶片与集料表面间的相互碰撞和研磨增强,表面刮擦效果更全面,纹理特征得到明显提高。上述4个指标正态分布拟合结果如表2所示。

表2 精细化处置 30 min 时不同主轴转速下不同材料形态参数正态分布拟合

材料	μ				σ			
	针片状指数	球度	梯度棱角性	纹理指数	针片状指数	球度	梯度棱角性	纹理指数
新集料	2.42	0.60	3 725.98	586.89	0.93	0.09	1 359.40	184.44
RAP	2.69	0.63	3 467.25	621.58	0.73	0.10	1 120.43	182.68
RAP-20	2.41	0.64	3 335.97	656.69	0.59	0.08	1 092.04	180.40
RAP-40	2.32	0.66	3 260.57	667.02	0.49	0.07	934.16	165.19
RAP-60	2.29	0.67	3 091.08	718.30	0.46	0.05	790.33	156.77

由表 2 可知:随主轴转速的增大,再生粗集料 4 个指标的标准差比 RAP 均明显减小,表明加大主轴转速可有效改善集料宏观-细观-微观形态特征的变异性,保证材料的一致性。

3.2 精细化处置时间对再生集料形态特征的影响

分析在恒定主轴转速为 60 rad/min 条件下,处置时间(15、30、45 min)对再生粗集料形态特征的影响规律,再生粗集料的宏观形态参数如图 5 所示,处置后的再生粗集料分别为 RAP-15、RAP-30、RAP-45。

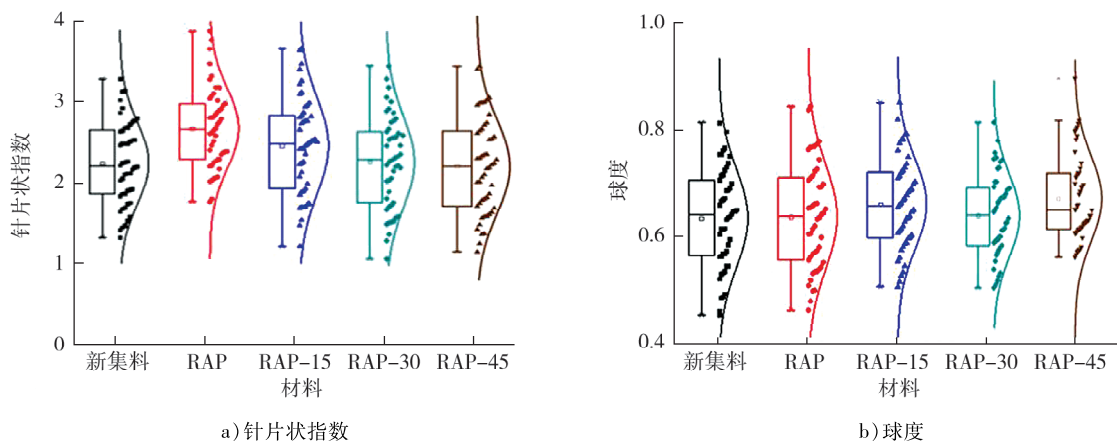


图 5 主轴转速为 60 rad/min 时不同精细化处置时间下再生粗集料的宏观形态参数

由图 5 可知,针片状指数和球度均满足正态分布特征。随精细化处置时间延长,再生粗集料的平均针片状指数比 RAP 分别减小 11.15%、14.50%和 8.92%,表明精细化处置 15~30 min 时可缓解 RAP 中的团聚现象;处置时间超过 30 min 时,再生粗集料的平均针片状指数略增。再生粗集料的平均球度受处置时间影响较小,比 RAP 分别增大 1.59%、3.18%和 6.35%,处置 15~30 min 时可减小再生集料的磨圆度。

主轴转速为 60 rad/min 时,不同精细化处置时间下再生粗集料的细观-微观形态参数如图 6 所示。

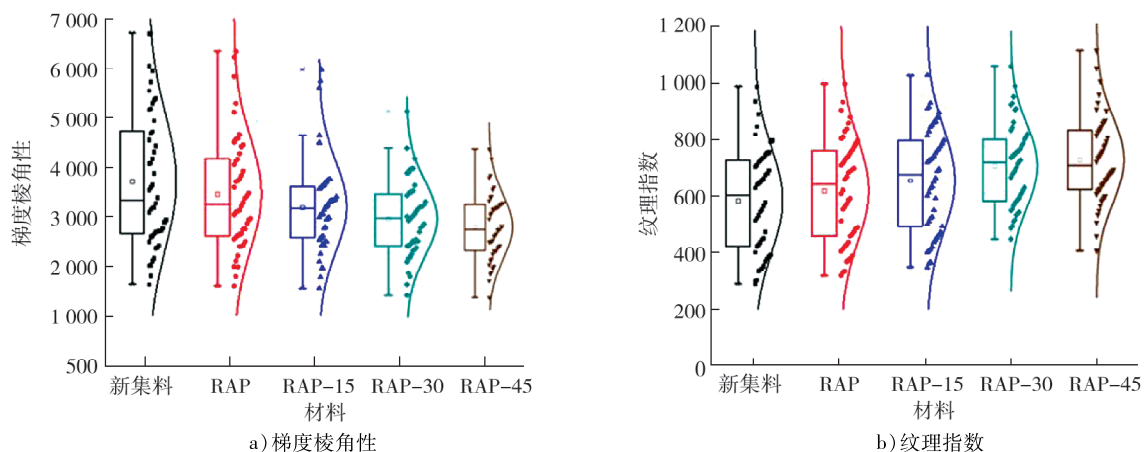


图 6 主轴转速为 60 rad/min 时不同精细化处置时间下再生粗集料的细观-微观形态参数

由图 6 可知,梯度棱角性和纹理指数均满足正态分布特征。随精细化处置时间延长,再生粗集料的平均梯度棱角性逐渐减小,比 RAP 分别减小 7.46%、9.98%和 16.48%,处置 30~45 min 时,再生粗集料的平均梯度棱角性衰减速率加快。随处置时间延长,再生粗集料的平均纹理指数逐渐增大,比 RAP 分别增大 5.65%、8.44%和 16.00%,处置 30~45 min 时,再生粗集料的平均纹理指数增长速率加快,可能是处置超过 30 min 后,再生集料表面老化沥青油膜较薄,集料间的挤压和研磨直接作用于再生集料自身表明,表面粗糙度增大。确定最优处置时间为 30 min。

上述 4 个指标正态分布拟合结果如表 3 所示。随处置时间的延长,再生集料 4 个指标的标准差比 RAP 均明显减小,表明延长处置时间可有效改善再生集料宏观-细观-微观形态特征的变异性。

表3 主轴转速为 60 rad/min 时不同处置时间下不同材料形态参数正态分布拟合

材料	μ				σ			
	针片状指数	球度	梯度棱角性	纹理指数	针片状指数	球度	梯度棱角性	纹理指数
新集料	2.42	0.60	3 725.98	586.89	0.93	0.09	1 359.40	184.44
RAP	2.69	0.63	3 467.25	621.58	0.73	0.10	1 120.43	182.68
RAP-20	2.39	0.64	3 208.51	656.69	0.56	0.08	915.59	172.23
RAP-40	2.45	0.65	3 121.08	674.02	0.46	0.07	790.33	156.77
RAP-60	2.30	0.67	2 895.78	721.06	0.41	0.05	731.36	149.47

4 结论

选用 RAP 精细化处置装备对 RAP 进行油石分离,建立定量评价再生粗集料颗粒宏观-细观-微观形态特征的多维度指标体系,分析主轴转速和处置时间等工艺参数对再生粗集料颗粒形态的影响规律。

1)采用三维扫描仪与 AIMS 评价再生集料的宏观-细观-微观形态特征,选择针片状指数、球度、梯度棱角性和纹理指数作为再生集料的宏观-细观-微观尺度方面评价指标,多尺度形态颗粒评价体系操作简单,数据精度高。

2)随主轴转速增大,再生粗集料针片状指数和平均梯度棱角性比 RAP 小,球度与纹理指数比 RAP 大。主轴转速大于 40 rad/min 后,再生粗集料梯度棱角性衰减速率和纹理指数增速明显加快。确定最优主轴转速为 40 rad/min。

3)随处置时间延长,再生粗集料球度与平均纹理指数比 RAP 大,梯度棱角性比 RAP 小,平均针片状指数先减小后逐渐增大。处置时间为 30~45 min 时,再生粗集料平均梯度棱角性的衰减速率和平均纹理指数的增长速率加快。确定最优处置时间为 30 min。

4)增大主轴转速或延长处置时间,再生集料针片状指数、球度、梯度棱角性和纹理指数的标准差比 RAP 均明显小,表明精细化处置工艺可有效改善再生集料宏观-细观-微观形态特征的变异性,保证材料具有良好的一致性。

参考文献:

- [1] AL-SABAEI A M, NAPIAH M B, SUTANTO M H, et al. A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249:119357.
- [2] CHEN T, LUAN Y, MA T, et al. Mechanical and microstructural characteristics of different interfaces in cold recycled mixture containing cement and asphalt emulsion[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 258:120674.
- [3] AURANGZEB Q, AL-QADI I L, OZER H, et al. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content [J]. Resources Conservation Recycling, 2014, 83:77-86.
- [4] 张晓强. 再生沥青混合料中旧沥青再生程度影响因素研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(4):667-670.
- [5] 王振军, 阎凤凤, 张含笑, 等. 乳化沥青与 RAP 再生界面融合特征研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(7):57-66.
- [6] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚, 等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10):72-88.
- [7] ZHOU L, WANG S S, ZHANG J Z, et al. Developing and testing of the principle prototype for efficient micro-damage fine stripping of asphalt on the surface of reclaimed asphalt pavement[J]. Machines, 2023, 11(3):11030367.
- [8] 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):91-103.
- [9] 阳虎, 单丽岩, 李志伟. 基于 CT 图像的水泥稳定 RAP 材料细观结构研究[J]. 材料导报, 2024, 38(1):70-75.
- [10] 裴建中, 樊泽鹏, 薛斌, 等. 沥青路面材料的颗粒物物质视域:理论、方法与进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8):

- 121-136.
- [11] 汪海年,雷鸣宇,孔庆鑫,等. 粗集料综合形态特征与抗磨损性能的关联性[J]. 科学技术与工程,2022,22(18): 8056-8063.
- [12] ZHANG D Y, GU L H, ZHU J Q. Effects of aggregate mesostructure on permanent deformation of asphalt mixture using three-dimensional discrete element modeling[J]. Materials,2019,12(21):3601.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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, 2020,242:118150.
- [16] GE H, SHA A, HAN Z, et al. Three-dimensional characterization of morphology and abrasion decay laws for coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188:58-67.
- [17] 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, 2018, 30(1): 04017248.
- [18] PAN T, TUTUMLUER E. Imaging-based direct measurement of aggregate surface area and its application in asphalt mixture design[J]. International Journal of Pavement Engineering,2010,11(5):415-428.
- [19] HUANG H, TUTUMLER E. Discrete element modeling for fouled railroad ballast[J]. Construction and Building Material, 2011,25:3306-3312.

The influence of RAP fine treatment process equipment and process parameters on particle morphology

ZHANG Wenwu¹, FAN Xiuze², HU Xueliang¹, HU Wei³,
WANG Shanshan¹, ZHANG Jizhe², YAO Zhanyong²

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

2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250001, China;

3. Binzhou Comprehensive Law Enforcement Branch of Transportation, Binzhou 256600, China

Abstract: To improve the performance of recycled asphalt pavement (RAP) and increase the utilization rate of RAP, while reducing the impact of fine processing technology on the particle morphology of aggregates, this study investigates the quantitative characterization of recycled aggregate particle morphology. A combination of three-dimensional scanning and the aggregate image measurement system (AIMS) is employed to study the influence of different process parameters on the needle-like index, sphericity, angularity gradient, and texture index of recycled aggregates, and to comprehensively analyze the key influencing factors. The results indicate that with an increase in spindle speed or extension of processing time, the angularity gradient of recycled coarse aggregates gradually decreases, while the texture index and sphericity gradually increase. The needle-like index of recycled coarse aggregates decreases with increasing spindle speed and initially decreases then gradually rebounds with the extension of processing time. Increasing the spindle speed or extending the processing time significantly reduces the standard deviations of the needle-like index, sphericity, angularity gradient, and texture index of RAP materials, indicating that the fine processing technology can improve the variability of the macro-meso-micro morphological characteristics of recycled aggregates.

Keywords: RAP; fine treatment; multiscale evaluation system; needle-like index; sphericity; angularity gradient; texture index

(责任编辑:王惠)