

# 基于机械分离法的再生粗集料的路用性能

吴江<sup>1</sup>, 栗翔<sup>1</sup>, 徐绮<sup>1</sup>, 黄军瑞<sup>2</sup>

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250100

**摘要:**为研究废旧沥青路面材料(reclaimed asphalt pavement, RAP)的机械法油石分离技术,分析再生粗集料的性能,采用洛杉矶磨耗仪对RAP进行磨耗作为再生粗集料,采用磨耗率和分离率评价分离效果,测定不同旋转次数下RAP的磨耗率和分离率随球料质量比的变化,确定最佳工艺参数,采用荧光显微镜观察再生粗集料的微观空隙状态;将再生粗集料、同源普通石灰岩粗集料、抽提的粗集料分别与细集料拌制稀浆混合料应用于微表处中,研究不同材料对微表处性能的影响。结果表明:油石分离的最佳工艺参数为磨耗仪旋转900次,磨料用小球与RAP的质量比为1.0;再生粗集料表面仍残留沥青,填充于开口空隙中;与其他2种粗集料相比,再生粗集料制备的微表处混合料的拌和时间延长,配伍性及抗水害性能明显提升,油石比下降,可有效节省乳化沥青。再生粗集料可作为微表处中的新集料使用,性能优越,施工成本降低。

**关键词:**油石分离;再生粗集料;微表处;拌和时间

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-0032(2024)01-0043-06

**引用格式:**吴江,栗翔,徐绮,等.基于机械分离法的再生粗集料的路用性能[J].山东交通学院学报,2024,32(1):43-48.

WU Jiang, LI Xiang, XU Qi, et al. Pavement performance of recycled coarse aggregate based on mechanical separation method[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(1): 43-48.

## 0 引言

我国每年因公路建设和养护产生大量废旧沥青路面材料(reclaimed asphalt pavement, RAP),堆放RAP占用大量土地,易污染当地环境。回收使用RAP可降低施工成本,保护当地生态环境<sup>[1-3]</sup>。我国目前主要通过沥青路面再生技术回收使用RAP,但RAP级配的变异性较大,RAP中的旧沥青与新沥青及再生剂充分融合的难度较大,难以保证再生路面的路用性能,RAP的重复利用率较低,仍有大量RAP未得到合理利用<sup>[4-6]</sup>;RAP中的沥青老化严重,但集料的相关性能指标变化不大,符合规范要求<sup>[7-9]</sup>。若能合理地回收利用RAP中的旧集料,可实现RAP的大批量重复利用。

油石分离是指将RAP中的沥青与集料分离,可采用化学法、生物法、机械法等<sup>[10-12]</sup>。化学法主要是采用化学试剂溶解RAP中的沥青,经过滤和离心分离等处理措施后获得再生集料和再生沥青,但化学试剂大多有毒,挥发性较强,危害人体健康,试剂价格昂贵,若无法有效回收,会大大提高分离成本<sup>[13-15]</sup>。生物法是指在RAP中加入特定的微生物菌群,改变沥青与集料间的表面结合能力,实现油石分离,但工艺较复杂、技术难度较大,分离效率较低<sup>[16-18]</sup>。机械法应用最广,采用机械设备对RAP进行物理破碎或冲击,可通过机械外力从集料上分离RAP表面老化的胶结料,工艺简单,成本较低,易实现,但工序较多,专用设备昂贵。Feng等<sup>[19]</sup>采用小型物理柔性离心分离装置对RAP进行机械分离,发现所得较粗再生集料的压碎值未发生明显变化,低温有利于提升分离效果。周新锋等<sup>[20]</sup>通过机械法对RAP除尘、破碎、油石分离和筛分,将集料表面的沥青分离,所得再生集料的各项性能与新集料基本一致,符合规范要求,同

收稿日期:2023-05-20

第一作者简介:吴江(1999—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为道路与铁道工程,E-mail:1206331052@qq.com。

时提高再生集料与沥青的黏附性。马川义等<sup>[21]</sup>采用多尺度评价指标评价机械法油石分离得到的再生集料的颗粒形态,认为该方法对再生集料颗粒的宏观-微观-细观特征有积极影响。

机械法油石分离技术的综合优势明显,应用前景广阔。本文采用机械法进行油石分离,选定分离设备,提出相关评价指标,通过室内试验确定设备的最佳工艺参数,将RAP中的旧沥青与旧集料分离,研究分离后所获粗集料应用于微表处的相关性能,以期扩大RAP的应用范围和用量。

## 1 试验方法

分离RAP存在铣刨不彻底及板结问题,采用颚式破碎机破碎RAP;采用边长为2.36 mm的方孔筛筛分,取筛上RAP作为试验材料,通过抽提试验测得5组RAP的油石比分别为2.2、2.3、2.2、2.2、2.2,平均油石比为2.2。

采用洛杉矶磨耗仪回收RAP中粗集料的基本步骤为:将RAP放入洛杉矶磨耗仪中高速旋转,颗粒与颗粒、颗粒与小球、颗粒与机械内壁间发生激烈碰撞与摩擦,RAP结构开裂,沥青逐渐从石料表面脱落,实现沥青和集料的有效分离。

将破碎后的RAP洗净后置于(105±5)℃烘箱内烘干至恒重,采用边长为2.36 mm的方孔筛筛除粒径较小的RAP,得到粗颗粒RAP,称取一定质量的粗颗粒RAP放入洛杉矶磨耗仪中,放入磨耗用小球,开动磨耗仪旋转至设定次数,回收磨耗后的RAP;采用边长为2.36 mm的方孔筛筛除回收RAP中的细屑,冲洗筛上的RAP,再次置于(105±5)℃的烘箱内烘干至恒重,即获得再生粗集料。磨耗RAP时需控制磨耗用小球质量与RAP质量之比,即球料质量比。

## 2 分离效果评价指标与最佳工艺参数

### 2.1 分离效果的评价指标

在磨耗过程中粗颗粒RAP发生细化,细颗粒RAP占比增大,磨耗效率降低,选用分离率和磨耗率作为分离效果的评价指标。

称取质量为 $m_1$ 的粗颗粒RAP放入洛杉矶磨耗仪中,磨耗完成后取出腔室内RAP,采用边长为2.36 mm的方孔筛筛分,筛上剩余RAP的质量 $m_2$ ,磨耗率 $E_M = (1 - m_2/m_1) \times 100\%$ 。

称取一定质量的粗颗粒RAP,在不同工艺参数下磨耗,将磨耗后的RAP通过边长为2.36 mm的方孔筛筛分,测定筛上剩余RAP的质量 $m$ ,通过抽提试验测定该部分RAP中沥青的质量 $m_3$ 。取质量为 $m$ 的未磨耗RAP进行抽提试验,测定未磨耗RAP中沥青的质量为 $m_4$ ,分离率 $E_F = (1 - m_3/m_4) \times 100\%$ 。

球料质量比均为1.0时,测试在磨耗仪不同旋转次数 $n$ 下的分离率和磨耗率,试验结果如表1所示。

由表1可知:随旋转次数的增大,分离率和磨耗率均增大。3组试验的分离率均高于磨耗率,磨耗率较低,表明磨耗过程中主要是分离RAP表面的沥青,RAP的细化程度较低,该方法可有效磨耗RAP表面的沥青,油石分离效果较好。

表1 磨耗试验结果

组号	$n$	$E_M/\%$	$E_F/\%$
1	300	16.5	73.0
2	500	20.5	78.2
3	700	24.2	83.1

### 2.2 最佳工艺参数的确定

为确定该分离方法中洛杉矶磨耗仪的最佳工艺参数,分析粗颗粒RAP的分离率和磨耗率的主要影响因素及影响规律,选择旋转次数、球料质量比为影响因素,设置不同的因素水平,在不同的旋转次数下,RAP的磨耗率、分离率随球料质量比的变化如表2所示。由表2可知:球料质量比相同时,磨耗率、分离率与旋转次数正相关,原因是旋转次数越大,小球与磨耗仪侧壁及RAP的碰撞次数越多,磨耗更充分,分离率增大,但磨耗损失也越严重;旋转次数相同时,磨耗率、分离率与球料质量比正相关,原因是旋转次数相同时,球料质量比越大,磨耗用小球的相对个数越多,小球与RAP的碰撞概率越大,撞击后分离的沥青

和磨损到粒径小于 2.36 mm 的集料越多。磨耗仪旋转 900 次、球料质量比为 1.0 时,RAP 的磨耗率为 28.2%,相对较低,分离率为 87.3%,相对较高,将该组参数确定为最佳工艺参数。

表 2 不同旋转次数下 RAP 磨耗率、分离率随球料质量比的变化

球料 质量比	$E_M/\%$				$E_F/\%$			
	$n=300$	$n=500$	$n=700$	$n=900$	$n=300$	$n=500$	$n=700$	$n=900$
0.5	14.1	16.8	17.1	21.9	20.6	40.8	43.7	47.2
1.0	16.5	20.5	24.2	28.2	73.0	78.2	83.1	87.3
1.5	16.6	23.7	29.1	35.2	75.4	79.4	86.1	89.6
2.0	27.9	32.6	36.8	41.3	82.3	85.7	88.7	91.0

### 3 再生粗集料在微表处中的应用

#### 3.1 再生粗集料的微观空隙状态

再生粗集料表面的空隙状态对再生材料性能的影响较大,为分析再生粗集料表面残留沥青的分布及开口空隙的状态,采用荧光显微镜观察再生粗集料的微观空隙状态,放大 500 倍后,再生粗集料的微观空隙状态如图 1 所示。图 1 中颜色较深部分为机械磨耗过程中未被磨除、残留在集料表面的沥青,较浅部分为磨除沥青后外露的集料表面。

由图 1 可知:再生粗集料表面的大部分沥青已被磨除,集料的小部分凹陷区仍残余少量沥青,且主要填充在开口空隙,再生粗集料的开口空隙变小,与再生粗集料表面平齐,成为闭口空隙。

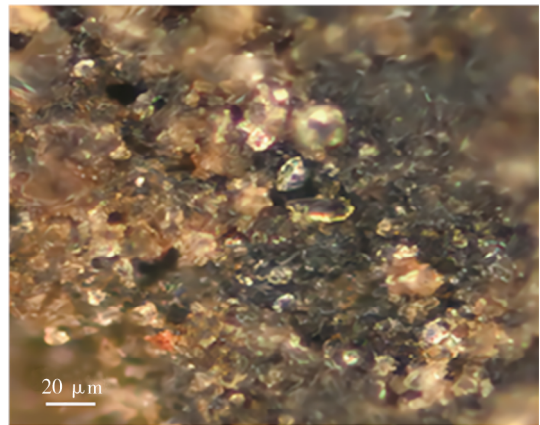


图 1 再生粗集料的微观空隙状态

#### 3.2 微表处性能试验

将再生粗集料应用于微表处中,研究再生粗集料对微表处的性能影响。

##### 3.2.1 粗集料性能及级配

选用 3~10 mm 的再生粗集料、同源普通石灰岩粗集料、抽提得粗集料,分别与普通石灰岩细集料拌制稀浆混合料,测试 3 种粗集料应用于微表处时的技术指标,结果如表 3 所示。由表 3 可知:3 种粗集料的技术指标均满足微表处的技术要求,再生粗集料的指标优于其他 2 种粗集料。

表 3 不同粗集料的性能指标

单位: %

集料类型	压碎值	洛杉矶磨耗损失	磨光值	坚固性	针片状集料的质量分数	砂当量
普通石灰岩粗集料	14	21	53	7	9	76
抽提得粗集料	15	23	47	9	11	73
再生粗集料	17	24	45	10	13	72
微表处技术要求 <sup>[22]</sup>	≤26	≤28	≥42	≤12	≤15	≥65

为避免级配因素对微表处性能的影响,减小试验误差,采用文献[23]中的 MS-III 型推荐级配中值为 3 种粗集料微表处的设计级配,如表 4 所示。

表4 MS-III型推荐级配通过率

筛孔边长/mm	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5
MS-III 推荐级配下限通过率/%	5	7	12	19	28	45	70	100
MS-III 推荐级配中值通过率/%	10.0	12.5	18.5	26.5	39.0	57.5	80.0	100
MS-III 推荐级配上限通过率/%	15	18	25	34	50	70	90	100

### 3.2.2 可拌和时间

设定油石比为0.06,采用室内手动拌和试验,测定再生粗集料、抽提得粗集料、普通石灰岩粗集料3种粗集料分别与细集料在MS-III型推荐级配中值下的合成矿料与乳化沥青的可拌和时间随水与集料的质量比 $w$ 的变化情况,试验结果如表5所示。

表5 不同集料的可拌和时间随水与集料的质量比的变化

集料类型	可拌和时间/s					
	$w=0.05$	$w=0.06$	$w=0.07$	$w=0.08$	$w=0.09$	$w=0.10$
再生粗集料-细集料	82	133	175	223	238	351
抽提得粗集料-细集料	13	42	63	145	168	221
普通石灰岩粗集料-细集料	57	86	121	196	211	319

由表5可知:3种粗集料微表处的可拌和时间均随水与集料的质量比的增大而延长,说明增加用水量可减缓破乳速度;水与集料的质量比相同时,再生粗集料微表处的可拌和时间比其他2种集料长,原因是乳化沥青破乳后,再生粗集料表面仍附着残留沥青,与破乳后的乳化沥青结合,可延长拌和时间;水与集料的质量比大于0.09时,3种粗集料微表处可拌和时间的增长速率明显加快。

### 3.2.3 黏聚力

根据文献[24],采用稀浆混合料黏聚力试验,测定3种粗集料微表处在养护完成后0.10、20、30 min时的黏聚力,测试结果如表6所示。

表6 不同集料的黏聚力试验结果

集料类型	黏聚力/(N·m)			
	完成养护后0 min	完成养护后10 min	完成养护后20 min	完成养护后30 min
再生粗集料-细集料	1.35	1.73	2.02	2.51
抽提得粗集料-细集料	1.53	1.77	1.89	2.21
普通石灰岩粗集料-细集料	1.41	1.76	2.03	2.52

由表6可知:刚完成养护时,按黏聚力从大到小依次为抽提得粗集料-细集料微表处、普通石灰岩粗集料-细集料微表处、再生粗集料-细集料微表处;完成养护后10 min时3种粗集料微表处黏聚力相当,完成养护后20、30 min时,再生粗集料-细集料和普通石灰岩粗集料-细集料微表处的黏聚力相当且大于抽提得粗集料-细集料微表处,说明再生粗集料用于微表处时,表面残留沥青对完成养护20 min后集料的黏聚力影响不大。

### 3.2.4 湿轮磨耗值

为研究采用3种粗集料的合成矿料与乳化沥青的配伍性及微表处的抗水害能力,根据文献[24],测定油石比 $w_1$ 不同时,为1 h、6 d(磨耗前试件在25℃水中水浴保温的时间)3种集料微表处的湿轮磨耗值,试验结果如表7所示。

由表7可知,磨耗前试件在25℃水中水浴保温时间为1h、6d 3种粗集料微表处的湿轮磨耗值均与油石比负相关。不同油石比下,乳化沥青破乳后与再生粗集料表面的残留沥青融合形成物理吸附作用,表面沥青膜比其他2种粗集料微表处厚,磨耗前试件在25℃水中水浴保温时间为1h、6d再生粗集料-细集料微表处的湿轮磨耗值小于其他2种集料。将再生粗集料应用于微表处中可降低油石比,有效节省沥青用量;相同油石比下,磨耗前试件在25℃水中水浴保温时间为6d湿轮磨耗值大于1h的湿轮磨耗值,说明恒温水浴时间越长,集料与沥青的物理吸附作用越差。

表7 不同集料微表处的湿轮磨耗值随油石比的变化

集料类型	水浴时间1h湿轮磨耗值/(g·m <sup>-2</sup> )					水浴时间6d湿轮磨耗值/(g·m <sup>-2</sup> )				
	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$	$w_1 =$
	0.060	0.064	0.068	0.072	0.076	0.060	0.064	0.068	0.072	0.076
再生粗集料-细集料	562	460	440	398	357	692	580	539	501	453
抽提得粗集料-细集料	821	663	572	516	459	1763	1145	886	779	679
普通石灰岩粗集料-细集料	587	482	472	425	391	1267	880	763	688	580

## 4 结论

采用洛杉矶磨耗仪磨耗RAP进行油石分离,通过室内试验确定洛杉矶磨耗仪旋转次数、球料质量比的最佳工艺参数,并制备再生粗集料,研究再生粗集料应用于微表处时的性能改善情况。

1)采用洛杉矶磨耗仪对RAP进行油石分离,将磨耗率和分离率作为评价指标,该方法的分离率大于磨耗率,油石分离效果较好;油石分离的最佳工艺参数为磨耗仪旋转900次,球料质量比为1.0,此时分离率为87.3%,磨耗率为28.2%,回收效率较高。

2)再生粗集料的表面残留少量沥青,填充于开口空隙中使得开口空隙变小,部分变成闭口空隙。将再生粗集料作为新集料应用于微表处中可延长可拌和时间,与乳化沥青的配伍性和所制微表处混合料的抗水害能力优于普通石灰岩粗集料-细集料和抽提得粗集料-细集料,同时可降低微表处的油石比,节省沥青用量,再生粗集料应用于微表处中可行。

### 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [2] 宋冰. 沥青路面回收旧料热再生研究与应用[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
- [3] 章辉健, 朱大彪. 沥青路面再生技术综述[J]. 现代交通技术, 2011, 8(4): 17-19.
- [4] 廖新华. 沥青路面再生技术在公路改造维护中的应用[J]. 西部交通科技, 2017(10): 42-45.
- [5] 潘园园. 高速公路沥青路面养护技术的评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [6] 牛文广. 沥青路面就地热再生技术现状与发展历程[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 50-59.
- [7] 李清富, 裴俊杰, 吕小永, 等. 废旧沥青路面再生利用研究现状与进展[J]. 河南科技, 2019(20): 108-111.
- [8] 刘亚洲. 沥青路面就地热再生施工常见问题及质量控制[J]. 公路交通技术, 2017, 33(1): 21-23.
- [9] 李丽, 罗明. 城市道路沥青路面就地热再生应用及探讨[J]. 四川建筑, 2016, 36(6): 231-233.
- [10] 郭德栋, 张圣涛, 李晋, 等. 厂拌热再生过程中旧矿料颗粒的迁移行为[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(2): 46-52.
- [11] 郭鹏, 韦万峰, 唐伯明, 等. 再生粗集料棱角性对混合料高温性能评价[J]. 公路, 2017, 62(9): 220-225.
- [12] 车俊霖. 回收沥青路面材料(RAP)性能研究[J]. 中国建材科技, 2021, 30(2): 62-64.
- [13] 文凤友. 回收旧集料评价及再生合成级配设计与检验[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(4): 44-48.
- [14] JING J, FAN L, ZHOU S, et al. Particle parameters of asphalt pavement milling recycling material[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 766(1): 012059.

- [15] QIU J, HUURMAN M, DE BRUIN B, et al. Towards 90% warm re-use of porous asphalt using foaming technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190:251–260.
- [16] CHEN Q, LIU Q. Bitumen coating on oil sands clay minerals: a review[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33:5933–5943.
- [17] XUE J, YU Y, BAI Y, et al. Marine oil-degrading microorganisms and biodegradation process of petroleum hydrocarbon in marine environments: a review[J]. *Current Microbiology*, 2015, 71(2):220–228.
- [18] MARIANE A, MARIA P, CLÉMENCE Q, et al. Subcritical hydrothermal liquefaction of microalgae residues as a green route to alternative road binders[J]. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2015, 3(4):583–590.
- [19] FENG D C, CAO J W, GAO L B, et al. Recent developments in asphalt-aggregate separation technology for reclaimed asphalt pavement[J]. *Journal of Road Engineering*, 2022, 2(4):332–347.
- [20] 周新锋,徐希娟,赵琳娜. 废旧沥青混合料分离再生应用技术[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2014, 31(1):79–81.
- [21] 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.
- [22] 中华人民共和国交通部,交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [23] 中华人民共和国交通部,交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [24] 中华人民共和国交通运输部,交通运输部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

## Pavement performance of recycled coarse aggregate based on mechanical separation method

WU Jiang<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, XU Qi<sup>1</sup>, HUANG Junru<sup>2</sup>

1. School of Civil Transportation Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250100, China

**Abstract:** To study the mechanical hot-mix separation technology for reclaimed asphalt pavement (RAP) and the performance of recycled coarse aggregates, the RAP is subjected to abrasion using a Los Angeles abrasion machine to obtain the recycled coarse aggregates. The abrasion rate and separation rate are used to evaluate the separation effectiveness. The abrasion rate and separation rate of RAP at different rotation counts are measured to determine the optimal process parameters. The micro-pore structure of the recycled coarse aggregates is observed using a fluorescence microscope. The recycled coarse aggregates, conventional limestone coarse aggregates from the same source, and extracted coarse aggregates are mixed with fine aggregates to prepare slurry mixtures for application in micro-surfacing. The influence of different materials on the performance of micro-surfacing is studied. The results show that the optimal process parameters for asphalt-aggregate separation are 900 rotations of the abrasion machine with a mass ratio of 1.0 between the abrasive balls and RAP. Residual asphalt still remains on the surface of the recycled coarse aggregates, which fills the open pores. Compared with the other two types of coarse aggregates, the slurry mixture prepared with recycled coarse aggregates exhibits prolonged mixing time, improved compatibility, increased resistance to water damage, lower asphalt-aggregate ratio, and effective reduction in emulsified asphalt consumption. Recycled coarse aggregates can be used as new aggregates in micro-surfacing, with superior performance and reduced construction costs.

**Keywords:** hot-mix separation; recycled coarse aggregate; micro-surfacing; mixing time

(责任编辑:王惠)