

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.03.007

旧沥青类型及掺量对再生沥青-钢渣集料黏附性能的影响

张志涛^{*1,2}, 崔宇^{2,3}, 韩方元^{2,3}, 袁正国⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏交建交通科技研究院有限公司, 宁夏 银川 750001; 4. 宁夏交通投资集团有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要:【目标】研究旧沥青类型及掺量对再生沥青与集料黏附性能的影响。【方法】分别模拟老化了沥青路面常用的基质沥青、SBS改性沥青及橡胶改性沥青。根据3种模拟老化沥青在不同旧沥青掺量(30%, 40%, 50%)、不同再生体系下的新旧沥青比例, 制备再生沥青样品。再生体系I中新沥青为基质沥青, 再生体系II中新沥青为SBS改性沥青。根据实际应用场景, 模拟同等老化程度的沥青混合料制备再生沥青混合料样品。采用水煮法及光电比色法分析再生沥青与集料的黏附行为; 采用冻融劈裂试验、肯塔堡飞散试验评价再生沥青混合料的黏附性能。【结果】沥青体系中, 再生沥青与集料黏附行为由强到弱排序为原始沥青、再生沥青II、再生沥青I、老化沥青, 且钢渣的黏附率优于石灰岩; 随着旧沥青掺量增大, 再生沥青与集料的黏附率基本呈降低的趋势; 再生体系II中, 旧沥青类型对黏附率的影响权重较小。混合料体系中, 当旧沥青掺量低于40%时, 随着旧沥青掺量增加, 再生沥青混合料的抗水损性能(黏附)增强, 而肯塔堡飞散残留仍随着旧沥青掺量的增加呈下降趋势。【结论】再生沥青与集料的黏附性能主要由再生沥青中占比大的沥青组分决定, 可采用改性新沥青来降低旧沥青对再生沥青与集料的黏附性能影响权重, 且旧沥青掺量建议不高于40%。

关键词: 道路工程; 黏附性能; 水煮法; 光电比色法; 再生沥青; 钢渣

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2025)03-0069-09

Influences of aged asphalt type and content on adhesive capacity of recycled asphalt and steel slag aggregate

ZHANG Zhitao^{*1,2}, CUI Yu^{2,3}, HAN Fangyuan^{2,3}, YUAN Zhengguo⁴

(1. Experimental Teaching Center of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Ningxia Communications Construction Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750002, China;
3. Research Institute of Transportation Technology of Ningxia Communications Construction, Yinchuan, Ningxia 750001, China;
4. Ningxia Transportation Investment Group Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750000, China)

Abstract: [Objective] The study investigates the influences of aged asphalt type and content on adhesive capacity of recycled asphalt and aggregate. [Method] The matrix asphalt, SBS modified asphalt and rubber modified asphalt commonly used for asphalt pavement were simulated to be aged. The recycled asphalt

收稿日期: 2024-08-06 修改日期: 2025-02-18

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BEG02044); 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03821); 银川市科技计划项目(2024KJRC005); 绿色低碳交通强国建设专项试点任务

作者简介(*通讯作者): 张志涛(1978-), 男, 宁夏银川人, 博士, 正高级工程师, 研究方向为沥青路面建养技术。(zhangzhitao@nxjtjs.com)

引用格式: 张志涛, 崔宇, 韩方元, 等. 旧沥青类型及掺量对再生沥青-钢渣集料黏附性能的影响[J]. 公路交通科技, 2025, 42(3): 69-77. ZHANG Zhitao, CUI Yu, HAN Fangyuan, et al. Influences of aged asphalt type and content on adhesive capacity of recycled asphalt and steel slag aggregate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(3): 69-77.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

specimens were made according to the new and aged asphalt ratio of 3 kinds of simulated asphalt with different aged asphalt contents (30%, 40%, 50%) and different regeneration systems. The new asphalt in regeneration system I is the matrix asphalt. The new asphalt in regeneration system II is SBS modified asphalt. According to the actual application scenario, the specimens of recycled asphalt mixture were prepared by simulating the asphalt mixture with same aging degree. The adhesive behavior between recycled asphalt and aggregate was analyzed with boiling method and photoelectric colorimetry method. The adhesive capacity of reclaimed asphalt mixture was evaluated with freeze-thaw splitting test and Kentucky fort scattering test. [Result] The adhesive behavior of reclaimed asphalt and aggregate in asphalt system is ranked from strong to weak as original asphalt, reclaimed asphalt II, reclaimed asphalt I and aged asphalt. The adhesion rate of steel slag is better than that of limestone. With the increase of aged asphalt content, the adhesion rate of reclaimed asphalt and aggregate basically decreases. In regeneration system II, the influence weight of aged asphalt type on adhesion rate is little. In the mixture system, when the aged asphalt content is less than 40%, the water loss resistance (adhesion) of recycled asphalt mixture is enhanced with the increase of aged asphalt content. While the Kentucky fort scattering residue is still decreasing with the increase of aged asphalt content. [Conclusion] The adhesive capacity of recycled asphalt and aggregate is mainly determined by the asphalt components that occupy large proportions in recycled asphalt. The modified new asphalt can be used to reduce the influence weight of aged asphalt on the adhesive capacity of recycled asphalt and aggregate. It is recommended that the aged asphalt content should not exceed 40%.

Key words: road engineering; adhesive capacity; boiling method; photoelectric colorimetry; recycled asphalt; steel slag

0 引言

随着“双碳”政策的实施及“美丽中国”建设工作的推进,厂拌热再生技术在公路建养领域的比重逐步上升,体系化再生工作已成为公路行业的亟需^[1-2]。然而,在中国道路工程建设多样化发展背景下,高性能、高模量、高耐久、高舒适性路面已占有沥青路面的很大比例,如橡胶沥青路面、高模量耐久型沥青路面、钢渣沥青路面、环氧沥青路面等。未来养护工程中废旧回收沥青路面包含多种筑路材料,将严重制约再生工作的高品质实施,因此针对不同沥青、矿物类型的厂拌热再生技术研究迫在眉睫^[3-4]。钢渣和废旧橡胶等固体废物与再生技术的结合利用逐渐成为研究热点。常建勇^[5]研究指出,废油类再生剂可补充 SBS 老化沥青因热氧作用损失的轻质组分,但无法修复断裂的 SBS 分子链。张召明等^[6]指出老化改性沥青再生后其流变性能得到了一定程度的重塑。王智超等^[7]研究结果表明,基质旧沥青的比例对再生混合料的高温性能为正相关作用,对水稳、低温和疲劳性能为负相关作用。田耀刚等^[8]指出,采用反应型化合物可修复 SBS 沥青老化后断裂的支链,进而提高再生沥青高低温性能。董桢^[9]研究表明,使用稳定型橡胶沥青再生旧沥青时,

可同步改善再生沥青混合料的高低温性能。祝谭雍等^[10]研究表明,采用复合改性橡胶沥青可显著提高再生沥青混合料的抗裂、抗疲劳能力。韩涛^[11]研究表明,随着钢渣比例的增加,钢渣基热再生沥青混合料的高温稳定性能增强。崔友超^[12]研究表明,SMA 钢渣再生沥青混合料高温稳定性能突出,但水稳定性能相对较差。结合上述研究现状,学者们对多样化筑路材料的再生研究多停留在单一沥青材料或单一矿料中,且鲜有对再生沥青混合料黏附性能的研究,缺乏对再生沥青路面早期松散病害的考虑^[13-17]。

本研究模拟老化了 3 种常见的道路用沥青——基质沥青、SBS 改性沥青、橡胶改性沥青。根据 3 种模拟老化沥青在不同旧沥青掺量(30%, 40%, 50%)、不同再生体系下的新旧沥青比例,制备再生沥青及其混合料样品。再生体系 I 中新沥青为基质沥青,再生体系 II 中新沥青为 SBS 改性沥青。分别研究旧沥青类型及掺量对不同再生体系沥青与集料(钢渣为试验组,石灰岩为对照组)的黏附性能影响规律。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 新沥青

本研究采用的新沥青为镇海 90# A 级道路石油沥

青 (ZH90), SBS-I-C 改性沥青 (SBSMA), 橡胶改性沥青 (ARMA)。新沥青技术指标如表 1 所示。

表 1 新沥青技术指标

Table 1 Technical indicators of new asphalt

检测项目	ZH90	SBSMA	ARMA
25 °C 针入度/(0.1 mm)	66.0	65.3	57.5
针入度指数	-0.81	6.20	4.0
软化点/°C	49.0	70.5	83.0
5 °C 延度/cm	—	39.4	28.2
180 °C 旋转黏度/(Pa·s)	—	0.25	2.20
弹性恢复/%	—	96.2	98.8

(2) 旧沥青 (模拟老化)

为降低因施工、储存等方式引起的旧沥青材料性能差异,本研究采用旋转薄膜烘箱试验 (RTFOT, 300 min) 室内模拟老化得到了 3 种老化沥青——老化基质沥青 (A90), 老化 SBS 改性沥青 (ASBS), 老化橡胶改性沥青 (AAR)。旧沥青技术指标如表 2 所示。

表 2 旧沥青技术指标

Table 2 Technical indicators of aged asphalt

检测项目	A90	ASBS	AAR
25 °C 针入度/(0.1 mm)	26.0	35.2	37.4
软化点/°C	59.5	64.0	67.5
5 °C 延度/cm	—	7.8	6.2
溶解度/%	99.5	99.4	—
180 °C 旋转黏度/(Pa·s)	—	1.61	4.85

(3) 集料

试验所用集料为整形石灰岩与钢厂的钢渣,集料技术指标如表 3 所示。

表 3 集料技术指标

Table 3 Aggregate technical indicators

性质	10~15 mm 石灰岩	10~15 mm 钢渣
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.713	3.484
压碎值/%	22.4	14.0
磨耗值/%	20.2	15.4
吸水率/%	0.51	1.80

1.2 试验方案

(1) 再生沥青的制备

本研究以回收公路废旧沥青材料 (RAP) 旧沥青含量及 AC-13 厂拌热再生沥青混合料配合比设计为参考值,分别确定了 30%, 40%, 50% RAP 掺量 (以下简称“掺量”) 下的新旧沥青比例为 2.1:1, 1.4:1, 1:1。

将旧沥青加热至 150 °C, 分别掺入相应比例的熔融新沥青; 于 140 °C (基质新沥青再生体系 I) 或

175 °C (SBS 改性新沥青再生体系 II) 烘箱中保温渗透 20 min; 在相同温度下以 2 000 r/min 的转速剪切 10 min, 制备得到均质化再生沥青样品, 样品编号中的 30, 40, 50 表示老化沥青的掺量为 30%, 40%, 50%。

(2) 再生沥青混合料级配设计

为减少材料性能差异,本研究再生沥青混合料级配设计中粒径 0~10 mm 的 RAP 材料为室内长周期模拟老化制备,其抽提沥青性能与模拟老化沥青针入度为同一量级,误差不超过 0.5 mm。不同再生沥青混合料均选用同种 AC-13 级配,控制空隙率为 (4±0.3)%, 确定最佳沥青总用量分别为:再生体系 I 为 4.4%, 再生体系 II 为 4.7%。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) 成型再生沥青混合料试件。

(3) 沥青-集料黏附性研究

本研究首先按照 JTG E20—2011 规范中 T 0616—1993 规定的水煮法对各再生沥青-粗集料黏附等级进行定性评价。利用光电比色法^[18]对再生沥青-细集料的黏附行为进行量化表征,综合评价不同再生沥青-集料的黏附行为。采用冻融劈裂试验、肯塔堡飞散试验间接评价再生沥青混合料的黏附性能,综合评价不同旧沥青类型、旧沥青掺量及再生体系对再生沥青-钢渣集料黏附性能的影响。

2 试验结果与分析

2.1 再生沥青-集料黏附行为评价

2.1.1 黏附等级

根据 JTG E20—2011 规范中水煮法试验内容,分别评价不同沥青样品与石灰岩和钢渣的黏附等级,测试结果如表 4 所示。不同样本的黏附等级存在差异。从沥青角度分析,黏附性等级由大到小依次为原始沥青、再生沥青 II、再生沥青 I、老化沥青。3 种

表 4 不同沥青样品与集料的水煮法黏附等级

Table 4 Adhesion grades of different asphalt specimens to aggregates by using boiling method

沥青状态	ZH90		SBSMA		ARMA	
	石灰岩	钢渣	石灰岩	钢渣	石灰岩	钢渣
原始	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0
老化	2.5	3	3.5	3.5	3.5	3.5
再生 I-30	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
再生 I-40	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
再生 I-50	3.0	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
再生 II-30	4.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
再生 II-40	4.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
再生 II-50	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

原始沥青 (ZH90, SBSMA, ARMA) 长周期老化后与集料的黏附等级均有所下降, 掺加新沥青再生后黏附性能增加。从集料角度分析, 钢渣的黏附性等级优于石灰岩, 但水煮法并不能明显区分不同再生沥青与集料的黏附性等级优劣, 含有改性组分时沥青与集料的黏附性等级基本相同。

2.1.2 黏附性

光电比色法试验可利用紫外可见光谱仪检测体系中待测溶液在不同浓度下的吸光度, 按照朗伯-比尔吸收光度定律, 绘制该溶液的吸光度-浓度标定曲线, 换算出体系中实际溶液浓度。配制浓度分别为 0.006 mg/mL, (0.006±0.002) mg/mL, (0.006±0.004) mg/mL 的酚藏花红染料溶液并测定其吸光度, 绘制波长-吸光度曲线 (见图 1)。由图 1 可知, 所测溶液在 554 nm 波长处的吸光度最大, 故以此峰值为测试结果拟合出酚藏花红溶液的浓度-吸光度标准曲线 (见图 2)。

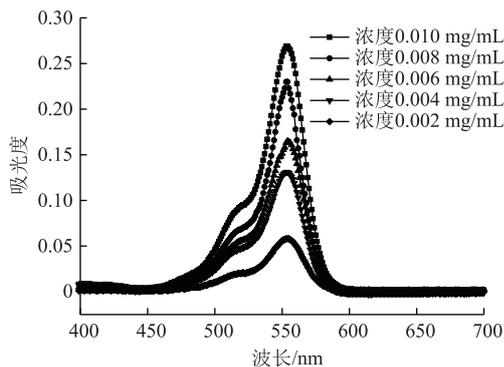


图 1 不同浓度酚藏花红染料溶液波长-吸光度曲线

Fig. 1 Wavelength-absorbance curves of phenosafranine dye solution with different concentrations

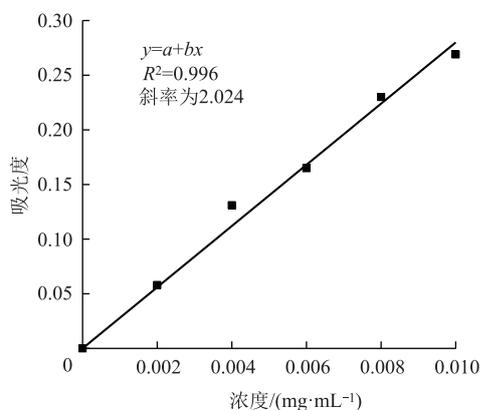


图 2 酚藏花红染料溶液浓度-吸光度标准曲线

Fig. 2 Concentration-absorbance standard curve of phenosafranine dye solution

在水介质中, 裸露集料会吸附酚藏花红染料溶液

中的有效成分, 使体系中溶液浓度降低, 裹附沥青会阻碍集料对染料成分的吸附。因此, 通过测算残留酚藏花红染料溶液吸光度, 可量化集料外沥青的剥落率, 间接表征界面黏附率。具体测试方法如下。

(1) 称取粒径为 2.36~4.75 mm 的 2 种集料 (石灰岩、钢渣), 洗净, 烘干至 180 °C 备用, 同时将各沥青加热至拌和温度下备用。

(2) 取 400 g 各类试验集料和 8 g 沥青, 均匀拌和至完全裹附状态, 在室温下分散摊铺冷却至少 24 h。

(3) 称取 102 g 冷却混合料、200 mL 酚藏花红染料溶液 (浓度为 0.01 mg/mL) 于 250 mL 锥形瓶中, 60 °C 水浴封闭加热 2 h。取 100 g 原集料为对照组。

(4) 取出试样后水平轻晃摇匀, 静置至室温, 取少量 (3~6 mL) 溶液采用紫外可见光谱仪测定其吸光度, 根据标准曲线换算其残留浓度。

(5) 集料与沥青的黏附率计算为:

$$A_1 = \left(1 - \frac{\alpha - \alpha_1}{\alpha - \alpha_0} \right) \times 100\% = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \times 100\%,$$

(1)

式中, A_1 为沥青与集料黏附率; α 为酚藏花红染料溶液初始浓度; α_0 为原集料吸附后残留溶液浓度; α_1 为混合料吸附后残留溶液浓度。不同再生沥青样品与集料的黏附率如图 3 所示。由图可知, 不同沥青与钢渣集料的黏附率均大于石灰岩对照组。

随着旧沥青掺量增大, 不同再生体系中再生沥青与集料的黏附率均呈降低的趋势, 当掺量高于 40% 时, 黏附率降幅增加。随着旧沥青掺量由 30% 增至 50%, 图 3 (a)~(f) 中, I 类再生沥青与集料的黏附率分别降低了 22.01%, 7.32%, 6.24%, 11.61%, 7.99%, 6.25%, II 类再生沥青与集料的黏附率分别降低了 14.46%, 10.95%, 9.96%, 11.02%, 10.56%, 9.47%。黏附率表示沥青样品在试验条件下于集料表面的剥落残留率, 这说明旧沥青掺量增多会降低沥青与集料的黏附能力。对比不同沥青的黏附率降幅可知, 旧沥青类型对 I 类再生体系的黏附行为影响较显著, 旧沥青为基质沥青时, 其黏附率下降幅度远大于改性沥青。这主要是因为基质沥青老化后其弹性组分大幅度增加, 再生过程中新基质沥青对其调和作用较低, 再生沥青性能更趋向于老化沥青; 而改性组分的高黏特性降低了再生沥青材料黏弹组分的区间范围, 导致旧沥青掺量

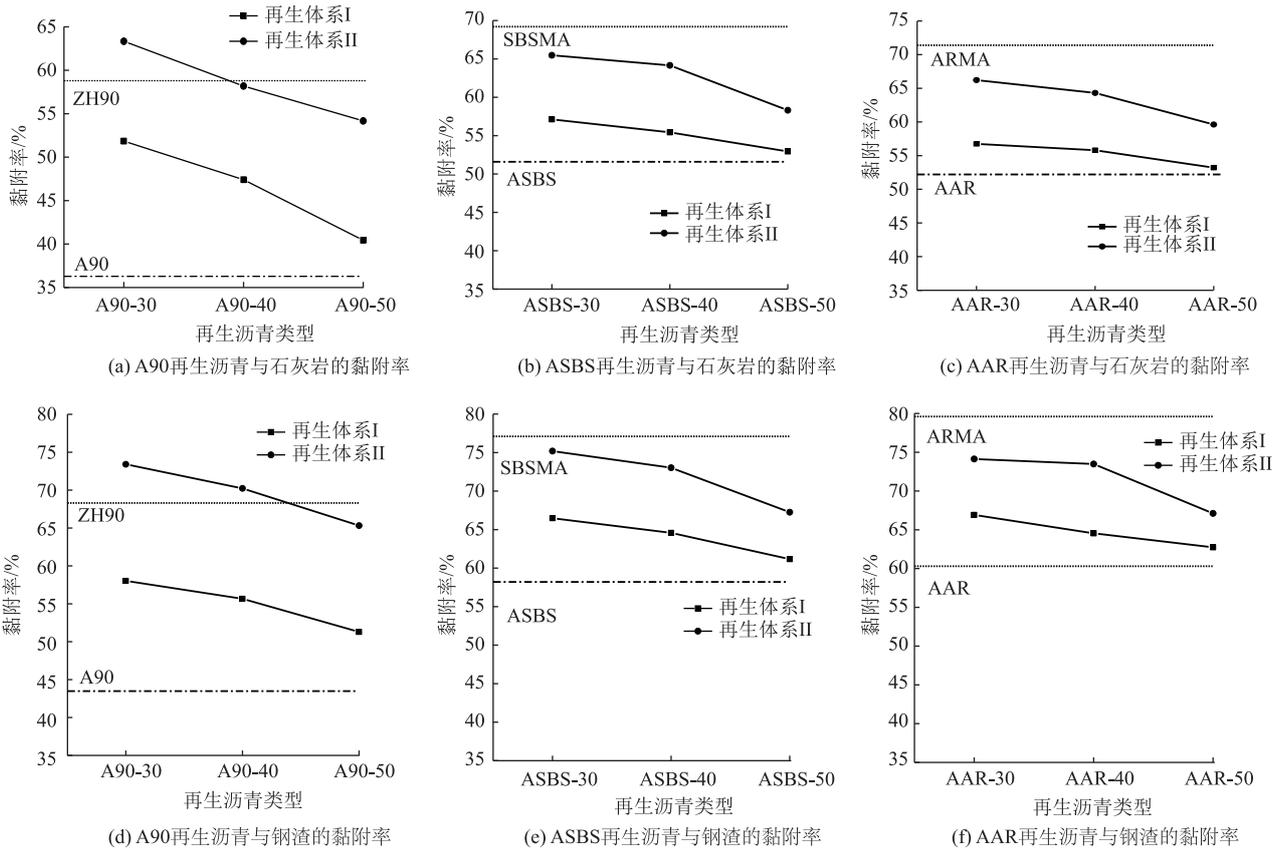


图3 不同再生沥青与集料的黏附率

Fig. 3 Adhesive rate of different recycled asphalt to aggregates

对再生改性沥青黏附率的影响不显著。因此,再生过程中可通过优选再生体系 II 来降低旧沥青对黏附行为的影响权重,且旧沥青掺量建议不高于 40%。

对比沥青在不同状态的黏附行为可以发现,黏附率由大到小排序为原始沥青、II 类再生沥青、I 类再生沥青、老化沥青,但该规律在旧沥青为基质沥青时存在特殊情况。由图 3 (a), (d) 可知,当旧沥青掺量低于 40% 时,II 类再生沥青的黏附率高于原始沥青,如 A90-30-II 再生沥青与石灰岩的黏附率较 ZH90 增长了 7.15%,与钢渣的黏附率较 ZH90 增长了 6.96%。这可能是因为沥青与集料的黏附行为可归于固-液界面的表面能理论,沥青的路易斯酸成分通过影响界面的酸碱作用,宏观控制着沥青与集料的黏附行为。当再生沥青中存在更多的改性组分时,沥青-集料界面的酸碱性更明显,表现为黏附率高于原始沥青。由此可见,再生沥青的黏附性能应以再生沥青混合物中占比大的沥青类型作为判断混合物类型的依据,当旧沥青掺量低于 40% 时,可优选改性沥青来改善旧基质沥青的黏附性能。

综合分析表明,水煮法与光电比色法在评估再生沥青与集料黏附行为时总体趋势保持一致,但水

煮法黏附等级多集中于 3~5 级而难以区分优劣。相比之下,通过黏附率指标,光电比色法可显著区分不同再生沥青与集料组合的黏附性能,如 ASBS-30-I, ASBS-40-I 与石灰岩及 ASBS-30-II, ASBS-40-II 与钢渣的水煮法黏附等级均为 4 级,但黏附率分别为 57.12%, 55.43%, 75.19%, 73.03%。

2.2 再生沥青混合料黏附性能评价

2.2.1 冻融劈裂强度比

混合料冻融劈裂试验主要用来评价沥青混合料试样在经历饱水冻融后强度的变化情况,可间接表征沥青-集料的黏附行为。不同再生沥青混合料的冻融劈裂强度比如图 4 所示。由图可知,不同再生沥青混合料的冻融劈裂强度比值由大到小排序依次为再生体系 II-钢渣混合料、再生体系 II-石灰岩混合料、再生体系 I-钢渣混合料、再生体系 I-石灰岩混合料。体系 II 类再生混合料冻融劈裂强度比均值为 90.37%,较体系 I 类再生混合料冻融劈裂强度比均值增长了 11.92%,增幅明显;钢渣再生沥青混合料冻融劈裂强度比均值为 86.3%,较石灰岩再生混合料冻融劈裂强度比均值增长了 1.69%,增幅不显著。结果表明,改性沥青的引入能够有效增强再生沥青

的黏附特性,而再生沥青混合料中新旧沥青组分的差异性并未对冻融劈裂强度比值产生显著影响;相比石灰岩对照组,钢渣再生沥青混合料拥有同水平的抗水损能力,黏附性能突出^[19]。因此,再生方案设计时新沥青可优先考虑改性沥青,而非相同类型沥青。

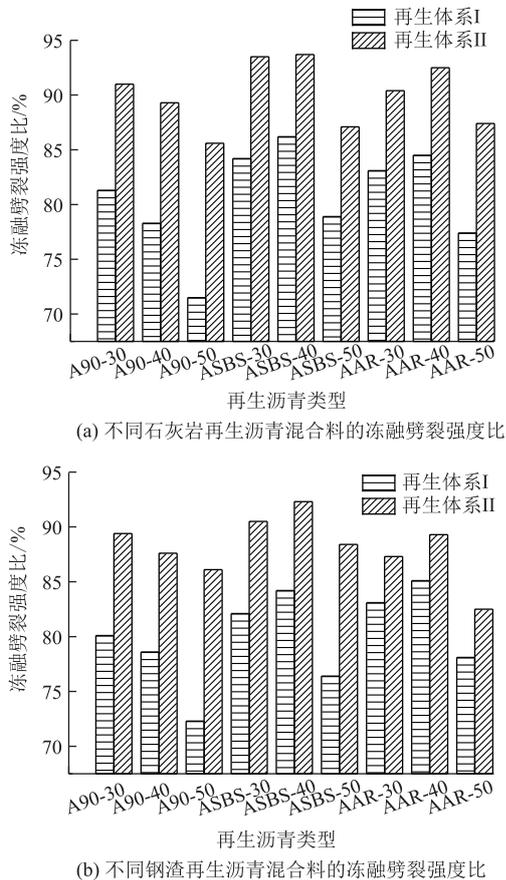


图4 不同再生沥青混合料的冻融劈裂强度比
Fig. 4 Freeze-thaw split strength ratio of different recycled asphalt mixtures

随着旧沥青掺量的增加,不同再生沥青混合料的冻融劈裂强度比值变化规律与再生沥青-集料的黏附行为变化规律存在差异。当旧沥青为基质沥青时,再生混合料的冻融劈裂强度比值随旧沥青掺量的增加而降低。当旧沥青为SBS改性沥青或橡胶沥青时,冻融劈裂强度比值随旧沥青掺量的增加呈先上升,后下降的趋势。当旧沥青掺量超过40%时,冻融劈裂强度比值均呈下降的趋势。这可能是由于沥青-集料黏附行为测试中,新旧沥青混溶为均质态,再生沥青性能随旧沥青掺量而正相关变化。再生沥青混合料体系中,旧集料外裹附沥青为多种形态,由内到外依次为旧沥青、新旧混合沥青、新沥青,其混合料的抗水损害能力受沥青内部断裂和沥青与集料

界面状态影响。随着旧沥青掺量的增加,混合料内部部分沥青组分极性上升,降低了水对沥青材料的破坏,表现为冻融劈裂强度比值上升,但极性增强也导致沥青与集料的界面黏附性降低。2种作用力下再生改性沥青混合料冻融劈裂强度比值在40%旧沥青掺量时达到峰值。由此可见,当新沥青采用改性沥青时,适量旧沥青(不高于40%掺量)可增加再生沥青混合料的黏附性能(抗水损性能)。

2.2.2 飞散残留率

肯塔堡飞散试验主要用来评价由于沥青用量或黏结性不足,在交通荷载作用下路表集料脱落而散失的程度。本研究以飞散残留率来表征再生沥青混合料的黏附性能,不同再生沥青混合料的飞散残留率如图5所示。

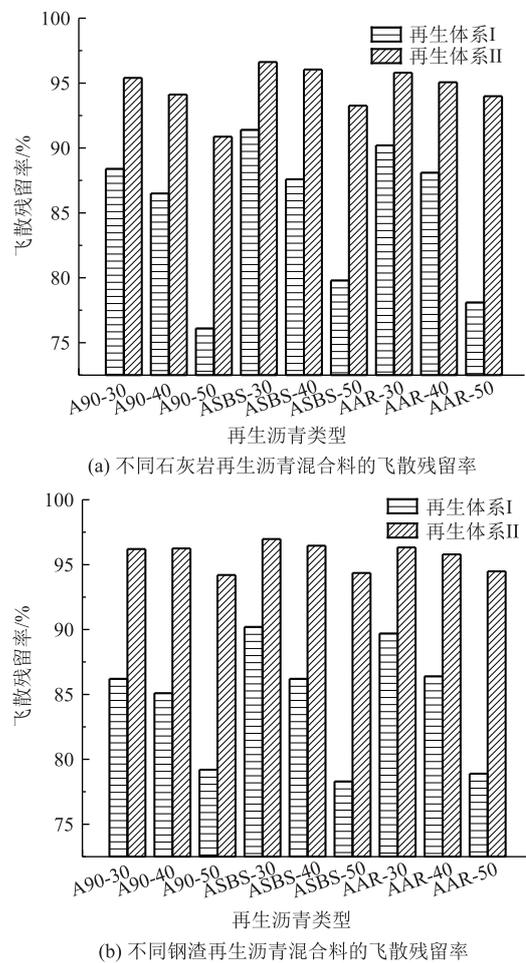


图5 不同再生沥青混合料的飞散残留率

Fig. 5 Dispersion residue rates of different recycled asphalt mixtures

由图5可知,不同钢渣再生沥青混合料的飞散残留较石灰岩混合料并无显著差异。再生体系II混合料的飞散残留远大于再生体系I,由大到小排序依

次为再生体系 II-钢渣混合料、再生体系 II-石灰岩混合料、再生体系 I-钢渣混合料、再生体系 I-石灰岩混合料。部分钢渣再生沥青混合料的飞散残留略低于石灰岩, 如 ASBS-50-I 钢渣混合料飞散残留率为 78.3%, ASBS-50-I 石灰岩混合料飞散残留率为 79.8%。这可能是由于相同水平黏附性下, 钢渣混合料具有更大的密度, 试验中试件承受的撞击功较大, 导致飞散残留小幅度降低。

随着旧沥青掺量由 30% 增至 50%, 不同再生沥青混合料的飞散残留率均呈下降趋势。再生体系对混合料飞散残留率有显著的影响, 再生体系 II 类混合料下降均值为 2.80%, 再生体系 I 类混合料下降均值为 12.71%; 旧沥青类型对混合料飞散残留无显著影响, A90-II, ASBS-II, AAR-II 石灰岩混合料分别下降 4.75%, 3.48%, 1.89%; A90-II, ASBS-II, AAR-II 钢渣混合料分别下降 2.08%, 2.69%, 1.92%。基质旧沥青与改性旧沥青影响权重无明显差异。这可能是由于肯塔堡飞散试验主要以撞击方式来评价沥青与集料的黏附性, 作用功由表层向内部扩散, 当旧沥青掺量较低时, 其混合料飞散残留率主要取决于新沥青与集料的界面黏结强度。

为探究钢渣集料与沥青的黏附机理, 本研究采用光谱仪测定石灰岩和钢渣这 2 种集料的化学组成, 如表 5 所示。采用扫描电子显微镜分析 2 种集料的形貌特性。采用红外光谱仪分析沥青在不同状态下的官能团变化情况。

表 5 不同集料的化学组成 (单位: %)

Table 5 Chemical composition of different aggregates (unit: %)

组成	石灰岩	钢渣
Na ₂ O	0.05	0.15
MgO	1.34	3.78
Al ₂ O ₃	1.51	8.36
SiO ₂	3.38	8.50
P ₂ O ₅	0.01	1.63
SO ₃	0.10	1.34
Cl	0.04	0.04
K ₂ O	0.47	0.08
CaO	51.07	40.48
TiO ₂	0.13	0.83
V ₂ O ₅	0.00	1.99
MnO	0.05	3.89
Fe ₂ O ₃	0.78	26.60
Nb ₂ O ₅	0	0.15
BaO	0	0.16
CaCO ₃	40.13	1.92

由表 5 可知, 参照组石灰岩以 CaO (51.07%) 和 CaCO₃ (40.13%) 为主要成分, 其 SiO₂ 含量仅为 3.38%, 具有典型碱性岩特征, 与沥青材料呈现优异的界面黏附性能。钢渣化学组成与石灰岩具有相似性, 其中 CaO 含量 (40.48%) 较石灰岩略低, 但富含 26.60% 的 Fe₂O₃, 整体呈碱性特征。这种碱性特质促使酸性沥青材料中的活性官能团与钢渣表面 Ca²⁺, Fe³⁺, Al³⁺ 等离子发生化学键吸附, 进而提高材料黏附性^[20], 宏观表现为与再生沥青作用时不易产生剥落 (见 2.1 节和 2.2 节)。

石灰岩宏观表面呈现致密光滑特征, 无显著开孔结构; 钢渣则具有显著粗糙表面形貌及宏观可见的多孔构造, 这种多尺度孔隙特征赋予其更高的沥青吸附潜力。微观尺度上, 石灰岩界面以低孔隙率为特征, 而钢渣表面存在水化反应产物及发育的疏松孔隙网络, 可能对其界面黏结性能产生负面影响^[21]。

不同状态下沥青的红外光谱图如图 6 所示。由图可知, 改性沥青与基质沥青的红外光谱图基本相似, 但在 966 cm⁻¹ 处有独特的 C=C 官能团, 不同沥青在不同状态下官能团的变化主要体现在 C=O (1 700 cm⁻¹), S=O (1 031 cm⁻¹), C=C (966 cm⁻¹)。为直观分析沥青在不同老化状态的官能团变化情况, 引入官能团指数 (见表 6), 以 40% 旧沥青掺量再生试验为例, 计算公式为:

$$I_{C=O} = A_{1700} / A_{2800-3000}, \quad (2)$$

$$I_{S=O} = A_{1031} / A_{2800-3000}, \quad (3)$$

$$I_{C=C} = A_{966} / A_{2800-3000}, \quad (4)$$

式中, $I_{C=O}$, $I_{S=O}$, $I_{C=C}$ 分别为 C=O, S=O, C=C 官能团指数; A_{1700} 为 C=O 官能团峰面积; A_{1031} 为 S=O 官能团峰面积; A_{966} 为 C=C 官能团峰面积; $A_{2800-3000}$ 为波长 2800~3000 cm⁻¹ 处官能团峰面积。

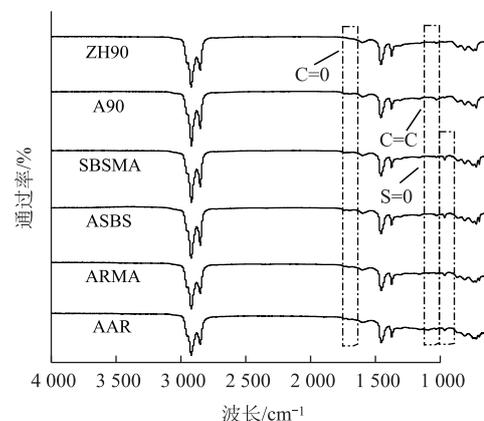


图 6 不同状态下沥青的红外光谱图

Fig. 6 Infrared spectra of asphalt in different states

表6 不同老化状态下沥青的官能团指数

Table 6 Functional group index of bitumen in different aging states

沥青种类	沥青状态	$I_{C=O}$	$I_{S=O}$	$I_{C=C}$
ZH90	原始	0.195	0.566	0
	老化	0.437	1.936	0
	再生 40%-I	0.264	1.242	0
	再生 40%-II	0.272	1.116	1.260
SBSMA	原始	0.196	0.401	1.620
	老化	0.479	0.655	1.536
	再生 40%-I	0.292	0.505	0.840
	再生 40%-II	0.284	0.430	1.572
ARMA	原始	0.306	0.354	1.435
	老化	0.477	0.463	1.384
	再生 40%-I	0.334	0.487	0.982
	再生 40%-II	0.412	0.412	1.503

由表6可知,沥青在原始—老化—再生过程中,其C=O指数和S=O指数呈先增大后减小的趋势,即在热氧耦合作用下,沥青中小分子量化合物经历挥发、氧化等过程致使大分子量化合物比例持续增大^[22]。添加新沥青补充轻质组分后,相应沥青胶体指数得到恢复,实现了沥青老化的逆过程。改性沥青中特有的C=C指数呈先减小后增加的趋势,这是因为改性剂在老化过程中发生了热氧降解,再生后改性组分得到补充。沥青老化后,极性分子比例上升,一定程度内降低了与水的结合作用,可增强与集料的黏附性,但沥青极性增强将削弱与极性集料表面的界面黏合力,综合作用下表现为黏附性削弱。

3 结论

本研究对比了3种老化沥青在不同再生环境下与钢渣集料的黏附特性,得到如下结论。

(1) 水煮法及光电比色法试验结果表明,不同状态沥青与集料的黏附性由大到小排序依次为原始沥青、再生沥青II、再生沥青I、老化沥青;钢渣的黏附率优于石灰岩,光电比色法可量化评价再生沥青与集料的黏附率。

(2) 随着旧沥青掺量增大,再生沥青与集料的黏附率均呈降低的趋势。当再生沥青中新、旧组分均为基质沥青时,旧沥青掺量对再生沥青-集料的黏附性能有较大的影响;当再生沥青中存在改性组分时,其黏附性能随旧沥青掺量的变化幅度较小。

(3) 再生沥青的黏附性能应以再生沥青混合物中占比大的沥青类型作为判断混合物黏附特性的依据。较低比例的旧沥青对再生沥青黏附性的影响权

重较小。再生过程中可优选改性沥青来改善旧沥青的黏附性能,且旧沥青掺量建议不高于40%。

(4) 当旧沥青掺量低于40%时,随着旧沥青掺量增加,再生沥青混合料的抗水损害(黏附)能力增强。混合料试验结果表明,不同再生沥青混合料的黏附性能主要由沥青老化程度决定,且掺加改性沥青组分可提高再生沥青混合料的黏附性能。

参考文献:

References:

- [1] 仰建岗,黄锦化,高杰,等.温拌剂对再生沥青与沥青混合料性能影响及作用机理[J].公路交通科技,2023,40(7):1-10.
YANG Jiangan, HUANG Jinhua, GAO Jie, et al. Influence and mechanism of warm mix agent on performance of recycled asphalt and asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (7): 1-10.
- [2] 仪明伟,肖月,林翔,等.沥青路面典型养护施工全过程直接能耗及碳排放量化分析[J].材料导报,2024,38(20):111-121.
YI Mingwei, XIAO Yue, LIN Xiang, et al. Research on direct energy consumption and carbon emission of asphalt pavement maintenance engineering [J]. Materials Reports, 2024, 38 (20): 111-121.
- [3] 王晨.多来源RAP料性能评价及超高比例厂拌热再生利用技术研究[D].南京:东南大学,2021.
WANG Chen. Research on multi-source RAP materials performance evaluation and ultra-high-proportion plant produced reclaimed asphalt pavement mixture technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [4] GAO J, YANG J G, YU D, et al. Reducing the variability of multi-source reclaimed asphalt pavement materials: A practice in China [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122389. (2021-04-05) [2024-07-05]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122389>.
- [5] 常建勇.不同废油对老化SBS沥青流变性能的影响[J].公路交通科技,2023,40(6):33-40.
CHANG Jianyong. Effects of different waste oils on the rheological properties of aged SBS asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (6): 33-40.
- [6] 张召明,张奥星,王晓阳.基于灰熵关联分析法的再生沥青流变特性研究[J].合成材料老化与应用,2024,53(2):29-33.
ZHANG Zhaoming, ZHANG Aoxing, WANG Xiaoyang. Research on rheological properties of recycled asphalt based on gray entropy correlation analysis [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2024, 53 (2): 29-33.
- [7] 王智超,胡槟,沈明燕,等.基于路用性能的热再生

- 沥青混合料 RAP 掺量研究 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (1): 10-17.
- WANG Zhichao, HU Bin, SHEN Mingyan, et al. Study on RAP content of hot recycled asphalt mixture based on road performance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (1): 10-17.
- [8] 田耀刚, 卯爱军, 阎宝宝, 等. 基于 SBS 支链活性修复的老化沥青再生性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (12): 12113-12118.
- TIAN Yaogang, MAO Aijun, YAN Baobao, et al. Study on the regeneration performance of aged asphalt based on SBS branched chain activity repair [J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54 (12): 12113-12118.
- [9] 董桢. 稳定型橡胶沥青与热再生技术复合应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- DONG Zhen. Research on the composite applications between stabilized asphalt rubber and technology of hot recycling in plant [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [10] 祝谭雍, 段卫党, 许兵, 等. 基于厂拌热再生的复合改性橡胶沥青应力吸收层抗裂性能研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (12): 8-16.
- ZHU Tanyong, DUAN Weidang, XU Bing, et al. Study on crack resistance of stress absorbing layer of compound modified rubber asphalt based on plant-mixing hot recycling technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (12): 8-16.
- [11] 韩涛. 基于活化-融合行为的钢渣基热再生沥青混合料性能研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- HAN Tao. Performance study of steel slag-based hot recycled asphalt mixture based on activation-blending [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023.
- [12] 崔友超. 钢渣与沥青混合料回收料用于 SMA 优化设计与性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2024.
- CUI Youchao. Study on optimization design and performance of SMA using steel slag and reclaimed asphalt [D]. Jinan: Shandong University, 2024.
- [13] SHAKER H, AMERI M, ALIHA M R M, et al. Evaluating low-temperature fracture toughness of steel slag aggregate-included asphalt mixture using response surface method [J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 370: 130647. (2023-03-17) [2024-07-05]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130647>.
- [14] 刘炳华, 闫新勇, 丁润铎, 等. 花岗岩-钢渣沥青混合料抗滑衰变特性研究 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (4): 16-25.
- LIU Binghua, YAN Xinyong, DING Runduo, et al. Study on anti-slip decay characteristics of granite-steel slag asphalt mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40 (4): 16-25.
- [15] 柳力, 朱晓明, 刘朝晖, 等. 钢渣掺量对橡胶沥青混合料 ARAC-13 性能的影响 [J]. 材料导报, 2023, 37 (10): 66-72.
- LIU Li, ZHU Xiaoming, LIU Zhaohui, et al. Effect of steel slag content on performance of rubber mixture ARAC-13 [J]. Materials Reports, 2023, 37 (10): 66-72.
- [16] WANG L, CHEN L, LI Y X, et al. Adhesion characteristics of warm-mix crumb rubber-modified asphalt-steel slag interface under water erosion [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36 (9). (2024-06-21) [2024-07-05]. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-1798>.
- [17] 徐宝贵, 卢桂灵, 韦金城, 等. 植物油再生剂老化时间对再生沥青与集料黏附性的影响研究 [J]. 公路, 2023, 68 (9): 35-42.
- XU Baogui, HU Guiling, WEI Jincheng, et al. Research on the effect of aging time of vegetable oil regenerator on adhesion between recycled bitumen and aggregates [J]. Highway, 2023, 68 (9): 35-42.
- [18] 符策源, 张德文, 资西阳, 等. 热氧老化对沥青与集料界面黏附性的影响 [J]. 公路, 2023, 68 (2): 25-32.
- FU Ceyuan, ZHANG Dewen, ZI Xiyang, et al. Effect of thermal oxidative aging on interfacial adhesion between asphalt and aggregate [J]. Highway, 2023, 68 (2): 25-32.
- [19] 惠迎新, 王欣宇, 徐新强, 等. 钢渣沥青混合料在道路工程中的应用 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (2): 22-38.
- HUI Yingxin, WANG Xinyu, XU Xinqiang, et al. Application of steel slag asphalt mixture for road engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (2): 22-38.
- [20] 李松, 张彩利, 丁维哲, 等. 钢渣-沥青界面黏附特性研究 [J]. 大连理工大学学报, 2022, 62 (3): 254-262.
- LI Song, ZHANG Caili, DING Weizhe, et al. Research on adhesion characteristics of steel slag asphalt interface [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62 (3): 254-262.
- [21] 王利波, 吕维前, 王雨露, 等. 钢渣集料表面形貌对沥青吸收与黏附性能的影响分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (33): 14406-14419.
- WANG Libo, LÜ Weiqian, WANG Yulu, et al. Effects of surface morphology of steel slag aggregates on asphalt absorption and adhesion performance [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23 (33): 14406-14419.
- [22] 陈华鑫, 崔宇, 尹艳平, 等. 再生剂类型对沥青抗老化性能的影响 [J]. 中国科技论文, 2022, 17 (6): 589-594.
- CHEN Huaxin, CUI Yu, YIN Yanping, et al. Influence of regeneration agent types on the aging resistance properties of asphalt [J]. China Sciencepaper, 2022, 17 (6): 589-594.