

生物油再生剂对温拌再生沥青混合料性能影响

付光辉¹,徐钦升²,张铭剑¹,芮照诚^{2*},郑世瑞¹,狄恩州²,金钊¹

1. 齐河恒晟公路工程有限责任公司,山东 德州 251120; 2. 山东省交通科学研究院,山东 济南 250102

摘要:为提高废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)的再生利用水平,降低热再生过程中回收沥青的二次老化,保证再生沥青混合料的路用性能,在 70# 基质沥青中掺加回收沥青、生物油再生剂和温拌剂制备温拌再生沥青胶结料,回收沥青与基质沥青的质量比分别为 0、20%、40%、60%、80%,生物油再生剂的质量为回收沥青质量的 10%,温拌剂的质量为基质沥青与回收沥青总质量的 2%。通过旋转黏度试验、多应力蠕变恢复试验和线性振幅扫描试验,测量温拌再生沥青胶结料高、低温下的流动特性、抗变形能力和抗疲劳性能;制备不同 AC-20 型温拌再生沥青混合料,通过车辙试验、低温小梁试验、冻融劈裂试验和四点弯曲疲劳试验等,测量 AC-20 型温拌再生沥青混合料的高温性能、低温性能、水稳定性和疲劳寿命。试验结果表明:随回收沥青与基质沥青质量比的增大,温拌再生沥青胶结料的旋转黏度增大,剪切应变减小,蠕变恢复率增大,不可恢复蠕变柔量减小,剪切应力随剪切应变的增大而先增大后减小,峰值应力增大,疲劳寿命减小,对应变的敏感性降低,高温抗变形能力比未加入生物油再生剂的沥青胶结料略降,疲劳性能得到有效改善;随回收沥青与基质沥青质量比的增大,AC-20 型温拌再生沥青混合料的动稳定度增大,车辙深度减小,弯曲劲度模量增大,破坏弯拉应变减小,冻融前后劈裂强度减小,冻融强度劈裂比减小,疲劳寿命减小,高温抗变形能力比未加入生物油再生剂的沥青混合料降低,低温抗变形能力、抗冻能力和抗疲劳能力显著提高。在回收沥青与基质沥青质量比大于 60% 时,AC-20 型温拌再生沥青混合料的路用性能仍可达到普通热拌沥青混合料水平。

关键词:道路工程;温拌再生沥青混合料;生物油再生剂;高温性能;低温性能;疲劳寿命

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0052-07

引用格式:付光辉,徐钦升,张铭剑,等. 生物油再生剂对温拌再生沥青混合料性能影响[J]. 山东交通学院学报,2025,33(4):52-58.

FU Guanghui, XU Qinsheng, ZHANG Mingjian, et al. Influence of bio-oil regenerant on the performance of warm-mixed reclaimed asphalt mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4): 52-58.

0 引言

截至 2024 年底,我国公路总里程为 549.04 万 km,进入建养并重阶段^[1-2]。路面养护过程中产生大量的废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)^[3]。目前 RAP 的再生利用率仅为 30%~40%^[4-6],再生利用过程中会造成回收沥青的再次老化^[7-9],导致路用性能降低。采用温拌再生技术可在较低温度下实现沥青混合料的拌和、摊铺及碾压等工序,在一定程度上减少回收沥青的二次老化,减少道路建设中的碳排放,与交通运输领域的绿色低碳发展理念高度契合,成为道路工程领域的研究热点之一。

田耀刚等^[10]研究回收沥青在沥青混合料中的质量分数对温拌再生沥青混合料的影响,综合各项路用性能,确定回收沥青的最佳质量分数为 30%。肖庆一等^[11]研发高质量分数回收沥青专用的温拌再生剂,可在最佳拌和温度为 148℃ 条件下完成再生沥青混合料的拌和及碾压,且可达到热拌沥青混合料的

收稿日期:2024-07-14

第一作者简介:付光辉(1987—),男,山东齐河人,高级工程师,主要研究方向为道路工程材料,E-mail:419748330@qq.com。

***通信作者简介:**芮照诚(1997—),男,山东商河人,工程师,工学硕士,主要研究方向为道路工程,E-mail:rui_zhaocheng@163.com。

力学性能水平。杨巍等^[12]通过冻融、半圆弯曲等试验发现,在回收沥青质量分数相同的条件下,温拌再生沥青混合料的耐久性能不及热拌沥青混合料。鲁承慧等^[13]、仰建岗等^[14]、王鑫洋等^[15]分析温拌再生过程中新旧沥青的融合特性、作用机理及混合料性能,明确温拌再生技术优势。

针对 RAP 再生利用率普遍偏低,或在高掺量水平时再生沥青混合料的路用性能难以保证的问题,本文基于温拌再生技术,分别制备含生物油再生剂的再生沥青胶结料和温拌再生沥青混合料,并通过沥青及其相应沥青混合料的常规/非常规性能试验综合评价路用性能,以期为 RAP 在温拌沥青混合料中的大规模、高质量分数再生利用提供依据。

1 试验原材料及试验方案

1.1 原材料

RAP 来自山东某高速改扩建项目路面,粒径分别为 0~10 mm 和>10~20 mm,RAP 的级配如表 1 所示,经试验测得其所含沥青的质量分数分别为 4.52%和 2.48%,回收沥青的技术指标如表 2 所示。以 70[#]基质沥青作为对照组沥青,70[#]基质沥青技术指标如表 3 所示。新集料为石灰石,粒径分别为 0~5 mm、>5~10 mm 和>10~20 mm,筛分试验结果如表 4 所示。

表 1 RAP 的筛分试验结果

筛孔边长/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
粒径 0~10 mm 的通过率/%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	73.0	48.5	36.9	25.8	17.0	12.2	8.6
粒径>10~20mm 的通过率/%	100.0	100.0	98.6	89.2	51.0	19.1	14.7	12.6	10.4	8.1	6.3	4.4

表 2 回收沥青技术指标

项目	针入度 ^① /(0.1 mm)	延度 ^② /cm	软化点/℃
试验结果	31.4	7.2	61.5
规范要求 ^[16]	60.0~80.0	≥20.0	≥46.0

①25℃;②10℃。

表 3 70[#]基质沥青的技术指标

项目	针入度 ^① /(0.1 mm)	延度 ^② /cm	软化点/℃	闪点/℃	布氏黏度 ^③ /(Pa·s)	弹性恢复率/%
试验结果	68.6	77.2	51.5	273	0.4	92
规范要求 ^[16]	60.0~80.0	≥20.0	≥46.0	≥260		

①25℃;②10℃;③135℃。

表 4 新集料的筛分试验结果

筛孔边长/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
粒径>10~20 mm 的集料通过率/%	100.0	94.4	72.1	49.7	12.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
粒径>5~10 mm 的集料通过率/%	100.0	100.0	100.0	100.0	93.7	12.6	3.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
粒径 0~5 mm 的集料通过率/%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	82.9	54.2	36.2	21.2	14.0	9.8

通过快速热裂解工艺处理稻壳、稻秸得到植物基生物油再生剂,外观为淡黄色液体;表面活性类 Evotherm 型温拌剂的密度为 1.028 g/cm³。

1.2 试验方案

1.2.1 再生沥青胶结料

为研究生物油再生剂、温拌剂对再生沥青胶结料性能的影响,在 70[#]基质沥青中掺加回收沥青、生物

油再生剂和温拌剂制备再生沥青胶结料,回收沥青与基质沥青的质量比 w 分别为 0、20%、40%、60%、80%,生物油再生剂的质量为回收沥青质量的 10%,温拌剂的质量为回收沥青与基质沥青总质量的 2%,并在温度 180 °C 下搅拌 1 h,使各组分充分混合,制备得到不同再生沥青胶结料,对应试样编号分别为 A00、AW20、AW40、AW40R、AW60R、AW80R,其中,A 表示再生沥青胶结料试样,W 表示再生沥青胶结料试样中已添加 Evotherm 型温拌剂,数字如 00、20、40、60、80 表示试样中已添加与基质沥青的质量比为 0、20%、40%、60%、80%的回收沥青,R 表示试样中已添加生物油再生剂。通过旋转黏度试验、多应力蠕变恢复试验、线性振幅扫描试验,测量再生沥青胶结料高温下的流动特性、抗变形能力、抗疲劳性能。

1.2.2 温拌再生沥青混合料

采用 AC-20 级配类型,制备不同温拌再生沥青混合料,回收沥青与基质沥青质量比 w 分别为 0、20%、40%、60%、80%,生物油再生剂的质量为回收沥青质量的 10%,温拌剂的质量为回收沥青与基质沥青总质量的 2%,对应试样编号分别为 M00、MW20、MW40、MW40R、MW60R、MW80R,其中,M 表示温拌再生沥青混合料试样,其他数字、字母与 1.2.1 节含义一致。通过沥青混合料车辙试验、小梁低温弯曲试验、冻融劈裂试验和四点弯曲疲劳试验,验证 AC-20 型温拌再生沥青混合料的高温性能、低温性能、水稳定性和疲劳寿命。不同回收沥青与基质沥青质量比的沥青混合料合成级配曲线如图 1 所示。随着回收沥青与基质沥青质量比的增大,筛孔边长分别为 13.2、16.0、19.0 mm 等的沥青混合料通过率增大,这是由于在车辆荷载反复作用下,沥青路面中的集料颗粒被压碎,使得沥青混合料的合成级配整体偏细^[17]。

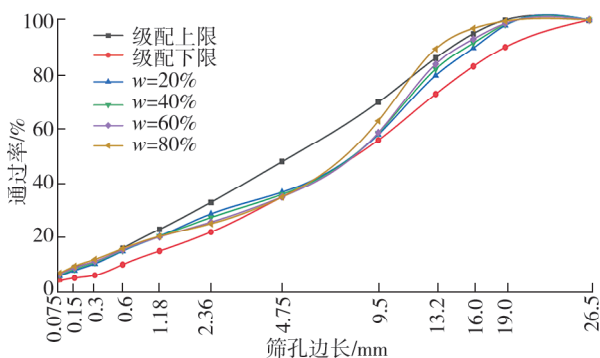


图 1 不同沥青混合料级配曲线

2 试验结果分析

2.1 沥青流变性能

2.1.1 旋转黏度试验

旋转黏度反映高温下沥青的流动特性,旋转黏度越大,在剪切力作用下流体流动的阻力越强,流体的黏稠度越高,流动性越差。根据文献[18]对再生沥青胶结料进行旋转黏度试验,试验温度为 110 °C,编号为 A00~AW80R 的再生沥青胶结料的旋转黏度分别为 2.547、1.584、1.719、0.927、1.062、1.233 Pa·s。

温拌再生沥青胶结料的旋转黏度随 w 的增大而增大。AW20 的旋转黏度比 A00 减小 37.8%,回收沥青在自然环境中长期老化,轻质组分相对减少^[18],延展性降低,黏度增大,Evotherm 型温拌剂起到显著的降黏作用。AW40R 的旋转黏度比 AW40 减小 46.1%。AW40R、AW60R、AW80R 的旋转黏度分别比 A00 减小 63.6%、58.3%、51.6%,降黏效果显著。通过 Evotherm 型温拌剂和生物油再生剂的共同作用,可提高 RAP 再生利用率。

2.1.2 多应力蠕变恢复试验

根据文献[18]对温拌再生沥青胶结料进行多应力蠕变恢复试验,应力为 3.2 kPa,评价其高温抗变形能力,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知:随 w 的增大,沥青胶结料的剪切应

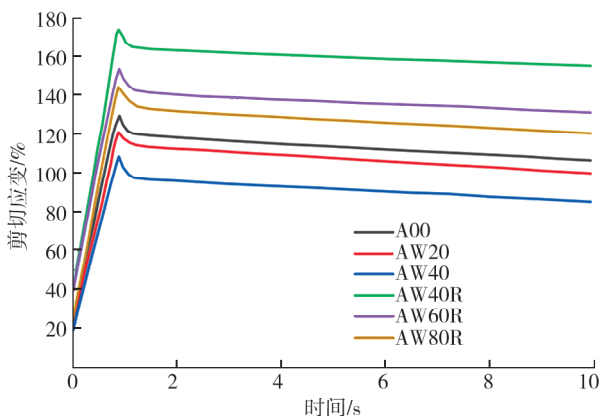


图 2 应力为 3.2 kPa 条件下不同温拌再生沥青胶结料的应变曲线

变减小,沥青逐渐变硬;加入生物油再生剂后,再生沥青胶结料的剪切应变比未加生物油再生剂的沥青胶结料显著增大,抗变形能力减弱。原因是向沥青中补充生物油再生剂后,沥青的黏性降低,在相同的荷载作用下变形增大。

编号为 A00~AW80R 的沥青胶结料的蠕变恢复率分别为 1.90%、1.91%、2.01%、1.14%、1.30%、1.49%,沥青胶结料的变形恢复能力随 w 的增大而增大;加入生物油再生剂后,变形恢复能力略降,高温性能降低,原因是生物油再生剂主要为再生沥青提供轻质组分,弹性降低,故蠕变恢复率减小。

编号为 A00~AW80R 的沥青胶结料的不可恢复蠕变柔量分别为 4.20、4.36、3.25、8.41、6.34、5.07 kPa^{-1} 。沥青胶结料的不可恢复蠕变柔量随 w 的增大而减小,表明其高温抗车辙性能增强。AW40R 的不可恢复蠕变柔量比 AW40 增大 158.7%,再生沥青的高温抗车辙性能降低。AW40 的高温抗车辙能力最好,AW20 和 AW80R 的高温性能与基质沥青相近。

2.1.3 线性振幅扫描试验

根据文献[18]对沥青胶结料进行线性振幅扫描试验,评价其抗疲劳性能,沥青胶结料的应力-应变曲线如图3所示。

由图3可知:所有沥青胶结料试样的剪切应力随剪切应变的增大而先增大后减小,存在峰值应力;随 w 的增大,再生沥青胶结料试样中的峰值剪切应力增大;AW20 和 AW40 的峰值剪切应力较 A00 分别增大 3.86%、8.37%,原因是掺入回收沥青后再生沥青变硬,在相同应变荷载作用下剪切应力更大,更易受荷载破坏;加入生物油再生剂后再生沥青胶结料的剪切应力比未加入生物油再生剂的沥青胶结料小。加入生物油再生剂后,沥青胶结料的峰值应力增大,峰值宽度增大,表明沥青胶结料对应变的敏感性降低,疲劳性能得到有效改善。

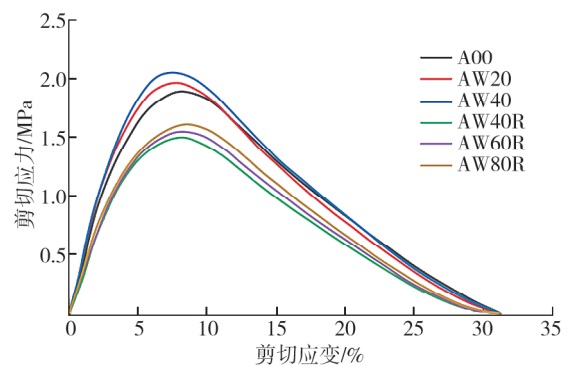


图3 不同沥青胶结料的应力-应变曲线

应变水平为 2.5%,编号为 A00~AW80R 的沥青胶结料的疲劳寿命分别为 11 410、10 852、9 702、16 114、13 780、12 874 次。AW20、AW40 的疲劳寿命比 A00 分别减小 4.9%、15.0%。加入生物油再生剂后,再生沥青胶结料的疲劳寿命显著提高,AW40R 的疲劳寿命比 AW40 增大 66.1%。AW80R 的疲劳性能优于 A00,生物油再生剂可显著改善沥青胶结料的抗疲劳性能。

2.2 沥青混合料的路用性能

2.2.1 车辙试验

根据文献[18],在温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 下,对不同 AC-20 型温拌再生沥青混合料进行车辙试验,结果如表5所示。

由表5可知:不同 AC-20 型温拌再生沥青混合料的动稳定度随 w 的增大而增大,MW20、MW40 的动稳定度分别比 M00 增大 16.0%、37.9%;掺入生物油再生剂后,温拌再生沥青混合料的动稳定度略降,MW40R 的动稳定度比 MW40 减小 33.6%,温拌再生沥青混合料的高温性能有一定衰减。原因是掺入生物油再生剂后,回收沥青中的轻质组分(饱和分、芳香分)增多,沥青质、胶质重质组分减少,可软化回收沥青,AC-20 型温拌再生沥青混合料的高温性能降低^[19-21];车辙深度与动稳定度负相关,随 w 的增大而减小;加入生物油再生剂后,车辙深度增大。

2.2.2 低温小梁试验

根据文献[18]对不同 AC-20 型温拌再生沥青混合料在温度为 -10 $^{\circ}\text{C}$ 下进行低温小梁试验,结果如

表5 不同 AC-20 型温拌再生沥青混合料的车辙试验结果

试样编号	动稳定度/(次 $\cdot\text{mm}^{-1}$)	车辙深度/mm
M00	1 352	3.905
MW20	1 569	3.237
MW40	1 864	1.965
MW40R	1 238	4.103
MW60R	1 379	3.734
MW80R	1 518	3.167

表 6 所示。

由表 6 可知:不同 AC-20 型沥青混合料的破坏弯拉应变试验结果随 w 的增大而减小,MW20 和 MW40 试样的破坏弯拉应变分别比 M00 减小 10.5%、21.3%,弯曲劲度模量分别比 M00 增大 10.7%、25.3%,低温性能降低;MW40R 的破坏弯拉应变比 MW40 增大 33.7%,表明生物油再生剂可显著提高再生沥青混合料的低温性能;MW40 的破坏弯拉应变小于 $2\,800.0\times10^{-6}$,其他试样均满足文献[16]的技术指标要求。

2.2.3 冻融劈裂试验

根据文献[18],对不同 AC-20 型沥青混合料进行冻融劈裂试验,结果如表 7 所示。

由表 7 可知:不同 AC-20 型沥青混合料的冻融劈裂强度比随 w 的增大而减小;MW40 试样的冻融劈裂强度比小于 75.0%,不满足文献[16]要求,其他试样均满足文献[16]要求;加入生物油再生剂后,MW40R 试样的冻融劈裂强度比比 MW40 增大 21.5%,抗冻性能显著提高,表明生物油再生剂明显改善沥青混合料的抗冻融性能。

2.2.4 四点弯曲疲劳试验

根据文献[18]对不同 AC-20 型沥青混合料进行疲劳试验,结果如表 8 所示。由表 8 可知:不同 AC-20 型沥青混合料的疲劳寿命随 w 的增大而减小;应变水平为 700×10^{-6} 时,MW20 和 MW40 的疲劳寿命分别比 M00 减小 9.2%、21.9%,加入生物油再生剂后,温拌再生沥青混合料的疲劳寿命明显提高,MW40R 的疲劳寿命比 MW40 增大 86.7%,MW60R 和 MW80R 的疲劳性能均优于 M00。加入生物油再生剂可软化沥青,降低沥青混合料的整体刚度,吸收能量更强,延迟微裂纹的产生,提高抗疲劳性能^[22-23]。将试验数据进行回归分析,如图 4 所示。由图 4 可知:在两种应变水平下,二者的拟合优度均大于 0.900 0,可根据 AC-20 型沥青的疲劳寿命预估沥青混合料的疲劳寿命。

表 8 不同 AC-20 型沥青混合料的疲劳试验结果

试样编号	疲劳寿命/次	
	应变水平 为 500×10^{-6}	应变水平 为 700×10^{-6}
M00	210 319	51 880
MW20	191 335	38 152
MW40	164 424	25 950
MW40R	306 931	82 821
MW60R	285 141	78 245
MW80R	258 775	63 973

表 6 不同 AC-20 型沥青混合料的低温小梁试验结果

试样编号	破坏弯拉应变/ 10^{-6}	弯曲劲度模量/MPa
M00	3 256.8	2 933.4
MW20	2 916.3	3 246.8
MW40	2 563.9	3 676.3
MW40R	3 428.7	2 842.7
MW60R	3 236.5	2 953.8
MW80R	3 108.4	3 012.1

表 7 不同 AC-20 型沥青混合料的冻融劈裂试验结果

试样编号	劈裂强度/MPa		冻融劈裂 强度比/%
	冻融前	冻融后	
M00	0.843	0.682	80.9
MW20	0.776	0.679	87.5
MW40	0.726	0.533	73.5
MW40R	0.923	0.823	89.2
MW60R	0.865	0.745	86.1
MW80R	0.803	0.671	83.5

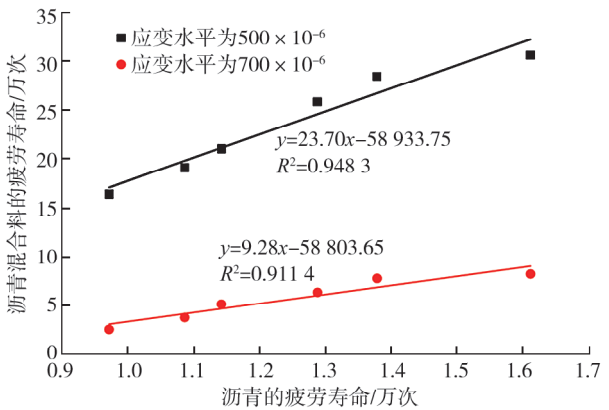


图 4 沥青-沥青混合料疲劳寿命相关性分析

3 结论

1)随回收沥青与基质沥青的质量比的增大,再生沥青胶结料的旋转黏度增大,蠕变恢复率增大,不可

恢复蠕变柔量减小,抗变形及变形恢复能力降低,在回收沥青与基质沥青的质量比达到 80%时,其流变性能与 70[#]基质沥青的流变性能相当。

2) AC-20 型温拌再生沥青混合料的高温性能随回收沥青与基质沥青的质量比的增大而提高,低温性能、抗水损性能降低;加入生物油再生剂后,高、低温性能和抗水损性能均存在一定程度的改善,且当回收沥青与基质沥青的质量比不小于 60%时,AC-20 型温拌再生沥青混合料的动稳定度、破坏弯拉应变等路用性能可达到热拌沥青混合料水平。

3) 生物油再生剂可明显改善温拌再生沥青胶结料及其温拌再生沥青混合料的疲劳性能,且二者间存在显著的线性关系。

参考文献:

- [1] 李海莲,司金忠,贾卫东,等. 基于三级养护标准的沥青路面预养护方案多目标加权灰靶决策[J]. 北京工业大学学报,2024, 50(5): 591-599.
- [2] 徐法政,刘永利,席长友. 旧路面热再生沥青混合料综合性能研究[J]. 山东交通学院学报, 2013, 21(2): 61-64.
- [3] 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.
- [4] 单志义. 提高废旧沥青掺量的热再生材料应用研究[J]. 混凝土世界, 2024(4): 41-47.
- [5] 刘欢,林杰. 废旧沥青路面材料的再生利用研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(26): 89-92.
- [6] 张启鑫. 微波厂拌大掺量 RAP 热再生沥青混合料路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2022.
- [7] 李强,陆杨,王家庆,等. 温拌再生沥青胶结料二次老化性能[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(4): 102-116.
- [8] 张阳. 高 RAP 掺量温拌再生沥青混合料的应用研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2022.
- [9] 周合轻,陈浩,张珈毓,等. 基于 RAP 全掺量下再生温拌沥青混合料路用性能研究[J]. 河南科学, 2023, 41(5): 721-729.
- [10] 田耀刚,覃超,张梦缘,等. 温拌 SBS 改性再生沥青混合料的路用性能研究[J]. 应用化工, 2024, 53(5): 1031-1035.
- [11] 肖庆一,陈森,宇锦涛,等. 大掺量温拌再生沥青混合料路用性能研究[J]. 中国科技论文, 2024, 19(4): 399-406.
- [12] 杨巍,赵永伟,龙琰,等. 不同旧料掺量下温拌再生沥青混合料的耐久性[J]. 合成纤维, 2023, 52(10): 62-65.
- [13] 鲁承慧,谢凤章,王大为,等. 微观尺度下温拌再生混合料新-旧沥青界面融合特性[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 89-97.
- [14] 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.
- [15] 王鑫洋,苏纪壮,高国华,等. 高掺量 RAP 温拌再生沥青混合料动态黏弹特性研究[J]. 中国测试, 2024, 50(10): 175-184.
- [16] 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.
- [17] 景广涛,陈海强,张婷. 厂拌热再生沥青混合料 RAP 合理掺量与路用性能研究[J]. 中国水运, 2024, 24(6): 132-134.
- [18] 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.
- [19] 金爱华. 再生沥青混合料低温抗裂性能的多指标评价[D]. 淮南:安徽理工大学, 2021.
- [20] 周新星. 木屑基生物油再生老化沥青的疲劳特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(9): 57-62.
- [21] 刘涛,余乐,何兆益,等. 生物基温拌再生剂对老化沥青路用性能与微观特性影响研究[J]. 应用化工, 2025, 54(6): 1433-1439.
- [22] 金鑫,付昊轩,杨野,等. 沥青温拌再生剂研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊 2): 183-190.
- [23] 仇金. 基于温拌再生剂的高掺量 RAP 沥青混合料性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2024.

Influence of bio-oil regenerant on the performance of warm-mixed reclaimed asphalt mixture

FU Guanghui¹, XU Qinsheng², ZHANG Mingjian¹, RUI Zhaocheng^{2},
ZHENG Shirui¹, DI Enzhou², JIN Zhao¹*

1. Qihe Hengsheng Highway Engineering Co., Ltd., Dezhou 251120, China;

2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250102, China

Abstract: To improve the recycling level of reclaimed asphalt pavement (RAP), reduce the secondary aging of recovered asphalt during the thermal regeneration process, and ensure the road performance of recycled asphalt mixtures, a warm mix recycled asphalt binder is prepared by adding reclaimed asphalt, bio-oil regenerant, and warm mix agent to 70# matrix asphalt. The quality ratios of reclaimed asphalt to matrix asphalt are 0, 20%, 40%, 60%, and 80%, with the mass of the bio-oil regenerant being 10% of the reclaimed asphalt mass and the mass of the warm mix agent being 2% of the total mass of matrix asphalt and reclaimed asphalt. The flow characteristics, deformation resistance, and fatigue performance of the warm mix recycled asphalt binder are measured through rotational viscosity tests, multi-stress creep recovery tests, and linear amplitude sweep tests at high temperatures. Different AC-20 type warm mix recycled asphalt mixtures are prepared, and their high-temperature performance, low-temperature performance, water stability, and fatigue life are measured through rutting tests, low-temperature beam tests, freeze-thaw splitting tests, and four-point bending fatigue tests. The test results indicate: 1) As the quality ratio of reclaimed asphalt to matrix asphalt increased, the rotational viscosity of the warm mix recycled asphalt binder increases, shear strain decreases, creep recovery rate increases, non-recoverable creep compliance decreases, shear stress initially increases and then decreases with increasing shear strain, peak stress increases, and fatigue life decreases, with reduced sensitivity to strain; The high-temperature deformation resistance slightly decreases compared to the binder without the bio-oil regenerant, while the fatigue performance is effectively improved. 2) As the quality ratio of reclaimed asphalt to matrix asphalt increases, the dynamic stability of the AC-20 type warm mix recycled asphalt mixture increases, rut depth decreases, bending stiffness modulus increases, failure tensile strain decreases, splitting strength before and after freeze-thaw decreases, freeze-thaw strength splitting ratio decreases, and fatigue life decreases. The high-temperature deformation resistance is reduced compared to the mixture without the bio-oil regenerant, while the low-temperature deformation resistance, freeze resistance, and fatigue resistance are significantly improved. When the quality ratio of reclaimed asphalt to matrix asphalt exceeds 60%, the road performance of the AC-20 type warm mix recycled asphalt mixture can still reach the level of ordinary hot mix asphalt mixture.

Keywords: road engineering; warm-mixed reclaimed asphalt mixture; bio-oil regenerant; high-temperature performance; low-temperature performance; fatigue life

(责任编辑:王惠)