

微表处用水性树脂基改性乳化沥青流变性能

李彦伟^{1,2}, 王育聪¹, 冯雷², 张丹², 王朝辉¹

(1. 长安大学公路学院, 西安, 710064; 2. 太行城乡建设集团有限公司, 石家庄, 050200)

摘要 机场道面微表处技术养护品质依赖于其胶结材料性能,为明确水性树脂聚合物掺量对微表处用改性乳化沥青流变特性的影响,制备了微表处用 WER/WPU 改性乳化沥青与 WER/WPU/EVA 改性乳化沥青,借助动态剪切流变试验、线性振幅扫描试验和弯曲梁流变试验,探明了不同水性树脂聚合物掺量下改性乳化沥青高温抗变形能力、中温疲劳性能与低温蠕变特性,对比分析了 WER/WPU 改性乳化沥青与 WER/WPU/EVA 改性乳化沥青的流变性能,并与现有研究中改性乳化沥青的抗变形、抗开裂能力进行了对比评价。结果表明:掺加树脂聚合物后乳化沥青材料的高温抗变形能力、中温疲劳寿命以及低温柔韧性得到有效提升,提升幅度随水性树脂聚合物掺量增加而提高;WER/WPU/EVA-15 改性乳化沥青高温抗变形性能略优于 WER/WPU-15 改性乳化沥青,但其疲劳特性与低温抗裂性较 WER/WPU-15 改性乳化沥青略低。文中所研制的树脂基改性乳化沥青具有显著的先进性。

关键词 机场道面;微表处;树脂基改性乳化沥青;流变性能;疲劳特性

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.003

中图分类号 U418.6 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0019-10

Rheological Properties of Waterborne Resin-Based Modified Emulsified Asphalt for Micro-Surfacing

LI Yanwei^{1,2}, WANG Yucong¹, FENG Lei², ZHANG Dan², WANG Chaohui¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Taihang Urban and Rural Construction Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050200, China)

Abstract The technical maintenance quality of micro-surface for airport pavement is for the performance of its agglutination material to decide. In order to clarify the effect of water-based resin polymer content on the rheological properties of modified emulsified asphalt for micro-surfacing, WER/WPU modified emulsified asphalt and WER/WPU/EVA modified emulsified asphalt for micro-surfacing are prepared. With the help of dynamic shear rheological test, linear amplitude scanning test and bending beam rheological test, the high temperature deformation resistance, medium temperature fatigue performance and low temperature creep characteristics of modified emulsified asphalt under different water-based resin polymer content are proved. The rheological properties of WER/WPU modified emulsified asphalt and WER/WPU/EVA modified emulsified asphalt are compared and analyzed. The anti-deformation and anti-cracking ability of the modified emulsified asphalt in the existing research are compared and evaluated. The results show that

收稿日期: 2024-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(52378429);太行城乡建设集团有限公司科技项目(KT-2)

作者简介: 李彦伟(1969—),男,河北石家庄人,教授级高工,博士,研究方向为道路新材料与新技术。E-mail: 1261254572@qq.com

通信作者: 王朝辉(1980—),男,河南滑县人,教授,博士生导师,研究方向为绿色道路新材料与新技术。E-mail: wchh0205@chd.edu.cn

引用格式: 李彦伟,王育聪,冯雷,等.微表处用水性树脂基改性乳化沥青流变性能[J].空军工程大学学报,2024,25(5):19-28. LI Yanwei, WANG Yucong, FENG Lei, et al. Rheological Properties of Waterborne Resin-Based Modified Emulsified Asphalt for Micro-Surfacing[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5):19-28.

the high temperature deformation resistance, medium temperature fatigue life and low temperature flexibility of emulsified asphalt material are effectively improved after resin polymer is being added, and the improvement range increases with the increase of water-based resin polymer content. The high temperature deformation resistance of WER/WPU/EVA-15 modified emulsified asphalt is slightly better than that of WER/WPU-15 modified emulsified asphalt, but its fatigue characteristics and low temperature crack resistance are slightly lower than that of WER/WPU-15 modified emulsified asphalt. The resin-based modified emulsified asphalt developed in this paper is significant advanced.

Key words airport pavement; micro-surfacing; resin-based modified emulsified asphalt; rheological properties; fatigue characteristics

由于受到气候环境、飞机轮胎的机械磨损与冲击等因素共同作用,机场沥青道面易产生开裂、磨光、轮辙以及抗滑性能下降等病害^[1]。若不及时对机场道面进行预防养护,每推迟一年养护成本至少提升 50%^[2]。当前机场沥青道面预防养护研究主要集中于雾封层技术^[3-4],但是该技术仅适用于封闭道面裂缝、防水等,对改善机场道面抗滑性能、修复轮辙病害有着较大局限性。作为一种预防养护技术,微表处不仅能提高沥青混凝土道面防水、耐磨及防滑性能,还可快速修复道面流动性车辙,为飞机的起降、滑行和停靠提供安全保障。然而,普通乳化沥青高低温稳定性不佳、粘附力低^[5],常规微表处易出现松散、开裂、耐久性不足等问题^[6],影响了机场沥青混凝土道面服役性能与使用寿命。

现阶段,提升乳化沥青强度、柔韧性、弹性及粘附性等使用性能主要采用 SBS(styrene butadiene styrene)、SBR(styrene butadiene rubber)、EVA(ethylene vinyl acetate)等传统水性聚合物^[7]与水性环氧树脂 WER(waterborne epoxy resin)、水性丙烯酸酯 WA(waterborne acrylate)、水性聚氨酯 WPU(waterborne polyurethane)等树脂聚合物及其复合乳液^[8-11]材料。研究表明,SBR 与 SBS 胶乳与乳化沥青混合后,通过吸收沥青中的油分产生溶胀,改变沥青的胶体结构,加入 SBR、SBS 改性剂后,微表处用改性乳化沥青的高温稳定性与低温抗裂性显著提升^[7]。具有自交联特性的水性聚合物通过自交联反应形成非定形的、高度交联的网络结构,为微表处用改性乳化沥青体系提供较强的粘聚力与优良的机械强度。水性环氧树脂在乳化沥青体系中形成空间骨架结构,赋予了改性乳化沥青蒸发残留物较高的拉伸强度与粘结强度,使得水性环氧乳化沥青微表处路用性能优于 SBS 改性乳化沥青微表处^[8]。为进一步提升水性环氧树脂改性乳化沥青的路用性能与耐久性,傅豪等^[10-12]借助多嵌段共聚物水性聚氨酯高韧性特点,提升了水性环氧乳化沥青蒸发残留物的柔韧性与抗变形能力。此外,SBR 胶乳与 WER 共混体系将 SBR 分子结构中 1,3-丁二

烯良好的低温柔韧性与 WER 三维网络结构高强度特点相结合,均衡改善了乳化沥青机械强度与低温韧性^[13-14]。相关研究结果表明,在 SBR 改性乳化沥青掺入水性环氧树脂能有效改善微表处用改性乳化沥青的热稳定性与粘附性,与传统 SBR 乳化沥青微表处相比,所研制水性环氧/SBR 改性乳化沥青微表处抗高温车辙、层间剪切、抗滑和防水性能更为优异^[13-15]。综上所述,水性树脂聚合物在提升改性乳化沥青性能上具有显著优势。微表处用树脂基改性乳化沥青研究主要集中于改性乳化沥青粘附性、耐久性及其对微表处路用性能改善效果等方面,对水性树脂基乳化沥青流变性能的研究较为薄弱,关于树脂聚合物掺量对微表处用改性乳化沥青高温变形、低温抗裂、中温疲劳等性能的影响研究更是鲜有涉及。

基于此,以水性环氧树脂/聚氨酯(WER/WPU)、水性环氧树脂/聚氨酯/乙烯-醋酸乙烯酯(WER/WPU/EVA)作为改性剂,制备微表处用树脂基改性乳化沥青,借助动态剪切流变试验、线性振幅扫描试验、弯曲梁流变试验,探明水性树脂聚合物掺量对改性乳化沥青流变性能的影响,明确树脂基改性乳化沥青的高温、中温、低温流变特性,进一步提升树脂基改性乳化沥青使用品质。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

微表处用水性树脂基改性乳化沥青所用材料由基质沥青、水性树脂聚合物、乳化剂等组成。基质沥青为 SK70 号,其主要技术指标见表 1。根据课题组前期研究成果^[16-19],WER/WPU、WER/WPU/EVA 能有效改善乳化沥青内聚强度、柔韧性、粘附性等性能。本节选用 WER/WPU、WER/WPU/EVA 作为乳化沥青改性剂,其具体配比及性能见表 2。乳化剂选用阳离子慢裂快凝型,主要技术指标见表 3,改性乳化沥青制备过程见图 1。

表 1 基质沥青技术指标
Tab. 1 Technical indicators of matrix asphalt

指标	针入度(25℃)/ 0.1 mm	软化点/℃	延度(15℃)/cm	含蜡量/%	RTFOT 老化后		
					质量变化/%	针入度比/%	延度/cm
数值	72	47.9	120	1.5	0.12	63	7.6

表 2 水性树脂改性剂材料配比及性能
Tab. 2 Material proportioning and performance of waterborne resin modifier

材料类型	材料配比	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	拉拔强度/MPa
WER/WPU	2 : 8	24.22	735.53	2.15
WER/WPU/EVA	2 : 4 : 4	21.40	363.08	2.15

表 3 乳化剂技术指标
Tab. 3 Technical indicators of emulsifier

项目	外观	活性物含量	pH 值
指标	淡黄色液体	≥80%	8~10

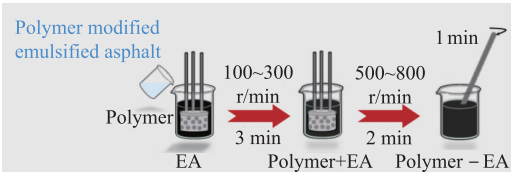


图 1 改性乳化沥青制备过程
Fig. 1 Preparation process of modified emulsified asphalt

现有研究文献表明,5%~15%水性树脂聚合物能够赋予乳化沥青残留物优异的粘附性、内聚强度、柔韧性等性能^[16-19]。因此,拟定 WER/WPU 和 WER/WPU/EVA 掺量均为 5%、10%、15%。为方便分析,对不同掺量下 2 种树脂基改性乳化沥青分别命名为 WER/WPU-X 和 WER/WPU/EVA-X, X 为聚合物掺量,未改性乳化沥青命名为 JZEA。

1.2 测试方法

1.2.1 动态剪切流变试验

动态剪切流变试验能较好地模拟沥青的受力状态,通过改变加载频率模拟不同车辆荷载,改变不同的温度来模拟气候变化,具体测试方法如下。

1) 温度扫描试验。参照《JTG E20—2011 公路工程沥青与沥青混合料试验规程》中 T0628 进行温度扫描试验,设定加载频率为 10 rad/s,设置控制应变模式为 10%。高温温度扫描试验温度设置为 46~88℃,每次间隔的测试温度为 6℃;设置中温温度扫描试验温度为 16~40℃,每次间隔的测试温度为 6℃。

2) 频率扫描试验。参照《JTGE20—2011 公路工程沥青与沥青混合料试验规程》中 T0628 进行频率扫描试验,频率扫描范围为 0.1~100 rad/s,扫描

温度分别为 40℃、50℃、60℃、70℃、80℃。

1.2.2 线性振幅扫描试验

参照《AASHTO TP101-14》,线性振幅扫描试验(linear amplitude sweep, LAS)过程分为 2 个阶段,第 1 阶段为频率扫描,在 0.1%应变条件下,选定温度后在 0.1~30 Hz 频率范围内对复数模量、相位角等数据进行扫描采样;第 2 阶段进行振幅扫描,在选定试验温度下采用振动剪切以 10 Hz 的频率运行,扫描时间为 300 s,剪切应变与时间呈线性从 0.1%增长至 30%。

1.2.3 弯曲梁流变试验

参照《AASHTO T313-02》,弯曲梁流变试验(bending beam rheometer, BBR),首先将乳化沥青材料制备为长 127 mm、厚 6.4 mm、宽 12.7 mm 的小梁试件,将其置于低温油浴试验仪的 2 个支点之上,于试件中部施加压力荷载,测量试件的蠕变劲度和蠕变速率,试验温度为-24~-6℃。

2 树脂基改性乳化沥青流变性能

2.1 高温流变性能

微表处结构作用在道路表面,直接受到温度和荷载的共同作用,若其高温稳定性能较差,则会导致路面产生车辙、推移拥包等病害,改性乳化沥青材料高温稳定性能的优劣直接影响微表处的高温稳定性能的高低。

2.1.1 基于温度扫描的高温流变性能

为全面评价水性树脂改性剂对改性乳化沥青高温稳定性能的影响,通过温度扫描试验,测得改性乳化沥青的相位角δ、复数剪切模量G*随温度的变化规律,如图 2 和图 3 所示。

1) 分析图 2 可知,随着温度升高,JZEA 的相位角逐渐增大,改性乳化沥青的相位角 δ 逐渐减小。说明随着温度的升高,JZEA 逐渐靠近粘性状态,改性乳化沥青均逐渐靠近弹性状态,这是由于温度升高后,水性树脂基改性乳化沥青内部形成了稳定均匀的网络结构,从而使其具有良好的弹性。相同温度下,水性树脂聚合物掺量越多,改性乳化沥青的相位角越小,弹性越好,当水性树脂聚合物掺量为 15% 时,改性乳化沥青在高温条件下均表现出良好的弹性性能。当温度为 64~88 °C 时,WER/WPU 改性乳化沥青的相位角小于 WER/WPU/EVA 的相位角,表现出更为优异的高温弹性性能,更不易发生塑性变形。

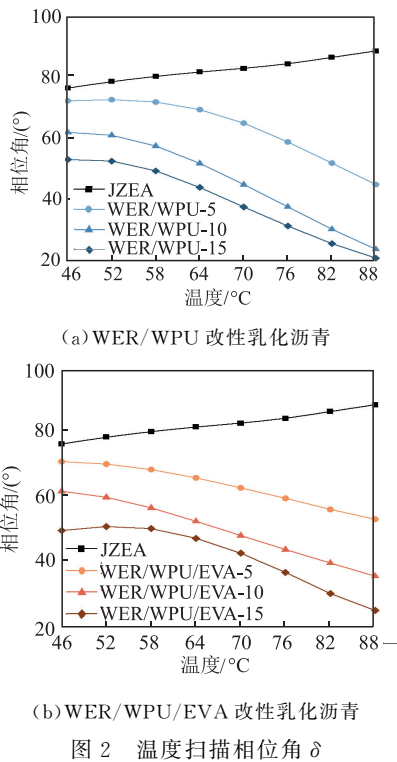
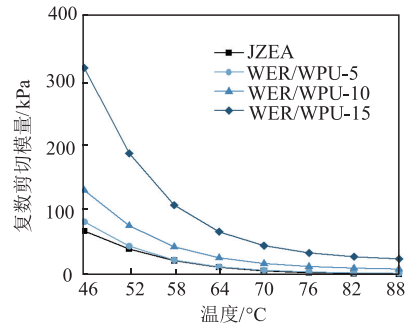


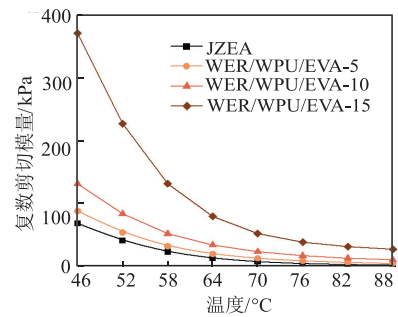
Fig. 2 Temperature scanning phase angle δ

2) 分析图 3 可知,从乳化沥青材料的复数剪切模量 G^* 整体的变化情况来看,随着温度升高,JZEA、WER/WPU、WER/WPU/EVA 乳化沥青材料 G^* 均呈现先下降后逐渐趋于平稳的趋势。各温度条件下,随着改性剂掺量的增加,WER/WPU、WER/WPU/EVA 改性乳化沥青 G^* 均提高,当树脂聚合物掺量为 5% 时,WER/WPU 改性乳化沥青在各温度下的 G^* 均与 JZEA 的 G^* 相差不大,WER/WPU/EVA 改性乳化沥青 G^* 略高于 JZEA。当树脂聚合物掺量增加至 15% 时,在 46 °C 条件下,2 种改性乳化沥青的 G^* 分别为 318 840 Pa 和 371 200 Pa,分别约为基质乳化沥青在该温度下 G^* 的 4.7 倍和 5.5 倍,并且当温度升高, G^* 趋于稳定

后,WER/WPU 与 WER/WPU/EVA 改性乳化沥青 G^* 仍明显优于基质乳化沥青。这表明随着树脂聚合物掺量的增加,2 种改性乳化沥青的温度稳定性均明显提升。



(a) WER/WPU 改性乳化沥青



(b) WER/WPU/EVA 改性乳化沥青

图 3 复数剪切模量 G^*

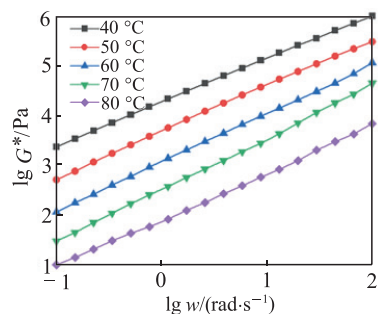
Fig. 3 Complex shear modulus G^*

相同温度与树脂聚合物掺量下,WER/WPU 改性乳化沥青的 G^* 均略小于 WER/WPU/EVA,这表明 WER/WPU/EVA 对乳化沥青高温稳定性的提升效果优于 WER/WPU。通过分析认为,WER 与 WPU 能够在沥青材料中形成稳定的网状结构体系,而 EVA 能够均匀分散在沥青材料中,形成增强颗粒使整个乳化沥青体系更加稳定,因此 3 种改性剂交联复合能够显著提升乳化沥青的抗变形能力。

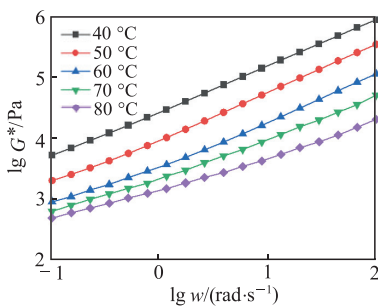
2.1.2 基于频率扫描的高温流变性能研究

采用动态剪切流变试验仪开展频率扫描试验,进一步研究改性乳化沥青在不同加载频率下高温抗变形性能,将获得的数据进行对数处理后拟合所得的 $\lg G^* - \lg \omega$ 曲线如图 4 所示。

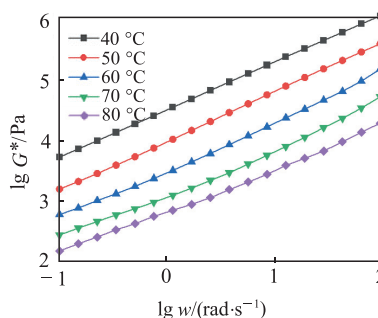
分析图 4 可知,在对数坐标下,温度相同时,JZEA、WER/WPU、WER/WPU/EVA 改性乳化沥青复数剪切模量 G^* 与角频率 ω 呈较为明显的线性关系,随着 ω 的增加,乳化沥青材料的 G^* 逐渐增大。 ω 相同时,随着温度的增加,乳化沥青材料的 G^* 逐渐减小。掺入树脂聚合物后,2 种改性乳化沥青在各温度与频率下的 G^* 均有所提升。



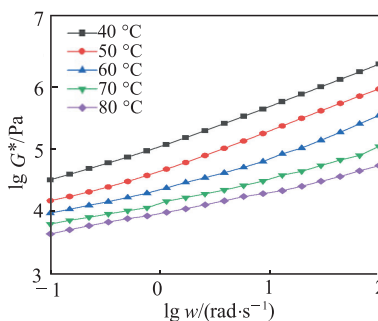
(a) JZEA



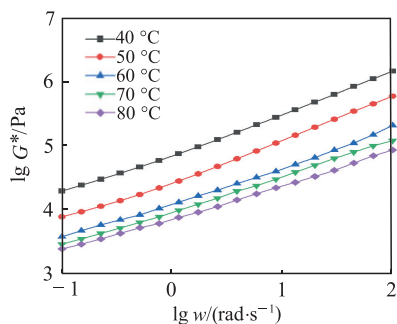
(b) WER/WPU-5 改性乳化沥青



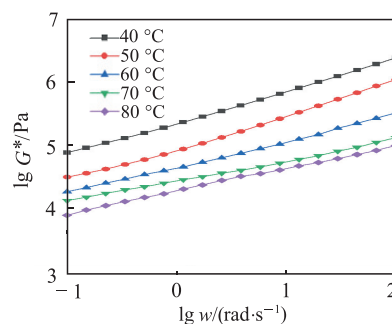
(c) WER/WPU/EVA-5 改性乳化沥青



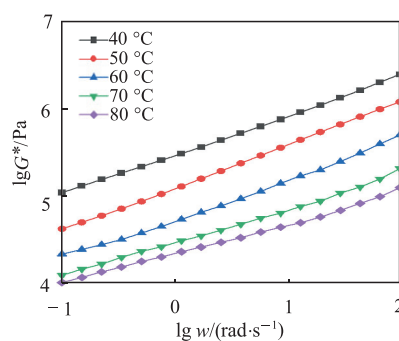
(d) WER/WPU-10 改性乳化沥青



(e) WER/WPU/EVA-10 改性乳化沥青



(f) WER/WPU-15 改性乳化沥青



(g) WER/WPU/EVA-15 改性乳化沥青

图4 频率扫描试验结果

Fig. 4 Frequency scanning test results

为了更直观地分析水性树脂聚合物类型与掺量对乳化沥青材料的黏弹性影响,借助时间-温度等效原理,以 40 °C 作为乳化沥青材料 $\lg G^* - \lg w$ 主曲线的参考温度,通过计算位移因子(如图 5 所示),得到以 40 °C 为参考标准的乳化沥青材料 $\lg G^* - \lg w$ 主曲线,如图 6 所示。

分析图 6 可知,在相同加载频率下,所研制的树脂基改性乳化沥青材料 G^* 高于 JZEA 的 G^* 。在低频段,2 种改性乳化沥青的 G^* 均与基质乳化沥青的 G^* 差距较大,随着加载频率的增大,2 种改性乳化沥青 G^* 与基质乳化沥青 G^* 之间的差值逐渐减小。当加载频率超过 10 rad/s 时,WER/WPU-5 与 WER/WPU/EVA-5 的 G^* 与 JZEA 的 G^* 有部分重叠,说明在较高频率下,JZEA 与 WER/WPU、WER/WPU/EVA 改性乳化沥青材料高温性能差异逐渐变小。

在相同加载频率下,乳化沥青材料 G^* 从高到低排序为 WER/WPU/EVA-15 > WER/WPU-15 > WER/WPU-10 > WER/WPU/EVA-10 > WER/WPU-5 = WER/WPU/EVA-5 > JZEA。由此可见,随着树脂聚合物掺量的增加,改性乳化沥青材料的 G^* 均逐渐增大,树脂聚合物掺量越大,改性乳化沥青材料的高温抗变形性能更为优异。当树脂聚合物掺量相同时,改性乳化沥青材料的 G^* 相差不大,表明树脂聚合物对基质乳化沥青材料的高温抗变形性能提升效果较为接近,均能显著提升乳化沥青材料的高温抗变形性能。

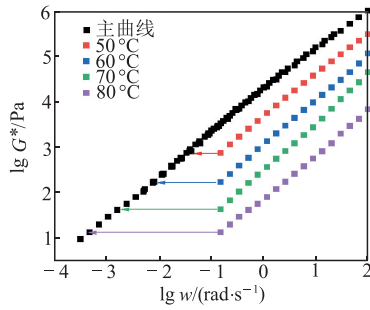


图5 基质乳化沥青主曲线生成过程

Fig. 5 Main curve generation process of matrix emulsified asphalt

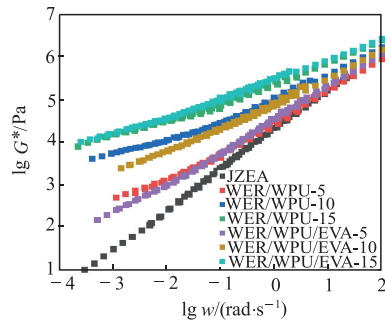


图6 乳化沥青材料复数剪切模量主曲线

Fig. 6 Master curve of complex shear modulus of emulsified asphalt material

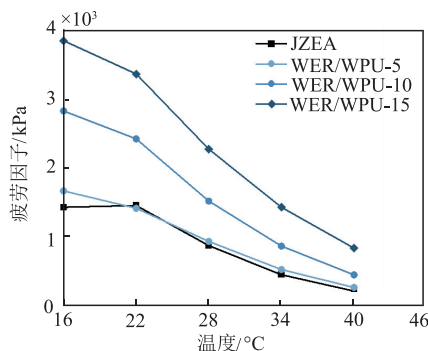
综合考虑乳化沥青材料温度扫描与频率扫描试验结果可知,树脂改性剂均能显著提升乳化沥青材料的高温稳定性性能,且2种树脂基改性乳化沥青的高温性能相差不大,树脂聚合物掺量越高,树脂基改性乳化沥青的高温稳定性越好。

2.2 温流变性能

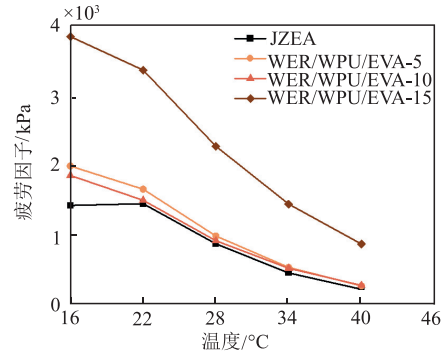
疲劳开裂是沥青路面的主要失效模式之一,沥青结合料的抗疲劳性能在整个路面性能中起着关键作用。

2.2.1 基于温度扫描的中温抗疲劳性能

为了表征 WER/WPU 改性乳化沥青与 WER/WPU/EVA 改性乳化沥青的疲劳特性,以疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 为评价指标,测试了不同树脂聚合物掺量下改性乳化沥青疲劳特性,结果如图7所示。



(a) WER/WPU 改性乳化沥青



(b) WER/WPU/EVA 改性乳化沥青

图7 乳化沥青材料疲劳因子 $G^* \sin \delta$ Fig. 7 Fatigue factor $G^* \sin \delta$ of emulsified asphalt material

分析图7可知,随着温度升高,改性乳化沥青材料疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 均呈现下降趋势,即抗疲劳性能提升。这表明乳化沥青材料的疲劳失效更倾向于发生在温度较低条件下。在同一温度下,随着树脂聚合物掺量的增加,改性乳化沥青 $G^* \sin \delta$ 增大,表明掺入水性树脂改性剂后,乳化沥青的抗疲劳性能下降。对于 WER/WPU 改性乳化沥青,树脂聚合物掺量越多,改性乳化沥青耐疲劳性能越差,当树脂聚合物掺量为5%时,其耐疲劳性能与 JZEA 较为相近。对于 WER/WPU/EVA 改性乳化沥青,当树脂聚合物掺量为5%或10%时,其抗疲劳性能下降不明显,与 JZEA 的耐疲劳性能相差不大。当树脂聚合物掺量为15%时,改性乳化沥青的耐疲劳性能均大幅下降,但降低后在16℃条件下的 $G^* \sin \delta$ 仍低于4000 kPa,满足 Superpave 规范中 $G^* \sin \delta$ 不超过5000 kPa 的规定。

综上可知,掺入水性树脂改性剂后,乳化沥青材料的耐疲劳性能下降,树脂聚合物掺量为15%时,改性乳化沥青抗疲劳性能下降幅度最大,但降低后耐疲劳性能仍满足 Superpave 规范要求。

2.2.2 基于 LAS 的中温抗疲劳性能

$G^* \sin \delta$ 是一个基于沥青材料刚度的参数,该参数是在较小剪切应变(1%)和恒定的加载频率条件下测得的。而 LAS 试验可模拟沥青材料在实际路面运营过程中受到的重复荷载长期作用现象,更符合路面实际服役状态,能够更准确评价乳化沥青材料疲劳性能。为此,基于线性振幅扫描试验获取了改性乳化沥青应力-应变曲线,如图8所示,并提取了改性乳化沥青屈服应力与屈服应变,如图9所示,并借助 VECD 理论计算了乳化沥青在不同应变水平下的疲劳寿命 N_f ,如图10所示。

1) 改性化沥青应力-应变曲线分析。由图8可

知,随着剪切应变的增加,剪切应力呈现先增加后减小的趋势,峰值剪切应力被定义为材料的屈服应力,达到屈服应力之前,乳化沥青材料具有一定的抵抗变形能力,超过屈服应力后,材料为脆性断裂,屈服应力越大,表明材料抵抗变形的能力越强。与屈服应力对应的剪切应变为屈服应变,屈服应变越大,其弹性越好,抗变形性能越强。

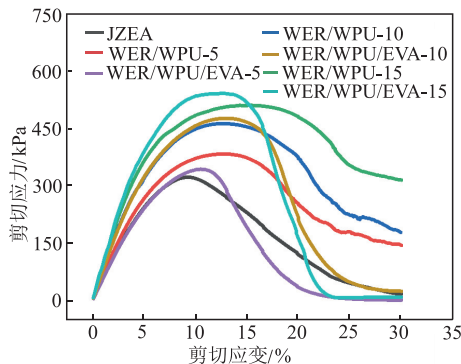


图8 乳化沥青材料应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of emulsified asphalt material

分析图9可知,掺加 WER/WPU 和 WER/WPU/EVA 2 种水性树脂改性剂对乳化沥青材料进行改性后,乳化沥青材料的屈服应力和屈服应变均大幅提升,当水性树脂聚合物掺量为 15% 时, WER/WPU 改性乳化沥青材料的屈服应力和屈服应变均达到最大值,分别为 15.40% 和 510.92 kPa,与基质乳化沥青相比,屈服应变提升约 64.7%,屈服应力提升约 58.3%。WER/WPU/EVA 改性乳化沥青材料的屈服应力和屈服应变分别为 12.9% 和 542.47 kPa,与 JZEA 相比,屈服应变提升约 37.9%,屈服应力提升约 68.0%,说明 2 种改性剂在提升乳化沥青材料抗变形性能的同时也提升了乳化沥青材料的弹性。

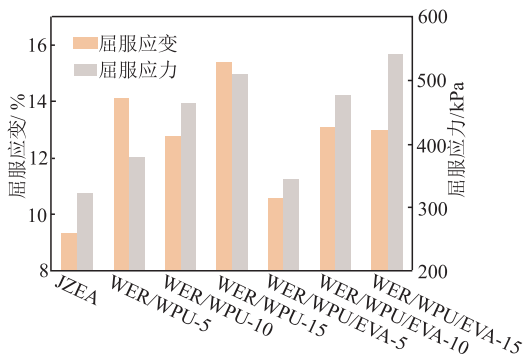


图9 乳化沥青材料屈服应力与屈服应变

Fig. 9 Yield stress and yield strain of emulsified asphalt material

2) 改性乳化沥青疲劳寿命分析。分析图10可知,疲劳寿命 N_f 越大,该乳化沥青材料的抗疲劳性能越优异。随着加载应变的增加,乳化沥青材料疲劳

寿命呈下降趋势,表明当乳化沥青材料承受较低荷载产生较小应变时,具有较优异的抗疲劳性能,当承受较大荷载产生较大应变时,抗疲劳性能下降。当应变水平处于 0.1%~1.0% 时,几种乳化沥青疲劳寿命 N_f 排序为 WER/WPU-15>WER/WPU/EVA-15>WER/WPU-10>WER/WPU-5≈WER/WPU/EVA-10>WER/WPU/EVA-5>JZEA,表明掺加树脂聚合物后乳化沥青材料疲劳寿命大幅提升,树脂聚合物掺量越高,抗疲劳性能越好。当应变水平处于 1%~10% 时,改性乳化沥青疲劳寿命排序为 WER/WPU-15>WER/WPU/EVA-15≈WER/WPU-10≈WER/WPU-5≈WER/WPU/EVA-10>WER/WPU/EVA-5>JZEA。

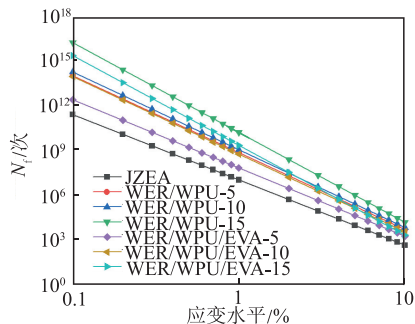


图10 不同应变水平下乳化沥青材料疲劳寿命 N_f

Fig. 10 Fatigue life N_f of emulsified asphalt material under different strain levels

综上所述,随着应变水平的增加,不同改性乳化沥青 N_f 之间的差距逐渐变小,但改性乳化沥青疲劳寿命远仍大于基质乳化沥青,且 WER/WPU 改性乳化沥青表现出更优异的抗疲劳性能。

2.3 低温流变性能

为探明树脂基聚合物掺量对改性乳化沥青低温流变特性的影响,借助 BBR 试验,测试了不同树脂基聚合物掺量下 -24~-6 °C 范围内改性乳化沥青的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m ,明确了水性树脂基改性乳化沥青的低温蠕变特性,如图11所示。

分析图11可知,温度越低,乳化沥青材料蠕变劲度 S 的值越大,表明温度越低乳化沥青材料越容易开裂。相同温度下,几种乳化沥青材料蠕变劲度 S 排序为 JZEA>WER/WPU/EVA-5>WER/WPU-5>WER/WPU/EVA-10>WER/WPU-10>WER/WPU/EVA-15>WER/WPU-15,掺入水性树脂改性剂后,乳化沥青材料的蠕变劲度 S 降低,且改性剂掺量越多,乳化沥青材料的蠕变劲度越小,表明 WER/WPU 和 WER/WPU/EVA 这 2 种水性树脂基聚合物均能够减弱乳化沥青胶结料的刚度,提

升韧性,使其在较低温度下不易发生脆性断裂。当水性树脂聚合物掺量为 15% 时,改性乳化沥青在 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的蠕变劲度 S 的值均小于 300 MPa ,满足 SHRP 的规定,具有优异的低温韧性。当改性剂掺量相同时,WER/WPU 改性乳化沥青的蠕变劲度 S 的值小于 WER/WPU/EVA 改性乳化沥青,表明其更不易发生脆性断裂,低温韧性更为优异。

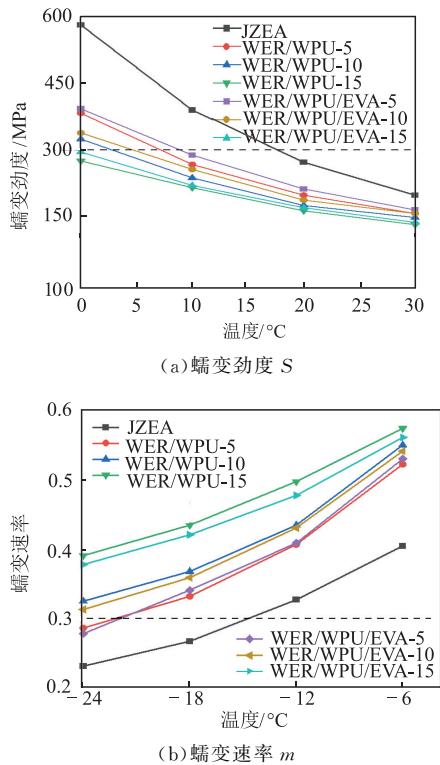


图 11 乳化沥青材料低温蠕变参数

Fig. 11 Low temperature creep parameters of emulsified asphalt material

随着温度降低,乳化沥青材料蠕变速率 m 值越低,这是由于乳化沥青材料为温度敏感性材料,在低温下会变硬,流动性降低,自身蠕变吸收内部温缩应力的能力下降。在相同温度下,几种乳化沥青材料 m 的值排序为 $\text{JZEA} < \text{WER/WPU/EVA-5} \approx \text{WER/WPU-5} < \text{WER/WPU/EVA-10} \approx \text{WER/WPU/EVA-10} < \text{WER/WPU/EVA-15} < \text{WER/WPU-15}$,掺入水性树脂聚合物后,乳化沥青材料 m 值增加,且水性树脂聚合物掺量越多, m 越大。水性树脂聚合物掺量相同时,2 种改性乳化沥青材料的蠕变速率相差不大,表明 WER/WPU 与 WER/WPU/EVA 改性剂能够提升乳化沥青材料的应力松弛能力,使乳化沥青材料更不易发生脆性开裂,且提升效果相差不大。 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,当水性树脂聚合物掺量为 10% 或 15% 时,2 种改性乳化沥青的 m 值均大于 0.3,满足 SHRP 的规定,具有优异的低温韧性。其中 WER/WPU-15 改性乳化沥青的低温性

能略优于 WER/WPU/EVA-15。

2.4 流变性能对比评价

通过系统梳理国内外现有不同类型树脂基改性乳化沥青流变性能研究动态,对比评价所研制树脂基改性乳化沥青与现有树脂基改性乳化沥青性能的优劣,明确所研制树脂基改性乳化沥青的先进性。因现有研究中关于树脂基改性乳化沥青流变性能的研究主要集中在基于温度扫描的高温流变性能与基于 BBR 试验的低温流变性能两方面,因此只针对这 2 项进行对比^[19-24],如图 12 和图 13 所示。

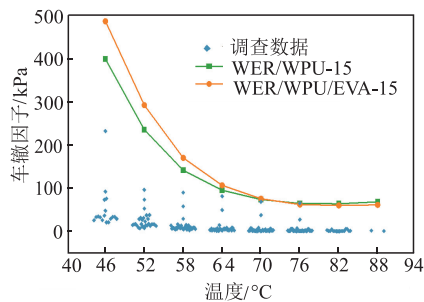


图 12 乳化沥青高温流变性能

Fig. 12 High temperature rheological properties of emulsified asphalt materials

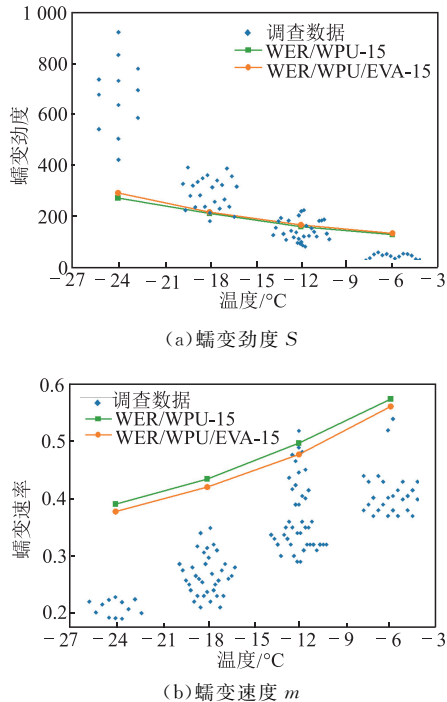


图 13 乳化沥青低温流变性能

Fig. 13 Low temperature rheological properties of emulsified asphalt materials

2.4.1 高温流变性能对比

分析图 12 可知,与现有研究与实体工程中树脂基改性乳化沥青高温流变性能相比,所研制的 2 种树脂基改性乳化沥青具有显著优势。46 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,调查树脂基改性乳化沥青车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 集中在 $30 \sim 90\text{ kPa}$,研制的 2 种树脂基改性乳化沥青车辙因

子 $G^*/\sin \delta$ 分别为 399.44 kPa 和 487.36 kPa;82 °C 条件下,调查树脂基改性乳化沥青车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 集中在 1 kPa 左右,所制备 2 种树脂基改性乳化沥青车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 分别为 64.30 kPa 和 60.37 kPa,与调查数据中其他树脂基改性乳化沥青相比,车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 提升约 60 倍,表现出优异的高温抗变形性能。

2.4.2 低温蠕变性能对比

分析图 13 可知,现有研究中树脂基改性乳化沥青蠕变劲度 S 值与蠕变速率 m 值离散性较大。在 -24 °C 条件下,所研制 2 种树脂基改性乳化沥青的蠕变劲度显著低于现有研究与实体工程中树脂基改性乳化沥青的,低温抗裂性具有显著优势;在 -12 °C 条件下,所制备 2 种树脂基改性乳化沥青 S 值处于所调查数据平均水平;-6 °C 条件下,所研制 2 种树脂基改性乳化沥青 S 值高于所调查数据,但是仍保持着较低水平,远远满足规范规定的 $S \leq 300$ MPa 的要求。各温度条件下,所制备 2 种树脂基改性乳化沥青蠕变速率 m 值均优于或接近现有研究与实体工程中树脂基改性乳化沥青 m 值最优水平。且温度越低,所研制 2 种树脂基改性乳化沥青 m 值与所调查研究动态与实体工程中 m 值相差越大,表现出优异的低温韧性。

3 结论

本文探明了树脂基改性乳化沥青材料的高温、中温、低温流变性能,明确了树脂基改性乳化沥青在更宽加载频率范围内的粘弹性特点,揭示了不同应变条件下树脂基改性乳化沥青疲劳寿命,探究了树脂基改性乳化沥青的蠕变劲度及蠕变速率,明确了所研制树脂基改性乳化沥青的先进性。

1)树脂聚合物掺量越高,所研制的 2 种微表处用水性树脂基改性乳化沥青材料高温稳定性越好,当树脂聚合物掺量增加至 15% 时,在 46 °C 条件下,2 种改性乳化沥青的 G^* 分别约为基质乳化沥青在该温度下 G^* 的 4.7 倍和 5.5 倍。在相同温度下,WER/WPU/EVA-15 改性乳化沥青的高温抗变形性能略优于 WER/WPU-15 改性乳化沥青。

2)掺加树脂聚合物后乳化沥青材料的疲劳寿命大幅提升,随着应变的增加,不同改性乳化沥青疲劳寿命差距减小,但仍远大于基质乳化沥青,相比于 WER/WPU/EVA-15 改性乳化沥青,WER/WPU-15 改性乳化沥青表现出更优异的抗疲劳性能。

3)掺入树脂聚合物后,所制备的 2 种树脂基改性乳化沥青蠕变劲度 S 降低、蠕变速率 m 增加,且树脂聚合物掺量越多,树脂基改性乳化沥青的低温

柔韧性越好。在 -24 °C 条件下,2 种改性乳化沥青的蠕变劲度模量 S 值及 m 值均满足 SHRP 规范要求。其中 WER/WPU-15 改性乳化沥青的低温抗裂性能略优于 WER/WPU/EVA-15 改性乳化沥青。

4)所制备的 2 种树脂基改性乳化沥青各温度下 $G^*/\sin \delta$ 均显著高于与所调查树脂基改性乳化沥青,高温抗变形性能具有显著优势。在 -24 °C 条件下,2 种树脂基改性乳化沥青 S 值与 m 值均优于现有研究水平,在更低温度下的抗裂性能具有显著优势。

5)未来的研究中应重点关注微表处用水性树脂基改性乳化沥青道路服役性能,探明微表处用水性树脂基乳化沥青病害,深入研究新型水性树脂基改性乳化沥青材料。

参考文献

- [1] 于俐婷,蔡良才,刘军忠,等大型飞机荷载作用下 SEA 道面结构响应分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(6): 22-26.
- [2] YU L T, CAI L C, LIU J Z, et al. An Analysis of Structural Response for a Large Aircraft on SEA Pavement[J]. Journal of Air Force Engineering University(Nature Science Edition),2018,19(6): 22-26. (in Chinese)
- [3] BABASHAMSI P, KHAHRO S H, OMAR H A, et al. Perspective of Life-Cycle Cost Analysis and Risk Assessment for Airport Pavement in Delaying Preventive Maintenance[J]. Sustainability,2022,14(5): 2905.
- [4] XU L, JIANG C S, XIAO F P, et al. Application of Fog-Seal Technology with Waterborne Thermosetting Additive in Asphalt Pavement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2022,34(8): 0004288.
- [5] LI P, XIAO X, PENG W J, et al. Performance Test and Evaluation Index Recommendation of Fog Seal on Airport Asphalt Pavement[J]. Case Studies in Construction Materials,2023,19: e02604.
- [6] 王梦浩,王朝辉,高璇,等.公路路面乳化沥青冷再生技术综述[J]. 材料导报,2023,37(7): 50-60.
- [7] WANG M H, WANG C H, GAO X, et al. Emulsified Asphalt Cold Recycled Technology for Highway Pavement: a State-of-the-Art Review[J]. Materials Reports,2023,37(7): 50-60. (in Chinese)
- [8] 陈谦,王朝辉,李彦伟,等.道路养护吸能封层增韧缓力功效评价[J]. 中国公路学报,2023,36(12): 249-262.
- [9] CHEN Q, WANG C H, LI Y W, et al. Evaluation of Toughening and Buffering Effects of Road Maintenance Energy-Absorbing Seal[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(12): 249-262. (in Chinese)
- [10] CHEN X Y, CHENG G H, XU W. Influence of Evaporation Temperature on the Rheological Properties of Modified Emulsified Asphaltic Residues[J]. Journal of Nanoparticle Research: an Interdisciplinary Forum for

- Nanoscale Science and Technology, 2021, 22(8): 228.
- [8] LUO Y F, ZHANG K, XIE X B, et al. Performance Evaluation and Material Optimization of Micro-surfacing Based on Cracking and Rutting Resistance[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 193-200.
- [9] 郑木莲, 范贤鹏, 刘富强, 等. 复配型水性环氧乳化沥青微表处耐久性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 68-76.
- ZHENG M L, FAN X P, LIU F Q, et al. Durability of Compound Waterborne Epoxy Emulsified Asphalt Micro-surfacing[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 68-76. (in Chinese)
- [10] 傅豪, 王朝辉, 刘鲁清, 等. 路用水性环氧改性乳化沥青组成优化及耐久性性能评价[J]. 材料导报, 2023, 37(18): 282-290.
- FU H, WANG C H, LIU L Q, et al. Composition Optimization and Durability Evaluation of Waterborne Epoxy Modified Emulsified Asphalt for Road[J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 282-290. (in Chinese)
- [11] 徐凌, 王小兵, 李先锐, 等. 水性乳液对聚合物改性沥青封层性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 1471-1481.
- XU L, WANG X B, LI X R, et al. Effect of Waterborne Emulsion on Performance of Polymer-modified Fog Seal Materials[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(10): 1471-1481. (in Chinese)
- [12] YANG G L, WANG C H, WEN P H, et al. Performance Characteristics of Cold-Mixed Porous Friction Course with Composite-Modified Emulsified Asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(3): 04019372.
- [13] LIU F Q, ZHENG M L, FAN X P, et al. Properties and Mechanism of Waterborne Epoxy Resin-SBR Composite Modified Emulsified Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 122059.
- [14] ZHANG Q, XU Y H, WEN Z G. Influence of Waterborne Epoxy Resin Content on Performance of Waterborne Epoxy Resin Compound SBR Modified Emulsified Asphalt for Tack Coat[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 774-782.
- [15] 陈谦, 王朝辉, 周璐, 等. 中国路用水性环氧材料工作性能研究与应用进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 26-40.
- CHEN Q, WANG C H, ZHOU L, et al. Research and Application Progress of Working Properties of Waterborne Epoxy Materials for Road in China[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 26-40. (in Chinese)
- [16] 陈谦, 王朝辉, 傅豪, 等. 基于性能演变的水性环氧沥青开普封层施工方法优化[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 236-245.
- CHEN Q, WANG C H, FU H, et al. Optimization of Construction Method of Waterborne Epoxy Asphalt Cape Seal Based on Performance Evolution[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 236-245. (in Chinese)
- [17] WANG F, FU H, LIU G X, et al. Preparation Optimization and Performance Evaluation of Waterborne Epoxy Resin for Roads[J]. Advances in Civil Engineering, 2021: 8977674.
- [18] YANG G L, WANG C H, FU H, et al. Waterborne Epoxy Resin-Polyurethane-Emulsified Asphalt: Preparation and Properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(11): 04019265.
- [19] LIU S T, CAO W D, SHANG S J, et al. Analysis and Application of Relationships Between Low-Temperature Rheological Performance Parameters of Asphalt Binders[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4): 471-478.
- [20] 韩森, 郭寒, 尚为公, 等. 水性环氧树脂微表处的层间抗剪性能[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 325-330.
- HAN S, GUO H, SHANG W G, et al. Interlayer Shear Resistance of Micro-Surfacing with Waterborne Epoxy Resin[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36): 325-330. (in Chinese)
- [21] 王可, 刘富强, 孙天一, 等. 水性环氧树脂-丁苯橡胶复合改性乳化沥青高温性能[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 359-366.
- WANG K, LIU F Q, SUN T Y, et al. High Temperature Properties of Waterborne Epoxy Resin-Styrene Butadiene Rubber Composite Modified Emulsified Asphalt[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 359-366. (in Chinese)
- [22] 陈华鑫, 操霞芳, 徐鹏, 等. SBS 和 SBR 胶乳对彩色乳化沥青蒸发残留物性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 62-70.
- CHEN H X, CAO X F, XU P, et al. Effect of SBS and SBR Latex on Evaporative Residue Property of Colored Emulsified Asphalt[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(3): 62-70. (in Chinese)
- [23] 周卫峰, 董利伟, 宋晓燕, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青高温性能试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 55-59.
- ZHOU W F, DONG L W, SONG X Y, et al. Experimental Study on High-Temperature Performance of Waterborne Epoxy Resin Modified Emulsified Asphalt[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, 38(4): 55-59. (in Chinese)
- [24] 梁建, 许辉, 郭寒, 等. 水性环氧树脂改性剂对乳化沥青性能及结构的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1998-2004.
- LIANG J, XU H, GUO H, et al. Research on Influence of Water-Based Epoxy Resin Modifier on Performance and Structure of Emulsified Asphalt[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(6): 1998-2004. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)