

水性乳液对聚合物改性沥青封层性能的影响

徐 凌, 王小兵, 李先锐, 管 鑫, 肖飞鹏

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 通过三大指标试验、重复蠕变恢复(MSCR)试验、振幅扫描和频率扫描试验,研究了雾封层材料对老化沥青的再生效果。随后,进行了雾封层材料浸泡马歇尔试件的冻融劈裂试验和肯塔堡飞散试验,分析了雾封层材料对沥青混合料耐久性能的影响。结果表明:水性丙烯酸酯和水性聚氨酯起到了协同增强效果,提高了沥青的弹性性能;水性乳液中的氨基甲酸酯和羧基极性基团显著提高了沥青混合料的水稳定性和抗松散性能。显著性检验和灰色关联分析结果表明,雾封层材料再生性能指标之间存在较强的一致性。

关键词: 道路工程;雾封层;水性改性剂;乳化沥青;预防性养护

中图分类号: U414

文献标志码: A

Effect of Waterborne Emulsion on Performance of Polymer-modified Fog Seal Materials

XU Ling, WANG Xiaobing, LI Xianrui, GUAN Xin, XIAO Feipeng

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The traditional indexes test, multiple stress creep and recovery (MSCR) test, amplitude sweep and frequency sweep test were conducted to study the rejuvenation effect of fog seal material on aging asphalt. Then, the freeze-thaw splitting test and Cantabro stripping test of Marshall specimens soaked in fog seal materials were also conducted to explore the effect of fog seal materials on the durability of asphalt mixture, respectively. It is shown that the waterborne acrylate and waterborne polyurethane play a synergistic enhanced effect and improve the elastic properties of asphalt. The fog seal materials with carbamate and carboxyl polar groups enhance water stability and anti-loosening

performance of asphalt mixture significantly. According to the significance testing and grey relational analysis, the regeneration indexes of the fog seal materials present a strong consistency.

Key words: road engineering; fog seal; waterborne additive; emulsified asphalt; preventive maintenance

预防性养护技术是指在道路重大病害发生前的主动维养作业^[1-2]。常用的预防性养护技术包括超薄磨耗层^[3-4]、微表处^[5-6]、稀浆封层^[7]、石屑封层^[8]和雾封层等技术。其中,雾封层技术是最常见的道面预防性养护措施之一,具有恢复交通服务快、施工方便等优点^[9]。喷洒雾封层材料后,借助其良好的流动性,雾封层材料可以渗透到裂缝中,填补路表的微小空隙和裂缝,防止环境水下渗。路表沥青黏附力的及时补充,可以将沥青路面性能继续维持2~3年,推迟造价更高的薄层加铺甚至铣刨再生,提高了沥青路面服役的经济效益,降低沥青路面的养护成本和退化率^[10]。另外,雾封层技术可以有效固定碎石,防止由于路表碎石飞溅而引发的交通事故。

耐久性雾封层材料的创新和开发是雾封层技术的关键,但是现有的雾封层材料仍然面临着早期老化、黏结力和强度不足而剥落失效等问题^[11]。现有雾封层技术的应用实体工程也表明,雾封层材料会伴随着路表摩擦而逐渐损失预防性养护的效果,其工程应用性能很大程度上取决于雾封层材料的性质^[12-13]。因此,应尽可能开发耐久的雾封层改性材料,降低养护成本,以扩大雾封层技术的使用范围,最大限度地提高路面的耐久性能和服役性能,延长沥青路面的维修周期^[14]。这一目标可以通过聚合物改性乳化沥青(PMAE)技术提高沥青乳液的性能来

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 国际(地区)合作与交流项目(51861145402)

第一作者: 徐 凌(1997—),男,博士生,主要研究方向为道路材料。E-mail: lxu@tongji.edu.cn

通信作者: 肖飞鹏(1973—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为道路材料。

E-mail: fpxiao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

实现^[15-16]。常用的改性聚合物包括丁苯橡胶(SBR)、低/高密度聚乙烯(L/HDPE)、乙烯乙酸乙烯酯共聚物(EVA)、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)、天然橡胶等。然而,高分子聚合物如苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物对沥青的改性需要较高的剪切速度和加工温度,存在基质沥青老化和高分子聚合物降解的风险,常规的SBR改性乳化沥青仍然面临高温性能不足的问题。因此,有必要尝试新型改性剂和适当的改性方式以改善沥青路面雾封层养护材料的性能^[17-18]。

水性自交联乳液是一种水基体系,聚合物通过表面活性剂稳定在水中。随着水的蒸发,聚合物液滴逐渐聚结,引发自交联反应,形成了聚合物高度交联网络,以提供较强的黏结能力和强度。水性丙烯酸酯乳液已广泛应用于涂料领域,在塑料加工中常用作相容剂。多个官能团(羧基、酰胺、羟基或羟甲基等)被引入丙烯酸酯预聚体中,聚合物分子链上的这些化学官能团将在加热或催化时相互反应并自行交联,从而提高了丙烯酸酯的力学强度^[19]。另外,聚氨酯(PU)是一种典型的多嵌段聚合物,主链中包含许多氨基甲酸酯基团,官能团可与沥青组分发生反应^[20]。此外,聚氨酯聚合物分子链同时包含软链段和硬链段,具有相应的挠性和刚性。这些新型的水

性添加剂在雾封层技术中的应用还是一个比较新的领域,相关的研究非常有限。基于水性丙烯酸酯乳液和水性聚氨酯乳液的自交联特性,尝试将其用于雾封层材料的改性,以增强雾封层材料的力学强度、黏弹性能和耐久性。因此,研究了水性丙烯酸酯乳液、水性聚氨酯乳液、SBR和SBS改性乳化沥青复合制备耐久雾封层养护材料的可行性。

1 试验材料与方法

1.1 研究重点与技术路线

本研究的重点是雾封层材料对老化基质沥青再生效果的影响,因此采用多种试验方法开展研究,包括传统的三大指标试验。同时,利用动态剪切流变仪(DSR)拓展了雾封层材料对老化基质沥青再生效果的评价方法,包括重复蠕变恢复(MSCR)试验、振幅扫描和频率扫描试验。随后,通过雾封层材料浸泡马歇尔试件的冻融劈裂试验和肯塔堡飞散试验,分析雾封层材料对沥青混合料水稳定性和抗松散性能的影响,并揭示水性丙烯酸酯乳液和水性聚氨酯乳液的改性机理。最后,根据显著性检验和灰色关联分析对雾封层材料性能指标进行统计分析。具体的技术路线如图1所示。

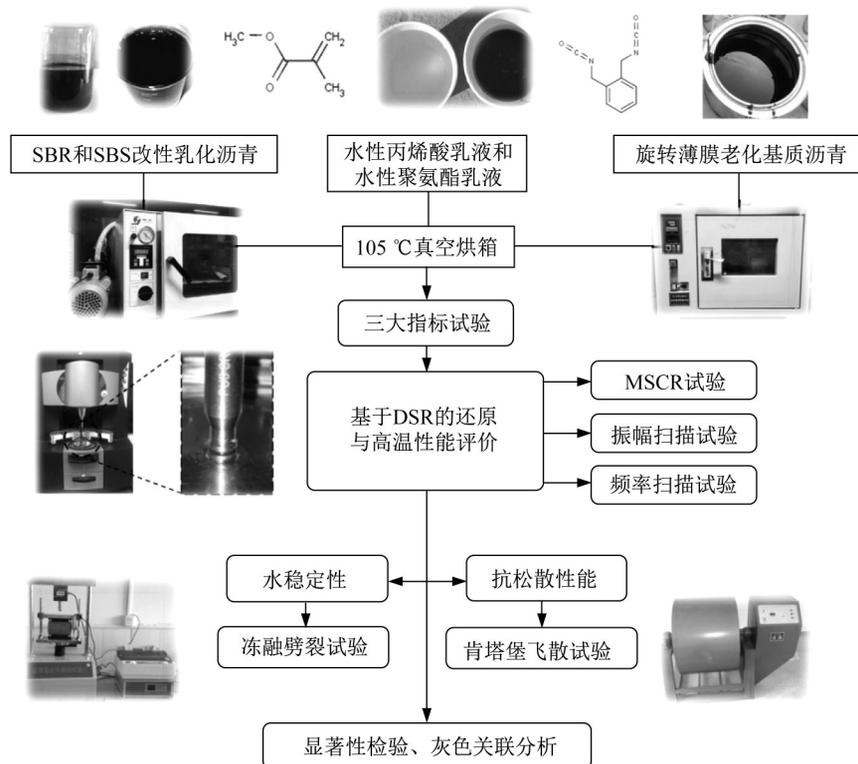


图1 技术路线

Fig.1 Experimental scheme

1.2 试验材料

试验所使用的基质沥青为山东京博 70 号沥青, SBR 和 SBS 改性乳化沥青作为常用的 2 种雾封层基体材料。另外,选取市面上的雾封层产品 Star Seal 作为对照材料。基质沥青和乳化沥青的基本性质根据规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

(JTG E20—2011)进行测试,结果如表 1 所示。

试验所用粗集料为玄武岩,细集料为石灰岩,质量指标符合《公路工程集料试验规程》(JTG 42—2005)的指标要求。选取水性丙烯酸酯乳液和水性聚氨酯乳液作为改性剂制备改性沥青乳液,2 种水性改性剂的基本性质如表 2 所示。

表 1 基质沥青和乳化沥青的基本性质

Tab.1 Basic properties of base asphalt and emulsified asphalt

| 性能指标 | 单位 | 70号沥青 | 质量指标 | 测试方法 |
|------------------|--------------------|----------|----------|--------|
| 针入度(25℃,5s,100g) | 0.1mm | 71.2 | 60~80 | T 0604 |
| 软化点(R&B) | ℃ | 46.3 | ≥46 | T 0606 |
| 60℃动力黏度 | Pa·s | 192 | ≥180 | T 0620 |
| 15℃延度 | cm | >150 | ≥100 | T 0605 |
| 密度(15℃) | g·cm ⁻³ | 1.035 | ≥1.01 | T 0603 |
| 闪点 | ℃ | 276 | ≥260 | T 0611 |
| 蜡含量(蒸馏法) | % | 1.7 | ≤2.0 | T 0615 |
| 性能指标 | 单位 | SBR 乳化沥青 | SBS 乳化沥青 | 测试方法 |
| 恩格拉黏度(25℃) | | 13.0 | 4.8 | T 0622 |
| 蒸发残留物含量 | % | 59 | 62 | T 0651 |
| 筛上剩余量(1.18mm) | % | 0.06 | 0.06 | T 0652 |
| 离子电荷 | | 阳离子(+) | 阳离子(+) | T 0653 |
| 存储稳定性(1d) | % | 0.3 | 0.5 | T 0655 |
| 存储稳定性(5d) | % | 1.1 | 1.5 | T 0655 |
| 破乳速度 | | 慢 | 快 | T 0658 |

表 2 水性改性剂的基本性质

Tab.2 Basic properties of waterborne additives

| 性能指标 | 单位 | 水性丙烯酸酯 | 水性聚氨酯 |
|----------|--------------------|---------|---------|
| 外观 | | 黄白牛奶状液体 | 白色牛奶状液体 |
| 固含量 | % | 35 | 38±2 |
| pH值(22℃) | | 6.0 | 8.0 |
| 离子电荷 | | 阳离子(+) | 阳离子(+) |
| 黏度 | mPa·s | <500 | <500 |
| 密度 | g·cm ⁻³ | 1.06 | 1.00 |
| 存储稳定性 | 月 | >1 | >3 |

1.3 试件制备

将水性丙烯酸酯乳液和水性聚氨酯乳液在常温下掺入沥青乳液后,搅拌均匀,水性改性剂的添加量为乳化沥青质量的 6%。制备的样品在室温下静置 24 h 后,根据规范 T 0655 进行乳化沥青储存稳定性试验。试验结果表明,水性聚氨酯乳液和 SBS 乳化沥青发生破乳反应,其余样品稳定性值 S_{1d} 满足规范要求。按照《沥青旋转薄膜加热试验》(T 0610—1993)进行基质沥青的老化,采用外掺法将 5% (质量比)的雾封层材料与老化后的基质沥青物理混合,搅拌均匀后,在 105℃真空烘箱内放置 1 h,以挥发雾封层材料中可能存在的稀释剂。沥青混合料级配参考 AC-13 的级配要求,油石比采用 4.9% 的质量比,沥青混合料设计级配如图 2 所示。

在马歇尔试件成型前,先将充分拌和后的混合

料在 135℃的烘箱中放置 4 h,进行短期老化。沥青混合料短期老化后成型标准马歇尔试件,双面击实

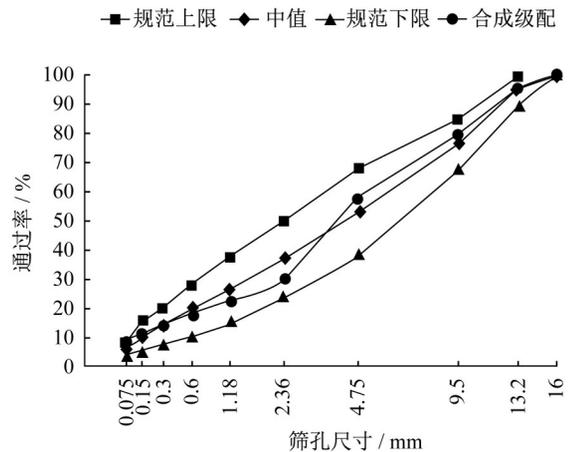


图 2 AC-13 级配曲线

Fig.2 Gradation curve of AC-13

75次,马歇尔试件孔隙率控制在3.5%~4.5%。马歇尔试件完全浸泡在雾封层材料中,取出后在80℃的烘箱中放置24h,进行混合料试件的再次短期老化。设置标准试件(老化沥青,未涂布雾封层)、涂布Star Seal(Star Seal)、涂布SBR乳化沥青(SBR)、涂布SBS乳化沥青(SBS)、涂布SBR乳化沥青+6%质量比的水性丙烯酸酯乳液(SBR+丙烯酸酯)、涂布SBR乳化沥青+6%质量比的水性聚氨酯乳液(SBR+聚氨酯)和涂布SBS乳化沥青+6%质量比的水性丙烯酸酯乳液(SBS+丙烯酸酯)共计7种试件。每种试验至少制备3个平行样品。

1.4 试验与分析方法

1.4.1 三大指标试验

根据规范T 0604,在25℃下进行针入度测试。将样品在水浴中恒温,在5s内以标准载荷(100g)标准针进行测试。根据规范T 0606,采用环球法进行软化点(R&B)测试。将装有样品的环和钢球在5℃的水浴中冷却,15min后,在水浴中以恒定速率(5℃·min⁻¹)加热,钢球落下后记录软化点的温度。根据规范T 0605,在15℃下进行沥青延度试验,拉伸速率为5cm·min⁻¹。

1.4.2 重复蠕变恢复试验

根据规范AASHTO T 350,在64℃下进行重复蠕变恢复试验。在0.1kPa和3.2kPa的应力水平下分别进行10次蠕变和恢复循环。在每个循环中,对样品施加恒定应力1s,然后进行9s的恢复,计算平均蠕变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J_{nr} ,如下所示:

$$J_{nr}(\sigma, N) = \frac{\xi_{10}}{\sigma}$$

$$J_{nr}(\sigma) = \frac{J_{nr}(\sigma, N)}{10}$$

$$R(\sigma, N) = \frac{(\xi_1 - \xi_{10}) \times 100}{\xi_1}$$

$$R(\sigma) = \frac{\xi_r(\sigma, N)}{10}$$

式中: σ 为加载应力; N 为加载次数; $\xi_{10} = \xi_r - \xi_0$,其

$$\varepsilon_j(k) = \frac{\min(j) \min(k) |x_0(k) - x_j(k)| + \beta \max(j) \max(k) |x_0(k) - x_j(k)|}{|x_0(k) - x_j(k)| + \beta \max(j) \max(k) |x_0(k) - x_j(k)|}$$

式中: $\varepsilon_j(k)$ 为第 k 个指标的比较序列和参考序列之间的相关系数; β 为分辨率, $\beta \in (0, 1)$ 。

(4)灰色关联度计算式为

$$r_j = w_k \varepsilon_j(k)$$

(5)根据计算出的关联度,对评价对象进行排序。

中 ξ_r 为每个循环恢复部分结束时的应变, ξ_0 为每个循环蠕变部分开始时的初始应变; $\xi_1 = \xi_c - \xi_0$,其中 ξ_c 为每个循环蠕变部分结束时的应变。

1.4.3 振幅扫描试验

根据规范AASHTO T 315,在64℃和10Hz下进行振幅扫描试验,应变从0.001%增加到100%,测量材料的动态模量、相位角等在不同应变下的变化趋势,以确定样品的线性黏弹性区(LVE)。

1.4.4 频率扫描试验

根据规范AASHTO T 315,在64℃下进行频率扫描试验,在100Pa的恒定应力下选择0.1~100Hz的频率。为确保试验保持在线性黏弹性区,根据振幅扫描结果,选择0.1%的控制应变加载模式。

1.4.5 冻融劈裂试验

根据规范T 0729进行冻融劈裂试验。一组试件经过饱水、冷冻等过程处理,另一组试件不做处理。根据冻融前劈裂强度和冻融后劈裂强度,计算冻融劈裂强度比(tensile strength ratio, TSR)来评价沥青混合料的水稳定性。

1.4.6 肯塔堡飞散试验

根据规范T 0733,将马歇尔试件放入洛杉矶试验机旋转撞击后,测量沥青混合料试件的飞散损失,以表征沥青路面集料脱落散失的程度,以百分比表示。

1.4.7 灰色关联分析

灰色关联分析是对一个系统发展变化态势的定量描述,可分析各个因素对于结果的影响程度。具体步骤如下所示:

(1)确定评价对象 m 和评价指标 n 。评价指标参考序列为 $x_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$,参考序列由归一化值为1.00的指标组成。评价对象比较序列为 $x_j = \{x_j(k) | k=1, 2, \dots, n\}, j=1, 2, \dots, m$ 。

(2)采用层次分析法确定各评价指标的权重系数 $w_k(k=1, 2, \dots, n)$ 。本研究中的评价对象被认为具有相同的权重。

(3)灰色关联系数计算式为

2 雾封层材料对老化沥青再生效果的评价

2.1 基于三大指标的再生效果评价

不同沥青样品的针入度、软化点和延度如图3所示。根据雾封层材料混合前后三大指标的比值来

定量评价雾封层材料对老化沥青的再生效果。

根据沥青材料的老化机理,沥青组分中树脂和芳烃的某些成分在环境老化作用下转化为沥青质,引起沥青质含量的增加。因此,沥青材料从溶胶-凝胶结构逐渐转变为凝胶结构,宏观上表现为硬化。从图 3 可以看出,雾封层材料的加入明显缓解了老化沥青的硬化,表现为针入度和延度的提高。然而,老化基质沥青的软化点几乎没有变化,因此软化点比值无法较好地反映雾封层材料的再生效果。同

时,由于水性丙烯酸酯和水性聚氨酯树脂基材料的加入,雾封层材料对老化沥青呈现出再生与增强的耦合效果。根据试验结果,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯固化后,形成的聚合物网络交联度提高,起到了弹性增强的效果,这与后续动态剪切流变的试验结果保持一致。由于沥青材料是一种典型的黏弹性材料,雾封层直接承受车辆荷载的冲击,因此提高雾封层材料的弹性可以减少永久变形和提高蠕变恢复,有效延缓沥青材料的失效。

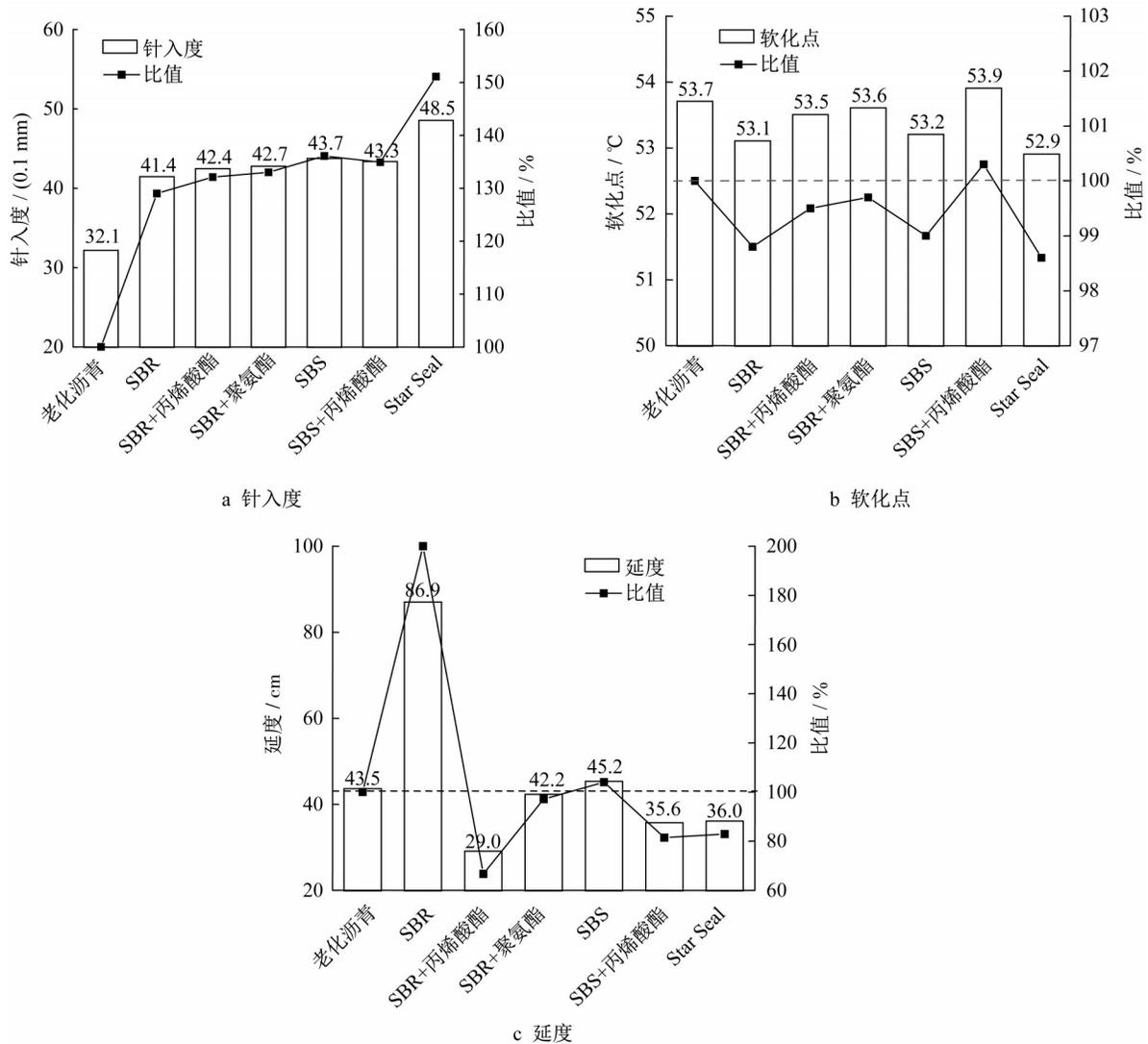


图 3 老化沥青掺入雾封层材料后的针入度、软化点和延度

Fig.3 Penetration, softening point and ductility of aged asphalt with the addition of fog seal materials

2.2 基于重复蠕变恢复试验的再生效果评价

图 4a 为 0.1 kPa 和 3.2 kPa 下不同沥青样品的不可恢复蠕变柔量 J_{ir} 。可以看出,在高、低应力水平下,雾封层材料的掺入显著增大老化沥青的不可恢复蠕变柔量,并且在高应力水平下的增大更加明显。这说明雾封层材料的掺入降低了老化沥青在高、低

应力作用下的高温性能,抵抗变形的能力被削弱,呈现出软化效果。老化沥青高温性能的弱化从侧面反映了雾封层材料对老化沥青的再生效果。水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入降低了沥青样品的不可恢复蠕变柔量。这是由于水性丙烯酸酯和水性聚氨酯固化后交联密度较高,提高了雾封层材料在高、低应

力作用下抵抗变形的能力。图4b为0.1 kPa和3.2 kPa下的蠕变恢复率 R 。从图4b可以看出,无论是SBR改性乳化沥青、SBS改性乳化沥青还是Star Seal,均降低了老化基质沥青的蠕变恢复率,尤其是在高应力水平3.2 kPa下。蠕变恢复率的降低也从侧

面反映了雾封层材料对老化基质沥青的再生效果。然而,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入显著提高了沥青样品的蠕变恢复率,尤其是在低应力水平下,这表明水性丙烯酸酯和水性聚氨酯增强了雾封层材料的弹性部分,这与沥青的老化作用一致。

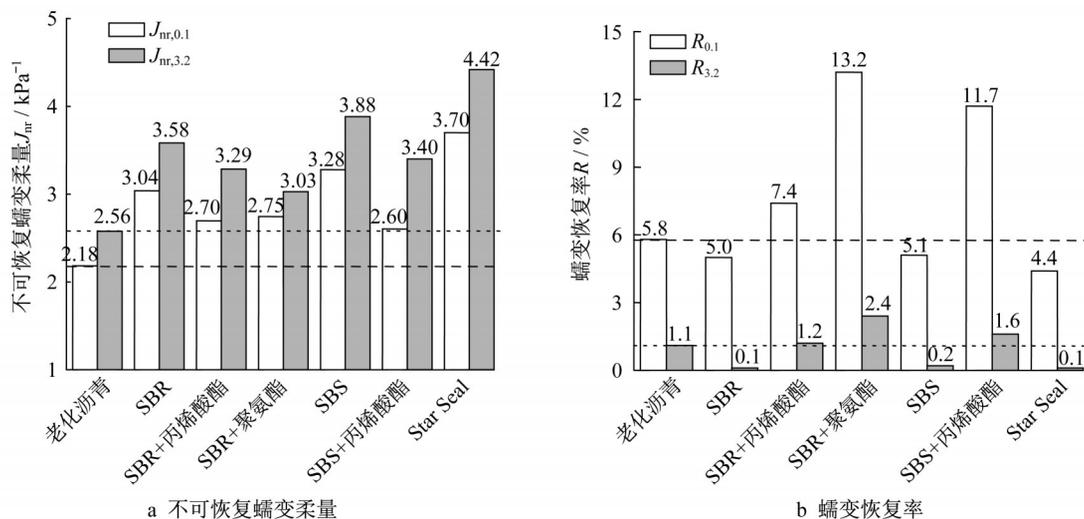


图4 2种应力条件下的重复蠕变恢复试验结果

Fig.4 MSCR test results under two stress conditions

2.3 基于振幅扫描的再生效果评价

沥青材料是一种黏弹性材料,由黏性成分和弹性成分组成,分别对应损耗模量和存储模量。存储模量代表弹性形变(可逆),反映了沥青材料的弹性大小,即可恢复变形能力。损耗模量代表黏性形变(不可逆),反映了沥青材料的黏性大小。损耗模量占比越大,代表沥青的黏性成分比例越高,即不可恢

复变形越大,越容易在实际的路用服役过程中受车辆荷载作用而产生永久变形。振幅扫描试验可以确定沥青材料的线性黏弹性区,在该区域内沥青的模量几乎恒定,当存储模量偏离线性黏弹性区平台时,对应线性黏弹性区的极限应变 ϵ_L 。在测试温度下沥青样品的存储模量和损耗模量如图5所示,计算的线性黏弹性区特征参数如表3所示。

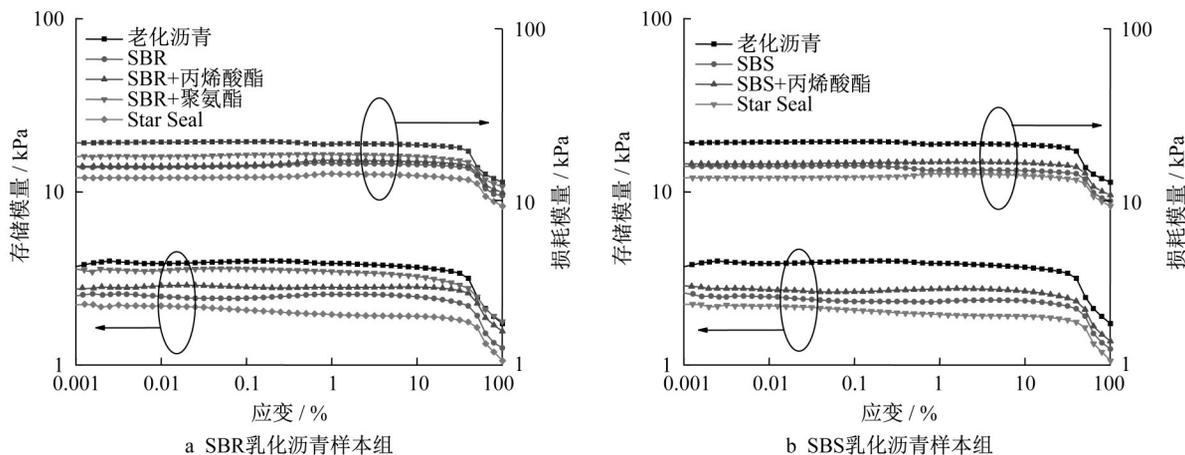


图5 振幅扫描曲线

Fig.5 Amplitude sweep curve

显然,随着剪切应变的增大,所有沥青样品的存储模量和损耗模量逐渐降低,直到偏离线性黏弹性

区平台。雾封层材料的掺入明显降低了老化基质沥青的储能模量和损耗模量,表明沥青样品抵抗变形

表 3 线性黏弹性区特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of linear visco-elastic region

| 沥青样品 | 存储模量/kPa | 损耗模量/kPa | 极限应变 ϵ_1 /% |
|-----------|----------|----------|----------------------|
| 老化沥青 | 3.89 | 19.28 | 25.15 |
| SBR | 2.54 | 13.86 | 31.62 |
| SBR+丙烯酸酯 | 2.84 | 14.09 | 25.13 |
| SBR+聚氨酯 | 3.51 | 16.01 | 15.86 |
| SBS | 2.49 | 14.03 | 31.64 |
| SBS+丙烯酸酯 | 2.77 | 14.53 | 25.12 |
| Star Seal | 2.20 | 12.05 | 0.50 |

的能力有所降低,线性黏弹性区极限应变也有所增大,表明线性黏弹性区有所扩大,体现出雾封层材料

对老化基质沥青的再生效果。然而,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入提高了老化基质沥青的存储模量和损耗模量,减小了线性黏弹性区极限应变,表明水性丙烯酸酯和水性聚氨酯减少了雾封层材料的黏性部分,提高了弹性部分,这与重复蠕变恢复试验结果一致。

2.4 基于频率扫描的再生效果评价

由动态频率扫描试验可得到各沥青样品在频率下的复合剪切模量和相位角,以及由此衍生的车辙因子,试验结果如图 6 所示。根据常见交通车辆的荷载频率,选取 10 Hz 作为特征频率,计算出的复合剪切模量、相位角和车辙因子如表 4 所示。

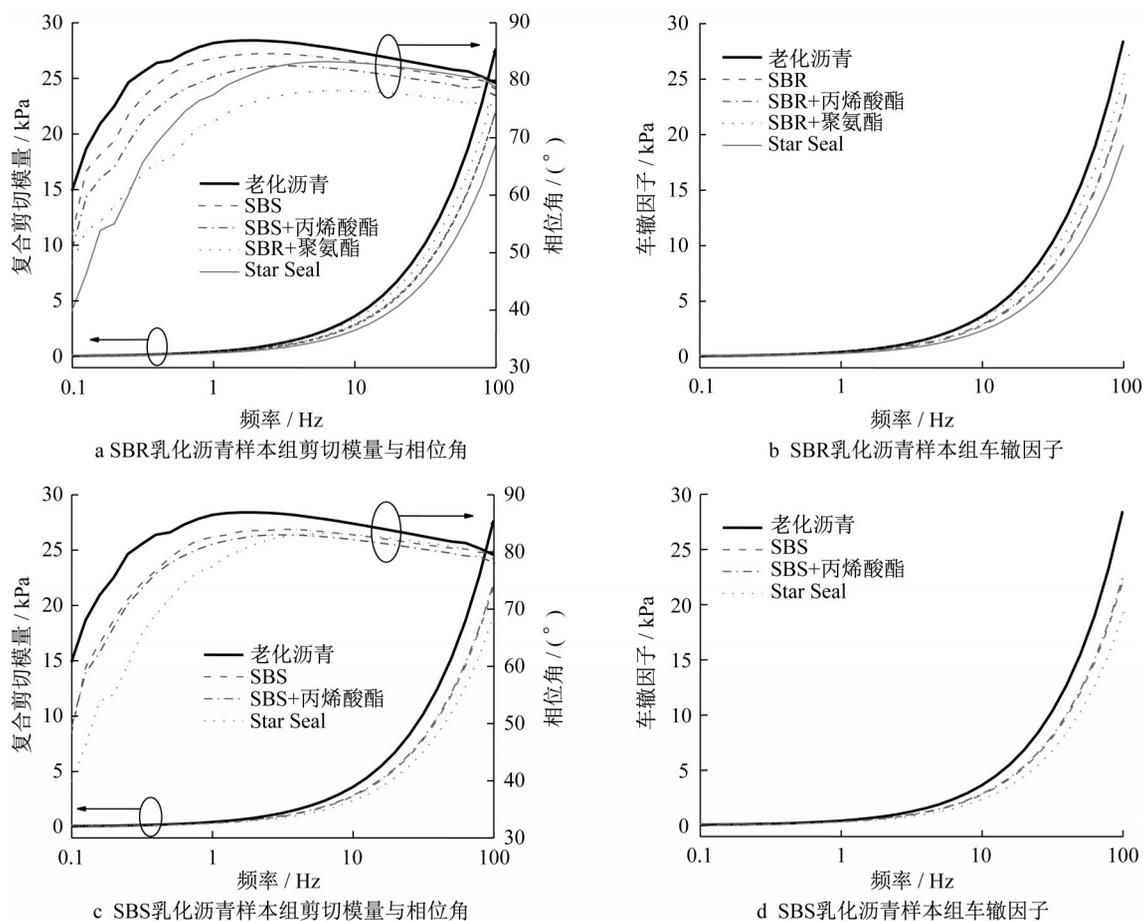


图 6 频率扫描曲线

Fig.6 Frequency sweep curve

复合剪切模量表征沥青材料抵抗变形的能力,相位角是表现沥青材料黏弹性的指标。从图 6 和表 4 可以观察到,随着加载频率的不断增大,复合剪切模量逐渐提高,相位角呈现先增大后减小的趋势。相比 SBR 和 SBS 改性乳化沥青,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入会提高雾封层材料的复合剪切模量和减小雾封层材料的相位角,呈现出抗变形能力增

强的变化趋势。车辙因子耦合了复合剪切模量和相位角的变化影响,反映了沥青材料抵抗不可恢复变形的性能。依据时温等效原理可以得出以下结论:雾封层材料的掺入会降低老化沥青在高频(低温)状态下的车辙因子,说明对沥青在低温下抗变形能力有降低作用;在低频(高温)状态下的车辙因子虽然相差不大,但总体还是有所降低,说明雾封层材料的

表4 10 Hz下频率扫描特征参数

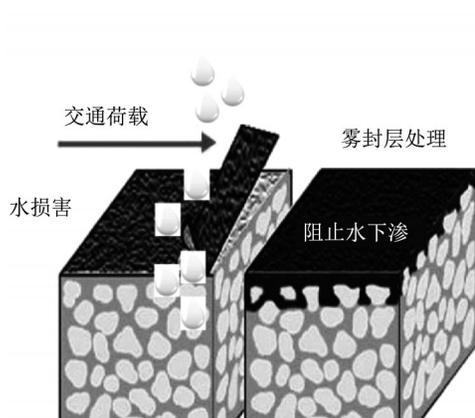
Tab.4 Characteristic parameters of frequency sweep at 10 Hz

| 沥青样品 | 复合剪切模量/kPa | 相位角/(°) | 车辙因子/kPa |
|-----------|------------|---------|----------|
| 老化沥青 | 3.599 | 84.95 | 3.634 |
| SBR | 2.767 | 83.27 | 2.786 |
| SBR+丙烯酸酯 | 2.874 | 81.64 | 2.905 |
| SBR+聚氨酯 | 3.345 | 78.13 | 3.418 |
| SBS | 2.743 | 82.99 | 2.763 |
| SBS+丙烯酸酯 | 2.821 | 82.14 | 2.848 |
| Star Seal | 2.341 | 83.03 | 2.358 |

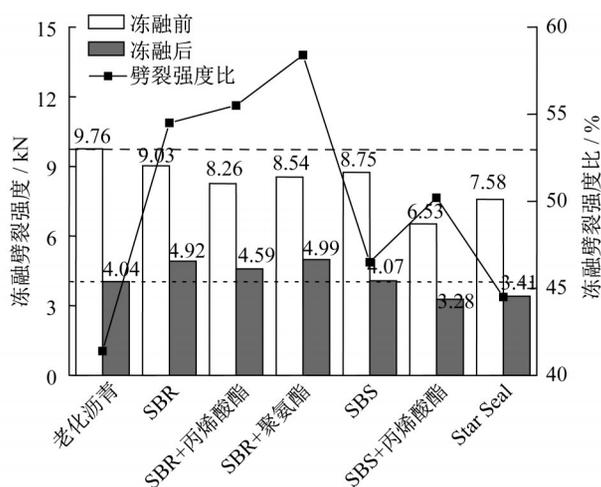
掺入对老化沥青的高温抗车辙能力有弱化作用。此时水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入有效弥补了沥青材料高温抗车辙能力的损失。

3 雾封层材料对沥青混合料水稳定性的影响

水损害是指沥青路面在水或冻融循环下,由于车辆动态荷载的作用,进入路面空隙中的水不断产



a 路面水损病害示意图



b 混合料冻融劈裂强度

图7 沥青路面水损病害和混合料冻融劈裂强度

Fig.7 Moisture damage and splitting strength of asphalt mixture after freeze-thaw

4 雾封层材料对沥青混合料抗松散性能的影响

沥青混合料的抗松散性能是指其抗剥离的能力。当路表沥青混合料的黏结性能较差时,水分进入胶结料与集料之间的薄弱区,在水分和交通荷载的耦合作用下,极易发生剥落病害,产生飞散等现象,如图8a所

生动水压力或真空负压抽吸的反复循环,水分逐渐渗入沥青与集料的界面上,使沥青黏附性降低并逐渐丧失黏结力,沥青从集料表面剥离,混合料掉粒、松散,继而形成沥青路面的坑槽、推挤变形等损坏现象,如图7a所示。采用冻融劈裂试验检验沥青混合料(试件)的水稳定性。本研究中对沥青混合料试件进行了长时间的老化处理,以模拟水稳定性较差的实际路面情况。试验结果如图7b所示。

从图7可以看出,雾封层材料浸泡后,沥青混合料冻融前的劈裂强度略微降低,冻融后的劈裂强度并未表现出明显规律。老化沥青试件的冻融劈裂强度比(TSR)较低,水稳定性较差。虽然雾封层材料浸泡后冻融劈裂强度比仍不合格,但是相比未浸泡过的标准试件,冻融劈裂强度比有所提高。水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的加入进一步提高了雾封层材料的水稳定性。雾封层材料浸泡后,沥青混合料试件的冻融劈裂强度比明显提高,表明雾封层材料对沥青混合料的水稳定性有积极影响,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入进一步强化了沥青混合料的水稳定性。

示。采用肯塔堡飞散试验对沥青混合料及雾封层材料的影响进行了评价,试验结果如图8b所示。

如图8b所示,雾封层处理后沥青混合料试件的质量损失率明显降低。Star Seal浸泡后,沥青混合料的抗松散性能几乎无变化,SBR和SBS改性乳化沥青的浸泡提高了混合料的抗松散性能,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的加入进一步提高了沥青混合料的抗松散性能。

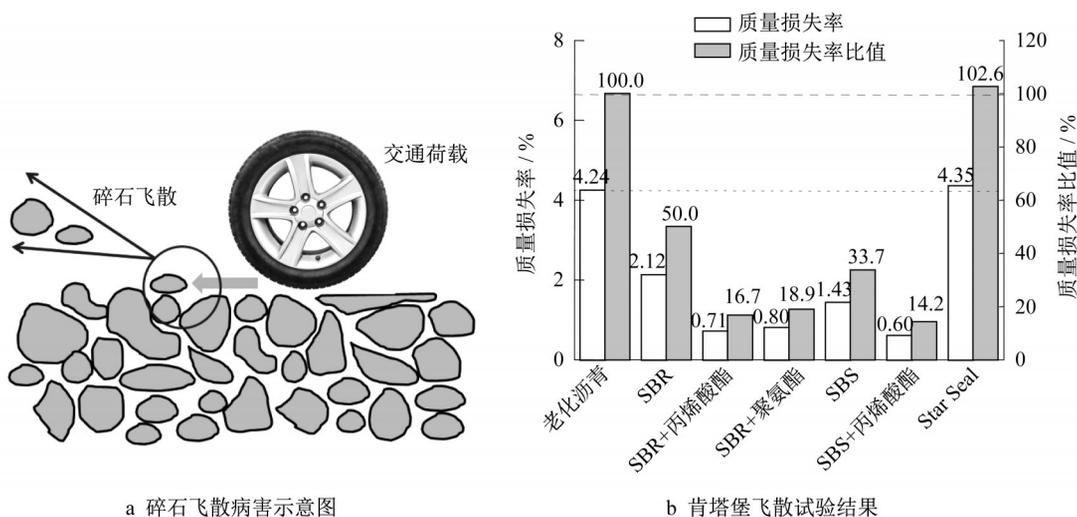


图 8 碎石飞散病害和肯塔堡飞散试验结果

Fig.8 Stripping disease and Cantanbro stripping test results

5 水性乳液改性乳化沥青的改性机理

图 9 为水性丙烯酸酯和水性聚氨酯在改性乳化沥青时的机理。水性聚氨酯和水性丙烯酸酯作为多嵌段共聚物,主链中包含氨基甲酸酯基团(-NHCOO-)和羧基基团(-COOH),水性聚氨酯和水性丙烯酸酯官能团可通过氢键和结晶发生化学交联反应;同时,水性聚氨酯和水性丙烯酸酯分子包含硬链段和软链段,

具有相应的刚性和柔韧性。随着水分的蒸发,丙烯酸酯和聚氨酯分子结构中软硬链段进一步交联引起固化反应,从而形成强度更高的聚合物网络结构,同时赋予雾封层材料更高的机械强度和弹性性能,从而提高雾封层材料的耐久性能。主链中包含的氨基甲酸酯极性基团和羧基极性基团可以提高雾封层材料与碱性集料的黏结强度。因此,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯有效地提升了沥青混合料的水稳定性和抗松散性能。

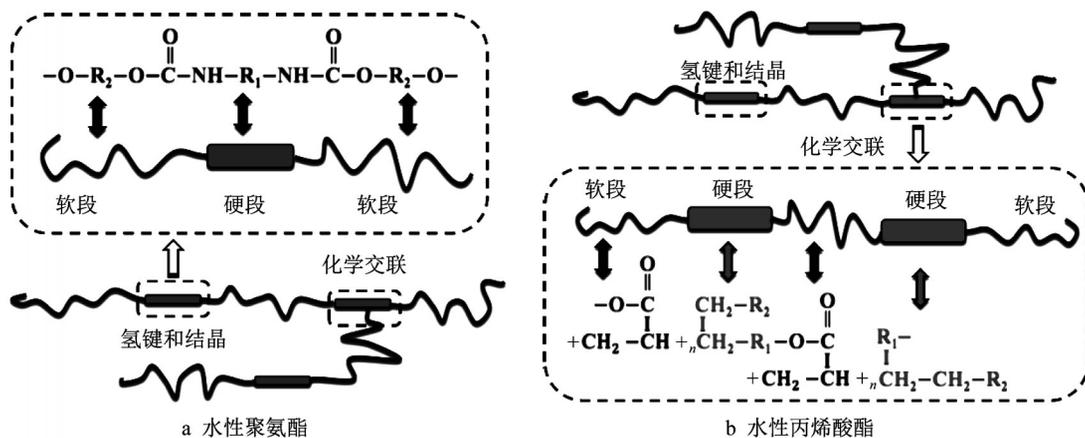


图 9 水性聚氨酯和水性丙烯酸酯交联固化反应示意图

Fig.9 Schematic diagram of crosslinking and curing reaction of waterborne polyurethane and acrylate

6 统计结果分析

为了进一步评价雾封层材料对沥青及混合料性能的影响,以 5% 的显著性水平 α (即拒绝一个真实假设的错误概率为 0.05) 对各项指标进行统计分析,以检验水性丙烯酸和水性聚氨酯掺入的改性效果。雾封层材料性能显著性统计分析结果如表 5 所示。

从表 5 可以看出,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入对雾封层材料的延度、不可恢复蠕变柔量、蠕变恢复率、极限应变 ϵ_L 和质量损失率比值产生显著性影响,而针入度、软化点、车辙因子和冻融劈裂强度比等指标未反映出显著性差异。利用灰色关联分析(GRA)定量分析了水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的掺入对雾封层材料再生效果和增强效果的耦合影

响。计算出的灰色关联系数和排序结果如表 6 和图 10 所示。

表 5 雾封层材料性能显著性统计分析($\alpha=0.05$)

Tab.5 Significance statistical analysis of fog seal materials' performance ($\alpha=0.05$)

| 性能指标 | 各雾封层材料性能指标的 P 值 | | |
|-------------------|-----------------|---------|----------|
| | SBR+丙烯酸酯 | SBR+聚氨酯 | SBS+丙烯酸酯 |
| 针入度 | 0.385 | 0.103 | 0.678 |
| 软化点 | 0.208 | 0.111 | 0.070 |
| 延度 | 0.004 | 0.009 | 0.062 |
| $J_{nr,0.1}$ | 0.010 | 0.015 | 0.015 |
| $J_{nr,3.2}$ | 0.004 | 0.012 | 0.122 |
| $R_{0.1}$ | 0.008 | 0.003 | 0.006 |
| $R_{3.2}$ | 0.001 | 0.002 | 0.033 |
| 极限应变 ϵ_L | 0.004 | 0.001 | 0.006 |
| 车辙因子 | 0.593 | 0.003 | 0.412 |
| 冻融劈裂强度比 | 0.860 | 0.391 | 0.054 |
| 质量损失率比值 | 0.002 | 0.003 | 0.007 |

表 6 雾封层材料再生效果灰色关联分析

Tab.6 Gray relational analysis of fog seal materials' rejuvenation effects

| 沥青样品 | 各性能指标的灰色关联系数 | | | | | | | | |
|-----------|--------------|-------|-------|--------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|-------|
| | 针入度 | 软化点 | 延度 | $J_{nr,0.1}$ | $J_{nr,3.2}$ | $R_{0.1}$ | $R_{3.2}$ | 极限应变 ϵ_L | 车辙因子 |
| 老化沥青 | 0.429 | 0.667 | 0.454 | 0.429 | 0.429 | 0.674 | 0.518 | 0.449 | 0.429 |
| SBR | 0.519 | 0.439 | 1.000 | 0.518 | 0.513 | 0.806 | 1.000 | 0.429 | 0.555 |
| SBR+丙烯酸酯 | 0.540 | 0.515 | 0.429 | 0.468 | 0.477 | 0.552 | 0.506 | 0.449 | 0.520 |
| SBR+聚氨酯 | 0.547 | 0.556 | 0.452 | 0.474 | 0.455 | 0.429 | 0.429 | 0.502 | 0.445 |
| SBS | 0.575 | 0.451 | 0.459 | 0.584 | 0.576 | 0.785 | 0.862 | 0.429 | 0.563 |
| SBS+丙烯酸酯 | 0.563 | 1.000 | 0.438 | 0.458 | 0.489 | 0.445 | 0.469 | 0.449 | 0.535 |
| Star Seal | 1.000 | 0.429 | 0.440 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

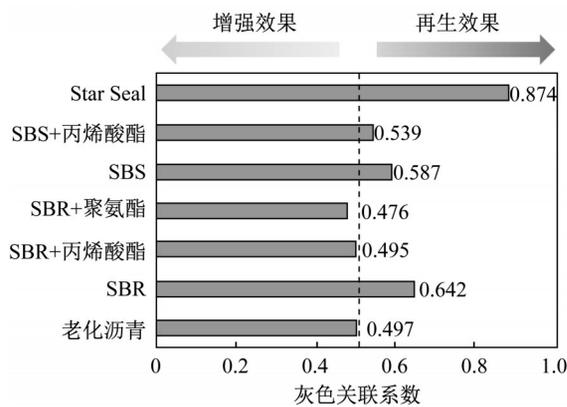


图 10 雾封层材料再生效果灰色关联系数

Fig.10 Gray correlation coefficient of fog seal materials' rejuvenation effects

雾封层材料再生效果的灰色关联分析结果表明,雾封层材料对老化沥青有明显的再生作用,水性丙烯酸酯或水性聚氨酯的加入提高了雾封层材料对老化基质沥青的增强效果。Star Seal 产品表现出了最好的再生效果。因为相比基于普通乳化沥青的雾封层材料,Star Seal 产品中含有较多的芳香烃等轻组分物质,因此对老化沥青的再生效果较好。另外,由表 6 可以看出,基于三大指标的再生效果评价一

致性较差,而基于重复蠕变恢复试验和振幅扫描试验的再生效果之间存在较强的一致性。

7 结论

(1)雾封层技术作为高效的沥青路面预防性养护技术,可以有效缓解老化沥青的硬化,表现为针入度和延度的提高,但软化点似乎无法明显反映雾封层材料的再生效果。蠕变恢复率和不可恢复蠕变柔量作为性能指标更能体现雾封层材料对老化沥青再生效果的影响,而 Star Seal 产品中含有较多的芳香烃等轻组分物质,表现出最佳的再生效果。

(2)雾封层材料降低了老化沥青的复合剪切模量和相位角,车辙因子的降低表明雾封层材料对老化沥青硬化的缓解,体现出雾封层材料对老化沥青的再生效果。同时,水性丙烯酸酯和水性聚氨酯的加入减小了雾封层材料的线性黏弹性区,提高了老化沥青的存储模量和损耗模量。

(3)雾封层材料对沥青混合料的水稳定性有积极影响,同时雾封层处理后沥青混合料试件的质量损失率明显降低。水性丙烯酸酯和水性聚氨酯中存

在氨基甲酸酯和羧基极性基团,进一步强化了沥青混合料的水稳定性和抗松散性能。

作者贡献声明:

徐凌:试验开展,论文撰写与修改。

王小兵:数据采集,数据分析。

李先锐:试验设计,数据采集。

管鑫:数据采集,数据分析。

肖飞鹏:研究方向确定,论文修改。

参考文献:

- [1] 林俊涛,吴少鹏,刘全涛,等. 沥青路面功能性预养护材料的养护时机研究[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 19.
LIN Juntao, WU Shaopeng, LIU Quantao, *et al.* Research on maintenance time for functional preventive materials in asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 19.
- [2] 刘豫. 沥青碎石封层在路面养护技术中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
LIU Yu. Research on application of asphalt chip seal in pavement maintenance technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [3] PRATICÒ F G, VAIANA R, IUELE T. Macrotecture modeling and experimental validation for pavement surface treatments[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95(4): 658.
- [4] 王慧峰. 高摩阻薄层罩面材料设计与技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
WANG Huifeng. Research on the material design and technical performance of high friction course [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [5] BHARGAVA N, SIDDAGANGAIAH A K, LYNGDOH RYNTATHIANG T. Systematic approach to address challenges in microsurfacing mix design [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121759.
- [6] ZALNEZHAD M, HESAMI E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2020, 7(2): 215.
- [7] LIU F, ZHENG M, FAN X, *et al.* Properties and mechanism of waterborne epoxy resin-SBR composite modified emulsified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2021, 274(2): 122059.
- [8] ZHANG Z, YANG J, FANG Y, *et al.* Design and performance of waterborne epoxy-SBR asphalt emulsion (WESE) slurry seal as under-seal coat in rigid pavement [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270(2): 121467.
- [9] CUI P, WU S, XU H, *et al.* Silicone resin polymer used in preventive maintenance of asphalt mixture based on fog Seal [J]. Polymers, 2019, 11(11): 1814.
- [10] 王朝辉,殷卫永,孙晓龙,等. 环保型降温微表处制备及其功效[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 9.
WANG Chaohui, YIN Weiyong, SUN Xiaolong, *et al.* Preparation and effect of environment-friendly cooling micro-surfacing [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(7): 9.
- [11] 余增兵. 嵌固型砂雾封层路用性能及其表面纹理特征研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
YU Zengbing. Study on road performance and pavement texture characteristic of thermosetting inserting chip seal [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [12] ISLAM R M, ARAFAT S, WASIUDDIN N M. Quantification of reduction in hydraulic conductivity and skid resistance caused by fog seal in low-volume roads [J]. Transportation Research Record, 2017, 2657(1): 99.
- [13] PRAPAITRAKUL N, FREEMAN T, GLOVER C. Fog seal treatment effectiveness analysis of pavement binders using the t-test statistical approach [J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(18): 1895.
- [14] 陈娟. 基于全寿命周期成本的高速公路沥青路面养护决策研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
CHEN Juan. Research on maintenance decision of expressway asphalt pavement based on life cycle cost [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [15] HAN S, YAO T, HAN X, *et al.* Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture [J]. Construction and Building Materials, 2020, 249(6): 118835.
- [16] HU C, ZHAO J, LENG Z, *et al.* Laboratory evaluation of waterborne epoxy bitumen emulsion for pavement preventative maintenance application [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197(10): 220.
- [17] LI R, LENG Z, ZHANG Y, *et al.* Preparation and characterization of waterborne epoxy modified bitumen emulsion as a potential high-performance cold binder [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 235(14): 1265.
- [18] XIANG Q, XIAO F. Applications of epoxy materials in pavement engineering [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235(3): 117529.
- [19] LI X, OUYANG C, YUAN Y, *et al.* Evaluation of ethylene-acrylic acid copolymer (EAA)-modified asphalt: fundamental investigations on mechanical and rheological properties [J]. Construction and Building Materials, 2015, 90: 44.
- [20] SHENG X, WANG M, XU T, *et al.* Preparation, properties and modification mechanism of polyurethane modified emulsified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 375.