

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.009

VAE 改性乳化沥青及其性能研究

姚爱玲¹, 杨浩¹, 郑华宇², 马俊龙³, 王永岗⁴, 王磊挺⁵

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 3. 山西路桥第一工程有限公司五分公司, 山西 太原 030006; 4. 山西路桥集团试验检测中心有限公司, 山西 太原 030006; 5. 浙江省交通投资集团有限公司杭金衢分公司杭绍管理处, 浙江 绍兴 311816)

摘要:针对普通乳化沥青冷再生混合料水稳定性与温度稳定性较差的问题, 文章提出醋酸乙烯-乙烯(vinyl acetate-ethylene, VAE)水性胶改性乳化沥青; 通过改性乳化沥青在集料表面的剥落率、蒸发残留后的沥青技术指标优选出 VAE 改性剂的种类为 DA-1410 胶粉; 采用动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)试验及荧光显微镜试验, 测试 VAE 质量分数(简称“掺量”) 对改性乳化沥青蒸发残留物性能的影响。结果表明: 随着 VAE 掺量增加, 改性乳化沥青蒸发残留物的三大指标、沥青标准黏度及沥青在集料表面的剥落率都显著提高; 复数剪切模量 G^* 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 逐渐增大; 当 VAE 掺量为 3%~4% 时, 沥青的各项性能指标都优异, 且其固化物颗粒在沥青中均匀分布, 形成紧密结合的交联结构, 乳化沥青的性能得到改善。研究结果可为拓展冷再生技术及其应用提供参考。

关键词:道路工程; 乳化沥青冷再生; 醋酸乙烯-乙烯(VAE)水性胶改性乳化沥青; 动态剪切流变仪(DSR)试验; 荧光显微镜试验

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2023)04-0481-07

VAE modified emulsified asphalt and its performance

YAO Ailing¹, YANG Hao¹, ZHENG Huayu², MA Junlong³, WANG Yonggang⁴, WANG Leitong⁵

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Areas of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. The Fifth Branch of Shanxi Road and Bridge The First Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 4. Shanxi Road and Bridge Group Test and Inspection Center Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 5. Hangshao Management Office of Hangjiinqu Branch of Zhejiang Communications Investment Group Co., Ltd., Shaoxing 311816, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor water stability and temperature stability of common emulsified asphalt cold recycled mixture, a vinyl acetate-ethylene(VAE) modified emulsified asphalt was proposed. The type of VAE modifier selected by the exfoliation rate of the modified emulsified asphalt on the aggregate and the technical indicators of the remaining asphalt after evaporation is DA-1410 rubber powder. The effect of VAE content(mass fraction) on the performance of evaporation residue of modified emulsified asphalt was tested using dynamic shear rheometer(DSR) and fluorescence microscope tests. The results show that with the increase of VAE content, the three major indicators of modified emulsified asphalt evaporation residue, standard viscosity of asphalt, and exfoliation rate of asphalt on the aggregate significantly increase; complex shear modulus G^* and rutting factor $G^*/\sin \delta$ gradually increase; when the VAE content is 3%-4%, the various performance indicators of asphalt are excellent, and the solidified particles are evenly distributed in the asphalt to form a tightly combined cross-linked structure, thereby improving the performance of the emulsified asphalt. The research results can provide a reference for expanding the cold recycling technology and its application.

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078048); 山西路桥建设集团科技资助项目(SXLQ-YGS-035-2020)

作者简介: 姚爱玲(1965—), 女, 陕西澄城人, 博士, 长安大学正高级工程师, 硕士生导师。

Key words: road engineering; cold recycling of emulsified asphalt; vinyl acetate-ethylene(VAE) modified emulsified asphalt; dynamic shear rheometer(DSR) test; fluorescence microscope test

乳化沥青冷再生是一项绿色、环保、节约资源的再生技术^[1],但在实际工程应用中,普通乳化沥青混合料早期强度较低、水稳定性和抗变形能力较差^[2-4]。山西省国省干线公路 2020 年部分项目改扩建时发现,沥青面层厚度较薄,上面层为 4 cm 厚改性沥青混合料,下面层为 8 cm 厚乳化沥青冷再生混合料;由于道路重载交通量大,对冷再生混合料的要求非常高,有必要通过乳化沥青改性提高冷再生混合料的性能。目前常用的聚合物改性剂有苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(styrene-butadiene-styrene, SBS)嵌段共聚物、丁苯橡胶(styrene-butadiene rubber, SBR)、水性环氧树脂^[5-8]。添加这些改性剂能较好地改善乳化沥青的高低温性能,然而 SBS 改性乳化沥青的生产要求高、难度大、费用高, SBR 改性乳化沥青的高温黏结性能相对较差,水性环氧树脂虽然能显著改善乳化沥青高温和黏结性能,但会使其低温性能恶化^[9-10]。醋酸乙烯-乙烯(vinyl acetate-ethylene, VAE)水性胶作为一种高强和抗渗的线型高分子材料,易与沥青乳化,相容性与稳定性较好^[11],尤其是随着聚合物改性技术的发展,经过多元共混改性和配方优化后得到的 VAE 具有优异的高低温性能、韧性及黏结性能。目前,对于 VAE 改性乳化沥青的研究较少。本文采用 VAE 共聚物对乳化沥青进行改性,寻求 VAE 的优选及最佳质量分数(简称“掺量”),利用小型胶体磨制备 VAE 改性乳化沥青,通过改性乳化沥青在集料表面的剥落率^[12]、蒸发残留后的沥青技术指标来优选 VAE 改性剂;通过不同温度下的动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR) 试验,分析 VAE 掺量对复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 的影响,并计算出相应的车辙因子 $G^*/\sin \delta$,从更深层次分析 VAE 掺量对乳化沥青高温性能和黏弹性能的影响;通过荧光显微镜对不同 VAE 掺量的改性乳化沥青蒸发残留物微观结构进行分析,揭示 VAE 在沥青中的存在状态;通过性能和微观分析给出 VAE 的最佳掺量。研究结果可为拓展冷再生技术及其应用提供参考。

1 原材料与改性乳化沥青制备

1.1 原材料

(1) 选用产自中国石化某公司的 90 号基质

沥青,其 25 °C 针入度为 86(0.1 mm),软化点为 45.2 °C,10 °C 延度为 98 cm,沥青各项性能满足文献^[13]要求。

(2) 选用江苏某公司生产的阳离子慢裂慢凝型乳化剂,其主要性能指标如下:外观为棕黑色黏稠液体,电荷为+,活性物质质量分数为(48.0 ± 2.0)%,pH 值为 8~10。采用质量分数为 36%~38%的盐酸为乳化剂提供酸性环境。

(3) 选用 CaCl₂ 为稳定剂,其外观为白色固态球状颗粒,有效物质量分数大于 96%。

(4) 黏附性试验的集料来自山西吕梁地区,粒径范围为 19.0~31.5 mm,压碎值为 16.7%,针片状质量分数为 12.4%,洛杉矶磨耗值为 24.8%。

1.2 改性剂

VAE 改性剂属于水溶性可再分散乳胶粉,为乙烯、醋酸乙烯酯的共聚物,以聚乙烯醇作为保护胶体,其黏结能力强,抗水性、施工性及隔热性优异。由于多元共混改性及接枝改性的生产工艺扩大了 VAE 的应用领域,市场上的 VAE 品种多且性能差异较大。本文挑选 3 种市售的 VAE,分别用 MX1、MX2、MX3 来表示,MX1 型为一个较小厂家的胶粉,MX2 型为廊坊某厂的 502 型胶粉,MX3 型为大连某化学胶乳厂的 DA-1410 进口胶粉。3 种改性剂均为固体粉末,在 0 °C 以上中度可溶,粒径大于 400 μm 粉末的质量分数为 0.1%,其他技术性能指标取值见表 1 所列。

表 1 3 种改性剂的部分技术性能指标取值

| 技术指标 | MX1 | MX2 | MX3 |
|----------------------------|---------|---------|---------|
| 颜色 | 白色 | 淡黄色 | 白色 |
| pH | 7.0~8.5 | 6.0~7.0 | 6.0~7.0 |
| 堆积密度/(kg·m ⁻³) | 525.0 | 550.0 | 535.0 |
| 玻璃转化温度/°C | 0 | -15.0 | -15.0 |
| $w_{\text{灰分}}/\%$ | 11.0 | 10.0 | 10.0 |

1.3 改性乳化沥青的制备

采用“边乳化边改性”的制备工艺进行改性乳化沥青制备,主要分为加热混溶、控温研磨及恒温存储 3 个步骤。本文设定的乳化沥青固化物质量

分数为62%;外加剂中,乳化剂掺量为3.0%,稳定剂掺量为0.3%;皂液pH值为2.0~3.0;以1.0%为增幅依次提高VAE掺配比例(外加剂均为外掺,按所占沥青质量的百分比计)。改性乳化沥青具体制备步骤如下:①将水加热至75~85℃,加入一定量的乳化剂与稳定剂,并用玻璃棒均匀搅拌30s;②在调制的溶液中加入一定量的改性剂,并用玻璃棒均匀搅拌30s;③向皂液中添加盐酸,使pH值保持在2.0~3.0;④开启胶体磨,并倒入适量的开水进行预热,1min后将热水排出,将预制好的皂液倒入胶体磨中细化剪切3min;⑤将135~140℃的热基质沥青缓慢倒入胶体磨,将胶体磨温度控制在70~80℃剪切4~5min,即可完成改性乳化沥青的制备。

2 VAE 改性剂优选

2.1 试验方法与结果

采用上述生产工艺制备改性乳化沥青,分别按质量分数0.2%、3%、4%、5%添加VAE改性剂,固定乳化剂掺量为3.0%,皂液pH值为2.0~3.0,稳定剂掺量为0.3%。

乳化沥青冷再生混合料浸水后的劈裂强度会有较大幅度降低,因此,本文通过提高沥青与集料的黏附性考察混合料的水稳定性。为了检验VAE改性剂提升乳化沥青与集料黏附性的效果,除了测试蒸发残留物的25℃针入度、5℃延度、软化点、沥青标准黏度 $C_{25.3}$ 及1d储存稳定性外,还测试沥青在集料表面的剥落率,进行综合评价,确定VAE改性剂的最终优选方案。

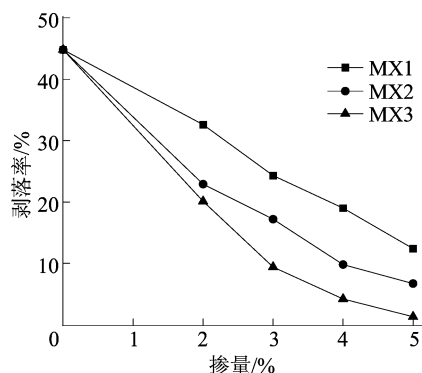
考虑到传统的水煮法较难使沥青从集料表面脱落,且目测观察数据的可靠性较低,目前的黏附性试验不能有效反映乳化沥青在集料上的黏附力强弱,在参照传统水煮法的基础上,对其进行改良并建立一种针对阳离子乳化沥青的水煮法,用剥落率这一量化指标来评价其黏附性好坏。其中与传统方法的主要差异如下:①具体称量水煮前后的集料裹覆沥青的质量,水煮前用VAE改性乳化沥青裹覆19.0~31.5mm集料颗粒,裹覆时将集料在乳化沥青中浸1min,保证集料表面有一层沥青膜,室温晾干24h后称其质量,记为 m_2 ,然后放入60℃的烘箱中烘干1h;②在对集料颗粒水煮时用小型电动搅拌机以500r/s的速率转动水体,从而尽可能干扰沥青在集料中的裹覆。沥青在集料表面的剥落率 λ 计算公式为:

$$\lambda = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

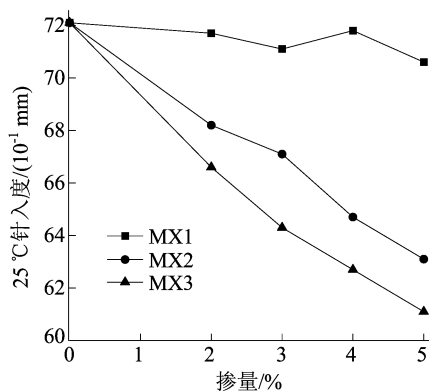
其中: m_1 为未裹覆乳化沥青的集料颗粒干质量; m_2 为水煮前裹覆乳化沥青的集料颗粒质量; m_3 为水煮后裹覆乳化沥青的集料颗粒质量。

剥落率代表沥青与集料的黏附性能,该指标越小,则改性乳化沥青冷再生混合料抗水损的能力越强。

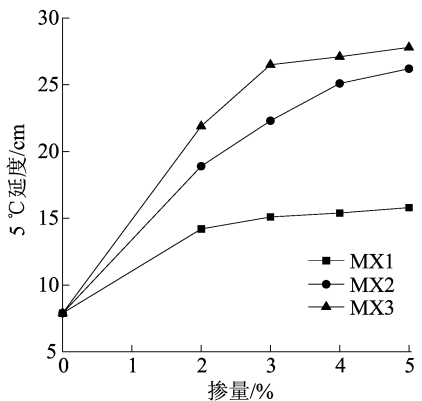
根据文献[14],沥青与集料裹覆面积达到70%以上相当于黏附性3级,本文参照该要求,当 $\lambda \leq 30\%$ 时可认为黏附性已有充分改善。采用3种改性剂的改性乳化沥青6个技术指标试验结果对比如图1所示。



(a) 沥青在集料表面的剥落率



(b) 25℃针入度



(c) 5℃延度

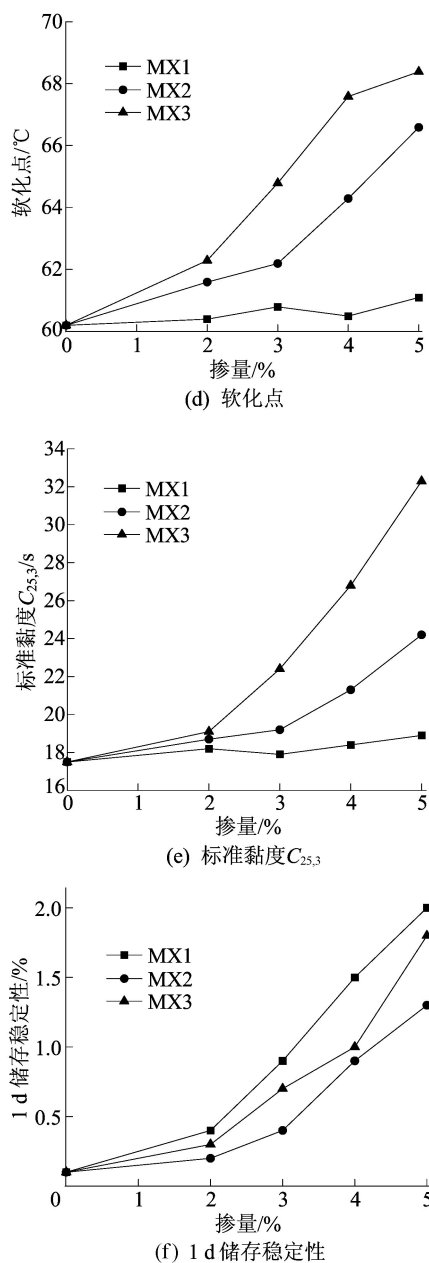


图 1 3 种 VAE 改性剂改性的乳化沥青 6 个技术指标结果对比

2.2 试验结果分析

由图 1a 可知,未参加改性剂时剥落率几乎达到 50%,随着 3 种 VAE 改性剂掺量增加,被改性乳化沥青裹覆的集料经过水煮后的剥落率近似呈直线式减小,说明加入 VAE 改性剂能够有效提高沥青与集料的黏结能力。当 3 种 VAE 改性剂的掺量从 0 增至 3% 时,剥落率的下降幅度最大,再提高掺量后,剥落率的下降幅度逐渐变缓,且当掺量大于等于 3% 时,改性乳化沥青在集料表面的剥落率均小于 30%,即不小于黏附性 3 级,均符合文献[13]要求。在相同掺量下,3 种 VAE 改性剂对剥落率的改善效果是 MX3 最好、MX1 最差,其中 MX3 掺量为 3% 时,剥落率仅为 9.4%,

比未参加改性剂时的剥落率降低近 80%,极大地改善了沥青与集料之间的黏附性,可大幅提高改性乳化沥青冷再生混合料的抗水损能力;该结果表明, MX2、MX3 的水溶性聚合物性能比较优异,尤其是 MX3 改性效果更佳。

从图 1b~图 1d 可以看出:随着 VAE 改性剂掺量增加, MX1 对改性乳化沥青蒸发残留物的 25 °C 针入度、软化点的影响不大, 5 °C 延度有少量增加,且软化点和 5 °C 延度都没有达到改性乳化沥青的规范要求^[13]; MX2、MX3 从三大指标上看,改性效果比较显著, 25 °C 针入度不断减小的同时,软化点在不断上升,说明此时改性乳化沥青的高温稳定性得到显著改善,原因可能是 VAE 的加入及溶胀有效增加了沥青黏度,使其在高温下的性能得到提升。5 °C 延度在改性剂掺量从 0 增加到 3% 的过程中急剧增大,大于 3% 后改善效果逐渐趋于平缓,当 VAE 掺量为 3% 时, MX2、MX3 的低温延度已经相当好,分别达到 22.3、26.5 cm,均比未加入改性剂时提高 3 倍左右,说明其低温抗裂性得到极大改善,原因可能是 VAE 溶胀吸收了沥青中的油分,使沥青质与胶质聚结,同时 VAE 颗粒之间形成网状结构,使得沥青由原来的溶胶结构变成溶-凝胶结构,宏观表现为低温延度增加。综合来看, MX2、MX3 对乳化沥青的高、低温性能均有不错的提升, MX3 对沥青低温性能的改善效果更好。

由图 1e 可知,随着掺量增加, MX1 对改性乳化沥青的标准黏度提升不明显,而 MX2、MX3 在掺量大于 3% 后对沥青标准黏度的提升明显,其中 MX3 的提升效果更显著。

由图 1f 可知, 3 种改性乳化沥青的 1 d 储存稳定性随着掺量增加而不断变差,其中在掺量大于 3% 后, 3 种改性乳化沥青储存稳定性变差的幅度均较大,原因可能是掺量增加使 VAE 颗粒溶胀,吸收了沥青中更多的油分,油分减少使得沥青质与胶质这类大分子组分更容易聚结、絮凝,从而导致储存稳定性下降,其中 MX1 的掺量超过 3% 后不满足 1 d 储存稳定性小于等于 1% 的要求,而 MX2、MX3 在掺量为 4% 时刚好满足规范上限的要求^[13]。因此,从储存的角度看, VAE 掺量不宜超过 4%。

综合对比 6 个指标的试验结果,最终采用 VAE 改性剂 MX3 进行乳化沥青改性,改性剂掺量宜控制在 3%~4%。

3 改性乳化沥青动态剪切流变性能分析

为了分析 VAE 掺量对改性乳化沥青高温性能、黏弹性能的影响,选择 VAE 掺量为 0、3%、4%、5% 的改性乳化沥青蒸发残留物进行 DSR 试验。

3.1 试验结果

采用 DSR 对 VAE 掺量为 0、3%、4%、5% 的 MX3 型 VAE 改性乳化沥青蒸发残留物进行时间-温度扫描试验,试验时板间距为 1 mm,角频率为 10 rad/s,温度分别为 52、58、64、70、76、82、88 °C,测得改性乳化沥青蒸发残留物的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ ,并计算出相应的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 随温度与掺量的变化规律,结果如图 2 所示。

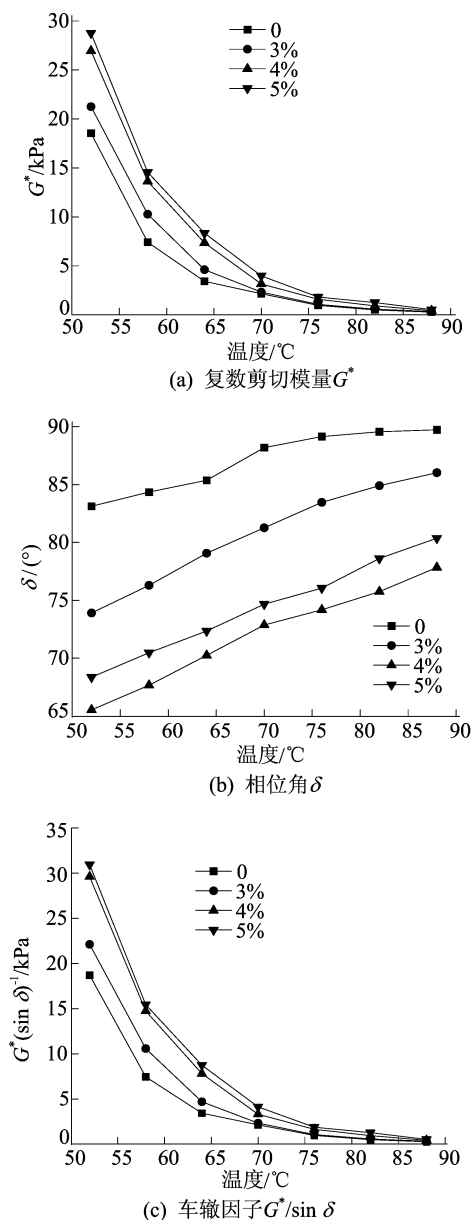


图2 不同掺量 VAE 改性乳化沥青动态剪切流变性能指标

G^* 为最大剪切力 τ_{\max} 与最大剪切应变 γ_{\max} 之比(即 $\tau_{\max}/\gamma_{\max}$); δ 为实施的应力与所产生应变之间的时间延迟,它表征弹性部分和黏性部分所占有的比例, δ 越大,表明弹性部分所占比例越小,沥青受到荷载作用后产生的变形越不容易恢复; $G^*/\sin \delta$ 是评价沥青高温流变性能的技术指标,反映沥青材料抵抗永久变形的能力, $G^*/\sin \delta$ 越大,表示在高温下沥青的流动变形越小,高温稳定性越好。

3.2 试验结果分析

(1) 与普通乳化沥青相比,随着 VAE 掺量增大,掺加 VAE 的改性乳化沥青 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 都增大,说明掺加改性剂后的改性乳化沥青比普通乳化沥青的高温抗变形能力强。

(2) 随着试验温度升高,VAE 改性乳化沥青蒸发残留物的 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 逐渐减小, δ 逐渐增大。这是由于温度升高,分子链运动加剧,导致分子之间的交联作用和分子力减弱,削弱了对分子运动的约束,从而表现为 G^* 随温度增加而不断减小;同时随着温度升高,沥青由弹性向黏性转换,黏性成分的比例增加,由此使 δ 不断增大, $G^*/\sin \delta$ 不断减小,导致改性乳化沥青在高温下流动变形增大,抵抗变形的能力减弱。

(3) 在相同温度下,随着 VAE 掺量增加, G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 逐渐增大,这也再次说明加入改性剂 VAE 可以有效提高乳化沥青抵抗变形的能力。VAE 的加入对沥青轻质组分的流动起到约束作用,VAE 掺量越大,阻碍作用越强。

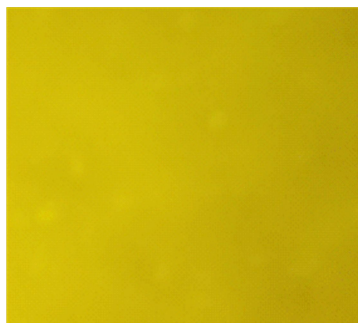
(4) VAE 改性乳化沥青的温度在 52~70 °C 之间时, $G^*/\sin \delta$ 下降幅度明显,70 °C 以后下降趋于定值,说明在较高温度时,VAE 对乳化沥青的改性效果不如较低温度时明显。

(5) VAE 掺量从 0 增加到 3% 时, G^* 、 δ 和 $G^*/\sin \delta$ 有较好的提升,但相比而言 VAE 掺量从 3% 增加到 4% 时的提升效果更显著;在 VAE 掺量从 4% 增加到 5% 时, $G^*/\sin \delta$ 变化不大,改性乳化沥青的抗变形能力提升幅度不大,且在 VAE 掺量超过 4% 时,其 1 d 储存稳定性不符合规范要求^[13],因此改性乳化沥青中 VAE 掺量不宜超过 4%。

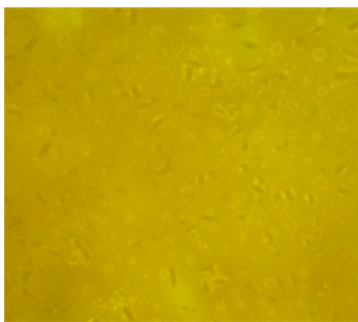
4 乳化沥青蒸发残留物的微观结构

使用 LW300LFT 落射荧光显微镜,选用 400X 荧光聚焦镜,探究并验证 MX3 型 VAE 改性剂对乳化沥青的改性效果。分别制备 VAE 掺

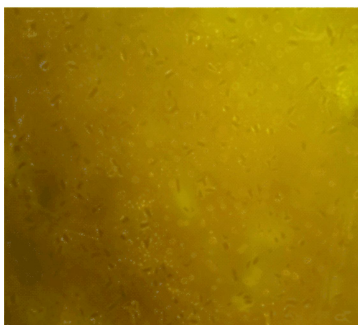
量为 0、3%、4%、5% 的改性乳化沥青蒸发残留物样本,取代表性样本置于荧光显微镜的载物台上,通过调整焦距观测改性乳化沥青的状态,包括改性剂的分散情况及粒径大小,观测图像如图 3 所示。



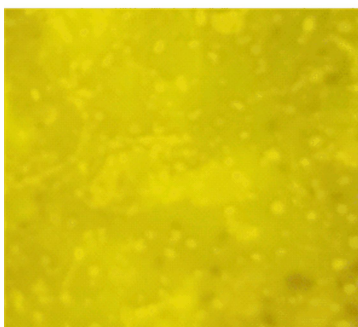
(a) VAE 掺量为 0



(b) VAE 掺量为 3%



(c) VAE 掺量为 4%



(d) VAE 掺量为 5%

图 3 不同掺量 VAE 改性乳化沥青蒸发残留物显微结构

(1) 在荧光显微镜下,VAE 的分散状态清晰可见。通过其分布状态可知,VAE 可以均匀有效地分布于乳化沥青中,证明 VAE 与乳化沥青具有良好的相容性,以其作为改性剂是有效的。

(2) 随着 VAE 掺量增加,其固化物颗粒在沥青中均匀分布,且密度和聚集面积不断变大;当 VAE 掺量为 3% 时,VAE 改性剂在乳化沥青中呈微小多颗粒状分布于沥青中,沥青呈连续载体,改性剂呈分散相,当 VAE 掺量为 4%~5% 时,两者已经形成紧密的交联结构。

5 结 论

本文对不同种类 VAE 改性乳化沥青的性能进行分析,优选出最佳 VAE 改性剂为 MX3 型,对不同掺量 VAE 改性乳化沥青蒸发残留物进行常规性能试验、不同温度下 DSR 试验及荧光显微镜试验,分析各性能指标随 VAE 掺量的变化规律,得到以下结论:

(1) 加入优选的 MX3 型 VAE 改性剂后,改性乳化沥青蒸发残留物的 25 °C 针入度明显降低,软化点明显增大,说明改性乳化沥青的黏稠性与高温稳定性有显著改善;标准黏度急剧增大,说明改性乳化沥青的黏结性改善明显,其抵抗剪切变形的能力增强;5 °C 延度显著增加,说明改性乳化沥青的低温抗裂性有明显提高。当 VAE 掺量大于 4% 时,改性乳化沥青的储存稳定性基本上不能满足规范要求^[13]。

(2) 随着 VAE 改性剂掺量增加,改性乳化沥青在集料表面的剥落率近似呈直线式减小,降幅很明显,极大地改善了沥青与集料之间的黏附性,大幅度提高改性乳化沥青冷再生混合料的抗水损能力。

(3) 通过 DSR 试验发现,随着 VAE 改性剂掺量增加,复数剪切模量 G^* 、车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 逐渐增大,改性乳化沥青的抗变形能力显著提高。

(4) 通过荧光显微镜试验发现,随着 VAE 掺量增加,其颗粒在沥青中均匀分布,密度和聚集面积不断变大,逐渐与沥青形成紧密结合的交联结构,增强改性乳化沥青的黏性,从而改善 VAE 改性乳化沥青与集料之间的黏结性能。

(5) 综合分析不同 VAE 掺量对改性乳化沥青各项性能指标的影响可知,VAE 最适宜掺量为 3%~4%。

[参 考 文 献]

- [1] 贾亚楠. 冷再生技术在高速公路路面大修中的应用[J]. 交通世界, 2019(30): 20-21.
- [2] 郝轩. 乳化沥青冷再生混合料应用与研究进展调查评价[J]. 山西交通科技, 2019(4): 25-28.

(下转第 493 页)

- complex loadings[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 5628-5646.
- [5] DAI H L, WANG X. Magnetoelastodynamic stress and perturbation of magnetic field vector in an orthotropic laminated hollow cylinder[J]. International Journal of Engineering Science, 2006, 44: 365-378.
- [6] TAHANI M, HOSSEINI S M, SAFARI A, et al. Transient and dynamic stress analysis of functionally graded thick hollow cylinder subjected to thermal shock loading using an analytical method[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2010, 4(8): 1346-1359.
- [7] SHARIYAT M, LAVASANI S M H, KHAGHANI M. Nonlinear transient thermal stress and elastic wave propagation analyses of thick temperature-dependent FGM cylinders, using a second-order point-collocation method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(4): 898-918.
- [8] DAI H L, RAO Y N. Dynamic thermoelastic behavior of a double-layered hollow cylinder with an FGM layer[J]. Journal of Thermal Stresses, 2013, 36(9): 962-984.
- [9] ZEVEERDEJANI P K, KIANI Y. Radially symmetric response of an FGM spherical pressure vessel under thermal shock using the thermally nonlinear Lord-Shulman model[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 182: 104065.
- [10] LOGHMAN A, PARSIA H. Exact solution for magneto-thermo-elastic behaviour of double-walled cylinder made of an inner FGM and an outer homogeneous layer[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, 88: 93-99.
- [11] HAJISADEGHIAN A, MASOUMI A, PARVIZI A. Investigating the magnetic field effects on thermomechanical stress behavior of thick-walled cylinder with inner FGM layer[J]. Journal of Thermal Stresses, 2018, 41(3): 286-301.
- [12] 钱伟东, 蒋泉. 磁场冲击下软磁材料空心圆柱体的瞬态响应[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2016, 15(2): 35-39.
- [13] CHENG Z J N, JIANG Q. Transient response in a bi-material cylinder of soft ferromagnetic material subjected to magnetic shock[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2021, 34(2): 286-296.

(责任编辑 张淑艳)

(上接第 486 页)

- [3] 孙翔. 乳化沥青配方对冷再生混合料性能的影响[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 232-236.
- [4] 李昊隆. 乳化沥青冷再生混合料早期强度发展规律研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [5] 周璐, 黄卫东, 吕泉, 等. 不同改性剂对沥青黏结及抗水损害性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 377-384.
- [6] 孙志林, 元帅, 马帅杰, 等. SBR 改性乳化沥青的制备及其快干性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 32-40.
- [7] 李霞, SAUSAN T. 不同改性剂乳化沥青及冷拌冷铺乳化沥青混合料性能研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 166-173.
- [8] 石福周, 贾小军, 王震, 等. 复合改性乳化沥青的制备及其微表处混合料路用性能[J]. 兰州理工大学学报, 2021, 47(2): 138-143.
- [9] WANG P P, TIAN X G, ZHANG R, et al. Effect of waterborne epoxy resin on properties of modified emulsified asphalt and its microstructure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(8): 04021177.
- [10] LI R, LENG Z, PARTL M N, et al. Characterization and modelling of creep and recovery behaviour of waterborne epoxy resin modified bitumen emulsion[J]. Materials and Structures, 2021, 54(1): 8.
- [11] 陈续鸿, 洪康, 王浩镔. 乙烯-乙酸乙烯酯改性沥青相容性研究[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(4): 5-7.
- [12] 李俊禧, 尹应梅, 张荣辉, 等. 高聚物改性乳化沥青制备及路用性能研究[J]. 广东建材, 2020, 36(4): 11-15.
- [13] 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, 2005: 11-12.
- [14] 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: 21-163.

(责任编辑 张淑艳)