

超粘抗剪乳化沥青稀浆混合料稳定性研究

李秀君¹, 崔灿¹, 张恒², 彭天平³, 宋明洋¹

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 中国五冶集团有限公司, 成都 610063;

3. 安徽省交规院工程智慧养护科技有限公司, 合肥 230041)

摘要: 针对基层间易发生脱粘和水损病害, 通过自主设计拉拔和扭剪试验, 研究下封层超粘抗剪乳化沥青(super-viscous and shear resistant emulsified asphalt, SEA)稀浆混合料高温稳定性和水稳定性, 并结合分子动力学对SEA改性机理进行分析。结果表明: SEA稀浆下封层混合料高温敏感度较低, 相较于基质乳化沥青, 60℃条件下其稀浆下封层抗拉强度和抗剪强度分别增加156.81%和88.17%; 且SEA稀浆混合料相较于基质乳化沥青稀浆混合料和SBS改性乳化沥青稀浆混合料经干湿循环后其层间抗拉和抗剪强度基本丧失, 仍有约干燥条件下的60%, 极大地改善了稀浆下封层水稳定性。SEA中PU分子的异氰酸酯基与沥青中的羟基发生化学反应而连接, 又因其自身链状结构使沥青中极性组分聚集更加紧密, 从而增大沥青胶团的粘聚性。在受到水分侵蚀稀浆混合料时, SEA中SBR通过自生聚集行为形成胶网结构, 从而达到减弱水分子对沥青胶浆入侵的目的, 提高下封层水稳定性。

关键词: 超粘抗剪乳化沥青; 拉拔试验; 扭剪试验; 分子动力学

中图分类号: U 414 文献标志码: A

Stability of super-viscous and shear resistant emulsified asphalt slurry mixture

LI Xiujun¹, CUI Can¹, ZHANG Heng², PENG Tianping³, SONG Mingyang¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu 610063, China; 3. Anhui Transport Consulting & Design Institute Engineering Wisdom Maintenance Technology Co., Ltd., Hefei 230041, China)

Abstract: In order to solve the problems of debonding and water loss between base course and surface course, the high temperature stability and water stability of super-viscous and shear resistant emulsified asphalt (SEA) slurry mixture were studied by self-designed pull-out test and shear test, and the

收稿日期: 2023-09-21

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(23ZR1444000)

通信作者: 李秀君(1976-), 女, 副教授。研究方向: 沥青路面结构与路面材料。E-mail: 363096289@qq.com

引文格式: 李秀君, 崔灿, 张恒, 等. 超粘抗剪乳化沥青稀浆混合料稳定性研究[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(6): 667-676.

Citation: LI Xiujun, CUI Can, ZHANG Heng, et al. Stability of super-viscous and shear resistant emulsified asphalt slurry mixture[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(6): 667-676.

modification mechanism of SEA was analyzed by molecular dynamics. The results show that the high temperature sensitivity of SEA slurry seal mixture is low. Compared with the matrix emulsified asphalt, the tensile strength and shear strength of SEA slurry seal mixture at 60 °C are increased by 156.81% and 88.17%, respectively. Compared with the matrix emulsified asphalt slurry mixture and the SBS modified emulsified asphalt slurry mixture, the interlaminar tensile and shear strength of the SEA slurry mixture basically loses after dry-wet cycle still has about 60% of that under dry conditions, which greatly improves the water stability of the slurry seal. The isocyanate groups of PU molecules in SEA react with the hydroxyl groups in asphalt, which makes the polar components in asphalt gather more closely because of its own chain structure, thus increasing the cohesiveness of asphalt micelle. When the slurry mixture is eroded by water, the SBR in SEA forms the glue net structure through the self-generated aggregation behavior, so as to achieve the purpose of reducing the invasion of water molecules to the asphalt mortar and improve the water stability of the lower seal coat.

Keywords: *super-viscous and shear resistant emulsified asphalt; pull-out test; torsional shear test; molecular dynamics*

近年来,随着层间处治愈发成为新时代道路建设的重要标准和要求,聚合物改性乳化沥青作为层间材料在实际工程应用中展现出较为良好的路用性能。但单掺改性乳化沥青性能较为单一,不能满足恶劣环境条件下的多种性能要求。鉴于下封层在高温多雨条件下易产生层间剥离和反射裂缝等病害,工程实际中多采用具有优越粘结性能、高低温性能和抗水损害性能等特点^[1]的聚合物复合改性乳化沥青以提高下封层综合性能。

本文针对杭嘉湖平原气候条件选取性能满足条件的两种聚合物:聚苯乙烯丁二烯共聚物 SBR^[2-3]和聚醚型、颗粒状热塑性透明弹性体 PU^[4-5],以乳化沥青蒸发残留物室内试验性能为依据进行设计,调配出超粘抗剪乳化沥青(super-viscous and shear resistant emulsified asphalt, SEA)。但对于 SEA 稀浆混合料的路用性能测试,多在理想条件下进行,缺乏对实际应用工况的模拟。因此本文针对基层层间易发生脱粘和水损病害,通过自主设计拉拔和扭剪试验,研究下封层 SEA 稀浆混合料高温稳定性和水稳定性,并结合分子动力学对 SEA 改性机理进行分析。

1 原材料、试验方法与试验方案

1.1 原材料

本文根据大修项目资料,采用中国石化 70[#]沥青作为改性乳化沥青原材料,其性能指标如表 1 所示。

SBR 为淡黄色粉末,深圳某化工公司生产;PU 为聚醚型、颗粒状热塑性透明弹性体,山东某化工公司生产。两者标准性能见表 2。

表 1 70[#]沥青基本性质

Tab.1 Basic properties of 70[#] asphalt

检测项目	检测值	技术要求	评定	试验方法
针入度(25 °C, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	68	60~80	合格	T0604
软化点/°C	48	≥46	合格	T0606
15°C延度/cm	136	≥100	合格	T0605
60°C动力粘度/(Pa·s)	219	≥180	合格	T0620
闪点/°C	>270	>260	合格	T0611
TFOT后质量变化/%	-0.065	-0.8~+0.8	合格	
残留针入度/0.1 mm	57			T0609
残留针入度比/%	83.9	≥61	合格	

表 2 SBR 和 PU 主要性能指标

Tab.2 Main performance indexes of SBR and PU

性能指标	SBR	PU
外观	淡黄色粉末	透明颗粒
熔融温度/°C	145	139
拉伸强度/MPa	31.5	25.9
断裂伸长率/%	515	770

基层采用水泥用量为 6% 的水泥稳定碎石基层,沥青下面层采用 AC-20 基质沥青混合料,两者级配如表 3 所示。

表3 面层与基层矿料级配

Tab.3 Mineral gradation of surface and base course

筛孔/mm	质量通过百分率/%	
	面层	基层
31.5	100	100
26.5	100	95
19	95	83
16	85	73
13.2	71	64
9.5	61	53
4.75	41	35
2.36	30	24.5
1.18	22.5	15.5
0.6	16	11.5
0.3	11	7.5
0.15	8.5	5.5
0.075	5	2.5

透层油采用5%SBS改性乳化沥青,其技术性质见表4。

表4 透层油技术性质

Tab.4 Technical properties of permeable layer oil

检测项目	技术要求	检测结果	试验方法
破乳速度	慢裂	慢裂	T0658
粒子电荷	阳离子(+)	阳离子(+)	T0653
筛上剩余量(1.18 mm)/%	≤0.1	0.07	T0652
蒸发残留物含量/%	≥60	60.51	T0651
针入度(25℃)/(0.1 mm)	40~100	58.2	T0604
软化点/℃	≥53	57.7	T0606
延度(5℃)/cm	≥20	24.3	T0605
贮存稳定性1 d/%	≤1	0.6	T0656
贮存稳定性5 d/%	≤5	3.4	

1.2 试验方法

由于国内强基薄面的道路设计理念,半刚性路面结构层间破坏研究多以面层与面层之间为主,而针对基面层间性能试验研究较少。鉴于此,本文参考面面层间试验相关论文^[6-7],模仿并改进已有的层间试验方案,利用自主设计的试验模具研究基面层间材料路用性能,并结合分子动力学对SEA改性机理进行分析。

首先利用响应面法^[8]设计对乳化沥青胶浆针

入度、软化点和延度的影响。结合多项式拟合结果,确定SBR和PU对针入度和软化点的影响较为独立,而延度响应曲面扭曲程度较大,且多项式出现三次项,说明两种聚合物对乳化沥青延度的影响互相关;调配出改性乳化沥青改性剂双组最佳掺配比例:SBR为3.8%、PU为11.2%,按照该比例制备的SEA三大指标试验结果与响应面预测值误差较小。并基于表3中的级配,通过稠度试验、拌和试验、湿轮磨耗试验和负荷车轮粘砂试验进行乳化沥青稀浆混合料配合比设计。最终确定SEA稀浆混合料中集料、SEA、外加水量、填料用量的配合比为100:11.7:10:1.5。

试样制备采用静压成型法,利用300 mm×300 mm×50 mm车辙板模具制作基层试块,待水泥稳定碎石初凝后脱模,在恒温恒湿标准条件下养护7 d;将养护完成的基层试块放入300 mm×300 mm×100 mm车辙板模具,并在试件表面涂刷透层油,洒布量为0.9 kg/m²,养护时间6 h;接着在模具内铺设稀浆封层混合料,用击实锤使表面平整,厚度保持在10 mm,并在室温条件下养护24 h(见图1);之后将AC-20基质沥青混合料铺设在稀浆封层之上,并用轮碾仪压实,在室温条件下养护24 h后脱模;最后如图2(a)所示,用路面钻芯机从复合试件取样^[9-11],过程用水泥试块固定试件,同时为了保证该过程中芯样保持完整,每个试件取芯样4个,图2(b)为取样得到的芯样试件。

采用上述方法制备“三明治”芯样试件,充分考虑到实际工程中半刚性路面结构的施工条件,模拟路面分层多次压实等施工过程,保证稀浆混合料与上下层之间充分接触粘结,提高后续试验结果可信度与实际指导价值。

受实验室层间结构扭剪仪启发,自主设计了一款针对圆柱体试件的试验夹具。如图3所示,夹具主体由连接件、固定盘和紧锁件组成。其上部是宽度为25 mm的圆环,为了提高夹具适用性,将圆环内径增大至101 mm,使之适配马歇尔试件,而当试件为芯样时,在试件与夹具之间增加垫片以保证完全固定。对圆环右半部分进行处理使其可以绕转动轴180°自由旋转,此外为了提高组装便捷性,对转动轴区域进行倒角处理,解决夹具棱角与试件组装时的冲突。当试件与夹具组装完成后,用紧锁弹簧固定可转动圆环,接着将试件与夹具安装到试验仪器上。在初期试验测

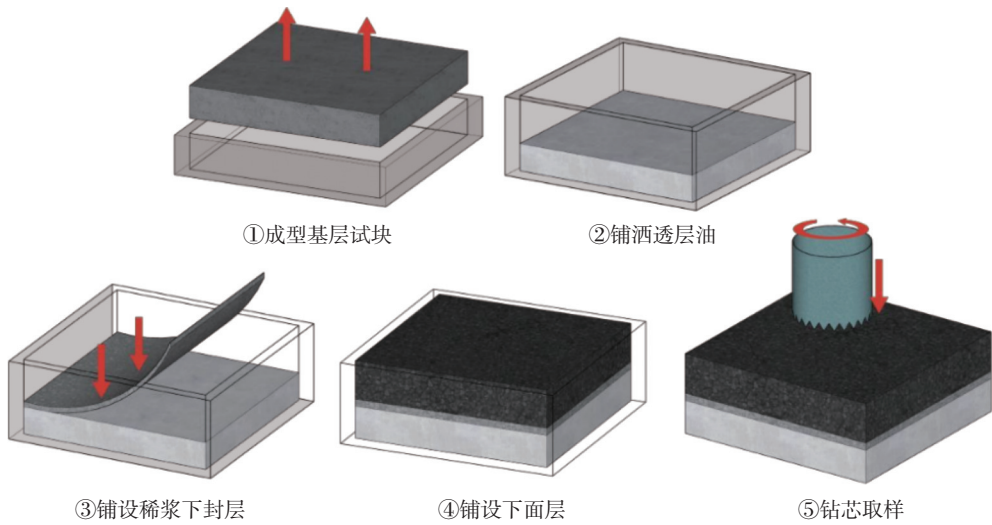


图1 试件成型过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of specimen forming process



图2 钻芯取样过程及芯样

Fig.2 Core drilling sampling process and core sampled

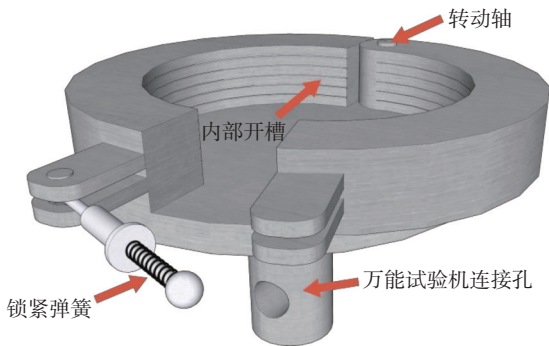


图3 夹具三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of fixtures

试时,发现由于夹具圆环内部过于光滑,导致拉拔过程中试件易脱落。经过多次尝试后,对夹具圆环内壁进行开槽,以增大试件与夹具之间的摩擦力,可确保试验试件在 25 ℃ 时拉伸最大抗拉强

度达到 1 MPa 而不脱落(参数如图 4 所示)。

拉拔试验采用万能试验机作为动力装置,配合自主设计夹具进行。试验步骤如下:

a. 如图 5 所示,快速将预先处理好的试件用夹具固定好;

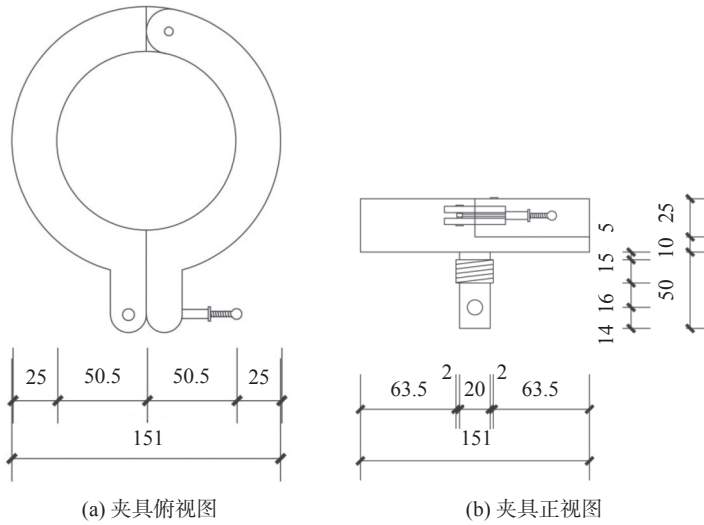
b. 通过位移控制器移动试验台,将试件与夹具一起安装到万能试验机上;

c. 设置拉伸速率 10 mm/min,破坏条件为应力降为峰值应力 70%;

d. 开始试验至层间破坏,并记录过程中峰值拉力 F_m ;

e. 通过式(1)计算试件层间抗拉强度,试验结束。

$$\sigma = \frac{F_m}{A} \quad (1)$$



(a) 夹具俯视图

(b) 夹具正视图

图 4 夹具尺寸参数详图

Fig.4 Detailed dimension parameter of fixture

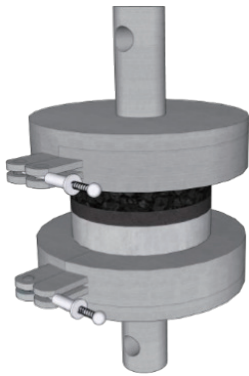


图 5 拉拔试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of pull-out test

式中: σ 为抗拉强度; F_m 为峰值拉力; A 为粘结面积。

扭剪试验采用试验室 LHNJ 型结构层材料强度扭剪仪进行稀浆下封层抗剪性能试验, 该仪器使试件仅在层间结合平面内受剪, 消除弯矩对试验结果的影响。试验步骤如下:

a. 如图 6(a)所示, 用 AB 胶将试件固定在扭剪盘上, 等待完全黏结;

b. 如图 6(b)所示, 将试件固定在仪器底部, 并放下顶部扭转器与扭剪盘连接;

c. 接入电源, 操作电控设备设置扭剪速率为 0.5 r/min;

d. 开动试验机扭转至试件层间完全错动剥离, 记录试验过程中峰值扭矩 T_m 和破坏转角 θ_m ;

e. 通过公式 2 计算试件层间抗拉强度。

$$\tau = \frac{16T_m}{\pi D^3} \quad (2)$$

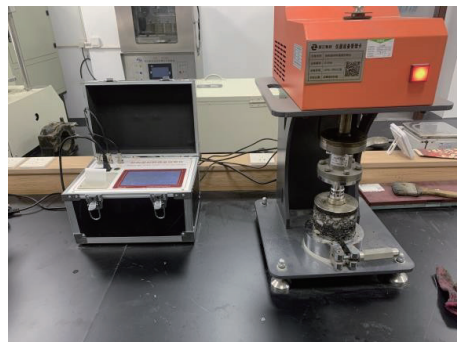
式中: τ 为抗剪强度; T_m 为峰值扭矩; D 为扭剪盘直径。

1.3 试验方案

根据项目所在地气候条件调查, 设置试验温度变量为 25, 40, 60 °C, 分别对应标准室外气温、高温和极端高温环境。同时考虑我国东南沿



(a) 扭剪试件准备



(b) 扭剪试验仪器

图 6 扭剪试验过程

Fig.6 Torsional shear test process

海夏季雨热交替环境,采用干湿循环方式模拟面层透水后层间水损害状态。根据路面温度场研究^[12],极端高温天气条件下,下面层最高温度可达 50 ℃,考虑到浸水环境,将最不利水温条件设为 40 ℃。干湿循环状态具体为:设置恒温水箱温度为 40 ℃,将“三明治”试件面层朝下,调整水面处于稀浆封层高度范围,将试件先浸水 12 h;接着放入 40 ℃ 烘箱 12 h 将试件中水分烘干。一次循环共计 24 h,共循环 3 次。试验中以基质乳化沥青和 5% SBS 改性乳化沥青稀浆混合料作为对照组,结合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004),摊铺厚度统一为 10 mm。对干燥和干湿循环预处理试件进行分组(见表 5)。每种工况下设平行试验 3 组,取平均值进行记录分析。

表 5 试件预处理分组情况

Tab.5 Grouping condition of specimen pretreatment

分组	乳化沥青种类	预处理方式
A	基质乳化沥青	干燥
B	SBS改性乳化沥青	干燥
C	SEA	干燥
D	基质乳化沥青	干湿循环
E	SBS改性乳化沥青	干湿循环
F	SEA	干湿循环

2 试验结果与分析

根据项目应用目标和病害调查可知,稀浆下封层需要保证结构层间具有良好的粘结和抗剪性能。据此本文将基面层间抗拉抗剪性能作为 SEA 稀浆混合料路用性能重点研究对象。

2.1 SEA 稀浆封层高温稳定性

2.1.1 拉拔试验结果与分析

按照试验方案进行拉拔试验并根据式(1)计算试件抗拉强度,结果见表 6。

由表 6 可知,3 种稀浆下封层抗拉强度随温度升高逐渐减小,且在各温度下 SEA 稀浆下封层性能均为最佳。在 25 ℃ 室温条件下,SEA 和 SBS 改性乳化沥青较基质乳化沥青稀浆下封层抗拉强度分别增大 30.17% 和 36.42%,虽有提升但效果并不显著。但随温度升高至 40 ℃,此项数据达到 62.28% 和 74.73%,改性效果明显。这表明高温条件下 SEA 和 SBS 乳化沥青稀浆下封层仍具有较

表 6 层间拉拔试验结果

Tab.6 Pull-out test results between layers

试验组别	抗拉强度/MPa		
	25 ℃	40 ℃	60 ℃
A	0.527	0.281	0.044
B	0.686	0.456	0.052
C	0.719	0.491	0.113

强的抗拉作用。当温度为 60 ℃ 时,SEA 稀浆混合料仍具有 0.113 MPa 的抗拉强度,较基质乳化沥青提高 156.81%,但此时 SBS 改性乳化沥青却与基质乳化沥青稀浆下封层抗拉强度处于同一水平,仅有微弱的改性效果。横向分析表格数据,40 ℃ 时,A,B,C 组稀浆混合料抗拉强度衰减率分别为 53.32%、66.47%、68.29%,而 60 ℃ 时该数据分别为 7.58%、8.35%、15.72%。由此可知 SEA 稀浆混合料温度敏感性略低于 SBS 改性乳化沥青、显著低于基质乳化沥青。

2.1.2 扭剪试验结果与分析

按照试验方案进行扭剪试验并根据式(2)计算试件抗拉强度,结果如表 7 所示。

表 7 层间扭剪试验结果

Tab.7 Result of interlayer torsional shear test

试验组别	25 ℃		40 ℃		60 ℃	
	τ /MPa	θ_m (°)	τ /MPa	θ_m (°)	τ /MPa	θ_m (°)
A	0.599	4.6	0.225	2.5	0.093	1.8
B	0.963	7.3	0.391	6.3	0.175	3.8
C	1.037	10.2	0.635	6.9	0.316	4.7

由表 7 可知,3 种稀浆下封层抗剪强度随温度升高逐渐减小, θ_m 与抗剪强度 τ 呈正相关。在 25 ℃ 室温条件下,SEA 和 SBS 改性乳化沥青较基质乳化沥青稀浆下封层抗剪强度分别增大 60.77% 和 73.12%;在 40 ℃ 高温下,此项数据分别为 73.78% 和 182.22%。这表明在层间受剪作用下 SEA 和 SBS 乳化沥青比基质乳化沥青稀浆混合料具有更强的高温稳定性。在极端 60 ℃ 条件下,虽然 B 组试验结果远小于 C 组,但是仍较 A 组有 88.17% 的提高效果。横向分析表格数据,40 ℃ 时 A,B,C 组稀浆混合料抗拉强度衰减率分别为 37.56%、40.60%、61.23%,60 ℃ 时该组数据为 15.53%、18.17%、30.47%。对比拉拔试验结果,3 组扭剪试

验结果随温度衰减率明显减小。

综上所述, SEA 具有较低混合料温度敏感性, 与基质乳化沥青相比, 其下封层粘结和抗剪强度均显著提升; SBS 虽然也增强了乳化沥青稀浆混合料的高温稳定性, 但 SEA 稀浆混合料在极端高温条件下具有明显优势, 可以满足罕见天气条件对半刚性路面层间结构粘结性能要求。

2.2 SEA 稀浆封层水稳定性

按照试验方案对试件进行干湿循环预处理后, 对其进行拉拔和扭剪试验, 根据式(1)和(2)计算抗拉强度和抗剪强度, 结果见表 8。

表 8 干湿循环试验结果

Tab.8 Result of dry-wet cycle test

试验组别	σ/MPa	τ/MPa
D	0.024	0.032
E	0.188	0.138
F	0.307	0.192

由表 8 可知, 经过 3 次 40 °C 水浴干湿循环后, 试件抗拉和抗剪性能显著下降。基质乳化沥青下封层强度几乎失去对上下层结构的粘结作

用, σ 和 τ 为 0.024 MPa 和 0.032 MPa, 分别仅有干燥条件下的 8.54% 和 14.22%。由此可知, 基质乳化沥青稀浆混合料水稳定极差, 当面临面层开裂层间浸水时, 层间水损害不可避免。SBS 改性乳化沥青下封抗拉和抗剪强度分别降至干燥条件下的 39.03% 和 30.18%, 其效果优于基质乳化沥青, 说明在干湿循环条件下其仍具有一定的层间粘结作用。SEA 稀浆混合料展现出优越的水稳定性, 经过 3 次干湿循环后其层间抗拉和抗剪强度仍有约干燥条件下的 60%, 高于相同类型材料性能试验^[13]。

浸水后的试件结构强度下降不仅体现在试验结果数值上, 通过试验过程中试件的表观状态亦能发现不同组别之间强度的差异。图 7 为采用 SEA 稀浆混合料试件 40 °C 不同预处理下的拉拔试验最终破坏状态, 可以清晰地观察到两者破坏界面中均存在丝状沥青胶浆, 但经过干湿循环后的试件丝状沥青数量明显更少、长度更短、直径更小。结合试验数据可知, 虽然 SEA 稀浆下封层也发生了水损害, 但是最终破坏状态仍与干燥条件下保持一致, 为粘聚破坏, 绝大部分沥青仍然包裹在集料表面, 稀浆混合料也与上下结构层粘结良好。



(a) 未经干湿循环C组试件



(b) 经过3次干湿循环F组试件

图 7 SEA 稀浆下封层试件 40 °C 拉拔试验最终破坏状态

Fig.7 Final failure state of SEA slurry seal specimen at 40 °C pull-out test

3 SEA 稀浆下封层改性机理分析

根据前文总结试验现象可知, 稀浆下封层在高温条件下均为沥青胶浆之间粘聚破坏。经过干湿循环处理后基质乳化沥青稀浆下封层试件, 由于浸水作用, 大量沥青从集料表面剥离, 发生粘附破坏。而 SEA 稀浆下封层在干湿循环后试验过

程中仍保持极好的粘附性。针对 SEA 稀浆混合料优越的高温稳定性和水稳定性, 采用分子动力学模拟动态过程可视化方法, 结合相关理论对 SEA 改性机理做出分析。

3.1 粘聚性增强机理

在沥青混合料胶浆粘聚力形成过程中, 沥青质和胶质极性组分作用至关重要。在沥青胶团结

构中，沥青质组分由于极性最大紧密聚集在中心位置，胶质组分由于极性次之而围绕在沥青质周围。这两种组分形成的极性大分子团对饱和分和芳香分形成极性感应作用，使这两种轻质组分可以团聚在胶团周围。如图8(a)所示，基质沥青中沥青胶团处于相对分散状态，由于距离较远导致极性作用力较小，宏观表现为粘聚力较弱。当沥青中加入改性剂后，如图8(b)所示，PU分子中的异氰酸酯基会与沥青质分子中的羟基发生化学反应连接在一起。对沥青进行高速剪切搅拌后，如图8(c)所示，链状PU会使沥青胶团聚集得更加紧密，从而实现对沥青混合料粘聚力的提升。

3.2 分子动力学模拟验证

(1) 扩散系数

MS 软件进行 MD 模拟过程中，晶胞内分子会随着温度变化进行无规则热运动直至能量稳定。

本文分别建立同种沥青双层模型^[14]并进行 MD 模拟计算。如图9所示，双层沥青分子模型在动力学模拟时，会发生扩散融合。因此，决定通过分析分子扩散速率的变化，验证改性剂对沥青粘聚性的促进作用。

扩散系数能够更好表征体系中分子的扩散混溶能力，其与均方位移(mean square displacement, MSD)符合 Stokes-Einstein 方程，如式(3)所示。由于 MD 模拟计算时间有限，故将方程简化为式(4)。计算前先对 MSD(*t*) 和 *t* 分别取对数确认一次方区间的时间范围后，再进行线性拟合计算扩散系数 *D*，以避免异常扩散导致目标分子受体系内其他分子的约束，或由于体系外能量的输入使目标分子运动被加强，从而影响扩散系数 *D* 的准确性。分别对 SEA 和基质乳化沥青双沥青分子模型进行 Dynamic 模拟，结果见表9。

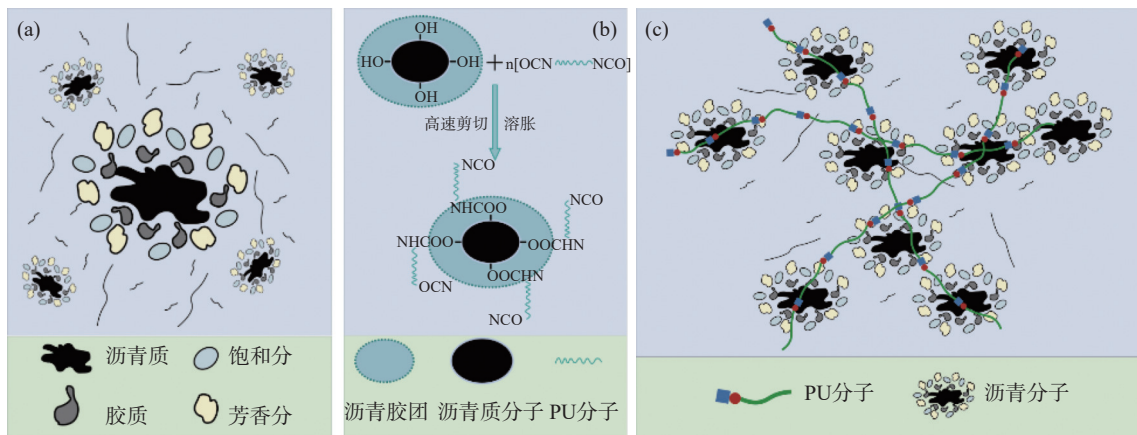


图8 沥青混合料粘聚力增强机理

Fig.8 Cohesion enhancement mechanism of asphalt mixture

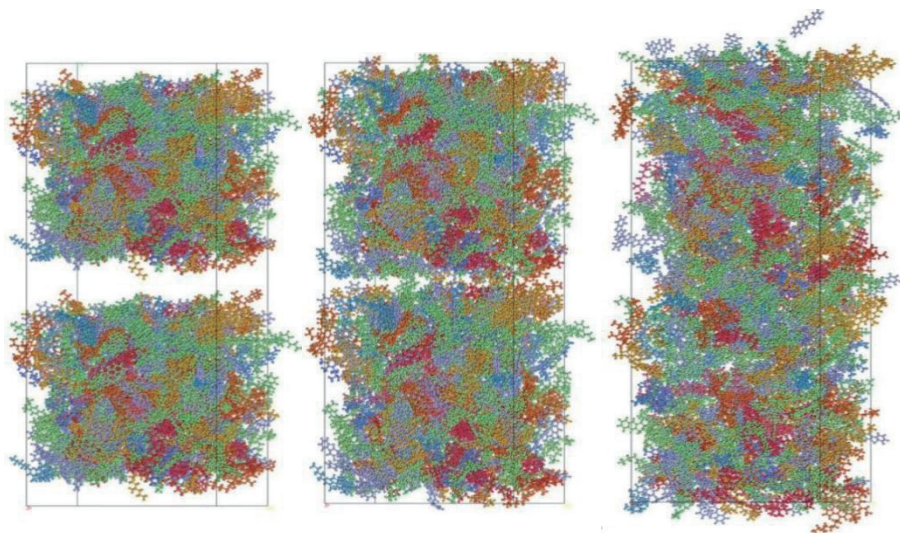


图9 基质乳化沥青双层模型动力学模拟过程

Fig.9 Dynamic simulation process of matrix emulsified asphalt double-layer model

$$D = \frac{1}{6N} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \{[r_i(t) - r_i(0)]^2\} \quad (3)$$

$$D = \frac{k}{6} \quad (4)$$

式中: D 表示扩散系数; N 表示体系内扩散分子总数; t 表示扩散时间; $\{[r_i(t) - r_i(0)]^2\}$ 即为 $\text{MSD}(t)$; k 表示 $\text{MSD}(t)$ 曲线的斜率。

表 9 不同种类乳化沥青双分子层体系扩散系数 ($\times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$)

Tab.9 Diffusion coefficient of different types of emulsified asphalt bimolecular layer system ($\times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$)

乳化沥青 种类	25 °C		40 °C		60 °C	
	沥青质 组分	胶质 组分	沥青质 组分	胶质 组分	沥青质 组分	胶质 组分
基质乳化沥青	5.32	5.11	8.67	9.04	12.98	12.77
SEA	2.33	1.98	3.77	3.16	5.77	4.79

双层沥青模型中的胶团在模拟开始前都具有中心位置极性组分聚集形成的极性力场, 使各自都保持相对稳态。当模拟开始后, 所有分子做无规则热运动向整个晶胞内扩散, 越靠近胶团中心的分子受到的极性作用力越大, 所以粘聚力越大的沥青胶团扩散速率越小。由表 9 可知, SEA 体系中沥青质和胶质组分在各温度下的扩散系数均显著小于基质乳化沥青体系。基质乳化沥青和 SEA 的技术指标试验结果如表 10 所示, SEA 的各项技术指标大幅提升, 验证了其通过增大沥青中沥青质和胶质组分之间极性作用力使沥青粘聚性增强。

(2) 分子相对浓度

建立 SEA-水-集料模型并进行 MD 模拟, 通过分析模拟结果中极性组分的聚集状态和水分子向沥青胶团的入侵程度, 分析 SEA 稀浆下封层水稳定性增强机理。图 10 为 40 °C 时 SEA-水-集料模型模拟初末状态, 图中紫色高亮为 SBR 分子。由图可知, 沥青分子向集料表面吸附, 同时水分子向沥青胶团内部扩散, 说明模拟结果合理可信。在模拟开始前, SBR 分子在沥青胶团中分散较为均匀, 但当模拟结束后, SBR 出现自身聚集现象, 且分布在沥青胶浆外侧和界面接触区域, 如图 10(b) 所示, 此时 PU 的分布仍较为均匀。

分别对 SEA 和基质乳化沥青 3 层结构体系模型进行 Analysis 中的 Concentration Profile 运算, 得到沥青质组分、胶质组分和水分子沿 Z 轴的相对浓度分布曲线, 如图 11 所示。由图可知, SEA 体

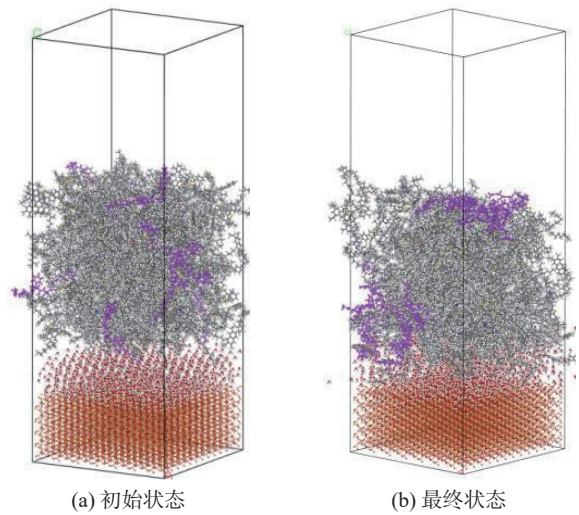


图 10 SEA3 层模型 MD 模拟过程

Fig.10 MD simulation process of SEA three-layer model

表 10 基质乳化沥青和 SEA 的技术指标试验结果

Tab.10 Test Results of Matrix Emulsified Asphalt and SEA Technical Index

检测项目	基质乳化沥青	SEA
针入度(25 °C)/0.1 mm	78	47.2
软化点/°C	76.4	64.7
延度(5 °C)/cm	61	41.3
动力粘度(60 °C)/(Pa·s)	501.6	3743.5

系中两种极性组分主要分布在 30~100 Å, 而基质乳化沥青体系中极性组分分布在 30~140 Å。在相同分子量条件下, SEA 体系聚集程度优势明显, 这说明 SEA 与集料粘附更紧密。比较图 11 中水分子的分布曲线可知, SEA 体系中水分子集中在 25~50 Å, 与初始状态相比变化较小; 而基质乳化沥青体系中水分子对沥青胶团侵入超过 60 Å, 这说明 SEA 中的聚合物成分对水分子向沥青胶团的扩散行为有抑制作用。结合图 10 中 SBR 的分布规律可以进一步推断, SEA 中的 SBR 成分通过自身聚集形成胶网结构来减弱水分子对沥青胶团的侵入程度, 提高了乳化沥青稀浆下封层的水稳定性。

4 结论

a. SEA 稀浆下封层混合料高温敏感度较低。与基质乳化沥青相比, 在 25, 40, 60 °C 条件下, 其稀浆下封层抗拉强度分别增大 30.17%, 62.28%, 156.81%, 抗剪强度分别增大 60.77%, 73.78%, 88.17%。且由于扭剪试验中层间破坏面

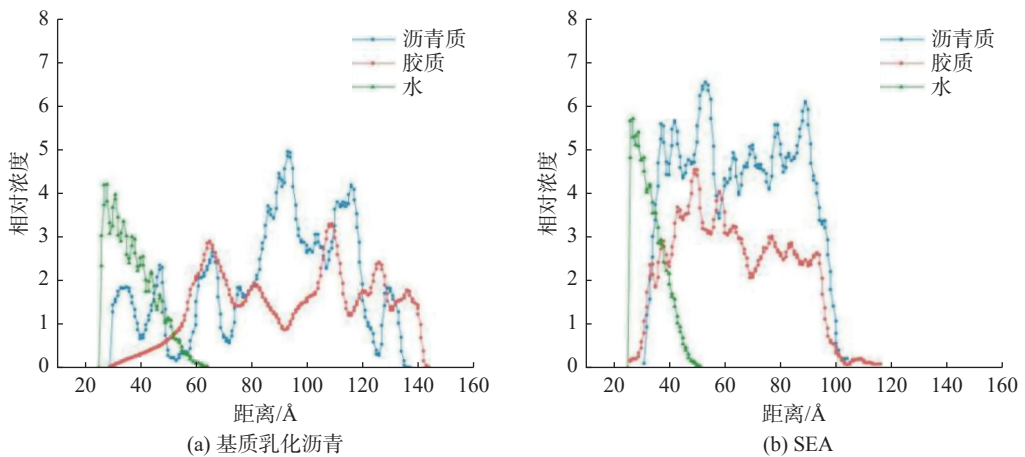


图 11 乳化沥青-水-集料 3 层模型体系分子相对浓度分布曲线

Fig.11 Distribution curve of molecular relative concentration of emulsified asphalt-water-aggregate three-layer model system

存在集料嵌挤作用, 所以抗剪强度随温度衰减率小于抗拉强度。SEA 稀浆混合料在极端高温条件下具有明显优势, 可以满足罕见天气条件对半刚性路面层间结构粘结性能要求。

b. 基质乳化沥青稀浆混合料和 SBS 改性乳化沥青稀浆混合料经过 3 次干湿循环后, 其层间抗拉和抗剪强度相对于干燥条件基本丧失; 而 SEA 稀浆混合料经过 3 次干湿循环后, 其层间抗拉和抗剪强度仍有约干燥条件下的 60%, 极大地改善了稀浆下封层水稳定性。

c. SEA 中 PU 分子的异氰酸酯基会与沥青中的羟基发生化学反应而连接在一起, 又因其自身链状结构使沥青中极性组分聚集更加紧密, 从而增大沥青胶团的粘聚性。SEA 体系中沥青质和胶质组分在各温度下的扩散系数均显著小于基质乳化沥青体系, 这与混合料试验结果吻合, 验证了 SEA 是通过增大沥青中沥青质和胶质组分之间极性作用力使沥青粘聚性增强。在水分侵蚀稀浆混合料时, SEA 中 SBR 通过自生聚集行为形成胶网结构来减弱水分子对沥青胶浆的入侵, 提高了下封层水稳定性。

参考文献:

[1] 李俊禧. 高聚物改性乳化沥青制备及混合料性能试验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
 [2] KHADIVAR A, KAVUSSI A. Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 1099–1105.
 [3] HAO P W, ZHAI R X, ZHANG Z X, et al. Investigation on performance of polyphosphoric acid (PPA)/SBR

compound-modified asphalt mixture at high and low temperatures[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20(6): 1376–1390.

- [4] HUANG G, YANG T H, HE Z Y, et al. Polyurethane as a modifier for road asphalt: a literature review[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129058.
 [5] SUN M, ZHENG M L, QU G Z, et al. Performance of polyurethane modified asphalt and its mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 386–397.
 [6] 万正华, 黄超, 郭洪军, 等. 隧道水泥混凝土路面加铺沥青层数值模拟及试验分析 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(1): 28–35.
 [7] 李秀君, 叶锦镛, 吕建伟, 等. 浸水条件下环氧微表处与沥青路面层间抗剪性能的试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(2): 321–327.
 [8] 马印平, 刘永健, 刘江. 基于响应面法的钢管混凝土组合桁梁桥多尺度有限元模型修正 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 51–61.
 [9] 艾长发, 宋姣姣, 王福成, 等. 界面性质对沥青路面层间抗剪强度的影响试验 [J]. *公路*, 2016, 61(2): 1–5.
 [10] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙. 南方地区混凝土基层沥青路面层间抗剪强度结构系数研究 [J]. *公路交通科技*, 2015, 32(4): 28–33.
 [11] 邸洪江, 何宏智, 尹显辉, 等. 沥青路面增强型基-面层层间黏结组合材料优选试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2022, 39(5): 1–8,25.
 [12] 杜镀, 陈家豪. 持续极端高温天气下沥青路面温度特性分析 [J]. *公路*, 2020, 65(8): 23–26.
 [13] 何宏智, 孟会林, 刘一鸣, 等. 沥青路面增强型基-面层层间黏结强度特性分析 [J]. *长安大学学报 (自然科学版)*, 2022, 42(2): 22–31.
 [14] LI D D, GREENFIELD M L. Chemical compositions of improved model asphalt systems for molecular simulations[J]. *Fuel*, 2014, 115: 347–356.