•水利与土木工程•
DOI:10.12454/j.jsuese.202500279
本刊网刊

基于复合改性的橡胶改性沥青灌缝胶高温性能试验研究

王　伟[1],石家乐[1],高旭和[2],何荣森[1],陈晓梅[1]
(1.长春工程学院 土木工程学院,吉林 长春 130012;2.重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074)

摘　要:针对季冻区灌缝胶低温抗裂性能较好但高温性能缺失的问题,本文以橡胶改性沥青为基体,通过加入少量苯乙烯–丁二烯–苯乙烯嵌段共聚物(SBS)和玄武岩纤维进行复合改性,可在提高其高温性能的同时满足低温需求。采用响应面法(RSM)确定了SBS、糠醛抽出油和玄武岩纤维的最佳掺量,并通过温度扫描试验、多重应力蠕变和恢复试验(MSCR)及频率扫描试验,对复合改性沥青灌缝胶的高温性能和流变性能进行了评估。结果表明:1)最佳制备参数为SBS含量9.9%、糠醛抽出油含量15.0%、玄武岩纤维含量1.3%;2)制备所得灌缝胶的软化点为96.8 ℃,锥入度为123.77/(0.1 mm),弹性恢复率为67.7%;3)复合改性灌缝胶在高温下具有更大的复数剪切模量和更小的相位角,表现出优异的高温稳定性和抗疲劳性能,同时在低应力和高应力下均表现出较高的恢复性能和较低的不可恢复蠕变模量;4)动态剪切流变仪(DSR)的频率扫描试验验证了复合改性灌缝胶的时间–温度等效原理,显示其在高温条件下有优异的抗永久变形能力,在低温性能上也表现出色,综合性能优于市场上现有的灌缝胶产品。

关键词:灌缝胶;玄武岩纤维;复合改性沥青;高温性能;响应面分析
中图分类号:U414.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0217-14

寒区沥青路面开裂是一种常见的路面病害,极易引发水损害和冻融破坏,减少路面寿命[1]。使用沥青灌缝胶对路面裂缝修补是延长路面寿命的主要方法[2–3]。使用橡胶粉与其他改性剂复合制备的改性沥青灌缝胶表现出良好的低温抗变形和抗裂性能[4–5],在延长路面寿命的同时为废旧轮胎的资源化利用提供了有效途径[6–8]。

常规的灌缝胶不能同时保证高、低温环境下的性能,在夏季高温环境下,易产生灌缝胶变形较大、力学性能下降显著、被行车剥离等问题,从而极易引起灌缝胶失效[9–10]。苯乙烯–丁二烯–苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene,SBS)作为一种热塑性弹性体,可以和沥青形成三维网状结构,提高沥青弹塑性和延展性,改善沥青灌缝胶的高低温性能[11–12]。但其在年温差较大的地区(如中国东北)却很难满足路面材料的宽温域要求,在高温下的性能明显欠佳[13]。使用外加剂可以提高SBS改性沥青灌缝胶的高温性能,但高温性能的提升往往伴随着低温性能的降低。聚氨酯固固相变材料(PUP)/SBS复合改性沥青灌缝胶的使用,显著提高了高温抗车辙性能,但低温蠕变性能明显下降[14]。通过调整废旧SBS改性沥青混合料(RAP)、温拌剂Sasobit和Evother的掺量,可极大地改善温拌再生沥青混合料在高温环境下的性能,但不利于其低温抗裂性能和水稳定性能[15]。而通过调整SBS相对分子质量发现,SBS相对分子质量越高,对改性沥青软化点的提升效果更明显,但同时又会降低沥青的低温延伸性能[16]。面对综合提升沥青灌缝胶高低温性能的问题,国内主要采用聚合物、胶粉等低成本改性剂来提升高温抗软化能力[17–18]。国外开发了生物沥青、纳米黏土等材料来提升灌缝胶高低温性能,并采用动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer,DSR)、弯曲梁流变仪(bending beam rheometer,BBR)等评估高温性能,但高成本限制了其大规模推广应用[19–20]。

玄武岩纤维作为一种环保型增强材料,可有效改善力的分布,并且在高速剪切作用下能够形成三维纤

收稿日期:2025 – 04 – 16　　**修回日期:**2025 – 08 – 05　　**网络出版日期:**2025 – 11 – 13
基金项目:吉林省自然科学基金项目(YDZJ202501ZYTS392)
作者简介:王　伟(1982—),男,教授,博士. 研究方向:高性能寒区灌缝材料. E-mail:16695496@qq.com

维网结构，对灌缝胶起到加固作用[21]。虽然玄武岩纤维改性沥青在近年来得到了广泛应用，但在灌缝材料中加入玄武岩纤维并进行复合改性的研究相对较少。鉴于此，本文基于响应面法（response surface methodology，RSM），以橡胶改性沥青灌缝胶为基质材料，以SBS与玄武岩纤维为复合改性材料，研发一种同时满足高低温性能要求的橡胶改性沥青灌缝胶，分析不同改性材料对灌缝胶高温稳定性的影响，并通过温度扫描测试、多应力蠕变恢复试验（multiple stress creep recovery，MSCR），以及扫频试验揭示玄武岩纤维对于灌缝胶高温性能的改性机理。

1 试验概况

1.1 试验材料

以掺量为20%的橡胶改性沥青作为基质沥青，橡胶改性沥青来自河北亿诺千斤商贸有限公司，改性材料选用东莞市锦恒塑料有限公司的SBS和海宁安捷复合材料的玄武岩纤维。考虑到短纤维分散性较好但对低温抗裂性能提升有限，而长纤维易出现团聚，本文选择6 mm玄武岩纤维。添加剂选用天津大茂试剂的邻苯二甲酸二丁酯（DBP）和山东泰畅石化科技有限公司的糠醛抽出油。所有试验材料基本性能指标见表1。表1中，橡胶改性沥青性能测试参考标准[22]进行，玄武岩纤维性能测试参考标准[23]进行。

1.2 试验设计

基于响应面法采用Box–Behnken设计（BBD）三因素三水平试验。需要注意的是，改性沥青中选择DBP和糠醛抽出油作为软化剂，两者虽同属软化剂，但作用机制与功能侧重点不同，DBP强在低温增塑，糠醛抽出油更利于聚合物相容性及流变特性调控。响应面试验聚焦灌缝胶高温性能不足的核心矛盾，重点优化SBS（弹性网络构建）、糠醛抽出油（相容性调控）与玄武岩纤维（增强骨架）的协同配比。同时，糠醛抽出油为石化副产品，相对于DBP更符合绿色材料发展趋势。将DBP用量固定，可减少其在配方中的比例，同时通过复合改性提升性能，符合工程应用导向。选择DBP为固定添加的基础软化剂，其核心作用是通过降低玻璃态转变温度提升低温延展性，确保灌缝胶满足寒区低温抗裂要求。选择糠醛抽出油为响应面试验变量。根据标准[24]要求，使用万能拉伸机对灌缝胶低温性能进行低温拉伸试验，对灌缝胶进行环境温度为−20 ℃、拉伸率为100%的条件下的3次循环拉伸试验，检查是否有裂缝产生或裂缝长度是否小于等于3 mm。试验最终确定7%的DBP掺量能满足灌缝胶低温拉伸性能的最低要求。以SBS含量（S_C）、糠醛抽出油含量（E_C）、玄武岩纤维含量（B_{FC}）为响应因子，以软化点、锥入度和弹性恢复率为响应指标，总计进行17次试验。在中心点以随机顺序进行5次重复试验，以排除系统误差。试验变量包括5个中心点、6个面心点和6个交互点，试验点空间分布示意图如图1所示，试验因子取值和BBD区间见表2。

表 1 试验材料性能指标

Tab. 1 Performance indicators of experimental materials

试验材料	性能指标		测试结果	标准参考值
橡胶改性沥青	锥入度/(0.1 mm)		76	60～80
	软化点/℃		72	≥65
	5 cm/min延度/cm		32	≥20
	薄膜烘箱	质量变化/%	−0.303	≤±0.8
		针入度比/%	70	≥60
		5 ℃延度/cm	15	≥10
SBS	链段质量比		40/60	
	拉伸强度/MPa		22	
	邵氏硬度		89	
	200 ℃、5 kg条件下MFR/(g·min^{-1})		0.1	
玄武岩纤维	密度/(g·cm^{-3})		2.65	2.65
	直径/μm		17	13～20
	拉伸强度/MPa		1 256	≥1 200
	弹性模量/GPa		76.1	≥75
	长度/mm		6	6
	极限伸长率/%		3.01	≤3.1
	耐碱性能/%		86	≥75
邻苯二甲酸二丁酯	分子式		$C_6H_4[CO_2—(CH_2)_3CH_3]_2$	
	相对密度/(kg·m^{-1})		10 463～10 475	
	灼烧残渣含量（以硫酸盐计）/%		0.003	
	挥发性物质含量/%		0.3	
	游离酸含量（以苯二酸计）/%		0.05	
糠醛抽出油	闪点/℃		215	
	运动黏度（100 ℃）/(m^2·s^{-1})		20	
	密度/(kg·m^{-3})		1.02	
	凝点/℃		−5	

采用全自动软化点仪测试灌缝胶的软化点，分析温度敏感性。将沥青针入度仪中的标准针换成标准锥，测试灌缝胶的锥入深度。将标准针换成贯入球，测

试灌缝胶的弹性恢复率。采用动态剪切流变仪对复合改性的沥青灌缝胶进行温度扫描，分析高温条件下的流变性能，同时测试复数剪切模量和相位角，并对灌缝胶的黏弹性参数进行评估，试验设备如图2所示。

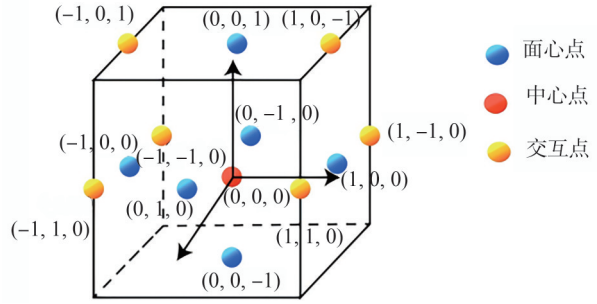


图 1　试验点空间分布示意图

Fig. 1　Diagram of spatial distribution of experimental points

表 2　试验因子取值和BBD区间

Tab. 2　Experimental factors and BBD ranges

取值	因子A(S_C)/%	因子B(E_C)/%	因子C(B_{FC})/%
最小值	8.00	13.00	1.00
最大值	10.00	16.00	4.00
编码低值	−1.00～8.00	−1.00～13.00	−1.00～1.00
编码高值	1.00～10.00	1.00～16.00	1.00～4.00



图 2　动态剪切流变仪

Fig. 2　Dynamic shear rheometer

通过MSCR试验测试灌缝胶在高温条件下的抗变形和弹性恢复能力，并对不同温度条件下的灌缝胶样本进行扫频测试，分析不同加载频率下复合改性灌缝胶的力学性能。MSCR试验在64 ℃条件下进行，扫频测试在30～80 ℃条件下进行。

在灌缝胶制备过程中，玄武岩纤维与SBS聚合物改性剂显著增加了材料的复杂性与潜在的非均质性。为保证两类添加剂的均匀分散与结构完整性，确保改性体系的线性黏弹性响应特性，采用高速剪切法进行复合改性。然而，预试验结果表明，当转速超过4 000 r/min时，玄武岩纤维因机械力过载发生过度破碎，不仅损害纤维长径比，削弱应力传递效率，更导致改性沥青弹性模量下降，影响灌缝胶高低温性能。

灌缝胶制备流程如图3所示。制备流程可分为3个阶段：1)第1阶段(165～175℃，800 r/min，10 min)，将糠醛抽出油和邻苯二甲酸二辛酯加入沥青中，搅拌均匀；2)第2阶段(175～185 ℃，4 500 r/min，30 min)，优先分散SBS，使其充分溶胀形成连续三维网络；3)第3阶段(165～175 ℃，2 000 r/min，≤15 min)，降温降速后加入玄武岩纤维，通过提升基质黏度降低剪切冲击能，减少沉降和团聚，在保障纤维分散度的同时降低破碎率。该协同调控策略在维持纤维增强相结构完整的前提下，有效优化了体系的线性黏弹性行为，为后续流变测试提供了可靠基础。

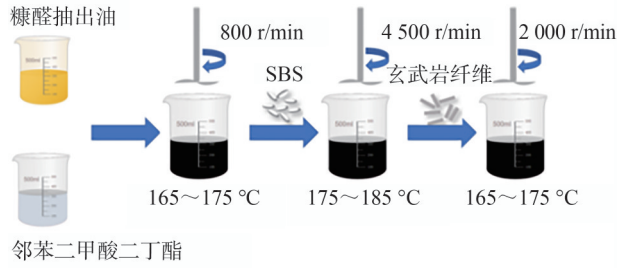


图 3　灌缝胶制备流程

Fig. 3　Preparation process of sealant

2　响应面结果分析

2.1　基于BBD的试验结果

采用BBD进行了17组试验，根据响应面法分析SBS含量、糠醛抽出油含量和玄武岩纤维含量对灌缝胶试验指标的影响，试验结果见表3。

表 3　BBD试验结果

Tab. 3　Test results of BBD

试验编号	S_C/%	E_C/%	B_{FC}/%	软化点/℃	锥入度/(0.1 mm)	弹性恢复率/%
1	9.0	14.5	2.5	88.5	122.9	60.8
2	9.0	14.5	2.5	89.3	121.9	59.5
3	8.0	14.5	4.0	85.8	105.6	53.6
4	8.0	13.0	2.5	80.7	105.3	56.5
5	9.0	14.5	2.5	87.2	122.5	59.5
6	10.0	13.0	2.5	93.4	123.3	62.3
7	9.0	14.5	2.5	89.2	122.0	60.4
8	9.0	13.0	1.0	89.8	115.5	53.7
9	9.0	16.0	4.0	94.5	115.9	48.1
10	10.0	14.5	1.0	96.4	122.5	66.1
11	10.0	14.5	4.0	99.4	114.1	58.8
12	9.0	16.0	1.0	92.0	125.4	58.5
13	8.0	14.5	1.0	83.4	115.6	53.8
14	8.0	16.0	2.5	83.2	122.6	48.6
15	10.0	16.0	2.5	97.2	120.9	63.7
16	9.0	13.0	4.0	94.1	80.5	62.2
17	9.0	14.5	2.5	88.5	92.5	59.2

2.2 方差分析与显著性检验

对试验结果进行回归模型适应性分析，方差分析统计的显著水平设定为 0.05。通过 Design–Expert 13.0 软件分析得到二次多项式模型拟合最为合适，且显著性较高。表 4、5 分别为二次多项式模型拟合效果和自变量的方差分析结果。

表 4 改性沥青灌缝胶二次多项式模型拟合效果

Tab. 4 Fitting performance of the quadratic model for modified asphalt sealing adhesive

自变量	R^2	R^2_{Adj}	精密度值	F	P	显著性
软化点	0.983 5	0.970 7	29.873 6	76.74	<0.000 1	显著
锥入度	0.997 5	0.990 2	43.028 7	181.30	<0.000 1	显著
弹性恢复率	0.979 4	0.952 9	21.757 1	36.98	<0.000 1	显著

表 5 自变量的方差分析（ANOVA）结果

Tab. 5 ANOVA results for the independent variables

自变量	变异来源	模型变异平方和	自由度	均方	F	P	显著性
软化点	A–S_C	355.11	1	355.11	439.98	<0.000 1	显著
	B–E_C	9.90	1	9.90	12.27	0.006 7	
	C–B_{FC}	18.60	1	18.60	23.05	0.001 0	
	AB	0.42	1	0.42	0.52	0.487 7	
	AC	0.09	1	0.09	0.11	0.746 1	
	B^2	1.98	1	1.98	2.45	0.152 0	
	C^2	46.24	1	46.24	57.29	<0.000 1	
锥入度	A–S_C	125.61	1	125.61	326.32	<0.000 1	显著
	B–E_C	114.01	1	114.01	296.17	<0.000 1	
	C–B_{FC}	135.30	1	135.30	351.50	<0.000 1	
	AB	97.02	1	97.02	252.05	<0.000 1	
	AC	0.64	1	0.64	1.66	0.238 2	
	BC	5.06	1	5.06	13.15	0.008 4	
	A^2	47.39	1	47.39	123.12	<0.000 1	
	B^2	4.04	1	4.04	10.51	0.014 2	
	C^2	87.36	1	87.36	226.95	<0.000 1	
弹性恢复率	A–S_C	184.32	1	184.32	157.10	<0.000 1	显著
	B–E_C	31.20	1	31.20	26.60	0.001 3	
	C–B_{FC}	11.05	1	11.05	9.41	0.018 1	
	AB	21.62	1	21.62	18.43	0.003 6	
	AC	12.60	1	12.60	10.74	0.013 5	
	BC	89.30	1	89.30	76.11	<0.000 1	
	A^2	0.12	1	0.12	0.10	0.753 4	
	B^2	21.84	1	21.84	18.61	0.003 5	
	C^2	16.47	1	16.47	14.03	0.007 2	

注：A–S_C、B–E_C、C–B_{FC}为线性主效应项，表征单因素对响应指标的线性影响；AB、AC、BC 为两因素交互效应项，表征两因素配伍产生的协同或拮抗作用；A^2、B^2、C^2为二次效应项，表征单因素对响应指标的非线性作用规律。

表 4 中，R^2 为决定系数，R^2_{Adj} 为修正决定系数，F 为统计量，P 为显著性概率。由表 4 可知：用二次多项式模型对软化点、锥入度和弹性恢复率进行拟合时，所得的 R^2 和 R^2_{Adj} 均较高，R^2 分别为 0.983 5、0.997 5、0.979 4，R^2_{Adj} 分别为 0.970 7、0.990 2、0.952 9，表明模型具备极高的解释力；软化点、锥入度和弹性恢复率的精密度值分别为 29.873、43.028 7、21.757 1，均远大于 4，说明二次多项式模型有较高的适用性和充足的预测精度。由表 5 可知，二次多项式模型对 3 个变量的拟合具有较高显著性。

基于最小二乘法确定因子的回归系数，建立软化点（γ_1）、锥入度（γ_2）和弹性恢复率（γ_3）的二次多项式拟合方程如下：

$$\gamma_1 = 63.655 + 14.656S_C - 9.956E_C - 4.411B_{FC} + 0.217S_CE_C + 0.1S_CB_{FC} - 0.2E_CB_{FC} - 0.633S_C^2 + 0.319E_C^2 + 1.486 \times B_{FC}^2 \quad (1)$$

$$\gamma_2 = -759.523 + 111.294S_C + 45.948E_C + 12.231B_{FC} - 3.283S_CE_C + 0.267S_CB_{FC} - 0.5E_CB_{FC} - 3.355S_C^2 - 0.436E_C^2 - 2.024B_{FC}^2 \quad (2)$$

$$\gamma_3 = -67.085 - 17.822S_C + 19.338E_C + 44.711B_{FC} + 1.550S_CE_C - 1.183S_CB_{FC} - 2.1E_CB_{FC} + 0.173S_C^2 - 1.012E_C^2 - 0.879B_{FC}^2 \quad (3)$$

软化点的残差正态图如图 4 所示，各试验点基本上呈正态分布趋势。结合表 5 可知，SBS 含量的线性项和玄武岩纤维含量的二次效应项对于改性沥青灌缝胶软化点的影响最为显著，其 P<0.000 1。由此可见，SBS 含量、糠醛抽出油含量和玄武岩纤维含量的线性项和二次效应项都是较为显著的模型因子。

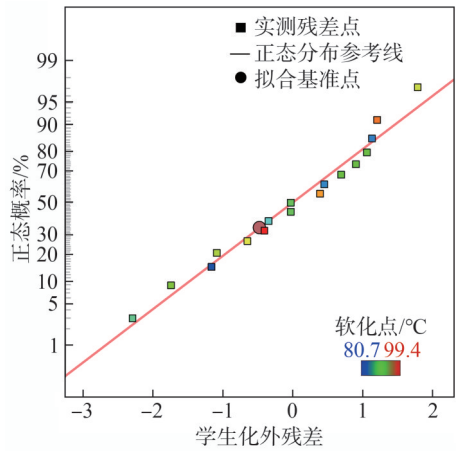
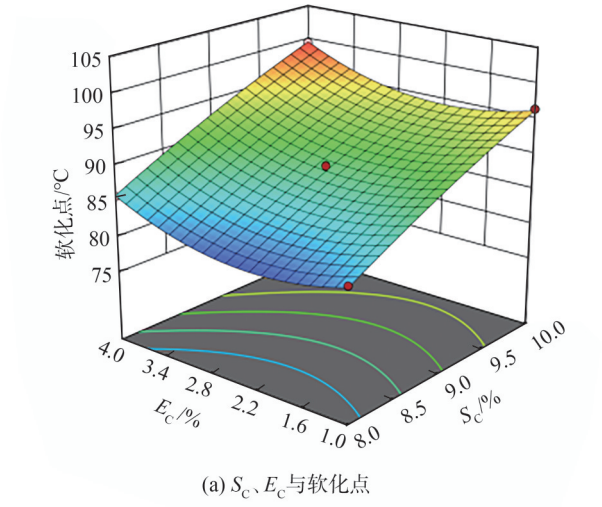


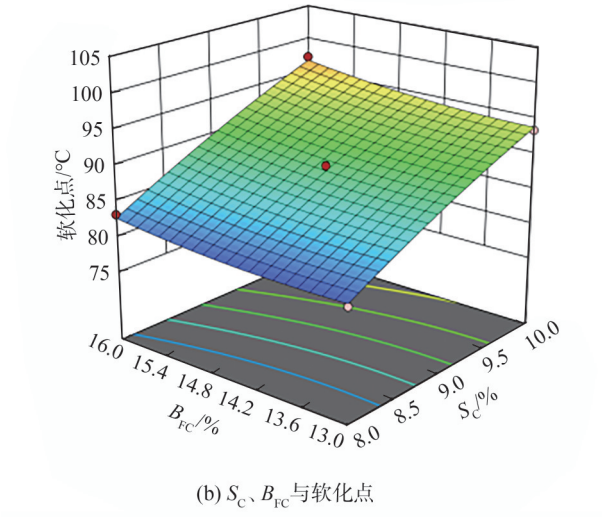
图 4 软化点的残差正态图

Fig. 4 Residual normality plot of the softening points

图 5 为软化点和因子之间的响应曲面。由图 5 可知，沥青基灌缝胶的软化点温度与 SBS 改性剂掺量呈显著正相关。这一现象可归因于 SBS 聚合物的多重作用机制。首先，SBS 共聚物中苯乙烯硬段与丁二烯软段



(a) S_C、E_C与软化点



(b) S_C、B_{FC}与软化点

图 5　软化点和因子之间的响应曲面图

Fig. 5　Response surface between the softening points and factors

的嵌段结构赋予其优异的热稳定特性，在高温相态转变过程中能够有效维持材料刚性。其次，SBS 分子链通过物理缠结和界面相容作用与沥青基质形成互穿网络结构，这种三维拓扑构型显著增强了体系的空间支撑能力。值得注意的是，当掺入等量改性剂时，糠醛抽出油对软化点的提升幅度低于SBS改性剂，这与其分子量偏低及缺乏功能性官能团直接相关。而玄武岩纤维的增强机理体现为双重效应，一方面，纤维表面丰富的硅羟基与沥青组分产生化学键合，构建出稳定的多尺度增强网络，另一方面，纤维在灌缝胶基体中的空间取向分布通过“微加筋”效应显著提高体系的流动阻力。

锥入度的残差正态图如图 6 所示，锥入度实测残差点数据点沿正态分布参考线呈良好线性排列，表明其拟合模型的残差符合正态性分布特征。结合表 5 方差分析结果可知，SBS 掺量、糠醛抽出油含量及玄武岩纤维掺量均为模型显著项（P<0.000 1），其中，SBS 与糠醛抽出油的二元交互作用项及 SBS 的二次效应项较为显著。通过二次多项式回归模型构建的三维响应曲面及其二维等高线投影，定量表征了关键制备参数 SBS、糠醛抽出油、玄武岩纤维与锥入度之间的非线性耦合关系。

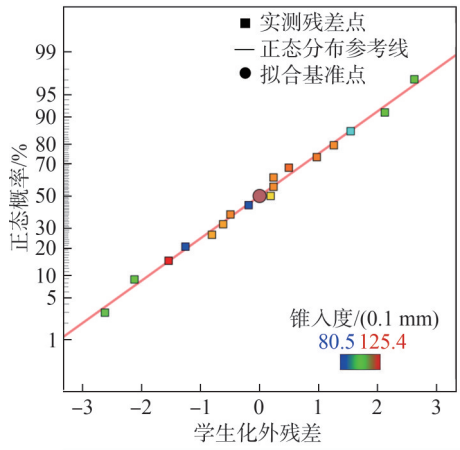
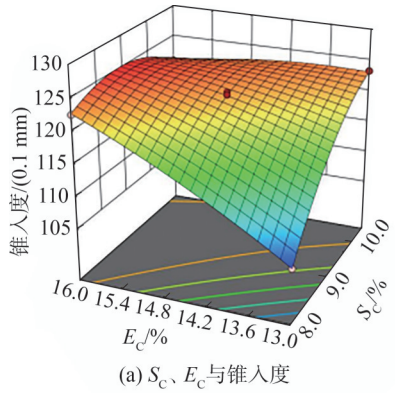


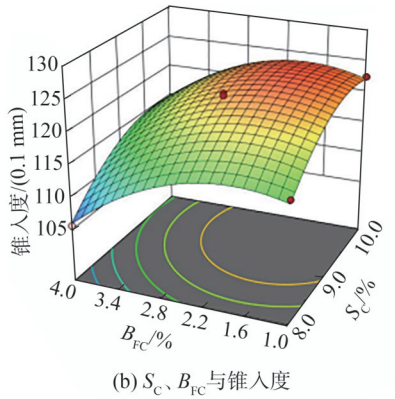
图 6　锥入度的残差正态图

Fig. 6　Residual normality plot of cone penetration

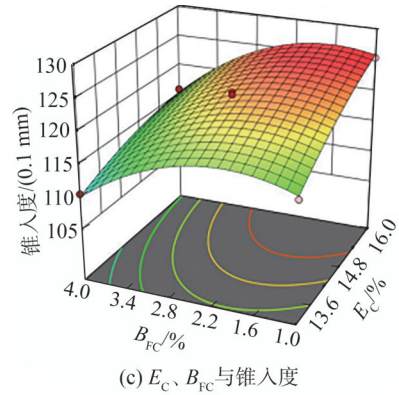
锥入度与各因子之间的响应曲面如图 7 所示。由图 7 可知，锥入度与 SBS 掺量及糠醛抽出油掺量呈显著正相关，其作用机制为：一方面，SBS 分子链通过苯乙烯硬



(a) S_C、E_C与锥入度



(b) S_C、B_{FC}与锥入度



(c) E_C、B_{FC}与锥入度

图 7　锥入度与各因子之间的响应曲面

Fig. 7　Response surfaces between cone penetration and factors

段形成的物理交联网络赋予体系弹性骨架，而丁二烯软段通过增塑效应提升材料形变能力；另一方面，糠醛抽出油作为低分子量增塑剂，其烷基侧链可有效渗透至沥青胶体结构，通过稀释效应降低体系黏弹性模量，从而协同提升灌缝胶的流动特性。进一步分析图7(b)中玄武岩纤维与SBS的复合作用曲线，锥入度呈现先增后减的非单调变化规律。在低掺量阶段，纤维的桥接作用与SBS弹性网络产生协同增塑效应，使锥入度增大。但当掺量超过临界值时，纤维–聚合物界面形成的三维互锁结构显著增强，其约束效应导致体系锥入度下降，表明组分间强相互作用引发的交联密度增加是性能转折的关键机制。

弹性恢复率的残差正态图如图8所示。图8中弹性恢复率实测残差点分布贴近正态分布参考线，表明其拟合模型残差符合正态性分布特征。弹性恢复率和各因子之间的响应曲面如图9所示。由图9可知，弹性恢复率与聚合物含量呈正相关性，当SBS掺量增加时，弹性恢复率显著提升，这归因于SBS分子形成的三维网状交联结构显著增强了沥青基体的弹性响应能力，与之形成对照的是，糠醛抽出油的增塑作用导致体系储能模量下降。值得注意的是，玄武岩纤维的掺入通过纤维–基体界面黏结效应和应力分散机制，使复合材料的弹性恢复效率提升显著。

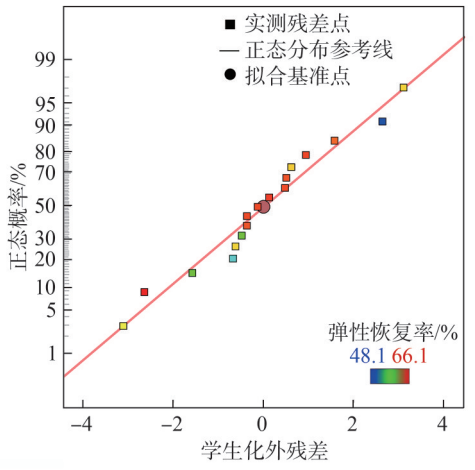
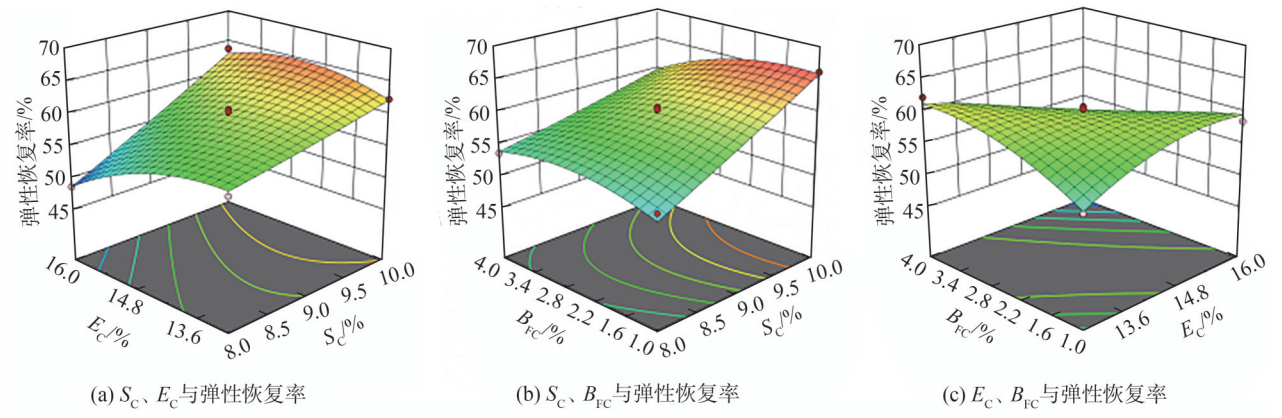


图 8 弹性恢复率的残差正态图

Fig. 8 Residual normality plot of elastic recovery rates



(a) S_C、E_C与弹性恢复率　(b) S_C、B_{FC}与弹性恢复率　(c) E_C、B_{FC}与弹性恢复率

图 9 弹性恢复率和各因子之间的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces between the elasticity recovery rate and factors

2.3 最优制备参数

通过试验确定了最优制备参数，最优制备参数与材料性能指标的预测及试验结果见表6。由表6可知：1)最佳制备参数组合为SBS含量为9.9%、糠醛抽出油含量为14.9%、玄武岩纤维含量为1.65%；2)软化点、锥入度、弹性恢复率的预测与试验值相对误差分别为0.33%、0.34%、1.19%，相对误差均小于2%，表明RSM对复合改性沥青灌缝胶制备参数的设计具有较高的准确性。对基于最优制备参数制备的灌缝胶进行性能检测，结果如表7所示。

表 6 最优制备参数与材料性能指标的预测及试验结果

Tab. 6 Prediction and experimental resuls of optimal preparation parameters and performance indicators

预测或试验值	S_C/%	E_C/%	B_{FC}/%	软化点/℃	锥入度/(0.1 mm)	弹性恢复率/%	是否通过3次循环*
预测值	9.990	15.024	1.338	95.936	122.941	67.001	
试验值1	9.9	15.0	1.3	94.7	124.65	65.89	通过
试验值2	9.9	15.0	1.3	96.3	122.89	65.01	通过
试验值3	9.9	15.0	1.3	95.5	123.78	66.22	通过
试验平均值	9.9	15.0	1.3	95.5	123.77	65.71	

注：*表示在−20 ℃温度下拉伸长度为材料自身长度100%的3次循环。

表 7　最优参数下制备的灌缝胶性能与规范要求

Tab. 7　Performance of crack sealant prepared under optimal parameters and specific requirements

项目	软化点/℃	锥入度/(0.1 mm)	弹性恢复率/%	流动度/mm	低温拉伸
测试结果	94.8	124.1	65.7	0.1	通过
规范要求	≥80[24]	90～150[24]	30～70[24]	≤5[24]	通过[24]

3　复合改性灌缝胶试验结果分析

3.1　抗变形能力分析

本文共制备了 3 组复合改性灌缝胶：1）a 组，20% 橡胶改性沥青+7% 邻苯二甲酸二丁酯+糠醛抽出油；2）b 组，20% 橡胶改性沥青+7% 邻苯二甲酸二丁酯+糠醛抽出油+SBS 改性剂；3）c 组，20% 橡胶改性沥青+7% 邻苯二甲酸二丁酯+糠醛抽出油+SBS 改性剂+玄武岩纤维；SBS、糠醛抽出油、玄武岩纤维掺量均按本文最佳掺量控制添加。3 组灌缝胶常规性能见表 8。

表 8　复合改性灌缝胶常规性能试验结果

Tab. 8　Regular performance test results of composite modified crack sealants

组别	软化点/℃	锥入度/(0.1 mm)	压缩弹性回复率/%	是否通过 3 次循环
a	71	133	55	未通过
b	88	120	61	通过（临界）
c	95	122	65	通过

购买了两种适用于−30 ℃的灌缝胶市售产品（d、e 组）进行对比试验。复合改性沥青灌缝胶的黏弹特性对于温度格外敏感，需要通过温度扫描试验来评估其敏感性，从而验证其力学性能。在温度扫描试验中，用复数剪切模量 G^* 评估灌缝胶的抗变形能力，用相位角 δ 对沥青的黏弹性进行评估。线性黏弹性区间（LVR）指在应变或应力足够小的范围内，材料响应与激励输入呈线性比例关系；该区间内材料的黏弹性特性与应变幅值无关，仅取决于频率或时间。在添加了玄武岩纤维和 SBS 后，材料的微观结构变得复杂且不均匀，LVR 会显著变窄。如果测试时选择的应变幅度过大，超过了 LVR，那么测得的结果将不能真实反映材料的黏弹性，而是包含了结构破坏、屈服、大变形等非线性效应。根据标准[25]推荐值和预试验结果，将 DSR 测试（温度扫描、MSCR、频率扫描）的应变幅度设定为 1%。

不同复合改性灌缝胶的复数剪切模量和相位角如图 10 所示。由图 10（a）可知，改性灌缝胶的 G^* 值呈现出显著的温度依赖性，即在 35～95 ℃温度范围内，G^* 随温度升高呈指数衰减。其中，a 组体系衰减率相对较大，与邻苯二甲酸二丁酯与糠醛抽出油的协同增塑效应有关，即通过削弱沥青质分子间 π−π 堆积作用，显著提升自由体积分数，导致黏弹性响应加速松弛。相比较而言，b 组表现出了较好的温度稳定性。c 组展现出显著的高温性能优势，其最大 G^* 达到 81 kPa，较未添加纤维的 b 组（60 kPa）提升 35.2%，且在整个温度区间内 G^* 下降速率最为平缓。c 组的 G^* 分别比 d 组（79 kPa）和 e 组（60 kPa）高出 2.5% 和 33.5%，这种性能提升源于玄武岩纤维形成的三维网络结构，通过应力传递和裂纹阻滞双重机制，有效增强了材料的抗裂性、高温稳定性及耐久性。图 10（b）进一步展现了材料的性能差异。a 组的 δ 值随温度升高急剧上升，最大为 83.09°，反映出严重的高温流变特性与温度敏感性。在引入 SBS 改性后，b 组的 δ 值相比 a 组显著下降。而加入玄武岩纤维后，c 组 δ 值相比 b 组进一步下降，表明材料弹性恢复能力得到进一步强化。值得注意的是，市售产品中 d 组表现出仅次于 a 组的温度敏感性，其 δ 值变化率与 a 组最为接近，而 e 组虽保持较低 δ 值，但其力学性能却劣于本文制备的复合材料。

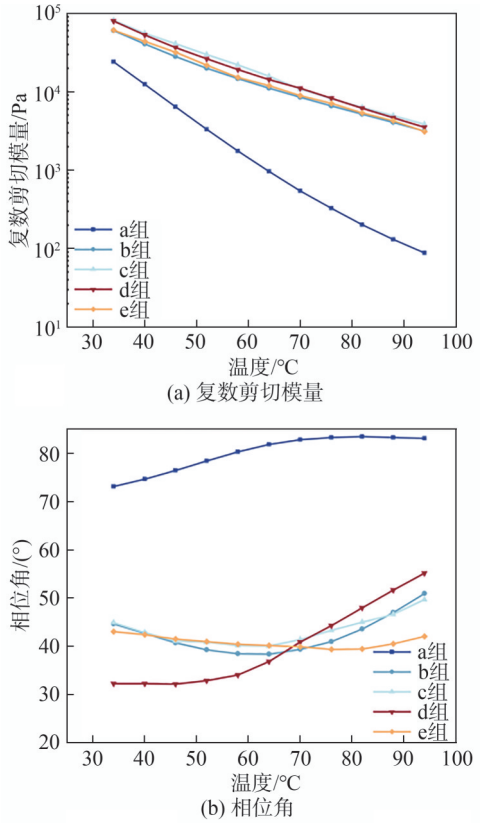


图 10　不同复合改性灌缝胶的复数剪切模量和相位角

Fig. 10　Complex shear modulus and phase angles of different composite modified crack sealants

G^* 与 δ 的关联分析表明，基于 RSM 改性的玄武岩纤维复合灌缝胶形成了“聚合物−纤维”双重增强体系：SBS 改性有效提升基础黏结性能，玄武岩纤维则通过物理增韧机制抑制温度敏感性和延迟模量衰减。这种协同效应使材料同时满足高模量保持率和强弹性响应的要求，其综合性能较现有市售产品明显提升。

研究结果表明，聚合物–纤维复合改性技术可突破传统灌缝胶“高模量–低弹性”的性能矛盾，为开发长寿命道路养护材料提供了新思路。

SBS增强作用示意图如图11所示。微观机理分析表明，SBS通过苯乙烯硬段微区形成物理交联网络，这种三维互穿网络结构不仅通过弹性耗散机械能，更在宽温域内实现模量梯度调控：低温段柔性丁二烯链段通过构象变化释放集中应力，高温段则通过物理交联点抑制塑性流动，表明该体系兼具抗裂与抗车辙的双重功能特征[26]。

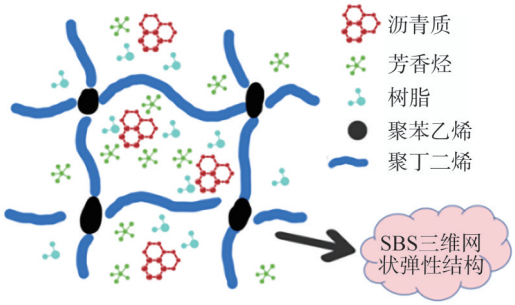


图 11 SBS增强作用示意图

Fig. 11 SBS enhancement effect schematic diagram

3.2 高温性能分析

沥青灌缝胶服役过程中需承受路面温度波动与行车动荷载的耦合作用，其变形行为本质上属于热–力动态响应过程。采用多应力蠕变恢复试验（MSCR），模拟实际工况中循环荷载与温度场的协同效应，定量表征灌缝胶的高温抗变形能力。通过分级施加蠕变应力（0.1、3.2 kPa），解析材料在不同应力水平下的平均恢复率$\overline{R}$（表征材料的弹性恢复能力）和平均不可恢复蠕变柔量$\bar{J}_{nr}$（反映黏塑性变形累积程度）的变化规律，重点揭示灌缝胶在长期动载作用下的弹性恢复特性与累积塑性变形趋势，为评价其抗车辙及抗流动性能提供关键参数依据。$\overline{R}$与$\bar{J}_{nr}$计算公式如下：

$$\begin{cases} R=\dfrac{\varepsilon_C-\varepsilon_0}{\varepsilon_R-\varepsilon_0}, \\ \overline{R}=\displaystyle\sum_{N=1}^{10}\frac{R(\tau,N)}{10} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} J_{nr}=\dfrac{\varepsilon_R-\varepsilon_0}{\tau}, \\ \bar{J}_{nr}=\displaystyle\sum_{N=1}^{10}\frac{J_{nr}(\tau,N)}{10} \end{cases} \tag{5}$$

式（4）～（5）中：ε_C为蠕变阶段终了时刻的总应变；ε_0为蠕变开始前的初始基准应变；ε_R为恢复阶段终了时刻的残余应变；N为有效蠕变–恢复循环周期总数；τ为每个加载周期所对应的蠕变应力，kPa；R为恢复率；J_{nr}为不可恢复蠕变模量，kPa^{-1}。

MSCR试验结果、DBP软化机理示意图、糠醛软化机理示意图分别如图12～14所示。

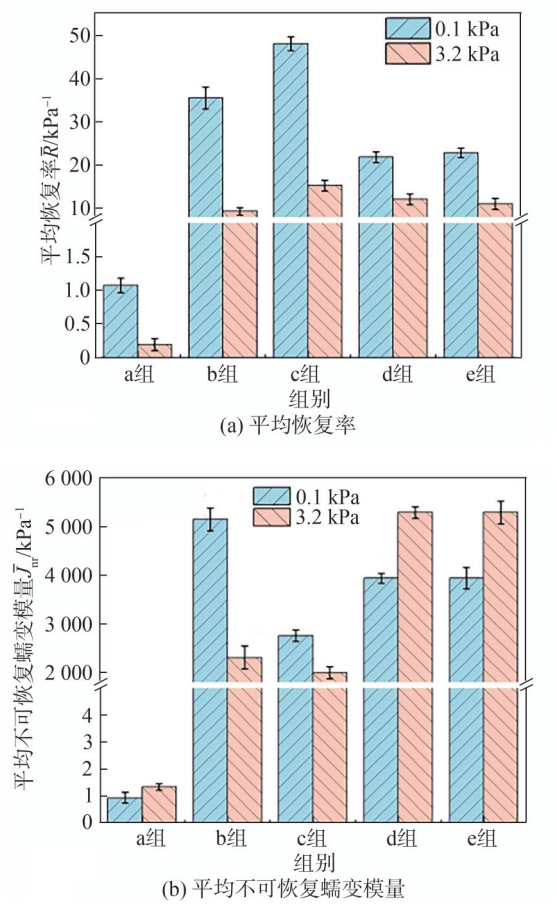


图 12 MSCR试验结果（试验温度64 ℃）

Fig. 12 MSCR test results (test temperature 64 °C)

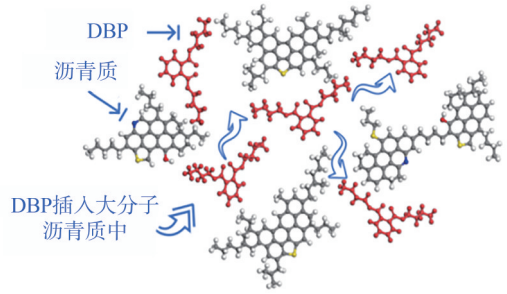


图 13 邻苯二甲酸二丁酯（DBP）软化机理示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the softening mechanism of dibutyl phthalate (DBP)

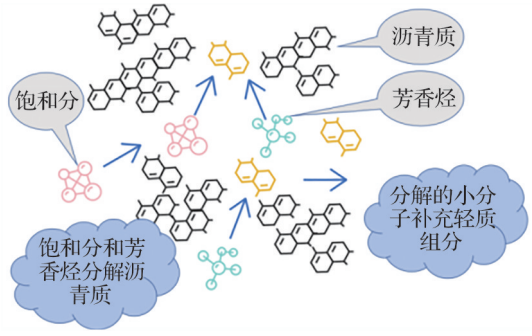


图 14 糠醛软化机理示意图

Fig. 14 Schematic diagram of furfural softening mechanism

由图12可知，a组在应力提升过程中呈现$\overline{R}$值下降与$\bar{J}_{nr}$值缓增的典型黏弹性劣化特征。这种力学退化现象源于配方中糠醛抽出油与DBP的协同软化作用，DBP作为低极性小分子增塑剂，其分子动力学直径（约0.6 nm）小于沥青胶体结构单元间隙（1.2～2.5 nm），可渗透至沥青质–胶质界面域。DBP通过破坏分子间氢键及范德华力作用，使体系内聚力下降，直接导致宏观硬度和软化点的降低[27–28]。糠醛抽出油富含轻质芳香烃与饱和分，其通过溶解沥青质实现胶体体系重构。该过程不仅稀释了刚性沥青质网络浓度，同时还补充游离轻组分，引发体系自由体积扩大，促使聚合物链段玻璃化转变温度降低，最终表现为低温延展性提升与高温抗变形能力削弱[29–30]。

MSCR试验结果揭示了各组材料非线性黏弹响应的显著差异：1）b组在0.1 kPa低应力下展现出较优弹性恢复率（$\overline{R}$=35.5%），但应力升至3.2 kPa时$\overline{R}$衰减达56.9%，且$\bar{J}_{nr}$从3 254.1 kPa^{-1}降至2 917.3 kPa^{-1}，表明其抗变形能力存在应力依赖性；c组（SBS–玄武岩纤维复合改性体系体系）在0.1、3.2 kPa应力下$\overline{R}$值分别为48.07%（相比b组增加35.3%）和15.28%（相比b组增加63.7%），同时$\bar{J}_{nr}$为最低值（2 758.12、1 989.74 kPa^{-1}），表明纤维三维网络既通过应力传递与裂纹桥接机制，提升低应力弹性恢复（纤维弹性储能占比＞40%），又通过界面摩擦耗能抑制高应力塑性流动（塑性应变降低28.6%）；d组和e组在3.2 kPa应力下的$\bar{J}_{nr}$分别比0.1 kPa下增加22.4%和18.7%，暴露其黏弹体系缺乏刚性骨架支撑，导致高应力工况下抗车辙能力劣化。

为了检验c组改性后灌缝胶的分散性，蠕变应力为0.1 kPa时对c组进行3次平行测试，可重复性试验结果见表9。由表9可知，R和J_{nr}的标准差均较小，且计算变异系数可得，R和J_{nr}的变异系数分别为2.5%和3.1%，均小于5%，表明试验工艺可控且结果可重复。

表9　0.1 kPa下c组可重复性试验结果

Tab. 9　Repeatability test results for Group c at 0.1 kPa

参数	R/%	J_{nr}/kPa^{-1}
平均值	48.07	2 758.12
标准差	1.20	85.00

3.3　黏弹性分析

作为典型时温依赖性沥青基黏弹性材料，改性灌缝胶的服役性能受动态温频场作用呈显著非线性衰减，直接影响其抗疲劳与抗流动特性。通过动态剪切流变（DSR）频率扫描试验，在0.1～100.0 Hz频域范围内测定a～e组（平行样品数n=3）的黏弹响应特性，构建复数剪切模量G^*的时温等效主曲线，频率扫描测试结果如图15所示。由图15可知：所有体系G^*均遵循频域强化规律（频率每提升1个数量级，G^*增幅达45%～78%）和温致软化趋势（温度每升高10 ℃，G^*衰减23%～41%）；a组在30 ℃、10^{-1} Hz条件下G^*小于10^3 Pa，且温度升至80 ℃时G^*最小（约10 Pa），暴露其高温抗变形

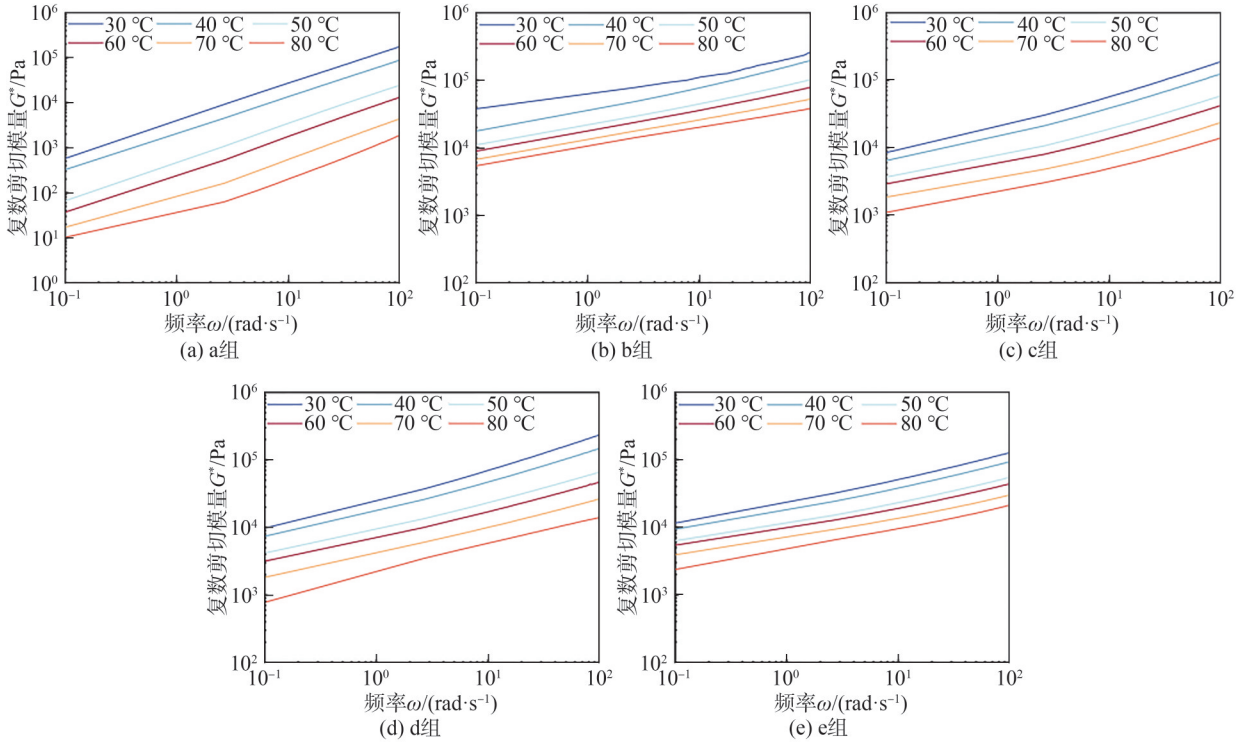


图15　频率扫描测试结果

Fig. 15　Frequency sweep test results

能力缺陷;而玄武岩纤维复合改性的c组在同等条件下G^*达10^4～10^5 Pa,且升温至80 ℃时保持率最优,其优越的频温稳定性源于纤维–沥青界面形成的耗能机制与聚合物交联网络的协同作用。

改性沥青灌缝胶作为一种黏弹性材料,其本身的力学特性的变化遵循时间–温度等效原理,即在一定的测试温度下,频率的改变是通过位移因子沿着对数频率轴而发生改变。其中,位移因子只与温度有相关,可由下式计算:

$$\lg \alpha_T = \frac{-C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} \tag{6}$$

式中,α_T为位移因子,C_1、C_2为常数,T为试验温度,T_0为参考温度。

设定参考温度为30 ℃,依据式(6)计算5组灌缝胶的位移因子,得到复合改性沥青灌缝胶的复数剪切模量拟合结果如图16所示。

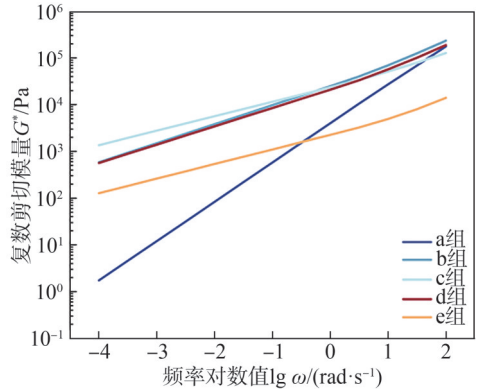
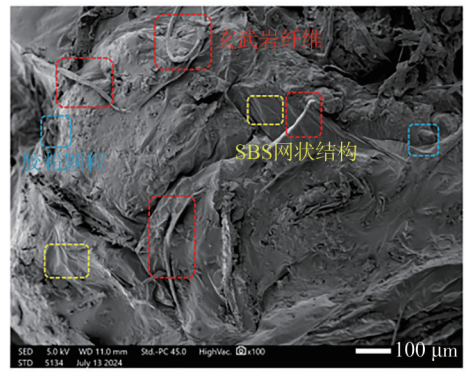


图 16 复数剪切模量拟合结果

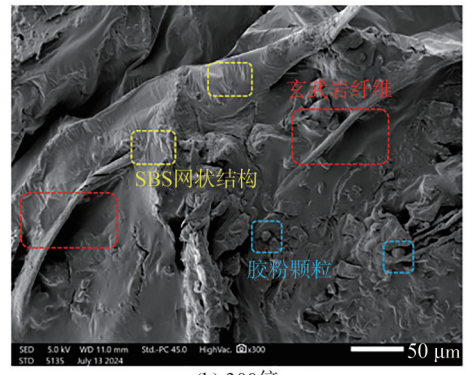
Fig. 16 Fitting results of the shear modulus in plural form

玄武岩纤维复合改性(c组)斜率值最低(0.322),较SBS改性体系b组(0.425)降低24.7%,且显著低于市售产品d组(0.411)和e组(0.329)。这表明玄武岩纤维的引入有效抑制了灌缝胶的黏性流动响应,其三维纤维网络通过界面摩擦耗能和应力再分配机制,将材料动态响应模式从b组的“聚合物主导型”转变为“弹塑性协同型”,使体系对频率变化的敏感性降低至最优水平。结合时温等效主曲线特征,低频区对应高温服役工况,高频区映射低温抗裂场景。c组在低频区展现最高G^*值(约10^3 Pa),其高温抗变形能力较a组提升2个数量级,高频区虽出现模量适度下降,但仍处于较高水平(约10^5 Pa)。这种“高频缓降–低频高稳”的独特黏弹行为表明:玄武岩纤维可通过协同作用,在提升沥青基体刚性的同时维持聚合物链段的运动自由度,有效突破传统改性沥青存在的高低温性能互斥这一技术瓶颈。

用扫描电镜(SEM)对材料拉伸断口的微观结构进行解析,以揭示玄武岩纤维的增强机制,c组和b组的SEM图如图17、18所示。玄武岩纤维对灌缝胶的改性机理如图19所示。



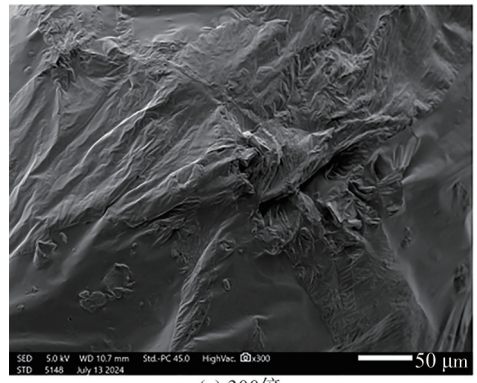
(a) 100倍



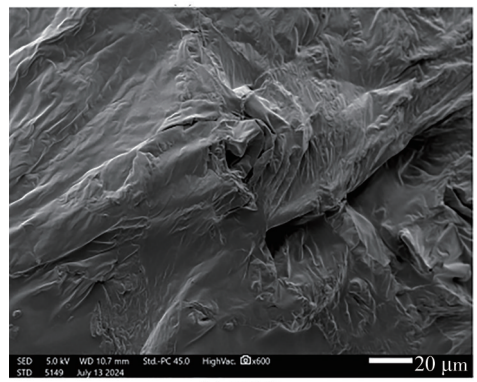
(b) 300倍

图 17 c组SEM图

Fig. 17 SEM images of Group c



(a) 300倍



(b) 600倍

图 18 b组SEM图

Fig. 18 SEM images of Group b

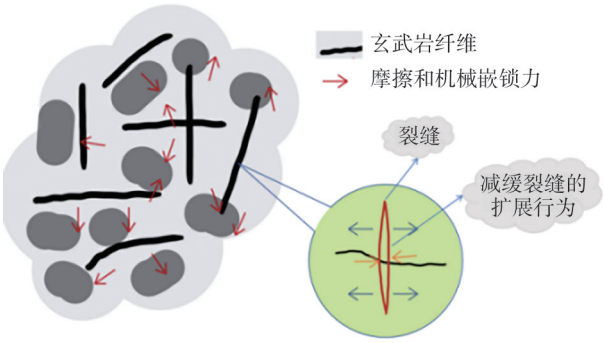


图 19　玄武岩纤维对灌缝胶的改性机理

Fig. 19　Modification mechanism of basalt fibers for crack sealant

由图 17 可知，玄武岩纤维以单丝形态在基体中呈空间随机分布，无纤维团聚或局部富集现象，且可观察到 2～3 根独立纤维，间距均匀。纤维表面被沥青/SBS 相紧密包覆，外露部分仍与基体形成连续过渡界面，无可见孔隙或剥离迹象，界面结合较紧密。在 c 组体系中，玄武岩纤维与 SBS 改性剂协同构建三维互穿网络，该网络通过三重作用机制提升性能：1）纤维–沥青界面形成机械锚固区，限制胶粉颗粒迁移；2）纤维桥接微裂纹时产生闭锁应力，提升裂纹扩展能；3）c 组 SEM 图较 b 组粗糙，因为纤维束与 SBS 交联点形成能量耗散节点，促使断裂面粗糙度增加，提高灌缝胶断裂功[31]。这种多尺度增强效应使材料同时获得高刚度与强韧协同性，弥补传统改性沥青抗变形与抗开裂性能难以兼得的局限。

3.4　工程经济性对比

基于原材料的市场均价，计算 c 组复合改性灌缝胶的成本，结果见表 10。

表 10　c 组复合改性灌缝胶成本

Tab. 10　Cost of Group c composite modified crack sealant

材料	单价/(元·kg^{-1})	复合改性配方用量/kg	成本/(元·kg^{-1})
橡胶改性沥青	3.5	0.720	2.52
SBS	15.0	0.099	1.49
玄武岩纤维	8.0	0.013	0.10
糠醛抽出油	4.5	0.150	0.68
合计			4.79

由表 10 可知，本文制备的 c 组复合改性灌缝胶的成本合计为 4.79 元/kg，而寒区灌缝胶市售产品的均价为 5.20～6.00 元/kg，说明本文制备的复合改性材料相比市售寒区灌缝胶单价每千克可节省约 0.41～1.21 元。东北地区灌缝胶用量普遍在 0.3～0.6 kg/延米，灌缝胶用量按实际开槽尺寸计算+10% 损耗，复合改性灌缝胶每延米可节省约 0.20～0.80 元[32]。此外，高温性能的显著提升，可延长维修周期，减少因夏季高温软化导致的返修频率，降低综合成本。减少的施工频次可抵消材料增量的成本，长期使用更具经济性。

4　结　论

1）SBS–玄武岩纤维复合改性体系通过三维网络约束效应，使平均不可恢复蠕变柔量在 0.1、3.2 kPa 下分别降低至 2 758.12 kPa^{-1} 和 1 989.74 kPa^{-1}，并实现 48.07% 和 15.28% 的平均恢复率，复数剪切模量 G^* 升温保持率为 5 组中最优，软化点为 96.8 ℃，同时高频区的 G^* 与市售低温型灌缝胶相当（约 10 kPa），差异小于 10%，成功实现了高温性能突破与低温性能保留的协同优化。

2）针对轻质组分迁移引发的高温软化缺陷，SBS–玄武岩纤维复合改性体系通过双重稳定化机制实现性能平衡，SBS 交联网络与纤维三维骨架物理吸附轻质组分，提升黏度，并使锥入度精准调控至 123.77/(0.1 mm)，从根本上强化高温抗变形能力。

3）SBS–玄武岩纤维复合改性体系可形成“弹性–刚性”双相增强结构，SBS 的弹性储能效应与纤维的刚性承载作用协同抑制体系脆化倾向，通过分子链构象变化吸收低温变形能，同时三维加筋作用使胶浆流动度降低至 0.1 mm，成功破解高黏度体系常见的“高温增强–低温脆化”连锁反应难题，实现黏弹性性能的跨温域协同优化。复合改性通过协同效应突破传统灌缝胶高低温性能互斥瓶颈，在成本可控前提下延长使用寿命，为寒区路面养护提供了更优解决方案。

参考文献：

[1] Wang Shaoquan,Jia Yanshun,Li Zhuoran,et al.A new pavement crack repair sealant with two-way shape memory effect [J].Construction and Building Materials,2024,436:136816.

[2] Wang Shaoquan, Li Yingsong, Wei Ziyao, et al. Effects of periodically changing temperatures on the bond interface between crack sealant and repaired pavement[J]. Journal of Transportation Engineering,Part B:Pavements,2024, 150:04024003.

[3] Offenbacker D, Mehta Y. Assessing the life-cycle costs of pavement rehabilitation strategies used in long-term pavement performance program[J]. Journal of Transportation Engineering,Part B:Pavements,2022,148:04022002.

[4] Wang Hui,Wang Xu,Huang Weilin,et al.Study on compatibility of crumb rubber powder composite modified asphalt[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2022,53(10):3879–3889.[王辉,王旭,黄威麟,等.废胶粉复合改性沥青相容性研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):3879–3889.]

[5] Suo Lijun. Preparation and properties of rubber powder/SBS composite modified asphalt binder[J]. Journal of Functional Materials,2022,53(6):6224–6229.[锁利军.橡胶粉/SBS复合改性沥青胶结料的制备与性能研究[J].功能材料,2022,53(6):6224–6229.]

[6] Wang Hui,Xiong Mengri,Yang Zhen.Research on performance and mechanism of crumb rubber composite modified asphalt with chemical modifier[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2021,48(6):30–37.[王辉,熊梦日,杨震.基于化学改性的废胶粉复合改性沥青性能与机理研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(6):30–37.]

[7] Sun Qirun,Yuan Zhaodi,Cheng Hao,et al.Effect of warm-mixed agents on rheological properties and microstructure of desulfurized rubber powder modified asphalt[J]. China Synthetic Rubber Industry,2023,46(4):336–340.[孙启润,苑兆迪,程浩,等.温拌剂对脱硫胶粉改性沥青流变性能和微观结构的影响[J].合成橡胶工业,2023,46(4):336–340.]

[8] Xin Xue,Su Linping,Liang Ming,et al.Preparation and dynamic mechanical properties of high-modulus asphalt modified by waste rubber[J]. Materials Review, 2020, 34(18):18060–18064[辛雪,苏林萍,梁明,等.废胶粉改性制备高模量沥青及其动态力学性能[J].材料导报,2020,34(18):18060–18064.]

[9] Hao Yan,Ye Yali,Zhuang Chuanyi,et al.Research on high-temperature evaluation indexes and performance of Qingchuan rock-SBS composite modified asphalt[J].Materials, 2022,15(21):7455.

[10] Chen Zeyang,Huang Wenke,Wu Kuanghuai,et al.Performance degradation of styrene-butadiene-styrene modified asphalt binder at ultra-high temperature: Process of construction in fluid mastic asphalt[J]. Case Studies in Construction Materials,2023,19:e02490.

[11] Liu Yunxue, Guo Xueyan, Fan Zhaorong, et al. Study on properties of different SBS modified asphalt[J]. Chemical Research and Application,2024,36(7):1646–1651.[刘运学,郭学艳,范兆荣,等.不同SBS改性沥青的性能研究[J].化学研究与应用,2024,36(7):1646–1651.]

[12] Tian Yaogang,Qin Chao,Zhang Mengyuan,et al.Study on the road performance of warm-mix recycled SBS modified asphalt mixes[J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(5):1031–1035.[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.]

[13] Gong Yafeng,Wu Shuzheng,Zhang Yuwei,et al.Investigation of the high-temperature and rheological properties for asphalt sealant modified by SBS and rubber crumb[J]. Polymers,2022,14(13):2558.

[14] Liu Tao,Guo Naisheng,You Zhanping,et al.High- and low-rheological properties and modification mechanism of PUP/SBS composite-modified asphalt[J].Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2023,53(4):672–681.[刘涛,郭乃胜,尤占平,等.PUP/SBS复合改性沥青的高低温流变性能及改性机制[J].东南大学学报(自然科学版),2023,53(4):672–681.]

[15] Tian Yaogang,Qin Chao,Zhang Mengyuan,et al.Study on the road performance of warm-mix recycled SBS modified asphalt mixes[J].Applied Chemical Industry,2024,53(5):1031–1035.[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.]

[16] Chen Xiangdong,Zou Jiahui,Li Enze,et al.Exploration of the influence of SBS relative molecular mass on the performance of modified asphalt[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(28):12342–12349]

[17] Qin Jinshun,Wang Zhenjun,Sun Ning,et al.Improvements and mechanism of crumb rubber on high temperature stability performance of asphalt sealant[J].Highway,2023,68(8):332–340.[覃金顺,王振军,孙宁,等.橡胶粉对沥青灌缝胶高温稳定性提升与机理[J].公路,2023,68(8):332–340.]

[18] Feng Xinjun,Liang Hui,Peng Cheng.Preparation and performance of high performance grouting sealant for asphalt pavement in humid and hot areas[J].Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2023,43(5):11–20.[冯新军,梁辉,彭程.湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的研制与性能[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(5):11–20.]

[19] Guo Peng,Cheng Shengjie,Luo Yuhong,et al.Preparation and rheological properties of crack sealants for asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2025,465:140052.

[20] Wang Hainian,Ma Ziye,Chen Xi,et al.Preparation process of bio-oil and bio-asphalt,their performance,and the application of bio-asphalt: A comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition),2020,7(2):137–151.

[21] Yan Xiang,Wu Di,Hu Kui,et al.The modification mechanism, evaluation method, and construction technology of direct-to-plant SBS modifiers in asphalt mixture:A review [J].Polymers,2023,15(13):2768.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.橡胶沥青路面技术标准:CJJ/T 273—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[23] 中华人民共和国交通运输部.公路工程 玄武岩纤维及其制品 第1部分:玄武岩短切纤维:JT/T 776.1—2010[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2010.

[24] 中华人民共和国交通运输部.路面加热型灌缝胶:JT/T 740—2024[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2024.

[25] American Society for Testing, Materials. Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer: ASTM D7175–23[S].West Conshohocken:ASTM International,2023.

[26] Liu Yong,Gu Xingyu,Li Zhigang,et al.Performance evaluation and modification mechanism of rubber/SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2019,40(1):108–113.[刘勇,顾兴宇,李志刚,等.胶粉/SBS复合改性沥青性能评价及改性机理[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(1):108–113.]

[27] Tian Weiwei,Gao Yingli,Li Yuelin,et al.Molecular dynamics study on the effect of rheological performance of asphalt with different plasticizers[J].Construction and Building Materials,2023,400:132791.

[28] Cao Wei,Li Xinyan.The rejuvenating potential of plasticizers on oxidatively aged asphalts:Rheological and molecular dynamics perspectives[J].Polymers,2022,14(21):4624.

[29] Daniels P H.A brief overview of theories of PVC plasticization and methods used to evaluate PVC-plasticizer interaction[J].Journal of Vinyl and Additive Technology,2009,15(4):219–223.

[30] Wu Wenliang, Dai Shenglin, Si Li. Study on rheological and temperature sensitive properties of recycled asphalt from furfural extraction oil[J].Journal of Zhengzhou University(Engineering Science),2022,43(3):52–58.[吴文亮,代生林,斯李.糠醛抽出油再生沥青的流变和感温性能研究[J].郑州大学学报(工学版),2022,43(3):52–58.]

[31] Wang Cuihong. Study on performance and modification mechanism of basalt fiber and Burton rock asphalt compound modified asphalt mixture[J].Highway Engineering,2018,43(1):102–109.[王翠宏.玄武岩纤维与布顿岩沥青复合改性沥青混合料性能及改性机理[J].公路工程,2018,43(1):102–109.]

[32] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面养护技术规范:JTG 5142—2019[S].北京:人民交通出版社,2019.

Experimental Study on High-temperature Performance of Rubber-modified Asphalt Sealant Based on Composite Modification

WANG Wei[1], *SHI Jiale*[1], *GAO Xuhe*[2], *HE Rongsen*[1], *CHEN Xiaomei*[1]

(1.School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;
2.School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract:

Objective Rubber-modified asphalt sealants used in northeastern China exhibit adequate low-temperature crack resistance; however, insufficient high-temperature performance, resulting in excessive deformation, mechanical degradation, and debonding under summer conditions. This limitation highlights the need to develop sealants that simultaneously satisfy performance requirements across extreme temperature ranges. In this study, we address this challenge by incorporating styrene–butadiene–styrene (SBS) copolymer and basalt fiber (BFC) into rubber-modified asphalt and optimizing their proportions to enhance high-temperature stability while maintaining the low-temperature flexibility required under regional climatic conditions.

Methods A composite system was prepared using 20% rubber-modified asphalt as the base matrix supplemented with 7% dibutyl phthalate (DBP) as a fixed plasticizer to improve low-temperature flexibility. Response Surface Methodology (RSM) combined with Box–Behnken Design (BBD) was employed to optimize three key components: SBS (8%–10%), furfural-extracted oil (FEO, 13%–16%), and basalt fiber (BFC, 1%–4%). Seventeen experimental formulations were subjected to a two-stage high-shear mixing process, which involved initial SBS dispersion at 175–185 ℃ and 4 500 r/min for 30 minutes, followed by BFC incorporation at 165–175 ℃ and 2 000 r/min for ≤15 minutes to minimize fiber breakage. Performance evaluation included the assessment of physical properties, including the softening point based on ASTM D36, cone penetration using modified ASTM D5, and elastic recovery based on JT/T 740—2024, as well as comprehensive rheological characterization. Rheological assessments included temperature sweep tests (35–95 ℃, 10 rad/s, and 1% strain) to determine the complex shear modulus (G^*) and phase angle (δ) using a dynamic shear rheometer; multiple stress creep and recovery (MSCR, ASTM D7405) tests at 64 ℃ under applied stresses of 0.1 kPa and 3.2 kPa to quantify the recovery rate (R) and nonrecoverable creep compliance (J_{nr}); and frequency sweep tests (0.1–100.0 Hz, 1% strain) across 30–80 ℃ to establish time–temperature superposition (TTS) master curves. Low-temperature performance was validated through cyclic tensile tests conducted at −20 ℃ under 100% strain based on JT/T 740—2024. The composite performance was benchmarked against two commercial low-temperature (−30 ℃) sealants.

Results and Discussions RSM optimization produced highly significant models ($R^2 > 0.97$ for all responses) and identified the optimal component proportions as 9.9% SBS, 15.0% FEO, and 1.3% BFC. Validation tests confirmed close agreement between the experimental and predicted

values: the softening point was 95.5 ℃ (predicted: 95.9 ℃; error: 0.33%), cone penetration was 123.77 (0.1 mm) (predicted: 122.9; error: 0.34%), and elastic recovery was 65.71% (predicted: 67.0%; error: 1.19%). The composite sealant satisfied all JT/T 740—2024 specifications for the −30 ℃ grade, including the critical requirements for low-temperature tensile performance. Rheological characterization revealed substantial improvements in high-temperature performance. Temperature sweep tests demonstrated superior G^* retention in the composite sealant (Group c: 81 kPa at 64 ℃) compared to the SBS-modified control (Group b: 60 kPa, +35.2%) and commercial products (Groups d/e: 79/60 kPa). Group c consistently exhibited lower δ values than the unmodified and commercial groups, indicating enhanced elasticity, while also demonstrating the slowest rate of G^* reduction with increasing temperature. MSCR tests further confirmed the superior performance of the composite sealant: at an applied stress of 0.1 kPa, Group c achieved a recovery rate of 48.07% (compared to 35.5% for Group b, +35.3%) and a J_{nr} value of 2 758.12 kPa^{-1} (compared to 3 254.1 kPa^{-1} for Group b, −15.2%); at 3.2 kPa, the recovery rate reached 15.28% (compared to 9.6% for Group b, +63.7%), whereas the J_{nr} value was 1 989.74 kPa^{-1} (compared to 2 917.3 $kPa^{-1}$for Group b, −31.8%). The commercial products of Group d exhibited increases of 18.7%−22.4% in J_{nr} compared to Group c under high-stress conditions. Frequency sweep tests validated the TTS principle, with the master curve of Group c (30 ℃ reference temperature) exhibiting the lowest slope (0.322 compared to 0.425 for Group b), indicating reduced sensitivity to frequency and temperature variations. At low frequencies, which simulated high-temperature conditions, Group c maintained the highest G^* (approximately 10^3 Pa), exceeding that of the unmodified sealant by two orders of magnitude. At high frequencies, which simulated low-temperature conditions, G^* of Group c remained elevated (approximately 10^5 Pa), confirming balanced rheological performance. SEM analysis revealed uniform BFC dispersion within the SBS-modified matrix, which formed a synergistic three-dimensional network that provided mechanical reinforcement through interfacial bonding, stress transfer, microcrack bridging, and energy dissipation while complementing the elastic network formed by SBS.

Conclusions Composite modification of rubber-modified asphalt with optimized SBS (9.9%) and basalt fiber (1.3%) using RSM effectively addresses the high-temperature performance deficiency while preserving the low-temperature crack resistance required for the climate in Northeast China. The composite sealant achieved a softening point of 95.5 ℃, a 35.2% increase in G^* at 64 ℃, superior MSCR recovery (48.07% at 0.1 kPa and 15.28% at 3.2 kPa), and reduced J_{nr} compared to SBS-modified asphalt, surpassing commercial low-temperature sealants by >30% in key high-temperature performance metrics. It maintained its low-temperature flexibility, passing cyclic tensile tests at −20 ℃. The SBS elastomeric network and BFC reinforcing skeleton formed a dual-phase structure in which SBS enhanced elasticity and recovery, whereas the BFC 3D network provided mechanical reinforcement, flow inhibition, energy dissipation, and crack bridging. This approach overcomes the traditional tradeoff between high-temperature stiffness and low-temperature flexibility in asphalt sealants, providing a viable high-performance solution for durable pavement maintenance in regions experiencing extreme temperature variations through cost-effective and sustainable modification strategies.

Key words: asphalt sealant; basalt fiber; composite modified asphalt; high-temperature performance; response surface analysis

（编辑 陈 雪）

引用格式: Wang Wei, Shi Jiale, Gao Xuhe, et al. Experimental study on high-temperature performance of rubber-modified asphalt sealant based on composite modification[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(6): 217–230. [王伟, 石家乐, 高旭和, 等. 基于复合改性的橡胶改性沥青灌缝胶高温性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(6): 217–230.]