

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.015

文章编号:1672-9331(2022)04-0152-09

引用格式:韦慧,戴吟吟,张虎,等.沥青路面低温型灌缝胶制备及性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):152-160.

Citation: WEI Hui, DAI Yinhan, ZHANG Hu, et al. Research on preparation and performance of low temperature asphalt pavement of sealants and fillers[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 152-160.

沥青路面低温型灌缝胶制备及性能研究

韦慧¹, 戴吟吟^{1,2}, 张虎¹, 周煜¹, 姚泽光¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114;2.广西新发展交通集团有限公司,广西 南宁 530022)

摘要:【目的】研究低温型灌缝胶各添加剂的最佳掺量,有效延长道路使用寿命。【方法】在改进灌缝胶制备工艺的基础上,以不同掺量的灌缝胶为研究对象,利用主成分分析法进行掺量比选,通过低温弯曲梁流变(BBR)试验、线性振幅扫描(LAS)试验及黏度试验分别评价灌缝胶的流变性能、疲劳性能和黏聚性能,以获得低温型灌缝胶各添加剂的最佳掺量。【结果】低温型灌缝胶中苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(SBS)、增容剂、增塑剂、废胶粉、稳定剂及增黏剂等添加剂的最佳掺量分别为:6%、2%、2%、12%、14%及7%;常规性能指标按重要性从高到低排序依次为:流动值、锥入度、软化点、延度、弹性恢复率;最佳掺量的灌缝胶疲劳寿命为 2.81×10^6 次。【结论】添加剂掺量与疲劳寿命并无一致性,研究成果可为低温型灌缝胶添加剂掺量及性能研究提供参考。

关键词:沥青路面;灌缝胶;主成分分析法;线性振幅扫描试验;流变性能

中图分类号:U418

文献标志码:A

0 引言

沥青路面裂缝主要是由车辆荷载及低温引起的,若不及时处理,裂缝逐步扩大,导致地表水及降雨通过裂缝渗入基层和路基,破坏路面结构^[1-3]。对开裂的沥青路面进行灌缝处理,能有效防止水渗入裂缝,从而延长路面使用寿命^[4]。灌缝胶的低温抗裂性能是影响耐久性的重要因素之一^[5],文献[6]明确了灌缝胶性能的评价方法。AL-QADI等^[7]进行了一系列Superpave校正测试,用改进的弯曲梁流变(bending beam rheometer, BBR)和直接拉伸试验评估灌缝胶的低温性能。LI等^[4]提出用应力松弛指数作为评价灌缝胶低温性能的补充指标。SUN等^[8]基于表面能理论,通过定量煮沸法和电子显微镜扫描试验验证了黏附功能指标之间的相关性,研究了沥青裂缝密封胶对

不同沥青混合料的黏附性能。周志刚等^[9]使用橡胶粉、SBS改性剂及高黏剂制备了高黏度复合改性沥青,并研究了其高温流变性能及改性机理。CAO等^[10]采用低温拉伸试验测试裂缝自愈前后灌缝胶与裂缝之间的黏结性能,并研究了功能自愈评价指标和影响因素,分析了灌缝胶的防水能力。

国内外学者主要对灌缝胶的拉伸性能及工程可行性等进行了研究,而对不同掺量的低温型灌缝胶的制备、疲劳特性及影响因素缺乏关注。然而,在工程应用中,灌缝材料的疲劳耐久性能、低温抗裂性能及影响因素等对沥青路面预防性养护极其重要。因此,本研究在普通型橡胶沥青灌缝胶组成及配比的基础上,优化低温型灌缝胶增韧的制备工艺,利用主成分分析法对不同掺量的灌缝胶进行常规试验指标比选,通过低温BBR试验、线性振幅扫描(linear amplitude sweep, LAS)试验

收稿日期:2021-12-01;修回日期:2022-03-28;接受日期:2022-04-10

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5586);湖南省教育厅优秀青年项目(20B039)

通信作者:韦慧(1984—)(ORCID:0000-0002-2462-8180),女,副教授,主要从事道路养护工程及公路无损检测与评价技术方面的研究。E-mail:wh@csust.edu.cn

以及黏度试验评价低温型灌缝胶的性能,得到低温型灌缝胶各添加剂的最佳掺量,对不同掺量下的低温型灌缝胶进行性能分析,为改善灌缝胶制备工艺及提高其性能提供指导和技术参考。

1 原材料与试验方法

1.1 试验原材料

以普通型橡胶沥青灌缝胶的材料组成及份数作为参考^[11],使用外掺法按照一定增量确定各添加剂掺量。按照掺量高低将制备的灌缝胶分为 3 类,即零掺量(基质沥青)、低掺量与高掺量。低温型灌缝胶采用的添加剂有苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)、废胶粉、树脂、软化剂、稀释剂、稳定剂等。本试验制备低温型灌缝胶采用的添加剂具体如下:SBS 改性剂采用 YH-791 线型 SBS;废胶粉采用 80 目废旧轮胎颗粒;增黏剂采用石油树脂;增塑剂采用邻苯二甲酸酯类化合物,无色油状液体;增容剂采用石油基类抽出油;稳定剂采用硅酸盐类矿物;基质沥青采用 70#沥青。每组灌缝胶均制备 3 份试样并进行平行试验,不同掺量的灌缝胶制备见表 1,表中 S₁、S₂ 组为低掺量组,S₃、S₄ 组为高掺量组。

表 1 不同添加剂掺量的灌缝胶制备表
Table 1 Preparation formulation of sealants and fillers with different dosage additives

添加剂	添加剂掺量/%				配比参考	份数
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄		
线型 SBS	4	6	6	9	星型 SBS	5
增容剂	4	2	6	9	SBR	3
增塑剂	0	2	16	19	外掺剂	7
废胶粉	12	12	13	15	胶粉	25
稳定剂	14	14	18	18	90#沥青	100
增黏剂	7	7	8	8	-	-
70#沥青	100	100	100	100	-	-

注:表中 SBR 为丁苯橡胶(styrene butadiene rubber)

在文献[6]中,对加热型灌缝胶提出了技术要求,见表 2。加热型灌缝胶分为普通型、低温型和严寒型 3 类,分别适用于最低气温不低于-10、-20 和-30 ℃的地区^[6]。

表 2 不同类型灌缝胶技术指标
Table 2 Technical indicators for different sealants and fillers

类型	锥入度/mm	软化点/℃	流动值/mm	弹性恢复率/%
普通型	30~70	≥80	≤5	≥40
低温型	50~90	≥80	≤5	≥40
严寒型	70~150	≥80	≤5	≥40

1.2 制备工艺

灌缝胶的性能不仅与添加剂种类和掺量有关,而且还受制备工艺(如温度、剪切速率及添加剂的添加顺序等)的影响^[11]。高温下,先将粉尘态的 SBS、废胶粉及稳定剂粉末加入基质沥青搅拌 30 min,延长粉末溶胀时间,有效减少粉末污染,同时避免剪切过程中轻质组分的过度挥发和热氧老化作用产生的不利影响。本试验对灌缝胶制备工艺进行了优化,其流程为:首先,将沥青样品置于烘箱加热熔融,烘箱温度为 135 ℃,烘烤 0.5 h。将加热熔融的基质沥青移至保温套(温度控制在 180 ℃),同时加入 SBS 和增容剂,均匀搅拌 5 min。接着依次加入废胶粉、稳定剂和增黏剂,每次添加时均搅拌 5 min,将加入添加剂的样品移至剪切仪进行剪切,剪切速率为 3 000 r/min,剪切温度为 165~185 ℃,剪切 1.5 h。然后,将剪切好的样品移至分散仪进行分散,分散速率为 5 000 r/min,分散温度为 165~185 ℃,分散 30 min。最后将处理好的样品置于烘箱(温度 160 ℃)溶胀发育 0.5 h。

1.3 常规性能试验

常规性能试验主要测试灌缝胶锥入度、弹性恢复率、流动值、软化点及延度等试验指标,每个样品均进行 3 组平行试验^[5-6,12-14]。

1.4 弯曲梁流变试验

BBR 试验模拟沥青类黏弹性材料的温缩开裂过程,被用于评价沥青的低温脆裂性能^[12]。采用 BBR 试验对标准小梁试件进行测试,通过传感器采集劲度模量 S 和蠕变速率 m,测试温度为-18 和-24 ℃。

1.5 线性振幅扫描试验

本研究采用奥地利安东帕公司的动态剪切流变仪,在 25 ℃下进行 LAS 试验。夹具为 8 mm 的上下平行板,频率扫描范围为 0.1~30.0 Hz。本试验

对4组样品及在163℃旋转薄膜烘箱中老化5h后的灌缝胶样品进行测试,对老化灌缝胶进行测试能更好地模拟服役阶段的沥青路面灌缝胶。试验主要分为频率扫描和振幅扫描两阶段,通过测定剪切应力、相位角和动态剪切模量等数据,测试灌缝胶的抗疲劳损伤性能^[12]。

采用黏弹连续介质损伤(viscoelastic continuum damage, VECD)模型得到疲劳方程中的参数。沥青疲劳性能模型的计算步骤如下:

1) 通过频率扫描结果获得材料未损伤时的特征参数 α 及疲劳方程参数 B 。将每个频率的动态模量 $|G^*(\omega)|$ 和相位角 $\delta(\omega)$ 的数据转换为存储模量 $G'(\omega)$,即:

$$G'(\omega) = |G^*(\omega)| \times \cos \delta(\omega) \quad (1)$$

以 $\lg \omega$ 为横坐标, $\lg G'(\omega)$ 为纵坐标,拟合出一条最佳直线,假设该直线方程为: $\lg G'(\omega) = \gamma(\lg \omega) + b$,其中, γ 为拟合直线的斜率, b 为拟合直线的截距。再将获得的 γ 值记为 α 的函数:

$$\alpha = 1/\gamma \quad (2)$$

$$B = 2\alpha \quad (3)$$

2) 通过振幅扫描结果获得疲劳方程参数 A 。灌缝胶累计损伤的计算公式如下:

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (4)$$

$$C(t) = \frac{|G^*(t)|}{|G^*|_{\text{initial}}} \quad (5)$$

式中: $|G^*|_{\text{initial}}$ 为应变区间的初始复数剪切模量,MPa; $|G^*(t)|$ 为 t 时间点的复数剪切模量,MPa; γ_0 为给定数据点的应变,%; t 为试验时间,s。

从第一个数据点开始计算累计损伤,每一个后续点的 $D(t)$ 值为前一个点的 $D(t)$ 值加上增量值,一直计算到测试的最终数据点的应变达到70%为止。 $D(0)=0$ 。 $C(t)$ 和 $D(t)$ 之间的关系如下:

$$C(t) = C_0 - C_1 (D(t))^{C_2} \quad (6)$$

式中: C_0 取0.1%应变间隔开始的疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 的平均值; C_1 、 C_2 为曲线拟合系数,可通过下面的幂次线性化计算得出:

$$\lg(C_0 - C(t)) = \lg(C_1) + C_2 \cdot \lg(D(t)) \quad (7)$$

式中: $D(t)$ 为失效时的累计损伤。对应损伤值小

于100的数据可忽略。

3) 计算疲劳损伤点 D_f :

$$D_f = (C_0 - C_p/C_1)^{\frac{1}{C_2}} \quad (8)$$

式中: C_p 为峰值应力对应的 C 值。

4) 计算沥青疲劳性能模型的参数 A :

$$A = \frac{f(D_f)^k}{K(\pi C_1 C_2)^a} \quad (9)$$

式中: f 为加载频率, $f=10$ Hz; $K=1+(1-C_2)\alpha$ 。

5) 沥青的疲劳性能参数 N_f 的计算公式为:

$$N_f = A(\gamma_{\max})^{-B} \quad (10)$$

式中: γ_{\max} 为给定路面结构下的沥青最大期望应变; $B=2\alpha$ 。

1.6 黏度试验

根据文献[12]的规定,本试验采用ND-1F布洛克菲尔德黏度仪测定黏度,选取28号转子,扭矩控制在10%~98%之间。

2 试验结果

2.1 常规性能

表3为低温型灌缝胶常规性能的试验结果。由表3可知,不同掺量的灌缝胶性能差异较大。如高掺量组(S_3 、 S_4)具有很高的锥入度,但是软化点和流动值并不满足要求;低掺量组(S_1 、 S_2)所有指标均满足低温型灌缝胶技术指标的要求,但在样品 S_1 与样品 S_2 之间难以直接评判优劣。仅根据单项指标是无法比选灌缝胶的,并且多指标之间存在性能重叠,这使得性能分析变得更加复杂。因此,需要利用一种降维的统计方法进行多指标评价优选的研究^[15],本文利用主成分分析法进行研究,步骤如下:

1) 通过KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验法进行适用性检验,得出KMO值等于0.621,大于0.6,表明此试验数据适宜于进行主成分分析。

2) 计算各主成分的贡献率,见表4。由表4可知,第一主成分 Z_1 的贡献率高达90.466%,表明第一主成分能反映常规性能的主要方面。第二主成分 Z_2 的贡献率为5.079%,第二主成分可以作为第一主成分的补充,避免抽取信息发生重叠。 Z_1 所

对应的特征向量 $L_1=(0.969,-0.961,0.992,0.908,-0.922)$, Z_2 所对应的特征向量 $L_2=(-0.144,0.269,-0.003,0.339,-0.041)$ 。从第一主成分得出最终评价函数表达式的信息抽取率,信息抽取率由高到低依次为:流动值、锥入度、软化点、延度、弹性恢复率。流动值的信息抽取率最高的原因是流动值与软化点之间并非具有一致性,流动值表征灌缝胶在高温时的流淌程度,有些软化点高的灌缝胶流动值却很大,因此,用流动试验评价灌缝胶的高温性能更为合理。

表 3 低温型灌缝胶常规性能试验结果

Table 3 Routine performance test results for low-temperature sealants and fillers

样品 编号	锥入度/mm		软化点/℃		流动值/mm		弹性恢复率/%		延度(5℃)/mm	
	测量值	均值	测量值	均值	测量值	均值	测量值	均值	测量值	均值
S ₁	90.3		82.4		2.90		47.7		278	
	92.5	91.8	83.9	83.2	2.79	2.85	49.3	48.6	305	292
	92.7		83.2		2.87		48.7		292	
S ₂	82.1		91.7		1.19		55.8		301	
	83.6	82.5	91.2	92.1	1.30	1.28	54.2	55.2	293	303
	81.8		93.5		1.34		55.5		314	
S ₃	96.8		79.3		5.79		65.8		275	
	98.0	97.4	80.6	79.8	5.94	5.88	67.6	66.7	268	260
	97.5		79.6		5.90		66.7		237	
S ₄	115.6		72.0		8.06		76.8		258	
	117.5	116.0	71.2	71.5	8.20	8.14	75.7	76.1	241	245
	114.8		71.4		8.15		75.9		237	
技术要求	50~90		≥80		≤5		30~70		—	

表 4 特征值和贡献率

Table 4 Eigenvalue and contribution rate

主成分	特征值	贡献率 $W_k/\%$	累计贡献率 $W/\%$
Z_1	4.523	90.466	90.466
Z_2	0.254	5.079	95.545
Z_3	0.193	3.860	99.406
Z_4	0.027	0.539	99.944
Z_5	0.003	0.056	100.000

3) 综合评价。由第一、二主成分的特征向量 L_1 、 L_2 及两个主成分的方差贡献率得出最终评价函数 Z 的表达式:

$$Z=0.905Z_1+0.051Z_2 \tag{11}$$

由式(11)计算各试验样品的性能综合得分,分别为 $Z_{S_1}=-1.24$, $Z_{S_2}=-2.12$, $Z_{S_3}=0.80$, $Z_{S_4}=2.63$, 样品 S_4 的函数 Z 的值最大。因为严寒型与低温型的技术指标要求不同,根据主成分性能数据,严寒型灌缝胶更加优越。样品 S_4 的指标数据更接近严寒型,可参考其深入研究严寒型灌缝胶的性能。本文着重研究低温型灌缝胶,因此需在低温型指标

中选择最佳掺量。利用式(11)进行数据分析,分析结果显示严寒型的评分更高;根据主成分分析法评价得出流动值的信息抽取率最高。然而,样品 S_3 、 S_4 的流动值均不满足低温型灌缝胶技术要求,其指标整体上更偏向于严寒型。此外,除了考虑基础性能的主成分贡献率和主成分分析结果,还需综合考虑低温型灌缝胶低温流变、中温疲劳、高温黏聚性能等的影响。

2.2 中温疲劳性能

2.2.1 线性振幅扫描试验

图 1 为不同添加剂掺量的灌缝胶应力-应变曲线图。由图 1 可知,剪切应变为 0~20% 时,各剪切应力均出现不同程度的涨幅,尤其是样品 S_1 和样品 S_2 。各样品的剪切应力均存在峰值,在 20% 的应变后,其涨幅趋势逐渐平稳,应力峰值并不明显。各样品的剪切应力达到峰值后,维持一段时间的高应力状态后缓慢下降,基质沥青的剪切应力达到峰值后迅速下降^[16],而低温型灌缝胶能够维持较长时间的高应力水平,这表明加入 SBS、废

胶粉等多种添加剂复合改性后,灌缝胶形成了更加稳定的三维交联网状结构^[17],其抗疲劳性能更好。

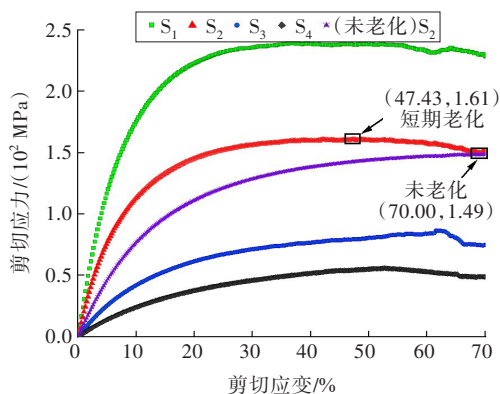


图1 不同添加剂掺量的灌缝胶应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of sealants and fillers with different dosage additives

图2为不同添加剂掺量的灌缝胶相位角曲线图。由图2可知,随着剪切应变逐渐增大,相位角整体上呈增加趋势。剪切应变为0~20%时,相位角变化规律同剪切应力变化趋势类似,均出现了不同程度的涨幅。剪切应变为20%后,各相位角的变化趋势表现出了各向异性的特点,样品S₃、S₄明显在继续增加,样品S₂趋于平缓增长,而样品S₁呈现下降趋势且存在峰值。从整体来看,各样品按相位角从小到大排序依次为:S₂、S₁、S₄、S₃,样品S₃相比于其余3个样品更显黏稠。这是由于样品S₃、S₄的增塑剂和废胶粉含量较多,当废胶粉掺量持续增加时,基质沥青中的轻质组分被大量的废胶粉吸收,导致基质沥青中饱和分和芳香分的软化和润滑作用降低,所以造成样品整体的黏度增大;在SBS与增塑剂、废胶粉发生溶胀反应后,增塑剂的小分子穿插到聚合物分子链之间,使聚合物分子链之间的内聚力削弱,缠结降低,形成空间网状结构;随着废胶粉掺量的增加,废胶粉在连续共混体系中发挥的阻尼作用就越明显,从而使得废胶粉改性沥青的黏度持续增大。同时,在制备过程中也发现,样品S₃、S₄搅拌困难,具有黏度较大、流动性差等特点。经综合分析,在低温型灌缝胶中,样品S₂的性能及黏度更具优势^[18]。

图3为不同添加剂掺量的灌缝胶复数剪切模

量曲线图。由图3可知,随着剪切应变的逐渐增大,复数剪切模量在逐渐减小。在初始应变下,样品S₁的复数剪切模量达到了 3.15×10^3 MPa,样品S₂的复数剪切模量达到了 2.11×10^3 MPa,复数剪切模量越大表明灌缝胶抗变形能力越强,故样品S₁和S₂为高弹性材料,抗变形能力强。而高掺量组S₃和S₄的复数剪切模量的最大值分别为 6.04×10^2 和 3.42×10^2 MPa,样品S₁的最大复数剪切模量是样品S₄的9.2倍,这表明高掺量组S₃、S₄的弹性抗变形能力远不如低掺量组S₁、S₂的。剪切应变为0~40%时,低掺量组S₁、S₂的复数剪切模量近似直线下降;剪切应变为40%~70%时,各样品复数剪切模量均趋于平缓。

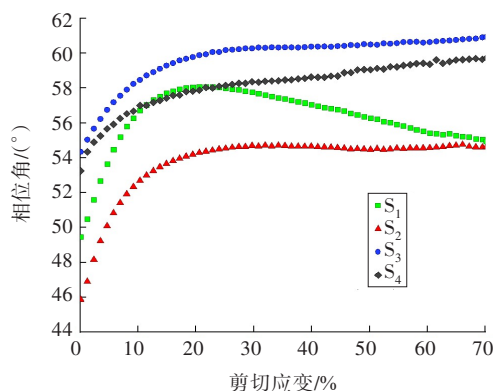


图2 不同添加剂掺量的灌缝胶相位角曲线

Fig. 2 Phase angle curves of sealants and fillers with different dosage additives

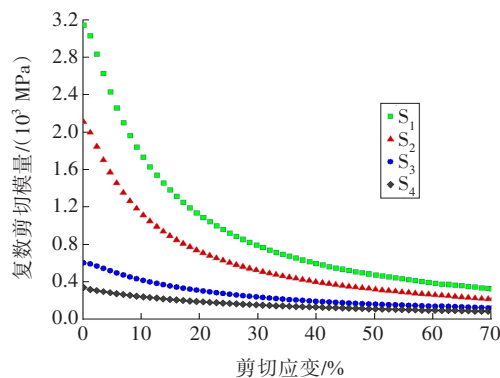


图3 不同添加剂掺量的灌缝胶复数剪切模量曲线

Fig. 3 Complex shear modulus of sealants and fillers with different dosage additives

2.2.2 疲劳模型性能参数 N_f

根据1.5节中的式(1)~(10),计算得到VECD模型的各个参数,见表5。

表 5 LAS 试验 VECD 模型参数

Table 5 VECD model parameters in LAS

样品	α	A	B	C_1	C_2	D_f
S_1	1.735	4.08×10^7	-3.47	0.08	0.39	335.67
S_2	1.913	1.98×10^8	-3.83	0.11	0.34	396.05
S_3	1.716	8.41×10^7	-3.43	0.05	0.44	472.29
S_4	1.778	3.26×10^8	-3.56	0.11	0.30	509.11

图 4 所示为不同添加剂掺量下灌缝胶样品的疲劳寿命。由表 5 和图 4 可知,不同添加剂掺量的灌缝胶疲劳性能之间存在差异,灌缝胶按疲劳性能从大到小排序依次为: S_4 、 S_2 、 S_3 、 S_1 。其中,样品 S_4 的疲劳寿命为 3.84×10^9 次,分别是样品 S_1 和样品 S_3 的 8.5 倍和 4.2 倍。样品 S_2 的疲劳寿命为 2.81×10^9 次,分别是样品 S_1 和样品 S_3 的 6.2 倍和 3.1 倍。由此可知,掺量的大小与疲劳寿命关联不大。以样品 S_2 为例,在相同应变范围内,在 163 ℃ 旋转薄膜烘箱中热氧老化 5 h 后,其应力在应变为 47.43% 时达到应力峰值,而未老化的样品 S_2 的应力一直呈增加趋势。经短期老化后的灌缝胶的应力峰值较未老化的出现更早,这是因为短期老化使部分改性剂分解为更小的颗粒,甚至小部分颗粒裂解消失^[19]。

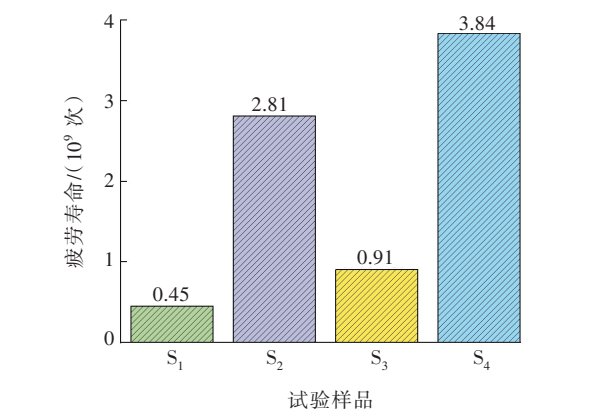


图 4 不同添加剂掺量下灌缝胶样品的疲劳寿命

Fig. 4 Fatigue life of sealants and fillers with different dosage additives

2.3 低温流变性能

美国公路战略研究计划(strategic highway research program, SHRP)的研究成果认为,当蠕变速率 $m \geq 0.3$ 且劲度模量 $S \leq 300$ MPa 时,沥青满足低温抗裂性能要求。相同温度下灌缝胶的劲度模量越小,蠕变速率就越大,表示灌缝胶产生单位应变所需应力越小,蠕变松弛能力就越强,灌缝胶材质

低温抗裂性能就更优越。在-6 和-12 ℃ 时,传感器未能采集到灌缝胶小梁试件的劲度模量和蠕变速率,在-18 和-24 ℃ 时的测试结果见表 6。由表 6 可知,灌缝胶的低温数据均优于基质沥青的,不同添加剂掺量的灌缝胶之间也有明显差异。在-18 ℃ 时,各样品的劲度模量略优于文献[20]中德克萨斯州沥青黏结材料的测试结果,两者的蠕变速率接近,这表明本研究灌缝胶样品低温抗裂性能较好,能够满足工程实际应用需要。

表 6 灌缝胶低温流变性能

Table 6 Low temperature rheological properties of different sealants and fillers

样品编号	-18 ℃		-24 ℃	
	S/MPa	m	S/MPa	m
基质沥青	348	0.215	—	—
样品 S_1	126	0.307	194	0.295
样品 S_2	94	0.334	186	0.309
样品 S_3	63	0.316	135	0.294
样品 S_4	—	—	97	0.282

样品 S_4 因添加剂掺量最大,在-18 ℃ 时并没有发生或者仅有极小的收缩变形,所产生的温度应力通过灌缝胶自身的黏性流动而释放,这导致传感器未采集到数据。灌缝胶 S_1 、 S_2 和 S_3 三个样品在-18 和-24 ℃ 时均测出了数据,与低掺量组 S_1 、 S_2 相比,样品 S_3 的蠕变劲度模量较小,这是由于含量较多的增塑剂、增容剂降低了分子间作用力,使聚合物之间黏度降低,柔韧性增强。在-18 ℃ 时,灌缝胶样品 S_1 、 S_2 、 S_3 的蠕变速率均满足 $m > 0.3$ 。在-24 ℃ 时,仅有样品 S_2 满足要求。经综合分析,在-18 和-24 ℃ 时,样品 S_3 的劲度模量一直较小,这表明其低温韧性较好;但样品 S_3 的蠕变速率随温度的降低逐渐变小,这表明样品 S_3 随着温度的下降,自身的应力松弛速率逐渐变小,在温度应力荷载下难以松弛恢复。适量的废胶粉能够提高灌缝胶的低温性能,若废胶粉掺量过多,橡胶烃分子破坏了更多 SBS 网络交联结构,且不能形成有效的化学交联结构^[21],这导致灌缝胶低温蠕变松弛能力降低,故高掺量组 S_3 、 S_4 的蠕变速率比低掺量组 S_1 、 S_2 的低。此外,在试验过程中,样品 S_3 、 S_4 过于黏稠,脱模难度较大。由以上分析可知,样品 S_2 的低温抗裂性能最优,各样品按低温抗裂性能由高到低排序依次为: S_2 、 S_1 、 S_4 、 S_3 、基质沥青。

2.4 高温黏聚性能

图5所示为不同添加剂掺量下灌缝胶的布氏黏度。由图5可知,在135℃时,基质沥青的黏度明显低于灌缝胶的,这与各添加剂的加入有关。稳定剂在高温高速剪切下产生活性游离基,活性游离基使SBS聚合物分子链和沥青活性官能团形成接枝共聚物,这使得灌缝胶的整体空间结构更稳定,有效改善了灌缝胶的黏聚性能,解决了灌缝胶的离析问题^[22]。增容剂含有烷烃、芳香烃和胶质等物质,黏温性能好,能有效改善SBS、废胶粉与沥青之间的相容性^[23]。废胶粉高温溶胀吸收了沥青的轻质组分,胶粉颗粒体积增大,自由流动的沥青相对减少,这使得灌缝胶黏度和流动值增大^[24]。增塑剂能够降低沥青的表面张力和黏度,样品S₁无增塑剂,故其黏度较其他3个样品的高,其抗车辙性能较好。

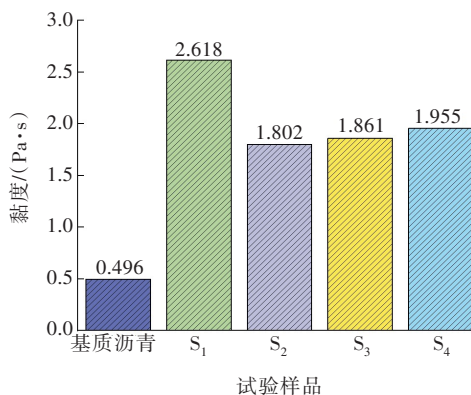


图5 不同添加剂掺量下灌缝胶的布氏黏度
Fig. 5 Brookfield viscosity of sealants and fillers with different dosage additives

3 讨论

为了获取最佳掺量的低温型灌缝胶,利用橡胶类灌缝胶特有的基础性能试验进行分析比选,采用锥入度、流值及弹性恢复率等不同指标评价流变性能、疲劳性能和低温抗裂性能等,探究不同添加剂掺量对低温型灌缝胶性能的影响规律。

由试验结果可知,样品S₄的性能最好,但样品S₃、S₄更适用于严寒地区,样品S₁、S₂符合所有低温型灌缝胶的指标要求。在LAS试验下,高掺量组S₃、S₄的相位角和复数剪切模量等指标远不如低掺量组S₁、S₂的,且其抗疲劳变形能力较弱,高温稳定

性较差。经综合分析,低温型灌缝胶不再考虑高掺量组S₃、S₄。样品S₄的添加剂掺量可为研究严寒型灌缝胶提供参考。另外,本研究各添加剂的掺量选择范围较窄,建议后续研究用正交设计方法进行掺量设计,对不同添加剂掺量下灌缝胶的各性能进行相关性分析和经济效益分析,建立不同指标之间的联系。

4 结论

1) 低温型灌缝胶中SBS、增容剂、增塑剂、废胶粉、稳定剂和增黏剂的最佳掺量分别为:6%、2%、2%、12%、14%和7%。

2) 利用主成分分析法对低温型灌缝胶的常规性能指标进行评价,得出其指标按重要性从高到低的排序依次为:流动值、锥入度、软化点、延度、弹性恢复率。

3) 通过低温BBR试验,得到各样品按低温抗裂性能由高到低的排序依次为:S₂、S₁、S₄、S₃、基质沥青;基于VECD模型,得到各样品按疲劳寿命由高到低的排序依次为:S₄、S₂、S₃、S₁,添加剂掺量与疲劳寿命之间并无一致性;通过高温黏度试验,得到各样品按黏度性能由高到低的排序依次为:S₁、S₄、S₃、S₂、基质沥青,但灌缝胶样品S₂、S₃、S₄之间黏度相差不大。经综合分析,样品S₂为最优的低温型灌缝胶。

4) 本研究为低温型灌缝胶研究提供了新的试验思路,但尚未涉及微观机理分析,后续将通过原子力显微镜、分子动力学等方法进行微观对比分析,从而延长沥青路面的使用寿命,降低公路养护成本,提高社会经济效益。

〔参考文献〕

- [1] 黄拓,漆帅,蒋浩浩,等.单向拉伸应力状态下沥青混合料强度和刚度特性[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(2):460-465.DOI:10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.027.
HUANG Tuo, QI Shuai, JIANG Haohao, et al. Stress and stiffness characteristics of asphalt mixture under uniaxial tensile stress state[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 460-465. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.027.
- [2] 吕松涛,张超,樊喜雁,等.水泥替代矿粉对橡胶沥青混合料性能的影响[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(4):57-63.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2019.04.008.

- LYU Songtao, ZHANG Chao, FAN Xiyan, et al. The effect of cement substituting mineral powder on the performance of rubber asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(4): 57-63. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2019.04.008.
- [3] 周志刚, 陈功鸿, 张红波, 等. 胶粉/高黏剂复合改性SBS沥青的性能与改性机理[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.002.
- ZHOU Zhigang, CHEN Gonghong, ZHANG Hongbo, et al. Performance and modification mechanism of SBS composite modified asphalt by rubber powder/high viscosity agent[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(2): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.02.002.
- [4] LI F, DU Y, LI L. Viscoelastic model and stress relaxation evaluation of pavement crack sealants at low temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9): 04017135. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001982.
- [5] 李峰, 黄颂昌, 徐剑, 等. 沥青路面灌缝胶性能评价及技术要求[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 7-11. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2009.02.002.
- LI Feng, HUANG Songchang, XU Jian, et al. Performance evaluation and technical requirement of sealant and filler in asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(2): 7-11. DOI: 10.3321/j.issn:1671-1637.2009.02.002.
- [6] 交通运输部公路科学研究院. 路面橡胶沥青灌缝胶: JT/T 740—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. Research Institute of Highway Ministry of Transport. Rubber asphalt sealant and filler of pavement: JT/T 740—2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [7] AL-QADI I L, DESSOUKY S, YANG S H. Linear viscoelastic modeling for hot-poured crack sealants at low temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(10): 996-1004. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000101.
- [8] SUN Z L, LI S T, ZHANG J H, et al. Adhesion of bituminous crack sealants to aggregates using surface energy theory[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(10): 04020299. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003406.
- [9] 周志刚, 陈功鸿, 张红波, 等. 橡胶粉/SBS与高黏剂复合改性沥青的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6093-6099. DOI: 10.11896/cldb.19110032.
- ZHOU Zhigang, CHEN Gonghong, ZHANG Hongbo, et al. Study on the preparation and properties of modified asphalt by rubber powder/SBS and high viscosity modifier composite[J]. Materials Reports, 2021, 35(6): 6093-6099. DOI: 10.11896/cldb.19110032.
- [10] CAO L P, YANG C, WANG W J, et al. Mechanical and functional self-healing characteristics of hot-poured crack sealant exploiting dynamic shear rheometer and low-temperature tensile tester[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2021, 147(3): 04021018. DOI: 10.1061/JPEODX.0000273.
- [11] TAN Y Q, GUO M, CAO L P, et al. Performance optimization of composite modified asphalt sealant based on rheological behavior[J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 799-805. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.015.
- [12] 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. Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [13] 姚辉, 李亮, 杨小礼, 等. 纳米材料改性沥青的微观和力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 712-717. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2011.05.027.
- YAO Hui, LI Liang, YANG Xiaoli, et al. Mechanics performance research and microstructure analysis of nanomaterials modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 712-717. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2011.05.027.
- [14] 李侠, 张爱勤, 周晓静, 等. 高温型复合改性沥青灌缝胶正交试验研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 234-240. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.049.
- LI Xia, ZHANG Aiqin, ZHOU Xiaojing, et al. Orthogonal experimental study on high temperature modified asphalt joint sealant[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 234-240. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.049.
- [15] 马伟中, 李良英, 张兴军, 等. 基于主成分分析法的沥青路面裂缝灌缝胶性能评价[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(1): 115-117, 128. DOI: CNKI: SUN: GLJJ.0.2019-01-036.
- MA Weizhong, LI Liangying, ZHANG Xingjun, et al. Evaluation of crack sealant and filler for asphalt pavement performance based on principal component analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2019, 15(1): 115-117, 128. DOI: CNKI: SUN: GLJJ.0.2019-01-036.
- [16] 王冠. 基于线性振幅扫描试验的沥青胶结料疲劳性能研究[J]. 石油沥青, 2018, 32(4): 45-50. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7450.2018.04.010.
- WANG Guan. Fatigue performance evaluation of asphalt binders based on linear amplitude sweep test[J]. Petroleum Asphalt, 2018, 32(4): 45-50. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7450.2018.04.010.
- [17] 宋亮, 王朝辉, 舒诚, 等. SBS/胶粉复合改性沥青研究进展与性能评价[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 17-33. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2021.10.003.
- SONG Liang, WANG Chaohui, SHU Cheng, et al. Research progress and performance evaluation of SBS/CR-modified asphalt[J]. China Journal of Highway and

- Transport, 2021, 34(10): 17–33. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-7372.2021.10.003.
- [18] RASOOL R T, SONG P, WANG S F. Thermal analysis on the interactions among asphalt modified with SBS and different degraded tire rubber[J]. Construction and Building Materials, 2018, 182(10): 134–143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.104.
- [19] ZHANG F, HU C B. Influence of aging on thermal behavior and characterization of SBR compound-modified asphalt[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, 115(2): 1211–1218. DOI: 10.1007/s10973-013-3338-2.
- [20] WALUBITA L F, FUENTES L, TANVIR H, et al. Correlating the asphalt-binder BBR test data to the HMA (ML-OT) fracture properties[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(9): 4021230. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003866.
- [21] XUE H X, CAO Y B, LIU Q, et al. Stability evaluation and mechanism of asphalts modified with various rubber powder contents[J]. Frontiers in Materials, 2021, 7: 622479. DOI:10.3389/fmats.2020.622479.
- [22] ZHANG W G, DING L T, JIA Z R. Design of SBS-modified bitumen stabilizer powder based on the vulcanization mechanism[J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 457. DOI:10.3390/app8030457.
- [23] 方彬彬, 周晶晶, 赵基钢, 等. 胶粉改性沥青的老化及再生[J]. 现代化工, 2017, 37(1): 75–78. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.01.017.
- FANG Binbin, ZHOU Jingjing, ZHAO Jigang, et al. Aging and regeneration of crumb rubber modified asphalt[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(1): 75–78. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.01.017.
- [24] SIENKIEWICZ M, BORZĘDOWSKA-LABUDA K, WOJTKIEWICZ A, et al. Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: a review[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 159: 272–279. DOI: 10.1016/j.fuproc.2017.01.049.

Research on preparation and performance of low-temperature asphalt pavement of sealants and fillers

WEI Hui¹, DAI Yinhan^{1,2}, ZHANG Hu¹, ZHOU Yu¹, YAO Zeguang¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530022, China)

Abstract: [Purposes] This paper aims to study the optimum content of each additive of low-temperature sealants and fillers so as to prolong the service life of road effectively. [Methods] Based on improving the preparation process of seam filling glue, different content of sealants and fillings was incorporated and then principal component analysis method was used to compare the result. The rheological, fatigue and cohesive properties of the sealant were evaluated by low-temperature bending beam rheological test, linear amplitude scanning test and viscosity test, respectively. Subsequently, the optimum content of each additive of low-temperature sealant was obtained. [Findings] The optimum content of each additive of low-temperature sealant was 6% styrene-butadiene block copolymer (SBS), 2% compatibilizer, 2% plasticizer, 12% waste rubber powder, 14% stabilizer and 7% tackifier. The conventional performance indicators were arranged in descending order of importance as follows: flow value, cone penetration, softening point, ductility, and elastic recovery rate. The fatigue life of the optimal amount of sealant and filling was 2.81×10^9 times. [Conclusions] There was no consistency between additive content and fatigue life. The research results could provide a reference for studying additive content and performance of low-temperature sealants and fills.

Key words: asphalt pavement; sealant and filler; principal component analysis; linear amplitude sweep test; rheological property

Manuscript received: 2021-12-01; **revised:** 2022-03-28; **accepted:** 2022-04-10

Foundation item: Project (2020JJ5586) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (20B039) supported by Outstanding Youth of Hunan Education Department

Corresponding author: WEI Hui (1984—) (ORCID: 0000-0002-2462-8180), female, associate professor, research interest: road maintenance works, highway nondestructive testing and evaluation technology. E-mail: wh@csust.edu.cn

(责任编辑: 刘平; 校对: 石月珍; 英文编辑: 田湘)