

一种沥青路面灌缝胶的制备方法及其性能研究

赵健¹, 李东钊^{2*}, 康潇刚¹, 张政基¹

¹华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

²交通运输部公路科学研究所, 北京

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月24日

摘要

由于行车荷载、自然环境等因素的影响, 沥青路面在服役过程中易出现早期裂缝, 严重时会导致沥青路面结构的破坏, 影响沥青路面的使用寿命。采用糠醛抽出油(FEO)、胶粉(CR)和有机蒙脱土(OMMT)对中试I-B型SBS改性沥青进行复合改性制备沥青路面灌缝胶, 采用三因素三水平正交试验, 以灌缝胶的软化点、锥入度、5℃延度、密度、黏度、弹性恢复为技术指标, 通过极差法分析糠醛抽出油(FEO)、胶粉(CR)和有机蒙脱土(OMMT)掺量对灌缝胶性能的影响, 进而确定该灌缝胶的最佳配合比; 最后通过压力老化试验评价其抗老化性能。结果表明: 选择3%糠醛抽出油(FEO)、18%胶粉(CR)、2%有机蒙脱土(OMMT)时, 灌缝胶的综合性能最佳。

关键词

灌缝胶, 糠醛抽出油, 胶粉, 有机蒙脱土, 正交试验

Preparation Method and Performance Evaluation of a Sealant for Asphalt Pavement Cracks

Jian Zhao¹, Dongzhao Li^{2*}, Xiaogang Kang¹, Zhengji Zhang¹

¹School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing

Received: Jun. 21st, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

Due to the impact of factors such as traffic loads and natural environments, asphalt pavements are

*通讯作者。

文章引用: 赵健, 李东钊, 康潇刚, 张政基. 一种沥青路面灌缝胶的制备方法及其性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1698-1706. DOI: 10.12677/hjce.2025.147183

susceptible to early cracking during their service life, which, in severe cases, can result in structural damage and compromise the service life of the asphalt pavement. Composite modification of pilot I-B type SBS modified asphalt was conducted using furfural extract oil (FEO), rubber powder (CR), and organic montmorillonite (OMMT) to prepare asphalt pavement crack sealing material. A three-factor, three-level orthogonal experiment was implemented, utilizing the softening point, cone penetration, ductility at 5°C, density, viscosity, and elastic recovery of the sealing material as technical indicators. The influence of the incorporation levels of FEO, CR, and OMMT on the performance of the sealing material was analyzed through the range method, thereby determining the optimal mix ratio for the sealing material. Lastly, its resistance to aging was evaluated through pressure aging tests. The results indicated that the comprehensive performance of the sealing material was optimal when using 3% FEO, 18% CR, and 2% OMMT.

Keywords

Grouting Sealant, Furfural Extract Oil, Rubber Powder, Organic Montmorillonite, Orthogonal Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

裂缝是沥青路面最常见的病害之一，它是最早出现且伴随沥青路面始终，在路面使用过程中随着路龄的增长、交通量及行车荷载的增加、气候及雨水的作用下逐渐加[1] [2]。由于雨水能沿着裂缝渗入到下面层及路基，在行车荷载作用下，动水压力将会引起结构层的冲刷，形成唧泥或基层脱空；此外，路面积水通过裂缝进入到路面层中，会导致路面出现冻胀、剥落等病害，严重破坏路面结构。因此，路面出现裂缝不仅影响路面美观和行车安全性及舒适性，还会由于裂缝的扩展加剧导致路面结构破坏，大大缩短路面的使用寿命。现阶段，灌缝处理是对裂缝进行修补最常用的处治方法，而加热型灌缝胶作为主要的沥青路面裂缝修补材料之一，因其优异的性能、较低的成本、易于施工等优点，在沥青路面裂缝修补中被广泛应用[3]-[5]。

目前用于裂缝修补的加热型沥青灌缝胶综合性能较差，且高温易流淌、柔韧性差、抗老化性能不足[6] [7]。采用 SBS 与废旧橡胶粉复合改性是加热型灌缝胶的主要研究方向，但这类产品在实际应用中存在问题：虽然 SBS 与胶粉复合改性制备的灌缝胶高温性能、低温性能和粘附性均有提高，但灌缝胶的抗老化性能不足，在紫外线、高温、雨水等的作用下易出现老化现象，进而导致灌缝胶因老化而失效[8]-[10]。Tan 等采用星点设计 - 效应面优化法制备沥青灌缝胶，使用胶粉、SBS 改性剂、SBR 改性剂和外加剂对基质沥青进行复合改性，通过分析得出 25%胶粉、5% SBS、3% SBR 和 7%外加剂为最佳掺量，制备的灌缝胶具备优良的高、低温性能[11]。冯新军等采用 SBS、胶粉、生物油、硫磺和 C9 石油树脂对基质沥青进行复合改性，通过极差法和层次分析法确定了灌缝胶的最佳配合比，研究表明其具备良好的水稳定性和抗老化性[12]。宋莉芳等采用液体丁腈橡胶(LNBR)、SBS 和胶粉复合改性沥青制备灌缝胶，通过分析软化点、锥入度、弹性恢复等指标确定了灌缝胶的最佳配方：3%丁腈橡胶、4% SBS 和 20%胶粉，制备的灌缝胶综合性能良好[13]。

综上所述，现阶段虽然国内外对沥青路面裂缝灌缝胶的研究取得了一系列进展，但是对于提高灌缝胶的抗老化性能相关研究较少，实际工程中灌缝胶长期暴露在自然环境中，其不可避免的会受到温度、紫外线、水分等的作用，这些因素都会导致灌缝胶的耐久性降低，严重时会导致灌缝胶与旧路面粘结处开裂。因此，研发出性能优良、成本较低且具有良好抗老化性能的灌缝胶，对提高沥青路面的使用性能，延长道路的使用寿命，具有重要的理论价值和实际意义。

本文采用糠醛抽出油(FEO)、胶粉(CR)、和有机蒙脱土(OMMT)对中试I-B型SBS改性沥青进行复合改性制备沥青路面灌缝胶。研究FEO、CR和OMMT掺量对灌缝胶性能的影响,并通过软化点、锥入度、5℃延度、密度、黏度、弹性恢复等评价灌缝胶的性能。

2. 试验材料与方法

2.1. 试验原材料

沥青:中试I-B型SBS改性沥青,其技术指标如表1所示;糠醛抽出油(FEO),泰畅石化科技有限公司;胶粉(CR),都堰市华益橡胶有限公司(40目);有机蒙脱土(OMMT),浙江丰虹新材料股份有限公司,其技术指标如表2所示。

Table 1. Technical indicators of type I-B SBS modified asphalt

表 1. I-B型SBS改性沥青技术指标

指标	规范值	测试值	试验方法
软化点(°C)	≥50	74.1	T0606
针入度(25°C)(0.1 mm)	80~100	96.1	T0604
延度(5°C)(cm)	≥40	49	T0605
闪点(°C)	≥230	260.0	T0611
溶解度(三氯乙烯)(%)	≥99%	99.77%	T0607
密度(15°C)(g/cm ³)	—	1.0338	T0603
旋转粘度(135°C)(pa·s)	≤3	1.14	T0619

Table 2. OMMT technical indicators

表 2. OMMT技术指标

指标	测试值
外观	米白色
粒度/目	200
密度(g/cm ³)	1.8
堆积密度(g/cm ³)	<0.3
XRD(d001/nm)	>2.6

2.2. 试样制备

首先将I-B改性沥青放入180℃烘箱中加热至流动状态,接着将沥青置于提前保温180℃的加热套中;将FEO缓慢加入到沥青中,先快速剪切5 min使其分散,剪切速率5000 r/min,然后再缓慢剪切25 min使其与沥青充分反应,剪切速率1000 r/min;升温至190℃,缓慢加入CR,在5000 r/min剪切速率下剪切60 min,使得CR充分剪切均匀;然后缓慢加入OMMT,剪切30 min,剪切速率5000 r/min;最后在190℃烘箱中发育2 h,制成灌缝胶。

2.3. 试验方法

2.3.1. 正交试验设计

为了确定灌缝胶的最佳配合比,选取FEO、CR和OMMT掺量(占沥青质量分数,下同)为影响因素,

设计三因素三水平正交试验方案, 研究各影响因素对灌缝胶性能的影响。正交试验因素水平表如表 3 所示, 其对应的正交试验方案如表 4 所示。

Table 3. Level of orthogonal experimental factors

表 3. 正交试验因素水平

水平	正交试验各因素掺量		
	FEO	CR	OMMT
水平 1	2%	16%	0
水平 2	3%	18%	2%
水平 3	4%	20%	3%

Table 4. Orthogonal experimental scheme

表 4. 正交试验方案

编号	正交试验各因素掺量		
	FEO	CR	OMMT
1	2%	16%	0
2	2%	18%	3%
3	2%	20%	2%
4	3%	16%	3%
5	3%	18%	2%
6	3%	20%	0
7	4%	16%	2%
8	4%	18%	0
9	4%	20%	3%

2.3.2. 常规性能试验

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行软化点和 5℃延度试验。软化点表征灌缝胶的高温性能, 5℃延度表征灌缝胶的低温性能。(注: 软化点、5℃延度试验需采用热老化后的灌缝胶, 即将每 100 g 灌缝胶注入老化盘中, 然后置于 190℃烘箱中 1 h 进行热老化。)

根据《路面加热型灌缝胶》(JT/T 740—2024)进行锥入度、密度、黏度、弹性恢复试验。锥入度表征灌缝胶的抗异物嵌入能力, 黏度表征灌缝胶的流动性和施工和易性, 弹性恢复表征灌缝胶的弹性性能。

2.3.3. 压力老化试验

按本研究确定的最佳配合比制备灌缝胶 500 g, 然后将加热的灌缝胶按每 50 g±0.5 g 注入老化盘中, 接着放入旋转薄膜烘箱中进行 5 h 短期老化, 短期老化结束后将灌缝胶放入压力老化箱中进行 20 h 压力老化, 压力老化完成后用热刮刀将灌缝胶从老化盘中取出。对已经老化的灌缝胶分别进行软化点、5℃延度、锥入度、密度、黏度、弹性恢复试验, 其中压力老化试验如图 1 所示。

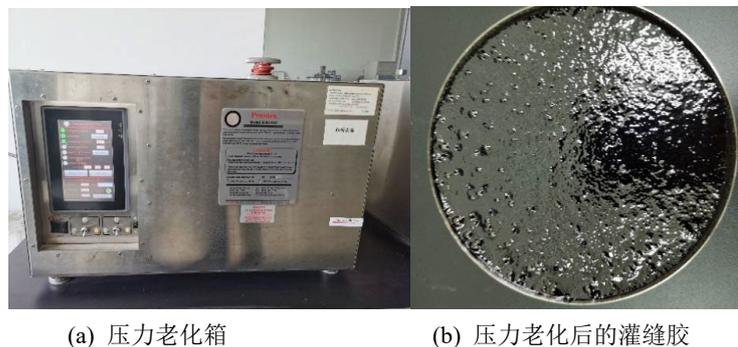


Figure 1. Pressure aging test
图 1. 压力老化试验

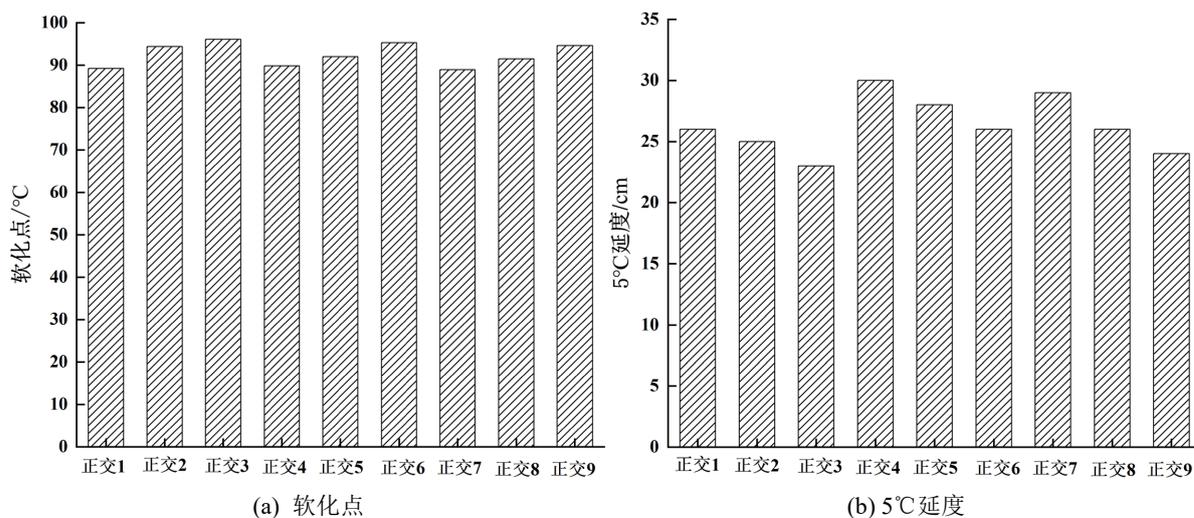
3. 结果与讨论

3.1. 正交试验结果统计分析

分别对制备的 9 组不同掺量的灌缝胶进行软化点、5℃延度、锥入度、密度、黏度、弹性恢复试验，试验结果如表 5 所示。

Table 5. Orthogonal test results of grouting adhesive
表 5. 灌缝胶正交试验结果

编号	软化点(°C)	5℃延度(cm)	锥入度(25℃) (0.1 mm)	密度(15℃) (g/cm ³)	黏度(190℃) (pa·s)	弹性恢复(%)
1	89.2	26	66.5	0.9716	1.87	40.4
2	94.4	25	46.7	0.9787	2.63	42.6
3	96.1	23	46.3	0.9807	3.90	53.2
4	89.8	30	62.8	0.9515	1.76	36.3
5	92.0	28	60.5	0.9579	2.34	40.1
6	95.3	26	52.6	0.9673	3.85	49.2
7	88.9	29	63.2	0.9832	1.62	35.6
8	91.5	26	61.1	0.9852	2.26	37.9
9	94.6	24	52.1	0.9892	3.79	42.3



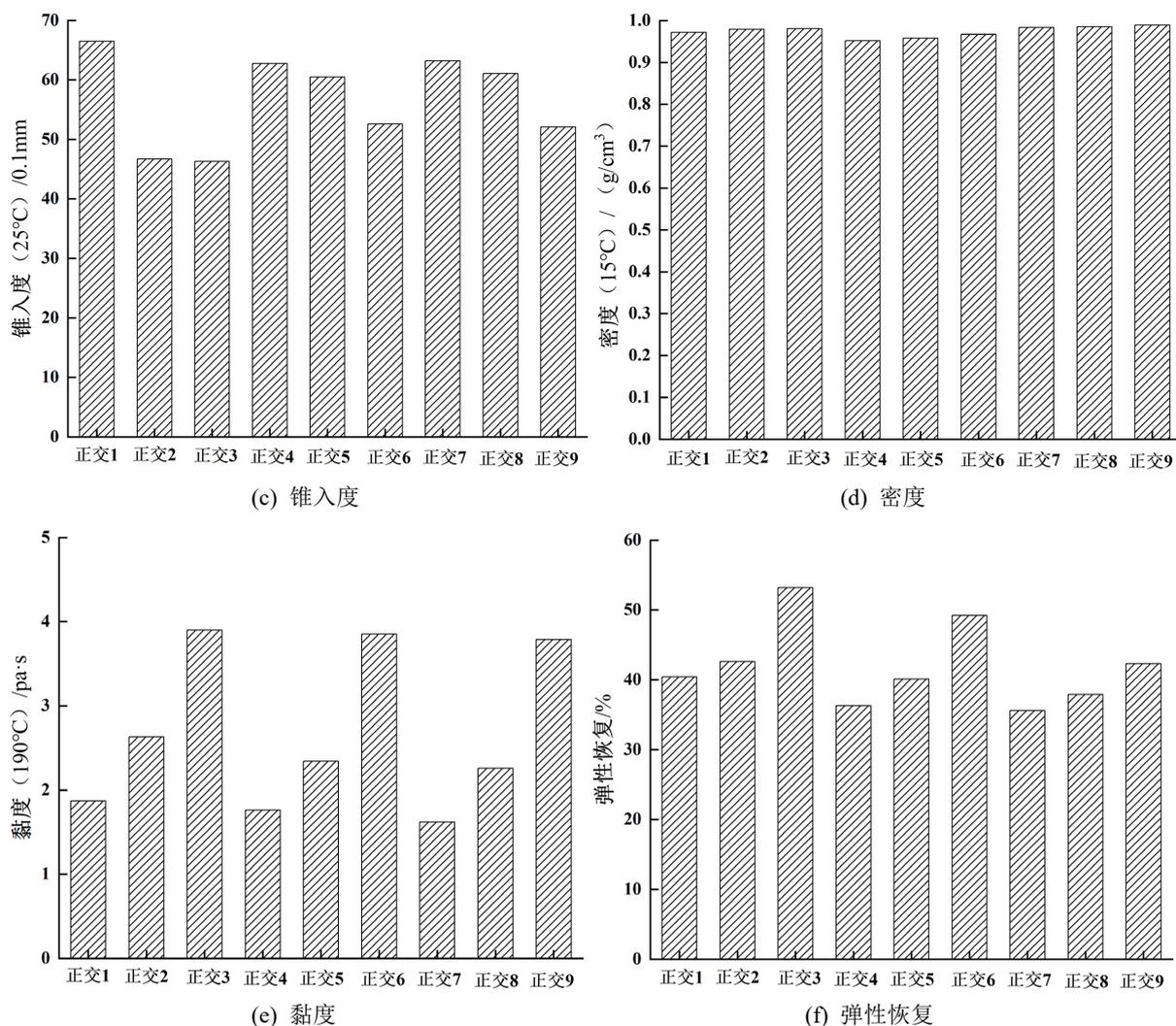


Figure 2. Orthogonal experimental test results

图 2. 正交试验测试结果

为了直观反映试验结果，将各正交试验灌缝胶的试验结果用图 2 表示。

采用极差法分析正交实验结果，各因素对灌缝胶性能指标的计算结果如表 6 所示。

Table 6. Range analysis of performance indicators of grouting adhesive by various factors

表 6. 各因素对灌缝胶性能指标的极差分析表

指标	因素水平	FEO	CR	OMMT
软化点/°C	k ₁	93.2	89.3	92.0
	k ₂	92.4	92.6	92.3
	k ₃	91.7	95.3	92.9
	极差 R	1.5	6.0	0.9
5°C 延度/cm	k ₁	24.7	28.3	26.0
	k ₂	28.0	26.3	26.7
	k ₃	26.3	25.3	26.3
	极差 R	3.3	3.0	0.7

续表

锥入度(25℃)/0.1 mm	k ₁	53.2	64.2	60.1
	k ₂	58.6	56.1	56.7
	k ₃	58.8	50.3	53.9
	极差 R	5.6	14.1	6.2
密度(15℃)/ g/cm ³	k ₁	0.9770	0.9688	0.9747
	k ₂	0.9589	0.9739	0.9739
	k ₃	0.9859	0.9791	0.9731
	极差 R	0.027	0.0103	0.0016
黏度(190℃)/pa·s	k ₁	2.80	1.75	2.66
	k ₂	2.65	2.41	2.62
	k ₃	2.56	3.85	2.73
	极差 R	0.24	2.1	0.11
弹性恢复/%	k ₁	45.4	37.4	42.5
	k ₂	41.9	40.2	43.0
	k ₃	38.6	48.2	40.4
	极差 R	6.8	10.8	2.6

由以上正交试验结果可知:

(1) CR 对软化点影响最大, 其次是 FEO 和 OMMT, 即 $CR > FEO > OMMT$ 。随着 CR 掺量的增加, 灌缝胶的软化点增大, 这是因为 CR 在溶胀和发育过程中吸收了沥青中的部分轻质组分, 同时溶胀的胶粉颗粒与 SBS 在改性沥青中形成相互交织的交联网状结构, 从而提高灌缝胶的高温性能。

(2) FEO 对 5℃ 延度影响最大, 其次是 CR 和 OMMT, 即 $FEO > CR > OMMT$ 。随着 FEO 掺量的增加, 灌缝胶的延度先增加后降低, 这是因为 FEO 能够促进 SBS 与沥青的相容, 使得灌缝胶的抗塑性变形能力提高; 而随着胶粉的增加, 灌缝胶的延度逐渐下降, 这是因为胶粉颗粒会使灌缝胶在受拉过程中产生应力集中, 导致其延度下降。

(3) CR 对锥入度影响最大, 其次是 OMMT 和 FEO, 即 $CR > OMMT > FEO$ 。随着 CR 和 OMMT 掺量的增加, 灌缝胶的锥入度逐渐下降, 其中 CR 掺量变化对灌缝胶的锥入度影响更显著; FEO 掺量的增加会使灌缝胶的锥入度下降。

(4) CR 对黏度影响最大, 其次是 FEO 和 OMMT, 即 $CR > FEO > OMMT$ 。随着 CR 掺量的增加, 灌缝胶的黏度逐渐增加, 这是因为胶粉颗粒表面与沥青分子间通过范德华力相互吸附, 形成“沥青-胶粉”网络结构, 阻碍沥青分子的相对运动, 从而增大黏度。

(5) CR 对弹性恢复影响最大, 其次是 FEO 和 OMMT, 即 $CR > FEO > OMMT$ 。随着 CR 掺量的增加, 灌缝胶的弹性恢复逐渐增加, 这是因为胶粉的分子链具有柔性链段, 在受力变形时可通过链段旋转吸收能量, 同时溶胀后的胶粉颗粒与沥青中的轻质组分形成互穿网络结构, 该结构具有橡胶的高弹性和沥青的粘结性。

综合分析, CR 溶胀之后与 SBS 在改性沥青中形成相互交织的交联网状结构, 为灌缝胶提供了良好的弹性性能和高温性能。OMMT 的增加使得灌缝胶变硬, 同时也提高了灌缝胶的高温性能。综合考虑不同因素的影响和经济效益, 同时满足灌缝胶的技术规范标准, 确定灌缝胶的最佳配合比为: FEO 掺量 3%、CR 掺量 18%、OMMT 掺量 2%。

3.2. 基本性能评价

按照《路面加热型灌缝胶》(JT/T 740—2024)规定的试验方法对最佳配合比下的灌缝胶进行基本性能测试,测试结果如表 7 所示。

Table 7. Results of performance indicators for the optimal mix proportion of grouting adhesive
表 7. 灌缝胶最佳配合比性能指标结果

指标	规范值	测试值
锥入度(25℃) (0.1 mm)	≤70	60.5
弹性恢复(25℃) (%)	30~70	40.1
黏度(190℃) (pa·s)	1~4	2.34
密度(g/cm ³)	≤1.5	0.9579
热老化后性能(190℃)	软化点(℃)	≥90
	低温拉伸	0℃, 50%, 3 次循环, 通过

由表 7 可知,研制的灌缝胶各项性能指标均满足高温型灌缝胶的相关技术规范要求。

3.3. 抗老化性能评价

灌缝胶注入路面之后,会受到环境因素和交通荷载的双重作用,在两者的长期作用下,灌缝胶会因自身的老化导致其性能发生变化,严重时会导致灌缝胶老化失效。因此,应对灌缝胶的抗老化性能进行评价。对本研制灌缝胶以及市售灌缝胶进行压力老化实验来模拟其长期老化,老化前后灌缝胶各项性能指标结果如表 8 所示。

Table 8. Performance indicators of sealant before and after aging
表 8. 老化前后灌缝胶性能指标结果

实施案例	软化点(℃)	锥入度 (25℃) (0.1 mm)	黏度(190℃) (pa·s)	弹性恢复 (25℃) (%)	密度(g/cm ³)	低温拉伸 (0℃, 50%)
规范值	≥90	≤70	1~4	30~70	≤1.5	3 次循环通过
本研制灌缝胶(老化前)	92.0	60.5	2.34	40.1	0.9579	通过
本研制灌缝胶(老化后)	95.3	50.1	2.56	37.5	0.9512	通过
市售灌缝胶(老化前)	92.6	60.0	2.41	40.0	0.9821	通过
市售灌缝胶(老化后)	97.5	42.1	2.78	31.0	0.9613	不通过

由表 8 可知,本研制的灌缝胶老化后各项性能指标变化较小,均满足规范要求;而市售灌缝胶老化后各项性能指标变化巨大,且老化后部分性能指标不满足规范要求,这表明本研制的灌缝胶具有良好的抗老化性能。OMMT 是改善灌缝胶抗老化性能的关键因素,主要是因为 OMMT 的片层结构在沥青中形成纳米层状阻隔,阻碍氧气、紫外线、水分等老化介质的渗透,延缓灌缝胶的老化进程;OMMT 表面的活性羟基可吸附老化过程中产生的自由基,进而抑制链式氧化反应。

4. 结语

(1) 采用 FEO、CR 和 OMMT 对中试 I-B 型 SBS 改性沥青进行复合改性制备沥青路面灌缝胶,通过正交试验分析确定了灌缝胶的最佳配合比: FEO 掺量为 3%, CR 掺量为 18%, OMMT 掺量为 2%。

(2) 通过正交试验结果分析可知: CR 的加入可以提高灌缝胶的弹性恢复、黏度和软化点, 显著改善了其高温稳定性; FEO 的加入直接影响了灌缝胶的低温延度和低温拉伸, 提高了其低温性能; OMMT 的加入使得灌缝胶具有良好的抗老化性能, 其通过独特的纳米层状阻隔、自由基捕获等机制, 显著提高了灌缝胶的抗老化性能。

(3) 本研制的灌缝胶具备优异的抗老化性能, 较市售灌缝胶的抗老化性能提升约 30%, 能够有效缓解灌缝胶的老化, 延长灌缝胶的使用寿命。

参考文献

- [1] Li, B., Ren, X.Y., Li, Y.B., Ma, W.Z. and Li, H.L. (2017) Evaluation and Selection of Sealants and Fillers Using Principal Component Analysis for Cracks in Asphalt Concrete Pavements. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science)*, **32**, 408-412.
- [2] 李强, 倪富健, 王文达, 马翔. 沥青路面裂缝修补材料技术性能对比研究[J]. 公路工程, 2013, 38(6): 33-37.
- [3] 李侠, 张爱勤, 周晓静, 孙华东, 王彦敏. 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.
- [4] 杜素军. SBS/轻质碳酸钙/大豆油复合改性沥青灌缝胶性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2021, 30(4): 59-62.
- [5] 王海战, 陈立福. 高性能橡胶改性沥青道路密封胶的制备和应用[J]. 中国标准化, 2019(22): 190-191.
- [6] 刘曼毓. 沥青路面裂缝修补技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
- [7] 夏慧芸, 杨浩田, 卢昌杰, 宋莉芳, 牛艳辉. 复合改性沥青密封胶的组成优化及性能研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 136-145.
- [8] 赵旭. 基于胶粉与 SBS 复合改性的灌缝胶实验研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2018.
- [9] 于晓晓, 李彦伟, 蔡斌, 颜川奇, 黄卫东, 黄宝山, 王笑风, 杨渭, 王仕峰. 胶粉改性沥青研究进展: 从分子到工程[J]. 合成橡胶工业, 2022, 45(1): 2-12.
- [10] 张玮, 梁明, 范维玉, 南国枝, 罗辉. 沥青路面灌缝材料研究进展[J]. 石油沥青, 2015, 29(2): 6-12.
- [11] 谭忆秋, 郭猛, 曹丽萍, 等. 复合改性沥青填缝料的性能优化方法[J]. 公路交通科技, 2012, 29(1): 11-17.
- [12] 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.
- [13] 宋莉芳, 薛亚楠, 夏慧芸, 牛艳辉. SBS/LNBR/CR 复合改性沥青密封胶的制备和性能研究[J]. 应用化工, 2023, 52(6): 1630-1636.