

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.
FENG Xin-jun, 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.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.05.002

湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的研制与性能

冯新军, 梁 辉, 彭 程

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为研制适用于湿热地区沥青路面高性能灌缝胶,提高沥青路面的耐久性,采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)聚合物、废胶粉、生物油、硫磺和 C₉ 石油树脂对 SK70[#] 基质沥青进行复合改性,基于五因素四水平正交试验,以沥青路面灌缝胶的流动值、软化点、5 ℃ 延度、针入度及弹性恢复试验作为评价指标,采用极差分析法和层次分析法探究 SBS 聚合物掺量、废胶粉掺量、生物油掺量、硫磺掺量和 C₉ 石油树脂掺量对沥青路面灌缝胶技术指标的影响,确定了湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的最佳配合比。通过布氏旋转黏度试验评价高性能灌缝胶的施工和易性,通过模拟施工老化试验和沥青旋转薄膜加热试验(RTFOT)评价高性能灌缝胶的施工老化性能和使用过程老化性能,并基于 MTS 万能试验机通过冻融循环拉拔试验评价了湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的水稳定性。结果表明:湿热地区沥青路面高性能灌缝胶最佳配合比为 SBS 聚合物掺量(质量分数,下同)8%、胶粉掺量 14%、生物油掺量 3%、硫磺掺量 0.2%、C₉ 石油树脂掺量 0%。制备的湿热地区沥青路面高性能灌缝胶常规物理性能满足规范要求,且软化点超出规范要求 10.1 ℃,针入度低于规范要求最高限度的 41.1%,5 ℃ 延度达 32.3 cm,弹性恢复率接近规范范围的高值,其合理施工温度为 182 ℃,并且具有优良的抗老化性和水稳定性。

关键词:道路工程;湿热地区;灌缝胶;正交试验;最佳配合比;性能评价

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)05-0011-10

Preparation and performance of high performance grouting sealant for asphalt pavement in humid and hot areas

FENG Xin-jun, LIANG Hui, PENG Cheng

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to develop a high-performance grouting adhesive that suitable for asphalt pavement in hot and humid areas and to improve the durability of asphalt pavement, SBS polymer, waste rubber powder, bio-oil, sulfur and C₉ petroleum resin were used to modify SK70[#] base asphalt, and based on the five-factors, four-levels orthogonal test, the flow value of the grouting adhesive for asphalt pavements, the softening point, the 5 ℃ ductility, the taper

收稿日期:2023-02-08

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2021JJ30709);长沙市自然科学基金项目(kq2007029);

湖南省研究生科研创新项目(SJCX202112)

作者简介:冯新军(1971-),男,江西宜春人,教授,工学博士,E-mail:fxjasphalt@aliyun.com。

degree and the elasticity of the elasticity of the restoration test were used as the evaluation indexes. Polar deviation analysis and hierarchical analysis were used to investigate the effects of SBS polymer dosage, waste rubber powder dosage, bio-oil dosage, sulfur dosage and C_9 petroleum resin dosage on the technical indexes of asphalt pavement grouting adhesive, and to determine the optimal mixing ratios of high-performance grouting adhesive for hot and humid asphalt pavements. The construction and ease of high-performance grouting adhesive were evaluated by Brinell rotational viscosity test, and the construction aging performance of high-performance grouting adhesive and the aging performance in use process were evaluated by simulated construction aging test and asphalt rotating film heating test (RTFOT), and the water stability of high-performance grouting adhesive for hot and humid areas of asphalt pavements were evaluated based on the freezing and thawing cyclic pullout test of the MTS universal testing machine. The results show that hot and humid areas of asphalt pavement high-performance grouting adhesive with the optimal ratio of SBS polymer dosage (mass fraction, the same below) of 8%, powder dosage of 14%, bio-oil dosage of 3%, sulfur dosage of 0.2%, C_9 petroleum resin dosage of 0%. Preparation of hot and humid areas of asphalt pavement high-performance grouting adhesive conventional physical properties to meet the specification requirements, and the softening point exceeds the specification requirements of 10.1 °C, taper less than the specification requirements of the maximum limit of 41.1%, 5 °C elongation up to 32.3 cm, elasticity recovery rate of the specification range of close to the high value of the reasonable construction temperature of 182 °C, and has excellent aging resistance and water stability. 11 tabs, 5 figs, 24 refs.

Key words: road engineering; humid and hot area; grouting sealant; orthogonal test; optimal mix ratio; performance evaluation

0 引 言

裂缝是沥青路面最常见的病害之一,其可在行车荷载和自然环境的影响下逐渐恶化,影响车辆的行驶安全性及舒适性,严重降低路面的使用寿命^[1-3]。对裂缝进行密封或填充处理,防止水渗入路面结构内部,一直是路面养护方案中延长路面使用寿命的重要措施^[4-5]。高温加热型灌缝胶作为主要沥青路面修补材料中的一种,因其性能优良、成本相对较低,在需要养护材料量较大的普通沥青路面裂缝处理中被广泛使用^[6-7]。然而,湿热地区沥青路面灌缝胶因其高温流淌、耐老化性和水稳定性不足、黏附性差等问题失效严重,使裂缝修补形成开裂-修补-再开裂-再修补的恶性循环,造成了人力及养护费用的浪费^[8-10]。

目前应用较为广泛的沥青路面灌缝胶通常以沥青为基础材料,掺加各种聚合物和无机填料等改性剂制得。夏慧芸等通过试验确定基质沥青、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)、橡胶粉、增塑剂、矿粉等组分的含量,得到一种高性能沥青混凝土路面裂缝灌缝胶,并将其与现有沥青路面修补材料分

别从抗高低温、抗异物嵌入、抗腐蚀、抗拉伸性能等5个方面进行对比,研究表明其具有较好的抗高低温性能和抗腐蚀性^[11]。Liu等针对沥青路面过早开裂、车辙和脱黏等问题,采用SBS、粒状橡胶(CR)、聚丙烯(PP)对基础沥青单一改性或复合改性制备了5种不同组成的密封胶,并对其常规性能和流变性能进行了研究,发现废胶粉/SBS复合改性沥青密封胶具有最优的综合性能^[12]。Tan等采用星点设计-效应面优化法进行沥青路面裂缝灌缝胶制备,原材料包括基质沥青、橡胶粉、SBS改性剂、聚苯乙烯丁二烯共聚物(SBR)改性剂和外加剂,通过对各配方进行针入度、软化点、弹性恢复、延度等性能检测及分析,最终得出掺量(质量分数,下同)25%橡胶粉、7%外加剂、5%SBS和3%SBR与基质沥青复配而成的灌缝胶具有优良的高温、低温性能^[13]。

为了制备性能优良的灌缝胶,一些学者研究了不同改性剂对灌缝胶性能的影响。Zhang等选用SBS、聚氨酯和有机硅分别对沥青进行单一改性,发现聚氨酯对沥青热稳定性的改性效果最为明显,SBS可以在沥青中形成稳定的网状结构,提高沥青的柔韧性^[14]。Fang等制备了新型单组分环氧树脂

路面补缝胶,其表现出良好的弹性和韧性、低温抗裂性以及低温条件下对裂缝壁的附着力,在高温条件下具有较高的弹性恢复率,可有效抵抗异物侵入^[15]。针对密封胶耐久性不足,修补之后再次开裂问题,Sun 等采用原位聚合法制备葵花油微胶囊,然后将葵花油微胶囊加入到沥青基密封胶中,研究发现微胶囊显著提高了沥青基密封胶的低温拉伸性能、自愈能力和疲劳寿命^[16]。Luo 等将邻苯二甲酸二辛酯(DOP)作为增塑剂引入沥青基密封胶中,研究结果表明,DOP 能显著提高密封胶的低温性能,但对密封胶的热稳定性稍有不利,DOP 可以促进密封胶中聚合物的膨胀和交联,最终增强沥青与聚合物分子之间的相容性^[17]。

综上所述,目前国内外虽然对沥青路面灌缝胶的制备和性能进行了较多研究,取得了一定的成果,但是这些研究均未考虑水分对灌缝胶黏附性的影响,而在气候炎热、高温多雨的南方湿热地区,水分对灌缝胶黏附性的影响较大,在实体工程中存在灌缝胶与旧路面之间黏结强度衰减快等缺点,导致维修后的裂缝还会在原位置开裂,一般使用期只有 1 年左右。迄今为止,鲜有关于湿热地区沥青路面灌缝胶研发的报道。因此,研发出适用于湿热地区的高质量低成本的加热型灌缝胶材料,对于提高湿热地区沥青路面的使用性能,延长路面的使用寿命,具有重要的理论意义和工程应用价值。

根据国内外研究成果^[9,18-19],SBS 与胶粉复合可使两者优势互补,其复合改性沥青的路用性能大幅提高,加入硫磺可提高复合改性沥青的储存稳定性,生物油可作为增容剂改善聚合物改性剂的溶胀特性,使改性沥青中聚合物的网络结构更为致密,从而显著提升复合改性效果。C₉ 石油树脂可增强 SBS 中聚苯乙烯(PS)段与基质沥青之间的相容性,提高 SBS 改性沥青的 60 ℃黏度并降低针入度^[20]。基于此,本文采用 SBS 聚合物、废胶粉、生物油、硫磺和 C₉ 石油树脂对 SK70[#] 基质沥青进行复合改性,通过正交试验确定湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的最佳配合比,并评价其热储存稳定性、水稳定性和抗老化性。

1 试验材料与方法

1.1 试验原材料

基质沥青采用韩国 SK 公司生产提供的 70[#] 石油沥青,其技术指标如表 1 所示。橡胶粉为四川华益橡胶生产的 0.25 mm 粒径的废轮胎橡胶,技术参

数见表 2。试验采用中石化巴陵石化生产的 YH-791H 型线形 SBS 作为改性剂,其主要技术指标见表 2。

生物油采用苏州丰倍生物科技有限公司水解酯化生产的 1030A 型生物油,即从椰壳中通过萃取的方法提炼出椰子油,再对椰子油进行高温水解,并分离产物脂肪酸和甘油,将脂肪酸蒸馏脱水后,在催化剂下与甲醇进行酯化反应,反应产物通过分子蒸馏分馏出 12~14 碳甲酯,16~18 碳甲酯后的底料产物,其技术指标如表 3 所示。稳定剂选用 LF 公司生产的升华硫,石油树脂选用深圳市吉田化工生产的 4[#] C₉ 石油树脂。

表 1 沥青性能指标要求
Tab. 1 Asphalt performance indexes requirements

指标		技术指标	测试结果
针入度(5 s,100 g,25 ℃)/0.1 mm		60.0~80.0	67.2
延度(5 cm·min ⁻¹ ,15 ℃)/cm		≥100.0	>100.0
软化点/℃		≥46.0	49.1
闪点/℃		≥260	280
旋转薄膜加 热(RTFOT) 老化后	残留针入度比/%	≥61.0	62.9
	残留延度(5 cm·min ⁻¹ ,15 ℃)/cm	≥15.0	78.3
	质量损失/%	≤±0.8	0.2

表 2 废胶粉及 SBS 性能指标
Tab. 2 Performance indexes of rubber powder and SBS

橡胶粉指标	测试值	SBS 指标	测试值
灰分/%	7.09	结构类型	线形
金属含量/%	0.03	嵌段比(S/B)	30/70
炭黑/%	33.23	拉伸强度/MPa	20
橡胶烃/%	47.79	硬度(邵氏 A)	76
丙酮抽出物/%	7.65	熔融指数(g·10 min ⁻¹)	0.2
断裂伸长率/%	575	密度/(g·cm ⁻³)	0.86

表 3 1030A 型生物油指标
Tab. 3 Parameters of type 1030A bio-oil

指标	60 ℃ 黏度/ (Pa·s)	闪点/ ℃	15 ℃密度/ (g·cm ⁻³)	薄膜烘箱 老化前后 黏度比	薄膜烘箱 老化前后 质量变化/%	外观形貌
测试性能	152	231	0.964	1.35	-2.09	棕黑色 黏稠液态

1.2 试样制备

首先将 C₉ 石油树脂加入到 150 ℃的 SK70[#] 基质沥青中,使其充分溶解,再将 SBS 加入到上述混合物中高速剪切分散并低速剪切溶胀 30 min,将溶胀好的改性沥青在 170 ℃下高速剪切(转速为 5 000 r/min)30 min,制得 SBS 改性沥青。然后依次将预定剂量的胶粉和生物油加入上述 SBS 改性沥青中同时在 180 ℃下高速剪切(转速为 5 000 r/min)分

散 60 min,最后向剪切完毕后的沥青中加入硫磺稳定剂,并低速剪切发育 30 min。

1.3 试验方法

1.3.1 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)对试验所制备的沥青路面灌缝胶分别进行软化点试验和 5℃延度试验。此外,按照《路面加热型密封胶》(JT/T 740—2015)规定的试验方法对试验所制备的沥青路面灌缝胶进行了针入度试验、弹性恢复试验和流动试验,其中流动试验示意如图 1 所示。

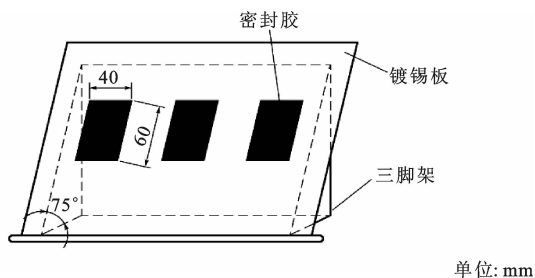


图 1 流动试验示意

Fig. 1 Schematic of flow test

1.3.2 布氏旋转黏度试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),采用 Brookfield 黏度计(DV2T-27 号转子)对灌缝胶进行布氏黏度试验,试验温度为 150℃、160℃、170℃、180℃和 190℃,通过分析高性能灌缝胶的布氏旋转黏度和温度变化关系来确定高性能灌缝胶的施工温度。

1.3.3 模拟老化试验

模拟施工老化:按本研究确定的最佳配比制备高性能灌缝胶材料 500 g,将灌缝胶置于常温环境下冷却 24 h 后置于烘箱中加热至 180℃,然后放于控温加热套上控制温度在 180℃左右低速剪切 2 h。对灌缝胶分别进行流动值、软化点、针入度、弹性恢复、5℃延度试验。

模拟使用过程老化:取已经经过模拟施工老化的高性能灌缝胶 500 g,进行沥青薄膜加热试验。将灌缝胶置于老化盘中,然后放入旋转薄膜烘箱中,在 180℃下开启旋转保温 5 h 以后取出灌缝胶,使用硅油折叠并包裹的刮刀在灌缝胶未冷却的时候从老化盘中取出灌缝胶材料。对已经老化的灌缝胶分别进行流动值、软化点、针入度、弹性恢复、5℃延度试验。

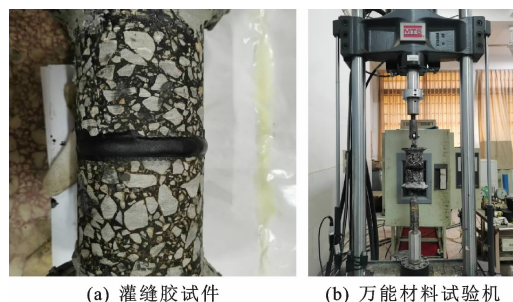
1.3.4 水稳定性试验

目前中国尚无关于灌缝胶水稳定性评价方法

的试验规程。为了模拟灌缝胶在南方湿热地区路面的实际情况,本研究自制裂缝宽度为 0.8 cm 的拉拔试件:取 2 个 $\Phi 100$ mm(直径)×100 mm(高度)的圆柱状马歇尔试件将其底面两两相对,并始终保持两试件底面相隔 0.8 cm 的间距,用硅油纸同时包裹底面相对的圆柱体试件圆弧面,将自制的高性能灌缝胶灌满两试件之间的空隙,将试件置于常温下冷却 4 h,制得拉拔试件,采用同样的方法利用 70# 基质沥青作为裂缝修补材料进行试验对比。

为了表征高性能灌缝胶的抗水损害能力,对拉拔试件进行冻融处理。将所制备的拉拔试件随机分为 2 组:一组置于干燥的室温下保存;另一组置于水中浸泡 8 h 后,将其放入塑料袋中加入 20 mL 的水后置于一 18℃±2℃ 的温度下养护 16 h。将 2 组试件置于干燥的 25℃或 50℃恒温箱中保温 2 h。

利用万能材料试验机对冻融前后的试件进行拉拔强度试验,试验温度选取 25℃和 50℃,分别模拟常温 and 高温环境下高性能灌缝胶的拉伸能力,采用残留强度比评价高性能灌缝胶的水稳定性,试验过程如图 2 所示。



(a) 灌缝胶试件 (b) 万能材料试验机

图 2 万能材料试验机拉伸灌缝胶试件

Fig. 2 Universal material testing machine tensile filling glue specimens

1.3.5 正交试验设计

本研究针对南方湿热地区的气候特点,主要目标是研制出高温型(最低气温不低于 0℃)的高性能灌缝胶。为确定湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的最佳配合比,选取 SBS、胶粉、生物油、C₉ 石油树脂和硫磺掺量(占基质沥青质量分数,下同)为影响因素,设计五因素四水平正交试验方案,考察各影响因素对沥青路面热灌缝胶技术指标的影响。表 4 为本研究所设计五因素四水平的正交试验因素掺量,其对应的正交试验方案见表 5。

表 4 正交试验的因素水平

Tab. 4 Factors level of orthogonal test %

水平	正交试验各因素掺量				
	SBS	胶粉	生物油	C ₉ 石油树脂	硫磺
水平 1	4	10	3	0	0.05
水平 2	6	14	6	2	0.10
水平 3	8	18	9	4	0.15
水平 4	10	22	12	6	0.20

表 5 湿热地区沥青路面高性能灌缝胶正交试验方案

Tab. 5 Orthogonal test scheme of hot sealant for asphalt pavement %

编号	正交试验各因素掺量				
	SBS	胶粉	生物油	硫磺	C ₉ 石油树脂
1	4	10	3	0.05	0
2	4	14	6	0.10	2
3	4	18	9	0.15	4
4	4	22	12	0.20	6
5	6	10	6	0.15	6
6	6	14	3	0.20	4
7	6	18	12	0.05	2
8	6	22	9	0.10	0
9	8	10	9	0.20	2
10	8	14	12	0.15	0
11	8	18	3	0.10	6
12	8	22	6	0.05	4
13	10	10	12	0.10	4
14	10	14	9	0.05	6
15	10	18	6	0.20	0
16	10	22	3	0.15	2

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果统计分析

分别对制备的 16 组不同掺量的沥青路面灌缝胶进行针入度、软化点、5℃延度、流动度、弹性恢复试验,试验结果如表 6 所示。通过极差分析法研究各影响因素对沥青路面灌缝胶针入度、软化点、5℃延度、流动度和弹性恢复的影响,如图 3 所示。从表 6、图 3 可以看出:

(1)随着 SBS 掺量的增加,灌缝胶的流动值和针入度总体呈降低趋势,5℃延度、软化点和弹性恢复率均明显增加。SBS 可以有效地降低沥青在 60℃下的流动性,同时提升沥青的抗异物嵌入能力,提高高温性能。这是因为 SBS 聚合物颗粒吸收了灌缝胶体系中的油分发生溶胀,改变了其胶体结构,同时溶胀后的 SBS 颗粒形成了稳定的弹性网状结构,从而降低了灌缝胶的高温流淌性,增强了沥青的柔韧性和弹性性能。当 SBS 掺量从 6% 增加到

表 6 湿热地区沥青路面高性能灌缝胶正交试验结果

Tab. 6 Orthogonal test results of hot sealant for asphalt pavement

编号	流动值/ mm	软化点/ ℃	针入度(5 s,100 g, 25℃)/mm	弹性恢 复/%	5℃延度/ cm
1	1.3	76.2	5.40	45.6	23.1
2	1.9	77.6	6.12	50.7	26.5
3	2.5	78.5	6.16	64.8	27.4
4	3.2	78.3	7.18	61.0	28.1
5	1.9	83.1	5.37	64.1	33.3
6	0.1	84.3	4.01	53.5	26.3
7	0.9	81.9	6.30	64.2	33.0
8	0.4	85.9	5.77	76.0	38.9
9	0.2	96.8	6.05	80.7	54.9
10	1.0	97.7	6.60	85.1	54.1
11	2.0	104.7	2.90	63.8	28.5
12	1.2	106.8	4.57	78.7	32.3
13	0.8	99.0	6.12	84.6	59.2
14	0.2	100.0	5.34	79.7	50.3
15	0.0	109.0	4.28	77.6	43.4
16	0.0	111.0	3.27	66.8	31.2

8%时,灌缝胶的流动值有少量增加,可能是由于 SBS 颗粒在沥青中分散不均匀造成的。

(2)随着胶粉掺量的增加,灌缝胶的流动值和弹性恢复率变化幅度不明显,但是软化点一直呈上升趋势,这是因为胶粉在溶胀和发育过程中也吸收了部分轻质组分,在其表面形成沥青质含量很高的凝胶膜,使胶粉之间的交联作用加强,提高了灌缝胶的高温性能^[21]。随着胶粉掺量的增加,灌缝胶的 5℃延度有明显的下降,表明胶粉对灌缝胶的低温抗裂性以及低温柔韧性起负面效果,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,从而降低了其延度。当胶粉含量在 14%~18%时,灌缝胶的 5℃延度下降最快,所以应避免选择超过 14%的胶粉掺量作为试验最佳配合比。随着胶粉的加入,灌缝胶的针入度呈先下降后上升的趋势,胶粉掺量为 10%~18%时逐渐下降,在掺量为 18%时达到最低值 4.91 mm,其极差值仅为 0.83 mm,表明胶粉对灌缝胶抗异物嵌入能力提高不大。

(3)随着生物油掺量的增加,灌缝胶的流动值总体呈上升趋势,其极差值为 0.65 mm。随着生物油掺量的增加,灌缝胶的 5℃延度、针入度和弹性恢复率均迅速上升。这是因为生物油富含芳香分,能够促进 SBS 聚合物的溶胀,形成更为致密的弹性网状结构,从而促进灌缝胶延度和弹性恢复率的提升。灌缝胶的针入度随着生物油掺量的增加急剧上升,其极差值为 2.65 mm,在各因素中极差值最大。

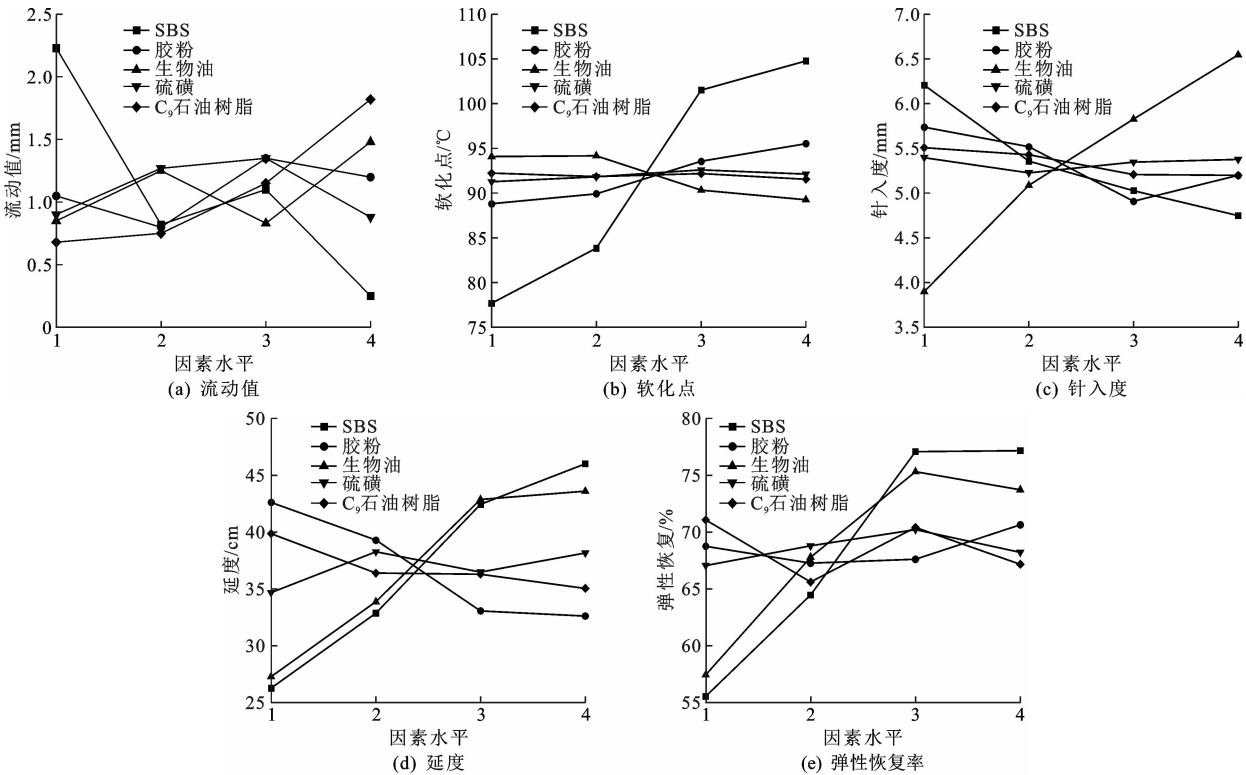


图3 湿热地区沥青路面高性能灌缝胶正交试验极差分析结果

Fig. 3 Range analysis results of orthogonal test of high performance sealant on asphalt pavement in hot and humid area

(4)随着硫磺掺量的增加,灌缝胶的流动值先增大后减少,在硫磺掺量为 0.05%和 0.2%时的流动值持平,在所有因素中硫磺掺量对流动值的影响最小。硫磺掺量对灌缝胶的软化点、5℃延度、针入度和弹性恢复率的影响均不明显,这是因为硫磺作为灌缝胶体系的稳定剂,主要作用为提高其储存稳定性。

(5)随着 C₉石油树脂掺量的增加,流动值一直呈上升趋势,其极差值为 1.15 mm,表明 C₉石油树脂增大了灌缝胶在 60℃条件下的流动性,提高了其高温流淌性。C₉石油树脂掺量对灌缝胶的软化点、5℃延度、针入度和弹性恢复率的影响均不明显,表明 C₉石油树脂对灌缝胶的高温稳定性、低温性能、抗异物嵌入能力和弹性性能均影响较小,同时还会提高灌缝胶的高温流淌性,故在确定高性能灌缝胶最佳配比时应尽量降低 C₉石油树脂掺量。

2.2 沥青路面高性能灌缝胶最佳配比确定

由于高性能灌缝胶正交试验中试验因素、水平和试验指标较多,试验分析比较复杂,为了分析出各方案的最佳选项和影响因素主次顺序,需计算出各水平因素对试验结果影响的权重,科学高效地选择最佳掺量进行性能验证,本试验采用 Origin 软件对正交试验结果进行层次分析来确定最佳配比^[22],层

次分析法给定的正交试验因素水平如表 7 所示。

表 7 层次分析法正交试验因素水平

Tab. 7 Hierarchical analysis method orthogonal test factor level					
因素	$A^{(1)}$	$A^{(2)}$	$A^{(3)}$	...	$A^{(k)}$
水平	$A_1^{(1)}$	$A_1^{(2)}$	$A_1^{(3)}$	...	$A_1^{(k)}$
	$A_2^{(1)}$	$A_2^{(2)}$	$A_2^{(3)}$	...	$A_2^{(k)}$
	$A_3^{(1)}$	$A_3^{(2)}$	$A_3^{(3)}$	...	$A_3^{(k)}$
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	$A_n^{(1)}$	$A_n^{(2)}$	$A_n^{(3)}$	...	$A_n^{(k)}$

注:因素数量为 k;水平数量为 n。

要计算每个水平因素对试验数据的影响需要进行以下 3 个步骤:

(1)计算水平层影响效应矩阵。计算因素 $A^{(i)}$ 的第 j 水平下的数据之和为 K_{ij} , K_{ij} 记为 $A^{(i)}$ 的第 j 水平的试验影响效应($i=1,2,\cdots,k;j=1,2,\cdots,n$)。当需要试验指标越大越好的时候,令 $M_{ij}=K_{ij}$;当需要试验指标越小越好的时候,则令 $M_{ij}=1/K_{ij}$ 。然后列出水平层对试验影响效应矩阵 S

$$S=\begin{bmatrix} 1/t_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/t_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/t_k \end{bmatrix}$$

式中: $t_j=\sum_{i=1}^k M_{ij},j=1,2,\cdots,n$ 。

(2)计算水平标准影响效应矩阵。将矩阵 A 列出并右乘矩阵 S ,进行每一列量纲一化,计算并得出矩阵 AS , A 矩阵可表示为

$$A = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ M_{21} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_{12} & \cdots & 0 \\ 0 & M_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & M_{n2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & M_{1k} \\ 0 & 0 & \cdots & M_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & M_{nk} \end{bmatrix}$$

(3)计算各因素水平对试验影响的权重。首先计算各因素 $A^{(i)}$ 的极差 R_i ,然后计算并列出矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} \frac{R_1}{\sum_{i=1}^k R_i} & \frac{R_2}{\sum_{i=1}^k R_i} & \cdots & \frac{R_i}{\sum_{i=1}^k R_i} \end{bmatrix}$$

最后计算权重 $\omega = ASC^T$,所得的结果为 $n_k \times 1$ 的向量,各向量依次为 $A_n^{(k)}$ 所对应的因素水平对试验的影响权重。

根据《公路沥青路面预防养护技术规范》(JTG/T 5142-01—2021),在计算各个水平指标综合影响权重的时候,默认所有指标的权重为 1,若对特定指标有特定要求而研发特殊功能属性的灌缝胶,只需要将水平权重乘以指标权重再加和即可。通过计算得到湿热地区沥青路面高性能灌缝胶各因素水平影响权重如表 8 所示。

根据表 8 确定湿热地区沥青路面高性能灌缝胶最佳配合比为:SBS 掺量 10%;胶粉掺量 14%;生物油掺量 3%;硫磺掺量 0.2%;C₉ 石油树脂掺量 0%。

由前文极差分析可知,当 SBS 掺量达到 10%时,沥青路面高性能灌缝胶弹性恢复率平均值超过 70%,故不应采用此掺量作为最佳掺量。当 SBS 掺量为 4%和 6%时软化点都低于 90℃,也不宜作为沥青路面高性能灌缝胶最佳掺量。综合考虑极差分析和层次分析的结果,最终确定湿热地区沥青路面高性能灌缝胶最佳配合比为:SBS 掺量 8%;胶粉掺量 14%;生物油掺量 3%;硫磺掺量 0.2%;C₉ 石油树脂掺量 0%。

表 8 湿热地区沥青路面高性能灌缝胶各因素水平影响权重
Tab. 8 Influence weights of each factor level of high performance grouting sealant for asphalt pavement in humid and hot areas

因素	水平	针入度	延度	软化点	流动值	弹性恢复	综合权重
SBS	1	0.057	0.074	0.140	0.028	0.235	0.535
	2	0.066	0.093	0.152	0.076	0.090	0.477
	3	0.071	0.120	0.184	0.057	0.048	0.480
	4	0.075	0.074	0.189	0.251	0.048	0.638
胶粉	1	0.035	0.053	0.040	0.029	0.016	0.173
	2	0.037	0.049	0.040	0.038	0.018	0.182
	3	0.041	0.041	0.042	0.022	0.017	0.164
	4	0.039	0.041	0.043	0.025	0.015	0.162
生物油	1	0.161	0.055	0.031	0.041	0.171	0.460
	2	0.123	0.069	0.031	0.028	0.072	0.323
	3	0.108	0.087	0.030	0.042	0.050	0.317
	4	0.096	0.088	0.029	0.024	0.054	0.291
硫磺	1	0.008	0.016	0.008	0.029	0.017	0.077
	2	0.008	0.017	0.008	0.020	0.015	0.069
	3	0.008	0.016	0.008	0.019	0.014	0.066
	4	0.008	0.017	0.008	0.030	0.016	0.078
C ₉ 石油树脂	1	0.014	0.024	0.004	0.084	0.023	0.149
	2	0.014	0.022	0.004	0.075	0.031	0.147
	3	0.015	0.022	0.004	0.049	0.024	0.114
	4	0.015	0.021	0.004	0.031	0.028	0.100

3 最佳配比验证

3.1 基本性能验证

为了验证湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的基本性能,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)和《路面加热型灌缝胶》(JT/T740—2015)中规定的方法对最佳配合比下的湿热地区沥青路面高性能灌缝胶进行基本性能测试,测试结果如表 9 所示。

表 9 高性能灌缝胶最佳配方试验指标结果
Tab. 9 Results of test indexes of best formula of high temperature type grouting sealant

指标	规范要求	测试值
软化点/℃	≥90.0	100.1
5℃延度/cm		32.3
流动值/mm	≤3.0	1.2
弹性恢复/%	30.0~70.0	69.4
针入度(5 s,100 g,25℃)/0.1 mm	≤70.0	41.2

由表 9 可知,湿热地区沥青路面高性能灌缝胶不仅满足规范的要求,且软化点超出规范要求 10.1℃,针入度低于规范要求最高限度的 41.1%,5℃延度达 32.3 cm,弹性恢复率接近规范要求范围的高值。

3.2 施工温度的确定

施工温度是影响沥青路面加热型灌缝胶路用性能的关键因素,施工温度过低会导致灌缝胶的黏度较大,不易渗入到缝槽两壁的沥青混合料孔隙中,影响灌缝胶和缝槽两壁的黏结力;施工温度过高会导致灌缝胶容易老化,并且降低了施工安全性,增加了施工成本和废气排放,因此确定灌缝胶的施工温度非常重要^[23]。采用 Origin 软件对高性能灌缝胶布氏旋转黏度试验结果进行回归分析得到灌缝胶的黏温曲线,进一步通过微分处理得到其黏温曲线变化率随温度的变化曲线,如图 4 和图 5 所示。

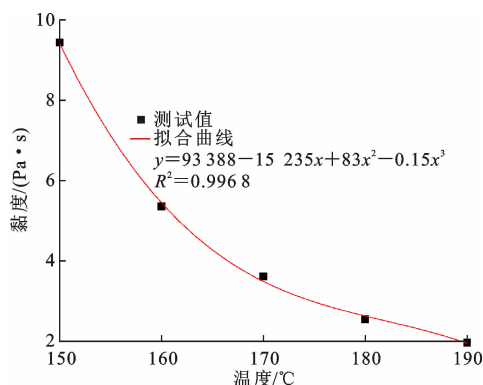


图 4 高性能灌缝胶黏温曲线

Fig. 4 High performance slotting adhesive temperature curve

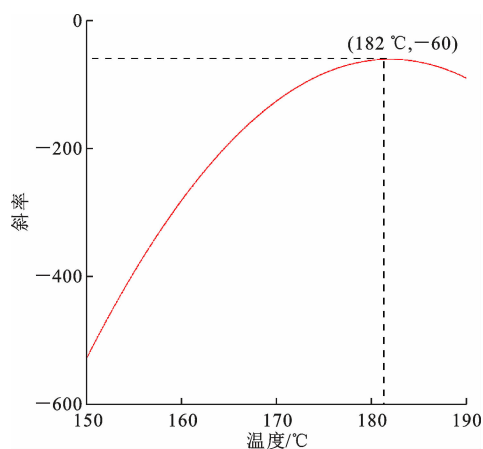


图 5 高性能灌缝胶的黏温曲线微分曲线

Fig. 5 Differential curve of viscosity-temperature curve of high performance sealant

由图 4 和图 5 可以看出,随着温度的升高,高性能灌缝胶黏度一直呈下降趋势,但是下降的速度越来越小,黏温曲线斜率绝对值不断减小,到 182 °C 时达到了极值,表明高性能灌缝胶在 182 °C 左右时的温度敏感性最小。为了方便施工,确保灌缝胶的路用性能,李廷刚等提出灌缝胶的 190 °C 布氏旋转黏度的技术要求范围为 1~3 Pa·s^[21]。根据图 5,高

性能灌缝胶在 182 °C 时的布氏旋转黏度为 2.438 Pa·s,在要求的黏度范围之内,故推荐采用 182 °C 作为高性能灌缝胶的施工温度。

3.3 抗老化性评价

对所研制的高性能灌缝胶模拟施工过程老化和模拟使用过程老化,并分别对老化前后的灌缝胶材料进行流动值、软化点、针入度、弹性恢复、5 °C 延度试验,同时采用老化影响系数(老化后与老化前测试值之比)分析老化对灌缝胶高低温性能、抗异物嵌入性能的影响,老化影响系数越接近 1,表明老化对该指标的影响越小。试验结果如表 10 所示。

表 10 高性能灌缝胶老化试验前后各指标结果

Tab. 10 Index results of sealant before and after aging test

灌缝胶指标	老化前 测试值	模拟施工老化		模拟使用过程老化	
		测试值	老化影响 系数	测试值	老化影响 系数
软化点/°C	100.1	101.3	1.01	105.5	1.05
流动值/mm	1.2	1.1	0.92	1.0	0.83
5 °C 延度/cm	32.3	32.1	0.99	26.3	0.81
弹性恢复率/%	69.4	66.3	0.95	56.2	0.81
针入度(5 s, 100 g, 25 °C)/0.1 mm	41.2	40.5	0.98	40.0	0.97

由表 10 可以看出,经施工老化和使用过程老化后,高性能灌缝胶的各项性能指标仍然满足规范对高温型灌缝胶的要求,表明制备的湿热地区高性能灌缝胶具有优良的抗老化性能。

施工老化和使用过程老化均使高性能灌缝胶的软化点升高,使用老化后达到 105.5 °C,老化影响系数为 1.05,比施工老化影响系数 1.01 略高,这是由于更长时间的高温老化,使得灌缝胶材料内部轻组分挥发、氧化和聚合反应以及废胶粉和 SBS 降解造成的^[24]。经老化后灌缝胶流动值有所降低,其模拟使用过程老化影响系数达到 0.83,表明老化降低了高性能灌缝胶的流动度。经施工老化后的高性能灌缝胶延度值变化不大,其老化影响系数为 0.99,表明施工过程对灌缝胶的低温抗裂性能影响不大。进一步研究发现,灌缝胶在使用过程中老化后的延度有较大幅度的降低,其老化影响系数为 0.81,反映出使用过程老化会明显降低灌缝胶的低温抗裂性。弹性恢复率间接反映材料在低温状态下受力后恢复初始状态的能力,模拟施工老化对灌缝胶的弹性恢复率影响较小,但长时间的使用过程老化明显降低了灌缝胶的弹性恢复能力。模拟施工老化和使用过程老化对高性能灌缝胶针入度的影响均较小,表明高性能灌缝胶的抗异物嵌入性能受老化影响不大。

3.4 水稳定性评价

在南方湿热地区,沥青路面容易受到雨水的侵蚀,水分对灌缝胶黏附性的影响较大,应对灌缝胶的水稳定性进行评价。对高性能灌缝胶和基质沥青分别进行冻融循环前后 25 ℃ 和 50 ℃ 的拉拔强度试验,采用残留强度比评价高性能灌缝胶的抗水损害能力。高性能灌缝胶和基质沥青水稳定性试验结果如表 11 所示。

表 11 高性能灌缝胶水稳定性试验结果
Tab. 11 Water stability test results of high performance sealant

性能	25 ℃ 拉拔强度			50 ℃ 拉拔强度		
	冻融前/ MPa	冻融后/ MPa	残留强度 比/%	冻融前/ MPa	冻融后/ MPa	残留强度 比/%
	1.56	1.41	90.4	0.67	0.53	79.1

从表 11 可以看出,在同一温度下,经冻融处理后的高性能灌缝胶拉拔强度明显降低,表明浸水对高性能灌缝胶材料的黏结性有不利影响。高性能灌缝胶的拉拔强度随温度升高而降低,这是由于温度升高时其内部结构发生变化,变得更“软”,导致抗拉伸强度下降,但其冻融后的 50 ℃ 拉拔强度仍达到 0.53 MPa,残留强度比达到 79.1%。综合分析可知,本文研制的灌缝胶材料在力学性能和水稳定性上均有明显的优势,具有优良的抗水损害能力,适合应用于湿热地区作为路面修补材料。

4 结 语

(1)采用 SBS 聚合物、废胶粉、生物油、硫磺和 C₉ 石油树脂对 SK70[#] 基质沥青进行复合改性,通过正交试验分析确定了湿热地区沥青路面高性能灌缝胶的最佳配合比:SBS 掺量 8%;胶粉掺量 14%;生物油掺量 3%;硫磺掺量 0.2%;C₉ 石油树脂掺量 0%。

(2)湿热地区沥青路面高性能灌缝胶不仅满足规范对高温型灌缝胶的要求,且软化点超出规范要求 10.1 ℃,针入度低于规范要求最高限度的 41.1%,5 ℃ 延度达 32.3 cm,弹性恢复率接近规范要求范围的高值。

(3)湿热地区沥青路面高性能灌缝胶合理施工温度为 182 ℃,并且具有优良的抗老化性能和水稳定性,满足湿热地区沥青路面裂缝修补材料的使用要求。

(4)本文试验结果仅建立在灌缝胶室内试验的基础上,后续将通过高性能灌缝胶在实际工程中的

应用进一步验证其路用性能。

参考文献:

References:

[1] 林博煌,石立万,王悦婵,等. 沥青路面裂缝的数字图像测量与细观结构特征研究[J]. 公路 2022,67(7): 33-40.
LIN Bo-huang, SHI Li-wan, WANG Yue-chan, et al. Research on measurement and meso-structural characteristics of asphalt pavement cracks based on digital image processing[J]. Highway, 2022, 67(7): 33-40.

[2] LI B, REN X Y, LI Y B, et al. Evaluation and selection of sealants and fillers using principal component analysis for cracks in asphalt concrete pavements[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Mater Science Edition), 2017, 32(2): 408-412.

[3] 李 强,倪富健,王文达,等. 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.
LI Qiang, NI Fu-jian, WANG Wen-da, et al. Performance comparison of cracking repairing materials for asphalt pavements[J]. Highway Engineering, 2013, 38(6): 33-37.

[4] MAZUMDER M, KIM H H, LEE S J. Comparison of field performance of crack treatment methods in asphalt pavement of Texas[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B, 2019, 145(1): 04018057.

[5] LI F, ZHOU S Q, CAI W Y, et al. Laboratory evaluation of short and long term performance of hot-poured sealants [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 30-37.

[6] GONG Y F, PANG Y Z, HE F, et al. Investigation on preparation and properties of crack sealants based on CNTs/SBS composite-modified asphalt[J]. Materials, 2021, 14(16): 45-69.

[7] 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.
LI Xia, ZHANG Ai-qin, ZHOU Xiao-jing, et al. Orthogonal experimental study on high temperature modified asphalt joint sealant[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 234-240.

[8] CAO L P, YANG C, DONG Z J, et al. Aging mechanism of hot-poured sealants for asphalt pavement under natural environmental exposure[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(2): 197-206.

[9] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.

- Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's pavement engineering Research • 2020[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 1-66.
- [10] 张 玮, 梁 明, 范维玉, 等. 沥青路面灌缝材料研究进展[J]. *石油沥青*, 2015, 29(2): 6-12.
- ZHANG Wei, LIANG Ming, FAN Wei-yu, et al. Recent advances in asphalt pavement crack filling materials[J]. *Petroleum Asphalt*, 2015, 29(2): 6-12.
- [11] 夏慧芸, 张 瑞, 宋莉芳, 等. 高性能沥青混凝土路面裂缝密封胶的制备及性能研究[J]. *公路*, 2017, 62(4): 253-257.
- XIA Hui-yun, ZHANG Rui, SONG Li-fang, et al. Study on preparation and performance of high performance asphalt concrete pavement crack sealant[J]. *Highway*, 2017, 62(4): 253-257.
- [12] LIU S, MO L T, WANG K, et al. Preparation, microstructure and rheological properties of asphalt sealants for bridge expansion joints[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105: 1-13.
- [13] TAN Y Q, GUO M, ZHANG L, et al. Performance optimization method of composite modified asphalt sealant[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2013, 7(2): 1-7.
- [14] ZHANG H S, SHENG X H, WANG S W, et al. Effects of different modifiers on thermal stability, constituents and microstructures of asphalt-based sealant[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, 142(3): 1183-1192.
- [15] FANG Y F, MA B, WEI K, et al. Performance of single-component epoxy resin for crack repair of asphalt pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 304: 124625.
- [16] SUN G Q, ZHANG J P, TAN X Y, et al. Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119299.
- [17] LUO Y M, GUO H Y, WANG Z J, et al. Effects of dioctyl phthalate on performance of asphalt sealant[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(2022): 1-12.
- [18] 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.
- SONG Liang, WANG Chao-hui, 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.
- [19] 董泽蛟, 周 涛, 栾 海, 等. SBS/橡胶粉复合改性SH型混合生物沥青工艺及机理[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 215-225.
- DONG Ze-jiao, ZHOU Tao, LUAN Hai, et al. Composite modification technology and mechanism of SH blended bio-asphalt by combining SBS with crumb rubber[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 215-225.
- [20] 聂鑫垚, 姚鸿儒, 李 政, 等. C9石油树脂对高黏度改性沥青性能的影响[J]. *石油学报(石油加工)*, 2019, 35(1): 176-182.
- NIE Xin-yao, YAO Hong-ru, LI Zheng, et al. Effects of C9 petroleum resins on the performance of high-viscosity asphalt[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2019, 35(1): 176-182.
- [21] 李廷刚, 梅 平, 袁 航, 等. 沥青路面加热型密封胶的黏度-温度特征[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(7): 8-12.
- LI Ting-gang, MEI Ping, YUAN Hang, et al. Viscosity-temperature characteristics of asphalt pavement hot-applied sealant[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(7): 8-12.
- [22] 董伟智, 张 爽, 朱 福. 基于可拓层次分析法的沥青混合料路用性能评价[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(6): 2137-2143.
- DONG Wei-zhi, ZHANG Shuang, ZHU Fu. Evaluation of pavement performance of asphalt mixture based on extension analytic hierarchy process[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(6): 2137-2143.
- [23] 闫 瑾, 张连振, 惠 嘉, 等. 适用于低温环境的聚氨酯防水粘结材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(2): 229-233, 239.
- YAN Jin, ZHANG Lian-zhen, HUI Jia, et al. Research progress on PU waterproof adhesive material suitable for low temperature environment[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(2): 229-233, 239.
- [24] 杨永强, 康秉铎, 郭海东, 等. 活化胶粉/SBS复合改性沥青短期老化性能[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(5): 23-33.
- YANG Yong-qiang, KANG Bing-duo, GUO Hai-dong, et al. Short-term aging performance of activated rubber powder/SBS composite modified asphalt[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(5): 23-33.