

季冻区沥青路面灌缝胶工作性能试验

王伟^{1,2}, 何荣森¹, 陈志国², 石家乐¹, 徐亮¹, 孙彦楠²

(1. 长春工程学院 土木工程学院, 长春 130012; 2. 吉林省交通科学研究所, 长春 130012)

摘要:在现行灌缝胶评价指标基础上,通过短期和长期老化试验,提出增设锥入度比、压缩弹性恢复率、低温拉伸等评价指标,并采用熵权-TOPSIS组合方法,构建了适用于季冻区沥青路面灌缝胶工作性能的指标评价模型。试验结果表明:短期老化后锥入度比和压缩弹性恢复率控制标准分别为 90%、30%,长期老化后的锥入度比和压缩弹性恢复率控制标准分别为 50% 和 20%;灌缝胶黏度的评价标准为 190 °C 时的 1~3 Pa·s,灌入深度评价标准为 5 cm,浸水后灌缝胶的低温拉伸应力评价标准为 0.06 MPa(-30 °C)和 0.03 MPa(-20 °C),而冻融循环后的灌缝胶黏附力评价标准为 0.03 MPa(-30 °C)和 0.025 MPa(-20 °C);采用熵权-TOPSIS 法不仅可以判断样本合格与否,还可以根据各个指标的评价结果全面综合地判断样本的优劣。本文研究有助于提高灌缝材料应用效果和耐久性评价水平,为寒区灌缝胶性能评价及规范修订提供补充与参考数据。

关键词:季冻区;沥青路面;灌缝材料;熵权-TOPSIS;评价指标

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)10-3228-14

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240876

Experiment on performance of asphalt pavement grouting adhesive in seasonal frozen zone

WANG Wei^{1,2}, HE Rong-sen¹, CHEN Zhi-guo², SHI Jia-le¹, XU Liang¹, SUN Yan-nan²

(1. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Jilin Provincial Transport Scientific Research Institute, Changchun 130012, China)

Abstract: This study builds on existing evaluation criteria by introducing additional indicators, including cone penetration ratio, compression elastic recovery rate, and low-temperature tensile strength, which are assessed through short-term and long-term aging tests. An evaluation model tailored to the performance of sealants in seasonally frozen asphalt pavements is developed using the entropy weight-TOPSIS method. The experimental results indicate the following: After short-term aging, the control standards for cone penetration ratio and compression elastic recovery rate are 90% and 30%, respectively, whereas after long-term aging, these standards decrease to 50% and 20%. The evaluation criteria for sealant viscosity are 1-3 Pa·s at 190 °C, with a grouting depth of 5 cm. The low-temperature tensile stress evaluation criteria for sealants after immersion are 0.06 MPa at -30 °C and 0.03 MPa at -20 °C, while the adhesion strength after

收稿日期:2024-08-06.

基金项目:吉林省交通运输创新发展支撑项目(2022-1-1).

作者简介:王伟(1982-),男,副教授,博士.研究方向:寒区沥青路面灌缝材料.E-mail:16695496@qq.com

通信作者:徐亮(1969-),男,教授.研究方向:寒区交通安全设计.E-mail:123333369@qq.com

freeze-thaw cycles is 0.03 MPa at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0.025 MPa at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. The entropy weight-TOPSIS method not only determines whether the sample meets qualification standards but also provides a comprehensive assessment of its quality across multiple indicators. These findings contribute to improving the application efficiency and durability evaluation of sealant materials, offering supplementary data for performance assessment and specification updates in cold regions.

Key words: seasonal freezing zone; asphalt pavement; grouting material; entropy weight TOPSIS; evaluating indicator

0 引 言

沥青路面疲劳开裂是寒冷地区公路最常见的病害之一,特别是在车辆荷载的长期作用下,裂缝不断扩展,从而缩短公路的使用寿命^[1,2]。目前,国内外常采用加热型灌缝胶修复路面裂缝,取得了较为显著的效果^[3-5]。然而,不同国家和地区在评价标准和技术规范上存在显著差异。其中,欧美发达国家如美国已制定了较为完善的加热型路面裂缝密封胶检测标准^[6]。中国交通运输部于2009年发布了路面加热型灌缝胶行业标准(JT/T 740),并于2015年进行了修订^[7],为国内该领域提供了重要的技术依据。然而,灌缝胶在季冻区应用时存在一定的局限性,尤其是低温性能不足,经过冻融循环作用后其防水性能显著下降,严重影响了灌缝修复效果。因此,如何有效评估灌缝胶的工作性能,特别是在季冻区的长期使用效果,成为当前亟待解决的重要问题。相关学者开展了多项研究,提出了通过弯曲梁流变仪(BBR)和动态剪切流变仪(DSR)试验、结合蠕变刚度、 m -value 和温度敏感性加权归一化值等方法来综合评价灌缝胶的高低温性能^[8,9]。一些研究采用玻璃化转变温度(T_g)来反映灌缝胶从柔性到脆性转变时的临界温度,采用动态刚度模量来评估灌缝材料在不同频率和温度下的弹性行为,将二者结合可全面分析灌缝胶在低温下的力学性能和温度敏感性。还有一些学者提出采用改进 SC4-27 主轴的 Brookfield 旋转黏度计测试黏度和改进 BBR 试件厚度来评估灌缝胶低温性能^[10]。哈尔滨工业大学的研究团队^[10-12]对灌缝胶低温拉伸设备进行改进,并提出了灌缝胶的失效判别方法,同时基于弱边界层理论揭示了灌缝胶的失效机理。尽管这些研究通过实验室条件模拟了灌缝胶在低温环境下的性能表现,但在实际使用过程中,灌缝胶还受季节性冻融循环的影响,导致其性能进一

步劣化^[13]。虽然 Wang 等^[14]设计了一种冻融循环试验装置,模拟了灌缝胶在冻融循环过程中的变化情况,但研究仅分析了冻融循环次数对灌缝胶的影响,并未充分考虑灌缝胶在冻融循环过程中的老化问题。Masson 等^[15-17]发现,施工中加热釜和加热喷枪会造成灌缝胶老化,从而导致其工作性能显著下降。可见,现有的规范只反映了软化点、流动度等基本指标,而灌缝胶的长短期老化又与低温拉应力等指标存在性能上的内在联系,进而影响灌缝胶的工作性能。

鉴于此,本文通过模拟灌缝胶长短期老化试验,并结合灌入深度试验,对灌缝胶抗长短期老化性能、抗冻融性能以及施工性能等进行分析。通过增加锥入度比、压缩弹性恢复率之比,以及低温拉伸后的力学性能等指标,结合采用熵权-TOPSIS 评价方法构建适合东北季冻区沥青路面灌缝胶长短期使用性能的评价指标体系,为寒区灌缝胶性能评价及相关规范的补充与修订提供数据参考。

1 材料与试验设计

1.1 试验材料

试验选取东北季冻区沥青路面养护常用的 8 种型号灌缝胶,按照《路面加热型密封胶》(JT/T 740)进行分类,4 种适用于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,4 种适用于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其中,灌缝胶所使用的测试温度均按照选购时其推荐温度进行测试,灌缝胶基本参数如表 1 所示。

1.2 试验方案设计

1.2.1 基本试验

对试验采用的 8 种灌缝胶进行锥入度、软化点、压缩弹性恢复率、流动性和低温拉伸性能测试,如图 1 所示。其中,锥入度可反映灌缝胶抵抗异物嵌入的能力,软化点是灌缝胶高温性能的关键指标,压缩弹性恢复率能够间接反映灌缝胶在车辆荷载和低温作用下的变形恢复能力

表 1 加热型灌缝胶基本参数
Table 1 Basic parameters of heating type sealant

样本编号	样本 A	样本 B	样本 C	样本 D	样本 E	样本 F	样本 G	样本 H
成分	改性沥青							
修补方式	加热							
适用温度/℃	-30	-30	-30	-30	-20	-20	-20	-20
锥入度/0.1 mm	110.0~120.0	115.0~120.0	120.0~125.0	115.0~125.0	85.0~95.0	75.0~85.0	90.0~95.0	80.0~90.0
软化点/℃	86~90	80~88	85~95	90~95	87~92	85~90	92~98	88~94
压缩弹性恢复率/%	45~50	40~45	35~40	45~50	30~35	30~40	45~50	35~40
流动性/mm	1.5~2	0	0	1~1.5	0	0	0	0~0.5
适用规范	JT/T740—2015							

以及低温下的柔韧性,流动性反映了灌缝胶在高温作用下的稳定性,低温拉伸性能包括拉伸强度和截面黏附力,用于评估灌缝胶低温条件下的工作性能。

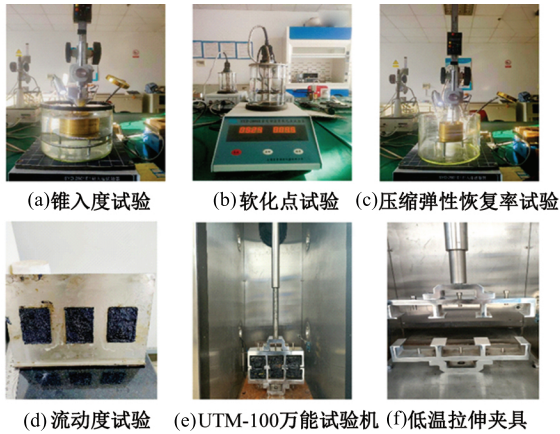


图 1 基础试验项目
Fig. 1 Basic experiment

1. 2. 2 灌缝胶性能试验

(1)施工过程模拟。灌缝胶现场施工时,需将灌缝机加热至 190 ℃,且每罐灌缝胶需要 2~4 h 才能使用完毕。由于施工过程中加热时间过长,灌缝胶极易发生老化。为模拟该施工过程,短期老化试验可依据灌缝胶的施工温度设定室内模拟老化温

度,即 190 ℃,老化时间则根据实际施工时间设定为 4 h。在室内试验中,将灌缝胶置于 190 ℃的烘箱中保温 4 h,以此模拟灌缝胶的施工老化过程。

(2)黏度测试。在实际施工中,灌缝胶加热后通过灌缝机的喷枪注入裂缝,并迅速渗透和冷却,其渗透微孔隙的能力主要由黏度决定。低黏度灌缝胶具有较强的渗透性和良好的黏结性能,而高黏度灌缝胶则表现出较差的喷出速度和黏结效果。虽然高温可以降低黏度,但同时也会加速灌缝胶老化。因此,本试验采用布洛克菲尔德黏度计来测量灌缝胶黏度。将转子和盛样筒在烘箱中保温 1.5 h,灌缝胶在恒温容器中保温 15 min,选用 27 dPas 转子,确保扭矩读数在 10%~98% 范围内。当读数稳定后,确定样本的测定值。

(3)灌入深度测试。将两块汉堡车辙试件(320 mm×260 mm×50 mm)拼合,并进行灌入深度测试。首先,在两块试件连接处放置适量灰尘粉末,然后将每个样本竖向放置,两个部分相距 15 mm 以模拟实际路面的裂缝宽度。随后将灌缝胶缓慢注入裂缝中,保持 2 h 渗透时间。沿着裂缝的黏结位置将两块试件重新分开,并在黏结界面选取 5 个位置记录灌缝胶的渗透深度,以确定灌缝胶灌入深度值。测试流程如图 2 所示。

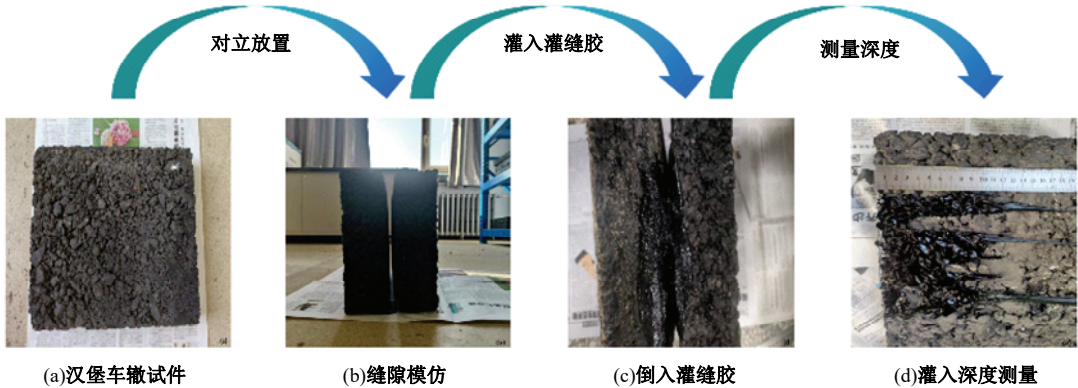


图 2 灌缝胶深度测试流程
Fig. 2 Testing process for depth of sealant filling

(4)浸水稳定性试验。由于季冻区冬季降雪丰富,大量融雪、雨水会渗透浸入路面、路基,导致结构材料面临较大的水侵害风险。为此,根据 ASTM D5329-20^[18]和 D6690 相关要求,将灌缝胶样本浸泡在 25 ℃的水中 96 h,并进行 3 组循环拉伸测试,测试过程中对样本的黏结力进行监测,如图 3(c)所示。

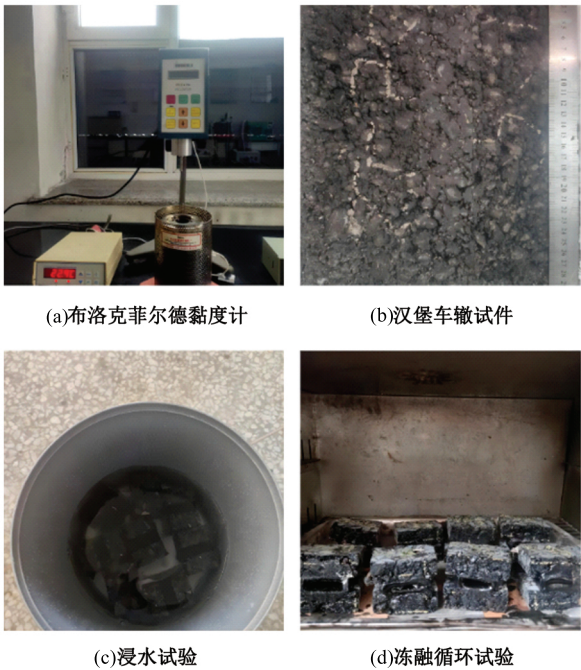


图 3 灌缝胶样本试验

Fig. 3 Sample test of grouting adhesive

(5)冻融循环试验。冻融循环作用对于沥青混合料以及改性沥青黏结剂的力学性能影响显著。本试验使用夹层试样进行热处理和冷处理^[19,20]。为模拟夏季路面 60 ℃的高温,先将夹层试样放入 60 ℃烘箱中不少于 4 h,并在自重作用下进行压缩试验。随后,在室温冷却 6 h,完成一次热处理。在季冻区,冬季路面的实际温度可达 -15 ℃,为了模拟此温度,将试样放置在 -15 ℃的环境箱中进行冷冻,冷冻时长不少于 4 h,完成一次冷处理。随后,使用 UTM 试验机以 1.5 mm/min 的速度进行拉伸,拉伸至铸件宽度的 150% (即 22.5 mm)。为保持拉伸幅度,使用 22.5 mm 的拉伸定位块放置在基材之间,并在室温下放置 6 h 完成一个冻融循环。按照此方法,进行 3 次冻融循环试验,并检测试样在冻融循环后的拉力值。

(6)长期老化试验。现行规范中主要考虑了使用初期的压缩弹性恢复率以及锥入度值,并未考虑长期使用之后灌缝胶的性能及恢复能力。本试验将

灌缝胶样本制备好后放入 60 ℃通风烘箱中,加热 7 d,从而模拟灌缝胶长时间工作老化^[21]。灌缝胶老化完成后,在 25±5 ℃冷却 1 h 后进行试验。

2 试验结果分析

2.1 基本指标试验结果分析

对试验样本进行锥入度、软化点等指标测试,如图 3 所示,试验结果如表 2、表 3 所示。根据基本指标测试结果,绘制试验样本不同指标老化前后的变化曲线,如图 4~图 6 所示。

表 2 -30 ℃ 样本性能测试结果

Table 2 Performance of sample at -30 ℃

	样本				JT/T 740 要求
	A	B	C	D	
锥入度/0.1 mm	115.6	138.9	120.7	135.2	90~150
软化点/℃	84.4	87.8	82.5	80.7	≥80
流动度/mm	0.1	0.5	1.1	2.0	≤5
弹性恢复率/%	49.7	42.2	54.1	57.5	30~70
-30 ℃,150%, 3 次循环	满足	满足	满足	满足	满足

表 3 -20 ℃ 样本性能测试结果

Table 3 Performance of sample at -20 ℃

	样本				JT/T 740 要求
	E	F	G	H	
锥入度/0.1 mm	99.6	102.2	88.0	84.2	70~110
软化点/℃	87.6	81.8	92.3	86.2	≥80
流动度/mm	1.2	0.0	0.1	0.5	≤5
弹性恢复率/%	32.5	33.9	47	35.4	30~70
-20 ℃,100%, 3 次循环	满足	满足	满足	满足	满足

(1)锥入度分析。如图 4 所示,在短期老化后,6 种灌缝胶样本的锥入度显著下降。而在长期老化后,全部 8 种灌缝胶样本的锥入度均出现明显下降。这表明,长期老化对灌缝胶锥入度的影响尤为显著。由于路用灌缝胶在本质上属于密封胶,因此,参考 ASTM D2872-22^[22]引入锥入度比作为灌缝胶热老化性能的评价指标,锥入度比的计算如下所示:

$$K_p = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \tag{1}$$

式中: K_p 为样本加热后残留物锥入度的比例,%; P_1 为加热前样本的锥入度(0.1 mm),mm; P_2 为加热后样本的锥入度,mm。

短期锥入度比可以用于评估短期抗老化性能,长期老化后的锥入度比可以反映灌缝胶长期

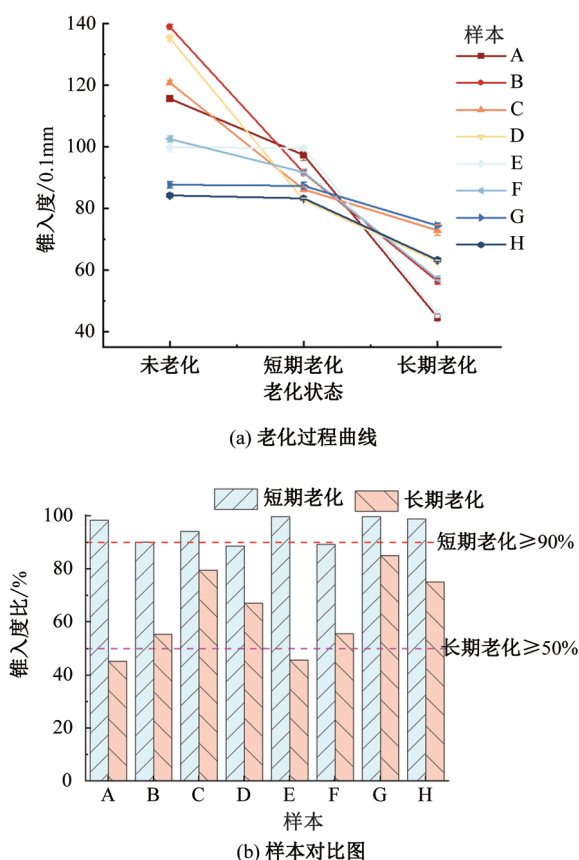


图4 试验样本锥入度老化过程及对比分析

Fig. 4 Aging process and comparative analysis of experimental sample cone penetration

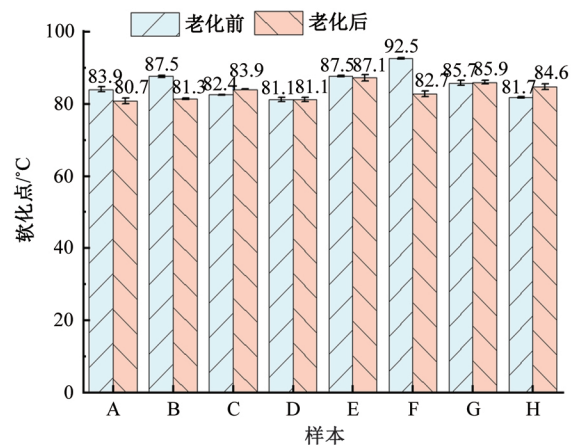


图5 试验样本软化点老化前后对比图

Fig. 5 Comparison of softening point before and after aging of test samples

使用性能。根据短期老化后的锥入度比,样本锥入度 $\geq 90\%$ 的抗短期老化性能较好,试验样本A、C、D、E、F、G均属于此类。 $< 90\%$ 的属于抗短期老化性能较差,样本B、H属于此类。对于长期老化后的锥入度比,以50%作为性能评估的界限值, $\geq 50\%$ 的抗长期老化性能较好,试验样本

B、C、D、F、G、H均属于此类。 $< 50\%$ 的抗长期老化性能较差,样本A、E属于此类。综合观察短期老化性能较好的与长期老化性能并无明显关联。其原因与不同产品中所掺杂的改性剂、软化剂等改性剂含量不同有关。

(2)软化点分析。将试验所得各灌缝胶样本老化前后的软化点进行对比,如图5所示。软化点的变化非常明显。其中,4种灌缝胶样本A、B、E、F的软化点随着短期老化发生了显著下降,3种灌缝胶样本C、G、H的软化点升高,1种灌缝胶样本D保持不变。

参考 ASTM D2872,采用软化点的差值作为判别灌缝胶老化性能的评价指标,计算如下所示:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (2)$$

式中: ΔT 为样本在加热后软化点的变化量, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为样本在加热老化前的软化点, $^{\circ}\text{C}$; T_2 为样本在加热老化后的软化点, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据短期老化后的软化点差值变化,以 3°C 为界限,将灌缝胶划分为两类,老化后软化点大于 3°C 的样本A、B、G属于老化性能较差的类型,小于 3°C 的样本C、D、E、F、H的属于老化性能较好的类型。

(3)压缩弹性恢复率分析。对各灌缝胶样本在未老化、短期老化和长期老化3个阶段后的压缩弹性恢复率进行测试,并绘制成曲线,以反映灌缝胶压缩弹性恢复率随老化过程的变化规律,如图6所示。

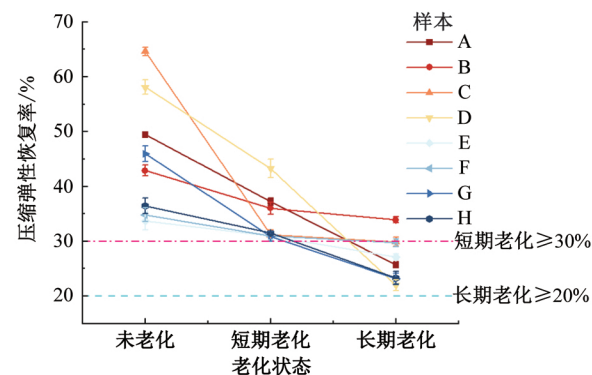


图6 老化前后灌缝胶压缩弹性恢复率对比图

Fig. 6 Comparison of compression elasticity recovery rate of sealant before and after aging

如图6所示,灌缝胶在每次老化后,其压缩弹性恢复率均会受到一定程度的影响,总体看,压缩弹性恢复率随着老化时间的增加而急剧降低。考虑灌缝胶在施工过程中会经历短期老化,因此,将

短期老化后的压缩弹性恢复率作为主要指标,将老化前后的压缩弹性恢复率比值作为长期老化后的指标,如下所示:

$$K_r=\frac{r_1}{r_2}\times 100$$

(3)

式中: K_r 为样本加热后残留压缩弹性恢复率的比值; r_1 为长期老化后的压缩弹性恢复率; r_2 为短期老化的压缩弹性恢复率,%。

根据短期老化后的压缩弹性恢复率,推荐在

表 4 灌缝胶试验样本锥入度比、软化点差值和压缩弹性恢复率比

Table 4 Cone penetration ratio, softening point difference, and compression elastic recovery rate ratio of sealant test samples

评价指数	样本 A	样本 B	样本 C	样本 D	样本 E	样本 F	样本 G	样本 H
短期老化后的锥入度比/%	87.4	79.2	94.2	100	100	89.6	98.8	98.8
长期老化后的锥入度比/%	69.7	54.1	52.0	46.7	46.1	55.6	85.1	74.9
老化后软化点差值/℃	-3.1	-6.4	1.5	0	0	2.2	-9.1	0
短期老化后的压缩弹性恢复率/%	37.7	35.2	30.5	43.3	30.4	30.3	30.2	31.6
长期老化后的压缩弹性恢复率/%	69.20	93.9	100	51.01	90.5	99.7	46.0	76

对于上述长短期老化后的现象,目前市面上加热型灌缝胶的主要商品成分为沥青、橡胶粉、SBS、软化剂、增容剂、填料等,不同灌缝胶的老化规律并不完全一致。其原因主要是不同灌缝胶在储存时间、组分配比、外加剂构成等方面存在差异。短期老化保温温度过高,加热时间过长,过程中存在轻质油的挥发和废橡胶粉降解,油分的挥发会导致锥入度下降,软化点上升,胶粉降解则会导致灌缝胶的锥入度上升,软化点下降。在进行长期老化时,油分的挥发,胶粉和聚合物降解,亦是导致灌缝胶压缩弹性恢复率下降的主要原因。

(4)流动性分析。老化后的流动度反映了灌缝胶在服役过程中是否发生过高温度流淌现象。如表 5 所示,灌缝胶样本老化后的流动度均有所降低,虽然老化前后的流动度均满足现行规范中最大流动度为 5 mm 的要求,然而,随着道路灌缝胶中 SBS 和橡胶粉的大量使用,SBS 和橡胶以及外加填料均会显著改善沥青的高温性能,未来的产品均会满足流动度要求,故建议流动度要求降低。

(5)低温拉伸性分析。对灌缝胶样本进行 3 次循环拉伸试验,并检测拉伸结束时最大拉应力

短期老化后压缩弹性恢复率应 $\geq 30\%$,根据长期老化后的压缩弹性恢复率推荐在长期老化后压缩弹性恢复率应 $\geq 20\%$,根据长期老化后的压缩弹性恢复率比例可将其分为两类,长期老化后压缩弹性恢复率之比 $\geq 80\%$ 的 B、C、E、F,这几种灌缝胶抗长期老化性能较好。长期老化后压缩弹性恢复率之比 $< 80\%$ 的 A、D、G、H,这几种灌缝胶的抗长期老化性能较差。试验结果如表 4 所示。

表 5 各样本老化前后的流动度

Table 5 Liquidity of each sample before and after aging

	样本							
	A	B	C	D	E	F	G	H
老化前流动度/mm	0.1	0.5	1.1	1.1	1.2	0	0	1.1
老化后流动度/mm	0	0	0.5	0	0.9	0	0	0

值,试验结果如表 6 所示,拉伸力与位移的关系曲线如图 7 所示。

图 7 中,各样本在拉伸过程中均未发生破坏,在进行 3 次循环时,第 1 次反映了初始拉力,第 3 次反映了循环结束时的拉力。对于没有进行短期老化的灌缝胶,随着循环次数增加,最大拉力也随之减小。可见,低温循环对灌缝胶的力学性能影响显著。在拉伸初期,灌缝胶样本的位移均表现出线性增长趋势,具有明显的弹性特征。随着拉伸的持续,位移仍然持续增长,但拉力呈现波动,说明沥青出现了一定的应力松弛^[20]。老化后的灌缝胶无论是全过程拉力还是最大拉力均比未老化时小,可见,灌缝胶的老化对拉力的衰减影响显著。此外,部分灌缝胶 D、H 在老化后的曲线相较于未老化的发生了明显的变化,这表明短期老化对灌缝胶在初始阶段和演化阶段全过程均有影

表 6 低温拉伸最大拉力

Table 6 Maximum tensile strength under low-temperature stretching

	样本 A	样本 B	样本 C	样本 D	样本 E	样本 F	样本 G	样本 H
老化前第 1 次循环最大拉力/N	868	662	1533	759	305	163	617	560
老化前第 3 次循环最大拉力/N	728	553	1006	606	292	149	540	301
老化后第 1 次循环最大拉力/N	559	414	305	499	297	144	574	307
老化后第 3 次循环最大拉力/N	447	282	295	275	284	129	350	287

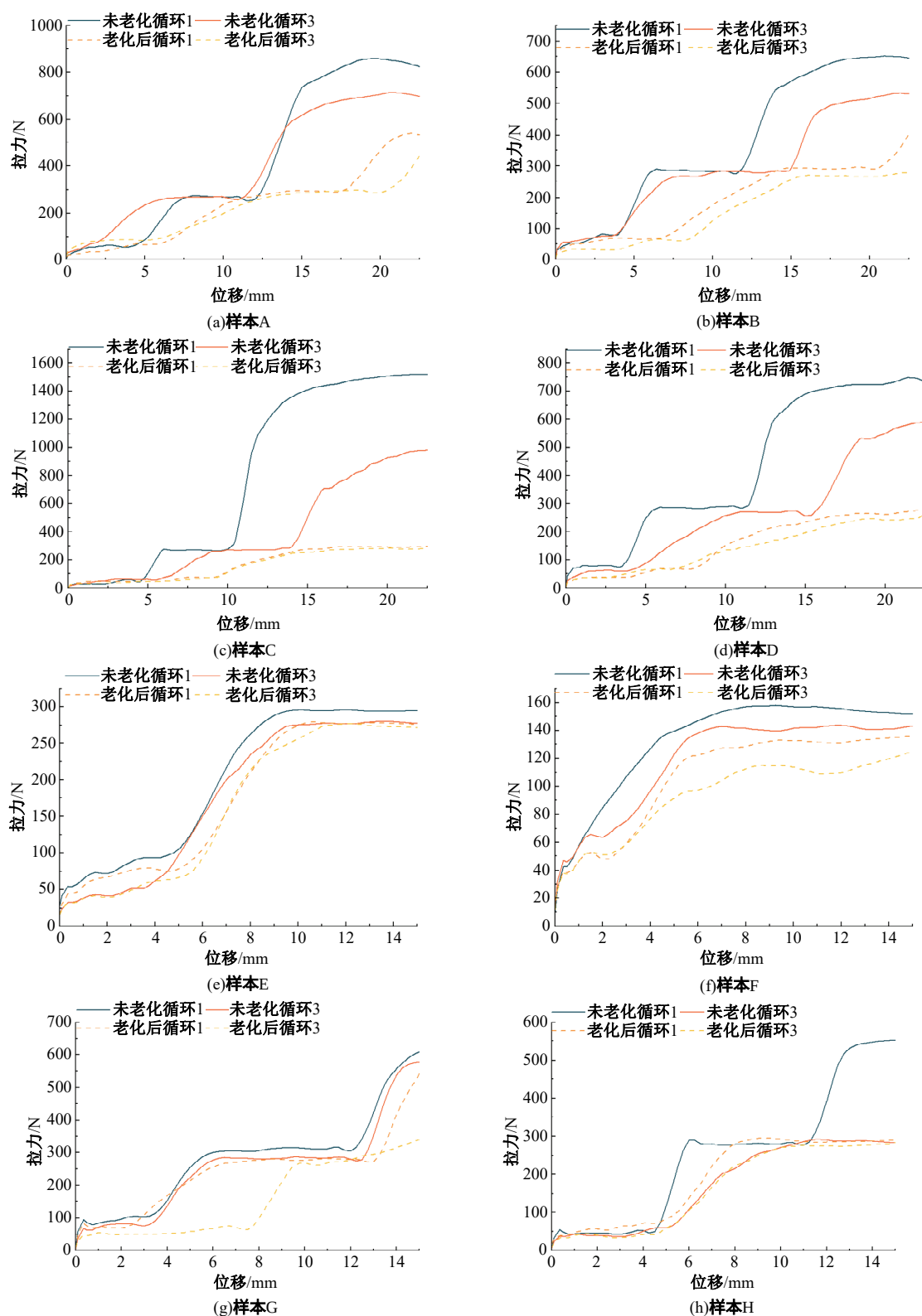


图 7 各灌缝胶样本低温拉伸力与位移的关系曲线

Fig. 7 Low temperature tensile force displacement relationship curve of each sealant sample

响,也与老化过程对灌缝胶中的橡胶粉降解以及其余改性剂挥发或发生老化有关。

由于灌缝胶在低温拉伸过程中,其拉力承担主要作用,因此以 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的短期老化最

小拉应力指标作为低温拉伸性能的评价依据,计算公式如式(4)所示:

$$\delta_n^t = F_t / A \quad (4)$$

式中: δ_n^t 为第 t 次循环时的最大拉应力,MPa; t 为

第 3 次循环或发生破坏时的循环次数; F_t 为第 t 次循环时的最大拉力, kN; A 为受力面积, mm^2 。

因此, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的短期老化最小拉应力应以式 (5) 作为判别标准。若都满足, 则越大越好。

$$\begin{cases} \delta_{\min}(-30\text{ }^{\circ}\text{C})\geqslant 0.06\text{ MPa} \\ \delta_{\min}(-20\text{ }^{\circ}\text{C})\geqslant 0.03\text{ MPa} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 新增指标试验结果分析

(1) 黏度分析。将 8 种灌缝胶在不同温度下的黏度绘制成散点图, 如图 8 所示。各灌缝胶的黏度均随着温度的上升而下降, 其中, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的早期黏度均高于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶, 主要原因是为满足低温性能在生产时添加了更多的橡胶粉和其他填料所致。在 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的黏度大幅下降, 并逐渐趋近于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的黏度, 其原因是随着温度升高, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶中的软化剂等开始融化, 增加了其流动性从而导致灌缝胶整体流动性增强。在 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的黏度均在 $1\sim 3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的区间。而在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的黏度都比较低。可见, 短期高温老化对灌缝胶的黏度影响显著。

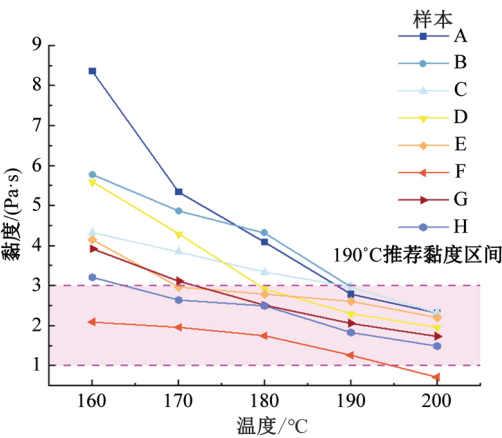


图 8 灌缝胶样本黏温曲线
Fig. 8 Adhesive and temperature curve of sealant sample

由于施工过程中需要将灌缝胶加热至 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, 考虑将灌缝胶黏度取 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度介于 $1\sim 3\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 作为一个参考标准, 若不在此范围考虑该灌缝胶性能较差不予采用。

(2) 灌入深度分析。对灌缝胶试验样本进行灌入深度测试, 如图 9 所示。对比 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶与 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的整体灌入深度, 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶样本中, C 样本的灌入深度最大。在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌

缝胶样本中, E 样本的灌入深度最大, 其原因是含有的软化剂等外加剂导致其高温流动性较大, 冷却速度较慢。且在试验时灌缝胶冷却后并未发现两种适用温度不同的灌缝胶灌入深度有明显区别。因此, 以灌入深度 5 cm 作为评价指标的判别值。根据试验情况, 考虑选择灌入深度 $\geqslant 5\text{ cm}$ 作为灌入深度指标, $< 5\text{ cm}$ 的考虑不予采用。

(3) 浸水稳定性分析。将灌缝胶样本浸水后进行低温拉伸试验, 测得的灌缝胶浸水后最大拉力如表 7 所示, 根据试验结果绘制各灌缝胶样本浸水后拉力与位移的关系曲线, 如图 10 所示。

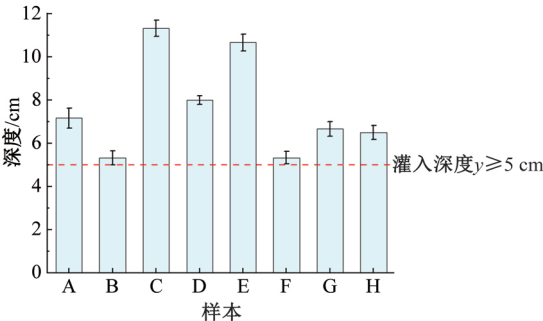


图 9 各灌缝胶样本灌入深度
Fig. 9 Depth of injection for each sealant sample

表 7 灌缝胶浸水后最大拉力
Table 7 Maximum tensile force of sealant after immersion in water

	样本							
	A	B	C	D	E	F	G	H
第 1 次循环	910	572	590	1181	564	175	853	324
第 2 次循环	860	505	487	708	303	155	802	304
第 3 次循环	853	325	305	375	285	128	720	297

图 10 展现了各样本在拉伸初期表现出的明显弹性特征。拉力随着位移增大而呈现明显增大趋势, 对比图 7 老化后的低温拉伸结果, 浸水后的低温拉伸性能发生了一定变化, 其最大拉力以及拉力变化过程中的拉力均大于老化后的数值, 其原因主要是水通过沥青混合料的空隙渗入灌缝胶中, 增加了沥青混合料内的界面与灌缝胶本身的黏结力。B、F 样本在进行第 3 组循环拉伸时, 拉力发生陡降。这是由于 B、F 在放置过程中水分有所挥发, 导致其中的一些冰晶在拉伸过程中发生断裂, 进而引起拉力减小。鉴于此, 可将低温拉伸时的最小拉应力即式 (5) 最小拉应力作为灌缝胶判别指标。

(4) 冻融循环试验结果分析。将 8 种灌缝胶样本分别进行冻融循环试验, 并测试冻融循环后的最大拉力, 如表 8 所示, 冻融循环作用后, 灌缝

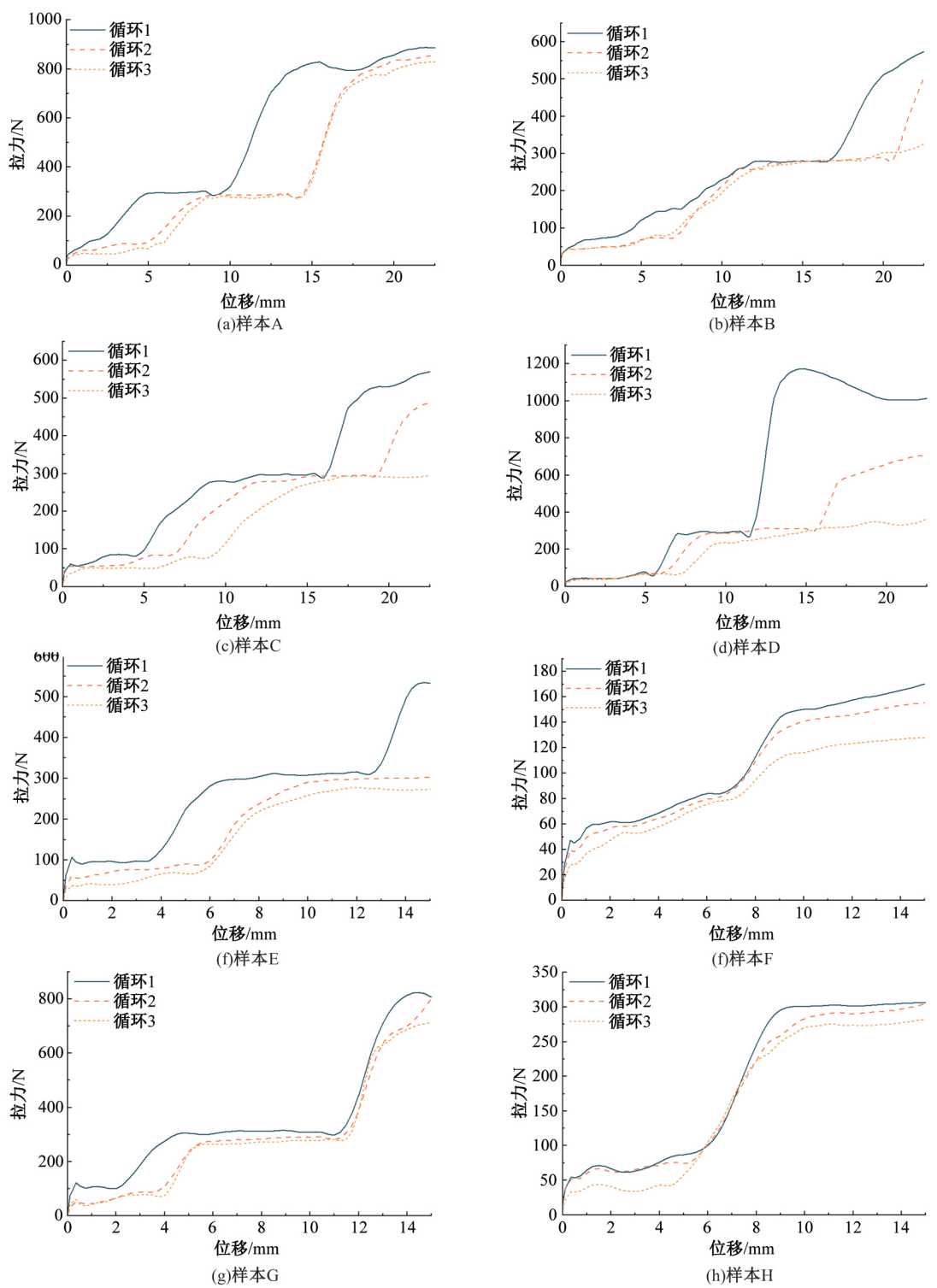


图 10 浸水拉伸后灌缝胶拉力与位移的关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between tensile strength and displacement of sealant after immersion and stretching

表 8 冻融循环最大拉力

Table 8 Maximum tensile strength during freeze-thaw cycles

	样本							
	A	B	C	D	E	F	G	H
第 1 次循环/N	299	282	213	167	861	193	551	309
第 2 次循环/N	246	157	206	151	629	190	452	239
第 3 次循环/N	148	145	144	148	569	128	284	221

胶拉力与位移曲线如图 11 所示。从试验结果可知,经过冻融循环作用的 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶的拉力变化曲线与未经过冻融循环的变化曲线存在着较大差异。从图 11 中的每组曲线可以看出,随着冻融循环次数的增加,各个样本的拉力均呈现出显著下降趋势,尤其在第 1 次循环中拉力峰

值最高,而在第2次、第3次循环中拉力显著减小,力学性能明显下降。所有样本的位移在第一次循环后表现出较为明显的线性增长趋势,然而随着冻融循环次数的增加,位移增长的斜率有所减缓,尤其在第3次循环时,位移增加幅度较小,

说明灌缝胶的延展性和抗拉伸能力在多次冻融作用后明显下降。图 11 中的变化趋势表明,冻融循环作用下,灌缝胶内部的 SBS 改性剂及橡胶粉发生了结构破坏。随着冻融次数的增加,灌缝胶的网状结构逐渐被破坏,导致其拉力和位移特性发

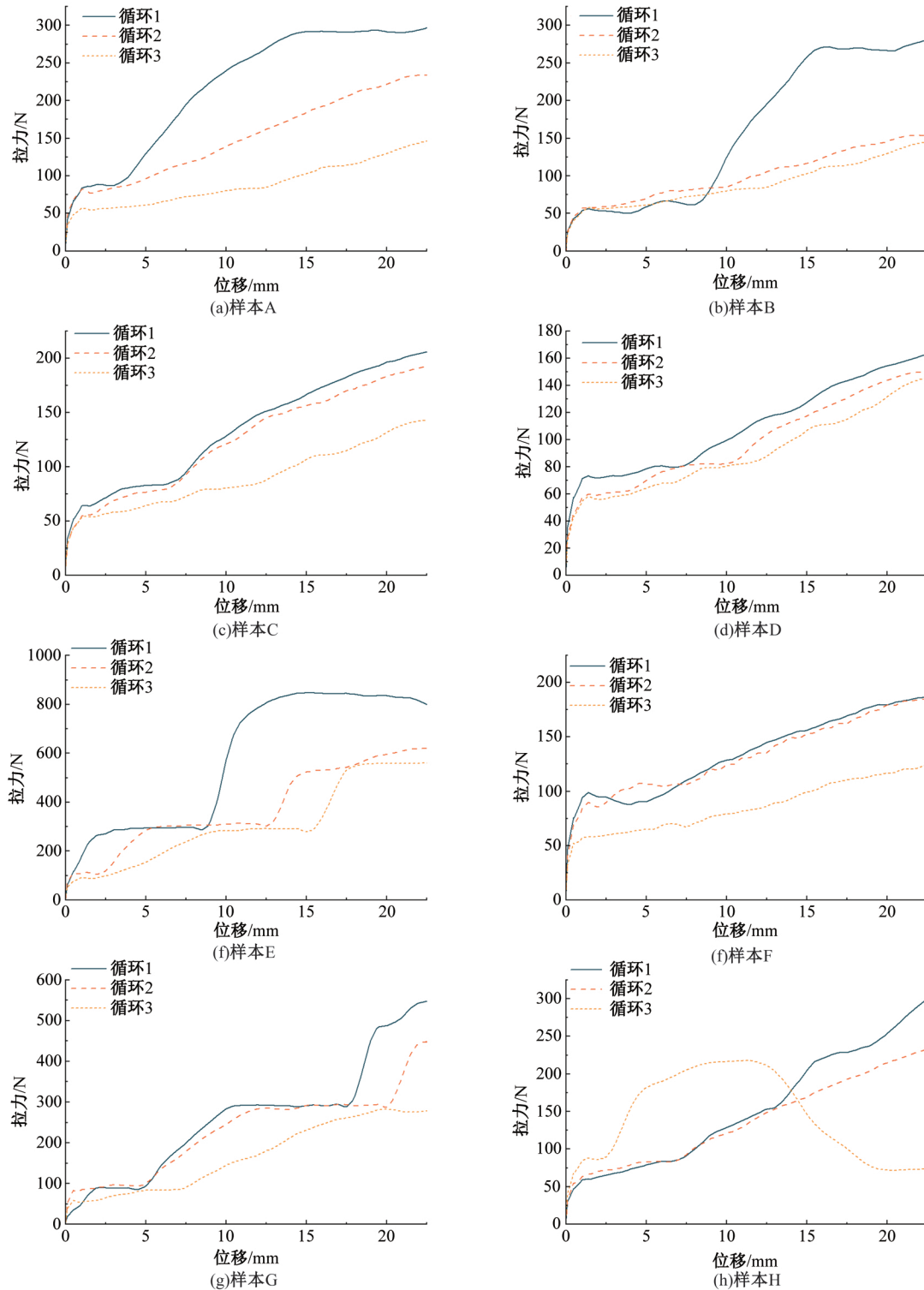


图 11 冻融循环作用下各灌缝胶拉力与位移的关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between tensile force and displacement of each sealant under freeze-thaw cycles

生变化。样本 H 在进行第 3 次冻融循环时,拉力位移曲线与第 1、第 2 次循环显著不同,通过样本 H 的外观破坏可知,如图 12 所示,其原因是黏结失效造成的。

鉴于此,将冻融循环后的最小拉力作为新增评价指标,对于 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶,以 0.03 MPa 作为判别值;对于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌缝胶,以 0.025 MPa 作为判别值。若满足,则越大越好。

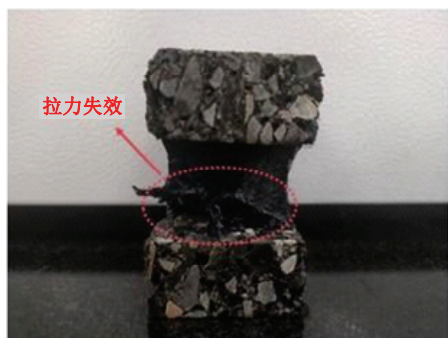


图 12 样本 H 破坏图片

Fig. 12 Damaged photo of sample H

3 评价指标体系

3.1 评价指标

对于灌缝胶指标的综合评价,综合试验分析结果,本文考虑灌缝胶在满足原有规范基础上,以长短期老化后的锥入度比、软化点差值、长期老化后的压缩弹性恢复率比、长短期老化后的压缩弹性恢复率、低温拉应力、冻融循环拉应力、灌入深度和 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黏度等指标来构建评价指标体系。在综合比较了主成分分析、TOPSIS、模糊综合评判、熵值等方法后,选择熵权-TOPSIS 综合评价方法进行指标因素的赋权。

3.2 评价方法

3.2.1 熵权法

熵权法是一种客观赋权方法,能够基于各指标的信息熵来确定权重,避免人为因素对赋权过程的主观干扰。熵权法的具体应用步骤如下:

(1)归一化决策矩阵。为消除不同指标单位和量纲的差异,先对效益类和成本类指标进行归一化处理。对于效益类指标(如压缩弹性恢复率、锥入度比、低温拉应力等),采用以下公式进行归一化处理:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (6)$$

对于成本类指标(如软化点差值),采用以下

公式进行标准化处理:

$$x_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (7)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本在第 j 个指标上的原始评分; $\max x_{ij}$ 为 j 的替代值的最大值; $\min x_{ij}$ 为 j 的替代值的最小值。

(2)计算第 i 个方案对第 j 个指数的贡献。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^s}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^r} \quad (8)$$

式中: p_{ij} 为 j 指数的第 i 个替代方案的贡献指数。

(3)对第 j 个索引的熵值 e_{ij} 进行计算。

$$e_{ij} = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (9)$$

式中:常数 k 一般取 $k = 1/\ln n$,这样可以确保 $0 < e_{ij} < 1$ 。

(4)各指标权重的系数由式(10)(11)进行确定。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (10)$$

$$g_j = 1 - e_j \quad (11)$$

式中: g_j 为各方案对 j 指数的贡献程度。

3.2.2 TOPSIS 法

对于 TOPSIS 的运用应该遵循以下步骤。将相应的权重与矩阵 B 相乘,得到加权归一化后的决策矩阵 B ,如(12)所示:

$$b_{ij} = w_j \cdot x_{ij}^i \quad (12)$$

确定正理想解 A_j^+ 和负理想解 A_j^- 如下:

$$A_j^+ = \{\max b_{ij}\}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

$$A_j^- = \{\min b_{ij}\}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

定义正理想解与负理想解的最远距离:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_j^+ - b_{ij})^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_j^- - b_{ij})^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

计算正理想解与每个备选方案的相对接近程度:

$$\delta_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ - d_i^-} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

依据相对的接近程度对其进行排序,最佳的

方案相较之下具有较高的 δ_i 值,其更接近于正理想解决方案。

3.3 评价体系构建

采用长短期老化后的锥入度比、软化点差值、长期老化后的压缩弹性恢复率之比、低温拉应力、190℃黏度、灌入深度、冻融循环拉应力作为评价指标构建灌缝胶综合评价体系,计算所得各指标权重如表9所示。

表 9 指标权重计算结果

Table 9 Calculation results of indicator weights

指标项	信息熵值 e	信息效用值 d	权重/%
短期老化后的压缩弹性恢复率/%	0.601	0.399	19.295
低温拉伸拉应力/N	0.916	0.084	4.084
长期老化锥入度比/%	0.773	0.227	10.986
冻融循环拉应力/N	0.603	0.397	19.238
压缩弹性恢复率比/%	0.871	0.129	6.223
短期老化锥入度比/%	0.913	0.087	4.219
灌入深度/mm	0.77	0.23	11.131
长期老化后压缩弹性恢复率/%	0.775	0.225	10.889
软化点差值/℃	0.883	0.117	5.652
190℃黏度/(Pa·s)	0.829	0.171	8.284

从表9数据可以看出,短期老化后的压缩弹性恢复率和冻融循环拉应力这两个指标的权重最高,约为19%,这反映了两个指标在评价灌缝胶性能时的重要性,对于材料的长期使用具有更高的参考价值。相比之下,低温拉伸拉应力和短期老化锥入度比权重则约为4%,指标权重较小。由试验结果可知,构建的指标体系可全面反映灌缝胶的性能。其中间值即正、负理想解,评价指标的最优解或最劣解如表10所示。

3.4 评价结果分析

将依据本文提出的评价体系的评价结果与现行评价方法的评价结果进行比较,结果如表11所示。

正理想解($D+$)是样本对象与最优解的距离,负理想解($D-$)则代表样本对象与最劣解之间的距离,而综合得分指数是基于这两个距离值之间计算得出,反映了样本对象与最优解的接近程度。

由表11可知,样本E的正理想解距离最短,负理想解距离最大,因此,综合得分最高,是所有样本对象中的性能最优样本。样本F正理想解距离最长,负理想解距离最短,综合得分指数最低,属于劣质样本。采用现行规范的评价方法只能判

表 10 中间值

Table 10 Intermediate values

指标项	正理想解	负理想解
短期老化后的压缩弹性恢复率/%	1	0
低温拉伸拉应力/N	1	0
长期老化锥入度比/%	1	0
冻融循环拉应力/N	1	0
压缩弹性恢复率之比/%	1	0
短期老化锥入度比/%	1	0
灌入深度/mm	1	0
长期老化后的压缩弹性恢复率/%	1	0
软化点差值/℃	1	0
190℃黏度/(Pa·s)	1	0
短期老化后的压缩弹性恢复率/%	1	0
低温拉伸拉应力/N	1	0
长期老化锥入度比/%	1	0
冻融循环拉应力/N	1	0

表 11 评价结果对比

Table 11 Comparison of evaluation results

样 本	正理想解距 离($D+$)	负理想解距 离($D-$)	综合得分 指数	排 序	原有 评价	排 序
A	0.671 152 25	0.477 917 18	0.415 916 60	3	合格	无
B	0.744 394 00	0.483 968 60	0.393 994 90	6	合格	无
C	0.751 896 15	0.517 854 54	0.407 839 54	5	合格	无
D	0.734 016 09	0.537 363 94	0.422 661 93	2	合格	无
E	0.514 680 20	0.634 990 57	0.493 595 81	1	合格	无
F	0.820 061 62	0.393 166 36	0.324 066 35	8	合格	无
G	0.750 362 86	0.529 487 34	0.413 710 40	4	合格	无
H	0.720 010 99	0.417 206 26	0.366 865 92	7	合格	无

断样本合格与否,并不能判断各样本性能优劣。而采用本研究提出的熵权-TOPSIS评价方法则判断测试样本的优劣。对于不同使用温度条件下的排名,−30℃灌缝胶排名顺序为D>A>C>B,−20℃灌缝胶排名顺序为E>G>H>F。可见,基于熵权-TOPSIS的评价体系具有一定的优越性。

4 结 论

(1)灌缝胶长短期老化性能主要以锥入度之比、软化点差值以及压缩弹性恢复率之比作为评价指标。试验结果表明:较大的锥入度之比、较小的软化点差值以及较大的压缩弹性恢复率之比表示灌缝胶具有较好的热老化性能。根据试验结果对锥入度比、软化点差值等指标进行了分类定级,对于短期老化锥入度比以90%为界限值,长期老化锥入度比以50%为界限值,短期老化后压缩弹

性恢复率应不小于 30%, 长期老化后压缩弹性恢复率之比以 20% 为界限值, 作为评价季冻区沥青路面灌缝胶工作性能的评价指标最为适宜。

(2) 由对灌缝胶样本的试验测试结果可知, 加热型灌缝胶的灌入黏度、灌入深度亦是不可忽视的重要因素, 试验结果表明, 评价灌缝胶黏度时应以 190 °C 时的 1~3 Pa·s 作为控制指标, 灌入深度应不小于 5 cm, 浸水后灌缝胶的低温拉伸指标应控制在 $\delta_{\min}(-30\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 0.06\text{ MPa}$ 和 $\delta_{\min}(-20\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 0.03\text{ MPa}$, 而冻融循环后的灌缝胶黏附力应以 $\delta_{\min}(-30\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 0.03\text{ MPa}$ 和 $\delta_{\min}(-20\text{ }^{\circ}\text{C}) \geq 0.025\text{ MPa}$ 作为控制指标。

(3) 采用熵权-TOPSIS 法构建了新的季冻区沥青路面灌缝胶工作性能评价体系, 并依据试验结果对新增评价指标和沿用的评价指标进行了权重计算。通过对 -30 °C 和 -20 °C 的灌缝胶样本进行评价与比较, 熵权-TOPSIS 不仅可以判断样本合格与否, 还可以根据各个指标的评价结果, 全面综合地判断样本的优劣。其中, 长短期的使用性能评价是对现行规范的有效补充。

参考文献:

- [1] 许正森, 雷相达, 管海燕. 多尺度局部特征增强 Transformer 道路裂缝检测模型[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(4): 1019-1028.
Xu Zheng-sen, Lei Xiang-da, Guan Hai-yan. Multi-scale local feature enhanced transformer network for pavement crack detection[J]. Journal of Image and Graphics, 2023, 28(4): 1019-1028.
- [2] 陈嘉锐, 崔得龙, 邱泽环, 等. 基于 YOLOv5s 模型的新型道路裂缝检测系统[J]. 现代电子技术, 2023, 46(13): 62-66.
Chen Jia-rui, Cui De-long, Qiu Ze-huan, et al. A new road crack detection system based on YOLOv5s model[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(13): 62-66.
- [3] 逢蕴泽. SBS/CNTs 改性沥青灌缝胶的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2023.
Pang Yun-ze. Investigation on the preparation and properties of SBS/CNTs modified asphalt sealant [D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2023.
- [4] 李艳博. 适用于甘肃省典型气候环境的沥青路面灌缝胶研制与应用[D]. 兰州: 兰州交通大学土木工程学院, 2017.
Li Yan-bo. Preparation and application of asphalt pavement's sealants and fillers for the typical climate of gansu province[D]. Lanzhou: School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [5] 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.
Qin Jin-shun, Wang Zhen-jun, 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.
- [6] BS EN 14188-1:2004. Hot applied joint sealants[S].
- [7] JT/T 740—2015. 路面加热型密封胶[S].
- [8] Soliman H, Shalaby A, Kavanagh L. Performance evaluation of joint and crack sealants in cold climates using DSR and BBR tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(7): 470-477.
- [9] Al-Qadi I L, Yang W, Fini E, et al. Towards performance-based selection guidelines for roadway crack sealants[C]//International ISAP Symposium on Asphalt Pavements Environment, Zurich, Switzerland, 2008: 161-172.
- [10] 薛恒潇. 灌缝胶拉伸设备改进及低温性能评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2013.
Xue Heng-xiao. Research on crack sealant stretching tester improvement and performance evaluation in low temperature[D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2014.
- [11] 董岩岩. 基于弱边界层理论的灌缝胶失效机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2017.
Dong Yan-yan. The failure mechanism of crack sealant based on the weak boundary layer theory[D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] 刘忠骥. 灌缝胶失效判别方法及自愈性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2017.
Liu Zhong-ji. The failure evaluation and self-healing investigation of crack sealant[D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] Poulikakos L D, Falchetto A C, Wang D, et al. Impact of asphalt aging temperature on chemo-mechanics[J]. RSC Advances, 2019, 9(21): 11602-11613.
- [14] Wang S Q, Jia Y S, Li Z R, et al. Evaluating the ef-

- fect of aging on adhesion for hot-poured road sealants through a modified adhesion test[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 347: No. 128576.
- [15] Masson J F, Collins P, Bundalo-Perc S, et al. Early thermodegradation of bituminous sealants resulting from improper installation: field study[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, 1991(1): 119-123.
- [16] Masson J F, Woods J R, Collins P, et al. Accelerated aging of bituminous sealants: small kettle aging[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2008, 9(5): 365-371.
- [17] Masson J F, Lacasse M A. Effect of hot-air lance on crack sealant adhesion[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1999, 125(4): 357-363.
- [18] ASTM D5329-20. Standard test methods for sealants and fillers, hot-applied, for joints and cracks in asphalt pavements and portland cement concrete pavements[S].
- [19] Wang S Q, Gao Y, Jia Y S, et al. Development of a modified bond test for hot applied crack sealants by using hot-cold cycles[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2023, 24(8): 1-21.
- [20] Wang S Q, Li Y S, Wei Z Y, 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(1): No. 04024003.
- [21] Al-Qadi I L, Masson J F, Yang S H, et al. Development of performance-based guidelines for selection of bituminous-based hot-poured pavement crack sealant: an executive summary repor[R]. Virginia: Virginia Transportation Research Council, 2009.
- [22] ASTM D2872-22. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder[S].