

滨海地区桥面铺装速溶高黏沥青混合料性能研究

于吉明¹, 么子成², 徐强³, 王超⁴, 张龙⁵, 马世东⁶

(1. 青岛市公路事业发展中心, 山东 青岛 266075; 2. 青岛市交通规划设计院有限公司, 山东 青岛 266075;

3. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 4. 青岛市交通运输局, 山东 青岛 260000;

5. 中交一公局集团有限公司, 山东 青岛 266299; 6. 德州市德城区交通运输局, 山东 德州, 253000)

摘要: 为研究速溶高黏改性沥青混合料在滨海地区桥面铺装中的路用性能, 通过制备速溶高黏改性沥青和 SMA (asphalt mastic stone) 沥青混合料, 对比 SBS (styrenic block copolymers) 改性沥青, 进行路用性能和耐久性检验。结果表明: 速溶高黏改性沥青混合料的高温动稳定度更大, 抗蠕变能力更强; 低温弯曲破坏应变更高, 弯曲劲度模量更低, 断裂能和抗裂指数更大; 在纯水冻融劈裂、盐水浸泡和盐水冻融循环条件下, 劈裂强度损失更小。综上所述, 速溶高黏改性沥青及其 SMA-13 混合料在高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和抗盐蚀性方面具有显著优势, 为滨海地区桥面铺装材料的选择提供了科学依据。

关键词: 桥面铺装; 速溶高黏改性沥青; 高黏改性沥青混合料; 路用性能; 抗盐蚀性能

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0056-07

Study on Performance of Instant High-Viscosity Asphalt Mixture for Bridge Deck Pavement in Coastal Area

YU Jiming¹, YAO Zicheng², XU Qiang³, WANG Chao⁴, ZHANG Long⁵, MA Shidong⁶

(1. Qingdao Highway Development Center, Qingdao 266075, China; 2. Qingdao Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd.,

Qingdao 266075, China; 3. School of Traffic Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 4. Qingdao

Transportation Bureau, Qingdao 260000, China; 5. China First Highway Engineering Group Co., Ltd., Qingdao 266299, China;

6. Decheng Transportation Bureau, Dezhou 253000, China)

Abstract: To study the pavement performance of instant high-viscosity modified asphalt mixtures for bridge deck pavements in coastal areas, by preparing the instant high-viscosity modified asphalt mixtures and asphalt mastic stone (SMA) and comparing the styrenic block copolymers (SBS) modified asphalt, the pavement performances and durability are verified. The results demonstrate that the high-temperature dynamic stability of the instant high-viscosity modified asphalt mixture is greater, its resistance to creep deformation is stronger, its low-temperature bending failure strain is higher, its bending stiffness modulus is lower, and its fracture energy and crack resistance indexes are larger. Under the conditions of pure water freeze-thaw splitting, saltwater immersion and saltwater freeze-thaw cycle, the splitting strength loss is smaller. In conclusion, the instant high-viscosity modified asphalt and its SMA-13 mixture have the obvious advantages in terms of high-temperature stability, low-temperature crack resistance, moisture stability and salt erosion resistance, providing a scientific basis for the selection of bridge deck pavement materials in coastal areas.

Keywords: bridge deck pavement; instant high-viscosity modified asphalt; high-viscosity modified asphalt mixture; pavement performance; salt erosion resistance

0 引言

桥面的耐久性、行车安全性、使用舒适性^[1]与铺装材料性能息息相关。与普通沥青路面相比, 桥面铺装层在受力模式上存在显著差异^[2-4], 普通改性沥

青混合料难以满足其复杂要求^[5], 从而导致车辙、推移、拥包及开裂等早期病害^[6]。

高黏改性沥青能够在较大温度波动范围内保持黏度、韧性和黏结性能的稳定, 适用于复杂气候条件下的使用环境, 因而受到学者的广泛关注。邢明亮等^[7]分析了多种高黏改性沥青的作用机理, 并比较了改性剂种类与掺量等对关键技术性能的影响; 马峰等^[8]通过针入度、延度、弯曲梁流变试验及 Burgers 模型拟合, 证实增黏剂可显著提升沥青的低温性能;

收稿日期: 2025-10-27

作者简介: 于吉明(1973—), 男, 学士, 高级工程师, 从事公路工程研究工作。

通信作者: 徐强(1986—), 男, 硕士, 实验师, 从事道路工程研究工作。电子信箱: 13024@sdjzu.edu.cn

周志刚等^[9]采用SBS、橡胶粉和高黏复合剂复配制备高黏改性沥青,研究了三者对改性沥青技术指标的影响;Geng等^[10]基于高黏改性沥青设计了SMA混合料,通过路用性能、疲劳特性及动态模量测试,证明其用于钢桥面铺装具有多方面优势;Luo等^[11]从多方面路用性能及施工和易性出发,系统分析不同黏度沥青的混合料,同样得出高黏改性沥青在桥面铺装中表现优异的结论;吴杰等^[12]以60℃动力黏度高于70万Pa·s的高黏改性沥青作为桥面过渡层,研究了不同油石比、级配和厚度条件下的服役性能规律,结果表明该材料在动态荷载下能有效抑制裂缝反射与扩展,显著延长铺装层的抗疲劳寿命;丁子豪等^[13]对比4种高性能改性沥青及其混合料,推荐将高黏高弹改性沥青作为重载交通下钢桥面磨损层的胶结料;李东旭等^[14]对比了高黏沥青和SBS改性沥青混合料的路用性能,确认高黏改性沥青在钢桥面铺装中性能最优。

在海雾频发、含盐高湿的滨海地区,海水盐分随水蒸气易渗入铺装层,长期积累可能对沥青材料造成损害,但目前相关研究尚不充分。此外,现有高黏改性沥青多依赖多组分复配或对SBS改性沥青进行二次改性,存在工艺复杂、效率低、成本高以及成品技术指标控制难度大等问题。与之相比,速溶高黏改性沥青通过引入低熔点高聚物改性剂与生物基环保稳定剂,在保持优异路用性能的同时,显著缩短了改性剂的剪切与溶化时间,并提高了存储稳定性^[15-16]。

基于上述背景,本研究制备了速溶高黏改性沥青,并设计了SMA-13沥青混合料,从沥青技术指标、混合料的高低温性能和耐久性等方面系统对比SBS改性沥青,以期为该材料在滨海地区桥面铺装中的应用提供参考。

1 材料与试验方法

1.1 速溶高黏改性沥青

速溶高黏改性剂掺量为基质沥青质量的12%(内掺),将其添加到180℃的70号沥青中,搅拌均匀后以4 000 r/min的速率剪切不少于1 h至改性剂完全溶于沥青;再次转为搅拌模式,加入4‰(内掺)生物基稳定剂,将沥青维持在温度180℃±5℃范围内,稳定发育3~4 h。按照标准试验方法^[17]对技术性能进行检测,对比SBS改性沥青结果,将其列入表1。

由表1可知:速溶高黏改性沥青的软化点比SBS提高了13.2℃,60℃动力黏度约为SBS的25.4倍;

表1 沥青材料技术性能

项目	速溶高黏改性沥青	SBS改性沥青
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	38.5	49.5
延度(5 cm/min,5℃)/cm	35.6	28.9
软化点(R&B)/℃	89.5	76.3
黏韧性(30℃)/(N·m)	31.5	25.1
韧性(30℃)/(N·m)	22.9	18.4
60℃动力黏度/(Pa·s)	248 832	9 808
135℃布氏黏度/(Pa·s)	7.3	1.9
175℃布氏黏度/(Pa·s)	1.308	0.378
贮存稳定性离析(48 h软化点差)/℃	1.2	1.3
弹性恢复(25℃)/%	97.2	90.0

5℃低温延性提高了23%,黏韧性和韧性指标分别提高了25.5%和24.5%。这表明速溶高黏改性沥青在高温性能、低温延性和黏韧性等方面均有显著改善。此外,其在弹性恢复变形和贮存稳定性方面也保持在较高水平。

1.2 高黏改性沥青混合料设计

按照SMA-13矿质混合料级配范围设计矿料合成级配,结果见图1。其中粗、细集料和填料均符合现行技术规范^[18]的技术要求。

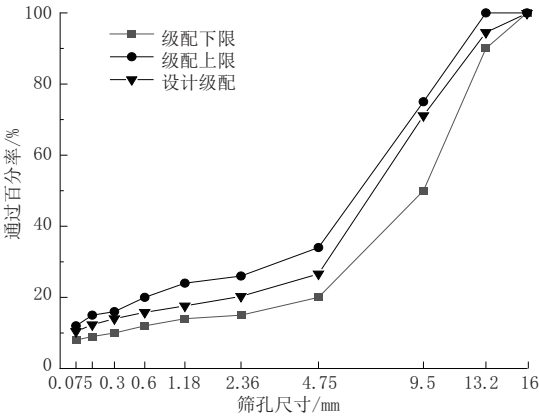


图1 SMA-13矿料级配曲线

分别采用高黏沥青和SBS改性沥青制作标准马歇尔试件,进行体积参数、飞散试验质量损失和析漏试验质量损失等指标检验,确定最佳沥青用量为6.3%,结果见表2。

由表2可知,速溶高黏改性沥青SMA-13飞散质量损失显著小于SBS改性沥青SMA-13,其稳定度也明显较高,表明高黏改性沥青具有更强的黏结力和内聚力。

1.3 高黏改性沥青混合料性能研究

1.3.1 高温性能

采用车辙试验和汉堡车辙试验评价高温稳定

表2 沥青混合料技术指标

检测指标	速溶高黏 SMA-13	SBS 改性 SMA-13	设计要求
毛体积相对密度	2.461	2.467	—
理论最大相对密度	2.565 4	2.564 5	—
空隙率/%	4.0	3.8	3.0~4.5
矿料间隙率/%	17.4	17.1	≥17
沥青饱和度/%	77.0	77.8	75~85
稳定度/kN	23.4	13.2	≥6
流值/(0.1 mm)	50.8	32.4	—
飞散试验混合料损失/%	2.8	5.4	≤15
析漏试验结合料损失/%	0.01	0.02	≤0.1

性。车辙试验轮压为 0.7 MPa,测试 50 ℃、60 ℃和 70 ℃下的动稳定度 DS。汉堡车辙试验采用直径为 150 mm、高度为 62 mm±2 mm 的旋转压实试件。为更好地模拟沥青路面在初期服役的实际状态,并加速验证破坏过程,汉堡车辙试件空隙率控制为 7%,选用钢轮加载,宽度 47 mm、单轮荷载大小 705 N,行走速度为 52 次/min,试验温度选择 40 ℃、50 ℃和 60 ℃。运行至试件变形深度达到 12.5 mm 或加载次数达 20 000 次结束^[16]。通过采集得到的变形与加载次数的关系,判定是否出现剥落点 SIP (Stripping Inflection Point) 并计算车辙变形速率。

1.3.2 低温抗裂性

采用低温弯曲试验和 IDEAL-CT 试验评价速溶高黏改性沥青 SMA-13 和 SBS 改性沥青 SMA-13 的低温抗裂性。

低温弯曲试验采用标准方法^[17]中的 T0715 进行试件制备、养护和加载,测定小梁试件的-10 ℃弯曲破坏应变。

IDEAL-CT 试验采用 φ150 mm×62 mm 的圆柱形试件,通过劈裂夹具加载,按 50 mm/min 的速率加载。自动记录加载时间、荷载大小、位移变化等数据,在试件破坏后荷载降至 100 N 以下时停止,得到最大位移 X_T 、断裂能 G_f 、裂缝扩展速度 $|m_{75}|$ 、抗裂指数 I_{CT} 。试验温度选择-5 ℃和-10 ℃。

1.3.3 水稳定性

按照标准冻融劈裂试验要求^[17]进行试件制作和养护,测得冻融试件和未冻融试件的劈裂强度,计算两种混合料各自的冻融劈裂强度比 TSR。

1.3.4 抗盐蚀性

为考察高黏沥青混合料的抗盐蚀性能,分别以浸泡盐蚀试验和冻融循环盐蚀试验进行评价。

浸泡盐蚀试验采用 φ150 mm×62 mm 的圆柱形试

件,空隙率同样控制为 7%,分别浸泡在 0% (纯净水)和 3%、6% 和 9% 氯化钠溶液中,研究不同浸泡龄期下两种沥青混合料的劈裂强度变化。

选择接近我国渤海、黄海海水盐度的 3% 作为冻融循环盐蚀试验的试验浓度。试件在氯化钠溶液中真空饱水后,置于-18 ℃冷冻 16 h,取出后置于 60 ℃水浴融化 8 h 作为一个冻融循环周期,若干循环结束后浸入 25 ℃水中 2 h,进行劈裂试验。对照组仅在 2 h 的 25 ℃水浴浸泡后进行劈裂试验,计算劈裂强度比 TSR。

2 结果与讨论

2.1 高温性能

2.1.1 车辙试验结果分析

沥青混合料的动稳定度结果见图 2。

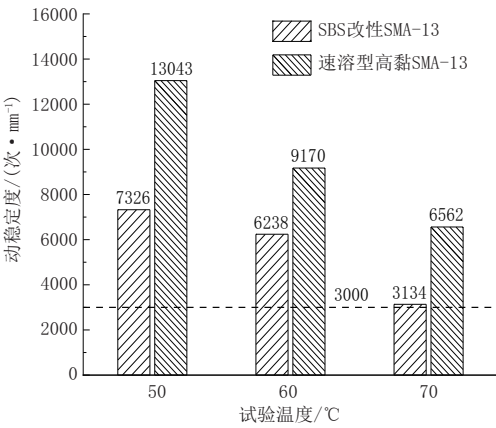


图2 不同沥青类型和温度的车辙试验结果图

从图 2 可以看出,标准温度 (60 ℃) 下两者的动稳定度均显著高于改性沥青混合料最小要求 3 000 次/mm。环境温度升高,动稳定度均呈现下降的趋势。相同温度下,高黏改性 SMA-13 动稳定度显著高于 SBS 改性沥青。特别是在 70 ℃下,SBS 改性沥青 SMA-13 动稳定度已经低至 3 134 次/mm,而速溶高黏改性沥青 SMA-13 沥青混合料仍可达到 6 562 次/mm,是前者的 2.09 倍。这表明速溶高黏改性 SMA 材料在抵抗超高温环境下的桥面车辙方面具有显著的优势。

2.1.2 汉堡试验结果分析

汉堡车辙试验得到两种沥青混合料汉堡车辙深度随加载次数变化和总变形大小,结果见图 3 和图 4。由图可知,两种沥青混合料在 3 种温度条件下均未出现剥落点 SIP,表明其在抵抗水剥离作用方面效果良好。40 ℃升至 50 ℃温度范围内,两种沥青混合料的车辙深度发展速度变化不大,表明在该温度范

围抗变形能力较强;SBS 改性沥青混合料车辙深度增长速度显著快于速溶高黏改性沥青混合料,说明后者抗车辙性能更优。当试验温度升至 60 ℃时,两种沥青混合料的车辙深度发展速度均显著增大,但速溶高黏改性沥青 SMA-13 车辙深度仍显著小于 SBS 改性沥青 SMA-13。

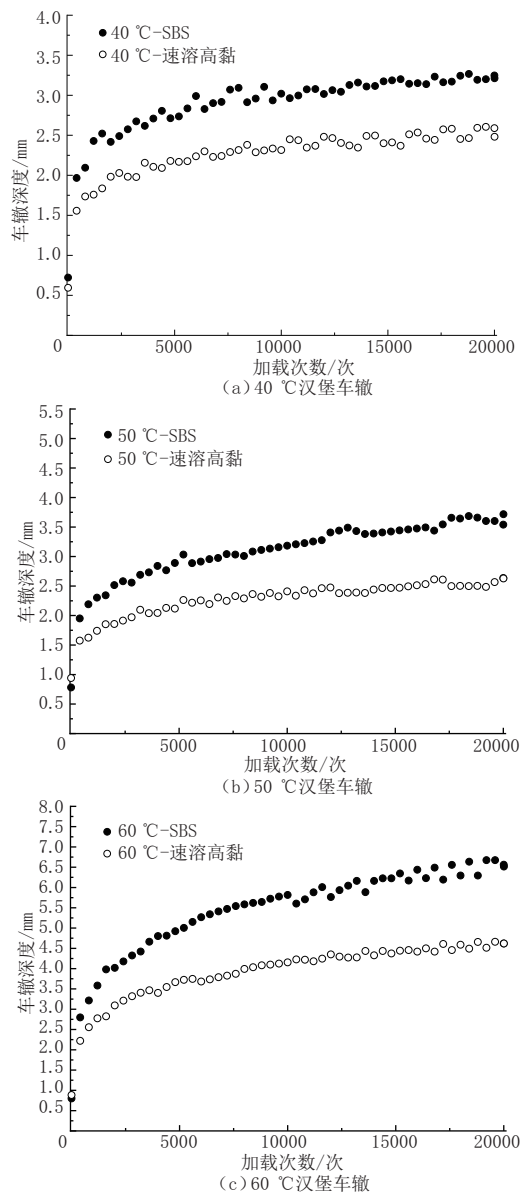


图3 不同沥青类型 SMA-13 混合料汉堡车辙深度结果图

选取上述曲线线性变化阶段斜率作为蠕变速率 CS,表示车辙深度的增长速率;取其倒数作为抗蠕变速率 C_r ,表征沥青混合料抵抗车辙变形的能力;车辙深度与试验时长的比值作为总变形速率 D_r ,结果见表3。

表3中,温度从 40 ℃升高至 60 ℃,SBS 改性沥青 SMA-13 的 CS 从 3.19×10^{-5} mm/次增加到 9.64×10^{-5} mm/次,相应的 C_r 从 31 379 次/mm 降低到了 10 374 次/mm,表

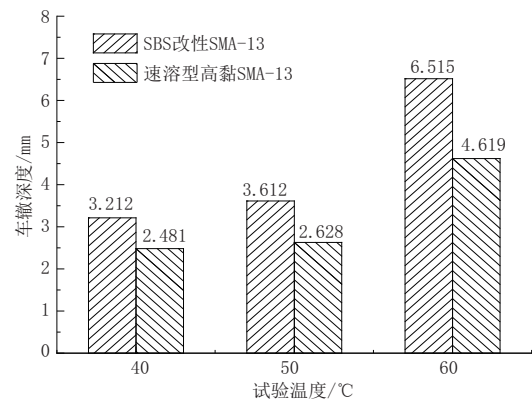


图4 汉堡车辙试验总变形量结果图

表3 汉堡车辙试验指标结果

试验温度/℃	沥青类型	蠕变速率 CS/ (mm·次 ⁻¹)	抗蠕变速率 C_r / (次·mm ⁻¹)	总变形速率 D_r / (mm·h ⁻¹)
40 ℃	SBS 改性沥青	3.19×10^{-5}	31 379	0.501
	速溶高黏沥青	2.21×10^{-5}	45 289	0.387
50 ℃	SBS 改性沥青	3.72×10^{-5}	26 879	0.563
	速溶高黏沥青	2.49×10^{-5}	40 119	0.410
60 ℃	SBS 改性沥青	9.64×10^{-5}	10 374	1.016
	速溶高黏沥青	5.30×10^{-5}	18 868	0.721

明其在高温和水综合作用下抵抗变形的能力显著降低。相比之下,速溶高黏改性沥青 SMA-13 的 C_r 在 40 ℃、50 ℃和 60 ℃下分别为 SBS 改性沥青的 1.4 倍、1.5 倍和 1.8 倍,且 D_r 分别减少 23%、27% 和 29%,表明速溶高黏改性沥青能显著改善 SMA 沥青混合料的高温-水稳定性,尤其在 60 ℃下优势更加明显,更加适合高温多雨地区桥面铺装使用。

2.2 低温抗裂性

2.2.1 低温弯曲试验结果分析

两种沥青混合料的低温弯曲试验结果如图5所示。

从图5可以看出,速溶高黏改性沥青的 SMA-13 混合料的 R_b 为 17.55 MPa,达到了 SBS 改性沥青混合料的 1.63 倍,表明速溶高黏改性沥青混合料能承受温度或低温荷载带来的弯拉应力更大,从而显著减少或延缓低温裂缝的产生。变形能力方面,速溶高黏 SMA-13 的 ε_b 为 7 375 $\mu\varepsilon$,达到了 SBS 改性沥青 SMA-13 (3 282 $\mu\varepsilon$) 的 2.25 倍,表明前者在低温下容许的最大变形显著增大,能适应更大的低温收缩变形和变形速率。此外,其劲度模量也显著低于 SBS 改性沥青 SMA 混合料,表明其柔韧性显著提升,开裂损伤的扩展速率明显降低。因此,在低温抗裂性方面,速溶高黏改性沥青混合料优势显著,能够有效防止桥面铺装层在低温环境下的裂缝病害发生与发展。

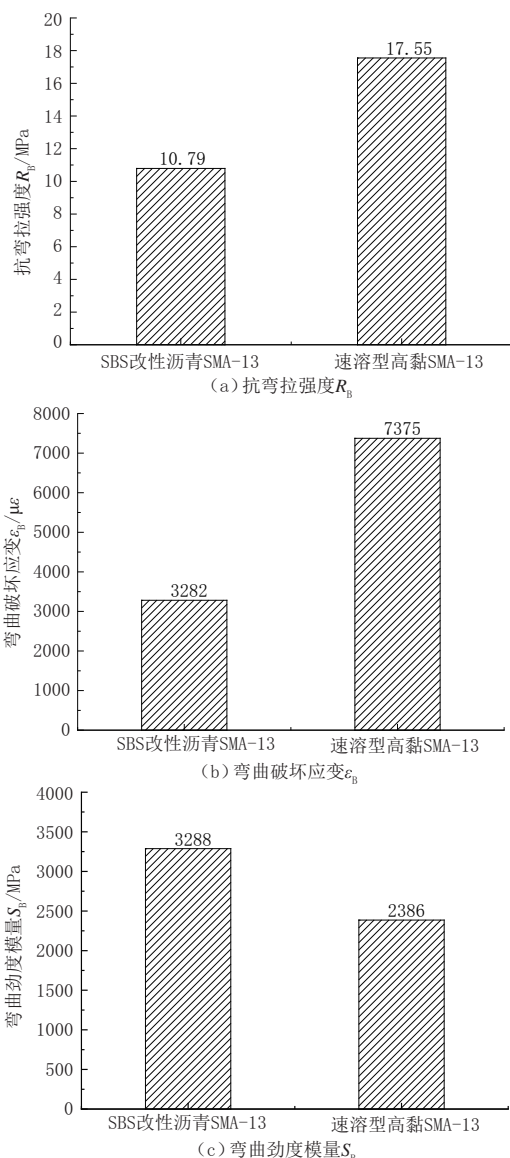


图5 低温弯曲破坏试验结果图

2.2.2 IDEAL-CT 试验结果分析

两种 SMA-13 沥青混合料 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 IDEAL-CT 试验曲线见图 6。

由图 6 可见,通过 IDEAL-CT 试验可以得到两种沥青混合料的荷载峰值位移 X_c ,其大小间接表征了试件从加载至发生劈裂破坏的时间。温度相同时,速溶高黏改性沥青混合料的峰值位移更大,表明其在低温环境下具有更好的抗裂性能,能够显著延缓裂缝的出现时间,降低桥面铺装层的早期开裂风险。

最大位移 X_f 代表沥青混合料总的变形能力;荷载-位移曲线、 X 轴围成的面积与试件破坏面面积的比值为断裂能 G_f ,反应了沥青混合料从受载开始到最终破坏全过程的抵抗能力,由式(1)表示为:

$$G_f = \frac{\int_0^{X_f} Pdl}{Dh} \quad (1)$$

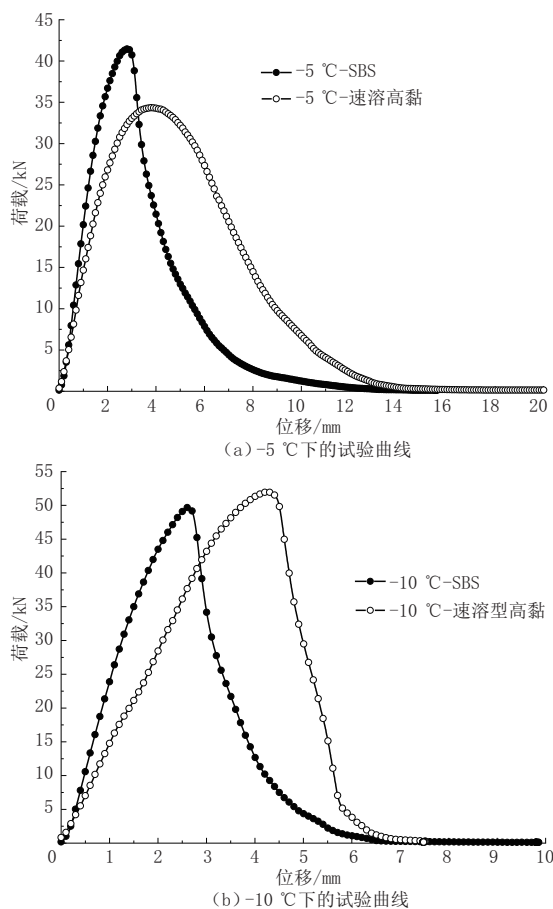


图6 IDEAL-CT 试验曲线图

式中: P 为荷载; l 为位移; D 为试件直径; h 为试件高度。

$|m_{75}|$ 是以峰值后最大荷载的 85% 和 65% 两点计算斜率绝对值,代表了裂缝的扩展速度,由式(2)表示为:

$$|m_{75}| = \left| \frac{P_{85} - P_{65}}{l_{85} - l_{65}} \right| \quad (2)$$

式中: l_{85} 和 l_{65} 分别为 P_{85} 、 P_{65} 对应的位移。

通过 G_f 和 $|m_{75}|$ 进一步得出抗裂指数 I_{CT} ,由式(3)表示为:

$$I_{CT} = \frac{h}{62} \frac{l_{75}}{D} \frac{G_f}{|m_{75}|} \quad (3)$$

式中: l_{75} 为荷载下降到峰值 75% 对应的位移。

将 X_f 、 G_f 、 $|m_{75}|$ 和 I_{CT} 结果绘制成图(见图 7)。由图 7(a)、(b)可知,相比之下, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下最大位移 X_f 和断裂能 G_f 更低,表明沥青混合料在低温下更容易发生开裂。然而,在相同温度下,速溶高黏 SMA 沥青混合料的 X_f 和 G_f 始终显著高于 SBS 改性沥青 SMA 混合料, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 X_f 达到后者的 1.66 倍, G_f 达到后者的 1.74 倍,表明其抵抗开裂的能力更强。从图 7(c)则可以看出, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时裂缝扩展速度 $|m_{75}|$ 显著增加,但

速溶高黏改性沥青混合料仅为 SBS 改性沥青混合料的 14.3% 的 $|m_{75}|$, 这表明速溶高黏改性沥青混合料能有效减缓低温裂缝的扩展速率, 从而显著降低桥面铺装层裂缝的发展速度。图 7(d) 展示了抗裂指数

I_{CT} 结果, 该指标值越大, 表明综合抗裂性能越优。温度下降时, 两者的 I_{CT} 均显著下降, 但速溶高黏沥青的混合料 I_{CT} 始终更大, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下达到了后者的 23.4 倍, 进一步证明其在低温环境下的卓越抗裂性能。

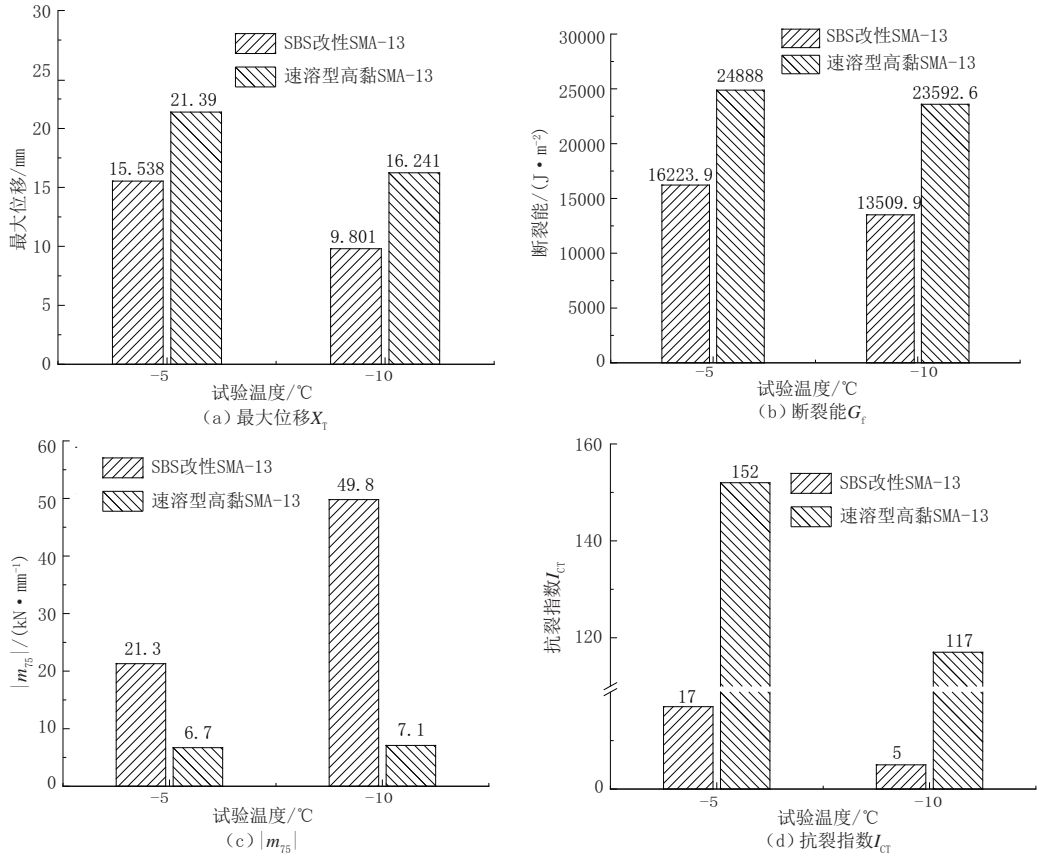


图 7 IDEAL-CT 试验结果对比图

2.3 水稳定性

冻融劈裂试验结果见图 8, 两种沥青混合料的 TSR 值都满足改性沥青混合料水稳定性的要求 ($\text{TSR} \geq 80\%$)。其中, 速溶高黏改性沥青混合料 TSR 高达 98.8%, 相比具有明显的抗水损坏优势, 表明速溶高黏改性沥青与集料之间黏结能力更强, 对于频繁处于复杂水环境的钢混组合梁桥桥面铺装工程, 能显著降低桥面出现松散、坑槽等病害的发生风险。

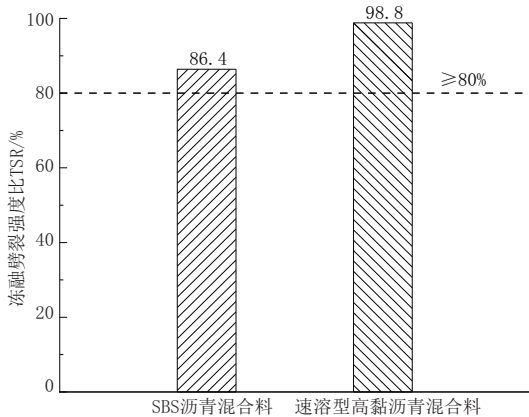


图 8 SMA-13 沥青混合料冻融劈裂强度比

2.4 抗盐蚀性

沥青混合料在盐水浸泡下劈裂强度随龄期的变化见图 9。劈裂强度均随浸泡龄期的延长呈下降趋势。0% 浓度盐水浸泡下, 两者的劈裂强度略有下降, 21 d 龄期时分别降至初始值的 98.4% 和 93.8%, 说明即使在纯水中长期浸泡仍会对劈裂强度产生一定影响。3%、6% 和 9% 盐水浓度下, 劈裂强度均在 7 d 龄期时出现显著降低。速溶高黏改性沥青混合料降至初始值的 96.3%, SBS 改性沥青混合料降至初始值的 92.8%; 7 d 至 21 d 龄期期间, 劈裂强度下降速度有所减缓; 浸泡 21 d 后, 速溶高黏改性沥青混合料降至初始值的 86.3%, 相比 SBS 改性沥青混合料高出 4 个百分点, 这表明盐水浓度越高, 沥青混合料劈裂强度下降越显著; 速溶高黏改性沥青混合料的残留劈裂强度始终大于 SBS 改性沥青混合料。

在 3% 盐水浓度条件下, 两种沥青混合料经 1 d、2 d 和 3 d 冻融循环后的残留劈裂强度比如图 10 所示。结果表明, 经历 1 个盐水冻融循环周期后, 沥青

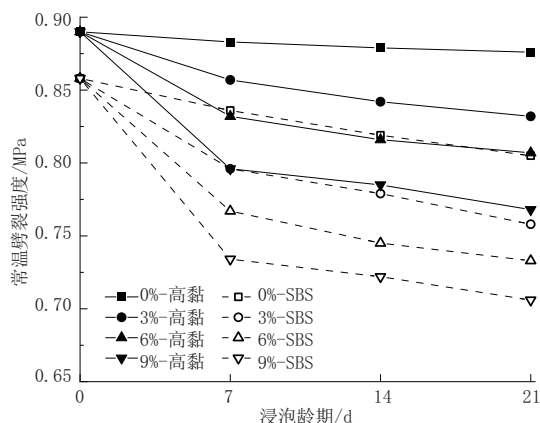


图9 不同龄期和盐水浓度下劈裂强度变化

混合料劈裂强度比显著低于纯水环境。随着循环次数的增加,两种沥青混合料的TSR均呈下降趋势,但速溶高黏改性沥青混合料始终较大,3个周期后TSR高出SBS改性沥青混合料6.5个百分点,且仍不低于80%。

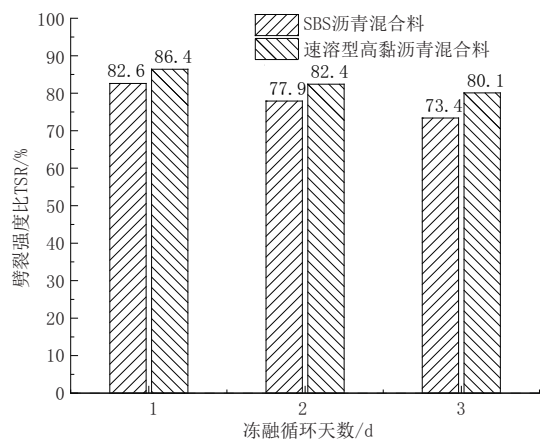


图10 不同冻融循环天数后劈裂强度变化图

综上所述,速溶高黏改性沥青混合料具有更强的抗盐蚀能力,可降低铺装层病害风险,延长桥梁使用寿命,更加适用于沿海地区的桥面铺装工程。

3 结论

(1)高温性能方面:速溶高黏改性沥青 SMA-13 混合料的动稳定度显著高于 SBS 改性沥青混合料,在 70℃ 时动稳定度为后者的 2.09 倍;汉堡车辙试验中,其抗蠕变速率显著优于 SBS 改性沥青混合料,尤其在 60℃ 高温条件下,抗车辙性能优势更加明显。

(2)低温抗裂性方面:速溶高黏改性沥青 SMA-13 混合料的抗弯拉强度显著高于 SBS 改性沥青混合料,弯曲破坏应变为后者的 2.25 倍,劲度模量更低,表现出更好的柔韧性和抗裂性能;IDEAL-CT 试验结果显示,速溶高黏改性沥青混合料的断裂能和抗裂

指数更大,裂缝扩展速度更低,可以有效减缓桥面铺装层裂缝病害的出现。

(3)水稳定性方面:速溶高黏改性沥青混合料的冻融劈裂强度比(TSR)达到 98.8%,显著高于 SBS 改性沥青混合料的 86.4%,表明其具有更强的抗水损坏能力。

(4)在盐水浸泡和冻融循环条件下,速溶高黏改性沥青混合料的劈裂强度损失更小,在滨海地区桥面铺装中可表现出更好的抗盐蚀性能。

参考文献:

- [1] 李娣,刘李君,李威,等.大跨径索承桥钢桥面铺装技术应用现状分析[J].北方交通,2024(10):1-4.
- [2] 张志强,樊振通,卢强.局部整平下桥面铺装各结构层力学响应分析[J].公路,2025,70(2):57-65.
- [3] Chen L, Zhao X, Qian Z, et al. Mechanical behavior of asphalt pavement on steel-concrete composite beam bridge under temperature-load coupling[J]. Construction & Building Materials, 2023(3): 403.
- [4] 宋扬.基于数值模拟的钢混组合梁桥高黏沥青铺装力学分析[D].济南:山东建筑大学,2023.
- [5] 王民,王明明,王滔,等.钢桥面沥青铺装磨耗层抗滑及耐磨性能分析[J].交通科学与工程,2024,40(6):34-41.
- [6] 赵明宇,李志强,焦理格,等.大跨径钢-混凝土组合结构桥梁桥面铺装材料的研究与应用[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(2):287-295.
- [7] 邢明亮,张心攀,赵曦,等.高黏改性沥青研究进展[J].应用化工,2023,52(5):1530-1536.
- [8] 马峰,祝崇鑫,傅珍,等.高黏复配改性沥青低温性能试验评价[J].广西大学学报(自然科学版),2023,48(1):30-39.
- [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.
- [10] Geng L T, Xu Q, Ren R B, et al. Performance research of high-viscosity asphalt mixture as deck-paving materials for steel bridges[J]. Road Materials & Pavement Design 2016, 18(1): 208-220.
- [11] Luo Y, Zhang K, Li P, et al. Performance evaluation of stone mastic asphalt mixture with different high viscosity modified asphalt based on laboratory tests[J]. Construction and Building Materials, 2019, 225(20): 214-222.
- [12] 吴杰,郑红,吴繁,等.富油型高黏高弹桥面铺装过渡层材料服役性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(2):320-325.
- [13] 丁子豪,倪富健,李松,等.钢桥面铺装常用改性沥青高温性能关键指标分析[J].建筑材料学报,2021,24(4):833-841.
- [14] 李东旭,江照伟,彭建,等.基于力学响应分析的钢桥面铺装结构与材料的一体化[J].科学技术与工程,2025,25(7):2974-2982.
- [15] 徐慧明.速溶高黏沥青及混合料性能研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
- [16] 马世东.大型钢-混组合梁桥桥面铺装用速溶型高黏沥青混合料的研究[D].济南:山东建筑大学,2023.
- [17] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [18] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].