

表活型温拌SBS改性沥青试验研究及性能评价

张阳光¹, 周义生¹, 俞喜兰², 黄迎春¹, 樊向阳²

(1. 江西省交投供应链有限公司, 江西 南昌 330013; 2. 江西省交投养护科技集团有限公司, 江西 南昌 330200)

摘要: 为研究表面活性型(表活型)温拌SBS改性沥青的性能特点, 探究其在道路工程温拌技术中的应用潜力, 采用沥青常规性能测试、动态剪切流变(DSR)、弯曲梁流变(BBR)、红外光谱分析(FTIR)、热重分析(TGA)等试验, 测试其常规性能、流变特性及热稳定性。结果表明, 相比SBS改性沥青, 表活型温拌SBS改性沥青的高温性能变化很小, 低温性能有所下降, 135℃布氏黏度降低8.94%; 加热会导致表活型温拌剂分解失重, 但其失重速度与加热条件及所处环境密切相关, 表活型温拌SBS改性沥青的低黏表现在受热48h后仍得到维持。研究证实, 表活型温拌SBS改性沥青具备良好应用潜力, 但应控制储存条件。

关键词: 道路工程; 温拌SBS改性沥青; 表面活性型温拌剂; 热稳定性; 动态剪切流变(DSR); 弯曲梁流变(BBR)

中图分类号: U414.01; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0086-04

Experimental Study and Performance Evaluation of Surface-Active Warm-Mixed SBS Modified Asphalt

ZHANG Yangguang¹, ZHOU Yisheng¹, YU Xilan², HUANG Yingchun¹, FAN Xiangyang²

(1. Jiangxi Communications Investment Supply Chain Co., Ltd., Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Communications Investment Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang 330200, China)

Abstract: To study the performance characteristics of surface-active warm-mixed SBS modified asphalt and explore its potential application in road engineering warm mixing technology, the conventional asphalt performance testing, dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermo gravimetric analysis (TGA) and other tests are conducted to test its general properties, rheological properties and thermal stability. The results show that compared with SBS modified asphalt, the high-temperature performance of surface-active warm-mixed SBS modified asphalt changes little, the low-temperature performance decreases slightly, and the Brinell viscosity decreases by 8.94% at 135℃. Heating can cause the decomposition and weight loss of surface-active warm-mixed agents, but the rate of weight loss is closely related to the heating conditions and the environment. The low viscosity performance of surface-active warm-mixed SBS modified asphalt is maintained after 48 hours of heating. Research has confirmed that the surface-active warm-mixed SBS modified asphalt has the good potential of application, but the storage conditions should be controlled.

Keywords: road engineering; warm-mixed SBS modified asphalt; surface-active warm-mixed agent; thermal stability; dynamic shear rheometer (DSR); bending beam rheometer (BBR)

0 引言

热拌沥青混合料在道路工程中应用广泛, 但其施工温度偏高, 存在污染环境、消耗能源多的问题, 并不符合我国绿色节能、可持续发展的理念。尤其

在隧道等较为封闭的施工环境中, 更会由于高温下产生的沥青烟气无法被及时排出, 而极大损害作业人员身体健康。与之相反, 温拌技术可以将混合料施工温度下降20℃以上, 可适应更低的环境温度、更封闭的施工环境, 具有利于隧道施工、延长施工季节并便于夜晚路面施工等优点, 还可以扩大沥青拌和站的覆盖半径, 减少因温度过低而导致的沥青混合料性能下降。

当前, 温拌技术按温拌剂种类分为有机降黏剂型、化学添加剂型、发泡型这3类^[1]。有机降黏剂型利用蜡类材料在其熔点(80~120℃)以上温度时熔化

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20252BCG330027); 江西省交通投资集团有限责任公司科技项目(2022JT0016)

作者简介: 张阳光(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事道路材料研发工作。

通信作者: 俞喜兰(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事道路材料研发工作。电子信箱: wuyuanxilan@163.com

的特性,降低沥青黏度,进而降低混合料拌和碾压温度;化学添加剂型主要通过表面活性手段,改善沥青与集料间的和易性,从而改善混合料的压实特性;发泡型使沥青发生鼓泡膨胀从而降低其黏度。但有机降黏剂型通常会牺牲材料的低温、抗水损性能^[2-3],而发泡型涉及拌和工艺的调整,工程控制较为困难^[4-5]。延西利等^[6]研究发现,表面活性剂型(表活型)温拌剂基本不改变沥青的基本技术性能;张镇等^[7]认为表活型温拌沥青混合料在高温稳定性、低温抗裂性能等方面与同级配的热拌沥青混合料相当。但表活型温拌剂由于其材料特性,热稳定性一般较差,当其与SBS改性技术结合后,得到的表活型温拌SBS改性沥青各项性能、应用技术及适用性值得更深入的探索和评估。然而,目前文献中尚不见此类研究。

本文通过室内试验,对表活型温拌SBS改性沥青的常规性能、流变性能等展开测试评价,并通过多维度分析表活型温拌剂的热分解特性及对沥青热稳定性的影响,揭示其在加热储存条件下的性能演变规律,从而为表活型温拌SBS改性沥青的工程应用提供数据支撑、理论依据和应用建议,有效降低热拌沥青混合料的施工温度,保障路面工程施工质量。

1 材料与试验

1.1 试验材料

1.1.1 原材料

本文基质沥青采用中石化重交石油沥青 70 号,其基本性能指标检测结果见表 1。由表 1 可见,基质沥青各项基本性能均符合规范要求。

表 1 基质沥青基本性能检测结果

	指标	试验结果	规范要求
原样沥青	针入度(25℃,5 s,100 g)/(0.1 mm)	64	60~80
	软化点/℃	49.0	≥46
	延度(15℃)/cm	151.0	≥100
RTFOT 后残留物	质量变化/%	-0.039	≤±1.0
	针入度比(25℃)/%	72.2	≥61
	延度(10℃)/cm	7.6	≥6

SBS 采用中石化岳化 791-H,属线型,苯乙烯/丁二烯(S/B)质量比为 70/30。为提升 SBS 改性沥青体系的稳定性和均一性,本文按常规做法^[8]添加稳定剂和增溶剂。其中稳定剂为市售硫磺,增溶剂为市售糠醛抽出油。

表活型温拌剂采用维实伟克 Evotherm,室温下为

棕色黏稠液体,有效成分含量大于 99%。用赛默飞世尔 IS10 红外光谱仪测得其红外光谱图,见图 1。

由图 1 可知:1 670 cm⁻¹处的峰来自叔酰胺 C=O 双键的伸缩振动;1 272 cm⁻¹处的峰来自叔酰胺 C—N 键的伸缩振动;1 053 cm⁻¹处的峰来自叔胺 C—N 键的伸缩振动;2 923、2 842 cm⁻¹等处的特征峰来自脂肪烃基团^[9]。结合产品功能,判断表活型温拌剂的基本成分为烷基酰胺基叔胺类表面活性剂。

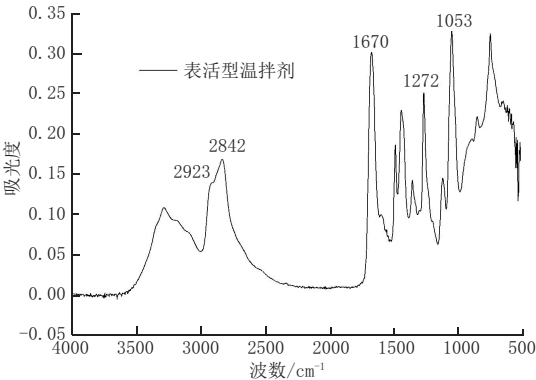


图 1 Evotherm 衰减全反射-红外光谱图

1.1.2 SBS 改性沥青和表活型温拌SBS改性沥青

基质沥青加热至流动状后加入质量分数为 1.3%(内掺,下同)的糠醛抽出油搅拌均匀;然后启动高速剪切机,加入 4% 的 SBS 改性剂,在 180℃ 下以 6 000 r/min 的转速剪切 40 min。随后加入 0.17% 的硫磺,用低速搅拌机以 900 r/min 的转速发育 120 min,得到 SBS 改性沥青样品(简称“SBS 改”)。以相同步骤(发育时间减少为 110 min)制得 SBS 改后,再加入占其质量 0.5% 的 Evotherm 温拌剂(掺量参考 Evotherm 及类似温拌剂产品的产品说明^[10]),以 900 r/min 的转速再搅拌 20 min,即可得到表活型温拌 SBS 改性沥青(简称“温拌 SBS 改”)。

1.2 试验方法

1.2.1 沥青物理性能试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),对 SBS 改性沥青和表活型温拌 SBS 改性沥青开展多项常规性能试验。以针入度、软化点评价其高温性能;以 5℃ 延度评价其低温延展性;以 135、175℃ 下的布氏旋转黏度评价其施工性能;以水煮法测试沥青与集料的黏附性等级,以此来评价其抗水损性。

同时开展动态剪切流变(DSR)试验、弯曲梁流变(BBR)试验,对沥青的流变特性进行测试,以进一步评估沥青的高低温性能。

DSR 试验的试验条件为:转子直径 25 mm,转子

间隙1 mm,以10 rad/s的剪切速度对原样沥青做42~82 ℃、间隔6 ℃的温度扫描,计算其复合模量、相位角和车辙因子参数,作为其评价指标。

BBR 试验的试验条件为:参照当地气候环境,以-12 ℃为测试温度,接触荷载为(35±5) mN,试验荷载为(980±50) mN,对原样沥青做 BBR 试验,记录60 s时的沥青蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 。

1.2.2 温拌剂热稳定性试验

本文采用的温拌剂为烷基酰胺基叔胺类表面活性剂。该类材料遇热可能分解,进而丧失温拌功效,因此需对其热稳定性展开研究。

对微量样品,采用梅特勒-托利多同步热分析仪 TGA/DSC1 进行热重分析。测试条件为:将 2~5 mg 样品置于盖上有小孔的 50 μ L 氧化铝坩埚内,在 50 mL/min 流速的 N_2 气氛中,以 10 ℃/min 升温至预设温度,然后在预设温度下等温 2 h,测试样品的质量实时变化曲线。

对宏观样品,采用温度波动±1 ℃的鼓风烘箱进行加热失重试验。测试条件为:样品量(20±1) mg,烘箱温度 155 ℃,装样容器为内径 7 cm 的圆柱形金属杯,以锡箔密封容器后加热 4 h,或敞开加热 1 h,称取加热前后的样品质量。

1.2.3 温拌SBS改沥青热稳定性试验

在测试评估表活型温拌剂自身热稳定性的基础上,将 SBS 改和温拌 SBS 改样品置于加盖烧杯内,然后放入 163 ℃烘箱内持续加热,制备经历不同高温储存时长(2、18、48 h)的 SBS 改和温拌 SBS 改老化样品,分别测试其布氏黏度,以对比分析表活型温拌剂的功能发挥效果。

2 试验结果分析

2.1 性能试验结果

SBS 改和温拌 SBS 改的常规性能和 BBR 试验结果见表 2;DSR 试验结果见表 3。

表活型温拌 SBS 改性沥青的高温性能可从针入度、软化点、复合模量和车辙因子进行评价^[11、2]。表活型温拌 SBS 改性沥青的低温性能可从延度、劲度模量 S 和蠕变速率 m 进行评价^[12-13]。表活型温拌 SBS 改性沥青的施工性能可从布氏黏度进行评价。

由表 2、表 3 可知:
(1)与 SBS 改相比,温拌 SBS 改的软化点基本无变化,针入度略下降 3.56%,而复合模量和车辙因子在温度较低时相差稍大,在 58 ℃以上的高温区相差

表 2 沥青常规性能和 BBR 测试结果			
指标	SBS 改	温拌 SBS 改	变化率/%
针入度(25 ℃,5 s,100 g)(0.1 mm)	47.7	46.0	-3.56
软化点(R&B)/℃	85.0	84.5	-0.59
延度(5 ℃)/cm	31.4	23.8	-24.20
135 ℃布氏黏度/(Pa·s)	2.350	2.140	-8.94
175 ℃布氏黏度/(Pa·s)	0.434	0.405	-6.68
与常规粗集料的黏附性等级	5	5	0
劲度模量 S @60 s/MPa	85.969	95.891	11.54
蠕变速率 m @60 s	0.467	0.394	-15.63

表 3 沥青 DSR 性能结果						
测试温度/℃	复合模量 G^* /kPa		δ /(°)		车辙因子/kPa	
	SBS 改	温拌 SBS 改	SBS 改	温拌 SBS 改	SBS 改	温拌 SBS 改
46	38.36	31.85	63.04	63.07	43.04	35.72
52	20.18	17.26	62.85	62.84	22.68	19.40
58	10.77	9.44	63.53	63.36	12.03	10.56
64	5.83	5.28	64.26	63.81	6.48	5.88
70	3.23	2.94	64.15	63.22	3.59	3.29
76	1.88	1.76	62.71	61.37	2.12	2.01
82	1.17	1.13	60.03	58.28	1.35	1.33

很小;结合温拌 SBS 改略小的相位角,可判断其黏性属性有所增大,抗高温变形能力略有下降。这与表活型温拌剂对沥青分子的润滑作用有关,该作用可使分子间相互移动更容易,更易发生永久变形。以上结果也在一定程度上显示了沥青性能评价的针入度体系与美国公路战略研究计划(SHRP)体系具有较好的吻合度。

(2)与 SBS 改相比,温拌 SBS 改的延度和 60 s 时蠕变速率有所下降,60 s 时劲度模量则有所升高,说明温拌 SBS 改的低温抗裂能力整体变弱。表活型温拌剂作为一种同时含有疏水端和亲水端的小分子添加剂,其与沥青和 SBS 相的相互作用十分复杂,对 SBS 改性沥青的三维空间结构有一定破坏作用,对沥青体系的整体性有负面影响,更容易导致低温条件下微裂缝的扩展,造成延度等低温指标的劣化。

(3)与 SBS 改相比,温拌 SBS 改的 135 ℃布氏黏度下降了 8.94%,175 ℃布氏黏度下降了 6.68%。原因是表活型温拌剂能改变沥青分子间的相互作用力;同时在沥青与空气界面上,由于温拌剂分子的聚集排列会降低沥青表面张力,从而使得体系黏度降低,进一步实现温拌。这验证了温拌 SBS 改可以在更低温度下实现对集料的充分裹附,具有更佳的施工性。但具体的降温幅度需要通过混合料试验进行验证,例如通过马歇尔试验,在保证空隙率与 SBS 改

性沥青混合料一致的条件下,测试表活型温拌SBS改性沥青混合料的拌和击实温度,进而预估施工中的摊铺碾压温度。

另外,从水煮法试验结果来看,表活型温拌剂对沥青黏附性影响较小,温拌SBS改仍保留了SBS改优秀的抗水损性能,与江西地区常用的玄武岩集料的黏附性等级为5级。

2.2 表活型温拌剂的热失重特性

表活型温拌剂的热失重分析图见图3。

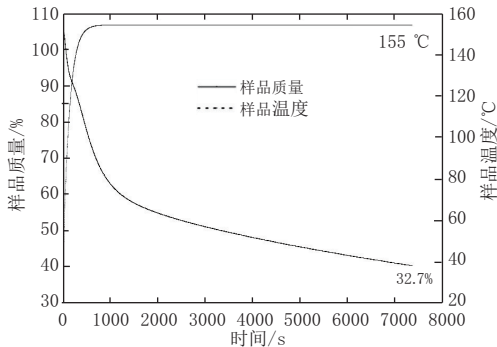


图3 表活型温拌剂的热失重分析图

由图3可知,该温拌剂有明显热失重现象,即在设定的气氛环境和加热条件下,样品质量损失达67.3%。这验证了作为胺类表活型温拌剂,该温拌剂的热稳定性较差,微量样品在充分受热且不完全密闭的环境下,热分解及分解产物挥发的速度很快。

烘箱加热试验结果为:在155℃下封闭加热4h后,样品质量损失为5.20%;在155℃下敞开加热1h后,质量损失高达16.99%。这表明表活型温拌剂的热分解失重行为与环境条件密切相关。封闭条件下,温拌剂分解产生的挥发性物质积累形成抑制效应,而敞开环境加速了挥发物的逸出,从而使失重加剧。

2.3 表活型温拌SBS改性沥青的热稳定性分析

对经历不同加热时长的SBS改和温拌SBS改各平行试样进行布氏黏度测试,结果见表4。

表4 布氏黏度结果演变情况

样品类别	指标	热存储时间/h			
		0	2	18	48
SBS改	135℃布氏黏度/(Pa·s)	2.350	2.112	1.870	3.470
	175℃布氏黏度/(Pa·s)	0.434	0.414	0.334	0.444
温拌SBS改	135℃布氏黏度/(Pa·s)	2.140	2.109	1.620	2.300
	175℃布氏黏度/(Pa·s)	0.405	0.399	0.292	0.410

由表4可知,随着热存储时长的增加,SBS改与温拌SBS改的布氏黏度都经历了先下降后上升的过程。前期的下降与SBS在高温下发生分子链断裂老化、三维立体网络遭到破坏有关,后期的上升则可能

是沥青自身的老化对黏度的影响占据了主导。并且,试验显示温拌SBS改在各老化阶段的135、175℃布氏黏度均低于SBS改。这证明在持续加热下,沥青中仍保留着足量的表面活性剂分子,发挥了降黏作用,且对于经历老化的沥青,降黏作用更为明显。这是由于在表活型温拌SBS改性沥青中,温拌剂以很低的掺量(0.5%)均匀分布在沥青内部,沥青实际上对其产生了一定的保护作用,在这种环境下,温拌剂的分解失效不易发生。结果再次提示,在沥青储存和施工加热过程中,需密切注意容器密封性和加热存储时长,确保表面活性型温拌剂功能的维持;在存储密封性有足够保障的情况下,储存时间可适当延长,但仍建议不超过96h。

3 结 语

(1)与SBS改性沥青相比,利用Evotherm制备的表活型温拌SBS改性沥青的常规性能和SHRP流变指标变化不大,SBS改性沥青的基本性能得到了维持。

(2)与SBS改性沥青相比,表活型温拌SBS改性沥青的布氏黏度下降明显,对其在更低温度下的集料表面铺展有利。

(3)表活型温拌剂热稳定性不佳,但在掺入沥青后,其热分解失效不易发生,但为确保其在使用中发挥最大功用,需尽量减少表活型温拌SBS改性沥青的存储时间,并确保存储过程中的密闭性。

参考文献:

[1] 蔡莉莉,吴春颖,夏东,等.温拌沥青技术与现状[J].石油沥青,2024,38(6):64-68.

[2] 章清涛,徐书东,王晓然,等.Sasobit温拌剂对SBS改性沥青及混合料性能影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(5):974-978.

[3] WANG X, MA B, LI S, *et al.* Review on application of phase change materials in asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2023, 10(2): 185-229.

[4] 蔡海泉.泡沫温拌沥青混合料在养护工程中的应用及环境影响研究[J].公路,2024,69(5):447-451.

[5] 余晖,郑炳锋,黄毅,等.泡沫温拌再生沥青混合料力学性能研究[J].中外公路,2021,41(4):277-281.

[6] 延西利,郑涛,蒋双全,等.沥青温拌技术分类及温拌效果的试验评价方法[J].材料导报,2024,38(4):84-91.

[7] 张镇,刘黎萍,汤文.Evotherm温拌沥青混合料性能研究[J].建筑材料学报,2009,12(4):438-441.

[8] POLACCO G, FILIPPI S, MERUSI F, *et al.* A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility (Review)[J]. Advances in Colloid and

(下转第111页)