

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.11.056

# 高黏沥青混合料 SMA-10 性能研究

赵 鹏<sup>1</sup>,姜益顺<sup>1</sup>,李 龙<sup>1</sup>,赵德生<sup>1</sup>,郭福瑞<sup>2</sup>

(1.山东省路桥集团有限公司,山东 济南 250014; 2.山东建筑大学交通工程学院,山东 济南 250101)

**摘 要:**采用实验室自主研发的高黏沥青,采用 MARSHALL 方法进行了 SMA-10 型混合料设计,通过一系列室内试验检测了混合料的高低温性能、水稳定性和耐盐蚀性,并与商品化 SBS 改性沥青制备的对比样进行了平行对比。结果表明:SMA-10 高黏沥青混合料的高低温性能优于 SBS 沥青混合料,水稳定性和耐盐蚀性也具有明显优势。

**关键词:**高黏沥青;车辙试验;冻融劈裂试验;水稳定性;耐盐蚀性

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)11-0237-05

## 0 引 言

在现代社会中,道路网络的发展对于城市化进程和经济增长至关重要。作为道路基础建设的关键组成部分,沥青路面是最主要的道路结构形式。随着交通荷载和环境条件的变化,传统的沥青混合料在一些特殊路段和高荷载情况下存在着一些问题,如车辙、开裂、沉陷等<sup>[1]</sup>。高黏沥青混合料 SMA 以其优异的耐久性、抗变形能力强的特点而备受青睐<sup>[2-3]</sup>。它采用了特殊的骨料骨架结构和高黏度沥青胶结料,能够有效地抵抗重大交通荷载和环境因素的影响,保持道路的平整度和耐久性<sup>[4-5]</sup>。在此方面的研究与分析中,Mansour Fakhri 等<sup>[6]</sup>发现增加级配中最大公称粒径会影响 SMA 沥青混合料抵抗永久变形性能。Voskuilen 等<sup>[7]</sup>发现沥青胶结料黏度较小会降低其与集料的黏附性,引起路面出现飞散病害。王玉恒<sup>[8]</sup>介绍了高黏 SMA 沥青混合料并与环氧沥青混合料进行了对比,结果表明高黏 SMA 沥青混合料有更优异的力学性能。Wang Jianwei 等<sup>[9]</sup>测试发现,高黏沥青混合料 HM-SMA-13 在抗水损害、抗剪切变形、抗疲劳方面具有优势。M. Khedmati 等<sup>[10-11]</sup>通过试验对比 SMA 混合料与 HMA 混合料,认为 SMA 混合料具有较高的抗车辙破坏能力、抗滑能力,且可以减少噪声污染。Ai Changfa 等<sup>[12]</sup>发现纤维

含量对 SMA 沥青混合料的残余稳定性有积极影响。目前,关于高黏沥青混合料的研究仍较有限,特别是高黏沥青混合料用于滨海地区时,关于其抵抗盐雾侵蚀作用的成果鲜有报道。

SMA-10 是桥面铺装或路面表层应用最为普遍的混合料类型之一。为较全面地分析高黏沥青混合料的路用性能,本文采用自主研发的高黏沥青,以 MARSHALL 方法进行了 SMA-10 型高黏沥青混合料设计,并通过路用性能和耐盐蚀性系列测试,评价了高黏沥青混合料 SMA-10 的使用性能。

## 1 原材料

### 1.1 沥青

试验采用的高黏沥青由齐鲁 70# 基质沥青中按比例加入高黏改性剂和硫磺稳定剂,高黏改性剂和硫磺稳定剂的掺量分别为沥青质量的 12% 和 0.3% (内掺)。其具体制备方法为:70# 基质沥青加热至 180~185℃,搅拌状态下,30 min 内分三批次投入高黏改性剂;而后更换剪切模式,剪切速率 3500~4000 r/min,剪切时长 40~60 min。确认改性剂分散完全后再转为搅拌模式,在 180~185℃ 温度下,30 min 内分三批次投入稳定剂,搅拌发育 3~4 h 后制成,并选择商品化 SBS 改性沥青进行对比研究。高黏沥青和 SBS 改性沥青的主要技术指标与检测结果见表 1。

由表 1 可知,与 SBS 改性沥青相比,高黏沥青的针入度小、软化点高、黏度大、弹性恢复大,表明高黏沥青具有更好的高温稳定性和弹性恢复能力,抵抗车辙、推移、拥包等病害的能力更强。与商品化 SBS 改

收稿日期:2023-09-12

作者简介:赵鹏(1984—),男,本科,高级工程师,从事道桥工程研究工作。

通信作者:姜益顺(1974—),男,本科,正高级工程师,从事道桥工程研究工作。电子信箱:jiangyishun@163.com

表 1 两种沥青的技术指标测试结果

技术指标	高黏沥青	SBS 改性沥青	试验方法
针入度(25℃)/0.1 mm	38.5	49.5	T0604
延度(5℃)/cm	35.6	28.9	T0605
软化点(R&B)/℃	89.5	76.3	T0606
黏韧性(30℃)/(N·m)	31.5	25.1	T0624
韧性(30℃)/(N·m)	22.9	18.4	T0624
60℃动力黏度/(Pa·s)	248 832	9 808	T0620
135℃布氏黏度/(Pa·s)	7.3	1.908	T0625
175℃布氏黏度/(Pa·s)	1.308	0.378	T0625
离析/℃	1.2	1.3	T0661
弹性恢复(25℃)/%	97.2	90	T0662

性沥青相比,高黏沥青的延度更大,表明其有更好的低温抗裂能力,可以在低温环境下有效减少裂缝。此外,高黏沥青具有更大的黏韧性和韧性指标,说明高黏沥青与集料的黏结能力更强,其混合料的抗水损害能力更强。在贮存稳定性方面,高黏沥青也具有理想的离析指标,表明其适于运输、存储。

### 1.2 集料

该研究使用了实际工程项目提供的不同规格的玄武岩石料作为集料,具体的技术指标列于表 2、表 3 中。填料采用经磨细的石灰岩矿粉,技术指标列于表 4 中。

## 2 混合料设计

混合料类型选择常用的 SMA-10;沥青结合料选用表 1 所示的两种沥青材料;0~3 mm、5~10 mm 两档集料选用玄武岩;纤维采用木质素纤维,添加比例为 0.3%(内掺,以混合料质量计)。采用 MARSHALL 方法进行混合料设计,确定了矿料的合成级配,列于表 5 中。试验确定最佳沥青用量为 6.1%。

表 5 SMA-10 的合成级配

筛孔尺寸/mm	各筛孔通过百分率/%								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	60	32	26	22	18	16	13
级配下限	100	90	28	20	14	12	10	9	8
合成级配	100	99.1	38.5	27.8	23.1	19.9	16.8	14.4	12.1

## 3 高黏沥青混合料 SMA-10 路用性能

### 3.1 高温稳定性

沥青混合料高温性能的优劣,与路面产生车辙、拥包等病害直接相关,是路用性能检测中的重要指标之一。目前,轮辙类试验是被各国广泛认可的评价

表 2 粗集料技术指标

检测指标	5~10 mm	10~15 mm	15~20 mm	技术指标
	针片状颗粒含量/%	1.8	4.5	
压碎值/%	—	18.5	—	≤26
表观相对密度	2.961	2.962	2.730	≥2.6
毛体积相对密度	2.820	2.855	2.714	—
吸水率/%	1.7	1.3	0.22	≤2.0
坚固性/%	5	4	6	≤12
洛杉矶磨耗损失/%	17.2	18.1	18.6	≤28

表 3 细集料技术指标

检测指标	0~3 mm	技术指标
表观相对密度	2.861	≥2.5
毛体积相对密度	2.695	—
吸水率/%	2.1	—
砂当量/%	65	≥60
亚甲蓝值/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.6	≤2.5
棱角性(流动时间)/s	32.8	≥30
坚固性/%	6	≤12

表 4 矿粉质量技术指标

检测指标	检测结果	技术指标
表观相对密度	2.674	≥2.5
含水率/%	0.21	≤1
亲水系数	0.51	<1
粒径范围	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	90.3
	<0.075 mm	77.9

沥青混合料在高温环境下抵抗病害的重要方法。本文选用车辙试验和汉堡车辙试验评估沥青混合料的高温性能。车辙试验操作简便且适用范围较广,旨在模拟车辆行驶过程中对路面的压力和剪切力作用。通过评估车辙的形成和发展情况,可以判断沥青混合料能否服役于夏季炎热地区。另外,汉堡车辙试验

考虑了荷载、水和温度等因素的耦合作用,能够更好地模拟路面的实际使用状况。利用车辙试验和汉堡车辙试验进行高黏沥青混合料 SMA-10 的性能测试,与对照组 SBS 沥青混合料进行对比验证,结果见图 1~图 4。

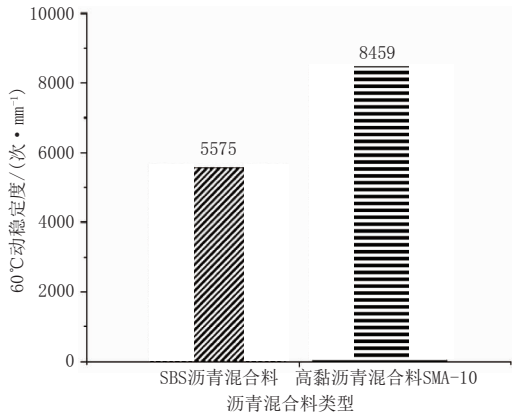


图 1 60°C 动稳定度

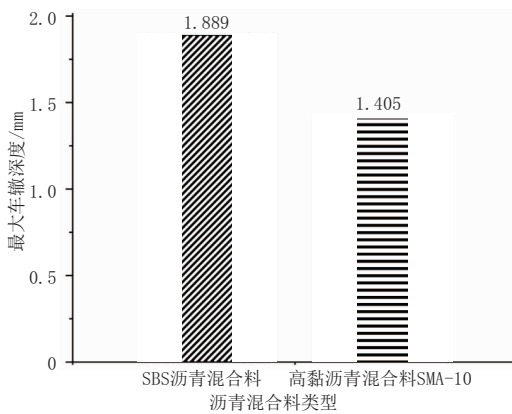


图 2 最大车辙深度

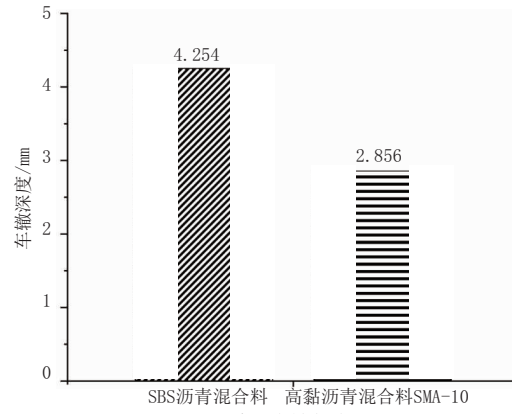


图 3 车辙深度

如图 1 所示,两种沥青混合料的动稳定度虽然都能满足现行规范(JTG F40—2004)中的要求(> 3 000 次/mm),但高黏沥青混合料 SMA-10 达到了 SBS 沥青混合料的 1.5 倍。这表明高黏沥青相较于 SBS 改性沥青具有更高的黏度和内聚力,能够有效地抵抗外部应力和变形,从而提高其动稳定度。如图 2 所示,通过对比两种沥青混合料的最大车辙深度可

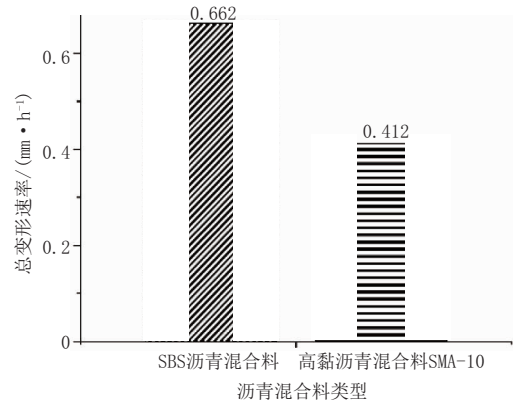


图 4 总变形速率

知,高黏沥青混合料 SMA-10 的最大车辙深度较小。这表明高黏沥青混合料 SMA-10 中的沥青胶结料与集料之间的黏结能力更强,具有更高的抗剪强度。

由图 3 和图 4 可知,高黏沥青混合料 SMA-10 的车辙深度和总变形速率均小于 SBS 沥青混合料。这表明高黏沥青混合料 SMA-10 在高温环境下不易受影响而产生病害,具有更好的高温稳定性。

### 3.2 低温抗裂性

为评价其低温抗裂性,本试验选取高黏沥青、SBS 改性沥青制备 SMA-10 沥青混合料小梁试件进行 -10°C 低温弯曲试验,最大弯拉应变结果见图 5。

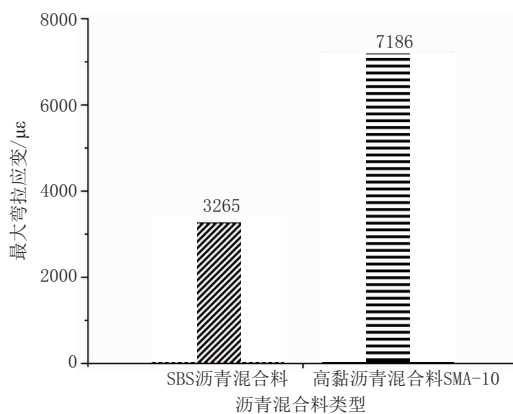


图 5 不同沥青混合料的低温弯拉应变

现行规范(JTG F40—2004)要求沥青混合料的最大弯拉应变不小于 2 800 με(冬寒区)。由图 5 可以看出,高黏沥青混合料 SMA-10 的最大弯拉应变远大于 SBS 沥青混合料,为后者的 2 倍以上,表明其低温性能优异,更有利于抵抗低温裂缝。

### 3.3 水稳定性

为评价高黏沥青混合料 SMA-10 抵抗水损害的能力,对其进行冻融劈裂试验,并与对照组 SBS 沥青混合料进行对比,试验结果见表 6。

由表 6 可知,高黏沥青混合料 SMA-10 和 SBS 沥青混合料的 TSR 值都大于规范(JTG F40—2004)



表 6 冻融劈裂计算结果

混合料类型	沥青类型	$\bar{R}_{T1}$ /MPa	$\bar{R}_{T2}$ /MPa	TSR/%	技术要求
SMA-10	SBS 沥青	1.056	0.937	88.7	TSR ≥ 80
	高黏沥青	1.125	1.123	99.8	

要求的 80%。然而,高黏沥青混合料 SMA-10 的 TSR 值达到 99.8%,即几乎未受冻融循环的影响。分析原因,是高黏沥青混合料 SMA-10 使用的高黏沥青与集料的黏附能力更好,可以将集料紧紧包裹,使其具有优异的抗水损害能力。

### 3.4 耐盐蚀性

采用 NaCl 溶液模拟海水,浓度分别为 0%和 3%,对 SMA-10 沥青混合料试件进行冻融循环浸泡,时间为 0~3 d。此后进行劈裂试验测定其劈裂强度,结果见表 7 和图 6。

表 7 盐蚀冻融循环试验劈裂强度 单位:MPa

混合料类型	NaCl 溶液浓度	0 d	1 d	2 d	3 d
SBS 沥青混合料	0%	0.858	0.741	0.712	0.684
	3%	0.858	0.709	0.668	0.633
高黏沥青混合料	0%	0.89	0.791	0.773	0.757
	3%	0.89	0.756	0.733	0.717

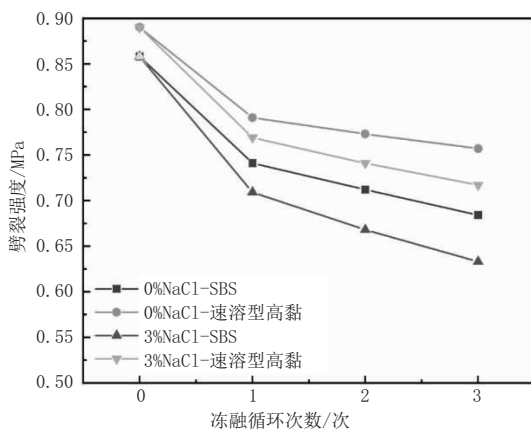


图 6 沥青混合料劈裂强度变化

如图 6 所示,冻融循环次数与沥青混合料的劈裂强度呈现负相关关系;沥青混合料在经历冻融循环的初始阶段时,劈裂强度降幅较大;在清水和 3%浓度 NaCl 溶液的冻融条件下,SBS 沥青混合料的劈裂强度分别降低 13.6%和 17.4%,而高黏沥青混合料 SMA-10 的劈裂强度降幅相对较小,分别为 11.1%和 13.6%;在盐水冻融条件下,沥青混合料的劈裂强度下降幅度增大,原因是盐蚀作用加剧了对混合料的破坏。与 SBS 沥青混合料相比,高黏沥青混合料受盐水冻融循环侵蚀的破坏效果较小。

在后续冻融循环过程中,沥青混合料的劈裂强度虽持续下降,但下降速率变小。低温下,沥青混合料内部的溶液结冰膨胀,导致内部空隙逐渐增大,破坏内部结构,盐分结晶损害沥青膜。随后,温度升高,冰融化导致空隙失去支撑,劈裂强度快速降低。经过三次冻融循环后,混合料的空隙逐渐适应冻胀结冰,主要受到高温和低温交替作用的损害,劈裂强度下降速率变小。在清水和 3%浓度 NaCl 溶液的冻融条件下,高黏沥青混合料的劈裂强度相较于第一次冻融后的强度减少了 4.3%和 6.8%,SBS 沥青混合料的劈裂强度分别减少了 7.7%和 10.7%,下降速率变小。分析原因,是高黏沥青与集料之间的黏附性更强,沥青膜受损较小。在 3%浓度 NaCl 溶液的冻融条件下,SBS 沥青混合料的劈裂强度下降速率仍然较大。

## 4 结论

本文采用自主研发的高黏沥青,采用 MARSHALL 方法设计高黏沥青混合料 SMA-10,通过路用性能测试及与 SBS 沥青混合料对比结果,得出以下结论:

(1)为评价其在高温环境下抵抗病害的能力,进行轮辙类试验。结果表明,相较于 SBS 沥青混合料,高黏沥青混合料 SMA-10 在高温环境下有更高的黏度和内聚力,可以减少车辙等病害,具有良好的高温稳定性。

(2)为评价其抵抗低温开裂的能力,进行低温弯曲试验。结果表明,相较于 SBS 沥青混合料,高黏沥青混合料 SMA-10 在低温环境下最大弯拉应变较大,不易开裂,具有良好的低温抗裂性。

(3)为评价其抵抗水损害的能力,进行冻融劈裂试验。结果表明,高黏沥青混合料 SMA-10 有较高的 TSR 值,仅出现轻微水损害,具有良好的抵抗水损害能力。

(4)采用盐-冻融循环试验对其耐盐蚀性进行检测。结果表明,高黏沥青混合料 SMA-10 与对照组 SBS 沥青混合料的劈裂强度会在经历第一次冻融循环时出现较大降幅,但高黏沥青混合料 SMA-10 在后续盐-冻融循环试验中劈裂强度下降变缓,相较于 SBS 沥青混合料有更好的耐盐蚀性。

### 参考文献:

[1] 张锦红.超薄磨耗层 SMA-10 在高速公路中的应用[J].公路交通技术,2021,37(4):27-32.

- [2] 陈超, 范子然, 李闯民. 基于高黏剂改性透水沥青混合料的工艺对比研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 237-240.
- [3] 胡芙蓉. 沥青特征官能团对高黏改性沥青及混合料的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [4] 钟华斌. 钢桥面铺装层 SMA-10 沥青混合料材料设计及使用性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [5] 杨振富. 高弹改性沥青 SMA-10 路用性能研究及其在桥面铺装中的应用[J]. 北方交通, 2019(7): 36-39.
- [6] Fakhri M, Kheiry P T, Mirghasemi A A. Modeling of the permanent deformation characteristics of SMA mixtures using discrete element method[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1): 67-84.
- [7] Voskuilen J L M, Verhoef P. Causes of renmatre Raveling Falue in Porous asphalt[C]. IPARTLM NA. Sith ntenclion IILEM Symposim on Perfomance Testing and Ervlation of Bituminous Materials. Paris: RILEM Publications SARL. 2003: 191-197.
- [8] 王玉恒. 大型钢桥桥面铺装高黏沥青及混合料的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- [9] Wang J, Ji B, Chen B, *et al.* Application of high-viscosity modified asphalt mixture in curved bridge pavement[J]. Sustainability, 2023, 15(4).
- [10] Khedmati M, Khodaii A, Haghshenas H F. A study on moisture susceptibility of stone matrix warm mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2017(30): 42-49.
- [11] Fakhri M, Shahryari E. The effects of Nano Zinc Oxide (ZnO) and Nano Reduced Graphene Oxide (RGO) on moisture susceptibility property of Stone Mastic Asphalt (SMA)[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00655.
- [12] Ai C F, Qiu S, Xin C F, *et al.* Evaluation and optimisation of stone matrix asphalt (SMA-13) mix design using weight-matrix method[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 1-10.

\*\*\*\*\*  
(上接第 236 页)

- 蚀性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2020(12): 10-14.
- [5] 张野. 短切玄武岩纤维混凝土基本力学性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [6] 刘茜, 张津滔, 高子祁, 等. 短切玄武岩纤维混凝土筒支梁正截面受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(12): 189-198.
- [7] Liu J, Jia Y, Wang J. Calculation of chloride ion diffusion in glass and polypropylene fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 875-885.
- [8] Niu D, Huang D, Fu Q. Experimental investigation on compressive strength and chloride permeability of fiber-reinforced concrete with basalt-polypropylene fibers[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(10): 2278-2288.
- [9] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 玄武岩纤维混凝土氯盐侵蚀行为及力学性能试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6): 1060-1070.
- [10] 陈亚迪, 洪丽, 蒋津, 等. 水泥砂浆基体中玄武岩纤维的拔出试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2985-2991.
- [11] 戴勇. 玄武岩纤维对混凝土抗压和劈裂抗拉强度的影响[J]. 合成纤维, 2023, 52(10): 75-78.
- [12] 谢金东, 武亮, 刘志洪等. 短切玄武岩纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2022, 39(4): 105-109, 117.
- [13] 王志杰, 徐成, 王嘉伟, 等. 玄武岩纤维长度对喷射混凝土力学性能影响规律研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊1): 9-16.