

聚芳酯纤维水泥稳定碎石-沥青混合料层间黏结性能

吴树恒, 马新伟, 姜益顺, 张永鹏

(山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 为研究聚芳酯纤维水泥稳定碎石与沥青混合料的层间黏结效果, 基于复合试件的性能测试研究了层间黏结性能的影响因素。制备了不同组合形式的“水泥稳定碎石+黏层沥青+沥青混合料”复合试件, 通过剪切试验、拉拔试验及弯曲疲劳试验分别测试了层间剪切强度、拉拔强度和疲劳寿命。结果表明: 复合试件的层间黏结强度峰值存在对应的沥青洒布量范围, 约为1.5~1.8 kg/m², 疲劳寿命则随黏层洒布量的增加而增大; SBS改性沥青作为黏层材料时层间黏结强度优于70#沥青; 水泥稳定碎石中掺加纤维可进一步提升黏结强度和疲劳寿命, 剪切强度和拉拔强度的提升幅度分别为4.5%~12%和3.9%~7.6%, 疲劳寿命可提升约10%~44%。黏层沥青类型、洒布量及水泥稳定碎石中的聚芳酯纤维掺量对水泥稳定碎石与沥青混合料的层间黏结效果均有影响。

关键词: 聚芳酯纤维; 水泥稳定碎石; 层间黏结强度; 疲劳性能

中图分类号: U414; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)11-0288-04

Interlayer Bonding Properties between Polyarylate Fiber-reinforced Cement-stabilized Macadam and Asphalt Mixture

WU Shuheng, MA Xinwei, JIANG Yishun, ZHANG Yongpeng

(Shandong Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: To study the interlayer bonding effect between polyarylate fiber-reinforced cement-stabilized macadam and asphalt mixture, the influencing factors of interlayer bonding performance are studied according to the performance tests of composite specimens. The composite specimens of "cement-stabilized macadam + tack coat asphalt + asphalt mixture" with different combination forms are prepared. The interlayer shear strength, pull-off strength and fatigue life are measured through shear tests, pull-off tests and flexural fatigue tests, respectively. Results show that the peak value of the interlayer bonding strength of the composite specimens has a corresponding range of asphalt spreading amount, approximately 1.5~1.8 kg/m², and the fatigue life increases with the increase of the spreading amount of the bonding layer. When SBS modified asphalt is used as a bonding material, its interlayer bonding strength is superior to that of 70# asphalt. Adding fibers to cement-stabilized macadam can further enhance the bonding strength and fatigue life, the increase in shear strength and tensile strength is 4.5% to 12% and 3.9% to 7.6% respectively, and the fatigue life can be increased by approximately 10% to 44%. The type of tack coat asphalt, its spreading amount and the dosage of polyarylate fibers in cement-stabilized macadam all have an impact on the interlayer bonding effect between cement-stabilized crushed stone and asphalt mixture.

Keywords: polyarylate fiber; cement-stabilized macadam; interlayer bonding strength; fatigue performance

0 引言

水泥稳定碎石因其强度高、稳定性好、施工便捷等优点, 是我国沥青路面主要采用的基层结构型式^[1]。然而, 由于水泥稳定碎石的温缩、干缩开裂特性, 路面服役过程中会处于带裂缝工作状态, 尤其在

大交通量、重载交通条件下, 开裂部位应力集中程度明显, 致使沥青路面发生反射裂缝病害。内部水分蒸发是水泥稳定碎石发生干燥收缩的主要原因, 随着干燥收缩的发生, 水泥稳定碎石内部的孔隙率增加, 并产生干缩裂缝^[2-3]。为提升层间粘结效果, 道路工作者基于黏弹理论、能量理论等开展了关于黏层材料流变特性分析、断裂能测试等研究工作^[4-5], 提出了层间界面处理^[6-9]、设应力吸收层^[10]等技术措施。近年来, 为改善水泥稳定碎石自身的抗裂性能, 道路工作者也开展了关于纤维水泥稳定碎石的研究

收稿日期: 2025-05-14

作者简介: 吴树恒(1992—), 男, 学士, 工程师, 从事道路工程研究工作。

通信作者: 马新伟(1987—), 男, 学士, 工程师, 从事道路工程研究工作。电子信箱: 837513165@qq.com

工作^[11-12],常用的纤维类型包括聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、玄武岩纤维和玻璃纤维等^[13-15],但由于上述纤维抗变形能力差、强度保持率不足等缺陷,对水泥稳定碎石的抗裂性提升幅度有限。聚芳酯纤维因其高强度保持率、高耐磨、低吸湿性等特征^[16-18],具有提升水泥稳定碎石抗裂性能优势,但关于聚芳酯纤维水泥稳定碎石与沥青混合料层间黏结性能的研究鲜见报道。本文开展聚芳酯纤维水泥稳定碎石与沥青混合料的层间黏结性能研究,采用“水泥稳定碎石+黏层沥青+沥青混合料”思路,设计制备了不同纤维掺量的水泥稳定碎石、黏层沥青类型及洒布量组合的复合试件,基于剪切试验、拉拔试验和疲劳试验,研究了不同层间结合条件及水泥稳定碎石中聚芳酯纤维掺量对复合试件层间黏结强度与疲劳寿命的影响。

1 试验材料

1.1 水泥稳定碎石

以 JTG/T F20《公路路面基层施工技术细则》^[19]中的 C-A-1 型水泥稳定碎石为基准,其合成级配见图 1。其中,粗、细集料均采用石灰岩碎石,无机结合料采用 P.O 42.5 硅酸盐水泥,拌和用水采用饮用水。水泥剂量和含水率分别取固定值,为 5% 和 5.6%;以集束状高强聚芳酯纤维作为外加剂,掺量分别取 0.08% 和 0.12%,并以无纤维的素水泥稳定碎石(即纤维掺量为 0%)作为对照组。以上掺量均为内掺,以质量百分比计。

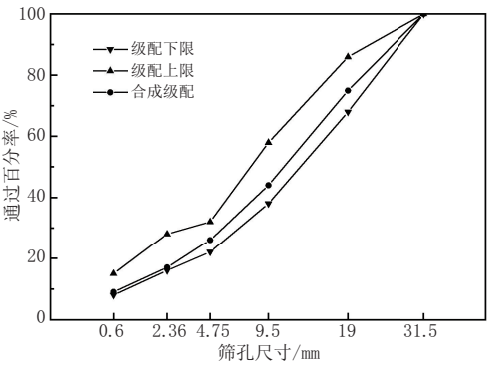


图 1 水泥稳定碎石的合成级配

2.2 黏层用沥青

分别以 70#道路石油沥青和商品化 SBS 改性沥青作为黏层材料,其技术性能见表 1,均符合 JTG F40《公路沥青路面施工技术规范》^[20]的要求。用于层间黏结时,两种黏层材料的洒布量分别取为 0.9、1.2、1.5、1.8、2.1 kg/m²。

表 1 沥青的技术性能测试结果

测试项目	70#沥青	SBS 改性沥青
针入度(25℃)/0.1 mm	71	64
延度(5 cm/min)/cm	60.2(10℃)	19(5℃)
软化点(环球法)/℃	45.6	58.8
针入度指数 PI	-1.73	0.09
175℃运动粘度/(Pa·s)	/	0.457
135℃运动粘度/(Pa·s)	/	3.850
针入度比(25℃)/%	73.85	75.38
残留延度(5 cm/min)/cm	9.0(10℃)	10.0(5℃)
PG 分级	64-22	76-28

2.3 沥青混合料

采用沥青路面下面层常用的 AC-20 型沥青混合料,其设计级配见图 2。其中,粗、细集料均采用石灰岩碎石,填料采用石灰岩磨细矿粉,沥青结合料采用表 1 所示的 70#沥青。经马歇尔法确定最佳沥青用量为 5.2%,对应的沥青混合料空隙率为 4.1%。

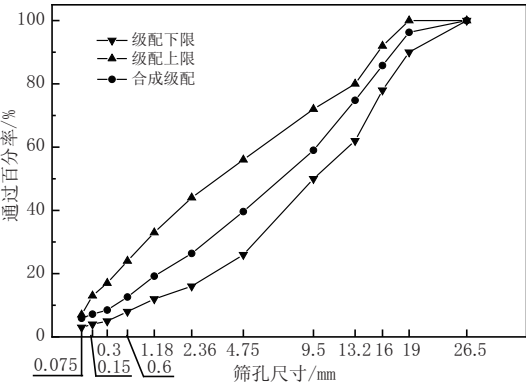


图 2 AC-20 沥青混合料的设计级配

3 复合试件的制备

采用“水泥稳定碎石+黏层沥青+沥青混合料”的工艺制备复合试件,并分别通过剪切试验、拉拔试验及弯曲疲劳试验测试层间剪切强度、拉拔强度和疲劳寿命,据此评价了水泥稳定碎石中聚芳酯纤维掺量、黏层沥青类型及洒布量对水泥稳定碎石与沥青混合料层间黏结效果的影响。

为成型用于剪切和拉拔试验的复合试件,首先依据 98% 的压实度,通过击实试验成型直径为 15 cm、高 5 cm 的圆柱形纤维水泥稳定碎石试件,经 28 d 标准养生后,按设计的洒布量涂刷黏层沥青,待黏层沥青冷却后,再将其置于旋转压实仪试模中,倒入预制并保温 160℃ 的 AC-20 沥青混合料并进行旋转压实,其中沥青混合料的用量按 4% 目标空隙率及 5 cm 高度预先计算获得,压实后复合试件的总高度为 10 cm。

对于四点弯曲疲劳试验用复合试件,由于试件尺寸较大,故采用轮碾法分阶段成型,获得 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的复合试件后,再经岩石切割机切割获得尺寸为 $30\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的梁式试件。除成型方法不同外,成型过程中的控制标准和步骤与剪切、拉拔试验用的复合试件均相同。

4 性能测试与分析

复合试件组合时,水泥稳定碎石采用3种、黏层沥青采用2种类型、黏层洒布量采用5种,故共成型30组复合试件,每组成型3个平行试件,分别进行剪切试验、拉拔试验和疲劳试验。

以直剪仪和拉拔仪分别对圆柱形复合试件进行直接剪切试验和拉拔试验,以测定不同组合下黏结层的剪切强度和拉拔强度,测试温度均取为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,剪切和拉拔速率均取 50 mm/min 。黏结层的剪切强度 S_F 和拉拔强度 S_P 分别按式(1)和式(2)计算。图3和图4分别给出了不同工况下 S_F 和 S_P 的均值,其标准差极值分别为 0.13 MPa 和 0.09 MPa ,变异系数分别为 $11\%\sim 17\%$ 和 $16\%\sim 23\%$,稳定性处于可被接受的范围。

$$S_F = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$S_P = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2)$$

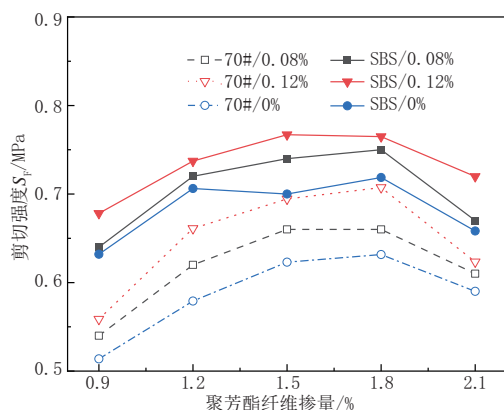


图3 剪切强度测试结果

可以看出,黏层沥青类型、洒布量及水泥稳定碎石中纤维掺量对复合试件的剪切强度和拉拔强度均产生影响,且影响规律总体相似。SBS改性沥青由于更高的黏弹特性,作为层间黏结材料时可提供更高的黏结强度,故复合试件的剪切强度和拉拔强度均明显高于70#沥青,增幅分别达到 $8\%\sim 23\%$ (剪切强度)和 $21\%\sim 45\%$ (拉拔强度);其它条件相同时,剪切强度和拉拔强度均随洒布量的增加呈先增大再减小

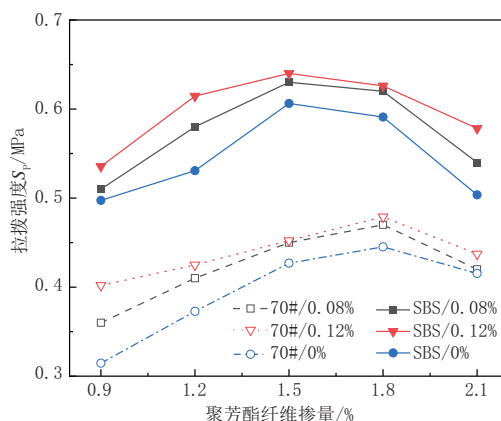


图4 拉拔强度测试结果

趋势,即存在最佳洒布量范围,结合剪切强度和拉拔强度的变化趋势,该范围约为 $1.5\sim 1.8\text{ kg/m}^2$;基层水泥稳定碎石掺加纤维后,层间黏结强度随纤维掺量的增加而增大,表明水泥稳定碎石中掺加纤维后,裸露于表面的纤维对黏层沥青相对移动具有阻滞效果,对应于最佳洒布量范围的剪切强度和拉拔强度增幅分别为 $4.5\%\sim 12\%$ 和 $3.9\%\sim 7.6\%$ 。

采用四点弯曲疲劳试验对梁式复合试件的抗疲劳性能进行测试。测试温度取 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,以应变控制模式进行测试,加载波形取连续半正矢波,幅值应变取为 $100\text{ }\mu\epsilon$,荷载频率取 10 Hz 。图5给出了各纤维水泥稳定碎石的疲劳寿命均值随应力强度比的变化规律。

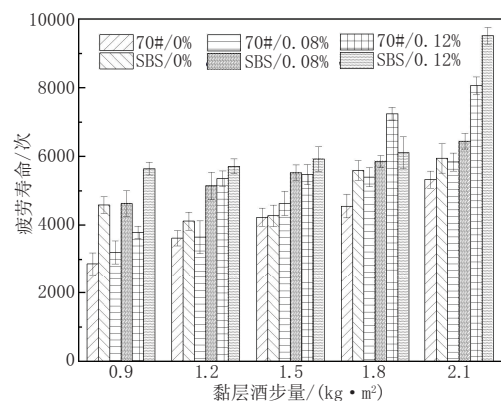


图5 复合试件的疲劳寿命

可以看出,黏层沥青类型、洒布量及水泥稳定碎石中纤维掺量对复合试件的疲劳寿命具有明显影响。与70#沥青相比,采用SBS改性沥青为黏层材料时可明显提升复合试件的疲劳寿命,平均增幅为 22% 。基层水泥稳定碎石掺加纤维后复合试件的疲劳寿命同样有所提升,与未掺加纤维相比,对应于 0.08% 和 0.12% 纤维掺量的疲劳寿命分别提升 $10\%\sim 14\%$ (黏层为70#沥青)和 $34\%\sim 44\%$ (黏层为SBS改性沥青)。与剪切强度和拉拔强度与黏层沥青洒布量

的变化规律不同,复合试件的疲劳寿命随黏层洒布量的增加而增大,洒布量为 2.1 kg/m^2 时复合试件的疲劳寿命较洒布量为 0.9 kg/m^2 时可提高 46%~93%。

6 结 语

该文通过对“水泥稳定碎石+黏层沥青+沥青混合料”复合试件的剪切试验、拉拔试验及弯曲疲劳试验测试了层间剪切强度、拉拔强度和疲劳寿命,以此评价了水泥稳定碎石中聚芳酯纤维掺量、黏层沥青类型及洒布量对水泥稳定碎石与沥青混合料层间黏结效果的影响。得出以下结论:

(1)黏层沥青类型、洒布量及水泥稳定碎石中纤维掺量对复合试件的黏结强度和疲劳寿命均有影响,其中剪切强度和拉拔强度存在最佳洒布量范围,约为 $1.5\sim 1.8\text{ kg/m}^2$,疲劳寿命则随黏层洒布量的增加而持续增大。

(2)采用 SBS 改性沥青作为黏层材料时复合试件的黏结强度优于 70# 沥青;黏层沥青处于最佳洒布量范围时,水泥稳定碎石中掺加纤维可进一步提升剪切强度和拉拔强度,提升幅度分别为 4.5%~12% 和 3.9%~7.6%。

(3)黏层材料采用 SBS 改性沥青时可提升复合试件疲劳寿命约 22%,水泥稳定碎石掺加纤维后复合试件疲劳寿命可提升约 10%~14% (黏层为 70# 沥青)和 34%~44% (黏层为 SBS 改性沥青),黏层洒布量为 2.1 kg/m^2 时复合试件的疲劳寿命较洒布量为 0.9 kg/m^2 时可提高 46%~93%。

参考文献:

[1] 胡力群.半刚性基层材料结构类型与组成设计研究[D].西安:长安大学,2004.
[2] Maruyama I, Nishioka Y, Igarashi G, *et al.* Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying

process[J]. *Cement & Concrete Research*, 2014(58): 20-34.
[3] Zhang P, Li Q. Experimental Study on Shrinkage Properties of Cement-stabilized Macadam Reinforced with Polypropylene Fiber[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, 29(12): 1851-1860.
[4] 熊敏. 沥青面层层间黏结材料性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2021.
[5] 朱彬彬,杨树,李庭予,等. 沥青材料断裂行为及抗裂指标的分子动力学模拟[J/OL]. 公路工程, 1-8[2025-05-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1481.U.20250212.1502.004.html>.
[6] 岳福青.半刚性基层沥青混凝土路面反射裂缝形成扩展机理与基层预裂技术研究[D].石家庄:河北工业大学,2004.
[7] 陈世斌,袁永强,姚运仕,等.半刚性基层沥青路面层间处治增强黏结力的试验[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(4):44-51.
[8] 汪水银.半刚性基层与沥青面层粘结性能影响因素[J].交通运输工程学报,2010,10(2):12-19.
[9] Ge Zhesheng, WANG Yangyang. The interlaminar shear and fatigue performance of pavement structure connected by the nail[J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(1): 160-164.
[10] 耿立涛,杨新龙,徐惠芬,等.撒布型应力吸收层技术性能的试验方法[J].建筑材料学报,2014,17(4):738-742.
[11] 张鹏,李清富,黄承远,等.聚丙烯纤维水泥稳定碎石收缩性能[J].交通运输工程学报,2008,8(4):30-34.
[12] 程培峰,于铭泽.掺玄武岩纤维水泥稳定碎石温缩抗裂性能试验研究[J].中外公路,2013,33(6):234-238.
[13] 张虹.聚丙烯纤维在水稳碎石基层中的应用[J].交通科学与工程,2019,35(1):20-24.
[14] 舒洪波,唐正光,张燕红,等.玄武岩纤维对水稳碎石基层强度的影响[J].中外公路,2024,44(5):125-131.
[15] 郭寅川,刘逸伟,申爱琴,等.玻璃纤维水泥稳定碎石收缩及柔化抗裂性能研究[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(5):114-120.
[16] Karacan I. A comparative study of structure-property relationships in highly oriented thermoplastic and thermotropic polyesters with different chemical structures[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 100(1): 142-160.
[17] 王桦,陈丽萍,覃俊,等.热致液晶聚芳酯 Vectran 纤维的结构与性能[J].合成纤维,2016,45(12):18-22.
[18] 李志强.热致液晶聚芳酯结构与性能关系的研究[D].郑州:中原工学院,2024.
[19] JTG/T F20—2015,公路路面基层施工技术细则[S].
[20] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].