

双层复合型防水黏结层结构优化及性能评价

李虎¹, 陶福德¹, 高艳龙², 王 阁¹, 杨道伟¹, 吴光勇¹, 覃琳洪¹, 何 杰³, 闫东波³

(1. 贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001; 2. 四川高速公路建设开发集团有限公司, 四川 成都 610047;

3. 重庆鹏方路面工程技术研究院有限公司, 重庆市 400026)

摘 要: 基于桥面铺装体系中防水与层间抗剪受力协同的设计理念, 构建了一种由下层溶剂型黏结剂与上层沥青胶砂组成的双层复合型防水黏结层结构, 通过拉拔和剪切试验, 研究了黏结剂涂布量及胶砂厚度对复合体系层间力学性能的影响规律, 并分析了温度与浸水作用条件下的性能衰减特征及界面破坏机理。结果表明, 溶剂型黏结剂涂布量为 0.3 kg/m^2 时, 与水泥混凝土基层的附着力最强; 下层涂布量固定, 胶砂厚度对拉拔与剪切性能的影响呈非线性特征, 厚度不足或厚度过大均不利于层间稳定性, 胶砂最佳厚度为 $6 \sim 7 \text{ mm}$ 。

关键词: 桥面铺装; 复合防水黏结层; 溶剂型黏结剂; 沥青胶砂

中图分类号: U443.33; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0012-04

Structural Optimization and Performance Evaluation of Double-layer Composite Waterproof Bonding Layer

LI Hu¹, TAO Fude¹, GAO Yanlong², WANG Ge¹, YANG Daowei¹, WU Guangyong¹, TAN Linhong¹, HE Jie³, YAN Dongbo³

(1. Guizhou Road and Bridge Group Co., Ltd., Guiyang 550001, China; 2. Sichuan Expressway Construction and Development Group Co., Ltd., Chengdu 610047, China; 3. Chongqing Pengfang Pavement Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400026, China)

Abstract: Based on the design concept of synergistic waterproofing and interlayer shear resistance in bridge deck pavement systems, a two-layer composite waterproof bonding layer structure consisting of a lower layer of solvent-based adhesive and an upper layer of asphalt mortar is constructed. Through pull-out and shear tests, the influence of adhesive coating amount and mortar thickness on the interlayer mechanical properties of the composite system is studied, and the performance degradation characteristics and interfacial failure mechanism under temperature and water immersion conditions are analyzed. The results show that when the coating amount of solvent-based adhesive is 0.3 kg/m^2 , the adhesion to the cement concrete base is the strongest. With a fixed lower layer coating amount, the effect of mortar thickness on pull-out and shear properties exhibits nonlinear characteristics. The insufficient thickness or excessive thickness are detrimental to interlayer stability, and the optimal mortar thickness is $6 \sim 7 \text{ mm}$.

Keywords: bridge deck pavement; composite waterproof bonding layer; solvent-based adhesive; asphalt mortar

0 引 言

防水黏结层作为沥青混凝土层与混凝土基层之间的重要界面结构, 其性能直接影响桥面铺装体系的实际使用寿命, 其核心作用是黏结桥面板与铺装层, 此外还应具备防水保护和应力吸收功能^[1]。目前, 研究者对防水黏结层进行了相关研究, 包括新材

料开发、路用性能、施工检测等内容^[2-4], 在防水黏结层材料的选取上, 已开展了大量研究^[5-6], 同时, 一些研究者通过聚合物改性增强传统沥青基防水黏结层材料的性能^[8-11], 提升防水黏结层的抗剪稳定性和抗疲劳性。在性能评价方面, 多采用拉拔试验、剪切试验和疲劳试验^[12-15], 但工程实践表明, 尽管部分材料在防水性能或抗剪性能方面表现突出, 但由于材料本构特性差异, 单一材料往往难以同时兼顾高温抗剪稳定性与长期防水耐久性^[16-17], 在高温或重载交通条件下, 防水层易发生剪切滑移; 而在薄层设计条件下, 又可能因厚度不足而导致防水失效。因此, 有必要将不同功能材料进行分层协同设计, 以实现防

收稿日期: 2026-01-09

作者简介: 李虎(1987—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥施工技术管理工作。

通信作者: 高艳龙(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路与铁道工程管理工作。电子信箱: hellogao@163.com

水与抗剪性能的协同提升。

1 材料与方法

1.1 原材料

试验采用的原材料主要包括水泥混凝土、溶剂型黏结剂、沥青砂胶和沥青混凝土^[17-20],其材料性能指标见表1至表4。水泥混凝土板的各项技术指标见表1。

表 1 水泥混凝土技术指标

初凝时 间/min	终凝时 间/h	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
140	6	29.5	45.7	5.9	8.1

桥面铺装所采用的溶剂型黏结剂的主要技术指标见表2。

沥青胶砂由改性沥青与矿粉按比例拌制而成,其沥青含量较高,拌和后具有良好的流动性和一定

表 2 溶剂型黏结剂技术指标

固体含量/ %	表干时间/h	实干时间/h	不透水性	黏结强度/ MPa
43.8	0.5	2.5	不透水	1.36

的自密实能力^[20-22],依据《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》^[23]对相关性能指标的要求,其试验结果见表3。

沥青混合料使用的沥青为 SBS 改性沥青,混合料类型为 AC-13,其技术指标测试见表4。

表 3 沥青胶砂性能指标

性能指标	测试结果	要求
环球法软化点/℃	132.6	≥120
热稳流淌性	0 无流淌	0 无流淌
低温柔性	-20 ℃无裂纹	-20 ℃无裂纹
刘埃尔流动性(220 ℃)	1 s	≤3 s
黏结强度	1.63 MPa	≤1.0 MPa

表 4 沥青混合料技术指标

油石比/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	破坏应变(μ ϵ)	水稳定性性能	
					残留稳定度/%	劈裂强度比/%
5.0	3.8	14.6	3 682	2 895	90.2	85.7

1.2 试样制备

复合试件由沥青铺装层、防水黏结层及 C40 混凝土板组成,制备流程为:混凝土板振实养护 28 d→表面打磨、涂布黏结剂→刮涂沥青胶砂→压实沥青混合料→室温放置 24 h→加工成试块。

1.3 试验方法

1.3.1 附着力试验

为评价防水黏结层与水泥混凝土基层界面黏结性能^[24-25],采用拉拔式附着力测试仪对溶剂型黏结剂进行试验。

1.3.2 拉拔试验

对复合试件钻芯取样,在芯样顶部沥青混合料表面粘贴金属拉拔头,采用快硬环氧树脂胶黏结。拉拔试验使用万能试验机进行,温度为 25 ℃,拉拔速度为 10 mm/min,加载至层间破坏,记录最大拉力,并记录断裂面情况^[26]。

1.3.3 剪切试验

本文采用斜面剪切试验测试复合结构试件的抗剪强度^[27-28],其具体步骤为:将制备好的剪切试件在试验所要求的条件下放入剪切角度为 45°斜剪模具中,再按照规定的剪切速度,施加竖向荷载至试件破坏。

2 结果与分析

2.1 附着力

对不同涂布量黏结剂进行了附着力测试,确定

最佳涂布量,试验结果如图1所示。由图1可得溶剂型黏结剂附着力随涂布量增加先升后降,在 0.3 kg/m²时达到最大值 1.71 MPa。涂布量过大易在界面形成低模量厚膜并发生内聚破坏,导致附着力下降。因此,本文确定 0.25 ~ 0.30 kg/m²为合理涂布量范围,后续试验采用 0.3 kg/m²。

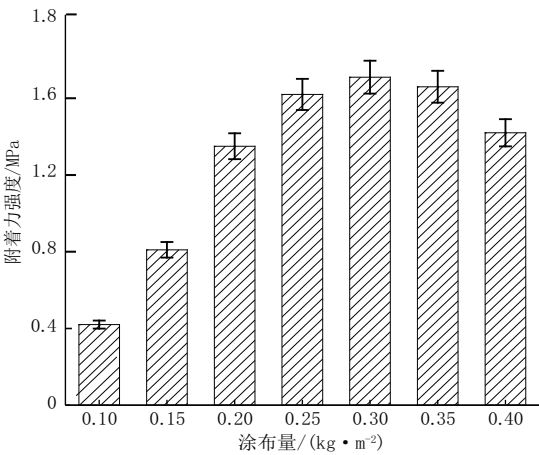


图 1 溶剂型黏结剂涂布量的附着力

2.2 拉拔强度

在溶剂型黏结剂涂布量为 0.3 kg/m²条件下,胶砂厚度对拉拔强度的影响见图2。25 ℃时,厚度由 5 mm 增至 8 mm 强度提高,但 7 ~ 8 mm 区间增幅趋缓;60 ℃时整体强度下降,且厚度超过 7 mm 后反而降低,表明高温条件下胶砂黏弹软化对界面性能产生不利影响。

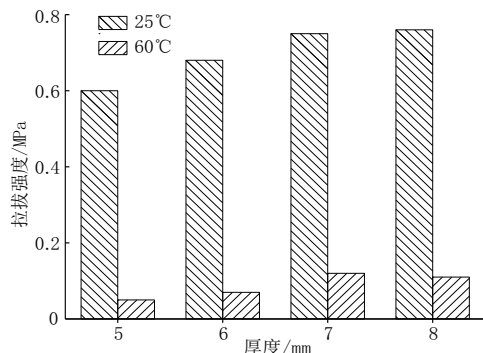


图2 不同沥青胶砂厚度的组合件的拉拔强度

2.3 剪切强度

2.3.1 温度的影响

在溶剂型黏结剂涂布量固定为 0.3 kg/m^2 条件下,以 $25 \sim 60^\circ\text{C}$ 为试验温度条件,采用 45° 斜剪剪切试验分别测试沥青胶砂不同厚度下的剪切强度,结果见图3。各厚度组合件的剪切强度均随温度升高而降低,表明体系抗剪性能受沥青黏弹特性主导。在 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 条件下,适当增加胶砂厚度可分散界面剪切应力,其中 7 mm 试件强度最高;当温度超过 40°C 时, $5 \sim 6 \text{ mm}$ 薄层强度快速衰减,而 7 mm 仍保持较高水平。继续增厚至 8 mm 后,强度不再提高甚至略有下降,说明过厚胶砂层易产生层内黏弹变形集中,高温下抗剪能力不足。

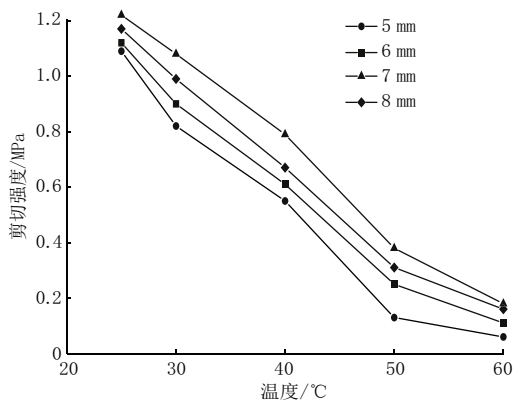


图3 不同温度下组合件的剪切强度

由此可见,沥青胶砂层既承担界面应力过渡作用,又受温度敏感性影响,其合理厚度应在缓解界面应力集中与控制高温变形之间取得平衡。

2.3.2 水的影响

按照成型方法制备不同涂布量的沥青胶砂组合试件,将试件浸入 25°C 的恒温水浴中,分别浸泡 1 d 和 2 d 后,进行斜剪剪切试验测试其剪切强度,试验结果见图4。

由图4可知,双层复合防水黏结层在浸水作用下剪切强度均下降,表明水分显著影响抗剪性能。浸

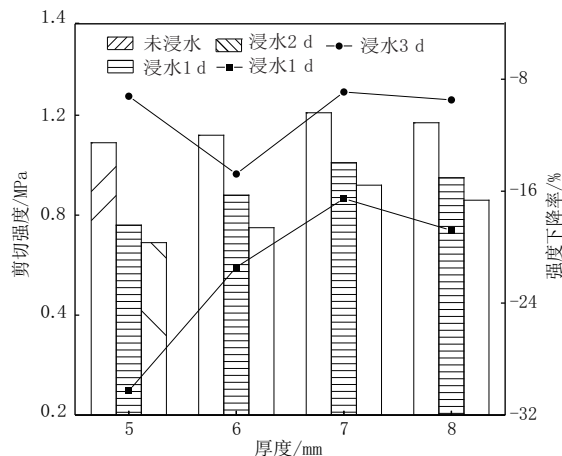


图4 浸水条件下组合件的剪切强度

水 1 d 时,胶砂厚度由 5 mm 增至 7 mm ,剪切强度分别为 1.09 、 1.12 、 1.2 MPa ,强度下降率由 30.27% 降至 16.52% ,说明适当增厚可抑制早期水损破坏。薄层易渗水削弱黏结力, 7 mm 厚度可阻隔水分并改善界面剪切应力分散。浸水 2 d 后,剪切强度进一步下降,差异缩小。 7 mm 试件仍最高 (0.92 MPa , 下降 8.91%), 5 mm 降至 0.69 MPa , 8 mm 低于 7 mm ,说明过厚胶砂易产生局部应力集中和应变不协调,破坏由界面向胶砂层内部转移。因此,胶砂厚度对剪切性能呈非线性关系,且 7 mm 厚度在温度与浸水条件下性能最优。

双层复合结构中,下层溶剂型黏结剂主要承担界面附着与防水功能,上层沥青胶砂起到应力缓冲与剪切过渡作用。胶砂层过薄时,界面剪切应力集中,易发生界面破坏;厚度适当增加可分散应力。但当厚度过大,胶砂层内黏弹变形增大,产生层内剪切集中,高温下更易发生内聚破坏。因此,胶砂厚度对层间力学性能呈现非线性影响。

由此可见,双层复合结构的层间协同机理可概括为“界面黏结控制—胶砂缓冲过渡—层内变形协调”三阶段传递模式。合理厚度的胶砂层能够在界面与上部沥青层之间形成应力过渡区,实现剪切应力的渐进式传递,而非集中式突变,从而提高整体结构稳定性。

3 结 语

(1)溶剂型黏结剂涂布量对界面附着性能具有影响,在 0.3 kg/m^2 条件下附着力达到最佳。

(2)沥青胶砂厚度对复合结构拉拔与剪切性能均呈现非线性影响规律,厚度不足时界面应力集中明显,厚度过大时层内黏弹变形增大,不利于抗剪稳定性。

(3)在高温及浸水作用下,双层复合结构抗剪性能均出现不同程度衰减,其中胶砂厚度为6~7 mm时性能保持率最高,表明该厚度范围具有较优的应力缓冲与界面协同能力。

(4)从工程应用角度建议,双层复合防水黏结层宜采用“0.3 kg/m²溶剂型黏结剂+6~7 mm胶砂层”结构形式,并在后续研究中进一步开展干湿循环与冻融条件下的长期耐久性验证。

参考文献:

[1] 王端宜,司徒坚文,聂文.高温多雨地区钢桥面铺装脱粘病害成因试验研究[J].桥梁建设,2025,55(5):34-40.

[2] 徐学召,张治涛,耿瑞聪.基于性能综合比选的铺装界面粘结性能研究[J].科学技术创新,2024(6):158-161.

[3] 苏雪梅.水泥混凝土桥面防水粘结层力学特性及其影响因素分析[J].价值工程,2025,44(23):1-3.

[4] 康文娟.基于复合梁弯曲疲劳试验的水泥混凝土桥面防水粘结层材料优选[J].福建交通科技,2019(1):71-74.

[5] 戴文斌,王笑风,李豪.防水粘结层材料复合件耐久性能评价[J].新型建筑材料,2023,50(3):143-146.

[6] Biao H, Jie S, Songqiang C. Research on the performance of different waterproof bonding layer materials for steel bridge decks[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 39858-39858.

[7] 赵曦.桥面防水粘结层材料优选与适配性研究[D].西安:长安大学,2023.

[8] 刘林林,李银山,纵瑾瑜,等.钢桥面刚柔复合铺装防水粘结材料性能对比研究[J].中国胶黏剂,2021,30(2):50-53;58.

[9] 何丽红,张博,马悦帆,等.水性环氧乳化沥青桥面防水粘结层材料性能研究[J].化工新型材料,2022,50(11):240-244.

[10] Wenyao L, Kezhan Y, Hongyan J. Bonding performance evaluation on WTR-APAO composite modified asphalt as waterproof adhesive layer for concrete bridge[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346: 128492.

[11] Yu H, Feng X, Ge J, et al. Evaluation of the developed and performance of epoxy resin bonding materials for steel bridge deck pavement layers[J]. Construction and Building Materials, 2024: 455139155-139155.

[12] 马兰.高渗透桥面防水粘结层材料性能研究[J].新型建筑材料,2020,47(10):164-168.

[13] Huizhen L, Xiangwei M, Xiaofeng Y, et al. A Study on the Bonding Properties of SBR/WER Composite-Modified Emulsified Asphalt Waterproof Bonding Layer for Bridge Floors[J].Advances in Materials Science and Engineering, 2025: 1136796.

[14] 胡文娟.桥面防水粘结层材料室内及现场性能测试分析研究[J].合成材料老化与应用,2023,52(1):95-97.

[15] Xu Y, Fan Z, Wang Z, et al. Research on anti-shear performance of waterproof adhesive layer (WAL) in polyurethane-mixture steel-bridge pavement structure[J]. Construction and Building Materials, 2024: 417135314.

[16] 戴中伟.城市高架桥双层高弹高粘+防水粘结层钢桥面铺装体系施工技术研究[J].江西建材,2022(10):201-203.

[17] 聂忆华,钟世雄,毛惺,等.UHPC-AC复合路面沥青层剪应力试验研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(6):7-15.

[18] 张虎,吴剑.AC-13C沥青混合料配比设计及性能试验研究[J].江西建材,2024(2):34-36.

[19] 毛浓平.溶剂型粘结剂在水泥混凝土桥面铺装防水粘结层的应用研究[J].公路交通技术,2016,32(2):11-15;24.

[20] 李娣,朱瑶之,沈聪.溶剂型橡胶沥青防水粘结层在钢桥面铺装中的应用研究[J].中国建筑防水,2018(5):37-40.

[21] 王永生,周吉森,高大鹏,等.基于拉拔试验的沥青胶砂-集料界面相粘结性能研究[J].森林工程,2025,41(2):430-438.

[22] 范会斌,张倩.沥青混合料胶砂填充设计法[J].公路,2020,65(3):275-278.

[23] JTG/T 3364-02—2019 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S].

[24] 孟丽丰,王静,戴文斌.混凝土桥面铺装防水粘结层现场检测技术研究[J].新型建筑材料,2022,49(11):101-106.

[25] 丘伟强.基于室内试验的桥面防水粘结层性能评价[J].黑龙江交通科技,2019,42(1):112-114.

[26] 姚政权.钢桥面防水粘结层材料性能对比及应用[J].四川水泥,2025(6):198-200.

[27] 康广朝,董春晓,李若晨,等.不同温度下水泥混凝土桥面铺装结构抗剪性能研究[J].新型建筑材料,2024,51(3):111-115.

[28] 焦伟立,李豪,郭天帅,等.不同温度条件下防水粘结层材料各粘结强度指标之间关联性分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(4):117-124.

[29] 段宝东,李俊,李明亮,等.基于层间粘结性能的排水沥青路面防水粘结层材料参数研究[J].公路工程,2019,44(2):45-49.

[30] 李清华,李银山.水泥混凝土桥面薄层沥青铺装结构研究[J].西部交通科技,2022(7):151-154.