

# 路面黏层复合改性沥青材料的性能试验与分析

普艳梅\*

(云南通衢工程检测有限公司, 昆明 650000)

**摘要:** **目的** 优化路面黏层复合改性沥青材料性能, 提升层间黏结与耐久稳定性。**方法** 以苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)改性剂、橡胶粉掺量及黏层油洒布量为变量, 设计5组试件, 经浸水老化预处理后施加层间剪切应力, 测试力学性能。**结果** 黏层油洒布量  $1.2 \text{ kg/m}^2$  的组合黏结强度最优, SBS 改性剂掺量 4% 的组合剪切黏结强度保留率最高, 说明抗水老化性能最优。**结论** 明确各参数对材料性能的影响规律, 为工程中黏层材料配比优化及路面层间长期稳定提供技术支撑。

**关键词:** 路面黏层; 复合改性沥青材料; 材料性能试验; 黏结强度

## 0 引言

路面黏层是保障沥青路面层间整体性与荷载传递效率的关键环节, 层间黏结失效易引发推移、剥落等病害, 直接缩短道路服役周期<sup>[1]</sup>。传统黏层沥青多采用单一改性或未改性基质沥青, 在复杂气候与重载交通作用下, 暴露出黏结可靠性不足、抗水损害与抗老化能力薄弱等问题。复合改性技术通过多组分协同作用, 可针对性优化沥青材料核心性能, 成为解决黏层技术难题的有效途径<sup>[2]</sup>。基于此, 本研究设计复合改性黏层沥青体系, 通过试件制作、环境预处理、应力施加及数据采集等系列试验, 系统探究材料黏结强度与耐久性能, 为路面黏层材料优化与工程应用提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

依托省道 S11 师宗至丘北高速公路文山段项目, 路线按双向四车道高速公路标准建设, 设计速度  $80 \text{ km/h}$ , 路基宽度  $25.5 \text{ m}$ , 桥隧比  $45.7\%$ , 适配复杂路况下路面黏层力学性能需求。试验选用 70#道路石油沥青为基质沥青,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$   $100 \text{ g}$  荷载  $5 \text{ s}$  作用下针入度  $62\sim 78 \text{ mm}$ , 软化点  $47\sim 52 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  延度  $18\sim 25 \text{ cm}$ ,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  密度  $0.990\sim 0.995 \text{ g/cm}^3$ 。

复合改性沥青材料以该基质沥青为基材, 掺加  $3\%\sim 5\%$  线型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)改性剂、 $8\%\sim 12\%$   $40 \text{ 目}$  废旧橡胶粉、 $1\%\sim 2\%$  纳米碳酸钙粉体, 搭配  $0.3\%\sim$

$0.5\%$  聚烯烃类稳定剂与  $0.2\%\sim 0.4\%$  受阻酚类抗老化剂, 经  $160\sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$  高温熔融、 $4000 \text{ r/min}$  高速剪切乳化工艺制备。集料选用文山本地玄武岩, 粒径  $2.36 \text{ mm}$  至  $4.75 \text{ mm}$ , 压碎值  $12\%\sim 15\%$ , 洛杉矶法磨耗值不大于  $28\%$ , 与沥青黏附性等级不低于 5 级<sup>[3]</sup>。

复合改性沥青材料关键指标为: 针入度指数  $0.6\sim 1.0$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  弹性恢复率不小于  $75\%$ ,  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  低温延度不小于  $30 \text{ cm}$ ,  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  旋转黏度  $3.0\sim 5.0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 薄膜烘箱老化后质量损失率不大于  $0.8\%$ , 残留针入度比不小于  $65\%$ , 为后续性能试验提供稳定材料支撑。

### 1.2 仪器与设备

试验采用 JRJ-300-S 型高速剪切机(转速  $0\sim 10000 \text{ r/min}$ ) 制备复合改性沥青, 配套控温范围室温- $200 \text{ }^\circ\text{C}$  的导热油加热釜; 试件成型用 HYE-200 型液压压实机(最大压力  $10 \text{ MPa}$ )、精度  $\pm 0.05 \text{ kg/m}^2$  的自动洒布设备; 辅助设备含控温精度  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  的恒温烘箱、 $105 \text{ }^\circ\text{C}$  鼓风干燥箱及密封干燥器; 层间剪切试验依托 CMT5105 型万能试验机(加载速率  $0.1\sim 50 \text{ mm/min}$ ), 所有设备均经计量校准后投入使用。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 层间复合沥青试件制作

采用马歇尔标准试件尺寸为直径  $101.6 \text{ mm}$ 、高度  $63.5 \text{ mm}$  的模具, 分 5 组制作层间复合沥青试件<sup>[4]</sup>。各组以 SBS 改性剂掺量、橡胶粉掺量及黏层油洒布量为变量设计配比, 仅单一参数调整其余条件保持一致, 具体分组参数详见表 1。

表1 层间复合沥青试件各组分分配比参数表

试验组	SBS 改性剂 掺量/%	橡胶粉掺量/%	黏层油洒 布量/(kg/m <sup>2</sup> )
A组	3	8	0.8
B组	4	8	0.8
C组	3	10	0.8
D组	3	8	1.0
E组	3	8	1.2

集料提前加热至 160~170 °C, 复合改性沥青加热至 170~180 °C, 通过小型沥青洒布装置均匀喷洒于集料表面, 黏层油需全覆盖无漏洒<sup>[5]</sup>。将裹覆黏层油的集料分层装入模具, 每层装入量控制为总质量的一半, 采用自动击实仪在 150~155 °C 击实温度下双面各击实 75 次, 成型后脱模放入 25 °C 恒温养护箱, 养护 24 h 至试件温度与环境温度一致。

### 1.3.2 浸水老化试件预处理

选取养护完成的 A 至 E 组层间复合沥青试件, 均采用毛刷清除表面浮尘与松散集料, 保证路面黏层完整暴露且无损伤<sup>[6]</sup>。各组试件同步放入真空饱水仪, 施加 0.09 MPa 真空压力持续 20 min, 充分排出黏层内部孔隙空气, 解除压力后自然恢复常压 10 min。随后将所有试件按相同间距悬挂于不锈钢支架, 浸入温度设定为 60 °C 的恒温水槽, 浸水深度统一高出试件顶面 20 mm, 避免试件与槽壁或彼此接触造成受力不均。

全过程维持水槽水温波动不超过±1 °C, 通过高精度温控系统实时监测调节, 各组浸泡时长均严格控制为 72 h, 期间不中断水温稳定供应<sup>[7]</sup>。浸水结束后, 各组试件同步取出, 用无纺布吸水滤纸快速吸干表面游离水分, 立即移入 25 °C 恒温环境静置 3 h, 使试件温度与测试环境达成平衡, 完成统一标准的浸水老化预处理, 确保各组仅因复合改性沥青材料本身参数差异产生性能区别。

### 1.3.3 层间剪切应力施加

试验采用微机控制电子万能试验机搭配路面黏层专用剪切夹具, 将 A 至 E 组预处理完成的层间复合沥青试件精准安装于夹具中心, 剪切面与试件层间界面完全重合, 夹具加持力度控制在 0.3 MPa 至 0.5 MPa, 避免试件滑移或黏层损伤。试验环境温度恒定 25 °C, 通过恒温环境箱维持温度波动不超过±0.5 °C, 试件静置 1 h 达成温度平衡后启动加载程序<sup>[8]</sup>。

加载方式采用恒速率剪切加载, 速率设定 5 mm/min, 加载方向垂直于层间界面, 确保剪切应力集中作用于路面黏层及复合改性沥青材料结合区域。力值传感器量程设定 50 kN, 精度 0.01 kN, 实时捕捉加载过程中的力值变化, 持续施加剪切力直至试件出现层间剥离、裂缝扩展或完全破坏即停止加载<sup>[9]</sup>。各组按相同流程依次施加剪切应力,

每完成 1 组试件加载后清洁夹具接触面, 消除残留复合改性沥青材料对后续试验影响。

### 1.3.4 力学性能数据采集

万能试验机配套数据采集系统启动后, 设定采样频率 100 Hz, 同步捕捉 A 至 E 组层间复合沥青试件剪切加载过程中力值与位移的动态变化。系统自动记录剪切力峰值、对应位移量、力值上升段斜率及破坏瞬间力值衰减速率, 同时采集加载全过程连续力值-位移曲线, 覆盖从受力初始阶段至层间完全破坏的完整数据链<sup>[10]</sup>。

通过游标卡尺测量每组试件上中下 3 个截面直径, 取平均值后按直径 101.6 mm 标准尺寸换算层间接触面积, 核算结果约 8107 mm<sup>2</sup>, 结合剪切力峰值换算路面黏层黏结强度, 单位统一为 MPa。

同步记录每组试件破坏形态相关数据, 包括破坏界面位置、裂缝扩展长度及残余黏结力数值, 所有采集数据按组分类存储, 标注对应复合改性沥青材料参数与黏层油洒布量信息, 形成标准化数据记录, 为后续黏结强度评估与耐久性能分析提供完整原始数据支撑。

## 1.4 数据处理

每组试验设置 3 次平行重复, 采用格拉布斯准则剔除异常数据(显著性水平  $\alpha=0.05$ )。通过 Excel 2019 软件整理原始数据, 计算黏结强度、剪切极限应力及强度保留率的算术平均值与标准差; 借助 Origin 9.0 软件绘制剪切应力-黏结强度关系曲线及耐久性能对比图。所有数据保留 3 位有效数字, 统计学分析聚焦参数对性能的影响显著性, 确保试验结果的可靠性与可比性。

## 2 结果与分析

### 2.1 黏结强度评估

基于层间剪切应力施加与力学性能数据采集试验, 各组剪切应力-黏结强度关系如图 1 所示。

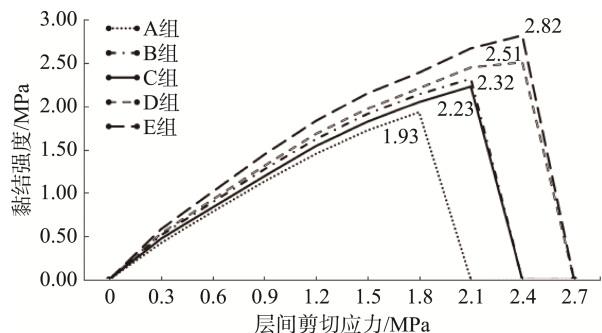


图1 不同复合改性沥青组层间剪切应力-黏结强度关系曲线

A 组峰值黏结强度 1.93 MPa, 层间剪切极限应力 2.1 MPa, 呈现基准参数下的层间黏结性能; B 组峰值 2.32 MPa, 层间剪切极限应力 2.4 MPa, 因 SBS 分子链的增强作用, 层

间黏结与抗剪切能力显著提升; C 组峰值 2.23 MPa, 层间剪切极限应力 2.4 MPa, 橡胶粉的颗粒填充与弹性改性虽改善性能, 但增韧效果弱于 SBS 化学改性; D 组峰值 2.51 MPa, 层间剪切极限应力 2.5 MPa, 洒布量增加使沥青膜厚度与界面结合面积提升, 黏结强度及抗剪切极限同步增长; E 组峰值 2.82 MPa, 层间剪切极限应力 2.7 MPa, 洒布量进一步增加后沥青膜的黏附裹覆作用达最优, 层间剪切黏结性能最强。可见, SBS 改性剂掺量、黏层油洒布量对黏结强度与抗剪切能力提升效果显著, 橡胶粉掺量次之, 三者协同可优化路面黏层复合改性沥青层间剪切黏结性能。

## 2.2 耐久性能分析

经浸水老化预处理与层间剪切应力施加试验, 各组剪切黏结强度耐久性能如图 2 所示。

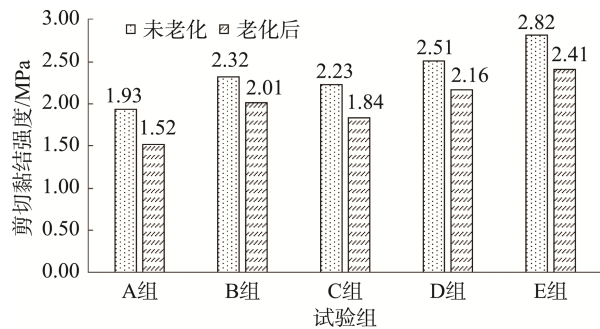


图 2 A~E 组复合改性沥青剪切黏结强度耐久性能对比

A 组未老化 1.93 MPa, 老化后 1.52 MPa, 剪切黏结强度保留率约 78.76%, 基础参数下性能衰减明显; B 组未老化 2.32 MPa, 老化后 2.01 MPa, 剪切黏结强度保留率约 86.64%, SBS 改性剂掺量提升至 4%, 化学交联结构增强沥青膜密实性, 抗水老化性能最优; C 组未老化 2.23 MPa, 老化后 1.84 MPa, 剪切黏结强度保留率约 82.51%, 橡胶粉掺量增至 10%, 抗老化性弱于 SBS 改性, 衰减程度更高; D 组未老化 2.51 MPa, 老化后 2.16 MPa, 剪切黏结强度保留率约 86.06%, 洒布量 1.0 kg/m<sup>2</sup> 使界面结合紧密, 水损害影响降低; E 组未老化 2.82 MPa, 老化后 2.41 MPa, 剪切黏结强度保留率约 85.46%, 洒布量 1.2 kg/m<sup>2</sup> 优化界面裹覆, 抗水老化能力较强。综上, SBS 改性剂掺量对剪切黏结强度保留率提升作用显著, 黏层油洒布量合理增加可改善水稳定性, 橡胶粉掺量需结合抗老化需求优化, 三者协同可增强路面黏层复合改性沥青在水损害与剪切作用下的耐久性能。

## 3 讨论与结论

本研究通过多参数复合改性沥青黏层材料的性能试验, 揭示了改性参数对黏结强度、耐久性能的影响规律, 为路面黏层材料优化与工程应用提供依据。

(1)黏结强度方面, SBS 改性剂掺量、黏层油洒布量对层间剪切黏结强度提升作用显著, 橡胶粉掺量次之; 其中 E 组黏层油洒布量 1.2 kg/m<sup>2</sup>、SBS 掺量 3% 的组合层间剪切黏结强度及抗破坏能力最优, B 组 SBS 掺量 4%、黏层油洒布量 0.8 kg/m<sup>2</sup> 的组合性能次之, 均可满足不同荷载等级路面层间强黏结需求。

(2)耐久性能上, SBS 改性剂通过化学交联增强沥青膜密实性, 大幅提升抗水老化性能; 黏层油洒布量合理增加可优化界面水稳定性, 橡胶粉掺量对耐久性能的改善弱于 SBS 改性, 工程中需优先通过 SBS 改性保障水损害环境下的层间耐久性能。

(3)综合应用时, 根据交通荷载、气候条件协同优化 SBS 改性剂掺量、黏层油洒布量及橡胶粉掺量, 以实现黏层材料黏结强度与耐久性能的平衡, 为高速公路路面层间长期稳定提供材料技术支撑。

## 参考文献

- [1] 于丽娜. 沥青路面黏层材料直剪性能及影响因素研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2024(5): 6-10.
- [2] 张建华, 王倩, 忻磊迪, 等. 高黏改性乳化沥青粘层力学性能研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(7): 281-286, 30.
- [3] 姜雪亮. 南方地区改性乳化沥青粘层油技术指标研究[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(3): 170-175.
- [4] 张嘉祥. 高黏纳米复合改性沥青 OGFC 超薄磨耗层在高速公路中的应用[J]. 交通世界, 2025(11): 92-94.
- [5] 宋家楠. 粘层用复合改性乳化沥青制备及层间性能研究[J]. 北方交通, 2022(8): 64-67.
- [6] 戴文斌, 王笑风, 李豪. 防水粘层材料复合件耐久性能评价[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(3): 143-146.
- [7] 李洋洋. 某公路项目桥面铺装防水粘层的材料优选及性能分析[J]. 交通世界, 2024(28): 123-125.
- [8] 王东浩, 史伟, 王剑伦, 等. 基于层间抗剪性能的黏层材料研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(10): 215-217, 27.
- [9] 李嘉, 肖鹏, 范思源, 等. 基于表面能理论的粘结剂-UHPC 粘层失效模式分析[J]. 材料导报, 2024, 38(14): 135-141.
- [10] 陈乘鑫. 沥青混凝土铺装层间粘层材料的性能研究与应用[J]. 广东建材, 2023, 39(6): 12-14, 118.