

公路工程沥青路面裂缝修复技术及施工工艺探析

刘红强

(宁夏公路管理中心, 宁夏 银川 750011)

摘 要 沥青路面裂缝是影响道路使用寿命与结构安全的关键病害之一, 精准修复对提升道路性能具有重要意义。本文基于裂缝类型、成因与演化机制, 构建裂缝技术识别体系, 并结合力学模型与材料参数开展技术适配分析, 围绕封层、灌缝、开槽与复合修复等不同修复路径, 系统梳理施工工艺流程与质量控制要点。实测数据显示, 规范化修复可使裂缝宽度降低至原有的 30%, 扩展速率下降超过 60%, 并显著提高结构模量与路用性能指标。

关键词 沥青路面; 裂缝病害; 修复技术; 结构性能

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.020

0 引言

沥青路面因其良好的行车舒适性与施工便捷性被广泛应用于公路工程领域, 但在长期服役过程中易发生各种类型的裂缝病害, 严重影响结构性能与道路安全。裂缝的产生涉及材料劣化、交通荷载、环境应力及施工质量等多重因素, 表现出显著的多源性和阶段性特征。随着路网密度与交通强度的不断提升, 裂缝修复需求呈增长趋势, 需从裂缝识别、成因机制到修复技术与施工工艺全过程进行系统分析, 构建技术路径清晰、施工可控、性能可评价的裂缝修复体系。

1 沥青路面裂缝类型与成因分析

1.1 常见裂缝类型分类

沥青路面裂缝根据其形态与分布规律可划分为纵向裂缝、横向裂缝、龟裂、反射裂缝和滑移裂缝等类型。纵向裂缝通常沿行车方向平行于路中心线展开, 常见于施工接缝位置或基层结构不均处; 横向裂缝和路面中心线基本保持垂直, 但宽度不一, 裂缝长度有的可能贯穿整个路面, 多因温度变化诱发的材料收缩而形成; 龟裂表现为密集且规则的龟甲状裂纹, 横纵向交错分布, 宽度超过 1 mm, 间距小于 40 mm, 反映结构层老化或疲劳破坏; 反射裂缝源于旧路层面裂缝在新铺层中的延伸传导; 滑移裂缝多呈对角线形式, 通常因剪切应力集中引起^[1]。

1.2 裂缝形成的主要原因

裂缝形成受多种因素共同作用, 主要包括材料性能退化、结构荷载作用 and 环境影响三类。在材料方面, 沥青随使用年限增长会发生老化, 粘结性和延展性下

降, 易产生脆裂。在结构方面, 重复荷载引发疲劳裂缝, 车流量以及车辆荷载逐年增加的背景下, 路面强度不能满足实际需求, 难免就会造成路面裂缝问题, 重载车辆通行频率超过 3 000 辆/日时裂缝概率显著上升^[2]。在环境方面, 昼夜温差大于 15 ℃或年均冻融周期超过 30 次的地区, 热胀冷缩频繁, 易诱发温度裂缝。此外, 施工质量不达标、接缝处理不当等也会加剧裂缝发展。

1.3 裂缝诊断与评估方法

裂缝诊断依赖现场检测与图像识别技术, 常用方法包括目测记录、激光测距、高清摄像巡查与地质雷达扫描, 评估指标主要涵盖裂缝长度、宽度、密度与分布范围, 依据《公路技术状况评定标准》(JTG5210—2018) 可分为轻度、中度与重度等级。当前普遍采用数字图像处理算法提取裂缝边缘轮廓, 结合人工智能模型分类判别裂缝类型, 在结构评估中还需结合弯沉值与模量测试结果, 评估裂缝对整体承载能力的影响程度, 以指导后续修复方案选择。

2 裂缝修复关键技术及适用性分析

2.1 表面封层与灌缝技术

表面封层与灌缝技术主要应用于早期微细裂缝与非结构性裂缝的处理, 其中表面封层通过喷洒或铺设封层材料于裂缝及其周边区域, 以防止水分渗入和氧化反应, 常用材料包括快干乳化沥青、橡胶沥青及聚合物改性乳液, 喷洒厚度一般控制在 1.0 ~ 1.5 mm 之间, 渗透深度在 3 ~ 5 mm 范围内, 可有效抑制细裂纹扩展^[3]。灌缝技术适用于裂缝宽度为 3 ~ 10 mm 的中度裂缝修复, 常用灌缝材料包括热灌缝胶、冷补聚合物胶与改性

沥青类材料。热灌缝施工温度需控制在 $170 \sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,冷灌缝材料黏结强度一般不低于 0.25 MPa ,延展性能在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下拉伸率不低于 250% 。施工工艺包括裂缝清理、加热、注胶与压实四个环节,其中裂缝内部清洁程度对修复效果影响显著,灌缝后养护期一般为 $2 \sim 4$ 小时,完全固化后表面抗剪强度应达到 0.3 MPa 以上。

裂缝灌缝材料性能可通过动态剪切模量 G^* 与相位角 δ 描述其高温稳定性与黏弹性行为,其抗变形能力常用性能指标如下:

$$G^*/\sin(\delta) > 1.0\text{ Pa (PG 等级要求)} \quad (1)$$

式(1)中, G^* 表示材料的复数模量, δ 为相位角,该值越大表示材料流动性越强,越小则表示材料刚性越高。

2.2 开槽填补与贴缝带修复技术

开槽填补技术适用于结构性裂缝或中宽裂缝的处理,裂缝宽度通常在 $5 \sim 25\text{ mm}$ 范围,裂缝深度控制在 $20 \sim 50\text{ mm}$ 之间,施工工艺包括裂缝切割、槽口清理、灌注填料及压实等过程,填料类型包括热拌沥青混合料、冷补料与聚合物改性砂浆^[4]。热拌料常控制出料温度为 $160 \sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,铺设压实后密度宜达到 2.35 g/cm^3 以上,压实度不低于 96% ,为保证粘结效果,常在缝壁预涂界面剂,其拉拔黏结强度需超过 0.4 MPa 。在使用冷补型材料修复时,建议选用掺加矿物纤维和 SBS 改性的混合材料,其常温压实后抗渗性能提升幅度可达 35% ,冻融循环后结构完整性保持率不低于 90% 。贴缝带修复多用于低等级道路及养护后期的裂缝延缓技术,贴缝材料通常为自粘橡胶沥青复合层或聚合物改性带状材料,宽度为 $30 \sim 50\text{ mm}$,厚度控制在 $2 \sim 3\text{ mm}$ 。贴缝带施工温度宜控制在 $10 \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,贴合强度应大于 0.3 MPa ,抗老化能力测试周期达 500 h 紫外照射不产生开裂。对贴缝带施工后的长期黏结稳定性评估表明,在高温环境($\geq 45\text{ }^{\circ}\text{C}$)连续作用 72 小时后,其剪切强度下降幅度小于 12% ,表现出优良的界面稳定性能。

贴缝带与沥青混合料界面应力分布可通过剪切滑移模型计算,贴缝层剪切强度表达如下:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n + c \quad (2)$$

式(2)中, τ 为剪应力, μ 为摩擦系数, σ_n 为法向应力, c 为界面粘结强度常数。该模型可用于评估材料界面剪切破坏的可能性和抗滑移能力。

2.3 复合材料裂缝封闭及结构补强技术

复合材料修复技术适用于深层裂缝及重复疲劳裂缝的封闭与补强,采用材料包括玻璃纤维增强聚合物

(GFRP)、芳纶纤维增强复合层(AFRP)及环氧树脂浸渍布,该类材料具有高模量、高黏结强度及良好的温度稳定性,其抗拉强度通常超过 600 MPa ,弹性模量在 $30 \sim 50\text{ GPa}$ 范围内^[5]。喷涂式复合材料施工工艺主要包括裂缝预处理、底涂封闭、喷涂主层材料、表面覆膜与固化,喷涂厚度控制在 $3 \sim 8\text{ mm}$,固化后黏结强度应大于 0.5 MPa ,耐水性测试中质量损失率不得超过 2% 。纤维增强布铺设通常采用湿法或干法结合技术,其拉伸变形控制范围在 1.5% 以内,纤维—基材界面黏结性能是决定裂缝封闭效果的关键因素之一^[6]。

其抗裂增强机制可通过界面断裂能模型描述,裂缝扩展阻力 G_c 计算如下:

$$G_c = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (3)$$

式(3)中, G_c 为单位裂缝扩展所需能量, K_{IC} 为材料断裂韧度, E 为弹性模量。该参数越大,表示材料对裂缝扩展的抑制能力越强。

复合材料修复技术广泛应用于特殊路段、桥面铺装与交通密集区,其性能稳定性对长周期道路运行安全具有显著保障作用,在长期荷载与环境耦合作用下,复合材料的疲劳寿命可达传统材料的 $2 \sim 3$ 倍。研究显示,在年通车量超过 2 000 万辆的主干道上使用 GFRP 封闭层,其裂缝再生周期平均延长 35 年,表面模量下降率低于 15% 。因此,该类修复技术在高性能路面养护中具备重要应用价值。

3 裂缝修复施工工艺流程与质量控制

3.1 裂缝修复前的准备与勘察

施工准备阶段包括目标区域划定、裂缝现状数据采集、结构层参数调查与材料方案制定,裂缝区域需依据病害等级进行等级分区,并采用激光裂缝扫描设备与全站仪进行精确测绘,误差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。裂缝长度统计宜采用等距断面法,推荐断面间距为 10 m ,裂缝宽度、深度分别采用图像识别系统与裂缝深探针仪检测^[7]。结构层参数调查中,主要通过地质雷达与落锤弯沉仪进行评估,其模量反演值误差范围不应超过 10% ,沥青面层模量需不低于 1 000 MPa ,基层模量不得低于 150 MPa ,基层厚度不低于 180 mm 。施工前材料性能检验包括延度、软化点、针入度、复数模量、拉伸强度等多个指标,施工设备必须经过高温灌注试验、槽切深度稳定性测试及喷涂均匀性检定,合格率应达到 98% 以上。交通疏解方案制定应结合日均交通量(ADT)与车道占用面积比进行控制,ADT 超过 10 000 辆/日的路段,应设立连续监控与警示系统,材料进场批次抽检率应不低于 10% ,同一型号材料试验结果变异系数不得大于 5% 。

3.2 修复过程的标准化作业流程

裂缝修复施工过程需依据裂缝类型和宽深特性设定作业路径,以宽度 610 mm、深度 20 ~ 40 mm 的中裂缝为例,其典型作业流程为切缝—清缝—加热—注胶—压实—表面整平,切缝过程采用高精度锯缝机,锯缝深度应控制为裂缝深度的 1.2 倍,清缝使用高压风枪或真空吸尘装置,清理效率需达到 95% 以上。加热步骤要求沥青灌缝料加热至 170 ~ 190 ℃ 并保持恒温注入,注入速度控制在 0.5 ~ 0.8 L/m,压实设备为钢轮压路器或履带式振动压板,其单位压力控制在 0.4 ~ 0.6 MPa 范围。表面处理应采用封层乳液,涂布量控制为 0.5 ~ 0.8 kg/m²,施工后应进行 48 小时封闭养护。在施工工艺的质量检验中,设置过程控制点 9 项、关键控制点 4 项,关键控制点合格率须达到 100%,具体如表 1 所示。

表 1 裂缝修复标准化工艺关键控制点设置表

序号	控制点内容	控制标准	合格率要求
1	灌缝料温度控制	170 ~ 190 ℃	100%
2	注胶深度一致性	偏差 ≤ ±2 mm	≥ 98%
3	表面整平高度差	高差 ≤ 3 mm	≥ 95%
4	封层材料黏结强度	≥ 0.3 MPa	100%

多类型裂缝组合修复中采用多工序并行机制,施工调度应使用基于 BIM 技术的工序模拟系统,模拟施工干扰率不得超过 15%,每道工序间需设定 20 ~ 30 分钟冷却时间,以避免交叉污染。

3.3 施工质量控制与后期维护

质量控制涵盖原材料、施工过程、结构性能与修复效果四个层面。在原材料控制方面,热灌缝材料的针入度要求为 60 ~ 90 (0.1 mm),延度不低于 30 cm,软化点控制在 80 ~ 90 ℃ 之间,复数模量 G^* 在 60℃ 时应大于 1.0 kPa,低温延展性通过 -12 ℃ 拉伸试验验证不得出现断裂。施工过程中设置四级质量检验流程,包含班组自检、现场监理、第三方抽检与竣工验收,现场检测数据须实时上传至质量监管平台。结构性能评估采用改进型路面结构指数 RSI (Road Structure Index) 指标体系,其计算表达式如下:

$$RSI = \frac{E_{surf} \cdot h_{surf} + E_{base} \cdot h_{base}}{D} \quad (4)$$

式(4)中, E_{surf} 、 E_{base} 分别为面层与基层弹性模量 (MPa), h_{surf} 、 h_{base} 为其厚度 (mm), D 为测得弯沉值 (mm)。RSI 指标可用于量化结构承载恢复程度,修复后 RSI 值应提升至少 20% 以上。

后期维护管理采用周期性巡检与动态监测相结合

的方式,常规裂缝再生周期平均为 36 ~ 48 个月,高强复合修复区域周期可延长至 60 个月以上,再生裂缝密度控制指标为 ≤ 5 条 /100 m,宽度不大于 3 mm,深度小于 10 mm,均不得集中于车辙区,典型区域后期效果统计如表 2 所示。

表 2 修复后裂缝发展指标统计对比表 (单位: mm、条 /100 m)

指标类别	修复前宽度	修复后宽度	修复前深度	修复后深度	修复前密度	修复后密度
普通灌缝区	6.2	2.8	35	12	18	6
复合封闭区	7.1	1.9	38	9	20	3

基于以上数据分析,裂缝修复后的路面性能保持率平均提升至 85% 以上,裂缝扩展速率降低约 60%,通过量化指标控制与高频反馈机制的构建,可实现修复工程的全过程可控与结果可评价,为后续病害管理提供科学支撑。

4 结束语

沥青路面裂缝的修复需在多因素耦合背景下实现工程可持续性 with 结构长期稳定性。通过细化裂缝识别方法、强化修复技术参数匹配与提升工艺过程的标准化程度,可有效降低裂缝再生率与结构损伤扩展速率。未来裂缝修复应逐步向集成化、高性能、智能化方向发展,融合新型材料、实时监测与数字化建模手段,推动道路养护从经验导向向数据驱动转变,构建高效、长效的道路维护技术体系。

参考文献:

- [1] 常丽功.研究沥青路面裂缝灌缝新技术在公路养护中的应用[J].中华建设,2024(04):130-132.
- [2] 杨琼.公路沥青路面裂缝养护技术分析[J].建材发展导向,2023,21(24):150-152.
- [3] 王安邦.公路沥青路面裂缝灌缝材料性能研究[J].工程与试验,2024,64(04):91-93.
- [4] 居玮.公路沥青路面裂缝成因及修补技术研究[J].交通科技与管理,2024,05(12):29-32.
- [5] 佟春阳.公路养护工程中沥青路面修复技术的应用研究[J].交通世界,2023(21):100-102,142.
- [6] 李威.沥青混凝土公路路面裂缝修复施工技术[J].散装水泥,2023(01):164-166,169.
- [7] 肖晓华.沥青路面裂缝处治用聚氨酯修复材料研究[D].长沙:长沙理工大学,2021.