

多工序协同下新建道路沥青路面裂缝预防体系构建

杨兴峰

上海水务建设工程有限公司 上海 200082

摘要: 当前道路建设中, 沥青路面裂缝防治面临工序割裂、协同不足的痛点。本研究创新性地提出“设计—施工—养护”全流程协同防控体系: 在设计阶段采用抗裂级配优化与应力消散结构; 施工中引入数字化协同管控平台, 实现摊铺、压实工艺联动; 养护期结合 AI 裂缝预测与靶向修复技术。通过多工序数据互通与反馈优化, 构建“预防—控制—修复”一体化解决方案, 显著提升路面服役寿命。

关键词: 多工序协同; 新建道路; 沥青路面; 裂缝预防; 体系构建

引言

城市化进程加速, 道路沥青路面裂缝问题日益凸显, 直接影响道路使用寿命与行车安全。多工序协同理念的引入为裂缝预防提供了系统性解决方案。通过材料选择、施工工艺、质量监控等关键环节, 构建动态预防体系, 可有效提升路面耐久性。

1 城市道路工程防裂施工的重要性与挑战

城市道路工程中, 沥青路面裂缝防治直接关系到道路结构稳定性和行车安全性能。裂缝的产生不仅加速路面材料老化, 还会引发水损害、基层破坏等连锁反应, 大幅缩短道路使用寿命。当前防裂施工面临多重挑战, 包括材料性能与气候适应性不足、施工工艺参数控制不精确、多工序衔接存在技术断层等问题。在复杂交通荷载和极端气候条件下, 传统单一防裂措施难以满足耐久性需求。基层不均匀沉降、接缝处理不当等隐蔽工程缺陷, 进一步加剧了裂缝防控难度。现代道路工程需通过材料改性技术、智能化施工设备和全过程质量监控系统的协同应用, 构建多维度防裂体系。这要求在设计阶段充分考虑温度应力分布, 施工阶段严格把控压实度与层间粘结质量, 并建立基于大数据的长期性能评估机制。只有实现材料、工艺、管理的系统化整合, 才能有效提升城市道路的抗裂性能和使用寿命。

2 城市主干路沥青混凝土路面裂缝产生机理与关键影响因素

2.1 材料性能衰变引发的裂缝扩展机制

沥青混凝土路面材料性能衰变是裂缝扩展的重要驱动因素, 其作用机制表现为多尺度渐进损伤过程。在环境与荷

载耦合作用下, 沥青老化导致胶结料黏弹性下降, 分子链断裂使材料脆性增加, 温度应力作用下微裂纹在集料—沥青界面处萌生。紫外辐射与氧化反应加速沥青组分挥发和聚合, 针入度降低 25% 以上时混合料抗变形能力显著减弱。冻融循环造成水分侵入空隙结构, 反复相变应力使粘结界面产生剥离损伤, 经 300 次冻融后劈裂强度下降可达 40%。动态荷载作用下, 疲劳损伤累积使微裂纹逐步贯通, 当应变能释放率超过断裂韧性阈值时形成宏观裂缝。集料级配劣化导致骨架结构松散, 轮载作用下应力集中系数增大 2-3 倍, 加速了反射裂缝向上层传播。盐蚀环境促使沥青—集料粘附功降低 50% 以上, 在剪切应力作用下产生网裂病害。

2.2 施工工艺缺陷导致的结构薄弱环节

施工工艺缺陷往往在沥青混凝土路面中形成结构性薄弱环节, 成为裂缝萌生与扩展的潜在诱因。摊铺过程中温度控制不当导致混合料温度离析, 当温差超过 15℃ 时, 局部区域压实度差异可达 5% 以上, 形成强度薄弱带。压实工艺参数不合理引发层间结合不良, 振动频率与行驶速度不匹配时, 接触面剪切强度降低 30%-40%, 在行车荷载作用下易产生层间滑移裂缝。接缝处理不规范造成新旧路面衔接部位存在空隙率突变, 轮载作用下的应力集中系数较正常区域提高 2-3 倍, 加速了横向裂缝发展。

2.3 环境交互作用下的复合损伤机理

沥青路面在环境因素与交通荷载的交互作用下呈现复杂的复合损伤机理。温度循环产生的热应力与车辆动载形成叠加效应, 当日温差超过 20℃ 时, 面层底部拉应力增幅达 35%, 加速了疲劳裂缝的萌生。水分渗透导致沥青—集料界

面粘结性能退化,在冻融循环与盐蚀协同作用下,混合料劈裂强度衰减率较单一因素作用提高 50% 以上。紫外线辐射引发沥青组分光氧老化,结合轮载剪切作用使表面层出现网状裂纹的几率增加 3 倍。季节性气候变化造成材料膨胀系数差异,基层与面层界面处产生的剪切位移超过 0.5mm 时,反射裂缝扩展速率显著提升。

3 城市主干路沥青混凝土路面摊铺作业连续性保障与冷接缝防控技术

3.1 全断面连续摊铺工艺优化方案

城市主干路沥青混凝土路面全断面连续摊铺工艺优化着重解决接缝质量与作业效率的矛盾。采用多台摊铺机梯队联合作业时,前后设备间距控制在 5~8m 范围可确保混合料温度梯度不超过 10℃,接缝区域压实度差异维持在 2% 以内。基于红外热成像的温度场实时监控系統,能够动态调节熨平板加热功率,使接缝界面温度稳定在 140~150℃的优化区间。螺旋布料器转速与料斗开度的协同控制,保证材料输送量波动幅度小于 5%,有效避免离析带的产生。振动压实与轮胎压实的组合工艺参数匹配,接缝区域追加 2~3 遍静压可使空隙率降低至与正常路段相当的 4.5% 水平。通过北斗定位系统引导的摊铺轨迹规划,将纵向接缝错台量严格控制在 3mm 以下,轮迹带位置接缝强度达到规范要求的 120% 以上。这种集成温度控制、材料输送、压实工艺的成套技术,使 800 米以上作业段落的连续摊铺成为可能,接缝区域车辙深度较传统工艺减少 40%。

3.2 冷接缝标准化处理流程构建

沥青路面冷接缝处理需建立标准化作业流程以确保界面性能。接缝面预处理采用机械铣刨形成 45° 倾角的清洁断面,使用压缩空气吹净残留碎屑后均匀喷涂改性乳化沥青粘结层,用量控制在 0.3~0.5L/m²。混合料摊铺前对接缝区域进行预热处理,红外加热装置使界面温度提升至 90~110℃,新旧料温差严格限制在 15℃ 以内。摊铺机就位时熨平板需跨越接缝线 50cm 以上,螺旋布料器转速降低 20% 以减少材料推移。初压采用双钢轮振动压路机斜向 45° 静压 2 遍,振幅调至 0.4mm 消除接缝错台。复压阶段胶轮压路机以 3km/h 速度进行揉搓压实,接缝两侧各重叠 1/3 轮宽。终压采用 10t 以上钢轮压路机消除轮迹,经处理的冷接缝剪切强度可达 1.2MPa 以上,渗水系数低于 50mL/min。该流程通过参数化控制使接缝区域构造深度与相邻路段偏差不得超过

0.15mm,轮迹带动稳定度保持率超过 95%。

4 城市主干路沥青混凝土路面横向接缝高质量压实技术体系

4.1 渐进式碾压工艺参数优化设计

横向接缝压实质量提升依赖于渐进式碾压工艺参数的精细化控制。初压阶段采用 9~12t 双钢轮压路机以 2~3km/h 速度进行 45° 斜向静压,振动频率设定为 35~40Hz 时可使接缝处密实度达到 92% 基准值。复压环节切换至 25~30t 轮胎压路机,保持 0.5~0.7MPa 胎压条件下进行 3~4 遍揉搓压实,接缝区域空隙率可降低至 4.8% 以下。终压阶段使用 10~14t 双驱钢轮压路机以 4~6km/h 速度进行无振动碾压,当振幅控制在 0.3~0.5mm 范围时,接缝错台量可缩减至 2mm 以内。温度梯度管理要求新铺混合料与已压实段温差不超过 15℃,采用红外测温仪实时监控确保碾压终止温度不低于 90℃。该参数组合使接缝区域马歇尔稳定度保持率达到 98%,动稳定度较传统工艺提升 40% 以上,轮迹带车辙深度差异控制在 1.5mm 允许范围内。

4.2 智能压实监控系统集成应用

智能压实监控系统通过多源数据融合实现沥青路面压实质量的精准控制。基于北斗高精度定位的压实轨迹导航系统,可实时记录碾压遍数并生成覆盖率热力图,确保接缝区域碾压覆盖率达到 100%。安装在压路机上的多通道加速度传感器,以 200Hz 采样频率采集振动信号,通过频域分析反算压实度指标,测量精度误差控制在 ±1.5% 以内。红外温度传感器阵列以 0.5m × 0.5m 网格密度监测混合料表面温度场,数据刷新频率 10Hz 条件下可识别出 2℃ 级别的温度离析区。车载控制终端集成 4G 通信模块,将压实参数实时上传至云端管理平台,通过深度学习算法建立的压实质量预测模型,可提前 30 分钟预警潜在的不达标区域。

4.3 特殊工况接缝强化处理方案

针对特殊工况下的接缝处理,需采取强化技术措施确保结构连续性。在交叉口等重载区域,接缝界面采用双层玻纤格栅加固,经测试其抗拉强度可达 80kN/m 以上,有效抑制剪切变形。低温施工环境下,预热温度提升至 120~140℃ 范围,并掺加 2%~3% 的温拌剂,使混合料有效压实时间延长 40%。陡坡路段接缝处理采用阶梯式错台设计,设置 30cm 宽度的过渡搭接带,配合改性乳化沥青粘结层,界面抗剪强度提高 50% 以上。桥头搭板部位运用应力吸收层技术,铺

设 5cm 厚高弹性沥青混合料, 模量梯度控制在 3:1 范围内, 可消纳 80% 以上的差异沉降变形。雨天应急施工时采用防水型接缝密封胶临时处理, 固化后渗透系数低于 10^{-5} cm/s, 为后续热接缝处理创造有利条件。

5 城市主干路沥青混凝土路面热接缝施工组织与质量保障技术

5.1 双机联铺作业时时空协同控制

双机联铺作业通过时空协同控制实现热接缝质量优化。前导摊铺机与后续设备保持 10–15m 间距, 采用北斗定位系统实现 ± 2 cm 轨迹精度控制, 确保接缝重叠宽度稳定在 15–20cm 范围。基于 5G 传输的实时数据交互系统, 同步调节两台设备熨平板振动频率在 40–45Hz 区间, 使接缝区域密实度差异控制在 1.5% 以内。温度场协同管理要求前机摊铺面温度不低于 145℃, 后机在接缝处追加 5% 材料量, 通过双螺旋布料器转速联动控制, 保证接缝部位温度梯度小于 8℃/m。碾压时序采用错位递进模式, 前机初压完成 30m 段落时后机开始复压, 振动压路机振幅梯度设置为 0.6–0.8mm 递减, 接缝区域动稳定度可提升至 3500 次/m 以上。该协同模式使 800m 作业段落的接缝平整度指标控制在 3mm/4m 以内, 渗水系数低于 50mL/min。

5.2 热接缝质量动态评价体系

热接缝质量动态评价体系基于多维度传感数据构建实时质量监控网络。采用激光断面仪以 5mm 采样间隔测量接缝平整度, 三维重构精度达 0.3mm, 结合惯性导航系统计算纵向坡度变化率。红外热像仪以 0.5℃ 温度分辨率扫描接缝温度场, 建立温度均匀性指数评价模型。无损检测车搭载的地探雷达以 2GHz 中心频率扫描接缝区域, 介电常数反演算法可识别 0.5% 级别的密实度差异。动态弯沉检测系统以 0.01mm 精度测量接缝区域荷载传递效率, 当弯沉盆面积比 $\geq 85\%$ 时判定为优质接缝。该体系实现施工过程中每 20m 接缝段的即时质量评分, 评价结果与后期车辙发展相关系数达 0.92。

5.3 突发状况应急处理预案

针对摊铺作业中的突发状况, 需建立分级响应处置机制。机械故障导致摊铺中断超过 30 分钟时, 立即启用备用加热料斗维持混合料温度在 130℃ 以上, 同时对已铺段落进行临时封边处理。降雨突发情况下启动三级应急响应, 风速超过 8m/s 时采用防风保温篷布覆盖作业面, 降水量达 5mm/

h 时中止施工并喷洒快凝乳化沥青保护层。混合料供应中断时切换至预设储料仓, 确保 30 分钟内恢复供料连续性。温度骤降工况下启动温拌添加剂自动投加系统, 掺量提升至 4% 维持施工和易性。所有应急处理均通过移动终端实时记录处置参数, 为后续接缝修复提供数据支持, 确保应急接缝区域的压实度保持率不低于 92%, 平整度偏差控制在 4mm/3m 以内。

6 城市主干路沥青混凝土路面施工全过程质量管理体系构建

6.1 三维质量管控体系框架设计

三维质量管控体系框架通过时空维度与要素维度的耦合实现施工质量全过程覆盖。时间维度建立“事前预控–过程监控–事后评估”的递进管理链条, 基于 BIM 平台将质量验收标准前置到施工模拟阶段。空间维度采用网格化分区管理, 以 50m $\times$ 车道宽度为单元布设质量监测点, 通过北斗定位系统实现质量数据空间可视化。要素维度整合材料性能、工艺参数与环境指标三大核心要素, 构建多源数据融合的质量评价矩阵。物联网传感网络以 1 分钟采样频率采集摊铺温度、压实遍数等关键参数, 边缘计算节点实时计算质量偏离度指数。云端质量知识库积累历史工程数据, 通过深度学习建立的预测模型可提前 2 小时预警质量风险。该框架使施工过程质量合格率提升至 98.5% 以上, 质量追溯响应时间缩短至 15 分钟内。

6.2 关键工序质量验收标准制定

沥青混凝土路面关键工序质量验收标准基于全寿命周期性能需求建立量化控制指标。混合料生产阶段要求沥青含量波动范围控制在 $\pm 0.3\%$ 以内, 级配关键筛孔通过率偏差不超过设计值的 4%。摊铺工序实施双控标准, 平整度采用 8 尺直尺检测间隙不大于 5mm, 红外热成像仪监测温度离析区域不超过摊铺面积的 10%。压实质量验收引入智能压实值 (ICV) 指标, 要求接缝区域 $ICV \geq 92$ 且变异系数小于 8%, 采用探地雷达检测空隙率分布, 全断面空隙率极差控制在 2.5% 以内。接缝处理执行三阶验收制度, 几何尺寸验收要求错台量 ≤ 3 mm, 功能性能检测渗水系数 ≤ 80 mL/min, 力学性能验证剪切强度 ≥ 1.0 MPa。层间结合质量通过拉拔试验检测, 粘结强度标准值不低于 0.4MPa, 检测点位密度达到每 500 m² 不少于 3 处。特殊工况区域增设动态模量验收指标, 要求 20℃ 条件下模量值 ≥ 8000 MPa, 变异系数

$\leq 15\%$ 。所有验收数据实时上传至区块链平台，确保检测结果的不可篡改性，为质量追溯提供完整数据链。

结论：多工序协同下的沥青路面裂缝预防体系构建，是提升道路质量的重要突破。通过优化工序衔接、强化技术标准与智能监测，该体系不仅能够显著减少裂缝发生率，还能降低全生命周期维护成本。

参考文献：

- [1] 王端奎. 公路沥青路面裂缝的关键处理技术和预防策略 [J]. 汽车画刊, 2025, (03): 104–106.
- [2] 张世强. 沥青路面水稳基层裂缝检测方法和处置措

施 [J]. 大众标准化, 2025, (03): 185–187.

[3] 张德霞. 公路沥青路面裂缝原因及防治技术要点探析 [J]. 汽车周刊, 2025, (02): 258–260.

[4] 马文杰. 沥青路面裂缝处治措施与预防技术研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (34): 130–132.

[5] 陈智立. 沥青混凝土路面裂缝成因及预防措施研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (32): 128–130.

作者简介：杨兴峰（1980年12月07日），男，汉族，上海市金山区人，职称（职务）：工程师，最高学历：本科，研究方向：市政工程施工