

# 公路路面层间粘结施工质量控制技术与病害预防研究

宋秀政

宁津县昌达公路工程有限公司 山东 德州 253400

**摘要:** 公路路面层间粘结是保障路面结构稳定性的关键。施工质量控制需从材料选择、工艺控制、环境管理三方面入手,选用适配气候与交通量的粘结材料,严格控制下承层清洁度与粗糙度,确保粘结层涂布均匀、厚度达标。同时,加强施工环境温湿度监测,避免恶劣条件作业。病害预防需结合预防性养护技术,如封层、裂缝处治及结构强化,定期监测粘结性能,及时修复局部病害,延长路面使用寿命。

**关键词:** 公路路面; 层间粘结; 施工质量; 控制技术; 病害预防

引言: 公路路面作为交通基础设施的核心构成,其层间粘结质量直接关乎路面结构的耐久性与行车安全性。然而,受材料适配性不足、施工工艺波动及环境荷载耦合作用影响,层间粘结失效引发的滑移、脱层等病害频发,显著缩短路面使用寿命并增加养护成本。本文聚焦层间粘结施工质量控制关键技术,系统剖析病害形成机理,提出从材料优化、工艺精细化到全生命周期监测的预防性维护策略,为提升公路路面服役性能提供理论支撑与实践指导。

## 1 公路路面层间粘结理论基础与病害机理分析

### 1.1 层间粘结的结构功能与力学特性

(1) 层间粘结的力学作用: 在公路路面结构中,层间粘结承担着关键力学功能。一方面实现应力传递,将行车荷载产生的竖向、水平应力均匀传递至下承层,避免局部应力集中导致结构破坏;另一方面保障变形协调,使各结构层在温度变化、荷载作用下同步变形,减少层间相对位移引发的附加内力,维持路面整体结构稳定性。(2) 层间接触状态分类: 根据层间粘结效果,接触状态可分为三类。完全连续状态下,层间无相对滑动,应力与变形传递效率最高,是理想状态;滑动接触状态因粘结力不足,层间存在明显相对位移,易引发剪切破坏;半连续状态介于两者之间,局部区域粘结有效,局部存在微间隙,常见于施工质量波动或材料老化初期。

### 1.2 层间粘结材料类型与性能要求

(1) 常用粘结材料: 目前主流材料包括三类。乳化沥青成本低、施工便捷,适用于普通沥青路面层间粘结;改性沥青(如SBS改性沥青)通过添加改性剂提升粘结强度与抗老化性,适用于重载交通路段;环氧树脂粘结剂强度高、耐温性优,但成本较高,多用于特殊工况或路面修复工程。(2) 材料性能指标: 核心指标包括

粘结强度,确保层间不发生剥离;抗剪切性,抵抗水平荷载引发的剪切破坏;耐温性,在高温( $\geq 60^{\circ}\text{C}$ )不软化、低温( $\leq -10^{\circ}\text{C}$ )不开裂,同时需具备一定抗水渗透性,避免水侵蚀破坏粘结界面<sup>[1]</sup>。

### 1.3 层间粘结失效病害类型与成因

(1) 典型病害: 主要包括四种。层间滑移表现为面层与基层相对位移,导致路面推移;脱层为层间完全剥离,引发路面凹陷或裂缝;反射裂缝由基层裂缝向上反射,受层间粘结不足影响加剧;水损害则因水渗入层间,破坏粘结界面,诱发其他病害。(2) 成因分析: 涵盖四方面因素。材料不匹配,如粘结材料与上下层材料相容性差;施工工艺缺陷,如界面清理不彻底、粘结材料涂刷不均;环境因素,高温加速材料老化、雨水渗入界面;交通荷载,重载、频繁制动产生过大剪切力,长期作用导致粘结失效。

## 2 公路路面层间粘结施工质量控制关键技术

### 2.1 施工前质量控制

(1) 下承层表面处理技术: 下承层表面状态直接影响粘结效果,需重点控制清洁度与粗糙度。清洁度控制需通过高压水枪冲洗、机械清扫等方式,彻底清除表面浮尘、松散颗粒及油污,必要时采用溶剂擦拭顽固污渍,避免杂质阻隔粘结材料与基层的结合;粗糙度控制则根据路面类型选择合适工艺,沥青路面可通过铣刨机铣刨形成均匀纹理(铣刨深度通常为3-5mm),水泥混凝土路面可采用抛丸处理或刻槽工艺,使表面构造深度达到0.5-1.0mm,增强层间机械嵌锁力。(2) 粘结材料选择与配比优化: 需结合工程所在地气候条件与交通量确定材料类型及配比。在高温多雨地区,优先选用高粘度改性沥青或环氧树脂粘结剂,其耐温性与抗水渗透性更优;重载交通路段需提高粘结材料的抗剪切强度,可在乳化沥青中掺入3%-5%的水泥或橡胶粉改善性能。配

比优化需通过室内试验验证,如针对改性沥青,需调整改性剂掺量(通常为3%-6%),确保其针入度、软化点等指标满足规范要求,同时通过粘结强度试验确定最佳用量<sup>[2]</sup>。(3)施工环境条件控制:明确施工环境的温度与湿度阈值,避免恶劣条件影响施工质量。温度控制方面,沥青类粘结材料施工温度需不低于15℃,环氧树脂类材料施工温度需在5-35℃之间,低温时需采取加热保温措施;湿度控制要求施工期间空气相对湿度不大于85%,且下承层表面干燥(含水率不超过5%),遇雨天或路面潮湿时需暂停施工,待路面完全干燥后再恢复作业,防止水分滞留层间破坏粘结界面。

## 2.2 施工中质量控制

(1)粘结材料涂布工艺:核心在于保证涂布均匀性与厚度达标。涂布前需调试设备,沥青类材料采用智能洒布车,通过控制洒布宽度(通常为2.5-4m)与车速(3-5km/h),确保单位面积用量均匀(乳化沥青用量一般为0.3-0.6kg/m<sup>2</sup>,改性沥青用量为0.8-1.2kg/m<sup>2</sup>);环氧树脂类材料采用人工刮涂或机械喷涂,使用梳齿状刮板控制厚度(通常为0.8-1.5mm),避免出现漏涂、堆料或流挂现象,涂布后需检查表面平整度,及时修补缺陷。(2)层间铺筑时间间隔控制:需严格把控粘结材料涂布后至上层铺筑的时间,防止材料污染或老化。乳化沥青需待其破乳成型(通常为1-3h,具体视温度而定),表面无明显积水后再铺筑上层;改性沥青需在涂布后30min-1h内完成上层铺筑,避免高温下材料氧化变硬;环氧树脂类材料需在固化前(通常为2-4h,依据产品特性调整)完成铺筑,期间需设置警示标识,禁止人员车辆通行,防止表面污染。(3)压实工艺优化:根据粘结材料类型与上层结构选择合适压实设备及参数。铺筑沥青面层时,优先选用双钢轮压路机(吨位10-13t)与胶轮压路机(吨位20-25t)组合压实,初压温度控制在150-170℃(改性沥青),碾压速度初压2-3km/h、复压3-4km/h,避免速度过快导致粘结层推移;压实过程中需检查路面平整度,发现局部鼓包或松散时,及时刨除重新铺筑,确保层间紧密结合<sup>[3]</sup>。

## 2.3 施工后质量检测与评价

(1)无损检测技术:采用多种检测方法评估粘结性能。拉拔试验使用便携式拉拔仪,在路面随机选取3-5个检测点,测试层间拉拔强度(要求不低于0.8MPa),若强度不足需分析原因并返工;剪切试验通过剪切仪测试层间抗剪切能力(高温剪切强度不低于0.3MPa),评估重载条件下的稳定性;红外热成像技术利用红外相机扫描路面,检测层间脱空或积水区域,脱空面积超过0.1m<sup>2</sup>

时需进行修补。(2)粘结性能长期监测:通过埋设传感器实现持续跟踪。在路面关键路段(如桥头、陡坡)埋设应变传感器与温度传感器,实时采集车辆荷载作用下的层间应变数据及环境温度变化,分析粘结性能随时间的衰减规律;同时定期(每6个月)进行现场检测,对比监测数据与初始指标,若发现性能明显下降(如拉拔强度降低20%以上),需及时采取养护措施(如喷洒粘结剂修复)。(3)质量验收标准:结合国内外规范明确验收要求。国内参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004),要求粘结层涂布均匀度 $\geq 95\%$ ,拉拔强度合格率 $\geq 90\%$ ;国际上参考美国AASHTO规范,对层间剪切强度提出更严格要求(高温剪切强度不低于0.4MPa),且要求长期监测数据需满足5年内性能衰减不超过30%。验收时需提交检测报告,包括检测点位、试验数据及整改记录,确保施工质量符合工程要求。

## 3 公路路面层间粘结病害预防与维护策略

### 3.1 病害早期预警技术

(1)基于监测数据的病害预测模型:依托施工后埋设的应变、温度传感器及定期检测数据,构建应力-应变分析模型。通过采集车辆荷载下的层间应力变化、环境温度波动对粘结界面的影响数据,运用有限元分析方法,模拟不同工况下(如重载、高温、雨水浸泡)层间粘结性能的衰减趋势。当模型计算出的层间剪应力超过材料抗剪强度阈值的80%,或拉应变持续增大时,自动发出早期预警信号,提示可能出现层间滑移或脱层风险,为养护决策提供数据支撑。(2)人工智能在病害识别中的应用:借助人工智能技术提升病害识别效率与精度。采用高清摄像头、无人机航拍等设备采集路面表面图像,通过图像识别算法(如卷积神经网络)自动识别路面裂缝、推移等表观病害,并关联层间粘结失效情况——例如,当识别到路面出现纵向推移时,可预判层间粘结力不足;结合机器学习算法,利用历史病害数据(如病害类型、发生时间、环境条件)训练模型,实现对病害发展趋势的预测,准确率可达90%以上,大幅减少人工巡检的工作量与误判率。

### 3.2 预防性养护措施

(1)封层技术:针对路面早期可能出现的层间水损害与微裂缝,采用稀浆封层或微表处技术进行防护。稀浆封层选用乳化沥青、矿料、填料按比例混合,均匀摊铺于路面表层(厚度3-5mm),形成封闭层,阻隔雨水渗入层间;微表处则通过添加改性剂提升封层强度与耐磨性,适用于中重载交通路段,可延长层间粘结界面的使用寿命3-5年。施工时需控制封层材料的级配与摊铺温

度,确保与原路面粘结紧密。(2)粘结层补强技术:当监测发现层间粘结性能轻微衰减但未出现明显病害时,采用再生剂或高粘度改性沥青进行补强。对老化的粘结层,喷洒再生剂(如糠醛抽出油类再生剂),渗透深度控制在2-3mm,恢复沥青的粘结性与柔韧性;对于粘结力不足的区域,局部涂刷高粘度改性沥青(粘度 $\geq 3000\text{Pa}\cdot\text{s}$ , $60^\circ\text{C}$ ),补充粘结层厚度,提升层间抗剪切能力,该技术可使粘结强度恢复至初始值的90%以上,且施工便捷、成本较低<sup>[4]</sup>。

### 3.3 典型病害修复技术

(1)局部修复工艺:针对局部层间滑移、脱层病害,采用铣刨重铺或注浆加固工艺。铣刨重铺适用于病害范围较小(面积 $< 10\text{m}^2$ )的区域,先铣刨上层路面(深度5-8cm),清理粘结界面后重新涂刷粘结材料,铺筑新面层并压实,确保新老结构层粘结紧密;注浆加固则用于层间脱空区域,通过钻孔(孔径10-15mm)注入环氧树脂浆液或改性沥青砂浆,浆液扩散半径控制在30-50cm,填充层间空隙,恢复粘结性能,适用于基层完好但层间脱空的情况。(2)全断面再生技术:当路面层间粘结病害大面积发生(超过30%路面面积)且基层性能衰减时,采用热再生或冷再生技术进行全断面修复。热再生通过加热机将路面加热至 $120-150^\circ\text{C}$ ,铣刨旧路面材料,掺入再生剂与新粘结材料(如高粘度改性沥青),重新搅拌后摊铺压实,实现旧材料利用率80%以上,同时改善层间粘结界面;冷再生则在常温下铣刨旧路面,掺入水泥、乳化沥青等稳定剂,形成新的基层与粘结层,适用于低温、多雨地区,施工后需养护7-14天,确保层间粘结强度达标。

### 3.4 全生命周期管理

(1)建立层间粘结质量数据库:整合施工阶段的材料参数、施工记录、检测数据,以及运营阶段的监测数据、养护记录、病害修复信息,构建全生命周期质量数据库。数据库需包含项目基本信息(如路段位置、交通

量、气候条件)、层间粘结性能指标(如拉拔强度、剪切强度)、养护措施及效果评估等内容,采用云端存储与管理,实现数据实时更新与共享,为后续项目的材料选择、施工工艺优化及养护决策提供参考依据。(2)制定分阶段养护计划:根据路面全生命周期(通常15-20年)的性能衰减规律,分初期、中期、后期制定针对性养护计划。初期(0-5年)以预防性养护为主,每2年进行一次封层检查与粘结层补强,避免病害发生;中期(6-12年)加强监测频率,每1年开展一次全面检测,及时处理局部病害,采用注浆加固、铣刨重铺等工艺修复小规模失效区域;后期(13-20年)评估路面整体性能,若层间粘结病害大面积发生,采用全断面再生技术进行彻底修复,或结合路面改造工程更换粘结层与基层,确保路面在生命周期内持续满足使用要求。

### 结束语

公路路面层间粘结质量是保障道路安全与耐久性的基石。本文通过系统研究施工质量控制技术,明确了材料适配、工艺精细化及环境管控的关键作用,同时揭示了病害形成的内在机理与外在诱因。未来需进一步融合智能监测与绿色养护技术,构建全生命周期动态管理体系,以实现层间粘结性能的精准调控与病害的主动预防。此研究为提升公路建设品质、降低全寿命周期成本提供了重要参考,助力交通基础设施高质量发展。

### 参考文献

- [1]郑绍强.公路路基路面施工质量控制对策分析[J].运输经理世界,2024,(35):13-15.
- [2]张秋.高速公路路基路面施工质量控制措施研究[J].运输经理世界,2024,(21):17-19.
- [3]何彦庆.公路工程中路基路面施工质量控制及防范措施[J].科技创新与生产力,2024,45(05):69-71.
- [4]王常青.公路路基路面施工技术和质量控制对策分析[J].冶金管理,2023,(17):72-73.