

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重要环节。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，同时需具备一定防水渗透性，避免水侵蚀破坏粘结界面^[1]。

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，其耐温性与防水渗透性更优；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^[2]。（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/m²，改性沥青用量为0.8-1.2kg/m²）；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^[3]。

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0.1m²

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≥95%，拉拔强度合格率≥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℃），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^[4]。

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，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℃，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] 张秩.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.