

市政道路沥青路面车辙、裂缝病害耦合机理与 新型抗裂防水粘结层应用

尹振华 马 燕

青岛红福集团市政园林建设有限公司 山东 青岛 266000

摘 要：本文聚焦市政道路沥青路面车辙与裂缝病害，概述了车辙（压密型、剪切流动型、推移型）和裂缝（低温收缩、疲劳、反射）的类型、成因及危害，指出二者耦合会加速路面损坏、增加养护成本。分析了病害耦合的力学机理、材料性能影响及环境因素作用。研发了新型抗裂防水粘结层，阐述了材料设计思路、制备工艺，经性能测试与优化后，其抗裂、防水、粘结性能显著提升。介绍了该粘结层的施工工艺流程与质量控制方法，为解决路面病害问题提供新方案。

关键词：市政道路；沥青路面；车辙裂缝；耦合机理；新型抗裂防水粘结层

1 市政道路沥青路面车辙与裂缝病害概述

1.1 车辙病害

市政道路沥青路面车辙，是轮迹带处永久性凹陷变形，分压密型、剪切流动型和推移型三种。重载车辆频繁通行路段易出现。压密型车辙源于交通荷载反复碾压，使沥青混合料颗粒间隙减小，占总深度30%-40%，重载轴载超100kN时，压密变形量增15%-20%。剪切流动型车辙是核心类型，占比50%-60%，轮迹带处“垂直压力+水平剪切力”超抗剪强度，集料滑动，夏季高温时发展速度是常温3-5倍。推移型车辙多在车辆启停频繁区域，水平推力致沥青混合料推移，占比10%-20%。车辙深度超5mm会影响平整度与行车安全。

1.2 裂缝病害

市政道路沥青路面裂缝分低温收缩裂缝、疲劳裂缝和反射裂缝。低温收缩裂缝冬季出现，气温24小时内骤降超15℃，沥青混合料收缩变形，基层约束产生拉应力，超低温抗拉强度（一般低于2MPa）形成横向裂缝，间距5-10m，宽1-3mm，沥青低温延度小于10cm，裂缝发生率提高40%-50%。疲劳裂缝因交通荷载反复作用，日均交通量2-3万辆时，路面受“拉-压循环应力”，循环次数超疲劳寿命（ 10^6 - 10^7 次）形成网状裂缝。反射裂缝占比60%-70%，由基层裂缝向上反射形成，基层裂缝宽增1mm，面层反射裂缝宽增0.8-1.0mm。

1.3 车辙与裂缝病害的危害

车辙与裂缝病害不仅破坏路面外观，更严重危害市政道路功能与结构安全，增加养护成本。行车安全上，车辙凹陷处雨天积水形成“水膜效应”，制动距离延长20%-30%，雨天交通事故率比无车辙路面高1.5倍；裂缝

致路面平整度下降，车辆颠簸，易引发轮胎磨损和悬挂系统损坏。路面结构上，二者耦合加速损坏，车辙边缘应力集中，裂缝快速扩展，裂缝进水冲刷基层集料形成空洞，车辙深度增5-8mm，设计寿命8-10年的路面可能5年大修。经济上，耦合病害使年均养护成本达15-20元/ m^2 ，是无耦合病害路面的2-3倍，且频繁养护致交通中断，影响城市经济运行。

2 市政道路沥青路面车辙、裂缝病害耦合机理分析

2.1 力学机理分析

车辙与裂缝病害的耦合本质是力学作用的双向促进，形成“车辙→应力集中→裂缝扩展→基层削弱→车辙加剧”的恶性循环。车辙形成后，路面横断面呈“V”型凹陷，轮载作用时凹陷底部与边缘产生局部应力集中，应力值可达正常路面的1.5-2.0倍，若此处已存在微裂缝，应力集中会打破裂缝尖端的力学平衡，加速裂缝沿车辙边缘纵向扩展，使裂缝宽度从1mm增至3-5mm，扩展速率较无车辙区域提升2-3倍。反之，裂缝产生后会破坏路面结构连续性，雨水在荷载动水压力作用下沿裂缝渗入基层，软化基层材料，使基层承载力降低20%-30%，轮载作用时基层支撑不足，导致轮迹带处进一步凹陷，车辙发展速度较无裂缝路面提升1.5-2.0倍。此外，车辙与裂缝耦合还会改变路面受力状态，原本均匀分布的荷载应力因结构破损出现局部集中，使路面疲劳寿命缩短50%，进一步加剧病害发展。

2.2 材料性能影响

沥青混合料与基层材料的性能劣化，是车辙与裂缝病害耦合的内在诱因，材料性能不足会加速耦合进程。沥青混合料方面，若粗集料比例不足（< 60%）、沥青

用量过大 ($> 5.5\%$)，会导致骨架支撑薄弱，高温稳定性差，车辙深度易达15-20mm，同时混合料抗拉强度下降，裂缝易产生且扩展迅速；若沥青低温延度不足 ($< 15\text{cm}$)，低温脆性增强，收缩裂缝发生率提升40%，为雨水渗入提供通道，进一步削弱基层。基层材料方面，半刚性基层若水泥剂量过高 ($> 5\%$)，易产生干缩裂缝，成为反射裂缝的源头，裂缝进水后基层强度下降，加剧车辙；柔性基层若压实度不足 ($< 96\%$)，承载力低，轮载作用下易产生塑性变形，同时与面层粘结力弱，易出现层间滑动，诱发车辙与裂缝耦合。材料老化同样不可忽视，沥青长期受光、热作用发生氧化，针入度降低、软化点升高，混合料变脆，既易产生裂缝，又使抗车辙能力下降，形成耦合隐患^[2]。

2.3 环境因素作用

环境因素通过改变路面受力状态与材料性能，为车辙与裂缝病害耦合提供外部条件，主要包括温度、降水与荷载叠加三大因素。温度方面，夏季高温使沥青呈黏流态，混合料抗变形能力骤降，车辙发展加速，同时高温导致路面热胀，降温时又产生收缩应力，易引发裂缝；冬季低温则使沥青混合料脆性增强，收缩裂缝频发，裂缝进水后冻结膨胀，扩大裂缝宽度，为耦合创造条件。降水方面，多雨地区（年降雨量 $> 1000\text{mm}$ ）路面长期处于潮湿状态，裂缝进水后冲刷基层，形成空洞，削弱支撑导致车辙加深，同时雨水会降低集料与沥青的粘结力，使混合料强度下降，加剧裂缝扩展，多雨地区病害耦合发生率较干燥地区高2-3倍。荷载叠加方面，市政道路重载车辆（轴载 $> 100\text{kN}$ ）通行频率高，荷载反复作用使车辙与裂缝相互促进，重载车辆每增加10%，病害耦合程度提升15%-20%，且交叉口等车辆启停区域，水平推力与垂直荷载叠加，耦合效应更为显著。

3 新型抗裂防水粘结层材料研发与性能研究

3.1 材料设计思路

新型抗裂防水粘结层的设计核心是实现“抗裂-防水-粘结”三重功能协同，打破车辙与裂缝的耦合链条，其设计思路围绕“基体改性+功能组分复合”展开。基体选择SBS改性沥青，利用其优异的高低温性能（软化点 $> 60^\circ\text{C}$ 、低温延度 $> 30\text{cm}$ ），为粘结层提供基础弹性与粘结能力；同时掺入5%-8%的橡胶粉，提升材料低温抗裂性与弹性恢复能力，减少温度应力引发的裂缝。功能组分方面，引入2%-3%的玄武岩短纤维（长度6-10mm），纤维在粘结层内形成三维网状结构，吸收路面收缩应力，阻断裂缝扩展路径；添加10%-15%的纳米硅烷偶联剂与5%-8%的碳酸钙粉，纳米硅烷偶联剂填充材料内部

孔隙，形成致密防水膜，碳酸钙粉优化材料密实度，提升防水与粘结性能。整体设计需兼顾与沥青面层、基层的相容性，确保层间粘结牢固，避免界面剥离引发新的病害。

3.2 材料制备工艺

新型抗裂防水粘结层采用“分步复合-高温剪切”的制备工艺，确保各组分均匀分散，性能稳定。第一步为基体改性，将基质沥青加热至160-170 $^\circ\text{C}$ ，加入SBS改性剂（3%-5%），采用高速剪切机（转速4000-5000r/min）剪切30-40min，使SBS均匀分散，形成SBS改性沥青基体；随后加入橡胶粉，升温至170-180 $^\circ\text{C}$ ，继续剪切20-30min，确保橡胶粉充分溶胀。第二步为功能组分添加，待改性沥青降温至150-160 $^\circ\text{C}$ ，依次加入玄武岩短纤维、纳米硅烷偶联剂与碳酸钙粉，采用低速搅拌（转速1000-1500r/min）15-20min，避免纤维断裂，确保各组分混合均匀。第三步为发育陈化，将制备好的粘结层材料置于140-150 $^\circ\text{C}$ 的恒温罐中陈化2-3h，消除材料内部气泡，稳定性能，陈化过程中需每隔30min搅拌一次，防止组分沉降。制备完成后，需检测材料的软化点、延度、粘度等指标，确保符合设计要求方可用于施工^[3]。

3.3 材料性能测试

采用室内试验对新型抗裂防水粘结层的关键性能进行测试，依据《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40-2004）与相关行业标准，验证其技术优势。抗裂性能通过低温弯曲试验测试，在-10 $^\circ\text{C}$ 、加载速率50mm/min条件下，新型粘结层的低温弯曲应变达3500-4000 μe ，是普通改性沥青粘结层（1500-2000 μe ）的2倍，乳化沥青粘结层（800-1200 μe ）的3-4倍，表明其能有效吸收温度应力，抑制裂缝产生与扩展。防水性能通过透水系数试验测试，在0.1MPa压力下，新型粘结层透水系数 $< 1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ ，远低于传统乳化沥青粘结层（ $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ ），防水性能提升1000-10000倍，可有效阻断雨水渗入基层。粘结性能通过剪切粘结试验测试，在25 $^\circ\text{C}$ 、剪切速率10mm/min条件下，新型粘结层剪切强度达0.8-1.0MPa，是普通改性沥青粘结层（0.4-0.5MPa）的2倍，乳化沥青粘结层（0.2-0.3MPa）的3-5倍，确保面层与基层紧密结合，减少层间滑动引发的车辙。

3.4 材料性能优化

基于性能测试结果，针对新型抗裂防水粘结层的薄弱环节进行优化，进一步提升其适配性与长效性。针对高温稳定性不足的问题，调整SBS改性剂掺量，从3%-5%提升至5%-7%，同时加入1%-2%的树脂，使材料软化点从60 $^\circ\text{C}$ 提升至65 $^\circ\text{C}$ 以上，避免夏季高温时粘结层软化

流淌,影响抗车辙效果。针对低温环境下纤维分散不均的问题,优化纤维预处理工艺,将玄武岩短纤维在100-110℃下烘干1-2h,去除表面水分,再采用硅烷偶联剂进行表面改性,提升纤维与沥青基体的相容性,使低温弯曲应变进一步提升至4000-4500 $\mu\epsilon$ 。针对长期使用后防水性能衰减的问题,增加2%-3%的石墨烯改性剂,利用石墨烯的片状结构增强防水膜致密性,经加速老化试验(168h紫外线照射)后,透水系数仍 $<5\times 10^{-7}\text{cm/s}$,防水性能衰减率 $<10\%$,远低于未优化材料(衰减率30%-40%)。优化后的材料综合性能显著提升,可适配不同气候与交通条件的市政道路需求。

4 新型抗裂防水粘结层施工工艺与质量控制

4.1 施工前准备

施工前准备是确保新型抗裂防水粘结层施工质量的重要环节。首先,对基层进行全面检查和处理,清除基层表面的杂物、灰尘和松散颗粒,确保基层平整、坚实、干燥。若基层存在裂缝等病害,需提前进行修复。然后,根据设计要求,准确测量和放样,确定粘结层的施工范围和厚度。同时,准备好施工所需的设备和材料,如沥青洒布车、碎石撒布机、改性沥青、集料等,并对设备进行调试和检查,确保设备正常运行^[4]。另外,对施工人员进行技术交底和安全培训,使其熟悉施工工艺和质量要求,提高施工质量和安全性。

4.2 施工工艺流程

新型抗裂防水粘结层的施工工艺流程主要包括基层处理、喷洒改性沥青、撒布集料、碾压等步骤。基层处理合格后,使用沥青洒布车均匀喷洒改性沥青,控制喷洒量和喷洒速度,确保改性沥青均匀覆盖基层表面。喷洒完成后,立即用碎石撒布机撒布集料,集料的撒布量要根据设计要求严格控制,使集料均匀分布在改性沥青上。然后,采用轮胎压路机进行碾压,碾压速度和遍数要符合规范要求,使集料与改性沥青充分嵌挤,形成紧

密的粘结层。施工过程中,要注意各步骤之间的衔接,确保施工质量。

4.3 施工质量控制

施工质量控制是保证新型抗裂防水粘结层性能的关键。在施工过程中,要严格控制改性沥青的喷洒量和集料的撒布量,通过现场检测和试验,确保其符合设计要求。对碾压过程进行实时监控,检查碾压是否均匀、密实,避免出现漏压或碾压过度的情况。施工完成后,对粘结层进行质量检测,包括厚度检测、粘结强度检测和渗水系数检测等。若检测结果不符合要求,要及时进行整改。同时,建立完善的质量管理体系,加强施工过程中的质量检查和监督,确保新型抗裂防水粘结层的施工质量,提高市政道路沥青路面的耐久性和使用性能。

结束语

市政道路沥青路面车辙与裂缝病害严重影响道路功能、结构安全及经济运行,其耦合作用更是加剧了路面损坏。新型抗裂防水粘结层的研发与应用,为解决这一难题提供了有效途径。通过合理的材料设计、科学的制备工艺、严格的性能测试与优化,以及规范的施工工艺和质量控制,该粘结层展现出优异的抗裂、防水和粘结性能。未来,需持续关注其长期使用效果,不断改进和完善,以更好地保障市政道路的质量和安

参考文献

- [1]韦毅,袁超扬.沿海地区高速公路沥青路面早期抗车辙性能衰减分析[J].西部交通科技,2022(10):34-37.
- [2]彭桂崇.沥青路面抗车辙性能研究[J].运输经理世界,2022(21):13-15.
- [3]周晨光.市政沥青路面车辙病害损坏机理分析[J].运输经理世界,2024,(25):103-106.
- [4]吴杰,马茂,彭陈璐.市政道路沥青路面病害机理及处理措施研究[J].交通科技与管理,2024,5(11):102-104.