

半刚性基层反射裂缝对沥青面层性能的影响探讨

李诗吟

湖北交投建设集团有限公司 湖北 武汉 430070

【摘要】：在半刚性基层结构中，反射裂缝是影响沥青面层性能的关键因素。半刚性基层因其弹性和刚性相结合的特性，易在荷载、温度变化等主要因素及化学腐蚀、冻融循环等次要诱因共同作用下产生裂缝，且次要诱因与主要因素存在协同加剧效应；这些裂缝逐步传递到沥青面层，导致沥青面层抗裂性能下降、耐久性和抗疲劳性减弱。为此，本文探讨了反射裂缝的形成机理、对沥青面层性能的影响以及防治策略。通过优化基层设计、选择高耐久性材料和改进施工工艺，可有效预防裂缝的发生；对于已形成的反射裂缝，采用裂缝灌注、加固修复等技术进行修复。研究结果不仅为提高沥青路面的长期使用效能、减少养护成本提供理论依据和技术支持，还为全寿命周期成本视角下预防策略初期投入与后期养护成本最优平衡点的量化评估奠定基础。

【关键词】：半刚性基层；反射裂缝；沥青面层；性能影响；结构稳定性；全寿命周期成本

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.032

引言

沥青路面作为现代交通基础设施的重要组成部分，长期面临环境变化和交通荷载的双重考验。在这些因素的作用下，反射裂缝成为影响沥青面层性能的重要问题之一，尤其在采用半刚性基层的路段，裂缝往往从基层反射至面层，逐渐加剧面层的损害。与柔性基层、刚性基层相比，半刚性基层因兼具一定承载力和塑性变形能力，但其材料干缩、温缩特性显著，结构行为上存在模量过渡不均问题，导致反射裂缝问题尤为严重。这些反射裂缝不仅影响路面的结构完整性，还降低了其抗裂性和使用寿命。当前道路设计规范在半刚性基层反射裂缝考量上存在不足，如对多因素耦合作用考虑不充分、未明确动态模量匹配标准，本研究相关见解可弥补规范滞后性，推动设计理念更新。探索研究反射裂缝对沥青面层性能的影响机制及防治措施，是提升道路质量和减少养护成本的关键。通过系统研究，能够为半刚性基层设计提供新的视角，并为沥青路面养护管理提供科学依据。

1 半刚性基层反射裂缝的形成机理分析

半刚性基层反射裂缝的形成是多种因素共同作用的结果，通常与基层材料特性、路面结构设计、荷载作用、温度变化及化学腐蚀、冻融循环等相关。半刚性基层具有一定弹性和刚性，但与全刚性基层相比，承载力和变形能力存在差异。在结构设计层面，基层厚度不足、模量梯度设计不当是典型缺陷，前者会导致应力扩散不充分，后者易引发界面应力集中，形成拉压交替的应力状态，均易诱发微裂缝。在车辆荷载持续作用下，基层易出现应力集中区域，进而产生微裂缝，这些裂缝随时间推移会逐渐扩大并反射到沥青面层，尤其在基层表面存在微小缺陷或连接不良时，裂缝传播更为明显。

在荷载作用下，半刚性基层因刚性不足难以有效分散外部应力，导致局部区域较大变形并产生裂缝；温度变化是另一关键因素，温差使基层材料热胀冷缩，进一步加剧裂缝形成。荷载作用与温度变化在裂缝萌生和扩展阶段的主导作用存在转

换：裂缝萌生初期，荷载作用通常为主要主导因素；而在温差剧烈的寒区或春秋季温差波动大的环境下，或低交通荷载路段，温度应力会成为更关键的主导因素。当沥青面层与基层的温度和湿度条件不匹配时，基层裂缝会随温度升降扩展并反射至沥青面层，还可能使水分渗入基层，加速面层老化和结构损坏^[1]。

半刚性基层的施工质量也是影响反射裂缝形成的重要因素，若基层材料压实不足或基层与沥青面层黏结不良，基层微裂缝易通过界面反射至沥青面层。在多次车轮荷载和温度循环作用下，裂缝逐渐扩展并显著影响路面性能，表现为沥青面层裂缝、变形及局部剥落。

2 反射裂缝对沥青面层抗裂性能的影响

反射裂缝对沥青面层的抗裂性能产生深远影响，往往表现为面层抗裂能力逐渐下降。当半刚性基层的反射裂缝传播到沥青面层时，不仅影响表面完整性，还显著降低抗裂性能。沥青面层由沥青混合料与矿料构成，具有较好的抵抗变形能力，但基层裂缝会改变沥青面层的应力分布，导致局部区域应力集中。不同形态基层裂缝引发的应力集中模式和程度存在差异：横向裂缝易引发面层横向拉应力集中，应力集中系数约1.8-2.2；纵向裂缝对应纵向拉应力集中，系数约1.6-2.0；网状裂缝则形成多向应力集中，系数可达2.3-2.8，对面层结构的破坏最为剧烈。

裂缝的反射不仅是单纯的表面损伤，还会影响沥青面层的内部结构。随着反射裂缝持续扩展，会破坏面层密封性，导致水分渗透到基层和面层之间^[2]。水分进入不仅加速沥青老化过程，还会降低沥青与矿料的粘结力，进一步削弱面层抗裂性和整体强度，形成“裂缝-渗水-性能加速衰退”的恶性循环。通过在面层材料中添加疏水性添加剂可打断该循环，即使裂缝已存在，疏水性材料也能在裂缝壁形成防护层，减少水分渗透，缓解性能衰退速率。

反射裂缝在沥青面层中的存在，不仅造成视觉上的裂缝损害，还影响行车安全和舒适性，裂缝进一步发展可能导致面层剥落或局部变形，影响路面平整度和抗滑性。在长期使用过程中，沥青面层的抗裂性能逐渐下降，导致路面维修成本增加。反射裂缝对沥青面层抗裂性能的影响是多方面的，涉及裂缝传播、面层老化、应力分布变化等多个因素。

3 反射裂缝对沥青面层耐久性与抗疲劳性的作用

反射裂缝对沥青面层的耐久性与抗疲劳性具有显著影响。沥青面层的耐久性通常依赖于结构完整性及长期抵御外界荷载、环境变化的能力。当反射裂缝形成并扩展时，面层连续性遭到破坏，不仅影响其抵抗外部环境和荷载的能力，还加速面层材料劣化。反射裂缝使水分和气体更易渗透到面层与基层之间，引发材料老化和界面脱落，导致面层强度显著下降、脆性增加，无法有效应对高频次交通荷载和温度变化，进而影响耐久性。

反射裂缝的存在同样会加剧沥青面层的疲劳损伤。当面层受到重复荷载时，裂缝成为局部应力集中区域，材料经受的应力远高于其他部分。这种不均匀应力分布会导致裂缝沿高应力区域进一步扩展，加速反复荷载下的疲劳损伤。半刚性基层上沥青面层的反射裂缝疲劳扩展基本符合经典 Paris 公式，但需结合基层-面层协同变形特性进行修正，引入界面黏结系数和温度影响系数，修正后的公式可更精准描述不同工况下的疲劳扩展规律。反射裂缝的形成是渐进过程，初期微裂缝在荷载作用下逐渐增大，随着反射裂缝不断扩展，沥青面层经长期交通荷载和温度波动后，整体疲劳性能显著下降，伴随局部面层剥落、结构变形等问题，严重时可能导致面层破坏和道路瘫痪^[3]。

在寒冷气候条件下，反射裂缝的影响尤为突出。低温下沥青变脆，裂缝易于扩展；温度升高时，沥青材料膨胀，裂缝处变形更为剧烈，导致面层开裂、局部变形甚至完全剥落。除直接冻胀应力外，反复冻融循环的破坏机理表现为：裂缝内水分冻胀-融缩产生交变应力，加剧裂缝扩展；冻融使沥青材料低温延度下降、脆性增加；破坏层间粘结剂的化学结构，降低界面黏结强度；三者耦合作用使裂缝扩展速度较常温区提升 3-5 倍。

4 预防与修复反射裂缝的技术策略

反射裂缝的预防与修复需采取一系列有效技术策略，以延缓或减缓其对沥青面层性能的影响。针对形成机理，预防措施应从设计、材料选择和施工工艺等多方面优化。在设计阶段，需考虑半刚性基层与沥青面层的适配性，合理选择基层材料与结构，增强基层抗裂性能和弹性，减少应力集中。优化基层设计需在基层强度（抗荷载）和柔韧性（抗裂）之间权衡，通过调整水泥剂量（3%-5%）和骨料级配，搭配适量木质素纤维或橡胶粉改性剂，可实现强度与柔韧性的最优平衡。对于高频次车流或温差变化较大的地区，基层设计应具备较强缓冲能力，

通过增加基层厚度或采用高弹性材料抵抗外部荷载和温度应力，降低反射裂缝发生概率^[4]。

在材料选择上，改良沥青混合料组成，选用高耐久性和高弹性沥青可显著提高面层抗裂性和抗疲劳性能；采用含增强纤维或橡胶的沥青材料，可改善沥青韧性和抗老化能力，减少裂缝反射；选择合适填料和骨料，确保沥青与基层的黏结性，提高协同作用，避免黏结不良导致的反射裂缝。

当反射裂缝已产生时，修复措施应及时精确，避免裂缝继续扩展。依据裂缝宽度、密度、活动性、下层基层状况及交通等级可定量界定裂缝严重程度，建立修复决策树：轻微级（裂缝宽<2mm、密度<5条/m²、无活动、基层完好）采用灌缝技术；中等级（2mm≤裂缝宽≤5mm、5条/m²≤密度≤15条/m²、轻微活动、基层基本完好）采用裂缝注入技术；严重级（裂缝宽>5mm、密度>15条/m²、明显活动、基层破损）采用局部加铺修补层或结构性修复。

裂缝注入技术通过注入聚合物类、橡胶基材料或高强度树脂等增强裂缝强度，阻止扩展；对显著影响路面性能的情况，可通过全面重铺或结构加固恢复原有性能。灌缝料、密封胶等修复材料的长期性能衰减规律为：高温环境下 3-5 年出现老化龟裂，低温环境下 4-6 年出现脆裂脱落；当材料拉伸强度下降 30% 以上时，修补易失效，甚至因材料与面层变形不协调形成新的应力集中点，导致裂缝转移扩展。在高温、高湿或交通荷载较重的区域，应定期进行裂缝检测和养护，及时发现潜在问题并采取修复措施。反射裂缝的预防和修复需多技术手段结合，通过优化设计、精确施工及有效修复，可大幅提高沥青面层耐久性和抗裂性能，延长使用寿命，降低维护成本。如下图所示：

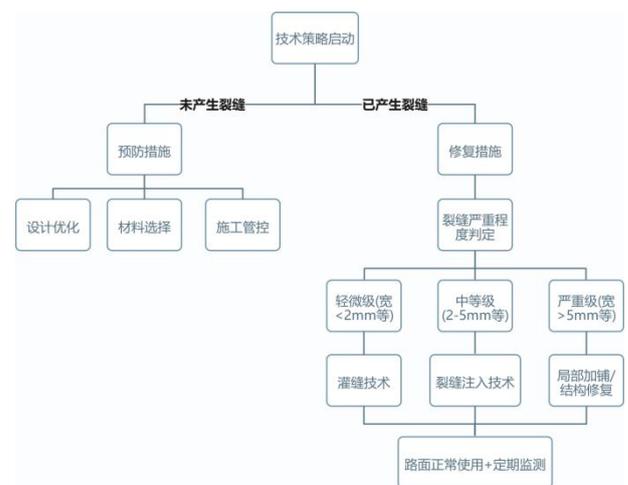


图 1 预防与修复反射裂缝的技术策略流程图

5 半刚性基层与沥青面层的协同作用与优化方案

半刚性基层与沥青面层的协同作用对路面长期性能至关重要。半刚性基层承担承载荷载和分配应力的作用，沥青面层

负责抵御外界侵蚀和提供平整行驶表面,两者协调工作是路面设计关键,优化相互作用可显著提高道路耐久性、抗裂性能和抗疲劳性。半刚性基层通过弹性和塑性特性吸收分散外部应力,减轻荷载传递至面层;若基层设计不当或施工质量不达标,协同作用会受影响,进而导致反射裂缝产生,影响路面使用性能。路面设计理论应从传统“层层设计”转向“一体化设计”理念,该转变面临的技术挑战为层间协同变形机制量化、多工况下模量匹配标准制定,管理挑战为设计-施工-养护全流程协同机制缺失、旧路改造中原有结构适配性评估困难。

半刚性基层与沥青面层的相互作用需通过材料选择、结构设计和施工工艺优化实现。基层的弹性和刚性需根据交通量、气候条件及荷载情况合理设计;对于交通繁忙或温差较大的地区,增加基层厚度或选用更高弹性模量材料,可减缓荷载传递速度,降低反射裂缝产生概率。基层与面层的粘结力是关键因素,选用良好粘结性沥青材料及优化施工工艺是保证协同作用的核心。

沥青面层设计应考虑与基层的配合度,尤其在温差较大地区,面层弹性需与基层特性匹配,避免温差波动下应力集中导致裂缝反射。面层抗裂性能与基层抗裂能力密切相关,改良沥青混合料组成、增加抗裂性和抗疲劳性是优化协同作用的重要途径;加入合成纤维、橡胶等增强材料,可改善沥青抗老化性和韧性,显著提升面层抗裂能力。施工时,基层与面层界面处

理至关重要,需保证基层表面清洁平整,减少界面不良现象;摊铺和压实过程中保持合理温度和压实度,避免材料性能波动;选择合适压实方法和密实度,确保两者紧密结合,增强协同作用^[5]。

对于现有路面,采用加铺面层、裂缝灌注修复等手段可有效增强协同作用,延长使用寿命。旧路改造加铺设计时,对原有反射裂缝应根据基层状况选择处理方式:基层完好时采用应力消散层分散应力;基层破损时需先对基层进行加固修复,再铺设加铺层;新加铺层与旧面层、基层的协同通过界面粘结层和模量过渡层设置重新建立。路面老化严重时,可通过加铺修复层改善基层和面层相互配合,修复反射裂缝带来的局部损害,恢复路面整体稳定性。

6 结语

反射裂缝对半刚性基层与沥青面层的性能影响深远,严重影响路面的耐久性、抗裂性能和抗疲劳性。通过优化设计、选择合适的材料以及改进施工工艺,可显著提高基层与面层之间的协同作用,延长路面使用寿命。在实际应用中,结合科学的检测与养护手段,能够有效预防和修复反射裂缝,降低养护成本,提升道路的长期性能。未来,随着技术的进步与材料的创新,路面设计和维护方法将不断优化,其中基于传感器和物联网的智能路面健康监测技术最具应用潜力,可实现反射裂缝萌生和扩展的实时预警与精准定位。

参考文献:

- [1] 王娜.半刚性基层沥青路面病害及其防治研究[J].工程技术研究,2024,9(01):110-112.
- [2] 许建欣.半刚性基层沥青路面裂缝产生机理及处治措施[J].交通世界,2022,(32):116-118+121.
- [3] 王婷.沥青路面半刚性基层裂缝处治技术[J].交通世界,2021,(32):89-90.
- [4] 曹鹏,朱啸山.沥青路面半刚性基层裂缝关键技术研究[J].技术与市场,2020,27(11):119+121.
- [5] 代科,马拉莫.沥青路面半刚性基层反射裂缝危害及预防措施[J].交通世界,2020,(Z1):60-61.