

半刚性基层沥青路面反射裂缝研究综述

王紫文, 马培建

(青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 半刚性基层沥青路面因其优异的承载能力在我国道路工程中广泛应用,然而其自身的收缩特性易导致路面在养护与使用过程中产生裂缝。裂缝在行车荷载与温度耦合作用下反射扩展直至贯穿沥青面层,形成反射裂缝这一典型病害,严重影响了路面使用寿命与通行能力。根据国内外对半刚性基层反射裂缝的普遍研究,系统梳理行车荷载与温度作用下裂缝的产生机理;总结温度与荷载大小对应力强度因子影响与裂缝扩展规律,分析面层厚度与模量、基层模量等设计参数对裂缝扩展的影响;从材料特性和结构优化方向2个方面给出防治措施(如设置应力吸收层、加铺土工格栅等),以便于为后续研究提供参考。

关键词: 半刚性基层;反射裂缝;扩展规律;应力强度因子;土工格栅

中图分类号: U414;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0033-05

A Review on Reflective Cracks in Semi-Rigid Base Asphalt Pavements

WANG Ziwen, MA Peijian

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Semi-rigid base asphalt pavement is widely used in China due to its excellent bearing capacity. However, its own shrinkage characteristics are prone to cause cracks in the pavement during maintenance and use. Under the coupled action of traffic load and temperature, the cracks reflect and expand until penetrating the asphalt surface layer, forming a typical disease of reflective cracks, which seriously affects the service life and traffic capacity of the pavement. Based on the universal research on reflective cracks in semi-rigid bases at home and abroad, the generation mechanism of cracks under the action of traffic load and temperature is systematically sorted out, the influences of temperature and load magnitude on the stress intensity factor as well as the crack propagation law are summarized, and the effects of design parameters such as surface layer thickness and modulus, and base layer modulus on crack propagation are analyzed. The prevention and control measures are proposed from two aspects of material properties and structural optimization, such as setting stress absorption layers and laying geogrids, so as to provide a reference for subsequent research.

Keywords: semi-rigid base; reflective crack; propagation law; stress intensity factor; geogrid

0 引言

半刚性基层沥青路面在我国应用广泛,其具有强度高、稳定性好、易于施工等特点^[1]。但在实际工程中,由于半刚性基层材料本身的干缩与温缩特性,在施工养护与环境变化过程中极易产生初始裂缝,在荷载和温度共同作用下,这些基层裂缝向上开展直至贯穿路面,使整体结构性发生改变,降低了其承载能力与使用寿命^{[2][3]}。因此,深入探究反射裂缝的产生与扩展机理,并发展行之有效的防治技术,对于提升我国沥青路面的耐久性与使用性能具有重大

的理论与工程意义^[4]。

围绕这一经典难题,国内外学者已开展了大量研究,其发展方向经历了从现象描述、机理分析到技术创新的过程。在力学机理与数值模拟方面,Dave等^[5]采用了基于断裂力学的粘着断裂模型来模拟反射裂缝,分析了温度应力作用下沥青路面反射裂缝问题;宋健民等^[6]则利用有限元软件,系统分析了行车与温度荷载共同作用下裂缝尖端应力强度因子的变化规律,为量化评估不同路面参数的影响奠定了基础;通过数值模拟发现,在对称荷载作用下,裂缝尖端主要为拉应力,剪应力几乎为零,裂缝不易扩展;而在偏载作用下,裂缝尖端的拉应力与剪应力均发生突变,反射裂缝加速扩展^[7-8]。通过计算分析,在偏载作用下,裂缝两侧弯沉值与车辆轴载呈正相

收稿日期: 2026-03-06

作者简介: 王紫文(2000—),男,博士在读,从事道路方向研究工作。

关,加剧了面层的剪切^{[9][10]}。赵复笑等^[11]利用广义参数 W 单元计算并分析得出了反射裂缝扩展过程中应力强度因子(stress intensity factor, SIF)的变化规律。这些研究共同深化了我们对裂缝在张开与剪切模式下扩展的认识。

在防治措施与技术方面,研究重心不断从被动维修向主动预防方向发展。一类侧重于增设夹层:在基层与面层间设置应力吸收层,如橡胶沥青应力吸收层(stress absorbing membrane interlayer, SAMI)^[12-13];加铺土工合成材料(如土工布、土工格栅)^[3-4],利用其高变形能力或加筋作用来分散应力、抑制裂缝扩展。另一类则侧重于结构优化,如增设柔性基层^{[15][16]}或采用预切缝技术^[17],通过改变结构受力模式或引导裂缝有规律发展来达到防裂目的。此外,参数优化始终是研究的基础,众多学者通过数值模拟分析了面层厚度与模量、基层模量等关键设计参数对裂缝尖端应力场的影响,为路面结构的科学设计提供了依据^[10,18]。

1 半刚性基层反射裂缝产生与扩展

1.1 反射裂缝产生与发展机理

交通荷载与温度荷载是产生反射裂缝并促使其扩展的关键因素,其根本原因在于半刚性基层与面层材料存在差异^[19]。由环境温度引起的低温收缩与温度疲劳都会产生温度型反射裂缝,当在温度降低时,由于半刚性基层的收缩系数远大于沥青混合料,基层的刚度大,约束性强,会在内部产生巨大的拉应力,当基层内部拉应力大于其极限抗拉强度后,基层本身就会开裂,形成初始裂缝。裂缝尖端产生应力集中,在后续降温作用下,裂缝处的沥青面层会承受较大的拉伸变形,当超过其极限抗拉强度后,裂缝会向上延伸,直至贯穿裂缝。而温度疲劳则会使裂缝尖端处的沥青混合料产生疲劳损伤(微裂纹),最后发展成反射裂缝。

交通荷载作用下存在2种最不利工况:一是当车轮行驶至裂缝正上方时,面层底部承受最大弯拉应力,引发张开型反射裂缝(见图1);二是当车轮作用于裂缝一侧时,会使裂缝两侧的板体产生竖向位移差,从而在面层中引发较大的剪切应力,导致剪切型反射裂缝^[20](见图2)。温度应力主要引起张开型反射裂缝(见图3),在拉应力和剪应力的反复作用下,裂缝尖端的沥青混合料会因疲劳而逐渐扩展。剪切作用通常是加速反射裂缝发展的主要原因。

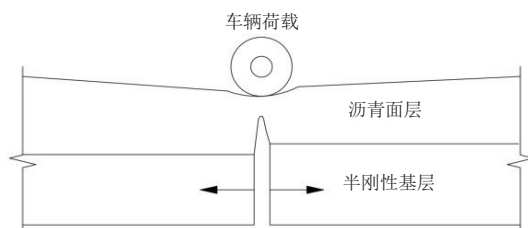


图1 张开型反射裂缝(荷载型)

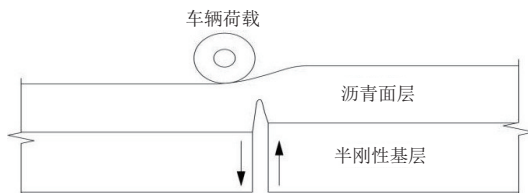


图2 剪切型反射裂缝(荷载型)

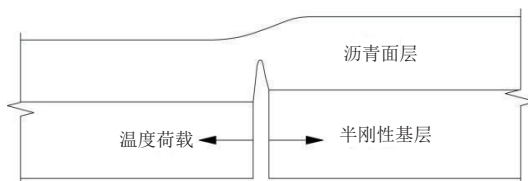


图3 张开型反射裂缝(温度型)

1.2 车辆荷载对反射裂缝扩展影响

车辆荷载对路面的作用方式主要有3种,即对称荷载、偏载与超载作用。在标准荷载作用下,对称荷载对面层底部进行弯拉作用,只有当拉应力强度超过极限抗拉强度后,裂缝才会向上扩展,但裂缝发展相对缓慢,只有当拉应力超过材料断裂应力时,裂缝才会显著扩展;而偏载作用则会使裂缝尖端处于拉力-剪切复合状态或纯剪切状态,偏载作用下裂缝尖端的应力强度因子会急剧增大,更容易达到材料的断裂临界值,裂缝发展速度较快。因此,在相同荷载作用下,偏载是反射裂缝产生并发展的主要原因。另外,据实际工程经验,超载会导致基层内部反射裂缝急剧增加,每次超载对路面都具有剧烈的剪切作用,促使反射裂缝向上扩展。首先在标准轴载100 kN作用下进行室内疲劳试验,根据疲劳方程得出裂缝完全贯通面层时的作用次数,然后将车辆荷载从标准轴载增加到2倍(即超载100%)时,基层层底的最大拉应力可增大至标准轴载作用下的2倍左右,计算出超载作用下的疲劳破坏作用次数,

即超载行驶1次对路面的破坏相当于标准轴载作用16次。因此,超载车量越重,对路面的破坏程度越大,裂缝尖端的应力越集中,从而使裂缝更易延伸^[21]。车辆荷载对裂缝扩展影响如表1所示。

1.3 温度荷载对反射裂缝扩展影响

在实际工程中,温度荷载是影响反射裂缝扩展的另一重要因素,温度作用往往具有长期性和疲劳

表 1 车辆荷载与裂缝扩展数量关系

荷载类型	轴载/ kN	基层层底最 大拉应力/ MPa	应力强度 因子/ (MPa·m ^{1/2})	等效疲劳 作用次数比 (相对于标准轴载)
对称荷载 (标准)	100	0.35	0.18~0.22	1.0
偏载 (标准)	100	0.48~0.55	0.28~0.35	2.5~3.2
超载 (200 kN)	200	0.70~0.75	0.32~0.40	16.0
超载 (300 kN)	300	0.95~1.10	0.45~0.55	38~45

特性。半刚性基层的温缩系数约为 $(15\sim25)\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,是沥青面层的2~3倍。当温度下降 20°C 时(从 25°C 至 5°C),基层收缩受约束产生的拉应力可达 $1.5\sim2.5\text{ MPa}$,超过其极限抗拉强度(通常为 $0.5\sim1.0\text{ MPa}$),导致基层开裂,温度下降得越低、越快,产生的拉应力就越大,越容易产生反射裂缝^[22]。但是,当温差(从 10°C 降至 -10°C)相同时,基层底部拉应力明显增大;而当材料持续在冰点(0°C)以下,沥青面层材料脆性增加,变形能力下降,裂缝更易在低温下脆性扩展。因此,当降温超过冰点时,温度对材料的破坏能力越强,其产生的反射裂缝扩展越明显。

路面结构抵抗温缩疲劳破坏的能力主要集中于中、下面层,上面层自身抵抗能力较弱。采用有限元法对半刚性基层沥青路面进行了温缩疲劳扩展分析,揭示了裂缝扩展长度与温度疲劳作用次数大致呈正比例关系,当作用次数达到一定阈值时,路面即发生破坏^{[23][24]}。例如,昼夜温差是产生温度疲劳的重要原因,以日温差 10°C (从日间 20°C 至夜间 10°C)为例,裂缝尖端的应力强度因子日均波动可达 $0.1\sim0.3\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,每日疲劳累积,促使裂缝缓慢扩展。因此,温度场变化对路面结构的深刻影响,越接近面层表面,温度疲劳引起的收缩变形越大,中、下面层的疲劳寿命约是上面层3~5倍,裂缝扩展速率降低约2倍^[25,26]。

1.4 路面参数对反射裂缝扩展影响

路面参数是控制反射裂缝扩展的关键因素,根据大量研究分析,总结了面层与基层的厚度、模量等对反射裂缝的影响规律,从而得出最能抑制反射裂缝扩展的参数设置。

随着面层厚度的不断增加,其裂缝尖端的应力强度因子减小,研究表明,沥青面层厚度从8 cm增加至24 cm,裂缝尖端拉应力可降低67.6%。面层每增厚1 cm,裂缝尖端的应力强度因子平均减小约12%。

随着面层模量的增加,裂缝尖端的剪应力逐渐减小,而其尖端应力强度因子先增后减,当面层模量在2 000 MPa左右,裂缝尖端的张开型应力强度因子逐渐由负变正,但其值较小不足以造成裂缝的张开型开裂。因此,适当增加面层模量能够抑制反射裂缝的剪切型开裂(见表2、3)。

随着基层模量的增加,其内部的拉应力逐渐转变为压应力,不会产生反射裂缝,然而偏荷载作用下,当基层模量逐渐增大时裂缝尖端的剪应力可能增大,但裂缝尖端的剪切型应力强度因子逐渐减小。因此,适当增大基层模量可以抑制张开型与剪切型反射裂缝发展。

由此可见,适当增加面层厚度与减小基层模量可以在一定程度上抑制反射裂缝的发展,但是,基层模量并非越高越好,过高的基层模量会与沥青面层形成更大的刚度比,可能导致面层底部弯拉应力增加,促进反射裂缝发展。

表 2 应力与面层厚度关系

面层厚度/mm	裂缝尖端拉应力/MPa	面层表面拉应力/MPa
80	10.2	4.8
120	7.1	3.5
160	5.1	2.6
200	3.8	2.0
240	2.9	1.6

表 3 应力强度因子与面层厚度的关系^[27]

面层厚度/mm	80	120	160	200	240
裂缝尖端应力强度因子 $K_I/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	0.213	0.200	0.191	0.186	0.185

2 半刚性基层反射裂缝防治措施

2.1 材料改性

材料改性措施主要从材料本身、外加剂与层间接触3方面进行改善。

2.1.1 材料方面

在保证强度的前提下,降低水泥用量,或采用石灰、粉煤灰等部分替代水泥,尽可能减少细集料含量,以减小材料的收缩性。研发和应用低收缩、高韧性新型基层材料,如大粒径多孔沥青稳定碎石(large stone porous macadam, LSPM)、沥青稳定碎石柔性基层等,从源头上减少裂缝产生的数量。

2.1.2 外加剂

在混合料中掺入聚丙烯纤维、玄武岩纤维或聚酯纤维等,能有效提高材料的抗拉强度、极限拉伸应变和韧性,抑制微裂纹的产生与扩展。研究表明,掺入0.1%~0.3%的聚丙烯纤维,可使水泥稳定碎石的

抗拉强度提高15%~30%,极限拉伸应变提高20%~50%^[28]。工程应用表明,纤维增强基层能显著减少裂缝数量和宽度。例如:G30连霍高速大修工程中,在水泥稳定碎石中掺入0.2%的聚丙烯纤维(长度12 mm),水泥剂量控制为4.0%,结果表明,与未加纤维的对比段相比,裂缝数量减少约60%,裂缝平均宽度从3~5 mm降至1~2 mm。通车3年后观测,纤维增强路段反射裂缝发展缓慢,证明了纤维改性在防治反射裂缝中的有效性。

2.1.3 层间接触

改善基层与面层之间的层间粘结状态,使用高性能乳化沥青、改性沥青粘结层等,提高界面抗剪强度,延缓裂缝的向上反射。

2.2 稀浆封层

稀浆封层一般用于半刚性基层的“下封层”,由于集料中的油石比较大,形成一层完整、密水的薄膜^[29-30],主要用于防水、粘结和表面封闭,而对于基层收缩引起的反射裂缝,其能力有限,属于辅助延缓措施。

2.3 应力吸收层

在沥青面层与半刚性基层之间设置一层高弹性、高韧性的应力吸收层(stress absorbing membrane interlayer, SAMI),是防治反射裂缝最直接有效的措施之一。该夹层模量远低于上下结构层,能通过自身的大变形吸收并分散由基层裂缝尖端传递上来的拉应力和剪应力,消除或显著降低应力集中效应,从而阻止或延缓裂缝向上扩展。常用材料包括橡胶沥青、高弹性改性沥青混合料等^[31]。工程实例1:在甘肃S06酒嘉绕城高速公路项目中,采用了橡胶沥青应力吸收层,该环保型高掺量全厚式低碳橡胶沥青路面具备显著的抗开裂、抗老化性能,通过绿色解交联技术处理橡胶,实现了材料的高性能与环保要求,有效抑制了反射裂缝的发展。工程实例2:某试验路段乡村公路,采用一种新型带有防裂设计的夹层结构,在实际工程测量中,因其具有良好的变形能力与抗压模量而具备较好的抗反射裂缝能力^[32]。

2.4 土工合成材料

在基层顶面或层间铺设土工合成材料(如土工布、土工格栅、玻璃纤维格栅等),利用其加筋、隔离、防水和应力扩散作用来防治反射裂缝。

2.4.1 土工布、土工格栅

具有良好的拉伸性能和变形能力,能承受部分拉应力,将集中应力分散到更大范围,从而抑制裂缝

的张开与扩展。同时,土工布还能起到一定的防水作用,防止水沿裂缝下渗加剧损害。

2.4.2 玻纤格栅

具有极高的抗拉强度和低延伸率,能有效限制基层裂缝处的应力集中和位移,尤其适用于抑制剪切型反射裂缝。工程案例:在205国道大修工程中,采用高性能应力吸收贴(复合土工合成材料)进行机械化摊铺,使材料降低了56%损耗与95%搭接缝,且具备抗裂、防水、粘结等功能。

2.5 柔性基层

在半刚性基层与沥青面层之间设置柔性基层,利用其松散或柔性特性消散应力,阻断裂缝反射路径。工程案例:广河高速公路惠州段,采用“沥青面层+沥青稳定碎石柔性基层+半刚性底基层”的倒装结构,运营数年后观测,反射裂缝发生率较传统结构降低约70%。

2.6 预切缝

在半刚性基层施工后,按一定间距预先切割具有一定宽度与深度的规则裂缝,引导收缩裂缝在预定位置有规律地发生,从而避免随机裂缝的产生,并使得反射至上层的裂缝更为规则,便于后期封缝处理。

工程案例1:在江苏某干线公路建设中,对水泥稳定碎石基层实施了预切缝技术,有效控制了不规则裂缝的大量产生,提高了路面外观和后期维护效率。工程案例2:冬寒区某两条高速公路,在半刚性基层中每20 m设置一条横向预切缝,虽能将不规则自然裂缝引导为规则、可控的横向裂缝,但53%的预切缝最终会反射至沥青面层,可能带来新的渗水风险,因此,预切缝在路用性能上还存在局限性。

上述6种防治措施的总结如表4所示。

3 研究现状及展望

目前,关于半刚性基层反射裂缝的研究已取得显著进展,但在理论与实践之间仍存在明显脱节。多数研究侧重于单一荷载或温度条件下的裂缝行为,未能充分反映实际路面在交通、温度、湿度等多场耦合作用下的真实响应。此外,室内试验与数值模拟往往基于理想化的材料模型与边界条件,难以复现野外环境中材料的不均匀性、层间接触状态及长期累积损伤效应,导致许多防治措施在实验室表现良好,却在工程实践中效果参差。未来,我们应该构建更贴近实际环境的裂缝扩展预测模型与长期观

表 4 6 种防治措施对比分析

类型	优点	缺点	工程应用效果评价
材料改性	从源头减少基层自身开裂,在提升抗裂性时,也常改善强度、抗疲劳等性能	难以完全杜绝开裂,成本较高。需严格控制施工工艺,难以保证改性均匀	适用于新建道路或大修工程中的基层。是性价比高的基础防裂方案
稀浆封层	成本低,施工速度快。具有改善抗滑、耐磨、修复车辙等功能	厚度薄(通常<3 cm),无法抵抗结构性受力,对延缓反射裂缝效果有限,属于辅助性措施	对于已出现的结构性反射裂缝基本无效
应力吸收层	应力吸收层是针对反射裂缝最直接、有效的措施之一。变形能力强,应用广泛,效果显著	成本较高,施工要求高,不同材料性能差异较大	防治反射裂缝的主力措施,研究显示,橡胶沥青层性价比最高。
土工合成材料	施工简便,铺设速度快,性价比高	依赖界面粘结,材料易老化,效果一般	一种有效的辅助或补充措施。常与应力吸收层组合使用
柔性基层	从根源上减少了基层开裂,抗裂性能好,耐久性高,维修方便	建设成本高,对材料要求较高	足够的承载力和耐久性,具有高性能和长寿命的特点
预切缝	将不规则裂缝变为规则裂缝,施工简单,能有效控制裂缝形态	切缝时机、深度、间距等技术要求严格	经济型裂缝控制技术,在道路中十分常见

测系统,在考虑低温、冻融、干湿循环等恶劣环境下的耦合效应的前提下,发展智能化施工与养护技术,提升层间粘结质量与结构整体性,采集裂缝发展、材料性能衰减、环境与荷载作用等全周期数据,形成具备效力的路面数据库,为后续防治措施的优化与优选提供实证支撑。

4 结 语

(1)本文系统梳理了半刚性基层沥青路面反射裂缝的产生机理、扩展规律及主要防治措施,揭示了荷载与温度耦合作用是裂缝产生与发展的根本驱动力,而路面结构参数与材料特性则是调控其扩展路径与速率的关键变量。综合现有研究可知,当前防治措施已从“被动修复”转向“主动预防”,形成了包含材料改性、应力吸收层、加筋等多元化解决方案。然而,现有研究成果仍存在若干矛盾与研究空白。

(2)基于不同类型的反射裂缝机理,可以为成因判断提供依据,未来可能需要开发新的数据分析技术,尤其是在大数据和图像处理领域,以实现自动提取与成因的精确匹配。这将为路面维护和修复提供更为科学的依据,提升整体养护效率。

(3)根据目前的研究成果,总结半刚性基层反射裂缝发展规律,补充多因素耦合作用下模型综合损伤效应,结合实际,并根据不同地区、路段等,研究组合式设计联合作用下防治效果,选出最合理、性价比最高的设计选择。诸多防治措施(如土工合成材料、应力吸收层)的短期力学效果显著,但缺乏长期系统性跟踪数据,严重影响了后续研究。

总之,攻克半刚性基层反射裂缝这一经典难题,不仅需要持续深化对复杂作用机理的认识,更需要在材料、结构及养护方面进行深度融合,才能构建起

安全、舒适、耐久的半刚性基层沥青路面,显著提升其全寿命周期性能与服务能力。

参考文献:

[1] 杨美坤,李万鹏,黄卫明,等.半刚性基层开裂的沥青路面承载力响应特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(3):310-321.

[2] 李月勇.基层组合形式对沥青路面性能影响的效果评价与分析[J].科学技术与工程,2012,12(2):458-460.

[3] 李智文.土工材料防治半刚性基层反射裂缝的有限元分析[J].中外公路,2011,31(3):275-278.

[4] 刘平伟.半刚性基层沥青路面反射裂缝产生的影响因素分析[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2015,17(2):4-8.

[5] DaveEV, Buttlar WG. Thermal reflection cracking of asphalt concrete overlays[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11(6): 447-488.

[6] 宋健民,白鹏飞,管晓晴.半刚性基层沥青路面反射裂缝建模分析[J].公路工程,2017,42(3):40-44;51.

[7] 王雪莲,黄晓明,卞国,等.基于数值模拟的半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展路径分析[J].公路,2018,63(5):1-6.

[8] 方俊.基于扩展有限元的沥青路面半刚性基层反射裂缝扩展模拟分析[D].北京:北京交通大学,2017

[9] 包龙生,魏喜乐,于玲,等.车辆荷载作用下半刚性基层道路反射裂缝应力分析与处理[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(3):458-466.

[10] 崔铭楷.玄武岩土工格栅加筋半刚性基层抗裂性能现场试验研究[D].西安:长安大学,2021.

[11] 赵复笑,余天庆,金生吉.沥青路面反射裂缝机理及夹层结构应力分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(2):296-300.

[12] 林海英,刘勇.橡胶沥青 SAMI 应力吸收层的性能试验研究[J].中外公路,2009,29(5):215-217.

[13] 武越锋.半刚性基层沥青路面温缩反射裂缝疲劳扩展[J].黑龙江交通科技,2021,44(10):260-261

[14] 钱劲松,陈欣然,郑毅,等.基于 MMLS3 设备的土工布防治反射裂缝效果研究[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(8):1042-1048.

[15] 申结结,郑传峰,胡孝阳,等.半刚性基层与柔性基层沥青路面

(下转第 75 页)