

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230724001

文章编号: 1672-9331(2023)06-0069-11

引用格式: 司春棣, 凡涛涛, 曹航, 等. 车-温耦合作用下沥青路面反射裂缝开裂影响因素研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(6): 69-79.

Citation: SI Chundi, FAN Taotao, CAO Hang, et al. Study on the influence factors of reflective cracking in asphalt pavement under the vehicle-temperature coupling effect[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(6): 69-79.

# 车-温耦合作用下沥青路面反射裂缝开裂 影响因素研究

司春棣<sup>1,2</sup>, 凡涛涛<sup>1,2,3</sup>, 曹航<sup>1</sup>, 周巍<sup>4</sup>, 康兴<sup>4</sup>, 张宇<sup>5</sup>

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 河北省交通安全与控制省级重点实验室, 河北 石家庄 050043; 4. 河北省高速公路京雄筹建处, 河北 保定 071799; 5. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**【目的】通过对不同温度下道路内部的应力变化情况进行分析, 探究沥青路面反射裂缝开裂的影响因素。【方法】首先, 选取半刚性基层底部反射裂缝为研究对象, 以反射裂缝尖端的应力强度因子和  $J$  积分为评价指标; 然后, 基于有限元法建立广义 Maxwell 模型, 分析温度作用下道路内部的应力变化; 最后, 探究不同轮胎接地压力、行车速度以及温度-行车荷载耦合作用下半刚性基层反射裂缝尖端评价指标的变化规律。【结果】根据评价指标对比, 当行驶速度由 30 km/h 增大至 150 km/h 时, I、II 型应力强度因子的最大值分别减小了 2.79% 和 5.62%; 与行驶速度 150 km/h 相比, 30 km/h 所对应的  $J$  积分增大了 18.0%; 当轮胎接地压力由 0.5 MPa 增大至 1.3 MPa 时, I、II 型应力强度因子的最大值均增大了 160%,  $J$  积分增大了 6.5 倍, 说明轮胎接地压力对反射裂缝应力强度因子的影响程度更大; 车-温耦合状态下 I 型应力强度因子均大于 II 型应力强度因子, 沥青路面基层横向反射裂缝为 I 型开裂主导的复合型裂缝;  $J$  积分在低温-荷载情况下的数值大小为  $3.6 \times 10^{-3}$  N/m, 其数值明显比高温-荷载及荷载单独作用时的大。【结论】低温和超载对路面反射裂缝扩展的影响最显著, 冬季应加强对沥青路面反射裂缝的检测。

**关键词:** 道路工程; 反射裂缝; 车-温耦合; 有限元; 应力强度因子;  $J$  积分

中图分类号: U416.223

文献标志码: A

## 0 引言

半刚性基层在道路运营期间易产生收缩开裂。在温度和行车荷载的重复作用下, 裂缝沿半刚性基层开裂处向上扩展, 进而引发沥青面层开裂。大量研究表明, 行车荷载、温度等外界因素会导致路面结构内的应力、应变发生变化<sup>[1-4]</sup>, 这种变化会使反射裂缝加剧, 严重影响路面的正常使用<sup>[5-6]</sup>。故研究行车荷载和温度对反射裂缝开裂的影响对提高路面的抗裂性能、延长路面的使用寿命具有十分重要的意义。

近年来, 学者们针对反射裂缝的开裂问题进

行了大量研究。艾长发等<sup>[7]</sup>研究了移动荷载作用下不同双裂纹间距、不同反射裂纹深度对基层反射(横向)裂纹应力强度因子的影响, 结果表明, 在移动荷载作用下, 当双裂纹的间距为 400 mm 时, 基层反射裂纹最易发生 I、II 型开裂扩展。付其林等<sup>[8]</sup>对大粒径级配碎石进行了抗反射裂缝性能试验, 结果表明, 粒径较大的集料和较大的空隙结构可使开级配大粒径沥青碎石的抗反射裂缝性能得到有效提升。当外界温度变化时, 各结构层之间存在温度梯度, 加之各结构层材料的热膨胀系数也不尽相同, 导致各结构层的变形情况和温度应力存在差异<sup>[9]</sup>, 进而出现路面开裂现象。低温易引发沥青面层的开裂破坏。因此, 查旭东等<sup>[10]</sup>

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-09-13; 接受日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11972237); 河北省科技厅科技计划项目(JD-202007、JD-202006、JX-202010)

通信作者: 凡涛涛(1990—)(ORCID: 0000-0002-4838-693X), 男, 讲师, 主要从事路面功能材料开发、车-环-路耦合作用下路面结构动力响应方面的研究。E-mail: fantaotao@stdu.edu.cn

通过开展小梁低温弯曲等试验,对比评价了面层不同改性沥青混合料的低温性能。李友云等<sup>[11]</sup>利用多尺度算法探讨了沥青混合料劈裂疲劳损伤性能,结果表明,集料粒径为1.18~2.36 mm的沥青混合料劈裂强度的提升幅度较大。也有学者利用室内试验和数值模拟方法,对反射裂缝的开裂扩展问题进行了研究<sup>[12-18]</sup>。WANG等<sup>[19]</sup>采用扩展有限元法研究了底面层预埋反射裂缝的力学响应,以及底面层预埋裂缝在扩展过程中各层模量和车辆荷载对主应力、剪应力、 $J$ 积分和两个应力强度因子( $K_I$ 、 $K_{II}$ )的影响,并采用熵方法分析了上述力学响应,结果表明,影响沥青道路反射裂缝发展的主要因素之一是底面层模量。栾利强<sup>[20]</sup>利用有限元软件计算了半刚性基层沥青路面的裂缝应力强度因子,认为裂缝的剪切疲劳扩展主要是由偏荷载引起的。李新宏<sup>[21]</sup>建立了含有基层裂缝的路面结构模型,并用其分析了在温度作用下铺设防裂功能层的路面结构的受力状态,结果表明,在铺设防裂功能层后路面结构应力的降低效果明显,铺设防裂功能层可明显缓解温度作用引起的反射裂缝问题。ZHANG等<sup>[22]</sup>为了分析车辆耦合振动对裂缝扩展的影响,在路面上设置了一定长度和宽度的初始裂缝,利用 $J$ 积分准则,使用离散积分环上的应力求得裂缝的应力强度因子,进而得到了路面裂缝的扩展路径。

综上所述,国内外学者针对反射裂缝开裂的研究多局限于移动荷载、温度场等单因素作用的情况,无法反映路面在运营期间受车辆和温度耦合作用的真实状况;在选择评价指标时多选用应力强度因子或 $J$ 积分等单一指标,导致对反射裂缝开裂扩展的影响分析不够全面。因此,本研究结合某地区的温度数据,利用ABAQUS软件建立存在反射裂缝的三维有限元沥青路面仿真模型,进行路面真实温度变化和行车荷载作用的模拟,探究变温作用下路面结构内的应力变化,以及在不同轮胎接地压力、行车速度及温度-行车荷载耦合作用下,半刚性基层反射裂缝尖端应力强度因子和 $J$ 积分的变化规律。

## 1 路面模型构建及验证

### 1.1 路面模型构建

#### 1.1.1 路面结构与反射裂缝预设

利用ABAQUS软件建立三维仿真模型,模型

宽8 m,深5 m,长6 m(行车方向)。车辆行车方向为 $z$ 轴负方向。模型边界约束条件为:底部为全约束;在行车方向两端(无路肩的两侧)施加 $x$ 、 $z$ 方向的固定约束;有路肩的两侧不约束。路面结构层从上往下分别为4 cm厚的SMA-13层、8 cm厚的AC-20层、10 cm厚的ATB-25层、40 cm厚的水泥稳定级配碎石(CTB)基层、20 cm厚的CTB底基层和土基层(SG),在基层CTB底部预设宽1 cm、深4 cm的反射裂缝。沥青路面结构和预设裂缝的位置如图1所示。

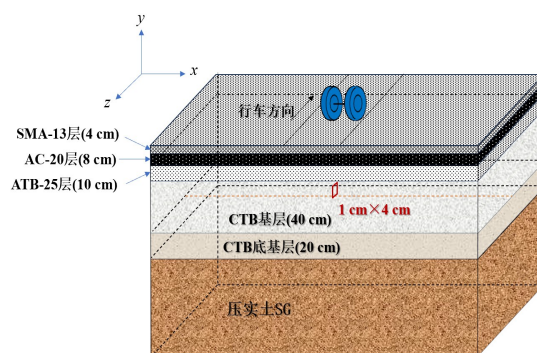


图1 路面结构三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of pavement structure

为模拟在气温变化情况下路面结构层内温度梯度的变化情况,现作出如下假设:

- 1) 路面各层为均质、各向同性的连续体。
- 2) 水平方向的温度梯度为0,只考虑热流在竖直向下方向上的传递。
- 3) 路面各层之间接触良好,层间温度和热流连续。

#### 1.1.2 荷载施加

将轮胎接地荷载简化为等效的矩形行车荷载,该矩形的长度为20.0 cm,宽度为18.4 cm,轮隙间距为13.5 cm,如图2所示。

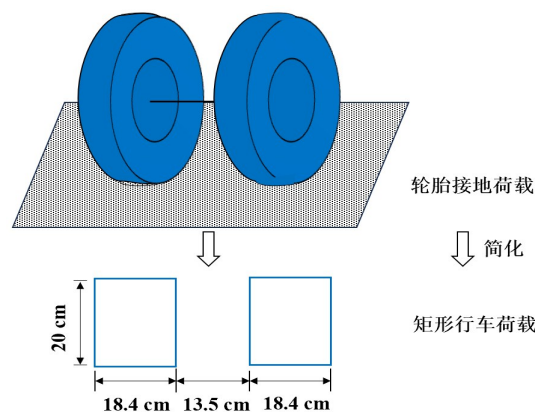


图2 轮胎接地荷载等效示意图

Fig. 2 Equivalent schematic of tire ground load

按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017),采用轴重为100 kN的单轴双轮组轴载作为行车荷载进行计算,标准轴载的计算参数见表1。

表1 标准轴载计算参数

Table 1 Standard axle load calculation parameters

标准轴	标准轴载/kN	单轮轴载/kN	轮胎接地应力/MPa
BZZ-100	100	25	0.70

### 1.1.3 材料参数

使用广义Maxwell模型模拟上面层和中面层材料特性,对下面层、基层、底基层以及土基按照线弹性材料进行模拟。材料参数见表2~3<sup>[23-25]</sup>。

为分析路面结构的最不利温度场,本研究搜集整理雄安地区的气象资料,并选定冬季和夏季中两个代表月份的气象资料(表4)进行温度计算与分析。一昼夜24 h各时刻温度不再详列。

路面材料热力学参数和线膨胀系数见表5~6<sup>[23-25]</sup>。通过编写FILM和DFLUX子程序来实现路面对流热交换和太阳的辐射作用。

表2 路面结构层材料参数

Table 2 Material parameters of pavement structure layer

材料	厚度/cm	模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
SMA-13	4	8 400	0.35	2 400
AC-20	8	9 000	0.25	2 400
ATB-25	10	7 000	0.25	2 400
CTB	60	9 000	0.25	2 300
SG	418	40	0.40	1 800

表6 线膨胀系数(-15~60℃)

Table 6 Coefficient of linear expansion(-15~60℃)

材料	各温度(℃)下的线膨胀系数										
	-15	-10	0	10	15	20	25	30	40	50	60
SMA-13	3.2	3.7	4.3	3.4	3.2	2.7	2.6	2.2	2.1	2.0	1.9
AC-20	1.8	2.1	2.6	2.4	2.1	1.8	1.5	1.2	1.1	1.0	
ATB-25	1.7	1.8	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2			
CTB	0.901	0.613	0.601	0.512	0.523	0.630	0.375				
SG	0.45										

### 1.2 路面模型验证

为验证本研究所建立路面模型的准确性,利用该模型计算冬、夏季路面内部结构的温度随时间的变化规律,如图3所示。与文献[26]中温度场数据的变化规律对比后发现,图3中不同深度(结构层)处温度随时间的变化规律与其基本一致。

提取不同结构层处最大温度与文献数据进行对比,结果见表7。由表7可知,本研究所建模型

表3 面层材料的Prony级数模拟参数(20℃)

Table 3 Prony series simulation parameters of surface layer materials (20℃)

材料	各松弛时间(s)下的模拟参数							
	0.000 1	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1 000
SMA-13	0.095	0.192	0.281	0.218	0.088	0.028	0.008	0.004
AC-20	0.087	0.043	0.139	0.202	0.245	0.174	0.073	0.022

注:SMA-13、AC-20的瞬态模量分别为8 400、9 000 MPa。

表4 气象参数

Table 4 Meteorological parameters

月份	日太阳辐射总量/(MJ·m <sup>-2</sup> )	日最高气温/℃	日最低气温/℃	有效日照时间/h	日平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )
1	14.0	-3.2	-19.3	7.5	3.0
7	24.6	36.1	21.8	12.0	2.8

表5 路面材料热力学参数

Table 5 Thermodynamic parameters of pavement materials

材料	导热率/(J·m <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	热容量/(J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	太阳辐射吸收率	路面发射率	绝对零度/℃
SMA-13	4 680	980.0	0.9	0.81	-273
AC-20	5 040	900.0			
ATB-25	4 320	815.0			
CTB	5 616	911.7			
SG	5 616	1 040.0			

的模拟温度与文献[26]中相应位置温度的最大差值(5℃)出现在路表面。随着路面深度的增加,该差值逐步减小,在下面层底部,温度差值减小至2℃。由于受温度、路面材料等因素的影响,各试验场景下相同结构层的温度会出现差值,但该差值均在合理范围内。

因此,本模型计算出来的结果可靠,且具备适用性。

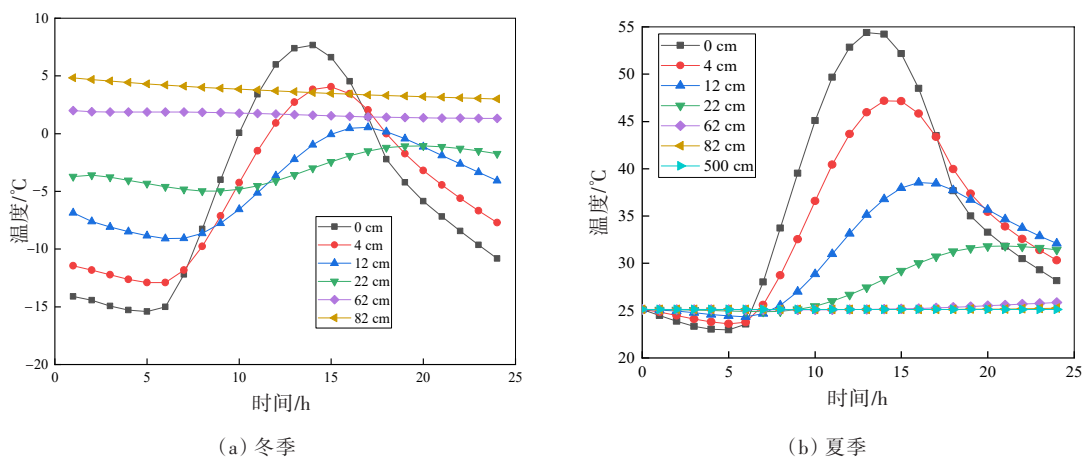


图3 不同季节路面结构不同深度处温度随时间的变化

Fig. 3 Variation of temperature values with time at different depths of pavement structure in different seasons

表7 路面不同结构层最大温度对比

Table 7 Comparison of maximum temperature values at different structural layers within the pavement surface °C

结构层位置	本研究模拟值	文献[26]中的值	差值
路表面	54	59	5
上面层底部	47	50	3
中面层底部	39	42	3
下面层底部	32	34	2

## 2 结果与讨论

### 2.1 路面结构温度场和温度应力分布规律

由图3可知,冬季道路不同结构层的最大温差为11.1 °C,夏季最大温差达到了29.1 °C;当路面结构深度为0~22 cm时,深度越小,曲线曲率越大;当深度达到及超过62 cm后,温度的变化接近直线。

综上所述,在冬、夏季,道路不同结构层处的温度存在明显差异;当路面结构的深度为0~22 cm时,道路结构层对气温变化比较敏感;当深度达到或超过62 cm后,气温变化对道路深层结构的温度的影响不显著。

沥青路面各结构层的温度应力随时间的变化如图4所示。分析图4可知,冬季最大温度应力为-0.9 MPa,夏季为-1.3 MPa,冬季和夏季的最大温度应力均出现在上面层;随着路面深度的增加,温度应力逐渐减小,在基层位置冬季最大温度应力为-0.04 MPa,夏季为-0.36 MPa;在面层位置温度应力曲线的曲率较大,随着深度的增加,曲率逐渐减小,在底基层、路基位置温度应力曲线趋近于一条直线,这与温度的变化规律相一致。

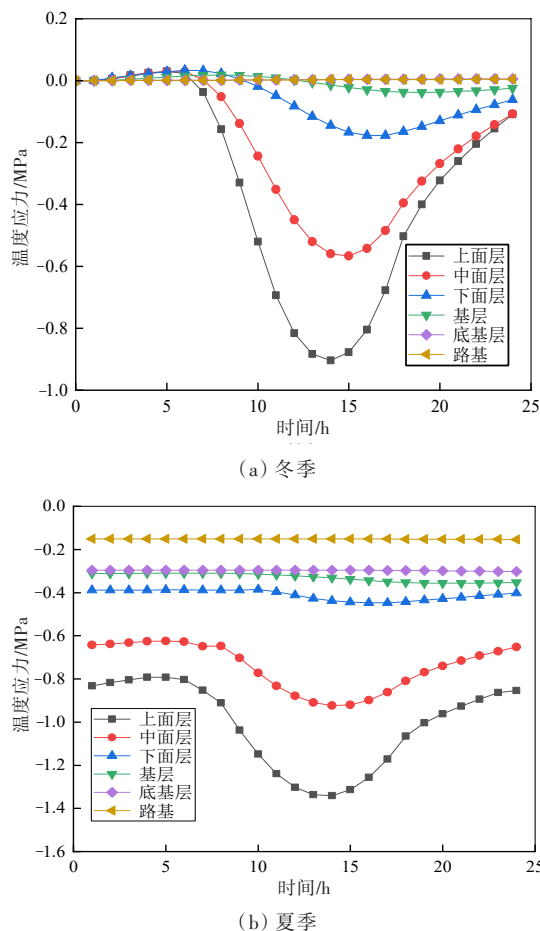


图4 不同季节各路面结构层温度应力随时间的变化  
Fig. 4 Variation of temperature stress values with time in different structural layers of the road in different seasons

由此可见,最大应力和温度应力的变化幅度均随着路面结构深度的增加而逐渐降低,原因在于沥青混合料是一种温敏性材料,其与大气环境越接近,受温度的影响越明显,因温差产生的温度应力就越大。



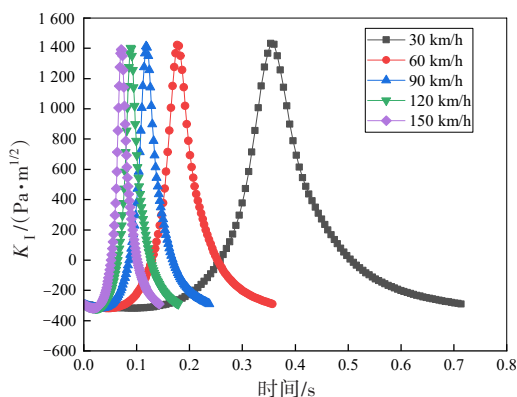
## 2.2 车速对路面反射裂缝的影响分析

### 2.2.1 计算点位的选取

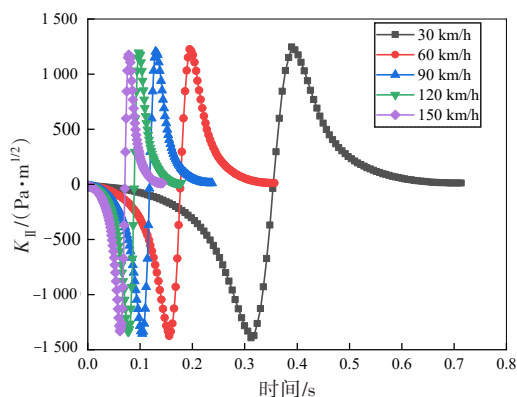
本研究的路面结构模型为三维模型,反射裂缝横向贯穿路面结构。为研究各影响因素对反射裂缝的影响,需选取移动荷载作用下裂缝扩展的最不利位置作为计算点位,此点位为荷载移动方向与横向反射裂缝的交点。

### 2.2.2 车速对应力强度因子的影响

断裂力学中将裂缝分为以下3种类型:Ⅰ型(张开型)、Ⅱ型(滑开型)和Ⅲ型(撕开型)裂缝。在实际路面结构中,Ⅲ型裂缝较少出现<sup>[27]</sup>。因此,本研究选用两个应力强度因子 $K_I$ 、 $K_{II}$ 来表征Ⅰ型和Ⅱ型裂缝的扩展情况。选取30、60、90、120、150 km/h的行车速度,并计算得到不同行车速度下路面结构 $K_I$ 、 $K_{II}$ 的时程曲线,如图5所示。



(a)  $K_I$ 时程曲线



(b)  $K_{II}$ 时程曲线

图5 不同车速下路面结构应力强度因子时程曲线

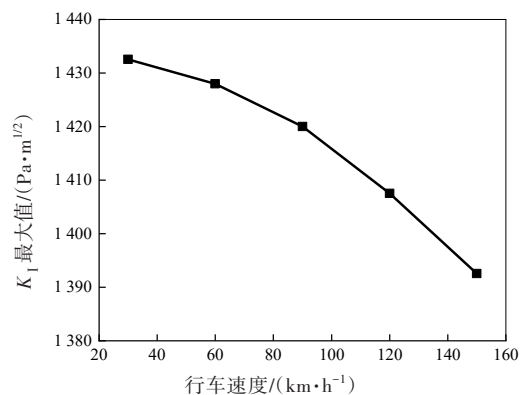
Fig. 5 Time history curves for the stress intensity factor of pavement structure under different vehicle speeds

由图5(a)可知,在不同车辆行驶速度下,计算点位的 $K_I$ 呈先增大后减小的趋势,当车辆行驶到计算点位正上方时, $K_I$ 达到最大值。由图5(b)可知,随着车辆的行驶,计算点位 $K_{II}$ 呈“正负交替”

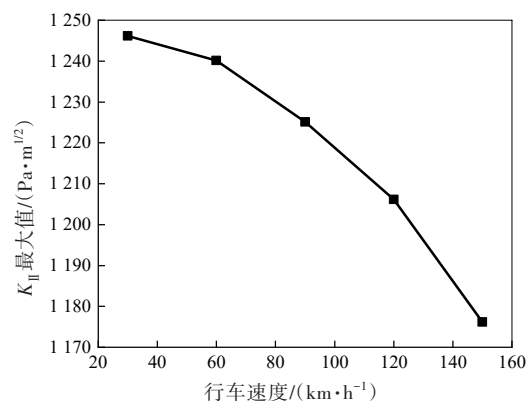
的规律变化,当车辆向计算点位靠近时, $K_{II}$ 先负向增大然后减小,当车辆驶离计算点位的正上方后, $K_{II}$ 正向先增大后减小。随着行车速度的增加, $K_I$ 和 $K_{II}$ 变化速率明显加快。

图6所示为不同车辆行驶速度下路面结构 $K_I$ 、 $K_{II}$ 最大值的变化规律。上述5种不同行车速度下 $K_I$ 最大值的取值范围为1392.54~1432.54  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , $K_{II}$ 最大值的取值范围为1176.13~1246.13  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;当行驶速度由30 km/h增大至150 km/h时, $K_I$ 最大值减小了2.79%, $K_{II}$ 最大值减小了5.62%,速度的增加对 $K_{II}$ 的影响比对 $K_I$ 的大。

由上述分析可知,路面结构 $K_I$ 的最大值均大于 $K_{II}$ 的最大值,基层反射裂缝属于以Ⅰ型为主导的复合裂缝;行车速度的增加会使应力强度因子 $K_I$ 和 $K_{II}$ 的峰值有所降低。



(a)  $K_I$ 最大值



(b)  $K_{II}$ 最大值

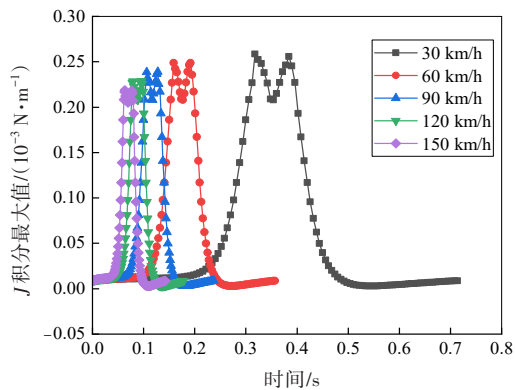
图6 路面结构应力强度因子最大值随行车速度的变化

Fig. 6 Effect of vehicle speed on the maximum value of the stress intensity factor for pavement structure

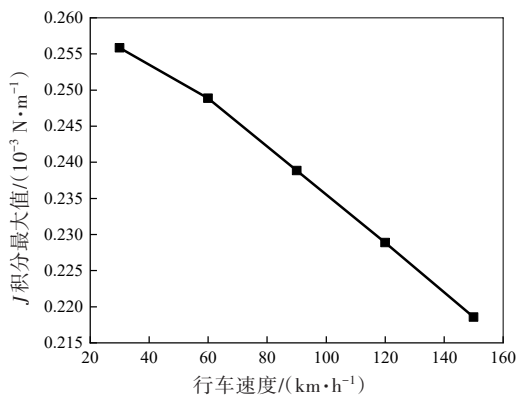
$J$ 积分作为弹塑性断裂力学中一个与路径无关的积分,可度量裂缝或缺口顶端应变场。对含有基层反射裂缝的沥青路面结构,其在移动荷载作用下的裂缝扩展为复合型断裂破坏,可通过计

算裂缝尖端的 $J$ 积分来有效判断裂缝的扩展趋势。

不同行车速度下路面结构裂缝尖端的 $J$ 积分结果如图7所示。由图7(a)可知,当行车荷载逐渐接近观测点时, $J$ 积分逐渐增大;当其驶进裂缝区域边缘但未到达裂缝正上方时, $J$ 积分逐渐减小;当其到达裂缝正上方时, $J$ 积分达到裂缝区域内的局部极小值;当其驶离裂缝正上方且到达裂缝另一个边缘时, $J$ 积分逐渐增大;当其到达裂缝另一个边缘正上方时, $J$ 积分的值达到顶峰;随着行车荷载离开裂缝区域, $J$ 积分又逐渐减小,直至趋近于0。由图7(b)可知,行车速度越快,路面结构裂缝尖端的 $J$ 积分越小,与150 km/h所对应的 $J$ 积分相比,当行车速度为30 km/h时,路面结构的 $J$ 积分增大了18.0%。



(a)  $J$ 积分时程曲线



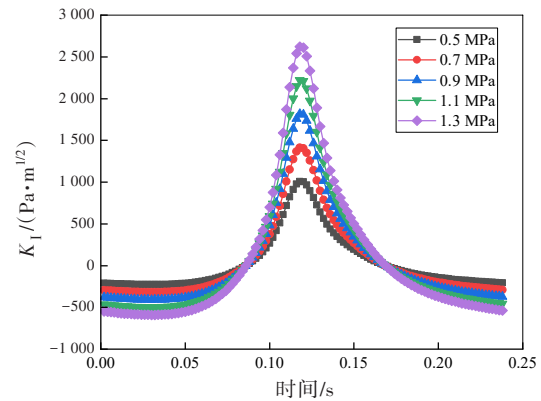
(b)  $J$ 积分最大值与行车速度的关系

图7 不同行车速度下的 $J$ 积分最大值变化

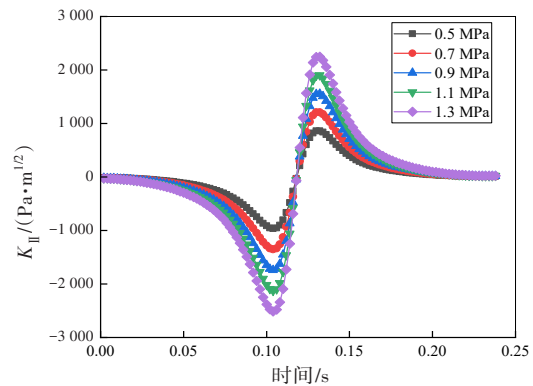
Fig. 7 Effect of vehicle speed on the maximum value of the  $J$ -integral

### 2.3 行车荷载对路面反射裂缝的影响分析

为了分析行车荷载对沥青路面横向反射裂缝扩展的影响,选取行车速度90 km/h下的5种轮胎接地压力(0.5、0.7、0.9、1.1、1.3 MPa)进行计算,结果如图8所示。



(a)  $K_I$ 时程曲线



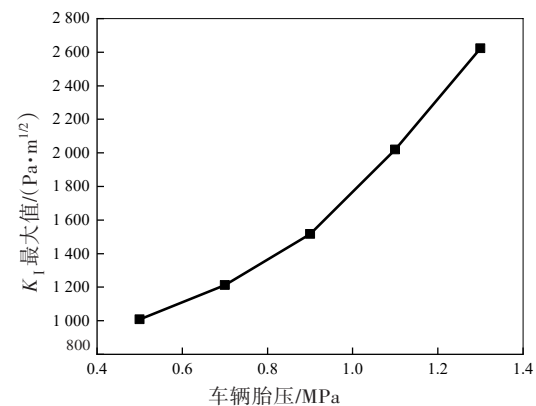
(b)  $K_{II}$ 时程曲线

图8 不同轮胎接地压力下路面结构应力强度因子时程曲线

Fig. 8 Time history curves for the stress intensity factor of pavement structure under different tire contact pressures

由图8可知,在不同轮胎接地压力下, $K_I$ 先增加后降低, $K_{II}$ 呈“正负交替”的规律变化。由此可见,这两个应力强度因子在不同轮胎接地压力下的变化规律与其在不同车速下的变化规律一致。

不同轮胎接地压力下应力强度因子的最大值如图9所示。不同轮胎接地压力下,路面结构 $J$ 积分结果如图10所示。由图9可知,随着车辆轮胎接地压力的增大, $K_I$ 和 $K_{II}$ 逐渐增大。当轮胎接地



(a)  $K_I$ 最大值

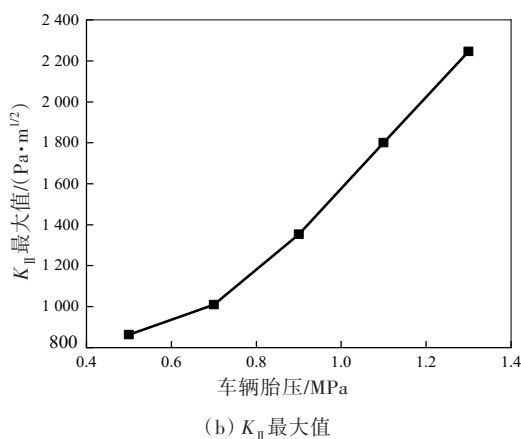
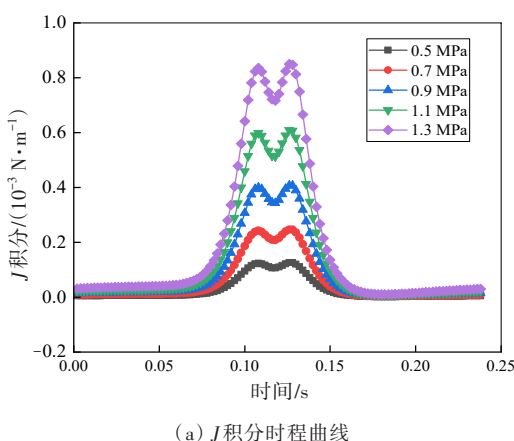
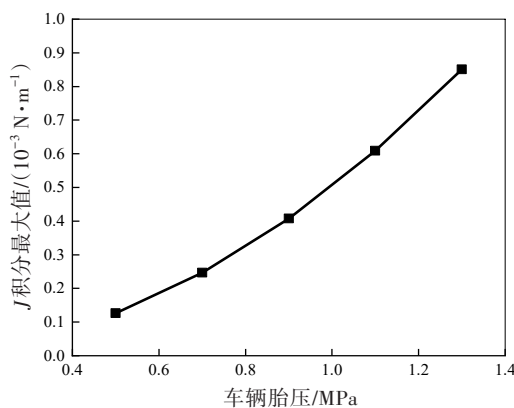


图9 不同车辆胎压下路面结构应力强度因子最大值变化  
Fig. 9 Effect of tire contact pressure on the maximum value of the stress intensity factor for pavement structure



(a)  $J$ 积分时程曲线



(b) 不同车辆胎压下  $J$  积分最大值变化曲线

图10 不同车辆胎压下路面结构  $J$  积分最大值变化  
Fig. 10 Effect of tire contact pressure on the maximum value of the  $J$ -integral for pavement structure

压力由0.5 MPa增大至1.3 MPa时,  $K_I$ 、 $K_{II}$  的最大值均增大了160%;随着车辆轮胎接地压力的变化,  $K_I$  的增长速率比  $K_{II}$  的略大;在轮胎接地压力达到1.1 MPa后,  $K_{II}$  最大值曲线的斜率基本不变,  $K_I$  最大值曲线的斜率增长变缓, 所以当轮胎接地压力大于1.1

MPa时, 轮胎接地压力对反射裂缝的影响比当轮胎接地压力为0.5~1.1 MPa时的小;在相同轮胎接地压力下, 路面结构的  $K_I$  最大值大于  $K_{II}$  最大值。

由图10可知,  $J$  积分随着车辆轮胎接地压力的增大而逐渐增大。当车辆轮胎接地压力由0.5 MPa增大到1.3 MPa时,  $J$  积分增大了6.5倍, 说明当轮胎接地压力增大后, 基层反射裂缝的扩展趋势逐渐显著。对比路面结构应力强度因子和  $J$  积分结果可知, 车辆轮胎接地压力比行车速度对基层反射裂缝扩展的促进作用更大<sup>[28-30]</sup>。

## 2.4 车-温耦合对路面反射裂缝的影响分析

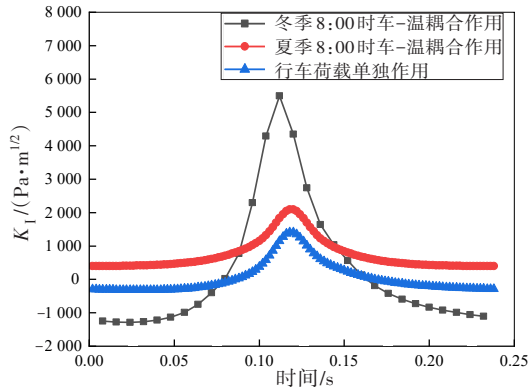
沥青路面同时承受温度场和行车荷载的共同作用。本研究通过顺序热力耦合方法建立车-温耦合模型, 即先根据前文已经计算得到的路面内部结构24 h温度梯度应力场, 在力学模型中导入某一时刻温度应力结果的odb文件作为预应力场; 再通过VDLOAD子程序加入移动荷载, 运行后计算某一时刻温度-荷载耦合作用下裂缝尖端的应力强度因子和  $J$  积分。耦合作用分为3种: 冬季20:00时车-温耦合作用, 夏季20:00时车-温耦合作用, 行车荷载单独作用。

根据路面结构温度应力场的变化情况可知: 路面基层在晚上20:00时温度应力达到最大值, 因此本研究以20:00为例, 分析高低温环境对反射裂缝开裂的影响, 结果如图11~12所示。

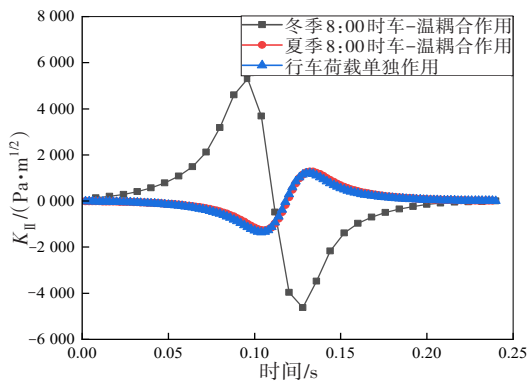
对比车-温耦合作用下路面结构  $K_I$ 、 $K_{II}$  和  $J$  积分时程曲线和最大值变化结果可知, 当行车荷载移动到裂缝前后时, 车-温耦合作用下的  $K_I$ 、 $K_{II}$  和  $J$  积分的绝对值均比行车荷载单独作用下的, 将3种耦合作用按从大到小的顺序排列, 依次为: 冬季20:00时车-温耦合作用, 夏季20:00时车-温耦合作用, 行车荷载单独作用。由此可知, 相对于行车荷载单独作用, 车-温耦合作用更易导致裂缝扩展。冬季20:00时车-温耦合作用下的  $K_I$  最大值为夏季20:00时车-温耦合作用下的2.6倍, 为行车荷载单独作用下的3.9倍; 冬季20:00时车-温耦合作用下的  $K_{II}$  最大值为夏季20:00时车-温耦合作用下的4.2倍, 为行车荷载单独作用下的4.4倍; 冬季20:00时车-温耦合作用下的  $J$  积分最大值为夏季20:00时车-温耦合作用下的7.8倍, 为行车荷载单独作用下的14.4倍。由此可知, 低温是引发路面出现裂缝的重要因素。

由图12可知, 在冬季20:00时车-温耦合作用

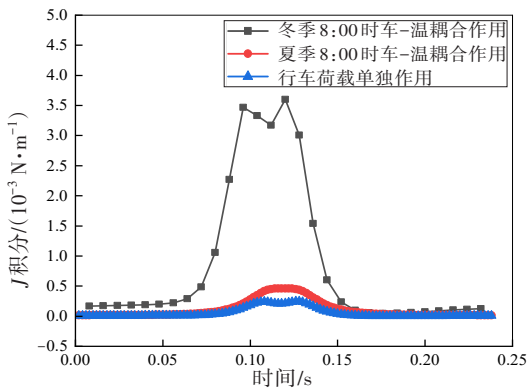
用、夏季 20:00 时车-温耦合作用及行车荷载单独作用下,  $K_I$  最大值分别为 5 490.69、2 098.32、1 412.54  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $K_{II}$  最大值分别为 5 295.94、1 272.60、1 209.36  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $J$  积分最大值分别为  $3.60 \times 10^{-3}$ 、 $0.46 \times 10^{-3}$ 、 $0.25 \times 10^{-3}$   $\text{N/m}$ , 由此可见, 在这 3 种耦合作用下  $K_I$  均大于  $K_{II}$ , 冬季 20:00 时车-温耦合作用下的  $J$  积分明显比其他两种耦合作用下的  $J$  积分大。



(a)  $K_I$  时程曲线



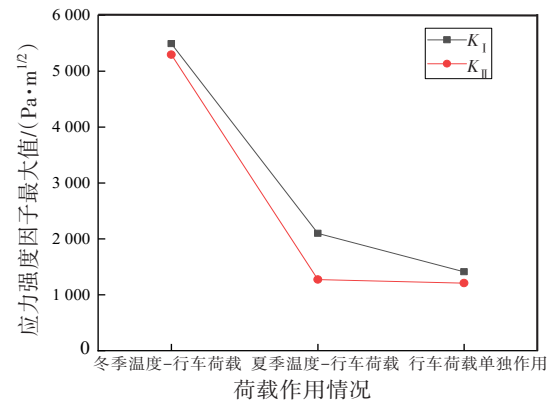
(b)  $K_{II}$  时程曲线



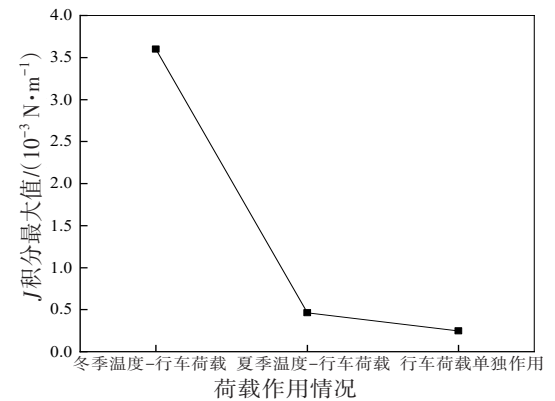
(c)  $J$  积分时程曲线

图 11 车-温耦合作用下路面结构应力强度因子和  $J$  积分的时程曲线

Fig. 11 Time history curves of stress intensity factor and  $J$ -integral of pavement structure under the vehicle-temperature coupling effect



(a)  $K_I$  和  $K_{II}$  最大值



(b)  $J$  积分最大值

图 12 车-温耦合作用下路面结构应力强度因子和  $J$  积分最大值

Fig. 12 The maximum values of the stress intensity factor and  $J$ -integral of pavement structure under the vehicle-temperature coupling effect

综上所述, 在车-温耦合作用以及行车荷载单独作用下, 反射裂缝扩展均由 I 型扩展主导; 温度越低, 裂缝尖端能量累积得越多, 裂缝的扩展程度也就越大。

### 3 结论

1) 当行驶速度由 30 km/h 增大至 150 km/h 后, I 型、II 型应力强度因子的最大值分别减小了 2.79%、5.62%; 与行驶速度 150 km/h 相比, 30 km/h 所对应的  $J$  积分增大了 18.0%。因此, 车辆行驶速度的增大会减缓沥青路面基层反射裂缝的扩展趋势。

2) 当车辆轮胎接地压力由 0.5 MPa 增大到 1.3 MPa 后, I 型和 II 型应力强度因子的最大值均增加了 160%,  $J$  积分增大了 6.5 倍。与车速变化相比, 行车荷载的增大在促进基层反射裂缝的扩展



方面作用更大。

3) 在车-温耦合作用及行车荷载单独作用下, I 型应力强度因子均大于 II 型应力强度因子, 反射裂缝扩展均由 I 型扩展主导。

4) 在冬季 20:00 时车-温耦合作用下, I、II 型应力强度因子最大值和  $J$  积分分别为 5 490.69、5 295.94  $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$  以及  $3.6 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ , 明显比夏季 20:00 时车-温耦合作用和行车荷载单独作用下的, 说明低温是裂缝扩展的主要因素。

### [参考文献]

- [1] ZAFIR Z, SIDDHARTHAN R, SEBAALY P E. Dynamic pavement-strain histories from moving traffic load[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(5): 821-842. DOI: 10.1061/(asce) 0733-947x(1994)120: 5(821).
- [2] SIDDHARTHAN R V, YAO J A, SEBAALY P E. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(6): 557-566. DOI: 10.1061/(asce) 0733-947x(1998)124: 6(557).
- [3] WANG X Y, ZHONG Y. Reflective crack in semi-rigid base asphalt pavement under temperature-traffic coupled dynamics using XFEM [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 280-289. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.125.
- [4] LIU Y, QIAN Z D, ZHANG M. Fatigue damage analysis of epoxy asphalt pavement for steel bridges considering coupled effects of heavy load and temperature variations [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2017, 33(4): 478-483.
- [5] DORE G, ZUBECK H K. Cold regions pavement engineering[M]. Reston: ASCE Press, 2009.
- [6] 陈飞, 张林艳, 封基良, 等. 沥青混合料低温抗裂性能试验方法研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊2): 127-137.  
CHEN Fei, ZHANG Linyan, FENG Jiliang, et al. Research progress on test methods of asphalt mixture's low-temperature anti-cracking performance [J]. Materials Review, 2021, 35(sup 2): 127-137.
- [7] 艾长发, 徐铖, 任东亚, 等. 移动荷载下含纵横向双裂纹沥青路面复合断裂特性[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(1): 128-135. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-2724.2018.01.016.  
AI Changfa, XU Cheng, REN Dongya, et al. Characterization of vertical and horizontal propagations of double cracks in asphalt pavements under moving loads [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1): 128-135. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-2724.2018.01.016.
- [8] 付其林, 魏建国, 王力扬. 基于 MMLS3 设备的 OLSM 抗反射裂缝性能研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 133-143. DOI: 10.19721/j. cnki. 1001-7372.2020.08.014.  
FU Qilin, WEI Jianguo, WANG Liyang. Research on anti-reflective cracking performance of open-graded large stone asphalt mixes based on MMLS3 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 133-143. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.08.014.
- [9] 朱洪洲, 雷蕾, 陈瑞璞, 等. 沥青路面温度应力研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 44-53. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-0696.2023.05.06.  
ZHU Hongzhou, LEI Lei, CHEN Ruipu, et al. Research progress on thermal stress of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2023, 42(5): 44-53. DOI: 10.3969/j. issn.1674-0696.2023.05.06.
- [10] 查旭东, 谭仕杰, 邹博, 等. 上面层改性沥青混合料低温性能综合对比评价[J/OL]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023: 1-9 [2023-06-30]. https://doi.org/10.19951/j.cnki.1672-9331.20220327002.  
ZHA Xudong, TAN Shijie, ZOU Bo, et al. Comprehensive comparative evaluation of low-temperature performance for modified asphalt mixtures in upper surface layer [J/OL]. Journal Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023: 1-9 [2023-06-30]. https://doi.org/10.19951/j.cnki.1672-9331.20220327002.
- [11] 李友云, 陈佳, 王硕, 等. 沥青混合料劈裂疲劳损伤力学特性多尺度研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 1-11, 80. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.001.  
LI Youyun, CHEN Jia, WANG Shuo, et al. Multi-scale research on mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 1-11, 80. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.001.
- [12] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916. DOI: 10.1061/(asce) 1090-0241(2002)128: 11(907).
- [13] 王威娜, 周圣雄, 秦煜. 室内反射裂缝试验方法研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(5): 79-88. DOI: 10.11896/cldb.20090234.  
WANG Weina, ZHOU Shengxiong, QIN Yu. Research progress of indoor reflective crack test method [J]. Materials Reports, 2022, 36(5): 79-88. DOI: 10.11896/cldb.20090234.
- [14] UDDIN W, GARZA S. 3D-FE simulation study of

- structural response analysis for pavement subgrade systems subjected to dynamic loads [C]//American Society of Civil Engineers Pavements and Materials: Characterization and Modeling Symposium at EMI Conference. Reston: ASCE Press, 2010. DOI: 10.1061/41129(385)15.
- [15] XIA K M. Finite element modeling of dynamic tire/pavement interaction [C]// American Society of Civil Engineers Pavements and Materials: Characterization and Modeling Symposium at EMI Conference. Reston: ASCE Press, 2010. DOI: 10.1061/41129(385)18.
- [16] 王雪莲, 黄晓明, 卞国剑. 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.
- WANG Xuelian, HUANG Xiaoming, BIAN Guojian. Numerical simulation analysis on reflective cracking extended path of semi-rigid base asphalt mixture [J]. Highway, 2018, 63(5): 1-6.
- [17] LV D, HUANG X, GUAN C. SMA anti-crack performance at low temperature [C]// Proceedings of ICTE: Safety, Speediness, Intelligence, Low-carbon, Innovation. Reston: ASCE Press, 2013. DOI: 10.1061/9780784413159.035.
- [18] 房娜仁, 胡士清, 李琪琪, 等. 基于半刚性基层强度控制的反射裂缝防治对策研究[J]. 公路, 2022, 67(9): 51-60.
- FANG Naren, HU Shiqing, LI Qiqi, et al. Research on countermeasures for reflection crack prevention based on strength control of semi-rigid base course [J]. Highway, 2022, 67(9): 51-60.
- [19] WANG H Z, WU Y, YANG J, et al. Numerical simulation on reflective cracking behavior of asphalt pavement[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7990. DOI: 10.3390/app11177990.
- [20] 栾利强. 半刚性基层沥青路面疲劳裂缝扩展与寿命预估研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(9): 118-128. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2017.09.012.
- LUAN Liqiang. Research on fatigue crack propagation and fatigue life prediction of semi-rigid base asphalt pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 118-128. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2017.09.012.
- [21] 李新宏. 温度作用下半刚性基层道路反射裂缝的应力分析与处理方法研究[J]. 公路, 2017, 62(6): 54-60.
- LI Xinhong. Stress analysis and treatment of reflective cracks in semi-rigid base road under temperature [J]. Highway, 2017, 62(6): 54-60.
- [22] ZHANG J N, YANG S P, LI S H, et al. Study on crack propagation path of asphalt pavement under vehicle-road coupled vibration [J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 101: 481-502. DOI: 10.1016/j.apm.2021.09.004.
- [23] 高思. 基于断裂力学的沥青路面裂缝扩展特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- GAO Si. Research on crack propagation characteristics of asphalt pavement based on fracture mechanics [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [24] SI C D, SU X, CHEN E L, et al. Comparative study on dynamic response of deck pavement of two kinds of box girder bridges under moving loads [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-13. DOI: 10.1155/2019/6052745.
- [25] 孙志棋. 基于收缩-松弛竞争机制的沥青混合料低温开裂机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- SUN Zhiqi. The thermal cracking mechanism of asphalt mixtures based on the contraction-relaxation competition [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [26] SI C D, CAO H, CHEN E L, et al. Dynamic response analysis of rutting resistance performance of high modulus asphalt concrete pavement [J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2701. DOI: 10.3390/app8122701.
- [27] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Application of ABAQUS finite element software in road engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [28] 刘溪溪, 谢海巍, 刘尊青, 等. 不同材料土工布防治反射裂缝效果试验研究[J]. 公路与汽运, 2022(2): 77-79, 83. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.020.
- LIU Xixi, XIE Haiwei, LIU Zunqing, et al. Experimental study on the effect of geotextiles with different materials on preventing reflection cracks [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(2): 77-79, 83. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.02.020.
- [29] 樊亮, 石南, 梁皓, 等. 路用耐水型聚氨酯注浆材料的修复效果与工程评价[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4): 24-31. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023070123081981.
- FAN Liang, SHI Nan, LIANG Hao, et al. Repair performance and engineering evaluation of waterproofing polyurethane grouting material in pavements [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(4): 24-31. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023070123081981.
- [30] 张芷英, 解建光, 张冰洋, 等. 改性沥青加铺层抗反射裂缝室内小梁试验[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 67-71. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.012.
- ZHANG Zhiying, XIE Jianguang, ZHANG Bingyang, et al. Laboratory trabecular test of anti-reflection crack of modified asphalt overlaying [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 67-71. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.012.

## Study on the influence factors of reflective cracking in asphalt pavement under the vehicle-temperature coupling effect

SI Chundi<sup>1,2</sup>, FAN Taotao<sup>1,2,3</sup>, CAO Hang<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>4</sup>, KANG Xing<sup>4</sup>, ZHANG Yu<sup>5</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Hebei Provincial Key Laboratory of Traffic Safety and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. Hebei Highway Jingxiong Preparatory Office, Baoding 071799, China; 5. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** [Purposes] In order to explore the factors that affect the reflective cracks on asphalt pavement, this study attempts to analyze the stress changes inside the road under different temperatures. [Method] First, the reflective cracks at the bottom of the semi-rigid base were selected as the research object, and the stress intensity factor and  $J$ -integral of the tip of the reflective cracks were used as the evaluation indexes. Then, a generalized Maxwell model was established based on the finite element method to analyze the stress changes inside the road under the action of temperature. Finally, The change laws of the evaluation index of reflective crack tip in semi-rigid base course under different tire pressure, vehicle speed and temperature-driving load coupling were explored. [Findings] According to the evaluation index comparison, when the vehicle speed increased from 30 km/h to 150 km/h, the maximum values of the stress intensity factors (mode I and mode II) decreased by 2.79% and 5.62% respectively. Compared to the driving speed of 150 km/h, the  $J$ -integral corresponding to 30 km/h increased by 18.0%. When the tire contact pressures increased from 0.5 MPa to 1.3 MPa, both the maximum values of the stress intensity factors (mode I and mode II) increased by 160%. The impact of tire contact pressure on the stress intensity factor of reflective cracks was greater than that of driving speed. Under the vehicle-temperature coupling conditions, the stress intensity factor of mode I was consistently higher than that of mode II, and the cracking of transverse reflective cracks in the asphalt pavement base was a composite crack dominated by mode I. The value of the  $J$ -integral was  $3.6 \times 10^{-3}$  N/m under low temperature-load conditions, and the value was significantly higher than that of high temperature-load and load acting alone. [Conclusions] Low temperature and overload have the most significant impact on the propagation of reflective cracks on the pavement, and the detection of reflective cracks on asphalt pavement should be strengthened in winter.

**Key words:** road engineering; reflective crack; vehicle-temperature coupling; finite element; stress intensity factor;  $J$ -integral

**Manuscript received:** 2023-07-24; **revised:** 2023-09-13; **accepted:** 2023-09-14

**Foundation item:** Project (11972237) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects (JD-202007, JD-202006, JX-202010) supported by Science and Technology Program of Department of Transportation of Hebei Province

**Corresponding author:** FAN Taotao (1990—) (ORCID: 0000-0002-4838-693X), male, lecturer, research interest: development of pavement functional materials, analysis of pavement structure dynamic response under vehicle-circle-road coupling. E-mail: fantaotao@stdu.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:李岳林)