

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.009

重冰冻区低温-荷载耦合作用下玄武岩纤维 沥青路面的抗裂性能

郭寅川¹, 郝宸伟², 郭汉³, 樊莉¹, 申爱琴¹, 王路生^{1*}

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 乌兰察布市公路工程质量监督站, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要: 针对内蒙古重冰冻区沥青路面所处的严寒工作环境及路面病害, 提出基于抗裂性能的路面结构控制指标。利用Ansys有限元软件建立新建玄武岩纤维沥青路面结构的计算模型和出现裂缝后的路面计算模型, 通过室内试验确定玄武岩纤维沥青路面力学参数、热物性参数与其他参数, 分别对其低温-荷载耦合作用下的抗裂性能指标进行计算分析, 并对玄武岩纤维沥青混合料疲劳寿命进行测试, 验证有限元模拟结果的正确性。研究表明: 低温-荷载耦合作用下, 易裂点位处新建玄武岩纤维沥青路面各项抗裂指标均有所提升; 不同荷载位置对含裂缝玄武岩纤维沥青路面不同裂缝扩展时期的影响具有差异化; 含裂缝玄武岩纤维沥青路面在低温-正载 K_I 、低温-偏载 K_{I1} 和低温-偏载 K_{I2} 作用下易裂系数指标 K_R 都较小; 在不同温度和应力水平下, 玄武岩纤维沥青混合料疲劳寿命始终显著高于普通沥青混合料。

关键词: 玄武岩纤维沥青路面; 重冰冻区; 抗裂性能; 有限元分析; 疲劳寿命

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

0 引言

内蒙古自治区国道332线拉布大林至哈达图段属于典型重冰冻区, 冬季温度极低、温差较大, 且该段交通量大, 存在较多车辆超载现象, 故沥青路面出现了裂缝和车辙等病害, 且裂缝在这些病害类型中占比最高^[1-3]。为提高沥青混凝土的抗拉能力, 可在混凝土中掺加玄武岩纤维^[4-5], 其优异的力学性能和温度稳定性可提高混凝土的高温稳定性、低温抗裂性和耐久性^[6-7]。同时, 玄武岩纤维掺量对沥青胶浆的抗裂性能有影响, 随着纤维掺量的增加, 抗裂性能呈“先升后降”的趋势^[8-9]。玄武岩纤维沥青混凝土具有较好的低温柔韧性和抗冲击韧性^[10-11], 甚至经疲劳损伤后, 还具有一定的自愈性能^[12]。上述研究对玄武岩纤维沥青混凝土的各项性能进行了试验分析, 但都限于温度、荷载或掺量等单因素条件, 尽管有些学者也对低温-荷载耦合作用下沥青混合料抗裂性能研究做了一定的工作, 但未对重冰冻区掺玄

武岩纤维沥青路面低温-荷载耦合作用下的抗裂性能进行研究。

本文对重冰冻区低温-荷载耦合作用下玄武岩纤维沥青路面的抗裂性能进行模拟研究。基于沥青路面沥青层层底容许拉应变、沥青层剪应力、半刚性基层底拉应力和路基顶面的容许竖向压应变4种路面结构控制指标和断裂力学理论, 先通过室内试验确定玄武岩纤维沥青路面的力学参数、热物性参数和其他参数, 再对新建玄武岩纤维沥青路面结构的计算模型和出现裂缝后的路面计算模型进行计算分析, 并对玄武岩纤维沥青混合料疲劳寿命进行测试, 以验证有限元模拟结果的正确性, 以为玄武岩纤维沥青路面的工程应用提供参考。

1 有限元模型的建立与参数研究

1.1 有限元模型的建立

国道332线拉布大林至哈达图段公路采用如图1所示的双面层沥青路面结构形式。

收稿日期: 2023-03-10(修改稿)

基金项目: 内蒙古交通科技项目(编号: NJ-2015-38); 陕西省交通科技项目(编号: 17-09k)

作者简介: 郭寅川, 男, 博士, 副教授. E-mail: silver007007@163.com

*通信作者: 王路生, 男, 博士研究生. E-mail: lusen1011@qq.com



图1 双层沥青路面结构示意图

利用 Ansys 有限元软件根据图 1 中的路面结构分别建立新建玄武岩纤维沥青路面结构计算模型以及出现裂缝后的路面计算模型。在进行沥青路面模型力学计算时,拟将路面结构模型简化为多层弹性体,基本假设为:①各结构层为均质线弹性体;②路面结构的变形均是小变形,不考虑其自重;③路面所受荷载作用的范围有限,且路面结构水平向和深度向无限远处位移和应力为零;④除特殊设定外,路面结构各层间为连续状态。

针对新建玄武岩纤维沥青路面结构,建立长度 5 m 的立方体路面模型,其中 x 向为道路横断面水平方向, z 向为行车方向, y 向为深度方向。单元使用 Solid185 单元,模型两 x - y 侧面约束其横向位移,两 y - z 侧面无约束,底部完全约束,路表为自由表面。四侧面为绝热边界,无热量传递,底部为恒温边界,根据实地量测数据,设其温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,路表受太阳辐射、路表间有效辐射及路表热对流作用。轴载模式采用双矩形,矩形形心间距 0.3 m,宽度 0.2 m,长度根据实际轴载进行等效。建成的路面结构有限元模型如图 2 所示。

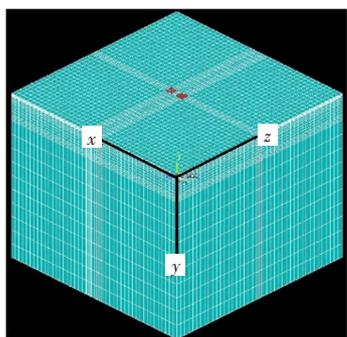


图2 新建沥青路面结构三维有限元模型

含裂缝的玄武岩纤维沥青路面采用二维模型,尺寸为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$, x 向为道路横断面水平方向, y 向为深度方向。单元使用高阶二维八节点 Plane183 单元。该单元具有二次位移函数,能适应不规则模型的分网。建模时对裂纹尖端进行奇异化处理,模型

两侧约束横向位移,底部完全约束,裂缝和路表均为自由表面,裂缝宽度设为 5 mm,初始长度 1 mm。模型两侧边界为绝热边界,底部为恒温边界,温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,路表受太阳辐射、路表间有效辐射及热对流作用。轮载模式采用线形,长度根据实际轴载等效,含裂缝路面二维节点模型如图 3 所示。

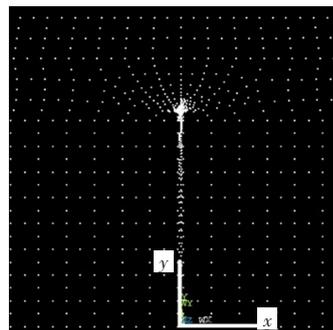


图3 含裂缝的沥青路面二维节点模型

1.2 力学与热物性材料参数研究

路面结构共采用了普通沥青混合料 AC-13 上面层+普通沥青混合料 AC-20 下面层和掺加 0.4% 玄武岩纤维沥青混合料 AC-13+BF (Basalt Fiber, 简称 BF) 上面层+掺加 0.3% 玄武岩纤维沥青混合料 AC-20+BF 下面层两种模式。在配合比及最佳油石比确定的基础上,对 AC-13、AC-13+BF、AC-20 和 AC-20+BF 在试验温度分别为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,路面行车近似频率 10 Hz 下的动态模量进行了测定。并根据时温等效原理,在基准温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,利用移位因子、动态模量主曲线计算得到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的动态模量值。由于泊松比对路面材料应力影响较小,根据以往的研究,选取泊松比代表值,其结果如表 1 所示。同时,水泥稳定级配碎石、水泥稳定级配砂砾、天然砂砾和路基的模量、泊松比等也取用当地代表值,如表 2 所示。

表1 沥青混合料力学参数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	动态模量/MPa				泊松 比
	AC-13	AC-13+BF	AC-20	AC-20+BF	
-40	64 856.0	78 699.0	67 699.0	83 378.0	0.070
-30	42 069.0	53 759.0	44 692.0	56 211.0	0.071
-20	25 264.2	36 223.2	26 966.9	37 753.8	0.072
-10	20 807.8	29 474.9	21 655.8	30 681.6	0.075
0	15 072.2	23 246.6	16 319.6	24 163.9	0.087

表2 其他材料力学参数

材料类型	模量/MPa	泊松比
水稳碎石	18 000	0.25
水稳砂砾	17 000	0.25
天然砂砾	150	0.25
路基	65	0.40

根据断裂力学理论, I型张开型裂缝的应力强度因子 K_I 和 II型剪切型裂缝的应力强度因子 K_{II} 可反映裂缝某点处的应力场强度大小,当裂缝尖端应力强度因子 K 达到材料断裂韧性 K_{Ic} 时,裂缝继续延长开裂^[13]。根据重冰冻区低温气候条件,利用低温弯曲试验测算 AC-13、AC-13+BF、AC-20 和 AC-20+BF 共4种沥青混合料的断裂韧性 K_{Ic} 见表3。

表3 沥青混合料断裂韧性 K_{Ic}

温度/°C	不同沥青混合料的断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})			
	AC-13	AC-13+BF	AC-20	AC-20+BF
-10	1.785	2.065	1.879	2.198
-20	1.983	2.212	2.177	2.436
-30	2.282	2.501	2.426	2.659

根据环境条件和路面材料情况,在室内试验基础上,参考相关文献[14],得到沥青混合料在0、-10 °C、-20 °C、-30 °C和-40 °C下的热物性参数,并对水泥稳定级配碎石、水泥稳定级配砂砾、天然砂砾和路基的相关热物性参数进行了测算,其结果分别如表4、5所示。

表4 沥青混合料热物性参数

温度/°C	比热容/[J·(kg·°C) ⁻¹]	导热系数/[W·(m·°C) ⁻¹]	温缩系数/(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)
-40	810	2.30	14.0	2 500
-30	830	2.10	16.0	2 500
-20	850	1.87	18.6	2 500
-10	870	1.20	21.6	2 500
0	920	1.00	25.0	2 500

表5 其他材料热物性参数

材料类型	比热容/[J·(kg·°C) ⁻¹]	导热系数/[W·(m·°C) ⁻¹]	温缩系数/(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)
水稳碎石	810	1.1	10	2 400
水稳砂砾	810	1.1	10	2 400
天然砂砾	900	1.3	5	2 200
路基	860	1.3	100	1 900

1.3 其他参数研究

根据气象调查数据,额尔古纳市冬季平均气温为-19.2 °C,年平均气温为0.1 °C,最低的极端气温为-49.3 °C,年均降水量为350.9 mm,冬季平均风速为2.3 m/s。对比近几年气象数据,选取出现极端气温的一天为代表,将该气温数据作为建模气温参数,其气温变化情况如图4所示。

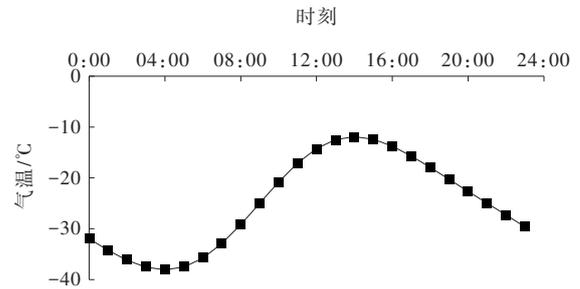


图4 极端低温天气日气温变化图

太阳辐射任意时刻变化过程可采用式(1)所示的分段函数近似表示^[15],对流换热系数 h_c 与风速 v 呈式(2)所示的线性关系^[16],结合当地气象局数据,可得环境参数见表6。

$$q(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 12 - \frac{c}{2} \\ q_0 \cos[m\omega(t-12)], & 12 - \frac{c}{2} \leq t \leq 12 + \frac{c}{2} \\ 0, & 12 + \frac{c}{2} < t \leq 24 \end{cases} \quad (1)$$

$$h_c = 3.7v + 9.4 \quad (2)$$

式中: q_0 为日最大辐射(MJ/m²); $m=12/c$; c 为日照时间(h); ω 为角频率, $\omega=2\pi/24$ rad; t 为任意时刻(h)。

表6 建模的环境参数

日太阳辐射总量/(MJ·m ⁻²)	日最大辐射/(MJ·m ⁻²)	日照时间/h	对流换热系数/[W·(m ² ·°C) ⁻¹]
4.03	0.605	8	17.91

通过交通状况调查和计算可知,拉布大林至哈达图段公路一个车道的15年预测交通量累积当量轴次为2 361.9万次,属于重交通等级,且大货车、大客车和拖挂车等重载车占比13%,超载现象频发,故选取超载的轴载分别为120 kN、140 kN、160 kN和180 kN 4种类型,轴载相关参数如表7所示。

表7 轴载相关参数

轴重/ kN	接地面积 A/cm^2	轮胎压力 p/MPa	荷载圆半径 δ/cm	等效荷载 边长/cm
100	356	0.702	10.65	18.87
120	394	0.757	11.19	19.83
140	435	0.812	11.75	20.82
160	476	0.849	12.27	21.74
180	513	0.876	12.79	22.66

2 计算结果与分析

2.1 低温-荷载耦合作用下新建玄武岩纤维沥青路面抗裂指标分析

在对沥青路面抗裂指标分析前,应先确定路面最容易开裂的点位。理论上分析认为,一天中不同时刻车辆行驶时,路面不同位置的力学指标变化规律应相同。但为了分析的全面性,结合当地大货车占比高的实际交通状况和前期轴载影响分析,选取140 kN的荷载级别,分别对03:00、06:00、11:00和18:00共4个时刻下重载车双轮组作用时,轮载附近沥青层、基层和路基顶面抗裂指标的变化情况进行研究,模拟结果如图5~8所示。

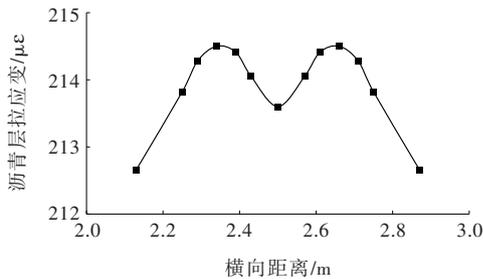


图5 03:00路面沥青层拉应变横向分布

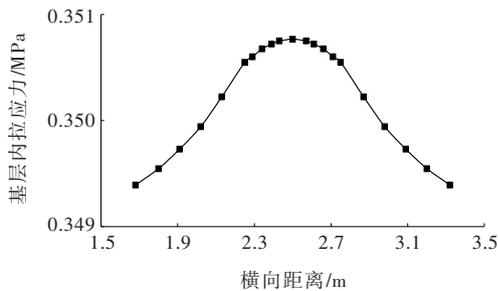


图6 06:00路面基层内拉应力横向分布

由图5~8可知:路面沥青层层底拉应变、基层内拉应力、沥青层剪应力和路基顶面压应变的横向分布均呈对称分布。同时,沥青层层底拉应变最大值

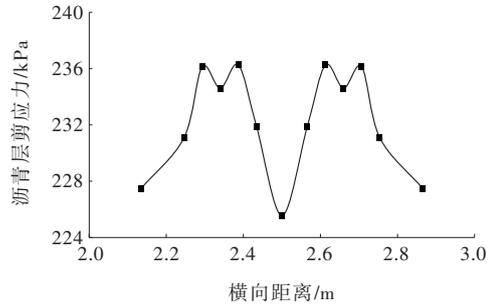


图7 11:00路面沥青层剪应力横向分布

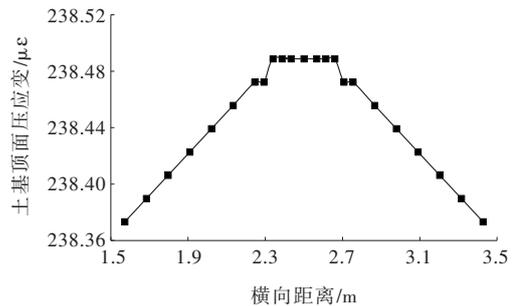


图8 18:00路基顶面压应变横向分布

出现在 x 坐标为2.34 m和2.66 m处,基层内拉应力最大值出现在 x 坐标为2.50 m处,沥青层内剪应力最大值出现在 x 坐标2.387 m和2.613 m处,路基顶面压应变最大值出现在横向距离2.50 m处。故取 x 坐标分别为2.34 m、2.387 m和2.50 m处的位置,对应计算沥青层层底拉应变值、剪应力值、基层内拉应力值24 h的变化规律,由于温度和荷载对路基顶面压应力影响随时间变化较小,仅计算其在 x 坐标为2.50 m处的最大值,结果分别如图9~12所示。

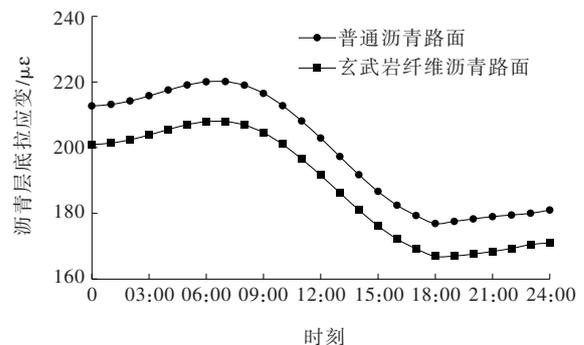


图9 路面沥青层拉应变24 h变化规律

由图9~12可知:在低温-荷载耦合作用下,玄武岩纤维沥青路面沥青层层底拉应变、沥青层剪应力和基层底拉应力均低于普通沥青路面相应指标。同时,在低温-荷载耦合作用下,玄武岩纤维沥青路面24 h内沥青层层底最大应变、沥青层最大剪应力和基

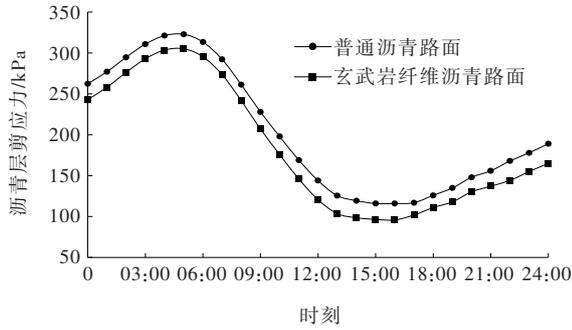


图10 路面沥青层剪应力24 h变化规律

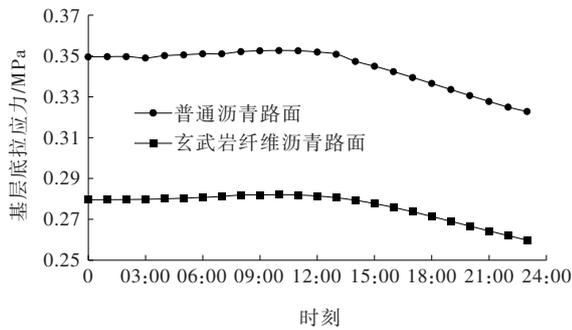


图11 路面基层底拉应力24 h变化规律

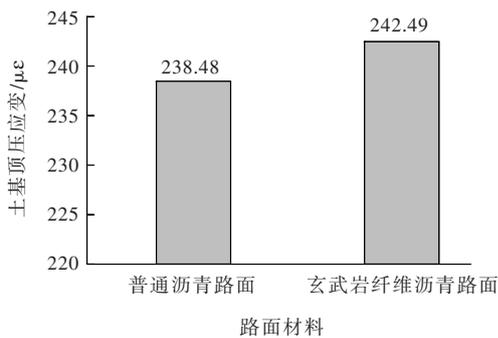


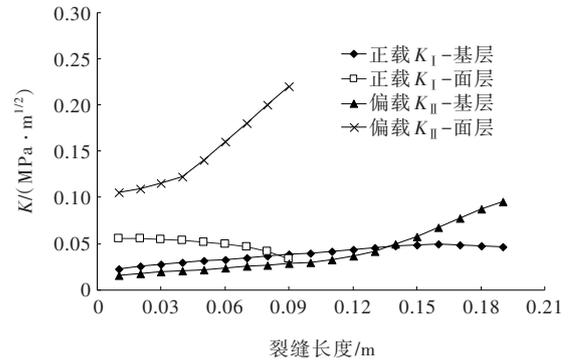
图12 土基顶面压应变24 h最大值

层底最大拉应力比普通沥青路面分别减少了12.12 $\mu\epsilon$ 、17.77 kPa、0.07 MPa,降低比例分别为5.5%、5.5%和20%。在低温-荷载耦合作用下,玄武岩纤维沥青路面比普通沥青路面土基顶面压应变值大4 $\mu\epsilon$,增加比例为1.68%。因此,低温-荷载耦合作用下,新建玄武岩纤维沥青路面的抗裂性能优于普通沥青路面。

2.2 荷载位置对含裂缝玄武岩纤维沥青路面应力强度因子的影响

在低温-荷载的疲劳作用下,当疲劳应力达到路面材料的断裂韧度 K_{Ic} 时,路面会发生开裂,但开裂后裂缝尖端的应力强度因子 K 因路面材料、裂缝长度、荷载位置和轴重不同而不同。在车辆荷载作用

时,含裂缝路面的最不利荷载位置主要有正载和偏载两种。当路面受正载作用时,裂缝尖端应力强度因子表现为张开型 K_I ;当路面受偏载作用时, K_{II} 剪切型远大于 K_I 。因此,正载作用下,仅考虑 K_I 的变化规律,而偏载作用时,仅考虑 K_{II} 的发展规律,玄武岩纤维沥青路面中正载 K_I 和偏载 K_{II} 随裂缝扩展的变化如图13所示。

图13 裂缝在基层、面层扩展应力强度因子 K 变化图

由图13可知:①裂缝在基层扩展初期及中期,正载作用下的 K_I 值均大于偏载作用的 K_{II} ,在裂缝长度达到0.14 m后, K_{II} 大于 K_I 并呈线性增长。说明在半刚性基层裂缝扩展初期和中期阶段, K_I 对裂缝扩展起主导作用,而在扩展后期阶段, K_{II} 起主导作用;②裂缝在面层中扩展时, K_{II} 始终大于 K_I ,且裂缝进入上面层时, K_{II} 呈线性增长,故裂缝在面层中扩展时,剪切型应力强度因子 K_{II} 起主导作用。

2.3 低温-重载耦合作用下含裂缝玄武岩纤维沥青路面抗裂指标分析

在低温-荷载耦合作用下,不同面层材料可能会对基层中裂缝的向上扩展有所影响。由前述分析可知:基层中裂缝扩展是正载 K_I 和偏载 K_{II} 分阶段主导的结果。同时,温度作用会使基层产生 K_I 型裂缝,故低温-正载耦合时,基层开裂仅考虑 K_I 的影响,而低温-偏载耦合时,应分别考虑 K_I 和 K_{II} 作用。为分析不同温度下的玄武岩纤维沥青面层对含裂缝路面基层裂缝扩展的抑制作用,选取0、-10 $^{\circ}\text{C}$ 、-20 $^{\circ}\text{C}$ 、-30 $^{\circ}\text{C}$ 和-40 $^{\circ}\text{C}$ 共5种温度条件和代表性重载轴重140 kN的荷载条件,分别对AC+BF面层和AC面层下含裂缝水泥稳定级配碎石基层中正载 K_I 、偏载 K_I 和偏载 K_{II} 裂缝扩展进行数值模拟研究,其结果如图14~19所示。

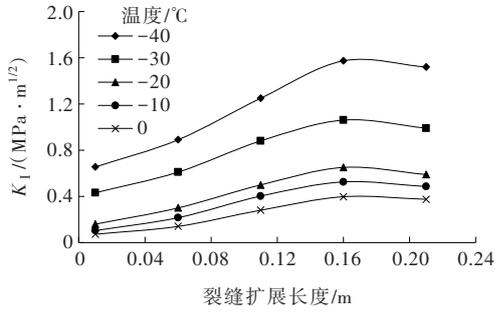


图14 AC+BF路面正载 K_I 的变化规律

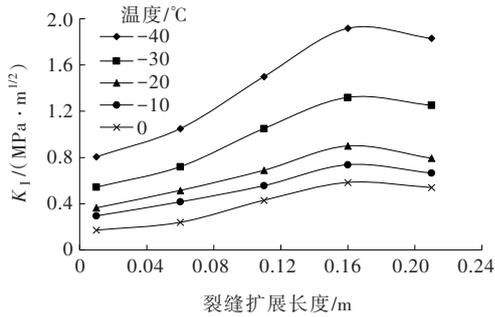


图15 AC路面正载 K_I 的变化规律

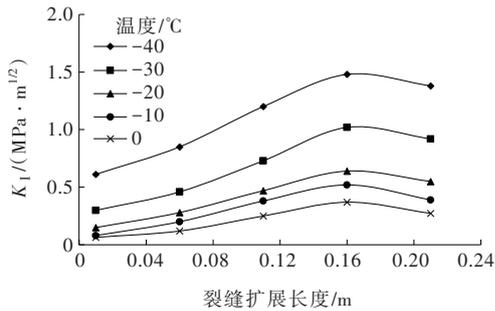


图16 AC+BF路面偏载 K_I 的变化规律

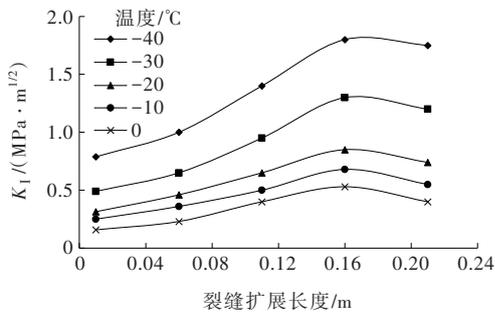


图17 AC路面偏载 K_I 的变化规律

由图14~19可知:①玄武岩纤维沥青路面与普通沥青路面在不同温度-正载的作用下 K_I 值随裂缝的扩展均先增大后减小,在裂缝长度达到0.16 m时, K_I 值达到最大;0~-20 °C时, K_I 的增幅较小,-20~-40 °C时, K_I 增幅较大;②玄武岩纤维沥青

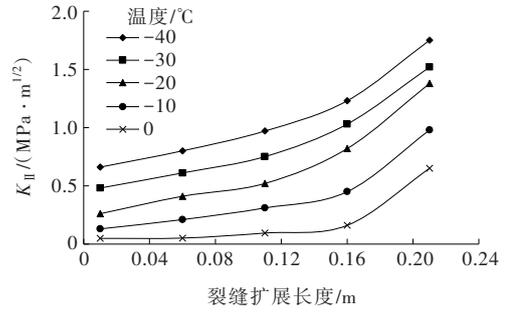


图18 AC+BF路面偏载 K_{II} 的变化规律

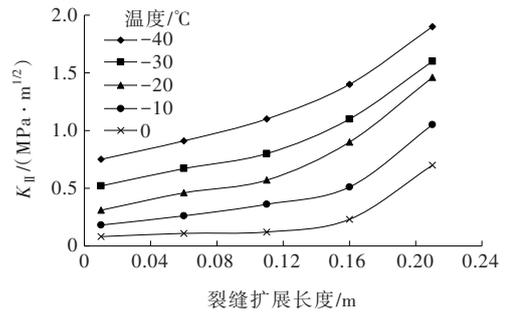


图19 AC路面偏载 K_{II} 的变化规律

路面与普通沥青路面在不同温度-偏载作用下的 K_I 值随裂缝扩展的变化规律与不同温度-正载作用下 K_I 值的变化规律相似;③玄武岩纤维沥青路面和普通沥青路面在不同温度-偏载作用下的 K_{II} 值随裂缝扩展持续增长,从裂缝开始产生至长度达到0.16 m前, K_{II} 值增长缓慢,此后 K_{II} 值迅速增长;④在低温-重载耦合作用下,玄武岩纤维沥青路面的正载 K_I 、偏载 K_I 和偏载 K_{II} 的最大值随裂缝扩展均显著低于普通沥青路面相应值。

为进一步探索含裂缝的玄武岩纤维沥青路面抗裂效果,本文提出易裂系数 K_R ,即应力强度因子计算值 K /断裂韧度值 K_{Ic} , K_R 值越小,说明材料的抗裂性能越好。玄武岩纤维沥青路面在-10 °C、-20 °C和-30 °C时,正载 K_I 、偏载 K_I 和偏载 K_{II} 作用下的 K_R 值分别如图20~22所示。

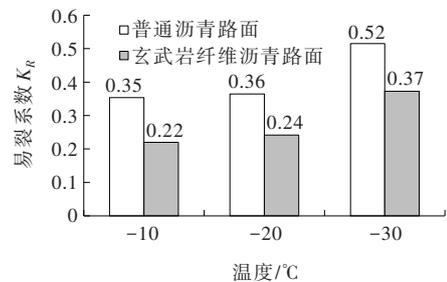
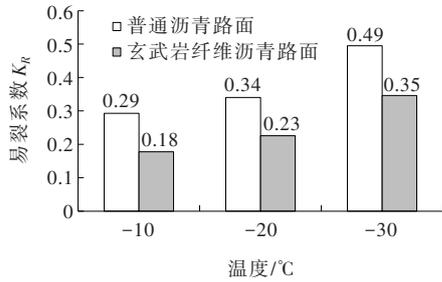
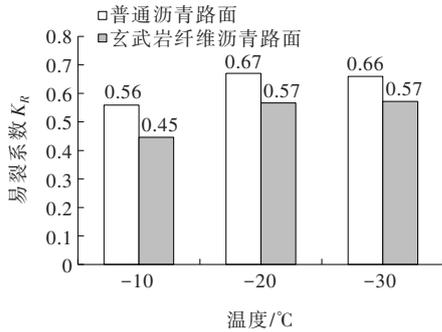


图20 正载 K_I 作用下沥青路面易裂系数 K_R

图 21 偏载 K_I 作用下沥青路面易裂系数 K_R 图 22 偏载 K_{II} 作用下沥青路面易裂系数 K_R

由图 20~22 可知:在温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,玄武岩纤维沥青路面低温-正载 K_I 作用下易裂系数比普通沥青路面分别降低 37.1%、33.3% 和 28.8%;玄武岩纤维沥青路面低温-偏载 K_I 作用下易裂系数比普通沥青路面分别降低 37.9%、32.4%、28.6%;玄武岩纤维沥青路面低温-偏载 K_{II} 作用下易裂系数比普通沥青路面分别降低了 19.6%、14.9%、13.6%。因此,在低温-荷载耦合作用下,含裂缝玄武岩纤维沥青路面比普通沥青路面具有更好的抗裂性能。

3 低温-荷载耦合作用下玄武岩纤维沥青混合料的疲劳寿命

沥青混合料的疲劳性能可在一定程度上反映沥青路面的疲劳性能。为探索对玄武岩纤维沥青路面抗裂性能有限元模拟结果的正确性,制作了 4 组 AC-13 和 AC-13+BF 的旋转压实试件,尺寸为直径 $100\text{ mm}\times$ 高 63.5 mm ,每组 4 个试件。尽管路面厚度在 12.7 cm 以内的疲劳试验通常采用应变加载模式,但鉴于应力控制模式具有试验操作的简便性和技术上的可行性等优点^[17-20],本研究仍采用应力加载模式。在加载前,已通过劈裂强度试验确定了试件间

接拉伸强度。试验过程中,利用 MTS 试验机进行疲劳试验,控制试件在环境箱内的温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,每种温度下测试 2 组试件,且应力比采用 0.5 和 0.7 两种,每种应力比下测试 1 组试件。试验采用的加载频率为道路行车荷载近似频率 10 Hz ,加载波形为半正弦波。4 组试件经过疲劳试验后的疲劳寿命如表 8 所示。

表 8 疲劳寿命计算结果

材料类型	应力水平	沥青混合料疲劳寿命/次	
		$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-30\text{ }^{\circ}\text{C}$
普通沥青混合料	0.5	1.07×10^4	2.42×10^3
	0.7	1.35×10^3	4.29×10^2
玄武岩纤维沥青混合料	0.5	2.09×10^4	4.02×10^3
	0.7	3.47×10^3	7.65×10^2

由表 8 可知:① 随温度的降低和应力水平的增加,普通沥青混合料和玄武岩纤维沥青混合料的疲劳寿命均出现了显著下降,但玄武岩纤维沥青混合料的疲劳寿命始终高于普通沥青混合料,且降低幅度也较普通沥青混合料低;② 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下,0.5 和 0.7 的应力水平条件下,玄武岩纤维沥青混合料疲劳寿命分别约为普通沥青路面的 1.95 倍和 2.57 倍;在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下,0.5 和 0.7 的应力水平条件下,玄武岩纤维沥青混合料疲劳寿命分别约为普通沥青路面的 1.66 倍和 1.78 倍。因此,低温-荷载耦合作用下,玄武岩纤维沥青混合料的疲劳寿命显著高于普通沥青混合料。该结果在一定程度上验证了前述有限元模拟结果的正确性,也说明在重冰冻区低温-荷载耦合作用下,玄武岩纤维沥青路面具有更好的抗裂性能。

4 结论

(1) 低温-荷载耦合作用下,易裂点位处 24 h 内新建玄武岩纤维沥青路面沥青层底最大应变、沥青层最大剪应力和基层底最大拉应力分别比普通沥青路面降低 5.5%、5.5% 和 20%,而土基顶面压应变值仅增加 1.67%。

(2) 低温-荷载耦合作用下,裂缝在基层中扩展的初期及中期,正载下的张开型应力强度因子 K_I 占

主导作用,在裂缝长度达 0.14 m 后,偏载下的剪切型应力强度因子 K_{II} 大于 K_I 并呈线性增长,而在面层中扩展时, K_{II} 始终起主导作用。

(3) 低温-荷载耦合作用下,玄武岩纤维沥青路面低温-正载 K_I 、低温-偏载 K_I 和低温-偏载 K_{II} 作用下的易裂系数均显著低于普通沥青路面相应值,即含裂缝玄武岩纤维沥青路面具有更好的抗裂性能。

(4) 低温-荷载耦合作用下,随温度的降低和应力水平的提高,普通沥青混合料和玄武岩纤维沥青混合料的疲劳寿命均显著下降,但玄武岩纤维沥青混合料疲劳寿命始终显著高于普通沥青混合料,且降低幅度也较普通沥青混合料低。

参考文献:

- [1] 温宇宁.寒冷地区重载交通沥青路面纵向裂缝处置技术研究[J].北方交通,2022(11):62-66.
- [2] 谢玉田.季冻区沥青路面裂缝的影响因素分析和处置方法[C]//中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集,2021.
- [3] 林博煌,石立万,王悦婵,等.沥青路面裂缝的数字图像测量与细观结构特征研究[J].公路,2022,67(7):33-40.
- [4] 刘彦光.玄武岩纤维的特性及在沥青路面中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2010,6(12):213-215.
- [5] 李建.短切玄武岩纤维对矿渣粉煤灰混凝土力学性能和微观结构的影响[J].硅酸盐通报,2017,36(2):727-732,737.
- [6] 穆岩,张寒梅,杨田田.玄武岩纤维在京承高速路面维修工程中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(12):91-95.
- [7] QIN X, SHEN A Q, GUO Y C, et al. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 508-516.
- [8] 覃潇,申爱琴,郭寅川.基于关联性的玄武岩纤维沥青胶浆及其混合料性能研究[J].材料导报,2016,30(12):124-128,152.
- [9] 张艳娟,翟晓静,马彦芹.玄武岩纤维沥青混合料掺量优化设计与性能评价[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(3):25-26,87.
- [10] 李海光,孙文智,邱庆莉,等.玄武岩混合纤维混凝土弯曲韧性特征研究[J].公路交通科技,2016,33(9):78-83.
- [11] 赵玉肖.玄武岩纤维增强沥青混凝土抗裂性能试验研究[J].公路工程,2014,39(4):48-51.
- [12] YAN J C, ZHOU H, SHEN L. Study on fatigue self-healing properties of basalt fiber asphalt mixture[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1168(2): 022048.
- [13] 范天佑.断裂理论基础[M].北京:科学出版社,2003.
- [14] 邹玲.沥青混合料热物性参数研究[D].西安:长安大学,2011.
- [15] 严作人.层状路面体系的温度场分析[J].同济大学学报,1984,12(3):76-85.
- [16] 申爱琴,王礼根,万晨光,等.耦合场下吐鲁番半刚性沥青路面三维有限元分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1):40-45.
- [17] 谢军,郭忠印.沥青混合料疲劳响应模型试验研究[J].公路交通科技,2007,24(5):21-25.
- [18] 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.
- [19] 汪彪,侯强,詹斌,等.湿度对沥青混合料疲劳性能的影响[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(1):141-145.
- [20] 吕松涛,刘超超,屈芳婷,等.沥青混合料疲劳性能试验与表征方法综述[J].中国公路学报,2020,33(10):67-75.