

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.034



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 铺装层温度效应影响下钢桥面板焊接细节的疲劳性能

王达<sup>1,2</sup>, 邵育新<sup>1</sup>, 谭本坤<sup>3</sup>, 王鸿浩<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 长沙 410004;  
3. 湖南文理学院 土木建筑工程学院, 湖南 常德 415000)

**摘要:**为研究沥青铺装层温度效应对正交异性钢桥面板焊接细节疲劳性能的作用机制,基于线弹性断裂力学理论,系统分析铺装层温度效应对焊接细节应力及顶板焊趾处疲劳裂纹尖端应力强度因子的影响规律,并基于XGBoost算法构建裂纹修正系数预测模型。结果表明:沥青铺装层厚度及其温度效应对钢桥面板焊接细节疲劳性能的影响不可忽略;高温情况下,顶板焊趾处的疲劳裂纹扩展速率较快,裂纹形态比对有效应力强度因子的影响更为显著,仅通过应力指标评估铺装层温度效应对钢桥面板焊接细节疲劳性能的影响存在安全隐患;顶板焊趾处的应力及裂纹尖端的有效应力强度因子与铺装层温度效应呈非线性相关;结合建立的裂纹修正系数预测模型,能有效预测疲劳裂纹尖端的有效应力强度因子,便于工程中快速评估温度影响下焊接细节的疲劳性能。

**关键词:**钢桥面板;铺装层温度效应;疲劳裂纹;应力强度因子;XGBoost算法

**中图分类号:**U448.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)02-0199-13

## Fatigue properties of welded details of steel bridge deck under temperature variation of pavement layer

WANG Da<sup>1,2</sup>, SHAO Yuxin<sup>1</sup>, TAN Benkun<sup>3</sup>, WANG Honghao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, P. R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the influence of asphalt pavement temperature on the fatigue properties of welded details of an orthotropic steel bridge deck based on linear elastic fracture mechanics, this paper studies the influence of asphalt pavement temperature on the stress of welded details and the stress intensity factor of a fatigue crack tip at the weld toe of the roof. A crack correction coefficient prediction model is established based

**收稿日期:**2024-01-17

**基金项目:**国家自然科学基金(52278235);湖南交通科技项目(202309);长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升项目(CLSJXC22048)

**作者简介:**王达(1980-),男,博士,教授,主要从事钢-混组合结构研究,E-mail:yxwang2006@yeah.net。

谭本坤(通信作者),男,博士,E-mail:tanbenkun@yeah.net。

**Received:** 2024-01-17

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52278235); Hunan Transportation Technology Project (No. 202309); Changsha University of Science and Technology Graduate Practical Innovation and Entrepreneurial Ability Improvement Project (No. CLSJXC22048)

**Author brief:** WANG Da (1980-), PhD, professor, main research interest: steel-concrete composite structure, E-mail: yxwang2006@yeah.net.

TAN Benkun (corresponding author), PhD, E-mail: tanbenkun@yeah.net.

on the XGBoost algorithm. The results show that the influence of asphalt pavement thickness and temperature effect on the fatigue properties of welded details of steel bridge decks cannot be ignored. Under high temperature conditions, the fatigue crack propagation rate at the weld toe of the roof is faster, and the crack shape ratio has a greater influence on the effective stress intensity factor. Therefore, it is unsafe to evaluate the effect of pavement temperature on the fatigue performance of welded details of steel bridge decks only by stress. The stress at the weld toe of the roof and the effective stress intensity factor at the crack tip are nonlinearly related to the temperature effect of the pavement layer. Combined with the prediction model of the crack correction coefficient established in this paper, the effective stress intensity factor of the fatigue crack tip can be effectively predicted, which is convenient for the rapid evaluation of the fatigue properties of welded details under the influence of temperature in engineering.

**Keywords:** steel bridge deck; temperature effect of pavement; fatigue cracks; stress intensity factors; XGBoost algorithm

凭借重量轻、适用性强、施工便捷等优点,正交异性钢桥面板已成为各类钢结构桥梁桥面板的首选结构<sup>[1-2]</sup>。但该结构亦存在构造形式复杂、连接焊缝较多且焊接缺陷难以有效控制和检测的不足,在重载车辆的长期作用下,顶板与纵肋焊接构造细节易萌生疲劳裂纹并迅速扩展,对桥梁的安全性和耐久性产生较大影响<sup>[3-6]</sup>。在桥梁运营过程中,除车辆荷载外,温度作用同样是结构承受的最具代表性的疲劳荷载形式之一<sup>[7]</sup>。已有研究<sup>[8]</sup>表明,夏季高温天气下钢桥面板的温度可达50~60℃,桥面铺装的温度更高达60~70℃;该温度虽不足以改变钢材性能,但会造成沥青铺装层性能大幅衰减,严重削弱其扩散荷载能力和组合刚度效应<sup>[9-11]</sup>,进而加快焊接细节疲劳裂纹的萌生和扩展,降低其抗疲劳性能,最终导致钢桥面板使用寿命急剧缩短。

目前,针对铺装层温度效应对钢桥面板焊接细节疲劳性能的影响,学者们已通过多种研究取得一定进展。吴冲等<sup>[8]</sup>对足尺模型进行疲劳试验后发现,在相同荷载条件下,带桥面铺装的正交异性钢桥面板高温下的疲劳损伤度是常温下的21倍。Guo等<sup>[12]</sup>发现,铺装层的刚度会随温度变化而改变,进而引起焊接细节的应力变化。基于实测数据,王高新等<sup>[13]</sup>研究了铺装层温度变化对钢桥面板顶板-纵肋及纵肋对接处焊接细节疲劳效应的影响。王石磊等<sup>[14]</sup>对某悬索桥开展长期现场试验发现,带铺装层钢桥面板疲劳敏感部位的应力与温度存在线性关系。基于温度实测数据,Liu等<sup>[15]</sup>利用有限元法分析了车辆荷载和温度荷载作用下焊接细节的疲劳应力,发现铺装层温度较高时焊接细节应力是温度较低时的数倍。既有研究表明,在钢桥面板疲劳分析中,铺装层温度效应不可忽略。但现有研究多关注钢桥面板焊接细节的受力状态,尚未考虑铺装层温度效应对焊接细节疲劳裂纹的影响。

断裂力学法作为钢桥面板焊接细节常用的疲

劳性能评估方法之一,可通过裂纹尺寸及裂纹扩展速率预测结构的疲劳寿命。近年来,学者们将断裂力学法与有限元法相结合,实现了宏观疲劳裂纹扩展过程的数值模拟,并成功应用于正交异性钢桥面板中。基于线弹性断裂力学理论,刘益铭等<sup>[16]</sup>建立了正交异性钢桥面板三维疲劳裂纹的数值模拟方法。基于断裂力学理论,张亚海等<sup>[17]</sup>研究了顶板-纵肋焊缝疲劳裂纹的应力强度因子,揭示了不同初始参数对双面焊缝疲劳裂纹应力强度因子的影响规律。通过断裂力学理论,鲁乃唯等<sup>[18]</sup>建立了钢桥面板顶板-U肋焊缝处的共线双裂纹有限元模型,并分析了单裂纹和双裂纹的扩展特性。Liu等<sup>[19]</sup>联合Abaqus和Franc 3D,对正交异性钢桥面板焊接细节处疲劳裂纹的应力强度因子进行精确计算,验证了该技术的适用性和可靠性。

基于断裂力学理论与有限元法,在验证正交异性钢桥面板裸板有限元模型有效性的基础上,分析不同铺装层温度效应对钢桥面板两处焊接细节应力状态的影响;采用Abaqus-Franc 3D交互技术建立钢桥面板断裂力学有限元模型,以影响裂纹扩展速率的应力强度因子作为焊接细节疲劳性能的评价指标,研究不同铺装层温度效应下钢桥面板顶板焊趾疲劳性能的变化规律,并对比分析不同初始裂纹参数及铺装层厚度下铺装层温度效应对钢桥面板顶板焊趾疲劳性能的影响;基于集成学习算法建立并验证考虑铺装层温度效应的裂纹修正系数预测模型。

## 1 应力强度因子的计算方法

### 1.1 应力强度因子理论

在断裂力学中,根据裂纹的受力状态,将其开裂模式划分为3种,即张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。为反映裂纹尖端复杂的应力位

移场,Rice<sup>[20]</sup>提出了  $J$  积分,表达式为

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) ds \quad (1)$$

式中: $\Gamma$ 为靠近裂纹尖端的任意积分路径; $W$ 为应变能密度, $W = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij}$ ,其中  $\sigma_{ij}$  为应力分量, $\epsilon_{ij}$  为应变分量; $x, y$  分别为直角坐标系的量; $T_i$  为  $\Gamma$  边界上的应力分量, $T_i = \sigma_{ij} n_j$ ,其中  $n_j$  为  $\Gamma$  的外法线单位分量; $u_i$  为位移矢量的分量; $ds$  为沿方向  $\Gamma$  的微分弧长。

由式(1)可以看出, $J$  积分与围绕裂纹尖端的积分路径无关,因此可利用裂纹尖端附近的应力位移场描述裂纹尖端的力学特性,避开复杂的裂纹尖端应力和位移计算。在  $J$  积分的基础上,Yau 等<sup>[21]</sup>提出了相互作用积分( $M$ 积分),用于计算 3 种开裂模式的应力强度因子,其表达式为

$$M^{(1,2)} = \int_{\Gamma} \left( W^{(1,2)} dy - \left[ T_i^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x} + T_i^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x} \right] \right) ds \quad (2)$$

式中: $W^{(1,2)}$ 为相互作用应变能密度, $W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \epsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \epsilon_{ij}^{(1)}$ ,上标 1、2 分别为实际场和辅助场。

其中, $M$  积分与材料的弹性模量、泊松比以及应力强度因子的关系表达式为

$$M^{(1,2)} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} (K_I^{(1)} K_I^{(2)} + K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)}) + \frac{2(1+\nu)}{E} K_{III}^{(1)} K_{III}^{(2)} \quad (3)$$

式中: $K_I, K_{II}, K_{III}$  分别为 3 种开裂模式的应力强度因子; $E, \nu$  分别为材料的弹性模量和泊松比。

联立式(2)、式(3)即可对不同类型的应力强度因子进行计算。此外,正交异性钢桥面板焊缝处的疲劳裂纹主要为复合型开裂,在判断其是否开裂时需考虑 3 种开裂模式的综合作用。采用文献[22]推荐的公式计算复合型裂纹的应力强度因子,计算公式为

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{K_{III}^2}{1-\nu}} \quad (4)$$

式中: $K_{\text{eff}}$ 为有效应力强度因子,MPa·mm<sup>1/2</sup>; $\nu$ 为材料的泊松比,取 0.3。

### 1.2 Abaqus-Franc 3D 交互技术

采用 Abaqus-Franc 3D 交互技术<sup>[19]</sup>开展带铺装层正交异性钢桥面板焊接细节的应力强度因子计算。其中,作为建模和应力位移分析的平台,Abaqus 主要完成两大核心工作:一是建立全三维无裂纹有限元模型,二是对带裂纹的全三维有限元模型进行应力、位移等力学特性计算分析;Franc 3D 则主要向模型引入裂纹、划分网格,并完成裂纹尖

端应力强度因子的计算。具体工作流程如图 1 所示。

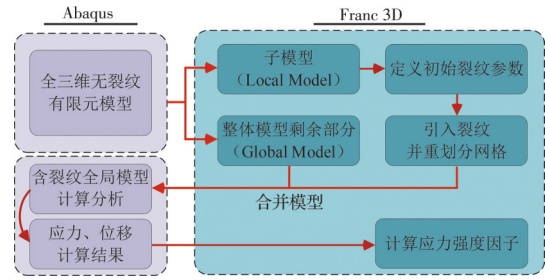


图 1 Abaqus-Franc 3D 工作流程图

Fig. 1 Abaqus-Franc 3D working flow chart

## 2 有限元模型

### 2.1 模型的建立与验证

以文献[23]的试验为参考,采用 Abaqus 建立正交异性钢桥面板精细化模型。模型中试件尺寸、边界条件与荷载工况完全按照试验设计建立,如图 2 所示。其中,顶板与 U 型肋采用熔透率为 80% 的连续角焊缝连接,焊角高度为 8 mm,焊接方式为 CO<sub>2</sub> 保护焊<sup>[24]</sup>。为避免加载器与钢桥面板间产生刚性接触,在两者间放置 50 mm 厚的橡胶垫块。试件材料均为 Q345qD 钢材,建立有限元模型时,采用双折线模型对该钢材的应力-应变关系进行模拟,如图 3 所示。弹性模量取  $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比取 0.3,屈服应力和屈服应变分别为 353 MPa 和 0.001 7。模型在钢桥面板横向两端 50 mm 处设置简支边界,其

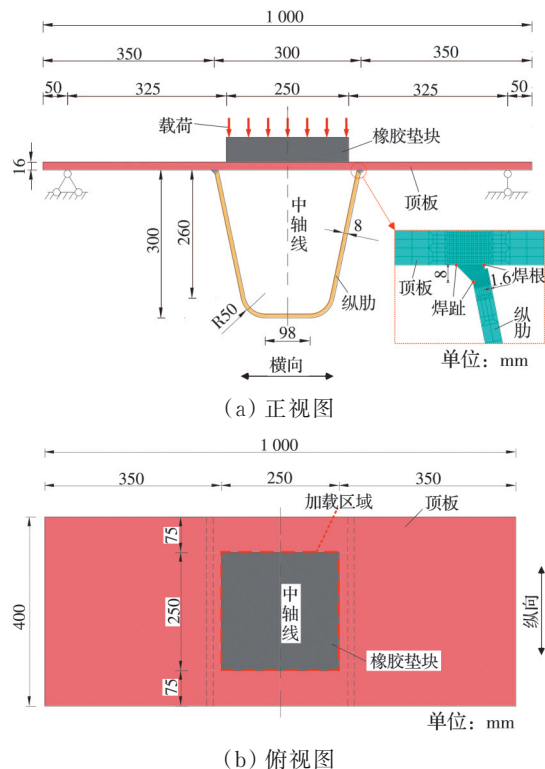


图 2 正交异性钢桥面板试件模型

Fig. 2 Orthotropic steel bridge deck specimen model

中一端限制横向、纵向和高度方向的位移,另一端仅限制高度方向的位移。正交异性钢桥面板有限元模型采用 C3D8R 实体单元进行模拟,并精细划分焊缝处的网格,单元尺寸控制在 1 mm 左右;其余非关注区域通过过渡网格将单元尺寸增大至 8 mm 左右,模型单元总数为 276 966 个。

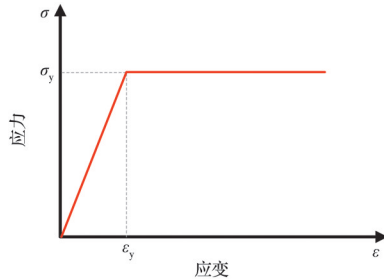


图 3 正交异性钢桥面板的本构模型

Fig. 3 Constitutive model of orthotropic steel bridge deck

为验证正交异性钢桥面板有限元模型的有效性,选择焊缝处 4 个测点,将 1 kN 静载试验中各测点热点应力的试验结果与计算结果进行对比。其中,测点 M1、S1 位于顶板-纵肋焊趾处,测点 M2、S2 位于纵肋-顶板焊趾处;测点 M1、M2 位于钢桥面板纵向端点 200 mm 处,测点 S1、S2 位于钢桥面板纵向端点 100 mm 处。

各测点热点应力的试验结果与计算结果如图 4 所示。由图 4 可知,有限元计算结果普遍略小于试验结果,可能是由于有限元模型的边界条件与实际工况存在不可避免的差异,但两者相对误差较小,最大误差仅 3.4%。表明建立的正交异性钢桥面板裸板模型有效,可用于后续考虑铺装层温度效应下钢桥面板焊接细节的疲劳性能分析。

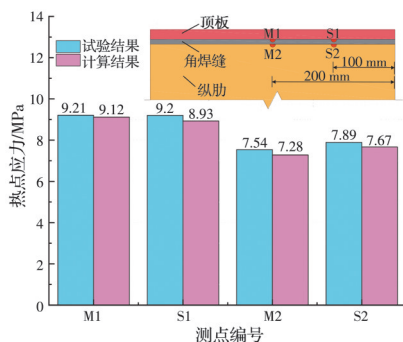


图 4 钢桥面板焊接细节测点应力的试验值与计算值

Fig. 4 Test and calculated values of stress at measuring points of steel bridge deck welding details

## 2.2 参数取值

以建立的正交异性钢桥面板精细化有限元模型为基础,在钢桥面板顶板上增设沥青铺装层,铺装层与钢桥面板间采用界面耦合约束,不考虑材料非线性及界面滑移的影响<sup>[14]</sup>。沥青铺装层尺寸与顶

板一致,均为 400 mm×1 000 mm,厚度为 50 mm,泊松比为 0.25。正交异性钢桥面板裸板模型的单元尺寸、类型及边界条件保持不变;铺装层同样选用 C3D8R 实体单元,单元尺寸设置为 8 mm,对应的有限元模型如图 5 所示。为模拟轮载作用,在沥青铺装层顶面中心位置施加 20 kN 荷载,加载区域尺寸与钢桥面板裸板模型相同,均为 250 mm×250 mm。

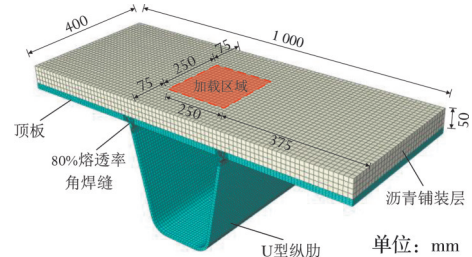


图 5 带铺装层的正交异性钢桥面板有限元模型

Fig. 5 Finite element model of orthotropic steel bridge deck with asphalt pavement

目前,大量针对沥青铺装层的研究表明<sup>[25-26]</sup>:沥青混合料受温度影响时,主要表现为弹性模量降低,进而导致沥青铺装层的强度和刚度下降。因此,对沥青铺装层采用线弹性本构关系。此外,由于所处环境、沥青材料和荷载频率等因素存在差异,沥青铺装层温度与弹性模量的关联规律存在显著差异。如图 6 所示,基于不同温度和荷载频率条件,文献[27]对两种沥青铺装层材料的弹性模量进行了测定。从图 6 可知,在不同荷载频率和沥青材料条件下,温度对沥青铺装层弹性模量的影响差异明显;总体表现为,沥青铺装层的温度越高,其弹性模量越低。

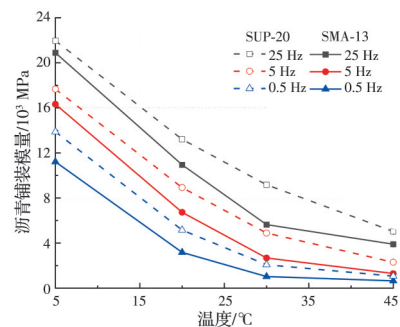


图 6 温度影响下沥青铺装模量变化图<sup>[27]</sup>

Fig. 6 Variation diagram of asphalt pavement modulus under the influence of temperature<sup>[27]</sup>

为体现不同条件下沥青铺装层的温度效应,以弹性模量作为沥青铺装层的温度效应参数,在 500~20 000 MPa 范围内选取 18 组沥青铺装模量作为研究参数。其中,在 500~3 000 MPa 区间取 6 个值,间隔为 500 MPa;在 4 000~10 000 MPa 区间取 7 个值,间隔 1 000 MPa;在 12 000~20 000 MPa 区间

取 5 个值,间隔 2 000 MPa。基于上述参数取值,共建立 18 个考虑不同沥青铺装模量(即铺装层温度效应)的钢桥面板有限元模型。

### 3 焊接细节应力状态分析

#### 3.1 应力分布特征

对焊缝引入疲劳裂纹前,首先对无裂纹模型开展应力分析,以确定铺装层温度效应下焊接细节的疲劳裂纹易萌生位置。分别提取不同沥青铺装模量下钢桥面板顶板焊趾处和 U 肋焊趾处各节点的最大主应力,并将提取路径上的应力分布绘制成图,如图 7 所示。铺装层弹性模量取 0 时,对应无铺装层钢桥面板裸板模型的计算结果。

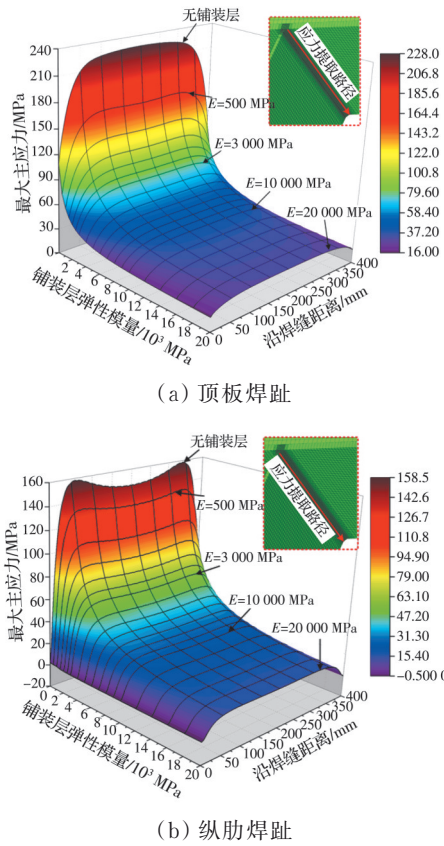


图 7 焊接细节最大主应力分布  
Fig. 7 Maximum principal stress distribution of welding details

由图 7 的应力分布可知,不同沥青铺装模量下,顶板焊趾处和 U 肋焊趾处均呈现出边缘应力小、变化幅度大,中间应力大、变化幅度小的分布特征;两处焊趾应力分别在距离边缘 100、50 mm 范围内迅速增长至较大值并趋于稳定,这反映出钢桥面板焊缝的边缘效应受铺装层温度效应的影响较小。此外,除 U 肋焊趾靠近边缘的区域外,顶板焊趾处及 U 肋焊趾中间区域各点的应力均与沥青铺装模量呈指数正相关。

#### 3.2 应力最大值及对应位置

铺装层温度变化直接影响其刚度,导致相同荷载在铺装层中的扩散角度改变,进而造成焊接细节应力最大值的位置发生变化。为进一步探究钢桥面板焊接细节的应力状态变化规律,对不同铺装层温度效应下的主应力最大值及对应位置进行分析,结果如图 8 所示。

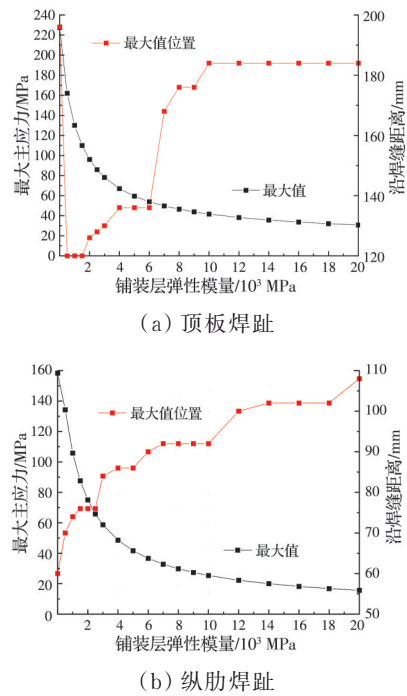


图 8 沥青铺装层温度变化下焊接细节的应力最大值及位置  
Fig. 8 Maximum stress value and its position of welding details under temperature variation of asphalt pavement layer

由图 8 可知,沥青铺装模量越大,应力最大值出现的位置越靠近沿焊缝距离的中心(200 mm)。这可能是由于铺装层作为传力层,其刚度变化会改变荷载在内部的传力路径。考虑铺装层时,钢桥面板顶板焊趾处的疲劳裂纹易萌生区域为距离边缘两端 120~184 mm 范围;其中,沥青铺装模量为 1 500、3 000、6 000 MPa 时,应力最大值的位置变化较为显著;当模量大于 10 000 MPa 时,应力最大值的位置不再发生改变。U 肋焊趾处的疲劳裂纹易萌生区域在 60~108 mm 范围内。从应力数值上看,各焊接细节的应力变化趋势几乎相同,但不同沥青铺装层模量下,顶板焊趾处的应力显著大于 U 肋焊趾处。

由图 7、图 8 可知,不考虑铺装层时,因忽略了铺装层与钢桥面板间的复合作用,应力计算结果偏大,且应力最大值位置变化较显著;尤其在顶板焊趾处,无铺装层与考虑铺装层的应力最大值位置最

大相差 76 mm。因此,在研究正交异性钢桥面板焊接细节疲劳性时,不可忽略铺装层温度效应的影响。

综上,铺装层温度效应对钢桥面板焊接细节的应力状态具有较大影响;当沥青铺装模量大于 10 000 MPa 时,其模量变化对顶板焊趾处应力状态的影响相对较小,且顶板焊趾处出现疲劳裂纹的概率较大。

## 4 疲劳裂纹应力强度因子分析

### 4.1 初始裂纹的引入与网格划分

正交异性钢桥面板的焊缝在焊接过程中无法避免产生空洞、裂纹等初始缺陷,这会导致钢桥面板在使用过程中过早开裂,进而形成疲劳裂纹。文

献[23]的疲劳试验表明,正交异性钢桥面板裸板的疲劳裂纹最早出现于顶板焊趾表面,且裂纹由此处不断发展,最终导致钢桥面板断裂。裂纹形状采用 IIW<sup>[28]</sup>推荐的半椭圆形裂纹,其深度为  $a_0$ 、半长为  $c_0$ ;裂纹方向和位置根据裸板疲劳试验确定,分别取  $\alpha=90^\circ$  和测点 S1 处(距离焊缝边缘 100 mm),裂纹深度( $a_0$ )及形态比( $a_0/2c_0$ )分别取 0.2 mm 和 0.5<sup>[29]</sup>。利用 Franc 3D 分别对所建立的 18 个无裂纹有限元模型进行切分,在 200 mm 长的子模型中引入裂纹后重新划分网格,最后与整体模型的剩余部分合并节点,具体建模过程如图 9 所示。裂纹尖端内圈采用 C3D15 楔形体单元,外圈采用 C3D20 六面体单元,远离裂纹尖端的区域采用 C3D10 四面体单元,六面体和四面体单元之间通过金字塔单元进行过渡。

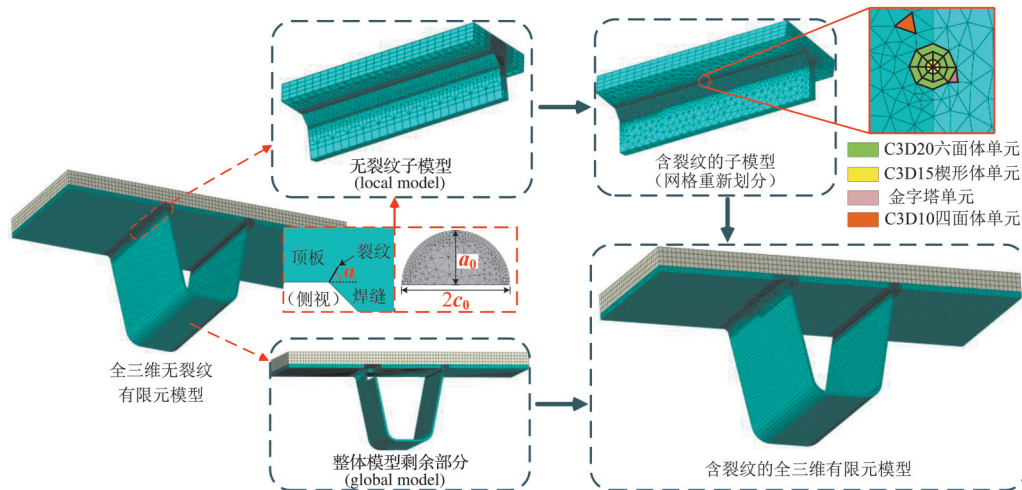


图 9 含裂纹的全三维有限元模型建模过程

Fig. 9 Modeling process of full 3D finite element model with cracks

### 4.2 应力强度因子计算与分析

基于 Abaqus-Franc 3D 交互技术,对考虑铺装层不同温度效应的 18 个带裂纹全三维有限元模型进行计算分析,得到裂纹尖端 3 种断裂类型对应的应力强度因子分布规律。对于考虑铺装层不同温度效应的正交异性钢桥面板,研究发现,其顶板焊趾处疲劳裂纹尖端的 3 种断裂类型对应的应力强度因子分布规律基本一致。因此,选择沥青铺装模量差值最大的两组结果进行分析,如图 10 所示。其中,  $K_{eff}$  为裂纹尖端的有效应力强度因子。

由图 10 可知,裂纹尖端的有效应力强度因子  $K_{eff}$  与 I 型应力强度因子的分布规律几乎一致,且  $K_I$  在  $K_{eff}$  中的占比较大。因此,带铺装层的正交异性钢桥面板顶板焊趾处的疲劳裂纹属于 I 型主导的复合型裂纹。I 型应力强度因子在裂纹尖端端点处取值最大,随后沿裂纹尖端向裂纹最深处不断

减小,在裂纹尖端中点处降至最小值。II、III 型应力强度因子则相对较小。由裂纹尖端应力强度因子的分布规律可知,铺装层温度效应对钢桥面板顶板焊趾处疲劳裂纹的开裂模式无显著影响。

由以上分析可知,在不同沥青铺装模量下,裂纹尖端的  $K_{eff}$  在端点处始终为最大值,在中点处始终为最小值。因此,通过获取裂纹尖端中点和端点的有效应力强度因子,即可基本掌握铺装层温度效应影响下裂纹尖端有效应力强度因子的变化趋势。图 11 为在特定荷载和几何尺寸条件下铺装层温度效应对裂纹尖端中点和端点  $K_{eff}$  的影响规律。其中,  $K_{th}$  为裂纹扩展的门槛值,即当  $K_{eff}$  大于  $K_{th}$  时,可认为裂纹会发生扩展;反之,裂纹则不会扩展。根据 IIW<sup>[28]</sup> 的推荐,  $K_{th}$  取  $63 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ 。

由图 11 可知,以裂纹尖端中点和端点的有效应力强度因子  $K_{eff}$  与裂纹扩展门槛值  $K_{th}$  作为指标评价

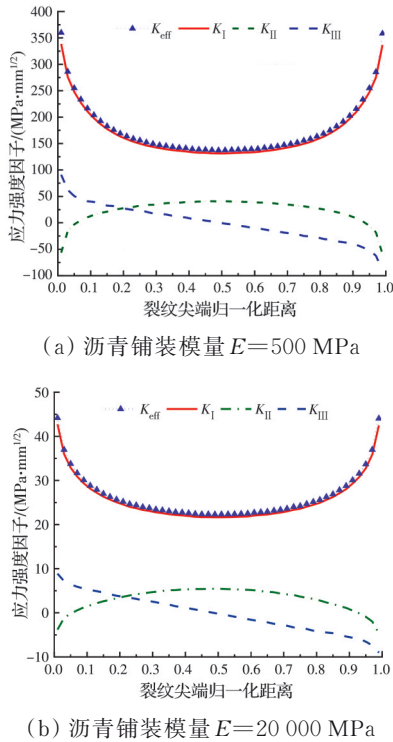


图 10 裂纹尖端应力强度因子分布图

Fig. 10 Distribution diagram of stress intensity factor at crack tip

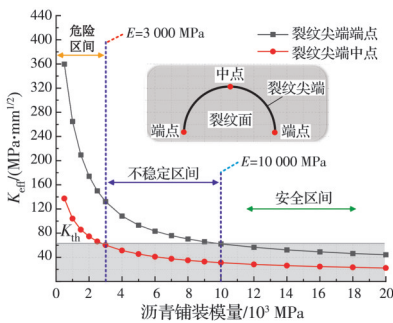


图 11 裂纹尖端中点和端点有效应力强度因子的变化趋势  
Fig. 11 Variation trend of effective stress intensity factor at the middle and end points of the crack tip

疲劳裂纹状态时,沥青铺装模量大致可分为 3 个区间。

在第 1 个区间内,疲劳裂纹处于安全稳定状态,无论沥青铺装层温度即沥青铺装模量如何变化,疲劳裂纹均不会扩展,对焊接细节的疲劳性能影响较小。当沥青铺装模量大于 10 000 MPa 时,裂纹尖端各位置的有效应力强度因子  $K_{eff}$  均小于裂纹门槛值  $K_{th}$ ;且随着沥青铺装模量的增大, $K_{eff}$  呈缓慢降低的线性变化趋势。

第 2 个区间内的疲劳裂纹会随着沥青铺装层温度即沥青铺装模量的改变呈现出 不稳定状态,且靠近裂纹尖端端点区域更易发生扩展行为。当沥青铺装模量小于 10 000 MPa 时,裂纹尖端端点处的有效应力强度因子  $K_{eff}$  率先越过裂纹扩展门槛值  $K_{th}$ 。

此后,随着沥青铺装模量的减小,当模量降低至 3 000 MPa 时,除裂纹尖端中点(即裂纹最深处)区域外,裂纹尖端其余各位置的  $K_{eff}$  均会越过裂纹扩展门槛值  $K_{th}$ 。

在第 3 个区间内,疲劳裂纹处于危险状态,裂纹尖端各位置均具备扩展能力,且各位置点的  $K_{eff}$  与铺装层温度存在指数关系。当沥青铺装模量小于 3 000 MPa 时,裂纹尖端各位置的有效应力强度因子  $K_{eff}$  均会超过裂纹扩展门槛值  $K_{th}$ ;且随着沥青铺装模量的减小, $K_{eff}$  呈指数级增长趋势。当沥青铺装模量为 500 MPa 时,裂纹尖端中点和端点的  $K_{eff}$  分别为 137、360  $MPa \cdot mm^{1/2}$ ,约为裂纹扩展门槛值  $K_{th}$  的 2.2 倍、5.7 倍。因此,当沥青铺装模量小于 3 000 MPa 后,焊接细节的疲劳性能会急剧衰减。

以上分析表明,在沥青铺装模量较低(即铺装层温度较高)时,钢桥面板焊接细节的疲劳性能显著衰减,大幅缩短了结构的使用寿命。

### 4.3 裂纹修正系数

受铺装层温度效应的影响,不同应力条件下的应力强度因子并不相同。因此,引入裂纹修正系数  $F^{[30]}$  表示有效应力强度因子  $K_{eff}$ ,疲劳裂纹尖端中点的影响系数  $F_z$  和端点的影响系数  $F_d$  表达式分别为

$$F_z = \frac{K_z}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} \quad (5)$$

$$F_d = \frac{K_d}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} \quad (6)$$

式中: $K_z$ 、 $K_d$  分别为裂纹尖端中点、端点的有效应力强度因子,  $MPa \cdot mm^{1/2}$ ;  $\sigma_0$  为未开裂截面的最大主应力, MPa;  $a$  为裂纹深度, mm。

图 12 给出了铺装温度效应影响下  $F_z$  与  $F_d$  的变化规律。

由图 12 可知,不同沥青铺装模量下,裂纹修正系数  $F_z$  与  $F_d$  呈非线性变化特征,而非恒定值;且随着沥青铺装模量的降低,裂纹修正系数越来越大。当沥青铺装模量由 20 000 MPa 减小至 500 MPa 时,  $F_z$  从 0.94 增长到 1.07,增大了 14.1%;  $F_d$  从 1.86 增长到 2.8,增大了 51%。这表明铺装层温度效应对裂纹修正系数的影响显著,顶板焊趾处的应力与裂纹尖端应力强度因子并非线性关系。因此,高温条件下,仅从应力角度评估钢桥面板焊接细节的疲劳性能存在较大安全隐患。

在工程实践中,直接计算裂纹尖端应力强度因子的过程较为复杂,而焊接细节的应力则可通过试验、有限元法等手段轻松获得。若已知铺装层温度效应影响下的裂纹修正系数  $F_z$ 、 $F_d$ ,即可求得疲劳裂纹尖端的应力强度因子,进而结合裂纹扩展门槛值

$K_{th}$ 对钢桥面板焊接细节的疲劳性能进行评估。因此,可针对顶板焊趾处疲劳裂纹的应力强度因子进行参数分析,建立裂纹修正系数数据库,并基于集成算法建立考虑铺装层温度效应的裂纹修正系数预测模型。

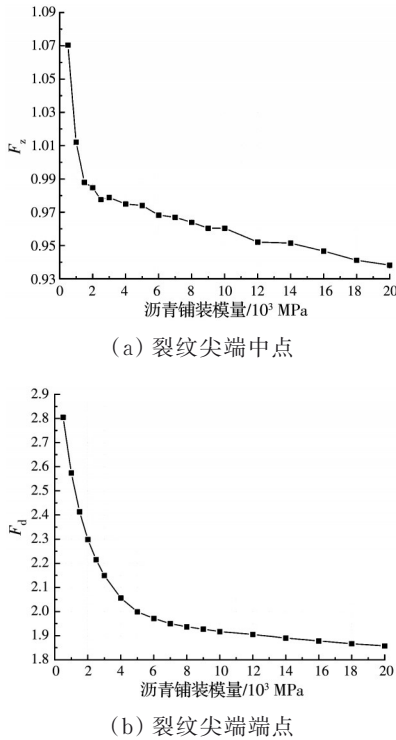


图 12 铺装层温度效应影响下裂纹修正系数  $F$  的变化  
Fig. 12 Variation diagram of crack correction coefficient  $F$  under the influence of pavement temperature effect

### 5 基于铺装层温度效应的疲劳裂纹应力强度因子参数分析

为探究不同初始参数(裂纹尺寸、形态比、深度方向、铺装层厚度)下沥青铺装层温度效应对疲劳裂纹应力强度因子的影响规律,对带铺装层的正交异性钢桥面板进行参数化研究。为简化计算过程,选取模量 500、1 500、3 000、6 000、10 000 MPa 作为沥青铺装层温度效应的基本参数。

#### 5.1 裂纹尺寸

为研究不同裂纹尺寸下铺装层温度效应对疲劳裂纹应力强度因子的影响,在其余参数不变的条件下,分别选取裂纹深度  $a_0$  为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm,对应的裂纹表面长度  $2c_0$  为 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 mm,对顶板焊趾处疲劳裂纹的应力强度因子开展计算分析,以探究裂纹尺寸及沥青铺装模量对该部位应力强度因子的影响规律。裂纹最深处的有效应力强度因子  $K_{eff}$  如图 13 所示。

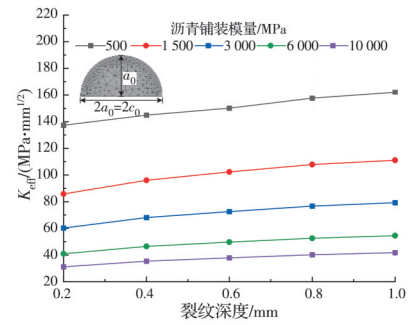


图 13 裂纹尺寸与铺装层温度效应影响下  $K_{eff}$  的变化趋势  
Fig. 13 Variation trend of  $K_{eff}$  under the influence of crack size and pavement temperature

由图 13 可知,随着裂纹尺寸的增大,不同沥青铺装模量下裂纹最深处的  $K_{eff}$  几乎均呈线性增长,且变化趋势基本一致。当裂纹深度从 0.2 mm 增长至 1.0 mm 时,沥青铺装模量为 500 MPa 下的  $K_{eff}$  从 137.3 MPa·mm<sup>1/2</sup> 增长至 162.1 MPa·mm<sup>1/2</sup>,累计增加 24.8 MPa·mm<sup>1/2</sup>,增幅约 18.1%;沥青铺装模量为 10 000 MPa 下的  $K_{eff}$  则从 31.2 MPa·mm<sup>1/2</sup> 增长至 41.8 MPa·mm<sup>1/2</sup>,累计增加 10.6 MPa·mm<sup>1/2</sup>,增幅约 34.1%。综上可知,沥青铺装模量较低(即铺装层温度较高)时,裂纹最深处的  $K_{eff}$  较大;在此条件下,随着裂纹尺寸的增大, $K_{eff}$  虽然增幅较小,但增加较多。

以上分析表明,裂纹尺寸增大和沥青铺装模量减小均会导致钢桥面板焊缝细节的疲劳性能下降。但相比裂纹尺寸带来的影响,铺装层温度效应对钢桥面板焊缝疲劳细节的影响更显著。

#### 5.2 裂纹形态比

在其余参数不变的情况下,分别取裂纹形态比  $a_0/2c_0$  为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 的工况,对顶板焊趾处疲劳裂纹尖端的有效应力强度因子  $K_{eff}$  进行计算,分析裂纹形态比及沥青铺装模量对裂纹最深处  $K_{eff}$  的影响规律,如图 14 所示。

由图 14 可知,裂纹形态比越小、沥青铺装模量

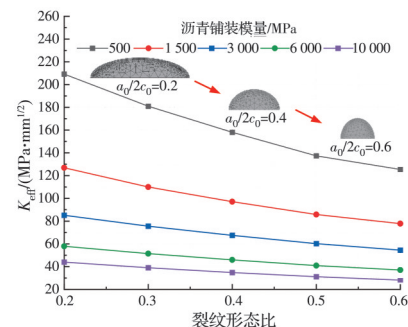


图 14 裂纹形态比与铺装层温度效应影响下  $K_{eff}$  的变化趋势  
Fig. 14 Variation trend of  $K_{eff}$  under the influence of crack shape ratio and pavement layer temperature effect

越低,裂纹最深处的  $K_{eff}$  越大。当沥青铺装模量为 10 000 MPa、裂纹形态比为 0.6 时,  $K_{eff}$  为 28.1  $MPa \cdot mm^{1/2}$ ; 当沥青铺装模量为 3 000 MPa、裂纹形态比为 0.2 时,  $K_{eff}$  达 209.2  $MPa \cdot mm^{1/2}$ , 两种情况下  $K_{eff}$  相差 181.1  $MPa \cdot mm^{1/2}$ 。此外,从  $K_{eff}$  随裂纹形态比的变化趋势可以发现,在不同沥青铺装模量条件下,裂纹形态比对  $K_{eff}$  的影响规律几乎均呈线性变化。 $a_0/2c_0$  每减小 0.1,  $K_{eff}$  就会增加约 10%~15%。但当裂纹形态比从 0.6 减小至 0.2 时,沥青铺装模量为 500 MPa 时的  $K_{eff}$  累计增幅约 66.8%, 而沥青铺装模量为 10 000 MPa 时的  $K_{eff}$  累计增幅约 56.3%, 两种铺装模量下的累计增幅相差近 10%。

以上分析表明,当铺装层温度较高时,疲劳裂纹形态比的减小对钢桥面板焊接细节的疲劳性能影响较大。为防止沥青铺装模量降低导致疲劳裂纹的应力强度因子过大,应该控制钢桥面板焊缝细节处疲劳裂纹的表面长度,进而提高钢桥面板的疲劳寿命。

### 5.3 裂纹深度方向

为研究不同裂纹深度方向下铺装层温度效应对疲劳裂纹应力强度因子的影响,在其余参数不变的情况下,分别取裂纹深度方向  $\alpha$  为 30°、60°、90°、120°,并对顶板焊趾处疲劳裂纹尖端的有效应力强度因子  $K_{eff}$  进行计算。裂纹深度方向与铺装层温度效应对裂纹最深处  $K_{eff}$  的影响如图 15 所示。

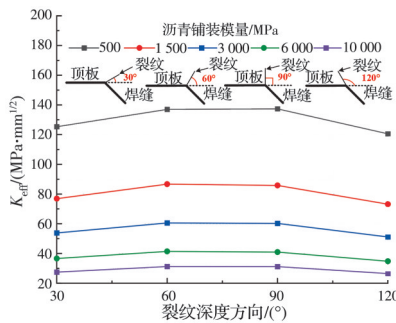


图 15 裂纹深度方向与铺装层温度效应影响下  $K_{eff}$  的变化趋势  
Fig. 15 Variation trend of  $K_{eff}$  under the influence of crack depth direction and pavement layer temperature effect

由图 15 可知,不同沥青铺装模量下,裂纹深度方向的改变对疲劳裂纹最深处的  $K_{eff}$  影响规律基本一致。当裂纹深度方向为 60°和 90°时,不同沥青铺装模量下的  $K_{eff}$  均达到最大值,且几乎相等。因此,带铺装层的钢桥面板焊趾处的疲劳裂纹深度方向最有可能出现在 60°到 90°之间。

由以上分析可知,在铺装层温度效应作用下,钢桥面板焊接细节疲劳裂纹深度方向对裂纹尖端

$K_{eff}$  的变化规律无显著影响;且当疲劳裂纹深度方向介于 60°~90°时,对焊接细节的疲劳性能最为不利。

### 5.4 铺装层厚度

为研究不同铺装层厚度下铺装层温度效应对疲劳裂纹应力强度因子的影响,在其余参数不变的情况下,分别取铺装层厚度  $h$  为 30、50、70、90 mm,并对顶板焊趾处疲劳裂纹尖端的有效应力强度因子  $K_{eff}$  进行计算。铺装层厚度与沥青铺装模量对裂纹最深处  $K_{eff}$  的影响如图 16 所示。

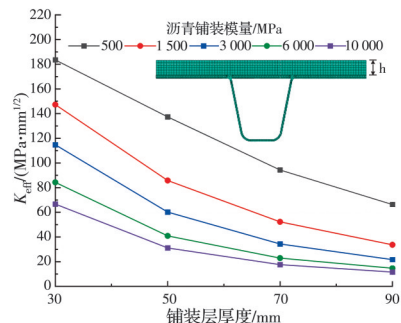


图 16 铺装层厚度与铺装层温度效应影响下  $K_{eff}$  的变化趋势  
Fig. 16 Variation trend of  $K_{eff}$  under the influence of pavement layer thickness and temperature effect

由图 16 可知,沥青铺装层厚度越小,顶板焊趾处疲劳裂纹最深处的  $K_{eff}$  越大。当铺装层厚度为 90 mm、沥青铺装模量为 500 MPa 时,裂纹最深处的  $K_{eff}$  为 66.3  $MPa \cdot mm^{1/2}$ ; 但当铺装层厚度为 30 mm、沥青铺装模量为 10 000 MPa 时,  $K_{eff}$  就已达到 66.7  $MPa \cdot mm^{1/2}$ 。这表明铺装层厚度对钢桥面板焊接细节疲劳性能有显著影响。

此外,随着沥青铺装模量的减小,铺装层厚度越大,  $K_{eff}$  的增长速度越快。当沥青铺装模量由 1 500 MPa 减少至 500 MPa 时,铺装层厚度为 90 mm 时的  $K_{eff}$  从 33.7  $MPa \cdot mm^{1/2}$  增长至 66.3  $MPa \cdot mm^{1/2}$ , 增幅约 97%; 铺装层厚度为 30 mm 下的  $K_{eff}$  从 147.3  $MPa \cdot mm^{1/2}$  增长至 183.5  $MPa \cdot mm^{1/2}$ , 增幅仅为 24.6%。究其原因,当铺装层厚度增加时,其弹性模量的减小会导致自身刚度降幅更大;而当铺装层的刚度减小到一定值时,其刚度的下降会造成钢桥面板焊缝的疲劳性能明显降低。

由以上分析可知,在沥青铺装层温度效应作用下,增大铺装层厚度可显著提高钢桥面板顶板焊趾处的疲劳性能。但在高温条件下,铺装层厚度越大,刚度衰减越快,焊接细节疲劳性能的下降速度也更快。因此,在进行桥面铺装设计时,应充分考虑铺装层的温度和厚度对钢桥面板疲劳细节的影响,进而选取合适的铺装层参数。

## 6 基于 XGBoost 算法的裂纹修正系数预测模型

### 6.1 XGBoost 算法

作为机器学习的延伸,集成学习可通过有机集成多个性能各异的基学习器完成回归任务。极限梯度提升树(extreme gradient boosting, XGBoost)算法作为目前集成学习算法的代表,在工程领域中的应用已较为成熟<sup>[31]</sup>。其基本思想是将当前决策树与已集成决策树的残差进行拟合,进而将新的决策树加入算法序列中,以降低模型的整体残差。算法的目标函数由损失函数和正则化项两部分组成,其中正则化项用于抑制算法的复杂度,防止模型过拟合<sup>[32]</sup>。XGBoost 算法的目标函数定义为

$$O = \sum_{i=1}^N l(y_i, s_i) + \sum_{m=1}^M \Omega(f_m) \quad (7)$$

其中

$$s_i = \sum_{m=1}^M f_m(x_i) \quad (8)$$

式中: $O$ 为目标函数; $s_i$ 为第  $i$  个目标的预测值; $N$ 为总样本数; $y_i$ 为第  $i$  个目标的真实值; $l(y_i, s_i)$ 为损失函数,即真实值与目标预测值之间的差值; $M$ 为决策树的数目; $\Omega(f_m)$ 为决策树的复杂度; $f_m(x_i)$ 为第  $m$  棵决策树在第  $i$  个样本上的树叶权重函数。

XGBoost 算法以最小化目标函数为训练目标,将损失函数进行二阶泰勒展开,当  $t$  轮迭代后得到的目标函数导数为 0 时,即得到目标函数的最小值,进而得到最优预测模型。基于以上算法原理,建立基于 XGBoost 算法的裂纹修正系数预测模型。

### 6.2 模型训练与预测

考虑到铺装层温度效应与初始参数影响下钢桥面板顶板焊趾处疲劳裂纹应力强度因子计算的复杂性,基于集成学习 XGBoost 算法建立考虑铺装层温度效应的裂纹修正系数预测模型。通过该模型获取裂纹修正系数,结合钢桥面板顶板焊趾的实测应力,可按式(5)、式(6)分别计算疲劳裂纹尖端中点和端点的应力强度因子,从而实现对接桥面板顶板焊趾疲劳性能的评估。

在不同铺装层温度效应及初始参数下,分别按式(7)、式(8)计算钢桥面板顶板焊趾处疲劳裂纹尖端中点与端点的应力强度因子,据此得到 176 组考虑铺装层温度效应的疲劳裂纹修正系数。将这些系数按照 8:2 的比例划分训练集与测试集,模型的具体工作流程如图 17 所示。

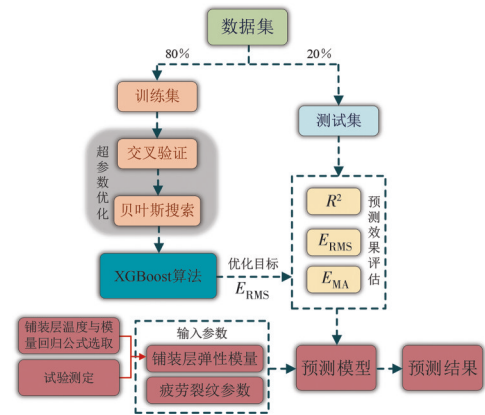


图 17 基于 XGBoost 算法的裂纹修正系数预测模型建立流程  
Fig. 17 Process of establishing crack correction coefficient prediction model based on XGBoost algorithm

模型预测效果的评估指标包括决定系数  $R^2$ 、均方根误差  $E_{RMS}$  及绝对误差  $E_{MA}$ 。其中,  $R^2$  代表模型的预测效果,其值越接近 1,说明模型预测效果越好;  $E_{RMS}$  可体现预测值与真实值的差异程度,其值越小,说明二者吻合度越高;  $E_{MA}$  为预测与真实值绝对误差的平均值,能够反映预测值的误差情况。  $R^2$ 、  $E_{RMS}$ 、  $E_{MA}$  的计算式分别为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (9)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - s_i)^2} \quad (10)$$

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - s_i| \quad (11)$$

按照以上流程可得到考虑铺装层温度效应的疲劳裂纹修正系数预测模型,输入沥青铺装模量、裂纹尺寸、裂纹形态比、裂纹方向及铺装层厚度,即可输出该修正系数。其中,沥青铺装模量可通过铺装层温度与弹性模量的回归公式计算,或通过试验测定等方式获得。模型的预测结果如图 18 所示,预测效果评价指标如表 1 所示。

从图 18 可知,所建预测模型能较好地预测铺装层温度效应影响系数  $F_z$  和  $F_d$ 。由表 1 可知,  $F_z$  和  $F_d$  的  $R^2$  分别达到 0.966 和 0.937,表明预测模型对样本的拟合效果良好。工程应用中,利用本模型结合铺装层实测温度或弹性模量数据,可高效预测疲劳裂纹修正系数,再结合钢桥面板焊接细节的应力数据,即可计算出疲劳裂纹尖端的应力强度因子,为钢桥面板焊接细节的疲劳性能评估提供便捷方法。

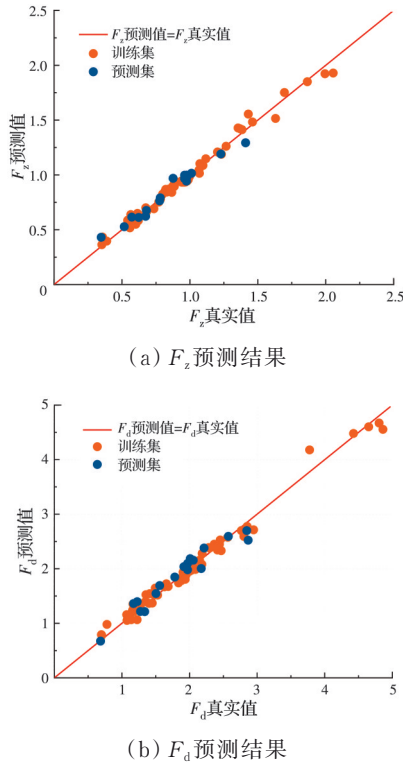


图 18 铺装层温度效应影响系数的预测结果

Fig. 18 Prediction results of influence coefficient of pavement temperature effect

表 1 铺装层温度效应影响系数的预测效果

Table 1 Prediction effect of pavement temperature effect influence coefficient

数据集	$R^2$	$E_{RSM}$	$E_{MA}$
$F_z$	0.966	0.046	0.033
$F_d$	0.937	0.144	0.119

## 7 结论

针对沥青铺装层温度效应对钢桥面板焊接细节疲劳性能的影响,分析了不同铺装层温度效应下两处焊接细节的应力状态,借助 Abaqus-Franc 3D 交互技术,对受影响较显著的顶板焊趾开展断裂力学分析与参数化研究,并基于集成学习算法建立了铺装层温度效应影响系数预测模型。主要结论如下:

1) 沥青铺装层温度效应与钢桥面板焊接细节的应力状态具有较强的相关性。随着沥青铺装模量的降低,两处焊接细节的应力均呈指数型增长,且应力最大值的位置会向焊缝纵向边缘偏移。因此,开展正交异性钢桥面板焊接细节疲劳性能研究时,不能忽略铺装层温度效应的影响。

2) 钢桥面板顶板焊趾处疲劳裂纹尖端的应力强度因子分布特征不受沥青铺装层温度效应的影响;且该位置的疲劳裂纹始终表现为 I 型断裂模式

主导的复合型裂纹。当沥青铺装层温度较高时,裂纹扩展速率显著增大,钢桥面板的疲劳性能也随之大幅衰减。

3) 沥青铺装层温度效应对裂纹修正系数的影响显著,钢桥面板顶板焊趾处的应力与裂纹尖端应力强度因子呈非线性关系,仅从应力角度评估钢桥面板焊接细节的疲劳性能存在安全隐患。

4) 随着沥青铺装层温度的升高,裂纹形态比越小,疲劳裂纹尖端的  $K_{eff}$  累计增幅越大;当沥青铺装模量为 500 MPa 时,其  $K_{eff}$  累计增幅较 10 000 MPa 时增加了近 10%。当疲劳裂纹深度方向为  $60^\circ \sim 90^\circ$  时,对钢桥面板焊接细节的疲劳性能最不利。增大沥青铺装层厚度可大幅减小疲劳裂纹尖端的应力强度因子,进而有效提升钢桥面板焊接细节的疲劳性能。

5) 基于 XGBoost 算法可有效预测考虑铺装层温度效应的裂纹修正系数。采用所建立的预测模型,结合铺装层实测温度或弹性模量数据,能高效预测疲劳裂纹修正系数;再结合钢桥面板焊接细节的应力参数即可计算得到疲劳裂纹尖端的应力强度因子,为工程中评估钢桥面板焊接细节的疲劳性能提供便捷。

## 参考文献

[1] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30, 39.  
ZHANG Q H, BU Y Z, LI Q. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30, 39. (in Chinese)

[2] 张清华, 劳武略, 崔闯, 等. 钢结构桥梁疲劳 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(增刊 1): 79-90.  
ZHANG Q H, LAO W L, CUI C, et al. State-of-the-art review of fatigue of steel bridge in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 79-90. (in Chinese)

[3] 王春生, 翟慕赛, Houankpo TON. 正交异性钢桥面板典型细节疲劳强度研究[J]. 工程力学, 2020, 37(8): 102-111.  
WANG C S, ZHAI M S, HOUANKPO T. Fatigue strength of typical details in orthotropic steel bridge deck [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(8): 102-111. (in Chinese)

[4] 陈斌, 邵旭东, 曹君辉. 正交异性钢桥面疲劳开裂研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170-174.  
CHEN B, SHAO X D, CAO J H. Study of fatigue cracking for orthotropic steel bridge deck [J]. Engineer-

- ing Mechanics, 2012, 29(12): 170-174. (in Chinese)
- [5] 鲁乃唯, 崔健, 王鸿浩, 等. 钢桥面板焊缝多疲劳裂纹交互融合特性研究[J]. 工程力学, 2025, 42(6): 164-173. LU N W, CUI J, WANG H H, et al. Study on interaction fusion characteristics of multiple fatigue cracks in steel bridge deck welds [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(6): 164-173. (in Chinese)
- [6] 袁周致远, 吉伯海, 夏俊元, 等. 钢箱梁横隔板-纵肋疲劳裂纹气动冲击维修试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(12): 2883-2891. YUAN Z Z Y, JI B H, XIA J Y, et al. Pneumatic impact test on rib-to-diaphragm fatigue crack of steel box girder [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(12): 2883-2891. (in Chinese)
- [7] 张海萍, 刘扬, 罗媛, 等. 车-温度荷载耦合作用下悬索桥钢桥面板疲劳寿命评估[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(5): 41-52. ZHANG H P, LIU Y, LUO Y, et al. Fatigue life assessment of the steel deck of suspension bridge under vehicle-temperature load coupling [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2021, 35(5): 41-52. (in Chinese)
- [8] 吴冲, 刘海燕, 张志宏, 等. 桥面铺装温度对正交异性钢桥面板疲劳的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 1213-1218. WU C, LIU H Y, ZHANG Z H, et al. Influence of pavements temperature on fatigue life of orthotropic deck of steel bridge [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1213-1218. (in Chinese)
- [9] 马林, 黄雷, 代希华, 等. 正交异性钢桥面环氧沥青铺装层疲劳耐久极限研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 29-34. MA L, HUANG L, DAI X H, et al. Study on fatigue durability of epoxy asphalt pavement on orthotropic steel bridge deck [J]. Bridge Construction, 2019, 49(4): 29-34. (in Chinese)
- [10] 叶华文, 段智超, 刘吉林, 等. 正交异性钢-混组合桥面的轮载扩散效应[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(8): 1808-1816. YE H W, DUAN Z C, LIU J L, et al. Wheel-load diffusion effect on orthotropic steel-concrete composite bridge deck [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(8): 1808-1816. (in Chinese)
- [11] 王达, 谭本坤, 赵鹏鑫. 钢-混凝土组合桥面板温度梯度效应的试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 74-82. WANG D, TAN B K, ZHAO P X. Experimental study and numerical simulation of temperature gradient effect of steel-concrete composite bridge deck [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup 2): 74-82. (in Chinese)
- [12] GUO T, LI A, WANG H. Influence of ambient temperature on the fatigue damage of welded bridge decks [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(6): 1092-1102.
- [13] 王高新, 丁幼亮, 宋永生, 等. 温度作用对带铺装层钢桥面板疲劳效应的影响研究[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 115-123. WANG G X, DING Y L, SONG Y S, et al. Influence of temperature action on the fatigue effect of steel deck with pavement [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 115-123. (in Chinese)
- [14] 王石磊, 齐法琳, 柯在田, 等. 环氧沥青铺装对钢桥面板受力影响试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 145-154. WANG S L, QI F L, KE Z T, et al. Experimental study on the effect of an epoxy asphalt concrete pavement on an orthotropic steel deck [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 145-154. (in Chinese)
- [15] LIU Y, ZHANG H P, LIU Y M, et al. Fatigue reliability assessment for orthotropic steel deck details under traffic flow and temperature loading [J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 71: 179-194.
- [16] 刘益铭, 张清华, 崔闯, 等. 正交异性钢桥面板三维疲劳裂纹扩展数值模拟方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 89-95. LIU Y M, ZHANG Q H, CUI C, et al. Numerical simulation method for 3D fatigue crack propagation of orthotropic steel bridge deck [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 89-95. (in Chinese)
- [17] 张亚海, 郭宝圣, 张卫国, 等. 钢桥面板-纵肋双面焊缝疲劳裂纹应力强度因子[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 62-70. ZHANG Y H, GUO B S, ZHANG W G, et al. Fatigue crack stress intensity factor of double-sided welded rib-to-deck joints in steel bridge deck [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 62-70. (in Chinese)
- [18] 鲁乃唯, 王鸿浩, 陈方怀, 等. 钢桥面顶板焊缝处共线双裂纹耦合扩展特性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(11): 180-188. LU N W, WANG H H, CHEN F H, et al. Analysis on coupled propagation characteristics of two collinear cracks on steel bridge deck to-U rib welding seam [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(11): 180-188. (in Chinese)
- [19] LIU Y, CHEN F H, LU N W, et al. Fatigue performance of rib-to-deck double-side welded joints in orthotropic steel decks [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 127-142.

- [20] RICE J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1968, 35(2): 379-386.
- [21] YAU J F, WANG S S, CORTEN H T. A mixed-mode crack analysis of isotropic solids using conservation laws of elasticity [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(2): 335.
- [22] Fatigue design and assessment of steel structures: BS 7608-1993 [S]. London: British Standards Institution, 1993.
- [23] CHENG B, YE X H, CAO X E, et al. Experimental study on fatigue failure of rib-to-deck welded connections in orthotropic steel bridge decks [J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 103: 157-167.
- [24] 田亮, 邢守航, 樊立龙, 等. 模拟轮载作用下钢桥面板RD节点疲劳寿命计算方法对比分析[J]. *华东交通大学学报*, 2023, 40(4): 76-85.  
TIAN L, XING S H, FAN L L, et al. Comparative analysis of fatigue life calculation methods for rib-to-deck joints in steel bridge decks under simulated wheel load [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2023, 40(4): 76-85. (in Chinese)
- [25] 查旭东. 沥青路面反算模量的温度修正[J]. *公路*, 2002, 47(6): 51-53.  
ZHA X D. Temperature adjustment for back calculation moduli of asphalt pavement [J]. *Highway*, 2002, 47(6): 51-53. (in Chinese)
- [26] 周亮, 凌建明, 林小平, 等. 沥青层反算模量的温度修正系数[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 1641-1645.  
ZHOU L, LING J M, LIN X P, et al. Temperature adjustment factor for back-calculated modulus of asphalt pavement layer [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(11): 1641-1645. (in Chinese)
- [27] 徐富兴. 基于铺装层性能的正交异性钢桥面板的疲劳研究[D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2022.  
XU F X. Fatigue research of orthotropic steel bridge deck based on pavement performance [D]. Suzhou, Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [28] HOBBAKER A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components [M]. Springer Cham, 2016.
- [29] ABDELBASET H, CHENG B, XIANG S, et al. An investigation on fatigue crack propagation behavior of welded connections in UHPC reinforced OSDs using 3D crack simulation [J]. *Structures*, 2023, 50: 1527-1544.
- [30] WANG D, TAN B K, WANG L, et al. Numerical study on stress intensity factors for stud connectors of steel-concrete connection [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2021, 21(5): 1775-1789.
- [31] 张书颖, 陈适之, 韩万水, 等. 基于集成学习的FRP加固混凝土梁抗弯承载力预测研究[J]. *工程力学*, 2022, 39(8): 245-256.  
ZHANG S Y, CHEN S Z, HAN W S, et al. Study on prediction of FRP strengthened reinforced concrete beam's moment bearing capacity based on ensemble learning algorithm [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(8): 245-256. (in Chinese)
- [32] 陈健, 靳军伟, 李新潮, 等. 基于XGBoost算法的大直径穿黄隧道施工期管片上浮研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(增刊1): 72-80.  
CHEN J, JIN J W, LI X C, et al. Segment uplift of large-diameter tunnel crossing Yellow River during construction based on XGBoost algorithm [J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(Sup 1): 72-80. (in Chinese)

(编辑 朱备)