

DOI:10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2025.06.007

引用格式:左宏圆,吉伯海,李心诚,等.残余应力对钢桥顶板 U 肋双面焊疲劳评估的影响[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(6):53-60.

残余应力对钢桥顶板 U 肋双面焊疲劳评估的影响

左宏圆 吉伯海 李心诚 傅中秋

(河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘要:新型双面焊构造有望提高钢桥面板顶板 U 肋焊接接头的抗疲劳性能,而残余应力存在会对焊接接头疲劳强度产生不利进而影响疲劳评估结果.为探究残余应力对双面焊疲劳评估的影响,本文基于正交异性钢桥面板顶板 U 肋节段有限元模型,得到了标准车加载下双面焊接头的受力特征与焊接残余应力的分布情况,分别采用名义应力法、热点应力法、结构应力法对双面焊构造进行疲劳评估.研究表明:双面焊相较单面焊有更为复杂且不利的残余应力场,考虑残余应力影响后,各疲劳应力幅值有显著增加,其中名义应力幅值增幅最大,热点应力次之,结构应力最小;此外在考虑残余应力影响后,名义应力法评估的最不利损伤部位由 U 肋外焊趾转变为顶板外焊趾,其余评估方法在 U 肋焊趾处的损伤度评估结果差异减小.

关键词:钢桥面板; 双面焊; 残余应力; 应力幅值; 损伤度; 疲劳

中图分类号:U443.32; U448.36 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-948X(2025)06-0053-08

The Influence of Residual Stresses on the Fatigue Assessment of Double-Sided Welding of U-Ribs on Steel Bridge Deck

ZUO Hongyuan JI Bohai LI Xincheng FU Zhongqiu

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The new double-sided welding structure is expected to improve the fatigue resistance of the U-rib welded joint of the steel bridge deck roof, and the existence of residual stress will adversely affect the fatigue strength of the welded joint and thus affect the fatigue assessment results. In order to explore the influence of residual stress on the fatigue assessment of double-sided welding, based on the finite element model of U-rib section of orthotropic steel bridge deck, the stress characteristics and welding residual stress distribution of double-sided welded joints under standard vehicle loading are obtained. The nominal stress method, hot spot stress method and structural stress method are used to evaluate the fatigue of double-sided welded structure. The results show that the double-sided welding has more complex and unfavorable residual stress field than the single-sided welding. Under the considering of the influence of residual stress, the amplitude of each fatigue stress increases significantly. Among them, the nominal stress amplitude increases the most, followed by the hot spot stress, and the structural stress is the smallest. In addition, after considering the influence of residual stress, the most unfavorable damage site evaluated by the nominal stress method changes from the U-rib outer weld toe to the roof outer weld toe, and the difference in the damage degree evaluation results of the other evaluation methods at the U-rib weld toe is reduced.

Keywords steel bridge deck; double-sided welding; residual stress; stress amplitude; damage degree evaluation; fatigue

收稿日期:2025-05-30

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52378153)

通信作者:吉伯海(1966-),男,教授,博士,主要从事钢桥疲劳与维护研究. E-mail: bhji@hhu.edu.cn

随着焊接技术发展,新型双面焊构造被提出,并被应用于正交异性钢桥的建设当中^[1].相较于传统单面焊构造,新型双面焊构造可以减少疲劳裂纹从焊根部出现的情况^[2],而双面焊热输入增加则会导致产生更加复杂和不均匀的残余应力场^[3],在叠加外部车辆等循环荷载后会在很大程度上降低钢桥面板疲劳性能^[4],在焊缝等敏感部位诱发疲劳裂纹,进而导致构件产生开裂破坏,疲劳问题仍是需要关注的重点.

针对钢桥顶板 U 肋双面焊的疲劳评估,多位学者开展了相关研究.范传斌等^[5]开展了 14 个顶板-U 肋试件疲劳试验,采用名义应力法评估对比了全熔透双面焊顶板-U 肋焊接构造细节试验与模拟的疲劳强度,结果显示试验名义应力幅值大于模型计算应力幅值.彭强等^[6]基于热点应力法设计试验评估双面焊疲劳强度,试验结果表明所设计试件疲劳抗力均高于 FAT90,但其疲劳抗力离散性较大.聂斌等^[7]基于结构应力法对单、双面焊进行了分析对比,结果表明双面焊的疲劳破坏模式发生改变,最不利位置由原来单面焊的焊根位置转移至外焊缝焊趾位置.随着研究的深入,有学者指出忽略平均应力效应会对疲劳损伤评价的准确性产生较大影响^[8],而残余应力的存在会影响平均应力效应进而对疲劳性能评估结果产生影响.Tang 等^[9]考虑多场耦合效应对钢桥面板疲劳裂纹萌生与扩展问题展开研究,结果表明考虑残余应力的分布和扩散,结合线性断裂力学得到的 $a-N$ 曲线与试验结果拟合效果更好,可见考虑残余应力影响后疲劳评估结果更可靠.从研究现状和应用情况来看,目前双面焊疲劳评估相关研究已取得一系列进展,也有学者开始关注和研究残余应力对双面焊疲劳评估的影响,但相对较少,需要开展更多相关研究以明确残余应力对双面焊疲劳评估的影响.

为此,本文通过有限元模拟得到了车载作用下顶板 U 肋双面焊焊接接头构造的受力特征以及焊接过程中温度场与应力场的分布情况,同时为避免单一评估方法可能导致的结果离散性较大的情况,基于名义应力法、热点应力法和结构应力法 3 种评估方法,以应力幅值和损伤度结果为参数,对比分析了残余应力对疲劳评估的影响,可为正交异性钢桥面板顶板 U 肋双面焊疲劳评估提供参考.

1 有限元模型

1.1 模型建立

本研究利用 ABAQUS 软件建立了一个具有 7 个横向 U 肋和 5 个纵向横隔板的节段模型,如图 1

所示,横向 U 肋间距为 0.6 m,总长 4.2 m,纵向横隔板间距为 3 m,长度为 12 m.横隔板厚度设定为 12 mm,桥面顶板厚度为 18 mm,U 肋厚度为 8 mm.顶板与 U 肋之间采用双面全熔透焊缝连接,焊脚尺寸 8 mm.全桥模型网格尺寸为 50 mm,单元类型为 C3D8R,包含约 19.8 万个单元.考虑到全桥模型尺寸大,对研究细节进行网格细化后,模型网格数量较多造成计算耗时较长,故在 HG-2 与 HG-3 中段位置选取半 U 肋模型为子模型.为兼顾计算的精度和效率,对于形状规则的区域采用结构化网格划分,局部几何形态较为复杂的区域采用扫掠网格划分,子模型全局网格大小设置为 10 mm,加密区局部网格大小为 1 mm,其间采用四面体单元过渡,以满足后续研究对网格精度的要求.根据正交异性钢桥面板的受力特点选取边界条件如下:纵桥向约束铺装层、顶板及 U 肋 3 个方向的平动自由度,横桥向约束铺装层和顶板的平动自由度,竖直方向约束横隔板 3 个方向的平动和转动自由度.

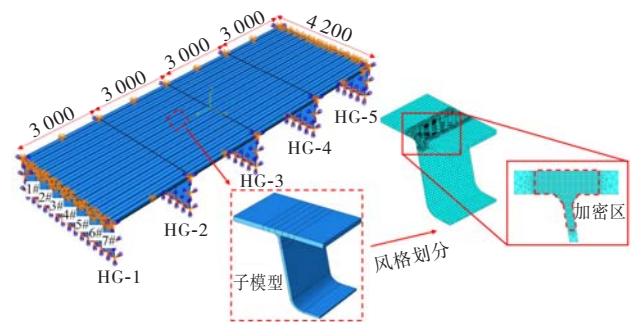


图 1 模型建立(单位:mm)

1.2 焊接模拟

焊接有限元模型几何构造与节段子模型保持一致,顶板厚 18 mm,长 200 mm,宽 300 mm,U 肋厚 8 mm,U 肋高 280 mm,焊脚尺寸为 8 mm.全局网格大小设置为 10 mm,加密区局部网格大小为 1 mm,其间采用四面体单元过渡,总计约 17.2 万个单元,如图 2 所示.

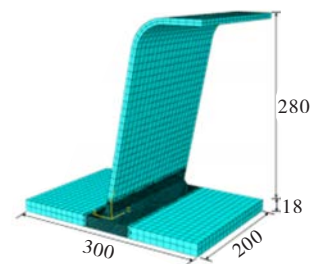


图 2 焊接模拟(单位:mm)

采用顺序热力耦合的焊接工艺,内侧焊缝焊接时间为 40 s,冷却 100 s 后进行外侧焊缝焊接,焊接完成后逐渐冷却至室温,温度场计算完成后得到热分析结

果,将其以体荷载的形式施加在节点上,进行结构总体分析.热传导分析时采用 DC3D8 八节点线性六面体传热单元,热应力分析时采用 C3D8R 八节点线性六面体单元.焊料模拟填充采用生死单元法并利用 Dflux 子程序控制热源的移动,焊接热源采用 Goldak 双椭球体热源模型,根据实际熔池形状调整热源参数,保证焊接残余应力的计算精度.由于该顶板 U 肋模型为对称结构上截取的局部模型,热应力分析时在顶板和 U 肋对称中心线处施加约束 x 方向的平动位移 $u_x = u_y = 0$ 和 y, z 方向的转动位移 $r_y = r_z = 0$;为保证不发生刚体位移,且尽量不阻碍焊接过程中发生的应力释放和变形情况,因此在顶板另一侧的边缘角点上施加固定约束.

在进行焊接模拟时,需要定义不同温度下材料物理性能参数,结合文献[10],材料物理性能参数如图 3~4 所示.

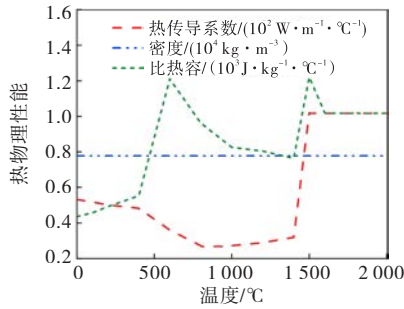


图 3 不同温度下热物性能变化曲线

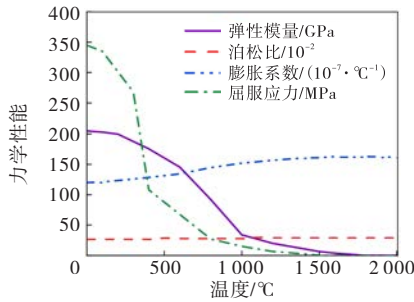


图 4 不同温度下力学性能变化曲线

1.3 荷载工况选取

车轮荷载采用我国《公路钢结构桥梁设计规范》中推荐的 III 型疲劳车模型^[11],如图 5 所示,单个车轮面积为 $200\text{ mm} \times 600\text{ mm}$,重量为 60 kN ,换算得荷载集度为 0.5 MPa .考虑到由于 U 肋与顶板连接焊缝横向受力影响范围约为 U 肋开口宽度的 3 倍^[12],而标准疲劳车横向轴距 2 m 大于 U 肋开口宽度的 6 倍,因此单个轮轴两车轮在横向影响区域内无明显叠加效应.标准疲劳车纵向最小轴距为 1.2 m ,处于 U 肋与顶板连接焊缝纵向影响范围内,采用单侧前后双轴轮载的加载方式.对焊缝细节的关注,参考在横桥向加载工况选取距离关注焊缝最近的 3 种典型加载工况:

工况 1 为两 U 肋间加载、工况 2 为顶板 U 肋焊接接头正上方加载、工况 3 为 U 肋正上方加载,各工况之间相差 150 mm .纵桥向加载沿桥梁纵向移动荷载步长为 150 mm ,从前轮与 HG-2 接触开始,到后轮离开 HG-3 时结束,计算 30 个荷载步.

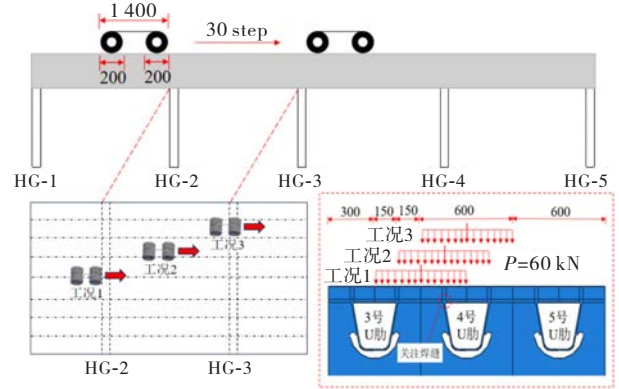


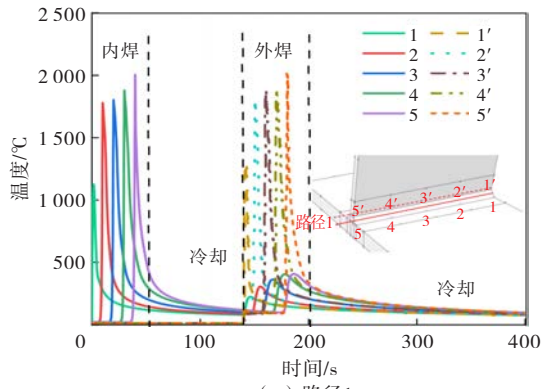
图 5 荷载工况(单位:mm)

2 双面焊接接头残余应力

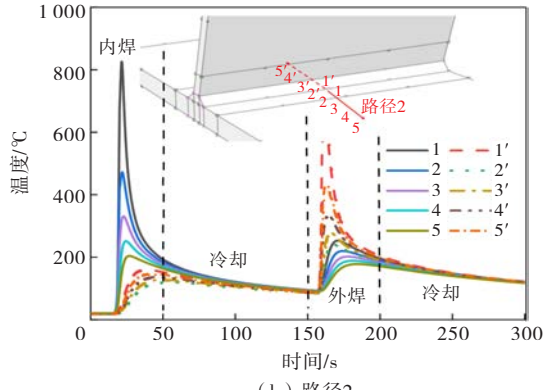
2.1 热影响性分析

为了清楚地显示焊缝周围不同位置处的温度随时间的变化情况,沿焊缝方向、垂直于焊趾方向、板厚方向及 U 肋表面方向取 4 类路径,路径 1 为焊缝的起弧段、熄弧段、中间段按照焊缝长度等间距选取 5 个测点,路径 2~4 分别为在焊缝中部的顶板上距焊趾、焊趾处随顶板厚度方向、U 肋表面距焊趾 3 条路径,在各路径上等距离 2 mm 选取 5 个测点,具体研究双面焊温度场的梯度分布情况.

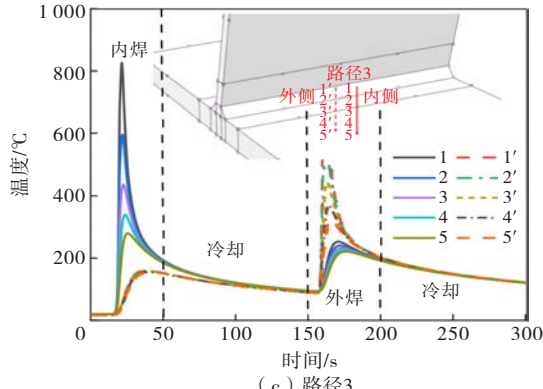
由图 6 可知,在路径 1 中测点 1 与测点 1' 处为起弧段热源经过时没有形成稳定的温度场,温度峰值较其他点相比较低,其他各点的温度变化曲线都相类似,在热源经过时各测点温度骤然上升至峰值近 $1800\text{ }^\circ\text{C}$,达到母材熔点温度符合实际工况要求,在热源离开后温度急剧下降,直至 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时下降速度开始逐渐减缓.在路径 2~4 中各测点的温度变化曲线基本类似,在热源经过时测点温度骤然上升至峰值离开时急剧下降,直至 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时下降速度开始逐渐减缓,同时可以观察到较为明显的内焊缝对外焊缝的预热作用以及外焊缝对内焊缝的回温作用.各路径不同测点之间温度统计结果表明,温度以及温度变化幅度随测距增大而减小,在距离焊趾位置 10 mm 范围内具有明显的温度梯度,此外对于路径 1 冷却时间 60 s 左右时各测点温度基本稳定下降至 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,对于路径 2~4 冷却时间 40 s 左右时各测点温度基本稳定下降至 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 左右.



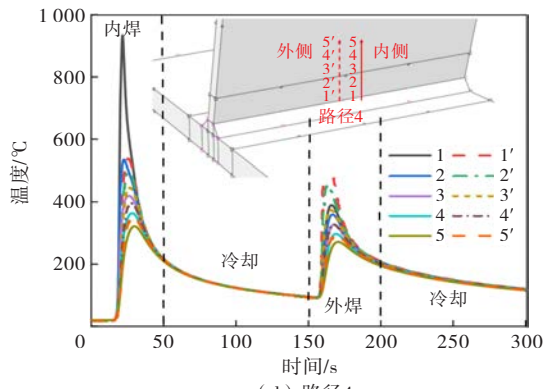
(a) 路径1



(b) 路径2



(c) 路径3

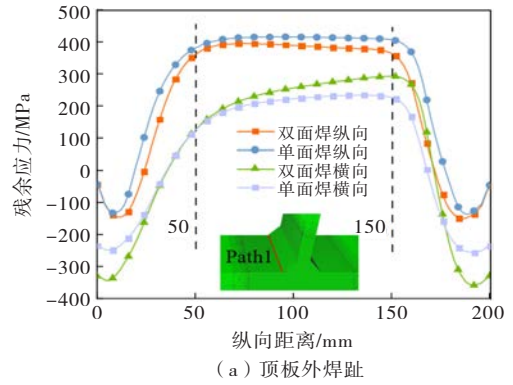


(d) 路径4

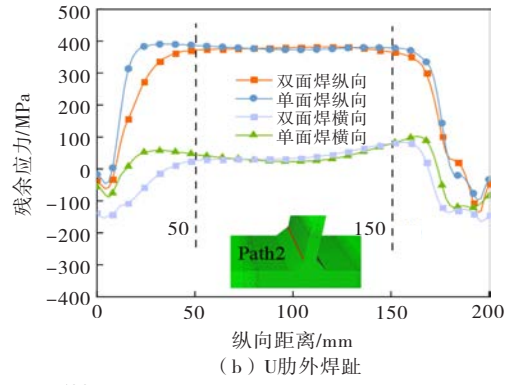
图 6 不同测点位置温度随时间变化曲线

2.2 单双面焊残余应力对比

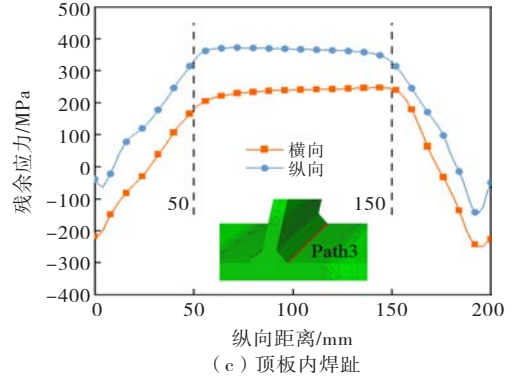
在焊接模型的基础上求出残余应力分布情况,在顶板 U 肋外内焊趾依次选取各应力路径 Path 1~4,如图 7 所示,横轴距离表示起弧到灭弧的距离,纵轴表示提取点对应的残余应力。



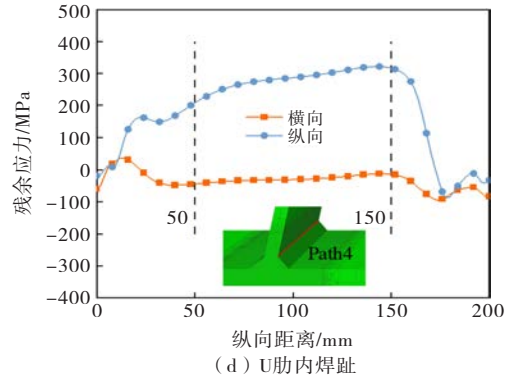
(a) 顶板外焊趾



(b) U肋外焊趾



(c) 顶板内焊趾



(d) U肋内焊趾

图 7 各疲劳关注细节残余应力分布情况

从整体上看纵向残余应力以拉应力为主,而在起弧段和灭弧段由于焊接起止区域起始热输入不足导致温度梯度较小且受拘束较弱,致使其在有限区域内形成了具有波谷特征的压缩残余应力分布,而后随着焊接热源温度升高与稳定输入,残余应力由压转拉的急剧变化,并于纵向 50~150 mm 范围内形成稳定的残余应力场,这与文献[13]和[14]中试验模拟数据的

分布规律相似,验证了本文所建立的焊接数值计算模型具有可靠性。

为进一步探讨顶板 U 肋新型双面全熔透焊缝相对传统单面焊缝的区别,在保证其他结构尺寸以及焊接参数不变的基础上,去除内侧焊缝建立一个单面焊接的模型并与双面焊顶板 U 肋外焊趾位置沿焊缝方向纵向及横向残余应力进行对比分析,如图 7(a)、(b)所示,取单双面焊残余应力场稳定段均值进行比较.单、双面焊桥面板与 U 肋外焊趾处沿焊缝路径上的纵向及横向残余应力分布趋势基本一致,但在双面焊焊接过程中两道焊缝之间的预热与回温作用会释放掉部分焊接残余应力,而后焊缝冷却收缩又会对对侧焊缝产生拉伸作用,进而增大焊接残余应力,内外侧焊缝之间的相互作用影响使得双面焊产生了更为复杂的残余应力场.通过与单面焊残余应力数值对比发现,双面焊顶板外侧焊趾处纵向残余应力整体平均较单面焊减少 18.28 MPa,减小率为 4.59%,U 肋外焊趾位置纵向残余应力减小 1.03 MPa,减小率为 0.27%.而双面焊顶板外侧焊趾处横向残余应力整体平均较单面焊增大 32.96 MPa,增长率为 15.67%,U 肋外侧焊趾处横向残余应力平均值较单面焊增大了 4.64 MPa,增长率为 12.41%.结果表明横向残余应力的增长率明显大于纵向残余应力的减小率,且垂直于焊缝方向的横向残余应力的增加更容易导致焊缝位置的疲劳开裂问题,故在实际设计使用时,需充分考虑这种复杂且不利的残余应力场对结构疲劳性能的潜在影响。

3 车载作用下疲劳应力

3.1 疲劳细节

有研究表明^[15]顶板 U 肋双面全熔透焊连接细节的疲劳开裂模式主要有以下几种:(1)起源于焊趾位置并沿顶板厚度方向扩展的疲劳开裂模式①、②;(2)起源于焊趾位置并沿腹板厚度方向扩展的疲劳开裂模式③、④. U 肋与顶板连接焊缝的疲劳开裂主要受垂直于裂纹扩展方向的应力分量影响,故本文仅关注顶板及 U 肋平面内且垂直于焊缝方向的应力分量.顶板内外焊趾裂纹扩展垂直方向为 S11 方向,U 肋内外焊趾裂纹扩展垂直方向为 S11',借助局部坐标系提取 S11'方向的应力.为充分考虑结构所承受的弯曲应力,沿子模型纵向位置关键点在中部的横截面进行选取,即对应于节段模型的跨中位置,4 个疲劳开裂关注位置如图 8 所示,分别为顶板外焊趾(DW)、顶板内焊趾(DN)、U 肋外焊趾(UW)、U 肋内焊趾(UN)。

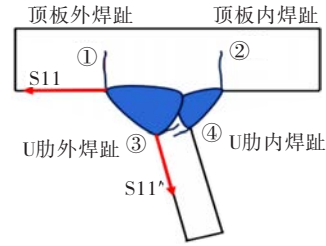
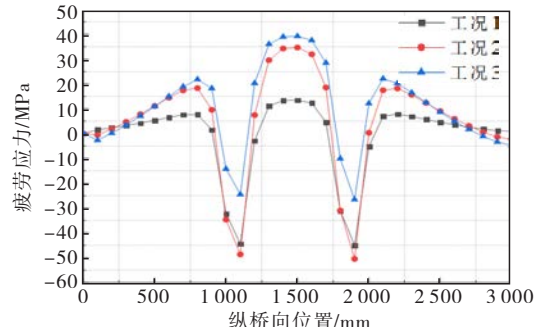


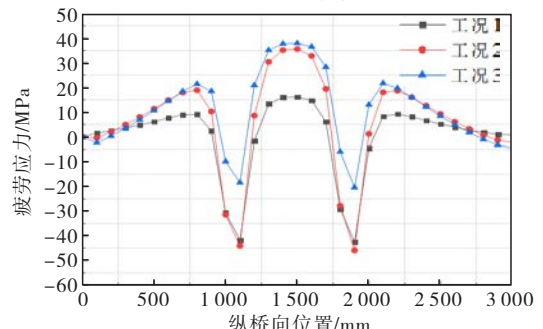
图 8 疲劳开裂关注位置

3.2 应力特征

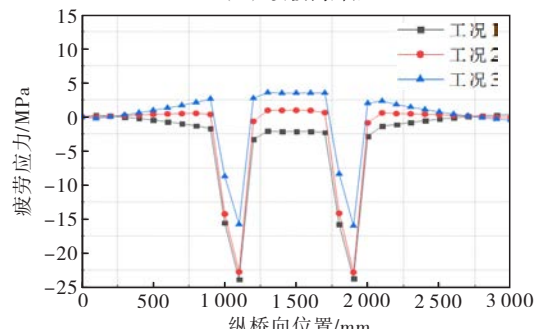
疲劳应力历程曲线如图 9 所示。



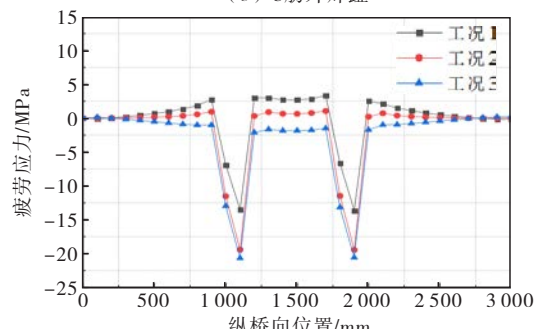
(a) 顶板外焊趾



(b) 顶板内焊趾



(c) U 肋外焊趾



(d) U 肋内焊趾

图 9 疲劳应力历程曲线

由图9可知,车轮作用在跨中时,双面焊顶板焊趾处拉应力最大,随着车轮作用位置向横隔板方向移动,拉应力迅速减小甚至变为压应力.当车轮作用位置偏离跨中约500 mm时,双面焊各疲劳开裂关键点压应力趋向于最大后逐渐减小;当车轮作用在横隔板附近时,各疲劳易损部位应力基本为0,这说明车轮作用的纵向影响范围仅限于2个横隔板之间.各横向工况中,顶板内外焊趾应力状态呈现拉压循环,U肋内外焊趾除个别工况外,多数工况应力状态呈现压压循环.对于焊接钢结构疲劳强度起控制作用的是应力幅,在各疲劳开裂关键点中双面焊顶板外焊趾应力幅最大,标准疲劳车加载情况下最不利工况为工况2,考虑最不利工况进行后续研究.

3.3 不同应力评估方法

在钢桥面板疲劳性能的评估方法中,名义应力法方便快捷应用广泛^[5],其测点选取避开了焊接构件结构交叉,且远离焊接产生的应力集中区域,在顶板内外焊趾选取参考点为 $1.0t_d$ (顶板厚度),U肋内外焊趾选取参考点为 $1.0t_r$ (肋板厚度),如图10所示.

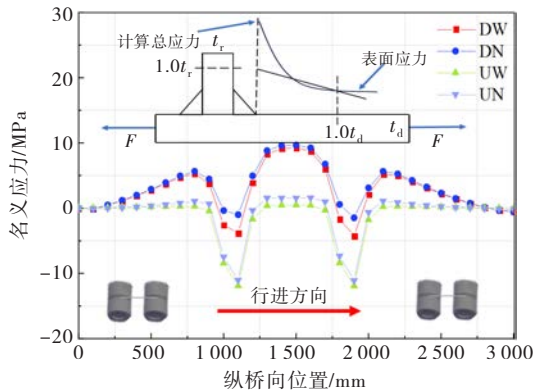


图10 名义应力历程曲线

热点应力的获取采用国际焊接协会(IIW)给出的两点线性外推法^[6],在顶板内外焊趾选取外推参考点为 $0.4t_d$ 、 $1.0t_d$,U肋内外焊趾选取外推点为 $0.4t_r$ 、 $1.0t_r$,如图11所示.

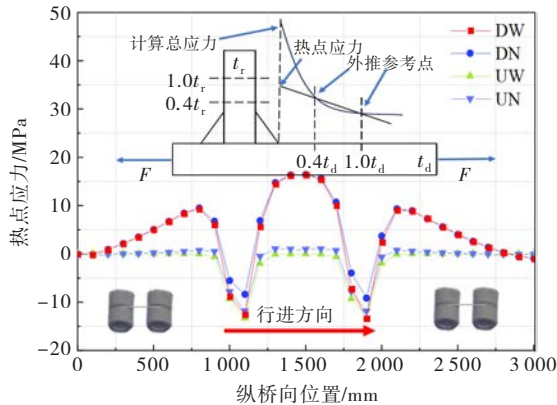


图11 热点应力历程曲线

结构应力法具有网格不敏感性^[7],适用于焊接构件的疲劳性能评估,该方法通过节点力积分反映了整体结构的载荷分布和边界约束条件,其中网格自平衡的结构应力 σ_s 可以认为是膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b 之和.计算结构应力需要先求得线力 f_y 和线矩 m_z ,其中线力指的是单位长度焊线所承受的力,线矩则是单位长度焊线所承受的力矩,如图12所示.依据计算结果提取标准疲劳车行驶过程中模型跨中横截面各个疲劳关注位置节点应力变化历程曲线.

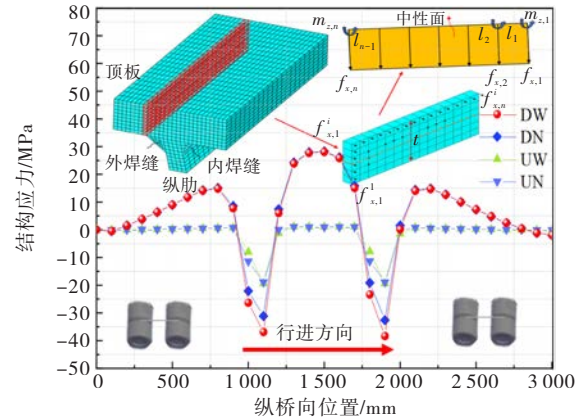


图12 结构应力历程曲线

4 考虑残余应力的双面焊疲劳评估

4.1 残余应力的影响

疲劳应力幅在叠加与疲劳应力方向相同的残余应力分量之后,应力比会相应升高,进而影响到焊接细部的疲劳性能,忽略应力比的变化会导致评估结果不准确.应力比定义为 σ_{min} 与 σ_{max} 比值,考虑残余应力之后应力比 R' 为 σ'_{min} 与 σ'_{max} 比值.多位学者^[8,16]认为利用Walker法考虑应力比对名义应力幅和热点应力幅的影响是可靠的, $\Delta\sigma_i$ 为修正前应力幅值, $\Delta\sigma_i^{eq}$ 为修正后等效应力幅值[由式(1)求得], γ 为物理常数[由式(2)求得], σ_u 为材料极限抗拉强度.

$$\Delta\sigma_i^{eq} = \Delta\sigma_i \left(\frac{2}{1-R'} \right)^{1-\gamma} \quad (1)$$

$$\gamma = -0.0002\sigma_u + 0.8818 \quad (2)$$

Osage等^[17]提出了一个考虑应力比、板厚和弯曲比效应的等效结构应力法和主S-N应力曲线用于结构性能的评估分析.等效结构应力幅值计算如式(3)所示,其中的 t 是相对厚度即板厚与1 mm的比值,裂纹扩展指数取 $m=3.6$,无量纲函数 $I(r)^{m-1}$ 与初始裂纹参数有关,应用解析法求解困难.通过数值拟合曲线,在荷载控制条件下拟合得到式(4),其中载荷弯曲比 r 与膜应力 $\Delta\sigma_m$ 以及弯曲应力 $\Delta\sigma_b$ 有关,

可由式(5)计算得到,将结构应力幅值 $\Delta\sigma_s$ 、板厚 t 和无量纲函数 $I(r)^{m^{-1}}$ 以及考虑残余应力影响后的应力比 R' 代入式(3),即可求出等效结构应力幅值.

$$\Delta\sigma_s^{eq} = \begin{cases} \frac{\Delta\sigma_s}{(1-R)^{1/m} t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} & R \geq 0 \\ \frac{\Delta\sigma_s}{(1-R)^{2/m} t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} & R < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$I(r)^{\frac{1}{m}} = 0.0011r^6 + 0.0767r^5 - 0.0988r^4 + 0.0946r^3 + 0.0221r^2 + 0.014r + 1.1223 \quad (4)$$

$$r = \frac{|\Delta\sigma_b|}{|\Delta\sigma_m| + |\Delta\sigma_b|} \quad (5)$$

4.2 应力幅值对比

依据前文有限元计算分析结果,将不同关注细节考虑残余应力前后的应力幅值数据统计如图 13 所示,其中 WRS 代指残余应力. 不考虑残余应力影响时,热点应力与名义应力在顶板外焊趾处应力幅值相差 15.88 MPa,而 U 肋外焊趾处应力幅相差 0.95 MPa,二者顶板内焊趾处应力幅值相差 14.1 MPa 而 U 肋内焊趾处应力幅值相差 0.23 MPa,表明相较于 U 肋焊趾位置,顶板焊趾位置应力集中效应更强. 对比结构应力与热点应力,在顶板外焊趾处应力幅值相差 21.87 MPa 而 U 肋外焊趾处应力幅相差 6.4 MPa,二者顶板内焊趾处应力幅值相差 20.08 MPa 而 U 肋内焊趾处应力幅值相差 7.67 MPa,说明边界约束作用在总应力幅的贡献大于几何应力集中效应. 考虑残余应力影响后,名义应力顶板内外焊趾增幅为 153% 和 159%,U 肋内外焊趾增幅为 127% 和 157%;热点应力顶板内外焊趾增幅为 125% 和 132%,U 肋内外焊趾增幅为 125% 和 154%;结构应力顶板内外焊趾增幅为 91% 和 95%,U 肋内外焊趾增幅为 70% 和 87%,可见考虑残余应力影响名义应力幅值增幅最大,热点应力幅值次之,结构应力幅值增幅最小,考虑残余应力前后,双面焊顶板焊趾位置处的疲劳应力幅值较 U 肋焊趾处更大,且最大疲劳应力幅值出现在顶板外焊趾处,实际工程应用需予以关注.

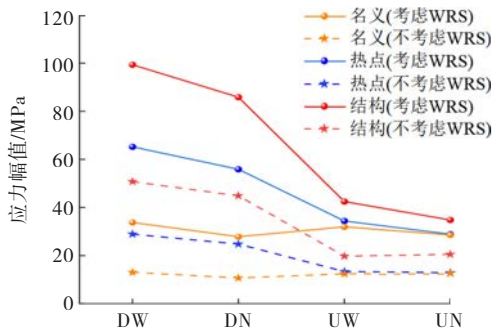


图 13 应力幅值对比

4.3 损伤度对比

为更直观地反映和评估考虑残余应力影响的双面焊结构在实桥下的疲劳寿命和安全储备,通常采用的评估方法基于 Miner 线性累积损伤准则和 S-N 曲线的损伤度预测^[18],名义应力法采用规范中给出的疲劳强度等级为 FAT71 的 S-N 曲线^[2],热点应力法推荐采用疲劳强度等级为 FAT90 的 S-N 曲线^[6],Osage 等基于大量实验结果统计发现结构应力法的计算结果汇聚于一条主 S-N 曲线^[17],为方便统计取标准疲劳车载通过全桥一次的损伤度进行比较.

由图 14 可知,不考虑残余应力影响时,名义应力法评估下最不利疲劳损伤部位为 U 肋外焊趾,热点应力法和结构应力法评估下最不利疲劳损伤部位为顶板外焊趾. 图 15 表明考虑残余应力影响后,各方法损伤度评估结果显著增大,名义应力法评估下最不利疲劳损伤部位转变为顶板外焊趾,热点应力法与结构应力法评估下最不利疲劳损伤部位仍为顶板外焊趾,且二者在 U 肋焊趾位置损伤度评估结果相较于不考虑残余应力时更加接近.

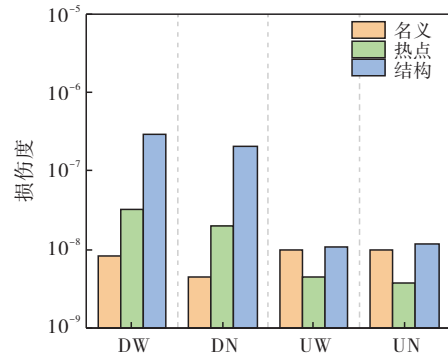


图 14 不考虑残余应力损伤度评估

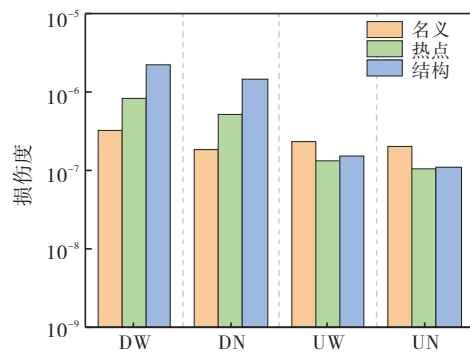


图 15 考虑残余应力损伤度评估

5 结 论

本文基于有限元模型分析了正交异性钢桥面板顶板 U 肋双面焊疲劳受力特征和焊接热输入过程,基于名义应力法、热点应力法、结构应力法 3 种方法

探究了残余应力对双面焊模型疲劳评估的影响,主要结论如下:

1) 双面焊焊接过程中具有明显的预热和回温作用,在距离焊趾位置 10 mm 范围内温度随测距变化较大,具有明显的温度梯度效应,两道焊缝之间冷却时间控制在 1 min 以上时各焊趾温度趋于稳定。

2) 相较于单面焊,双面焊内侧焊缝的压缩作用可抵消部分外侧焊缝焊接产生的纵向残余应力,但也增大了该处横向残余应力,形成了更为不利的残余应力场,考虑残余应力影响后,各疲劳应力幅值显著增大,其中名义应力幅值增幅最大,热点应力次之,结构应力最小。

3) 考虑残余应力影响前后,名义应力法损伤度评估最不利位置由 U 肋外焊趾转变为顶板外焊趾,这与实桥损伤开裂情况更相符,在 U 肋焊趾处的损伤度结果也在考虑残余应力影响之后更加接近。

参考文献:

- [1] 冯鹏程,付坤,陈毅明. 沌口长江公路大桥主桥设计关键技术[J]. 桥梁建设,2017,47(2):7-12.
- [2] 张清华,袁道云,王宝州,等. 纵肋与顶板新型双面焊构造细节疲劳性能研究[J]. 中国公路学报,2020,33(5):79-91.
- [3] 田亮,徐正,肖飞知,等. 焊接顺序对 U 肋双面焊接头残余应力及变形的影响[J]. 桥梁建设,2025,55(2):66-72.
- [4] MANAI A, FRANZ VON BOCK UND POLACH R U, AL-EMRANI M. A probabilistic study of welding residual stresses distribution and their contribution to the fatigue life[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104787.
- [5] 范传斌,宋神友,陈焕勇,等. 钢桥面顶板-U 肋全熔透双面焊构造细节疲劳性能研究[J]. 世界桥梁,2023,51(2):61-68.
- [6] 彭强,彭涛,凌立鹏,等. 基于热点应力法的双面焊正交异性钢桥面板疲劳强度评估[J]. 公路,2020,65(12):17-21.
- [7] 聂斌,王定全,孙丽明,等. 基于结构应力法的钢桥顶板-U 肋双面焊连接疲劳性能评估[J]. 建筑钢结构进展,2025,27(2):74-82.
- [8] WANG Q D, JI B H, GAO T, et al. Effective-notch-stress-based fatigue evaluation of rib-deck welds integrating the full-range S-N curve concept[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 179(9): 106541.
- [9] TANG K, CUI C, LIU J W, et al. Multiscale and multi-field coupled fatigue crack initiation and propagation of orthotropic steel decks [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199: 111843.
- [10] ZHANG Q H, MA Y, CUI C, et al. Experimental investigation and numerical simulation on welding residual stress of innovative double-side welded rib-to-deck joints of orthotropic steel decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 179(3): 106544.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [12] 曹雪坤,傅中秋,高玉强,等. 钢桥面板顶板焊根裂纹对铺装层受力性能影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2022,44(4):39-44.
- [13] KONG W K, HUANG W, WEI Y. Numerical study on welding residual stress by double-sided submerged arc welding for orthotropic steel deck[J]. Engineering Structures, 2024, 302:117445.
- [14] WANG S B, PEI J N, REN F J, et al. Numerical study of full penetration single- and double-sided U-rib welding in orthotropic bridge decks[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03120.
- [15] 吉伯海,蒋斐,王益逊,等. 钢桥面板顶板-U 肋焊缝多轴疲劳效应评估[J]. 郑州大学学报:工学版,2020,41(1):25-31.
- [16] LI X C, FU Z Q, JI B H, et al. Crack growth and fatigue strength of deck-rib welded joints in orthotropic steel decks integrating mean stress effect[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2025, 48(1):145-157.
- [17] OSAGE D A, DONG P S, SPRING D. Fatigue assessment of welded joints in API 579-1/ASME FFS-1 2016-existing methods and new developments [J]. Procedia Engineering, 2018, 213: 497-538.
- [18] 畅卫杰,陈勇,吴向阳,等. 基于随机车辆荷载的大跨悬索桥钢桥面板疲劳损伤评估方法[J]. 公路,2023,68(9):237-242.

[责任编辑 卢亚霞]