

文章编号:1673-9469(2025)04-0041-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.006

U肋加劲板对接接头焊接残余应力数值模拟与试验验证

王玉建¹,张纪刚^{1*},古 驰²,于风波^{1,3}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 青岛第一市政工程有限公司, 山东 青岛 266034;
3. 青岛义和钢构集团有限公司, 山东 青岛 266216)

摘要: 为研究钢箱梁桥现场拼装时U肋加劲板对接部位的焊接残余应力分布规律,设计并制作了钢箱梁桥现场拼装用的U肋加劲板对接接头试件,采用盲孔法测量了试件表面的焊接残余应力,并利用ABAQUS有限元软件对试件焊接过程进行数值模拟计算,获取了试件模型的焊接残余应力分布规律,并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析。结果表明,纵向残余应力中,拉应力主要集中分布在对接焊缝周围及U肋角焊缝附近,而压应力则主要分布于靠近U肋外侧的母材部分以及U肋角焊缝的端部;横向残余应力中,拉应力主要集中分布在U肋角焊缝周围,而压应力主要分布于对接焊缝的端部。

关键词: U肋加劲板;对接接头;盲孔法;数值模拟

中图分类号: U404

文献标识码: A

Numerical Simulation and Experimental Verification of Welding Residual Stress of U-rib Stiffened Plate Butt Joint

WANG Yujian¹, ZHANG Jigang^{1*}, GU Chi², YU Fengbo^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;
2. Qingdao First Municipal Engineering Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266034, China;
3. Qingdao Yihe Steel Structure Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266216, China)

Abstract: In order to study the welding residual stresses of the butt joint of the U-rib stiffened plate during the on-site assembly of the steel box girder bridge, this paper were designed and fabricated the butt joint specimen of the U-rib stiffened plate during the on-site assembly of the steel box girder bridge. The blind-hole method was used to measure the welding residual stress on the surface of the specimen, and the ABAQUS finite element software was used to simulate the welding of the specimen. The distribution law of the welding residual stress of the specimen model was obtained, and the numerical simulation results were compared with the experimental results. The results show that the longitudinal residual stress are mainly the tensile stresses distributed around the butt weld and near the U-rib fillet weld, and the compressive stresses mainly distributed in the base metal near the outer side of the U-rib and the end of the U-rib fillet weld. The transverse residual stresses are mainly the tensile stress distributed around the U-rib fillet weld, and the compressive stresses mainly distributed at the end of the butt weld.

Key words: U-rib stiffened plate; butt joint; blind-hole method; numerical simulation

在工厂预制阶段和现场施工阶段,钢箱梁桥构件连接都离不开焊接工艺。在工厂预制阶段,通过焊接将不同板件拼装成加劲板等结构构件,

然后将加劲板等结构组装为分段箱梁结构,在此过程中,焊接起着主要作用。然后是钢箱梁在现场施工拼装,将钢箱梁吊装到指定位置后,采用不

收稿日期:2024-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378304)

第一作者:王玉建(1999—),男,山东临沂人,硕士,从事焊接残余应力方面的研究。

* 通信作者:张纪刚(1975—),男,山东临沂人,博士,教授,从事结构振动控制方面的研究。

同的连接方式将相邻钢箱梁连接,其中,焊接是顶底板及腹板连接的主要手段^[1]。在钢箱梁桥的U肋加劲板焊接领域已有大量学者利用试验或数值模拟进行了不同研究,顾颖^[2]制作了U肋加劲桥面板并开展焊接残余应力测试工作,得出在焊缝区残余应力表现为拉应力,且拉应力区宽度较窄,给出了焊接残余应力超过材料屈服强度的原因。周思廷^[3]对U肋加劲桥面板进行了焊接试验,发现焊接纵向残余应力大于横向残余应力,在靠近焊缝处出现残余应力峰值,并沿垂直焊缝方向逐渐降低变为压应力。肖雄^[4]开展了U肋加劲桥面板焊接残余应力的研究,发现其研究路径1、2(平行于焊缝)上纵向残余应力基本呈现两端较小、中间区域平缓的分布,构成整体平衡的应力场;研究路径3、4(垂直于焊缝)上残余应力随着与焊缝距离增大而减小。刘建^[5]通过对U肋加劲桥面板分阶段焊接过程进行数值模拟,发现较大的横向、纵向和厚度方向的残余应力都主要分布在焊缝及其周边区域,其中较大的横向残余压应力和厚度方向残余压应力集中出现在焊接起始和结束的位置,纵向残余拉应力主要存在于焊缝的中部。

目前这些研究大多聚焦于U肋加劲桥面板在工厂制作阶段中U肋与顶板之间的焊接情况,而针对U肋加劲桥面板现场施工对接焊接的研究却较为匮乏^[6]。在钢箱梁桥现场施工过程中,通常

会涉及U肋加劲桥面板的对接焊接作业。这些焊接部位往往容易出现应力集中现象,导致桥梁裂纹过早萌生与扩展,成为钢箱梁桥的薄弱环节^[7]。因此,掌握U肋加劲板对接接头部位的应力分布规律,并采取有效措施减小焊接残余应力,对改善桥梁整体性能十分必要。本文为了精准分析钢箱梁桥现场施工时U肋加劲板对接部位的焊接残余应力,设计、制作了U肋加劲板对接试件,利用盲孔法^[8]对试件的焊接残余应力进行了测试,同时利用ABAQUS有限元软件对试件残余应力进行模拟计算,得出焊接残余应力分布规律,并将模拟结果与试验结果进行对比验证,以期对钢箱梁桥的现场拼装焊接提供一定参考依据。

1 试验试件及测试方法

1.1 试验试件及焊接工艺参数

本试验参照实际工程中使用的钢材及尺寸,试件选用Q345qD钢材,屈服强度为345 MPa,试件面板由两块尺寸为900 mm×400 mm×16 mm的钢板对接而成,加劲肋采用两段长度为400 mm的U肋,试件的几何尺寸如图1所示。试件开始焊接之前需要对板件进行开坡口处理,试件不同位置焊缝坡口形式如图2所示。试件开始焊接前还需要确定焊接工艺参数,参考钢箱梁桥现场施工

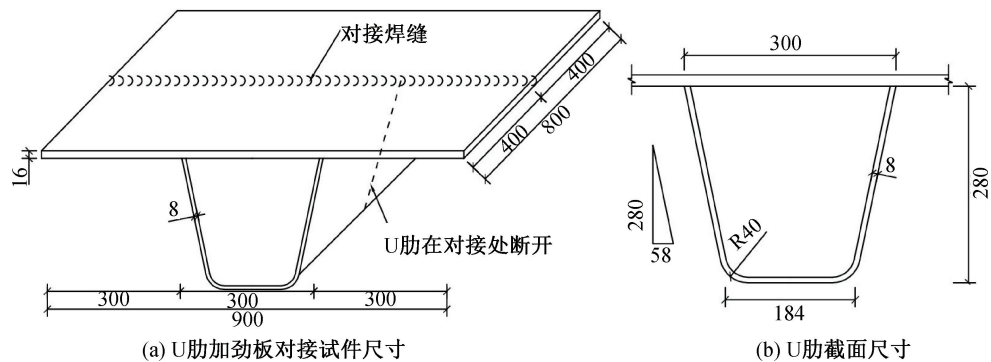


图1 U肋加劲板对接试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Geometric size of U-rib stiffened plate butt specimen (unit:mm)

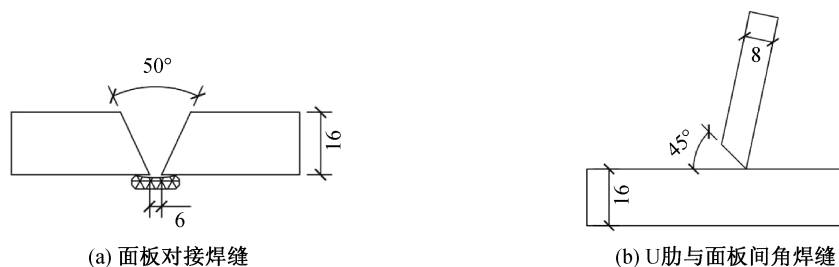


图2 焊缝坡口形式(单位:mm)

Fig. 2 Weld groove form (unit:mm)

拼装的实际工艺参数,并根据试件制作过程进行适当调整,最终确定试件的焊接工艺参数如表 1 所示。其中,每层焊缝的层间冷却时间为 300 s。

表 1 试件焊接工艺参数表

Tab. 1 Welding process parameters of test piece

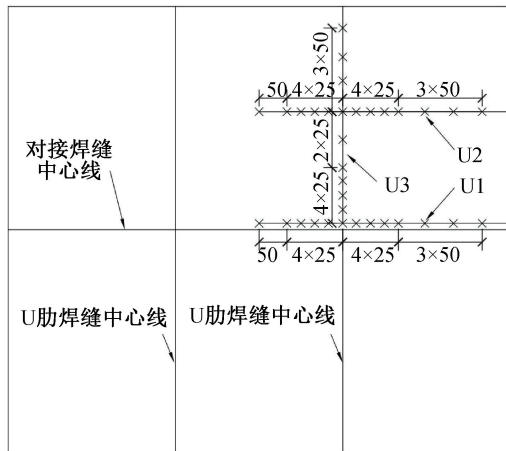
焊道	电流/A	电压/V	焊速/ (mm · s ⁻¹)
面板对接焊缝打底	210	24	4
面板对接焊缝填充 1	280	28	4
面板对接焊缝填充 2	280	28	3
面板对接焊缝盖面	250	28	3
U 肋与面板角焊缝打底	210	24	5
U 肋与面板角焊缝盖面	240	28	6

制作试件时,首先开展 U 肋与面板之间的焊接作业。待试件冷却至室温后,再实施面板对接焊缝的焊接工作^[9]。在实际工程中,两片 U 肋之间的对接连接通常采用螺栓连接方式,所以试验中令两片 U 肋在对接焊缝位置处断开,不再进行焊接操作。同时,在试件 U 肋的对接焊缝处设置半径为 35 mm 的过焊孔。

1.2 盲孔法测残余应力

盲孔法具有成本低、操作简便的显著优势,且其检测精度能够满足本试验的要求,因此,本试验选用盲孔法进行焊接残余应力的测量^[10]。残余应力的计算过程如下:首先,需要将得到的释放应变(ε_1 、 ε_2 和 ε_3)换算成测点残余应力的主应力;随后,将主应力的计算结果转化为各个方向的残余应力。

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} \pm \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + [2\varepsilon_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]^2} \quad (1)$$



(a) 测点布置示意图 (单位: mm)

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \mp \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2} \times \cos 2\theta \quad (3)$$

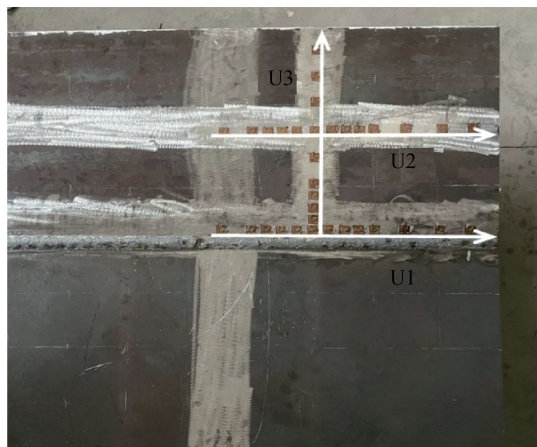
式中: ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为应变花沿焊缝方向、与焊缝成 45°方向和垂直焊缝方向的 3 个应变计所测得的释放应变; A 、 B 为标定常数,可由理论公式或试验标定。本文应力标定系数采用张壮南等^[11]总结的应力标定系数获取方法来确定, σ_x 、 σ_y 为纵向及横向残余应力。

由于试件在无约束条件下焊接,且试件具有对称性,故试验主要测试了试件面板 1/4 表面上的残余应力。U 肋加劲板对接试件测点布置如图 3 所示,试件设置平行于对接焊缝的两条测量路径 U1、U2,以及沿 U 肋角焊缝的测量路径 U3。

2 有限元数值模拟

2.1 有限元模型建立

利用有限元软件 ABAQUS 建立试件的有限元模型。在划分模型网格时,采用较密的网格能够提高计算结果的准确性,但会增加计算量,降低计算效率。由于焊缝区域温度梯度较大,为了在兼顾计算精确度的同时减少计算量,在网格划分时使用过渡网格划分技术,在焊缝处进行网格加密划分,既保证了计算的精确性又简化了模型,提高了计算效率^[12]。划分网格后的焊缝区域有限元网格尺寸约为 2 mm,远离焊缝区域网格尺寸约为 12 mm,在焊接模拟过程中使用了生死单元法,在计算开始时先将焊缝区域的模型单元设置为无效状态;随着计算的推进,对试件模型焊缝处的单元进行重



(b) 实际测点布置图

图 3 U 肋加劲板对接试件测点布置

Fig. 3 Measurement point arrangement of U-rib stiffened plate butt specimen

活,实现焊缝焊接过程中焊缝金属的填充模拟^[13]。对于焊缝处几何形状的划分,由于后焊焊缝与先焊焊缝之间相互熔合,其边界不明显,故通过对比试验获得的整体熔池形状对焊缝区域形状进行近似划分,焊缝区域附近的网格划分如图4所示。

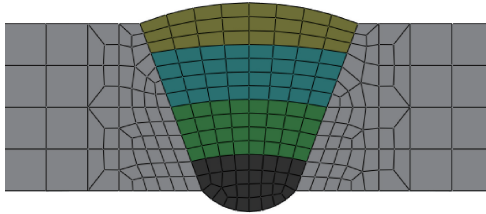


图4 对接焊缝处网格划分

Fig. 4 Grid division at butt weld

为了模拟试件在实际焊接过程中的边界条件约束,在三个试件模型的点A约束 x 、 y 、 z 三个方向的线位移,在B点约束模型 x 和 z 方向的线位移,在C点约束模型 z 方向的线位移,这样既能保证试件在空间中不发生整体平动及转动,又能保证试件的自由变形及应力释放^[14]。划分完网格的试件模型及模型边界条件如图5所示,图中箭头表示限制该点在箭头方向的位移。

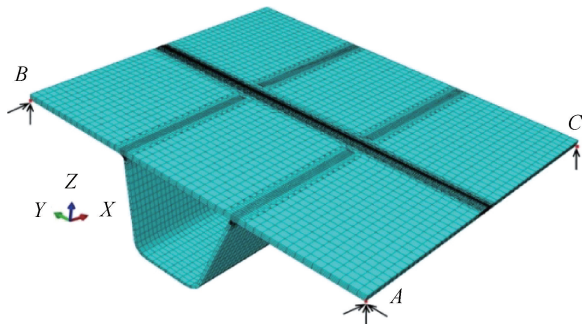
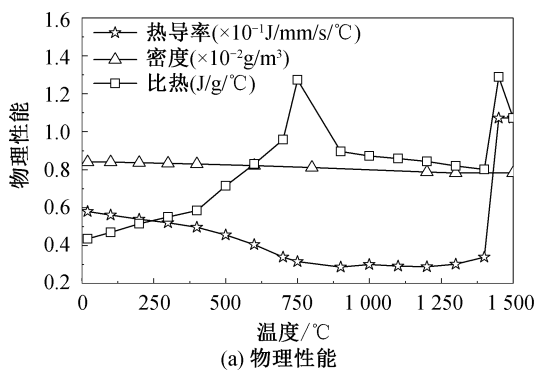


图5 有限元模型及边界条件

Fig. 5 Finite element model and boundary conditions

2.2 材料参数设置

在进行试件模型温度场分析之前,需要在软



(a) 物理性能

件中定义材料的物理及力学性能参数。Q345qD材料的热物理性能参数值^[15]如图6所示。当温度超出试验温度范围时,软件采用外推法和插值法来确定未定义温度处的参数值。本文将模型热对流交换系数设为 $0.015 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,热辐射交换系数设置为 0.85 ,空间温度设置为室温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时,忽略金属的相变影响,并假定焊缝处与母材有着相同的材料性能。

2.3 热源模型选择

热源模型的选择与参数设定对焊接过程的模拟结果影响显著。在焊接有限元数值模拟中,需要依据实际焊接情况选择合适的热源模型。例如对于熔深较浅的薄板焊接一般采用平面热源模型,对于有较大熔深焊缝的焊接过程,如厚板焊接、坡口焊、埋弧焊等则不宜采用平面热源模型,一般采用双椭球体热源模型。由于本文涉及焊接均为坡口焊,故选用双椭球体热源模型。

双椭球热源模型最早由Goldak等^[16]提出,如图7所示,该模型由前后两个 $1/4$ 椭球来模拟焊接热流密度的分布,双椭球体热源的形状参数有 a_1 、 a_2 、 b 和 c ,模型前后椭球长度不等是为了体现在焊接热源移动时,热源前端和后端不同的温度梯度分布,且由于该模型引入了考虑电弧对熔池深度影响的参数,克服了平面热源无法考虑熔深的缺陷。

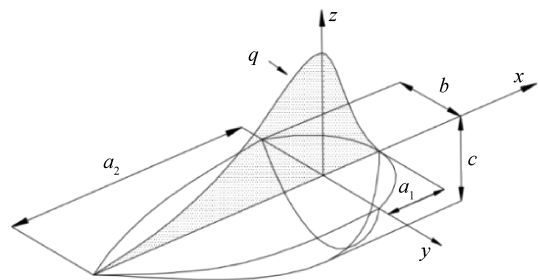
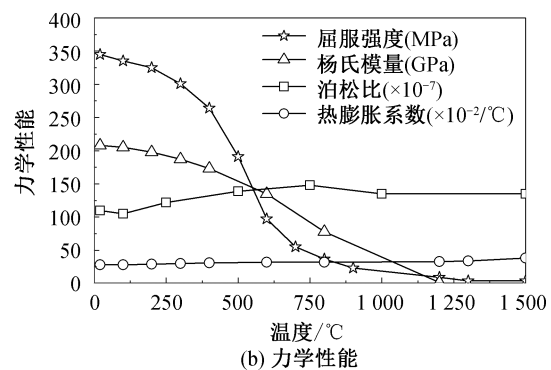


图7 双椭球热源模型

Fig. 7 Double ellipsoid heat source model



(b) 力学性能

图6 Q345qD材料性能参数

Fig. 6 Material performance parameters of Q345qD

椭球内前半部分的热源分布函数为

$$q_1(r) = \frac{6\sqrt{3}f_1UI\eta}{\pi^{3/2}a_1bc} \exp \left\{ -3 \left[\left(\frac{x}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

后半部分的热源分布函数为

$$q_2(r) = \frac{6\sqrt{3}f_2UI\eta}{\pi^{3/2}a_2bc} \exp \left\{ -3 \left[\left(\frac{x}{a_2} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

总的热流密度为

$$q(r) = q_1(r) + q_2(r) \quad (6)$$

式中: U 为焊接电压, V ; I 为焊接电流, A ; η 为焊接热效率; f_1, f_2 为前后椭球能量分配系数, 且有 $f_1 + f_2 = 1$ 。

3 数值模拟结果与试验对比

3.1 焊接温度场结果对比

将试验中制作的试件在对接焊缝横截面处进行切割, 把切割后获得的对接焊缝横截面打磨平整, 然后浸泡于 5% 的硝酸酒精溶液中进行金相腐蚀, 从而获得试验焊缝熔池横截面形状^[17]。

依据 Q345qD 钢材的熔点, 将模型中温度高于 1 500 °C 的部分定义为熔池。对于焊缝熔池边界的

验证, 由于各层焊缝之间的熔池边界不易分辨, 故以试件的对接焊缝打底焊及盖面焊为例, 将模拟所得的熔池形状与实际熔池形状进行对比, 如图 8 所示, 由图 8 可以看出, 有限元模型计算获得的熔池边界与实际的焊缝边界吻合程度较好, 证明所选取的热源模型及参数设置较为合理^[18-19]。

3.2 焊接应力场结果对比

为了表述方便, 将平行于对接焊缝方向的残余应力表示为纵向残余应力, 垂直于对接焊缝方向的残余应力表示为横向残余应力, 在各图表中残余拉应力为正值, 残余压应力为负值。图 9 为 U 肋加劲板对接试件上表面焊接残余应力场。

由图 9(a) 可以看出, 纵向残余应力主要为分布在对接焊缝周围的 300 MPa 左右的拉应力, 最大值为 393.3 MPa, 以及 U 肋角焊缝附近 200 MPa 左右的拉应力; 压应力主要分布在靠近 U 肋外侧的母材部分及 U 肋角焊缝的端部, 最大值为 346.7 MPa。由图 9(b) 可以看出, 横向残余应力主要为分布在 U 肋角焊缝周围的拉应力, 最大值为 411.6 MPa; 压应力主要分布在对接焊缝的端部, 最大值为 390.5 MPa。

图 10—图 12 给出了模拟结果中与试验对应各条路径上残余应力与实测值的对比情况, 由图 10—图 12 可以看出模拟结果与试验实测值分布

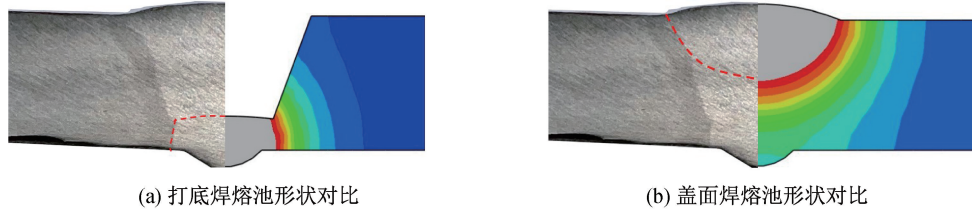


图 8 熔池形状对比

Fig. 8 Comparison of molten pool shape

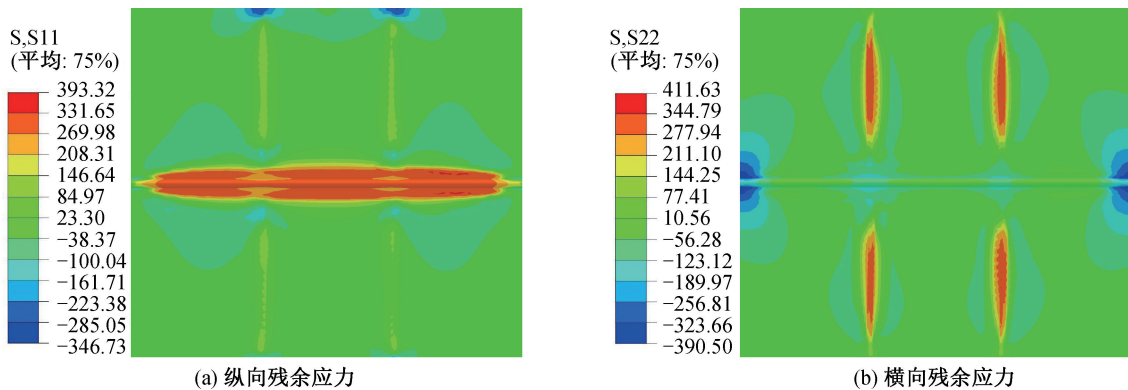


图 9 U 肋加劲板对接试件表面焊接残余应力场

Fig. 9 Welding residual stress field on the surface of U-rib stiffened plate butt specimen

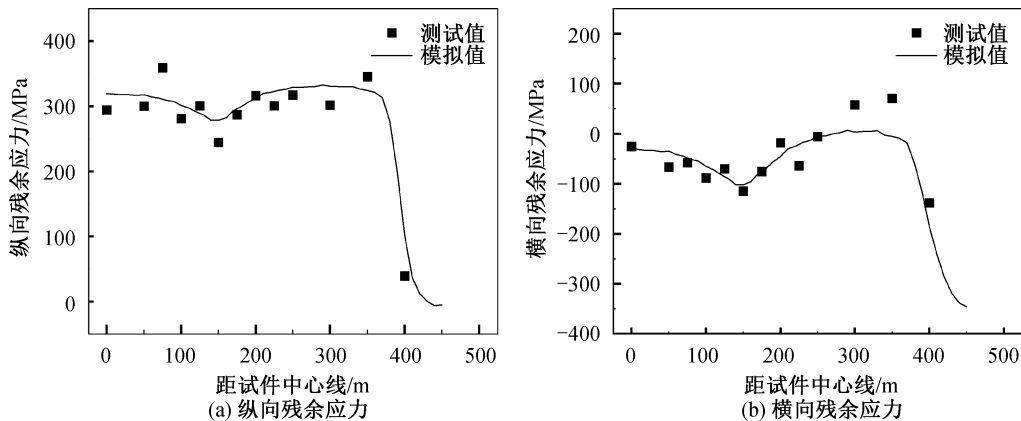


图 10 U1 路径焊接残余应力

Fig. 10 U1 path welding residual stress

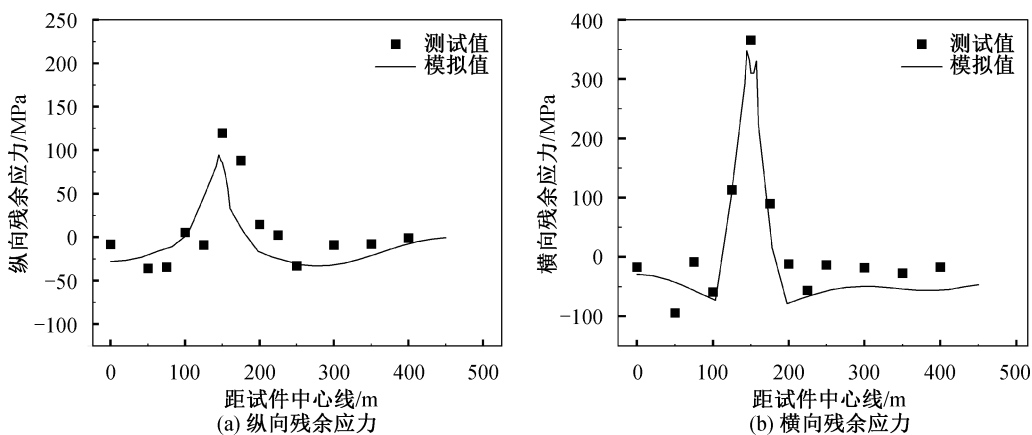


图 11 U2 路径焊接残余应力

Fig. 11 U2 path welding residual stress

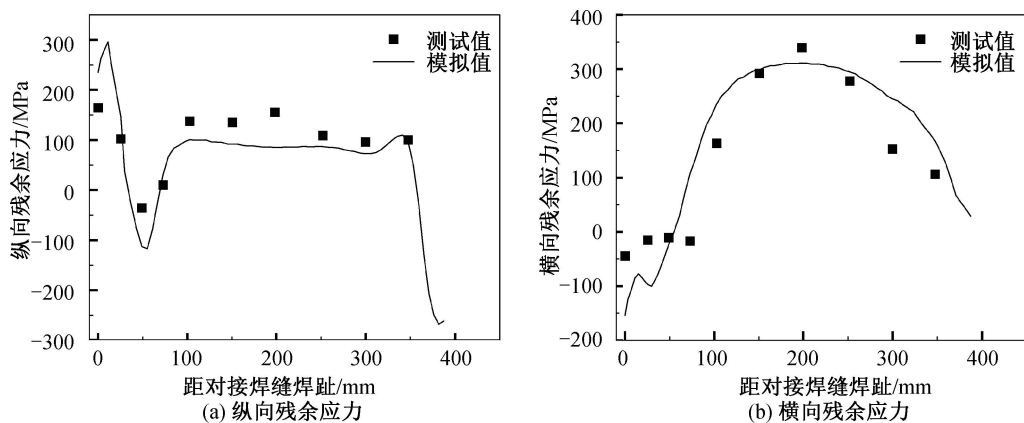


图 12 U3 路径焊接残余应力

Fig. 12 U3 path welding residual stress

趋势基本一致且数值大小吻合较好。由图 10(a)可以看出,U1 路径纵向残余应力整体表现为拉应力,在 U 肋角焊缝处略微减小,在距焊缝端部 50 mm 处减小至接近于 0。由图 10(b)可以看出,横向残余应力在 U1 路径表现为压应力,在 U 肋角焊缝处略微减小,在距焊缝端部 50 mm 处逐渐增

大。由图 11(a)可以看出,U2 路径纵向残余应力在远离 U 肋角焊缝处表现为较小的压应力,在 U 肋角焊缝处则存在 90 MPa 左右的拉应力。由图 11(b)可以看出,U2 路径横向残余应力分布与纵向残余应力大致相同,但在 U 肋角焊缝处横向残余应力大于纵向残余应力,横向残余应力存在

300 MPa 左右的拉应力。

由图 12(a) 可以看出,U3 路径纵向残余应力在靠近对接焊缝焊趾处波动较大,这是由于对接焊缝设置了过焊孔,U肋角焊缝与对接焊缝之间未连接。在距对接焊缝焊趾 100 mm 至 350 mm 范围内存在 100 MPa 左右的拉应力,随后拉应力迅速减小,并在试件边缘变为约 250 MPa 的压应力。由图 12(b) 可以看出,U3 路径横向残余应力先由压应力逐渐减小转变为拉应力,随后表现为先增大后减小的拉应力。

4 结论

1) U肋加劲板对接接头纵向残余应力主要表现为集中分布在对接焊缝及 U肋角焊缝附近的拉应力,以及在靠近 U肋外侧的母材部分及 U肋角焊缝端部的压应力。

2) U肋加劲板对接接头横向残余应力主要表现为集中分布在 U肋角焊缝的拉应力,以及在对接焊缝端部的压应力。

3) 数值模拟计算获得的结果与试验测试结果吻合较好,相关数据可为后续钢箱梁桥施工制作提供参考。

参考文献:

- [1] 马国伟. 钢箱梁分块拼装施工工艺[J]. 交通世界, 2022, 30(27): 60-62.
MA G W. Construction technology of segmental assembly for steel box girders [J]. TranspoWorld, 2022, 30(27): 60-62.
- [2] 顾颖. U肋加劲钢桥面板焊接残余应力与变形研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
GU Y. Research on welding residual stresses and distortions in steel bridge decks stiffened with U-shaped ribs [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [3] 周思廷. 全熔透 U肋加劲正交异性钢桥面板焊接残余应力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHOU S T. Research on welding residual stress of fully-permeated in steel bridge decks stiffened with U-shaped ribs [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [4] 肖雄. U肋加劲钢桥面板焊接残余应力研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
XIAO X. Study on welding residual stresses in steel bridge decks stiffened with U-shaped ribs [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.
- [5] 刘建. U肋加劲钢桥面板节段制造焊接有限元精细化分析与研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
LIU J. Fine analysis and research on welding finite element method for manufacturing segments of U-ribbed stiffened steel bridge panel [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [6] 张陕锋. 正交异性板扁平钢箱梁若干问题研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
ZHANG S F. Structure characteristics research of orthotropic deck flat steel box girders [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [7] 邹修兴. 正交异性钢桥面焊接应力数值模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
ZOU X X. The welding stress numerical simulation of orthotropic steel bridge deck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [8] 陈建桂. 开口肋加劲板焊接残余应力试验与数值模拟研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
CHEN J G. Experimental and numerical simulation study of welding residual stress in stiffened plate with open ribs [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [9] 杨松伟. 钢箱梁桥大节段制造线形的精准控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
YANG S W. Research on precise control of large-segment fabrication geometry of steel box girder bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [10] 陈利. 基于振动时效工艺的正交异性钢桥面板残余应力调控[J]. 河北水利电力学院学报, 2023, 33(4): 58-63.
CHEN L. Residual stress control of orthotropic steel bridge deck based on vibration stress relief technology [J]. Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, 2023, 33(4): 58-63.
- [11] 张壮南, 王元鸷, 田路. Q345B 钢焊接残余应力应变释放系数有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 393-398.
ZHANG Z N, WANG Y Z, TIAN L. Finite element analysis on strain release factors of welding residual stresses of Q345B steel [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 393-398.
- [12] 苗玉刚, 王林, 王子然, 等. DH36 高强度船板钢对接焊残余应力与变形数值模拟与试验分析[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(10): 104-111.
MIAO Y G, WANG L, WANG Z R, et al. Numerical simulation and experimental analysis of residual stress and deformation in DH36 high-strength ship plate steel butt welding [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(10): 104-111.
- [13] 邹永丰. 桥钢厚板焊接残余应力数值模拟及试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

- ZOU Y F. Numerical simulation and experimental research on welding residual stress of thick plate for steel bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 周佳惠, 张雪彪. T型焊接结构多道焊的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(19): 109-113.
- ZHOU J H, ZHANG X B. Numerical simulation study on multi-pass welding of T-type welding structure[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(19): 109-113.
- [15] 强斌, 李亚东, 顾颖, 等. 钢桥对接焊缝残余应力及变形场数值分析与试验验证[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 134-139.
- QIANG B, LI Y D, GU Y, et al. Numerical analysis and experimental verification on welding residual stress and deformation of butt weld plate for steel bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 134-139.
- [16] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299.
- [17] 刘未钦. 桥梁耐候钢T接十字交叉焊缝残余应力分布及其对疲劳性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- LIU W Q. Residual stress distribution of T-joint cross weld of bridge weathering steel and its effect on fatigue performance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [18] 巨航瑞. 钢桥不等厚钢板对接焊缝焊接残余应力研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- JU H R. Research on welding residual stresses in butt welds of steel plates with different thicknesses for steel bridges[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.
- [19] 李自林, 詹阳, 谢新. 大跨径钢结构箱梁桥铺管法热力融雪研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 17-20.
- LI Z L, ZHAN Y, XIE X. Research of hydronic sowing on pipe laying of long-span steel box girder bridge[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2013, 30(3): 17-20.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第8页)
- [19] 石晓阳, 郭子琦, 夏明, 等. 复合地层土压平衡盾构刀盘掘进参数[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3956-3965.
- SHI X Y, GUO Z Q, XIA M, et al. Tunnelling parameters of cutter head of earth pressure balance shield machine in composite strata[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3956-3965.
- [20] YU H, CHEN L, PENG K. Adaptability of a reinforced concrete diaphragm wall cut by disc cutter[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 16154.
- [21] 包扬. 超深地下连续墙工程施工技术及管理措施研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- BAO Y. Study on construction technology and management measures of super deep underground continuous wall project[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [22] 苏翠侠. 盾构刀盘掘进载荷的三维有限元仿真分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- SU C X. 3-D FEM simulation analysis of excavation load on cutterhead in shield tunneling machine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [23] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005(5): 69-74.
- CHEN G, CHEN Z F, TAO J L, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005(5): 69-74.
- [24] HAN M, CAI Z, QU C, et al. Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 286-298.
- (责任编辑 周雪梅)