

# 波形钢腹板梁 T 形接头焊接仿真分析与试验研究

冀伟<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为了解决波形钢腹板梁焊接温度场和残余应力分布尚不明确的问题,本文基于 Simufact Welding 软件建立三维有限元模型,对其 T 形接头的焊接温度场和残余应力进行了预测,并对模拟结果进行了试验验证。波形钢腹板梁的焊接温度场分布与熔池中心距离有关,距离熔池中心越近,温度梯度越大;焊接残余应力以纵向残余拉应力为主,而横向残余应力的应力水平相对较低,拉压应力共存;焊接速度和底板厚度的改变只会影响残余应力的峰值大小,不会影响残余应力的分布规律。结果表明:数值模拟结果和试验实测值吻合良好,数值模拟可靠。

**关键词:**桥梁工程; 波形钢腹板梁; T 形接头; 焊接温度场; 焊接残余应力; 参数分析; 焊接速度; 腹板厚度

DOI: 10.11990/jheu.202201024

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240131.0928.006>

中图分类号: TG404 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2024)04-0691-08

## Simulation analysis and experimental research on T-joint welding of corrugated steel web girders

Ji Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Peng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To study the distribution of the welding temperature field and residual stress of corrugated steel web girders, a 3D finite element model is constructed using Simufact Welding software. The welding temperature field and residual stress of the model's T-shaped joint are predicted, and the simulation results are verified by experiments. The distribution of the welding temperature field of the corrugated steel web beam is related to the center distance of the molten pool, and the closer the center of the molten pool, the greater the temperature gradient. The longitudinal residual tensile stress primarily dominates the welding residual stress. The horizontal residual stress is relatively low, showing a blend of tensile and compressive stresses. Changes in welding speed and base plate thickness do not affect the distribution pattern of residual stress but only the peak value of stress. The numerical simulation results align well with the experimental data, proving the reliability of the numerical simulation.

**Keywords:** bridge engineering; corrugated steel web girder; T-joint; welding temperature field; welding residual stress; parameter analysis; welding speed; web thickness

波形钢腹板组合箱梁具有自重轻、抗震性能好、跨越能力强、造型美观等优点,在桥梁建设中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。波形钢腹板与底板通过焊接的方式进行连接,其焊接过程中会产生焊接残余应力和焊接残余变形。焊接残余应力在环境

温度和外载荷的作用下容易引起构件发生失稳、甚至断裂失效。因此,研究焊接残余应力和焊接残余变形的对服役期间桥梁的安全评估具有重要意义<sup>[3]</sup>。近年来,国内外学者针对钢结构的焊接已经展开了一系列的研究。于海丰等<sup>[4]</sup>对小截面焊接工字钢的残余应力进行了试验研究,并分析了板件宽厚比对残余应力的影响;崔闯等<sup>[5]</sup>采用数值模拟的方法对港珠澳大桥正交异性钢桥面板焊接全过程和残余应力的分布特性进行了研究,发现板厚方向焊接残余应力符合其正弦分布;

收稿日期: 2022-01-10.

网络出版日期: 2024-01-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168019); 中央高校基本科研项目(541109030099); 甘肃省重点研发计划-工业类项目(23YFGA0043).

作者简介: 冀伟,男,教授,博士生导师.

通信作者: 冀伟, E-mail: jiwei@hnu.edu.cn.

强伟等<sup>[6]</sup>通过有限元法研究了铝镁合金 T 形接头双热源协同焊接温度场、应力场及其变形; Wang 等<sup>[7]</sup>利用切片法和钻孔法研究了高强钢箱梁的残余应力分布规律; 耿旭阳等<sup>[8]</sup>利用有限元软件 ProCAST 对某跨海大桥钢桥的顶板和 U 肋间的焊接残余应力进行了研究; 刘国宁等<sup>[9]</sup>利用 Simufact Welding 有限元软件分析了不同焊接顺序对 T 型接头焊接温度场、应变场、应力场的影响, 得出了不同焊接顺序的优劣排序; 唐琪等<sup>[10]</sup>结合固有相变法和有限元法研究了不同焊接约束对地铁牵引梁焊接变形的影响; 胡效东等<sup>[11]</sup>利用 ABAQUS 有限元软件对 304/Q345R 复合板的焊接过程进行了数值模拟, 分析焊接过程中复合板的复杂热力学行为。虽然对于各种钢构件焊接的研究较多, 但是所研究的构件大都是直线样式的构件, 且所研究的都是缩尺比例模型, 而通过试验和数值模拟结合研究真实尺寸曲线样式构件焊接少。由于其较复杂的几何构造和独有的“手风琴效应”, 波形钢腹板的残余应力分布模式势必与传统直线样式的构件不同; 且焊接作业对波形钢腹板弯折角处的应力集中现象的影响也不明确。

本文通过焊接仿真软件 Simufact Welding 对波形钢腹板 T 形接头的焊接过程进行模拟, 并通过试验来验证数值模拟的正确性, 从而得到波形钢腹板 T 形接头复杂的热力学行为。

## 1 波形钢腹板梁焊接数学模型

### 1.1 热传导理论及热源选定

金属材料焊接是一个将局部材料快速加热至高温, 随后快速冷却的过程。随着热源的移动, 整个焊件的温度随时间和空间急剧变化, 材料的热物理性能也随温度剧烈变化, 同时还存在熔化和相变时的潜热现象。因此, 焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题<sup>[12]</sup>。在热分析中, 有限元公式的瞬态非线性传热分析控制方程<sup>[13]</sup>为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $k_x$ 、 $k_y$  和  $k_z$  为  $x$ 、 $y$  和  $z$  中的导热系数;  $T$  为当前温度;  $Q$  为发热量;  $\rho$  为密度;  $c$  为比热容。

焊接温度场和残余应力准确计算的基础为选取合适的热源模型, 本文结合焊件的尺寸和焊接的类型选取 Goldak 所提出的移动双椭球热源模型<sup>[14]</sup>进行波形钢腹板梁的焊接数值模拟, 作用于工件上的体热源沿轴分成前、后 2 个部分, 其几何形状如图 1 所示, 其热源分布函数为:

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1q_0}{bda_1\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{d^2}\right) \quad (2)$$

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2q_0}{bda_2\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{d^2}\right) \quad (3)$$

式中:  $q_0$  为热量输入值, 且  $q_0 = \eta UI$  ( $U$  为电弧电压;  $I$  为电弧电流;  $\eta$  为热效率);  $f_1$ 、 $f_2$  为热流密度分布系数,  $f_1 + f_2 = 2$ ;  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b$ 、 $d$  为热源形状参数, 且一般情况下后轴长  $a_2$  为前轴长  $a_1$  的 2~4 倍。

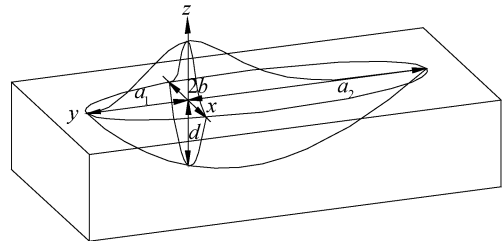


图 1 双椭球热源模型

Fig. 1 Double ellipsoid heat source model

### 1.2 应力-应变数学模型

采用 Von Mises 屈服准则、随温度变化的力学性能和线性运动硬化准则, 考虑与速率无关的弹塑性本构方程<sup>[15]</sup>, 应力应变关系的增量为:

$$\{d\sigma\} = D_d \{d\varepsilon\} - CdT \quad (4)$$

式中:  $d\sigma$  为应力增量;  $d\varepsilon$  为应变增量;  $dT$  为温度增量; 而  $D_d$  由  $D_d^e$  和  $D_d^p$  组成,  $D_d^e$  为弹性刚度矩阵,  $D_d^p$  为塑性刚度矩阵;  $C$  为反映因材料物理和机械应力变化参数, 随温度变化其材料物理和机械性能发生变化。

## 2 有限元模型的建立

图 2 为波形钢腹板 T 形接头具体尺寸图, 该型号钢梁由上下底板和波形腹板所组成, 每个波段长 1 200 mm, 为分析研究方便, 本文选取一个波段, 且不包含上底板的钢梁进行焊接温度场的研究。首先, 利用 SolidWorks2016 软件进行实体模型建立, 该模型由腹板和底板构成。然后, 在 HyperMesh 软件中进行实体网格划分, 为兼顾计算精度与效率, 在焊缝及其附近采用较细密的网格; 在远离焊缝的区域, 采用较为稀疏的网格, 整个模型均采用六面体网格划分, 并将网格尺寸设置为 10 mm。最后, 在焊接仿真软件 Simufact Welding 中进行焊接参数配置和焊接过程模拟, 在此过程为了提高数值计算的精度, 在温度场和应力场计算时利用该软件的优势, 即网格不需要节点匹配和热源附近网格的自动细化加密功能, 对其热源区域的网格进行细化等级为 2 的加密,

故此热源区域网格尺寸为 2.5 mm。焊接采用 CO<sub>2</sub> 气体保护电弧焊,焊件材料为 Q345D,对应软件中的材料 S355J2G3,其相关热学参数曲线如图 3 所示。

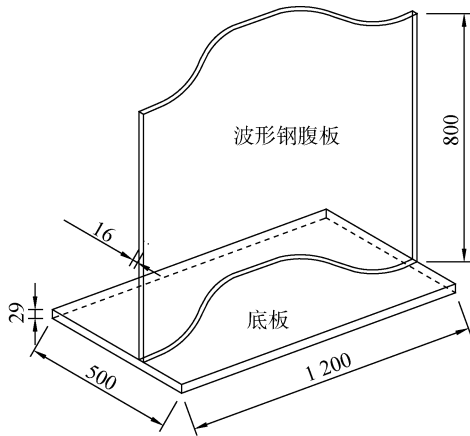


图 2 焊件尺寸

Fig. 2 Geometric dimension of weldment

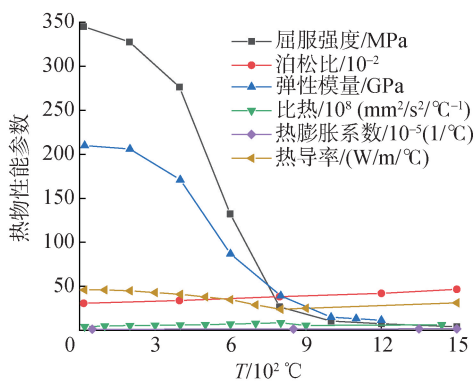


图 3 S355J2G3 热学参数变化曲线

Fig. 3 S355J2G3 thermal parameter change curves with temperature

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 温度场分析

Simufact Welding 软件的焊接监控器能够对其

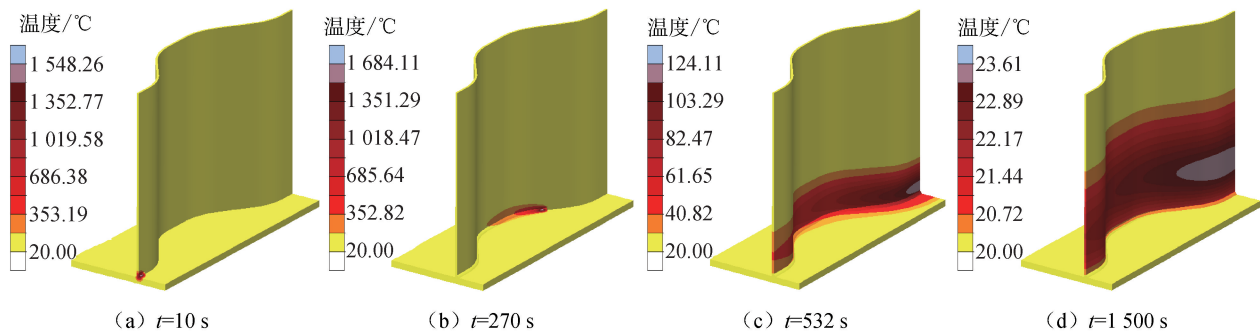


图 5 不同时刻试件温度场分布

Fig. 5 Temperature field distribution of specimens at different time

为了更加直观地描述波形钢腹板梁焊接的温度场分布,沿着焊缝方向在波形钢腹板梁 1/2 横截面处提取跟踪点的温度历程曲线如图 6 所示,图中小

焊件的焊接情况进行实时监控,对焊接过程中出现的可能导致焊件连接不良的因素进行及时的调整。得到其波形钢腹板梁焊接过程的熔池形貌如图 4 所示,焊缝的中心温度已经超过材料的熔点 1 500 °C,这说明焊接过程具有足够的能量输入,焊缝金属填料可以全部熔化和焊缝熔深得到保证,波形钢腹板梁的焊接质量高。

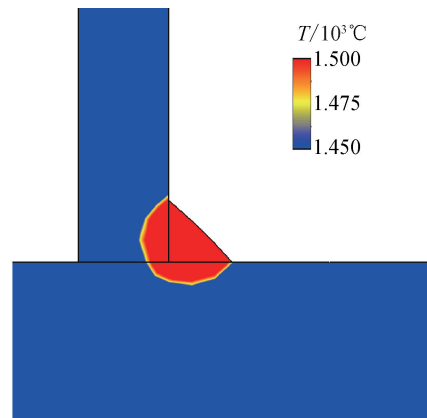


图 4 焊接过程熔池形貌及温度场云图

Fig. 4 The morphology of the molten pool and the cloud map of the temperature field in the welding process

焊接过程中,金属焊缝填料的生成采用生死单元技术来模拟。本文提取波形钢腹板梁在 10、270、532 和 1 500 s 时刻的温度场分布云图如图 5 所示。从图 5 可以看出,焊件在起弧阶段的温度场是一个瞬态温度场,随着时间的推移,焊接温度场变成了一个准稳态温度场,形状为不规则的椭圆形且熔池温度高达 1 684.11 °C。焊接过程耗时 132 s,此后的 1 368 s 为焊件的冷却阶段。在冷却阶段,由于焊接热源的撤除,焊缝中心及附近的温度快速下降,所表现的温度场呈梯度递减分布,且在波形钢腹板的辐射范围急剧增大。当冷却到 1 500 s 时,焊件整体温度趋于室温,此时,波形钢腹板梁的整个焊接过程结束。

图表示各温度跟踪点的具体位置。可以看出,波形钢腹板和底板焊趾位置处的跟踪点热循环历程类似,峰值温度都出现在焊缝位置处,且峰值温度都超

过了材料的熔点,当离焊缝一定距离后,温度历程曲线趋于重合。距离焊缝越近的跟踪点温度变化越剧烈,而离焊缝越远温度变化则越为缓和,这说明距离焊缝越近热传递越多,温度越高。

过了材料的熔点,当离焊缝一定距离后,温度历程曲线趋于重合。距离焊缝越近的跟踪点温度变化越剧烈,而离焊缝越远温度变化则越为缓和,这说明距离焊缝越近热传递越多,温度越高。

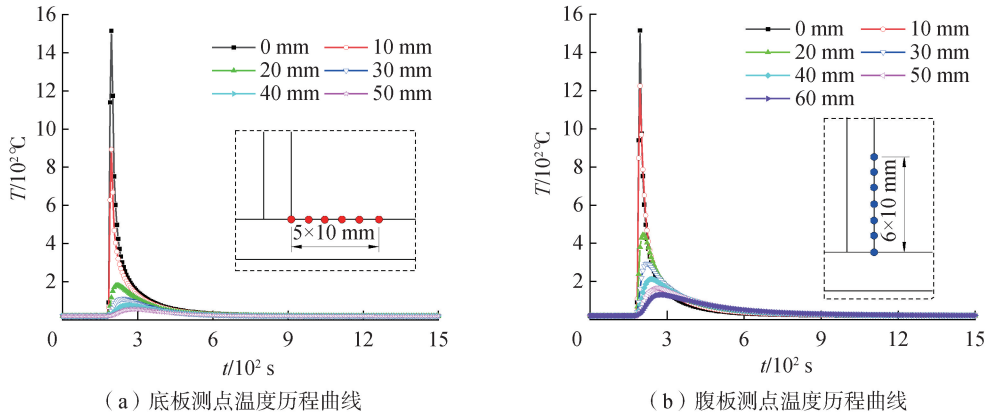


图 6 温度历程曲线

Fig. 6 Temperature history curves

为验证数值模拟的可靠性,利用红外测温枪采集波形钢腹板梁焊接过程和冷却阶段温控点的温度。通过 Simufact Welding 软件自带的测量和数值提取工具提取和试验阶段相同位置的温控点的温度值,将两者进行比较以验证数值模拟的正确性。温控点的具体布置如图 7 所示,温控点温度对比如图 8 所示。焊接过程中,温控点温度每 5 min 中采集一次,冷却过程中 30 min 采集一次,直至温度冷却至室温,试验结束。在此过程中,为了试验操作的便捷性,仅对 1200 型波形钢腹板梁的 1/2 横截面处的测点进行温度值的采集与对比。

却阶段要缓于其焊接过程,腹板的温度值跌幅大于其底板,这是由于底板的厚度大于波形钢腹板的厚度,热流量腹板大于其底板而导致。热流量的增大会导致焊接变形的产生,为此,在焊接时为防止焊接变形太大而导致构件失稳,要特别注意控制线能量输入的大小。

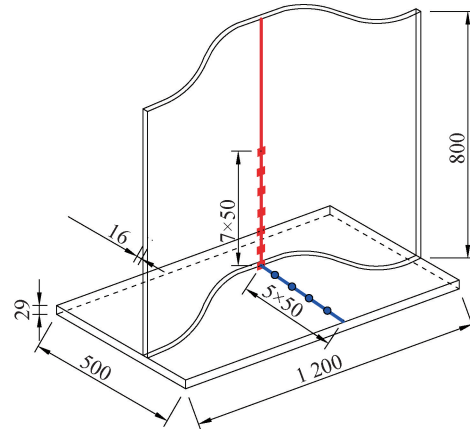


图 7 焊接过程温控点布置

Fig. 7 Layout of temperature control points in welding process

从图 8 焊接过程测点温度对比图可以看出,峰值温度均出现在焊缝位置处,且随着距离焊缝中心位置越远温度值越低。焊接过程中温度测点的温度实测值与模拟值最大相差 2.35 °C,冷却过程测点温度实测值和模拟值最大相差为 2.45 °C,计算 2 阶段的各点相对误差后发现也都小于 5%,故此说明试验所测结果和模拟所得结果吻合良好,证明了数值模拟的正确性。除此之外,还可以看出,焊件温度值的跌幅冷

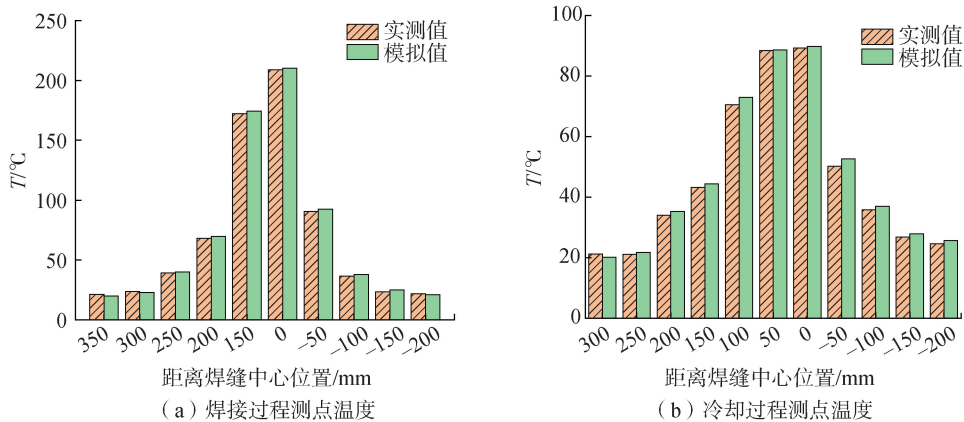


图 8 温控点温度对比

Fig. 8 Temperature comparisons of temperature control points

### 3.2 应力场分析

焊接材料在焊接过程中会产生材料硬化,如果在计算时不考虑该现象,则可能会使焊接残余应力的结果与实际结果不相符合,从而导致后续结构力学性能分析的结果不合理。为此,本文数值模拟过程中考虑了材料的加工硬化效应<sup>[16]</sup>。图 9 为波形钢腹板梁焊接冷却完成之后所得的等效应力云图,从图中可以清楚地看出应力等效应力最大值出现在焊缝中心线上,最大值为 370.10 MPa,最小值为 0.03 MPa。

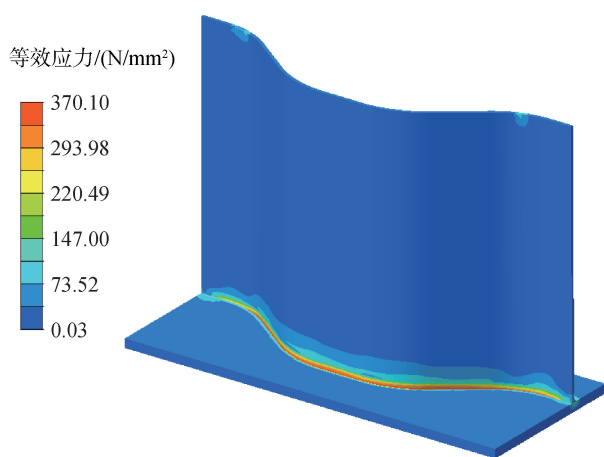


图 9 等效应力云图

Fig. 9 Equivalent stress nephogram

为方便对波形钢腹板梁 T 型接头的残余应力进行分析,选取了图 10 所示的 2 条路径进行研究。图 11 为波形钢腹板梁焊缝中心线上(路径  $L_1$ )残余应力的分布曲线。从图 11 可以发现,残余应力呈峰谷形式分布,纵向残余应力以拉应力为主,最大值 371.4 MPa,超过材料屈服强度,这是由于在模拟过程中材料的加工硬化;横向残余应力拉压应力共存,最大拉应力为 189.0 MPa,最大压应力为 -134.4 MPa。

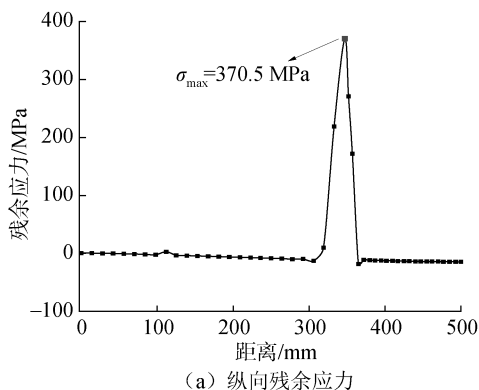


图 12 路径  $L_2$  焊接残余应力分布

Fig. 12 Residual stress distributions of path  $L_2$  welding

为了进一步验证数值模拟的正确性,通过在焊件表面粘贴应变片,利用 DH3816N 应变测试仪和电脑采集波形钢腹板梁焊接所产生的应变,将计算得

除此之外,可以发现,焊件在焊缝的始末两端残余应力发生了大的突变,前者急剧增大,后者急剧减小。这是由于焊件在焊接过程中电弧的引发和收缩引起热源的突然输入和输出所引起。

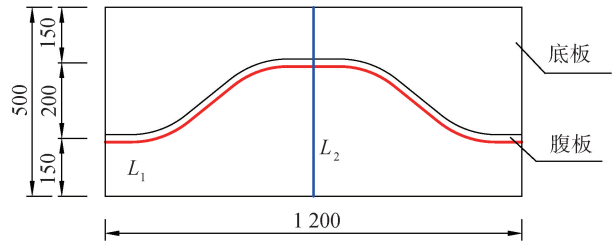


图 10 残余应力提取路径

Fig. 10 Residual stress extraction path

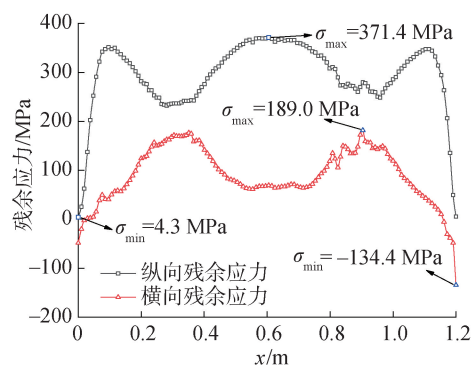
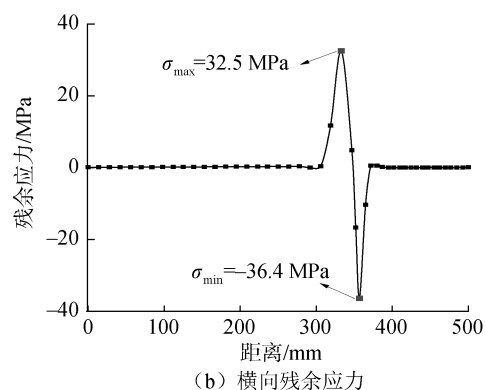


图 11 路径  $L_1$  焊接残余应力分布

Fig. 11 Distribution of residual stress in path  $L_1$  welding

图 12 为波形钢腹板梁垂直于焊缝方向(路径  $L_2$ )残余应力的分布曲线。从图 12 可以看出,波形钢腹板梁纵向和横向残余应力的峰值均出现在焊缝位置处,纵向残余拉应力最大值为 370.5 MPa,超过材料屈服强度,其原为数值模拟过程中考虑了材料的加工硬化;横向残余拉、压应力最大值分别为 32.5 和 -36.4 MPa,而焊缝两端残余应力分布平缓,数值趋近于 0 MPa。



出焊接残余应力与数值模拟所得进行比较。

应变花的粘贴位置具体如图 13 所示。具体表现为:一个波长 1 200 mm 的波形钢腹板试件从左往

右划分为 5 组标识线,间隔 300 mm。考虑到波形钢腹板与底板进行焊接时焊道的温度过高而烧坏应变片,故而从波形钢腹板最低端往上 150 mm 处开始设置应变片的位置,从 150 mm 向上每隔 50 mm 设置一个控制点,每个标示线 5 个,整个试件共设置 25 个控制点。底板的控制点从底板与腹板相交到底板边缘每个 50 mm 设置一个。为了试验过程的简单性,仅将 1 200 型波形钢腹板梁最中间腹板上的 5 个残余应力值与数值模拟的应力值进行对比。

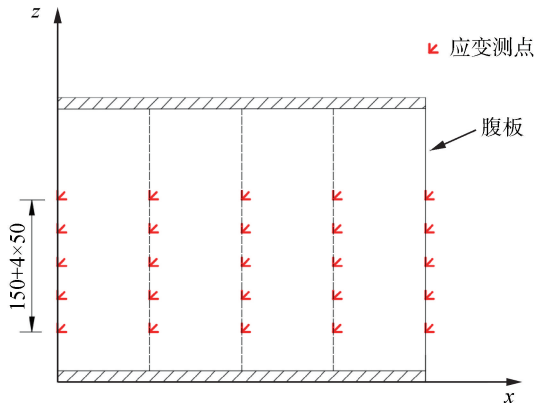


图 13 应变花粘贴位置

Fig. 13 Sticking positions of strain rosette

图 14 为波形钢腹板梁试验所得残余应力与数值模拟的残余应力的对比图,从图可以看出,波形钢腹板的纵向、横向残余应力的试验值与模拟值之间均有一定的偏差,分析原因是因为焊件在焊接过程中焊缝的温度过高,使得应变花的工作性能下降,从而导致试验结果精度下降。虽然存在一定的误差,但总的来看,波形钢腹板梁的腹板上的残余应力变

化趋势大致相同、数值基本吻合,可以证明数值模拟的正确性。

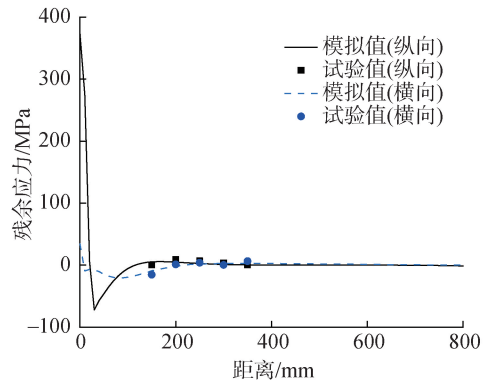


图 14 残余应力对比

Fig. 14 Residual stresses comparison

### 4 焊速及腹板厚度参数分析

#### 4.1 焊速对残余应力的影响

由于焊接速度会直接影响焊件焊接过程的能量输入,而能量输入的大小则会直接影响焊接温度场和残余应力的分布与大小,本文将利用控制变量法对不同焊接速度下波形钢腹板梁的焊接残余应力进行对比分析。通过 3.2 节的分析可知,波形钢腹板梁在 1/2 底板处的焊接残余应力最大,为此,本文针对该部位的残余应力分析研究。在此过程中,焊接速度分别设定为 8、10 和 12 mm/s,其中 10 mm/s 为试验实测速度。不同焊接速度在波形钢腹板梁 1/2 底板处的焊接残余应力分布如图 15 所示。

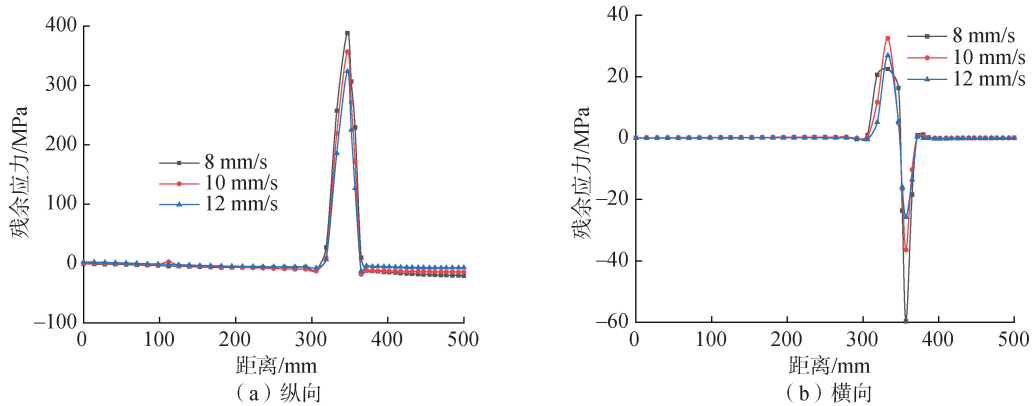


图 15 焊接速度对残余应力的影响

Fig. 15 Residual stresses of weldment corresponding to different welding speeds

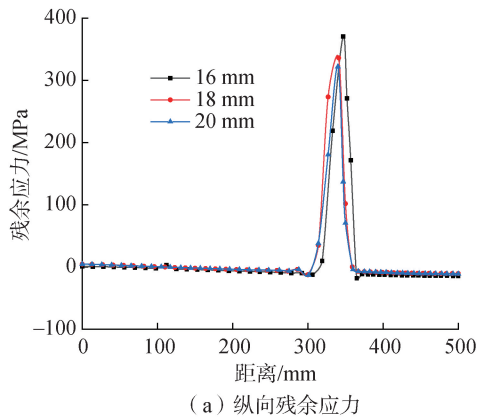
从图 15 可以看出,不同焊接速度所对应的纵向残余应力和横向残余应力的分布规律基本相同,焊接速度所直接影响残余应力的峰值。数值上,当焊接速度从 8 mm/s 增大到 10 mm/s 时,纵向和横向残余应力的峰值分别增加了 16.7% 和 56.8%;规律上,残余应力的峰值与焊接速度呈反比关系。除此

之外,还可以发现横向残余应力相较于纵向残余应力受焊接速度的影响较大。为此,在保证焊接质量的前提下,应尽可能的提高焊接速度来减小所产生焊接残余应力。

#### 4.2 腹板厚度对残余应力的影响

为了研究腹板厚度对波形钢腹板梁焊接残余应

力影响,利用 Simufact Welding 软件分别对腹板厚度为 16、18 和 20 mm 的波形钢腹板梁进行了焊接模拟,得到了波形钢腹板梁 1/2 底板处的焊接残余应力



力分布如图 16 所示。其中 16 mm 为试验梁的实测数据,且除腹板的厚度以外,其余各尺寸、参数均相同。

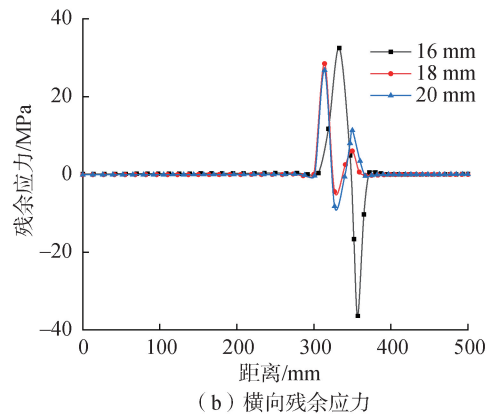


图 16 底板厚度对残余应力的影响

Fig. 16 Residual stress of weldment corresponding to different bottom plate thickness

从图 16 可以看出,焊件 1/2 底板处纵向残余应力随着波形钢腹板厚度的增加残余应力峰值有明显地减小,但其总的分布规律基本相同;从图 16(b)可以看出,随着腹板厚度的增加焊件的横向残余应力峰值大小的变化与其纵向残余应力一致,但应力的分布规律发生了大的变化。在焊缝附近,腹板厚 16 mm 的焊件横向残余应力状态为拉-压,而腹板为 18 和 20 mm 时所得的残余应力状态为拉-压-拉。而远离焊缝的部位,残余应力几乎不受腹板厚度的影响。为此,在工程实际中,为了使波形钢腹板梁的焊接残余应力变小和受力状态更合理,应尽可能的增大腹板的厚度。

的增加而减小,其纵向残余应力分布规律不受底板厚度的影响,横向残余应力则反之。在工程实际中,为了使波形钢腹板梁的焊接残余应力变小和受力状态更合理,应适当的增大腹板的厚度。

## 5 结论

## 参考文献:

1) 波形钢腹板梁在焊接过程中,焊缝区域距离熔池中心越近,焊接温度场变化越快,温度也越高,焊缝任意位置总的温度变化规律基本一致,所得焊接热影响区分布为不规则的封闭椭圆形。焊后冷却时,焊缝区域温度迅速降低,温度场范围分布越来越大。

[1] JIANG Ruijuan, KWONG AU F T, XIAO Yufeng. Prestressed concrete girder bridges with corrugated steel webs: review[J]. Journal of structural engineering, 2015, 141(2): 123-142.

[2] 樊健生, 刘晓刚, 聂建国, 等. 波形钢腹板组合刚构桥墩-梁结合部受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 89-97.

FAN Jiansheng, LIU Xiaogang, NIE Jianguo, et al. Experimental study on mechanical behavior of pier-beam junction of composite rigid frame bridge with corrugated steel webs[J]. China civil engineering journal, 2014, 47(8): 89-97.

[3] 郭政伟, 龙伟民, 王博, 等. 焊接残余应力调控技术的研究与应用进展[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 148-154.

GUO Zhengwei, LONG Weimin, WANG Bo, et al. Progresses on research and application of welding residual stress regulation technologies[J]. Materials reports, 2023, 37(2): 148-154.

[4] 于海丰, 周建伟, 张岩, 等. 小截面焊接工字钢残余应力分布试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(S1): 388-392, 398.

YU Haifeng, ZHOU Jianwei, ZHANG Yan, et al. Experimental study on residual stresses distribution on small welded I-shaped section[J]. Journal of building structures, 2016, 37(S1): 388-392, 398.

[5] 崔闯, 卜一之, 李俊, 等. 钢箱梁面板与 U 肋焊接残余应力的分布特性[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 260-265.

CUI Chuang, BU Yizhi, LI Jun, et al. Distribution characteristics of welding residual stress at U deck-to-rib connection detail of steel box girder[J]. Journal of Southwest

2) 不论垂直还是平行于焊缝的残余应力均以纵向残余拉应力为主,残余应力离焊缝越近数值越大,最大值均出现在焊缝的中部,且都超过了材料的屈服强度。横向残余应力的应力水平相对较低,拉压应力共存,离焊缝位置越远,应力变化越稳定。

3) 波形钢腹板梁焊接残余应力的分布规律几乎不受焊接速度的影响,但残余应力的峰值受焊接速度影响较大。因此,在保证焊接质量的前提下,应尽可能的提高焊接速度来减小所产生焊接残余应力。

4) 波形钢腹板梁残余应力的峰值随底板厚度

- Jiaotong University, 2018, 53(2): 260–265.
- [6] 强伟, 路永新, 袁银辉, 等. T 形接头冷丝填充双热源协同焊接数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2021, 29(5): 57–62.
- QIANG Wei, LU Yongxin, YUAN Yinhui, et al. Numerical simulation of T-joint welding with cold wire filling and double heat sources[J]. Materials science and technology, 2021, 29(5): 57–62.
- [7] WANG Yanbo, LI Guoqiang, CHEN Suwen. The assessment of residual stresses in welded high strength steel box sections [J]. Journal of constructional steel research, 2012, 76: 93–99.
- [8] 耿旭阳, 杨爱丽. 钢桥面板 U 肋焊接处残余应力影响因素[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(1): 56–60.
- GENG Xuyang, YANG Aili. Analysis on influence factors of residual stress at the welded joint of steel bridge deck U-rib [J]. Ordnance material science and engineering, 2022, 45(1): 56–60.
- [9] 刘国宁, 李楠楠, 宋晓辉, 等. 焊接顺序对 T 型接头焊接温度场、应变场和应力场的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(13): 142–147.
- LIU Guoning, LI Nannan, SONG Xiaohui, et al. Influence of welding sequence on temperature, strain and stress fields of T type welding joint[J]. Hot working technology, 2019, 48(13): 142–147.
- [10] 唐琪, 陈鹏, 陈静青, 等. 基于 SYSWELD 的激光复合焊焊接变形数值模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 32–36, 162.
- TANG Qi, CHEN Peng, CHEN Jingqing, et al. Numerical simulation of welding deformation in laser hybrid welding based on SYSWELD [J]. Transactions of the China welding institution, 2019, 40(3): 32–36, 162.
- [11] 胡效东, 王吉涛, 杨熠成, 等. 304/Q345R 复合板焊接接头微观组织及残余应力[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 39–45, 99.
- HU Xiaodong, WANG Jitao, YANG Yicheng, et al. Microstructure investigation and residual stress numerical simulation on welded joint of 304/Q345R composite plate [J]. Transactions of the China welding institution, 2020, 41(7): 39–45, 99.
- [12] 马思群, 袁永文, 冯良波, 等. 焊接速度对铝合金多道焊焊接残余应力影响研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(1): 16–21.
- MA Siqun, YUAN Yongwen, FENG Liangbo, et al. Research on effect of welding speed on aluminium alloy multi-pass welding residual stress [J]. Journal of the China railway society, 2014, 36(1): 16–21.
- [13] PERIĆ M, TONKOVIĆ Z, RODIĆ A, et al. Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld [J]. Materials & design, 2014, 53: 1052–1063.
- [14] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical transactions B, 1984, 15(2): 299–305.
- [15] CHANG K H, LEE C H. Finite element analysis of the residual stresses in T-joint fillet welds made of similar and dissimilar steels [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2009, 41(3): 250–258.
- [16] 薄纯瑞, 张晓飞, 李良碧, 等. 考虑材料硬化模型的对焊平板残余应力研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(9): 12–17.
- BO Chunrui, ZHANG Xiaofei, LI Liangbi, et al. Study on the residual stress of butt welding plate with material hardening model considered [J]. Ship science and technology, 2022, 44(9): 12–17.

## 本文引用格式:

冀伟, 张鹏. 波形钢腹板梁 T 形接头焊接仿真分析与试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(4): 691–698.

Ji Wei, ZHANG Peng. Simulation analysis and experimental research on T-joint welding of corrugated steel web girders [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 691–698.