

基于热弹塑性有限元法的双腹加筋板 焊接顺序研究*

崔虎威^{1,2,3}, 朱兴华³, 张 朋⁴

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400041; 2. 重庆高新开发建设投资集团有限公司, 重庆 401329; 3. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074;
4. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘 要: 为进一步研究双腹加筋板不同焊接顺序下残余应力和变形的分布规律, 基于热弹塑性有限元法, 采用有限元软件 Abaqus 对双腹加筋板进行了焊接数值模拟, 分析了双腹加筋板不同焊接顺序下残余应力和变形的分布规律。分别采用壳单元和实体单元对双腹加筋板远离焊缝区及焊缝区建模, 以提高计算效率, 并建立了壳单元与实体单元自由度之间的线性约束。计算比较了双腹板同步焊接与连续焊接下的加筋板焊接残余应力与变形, 共计 17 种焊接顺序。结果表明: 相比于连续焊接, 双腹加筋板采用同步焊接产生的残余应力与角变形较小, 双腹加筋板同步焊接角变形的幅值比连续焊接角变形幅值减小了 47.1%。

关键词: 热弹塑性有限元法; 双腹加筋板; 焊接变形; 残余应力

中图分类号: TG407

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.05.004

Research on Welding Sequences of Double Web Stiffened Plates based on Thermal Elastic-plastic Finite Element Method

CUI Huwei^{1,2,3}, ZHU Xinghua³, ZHANG Peng⁴

(1. China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400041, China; 2. Chongqing High-tech Development and Construction Investment Group Co., Ltd, Chongqing 401329, China; 3. School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to understand the effect of welding sequence on the residual stress and deformation of the double web stiffened plate, based on the thermal elastic-plastic finite element method, the finite element software Abaqus was used to simulate the welding of the double web stiffened plate, and the effect of welding sequence on the residual stress and deformation of the double web stiffened plate was analyzed. Shell element and solid element were used respectively to model the distance from the weld zone and weld zone of the stiffened plate to improve the computational efficiency, and the linear constraint between the freedom of shell element and solid element was established. The welding residual stress and deformation of the stiffened plate under synchronous welding of double web and continuous welding on both sides were calculated and compared. There were 17 welding sequences in total. The results show that the residual stress and angle deformation of the double web stiffened plate are smaller than those of the continuous welding. The amplitude of angle displacement of synchronous welding of the double web stiffened plate is reduced by 47.1% compared with that of continuous welding.

Key words: thermal elastic-plastic finite element method; double web stiffened plate; welding deformation; residual stress

* **基金项目:** 国家自然科学基金项目“循环载荷下基于弹性安定临界状态的船体梁极限强度研究”(项目编号 52001040); 重庆市自然科学基金面上项目“基于弹性安定临界状态的船体加筋板极限承载性能研究”(项目编号 cstc2021jcyj-msxmX0944); 重庆市教委科学技术研究项目“基于增量热弹塑性理论的船体结构极限强度研究”(项目编号 KJZD-K202300710)。

0 前言

焊接是钢结构主要加工方式之一，在船体建造中应用极为广泛。由焊接引起的残余应力和变形严重影响船舶整体建造质量，提前预测焊接残余应力和变形是船舶建造过程中精度控制的重要基础^[1]。热弹塑性有限元法能够实时追踪焊接过程中应力应变过程、焊后的残余应力与变形^[2]。许多学者围绕焊接数值模拟开展了大量相关性研究工作。大阪大学 Wang 等^[3]基于子结构迭代法，将焊接构件划分为焊缝高温区和远离焊缝高温区，研究了加筋板结构焊后的扭转变形。喻琪等^[4]采用静态子结构法实现了加筋板焊接热传导分析计算，并将静态子结构法应用于船体多筋加筋板的焊接残余变形和应力的预报，大大缩短了计算时间。Peric 等^[5-7]将焊接三维模型由全实体单元简化为实体-壳单元组合模型，研究了加筋板全实体模型与实体-壳单元组合模型计算时间及残余应力应变分布情况。结果表明，实体-壳单元组合模型用时更短。通过比较计算结果与试验结果，验证了所提出的实体-壳单元组合模型的准确性。

船体结构大多数由板材与型材通过焊接而成，焊接顺序的不同会较为明显的使构件产生差异较大的焊接变形与残余应力^[8-9]。为降低构件的焊接变形与残余应力，有必要在构件施焊前进行数值模拟，为焊件焊接顺序的合理制定提供参考。Fu 等^[10]进行试验验证了数值模型，研究了9种焊接顺序对八角形管板铝合金焊接结构残余应力的影响。研究表明，焊接顺序对八角形管板结构的纵向和横向残余应力均有显著影响。Fallahi 等^[11]对薄板3种常见的焊接顺序进行了数值模拟，研究了板的焊接顺序对焊接残余应力的影响，建议构件焊接时，采用对称焊接顺序。Gannon 等^[12]开发了一种三维数值模型，研究了4种焊接顺序对加筋板残余应力和变形的影响，在数值模拟中采用了4种不同的焊接顺序。结果表明，焊接顺序对加筋板纵向残余应力的分布没有显著影响，但对加筋板残余应力峰值有较大影响。同时，不同的焊接顺序导致垂向和横向变形分布不同。Guirao 等^[13-14]进行了不同的焊接顺序模拟，以研究焊接顺序如何在大型结构中引起不同的焊接变形。Manurung 等^[15]研究了焊接顺序固定边界条件下对T型接头焊

接变形的影响，结果发现焊接顺序对焊接变形没有显著影响。Fu 等^[16]研究焊接顺序对T型接头焊缝焊接残余应力与变形的影响。结果表明，焊接顺序对焊接残余应力、焊接变形的大小和分布方式均有显著影响。目前大部分船厂对焊接顺序的选取主要基于经验，缺乏必要的焊接顺序理论与数值验证。将热弹塑性有限元法应用到焊前模拟中，可以实现不同焊接顺序下残余应力和变形的预测，弥补经验性方法的不足。

以上研究都有助于船体加筋板焊接顺序的研究，但还需要更为广泛和深入的开展研究工作。已有工作在开展焊接顺序研究时，大多数只考虑了单腹加筋板的焊接顺序，并未研究双腹加筋板焊接时焊接顺序对加筋板焊接残余应力与变形的影响及分布规律。焊接过程包含了非线性瞬态热传导，Abaqus 软件已经广泛应用于热弹塑性有限元模拟，并且其准确性已经得到了认可。本研究以加筋板构件两侧角焊缝为研究对象，使用 Abaqus 软件采用实体-壳单元建模，并进行17种焊接顺序下双腹加筋板热弹塑性有限元分析。利用热弹塑性有限元法，分别模拟不同焊接方案下双腹加筋板的焊接过程。根据得到的温度场与应力场结果，获得了双腹加筋板焊后残余应力与变形的分布规律，为实际船体焊接加工工艺方案的选取提供理论基础。

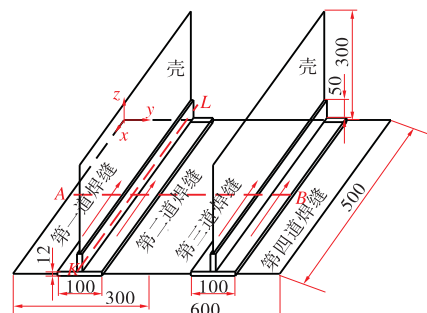
1 有限元分析模型

1.1 几何模型及物理参数

焊接热力耦合主要分为2种形式：直接耦合和间接（顺序）耦合^[17]。对于同一焊接模型，采用直接耦合计算所需要的时间比采用间接（顺序）耦合所需时间长很多。本研究以顺序耦合法进行数值模拟，采用三维实体和壳单元组合模型进行建模。双腹加筋板由一块带板和两块腹板组成，带板的尺寸为600 mm×500 mm，腹板尺寸为300 mm×500 mm，带板和腹板厚度均为12 mm。每块腹板与带板间存在左右两道焊缝，总共4道焊缝。焊枪与焊件保持45°姿态进行焊接，每道焊缝均有6 mm×6 mm焊脚结构，焊接方向与带板长度方向一致。双腹加筋板几何模型如图1所示，图1（a）为双腹加筋板实际焊接结构的具体尺寸，

焊接数值模拟时,假定焊缝金属和母材具有相同的材料属性。焊接材料的物理性能包括热物理属性和力学属性,在进行热分析时,需要输入材料的热物理性能参数。在进行力学分析时还要

增加材料的力学性能参数,忽略加工硬化和相变的影响。材料选用SM400A造船用高强度钢,材料性能参考文献[17]中给出的参数,不同温度下热物理性能和力学性能参数分别如图2和图3所示。



(b) 简化模型

图1 双腹加筋板几何模型 (单位: mm)

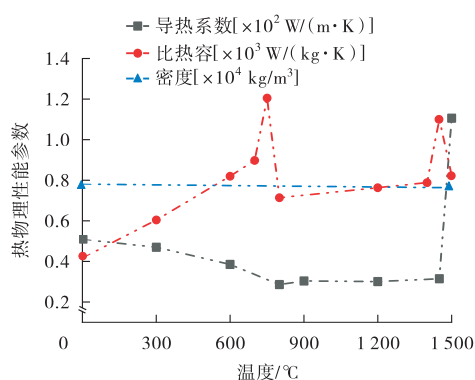
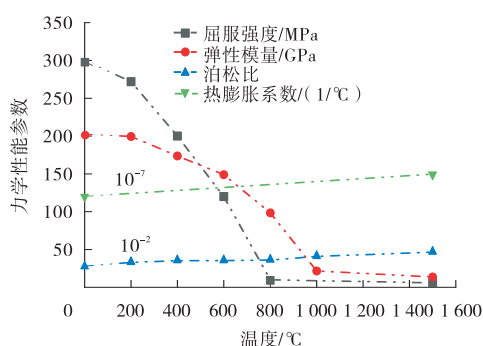
图2 SM400A材料物理性能^[17]图3 SM400A材料力学性能^[17]

表1 焊接工艺参数

焊接电流/A	焊接电压/V	焊接热效率	焊接速度/(mm·s ⁻¹)
185.9	28	0.85	5

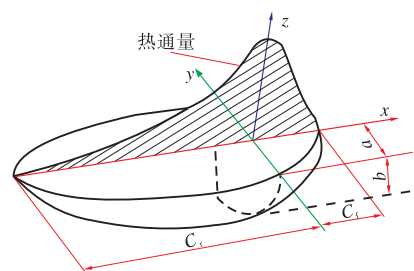


图4 双椭球形热源模型

前半段椭圆热源方程

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1\eta UI}{C_f ab\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{C_f^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (1)$$

后半段椭球热源方程

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2\eta UI}{C_{r,ab\pi}\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{C_r^2} - \frac{3y^2}{a^2} - \frac{3z^2}{b^2}\right) \quad (2)$$

式中： η ——焊接热源效率；

U ——焊接电压, V;

I ——焊接电流, A;

x, y, z ——与热源中心上的距离, mm;

a, b ——熔池的宽度和深度, mm;

1.2 热源模型

文中双腹加筋板焊接过程选用的焊接方式为CO₂气体电弧焊,焊接电流 $I=185.9\text{ A}$,焊接电压 $U=28\text{ V}$,焊接速度 $v=5\text{ mm/s}$,具体焊接工艺参数见表1。焊接过程中采用双椭球形热源模型。双椭球形热源模型如图4所示。

C_f 、 C_f ——实际热源熔池前、后半椭球的半轴长度，mm；

f_1 、 f_2 ——前后半球能量分配系数， $f_1+f_2=2$ 。

热源随时间的移动通过 Abaqus 软件中用户子程序 Fortran 语言实现。

焊接过程中，由于热对流和热辐射现象的存在，需要考虑热量在传递过程中不断损失的影响。温度场分析中的边界条件主要以对流和辐射与外界进行热交换，结构表面与周围介质之间的对流换热能量交换依据以下公式

$$q_a = -h_a(T_a - T_0) \quad (3)$$

式中： h_a ——对流换热系数；

T_0 ——环境温度，℃；

T_a ——实际温度，℃。

热量在传递过程中，通过热辐射散失的热量遵从 Stefan-Boltzman 定律

$$q_r = \varepsilon_r \alpha_r [(T_a + 273)^4 + (T_0 + 273)^4] \quad (4)$$

式中： ε_r ——热辐射系数；

α_r ——Stefan-Boltzman 常数。

进行温度场分析时，初始温度取环境温度 20℃，考虑对流表面散热和辐射效应的影响。其中， $h_a = 33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ， $\varepsilon_r = 0.85$ ， $\alpha_r = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.3 网格划分及边界条件

为兼顾计算效率和计算精度，模型网格划分中采用过渡网格。焊缝及焊缝附近区域进行网格加密处理，远离焊缝区域网格划分

较为稀疏，且网格尺寸随着离焊缝距离的增大而逐渐增大。双腹加筋板实体单元模型区热传导分析采用八节点六面体热单元，对应的应力场分析采用八节点六面体结构单元，壳单元模型区热传导分析采用四边形壳单元，对应的应力场分析采用壳单元。

在进行力学分析时，为防止双腹加筋板发生刚体位移，对有限元模型施加力学边界条件与文献[16]中加筋板焊接试验所施加的边界条件保持一致。有限元分析整体模型网格划分及边界条件如图5所示。A点： $UX=UY=UZ=0$ ，B点： $UY=UZ=0$ ，C点： $UZ=0$ 。 UX 、 UY 、 UZ 分别代表带板宽度方向位移、带板长度方向位移和腹板高度方向位移。

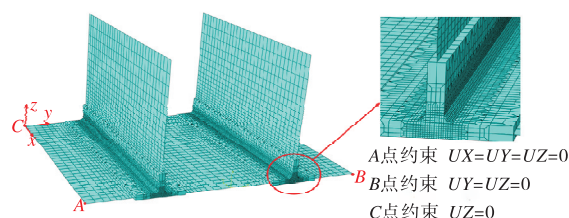


图5 双腹加筋板网格划分及边界条件

1.4 双腹加筋板焊接顺序

图6所示为双腹加筋板不同的焊接顺序，共17种。图中蓝色箭头表示双腹加筋板焊缝处不同的焊接方向，沿箭头方向代表焊接方向为起焊端向止焊端移动，红色字体表示不同的焊接顺序。J0表示同步焊接，即4道焊缝同步焊接。J1~J16表示连续焊接，即从第一道焊缝开始焊接，到第四道焊缝依次进行焊接。

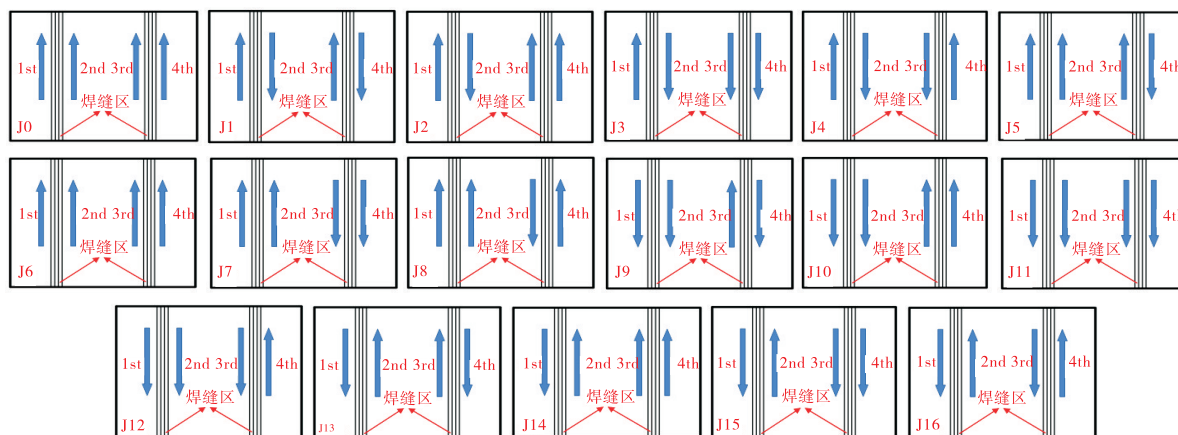


图6 双腹加筋板不同焊接顺序

2 数值计算结果

2.1 温度场

图7显示了双腹加筋板同步焊接和连续焊接时焊缝横截面上温度分布情况。腹板两侧同步焊接时,左右焊脚温度成对称分布,最高温度出现在焊脚斜边中点位置附近,如图7(b)所示。两侧连续焊接时,焊缝横截面左侧温度分布与同步焊接横截面温度分布情况大致相同,如图7(c)所示。图7(a)为文献[16]对加筋板数值分析所给出的焊缝横截面上温度分布情况及熔池形貌。本研究中双腹加筋板数值模拟所得到的焊接熔池形貌与文献[16]中

给出的加筋板试验和数值模拟所得到的熔池形貌相吻合。

以同步焊接为例,图8和图9给出了所研究的双腹加筋板的温度场分布曲线。由图8、图9可知,加热过程中最高温度稳定在1 900℃左右。当热源中心移动到某一位置时,该位置温度急剧上升至最大值,然后逐步冷却到室温,升温速度比温度下降速度快。随着热源中心远离某一位置时,该位置的温度逐步降低,各节点的温度与温度变化速率逐渐下降到同一水平。垂直于焊缝方向,随着与焊缝中心的距离变大,双腹加筋板最高温度逐渐降低。

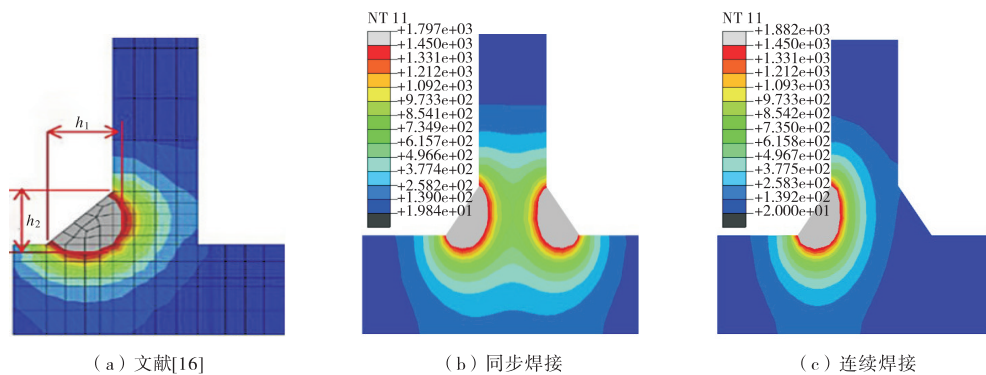


图7 焊缝横截面温度分布图

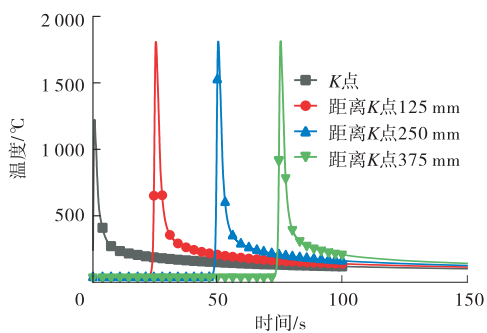


图8 焊缝中心线K-L各点温度

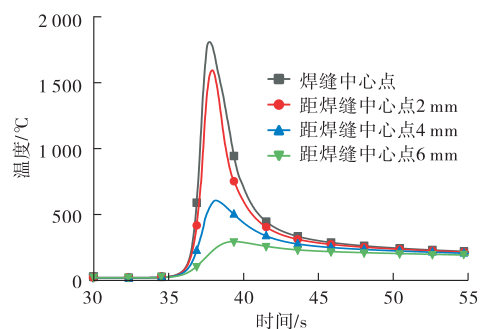


图9 垂直于焊缝方向各点温度

2.2 残余应力

焊接过程中材料内部温度分布不均匀会产生残余应力,沿着焊缝方向将产生纵向残余应力,垂直于焊缝方向将产生横向残余应力。图10显示了双腹加筋板同步焊接 Von Mises 等效应力分布云图。由图可知,双腹加筋板最大等效残余应力为297.1 MPa,残余应力集中分布在

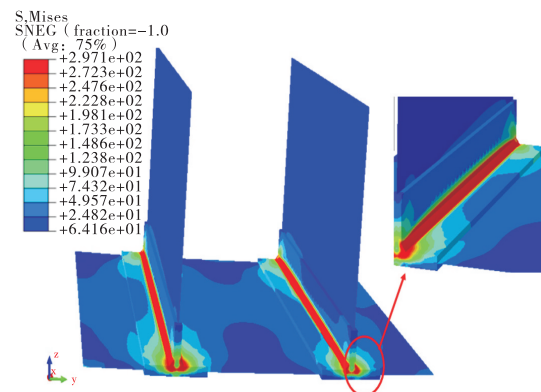


图10 同步焊接 Von Mises 等效应力云图

焊缝及焊缝附近区域，在焊缝起始和结束端出现应力集中现象。

图 11 和图 12 显示了同步焊接和连续焊接顺序下，四道焊缝焊脚处纵向残余应力分布情况。对于同步焊接，第一道焊缝和第二道焊缝残余应力分布情况大致相同，第三道和第四道焊缝纵向残余应力分布情况大致相同。对于连续焊接，先焊左侧焊缝后冷却至室温，此时焊缝处已经产生了焊接残余应力；再焊右侧焊缝，在第二道焊缝处会出现应力增大的现象。

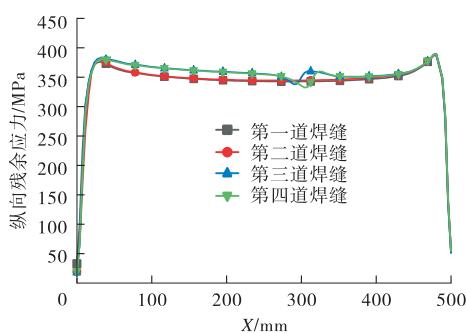


图 11 同步焊接纵向残余应力

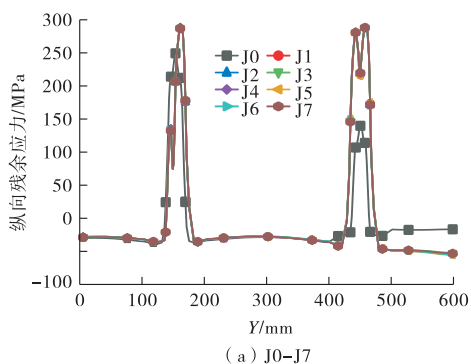


图 13 双腹加筋板纵向残余应力 (A-B 线)

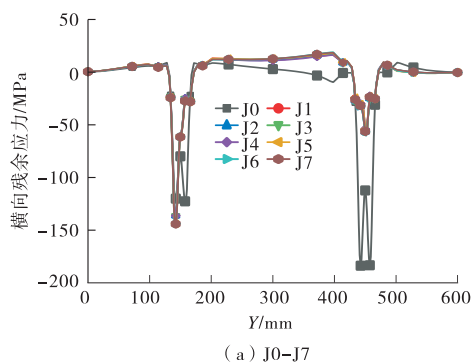


图 14 双腹加筋板横向残余应力 (A-B 线)

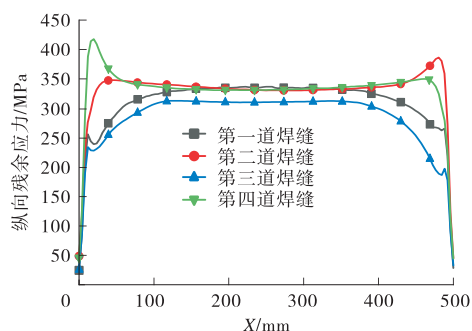
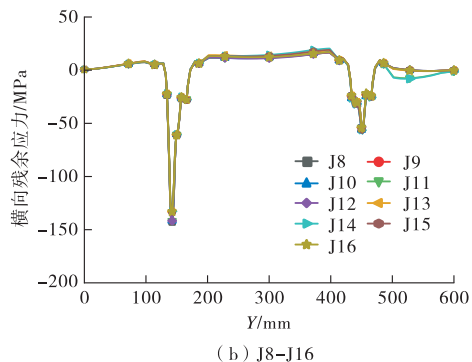
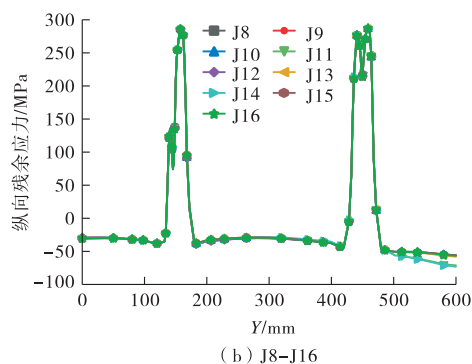


图 12 连续焊接纵向残余应力

图 13 和图 14 分别为双腹加筋板沿 A-B 线上纵向和横向残余应力分布曲线。在焊缝附近，残余应力急剧上升，应力达到峰值。同步焊接时，双腹加筋板焊缝处沿 A-B 线上的纵向残余应力比连续焊接纵向残余应力 (A-B 线) 明显降低，沿 A-B 线上的横向残余应力比连续焊接时明显升高。连续焊接时，双腹加筋板沿 A-B 线上纵向残余应力和横向残余应力具有较好的一致性，即连续焊接时，焊接顺序对双腹加筋板沿 A-B 线上纵向残余应力和横向残余应力无明显影响。



2.3 双腹加筋板焊接变形

以同步焊接为例，图 15 显示了双腹加筋板同步焊接顺序下焊后变形云图，图中红色轮廓代

表双腹加筋板变形前的位置。由图 15 可见，双腹加筋板发生了较大的角变形。图 16 显示了带板沿 A-B 线的角变形。同步焊接时，每条焊缝同

时焊接,两腹板的角变形大致相同,双腹加筋板沿A-B线垂向最大角变形值为2.99 mm。连续焊接时,左侧2道焊缝焊接完成产生了角变形,再焊接右侧焊缝,右侧2道焊缝产生的角变形明显大于左侧道焊缝的角变形。沿A-B线加双腹筋板角变形最大值达到了5.65 mm,同步焊接角变形的幅值比连续焊接角变形幅值减小了47.1%,因此同步焊接时双腹加筋板焊缝处沿A-B线角变形远小于连续焊接焊缝处的角变形。

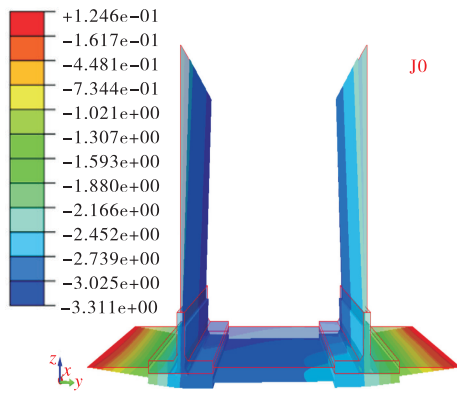


图15 同步焊接变形云图(变形放大系数为5)

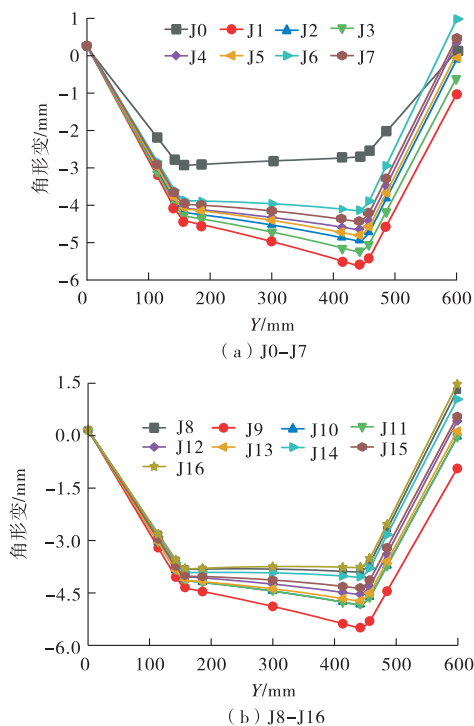


图16 双腹加筋板角变形(A-B线)

3 结 论

(1) 在同步焊接时,双腹加筋板左右两侧焊

脚处的纵向残余应力分布大致相同,连续焊接时,腹板左侧焊缝完成焊接,而在腹板右侧焊缝处有应力增大的现象。

(2) 在同步焊接时,焊缝处产生横向残余应力比连续焊接大,而此处产生纵向残余应力却很小;连续焊接时,焊接顺序对横向和纵向残余应力影响较小。

(3) 双腹加筋板同步焊接总体产生的残余应力和角变形较小,同步焊接角变形幅值比连续焊接角变形幅值减小了47.1%。

参考文献:

- [1] 周宏,罗宇,蒋志勇.基于固有应变的船体总段船台合拢焊接变形预测研究[J].船舶力学,2013,17(10):1153-1160.
- [2] 徐东,杨润党,王文荣,等.船体结构焊接变形预测与控制技术研究进展[J].舰船科学技术,2010,32(1):132-137.
- [3] WANG J C, SHIBAHARA M, ZHANG X D, et al. Investigation on twisting distortion of thin plate stiffened structure under welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(8):1705-1715.
- [4] 喻琪,陈震.船体加筋板结构焊接变形和残余应力热弹塑性有限元分析[J].舰船科学技术,2016,38(6):47-51,80.
- [5] PERIĆ M, STAMENKOVIĆ D, MILKOVIĆ V. Comparison of residual stresses in Butt-Welded plates using software packages Abaqus and Ansys[J]. Scientific Technical Review, 2010, 60(3/4):22-26.
- [6] 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.
- [7] PERIĆ M, SELEŠ K, TONKOVIĆ Z, et al. Numerical simulation of welding distortions in large structures with a simplified engineering approach[J]. Open Physics, 2019, 17(1):719-730.
- [8] OZCATALBAS Y, VURAL H I. Determination of optimum welding sequence and distortion forces in steel lattice beams[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1):599-604.
- [9] DENG D A. Influence of deposition sequence on welding residual stress and deformation in an austenitic stainless steel J-groove welded joint[J]. Materials & Design, 2013, 49:1022-1033.
- [10] FU D F, ZHOU C Q, LI C, et al. Effect of welding sequence on residual stress in thin-walled octagonal pipe-plate structure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(3):657-664.

(下转第39页)