https://doi.org/10.1051/jnwpu/20244261057

钢板感应加热工艺中加热顺序对于变形的影响

张雪彪[1,2], 王俊淇[1,2], 汪巧[1,2]

(1.大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.大连市舰船先进制造技术重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要:复杂曲面板的水火弯板成形需要多条加热线,加热顺序是成形特定形状曲面板的重要影响因素。采用弹塑性固有应变有限元模型研究钢板在不同加热顺序下的整体变形,同时以加热顺序为唯一变量,对 2 张辊弯板进行多加热线感应加热实验,2 张板的计算值与测量值之间的高度差符合工程应用要求。弹塑性固有应变有限元模型可用于计算钢板在不同加热顺序下的变形。对 2 张钢板进行三维曲面定位和偏差数据的假设检验,分析表明多条加热线的加热顺序对钢板变形有显著影响。

关 键 词:水火弯板;感应加热;加热顺序;弹塑性固有应变法;曲面定位
中图分类号:U671.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2024)06-1057-06

钢板感应加热的水火弯板工艺本质是钢板的热弹塑性成形问题,影响变形的主要因素是热变形过程中局部温度场产生的温度应力。加热线布置方案相同的情况下,不同的加热顺序也会产生不同的变形,这是由于塑性应变具有积累效应[1]。在以往的研究中[2],多加热线的热弹塑性有限元模型收敛困难,需要精心设计有限元网格,且大尺寸钢板计算量巨大。所以很少有人研究加热顺序对于变形的影响,在制定工艺时依靠造船工人的隐性经验设计加热线的加热顺序。

为了计算钢板多加热线的变形计算问题,应用弹性固有应变有限元法计算大尺寸钢板的感应加热变形[3],该计算过程不需要对加热过程中各时刻的温度场进行模拟,输入加热线的固有应变值后,经过一次弹性有限元计算即可得到钢板的变形,计算时间快,但无法考虑加热顺序对钢板变形的影响。

姚熊亮和刘庆杰等[4-6]采用弹塑性固有应变有限元法对厚壁球冠的焊接顺序进行了规划。荆洪阳等[7-8]预测了港口机械大型构件的焊接顺序对变形的影响。本文结合文献[2]中所开发的钢板感应加热电磁-热-结构多场耦合有限元模型,应用弹塑性固有应变有限元法,计算钢板感应加热多加热线的变形,考虑前后加热线的影响作用,并设计了帆形板加热实验,探讨不同加热顺序对钢板变形的影响,以及弹塑性固有应变有限元法在钢板加热顺序方面的适用性,评估不同加热顺序对钢板成形的影响程度。

1 固有应变的计算与加载

固有应变是指外载荷去除后结构内部的残留应变,是结构产生内应力和变形的原因。固有应变 ε^* 等于总应变 ε 减去弹性应变 ε_e,即

$$\varepsilon^* = \varepsilon - \varepsilon_e \tag{1}$$

在加热过程中,固有应变 ε^* 等于塑性应变 ε_p、热应变 ε_t 和相变应变 ε_x 的总和,即

$$\varepsilon^* = \varepsilon_p + \varepsilon_t + \varepsilon_x \tag{2}$$

当一次热循环结束后,结构的热应变为零,同时相变应变影响极微,可以忽略不计,此时残余塑性应变即为固有应变。如果知道了钢板加热线附近的固有应变大小和分布,只需将它作为初始应变施加于加热线附近的固有应变区域,通过一次弹性固有应变限元分析求得结构的加热变形。弹性固有应变有限元分析无法跟踪每一时刻的加热过程,只关注加热后的变形结果[1]。

相较于弹性固有应变有限元法,弹塑性固有应变有限元法同样是以固有应变理论为基础,不同之处在于弹塑性固有应变法中所施加的是参考温度载荷而非单位温度载荷,经过一次弹塑性有限元法来

收稿日期:2023-10-18
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51779043)资助
作者简介:张雪彪(1974—),副教授
通信作者:张雪彪(1974—) e-mail:xbzhang@dlut.edu.cn

完成钢板的变形计算[4],具体的计算过程为:

根据单条加热线加热时产生的变形相等的原则,确定产生固有应变区单元的参考温度,以此参考温度作为加热变形的载荷,施加在大尺度钢板的各条加热线处,通过一次弹塑性有限元分析即可求出整个大尺度钢板多加热线的整体变形。

首先使用单加热线的钢板电磁-热-结构耦合有限元计算结果[2]得到加热线附近的等效塑性应变 ε_{ep} 及固有应变区。将等效塑性应变 ε_{ep} 沿着固有应变区所在的横截面 A 进行积分,即可计算出所在截面的固有应变之和 W。

$$W = \int \varepsilon_{ep} \mathrm{d}A \tag{3}$$

式中,A 为垂直于加热线方向固有应变加载区域的截面积/mm^2。

如图 1 所示,为方便计算,将固有应变的施加区域简化成一个截面为矩形的区域[3,9]。$2B_w$ 为固有应变的加载区域宽度,h_y 为加载区域高度,h 为钢板厚度。假设沿加热线方向的固有应变 ε^* 是均匀分布的,则有

$$W = 2B_w h_y \varepsilon^* \tag{4}$$

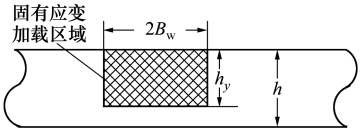

图 1 固有应变区示意图

在 ABAQUS 有限元软件中通过加载参考温度载荷实现固有应变的间接加载,同时在材料属性中加入屈服强度,对结构进行一次弹塑性固有应变的有限元分析即可得到加热变形结果。(5)式为参考温度载荷的计算方法。

$$\varepsilon^* = \alpha_0 \cdot \Delta T_{ref} \tag{5}$$

式中,α_0 为室温下材料的热膨胀系数;ΔT_{ref} 为参考温度载荷,代入(4) 式中整理后可得

$$\Delta T_{ref} = \frac{W}{2B_w h_y \alpha_0} \tag{6}$$

与弹性固有应变有限元法相比,弹塑性固有应变有限元分析过程包含钢板加热的整个弹塑性过程,能够对不同加热顺序条件下的钢板变形进行计算。

2 不同加热顺序下的钢板加热实验

在造船工艺实验室进行了 2 张帆形板 P1 和 P2 的多加热线感应加热实验,选取 16 mm 厚的 A 级辊弯板,图 2 是 16 mm 辊弯板加热前的照片,图 3 是加热线布置图。钢板长 1 600 mm,宽 1 000 mm,曲率半径 2 000 mm。2 张板的加热线布置和加热参数均相同,但加热顺序不同。每张板 14 条加热线,各加热线的加热参数如表 1 所示,采用三角加热路径[3],其中 l 是加热线长度/mm,v_1 是直线段加热速度/(mm · s^{-1}),v_2 是摆动时加热速度/(mm · s^{-1}),加热后进行水冷却。表 2 为 2 张板的加热顺序,P1 板对应的加热顺序为 S1,P2 板对应 S2,加热时的空气间隙为 9 mm,加热功率为 50 kW。

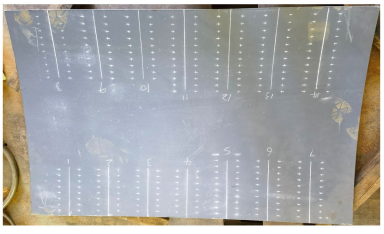

图 2 16 mm 帆形板加热前照片

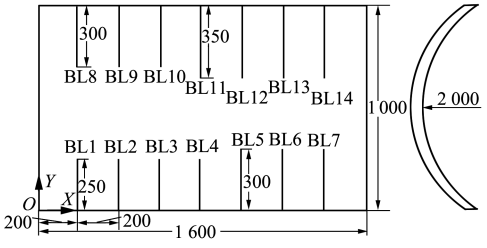

图 3 帆形板加热线布置图

表 1 16 mm 帆形板各加热线参数

编号	l/mm	v_1/(mm · s^{-1})	v_2/(mm · s^{-1})	编号	l/mm	v_1/(mm · s^{-1})	v_2/(mm · s^{-1})
BL1	250	4	12	BL8	300	6	12
BL2	250	6	12	BL9	300	7	12
BL3	250	7	12	BL10	300	5	12
BL4	250	5	12	BL11	350	4	12
BL5	300	4	10	BL12	350	6	12
BL6	300	4	12	BL13	350	7	12
BL7	300	4	14	BL14	350	5	12

表 2　16 mm 帆形板加热顺序表

编号	加热顺序
S1	BL5→BL6→BL7→BL8→BL9→BL10→BL11→BL12→BL13→BL14→BL1→BL2→BL3→BL4
S2	BL14→BL13→BL12→BL11→BL10→BL9→BL8→BL7→BL6→BL5→BL4→BL3→BL2→BL1

图 4 和图 5 分别为 P1、P2 板加热后的照片。钢板加热后采用 S910 激光测距仪对钢板表面特征点的坐标进行测量,如图 6 所示,测量精度为 1 mm,各测量线的纵向网格间距为 200 mm,横向网格间距为 100 mm。

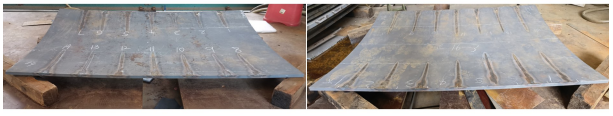

图 4 帆形板 P1 加热后的照片　图 5 帆形板 P2 加热后的照片

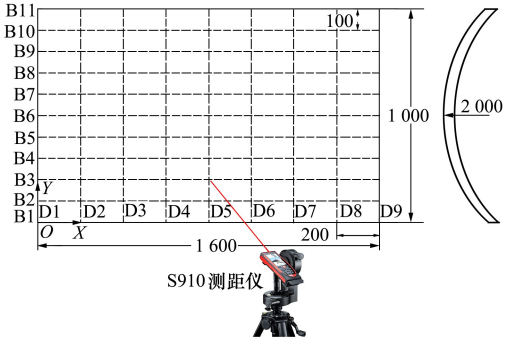

图 6　S910 测量 16 mm 帆形板示意图

3　帆形板弹塑性固有应变有限元分析

采用 ABAQUS 软件对多加热线的钢板变形进行计算,辊弯板的网格划分细节如图 7 所示。面内网格尺寸为 5 mm×5 mm,厚度方向划分为 2 mm 的多层网格,单元类型为 C3D8R,计算时对 4 个角点施加铰支约束。

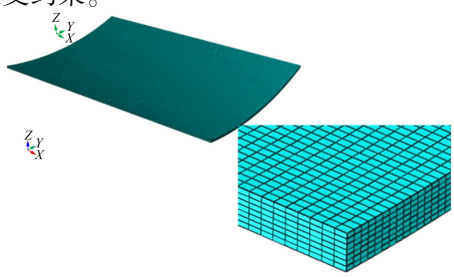

图 7　辊弯板有限元模型

表 3 显示了各条加热线的固有应变值,按照弹塑性固有应变有限元分析的计算过程,对固有应变区的单元加载参考温度载荷,并设置材料的屈服强度。2 张板计算时只是加热顺序不同,其他的计算设置都相同。

表 3　各加热线的固有应变

编号	ε^*	编号	ε^*
BL1	0.004 0	BL8	0.003 4
BL2	0.004 7	BL9	0.002 7
BL3	0.002 4	BL10	0.003 6
BL4	0.002 5	BL11	0.004 3
BL5	0.003 1	BL12	0.003 2
BL6	0.004 1	BL13	0.002 6
BL7	0.003 1	BL14	0.003 4

在 Dell OPTIPLEX 990 计算机(CPU 3.4 Hz,64 GB内存)上耗时 3 h 得到计算结果。图 8~9 分别为 P1、P2 板的垂向位移云图。

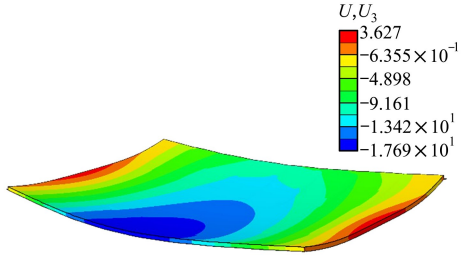

图 8　P1 板的垂向位移云图

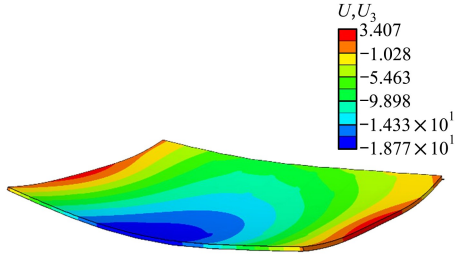

图 9　P2 板的垂向位移云图

图 10~11 分别为 P1、P2 板的等效塑性应变云图,该云图表征计算过程中塑性应变的累积,2 张板

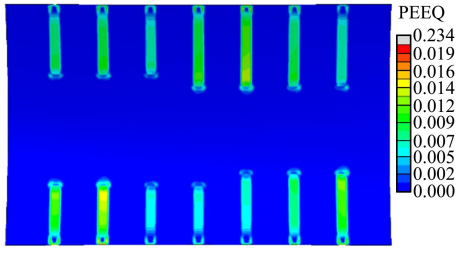

图 10　P1 板的等效塑性应变云图

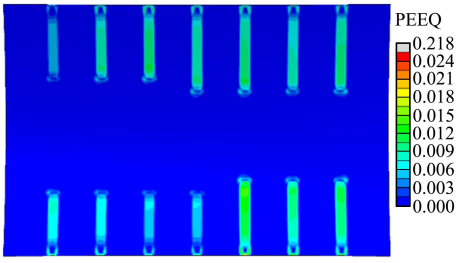

图 11 P2 板的等效塑性应变云图

的塑性应变云图类似。为了对比实际加工板和数值计算后钢板形状的差异,本文将钢板的测量曲面和数值计算后的曲面形状进行曲面定位,或者称之为曲面匹配。采用迭代最近点算法(iterative closest point,ICP)对 2 张曲面进行曲面定位,然后提取 P1、P2 板各测量线数据。

图 12~13 分别为 P1 板 X,Y 方向各测量线的最大偏差 Z 值,在每个测量线柱形图附近都标注了 Z 值最大偏差和平均相对误差,各条测量线在 X 方向和 Y 方向的平均相对误差分别为 10.6%和 4.8%。

图 14~15 分别为 P2 板在 X 和 Y 方向的最大偏差 Z 值,各条测量线在 X 方向和 Y 方向的平均相对误差分别为 14.0%和 4.9%。尽管个别测量线的误差较大,但对于水火弯板研究而言,由于影响因素众多,大尺度钢板整体变形的预测一直是计算难题,且两者的平均误差都在 15%以内,表明该计算模型可用于计算不同加热顺序下的钢板变形。

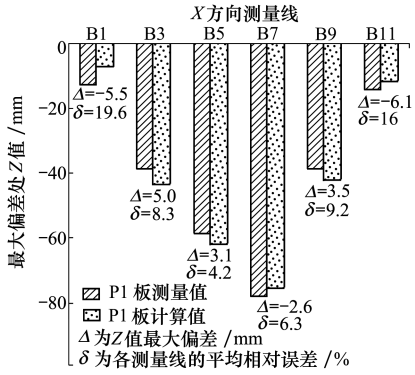

图 12 P1 板 X 方向的最大偏差 Z 值

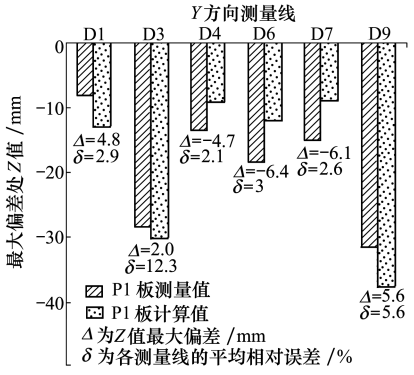

图 13 P1 板 Y 方向的最大偏差 Z 值

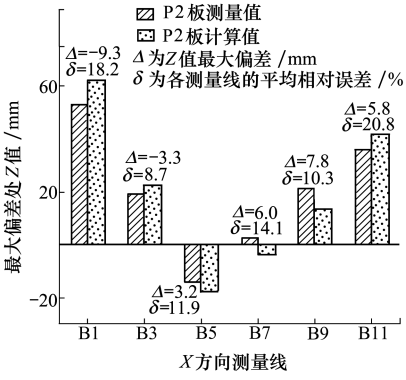

图 14 P2 板 X 方向的最大偏差 Z 值

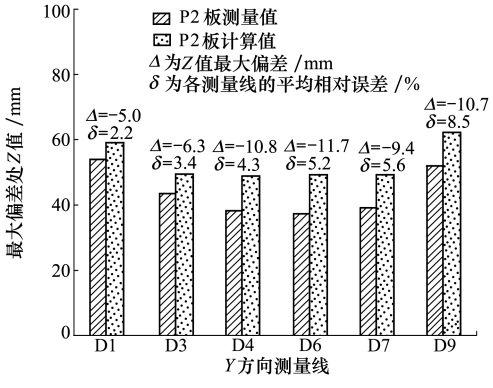

图 15 P2 板 Y 方向的最大偏差 Z 值

4 加热顺序对于钢板变形影响的分析

图 16 是 P1 和 P2 板测量曲面定位后的结果。图 17 和图 18 分别为 2 张加工板在 X 和 Y 方向测量线的最大偏差对比。根据《中国造船质量标准》的 5.1.5.6 节[10],双曲度板加工的标准范围为不大于 3 mm,允许极限为不大于 5 mm,图 17~18 中也显示了这 2 条控制线,X 方向 Z 值最大偏差的平均值为 3.8 mm,Y 方向为 6. 4 mm。加热顺序对于钢板 X 和 Y 方向的变形都有影响,Y 方向各测量线的 Z 值偏差更明显。

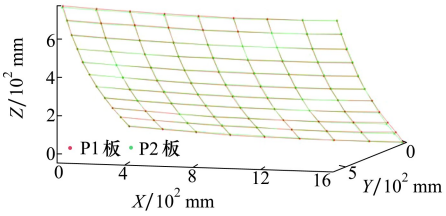

图 16 P1 和 P2 板的测量曲面定位

为验证加热顺序对钢板的变形是否有显著影响,这里对 X 方向和 Y 方向的 Z 值最大偏差进行 t 检验,由于缺乏钢板不同加热顺序变形后的大量偏

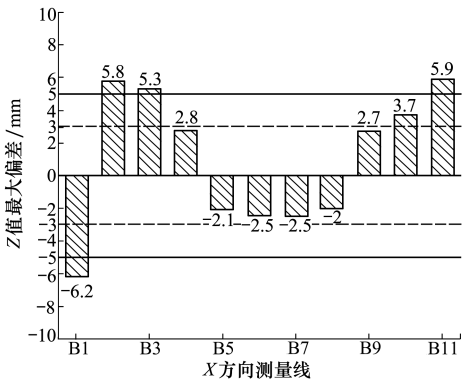

图 17　P1 板和 P2 板 X 方向的最大偏差 Z 值

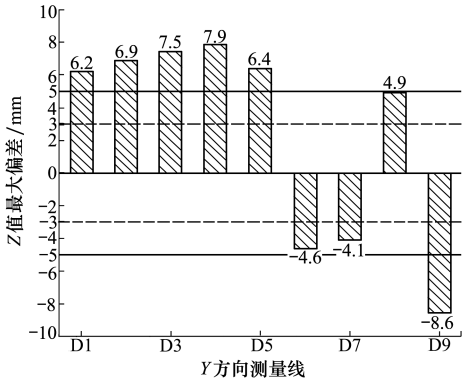

图 18　P1 板和 P2 板 Y 方向的最大偏差 Z 值

差统计数据,取其估计值为允许极限 5 mm,计算在 0.05 的显著性水平下, 各测量线的偏差数据是否较给定值有显著影响。实际上给定值μ 选用允许极限值是偏保守的估计。

原假设: $H_0 \leqslant 5$ mm,备择假设:$H_1 > 5$ mm。X 方向处 $t = -2.313\ 5$,因为 $t < 0$, $|t| = 2.313\ 5 > t_{0.05}(10) = 1.812\ 5$,故拒绝 H_0,接受 H_1,即在 0.05 的显著性水平下,加热顺序对钢板 X 方向的变形有显著影响。Y 方向处 $t = 2.445\ 6 > t_{0.05}(8) = 1.859\ 5$,故拒绝 H_0,接受 H_1,即在 0.05 的显著性水平下,加热顺序对钢板 Y 方向的变形有显著影响。从实验数据的假设检验分析结果可以看出,加热顺序对于钢板变形有显著影响。

5　结　论

本文使用实验和数值计算方法研究了加热线加热顺序对于钢板感应加热变形的影响,以 16 mm 辊弯板多加热线的感应加热为例,以加热顺序为唯一变量设计实验,2 张板计算值与测量值之间的偏差符合工程应用要求,弹塑性固有应变有限元模型可以进行钢板不同加热顺序的变形计算。通过对 2 张钢板进行三维曲面定位和偏差数据的假设检验分析,证明了多条加热线的加热顺序对钢板的变形有显著影响。

由于条件限制,加热后的钢板形状采用普通的激光测距仪进行逐点测量,测量精度还有提升空间,在后续研究中将进行改进。

参考文献:

[1] VEGA A, ESCOBAR E, FONG A, et al. Analysis and prediction of parallel effect on inherent deformation during the line heating process[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2013, 90(3): 197-210

[2] 张雪彪, 陈诚, 刘玉君, 等. 钢板移动式感应加热的多场耦合数值分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(4): 473-478
ZHANG Xuebiao, CHEN Cheng, LIU Yujun, et al. Numerical analysis of multi-field coupled process of steel plate bending by moveable induction heating[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(4): 473-478 (in Chinese)

[3] 张雪彪, 贾洞洞, 刘海涵. 帆形板多加热线感应加热变形的弹性有限元分析[J]. 大连海事大学学报, 2022, 48(4): 94-101
ZHANG Xuebiao, JIA Dongdong, LIU Haihan. Elastic finite element analysis of induction heating deformation of convex plate with multiple heating lines[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2022, 48(4): 94-101 (in Chinese)

[4] 姚熊亮, 刘庆杰, 庞福振, 等. 厚壁球冠结构焊接变形及残余应力数值实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007(4): 369-374
YAO Xiongliang, LIU Qingjie, PANG Fuzhen, et al. Numerical research on the welding deform ation and residual stress of thick spherical cap structure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007(4): 369-374 (in Chinese)

[5] 姚熊亮, 庞福振, 许维军, 等. 焊接工艺对不规则厚壁球台结构变形的影响[J]. 中国造船, 2007(3): 134-144
YAO Xiongliang, PANG Fuzhen, XU Weijun, et al. The Influence of welding technique on irregular thick spherical structure deformation[J]. Shipbuilding of China, 2007(3): 134-144 (in Chinese)

[6] 刘庆杰. 厚壁球冠结构焊接工艺及其稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007
LIU Qingjie. Research on welding technology andstability of thick spherical cap structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007 (in Chinese)
[7] 荆洪阳, 苗春龙, 徐连勇, 等. 港口机械超大型构件焊接顺序规划研究[J]. 天津大学学报, 2021, 54(4): 435-440
JIN Hongyang, MIAO Chunlong, XU Lianyong, et al. Welding sequence planning for port machinery large welded structures [J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(4): 435-440 (in Chinese)
[8] 苗春龙. 港口机械超大型构件焊接顺序规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2020
MIAO Chunlong. Welding sequence planning for port machinery large welded structures[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020 (in Chinese)
[9] 王智祥, 王帅, 张继祥, 等. 基于固有应变法的板材高频感应加热热弹塑性变形研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(7): 50-54
WANG Zhixiang, WANG Shuai, ZHANG Jixiang, et al. Investigation on thermal elastic-plastic deformation of high frequency induction heating plate based on inherent strain method[J]. Forging & Stamping Technology, 2014,39(7):50-54 (in Chinese)
[10] 全国海洋船标准化技术委员会. 中国造船质量标准[S]. GB/T34000-2016
National Technical Committee of Standardization on Marine Vessels. China shipbuilding quality standard[S]. GB/T34000-2016

The influence of heating sequence on deformation of steel plate in induction heating process

ZHANG Xuebiao[1,2], WANG Junqi[1,2], WANG Qiao[1,2]
(1.School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.Dalian Key Laboratory of Advanced Shipbuilding Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The line heating formation of a complex curved plate needs multiple heating lines. Heating sequence is an important factor of influence on the formation to obtain the curved surface plate of a particular shape. The paper uses the elastic-plastic inherent strain finite element model to study the overall deformation of a steel plate in different heating sequences. Meanwhile, it carries out experiments on the induction heating of two roll bending plates with multiple heating lines, using the heating sequence as the only variable. The difference in height between the calculation value and measurement value of the two plates meets the engineering application requirements. The elastic-plastic inherent strain finite element model can be used to calculate the deformation of the steel plate in different heating sequences. The three-dimensional surface location and hypothesis test analysis of data on difference between two steel plates show that the heating sequence of multiple heating lines has a significant effect on steel plate deformation.

Keywords: line heating; induction heating; heating sequence; elastic-plastic inherent strain method; surface localization

引用格式: *张雪彪, 王俊淇, 汪巧. 钢板感应加热工艺中加热顺序对于变形的影响[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(6): 1057-1062*
ZHANG Xuebiao, WANG Junqi, WANG Qiao. The influence of heating sequence on deformation of steel plate in induction heating process[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(6): 1057-1062 (in Chinese)