

文章编号 1004-924X(2012)11-2465-07

夹具拘束距离对 Hastelloy C-276 薄板脉冲 激光焊接变形的影响

郭玉泉, 吴东江*, 马广义, 杨义彬, 佟宇, 郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为了揭示夹具拘束距离对 0.5 mm 厚 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接变形的影响,基于有限元软件 ANSYS 建立了三维热力耦合有限元模型。采用位移约束假设代替实际夹具的拘束作用,研究了夹具拘束距离对 Hastelloy C-276 薄板焊接纵向挠曲变形及横向收缩变形的影响规律。实验测量了焊接热循环曲线和残余变形,验证了所建立有限元模型的可靠性。模拟结果表明,随着夹具拘束距离从 8 mm 增加到 20 mm,焊接纵向挠曲变形及横向收缩变形均表现为近似线性增大的趋势,特别是焊接横向收缩变形增加了将近 3.6 倍,而减小夹具拘束距离可以控制焊接残余变形。该模型较准确地模拟了薄板脉冲激光焊接温度场及残余变形,为抑制薄板焊接变形提供了理论和实验依据。

关键词:激光技术;脉冲激光焊接;数值模拟;焊接变形;Hastelloy C-276 合金;塑性应变

中图分类号:TG456.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2465

Influence of fixture restraint distance on pulsed laser welding distortion of Hastelloy C-276 thin sheet

GUO Yu-quan, WU Dong-jiang*, MA Guang-yi, YANG Yi-bin, TONG Yu, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

Abstract: A three-dimensional thermal-mechanical Finite Element Model (FEM) was established by the ANSYS code to reveal the influence of fixture restraint distance on Pulsed Laser Welding (PLW) distortion of Hastelloy C-276 thin sheet with a thickness of 0.5 mm. The influence laws of the restraint distance on welding longitudinal deflection and transverse shrinkage distortion were investigated by using the displacement restriction assumption instead of the actual restraint condition. Experiments were carried out to measure the welding thermal cycle curves and residual distortions. The simulation results are in good agreement with that of the corresponding experiment, which validates the reliability of the FEM. It shows that the welding longitudinal deflection and transverse shrinkage distortion increase linearly with the restraint distance increasing from 8 mm to 20 mm, especially the welding transverse shrinkage distortion increases by nearly 3.6 times. Furthermore, the welding re-

收稿日期:2012-05-21;修订日期:2012-07-02.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2009CB724307)

sidual distortions can be controlled by reducing the restraint distance. Results demonstrate that the FEM can simulate accurately the temperature field and the residual distortion of PLW and can provide theoretical and experimental basis for suppression of the welding distortion of thin sheets.

Key words: laser technique; pulsed laser welding; numerical simulation; welding distortion; Hastelloy C-276 alloy; plastic strain

1 引言

Hastelloy C-276 镍基合金因为具有强度高、非磁性、耐腐蚀、电阻率高、导热性能好和焊接性能优等特点已成为 AP1000 核主泵屏蔽套的首选材料。定子屏蔽套的厚度一般为 0.3~0.5 mm, 长度在 3 000 mm 以上, 直径为 565 mm, 而且其直径所允许的偏差仅为 ± 0.076 mm, 所以其焊接成形制造工艺精度要求极高^[1-4]。激光焊接具有功率密度高、热输入低、焊缝窄且晶粒细小、热影响区小以及易于实现自动化等特点^[5-8], 满足 AP1000 核主泵屏蔽套焊接成形的基本要求。不过激光焊接是一个快速而不均匀的热循环过程, 焊缝附近会出现很大的温度梯度, 焊后的结构中也会出现不同程度的残余应力和变形, 它们是影响焊接结构制造精度和使用性能的重要因素。而在影响焊接残余应力和变形的各种因素中, 夹具拘束对被焊工件焊缝及附近区域的非协调应变有显著影响, 尤其对于超薄板结构的焊接影响更加明显。

目前, 国内外对厚度大于 1 mm 薄板结构的焊接残余应力和变形已经开展了较多的研究工作。文献[9]采用模拟和实验的方法研究了工件厚度和焊接速度对焊接变形的影响, 发现焊接纵向和横向收缩变形都随工件厚度和焊接速度的减小而增大。文献[10-11]通过建立工件和支撑夹具的有限元模型, 研究了连续激光焊接变形及残余应力的分布特点, 发现工件与支撑夹具之间摩擦系数及吸附力的变化对焊接平面外变形的影响较小。文献[12-13]通过模拟和实验还发现夹具的不同布置形式对焊接变形的控制效果不同, 以及夹具拘束作用的处理方式不同对焊接变形的趋势也具有一定的影响。虽然上述研究表明了夹具拘束对薄板结构焊接残余应力和变形有重要的影响, 但是目前关于厚度在 0.5 mm 及以下的超薄板结构的研究较少。

本文针对 AP1000 核主泵屏蔽套焊接成形对直径尺寸精度要求极高的制造难点, 对 0.5 mm 厚的 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接温度场和拘束焊接残余变形进行了有限元模拟计算, 并搭建焊接温度和变形测试系统, 验证了所建立的有限元模型的可靠性。同时, 利用验证的有限元模型进一步研究了夹具拘束距离对 Hastelloy C-276 薄板焊接变形的影响规律。

2 有限元模型建立

采用 ANSYS 软件建立三维热弹塑性有限元模型模拟了 0.5 mm 厚的 Hastelloy C-276 薄板的脉冲激光焊接过程。模拟过程中先计算焊接温度场, 再将温度场结果作为边界条件读入力学分析模型进行焊接变形的计算。

2.1 几何模型简化

为了节省计算时间, 同时保证所提取的简化几何模型能反映实际焊接应力应变特点, 对焊接结构的原始几何模型进行了合理简化, 本文采用如图 1 所示的简化几何模型进行模拟计算。

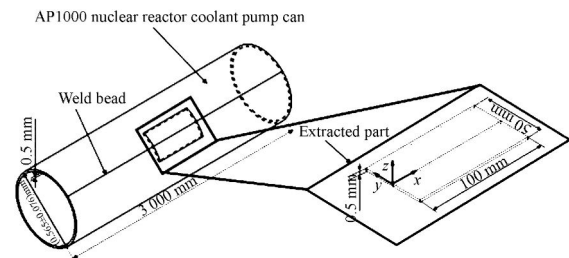


图 1 简化几何模型

Fig. 1 Simplified geometric model

2.2 网格划分

对不同拘束条件下的夹具采用相同的有限元模型, 由于工件厚度仅为 0.5 mm, 而长度和宽度尺寸远大于厚度尺寸, 因此焊接温度场的计算选择 shell 57 单元, 焊接应力场的计算选择 shell

181 单元。由于焊缝中心为对称面,在模拟过程中取工件的一半进行建模。为提高模拟计算的精度和效率,采用一种过渡网格划分方式,焊缝及其附近的网格划分较细密,离焊缝中心越远,网格划分越粗,有限元网格划分如图 2 所示。

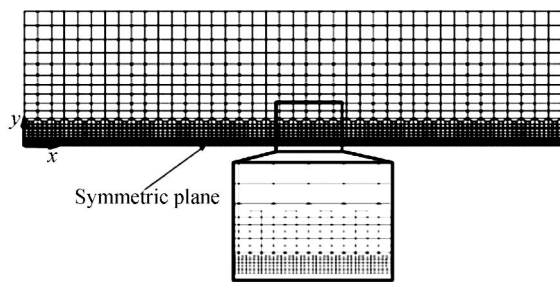


图 2 有限元网格划分

Fig. 2 Finite model meshing

2.3 材料热物理性能参数

所选用的精轧 Hastelloy C-276 合金薄板的固相线为 $1\ 323\ ^\circ\text{C}$,液相线为 $1\ 371\ ^\circ\text{C}$,常温屈服强度为 $391\ \text{MPa}$,抗拉强度为 $857\ \text{MPa}$ 。数值模拟中的材料热物理性能参数均设定为随温度变化,材料性能参数值取自文献[14],对于更高温度条件下的材料性能参数运用外推法得到。

2.4 热源模型

由于有限元模型采用了三维壳单元,因此脉冲激光热源选择高斯面热源模型,其热流密度可表示为^[15]:

$$Q(r) = \frac{3P}{\pi R^2} \exp\left[-3\frac{r^2}{R^2}\right], \quad (1)$$

式中: P 为激光热源有效功率, R 为激光热源作用的有效半径, r 为距移动热源中心的距离。

2.5 边界条件

焊接过程中工件上的拘束条件由刚性焊接夹具提供,其结构示意图如图 3。通过调整 2 个上压板之间的间距可以改变夹具的拘束距离 L 。有限元模型中采用等效的热学和力学边界条件来代替实际的夹具作用。在热学模拟过程中,将工件与夹具接触的表面施加经过实验修正的等效对流换热。在力学模拟过程中,保持夹具的压紧力足够大,由于夹具上下压板对工件的约束作用很强,因此焊接过程中工件与夹具发生接触的区域均采用刚性固定约束,并在对称面处施加对称约束。焊接结束冷却到室温以

后,释放夹具的约束条件,只施加保证工件在夹具约束撤掉过程中不会发生刚性移动的位移约束,使工件的焊后变形能在近似于无夹具约束的条件下展现出来。

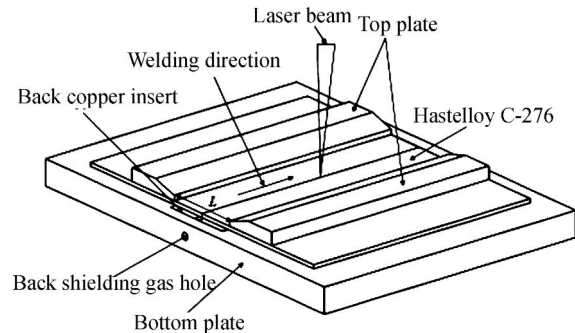


图 3 刚性焊接夹具结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rigid welding fixture

3 实验装置及方法

激光焊接实验采用英国 GSI Lumonics 公司生产的 JK701H 型 Nd:YAG 脉冲激光器,焊接材料为精轧 Hastelloy C-276 合金薄板,工件尺寸为 $100\ \text{mm} \times 25\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ 。采用自熔对接焊方式,焊接平均功率为 $45\ \text{W}$,脉冲宽度为 $6\ \text{ms}$,焊接速度为 $100\ \text{mm}/\text{min}$,光斑直径为 $0.6\ \text{mm}$ 。焊接过程中通过对焊缝正面和背面同时吹高纯氩气进行防氧化保护。

焊接温度场的分布采用在工件表面点焊 K 型热电偶的方式如图 4 所示,数据采集装置采用成都中科动态仪器有限公司的 USB8516 型便携数据采集仪。焊接残余变形的测量方法如图 5 所示,位移测量采用日本 KEYENCE 公司的 LK-H025 型激光位移传感器,分辨率为 $0.02\ \mu\text{m}$ 。为保证残余变形测量的精确性和统一性,测试前通过激光位移传感器的零点设置及数控工作台上的可调支撑对被焊工件 A、B、C 3 个角点进行调平将其确定为变形基准平面。测试时,激光位移传感器固定不动,数控工作台沿 y 轴方向的移动速度为 $500\ \text{mm}/\text{min}$,采样频率为 $1\ \text{kHz}$,沿焊缝长度方向每间隔 $2\ \text{mm}$ 进行一次 z 轴方向的位移测量,测试数据经过计算机采集和处理后可以得到焊接残余变形。

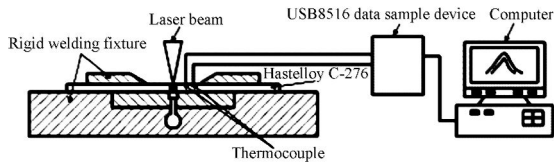


图 4 温度测量方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of temperature measuring method

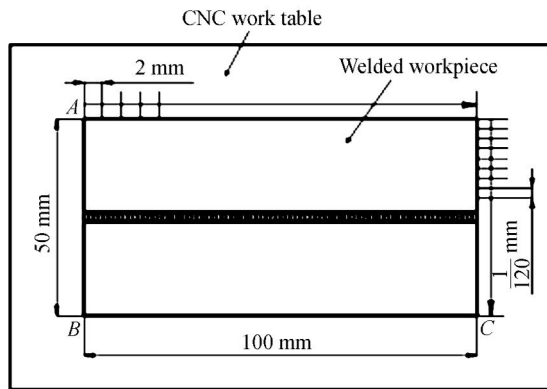


图 5 变形测量方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of deformation measurement

4 实验与模拟结果分析

4.1 焊接温度场

当夹具拘束距离 $L=12\text{ mm}$ 时,模拟和实验得到的 Hastelloy C-276 合金薄板脉冲激光焊接热循环曲线的分布特点如图 6 所示。由图 6 可以看出,工件上 3 个特征点 $P_1(25, 0, 0)$ 、 $P_2(25, 1.5, 0)$ 和 $P_3(25, 3, 0)$ 都经历了一次急剧升温与降温的热循环过程。由于脉冲激光具有周期性作用的特点,所以当激光光斑移动靠近及远离的过程中 P_1 点的温度还经历了周期性波动,而且光斑中心越接近 P_1 点,温度波动越大,最大温度可以达到将近 $1\ 600\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于光斑直径仅为 0.6 mm ,因此处于光斑作用区域以外的 P_2 和 P_3 2 点没有出现温度波动现象。为了验证模拟结果的准确性,对比了 P_2 和 P_3 2 点的模拟和实验结果,可见模拟得到的温度场分布与实验测量结果在分布趋势上完全一致,温度数值仅在冷却阶段存在一定的误差,但相对误差小于 5% 。因此,利用该温度场进行力学模拟计算,可以满足计算精度的要求。

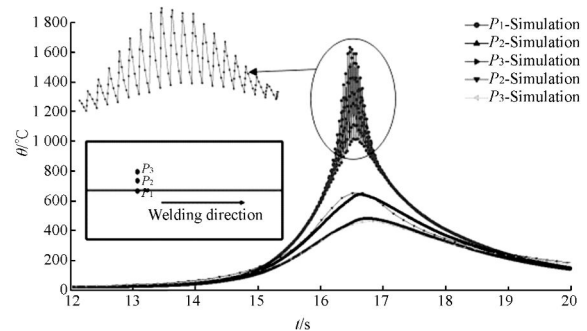


图 6 焊接热循环曲线的分布特点

Fig. 6 Distribution characteristics of welding thermal cycle curves

4.2 焊接残余变形

当夹具拘束距离 $L=12\text{ mm}$ 时,模拟和实验得到的夹具拘束释放后的焊接残余变形如图 7 (a)和 7(b)所示。从图 7(a)和 7(b)可以看出, 0.5 mm 厚度的 Hastelloy C-276 薄板脉冲激光焊接后变形主要表现为平面外变形,薄板变形后的形态呈近似马鞍状,变形特征均为平行焊缝方向下凹的较大纵向挠曲变形和垂直焊缝方向上凸的较小横向角变形。数值模拟和实验测试得到的焊接残余变形在整个薄板上都具有相同的趋势,验证了所建立有限元模型的可靠性。

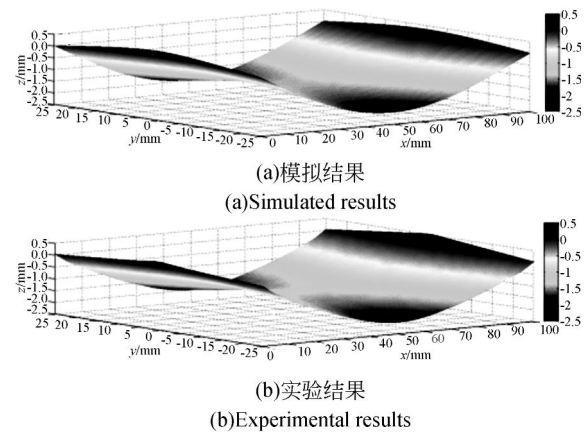


图 7 焊接残余变形模拟结果和实验结果对比

Fig. 7 Comparison of simulated and experimental results for welding residual distortions

4.3 拘束距离对焊接变形的影响

利用上述实验验证的有限元模型进一步模拟计算拘束条件对焊接纵向挠曲变形 ΔX 及横向收缩变形 ΔY 的影响规律。提取 $y=25\text{ mm}$ 边线上的

z 向位移变化曲线,曲线挠度的绝对值定义为焊接纵向挠度。图 8 为焊接纵向挠度与夹具拘束距离的关系曲线。由图 8 可以看出,随着夹具拘束距离的增大,焊接纵向挠曲变形 ΔX 呈逐渐增大的趋势。当夹具拘束距离从 8 mm 增加到 20 mm 时,焊接纵向挠度则从 1.74 mm 增加到了 2.31 mm,增加了将近 33%。由此可知,选取较小的夹具拘束距离可以起到控制焊接纵向挠曲变形 ΔX 的作用。

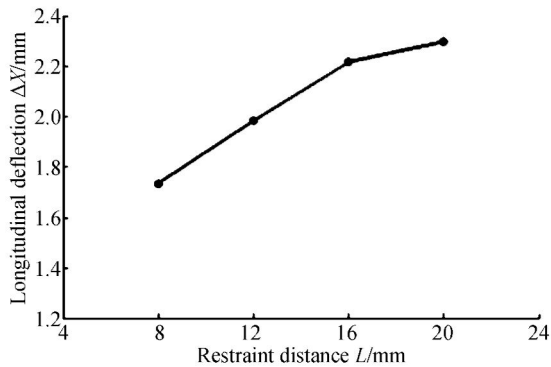


图 8 拘束距离对焊接纵向挠度的影响

Fig. 8 Impact of restraint distance on welding longitudinal deflection

焊接残余应力和变形出现的根源在于焊缝及附近区域存在不协调的残余塑性应变,夹具拘束距离之所以会对焊接变形产生影响实质是因为其改变了被焊试件中残余塑性应变峰值和分布范围的大小。图 9 为 $x=50$ mm 横截面路径上焊接纵向塑性应变与夹具拘束距离的关系曲线。由图 9 可以看出,当夹具拘束距离从 8 mm 增加到 20 mm 时,焊缝横截面上的纵向压缩塑性应变的峰

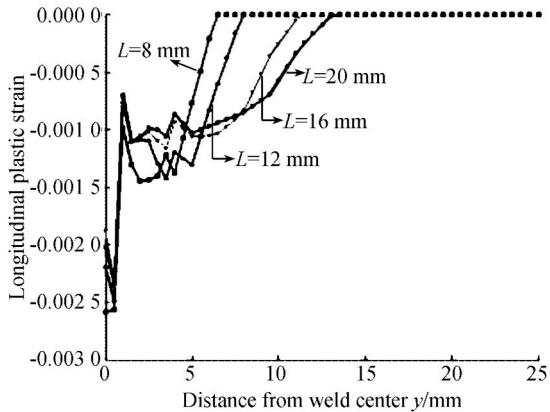


图 9 拘束距离对焊接纵向塑性应变的影响

Fig. 9 Impact of restraint distance on welding longitudinal plastic strain

值变化不大,而分布范围却呈现显著的增大,最终导致横截面上的残余压缩塑性应变总量和的绝对值随夹具拘束距离的增加而增加。

图 10 为焊接横向收缩变形 ΔY 与夹具拘束距离 L 的关系曲线。由于焊接残余塑性应变主要发生在焊缝及附近区域,所以提取 $x=50$ mm 横截面路径上跨焊缝两侧标记点 M_1 和 M_2 之间的距离 Y_1 为 20 mm。通过将焊接前原始距离 Y_1 和焊接后模拟计算得到的曲线弧长 Y_2 相减来表征焊接横向收缩变形 ΔY 。其中,曲线弧长 Y_2 的计算方法为提取焊接后 2 标记点 M_1 和 M_2 之间曲线的 z 向位移及 y 向位移的变化曲线,对 z 向位移曲线在 y 向位移变化后得到的新的 y 向坐标上进行曲线积分而得到。由图 10 可以看出,随着夹具拘束距离的增大,焊接横向收缩变形 ΔY 呈显著增大的趋势。当夹具拘束距离从 8 mm 增加到 20 mm 时,焊接横向收缩变形 ΔY 则从 0.01 mm 增大到 0.046 mm,增加了将近 3.6 倍。由此可知,夹具拘束距离对焊接横向收缩变形 ΔY 有显著的影响,对于被焊试件横向尺寸精度要求较高的结构,选择较小的夹具拘束距离可以起到很好的控制作用。

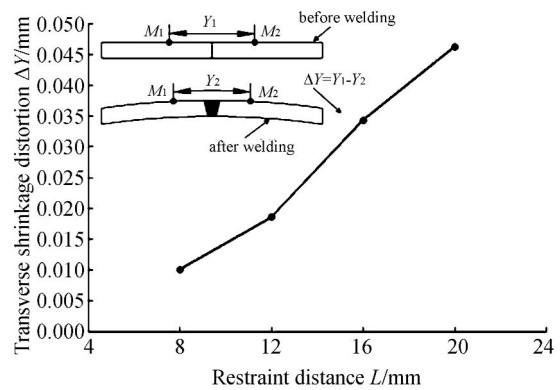


图 10 拘束距离对焊接横向收缩变形的影响

Fig. 10 Impact of restraint distance on welding transverse shrinkage distortion

图 11 为 $x=50$ mm 横截面路径上焊接横向塑性应变与夹具拘束距离的关系曲线。由图 11 可以看出,当夹具拘束距离从 8 mm 增加到 20 mm 时,焊缝横截面上的横向压缩塑性应变的分布范围变化不大,而峰值的绝对值却呈现逐渐增大的趋势。同时,在焊缝附近区域出现了横向拉伸塑性应变,而且其峰值远小于横向压缩塑性应

变峰值的绝对值,并随夹具拘束距离的增加而逐渐减小,最终导致横截面上的残余压缩塑性应变量和绝对值呈明显增加的趋势。这也说明了焊接横向收缩变形 ΔY 随夹具拘束距离的增加而增大的原因。由此可知,较小的夹具拘束距离可以使焊缝及附近区域的收缩受到强烈的反向拉伸制约,导致加热阶段产生的压缩塑性应变得到了

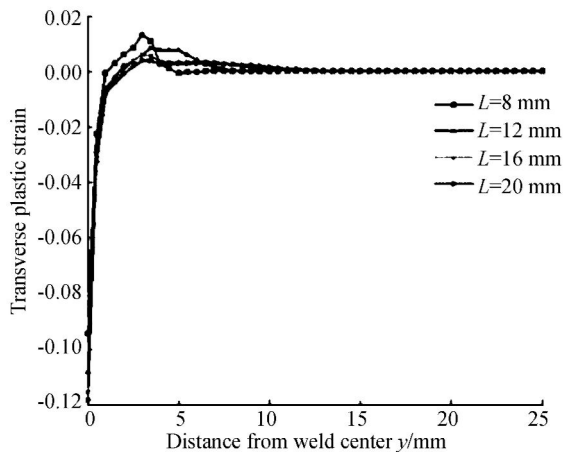


图 11 拘束距离对焊接横向塑性应变的影响

Fig. 11 Impact of restraint distance on welding transverse plastic strain

参考文献:

- [1] 张明乾, 刘昱, 李承亮. 浅谈压水堆核电站 AP1000 屏蔽式电动主泵[J]. 水泵技术, 2008, (4): 1-5. ZHANG M Q, LIU Y, LI CH L. Brief analysis on reactor coolant pump of pressurized water reactor nuclear power plant AP1000 [J]. *Water Pump Technology*, 2008, (4): 1-5. (in Chinese)
- [2] 关锐, 高永军. AP1000 反应堆主泵屏蔽套制造工艺浅析[J]. 中国核电, 2008, 1(1): 49-53. GUAN R, GAO Y J. Brief analysis on fabrication process of AP1000 reactor coolant pump can [J]. *China Nuclear Power*, 2008, 1(1): 49-53. (in Chinese)
- [3] 林诚格. 非能动安全先进核电厂 AP1000[M]. 北京: 原子能出版社, 2008. LIN CH G. *Passive Safe Advanced Nuclear Power Plant AP1000* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2008. (in Chinese)
- [4] 庄亚平. AP1000 屏蔽泵的应用分析 [J]. 电力建设, 2010, 31(11): 98-101. ZHUANG Y P. Application of AP1000 canned motor pump [J]. *Electric Power Construction*, 2010, 31(11): 98-101. (in Chinese)

很大程度的恢复,因此选取较小的夹具拘束距离可以起到很好的控制焊接横向收缩变形的作用。

5 结 论

基于 ANSYS 软件平台,结合脉冲激光对材料周期性作用的特点,建立了 0.5 mm 厚 Hastelloy C-276 合金薄板脉冲激光焊接的三维热弹塑性有限元模型。通过对比焊接热循环曲线和残余变形的模拟结果与实验结果,验证了所建立的有限元模型的可靠性。基于本模型对夹具拘束距离与焊接纵向挠度及横向收缩变形的关系进行了模拟分析。结果表明,随着夹具拘束距离的增加,焊接纵向挠曲变形及横向收缩变形都近似呈线性增大的趋势,特别是对焊接横向收缩变形影响更显著,当拘束距离从 8 mm 增加到 20 mm 时,横向收缩变形增加了将近 3.6 倍。夹具拘束距离对焊接变形产生影响的实质是改变了被焊试件中残余塑性应变量和大小。建立的有限元模型能够为 AP1000 核主泵屏蔽套脉冲激光精密焊接工艺优化提供理论参考。

- [5] 吴东江, 尹波, 周秋菊, 等. 用 Nd:YAG 激光焊接殷钢薄板材料[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 557-562. WU D J, YIN B, ZHOU Q J, *et al.*. Nd:YAG Laser beam welding invar36 alloy sheet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 557-562. (in Chinese)
- [6] 石岩, 张宏, 渡部武弘, 等. 连续-脉冲双激光束焊接钢-铝合金[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1132-1137. SHI Y, ZHANG H, TAKEHIRO WATANABE, *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 1132-1137. (in Chinese)
- [7] 马广义, 吴东江, 王占宏, 等. 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603014. MA G Y, WU D J, WANG ZH H, *et al.*. Weld joint forming of thin Hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0603014. (in Chinese)
- [8] 吴东江, 王占宏, 马广义, 等. 脉冲激光焊接 Hastelloy C-276 合金的熔池流动传热特性分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 534-540. WU D J, WANG ZH H, MA G Y, *et al.*. Analy-

- sis of fluid flow and heat transfer in weld pool during pulsed laser welding Hastelloy C-276 alloy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 534-540. (in Chinese)
- [9] LONG H, GERY D, CARLIER A, *et al.*. Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates [J]. *Materials and Design*, 2009, 30(10): 4126-4135.
- [10] MUHAMMAD Z A, DANIEL N, JEANFRANCOIS J, *et al.*. Prediction of laser beam welding-induced distortions and residual stresses by numerical simulation for aeronautic application [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(6): 2907-2917.
- [11] MUHAMMAD Z A, DANIEL N, JEANFRANCOIS J, *et al.*. Experimental investigation and finite element simulation of laser beam welding induced residual stresses and distortions in thin sheets of AA 6056-T4 [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(12): 3025-3039.
- [12] 张建强, 赵海燕, 鹿安理, 等. 夹具约束对铝合金薄板焊接变形的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(增刊 3): 165-169.
- ZHANG J Q, ZHAO H Y, LU A L, *et al.*. Effects of clamps on welding distortion in thin aluminum alloy plate [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38 (Supp 3): 165-169. (in Chinese)
- [13] 张增磊, 史清宇, 鄢东洋, 等. 夹具拘束模型在焊接过程有限元分析中的建立及应用[J]. *金属学报*, 2010, 46(2): 189-194.
- ZHANG Z L, SHI Q Y, YAN D Y *et al.*. Establishment and application of fixture constraint models in finite element analysis of welding process [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(2): 189-194. (in Chinese)
- [14] RICHTER F. Die thermophysikalischen eigenschaften der hochwarmfesten nickel-basislegierungen HASTELLOY S, HASTELLOY X und HASTELLOY C276 zwischen 20 and 1000°C [J]. *Metall*, 1988, 42(12): 1188-1191.
- [15] DE A, MAITI S K, WALSH C A, *et al.*. Finite element simulation of laser spot welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, 8(5): 377-384.

作者简介:



郭玉泉(1981—),男,黑龙江密山人,博士研究生,主要从事激光精密制造工艺及数值模拟方面的研究。E-mail: guoyuquan2009@163.com



马广义(1982—),男,辽宁大连人,博士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: gyma@mail.dlut.edu.cn



杨义彬(1987—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事激光精密制造方面的研究。E-mail: yangyibin06@163.com



佟宇(1955—),男,黑龙江通河人,高级工程师,硕士生导师,1982年于大连工学院获得学士学位,1988年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事精密加工工艺与装备设计及非标机械设计等方面的研究。E-mail: tongyu@dlut.edu.cn



郭东明(1959—),男,辽宁大连人,博士,教授,中国工程院院士,1982年于大连工学院机械制造专业获得工学学士学位,1992年于大连理工大学机械制造专业获得工学博士学位,目前主要从事精密与特种加工等方面的研究。E-mail: guodm@dlut.edu.cn

导师简介:



吴东江(1964—),男,山东昌邑人,博士,教授,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,2000年于中科院长春光学精密机械与物理所获得博士学位,目前主要从事激光与材料相互作用机理及激光精密微细加工领域的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn