

Hastelloy C-276 超薄板激光焊接变形的数值模拟

吴东江 杨义彬 马广义 王占宏 郭玉泉 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 随着脉冲激光焊接技术在精密制造领域的应用越来越广泛, 研究脉冲激光精密焊接过程中的焊接变形规律, 对于提高焊接质量具有重要意义。采用 ANSYS 的壳单元建立三维有限元模型, 模拟厚度为 0.5 mm Hastelloy C-276 超薄板的脉冲激光焊接过程。通过实验测量焊接变形的分布情况, 获得的实验结果与模拟结果一致, 验证了有限元模型的合理性。利用建立的模型, 进一步研究激光单脉冲能量输入对横向收缩变形和失稳变形分布规律的影响。结果表明, 激光的脉冲作用引起瞬时变形周期性振荡; 随着激光单脉冲能量输入的增加, 焊接件的横向收缩变形和失稳变形变大。

关键词 激光技术; 脉冲激光焊接; 焊接变形; 数值模拟; Hastelloy C-276 薄板

中图分类号 TG404 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100414

Numerical Simulation of Distortions of Pulsed Laser Welding in Hastelloy C-276 Ultra Thin Plane

Wu Dongjiang Yang Yibin Ma Guangyi Wang Zhanhong Guo Yuquan Guo Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-Conventional Machining, Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The application of pulsed laser welding technology increases in precision manufacturing. The study on the deformation characteristic of pulsed laser welding has a special significance for improving the quality of welding. A three-dimensional finite element method model is established by the shell element in ANSYS. The model simulates the process of pulsed laser welding of Hastelloy C-276 with 0.5 mm thickness. Experiments are carried out to measure the welding distortion, and the simulation results have a good agreement with the experiment results. Then, the model is used to further study the effect of single-pulse laser energy input on the transverse shrinkage distortion and buckling distortion. The results show that the periodic oscillation of the immediate distortion is caused by the pulsed laser wave. With the single-pulse laser energy input increasing, the transverse shrinkage and buckling distortion are improved.

Key words laser technique; pulsed laser welding; welding distortion; numerical simulation; Hastelloy C-276 thin plane

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3538; 140.6810

1 引 言

核能作为一种清洁能源, 具有广阔的发展前景。AP1000 是目前最先进的第三代核电站, 它采用屏蔽式核主泵, 核主泵屏蔽套是核主泵的关键部件。屏蔽套的材料为 Hastelloy C-276, Hastelloy C-276 合金是 Ni-Cr-Mo 系固溶镍基合金, 具有良好的耐蚀性和高温力学性能。屏蔽套采用薄壁大长径比结构, 厚度为 0.5 mm, 直径为 600 mm, 长度为 2000 mm。屏蔽套的特殊工作环境对屏蔽套的成形质量有严格的要求。激光焊接作为一种精密的材料连接工艺方

法, 能够大大提高屏蔽套的制造精度。与其他的焊接方法一样, 激光焊接过程是一个激光束对材料局部作用, 快速加热和冷却的过程, 在激光作用区产生很大的温度梯度, 进而引起焊接变形。目前, 国内外针对激光焊接变形已经开展了大量的研究工作。Long 等^[1]研究了焊接速度、板材厚度对焊接收缩变形和角变形的影响; Zain-ul-Abdein 等^[2~6]研究了不同的夹具约束条件对焊接变形的影响; Adak 等^[7~9]通过模拟与实验的方法研究了热沉法控制焊接变形; 李军等^[10]提出了随焊接旋转挤压控制薄板的失

收稿日期: 2011-01-30; 收到修改稿日期: 2011-03-10

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724307)资助课题。

作者简介: 吴东江(1964—), 男, 教授, 主要从事激光精密制造以及先进制造技术的研究。E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

稳变形;何小东等^[11]研究了线能量对焊接横向收缩和角变形的影响。

以往的研究主要是针对厚度为 2 mm 以上的薄板,焊接构件的长厚比、宽厚比小于 100:1,而屏蔽套的厚度仅为 0.5 mm,长厚比达到 4000:1,因此研究超薄结构的焊接变形规律有重要的理论和工程意义。与连续热源和材料的相互作用不同,脉冲激光与材料作用的一个周期分为加热和冷却这 2 个阶段,存在复杂的物理变化过程。而目前针对脉冲激光与材料相互作用过程的研究开展得还比较少。

本文采用数值模拟的方法研究脉冲激光焊接的特点和超薄板的焊接变形规律。由于屏蔽套的长厚比大,研究利用 ANSYS 中的壳单元建立有限元模型。为了简化计算量,建立尺寸为 100 mm × 50 mm × 0.5 mm,焊缝长度为 50 mm 的模型。通过实验方法验证有限元模型和计算结果,并利用建立的模型进一步研究激光单脉冲能量对超薄板焊接收缩变形和失稳变形的影响规律。

2 有限元模型

采用 ANSYS 中的壳单元 SHELL57 和 SHELL181 建立三维模型。脉冲激光焊接工艺参数如表 1 所示,激光束的加载采用高斯面热源模型。夹具约束如图 1 所示,焊接完成后去除夹具的约束,只施加不让模型产生刚性位移的约束条件,让变形自由释放。

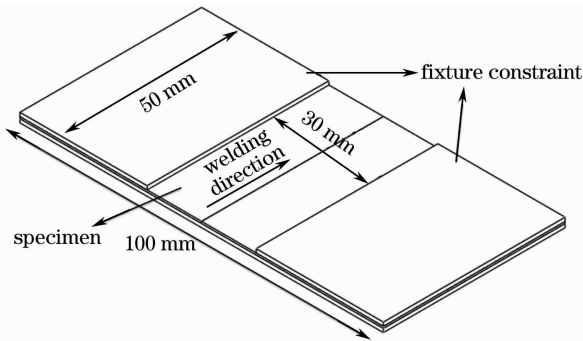


图 1 激光对接焊的夹具约束

Fig. 1 Fixture constraint of laser butt-welded joint

表 1 Hastelloy C-276 激光焊接工艺参数

Table 1 Laser welding parameters of Hastelloy C-276

Parameters	Numerical value
Pulse energy P/J	1.5
Repetition rate f/Hz	30
Pulse width b/ms	6
Velocity $V/(mm/min)$	100
Spot diameter d/mm	0.6

熔点以下的材料热物理性能和力学性能参数通过实验获得,熔点以上的材料特性参数由外推法获得。采用等效比热容法考虑焊接过程中的熔化潜热。

3 模拟计算与实验验证

采用 JK701H 型 Nd:YAG 固体脉冲激光器进行 Hastelloy C-276 薄板焊接实验,通过 CCD 监控系统和机床数控系统测量焊接前后的横向收缩变形,采用百分表测量焊接件的失稳变形。

焊接收缩变形可以分为纵向收缩和横向收缩,通过实验和模拟结果发现, Hastelloy C-276 激光焊接的纵向收缩变形量是横向收缩变形量的 10% 左右,本文主要考虑焊接过程中产生的横向收缩变形。在焊缝两侧对称选取 10 个点,分别测量焊接过程前后各点坐标在垂直于焊缝方向上的变化量,计算焊接过程产生的横向收缩变形。将横向收缩变形和失稳变形的模拟结果与实验测量结果相比较,如图 2 和图 3 所示。模拟结果和实验测量结果存在差异的主要原因是材料熔点以上的力学性能假设、模型边界条件与实际条件很难完全一致。

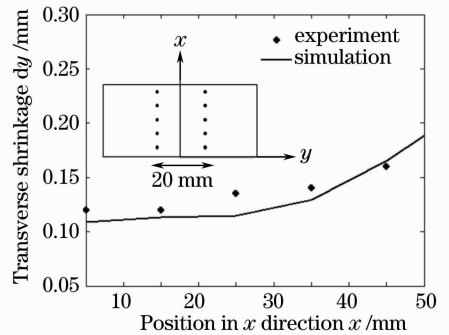


图 2 横向收缩变形模拟和实验测量结果比较

Fig. 2 Comparison between simulation and experimental results of transverse shrinkage distortion

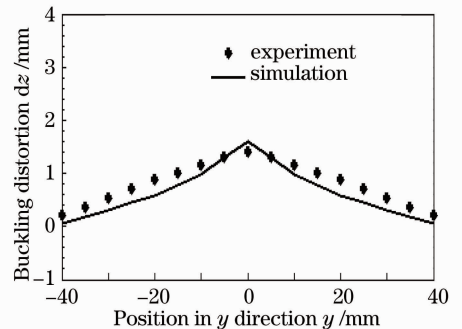


图 3 失稳变形模拟和实验测量结果比较

Fig. 3 Comparison between simulation and experimental results of buckling distortion

4 收缩变形与失稳变形分析

4.1 收缩变形

平面内收缩变形的产生有 2 个过程:在焊接加热过程中,由于材料加热膨胀受到周围材料的约束产生压应力,当压应力超过材料的屈服极限时产生压缩塑性变形;在冷却的过程中,在焊缝由液相转变为固相和焊缝区域冷却的过程中产生收缩变形。受到夹具的约束作用,使得横向压缩应力增大,横向压缩变形增加;而沿着焊缝方向受夹具约束的影响较小,纵向收缩变形相对较小。当激光单脉冲能量为 1.5 J 时,沿着焊缝方向的 3 个点(A,B,C,A 为焊接开始端,C 为末端)的横向收缩变形如图 4 所示。随着焊接过程的进行,压应力超过屈服极限产生了压缩塑性变形,同时由于焊缝金属的相变收缩,产生了横向的收缩变形。焊接过程完成后去除夹具的约束,焊接件能够在横向自由收缩变形,弹性变形得到释放,横向收缩变形瞬间增大。随着温度的降低,材料进一步收缩,直到达到室温状态,焊接件的横向收缩变形达到最大值。在焊接过程中,焊接完成区域的压缩塑性变形会对随后焊接区域产生压缩作用,A,B,C 这 3 点的横向收缩变形依次增加;同时由于焊接过程中的传热对工件有一定的预热作用,而焊接开始阶段没有经过预热作用,所以在开始阶段的收缩变形较小。因此沿着焊缝方向焊接横向收缩量不断增加,在焊接结束端收缩变形量最大。

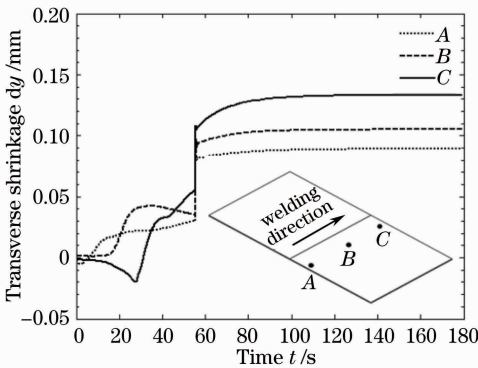


图 4 不同节点横向收缩变形随时间变化曲线

Fig. 4 Transverse shrinkage-time curves at different nodes

不同激光单脉冲能量下不同位置冷却到室温的横向收缩变形如图 5 所示。随着激光单脉冲能量的增大,材料温度升高,由材料热膨胀引起的压应力增加,产生的压缩变形增大;同时,焊接输入能量的增大引起熔池宽度增加,使得在冷却的过程中焊接横向收缩量增加。随着激光单脉冲能量的增加,焊接横向收缩变形增大,而收缩变形的增加量逐渐减小。

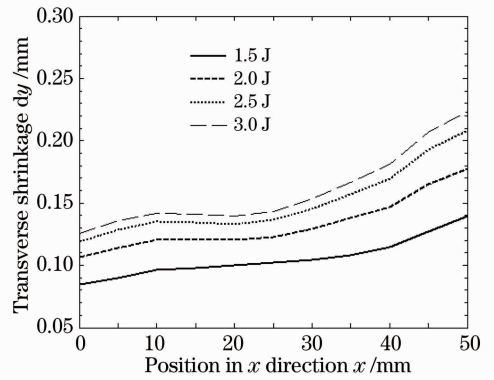


图 5 不同单脉冲能量输入的横向收缩变形

Fig. 5 Transverse shrinkage in different single-pulse laser energy inputs

4.2 失稳变形

平面外的变形是由于焊接过程中的角变形和失稳变形产生的。对于 0.5 mm 厚的薄板,厚度方向的温度梯度很小,不考虑焊接过程引起的角变形。由于夹具约束作用使得温度场引起的材料热膨胀在垂直于焊缝方向不能释放,引起横向压应力增加。当横向压应力小于焊接件自身的临界失稳应力时,薄板处于面内压缩变形的稳定平衡状态;当横向压应力超过临界失稳应力时,薄板发生横向失稳变形。而在沿着焊缝方向没有夹具的约束作用,应力和变形能够在平面内自由释放,使得纵向压应力相对较小且分布均匀,同时焊接件的焊缝距离较短,刚度增加,所以纵向失稳变形较小。图 6 为焊缝一点失稳变形随时间的变化曲线,在激光束作用之前,焊接件的失稳变形量很小;在激光束作用的区域产生了挠曲变形量并达到极大值;随着冷却过程的进行,挠曲变形量逐渐减少;当夹具约束去除以后,材料的弹性变形得到释放,焊接件的变形量急剧增大。在激光作用区一定范围内,由于激光的脉冲作用,焊接变形存在周期性的变化,变形量变化周期与激光脉冲周

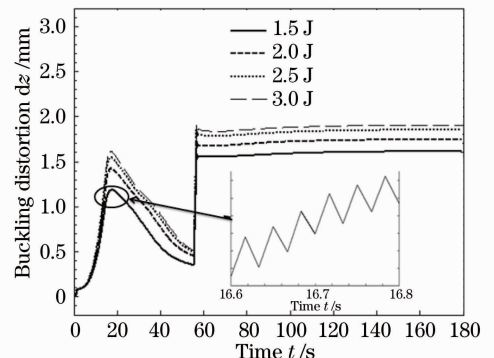


图 6 失稳变形随时间的变化曲线

Fig. 6 Buckling distortion-time curves

期和温度场的振荡周期相同。温度场和变形的周期性变化,会对焊接残余变形和残余应力的分布产生一定的影响。图7为不同单脉冲能量输入下焊接件在垂直于焊接平面方向上的最大变形量。随着单脉冲能量的增加,焊接件的温度场温度升高,材料的热膨胀引起的横向压应力增加,从而引起横向失稳变形不断增大。然而随着单脉冲能量的增加,挠曲变形的增量逐渐减小。

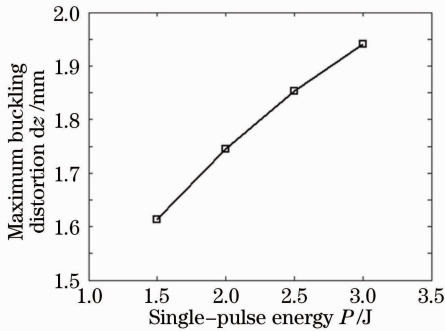


图7 不同单脉冲能量输入下的失稳变形

Fig. 7 Buckling distortion in different single-pulse laser energy inputs

5 结 论

1) 对于0.5 mm厚的Hastelloy C-276超薄板,焊接变形主要是横向的收缩变形和失稳变形;2) 在脉冲激光作用区,温度场和瞬态变形产生周期性的变化,变化周期与激光脉冲作用周期一致;3) 沿着焊接焊缝方向,横向收缩变形不断增大,收缩量在焊接末尾端达到最大值;4) 焊接夹具约束能够抑制焊接过程中产生的变形,然而在夹具释放以后会产生较大的变形释放;5) 随着激光能量输入的增加,焊接件的温度场温度升高,引起横向收缩变形和横向失稳变形增加。

参 考 文 献

1 H. Long, D. Gery, A. Carrier *et al.*. Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates[J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(10): 4126~4135

2 Muhammad Zain-ul-Abdein, Daniel Nelias, Jean-Francois Jullien *et al.*. Prediction of laser beam welding-induced distortions and residual stresses by numerical simulation for aeronautic application [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2009, **209**(6): 2907~2917

3 Muhammad Zain-ul-Abdein, Daniel Nelias, Jean-Francois Jullien *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

4 T. Schenk, I. M. Richardson, M. Kraska *et al.*. A study on the influence of clamping on welding distortion [J]. *Computational Materials Science*, 2009, **45**(4): 999~1005

5 T. Schenk, I. M. Richardson, M. Kraska *et al.*. Influence of clamping on distortion of welded S355 T-joints [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, **14**(4): 369~375

6 C. Liu, J. X. Zhang. Numerical simulation of transient welding angular distortion with external restraints [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, **14**(1): 26~31

7 M. Adak, N. R. Mandal. Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, **34**(1): 146~158

8 Yao Junshan, Zhang Yanhua, Zhang Chongxian *et al.*. Research on effect of forced-heat-transfer on buckling distortion of thin plate during welding [J]. *J. Mechanical Engineering*, 2000, **36**(9): 55~60

姚君山, 张彦华, 张崇显等. 有源强化传热控制薄板焊接压曲变形的研究[J]. *机械工程学报*, 2000, **36**(9): 55~60

9 Wen Peng, Zhang Xudong, Chen Wuzhu *et al.*. Buckling distortion of laser welded thin plates and its control by dynamic cooling [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(9): 99~102

温鹏, 张旭东, 陈武柱等. 薄板激光焊时失稳变形及其控制 [J]. *焊接学报*, 2006, **27**(9): 99~102

10 Li Jun, Yang Jianguo, Liu Xuesong *et al.*. New method to control residual stresses and distortion by welding with trailing rotating extrusion [J]. *J. Mechanical Engineering*, 2010, **46**(12): 81~85

李军, 杨建国, 刘雪松等. 随焊旋转挤压控制薄板焊件应力变形新方法 [J]. *机械工程学报*, 2010, **46**(12): 81~85

11 He Xiaodong, Zhang Jianxun, Gong Shuili *et al.*. Finite element analysis of laser welding residual stress and distortion in welded joints of TC4 titanium alloy [J]. *J. Materials Engineering*, 2005, (8): 39~42

何小东, 张建勋, 巩水利等. TC4钛合金激光焊接应力变形有限元分析 [J]. *材料工程*, 2005, (8): 39~42