

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.010

基于 ANSYS 的激光焊接温度场数值模拟与实验研究

张立艳, 董万鹏, 刘雅芳, 张学奇

(上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘 要:为了探究钢铝2种金属材料的焊接性能,以B1500HS高强度钢和6016铝合金为对象,基于ANSYS平台建立钢/铝激光平板搭接焊的三维有限元模型,进行焊接过程温度场数值模拟,采用热电偶同步测温方法测得焊接热循环曲线。将实测结果与数值模拟结果对比分析,表明吻合度较好。验证了模拟计算的准确性。

关 键 词:激光焊接;数值模拟;温度场;搭接焊

中图分类号: TG406

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2017)01-0045-05

Numerical Simulation of Thermal on Laser Welding and Experimental Study Based on ANSYS

ZHANG Liyan, DONG Wanpeng, LIU Yafang, ZHANG Xueqi

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Based on the principle of laser braze welding and B1500HS high-strength steel and the 6016 aluminum alloy, three-dimensional finite element model of the steel/aluminum laser lap welding of plate was established with tie fiber laser using ANSYS software, to start numerical simulation of temperature field. Thermocouple temperature measurement method was used to measure the welding thermal cycle curve of relevant points on the workpiece. The measured results and simulation structure were analyzed in this paper, which verified the accuracy of the simulation.

Keywords: laser welding; numerical simulation; temperature distribution; laser lap welding of plate

当前铝合金轻型材料在工业制造领域中的应用越来越广泛^[1],大量轻型金属材料的应用,涉及到很多钢铝异种材料的连接问题。激光焊接是利用高能量密度激光束为热源轰击焊件所产生热量的一种焊接方法,与传统的熔化焊相比焊接速度快,生产效率高,能量密度高,热输入小,焊缝质量好,具有热影响区窄,焊接变形小、适应性强、精度高等优点而得到广泛应用^[2-3]。激光焊接是异种金属连接^[4-6]的理想方式。由于钢铝2种金属材料之间的固溶度低、晶体结构和物理化学性能差异明显,在焊接冶金过程中极易发生反应生成Fe/Al脆性的金属间化合物,会降低接头的综合性能,这一直是焊接研究的热点和难点^[7-9]。

以B1500HS高强度钢与6016铝合金为研究对象,笔者利用ANSYS对不同工艺参数下钢铝2种金属材料焊接过程进行温度场数值模拟,进而得到不同工艺参数条件下的温度场,以为实际工程应用提供参考。

1 实验

1.1 设备及实验材料

激光焊接试验采用最大输出功率为5 000 W的IPG-YLS-5000型光纤激光器,保护气体为Ar,整个激光器工作系统由激光器、工作台、运动控制装置、气体保护装置和视频监控装置组成。

实验母材采用材料为1.0 mm厚的B1500HS高强度钢和1.2 mm厚的6016铝合金,线切割后尺寸均为

收稿日期:2016-06-21;修回日期:2016-10-20

基金项目:上海工程技术大学研究生科研创新项目(15KY0508)。

第一作者简介:张立艳(1988),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为钢铝激光焊接轻量化设计。通信作者:董万鹏(1976),男,上海人,副教授,高级工程师,主要研究方向为激光焊接技术。E-mail: dong@sues.edu.cn

120.0 mm × 40.0 mm × 1.2 mm。2种材料的化学成分如表1~2所示。

表1 B1500HS钢板的化学成分

Table 1 Chemical composition of B1500HS steel plate

合金元素	质量分数/%	合金元素	质量分数/%
C	0.230 0	Cr	0.190 0
Si	0.250 0	Mo	0.040 0
Mn	1.350 0	B	0.003 2

表2 6016铝合金的化学成分

Table 2 6016 aluminum alloy chemical composition of steel plate

合金元素	质量分数/%	合金元素	质量分数/%
Si	1.100 ~ 1.500	Mn	0.070 ~ 0.100
Mg	0.500 ~ 0.600	Cu	0.095 ~ 0.200
Fe	0.100 ~ 0.500	Ti	0.020 ~ 0.150
Zn	0.025 ~ 0.200		

焊接过程中采用K型热电偶对熔池附近板材的温度进行同步测温,将测量值与模拟结果进行对比。

2 温度场数值计算

2.1 有限元模型建立及网格划分

采用6016铝合金和B1500HS高强钢激光搭接焊试验建立热传导模型。上层材料为1.2 mm厚6016铝合金,下层材料为1.0 mm厚的B1500HS高强钢,搭接长度为15.0 mm。图1为焊件结构示意图。

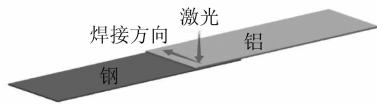


图1 焊件结构示意图

Figure 1 Structure of welding parts

由于焊接加热过程的不均匀性,焊缝区域温度梯度变化大,故需要采用较密的网格划分^[10],采用映射法划分网格。对温度变化不显著的远离焊缝区域,用较稀疏的网格划分,本研究采用自由网格划分法。网格划分有限元模型如图2所示,包含29 889个节点,24 000个单元。

2.2 材料热物理性能

导热系数、比热容、密度和对流换热系数等为温度场模拟的材料热物性参数。焊接加热时产生的能量密度很高,金属材料局部温度瞬时升温较高,材料的热物理性能随温度发生较大变化^[11-12]。利用Jmatpro软件,输入材料的合金成分,预测出密度、比热容和热导

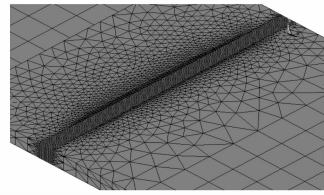
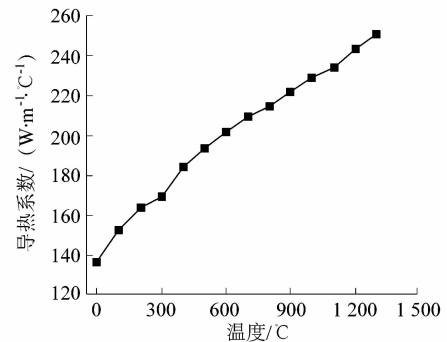


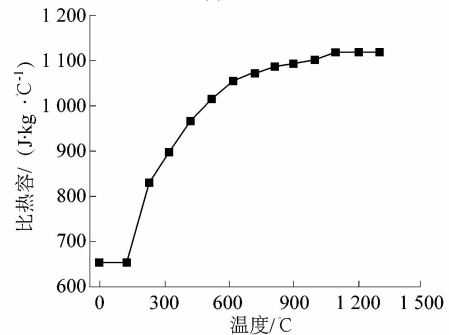
图2 网格划分局部示意图

Figure 2 Local sketch map of mesh

率等物理参数随温度变化值,确定2种材料各项热物性参数的取值,如图3~4所示。



(a) 导热系数



(b) 比热容

图3 铝合金的热物性参数

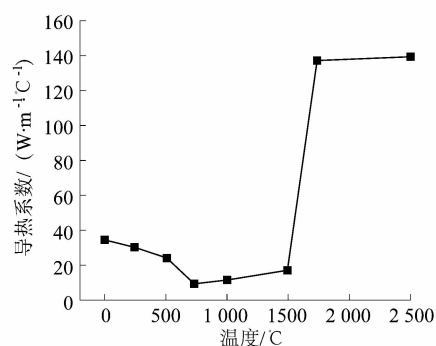
Figure 3 Thermal physical properties of aluminum alloy

2.3 边界条件和热源

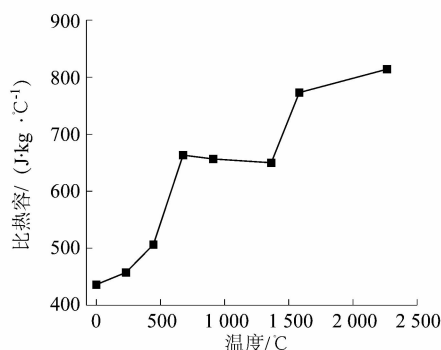
焊接前焊件温度为室温20 °C。利用APDL^[13-14]语言,创立表面高斯热源,在焊接有效区域加载。实际焊接过程中,由于焊接表面与外界环境存在温度差,会发生复杂的辐射对流热交换,在对流面添加对流边界条件。为了简化计算,综合考虑辐射换热作用与对流换热,用一个总的换热系数 Q 表示,

$$Q = \beta(T - T_0).$$

式中: T 为焊件表面温度, T_0 为周围环境温度; β 为表面换热系数, $\beta = \beta_c + \beta_r$, β_c 为对流换热系数, β_r 为辐射换热系数。



(a) 导热系数



(b) 比热容

图4 钢的热物性参数

Figure 4 Thermal physical parameters of steel

3 数值计算结果与分析

3.1 计算结果

激光焊接热源属于高能束焊接,加热半径小且焊接速度快^[15-16]。为便于全面观测激光焊接温度场的分布

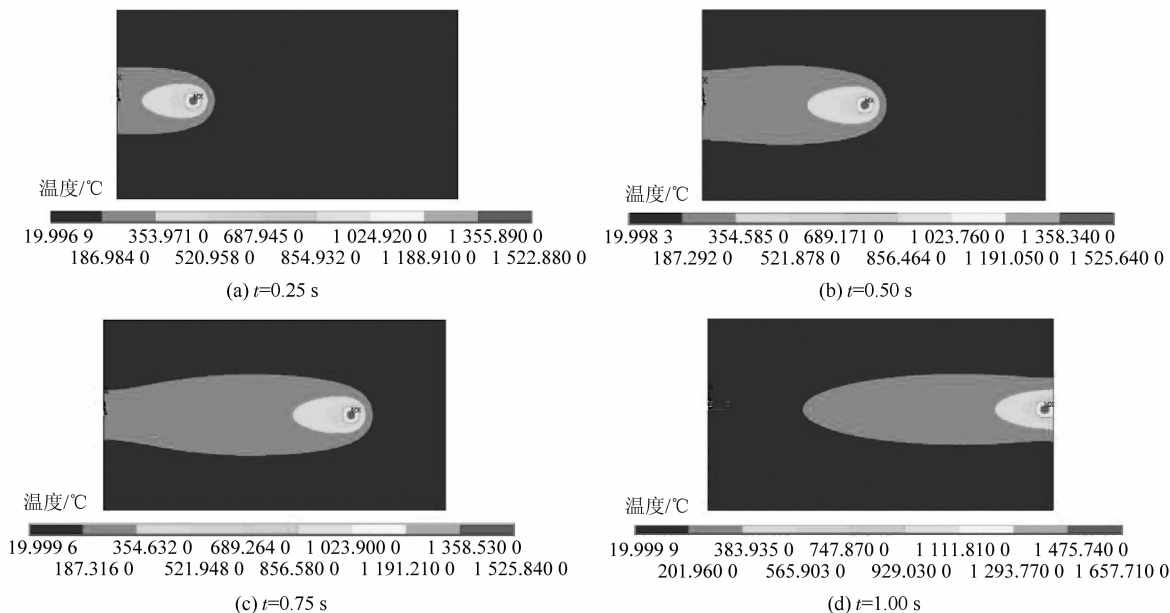


图5 不同时刻表面温度分布

Figure 5 Surface temperature distribution at different time

特点,笔者从表面和纵向截面温度场2个方面研究。

1) 表面温度场

温度分布工艺参数为:激光功率 1 800 W,焊接速度 40 mm/s,光斑半径 1.0 mm。取 4 个时间点分别为 0.25,0.50,0.75,1.00 s 研究温度场分布。随着光源的移动得到相应的焊接温度场分布如图 5 所示。

由图 5 可知,随着激光焊接热源的移动,焊接熔池形态基本保持不变,温度场呈准稳态。激光焊接熔池较小,大致呈椭球形,焊接温度场中各个点的温度随时间而变化。加热初期,焊件升温迅速,温度场变化剧烈;到 0.50 s 时,温度场呈近似椭圆形的准稳态,其中,越靠近激光中心的位置,温度越高,中心最高温度达到 1 657.71 °C;在焊接结束时,温度较低。

2) 纵截面温度场

纵向截面温度场的工艺参数分 3 组(表 3),温度分布如图 6 所示。

表3 工艺参数条件

Table 3 Condition of technics parameters

焊接工艺参数	功率 P/W	速度 $V/(mm \cdot s^{-1})$	光斑半径/mm
I	1 800	40	1.0
II	2 200	25	0.8
III	2 600	35	0.6

由图 6 可以看出激光焊接过程中纵截面的温度分布等值线呈勺状,激光光斑中心前沿的温度较低、熔池较浅,光斑后沿的温度较高、熔池较深。随着热量输入的增加焊接熔深增大,通过测量计算 3 组不同工艺参

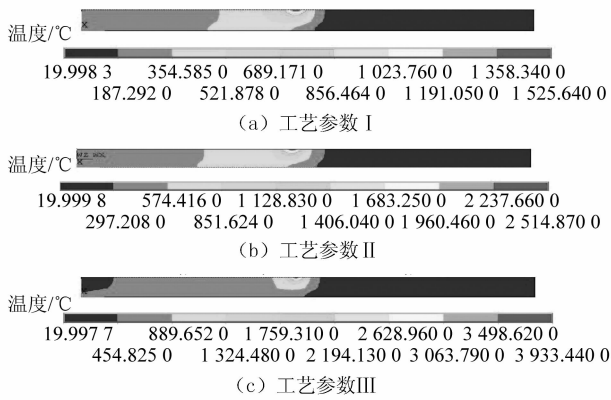


图6 不同工艺参数纵截面温度分布图

Figure 6 Temperature distribution of longitudinal section

数条件下的焊接熔深分别为0.97,1.20,1.24 mm。

3.2 焊接热循环曲线

笔者利用 ANSYS-POST26 时间-历程后处理器获得了各节点的焊接热循环曲线。以激光功率 1 800 W,焊接速度 40 mm/s,光斑半径 1.0 mm 为例,说明激光焊温度分布规律。

沿焊缝中心线方向距焊接起始点距离分别为 6, 12,18,24 mm 选取 4 个点,如图 7 所示。焊缝中心线上 4 个点加热速度很快,温度上升曲线近乎垂直于时间轴,几乎在热源到达选取点瞬间温度上升至最高值。并且,各点在高温上停留时间和相变温度区间内停留时间较短。热源过后,选取点温度逐渐降低,冷却速率较大,并且随着时间延续,冷却速率逐渐降低。

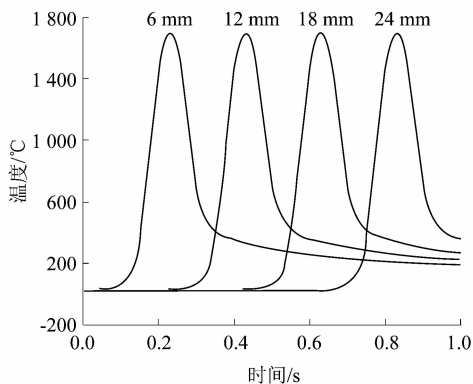


图7 温度沿焊缝方向变化

Figure 7 Long direction of weld

在垂直焊缝中心线方向依次选取距焊缝中心的垂直距离分别为 0,1,3,5 mm 4 个节点,利用 ANSYS 中时间后处理器得到各点温度时间历程变化曲线,如图 8 所示。距离焊缝中心线越近的点,在焊接加热过程

中,其温度上升的速率就越大,可以达到的峰值温度也就越大。在焊后冷却过程中,温度降低速率也越大。1 mm 和 3 mm 处节点之间温度相差较大,体现了激光焊接热源半径小,能量集中的特点。

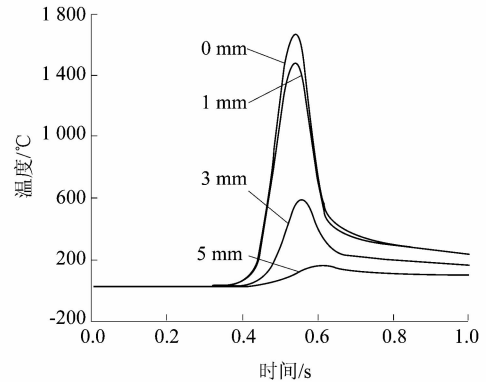
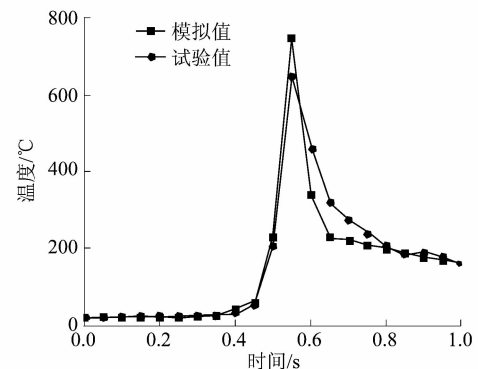


图8 温度沿垂直焊缝方向变化

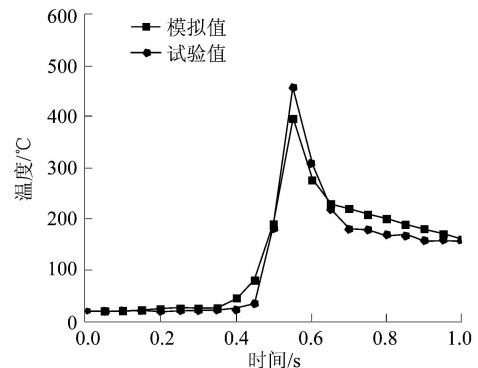
Figure 8 Long direction of vertical weld

3.3 试验结果与模拟结果的对比

在激光功率 1 800 W,焊接速度 40 mm/s,光斑半径 1.0 mm 下,采用高温热电偶测温试验测得各点的热循环曲线与模拟结果的对比如图 9 所示。



(a) 距离焊缝 2 mm 处



(b) 距离焊缝 4 mm 处

图9 试验测得各点的热循环曲线与模拟结果对比

Figure 9 Comparison of thermal cycling curves and simulation results for each point

由图9可知,2点处的升温、降温速度与模拟结果吻合度较好。激光焊接过程中,当热源中心到达被测位置点时,该点在极短时间内上升至最高温度,加热速度很快。热源中心经过以后,待测位置点处温度降低,温度下降速率随时间增加而趋于平稳。

4 结论

1) 基于 ANSYS 平台建立了铝钢平板搭接激光焊的三维有限元模型,利用 APDL 参数化设计语言,编制用于实现平面高斯热源的加载和移动的子程序,解决了焊接热源移动的数值模拟问题。

2) 激光熔钎焊的表面温度场呈椭圆形分布,且分布不均匀,光斑前沿的温度梯度大,等温线密集,光斑后沿的温度梯度小,等温线稀疏。纵截面温度场分布呈勺状,光斑前沿的温度较低、熔池较浅,光斑后沿的温度较高、熔池较深。

3) 采用热电偶同步测温方法测得焊接热循环曲线,试验结果与数值模拟结果吻合较好,验证了模拟计算的准确性。

参考文献:

- [1] 陈树海,张茗馨,李猛,等. 钢/铝异种金属光纤激光熔钎焊数值模拟[J]. 焊接学报,2015,36(10):21-25.
- [2] 李亚江,李嘉宁. 激光焊接/切割/熔覆技术[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [3] 李亚江,王娟. 特种焊接技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [4] 虞钢,赵树森,张永杰,等. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光,2009,36(2):261-268.
- [5] 刘中青,刘凯. 异种金属焊接技术指南[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [6] 周恬武,吴平,彭利,等. 镀 Zn 钢-6016 铝合金异种金属的激光熔钎焊及数值模拟[J]. 中国有色金属学报,2012,22(6):1738-1746.
- [7] 彭利,周恬武,徐少华,等. 镀 Zn 钢-6016 铝合金激光焊接组织性能与第一原理计算[J]. 中国有色金属学报,2012,22(1):230-238.
- [8] 张明军,陈根余,李时春,等. 车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究[J]. 中国激光,2011,38(6):134-139.
- [9] 雷振,王旭友,王伟波,等. 铝/镀锌钢复合热源熔一钎接头中的 Al-Fe 金属间化合物层分析[J]. 焊接学报,2007,28(11):65-68.
- [10] BALASUBRAMANIAN K R, BUVANASHEKARAN G, SANKARANARAYANASAMY K. Modeling of laser beam welding of stainless steel sheet butt joint using neural networks[J]. CIRP journal of manufacturing science and technology,2010,3(1):80-84.
- [11] 曾志,王立君. 5A06 铝合金材料高温热物理参数的工程估算方法[J]. 焊接学报,2007,28(11):101-105.
- [12] PIEKARSKA W, KUBIAK M. Three-dimensional model for numerical analysis of thermal phenomena in laser-arc hybrid welding process[J]. International journal of heat and mass transfer,2011,54(23/24):4966-4974.
- [13] 阙前华,张娟,谭长建,等. ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发[M]. 北京:电子工业出版社,2006:237-261.
- [14] 刘雅静,李鹍,宋丙新. 基于 Ansys Workbench 激光焊接热固耦合数值计算与实验研究[J]. 激光杂志,2014,35(7):89-93.
- [15] YAMAMOTO M, SHINOZAKI K, KADOI K, et al. Development of hot-wire laser welding method for lap joint of steel sheet with wide gap[J]. Quarterly journal of the Japan welding society,2011,29(3):58s-61s.
- [16] 封小松,陈树海,李俐群,等. 铝/钛异种合金激光熔钎焊接头温度分布[J]. 焊接学报,2009,30(10):9-12.

(上接第44页)

- [5] HALLQUIST J O. LS-DYNA keyword use's manual version 970[M]. California:Livermore Software Technology Corporation,2003.
- [6] OZEL T, ALTAN T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting[J]. International journal of machine tools & manufacture,2000,40(1):133-152.
- [7] 武文革,黄美霞. 基于 DEFORM. 3D 的高速车削加工仿真[J]. 现代制造工程,2009(11):91-95.
- [8] 赵腾伦. ABAQUS6. 6 在机械工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [9] 刘胜永,万晓航,董兆伟. 刀屑摩擦对切削加工影响的有限元分析[J]. 有色金属,2007,59(3):33-36.
- [10] 刘胜永,郝宏伟,万晓航,等. 金属切削中的摩擦数值分析[J]. 机械设计与制造,2007(4):119-121.
- [11] 张倩,占君. 切削速度影响切削力的有限元模拟[J]. 工具技术,2008,42(6):71-73.
- [12] 谢峰,赵吉文,刘正士,等. 二维金属切削过程的数值模拟[J]. 系统仿真学报,2004,16(7):1412-1417.