

文章编号: 1001-3806(2016)04-0606-04

钢/铝异种金属光纤激光焊接数值模拟

杨洪亮, 金湘中*, 修腾飞, 费鑫江, 叶颖

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 为了研究钢/铝异种金属激光深熔焊接的温度分布情况, 采用有限元 ANSYS 软件建立了钢/铝异种金属激光对接焊的数学模型, 对焊接温度场进行了模拟。通过计算模拟得到了不同时刻的温度场分布云图、试件表面节点的热循环曲线以及焊接速率对温度场变化的影响, 并与实际焊接试验结果进行了对比。结果表明, 焊接温度场呈非对称分布, 钢一侧的温度梯度大于铝合金一侧的温度梯度; 随着焊接速率的增大, 热源中心的最高温度会逐渐降低, 焊接熔池的熔宽也会随之逐渐变小。模拟的焊缝形状与实际焊接实验得到的焊缝截面的熔合线基本一致, 熔池熔宽的模拟结果与实验结果误差在 5% 以内, 验证了模拟结果的准确性。

关键词: 激光技术; 激光焊接; 温度场; 数值模拟; 钢/铝异种金属

中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.031

Numerical simulation of fiber laser welding of steel/aluminum dissimilar metals

YANG Hongliang, JIN Xiangzhong, XIU Tengfei, FEI Xinjiang, YE Ying

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the temperature distribution for laser butt welding of dissimilar metal steel/aluminum, a mathematical model was established and welding temperature field was also simulated by ANSYS software. Temperature distribution at different time and the thermal cycling profile at the node on specimen surface were obtained. The effect of welding speed on welding temperature field was studied. The results were compared with the actual welding. The results show that, the welding temperature field is asymmetrically distributed and the temperature gradient in steel side is greater than that in aluminum side; With the increase of welding speed, the maximum temperature reduces gradually and weld width also decreases gradually. The weld shapes obtained from simulation and experiments are consistent, and the error is less than 5%. The study can verify the accuracy of simulation results.

Key words: laser technique; laser welding; temperature field; numerical simulation; steel/aluminum dissimilar metals

引言

汽车轻量化是目前汽车工业中用来实现汽车节能、环保和安全要求的重要技术手段。汽车工业中大多采用铝合金代替钢材的方法来减轻车身重量, 这导致钢/铝异种金属的连接逐渐增多, 国内外越来越多的专家学者研究钢/铝异种金属的连接技术^[1]。然而, 钢和铝两种金属材料在物理和化学性能方面存在着巨大的差异, 并且钢与铝的固溶度非常低, 在进行钢/铝异种金属焊接时容易导致脆性 Fe-Al (FeAl, FeAl₂, FeAl₃, Fe₂Al₅, Fe₂Al₇) 金属间化合物的产生^[2-3]。因此, 钢/铝异种金属焊接非常困难, 是一大技术难点。激光焊接技术就是将光斑直径很小的激光束照射到焊

缝处, 通过激光的辐射能量来实现金属焊接。激光焊接能够实现激光束的可控性输入, 且焊接后金属板材变形较小, 因此, 激光焊接是能够实现钢/铝异种金属连接的一种有效焊接方法^[4]。激光焊接的热影响区窄, 熔池内部有着比较大的温度梯度, 而熔池内部温度对钢/铝异种金属激光深熔焊接中脆性化合物的生长有重要影响。为了了解异种金属焊接过程中温度场的变化, 目前国内外许多学者对异种金属的焊接过程进行了模拟研究^[5-7]。

CHEN^[8]等人通过采用 ANSYS 仿真模拟和工艺试验相结合的方法, 分析研究了 V 型坡口对钢/铝异种金属激光对接熔钎焊性能的影响。结果表明, 在镀锌钢板上开设 V 型开口能够有效地减小结合界面靠近上表面和靠近下表面的温度梯度; 通过工艺实验证明 V 型坡口能够提高焊接接头的拉伸性能。SONG 等人采用软件 FLUENT 建立了铝/钢钨极惰性气体熔钎焊数学模型, 并模拟了焊接温度场和流场^[9], 结果表

作者简介: 杨洪亮 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光深熔焊接。

* 通讯联系人。E-mail: jxz2014@hnu.edu.cn

收稿日期: 2015-04-15; 收到修改稿日期: 2015-05-20

明,焊接温度场呈现明显的非对称分布,钢板一侧的温度梯度要大于铝合金一侧的温度梯度。通过流场模拟计算得到熔池内的最大流速为0.449m/s,流体流动过于剧烈,流体流动时所形成的涡流会导致熔池内低沸点金属蒸发,这样极易在焊接接头中生成气孔。

本文中在实际焊接试验观察的基础上,建立了钢/铝异种金属激光光纤对接焊的温度场模型,采用ANSYS软件模拟分析了焊接温度场,可为优化焊接工艺提供依据。

1 激光焊接温度场模拟计算

1.1 基本假设

基本假设为:(1)不考虑高温下材料汽化与化学反应的影响;(2)认为材料是均匀的并具有各向同性;(3)忽略材料的表面热辐射以及焊接过程中等离子体对激光吸收的影响;(4)本次模拟是以实际焊接实验为参考,实际试验中为了抑制和减少钢/铝化合物的产生选择0.1mm的镍片作为填充材料,在模拟中忽略镍片对焊接温度的影响^[6]。

1.2 控制方程

钢/铝异种金属激光深熔焊接温度场分析是典型的非线性瞬态热传导问题。在直角坐标系(x,y,z)中,被照射的物体表面温度T(x,y,z,t)满足导热控制方程^[10]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

式中,c为材料的比热容,ρ为材料的密度,λ为材料的导热系数,T为材料的温度函数,t为时间,Q为内热源强度。

1.3 焊接热源模型的选取

模拟采用的热源模型为面-体组合热源,该热源模型中采用高斯面热源来模拟等离子体和表面熔池对工件的加热作用,而用高斯圆柱体热源来模拟激光深熔焊接的小孔效应,如图1所示。RAMANAN^[11]通过实验确定了作用在工件表面和小孔内部的能量分别为总能量的25%和75%,计算时分别通过热流密度和体载荷的形式带入到控制方程中。

上表面热源服从高斯分布,如图2所示,其函数表达式为:

$$q = \frac{aP}{\pi R^2} \exp \left[- \left(\frac{ar^2}{R^2} \right) \right] \quad (2)$$

式中,a为热流集中程度系数,当a的值为1,2,3时,对应的高斯热源的能量分布百分比分别为63.2%,86.4%,95.05%,本次模拟中取a=2;R为热流分布的特征半径;P为有效功率,取为入射激光功率P₀的80%。

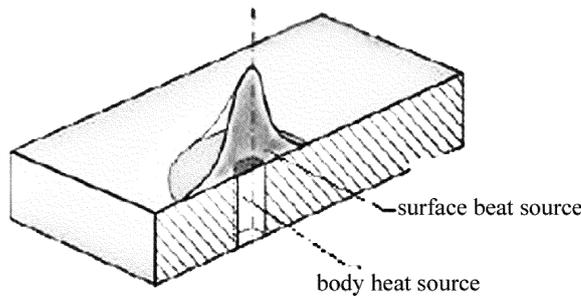


Fig. 1 Model for composite heat source

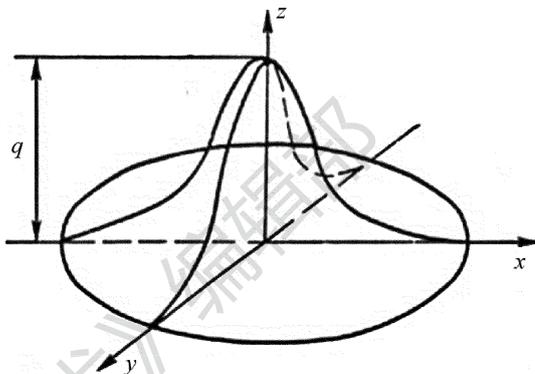


Fig. 2 Gaussian heat source distribution

假设小孔内部的能量为高斯圆柱体热源,在高度方向上均匀分布,则体热源表示为:

$$q(r,z) = \frac{2P}{\pi r_0^2 h} \exp \left(- \frac{2r^2}{r_0^2} \right) \quad (3)$$

式中,r₀是热源的有效作用半径,计算取r₀=R/2^[11],即约为0.4mm;h为试件厚度。

1.4 材料物理性能参量

实际焊接工艺试验中所选用材料为Q235和6061-T6铝合金。金属材料的热物理性能参量包括比热容、密度和传热系数等,但是这些参量一般随金属材料温度的变化而变化,因此不能够得到准确的数值。本文中选用常温下的热物性参量进行模拟,见表1。

Table 1 Thermal-physical property parameters of Q235 and 6061-T6

material	density ρ/ (kg · m ⁻³)	thermal conductivity λ/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	specific heat capacity c/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
Q235	7860	77.5	460
6061-T6	2700	167	900

1.5 计算模型和网格划分

本节中采用ANSYS建模时,考虑到计算精度与计算时间后选取焊缝附近的一小块区域建立几何模型,尺寸定位20mm×10mm×3mm。本文中为钢/铝异种金属焊接模拟,因此划分网格比较困难,为了保证计算结果能够有效地收敛,网格划分时,模型整体采用较密网格划分,网格大小为0.2mm,模型和网格划分结果如图3所示,整个模型一共生成150000个单元和163216个节点。

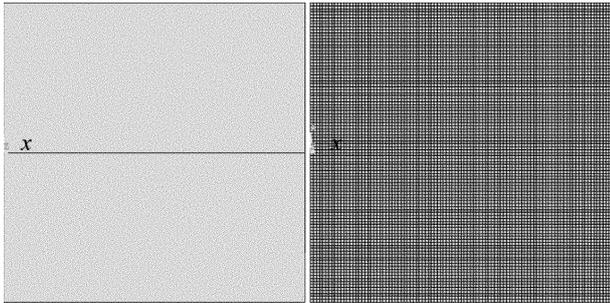


Fig. 3 Thermal model and finite element mesh

1.6 边界条件处理

ANSYS 瞬态热分析中要得到正确的计算结果必须定义边界条件和初始条件。初始条件即零时刻的情况,本次模拟中材料的初始温度定义为 20℃。考虑到母材与周围环境间的热对流引入了热对流系数,主要通过母材的表面进行,与周围环境的热对流系数为 30W/(m²·K),与底座夹具间的热对流系数定为 150W/(m²·K)。

2 模拟结果与分析

2.1 整体焊接温度场分布

图 4 所示为激光功率 2200W、焊接速率 $v = 10\text{mm/s}$ 、光斑直径为 1.6mm 的瞬态温度场分布云图。在图中显示了焊接加热过程中不同时刻焊件的温度场分布情况,依次取时间点为 0.2s, 0.6s, 0.8s, 1.2s。从图中可以看出:钢/铝异种金属激光深熔焊接的温度场在焊缝两侧呈现非对称分布,钢一侧的温度梯度要大于铝合金一侧的温度梯度,而且等温线也更加密集,这是由于钢/铝两种金属试件的导热率和熔点存在差异;焊接热源附近温度梯度大,等温线相对较为密集,在热源附近等温线类似于圆形。在热源后方远离热源区,等温线相对稀疏,等温线类似于椭圆形。

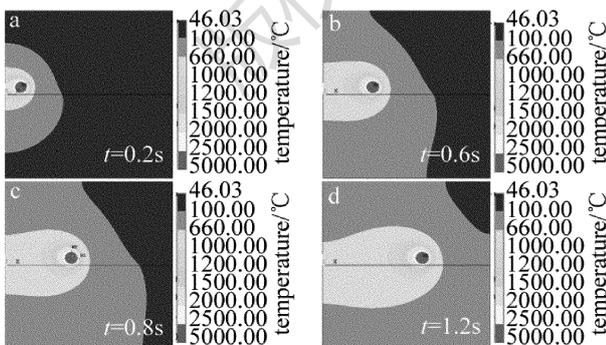


Fig. 4 Distribution of temperature field in different times

2.2 焊接热循环曲线

在激光焊接工件的上表面,沿着焊缝方向,在焊缝中心线上取 6 个节点,节点距离为 4mm,图 5 所示为所选节点(图中曲线 1~曲线 6 表示所选节点)的热循环曲线。从图中可以看出,当焊接刚开始时,热源中心的

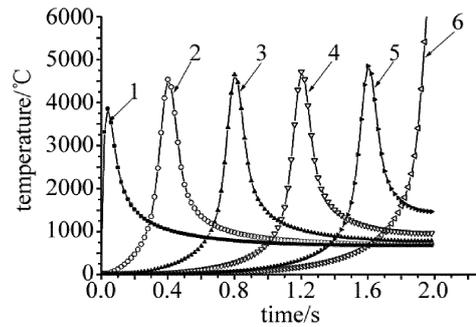


Fig. 5 Thermal cycle curve of weld direction

温度相对较低,随着热源沿焊缝的移动会导致焊件表面直接作用区域的温度急剧上升,相应地节点处的温度也会随着热源中心的离开而迅速下降。在焊接试件末端,节点的最高温度会有一个突变,这是由于在焊接工件末端时热源作用处前方没有新的材料吸收传导热量,造成热量瞬时集中而使该部分的热量瞬时升高到最大值所致。

2.3 焊接速率对温度场的影响

激光焊接速率是一个非常重要的参量,它对焊接质量有十分重要的影响。选用激光功率 $P = 2200\text{W}$,光斑直径 1.6mm,模拟计算了焊接速率分别为 10mm/s, 15mm/s, 20mm/s, 25mm/s 的温度场分布情况。图 6 为 4 个不同焊接速率同一时刻 ($t = 0.5\text{s}$) 下的温度场分布云图。从图中可以看出,随着焊接速率的增大,熔池最高温度逐渐的减小;同时也可以看出随着焊接速率变大,熔池的熔宽会逐渐变小,如图 7 所示。这是因

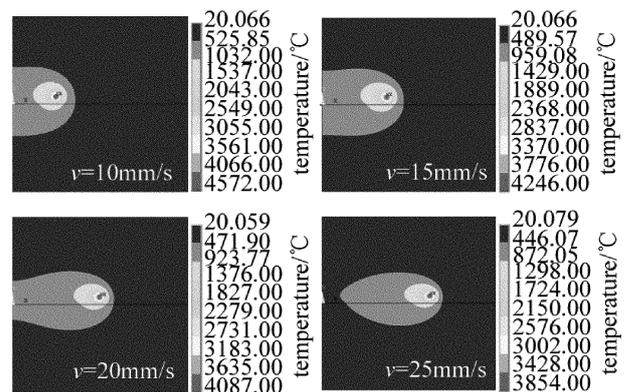


Fig. 6 Distribution of temperature field at different welding speed

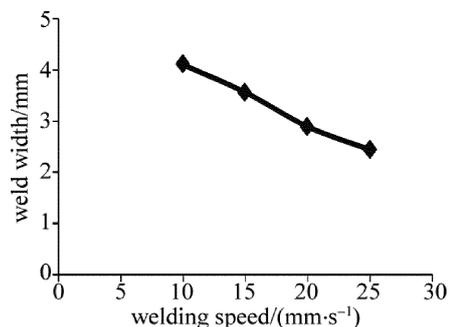


Fig. 7 Relationship between weld width and welding speed

为,在保持其它工艺参量不变的情况下,当速率增加时,单位面积上的能量输入就会相应的减小,所以导致熔池温度降低。

2.4 温度场模拟结果验证

模拟结果需要与工艺实验结果进行对比来验证其准确性。采用 YLR-4000-C-WA 光纤激光器进行焊接工艺实验,激光器最大输出功率为 4.0kW,光束波长为 1.07 μm ,输出模式为 TEM00,并且严格保证工艺参量一致。实验中所获得的焊缝照片与模拟分析获得的工件横截面的温度场分布云图的对比如图 8 所示。从图中可以看出,模拟得到的熔池边界呈现上宽下窄的形状,这与实验中所获得的焊缝截面基本吻合,验证了模拟结果的准确性。表 2 中列出了该工艺参量下的焊缝的正反面宽度的模拟计算值和实验测试值。可以看出,模拟结果与实验结果有误差,但是误差在 5% 以内。由此可见,所建立的面体复合热源模型是合理的,可以用于激光焊接温度场的模拟。

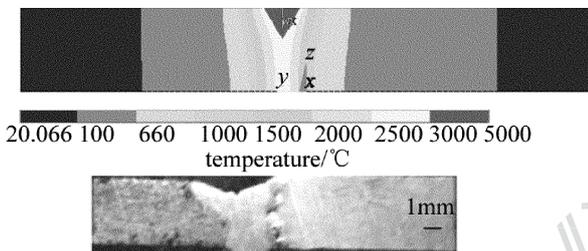


Fig. 8 Weld cross-section morphology

Table 2 Comparison of weld width

	positive weld width/mm	back weld width/mm
the simulation results	3.45	2.56
the experimental results	3.3	2.6

3 结论

(1) 根据钢/铝激光深熔焊接过程建立有限元模型进行温度场模拟,在模拟过程中采用由高斯面热源和高斯圆柱体热源组成的面-体组合热源模型。

(2) 焊接温度场呈现非对称分布,钢一侧的温度

梯度要大于铝合金一侧的温度梯度;焊接表面节点的温度急剧上升然后又迅速下降;焊接速率越高,熔池最高温度越低,焊接熔池熔宽越小。

(3) 模拟得到的熔池边界呈现上宽下窄的形状,这与实验中所获得的焊缝截面基本吻合,熔宽误差在 5% 以内,这验证了有限元模拟结果的准确。

参 考 文 献

- [1] MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J, *et al.* Recent development in aluminum alloys for the automotive industry[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A280(1): 37-49.
- [2] LI J. Research on steel-aluminum thin plate joint with laser welding [J]. *Welding Technology*, 2006, 35(4): 25-27 (in Chinese).
- [3] RATHOD M J, KUTSUNA M. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding[J]. *Welding Journal*, 2004, 83(1): 16-26.
- [4] ZHANG M J, CHEN G Y, LI Sh Ch, *et al.* Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 1-6 (in Chinese).
- [5] CAO R, YU S L. Numerical simulation of temperature field of GMT welding for jointing dissimilar metals of aluminum to steel[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2013, 39(5): 19-22 (in Chinese).
- [6] FENG X S, CHEN S H, LI L Q, *et al.* Temperature distribution of AL/Ti dissimilar alloys joint in laser welding brazing[J]. *Transaction of China Welding Institution*, 2009, 30(10): 9-12 (in Chinese).
- [7] IORDACHESCU M, IORDACHESCU D, SCUTELRTICU E, *et al.* Influence of heating source position and dilution rate in achieving overmatched dissimilar welded joint [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(5): 378-385.
- [8] CHEN G Y, WU K R, LIAO Sh H, *et al.* Effect of V-shaped grooves on properties of laser welding-brazed steel-aluminum butt joints[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(1): 11-16 (in Chinese).
- [9] SONG Y, ZHANG X Ch, HAO X H, *et al.* Numerical simulation of temperature and flow fields of TIG welding brazing of aluminum/steel [J]. *Welding Joining*, 2014(7): 32-36 (in Chinese).
- [10] ZHAO S, YU G, HE X, *et al.* Numerical simulation and experimental investigation of laser overlap welding of Ti6Al4V and 42CrMo [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(3): 530-537 (in Chinese).
- [11] RAMANAN N, KORPELA S A. Fluid dynamics of a stationary weld pool[J]. *Metallurgical Transactions*, 1990, A21(1): 45-57.