

异种钢激光-电弧焊复合焊接数值模拟

许新猴¹, 赵小强¹, 华鹏¹, 李先芬¹, 周伟^{1,2}

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;

2. 新加坡南洋理工大学 机械与宇航工程学院, 新加坡 639798)

摘要: **目的** 研究异种钢激光-GMAW 复合焊接温度场以及应力场变化。**方法** 运用 ANSYS 有限元分析软件,以 5 mm 厚 D500 钢和 A514 钢为研究对象,采用均匀分布的柱体热源与椭球热源组合的方法,建立了激光-GMAW 焊接热源模型,对异种钢激光电弧复合焊接过程进行了模拟计算,并与实验所得的焊缝形状以及焊后残余应力进行了对比。**结果** 结果表明,异种钢激光电弧复合焊接过程焊接变形以及残余应力实验结果与数值计算结果吻合较好。**结论** 验证了锥体加柱体热源与椭球热源的组合热源模型在异种钢激光-GMAW 复合焊接温度场及应力场模拟中的适用性,从而为不同焊接工艺条件下异种钢激光-GMAW 复合焊接的焊缝形状和尺寸预测,提供了一种有效的途径。

关键词: 异种钢; 热源模型; 激光-GMAW 复合焊; 应力场; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.04.015

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)04-0071-05

Simulation on Laser-GMAW Hybrid Welding of Heterogeneous Steel

XU Xin-hou¹, ZHAO Xiao-qiang¹, HUA Peng¹, LI Xian-fen¹, ZHOU Wei^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nan yang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

ABSTRACT: on the aim of this study was to investigate the welding thermal field and residual stress field of laser-GMAW hybrid welding. ANSYS finite element software was employed to simulate the welding thermal field and residual stress field of Heterogeneous steel. Laser-GMAW hybrid welding source model was built by using Ellipsoid-Cylinder-Cone hybrid heat method, and the results were analyzed. The simulated results were coincided well to the experimental results. The laser-GMAW hybrid welding source model is applicable in the simulation of welding thermal field and residual stress field of Heterogeneous steel, which provided an effective method for predicting weld seam shape and size of heterogeneous steel under different welding conditions.

KEY WORDS: heterogeneous steel; heat source model; laser-GMAW hybrid welding; welding stress field; simulation

激光电弧复合焊接通过激光和电弧两热源之间的相互作用,弥补了单一热源焊接工艺的不足,具有焊接熔深大、焊接速度快、工件变形小、熔池搭桥能力

强、易于集成等特点^[1-4]。随着社会的进步和科学技术的发展,人们越来越重视焊接质量和焊接生产率。有限元技术和焊接技术的飞速发展,为数值模拟

收稿日期: 2015-05-25

作者简介: 许新猴(1990—),男,安徽,硕士研究生,主要研究方向为激光电弧复合焊接技术。

通讯作者: 李先芬(1969—),女,安徽人,博士,教授,硕士生导师,主要从事先进焊接工艺及焊接材料研究。

技术提供了有力的工具,焊接温度场的研究和残余应力的分布情况可以采用数值模拟方法进行分析,这样就可以省去大量的实验,从而可以大大节省人力、物力和时间,具有很大的经济效益^[5-7]。D500 钢与 A514 钢作为一种低合金高强钢,具有高强度、高韧性的特点,被广泛应用于船舶工业、桥梁钢构、航空航天等领域。低合金钢在世界范围内需求的不断提高使得其在焊接结构件上的应用越来越普遍,焊接质量和焊接效率要求也越来越高。目前,针对异种钢激光电弧复合焊接数值模拟研究较少,因此,异种钢焊接过程残余应力及变形的模拟研究对实际生产具有一定的指导意义。文中以厚度均为 5 mm 的 D500 钢与 A514 钢为研究对象,借助 ANSYS 有限元分析软件,对异种钢激光-GMAW 复合焊接温度场及应力场进行模拟计算,并与实验所得的焊缝形状以及焊后残余应力进行对比。

1 激光-电弧焊(GMAW)复合焊接试验

试验选用厚度均为 5 mm 的 D500 钢板和 A514 钢板,使用激光+GMAW 复合热源焊机头焊接,复合焊接装置如图 1 所示,其中,激光器为额定功率 3.8 kW 的 Nd:YAG 固体激光器,激光波长为 1.06 μm ,聚焦透镜焦距为 300 mm,焦点直径为 0.3 mm;脉冲 GMAW 焊接电源为 Fronius TPSS000 数字化电源,对于一定材料和直径的焊丝,焊接电流、电弧电压、送丝速度等焊接规范参数可实现一体化调节。焊接时,激光前置,GMAW 焊枪在后,两者夹角为 10°,光丝间距为 3 mm,激光功率为 3000 W;电弧功率为 3800 W,焊接速度为 20 mm/s。焊接试验结束后,对试样进行线切割、打磨、抛光、腐蚀,获取接头截面宏观试样,测量焊缝表面尺寸,并利用 X 射线法对焊接接头残余应力进行测定。

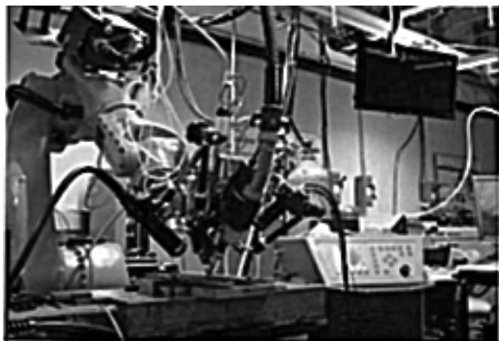


图 1 激光-GMAW 复合焊接装置

Fig. 1 Set-up for Laser-GMAW welding

2 激光-GMAW 复合焊接模型

2.1 控制方程及边界条件

由焊接过程的特点可知,焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题,非线性瞬态热传导问题的控制方程^[8]为:

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

式中: C_p 为定压比热容; λ 是温度的函数; Hr 为熔化潜热。

异种钢激光-GMAW 复合焊接有限元模型如图 2 所示。

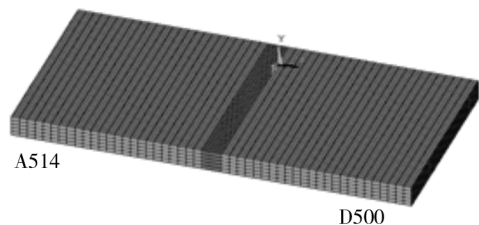


图 2 复合焊接有限元模型

Fig. 2 The finite element model for hybrid welding

对流边界条件的处理比较复杂,施加的气体保护焊接过程包括 4 种对流现象,即熔池中液态金属的对流,远离熔池区域的自然对流,喷嘴下方区域的保护气体强制对流,以及喷嘴邻近区域的保护气体流散所造成的强制对流。在数值模拟中,熔池内的对流损失一般采用人为的提高导热系数来处理。为简化整个计算过程,采用一个总传热系数,即 20 W/(m² · K),试样初始温度设为环境温度(20 °C)。

2.2 激光-GMAW 复合焊接热源模型

激光-GMAW 复合热源焊接过程中,由于激光和电弧的相互作用,形成一个温度极高的热源(约有 11 000 K),对工件有强烈的加热作用。对于激光-GMAW 复合焊接,热源模型总体上是 2 种子热源(电弧、激光)的组合。此外,由于复合焊接中电弧利用率得以有效提高,等离子体能量在变形熔池内部分布较为复杂。基于激光-电弧能量耦合机理,复合热源模型建立在椭球热源加锥体热源加柱体热源模型基础之上,通过调整相应的分布参数,模拟激光和电弧的耦合作用。组合式热源模型对于复合焊而言,相当于有一

个椭球分布的体热源模拟电弧的热输入作用,运用锥体热源及柱体热源来体现激光焊接典型的“钉头”和“深熔”的现象。各热源模型公式见参考文献^[9-12]。

2.3 材料热物理性能参数

材料的热物理性能对激光-电弧复合焊的温度场分布及焊缝成形有着非常重要的影响,其物理性能参数直接影响温度场和应力场的形态和大小^[13]。在对异种钢激光-GMAW 复合焊模拟分析时必须确定以下热物理性能参数:焊件的初始温度、焊件的熔点(℃)、材料的密度(kg/m³)、导热系数(W/(m·℃))、对流换热系数(W/(m²·℃))和比热容(J/(kg·℃))。除了材料的熔点、工件的初始温度(20℃)、材料的密度是常数外,材料的其他属性参数都是温度的函数。D500 钢与 A514 钢物理性能参数^[14-16]见表 1—3。

表 1 A514 钢应力场分析热物理部分参数
Table 1 Part thermal parameters of A514 steel

温度/℃	泊松比	弹性模量 E ($\times 10^5$)/MPa	热膨胀系数 α ($\times 10^{-5}$)/℃ ⁻¹
20	0.289	2.13	1.310
100	0.292	2.09	1.380
200	0.288	2.02	1.433
300	0.290	1.94	1.416
400	0.287	1.85	1.566
500	0.295	1.78	1.607

表 2 A514 钢应力场分析热物理部分参数
Table 2 Part thermal parameters of A514 steel

温度/℃	屈服应力/MPa	切变模量 G ($\times 10^{10}$)/MPa
20	690	8.26
200	660	7.84
600	450	4.32
1000	500	1
1500	1	0.5
1800	1	0.1

表 3 D500 钢应力场分析热物理性能参数
Table 3 Part thermal parameters of D500 steel

温度 /℃	泊松比	弹性模量 E ($\times 10^5$) /MPa	热膨胀系数($\times 10^{-5}$) /℃ ⁻¹	屈服应力 /MPa	切变模量 G ($\times 10^{10}$) /MPa
20	0.31	2.05	1.1	500	7.68
250	0.31	1.87	1.22	450	7.19
500	0.31	1.8	1.39		
750	0.31	1.3	1.48	50	2.59
1000	0.31	1.00	1.34		
1500	0.31	0.8	1.33	1	1
1700	0.31	0.5	1.32	0.05	0.5
2500	0.31	0.1	1.31	0.001	0.1

3 结果及分析

3.1 温度场结果分析及实验验证

图 3 所示为 2.5 s 时焊件上表面温度场分布以及 1.5 s 时纵截面方向热循环曲线图。

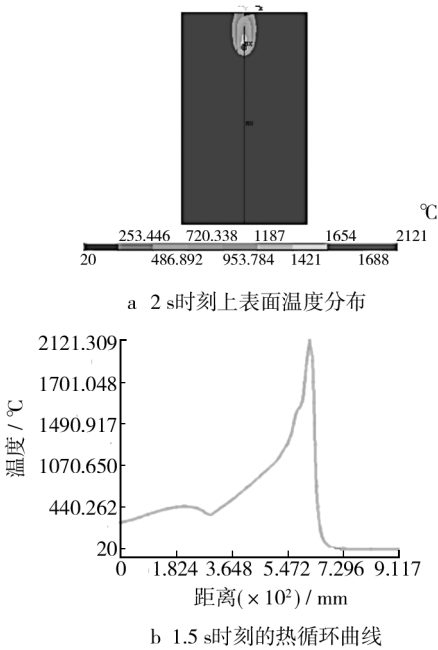


图 3 温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution on the surface

由图 3a 可以看出,激光-GMAW 复合焊接过程中热影响区小,焊缝附近的温度场梯度大;热源后方的等温线稀疏,温度梯度小;在热源前方的等温线密,温度梯度大。随着热源的移动,相邻位置的金属经历不同的热循环史,热源后方的熔融金属开始冷却凝固并逐渐形成焊缝,而恢复弹性对后冷却的焊缝金属产生拘束作用,这是诱导残余应力及焊接变形的一个重要原因。图 3b 所示为纵截面方向在 1.5 s 时刻的热循环曲线。由图 3 可以看出,焊接时试样经历了一个快速升温 and 缓慢降温的过程,且最高温度已经远远高于材料的熔点,由于 2 种材料的热膨胀系数不同,容易在焊缝周围产生过大的应力应变,接头容易产生缺陷。

图 4 为模拟焊缝形状与实验焊缝形状的对比。实际焊缝深度为 5 mm,上下表面熔宽分别为 5.4,1.3 mm,有限元模拟结果分别为 5.0,5.0,1.4 mm。

由图 4 和数据对比结果可知,组合式热源模型模拟所得的焊缝形状与实验所得的焊缝形状比较接近,

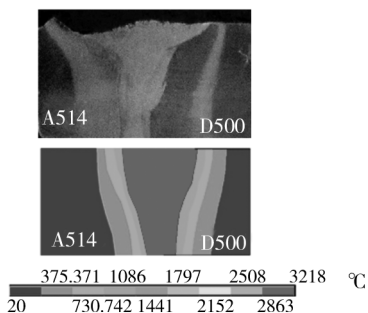


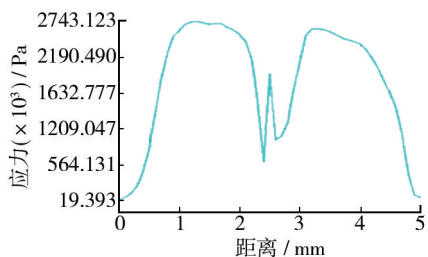
图4 模拟焊缝形状与实验焊缝形状的对比如

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental weld seam shape

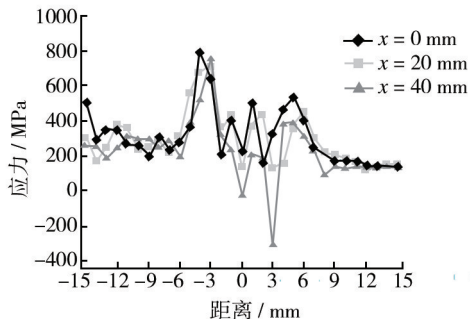
且2种结果的焊缝尺寸在误差范围内。

3.2 应力场结果分析及实验验证

图5所示为实验结果与模拟结果纵向残余应力对比。图5b中实测的残余应力分布由X射线法测得。由图5可以看出,焊缝处数值模拟出的焊接残余应力基本上能够与试验测量的残余应力结果相对应,曲线变化趋势基本一致,实测结果与模拟结果中的最大残余拉应力均出现在焊缝两侧的热影响区,且纵向残余应力主要表现为两端受较小的拉应力,越靠近焊缝中间处拉应力越大,而在焊缝中心处应力略微下降。因为焊缝部分的材料最后冷却,此时焊缝纵向收缩时受到已经冷却材料的阻力,焊缝冷却受阻,焊缝



a 实测的纵向残余应力分布



b 实测的纵向残余应力分布

图5 实测残余应力与模拟所得残余应力的对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated residual stress

及其附近区域的纵向应力为拉应力。模拟结果与实测结果中,焊缝左侧的最大残余应力大于焊缝右侧的残余应力,这是由于在同一焊接热循环下,A514钢的热膨胀系数比D500钢的热膨胀系数要大,在焊缝冷却时产生的收缩较大,致使A514钢一侧的残余应力较大。

通过对模拟所得应力曲线和实验测得的应力曲线进行比较分析可知,模拟的应力分布曲线与实验测得应力分布曲线形状相近,但是模拟得出的残余应力数值比其实验得出的残余应力数值要小。引起残余应力值偏小的原因可能是在进行温度场及应力场模拟时,对材料的热物理性能参数选择不当,建模后的网格划分疏密程度以及模拟计算时时间载荷步的设置方式等。

4 结论

1) 采用锥体-椭球-柱体组合式热源模型,可以对5 mm厚的A514与D500异种钢激光-GMAW复合焊的温度场进行准确模拟,模拟所得焊缝形状和实际焊缝截面形状比较接近。

2) 通过应力场模拟结果可以看出,实测结果与模拟结果中的最大残余拉应力均出现在焊缝两侧的热影响区,且纵向残余应力主要表现为两端受较小的拉应力,越靠近焊缝中间处拉应力越大,而在焊缝中心处应力略微下降,且A514钢一侧的残余应力大于D500钢一侧的残余应力。

3) 由试验结果与模拟结果对比分析可知,数值模拟结果与测量的焊接残余应力分布规律曲线形状基本一致,但模拟结果数值偏小。

参考文献

- [1] 田川,闻义. 激光电弧复合焊接——一种新型焊接方法[J]. 机车车辆工艺,2005,4(2):5—10.
TIAN Chuan, WEN Yi. A New Welding Process: Laser—Arc Hybrid Welding[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology,2005,4(2):5—10.
- [2] 卢振洋,刘建,黄鹏飞,等. 基于ANSYS薄板GTAW焊接温度场数值模拟[J]. 微计算机信息,2007,23(4):291—292.
LU Zhen-yang, LIU Jian, HUANG Peng-fei, et al. Simulation on Welding Temperature Field of GTAW on ANSYS[J]. Microcomputer Information,2007,23(4):291—292.

- [3] FENG Gao, QIAN Yi-yu. Micromechanical Properties of Heterogeneous Aluminum-silicon Brazed Joint [J]. Materials Letters, 2004(58):2861—2866.
- [4] KELVII Wei Guo. Influence of In Situ Reaction on the Microstructure of SiCp/AlSi7Mg Welded by Nd:YAG Laser with Ti Filler[J]. JMEPEG, 2010(19):52—58.
- [5] 崔旭明, 李刘合, 张彦华. 激光-电弧复合热源焊接[J]. 焊接技术, 2003, 32(2):19—21.
- CUI Xu-min, LI Liu-he, ZHANG Yan-hua. Laser-arc Hybrid Welding[J]. Welding Technology, 2003, 32(2):19—21.
- [6] 武传松. 焊接热过程与熔池形状[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- WU Chuan-song. Welding Thermal Process and Pool Shape [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.
- [7] LEE W B, YEON Y M, JUNG S B. The Improvement of Mechanical Properties of Friction Stir Welded A356 Al Alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003(355):154—159.
- [8] 李冬林. 基于 ANSYS 软件焊接温度场应力场模拟研究 [J]. 湖北工业大学学报, 2005, 20(5):81—83.
- LI Dong-lin. Simulation Research for Welding Temperature and Stress Field Based on ANSYS[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2005, 20(5):81—83.
- [9] 张旭东. CO₂ 激光-MIG 同轴复合焊方法及铝合金焊接的研究[J]. 应用激光, 2005, 25(1):1—3.
- ZHANG Xu-dong. Coaxial Hybrid CO₂ Laser-MIG Welding System and Its Application in Welding of Aluminum[J]. Applied Laser, 2005, 25(1):1—3.
- [10] AMIRIZAD M, KOKABI A H, GHARACHEH M A, et al. Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welded A356+15% SiCp Cast Composite[J]. Materials Letters, 2006(60):565—568.
- [11] XU C L, JIANG Q C. Morphologies of Primary Silicon in Hypereutectic Al—Si Alloys with Melt Overheating Temperature and Cooling Rate[J]. Materials Science and Engineering A, 2006(437):451—455.
- [12] 张春平, 李萌盛, 秦琳. 基于 ANSYS 的异种钢焊接残余应力的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2003, 26(3):460—463.
- ZHANG Chun-ping, LI Meng-sheng, QIN Lin. Numerical Simulation of Residual Stress in Dissimilar Steel Based on ANSYS[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2003, 26(3):460—463.
- [13] CHEN Ming-hua, LI Chen-bin, LIU Li-ming. Research of Discharge Status of Arc Plasma Enhanced by Laser Enhanced Research[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7).
- [14] 吴圣川, 刘建华. 铝合金激光-电弧复合焊的有限元数值 [J]. 模拟航空制造技术, 2005(12):74—76.
- WU Shen-chuang, LIU Jian-hua. Finite Element Simulation on Laser-arc Hybrid Welding of Aluminum Alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(12):74—76.
- [15] GHOSH M, KUMAR K, KAILAS S V, et al. Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Dissimilar Aluminum Alloys[J]. Materials and Design, 2010(31):3033—3037.
- [16] MA Zhi-hua, CHEN Dong-gao, TAN Bin. Effect of Laser-MIG Hybrid Welding of 5052 Alloy on Weld Forming[J]. Material Science and Engineering, 2012, 2(35):76—80.

(上接第 61 页)

- [11] HE De-hua, LI Xiao-qiang, LI Dong-sheng. Process Design for Multi-stage Stretch Forming of Aluminum Alloy Aircraft Skin[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20:1053—1058.
- [12] O'DONNELL M. Finite Element Modeling of a Multi-stage Stretch-forming Operation Using Aerospace Alloys [D]. Belfast: University of Ulster, 2003.
- [13] HEUNG K, SEOK H. FEM-based Optimum Design of Multi-stage Deep Drawing Process of Molybdenum Sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1/3):354—362.
- [14] CAI Zhong-yi, WANG Shao-hui, XU Xu-dong. Numerical Simulation for the Multi-point Stretch Forming Process of Sheet Metal[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209:396—407.
- [15] ESMAEILZADEH R, KHALILI K, MOHAMMADSADEGHI B, et al. Simulated and Experimental Investigation of Stretch Sheet Forming of Commercial AA1200 Aluminum Alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2):484—490.