

基于 ANSYS 的 D500 钢激光焊接温度场数值模拟

许新猴¹, 赵小强¹, 翟文刚¹, 康泽军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 D500 钢激光焊接温度场的变化。**方法** 运用 ANSYS 有限元分析软件, 以 5 mm 厚 D500 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, 建立了激光焊接热源模型。对 D500 钢激光焊接温度场进行了模拟计算, 并与实验所得焊缝形状及尺寸进行了比较分析。**结果** 结果表明, 数值模拟所得焊缝截面尺寸与实验结果一致性达到 95% 以上。**结论** 验证了柱体热源与椭球热源的组合热源模型在 D500 钢激光深熔焊接温度场模拟中的适用性, 从而为不同焊接工艺条件下 D500 钢激光焊接焊缝形状和尺寸的预测, 提供了一种有效的途径。

关键词: 激光器; 激光焊; D500 钢; 热源模型; 温度场; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.03.009

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)03-0048-04

Numerical Simulation on Welding Thermal Field of Laser Welding of D500 Steel Based on ANSYS

XU Xin-hou¹, ZHAO Xiao-qiang¹, ZHAI Wen-gang¹, KANG Ze-jun¹, 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, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the changes in laser welding thermal field of D500 steel. ANSYS finite element software was used for simulating the welding thermal field of laser welding of D500 steel with a thickness of 5 mm, and evenly distributed Ellipsoid-Cylinder hybrid heat sources were used to build the laser welding heat source model to perform simulation calculation for the laser welding thermal field of D500 steel. The results were comparatively analyzed with the weld seam shape and dimensions obtained by the experiments. The results showed that the consistency between the weld seam sectional dimensions obtained by simulation and the experimental results reached up to 95%. This study verified the applicability of the Ellipsoid-Cylinder hybrid heat source model in the simulation of laser welding thermal field of D500 steel, and provided an effective way for predicting the weld seam shape and dimensions of D500 steel under different welding conditions.

KEY WORDS: laser; laser welding; D500 steel; heat source model; thermal field; numerical simulation

激光深熔焊接过程包含着一系列复杂的物理、化学变化, 表现出复杂、快速且受多参数影响的特点^[1-4]。焊接温度场的变化反映了焊接过程中的热

变化, 其对焊接质量有着至关重要的影响。随着人们对激光焊接工艺的不断认识, 研究焊接的方法也变得多种多样。焊接过程的数值模拟一直都被认为是一

收稿日期: 2015-04-14

作者简介: 许新猴(1990—), 男, 安徽人, 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, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事焊接工艺及焊接材料研究。

种前沿且能够快速重现整个过程的方法,也是近几年研究的重点。尽管前人对激光焊接过程已经有了一些研究,但是在对激光深熔焊接过程的数值模拟仍存在一定的局限。随着社会的进步、科学技术的发展,人们越来越重视焊接质量和焊接生产效率。有限元技术和焊接技术的飞速发展,为数值模拟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^[5,7,9]。D500 钢作为一种低合金高强度钢,具有高强度、高韧性的特点,重量低,生产工序简单,蠕变速率低,使用寿命长,承载能力高,运输费用低,整体成本较低,被广泛应用于船舶工业、桥梁钢构、航空航天等领域^[6,10]。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,对焊接质量和焊接效率的要求也越来越高。目前,针对 D500 钢激光焊接数值模拟的研究较少,因此,D500 钢激光焊接过程温度场模拟对实际生产具有一定的指导意义。

1 激光焊接试验

试验选用厚度为 5 mm 的 D500 低碳调质钢平板,其化学成分如表 1 所示。采用波长为 1.06 μm 的光纤激光焊机,焊接装置如图 1 所示,通过逐步改变激光输出功率和离焦量,使试件均匀焊透,并获得良好外观焊缝。焊接工艺参数如下:激光输出功率为 3000 W,光斑直径为 0.6 mm,离焦量为 1 mm,焊接速度为 15 mm/s。焊接试验结束后,对试样进行线切割、

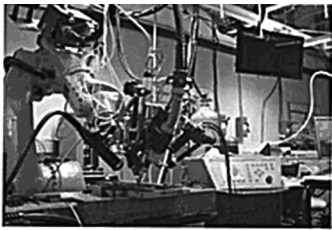


图1 激光焊接装置
Fig.1 Laser welding device

表1 D500 钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of D500 steel

元素	Al	C	Fe	Mn	Nb
含量	≤0.015	≤0.1	98	≤0.16	≤0.09
元素	P	Si	S	Ti	V
含量	≤0.025	≤0.3	≤0.01	≤0.15	≤0.20

打磨、抛光、腐蚀,获取接头截面宏观试样,测量焊缝表面尺寸。

2 激光焊接模型

2.1 建立有限元模型

所分析的激光焊试件是对称的几何平板形状,几何形状和载荷分布关于焊缝中心线对称。为了简化计算,便于分析模拟,通常取一半进行分析,因此建模时只需建立实际几何形状尺寸的一半,尺寸为 90 mm×25 mm×5 mm。有限元模型如图 2 所示。

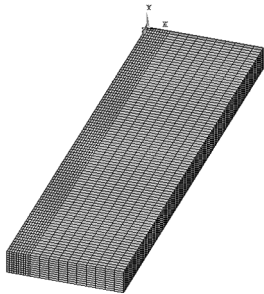


图2 D500 钢激光焊有限元模型

Fig.2 The finite element model for laser welding of D500 steel

2.2 材料热物理性能参数

进行焊接温度场分析,首先要确定热物理性能参数:导热系数($W/(m \cdot ^\circ C)$)、对流换热系数($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$)、密度(kg/m^3)、比热容($J/(kg \cdot ^\circ C)$)、熔点($^\circ C$)以及焊件的初始温度($^\circ C$)。材料的热物理性质对焊接温度场分布及焊缝成形有着十分重要的影响,其数值直接影响温度场的形态和大小^[11-12]。除了材料的熔点(D500 钢熔点约为 1500 $^\circ C$)和工件的初始温度(20 $^\circ C$)是常数外,材料的其他属性参数都是温度的函数。D500 钢热物理性能参数^[5,14]见表 2。

表2 D500 钢热物理性能参数

Table 2 Thermo-physical property parameters of D500 steel

温度/ $^\circ C$	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)
20	7870	35.5	460
250	7870	36.6	480
500	7870	32.75	530
750	7870	26.75	675
1000	7870	25.5	670
1500	7870	25.5	700
1700	7870	140	780
2500	7870	140	820

2.3 建立热源模型

要对激光焊进行数值模拟,首先要合理描述激光焊热输入分布模式,在考虑激光焊接工艺热输入分布特点的情况下,建立适用于激光焊接的热源模型。笔者采用的组合热源模型为椭球热源加柱体热源。各热源模型公式^[13]如下。

1) 椭球热源模型函数公式:

$$q = \frac{6\sqrt{3}\eta_2 Q}{\pi\sqrt{\pi abc}} \exp\left[-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{c^2} + \frac{z^2}{b^2}\right)\right]$$

式中: a, b, c 分别为椭球的半轴长。

2) 柱体热源模型函数表达式:

$$q(r, z) = \frac{6Q}{\pi r_0 H(mH + 2r_0)} \exp\left(\frac{-3r^2}{r_0^2}\right) \left(\frac{mh + r_0}{r_0}\right)$$

式中: r_0 为热源径向分布参数; H 为热源高度; h 为热源任意界面高度; m 为热源上下表面热流峰值调节系数。

2.4 初始条件与边界条件

将焊接试样的初始温度设置为环境温度,即室温 20 ℃。焊接过程中,焊件与外界同时存在着对流和辐射。由于焊接过程的对流和辐射过程非常复杂,因此为了简化整个计算过程,采用一个总传热系数,即为 20 W/(m² · K)。

3 结果及分析

3.1 激光焊接接头宏观金相

焊接试验结束后制取接头截面宏观试样并测量焊缝表面尺寸。接头宏观截面如图 3 所示。由图 3 可知,工件表面下陷可能是由于激光焊接过程中匙孔效应导致金属元素的蒸发所致。

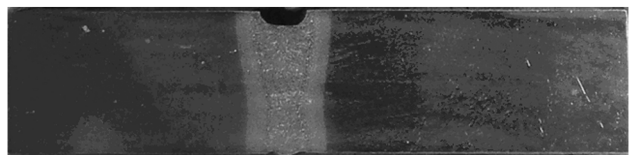


图 3 激光焊接接头宏观金相

Fig. 3 Macro metallurgical structure of welded joint by laser welding

3.2 模拟结果分析

焊接过程中焊件表面温度场分布如图 4 所示。

由图 4 可知,在焊接过程中的整个温度场变化情况都是经历了一个从非稳态到准稳态再到非稳态的过程。加热开始一段时间内,温度很不稳定,而且焊件升温迅速,经过一段时间后,焊件上会形成准稳定温度场,即焊件上各点的温度虽然随时间变化,但各点固定的温度跟随热源一起移动。进入准稳定状态后,激光焊接温度场模拟结果为一组以焊接方向为长轴的椭圆,光斑中心前半部等温线较密、后半部较疏,越远离光斑中心越稀疏,说明前半部的温度梯度大、后半部的温度梯度小,越远离光斑中心温度梯度越小。

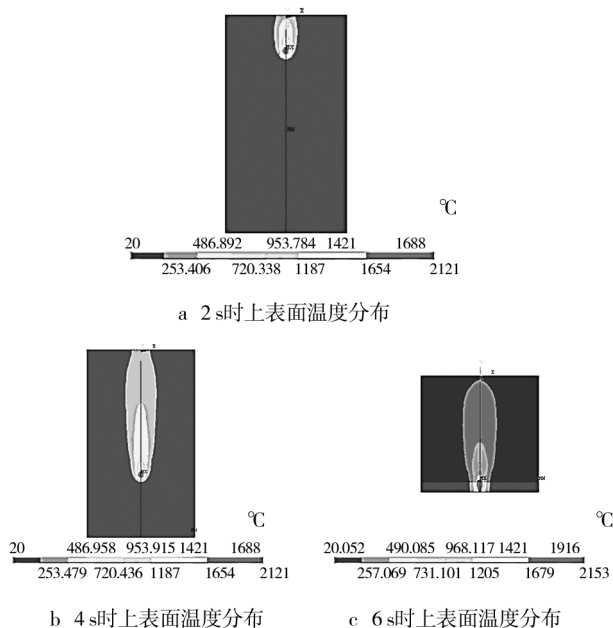


图 4 焊件上表面温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution on the surface of the welded part

图 5 所示为纵截面方向在 4 s 时刻的热循环曲线。可以看出,焊接过程中试板经历了一个快速升温和缓慢降温的过程,且最高温度已经远远高于材料的熔点,因此,实际焊接时在中心部位不可避免地要发

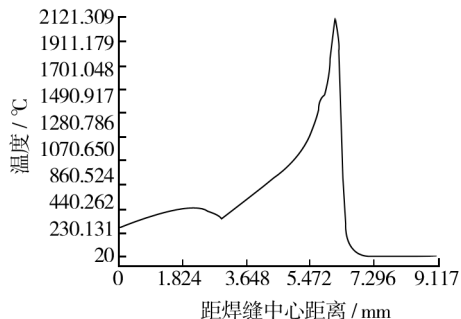


图 5 纵截面方向在 4 s 时刻的热循环曲线

Fig. 5 Thermal cycle curve in the longitudinal section direction at 4 s

生一定的变化,由于温度梯度大,引起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,从而容易产生缺陷。

3.3 模拟结果与实验结果的分析

图6为有限元模拟的焊接熔池边界与实际焊缝熔合线的比较。从图6可以看出,模拟的焊接熔池边界处的温度达到D500钢熔化温度1500℃以上,且其钉头状焊缝形貌与焊缝熔合线基本吻合,实际焊缝尺寸:焊缝深度、焊缝上表面熔宽、焊缝下表面熔宽分别为5,2.5,1.5 mm,有限元模拟尺寸:焊缝深度、焊缝上表面熔宽、焊缝下表面熔宽分别为5,2.4,1.3 mm,且尺寸误差均在误差范围内。以上均表明,采用椭圆热源和柱体热源的组合热源模型模拟激光深熔焊接温度场是较合理的。

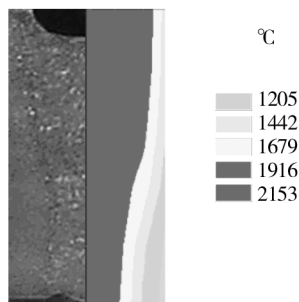


图6 模拟焊缝形状与实验焊缝形状对比

Fig.6 Comparison of the simulated and experimental weld seam shape

4 结论

1) 针对D500钢激光焊接接头形状,建立了均匀分布的柱体热源加椭球的组合热源模型。

2) 基于ANSYS有限元软件对D500钢激光焊接温度场进行模拟分析,并与实验结果进行了对比,证明了实验结果与模拟结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 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-ming, LI Liu-he, ZHANG Yan-hua. Laser-arc Hybrid Welding[J]. Welding Technology, 2003, 32(2): 19—21.
- [2] 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.
WEN Yi. HLAW: a New Connection Method[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2005, 4(2): 5—10.
- [3] GAO Feng, QIAN Yi-yu. Micromechanical Properties of

Heterogeneous Aluminum - silicon Brazed Joint[J]. Materials Letters, 2004(58): 2861—2866.

- [4] GUO K W. 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] 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, 2(1): 1—3.
ZHANG Xu-dong. CO₂ Laser-MIG Laser Hybrid Welding and Study of Aluminum Welding[J]. Application of Laser, 2005, 2(1): 1—3.
- [6] 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 Sheng-chuan, LIU Jian-hua. Simulation on Laser-arc Hybrid Welding of Aluminum Alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 12: 74—76.
- [7] 卢振洋. 基于 ANSYS 薄板 GTAW 焊接温度场数值模拟[J]. 微计算机信息, 2007, 23(21): 291—292.
LU Zhen-yang. Simulation on Welding Temperature Field of GTAW on ANSYS[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(21): 291—292.
- [8] 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. Thermal Process and Shape of Weld Pool [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 张春平. 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. Numerical Simulation on Welding Residual Stress of Dissimilar Steel Based on ANSYS[J]. Hefei University of Technology (Natural Science), 2003, 26(3): 460—463.
- [12] 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. Numerical Simulation on Welding Residual Stress Based on ANSYS[J]. Hubei University of Technology, 2005, 20(5): 81—83.
- [13] 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.
- [14] 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.