6061铝合金激光焊温度场与应力场 数值模拟研究

康 悦¹,占小红¹,封小松²,夏佩云²

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院,江苏南京210016;2.上海航天设备制造总厂有限公司,上海200245)

摘 要:为了解决激光焊接铝合金对接接头的质量问题,本文采用热-结构耦合有限元技术,建立了在移动高 斯热源作用下的三维激光焊接温度场和应力应变场的计算模型。首先,利用有限元软件MSC.Marc模拟焊接过程 中试片级试样的温度和应力的变化及其变形情况;其次,研究试样瞬态温度场和应力应变场的变化规律及其分布 特征;最后,探讨激光功率和焊接速度对接头质量的影响规律。试验中所选取的激光功率和焊接速度等工艺参数 均通过数值模拟进行优化,并根据优化后的工艺参数完成激光焊接4 mm厚 6061-T6 铝合金平板对接试验。通过 对焊接接头形貌的观察及分析进行热源校核,结果表明:仿真计算得到的焊接熔池边界温度达到 6061 铝合金熔点 以上,且其形状分布与实际试验所得焊缝边界基本吻合,从而验证了模拟结果的准确性和可靠性。

关键词:6061铝合金;激光焊接;热-结构耦合;温度场;应力应变场

中图分类号: TG 404 文献标志码: A **DOI**: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.008

Numerical Simulation Study on Temperature Field and Stress-Strain Field of 6061 Aluminum Alloy in Laser Beam Welding

KANG Yue¹, ZHAN Xiaohong¹, FENG Xiaosong², XIA Peiyun² (1.School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturing General Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

Abstract: To solve the quality problem of laser beam welded 6061 aluminum alloy butt joints, a thermalstructural coupling finite element (FE) technique is used to establish a calculation model for simulating the temperature field and the stress-strain field during the laser beam welding process under the action of 3D moving Gaussian heat source. Firstly, the FE software MSC.Marc is adopted to calculate the variation of temperature field and stress field and the deformation of the specimens in the welding process. Secondly, the variation law and distribution characteristics of the samples' transient temperature field and strain field are studied. Finally, the influences of laser power and welding speed on the joint quality are discussed. These welding process parameters selected in the test are optimized by numerical simulation. According to the optimized process parameters, a laser welding 4 mm thick 6061-T6 aluminum alloy plate butt joint test is completed. The heat source is checked by observing and analyzing the microstructure of the weld seam. The results show that the temperature of the boundary molten pool obtained by the simulation reaches the melting point 6061 aluminum alloy. Its shape distribution is consistent with the weld seam boundary obtained in the actual test, which verifies the simulation results' accuracy and reliability.

Key words: 6061 aluminum alloy; laser beam welding; thermal-structural coupling; temperature field; stressstrain field

作者简介:康 悦(1992-),女,博士研究生,主要研究方向为激光焊接铝合金与计算机仿真。

收稿日期:2019-07-05;修回日期:2019-09-25

基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2017-061)

通信作者:占小红(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为激光增材制造工艺与装备、激光焊接与先进连接技术、航空航天先进制造工艺、材料加工工艺建模与仿真等。

0 引言

铝合金因其具有比强度高、密度小、耐腐蚀及 易加工成形等优点,已被大量地应用于大型客机和 高铁制造业中。6061铝合金是Al-Mg-Si系可热处 理强化锻铝合金,高温时其塑性良好,在退火处理 后仍能保持优良的操作性[1]。尽管 6061 铝合金在 高温下具有良好的塑性,但强度不高,然而由于其 具有优良的耐蚀性,且无晶间腐蚀倾向,因此焊接 性能良好^[2-3],并大量地应用于新型高铁的制造中, 最大限度地降低牵引动能消耗,且使车体更耐腐 蚀,列车运行得更加平稳和安全。但同时也存在许 多铝合金焊接问题急需处理^[4]。目前,TIG焊和 MIG 焊是焊接铝合金的主要方法,然而由于铝合金 密度低、熔点低、线膨胀系数高及导热性能良好等 特点,气孔、裂纹以及热变形等缺陷极易在电弧焊 时出现,且焊后接头强度较低,这制约了其在制造 业中的使用[5-6]。

与TIG焊、MIG焊不同,激光焊接兼具高精度、 高效率、高可靠性等特点[7-9]。因为激光焊接的热源 功率密度大,热输入量低,在确保足够熔深的同时, 可以保持较小的焊接热影响区和焊接变形[10-11]。然 而铝合金激光焊的难点在于铝合金对各类激光束 均有较高的表面初始反射率,由于高反射率、高热 导性等难以克服的问题,在激光焊接铝合金的实际 过程中,良好的光束聚焦和高功率密度的高能激光 是必不可少的。蒋志伟等[12]使用光纤激光对 6061 铝合金进行填丝焊接,发现激光焊接接头抗拉强度 随热输入增加而降低。许飞等[13]发现高能的光纤 激光较容易完成穿透焊接,且获得成形较好焊缝的 工艺参数范围也更大。已有的研究表明,激光焊接 质量不由单个参数控制,而是通过一系列激光参数 和加工参数的组合来对焊缝质量产生影响。然而, 通过分析焊接过程的温度场和应力应变场实现激 光焊接参数优化的研究报道较少。因此,本文采用 有限元方法对激光焊接6061铝合金薄板对接接头 的焊接过程进行模拟,并结合试验结果实现焊接工 艺参数的优化。

本文采用热-结构耦合有限元技术,应用MSC. Marc软件对6061铝合金薄板对接接头激光焊接过 程进行模拟,获得试片级焊接试样的温度场和应力 应变场,并对激光功率和焊接速度等工艺参数与焊 接试样的温度场及其应力应变场的关系进行研究。

1 试验方法及装置

试验中所采用的激光焊接装置为Trumpf公司 生产的TruDisk-12003碟片式固体激光器,其最高 功为12 kW,光斑为圆形,直径大于0.3 mm,并配套 KUKA焊接机器人。试验中所使用的激光功率、焊 接速度等工艺参数均通过程序预先设定。试验选 用 6061铝合金平板作为母材,厚度为4 mm,T6 状 态(固溶处理后人工时效)。激光焊接原理示意图 如图1所示。激光作用于铝合金的方式按激光功率 密度大小分为多种,当激光功率密度处于1×10⁴~ 1×10⁶ W/cm²之间时,激光能量可以使铝合金表面 发生熔化,激光热源经过后,熔池急速冷却,形成晶 粒细小的组织,材料得到细晶强化,硬度和强度都 有所提高,处于这个范围的激光多用于激光焊 接^[14]。本试验所采用的激光焊接工艺参数见表1。



图 1 成元序按原理示息图 Fig.1 Schematic diagram of laser welding

表1 6061铝合金激光焊接工艺参数

Tab.1	Table of 6061	aluminum	alloy	laser	welding	process	parameter
-------	---------------	----------	-------	-------	---------	---------	-----------

试样编号	激光功率 P/W	焊接速度 v/(m•min ⁻¹)	离焦量 <i>f</i> /mm	保护气体流量 $Q/(L\cdot min^{-1})$	填丝情况
1	2 500	3.0	-2	15	Ν
2	2 500	2.6	-2	15	Ν
3	5 000	2.6	-2	15	Ν

2 数学模型的建立

2.1 几何模型建立

本文根据焊件的形状、尺寸大小,在CATIA中 建立该焊接试件的几何模型,取该板长度为100mm, 宽度为30mm,厚度为4mm。该部分模型可以真实 反映焊接试件整体的温度场和应力应变场的分布 及变化情况。



(a) 平板网格划分

2.2 网格划分

本文采用有限元网格处理软件HYPERMESH 对平板模型进行网格划分。在划分网格时,焊缝附 近采用尺寸较小的网格进行划分,且网格分布密 集;远离焊缝处采用尺寸较大的网格进行划分,且 网格分布较为稀疏。大小网格过渡区采用"3变1" 的过渡方法。

网格过渡原理如图2所示。



(b) 网格过度方法

图 2 网格划分过度方法图 Fig.2 Schematic of over-meshing method

2.3 材料属性

由于本文采用热-结构耦合分析法,因此需要确 定材料特定的物性参数。与材料热-结构分析直接 相关的物性参数包括密度、熔点、导热系数、对流系 数、比热容、杨氏模量、屈服强度和线膨胀系数等^[4]。

2.4 边界条件设定

边界条件是热传导问题完整数学描述中不可 缺少的部分,所谓边界条件就是焊件的初始条件、 表面换热条件^[15]以及位移约束条件。由于未对焊 接试件进行预热,因此,初始温度即环境温度20℃。 通过调用子程序来实现高斯旋转体热源模型的加 载,焊接过程考虑自身热传导和周围空气热交换。 由于 6061 铝合金是被装夹固定在特定夹具上进行 焊接的,故采用"三点装夹"的方法。Marc 中加载的 位移约束示意图如图3所示。

2.5 热源模型选取

热源的选取和加载对于激光焊接仿真计算来 说是最关键的。经研究发现,高斯旋转体热源能较 好地反映激光束照射至焊件后,其表面的热流分布



图 5 世 修 约 宋 小 息 图 Fig.3 Schematic diagram of displacement constrain

情况^[16]。焊件受到该热源作用后通过一定的作用 面积传递激光能量,此面积与激光的光斑直径大致 相近,热源的能量分布从中心到边缘递减。

3 结果与讨论

3.1 热源模型校核

模拟的熔池边界与实际焊缝边界的对比如图4 所示。由图可见,仿真计算得到的焊接熔池边界 (即图中左侧的灰色区域温度达到6061铝合金熔点 (660℃)以上)的形状分布与实际焊缝的边界基本 吻合,这表明采用高斯面热源与高斯旋转体组合热 源模拟激光焊接6061铝合金平板对接接头的移动 热源是合理的。这也进一步验证热-结构耦合分析 对于激光焊接过程模拟的可行性,以及本文所采用 的高斯热源进行仿真计算的可信程度。



Fig.4 Comparison of simulated molten pool boundary and weld fusion line

3.2 不同激光功率仿真计算结果分析

3.2.1 激光功率对焊接温度场的影响

激光功率对焊接温度影响较大,因此,需要对 其进行重点研究。保持焊接速度恒定为2.6 m/min, 取激光功率为2 500 W 和5 000 W 对其焊接温度场 进行对比。

不同激光功率下焊接温度场的对比如图5所 示,由图可以看出,焊接过程中温度场的形状均近 似椭圆形,激光前进方向的温度场区域中心基本与 热源的中心重合,温度场前端等温线分布较为密 集,后端较为稀疏,说明前端温度梯度大,后端温度 梯度小。随着激光功率的增大,温度场的峰值温度 逐渐升高,激光功率为5000 W时,焊缝中心的最高 温度为1894℃;而激光功率为2500 W时,其最高 温度仅为989.9℃。同时还发现:激光功率为2500 W 时,焊接试件未熔透;而激光功率为5000 W时,焊 接试件完全熔透,且熔宽及熔深均较大。



图 5 焊接速度为 2.6 m/min 的温度场分布



3.2.2 激光功率对应力应变场的影响 激光功率分别为2500W和5000W时,激光 焊接 6061 铝合金平板对接接头的焊接变形情况和 等效米塞斯应力分布如图 6 所示。由图可见,虽然 两者的变形趋势和等效米塞斯应力分布大致相同, 但在焊接过程中的同一时刻,激光功率为5000 W 时,焊接试件的最大变形量为0.436 mm;而激光功 率为2500 W时,焊接试件的最大变形量仅为0.328 mm。 这说明随着激光功率的增加,热输入增大,因此,焊 接变形量增大。等效米塞斯应力也存在相似的规律,激光功率为5000W时,焊缝处的最大等效米塞斯应力值为443.1MPa;而激光功率为2500W时,焊缝处的最大等效米塞斯应力值仅为362.5MPa。说明随着激光功率的增加,焊后残余应力也会随之增大。





3.3 不同焊接速度仿真计算结果分析

3.3.1 焊接速度对焊接温度场的影响

焊接速度也是影响激光焊接接头质量的重要因素,因此,同时也需要对其进行重点研究。保持激光功率恒定为2500W,分别选取焊接速度为2.6m/min和3.0m/min进行计算,并对焊接温度场和应力应变场进行对比分析。

对比图 5 和图 7 中不同焊接速度下的温度场分 布可以发现,由于采用相同的热源模型,且激光功 率一致,故两者的焊接温度场分布类似。温度场的 分布为从热源中心的高温区域向周围区域逐步降 低。同时也可发现,随着焊接速度的增加,热源中 心的最高温度逐渐下降,当焊接速度从 2.6 m/min 增加 至 3.0 m/min 时,热源中心的最高温度从 989.5 ℃逐渐降低到 954.4 ℃。焊后区域的温度梯度 逐渐变大。在焊接完成进入冷却阶段后,焊接速度 快的焊件冷却速度较快,较易恢复到室温。观察两 组仿真计算的温度场亦可发现,激光焊接速度越 快,熔深越浅,可以发现焊接速度与焊接质量关系 紧密。

3.3.2 焊接速度对应力应变场的影响

对比图6和图8中不同焊接速度下焊缝的应力 应变场可以发现,等效米塞斯应力主要分布在焊缝 周围和边角处,变形情况也较为类似,且焊接试件 的中部变形较大。

随着焊接速度的提高,焊接试件的变形逐渐减 小,且其变形区域也逐渐减小,焊后焊接试件的最 大变形量由0.328 mm逐渐减小到0.306 mm。这是 因为随着焊接速度的提高,热源作用时间缩短,激 光热源的热输入降低,焊接试件接收的线能量密度 也降低。因此,较小的热量必将导致较小的变形



图/ 励儿切华为2300 W、件按述反为3.0 m/mm的温度切力和





Fig.8 Stress and deformation distribution with laser power of 2 500 W and welding speed of 3.0 m/min

量。而等效米塞斯应力却随着焊接速度的提高先 升后降,说明6061铝合金激光焊接中存在一个最佳 焊接速度使得其等效米塞斯应力最小,此参数的确 定需要进行大量模拟和试验。

4 结束语

 1) 文中的模拟计算使用 Fortran 语言编写高斯 面热源与旋转体热源复合模型,并结合 Marc 软件中 的边界条件完成了该热源的移动和加载,经验证, 该高斯旋转体热源模型与实际激光热源较为接近。

2)对6061铝合金平板激光对接焊的温度场和应 力应变场进行了热-结构分析,对比不同焊接工艺参数 下的不同时间点,不同节点的温度和应力及其云图。 当激光功率为2500 W、焊接速度为2.6~3.0 m/min 时,焊接熔池的最高温度达到900 ℃以上,且焊接速 度对焊缝的应力应变影响不大。而激光功率提高 至5000 W、焊接速度保持为2.6 m/min时,熔池的 最高温度达到1894 ℃,且应力应变均大幅增加。

3)分析对比不同工艺参数下的结果,通过调整 激光功率和焊接速度等参数,并研究其对焊接试件 温度场及应力应变场的影响,为预测焊接试验效 果、优化焊接工艺参数、减少试验量提供帮助。

参考文献

- [1] 王金涛.6061铝合金焊接气孔问题的解决[J].金属加工(热加工),2011(8):69-69.
- [2] CHANG Y J, DONG J H, ZHANG Y. A study on the microstructures and properties of the welded 6061 aluminum alloy joint [J]. Welding and Joining, 2006 (1): 21-26.
- [3] DEVINCENT S M, DEVLETIAN J H, GEDEON S
 A. Weld properties of the newly developed 2519-T87 aluminum armor alloy [J]. Welding Journal, 1988, 67 (7): 33-43.
- [4] 李京.高速列车6061铝合金激光焊接工艺研究[D].石 家庄:石家庄铁道大学,2015.
- [5] 翟玉峰,黄坚,李敏,等.6061-T6铝合金高速高功率
 CO₂激光填丝焊接性的研究[J].中国激光,2011(5):
 80-85.
- [6] HU B, RICHARDSON I M. Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 429(1/2): 287-294.
 (下转第68页)