

Numerical Simulation of Temperature Field and Flow Field in 6061 Aluminum Alloy Laser Welding

Qian Liang^{1,2} Jiangtao Cao¹ Li Xia¹

1. China Electronics Technology Group Corporation 54th Research Institute, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China

Abstract

To investigate the molten pool flow behavior during laser welding of aluminum alloys, a three-dimensional transient mass and heat transfer numerical model was established to analyze the temperature field and flow field in laser welding of 6061 aluminum alloys. When the laser thermal efficiency was set to 60%, the weldment of 6061 aluminum alloy of 4-mm-thick could not be penetrated by the laser welding with the power of 2500W and 3500W. While the weldment could be penetrated when the laser power was 4500W. Before the weldment penetration, there were three flow trends in the molten pool, downward flow at the bottom of the keyhole, clockwise downward flow at the front of the keyhole, and counterclockwise flow at the back of the keyhole. After the weldment penetration, there were four flow trends in the molten pool, downward flow at the bottom of the keyhole, clockwise downward flow at the front of the keyhole, counterclockwise flow at the back of the keyhole, and upward flow at the bottom of the molten pool.

Keywords

6061 aluminum alloy; laser welding; temperature field; flow field

6061 铝合金激光焊温度场流场数值模拟

梁谦^{1,2} 曹江涛¹ 夏立¹

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 中国·河北 石家庄 050081

2. 哈尔滨工程大学机电工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150001

摘要

为了研究铝合金激光焊接过程中的熔池流动行为, 建立了三维瞬态传质传热数值模型, 对6061铝合金激光焊温度场-流场进行分析。当激光热效率设定为60%时, 功率2500W和3500W的激光焊不能熔透4mm厚的6061铝合金焊件, 而激光功率为4500W时可以使焊件熔透。焊件熔透前, 熔池形成三种流动趋势, 匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动以及匙孔后部的逆时针流动。焊件熔透后熔池主要存在四种流动趋势, 匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动、匙孔后部的逆时针涡流以及焊件底部熔透处的向上流动。

关键词

6061铝合金; 激光焊接; 温度场; 流场

1 引言

铝合金具有比强度高、热稳定性好、耐腐蚀性强等优点, 在保证强度要求的同时可以减轻装备重量, 是航空航天领域中重要的轻量化结构材料^[1-3]。6061铝合金是一种典型的Al-Mg-Si系中等强度铝合金, 因其具有优良的耐腐蚀性被广泛应用于航空航天领域^[4,5]。激光焊由于能量密度集中、热输入低、热影响区小等优势可以获得高质量的焊接接头, 在铝合金焊接中具有诸多优势。但由于铝合金熔点低、热导率大、散热快等特点, 极易在焊接过程中产生气孔、裂纹等

缺陷, 这降低了其在重要领域应用的进一步扩大^[4]。

考虑到焊接质量与焊接过程中的热力学行为密切相关。由于激光焊过程中匙孔和熔池流动的动态变化特点, 采用试验手段难以准确地观察熔池内的热力学行为, 需要花费大量成本。随着数值模拟手段的日渐成熟, 越来越多的研究学者采用数值模拟的方法来研究分析焊接过程中的热力学行为。黄立进等^[6]建立了铝合金激光焊三维数值模型, 研究了铝合金激光焊中匙孔行为和气孔形成机理。康悦等^[4]对6061铝合金激光焊温度场和应力场进行数值模拟研究, 为工艺试验提供参数参考。

论文采用峰值指数递增—锥体热源模型, 建立了三维瞬态传质传热数值模型, 对6061铝合金激光焊接过程中的温度场-流场进行数值模拟。分析不同激光功率下的温度场

【作者简介】梁谦(1990-), 男, 中国河北井陘人, 硕士, 工程师, 从事电子装备工艺设计及动力学分析研究。

分布特征，以及焊件熔透前后的熔池流动行为，对铝合金激光焊工艺优化具有重要意义。

2 数学模型

2.1 计算域模型及网格划分

图 1 为计算域模型，模型尺寸为 35mm × 16mm × 8mm。计算域被划分为流体区域和固体区域，将远离焊缝的区域设置为固体区域，该区域只进行热传导方程的求解，流体区域则进行全部方程的求解。基板厚度为 4mm，宽度为 16mm，其中固体区域宽度为 4mm。考虑到大功率激光可能会使基板焊穿以及激光的热力作用使熔融金属挤压到基板表面，因此在基板上下分别设置 2mm 厚的空气层。对计算域进行六面体网格划分，靠近焊缝的流体区域网格尺寸为 0.2mm，为了减少计算时间，固体区域网格尺寸为 0.4mm，

网格划分如图 2 所示。

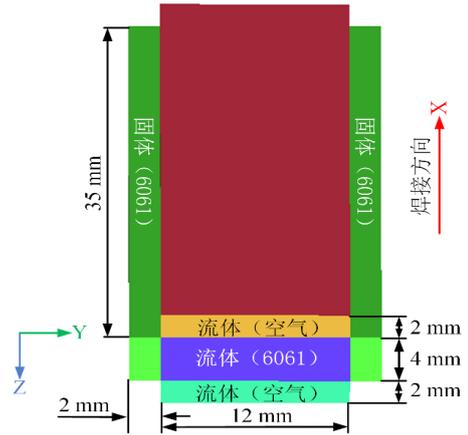


图 1 计算域模型

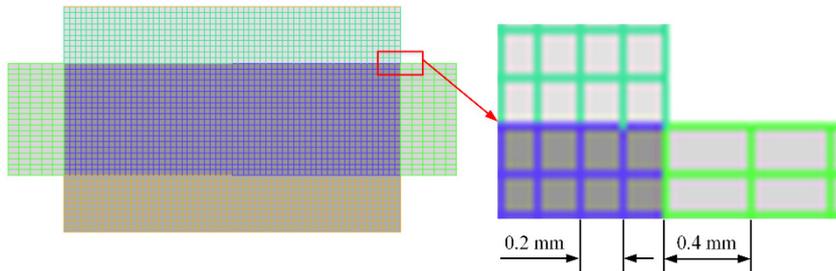


图 2 网格划分

2.2 材料属性

焊接材料为 6061-T6 铝合金，在焊接过程中，材料的热物性参数会随温度发生变化。为了准确模拟焊接温度场一流场，需要考虑材料性能随温度的变化。6061-T6 铝合金的热导率、比热容、密度随温度的变化数值如表 1 所示^[7]。

表 1 6061 铝合金的热物性参数

温度 /K	热导率 / (J/m · K)	比热容 / (J/kg · K)	密度 / (kg/m ³)
300	155	900	2700
400	158.5	1000	2650
500	162.5	1020	2620
600	163.5	1030	2600
700	167.5	1070	2500
800	169.5	1100	2400
900	172.5	1100	2300
1000	174.5	1100	2200
1100	178.5	1100	2100
1200	182	1100	2000

2.3 激光热源模型

热源模型的选取和加载对于激光焊接数值模拟来说是最关键的。对于激光深熔焊，在激光能量的作用下形成匙孔来加热工件，激光在匙孔内发生多次反射，受 Fresnel 吸收影响，匙孔下部能量密度较大^[8]。根据激光深熔焊的特征，论文采用峰值指数递增—锥体热源模型来描述激光能量的分布。热源作用半径沿厚度方向呈线性递减，热源的峰值热

流密度在焊件深度方向指数递增、在任意深度截面内热源的热流密度呈高斯分布^[9]，其热流密度分布函数为：

$$q = Q_0 \exp\left(\frac{\ln(\chi)}{z_i - z_e}(z - z_e)\right) \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (1)$$

$$Q_0 = \frac{3Q_l \ln(\chi)}{\pi(1-e^{-3})(z_i - z_e) \left\{ r_e^2 - r_i^2 - 2 \frac{r_i - r_e}{\ln(\chi)} \left[r_e - r_i \chi - \frac{r_i - r_e}{\ln(\chi)} (1 - \chi) \right] \right\}} \quad (2)$$

其中， χ 为热源上下表面热流峰值比例系数； Q_l 为激光有效热输入； $r_0(z)$ 为热源的分布参数； z_e 和 z_i 分别为热源上、下表面 z 坐标； r_e 和 r_i 分别为热源上、下表面半径。

3 结果与讨论

激光功率对焊接温度影响较大^[4]，其功率大小直接影响到熔池形状和温度场分布^[7]，并对最终焊接质量起重要作用。为确定功率对激光焊接的影响，保持焊接速度恒定为 1.8m/min，取激光功率为 2500W、3500W 和 4500W 进行 4mm 厚的 6061 铝合金激光自熔焊数值模拟，由于铝合金对激光强烈的反射作用，激光热效率设定为 60%^[10]，并选取使焊件熔透的激光功率进行温度场一流场数值分析。

3.1 不同激光功率下纵截面温度场分布

图 3 为不同激光功率下两个时刻纵截面的温度场分布。为了更直观地展示熔池区域，设定温度大于液相线（928K）的区域用红色表示。焊接初期，在激光能量作用下开始形成

熔池，由于此时热量积累较少，匙孔深度和熔池深度较小，如图 3 (a1)、(b1)、(c1) 所示。随着焊接进行，同功率下的匙孔深度和熔池深度不断增大，熔池尺寸也逐渐趋于稳定，如图 3 (a2)、(b2)、(c2) 所示。当焊接时间为 0.88s 时，对比 2500W 和 4500W 功率下的纵截面温度场，可以观察到，2500W 功率下的匙孔深度仅约为 0.5mm，而 4500W 功率下的匙孔深度约为 2.5mm，如图 3 (a2) 和图 3 (c2) 所示。随着激光功率的增加，热输入量增加，匙孔深度和熔池范围随之增加。熔池底部热量主要来自匙孔，匙孔深度的增加将更多热量传递到熔池底部，必将带动熔池深度的增加。通过模拟不同激光功率对温度场的影响可以得出，激光功率为 2500W 和 3500W 时很难使焊件熔透。当激光功率为 4500W 时，可以观察到焊件被熔透，熔池尺寸在熔透后趋于稳定，如图 3 (c2) 所示。

3.2 熔透功率下的焊件上下表面温度场分布

基于前文对比的不同功率下纵截面温度场分布，选取 4500W 激光功率进行熔透焊接过程数值分析。图 4 为不同时刻焊件上表面和下表面的温度场计算结果。从图 4 (a) 可以看到，由于激光作用于焊件，焊件上表面熔池区域较小，同时刻的焊件下表面峰值温度约为 730K，远低于液相线温度。当焊接时间为 0.35s 时，可以观察到焊件背面峰值温度已超过 928K，此时焊件被熔透，如图 4 (b) 所示。随着焊接进一步进行，上表面熔池尺寸趋于稳定，熔池温度场前部

和后部稍窄、中部稍宽。熔透后的焊件下表面熔池呈明显的椭圆形，熔池尺寸小于上表面熔池尺寸，如图 4 (c) 所示。

3.3 熔透功率下的熔池纵截面温度场一流场

图 5 为 4500W 功率下不同焊接时刻熔池纵截面温度场-流场计算结果。如图 5 (a) 所示，焊接初期，在蒸发反力的作用下熔融金属被挤压形成凹坑^[6]，凹坑底部熔融金属表现为向下流动，促进匙孔的形成。蒸发反力是激光匙孔形成的主要驱动力，随着焊接进行，在蒸发反力的作用下凹坑不断扩大，匙孔形成，如图 5 (b) 所示。焊件被熔透前，熔池形成三种流动趋势，匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动以及匙孔后部的逆时针流动，这种流动方式有助于熔融金属和能量向熔池底部和后部传递，如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示。随着热量不断积累，熔池区域逐渐增大，0.35s 时观察到焊件被熔透。由于匙孔前壁的小型顺时针涡流和匙孔后部的逆时针涡流，使得匙孔上部前后壁熔融金属被推动形成“凸起”^[6]，焊件底部熔透处的熔融金属表现为向上流动，如图 5 (c) 所示。匙孔前后壁在涡流的影响下，凸起进一步扩大，最终在匙孔上部前后壁相连形成金属液桥，如图 5 (d) 所示。之后在蒸发反力的作用下，匙孔底部又重新打开，熔池尺寸趋于稳定，如图 5 (e) 和图 5 (f) 所示。焊件熔透后熔池主要存在四种流动趋势，匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动、匙孔后部的逆时针涡流以及焊件底部熔透处的向上流动。

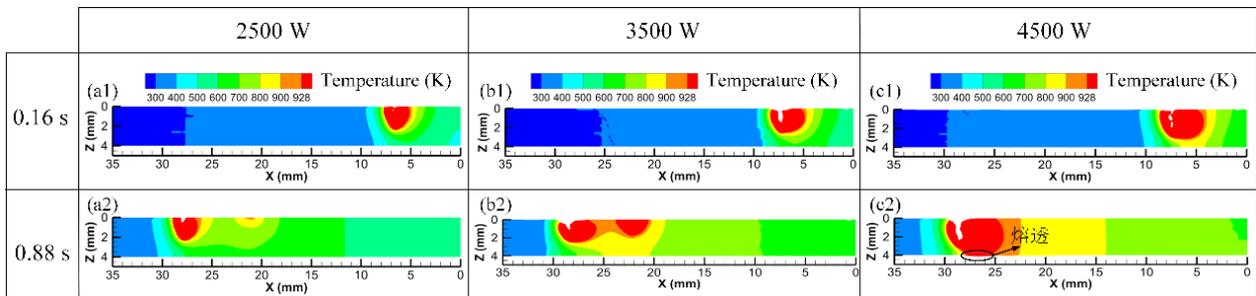


图 3 不同激光功率下两个时刻的纵截面温度场分布

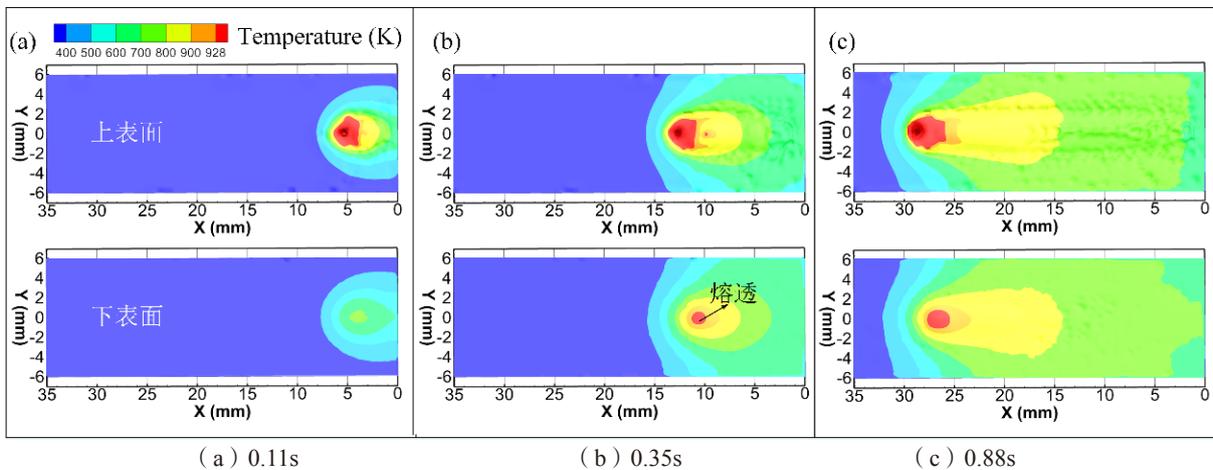


图 4 4500W 激光功率下不同时刻上下表面温度场分布

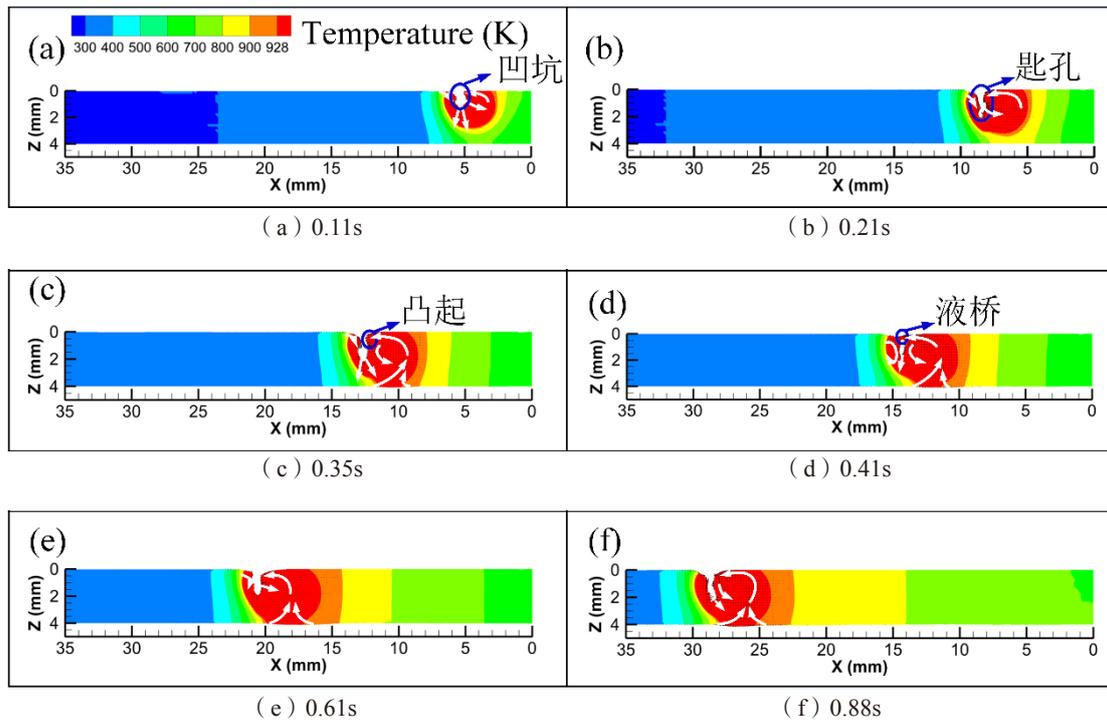


图 5 4500 W 激光功率下不同时刻纵截面温度场—流场分布

4 结论

建立三维瞬态传质传热数值模型,研究了不同激光功率下 4mm 厚 6061 铝合金激光焊温度场,针对熔透功率下的激光焊温度场—流场进行研究,基于数值模拟结果,得出结论如下:

①保持其他焊接参数一致,选取激光功率分别为 2500W、3500W 和 4500W 进行 6061 铝合金激光焊温度场数值分析。随着激光功率的增加,匙孔深度和熔池深度明显增加。功率为 2500W 和 3500W 的激光焊难以将 4mm 厚的 6061 铝合金熔透,而功率为 4500W 的激光焊可以熔透。

②分析了熔透功率(4500W)下的焊件上下表面温度场分布。熔透后的上表面熔池尺寸趋于稳定,熔池温度场前部和后部稍窄、中部稍宽;焊件下表面熔池呈明显的椭圆形,熔池尺寸小于上表面熔池尺寸。

③分析了熔透功率(4500W)下的熔池纵截面温度场—流场分布。焊件熔透前,熔池形成三种流动趋势,匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动以及匙孔后部的逆时针流动。焊件熔透后熔池主要存在四种流动趋势,匙孔底部的向下流动、匙孔前壁的顺时针向下流动、匙孔后部的逆时针涡流以及焊件底部熔透处的向上流动。

参考文献

- [1] 许芙蓉,杨立军,王金杰.6061铝合金薄板激光焊工艺试验研究[J].兰州石化职业技术大学学报,2023,23(3):11-13.
- [2] 杨帆,陈芙蓉.A-UIT处理对7075铝合金焊接应力影响的数值模拟[J].焊接学报,2021,42(12):91-96.
- [3] 马俊雅,李静静.航空航天用高强铝合金搅拌摩擦焊的研究现状与发展[J].材料研究与应用,2023,17(1):79-86.
- [4] 康悦,占小红,封小松,等.6061铝合金激光焊温度场与应力场数值模拟研究[J].上海航天(中英文),2020,37(6):58-63+68.
- [5] 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.
- [6] 黄立进,刘鹏,朱苏,等.铝合金激光焊气孔数值模拟[J].造船技术,2020(2):1-6+12.
- [7] 穆绍帅.6061-T6中厚板铝合金激光焊接工艺参数研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [8] 晋国祥,郭庆虎,胡庆贤,等.中厚板铝合金光纤激光+MIG复合热源焊残余应力的数值分析[J].机械工程学报,2018,54(2):77-83.
- [9] 姜自立.小电流脉冲GMA辅助大功率固体激光焊接过程数值分析[D].济南:山东大学,2020.
- [10] 朱桢.6061/5182异种铝合金激光焊接接头组织与性能研究[D].苏州:苏州大学,2022.