

文章编号: 1002-1582(2025)04-0415-09

铝合金板激光增材制造温度特性模拟仿真

余天锡¹, 李隆^{1,2*}, 姜永霞¹, 程雨露¹, 张春玲^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

(2. 西安建筑科技大学 应用物理研究所, 陕西 西安 710055)

摘 要: 为了探究铝合金板表面激光增材制造过程中的熔池形貌以及温度场的分布, 建立了流体传热的三维有限元模型。考虑材料在加工过程中热物理性质以及激光的吸收率随温度的变化, 研究了激光的功率、扫描速度对熔池流场及温度场分布的影响。研究结果表明: 在加工的过程中, 熔池的形貌会受到重力、反冲压力、马兰戈尼效应的影响。较大的激光功率以及较低的扫描速度可以使熔池有较高的温度以及更大的尺寸, 但是容易导致熔池中的金属液体产生飞溅, 影响材料的加工质量; 较小的激光功率以及较高的扫描速度会导致材料吸收激光能量不足而无法充分熔化, 容易出现球化现象。激光功率设置在 86W 且扫描速度设置在 1300mm/s 附近时, 制件能获得良好的成型质量, 此研究为 6061 铝合金激光增材制造提供一定的理论以及数据上的参考。

关 键 词: 铝合金; 激光增材制造; 温度场分布; 熔池

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Simulation of temperature characteristics of laser additive manufacturing of aluminum alloy plate

YU Tianxi¹, LI Long^{1,2*}, JIANG Yongxia¹, CHENG Yulu¹, ZHANG Chunling^{1,2}

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Institute of Applied Physics, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to explore the morphology of molten pool and the distribution of temperature field in the process of laser additive manufacturing on the surface of aluminum alloy plate, a three-dimensional finite element model of fluid heat transfer was established. Considering the thermophysical properties of the material during processing and the change of laser absorption rate with temperature, the effects of laser power and scanning speed on the flow field and temperature field distribution of the molten pool were studied. The results show that in the process of processing, the morphology of the molten pool will be affected by gravity, recoil pressure and Marangoni effect. Larger laser power and lower scanning speed can make the molten pool have higher temperature and larger size, but it is easy to cause splashing of the metal liquid in the molten pool, which affects the processing quality of the material. Smaller laser power and higher scanning speed will lead to insufficient energy of the material to absorb the laser and cannot be fully melted, which is prone to spheroidization. When the laser power is set at 86 W and the scanning speed is set near 1300mm/s, the parts can obtain good forming quality. This study provides a certain theoretical and data reference for laser additive manufacturing of 6061 aluminum alloy.

Keywords: aluminum alloy; laser additive manufacturing; temperature field distribution; melting pool

收稿日期: 2025-02-17; 收到修改稿日期: 2025-04-02

基金项目: 国家自然科学基金 (11705136)

作者简介: 余天锡 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事激光应用技术研究。1299960448@qq.com

李隆 (1972—), 男, 教授, 博士, 从事全固态激光器以及应用技术方面研究。

* 通讯作者: lilong@xauat.edu.cn

0 引 言

21 世纪以来, 人类在材料学领域取得了较大的突破。铝合金具有密度小、比强度大以及耐腐蚀性强等特点, 在汽车制造以及航空航天领域得到了较为广泛的应用^[1,2]。在 Al-Mg-Si 系铝合金中, 6061 铝合金有着优越的加工性能, 它熔点较低、可焊接性较强以及铸造性良好, 被应用于飞机的机身以及相关零件的制造, 在提高飞行器的载重效率等方面起着十分重要的作用^[3,4]。

为了快速制造航空领域所需要的零部件, 激光增材制造受到了科学家们的广泛关注。目前, 增材制造主要是通过激光、离子束、搅拌摩擦等方式使金属粉末快速熔化、凝固, 逐层堆积从而实现相关零件的制造。激光选区熔化技术 (slm) 属于增材制造的一种, 其过程是将金属粉末铺设在基材上面, 然后使用激光按照一定的路径进行熔化、凝固, 从而形成零部件, 激光选区熔化技术具有加工精度高、制造周期短以及成本较低的优点, 在工业制造领域具有极大的优势^[5-7]。

目前, 国内外有许多学者针对激光选区熔化技术进行了研究。薛九天^[8]等研究激光选区熔化制造过程中熔池的演变, 建立数值仿真模型探讨了激光的扫描速率与熔化温度及流场之间的变化规律, 研究结果表明, 熔池的大小以及存在的时间会随着扫描速度的增大而减小, 当扫描速度较低时熔池界面会出现波浪状的突变。文舒^[9]等利用模拟仿真模型计算了 GH536 高温合金选区激光熔化过程熔池的温度场变化以及熔池凝固后温度场的分布。研究结果表明, 使用高斯热源能够很好地模拟出激光选区熔化制造的过程, 当激光的扫描速率减小或者功率增大时, 熔池的宽度会增加。宋军^[10]等采用了离散元法与有限体积法建立了激光选区熔化的热流耦合数值模拟模型, 研究了不同激光参数下的熔道形貌以及熔池尺寸, 该模型为工艺优化提供了相关的指导。梁平华^[11]等利用数值模拟软件建立了激光选区熔化 316L 不锈钢模型, 探究了激光功率、扫描搭接率对熔道以及搭接质量的影响, 该研究成果有助于激光选区熔化的工艺参数优化。杨寅晨^[12]等对 TC4 钛合金激光选区熔化进行全过程模拟仿真, 对加工的工艺进行了参数优化并与试验相结合, 该研究为激光选区熔化成型提供了理论基础。Tan^[13]等使用了计算流体力学来观察 316L 不锈钢熔池变化过程, 考虑到

了马兰戈尼效应和反冲压力对熔池流动的影响, 研究了不同的激光功率以及扫描速度对于熔池特性的影响, 为激光选区熔化提供了相关的理论数据。Luo^[14]等采用了高斯线热源和高斯点热源的混合作为热输入, 并与高斯点热源的计算结果进行了一系列的对比。通过将计算所得到的结果与实验结果进行对比, 验证了仿真的准确性。Le^[15]等建立三维的数值模型, 研究了 IN78 的激光选择性熔化的熔化以及凝固过程, 研究结果表明 IN78 非线性凝固行为不仅影响了熔池的形成, 而且也影响了液-固的转变。

许多学者对各种金属材料展开了研究, 但是目前对 6061 铝合金激光选区熔化的研究还相对较少。本文对 6061 铝合金的激光选区熔化展开研究, 考虑加工过程熔池中的反冲压力、马兰戈尼效应以及重力等因素对熔池形貌演变的影响, 同时考虑不同温度下的 6061 铝合金的激光的吸收率以及热物理性质, 采用了数值模拟的方法对加工过程熔池的演变以及温度场的分布进行了探究, 分析不同的激光参数对于 6061 铝合金激光选区熔化制件质量的影响, 为 6061 铝合金激光选区熔化提供一定的理论指导。

1 基本原理

质量守恒方程: 在激光作用下, 铝合金金属粉末会发生熔化从而形成熔池, 熔池整体质量保持不变, 由公式得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为材料的密度; $\mathbf{u}$ 为熔池中金属液体的流速。

流体传热: 激光加工铝合金的过程中存在着能量交换, 整个过程符合能量守恒, 由流体传热方程得

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (2)$$

动量运输方程: 熔池中的液体动量守恒, 符合 Navier-Stokes 方程, 表示为

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \rho \mathbf{g} + F_r + F_s + F_b + \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

式中, p 表示压力; μ 表示动力粘度; $\mathbf{I}$ 表示单位矩阵; F_r 表示熔池发生蒸发时产生的反冲压力; F_s 表示表面张力; F_b 表示由于流体热膨胀引起的热浮力。其中

$$F_r = 0.54P_0 \exp\left(L_v \frac{T - T_b}{RTT_b}\right) \quad (4)$$

式中, P_0 为环境压力; L_v 为金属的蒸发潜热; R 为通用气体常数; T_b 为金属的沸点。

$$F_b = -\beta\rho(T - T_L)g \quad (5)$$

式中, β 为热膨胀系数; T_L 为金属的熔化温度。

$$F_\sigma = \sigma\kappa \cdot \mathbf{n} - \nabla_s \sigma \quad (6)$$

式中, σ 为表面张力系数; $\mathbf{n}$ 为法向表面向量; κ 为表面曲率; ∇_s 为梯度算子, 等号右侧的两项分别代表了毛细管力和由于温度梯度导致表面张力系数在空间中的变化而产生的马兰戈尼效应。马兰戈尼效应能够驱动熔池中的流体由表面张力低的地方向表面张力高的地方流动, 能够在液体表面产生剪切力^[16]。

相变变化: 在激光加工的过程中 6061 铝合金金属粉末会产生相变, 因此对热容进行修正, 使用等效比热容描述相变潜热

$$\begin{aligned} \rho &= \theta_1 \rho_s + \theta_2 \rho_l \\ C_p &= \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_s C_s + \theta_2 \rho_l C_l) + L_m \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \\ \alpha_m &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\theta_2 \rho_l - \theta_1 \rho_s}{\theta_1 \rho_s + \theta_2 \rho_l} \\ \theta_1 + \theta_2 &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, ρ_s 、 ρ_l 分别为固、液相密度; α_m 为反映了相变的进程; θ_1 、 θ_2 为分别代表了固相与液相的体积分数。

热源与热交换: 熔池与激光之间的能量交换可以表示为

$$\begin{aligned} Q &= \frac{2\eta P}{\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) - h_c(T - T_0) \\ &\quad - \sigma_b \epsilon (T^4 - T_0^4) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, η 是激光的吸收率; P 为激光的功率; r_0 为激光束半径; r 为被检测点到激光束中心的距离; h_c 传热系数; σ_b 为 Stefan Boltzmann 常数; ϵ 为发射率。

图 1 为仿真模型边界条件示意图。激光的能量为金属材料的热源, 其能量分布呈现高斯分布

$$q_1 = \frac{2\eta P}{\pi r_0^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) \quad (9)$$

金属材料上表面与空气之间存在着热交换, 因此需要考虑到对流换热损失的热量

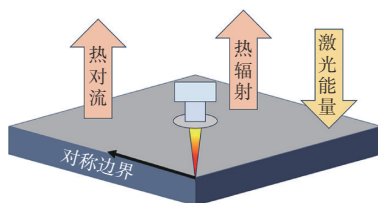


图1 仿真模型的边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_c (T - T_0) \quad (10)$$

金属材料还会以热辐射的形式与外界进行热交换, 由热辐射损失的热量有

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \sigma_b \epsilon (T^4 - T_0^4) \quad (11)$$

此外, 模型还设置了“对称”边界条件用来节约计算资源。

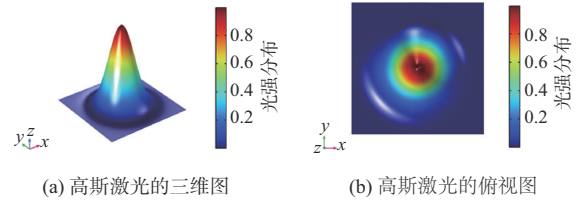


图2 激光的能量分布图

2 有限元模型以及物理参数

激光选区熔化过程涉及到了复杂的相变过程, 为了简化数值模拟模型, 做出了以下的假设: (1) 金属粉末在吸收激光能量之后形成熔融金属液体, 该熔融液体为层流状态, 且为不可压缩的牛顿流体^[17]。(2) 6061 铝合金金属粉末以及基材各向同性, 不会因为温度等因素的变化而发生改变。(3) 在加工的过程中由于达到金属的沸点而蒸发损失的质量较小, 因此可以忽略不计, 整个过程质量守恒。(4) 高斯面热源是加工过程中金属材料的唯一热源且不存在其它形式的热源。(5) 金属粉末是平铺在基材上面, 因此将其简化为一个连续均匀的板^[18]。

CFD (Computational Fluid Dynamics) 为计算流体力学的英文简称, 其基本原理是利用微分方程对流体相关问题进行数值求解, 通过离散化、迭代等方式获得流体速度、压力等物理量的近似解, 能够用来解答各种关于流体流动的问题。

如图利用 CFD 有限元软件建立三维模拟仿真模型, 该模型的长 1500 μm , 宽 800 μm , 高 250 μm 。在激光与金属粉末相互作用的区域发生复杂的相变过程, 因此在金属板铺设粉末的区域使用了细化的自由四面体网格。为了保证计算结果的准确性同时为了节约计算资源, 有限元模型采用了“对称”的边界条件以及在没有铺设金属粉末的区域使用了较为粗化的网格。有限元模型的网格划分如图 3, 铝合金选区熔化的示意图如图 4。

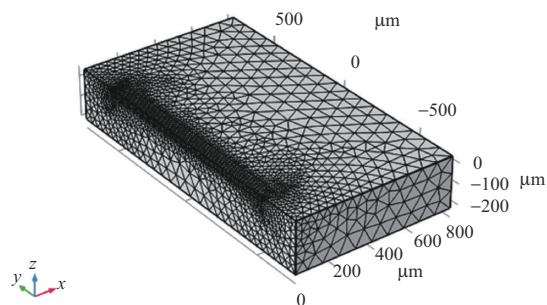


图3 有限元模型的网格划分

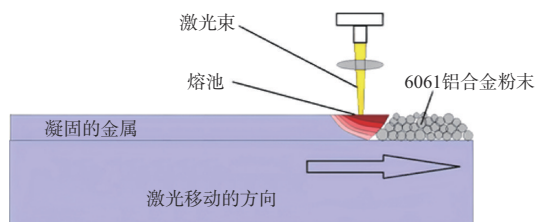


图4 激光选区熔化示意图

从物理学原理进行分析,金属材料的电阻率能够影响金属对于激光的吸收率。当激光与金属

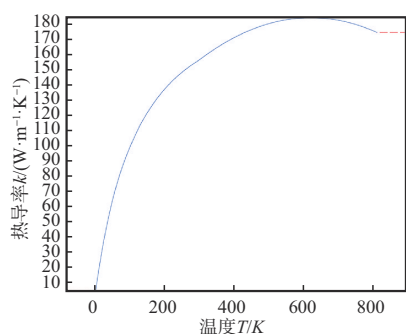


图5 6061铝合金热导率随温度变化

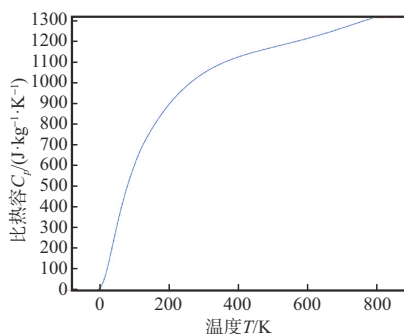


图6 6061铝合金比热容随温度变化

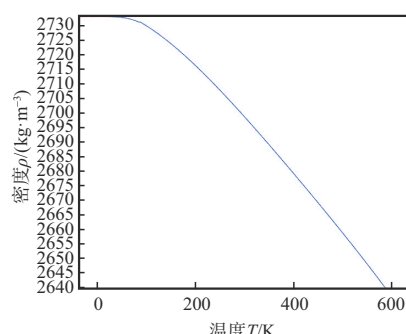


图7 6061铝合金密度随温度变化

表2 6061铝合金的热物理参数

参数	符号/单位	数值
动力粘度	μ kg/(m·s)	1.28×10^{-3}
表面张力温度系数	$d\sigma/dT$ N/(m·K)	-1.55×10^{-4}
熔化潜热	L_m J/kg	3.87×10^5
蒸发潜热	L_v J/kg	1.05×10^7
沸点	T_b /K	2760
固相温度线	T_s /K	870
液相温度线	T_l /K	930
热膨胀系数	β 1/K	2.8×10^{-5}
表面张力	σ_0 N·m ⁻¹	0.871

3 分析与讨论

3.1 加工过程中的温度场以及熔池的流动状态

仿真过程选取了Nd:YAG激光器的相关参数,该激光器的光斑半径为50μm,输出功率的范围为0~100W,输出的波长1064nm,将激光的功率设置为86W,激光的前进速度为1300mm/s,在此功率下探究温度场的演变以及熔池流动。使用“对

相互作用,金属会因为吸收激光的能量导致升温,此时金属的电阻率会发生较大的变化,从而导致金属对激光的吸收率提高^[19,20],以下为不同温度下金属材料对激光的吸收率。

表1 不同温度下的6061铝合金的激光吸收率

温度范围 T /K	273~473	473~653	653~723	723~798	798~1073
η	0.19	0.25	0.27	0.32	0.74

在模拟仿真的过程中需要考虑到材料的热物理参数,为了提高模拟仿真结果的准确度,在仿真过程中考虑到了材料的热物理参数随温度发生改变。在本次激光选区熔化中选用了6061铝合金金属粉末以及6061铝合金基材,通过查阅参考文献并通过插值的方法获得铝合金材料的热物理参数与温度之间的关系^[21],参数如图5~7以及表2所示。

”边界条件能够有效地节约计算资源,待计算结束时可以利用该边界条件将所得到的结果通过三维镜像来进行绘图。

图8为不同时刻下6061铝合金的三维形貌以及温度场的分布,红色箭头为激光的前进方向。由图8可以得知,激光能量的持续输入使得6061铝合金升温,当温度达到铝合金的金属熔点时,6061铝合金金属粉末会发生固-液相变,从而形成熔池。由图8(a)、(b)、(c)、(d)可得,在激光行进路径的前端的等温线分布较为密集,这是因为高能激光束作用在6061铝合金金属粉末上,使其瞬间升温。与此同时,温度的升高使得铝合金对激光的吸收率进一步提升,导致高温区域吸收的热量增加,从而使得在激光光斑作用的区域内出现较大的温度梯度。在激光行进路径的尾部等温线的分布较为稀疏,这是由于随着激光的移动,熔池失去了激光的能量输入,先前积累的热量由热对流以及热辐射的形式散失掉。此外,热量的损失需要一定的时间,

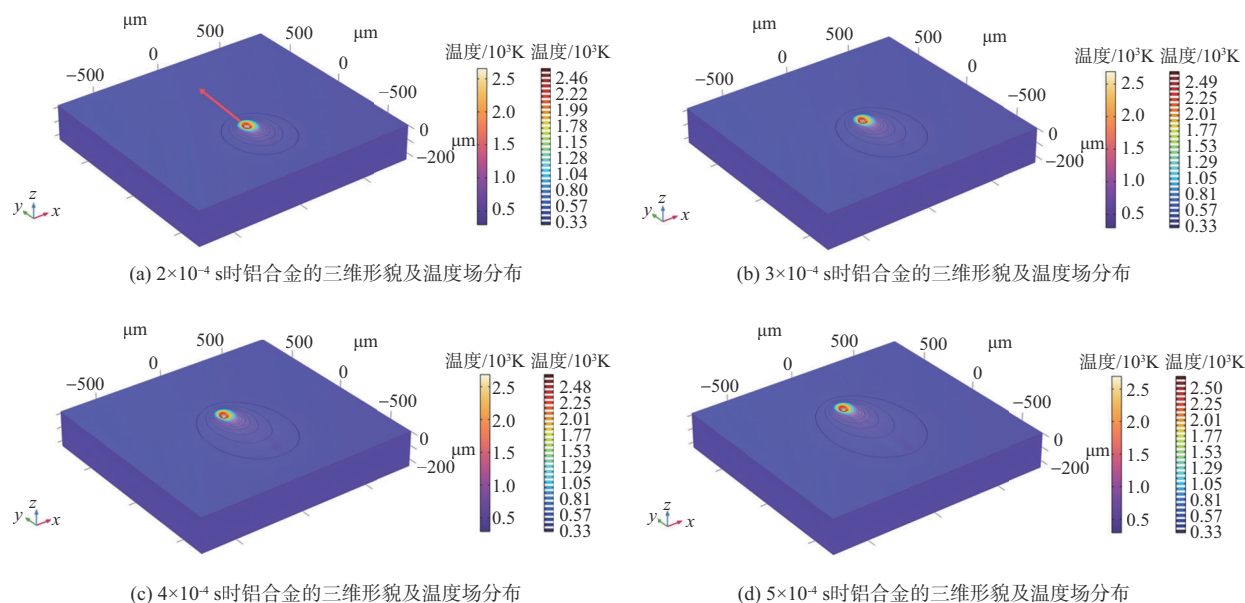


图8 不同时刻下6061铝合金的三维形貌及温度场分布

温度由离光源近的区域向离光源远的地方逐渐递减,从而形成了等温线稀疏分布的情况。激光行进路径的前后段存在着温度梯度,温度场整体上呈现出“前密后疏”的椭圆状分布。

对激光选区熔化过程的材料的三维形貌进行分析。从图8(a)、(b)、(c)、(d)的等温线分布图中可以看出,在激光行进路径的前端等温线分布较为密集且温度较高,激光行进路径的后端等温线分布较为稀疏且温度较低,这就导致了熔池的前后端之间产生了温度梯度。熔融6061铝合金液体的表面张力的大小与温度呈现出负相关,温度高的地方熔融金属液体的表面张力较低,温度低的地方熔融金属液体表面张力较高。在激光加工的过程中,熔池由于热量分布不均从而形成温度梯度。由马兰戈尼效应可知,由温度梯度导致的表面张力梯度会驱动熔融的金属液体由表面张力低的地方向表面张力高的地方运动。在此次加工过程中,由于马兰戈尼效应,熔池中的金属液体由熔池前端的高温区域被拖拽至熔池后端的低温区域,冷却后形成了凸起的熔道。在马兰戈尼效应的作用下,熔道的末端会出现水滴状的凸起。随着金属液体的流动,熔池能够充分实现热传递与热交换,与此同时,激光的能量输入与熔池的热对流、热辐射的能量损失之间形成动态平衡,因此形成了较为平整的熔道。

图9(a)、(b)、(c)为熔池流场以及温度场的变化,黑色实线为6061铝合金的液相线。由图可以得知:在初期阶段,高能激光束作用于铝合金金属粉末,使金属粉末熔化形成熔池,熔融金属液体在

重力作用下向下流动,熔池产生了凹陷的趋势。与此同时,随着熔池吸收能量的增多,熔池的温度逐渐升高至铝合金的沸点(2760K),熔融的液态金属就会汽化蒸发从而对熔池产生相反方向的反冲压力。由图9可知,在竖直方向上,反冲压力对熔池产生了向下的力,使熔池中的液体向下流动,熔池的凹陷现象进一步加剧。在水平方向上,反冲压力将金属液体向熔池边缘挤压,高温金属液体的横向流动可以将熔池中心的热量带到熔池边缘,一方面能够增大熔池的宽度,另一方面随着热量的转移,熔池深度的增长速度有所放缓。

加工过程采用的激光光源为高斯面热源,激光的能量由光斑的中心向边缘逐渐递减,这就导致熔池不同区域的温度不一致,使熔池由中心向边缘区域形成温度梯度。6061铝合金金属液体的表面张力大小与温度呈现出负相关,温度高的地方熔融金属液体的表面张力较低,温度低的地方熔融金属液体的表面张力较高。因此由马兰戈尼效应可知:在熔池的表面,由表面张力梯度产生的剪切力会驱动熔池中心的金属液体向边缘移动;在熔池的底部,部分金属液体会从熔池的边缘回流到熔池的中心,从而形成环流,仿真图中熔融金属液体流场的变化也验证了这一点。

随着激光的移动,熔池失去了激光能量的输入而开始逐渐冷却,当熔池的温度下降至金属沸点以下,反冲压力消失。与此同时,液态金属的流动使得熔池各个区域之间能够进行充分地热交换,因此熔池各个区域的温度逐渐趋于一致,马兰戈尼效应开始减弱。随着熔池的进一步冷却,熔池的表面张

力开始占主导地位, 熔池在表面张力的作用下逐渐收缩, 熔池的凹陷逐渐消失。此外, 熔融的金属开始凝固, 导致熔池体积进一步缩小。

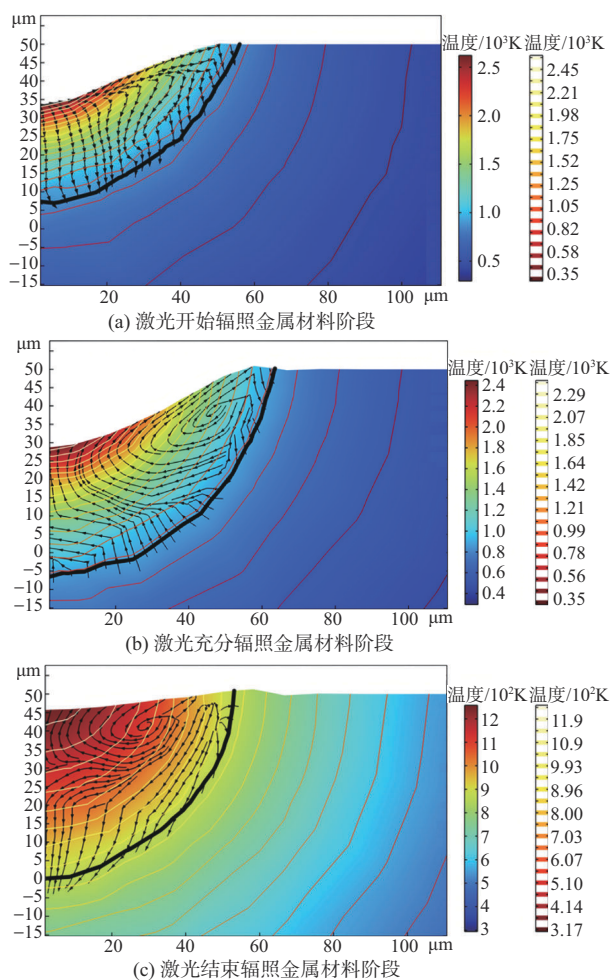


图 9 熔池流场以及温度场的变化

3.2 不同的激光功率对于激光选区熔化过程温度的影响

激光参数的选取区间为 80~92W, 激光的半径为 50μm, 扫描速度为 1300mm/s。激光与熔池相互作用时, 熔池会在各种体积力的作用下产生凹陷, 由于仿真软件不支持跨网格计算, 因此选取熔池凹陷区域以下的点进行测量。选取 X, Y 坐标为 (0,0) 且深度为 40.5μm 的观测点, 探究不同激光功率下该观测点的温度。

由图 10 (a) 可以得知, 在激光功率为 80W 时, 观测点温度上升的速率最慢。随着激光功率的升高, 观测点温度上升的速率也在提高。这是因为较大的激光功率有着较高的功率密度, 铝合金金属粉末在激光束的辐照下能够在短时间内急剧升温, 激光功率越高其升温的速率也就越大。此外, 由图 10 (a) 可以得知, 观测点的温度上升曲线在开始阶段较为平缓, 随着时间的推移, 其温度上升曲线骤然变陡且几乎垂直于横坐标。

这是因为温度的上升能够提高铝合金对激光的吸收率, 使得铝合金能够吸收更多的热量, 从而提高铝合金的升温速率。由图 10 (b) 可知, 当激光功率设置为 80W 时, 观测点的最高温度为 1029.6K。当激光功率提升至 92W 时, 观测点的最高温度为 2302K。合适的激光功率能够使金属粉末以及基板充分熔化, 使两者之间能够很好地进行结合, 从而形成质量较好的形成层。

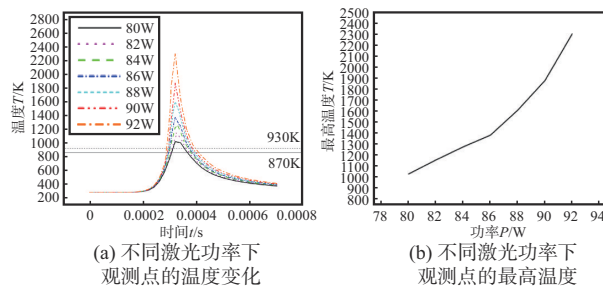


图 10 不同激光功率下观测点的温度图像

3.3 不同的激光功率对于熔池宽度以及深度的影响

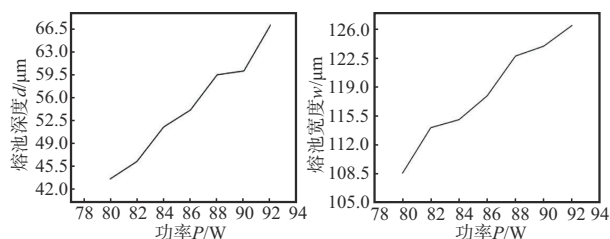
激光功率的选取区间为 80~92W, 激光的半径为 50μm, 扫描速度为 1300mm/s。探究不同激光功率下熔池的最大尺寸。

激光功率的大小对于选区熔化制件成品质量的好坏起着至关重要的作用。一方面, 激光功率的大小决定着铝合金吸收热量的多少, 对加工过程中的熔池的深度以及宽度造成影响。另一方面, 激光的功率的大小影响熔池的热效应, 与熔池内部的体积力之间存在着一定的关系。

当激光无法充分熔化金属粉末时, 形成的熔池可以近似地认为仅有气液界面, 熔池表面就会在表面张力作用下向着具有最小吉布斯表面自由能的球形转变, 因此熔池就会发生球化现象。充分熔化铺粉层以及提高基板的熔化量能够有效地抑制球化的趋势, 减少球化现象的发生^[22]。如图 11 (a) 和图 11 (b), 在激光功率为 80W 时, 熔池的深度和宽度分别为 43.7μm 与 108.6μm。由数据可以得知在此功率下熔池深度较浅, 铝合金金属粉末难以被激光充分熔化, 熔池在表面张力作用下收缩, 从而出现球化现象。此外, 激光功率过低导致铝合金金属粉末与基板之间难以充分熔化, 从而导致熔道与基板之间的粘接性较差。

匙孔以及孔隙的形成与材料加工过程中熔池的流体动力学行为有着紧密的联系, 当激光短时间内输入较大的能量时, 金属粉末由于吸能导致温度升高, 当温度升高至金属沸点, 熔池中的金属液体就会由于蒸发而产生反冲压力, 容易产生

狭长且深度较大的匙孔。功率密度过高的激光作用在熔池上使得熔池发生剧烈的蒸发,产生的反冲压力把熔池中的金属液体推出熔池外,熔池冷却收缩时缺少金属液体的补充,凝固时可能会形成孔隙等缺陷^[23]。



(a) 不同激光功率下的熔池的深度 (b) 不同激光功率下熔池的宽度

图11 不同激光功率下的熔池尺寸

由图11(a)和图11(b)可知,当激光功率增大到92W时,熔池的深度和宽度分别为67.1 μm 和126.5 μm 。图12为在激光功率为92W时,放大后的熔池形貌的变化图。由图11和图12可以得知,在该激光功率下能够完全熔化铺粉层以及一定深度的基板,此时熔池有着较大的深度,因而较为容易形成匙孔。与此同时,熔池液体在该功率的激光的作用下吸收了过多的热量,熔池中的金属液体会剧烈蒸发从而产生较大的反冲压力,金属液体被巨大的反冲压力推出熔池外面,造成了材料的损失,这就导致加工后的制件容易出现包含气孔的孔隙,从而影响加工质量。在激光功率取86W时,熔池的深度和宽度分别为54.2 μm 和118 μm 。在该激光功率下,铝合金金属粉末以及基板能够被充分熔化,熔融的金属液体能够得到较好地铺展,熔道与基板之间的粘接性良好。

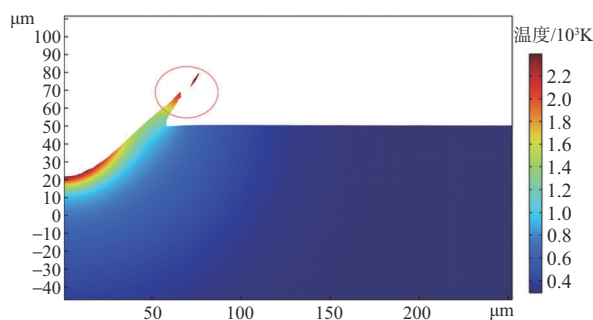


图12 熔池飞溅现象

3.4 不同的扫描速度对于激光选区熔化过程温度的影响

激光功率的设定参数为86W,激光半径为50 μm ,扫描速度为1100~1500mm/s。激光与熔池相互作用时,熔池会在各种体积力的作用下产生凹陷,由于仿真软件不支持跨网格计算,因此选取熔池凹陷区域以下的点进行测量。选取X,Y坐

标为(0,0)且深度为40.5 μm 的观测点,探究不同扫描速度下该观测点的温度。

由图13(a)可以得知,激光的扫描速度能够对加工过程的材料的温度场产生影响。在扫描速度分别为1500mm/s和扫描速度为1100mm/s的情况下,观测点在扫描速度为1500mm/s时能够更快地达到相变温度。这是因为激光扫描速度的提升,使激光移动到观测点的时间缩短,从而使得观测点升温的速率加快。由图13(a)与图13(b)可得,铝合金金属粉末在加工过程中吸收能量的多少与激光的扫描速度有关。当扫描速度为1100mm/s时,熔池所能达到的最高温度为1827.4K;当扫描速度为1500mm/s时,熔池所能达到的最高温度为1135.2K。在较低的扫描速度下,激光能够与金属材料充分作用,金属的热效应较为明显,熔池能够存在较长的时间以及拥有较大的最高温度。在较高的扫描速度下,金属材料与激光热交换相对较少,熔池存在时间较短以及能达到的最高温度相对较低。

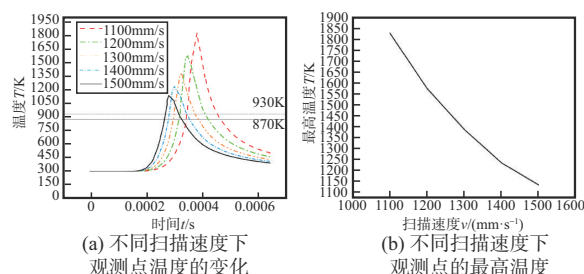


图13 不同扫描速度下观测点的温度图像

3.5 不同的扫描速度对于熔池宽度以及深度的影响

激光功率的设定参数为86W,激光的半径为50 μm ,扫描速度为1100~1500mm/s。讨论不同的扫描速度下的熔池的最大尺寸。

由图14(a)和图14(b)可以得知,当激光扫描速度为1100mm/s时,熔池的深度和宽度分别为61.7 μm 和128.8 μm 。在激光扫描速度较低时,铝合金金属粉末能够充分吸收激光的能量,使制件有着较大的热积累。熔池中的金属液体在热积累过大的情况下汽化蒸发得很剧烈,熔池中的金属液体就会在反冲压力的作用下被挤推出熔池外面,从而出现飞溅现象。由熔池尺寸可以得知,在该扫描速度下,激光能够完全穿透铺粉层以及基板,有着较深的熔池深度,此时较为容易出现匙孔,影响制件的成型质量。当激光的扫描速度为1500mm/s时,熔池的宽度以及深度为48 μm 和108.6 μm 。由结果可知,随着激光扫描速度的加快,熔池的深度以及宽度逐渐变小。过大的扫描速度使得铝合金金属粉末与激光相互作用的时间

变短, 导致激光无法完全穿透铺粉层而无法充分熔化金属粉末。当金属粉末无法被充分熔化时, 熔池容易在表面张力的作用下收缩, 从而产生球化现象。此外, 熔池深度不足还会导致熔道与材料之间无法充分粘接, 影响制件成型质量。当激光的扫描速度设定为 1300mm/s 时, 熔池的宽度以及深度为 54.2 μ m 和 118 μ m。合适的激光扫描速度能够使金属粉末充分熔化, 使之与基板充分粘接, 形成良好的熔道, 从而得到成型质量较好的制件。

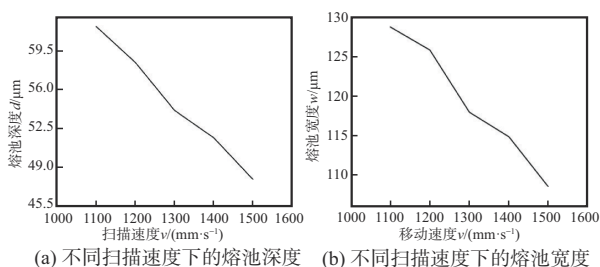


图 14 不同扫描速度下的熔池尺寸

4 结 论

在激光加工的过程中, 铝合金金属粉末由于吸收了激光的能量, 因此在激光行进路径前端的熔池的升温速度较快, 有着密集的等温线。激光行进路径后端的熔池逐渐冷却, 等温线较为稀疏。熔池的前端和后端之间存在温度梯度, 两处的表面张力不一样, 由于马兰戈尼效应, 熔池中的液体由前端向后方移动, 使得凝固的熔道有着轻微的凸起。除此之外, 在激光加工的过程中, 金属熔池在重力、反冲压力等体积力的作用下会先出现凹陷, 待熔池冷却收缩之后趋于平整。

激光的功率及扫描速度决定着激光与金属材料的能量交换, 对金属材料温度以及熔池的尺寸产生较大的影响。激光功率从 80W 提升至 92W 时, 观测点的最高温度由 1029.6K 上升至 2302K; 激光扫描速度从 1100mm/s 上升至 1500mm/s, 观测点的最高温度由 1827.4K 下降至 1135.2K。金属材料在大功率以及低扫描速度的激光下能够获取较多的热量, 因此观测点有着较大的最高温度。提高激光功率或者降低扫描速度能够使得熔池的深度以及宽度加大, 但也会导致熔池汽化蒸发过于剧烈而出现金属液体飞溅, 从而产生匙孔、孔隙等缺陷; 降低激光功率或提高扫描速度能够使得熔池的深度以及宽度变小, 但会因为金属粉末熔化不充分而出现球化现象, 从而对制件的成型质量产生影响。

参考文献:

- [1] 张新明, 邓运来, 张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(03):257—271.
Zhang Xinming, Deng Yunlai, Zhang Yong. Development of high strength aluminum alloys and processing techniques for the materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(03):257—271.
- [2] 王华明. 金属增材制造技术及其对重大装备制造业的影响[J]. 中国工业和信息化, 2019(12):54—56.
Wang Huaming. Metal additive manufacturing technology and its impact on major equipment manufacturing industry[J]. China Industry & Information Technology, 2019(12):54—56.
- [3] 张坚, 吴文妮, 赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(06):131—134, 139.
Zhang Jian, Wu Wenni, Zhao Longzhi. Research progress and development trend of laser cladding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(06):131—134, 139.
- [4] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J]. 航空制造技术, 2018, 61(03):74—82.
Li Quan, Wang Fude, Wang Guoqing, et al. Wire and arc additive manufacturing of lightweight metal components in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(03):74—82.
- [5] 黎志勇, 杨斌, 王鹏程, 等. 金属 3D 打印技术研究现状及其趋势[J]. 新技术新工艺, 2017(4):25—28.
Li Zhiyong, Yang Bin, Wang Pengcheng, et al. Research status and trend of metal 3D printing technology[J]. New Technology & New Process, 2017(4):25—28.
- [6] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components - process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92:112—224.
- [7] 刘婷, 葛建彪. 激光增材制造高强 AlSi7Mg 铝合金构件工艺与组织调控研究[J]. 应用激光, 2018, 38(03):393—401.
Liu Ting, Ge Jianbiao. Tailoring of process and microstructure of high-strength AlSi7Mg aluminum alloy parts prepared by laser additive manufacturing[J]. Applied Laser, 2018, 38(03):393—401.
- [8] 薛九天, 曾超, 黄芳. 扫描速度对激光选区熔化 Ti6Al4V 熔池流动行为的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(4):15—22.
Xue Jiutian, Zeng Chao, Huang Fang. Effect of scanning speed on flow behavior of laser selective melting Ti6Al4V molten pool[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(4):15—22.
- [9] 文舒, 董安平, 陆燕玲, 等. GH536 高温合金选区激光熔化温度场和残余应力的有限元模拟[J]. 金属学报, 2018, 54(03):393—403.
Wen Shu, Dong Anping, Lu Yanling, et al. Finite element simulation of the temperature field and residual stress in GH536 superalloy treated by selective laser melting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(03):393—403.
- [10] 宋军, 唐倩, 罗智超, 等. 马氏体时效钢激光选区熔化成形过程介观尺度数值模拟[J]. 机械工程学报, 2024, 60(03):282—295.
Song Jun, Tang Qian, Luo Zhichao, et al. Mesoscopic numerical simulation during selective laser melting of maraging steel[J].

- Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(03):282—295.
- [11] 梁平华, 唐倩, 冯琪翔, 等. 激光选区熔化单道扫描与搭接数值模拟及试验[J]. 机械工程学报, 2020, 56(22):56—67.
Liang Pinghua, Tang Qian, Feng Qixiang, et al. Numerical simulation and experiment of singletrack scanning and lapping in selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22):56—67.
- [12] 杨寅晨, 荣远卓, 王翔, 等. TC4粉末选区激光熔化基础烧结工艺仿真与试验研究[J]. 现代制造工程, 2022(12):19—26.
Yang Yinchun, Rong Yuanzhuo, Wang Xiang, et al. Simulative and experimental study on basal sintering process of TC4 powder via selective laser melting[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(12):19—26.
- [13] Tan J L, Tang C, Wong C H. Study and modeling of melt pool evolution in selective laser melting process of SS316L[J]. MRS Communications, 2018, 8(3):1178—1183.
- [14] Luo Z, Zhao Y. Numerical simulation of part-level temperature fields during selective laser melting of stainless steel 316L[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104:1615—1635.
- [15] Le T N, Lo Y L, Lin Z H. Numerical simulation and experimental validation of melting and solidification process in selective laser melting of IN718 alloy[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36:101519.
- [16] Kan X, Yin Y, Yang D, et al. Micro pool characteristics of 316L and the influence of sulfur during SLM[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142:107136.
- [17] Cook P S, Murphy A B. Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31:100909.
- [18] Yuan P, Gu D. Molten pool behaviour and its physical mechanism during selective laser melting of TiC/AlSi10Mg nanocomposites: simulation and experiments[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(3):035303.
- [19] 文康, 李和章, 马壮, 等. 光斑尺寸对连续激光辐照铝合金温度响应影响研究[J]. 中国光学, 2020, 13(05):1023—1031.
Wen Kang, Li Hezhang, Ma Zhuang, et al. Effects of spot size on the temperature response of an aluminum alloy irradiated by a continuous laser[J]. Chinese Optics, 2020, 13(05):1023—1031.
- [20] 王贵兵, 罗飞, 刘仓理. 大气环境下重复频率激光辐照45#钢反射率变化分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, (02):181—183.
Wang Guibing, Luo Fei, Liu Cangli. Reflectance change of 45# steel irradiated by laser in atmosphere[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, (02):181—183.
- [21] 李凤. CFRP与铝合金搅拌摩擦焊接连接机理及工艺研究[D]. 江苏:苏州大学, 2022.
Li Feng. Research on process and joining mechanism of friction stir welding of CFRP and aluminum alloy[D]. Jiangsu: Soochow University, 2022.
- [22] 吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(05):110—115.
Wu Weihui, Yang Yongqiang, Wang Di. Balling phenomenon in selective laser melting process[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(05):110—115.
- [23] Wei M, Ding W J, Vastola G, et al. Quantitative study on the dynamics of melt pool and keyhole and their controlling factors in metal laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2022, 54:102779.