

激光与光电子学进展

红外激光制备钛氧化层的温度场模拟与分析

李磊^{1*}, 王敬¹, 黄磊², 郑宏宇^{1**}, 赵元亮¹, 吴永玲¹, 王浪平³¹山东理工大学机械工程学院, 山东 淄博 255049;²洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471003;³哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 钛合金表面氧化在提高耐磨、耐蚀、界面相容性等方面具有重要应用。采用高斯分布的面热源, 模拟红外激光制备 Ti6Al4V 钛合金表面氧化层过程中的温度分布及变化。首先, 通过对比激光功率为 500 W (功率密度为 39.8 W/mm²)、扫描速度为 15 mm/s 时钛合金表面和厚度方向温度分布的模拟与试验结果, 验证了有限元模型的有效性。然后, 采用该模型研究激光功率、扫描速率、重复扫描间隔等对温度场的影响规律。随着激光功率增加, 扫描速率降低, 加工过程中的线能量增加, 钛合金表面和厚度方向的温度整体增加。当线能量相同情况下, 由于能量在钛合金表面的累积, 大功率高扫描速度下可以获得更高的表面温度和基本相同的内部温度。随着重复扫描间隔的缩小, 表面最高温度逐渐升高。

关键词 激光加工; 氧化层; 钛合金; 数值模拟

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222436

Simulation and Analysis of Temperature Field During Oxidation Layer Preparation on Titanium Alloy Using Infrared Laser

Li Lei^{1*}, Wang Jing¹, Huang Lei², Zheng Hongyu^{1**}, Zhao Yuanliang¹, Wu Yongling¹, Wang Langping³¹School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China;²Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471003, Henan, China;³School of Materials Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract The surface oxidation of titanium alloy is widely used to improve wear and corrosion resistance and interfacial compatibility. In this study, a surface heat source with a Gaussian distribution was employed to simulate the temperature field changes during the surface oxide layer preparation on a titanium alloy (Ti6Al4V) using an infrared laser. First, the simulation results of the temperature distributions on the titanium alloy surface and thickness with 500 W laser power (39.8 W/mm² power density) and 15 mm/s scanning speed were compared with the experimental results, verifying further the effectiveness of the finite element model. Next, the verified model was used to study the influence of the laser power, scanning rate, and repeated scanning interval on the temperature field. The simulation results reveal that the line energy increased when the laser power was increased and the scanning rate was decreased. Consequently, the temperature field on the surface and along the thickness increased as a whole. Under the same line energy, a higher surface temperature and a similar internal temperature could be obtained under both high energy and scanning speed because of the energy accumulation on the titanium alloy surface. Moreover, the maximum surface temperature of the titanium alloy increased with the scanning interval reduction.

Key words laser processing; oxide layers; titanium alloy; numerical analysis

1 引言

钛合金以其较高的比强度、无磁无毒性和良好的塑性及可焊性, 在海洋船舶、航空航天、生物医用材料

等领域得到了广泛应用^[1-3]。但钛及钛合金硬度较低、耐磨性较差, 在对磨过程中容易产生黏着磨损、磨粒磨损等现象^[4]。在潮湿环境中钛合金与钢、铜等腐蚀电位较高的材料接触, 发生电偶腐蚀, 造成严重破坏^[5]。

收稿日期: 2022-08-05; 修回日期: 2022-09-05; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

通信作者: *lilei@sdu.edu.cn; **zhenghongyu@sdu.edu.cn

钛合金的表面氧化层可以明显提高硬度,改善耐磨、耐蚀和生物相容性等^[6-8]。在与玻璃等材料进行连接时,钛合金表面预制氧化层,可以改善润湿性,缓解界面应力,提高连接强度^[9]。因此,在众多钛合金应用中需要表面制备氧化层。目前最重要的氧化层制备方法是热氧化法。将钛合金在氧化气氛中加热到一定温度,并保温一段时间,实现表面氧化层的制备^[10]。当钛合金加热至 β 相转变温度以上保温时,会造成金相组织的粗大和力学性能下降。氧化气氛下当加热温度过高(例如超过 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,钛合金氧化反应加剧,以至于能够实现自持,引起燃烧,即所谓“钛火”现象^[11]。因此热氧化方法将钛合金整体加热制备氧化层时,一般温度控制在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,同时保温足够长时间^[12]。

激光具有能量集中,加热迅速的特点。利用激光对钛合金表面快速加热至氧化温度以上,可以实现表面氧化层的高效制备,同时避免热作用对整体组织性能的影响。中国科学院力学研究所张坤等^[13]采用Nd:YAG连续激光器对工业纯钛进行表面氧化,去除氧化层后获得钛表面硬质耐磨的渗氧层。江苏大学徐兴文等^[14]采用Nd:YAG脉冲激光对钛合金表面预氧化处理,改善钛合金与高硼硅玻璃间的材料连接强度。但这些相关研究只关注激光氧化工艺对钛合金硬度或连接性能的改善,未对氧化层的生成过程、微观组织等进行分析,相关工作未见文献报道。在钛合金氧化过程中,温度是关键因素,影响着氧化反应的热力学和动力学过程^[15]。研究钛合金表面温度的变化过程和分布对于优化激光工艺参数具有指导作用。

激光加工过程中快速变化的温度场采用试验测量,特别是内部温度,具有一定的难度。测量不同工艺参数下的温度场变化也是非常繁琐的工作。有限元模拟是研究温度场变化的重要方法^[16]。本文建立对应激光表面加热过程的有限元模型。通过钛合金表面形貌和内部微观组织变化,分析温度历程,并与有限元模型进行对比,验证模型的有效性。然后采用该模型研究不同激光功率、扫描速度、重复扫描方式等对温度变化的影响,指导激光表面氧化工艺的优化。

2 有限元模型建立及试验方法

2.1 几何模型与网格划分

本模拟中采用 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的长方体,作为Ti6Al4V钛合金板的几何模型,如图1所示。在平面内采用均匀网格划分成 40×40 个小单元。靠近

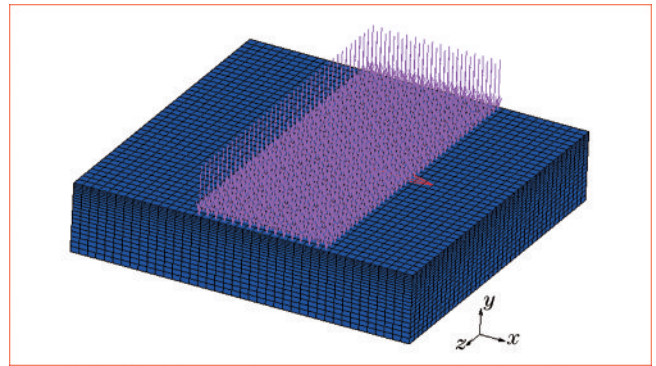


图1 钛合金板的有限元模型和网格划分

Fig. 1 Finite element model of titanium and mesh generation

表面处温度变化梯度大,为保证计算精度,同时提高计算效率,沿厚度方向采用疏密过渡网格,划分成20份。靠近表面处网格厚度最小,为 0.086 mm 。网格厚度最大值位于模型底部,为 0.314 mm 。

2.2 初始条件与边界条件

激光加工前,工件初始温度与周围环境温度相同,都为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在激光扫描过程中,加工区域的钛合金表面升温,与周围环境发生对流散热和辐射换热。扫描区域的钛合金红热状态比较短,与周围环境的热交换主要以对流散热形式进行。因此忽略激光扫描过程中的辐射换热,换热系数设置为常数 $35\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ^[17-18]。工件底部受激光表面扫描的影响很小,温度基本不变,因此忽略工件底部与底座之间的热传导。

2.3 材料属性

材料的热物理参数对温度场模拟的准确性有着十分重要的影响。模拟中用到的Ti6Al4V钛合金的热物理性参数,如比热容 C_p 、导热系数 λ 等,如表1^[19]所示。忽略钛合金密度随温度变化,取固定值 $4450\text{ kg}/\text{m}^3$ 。Ti6Al4V钛合金的固相线温度为 $1604\text{ }^{\circ}\text{C}$,液相线温度为 $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。忽略钛合金 β 相变潜热。由于激光热氧化过程中,加热温度一般都是低于熔化温度,即使表面熔化,此部分钛合金数量较少,故忽略熔化潜热。

2.4 热源模型

在表面氧化过程中,激光的热量被钛合金表面吸收,转化为热量,引起表面温度升高和热量向周围传递。表面温度一般不需要超过钛合金熔点。即使表面温度超过材料熔点,熔化区域也主要局限于表面,热量主要以光斑内的表面进行交换。因此采用高斯分布的面热源模拟高斯分布的激光,其热流密度的函数表达式为

表1 Ti6Al4V钛合金的热物理参数^[19]

Table 1 Thermophysical properties of Ti6Al4V alloy^[19]

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	20	100	200	400	600	800	1000	1400	1600	1660
$C_p / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	549.9	577.8	585	614.7	637.2	654.3	675.9	704.7	808.2	833.8
$\lambda / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	6.80	7.10	8.20	10.70	12.40	14.40	15.80	24.30	27.29	33.64

$$q(r) = \frac{3f_1 \times P \times \eta}{\pi R^2} \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中： f_1 为能量分配系数； P 为激光功率； η 为激光功率有效系数； R 为高斯热源分布的外半径； $x^2 + y^2$ 为所研究的点到光斑中心距离的平方。

模型中热源以高斯分布的面热流密度加载到对应光斑尺寸的表面内，结合钛合金表面状态，能量吸收率设定为 0.7^[20]，加载时间根据加载长度与速度来确定。为了保证计算精度，固定加载时间步长为 0.025 s。散

表 2 Ti6Al4V 合金的化学成分

Table 2 Chemical composition of Ti6Al4V alloy

Element	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
Mass fraction /%	Bal.	5.5-6.8	3.5-4.5	<0.3	<0.2	<0.1	<0.05	<0.015

本试验采用连续光纤激光器，波长为 1080 nm，在大气气氛下，对钛合金表面进行快速加热氧化试验。试验参数如下：平均功率为 500 W，正离焦量为 10 mm，光斑直径为 4 mm，功率密度为 39.8 W/mm²，扫描速度为 15 mm/s。

经激光热氧化处理后，采用光学显微镜观察加热路径上钛合金表面的变化。沿加热路径截取中间部分试样，进行磨抛制样，并用腐蚀液腐蚀，在光学显微镜下观察金相组织变化。

3 分析与讨论

3.1 激光扫描过程中温度场模拟与试验验证

根据以上建立的有限元模型，对钛合金表面激光氧化过程中的温度场进行模拟计算。当激光功率为 500 W、扫描速率 15 mm/s 时，激光扫描过程中表面温度场分布如图 2 所示。在激光辐照区域，中心温度最高，可以达到 1714 °C。由于激光光斑内能量呈高斯分布，因此光斑内的温度随着与中心距离的增大而逐渐减小，在距离中心 1.5 mm 处表面温度下降至 1207 °C，表面温度的等温线呈椭圆状分布。选择垂直于激光路径并对称分布的 10 个表面节点，提取激光加热时的最高温度，如图 3 所示。在光斑内 1 mm 的宽度范围中，

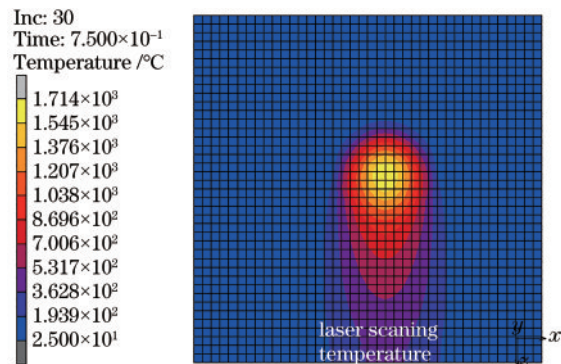


图 2 激光扫描过程中试样表面温度分布

Fig. 2 Temperature distribution on the surface during processing

热阶段采用自适应时间步长，初始步长为 0.05 s。

2.5 试验材料与方法

本文通过测试钛合金加热后的表面形貌及微观组织变化，分析其温度历程，验证数值模拟结果的正确性。试验材料为 Ti6Al4V 钛合金板材，去应力退火状态，化学成分见表 2。经线切割加工成 20 mm × 20 mm × 4 mm 的板。在激光加工前，采用 800 目细砂纸打磨表面锈迹，随后将板材放入乙醇中超声清洗 15 min，再热风吹干。

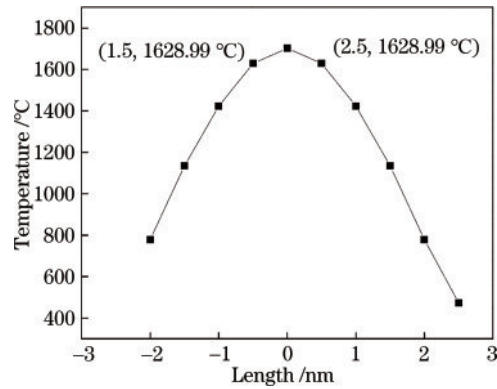


图 3 垂直于激光扫描路径的表面节点温度分布

Fig. 3 Temperatures of surface nodes perpendicular to the scanning path

温度超过 1628 °C，且超过 1605 °C 的范围约为 1.1 mm。在距离中心位置 2 mm 处，表面温度降低到 779 °C。

在垂直扫描路径的截面方向温度分布如图 4 所示。沿厚度方向等温线以激光加热点为中心，呈弧形分布。提取此时刻激光热源中心处沿垂直方向上的节点温度分布，如图 5 所示。沿厚度方向 0.086 mm 处，节点温度为 1601.2 °C。由此说明沿厚度方向存在很小的熔化区。随着厚度增加，节点温度快速下降。在 0.696 mm 处，节点温度达到 970 °C。由于 Ti6Al4V 合

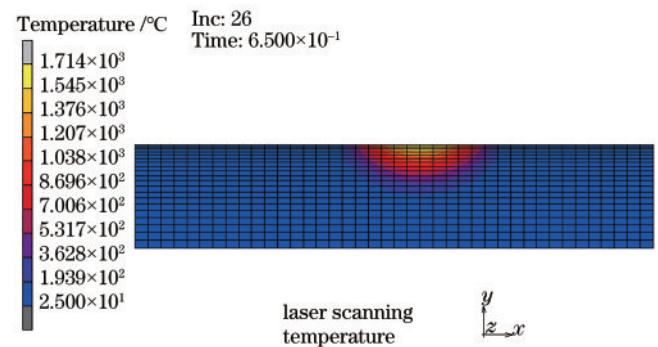


图 4 沿厚度方向温度分布

Fig. 4 Temperature distribution along thickness

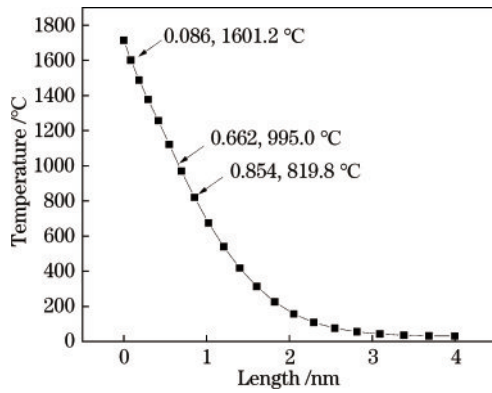


图5 光斑中心处沿垂直方向节点温度分布

Fig. 5 Temperature distribution along vertical direction at the center of laser spot

金的 β 转变温度为 $995\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此沿厚度方向会存在约 0.696 mm 的明显热影响区。

采用激光平均功率为 500 W 、扫描速度为 15 mm/s 加工钛合金表面,进行试验。加工后的钛合金表面形貌如图6所示。由于液相产生在表面形成了褶皱区域。该熔化范围约为 1 mm 。氧化区域宽度约为 3.5 mm 。Ti6Al4V合金的固相温度线为 $1605\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[21]。在模拟温度场中钛合金表面该温度范围的对应宽度约为 1.1 mm ,由于过热度的存在等因素,实际熔化区域宽度略小于计算温度场中的宽度。

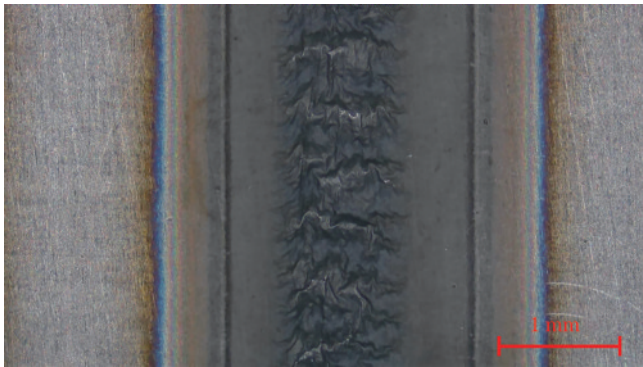


图6 激光扫描后钛合金表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of titanium alloy after laser scanning

经激光扫描后钛合金的截面金相组织如图7所示。最上方为未受热作用影响的钛合金原始组织,晶粒呈纤维状,沿轧制方向拉长。最下方为激光熔化的钛合金表面。熔化后组织快速冷却,转变为针状马氏体。紧接该区域的组织为完全相变区。该区域在加热时超过 β 转变温度 $995\text{ }^{\circ}\text{C}$,使得组织完全转变为 β 相,随后快速冷却转变为针状马氏体。因此完全相变区与熔化区的界线不明显^[19]。在完全相变区上方为部分相变区,其金相组织如图8所示。部分相变区由细小针状 α 和颗粒状 β 相组成,束集内的针状 α 相平行分布。该区域加热时达到钛合金转变温度,但时间较短不足以维持 β 相变的完成,因此形成了部分相变区。熔化

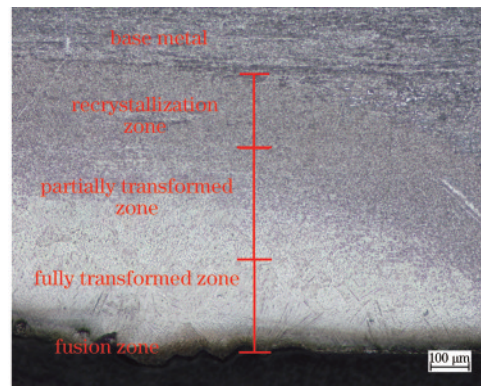


图7 激光扫描后钛合金截面方向金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of titanium alloy in section direction after laser scanning

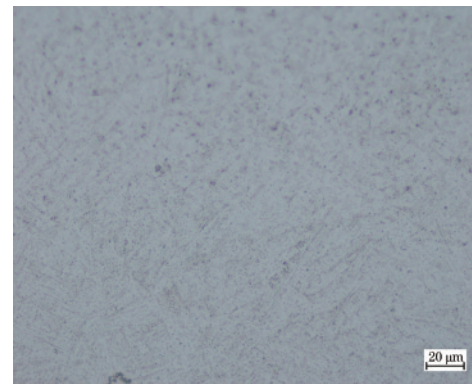


图8 部分相变区的金相组织

Fig. 8 Metallographic structure of partially transformed zone

区、完全相变区和部分相变区三个区域的厚度大约为 0.5 mm 。再结晶区在热作用下晶粒形状发生变化,呈现出与纤维状原始组织不同的形貌。整个热影响区呈弧形分布,厚度约为 0.77 mm 。在有限元计算厚度方向温度分布中,达到 β 转变温度($995\text{ }^{\circ}\text{C}$)的节点厚度约为 0.662 mm ,超过再结晶温度且厚度最大处的节点($819.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)厚度为 0.854 mm 。由于激光加热升温迅速的特点,钛合金相变需要更高的过热度。同时高温停留时间短,相变转变不完全。因此试验结果中相变区域小于模拟计算中相变温度区域。在忽略由此引入的尺寸误差后,该模拟计算结果与钛合金截面金相组织基本吻合。通过表面温度和厚度截面上温度场的对比验证,说明了该有限元模型的有效性,该模型可以用于激光扫描过程中钛合金表面温度场的模拟计算。

3.2 激光功率和扫描速率对温度场的影响

激光加热钛合金表面,较高的表面温度会促进氧化层的快速生成。在满足氧化层制备的同时,需尽可能地减小表面熔化区域和热影响区深度,降低加工过程对工件表面粗糙度和内部组织的影响,采用较高的扫描速率以加快制备效率。激光功率和扫描速率是影响加工过程的关键因素。通过有限元模拟计算不

同扫描速率和功率下温度场在表面和厚度方向的变化,研究功率和扫描速率的影响规律,用于指导优化

激光工艺参数。有限元模拟计算的试验参数如表 3 所示。

表 3 有限元模拟计算的激光工艺参数

Table 3 Laser processing parameters simulated by finite element

No.	Laser power /W	Power density / $(W \cdot mm^{-2})$	Scanning speed / $(mm \cdot s^{-1})$	Linear energy / $(J \cdot mm^{-1})$
1	500.0	39.8	15	33.3
2	500.0	39.8	20	25.0
3	500.0	39.8	25	20.0
4	400.0	31.8	20	20.0
5	666.7	53.1	20	33.3

当激光功率为 500 W,扫描速率分别为 15、20、25 mm/s 时,激光光斑中心处表面节点温度随时间变化如图 9 所示。当扫描速率升高时,单位长度上的热输入量(即线能量)减少,该表面节点所能达到的最高

温度降低。当扫描速率为 20 mm/s 时,表面节点最高温度为 1598.6 °C,低于钛合金的固相线温度。因此,激光功率为 500 W,扫描速率大于 20 mm/s 时,工件在激光扫描后不会出现表面熔化现象。

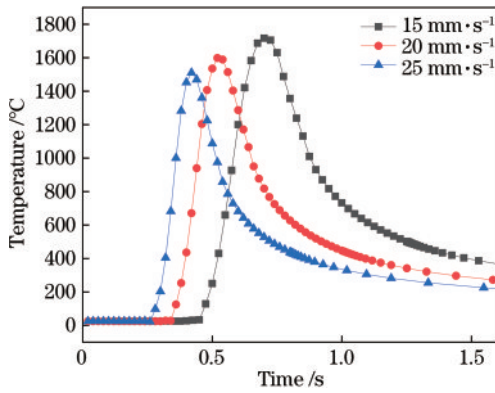


图 9 不同扫描速率下表面节点温度随时间变化

Fig. 9 Surface temperature varies with time under different scanning rates

图 10 分别为不同扫描速率下,垂直于扫描路径的表面和厚度方向节点温度分布。随着扫描速率增加,线能量降低,表面温度和厚度方向的温度整体降低。当扫描速率分别为 15、20、25 mm/s 时,表面最高温度分别为 1716.6 °C、1598.6 °C、1510.2 °C。三个扫描参数下表面温度分别下降了 6.9%、5.5%。在距离光斑中心 1 cm 处三个参数下的表面温度为 1438.2 °C、1328.6 °C、1251.6 °C。该处三个参数的温度分别下降了 7.6%、5.7%。在厚度 1.0 mm 处的节点温度分别为 626.1 °C、438.9 °C、347.6 °C。三个参数下该处的温度分别下降了 29.9%、20.8%。由此可见,由 1 号参数变为 2 号参数引起的温度场变化大于由 2 号参数变为 3 号参数引起的温度场变化。这是因为激光能量最先在材料表面沉积,能量越大,引起表面材料的温升越明显。

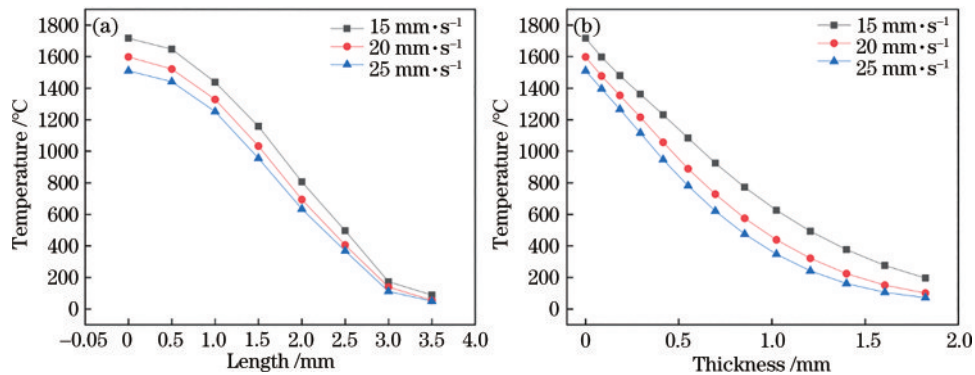


图 10 不同扫描速率下的表面温度和沿厚度方向温度分布。(a)表面温度分布;(b)沿厚度方向温度分布

Fig. 10 Surface temperature and temperature distribution along thickness under different scanning rates. (a) Surface temperature distribution; (b) temperature distribution along thickness

图 11 为激光功率为 500 W、扫描速率为 20 mm/s 时获得的钛合金表面和截面上氧化层微观组织形貌。如图 11(a) 所示,在激光扫描过程中钛合金表面未发生熔化,且表面产生了灰色氧化痕迹。在边缘处由于氧化膜厚度接近可见光波长,引起薄膜干涉形成不同颜色边缘。

对钛合金表面形成的氧化膜进行微观形貌测试,如图 11(b) 所示。经 2 号激光工艺参数制得的钛合金表面氧化膜,厚度约为 5 μm。该涂层的能谱测试结果如图 11(c) 所示。由于制备气氛为大气,因此该氧化层的组成成分除 Ti、Al、V、O 外,还有部分的 N。

改变激光能量,激光扫描路径上的表面节点温度

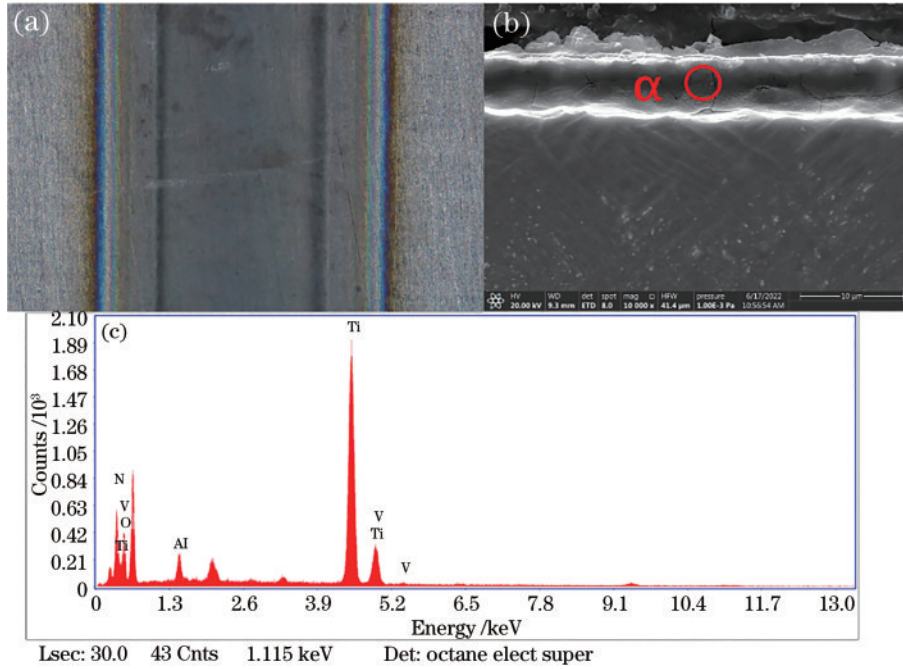


图 11 2 号激光工艺参数下钛合金表面形貌和氧化层的组织及成分。(a)激光扫描后钛合金表面形貌;(b)钛合金表面氧化层;(c)氧化层的能谱测试

Fig. 11 Surface morphology of titanium alloy and microstructure and composition of oxide layer under No. 2 parameter. (a) Surface morphology of titanium alloy after laser scanning; (b) oxide layer on the surface; (c) energy spectrum results of the oxide layer

随时间变化如图 12 所示。保持扫描速率为 20 mm/s, 随着激光功率的减小, 光斑处表面节点温度升温速率减小, 所能达到的最高温度降低, 当激光功率为 400 W 时, 表面节点最高温度为 1375.7 °C。试验序号 1 与 5 号, 3 与 4 号, 具有相同的线能量。

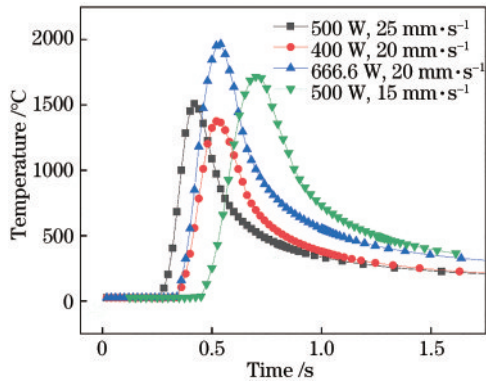


图 12 不同参数下光斑处表面节点温度随时间变化

Fig. 12 Variation of surface node temperature with time at the spot under different parameters

对比当线能量相同时, 表面节点温度随时间变化。由于激光以面热源形式从表面进行加热, 在同样线能量条件下, 大功率高扫描速率的参数, 如 500 W、25 mm/s, 表面积聚能量更快, 表面节点温度升温速率更高, 所能达到的最高温度升高, 达到 1510.2 °C, 相比 4 号试样的 1375.7 °C 增加了 134.5 °C。对比 1 号 (500 W, 15 mm/s) 与 5 号 (666.6 W, 20 mm/s) 参数可得同样规律。沿厚度方向的温度分布如图 13 所示。

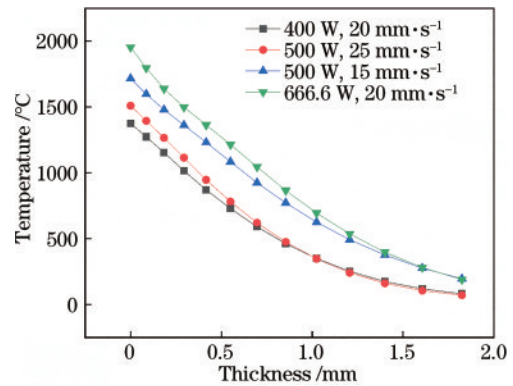


图 13 不同参数下沿厚度方向节点温度分布

Fig. 13 Temperature distribution along the thickness direction under different parameters

相同线能量情况下, 大能量高扫描速度的试样中靠近表面的节点温度更高。随着厚度增加, 节点温度差逐渐缩小。

增加激光功率或降低扫描速率, 使得线能量增加, 提高表面温度和沿厚度温度。在相同线能量情况时, 提高扫描速率和激光功率可以促进能量在合金表面沉积, 避免熔化钛合金内部的同时, 提高制备效率。

3.3 重复扫描间隔对温度场的影响

激光扫描过程中加热时间较短, 单次扫描制备的氧化层较薄, 需要多次扫描增加高温时间, 获得足够厚度的氧化层。不同的扫描间隔获得温度不同。当激光功率为 500 W, 扫描速率为 20 mm/s 时, 以不同的间隔时间进行重复扫描, 获得光斑中心处表面节点的温度

随时间变化,如图 14 所示。光斑扫过表面,节点温度快速上升,达到 1590 °C。随后快速下降,在下次扫描时,钛合金表面仍处于一定温度下,相当于获得了一定的预热温度。扫描间隔时间越短,第二次扫描开始时表面温度越高,因此激光扫描后节点温度越高。在间隔 1 s 时最高温度可以达到 1685 °C,相较第一次扫描的最高节点温度提高了 95 °C。在间隔 3 s 时,激光斑点中心处的试样表面节点温度降低到约 160 °C,此时进行第二次扫描获得表面最高温度为 1638 °C,相比间隔 1 s 情况下的最高温度降低了 47 °C。因此通过缩短扫描间隔,可以提高表面节点温度。

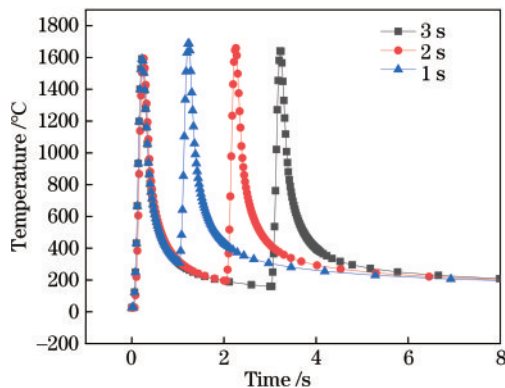


图 14 不同扫描时间间隔下表面节点温度变化

Fig. 14 Variation of surface node temperature at different scanning time intervals

4 结 论

本研究采用高斯分布的面热源,建立有限元模型,模拟红外激光制备钛合金表面氧化层过程中的温度场分布和随时间变化。通过激光加热后的钛合金表面形貌和截面微观组织,分析加热过程中的温度,并与模拟结果进行对比,验证了有限元模型的有效性。

采用该验证后的有限元模型,研究激光功率、扫描速率、重复扫描间隔等对钛合金温度变化与分布的影响。模拟结果表明,当激光功率为 500 W,扫描速率为 20 mm/s 时,光斑中心处表面节点温度最高为 1598.6 °C,接近 Ti6Al4V 合金的熔化温度。随着激光功率增加,扫描速度降低,加工过程中的线能量增加,钛合金表面和厚度方向的温度整体增加。

在相同线能量情况下,由于能量在钛合金表面的累积,大能量高扫描速度可以获得更高的表面温度和基本相同的内部温度,从而减少加工过程中对钛合金内部组织的影响,提高氧化层的制备效率。通过重复扫描的方式可以获得更高的表面温度,且随着扫描间隔的缩小,节点所能达到的最高温度增加。

参 考 文 献

[1] 刘宁夏,王存山,梁彦鹏,等. Nb对激光定向能量沉积 Ti-Zr 直熔点合金组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202016.

2022, 49(22): 2202016.

Liu N X, Wang C S, Liang Y P, et al. Influence of Nb on microstructure and properties of Ti-Zr congruent alloy fabricated by laser directed energy deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202016.

- [2] 白文倩,陈静青. 激光熔覆热循环对 TC4 组织与力学性能的影响研究[J]. 中国激光, 49(22): 2202017.
- Bai W J, Chen J Q. Influence of laser cladding thermal cycle on the microstructure and mechanical properties of TC4[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202017.
- [3] 刘一帆,周宝升,张涛,等. 基于表面微织构的钛合金与 CFRP 激光连接研究[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1803001.
- Liu Y F, Zhou B S, Zhang T. Laser joining of carbon fiber reinforced plastics to titanium alloy via laser texturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1803001.
- [4] 付现桥,韩彬,王勇,等. TA2 表面激光气体氮化组织结构和耐蚀性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0403004.
- Fu X Q, Han B, Wang Y, et al. Study on structure and corrosion resistance of the TA2 surface of laser gas nitriding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0403004.
- [5] 王占栋,王世彬,吴二柯,等. 水下定向能量沉积修复钛合金电化学腐蚀特性研究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402806.
- Wang Z D, Wang S B, Wu E K, et al. Electrochemical corrosion characteristics of Ti-6Al-4V repaired using underwater directed energy deposition technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402806.
- [6] Ashrafizadeh A, Ashrafizadeh F. Structural features and corrosion analysis of thermally oxidized titanium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 480(2): 849-852.
- [7] 李福泉,王树立,陈彦宾,等. Ti6Al4V 表面激光熔覆生物陶瓷复合涂层研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0603005.
- Li F Q, Wang S L, Chen Y B, et al. Investigation of bioceramic composite coatings fabricated by laser cladding on Ti6Al4V surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0603005.
- [8] Wang S, Liu Y H, Zhang C X, et al. The improvement of wettability, biotribological behavior and corrosion resistance of titanium alloy pretreated by thermal oxidation[J]. Tribology International, 2014, 79: 174-182.
- [9] 邹涛,陈长军,张敏,等. 建筑用玻璃/不锈钢、玻璃/钛合金激光焊接机理研究[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902002.
- Zou T, Chen C J, Zhang M, et al. Study on laser welding mechanisms of glass/stainless-steel and glass/titanium-alloy materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0902002.
- [10] 秦建峰,王馨舶,邹娇娟,等. 热氧化提高钛及钛合金表面性能的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 1-8.
- Qin J F, Wang X B, Zou J J, et al. Research progress of thermal oxidation effect on improving surface properties of titanium and titanium alloy[J]. Surface Technology, 2017, 46(1): 1-8.

- 2017, 46(1): 1-8.
- [11] 黄明月, 辛社伟, 赵永庆, 等. Ti40 合金在 500~1000 °C 的恒温氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(5): 1163-1168.
Huang M Y, Xin S W, Zhao Y Q, et al. Isothermal oxidation behavior of Ti40 alloy at 500-1000 °C[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1163-1168.
- [12] Dai J J, Zhu J Y, Chen C Z, et al. High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides: a review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 685: 784-798.
- [13] 张坤, 罗耕星, 陈光南. 钛的激光渗氧硬化研究[J]. 金属热处理, 2005, 30(3): 8-10.
Zhang K, Luo G X, Chen G N. Study of laser oxidizing for titanium hardening[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(3): 8-10.
- [14] 徐兴文, 刘会霞, 谭文胜, 等. 钛合金与高硼硅玻璃激光焊接工艺参数建模与优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1): 228-234.
Xu X W, Liu H X, Tan W S, et al. Process parameters modeling and optimization of laser welding of titanium alloy and high borosilicate glass[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(1): 228-234.
- [15] Rajabi A, Mashreghi A R, Hasani S. Non-isothermal kinetic analysis of high temperature oxidation of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 151948.
- [16] 李磊, 王浪平, 王小峰, 等. 自蔓延制备 NiAl 涂层温度场的数值模拟与分析[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 169-177.
Li L, Wang L P, Wang X F, et al. Simulation and analysis of temperature field in NiAl coatings prepared by self-propagating method[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 169-177.
- [17] Bhatti A A, Barsoum Z, Murakawa H, et al. Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion [J]. Materials & Design, 2015, 65: 878-889.
- [18] Tamanna N, Kabir I R, Naher S. Thermo-mechanical modelling to evaluate residual stress and material compatibility of laser cladding process depositing similar and dissimilar material on Ti6Al4V alloy[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 31: 101283.
- [19] Mishra A K, Kumar A. Numerical and experimental analysis of the effect of volumetric energy absorption in powder layer on thermal-fluidic transport in selective laser melting of Ti6Al4V[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 227-239.
- [20] Hao M Z, Sun Y W. A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 352-360.
- [21] Kumar C, Das M, Paul C P, et al. Comparison of bead shape, microstructure and mechanical properties of fiber laser beam welding of 2 mm thick plates of Ti-6Al-4V alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 105: 306-321.