



DOI: 10.12086/oe.2019.180659

连续激光辐照金属靶材 温升分析

侯建辉^{1,2*}, 刘崇¹, 景春元³¹浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310000;²新疆乌鲁木齐 21 信箱 192 分箱, 新疆 乌鲁木齐 841700;³河南开封魏都路 68 号 180 分箱, 河南 开封 475000

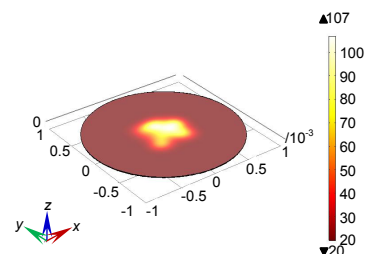
摘要: 本文对连续激光辐照金属材料的峰值温度变化情况进行研究, 建立了连续激光辐照材料的有限元分析模型, 采用仿真分析的方法对连续激光照射铝合金圆板的峰值温度变化情况进行了研究。通过对光束抖动、光斑扩散、空气对流、材料表面氧化等不同条件仿真结果的分析, 给出了各种因素对激光辐照材料峰值温度变化情况的影响, 并利用等效材料比热容的方法开展了相变潜热对温升情况的影响分析。最后综合各种条件给出了在连续激光辐照铝合金材料的峰值温度变化情况, 对材料的损伤进行了分析。

关键词: 激光损伤; 温度; 有限元; 相变

中图分类号: TB872

文献标志码: A

引用格式: 侯建辉, 刘崇, 景春元. 连续激光辐照金属靶材温升分析[J]. 光电工程, 2019, 46(12): 180659



Analysis of temperature rise of metal targets irradiated by CW laser

Hou Jianhui^{1,2*}, Liu Chong¹, Jing Chunyuan³¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;²Postbox 21-192 Urumqi Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 841700, China;³68 Weidu Road Kaifeng, Kaifeng, Henan 475000, China

Abstract: The variation of peak temperature of metal materials irradiated by continuous wave (CW) laser is studied in this paper. We established a finite element model of metal materials irradiated by CW laser. The variation of peak temperature of aluminum alloy circular plates irradiated by CW laser is studied by simulation analysis method. By analyzing the simulation results under different conditions, such as beam drift, spot diffusion, air convection and material surface oxidation, the effects of various factors on the peak temperature of laser-irradiated materials are given, and the influence of latent heat of phase change on temperature rise is analyzed by using the method of equivalent material specific heat capacity. Finally, according to various conditions, the change of peak temperature of aluminum alloy irradiated by CW laser is given, and the damage of aluminum alloy is analyzed.

Keywords: laser damage; temperature; finite element; phase transformation

Citation: Hou J H, Liu C, Jing C Y. Analysis of temperature rise of metal targets irradiated by CW laser[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(12): 180659

收稿日期: 2018-12-15; 收到修改稿日期: 2019-08-22

作者简介: 侯建辉(1988-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事激光与物质作用的研究。E-mail: 21630057@zju.edu.cn

1 引言

激光由于其单色性、方向性、亮度等方面的巨大优势，被应用于航天精密加工、高功率激光焊接、激光切割打孔、表面强化再造等领域。在研究激光与物质相互作用过程中，温度场是一个主要的物理特征。因此，温度场模型的建立对连续激光与材料相互作用的机理研究具有重要的意义。根据激光能量的不同与材料作用时产生的效果也不同，激光到达材料的功率密度为 $10^3 \text{ W/cm}^2 \sim 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时，与材料的相互作用结果主要为加热；功率密度为 $10^4 \text{ W/cm}^2 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时，能够使材料融化^[1]。功率密度更高时则能产生汽化、电离等效果。

脉冲激光与物质相互作用时，每个激光脉冲持续时间很短，瞬间作用于材料表面的功率密度很高，在光斑区域产生大量的热，并且在脉冲周期的时间尺度上难以扩散，从而产生汽化、等离子体等，对材料形成快速损伤。连续激光相比于脉冲激光，辐照到材料表面的功率密度一般较低，材料吸收的能量通过热传导、热辐射等方式扩散，不易使材料产生形变或汽化。但是经过一定的时间积累可以逐步实现加热物体并产生热破坏，导致温度不均匀产生应力破坏等，是一种慢速损伤方式。

在开展激光对材料的损伤效果研究时，激光辐照目标区域的瞬态温度及其变化是分析激光与目标相互作用的重要依据和基本物理量，也是对损伤效果评价的重要指标。目前，有限元法在激光加工材料热效应模拟方面有着广泛的应用。2006年，蒋艳锋等^[2]应用固体热传导理论，在激光光斑半径远大于材料热扩散长度的条件下建立并求解了材料升温 and 熔融过程的一维热传导过程，通过计算得到银、铝、铜等材料的熔融破坏阈值和汽化破坏阈值，与软件仿真结果的相对误差小于 4%。2008年，Darif 等^[3]采用 COMSOL Multiphysics 建立有限元仿真模型得到硅材料在不同形状不同能量密度激光作用下熔融状态持续时间以及融化深度。2012年，Hanon 等^[4]采用 Fluent 软件进行激光对铝合金打孔的模拟分析，发现对铝合金材料的打孔深度与激光功率、脉宽、脉数成正比，孔径与脉冲数成反比。2012年，Kuang 等^[5]采用有限元仿真软件研究了不同能量密度脉冲激光焊接不锈钢形成熔池的变化；裴旭等^[6]利用有限元分析软件开展了激光辐照材料过程仿真，获得材料瞬态温度场的变化情况。2015年，姚红兵等^[7]采用有限元分析模型进行激光辐

照铝材料的表面温度场模拟分析，研究了激光扫描过程中扫描速度、TEM00 及 TEM10 两种模式的叠加比例、材料厚度等因素对结果的影响。

本研究对连续激光辐照材料的温升情况进行研究，建立连续激光辐照铝合金圆板有限元模型，采用有限元分析的方法，分析连续激光照射下材料的温升变化，讨论了光束抖动、光斑扩散、空气对流及材料表面氧化等因素对材料温升的影响，进而对连续激光辐照铝合金材料的损伤情况进行分析。

2 理论模型

连续激光辐照金属、复合材料等时，部分能量被材料表层吸收。这部分能量使材料温度升高，经过一定时间，材料表面部分区域温度达到熔点发生融化。随着温度的持续升高，融化区域、深度增大，当温度达到沸点时产生汽化，具体过程如图 1 所示。

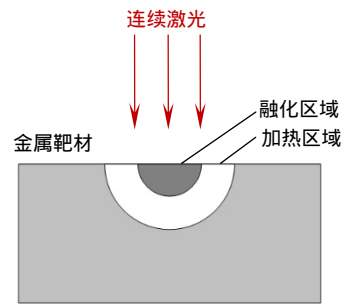


图 1 连续激光辐照材料模型
Fig. 1 Model of target irradiated by CW laser

要分析连续激光辐照材料的温度场分布，可以通过傅里叶定律来建立固体导热微分方程。假设材料无内热源，激光沿 z 轴方向入射到材料表面，三维非稳态热传导方程可表述为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + A Q_{inc} e^{-\alpha z} \quad (1)$$

式中： T 为材料温度， k 为热导率， ρ 为材料密度， c 为比热容， Q_{inc} 为入射到材料表面的激光功率密度， A 为表面吸收率， α 为吸收系数， $A Q_{inc} e^{-\alpha z}$ 为作用于材料的热源。

激光与不透明材料的相互作用过程中，激光吸收层很薄，可以将激光产生的热源简化为面热源。若激光空间能量分布为高斯分布，激光热源的模型可以表示为

$$Q(x, y, t) = A Q_{inc}(x, y, t) = A Q_{inc}(0, 0, t) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

式中 r 为光斑半径。当样品表面存在辐射和热交换时, 边界条件表示为

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = A Q_{\text{inc}}(x, y) - h(T - T_a) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad (3)$$

式中: h 表示对流传热系数, ε 表示热辐射系数, T_a 表示环境温度, σ 为玻尔兹曼常数。

温度场的有限元方程为^[8]

$$[C] \cdot [\dot{T}] + [K] \cdot [T] = [Q_s] \quad (4)$$

式中: $[C]$ 表示比热容矩阵, $[\dot{T}]$ 表示温度变化率矩阵, $[K]$ 表示热导率矩阵, $[T]$ 表示节点温度矩阵, $[Q_s]$ 表示外部热通量矩阵。

3 模型仿真

由于材料的热物理性能随温度变化, 热传导方程为不定常非线性方程。为了研究激光辐照材料的温度变化, 进行以下假设:

- ① 材料是各向同性的均匀材料;
- ② 材料的吸收率和物理参数与温度无关;
- ③ 在分析过程中将激光的入射热通量模拟为材料表面分布的面热源, 热损耗是材料表面对环境的热辐射和对流换热, 其他表面热绝缘良好;
- ④ 材料在激光的工作波长范围内是不透明的, 没有光线穿透材料。

基于以上理论模型和假设, 构建连续激光辐照铝合金材料的瞬态温度场有限元数值模型。将材料设置为圆板结构, 半径为 1 m, 材料为铝合金(2024), 厚度 5 mm。材料表面的热物性质如表 1 所示^[9]。

表 1 材料的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of materials	
性质	Al(2024)
密度(ρ)/(g/cm ³)	2.77
热容(C)/(J/(g·K))	1.05
热导率(k)/(W/(cm·K))	2.38
熔化温度(T_m)/K	933
融化热(L_m)/(J/g)	400

激光光源强度为高斯分布。根据参考文献[10], 将激光的平均功率密度设置为 127.33 W/cm², 如图 2 所示。假设激光辐照在靶面中心, 在 x 、 y 方向上产生随机抖动, 并且在辐照的表面有对流风速。设置环境温度和材料初始温度为 20 °C。

激光所产生的热载荷为激光的功率乘以材料的吸收率。材料表面对激光的吸收率受到温度、波长、激

光功率密度等^[11]诸多因素的影响, 同时材料表面粗糙度、缺陷等情况也导致其吸收率与理想情况有所不同, 因此对同一种材料, 不同文献中吸收率的实验数据差别很大。在激光波长范围内假设吸收率等于发射率。对于铝合金材料, 其本身对激光的吸收率很低, 通常只有 0.026~0.152^[12]。根据文献[13-14], 不同型号的铝合金材料发射率都随温度增大而增大, 在 300 K~873 K 时其发射率在 0.1~0.3 之间变化, 且与表面粗糙度、加热时间等因素也有很大关系。由于发射率的变化受到影响因素较多, 其规律也较为复杂, 在分析时假设铝合金(2024)的吸收率为 0.1。

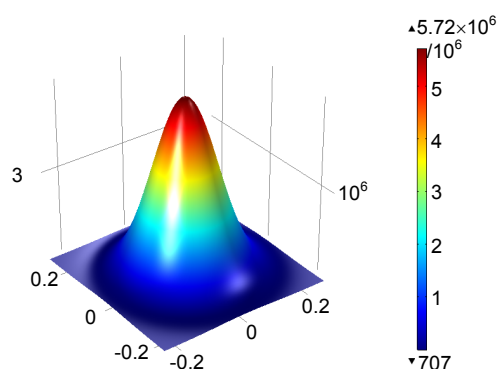


图 2 激光热源能量分布仿真

Fig. 2 Energy distribution simulation of laser heat source

再进行有限元分析, 对材料使用三角形扫掠网格进行网格划分, 构建的材料网格模型如图 3 所示。网格越精细且求解容差越小, 对峰值温度的预测就越准确^[15], 但对平均温度和最低温度的预测影响不大。

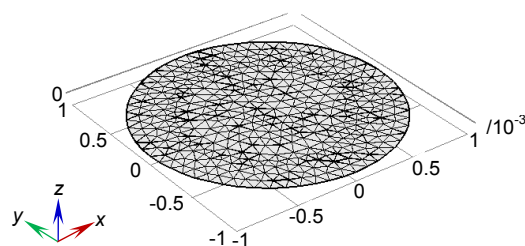


图 3 材料网格模型

Fig. 3 Target mesh model

4 辐照结果分析

4.1 光源抖动的影响

根据以上模型参数进行激光辐照材料的瞬态温度计算。通过对光斑位置添加随机函数模拟光斑抖动的情况, 随机函数为均匀分布的白噪声, 范围为光斑半径的 2 倍。图 4 分别显示了光斑无抖动和光斑随机抖

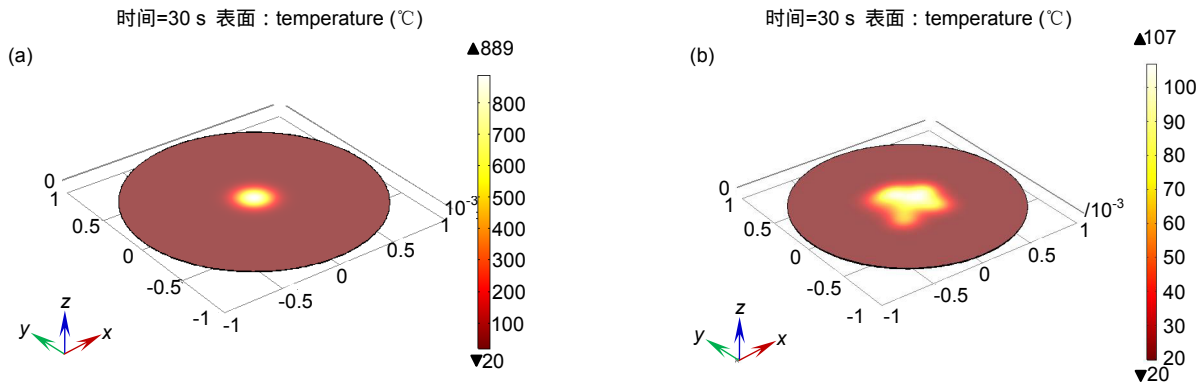


图 4 激光辐照材料后温度分布。(a) 光斑无抖动情况下温升情况; (b) 光斑随机抖动情况下温升情况
Fig. 4 Temperature distribution of target after laser irradiation. (a) Temperature rise without spot drift; (b) Temperature rise under random spot drift

动情况下靶板的空间温度分布。从图上可以看出, 不考虑光斑传输抖动时, 靶板上温度分布同入射光强分布相同, 呈高斯分布, 温升区域主要集中在靶板中心很小的区域。考虑光斑抖动时, 理论上经过一定时间辐照, 光斑会形成一个与抖动范围有关的高斯型的、圆对称的展宽光斑。但是, 由于照射不同部位时热量累积和热传导的作用, 导致靶板上的空间温度分布类似扩展高斯分布但形状不规则, 仍表现为中间温度高, 边缘温度低。

图 5 是不同光斑抖动情况下, 材料峰值温度的变化情况。光斑无抖动时, 材料峰值温度平滑上升, 经

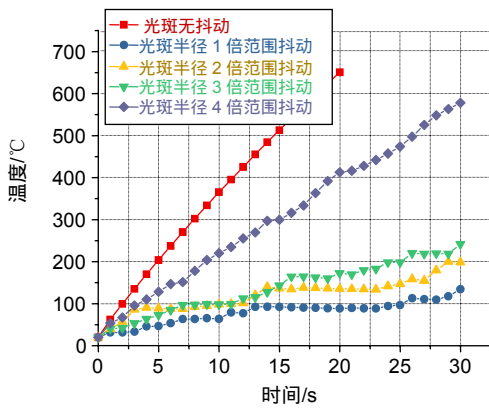


图 5 光束抖动时峰值温度随时间变化曲线
Fig. 5 Peak temperature curve with spot drift

过 21 s 辐照温升即达到材料熔点。在光斑随机抖动范围为光斑半径的 1 倍、2 倍、3 倍、4 倍时, 经过 30 s 的辐照峰值温升分别达到 578.09 °C、241.73 °C、198.70 °C、134.45 °C。可以看到, 随着光斑抖动范围的扩大, 对材料的加热效果急剧下降。同时, 光束抖动使峰值温度曲线不再平滑, 产生无规律的起伏, 对于预测温度上升情况有很大的影响。

4.2 光斑扩散的影响

受到光束质量的影响, 激光经过传输后会产生一定的光斑扩散, 在仿真中表现为平均功率密度的下降。不同光斑半径的平均功率密度如表 2, 则峰值温度变化情况如图 6 所示。当光斑半径较小时, 辐照前期温度上升较快, 温升速度随时间逐渐下降。随着光斑半径的扩大, 辐照到材料表面的平均功率密度逐渐下降, 温升速度变小。由于材料尺寸有限, 随着光斑半径的增大, 辐照在整个表面的功率趋于平均, 当光斑半径无限大时各点受到的辐照功率密度近似相等, 导致温升逐渐趋于线性。

4.3 表面对流影响

激光辐照目标时, 由于目标运动等原因产生空气对流。图 7 是不同对流条件下材料峰值温度的变化曲线。可以看到在对流速度为 0 m/s、50 m/s、100 m/s 时材料分别在 21 s、24 s、28 s 达到熔点, 对流速度在

表 2 不同光斑半径的平均功率密度

Table 2 Average power density of different spot radii

光斑半径倍数	1	2	3	4	5
平均功率密度/(W·cm ⁻²)	127.33	31.83	14.15	7.96	5.10

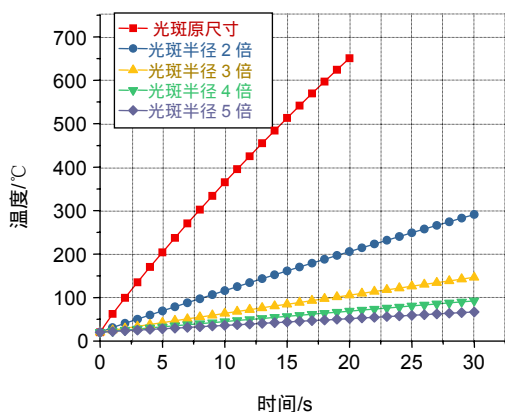


图 6 光斑扩散时峰值温度随时间变化曲线
Fig. 6 Peak temperature curve with spot diffusion

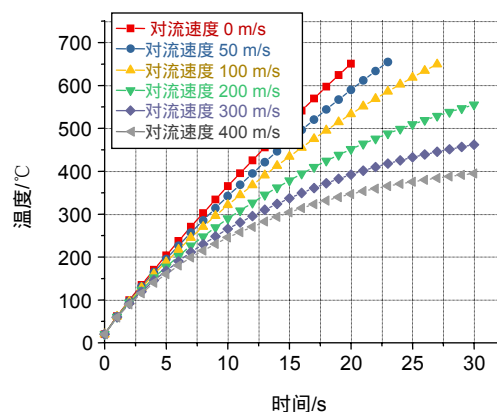


图 7 表面对流时峰值温度随时间变化曲线
Fig. 7 Peak temperature curve with surface air convection

200 m/s、300 m/s、400 m/s 时，材料经过 30 s 辐照，峰值温度为 555.11 °C、461.92 °C、394.65 °C。当有对流时材料温升的趋势同无对流时基本相同，但是随着时间增加，峰值温度上升速率逐渐变小，峰值温度下降明显。由此可见表面对流对于低速运动的目标温升影响较小，但是对于快速目标，表面对流对目标温升影响显著。

4.4 表面氧化的影响

工业上为提高铝合金材料的抗腐蚀能力、增大材料的强度和硬度，会对材料表面进行氧化处理。氧化的方式有阳极氧化、微弧氧化等。以微弧氧化为例，氧化膜层的厚度一般在 100 μm~300 μm^[16]。铝合金材料本身发射率较低，但是氧化铝发射率显著提高，因此会对材料的温度变化产生较大的影响。氧化铝的热物性质见表 3，根据文献氧化铝的发射率受波长影响很大^[17]，在分析时假设其发射率为 0.4。建立的分析模型中铝合金基底厚度为 5 mm，氧化铝膜层厚度为 100

μm。两层材料直接贴合，光斑照射在膜层表面对氧化铝材料加热，结合面为基底的热源面，对铝合金材料进行加热。图 8 显示了材料表面有氧化铝层和无氧化铝层的峰值温度变化情况，可以看到，通过 5 s 左右的辐照即达到铝合金材料的熔化温度。当铝合金材料达到熔化温度时，由于体积变化、热应力等各种因素会导致材料的破坏，本研究仅关注材料峰值温度变化情况因此不再对其他因素进行详细的分析。

从温升曲线看，具有氧化铝层的材料温升显著高于纯铝合金材料。这主要是由于氧化层的存在使材料从激光中吸收的能量增大。同时氧化铝膜层其本身很薄，因此热量的扩散主要还是在铝合金材料中，通过仿真也发现氧化铝膜层维持微米级厚度时，膜层厚度的变化对峰值温度影响较小。

4.5 相变潜热对温升影响

之前对材料的温升分析未考虑材料熔化后的变化。当材料发生熔化时吸收一定的热量，同时不引起

表 3 氧化铝的热物理性质
Table 3 Thermophysical properties of alumina

性质	Al ₂ O ₃
密度(ρ)/(g/cm ³)	4.08
热容(C)/(J/(g·K))	1.53
热导率(k)/(W/(cm·K))	0.30
熔化温度(T _m)/K	2307
融化热(L _m)/(J/g)	1067

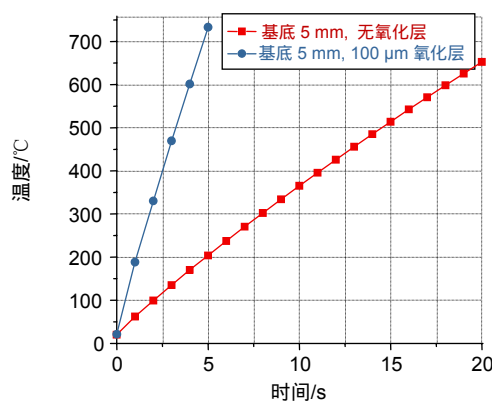


图 8 峰值温度随时间变化曲线
Fig. 8 Peak temperature curve

温度的变化, 这个热量即为相变潜热。铝合金(2024)相变温度范围为 650 °C~660 °C^[18], 在进行分析时, 通过使材料在相变温度时比热容增大来处理相变潜热的影响^[19]。引入参数 $h(T)$ 表示相变过程, 当 $h(T)$ 为 0 时, 材料为固态, 当 $h(T)$ 为 1 时, 材料为液态:

$$h(T) = (T - T_1)H(T - T_1) \cdot H(T_2 - T) + H(T - T_2), \quad (5)$$

式中: T_1 为相变起始温度, T_2 为相变结束温度, H 为 Heaviside 阶跃函数。 $h(T)$ 图像如图 9(a)。

利用 $h(T)$ 引入等效比热容:

$$C_p(T) = C_{ps} + \frac{dh}{dT} \Delta_h, \quad (6)$$

式中: C_{ps} 为材料常压比热容, Δ_h 为材料熔化潜热。等效比热容如图 9(b) 所示, 在相变温度区间, 材料比热容急剧增大。

图 10 为仿真结果, 考虑相变潜热时, 在相变温度

区间峰值温度出现凹陷, 峰值温度短暂降低, 而后继续上升, 由于熔化区域的不断扩大, 在后续的温升过程中曲线不再平滑, 最终温升比不考虑相变潜热时下降了 82.28 °C。与前边的分析相比, 相变对于材料温升的影响相对较小。

4.6 综合分析结果

根据上述研究, 综合考虑光斑扩散、光束抖动、目标表面对流、表面氧化等影响对激光辐照材料的峰值温度变化情况进行分析。分析模型同 4.4 中表面氧化的两层结构, 设置材料表面的平均功率密度为 127.33 W/cm², 光束中心抖动范围为光斑半径的 2 倍, 表面对流速度为 250 m/s, 经过约 25 s 峰值温度达到铝合金材料熔点, 峰值温度的变化情况如图 11 所示。在激光作用过程中抖动、对流、材料表面氧化等因素难以控制, 为了提高对目标的损伤效果, 通过增大激光功率或提高光束质量使目标处光斑半径减小。

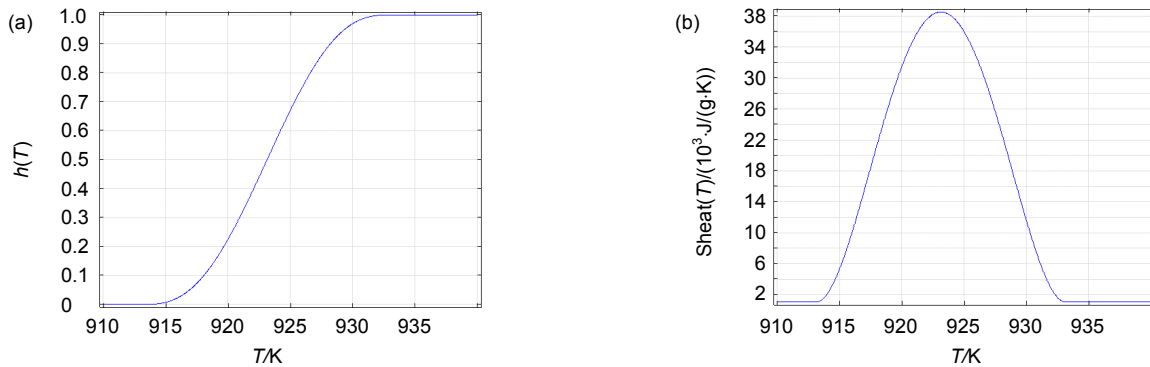


图 9 参数 h 和等效热容函数。(a) $h(T)$ 函数图像; (b) 等效比热容函数图像

Fig. 9 Functional image of h and equivalent specific heat capacity. (a) Functional image of $h(T)$; (b) Functional image of equivalent specific heat capacity

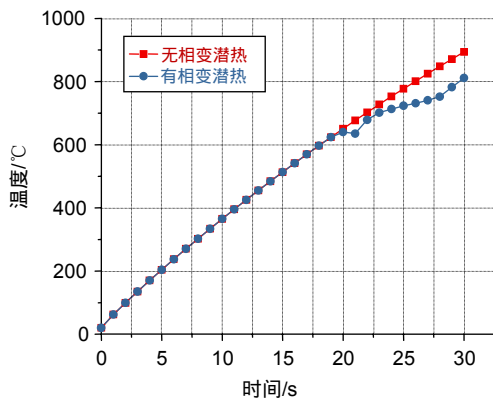


图 10 考虑相变时峰值温度随时间变化曲线

Fig. 10 Peak temperature curve with phase transition

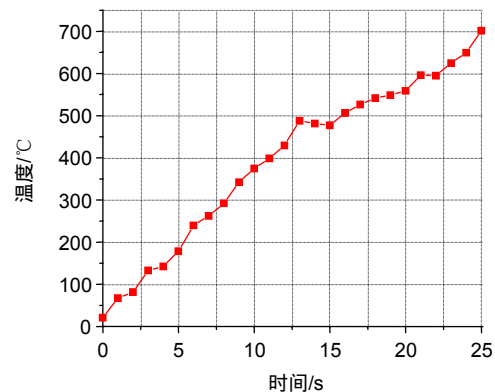


图 11 综合因素分析激光辐照材料峰值温度变化情况

Fig. 11 Analysis of peak temperature change of laser-irradiated target by comprehensive factors

5 结论

从仿真结果可以看到,连续激光辐照材料时主要产生热效应,材料表面平均功率密度为 127.33 W/cm^2 的高斯光束。伴随光斑半径 2 倍大小的抖动时,峰值温度约 $241.73 \text{ }^\circ\text{C}$;而光斑半径增大一倍时,材料的峰值温度约 $290.98 \text{ }^\circ\text{C}$ 。两种情况下光斑的范围大致相同,都导致峰值温度急剧下降,是影响材料峰值温度变化的主要因素。材料表面对流仅在对流速度较大时影响较为明显,对流速度为 100 m/s 时,仍可以使目标峰值温度达到熔点,目标速度超过 200 m/s 后,在 30 s 的辐照时间内峰值温度无法达到材料熔点。对铝合金材料表面的氧化处理导致激光吸收大幅增加,达到材料熔点的辐照时间大为缩小。

通过综合分析,材料表面平均功率密度为 127.33 W/cm^2 ,光束中心抖动范围为光斑半径 2 倍,表面对流速度为 250 m/s 时,辐照表面氧化的铝合金材料,最终经过 25 s 峰值温度达到熔点。研究的结果为激光与物质相互作用效应研究及评估提供支撑。

参考文献

- [1] Song N Q, Zhang H C, Mao C, et al. Multiple physical modeling for damage mechanism of high energy laser weapon[J]. *CIESC Journal*, 2016, **67**(S1): 359–365.
宋乃秋, 张昊春, 马超, 等. 高能激光武器毁伤机理多物理场建模[J]. *化工学报*, 2016, **67**(S1): 359–365.
- [2] Jiang Y F, Jiang D, Zhong M, et al. Theoretical research: the thermal damage of metal materials, under millisecond - pulsed laser irradiations[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(2): 75–76.
蒋艳锋, 江东, 钟鸣, 等. 长脉冲激光对金属材料热破坏的分析[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(2): 75–76.
- [3] Darif M, Semmar N. Numerical simulation of Si nanosecond laser annealing by COMSOL multiphysics[C]//*Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover*. Hannover, 2008: 567–571.
- [4] Hanon M M, Akman E, Oztoprak B G, et al. Experimental and theoretical investigation of the drilling of alumina ceramic using Nd: YAG pulsed laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(4): 913–922.
- [5] Kuang J H, Hung T P, Chen C K. A keyhole volumetric model for weld pool analysis in Nd: YAG pulsed laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(5): 1521–1528.
- [6] Pei X, Wu J H. Numerical simulation of transient temperature field on metal material induced by pulse laser irradiation[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(6): 828–831.
裴旭, 吴建华. 金属材料脉冲激光辐照瞬态温度场数值模拟研究[J]. *激光技术*, 2012, **36**(6): 828–831.
- [7] Yao H B, Gao Y, Yuan D Q, et al. Numerical simulation of characteristics evolution of aluminum surface temperature field irradiated by laser[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(10): 1175–1179.
姚红兵, 高原, 袁冬青, 等. 激光辐照铝材表面温度场特征演化的数值模拟[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(10): 1175–1179.
- [8] Sun C W. *Effect of Laser Irradiation*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [9] Xu L J, Zhang X H, Ni X W, et al. Temperature field of the CW-laser with different radius irradiating metal plates irradiating metal plate[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S1): 632–635.
徐立君, 张喜和, 倪晓武, 等. 不同光斑半径的连续激光作用金属靶材的温度场[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S1): 632–635.
- [10] Xu B, Zhao X K, Wang L F, et al. Numerical simulation of the temperature field of the ballistic missile irradiated by high intensity laser[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(12): 1526–1530.
徐斌, 赵选科, 王莲芬, 等. 强激光武器辐照弹道导弹温度场数值模拟[J]. *激光与红外*, 2016, **46**(12): 1526–1530.
- [11] Li Q Y. *Damage Effects of Vehicles Irradiated by Intense Lasers*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2012.
李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [12] Brückner M, Schäfer J H, Uhlenbusch J. Ellipsometric measurement of the optical constants of solid and molten aluminum and copper at $\lambda=10.6\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, **66**(3): 1326–1332.
- [13] Wang W B, Zhang K H, Yu K. A comparative research on the infrared spectral emissivity of Al5052 and Al6061[J]. *Journal of Xingyi Normal University for Nationalities*, 2015(4): 110–114, 118.
王文宝, 张凯华, 于坤. Al5052 和 Al6061 红外光谱发射率的对比研究[J]. *兴义民族师范学院学报*, 2015(4): 110–114, 118.
- [14] Zhang K H, Yu K, Liu Y F, et al. Normal spectral emissivity of Al5052 in atmospheric environment[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, **42**(1): 36–40.
张凯华, 于坤, 刘玉芳, 等. 大气环境中 Al5052 光谱发射率研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **42**(1): 36–40.
- [15] Ma J, Zhao Y, Zhou F Y, et al. Study on temperature field of materials irradiated by pulse laser based on FEM[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(1): 27–31.
马健, 赵扬, 周凤艳, 等. 基于有限元的脉冲激光辐照材料温度场研究[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(1): 27–31.
- [16] Wei X Y, Hui X G, Liang Z G. Introduction of micro-arc oxidation and anodic oxidation technology on aluminum alloy surface[J]. *China Metal Bulletin*, 2017(9): 69–70.
魏向禹, 惠鑫刚, 梁智国. 铝合金表面微弧氧化与阳极氧化工艺介绍[J]. *中国金属通报*, 2017(9): 69–70.
- [17] Liu B M, Wang Y Y, Shen Z H, et al. An apparatus for measuring normal spectral emittance of substances[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1986, **7**(3): 204–211.
刘宝明, 王燕燕, 沈志华, 等. 材料法向光谱发射率测定装置[J]. *计量学报*, 1986, **7**(3): 204–211.
- [18] Jiao L G, Yang Z F, Wang J R. Numerical simulation on laser ablation of aluminum target under tangential airflow[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(2): 145–149.
焦路光, 杨在富, 王嘉睿. 气流环境中激光烧蚀铝靶的数值模拟研究[J]. *激光与红外*, 2016, **46**(2): 145–149.
- [19] Radice J J, Joyce P J, Tresansky A C, et al. A COMSOL model of damage evolution due to high energy laser irradiation of partially absorptive materials[C]//*Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston*, Boston, 2012.

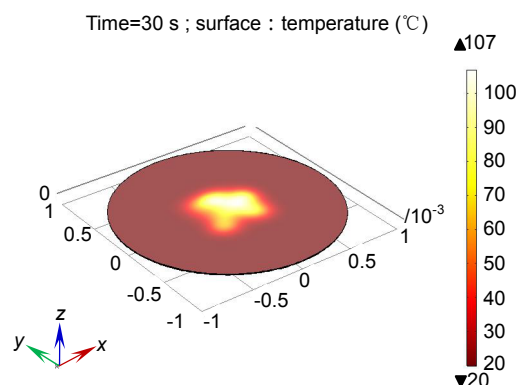
Analysis of temperature rise of metal targets irradiated by CW laser

Hou Jianhui^{1,2*}, Liu Chong¹, Jing Chunyuan³

¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

²Postbox 21-192 Urumqi Xinjiang, Urumqi, Xinjiang 841700, China;

³68 Weidu Road Kaifeng, Kaifeng, Henan 475000, China



Temperature variation of aluminum alloy materials irradiated by continuous laser

Overview: In order to study the interaction between CW laser and material, we analyzed the variation of peak temperature of aluminum alloy irradiated by CW laser. In this paper, the laser source which irradiated aluminum alloy material is approximated to a surface heat source. The finite element equation of temperature field of material surface irradiated by CW laser is established. The boundary conditions of material surface with radiation and heat exchange are given. When establishing the simulation analysis model of CW laser irradiated aluminum alloy circular plate, it is assumed that (i) the material is isotropic, (ii) the absorptivity and physical parameters of the material are independent of temperature, (iii) the heat loss is only the thermal radiation and convective heat transfer of the material surface to the environment, (iv) the material is opaque in the working wavelength range of the laser, and (v) there is no light penetrating material. A finite element model of the transient temperature field of aluminum alloy with a radius of 1 m and a thickness of 5 mm irradiated by CW laser was established. The effects of beam drift, spot diffusion, air convection and surface oxidation on the peak temperature of laser irradiated aluminum alloy were analyzed by simulation. The influence of latent heat of phase change on temperature rise is also analyzed by using the method of equivalent material specific heat capacity. Finally, according to the above conditions, the change of peak temperature of aluminum alloy irradiated by CW laser is given, and the damage of the material is analyzed. The simulation results show that the damage of CW laser irradiated materials is mainly due to thermal effect. Under the given simulation conditions, spot drift and spot diffusion will lead to a sharp drop in the peak temperature of the material compared with the normal situation. Surface convection has a significant effect only when the convection speed is high. The oxidation treatment on the surface of aluminum alloys will lead to a significant increase in laser absorption, and a significant reduction in the irradiation time to reach the melting temperature of the material. The latent heat of phase change has relatively little effect on the temperature rise of materials compared with other factors. From the final comprehensive analysis, when the laser reaches the material surface with an average power density of 127.33 W/cm^2 , the beam center drift range is twice the radius of the spot, and the surface convection velocity is 250 m/s, the peak temperature of the surface oxidized aluminum alloy reaches the melting temperature after 25 s. Under this condition, the material can be damaged.

Citation: Hou J H, Liu C, Jing C Y. Analysis of temperature rise of metal targets irradiated by CW laser[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(12): 180659

* E-mail: 21630057@zju.edu.cn