

高斯脉冲激光灼烧TC4钛合金时变温度场特性

李隆 贺政隆 李昕阳 宁江浩 纪玉潇 杨恒鑫 石镨 张春玲

Time-varying temperature field characteristics of TC4 titanium alloy by Gaussian-pulsed laser ablation

LI Long, HE Zhenglong, LI Xinyang, NING Jianghao, JI Yuxiao, YANG Hengxin, SHI Pu, ZHANG Chunling

引用本文:

李隆, 贺政隆, 李昕阳, 等. 高斯脉冲激光灼烧TC4钛合金时变温度场特性[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 604–611. DOI: 10.5768/JAO202546.0301008

LI Long, HE Zhenglong, LI Xinyang, et al. Time-varying temperature field characteristics of TC4 titanium alloy by Gaussian-pulsed laser ablation[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 604–611. DOI: 10.5768/JAO202546.0301008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲激光测距回波信号时间选通处理技术

Time-gated processing of pulse laser ranging echo signal

应用光学. 2020, 41(6): 1284–1288 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0607002>

纳秒脉冲激光诱导CCD探测器铝层金属液-固相变时间特性研究

Liquid-solid phase transition time characteristics of CCD aluminum layer metal induced by nanosecond pulse laser

应用光学. 2023, 44(4): 898–903 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0407001>

太瓦飞秒脉冲激光峰值功率测量装置及测量不确定度分析

Peak power measurement device of terawatt femtosecond pulsed laser and measurement uncertainty analysis

应用光学. 2024, 45(2): 398–404 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203001>

10.6 μm 脉冲激光对红外成像系统的干扰评估

Interference evaluation of 10.6 μm pulse laser on infrared imaging systems

应用光学. 2025, 46(1): 202–209 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0107002>

416 nm纳秒脉冲激光对CCD损伤机理研究

Research on damage mechanism of 416 nm nanosecond pulsed laser to CCD

应用光学. 2021, 42(3): 534–541 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307002>

激光能量密度对CMOS探测器的感光面热应力的影响研究

Influence of laser energy density on thermal stress at photosensitive layer of CMOS detector

应用光学. 2024, 45(3): 568–574 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310011>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0604-08

引用格式: 李隆, 贺政隆, 李昕阳, 等. 高斯脉冲激光灼烧 TC4 钛合金时变温度场特性 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 604-611.

LI Long, HE Zhenglong, LI Xinyang, et al. Time-varying temperature field characteristics of TC4 titanium alloy by Gaussian-pulsed laser ablation[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 604-611.



在线阅读

高斯脉冲激光灼烧 TC4 钛合金时变温度场特性

李隆^{1,2}, 贺政隆¹, 李昕阳¹, 宁江浩¹, 纪玉潇¹, 杨恒鑫¹, 石锺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: TC4 钛合金具有优良的耐蚀性、低密度、高比强度及较好的韧性和焊接性等一系列优点, 在航空航天领域起到越来越重要的作用。以有限元分析方法为基础, 利用热传导方程对 TC4 钛合金圆盘温度场进行了数值计算。分析了脉冲激光加工金属材料的工作特点, 建立了符合实际加工特点的热模型, 数值分析了 TC4 钛合金温度场随激光功率、光斑半径及激光脉宽的影响规律。研究表明: 若使用中心激光波长为 1 064 nm, 激光功率为 2 kW, 光斑半径为 2 mm, 激光脉宽为 8 ms, 脉冲重复频率为 1 kHz, 尺寸直径为 $\Phi 5.0$ cm, 厚度为 5 mm 的 TC4 钛合金, 其在 50 ms 间具有的峰值温升为 1 209.80 K; 在相同条件下, 当光斑半径分别为 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、5 mm 时, 钛合金端面的最高热形变量为 30.033 μm 。研究结果将为激光加工钛合金时准确设置激光加工参数提供理论依据。

关键词: 激光技术; TC4 钛合金; 脉冲激光; 温度场

中图分类号: TN249; TG156.33

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301008

Time-varying temperature field characteristics of TC4 titanium alloy by Gaussian-pulsed laser ablation

LI Long^{1,2}, HE Zhenglong¹, LI Xinyang¹, NING Jianghao¹, JI Yuxiao¹,
YANG Hengxin¹, SHI Pu¹, ZHANG Chunling^{1,2}

(1. School 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: TC4 titanium alloy has a series of advantages such as excellent corrosion resistance, low density, high specific strength, good toughness and weldability, and plays an increasingly important role in the aerospace field. Based on the finite element analysis method, the temperature field of TC4 titanium alloy disc was numerically calculated by using the heat conduction equation. On the basis of analysis of the working characteristics of metal materials processed by pulsed laser, a thermal model that conformed to the actual processing characteristics was established, and the influence of the temperature field of TC4 titanium alloy with laser power, spot radius and laser pulse width was numerically analyzed. The results show that if the central laser wavelength is 1 064 nm, the laser power is 2 kW, the spot radius is 2 mm, the laser pulse width is 8 ms, the pulse repetition rate is 1 kHz, the diameter is 5.0 cm, and the thickness of 5 mm, the peak temperature rise of TC4 titanium alloy within 50 ms is 1 209.80 K. Under the same conditions, when spot radius is 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm and 5 mm, respectively, the highest thermal deformation of the end face of titanium alloy is

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11705136); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202310703056)

作者简介: 李隆 (1972—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事新型激光技术及其应用研究。E-mail: lilong@xauat.edu.cn

30.033 μm . The research results will provide a theoretical basis for laser processing of titanium alloys and accurate setting of laser processing parameters.

Key words: laser technology; TC4 titanium alloy; pulsed laser; temperature field

引言

激光加工具有加工精度高、非接触式、可控性强、加工范围广和环境污染少等优势,在材料表面加工领域得到了广泛的应用,包括了相变硬化、熔覆、合金化、熔凝、冲击硬化等多种工艺^[1-2]。钛合金有着密度低、比强度高、抗腐蚀、焊接好等特点,在航空航天、民用工业、医疗等领域都有着重要的应用^[3-5]。在激光加工材料的过程中,温度场是决定热处理结果的重要因素之一,同时影响材料各方面的性能^[6]。对于温度场特性的研究,一直是激光加工材料领域重要方向之一。了解材料温度场分布特性,研究激光功率、光斑半径等参数对灼烧区域温度场的影响,为寻求最优的激光加工参数组合提供理论依据,进而获得较理想的被加工材料性能。

基于激光加工材料温度场的研究大多采用解析分析或 ANSYS 有限元方法。2008 年,吴艳梅等人提出了温度场的解析计算方法,研究了激光脉冲序列对钢材表面相变硬化处理的计算方法^[7]。2017 年,张春燕等人利用 ANSYS 有限元软件对激光熔凝稀土镁合金温度场进行数值模拟研究^[8]。同年,朱然等人采用有限元方法对三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金进行数值模拟,研究了不同激光参数对材料残余应力场分布的影响^[9]。2018 年,谭雯丹等人通过建立高强度柴油机气门座激光相变硬化温度场的数值模拟模型,分析了激光相变硬化过程中工艺参数对气门座温度场的影响^[10]。2019 年,庞铭等人利用 ANSYS 有限元分析方法,建立激光熔凝 RuT300 三维实体有限元模型,分析了不同预热温度下激光熔凝的瞬态温度场,获得了预热温度对温度分布、温度梯度、冷却速率等的影响规律^[11]。在之前的研究中,通常将材料的热物性参数作为定值,而近年来随着行业发展,可对更复杂的情况进行仿真,本文应用更权威的材料属性进行仿真,力求仿真更接近实际激光加工情况。

本文基于对脉冲激光垂直辐照钛合金工作特

点分析,考虑到钛合金上下表面与空气以热对流交换热量,合金内部以热传导散失热量,利用 COMSOL 有限元模拟软件,调用固体传热与固体力学模块,得到了脉冲激光辐照 TC4 钛合金温度场的分布特性,计算分析了钛合金处于不同条件下的温度场分布。同时对激光功率、光斑半径及激光脉宽等因素对钛合金温度场分布的影响进行了定量分析。研究结果对于优化激光加工参数组合提供了理论依据。

1 脉冲激光加工钛合金热模型

1.1 物理模型的建立

激光辐照金属材料时,由于吸收激光光束的能量,引起材料表面温度升高,表面温度以及纵深温度是决定激光热处理成败的关键,温度过高或过低,都将影响后续处理。图 1 是激光热加工金属材料装置示意图。

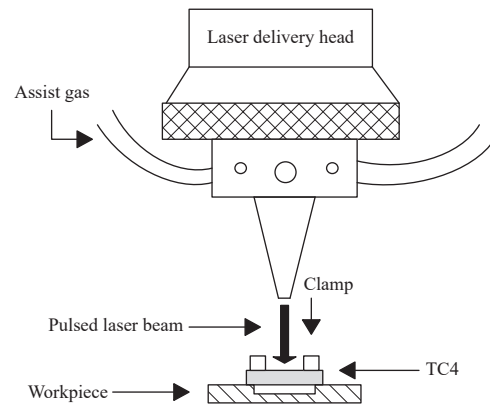


图 1 激光热处理材料装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser heat treatment device

依据傅里叶定律和能量守恒定律,钛合金受到脉冲激光辐照,因其吸收激光能量,在合金内部产生热源分布。因其具有轴对称的特点,可将三维轴对称温度场 $u(r, z, \varphi, t)$ 简化为 $u(r, z, t)$ 。在脉冲激光辐照期间,钛合金满足的热传导微分方程为

$$\frac{\partial u_1(r, z, t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 u_1(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_1(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_1(r, z, t)}{\partial z^2} \right) + \frac{q(r, z, t)}{\rho C}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

式中: $u_I(r, z, t)$ 为钛合金在脉冲激光辐照期间的温度场; ρ 为钛合金密度; t 为温度场持续时间; k 为钛合金导热系数; C 为钛合金比热容; $q(r, z, t)$ 为合金内部热功率密度; T 为激光辐照周期。其中 k, ρ, C 随合金温场变化。

$$\frac{\partial u_{II}(r, z, t)}{\partial t} = \frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 u_{II}(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_{II}(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_{II}(r, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad \tau \leq t \leq T \quad (3)$$

式中: $u_{II}(r, z, t)$ 为钛合金在脉冲激光辐照期间的温度场; τ 为激光脉冲宽度。

由于钛合金内部温度场具有连续性特点, 则有:

$$u_{II}(r, z, t)|_{t=\tau} = u_I(r, z, t) \quad (4)$$

钛合金导热系数 k 与温度的关系式为

$$-k(T) \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{z=0} = AI(r)g(t) \quad (5)$$

式中: A 为材料对激光能量的吸收率; $I(r)$ 为辐照激光功率密度的空间分布函数; $g(t)$ 为激光的时间函数。

激光二极管泵浦的全固态脉冲激光器产生的激光, 经过耦合透镜组, 进入多模光纤, 可将辐照激光视为理想高斯分布, 具有基模高斯光束光强分布^[12]。

具有高斯分布的激光束沿 z 轴入射到合金表面 ($z=0$), 光强分布表达式为^[13]

$$I(r) = I_0 \exp \left[-\frac{2r^2}{\omega^2} \right] \quad (6)$$

式中: I_0 为激光辐照光强; ω 为激光光斑半径。

对于脉冲激光 $g(t)$, 其表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 1 & \frac{n}{v} \leq t \leq \frac{n}{v} + \tau \\ 0 & \frac{n}{v} + \tau \leq t \leq \frac{n+1}{v} \end{cases} \quad n=0, 1, 2, 3, \dots, v-1 \quad (7)$$

式中: v 为重复频率; n 为激光脉冲个数。

辐照激光的功率 P 可表示为

$$P = \int_0^\infty I_0 e^{-2\frac{r^2}{\omega^2}} dr$$

由于钛合金对辐照激光存在吸收, 在合金内产生的热功率密度表式

$$q(r, z) = \eta \frac{P}{\pi R^2} \quad (8)$$

在热模型中, 可假设钛合金最初状态的温场为

$$u_I(r, z, t)|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

在脉冲激光辐照期间, 钛合金满足的热传导微分方程为

式中: η 为合金材料对激光能量的吸收率, 取值在 10%~30% 之间, 本文取 22%; R 为光斑半径。

在脉冲激光辐照合金过程中, 产生的热量一方面由于自身的传导, 另一方面由于合金露于空气中, 与空气间存在热对流交换。在此先假设钛合金初始温度与周围环境温度保持一致, 可为 20℃。合金上下表面与空气间均有热对流交换, 满足第三类边界条件, 其方程表示为^[14]

$$k \left(\frac{\partial u}{\partial x} n_x + \frac{\partial u}{\partial y} n_y + \frac{\partial u}{\partial z} n_z \right) = h(u - u_0) \quad (9)$$

式中: n_x, n_y, n_z 分别为边界 x, y, z 方向上的余弦; h 为与空气热对流交换系数, 取 0.0267; u_0 为空气环境温度; u 为激光辐照物体表面的温度。

1.2 有限元热分析模型

激光热处理仿真实验材料为 TC4 钛合金 (Ti-6Al-4V), 建立直径为 $\Phi 5.0$ cm, 厚度为 5 mm 的圆盘模型, 激光灼烧钛合金圆盘表面中心。有限元模型中的域单元个数为 360, 边界单元个数为 440, 边单元个数为 88, 模型如图 2 所示。

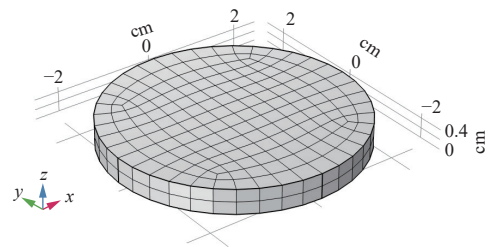


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

在数值计算中, 对激光作用时间进行离散化, 将激光辐照加工过程分割为较短的时间步长, 所取步长小于 0.1 ms。采用三维扫描网格划分, 调用 COMSOL 固体传热和固体力学模块, 以及金属材料库中钛金属的热物理参数, 用插值函数绘制其随温度变化的物理性质, 如图 3 所示。

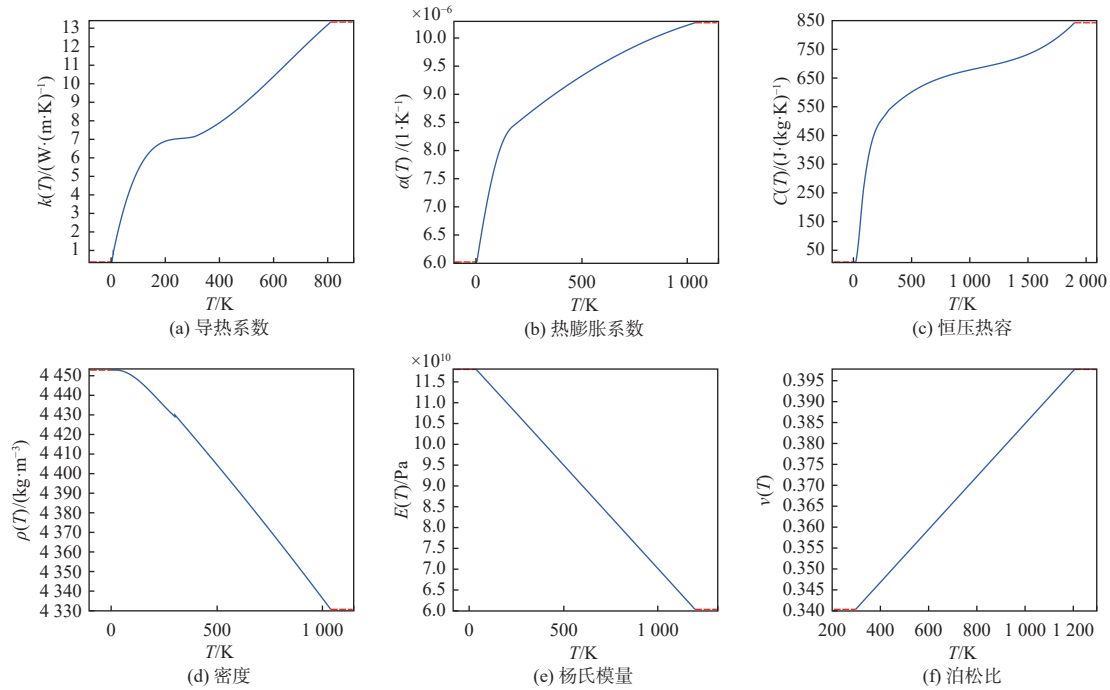
图3 使用的热物性参数^[15-16]

Fig. 3 Thermophysical parameters used

2 脉冲激光灼烧 TC4 钛合金温度场特性分析

2.1 不同功率下高斯脉冲激光对钛合金温度场的影响

要使毫秒高斯脉冲激光对 TC4 钛合金有较好

的加工效果, 对高斯脉冲激光参数的控制至关重要。图 4 给出了光斑半径 2 mm, 频率 1 kHz, 激光脉宽 8 ms, 激光功率分别为 1 kW 和 2.5 kW 时, 高斯脉冲激光灼烧 TC4 钛合金圆盘温度场的三维仿真结果。

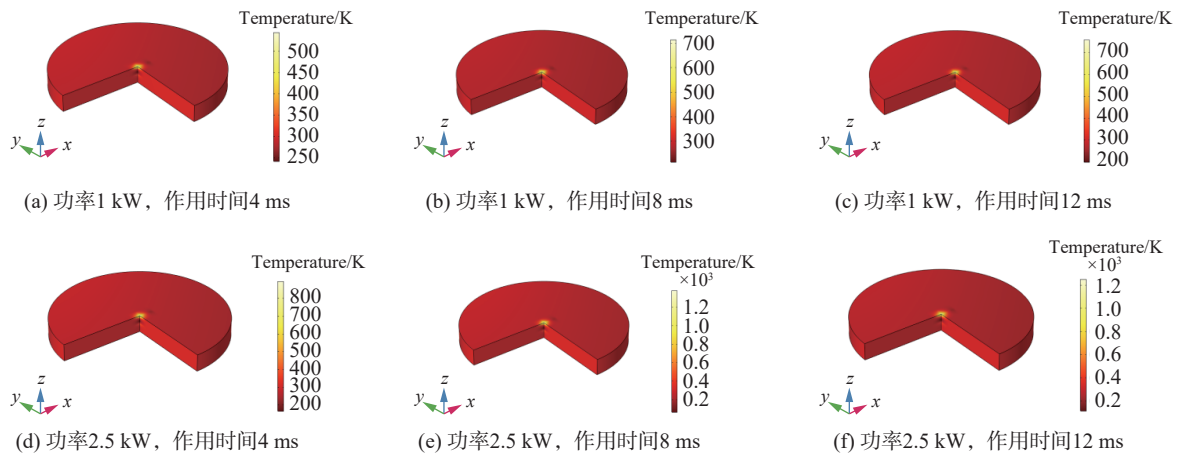


图4 激光功率分别为 1 kW 和 2.5 kW 时, 高斯脉冲激光灼烧 TC4 钛合金圆盘温度场三维仿真

Fig. 4 Three-dimensional simulation of temperature field of TC4 titanium alloy disc with Gaussian pulsed laser ablation at 1 kW and 2.5 kW laser power, respectively

图 5 给出了不同激光功率下 TC4 钛合金圆盘内端面灼烧点的温升变化情况。其中, p_{laser} 为激光源功率, x 为以圆盘几何中心为零点的上表面径

向距离。高斯脉冲激光功率分别为 1 kW、1.5 kW、2 kW、2.5 kW 时, TC4 钛合金圆盘端面灼烧点的温度峰值分别为 774.45 K、996.44 K、1209.80 K、

1416.60 K。激光灼烧功率越高,金属端面灼烧点温升越高。图 6 给出了在 20 ms 内峰值温度时不同激光功率对端面的热影响区范围,均处于-0.339 7 cm~0.450 1 cm 之间。

表 1 给出了端面灼烧点温度随不同激光功率达到峰值的温升变化,定量说明了激光功率与温度呈正相关关系。

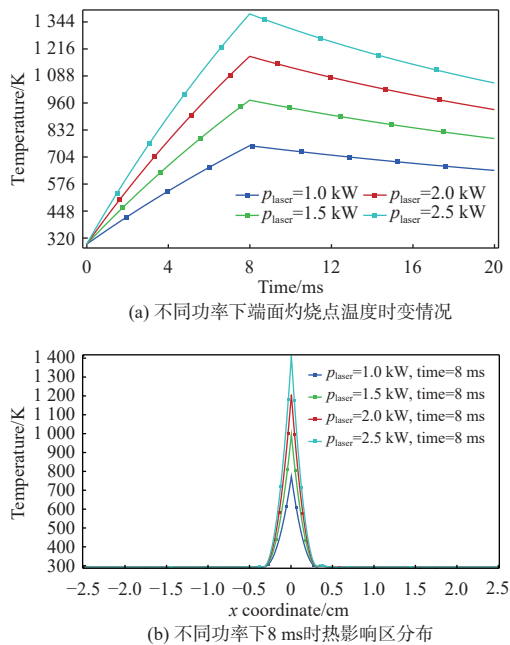


图 5 不同功率下 TC4 钛合金圆盘温度场分布的时变情况
Fig. 5 Time-varying distribution of temperature field of TC4 titanium alloy disc at different powers

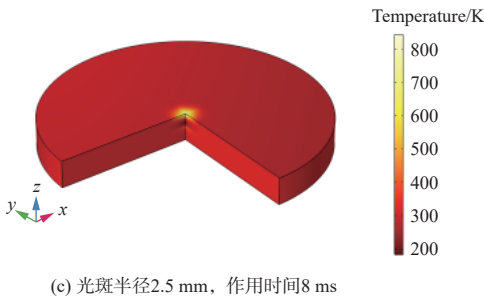
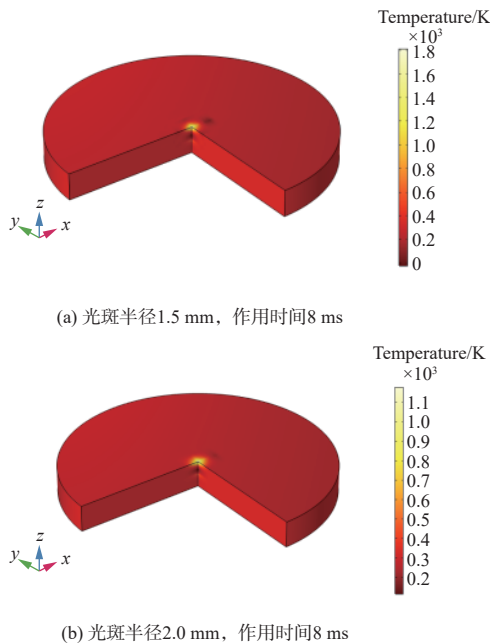


图 6 不同光斑半径下高斯脉冲激光辐照 TC4 钛合金圆盘温度场三维仿真

Fig. 6 Three-dimensional simulation of temperature field of TC4 titanium alloy disc irradiated by Gaussian pulsed laser under different spot radii

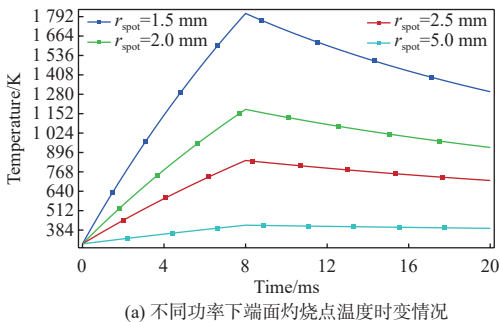
表 1 端面灼烧点温度随不同激光功率作用时间的温度改变
Table 1 Temperature changes of core temperature of ignition point with action time of different power lasers

Duration of action/ms	Laser power/kW			
	1.00	1.50	2.00	2.50
2.0	428.23	487.77	558.93	622.91
4.0	552.82	676.89	797.94	916.44
6.0	667.99	843.90	1014.20	1180.00
8.0	774.75	996.44	1209.80	1416.60

2.2 不同光斑半径下高斯脉冲激光对钛合金温度场的影响

在与图 4 相同的条件下,若高斯脉冲激光的光斑半径分别取 1.5 mm、2 mm、2.5 mm 时,TC4 钛合金圆盘端面灼烧点温度场的最高峰值分别为 416.25 K、843.05 K、1180.10 K,如图 7 所示。由图 7(a)可以得出,不同光斑半径下高斯脉冲激光对 TC4 钛合金圆盘温度场在最高温升上有所差异。

在图 7(b)中, r_{spot} 为激光光斑半径,当其值为 1.5 mm 时,热影响区为-0.695 6 mm~0.677 6 mm;2 mm 时,热影响区为-0.339 7 mm~0.286 8 mm;2.5 mm 时,热影响区为-0.339 7 mm~0.343 2 mm;5 mm 时,热影响区为-0.956 1 mm~0.960 9 mm。可以得出,随着光斑半径增大,热影响区的范围也随之增大。



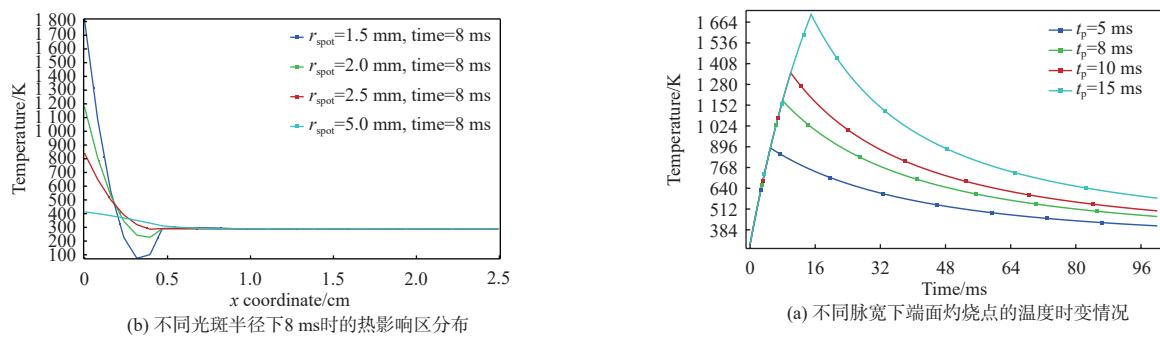


图 7 不同光斑半径下 TC4 钛合金圆盘温度场分布的时变情况

Fig. 7 Time-varying distribution of temperature field of TC4 titanium alloy disc under different spot radii

由表 2 可知,随着光斑半径的增加,工件端面灼烧点峰值温度下降。在光斑半径为 1.5 mm 时,温度从 2 ms 到 8 ms 升高了 1 115.64 K; 2.0 mm 时,温度从 2 ms 到 8 ms 升高了 650.87 K; 2.5 mm 时,温度从 2 ms 到 8 ms 升高了 403.24 K; 5.0 mm 时,温度从 2 ms 到 8 ms 升高了 90.66 K。即在激光功率和脉宽一定的条件下,光斑半径增大,灼烧点的峰值温度会减小。随着光斑半径的增大,在相同作用时间内灼烧点的升温速率下降。如果需要对某一物体进行定点加工,从经济与环保角度来讲,在满足加工要求的情况下,应适当降低光斑半径。

表 2 端面灼烧点温度随不同光斑半径作用时间的温度改变
Table 2 Temperature changes of core temperature of ignition point with action time of different spot radii K

Duration of action/ms	Spot radius/mm			
	1.50	2.00	2.50	5.00
2.00	764.86	558.93	452.32	325.88
4.00	1 180.70	797.94	598.09	357.16
6.00	1 550.80	1 014.20	732.17	387.71
8.00	1 880.50	1 209.80	855.56	416.54

2.3 不同脉宽下高斯脉冲激光对钛合金温度场的影响

在与图 4 相同的条件下,图 8 给出了高斯脉冲激光脉宽分别为 5 ms、8 ms、10 ms、15 ms 时,TC4 钛合金灼烧中心点的温度时变情况,其中 t_p 为激光脉冲宽度。由图 8(a)可知,脉宽不同情况下,灼烧点中心达到峰值温度的时间也有差异。

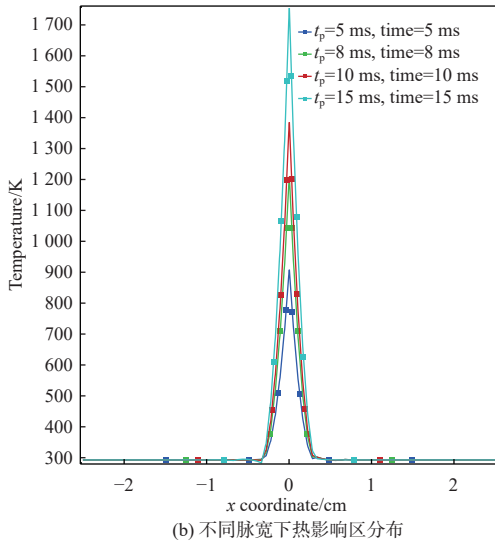


图 8 不同脉宽下 TC4 钛合金圆盘温度场分布的时变情况
Fig. 8 Time-varying distribution of temperature field of TC4 titanium alloy disc under different pulse widths

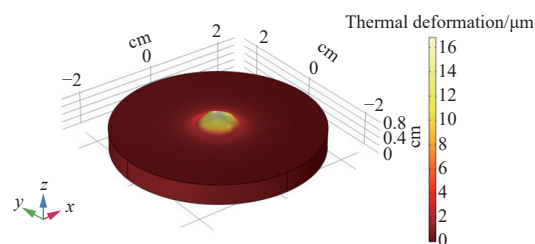
激光脉宽的改变使激光在金属表面的作用时间变长,由图 8 和表 3 可知,增大激光脉宽会显著提升激光对金属板的热效应。比较 5.0 ms 与 8.0 ms 的激光脉宽数据,得出在相同作用时间内增大激光脉宽,灼烧点的温升会显著提升,同时其峰值温度也会增大,但温度场范围没有显著的改变,均在 $-0.333\ 6\text{ mm}\sim 0.343\ 2\text{ mm}$ 之间。

表 3 灼烧点中心温度随不同激光脉宽作用时间的温度改变
Table 3 Temperature changes of core temperature of ignition point with action time of different laser pulse widths K

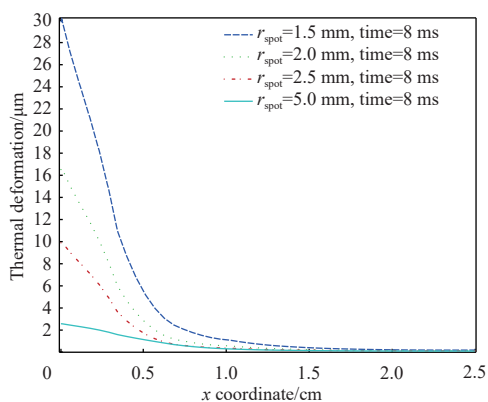
Duration of action/ms	Laser pulse width/ms			
	5.0	8.0	10.0	20.0
2.0	558.93	558.93	558.93	558.93
5.0	908.75	908.75	908.75	908.75
8.0	—	1 209.80	1 209.80	1 209.80
10.0	—	—	1 386.10	1 386.10
15.0	—	—	—	1 711.20

3 TC4 钛合金圆盘端面灼烧点的热形变

利用固体力学与固体传热耦合的多物理场,得到了TC4钛合金圆盘端面的热形变分布。当激光功率为2 kW,光斑半径为2 mm,激光脉宽为8 ms,周期为1 kHz,端面半径为2.5 cm,厚度为5 mm时,TC4钛合金圆盘端面热形变场三维分布如图9所示。高斯脉冲激光灼烧TC4钛合金圆盘最高热形变出现在激光灼烧中心处,其形状是以脉冲光为中心的圆形凸包,可以看出高温导致的热形变同样会限制激光输出质量。



(a) TC4钛合金圆盘三维热形变分布



(b) TC4钛合金圆盘灼烧热形变

图9 TC4钛合金圆盘灼烧热形变分布

Fig. 9 Distribution of thermal deformation of TC4 titanium alloy disc

如图9(b)所示,改变激光灼烧TC4钛合金圆盘的光斑半径 r ,当 r 分别为1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、5 mm时,金属端面灼烧点最高热形变量分别为30.033 μm 、16.448 μm 、9.8206 μm 、2.4869 μm 。

4 结论

本文通过对高斯脉冲光束作用TC4钛合金圆盘工作特点的分析,建立了模型整体与空气热对流,表面对环境辐射的激光灼烧热模型。利用有限元分析方法及热传导理论,对TC4钛合金材料进行高斯脉冲激光灼烧的有限元模拟计算,同时定量分析了高斯脉冲光束激光功率,光斑半径以

及激光脉宽不同情况下TC4钛合金圆盘端面温度场的时变情况。最后,在此基础上讨论了钛合金在不同光斑半径下热形变的规律。结果表明:随着激光功率的上升,钛合金的峰值温度和升温速率都会明显提高;光斑半径增大,温度场范围会扩大,灼烧点的温度峰值会下降;激光脉宽的增大,对温度场的峰值温度和温升影响较为明显,在一定范围内,激光作用时间越长,灼烧点的温升速率越快,峰值越高。光斑半径的改变对热影响区的范围影响尤为显著。使用输出功率为2 kW,脉冲宽度为8 ms,频率为1 kHz的高斯脉冲激光灼烧TC4钛合金圆盘,在光斑半径分别为1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、5 mm时,金属端面灼烧点的最高热形变量分别为30.033 μm 、16.448 μm 、9.8206 μm 、2.4869 μm 。

参考文献:

- [1] 张保生, 王强东, 李明. 18CrNiMo7 刀具钢表面处理对Ni60A激光熔覆层性能的影响[J]. 应用激光, 2023, 43(9): 15-22.
ZHANG Baosheng, WANG Qiangdong, LI Ming. Effect of 18CrNiMo7 tool steel surface treatment on the properties of Ni60A laser cladding layer[J]. Applied Laser, 2019, 43(9): 15-22.
- [2] 张飞, 郑浩, 李鹏飞, 等. 高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1201-1211.
ZHANG Fei, ZHENG Hao, LI Pengfei, et al. Numerical simulation of thermal effect of high power diamond Raman laser[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1201-1211.
- [3] 张均, 杜超, 于昌智, 等. 基于多峰高斯拟合的分布式拉曼测温系统设计与应用[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 128-136.
ZHANG Jun, DU Chao, YU Changzhi, et al. Design and application of distributed Raman temperature measurement system based on multi-peak Gaussian fitting[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 128-136.
- [4] 安强, 祁文军, 左小刚. TA15钛合金表面原位合成TiC增强钛基激光熔覆层的组织与耐磨性[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 139-146.
AN Qiang, QI Wenjun, ZUO Xiaogang. Microstructure and wear resistance of in situ TiC reinforced Ti-based coating by laser cladding on TA15 titanium alloy surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(4): 139-146.

- [5] 穆让修, 张佳, 龙井宇, 等. 高功率激光器的光谱合束技术研究[J]. 应用光学, 2022, 43(4): 792-797.
MU Rangxiu, ZHANG Jia, LONG Jingyu, et al. Study on spectral beam combination technology of high power laser[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(4): 792-797.
- [6] MARY C, LE MOGNE T, BEAUGIRAUD B, et al. Tribochemistry of a Ti alloy under fretting in air: evidence of titanium nitride formation[J]. Tribology Letters, 2009, 34(3): 211-222.
- [7] 吴艳梅, BISSON T, 伏云昌, 等. 激光脉冲对钢材热处理的计算[J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 66-68.
WU Yanmei, BISSON T, FU Yunchang, et al. Calculation of heat treatment of steel irradiated by pulse laser[J]. Laser Journal, 2008, 29(5): 66-68.
- [8] 张春燕, 杨武, 马超. 激光熔凝稀土镁合金温度场的数值模拟及其耐腐蚀性能[J]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 143-147.
ZHANG Chunyan, YANG Wu, MA Chao. Numerical simulation of temperature field in laser surface remelting rare earth magnesium alloy and its corrosion resistance[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(2): 143-147.
- [9] 朱然, 张永康, 孙桂芳, 等. 三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 802007.
ZHU Ran, ZHANG Yongkang, SUN Guifang, et al. Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 802007.
- [10] 谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相硬化温度场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111601.
TAN Wendan, PANG Ming, JIANG Guoye, et al. Numerical simulation of temperature field in laser phase-transformation hardening of highly-enhanced diesel engine valve seats[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 111601.
- [11] 庞铭, 张啸寒, 刘光, 等. 预热温度对激光熔凝 RuT300 温度场的影响规律[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071601.
PANG Ming, ZHANG Xiaohan, LIU Guang, et al. Effect of preheating temperature on temperature field of laser melting RuT300[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071601.
- [12] 李昕阳, 李隆, 任嘉欣, 等. 激光二极管端泵 Yb: YAG 晶体的温度场及应力场[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 118-125.
LI Xinyang, LI Long, REN Jiaxin, et al. Temperature and stress fields of Yb: YAG crystal end-pumped by laser diode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(3): 118-125.
- [13] 李隆, 聂建萍, 史彭, 等. 激光二极管端面抽运 YAG-Nd: YAG 复合晶体棒温度场特性[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 917-922.
LI Long, NIE Jianping, SHI Peng, et al. Temperature field characteristic of YAG-Nd: YAG composite crystal rod end-pumped by laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 917-922.
- [14] SHIN W S, YOO H J, KIM J H, et al. Effect of laser heat-treatment and laser nitriding on the microstructural evolutions and wear behaviors of AISI P21 mold steel[J]. Metals, 2020, 10(11): 1487.
- [15] UMEZAWA O, ISHIKAWA K. Electrical and thermal conductivities and magnetization of some austenitic steels, titanium and titanium alloys at cryogenic temperatures[J]. Cryogenics, 1992, 32(10): 873-880.
- [16] TOULOUKIAN Y S, KIRBY R K, TAYLOR R E, et al. Numerical data on thermal linear expansion of metallic elements and alloys[M]//Thermal Expansion. Boston, MA: Springer, 1975: 1353-1371.