

长脉冲激光作用下铝合金板材温度和热应力分析

王翼彬 金光勇 张巍

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 基于冯·米塞斯屈服准则和弹塑性本构关系,建立了长脉冲激光辐照 7A04 铝合金的空间轴对称有限元模型,并利用有限元-有限差分混合算法计算了光强为高斯分布的激光光束加热铝合金板时的温度场和热应力场。研究发现目标上表面米塞斯应力主要分布在中心点周围,离中心点相对较远位置处的米塞斯应力很小,对目标几乎不起破坏作用,并且米塞斯等效应力远小于铝合金目标的屈服强度。仿真计算结果与实验结果的一致性证实了该模型的有效性。

关键词 激光技术;长脉冲激光;脉冲串;热应力场;温度场

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0802006

Temperature and Thermal Stress Analysis of Aluminium Alloy Plate Irradiated by Long Pulsed Laser

Wang Yibin Jin Guangyong Zhang Wei

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Based on the von Mises yield criterion and the elastoplastic constitutive relation, a spatial axisymmetric finite element model is established for long pulsed laser irradiating 7A04 aluminium alloys, and the temperature field and the thermal stress field are calculated by the finite-element/finite-difference hybrid algorithm when the laser beam with a Gaussian intensity profile heats the aluminium alloy plate. It is found that the Mises stress on the target surface distributes mainly within a certain scope around the center. At a position far from the center, the Mises stress is very small which barely affects the target and the Mises equivalent stress is far less than the yield strength of the aluminum alloy target. The consistency between the simulation and experimental results confirms the validity of the model.

Key words laser technique; long pulsed laser; pulse train; thermal stress field; temperature field

OCIS codes 140.3330; 140.6810; 140.0140; 140.3390

1 引 言

自激光问世以来,激光技术的应用一直深受重视,激光逐渐成为加工领域不可或缺的技术手段,广泛应用于医疗、航天、精密器件加工等工业生产中。近年来,国内外很多研究机构针对激光与金属的相互作用进行了大量理论^[1]和实验方面的研究。

当激光作用于材料时,随着激光的参数(如波长、脉宽、能量等)、材料自身特征和环境因素的变化,材料表面会发生不同的物理现象。当激光能量密度较低时,材料发生的物理变化一般为熔化。在激光对材料加热的过程中,随着温度不断上升,材料自身发生热膨胀。由于材料自身的连续性,材料各部分相互制约,导致其不能自由膨胀,热应力^[2]随之产生。

传统研究认为,脉冲串对铝合金材料加热的过程是单脉冲加热铝合金材料过程的累加,对于脉冲串的频率

收稿日期: 2015-12-18; **收到修改稿日期:** 2016-04-12

作者简介: 王翼彬(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: 1226203534@qq.com

导师简介: 金光勇(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: jgy_cust@126.com(通信联系人)

和脉冲个数对加热过程的影响讨论较少。本文利用有限元模型对脉冲串加热铝合金材料的过程进行了研究, 计算了脉冲串辐照下铝合金材料内的温度和热应力分布。实验结果与仿真结果的对比证明了模型的有效性。

2 理论模型

毫秒(ms)脉冲激光辐照铝靶材模型图如图 1 所示, 激光束垂直照射铝合金材料, 入射激光束为高斯光束, 铝合金表面是边长为 $2b$ 的正方形, 在柱坐标系下建立空间轴对称模型, 其中 z 轴为对称轴, r 表示铝合金材料的径向, h 为铝合金材料厚度, a_0 为入射激光的光斑半径, o 为坐标轴原点。假设: 1) 铝合金各向同性; 2) 计算过程中未出现气化现象; 3) 铝合金表面没有发生严重的几何变形; 4) 铝合金液化后未流出辐照区域; 5) 不考虑液相的对流, 仍将液化区域传热作为热传导处理。

铝合金的热物性参数见表 1。

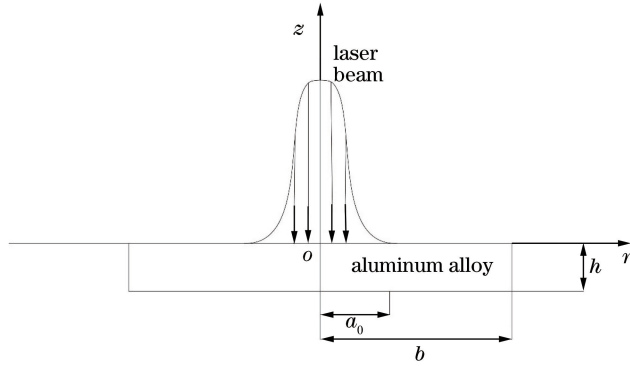


图 1 毫秒脉冲激光辐照铝靶材模型图

Fig. 1 Model diagram of millisecond laser pulse irradiating aluminum target

表 1 铝合金热物性参数

Table 1 Thermal physical parameters of aluminum alloy

Size /mm ³	25×25×3
Absorptivity	0.13
Density / (kg·m ⁻³)	2810 (Solid state) 2385 (Liquid state)
Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	917 (Solid state) 1080 (Liquid state)
Coefficient of thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	238 (Solid state) 100 (Liquid state)
Thermal expansion coefficient / (10 ⁻⁵ K ⁻¹)	2.36
Young modulus /GPa	71
Poisson ratio	0.33
Reflectivity	0.87
Melting point /K	908
Boiling point /K	2793
Melting latent heat / (10 ⁵ J·kg ⁻¹)	3.88
Latent heat of vaporization / (10 ⁶ J·kg ⁻¹)	9.46

激光光斑半径 $a_0 = 1$ mm, 每个脉冲高斯光束能量密度 $I = 248.6$ J/cm², 脉宽 $\tau = 1$ ms, 重复频率 $\nu = 10$ Hz, 辐照时间 $t = 0.3$ s。

选择二维轴对称模型, 热传导方程^[3]为

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right], \quad (1)$$

式中 ρ 、 c 和 k 分别为材料密度、比热容和导热系数, T 为温度, t 为时间。

初始时刻铝合金温度为 298 K。假设除激光辐照区域外其他面都是热绝缘面,即

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h, r=b} = 0。 \quad (2)$$

由于光在铝合金中的穿透深度很小,可以将辐照区域看作表面吸收,因此将铝合金热源定义为面热源并通过边界条件给出

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = I_0 A(T) f(r) g(t), \quad (3)$$

式中 I_0 为中心处激光功率密度, $A(T)$ 为铝合金吸收率, $g(t)$ 为激光能量的时间分布, 连续激光作用于铝合金时 $g(t)=1$, 激光能量的空间分布 $f(r)$ 选择高斯分布, 即

$$f(r) = \exp(-2r^2/a_0^2)。 \quad (4)$$

高斯光束的空间函数的分布图如图 2 所示。

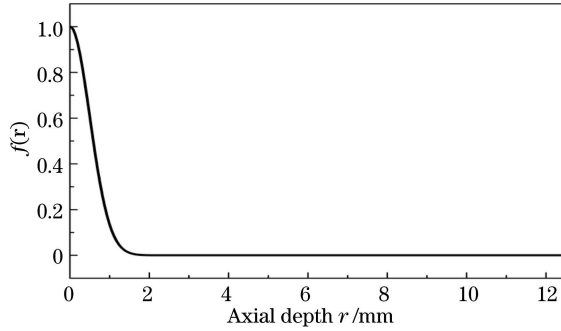


图 2 空间函数的高斯分布图

Fig. 2 Gaussian distribution of spatial function

对于脉宽为 1 ms 的单脉冲激光, $g(t)$ 的表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1 \text{ ms} \\ 0, & t \geq 1 \text{ ms} \end{cases}。 \quad (5)$$

对于重复脉冲, $g(t)$ 的表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & n/v \leq t \leq n/v + \tau \\ 0, & n/v + \tau \leq t \leq (n+1)/v \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $n=0, 1, 2, \dots, v-1$; τ 为激光脉冲宽度, 这里取 1 ms。当铝合金温度超过熔点时, 发生熔融相变, 带有相变的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}, \quad (7)$$

式中 L 为相变潜热, f_s 为固相率。固相率是一个无量纲量, 它的增加(或减小)与相变潜热^[4]的释放(或吸收)成正比。当 $f_s=1$ 时, 物质处于固相; 当 $f_s=0$ 时, 物质处于液相。由于固相率是温度的函数, 因此 f_s 对时间的导数可表示为

$$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式中, 得到齐次形式的热传导方程

$$\rho c_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right], \quad (9)$$

式中 c_p 为等效比热容, 表达式为

$$c_p = c - L \frac{\partial f_s}{\partial T}。 \quad (10)$$

对于不同的物质, f_s 与温度的关系也不同。铝合金中固相率与温度的关系为

$$f_s = (T_L - T)/(T_L - T_s), \quad (11)$$

式中 T_L 为液相线温度, T 为温度变量, T_s 为固相线温度。通过求解(1)式和(7)式, 就可以得到铝合金熔融^[5]前后的温度场分布。

3 数值仿真

3.1 仿真方法

网格剖分应遵循两个基本原则: 1) 热源附近区域的网格分布要比铝合金材料周边更加密集; 2) 测量位置附近区域的网格分布要比铝合金材料周边更加密集。对于轴对称几何模型, 在靶材的照射区域和靶材中心的轴对称面上对网格进行加密处理, 得到如图 3 所示的网格剖分图。

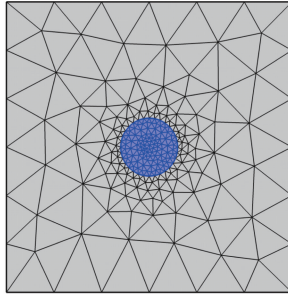


图 3 自由三角形网格剖分局部图

Fig. 3 Local view of free mesh triangulation

利用有限元-有限差分混合算法求解瞬态温度场。采用有限单元对空间域进行网格划分, 采用有限差分对时间域进行网格划分。一般采取二点差分的中心差分格式对时间域进行离散, 并将其代入温度场有限元^[6]控制方程, 得到某时刻与下一时刻温度分布的迭代关系。若已知初始时刻的温度值和温度变化率, 则可依次推导出任意时刻的温度场^[7]分布。瞬态温度场求解中常见的时间差分格式为二点差分, 其表达式为

$$\theta \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} \right) + (1 - \theta) \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} \right) = \frac{1}{\Delta t} (T_2 - T_1), \quad (12)$$

式中 θ 为时间积分参数, $0 \leq \theta \leq 1$ 。 T_1 为 t 时刻的温度变量, T_2 为 $t + \Delta t$ 时刻的温度变量, Δt 为时间步长。

利用(1)~(3)式, 温度场有限元控制方程可以表示为

$$\mathbf{K}_{th} \mathbf{T} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{T}}{dt} = \mathbf{Q}, \quad (13)$$

式中 \mathbf{C} 和 \mathbf{K}_{th} 分别为比热容矩阵和热传导矩阵, \mathbf{T} 和 $\frac{d\mathbf{T}}{dt}$ 分别为节点温度列向量和温度变化率列向量, \mathbf{Q} 为施加的温度载荷列向量。对于 t 和 $t + \Delta t$ 时刻, 有

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{th} \mathbf{T}_1 + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{T}_1}{dt} = \mathbf{Q}_1 \\ \mathbf{K}_{th} \mathbf{T}_2 + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{T}_2}{dt} = \mathbf{Q}_2 \end{cases}, \quad (14)$$

式中 \mathbf{T}_1 、 \mathbf{T}_2 分别为 t 和 $t + \Delta t$ 时刻节点温度列向量, $\frac{d\mathbf{T}_1}{dt}$ 、 $\frac{d\mathbf{T}_2}{dt}$ 分别为 t 和 $t + \Delta t$ 时刻温度变化率列向量, \mathbf{Q}_1 、 \mathbf{Q}_2 分别为 t 和 $t + \Delta t$ 时刻施加的温度载荷列向量。

铝从固态转变为液态时需要吸收大量热量, 而温度保持不变。铝的比热容在相变区间发生阶跃性变化, 不利于计算收敛性以及精度的提高。因而用单位阶跃函数表示固相率, 固相率及等效比热容曲线如图 4 所示。

3.2 仿真结果

在不同脉冲串作用下, $\tau_p = 1$ ms, 每个脉冲能量密度 $I = 248.6$ J/cm², $\nu = 10$ Hz, 目标上表面投影中心点温度随时间的变化关系如图 5 所示。由图可以看出, 无论脉冲个数是 5 还是 10, 每个脉冲作用结束时, 中心点温度都回落至初始温度 307 K 附近, 这是因为铝合金材料导热系数非常大, 升温迅速, 降温也很快。每两个脉冲的最大温度差值仅为 37.9 K, 所以脉冲串作用于铝合金材料只能使损伤区域稍微增大, 而热累积效果甚微。

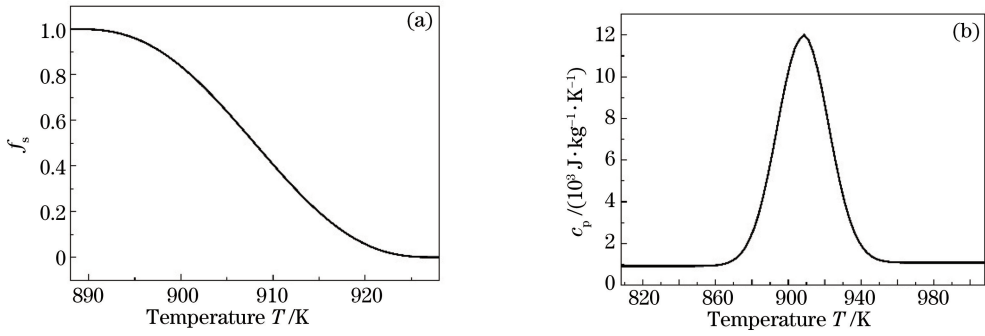


图 4 (a) 固相率曲线; (b) 等效比热容曲线

Fig. 4 (a) Curve of solid fraction; (b) curve of equivalent specific heat capacity

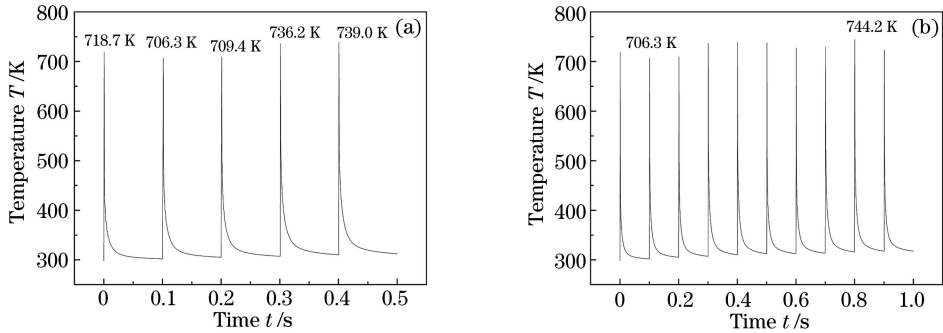


图 5 目标上表面投影中心点温度随时间的变化关系。(a) 5 个脉冲; (b) 10 个脉冲

Fig. 5 Relationship between temperature at the projection center of the top surface of target and time.

(a) Five pulses; (b) ten pulses

在不同脉冲串作用下, 铝合金材料达到最高温度时, 铝合金目标温度的三维分布图如图 6 所示, 其中 $\tau_p = 1 \text{ ms}$, $I = 248.6 \text{ J/cm}^2$, $v = 10 \text{ Hz}$, 298.43 K 和 763.08 K 分别为目标材料的最低和最高温度。

目标上表面米塞斯等效应力随径向深度的变化关系如图 7 所示, 由图可以看出, 米塞斯等效应力^[8]呈高斯分布且小于 9 MPa , 远小于铝合金目标的屈服强度。对照图 5 和图 7 可以看出, 每个脉冲作用结束时, 目标温度达到最高并迅速降低, 米塞斯等效应力也呈现高斯分布形式, 并且 5 个脉冲和 10 个脉冲的应力数值分布趋势也基本一致, 且多个脉冲作用后, 米塞斯等效应力值有所下降。

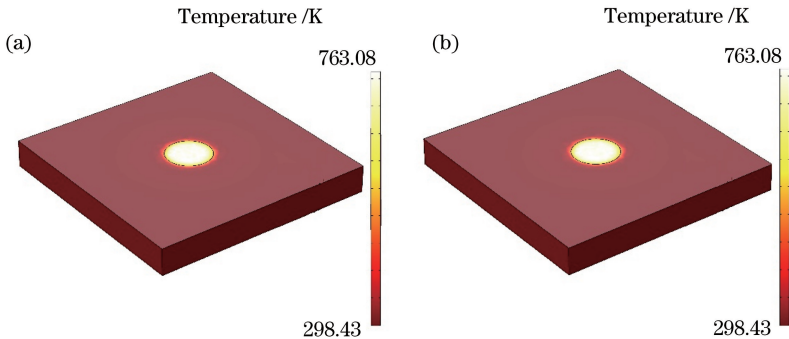


图 6 目标上表面温度的三维分布图。(a) 5 个脉冲; (b) 10 个脉冲

Fig. 6 Three-dimensional temperature distribution at the top surface of target. (a) Five pulses; (b) ten pulses

图 8 为在不同脉冲串作用下, $\tau_p = 1 \text{ ms}$, $I = 248.6 \text{ J/cm}^2$, $v = 10 \text{ Hz}$ 时, 目标上表面米塞斯等效应力随轴向深度的变化关系。由图可以看出, 当轴向深度大于 1 mm 时, 米塞斯等效应力值很小, 对铝合金目标几乎不起破坏作用。

在不同脉冲串作用下, 米塞斯等效应力达到最大值时, 铝合金目标温度的三维分布图如图 9 所示, 其中 $\tau_p = 1 \text{ ms}$, $I = 248.6 \text{ J/cm}^2$, $v = 10 \text{ Hz}$, $1.0013 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 和 $8.7375 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 分别为目标材料的最小和最

大应力。可以看出,目标上表面米塞斯应力只分布在中心点较小周围内,离中心点相对较远位置处的米塞斯应力很小,对目标几乎不起破坏作用。

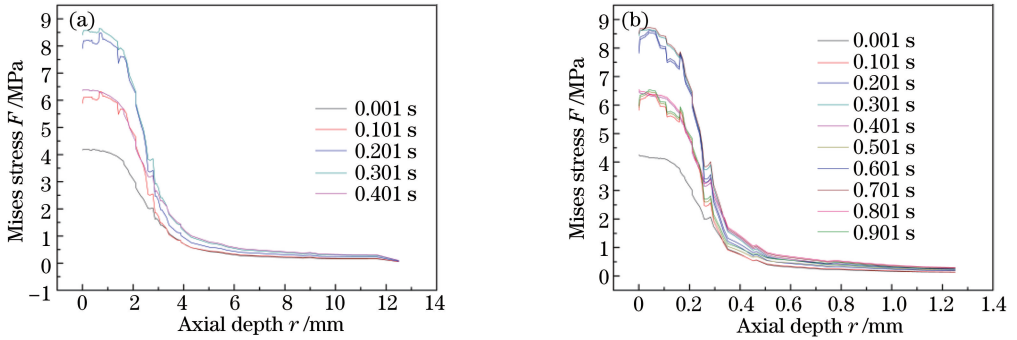


图 7 目标上表面米塞斯等效应力随径向深度的变化关系。(a) 5 个脉冲; (b) 10 个脉冲
Fig. 7 Relationship between Mises equivalent stress at the top surface of target and radial depth.
(a) Five pulses; (b) ten pulses

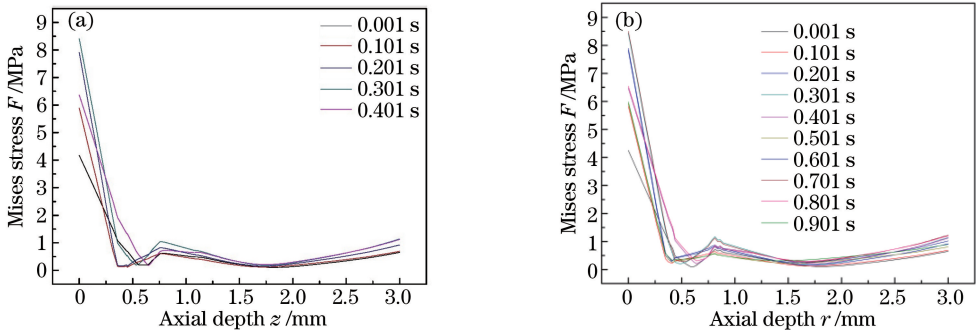


图 8 目标上表面米塞斯等效应力随轴向深度的变化关系。(a) 5 个脉冲; (b) 10 个脉冲
Fig. 8 Relationship between Mises equivalent stress at the top surface of target and axial depth.
(a) Five pulses; (b) ten pulses

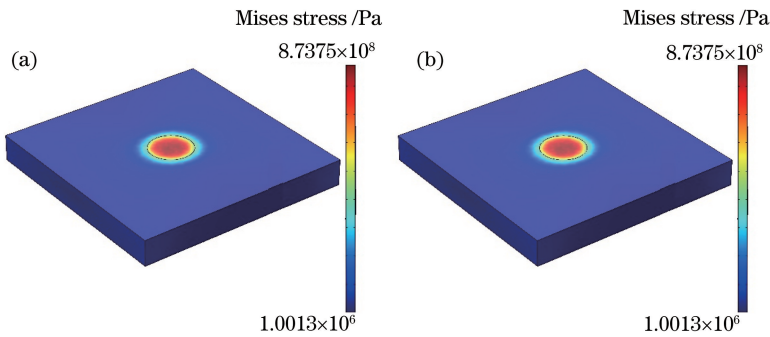


图 9 最大米塞斯等效应力作用下的目标三维分布图。(a) 5 个脉冲; (b) 10 个脉冲

Fig. 9 Three-dimensional distribution of target under maximum Mises equivalent stress. (a) Five pulses; (b) ten pulses

4 实验系统及测量结果

实验装置如图 10 所示,实验采用 Melar-100 激光器,其输出波长为 1064 nm,脉宽为 1 ms,能量可调,最大输出能量在 100 J 左右,有效光斑直径为 2 mm,脉冲重复频率 $\nu=10$ Hz;7A04 铝合金板被夹持于平移台上,采用点温仪进行温度测试。

在不同脉冲串激光作用下,当激光脉冲能量密度 $I=248.6$ J/cm²、脉冲重复频率 $\nu=10$ Hz 时,实际测试的 7A04 铝合金表面温度随脉冲个数的变化关系如图 11 所示。

由图 11 可以看到,在重复频率为 10 Hz 的毫秒脉冲串激光作用下,7A04 铝合金表面峰值温度没有因

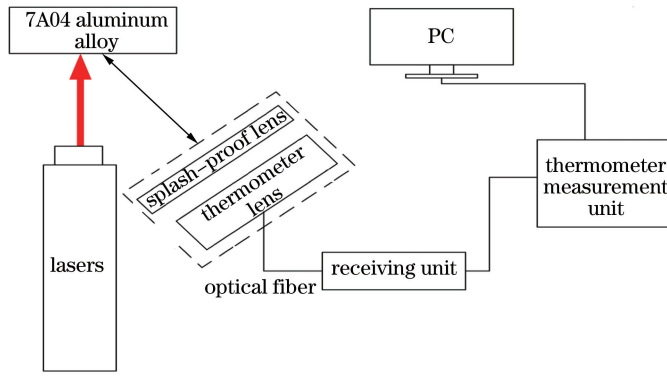


图 10 实验装置图

Fig. 10 Schematic diagram of experimental setup

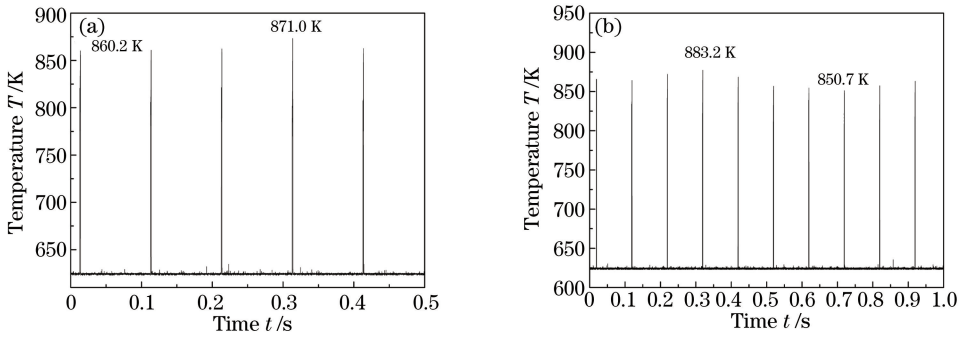


图 11 铝合金板材表面中心点温度实验值随时间变化关系。(a) 5 个脉冲；(b) 10 个脉冲

Fig. 11 Relationship between experimental temperature at the surface center of aluminum alloy plate and time.

(a) Five pulses; (b) ten pulses

为热量的积累效应发生明显的升高,对于单个脉冲而言,其作用结束后的 5 ms 时间内,温度迅速下降到 623 K 以下。其原因是铝的热扩散系数较大,热能量通过热传导迅速扩散到整个铝靶材;同时,在下个脉冲作用起始前,部分热量通过热对流的方式扩散到空气中。

由图 11 和图 5 的对比可以看到,实验测量曲线和数值仿真曲线的数值基本相符,只存在细微的差异,一方面可能是实验过程中测量点不是严格位于目标表面中心点,另一方面可能是数值计算过程中目标的吸收率取值存在误差。

5 结 论

基于冯·米塞斯屈服准则和弹塑性本构关系,建立了长脉冲激光辐照 7A04 铝合金的空间轴对称有限元模型,对长脉冲激光作用下铝合金靶材的温度场和热应力场进行分析。当长脉冲激光作用于 7A04 铝合金靶材时,损伤区域会随着脉冲个数的增加而变大,但热累积效果并不明显,多个脉冲作用后,米塞斯等效应力下降。当轴向深度大于 1 mm 时,米塞斯等效应力很小,对铝合金目标几乎不起破坏作用。目标上表面米塞斯应力只分布在中心点较小范围内,离中心点相对较远位置处的米塞斯应力很小,对目标几乎不起破坏作用,并且米塞斯等效应力远远小于铝合金目标的屈服强度。

参 考 文 献

- 1 Wang Baolin, Du Shanyi, Han Jiecai. Thermomechanical coupling analysis advances of functionally graded material structure[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(4): 528-548.
王宝林, 杜善义, 韩杰才. 功能梯度材料的热/机械耦合分析研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(4): 528-548.
- 2 Tanigawa Y. Some basic thermoelastic problems for nonhomogeneous structural materials [J]. Applied Mechanics Reviews, 1995, 48(6): 287-300.

- 3 Li Yong, Zhang Zhiming, Ma Shuya. Progress of the study on thermal stress of heat-resisting functionally gradient materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2000, 30(4): 571-580.
李 永, 张志民, 马淑雅. 耐热梯度功能材料的热应力研究进展[J]. *力学进展*, 2000, 30(4): 571-580.
- 4 Shen Huishen. Bending, buckling and vibration of functionally graded plates and shells[J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(1): 53-60.
沈惠申. 功能梯度复合材料板壳结构的弯曲、屈曲和振动[J]. *力学进展*, 2004, 34(1): 53-60.
- 5 Zhao J, Ai X, Li Y Z, *et al.* Thermal shock resistance of functionally gradient solid cylinders[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 418(1-2): 99-110.
- 6 Kong Xiangqian. The application of the finite element method in heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 1998.
孔详谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 7 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of the interaction for laser and material[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
陆 建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- 8 Gu Jianhui, Zheng Qiguang, Wang Tao, *et al.* The damage to type LY12 aluminum alloy targets due to a CW CO₂ laser beam[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1995, 23(4): 96-99.
辜建辉, 郑启光, 王 涛, 等. 连续 CO₂ 激光对 LY12 铝合金靶的破坏效应研究[J]. *华中理工大学学报*, 1995, 23(4): 96-99.