

长脉冲与连续激光联合辐照铝合金的温度场仿真

肖 婧 何衡湘 夏惠军 贾 静

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 为了给长脉冲与连续激光联合作用模式的参数选择提供依据,采用 ANSYS 分析了长脉冲激光和连续激光共同辐照下 2A12 铝合金的温度场,得到了不同连续激光与长脉冲激光加载起始时刻的时间间隔和不同光斑半径组合情况下激光辐照中心点的最高温度和熔池的大小。结果表明,随着时间间隔的增大,激光辐照中心点的最高温度越高;当两束激光的时间间隔大于某特定值时,脉冲激光所造成的温升才会逐渐增加;激光辐照中心点的最高温度和熔池的大小主要由峰值功率较高的长脉冲激光决定,但是如果选择合适的连续激光预热,尤其是当连续激光的功率密度达到 10^5 W/cm^2 量级时,联合作用能显著增大熔池的尺寸,并适量提高辐照中心点的温度。

关键词 激光技术;连续激光;长脉冲激光;铝合金;预热;温度场;熔池

中图分类号 O532+.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.1103002

Temperature Field Simulation on Aluminium Alloy Irradiated by Long Pulsed Laser and Continuous Wave Laser

Xiao Jing He Hengxiang Xia Huijun Jia Jing

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract Finite element analysis software ANSYS is used to simulate the temperature distribution of 2A12 irradiated by continuous wave (CW) laser and long pulsed laser. The effect of different intervals of time between the two beams on the maximum temperature of the center and the size of molten pool and the effect of different combinations of the two lasers' radiuses are investigated. The results show that the maximum temperature of the center increases by increasing the interval of time. The temperature rise induced by long pulsed laser increases when the interval of time is larger than one specific value. The maximum temperature of the center and the size of molten pool are mainly decided by the long pulsed laser which has a relatively higher peak power, the continuous wave laser used to preheat the material can significantly increase the size of molten pool when its power density is at 10^5 W/cm^2 level.

Key words laser technique; continuous wave laser; long pulsed laser; aluminium alloy; preheat; temperature field; molten pool

OCIS codes 350.5340; 350.3850; 160.3900

1 引 言

人们在研究激光与材料相互作用时,材料对激光的吸收率是一个重要参数,吸收率的大小决定了激光能量的沉积速率。对于不透明材料,吸收率越高,激光能量的利用率越高,被材料反射的激光能量越少。反射回来的激光对光学系统所构成的威胁也就越小。所以研究如何提高材料对激光的吸收率、增大激光能量的利用率成为研究激光与材料相互作用

的重要课题。利用在材料表面加涂层^[1,2]、增大材料表面的粗糙度^[3,4]等传统工艺可以提高材料对激光的吸收率,近年来开展的一系列热输入方式上的技术革新也提高了激光能量的利用率。联合使用两束激光辐照材料便是从改变热输入方式的角度来提高激光能量利用率的一种有效手段^[5~9]。这种方法通常是先利用一束激光预热材料,温度的上升使材料对另外一束激光的吸收率增大,材料吸收的激

收稿日期: 2012-06-21; 收到修改稿日期: 2012-07-30

作者简介: 肖 婧(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail: xxjjowen@163.com

导师简介: 何衡湘(1968—),男,研究员,主要从事光电对抗技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: hhxhyx@yahoo.com.cn

光能量也就更多。联合使用两束激光辐照材料不仅能提高激光能量的利用率,也能提高现有激光器的热作用能力,因此这种方法具有广泛的应用前景。

目前,人们在研究联合使用两束激光与材料的相互作用时,主要关注的是联合作用模式相对于单束激光作用模式的优缺点以及不同组合参数对激光热作用效能的影响。李俐群等^[5,6]采用分光镜将一束 CO₂ 激光分成两束进行双光束激光焊接,研究了不同激光功率、焊接速度、送丝速度和焊接线能量等对接头成形和性能的影响。Hess 等^[7]采用两束不同波长的连续激光焊接铜合金,对比分析了在总功率相同的情况下两种作用模式的熔池尺寸。结果表明,采用双光束焊接能显著增大熔池尺寸。曾交龙等^[8]利用连续激光预热 GaAs 材料,在第 7 s 的时候加纳秒级脉冲激光,得到了不同连续激光功率预热情况下脉冲激光的损伤阈值。结果表明,脉冲激光的损伤阈值随连续激光功率的增大而减小。李莉等^[9]用数值方法计算了光学型(PC) HgCdTe 光电探测器在双波段组合激光辐照下的温度响应过程,得到了不同功率密度的波段内和波段外激光组合对探测器温升的影响。但是针对长脉冲激光和连续激光联合作用模式,不同组合参数对激光热作用效能的影响却鲜有报道。

研究激光与材料的相互作用时,数值仿真是一种重要的理论研究方法^[10,11]。为了探究不同组合参数对长脉冲和连续激光联合作用模式热效能的影响,本文以 2A12 铝合金为研究对象,利用有限元分析法研究了其在不同组合参数作用下的温度场。在吸收率随温度变化的状况下,分析了连续激光和长脉冲激光发射起始时刻的时间间隔、二者光斑半径对铝合金温度场的影响,为优化联合加载参数提供依据。

2 理论模型

2.1 热传导数学模型

假设铝合金为各向同性的均匀材料,并且忽略对流和辐射,激光辐照铝合金的热传导过程可以描述为

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

式中 T 为温度, t 为时间, $k(T)$ 、 $c(T)$ 、 $\rho(T)$ 分别为材料的热导率、定压比热容和密度。

激光加热铝合金时,光能在材料表面($z=0$)被吸收,激光的作用按照边界条件处理:

$$k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = -A(T)P(r)g(t), \quad (2)$$

式中 $A(T)$ 为吸收率, $P(r)$ 为入射激光功率密度的空间分布, $g(t)$ 为入射激光的时间分布。对于连续激光, $g(t) = 1$; 对于脉冲激光, $g(t)$ 可表示为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \frac{n}{\nu} \leq t \leq \frac{n}{\nu} + \tau_0 \\ 0, & \frac{n}{\nu} + \tau_0 \leq t \leq \frac{(n+1)}{\nu} \end{cases}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

式中 ν 为重复频率, τ_0 为脉冲宽度, n 为脉冲数。

2.2 与温度相关的吸收率模型

金属材料的温度变化会影响金属电阻率,进而影响其对激光的吸收率。一般而言,随着温度的上升,金属材料的电阻率会变大,金属对于激光的吸收也会增强,特别是熔化时,电阻率会突然增加,液态电阻率可达固态电阻率的 1 倍以上,从而导致在熔点处吸收率的陡升。对于波长 1064 nm 的激光,描述这种吸收率随温度变化的 Hagen-Rubens 公式为

$$A(T) = 354.67 \sqrt{a + bT}, \quad (4)$$

式中 a, b 为材料参量。

光洁铝板对 1064 nm 激光的吸收率为^[12]

$$A(T) = \begin{cases} 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} T}, & (273 \text{ K} \leq T < 933 \text{ K}) \\ 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} T}, & (933 \text{ K} \leq T) \end{cases}, \quad (5)$$

所描述的吸收率随温度的变化如图 1 所示。

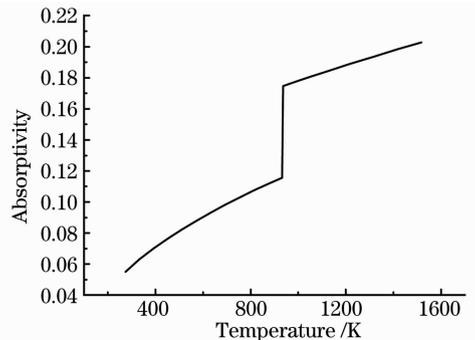


图 1 铝对 1064 nm 激光的吸收率

Fig. 1 Absorptivity versus temperature for aluminium at 1064 nm

3 仿真模型

3.1 有限元模型

设仿真实体模型呈圆饼状,其半径为 25 mm,厚度为 2 mm。由于连续激光和长脉冲激光都辐照于试件的上表面中心处,考虑到试件以及载荷的对称性,建立模型时采用 1/4 模型,并选用三维热分析单元 SOLID70,如图 2 所示。被激光辐照的试件存在较大的温度梯度,所以在激光辐照区域采用较密集的网格划分,在远离激光辐照区域采用较稀疏的网格划分。网格划分情况如图 2 所示。

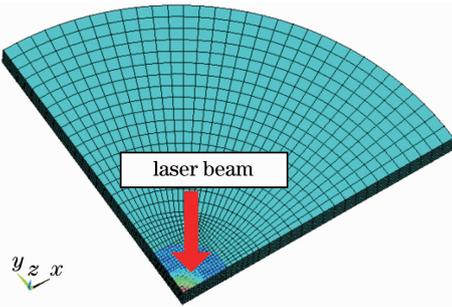


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite elements model

3.2 热源模型

仿真所采用的连续激光和长脉冲激光均为基模

高斯光束(TEM₀₀),波长均为 1064 nm。设作用激光的功率为 P_0 ,光斑半径为 R ,则光束的功率密度分布可表示为^[13]

$$P(r) = \frac{2P_0}{\pi R^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (6)$$

式中 r 为测试点到光斑中心的距离。

通常金属表面对激光的吸收发生在表层 0.1~5.0 μm 的范围内,因此,激光在金属中的热作用可以看成是发生在表面一个无限薄的区域内,故把激光热源当成表面热源。在 ANSYS 中用热流密度来施加热流载荷。记铝合金板对 1064 nm 激光的吸收率为 $A(T)$,那么热流密度加载的载荷应为

$$P(r, T) = \frac{2P_0 A(T)}{\pi R^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{R^2}\right). \quad (7)$$

3.3 材料参数及吸收率的选取

利用 ANSYS 分析连续激光和长脉冲激光共同作用下铝合金的温度场时,主要用到的热物理参数有:导热系数、比热容、密度、表面换热系数、熔化潜热及铝板对激光的吸收率。参照(5)式,定义吸收率为温度的变量。2A12 的导热系数、比热容、密度、表面换热系数、熔化潜热由表 1 给出^[14]。

表 1 2A12 铝合金的热物理参数

Table 1 Thermal parameters of 2A12

Temperature /K	Specific heat capacity /[[J/(kg · K)]	Density / (kg/m ³)	Thermal conductivity / [W/(m · K)]	Melting point /K	Melting latent heat /(J/kg)
373	921				
473	1047				
573	1130	2800	193	911	4 × 10 ⁵
623	1172				

4 实验仿真

连续激光和长脉冲激光都沿着一 z 方向垂直入射于铝合金表面。辐照在试件表面的激光功率如图 3 所示,其中 τ 为连续激光与脉冲激光入射起始时刻的时间间隔。长脉冲激光的脉宽为 5 ms,频率为 20 Hz,脉冲个数为 10。运用参数化有限元分析技术(APDL)中的循环模式实现连续激光和长脉冲激光的加载。设置环境温度和试件的初始温度为 300 K。在选择合适的网格尺寸后,调节连续激光和长脉冲激光的光斑半径以及二者发射起始时刻的时间间隔 τ ,分析温度场随之变化规律。

4.1 网格尺寸的选择

在有限元分析中,单元划分的大小会影响分析

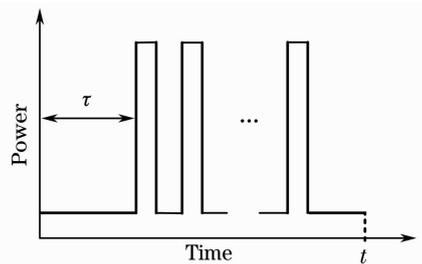


图 3 激光功率随时间的分布

Fig. 3 Distribution of laser power versus time

结果。如果选择的单元尺寸比较小,计算时间将增加;如果选择的单元尺寸比较大,计算结果的准确度将会下降。为了在求解准确度和计算时间之间寻找一个合适的网格尺寸,选择不同的网格尺寸进行分

析。分析时设定连续激光的功率为 125 W,长脉冲激光的能量为 10 J,两种激光光斑半径大小相同。通过改变光斑半径和网格尺寸,得到了不同网格密度下光斑中心点的最高温度,如图 4 所示。其中横坐标的值是单元尺寸与光斑半径的比值。由图 4 可知,对于不同的光斑半径,选择单元尺寸为光斑半径的 1/8 就能得到足够的计算精度。因此,为了平衡计算时间和计算精度,在接下来的计算中选用光斑半径的 1/8 作为载荷加载区域的单元尺寸。

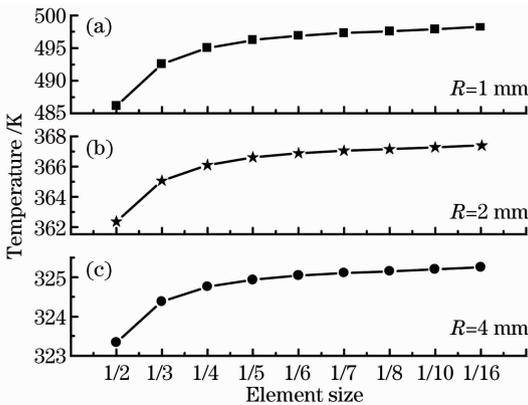


图 4 不同单元尺寸下中心点的最高温度
Fig. 4 Maximum temperatures of the center in different element sizes

4.2 时间间隔对材料温升的影响

通过调节连续激光和长脉冲激光时间间隔 τ ,改变长脉冲激光入射时靶材的温度分布,即连续激光在 τ 内辐照试件所产生的温度场。设连续激光的功率为 125 W,光斑半径为 0.25 mm;脉冲激光的能量为 10 J,光斑半径为 0.5 mm。图 5 给出了光斑辐照中心点温度随辐照时间的变化(当 $\tau=0.1$ s 时)。记脉冲作用前激光辐照中心处的温度为 T_1 ,脉冲作用后中心处的温度为 T_2 ,那么脉冲激光辐照期间中

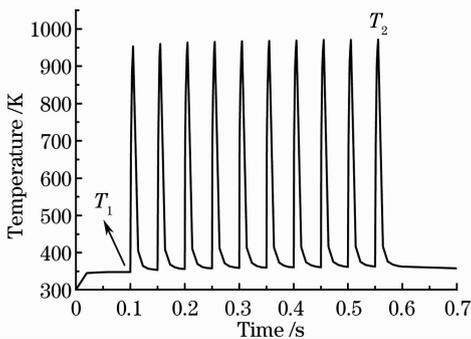


图 5 激光辐照中心点温度与时间关系曲线
(当 $\tau=0.1$ s 时)

Fig. 5 Temperature curve of the center versus time
(when $\tau=0.1$ s)

心点的温升 ΔT 应为 $T_2 - T_1$ 。

图 6 给出了连续激光与长脉冲激光以不同时间间隔作用下 T_2 的变化情况。从图中可以看出,随着 τ 的增大, T_2 近似呈线性增加。时间间隔 τ 越大,试件被预热得越充分,其对脉冲激光的吸收率就越大。因此随着时间间隔的增加, T_2 会逐渐增大。

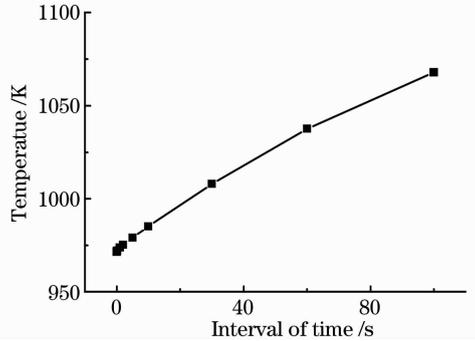


图 6 T_2 随时间间隔的变化曲线
Fig. 6 T_2 versus interval of time

图 7 给出了 ΔT 随时间间隔的变化规律。从图中可以看出,当 τ 小于 1 s 时, ΔT 随着时间间隔 τ 的增大迅速减小;当 τ 大于 1 s 时, ΔT 随着时间间隔 τ 的增大逐渐增大。这是因为铝合金的热传导系数较大,虽然随着 τ 的增大靶材吸收的激光能量越多,但是当激光刚辐照在铝合金上时,铝合金的温度梯度很大,吸收的激光能量有一部分以热传导的形式迅速向周围扩散。对于 125 W 的连续激光和 10 J 长脉冲激光共同作用于铝合金,在 τ 大于 1 s 时,脉冲激光所造成的温升才会逐渐增加。

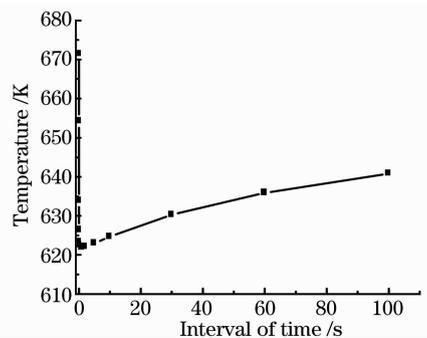


图 7 ΔT 随时间间隔的变化曲线
Fig. 7 ΔT versus interval of time

图 8 给出了不同时间间隔加载的情况下脉冲激光作用结束时刻铝合金 xz 平面上的温度分布。从图中可以看出,随着 τ 的增大,组合激光的热影响区域逐渐增大。

4.3 光斑半径对材料温升的影响

固定脉冲激光的光斑半径 r_{plused} ,调节连续激光的光斑半径 r_{cw} ,两束激光的时间间隔为 2 s,具体参

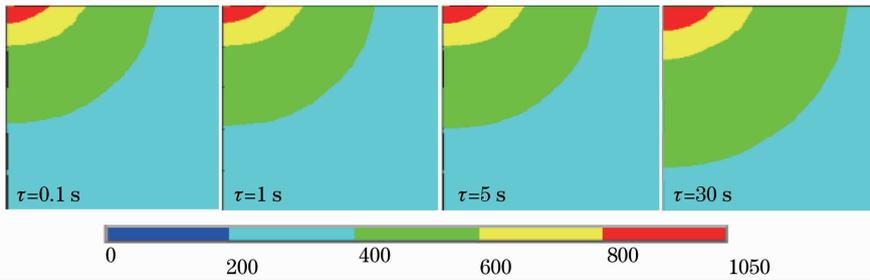


图 8 温度分布随时间间隔的变化

Fig. 8 Temperature distribution changes with intervals of time

表 2 连续激光参数

Table 2 Parameters of CW laser

	Long pulsed laser (10 J)		CW laser (125 W)				
Radius /mm	0.4	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
Power density /(MW/cm^2)	0.3979	1.5915	0.3979	0.0995	0.0249	0.0111	0.0062

数由表 2 给出。图 9 给出了不同连续激光半径作用下激光辐照中心点的最高温度 T_2 的变化情况，图 10 给出了对应情况下熔池的大小。由图 9、10 可知，当固定脉冲激光参数时， T_2 随 r_{cw} 的增大而下降，熔池尺寸随 r_{cw} 的增大而减小。通过仿真可知，对于脉宽为 5 ms，频率为 20 Hz 的长脉冲激光，当其功率密度达到 $0.3 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 时，才能使铝合金开始熔化。固定连续激光的功率，减小 r_{cw} 会增加辐照在铝合金表面的激光功率密度。由表 2 和图 10 可知，当连续激光的功率密度达到 $10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 量级时，采用连续激光预热能显著增大熔池尺寸，并适量提高中心点的温度。

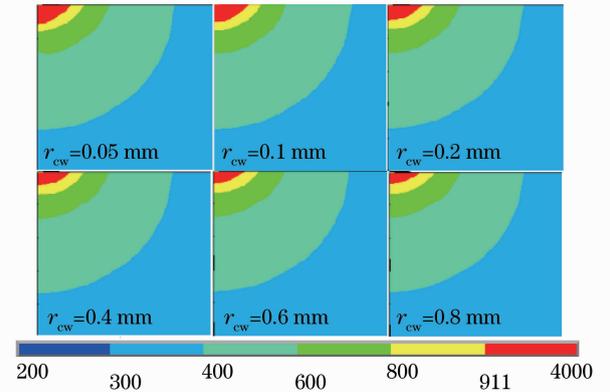


图 10 不同连续激光半径作用下的熔池

Fig. 10 Comparison of the molten pools for different radiuses of CW laser

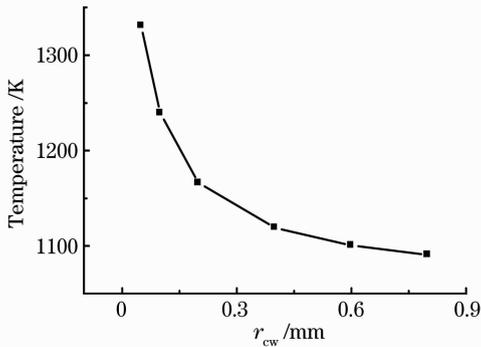


图 9 T_2 随连续激光光斑半径的变化曲线

Fig. 9 T_2 versus radius of CW laser

当连续激光的光斑半径不变时，调节脉冲激光

的光斑半径 r_{pulsed} ，两束激光的时间间隔为 2 s，具体参数由表 3 给出。图 11 给出了不同 r_{pulsed} 情况下激光辐照中心点的最高温度 T_2 的变化，图 12 给出了对应情况下熔池的大小。由图可知，当固定连续激光参数时，随着 r_{pulsed} 的增大， T_2 剧烈下降，熔池的尺寸也显著减小。由图 10、12 比较可知，熔池的大小和中心点的最高温度主要由功率密度较高的脉冲激光的参数决定，但是选择具有合适参数的连续激光预热，尤其是在连续激光的功率密度达到 $10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 量级时，预热能显著增大熔池的尺寸，并适量提高辐照中心点的温度。

表 3 长脉冲激光参数

Table 3 Parameters of long pulsed laser

	CW laser (250 W)		Long pulsed laser (8 J)				
Radius /mm	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Power density /(MW/cm^2)	0.199	5.093	1.273	0.566	0.318	0.204	0.141

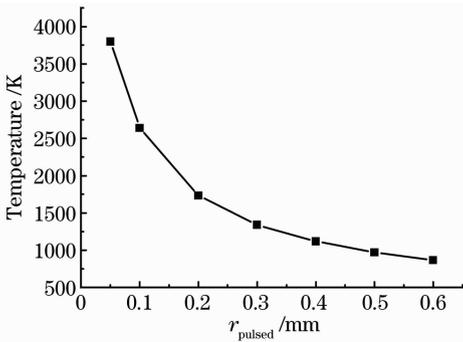


图 11 T_2 随脉冲激光光斑半径的变化曲线
Fig. 11 T_2 versus radiuses of pulsed laser

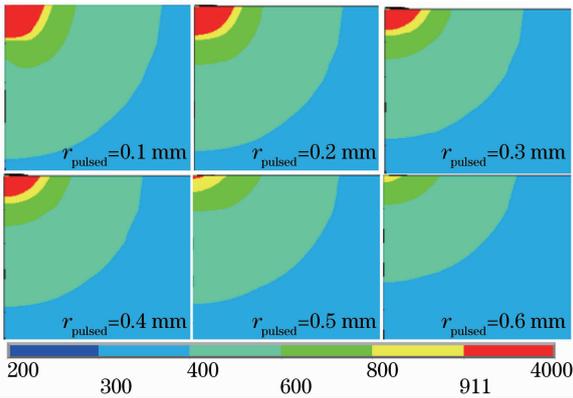


图 12 不同脉冲激光半径作用下的熔池

Fig. 12 Comparison of the molten pools for different radiuses of pulsed laser

5 结 论

针对联合使用长脉冲和连续激光的工作模式,在不同发射起始时刻的时间间隔和光斑半径组合的条件下,通过 ANSYS 仿真了 2A12 铝合金的温升过程。结果表明:1) 随着时间间隔的增大,激光辐照中心点的最高温度近似线性上升,激光影响区域逐渐变大。2) 当时间间隔大于某特定值时,脉冲激光所造成的温升才会逐渐增加。针对功率为 125 W,光斑半径为 0.25 mm 的连续激光和能量为 10 J,光斑半径为 0.5 mm 长脉冲激光共同作用于 2A12 铝合金,在 τ 大于 1 s 时,脉冲激光所造成的温升才会逐渐增加。3) 熔池的大小和中心点的最高温度主要由峰值功率较高的脉冲激光的参数决定,但是选择合适的连续激光预热铝合金,尤其是当连续激光的功率密度达到 10^5 W/cm^2 量级时,能显著增大熔池的尺寸,并适量提高辐照中心点的温度。

参 考 文 献

1 Chen Qinghua. Selection of absorption films and its application in infrared laser treatments of metallic materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1023~1026

陈庆华. 吸收膜的选择及其在红外激光金属表面处理中的应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1023~1026

2 Xu Guochang. Study of coating on metal surface in laser processing[J]. *Laser and Infrared*, 1997, **27**(1): 28~30

徐国昌. 激光加工中金属表面涂敷的研究[J]. *激光与红外*, 1997, **27**(1): 28~30

3 Li Ping, Wang Yu, Feng Guojin *et al.*. Study of silicon micro-structuring using ultra-short laser pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1688~1692

李平,王煜,冯国进等. 超短激光脉冲对硅表面微构造的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1688~1692

4 Chen Jun, Zhang Qunli, Yao Jianhua *et al.*. Influence of surface roughness on laser absorptivity[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 624~627

陈君,张群莉,姚建华等. 材料表面粗糙度对激光吸收率影响的研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(6): 624~627

5 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1783~1788

李俐群,陈彦宾,陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1783~1788

6 Li Liqun, Guo Wei, Tan Caiwang. Welding characteristics of AZ31B magnesium alloy/stainless steel dissimilar alloys by dual beam laser welding-brazing process[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0403002

李俐群,郭伟,檀财旺. AZ31B 镁合金/不锈钢异种合金双光束激光熔钎焊接特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0403002

7 A. Hess, R. Schuster, A. Heider *et al.*. Continuous wave laser welding of copper with combined beams at wavelengths of 1030 nm and of 515 nm[J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**: 88~94

8 Zeng Jiaolong, Lu Qisheng, Shu Bohong *et al.*. Combined damage effect of GaAs irradiated by 1.06 μm CW and pulse laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2): 217~230

曾交龙,陆启生,舒柏宏等. 1.06 μm 连续与脉冲激光对 GaAs 材料的联合破坏效应[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(2): 217~230

9 Li Li, Lu Qisheng. Temperature changes in PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(6): 912~916

李莉,陆启生. PC 型 HgCdTe 光电探测器在双波段组合激光辐照下的温升计算[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(6): 912~916

10 Xi Mingzhe, Yu Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1527~1532

席明哲,虞钢. 连续移动三维瞬态激光熔池温度场数值模拟[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1527~1532

11 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1801~1807

刘会霞,邢安,张惠中等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1801~1807

12 Chen Yanbei. Temperature Rise, Stress, Fluctuation of Stress and Evolution of Plastic Zone during Laser Heating of Metal Plate [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. 15~16

陈彦北. 金属板激光加热时的温升-应力-应力波动和塑性区演化[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. 15~16

13 Li Junchang. Diffraction of Laser and Calculation on Thermal Acting[M]. Beijing: Science Press, 2002. 344

李俊昌. 激光的衍射及热作用计算[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 344

14 Editorial Board of Practical Handbook of Engineering Materials. Practical Handbook of Engineering Materials(3) [M]. Beijing: Chinese Standard Publishing House, 2002. 39~83

工程材料实用手册编写委员会. 工程材料实用手册(第三册)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 39~83