

长脉冲与连续激光联合作用下铝合金的应力场仿真

肖 婧 何衡湘 夏惠军

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘要 为了给组合使用长脉冲与连续激光作用模式参数的选择提供依据,利用有限元软件 ANSYS 建立了组合激光辐照 2A12 铝合金的三维参数化有限元计算模型,进行了不同组合参数下温度场和应力应变场的计算。模拟结果表明,使用连续激光预热能显著增强长脉冲激光的作用效果。预热时间越长,材料的屈服时间(即从施加脉冲激光到材料发生塑性屈服的时间)越短,塑性变形以及屈服范围越大。在占空比为 10% 的长脉冲串作用下,导热系数较大的铝合金在脉冲间的温度和塑性应变积累并不明显。当激光功率在 10^4 W/cm² 量级时,对于同一参数的长脉冲激光,连续激光的预热时间比其功率密度对铝合金的影响更大。

关键词 激光技术;双光束;铝合金;预热;塑性屈服;应力场

中图分类号 O532+.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.0803009

Stress Simulation of Aluminum Alloy Irradiated by Long Pulsed Laser and Continuous Wave Laser

Xiao Jing He Hengxiang Xia Huijun

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

Abstract A three-dimensional finite element model is established to perform the thermo-elastic-plastic analysis on stress and deformation of 2A12 aluminum alloy irradiated by lasers with different parameters in ANSYS software. The results show that with an assistant continuous wave (CW) laser to preheat the material, the effect of long pulsed laser efficiently increases with the increase of preheat time, materials yield time shortens, plastic deformation and yield zone augrent. Irradiated by long pulsed laser with duty cycle of 10%, the temperature rise and deformation accretion of 2A12 aluminum alloy between pulses are not significant because of its high thermal conductivity. Increasing the preheat time is a more effective method than the power density increasing of CW laser to increase the plastic damage of material irradiated by the same long pulsed laser when their power densities are at 10^4 W/cm² level.

Key words laser technique; dual beam; aluminum alloy; preheat; plastic damage; stress field

OCIS codes 350.3850; 350.1820; 160.3900

1 引 言

在激光辐照下,金属材料吸收激光能量后温度迅速上升,温度梯度的存在使得材料内部不可避免地产生了热应力。当热应力达到金属在对应温度下的屈服强度时,材料将发生不可恢复的塑性变形;若热应力达到金属材料的强度极限,材料将会产生裂纹。工业中利用材料的塑性变形特性使得激光可用于弯曲加工^[1-2]。在军事上利用热应力导致的塑性变形和裂纹可实现激光对板件的热断裂破坏、受内压柱壳的热爆裂破坏以及热屈服失效等损伤效果^[3]。其中长

脉冲激光因具有较高的能量耦合效率而在工业^[4]和军事领域应用日渐广泛。若能掌握金属材料在长脉冲激光作用下其内部应力和应变的发展规律必将有利于推广长脉冲激光在工业和军事上的应用。

伴随着数值计算方法及实验条件的日益成熟,近十多年来人们对金属材料在激光作用下产生的塑性屈服和裂纹等力学效应进行了大量的研究。周益春等^[5-6]采用理论计算与实验相结合的方法研究了毫秒激光辐照在金属上所产生的鼓包和微裂纹等热应力损伤现象,论述了金属材料发生反冲塞破坏的主要

收稿日期: 2013-01-16; 收到修改稿日期: 2013-04-08

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

导师简介: 何衡湘(1968—),男,研究员,硕士生导师,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

机制。赵剑衡等^[7-8]分别采用解析法和数值法计算了强激光辐照下金属材料的应力分布,指出光斑中心是最有可能在热应力的作用下发生爆裂的位置。Yilbas 等^[1]采用数值计算与实验相结合的方法研究了激光弯曲 304 钢的塑性变形,模拟与实验所得到的温度和残余应力结果一致。组合激光概念提出后,人们又开始探索将这种激光作用模式应用于激光切割和激光焊接等领域。焦俊科等^[9]采用两束 CO₂ 激光进行切割玻璃的实验研究,结果表明双束激光切割比单束激光有更好的加工质量。李俐群等^[10]采用两束 CO₂ 激光焊接镁合金,分析了不同工艺参数对焊缝成形、接头力学性能和断裂行为的影响。肖婧等^[11]采用有限元法计算了长脉冲与连续激光联合辐照下铝合金的温度场,结果表明采用连续激光预热能显著增大熔池尺寸。但是针对长脉冲与连续激光联合作用模式,不同组合参数下金属材料的应力发展和塑性变形并未见相关报道。

本文利用有限元软件 ANSYS 仿真了长脉冲与连续激光组合辐照下 2A12 铝合金的应力应变发展状况,重点分析了不同组合参数下铝合金的屈服时间以及屈服范围的演变,为优化组合参数提供理论依据。

2 理论模型

2.1 热传导数学模型

组合激光辐照示意图如图 1 所示,圆饼状 2A12 铝合金的厚度 h 为 1 mm,半径 b 为 8 mm。连续激光作用于铝合金上表面中心点 O 处,连续激光预热一段时间 τ 后施加长脉冲激光, O 点激光功率密度随时间分布如图 2 所示。假设铝合金为各向同性材料,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。

激光能量在金属表面薄层被吸收,因此激光的作用按照边界条件处理

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

式中 $A(T)$ 是随温度变化的吸收率; $P(x,y,0,t)$ 是铝合金表面激光功率密度的时空分布,表达式为

$$P(x,y,0,t) = \begin{cases} P_{cw}(x,y,0) + P_{pulsed}(x,y,0), & \left(\tau + \frac{n}{\nu} \leq t \leq \tau + \frac{n}{\nu} + \tau_0\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \\ P_{cw}(x,y,0), & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $P_{cw}(x,y,0)$ 是连续激光的功率密度分布, $P_{pulsed}(x,y,0)$ 是长脉冲激光的功率密度分布, ν 为重复频率, τ 为预热时间。 τ_0 为脉冲宽度, n 为脉冲数。

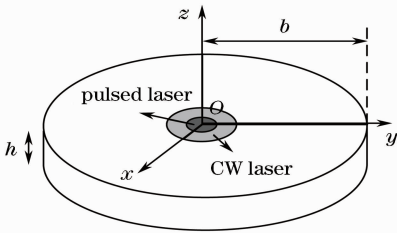


图 1 组合激光辐照示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combined lasers irradiation

2.2 热弹塑性本构关系

材料发生塑性变形后,其本构关系(即应力与应变之间的关系)是非线性的,必须以增量形式给出。描述超出弹性范围的材料塑性行为的塑性增量理论

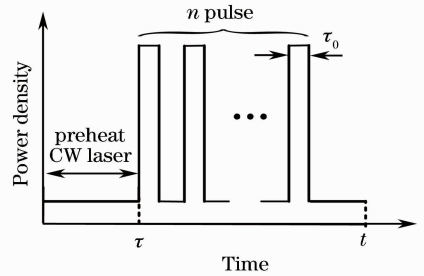


图 2 O 点激光功率密度随时间分布

Fig. 2 Distribution of laser power density at dot O

主要由三部分组成:屈服准则、硬化法则和流动法则。对于金属材料依据 Prandtl—Reuss 塑性流动增量理论和线性等向强化规律,可得到热弹塑性本构关系^[12]

$$\{d\sigma\} = [D]_{ep}\{d\epsilon\}, \quad (4)$$

式中 $[D]_{ep}$ 是材料的弹塑性矩阵,可描述为

$$[D]_{ep} = [D]_e - [D]_p = [D]_e - \frac{[D]_e[\partial\bar{\sigma}/\partial\{\sigma\}][\partial\bar{\sigma}/\partial\{\sigma\}]^T[D]_e}{H + [\partial\bar{\sigma}/\partial\{\sigma\}]^T[D]_e[\partial\bar{\sigma}/\partial\{\sigma\}]}, \quad (5)$$

式中 $[]$ 表示矩阵,大括号 $\{ \}$ 表示向量, H 为硬化模量, σ 是等效应力, $[D]$ 为弹性矩阵, $[D]_p$ 为塑性矩阵。

3 有限元模型

由于材料形状与载荷都沿 z 轴圆周对称,为了节省计算资源,在 ANSYS 中建立四分之一模型进行分析,如图 3 所示。在进行热-结构耦合场分析时采用顺序耦合方式。被激光辐照的材料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。模型的两个剖面(XOZ 面、 YOZ 面)需设置对称边界,并假设柱面的位移自由度为 0。

4 材料参数与激光参数

2A12 铝合金的熔点为 911 K,密度为 2800 kg/m^3 ,导热系数为 $193 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,熔化潜热为 $3.87 \times$

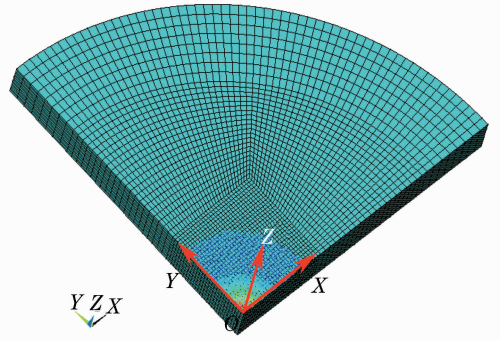


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite elements model

10^5 J/kg ,泊松比为 0.33,热膨胀系数为 $2.47 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,其他主要热学和力学性能如表 1 所示^[13]。假设材料为理想弹塑性材料,即认为铝合金在发生塑性屈服后没有强化。设材料的初始温度和环境温度均为 300 K。

表 1 2A12 铝合金的物理参数

Table 1 Physical parameters of 2A12 aluminum alloy

Temperature /K	293	373	398	448	473	573	623	673
Modulus of elasticity /Gpa	68		61	56	54	42		30
Yield stress $\sigma_{0.2}$ /Mpa	284		265	240	230	113		15
Specific heat capacity /[J/(kg·K)]		921			1047	1130	1172	

仿真所采用的连续激光和长脉冲激光参数根据实验现有激光器参数选取:两种情况的波长均为 1064 nm,并近似为高斯光束;长脉冲激光的脉宽为

5 ms,频率为 20 Hz,单脉冲能量为 10 J;连续激光的功率为 100 W。铝合金对两种激光的吸收率^[11]表达式为

$$A(T) = \begin{cases} 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} T}, & (273 \text{ K} \leq T < 933 \text{ K}) \\ 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} T}, & (933 \text{ K} \leq T) \end{cases} \quad (6)$$

分析时通过调节 τ 来改变连续激光的预热时间;通过调节两束激光的光斑半径来改变二者的功率密度,以保证辐照在材料表面的激光总能量一致。

5 计算结果及分析

5.1 脉冲间等效塑性应变的积累

连续激光的功率为 100 W,光斑半径为 0.5 mm;长脉冲激光的能量为 10 J,光斑半径为 1 mm,脉冲个数为 3。在连续激光预热 2 s 后施加长脉冲激光。图 4 给出了上表面中心点 O 的温度 T 、等效应力 σ 和等效塑性应变 ϵ_{ep} 随时间的变化。从图中可以看出,第一个脉冲作用时, O 点的等效应力先上升,到 2.0005 s 时(虚线 a)发生塑性屈服,产生塑性变形,等效应力得到释放并开始下降,材料进入塑性阶段,根

据塑性增量理论可知此后的应力应变状态将依赖于整个加载历史。在 2.005~2.05 s 期间,由于没有脉冲激光作用,铝合金的温度迅速下降,连续激光的功率密度不足以维持铝合金继续产生塑性应变,等效应力逐渐回升。在第二个脉冲作用初期,温度迅速上升,等效应力却迅速下降,这是因为第一个脉冲已使材料产生塑性变形,此时温度的升高反而使材料应力得到释放;直到 2.054 s(虚线 b)中心点的温度上升到第一个脉冲作用结束时的温度时, O 点才继续产生塑性变形。第 3 个脉冲作用期间,中心点的温度、等效应力和塑性应变的变化规律与第二个脉冲作用期间一致。从图 4 可以看出,在占空比为 10% 的长脉冲串作用下,材料的温度和塑性应变积累并不明显,所以在接下来的分析中取脉冲的个数为 1。

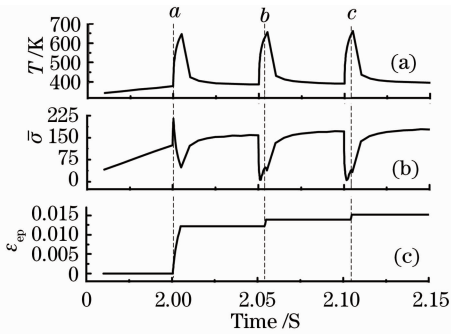


图 4 O 点的 (a) 温度、(b) 等效应力与 (c) 等效塑性应变随时间的变化曲线

Fig. 4 (a) Temporal temperature, (b) von mises stress and (c) equivalent plastic strain at dot O versus time

铝合金内发生塑性屈服区域的演变可通过分析沿半径方向 (X 方向) 和深度方向 ($-Z$ 方向) 的应力应变状态得到。定义 X 方向上屈服范围为屈服半径, $-Z$ 方向上的屈服范围为屈服深度, 图 5 给出了第一个脉宽内屈服半径和屈服深度随时间的变化。从图 5 可以看出, 在一个长脉冲激光作用过程中, 铝合金发生塑性屈服后屈服范围逐渐增大, 且铝合金表面的塑性屈服范围始终比屈服深度要大。

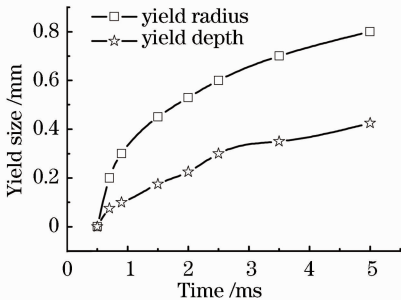


图 5 第一个脉宽内屈服范围的演变

Fig. 5 Temporal variation of plastic zone in the first pulse

5.2 预热时间对应力应变场的影响

长脉冲激光光斑半径为 1 mm, 能量为 10 J, 其功率密度为 0.637 MW/cm^2 ; 连续激光的功率为 100 W、光斑半径为 0.5 mm, 其功率密度为 0.127 MW/cm^2 。通过 ANSYS 软件仿真可知, 对于前者在激光辐照了 4.2 ms 后铝合金发生塑性变形, 一个脉冲结束后铝合金的最大塑性应变为 7.6×10^{-4} , 屈服半径为 0.24 mm, 屈服深度为 0.12 mm; 对于后者, 在激光辐照了 5 s 左右后铝合金才发生塑性变形。组合使用具有以上参数的两种激光, 将连续激光的预热时间 τ 由 0 逐渐增大至 5 s, 分析在不同预热时间下铝合金的响应。

在高斯激光作用下, 激光辐照中心点 (即 O 点)

温升最大, 将最先发生塑性屈服, 定义施加长脉冲激光到 O 点发生塑性屈服的时间为材料的屈服时间。图 6 依次给出了不同预热时间下铝合金的屈服时间、O 点的塑性应变、O 点发生屈服时的温度以及铝合金的屈服范围。从图 6(a) 可知, 与单独使用长脉冲激光作用相比, 在有连续激光预热 0~5 s 的情况下铝合金的屈服时间由 4.2 ms 缩短到 2.6 ms 内, 且随着 τ 的增大, 屈服时间迅速降低。从图 6(b) 可知, 在连续激光预热后, O 点的最大塑性应变由 7.6×10^{-4} 上升至 $3.2 \times 10^{-3} \sim 3.8 \times 10^{-2}$ 范围内, 且随着 τ 的增大, 塑性应变也迅速上升。由图 6(c) 可以看出, 随着预热时间的增长, 材料被预热得越充分, 热软化越严重, 材料发生塑性屈服时的温度线性降低。这从侧面反映了增大预热时间能使更多的激光能量用于材料产生不可恢复的塑性变形。由图 6(d) 可知, 预热后铝合金的屈服半径由 0.24 mm 增大至 0.4~2.08 mm 范围内, 屈服深度由 0.12 mm 增大至 0.18~0.99 mm 范围内。由此可知, 预热连续激光的存在能显著增大长脉冲激光的作用效果。预热时间越大, 铝合金的屈服时间越短, 而屈服范围和中心点的塑性应变也越大

5.3 不同光斑大小下铝合金的应力应变场

对于组合使用能量为 10 J 的长脉冲激光和功率为 100 W 的连续激光, 分别考虑两种情况: 1) 固定连续光斑半径 r_{cw} , 改变脉冲激光光斑半径 r_{pulsed} ; 2) 固定脉冲激光光斑半径 r_{pulsed} , 改变连续激光光斑半径 r_{cw} 。对于情况 1), 通过调节 r_{pulsed} , 改变铝合金表面的激光功率密度分布, 分析在相同预热条件下不同功率密度的长脉冲激光对 2A12 铝合金应力应变场的影响。两束激光的时间间隔为 2 s, 具体激光参数由表 2 给出。

图 7 依次给出了调节 r_{pulsed} 时铝合金的屈服时间、O 点的塑性应变、铝合金的屈服范围随之的变化规律。在图 7(a)、(b) 中, 随着脉冲激光光斑半径的减小, 屈服时间急剧减小, 塑性应变逐渐增大。在图 7(c) 中, 随着光斑半径的缩小, 铝合金内部的屈服深度呈线性增大趋势, 而表面的屈服半径也逐渐增大; 当长脉冲激光的功率密度达到 0.1 MW/cm^2 时, 铝合金表面的屈服范围近似等于长脉冲激光光斑大小。通过对比不同 r_{pulsed} 情况下的屈服状态发现, 在相同激光能量和预热条件下, 脉冲激光光斑越小, 功率密度越高, 材料越早发生塑性屈服, 塑性应变量和屈服范围越大。

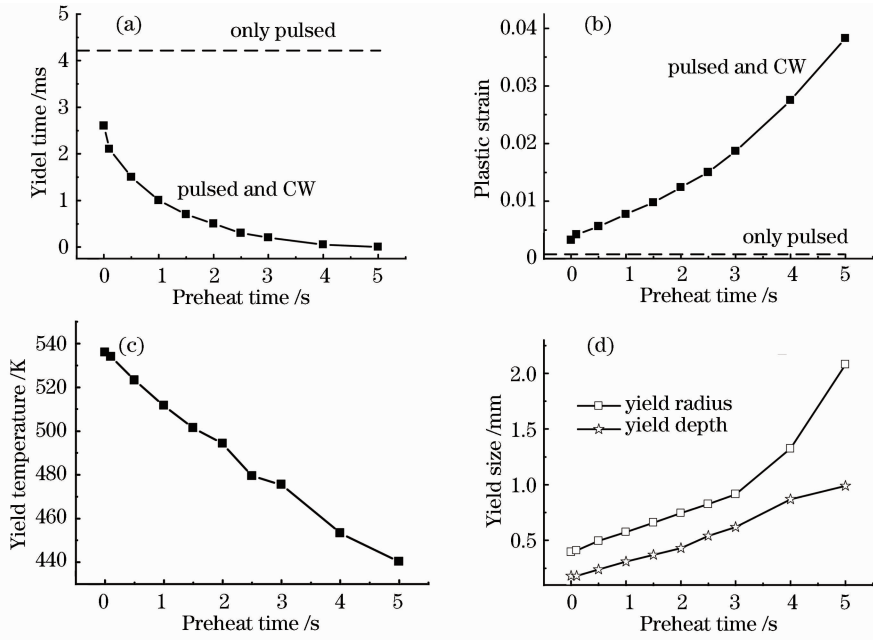


图 6 不同预热时间作用下铝合金的响应。(a) 屈服时间;(b) O 点的塑性应变;(c) O 点屈服温度;(d) 屈服范围
 Fig. 6 Response of aluminum alloy with different preheat time. (a) Yield time; (b) equivalent plastic strain at O dot;
 (c) yield temperature; (d) yield size

表 2 激光参数

Table 2 Parameters of laser

	CW laser (100 W)				Long pulsed laser (10 J)									
Radius /mm	0.5	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6				
Power density /(10^3 W/cm 2)	12.7	99.5	78.6	63.7	62.6	44.2	37.7	32.5	28.3	24.9				

对于情况 2), 固定脉冲激光光斑半径 r_{pulsed} , 通过调节连续激光的光斑半径 r_{CW} 来改变铝合金表面的激光能量分布, 分析对于同一参数的长脉冲激光

与不同功率密度的连续激光共同作用时 2A12 铝合金应力应变场。两束激光的时间间隔为 2 s, 具体参数由表 3 给出。

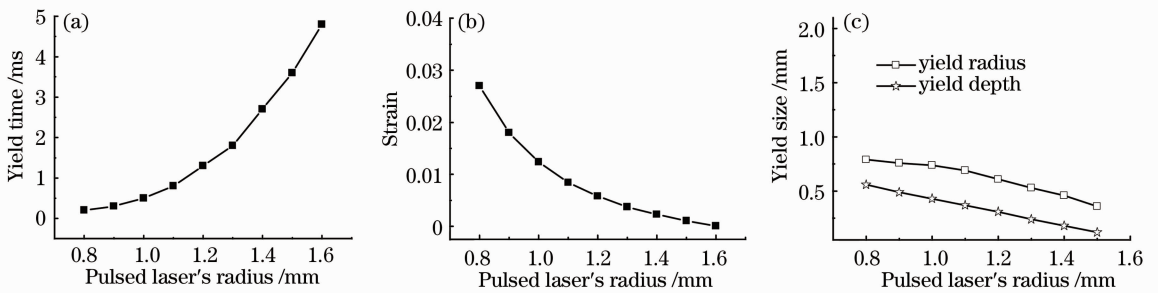


图 7 不同长脉冲激光光斑半径下铝合金的响应。(a) 屈服时间;(b) O 点的塑性应变;(c) 屈服范围

Fig. 7 Response of aluminum alloy with different r_{pulsed} of long pulsed laser. (a) Yield time;
 (b) equivalent plastic strain at dot O ; (c) yield size

表 3 激光参数

Table 3 Parameters of laser

	Long pulsed laser (10 J)						CW laser (100 W)								
Radius /mm	1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	2.0	2.5			
Power density /(10^3 W/cm 2)	63.7	79.6	35.4	12.7	5.0	3.2	2.6	2.2	1.9	1.4	0.8	0.5			

图 8 给出了改变连续激光光斑半径时铝合金的屈服时间、 O 点的塑性应变和屈服范围。随着 r_{CW} 逐

渐增大, 铝合金的屈服时间也逐渐增大, 而中心点的塑性应变逐渐降低, 并趋于平稳, 铝合金的屈服范围

变化不大。对比分析图 6 与图 8 可知,当激光功率在 10^4 W/cm^2 量级时,对于同一参数的长脉冲激光,连续激光的预热时间比其功率密度对铝合金的影响更大。对比分析图 6、7 与图 8 可以发现,对于联合使用长脉冲与连续激光这种组合模式,铝合金

的屈服时间受长脉冲激光的功率密度影响最大,预热时间次之,连续激光的功率密度影响较小;塑性应变和屈服范围受预热时间影响最大,长脉冲激光的功率密度次之,连续激光的功率密度最小。

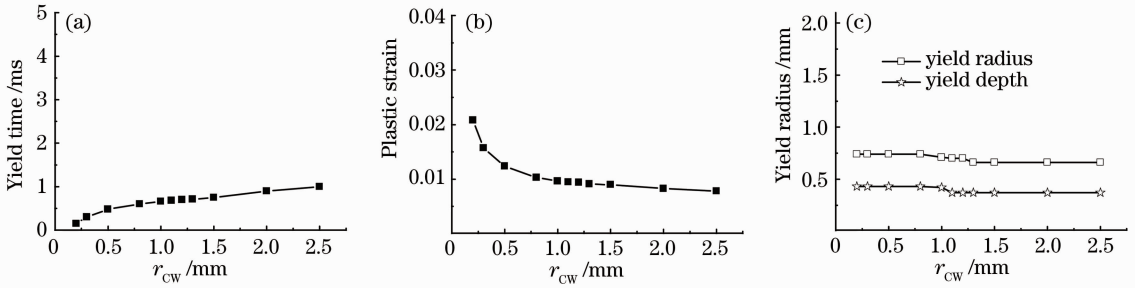


图 8 不同连续激光光斑半径下铝合金的响应。(a) 屈服时间;(b) O 点的塑性应变;(c) 屈服范围

Fig. 8 Response of aluminum alloy with different r_{cw} of CW laser. (a) Yield time; (b) equivalent plastic strain at dot O; (c) yield size

6 结 论

针对联合使用长脉冲和连续激光的工作模式,利用有限元软件 ANSYS 计算了在不同组合参数作用下 2A12 铝合金的温升、应力和塑性变形。结果表明:1)材料的屈服时间、塑性变形以及屈服范围受激光的功率密度和预热时间影响较大;2)在占空比为 10% 的长脉冲串作用下,导热系数较大的铝合金在脉冲间的温度和塑性应变积累并不明显;3)当激光功率在 10^4 W/cm^2 量级时,对于同一参数的长脉冲激光,连续激光的预热时间比其功率密度对铝合金的影响更大。

参 考 文 献

- 1 S B Yilbas, A F M Arif, B J Abdul Aleem. Laser bending of AISI 304 steel sheets thermal stress analysis [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(2): 303-309.
- 2 Ding Lei, Liu Huixia, Wang Hejun, *et al.*. Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet metal laser forming with semiconductor laser [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2143-2148.
丁磊,刘会霞,王鹤军,等.铝-锂合金薄板半导体激光弯曲成形试验研究[J].中国激光,2010,37(8):2143-2148.
- 3 Du Xiangwan. Essentials of Laser for High Technology [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003. 590-592.
杜祥琬.高技术要览(激光卷)[M].北京:中国科学技术出版社,2003. 590-592.
- 4 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Zhou Qiuju, *et al.*. Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9): 1361-1365.
吴东江,马广义,周秋菊,等.长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验[J].光学精密工程,2007,15(9):1361-1365.
- 5 Zhou Yichun, Duan Zhuping, Xie Bomin. The analytical study on the laser induced reverse plugging effect by using the classical elastic plate theory (II)——reverse-bulge motion [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1996, 17(7): 607-620.
周益春,段祝平,解伯民.反冲塞效应的热弹性理论分析(II)——反鼓包运动[J].应用数学和力学,1996,17(7):

- 607-620.
- 6 Yin Yihui, Yan Yixia, Chen Yuze, *et al.*. Analysis of the reverse plugging of a thin plate irradiated by long pulsed laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(1): 70-76.
尹益辉,颜怡霞,陈裕泽,等.脉冲激光诱导的薄片反冲塞破坏分析[J].强激光与粒子束,2002,14(1):70-76.
- 7 Zhao Jianhen, Zhang Guanren, Liu Xufa. Numerical simulation of the temperature distribution on a tank wall under an intensive laser loading [J]. Chinese J High Pressure Physics, 1996, 10(4): 44-49.
赵剑衡,章冠人,刘绪发.强激光辐照下柱壳温度场的数值模拟[J].高压物理学报,1996,10(4):44-49.
- 8 Qiang Xiwen. Investigation on mechanical effects of laser-targets interaction [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(3): 141-144.
强希文.强激光与靶材相互作用的力学效应研究[J].激光与红外,2000,30(3):141-144.
- 9 Jiao Junke, Wang Xinbing, Li Youping. Experimental study of cutting glass by dual CO₂ laser beams [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1808-1813.
焦俊科,王新兵,李又平.双束 CO₂ 激光切割玻璃的实验研究[J].中国激光,2008,35(11):1808-1813.
- 10 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.
- 11 Xiao Jing, He Hengxiang, Xia Huijun, *et al.*. Temperature field simulation on aluminum alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1103002.
肖婧,何衡湘,夏惠军,等.长脉冲激光与连续激光联合辐照铝合金的温度场仿真[J].中国激光,2012,39(11):1103002.
- 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. 15-46.
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. 15-46.
- 13 Editorial board of Practical Handbook of Engineering Materials. Practical Handbook of Engineering Materials (3) [M]. Beijing: Chinese Standard Publishing House, 2002. 569-580.
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. 569-580.