

TC4 钛合金激光冲击强化数值模拟

王博涵¹, 程礼^{1,2}, 丁均梁¹, 崔文斌¹, 王长凯¹, 李冬春¹

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 采用连续显式动态冲击策略对航空用 TC4 钛合金进行激光冲击强化数值模拟研究。根据冲击波能量变化曲线确定单次冲击求解时间为 3000 ns, 并分析了应力波传播过程。在此基础上开展多点冲击模拟, 分析了功率密度、冲击次数和光斑搭接率对残余应力、应变场的影响。得出增加功率密度对增大表面残余压应力的效果更好; 增加冲击次数对增大残余压应力影响深度的效果更好; 50% 光斑搭接率有效地避免了冲击不均匀和搭接空隙现象。实验和仿真所得的试件表面残余压应力变化趋势相同, 数值大小基本吻合。冲击 1, 3 次时, 两者的误差分别为 4.1%、2.6%, 说明仿真结果具有一定的参考意义。

关 键 词: 激光冲击强化; TC4 钛合金; 应力波; 残余应力; 塑性应变

中图分类号: V261.8; V252.2

文献标志码: A

Numerical simulation on laser shock peening of TC4 titanium alloy

WANG Bohan¹, CHENG Li^{1,2}, DING Junliang¹, CUI Wenbin¹,

WANG Changkai¹, LI Dongchun¹

(1. Aeronautics Engineering College,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engines, Beijing 100191, China)

Abstract: The continuous explicit dynamic impact strategy was used to carry out the numerical simulation study on laser shock peening of TC4 titanium alloy for aviation. According to the shock wave energy change curve, the solution time 3000 ns of a single shock was determined, and the stress wave propagation process was analyzed. On this basis, a multi-point impact simulation was carried out, and the effects of power density, impact times and spot overlap rate on residual stress and strain field were analyzed. It was concluded that increasing the power density had a better effect on increasing the residual compressive stress on the surface; increasing the number of impacts had a better effect on increasing the depth of the residual compressive stress; the 50% spot overlap rate effectively avoided uneven impact and overlap gaps phenomenon. The change trend of the residual compressive stress on the surface of the specimen obtained by the experiment and the simulation was the same, and the

收稿日期: 2020-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB057400)

作者简介: 王博涵(1997—), 男, 硕士生, 主要从事超高周疲劳、激光冲击强化研究。

通信作者: 程礼(1963—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事结构强度与振动、超高周疲劳研究。

E-mail: cheng_qiaochu@foxmail.com

引用格式: 王博涵, 程礼, 丁均梁, 等. TC4 钛合金激光冲击强化数值模拟[J]. 航空动力学报, 2021, 36(5): 959-968. WANG Bohan, CHENG Li, DING Junliang, et al. Numerical simulation on laser shock peening of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(5): 959-968.

numerical value was basically consistent. When the impact was 1 and 3 times, the errors of these two were 4.1% and 2.6%, respectively, indicating that the simulation results have certain reference significance.

Key words: laser shock peening; TC4 titanium alloy; stress wave; residual stress; plastic strain

激光冲击强化(LSP)是指利用高能激光束在金属构件表面和次表面诱导产生有益的残余压应力的表面工程与改性方法。与传统喷丸方法相比,LSP引入的残余压应力层深度大、数值高,同时对表面粗糙度影响小。高额残余压应力场的存在能够提高裂纹萌生^[1]和扩展寿命^[2],增加部件表面疲劳失效的抗力^[3],影响部件的振动特性^[4]。同时,LSP引入的相变^[5]、高密度位错^[6]、孪晶^[7]和表层晶粒细化甚至纳米晶^[8],一定程度上能提高部件疲劳性能。

航空发动机工作过程中,由于气流扰动、流场畸变和转子不平衡等因素,叶片和叶盘容易诱发高频振动,进而引起结构出现疲劳损伤乃至断裂破坏,给飞行安全带来严重隐患^[9]。针对此问题,美国于 20 世纪 90 年代提出将 LSP 技术作为改善航空发动机零部件疲劳性能的关键技术措施,并陆续应用于 F101、F110、F404、F119 等发动机风扇/压气机叶片上,提高叶片前缘损伤容限 15 倍以上^[10]。我国于 2008 年开始 LSP 技术工程应用,目前已初具规模^[11-13]。但由于起步较晚,LSP 技术尚未发展成熟,工艺设计和工程应用过程中缺乏理论依据和数据参考。

由于实验成本昂贵,数值模拟技术已成为研究 LSP 的有效手段。1999 年,Braisted 等^[14]利用 Abaqus 有限元软件实现了激光冲击强化数值模拟,分析了冲击波在 Ti-6Al-4V 钛合金内的传播行为,预测了 35CD4 不锈钢表面和截面残余应力场分布。随着计算机的快速发展,LSP 数值模拟研究方法日渐成熟。目前国内外大多数学者采用“显示动态+隐式静态”两步分析法进行数值模拟,对于多点冲击来说工作量大且效率较低。为提高 LSP 数值模拟效率及计算精度,有学者提出一种连续显式动态冲击仿真策略^[15-16],为多点冲击数值模拟提供了一种思路。

本文通过连续显式动态冲击策略对航空用 TC4 钛合金进行 LSP 数值模拟研究。阐述了单点冲击时应力波传播、衰减、反射、耦合过程,确定了单次冲击求解时间;进一步分析了多点冲击时功率密度、冲击次数和光斑搭接率对残余应力、应

变场的影响;并通过实验验证了模拟结果的准确性。所做工作为 TC4 钛合金 LSP 工艺设计和工程应用提供了理论依据和数据参考。

1 数值模拟

1.1 有限元模型的建立

LSP 数值模拟过程分为冲击时材料的动态塑性变形和冲击后的静态回弹两部分,其中动态计算结果需设置成静态分析的初始状态。通过对多次连续冲击结果进行整体动态应力平衡,模拟效率大幅度提升,同时能保证残余应力的计算精度^[15-16],LSP 数值模拟流程如图 1 所示。

本文仿真对象为经过锻造(加热至 985 ℃以 39.3%变形量锻造 15 min)和退火热处理(加热至 720 ℃并保温 1 h)后的航空用 TC4 板材,其力学性能参数如表 1 所示,其中, ρ 为材料密度, σ_b 为拉伸强度, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, E 为弹性模量, ν 为泊松比。

激光冲击波作用下材料会发生超高应变率($>10^6/s$)动态塑性变形,在现有描述材料高应变率条件下的经验本构方程中,Johnson-Cook(J-C)模型综合考虑了应变、应变率和温度等因素,广泛应用于高速冲击、爆炸冲击等动态数值分析^[17]。其表达式为

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*)[1 - (t^*)^m] \quad (1)$$

其中 ϵ 代表等效塑性应变, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 是无量纲塑性应变率; $t^* = (t - t_0)/(t_m - t_0)$ 为无量纲温度; t_0 为室温; t_m 为熔点;参数 A 为初始屈服应力、 B 和 n 为应变硬化模量和硬化指数; C 为应变率强化参数; m 为热软化指数。表 2 为 TC4 钛合金 J-C 模型参数^[18]。

为满足下一步 3 点弯曲超声疲劳试验要求(20 kHz 条件下固有振动模态为一维横向弯曲振动),按等截面梁的横向振动理论开展试件设计。设定宽度 $b=10\text{ mm}$ 、厚度 $h=4\text{ mm}$ 和倒角 $R=1\text{ mm}$,按文献[19]中公式求出试件长度 $L=31.6\text{ mm}$ 。图 2 为 TC4 试件模态分析所得的等效应力云图,在 20 017 Hz 谐振条件下,试件底端中间段

约 10 mm 承受最大拉应力,确认为危险区域。

有研究表明^[20],冲击区域边缘会形成平衡拉应力,易造成应力集中和应力突变;累积的宏观塑性变形会导致边缘横向扩展、鼓包,从而影响强化件疲劳性能。倒角的设计能有效地减弱应力集中和应力突变现象,但倒角的存在很可能导致试件

在冲击过程中发生侧面烧蚀,因此不能对危险区域进行 LSP 完全覆盖。同时由于试件较小,单面多次冲击会导致试件整体弯曲变形,因此需进行双面对称冲击。对于仿真所用的 50% 光斑搭接率,实际过程中要分 4 次进行才能冲击完成,冲击区域及过程如图 3 所示。

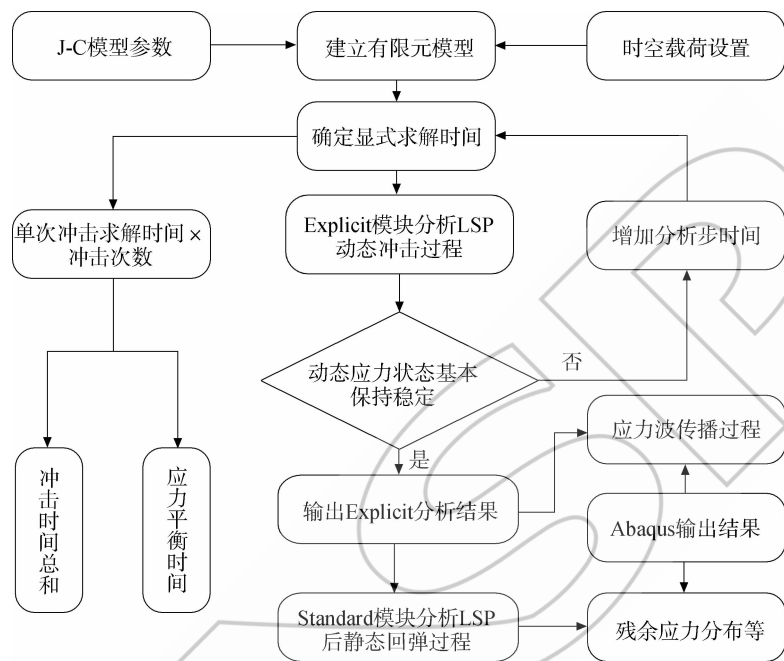


图 1 LSP 数值模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of numerical simulation of LSP

表 1 TC4 力学性能参数

Table 1 Mechanical properties parameters of TC4				
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	E/GPa	ν
4 400	986	903	120	0.33

表 2 TC4 钛合金 J-C 模型参数^[18]

Table 2 J-C model parameters of TC4 titanium alloy ^[18]					
材料	A/MPa	B/MPa	C	n	m
TC4	1 098	1 092	0.014	0.93	1.1

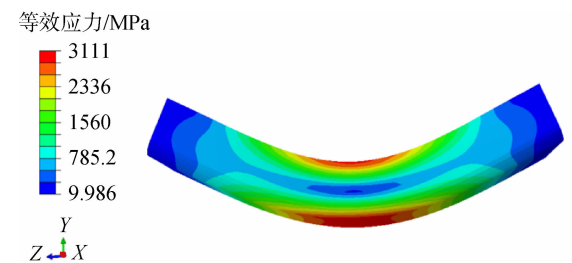


图 2 TC4 试件等效应力云图

Fig. 2 Equivalent stress cloud diagram of TC4 specimen

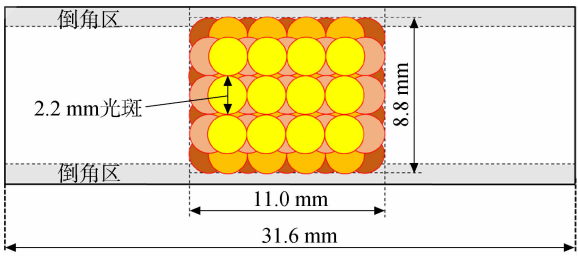


图 3 激光冲击区域及路径

Fig. 3 Laser impact region and path

1.2 冲击参数的确定

为保证强化效果,首先在理论上估算激光功率密度。在一维应变冲击压缩条件下,TC4 钛合金的动态弹性极限(Hugoniot elastic limit,HEL) σ_{HEL} 可以表示为^[21]

$$\sigma_{HEL} = \left(\frac{K}{2G} + \frac{2}{3} \right) \sigma_{0.2} \tag{2}$$

其中 K 为体积模量, G 为剪切模量。法国 Fabbro 等^[22]通过实验测试和理论推导提出了冲击波压力的半经验模型,我国学者对该模型进行了修正^[23-24],如公式(3)所示。

$$p_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{2\alpha}{3(2\alpha + 3)}} \sqrt{Z\beta I} \quad (3)$$

其中 $p_{\max}$ 为冲击波压力峰值(GPa), I 为激光功率密度(GW/cm^2), α 为效率系数, β 为吸收率, 当约束层和吸收层分别为黑胶带和工业纯水时, α 和 β 分别为 0.24 和 0.87; Z 为靶材、黑胶带和工业纯水的折合阻抗, 计算公式为

$$\frac{3}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \quad (4)$$

其中 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别为靶材、黑胶带和工业纯水的阻抗。研究表明^[25]: 当冲击波压力峰值达到材料的 $2.0\sigma_{\text{HEL}} \sim 2.5\sigma_{\text{HEL}}$ 时, 冲击效果较好。计算可得, 动态弹性极限 $\sigma_{\text{HEL}} = 1.8 \text{ GPa}$, 冲击波压力峰值范围为 $3.6 \sim 4.5 \text{ GPa}$, 阻抗 $Z = 0.9 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 功率密度范围为 $3.6 \sim 5.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

激光冲击波压力是一种特殊的时空载荷, 光斑内冲击波压力随径向距离服从高斯分布。根据聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)压电传感器测试结果, 冲击波压力随时间 T 变化曲线可简化为三角形进行压力相对化和离散化^[20], 如图 4 所示。

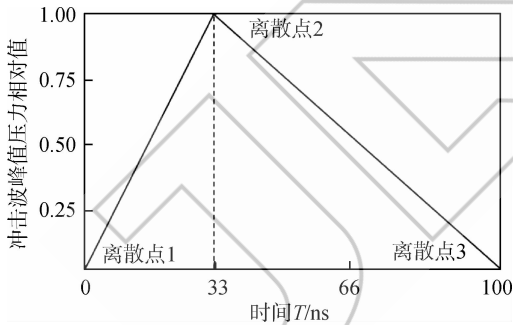


图 4 冲击波压力随时间变化曲线

Fig. 4 Shock wave pressure variation curve with time

为确定合适的显式求解时间, 对单点冲击过程进行有限元分析, 所得能量变化曲线如图 5 所示。当 $T=0 \sim 100 \text{ ns}$ 时, 材料动能 D 在冲击作用下迅速增大, 达到最大值 $D_{\max} = 31.7 \times 10^{-3} \text{ J}$ 后逐渐衰减; 当 $T > 3000 \text{ ns}$ 时, 动态应力变化基本保持稳定, 由此确定单次冲击求解时间为 3000 ns ; 为使计算结果收敛, 采用改进的 dense trajectories(DT)算法估计稳定增量步长, 同时设置场输出频率大于增量步数, 保证动态分析结果的连贯性。

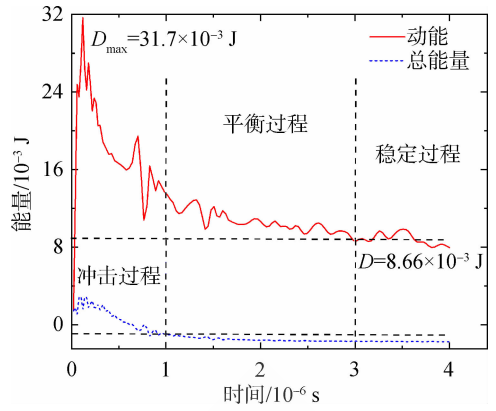


图 5 单点冲击能量变化曲线

Fig. 5 Variation curve of single point impact energy

2 结果及分析

2.1 应力波传播过程分析

当激光诱导产生的高压等离子体冲击波作用于试件表面时, 其内部会产生应力波, 并引起试件的超高应变率动态响应。本节以单点冲击为例说明应力波的传播过程, 冲击位置为试件底部中心, 功率密度选为 $3.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$, 对试件纵向截面上的应力波传播过程进行分析, 如图 6 所示。

在 79 ns 时处于激光冲击加载阶段, 压缩应力波及拉伸卸载波先后形成并开始传播; 610 ns 时, 压缩应力波传播至下表面; 随后反射为拉伸应力波后与拉伸卸载波耦合(图 6(c)); 920 ns 时, 拉伸卸载波反射为压缩应力波, 随反射拉伸波向上表面传播; 1074 ns 时, 反射拉伸波与后续压缩波耦合, 反射拉伸波峰值减小; 1352 ns 时, 拉伸应力波在上表面发生二次反射, 形成压缩应力波并与发射压缩波耦合; 耦合压缩波随后在上表面发生二次反射, 形成拉伸应力波, 并在其后形成卸载压缩波(图 6(g)); 1752 ns 时, 拉伸应力波与拉伸卸载波经下表面反射形成的压缩波相遇, 拉伸波峰值减小, 继续向下传播; 2275 ns 时, 拉伸应力波在下表面发生第 3 次反射; 其后, 从上下边界反射的应力波、应力波传播后形成的卸载波相互作用, 到 3000 ns 时, 应力波遍布试件整个纵向截面, 应力状态基本保持稳定; 静态回弹分析后, 试件表面及内部形成稳定的残余应力、应变场(图 6(l))。

由图 6 可知, LSP 引起试件的纳秒级动态响应过程十分复杂, 同时发现应力波在传播过程中逐渐衰减。由应力云图可得, 冲击点表面最大压应力值由 79 ns 时的 $1.98 \times 10^3 \text{ MPa}$ 减小到 3000 ns 时的 $2.42 \times 10^2 \text{ MPa}$, 静态分析后减小为

1.68×10² MPa,分析认为这是由于 LSP 过程中能量通过生成热、缺陷和其他方式进行耗散所致。

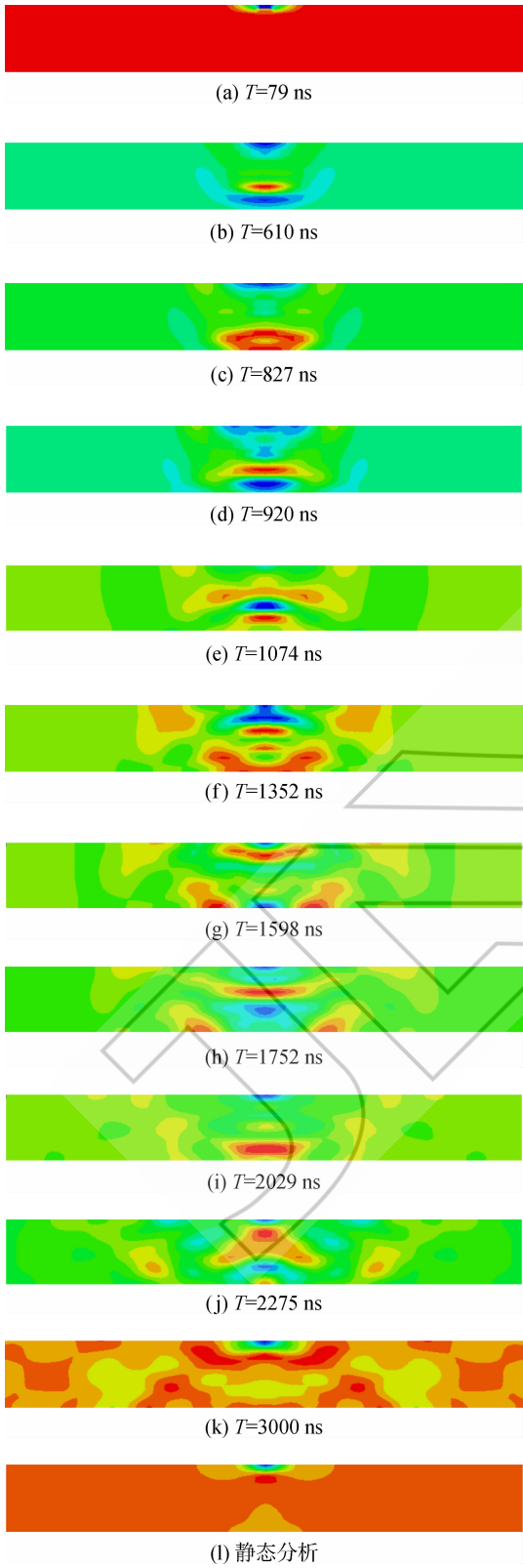


图 6 单点冲击应力波传播过程

2.2 功率密度对残余应力、应变场的影响

根据文中第 1.2 节所得最佳功率密度范围,选取功率密度为 2.6~6.6 GW/cm²、间隔 1 GW/cm²进行 LSP 数值模拟,试件表面和中间截面的残余应力 σ_x 、等效塑性应变分布如图 7 所示。

由图 7 可知,随着功率密度增大,产生的表面残余应力分别为 -100 MPa、-300 MPa、-430 MPa、-550 MPa、-620 MPa,增加幅度随功率密度的增大而减小;表面等效塑性应变分别为 0.0018、0.0039、0.0070、0.0100、0.0140,增加幅度随功率密度的增大保持不变。残余压应力层深度由 0.70 mm 增加到 1.16 mm,等效塑性应变层深度由 0.60 mm 增加到 1.40 mm,增加幅度均随着功率密度的增大而减小。

分析认为,功率密度增大使材料表面吸收的能量增大,表面塑性变形增大,因此表面残余压应力也增大;同时,材料在一定深度范围内的塑性变形随功率密度的增大逐渐趋于饱和,导致应力波继续向下传播的能力减弱,并产生反向稀疏波作

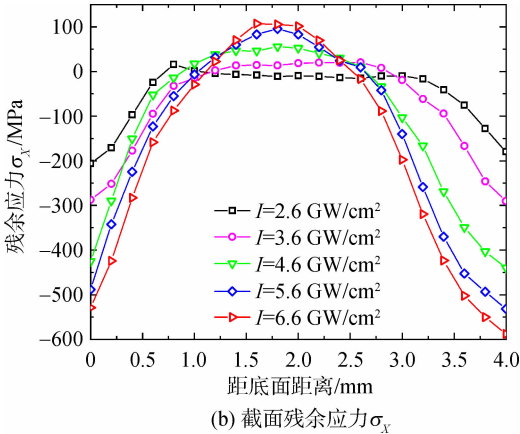
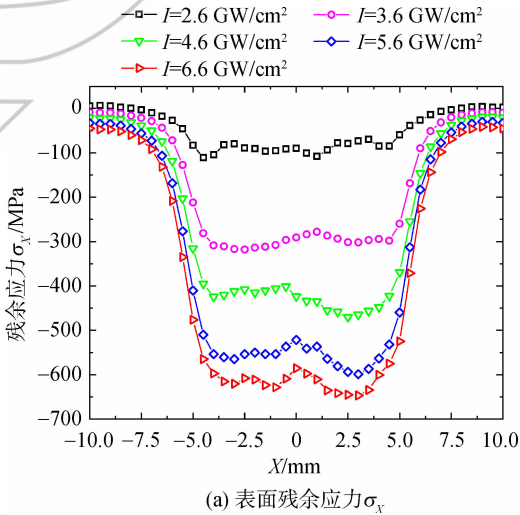


Fig. 6 Stress wave propagation process of single point impact

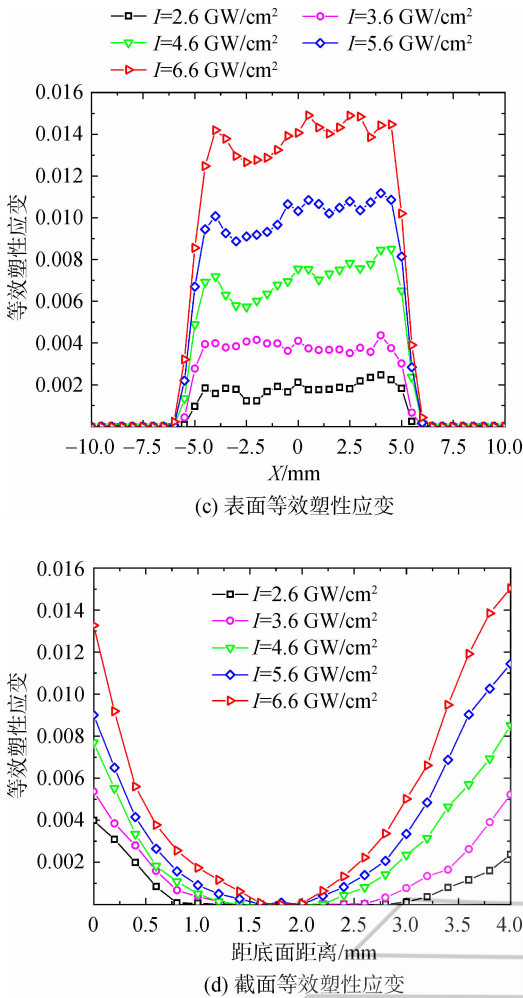


图 7 不同功率密度下残余应力、应变分布曲线
Fig. 7 Residual stress and strain distribution curves under different power densities

用于材料表面,使表面残余应力值增减幅降低。另一方面,更高的功率密度诱导产生了更大压力的冲击波,使相同深度下应力波的衰减程度更低,产生的残余压应力更大。随着应力波向下传播,更深一层的材料发生塑性变形,从而使得残余压应力层深度进一步提高。

2.3 冲击次数对残余应力、应变场的影响

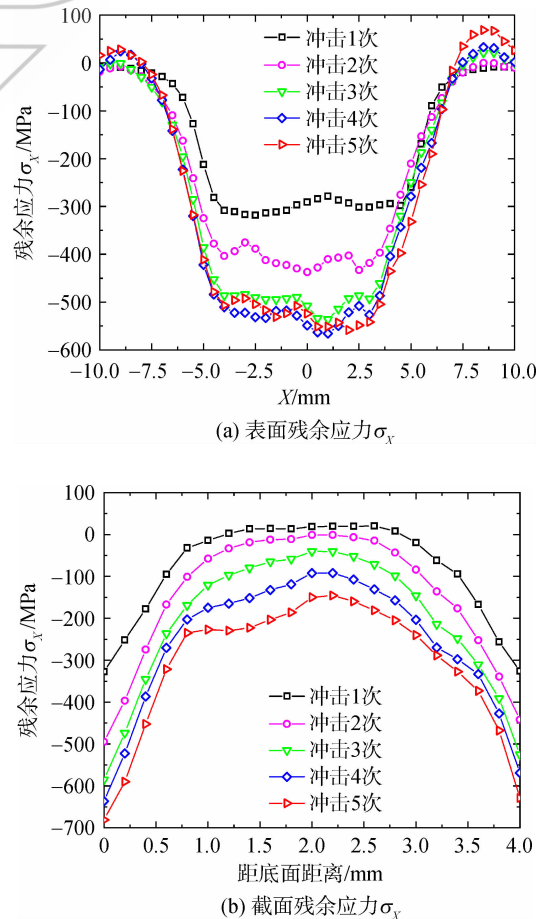
不同金属材料在固定功率密度下允许强化的次数是 LSP 生产中的关键参数之一。选取功率密度为 3.6 GW/cm^2 ,分别进行 1~5 次冲击,即冲击波作用时间依次加倍,图 8 为试件表面和中间截面的残余应力 σ_x 、等效塑性应变分布。

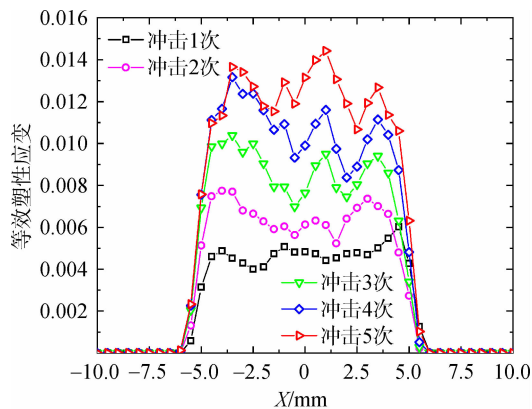
由图 8 可知,随着冲击次数增加,产生的表面残余应力分别为 -300 MPa、-400 MPa、-485 MPa、-510 MPa、-515 MPa,冲击 3 次以上的表面残余应力基本不再增加;表面等效塑性应变分别为 0.004 8、0.006 5、0.008 7、0.010 6、0.012 5,

增加幅度随功率密度的增大保持不变。残余压应力层深度由 1.14 mm 增加到 2.00 mm,等效塑性应变层深度由 1.20 mm 增加到 1.40 mm,增加幅度均随着功率密度的增大而减小。

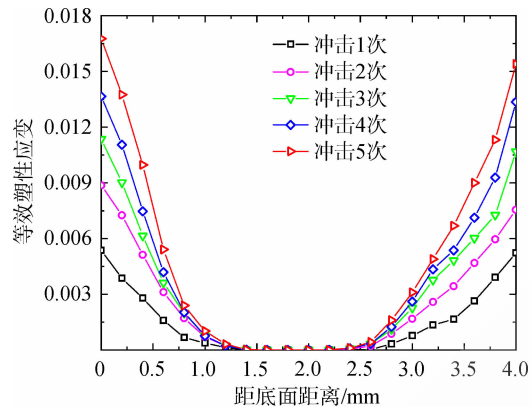
分析认为,冲击不大于 3 次时,在一定功率密度范围内,表面塑性变形随着冲击次数的增加而增大,因此表面残余压应力也增大。当冲击大于 3 次后,材料在一定深度范围内的塑性变形逐渐趋于饱和,并产生反向稀疏波。表面残余压应力由于反向稀疏波的塑性卸载作用增强而增幅降低,甚至局部减小。但在塑性变形饱和区以下的区域,多次冲击时应力波作用时间更长、影响深度更大,使得残余压应力随着冲击次数的增加逐渐增加,并在深度上遍布整个截面。

对比图 7、图 8 可知,增加功率密度和冲击次数均可以增大表面残余压应力和残余压应力影响深度。对于增大表面残余压应力,增加功率密度效果更好;对于增大残余压应力层深度,增加冲击次数效果更好。这是由于多次冲击时反向稀疏波的塑性卸载作用更强,不利于表面高额残余压应力的稳定;而增大功率密度虽然增大了冲击波压力,但单次冲击难以保证足够的应力波作用时间,





(c) 表面等效塑性应变



(d) 截面等效塑性应变

图 8 不同冲击次数下残余应力、应变分布曲线
($I=3.6\text{ GW/cm}^2$)

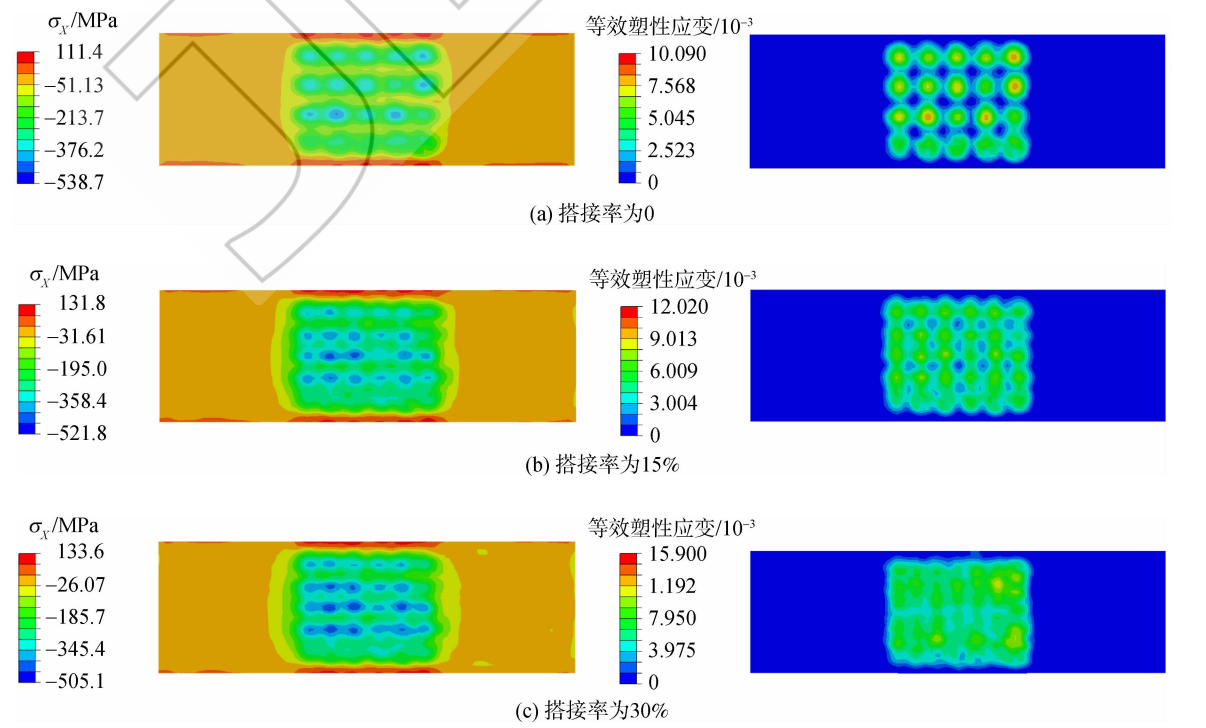
Fig. 8 Residual stress and strain distribution curve
under different impact times ($I=3.6\text{ GW/cm}^2$)

因此残余压应力层深度增加效果不明显。此外,材料会随着冲击次数的增多发生硬化,使动态屈服强度增大,塑性变形层深度增加更困难,如图 8(d) 所示。由此推断,残余压应力层深度不会随着冲击次数的增加而一直增大。

2.4 光斑搭接率对残余应力、应变场的影响

由于激光冲击波压力的空间分布特性,采用大量光斑搭接来覆盖待处理区域是实现大面积强化的必然选择。选取功率密度为 5.6 GW/cm^2 , 分别采用 0%、15%、30%、50% 四种搭接率进行 LSP 数值模拟,图 9 为试件表面残余应力 σ_x 、等效塑性应变(无量纲)云图。

当搭接率为 0 时,光斑中心区域的残余压应力最大,冲击点之间的残余压应力最小,局部甚至存在残余拉应力。这说明零搭接率易导致搭接空隙,并在金属表面形成残余拉应力,从而造成应力集中和应力突变,影响强化效果。当搭接率为 15% 时,残余压应力搭接空隙基本消除,冲击域内无残余拉应力产生,光斑边缘处的等效塑性应变因搭接而增加,但仍然存在明显的应变搭接空隙。当搭接率为 30% 时,残余压应力和等效塑性应变有所增大,应变搭接空隙基本消除。当搭接率为 50% 时,冲击域内形成的残余应力、应变进一步增大,且分布更加均匀。这说明采用 50% 光斑搭接率有效地避免了冲击不均匀和搭接空隙现象。实际生产中所采用的光斑搭接率要根据待强化部件



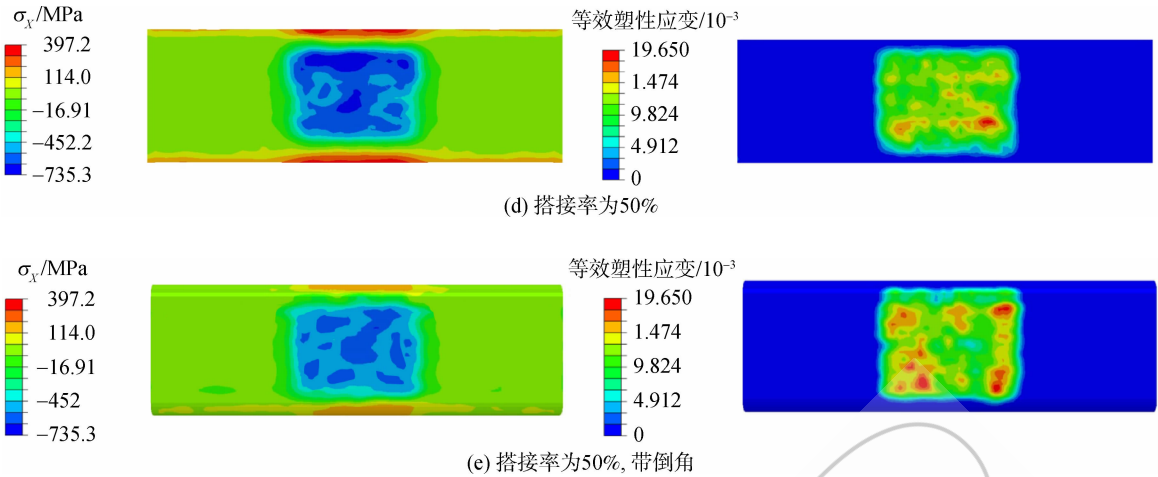


图 9 不同光斑搭接率下残余应力、应变云图

Fig. 9 Residual stress and strain cloud diagram under different spot lap ratios

或待强化区域所受的载荷来决定,但一般不能低于 50%。有学者认为^[26],光斑搭接的实质是搭接区域内冲击次数的增加,搭接率越高,在单个光斑内受到的冲击次数就越多,因此残余压应力就越大、越均匀。

此外,在冲击区域边缘发现了平衡拉应力,倒角区成为残余应力的过渡区,既保证了强化区域有均匀的残余应力场,又降低了拉应力水平,并使拉应力终止于试件的非关键部位(侧面)。

3 实验验证

实验采用西安天瑞达公司研制的 YD60-R200B 型激光冲击强化设备,最大输出能量为 6 J,波长为 1064 nm,脉宽为 18~20 ns,工作频率为 1~5 Hz,能连续稳定地进行 2.2 mm 光斑冲击。残余应力检测设备为加拿大 Proto 公司的 LXR D 型残余应力测试仪,测试方法为同倾法,衍射角 2θ 范围为 $139^{\circ}\sim142^{\circ}$,衍射晶面方向为 $\{213\}$,衍射波长为 1.541 nm,靶材为 Cu 靶。选取功率密度为 4.6 GW/cm^2 、光斑搭接率为 50%、分别冲击 1、3 次,测量试件表面沿 X 方向的 7 个点的残余应力,通过实验对 LSP 数值模拟结果进行验证。

图 10 为试件表面残余压应力的实验和仿真数据对比,发现实验结果与仿真结果的变化趋势相同,数值大小基本吻合。冲击 1、3 次时,仿真计算的冲击域内残余应力平均值分别为 -430 MPa 、 -617 MPa ,实验测得的平均值分别为 -413.2 MPa 、 -601.3 MPa ,误差分别为 4.1%、2.6%;说明仿真结果的准确定较高。

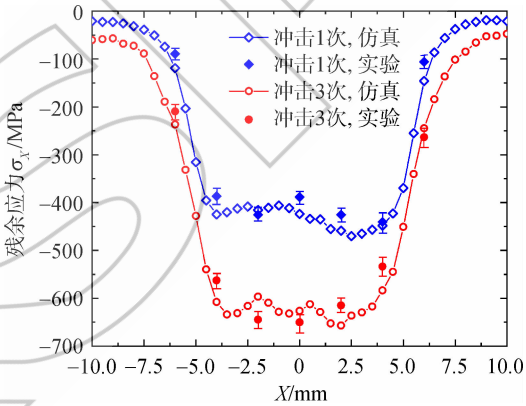


图 10 实验和仿真表面残余应力数据对比
($I=4.6\text{ GW/cm}^2$)

Fig. 10 Comparison of experimental and simulated surface residual stress results ($I=4.6\text{ GW/cm}^2$)

4 结 论

1) 采用了一种连续显式动态冲击仿真策略,通过能量变化曲线确定了单次冲击求解时间为 3000 ns,分析了单点冲击时应力波的传播过程,认为能量通过生成热、缺陷和其他方式进行耗散导致了应力波的衰减。

2) 增加功率密度和冲击次数均可以增大表面残余压应力和残余压应力影响深度。多次冲击时反向稀疏波的塑性卸载作用更强,不利于表面高额残余压应力的稳定,因此增加功率密度对增大表面残余压应力的效果更好;单次冲击难以保证足够的应力波作用时间,因此增加冲击次数对增大残余压应力层深度的效果更好。

3) 随着光斑搭接率的增加,冲击域内形成的残余应力、应变逐渐增大,且分布更加均匀。采用

50%光斑搭接率有效地避免了冲击不均匀和搭接空隙现象。倒角的设计对降低冲击区域边缘的平衡拉应力有明显效果。

4) 实验和仿真所得的试件表面残余压应力变化趋势相同,数值大小基本吻合。冲击 1、3 次时,两者的误差分别为 4.1%、2.6%,说明仿真结果具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] REN X D, ZHAN Q B, YANG H M, et al. The effects of residual stress on fatigue behavior and crack propagation from laser shock processing-worked hole[J]. *Materials Design*, 2013, 44: 149-154.
- [2] 李媛, 何卫峰, 聂祥樊, 等. 激光冲击 TC17 钛合金疲劳裂纹扩展试验[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(3): 40-47.
LI Yuan, HE Weifeng, NIE Xiangfan, et al. Fatigue crack growth behavior of TC17 titanium alloy with laser shock peening[J]. *China Surface Engineering*, 2017, 30(3): 40-47. (in Chinese)
- [3] LUO Sihai, ZHOU Liucheng, NIE Xiangfan, et al. The compound process of laser shock peening and vibratory finishing and its effect on fatigue strength of Ti-3.5Mo-6.5Al-1.5Zr-0.25Si titanium alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 783: 828-835.
- [4] LIU Jingyuan, CHENG Li, LI Silu, et al. Selective modal control of blade vibrations by local laser shock peening[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 445: 2-16.
- [5] ZHOU Liucheng, HE Weifeng, LUO Sihai, et al. Laser shock peening induced surface nanocrystallization and martensite transformation in austenitic stainless steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 655: 66-70.
- [6] ZHOU Liucheng, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 578: 181-186.
- [7] LIU Lin, WANG Jiaojiao, ZHOU Jianzhong. Characterization and analysis on micro-hardness and microstructure evolution of brass subjected to laser shock peening[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 115: 325-330.
- [8] ZHOU Liucheng, LONG Changbai, HE Weifeng, et al. Improvement of high-temperature fatigue performance in the nickel-based alloy by LSP-induced surface nanocrystallization[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 744: 156-164.
- [9] 刘庆琰. 航空发动机钛合金叶片制造技术及失效分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2018.
- [10] NIE Xiangfan, HE Weifeng, ZANG Shunlai, et al. Effects and application to improve high cycle fatigue resistance of TC11 titanium alloy by laser shock peening with multiple impacts[J]. *Surface and Coating Technology*, 2014, 253: 68-75.
- [11] MA Zhuang, LI Yinghong, WANG Cheng. Investigation of laser shock peening on aero-engine compressor rotor blade[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 27: 404-407.
- [12] 周留成. 激光冲击复合强化机理及在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2014.
ZHOU Liucheng. Study on the mechanism of laser shock composite strengthening and its application in aero-engine turbine blade[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [13] 周磊, 汪诚, 周留成, 等. 激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(5): 41-44.
ZHOU Lei, WANG Cheng, ZHOU Liucheng, et al. The effect of laser shock surface processing on mechanical properties of welded joints[J]. *China Surface Engineering*, 2010, 23(5): 41-44. (in Chinese)
- [14] BRAISTED W, BROEKMAN R. Finite element simulation of laser shock Peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21(7): 719-724.
- [15] 荀磊, 马玉娥, 杜永. 多点连续动态激光冲击强化残余应力场数值分析[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(12): 2738-2744.
GOU Lei, MA Yu'e, DU Yong. Continuous dynamic numerical analysis of residual stress field under multi-point laser shock peening[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(12): 2738-2744. (in Chinese)
- [16] 王春光, 宋亚杰, 朱然. 多点激光冲击强化对 TC17 钛合金表面残余应力和表面变形影响的数值模拟[J]. *应用激光*, 2019, 39(3): 475-481.
WANG Chunguang, SONG Yajie, ZHU Ran. Numerical simulation of surface residual stress and deformation of TC17 titanium alloy under multiple laser shock peening[J]. *Applied Laser*, 2019, 39(3): 475-481. (in Chinese)
- [17] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 116-118.
- [18] KAY G. Failure modeling of titanium Ti6Al4V and aluminum 2024-T3 with the Johnson-Cook material model[R]. San Francisco, US: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [19] 薛红前. 超声振动载荷下材料的超高周疲劳性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
XUE Hongqian. Investigation on fatigue behavior of materials in very high cycle regime under vibratory loading[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [20] 聂祥樊. 钛合金薄叶片激光冲击超高应变率动态响应与强化机理研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2015.
NIE Xiangfan. Study on dynamic response and strengthening mechanism of ultra-high strain rate of laser impact on titanium alloy thin blade[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [21] 何卫峰, 李应红, 李伟, 等. 激光冲击强化提高压气机叶片疲劳性能研究[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(7): 1551-1556.
HE Weifeng, LI Yinghong, LI Wei, et al. Laser shock peening on vibration fatigue behavior of compressor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(7): 1551-1556. (in Chinese)

nese)

[22] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P. Physics study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.

[23] 张永康, 于水生, 姚红兵. 强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中诱导冲击波的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5602-5605.

ZHANG Yongkang, YU Shuisheng, YAO Hongbing. Experimental study on shock wave induced by strong pulsed laser in AZ31B magnesium alloy[J]. Acta Physics Sinica, 2010, 59(8): 5602-5605. (in Chinese)

[24] CAO Z W, CHE Z G, ZOU S K, et al. Numerical simulation of residual stress field induced by laser shock processing with square spot[J]. Journal of Shanghai University (English Edition), 2011, 15(6): 553-556.

[25] 蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 5-9.

JIANG Congying, HUANG Lu, WANG Jingchen, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 5-9. (in Chinese)

[26] 余天宇, 戴峰泽, 张永康, 等. 平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1003001. 1-1003001. 7.

YU Tianyu, DAI Fengze, ZHANG Yongkang, et al. Simulation and experimental study on residual stress field of 2024 aluminum alloy induced by flat-top laser beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1003001. 1-1003001. 7. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)