

## 不同能量空间分布激光冲击钛合金残余应力的分布规律

李翔, 何卫锋, 聂祥樊\*, 杨竹芳, 罗思海, 李一鸣, 田乐

空军工程大学航空航天学院等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038

**摘要** 采用不同能量空间分布的激光对 TC11 钛合金进行了表面处理, 通过 X 射线测试获得了试件经激光冲击后残余应力的分布规律。结果表明, 在相同的工艺参数下, 高斯分布激光处理的钛合金表面残余应力为  $-636.71$  MPa, 压应力影响层深度为  $1187 \mu\text{m}$ ; 平顶分布激光处理的分别为  $-559.20$  MPa 和  $811 \mu\text{m}$ 。通过理论推算得到高斯分布激光产生的冲击波峰值压力是平顶分布的 1.55 倍。

**关键词** 激光技术; 激光冲击强化; 残余应力; TC11 钛合金; 能量空间分布

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061402

## Regularity of Residual Stress Distribution in Titanium Alloys Induced by Laser Shock Peening with Different Energy Spatial Distributions

Li Xiang, He Weifeng, Nie Xiangfan, Yang Zhufang, Luo Sihai, Li Yiming, Tian Le

Key Laboratory of Plasma Dynamics, School of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China

**Abstract** The surface treatment of TC11 titanium alloys by lasers with different energy spatial distributions is conducted, and the residual stress in specimens induced by laser shock peening (LSP) is tested by X-ray diffraction. The results indicate that, under the same process parameters, the surface residual stress and the stress-affected layer depth in titanium alloys after LSP with a Gaussian distribution are  $-636.71$  MPa and  $1187 \mu\text{m}$ , respectively, while those with a flat-top distribution are  $-559.20$  MPa and  $811 \mu\text{m}$ , respectively. The theoretical calculation shows that the peak stress of shock waves induced by Gaussian spatial energy distributions is 1.55 times of that by flat-top spatial energy distributions.

**Key words** laser technique; laser shock peening; residual stress; TC11 titanium alloy; energy spatial distribution

**OCIS codes** 140.3460; 140.3390; 160.3390

## 1 引言

激光冲击强化(LSP)是一种典型的表面处理技术<sup>[1]</sup>,具有强化效果显著、处理路径和深度可控等优点。LSP利用激光诱导产生的冲击波压力作用在金属材料表面,使其发生动态塑性变形后产生较深的残余压应力,进而形成高密度位错甚至细化晶粒<sup>[2-3]</sup>,从而增强材料的抗磨损、抗疲劳断裂和抗应力腐蚀能力<sup>[4-5]</sup>。残余压应力对材料的疲劳裂纹萌

生具有延缓作用<sup>[6]</sup>,可以提升材料的使用寿命。因此,LSP过程中产生的残余应力分布规律是研究的重点<sup>[7-8]</sup>,也是工艺优化的关键<sup>[9]</sup>。

LSP形成的残余应力与冲击波在材料中的传播及动态响应密切相关。Fabbro等<sup>[10]</sup>建立了激光能量呈平顶分布的冲击波峰值压力和功率密度的计算公式。Ding等<sup>[11]</sup>通过模拟仿真发现,在合适的功率密度、强化次数以及搭接率等参数条件下,可以获得较好的残余应力分布。Cellard等<sup>[12]</sup>研究发

收稿日期: 2017-12-01; 收到修改稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102600)、国家重点基础研究发展计划(2015CB057403)

作者简介: 李翔(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光表面处理方面的研究。E-mail: 651486396@163.com

导师简介: 何卫锋(1977—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事航空发动机结构表面工程、强度和可靠性等方面的研究。E-mail: hehe\_coco@163.com

\* 通信联系人。E-mail: Skingkgd@163.com

现, LSP 单面冲击 Ti-17 合金时, 高能冲击波在薄壁试件表面产生了残余拉应力。为了提高 LSP 的效率和应力均匀性, 通常采用平顶分布的激光束。

余天宇等<sup>[13]</sup>研究发现, 平顶 LSP 2024 铝合金产生的残余应力均匀性较好。然而, 国内一般采用的 YAG 激光器的输出光束能量呈高斯分布<sup>[14]</sup>。Zhang 等<sup>[15-17]</sup>通过高斯分布的激光束开展了 LSP 的试验研究。胡永祥等<sup>[18-20]</sup>使用高斯分布激光束冲击处理了 45 钢, 结果表明, 合适的搭接率可以获得较均匀的残余应力。

通过光束整形或增加特殊谐振腔结构可以得到平顶分布的激光束<sup>[21-22]</sup>。本文以 TC11 钛合金为研究对象, 分别采用高斯分布和平顶分布的激光束冲击试件表面, 并测量得到了 TC11 钛合金表面和深度方向上的残余应力分布, 为 LSP 工艺优化提供了试验依据。

## 2 试验方法和过程

### 2.1 试验材料

TC11 钛合金是一种综合性能良好的  $\alpha$ - $\beta$  型钛合金, 具有优异的热强性能和良好的力学性能, 其化学成分<sup>[23]</sup>和力学性能见表 1、2。

表 1 TC11 钛合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of TC11 titanium alloys (mass fraction, %)

Element	Al	Mo	Zr	Si	Fe	Ti
Content	5.8-7.0	2.8-3.8	0.8-2.0	0.20-0.35	0.25	Bal.

表 2 TC11 钛合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC11 titanium alloys

Property	Tensile strength /	Yield strength /	Section shrinkage	Elongation / %
	MPa	MPa	rate / %	
Value	1030	930	30	9

试件尺寸为 25 mm × 25 mm × 3 mm, 强化区域是试件中心 12.5 mm × 12.5 mm 的正方形区域。试件强化工艺示意图如图 1 所示。其中, 图 1(a) 所示的红色箭头为冲击路径, 图 1(b) 所示的黄色区域代表强化区, 红色区域代表强化与非强化的过渡区,  $\phi$  为直径。搭接率的计算方式为

$$\eta_i = \left(1 - \frac{S_i}{2R}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中  $\eta_i$  为搭接率;  $S_i$  为相邻两个光斑之间的距离;  $R$  为光斑半径; 下标  $i = x, y$ 。采用纵、横搭接率均为 50% 的搭接工艺进行试验。

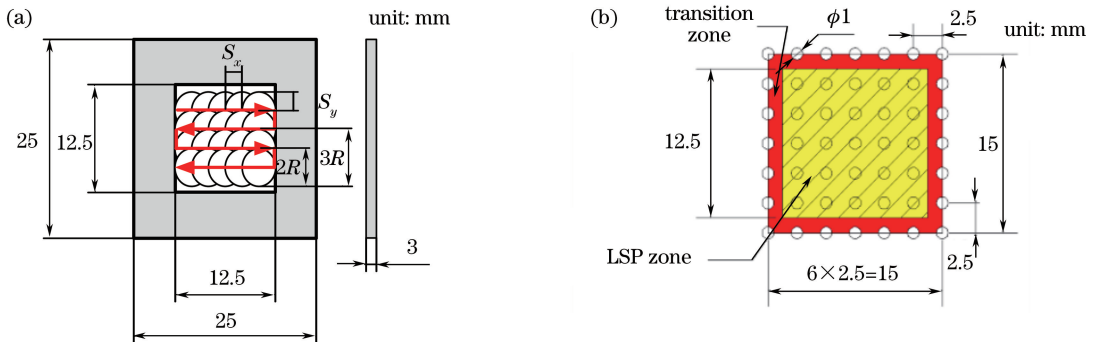


图 1 LSP 工艺示意图。(a) 光斑搭接及冲击路径; (b) 应力测试位置分布

Fig. 1 Schematics of LSP process. (a) Laser spot overlapping and LSP path;

(b) distribution of residual stress test points

### 2.2 试验方法与仪器

采用西安天瑞达光电技术有限公司的 YD60-M165 和 YS80-M165 设备进行试验, 其能量空间分布可以分别设置为高斯分布和平顶分布, 不同能量空间分布光束光斑内相对能量强度如图 2 所示。两种激光器参数相同, 激光能量为 5 J, 波长为 1064 nm, 圆光斑直径为 2.2 mm, 脉宽为 20 ns, 脉宽内采用高斯时间分布。强化过程采用固定激光束, 连续移动夹持试件的强化方式。脉冲式激光

的触发频率为 1 Hz, 平台的移动速度为  $1.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

采用加拿大 Proto 公司的 LXR D 型 X-ray 应力测试仪测量试件表面和深度方向上的残余应力。测量试件表面的残余应力时, 选取试件中心 15 mm × 15 mm 的正方形区域进行测试, 测量所用的光斑大小为 1 mm, 间隔 2.5 mm 测量一个点。采用对称分布射线管和探测器进行测量, 靶材为 Cu 靶, 辐射类型为 Cu-K $\alpha$ , 衍射角为  $139^\circ \sim 142^\circ$ ,

衍射晶面为(213),衍射波长为 1.541 nm。进行试件深度方向上的应力测试时,将试件表面抛光,抛

光液由体积分数为 10% 的  $\text{HClO}_4$  和 90% 的  $\text{CH}_3\text{OH}$  组成。

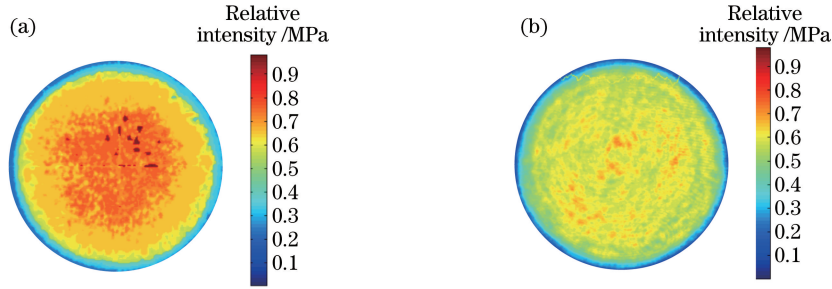


图 2 光束能量空间分布示意图。(a)高斯分布;(b)平顶分布

Fig. 2 Schematics of energy spatial distribution of laser beam. (a) Gaussian distribution; (b) flat-top distribution

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 不同能量空间分布的应力场

将测量得到的表面残余应力拟合,得到测试区域表面的残余应力分布,如图 3 所示。从图可知,使用高斯分布和平顶分布激光处理的表面强化区域残余应力分别是  $-636.71 \text{ MPa}$  和  $-559.20 \text{ MPa}$ 。高

斯分布与平顶分布激光处理的强化区域表面的残余应力分布“高低不平”。

试件深度方向的应力分布如图 4 所示。高斯分布的激光处理在材料内部产生了深度为  $1187 \mu\text{m}$  的压应力层,平顶分布的激光处理产生了深度为  $811 \mu\text{m}$  的压应力层。高斯分布与平顶分布的激光处理产生的最大残余压应力分别出现在材料次表层和材料表层。

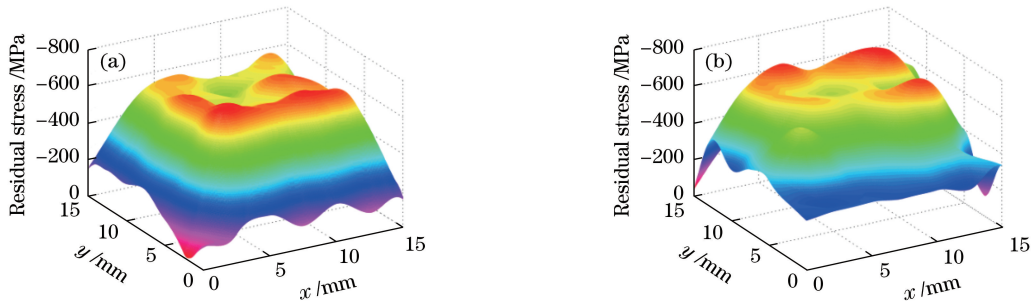


图 3 不同能量空间分布下试件表面的残余应力。(a)高斯分布;(b)平顶分布

Fig. 3 Surface residual stress distribution of specimens under different energy distributions.

(a) Gaussian distribution; (b) flat-top distribution

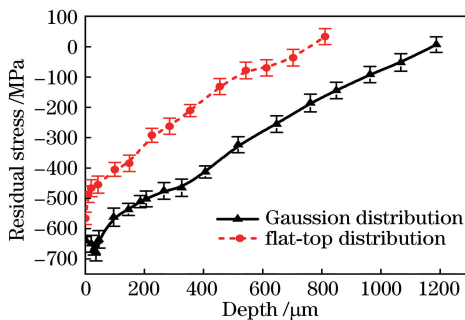


图 4 不同能量空间分布下试件深度方向的残余应力

Fig. 4 Residual stress of specimens along depth direction under different energy distributions

#### 3.2 结果分析

Fabbro 等<sup>[10]</sup>提出的近似平顶分布激光冲击波峰值压力与功率密度的关系为

$$P_m = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \cdot \sqrt{Z} \cdot \sqrt{I}, \quad (2)$$

式中  $P_m$  为平顶分布激光的冲击波峰值压力; $I$  为激光的功率密度; $Z$  为折合阻抗; $\alpha$  为效率系数。当水为约束层,胶带为吸收层时, $Z=0.382, \alpha=0.12$ <sup>[24]</sup>。

平顶分布激光的功率密度<sup>[3]</sup>计算公式为

$$I = \frac{E}{S \cdot \tau} = \frac{E}{\pi R^2 \tau}, \quad (3)$$

式中  $E$  为激光脉冲能量; $S$  为光斑面积; $\tau$  为脉宽。

对于横截面为圆形,能量分布呈轴对称的平顶高斯分布的场函数<sup>[13]</sup>为

$$E(r) = E_0 \exp\left[-\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right]^n, N=1,2,\dots, \quad (4)$$

式中  $E_0$  为光斑中心激光光场能量;  $r_0$  为束腰宽;  $r$  为圆形光斑内任一点到中心点的距离;  $N$  为函数阶数;  $E(r)$  为激光束能量分布场函数。则平顶高斯光束的空间能量分布<sup>[13]</sup>为

$$I_i(r) = E^2(r). \quad (5)$$

当时间脉宽不变时, 激光功率密度  $I$  与能量分布函数  $I_i$  成正比, 与能量分布场函数的平方成正比。由于冲击波峰值压力与功率密度的平方根成正比, 因此冲击波压力与能量场分布形式相同。高斯分布激光产生的冲击波压力<sup>[25]</sup>可估算为

$$P(r) = P_n \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2R_s^2}\right), \quad (6)$$

式中  $P(r)$  为任意时刻某位置处的压力;  $P_n$  为高斯分布激光的冲击波峰值压力;  $R_s$  为高斯分布激光的能量上升速率。

激光诱导冲击波时间很短, 假设两种激光冲的冲

击过程都是能量守恒, 并且两束激光的光能吸收、等离子体冲击过程不变。取  $P_n = 1$ , 根据能量守恒有

$$\int_0^R \exp\left(-\frac{r^2}{2R_s^2}\right) 2\pi r dr = P_u \cdot \pi R^2, \quad (7)$$

式中平顶激光束冲击波峰值压力  $P_u = 0.65$ 。不同能量空间分布下冲击波压力与塑性变形间的关系如图 5 所示, 其中  $D_0$  为空间高斯分布最大压力处产生的塑性变形量,  $D_1$  为平顶分布激光搭接后产生的塑性变形量,  $D_2$  为高斯分布搭接产生的最小塑性变形量,  $D_3$  为平顶分布未搭接时产生的塑性变形量,  $L_1$  为空间高斯分布重叠产生塑性变形的径向距离,  $L_2$  为平顶分布激光束产生塑性变形量大于高斯分布的径向距离。由图 5(a) 可以看出, 在单个光斑内, 高斯分布的冲击波产生的塑性形变具有一定的峰值, 且峰值大于平顶分布的冲击波产生的形变量, 高斯分布的冲击波产生的变形区域比平顶分布的窄。

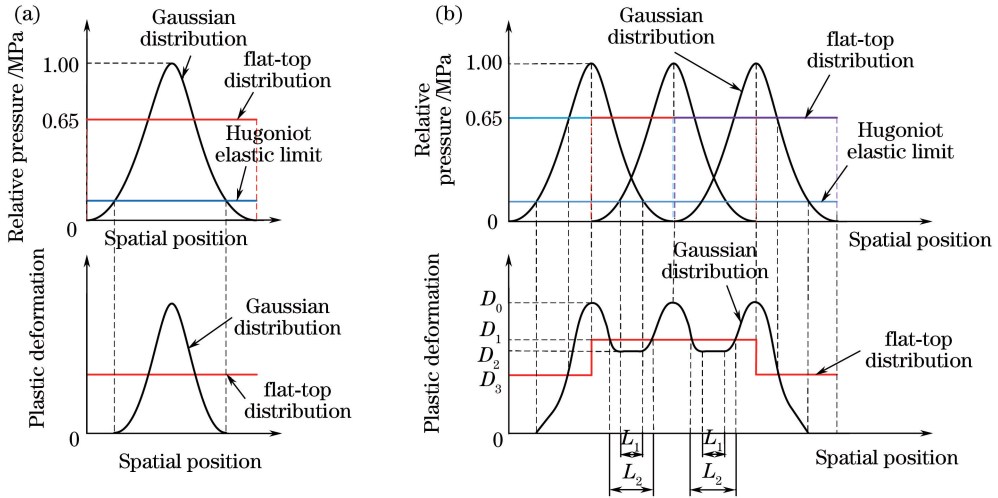


图 5 不同条件下冲击波压力与塑性变形间的关系。(a) 单个光斑; (b) 光斑搭接

Fig. 5 Relationship between shock wave pressure and plastic deformation under different conditions.

(a) Single spot; (b) spot lap

激光能量空间分布为高斯分布时, 塑性形变过程如图 5 中黑色线条所示。当冲击波引起的压力小于材料的许贡纽弹性极限  $\sigma_{HEL}$  时, 材料只发生弹性形变。当高斯分布的冲击波产生的压力大于  $\sigma_{HEL}$  时, 材料产生塑性形变, 且塑性形变量随着高斯分布冲击波产生的压力的增大而增大。50% 的搭接率使得重叠区域有两个使 TC11 钛合金产生形变的压力先后作用在材料表面, 相互叠加之后材料形变量如图 5(b) 中的  $L_1$  段所示。

激光能量空间分布为平顶分布时, 其冲击波压力一直大于材料的弹性极限, 因此, 强化区域的任何位置都会发生塑性形变, 塑性形变量随光斑位置的

变化如图 5 中红色线条所示。光斑搭接的实质是增加平均冲击次数<sup>[13]</sup>, 其示意图如图 6 所示。在单个圆光斑内的不同位置处, 因搭接率而产生的平均冲击次数不同, 这使得材料形变与受到的冲击次数不成正比。材料表面的塑性形变增量随着冲击次数的增加而减小<sup>[26]</sup>。因此, 搭接区域的形变量  $D_1$  要小于未搭接区域的  $D_3$ , 即  $D_1 < 2D_3$ 。

在搭接区域内, 高斯分布的冲击波压力产生的形变量在  $L_1$  段, 小于平顶分布在相同位置产生的塑性形变, 但  $D_0 D_2 \gg D_1 D_2$ , 且其他位置的塑性形变量均大于平顶分布的塑性形变量。因此, 高斯分布的冲击波压力产生的平均塑性形变量大于平顶分

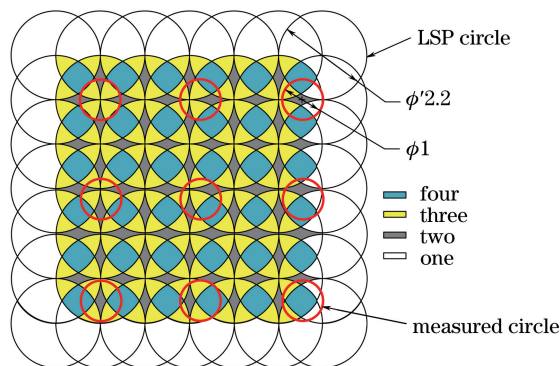


图6 不同光斑区域平均冲击次数和测量圆分布示意图

Fig. 6 Mean shock number and measured circle distribution for different spot areas

布的。在激光强化工艺和参数相同时,高斯分布激光产生的表面平均残余压应力大于平顶分布的。

高斯分布与平顶分布的冲击强化区域均发生了应力分布不均匀的现象。激光冲击采用的圆光斑直径为 2.2 mm,而测量材料表面的残余应力时,为了减小误差且能够获得单个冲击圆光斑中的微观应力分布,采用的测量光斑直径为 1 mm,因此,每次测量的区域都无法涵盖任何一个完整的冲击圆区域。在测试过程中,为了获得不同冲击次数位置处的应力,更加真实反映整个表面的残余应力水平,选取测量圆间隔的原则是:既要大于冲击圆的直径,可以反映不同冲击圆区域中的应力分布,又要不等于冲击圆直径的整数倍,可以得到不同平均冲击次数位置处的应力分布。在强化区域的测试圆中,可能会出现大部分面积为平均冲击次数多的区域,也可能出现大部分面积为平均冲击次数少的区域,如图 6 中红色测试圆区域的光斑搭接形状所示,每个区域的搭接情况都不相同,这样使得不同测试圆中得到的应力大小有明显差异,图 3 中应力分布呈现“高低不平”的不均匀现象。对强化区域各测试点取平均值,可以反映材料表面的整体平均残余应力值,减小误差。而对于每个冲击圆中不同冲击次数区域内更微观的应力分布,受测试区域大小的限制,则需要进一步的模拟仿真研究,以得到残余应力分布。

当激光诱导产生的冲击波峰值压力小于  $2.5\sigma_{\text{HEL}}$  时,最大残余压应力出现在材料表层<sup>[27]</sup>。当冲击波压力逐渐增大时,塑性形变趋于饱和<sup>[28]</sup>,并且随着深度的增大而不断减小;当冲击波峰值压力大于  $2.5\sigma_{\text{HEL}}$  时,表面塑性波的卸载作用使得残余压应力最大值出现在材料次表层。将距离材料表面  $0\sim 10\ \mu\text{m}$  的上层区域定义为材料表层,将材料表层

以下  $100\sim 200\ \mu\text{m}$  的区域定义为材料次表层。由 (2)、(3) 式计算可知,高斯分布的冲击波峰值压力为 5.36 GPa,大于  $2.5\sigma_{\text{HEL}}$ ,平顶分布的冲击波峰值压力为 3.45 GPa,小于  $2.5\sigma_{\text{HEL}}$ ,故高斯分布的激光产生的最大残余压应力出现在材料次表层,而平顶分布的激光产生的最大残余应力出现在材料表层。

在一定深度范围内,金属的塑性变形会出现饱和,反向稀疏波的塑性卸载作用使得高斯分布的激光产生的表面残余压应力减小,最大值出现在了材料次表层<sup>[27]</sup>;但在塑性形变饱和以下的区域,峰值压力越大,冲击波传播得越深,更深层的材料发生塑性形变,从而使得残余压应力的影响层更深。并且,胡永祥等<sup>[29]</sup>研究发现,冲击波的峰值压力越大,衰减到材料屈服强度以下的时间越长,冲击波的传播就越深,残余压应力的影响层表现为深度更深的特征。因此,在相同功率密度下,较大的峰值压力使高斯分布激光产生的残余压应力层比平顶分布的更深。

## 4 结 论

采用 X 射线衍射的方法,研究并分析了不同能量空间分布对 TC11 钛合金残余应力分布的影响,得到以下结论。

1) 在相同 LSP 参数下,高斯分布的冲击波压力造成的平均塑性形变量大于平顶分布的,高斯分布的冲击波产生的表面残余压应力大于平顶分布的。

2) 高斯分布激光产生的最大残余压应力出现在材料次表层,平顶分布的最大残余应力出现在材料表层,高斯分布产生的残余压应力影响层比平顶分布的深。

## 参 考 文 献

- [1] Li W, Li Y H, He W F, *et al.* Development and application of laser shock processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(12): 15-19.  
李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应[用]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(12): 15-19.
- [2] Liu B, Luo K Y, Wu L J, *et al.* Effect of laser shock processing on property and microstructure of AM50 magnesium alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0814003.  
刘波, 罗开玉, 吴刘军, 等. 激光冲击强化对 AM50 镁合金性能和结构的影响 [J]. *光学学报*, 2016,

- 36(8):0814003.
- [3] He W F, Li Y H, Li Q P, *et al.* Vibration fatigue performance and strengthening mechanism of TC6 titanium alloy by laser shock peening[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(8): 1643-1648. 何卫锋, 李应红, 李启鹏, 等. LSP 提高 TC6 钛合金振动疲劳性能及强化机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(8): 1643-1648.
- [4] Wang H, Huang Y H, Zhang W W, *et al.* Experimental study of tensile and wear resistance properties of ZK60 magnesium alloy treated by laser shock peening[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061406. 王浩, 黄亿辉, 张文武, 等. 激光冲击强化 ZK60 镁合金拉伸和耐磨性能实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061406.
- [5] Nie X F, He W F, Zang S L, *et al.* Experimental study on improving high-cycle fatigue performance of TC11 titanium alloy by laser shock peening [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0803006. 聂祥樊, 何卫锋, 臧顺来, 等. 激光喷丸提高 TC11 钛合金高周疲劳性能的试验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0803006.
- [6] Li D L, He W F, You X, *et al.* Experimental research on improving fatigue strength of wounded TC4 titanium alloy by laser shock peening [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0702006. 李东霖, 何卫锋, 游熙, 等. 激光冲击强化提高外物打伤 TC4 钛合金疲劳强度的试验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702006.
- [7] Tian L, Nie X F, Luo S H, *et al.* Dynamic response and residual tensile stress formation mechanism of titanium alloy thin-walled piece in laser shock peening [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2018, 19(3): 1-5. 田乐, 聂祥樊, 罗思海, 等. 激光冲击钛合金薄壁件动态响应及残余拉应力形成机制[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(3): 1-5.
- [8] Salimianrizi A, Foroozmehr E, Badrossamay M, *et al.* Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6 [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 77: 112-117.
- [9] Cao Y P, Xu Y, Feng A X, *et al.* Experimental study of residual stress formation mechanism of 7050 aluminum alloy sheet by laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0702008. 曹宇鹏, 徐影, 冯爱新, 等. 激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力形成机制的实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0702008.
- [10] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physics study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- [11] Ding K, Ye L. *Laser shock peening performance and process simulation*[M]. Florida: CRC Press, 2006.
- [12] Cellard C, Retraint D, Francois M, *et al.* Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy: Influence of process parameters [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 532: 362-372.
- [13] Yu T Y, Dai F Z, Zhang Y K, *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. 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.
- [14] Xia G C, Sun X Y, Duan J A. Beam shaping technologies for high efficiency laser fabrication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 010002. 夏国才, 孙小燕, 段吉安. 用于实现激光高效率加工的光束整形技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 010002.
- [15] Zhang W, Yao Y L. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: Experiment, modeling and simulation [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(1): 10-17.
- [16] Yibas B S, Shuja S Z, Arif A, *et al.* Laser-shock processing of steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135(1): 6-17.
- [17] Zou S K, Tan Y S, Guo D H, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(3): 371-373. 邹世坤, 谭永生, 郭大浩, 等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 371-373.
- [18] Hu Y X, Yao Z Q. Numerical simulation and experimentation of overlapping laser shock processing with symmetry cell [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(2): 152-162.
- [19] Hu Y X, Yao Z Q. Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd:YAG pulsed laser [J]. *Surface and Coatings*

- Technology, 2008, 202(8): 1517-1525.
- [20] Hu Y X, Yao Z Q, Hu J. 3D-FEM simulation of laser shock processing [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1426-1435.
- [21] Gao Y H, An Z Y, Li N N, *et al.* Optical design of Gaussian beam shaping [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1464-1471.  
高瑀含, 安志勇, 李娜娜, 等. 高斯光束整形系统的光学设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1464-1471.
- [22] Lü B D. Laser optics: Beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 223-241.  
吕百达. 激光光学: 光束描述, 传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 223-241.
- [23] *Aeronautical Manufacture Engineering Handbook* Edits Committee. Aeronautical manufacture engineering handbook [M]. Beijing: Aerospace Industry Press, 1997: 216.  
《航空制造工程手册》编辑委员会. 航空制造工程手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997: 216.
- [24] Xue D Y. Experimental research of the shock wave induced by nanosecond pulsed laser in spatial Gaussian distribution [D]. Xi'an Air Force Engineering University, 2017: 43-51.  
薛丁元. 空间高斯分布纳秒脉冲激光诱导冲击波试验研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2017: 43-51.
- [25] Nie X F, Zang S L, He W F, *et al.* Sensitivity analysis and restraining method of "residual stress hole" induced by laser shock peening [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2107-2112.  
聂祥樊, 臧顺来, 何卫锋, 等. 激光冲击“残余应力洞”的参数敏感性分析及其抑制方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 2107-2112.
- [26] Nie X F, He W F, Zhou L C, *et al.* Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance [J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 594: 161-167.
- [27] Li Y H. Theory and technology on laser shock peening [M]. Beijing: Science Press, 2013: 181-186.  
李应红. 激光冲击强化理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 181-186.
- [28] Zhang Y K, Zhou L C, Ren X D, *et al.* Experiment and finite element analysis on residual stress field in laser shock processing TC4 titanium alloy [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(1): 10-13.  
张永康, 周立春, 任旭东, 等. 激光冲击 TC4 残余应力场的试验及有限元分析 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 10-13.
- [29] Hu Y X. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008: 90-94.  
胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 90-94.