

# 双面激光喷丸条件下冲击前进方向对AM50镁合金 试样残余应力场的影响

王长雨 罗开玉 鲁金忠

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 激光喷丸扫描路径前进方向对金属板料大面积激光喷丸效果有着直接的影响。通过ABAQUS有限元软件建立拉伸试样残余应力三维分析模型,研究了激光喷丸扫描路径前进方向对AM50镁合金拉伸试样残余应力场的影响,以及双面同时冲击与双面间隔冲击之间的差异。结果表明,激光喷丸前进方向对残余应力均匀和一致性有决定性影响,并且双面激光同时冲击较双面激光间隔冲击有更好的效果。

**关键词** 激光技术; 激光喷丸; 有限元分析; 残余应力; AM50镁合金

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0303002

## Effect of Advancing Direction on Residual Stress Fields of AM50 Mg Alloy Specimens Treated by Double-Sided Laser Shock Peening

Wang Changyu Luo Kaiyu Lu Jinzhong

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** Advancing direction of massive laser shock peening (LSP) impacts often generates different residual stress distribution at the surface and along depth direction of metallic sheet. To investigate the effect of advancing direction of massive LSP impacts on the induced residual stress fields of AM50 Mg alloy tensile samples, a 3D analysis model is developed by using ABAQUS software. At the same time, the difference between the double-sided simultaneous LSP and double-sided non-simultaneous LSP impacts is also presented. Results show that advancing direction plays an important role in the generated residual stresses, and simultaneous LSP impacts can induce a better simulation results than non-simultaneous LSP.

**Key words** laser technique; laser shock peening; finite element analysis; residual stress; AM50 Mg alloy

**OCIS codes** 350.3390; 310.4925; 120.6660

## 1 引言

激光喷丸(LSP)技术是利用强激光束产生的等离子冲击波,提高金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀能力的一种高新技术。它具有非接触、无热影响区、可控性强以及强化效果显著等突出优点,显著提高金属材料 and 合金的抗拉强度<sup>[1]</sup>、疲劳寿命<sup>[2]</sup>、耐腐蚀和耐磨损性<sup>[3]</sup>。自20世纪80年代以来,世界各国科学家对激光喷丸金属材料中工艺参数、宏观性能和微观结构进行了广泛的研究。Jones等<sup>[4]</sup>研究了超快激光诱导的应力波在铝中传播的过程,获得了产生塑性应变和残余应力的激光喷丸条件。Fairand等<sup>[5]</sup>阐述了水约束层和油漆涂层对激光产生冲击波幅值的影响。光斑尺寸<sup>[6]</sup>、脉冲能量<sup>[7]</sup>、激光冲击次数<sup>[8]</sup>等重要工艺参数对金属材料 and 合金残余应力有着重要的影响,以往的研究结果表明,合适的激光喷丸工艺参数能够获得理想的残余压应

收稿日期: 2015-09-02; 收到修改稿日期: 2015-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(51275220)、江苏省杰出青年基金(BK20140012)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(2014ZBZZ015)、江苏省高校自然科学研究重大项目(14KJA460002)

作者简介: 王长雨(1991—), 硕士研究生, 主要从事激光表面改性技术方面的研究。E-mail: 15751010137@163.com

导师简介: 罗开玉(1975—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光冲击波非传统制造技术方面的研究。

E-mail: kyluo@ujs.edu.cn(通信联系人)

力场和强化效果。

由于激光喷丸具有高压(GPa~TPa)、超快(几十纳秒)、超高应变率( $10^7 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ , 比爆炸成形高出100倍)的显著特点,因此有限元模拟能够反映残余应力随冲击波的瞬时变化,如Warren等<sup>[9]</sup>在 $3 \times 3$ 光斑矩阵的小区域内模拟了激光冲击过程,结果表明激光搭接冲击可以获得最好的表面一致性和最大的残余应力值;Hfaiedh等<sup>[10]</sup>建立了相对简单的 $5 \times 5$ 光斑矩阵正四棱柱有限元模型,研究了搭接率和不同冲击路径对残余应力的影响,结果说明随着搭接率的增大,表面残余应力一致性逐渐变好,不同冲击路径所诱导的残余应力之间存在一定差异;Ren等<sup>[11]</sup>在 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  1/4模型上对残余应力热松弛进行了模拟,发现应力松弛主要发生在暴露的初始阶段,松弛程度随着温度的升高而增大。以上模拟研究模型结构相对简单,就目前而言,对完整复杂的三维模型进行大面积激光喷丸的模拟试验很有限。另外,以前的研究<sup>[12-13]</sup>表明大面积激光喷丸过程中冲击路径会影响残余应力场的分布,并且可以通过优化金属材料冲击路径来获得更好的疲劳寿命。以上研究主要针对激光喷丸具体金属材料的宏观性能的变化规律进行研究。航空发动机叶片型面复杂,是变截面扭曲叶片,叶片的前缘和后缘曲率变化剧烈,叶片沿展向长度的相对厚度分布不同,对于航空发动机叶片边缘处理,通常采用双面同时冲击以期获得最佳的冲击效果,并且金属构件的形状和尺寸也是影响激光喷丸效果的主要因素。

针对以上存在问题,本文以工业中广泛应用的AM50镁合金构件为研究对象,在比较和分析双面同时冲击与双面间隔冲击的残余应力场差异的基础上,采用三维非线性有限元分析模型研究激光喷丸冲击路径对残余应力分布影响规律,为金属构件的大规模激光喷丸技术的工业应用提供科学依据。

## 2 有限元模型建立

### 2.1 AM50镁合金材料力学特性

研究表明激光喷丸过程中,压力脉冲符合均匀分布,材料服从Von Mises屈服标准,材料的应变率高达 $10^7 \text{ s}^{-1}$ 以上,属于强动载荷<sup>[14]</sup>。强动载荷作用下的材料的屈服极限一般为静态载荷的2~4倍<sup>[15]</sup>,而AM50镁合金静态屈服极限为125 MPa,这里假定材料的动态屈服强度( $\sigma_y^{\text{dyn}}$ )为静态载荷的3倍,则动态屈服强度为375 MPa。想要使材料发生永久的塑性变形以获得足够的残余压应力,激光冲击板材所产生的峰值压力必须大于Hugoniot弹性极限(HEL)  $V_{\text{HEL}}$ ,材料的Hugoniot弹性极限定义为<sup>[15]</sup>:

$$V_{\text{HEL}} = \sigma_y^{\text{dyn}} \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \quad (1)$$

将动态屈服强度 $\sigma_y^{\text{dyn}}$ 代入(1)式即可算得HEL的值为656 MPa。根据文献[14]所述,为达到最佳的冲击强化效果,激光峰值压力 $P$ 应介于 $2 V_{\text{HEL}} \sim 2.5 V_{\text{HEL}}$ 之间,即在1312~1640 MPa,选定峰值压力设为1600 MPa。AM50镁合金密度为 $1800 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量为44800 MPa、泊松比为0.3、动态屈服强度为375 MPa、Hugoniot弹性极限为656 MPa。

### 2.2 数值模型与冲击方式

采用非线性有限元分析软件ABAQUS建立镁合金拉伸试样的三维非线性有限元模型。首先通过动态显示分析模块模拟短时间冲击过程中波的动态传播机制,把计算得到的动态数据导入隐式静态分析模块中进行回弹运算,最终得到板料达到稳态后材料内部的残余应力场,实现激光冲击波在金属板料中的实时传播过程。如图1(a)所示,在对拉伸试样这种复杂几何体进行网格划分时,激光喷丸区域内所用有限元单元为正方体,喷丸区域之外的单元形状以四棱柱为主,夹杂有少许三棱柱。如图1(b)所示,为了既能较准确地计算出模拟结果又能节约时间,冲击区域内的网格密度设为 $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ ,在拉伸试样圆弧的密度设为 $0.3 \text{ mm}$ ,而在对结果几乎没有影响的夹头区域仅设了2个网格,所有的网格数为207711个。

在对拉伸试样激光冲击处理时,采用两种冲击方式,如图1(c)所示。方式1是一种“Z”型的冲击扫描方式,即先沿Y轴方向(列)冲击,完成每列冲击后沿X轴方向(行)前进,行列之间光斑搭接率为50%,激光喷丸覆盖区域是“狗骨头”试样的标距部分,面积为 $24 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。在方式1中,冲击前进方向平行于拉伸力方向(即X轴方向)。为实现双面间隔冲击,先后对试样的上表面、下表面分别进行了冲击,总共有170个点(每面85个

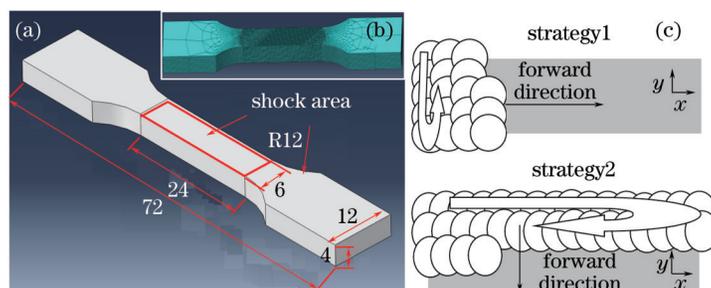


图1 (a) 试样尺寸(单位:mm); (b) 网格划分; (c) 两种冲击方式

Fig.1 (a) Dimensions of tensile specimen (unit: mm); (b) mesh; (c) two scanning strategies

点)。类似于方式1,方式2也是一种“Z”型的冲击扫描方式,不同之处在于冲击前进方向垂直于拉伸力方向(即Y轴方向)。

### 2.3 Fabbro 压力估算模型

Fabbro 等<sup>[16]</sup>建立了激光冲击波传播模型,并对靶材表面的冲击波峰值压力进行了估算:

$$P(t) = 0.01 \sqrt{\frac{Z_1 \alpha}{2\alpha + 3}}, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为等离子体-材料相互作用系数,为经验系数,一般取 0.1~0.25;  $Z_i$  为材料声阻抗,单位为  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  <sup>[16]</sup>, 1 为靶材, 2 为约束层,折合声阻抗:

$$Z = \frac{2Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (3)$$

对靶材镁合金和约束层水,其声阻抗分别为<sup>[17]</sup>:  $Z_1 = 0.946 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $Z_2 = 1.14 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 入射激光功率密度  $I_0 = 12 \text{ GW/cm}^2$ 。另外,压力脉冲的时空分布情况用如下准高斯公式表示:

$$P(x, y, t) = P(t) \exp[-(x^2 + y^2)/2R^2], \quad (4)$$

式中  $x, y$  是表面坐标;光斑半径  $R = 1.5 \text{ mm}$ 。

## 3 残余应力场数值分析

AM50 镁合金双面激光喷丸的强化效果不仅受脉冲能量、光斑大小、搭接率、吸收层等参数影响,在大面积激光喷丸过程中,冲击方向不同时,强化效果也不同。并且双面同时冲击的正反两个方向冲击波作用对强化效果也有一定的影响。模拟两种激光喷丸路径下镁合金拉伸试样标距部分双面同时冲击和双面间隔冲击两种方式下的残余应力场的分布。

### 3.1 双面间隔冲击残余应力分布

图2是方式1双面间隔冲击模拟的结果,可以看出在试样上表面、下表面和截面都有残余应力。在深度方向上,残余应力分布呈“三明治”状,上、下近表面是残余压应力,中间是残余拉应力(由于材料内部应力的自我平衡产生),但残余应力分布并不是完全对称的,上表面比下表面产生幅值更大的残余压应力。这种差异是由于上表面和下表面不是同时冲击的,当激光喷丸处理下表面时,材料上表面已经被预先冲击处理。另外,在表面,方式1诱导的残余压应力分布均匀,沿X轴有一定对称性,上下两边界均获得较大的残余压应力值。

图3是方式2双面间隔冲击模拟的结果,残余应力分布情况也类似于方式1,在深度方向上,残余应力分布呈“三明治”状,上、下近表面是残余压应力,中间是残余拉应力,但残余应力分布并不是完全对称的,上表面比下表面产生幅值更大的残余压应力。在表面,方式2诱导的表面残余压应力分布有一定规律,表面下半部分的压应力明显较上半部分的压应力大。图2和图3模拟结果显示,方式1诱导的表面残余压应力更均匀,两边界得到较好的喷丸效果,一致性较好。

### 3.2 双面同时冲击残余应力分布

图4是两种方式下双面同时冲击镁合金板料应力模拟图,方式1诱导的表面残余压应力分布均匀,沿X轴有一定对称性,上下两边界均获得较大的残余压应力值,但残余应力场分布形状较双面间隔冲击有一定

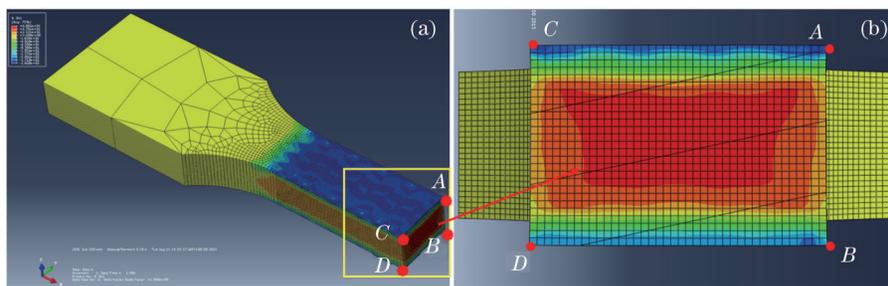


图2 方式1双面间隔冲击残余应力图。(a) 截面位置; (b) 截面

Fig.2 Residual stress of double-sided non-simultaneous LSP impacts with strategy 1. (a) Section position; (b) cross-section

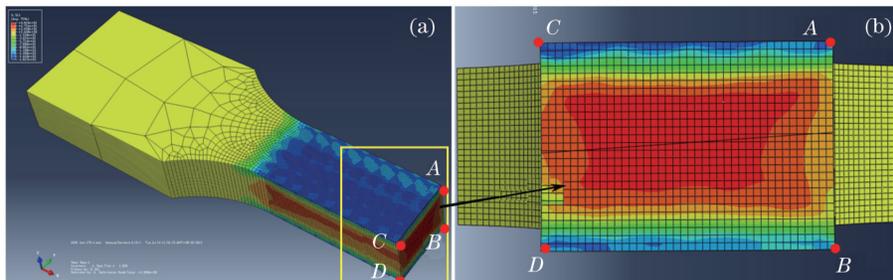


图3 方式2双面间隔冲击残余应力云图。(a) 截面位置; (b) 截面

Fig.3 Residual stress of double-sided non-simultaneous LSP impacts with strategy 2. (a) Section position; (b) cross-section

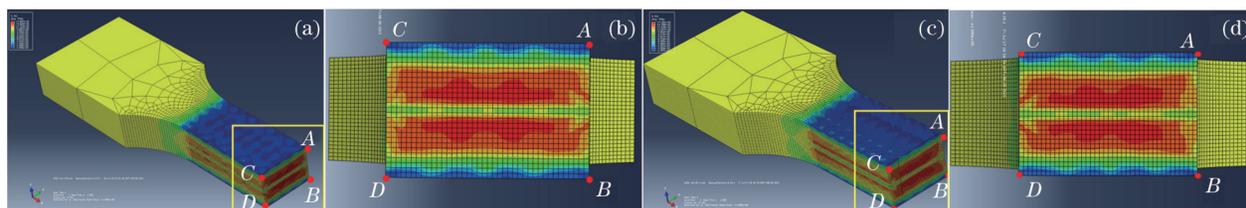


图4 双面同时冲击两种方式残余应力对比。(a) 方式1截面位置; (b) 方式1截面; (c) 方式2截面位置; (d) 方式2截面

Fig.4 Comparisons of residual stress with two strategies of double-sided simultaneous LSP impacts.

(a) Section position of strategy 1; (b) cross-section of strategy 1; (c) section position of strategy 2; (d) cross-section of strategy 2

的差异;深度方向上,与双面间隔冲击不同的是在材料中间部位不仅有残余拉应力,还有一定的压应力,且残余应力分布是完全对称的。从右边2幅图可以看出,方式2诱导的表面残余压应力分布有一定规律,表面上半部分的压应力明显较下半部分的压应力大,这与双面间隔冲击相反。这是因为在双面同时冲击的过程中,在冲击每一面下半部分的时候,材料的上半部分已经预先冲击过了。这和双面间隔冲击上下表面残余应力不同的原理相似。另外,深度方向上残余应力分布类似于方式1双面同时冲击的情况。

### 3.3 两种喷丸方式残余应力对比

如图2、3和4中试样截面的模拟图所示,标记点A、B、C、D用来方便选取数据。图5~7分别是AB、CD路径在深度方向上残余应力图。路径AB对应于冲击区域的一个边界,也是方式2最先冲击的边界,因此在路径AB上方式1和2诱导出的残余应力差异比在路径CD(方式2中最后冲击的边界)上的残余应力差异更明显。

#### 3.3.1 双面间隔冲击残余应力的比较

如图5所示,AB路径方式1和方式2上表面的残余压应力分别为-185 MPa和-112 MPa,底面的残余压应力分别为-152 MPa和-92 MPa。另外,方式1和方式2最大残余拉应力分别为22 MPa和11 MPa。然而,对于CD路径来说,方式1、2诱导出的残余应力的差异变小。方式1和方式2上表面的残余压应力分别为-180 MPa和-157 MPa,底面的残余压应力分别为-149 MPa和-133 MPa。另外,方式1和方式2最大残余拉应力分别为20 MPa和28 MPa。从以上数据可以看出,方式1和2诱导的残余拉应力差别不大,但方式1诱导的残余压应力明显比方式2诱导的残余压应力大。另外,AB、CD路径残余应力的差异说明了激光冲击对材料边界残余

应力的影响,以及脉冲序列对材料边界残余应力的影响比搭接冲击产生的各向异性<sup>[10]</sup>来的大。就冲击方式2而言,AB、CD路径所表现出的较大的差异源于边界效应的影响。在边界处,残余应力的平衡受到脉冲序列和周边材料缺失的影响。当每一列激光脉冲序列从一边界开始到另一边界结束,上下边界残余压应力差异不大,这符合方式1的结果;而当每一行激光脉冲序列最初沿着上边界(含A点平行于X轴的路径)冲击,最后沿着下边界(含C点平行于X轴的路径)结束冲击,这样在上边界就产生较小的残余压应力,而在下边界产生较大的残余压应力,上下边界残余压应力差异较大,这符合方式2的结果。这种与冲击路径相关的边界效应和文献<sup>[12]</sup>中的结果一致。

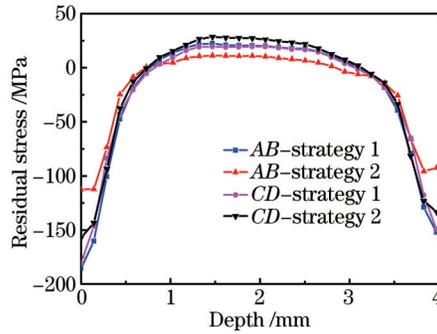


图5 双面间隔冲击残余应力对比

Fig.5 Comparisons of residual stress after double-sided non-simultaneous LSP impacts

### 3.3.2 双面同时冲击残余应力的比较

如图6所示,对于上边界AB路径来说,双面同时冲击条件下方式1和方式2表面的残余压应力分别为-165 MPa和-155 MPa。另外,方式1和方式2最大残余拉应力分别为47 MPa和32 MPa。而对于下边界CD路径,双面同时冲击条件下方式1和方式2表面的残余压应力分别为-164 MPa和-143 MPa。另外,方式1和方式2最大残余拉应力分别为36 MPa和47 MPa。从以上结果可以看出在方式1条件下,在上下边界处产生的残余压应力值几乎相同,而在方式2中这一差值较大。这是因为方式2中,上边界(含A点平行于X轴的路径)是最先冲击的,而当冲击下边界(含C点平行于X轴的路径)时,材料的其他大部分都已被冲击处理过。

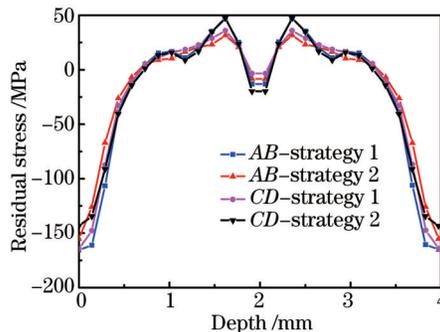


图6 双面同时冲击残余应力对比

Fig.6 Comparisons of residual stress after double-sided simultaneous LSP impacts

### 3.3.3 方式1下双面同时冲击与双面间隔冲击残余应力对比

从图7可以看出,虽然双面间隔冲击在上表面产生较大的残余压应力,且在材料内部产生较小的残余拉应力,但下表面残余压应力较小,考虑到裂纹大多产生于材料表面,而双面同时冲击带来对称均匀的残余应力,幅值较不同时冲击产生的残余应力相差不大,且在材料中间有一定的残余压应力,对于材料内部裂纹的萌生与扩展有一定的抑制作用。综上,双面同时冲击较双面间隔冲击有优势。

### 3.3.4 表面残余应力对比

除了在深度方向上可以对模拟结果进行对比,还可以对表面的残余应力结果进行对比如图8。图8是4个模型表面平行于Y轴方向的AC和BD路径模拟结果图(NS表示不同时,S表示同时)。从图中可以看出,方式1诱导的表面残余应力分布较均匀,波动不大,激光喷丸后具有较好的一致性,且在边界处也能获得较大的残余压

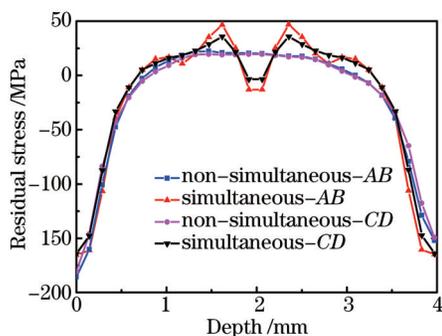


图7 方式1同时和间隔冲击残余应力对比

Fig.7 Comparisons of residual stress after two kinds of double-sided LSP impacts with strategy 1

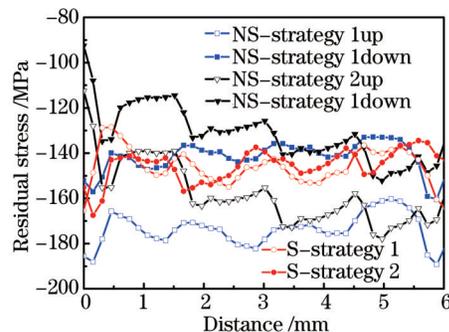


图8 表面残余应力对比

Fig.8 Comparisons of surface residual stress distributions

应力值,而方式2诱导的残余应力波动较明显,两边界间残余压应力值相差较大,一致性较差。另外,双面同时冲击诱导的表面残余压应力值虽然较双面间隔冲击上表面残余压应力值小,但较下表面诱导的残余压应力值大。

## 4 结 论

1) 大面积激光喷丸诱导的残余应力各向异性受激光冲击前进方向的影响。

2) 激光喷丸在 AM50 镁合金表层不仅能诱导高幅残余压应力,还会在材料内部产生不好的残余拉应力。双面同时冲击诱导出的残余压应力场结构对称,板料沿厚度中间部分不仅有残余拉应力存在,还有一定的压应力,一致性较双面间隔冲击好。

3) 大面积激光喷丸处理时冲击前进方向垂直于拉伸力方向的冲击方式可以获得数值更大的残余压应力,残余压应力场更均匀、一致性好,并且在边界处也可以获得较大的残余压应力,这些优点都能很好地抑制裂纹的萌生和扩展。

## 参 考 文 献

- 1 S G Irizalp, N Saklakoglu, E Akman, *et al.*. Pulsed Nd:YAG laser shock processing effects on mechanical properties of 6061-T6 alloy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(1): 273-277.
- 2 X C Zhang, Y K Zhang, J Z Lu, *et al.*. Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening[J]. *Mater Sci Eng A-Struct*, 2010, 527(15): 3411-3415.
- 3 Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2925-2930.  
葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2925-2930.
- 4 E D Jones. Ultrafast laser-induced stress waves in solids[J]. *Appl Phys Lett*, 1971, 18(1): 33-35.
- 5 B P Fairand, A H Clauer. Effect of water and paint coatings on the magnitude of laser-generated shocks[J]. *Opt Commun*, 1976, 18(4): 588-589.
- 6 Charles S Montross, Tao Wei, Lin Ye, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *Int J Fatigue*, 2002, 24(10): 1021-1036.
- 7 Z W Cao, H Y Xu, S K Zou, *et al.*. Investigation of surface integrity on TC17 Titanium alloy treated by square-spot laser shock peening [J]. *Chin J Aeronaut*, 2012, 25(4): 650-656.
- 8 C Wang, Z L Lai, W F He, *et al.*. Effect of multi-impact on high cycle fatigue properties of 1Cr11Ni2W2MoV stainless steel subject to laser shock processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0103001.  
汪 诚, 赖志林, 何卫锋, 等. 激光冲击次数对 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢高周疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103001.
- 9 A W Warren, Y B Guo, S C Chen. Massive parallel laser shock peening: simulation, analysis, and validation[J]. *Int J Fatigue*, 2008, 30(1): 188-197.
- 10 N Hfaiedh, P Peyre, H Song, *et al.*. Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy[J]. *Int J Fatigue*, 2015, 70: 480- 489.
- 11 X D Ren, Q B Zhang, S Q Yuan, *et al.*. A finite element analysis of thermal relaxation of residual stress in laser shock processing NI based

- alloy GH4169[J]. *Mater Des*, 2014, 54(2): 708–711.
- 12 C Correa, L Ruiz de Lara, M Díaz, *et al.*. Influence of pulse sequence and edge material effect on fatigue life of Al2024–T351 specimens treated by laser shock processing[J]. *Int J Fatigue*, 2015, 70: 196–204.
- 13 S Bhamare, G Ramakrishanan, S Mannava, *et al.*. Simulation–based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo alloy[J]. *Surf Coat Technol*, 2013, 232(10): 464–474.
- 14 S M Charles, W Tao, Y Lin, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International J Fatigue*, 2002, 24(10): 1021–1036.
- 15 Y K Zhang, C L Hu, L Cai, *et al.*. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser–excited shock waves[J]. *Appl Phys A*, 2001, 72(1): 113–116.
- 16 R Fabbro, J Fournier, P Ballard, *et al.*. Physical study of laser produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775–784.
- 17 Pei Xu, Ren Aiguo, Gu Yongyu, *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 552–556.
- 裴 旭, 任爱国, 顾永玉, 等. AZ91 镁合金激光冲击强化力学性能研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(4): 552–556.

栏目编辑: 张浩佳