

# 激光冲击强化 6061 铝合金的耐磨性能及电化学性能

宁成义<sup>1,2</sup>, 黄亿辉<sup>1\*</sup>, 张广义<sup>1</sup>, 张文武<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201;

<sup>2</sup>中国科学技术大学纳米科学技术学院, 江苏 苏州 215000

**摘要** 利用激光冲击强化(LSP)处理了 6061 铝合金,研究了 LSP 对试样耐磨性能及电学性能的影响,并对试样的显微硬度和残余应力等进行了测试与分析。结果表明,LSP 能有效提高试样的力学性能;LSP 试样的表面没有发生相变化,但硬度与残余应力显著增大,耐磨性明显提高;LSP 前后试样的摩擦系数相近,但 LSP 试样的磨损量减小,耐磨性得到提升。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;6061 铝合金;电学性能;耐磨性

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061403

## Wear Resistance and Electrochemical Properties of 6061 Aluminum Alloys Treated by Laser Shock Peening

Ning Chengyi<sup>1,2</sup>, Huang Yihui<sup>1</sup>, Zhang Guangyi<sup>1</sup>, Zhang Wenwu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China;

<sup>2</sup>Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215000, China

**Abstract** The 6061 aluminum alloys are treated by laser shock peening (LSP), and the effects of LSP on their wear resistance and electrochemical properties are investigated. The micro-hardness, residual stress, and so on are examined and analyzed. The results show that, LSP can effectively enhance the mechanical properties of samples. On the surfaces of the LSP treated specimens, there is no phase change, but the micro-hardness and residual stress increase obviously, and the corrosion resistance of 6061 aluminum alloys is obviously improved. The friction coefficients before and after the LSP treatment are comparable, but the wear loss of the LSP treated specimen decreases and the wear resistance is significantly improved.

**Key words** laser technique; laser shock peening; 6061 aluminum alloys; electrochemical properties; wear resistance

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

6061 铝合金具有密度小、比强度高、焊接性能良好等特点,被广泛应用于航空、航天、汽车电子、交通运输及化学工业领域中<sup>[1-3]</sup>。在实际工程应用中,受到腐蚀燃气、潮湿环境及摩擦接触的影响,材料容易发生腐蚀开裂,使用寿命大大降低。

因此,寻求一种合适的方法提高材料的耐腐蚀性能和耐磨性能具有重要的意义。传统的提高材料使用寿命的方法有掺杂<sup>[4]</sup>、涂层、机械喷丸<sup>[5]</sup>等。其中,机械喷丸是一种纯机械的表面处理工艺,在工程领域中得到广泛应用。与传统的喷丸强化相比,激光冲击强化(LSP)<sup>[6-8]</sup>具有可控性好、无热影响区、处理方式简便等优点,被广泛用于提高材料

收稿日期: 2017-08-18; 收到修改稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金-浙江两化融合联合基金(U1609208)、浙江省博士后项目、宁波市自然科学基金(2017A610084)

作者简介: 宁成义(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: ningchengyi@nimte.ac.cn

导师简介: 张文武(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: zhangwenwu@nimte.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: huangyihui@nimte.ac.cn

的耐腐蚀、抗疲劳、耐磨性等综合性能<sup>[9]</sup>。LSP 利用高能量、短脉冲的激光束辐照材料表面,利用所产生的冲击效应对材料进行表面强化<sup>[10-12]</sup>。当激光束辐照在材料表面时,材料表面吸收层吸收激光能量产生高温高压的等离子体,等离子体向外膨胀时受到约束层的约束,会产生高压的冲击波并作用于材料表面。冲击波的峰值一般远超过材料的屈服极限,并在材料表面产生深层的塑性变形,诱导产生残余应力,表面晶粒细化,从而提高材料的性能。张永康等<sup>[13]</sup>研究发现,LSP 的 AM50 镁合金的硬度明显提高,强化效果明显。王学德等<sup>[14]</sup>发现,LSP 能有效提高 TC4 叶片的疲劳寿命。罗开玉等<sup>[15]</sup>研究发现,LSP 的 316L 不锈钢熔覆层表面晶粒得到细化,材料的耐腐蚀性显著提升。然而,国内关于利用 LSP 提高 6061 铝合金耐磨性能及耐腐蚀性的研究鲜有报道。

本文研究了不同冲击次数下 LSP 对 6061 铝合金耐磨性能及电化学性能的影响,观察了磨痕试样与电化学腐蚀试样的形貌,并分析了材料表面硬度,为 6061 铝合金的工程应用提供了实验依据。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

选用 6061 铝合金作为实验材料,其化学成分与力学性能分别见表 1、2。利用水刀将 6061 铝合金板材切割成 30 mm×25 mm×3 mm 的方形块体,用砂纸依次打磨抛光后进行超声波清洗,冷风吹干后待用。

### 2.2 实验方法

LSP 系统参数:激光器能量为 0.9 J,波长为 1064 nm,脉宽为 8 ns。采用侧面喷水的方式,水膜厚度约为 2 mm,以 0.1 mm 厚的铝箔作为吸收层。聚焦后的光斑为椭圆形,其中,长轴长为 1.64 mm,短轴

表 1 6061 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 6061 aluminum alloys (mass fraction, %)

Element	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Fe	Al
Content	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.25	0.04-0.35	0.15	0.4-0.8	0.7	Bal.

表 2 6061 铝合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6061 aluminum alloys

Property	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Density / (g·cm <sup>-3</sup> )
Value	124	55	2.69

长为 1.40 mm,激光功率密度为 6.23 GW·cm<sup>-2</sup>,光斑搭接率为 50%。进行多次冲击处理实验,每一次冲击结束后更换吸收层,防止吸收层材料被击穿,对试样进行 0,1,2 次处理,处理后的试样分别记为 T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>,具体的工艺参数见表 3。

表 3 LSP 的工艺参数

Table 3 Process parameters of LSP

Sample No.	Laser energy / J	Number of impacts	Overlapping rate /%	Power density / (GW·cm <sup>-2</sup> )
T <sub>0</sub>	0	0	0	0
T <sub>1</sub>	0.9	1	50%	6.23
T <sub>2</sub>	0.9	2	50%	6.23

## 3 实验结果与分析

### 3.1 表面形貌

LSP 前后试样的形貌如图 1 所示。可以看出,LSP 试样的表面凹凸起伏,这是因为 LSP 过程中产生的冲击波在材料表面产生严重的塑性变形。通过测试可知,T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 试样的表面粗糙度分别为 1.9330,3.8431,5.5712 μm。由此可知,LSP 会引起试样表面粗糙度的增大,高能量密度的激光冲击使材料表面形成了宏观的塑性变形,从而提高了材料的力学性能。

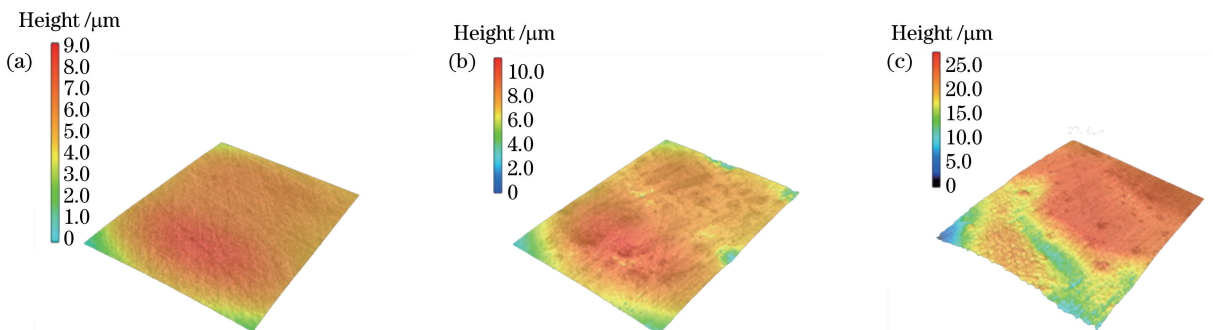


图 1 不同试样的形貌。(a) T<sub>0</sub>; (b) T<sub>1</sub>; (c) T<sub>2</sub>

Fig. 1 Morphologies of different samples. (a) T<sub>0</sub>; (b) T<sub>1</sub>; (c) T<sub>2</sub>

### 3.2 物相分析

通过 X 射线衍射 (XRD) 测量 LSP 前后试样的物相变化, 结果如图 2 所示。可以看出, LSP 试样中没有出现新的衍射峰, 材料没有发生相变, 但是衍射峰的强度减小, 半峰全宽的宽度增大, 这些变化是由晶粒细化引起的<sup>[16]</sup>。

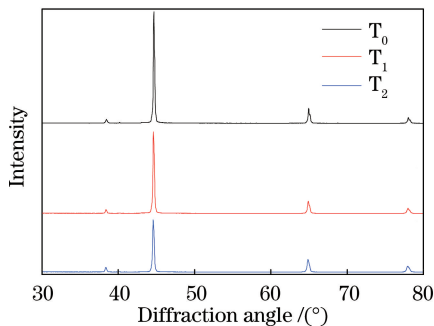


图 2 不同试样的 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns of different samples

### 3.3 硬度分析

采用上海集敏测试仪器有限公司生产的 MVS-1000D1 的显微硬度测试仪测量试样的硬度, 载荷为 200 g, 加载时间为 10 s, 每个点测量三次取平均值, 测试结果如图 3 所示。可以看出, 6061 铝合金基体的硬度为 88 HV, 而  $T_1$ 、 $T_2$  试样的表面硬度分别达到了 96.4 HV 和 106.3 HV, 分别比基体提高了 9.5% 和 20.4%。截面方向硬度测试的结果表明, LSP 试样的硬度随着截面距离的增大而减小,

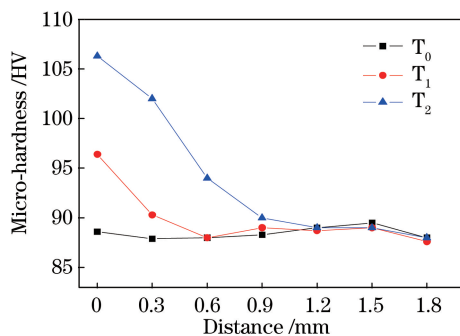


图 3 截面的显微硬度分布

Fig. 3 Cross-sectional micro-hardness distribution

直至达到基体硬度。这说明材料表面有一定深度的强化区, 冲击次数越多, 塑性变形越剧烈, 硬度值就越大。材料硬度值的增大有利于提高材料的耐磨性。在材料磨损过程中, 当接触应力超过材料的屈服强度时, 材料开始出现明显的塑性变形; 当接触应力达到材料断裂强度时, 材料会出现断裂磨损。金属材料的硬度越大, 屈服强度和断裂强度也越大, 金属材料的耐磨损性能也相应提升。

### 3.4 显微结构

使用凯勒试剂对 LSP 前后试样的表面进行腐蚀处理, 得到的表面金相图如图 4 所示。可以看出, 未处理试样的晶粒尺寸较大, LSP 试样晶粒发生明显细化, 且随着冲击次数的增加, 晶粒细化更明显。晶粒细化的产生有利于提高材料的耐磨性能与耐腐蚀性能。

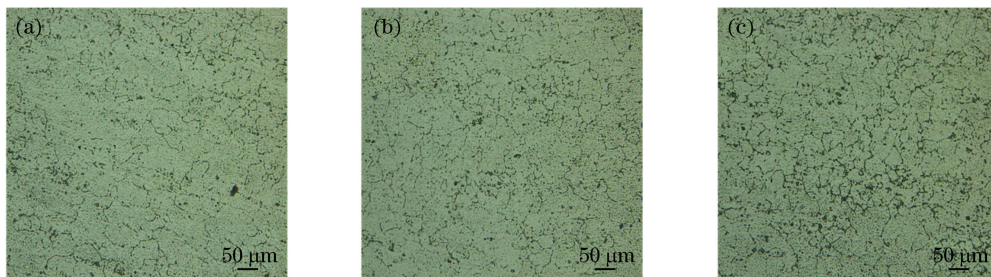


图 4 不同试样的金相图。(a)  $T_0$ ; (b)  $T_1$ ; (c)  $T_2$

Fig. 4 Metallographic images of different samples. (a)  $T_0$ ; (b)  $T_1$ ; (c)  $T_2$

### 3.5 残余应力

使用 X 射线应力测试仪对 LSP 前后试样的残余应力进行测试。结果表明,  $T_0$  试样的残余应力值为  $-6.0$  MPa,  $T_1$  试样的残余应力为  $-51.1$  MPa, 比  $T_0$  试样明显增大。残余压应力的增大能有效提高材料的耐腐蚀性, 这是因为腐蚀过程中通常以拉应力为主, LSP 引入的残余压应力会抵消腐蚀过程中的一部分拉应力, 促进裂纹闭合, 从而抑制材料在腐蚀过程

中的裂纹萌生和扩展, 提高材料的耐腐蚀性。

### 3.6 电化学性能分析

采用三电极体系进行电化学实验, 辅助电极为铂片电极, 参比电极为饱和甘汞电极, 电解液是质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液, 实验温度为  $20$  °C, 测量试样的面积为  $1$  cm<sup>2</sup>, 扫描速率为  $1$  mV · s<sup>-1</sup>, 扫描电位为  $-1.6 \sim -0.6$  V。LSP 前后试样的塔菲尔极化曲线如图 5 所示, 自腐蚀电位  $E$  及腐蚀电流密度  $I$

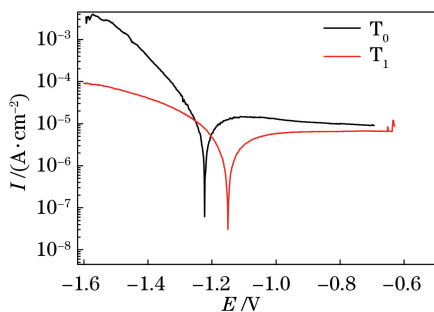


图5 不同试样的塔菲尔极化曲线

Fig. 5 Tafel polarization curves of different samples

的结果见表4。

表4 不同试样的腐蚀结果

Table 4 Corrosion results of different samples

Sample No.	Corrosion potential /V	Corrosion current density /( $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
T <sub>0</sub>	-1.239	$1.47 \times 10^{-6}$
T <sub>1</sub>	-1.180	$6.02 \times 10^{-7}$

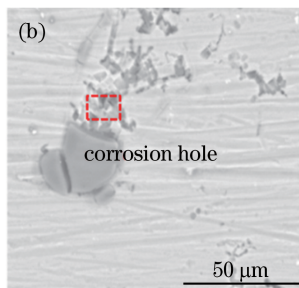
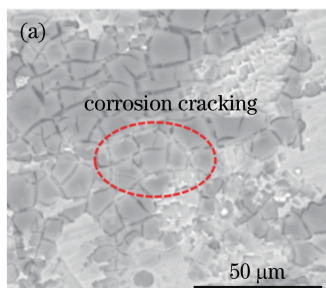
图6 不同试样腐蚀后的SEM形貌。(a) T<sub>0</sub>; (b) T<sub>1</sub>

Fig. 6 SEM morphologies of different samples after corrosion. (a) T<sub>0</sub>; (b) T<sub>1</sub>

### 3.8 摩擦学性能分析

使用摩擦磨损试验机进行摩擦实验,摩擦球采用直径为6 mm的Cr15轴承钢,施加载荷为5 N,运行时间为10 min,往复运行距离为5 mm,运行速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。LSP前后试样的摩擦系数随时间的变化曲线如图7所示。可以看出,在磨损的前200 s,摩擦系数都呈先增大后减小的趋势,这是因为摩擦副接触基体,产生了划痕与犁沟,接触面含有硬质点等不均匀颗粒,造成摩擦系数增大。当摩擦进行到300 s以后,摩擦系数趋于稳定在0.45~0.50。在磨损的前200 s, T<sub>1</sub>试样的摩擦系数略大于T<sub>0</sub>试样,这是由于LSP增大了试样的表面粗糙度,使试样在磨损跑合阶段的摩擦系数大于T<sub>0</sub>试样。在300 s以后,LSP前后试样的摩擦系数相近。因此,在5 N的载荷力下,LSP对6061铝合金摩擦系数的影响不大。

LSP前后试样的磨损量如图8所示。T<sub>1</sub>试样的磨损量为1.35 mg, T<sub>0</sub>试样的磨损量为1.80 mg,

从表4可以看出,一次LSP处理使试样的腐蚀电位从未处理时的-1.239 V增大到-1.180 V,自腐蚀电位正移,腐蚀电流密度从 $1.47 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 减小到 $6.02 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。腐蚀电流密度与腐蚀速率成正比关系,当腐蚀电流密度减小时,腐蚀速率也会减小,材料的耐腐蚀性提升。

### 3.7 腐蚀形貌

使用扫描电镜(SEM)对LSP前后试样经过腐蚀后的形貌进行分析,结果如图6所示。可以看出,未处理试样的腐蚀点堆聚,有明显的腐蚀开裂现象,可以推断,在腐蚀过程中试样表面发生了剧烈的腐蚀; LSP后试样表面的点腐蚀坑较少,腐蚀开裂现象不明显,腐蚀较为缓慢,材料的耐腐蚀性更好。这是因为LSP使材料表面晶粒细化,并产生了残余应力,这有效阻止了腐蚀开裂和点腐蚀的扩展,更多的晶粒也阻碍了应力的释放,减小了腐蚀速率。

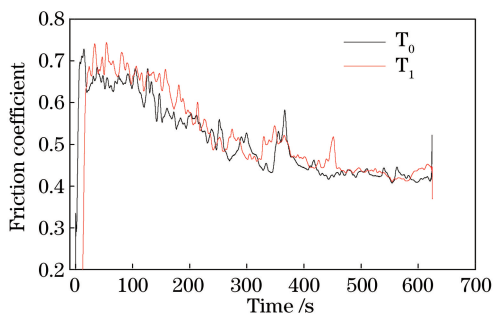


图7 不同试样的摩擦系数随时间的变化

Fig. 7 Friction coefficients of different samples versus time LSP使试样的磨损量减小了约25%,耐磨性得到明显提升。这说明通过增大6061铝合金表面的硬度,LSP能有效改善材料的耐磨性。

### 3.9 磨痕形貌

LSP前后试样的磨痕表面形貌如图9所示。可以看出, T<sub>0</sub>试样的磨痕表面有明显的磨粒脱落现象,表面沟槽分布较广且不均匀,犁沟的深度较



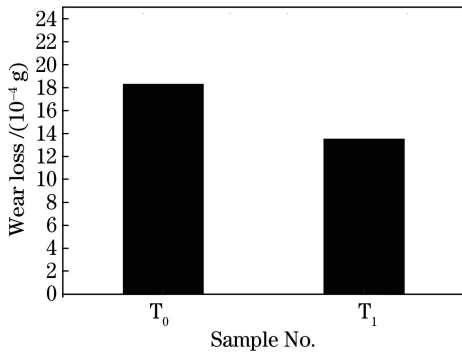
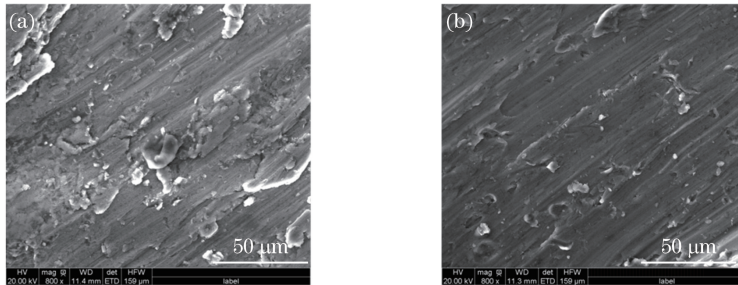


图 8 不同试样的磨损量

Fig. 8 Wear losses of different samples

图 9 不同试样的磨痕表面形貌。(a) T<sub>0</sub>; (b) T<sub>1</sub>Fig. 9 Wear surface morphologies of different samples. (a) T<sub>0</sub>; (b) T<sub>1</sub>

1) LSP 不会使 6061 铝合金产生相变,但 LSP 后 6061 铝合金的硬度增大,表面出现晶粒细化现象,强化效果显著。

2) LSP 可以使 6061 铝合金表面的点腐蚀现象减少,材料的耐腐蚀性得到明显提高。

3) 经过一次 LSP 处理的 6061 铝合金的耐磨性得到明显改善。

### 参 考 文 献

- [1] Sun C F, Ding Y C, Tang X W. Fatigue property of aluminum alloy AL6082 [J]. *Automobile Technology*, 2009(6): 55-58.  
孙春方, 丁焜赫, 唐希文. AL6082 铝合金疲劳性能 [J]. *汽车技术*, 2009(6): 55-58.
- [2] Hirsch J. Recent development in aluminium for automotive applications [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(7): 1995-2002.
- [3] 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.
- [4] Nalla R K, Altenberger I, Noster U, *et al.* On the influence of mechanical surface treatments-deep

大,磨损过程较为剧烈。T<sub>1</sub> 试样的磨痕底部相对光滑,犁沟较小,宽度较小,没有表面脱落现象,只是发生了轻微的磨粒磨损,磨损过程较为平稳。因此,LSP 通过提高材料的硬度及屈服强度,使材料表面不容易发生脆断与脱落,抑制了裂纹的扩展,降低了磨损,有效提高材料的耐磨性能。

## 4 结 论

通过 LSP 对 6061 铝合金进行了处理,分析了 LSP 前后试样的摩擦磨损性能及电化学性能,表征了 LSP 前后试样的物相及硬度变化,得出以下结论。

rolling and laser shock peening-on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 355(1/2): 216-230.

- [5] Okido S, Yoshimura T, Enomoto K, *et al.* Preventive effect of shot peening on stress corrosion cracking [J]. *Materials Science Research International*, 2002, 8(4): 193-198.
- [6] Peyre P, Carboni C, Forget P, *et al.* Influence of thermal and mechanical surface modifications induced by laser shock processing on the initiation of corrosion pits in 316L stainless steel[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(16): 6866-6877.
- [7] Qiao H C, Zhao J B, Zhang G X, *et al.* Effects of laser shock peening on microstructure and residual stress evolution in Ti-45Al-2Cr-2Nb-0.2B alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 276: 145-151.
- [8] Gill A S, Telang A, Vasudeyan V K. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 463-472.
- [9] Dane C B, Hackel L A, Daly J, *et al.* High power laser for peening of metals enabling production technology [J]. *Materials and Manufacturing*

- Processes, 2000, 15(1): 81-96.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Li Y Q, Meng C J, Wang X D, *et al.* Corrosion resistance property of 316L stainless steel welding joints treated by laser shock peening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061402.  
李玉琴, 孟长军, 王学德, 等. 激光冲击强化 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061402.
- [13] Zhang Y K, Chen J F, Xu R J. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 1068-1072.  
张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究 [J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1068-1072.
- [14] Wang X D, Li Q P, Zhou X, *et al.* Improvement of vibration fatigue performance on LSP processed TC4 blade [J]. China Surface Engineering, 2012, 25(2): 75-80.  
王学德, 李启鹏, 周鑫, 等. 激光冲击强化提高 TC4 叶片振动疲劳性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 75-80.
- [15] Luo K Y, Zhou Y, Lu J Z, *et al.* Influence of laser shock peening on microstructure and property of cladding layer of 316L stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402005.  
罗开玉, 周阳, 鲁金忠, 等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402005.
- [16] 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.