

# 激光冲击渗碳 12CrNi3A 钢的磨损性能

李玉琴 李应红 何卫锋 李靖 张峰 周留成

(空军工程大学等离子体动力学实验室, 陕西 西安 710038)

**摘要** 提出激光冲击处理增强渗碳的组和方法,提高了 12CrNi3A 钢渗碳层的质量和耐磨性能。采用球磨实验分析了渗碳和激光冲击增强渗碳两种工艺下材料的耐磨性能,采用扫描电镜(SEM)研究了激光冲击增强渗碳对 12CrNi3A 材料微观组织的影响。结果表明,激光冲击渗碳试样的比磨损率为  $2.69 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{Nm}$ ,比渗碳试样降低了 29%。从摩擦系数和微观组织两个方面分析讨论了这种工艺方法提高 12CrNi3A 耐磨性能的机理。一方面,激光冲击增强渗碳使试样的摩擦系数降低了 25%;另一方面,激光冲击渗碳试样表层形成了大量细小的碳化物颗粒,并呈梯度分布,从而提高了 12CrNi3A 钢材料的耐磨性能。

**关键词** 激光技术; 激光冲击处理; 渗碳层; 12CrNi3A 钢; 耐磨性能

中图分类号 TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0903004

## Wear Resistance of 12CrNi3A Steel after Carburization and Laser Shock

Li Yuqin Li Yinghong He Weifeng Li Jing Zhang Feng Zhou Liucheng

(Science and Technology on Plasma Dynamics Lab, Air Force Engineering University,  
Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract** In order to improve the carburized layer quality and wear performance of 12CrNi3A-steel, a combined method of laser shock processing carburization is put forward. The wear performances of different samples which are directly carburized and carburized after laser shock processing are measured by the ball milling experiment. The microstructures of 12CrNi3A steel are examined by scanning electron microscope (SEM). The result shows that the wear rate of carburized after laser shock is  $2.69 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{Nm}$ , reduced by 29% comparing with the samples carburized only. The mechanism of wear resistance improvement is discussed from two aspects. For one thing, the friction coefficient reduces by 25% after laser shock processing and carburization. For another, a large number of fine carbide particles on carburized layer are formed in the sample carburized after laser shock, and the surface carbide particles of 12CrNi3A steel are distributed in a gradient manner.

**Key words** laser technology; laser shock processing; carburized layer; 12CrNi3A steel; wear resistance

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 350.3850

## 1 引言

12CrNi3A 珠光体型渗碳钢在淬火后低温回火或高温回火都有良好的综合力学性能。其低温韧性好,缺口敏感性小,切削加工性能良好,冷变形塑性中等,但有回火脆性和形成白点的倾向<sup>[1]</sup>,已用于制造飞机发动机各类齿轮、轴、活塞涨圈、滚子等。采用 12CrNi3A 制造的航空发动机中传动齿和轴,在

工作中既受到强烈的摩擦,又受到很大的交变应力和冲击载荷作用,易发生疲劳和磨损。为了提高其耐磨性能,一般采用渗碳处理,使得表层获得高的表面硬度、耐磨性及高的接触疲劳强度,延长零件的使用寿命。但是,渗碳处理温度较高,在处理工件的变形大,渗碳层硬度和耐磨性提高有限。研究表明,采用机械研磨法、超声喷丸等方法使得材料表面晶

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-05-03

基金项目: 陕西省自然科学基金(2012JQ6012)

作者简介: 李玉琴(1982—),女,硕士,讲师,主要从事激光冲击强化技术等表面处理方面的研究。

E-mail: yuqin511@163.com

粒细化,晶界增多,这些表面区域高体积分数的晶界为原子扩散提供了理想的通道,有助于大幅度地提高材料表面化学元素的渗入浓度和深度,降低化学处理温度和减少保温时间,有利于对精密零件实施有效的化学处理<sup>[2]</sup>,但是受加工设备和工件型面尺寸等条件制约,难以实现广泛的工业应用。近年来发展的一种新型的表面强化技术——激光冲击强化技术(LSP),是通过激光诱导等离子体冲击波在材料表面引起塑性变形,残留较大的压应力<sup>[3]</sup>,同时使得表层形成高密度位错,晶粒细化,甚至达到纳米级<sup>[4-7]</sup>,显著提高材料的抗疲劳<sup>[8-15]</sup>、耐磨损<sup>[16]</sup>和抗应力腐蚀<sup>[17-20]</sup>等性能。

表1 12CrNi3A钢的主要化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical component of 12CrNi3A steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Concentration	0.10~0.17	0.17~0.37	0.30~0.60	≤0.035	≤0.035	0.60~0.90	2.75~3.15	≤0.030

## 2.2 实验过程和方法

为了对比研究渗氮及冲击波作用后渗氮对表层微观组织和耐磨性能的影响,设计了三种实验状态:第1组,未进行冲击波处理;第2组,气相渗碳;第3组,试样表面经激光冲击波作用后,按与第2组相同的工艺进行气相渗碳处理。

### 1) 激光诱导等离子体冲击波处理。

由于激光诱导的高压等离子体冲击波作用时间短,引起材料高应变率动态响应,要使表面发生塑性变形必须使冲击波压力大于其动态屈服强度(HEL)。为了保证激光诱导等离子体冲击波对材料的作用效果,首先对12CrNi3A钢激光功率密度进行估算。12CrNi3A钢材料的Hugoniot弹性极限 $\sigma_{HEL}$ 为

$$\sigma_{HEL} = \left[ \frac{k}{2G} + \frac{2}{3} \right] \sigma_0, \quad (1)$$

式中体积模量  $k = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ , 剪切模量  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,  $\sigma_0$  为屈服强度,  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu$  一般取 0.3,  $\sigma_0 = 700 \text{ MPa}$ , 计算得  $\sigma_{HEL} = 1225 \text{ MPa}$ 。

根据 Peyre 等<sup>[21]</sup>提出的冲击波峰值压力与激光功率密度的关系经验公式,估算引起材料动态塑性变形所需的功率密度:

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

式中  $P$  为冲击波峰值压力(GPa),  $\alpha$  是效率系数,  $A$  为吸收率,约束层为水、吸收层为胶带的情况下  $\alpha =$

本文将激光冲击强化技术与渗碳处理相结合,以典型的12CrNi3A渗碳钢为研究对象,对12CrNi3A钢材料激光冲击后进行渗碳处理,研究了其对材料摩擦磨损性能的影响,并探讨了激光冲击增强渗碳的机理。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

实验材料为12CrNi3A钢,通常在渗碳后淬火加低温回火状态下使用,此时零件心部为低碳回火马氏体,表层为高碳回火马氏体。12CrNi3A的主要成分见表1。

0.24,  $A = 0.87$ ;  $Z$  为水和胶带折合阻抗,即  $2/Z = 1/Z_t + 1/Z_c$ , 可得  $Z = 0.908 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $I$  为激光的输出功率密度:

$$I = E_l / \tau S, \quad (3)$$

式中  $E_l$  为激光器输出能量(J),  $\tau$  为激光脉冲(ns),  $S$  为试样面积( $\text{cm}^2$ )。

由计算可知,采用Nd:YAG固体激光器冲击参数为:激光波长1064 nm,激光能量10 J,脉宽20 ns,光斑直径4 mm,功率密度3.7 GW/ $\text{cm}^2$ ,搭接率66%。

### 2) 渗碳实验。

渗碳采用井式炉气体渗碳的方法,选用井式渗碳炉,在  $880 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  温度和甲苯介质滴注式的气氛下,保温3~5 h。

## 2.3 测试方法

采用Quanta200扫描电镜(SEM)观察渗碳和强化后渗碳试样横截面的形貌。耐磨试验在SJ-Tribometer磨损试验机上进行,以12CrNi3A材料的基材作标样,进行摩擦试验,测试参数为:线速度为100 mm/s,摩擦周次45000转,载荷1500 g,常温下测试。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 磨损性能结果

渗碳和激光冲击强化后渗碳试样的磨损轮廓如图1所示,箭头所指为磨痕部位。

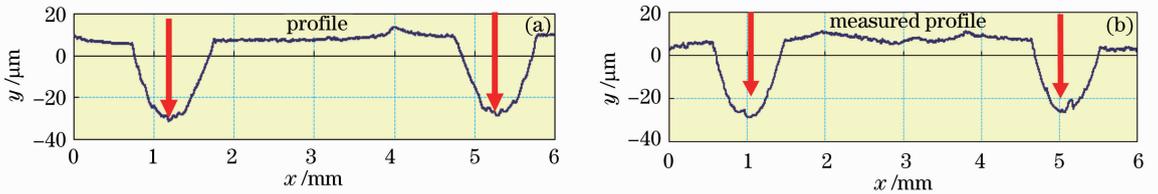


图 1 12CrNi3A 钢不同试样的磨痕轮廓。(a) 渗碳；(b) 激光冲击后渗碳试样

Fig. 1 Grinding crack outline of 12CrNi3A steel with different samples. (a) Carburization; (b) carburization after laser shock

12CrNi3A 钢不同试样的比磨损率如图 2 所示，12CrNi3A 钢试样的比磨损率为  $6.52 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{Nm})$ ，而渗碳试样的比磨损率为  $3.77 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{Nm})$ ，比磨损率降低了近一倍，经过激光冲击后渗碳处理试样的比磨损率为  $2.69 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{Nm})$ ，比渗碳处理试样降低了 29%。实验结果表明，激光冲击后渗碳降低了比磨损率，提高了材料的耐磨性能。

### 3.2 摩擦系数对耐磨性能的影响

对激光冲击后渗碳和单纯渗碳的试样进行了摩擦系数的测试对比，测试结果如图 3 所示。

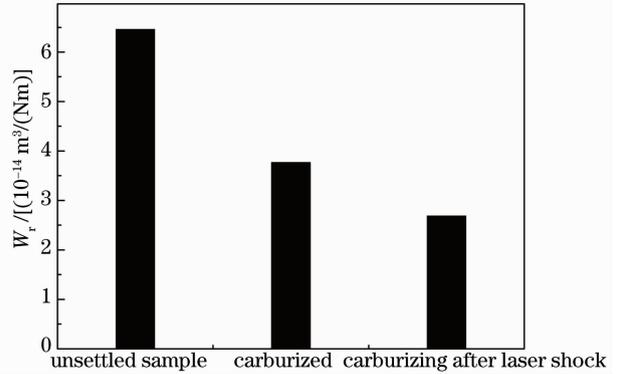


图 2 12CrNi3A 钢不同试样的比磨损率图

Fig. 2 Specific wearability of 12CrNi3A steel with different samples

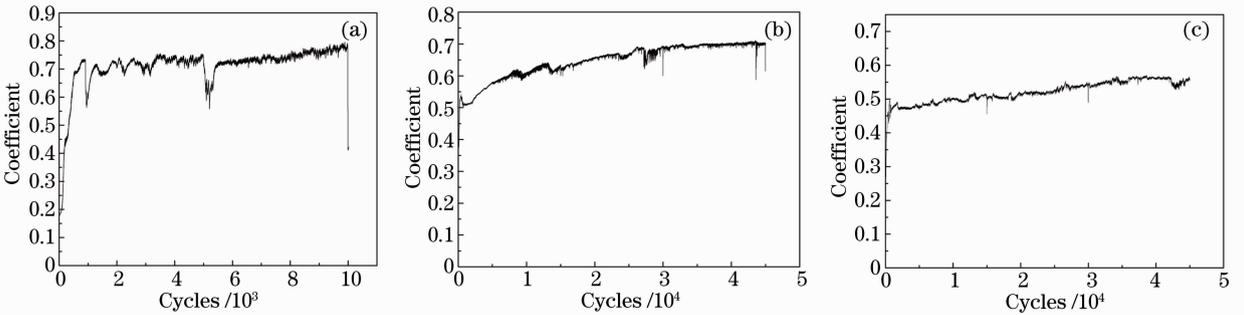


图 3 12CrNi3A 钢不同处理工艺的摩擦系数。(a) 未处理试样；(b) 渗碳；(c) 激光冲击后渗碳

Fig. 3 Friction coefficient of 12CrNi3A steel with different samples. (a) Unsettled sample; (b) carburization; (c) carburization after laser shock

在图 3(a)中，光板试样的摩擦系数高且不稳定，在整个测试过程中波动较大，试样稳定的摩擦系数大于 0.75。渗碳[图 3(b)]后摩擦系数随着循环次数的增加从 0.52 增加到 0.72 左右。而激光冲击后渗碳试样[图 3(c)]的表层摩擦系数为 0.45，且在整个测试过程中无明显波动，随着循环次数的增加，摩擦系数缓慢增加，在 45000 转摩擦周次后，摩擦系数才达到 0.54 左右，与渗碳试样相比降低了 25%。

激光冲击后渗碳试样的摩擦系数相比光板和渗碳试样，摩擦系数明显降低。体积磨损度计算式为<sup>[22]</sup>：

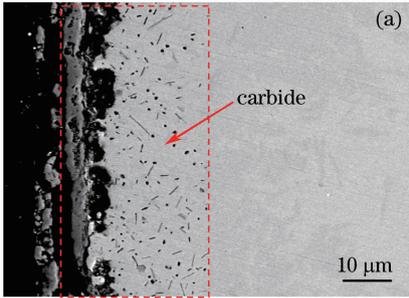
$$dV/dS = k_m(1 + \alpha f^2)^{1/2} \beta \frac{W}{\sigma_s}, \quad (4)$$

式中  $f$  为摩擦系数， $\beta$  为表面膜系数， $\sigma_s$  为受压屈服极限。由(4)式可以得出磨损量与材料的摩擦系数成正比。因此激光冲击后渗碳试样的磨损量降低，比磨损率降低，而耐磨性能提高。

### 3.3 微观组织结构对耐磨性能的影响

12CrNi3A 钢为低碳合金钢，经过  $880 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  高温渗碳时，12CrNi3A 钢基体组织转变为单相的奥氏体组织，奥氏体属于面心立方晶格，它有足够的空隙，可以溶解较多的活性碳原子，使钢材吸收碳的能力增加，含碳量由表面高碳逐渐向里降低一直过渡到心部，在缓慢冷却的情况下，可以得到近似于平衡状态的基本组织。SEM 图如图 4 所示。

从图中可以看出,渗碳处理试样[图 4(a)]扩散层中形成的碳化物分布深度在 20  $\mu\text{m}$  左右,碳化物颗粒少,分布不均匀,梯度明显,表层与扩散层之间的缺陷较多。相比于渗碳处理,激光冲击后渗碳处



理试样[图 4(b)]表面的组织更加致密和均匀,扩散层中形成的碳化物深度在 35~40  $\mu\text{m}$ ,细小颗粒状碳化物增多,且呈梯度分布。

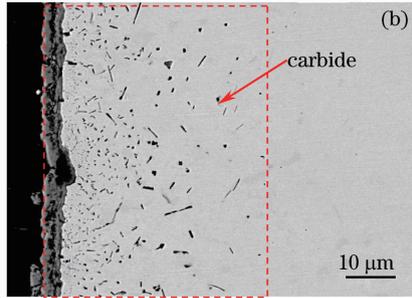


图 4 12CrNi3A 的未腐蚀截面的 SEM 图。(a) 渗碳;(b) 激光冲击后渗碳

Fig. 4 SEM photographs of 12CrNi3A with no corrosion. (a) Carburization; (b) carburization after laser shock

12CrNi3A 钢渗碳、激光冲击强化后渗碳处理试样经过腐蚀后表层的微观组织结构如图 5 所示。在图 5(a)中,表层的碳化物层结构不致密,碳化物层与扩散层之间的结合较差,有缺陷,扩散层中的碳

化物颗粒分布不均匀,沿深度方向分布的颗粒较大;经激光冲击后渗碳处理试样的表层渗层结构如图 5(b)所示,表层微观组织致密,渗碳的颗粒细小,数量增多,深度增加。

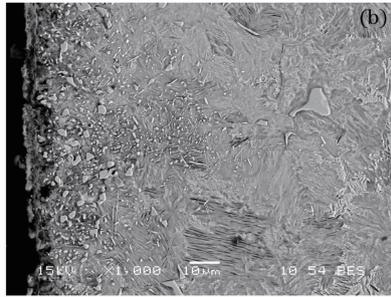
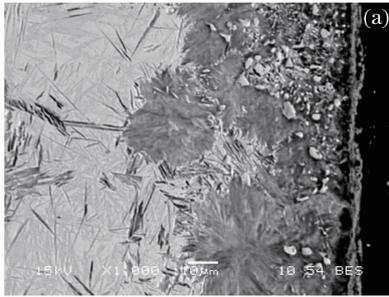


图 5 12CrNi3A 的腐蚀截面的 SEM 图。(a) 渗碳;(b) 激光冲击后渗碳

Fig. 5 SEM photographs of 12CrNi3A with corrosion. (a) Carburization; (b) carburization after laser shock

由于激光冲击使得材料表层组织发生剧烈塑性变形,残留较大残余压应力,并在表层形成大量的晶界、位错等<sup>[6]</sup>。残余压应力在渗碳 880  $^{\circ}\text{C} \pm 10$   $^{\circ}\text{C}$  温度下大部分释放,只有表层形成的晶粒细化、晶界增多、高密度位错等缺陷为 C 原子提供了更多的吸附中心,使得表层的 C 浓度明显增高,与基体内部形成了一个更大的浓度梯度,从而使得 C 原子沿晶界等缺陷提供的扩散通道进行短路扩散,扩散深度加深,而在晶粒内的奥氏体中间隙固溶 C 原子增多。沿晶界扩散的 C 原子在能量较高的高密度位错、晶界等部位与合金元素反应形成大量细小的碳化物,大量细小的碳化物形核长大,消耗了能量,阻碍了晶粒的进一步长大,从而形成大量细小、均匀分布的碳化物,且碳化物形成的深度加深。表层组织如图 5 所示,渗碳层结构致密,缺陷少,且形成的碳化物颗粒细小、梯度分布,深度加深,对表层起到了弥散强

化的作用,大量碳原子固溶在晶体中,起到固溶强化的作用,从而降低了材料的比磨损率,提高了材料的耐磨性能。

## 4 结 论

1) 激光冲击渗碳处理后 12CrNi3A 钢材料的比磨损率为  $2.69 \times 10^{-14} \text{ m}^3/(\text{Nm})$ ,比渗碳处理试样的比磨损率降低了 29%。

2) 激光冲击渗碳处理提高 12CrNi3A 钢试样的耐磨性能的原因是:激光冲击后渗碳处理渗碳层中形成大量细小的碳化物颗粒,呈梯度分布,且碳化物分布深度增加,使得材料表层的摩擦系数降低 25%,减小了磨损量,从而提高了材料的耐磨性能。

## 参 考 文 献

1 Chinese Aeronautical Materials Handbook Compiling Committee. Aeronautical Materials Handbook [M]. Beijing: Chinese

- Standards Press, 1988.
- 《中国航空材料手册》编辑委员会编. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- 2 Yan Mufu, Liu Ruiliang, Wu Yeqiong, *et al.*. First-principles characterization on mechanical properties of phases produced during lower temperature nitriding for nanocrystallized 3J33 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30 (2): 167-171.  
闫牧夫, 刘瑞良, 吴业琼, 等. 纳米化 3J33 钢低温渗氮生成相性能第一性原理表征 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30 (2): 167-171.
  - 3 M Dorman, M B Toparli, N Smyth, *et al.*. Effect of laser shock peening on residual stress and fatigue life of clad 2024 aluminium sheet containing scribe defects [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 548: 142-151.
  - 4 Weifeng He, Yuqin Li, Xiangfan Nie, *et al.*. A study of the microstructure and hardness of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr by laser shock peening [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 84-85: 471-475.
  - 5 Xiangfan Nie, Nidong Long, Weifeng He, *et al.*. The effect on the surface of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr by laser shock peening [J]. Materials Science Forum, 2011, 694: 946-950.
  - 6 Y Q Li, W F He, Y H Li, *et al.*. Characterization of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy by laser shock peening [J]. Materials Science Forum, 2012, 697-698: 466-469.
  - 7 R Melookaran, A Melaibari, C Deng, *et al.*. Laser shock processing on microstructure and hardness of polycrystalline cubic boron nitride tools with and without nanodiamond powders [J]. Materials and Design, 2012, 35: 235-242.
  - 8 Zhou Jianzhong, Xu Zengchuang, Huang Shu, *et al.*. Effects of different stress ratios on fatigue crack growth in laser shot peened 6061-T6 aluminum alloy [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0903006.  
周建忠, 徐增闯, 黄舒, 等. 基于不同应力比下激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0903006.
  - 9 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin, *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803002.  
黄舒, 周建忠, 蒋素琴, 等. AZ31B 镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析 [J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803002.
  - 10 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun, *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 316-320.  
曹子文, 邹世坤, 刘方军, 等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢 [J]. 中国激光, 2008, 35(2): 316-320.
  - 11 Zhou Jianzhong, Huang Shu, Zhao Jianfei, *et al.*. Numerical analysis on fatigue properties of aluminum alloy induced by laser shock peening [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35 (11): 1735-1740.  
周建忠, 黄舒, 赵建飞, 等. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析 [J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1735-1740.
  - 12 Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, *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 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.
  - 13 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong, *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2197-2201.  
李伟, 何卫锋, 李应红, 等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响 [J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2197-2201.
  - 14 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi, *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3323-3328  
罗新民, 张静文, 赵广志, 等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响 [J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3323-3328.
  - 15 Zhang Jie, Gu Xiang, Zhu Le, *et al.*. Numerical simulation of fatigue life of 7050 aluminum alloy processed by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3192-3195.  
张洁, 顾祥, 祝乐, 等. 激光冲击强化 7050 铝合金疲劳寿命的数值模拟 [J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3192-3195.
  - 16 Yan Hong, Hua Yinqun, Chen Ruifang, *et al.*. Study on the tribological and wear behavior of FeNi alloy treated by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(S1): 364-367.  
颜红, 花银群, 陈瑞芳, 等. 激光冲击强化铁镍合金摩擦磨损性能的研究 [J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 364-367.
  - 17 H Amar, V Vignal, H Krawiec, *et al.*. Influence of the microstructure and laser shock processing (LSP) on the corrosion behavior of the AA2050-T8 aluminium alloy [J]. Corrosion Science, 2011, 53(10): 3215-3221.
  - 18 H Lim, P Kim, H Jeong, *et al.*. Enhancement of abrasion and corrosion resistance of duplex stainless steel by laser shock peening [J]. J Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1347-1354.
  - 19 Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2632-2637.  
吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析 [J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2632-2637.
  - 20 Chen Jufang, Li Xingcheng, Zhou Jinyu, *et al.*. Research on corrosion resistance and mechanism of strengthened layer on AM50 Mg alloy surface processed by laser shot peening [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1203001.  
陈菊芳, 李兴成, 周金宇, 等. AM50 镁合金表面激光喷丸强化层耐蚀性能与机理研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1203001.
  - 21 P Peyre, R Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. Opt Quantum Electron, 1995, 27 (12): 1213-1229.
  - 22 Wen Shizhu, Huang Ping. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.  
温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

栏目编辑: 韩峰