

激光冲击强化 ZK60 镁合金拉伸和耐磨性能实验研究

王浩^{1,2} 黄亿辉^{1*} 张文武¹ 茹浩磊¹ 王声波³

¹中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

²中国科学技术大学纳米科学技术学院, 安徽 合肥 230026

³中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026

摘要 利用 Nd:YAG 脉冲激光器对 ZK60 镁合金进行了激光冲击强化处理, 分析了激光能量密度、单双面冲击和有保护层等工艺参数对 ZK60 镁合金力学性能的影响, 测试了 ZK60 镁合金在激光冲击强化处理前后的耐磨性能。实验结果表明, 激光冲击强化可以提高 ZK60 镁合金的力学性能和耐磨性; 高功率密度的处理效果比低功率密度的好; 单双面冲击处理效果没有明显差别; 有保护层时可以避免材料表面产生蜂窝状烧蚀层。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; ZK60 镁合金; 拉伸性能; 耐磨性

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.101406

Experimental Study of Tensile and Wear Resistance Properties of ZK60 Magnesium Alloy Treated by Laser Shock Peening

Wang Hao^{1,2} Huang Yihui¹ Zhang Wenwu¹ Ru Haolei¹ Wang Shengbo³

¹Ningbo Institute of Industrial Technology, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China

²Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract With pulsed Nd:YAG laser, ZK60 magnesium alloy is treated by laser shock peening (LSP). Influences of laser energy density, single-/double-sided LSP treatment, presence or absence of protective coating, and other process parameters on the mechanical property of ZK60 magnesium alloy are analyzed. Meanwhile, the wear resistance property of ZK60 magnesium alloy before or after LSP is tested. The experimental results show that LSP can improve the mechanical and wear resistance properties of ZK60 magnesium alloy, the reinforcing effect for high power density is better than that for low power density, there is no obvious difference between the single-sided and double-sided LSP treatments, and with the presence of protective coating, the honeycomb ablation layer occurring on the material surface can be avoided.

Key words laser technique; laser shock peening; ZK60 magnesium alloy; tensile property; wear resistance

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

镁合金具有密度小、比强度大、比弹性模量大、减震性好以及铸造性能良好等优点, 广泛应用于航空、汽车、火箭以及电子工业等领域^[1]。然而, 镁合金与铝合金相比存在强度低, 耐磨性差等缺点。提高镁合金力学性能的方法有热处理、添加其他元素以及大塑性变形等。何换菊等^[2-5]研究了热处理对 ZK60-Y 镁合金力学性能的影响, 通过添加稀土元素和采取热处理手段来提高镁合金的力学性能。

收稿日期: 2016-06-08; 收到修改稿日期: 2016-06-12; 网络出版日期: 2016-09-19

作者简介: 王浩(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: wh1@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

提高金属耐磨性的方法有化学热处理、表面添加涂层、表面激光冲击强化(LSP)等。其中激光冲击强化是一种新型金属材料表面处理技术^[6],即利用高能量激光束作用于材料表面,在短时间内诱导产生等离子体,在约束层的约束下产生强冲击波并作用于材料^[7-9]。在强冲击波的作用下,材料产生位错、孪晶等现象,表面产生残余应力,宏观表现为塑性变形^[10]。激光冲击强化处理可以有效改善金属材料力学性能、抗疲劳性能、耐磨性和耐腐蚀性等^[11-15]。激光冲击强化相对于热处理具有操作方便和效果明显等优点,早期已有很多学者开展了激光冲击强化对金属材料疲劳性能、耐腐蚀性影响的研究。张永康等^[16]研究了激光冲击强化对航空铝合金疲劳寿命的影响,发现经过LSP处理的航空铝合金7075T的疲劳寿命提高了80%。李玉琴等^[17]进行了激光冲击强化对纯铜表面耐磨性影响的研究,发现经过LSP处理后的纯铜磨损率下降了20%,耐磨性得到了显著提高。

本文通过改变激光冲击强化工艺参数,研究激光能量密度、单双面冲击和有无保护层等参数对ZK60镁合金力学性能的影响,同时研究了激光冲击强化对ZK60镁合金磨损量与摩擦系数的影响。

2 实 验

实验材料选用ZK60镁合金,其组成物质为Mg5.5Zn0.83Mn0.04Al(5.5%、0.83%、0.04%分别指对应组分所占的质量分数)。使用水刀对试件进行切割,拉伸试件的几何尺寸如图1所示。磨损摩擦试件为20 mm×20 mm×3 mm的正方形薄片,使用砂纸进行打磨抛光,并使用酒精清洗打磨试件的表面。经过上述处理之后的试件进行激光冲击强化处理。

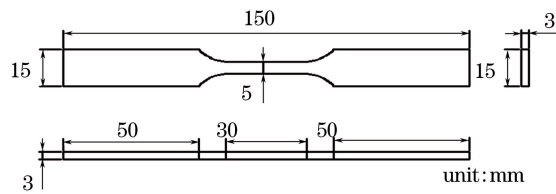


图1 ZK60镁合金拉伸试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tensile sample of ZK60 magnesium alloy

实验所用激光器为Nd:YAG脉冲激光器,波长为1064 nm,脉宽为8 ns,重复频率为1 Hz,输出能量范围为0~0.8 J,原始光斑直径为10 mm。将3M公司生产的100 μm厚的铝箔贴在待处理试件表面作为激光能量的吸收层,通过侧面喷水的方式在铝箔表面形成大约2 mm厚的水膜作为激光冲击强化约束层。利用焦距为500 mm的平凸透镜将原始激光束聚焦成直径为1.4 mm的光斑,聚焦后的激光透过水膜辐照到铝箔上。铝箔吸收高能量激光束后在表面形成高温高压的等离子体,等离子体在约束层的约束下产生高压冲击波并向试件内部传播,在材料表面附近产生残余应力从而对试件进行强化。冲击波的峰值压力可以根据Fabbro模型进行计算^[18]:

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \cdot \sqrt{ZI_0}, \quad (1)$$

式中 α 为内能转化为热能的转化系数,一般取0.25; Z 为约束层和保护层的耦合声阻抗,其满足

$$2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2, \quad (2)$$

式中 Z_1 为水膜约束层的声阻抗; Z_2 为铝箔吸收层的声阻抗; I_0 为激光功率密度,其满足

$$I_0 = \frac{E}{S\tau}, \quad (3)$$

式中 E 为激光输出能量, S 为聚焦后光斑面积, τ 为激光束脉宽。

Hugoniot弹性极限公式为

$$\sigma_H = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \sigma_Y, \quad (4)$$

式中 σ_H 为材料的动态屈服强度, ν 为材料的泊松比, σ_Y 为一维应力时材料的动态屈服强度。由(4)式可以看出,当冲击波的压力超过材料的动态屈服强度时,材料就会发生塑性变形,并且在材料内部产生残余应力。

激光处理区域的光斑搭接率为 50%，拉伸试件的处理区域以及光斑运动方向如图 2 所示。实验测试了激光能量密度、单双面冲击和有无保护层等工艺参数对 ZK60 镁合金力学性能的影响，以及激光冲击强化处理前后 ZK60 镁合金耐磨性的变化，详细工艺参数见表 1。力学性能测试使用电子万能实验机(CMT5105, 三思纵横科技股份有限公司, 中国), 拉伸速率为 0.5 mm/min。磨损量通过精度为 0.01 mg 的精密天平进行测重。

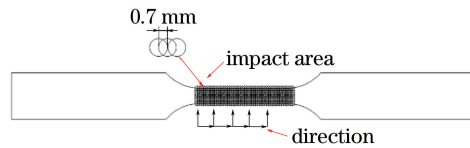


图 2 拉伸试件处理区域图

Fig. 2 Processing area graph of tensile sample

表 1 激光冲击强化工艺参数

Table 1 Process parameters of LSP

Sample number	Power density / (GW/cm ²)	Impact times	Protective layer	Single-/double-sided LSP	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa
P ₀	untreated	untreated	untreated	untreated	250	135
P ₁	4.87	1	with	double-side	255	149
P ₂	4.87	1	with	single-side	255	147
P ₃	6.50	1	with	double-side	260	156
P ₄	6.50	1	without	double-side	265	155
P ₅	6.50	1	with	single-side		

3 结果分析

3.1 物相分析

利用 X 射线衍射(XRD)对激光冲击强化处理前后 ZK60 镁合金试件表面进行物相分析,如图 3 所示。由图可以看出,经过激光冲击强化处理后 XRD 图谱中并未出现新的衍射峰,说明经过激光冲击强化处理的试件不会在试件表面产生新的物相。但是试件表面衍射峰的峰值会下降,这是因为激光冲击强化会造成材料表面晶粒细化,并且产生残余应力,从而降低了衍射峰的峰值。

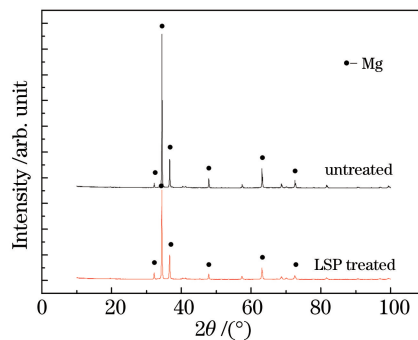


图 3 激光冲击强化前后 ZK60 镁合金 XRD 图

Fig. 3 XRD patterns of ZK60 magnesium alloy before and after LSP treatments

3.2 硬度分析

以水作为约束层、铝箔作为保护层,经过不同激光功率密度处理后,ZK60 镁合金的表面硬度发生了变化,结果如图 4 所示。ZK60 镁合金的原始硬度为 72.67 HV,试件 P₁ 经过输出能量为 4.87 GW/cm² 的激光冲击强化处理后,硬度达到了 77.89 HV。试件 P₃ 经过输出能量为 6.50 GW/cm² 的激光冲击强化处理后,硬度达到了 82.07 HV。这是因为 LSP 诱导冲击波作用于镁合金表面,在处理区域产生残余应力,形成大量的孪晶与位错,导致材料处理区域出现晶粒细化,进而提高了硬度。

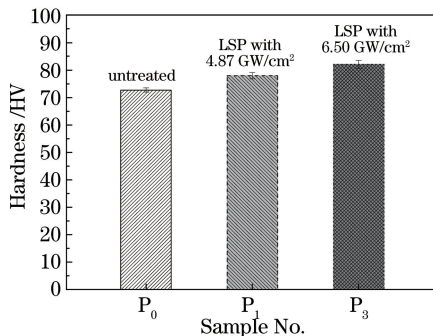


图 4 不同功率密度激光冲击强化处理后试件表面硬度

Fig. 4 Surface hardness of samples after LSP treatments at different laser power densities

3.3 力学性能分析

3.3.1 拉伸性能

经过不同工艺参数的激光冲击强化处理后,试件的力-位移曲线如图 5 所示。从图中可以看出,试件的应力-应变曲线均是由弹性阶段和屈服阶段组成;经过激光冲击强化处理的试件比未经激光冲击强化处理的试件屈服强度更高,且抗拉能力有所提高。

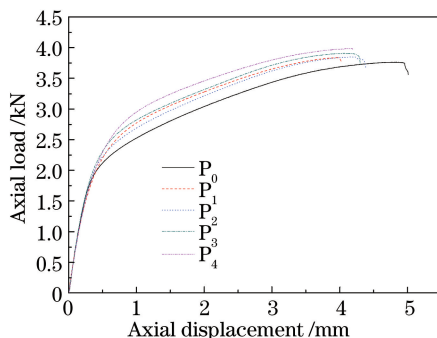


图 5 不同工艺参数的激光冲击强化处理后试件力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curves of samples after LSP treatments at different process parameters

结合表 1 和图 5 可以发现,未经处理试件的抗拉强度和屈服强度为 250 MPa 和 135 MPa,而经过激光功率密度为 4.87 GW/cm² 单面处理和双面处理的试件抗拉强度均为 255 MPa,屈服强度分别提高到 147 MPa 和 149 MPa。经过激光冲击强化处理的试件抗拉强度与屈服强度与未经处理试件相比都有提高,但是单面处理和双面处理效果几乎无差别。当激光功率密度为 6.50 GW/cm² 时,经过无保护层与有保护层处理的抗拉强度分别提高到 265 MPa 和 260 MPa,屈服强度分别提高到 155 MPa 和 156 MPa,抗拉强度和屈服强度都有提高,但是有吸收层和无吸收层处理效果差别不大。从图 6 所示的材料表面形貌图可以看出,吸收层不仅可以产生等离子体,而且可以保护试件表面不会产生烧蚀,保持试件表面原有的光洁度。同时可

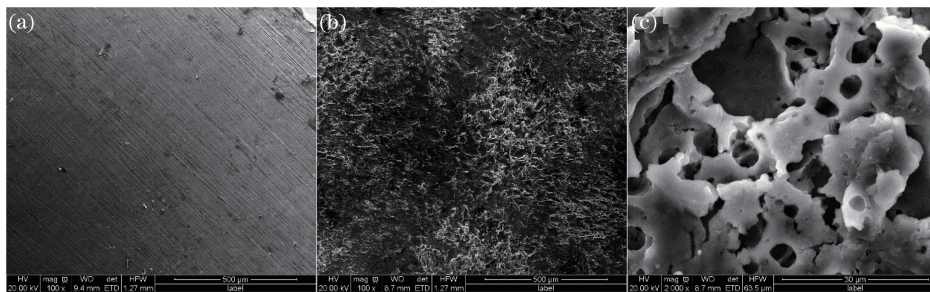


图 6 有无保护层激光冲击强化材料表面形貌。(a) 有保护层;(b)(c) 无保护层

Fig. 6 Surface morphologies of samples after LSP treatments with and without protective coatings.

(a) With protective coating; (b)(c) without protective coating

以看出,无保护层存在时,试件表面出现蜂窝状烧蚀层,不利于材料表层的防护。

激光冲击强化诱导的冲击波使材料表层产生孪晶,位错密度得到提高,导致形成更多的晶界,使得晶粒细化。由 Hall-Petch 关系可知,晶粒细化以及孪晶界阻碍位错运动现象都可以显著提高材料的强度。

3.3.2 断口形貌

P_0 和 P_3 拉伸试件断口扫描电子显微镜(SEM)微观图如图 7 所示。由图可以看出,未经激光冲击强化处理的 ZK60 镁合金断口处有很多韧窝,并且伴有晶间断裂;经过激光冲击强化处理的试件断口处出现“人”字形花样,与未经激光冲击强化试件相比韧窝较少,有河流花样出现,没有脆性断裂现象。

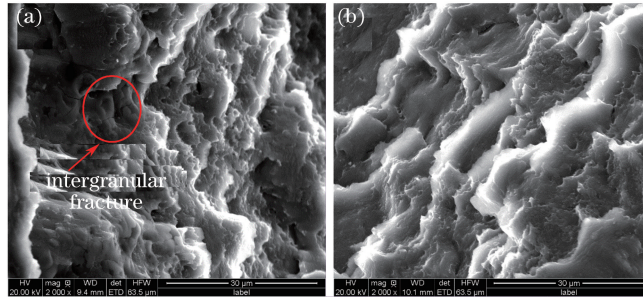


图 7 激光冲击强化前后 ZK60 镁合金拉伸断口 SEM 图。(a) 未处理;(b) 经过功率密度为 6.5 GW/cm^2 的激光处理

Fig. 7 SEM images of tensile fractures of ZK60 magnesium alloy before and after LSP treatments.

(a) Untreated; (b) treated at a power density of 6.5 GW/cm^2

3.4 摩擦磨损性能

3.4.1 磨损量分析

磨损摩擦测试过程中,摩擦球是直径为 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 mm/s。图 8 为未经处理和经过激光功率密度为 6.50 GW/cm^2 的激光冲击强化处理试件的磨损量。由图可以看出,未经处理试件的磨损量为 $3.7 \times 10^{-4} \text{ g}$,经过激光冲击强化处理后试件的磨损量降到了 $1.8 \times 10^{-4} \text{ g}$,磨损量降低了 51%。因此,激光冲击强化可降低 ZK60 镁合金的磨损量,从而提高其耐磨性。

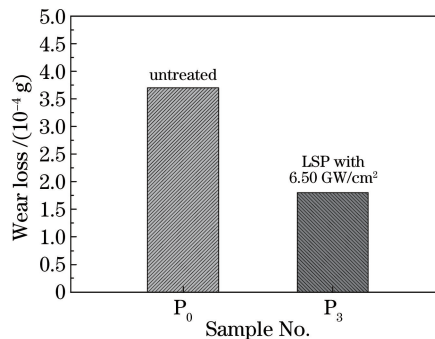


图 8 未处理和经过激光冲击强化处理试件的磨损量

Fig. 8 Wear losses of untreated and LSP treated samples

3.4.2 摩擦系数分析

图 9 给出了激光冲击强化处理前后试件摩擦系数随时间变化曲线。由图可以看出,100 s 之后材料的摩擦系数趋于稳定,未处理试件的平均摩擦系数为 0.3256,经过激光冲击强化处理后试件的平均摩擦系数变为 0.2992。可见经 LSP 处理后试件的摩擦系数变小,表面的摩擦性能变好。此外,可以看出在测试前期,经 LSP 处理后试件的摩擦系数高于未经处理的试件。这是因为在 LSP 处理过程中存在搭接率,因此会在两个冲击区域之间产生很薄的一层凸起,但是凸起部分很容易被磨掉。表层凸起部分被磨掉之后就是经过 LSP 处理的强化层,由硬度测试得知,经过 LSP 处理后材料表面的硬度得到提高。金属材料表面微观硬度的提高对材料的耐磨性有重要的影响,硬度增大会增强材料的耐磨性^[19]。

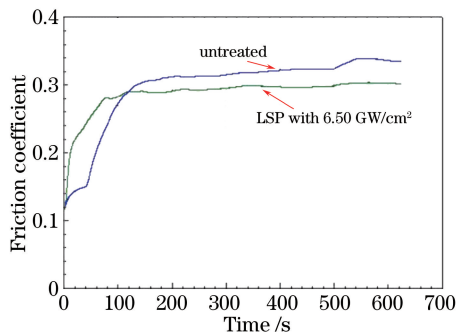


图9 未处理和经过激光冲击强化处理试件的摩擦系数

Fig. 9 Friction coefficients of untreated and LSP treated samples

4 结 论

实验研究了激光冲击强化对 ZK60 镁合金性能的影响。研究表明,激光冲击强化可以提高 ZK60 镁合金的表面硬度,随着能量功率密度的升高,材料的硬度变大;同时,激光冲击强化可以降低 ZK60 镁合金的磨损量与摩擦系数;经过不同工艺参数的激光冲击强化处理,ZK60 镁合金的抗拉强度和屈服强度都会得到提高,高功率密度的处理效果更好,单双面处理的效果差别不大,有保护层时可以避免材料表面产生蜂窝状烧蚀层。

参 考 文 献

- 1 Yu Kun, Li Wenxian, Wang Richu, *et al.* Research, development and application of wrought magnesium alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 277-288.
余 琨, 黎文献, 王日初, 等. 变形镁合金的研究、开发及应用[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 277-288.
- 2 He Huanju, Zhang Lingfeng, Yang Genmei, *et al.* Friction and wear properties of AZ31 magnesium alloy by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0906003.
何换菊, 张凌峰, 杨根妹, 等. 激光冲击强化 AZ31 镁合金摩擦磨损性能的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0906003.
- 3 Li Quan, Peng Jian, Jiang Xianquan, *et al.* Effect of Ce and homogeneous annealing on microstructure and deformation performance of Mg-2.0Zn-1.0Mn alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2014(S2): 64-67.
李 权, 彭 建, 蒋显全, 等. Ce 和均匀化对 Mg-2.0Zn-1.0Mn 镁合金组织和性能的影响[J]. 功能材料, 2014(S2): 64-67.
- 4 Qi F G, Zhang D F, Zhang X H, *et al.* Effect of Y addition on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Mn alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1352-1364.
- 5 Wang Menghan, Xian Guocai, Wang Yanli. Effect of annealing process on microstructure and wear resistance of AZ31 magnesium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(2): 123-124.
王梦寒, 咸国材, 王彦丽. 退火工艺对 AZ31 镁合金组织及耐磨性能的影响[J]. 金属热处理, 2014, 39(2): 123-124.
- 6 Zhang W W, Yao Y L, Noyan I C. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: Experiment, modeling and simulation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2004, 126(1): 10-17.
- 7 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing, *et al.* Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(1): 125-128.
王声波, 范 勇, 吴鸿兴, 等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击强化处理研究[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 125-128.
- 8 张永康. 激光冲击强化产业化关键问题及应用前景[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(3): 74-77.
- 9 Wang Jiangtao, Zhang Yongkang, Chen Jufang, *et al.* Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of 7075 aluminum alloy plasma arc weldments[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(12): 1203006.
王江涛, 张永康, 陈菊芳, 等. 强激光冲击对 7075 铝合金等离子弧焊接头电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203006.
- 10 Trdan U, Skarba M, Grum J. Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al-Mg-Si alloy[J]. Materials Characterization, 2014, 97: 57-68.

- 11 Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, *et al.* Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1766-1773.
乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(7): 1766-1773.
- 12 Zhang Qinglai, Shao Wei, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of laser shock processing on microstructures and mechanical properties of AZ31 and AZ80D-T6 magnesium alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(10): 2680-2687.
张青来, 邵 伟, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 和 AZ80-T6 镁合金显微组织及力学性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(10): 2680-2687.
- 13 Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.* Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0303001.
- 14 Zhong Jinshan, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, *et al.* Influence of laser shock processing on tensile properties and tribological behaviors of AISI304 stainless steel [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0503002.
钟金杉, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503002.
- 15 Trdan U, Grum J. SEM/EDS characterization of laser shock peening effect on localized corrosion of Al alloy in a near natural chloride environment [J]. *Corrosion Science*, 2014, 82: 328-338.
- 16 Zhang Yongkang, Zhang Bin, Yu Chengye, *et al.* Fatigue life improvement of aero Al-alloy by laser shocking [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1994(3): 17-19.
张永康, 张 斌, 余承业, 等. 激光冲击提高航空铝合金疲劳寿命的研究 [J]. *航空制造技术*, 1994(3): 17-19.
- 17 Li Yuqin, Wang Xuède, Yang Zhufang, *et al.* Wear resistance of copper improved by laser shock peening [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(2): 029002.
李玉琴, 王学德, 杨竹芳, 等. 激光冲击强化提高纯铜耐磨性能的研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(2): 029002.
- 18 Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- 19 Zhang Y S, Han Z, Wang K, *et al.* Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of pure copper [J]. *Wear*, 2006, 260(9-10): 942-948.