

# 激光冲击强化AZ31镁合金摩擦磨损性能的研究

何换菊<sup>1</sup> 张凌峰<sup>1,2</sup> 杨根妹<sup>1</sup> 吕阳阳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003

<sup>2</sup>河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室, 河南 洛阳 471003

**摘要** 采用高能脉冲激光束对AZ31镁合金进行激光冲击强化(LSP)处理,利用UMT-2摩擦磨损试验机对试样进行磨损实验,通过分析磨痕表面和磨屑形貌及磨屑能谱,得出LSP技术可提高AZ31镁合金的耐磨性能。在相同条件下,LSP AZ31镁合金摩擦系数和磨损量均比未冲击试样小,且磨屑更为细小,表明LSP对AZ31镁合金摩擦磨损性能有一定的改善效果。另外,AZ31镁合金经过LSP后,磨损机理由以剥落磨损为主转变为以磨粒磨损为主。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;AZ31镁合金;摩擦磨损;磨损机理

中图分类号 TN249;TG146.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0906003

## Friction and Wear Properties of AZ31 Magnesium Alloy by Laser Shock Processing

He Huanju<sup>1</sup> Zhang Lingfeng<sup>1,2</sup> Yang Genmei<sup>1</sup> Lü Yangyang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology,

Luoyang, Henan 471003, China

<sup>2</sup>Henan Key Laboratory of Non-Ferrous Materials Science & Processing Technology, Luoyang, Henan 471003, China

**Abstract** AZ31 magnesium alloy is treated by laser shock processing (LSP) using high-energy pulse laser beams. The dry-sliding wear tests of untreated and treated samples by LSP are conducted on the UMT-2 sliding wear tester. LSP can improve the wear resistance of AZ31 magnesium alloy through analyzing the micrographs of samples' worn surfaces and worn debris and energy dispersive spectra of worn debris. Under the same conditions, friction coefficients and mass loss of AZ31 magnesium alloy treated by LSP are both significantly lower than untreated samples and the debris are even finer, which indicates that LSP can improve the wear resistance of AZ31 magnesium alloy. Besides, the friction mechanism of AZ31 magnesium alloy treated by LSP turns from delaminate wear into abrasive wear.

**Key words** laser technique; laser shock processing; AZ31 magnesium alloy; wear behaviors; friction mechanism

**OCIS codes** 160.3918; 140.3538; 350.3850

## 1 引 言

镁合金具有密度小、比强度和比刚度高、抗震减震能力强、易于加工和回收等优点,被广泛应用在汽车、航空航天及电子工业等领域,是继钢铁、铝合金之后发展起来的第三类金属材料,被誉为“21世纪的绿色工程材料”<sup>[1-2]</sup>。由于零部件在工作时要和其他材料发生接触产生磨损,同时材料的加工成型和装配过程也会产生磨损<sup>[3-4]</sup>,而镁合金的硬度和塑性剪切抗力较差,其摩擦磨损性能较差,大大限制了其在工业产品上的应

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-04-30

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划(132300413212)、创新能力培育基金(2014ZCX007)

作者简介: 何换菊(1986—),女,硕士研究生,主要从事高速应变条件下镁合金的性能方面的研究。

E-mail: he\_huanju8866@163.com

导师简介: 张凌峰(1974—),男,博士,副教授,主要从事激光冲击技术方面的研究。

E-mail: zh\_lingfeng@163.com(通信联系人)

用。为改善镁合金的耐磨性能,对其进行表面改性成为扩大镁合金推广和使用的有效途径。目前镁合金表面改性技术有电镀及化学镀<sup>[5-6]</sup>、阳极氧化<sup>[7]</sup>、表面机械强化<sup>[8]</sup>、表面气相沉积<sup>[9-10]</sup>、表面扩散热处理、表面喷涂等,这些表面改性技术因其各自的不同特点被应用于不同性能的镁合金表面改性。针对提高镁合金的耐磨性能,上述方法仍存在工艺复杂、污染环境、处理后的镁合金构件不适合高温环境使用、与基体结合力差等缺点。激光冲击强化(LSP)技术是一种在超高应变速率下( $10^6\sim 10^7\text{s}^{-1}$ )对材料进行表面强化的新型加工技术,与传统的表面强化工艺相比,LSP对材料表面基本上无热损伤或机械损伤,更适用于处理对表面质量要求较高的精加工部件,同时还具有工艺简单、控制灵活,易于实现自动化、能快速高效地对工件表面局部区域进行表面处理等优点。已有研究表明 LSP 能显著提高材料的耐磨性、耐腐蚀性能和疲劳寿命<sup>[11-14]</sup>。而利用 LSP 技术改善镁合金摩擦磨损性能的研究鲜见报道。采用高能脉冲激光对 AZ31 镁合金进行强化处理,研究 LSP 对其硬度以及摩擦磨损性能的影响,深入探讨强化后合金的摩擦、磨损机制。

## 2 实验材料与方 法

### 2.1 实验材料

实验所用材料为 AZ31 镁合金,成分如表 1 所示。用线切割法加工成 15 mm×10 mm×6 mm 的试样块。切割好的试样在 420 °C 下固溶 24 h,再进行 220 °C/8 h 的时效处理,然后依次用 100~1000# 的 SiC 砂纸进行打磨,最后在乙醇溶液中进行超声波振洗,并吹干备用。

表 1 材料的化学组成

Table 1 Chemical composition of materials

Element	Mg	Al	Zn	Mn
Mass /%	Bal	3.06	0.65	0.38

### 2.2 激光冲击强化

本实验强化合金采用 Nd:YAG 脉冲激光器,激光波长为 1064 nm,脉冲能量为 6 J,激光功率密度为  $10^8\sim 10^9\text{ W/cm}^2$ ,脉冲宽度为 10 ns,光斑直径为 3 mm。其中流水层作为约束层,厚度为 1~2 mm,不透明铝箔为吸收层,厚度为 0.1 mm。由于脉冲激光的光斑直径有限,所以采用 50% 搭接率,LSP 区域为 2 排 4 列,如图 1 所示。

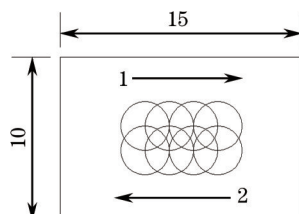


图 1 LSP 区域示意图(mm)

Fig.1 Area of LSP (mm)

### 2.3 性能表征

LSP 试样均采用砂纸打磨直至试样表面由 LSP 产生的微凹坑消失<sup>[14]</sup>,并使 LSP 表面抛光至粗糙度  $R_a < 0.05\ \mu\text{m}$ 。用 MH-3 型显微硬度计分别对冲击前后试样的表面进行硬度测试,所用载荷为 100 g,加载时间为 5 s。摩擦实验在 UMT-2 摩擦磨损试验机上进行。实验条件为室温下,大气环境,进行往复摩擦;对磨偶件采用直径为 3 mm 且显微硬度为 300 HV 的 416 不锈钢。实验载荷为 40 N,量程为 3 mm,重复速率为 5 mm/s,磨损时间为 20 min,记录摩擦系数曲线。另外,在实验开始前使用电子天平对试样进行称重,实验结束后立即放置于丙酮容器中并用超声波清洗,去除磨屑,并再次进行称重,计算实验前后试样的质量损失,进行磨痕量分析。利用 JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)观察摩擦磨损实验后样品表面,并对磨屑组织形貌进行表征。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 LSP 对 AZ31 镁合金显微硬度的影响

图 2 为激光冲击和未处理的样品显微硬度曲线,从图中可以看出,冲击区域的硬度高于未处理的硬度,

并随着与冲击边缘的距离的增加而逐渐变大,即在中心区域显微硬度最大。其中LSP中心区域的显微硬度由冲击前的78 HV增加到136 HV,提高了70%。这是因为LSP试样表面产生的等离子体能量呈高斯分布,在LSP中心处的能量最大,因此在该区域材料的塑性变形最为剧烈,会在金属表面层形成稳定的高密度的位错和孪晶结构,因此中心区域硬度值最大<sup>[15]</sup>。LSP在镁合金表面产生等离子体,其产生的冲击波所导致的位错密度增大和晶粒细化提高了合金的硬度<sup>[16]</sup>。

从图中还可以看出,随着测试区域远离LSP中心,合金的硬度也有一定的提高,表明LSP不仅作用于激光光斑的中心区域,对样品的其他区域也有强化作用,具有提高合金的整体性能的效果。

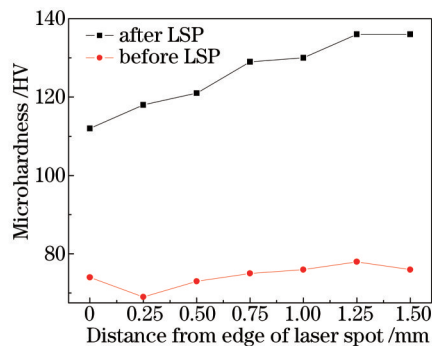


图2 镁合金LSP区域表面显微硬度

Fig.2 Micro-hardness of magnesium alloy after LSP

### 3.2 LSP对AZ31镁合金摩擦性能的影响

为了研究AZ31镁合金的摩擦性能,在摩擦性能测试过程中利用电脑实时监测摩擦系数随时间的变化,其中磨损时间为20 min,摩擦系数随时间变化曲线如图3所示。

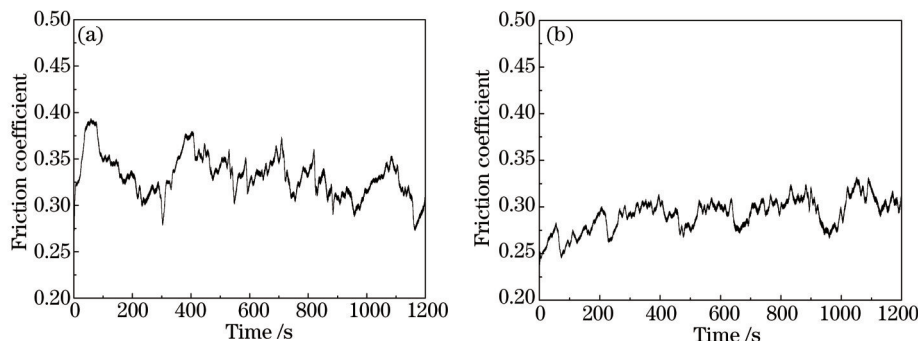


图3 摩擦系数随时间的变化曲线。(a) 未处理试样; (b) LSP试样

Fig.3 Friction coefficients of samples versus time. (a) Untreated sample; (b) LSP treated sample

从图中可以看出,在磨损初期,曲线均出现了迅速增大又减小的情况,其原因可能是在初始阶段,摩擦副较硬表面上的微凸体把较软的基体先磨掉产生犁沟、断裂或碎片,留下较硬的硬质点形成突出的接触表面,此时为跑合阶段,摩擦系数较大。随着跑合阶段的进行,摩擦表面逐步达到动态平衡,从而将摩擦系数维持在稳定的范围内即进入稳定阶段,此时摩擦系数较小。从图3(a)中可以看出,未处理的试样在0~300 s时摩擦系数波动范围较大,且数值也较高,说明磨损严重。在摩擦实验进行到300 s以后,摩擦系数趋于平稳,在小数值范围内波动,平均摩擦系数约为0.3355。从图3(b)中可以看出,LSP试样摩擦系数整体波动幅度相对较小,并且在200 s之后进入稳定阶段,其平均摩擦系数大约为0.2928。这表明,由于LSP的作用,合金的硬度得到提高,摩擦性能得到改善。镁合金经过LSP后,其变形层厚度约为0.8 mm<sup>[17]</sup>。由图3还可以看出,未冲击试样的摩擦系数均高于LSP试样的系数,说明经过LSP后,出现强化的形变层使合金耐磨性能提高,并且在1200 s内都具有一定效果,表明在此过程中强化层可能并未被完全磨损。

为了更好地研究LSP对合金耐磨性的影响,还利用磨损前后试样的质量损失即磨损量来表征合金耐磨性的大小。图4为相同条件下冲击试样和未冲击试样的磨损量。从图中可以看出磨损实验前后,激光冲击试样平均失重量为1.2 mg,未冲击试样平均失重量为1.8 mg。LSP试样磨损量均低于未强化试样,表

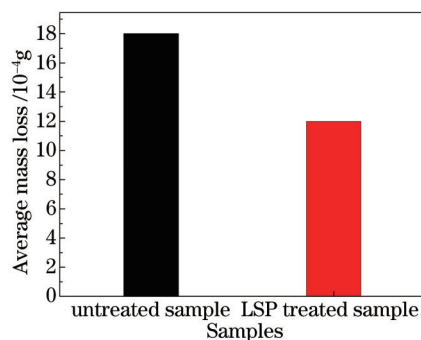


图4 相同条件下LSP试样和未处理试样的磨损量

Fig.4 Mass loss of untreated and LSP treated samples under the same conditions

明LSP改善了试样的磨擦磨损性能。这是由于LSP可以细化晶粒,晶粒细化提高了材料的强度和硬度<sup>[16]</sup>,由于材料硬度与强度越高,抵抗变形的能力越强,摩擦副之间啮合与粘着程度越差,摩擦系数越低<sup>[18]</sup>,因此磨损越小。

### 3.3 摩擦磨损机理分析

图5为磨损实验后试样的SEM表面形貌。图5(a)中可见未经过LSP的试样的磨损表面粗糙且出现较深较宽的犁沟,有明显的表面破坏,试样内部已出现微裂纹(如箭头处所示),存在明显的由于剥落而形成的凹坑(标记区域),该试样以剥落磨损为主。图5(b)中标记的区域出现大面积形状不规则的剥落坑,磨损比较严重,这是明显的疲劳磨损脱落特征。图5(c)和(d)是LSP试样的磨损表面形貌,磨痕表面出现相对较窄较浅的犁沟,并未出现裂纹,根据Hall-Petch公式<sup>[19]</sup>,LSP合金表面晶粒得到细化,增加了表面的屈服强度,表面最大综合切应力未超过屈服极限,所以表面不容易出现裂纹,从而降低了磨损。虽然图5(c)也出现较小片状脱落或唇边,但主要是以磨粒磨损为主。这表明未经过LSP的试样主要以剥落磨损为主,且磨损较为严重,而LSP试样主要以磨粒磨损为主。

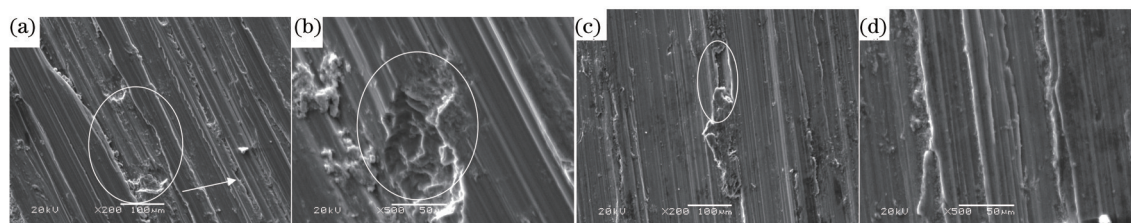


图5 磨损表面的SEM形貌。(a),(b)未处理试样;(c),(d)LSP试样

Fig.5 SEM micrographs of sample worn surfaces. (a),(b) Untreated sample; (c),(d) LSP treated sample

图6为磨损实验中产生的磨屑的SEM形貌,可见在相同条件下,未经LSP的试样磨屑主要为大片状的金属磨屑,相比之下,LSP试样的磨屑颗粒小得多,可见材料的磨损机制出现明显的不同,进一步说明了未处理试样以分层剥落磨损为主。这可能是由于LSP可以提高金属的塑性和表面屈服强度,与未冲击试样相比,LSP试样的金属层不容易发生脆断和剥落,所以磨损量相对较小。

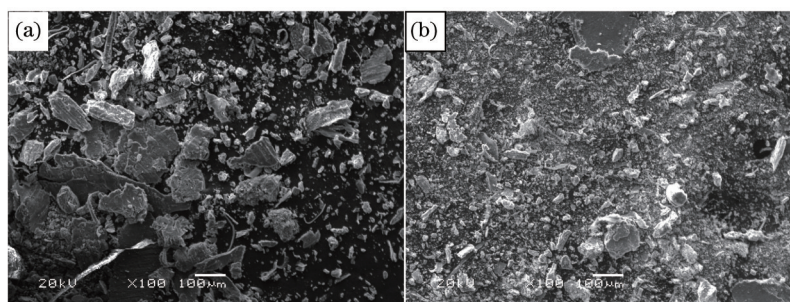


图6 磨屑SEM形貌。(a)未处理试样;(b)LSP试样

Fig.6 SEM micrographs of worn debris. (a) Untreated sample; (b) LSP treated sample

图7为磨屑的能谱(EDS)图。从图中可以看出,未处理试样磨屑的表面元素主要以Mg、O、Al为主,这3种元素的质量分数分别为97.7%、0.98%、0.31%,其中Mg和Al为基体所含元素,磨屑表面元素含少量O元素说明在磨损过程中发生氧化反应,即伴随氧化磨损。且在图7(a)中没有Fe元素峰,说明对偶件的磨损相对不严重。然而激光冲击试样的磨屑表面元素不仅有Mg、O、Al,而且出现了Fe和Cr元素峰,这5种元素的质量分数分别为63.2%、27.52%、2.1%、0.97%、5.77%,激光冲击试样的磨屑表面元素含较多O元素则说明发生了较多的氧化磨损。在图7(b)中出现了Fe和Cr元素峰,说明在与对偶件对磨过程中,对偶件的磨损相对未处理试样的磨损更严重。这是由于LSP后镁合金的整体硬度提高了70%,使镁合金的耐磨性能增加。同时磨损过程中主要发生磨粒磨损,对偶件也磨损出了微量的磨屑,进一步说明了LSP后其耐磨性增强。

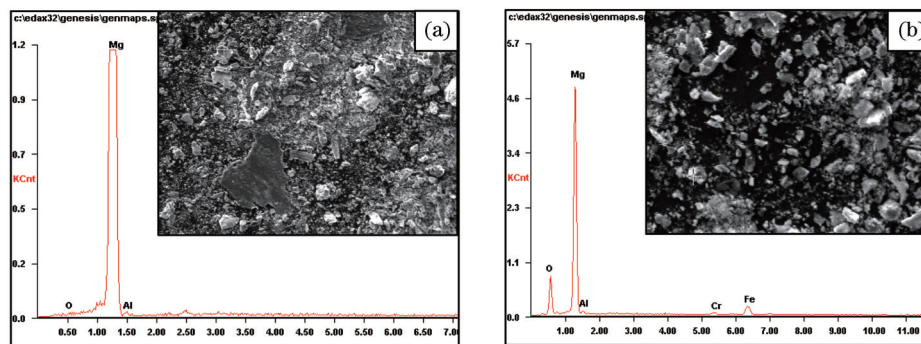


图7 磨屑的EDS图。(a)未处理试样;(b)激光冲击试样

Fig.7 EDS micrographs of worn debris. (a) Untreated sample; (b) LSP treated sample

综合分析试样磨痕的SEM形貌、磨屑的SEM形貌、磨屑的EDS图可知,未处理试样的磨损以分层剥落磨损为主,并伴有氧化磨损,相比之下,LSP试样的磨损以磨粒磨损为主并存在大量的氧化磨损,其磨损状况减轻,耐磨性能提高。

## 4 结 论

1) LSP对AZ31镁合金具有强化作用,能明显提高合金的硬度。

2) 相同条件下,LSP的AZ31镁合金提前进入稳定阶段,并且其摩擦系数和磨损量的测试结果具有较好的一致性,且均比未冲击的试样小,说明了材料耐磨性能得到提高。表明LSP对AZ31镁合金摩擦磨损性能的改善具有一定的效果。

3) 从磨痕和磨屑的SEM形貌及磨屑的EDS分析可知,未处理试样的磨损主要以分层剥落磨损为主,并伴有氧化磨损,相比之下,LSP试样的磨损是以磨粒磨损为主并存在大量的氧化磨损,其磨损状况减轻,耐磨性能提高。

## 参 考 文 献

- 1 Clow B B. Magnesium industry overview[J]. *Advanced Materials & Processes*, 1996, 150(4): 33-34.
- 2 Advedesian M M, Baker H. Magnesium Alloys ASM Specialty Handbook[M]. USA: ASM International Press, 1999.
- 3 Chen H, Alpas A T. Sliding wear map for the magnesium alloy Mg-9Al-0.9Zn(AZ91)[J]. *Wear*, 2000, 246(1): 106-116.
- 4 Xu Weiping, Xing Li, Ke Liming. Microstructural evolution of nugget zone in magnesium alloy AZ80A friction stir welds[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007, (5): 53-56.
- 徐卫平, 邢 丽, 柯黎明. 镁合金 AZ80A 搅拌摩擦焊焊核区组织金属学演变[J]. *材料工程*, 2007, (5): 53-56.
- 5 Ko Y G, Namgung S, Shin D H. Correlation between KOH concentration and surface properties of AZ91 magnesium alloy coated by plasma electrolytic oxidation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(7): 2525-2531.
- 6 Feinaeugle M, Alloncleet A P, Delaporte P H, *et al.*. Time-resolved shadowgraph imaging of femtosecond laser-induced forward transfer of solid materials[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(22): 8475-8483.
- 7 Mandelli A, Beatetti M, Forno A D, *et al.*. A composite coating for corrosion protection of AM60B magnesium alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(19): 4459-4465.
- 8 Zhao Jianfei, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Numerical simulation on fatigue crack growth of AZ31B magnesium alloy by laser

- shot peering[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009, 12: 117-119.
- 赵建飞, 周建忠, 黄 舒, 等. AZ31B 镁合金激光喷丸强化后疲劳裂纹扩展的数值模拟研究[J]. 机械设计与制造, 2009, 12: 117-119.
- 9 Uematsu Y, Kakiuchi T, Teratahi T, *et al.*. Improvement of corrosion fatigue strength of magnesium alloy by multilayer diamond-like carbon coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(8): 2778-2784.
- 10 Long Y, Javed A, Shapiro I, *et al.*. The effect of substrate position on the microstructure and mechanical properties of SiC coatings on carbon/carbon composites[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(2): 568-574.
- 11 Li Shaozhe, Zhang Lingfeng, Xing Qingpu. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503004.  
李少哲, 张凌峰, 邢清蒲, 等. 激光冲击强化对 AZ91 镁合金的电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503004.
- 12 Li Yuqin, Li Yinghong, He Weifeng, *et al.*. Wear resistance of 12CrNi3A steel after carburization and laser shock[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0903004.  
李玉琴, 李应红, 何卫峰, 等. 激光冲击渗碳 12CrNi3A 钢的磨损性能[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903004.
- 13 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang, *et al.*. Effect of laser shock processing on impact toughness of AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303002.  
葛茂忠, 项建云, 张永康, 等. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金冲击韧性的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303002.
- 14 Zhang 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.  
钟金衫, 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 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Ma Hui, *et al.*. Dislocation configurations induced by laser shock processing of 2A02 aluminum alloy [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0714002.  
罗新民, 张静文, 马 辉, 等. 2A02 铝合金中强激光冲击诱导的位错组态分析[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0714002.
- 16 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (9): 54-59.  
葛茂忠, 项建云, 张永康, 等. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2013, (9): 54-59.
- 17 Zhong Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun, *et al.*. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 1068-1072.  
张永康, 陈菊芳, 许仁军, 等. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1068-1072.
- 18 Li Jing, Cai Yuanxing, Lin Xiaojuan, *et al.*. Effect of Al contents on wear properties of Fe<sub>3</sub>Al intermetallics[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(2): 23-26.  
李 静, 蔡元兴, 林晓娟, 等. Al 含量对 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物耐磨性能的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(2): 23-26.
- 19 Corrochano J, Walker J C, Lieblich M, *et al.*. Dry sliding wear behavior of powder metallurgy Al-Mg-Si alloy-MoSi<sub>2</sub> composites and the relationship with the microstructure[J]. Wear, 2011, 270(9): 658-665.

栏目编辑: 张浩佳