

文章编号: 1001-3806(2011)05-0582-04

激光冲击强化对镁合金摩擦磨损性能的影响

陈菊芳¹, 叶霞², 申来娣¹, 李兴成²

(1. 江苏技术师范学院 材料工程学院, 常州 213001; 2. 江苏技术师范学院 机械工程学院, 常州 213001)

摘要: 为了研究激光冲击对镁合金摩擦磨损性能的影响, 采用 Nd:glass 脉冲激光对 AM50 镁合金表面进行冲击强化处理, 对强化区的表面形貌、粗糙度、微观组织、显微硬度、摩擦磨损性能进行了测试与分析。可知激光冲击强化后, 试样表面粗糙度略有增加, 强化层内含大量位错与孪晶, 强化层显微硬度明显提高, 表面的显微硬度值(约 67HV)明显高于基体(约 40HV), 强化层厚约 0.8mm。采用球-平面方式进行了干摩擦磨损实验。结果表明, 磨损的主要机制为磨粒磨损, 激光冲击强化试样的摩擦系数曲线与未处理试样相似, 磨损体积略大于未处理试样; 激光冲击镁合金的强化效果明显, 而对镁合金的摩擦磨损性能影响很小。

关键词: 激光技术; 激光冲击; 镁合金; 摩擦磨损性能

中图分类号: TG115.5⁺8

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.002

Influence of laser shock processing on friction and wear properties of magnesium alloy

CHEN Ju-fang¹, YE Xia², SHEN Lai-di¹, LI Xing-cheng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: In order to study the influence of laser shock processing on the friction and wear properties of magnesium alloy, some AM50 specimens were processed with Nd:glass pulse laser, and the surface morphology, roughness, microstructure, micro-hardness and frictional characterization were examined and analyzed. The experimental results showed that, after laser shock processing, the surface roughness was increased slightly, a lot of dislocations and twins were found in the strengthening layer, hardness was improved significantly, surface micro-hardness was improved to about 67HV as compared with about 40HV of the substrate, and the depth of strengthening layer was about 0.8mm. The friction and wear behaviors were investigated using a ball-on-flat apparatus under dry sliding condition. It was found that the main wear mechanism was abrasive wear, the friction coefficient curve of the LSP specimen was similar to that of the untreated specimen, and the wear volume of the LSP specimen was slightly bigger than that of the untreated specimen. Although the effect of laser shock strengthening magnesium alloy is evident, the influence of laser shock processing on the friction and wear properties of magnesium alloy is slight.

Key words: laser technique; laser shock processing; magnesium alloy; friction and wear behavior

引言

镁合金是目前工业应用最轻的金属结构材料之一, 密度仅为 $(1.74 \sim 1.85) \text{g/cm}^3$ 。随着航空和汽车工业的迅速发展, 对通过降低产品自重以实现节能减排提出了更为迫切的要求, 这给镁合金的发展带来了巨大契机。近年来, 镁合金在航空、车辆等工业的应用

日益广泛^[1-2]。由于疲劳是各种工程构件在服役期间的主要失效形式之一, 对于镁合金结构件也不例外, 且镁合金的耐磨、耐蚀性能较差, 在腐蚀环境中, 镁合金有十分强烈的应力腐蚀敏感性^[3,4]。随着镁合金的应用范围越来越广, 对如何提高镁合金结构件的疲劳强度, 耐磨、耐蚀性能, 已受到人们的普遍关注。激光冲击处理(laser shock processing, LSP)技术是利用功率密度为 GW/cm^2 量级、脉冲宽度为纳秒量级的强激光束辐照材料表面所产生的冲击波来提高金属材料的强度、硬度, 特别是能有效改善金属材料的抗疲劳断裂和抗应力腐蚀性能^[5]。已有的研究表明, 激光冲击镁合金的强化效果明显^[6], 但激光冲击强化对镁合金摩擦磨损性能的研究鲜见报道。本文中采用 Nd:glass 脉冲激光对工程中广泛使用的 AM50 镁合金进行了激光冲击强化处理,

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(09KJB460002); 江苏技术师范学院基础及应用基础研究基金资助项目(KYY09015)

作者简介: 陈菊芳(1971-), 女, 博士, 副教授, 现主要从事镁合金的激光表面改性研究。

E-mail: jfchen1031@sina.com

收稿日期: 2011-01-21; 收到修改稿日期: 2011-03-07

并对强化区的表面形貌、粗糙度、微观组织、显微硬度、摩擦磨损性能及磨损机制进行了研究与探讨。

1 实验材料与方法

试验中采用工程中广泛使用的 AM50 镁合金,其化学成分见表 1。试样用线切割法加工成 20mm × 25mm × 6mm 的试块,试样表面用 100# ~ 1000# SiC 砂纸逐级打磨、丙酮去油、无水乙醇超声振洗、冷风吹干后备用。

Table 1 Chemical composition of AM50 magnesium alloy

element	Al	Mn	Cu	Fe	Si	Mg
mass fraction	0.048	0.0032	0.00001	0.00001	0.00003	balance

激光冲击强化实验装置见图 1,采用 Nd:glass 脉冲激光,波长 1054nm,脉宽 23ns,光斑直径 5mm,激光功率密度约 3GW/cm²。为增强对激光能量的吸收,同时保护试样表面不被高能激光灼伤,采用黑漆作为能量吸收牺牲涂层。为增强激光在靶材表面产生的冲击波压力,延长冲击波作用时间,采用对激光透明的流水作约束层,流水厚约 3mm。因激光光斑尺寸有限,采用了搭接冲击方式,激光冲击路径见图 2。实验时,将试样安装在数控工作台上,在程序控制下,依次沿直线 1、直线 2 和直线 3 进行冲击处理,纵横方向光斑间距均为 4mm。

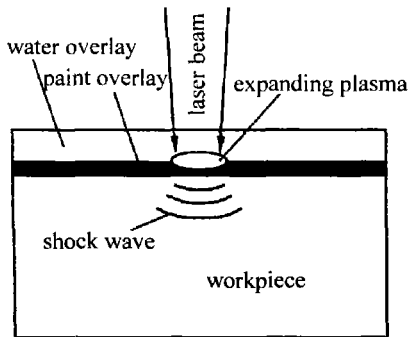


Fig. 1 Sketch map of laser shot peening

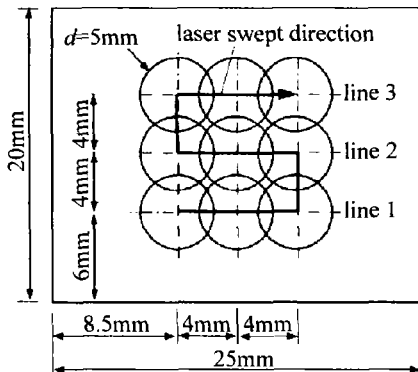


Fig. 2 Sketch map of laser spot pattern

激光冲击处理后,采用丙酮清洗去除试样表面残留的黑漆涂层。采用 VEECO NT1100 非接触光学轮廓仪分析表面的粗糙度。用线切割法将试样沿横截面

切开,将截面磨平、抛光、浸蚀后,采用光学显微镜对微观组织进行观察与分析。采用 HV-1000 型显微硬度计测试激光冲击区横截面由表及里的显微硬度分布,加载 1N,保荷时间 10s,每隔 50μm 测试 3 次,取其算术平均值。磨损实验在 UMT-2 微摩擦磨损试验机上进行,采用球-平面往复干摩擦方式,实验在大气和室温环境下进行,室温 15℃,相对湿度 58%。对磨偶件采用直径为 4mm、硬度为 62HRC 的 440-C 不锈钢球。实验时加载 0.2N,重程 5mm,重复频率 1Hz,磨损时间依次取 20min,40min,60min 和 90min。为保证实验具有可重复性,每种条件下重复磨损试验 3 次,对激光冲击试样,磨损路径沿图 2 中的直线 1、直线 2 和直线 3 进行。磨损过程中,采用电脑实时监测摩擦系数随时间的变化。磨损实验后,采用 JSM-6480 型扫描电镜对磨痕表面进行观察与分析,根据磨痕宽度按下式计算磨损体积^[7]:

$$V_w = \left[\frac{\pi R^2}{180} \arcsin\left(\frac{B}{2R}\right) - \left(\frac{B}{2}\right) \sqrt{R^2 - \left(\frac{B}{2}\right)^2} \right] L \quad (1)$$

式中, B 是磨痕宽度; R 是对磨钢球的半径 (2mm); L 是磨痕长度 (5mm)。

2 强化层的表面形貌、微观组织与显微硬度

2.1 表面形貌

激光冲击处理后,采用丙酮清洗去除试样表面残留的黑漆涂层。图 3 为激光冲击区的表面形貌,由图可见,激光冲击后留下了光亮的微凹坑,因受激光冲击波的强烈压研作用,激光冲击区表面不平度增加,表层材料发生了明显的塑性变形,但表面没有灼伤痕迹。激光冲击时,脉冲激光穿过透明约束层辐照在能量吸收层上,能量吸收层吸收激光能量后迅速气化、电离、爆炸产生冲击波,由于脉冲激光作用时间极短,仅使表层材料产生气化、电离,吸收层的底部材料起到了热屏障作用。由于能量吸收层的牺牲保护作用,激光冲击对试样表面的热影响很小,主要是机械力的作用。

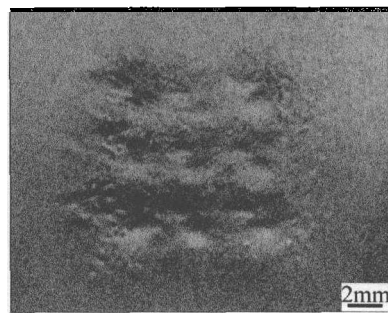


Fig. 3 Surface morphology in laser shock area

采用 VEECO NT1100 非接触光学轮廓仪对表面

粗糙度进行测试。图4为激光冲击区和未处理区的表面粗糙度测试结果,激光冲击区域的表面粗糙度为 $R_a = 0.65\mu\text{m}$,大于未处理区的粗糙度值 $R_a = 0.23\mu\text{m}$ 。可见,激光冲击后的镁合金表面保留了良好的形貌,因激光冲击波对试样表面的强烈压研作用,使表面不平度增加,表面粗糙度有所提高。

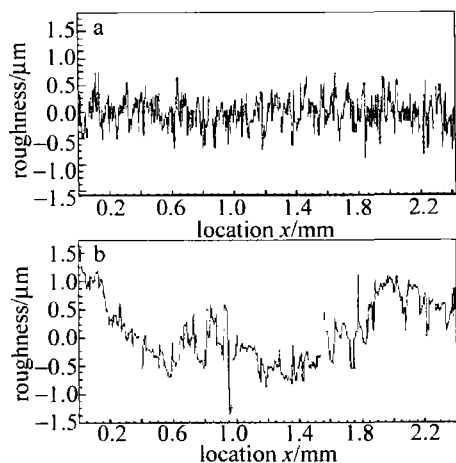


Fig. 4 Roughness profile on the specimen surface
a—without LSP treatment b—with LSP treatment

2.2 微观组织

图5是激光冲击处理前后材料的组织形貌,由图可见,激光冲击处理后表层材料的原始晶界清晰完整,材料的原始晶粒尺寸没有发生明显变化,这进一步说明激光冲击对材料表面的热影响很小。与基体组织(见图5a)相比,经过激光冲击处理后,组织内部出现了大量的孪晶和滑移线。这一现象表明,在激光冲击波作用下,材料表层发生了强烈的塑性变形,由于镁合金属于密排六方晶体结构,对称性低,滑移系少,塑性

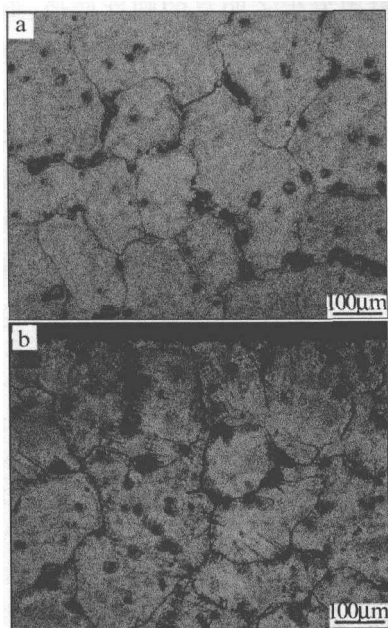


Fig. 5 Microstructure
a—untreated sample b—LSP sample

变形能力较差,其塑性变形依赖于位错滑移和孪生的协调作用,因此,激光冲击后镁合金的位错和孪晶密度显著增加^[8]。由图5b可见,孪晶和滑移线的方向与激光冲击波压力方向约成 45° ,这说明镁合金在激光冲击波作用下发生的塑性变形主要沿切应力最大的方向进行。进一步仔细观察可见,孪晶和滑移线在晶界附近的分布更为密集。已有的研究表明,晶界对塑性变形具有阻碍作用^[9],塑性变形时,位错滑移到晶界附近受到阻碍而堆积,因此晶界附近的孪晶和滑移线密度更大。

2.3 显微硬度

由于激光诱导的冲击波压力高达吉帕量级,作用时间仅几十纳秒,冲击波向靶材内部传播过程中引起表层材料产生高应变速率的塑性变形,材料内产生高密度的位错和孪晶,引起材料强度、硬度提高。实验测得激光冲击区表面及横截面上的显微硬度沿深度的分布,见图6。由图可见,表面的显微硬度最高,硬度值

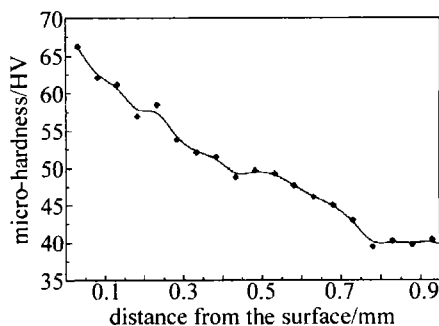


Fig. 6 Micro-hardness profile of laser shock processing zone

约为67HV,而基体的显微硬度约为40HV,表面显微硬度值约提高了68%。随着到表面距离的增加,显微硬度值逐渐减小并接近基体,强化层深约0.8mm。已有的研究表明,激光冲击时,应力波近似按1维应变平面波方式传播,应力波在材料内传播过程中,其峰值压力随传播距离的增加而逐渐衰减,当应力波峰值压力低于材料1维应变条件下的动态屈服强度 σ_H (也称Hugoniot弹性极限)后材料不再发生塑性变形^[10],因此,激光诱导的强冲击波使金属表面下一定深度范围内的材料得到强化。激光诱导的冲击波在传播过程中,在靶材表面时最强,对材料的强化效果最好,随着应力波向材料内部传播距离的增加,应力波强度逐渐衰减,对材料的强化效果也逐渐减弱,因此,表层材料的硬度最高,随着到表面距离的增加,材料的显微硬度值逐渐减小。

3 强化层的摩擦磨损特性

3.1 磨损表面形貌

为检测镁合金激光冲击强化层的摩擦磨损特性,将激光冲击强化试样与未处理试样进行对比磨损试

验。图 7 为磨痕表面的典型形貌,磨损时间为 40min。由图可见,在未处理试样和激光冲击试样表面均出现了平行于磨削方向的犁沟,说明磨损的主要机制为磨粒磨损^[11]。在磨损过程中,肉眼可见磨屑呈黑色,说明还存在氧化磨损机制。仔细观察可见,激光冲击试样表面的磨痕宽度略大于未处理试样的磨痕宽度,说明激光冲击后,镁合金的耐磨性能略有降低。

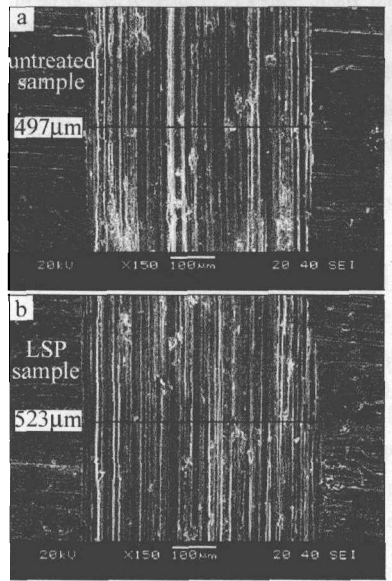


Fig. 7 SEM micrographs showing the worn surface morphologies after wearing for 40min of untreated sample and LSP sample

3.2 摩擦系数

磨损过程中,采用电脑实时监测摩擦系数随时间的变化,图 8 是磨损时间为 90min 的摩擦系数随时间变化的曲线。由图可见,激光冲击试样的摩擦系数曲线与未处理试样相似,经过初始磨损阶段后,逐渐进入稳定

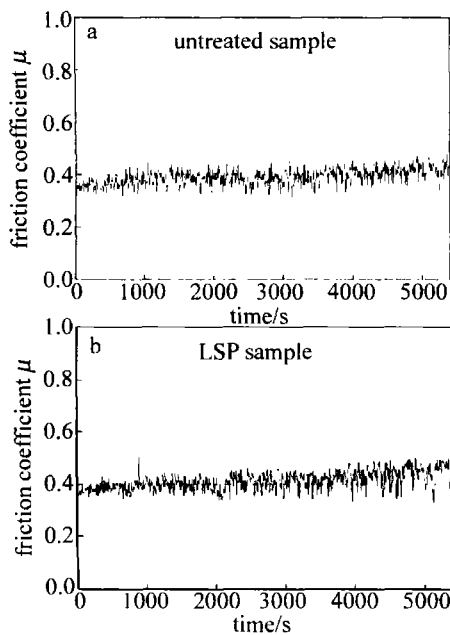


Fig. 8 Time dependencies of the kinetic friction coefficients μ with wearing time of 90min for the untreated AM50 and LSP AM50

磨损阶段,稳定磨损阶段的摩擦系数均约为 0.4。可见,激光冲击强化处理对镁合金的摩擦系数影响很小。

3.3 磨损体积

将磨痕的宽度代入(1)式计算磨损体积,随着磨损时间的延长,磨损体积逐渐增加,图 9 为不同磨损时间下的磨损体积。由图可见,在不同的磨损时间下,激光冲击试样的磨损体积均略大于未处理试样,这说明激光冲击强化处理虽然使镁合金的硬度有了较大幅度的提高,但并没有使镁合金的耐磨性能得到提高。参考文献[12]中指出,由于磨粒磨损中的犁沟作用本身就是强烈的冷作硬化过程,因此,磨粒磨损的耐磨性与冷作硬化的硬度无关。激光冲击强化处理使材料硬度提高,其实质是材料在激光冲击波作用下产生了塑性变形,是发生了冷作硬化造成的。相反在激光强冲击波作用下,材料表面不平度和粗糙度有所增加,这反而使镁合金的耐磨性略有降低。

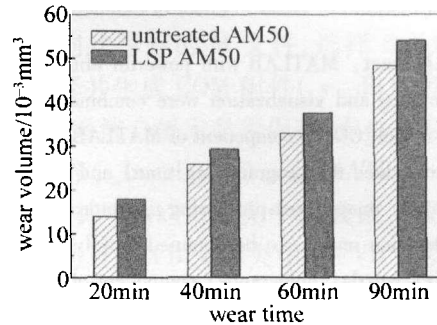


Fig. 9 Wear volumes of untreated AM50 and LSP AM50

4 结论

通过对 AM50 镁合金表面进行激光冲击强化处理及对强化区的表面形貌、微观组织、显微硬度和摩擦磨损性能的研究,得出如下主要结论:(1)激光冲击强化后,表面留下了光亮的微凹坑,没有被高能激光灼伤的痕迹,表面保留了良好的形貌,冲击区的表面粗糙度($R_a = 0.65\mu\text{m}$)略大于未冲击区的表面粗糙度($R_a = 0.23\mu\text{m}$)。(2)激光冲击对镁合金的强化效果明显,材料内的位错与孪晶密度显著增加,材料的显微硬度有了较大幅度的提高,表面的显微硬度值(约 67HV)明显高于基体(约 40HV),强化层深约 0.8mm。(3)摩擦磨损实验结果表明,激光冲击试样的磨损体积略大于未处理试样,摩擦系数曲线与未处理试样相似。激光冲击虽然使镁合金表层材料的显微硬度有较大幅度的提高,但由于磨损的主要机制为磨粒磨损,磨损中的犁沟作用本身就是强烈的冷作硬化过程,因此,基于冷作硬化原理使材料硬度增加的激光冲击强化没能使镁合金的耐磨性能得到提高,相反,激光冲击后试样表面粗糙度的增加

(下转第 647 页)

减是大气分子散射和吸收所引起衰减的十几倍甚至几十倍,同时结合实际测量给出了激光在海雾中传输衰减的经验公式。该研究可为科学评价激光对抗装备的远场效能提供参考依据。

参 考 文 献

- [1] SONG Zh F. Base of applied atmospheric optics [M]. Beijing: Weather Press, 1990: 1-230 (in Chinese).
- [2] ZHAO Z W, LIN L K, DONG Q S, *et al.* Radar backscattering characteristics of fog [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16 (4): 498-502 (in Chinese).
- [3] WANG Y L, LIU X D, DAI J M. Analysis of smog total obscure power on visible light based on laser transmission model [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9): 1415-1418 (in Chinese).
- [4] HOU W X. Research on shading attenuation characteristics of IR spectrum by water fog [J]. Electro-Optical Technology Application, 2008, 23(5): 25-28 (in Chinese).
- [5] HOU W X. Discussion on water fog operation principle on light wave [J]. Electro-Optical Technology Application, 2008, 23(4): 18-20 (in Chinese).
- [6] XU B, SHI J M, WANG J C, *et al.* Calculation and analyzing of the extinction characteristics of the water fog [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(1): 38-41 (in Chinese).
- [7] YUAN J T, YANG L L, XIE J, *et al.* Study on extinction properties of water fog particles in multi-spectrum based on Mie theory [J]. Optical Technique, 2007, 32(3): 459-461 (in Chinese).
- [8] CHEN B, LI C J. Analysis and attenuation experiments of water vapor on infrared radiation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(3): 48-52 (in Chinese).
- [9] TANG S Q, BAI L, WU Z S, *et al.* Extinction characteristics of water fog in multiband [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(2): 112-117 (in Chinese).
- [10] SUN H J. Discussing the theoretical relationship between the atmospheric scattering and the visibility [J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument, 1995, 4(4): 30-34 (in Chinese).
- [11] ZENG S E, WANG G L. Observation and instrument of visibility [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(2): 208-212 (in Chinese).
- [12] KE X Zh, MA D D, LIU J N. Study attenuation of laser transmission in fog [J]. Journal of Light Scattering, 2009, 21(2): 104-109 (in Chinese).
- [13] LIHDBERG J D, LENTZ W J, MEASURE E M, *et al.* Lidar determinations of extinction in stratus clouds [J]. Applied Optics, 1984, 23(13): 2172-2177.
- [14] WANG M, LIU W Q, LU Y H, *et al.* Study on the measurement of the atmospheric extinction of fog and rain by forward-scattering near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(8): 1776-1780 (in Chinese).

(上接第 585 页)

使镁合金的耐磨性略有降低。

参 考 文 献

- [1] THARUMARAJAH A, KOLTUN P. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light weighting cars [J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(11): 1007-1013.
- [2] CHEN J F, ZHANG Y K, XU R J. Research progress on laser surface processing of magnesium alloy [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 293-295 (in Chinese).
- [3] LEI M K, LI P, YANG H G, *et al.* Wear and corrosion resistance of Al ion implanted AZ31 magnesium alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(9): 5182-5185.
- [4] ZHANG Y, XU Y. Influencing factors and protective methods of stress corrosion cracking of magnesium alloys [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(6): 87-89 (in Chinese).
- [5] MONTROSS C S, WEI T, YE L, *et al.* Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys; a review [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [6] 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): 1068-1071 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y K, CHEN J F, LEI W N, *et al.* Effect of laser surface melting on friction and wear behavior of AM50 magnesium alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(14): 3175-3179.
- [8] LOU H F, WANG M P, TANG N, *et al.* Microstructures of twin-roll cast AZ31B Mg alloy and its deformation mechanism [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(9): 1584-1589 (in Chinese).
- [9] HOU L F, WEI Y H, LIU B S, *et al.* Microstructure evolution of AZ91D induced by high energy shot peening [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008; 18(5): 1053-1057.
- [10] MORDYUK B N, MILMAN Y V, IEFIMOV M O, *et al.* Characterization of ultrasonically peened and laser-shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(19): 4875-4883.
- [11] AN J, LI R G, LU Y, *et al.* Dry sliding wear behavior of magnesium alloys [J]. Wear, 2008, 265(1): 97-104.
- [12] WEN S Z, HUANG P. Tribology principle [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 301-331 (in Chinese).