

文章编号: 1001-3806(2010)04-0552-05

AZ91 镁合金激光冲击强化力学性能研究

裴旭¹, 任爱国¹, 顾永玉¹, 许仁军², 于水生¹, 张永康^{1*}

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 维克特陶瓷科技有限公司, 宜兴 214200)

摘要: 为了研究激光冲击强化对镁合金力学性能的影响以及不同激光冲击模式的效果, 采用双束无叠加钕玻璃脉冲激光对 AZ91 镁合金进行冲击处理; 冲击后在试样表面得到椭圆冲击斑, 对光斑形貌和形状进行了观测分析, 并与传统单点叠加冲击模式的结果对比。采用 Triboindenter 纳米压痕仪测试了冲击和未冲击区域的纳米硬度, 得到测量值分别为 1.59 GPa 和 1.47 GPa; 采用 X2350A 型 X 射线应力衍射仪测试冲击区域残余应力分布情况, 并用有限元软件 ABAQUS 对残余应力进行了数值模拟, 得到实验测量和模拟结果在加载区域都有高达 -120 MPa 左右的残余应力分布, 且模拟结果与实验结果一致。结果表明, 采用双束无叠加冲击模式可以提高冲击效率; 激光冲击处理提高了镁合金的纳米硬度和力学性能, 增强了其抗外物冲击损伤和抗疲劳性能。

关键词: 激光技术; 激光冲击强化; 纳米硬度; 残余应力; 镁合金; 有限元分析

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.032

Effects of laser shock processing on mechanical properties of AZ91 magnesium alloy

PEI Xu¹, REN Ai-guo¹, GU Yong-yu¹, XU Ren-jun², YU Shui-sheng¹, ZHANG Yong-kang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Victory Ceramics Science and Technology Co. Ltd., Yixing 214200, China)

Abstract: In order to study the influence of laser shock processing (LSP) and different laser shock model on the mechanical properties of magnesium alloy, an AZ91 magnesium alloy specimen was processed with two beams of non-superimposed Nd:glass laser pulses. The surface morphology, with an oval spot distribution, was observed and analyzed after shock, and then the model was compared with the traditional model of single-point-superposition. The nano-hardness of the shocked and non-shocked region was measured with a triboindenter nano-indentation instrument, and the measured value was 1.59 GPa and 1.47 GPa respectively. The residual stress in the shocked region was measured with a X2350A X-ray strain instrument, and the stress was simulated by means of the finite element software ABAQUS. Both experimental and simulation results were in good agreement, and showed that there was high residual stress distribution, about -120 MPa in the shocked region. The results show that the non-superposition of dual-beam mode can improve the shock efficiency. The LSP can improve the nano-hardness and mechanical properties of magnesium alloy and enhance its resistance to foreign objects damages and anti-fatigue properties.

Key words: laser technique; laser shock processing; nano-hardness; residual stress; magnesium alloy; finite element analysis

引言

镁合金是目前工业应用最轻的金属结构材料之一, 其密度仅为 $1.74 \text{ g/cm}^3 \sim 1.85 \text{ g/cm}^3$ ^[1-2], 它具有比强度高、比刚度、阻尼性能良好、价格低廉、可回收利用等优点。近几年来, 随着对降低产品自重以降低能源消耗和减少污染的要求的提高, 给镁合金的发展带

来巨大契机, 使镁合金在航空工业、汽车工业得到广泛应用^[1-3]。疲劳是各种工程构件在服役期间的主要失效形式之一, 镁合金结构件在应用中也遇到同样的问题; 随着镁合金的应用范围越来越广, 对提高镁合金结构零件抗疲劳强度, 延长其服役寿命, 提出了迫切的要求。

激光冲击强化技术 (laser shock processing, LSP) 是利用高功率强激光束 (功率密度为 GW/cm^2 数量级、脉冲宽度为 ns 数量级) 辐照材料表面产生的冲击波来提高金属材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀等性能, 特别是对改善金属材料抗疲劳断裂性能具有明显的效果^[4-5]。激光诱导的冲击波持续时

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50735001)

作者简介: 裴旭 (1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光冲击强化方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2009-06-16; 收到修改稿日期: 2009-10-08

间极短(仅几十纳秒),材料变形小,所以适合处理成品零件,尤其是对应力集中的局部区域能进行有效处理。开展激光冲击强化技术研究,对提高关键结构件的使用寿命和可靠性具有现实意义。目前,激光冲击铝合金^[4,6-7]、钢材^[5]、钛合金^[5,8]等的研究较多,而关于激光冲击镁合金性能的研究报道很少^[9]。本文中采用双束脉冲激光冲击 AZ91 镁合金试样,将双束无叠加冲击模式与传统的单点叠加冲击模式作了对比;冲击后分别从纳米力学性能和残余应力性能等角度对试样冲击区域和未冲击区域的表面进行了测量与分析;并对冲击区域的残余应力情况进行了有限元数值模拟研究,将模拟结果与实验结果进

行了对比。

1 实验材料及方法

实验中采用工业中广泛使用的 AZ91 镁合金,其具体化学成分如表 1 所示。用线切割法将试样加工成尺寸为 20mm × 20mm × 5mm 的小块,表面用 100# ~ 800# SiC 砂纸逐级打磨,再进行抛光处理。酒精清洗、风干后,在其表面贴上铝箔(厚度约 100μm),作为激光冲击的吸收层,来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;为增强激光在材料表面产生的冲击波压力,延长冲击波的作用时间,冲击时采用水作为约束层。

Table 1 The composition of AZ91 magnesium alloy

composition	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	others
mass fraction	0.9	0.83 ~ 0.97	0.0035 ~ 0.01	0.0015 ~ 0.005	≤ 0.0001	≤ 0.0003	≤ 0.00005	≤ 0.00002	≤ 0.0002

冲击实验采用钨玻璃激光器产生的双束脉冲激光,两束激光搭界但无重叠部分,单束激光直径约为 5mm,能量为 17.5J,激光波长 1054nm,脉冲宽度 23ns。激光冲击实验装置及冲击模型如图 1 所示,用

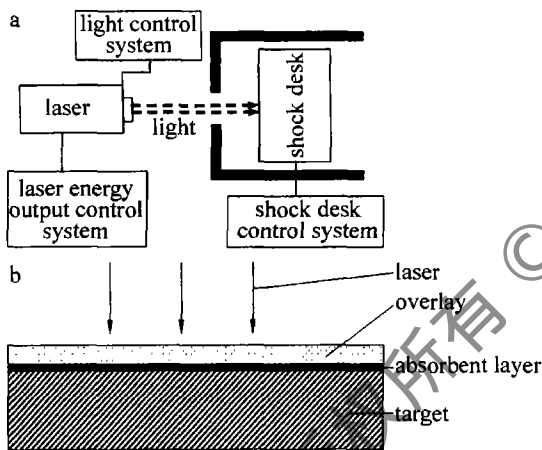


Fig. 1 The schematic diagram of laser shock processing system and the shock model

Triboindenter 纳米压痕仪测试材料表面力学性能;利用 X2350A 型 X 射线应力仪测试冲击区域表面残余应力。

2 激光冲击区表面形貌与光斑形状成因分析

脉冲激光冲击后,试样表面激光冲击区产生了一个椭圆形致密的微凹坑,如图 2 所示。按照椭圆形的形状测量,凹坑的长轴长约为 10mm,短轴长约为 5mm。激光冲击后在光斑中心分布着一些微小的斑点,斑点周围光斑区域内试样表面无灼伤痕迹,且光亮度较冲击前抛光表面变化不大,只是表面变得高低不平,可见激光冲击对试样表面热影响很小,主要是机械力作用。迎着光线观察,可以看到微凹坑处微微下凹,



Fig. 2 Photograph of the sample surface after LSP

表明表层材料发生了塑性变形。在冲击过程中,激光诱导的冲击波作用时间很短,一般仅为几十纳秒,材料的应变率很高,可达 10^7 s^{-1} 以上^[9]。

在冲击实验中,采用的是两束搭界但无重叠部分的激光冲击模式来对试样进行冲击的,如图 3 所示。

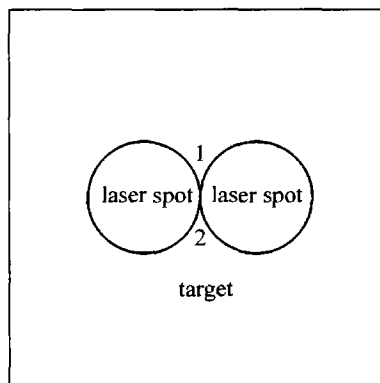


Fig. 3 The distribution of the laser spot

从冲击后试样表面来看,留下的光斑并非两束搭界但不重合的光斑分布,其形状是成椭圆形分布的;经测量其长轴、短轴分别为 10mm 和 5mm,冲击区域凹坑部分如图 2 标注所示。分析原因,可能是在激光冲击过程中,由于两束激光是同时触发、并作用于试样表面的,所以,生成的等离子体也应该是同步的。由两束激光分别生成的等离子体膨胀并产生冲击波向各个方向

传播。当两列冲击波波阵面相遇于两束光斑交点处时,由于叠加作用,使两列冲击波产生能量更强劲的冲击波,作用于试样表面并向图3中标示的1,2所在的区域传播。在等离子体扩散过程中,中间区域的扩大,使得两端冲击波的作用有所减弱,从而致使试样表面光斑成近椭圆的分布。

3 冲击后材料表面力学性能

3.1 纳米力学性能

镁合金的种类很多,对于AZ91镁合金来说,其压铸组织是由 α 相(Mg)和在晶界析出的 β 相($Mg_{17}Al_{12}$)组成^[1]。其基体组织晶相分布如图4所示。图中白色

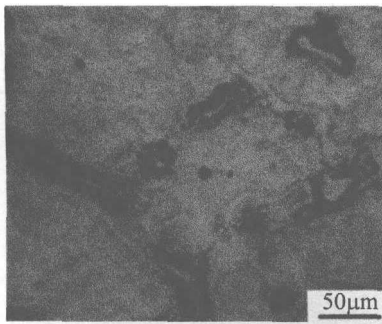


Fig. 4 The microstructure distribution of AZ91 magnesium alloy

区域为镁合金基体的 α 相(Mg),在白色区域边缘的黑色狭长区域为镁合金基体的 β 相($Mg_{17}Al_{12}$)。激光冲击后,考虑到镁合金的不同晶相区域会对其激光冲击后的力学性能产生不同的影响,因此,通过纳米压痕技术来研究其力学性能的变化情况。

纳米压痕技术是测量材料性能的重要手段,在纳米压痕测量技术中,纳米硬度 H 是最常用的力学性质,根据 Oliver-Pharr 方法,纳米硬度可以由下式给出^[10]:

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$A = 24.56h_c^2 + \sum_{i=0}^7 C\beta h_c^{1/2i} \quad (2)$$

$$h_c = h - \beta P_{\max}/S \quad (3)$$

式中, P_{\max} 为最大载荷, S 为卸载曲线顶部的斜率($S = dp/dh$), h 为加载深度, h_c 为接触深度, A 为接触面积, β 是与压头几何形状有关的系数(对于三棱锥压头,取1.034)。将冲击后的样品置于 Triboindenter 纳米压痕仪上,载荷范围为 $680\mu\text{N} \sim 690\mu\text{N}$,从中可以获得纳米压痕的最大载荷 P_{\max} 和接触深度 h_c 等数据,每组数据为多次试验结果的平均值。表2为AZ91镁合金激光冲击区域和未冲击区域的纳米硬度等测量数据,纳米压痕的加压卸载曲线如图5所示。

Table 2 The nano-indentation measured parameters in different region after LSP

test value	non-shocked region	shocked region
maximum load $P_{\max}/\mu\text{N}$	685.62	683.9
contact area $A/\mu\text{m}^2$	464886.86	429507.82
slope $S/(\mu\text{N} \cdot \text{nm}^{-1})$	26.49	31.2
nano-hardness H/GPa	1.47	1.59
contact depth h_c/nm	121.89	116.82

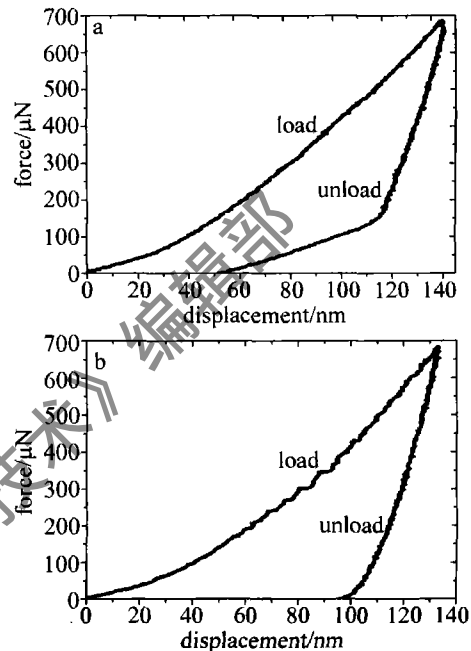


Fig. 5 Load-displacement curve of the indentation test
a—non-shocked region b—laser shocked region

由实验结果可得,激光冲击区域和未冲击区域镁合金表面的纳米硬度分别为1.59GPa和1.47GPa,可见激光冲击区域要高于未冲击区域表面的纳米硬度,并且激光冲击区域试样的接触深度明显变小,这也表明激光冲击提高了材料表面的纳米硬度,有利于提高试样的抗外物冲击损伤能力,这与YILBAS以及ZHANG的研究结果一致^[11-12]。

3.2 残余应力分布

3.2.1 激光功率密度与载荷计算 对于强激光冲击靶材所产生的冲击波的压力估算,THORSLUND等人进行了较为深入的研究^[13],对于为提高激光冲击波峰压力而广泛采用的带有约束层的冲击模型,FAB-BRO等人给出了波峰值压力估算公式^[14]:

$$p = 0.01 \sqrt{\alpha/(2\alpha + 3)} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (4)$$

式中, α 为内能转化为热能的系数, $\alpha = 0.1$; I_0 为入射激光功率密度($\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$),其计算公式为^[15]:

$$I_0 = \beta E/(\tau A) \quad (5)$$

式中, β 为材料对脉冲激光的吸收系数,其取值范围一般在0.8~0.9之间^[16]; E 为激光脉冲的能量(J), τ 为脉冲的宽度(s); A 为光斑面积(m^2); Z 为靶材与约束层的合

成冲击波声阻抗($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),其定义为^[12]:

$$2/Z = 1/Z_{\text{target}} + 1/Z_{\text{water}} \quad (6)$$

AZ91 镁合金的声阻抗 $Z_{\text{target}} = 0.946 \times 10^6 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,水的声阻抗 $Z_{\text{water}} = 1.14 \times 10^6 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。联立(4)式~(6)式代入数据,激光能量为 35J 时,得到功率密度 $I_0 = 3.1 \text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, $p = 1.65 \text{GPa}$ 。

3.2.2 残余应力测量结果 激光冲击处理后,用 X2350A 型 X 射线应力仪测试激光冲击区中心及其周围的表面残余应力。从测量的结果来看,在激光冲击区域有很高的残余应力分布,冲击区域的残余应力最大值约为 -120MPa (误差约为 $\pm 20 \text{MPa}$),测试结果与 CHEN 所得的结果相一致^[17];冲击区长轴边缘附近残余应力约为 5MPa ,短轴附近残余应力约为 -10MPa 。分析原因可能是因为中心区域受到冲击波的作用较大。前面分析了由于两列冲击波的波阵面在两束激光相交处产生叠加作用,因此产生新的更强冲击波,作用于试样表面。因此越靠近中心区域受到的影响也就越大。此外,在冲击时采用的是双束搭接无重合激光束,而最终在试样表面形成椭圆形的冲击光斑,与传统的单点叠加冲击模式相比(直径长度 50% 叠加),效率提高了近 20%。从测量结果来看,激光冲击处理使冲击区表层产生相对较高的残余压应力。材料表面的残余压应力可以平衡材料使用过程中的拉应力,从而延缓疲劳裂纹的产生和扩展,能有效提高材料的抗疲劳寿命。

3.3 残余应力的有限元数值模拟

鉴于有限元数值模拟能够验证实验结果,为实验设计方案及实验结果提供一定的参考,因此,采用有限元分析软件 ABAQUS 对激光冲击 AZ91 镁合金进行数值模拟。按照试样实际尺寸的大小,建立长宽高对应的数值模型。对模型进行网格划分,并赋予其 AZ91 镁合金的相关力学性能参量。AZ91 镁合金的静态屈服极限为 160MPa ,其动态屈服极限通常为静态屈服极限的 2 倍~4 倍^[18],此处将其取为 470MPa 。相关性能参量如表 3 所示。在网格模型上选取与激光冲击留

Table 3 The relevant mechanical parameters of AZ91 magnesium alloy

ultimate strength	static yield limit	dynamic yield limit	Young's modulus	yield stress	Poisson's ratio
250MPa	160MPa	470MPa	45GPa	78MPa	0.3

下的实际光斑相似的区域进行力加载,设长轴方向为 x 轴,短轴方向为 y 轴。因为留下的光斑为一近似椭圆的区域,所以加载区域取椭圆区域,加载的函数取为:

$$p = p_0 \exp[-(x^2/x_0^2 + y^2/y_0^2)] \quad (7)$$

式中, p_0 为加载的峰值压力, x_0, y_0 分别为光斑所在椭圆的长半轴和短半轴长度。为了验证模拟结果与实验

结果的一致性,将 p_0 取为 1.65GPa 。加载完成后,模型表面产生残余压应力分布,其残余应力分布的云纹图如图 6 所示,图 7 为沿不同方向测得的表面残余应

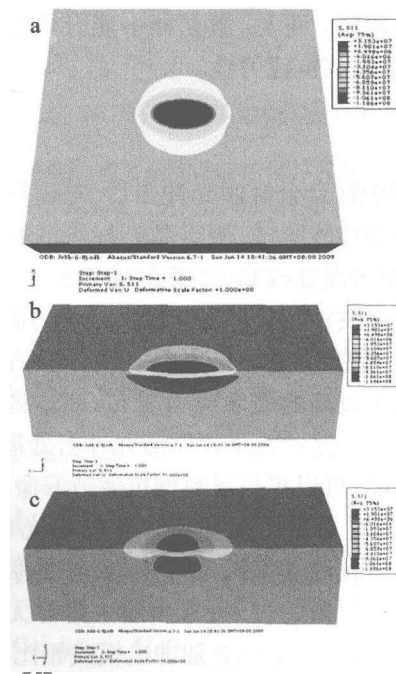


Fig. 6 Surface and inner residual stress distribution after loading a—surface distribution b—profile along x axis c—profile along y axis

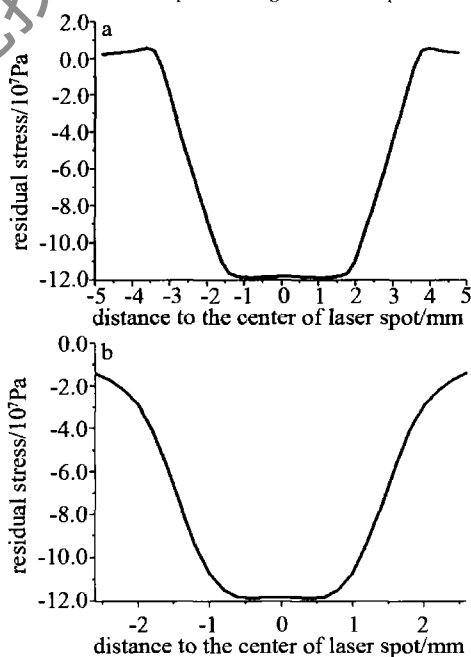


Fig. 7 Surface residual stress distribution curve vs. the distance to the center of the laser spot

a—profile along x axis b—profile along y axis

力分布曲线。从分布曲线可以看出,沿 x, y 方向残余应力分布的模拟结果都为近高斯分布。

将图 7 中的模拟值与测量结果进行比较,可以看到,模拟的试样表面残余应力分布情况与激光冲击后试样的测量结果保持一致。从以上实验和模拟的结果来看,可见 AZ91 镁合金在激光冲击处理后,冲击区表

层产生很高的残余压应力,这与冲击区域有较高的纳米硬度分布的测量结果相一致,在残余应力分布高的激光冲击区域,材料纳米硬度值较高,未冲击区域材料纳米硬度值较低。可见,激光冲击能有效提高材料的力学性能,增强其抗疲劳性。

4 结论

(1) AZ91 镁合金经激光冲击后,对试样表面进行纳米压痕力学性能测试,测得激光冲击区域与未冲击区域相比,纳米硬度较高,加载的曲线斜率变大,压头的接触深度变浅;同时,冲击区域残余应力测量结果以及 ABAQUS 数值模拟结果也都表明,与冲击前相比,冲击区域有了较高的残余应力分布;冲击区域的力学性能明显提高。这些结果说明激光冲击处理增强了材料的力学性能,可以提高材料的抗疲劳寿命。

(2) 冲击时采用的是双束非叠加激光束,冲击后在材料表面得到的是椭圆形冲击斑,可见激光冲击过程是一个非常复杂的过程;采用双束搭界无叠加激光冲击模式,与传统的单点叠加冲击模式相比,有效地提高激光的冲击效率和利用效率。

(3) 激光冲击后,试样表面冲击区域与冲击前相比,损伤现象很轻微,可见激光冲击对材料热影响很小,主要是机械力作用;而冲击以后,材料的变形量很小,因此激光冲击强化适用于成品零件的加工。

参考文献

- [1] ZHANG J, ZHANG Z H. Magnesium alloys and the application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:1-307 (in Chinese).
- [2] THARUMARAJAB 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.
- [3] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-applications-potential[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A302(1):37-45.
- [4] ZHANG Y K, HU C L, CAI L, *et al.* Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser-excited shock waves[J]. Appl Phys, 2001, A72(1): 113-116.
- [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] FAN Y, WANG Sh B, WU H X, *et al.* Experimental research of laser shock processing on aerial aluminum alloy[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 273-275 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y K, ZHANG X Q, ZHOU J Zh, *et al.* Deformation of aluminum alloy LY12CZ plate by laser shot peening[J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33(10): 1417-1421.
- [8] GU Y Y, ZHANG X Q, SHI J G, *et al.* Investigation of inverse deformation in laser shock forming with half die[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 95-97 (in Chinese).
- [9] ZHANG Y K, CHEN J F, XU R J. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(7): 1068-1072 (in Chinese).
- [10] ZHAO H L, CUI D G, GAO W, *et al.* Micromechanical properties estimation of composite coating consisting of cerium and titanium using nano-indentation technique[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(4): 511-514 (in Chinese).
- [11] YILBAS B S, ARIF A F M. Laser shock processing of aluminum: model and experimental study[J]. J Phys, 2007, D40(21): 6740-6747.
- [12] ZHANG W W, LAWRENCE Y Y, NOYAN I C. Micro-scale laser shock peening of thin films, part 2: high spatial resolution material characterization[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(1): 18-24.
- [13] THORSLUND T, KAHLEN F J, KAR A. Temperatures, pressures and stress during laser shock processing[J]. Optics and Laser in Engineering, 2003, 39(1): 51-71.
- [14] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, *et al.* Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. Material Science and Engineering, 1996, A210(1): 102-113.
- [15] ZHANG X Q, ZHOU J Zh, WANG C L, *et al.* Technology of laser peening and its application[J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(10): 26-28 (in Chinese).
- [16] ZHOU J Zh. Study on the mechanism of shock wave loading and the property of deformation of sheet metal of laser shock forming[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2003: 1-120 (in Chinese).
- [17] CHEN J F. Study on laser surface modification of AM50 magnesium alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008: 1-109 (in Chinese).
- [18] ZHOU N, QIAO D J. Materials dynamics under pulse beam radiation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-159 (in Chinese).