

文章编号: 0258-7025(2008)07-1068-05

# AM50 镁合金激光冲击强化实验研究

张永康<sup>1</sup> 陈菊芳<sup>1,2\*</sup> 许仁军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; <sup>2</sup> 江苏技术师范学院机械工程学院, 江苏 常州 213001)

**摘要** 为了研究激光冲击强化对镁合金性能的影响,采用钕玻璃脉冲激光(波长1054 nm,脉冲宽度23 ns)对 AM50 镁合金试样表面进行冲击强化处理,并对其表面形貌、微观组织、显微硬度、残余应力进行实验测试与分析。结果表明,在激光功率密度为3.1 GW/cm<sup>2</sup>的强脉冲激光作用下,试样表面留下光亮致密的微凹坑,凹坑深约27 μm;表层材料发生高应变速率的塑性变形,材料内产生大量位错与孪晶,强化层深度约0.8 mm;冲击区的显微硬度明显增加,表层材料的显微硬度比基体约提高58%;冲击区表面存在残余压应力,数值高达-146 MPa。实验结果表明,激光冲击镁合金的强化效果明显。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;镁合金;强化效果

**中图分类号** TN 249;TG 156.99

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20083507.1068

## Experimental Research of Laser Shock Strengthening AM50 Magnesium Alloy

Zhang Yongkang<sup>1</sup> Chen Jufang<sup>1,2</sup> Xu Renjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001, China

**Abstract** In order to study the effect of laser shock processing (LSP) on the properties of magnesium alloy, an AM50 magnesium alloy sample was processed with Nd:glass laser with the wavelength of 1054 nm and pulse width of 23 ns, and its surface figure, microstructure, micro-hardness and residual stress were examined and analyzed. The experimental results show that a bright dense shallow dent forms in the laser shocked area with laser power density of 3.1 GW/cm<sup>2</sup>, and the dent depth is about 27 μm. Ultrahigh strain rate plastic deformation takes place in the surface layer and results in extensive formation of dislocations and twins, and the depth of strengthening layer is about 0.8 mm. Laser shock processing improves hardness and residual stress of AM50 magnesium alloy significantly, surface micro-hardness increases by up to 58% and the compressive residual stress on the surface of laser shocked area reaches up to -146 MPa. The experiment results show that the effect of laser shock evidently strengthens the magnesium alloy.

**Key words** laser technique; laser shock strengthening; magnesium alloy; strengthening effects

## 1 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1.74~1.85 g/cm<sup>3</sup>[1,2]。随着航空和汽车工业的迅速发展,对通过降低产品的自重以降低能源消耗和减少污染提出了更迫切的要求,给镁合金的发展带来巨大契机。近年来,镁合金在航空工业、汽车工业的应用日益广泛[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

构件也不例外,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,延长其服役寿命,受到人们的普遍关注。激光冲击处理(LSP)技术是利用功率密度为吉瓦每平方厘米量级、脉冲宽度为纳秒量级的强激光束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性能,特别是能有效改善金属材料的抗疲劳断裂的性能[4,5]。激光诱导的冲击波持续时间极短(仅

收稿日期:2007-08-30;收到修改稿日期:2007-11-27

基金项目:国家自然科学基金(50735001,50675089)和江苏技术师范学院基础基金(KYY06105)资助项目。

作者简介:张永康(1963—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造与检测技术方面的研究。

E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: jfchen@jstu.edu.cn 或 jfchen1031@sina.com

几十纳秒),材料变形小,适合处理成品零件,特别是能有效处理具有应力集中的局部区域<sup>[5]</sup>。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、钢材、钛合金等的研究较多<sup>[4~6]</sup>,而激光冲击镁合金性能的研究未见报道。本文采用钕玻璃脉冲激光器对工业中广泛使用的 AM50 镁合金进行冲击处理,并对工艺参数,冲击区的表面形貌、微观组织、显微硬度、残余应力进行研究与探讨。

## 2 实验材料及方法

实验采用工业中广泛使用的 AM50 镁合金,其具体化学成分如表 1 所示。试样的基体组织由基相  $\alpha$ -Mg 和沿晶界析出的少量  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相组成,如图 1 所示。

表 1 AM50 镁合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of AM50 magnesium alloy (mass fraction, %)

Al	Mn	Cu	Fe	Si	Mg
4.83	0.32	0.001	0.001	0.003	Bal

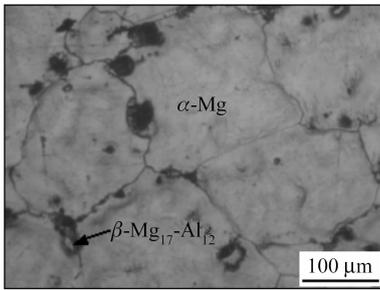


图 1 AM50 镁合金的基体组织

Fig. 1 Microstructure of the AM50 magnesium alloy

试样用线切割法加工成尺寸为 50 mm × 50 mm × 6 mm 的试块,试样表面用 100~800# SiC 砂纸逐级打磨、乙醇清洗、冷风吹干后,在其表面涂覆一层约 50 μm 厚的黑漆涂料。激光冲击实验装置如图 2 所示,实验采用钕玻璃脉冲激光,激光波长 1054 nm,脉冲宽度 23 ns。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;为增强激光在材料表面产生的冲击波压力,延长冲击波的作用时间,采用对激光透明的水作约束层,水流厚约 3 mm。

激光冲击处理后,采用乙醇清洗去除试样表面残留的黑漆;采用 VEECO NT1100 非接触光学轮廓仪测试激光冲击后的表面微观变形量;用线切割法将试样沿横截面切开,将截面磨平、抛光后,用体

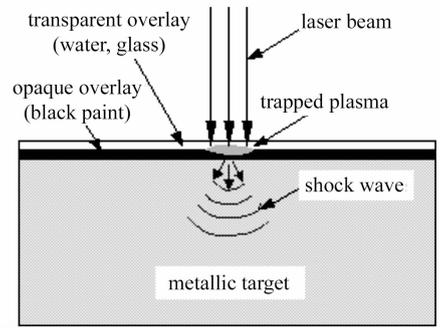


图 2 激光冲击处理示意图

Fig. 2 Schematic of LSP

积分数为 5% 的冰乙酸蒸馏水溶液浸蚀,采用 XJL-02 立式金相显微镜观察、拍摄金相组织;采用 HV-1000 型显微硬度计测试冲击区横截面由表及里的显微硬度分布,加载 100 g,保荷时间 10 s,每隔 50 μm 测试 3 次,取其算术平均值;利用 X-350A 型 X 射线应力仪测试表面残余应力,管电压 22 kV,管电流 6 mA,钴靶 K $\alpha$  特征辐射,准直管直径  $\phi = 2$  mm,阶梯扫描步进角 0.1°,时间常数 1 s,侧倾角  $\Psi$  分别取 0°,15°,25°和 35°,应力测试晶面为 (122),应力常数  $K = -129$  MPa/(°),扫描起始及终止角分别为 137°和 133°。

## 3 工艺参数的优化

激光功率密度、涂层及约束层厚度的选择对于激光冲击强化效果有着直接的影响,激光冲击处理前有必要对这些工艺参数进行优化。

### 3.1 激光功率密度

激光冲击处理是利用激光辐照材料表面诱导的强冲击波,使材料表层发生塑性变形,从而使材料的性能得以提高<sup>[4,5]</sup>。可见,要达到强化材料的目的,必须使激光诱导的冲击波压力大于材料的屈服强度。一般材料随着应变速率的增加,屈服强度亦增加,在激光冲击过程中材料的应变速率高达  $10^7$  s<sup>-1</sup> 以上<sup>[7]</sup>,属于强动载荷。实验测得 AM50 镁合金的静态屈服强度为 125 MPa<sup>[1]</sup>,鉴于材料在强动载作用下的动态屈服强度一般约为其静态屈服强度的 2~4 倍<sup>[8]</sup>,可设定 AM50 镁合金的动态屈服强度为 375 MPa。激光光斑尺寸有限,激光冲击引起的材料变形,可视为局部材料在其周边为刚性约束条件下的塑性变形,激光冲击应力波近似按一维应变平面波方式传播<sup>[8]</sup>,一维应变问题中的材料动态屈服强度  $\sigma_H$  可表示为<sup>[5,8]</sup>

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

式中  $\nu$  为材料的泊松比,对镁合金  $\nu = 0.3$ <sup>[8]</sup>,  $\sigma_{\text{dyn}}^{\text{dyn}} \approx 375 \text{ MPa}$ ,为材料一维应力时的动态屈服强度。将  $\nu, \sigma_{\text{dyn}}^{\text{dyn}}$  代入(1)式,得  $\sigma_{\text{H}} = 656 \text{ MPa}$ 。

激光诱导的冲击波压力  $P$  在  $\sigma_{\text{H}}$  与  $2\sigma_{\text{H}}$  之间时,塑性变形随压力增加呈线性增加;压力  $P$  为  $2\sigma_{\text{H}}$  时,塑性变形达到饱和;压力  $P$  大于  $2.5\sigma_{\text{H}}$  时,表面释放波聚焦并从冲击边界放大,使残余应力场发生改变<sup>[9]</sup>,冲击波压力  $P$  的最佳范围为  $2\sigma_{\text{H}} \leq P \leq 2.5\sigma_{\text{H}}$ <sup>[9]</sup>,对 AM50 镁合金为

$$1.31 \text{ GPa} \leq P \leq 1.64 \text{ GPa}. \quad (2)$$

对强激光冲击靶材所产生的冲击波压力的估算,许多学者已进行了较为深入的研究<sup>[10]</sup>,为提高激光冲击波峰压而广泛采用的透明约束层模式,Fabbro 等<sup>[11]</sup>建立了激光冲击波传播的一维模型,并对靶材表面的冲击波峰值压力进行了估算

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  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;  $Z$  为靶材与水约束层的合成冲击波声阻抗,定义为<sup>[11]</sup>

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{target}}} + \frac{1}{Z_{\text{water}}}, \quad (4)$$

对靶材镁合金和约束层水,其声阻抗分别为<sup>[8,12]</sup>

$$\begin{cases} Z_{\text{target}} = 0.946 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ Z_{\text{water}} = 0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}, \quad (5)$$

联立(2)~(5)式可得激光功率密度的最佳范围为:  $2.0 \text{ GW/cm}^2 \leq I_0 \leq 3.1 \text{ GW/cm}^2$ 。激光的脉冲宽度恒定,为  $23 \text{ ns}$ ,激光功率密度可通过改变脉冲能量和光斑直径进行调整。实验采用优化后的参数,脉冲能量  $14 \text{ J}$ ,光斑直径  $5 \text{ mm}$ ,平均激光功率密度为  $3.1 \text{ GW/cm}^2$ 。

### 3.2 涂层与约束层厚度

目前国内外使用的涂层、约束层的种类较多<sup>[13~15]</sup>,从经济、便于清理等角度考虑,实验选择了目前广泛使用的黑漆涂层与水约束层。涂层与约束层厚度,对冲击效果有着不可忽视的影响。涂层的理想厚度  $z$  为<sup>[13]</sup>

$$z = \frac{AI_0\tau}{\rho[L + c(T_b - T_0)]}, \quad (6)$$

式中  $A, \tau$  分别为涂层对激光的吸收系数和激光脉冲宽度,  $\rho, L, c, T_b$  分别为涂层的密度、气化热、比热容和气化温度,  $T_0$  为环境温度。由(6)式可见,若涂层太薄,涂层不能吸收掉足够的激光能量以至激光直接灼烧工件而使金属表面产生有害的热损伤,但如

果涂层太厚,则过剩的涂层会衰减传向靶的冲击波强度,降低强化效果<sup>[15]</sup>。文献[14]对约束层进行了理论分析,随着约束层厚度的增加,冲击波的作用时间延长,强化效果提高,但由于约束层对激光并不完全透明,随着约束层厚度的增加,透过约束层的激光能量减少,反而降低了强化效果。对波长为  $1054 \text{ nm}$ ,脉冲宽度为  $23 \text{ ns}$  的钕玻璃激光,当激光功率密度约为  $3 \text{ GW/cm}^2$ ,进行单次冲击时,较优的黑漆涂层厚度为  $50 \mu\text{m}$ ,水流厚度为  $3 \text{ mm}$ 。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 表面形貌

单次激光冲击后,在试样表面激光冲击区留下了光亮致密的微凹坑,如图 3 所示。激光冲击后的表面没有灼伤痕迹,激光冲击对试样表面的热影响很小,主要是机械力的作用,属于冷工艺。采用 VEECO NT1100 非接触光学轮廓仪对激光冲击后的微凹坑进行测试,结果如图 4 所示。激光冲击留下的微凹坑深度约为  $27 \mu\text{m}$ ,表明表层材料发生了塑性变形,由于激光诱导的冲击波作用时间很短,仅

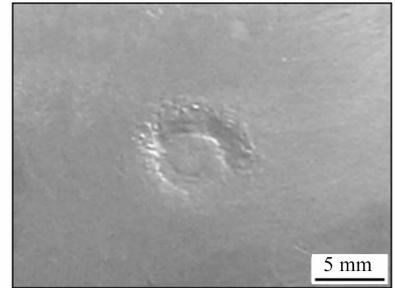


图 3 单次激光冲击后的试样表面形貌  
Fig. 3 Photograph of sample surface after LSP

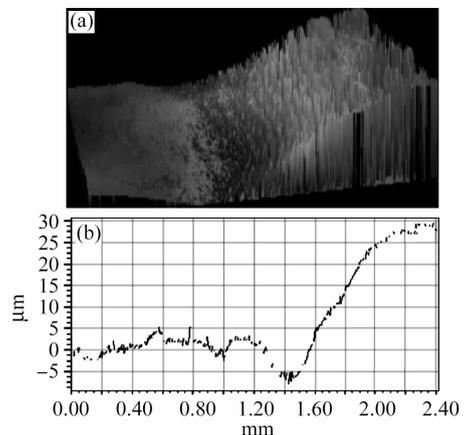


图 4 激光冲击后试样表面的凹坑深度  
Fig. 4 Depth of the dent after LSP

为几十纳秒,因此材料的应变速率很高,可达  $10^7 \text{ s}^{-1}$  以上<sup>[7]</sup>。进一步观察可见,凹坑表面由于受冲击波的强烈压研作用而变得高低不平,但表面变得更加光亮,这表明激光冲击可以保持甚至提高材料表面的微观光洁度。

#### 4.2 微观组织

图 5 为激光冲击处理后横截面的金相组织,由图可见,激光冲击后表层材料的原始晶界清晰完整,进一步说明激光冲击对材料表面的热影响很小。与基体的金相组织(如图 1 所示)相比,发现经过激光冲击后,晶粒内部出现大量孪晶。原因是金属表层承受激光诱导的强冲击应力波作用时经历了激烈的塑性变形过程。镁合金属于密排六方晶体结构,对称性低,滑移系数少,塑性变形能力较差,其塑性变形依赖于位错滑移和孪生的协调作用<sup>[16]</sup>。激光冲击后的镁合金,孪晶穿越,位错密度提高,导致更多晶界形成,使得晶粒细化,材料的强度、硬度提高。

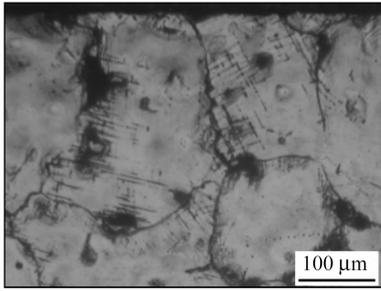


图 5 激光冲击区组织

Fig. 5 Microstructure of laser shocked zone

#### 4.3 显微硬度

激光诱导的冲击波压力很高,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。激光冲击区横截面的显微硬度分布如图 6 所示,表层的显微硬度较高,硬度值约为 63 HV,而基体的显微硬度约为

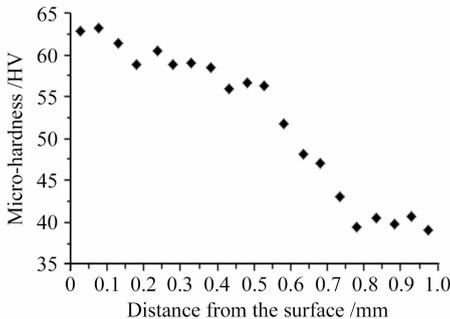


图 6 激光冲击区横截面上的显微硬度分布

Fig. 6 Micro-hardness profile on the cross-section of laser shocked zone

40 HV,显微硬度值约提高了 58%,随着到表面距离的增加,显微硬度值逐渐接近基体。

应力波在材料内传播时,其峰值压力随传播距离的增加成指数规律衰减<sup>[17]</sup>,当应力波峰值压力低于材料的  $\sigma_H$  后,材料不再发生塑性变形。因此,激光诱导的强冲击应力波使金属表面下一定深度范围内的材料得到强化。激光诱导的冲击应力波在传播过程中,在靶表面时应力波较强,对材料的强化效果较强,随着应力波向材料内部传播距离的增加,强度逐渐衰减,对材料的强化效果也逐渐减弱。因此,表层材料的硬度较高,随着到表面距离的增加,材料的显微硬度值逐渐减小。

激光冲击作用下的塑性变形层深度  $D$  可按式估算<sup>[9]</sup>

$$D = \frac{C_e C_p t}{C_e - C_p} \left( \frac{P - \sigma_H}{2\sigma_H} \right), \quad (7)$$

式中  $C_e, C_p$  分别为弹性波和塑性波在靶材中的传播速度,镁合金  $C_e = 5.74 \times 10^6 \text{ mm/s}$ ,  $C_p = 4.44 \times 10^6 \text{ mm/s}$ <sup>[8]</sup>,  $t$  为冲击波作用时间,由于激光脉冲宽度为 23 ns,约束层能将冲击波作用时间展宽至脉冲宽度的 2~3 倍<sup>[18]</sup>,因此  $t \approx 57 \text{ ns}$ 。将  $C_e, C_p, t, P, \sigma_H$  代入(7)式,得塑性变形层深度  $D \approx 0.84 \text{ mm}$ ,这与横截面上的显微硬度的测试结果基本一致(如图 6 所示)。理论计算与实验测试结果均显示,材料的强化层深度约为 0.8 mm。

#### 4.4 残余应力

激光诱导的强冲击波使工件表层材料产生塑性变形,表层材料被压扁,离开平衡位置的质点无法回到原先位置,同时塑性层阻挡了已发生弹性变形层的恢复,材料内部保持局部封锁住的应力作用,即残余应力。激光冲击处理后,用 X 射线应力仪测试激光冲击区内外的表面残余应力,结果在激光冲击区表面,残余应力值为  $-145.9 \text{ MPa}$  (误差为  $\pm 18.2 \text{ MPa}$ ),而在远离激光冲击区的表面,其残余应力值为  $-3.5 \text{ MPa}$  (误差为  $\pm 12.7 \text{ MPa}$ )。可见,激光冲击处理使冲击区表层产生残余压应力,表面残余压应力值高达  $-146 \text{ MPa}$ 。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<sup>[4,5]</sup>。

## 5 结 论

采用钨玻璃脉冲激光冲击处理 AM50 镁合金较优的工艺参数为激光功率密度  $3.1 \text{ GW/cm}^2$ ,黑

漆涂层厚约 50  $\mu\text{m}$ , 流水约束层厚约 3 mm, 实验结果表明, 在该工艺参数下既获得了较好的冲击强化效果, 又保护了材料表面不被高能激光灼伤; 激光冲击处理 AM50 镁合金, 使其显微硬度和残余应力有显著提高, 材料表层的显微硬度约比基体高 58%, 材料表面残余压应力值高达 -146 MPa, 强化层深度约 0.8 mm, 强化效果十分明显。

### 参 考 文 献

- Zhang Jin, Zhang Zonghe. Magnesium Alloys and the Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 1~307  
张 津, 章宗和. 镁合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 1~307
- A. Tharumarajah, P. Koltun. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, **15**(11):1007~1013
- B. L. Mordike, T. Ebert. Magnesium properties-applications-potential [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, **302**(1):37~45
- Y. K. Zhang, C. L. Hu, L. Cai *et al.*. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser-excited shock waves [J]. *Appl. Phys. A*, 2001, **72**(1):113~116
- Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys; a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10):1021~1036
- Zhang Yongkang, Zhang Xingquan, Zhou Jianzhong *et al.*. Deformation of aluminum alloy LY12CZ plate by laser shot peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1417~1421  
张永康, 张兴权, 周建忠 等. LY12CZ 铝合金激光喷丸变形[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1417~1421
- J. Z. Zhou, J. C. Yang, Y. K. Zhang *et al.*. A Study on super-speed forming of metal sheet by laser shock waves [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **129**(1):241~244
- Zhou Nan, Qiao Dengjiang. Materials Dynamics under Pulse Beam Radiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1~159  
周 南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 1~159
- P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, **210**(1):102~113
- Thord Thorslund, Franz-Josef Kahlen, Aravinda Kar. Temperatures, pressures and stresses during laser shock processing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **39**(1):51~71
- R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):775~784
- Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1282~1287  
张永康, 高 立, 杨超君. 激光冲击 TA2 板变形的理论分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1282~1287
- Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Thickness optimizing of surface coating for laser shock processing [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, **31**(7):61~64  
任旭东, 张永康, 周建忠 等. 激光冲击加工表面涂层厚度的优选[J]. *金属热处理*, 2006, **31**(7):61~64
- Gu Yongyu, Zhang Yongkang, Zhang Xingquan *et al.*. Theoretical study on the influence of the overlay on the pressure of laser shock wave in photo mechanics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11):5885~5891  
顾永玉, 张永康, 张兴权 等. 约束层对激光驱动冲击波压力影响机理的理论研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11):5885~5891
- Liu Shiwei, Gu Dahao, Wang Shengbo *et al.*. Effects of experimental parameters on LSP [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10):937~940  
刘世伟, 郭大浩, 王声波 等. 实验参数对激光冲击强化效果的影响[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(10):937~940
- Xia Weijun, Yang Chunhua, Huang Changqing *et al.*. Influence of deformation and rate on twins of cast AM60 during compression test [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, **30**(8):13~15  
夏伟军, 杨春花, 黄长清 等. 变形量和变形速率对 AM60 铸锭压缩过程中孪晶的影响[J]. *机械工程材料*, 2006, **30**(8):13~15
- Hong Xi, Wang Shengbo, Gu Dahao *et al.*. Research on the attenuation property of the laser induced shock wave propagating in aluminum [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, **15**(5):474~478  
洪 晰, 王声波, 郭大浩 等. 激光冲击波在铝靶中衰减特性的研究[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(5):474~478
- Xin Hong, Shengbo Wang, Dahao Guo *et al.*. Confining medium and absorptive overlay: their effects on a laser-induced shock wave [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, **29**(6):447~455