

文章编号: 1001-3806(2012)01-0045-05

激光冲击 AM50 镁合金残余应力场的有限元分析

申来娣¹ 陈菊芳¹ 李兴成² 李仁兴¹

(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: 为了研究镁合金在激光冲击载荷作用下残余应力场的特征, 采用实验测试和有限元分析的方法对激光冲击区的残余应力进行了研究。试验中使用 Nd:glass 脉冲激光对 AM50 镁合金表面进行冲击强化处理, 当激光功率密度为 $3\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 表面的残余压应力值高达 -146MPa , 残余压应力层深约 0.8mm ; 用有限元分析软件 ABAQUS 对残余应力场进行数值计算, 得到激光功率密度大于 $0.49\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 将产生残余压应力, 随着功率密度的增加, 残余压应力值增加并趋于饱和; 激光功率密度在 $1.95\text{GW}/\text{cm}^2 \sim 3.06\text{GW}/\text{cm}^2$ 之间时, 残余压应力值达到饱和。结果表明, 实验测试数据与数值计算结果一致性较好, 该结果可为激光冲击参数的优化提供理论依据。

关键词: 激光技术; 激光冲击; 镁合金; 残余应力场; 有限元分析

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.013

Finite element analysis on residual stress field for laser shock processing AM50 magnesium alloy

SHEN Lai-di¹, CHEN Ju-fang¹, LI Xing-cheng², LI Ren-xing¹

(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 characteristics of the residual stress field in the laser shocked area, the residual stress was studied with finite element analysis method. With a Nd:glass pulse laser shocking the surface of AM50 magnesium alloy in experiments, when the laser power density was about $3\text{GW}/\text{cm}^2$, the compressive residual stress on the surface of laser shocked area reached -146MPa , and the depth of the compressive residual stress layer was about 0.8mm . Numerical analysis was done with finite element software ABAQUS. The numerical analysis results showed that when the laser power density was over $0.49\text{GW}/\text{cm}^2$, there was compressive residual stress in the shocked area, as the laser power density increased, the residual compressive stress also increased and when the laser power density was between $1.95\text{GW}/\text{cm}^2$ and $3.06\text{GW}/\text{cm}^2$, the residual compressive stress reached saturation. The results show that the calculation results conforms to the experimental data, the numerical results can be used as theoretical basis for optimizing the process parameters in laser shock processing.

Key words: laser technique; laser shock processing; magnesium alloy; residual stress field; 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, 密度仅为 $1.74\text{g}/\text{cm}^3 \sim 1.85\text{g}/\text{cm}^3$ 。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, 且在腐蚀环境中, 镁合金有十分强烈的应力腐蚀敏感性^[3]。随着镁合金的应用范围越来越广, 如何提高镁合金结构件的疲劳强度, 提高镁合金在腐蚀环境中的抗应力腐蚀敏感性, 延长其服役寿命, 提高其工作可靠性, 已受到人们的普遍关注。

激光冲击处理(laser shock processing, LSP)技术是一种新型的表面强化技术, 利用功率密度为吉瓦每平方米量级、脉冲宽度为纳秒量级的强激光束辐照金属表面产生吉帕斯卡量级的高强冲击波, 使材料表层产生塑性变形, 残留较大的压应力, 且激光冲击产生的残余压应力层较深, 约为机械喷丸的2倍~5倍^[4]。激光冲击处理获得的残余压应力层有很好的阻止裂纹

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: 申来娣(1968-), 女, 实验师, 现主要从事材料力学性能及应力场研究。

E-mail: jxslld@jstu.edu.cn

收稿日期: 2011-04-07; 收到修改稿日期: 2011-04-27

萌生和扩展的能力,可以大大提高金属材料的疲劳寿命和抗应力腐蚀性能。目前,国内外对激光冲击产生残余压应力场的报道不少^[4-5],但对激光冲击产生残余应力场的理论分析鲜见报道。本文中采用 Nd:glass 脉冲激光对 AM50 镁合金表面进行冲击强化处理,采用 X 射线应力测定仪测试冲击区的残余应力,并用 ABAQUS 有限元分析软件对激光冲击区的残余应力场进行数值模拟,分析了不同激光功率密度下的残余应力场的分布,分析结果可为激光冲击参数的优化提供依据。

1 实验材料与方法

实验采用工程中广泛使用的 AM50 镁合金,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。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,黑漆涂层厚约 50μm。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做约束层,流水厚约 3mm。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 X-350A 型 X 射线应力仪测试残余应力,管电压 22kV,管电流 6mA,钴靶 K α 特征辐射,准直管直径为 2mm,阶梯扫描步进角 0.1°,时间常数 1s,侧倾角 ψ 分别取 0°, 15°, 25° 和 35°,应力测试晶面为 (122),应力常数 $K = -129$,扫描起始及终止角分别为 137° 和 133°。为测试冲击区残余应力值沿深度的变化,采用 XF-1 电解抛光机将表层材料逐层剥离,电解抛光液采用体积分数为 0.05 的甘油 NaCl 饱和溶液,抛光电压 9V。

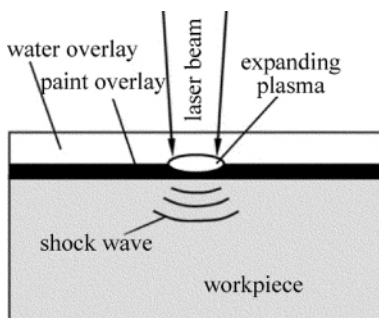


Fig. 1 Sketch map of laser shot processing

2 有限元分析

2.1 分析模块的选用

在激光冲击强化过程中,激光诱导的冲击波作用

时间极短,仅为几十纳秒,因此材料的应变速率很高,高达 10^7s^{-1} 以上^[6]。ABAQUS/Explicit 分析模块,采用显式动态算法,适用于模拟短暂、瞬时的动态事件,如冲击、爆炸问题等。因此,选用 ABAQUS/Explicit 模块分析激光冲击过程,模拟激光冲击波在材料中的传播及相互作用过程,得到材料的动态响应。为了得到稳定的残余应力场,还需要将应用显式动态算法得到的计算结果导入隐式静态算法模块 ABAQUS/Standard 进行平衡回弹运算,释放显式动态分析后材料内部的弹性应变,计算材料内部的平衡状态,得到稳定的残余应力场。

2.2 有限元模型的建立及网格划分

鉴于激光诱导的冲击载荷具有轴对称性,为提高计算效率,选择轴对称单元建立轴对称模型。由于数值分析的结果对网格密度敏感,网格划分越密,越容易获得精确结果,但是计算时间较长。为准确预测激光冲击波作用下残余应力场的分布,同时提高分析效率,模型在冲击区域附近两倍光斑直径内采用较细的网格,在周边区域采用较粗的网格,为使有限元分析结果与实验测试值具有可比性,有限元模型厚度与试样尺寸一致。

2.3 材料的力学性能

激光冲击过程中材料的应变速率高达 10^7s^{-1} 以上,属于强动载荷。已有的研究表明,随着应变速率的增加,材料的弹性模量变化较小,材料的屈服强度明显增加。在强动载作用下,材料动态屈服强度一般约为其静态屈服强度的 2 倍 ~ 4 倍^[7],实验测得 AM50 镁合金的静态屈服强度为 125MPa^[8],AM50 镁合金在激光冲击载荷作用下的力学性能见表 1。

Table 1 Mechanical properties of AM50 under strong dynamic load

density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Poisson's ratio ν	elastic modulus E / MPa	dynamic yielding strength σ_d / MPa
1780	0.3	45000	375

2.4 边界条件及激光诱导的冲击载荷

由于采用的有限元模型为轴对称模型,因此在对称轴上施加对称边界条件,限制对称轴上各节点的径向位移、绕对称轴的转动和在模型平面内的转动。激光冲击时,试样底部受到工作台的支撑,故限制模型底部各节点沿轴向的位移。实验中采用的激光为高阶模式,激光束内能量分布比较均匀,因此,在激光作用区内施加均匀分布的冲击载荷。施加了边界条件及载荷后的有限元模型见图 2。参考文献 [9] 中研究了激光诱导的冲击波压力随时间的变化。结果表明,激光诱导的冲击波随时间的变化与激光脉冲波形相似,呈准高斯分布,覆盖在靶材表面的约束层将激光诱导的冲

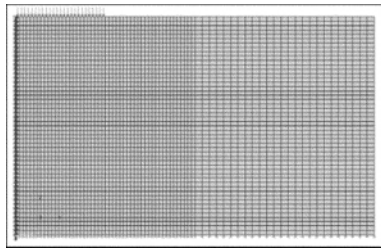


Fig. 2 Boundary condition and load

击波作用时间相对于激光脉冲时间延长 2 倍 ~ 3 倍, 根据测量所得的激光脉冲波形确定有限元分析时采用的冲击波加载曲线见图 3。

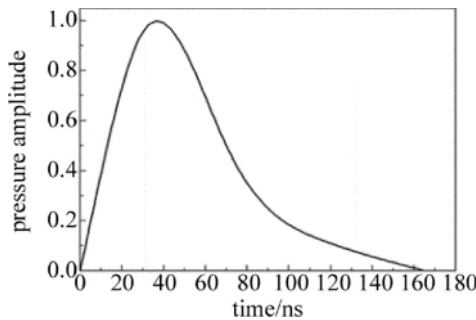


Fig. 3 Curve of laser shock wave loading

对于强脉冲激光冲击靶材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,针对为提高激光冲击波峰压而广泛采用的透明约束层模式, FAB-BRO 等人建立了激光冲击波传播的 1 维模型,并对靶材表面的冲击波峰值压力进行了估算^[10]:

$$p(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\alpha / (2\alpha + 3)} \times \sqrt{Z(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot I(\text{G} \cdot \text{W} \cdot \text{cm}^{-2})} \quad (1)$$

式中 α 为内能转化为热能的系数, $\alpha = 0.1$; I 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^[10]:

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

对靶材镁合金和约束层水, 其声阻抗分别为^[7, 11]:

$$\begin{cases} Z_{\text{target}} = 0.946 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ Z_{\text{water}} = 0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

联立(1)式~(3)式,代入激光功率密度,可计算激光诱导的冲击波峰值压力。

3 计算结果与分析

3.1 求解时间的确定

虽然激光诱导的冲击波加载时间非常短,但是由于冲击波传播过程中,材料内部会发生各种应力波的反射和相互作用,因而材料对冲击波的响应需要持续相当长的时间才能达到稳定,材料内各种能量的变化能够直观反映材料各种状态参量的变化。图 4 为 ABAQUS/Explicit 模块分析得到的激光冲击载荷作用

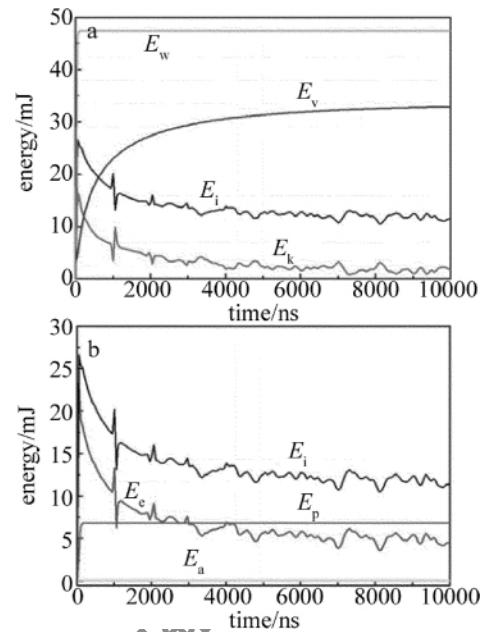


Fig. 4 Energy variation versus time in target loaded by laser shock wave

下材料内的能量随时间的变化曲线。由图可知,在激光冲击压力消失后,外力功 $E_w \approx 47\text{mJ}$, 几乎全部转化为内能 E_i 、动能 E_k 和粘性耗散能 E_v 。在 3000ns 内能量变化较快,内能、动能迅速减小并趋于 14mJ 和 0mJ, 粘性耗散能快速增加并趋于 33mJ。其中内能主要包括可恢复的弹性应变能 E_e 、非弹性耗散能 E_p 以及伪应变能 E_a 。由图可见,非弹性耗散能 E_p 在冲击波加载结束后很快达到饱和,非弹性耗散能的饱和表明靶材中无进一步的塑性变形发生;伪应变能 E_a 在整个分析过程中基本稳定在 0,说明建立的有限元模型的正确性;弹性应变能 E_e 在 3000ns 内迅速减小并最终稳定在 5mJ 左右,弹性应变能不为 0,说明模型中存在弹性应变。因此,需要将显式动态分析的计算结果导入隐式静态算法模块中进行平衡回弹运算,释放显式动态分析后材料内部的弹性应变能,才能得到稳定的残余应力场。根据靶材中能量的变化曲线,将有限元动态分析时间设置为 6000ns。

3.2 残余应力场的分布

图 5 为典型的激光冲击波作用下的残余应力场分布云图,图 5a 为显式动态分析的结果。将显式动态分析的结果导入隐式静态分析模块,进行平衡回弹运算,释放显式动态分析后材料内部的弹性应变能,得到稳定的残余应力场,见图 5b。可见,激光冲击强化处理后,在材料表层产生了均匀的残余压应力场。激光冲击过程中,激光诱导的强冲击波沿轴线向靶材内部传播,使靶材表层材料沿轴向压缩变形,同时导致这部分材料在平行于表面的平面内沿径向伸展。应力波向靶材内部传播过程中强度逐渐衰减,由于靶材表面冲击波峰值压力高达吉帕斯卡量级,远远超过靶材的动态

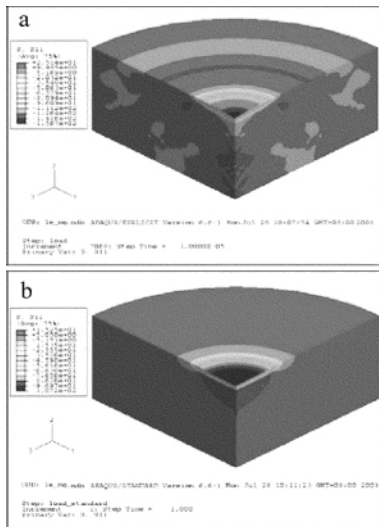


Fig. 5 Contour of residual stress distribution after laser shock processing
a—explicit dynamic analysis b—implicit static analysis

屈服强度,因此可使一定深度的表层材料发生塑性变形。冲击波作用结束后,塑性变形层阻挡了表层下既已发生弹性变形层的恢复,因此在材料表层产生残余压应力场。

3.3 激光功率密度对残余应力场的影响

残余压应力能平衡拉应力,从而有效提高构件的疲劳寿命和抗应力腐蚀性能,但高的残余压应力往往意味着需要消耗高的激光能量,因此,并不是残余压应力越高越好,而是应从实际需求出发,设置合适的残余压应力场,以保证既满足工作要求,又能合理利用激光能量。另外,已有的研究表明^[12],由于激光冲击过程中产生的表面波对残余应力场的影响,并不是激光能量越高,就一定能获得更高的残余压应力值。因此,研究不同激光功率密度下产生的残余应力场,对激光能量的有效利用和获得满足工作要求的残余压应力场具有重要意义。

图6为不同峰值压力的激光冲击波作用下残余应力的分布曲线,图6a为激光冲击区残余应力沿深度方向的分布,图6b为表面的残余应力沿半径方向的分布。由图可见,当激光冲击波峰值压力为0.7GPa时,产生的残余压应力值较小,随着冲击波峰值压力的增加,残余压应力值增大,同时残余压应力层的深度增加,当峰值压力为1.5GPa时,残余压应力值反而有所降低。由图6b还可以看出,随着冲击波压力的增大,由于表面波的影响,降低了表面中心区域的残余压应力水平。

由于激光光斑尺寸有限,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1维应变平面波方式传播。1维应变问题中的材料动态屈服强度 σ_H (也称Hugoniot弹性极限)可按下式计算^[7]:

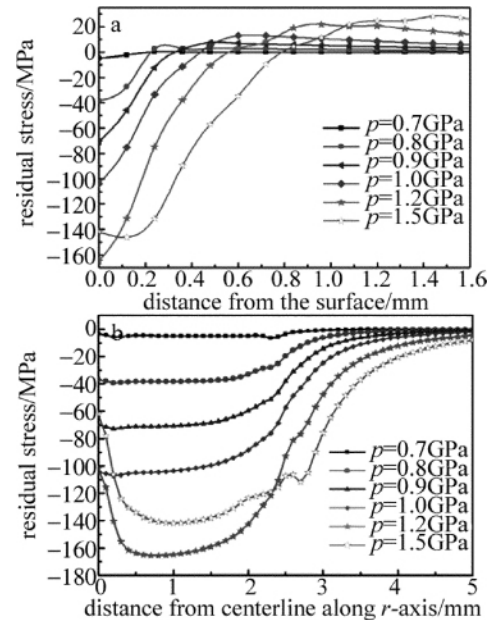


Fig. 6 Distribution of residual stresses under different shock wave pressure
a—residual stress distribution in depth b—residual stress distribution on top surface

$$\sigma_H = (1 - \nu) \sigma_d / (1 - 2\nu) \quad (4)$$

式中 ν 为材料的泊松比, σ_d 为材料1维应力时的动态屈服强度。将表1中的 ν 和 σ_d 值代入上式,得 $\sigma_H = 656\text{MPa}$ 。

已有的研究表明,激光诱导的冲击波峰值压力 p 在 σ_H 与 $2\sigma_H$ 之间时,塑性变形随压力增加呈线性增加; $p = 2\sigma_H$ 时,塑性变形达到饱和; $p > 2.5\sigma_H$ 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。所以获得最佳残余压应力场的 p 的范围为 $2\sigma_H \sim 2.5\sigma_H$ ^[12]。对AM50镁合金,当激光冲击波峰值压力大于656MPa时产生残余压应力,获得最佳残余压应力场的 p 的范围为1.31GPa~1.64GPa。可见,有限元分析结果与参考文献[12]中的研究结果有较好的一致性。由(1)式~(3)式可得相应的激光功率密度,当激光功率密度大于 $0.49\text{GW}/\text{cm}^2$ 时,将产生残余压应力,获得最佳残余压应力场的激光功率密度 I 的范围为 $1.95\text{GW}/\text{cm}^2 \sim 3.06\text{GW}/\text{cm}^2$ 。

3.4 有限元分析结果与实验测试值的对比

有限元分析的结果表明,对AM50镁合金,获得最佳残余应力场的激光功率密度 I 在 $1.95\text{GW}/\text{cm}^2 \sim 3.06\text{GW}/\text{cm}^2$ 之间。实验中采用的激光功率密度约为 $3\text{GW}/\text{cm}^2$,单次激光冲击后,在试样表面留下了光亮的微凹坑(见图7),可见,由于有覆盖在靶材表面的能量吸收层的牺牲保护作用,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。激光冲击区域的残余应力随深度变化的实验测试值与有限元分析结果见图8,由图可见,有限元分析结果与实验测试值有较好的一致性。激光冲

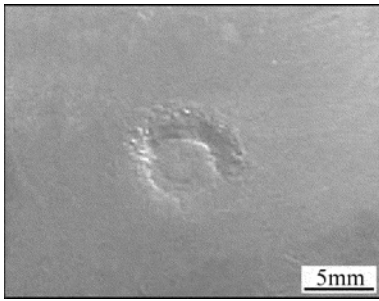


Fig. 7 Photograph of sample surface after laser shock processing

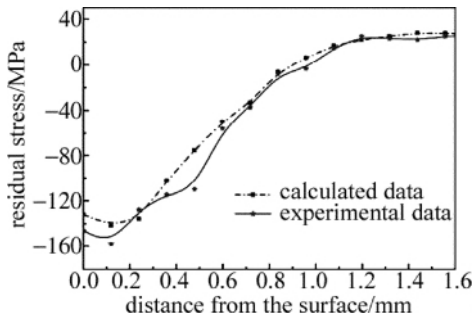


Fig. 8 Residual stress curve from calculated and experimental data for AM50 击后,材料表层内产生较大幅度的残余压应力,且获得了较深的残余压应力层。实验测得激光冲击区表面的最大残余压应力值为 -146MPa ,随着到表面距离的增加,残余压应力值逐渐减小,残余压应力层深度约为 0.8mm 。已有的研究表明,应力波在材料内传播时,其峰值压力随传播距离的增加成指数规律衰减^[13],因此,表面材料的残余压应力值较大,随着到表面距离的增加,残余压应力值逐渐减小。

4 结论

(1) 采用 Nd:glass 脉冲激光冲击处理 AM50 镁合金,可在材料表层获得较大的残余压应力层,当激光功率密度约 $3\text{GW}/\text{cm}^2$ 时,实验测得表面的残余压应力值为 -146MPa ,随着到表面距离的增加,残余压应力值逐渐减小,残余压应力层的深度约 0.8mm 。

(2) 通过对激光冲击过程中材料对冲击响应过程的分析,建立了轴对称有限元分析模型,分析过程包括 ABAQUS/Explicit 显式动态分析以及 ABAQUS/Standard 隐式静态分析两部分,实现了激光冲击强化处理残余应力场的数值模拟,分析结果与实验测试值吻合较好。

(3) 通过对不同激光功率密度下的残余应力场进行有限元分析表明,当激光功率密度大于 $0.49\text{GW}/\text{cm}^2$ 时,材料内产生残余压应力;随着激光功率密度的增加,残余压应力值变大,且残余压应力层深度增加;当激光功率密度 I 在 $1.95\text{GW}/\text{cm}^2 \sim 3.06\text{GW}/\text{cm}^2$ 之间时,残余压应力值达到饱和。

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] 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).
- [4] MONTROSS C S, WELT, XE 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.
- [5] ROSAS C G, GONZALEZ C R, OCANA J L, *et al.* High level compressive residual stresses produced in aluminum alloys by laser shock processing [J]. *Applied Surface Science* 2005, 252(4): 883-887.
- [6] ZHOU J Zh, YANG J C, ZHANG Y K, *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.
- [7] ZHOU N, QIAO D J. *Materials dynamics under pulse beam radiation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-459 (in Chinese).
- [8] ZHANG J, ZHANG Z H. *Magnesium alloys and the application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 1-307 (in Chinese).
- [9] HONG X, WANG S B, GUO D H, *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.
- [10] 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.
- [11] ZHANG Y K, GAO L, YANG Ch J. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2006, 33(9): 1282-1287 (in Chinese).
- [12] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, *et al.* Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering*, 1996, A210(1/2): 102-113.
- [13] HONG X, WANG Sh B, GUO D H, *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 (in Chinese).