

文章编号: 1001-3806(2012)03-0349-04

Fe-Ni 恒弹合金激光冲击力学性能异化现象研究

裴旭¹ 吴建华¹ 蒋素琴¹ 许兆美²

(1. 淮阴工学院 数字化制造技术实验室, 淮安 223003; 2. 淮阴工学院 机械工程学院 淮安 223003)

摘要: 为了研究激光冲击金属材料后, 光斑中心区域材料力学性能异化现象, 采用钕玻璃脉冲激光器产生的高能脉冲激光冲击强化型 Fe-Ni 恒弹合金 (Ni42CrTiAl) 材料。冲击后采用 X 射线应力仪对恒弹合金试样冲击区域表面进行了 X 射线衍射分析, 测试了冲击区域残余应力分布情况。结果表明, 在试样冲击区域产生了很高的残余压应力, 且在光斑中心区域, 残余应力值要略小于中心周围区域, 出现了力学性能反弹现象。采用有限元模拟软件对冲击试验进行有限元模拟, 进一步研究冲击诱导的残余应力分布情况; 得到冲击区域有很高的残余压应力分布, 且光斑中心区域的残余应力值小于其周围区域, 模拟结果与测量结果一致。从冲击波运动、反射与逆向作用角度, 探索了冲击区域中心出现的材料力学性能反弹现象的形成机理。这一结果对优化激光冲击强化过程和激光参数的选择是有帮助的。

关键词: 激光技术; 激光冲击强化; 力学性能反弹; 残余应力; 有限元模拟

中图分类号: TG156.99 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.016

Study on mechanical properties in the laser spot center of Fe-Ni elastic alloy induced by laser shock processing

PEI Xu¹, WU Jian-hua¹, JIANG Su-qin¹, XU Zhao-mei²

(1. Digital Manufacturing Technology Laboratory, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China; 2. School of Mechanical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

Abstract: In order to study the rebound phenomenon of mechanical properties in the spot center of metallic material induced by laser shock processing, Ni42CrTiAl, a Fe-Ni elastic alloy material, was processed by high-energy neodymium glass pulse laser. Then the distribution of the residual stress on the elastic alloy surface was tested with an X-ray strain gauge. The results showed that there was a high distribution of residual compressive stress in the shocked region and there was a rebound phenomenon of mechanical properties in the spot center region where the residual stress values slightly less than its surrounding area. And then for the purpose of further studying the distribution of the residual stress induced by laser shock processing, the finite element simulation software was introduced to simulate the shocking experiment. The simulation results showed that there was also a high distribution of residual compressive stress in the shocked region and a rebound phenomenon of mechanical properties in the spot center region. The simulation results are in good agreement with the measurement. Finally the formation mechanism of rebound phenomenon of the material mechanical properties in the center region was explored from the angle of the movement, the reflection and the reverse effect of the shock wave. This study result is benefit to optimize the process of the laser shock processing and laser parameter selection.

Key words: laser technique; laser shock processing; rebound of mechanical properties; residual stress; finite element simulation

引言

激光冲击强化是利用高能脉冲激光与材料相互作用, 诱导高幅冲击波的力效应使材料产生塑性变形的

新型加工技术。它可以提高金属材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀等性能, 尤其是对改善金属材料抗疲劳断裂性能具有明显的效果。在加工过程中, 激光诱导的冲击波持续时间短 (仅几十纳秒), 材料变形小, 所以适合成品零件的加工, 尤其是对应力集中的局部区域的零件能进行有效处理^[1]。因此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。到目前为止, 关于激光冲击强化的研究广泛用于铝合金^[2-3]、钢材、钛合金^[4]等金属材料, 研究内容主要是考察材料的力学性能、微观金相组

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075173); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2010288)

作者简介: 裴旭 (1983-), 男, 硕士, 主要从事激光冲击强化技术与理论方面的研究。

E-mail: peixuu@126.com

收稿日期: 2011-07-13; 收到修改稿日期: 2011-08-11

织以及表面结构等方面的变化。激光冲击强化过程是一个极其复杂的过程,此过程伴随着多种耦合作用,冲击效果与激光参量的选择和材料本身性质都直接相关。在冲击过程中,冲击光斑中心区域会出现材料“力学性能反弹现象”。所谓“力学性能反弹现象”是指激光冲击区域,在激光功率密度高的区域残余应力值不升反降的异化现象。对此现象的生成机理至今还未见到相关解释。为了研究金属材料激光冲击中心区域力学性能反弹现象,作者用钽玻璃高能脉冲激光器对铁镍恒弹合金进行冲击处理,通过应力测试得到在冲击中心区域出现了力学性能反弹现象,继而通过有限元软件 ABAQUS 模拟了冲击区域的残余应力分布情况;最后从冲击波运动、反射与逆向作用等角度,探索了冲击区域中心出现的材料力学性能反弹现象的形成机理。

1 试验材料与方法

Table 1 Composition of permanent elastic alloy Ni42CrTiAl

composition	Fe	Ni	Cr	Ti	Al	C	Mn	Si	P	S
mass fraction	0.47	0.415 ~ 0.430	0.0520 ~ 0.0580	0.0230 ~ 0.0270	0.0050 ~ 0.0080	≤ 0.0005	≤ 0.0080	≤ 0.0080	≤ 0.0002	≤ 0.0002

2 激光冲击后冲击区域残余应力测试结果

激光冲击后试样凹坑及其周围残余应力分布如图 1 所示。X 射线对金属的穿透深度约为 $20\mu\text{m}$,所以试验测得的残余应力值应为 $20\mu\text{m}$ 薄层内的平均值。带点曲线为试验测得的残余应力分布曲线,不带点曲线为拟合后残余应力分布曲线。从图中可以看出,激光冲击区域的残余应力为 $-210\text{MPa} \sim -100\text{MPa}$,激光冲击影响区域的残余应力为 $80\text{MPa} \sim -100\text{MPa}$ 之间, Ni42CrTiAl 试样基体的残余应力为 80MPa 左右。由于激光冲击强化引起了材料晶格之间位错、滑移,从而导致材料的塑性变形,因此,在试样冲击区域产生了很高的残余压应力。可见激光冲击 Ni42CrTiAl 试样,在试样表面的激光冲击区域和影响区域产生高幅的残余压应力,有助于提高 Ni42CrTiAl 试样的机械性能和抗疲劳性能。由于激光束为圆形光斑,激光空间能量呈准高斯分布,得到的残余应力分布情况总体来看也是

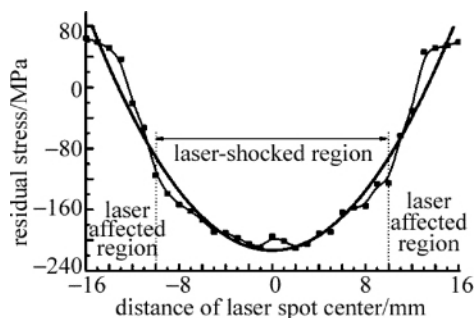


Fig. 1 Surface residual stress distribution of the Ni42CrTiAl sample by laser shock processing

试验材料采用在仪器仪表等领域广泛应用的^[5]强化型 Fe-Ni 恒弹合金 (Ni42CrTiAl) 材料。其材料组成成分如表 1 所示。试样尺寸大小为 $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。为了增强激光在材料表面产生的冲击波压力,冲击时采用 K9 玻璃作为约束层,用黑漆作为激光冲击吸收层。冲击试验前后,将试样放置到盛有乙醇的槽内,利用超声波进行清洗。

激光冲击试验中采用高功率钽玻璃脉冲激光器,激光光斑直径为 20mm ,脉冲能量为 30J ,激光波长为 1054nm ,激光脉冲宽度为 20ns 。冲击完成后,采用 X350A 型 X 射线应力仪对 Ni42CrTiAl 合金试样表面进行了 X 射线衍射分析,扫描起始角及终止角分别为 107° 和 114° ,侧倾角分别取 10° , 25° , 35° 和 45° 。沿着冲击光斑直径所在直线选择一系列的点测量其残余应力情况。

呈高斯分布的,但在冲击区中心部位残余压应力值相对较低,而靠近冲击中心的环形区域残余压应力值相对较高,与激光的能量分布情况又不完全相符合,可见激光冲击后,在材料冲击区域中心出现力学性能反弹现象。FAIRAND 等人在研究中观测到了同样的现象^[6]。

3 残余应力有限元数值模拟

ABAQUS 被广泛认为是功能最强的有限元分析软件之一,其功能强大的前后处理和内嵌的显式和隐式求解器,以及适合于各种特殊分析的专用模块等,为进行激光冲击板料过程的有限元模拟提供了强有力的分析平台。激光冲击过程是一个高度非线性的动态过程,而 ABAQUS 非常适用于此类高度非线性问题的研究,因此,选用 ABAQUS 对激光冲击过程进行有限元模拟和分析。

3.1 有限元模型建模过程

基于模型和冲击载荷的对称性,在建模时采用 $1/2$ 模型进行模拟。冲击靶材的尺寸大小为 $60\text{mm} \times 60\text{mm} \times 2\text{mm}$,在图形界面中,以 y 轴为中心对称轴,采用 C3D8R 单元类型,建立的有限元分析模型如图 2 所示。激光光斑半径为 20mm ,光斑作用区域是以靶材中心为圆心,半径 $r = 10\text{mm}$ 的圆形区域。恒弹合金的主要机械性能如表 2 所示,模拟中根据恒弹合金的机械性能对模型的材料性质进行定义。

Table 2 Permanent elastic alloy Ni42CrTiAl for frequency component technical requirement(YB/T5254-93)

elastic modulus E/GPa	shear modulus G/GPa	density d $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	curie temperature $T_c / ^\circ\text{C}$	tensile strength δ_b / GPa	elongation $\delta / \%$	vicker hardness /HV
180 ~ 190	65-75	8.0	110	1.5	6	420

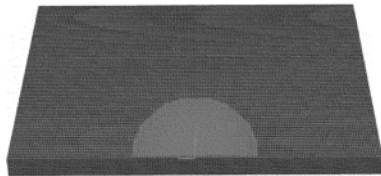


Fig. 2 Finite element analysis model of laser shock processing

3.2 冲击波加载曲线及峰值压力的计算

参考文献 [7] ~ 参考文献 [10] 中对约束模式下激光冲击过程中作用在靶材上的压力值进行了研究, 约束层能将激光诱导的冲击波的作用时间延长 2 倍 ~ 3 倍, 实验中采用的激光脉宽 $\tau = 23\text{ns}$, 这样每次冲击加载的作用时间为 69ns 左右, 模拟时取为 70ns。根据实际测量的激光脉冲信号来定义加载幅值曲线, 如图 3 所示。

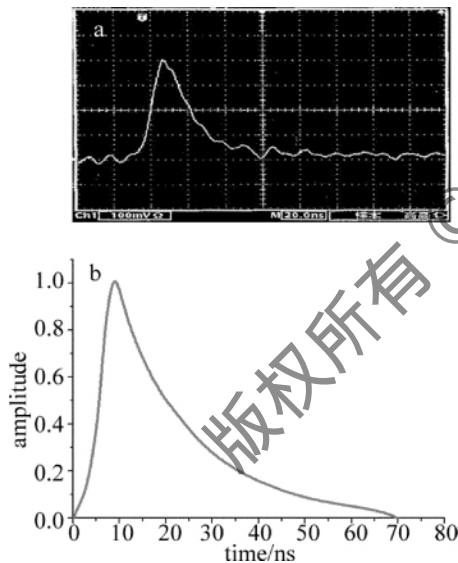


Fig. 3 Signal of laser pulse and loading amplitude curve of laser shock wave
a—signal of laser pulse b—loading amplitude

对于为了提高激光冲击波峰压力而采用约束层的冲击模式, FABBRO 等人 [10] 建立了靶材表面冲击波峰值压力估算公式:

$$P_m = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (1)$$

式中 α 为内能转化为热能的系数, $\alpha = 0.1 \sim 0.2$; I_0 为入射激光功率密度 (GW/cm^2), 可以由能量与功率密度的关系得到, 其计算公式为 [11]:

$$I_0 = \frac{AE}{\tau \cdot \pi r^2} \quad (2)$$

式中 A 为吸收系数 $0.80 \sim 0.95$; E 为激光能量, 单位

为 J ; τ 为激光脉宽, r 为光斑半径; Z 为靶材与约束层的合成冲击波声阻抗, 单位为 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 其定义为 [12]:

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_{c0}} \quad (3)$$

式中 Z_0, Z_{c0} 分别为靶材和约束层材料的声阻抗, 单位为 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

对于给定能量的脉冲激光, 可先根据 (1) 式、(2) 式和 (3) 式联立求解对应的峰值压力, 然后用峰值压力乘以幅值曲线上各点纵坐标值就可得到冲击波加载曲线, 把此曲线输入到 ABAQUS/Load 模块里面, 来实现冲击波的加载。

恒弹性合金的声阻抗为 $Z_0 = 38.47\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 对于约束层 K9 玻璃, 其声阻抗为 $Z_{c0} = 1.14 \times 10^6\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 代入 (3) 式可得 $Z = 2.21 \times 10^6\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。在直径为 20mm、激光能量为 30J 的光斑内, 激光的功率密度由 (2) 式可得 $I_0 = 0.374\text{GW}/\text{cm}^2$, 峰值压力为 $p_m = 2.265\text{GPa}$ 。

3.3 有限元模拟结果

加载时在网格模型上选取与激光冲击留下的实际光斑相似的圆形区域进行加载, 取光斑中心为原点建立 2 维平面直角坐标系。光斑区域的加载函数为:

$$p = p_m \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

加载完成后, 得到模型的残余应力分布状况的云纹图如图 4 所示。从图中可以看到, 在冲击区域表面和内部近表面, 以及模型的背面均产生了残余压应力分布。图 5 为沿直径方向得到的表面残余应力分布曲线。从曲线的分布状况可以得到, 在加载区域的中心区域, 出现了力学性能反弹现象, 得到了与实验测量结果相一致的模拟结果。

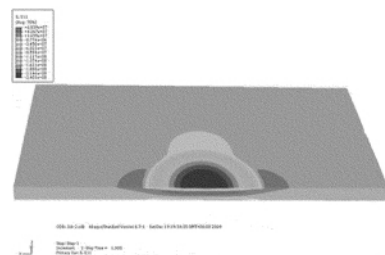


Fig. 4 Surface and inner residual stress distribution after loading

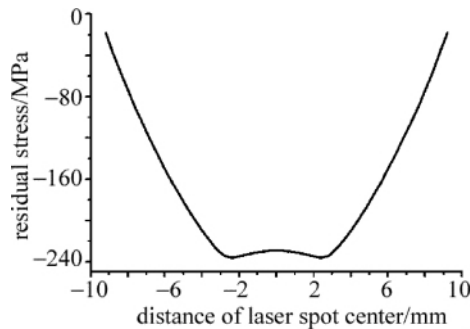


Fig. 5 Surface residual stress distribution curve after laser shock processing

4 冲击区域力学性能反弹机理分析

4.1 冲击波产生与在材料内部传播过程

金属靶材在进行激光冲击时,在试样表面覆盖有由能量吸收层和约束层等组成的能量转换体。由吸收层转化为等离子体诱导产生的冲击波,首先在约束层和吸收层中传播和衰减,因此,此处采用激光冲击波作用过程中激光-能量转换体-靶材系统相互作用推得的冲击波压力估算式^[13-14]:

$$p_m = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0Z_0Z_{c0}\rho}{(2\gamma-1)(K_aZ_{c0}+K_cZ_0)}} = \left[\frac{A(\gamma-1)}{(2\gamma-1)}\right]^{1/2} v_0^{1/2} \rho^{1/2} I_0^{1/2} \quad (5)$$

式中 γ 为等离子体的绝热指数,取为 1.67; K_a , K_c 分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参量,单位为 kg/m^3 ; ρ 为等离子体的密度,单位为 kg/m^3 ,可看作为约束层材料、能量吸收层和工件材料气化蒸气的综合体; v_0 为冲击波的初始速率,单位为 m/s ,由(5)式可得其表达式为:

$$v_0 = \frac{Z_0Z_{c0}}{(K_aZ_{c0}+K_cZ_0)} \quad (6)$$

$$\text{或 } v_0 = p_m^2 \frac{2\gamma-1}{A(\gamma-1)} \frac{1}{\rho} \frac{1}{I_0} \quad (7)$$

冲击波在材料内部运动,由于受到材料的声阻抗作用,能量不断减弱,而其传播的速率几乎不发生变化。冲击波能量的衰减表现为压力作用的衰减^[15],此过程遵循以下规律:

$$p_0 = p_m \exp(-\beta x) \quad (8)$$

式中 p_0 为传播一段距离 x 后冲击波在材料内部的峰值压力, β 为衰减系数,与材料本身的性质有关。

4.2 冲击波反射与逆向作用过程

冲击波在材料内部传播,当其传到靶材背面时,将发生反射作用。冲击波能量一部分随反射冲击波被反射回去,一部分被传递到靶材后面的底座上,最终被消散掉,还有一部分能量在反射撞击过程中以热能的形式耗散掉。因此,在冲击波反射这一过程中,能量会有很大的损失。与其它机械波反射过程一样,反射冲击

波所具有的能量至多只为反射前冲击波能量的一半。反射过程中,冲击波的相位也会比反射前的相位落后半个相位,即出现半波损。

反射冲击波在材料内部向靶材冲击表面传播过程中,会对冲击区域产生逆向峰压作用。由于激光束能量分布状态是呈高斯分布的,光斑的周围区域能量较低,且经过反射过程的衰减,不会对表面残余应力分布产生明显影响,中心区域由于能量较高,虽然衰减了,但仍然会对表面的残余应力产生影响,最终使冲击区域中心的残余应力小于其周围区域,使冲击光斑中心区域出现力学性能反弹现象。

5 结论

激光冲击强化引起的材料表面光斑中心区域力学性能反弹现象是一个较普遍的现象,但至今却鲜见有关于此现象的生成机理的研究报道。为了研究这一现象,采用钨玻璃高能脉冲激光器产生的激光冲击铁镍恒弹合金材料,并测试冲击区域的残余应力分布情况,进而用有限元分析软件 ABAQUS 进行模拟分析,得到与测量结果一致的模拟结果,最终从冲击波产生、运动、反射以及逆向作用等过程,分析了在光斑中心区域产生力学性能反弹的原因。从实验结果、模拟结果和分析过程来看,冲击波的整个运动过程对产生光斑中心区域力学性能反弹现象起至关重要的作用。

初步探索了冲击波纵向运动的对冲击光斑中心区域产生力学性能反弹现象作用,这一现象的产生可能还与冲击波横向运动及其与材料耦合作用过程有关系,这有待进一步研究与探索。

参考文献

- [1] 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): 1068-1072 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 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 Lasers 2006, 33(10): 1417-1421 (in Chinese).
- [4] 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).
- [5] AKINLADE D A, CALEY W F, RICHARDS N L, et al. Microstructural investigation of phase transformations and properties during thermal processing of a 6 w/o Al-modified Ni-Cr-Fe ternary alloy [J]. Materials Science and Engineering 2008, A488(1/2): 221-234.
- [6] FAIRAND B P, WILCOX B A, GALLAGHER W J, et al. Laser shock-induced micro-structural and mechanical property changes in 7075 aluminum [J]. Journal of Applied Physics, 1972, A3(9): 3893-3895.

(下转第 356 页)

Table 1 Rail wear measurement data under different background light interference

60kg standard rail	theoretical value	experiment 1	experiment 2	experiment 3	experiment 4	experiment 5	experiment 6	experiment 7	experiment 8
lever wear value/mm	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0.0
vertical wear value/mm	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1

激光锁定成像在钢轨磨耗测量中的应用能很好地消除背景光,能够保证系统在不同的背景环境光的作用下减小测量的误差。但由于要同时采集两幅图像,而且是动态测量,所以对 CCD 的帧频提出了很高要求。实验中采用 40Hz 的 CCD 进行图形采集,PC 机的主频为 AMD 双核处理器 2.99GHz,能达到以上实验效果。只有在 CCD 较短曝光时间和计算机较快处理速度情况下,才能保证采集到图像的准确度。否则就会出现前后两帧图像的背景不一致,此时的激光锁定成像就会产生误差。

4 结论

非接触式钢轨磨耗的测量因其高效率必将成为钢轨磨耗测量系统发展的趋势,但这种方法却存在易受外界环境干扰影响的缺点。为了能够更好地测量出钢轨磨耗值,测量系统的抗外界光的干扰能力必须很强。激光锁定成像技术能够很好地分离目标图像信息和外界环境光的图像信息,从复杂的背景光中提取出目标轮廓曲线,消除了外界环境光的干扰作用。目标图像的稳定能确保系统在各种外界环境光干扰下能够正常工作,进而大大提高了钢轨磨耗测量的准确度,提高了测量系统的实用性。

参考文献

[1] DING D W, JI Sh B, WANG L Zh. Photoelectric real-time detection

system for rail abrasion [J]. China Railway Science 2006 27(1): 64-67(in Chinese).

- [2] JIN W R, ZHAN X Q, JIANG B H. Non-contact rail-wear inspecting system based on image understanding [C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers 2007: 3854-3858.
- [3] LI Zh H. The design of rail wear cross section high precision measurement [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008: 1-48(in Chinese).
- [4] DAI D D, SUN H Y, HAN Y, et al. Image quality assessment of laser active imaging system [J]. Laser & Infrared 2009 39(9): 986-990(in Chinese).
- [5] YI S Y, SUH J H, HONG Y J, et al. Active ranging system based on structured laser light image [C]//Proceedings of SICE Annual Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE 2010: 747-752.
- [6] SU K, YU X C, ZHU L X, et al. Target image acquisition in strong background light using laser lock-in image [J]. Laser & Infrared 2010 40(12): 1293-1297(in Chinese).
- [7] YANG L J. Research and implement of steel rail abrasion measurement system based on computer vision [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University 2008: 25-36(in Chinese).
- [8] PENG X Q, SONG W A, MA J J. Test system of the rail abrasion [J]. Foreign Electronic Measurement Technology 2008 27(10): 32-34(in Chinese).
- [9] HE X C, YUNG N H C. Curvature scale space corner detector with adaptive threshold and dynamic region of support [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK: IEEE Computer Society 2004: 791-794.
- [10] WANG W H, SUN J H, LIU Zh et al. Stripe center extraction algorithm for structured-light in rail wear dynamic measurement [J]. Laser & Infrared 2010 40(1): 87-90(in Chinese).

(上接第 352 页)

- [7] WANG Sh B, FAN Y, WU H X, et al. Property of laser-induced shockwave with confinement [J]. High Power Laser and Particle Beams 2004, 16(8): 981-984(in Chinese).
- [8] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physics study of laser produced plasma in confined geometry [J]. Journal of Applied Physics 1990 68(2): 775-784.
- [9] DEVAUX D, FABBRO R, TOLLIER L, et al. Generation of shock waves by laser-induced plasma in confined geometry [J]. Journal of Applied Physics 1993 74(4): 2268-2273.
- [10] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behaviour [J]. Materials Science & Engineering 1996 A210(1/2): 102-113.
- [11] ZHANG X Q, ZHOU J Zh, WANG G L, et al. Technology of laser peening and its application [J]. Manufacturing Automation 2005, 27(10): 26-28(in Chinese).
- [12] ZHANG W W, YAO L Y. Micro-scale laser shock peening of thin films, part 2: high spatial resolution material characterization [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2004, 126(2): 18-24.
- [13] ZHOU J Zh. Study on the mechanism of shock wave loading and the property of deformation of sheet metal of laser shock forming [D]. Zhenjian: Jiangsu University, 2003: 13-30(in Chinese).
- [14] YANG Ch J, ZHANG Y K, ZHOU J Zh, et al. Analysis and experiment on deformation of sheetmetal by laser shock wave [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics 2005, 37(s1): 40-43(in Chinese).
- [15] HONG X, WANG Sh B, GUO D H, et al. Study of the properties of the shockwave induced by high-power laser [J]. Chinese Journal of Lasers 1998 25(8): 743-747(in Chinese).