

文章编号: 0258-7025(2007)06-0861-05

# 金属板料激光预应力复合的喷丸成形

周建忠, 黄 舒\*, 杜建钧, 陈毅彬, 孙月庆

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 在对激光热应力成形(LTF)和激光喷丸成形(LPF)的技术优势进行分析的基础上,提出了一种板料激光预应力复合喷丸成形技术,其将连续激光的热堆积作用和脉冲激光的冲击波作用相结合,是一种热效应和力效应复合的成形方法。板料激光预应力复合喷丸成形技术首先使用 CO<sub>2</sub> 激光器对 2 mm 厚的 SUS304 不锈钢板料按特定的轨迹扫描以施加预应力,实现板料基本形状成形,然后通过 ATOS-II 光学扫描测量系统测量成形后板料表面的轮廓点云图,利用逆向软件 Imageware 建立成形板料的虚拟模型。利用有限元软件 ABAQUS 与逆向软件 Imageware 的接口,将虚拟模型转换为有限元分析模型,通过调整激光工艺参数和控制激光喷丸轨迹,模拟得到最优的残余应力场分布。然后使用数值模拟优化的激光工艺参数和喷丸轨迹进行板料激光喷丸成形实验。结果表明,经激光复合成形的板料获得预期的形状,且正反两面都呈残余压应力场分布。

**关键词** 激光技术;激光预应力复合喷丸成形;逆向造型;数值模拟;残余应力场

**中图分类号** TN 249;TG 665 **文献标识码** A

## Laser Pre-Stressed Compound Peen Forming of Plate

ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, DU Jian-jun, CHEN Yi-bin, SUN Yue-qing

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Based on the analysis of advantages on laser thermal-stress forming (LTF) and laser peen forming (LPF), a laser pre-stressed compound peen forming of plate is presented, the technology combines heat stack action of continuous laser and shock wave action of pulse laser, so it combines heating effect and mechanics effect. At first, CO<sub>2</sub> laser is used to scan SUS304 stainless plate which is 2 mm thickness according to special tracks to apply pre-load stress, the basic configuration is formed and residual stress is measured. ATOS-II optical scan measure system is used to measure the contours of the plate's surface after pre-forming, the reverse engineering software Imageware is used to establish virtual model of the plate. Then the interface between ABAQUS and Imageware is used to invert virtual model into finite element model, the optimum distribution of residual stress field is obtained through adjusting laser processing parameters and controlling tracks of laser peening by ABAQUS. Finally, the optimum laser parameters and processing condition are used for laser peen forming experiment. The results indicate that the anticipated shape is obtained, and both sides of the plate hold residual compressive stress field after laser pre-stressed compound peen forming.

**Key words** laser technique; laser pre-stressed compound peen forming; reverse engineering; numerical simulation; residual stress field

## 1 引言

金属板料复合成形是指复合不同技术和不同工艺过程,共同发挥和扩展各自的优点,从而形成多种可行的新技术和新工艺的先进方法。

板料的激光成形技术是近年来出现的一种先进的、绿色的柔性加工技术。激光热应力成形(LTF)和激光喷丸成形(LPF)即为激光技术在金属板料无模成形中的新应用。激光热应力成形利用激光在材

**收稿日期**: 2006-11-14; **收到修改稿日期**: 2007-02-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(50675090, 50475127), 江苏省自然科学基金(BK2004063)和教育部科学技术研究重点项目(204052)资助课题。

**作者简介**: 周建忠(1964—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光新技术应用和模具设计制造新方法的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: huangshu5188@163.com

料表面局部瞬态加热产生不均匀的内部热应力来成形板料,易于实现中厚板料复杂形状成形,但其缺点是在加工板料时需要深度加热,导致成形件的表面粗糙,且表面应力状态不够理想<sup>[1~3]</sup>。激光喷丸成形利用强激光与材料相互作用产生的冲击波力效应来成形板料,当激光束和材料相互作用后,激光诱导的冲击波传入工件内部使材料表面及内部形成深层分布的残余压应力场,从而使板料发生塑性变形,具有加工柔性大、板料成形表面质量好等优点<sup>[4~7]</sup>,但激光喷丸成形过程中板料变形量较小,而且喷丸成形过程中伴随着喷丸强化,使材料屈服强度提高,后续的变形更加困难<sup>[8,9]</sup>。

单一地使用激光热应力成形或激光喷丸成形进行中厚板料复杂形状的精确成形,都因各自具有局限性而不易获得高质量的成形件。因此本文提出一种激光预应力复合喷丸成形方法,综合了激光热应力成形易于实现复杂形状成形和激光喷丸成形加工表面质量好的优点,实验证明该成形方法可实现中厚板料复杂形状的精确成形。

## 2 激光复合成形工艺设计

为了使板料达到预期的形状和变形量,将成形工艺分为基本形状成形和精确成形两步。图1显示了激光预应力复合喷丸成形工艺的设计流程。

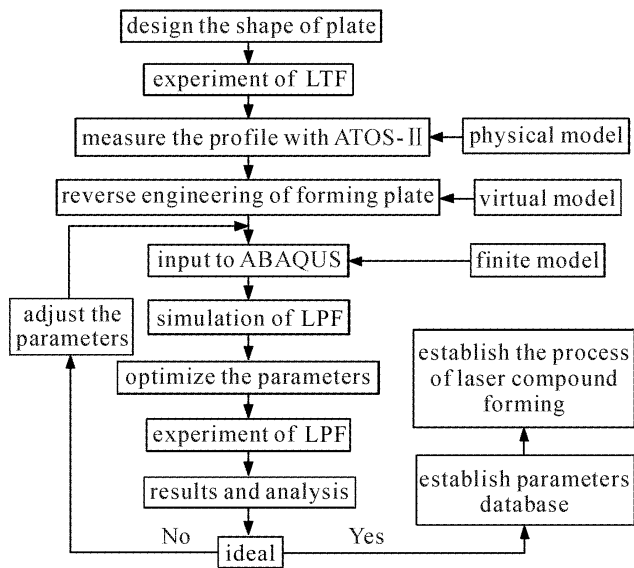


图1 激光预应力复合喷丸成形工艺设计流程图  
Fig. 1 Processing flow chart of laser pre-stressed compound peen forming

首先采用 CO<sub>2</sub> 激光器对板料进行连续激光扫描,通过控制激光束所走轨迹及激光工艺参数使板

料形成特定的基本形状;然后使用 ATOS- II 光学扫描测量系统对板料进行轮廓扫描,Imageware 逆向反求虚拟模型,建立有限元分析模型。在此基础上,采用 ABAQUS 软件对成基本形状的板料进行激光连续喷丸的数值模拟,通过轨迹的控制得到最佳残余应力场分布,并获得优化的激光工艺参数;然后用脉冲激光对预成形板料进行激光连续喷丸,实现板料的精确成形,同时比较板料激光喷丸前后表面应力状态的变化,分析实验结果,编制典型零件复合成形工艺数据库和工艺设计准则。

## 3 激光预应力成形实验

实验采用 2.5 kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器对板料进行连续激光扫描,所用材料为 SUS304 不锈钢,尺寸为 160 mm×100 mm×2 mm,实验前在试样表面涂覆一层油墨,以吸收激光能量,防止实验时表面发生烧蚀现象。按照激光热应力成形计算模型所得参数进行实验,激光功率为 500 W,扫描速度为 500 mm/min,光斑直径为 4 mm,扫描次数为 3 次,在此激光参数组合下,按图 2 所示轨迹进行激光连续扫描,图中 7 个点为残余应力测试点。为了控制每两次扫描之间的时间间隔,采用数控程序控制激光束的往复连续扫描。试样扫描后成马鞍形,如图 3 所示。

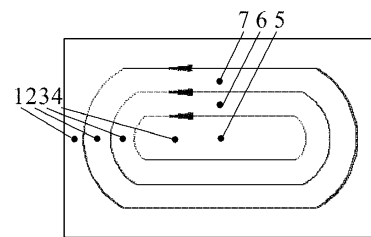


图2 板料成马鞍形的激光热应力扫描轨迹  
Fig. 2 Scan tracks on plate by laser forming of saddle

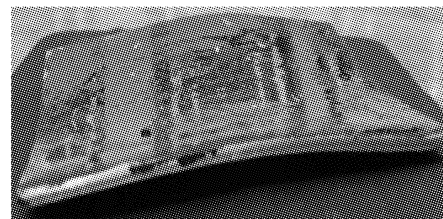


图3 板料经激光热应力扫描后的基本形状  
Fig. 3 Basic shape of plate after laser forming

## 4 逆向建立板料虚拟模型

使用 ATOS- II 光学扫描测量系统对激光预应力成形后的板料进行正反面的轮廓扫描,在板料周

围布置数码标记点和比例尺进行识别,围绕零件每隔  $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  拍摄一张照片,完成一周拍照后,系统自行计算生成板料表面轮廓点云图,图 4 所示为扫描后建立的板料物理模型。

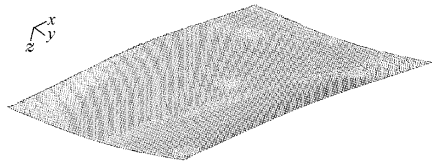


图 4 板料表面轮廓点云图

Fig. 4 Contours of the surface on plate

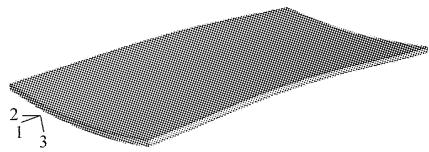


图 5 逆向反求得到的板料虚拟模型

Fig. 5 Virtual model of plate obtained by reverse engineering

利用逆向软件 Imageware 对图 4 轮廓点云图进行反求,重现板料变形图,得到与物理模型相一致的虚拟模型,如图 5 所示。

## 5 板料预成形后激光连续喷丸的数值模拟

### 5.1 有限元模型的建立

将用逆向软件 Imageware 建立的板料虚拟模型导入到分析软件 ABAQUS/CAE 中,利用 ABAQUS/CAE 平台对虚拟模型进行网格自适应划分等精确化处理,转换为有限元分析模型。

### 5.2 激光连续喷丸成形模拟

板料激光喷丸成形是一个高度非线性的瞬时动态事件,因此对其模拟主要是在 ABAQUS/Explicit 模块中进行,在进行多点喷丸时,第一个点喷丸结束

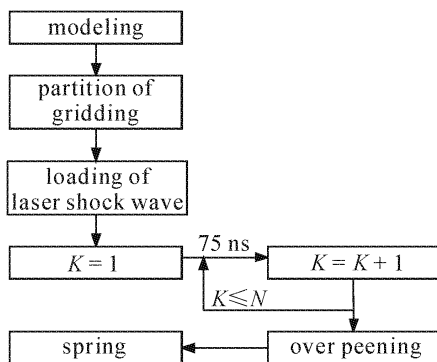


图 6 脉冲激光连续喷丸流程图

Fig. 6 Flow chart of pulsed laser peening

后进行第二个点喷丸,以此类推,点与点之间的喷丸间隙时间为 75 ns,移动步距为 7 mm,直到所有轨迹喷丸完成,最后进行回弹分析。该模拟过程与实验过程基本吻合,实验时,脉冲激光束对板料进行连续喷丸以后,将板料从夹具中取出,相当于模拟中的回弹分析。脉冲激光束连续喷丸的模拟过程如图 6 所示<sup>[10~12]</sup>。

激光连续喷丸时,为了避免板料变形过大,模拟采用的激光能量依次逐渐增加,图 7 显示了模拟时所用的激光连续喷丸轨迹。图 8 为激光连续喷丸后板料表面形貌图,为了分析喷丸后板料表面的质量,在与板料受喷表面(喷丸轨迹方向)垂直的方向上将变形放大 20000 倍,从放大的板料变形图中可以清楚地看到激光喷丸后留下的轨迹。

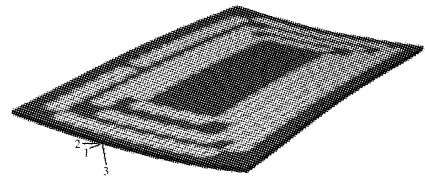


图 7 激光连续喷丸轨迹

Fig. 7 Tracks of laser peening

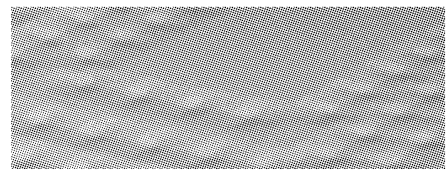


图 8 激光连续喷丸后板料表面形貌图(20000×)

Fig. 8 Surface profile on plate after laser peening (20000×)

## 6 激光喷丸成形的实验分析

采用数值模拟所得的工艺条件和激光参数对预成形金属板料进行激光连续喷丸的实验。实验在由中国科学技术大学和江苏大学联合研制的重复频率高功率钕玻璃激光冲击波系统上进行,输出的激光波长为  $1.06 \mu\text{m}$ ,脉冲能量为 35 ~ 50 J,脉宽为 23 ns,有效光斑直径为 8 mm 左右。

将试样表面用乙醇擦净后,在激光喷丸的轨迹上涂覆 86-1 型黑漆涂层,厚度约  $50 \mu\text{m}$ ,根据数值模拟的结果,选用 35J 的脉冲能量进行板料激光连续喷丸实验,图 9 显示了激光预应力复合喷丸后的板料成形形状。

用轮廓测量仪测得喷丸后的板料变形截面轮廓曲线,并与喷丸前板料同一截面的变形曲线进行比较,如图 10 所示。从图上看板料变形增量不是很

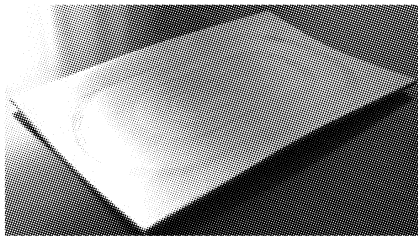


图 9 经过激光连续喷丸成形后的板料形状  
Fig. 9 Shape of plate after laser peen forming

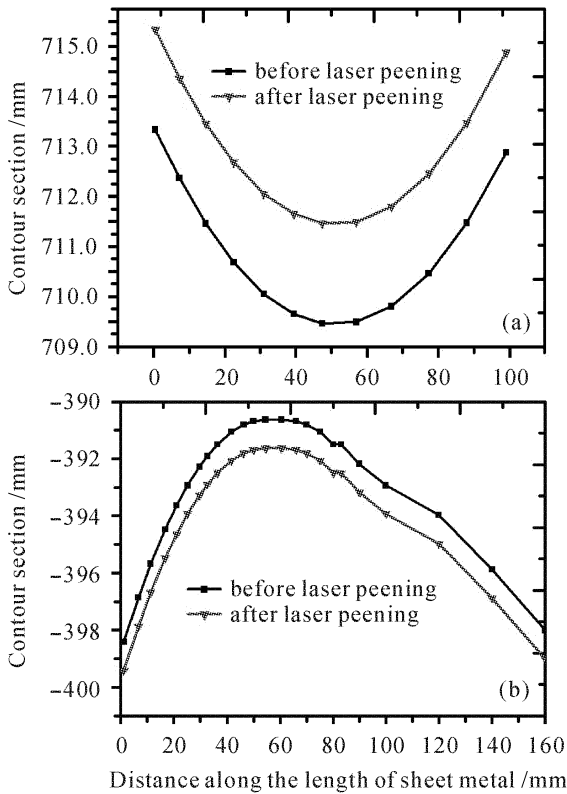


图 10 激光喷丸前后板料宽度方向(a)和长度方向(b)的变形曲线  
Fig. 10 Cross-section curves along width (a) and length (b) direction of plate before and after laser peening

大,这主要因为激光连续喷丸板料属于精微加工,在提高和改善表面残余应力的同时,实现板料的精密成形,获得所需的曲面形状,因而实验时所加的激光冲击波压力也相应地减小。

激光预应力成形时,板料在加热阶段,上表面材料的膨胀量远远大于下表面,此时上、下表面附近产生压缩应力,中间部位产生拉伸应力,而在冷却阶段,在上表面的材料已开始冷缩的最初一段时间,下表面处的材料还要继续热胀,此时应力分布情况如图 11(a)所示,在上、下表面附近均产生残余拉应力,中间部位产生残余压应力<sup>[13]</sup>。激光喷丸成形时,在激光与板料相互作用过程中,冲击波在喷丸区产生平行于板料表面的拉应力,并使板料发生塑性

变形。激光喷丸后,由于喷丸区周围材料的反作用,将在喷丸区材料表面形成残余压应力,此压应力分布可以抵消材料热应力成形过程中的表面拉应力,最终残余应力场分布如图 11(b)所示。

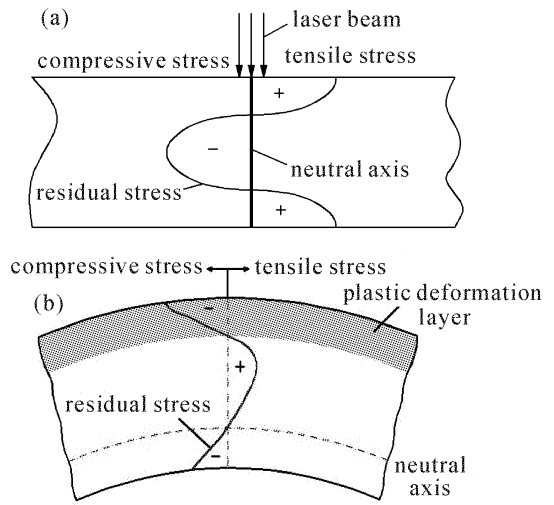


图 11 激光预应力成形后(a)和激光喷丸后(b)的残余应力场分布

Fig. 11 Distributions of residual stress after laser forming (a) and after laser peening (b)

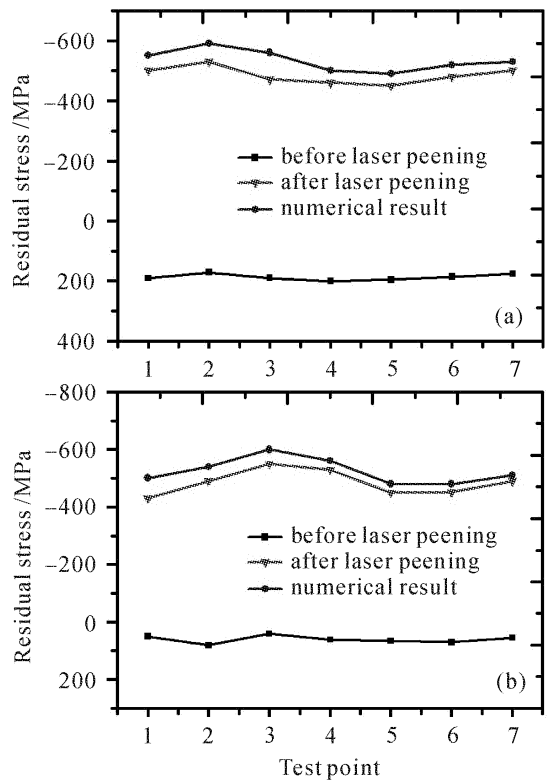


图 12 激光喷丸前后板料正面(a)和背面(b)残余应力的分布曲线  
Fig. 12 Distribution curves of residual stress on the upper side (a) and back side (b) of plate before and after laser peening

激光喷丸前后板料正反两面残余应力的变化情

况如图 12 所示, 选用测试点如图 2 所示。模拟和实验都表明, 经过激光预应力复合喷丸成形后, 板料表层中的残余应力由拉应力转化为压应力, 表面残余压应力可有效抑制疲劳裂纹源在表面萌生。在交变应力的作用下, 即使裂纹成核也必须达到  $R_a \geq R - R_r$  才能扩展, 即交变的外力  $R_a$  要大于材料本身的抗力  $R$  与残余应力  $R_r$  之差<sup>[14]</sup>。由此可见, 激光喷丸后获得的表面残余压应力能有效提高金属板料的强度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命。

## 7 结 论

通过对板料进行马鞍形预应力成形的实验, 对预成形板料逆向造型, 从而模拟激光连续喷丸获得工艺参数, 最后进行激光连续喷丸实验, 可以得出:

1) 激光预应力复合喷丸成形方法将连续激光的热堆积作用和脉冲激光的冲击波作用相结合, 既实现了板料马鞍形等复杂零件的精确成形, 又使板料表面应力状态由拉应力转变为压应力分布, 获得了较好的表面质量。

2) 在板料激光预应力初步成形的基础上, 利用数值模拟手段获得激光喷丸的轨迹和优化的工艺参数, 实验和数值模拟结果基本吻合, 表明可以用数值模拟的方法来预测成形板料的表面形貌和残余应力场的分布。

3) 激光喷丸后板料表面的残余应力状态跟激光工艺参数有关, 通过对工艺参数的优化, 可以合理控制残余应力场分布, 从而提高零件的抗疲劳、抗腐蚀和耐磨性能。为此必须以实验为依托, 数值模拟为手段, 建立相关材料性能和激光喷丸工艺参数数据库, 获得优异的激光喷丸成形件的表面质量。

## 参 考 文 献

- 1 J. G. Cheng, J. Zhang, C. C. Chu *et al.*. Experimental study and computer simulation of fracture toughness of sheet metal after laser forming [J]. *The International J. Advanced Manufacturing Technology*, 2005, **26**(11-12):1222~1230
- 2 An. K. Kyrsanidi, Th. B. Kermanidis, Sp. G. Pantelakis. Numerical and experimental investigation of the laser forming process [J]. *J. Materials Processing Technology*, 1999, **87**(1):281~290

- 3 G. Dearden, S. P. Edwardson, E. Abed *et al.*. Laser forming looks in good shape [J]. *Industrial Laser Solutions*, 2006, **6**:16~18
- 4 H. Lloyd, Haolin Chen. Laser peening—a processing tool to strengthen metals or alloys [R]. *Laser Science and Technology Program*, 2003, **9**:1~8
- 5 Zhou Jianzhong, Zhang Xingquan, Wang Guanglong *et al.*. A new technology of plastic forming plate by laser peening [J]. *Engineering Science*, 2005, **17**(11):94~97  
周建忠, 张兴权, 王广龙等. 金属板料激光喷丸成形新技术[J]. *中国工程科学*, 2005, **17**(11):94~97
- 6 J. Z. Zhou, Y. K. Zhang, X. Q. Zhang *et al.*. The mechanism and experimental study on laser peen forming of sheet metal [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, **315-316**:607~611
- 7 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 板料变形的理论分析和实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1282~1287
- 8 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):135~138  
周建忠, 张永康, 周明等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):135~138
- 9 Ni Minxiong, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. Investigation of generation mechanism and influencing factors on residual stress fields by laser shock processing [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2):73~77  
倪敏雄, 周建忠, 杨超君等. 激光冲击处理的残余应力场形成机理及影响因素分析[J]. *应用激光*, 2006, **26**(2):73~77
- 10 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Chen Jinyi *et al.*. Experimental study of high-power pulsed laser induced shock waves in aluminum targets [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(3):259~262  
李志勇, 朱文辉, 程经毅等. 实验研究脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3):259~262
- 11 Du Jianjun, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. Numerical simulation of laser peen forming based on ABAQUS [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):419~422  
杜建钧, 周建忠, 杨超君等. 基于 ABAQUS 的激光喷丸成形数值模拟[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):419~422
- 12 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]. *J. Material Processing Technology*, 2002, **129**(1-3):241~244
- 13 Li Weimin, Lu Xiuchun, Liu Zhuo. The effect regularity on the depth of sheet metal in laser forming [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1999, **9**(1):39~44  
李伟民, 卢秀春, 刘助柏. 激光弯曲工艺中板材厚度的影响规律[J]. *中国有色金属学报*, 1999, **9**(1):39~44
- 14 Gao Yukui, Yin Yuanfa, Li Xiangbin *et al.*. Research on residual stress field of GH909 alloy by shot peening [J]. *Material Engineering*, 2002, **4**:40~42  
高玉魁, 殷源发, 李向斌等. GH909 合金喷丸强化残余应力场的研究[J]. *材料工程*, 2002, **4**:40~42