

文章编号: 0258-7025(2008)07-1095-06

弹性预加载下板料激光喷丸成形特性

张兴权¹ 张永康² 周建忠² 顾永玉² 王 正¹

(¹ 安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002; ² 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 分析了弹性预加载下激光喷丸成形的机制, 并通过试验研究了板料在弹性预加载下激光喷丸成形的特性。试验用的激光脉冲参数为: 波长 1.06 μm , 脉宽 23 ns, 光斑直径 $\phi 4$ mm, 功率密度 10^9 W/cm² 量级; 试样的材料为 LY12CZ 硬铝合金。试验结果表明, 在弹性预加载下, 板料在弹性预弯方向获得的弯矩要比与弹性预弯垂直方向上的弯矩大得多, 弹性预加载下激光喷丸成形可以有效地克服自由状态下激光喷丸件呈球形现象, 激光喷丸件的曲率是自由状态下激光喷丸成形曲率的 2~3 倍; 在相同曲率下, 弹性预加载下激光喷丸成形件的表面粗糙度比自由状态下激光喷丸成形件的表面粗糙度要低 1~2 等级, 因此弹性预加载下激光喷丸成形要优于自由状态下的激光喷丸成形。

关键词 激光技术; 激光喷丸; 板料; 预加载; 弹性变形; 曲率; 粗糙度

中图分类号 TN 249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083507.1095

Characteristics of Deformation of Plate by Laser Peening under the Elastic Pre-Loading Condition

Zhang Xingquan¹ Zhang Yongkang² Zhou Jianzhong² Gu Yongyu² Wang Zheng¹

(¹ School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China)
² School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Laser peening forming is a novel technology, which employs the residual stress induced by high-power repetition laser to form plate. The mechanism of laser peening forming under elastic pre-loading condition was analyzed and the feature of deformation was tested by experiments. In the experiments, the parameters of laser were as follows: the wavelength is 1.054 μm , the pulse duration is 23 ns, and the power density is 10^9 W/cm². The material of sample was LY12CZ aeronautic aluminum alloy. The experimental results show that the flexural moment of the sample in the prebending direction is far bigger than that in the vertical direction to pre-bending and the spherical shape can be conquered during pre-loading laser peening forming to a great extent. Under the same conditions, curvature of workpiece after the pre-loading laser peening is two to three times than that after laser peening without pre-loading, and the surface roughness can be improved by one to two grade. So the laser peening forming during pre-loading is superior to the laser peening without pre-loading.

Key words laser technique; laser peening; plate; pre-loading; elastic deformation; curvature; surface roughness

1 引 言

金属板料在载荷作用下, 当其某些局部的应力超过材料屈服极限时, 则这些部位将出现塑性变形, 但构件的其余部分仍然是弹性的。如果再将载荷解除, 已经发生塑性变形的部分不能恢复原来的尺寸, 必然会阻碍弹性部分变形的恢复, 从而引起材料内

部相互作用的应力, 称为残余应力。板料激光喷丸成形技术是利用高功率短脉冲的强激光辐照金属板料表面, 导致板料内部非均匀分布的残余应力的产生, 从而使金属板料发生塑性变形的工艺方法^[1~3]。在无需模具、外力的情况下, 可以通过优化激光加工工艺参数和喷丸的轨迹, 即可获得合理的残余应力大小与分布, 最终使板料实现无模成形^[4~6]。但是

收稿日期: 2007-12-17; 收到修改稿日期: 2008-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(50475127, 50275068, 50675089)和安徽工业大学大学生 SRTP 项目资助课题。

作者简介: 张兴权(1970—), 男, 安徽人, 副教授, 目前主要从事激光冲击强化处理和激光成形金属板料等方面的研究。

E-mail: zhang20020313@163.com

激光喷丸成形存在一些问题:单次喷丸变形量小,尤其是板料较厚时,每次只能获得很小的曲率;要加大板料变形的曲率,就必须提高冲击波的峰值压力,这又导致板料表面的冲击坑深度加深,使表面粗糙度值增加,影响了板料表面质量和工件的使用性能,冲击波的压力过高,甚至还会引起材料的冲击熔化。为了克服不足,Hackel 等提出预加载下激光喷丸成形的设想^[7]。

本文以在航空制造业中有着重要应用的 LY12CZ 为研究对象,通过试验分析了弹性预加载下的板料激光喷丸成形的特性。试验表明预加载下激光喷丸成形不但可以加大板料变形的程度,还可以降低成形件的表面粗糙度,改善成形件的表面质量。

2 成形机制

预加载激光喷丸成形是指在激光喷丸前,板料先在预弯模具上进行单向预加载,使之弹性弯曲,如图 1 所示;然后用强激光辐照板料受拉的表面的吸收层,吸收层吸收激光的能量气化并形成等离子体;等离子体继续吸收激光能量而爆炸,产生高压冲击波;当冲击波的峰值超过材料的动态屈服极限时,板料表层会发生局部的微观塑性变形;表层材料不可恢复的塑性变形层阻挡了已发生弹性变形层的恢复,于是板料表层产生一定大小的残余压应力,并进一步导致材料内部残余应力的重新分配,形成了在板料厚度方向上不均匀的应力分布,从而使板料发生变形。因此通过选择激光喷丸的参数来控制板料内部的残余应力场,就能控制板料的变形形状。

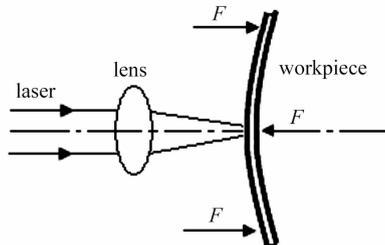


图 1 弹性预加载激光喷丸成形示意图

Fig. 1 Schematic of laser peening forming under elastic pre-loading condition

由于受到激光器输出能量的限制,激光喷丸成形中选用的激光光斑尺寸一般取为 $\phi 3 \sim 10$ mm,因此对于大型板料的弯曲成形,往往要根据成形件的曲率半径、表面质量等要求,选择激光的能量、激光光斑形状以及相邻光斑的间距,再通过数控系统控

制激光冲击头和板料的相对运动轨迹,对板料进行逐次喷丸冲击,实现板料大面积弯曲变形,如图 2 所示。



图 2 弹性预加载下激光喷丸的成形件

Fig. 2 Specimen formed by laser peening under elastic pre-loading condition

3 试验

3.1 试样制备

试验材料选用铝合金 LY12CZ,将轧制的大块板材切割成外形尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试样,在其表面用乙醇擦净后,将其分为两部分,一部分表面不涂漆,以便考察预加载下板料上载荷的分布规律;另一部分试样表面上涂上厚度为 0.1 mm 的黑漆涂层,用于激光喷丸成形。

3.2 主要仪器和设备

试验采用中国科学技术大学和江苏大学联合研制的钨玻璃强激光装置,其发出的激光脉冲波长为 $1.054 \mu\text{m}$,脉宽为 23 ns ,频率为 0.5 Hz ,采用的光斑直径为 $\phi 4 \text{ mm}$ 。用来测量板料变形程度的弧高仪,用来测量应力的 X-350A 型 X 射线衍射应力测定仪,用来测表面粗糙度的 Taylor Hobson-5M 型粗糙度仪以及对板料实施弹性预加载的模具,其曲率半径为 5000 mm , 1000 mm , 500 mm , 300 mm 和 250 mm 的 5 种。

3.3 试验方法

试样定位和预弯如图 3 所示,其原理图如图 4 所示。激光喷丸前,将表面未涂黑漆涂层的试样和曲率半径为 250 mm 的预弯模具的曲面贴合压紧,然后用 X-350A 型 X 射线衍射应力测定仪分别沿 x 、 y 轴方向测量激光喷丸前的应力分布。

激光喷丸时,将表面涂有黑漆的试样和预弯模

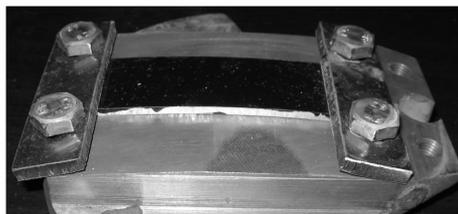


图 3 试样的定位

Fig. 3 Location of flexural sample

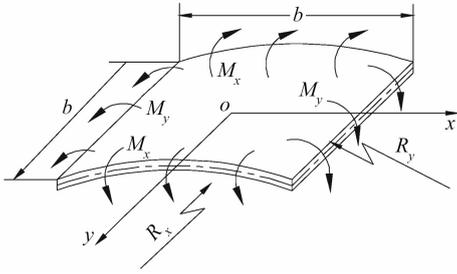


图 4 弯曲方向图

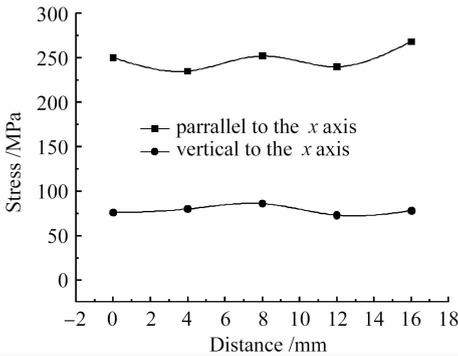
Fig. 4 Schematic of direction of flexural moment

具的曲面贴合,然后用压板压紧,如图 3 所示。将预弯夹具固定在工作台上,喷丸时采用流动的水帘作为约束层,其厚度为 2 mm 左右,以提高冲击波的峰值压力和延长冲击波的作用时间^[8]。为了便于比较,也进行在自由状态下不使用预弯模具的激光喷丸成形。激光喷丸后,去除工件表面残余的黑漆涂层,测其变形量、残余应力大小和表面粗糙度值。

4 结果及分析

4.1 弹性预加载荷分布

激光喷丸前,试样在预弯模具和压板的作用下,发生了变形,外表面被拉伸,表面存在应力。沿 x, y 轴方向测试样表面的应力,结果如图 5 所示。

图 5 激光喷丸前试样在 x, y 轴方向上的应力Fig. 5 Stresses in x or y axis direction before laser peening

由图 5 可以看出,试样表面存在拉应力,在 x 轴方向上的应力要远大于在 y 轴方向上的应力,其最大应力值为 240 MPa,而材料的屈服极限为 288 MPa,因此板料处于弹性状态,即在激光未喷丸前,试样从预弯模具取下以后,外加弯矩消失,应变也消失,由它引起的内应力和变形也都消失,板料恢复到平直状态。

在弹性预弯状态下,应力 σ 和对应的弯矩 M 存在以下关系

$$\sigma = M/W,$$

式中 W 为材料的抗弯截面模量。

因此试样上绕 x 轴和绕 y 轴的弯矩分别为

$$M_y = \sigma_x W, \quad M_x = \sigma_y W,$$

式中 M_y 为绕 x 轴的弯矩,即在预弯曲方向上的弯矩; M_x 为绕 y 轴的弯矩,即垂直预弯曲方向上的弯矩。

由于试样在 x 轴方向上的应力远大于 y 轴方向上的应力,因此在弹性预加载下,试样在预弯方向上获得的弯矩远大于其垂直方向上获得的弯矩,即 $M_y > M_x$ 。

4.2 变形的形状

用能量为 20 J 的激光对处于弹性预弯下的试样进行单面全喷丸,激光喷丸后,卸下工件,试样发生了塑性变形,呈单曲率为主的圆筒形。分析可知试样的塑性变形是激光喷丸引起的。

由于是施加弹性预弯,因而在分析弹性预弯的激光喷丸变形时,可把它看作是平板紧固状态下喷丸成形的情形,可以利用平板纯弯曲方程式对其曲率半径进行分析。根据二方向的平板纯弯曲方程式,可以得到喷丸成形以后,板件在预弯方向上曲率半径 R_x 和板件在与预弯相垂直方向上半径 R_y ^[9]

$$R_x = [E(h - t_w)^3 / 12(1 - \mu)] \cdot 1 / (M_y - \mu M_x),$$

$$R_y = [E(h - t_w)^3 / 12(1 - \mu)] \cdot 1 / (M_x - \mu M_y),$$

式中 R_x 为 x 轴方向上的曲率半径, R_y 为 y 轴方向上的曲率半径, E 为材料杨氏模量, μ 为泊松比, t_w 为弹性预加载下激光喷丸消除的残余压应力深度。则

$$\frac{R_x}{R_y} = \frac{M_x - \mu M_y}{M_y - \mu M_x} = \frac{M_x}{M_y} \cdot \frac{(1 - \mu \frac{M_y}{M_x})}{(1 - \mu \frac{M_x}{M_y})},$$

由上面的载荷分布规律知 $M_x < M_y$,可推知 $R_x < R_y$

$$\frac{R_x}{R} = (1 - \mu) \cdot \left(\frac{h - t_w}{h - t} \right)^3 \cdot \frac{M}{M_y - \mu M_x} = \frac{1 - \mu}{1 - \mu \frac{M_x}{M_y}} \cdot \frac{M}{M_y} \cdot \left(\frac{h - t_w}{h - t} \right)^3,$$

由于 $M_x < M_y, M = M_x$ 和 $t < t_w$,可推知 $R_x < R$ 。

同样在 y 轴方向上有

$$\frac{R_y}{R} = \frac{1 - \mu}{1 - \mu \frac{M_y}{M_x}} \cdot \frac{M}{M_x} \cdot \left(\frac{h - t_w}{h - t} \right)^3,$$

对于中厚板,板厚度值远大于残余应力层深度值^[10,11],即 $h > t$,可推知 $R_y > R$ 。

因此在施加弹性预加载方向上,成形曲率半径减小,而在与预弯相垂直的方向上,成形曲率半径增大,这在很大程度上克服自由状态喷丸成形时板件呈球面变形的倾向。航空器件上大多数的钣金件为单曲率件,因此,激光喷丸成形可以替代传统的机械喷丸成形。

4.3 预弯量对弧弓高的影响

试样在不同曲率半径的预弯模具作用下预弯,试样表面与5种不同曲面半径相对应的应变值,即预弯量,分别为0.02%,0.1%,0.2%,0.33%和0.4%。用能量为28 J的激光对厚度为2 mm的试样进行单面全喷丸,光斑相切。在不同预弯曲量下,激光喷丸后,试样在两个方向上的弧弓高与预弯量的关系曲线如图6所示。

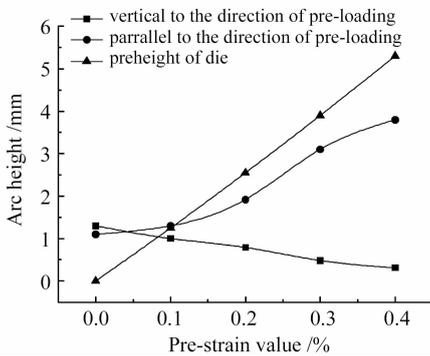


图6 弹性预弯量对两个方向上变形量的影响

Fig. 6 Effect of elastic pre-bending on the deformation in two directions

由图6可以看出,预弯量对试样在两个方向上的变形量影响很大,试样变形的弧弓高和对应的预应变几乎呈指数关系增减,即在预弯方向上的变形量随着预弯量的增加呈指数关系增加,在垂直于预弯方向上的变形量随预弯量的增加呈指数关系减少。当预弯量为0时,即在自由状态下,二个方向上的弧弓高相差不大,意味着两个方向上的曲率相差不大;当预弯量为0.4%时,在预弯方向上弧弓高增大了3.2倍,与预弯方向相垂直方向上的弧弓高减小了2/3。就一块试样来说,两个方向上弧弓高差值将随着预弯量的增加由0.9倍扩大到9倍。对于激光喷丸成形来说,试样变形的曲率几乎与弧弓高成正比关系,即在预弯方向上曲率随应变量的增加成指数关系增加,在垂直于预弯方向上,曲率随应变量的增加成指数关系衰减。

4.4 变形的极限半径

分别在预加载状态下和自由状态下对试样进行激光喷丸,进行单面全喷丸,喷丸时光斑相切,在不

同激光能量下,两种激光喷丸的成形件的曲率半径如表1所示。

表1 成形件的曲率半径

Table 1 Curvature radius of sample by laser peening under different conditions

Energy of laser /J	Curvature radius of sample /mm	
	Under free state	Under elastic pre-bending state
16	3425	1125
26	1675	680
38	560	290

可以看出,在自由状态下喷丸成形的极限曲率半径是预应力状态喷丸下成形极限曲率半径的2~3倍。曲率和曲率半径成反比关系,成形的曲率半径越大,曲率越小,也就是说弹性预加载下的激光喷丸件的曲率是自由状态下激光喷丸件曲率的2~3倍。

4.5 板厚对弧弓高的影响

试样在预弯量为0.4%时,用能量为28 J的激光对不同厚度的试样进行单面的全喷丸,光斑相切。激光喷丸后,试样变形的弧弓高与板料厚度之间的关系曲线如图7所示。

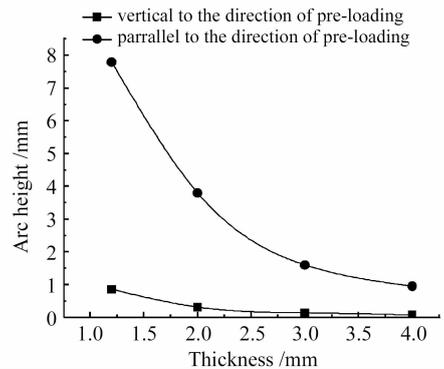


图7 弧弓高和板料厚度之间的关系

Fig. 7 Arc height of specimen versus its thickness

由图7可以看出,试样的变形量对其厚度的变化很敏感,变形量几乎随试样厚度增加成指数形式减少。因为板料越厚,其强度越高,变形就越困难,当试样的厚度增加到一定值时,试样就不再会有变形了。弹性预加载下激光喷丸能够增加板料的变形量,但增加量也是有限的,对于厚度较厚的板料,欲使之有明显的变形,在采用较大的弹性预弯量的同时,还必须加大激光能量。

4.6 成形件的残余应力

试样在预弯量为0.4%时,激光喷丸成形后,用X射线衍射应力测定仪分别沿x,y轴方向测量成形件表面的残余应力,测得的残余应力如图8所示。

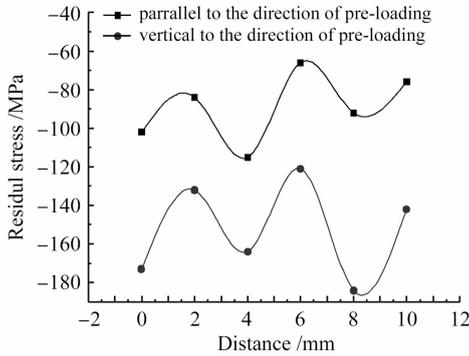


图8 激光喷丸后试样上的残余应力

Fig. 8 Stresses in different directions after laser peening

由图8可以看出,激光喷丸后,板料的表面出现了残余压应力。这是因为激光冲击波的作用使板料的表面出现了微型的塑性凹坑,阻挡了已经发生弹性部分的回复,因而在材料的表面产生残余压应力值。但残余压应力值在两个方向上的大小不等,在施加弹性预弯方向上的残余压应力值要小于垂直于预弯方向上的残余压应力值。这是因为在激光喷丸前,预弯方向上存在较大的拉应力,对激光冲击波诱导的压应力的“中和”程度要大于与预弯方向垂直的方向上,因而残余压应力值要小。与激光喷丸前表面的应力曲线相比,喷丸后的残余应力曲线有较大幅度的起伏,这主要与激光光斑为圆形光斑有关系,喷丸时,材料表面受圆形光斑作用区域的边缘产生表面波,表面波在向作用区域的中心会聚过程中,削弱已形成的应力场,离光斑作用区域中心越近,削弱的程度越大,因此试样表面的残余应力曲线呈现出波浪状。工件表面存在的残余压应力可以降低工件在使用过程中受到的拉应力幅值,这对于提高喷丸件的抗疲劳寿命是大有好处的。

4.7 表面粗糙度

图9和图10为用Taylor Hobson-5M型表面粗糙度仪测得的自由状态下激光喷丸成形的表面微观形貌图和弹性预弯状态下激光喷丸成形的表面微观形貌图。两种状态下激光的光斑直径为 $\phi 4$ mm,光斑相切,单面全喷丸。在自由状态下激光的能量为32 J,所得的成形件的曲率半径为1160 mm;在弹性预弯状态下激光的能量为20 J,所得的成形件的曲率半径为1080 mm。

板料接受激光喷丸以后,在其表面上存在着半球形微米级凹坑^[10],当板材的整个面接受喷丸后,在受喷表面上有许许多多多个半球形凹坑组成的包络面,存在许多高低不平的较小峰谷,使工件表面的粗糙度下降。根据表面粗糙度 R_z 的定义,在取样长度

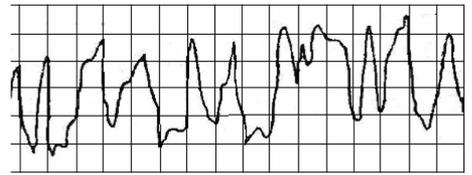


图9 自由状态下激光喷丸成形件的表面粗糙度
Fig. 9 Surface roughness of workpiece formed by laser peening without pre-loading

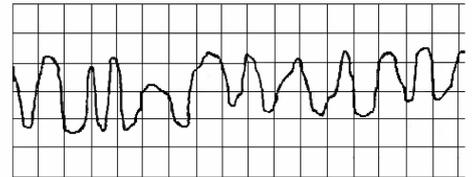


图10 弹性预弯状态下激光喷丸成形件的表面粗糙度
Fig. 10 Surface roughness of workpiece by laser peening under elastic pre-loading condition

内,有

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=5}^5 y_{vi}}{5},$$

式中 y_{pi} 为第 i 个最大的轮廓峰高, y_{vi} 为第 i 个最大的轮廓谷深。

由图5和图6可大致计算出在自由状态下激光喷丸成形件的表面粗糙度 R_z 为20~40 μm ,在弹性预弯状态下激光喷丸件的表面粗糙度 R_z 为6.30~20 μm 。

因此曲率半径大致相等的情况下,弹性预加载下激光喷丸成形件的表面粗糙度要比自由状态下激光喷丸成形件的表面粗糙度低1~2个等级。这是因为在激光喷丸前,对板料实施弹性预弯,改变了板料在两个方向上的刚度,使得板料在预弯方向上的刚度减小,容易成形,成形时使用的激光能量低,冲击形成的凹坑的深度较浅,因此成形零件表面粗糙度值低。表面较低的粗糙度值对于提高配合零件的接触刚度,减少机身蒙皮零件间的微动磨损,增强零件对海水烟雾等腐蚀介质的抗腐蚀性能,减小航空器件飞行的阻力,降低能耗,都有着十分重要的意义。

5 结论

弹性预加载下激光喷丸成形是从某一方向上增大弯矩或控制其他方向上的弯矩,使得板料在不同方向上变形的难易不同。与自由状态下的激光喷丸成形相比,弹性预加载下激光喷丸成形能够有效克服自由状态下激光喷丸成形件呈球面的倾向,不仅

能增加成形的曲率,还能降低成形件表面的粗糙度值。

参 考 文 献

- 1 Zhou Jianzhong, Huang Shu, Du Jianjun *et al.*. Laser prestressed compound peen forming of plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):861~865
周建忠,黄舒,杜建钧等. 金属板料激光预应力复合的喷丸成形[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):861~865
- 2 Wang Guanglong, Zhou Jianzhong, Zhang Xingquan *et al.*. The application of laser-induced shock wave in surface modification and forming of sheet metal [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, **36**(12):148~152
王广龙,周建忠,张兴权等. 激光冲击波技术在金属表面改性和成形中的应用[J]. *农业机械学报*, 2005, **36**(12):148~152
- 3 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Research on plastic curvature of plate by shock wave [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(1):249~252
张兴权,张永康,周建忠等. 金属板料激光冷塑性弯曲的研究[J]. *航空学报*, 2007, **28**(1):249~252
- 4 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Experimental research on narrow strip laser shot peening forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1446~1450
张兴权,张永康,周建忠等. 激光窄条喷丸成形的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1446~1450
- 5 H. A. Lloyd, F. Harris. Contour forming of metals by laser peening [P]. United State Patent, 6410884, 2002
- 6 H. A. Lloyd, H. M. John, H. B. Fritz. Pre-loading of components during laser peen forming [P]. United States Patent, 6670578, 2003
- 7 Zhang Yongkang, Gu Yongyu, Zhang Xingquan *et al.*. Mechanism of overlay to improve the pressure of laser shock waves [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **100**(9):5775~5781
- 8 Ma Xiaoqing. Impacting Dynamics [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1992
马晓青. 冲击动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1992
- 9 Li Guoxiang. Shot Peening Forming [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982
李国祥. 喷丸成形[M]. 北京:国防工业出版社, 1982
- 10 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 Journal of Fatigue*, 2002, **24**:1021~1036
- 11 Graham Hammersley, Lloyd A. Hackel, Fritz Harris. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2000, **34**: 327~337