

文章编号 1004-924X(2007)06-0915-07

# 铝合金板快速加热弯曲的参数预测

王续跃,王劲松,徐文骥,程丽芳,吴东江

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**基于 BP 神经网络平台,建立了铝合金板快速加热弯曲的角度预测 BP 网络模型,实现了脉冲激光加工工艺的参数控制与优化。通过试验获得样本数据,将试验样本数据用于 BP 网络的训练,利用训练好的 BP 网络对非线性的样本数据规律进行拟合,对脉冲激光弯曲角度和工艺参数进行准确的预测,预测误差范围可控制在 $<5\sim 8\%$ ,研究结果为实际生产中精密成形提供了有效的理论与试验依据。

**关键词:**精密成形;激光加热;激光弯曲;铝合金板;参数预测

**中图分类号:**TG665 **文献标识码:**A

## Parameter prediction of bending of aluminum alloy sheet induced by laser prompt heating

WANG Xu-yue, WANG Jin-song, XU Wen-ji, CHENG Li-fang, Wu Dong-jiang

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology,  
Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Based on the basic platform of BP neural network, a BP network model was founded to predict the bending angle in the process of laser bending of aluminum alloy sheet to optimize laser bending parameter control. The sample data obtained from experiment were used to train BP network. The nonlinear regularities of sample data were fitted through trained BP network, the predicted results include laser bending angles and laser bending parameters. Experimental results indicate the prediction allowance is controlled less than  $5\sim 8\%$ , it can provide effective foundation both theory and experiment for industry purpose.

**Key words:** precise shaping; laser heating; laser bending; aluminum alloy sheet; parameter prediction

## 1 引言

板材激光弯曲是快速加热弯曲的一种成形技术<sup>[1-3]</sup>,是激光加工的一个新的应用领域。国内外关于激光弯曲成形的文献表明其研究热点是快速

加热弯曲成形的机理和应用<sup>[4-7]</sup>,在利用数值模拟和试验研究激光弯曲成形的变化规律和优化激光弯曲成形工艺参数等方面取得了明显的研究进展<sup>[8-10]</sup>。这些研究主要针对碳钢和不锈钢等材料,而铝合金对激光的反射率较高,能量吸收率较低,同时,其热传导率较高造成散热快,所以,对铝

收稿日期:2006-12-11;修订日期:2007-01-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 59935110;No. 50375024)

合金板的激光弯曲成形比较困难,目前试验分析和成形工艺参数研究不能满足应用的要求。神经网络能够处理模糊的、非线性的数据,具有较强的输入—输出映射能力的优点,不需从理论模型上进行分析,利用训练好的 BP 神经网络能够对弯曲角度和加工参数进行预测。

随着航天、航空和汽车产业的快速发展,轻金属及其合金材料的应用越来越广泛。由于铝合金具有成本低、重量轻、强度高、耐腐蚀等优点,使其得到了广泛的应用<sup>[11]</sup>。利用激光弯曲成形来代替传统的模具成形,能够大大缩短开发周期,减少成本。目前,对铝合金板激光弯曲的成形规律以及激光弯曲时材料性能变化的研究较少<sup>[11,12]</sup>。

本文建立了适于铝合金板快速加热弯曲参数预测的 BP 神经网络模型。通过试验获得样本数据,借助于 MATLAB 仿真软件中的神经网络工具箱作为开发平台,将试验样本数据用于 BP 网络的训练,利用训练好的 BP 神经网络对非线性的样本数据规律进行拟合,对脉冲激光弯曲角度和工艺参数进行了准确的预测,预测误差范围控制在 $<5\% \sim 8\%$ ;同时,还对弯曲后材料性能和金相组织进行检测分析<sup>[13,14]</sup>,证明了对铝合金板快速加热弯曲的参数预测方法是可行性的。

## 2 预测模型的构建

### 2.1 基本原理

通常 BP 神经网络模型中有三个层次的神元,即输入层、隐含层和输出层。利用输入输出样本集对网络进行训练,可使网络实现指定的输入输出的映射关系。算法是利用梯度搜索技术,实现网络的实际输出与期望输出的均方差最小化。对于若干个输入学习样本已知对应的输出样本,用网络的实际输出与期望目标矢量的误差来修正权值,使网络实际输出尽可能接近期望目标矢量。通过连续不断地在相对于误差函数斜率下降方向上计算网络权值和偏差变化而逐渐逼近目标,每一次权值和偏差的变化都与网络误差的影响成正比,并以反向传播的方式传递到每一层,经过训练的 BP 网络对于不是样本集中的输入也能给出比较合适的输出<sup>[11]</sup>。训练网络的指标函数为:

$$E = \frac{1}{2p} \sum_p \sum_k (t_{pk} - O_{pk})^2, \quad (1)$$

式中: $p$ —训练用标准样本数; $t_{pk}$ —网络的实际输出; $O_{pk}$ —网络的期望输出。

采用梯度下降法使式(1)最小,即采用  $\delta$  广义规则算法,权值修正式为:

$$\Delta W_{ji}(n+1) = \eta \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} + \alpha \cdot \Delta W_{ji}(n), \quad (2)$$

式中: $\Delta W_{ji}(n+1)$ —该次的权值修正量; $\Delta W_{ji}(n)$ —上一次的权值修正量; $\alpha$ —惯性因子,取值(0,1)之间; $\eta$ —学习因子,取值(0,1)之间。

### 2.2 激光弯曲中 BP 神经网络的建立

为了训练一个 BP 神经网络,需要计算网络加权输入矢量以及网络输出和误差矢量,然后求得误差平方和。当所训练矢量的误差平方和小于误差目标,训练则停止,否则在输出层计算误差变化,且采用反向传播学习规则来调整权值,并重复此过程。图 1 为 BP 神经网络的流程图。预测工作借助 MATLAB 仿真软件中的神经网络工具箱作为开发平台,进行试验数据的训练和仿真。

#### (1) 网络的层数和选取

BP 神经网络的拓扑结构如图 2 所示,理论上已经证明:具有偏差和至少一个 S 型隐含层加上一个线性输出层的网络,能够逼近任何有理函数。在此选取一个输入层 P、一个输出层 T 和一个隐含层 H,对铝合金材料进行研究,网络的输入节点为三个,即激光功率、扫描速度、扫描次数,以弯曲角度为输出节点。

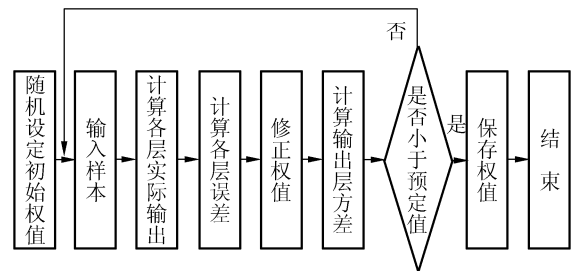


图 1 BP 神经网络的流程图

Fig. 1 Flow process chart of BP neural network

#### (2) 期望误差的选取

期望误差值也应当通过对比训练后确定一个合适的值,这个“合适”,是相对于需要的隐含层的节点来确定,因为较小的期望误差值是要靠增加隐含层的节点,以及训练时间来获得的。一般情况下,作为对比,可以同时两个不同期望误差值的网络进行训练,通过综合因素的考虑来选择,网

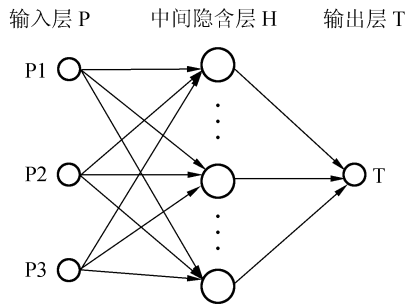


图 2 BP 神经网络模型拓扑结构

Fig.2 Topological structure of BP neural network model

络模型中期望误差值选取  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。

(3) 隐含层节点数选取

增加隐含层的神经元数可以提高网络训练的精度。其节点数目通常是依靠经验选取的,如果过小会导致网络训练误差达不到要求,甚至根本不收敛;如果过大将导致网络训练速度缓慢并发生振荡。一般由公式(3)来确定隐含层神经元个数的范围,即

$$J = \sqrt{n \cdot m} + a, (a = 1 \sim 10) \quad (3)$$

式中: $J$  为隐含层节点数, $n$  为输入层节点数, $m$  为输出层节点数。本网络模型选择隐含层节点数为 13。

### 3 样本数据的获取及分析

(1) 试验设备

试验采用英国生产的 JK701H 型 YAG 固体激光器,焊接模式能量输出,焊接镜头采用焦距  $f$  为 80 mm 的 ZnSe 聚焦透镜进行激光弯曲试验。

(2) 试验材料

试验以铝合金板作为成形研究对象,铝合金板为 Al-Mg-Si 系合金,厚度选择 1 mm 和 2 mm。铝合金物理性质如表 1 所示。

由于铝合金板表面对激光具有较大反射作用,为了在成形试验提高铝合金的热吸收系数,对材料表面进行黑化处理来增加吸收率,在铝合金件表面涂覆上海光机所生产的 86-1 黑漆,吸收率可达到 80%。

表 1 铝合金物理性质

Tab.1 Physical features of aluminum alloy

项	值	项	值
密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2 700	常温下对激光的吸收率 $A$	12%
比热容 ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ) ( $20^\circ$ )	900	硬度 (HK)	113.8
热导率 ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ) ( $25^\circ$ )	238	熔点 ( $^\circ\text{C}$ )	660.1

(3) 试验方法

采用不同的激光弯曲工艺参数,包括激光功率、扫描速度,扫描次数和离焦量,对不同厚度和长度铝合金板进行激光弯曲试验,获得相应的试验数据。图 3 是铝合金激光弯曲试验示意图。

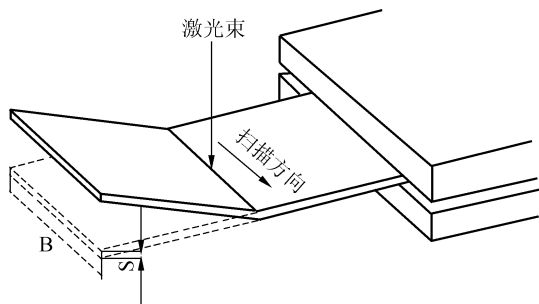


图 3 铝合金板激光弯曲试验示意图

Fig.3 Sketch map of laser bending aluminum alloy sheet

(4) 样本数据

表 2 为试验参数表,通过实验来获得所需要的训练样本数据。

表 2 试验参数表

Tab.2 Test parameters

激光功率 (W)	扫描速度 (mm/min)	光斑直径 (mm)	扫描次数
90,120,130,140,150,180	1400,1500,1600,1700,1750,1800,1850,1900	1.70,1.85,2.3,2.45,2.53	0-55

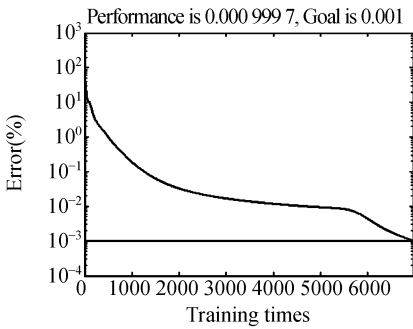
## 4 激光弯曲模型的训练和预测

### 4.1 弯曲模型的训练

网络的校验是很重要的步骤,只有经过对网络的数据进行性能检验,且结果满足要求后,网络

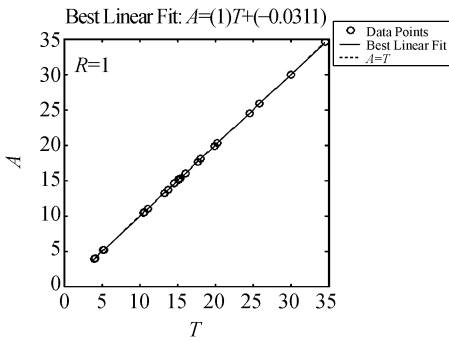
才能投入使用。选取 1 mm 的铝合金板材进行预测,在网络训练之前要对输入数据进行归一化处理。

利用试验数据,以激光功率、扫描速度、扫描次数为输入层,以弯曲角度为输出层构造预测弯曲角度的 BP 神经网络。系统首先对试验数据进行学习,取训练样本数为 20,在经过 3 000 次学习循环后,网络误差达到了规定的期望误差。参见图 2 BP 神经网络的拓扑结构,图 4 为训练样本的仿真结果与线性回归图。



(a) 1 mm 板件训练次数与误差

(a) Train times and error of 1 mm sheet



(b) 计算结果与实际结果线性回归

(b) Linear regressions of simulation and experiment results

图 4 训练样本的仿真结果过程与线性回归

Fig. 4 Simulation result of trained specimen and linear regression

从图 5 和表 3 可以看出仿真结果与试验数值非常接近,最大误差 0.692 6%,完全满足实际需要需要。

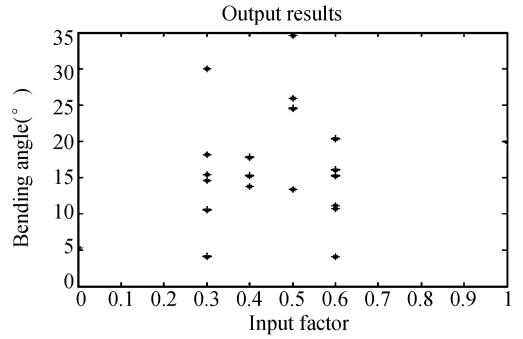


图 5 仿真数据与试验数据比较

Fig. 5 Comparison between simulation results and experiment data

表 3 仿真结果与试验数据比较

Tab. 3 Comparison between simulation results and experiment data

序号	弯曲角度(°)		
	实际值	预测值	误差(%)
1	4.090 6	4.097 8	-0.175 7
2	10.525 1	10.527 8	-0.025 6
3	15.386 8	15.386 9	-0.000 6
4	3.994 8	3.997 4	-0.065
5	10.680 6	10.681 6	-0.009 4
6	20.344 7	20.340 8	0.019 2
7	16.061 4	16.059 8	0.009 9
8	13.356	13.359 9	-0.029 2
9	24.540 3	24.540 4	0
10	15.228 4	15.334 6	-0.692 6
11	17.778 2	17.777 2	0.005 6
12	5.278 7	5.277	0.022 7
13	19.938	19.937 8	0
14	14.615 6	14.615 2	0.002 7
15	34.610 9	34.611 8	-0.002 6
16	25.912 6	25.912 5	0.000 4
17	13.729 2	13.726 5	0.019 7
18	5.221 1	5.223	-0.036 4
19	30.044 1	30.045 9	-0.006
20	18.119 5	18.112	0.040 9

#### 4.2 弯曲角度的预测

利用已经训练好的网络,对弯曲角度进行预测。在同样的加工条件下,在样本数据中抽取几组进行仿真。从表 4 弯曲结果与实际结果及误差中可以看出:误差范围在[-5.846%,0.512 6%]之间,可以说误差变化区间很小,基本上稳定在 6%之内。这说明建立的 BP 神经网络模型对激

光弯曲成形的预测具有可行性。

表4 弯曲角度预测值与实际结果及误差

Tab. 4 Predicting values and actual values of bending angles and their errors

序号	1	2	3	4
预测弯曲角度(°)	8.298 7	29.538	11.498	24.540 3
实际弯曲角度(°)	9.347 9	29.588	11.558 9	24.502 9
误差(%)	-5.846	-0.169	-0.526 9	0.152 6

### 4.3 加工参数的预测及其误差分析

在试验中,如果是加工结果弯曲角度和部分工艺参数已知,某一工艺参数未知,应用BP神经网络反求出其工艺参量,这样可以减少试验次数,节省试验成本,在一定程度上对于实际生产具有指导性作用。

#### (1) 激光功率的预测

预测激光功率时是以弯曲角度、扫描速度、扫描次数为输入层,激光功率为输出层构建预测成形参数的BP神经网络。从表5弯曲结果与实际结果及误差中可以看出:误差范围在 $[-7.861 7\%, 1.766 2\%]$ 之间,可以说误差变化区间很小,基本上稳定在8%之内,达到了加工要求。

表5 激光功率预测值与实际值及误差

Tab. 5 Predicting values and actual values of laser powers and their errors

序号	1	2	3	4	5
预测功率(W)	120.9	143.2	142.2	141.1	135.8
实际功率(W)	120	150	140	130	140
误差(%)	-0.74	4.77	-1.52	-7.86	3.13

#### (2) 激光扫描次数的预测

预测激光扫描次数时是以弯曲角度、扫描速度、激光功率为输入层,激光扫描次数为输出层构建预测成形参数的BP神经网络。从表6弯曲结果与实际结果及误差中可以看出:误差范围在 $[-1.746 7\%, 8.531 8\%]$ 之间,可以说误差变化区间很小,基本上稳定在9%之内,达到了加工要求。

表6 激光扫描次数预测值与实际值及误差

Tab. 6 Predicting values and actual values of laser scanning times and their errors

序号	1	2	3	4	5
预测扫描次数(N)	8.3	9.9	18.5	15.0	27.6
实际扫描次数(N)	9	10	18	15	27
误差(%)	8.5	0.5	-2.8	-0.1	-2.1

#### (3) 扫描速度的预测

预测扫描速度时是以弯曲角度、激光功率、光斑直径为输入层,扫描速度为输出层构建预测成形参数的BP神经网络。从表7弯曲结果与实际结果及误差中可以看出:误差范围在 $[-1.611 1\%, 4.885 7\%]$ 之间,可以说误差变化区间很小,基本上稳定在5%之内,达到了加工要求。

表7 激光扫描速度预测值与实际值及误差

Tab. 7 Predicted values and actual values of laser scanning speeds and their errors

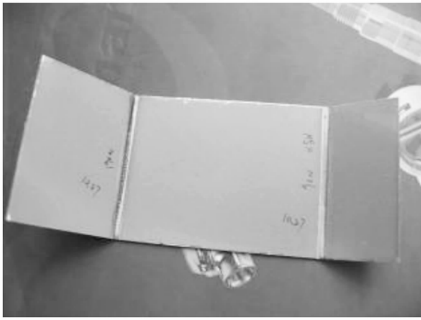
序号	1	2	3	4	5
预测扫描速度 (mm/min)	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800
实际扫描速度 (mm/min)	1 468.4	1 526.5	1 608.4	1 734.4	1 771.8
误差(%)	4.885 7	1.736	0.5	2.023 5	-1.611 1

## 5 弯曲后材料性能

为了对激光弯曲成形做进一步深入的研究,特别是激光对弯曲材料性能的影响,对研究激光弯曲成形机理和材料的使用性能具有重要意义<sup>[12]</sup>。图6所示为铝合金激光弯曲样件图。为了进行材料性能分析,选用厚度为2 mm,铝合金板长和宽分别为20 mm和10 mm,试验参数为 $P = 140 \text{ W}$ ,  $v = 1 500 \text{ mm/min}$ ,弯曲角度为 $5.348 6^\circ$ 的铝合金样件进行性能测试。

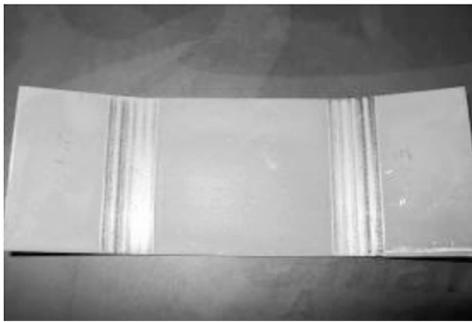
### 5.1 金相分析

铝合金激光弯曲的样件,金相分析要经过试件截取、研磨、抛光和腐蚀四个步骤<sup>[12]</sup>。图7为沿着板材厚度方向的金相组织,从图中的金相照片上可以得出,激光扫描的热影响区只达到板材



(a) 激光单道多次扫描锐角弯曲样件

(a) Picture of laser bending with single-way scanning



(b) 激光多道扫描圆角弯曲样件

(b) Picture of laser bending with multi-way scanning

图 6 铝合金激光弯曲样件图

Fig. 6 Picture of laser bending of aluminum alloy sheet

厚度的 1/5 左右, 强化作用有利于提高试件的使用性能。板材加热线附近处于晶粒成长区, 材料的晶粒明显比原始母材的晶粒大。晶粒成长区与原始母材之间的过渡部分为再结晶区, 这一领域在冷却过程中存在较快的冷却速度及较大的过冷度, 结晶后可以得到较细的晶粒, 晶粒细化的结果使板材的强度得到了提高, 同时表明: 晶粒细化使铝合金板内的应力分布不平衡, 从而使板材产生了弯曲。



图 7 厚度方向的热影响区

Fig. 7 Heat affected zone in thickness

## 5.2 硬度分析

图 8 为沿厚度方向的硬度分布图。在厚度方向上, 板材的硬度从表面到底面呈减小趋势。激光的扫描热作用区域上, 晶粒成长区与原始母材之间的过渡部分为再结晶区, 这一领域在冷却过程中存在较快的冷却速度及较大的过冷度, 结晶后可以得到较细的晶粒, 材料的硬度得到了提高。

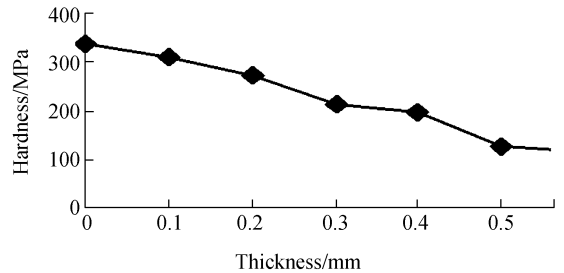


图 8 沿厚度方向硬度分布

Fig. 8 Variation of material hardness in thickness

## 6 结 论

(1) 利用 BP 神经网络, 建立激光弯曲角度与加工工艺参数之间的网络模型, 经仿真训练后, 对激光弯曲角度和加工工艺参数进行了预测。仿真结果与试验数值非常接近, 误差范围比较小, 证明了该方法和模型的正确性。成功地进行了弯曲角度和主要加工参数的预测, 解决了成形结果难以预测及加工参数难以选择的问题, 为铝合金板快速加热的精确控制成形奠定了基础。

(2) 激光对铝合金板的弯曲成形, 使材料的金相组织发生了变化, 表明了晶粒细化打破了铝合金板内应力原有的平衡, 产生了快速加热的弯曲效果。同时, 晶粒细化区域的显微硬度得到了提高, 其硬度分布是在板材厚度方向上(从表面到基体)呈减小趋势, 即激光扫描作用使材料受热区域的硬度得到了提高, 这在实际工业生产中具有重要的应用价值。

## 参考文献:

- [1] VOLLERTSEN F, GEIGER M. FDM-and-FEM simulation of laser forming: a comparative study [J]. *Proc. 4<sup>th</sup> ICTP, III*, 1993;1793-1798.
- [2] GEIGER M. Synergy of laser, material processing and metal forming [J]. *Ann. CIRP*, 1994, 43(2): 563-570.
- [3] VOLLERTSEN F. An analytical model for laser bending [J]. *Laser in Engineering*, 1994, 13(2): 261-267.
- [4] VOLLERTSEN F, HOLZER S. Laser beam forming-fundamentals and possible applications (in German) [J]. *VDI-Z*, 1994, 136(1/2):35-38.
- [5] NAMBA Y. Laser forming in space [J]. *Proc. Int. Conf. On Lasers*, 1986,85:403-407.
- [6] 管延锦,孙胜,季忠.板料激光成型技术的实验研究[J].*光学技术*,2001,12(1):87-90.  
GUAN Y J, SUN SH, JI ZH. Experimental study on laser forming technology of sheet metal [J]. *Optical Technology*, 2001, 12(1): 87-90. (in Chinese)
- [7] 杨起君,周建忠,张永康,等.激光冲击金属板料变形的最小激光能量估算及其实验研究[J].*光学精密工程*, 2006,14(3):396-401.  
YANG CH J, ZHOU J ZH, ZHANG Y K, *et al.*. Study on calculation of minimum laser energy of sheet metal deformation by laser shock forming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):396-401. (in Chinese)
- [8] 梁伟文,孙卫和,王红英.不锈钢薄板的激光弯曲成形试验研究[J].*新技术新工艺*,2005,28(8):45-47.  
LIAN W W, SUN W H, WANG H Y. Experiment study on laser forming technology of stainless steel sheet metals [J]. *New Technology & New Process*, 2005,28(8):45-47. (in Chinese)
- [9] 裴继斌,张立文,张全忠,等.船舶钢板激光弯曲成形的实验研究[J].*锻压技术*,2005,49(5):64-66.  
PEI J B, ZHANG L W, ZHANG Q ZH, *et al.*. Experimental study on laser bending of shipbuilding steel plate [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2005,49(5):64-66. (in Chinese)
- [10] 李俐群,陈彦宾,张立文,等.Ti-6Al-4V钛合金的激光弯曲成形特性[J].*中国有色金属学报*,2005,15(6):848-848.  
LI L Q, CHEN Y B, ZHANG L W, *et al.*. Laser bending characteristics of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005,15(6):848-848. (in Chinese)
- [11] CHENG P J, LIN S C. Using neural networks to predict bending angle of sheet metal formed by laser [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(8):1185-1197.
- [12] 李玉和,李庆祥,王东生,等.超精表面缺陷检测系统的实验研究[J].*光学精密工程*,2005,13(增):65-68.  
LI Y H, LI Q X, WANG D SH, *et al.*. Design and study on a novel micro-detecting devices for superfinish surface scratch [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp.):65-68. (in Chinese)
- [13] 吴东江,许媛,王续跃,等.激光清洗硅片表面  $Al_2O_3$  颗粒的试验和理论分析[J].*光学精密工程*,2006,14(5):764-770.  
WU D J, XU Y, WANG X Y, *et al.*. Experimental and theoretical study on laser cleaning  $Al_2O_3$  particle on silicon wafer surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):764-770. (in Chinese)
- [14] 刘群,杨建东,田春林,等.等距面误差对抛物面廓形精度的影响[J].*光学精密工程*,2006,14(6):1048-1051.  
LIU Q, YANG J D, TIAN CH L, *et al.*. Effect of equidistant surface errors on parabolic shape accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):1048-1051. (in Chinese)

作者简介:王续跃,男,汉族,辽宁大连市人,大连理工大学机械工程学院副教授,主要从事特种加工等方面的研究。E-mail: wbxzd@dlut.edu.cn