

铜-镍多层复合薄板激光弯曲成形工艺建模与优化

张国栋¹, 王霄¹, 谭文胜², 孙跃东¹, 姜英杰¹, 刘会霞¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²常州信息职业技术学院常州市大型塑料件智能化制造重点实验室, 江苏 常州 213164

摘要 基于参数实验设计,对影响铜-镍多层复合薄板激光弯曲成形的工艺参数进行了筛选;采用中心复合实验设计进行了实验规划,利用响应面建立了工艺参数与弯曲角度之间的数学模型,揭示了各工艺参数的交互式影响规律。采用满意度函数对工艺参数进行了优化,得出了理想的参数组合。

关键词 激光技术; 激光弯曲成形; 多层复合薄板; 响应面分析; 实验设计与优化

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061404

Process Modeling and Optimization of Laser Bending Forming of Copper-Nickel Multilayer Composite Sheets

Zhang Guodong¹, Wang Xiao¹, Tan Wensheng², Sun Yuedong¹, Jiang Yingjie¹, Liu Huixia¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Changzhou Key Laboratory of Large Plastic Parts Intelligence Manufacturing, Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract The process parameters of laser bending forming of copper-nickel composite sheets are screened based on the experimental design of parameters. The central composite design of experiments is chosen for the experimental plan and the response surface methodology is adopted for the establishment of mathematical model among all process parameters. The interactive influence law of each process parameter is disclosed. The satisfaction function is used to optimize the process parameters and the optimal combination of parameters is obtained.

Key words laser technique; laser bending forming; multilayer composite sheet; response surface methodology; experimental design and optimization

OCIS codes 140.3538; 160.3900

1 引言

激光弯曲成形通过高能激光束扫描板材表面,形成非均匀温度场,实现板材的塑性变形。激光弯曲成形属于非接触成形,不需要刀具和模具,不需要外力,不存在回弹现象,能提高材料成形精度^[1-2]。

目前,国内外从激光弯曲成形的机理、数值模拟、路径规划和影响因素等方面开展了许多研究^[3-6]。Wang等^[7]研究了钢管的三维扫描路径规

划。Kant等^[8]利用连续激光对镀锌薄片进行了曲线激光弯曲实验。Wu等^[9]研究发现,随着厚度的增大,硅片的塑性变形延迟。Genna等^[10]利用声发射技术对304不锈钢板的激光弯曲工艺进行了研究。Lambiase等^[11]利用分析模型很好地解释了纯温度梯度机制条件下工艺参数对金属板材激光成形的影响。陈亚利等^[12]揭示了5A06铝合金交叉筋壁板单道扫描激光成形的机理。李品等^[13]对不锈钢管材的激光弯曲成形进行了工艺研究。丁磊等^[14]

收稿日期: 2017-11-30; 收到修改稿日期: 2017-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(51675243),常州市高技术研究重点实验室资助项目(CM20153001)

作者简介: 张国栋(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: 15852933653@163.com

导师简介: 王霄(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: wx@ujs.edu.cn(通讯联系人)

确定了影响铝-锂合金激光成形弯曲角度的因素次序。李金华等^[15]研究发现,利用BP神经网络可以对铝合金板材激光弯曲角度进行预测。以上研究主要集中在单一材料、合金材料和脆性材料,而多层复合金属薄板的研究则鲜有报道。

多层复合金属薄板是一种新型的复合材料,两种或两种以上具有不同物理、化学和力学性能的金属通过复合技术在界面达到一种牢固的冶金结合;多层复合金属薄板保留了原有金属层各自的特点,但其物理、化学和力学性能优于单一金属^[16]。这使得多层复合金属薄板在汽车、飞机、电子、医药等领域中得到广泛应用^[17]。

Edwardson等^[18-20]研究发现,连续激光对金属-纤维多层板的弯曲成形是在温度梯度机理下进行的。Shen等^[21]利用有限元模型对金属-陶瓷双层复合板进行了模拟研究。Seyedkashi等^[22]表征了0.5 mm厚不锈钢-铜-不锈钢三层板激光弯曲成形中沿着厚度方向的热分布和塑性应变。张攀等^[23]研究发现,弯折区过渡层的元素扩散会促进不锈钢-碳钢多层板的冶金结合。王续跃等^[24-25]通过激光弯曲成形获得了具有85.6°极限弯曲角的不锈钢-碳钢多层板。关于多层复合金属薄板的研究多为机理及数值模拟研究,而关于激光弯曲成形工艺建模与优化的研究则鲜有报道。本文对厚度为0.1 mm的铜-镍复合薄板激光弯曲成形的工艺参数进行了筛选,并进行了工艺参数建模与优化,为多层复合金属薄板激光弯曲成形的工艺应用提供了实验依据。

2 实验材料、方法与器材

采用德国Rofin公司的STARWELD250型Nd:YAG激光器进行实验,最大平均输出功率为250 W,波长为1064 nm,脉冲宽度为0.5~20 ms,最大脉冲频率为500 Hz,激光由光纤传输至激光头,光斑形状为圆形。选择尺寸为60 mm×20 mm×0.1 mm的铜-镍复合薄板作为实验材料,其中,夹持部分的长度为10 mm;实验前用无水乙醇对试样的表面进行清洗。每组工艺参数选取3个样件进行测试实验,并取平均值作为实验结果。激光弯曲成形实验原理如图1所示。实验系统由控制台、工作台、激光器、光路系统、电荷耦合元件(CCD)、角度测量系统、计算机组成。

激光弯曲成形系统装置如图2所示。实验时,激光头固定不动,通过工作台的往复运动完成试样

的连续来回扫描,试样经过连续来回扫描后冷却至室温。试样弯曲角度(P)的测量示意图如图3所示。利用CCD、角度测量系统测量并结合画图软件得到试样的弯曲角度。

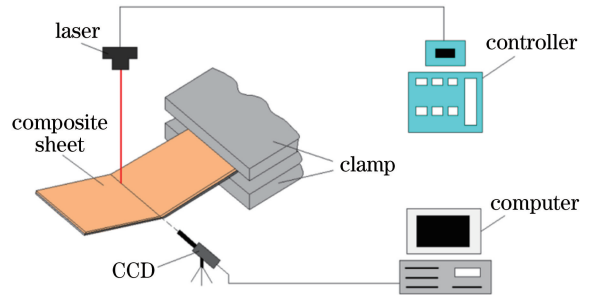


图1 激光弯曲成形实验原理图

Fig. 1 Schematic of laser bending forming experiment

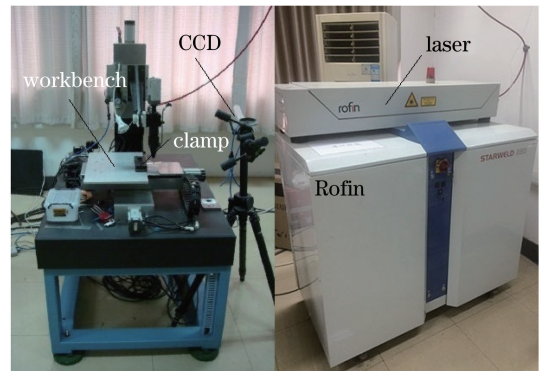


图2 激光弯曲成形系统装置

Fig. 2 Experimental setup for laser bending forming

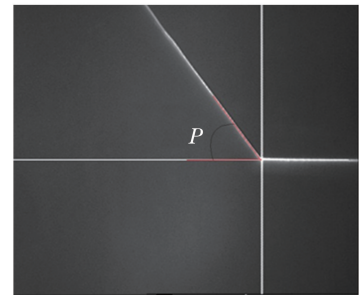


图3 弯曲角度测量示意图

Fig. 3 Schematic of bending angle measurement

3 结果与讨论

3.1 工艺参数筛选

峰值电压(A)、扫描速度(B)、扫描次数(C)、扫描路径(D ,扫描线距自由端的距离)、光斑直径(E)、脉冲频率(F)和脉冲宽度(G)是影响弯曲角度的7个初始变量。各初始变量的变化范围见表1。

表1 初始变量及其变化范围

Table 1 Initial variable and its variation range

Initial variable	Raw value	Minimum value	Maximum value
Pulse frequency /Hz	40	35	45
Pulse width /ms	1.1	1.05	1.15
Peak voltage /V	425	420	430
Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	600	500	700
Number of scans	20	10	30
Scan path position /mm	25	20	300
Spot diameter /mm	1.0	0.5	1.5

经过 44 次采样实验后,将得到每组变量的对应响应值,根据输入的样本点和对应的响应值拟合建立二次回归模型:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

式中 y 为各参数的响应值, x_i 为不同的初始变量, β_0 、 β_i 和 β_{ij} 为拟合数学方程的多项式系数,下标 i 、 j 表示每个初始变量的水平数。将(1)式进行微分求解,得

$$\frac{dy}{dx} = \sum \beta_i dx_i + \sum 2\beta_{ii} x_i dx_i + \sum \beta_{ij} dx_i dx_j. \quad (2)$$

由(1)式得到,各初始变量 x_i 对结果响应值 y 的一阶线性主效应 s_{x_i} 为

$$s_{x_i} = \beta_i dx_i, \quad (3)$$

二阶项的主效应 $s_{x_i^2}$ 为

$$s_{x_i^2} = 2\beta_{ii} x_i dx_i. \quad (4)$$

将各设计变量归一化到 $[-1, 1]$ 后,采用最小二乘法拟合得到模型系数(S_i)。

$$N_{x_i} = \frac{100S_{x_i}}{\sum |S_{x_i}|}, \quad (5)$$

式中 N_{x_i} 为各初始变量的贡献率。由(5)式可得到各个初始变量的贡献率。

通过 Pareto 图可以确定贡献值。初始变量对弯曲角度影响的 Pareto 图如图 4 所示。可以看出, A、B、C、D、E 这 5 个初始变量比 F、G 对响应值的贡献量大。为了提高工艺优化效率,去除 F、G 初始变量,以其他 5 个初始变量为最终优化的工艺参数。

3.2 工艺参数建模

通过前期的单工艺参数实验得到每个工艺参数的范围,工艺参数取值范围见表 2,然后对其进行中心复合实验设计。图 5 所示为弯曲角度随扫描速度变化的 5 个实验样件。

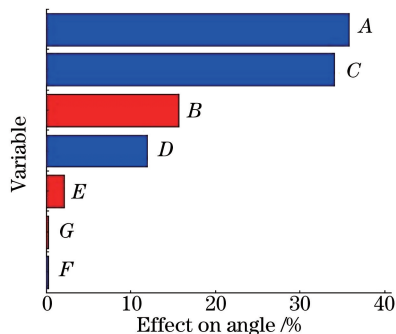


图4 初始变量对弯曲角度响应的 Pareto 图

Fig. 4 Pareto graph for initial variable responding to bending angle

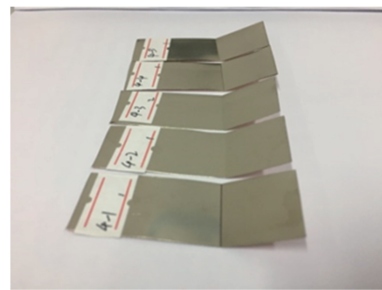


图5 部分单因素实验样件

Fig. 5 Partial samples of single-factor experiment

表2 中心复合实验因素水平表

Table 2 Factors and levels in central composite experiment

Parameter	Level		
	-1	0	1
Peak voltage /V	420	425	430
Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	500	600	700
Number of scans	10	20	30
Scan path position /mm	20	25	30
Spot diameter /mm	1.0	1.25	1.5

由表 2 得到中心复合实验设计矩阵,并进行 50 组激光弯曲实验,测得弯曲角度。响应与各个变量的关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon, \quad (6)$$

式中 k 为变量的个数, ϵ 为响应 y 的系统误差。当系统有弯曲时,需要采用高阶多项式逼近响应,如二阶模型

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon. \quad (7)$$

通过响应面法建立工艺参数与弯曲角度之间的二阶多项式数学模型表达式,即

$$P = +35.29 + 4.98A - 5.72B + 18.11C -$$

$$5.02D + 1.64E + 5.40AB + 1.92AC - 1.11AD + 0.04AE - 6.75BC - 2.62BD + 0.70BE - 1.16CD - 0.10CE - 0.08DE + 0.10A^2 - 4.02B^2 - 1.32C^2 + 9.03D^2 + 2.15E^2. \quad (8)$$

根据模型方差分析表可知,所建模型是显著的。模型的拟合度为 0.9731,预测拟合度为 0.9112,修正拟合度为 0.9545,信噪比为 26.876,这些数据说明数学分析模型在给定的工艺参数范围内对响应有良好的预测性。

3.3 工艺参数对弯曲角度的影响

不同工艺参数对多层板弯曲角度的影响如图 6 所示。可以看出,随着峰值电压、扫描次数的增大,多层板的弯曲角度都逐渐增大;随着扫描速度的增大,多层板的弯曲角度先平缓增大后逐渐减小;随着光斑直径、扫描路径的增大,多层板的弯曲角度都是先减小后增大。

峰值电压和扫描速度对弯曲角度的交互式影响如图 7 所示。当峰值电压为 422~428 V、扫描速度为 550~600 mm·min⁻¹时,试样的弯曲效果较好。随着峰值电压的增大、扫描速度的减小,弯曲角度会

先增大再缓慢减小。当峰值电压较小时,厚度方向的多层板没有加热透彻,下层材料仍为弹性状态,弯曲角度随着电压的增大而增大;而脉冲激光是瞬间作用在板材表面的,电压过高会造成热辐射区的烧蚀,弯曲角度减小;同时,下层材料的热膨胀会对部分上层材料的热膨胀造成阻碍,冷却时下层材料发生的收缩会缓解上层材料的部分收缩变形,因此,弯曲角度的增大变得缓慢。当扫描速度较小时,板料表面受到辐射的时间较长,上下层材料的温度梯度较小,不利于弯曲角度的增大。

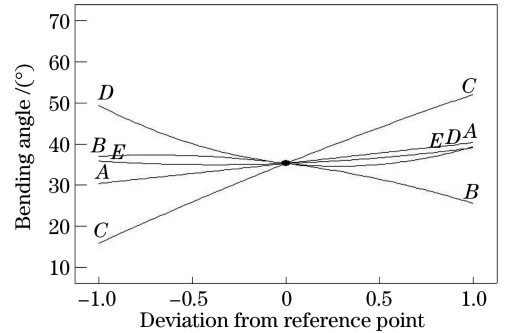


图 6 不同工艺参数对弯曲角度的影响

Fig. 6 Effects of different process parameters on bending angle

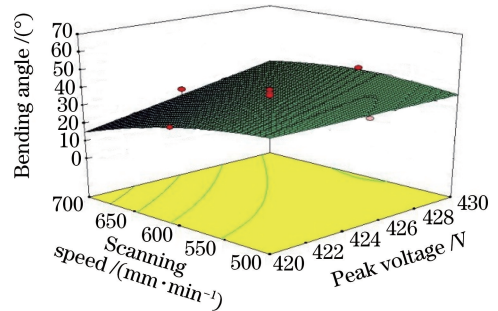
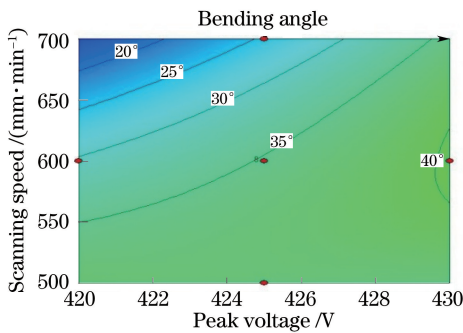


图 7 峰值电压和扫描速度对弯曲角度的影响。(a)等高图;(b)响应曲面图

Fig. 7 Effects of peak voltage and scanning speed on bending angle. (a) Contour plot; (b) response surface plot

峰值电压和扫描次数对弯曲角度的交互式影响如图 8 所示。随着扫描次数的增加,弯曲角度增大。

当峰值电压约为 424 V 时,试样具有较好的温度梯度且没有被烧蚀。随着扫描次数的增加,能量不断

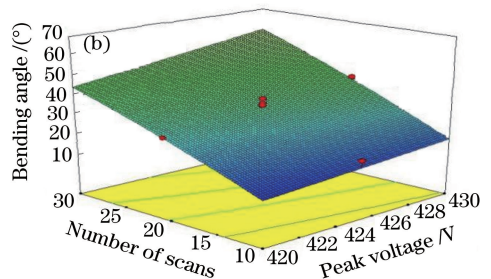
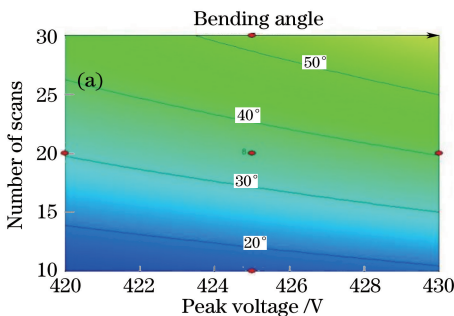
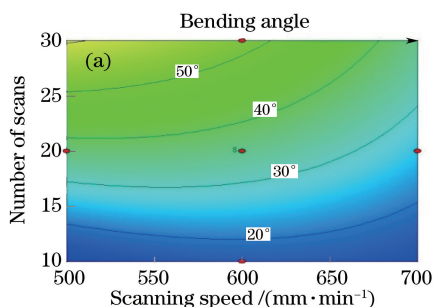


图 8 峰值电压和扫描次数对弯曲角度的影响。(a)等高图;(b)响应曲面图

Fig. 8 Effects of peak voltage and number of scans on bending angle. (a) Contour plot; (b) response surface plot

累积,使得上下层材料沿厚度方向上的温度梯度增大,弯曲角度增大。当扫描次数继续增加,弯折区的堆积材料增加,多层板横截面模量增大,弯曲抗力增大,弯曲角度的增量减小;而较大的电压导致试样表面会有少许烧蚀。

扫描速度和扫描次数对弯曲角度的交互影响如图9所示。随着扫描速度的增大,能量密度减小,弯曲角度减小。然而,扫描次数对弯曲角度的影响更大,随着扫描次数的增加,弯曲角度快速增大。随着扫描速度的进一步增大,加热区受激光辐射的时间减小,较小的能量密度不能使多层板的屈服强度减



小,并且材料表面对激光能量的吸收减小,多层板上下层材料间的温度梯度逐步减小,导致热应力减小,弯曲角度随之减小;能量的累积导致弯曲角度随着扫描次数的增加而增大。

扫描次数和扫描路径对弯曲角度的交互影响如图10所示。在一定条件下,随着扫描线与自由端距离的增大,弯曲角度先减小后增大。多层板非加热区的吸热作用导致试样沿厚度方向上的温度梯度减小,弯曲角度减小。随着距离继续增大,吸热作用减小,非加热区的刚性约束作用增大,加热区的塑性变形量增大,弯曲角度增大。

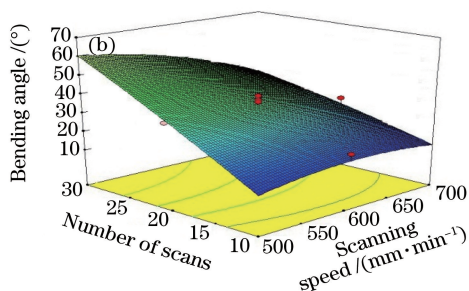


图9 扫描速度和扫描次数对弯曲角度的影响。(a)等高图;(b)响应曲面图

Fig. 9 Effects of scanning speed and number of scans on bending angle. (a) Contour plot; (b) response surface plot

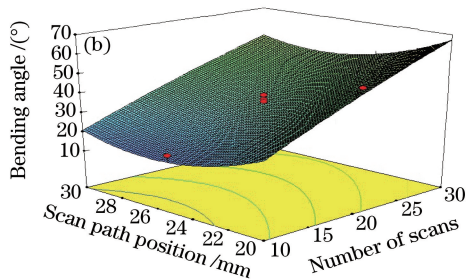
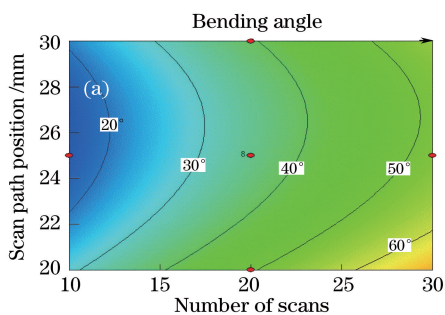


图10 扫描次数和扫描路径对弯曲角度的影响。(a)等高图;(b)响应曲面图

Fig. 10 Effects of number of scans and scan path on bending angle. (a) Contour plot; (b) response surface plot

3.4 数学模型的验证

弯曲角度的预测值与实验值的对比结果如图11所示,表明实验值与预测值具有较好的吻合

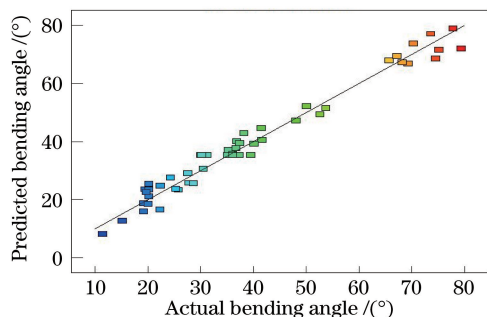


图11 弯曲角度的预测值与实验值

Fig. 11 Predicted and experimental results of bending angle

度。随机从实验结果中抽取3组数据进行验证,结果见表3。从表3可以看出,预测值与实验值的误差较小,说明所建立的响应曲面法数学模型能较好地预测实验结果。

3.5 工艺参数优化

通过响应面法对工艺参数进行优化,可提高激光弯曲成形后多层板的弯曲角度。通过满意度函数对工艺参数进行优化,把每个响应 y_i 转化为单个满意度函数 d_i ,如果响应是其目标值,那么 $d_i = 1$; 否则, $d_i = 0$ 。

选择初始变量使得 m 个响应的总满意度 D 最大, D 的表达式为

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m)^{1/m} \quad (9)$$

表3 优化实验结果的验证

Table 3 Test of optimized experimental results

No.	Peak voltage /V	Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	Number of scans	Scan path position /mm	Spot diameter /mm	Experimental bending angle / (°)	Predicted bending angle / (°)
1	425.00	600.00	20.00	20.00	1.25	52.63	49.35
2	430.00	600.00	20.00	25.00	1.25	41.64	40.37
3	420.00	700.00	10.00	30.00	1.50	15.23	12.65

假设响应 y 的目标 T 是一个最大值, L 是一个最小值, 则满意度函数为

$$d = \begin{cases} 0, & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r, & L \leq y \leq T \\ 1, & y > T \end{cases} \quad (10)$$

式中 r 为权重系数。从满意度函数中, 可以找到最大的点, 在该点的工艺参数组合条件下, 可获得最理想的弯曲角度。由优化工艺参数制定的优化标准见表4。

从优化的结果中挑取的5组优化工艺参数组合见表5。从表5可知, 预测的最大弯曲角度约为

62°, 满意度最高; 最佳工艺参数组合是: 峰值电压425 V, 扫描速度 550 mm·min⁻¹, 扫描次数30, 扫描路径30 mm, 光斑直径1.00 mm。

表4 满意度数学函数优化标准

Table 4 Optimization criteria of desirability mathematical function

Parameter	Range
Peak voltage /V	420-425
Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	550-650
Number of scans	20-30
Scan path position /mm	20-30
Spot diameter /mm	1-1.25
Bending angle / (°)	11.52-79.34

表5 优化工艺参数组合

Table 5 Optimal combination of process parameters

Test No.	Peak voltage /V	Scanning speed / (mm·min ⁻¹)	Number of scans	Scan path position /mm	Spot diameter /mm	Bending angle / (°)
1	425.00	550.00	30.00	29.99	1.00	62.46
2	424.97	550.00	30.00	29.98	1.04	61.97
3	425.00	550.65	30.00	30.00	1.10	61.48
4	425.00	550.00	29.98	30.00	1.14	61.37
5	425.00	550.00	29.98	30.00	1.17	61.29

4 结 论

采用参数化实验设计, 对影响铜-镍多层复合薄板激光弯曲成形的初始变量进行了筛选, 基于中心复合进行实验设计, 利用响应面法进行建模, 通过满意度函数进行优化分析, 得到以下结论。

1) 通过响应面建立的工艺参数模型可以很好地对弯曲角度进行预测。

2) 峰值电压、扫描速度、扫描次数、扫描路径、光斑直径对铜-镍多层复合薄板激光弯曲成形的影响较大。扫描速度和扫描次数对弯曲角度的交互式影响最大。

3) 铜-镍多层复合薄板激光弯曲成形的最优参数组合为: 峰值电压425 V, 扫描速度550 mm·min⁻¹, 扫描次数30, 扫描路径30 mm, 光斑直径1.00 mm。

参 考 文 献

- [1] Cui C, Chen Y L, Fu S C, *et al.* Study on laser multi-channel scanning forming of aluminum alloy cross stiffened panel [J]. Defense Manufacturing Technology, 2017(2): 28-33.
崔超, 陈亚利, 付守冲, 等. 铝合金交叉筋壁板激光多道扫描成形研究[J]. 国防制造技术, 2017(2): 28-33.
- [2] Yang L J, Chen Y L, Wei Y J, *et al.* Experimental investigation of laser induced thermoforming of 5A06 aluminum alloy sheet [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(33): 18-23.
杨立军, 陈亚利, 魏裕君, 等. 5A06 铝合金平板激光诱导热成形试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(33): 18-23.
- [3] Gisario A, Barletta M, Venettacci S, *et al.* Progress

- in tridimensional (3d) laser forming of stainless steel sheets [J]. *Lasers in Manufacturing & Materials Processing*, 2015, 2: 148-163.
- [4] Paunoiu V, Squeo E A, Quadrini F, *et al.* Laser bending of stainless steel sheet metals [J]. *International Journal of Material Forming*, 2008, 1(s1): 1371-1374.
- [5] Liu J, Sun S, Guan Y J. Numerical study on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8): 1265-1270.
刘杰, 孙胜, 管延锦. 预应力作用下微尺度激光弯曲成形的数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, 35(8): 1265-1270.
- [6] Shi Y J. Research on laser bending mechanism and forming process plan for 3D curved plates [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
石永军. 激光热变形机理及复杂曲面板材热成形工艺规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] Wang X Y, Luo Y H, Wang J, *et al.* Scanning path planning for laser bending of straight tube into coil-shape tube [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69 (1/2/3/4): 909-917.
- [8] Kant R, Bhuyan P M, Joshi S N. Experimental studies on curvilinear laser bending of thin sheets [C]. *International Conference on Advanced Technologies for Societal Application*, 2016: 539-548.
- [9] Wu D J, Ma G Y, Liu S, *et al.* Experiments and simulation on laser bending of silicon sheet with different thicknesses [J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(3): 517-521.
- [10] Genna S, Papa I, Leone C. A preliminary study on the characterization of laser-bending process of AISI 304 steel sheets by acoustic emission technique [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9/10/11/12): 4111-4119.
- [11] Lambiasi F. An analytical model for evaluation of bending angle in laser forming of metal sheets [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(10): 2044-2052.
- [12] Chen Y L, Yang L J, Fu S C, *et al.* Simulation of laser bending of cross-stiffened integral panel [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1002004.
陈亚利, 杨立军, 付守冲, 等. 交叉筋壁板激光弯曲成形仿真研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1002004.
- [13] Li P, Liu B G, Liu H X. Process model for laser bending shaping of tubes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081403.
李品, 刘保光, 刘会霞. 管材激光弯曲成形工艺模型 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081403.
- [14] Ding L, Liu H X, Wang H J, *et al.* Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet metal laser forming with semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2143-2148.
丁磊, 刘会霞, 王鹤军, 等. 铝锂合金薄板半导体激光弯曲成形试验研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2143-2148.
- [15] Li J H, Su Z C, Yao F P, *et al.* Application of BP neural network in laser bending forming of aluminum alloy sheet [J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(1): 158-161.
李金华, 苏智超, 姚芳萍, 等. BP神经网络在铝合金板材激光弯曲成形中的应用 [J]. *热加工工艺*, 2017, 46(1): 158-161.
- [16] Cheng X Z. Review of laminar composite metal material manufacturing technique [J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2017, 38(2): 63-66.
陈兴章. 层状金属复合材料技术创新及发展趋势综述 [J]. *有色金属材料与工程*, 2017, 38(2): 63-66.
- [17] Manesh H D, Shahabi H S. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer strips [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 476(1/2): 292-299.
- [18] Edwardson S P, Dearden G, French P, *et al.* Laser forming of metal laminate composites materials [C]. *22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 2003, 95(595): 107-116.
- [19] Edwardson S P, French P, Dearden G, *et al.* Laser forming of fibre metal laminates [J]. *Lasers in Engineering*, 2005, 15: 233-255.
- [20] Carey C, Cantwell W J, Dearden G, *et al.* Towards a rapid, non-contact shaping method for fibre metal laminates using a laser source [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 47(5/6/7/8): 557-565.
- [21] Shen H, Yao Z Q, Hu J. Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming [J]. *Computational Materials Science*, 2009, 45(2): 439-442.
- [22] Seyedkashi S M H, Gollo M H, Biao J, *et al.* Laser bendability of SUS430/C11000/SUS430 laminated composite and its constituent layers [J]. *Metals and*

- Materials International, 2016, 22(3): 527-534.
- [23] Zhang P, Wang X Y. Element diffusion and material properties in transition layer of bending zone in laminated plates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702001.
张攀, 王续跃. 层合板激光弯折区过渡层元素扩散及材料性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702001.
- [24] Yang B B, Wang X Y, Xu W J, *et al.* Experiments on laser bending of stainless steel-carbon steel laminated sheet [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091403.
杨冰冰, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光弯曲试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091403.
- [25] Ma X P, Wang X Y, Xu W J, *et al.* Heat conduction characteristics of stainless steel-carbon steel laminated sheet bending position [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 101401.
马绪鹏, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光弯折区的热传导特性[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101401.