

管材激光弯曲成形工艺模型

李 品^{1,2}, 刘保光¹, 刘会霞¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 利用响应曲面法建立了管材激光弯曲成形弯曲角度的工艺模型,并设计实验验证了模型的可靠性。通过该模型分析了自由端距离、辐射长度、扫描包角和扫描次数等工艺参数对弯曲角度的交互影响。结果表明,自由端距离、扫描次数和辐射长度对弯曲角度有显著影响,扫描包角对弯曲角度影响不大;辐射长度与扫描次数间的交互作用较弱,与自由端距离具有较强的交互作用。

关键词 激光技术; 激光弯曲成形; 响应曲面法; 管路系统; 工艺模型

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081403

Process Model for Laser Bending Shaping of Tubes

Li Pin^{1,2}, Liu Baoguang¹, Liu Huixia¹

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

² School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract A process model of the bending angle in laser-bending shaping of tubes is built by using the response surface method and its reliability is demonstrated with the designed experiment. The interactive influences of the process parameters such as the distance from free edge, the irradiation length, the scanning angle and the number of scanning on the bending angle are analyzed based on this model. The results show that the distance from free edge, the number of scanning and the irradiation length have significant influences on the bending angle, but the scanning angle has little influence. The irradiation length has a weak interaction with the number of scanning, but a strong one with the distance from free edge.

Key words laser technique; laser bending shaping; response surface method; piping system; process model

OCIS codes 140.3390; 140.3460

1 引言

管路系统主要用于输送各种工作液体、气体,在航空航天飞行器、船舶、汽车等大型复杂机械产品中应用广泛,是实现产品热控、环控等功能,影响产品可靠性和使用寿命的重要部件^[1-2]。管路系统由管路、阀件、部件和机械设备等组成,一般采用强制安装,但容易引起误差传递、放大等问题。激光弯曲成形是一种新的非接触式、无模成形技术,具有无回弹、柔性大、成形精度高等优点,是管路系统弯曲成形的理想选择^[3]。

激光弯曲成形在微器件的微调定位和微弯曲方面有独特的应用^[4-6]。Folkersma等^[4]针对细管封装的光纤对,提出采用激光微弯曲成形方法,并基于光纤末端二维偏心位置图像信息,提出估算单点激光微弯曲位置姿态的成形算法^[5],经过多点微弯曲成形实现光纤末端对中。但该成形算法仅适用于管径为1 mm的微细管单点激光微弯曲,并不适用于常见的工业用管(管径为5~50 mm)的激光弯曲成形。待弯曲管的外形尺寸、厚度、材料属性、弯曲位置形状和激光功率、光斑直径、扫描速度等工艺参数均对激光弯曲角度有

收稿日期: 2017-03-01; **收到修改稿日期**: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省高校自然科学研究面上项目(14KJB460006)

作者简介: 李 品(1983—),男,硕士,实验师,主要从事先进制造技术、智能制造及信息工程等方面的研究。

E-mail: lip@ujs.edu.cn

较大的影响^[7-9]。

管材激光弯曲成形的相关研究主要包括激光弯曲成形的机理研究^[10-11]、工艺参数的试验研究^[12-15]以及激光弯曲成形过程的数值模拟研究^[14-16]。激光弯曲成形机理主要有温度梯度机理(TGM)、屈曲机理(BM)和增厚机理(UM)三种变形机理。以上研究侧重于研究激光功率、光斑直径、扫描速度、管材直径等工艺参数对弯曲角度的影响,而对弯曲位置形状参数(自由端距离、辐射长度、扫描包角等)、工艺参数组合对弯曲角度的交互影响的研究很少。

本文以常用的不锈钢管材为研究对象,采用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 固体脉冲激光器,进行激光弯曲成形中弯曲角度的工艺模型研究。固定激光工艺参数(激光平均功率为 50 W、单脉冲能量为 2.5 J、重复频率为 20 Hz、脉宽为 2.2 ms、光斑直径为 1 mm)以获得较好的管材表面加工质量。基于响应曲面法^[17-18],建立数学模型,研究了弯曲位置形状参数(自由端距离、辐射长度、扫描包角)和扫描次数等工艺参数与弯曲角度的关系,分析了各工艺参数对弯曲角度的交互影响。

2 实验设计

2.1 试样准备和实验设备

304 不锈钢管材试样的尺寸:直径为 9.5 mm,长度为 110 mm,管壁厚度为 1 mm。激光器选用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 固体脉冲激光器。图 1(a)、(b)所示分别为激光弯曲成形实验原理图和实验装置。实验中,管材随着三爪卡盘作往复旋转运动,并沿轴向作进给运动,在激光辐照下,管壁温度沿厚度方向呈梯度分布,在热应力和端部刚性约束共同作用下管材发生塑性弯曲。其中,管材往复旋转次数为扫描次数,往复旋转夹角为扫描包角,管材轴向进给全长为辐射长度,激光辐射区域离管材自由端的长度为自由端距离。

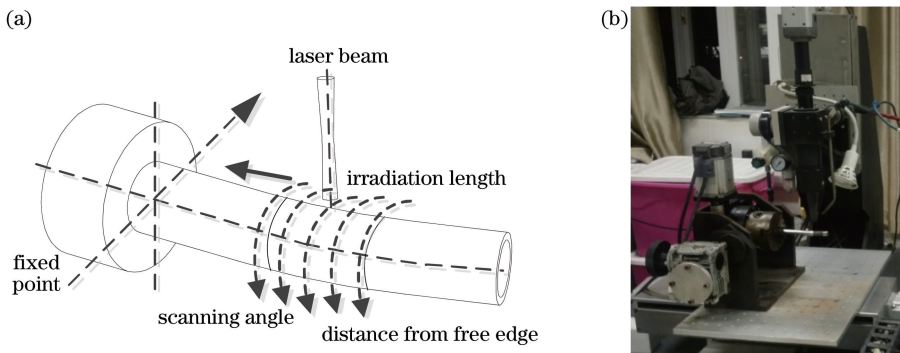


图 1 管材激光弯曲成形实验。(a)原理示意图;(b)装置图

Fig. 1 Experiment for laser bending shaping of tubes. (a) Schematic; (b) setup

2.2 实验方法

实验基于四因素(自由端距离、辐射长度、扫描包角和扫描次数)五水平响应中心旋转组合设计。首先进行单因素实验以确定各参数的范围,参数见表 1。根据实验设计矩阵和组合,进行激光弯曲成形实验,并对弯曲角度进行测量,如图 2 所示,不同参数的弯曲角度测量结果见表 2。

表 1 激光弯曲成形工艺参数

Table 1 Process parameters of laser bending shaping

Parameter	Code	Level				
		-2	-1	0	1	2
Distance from free edge /mm	A	5.0	12.5	20.0	27.5	35.0
Number of scanning	B	10	15	20	25	30
Irradiation length /mm	C	10	15	20	25	30
Scanning angle /($^{\circ}$)	D	140	150	160	170	180

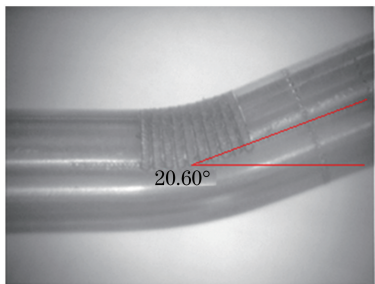


图 2 弯曲角度测量

Fig. 2 Measurement of bending angle

表 2 实验设计矩阵与结果

Table 2 Matrix and results in experimental design

A /mm	B	C /mm	D /($^{\circ}$)	Bending angle /($^{\circ}$)	A /mm	B	C /mm	D /($^{\circ}$)	Bending angle /($^{\circ}$)
20.0	20	20	160	18.8980	35.0	20	20	160	19.1234
27.5	15	15	170	19.3970	20.0	20	20	140	20.8466
20.0	30	20	160	11.5969	27.5	25	15	150	12.1911
12.5	15	25	170	22.5777	12.5	25	25	170	25.8534
12.5	15	15	150	8.5802	12.5	25	25	150	19.7262
27.5	15	15	150	16.9475	27.5	15	25	170	19.0700
20.0	20	20	160	19.2291	20.0	10	20	160	9.0161
12.5	25	15	150	21.8068	27.5	25	25	150	13.2333
27.5	25	25	170	14.9041	12.5	25	15	170	10.8509
20.0	20	30	160	28.2745	20.0	20	20	160	23.1000
20.0	20	20	160	20.5756	20.0	20	10	160	16.9093
20.0	20	20	180	20.9183	27.5	25	15	170	14.6468
12.5	15	25	150	23.7892	12.5	15	15	170	12.9242
20.0	20	20	160	15.2263	5.0	20	20	160	11.8558
27.5	15	25	150	10.5579	20.0	20	20	160	14.6014

3 结果与讨论

3.1 弯曲角度的方差分析和数学模型

采用 Design-Expert 软件对表 2 中的数据进行方差分析,得出方差分析表,结果见表 3,其中 F 值为 F 分布检验统计量值; P 值为模型可靠性统计检验值,一般 $P < 0.05$ 表示可靠。模型拟合度 $R^2 = 0.7063$,表明模型约有 7% 的总变异无法解释。预测拟合系数 $R^2_{\text{PRED}} = 0.3949$,修正拟合系数 $R^2_{\text{ADJ}} = 0.4322$,两者基本吻合,说明该模型符合模型可靠性要求。失拟值是模型预测值与实际值不拟合的概率,为 0.3054。模型的信噪比为 6.338。这些数据表明所建立的模型与实际情况较符合。

表 3 弯曲角度的方差分析

Table 3 Variance analysis of bending angles

Source	Sum of squares (adjusted)	Degree of freedom	Mean square (adjusted)	F -value	P -value
Model	534.76	14	38.20	2.58	0.0397
A	4.70	1	4.70	0.32	0.5815
B	0.86	1	0.86	0.058	0.8134
C	126.49	1	126.49	8.53	0.0105
D	7.63	1	7.63	0.51	0.4840
AB	28.52	1	28.52	1.92	0.1857
AC	116.65	1	116.65	7.87	0.0133
AD	17.61	1	17.61	1.19	0.2930

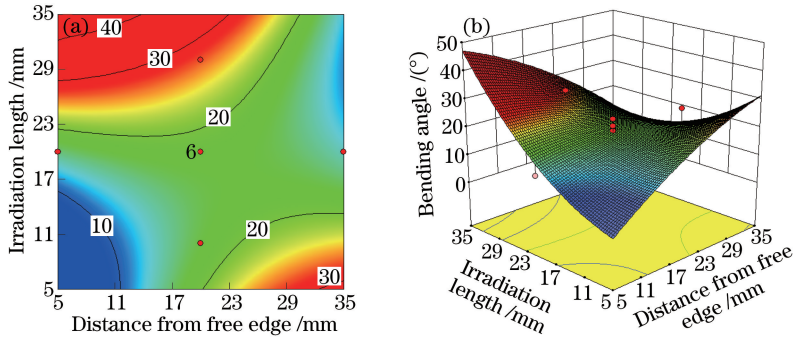


图4 自由段距离和辐射长度对弯曲角度的交互影响。(a)等值线;(b)三维响应曲面图

Fig. 4 Interactive effects of distance from free edge and irradiation length on bending angles.

(a) Isogram; (b) three-dimensional response surface plot

而显著增加,而随着扫描次数的增加先增加后缓慢减少。扫描次数和辐射长度对弯曲角度的交互作用不明显。因此,选择适当的扫描次数后,可根据所需的弯曲角度确定辐射长度。

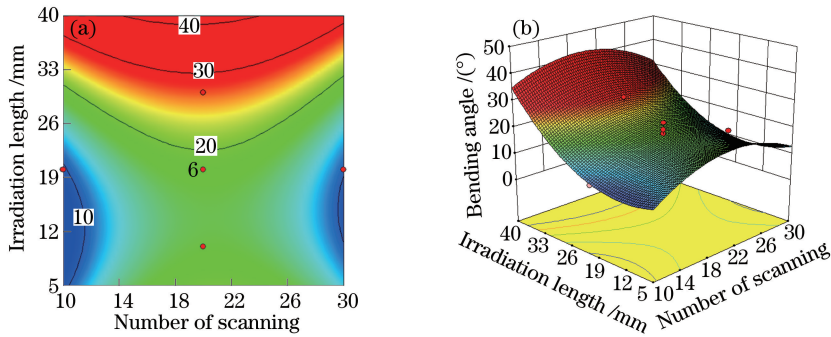


图5 扫描次数和辐射长度对弯曲角度的交互影响。(a)等值线图;(b)三维响应曲面图

Fig. 5 Interactive effects of number of scanning and irradiation length on bending angles.

(a) Isogram; (b) three-dimensional response surface plot

图6所示为扫描次数和扫描包角对弯曲角度的交互影响。从图6可知,扫描包角在 $140^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内时对弯曲角度影响不大,且扫描次数与扫描包角之间的交互作用不明显,选择参数时不用同时考虑。

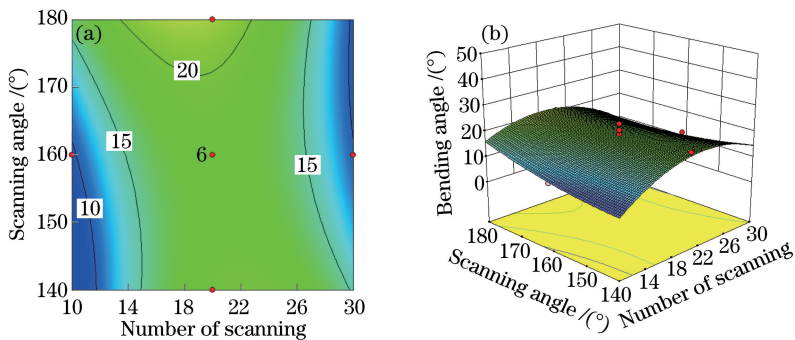


图6 扫描次数和扫描包角对弯曲角度的交互影响。(a)等值线图;(b)三维响应曲面图

Fig. 6 Interactive effects of number of scanning and scanning angle on bending angles.

(a) Isogram; (b) three-dimensional response surface plot

3.3 模型验证

从实验结果中随机抽取三组数据进行对比,结果见表4,表明所建立的数学模型与实际情况基本符合。

表 4 弯曲角度实验结果与预测值对比

Table 4 Comparison of experimental and predicted value of bending angle

A /mm	B	C /mm	D /($^{\circ}$)	Bending angle /($^{\circ}$)	
				Experimental value	Predicted value
27.5	15	15	150	16.9475	16.2750
20.0	20	20	160	15.2263	16.6050
12.5	15	15	170	12.9242	11.9670

4 结 论

采用响应曲面法,建立了管路系统激光弯曲成形中弯曲位置形状参数、扫描次数等工艺参数与成形弯曲角度关系的数学模型,通过对结果的分析得出以下结论:

- 1) 自由端距离、扫描次数和辐射长度对弯曲角度具有显著影响,扫描包角对弯曲角度影响不大,随着扫描包角的增大,弯曲角度缓慢增加;
- 2) 辐射长度与扫描次数间的交互作用较弱,而与自由端距离间有较强的交互作用;
- 3) 基于建立的模型,弯曲角度的预测值与实验值基本吻合,该模型为合理选择弯曲成形位置形状参数提供了有效方法。

参 考 文 献

- [1] Nahangi M, Haas C T, West J, *et al.* Automatic realignment of defective assemblies using an inverse kinematics analogy[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 30(2): 04015008.
- [2] Nahangi M, Yeung J, Haas C T, *et al.* Robotic kinematics analogy for realignment of defective construction assemblies [C]. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2015, 32: 1-7.
- [3] Nahangi M, Czerniawski T, Haas C T, *et al.* Parallel systems and structural frames realignment planning and actuation strategy[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2015, 30(4): 04015067.
- [4] Folkersma Ger K G P, Römer G R B E, Brouwer D M, *et al.* High precision laser forming for micro actuation[C]. *SPIE*, 2014, 8967: 89671B.
- [5] Folkersma K G P, Brouwer D M, Römer G R B E, *et al.* Robust precision alignment algorithm for micro tube laser forming[J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 301-308.
- [6] Folkersma K G P, Römer G R B E, Brouwer D M, *et al.* High precision optical fiber alignment using tube laser bending[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(1): 953-961.
- [7] Wang X Y, Wang J, Xu W J, *et al.* Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(1): 43-51.
- [8] Wang Xuyue, Tao Chunhua, Xu Weixing, *et al.* Scanning path planning for laser bending of metal tubes[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1813-1820.
王续跃, 陶春华, 许卫星, 等. 金属管材激光弯曲成形的扫描路径规划[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1813-1820.
- [9] Ding Lei, Liu Huixia, Wang Hejun, *et al.* Experimental study of thin aluminum-lithium alloy sheet metal laser forming with semiconductor laser[J]. *Chinese J 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.
- [10] Hao N, Li L. An analytical model for laser tube bending[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 208/209: 432-436.
- [11] Li W, Yao Y L. Laser bending of tubes: Mechanism, analysis, and prediction[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2001, 123(4): 674-681.
- [12] Hsieh H S, Lin J. Study of the buckling mechanism in laser tube forming[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45(12-13): 1368-1374.
- [13] Guan Y, Yuan G, Sun S, *et al.* Process simulation and optimization of laser tube bending[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(1): 333-342.
- [14] Jiang Yu, Cao Jun, Yang Guohui. Research of bucking mechanism in laser tube forming with axial preload[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 0061.

- 姜宇, 曹军, 杨国辉. 轴向预负荷对激光弯曲钢管的影响[J]. 激光技术, 2007, 31(1): 0061.
- [15] Liu Shunhong, Fang Xiong, Fan Xinrong. Experiment investigation on rules of laser tube bending [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 340-343.
- 刘顺洪, 方熊, 樊昕荣. 管材激光弯曲规律的试验研究[J]. 激光技术, 2004, 28(4): 340-343.
- [16] Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Numerical and experimental study on the laser micro-bending process[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 276-280.
- 刘杰, 孙胜, 管延锦. 微尺度激光弯曲成形数值模拟与实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 276-280.
- [17] Jamil M S C, Sheikh M A, Li L. A finite element study of buckling and upsetting mechanisms in laser forming of plates and tubes[J]. International Journal of Manufacturing Materials & Mechanical Engineering, 2011, 1(1): 1-17.
- [18] Kant R, Joshi S N. Finite element simulation of laser assisted bending with moving mechanical load[J]. International Journal of Mechatronics & Manufacturing Systems, 2013, 6(4): 351-366.