

层扫描式管材激光渐近弯曲矫形工艺

李 品^{1,2}, 严 长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 采用层扫描的方式,实现了管材的激光渐近弯曲矫形。基于 Perona-Malik 边缘提取算法和 RANSAC 直线特征提取算法,实现了激光渐近弯曲矫形过程的实时在线测量,分析了工艺参数对管材弯曲角度的影响。结果表明,弯曲角度随时间的增加呈近似线性增加;位置形状参数对弯曲角度的增大速率影响不大,而轴向进给次数与单层弯曲角度的变化量成正比;轴向进给步距可以改变弯曲段的曲率;激光平均功率越高,弯曲角度的增大速率越快。

关键词 激光技术; 激光渐近弯曲矫形; 逐层扫描; 管材; 工艺

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091404

Laser Tube Asymptotic Bending Correction Process Based on Layer Scanning

Li Pin^{1,2}, Yan Zhang¹

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

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

Abstract The laser tube asymptotic bending correction is realized by the layer scanning. Based on the Perona-Malik edge extraction algorithm and the RANSAC linear feature extraction algorithm, the real-time online measurement of the laser asymptotic bending correction process is realized. The influences of process parameters on the pipe bending angles are analyzed. The results show that the bending angle nearly increases with time linearly. The position and shape parameters have little effect on the increasing rate of bending angles, while the axial feeding times are directly proportional to the variation of the single-layer bending angle. The curvature of the bending section can be changed by the axial feeding step length. The higher the average laser power, the faster the increasing rate of bending angles.

Key words laser technique; laser asymptotic bending correction; layer scanning; pipe; process

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 350.3390

1 引 言

激光弯曲成形是一种新兴的非接触式、无模成形技术,具有无回弹、柔性大等特点^[1]。激光弯曲成形技术在微小器械的微定位和微弯曲方面有独特的应用^[2-3]。复杂的激光弯曲成形机理^[4]、交互影响的加工工艺^[5]、激光弯曲成形的加工效率和成本等问题使激光弯曲成形技术很少应用于常见工业用管的弯曲成形。在考虑弯曲回弹补偿的情况下,拉弯、压弯、推弯、绕弯、滚弯、挤弯、中频感应弯曲、水火弯曲等管材弯曲成形技术^[6-8],可基本满足工业用管的加工要求。然而,在航空航天、船舶、汽车等大型复杂管路系统的安装过程中,存在缺陷的零组件和管材弯曲回弹问题使复杂三维弯管加工时容易出现较大的制造误差,减缓安装进程,增加制造成本^[9-10]。激光弯曲成形技术适用于大型复杂管路系统的现场弯曲矫形,是管路系统弯曲矫形

收稿日期: 2017-02-07; **收到修改稿日期:** 2017-04-21

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,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

的理想选择^[11]。

激光弯曲成形的机理研究^[12]、工艺参数的实验研究^[13-16]、激光弯曲成形过程的数值模拟研究^[17-19]是当前管材激光弯曲成形的主要研究内容。然而,在以周向扫描为主、轴向进给为辅的管材激光弯曲成形技术中,待弯曲管的外形尺寸、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对管材弯曲具有显著的交互影响;弯曲过程中,由于激光与材料作用产生等离子体,故很难通过光学测量仪器进行在线实时测量与反馈,无法实现对激光弯曲矫形质量的预测和闭环控制。

本文以常用的不锈钢管材为研究对象,采用以轴向扫描为主的逐层扫描式加工路径,实现了管材的激光渐近弯曲矫形。搭建了激光弯曲矫形过程的在线实时测量系统,建立了相应的弯曲角度图像处理算法,研究了层扫描式激光渐近弯曲矫形的工艺规律,分析了弯曲位置形状参数(自由端距离、辐射轴向长度、轴向进给步距等)和激光参数等对层扫描式激光渐近弯曲矫形所得弯曲角度的影响。

2 实验方案

2.1 试样准备和实验设备

实验中所用的不锈钢管材试样的外径为 9.5 mm,长度为 110 mm,壁厚为 0.2 mm。采用德国 Rofin 公司的 StarWeld 250 型 Nd:YAG 固体脉冲激光器,其输出波长为 1064 nm。激光弯曲矫形原理如图 1(a)所示,实验装置如图 1(b)所示。实验中,管材随着三爪卡盘作往复旋转运动,并沿着轴向作进给运动。管材在激光辐照下受热,沿管的厚度方向产生温度梯度,在热应力和端部刚性约束的共同作用下,管材发生塑形弯曲,弯曲角度随着层扫描次数的增加而不断增大。其中,往复旋转夹角为扫描包角,管材轴向进给全长为辐射轴向长度,管材轴向单次进给距离为轴向进给步距,激光辐射区域与管材自由端之间的长度为自由端距离。

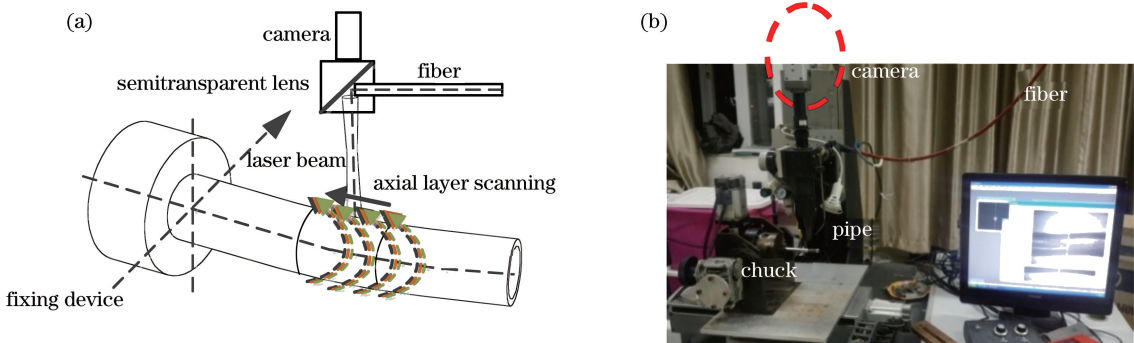


图 1 管材激光弯曲矫形的(a)原理图及(b)实验装置

Fig. 1 (a) Schematic and (b) experimental equipment of laser tube bending correction

2.2 在线实时测量系统及图像处理算法

在实验中,采用与激光束同轴的电荷耦合装置对激光渐近弯曲矫形过程进行在线实时测量,激光平均功率为 24 W、单脉冲能量为 1.2 J、频率为 20 Hz、脉宽为 1.2 ms、光斑直径为 1 mm,自由端距离为 30 mm,轴向进给步距为 1 mm,辐射轴向长度为 15 mm。拍摄时间为 0 s 和 806.73 s 时,管材激光弯曲的图像分别如图 2(a)、(b)所示,其中 t 为时间。

通过图像处理算法对弯曲角度进行实时测量,结果如图 3(a)所示,其中 RANSAC 为基于 RANSAC 算法提取的偏差值直线特征。算法主要包括当前图像与初始时刻图像的边缘提取、对应点的纵方向偏差值计算、基于偏差值的直线特征提取等。由于弯曲过程中激光与材料相互作用产生等离子体,因此实时获取的图像畸变严重。图像边缘提取采用基于各向异性扩散的 Perona-Malik 算法^[20],直线特征提取采用 RANSAC 随机一致性算法^[21],计算所得弯曲角度为 21.6113° 。采用德国 GOM 公司的 ATOS 型光学三维扫描测量系统离线测量弯曲角度,结果为 21.684° ,如图 3(b)所示。结果表明,所采用的实时图像算法准确、可行。

2.3 实验方法

固定激光参数,分析弯曲位置形状参数(自由端距离、辐射轴向长度、轴向进给步距)和激光参数等对层扫

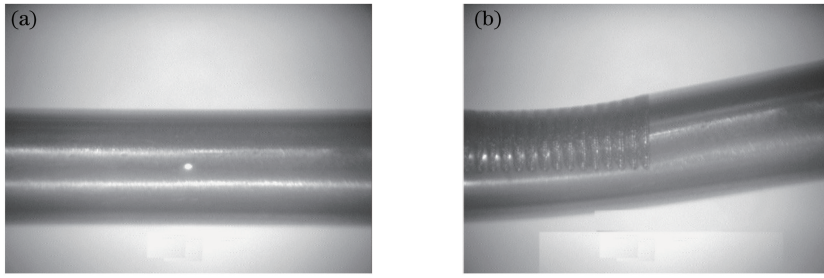


图2 管材激光弯曲过程中的在线实时图像。(a) $t=0$ s; (b) $t=806.73$ s

Fig. 2 Online real-time images in laser tube bending process. (a) $t=0$ s; (b) $t=806.73$ s

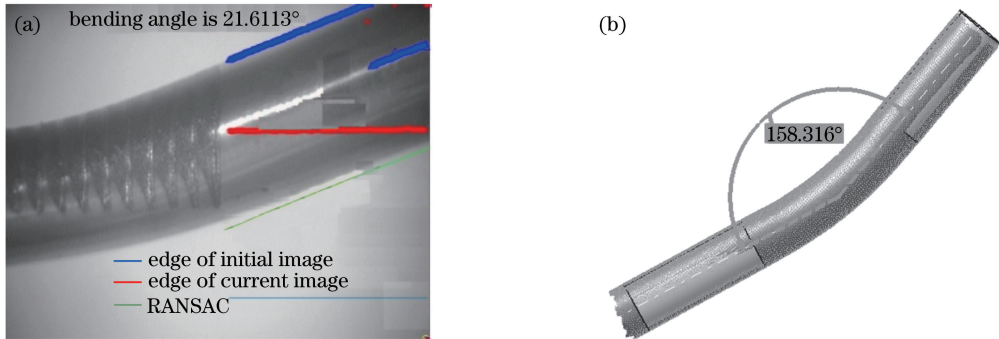


图3 管材弯曲角度的(a)在线实时测量结果和(b)光学三维扫描测量结果

Fig. 3 (a) Online real-time measurement result and (b) optical three-dimensional scanning measurement result of pipe bending angles

描式激光渐近弯曲矫形的影响。根据激光参数的不同,将实验分为 A、B 两组,每组在一定的范围内随机生成 5 组形状参数,基于该参数进行实验,具体设置见表 1。其中 A 组实验的激光平均功率为 24 W,单脉冲能量为 1.2 J,频率为 20 Hz,脉宽为 1.2 ms,光斑直径为 1 mm;B 组实验的激光平均功率为 32 W,单脉冲能量为 1.6 J,频率为 20 Hz,脉宽为 1.5 ms,光斑直径为 1 mm。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Experiment number	Distance from free edge /mm	Irradiation length /mm	Feeding step length /mm
A1	20	37.5	1.5
A2	40	15.0	1.0
A3	40	7.5	1.5
A4	20	2.5	0.5
A5	30	7.5	1.5
B6	40	30.0	1.5
B7	30	20.0	1.0
B8	20	12.5	0.5
B9	30	5.0	1.0
B10	30	7.5	0.5

3 结果与讨论

3.1 层扫描式激光渐近弯曲矫形实时过程及变化规律

图 4 所示为 B6 组实验中,层扫描式激光渐近弯曲矫形的实时过程。可以看出,弯曲角度随着层扫描层数的增加而逐渐增大;弯曲矫形过程中,层与层之间的弯曲角度变化量基本相同。图 5 所示为 B6 组实验中,弯曲角度随时间的变化。可以看出,当弯曲角度小于 25° 时,随着时间的增加,弯曲角度的增大呈近似线

性;当弯曲角度大于 25° 时,随着时间的增加,弯曲角度的增大速度趋缓。这是因为当弯曲角度较大时,激光辐射区域右侧的离焦量较大,这使得辐射区域右侧的激光热转化效率降低,被加热区域产生的热应力减小。激光弯曲矫形所需的弯曲角度一般小于 20° ,处于线性区,故可对弯曲角度进行准确的实时预测和闭环控制。

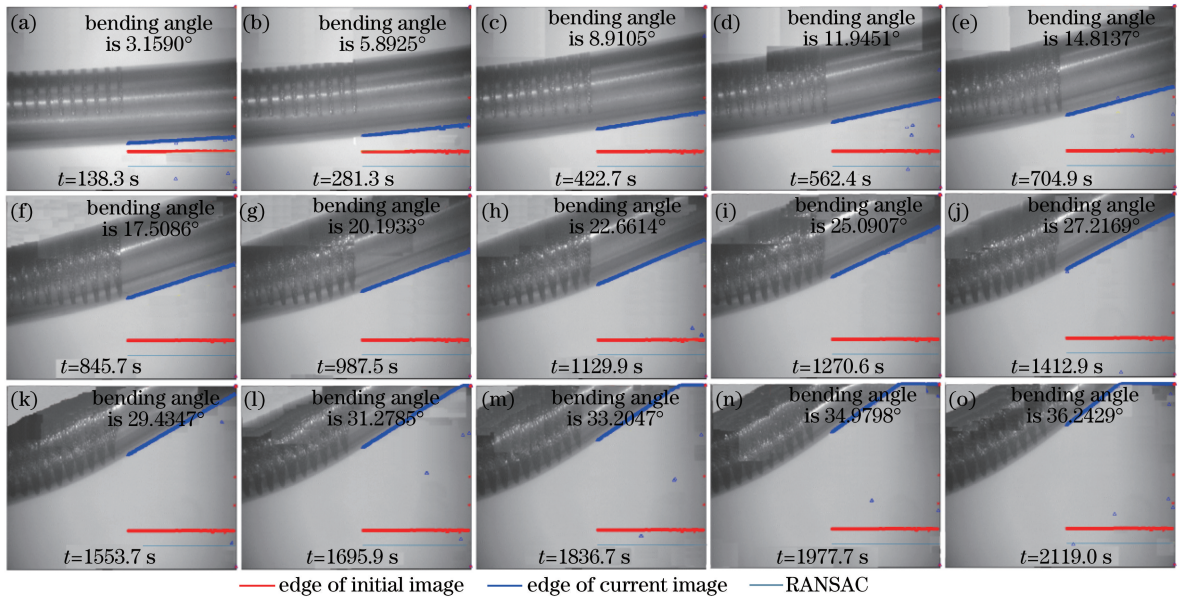


图 4 层扫描式激光渐近弯曲矫形实时过程(B6)

Fig. 4 Real time process of laser asymptotic bending correction by layer scanning (B6)

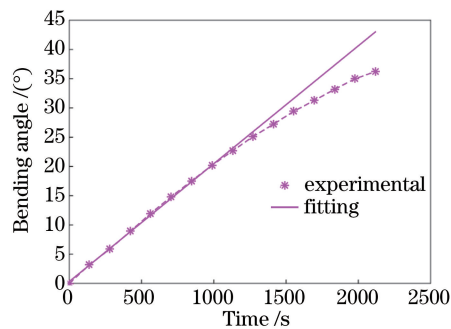


图 5 激光渐近弯曲矫形过程中弯曲角度随时间的变化

Fig. 5 Bending angle versus time in laser asymptotic bending correction process

3.2 弯曲位置形状参数对弯曲角度的影响

在 B 组实验的激光参数下,不同的位置形状参数对激光弯曲矫形过程的影响如图 6 所示。可以看出,固定激光工艺参数时,弯曲角度随时间变化的速率基本一致,且小于 20° 的弯曲角度具有较明显的线性变化特性。在 B6、B7、B8 三组实验中,虽然辐射轴向长度和轴向进给步距不同,但单层的轴向进给次数相同(均为 20),单层的激光热输入量亦相同,因此三组弯曲角度随时间的变化规律基本一致,层与层之间的弯曲角度变化量基本一致。然而,三组轴向进给步距不同,当弯曲角度大于 20° 、进给步距较小时,弯曲角度变化速率较低。在 B8 的实验参数下,激光渐近弯曲矫形的实时过程如图 7 所示,过小的进给步距使管材受热区域发生了烧蚀甚至烧穿,激光热转化效率降低。

在 B6、B9、B10 实验参数下,单层的轴向进给次数分别为 20、5、15,从图 6 中可以看出,扫描 15 层后,所得的弯曲角度与上述单层轴向进给的次数成正比。因此,在层扫描式激光渐近弯曲过程中,弯曲位置形状参数对弯曲角度随时间的变化速率影响不大,扫描一定层数后,所得的弯曲角度与单层的轴向进给次数成正比,即弯曲角度与单层的激光热输入量成正比。对比图 4 与图 7 可以看出,两者单层热输入量基本一致,所

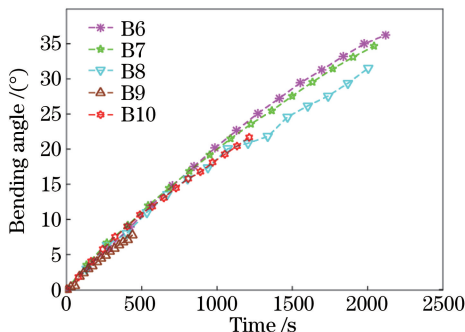


图 6 位置形状参数对弯曲角度的影响

Fig. 6 Influences of position and shape parameters on bending angles

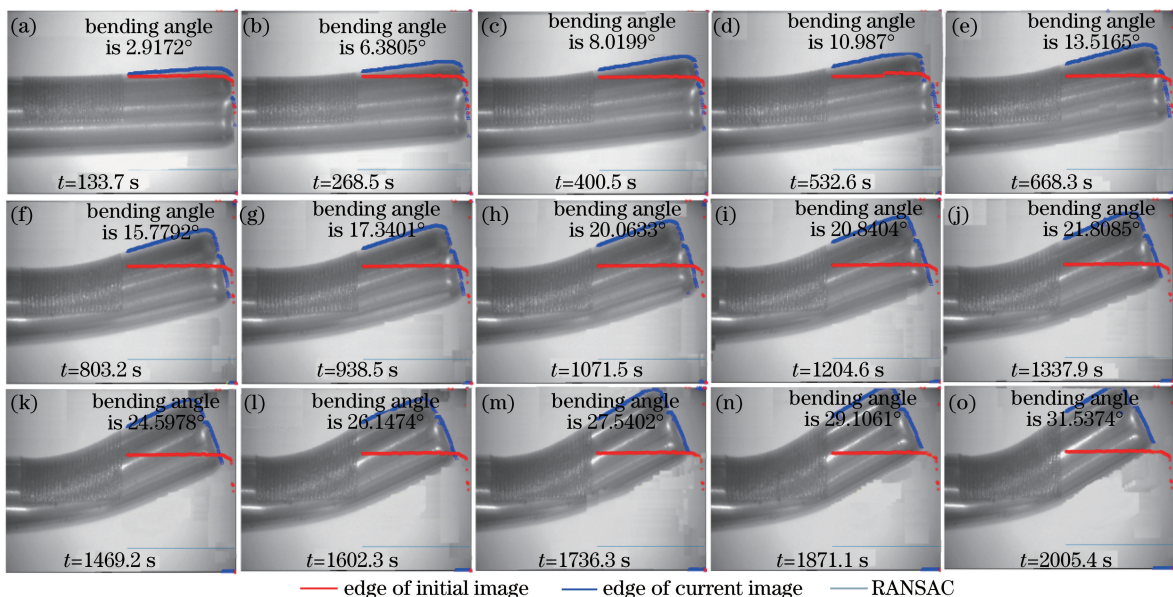


图 7 层扫描式激光渐近弯曲矫正实时过程 (B8)

Fig. 7 Real time process of laser asymptotic bending correction by layer scanning (B8)

得的弯曲角度也基本一致,但两者的激光辐射区域的长度明显不同,故激光弯曲矫正所得弯曲段的曲率明显不同。因此,当单层激光辐射区域(或单位长度)的激光输入量一致而轴向进给步距不同时,可以获得弯曲曲率明显不同的管材;通过改变单位长度内的轴向进给步距,有可能实现管材平面的变曲率弯曲成形,甚至管材空间的变曲率弯曲成形。

3.3 激光参数对弯曲角度的影响

图 8 所示为在 10 组不同的工艺参数下,层扫描式激光弯曲矫正的实验结果。可以看出,采用不同的激

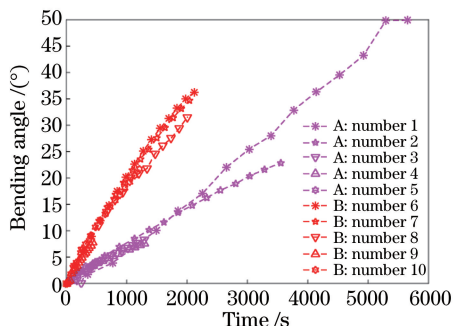


图 8 工艺参数对弯曲角度的影响

Fig. 8 Influences of process parameters on bending angles

光参数,弯曲角度均随时间的增加呈近似线性增加,但变化速率明显不同,激光平均功率(或单脉冲能量)越高,弯曲角度的变化速率也越高。

4 结 论

在层扫描式激光渐近弯曲矫形过程中,弯曲角度随时间的增加呈近似线性增加,故可对弯曲角度进行准确的实时预测和闭环控制;弯曲位置形状参数(自由端距离、辐射轴向长度、轴向进给步距)对弯曲角度的增大速率影响不大,而轴向进给次数直接影响单层激光热输入量,与单层弯曲的角度变化量成正比;当单层激光辐射区域的激光输入量一致时,在不同的轴向进给步距下可以获得不同曲率的弯曲段,故可通过改变轴向进给步距实现管材平面甚至空间的变曲率弯曲成形;激光平均功率(或单脉冲能量)对弯曲角度的线性增大速率影响显著,可通过调节激光参数来提高弯曲矫形的加工效率。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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(1/4): 953-961.
- [4] Li W C, Yao Y L. Laser bending of tubes: Mechanism, analysis, and prediction[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2001, 123(4): 674-681.
- [5] Guan Y J, Yuan G P, Sun S, *et al.* Process simulation and optimization of laser tube bending[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1/2/3/4): 333-342.
- [6] Zhang Shen. Springback prediction and compensation of variable curvature bending for minor diameter thick-walled tube[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
张 深. 小直径厚壁管材变曲率弯曲回弹控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [7] Xie Yuecheng. The research on the processing error theory of the large-scale space bending steel pipes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
谢岳城. 空间大型弯曲圆钢管加工误差理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [8] Zhang Shen, Wu Jianjun, Deng Liangcai, *et al.* Springback prediction of variable curvature bending for minor diameter thick-walled tube[J]. Materials Science & Technology, 2014, 22(3): 1-6.
张 深, 吴建军, 邓良才, 等. 小直径厚壁管材变曲率弯曲回弹预测[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(3): 1-6.
- [9] Nahangi M, Czerniawski T, Haas C, *et al.* Parallel systems and structural frames realignment planning and actuation strategy[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 30(4): 04015067.
- [10] Nahangi M, Yeung J, Haas C, *et al.* Robotic kinematics analogy for realignment of defective construction assemblies [C]. International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 2015: 1-7.
- [11] Nahangi M, Haas C, 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.
- [12] Hao N, Li L. An analytical model for laser tube bending[J]. Applied Surface Science, 2003, 208-209: 432-436.
- [13] Hsieh H S, Lin J. Study of the buckling mechanism in laser tube forming with axial preloads[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 1368-1374.
- [14] Wang X Y, Wang J, Xu W J, *et al.* Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube[J]. Optics and Laser Technology, 2014, 56: 43-51.
- [15] Jiang Yu, Cao Jun, Yang Guohui. Research on bucking mechanism in laser tube forming with axial preload[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(3): 226-230.
姜 宇, 曹 军, 杨国辉. 轴向预负载对细薄钢管激光弯曲机制的影响[J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(3): 226-230.

- [16] Liu Shunhong, Fang Xiong, Fan Xingrong. 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.
- [17] 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.
- [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.
- [19] Safdar S, Li L, Sheikh M A, *et al.* Finite element simulation of laser tube bending: Effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1101-1110.
- [20] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639.
- [21] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the Acm, 1981, 24(6): 381-395.