

金属板材直线单曲面激光弯曲成形研究

姜敏凤^{1,2} 陶茂科² 刘会霞^{2*} 李品² 张成² 王霄²

(¹无锡职业技术学院机械技术学院, 江苏 无锡 214121)
(²江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光成形技术的最大难点在于要制作出满足预定形状及尺寸要求的工件。针对板材直线单曲面预定形状, 提出了基于等弦长准则算法, 在给定形状误差下, 把扫描路径按照等弦长与不同弯曲角度的方式进行规划。基于这种算法需求, 试验研究了激光能量、扫描次数等激光工艺参数与弯曲角度的关系。在实验过程中, 构造了实时监测系统对弯曲角度进行测量。结果表明, 在一定的参数范围内, 激光能量、扫描次数均与弯曲角度呈现较好的线性关系。按照规划好的扫描路径进行试验, 验证了基于这种算法规划扫描路径方法的可行性。

关键词 激光技术; 激光成形; 路径规划; 工艺参数; 直线单曲面

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.081408

Experimental Study on Line Single Surface Laser Bending Process of Sheet Metal

Jiang Minfeng^{1,2} Tao Maoke² Liu Huixia² Lin Pin² Zhang Cheng² Wang Xiao²

(¹School of Mechanical Technology, Wuxi Institute of Technology, Wuxi, Jiangsu 214121, China)
(²School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract The biggest challenge of laser forming technology is how to fulfill the requirements of the workpiece shape and size. Equivalent length-based criterion algorithm is proposed for a scheduled line single surface. Scanning path is planned within the given shape error, according to the way of equivalent length and different bending angles. Based on the algorithm requirement, the relationship between process parameters and bending angles is researched. During the experiments, bending angles are measured by a real-time monitoring system. The experimental results reveal that the laser bending angles are linearly proportional to the number of irradiations and laser line energy in a certain parameter range. Then, the experiments according to scanning paths verify the applicability of the proposed method.

Key words laser technique; laser forming; scanning strategy; process parameters; line single surface

OCIS codes 140.2020; 140.3460; 140.3510; 350.3390

1 引言

激光弯曲成形技术是一种新型的无模具、无外力的非接触式热态积累成形技术, 具有生产周期短、柔性大、精度高、洁净无污染等特性^[1], 并能成形常温下难以变形的材料, 也可实现与切割、焊接、刻蚀等激光加工工序的复合化^[2,3], 因此特别适合大型工件、小批量或单件产品的制造, 已经广泛应用于航空、航天、微电子、船舶制造和汽车工业等多个领域^[4,5]。

近些年来, 国内外学者在激光弯曲的变形机理、工艺过程以及数值模拟等方面做了大量研究工作^[6~16], 但是主要研究还是集中在单个弯曲受工艺参数的影响规律方面。在实际的工程应用中, 必须根据给定的曲面形状, 规划出合理的扫描路径, 找到工艺参数与角度的关系, 最终实现所需要的形状。因此, 根据目标曲面形状规划扫描路径对该技术的发展和工程应用具有重要意义。从目前公开发表的文献中可知, 该方面的研

收稿日期: 2011-03-10; 收到修改稿日期: 2011-03-30; 网络出版日期: 2022-07-07

作者简介: 姜敏凤(1963—), 女, 副教授, 主要从事金属材料、材料成形技术等方面的研究。

E-mail: jiangmf@wxit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

究还刚刚起步, T. Hennige^[17]研究了直线扫描与曲线扫描路径之间的差异, 发现曲线扫描时, 扫描区域的受周围材料的影响特别大, 曲面形状不易控制; J. Kim 等^[18,19]提出了基于距离准则算法和基于角度的算法来研究直线单曲面激光弯曲成形, 取得了较大的进展。本文提出了较便捷的等弦长准则算法, 通过合理的规划路径, 采用试验的方法, 研究出工艺参数与弯曲角度之间的关系, 试验结果验证了这种算法的有效性和合理性。

2 基于等弦长准则确定扫描路径和角度的算法

工件的目标曲面形状从几何的角度可看作为一条动线, 在空间连续运动的轨迹而形成。形成曲面的动线称作为母线, 控制母线运动的线称作为导线。其中直线单曲面的定义是由直母线运动形成的曲面, 正如图 1 S_1, S_2, \dots, S_i 扫描轨迹得出的曲面。本文研究的弯曲成形目标曲面为直线单曲面。在激光弯曲成形研究中, 一般都假设沿着扫描路径方向弯曲角度的变化忽略不计, 这样激光弯曲成形的边沿效应也不需要考虑^[20]。为了通过激光扫描方式将平板加工得到这样的形状, 就必须计算出每个激光加工点的位置和与其相对应的每个激光加工点位置上的弯曲角度的大小。反映在加工工艺上就需要对每个扫描位置处弯曲角度选择合适的工艺参数, 其中包括激光功率、扫描速度、光斑直径和扫描次数等。

为了实现使平板变形得到直线单曲面的形状, 在满足允许误差的条件下, 提出采用多段折线等弦长拟合逼近曲线的算法。其思路是在相邻两个成形点的直线距离相等的前提下扫描, 根据曲线方程和允许的最大偏移量 δ 决定最终扫描路径, 激光每次扫描沿着板长方向移动等长的距离, 减少了每次计算移动距离的时间, 通过计算每个位置上的弯曲角度, 得到扫描路径和扫描路径上的弯曲角度。如图 2 所示, 基于等弦长的准则算法具体的过程如下:

1) 确定允许的弦长 l : 由于曲线各处的曲率不等, 等弦长逼近后, 最大误差 δ_{\max} 必在 R_{\min} 处(设为图 2 中的 DE 段), 则 l 为

$$l = 2 \sqrt{R_{\min}^2 - (R_{\min} - \delta)^2} \approx 2 \sqrt{2R_{\min}\delta}, \quad (1)$$

2) 求 R_{\min} : 曲线 $y = f(x)$ 任意一点的曲率半径为

$$R = (1 + z'^2)^{3/2} / z'', \quad (2)$$

取 $dR/dx = 0$, 即

$$3z'z''^2 - (1 + z'^2)z''' = 0, \quad (3)$$

根据 $z = f(x)$ 求得 z', z'', z''' , 并由(3)式求得 x 后, 再将 x 值代入(2)式即得 R_{\min} 。

3) 以曲线起点 A 为圆心, 做半径为 l 的圆相交 $z = f(x)$ 曲线于 B 点, 联立求解

$$\begin{cases} (x - x_a)^2 + (z - z_a)^2 = l^2 \\ z = f(x) \end{cases}$$

得到 x_b, z_b 。

4) 顺序以 B, C, \dots 为圆心, 重复步骤 3), 即可求得其余各节点的坐标值。

5) 计算得到所有相邻成形点之间长度 d_i 和扫描路径处的弯曲角度 θ_i , 最后便得到了满足曲面要求的扫描路径及其各处弯曲角度 θ_i 。

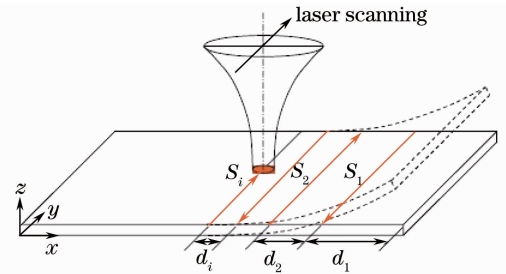


图 1 激光弯曲成形实验示意图

Fig. 1 Schematic of laser forming process

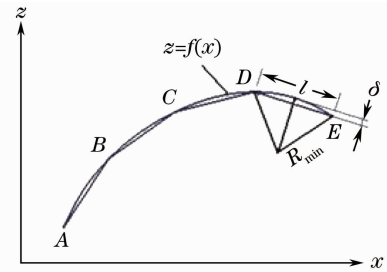


图 2 基于等弦长的准则算法过程示意图

Fig. 2 Procedure of equivalent length-based criterion algorithm

3 给定弯曲角度的板材成形实验

基于等弦长的准则算法反映在加工工艺上就是选择合适的工艺参数,使薄板在每个成形点的位置实现满足要求的弯曲角度,得到满足要求的弯曲形状。

3.1 实验设备与条件

实验采用德国 DILAS 公司的 Compact 130/400 型半导体激光器,最大输出功率 130 W,波长为 980 nm,激光采用光纤传输方式传输至激光头,光斑形状为圆形。使用 CNC2000 数控系统实现对工作台及数控加工的控制。实验材料为 AA5052 铝镁合金薄板,材料规格为 90 mm×20 mm×0.3 mm。实验前,用乙醇对样件表面进行清洗,以除去表面可能存在的油污等,为了增加材料对激光的吸收率,在样件的扫描表面涂敷碳黑。实验过程中为了样件充分冷却,消除激光成形扫描热累积的影响,两次扫描之间停留 10 s。实验过程中,光斑直径为 1.5 mm,激光弯曲成形的实验装置如图 3 所示。

3.2 弯曲角度的测量

对试验过程进行实时监测,可以观察、捕捉、测量试验过程中任意时刻的弯曲角度。测量是通过试验过程中视觉传感系统来实现,将信号放大、采集后存在计算机里面,然后通过计算机处理可以测量到弯曲角度,实时监测和角度测量系统如图 4 所示。这种测量方法具有精度较高、测量方便、误差小的一系列优点。

3.3 工艺参数与弯曲角度的关系

对于激光成形加工过程中弯曲角度与工艺参数的关系,不少学者进行了研究^[21,22]。本文研究弯曲角度选用激光能量,即激光功率与激光扫描速度之间比值和激光扫描次数两个参数作为研究对象。通过对两个综合性工艺参数与弯曲角度的关系研究,达到求出每个成形点位置处的成形角度的目的,最终得到所需要的薄板弯曲形状。

3.3.1 线能量与弯曲角度

按照表 1 的实验设计方案进行试验,线能量与弯曲角度之间的关系如图 5 所示。图中可以看出,线能量与弯曲角度之间存在较好的线性关系。在两者存在较好线性关系范围内,通过调节激光工艺参数来控制弯曲角度的大小。

表 1 试验设计方案

Table 1 Design scheme of experiments

Line energy /(J/mm)	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Laser power /W	30	35	40	45	50
Laser scan speed /(mm/min)	600	600	600	600	600

3.3.2 扫描次数与弯曲角度

图 6 给出的是扫描次数与弯曲角度之间的关系。在图中可以很清晰地看到,在扫描次数较少的情况下,弯曲角度与扫描次数之间呈现较好的线性关系。这个特征的

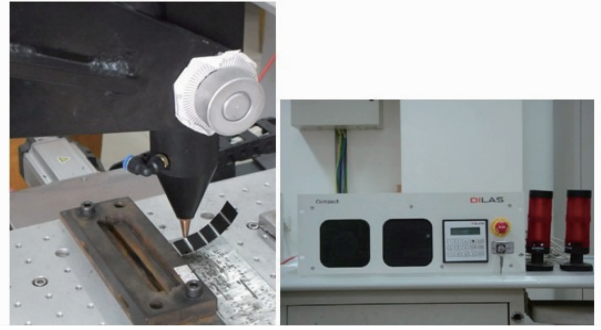


图 3 激光弯曲成形的试验装置

Fig. 3 Experimental setup of laser forming system

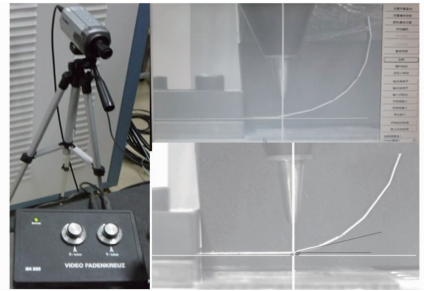


图 4 实时监测系统与弯曲角度的测量

Fig. 4 Real-time monitoring system and bending angle measurement for laser forming of sheet metal

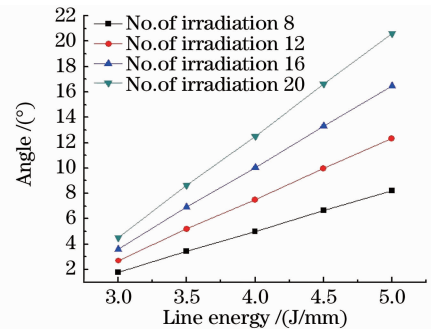


图 5 线能量与弯曲角度的关系

Fig. 5 Relation between bending angle and line energy

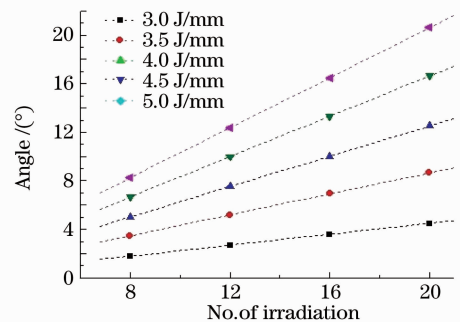


图 6 扫描次数与弯曲角度的关系

Fig. 6 Relation between bending angle and number of irradiations

存在,可以采用扫描次数较好地控制激光成形加工过程中弯曲角度的变化。

4 实验结果与分析

以图 7 给出的截面形状的曲面为例,采用基于等弦长准则算法,计算得出成形点的位置和其相对应位置上的弯曲角度。

表 2 是该曲线在采用等弦长准则算法下,设定的最大允许误差 $\delta_{\max}=0.4$ mm 所得到的结果,表中分别列出了两相邻成形点沿板长方向的距离 d_i 和对应成形点位置处的弯曲角度 θ_i 。

表 2 最大允许误差为 0.4 mm 所计算的结果
Table 2 Calculation results when $\delta_{\max}=0.4$ mm

Distance between irradiations d /mm	Forming angle θ_i /($^{\circ}$)
10.369	8.01
10.369	11.76
10.369	16.45
10.369	18.96
10.369	16.45
10.369	11.76
10.369	8.01
Total length: 82.952 mm	

对应于在曲面截面上的成形点的位置如图 8(a)所示,并求出了这种算法计算成形后的结果与目标曲线在 z 方向上的误差。从图 8(b)可以看出,这种算法计算得出的误差较小,成形精度较高,也说明了这种算法的可行性。然后由计算得出成形点的位置和角度,通过前面得出的参数与角度之间的关系,控制好成形点的位置和角度,实现目标曲面的成形。最终板材成形得到的实物图如图 9 所示。

5 结论

以直线单曲面对激光弯曲成形的研究对象,提出了基于等弦长准则算法,以一直线单曲面对为例,规划了合理的扫描路径,得到较好的实验结果,成功解决了金属板材直线单曲面对激光弯曲成形的形状控制的难题,并得出以下结论:

1) 基于等弦长准则算法可以解决直线单曲面对一大类的成形问题,具有很好的通用性;

2) 试验选择的材料为 0.3 mm 的铝合金薄板,线能量在 3.0~5.0 J/mm 范围内,弯曲角度与线能量存在较好的线性关系,同样,扫描次数与弯曲角度也存在较好的线性关系,为研究弯曲角度与工艺参数的关系带来了方便。

3) 对于结果的精度问题,可以自由地调整算法中 δ_{\max} 值的大小来达到所需要的精度。

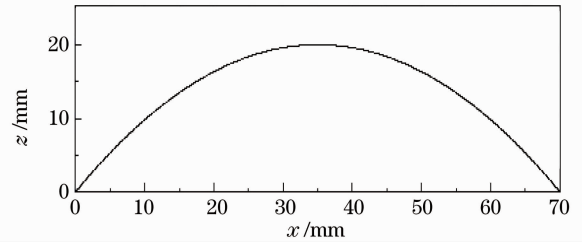


图 7 目标曲面的截面形状

Fig. 7 Profile of target shape

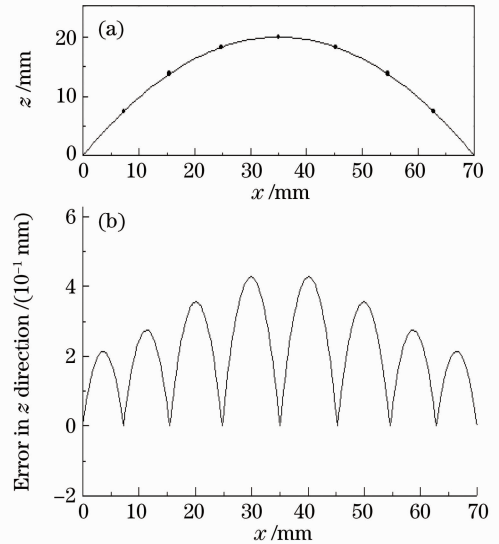


图 8 基于等弦长准则算法成形。(a)成形点的位置; (b)在 z 方向上的误差

Fig. 8 Process design with equivalent length-based criterion algorithm. (a) Forming points; (b) error in z direction

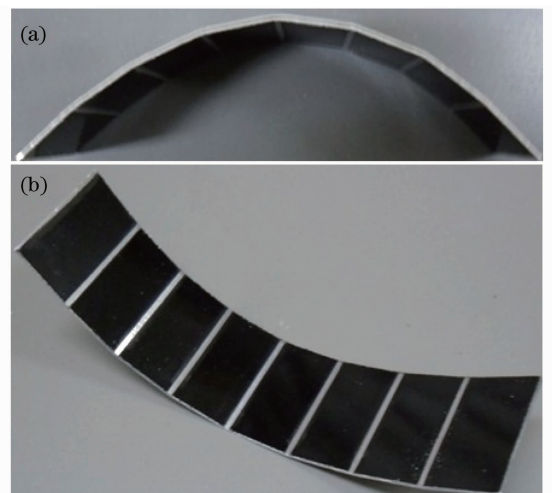


图 9 实验结果。(a)曲面轮廓;(b)曲面斜视图

Fig. 9 Results of experiments. (a) Profile of surface; (b) elevation of surface

参 考 文 献

- 1 Liu Ren, Ji Zhong, Zhang Peng *et al.*. Sheet laser forming & research progress [J]. *China Metalforming & Manufacturing Technology*, 2004, (3): 17~21
刘 韧, 季 忠, 张 鹏 等. 板料激光成形及其研究进展[J]. *锻压装备与制造技术*, 2004, (3): 17~21
- 2 Zhang Peng. Study on laser 3D forming process of sheet metal[J]. *New Technology & New Process*, 2006, (4): 94~96
张 鹏. 板料激光三维弯曲成形的工艺研究[J]. *新技术新工艺*, 2006, (4): 94~96
- 3 Ji Zhong, Liu Qingbin, Wu Shichun. Technology and application of rapid laser sheet metal forming[J]. *China Mechanical Engineering*, 1996, 7(6): 54~55
季 忠, 刘庆斌, 吴诗淳. 板料的快速激光成形技术及其应用[J]. *中国机械工程*, 1996, 7(6): 54~55
- 4 Shen Hong. Study on Shape Forming in Laser Forming[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. 2~3
沈 洪. 激光弯曲成形的精度控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 2~3
- 5 Zhang Liwen, Zhong Qi, Lü Bo *et al.*. Research and application of laser sheet bending[J]. *New Technology & New Process*, 2005, (3): 47~50
张立文, 钟 琦, 吕 波 等. 板材激光弯曲成形核术的研究进展及其应用前景[J]. *新技术新工艺*, 2005, (3): 47~50
- 6 C. L. Yau, K. C. Chan, W. B. Lee. Laser bending of leadframe materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 82(1-3): 117~121
- 7 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of metal sheets[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, A25(9): 859~864
李伟民, M. Geiger, F. Vollertsen. 金属板材激光弯曲成形规律的研究[J]. *中国激光*, 1998, A25(9): 859~864
- 8 J. Lawrence, M. J. J. Schmidt, L. Li. The forming of mild steel plates with a 2.5 kW high power diode laser[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(7): 967~977
- 9 M. Marya, G. R. Edwards. A study on the laser forming of near-alpha and metastable beta titanium alloy sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 108(3): 376~383
- 10 Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong *et al.*. Experimental study on laser bending of shipbuilding steel plate[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2005, 30(5): 64~66
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, 30(5): 64~66
- 11 Cai Yougui, Wang Xiufeng, Chen Guangnan *et al.*. Experimental of sheet metal on laser bending[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(2): 154~157
蔡友贵, 王秀凤, 陈光南 等. 板料激光弯曲试验[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(2): 154~157
- 12 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
- 13 Hsieh-Shen Hsieh, Jehnming Lin. Thermal-mechanical analysis on the transient deformation during pulsed laser forming [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44(2-3): 191~199
- 14 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
- 15 M. Marya, G. R. Edwards. An analytical model for the optimization of the laser bending of titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 124(3): 337~344
- 16 N. Hao, L. Li. An analytical model for laser tube bending[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 208-209: 432~436
- 17 T. Hennige. Development of irradiation strategies for 3D-laser forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(1): 102~108
- 18 J. Kim, S. J. Na. Development of irradiation strategies for free curve laser forming[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, 35(8): 605~611
- 19 J. Kim, S. J. Na. Feedback control for 2D free curve laser forming[J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, 37(2): 139~146
- 20 Bao Jiangcheng, Y. Lawrence Yao. Analysis and prediction of edge effects in laser bending[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, 123(1): 53~61
- 21 M. H. Gollo, S. M. Mahdavian, Naeini H. Moslemi. Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd:YAG laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(3): 475~482
- 22 Liu Jie, Sun Sheng, Guan Yanjin. Experimental study on negative laser bending process of steel foils[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2010, 48(1): 83~88