

文章编号: 0258-7025(2008)11-1813-08

# 金属管材激光弯曲成形的扫描路径规划

王续跃 陶春华 许卫星 徐云飞 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 116023)

**摘要** 基于几何曲率方法, 针对 AISI304L 不锈钢金属直管的激光平面弯曲成形和三维空间弯曲成形进行了路径规划的研究。对平面内弯曲成形, 根据目标管形的极值点和拐点将管材分段, 取极值点作为路径规划的初始位置, 对各分段采用不同的扫描间距以确定加热扫描路径。对三维空间弯曲成形, 采用投影分解的方法, 把三维成形曲面投影分解为两个二维曲面, 分别获取扫描路径和工艺参数, 然后组合与简化, 获取三维弯曲成形的扫描路径。实验采用 Nd:YAG 固体激光器, 以平面内正弦曲面弯曲和空间螺旋管弯曲两种形式为例, 作为目标形状进行扫描路径规划与实验验证, 扫描弯曲结果证明了扫描路径规划方法的有效性。

**关键词** 激光技术; 激光弯曲; 路径规划; 几何曲率; 金属管材

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1813

## Scanning Path Planning for Laser Bending of Metal Tubes

Wang Xuyue Tao Chunhua Xu Weixing Xu Yunfei Wu Dongjiang

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology, Ministry of Education,  
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

**Abstract** Based on geometric curvature method, the scanning path planning for laser bending of straight tube, AISI304L stainless steel, into a bent tube in a plane or three-dimension curvature was researched. To two dimensional(2D)laser bending tubes, the tube is divided into several segments according to the extreme point and inflection point of the desirable tube, taking the extreme point as the initial place of the path planning, using different scanning space for every subsection in order to identify the heating/scanning paths. In order to 3D laser bending of tubes using projection decomposition method, three-dimensional surface is decomposed into two two-dimensional curved surfaces, the scanning path planning and process parameters were thus acquired respectively. Through combining two groups' data, the 3D heating/scanning path planning was obtained. Finally experimental verification is carried out by using a typical complex sinusoidal surface and helical coils of three-dimensional shape as the desirable shape on Nd:YAG solid laser, scanning bending results show that in the paper scanning path planning method is effective and feasible.

**Key words** laser technique; laser bending; path planning; geometric curvature; metal tube

## 1 引 言

在现代工业生产中, 用管材制造的弯曲零件除大量用于气体和液体管道工程外, 在船舶制造业、锅炉及压力容器制造业、汽车工业、航空航天制造业等工业部门也得到广泛使用<sup>[1,2]</sup>。管材弯曲成形工艺是备受关注并得到迅速发展的重要领域<sup>[3,4]</sup>。管材

的弯曲方法可分为模具成形和柔性成形。激光弯曲成形是一种新兴的无模成形技术, 无需外力, 无回弹现象, 具有成形精度高、生产周期短、柔性大等特点, 适合于小批量零件生产, 可成形各类异构件, 高硬度和脆性材料, 像钛镍合金、陶瓷、铸铁等<sup>[4~6]</sup>, 在航空航天、造船和汽车等行业具有极大的应用潜力。

收稿日期: 2008-02-02; 收到修改稿日期: 2008-04-03

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50290101), 国家自然科学基金(50375024)和辽宁省自然科学基金(20062181)资助课题。

作者简介: 王续跃(1960—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士后, 主要从事特种加工、精密加工领域的研究工作。

E-mail: wbxzd@dlut.edu.cn

金属管材激光弯曲成形的过程简单,但影响激光弯曲成形的因素较多。对于简单的 V 形激光弯曲成形来说,影响激光弯曲成形的因素有激光入射功率、扫描速度、光束能量分布、材料对激光的吸收系数以及管材的几何参数。但是在多扫描路径的三维激光弯曲成形中,扫描步距、扫描线的先后次序、扫描线距自由端的距离等路径参数对最终变形量都有影响。作为金属件快速成形的一种柔性加工工艺,国内外学者利用激光弯曲成形技术对管材直线弯曲已进行了多种实验与仿真研究<sup>[6~8]</sup>,通过单次或多次重复扫描可以获得精确的 V 型工件。然而,实际工程应用中许多成形件型面是由复杂单曲率面和双曲率面构成的,因此,研究管材复杂型面激光弯曲加工工艺规划策略具有重要的现实意义。

激光弯曲成形不像有模成形那样容易确定工艺条件,需针对不同目标型面对成形过程进行扫描路径和扫描顺序的合理设计与规划,选取合适的工艺参数。目前主要通过直线和曲线的组合,对规则型面球冠状和碟状曲面的板材成形工艺进行研究<sup>[9~13]</sup>。其工艺规划方法主要包括加工经验、实验数据回归和塑性应变场估算,但大多工艺规划过程过于依赖于经验,且成形精度较低,同时研究工作主要针对板材成形展开,对管材的路径规划较少。

本文基于对管材激光弯曲成形特点和成形规律的研究,提出通过计算目标管材几何曲率的方法,对管材平面弯曲和三维弯曲进行扫描路径规划。

## 2 管材平面内弯曲的扫描路径规划

### 2.1 路径规划策略

对于金属管材平面弯曲成形,如果认为扫描截面上各处的成形角度相同,忽略上下表面的成形偏差,则可将其视为单曲率型面。由于管为对称截面,所成形单曲率型面可以用管的轴线弯曲成形来代替说明,因此,管材平面弯曲成形可以简化成二维曲线问题,其工艺规划策略流程可分为三步。

1) 基于二维曲线极值点和拐点将曲线分段。由于曲线极值点处有最大的弯曲曲率和拐点两侧有不同的弯曲方向,根据曲线方程求出曲线的极值点和拐点,基于曲线的极值点和拐点将曲线分段;取极值点为中点的曲线段为一分段,根据光斑直径大小确定其范围,选其他分段不包括极值点和拐点,但拐点可以作为分段曲线端点。

2) 规划扫描路径和扫描顺序。在极值点处规划一条扫描路径,而在拐点附近不规划扫描路径,其

他部分的扫描路径根据成形精度和光斑直径确定。通常复杂型面既包括凹面也包括凸面。管材激光弯曲为正向弯曲的凹面成形,扫描时管材为旋转加工,前面的弯曲成形对后面的扫描有较大影响,需要合理规划扫描顺序。采用由自由端到夹持端的顺序扫描方式,遇到凸面时通过旋转,变凸面成形为凹面成形。

3) 确定加工工艺参数。在实验过程中,激光功率与光斑直径的调整较为繁琐,同时由实验规律可知扫描包角为  $180^\circ$  时弯曲效果最好。因此,在实验中使用确定的激光功率、光斑直径和扫描包角进行扫描。通过弯曲实验和数值模拟可建立周向扫描时的扫描速度、扫描次数与弯曲角度的基本关系,基于弯曲角的大小确定出每一条扫描路径的工艺参数。

### 2.2 目标形状成形规划分段

为提高单曲率面的成形精度,在曲率较大的位置应规划较密的扫描路径,而在曲率较小的位置应规划较稀疏的扫描路径。对于给定复杂形状,不同位置曲率不同,通常极值点处有最大的弯曲曲率,而拐点两侧有不同的弯曲方向,其弯曲曲率为零。为了便于合理地规划扫描路径,尽量将路径规划在曲率较大的位置,应基于极值点和拐点对曲线进行划分,然后根据各分段成形要求进行扫描路径规划。为了验证工艺规划策略的有效性,将选取管材外径为 4mm 的典型复杂单曲率型面正弦管  $z = 5\sin(\pi x/50)$  ( $0 \leq x \leq 100$ ) 进行激光弯曲成形,目标曲面形状如图 1 所示。

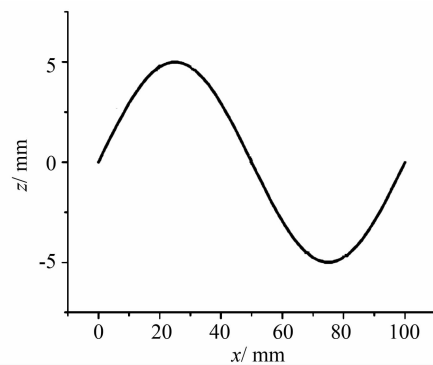


图 1 目标曲面形状

Fig. 1 Desirable curve shape

令  $z = f(x)$ ,  $f(x)$  的一阶导数和二阶导数分别表示为

$$f'(x) = \frac{\pi}{10} \cos \frac{\pi}{50} x, \quad (1)$$

$$f''(x) = -\frac{\pi^2}{500} \sin \frac{\pi}{50} x, \quad (2)$$

令(1)和(2)式分别等于零,可得到曲线极值点  $x = 25\text{ mm}$ 、 $75\text{ mm}$ ,拐点  $x = 50\text{ mm}$ 。图 2 为曲率随不同  $x$  位置的变化,可以看出,正弦曲线存在两个最大极值点和一个拐点,最大曲率位于极值点处,而在管两端和拐点处曲率为零。

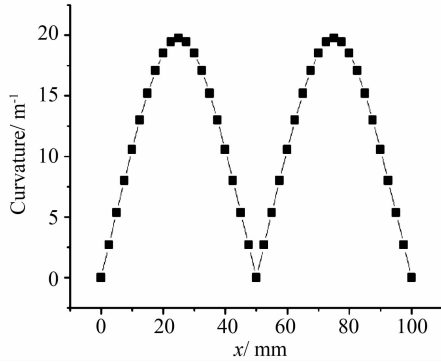


图 2 沿  $x$  轴方向正弦曲线曲率的变化  
Fig. 2 Variation of sine curvature along  $x$  axis

为了确保极值点处规划扫描路径和拐点附近无扫描路径,首先,根据光斑直径大小选取极值点为中心的一段曲线作为独立分段,其他分段内部不包括极值点和拐点,但拐点可以作为分段曲线端点。根据正弦曲线的两个极值点和一个拐点,将正弦曲线  $f(x)$  分为六分段,分别为  $0 \leq x \leq 21$ ,  $21 < x \leq 29$ ,  $29 < x \leq 50$ ,  $50 < x \leq 71$ ,  $71 < x \leq 79$ ,  $79 < x \leq 100$ ,如图 3 所示。

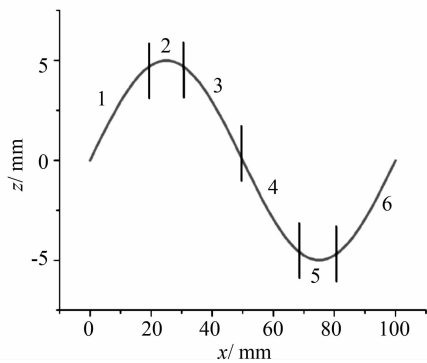


图 3 正弦曲线分段  
Fig. 3 Results of sine curve division

### 2.3 路径规划与工艺参数的确定

当激光的扫描间距较小时,可以得到较光滑连续的弯曲线,随着扫描间距的增加,弯曲段变为曲线段一直线段一曲线段,影响工件的弯曲成形质量。针对目标型面,扫描路径间距在大曲率段沿  $x$  方向设置为  $4\text{ mm}$ ,在小曲率段设置为  $10\text{ mm}$ 。由于曲线极值点处有最大曲率,所以在分段 2 和 5 的极值点处必须规划一条扫描路径。拐点两侧管材有不同的弯曲方向,曲率为零,因而拐点附近不应有扫描路径。对同一个方向的弯曲采用相同的扫描标志,不同标志间要将管材旋转  $180^\circ$ 后再进行扫描,如图 4 所示。

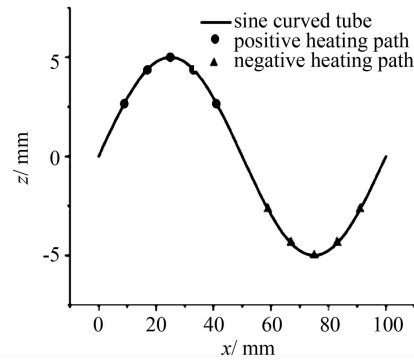


图 4 目标型面上的扫描路径规划  
Fig. 4 Scanning path planning on the desirable shape

工艺规划的最后一个步骤是确定出每一条加热路径所对应的加工工艺参数。在激光弯曲成形中,几何参数确定的条件下,管材弯曲角度主要与激光功率、扫描速度和光斑直径有关。为了确定加工工艺参数,首先应根据两个相邻路径间距中点的斜率计算出每一条扫描路径需要的弯曲角,如表 1 所示。对于给定的某一弯曲角,有多种工艺参数组合可以实现,本文基于对成形管材尺寸、目标型面和成形精度的考虑,选取激光功率  $P = 140\text{ W}$ ,离焦量  $L = 15\text{ mm}$ ,扫描角度  $\theta = 180^\circ$ ,并使其在加工过程中保持不变。

表 1 各扫描路径对应的距离与成形角度

Tab. 1 Bending angle required for every scanning path

Scanning No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distance to free end/mm	9.39	17.57	25.61	33.64	41.82	60.60	68.79	76.82	84.85	93.03
Bending degree/ $^\circ$	5.1	6.4	4.9	6.4	5.1	5.1	6.4	4.9	6.4	5.1

另外,由于管材弯曲后,后续扫描的旋转将使弯曲部分的离焦量和扫描位置发生变化,不能继续进行加工,因此采用由自由端到夹持端的顺序扫描方式进行扫描,使后续扫描不受前面弯曲变形的影响。具体的激光加热路径、加热方向和加热顺序如图 5 所示。

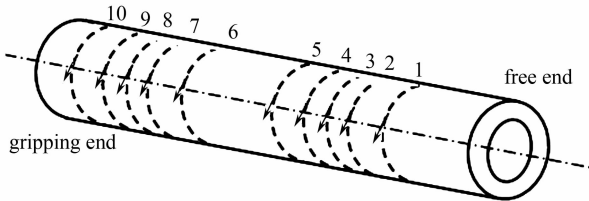


图 5 激光热成形的加热路径、加热方向和加热顺序

Fig. 5 Heating paths, heating direction and sequence of laser tube bending

### 3 管材三维弯曲的扫描路径规划

金属管材激光弯曲不仅有平面弯曲成形,还有发生在空间中的三维弯曲成形,如成形为三维螺旋形。金属管材的三维弯曲涉及的影响因素更多,三维管材的几何变量也更加复杂,可供选择的解决方案也增多。如何取得合理的扫描位置和工艺参数,以形成给定的三维目标形状,成为问题的难点。

#### 3.1 路径规划策略

管为对称截面,如果认为扫描截面上各处的成形角度相同,忽略上下表面的成形偏差,三维弯曲成形型面可用管的轴线形状代替说明,将管材三维成形等效为空间三维曲线问题。忽略加热引起的材料性能变化,同时激光弯曲成形引起的变形主要发生在光斑区域内,而光斑区域外的变形很小可以忽略不计,因此在同一截面扫描产生的弯曲效果可被完全等效代替。管材空间弯曲的方向有两个,三维弯曲可视为两个垂直平面内的曲线成形效果的叠加。

基于几何曲率的管材三维弯曲成形方法,总的工艺规划可分为三步:

1) 将三维成形曲面分解为两个平面曲线。三维成形曲面等效为三维曲线,使用原坐标系,将三维曲线投影到两个垂直平面上,得到两个平面曲线。利用三维曲线方程,推导出两个曲线的投影方程。对不规则曲线可通过数据拟合方法取得。

2) 分别对两个平面曲线进行路径规划,得到扫描路径和加热工艺参数。对分解取得的两个平面曲线,使用平面弯曲路径规划方法,将曲线按极值点和拐点进行分段,根据分段规划扫描路径,基于弯曲角

的大小确定各扫描路径的工艺参数。平面曲线相对三维曲线长度变小,计算直管时各扫描路径到自由端的距离,以保证扫描位置的准确。

3) 组合简化两组路径规划数据。对相同扫描位置可采取简化处理,减少扫描次数;根据距自由端的距离,对扫描顺序进行编排,使扫描由自由端到夹持端顺序进行;确定两组加热线在周向的扫描位置和扫描角度,最终取得三维空间成形所需的加热路径和工艺参数。

#### 3.2 管材三维弯曲成形的分解

管材三维弯曲成形可以等效为空间三维曲线问题,而三维曲线又可视为两个垂直平面内的曲线成形效果的叠加。将三维曲线转化为平面曲线,就可利用管材平面弯曲成形时的路径规划方法对其进行处理。为了验证工艺规划策略的有效性,选取管材外径为 4 mm 的典型复杂三维形状螺旋管进行激光弯曲成形。螺旋管轴线的圆柱坐标系参数方程为

$$R = 30, \Theta = 360t, Z = 240t \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (3)$$

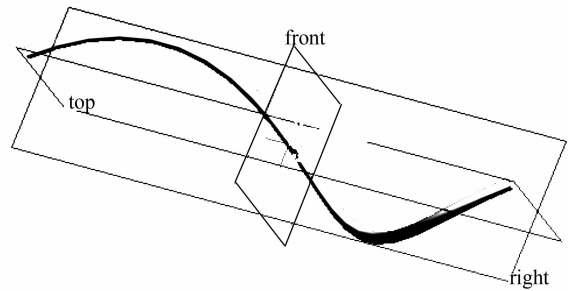


图 6 螺旋管的三维视图

Fig. 6 3D view of spiral

采用图 6 所示坐标系,将螺旋线对  $xoy$  和  $xoz$  两个平面进行投影,得到两条曲线及其方程,如图 7 所示。

#### 3.3 三维形面投影面内的扫描路径规划

令

$$f_1(x) = 30\cos\left(\frac{\pi}{120}x\right), \quad (4)$$

$$f_2(x) = 30\sin\left(\frac{\pi}{120}x\right), \quad (5)$$

则  $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$  的一阶导数和二阶导数可以表示为

$$f'_1(x) = -\frac{\pi}{4}\sin\left(\frac{\pi}{120}x\right), \quad (6)$$

$$f''_1(x) = -\frac{\pi^2}{480}\cos\left(\frac{\pi}{120}x\right), \quad (7)$$

$$f'_2(x) = \frac{\pi}{4}\cos\left(\frac{\pi}{120}x\right), \quad (8)$$

$$f''_2(x) = -\frac{\pi^2}{480}\sin\left(\frac{\pi}{120}x\right), \quad (9)$$

令(6)和(7)式分别等于零,可得到曲线  $L_1$  的极值点:  $x = 0 \text{ mm}, 120 \text{ mm}, 240 \text{ mm}$ , 拐点  $x = 60 \text{ mm}$ ,

180 mm。令(8)和(9)式分别等于零,可得到曲线  $L_2$  的极值点:  $x = 60 \text{ mm}, 180 \text{ mm}$ , 拐点  $x = 120 \text{ mm}$ 。

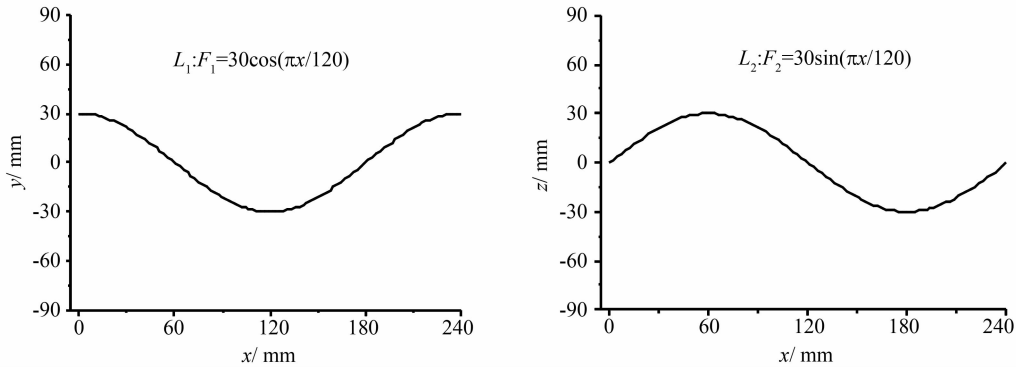


图7 螺旋线的投影曲线及方程

Fig. 7 Projective curves and equations of spiral

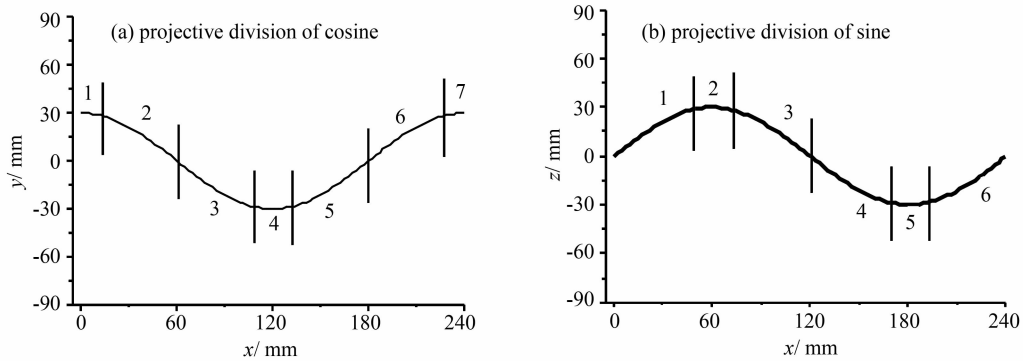


图8 投影曲线的划分

Fig. 8 Results of projective curves division

将曲线  $L_1$  根据余弦曲线的三个极值点和两个拐点,将余弦曲线  $f_1(x)$  分为 7 分段。分别为  $0 \leq x \leq 12$ ,  $12 < x \leq 60$ ,  $60 < x \leq 108$ ,  $108 < x \leq 132$ ,  $132 < x \leq 180$ ,  $180 < x \leq 228$ ,  $228 < x \leq 240$ , 如图 8(a) 所示。将曲线  $L_2$  根据正弦曲线的两个极值点、一个拐点和两个端点,将正弦曲线  $f_2(x)$  分为 6 分段。分别为  $0 \leq x \leq 48$ ,  $48 < x \leq 72$ ,  $72 < x \leq 120$ ,  $120 < x \leq 168$ ,  $168 < x \leq 192$ ,  $192 < x \leq 240$ , 如图 8(b) 所示。为保证弯曲精度,同时提高扫描效率,扫描路径间距在大曲率段沿  $x$  方向设置为 12 mm,在小曲率段设置为 24 mm。

针对目标型面  $L_1$ ,在余弦曲线分段 4 的极值点规划一条扫描路径,分段 1,7 的极值点位于端点,此时无扫描路径。由于此三段曲率较大,扫描路径以 12 mm 为间距进行规划,均作用于分段线上。分段 2,3,5 和 6 是小曲率段,扫描路径以 24 mm 为间距进行规划,在拐点处无扫描路径。针对目标型面  $L_2$ ,在正弦曲线分段 2,5 的极值点各规划一条扫描

路径。由于此两段曲率较大,扫描路径以 12 mm 为间距进行规划。分段 1,3,4 和 6 是小曲率段,扫描路径以 24 mm 为间距进行规划,在拐点处无扫描路径。

具体的激光加热位置如图 9 所示,由于型面有凹凸变化,对同向的弯曲采用相同的扫描标志,不同标志间要将管材旋转  $180^\circ$  后再进行扫描。

由于平面曲线相对三维曲线长度变小,两个投影型面的加热线  $x$  坐标位置和直管上加热线的  $x$  坐标位置不同,为保证扫描位置的准确,需要对两个型面上规划的加热线在直管上的具体位置进行确定。利用 PROE 软件计算出三维螺旋线管轴线的总长度为 305.2 mm,并求出在直管上各加热线距自由端的距离;根据两个相邻路径间距中点的斜率计算出每一条扫描路径需要的弯曲角,结果如表 2,3 所示。选取激光功率  $P = 140 \text{ W}$ ,离焦量  $L = 15 \text{ mm}$  不变,扫描包角  $\theta = 180^\circ$  并保持其在加工过程中不变,根据加工数据库确定出每一条加热路径所对应

的加工工艺参数。

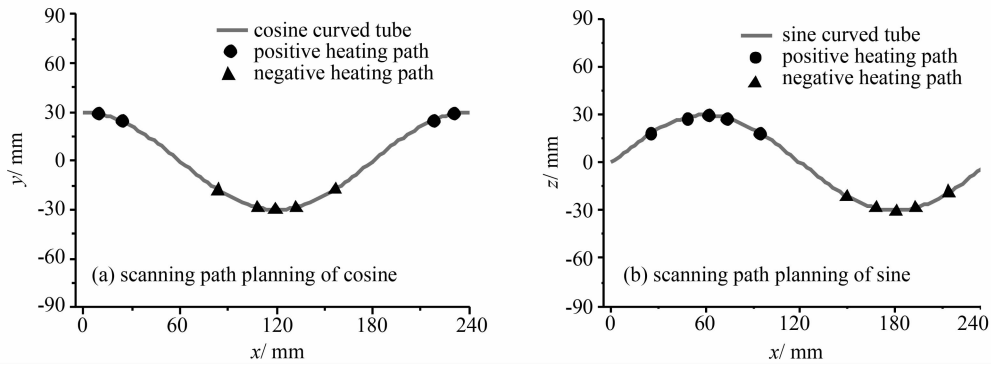


图 9 在投影曲线上的扫描路径规划

Fig. 9 Scanning path planning on projective curves

表 2 各扫描路径对应的  $L_1$  曲线的成形角度

Tab. 2 Bending angle of  $L_1$  curve required for every scanning path

Scanning No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distance to free end /mm	15.26	45.78	106.8	137.3	152.6	167.8	198.4	259.4	289.9
Bending degree/ (°)	17.5	11.9	11.9	17.5	14.1	17.5	11.9	11.9	17.5

表 3 各扫描路径对应的  $L_2$  曲线的成形角度

Tab. 3 Bending angle of  $L_2$  curve required for every scanning path

Scanning No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distance to free end/mm	30.52	61.04	76.30	91.56	122.1	183.1	213.6	228.9	244.1	274.7
Bending degree/ (°)	11.9	17.5	14.1	17.5	11.9	11.9	17.5	14.1	17.5	11.9

### 3.4 管材三维成形的二维扫描路径组合

对所得两组路径规划数据进行组合。此两组数据没有重合的扫描位置,无需进行简化。根据各加热线距自由端的距离,对扫描顺序进行编排,使扫描由自由端到夹持端顺序进行。两组加热线除在轴向方向上扫描位置不同外,在周向上的扫描位置也不相同,  $L_1$  为从  $x$  轴负向扫描  $180^\circ$  到  $x$  轴正向,  $L_2$  为从  $y$  轴正向扫描  $180^\circ$  到  $y$  轴负向。管材三维成形所需的具体激光加热路径、加热方向和加热顺序如图 10 所示。

## 4 实验验证

实验采用 AISI304L 不锈钢管材,管径为 4 mm,壁厚为 1 mm,长 100 mm(平面弯曲)和 200 mm(三维弯曲)。所用设备为 JK701H 型 Nd:YAG 固体激光器,工作模式为焊接模式,激光波长为 1.06  $\mu\text{m}$ ,输出功率为 0~650 W,脉冲宽度为 0.5~20

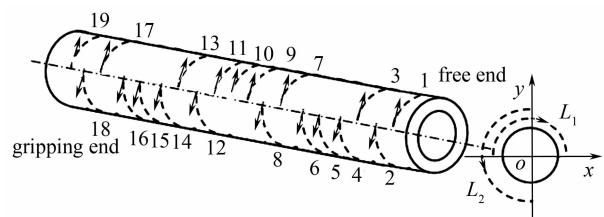


图 10 三维成形的加热路径、加热方向和加热顺序

Fig. 10 Heating paths, heating direction and sequence of 3D bending

ms,脉冲重复频率为 0.2~500 Hz 连续可调。采用自备的 CCD 监视系统检测弯曲角度。实验系统示意图如图 11 所示。

图 12 和 13 分别为管材平面弯曲和管材三维弯曲的最终成形结果。针对弯曲螺旋形样件特征参数螺旋升角和外圆直径,进行测量对比。三维目标管型的螺旋升角为  $49.62^\circ$ ,而实验中所得的三维螺旋

管测得其螺旋升角为  $48.98^\circ$ , 与目标管形进行对比存在误差, 相对误差为  $1.29\%$ ; 同时, 测得其轴向方向投影的外圆直径为  $29.6\text{ mm}$ , 而目标管形的轴向方向投影为  $30\text{ mm}$ , 其相对误差为  $1.3\%$ , 因此可以

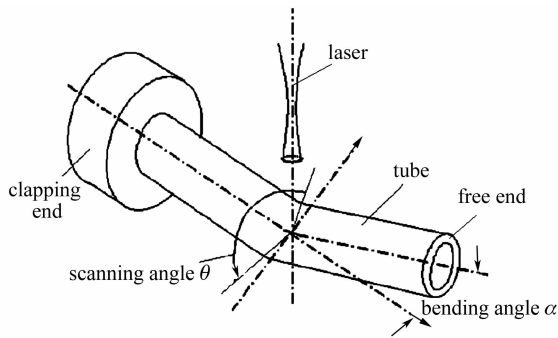


图 11 金属管材激光弯曲示意图

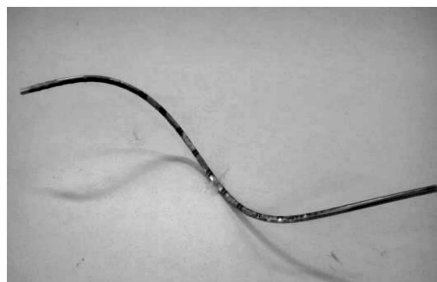
Fig. 11 Sketch map of laser bending tube

看出实验中所得的弯曲结果与目标管形两者基本吻合, 说明此路径规划方法有效。实验做了一个周期的三维螺旋管弯曲, 其他长度的三维螺旋管弯曲可以按此周期弯曲的方法继续循环进行。



图 12 金属管材激光平面内弯曲实验结果

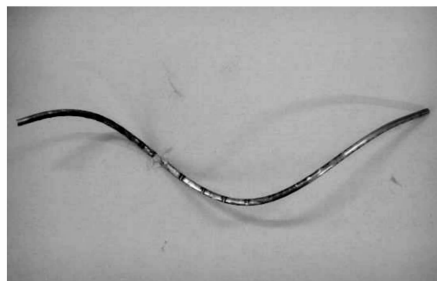
Fig. 12 Experimental result of two-dimensional laser bending metal tube



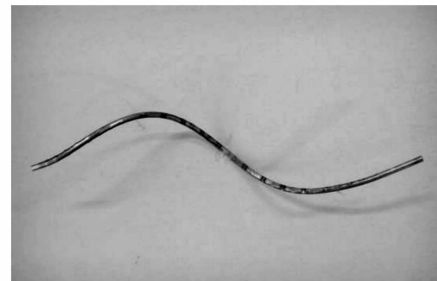
(a) experimental result of 3D bending



(b) bending result of projection from axis direction



(c) bending result of projection from xoy plane



(d) bending result of projection from xoz plane

图 13 金属管材激光三维弯曲实验结果

Fig. 13 Experimental results of 3D laser bending metal tubes

造成上述误差的原因主要是加工数据库不完善, 不能对给定角度取得理想的工艺参数, 同时每条加热路径均为多次扫描, 扫描次数与弯曲角并非呈精确的线性关系; 激光扫描时管材需要旋转, 管的初始弯曲对成形效果影响较大; 对管材形状预测是在理想状态下得到的, 而实验结果受加热时产生的残余应力的影响。

## 5 结论

1) 对直线管材分别进行平面内弯曲成形和空间螺旋形弯曲成形, 研究了激光弯曲成形扫描路径规

划策略。在平面弯曲成形扫描路径规划基础之上, 利用管截面对称的特性, 将管材空间三维成形曲面进行投影处理, 转化为两个平面弯曲效果的叠加, 分别取得平面内管材的扫描路径后进行组合和修正, 从而获取三维弯曲成形的扫描路径信息。对修正问题, 一方面完善弯曲参数数据库, 另一方面根据实验试样的测量结果和理论目标管形的加工误差, 采用相同方法进行二次扫描加工。

2) 由实验试样的测量结果和理论目标管形的弯曲误差, 可得螺旋升角的相对误差为  $1.29\%$ , 外圆轮廓直径的相对误差为  $1.3\%$ , 结果表明此路径

规划方法是有效的。

3)对给定的任意管材弯曲型面,合理选择投影面,只要投影面内的曲线没有重合现象,均可用本文的路径规划方法进行扫描成形。

### 参 考 文 献

- 1 Yang He, Lin Yan, Sun Zhichao. Advanced plastic processing technology research and development geared to the 21st century [C]. China Science Association, the Second Academic Collection. Beijing: Science and Technology Publishing House, 2000: 745~746  
杨合,林艳,孙志超.面向21世纪的先进塑性加工技术与管成形研究发展[M].中国科学协会第二届学术年会文集.北京:科学技术出版社,2000:745~746
- 2 Zhao Zisong, Yang He, Zhan Mei. State of the art of the bending process and research of tube [J]. *Metal Forming Process*, 2002, **20**(2):1~6  
赵臻淞,杨合,詹梅.管材弯曲工艺研究新进展[J].金属成形工艺,2002, **20**(2):1~6
- 3 Peng Zhihui, Gan Weiping. Development and application of aluminum material used for automotive industry [J]. *Automobile Process and Material*, 1999, (4):1~6  
彭志辉,甘卫平.汽车工业用铝材的开发与应用[J].汽车工艺与材料,1999, (4):1~6
- 4 Guan Yanjin, Sun Sheng. Study on buckling mechanism of laser bending of the sheet metal [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(1):1~4  
管延锦,孙胜.板料激光弯曲的屈曲机理的研究[J].激光技术,2001, **25**(1):1~4
- 5 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Cao Xiansuo *et al.*. Analysis of silicon surface profile of pulsed laser bending processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1589~1593  
吴东江,马广义,曹先锁等.脉冲激光弯曲成形技术中硅片表面的形貌分析[J].中国激光,2007, **34**(11):1589~1593
- 6 Liu Shunhong, Hu Qianwu, Zhou Longzao *et al.*. Investigation on microstructure and property of laser bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1050~1053  
刘顺洪,胡乾午,周龙早等.激光弯曲成形 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的组织及性能研究[J].中国激光,2002, **A29**(11):1050~1053
- 7 Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqun *et al.*. Study on relationship between material properties and bending angles in laser forming process of sheet metals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):499~504  
管延锦,孙胜,赵国群等.材料性能参数与板料激光弯曲成形角度的相关性研究[J].中国激光,2004, **31**(4):499~504
- 8 Guan Yanjin, Sun Sheng, Zhao Guoqu *et al.*. Study on influence of process parameters on laser tube bending [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **17**(10):1~4  
管延锦,孙胜,赵国群等.工艺参数对管材激光弯曲成形影响规律的研究[J].中国机械工程,2006, **17**(10):1~4
- 9 N. Hao, L. Li. An analytical model for laser tube bending [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 2003, **208-209**(1):432~436
- 10 Hsieh Hom Shen, Lin Jehnming. Study of the buckling mechanism in laser tube forming [J]. *Optics and Laser Technology*, 2005, **37**(5):402~409
- 11 Wenchuan Li, Y. Lawrence Yao. Laser bending of tubes: mechanism, analysis and prediction [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, **123**:674~681
- 12 Liu Shunhong, Fang Xiong. Experiment investigation on rules of laser tube bending [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(4):340~343  
刘顺洪,方熊等.管材激光弯曲规律的试验研究[J].激光技术,2004, **28**(4):340~343
- 13 Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong *et al.*. Simulation on influence of scanning passes during laser bending of steel plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1721~1725  
裴继斌,张立文,张全忠等.扫描次数对钢板激光弯曲成形影响的模拟[J].中国激光,2007, **34**(12):1721~1725