

文章编号: 0258-7025(2010)02-0586-07

# 双曲率复杂型面激光热成形工艺规划研究

石永军<sup>1</sup> 刘衍聪<sup>1</sup> 姚振强<sup>2</sup> 胡俊<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国石油大学机电工程学院, 山东 东营 257061; <sup>2</sup> 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘要** 在实际工业生产中,许多构件的表面是由双曲面构成的,因此,研究复杂型面激光热成形加工工艺规划策略具有重要的现实意义。然而,作为一种无模成形工艺,激光加热路径和目标型面没有直接联系,这增加了工艺规划的难度。为了实现双曲率面构件的高精度激光热成形,基于交叉加热与板材预弯曲对塑性应变场影响的研究,提出一种新的工艺规划策略。该方法基于板材成形所需要的应变场,分别建立平板和预弯曲板工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库以及上下表面应变比基本关系数据库,采用上下表面分别加热进行双曲率面工艺规划。实验结果表明,利用该加工策略,激光热成形面与目标曲面形状基本吻合。

**关键词** 激光技术;热成形;双曲率面;路径规划;工艺参数

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0586

## Study on Processing Strategy of Complicated Doubly Curved Surface in Laser Forming

Shi Yongjun<sup>1</sup> Liu Yancong<sup>1</sup> Yao Zhenqiang<sup>2</sup> Hu Jun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Mechanical & Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)  
(<sup>2</sup> School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** In engineering applications, some components are composed of doubly curved shapes. It is of significance for investigations on processing strategy of complicated doubly curved surface in laser forming. However, as a dieless forming technique, laser heating paths are not necessarily directly related with the desired shape, which raises the degree of difficulty for process planning. To acquire high accurate shape with doubly curved in laser forming, a new design approach is proposed to determine path planning and process parameters based on the studies of cross heating and pre-bend in this paper. Firstly, a strain field required to obtain a desired shape from a planar shape is obtained. Secondly, the heating paths are planned in the top and the bottom surface separately. Thirdly, the basic relationship databases of the flat and curved plate between process parameters and residual plastic strain and between process parameters and strain ratio of the top and bottom surfaces are built, respectively. Finally, the heating condition is determined according to the required strain field and the basic relationship databases. The experimental result based on the above process strategy shows that the laser forming shape is approximately consistent with the desirable shape.

**Key words** laser technique; thermal forming; doubly curved surface; path planning; process parameter

## 1 引言

激光热成形作为一种新型的无模、柔性成形工艺,正引起人们的广泛重视,初步的工业应用也显示出该技术具有广阔的应用前景和巨大的开发潜力<sup>[1~3]</sup>。在实际工业应用中,激光热成形件不仅包含简单的 V 型折弯件,而且还包含复杂的双曲率型面<sup>[4~8]</sup>,例如,船体的外壳(尤其是艏部和艉部)、汽

车车门、飞机机身等,因此,研究复杂型面激光热成形加工工艺规划策略具有重要的现实意义。然而,激光热成形并不像有模成形那样容易确定工艺条件,需要针对不同目标型面对成形过程进行合理工艺设计与规划,设计出扫描路径,选取合适的成形机制与工艺参数。由于激光热成形是逐步累积成形,前面激光扫描产生的温度场与变形场对下一次扫描

收稿日期: 2009-04-01; 收到修改稿日期: 2009-04-30

基金项目: 上海市科委重大攻关项目(04dz11002)和山东省自然科学基金(Y2007F76)资助课题。

作者简介: 石永军(1973—),男,博士,副教授,主要从事激光热加工工艺、汽车设计与制造理论等方面的研究。

E-mail: syjgl@126.com

产生的影响规律复杂。此外,像所有的反求问题一样,给定目标型面,通常扫描路径和加工工艺参数有多解,这给激光热成形工艺规划提出了挑战。

为了实现双曲率型面金属板材的激光热成形,Edwardson 等<sup>[9]</sup>采用了 5 种扫描方法对低碳钢 CR4 平板进行了实验研究。研究表明,利用合理的工艺参数配合同心的“跑道”型扫描路径,可成形出轴对称的马鞍形曲面,但该方法过于依赖于经验,且成形精度较低,不适用于自动化成形装备的开发。Liu 等<sup>[10]</sup>提出了基于微分几何与优化获得双曲率面应变场的方法,但该方法只考虑了板材中面的应变,而忽视了厚度方向的弯曲应变。为了便于实现热应力成形加工过程的自动化,提高不同厚度板材双曲率面的成形精度,本文基于板材成形所需要的应变场,提出采用上下表面分别加热进行双曲率面工艺规划的方法,并通过实验对工艺规划策略进行了验证。

## 2 总体规划策略

总的规划策略主要包括激光束扫描路径规划和

加工工艺参数选择两大部分,如图 1 所示。首先,基于弹性大变形有限元方法将目标型面挤压成平面,获得上下表面  $x$  方向和  $y$  方向应变场,并对激光热成形中板材上下表面交叉加热时应变场的相互影响以及板材预弯曲对塑性应变场的影响进行了研究。在此研究基础上,规划激光束在板材下表面加热,将板材翻转后再进行上表面加热。考虑到激光热成形过程中最大压缩应变发生在垂直于扫描路径方向,上表面加热路径垂直于  $y$  轴方向,下表面加热路径垂直于  $x$  轴方向。为了便于实现加工过程的自动化,在加工工艺参数确定时,基于目标型面、板材尺寸和成形精度等实际考虑决定光斑直径并在整个加工过程中保持不变。基于有限元仿真分别建立平板条件下和预弯曲板材条件下两个工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库,并且每一基本关系数据库必须包含两部分,一部分是工艺参数与激光束辐射面平均塑性应变基本关系数据库,另一部分是工艺参数与上下表面应变比基本关系数据库,这样就可以确定出唯一的激光功率与扫描速度同时满足上下表面压应变要求。

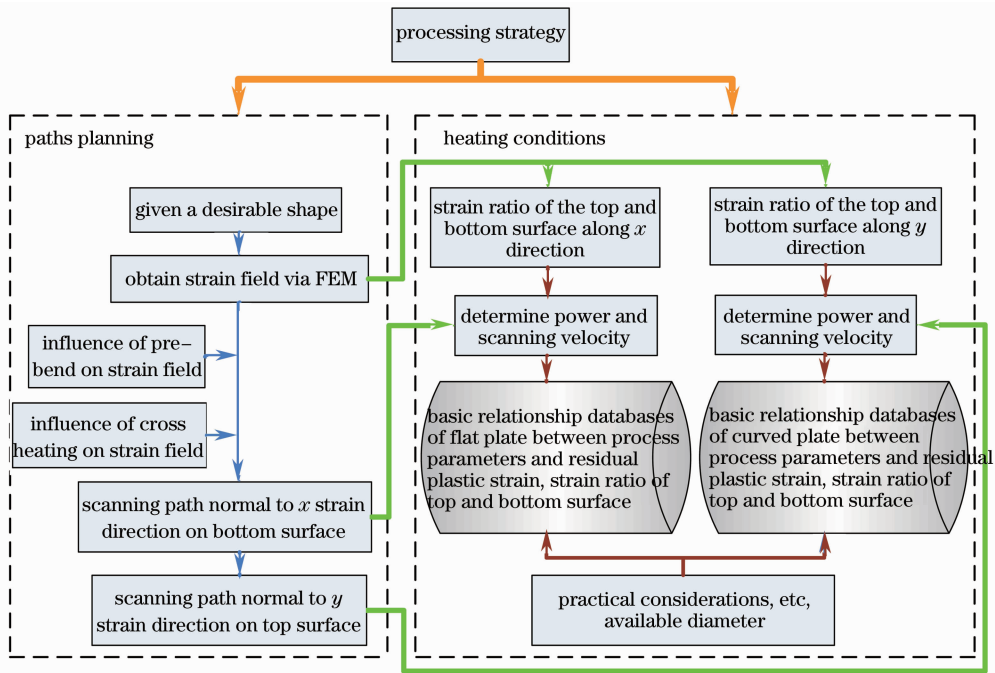


图 1 双曲率复杂型面加工工艺策略

Fig. 1 Overall strategy for double curved surface in laser forming

## 3 交叉加热与板材预弯曲对塑性应变场的影响

根据工艺规划总体策略,激光束需要先在板材下表面沿  $x$  方向进行加热,然后再沿  $y$  方向进行上

表面加热,加热路径在不同表面产生交叉。由于下表面残余塑性应变场在上表面进行加热以前已经形成,在交叉区域上表面加热会对下表面的应变场产生一定影响。为了分析上下表面交叉加热时上表面加热对下表面应变场的影响,分别在板材上下表面

各选取一条加热路径进行交叉加热。具体的加热路径如图 2 所示,首先激光束在板材下表面沿加热线 1 扫描,然后将工件翻转,激光束在板材上表面沿加热线 2 扫描,实线表示加热线位于板材上表面,虚线代表加热线位于板材下表面,其中,选取激光功率为 800 W,扫描速度为 25 mm/s,光斑直径为 6 mm,板材尺寸为 50 mm×50 mm×1.92 mm。图 3 为激光束仅沿加热线 1 扫描时与交叉扫描后板材下表面  $y$  向塑性应变分布的仿真结果比较,为了便于比较,图中交叉扫描后应变为下表面  $y$  向应变减去第二条加热线单独加热时在板材下表面产生的  $y$  向应变。从图中可以看出,在板材上表面沿加热线 2 进行加热对下表面已经形成的  $y$  向塑性应变分布影响不大,因此,在路径规划时可以忽略上表面加热对下表面应变场的影响。

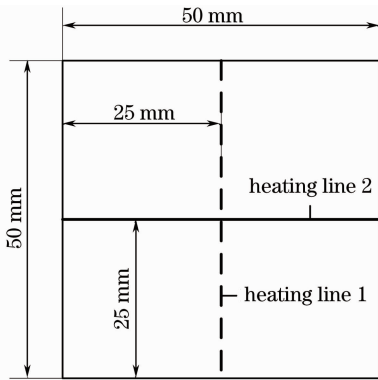


图 2 激光交叉扫描路径

Fig. 2 Cross heating paths of laser forming

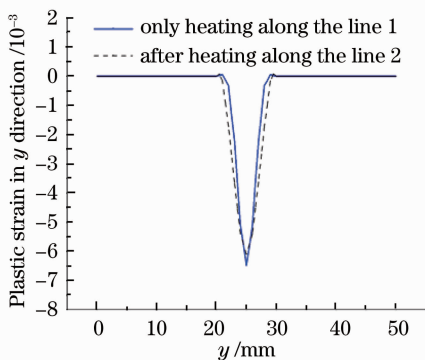


图 3 交叉加热对下表面塑性应变的影响 ( $x=25$  mm)

Fig. 3 Effect of cross heating on the plastic strain of bottom surface ( $x=25$  mm)

当激光进行下表面加热时,板材已经产生了一定的弯曲变形,曲率越大,板材截面模量越大,使得变形抗力增大,弯曲变形减小,因此,需要分析预弯曲对板材塑性变形场的影响。选取弯曲半径为 626 mm,尺寸为 100 mm×100 mm×1.92 mm 的预

弯曲板,分析在相同工艺参数条件下其塑性应变场与平板的差异,其中激光功率为 600 W,扫描速度为 20 mm/s,光斑直径为 6 mm。从图 4 可以看出,预弯曲板与平板在相同工艺参数条件下,由于加热区域的机械约束不同产生不同的塑性应变,平板  $y$  向塑性应变明显比预弯曲板大。因此,基于平面板材建立的工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库已不适用于板材上表面的加热,因此,在确定上表面加工工艺参数时必须建立预弯曲板材工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库。

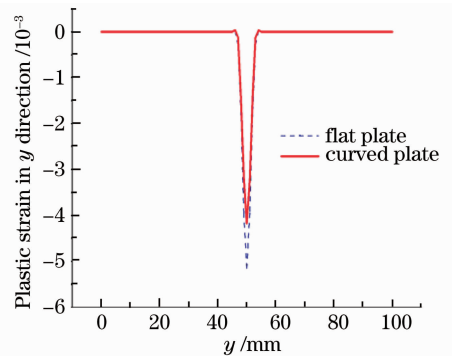


图 4 预弯曲板和平板  $y$  向塑性应变场比较 ( $x=25$  mm)

Fig. 4 Comparison of the plastic strain in  $y$  direction between the curved and the flat plate ( $x=25$  mm)

#### 4 目标型面应变场分析

为了规划加热路径和选择合适的加工工艺参数,首先要确定从平面发展为目标型面需要的应变场。基于 ANSYS 有限元软件的大变形弹性有限元接触分析将目标曲面挤压为平面,从而确定目标板材激光热变形所需要的应变场<sup>[11]</sup>。

为了验证扫描策略的有效性,选取板材尺寸为 100 mm×100 mm×1.92 mm 的典型双曲率马鞍面进行激光热成形。首先基于三次样条扫描曲面先建立板材中面,然后沿厚度方向拉伸生成双曲率面板材实体模型。扫描曲面被定义为

$$S(x, y) = A(x) + B(y), \quad x, y \in [0, 100],$$

$A(x)$  通过点  $(0, 0, 0)$ ,  $(50, 0, 2)$  和  $(100, 0, 0)$  定义,  $B(y)$  通过点  $(0, 0, 0)$ ,  $(0, 50, -2)$  和  $(0, 100, 0)$  定义,采用映射网格划分以形成规则的网格,建立目标型面有限元实体模型。将曲面板材挤压为平面后,得到激光热变形所需要的应变场,板材上下表面  $x$  方向和  $y$  方向应变分布如图 5 所示。从图 5 可以看出,下表面  $x$  方向应变大于上表面  $x$  方向应变,上表面  $y$  向应变大于下表面  $y$  向应变,并且,上表面  $x$  方向应变分布与下表面  $y$  向应变分布相似,下表面  $x$

方向应变分布与上表面  $y$  向应变分布相似。

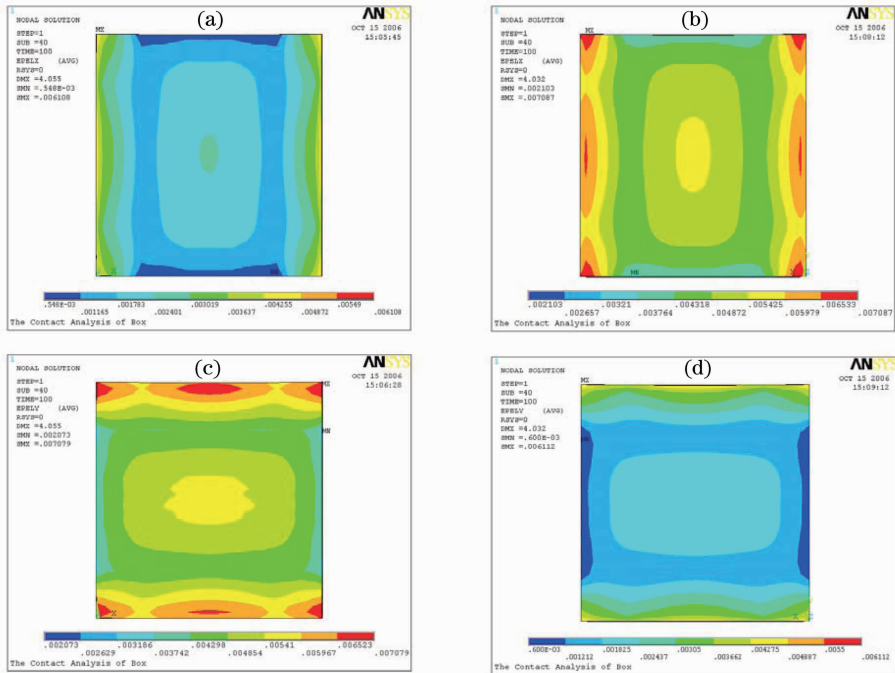


图 5 应变分布轮廓图。(a) 上表面  $x$  方向应变分布;(b) 下表面  $x$  方向应变分布;  
(c) 上表面  $y$  方向应变分布;(d) 下表面  $y$  方向应变分布

Fig. 5 Strain contour diagrams. (a) strain distribution in  $x$  direction on the top surface; (b) strain distribution in  $x$  direction on the bottom surface; (c) strain distribution in  $y$  direction on the top surface ; (d) strain distribution in  $y$  direction on the bottom surface

### 5 路径规划与工艺参数确定

将曲板挤压成平板过程与激光热成形的变形过程相反,该过程产生的拉应变就是激光热成形中需要产生的压应变,如果利用多条扫描路径将需要的应变场复制,就可成形目标曲面。然而,由于每次扫描仅能影响加热区域的应变分布以及应变场分布的不均匀性,因此很难在上表面通过多次扫描精确复制整个金属板材的应变场。考虑到激光热成形在上表面加热对下表面已经形成的应变场影响不大,将扫描路径分别布置在板材上下表面,通过下表面加热形成  $x$  方向应变,通过上表面加热形成  $y$  方向应变。由前面的分析可知,在激光热成形过程中最大压应力发生在扫描路径的垂直方向,因此,下表面加热路径垂直于  $x$  轴方向,上表面加热路径垂直于  $y$  轴方向。为了提高板材的成形精度,应取较小的路径间距,但扫描路径太密将大大降低板材的成形效率。激光扫描引起的塑性应变主要集中在光斑直径内,为了避免两条相邻扫描路径产生的应变场相互干扰,令相邻加热线间距  $d_i$  略大于光斑直径。

规划好扫描路径后,下一步是需要确定出每一

条加热路径所对应的加工工艺参数。从前面的路径规划可知,激光束首先在板材下表面垂直于  $x$  轴方向加热,然后在板材上表面垂直于  $y$  轴方向加热,由于在上表面加热前板材已经形成了一定的弯曲曲率,在建立数据库时要分别建立平板条件下和预弯曲板材条件下两个工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库,其中预弯板材的弯曲曲率按照目标型面确定。在建立数据库时,由于激光加热板材产生的垂直于扫描路径方向应变远大于其他两方向的应变,所以只考虑该方向塑性应变。为了便于实现生产自动化,保持光斑直径不变,基于目标型面、板材尺寸和成形精度等实际考虑选取光斑直径为 6 mm。另外,从应变场分布可以看出板材上下表面均存在收缩变形,获得目标型面既需要平面应变也需要弯曲应变。在光斑直径不变的条件下,通过调整激光功率和扫描速度,可以使得激光热成形应变场同时满足上下表面应变场要求。因此,每一基本关系数据库必须包含两部分,一部分是工艺参数与激光辐射面平均塑性应变基本关系数据库,另一部分是工艺参数与上下表面应变比基本关系数据库,这样就

可以确定出唯一激光功率与扫描速度同时满足上下表面压应变要求。基于有限元数值分析建立平板与

预弯曲板工艺参数与平均塑性应变基本关系数据库,分别如图 6 和图 7 所示。

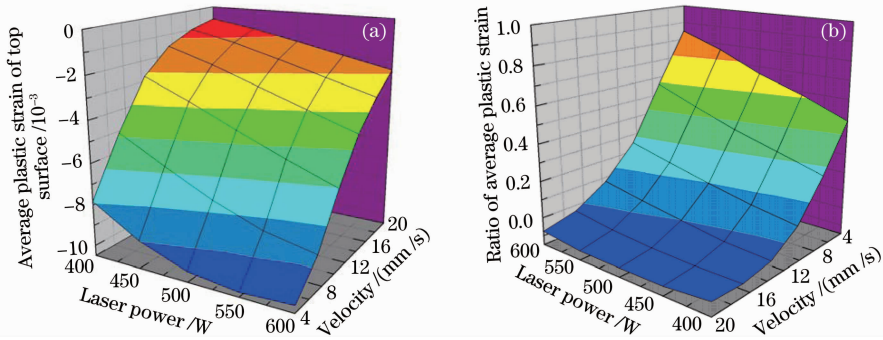


图 6 平板工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库。(a) 上表面平均塑性应变; (b) 应变比(下表面平均塑性应变/上表面平均塑性应变)

Fig. 6 Basic relationship of flat plate between process parameters and plastic strain. (a) average plastic strain of top surface; (b) ratio of strain (average plastic strain of bottom surface / average plastic strain of top surface)

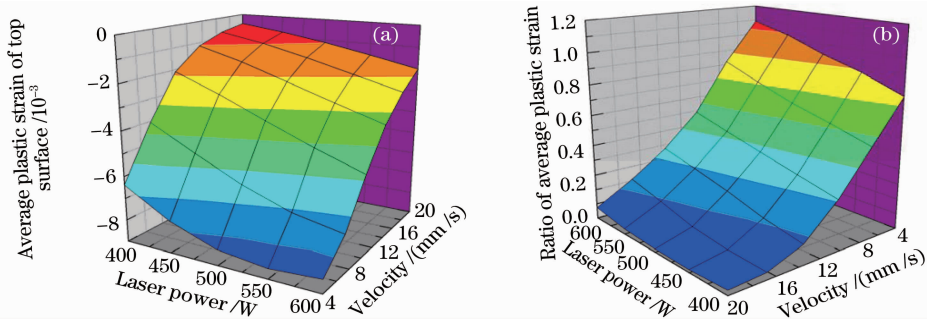


图 7 预弯曲板工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库:(a) 上表面平均塑性应变; (b) 应变比(下表面平均塑性应变/上表面平均塑性应变)

Fig. 7 Basic relationship of pre-curved plate between process parameters and plastic strain. (a) average plastic strain of top surface; (b) ratio of strain (average plastic strain of bottom surface / average plastic strain of top surface)

另外,为了确定出每一条加热路径的工艺参数,需要对激光束辐射面与上下表面应变比的变化规律进行分析,根据前面的计算结果,下表面  $x$  方向应变与上表面  $y$  方向应变分布如图 8 所示。从图 8 中可以看出,下表面  $x$  方向应变与上表面  $y$  方向应变分布在加热起始端与加热终止端外沿加热路径变化不大,与激光热成形产生的变形也具有相似的应变分

布,即:由于受温度分布与机械约束力的影响,加热起始与终止端相对于其他部分应变较小,在加热起始端与加热终止端外,沿加热路径方向上下表面应变比变化也不大,因此,整条扫描线可以采用相同的激光功率与扫描速度。对于其他复杂曲面成形,如果沿扫描路径应变比与表面应变变化较大,则需要分段确定出加工工艺参数。

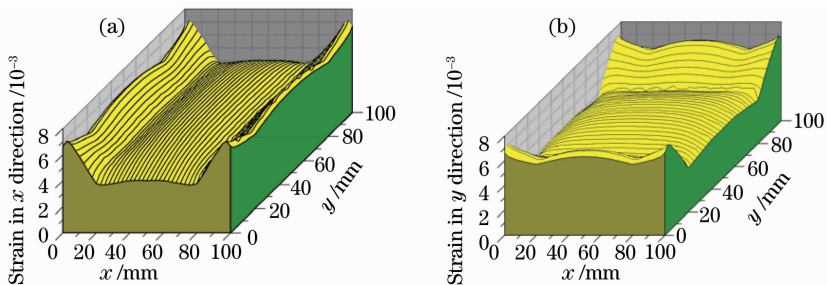


图 8 应变分布。(a) 下表面  $x$  方向应变;(b) 上表面  $y$  方向应变

Fig. 8 Strain distributions. (a) strain distribution of the bottom surface in  $x$  direction; (b) strain distribution of the top surface in  $y$  direction

对于每一条扫描路径,激光加热所产生的上下表面平均应变应满足<sup>[9]</sup>

$$\epsilon_1 = \frac{d_j \epsilon_a}{d}, \quad (1)$$

式中  $\epsilon_1$  为激光成形产生的光斑区域内的平均应变,  $d_j$  为相邻加热线间距,  $\epsilon_a$  为所需应变场相邻扫描路径间的平均应变,  $d$  为光斑直径。根据每一条扫描路径的加热位置、上下表面应变比以及上表面  $y$  方向应变分布与下表面  $x$  方向应变分布, 可从基本关系数据库中反求出所需的加工工艺参数。

### 6 加工策略验证

激光热成形实验测试平台主要由 CO<sub>2</sub> 连续激光器、四轴联动三维数控平台和工控机组成, 其中 CO<sub>2</sub> 连续激光器最大输出功率为 3 kW。板材选用工程中常用的 st12 钢, 为了防止金属板材表面油垢影响传热, 所有板材均用丙酮进行清洗。另外, 由于选用的 CO<sub>2</sub> 激光器产生的激光波长为 10.6 μm, 低碳钢对其吸收率很低, 为了提高激光的吸收系数, 在金属表面均匀涂上一层涂层, 进行黑化处理。金属板材三维曲面采用 KEYENCE 生产的 LK-081CCD 激光位移传感器进行测量。

为了定量评价工艺规划后板材的成形精度, 需要定义一个板材表面成形精度的评价标准<sup>[12]</sup>。为此, 定义 6×6 均匀格栅, 其平面尺寸与目标面相同, 如图 9 所示, 其中  $L$  为板材的长度,  $B$  为板材的宽度。通过比较格栅点处目标面和激光成形面之间的  $z$  向位移差, 定义曲面相似系数  $\delta_e$  来表征目标面与激光成形面之间的相似程度, 令

$$\delta_e = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} d_{ij}^2}{N_T}}, \quad (2)$$

式中  $d_{ij} = (a_{ij} - b_{ij})/b_{max}$ ,  $N_x$  和  $N_y$  分别代表  $x$  方向和  $y$  方向格栅点数目,  $N_T$  为总的格栅点数目,  $a_{ij}$

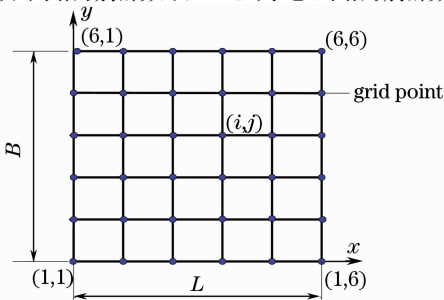


图 9 均匀格栅点

Fig. 9 Uniform grid points

和  $b_{ij}$  分别为激光成形面和目标型面在格栅点  $(i, j)$  处的  $z$  向位移,  $b_{max}$  为目标型面在所有格栅点位置处最大的  $z$  向位移。 $\delta_e$  值越大, 表明成形精度越高, 反之, 则成形精度就越低。

图 10 为金属板材热成形变形曲面实验结果和目标曲面的比较, 从图中可以看出, 利用双曲率复杂曲面加工策略获得的实验结果与目标曲面形状基本吻合。根据 (2) 式, 可以计算出激光热成形曲面相似系数  $\delta_e = 0.934$ , 由此可见, 该加工策略可以实现较高的成形精度。

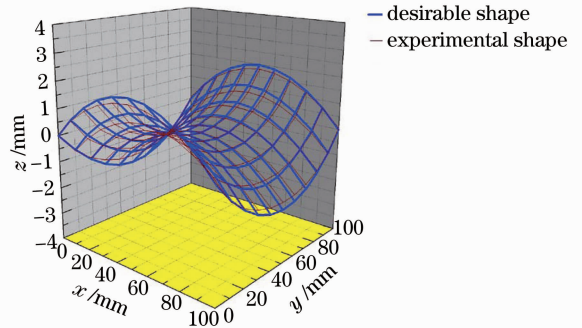


图 10 双曲率面加工策略实验结果和目标曲面比较

Fig. 9 Comparison of the experimental results of laser forming and desired shape

### 7 结 论

1) 板材上下表面交叉加热时上表面加热对下表面已经形成的  $y$  向塑性应变分布影响不大, 因此在路径规划时可以忽略上表面加热对下表面应变场的影响。

2) 预弯曲板与平板在相同工艺参数条件下, 由于加热区域的机械约束不同产生不同的塑性应变, 平板  $y$  向塑性应变明显比预弯曲板大。

3) 提出一种双曲率型面激光热成形工艺规划方法。该方法基于板材成形所需要的应变场, 通过建立平板和预弯曲板工艺参数与残余塑性应变基本关系数据库以及上下表面应变比基本关系数据库, 采用上下表面分别加热实现板材的热成形, 并选用典型的马鞍形双曲率面对该方法的有效性进行了验证。实验结果表明, 激光热成形面与目标曲面形状基本吻合, 曲面相似系数  $\delta_e = 0.934$ 。由此可见, 该加工策略可以实现较高的成形精度。

### 参 考 文 献

1 M. Geiger, F. Vollertsen. The mechanisms of laser forming[J]. *CIRP Annals*, 1993, 42(1): 301~304  
 2 Li Weimin, M. Geiger, F. Vollertsen. Study on laser bending of

- metal sheets[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9): 859~864  
李纬民, 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
- 3 Ji Zhong, Wu Shidun. FEM simulation on laser bending of sheet metal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(10): 953~956  
季 忠, 吴诗惇. 板料激光弯曲成形数值模拟[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(10): 953~956
- 4 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
- 5 Guan Yanjin, Sun Sheng, Luan Yiguo *et al.*. A new analytical model for laser bending[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(4): 483~486  
管延锦, 孙 胜, 栾贻国 等. 板料激光弯曲成形角度的解析研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(4): 483~486
- 6 Shi Yongjun, Yang Min, Yun Pingli *et al.*. Numerical investigation on undesirable deformation of metal plate in laser forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1825~1829  
石永军, 杨 民, 贲平利 等. 金属板材激光热成形非期望变形的数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1825~1829
- 7 Chen Dunjun, Xiang Yibin, Wu Shidun *et al.*. Curved laser bending of titanium alloy sheets and effects of heat radiation on its microstructure and property [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, **37**(6): 643~646  
陈敦军, 向毅斌, 吴诗惇 等. 钛合金板料激光曲线弯曲及热辐射对其组织性能的影响[J]. *金属学报*, 2001, **37**(6): 643~646
- 8 G. X. Yu, N. M. Patrikalakis, T. Maekawa. Optimal development of doubly curved surfaces [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2000, **17**(6): 545~577
- 9 S. P. Edwardson, K. G. Watkins, G. Dearden *et al.*. Generation of 3D shapes using a laser forming technique [C]. Proceedings of ICALEO'2001: Section D, 2001: 603~609
- 10 C. Liu, Y. L. Yao. Optimal process planning for laser forming of doubly curved shapes [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**(1): 1~9
- 11 J. Cheng, Y. L. Yao. Process design of laser forming for three-dimensional thin plates [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**(2): 217~225
- 12 J. S. Lee. Development of automatic marking generation system for plate forming by line heating [J]. *J. Ship Production*. 1996, **12**(4): 247~253