

文章编号: 0258-7025(2008)01-0131-06

正方形薄板激光弯曲三维成形球冠面的技术分析

杨立军 王 扬

(哈尔滨工业大学机械制造及自动化系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 激光弯曲成形是利用激光束的能量修整板材曲率的一种新型柔性无模成形加工方法。为探索激光弯曲三维成形的机制以及成形过程中的物理现象,对 1Cr18Ni9Ti 正方形薄板采用交叉线扫描策略激光弯曲三维成形制备了球冠面,利用显式动态有限元方法分析了正方形薄板在激光扫描过程中的温度、应力、应变、节点加速度与速度以及形变的变化情况,在二维激光成形温度梯度机制基础上探讨了激光弯曲三维成形中存在的物理现象。在扫描过程中,薄板整体的温度随着激光扫描逐渐增加,在任意时刻任意位置的加热都会造成整体薄板应力作用方向和大小改变,应力变化是形成圆周线的趋势,由于扫描路径时空的变化导致正方形薄板四角的变形量有所不同。

关键词 激光技术;激光弯曲三维成形;显式动态积分;球冠面

中图分类号 TN 249;TG 665 **文献标识码** A

Technique of Three-Dimensional Laser Forming of Thin Square Metal Sheet to Spherical Dome

Yang Lijun Wang Yang

(Department of Mechanical Manufacturing and Automation,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Laser forming is a technique of using the energy from a laser beam to modify and adjust the curvature of sheet metals or hard materials. In order to explore the mechanism and physical process of three-dimensional (3D) laser forming of square sheet, spider scanning path was used to transform the thin square 1Cr18Ni9Ti sheet to the spherical dome by 3D laser forming. And dynamic analysis on 3D laser forming was studied. On the base of temperature gradient mechanism of two-dimensional (2D) laser forming, depending on the geometry and the thermo-physical properties of stainless steel 1Cr18Ni9Ti, the mechanism for 3D laser forming of thin square sheet to the spherical dome was developed. This paper discusses the interaction between the moving laser beam and the sheet, the temperature field on the sheet, and the step transition of strain, stress, acceleration, velocity and deformation of the nodes in laser forming. The temperature of the whole sheet is increasing during laser scanning. The heat at any time or position can cause the change of stress which shapes the circles line. But the deformation of the four corners are different from the scanning difference.

Key words laser technique; three-dimensional laser forming; explicit dynamic analysis; spherical dome

1 引 言

金属薄板激光弯曲成形是一种新型柔性无模成形加工方法^[1~5]。主要是通过控制激光的工艺参数及扫描路径诱发热应力自然成形,可以使薄板产生复合弯曲变形,其受热集中且易控制,具有良好的经济性和灵活性,特别适合于小批量及用常规方法难以成形的硬脆材料的成形。航空、航天、造船、汽车等工业领域对薄板无模具激光弯曲成形技术极为关

注,已经逐步尝试将其应用到生产实践中^[5,6]。虽然国内外已经针对不同材料、不同激光器采用直线扫描方式获得的二维薄板弯曲角度进行了大量的研究^[4~8],但是若想在生产实践中充分应用这一新技术,成形具有三维几何特征形状的板材,必须研究激光弯曲三维成形的变形原理,建立激光弯曲三维成形的物理模型。

本文采用交叉线扫描正方形普通不锈钢薄板成

收稿日期:2006-12-01;收到修改稿日期:2007-06-15

作者简介:杨立军(1972—),男,辽宁人,讲师,博士,主要从事激光加工技术以及激光复合加工技术的研究。

E-mail: yljtj@hit.edu.cn

形球冠面,利用显式动态有限元方法分析了正方形薄板在激光扫描过程中的温度场、应力场及变形场的变化情况,并对在变形过程中板材内部各点的加速度、速度以及位移情况进行了研究,在激光二维成形温度梯度机制基础上探讨了激光三维成形中存在的物理现象。

2 激光弯曲三维成形理论基础

相对于激光弯曲二维成形,激光弯曲三维成形过程中存在着更多非线性相互作用的内部温度、应力场以及相变等物理现象,这对三维成形分析中材料的内能及形变能的影响是不能忽略的,因此在金属薄板激光三维成形的分析中需要对温度场和应力场进行耦合分析,即温度场和应力场在分析中同时求解。在分析中假定材料为各向同性,激光束符合高斯分布,以单脉冲跳跃式点热源形式加载到薄板表面,通过细分激光热流密度适应网孔的再分区技术^[9],以方光斑形式代替实际作用的圆光斑。

在有限元分析中采用的 1Cr18Ni9Ti 正方形不锈钢薄板,其尺寸为 60 mm×60 mm×1 mm,采用 8

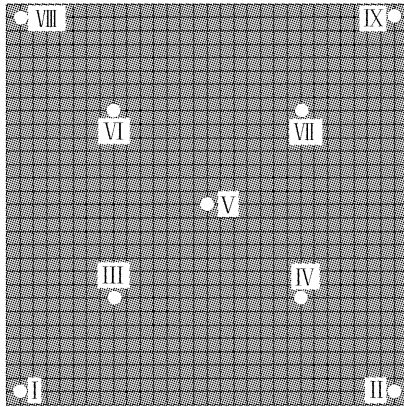


图 1 薄板网格划分
Fig. 1 Domain and mesh

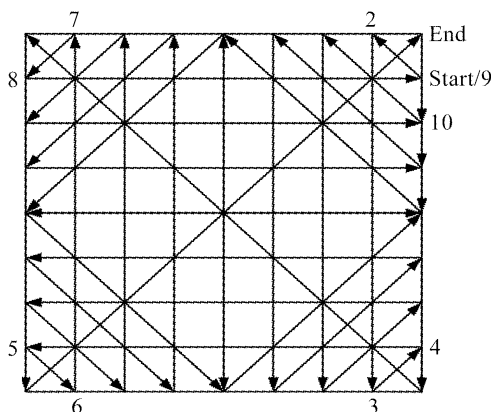


图 2 交叉线扫描路径
Fig. 2 Spider scanning path

节点的正方体实体单元,单元及网格划分如图 1 所示,正方形薄板的交叉线激光扫描路径如图 2 所示,起点从 start/9 点开始沿序号环绕薄板扫描,由外向内逐步推进共四圈交叉线,最后对对角线进行扫描。试样材料的热物性^[10]等如图 3 所示。

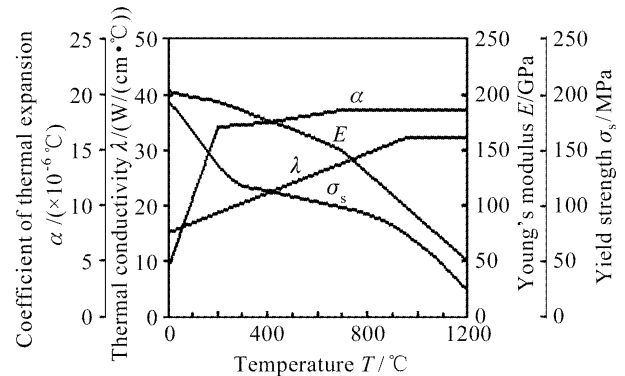


图 3 试样材料的热物理性能

Fig. 3 Physical properties of specimen

2.1 热-结耦合分析

2.1.1 瞬态温度场分析

假如激光束沿着交叉线扫描路径以等速 v 向前移动,对于热-结耦合系统,三维立方体单元的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + Q, \quad (1)$$

式中 ρ, c 为材料的密度及比热容, Q 为内热源功率密度, $k(T)$ 为材料的导热系数, q 为符合傅里叶定律的热流密度, $q = -k(T)\partial T/\partial r$ 。

初始边界条件为 $T = T_0$, T_0 为环境温度,在分析中综合考虑两种换热:1) 薄板表面上的对流换热: $q_c = h_c(T - T_0)$, 其中 h_c 为对流换热系数;2) 薄板与周围环境的辐射换热: $q_r = h_r[(T - T_2)^4 - (T_0 - T_2)^4]$, 其中 h_r 为辐射换热系数, T_2 为温度绝对零点。

在薄板激光弯曲成形温度场分析的数值模拟中,将激光光束假设为理想的基模高斯光束,激光束以热流密度方式加入上表面,其热流密度 q 可表示为

$$q = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

式中 A 为薄板对激光能量的吸收率; P 为激光输出功率; R 为激光有效加热半径; r 为研究点离激光束加热中心的距离。加热时间 t 与运动速度 v , 激光束

的半径 R 存在 $t = 2R/v$ 的关系。其平均热流密度为

$$q_m = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \frac{2rAP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) dr = \frac{0.865AP}{\pi R^2}, \quad (3)$$

则温度场分析非线性有限元控制方程为

$$[C]\{\dot{T}\} + [H]\{T\} = \{Q\}, \quad (4)$$

式中 $[C] = \int_V \rho c [N][N]^T dV$ 为比热容矩阵, $[N]$ 为形状函数矩阵, $[H] = \int_V k [B][B]^T dV$ 为与温度相关的热传导矩阵, $[B]$ 为常规几何点阵, $\{T\}$ 和 $\{\dot{T}\}$ 为节点温度向量和节点温度对时间的导数向量, $\{Q\}$ 为温度载荷, 包括激光束产生的及对流辐射换热的温度载荷。

2.1.2 应力场分析

根据虚功原理, 在 $t + \Delta t$ 时刻系统的能量平衡方程为

$$\int_V \sigma \cdot \delta \epsilon \cdot dV = \int_S q \cdot \delta u \cdot dS + \int_V p \cdot \delta u \cdot dV, \quad (5)$$

式中 V 是表面积为 S 的区域内的实体体积, σ 和 ϵ 为遵循拉格朗日方程的应力和应变张量, q 和 p 为体力和表面压力, δu 为虚位移, 采用有限元方法求解的非线性矩阵为

$$[K]\{\Delta u\} = \{F^a\} - \{F^r\}, \quad (6)$$

式中 $[K] = \int_V [B]^T [D_{ep}] [B] dV$ 为切线刚度矩阵, $[D_{ep}]$ 为弹塑性应力应变矩阵, $\{\Delta u\}$ 为单元节点的位移增量, $\{F^a\}$ 为外作用力, $\{F^r\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV$ 为内部载荷, 可以用牛顿-拉斐森 (Newton-Raphson) 方程求解。

因此, 可以得到薄板激光弯曲成形的热-结耦合分析方程

$$\begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{T}\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [H] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \{F\} \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

2.2 显式动态积分

显式动态积分应用中心差分方法对运动方程进行显式的时间积分, 由一个增量步的动力学条件去计算下一个增量步的动力学条件, 在增量步开始时求解的加速度为

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1} \cdot [F^{(i)} - I^{(i)}], \quad (8)$$

式中 M 为对角矩阵, F 为外加载荷, I 为单元内力, 任何节点的加速度完全取决于节点的质量和作用在节点上的合力, 计算成本非常低。对加速度在时间上进行积分求解速度时采用中心差分算法, 在计算速

度的变化时假定加速度为常数, 应用这个速度的变化值加上前一个增量步中点的速度来确定当前增量步中点的速度

$$\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)}, \quad (9)$$

通常对时间积分然后加上在增量步开始时的位移以确定增量步结束时的位移

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})}, \quad (10)$$

在增量步开始时提供了满足动力学平衡条件的加速度, 得到加速度后, 在时间上显式前推速度和位移, 显式是指在增量步结束时的状态仅依赖于该增量步开始时的位移、速度和加速度, 这种方法精确了积分常值的加速度, 由于不必求解联立方程组, 每一个增量步的计算成本很低, 大部分的计算消耗在单元的计算上。

单元的计算包括确定单元应变和应用材料本构关系确定单元应力, 进一步计算出内力。

3 结果及分析

3.1 加热过程的温度场

选取激光功率 $P = 200$ W, 光斑半径 $R = 2$ mm, 扫描速度 $v = 20$ mm/s 作为分析条件。选取板材上下表面对角线上的一些点 (点的标号如图 1 所示) 作为分析对象, 如图 4 所示。

薄板整体的温度随着激光的扫描而逐渐增加, 在完成扫描路径后由于对流及辐射而降到室温。伴随着激光光斑的移动, 扫描路径上点的温度依次达到峰值, 但是峰值的大小不一样, 主要由于各点的起始温度不同, 在接受激光能量后导致的温度变化也不同, 上表面点的最大温度为 1192 °C, 下表面点的为 867 °C。图 5 所示为加热过程中板材上表面温度变化云图, 由于扫描路径时空的变化, 整体薄板的温度变化是不对称的, 在此过程中诱发的薄板内部的热应力及应变不同。

3.2 成形过程中的应力场和应变场

图 6, 7 是采用激光交叉线扫描正方形薄板时最大基础应力和应变变化分布情况。在任意时刻任意位置的加热都会造成整体薄板的应力应变作用方向和大小的改变。并且方向和大小均不相同, 说明激光能量引发的薄板内部的热应力及热应变是不对称的而且是迅速变化的, 在激光扫描过程中薄板承受着快速多变的应力场作用。在扫描过程中最大基础应力的变化趋势是形成圆周线的趋势, 这种变化趋势最终使得薄板成形为球冠面。

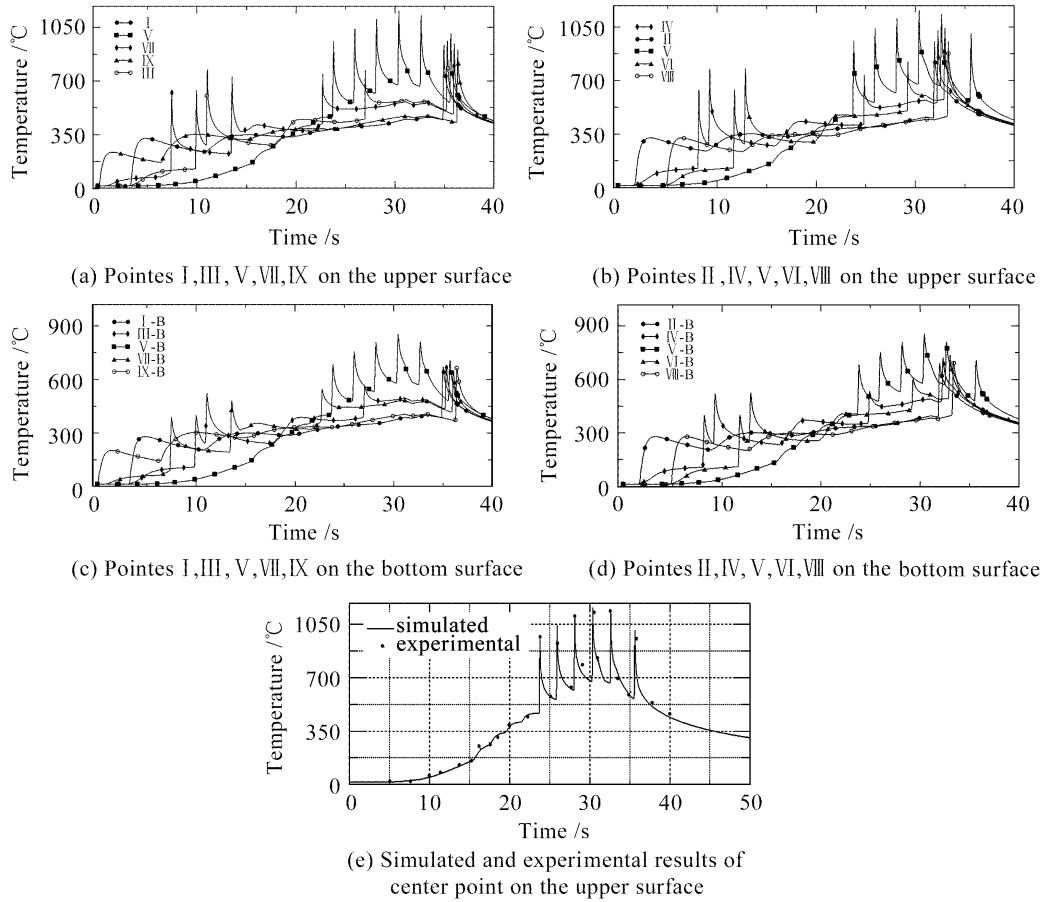


图 4 上下表面一些点的温度变化

Fig. 4 Temperature curves of some points on the upper and bottom surface

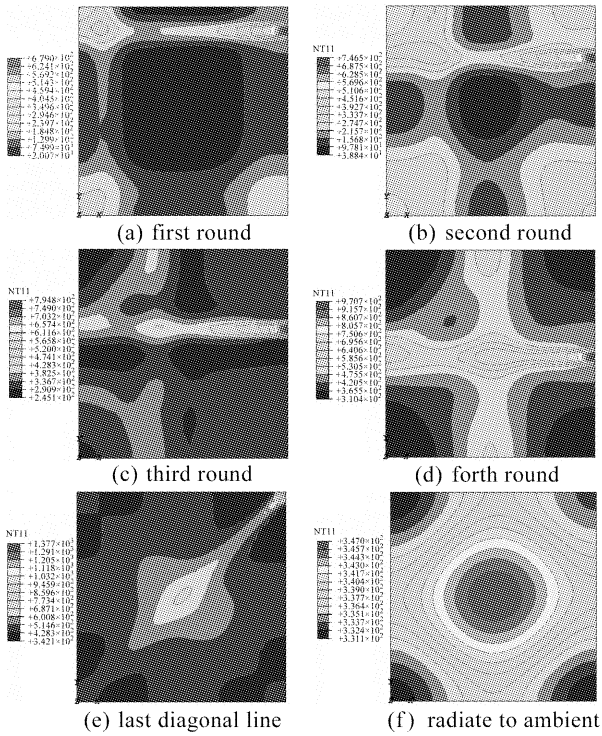


图 5 上表面的温度变化云图

Fig. 5 Simulated varied temperature distribution contours at top surface of square plate

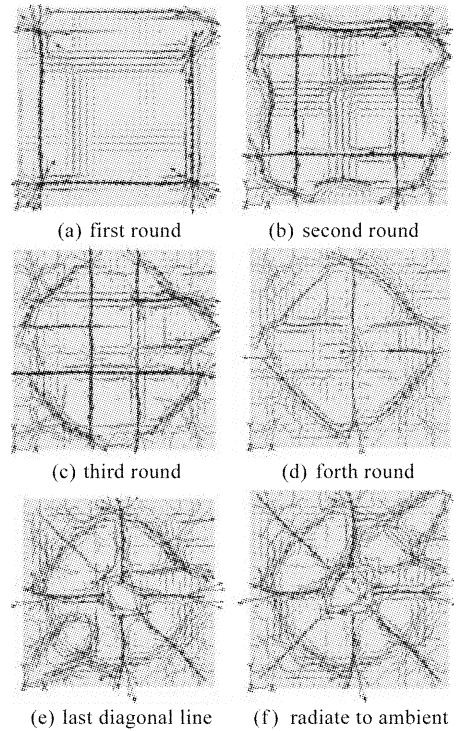


图 6 积分点的最大基础应力变化图

Fig. 6 Simulated the maximum principle stress distribution vectors at integration points during laser forming at top surface of square plate

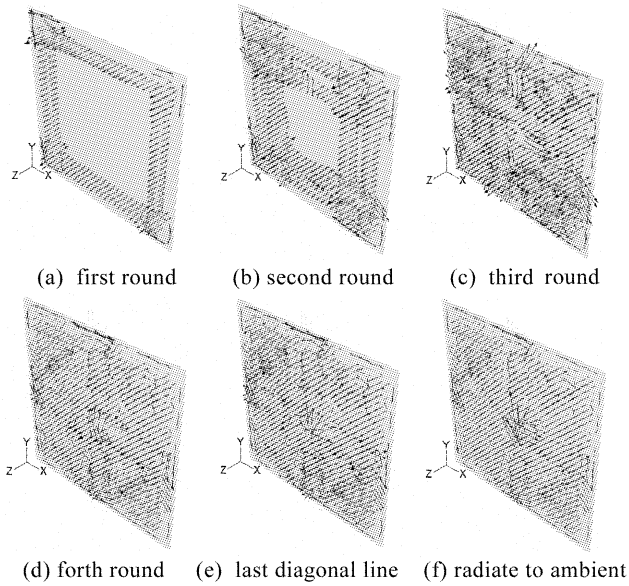


图 7 积分点的最大基础应变变化图

Fig. 7 Simulated the maximum principle strain distribution vectors at integration points during laser forming at top surface of square plate

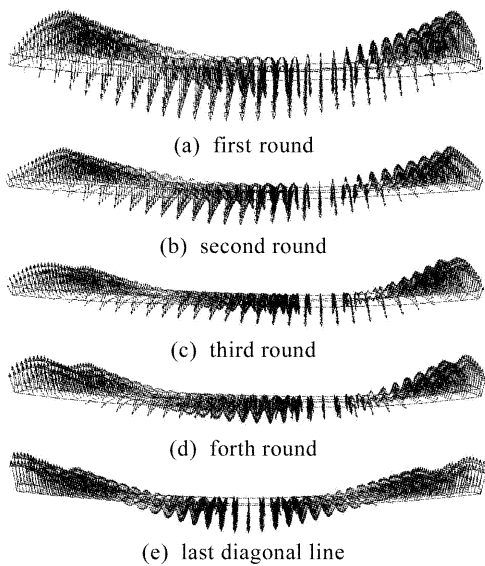


图 8 薄板节点位移矢量侧视云图

Fig. 8 Simulated deformation distribution vectors during laser forming at top surface of square plate

3.3 成形过程中质点的位移变化

图 8 所示为薄板节点位移矢量变化图,图 9 是最后成形的仿真位移云图和实验样品照片。在扫描结束时,位移矢量变化基本上达到了一个球冠面,由于扫描路径时空的变化导致正方形薄板四角的变形量不同,如图 9(b)所示,需要对四角位置进行调整才能够形成完美的球冠面。

图 10 所示为仿真的位移曲线,因为正方形的四个边角产生的是正向的位移,而薄板中心产生的是负向的位移,如果对于变形薄板采用测量变形板中

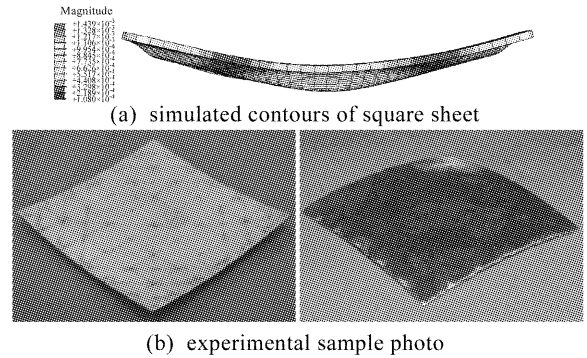
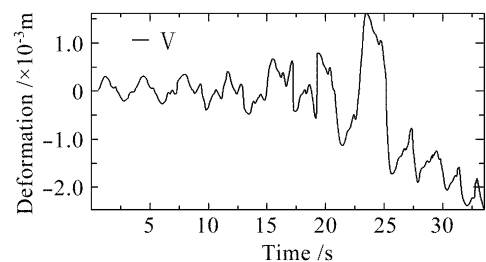
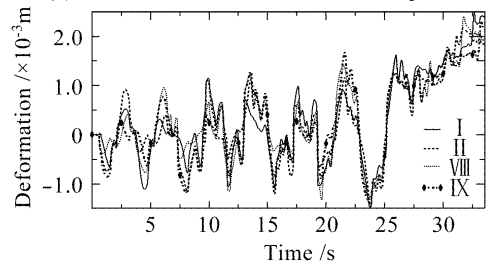


图 9 薄板成形仿真云图与实验样品

Fig. 9 Simulated contours and experimental sample photo of square sheet



(a) Deformation of the center of the square sheet



(b) Deformation of the four corners of the square sheet

图 10 仿真的薄板中心点和四边角点的位移曲线

Fig. 10 Simulated deformation curves of the center and four corners of the square sheet

心高度的方法检测变形的话,仿真的数据成形中心高度大致为5.5 mm,而实验测量数据为6.2 mm,产生一点偏差的原因,是因为在成形仿真过程中对于成形板材边缘效应的处理与实验中具有偏差。

4 结 论

金属薄板的激光弯曲三维成形过程应采用非线性的热-结耦合过程来分析,采用显式动态积分能够较好地解决这一物理过程。

在扫描过程中,薄板整体的温度随着激光的扫描而逐渐增加,随着激光光斑的移动,扫描路径上点的温度依次达到峰值,但是峰值的大小不一样,整体薄板的温度变化不对称。

在任意时刻任意位置的加热都会造成整体薄板的应力作用方向和大小的改变。最大基础应力和应变的变化趋势是形成圆周线的趋势,这种变化趋势

最终使得薄板成形为球冠面。热应力引起的节点加速度矢量变化情况比较复杂,但是速度矢量变化的趋势与位移矢量变化的趋势基本一致。在成形过程中由于扫描路径时空的变化导致正方形薄板四角的变形量有所不同,需要对四角位置进行调整才能够形成完美的球冠面。

参 考 文 献

- 1 M. Geiger. Synergy of laser material processing and metal forming [J]. *Annals of the CIRP*, 1994, **43**(2):563~570
- 2 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
- 3 Shi Jinwei, Li Liqun, Chen Yanbin *et al.*. Numerical simulation of bending properties for sheet metal with different laser source modes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1303~1307
石经纬,李俐群,陈彦宾 等. 不同激光热源模式下薄板弯曲特性数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1303~1307
- 4 E. Abed, S. P. Edwardson, G. Dearden. Closed loop 3-dimensional laser forming of developable surfaces [C]. International Workshop on Thermal Forming, Bremen, 2005. 1~21
- 5 Stuart Paul Edwardson. A study into the 2D and 3D laser forming of metallic components [D]. Liverpool: The University of Liverpool, 2004
- 6 Wenchuan Li, Y. Lawrence Yao. Numerical and experimental study of strain rate effects in laser forming [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, **122**(3):445~451
- 7 Wenchuan Li, Y. Lawrence Yao. Numerical and experimental investigation of convex laser forming process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2001, **3**(2):73~81
- 8 Jin Cheng, Y. Lawrence Yao. Microstructure integrated modeling of multiscan laser forming [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, **124**(2):379~388
- 9 L. J. Yang, Y. Wang, X. N. Jin. Numerical and experimental investigation of deformation field during laser forming of metal sheet [C]. Proc. the 1st ICNFT, Harbin, Harbin Institute of Technology Press, 2004. 247~252
- 10 P. J. Cheng, S. C. Lin. An analytical model for the temperature field in the laser forming of sheet metal [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **101**(1-3):260~267