

多点激光微冲击成形的数值模拟研究

戴毅斌, 樊玉杰, 李明尧, 刘晓宇, 蒋彭胜, 殷开婷

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 为了预测多点激光微冲击成形情况, 采用 ABAQUS 软件建立多点激光微冲击成形的有限元模型, 并对模拟结果进行实验验证; 在此基础上, 研究工艺参数对激光微冲击成形的影响规律。结果表明: 多点激光微冲击成形数值模拟有效地展示了激光冲击区域的三维变形特征, 并且特征路径上表面形貌分布与实验结果吻合。板材最大变形量随激光能量、搭接率和光斑直径的变化规律, 与实验结果一致, 证实采用数值模拟的方法能有效的预测多点激光冲击成形特征, 为多点激光微冲击工艺研究提供指导。

关键词: 激光微冲击; 数值模拟; T2 铜; 多点成形

中图分类号: TN241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0050-07

Study on numerical simulation of multi-micro laser shock forming

Dai Yibin, Fan Yujie, Li Mingyao, Liu Xiaoyu, Jiang Pengsheng, Yin Kaiting

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: In order to predict multi-micro laser shock forming, finite element model of multi-micro laser shock forming was built using ABAQUS software and simulation results were validated by experiment. On this basis, influence law of process parameters on micro laser shock forming was discussed. The results show that numerical simulation of multi-micro laser shock forming effectively shows three-dimensional deformation characteristics of laser impact area, and distribution of surface morphology under characteristic path is consistent with the experimental results. The influence law of sheet maximum deformation with laser energy, overlapping rate and diameter of laser spot conforms to experiment results. It confirms that numerical simulation can correctly predict the morphology of multi-micro laser shock forming, and provide good guidance for research on multi-micro laser shock forming.

Key words: micro laser shock forming; numerical simulation; T2 copper; multi-point forming

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(51405207); 江苏省自然科学基金(BK20140510); 江苏省高校自然科学基金(13KJB460007); 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201206); 江苏科技大学基金(2012JX101J)

作者简介: 戴毅斌(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光冲击微造型方面的研究。Email: bytwo09@163.com

导师简介: 樊玉杰(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光冲击方面的研究。Email: fanyujie1979@163.com

0 引言

随着现代微小型化技术的发展,微器件作为产品的重要组成部分,微器件的可靠性和失效问题将直接影响到整个产品的功能和使用。传统的微加工技术已经不能满足加工更加复杂零件的要求。激光冲击成形的出现,成为解决问题的新途径。激光冲击技术成形压力高,激光与物质相互作用产生的冲击波压力达到 GPa 量级;过程超快,在几十纳秒内完成塑性变形;高应变率,达到 $10^7 \sim 10^9$ 量级;成形无需模具^[1]。通过激光脉冲参数和脉冲轨迹控制板料的成形量和成形形状,节省传统冲压成形中模具制造和调试时间,缩短产品制作周期。

激光微冲击过程中,金属板受到高功率、短脉冲、高应变率的作用,它的成形过程也涉及到接触、材料和几何的非线性等方面,并且金属板材在成形过程中还会有残余应力、微观组织、硬度的变化。由于多点激光微冲击成形过程复杂,如果完全通过实验去探索各因素对微冲击成形的影响情况,将耗费大量的时间、物力和人力资源,同时冲击波与材料作用时的动态反应、塑性变形等都难以用实验方法进行监控与检测^[2],且检测结果也存在着设备和人为误差。有限元分析的出现为解决这些问题提供了有效方法。随着计算机近年来的广泛应用,有限元分析已经成为解决工程问题的重要手段,它不仅计算分析方便,而且可以解决各种线性、非线性和接触等问题^[3]。

文中运用有限元软件 ABAQUS 建立多点激光微冲击成形模型,分析不同工艺参数对激光微冲击纯铜成形的影响,对冲击成形过程中出现的状况进行预测,并进行相同工艺条件下的多点激光微冲击实验,验证冲击变形的数值模拟结果,为激光微冲击成形工艺控制提供指导,节省时间以及人力的支出。

1 多点激光微冲击成形原理

多点激光微冲击成形实际上是在每个单点冲击之间设置一定的间距并重复加载,用来预测激光冲击后材料的塑性变形量以及表面形貌,这对激光冲击成形中的参数优化以及板材变形特征控制非常重要。多点变形可以视为单点不同程度的搭接。轮廓近

似为^[4]:

$$x(r)=X\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right) \quad (1)$$

式中: $x(r)$ 为板材的最大变形量; r 为到光斑中心的距离; X 为光斑中心的最大变形量; a 为凹模半径。

假设在激光冲击成形过程中,板材的运动也满足抛物线规律^[5],即:

$$x(r,t)=X(t)\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right) \quad (2)$$

式中: $x(r,t)$ 为板材运动过程中的位移量,是半径 r 和时间 t 的函数关系式; $X(t)$ 为板材运动过程中光斑中心处板材的位移,是时间的函数关系式。可推导出板材运动过程中的速度函数关系式为^[5]:

$$v(r,t)=\frac{\partial x(r,t)}{\partial t}=\frac{dX(t)}{dt}\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right) \quad (3)$$

多点冲击采取一定的搭接率,由于搭接率的不同,冲击次数就不一样,从而产生的冲击效果差异就很大,前一次的冲击作用将会产生硬化效应,直接影响后一次冲击表面的初始状态。采取多点搭接的方式冲击能够极大的提高材料的冲击效果,提高材料的耐磨损、抗疲劳和防应力腐蚀等性能。

2 数值模拟

2.1 激光微冲击模型

试样材料为 T2 铜,长×宽为 20 mm×20 mm,板材厚度是 0.05 mm;激光能量分别为 400 mJ、600 mJ、800 mJ,光斑直径分别为 1.0 mm、1.2 mm、1.4 mm;凹模矩形孔尺寸为 10 mm×1 mm;材料性能参数如表 1 所示。冲击轨迹如图 1 所示,其中 η 表示搭接率,分别为 0、30%、50%。

表 1 T2 铜性能参数

Tab.1 Performance parameters of T2 copper

Material	Density $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Poisson ratio ν
T2	8 930	0.32
Elastic modulus E/GPa	Yield strength $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	Tensile strength σ_t/MPa
108	144	185

模型假设整个光斑内,材料表面受热均匀;约束层与板材为各项同性的均匀物质,板材物理参数为常量;等离子体为理想气体^[6]。

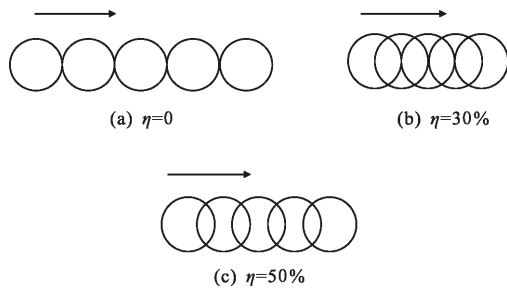


图 1 不同搭接率

Fig.1 Different overlapping rates

由于激光冲击成形是高应变率的过程,而且激光作用时间很短,因此在模拟过程中选用 ABAQUS 自带的 Johnson-Cook(JC)模型。这里使用 JC 模型的简化形式^[7]:

$$\sigma=(A+B\varepsilon^n)\left[1+C\ln\left(1+\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right)\right] \quad (4)$$

式中: σ 为材料的动态屈服强度; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; ε_0 为参考应变率,取 $\varepsilon_0=1$;A,B,C,n为材料参数。

2.2 边界条件的处理

激光微冲击成形采用约束模型,凹模和压边圈共同限制了边缘板材厚度方向的自由度,没有限制板材边缘在径向的自由度,因此在进行模拟过程中对边界条件进行处理时限制除板材平面内的其它自由度。

2.3 划分网格

激光微冲击所选用的金属材料为薄板,其厚度远小于另外二维尺寸,模拟过程中采用壳单元。为了既准确地模拟模型,又可控制网格数量。根据激光冲击影响区域将其划分为三个部分,冲击力作用区域采用较密网格,未冲击区域采用中等疏密的网格,其它区域网格尺寸相对大一些,单元类型选用 S4R。激光作用区域单元大小为 0.1×0.1 mm,单元数为 40×100 ,过渡区域单元大小为 0.1×0.25 mm,每个直角边的单元大小为 0.25×0.25 mm,单元数为 20×32 。图 2(a)为

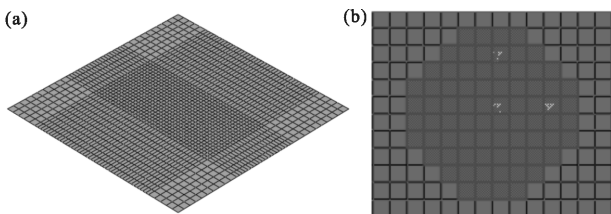


图 2 网格划分和加载区域

Fig.2 Mesh generation and loading area

网格划分示意图,图 2(b)为圆形激光光斑的近似加载区域。

2.4 激光冲击波压力加载

哥伦比亚大学的 Y.Lawrence Yao^[8]在 R.Fabbro 模型的基础上给出了激光冲击过程中压力加载公式:

$$P(r,t)=P(t)\exp\left(-\frac{r}{2R_0}\right) \quad (5)$$

$$P(t)=K(t)P_{\max} \quad (6)$$

式中: $P(r,t)$ 为 t 时刻径向距光斑中心 r 处的压力; $P(t)$ 为 t 时刻光斑中心的压力; r 为距光斑中心的距离; R_0 为光斑半径; $K(t)$ 为定义 t 时刻的比例因子; P_{\max} 为激光脉冲产生的峰值压力。而 P_{\max} 的估算式可表示为^[9]:

$$P_{\max}=\sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0Z_{t_0}Z_{c_0}\rho}{(2\gamma-1)(K_0Z_{c_0}+K_cZ_{t_0})}} \quad (7)$$

式中:A指吸收系数,在 0.80~0.95 之间,取 $A=0.9$; γ 是等离子体的绝热系数,取 $\gamma=1.67$; Z_{t_0} 、 Z_{c_0} 分别为板材和约束层材料的声阻抗; K_0 、 K_c 分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参数; ρ 指等离子体密度,可以看作是约束层材料、能量吸收层和试样气化蒸气的综合体; I_0 指激光功率密度。

2.5 求解及后处理

激光微冲击成形是一个高度非线性的瞬时动态过程,首先在 ABAQUS/Explicit 模块中完成所有点冲击,再将数据导入 ABAQUS/Standard 中进行材料的静态平衡分析,并在 ABAQUS/Viewer 模块中观察平衡状态下板材的变形情况^[10]。

3 结果及分析

3.1 多点激光微冲击成形的表征

根据多点激光冲击成形的特点,选取 path1、path2、path3 路径来表征 X 方向的变形;选取 path4、path5、path6 路径来表征 Y 方向的变形,如图 3 所示。

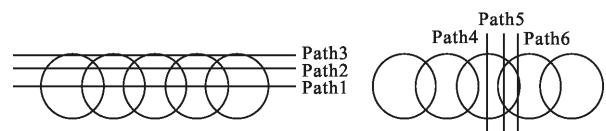


图 3 典型路径示意图

Fig.3 Typical path diagram

其中 path1 过光斑中心,path2、path3 分别距光斑中心

0.6R、R、path4 沿 Y 方向过光斑中心 ,path5、path6 分别距光斑中心 0.5R、R。

图 4(a)为激光能量 800 mJ,光斑直径 1 mm,搭接率 30%条件下的多点冲击变形云图。图中颜色的深浅表示变形量的大小,可以看出,冲击变形分布不均匀,蓝色部分为变形量较大区域,最大值为 0.641 4 mm,绿色和黄色区域变形量依次减小。图 4(b)、(c)、(d)分别为 path1、path2、path3 的剖视云图,可以看出不同路径上冲击变形分布不同。

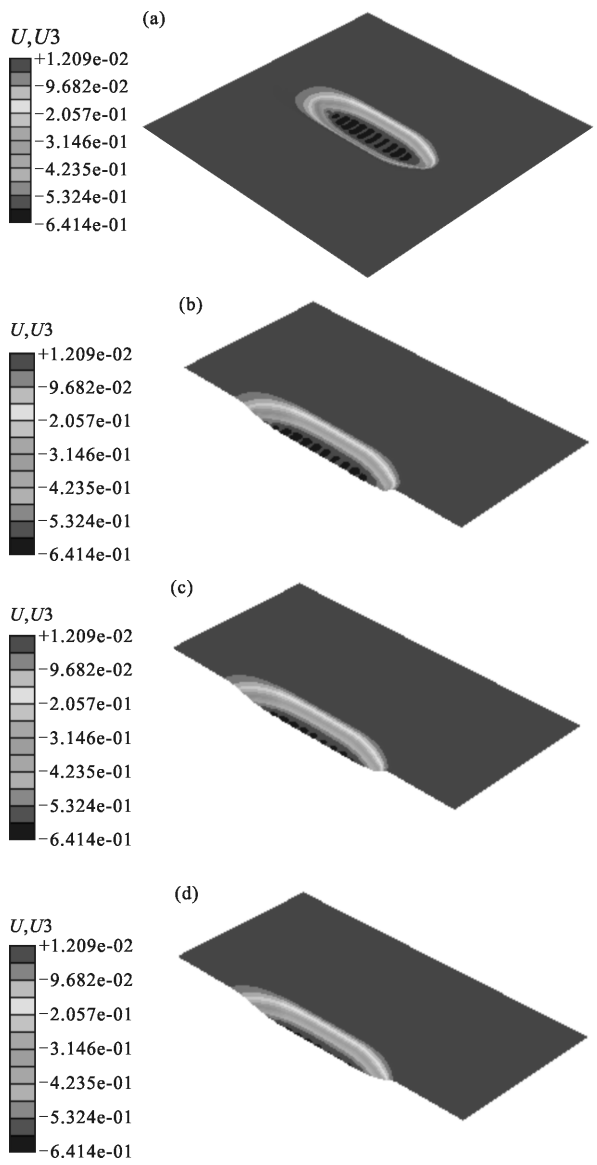


图 4 多点激光微冲击变形云图

Fig.4 Nephogram of multi-micro laser shock forming

图 5 为不同路径下多点激光微冲击变形量分布曲线图。可以看出 T2 铜的多点塑性变形在 X 方向呈

凹凸不平状,光斑中心区域表面凹凸分布现象明显,随着到光斑中心距离的增加,冲击变形表面越来越平滑。沿 Y 方向轮廓呈现抛物线形状,影响区域变化不大,但是过光斑中心区域的路径上变形量最大,不同路径上光斑中心区域显示出不同的波纹度,成周期分布。分析其原因是多点冲击变形是在单点冲击变形搭接条件下产生的,因为激光功率密度在空间上呈高斯分布,分布不均匀,在光斑中心产生的冲击作用力最大,变形量最大,离光斑中心距离越远,变形量越小。因此,在一定的搭接间距下,变形量大的冲击区域凹凸现象显著,而随着到光斑中心距离的增加,单点变形量变小,搭接表面变得平滑。

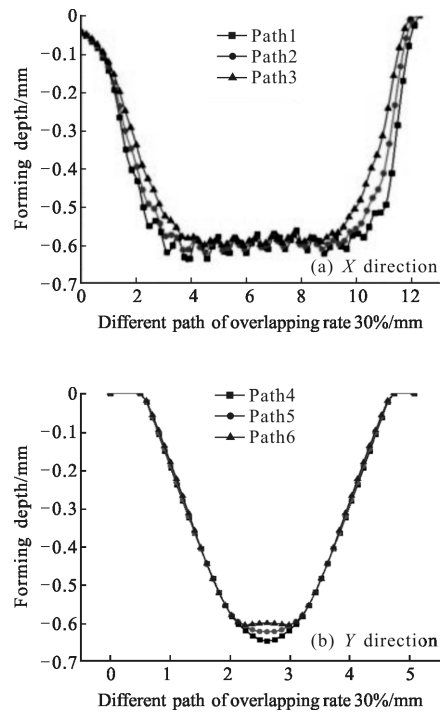


图 5 不同路径下多点激光微冲击变形曲线图

Fig.5 Multi-micro laser shock deformation under different paths

3.2 工艺参数的影响

3.2.1 激光能量

图 6 是搭接率 30%,板材厚度 0.05 mm,光斑直径 1 mm 时,path1 上冲击变形随激光能量变化的曲线分布图。从图中可以看出,当激光能量从 400 mJ 增大到 800 mJ 时,path1 路径上的数值模拟结果显示,冲击变形区域的表面波纹度随激光能量的增加而增加,这是因为单点激光冲击变形量随脉冲能量的增加而增大,搭接率不变时,造成多点搭接成形区

域的表面波纹度受激光能量的影响。不同激光能量下的表面波纹度分布与实验结果一致。实验结果由 Axio CSM 700 共聚焦显微镜测得,其分辨率为 $0.16 \mu\text{m}$, 最大测量高度 15 mm , 最小 $0.02 \mu\text{m}$ 。

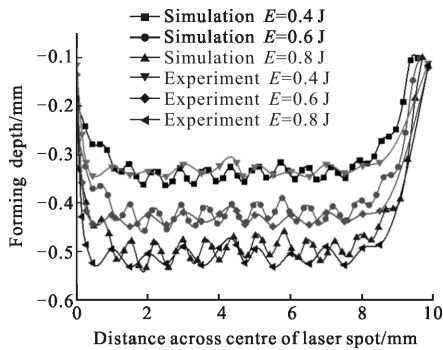


图 6 path 1 变形分布曲线

Fig.6 Curves of deformation distribution across path1

图 7 为不同路径上, 最大变形量随激光能量变化的实验和模拟结果对比图。图中 path1 上, 数值模拟的最大变形量随着激光能量的增加, 从 0.36 mm 增加到 0.54 mm ; 在 path2 上, 变形量从 0.32 mm 增加到 0.46 mm , 在 path3 上, 变形量从 0.38 mm 增加到 0.5 mm 。可以看出, 随着激光能量的增加, 三条路径上冲击变形量都增大, 模拟结果与实验结果很相近。

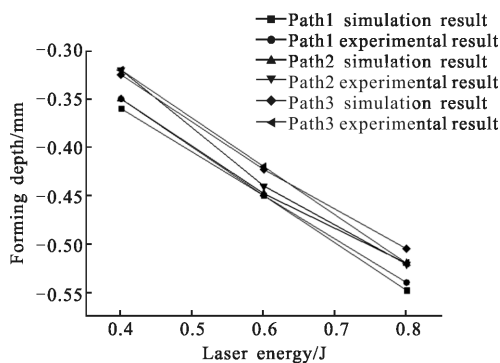


图 7 不同路径上实验和模拟的最大变形量随激光能量变化的对比图

Fig.7 Biggest deformation of experiment and simulation with changing laser energy under different paths

3.2.2 搭接率

图 8 是激光能量为 400 mJ , 板材厚度 0.05 mm , 光斑直径 1 mm 时, 不同搭接率下, 经过光斑中心处的数值模拟和实验结果的变形分布图。其中, 方点、圆点、正三角曲线分别表示搭接率为 0% 、 30% 、 50% 条

件下, path1 上数值模拟的变形分布。随着搭接率增加, 冲击表面越来越平整, 因为搭接区域不同, 造成冲击次数不同。搭接率越大, 相邻两次冲击区域的重叠面积就变大, 试样的表面变得更加平整。图中, 倒三角、菱形、左箭头曲线分别表示搭接率为 0% 、 30% 、 50% 条件下, path1 上实验结果的变形分布, 分布趋势与模拟结果一致。

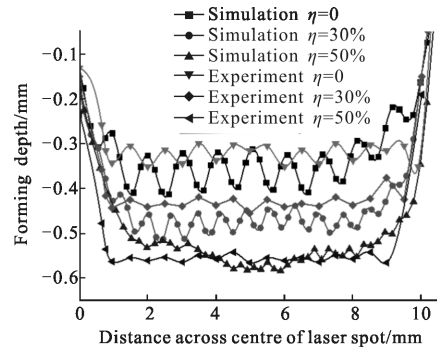


图 8 光斑中心的变形分布曲线图

Fig.8 Curves of deformation distribution across the centre of laser spot

图 9 为不同路径下, 实验和模拟的最大变形量随搭接率变化的对比图。图中 path1 上, 数值模拟的最大变形量随着激光能量的增加, 从 0.35 mm 增加到 0.56 mm ; 在 path2 上, 变形量从 0.32 mm 增加到 0.54 mm , 在 path3 上, 变形量从 0.34 mm 增加到 0.51 mm 。可以看出, 随着搭接率的增加, 两条曲线冲击变形量也逐渐增大, 模拟结果与实验结果变化趋

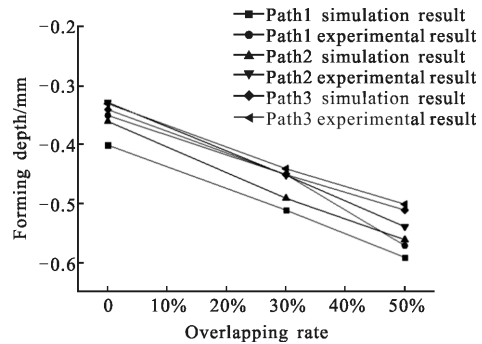


图 9 不同路径上实验和模拟的最大变形量随搭接率变化的对比图

Fig.9 Biggest deformation of experiment and simulation with changing overlapping rate under different paths

势一致。数值模拟的最大变形量略大于实验的最大变形量, 分析原因: 在实验过程中, 由于搭接率的存在, 前一次冲击吸收层的消耗将影响后面的冲击, 导

致后面冲击不完全,另外,由于实验中采用 K9 玻璃作为约束层,在冲击过程中,等离子体的汽化影响其透明度,导致有效激光能量减少,从而影响变形量,所以出现实验结果比模拟结果略小的情况。

3.2.3 光斑直径

图 10 是激光能量为 400 mJ, 板材厚度 0.05 mm, 搭接率为 0 时, path1 上不同光斑作用下的数值模拟和实验变形分布图。数值模拟和实验结果都显示出,随着光斑直径从 1 mm 增大到 1.8 mm 时,表面波纹度越来越小,但数值模拟中表面波纹度大于实验条件下的波纹度。分析认为,数值模拟中,没有考虑多点搭接条件下,由于能量吸收层的消耗和 K9 玻璃透明度的变化,前一次的冲击影响后一次冲击效果,从而表面波纹度明显。

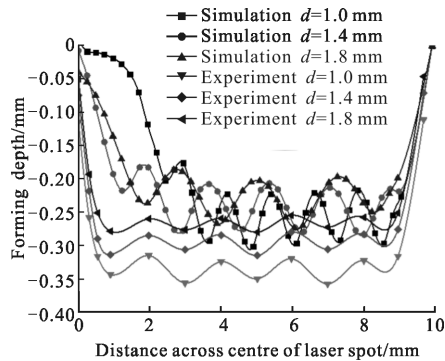


图 10 path 1 变形分布曲线

Fig.10 Curves of deformation distribution across path1

图 11 为不同路径下,实验和模拟的最大变形量随光斑直径变化的对比图。从图中看出在 path1 上,数值模拟的最大变形量随着光斑直径的增加,从

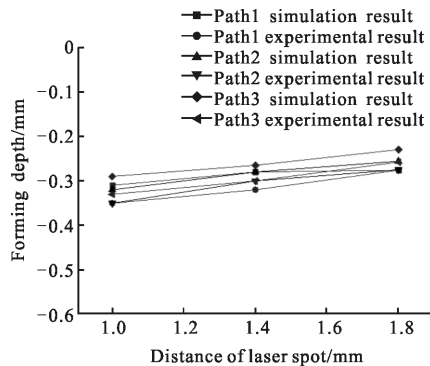


图 11 不同路径上实验和模拟的最大变形量随光斑直径变化的对比图

Fig.11 Biggest deformation of experiment and simulation with changing diameter of laser spot under different paths

0.31 mm 减小到 0.28 mm;在 path2 上,变形量从 0.32 mm 减少到 0.26 mm,在 path3 上,变形量从 0.29 mm 减小到 0.23 mm。可以看出,随着光斑直径的增加,两条曲线的冲击变形量减小,模拟结果与实验结果相一致。分析认为,当激光能量一定时,光斑直径越大,激光冲击的有效区域越大,导致单位面积上的能量减少,板材受到的冲击波压力减小,变形量减少。

4 结论

通过建立多点激光微冲击成形数值模拟模型,获得了激光微冲击成形分布云图,有效的展示了激光冲击区域的变形分布特征。并与激光微冲击实验结果对比,数值模拟结果与实验结果相近,规律一致,验证了数值模型的正确性,可以有效预测复杂形状特征的激光微冲击成形,为其工艺参数的选取、路径规划提供指导。

参考文献:

- [1] Guo Yongsheng, Sun Xiaochuan, Yang Xi, et al. Fabrication and controlling of metal sheets based on dynamic and mechanical effect of laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015(8): 167-171. (in Chinese)
郭永升, 孙霄川, 羊茜, 等. 基于激光冲击动力学效应的薄板变形特性与控制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015(8): 167-171.
- [2] Ge Maozhong. Research on AZ31B wrought magnesium alloy and its weldment treated by laser shock processing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
葛茂忠. AZ31B 变形镁合金及其焊接件激光冲击处理研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- [3] Wang Guoqiang. Practical Engineering Numerical Simulation Technology and Its Practice in ANSYS [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001. (in Chinese)
王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
- [4] Zheng Chao. Numerical simulation and experimental study on microscale laser peen forming [D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese)
郑超. 激光冲击微成形工艺数值模拟及其实验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [5] Song Xiujuan, Hao Qian. Theory and Application of Explosive Metal Processing [M]. Beijing: China Building

- Industry Press, 1983. (in Chinese)
- 宋秀娟, 浩谦. 金属爆炸加工的理论和应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [6] Hu Chen. Research on laser shocking of thin-walled titanium alloy in strengthening and deformation [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology and Education, 2015. (in Chinese)
- 胡琛. 激光冲击钛合金薄壁件的强化与变形研究 [D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2015.
- [7] Pan Yinghui, Dai Fengze, Lu Jinzhong. Johnson-Cook model of material parameter optimization for laser shock processing [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2012(2): 15-18. (in Chinese)
- 潘应晖, 戴峰泽, 鲁金忠. 激光冲击 Johnson-Cook 模型材料参数优化[J]. 兰州理工大学学报, 2012(2): 15-18.
- [8] Beethe L, Fabbro R, Peyre P, et al. Shock wave from a water-confined laser-generated plasma[J]. *J Appl Phys*, 1997, 82(6): 2826-2832.
- [9] Peyre P, Fabbro R, Berthe I, et al. Laser shock processing of materials and related measurements [C]//Part of SPIE Conference of High-Power Laser Ablation, 2003: 183-193.
- [10] Ma Xiaofeng. Finite Element Analysis From Entry to the Master [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- 马晓峰. 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.