

文章编号: 1001-3806(2018)06-0758-06

## 金属箔材无模激光多点冲击成形工艺研究

张凯<sup>1</sup>, 叶云霞<sup>1,2\*</sup>, 赵雳<sup>1</sup>, 饶宵<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学 激光技术研究所, 镇江 212013)

**摘要:** 为了解决金属箔材微拉深工艺中高昂的微型模具设计制造成本问题, 采用无模具激光冲击微成形方法, 对脉宽 5 ns、直径 50  $\mu\text{m}$  的高重复频率激光光斑微冲击成形 20  $\mu\text{m}$  厚 T2 铜箔进行了理论分析和实验验证。结果表明, 在约束层没有破损的情况下, 凹坑深度  $h$ 、凹坑底平面直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $(L - L_1)$  随着单脉冲能量  $E$  及光斑搭接率增加线性增大; 激光扫描内外圆周顺序对凹坑深度没有影响, 但会对凹坑底平面直径有影响, 先扫描外圆周时会形成更大的凹坑底平面直径, 无需模具, 凹坑形貌是可控的。这一结果对激光无模微拉深渐进成形的进一步研究是有帮助的。

**关键词:** 激光技术; 激光冲击成形; 实验法; 金属箔材; 无模具; 渐进成形

**中图分类号:** TG665 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.006

### Study on die-less multi-point laser shock forming of metal foils

ZHANG Kai<sup>1</sup>, YE Yunxia<sup>1,2</sup>, ZHAO Li<sup>1</sup>, RAO Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Laser Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high cost of micro mold design and manufacturing in metal foil micro deep drawing process, a die-less laser shock micro-forming method was used. A high repetition frequency laser with pulse width of 5 ns and spot diameter of 50  $\mu\text{m}$  was shocked on the T2 copper foil with thickness of 20  $\mu\text{m}$ , and theoretical analysis and experimental verification were carried out. The results show that, when the confinement layer is not damaged, the pit depth  $h$ , the diameter of pit bottom  $L_1$  and the inclination of pit wall  $(L - L_1)$  increase linearly with the increase of single pulse energy  $E$  and spot overlapping rate. The order of inner and outer circumference of laser scanning has no effect on the depth of pits. But it will affect the diameter of the bottom of the pit. When scanning the outer circumference firstly, a larger bottom diameter pit will be formed. The shape of the pit is controllable without die. The study is helpful to the further study on die-less laser micro drawing progressive forming.

**Key words:** laser technique; laser shock forming; experimental method; metal foils; die-less; progressive forming

### 引言

随着微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 的快速发展, 精密度高和可靠性高的微型零件需求量不断增加, 制造要求也不断提高<sup>[1-5]</sup>, 这促进了微型零件加工制造技术的快速发展。激光冲击成形是制造微型金属零件的重要方法之一, 相关成形方法和理论是目前非常活跃的研究领域<sup>[5-7]</sup>。美国 HACKEL 等人<sup>[8]</sup>正式提出金属激光喷丸成形加工方法; 同年

ZHANG 等人<sup>[9]</sup>从理论和实验角度研究了光斑直径约 12  $\mu\text{m}$  的小能量激光单点冲击 90  $\mu\text{m}$  厚的铜箔, 研究了铜箔变形过程, 证明了把激光冲击成形技术运用于箔材微成形的可能性。

把激光微冲击成形技术运用到金属箔材微拉深成形, 有望解决传统技术高昂模具成本、摩擦效应等问题<sup>[10]</sup>, 具有广阔的应用前景。国内外很多学者做了相关的研究。VOLLERTSEN 等人<sup>[11]</sup>成功用激光单点多次冲击和微型杯状模具, 以 50  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  厚的铜箔和铝箔为靶材, 成形出微型杯状零件。LIU 等人<sup>[12]</sup>用环形阵列微型模具, 成功实现 10  $\mu\text{m}$  铜箔阵列微圆形环状的 3-D 成形, 为工业上大量规整微型零件生产提供一种加工工艺方法。SHEN 等人<sup>[13-14]</sup>用阵列方形和四叶草状的微型模具, 完成了 10  $\mu\text{m}$  和 17  $\mu\text{m}$  铝箔的方形和四叶草状的 3-D 微成形, 证明了这种工艺方法

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20171297); 江苏省六大人才高峰资助项目 (GD2B-020)

作者简介: 张凯 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yeyunxia@ujs.edu.cn

收稿日期: 2018-01-18; 收到修改稿日期: 2018-03-30

可用于激光冲击微拉深成形复杂微型零件。WANG 等人<sup>[15-16]</sup>用激光诱导冲击波使柔性垫变形,变形的柔性垫代替凸模作用在铜箔上,使铜箔变形。NAGARAJAN 等人<sup>[17]</sup>用柔性垫代替凹模具,在激光冲击下,将  $25\mu\text{m}$  厚的铜箔成形出半球状,并研究了形貌的直径和深度跟激光能量的关系,提出了用柔性材料代替凹模的思路,减少了制作凹模的成本,这是一种由有模具成形向无模具成形过渡的中间方法。YE 等人<sup>[18]</sup>研究了无模具情况下飞秒激光冲击  $20\mu\text{m}$  厚铝箔的塑性变形机制,为飞秒激光无模具激光冲击成形提供了理论支持和参考。DAI 等人<sup>[19]</sup>用数值模拟的方式研究了多点激光微冲击成形,为多点激光冲击成形研究方法提供了有价值的参考。

综上所述,激光微冲击成形技术在国内学者的推动下得到长足发展:从单点冲击到多点冲击、从有模具到半模具、从技术可行性研究到成形精度控制研究,但是,总体而言,激光冲击微成形技术,尤其是无模具激光微冲击技术,从理论、工艺等方面,距离实际应用差距甚远,有待进一步完善。

作者通过改变激光扫描策略,在完全无模具的情况下,实验研究了激光参量和扫描方式对金属箔材成形形状参量的影响规律,以此为基础,研究利用纳秒激光多点冲击渐进成形控制零件形状。

## 1 实验方法

实验原理如图 1 所示。高功率、短脉冲激光穿过透明约束层,作用覆盖在金属箔材上的吸收层上,使吸收层迅速气化,电离产生等离子体,等离子体急速膨胀产生强冲击波作用在金属箔材上,冲击波压强达到 GPa 量级,大于材料的动态屈服强度,从而实现不可逆的冷塑性变形。其中约束层作用是延长冲击波作用时间并增加冲击波峰值压强,吸收层作用是更高效的吸收激光能量和避免激光直接作用在金属表面发生烧蚀。

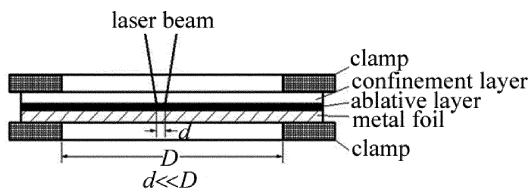


Fig. 1 Schematic diagram of process experiment

实验中采用主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 光纤激光器作为激光源,脉宽变化范围  $4\text{ns} \sim 200\text{ns}$ ,光斑为圆形光斑,直径  $50\mu\text{m}$ ,最

大能量密度约  $136\text{J}/\text{cm}^2$ ,光斑内光强分布呈高斯型。实验中以透明胶带作为约束层,厚度约为  $1.5\text{mm}$ ,速干型黑漆用作吸收层,厚度约为  $20\mu\text{m}$ 。靶材为在微型零件中常见的紫铜,纯度大于  $99.9\%$ ,伸长率大于  $30\%$ ,厚度为  $20\mu\text{m}$ 。夹具材料为铝合金,整体尺寸为  $50\text{mm} \times 40\text{mm}$ ,内部孔的尺寸为  $30\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。

因为成形目标是在平面铜箔上冲击出平底杯状形貌,成形过程完全无模具,并且能对该形貌的各个特征进行控制,所以激光冲击方式采用多点冲击方式,扫描路径为 3 个同心圆,同心圆直径从小到大分别为  $0.4\text{mm}$ ,  $0.45\text{mm}$  和  $0.5\text{mm}$ ,如图 2 所示。图中,光斑直径  $d$  和扫描路径直径  $D_1$  都远小于夹具内孔  $D$ ,由此保证夹具内孔对最终拉深成形特征部位无显著影响。

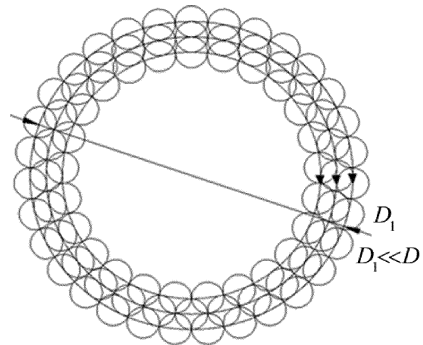


Fig. 2 Schematic diagram of laser scanning path

采用 WYKO NT1100 非接触光学轮廓仪测量成形零件的 3 维形貌,采用 OLYMPUS-BX51M 金相显微镜来拍铜箔表面形貌。

## 2 实验结果

在金属箔材无模激光多点冲击成形的过程中,工件的成形效果完全通过激光工艺参量的改变来实现,因此改变某一激光工艺参量,而其它工艺参量保持不变,工件形貌必定有相应的变化,测量得到形貌的变化,与激光工艺参量相结合分析,找出其中规律,达到控制凹坑形貌的目的。

### 2.1 无模激光多点冲击微拉深成形典型形貌

图 3 展示了无模激光冲击箔材微拉深的典型凹坑形貌。主要的激光参量是:激光单脉冲能量  $615\mu\text{J}$ ,激光光斑直径  $50\mu\text{m}$ ,激光脉宽  $5\text{ns}$ ,激光光斑搭接率  $0\%$ 。两层透明胶带被用作约束层,速干型黑漆被用作吸收层。在试验时,铜箔试样被完全夹紧在夹具中(如图 1 所示)。激光冲击扫描一次,激光能量密度大约为  $31.32\text{J}/\text{cm}^2$ 。如图 3 所示,为了方便分析凹坑形貌特征,将整个凹坑形貌分为以下 3 个部分:区域 II 为

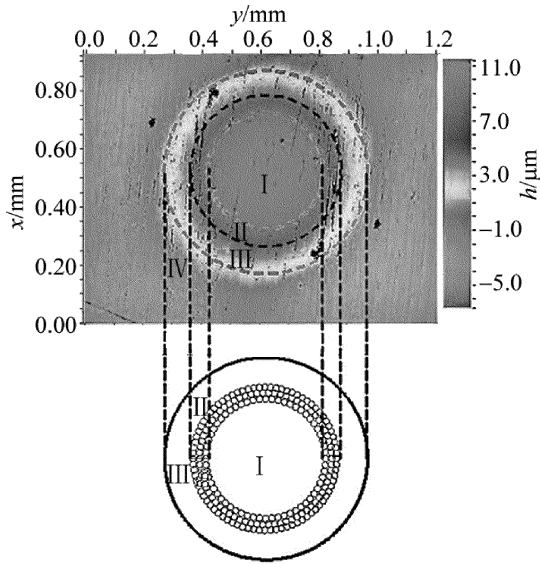


Fig. 3 Typical multipoint impact pits

激光光斑直接作用区域,区域 I 为区域 II 所围区域,区域 III 为区域 II 外和铜箔未变形平面之间的区域。图 4 是图 3 典型激光多点冲击凹坑形貌的轮廓图,可以清楚地看到凹坑形貌特征,其中凹坑深度用  $h$  表示,凹坑底平面直径用  $L_1$  表示,凹坑的直径用  $L$  表示,凹坑壁的倾斜程度用  $\alpha$  表示,由于角度  $\alpha$  不便于测量,但是  $\tan\alpha = 2h/(L - L_1)$ ,所以凹坑壁的倾斜程度可以用  $2h/(L - L_1)$  来表征,区域 I、区域 II 和区域 III 也在图 4 中清楚地标出。

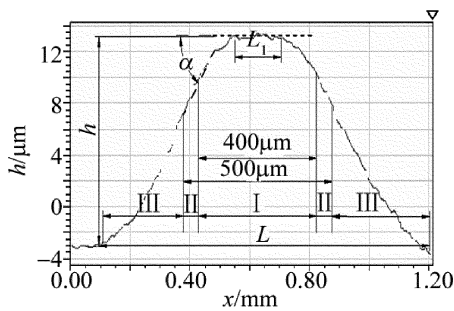


Fig. 4 Typical profile lines of the produced 3-D pits

### 2.2 激光单脉冲能量的影响

激光单脉冲能量是激光冲击成形工艺参量中的重要参量之一,具体实验激光参量是:单脉冲能量是 0.55mJ ~ 0.89mJ,激光频率 2kHz,激光脉宽 5ns,光斑直径 50 $\mu\text{m}$ ,激光扫描速率 100mm/s,激光扫描路径 3 道,分别为直径 0.4mm,0.45mm 和 0.5mm 的同心圆(如图 2 所示)。

图 5a 展示了凹坑深度  $h$  与激光单脉冲激光能量  $E$  的关系。从图中可以看出,凹坑深度  $h$  是随单脉冲能量  $E$  的增大线性增大,当激光单脉冲能量为 0.8mJ

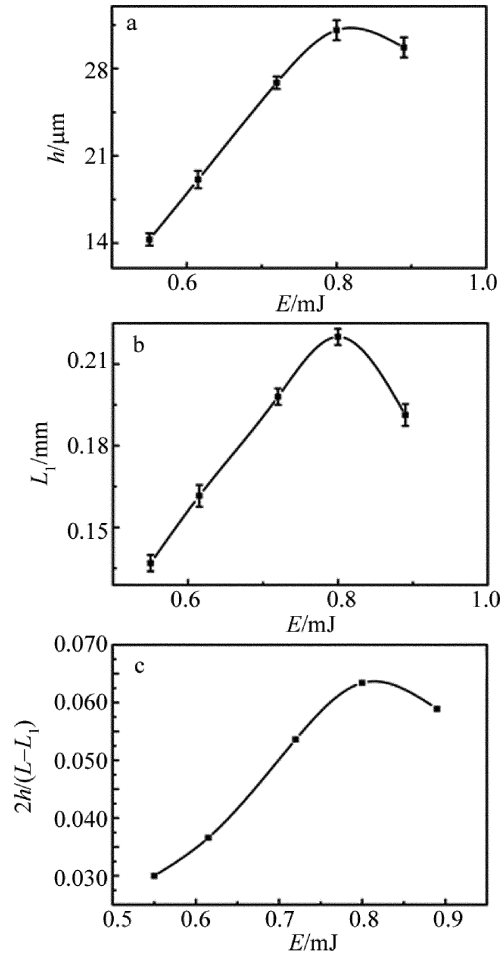


Fig. 5 Relationship between single pulse energy  $E$  and pit depth  $h$ , plane diameter  $L_1$  and  $2h/(L - L_1)$

左右,凹坑深度  $h$  达到最大值;当激光单脉冲能量  $E$  超过 0.8mJ 时,凹坑深度  $h$  随着激光单脉冲能量  $E$  的增大而减小。图 5b 展示了区域 I 中平面直径  $L_1$  与激光单脉冲能量  $E$  的关系。可以看出,平面直径  $L_1$  随着激光单脉冲能量  $E$  增大而线性增大,同样激光单脉冲能量  $E = 0.8\text{mJ}$  时,平面直径  $L_1$  达到最大值;激光单脉冲能量  $E > 0.8\text{mJ}$  时,平面直径  $L_1$  随着激光单脉冲能量  $E$  的增大而减小。图 5c 展示了激光单脉冲能量  $E$  与凹坑壁倾斜程度  $2h/(L - L_1)$  的关系。从图中可以看出,当单脉冲能量  $E$  在 0.8mJ 之前时, $2h/(L - L_1)$  随着  $E$  的增加线性增大;当  $E$  在 0.8mJ 左右时,凹坑壁倾斜程度  $2h/(L - L_1)$  达到最大值;当  $E > 0.8\text{mJ}$  时,凹坑壁倾斜程度  $2h/(L - L_1)$  随单脉冲能量  $E$  的增加而减小。可以看到  $L_1$  随  $E$  的变化规律、 $h$  随  $E$  的变化规律和  $2h/(L - L_1)$  随  $E$  的变化规律是相同的。为什么当激光单脉冲能量超过 0.8mJ 时, $h, L_1$  和  $2h/(L - L_1)$  会随着  $E$  的增加而减小呢? 分析原因如下:当激光单脉冲能量  $E$  不断增大时,铜箔表面的热量会不断

增加,热量增加到一定程度时,约束层透明胶带会熔化,约束层被破坏,使得激光诱导冲击波峰值压强和持续时间减小,从而凹坑深度  $h$  和平面直径  $L_1$  减小。图 6a 中,约束层完整,且影响区是规整的圆,约束层作用未遭到破坏。图 6b 中,虚线区域有明显的胶带熔化迹象,约束层被破坏,周围白色影响区有朝着胶带被破坏的方向扩散,形状不规则,约束层的作用遭到破坏,从而导致激光诱导冲击波压力的减小,凹坑深度  $h$ 、平面直径  $L_1$  和凹坑倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  减小。

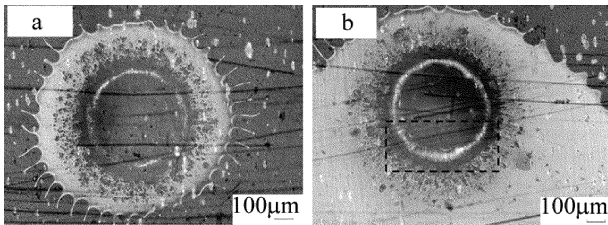


Fig. 6 Surface condition diagram of copper foil after different laser energies  
a—laser monopulse energy  $E = 0.75\text{mJ}$  b—laser monopulse energy  $E = 0.89\text{mJ}$

综上所述,在约束层未被破坏时,随着激光单脉冲能量  $E$  的增大,凹坑形貌的变化趋势如图 7 所示。凹坑深度  $h$  线性增加,区域 I 中平面直径  $L_1$  线性增加,凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  线性增大。因此,改变激光单脉冲能量  $E$  能控制凹坑深度  $h$ 、区域 I 中水平直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$ ,进而控制凹坑形貌。

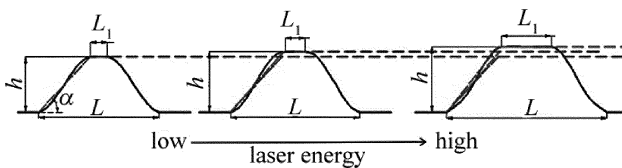


Fig. 7 Schematic diagram of depth  $h$  and plane diameter  $L_1$  of the concave pit with the increase of energy

### 2.3 光斑搭接率的影响

激光光斑搭接率也是激光冲击成形工艺参量中的重要参量之一。具体实验激光参量为:激光脉宽 5ns,频率 2kHz,单脉冲能量 0.72mJ,光斑直径  $50\mu\text{m}$ ,扫描速率  $20\text{mm/s} \sim 100\text{mm/s}$ ,即搭接率从 0% 到 80%。图 8a 中展示了凹坑深度  $h$  与光斑搭接率的关系。从图中可看出,在当光斑搭接率小于 30%,凹坑深度  $h$  随光斑搭接率增大线性增大,当光斑搭接率在 30% 左右,凹坑深度  $h$  达到最大值,光斑搭接率超过 30% 之后凹坑深度  $h$  随搭接率增大而减小。图 8b 中展示了区域 I 中平面直径  $L_1$  和激光光斑搭接率的关系。从图中可以看出,当光斑搭接率小于 30%, $L_1$  随着激光

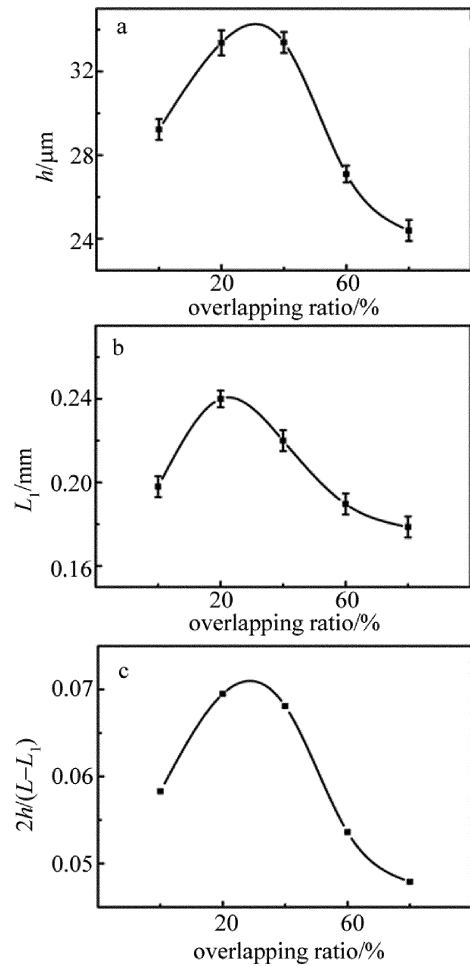


Fig. 8 Relationship between the overlap rate of the spot depth  $h$ , plane diameter  $L_1$  and  $2h/(L-L_1)$

光斑搭接率的增大线性增大;当光斑搭接率在 30% 左右, $L_1$  达到最大值;当光斑搭接率超过 30% 时, $L_1$  随着激光光斑搭接率的增大而减小。图 8c 中展示了激光光斑搭接率与凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  的关系。从图中可以看出,当光斑搭接率小于 30%,凹坑深度  $h$  随光斑搭接率增大线性增大;当光斑搭接率在 30% 左右,凹坑深度  $h$  达到最大值;当光斑搭接率超过 30% 之后,凹坑深度  $h$  随搭接率增大而减小。分析原因如下:搭接率的改变改变的是在靶材的同一个位置激光冲击的次数,激光冲击次数的增多,在约束层和吸收层完好时,凹坑深度  $h$ 、平面直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  是增加的,但是随着同一位置冲击次数的增加,该位置的热量不断增加,约束层透明胶带被破坏,导致峰值压强降低,从而导致凹坑深度  $h$ 、平面直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  减小,约束层的破坏情况如图 9 所示。

光斑搭接率的增加归根结底就是激光对靶材同一位置的能量密度增加了,从图 8 和图 5 也可看出, $h, L_1$

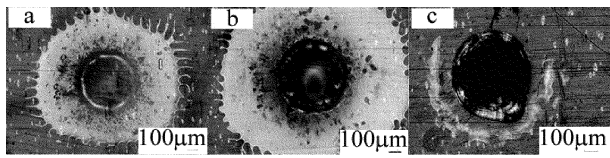


Fig. 9 Surface condition diagram of copper foil after laser shocking with different overlap rates of spot  
a—overlap rate of spot 20% b—overlap rate of spot 60% c—overlap rate of spot 80%

和  $2h/(L-L_1)$  随光斑搭接率的变化规律与随激光单脉冲能量  $E$  是一致的,在约束层未被破坏时,  $h$ ,  $L_1$  和  $2h/(L-L_1)$  都是随自变量的增加而增大,在约束层破坏之后随自变量的增加而减小,所以控制激光光斑搭

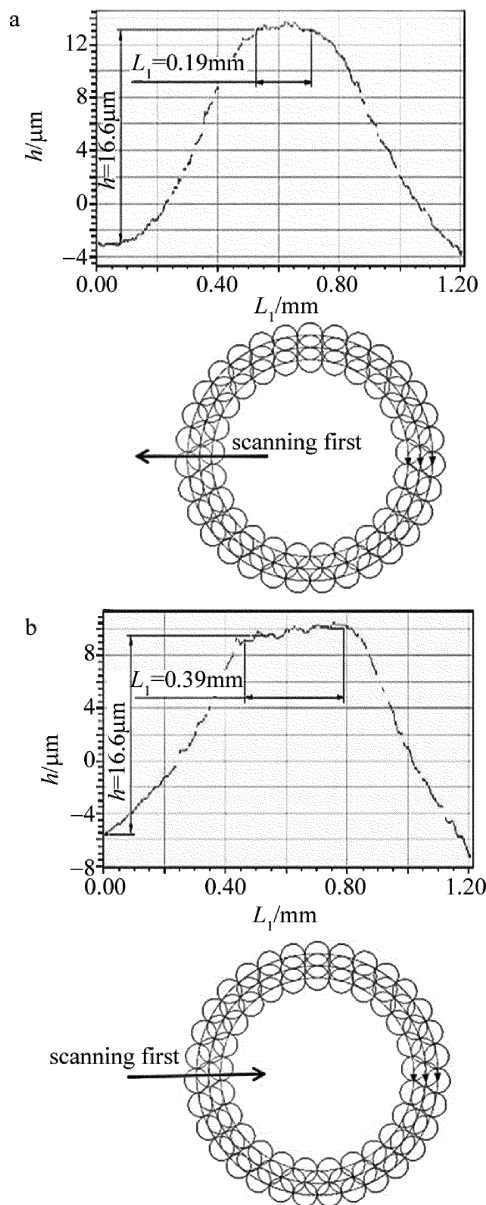


Fig. 10 Pits profile after laser scanning in different scanning sequences  
a—scanning from the diameter 0.4 mm to the diameter 0.5 mm b—scanning from the diameter 0.5 mm to the diameter 0.4 mm

接率可以控制凹坑深度  $h$ 、凹坑区域 I 中平面直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  的。

## 2.4 冲击方式的影响

如图 10 所示,图中均采用以下相同激光参量:激光单脉冲能量 0.72mJ,激光脉宽 5ns,频率 2kHz,扫描速率 100mm/s,搭接率 0%。图 10a 中的扫描方式是从直径 0.4mm 圆圈开始扫描,结束扫描于直径 0.5mm 圆圈;图 10b 是相反的,从直径 0.5mm 圆圈开始扫描,到直径 0.4mm 圆圈结束扫描。从图 10 中可以看出,两者凹坑深度  $h$  相等,但是图 10a 中区域 I 的平面直径  $L_1$  小于图 10b 中区域 I 的平面直径  $L_1$ 。证明同样的激光冲击参量,同样的激光冲击在靶材上的位置,改变激光扫描的前后顺序,成形的凹坑形貌不一样,主要是凹坑的横向尺寸的改变,纵向尺寸保持不变。凹坑深度  $h$  相等,证明激光冲击诱导冲击波对箔材的垂直方向的力的作用是相等的,而凹坑区域 I 的平面直径  $L_1$  不一样,证明激光冲击作用点的前后顺序会改变凹坑区域 I 的形貌,且首次激光扫描路径的直径增加,凹坑区域 I 的平面区域也会增大,所以在要求不改变凹坑深度  $h$  大小而增加凹坑底部平面直径  $L_1$  时,可以通过选择先扫描直径大的激光扫描路径,即调整激光扫描路径的顺序来实现。

## 3 结论

通过改变激光单脉冲能量、光斑搭接率等工艺参量,以 T2 紫铜箔材成形平底杯状凹坑形貌为例,研究了金属箔材无模激光多点冲击成形工艺。研究了激光单脉冲能量、光斑搭接率和激光扫描方式的改变对凹坑形貌深度、凹坑底部直径和凹坑壁的影响,能达到对凹坑形貌的初步控制。

(1) 控制单脉冲能量在 0.55mJ ~ 0.89mJ,光斑搭接率 0%,激光扫描 1 次,无模具约束,能够使 20μm 厚 T2 紫铜成形为凹坑深度  $h$  在 14.3μm ~ 31.08μm 范围内,凹坑底部平整且平面直径  $L_1$  在 136.9μm ~ 240μm 范围内和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  在 0.03 ~ 0.0634 范围内的形貌,在约束层未被破坏的情况下,凹坑深度  $h$ 、凹坑底部直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  随单脉冲能量  $E$  增加线性增加。

(2) 控制光斑搭接率 0% ~ 80%,激光单脉冲能量 0.72mJ,激光扫描一次,无模具约束,能够使 20μm 厚 T2 紫铜成形为凹坑深度  $h$  在 24.4μm ~ 33.39μm 范围内,凹坑底部平整且直径  $L_1$  在 178.7μm ~ 240μm 范围内和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  在 0.0479 ~ 0.0695

的形貌,在约束层未被破坏的情况下,凹坑深度  $h$ 、凹坑底部直径  $L_1$  和凹坑壁倾斜程度  $2h/(L-L_1)$  随光斑搭接率的增加线性增加。

(3)当单脉冲激光能量在 0.72mJ、搭接率为 0%、激光冲击位置一样时,改变激光扫描路径的前后顺序,先扫描直径 0.4mm 的路径与先扫描直径 0.5mm 的路径相比,凹坑深度  $h$  相等,凹坑底部平面直径  $L_1$  更小,如想控制凹坑深度不变,改变凹坑底部平面直径,可以考虑改变激光扫描路径的前后顺序。

### 参 考 文 献

- [1] ZUO H, ZHANG K, CAO X, *et al.* Research of microstructure and residual stress of copper foils processed by laser shock forming[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(1): 94-99(in Chinese).
- [2] LI X Ch, ZHANG Y K, ZHOU J Y, *et al.* Analysis of residual stress on surface of AZ31 magnesium alloy after laser shock processing[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1): 5-10(in Chinese).
- [3] ZHANG J, HUA Y Q, CAO J D. Simulation of propagation characteristics of stress wave in copper films with laser shock processing[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(4): 601-605(in Chinese).
- [4] YANG J D, ZHOU W F, YANG T, *et al.* Nanocrystallization of Ti-6Al-4V alloy by multiple laser shock processing[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 754-758(in Chinese).
- [5] ZHANG W H, LIU H X, SHEN Z B, *et al.* Experimental research on laser-shock flexible micro-forming of multilayer-metal composite sheets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0702001 (in Chinese).
- [6] ZHANG D, LIU L H, GUO H, *et al.* Experiment and simulation of manufacturing microparts by laser indirect shocking[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081404(in Chinese).
- [7] GUO Y Sh, SUN X C, YANG X, *et al.* Fabrication and controlling of metal sheets based on dynamic and mechanical effect of laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081402(in Chinese).
- [8] HACKEL L, HARRIS F. Contour forming of metals by laser peening: USA 6410884[P]. 2012-06-25.
- [9] ZHANG W, YAO Y L. Micro scale laser shock processing of metallic [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2002, 124(2): 369-378.
- [10] ZHONG M L, FAN P X. Applications of laser nano manufacturing technologies [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(6): 0601001(in Chinese).
- [11] VOLLERTSEN F, HU Z, NIEHOFF H S, *et al.* State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(1): 70-79.
- [12] LIU H, SHEN Z, WANG X, *et al.* Micromould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(14): 4687-4691.
- [13] SHEN Z, LIU H, WANG X, *et al.* Micromold-based laser shock embossing of metallic foil: fabrication of large-area three-dimensional microchannel networks [J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2011, 26(9): 1126-1129.
- [14] SHEN Z, GU C, LIU H, *et al.* Fabricating three-dimensional array features on metallic foil surface using overlapping laser shock embossing[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(8): 973-977.
- [15] WANG X, DU D, ZHANG H, *et al.* Investigation of microscale laser dynamic flexible forming process—Simulation and experiments [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2013, 67(2): 8-17.
- [16] WANG X, MA Y, SHEN Z, *et al.* Size effects on formability in microscale laser dynamic forming of copper foil[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220(1): 173-183.
- [17] NAGARAJAN B, CASTAGNE S, WANG Z. Mold-free fabrication of 3-D microfeatures using laser-induced shock pressure[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 268(3): 529-534.
- [18] YE Y, FENG Y, LIAN Z, *et al.* Mold-free fs laser shock micro forming and its plastic deformation mechanism[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 67(11): 74-82.
- [19] DAI Y B, FAN Y J, LI M Y, *et al.* Study on numerical simulation of multi-micro laser shock forming[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 50-56(in Chinese).