

# 激光动态柔性微弯曲中尺寸效应的实验研究

马友娟<sup>1</sup> 刘会霞<sup>1</sup> 周建忠<sup>1</sup> 朱和军<sup>2</sup> 陈俊<sup>2</sup> 钱清<sup>1</sup> 王霄<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

<sup>2</sup>镇江高等职业技术学校, 江苏 镇江 212003

**摘要** 制备了多特征尺寸微弯曲模具, 并利用激光动态柔性成形技术实现了单次脉冲下箔板的等压弯曲成形。为了研究工件尺寸(厚度)、晶粒尺寸对高应变率下箔板变形行为的影响, 使用超景深显微系统观测成形件三维形貌及轮廓形状, 采用纳米压痕仪测量其厚度方向上的微硬度分布, 并借助冷镶嵌技术测量成形件厚度减薄率。实验结果表明: 铜箔厚度由 50  $\mu\text{m}$  减小到 30  $\mu\text{m}$  时, 材料流动应力减小, 成形件轮廓形状由圆顶状转变为槽状, 表面硬度由于模具底部的碰撞滑移得到显著强化; 相比于细晶成形件, 粗晶件的微塑性成形能力较差; 工件底部回弹形变及厚度方向应变硬化不均匀; 圆角处易于破裂, 最大减薄率比细晶件增大约 10%。

**关键词** 激光光学; 激光技术; 尺寸效应; 动态微成形; 铜箔; 软膜

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0503007

## Experimental Research on Size Effects in Laser Dynamic Flexible Micro-Bending Forming

Ma Youjuan<sup>1</sup> Liu Huixia<sup>1</sup> Zhou Jianzhong<sup>1</sup> Zhu hejun<sup>2</sup> Chen Jun<sup>2</sup>

Qian Qing<sup>1</sup> Wang Xiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup>Zhenjiang Vocational Technical College, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

**Abstract** After the preparation of the multi-feature micro-bending mold, the isobaric micro-bending of foil plate can be achieved by laser dynamic flexible microforming under single pulse. In order to investigate the workpiece size (thickness) and grain size effects on high strain rate deformation behavior of foil plate, the digital microscopic is used to observe the surface topography of formed parts. Besides, Triboindenter nanomechanical test instrument is employed to obtain the micro-hardness distribution along thickness direction. With the aid of cold mosaic technique, the thinning rate of thickness is measured. Experimental results show that the contour of formed parts change from dome shape to groove shape when the thickness decreases from 50  $\mu\text{m}$  to 30  $\mu\text{m}$  due to the reduced flow stress of copper foil. After the strong impact with the bottom of micro-mold, the groove-like parts rebound and the micro-hardness of parts is improved significantly. Compared with the fine-grained formed parts, the forming ability is rather poor with the uneven rebound deformation and strain hardening across thickness direction. The maximum thinning rate of coarse-grained parts has an increase of approximately 10% than the fine-grained ones, which means the fillet region is easier to rupture.

**Key words** laser optics; laser technology; size effects; dynamic microforming; copper foil; flexible rubber

**OCIS codes** 140.3538; 000.2170; 160.3900

收稿日期: 2014-12-12; 收到修改稿日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51175235)、江苏省自然科学基金(BK 2012712)、江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB460003)

作者简介: 马友娟(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: phyllismay@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.cn(通信联系人)

## 1 引言

随着电子、医疗、能量存储领域产品的微型化、集成化发展趋势,金属微零件以其优良的力学性能和热稳定性在实际应用中愈趋广泛。微拉深、微压印、微挤压等传统微塑性成形方法在金属微零件制造领域发挥了重要作用<sup>[1-2]</sup>。但传统微成形工艺系统由于微模具加工困难、对中性差等难题,其应用范围受到复杂三维(3D)形状及高硬度、脆性难成形材料的限制。近年来迅速发展的激光动态微成形技术( $\mu$ LDF)结合了激光冲击喷丸和高速成形的优点,通过激光脉冲产生的等离子体膨胀对工件施加成形压力,为金属微零件尤其是金属薄板的成形提供了一定的技术支持<sup>[3-5]</sup>。激光冲击过程中工件应变率高达 $10^{6-7} \text{ s}^{-1}$ ,高应变中的惯性作用有利于延长难成形材料的极限塑性应变,成形能力相比于准静态成形过程也明显提高<sup>[6-7]</sup>。激光动态温热成形在此基础上融入温热成形的特点,能有效改善材料的不均匀塑性变形行为,提高薄板的成形能力<sup>[8]</sup>。由于激光能量相比于爆炸、电磁等高速成形方式,能量集中且精确可控,因此更加适合沟槽、圆环等复杂3D零件的局部成形<sup>[9-10]</sup>。然而当成形件尺寸减小到微尺度时,材料的力学属性、摩擦行为、变形机理不同于宏观成形,尺寸效应<sup>[11-14]</sup>出现,对微零件精确成形及微系统的设计产生极大影响。

目前尺寸效应方面的研究主要涉及的是基于传统塑性成形工艺发展起来的微成形方法<sup>[15-18]</sup>,其加载方式为静态、准静态条件。在激光冲击波加载下,金属材料发生高应变率绝热塑性变形,迅速温升达到动态再结晶条件,其力学响应发生变化。Meyers等<sup>[19]</sup>发现高应变率下材料的冲击响应受晶粒尺寸影响,为滑移、孪晶两种塑变机理的相互竞争。粗晶件由于发生动态再结晶,变形区域内出现孪晶及细小晶粒,且易于发生局部塑性变形,而细晶件变形主要以滑移为主,变形较均匀。Schmidt等<sup>[20]</sup>通过扭转式霍普金森杆测试和杆撞击测试研究了高导无氧铜箔(OFHC)晶粒尺寸对高应变率变形行为的影响。发现高应变率下屈服应力与晶粒尺寸的关系类似于准静态条件,而成形件的表面不规则形貌及截面不均匀变形受晶粒尺寸影响显著。Hu等<sup>[21]</sup>研究了激光高速冲击过程中工件厚度、光斑大小及晶粒尺寸对凹坑深度的影响。Gao等<sup>[22]</sup>结合临界应力模型(MST)和3D分离位错动态模型(DDD)来模拟激光动态微成形中材料动态响应与尺寸效应和高应变率的关系。

然而关于激光冲击加载箔板中尺寸效应的研究刚刚起步,尺寸效应对箔板高应变率成形性能方面的实验研究还很少。通过激光动态柔性成形技术,利用激光冲击软膜加载箔板,实现单次脉冲下4个不同特征尺寸弯曲件的等压成形。同时探讨了工件尺寸(厚度30、50  $\mu\text{m}$ )、晶粒尺寸(粗晶、细晶)对铜箔高应变率变形中成形精度、截面微硬度分布及厚度减薄率的影响。

## 2 实验原理与实验准备

### 2.1 实验原理

激光动态柔性成形不同于激光直接冲击成形,这种成形技术通过激光冲击软膜加载薄板使之在模具中塑性变形,可有效避免工件因激光辐射烧蚀而表面质量下降。激光动态柔性成形原理如图1所示。强脉冲激光透过透明的约束层辐射到软膜上表面的黑漆吸收层时,黑漆吸收层吸收能量迅速气化、电离为高温高压等离子体。该等离子体在约束层和软膜间剧烈膨胀,诱发高压冲击波加载柔性软膜。基于阻抗匹配原理,当冲击波从低阻抗软膜传播到高阻抗金属薄板时,冲击波压力进一步放大。当冲击波峰值压力超过材料的弹性极限强度时,工件在多特征尺寸微弯曲模具中等压变形。工件成形后,受压缩的软膜由于高弹特性和几乎不可压缩性迅速从工件表面分离,立即恢复原状。此过程中,由于软膜的隔热作用,工件能有效避免高温等离子体的热影响从而保护表面质量。

### 2.2 材料与实验准备

由于铜箔在金属板成形中具有极好的延展性、抗腐蚀性和成形特性,实验采用30  $\mu\text{m}$ 和50  $\mu\text{m}$ 两种厚度的T2紫铜箔作为研究对象并探讨工件尺寸(箔板厚度)对微变形行为的影响。将箔材置于真空炉中进行400  $^{\circ}\text{C}$ ~1 h和600  $^{\circ}\text{C}$ ~1 h的退火处理以得到预期的细晶和粗晶结构。退火后的箔材经打磨、抛光和质量分数为10%的 $\text{FeCl}_3$ 溶液腐蚀后,截面微观组织如图2所示。

模具材料采用硬度、韧性及耐磨性较高的1095高碳钢,经热处理后模具硬度可达65HRC。利用光学曲线磨床在模具上加工4个平行分布但特征尺寸不同的弯曲通槽。通槽内腔表面经过研磨抛光后进行超声清洗以保证表面光亮平滑,其三维形貌如图3所示。

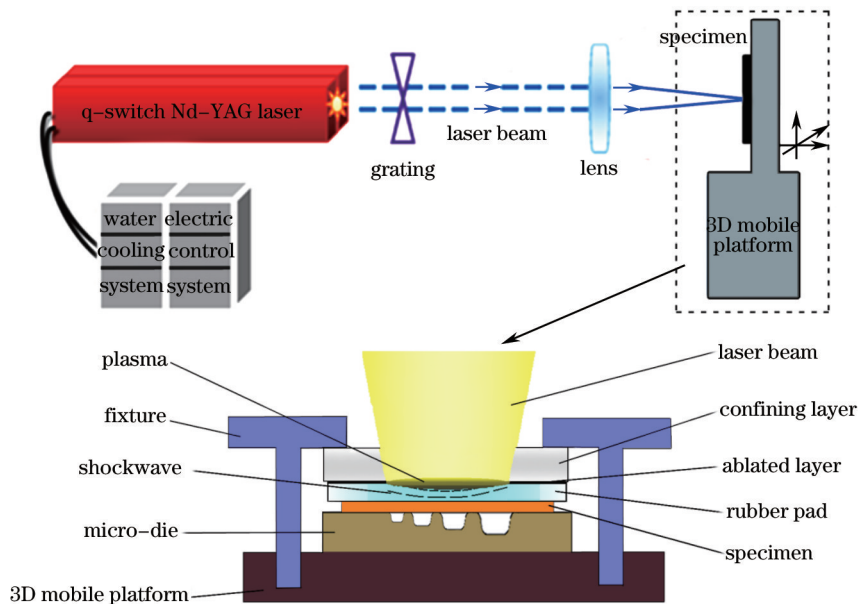


图1 激光动态柔性成形原理图

Fig.1 Principle of laser dynamic flexible microforming

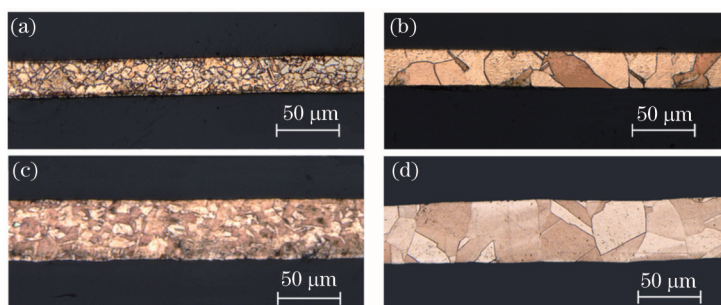


图2 退火铜箔的微观组织。(a) 30 μm 细晶; (b) 30 μm 粗晶; (c) 50 μm 细晶; (d) 50 μm 粗晶

Fig.2 Microstructure of annealed copper foil. (a) 30 μm fine grain; (b) 30 μm coarse grain; (c) 50 μm fine grain; (d) 50 μm coarse grain

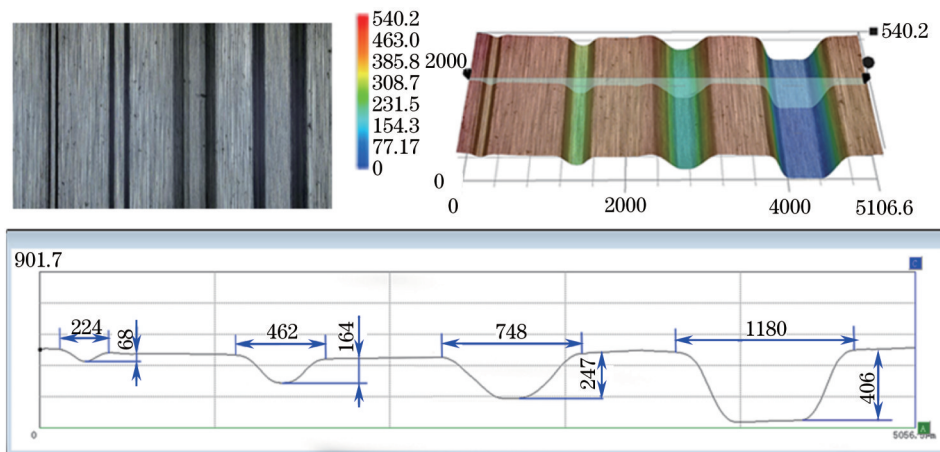


图3 弯曲微模具三维结构图(单位: μm)

Fig.3 3D structure of micro-bending die (unit: μm)

实验中使用Thales公司研制的Nd:YAG-GAIA R激光器,其光束能量为平顶分布,激光波长为1064 nm,脉冲宽度为20 ns。调整工作台位置使光斑直径为6 mm,此时光斑能完全覆盖4个平行的弯曲槽从而实现单脉冲下多槽的同时等压成形。约束层选取3 mm厚的有机玻璃(PMMA),以保证良好的透光性和耐冲击性。约束层和工件间放置的软膜由800 μm厚的硅橡胶制成,其表层涂覆一层黑漆以吸收激光能量。激光冲击微弯曲实验参数如表1所示。

表 1 激光冲击微弯曲实验参数

Table 1 Experimental parameters of laser shock micro-bending forming

Parameter	Value
Thickness of foil / $\mu\text{m}$	30, 50
Thickness of rubber pad / $\mu\text{m}$	800
Laser energy /J	2
Spot diameter $\Phi$ /mm	6
Power density /( $\text{GW}/\text{mm}^2$ )	3.54
Thickness of PMMA /mm	3

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 三维形貌和成形精度

为了定性研究箔板厚度及晶粒尺寸对成形件形貌和成形精度的影响,采用基恩士 VHX-1000 超景深三维显微镜对微弯曲成形件的表面 3D 形貌及二维(2D)轮廓进行测量。

图 4 为激光冲击高应变率下成形件的 3D 形貌。其中图 4(a)、(b)为 50  $\mu\text{m}$  铜箔在冲击波作用下仅发生了拉深变形,形成了 4 个圆顶状形貌。而图 4(c)、(d)中所示为 30  $\mu\text{m}$  铜箔形成了形状类似模具的微弯曲件,图 4(d)中 4 号弯曲件回弹现象明显。说明 30  $\mu\text{m}$  箔板塑性变形经历了三个阶段:1) 工件首先在冲击波作用下被拉深至模具底部;2) 在冲击波和惯性共同作用下逐渐填充凹模至完全贴合;3) 冲击波载荷卸载后,工件发生一定程度的弹性恢复。可见激光高应变率加载下,厚度较小的箔板发生的塑性形变较大,这种类似于准静态条件的变形规律是由箔板的力学性能差异引起的。一方面当工件厚度减薄而微观结构保持不变时,内部总体晶粒数量及阻止位错滑移的晶界数量会随之下降,晶界强化效果减弱。另一方面微成形中箔板厚度减小到一定程度时,表层晶粒与内部晶粒数量相当。由于表面晶粒上的位错可以直接滑移出自由表面,无法在表面塞积,因此表面晶粒所受约束比内部晶粒小。故随着表面晶粒体积比值的增大,工件总体屈服强度下降<sup>[23]</sup>。

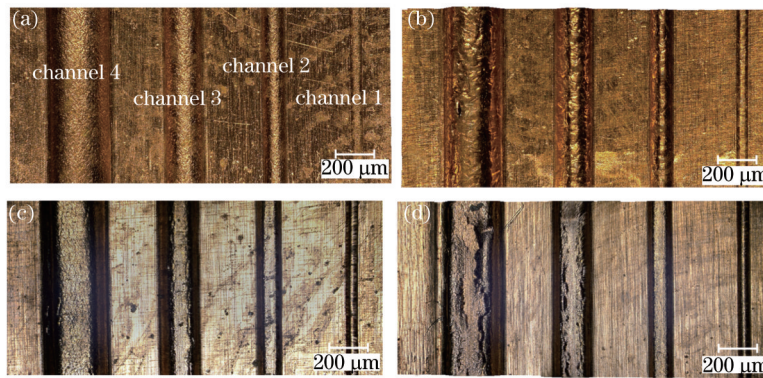


图 4 不同厚度、晶粒尺寸下微弯曲件的 3D 形貌。(a) 50  $\mu\text{m}$  细晶件; (b) 50  $\mu\text{m}$  粗晶件; (c) 30  $\mu\text{m}$  细晶件; (d) 30  $\mu\text{m}$  粗晶件

Fig.4 3D topography of microparts with different thicknesses and grain sizes. (a) 50  $\mu\text{m}$  fine grain; (b) 50  $\mu\text{m}$  coarse grain;

(c) 30  $\mu\text{m}$  fine grain; (d) 30  $\mu\text{m}$  coarse grain

对比粗晶和细晶成形件表面形貌可知,图 4(b)、(d)中所示的粗晶件表面更易破裂,且破裂位置主要集中于底部圆角处。这是由于粗晶件厚度方向上晶粒数量很少,只有少量的滑移系统参与塑性变形,导致材料失效时的破裂应变较小。在一定的冲击载荷条件下,作用于圆角处的拉伸力和摩擦力抑制了该处材料流动,晶粒会经历额外的拉长、旋转等塑性变形,导致底部圆角区域出现应变集中甚至破裂。

图 5 进一步对比了 4 号弯曲件的 2D 轮廓成形精度。由图可见,30  $\mu\text{m}$  弯曲件能完全填充模具的底部圆角从而较好的复制模具的槽状轮廓,但其成形深度由于回弹形变低于模具槽深。尤其是粗晶件底部内凹,底部中心比底部圆角处低 25  $\mu\text{m}$ 。这说明高应变率加载下工件回弹行为同样受晶粒尺寸的影响,当微尺度工件的晶粒粗大时,回弹形变仅由少量晶粒承担,工件内晶粒不再均匀分布,其变形能力取决于单个晶粒自身的位置、尺寸、晶向。晶粒的各向异性和不均匀分布会导致晶粒间应变不兼容,不同晶粒的回弹形变不

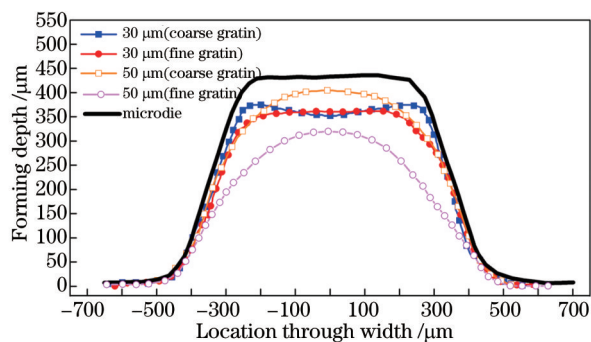


图5 铜箔厚度及晶粒尺寸对4号微弯曲件成形精度的影响

Fig.5 Effects of thickness and grain size on forming accuracy for channel 4 microparts

同,出现整体回弹形变不均匀的现象<sup>[24]</sup>。

### 3.2 微硬度表征

通过微硬度来表征晶粒尺寸和工件尺寸(箔板厚度)对激光冲击微弯曲件截面加工硬化的影响。借助镶嵌技术将成形件用环氧树脂固定进行研磨、抛光处理。选用Hysitron公司的TI 900 Tribofndenter原位纳米压痕系统配置的金钢石三棱锥压头压入成形件截面。纳米压痕测试最大加载压力为500  $\mu\text{N}$ ,压力保持5 s。测试位置为2号弯曲槽的底部中心和圆角位置,由截面中心向边缘依次打点,如图6(a)、(b)所示。压痕点间隔约为工件厚度的1/10以确保压入点的测量值不受相邻压痕加工硬化的影响。

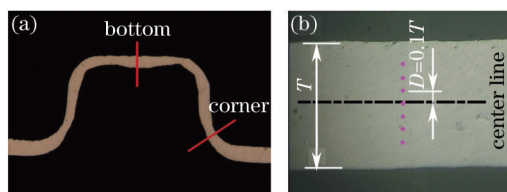


图6 (a) 微硬度测试位置; (b) 压痕测试点分布示意图

Fig.6 (a) Position of indentation test; (b) schematic distribution of testing points

图7对比了50  $\mu\text{m}$ 成形件底部和圆角处厚度方向上的硬度增量分布。零值对应中心轴,而正值、负值分别代表工件的拉伸侧、压缩侧。从图中可见,成形件的底部及圆角均呈现硬度增量由边缘区域到中心逐渐下降的整体趋势。在微弯曲过程中,边缘区域经受更大的拉应变或压应变,因此呈现出更明显的应变硬化。此外,由于激光冲击过程中绝热高应变率塑性变形等特性,成形件表面微观组织得到细化,截面边缘区域处力学性能大幅提升<sup>[25]</sup>。对比圆角和底部区域的硬度增量分布曲线,发现无论工件晶粒粗细,圆角处的硬度增量整体高于中心处。原因在于圆角区域受到的拉伸力和摩擦力相对较大,材料流动不利,圆角处晶粒经受额外的拉伸、旋转变形,导致圆角区域出现局部塑性应变。

除了成形位置的影响,箔板的高应变率应变硬化行为也受到晶粒尺寸的影响。图7中粗晶件底部位置的硬度增量随测试点分布相对分散并出现异常的浮点,变化范围为0.28~0.46 GPa,远远高于细晶件的0.08~0.16 GPa。这种分散、上下浮动的硬度分布是由于塑性应变集中于位置、取向有利的软晶粒上,导致厚度方向上塑性变形不均匀,表现为不均匀的应变硬化。

图8对比了两种厚度成形件底部位置的硬度增量分布。横坐标值表示厚度上测试点距中心的标准化位置,计算方法为测试点位置除以一半厚度。50  $\mu\text{m}$ 工件边缘硬度增量为0.45 GPa(粗晶)、0.16 GPa(细晶),而30  $\mu\text{m}$ 粗晶与细晶工件的边缘硬度增量比50  $\mu\text{m}$ 工件增加了一倍以上,均在1 GPa左右。结合图4分析结果,30  $\mu\text{m}$ 工件在成形的三个阶段中与模具底部发生高速碰撞并沿着模具型腔表面滑移,粗化的工件表面发生微塑性变形,表面硬度得到进一步强化。

此外,图8中工件截面边缘与中心的硬度差分别为0.25 GPa(50  $\mu\text{m}$ 粗晶),0.09 GPa(50  $\mu\text{m}$ 细晶)、0.45 GPa(30  $\mu\text{m}$ 粗晶),1.0 GPa(30  $\mu\text{m}$ 细晶),硬度增量梯度随着厚度的减小急剧增加。随着工件厚度的减小,变形几何梯度变陡,相应的塑性应变硬化梯度随之变大且晶粒尺寸的影响也愈趋显著。尤其在30  $\mu\text{m}$ 厚度的高应变梯度场中,粗晶件厚度方向上晶界数量较少,表面层位错不易堆积。位错更易于从高应变的工件表面压

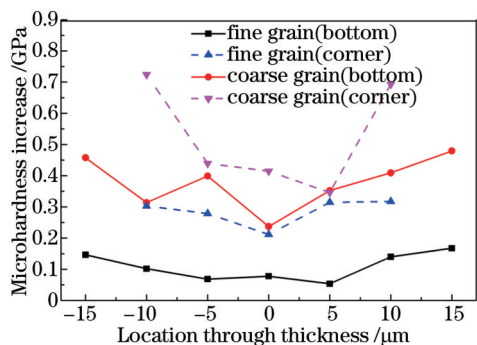


图7 50 μm成形件底部和圆角区域硬度增量分布图

Fig. 7 Micro-hardness increment distribution in the bottom and corner region of 50 μm formed parts

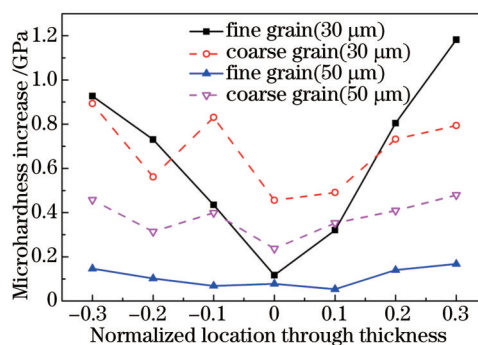


图8 不同厚度成形件的底部区域硬度增量分布对比图

Fig.8 Micro-hardness increments in the bottom region of formed parts with different thicknesses

入到低应变的内部区域<sup>[13]</sup>,导致30 μm粗晶件底部中心的硬度增值(0.45 GPa)远高于细晶件的0.1 GPa。

### 3.3 厚度减薄率分布

通过成形件截面上的厚度减薄率进一步表征高应变率下工件的成形能力。实验中使用KEYENCE VHX-1000C超景深显微系统来测量工件截面上的厚度分布,进而通过公式  $T = \frac{t_0 - t_i}{t_0}$  计算出减薄率,其中  $t_0$  为铜箔成形前初始厚度,  $t_i$  为成形件截面上测试点厚度。

与图5所示的30 μm 4号弯曲件轮廓相似,图9(a)、(b)中的30 μm 2号弯曲件同样复制模具的槽状轮廓。但随着模具特征尺寸的减小,箔板塑性形变相对减小,并未出现4号弯曲件中的破裂现象。对比图9(a)、(b)及图9(c)、(d)的截面厚度测量图,发现两种厚度成形件的形状差异导致了沿宽度方向的厚度分布规律不同。图9(a)、(b)所示的弯曲件在底部圆角和顶部圆角处局部减薄严重,槽底部和侧壁的减薄趋势减弱。30 μm细晶件圆角处厚度减小到15.03 μm,减薄率达到50%,而底部中心处减薄率约为圆角处的一半。图9(c)、(d)所示的圆顶成形件整体厚度分布相对较为均匀。即使是减薄最严重的顶部圆角处,图9(c)中的细晶件厚度也仅由初始的50 μm减小到42.43 μm,减薄率约15%。

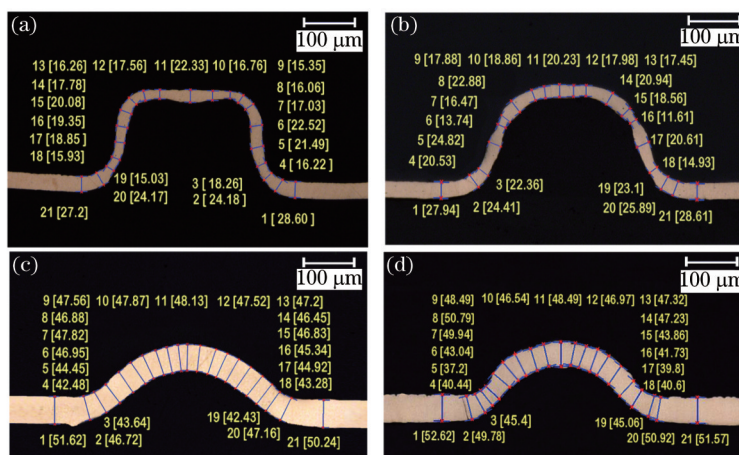


图9 2号微成形件截面厚度测量图。(a) 30 μm细晶件;(b) 30 μm粗晶件;(c) 50 μm细晶件;(d) 50 μm粗晶件

Fig.9 Thickness measurements in the section of channel 2. (a) 30 μm fine grain; (b) 30 μm coarse grain; (c) 50 μm fine grain; (d) 50 μm coarse grain

2号微成形件宽度方向的厚度减薄率分布如图10所示。4种材料下,成形件的最大减薄率分别为50%(30 μm细晶件)、61%(30 μm粗晶件)、15%(50 μm细晶件)、27%(50 μm粗晶件)。粗晶成形件相对细晶件最大厚度减薄率相应增加了10%(30 μm)和12%(50 μm),粗晶件在圆角处发生破裂的可能性更大,成形能力较差。此外,细晶件厚度减薄率相对中心(测量点11)左右分布较为对称,而粗晶件相对中心左右厚度分布差距明显。这是因为粗晶件成形区域内参与塑性变形的晶粒数较少,在一定的冲击载荷条件下,取向有利的晶粒发生的拉长、旋转等塑性变形较大,而取向不利的晶粒变形较小,变形不均匀性增强。

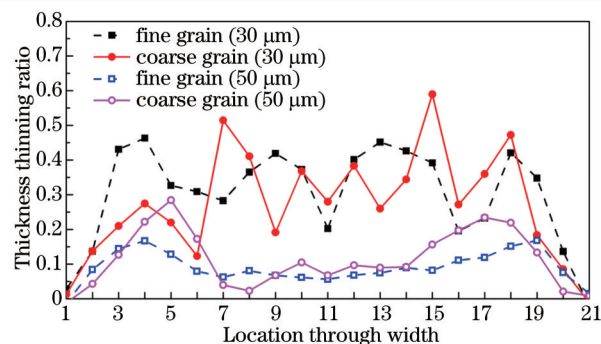


图10 2号微成形件截面减薄率分布。(a) 30  $\mu\text{m}$  细晶件; (b) 30  $\mu\text{m}$  粗晶件; (c) 50  $\mu\text{m}$  细晶件; (d) 50  $\mu\text{m}$  粗晶件

Fig. 10 Thickness thinning rate of channel 2. (a) 30  $\mu\text{m}$  fine grain; (b) 30  $\mu\text{m}$  coarse grain; (c) 50  $\mu\text{m}$  fine grain; (d) 50  $\mu\text{m}$  coarse grain

## 4 结 论

制备了多特征尺寸微弯曲模具,并利用激光动态柔性成形技术实现了单次脉冲下箔板的等压弯曲成形。揭示了激光动态柔性加载下,工件尺寸(箔板厚度)和晶粒尺寸对箔板成形精度、微硬度分布、厚度减薄率等高应变率变形行为的影响。

1) 高应变率冲击成形中箔板回弹形变与晶粒尺寸密切相关。细晶箔板整体回弹形变均匀,成形精度高。单个晶粒取向对粗晶箔板的回弹行为影响显著,回弹形变不均匀。

2) 高应变率下应变硬化行为与工件的厚度、晶粒尺寸、成形位置相关。30  $\mu\text{m}$  铜箔与模具底部高速碰撞,表面发生微塑性变形,表面硬度比50  $\mu\text{m}$  成形件增大一倍,呈现由表面区域向中心区域逐渐下降的趋势。随着箔板厚度的减小及晶粒尺寸的增大,箔板应变硬化梯度增大,异常浮动的硬度增量分布说明成形件厚度方向的变形不均匀。

3) 30  $\mu\text{m}$  的槽状成形件在底部圆角和顶部圆角处局部减薄严重,减薄率达到50%(细晶)、60%(粗晶)。粗晶成形件最大厚度减薄率相对细晶件增加了10%(30  $\mu\text{m}$ )和12%(50  $\mu\text{m}$ ),圆角处晶粒经受额外的拉伸、旋转变形极易出现局部塑性应变而破裂。此外,粗晶工件厚度减薄率分布相对中心(测量点11)对称性不如细晶件,其均匀塑性变形能力及微成形能力较差。

## 参 考 文 献

- 1 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(1-3): 70-79.
- 2 Geiger M, Kleiner M, Eckstein R, *et al.*. Microforming[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(2): 445-462.
- 3 Gao H, Ye C, Cheng G J. Deformation behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(5): 051011.
- 4 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming, *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(1): 135-138.  
周建忠, 张永康, 周 明, 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. *中国激光*, 2005, 32(1): 135-138.
- 5 Wang Xiao, Liu Hui, Shen Zongbao, *et al.*. Forming ability of the metal foil forming by laser-driven multi-layered flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40 (5): 0503006.  
王 霄, 刘 辉, 沈宗保, 等. 激光驱动复合飞片加载金属箔板的成形能力[J]. *中国激光*, 2013, 40 (5): 0503006.
- 6 Li J, Gao H, Cheng G J. Forming limit and fracture mode of microscale laser dynamic forming[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(6): 061005.
- 7 Cheng G J, Pirzada D, Zhou M. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(6): 063108.
- 8 Liu Huixia, Zhang Qiang, Gu Chunxin, *et al.*. Experimental investigation on warm micro-forming by laser-driven flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0703011.  
刘会霞, 张 强, 顾春兴, 等. 激光驱动飞片微塑性温成形实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0703011.

- 9 Gao H, Cheng G J. Laser-induced high-strain-rate superplastic 3-D microforming of metallic thin films[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(2): 273-281.
- 10 Lu Mengmeng, Liu Huixia, Shen Zongbao, *et al.*. Experiment and simulation of multihole micro-punching with complex layouts by laser-driven flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403004.  
陆萌萌, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 激光驱动飞片复杂轮廓多孔微冲裁实验及模拟[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403004.
- 11 Vollertsen F, Biermann D, Hansen H N, *et al.*. Size effects in manufacturing of metallic components[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, 58(2): 566-587.
- 12 Raulea L V, Goijaerts A M, Govaert L E, *et al.*. Size effects in the processing of thin metal sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(1): 44-48.
- 13 Mahabunphachai S, Koç M. Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(9): 1014-1029.
- 14 Gau J T, Principe C, Yu M. Springback behavior of brass in micro sheet forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191(1): 7-10.
- 15 Parasiz S A, Vanbenthysen R, Kinsey B L. Deformation size effects due to specimen and grain size in microbending[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(1): 011018.
- 16 Chan W L, Fu M W. Experimental and simulation based study on micro-scaled sheet metal deformation behavior in microembossing process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 556: 60-67.
- 17 Fu M W, Chan W L. Geometry and grain size effects on the fracture behavior of sheet metal in micro-scale plastic deformation[J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (10): 4738-4746.
- 18 Kim G Y, Koç M, Ni J. Experimental and numerical investigations on microcoining of stainless steel 304[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(4): 041017.
- 19 Meyers M A, Andrade U R, Chokshi A H. The effect of grain size on the high-strain, high-strain-rate behavior of copper[J]. *Metallurgical and materials transactions A*, 1995, 26(11): 2881-2893.
- 20 Schmidt C G, Caligiuri R D, Giovanola J H, *et al.*. Effect of grain size on high strain rate deformation of copper[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1991, 22(10): 2349-2357.
- 21 Hu Y X, Li K M, Qi C J, *et al.*. Size effect on indentation depth of oxygen-free high purity copper induced by laser shock processing [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 573-578.
- 22 Gao H, Cheng G J. 3D microscale laser dynamic forming: Multiscale modeling and experimental validation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109 (10): 103511.
- 23 Raulea L V, Goijaerts A M, Govaert L E, *et al.*. Size effects in the processing of thin metal sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(1): 44-48.
- 24 Fu M W, Chan W L. A review on the state-of-the-art microforming technologies[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(9-12): 2411-2437.
- 25 Liu H X, Hu Y, Wang X, *et al.*. Grain refinement progress of pure titanium during laser shock forming (LSF) and mechanical property characterizations with nanoindentation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 564: 13-21.

栏目编辑: 张浩佳