

激光驱动飞片微塑性温成形实验研究

刘会霞 张 强 顾春兴 沈宗宝 马友娟 顾宇轩 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 提出了一种激光驱动飞片微塑性温成形方法,采用波长 1064 nm 的 Yd:YAG 激光器进行了温成形实验,对 T2 紫铜成形件三维形貌进行观测,分析了温度(25 ℃, 100 ℃, 150 ℃, 200 ℃)与激光能量(1020, 1380, 1690, 1900 mJ)对成形深度的影响;使用纳米压痕仪研究了成形件成形区域硬度变化规律,并对成形机理进行了初步分析。结果表明,激光驱动飞片微塑性温成形方法可以获得较好的综合性能:不仅可以提高紫铜温成形能力,而且可以适当增强冲击区域硬度。分析认为,激光驱动飞片微塑性温成形是激光驱动飞片冲击强化机制与温度软化机制相互竞争的结果。

关键词 激光技术; 微塑性温成形; 激光驱动飞片; 纳米压痕

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0703011

Experimental Investigation on Warm Micro-Forming by Laser-Driven Flyer

Liu Huixia Zhang Qiang Gu Chunxing Shen Zongbao Ma Youjuan
Gu Yuxuan Wang Xiao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In this paper, the laser-driven flyer warm micro-forming method is proposed. Warm forming experiments are carried out using Yd:YAG laser with wavelength of 1064 nm and 3D morphology of formed T2 copper parts are observed. The influence of temperature (25 ℃, 100 ℃, 150 ℃, 200 ℃) and laser energy (1020, 1380, 1690, 1900 mJ) on the forming depth are analyzed. Hardness variation of the formed parts in forming regions is studied using nanoindentation and the forming mechanism is preliminary analyzed. It is found that better comprehensive performance during the plastic deformation is obtained by the laser-driven flyer warm micro-forming method; not only warm formability can be improved but also the hardness can be improved properly in forming regions. It is concluded that the laser-driven flyer warm micro-forming results from the competitive effects of both the laser shock peening mechanism and temperature soften mechanism.

Key words laser technology; warm micro-forming; laser-driven flyer; nanoindentation

OCIS codes 140.3538; 000.2170; 160.3900

1 引 言

近年来,随着微机电系统(MEMS)的快速发展,具有轻、薄、短、小、多功能特点的微型产品需求量不断增加,从而带动了金属微成形技术的发展。在微塑性制造领域,激光冲击成形是利用激光诱导冲击波力效应的一种微塑性加工技术,成形件不仅

具有较高的耐磨、耐腐蚀性还有较长的疲劳寿命,因而成为近年来研究的热点^[1]。

在激光冲击成形领域, Peyre 等^[2]研究了激光冲击强化技术(LSP); Gao 等^[3-4]提出了激光动态成形技术(LDF); Zhou 等^[5]提出一种激光冲击成形技术(LSF),实验发现通过激光冲击成形可以提高

收稿日期: 2013-12-30; **收到修改稿日期:** 2014-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(51175235)、江苏省自然科学基金(BK2012712)、江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB460003)

作者简介: 张 强(1988—),男,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: zhj1310@qq.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.edu.cn

不锈钢的表面硬度,获得有利的残余应力场分布,从而提高材料使用寿命。Ocaña 等^[6]使用纳秒激光器进行了激光冲击不锈钢微弯曲成形实验,并研究残余应力场分布和弯曲角度的变化。2009年, Liu 等^[7]将金属飞片(厚度为 $17\ \mu\text{m}$ 的铝箔)引入到激光冲击成形中来,提出了一种新型的激光驱动飞片间接成形技术,有效避免了成形工件起皱,从而提高成形件表面质量。2009年,王霄等^[8-9]进行了激光驱动飞片加载工件成形实验,指出激光驱动飞片冲击工件的成形能力高于激光直接冲击。2012年, Liu 等^[10]利用激光驱动飞片微压印方法制造出凹槽尺寸为 $260\ \mu\text{m} \times 59\ \mu\text{m}$ 的微压印件。2012年,周建忠等^[11]提出一种激光冲击形成飞片进而驱动飞片成形工件的复合工艺,还讨论了使用铜箔飞片的可行性。2012年, Liu 等^[12]提出了一种激光驱动飞片微冲裁技术,采用厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的紫铜箔板进行了单孔和三孔的微冲裁实验,成形件具有较好的断口质量。

当成形特征尺寸小于 $1\ \text{mm}$ 时就会产生所谓的尺寸效应。室温下,尺寸效应往往导致冷成形过程充满不确定性,如塑性变形更加不均匀^[13]。最近的研究发现较高的成形温度可以改善材料的不均塑性变形行为,提高微型件的成形性能^[14-16]。Ye 等^[17]提出了一种温激光强化技术(WLSP),对 AA6061 进行实验研究,结果表明较高温度下有利于提高成形件的表面强度并降低表面粗糙度,从而提高疲劳寿命。Ye 等^[18]对成形温度分别为 $300\ \text{K}$, $400\ \text{K}$, $500\ \text{K}$ 时,激光直接冲击强化后铜箔的成形性能进行研究,结果显示温度越高、激光能量越大,成形深度越大。

激光诱导微塑性温成形方面的研究还刚刚起步,上述少量研究仅仅讨论了激光冲击直接成形,而激光驱动飞片间接温成形技术的研究还未见报道。因此,深入研究成形温度对激光驱动飞片温成形件综合性能的影响很有必要。本文首先进行了激光驱动飞片微塑性温成形实验,研究了厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的 T2 紫铜在不同成形温度($20\ ^\circ\text{C}$ 、 $100\ ^\circ\text{C}$ 、 $150\ ^\circ\text{C}$ 、 $200\ ^\circ\text{C}$),不同激光器能量($1020, 1380, 1690, 1900\ \text{mJ}$)下的成形性能;然后通过对不同温度下成形工件三维形貌观测实验和纳米压痕实验的结果进行讨论分析,初步揭示了激光驱动飞片微塑性温成形机理。

2 激光驱动飞片温成形原理

激光驱动飞片温成形工艺是一种典型的基于激

光的力效应的微塑性成形技术,其原理如图 1 所示。当高功率密度($10^9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 级)短脉冲($10^{-9}\ \text{s}$ 级)激光辐射照射到金属材料上时,金属材料表面吸收层(黑漆)迅速汽化,形成高温、高压等离子体^[19]。在约束层的作用下,剧烈膨胀的等离子体加载金属飞片冲击紧贴在工件上表面的柔性硅橡胶软膜,并产生向工件内部传播的强冲击波。工件置于模具中加热,成形温度由温控仪比例-积分-微分(PID)精确控制。当此高压冲击波峰值压力超过材料的 Hugoniot 弹性极限强度,工件在模具中塑性变形。

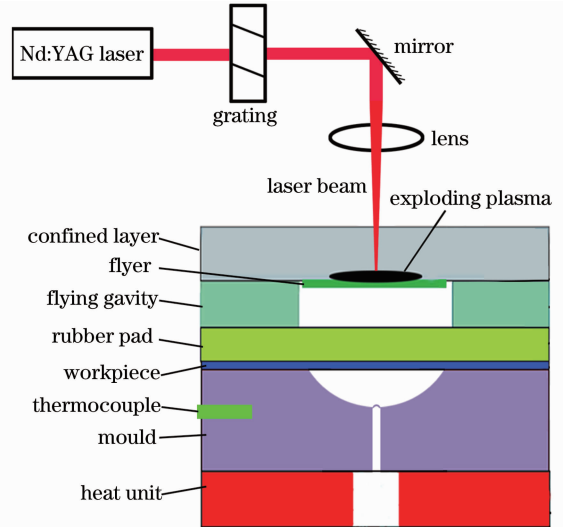


图 1 激光驱动飞片温成形原理图

Fig. 1 Principle of warm forming by a laser-driven flyer

3 实验

3.1 温成形实验

实验中采用 Splitlight 2000 型 Nd:YAG 激光器,激光波长 $1064\ \text{nm}$,脉冲宽度 $7\ \text{ns}$,最大单脉冲能量为 $2000\ \text{mJ}$ 。调节离焦量为 $110\ \text{mm}$,使得作用于工件上表面的光斑直径为 $1.2\ \text{mm}$ 。温成形实验中金属飞片选择纯度为 99.99% ,厚度为 $17\ \mu\text{m}$ 的铝箔,成形工件为 T2 紫铜,其化学成分含量见表 1,力学属性见表 2。热电偶传感器被固定在模具内部,模具采用 H13 耐热模具钢,其几何尺寸如图 2 所示,模具型腔呈半球状,半径为 $0.5\ \text{mm}$,底部开设有通气孔。约束层材料为透光率很高的 K9 玻璃,实验中飞片与约束层之间涂有耐高温黑漆作为激光能量吸收层。飞行腔使用厚度 $135\ \mu\text{m}$,孔径 $3\ \text{mm}$ 的聚酰亚胺(PI)薄膜。工件与飞行腔之间放置硬度为 $60\ \text{HV}$ 、厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 的硅橡胶薄膜,根据相关报道^[20],硅橡胶具有很高的分辨率(高达 $0.1\ \mu\text{m}$),比较适合微成形。

表 1 T2 紫铜成分

Table 1 Composition of T2 copper

Material	Cu+Ag	Bi	Sb	As	Fe	Pb	S	other
Mass fraction /%	99.9	0.001	0.002	0.002	0.005	0.005	0.005	0.1

表 2 T2 紫铜力学性能

Table 2 Mechanical property of T2 copper

Type	Density / (g/cm ³)	Tensile strength / (N/mm ²)	Elongation /%	Hardness /HV
Value	8.9	2305	25	90

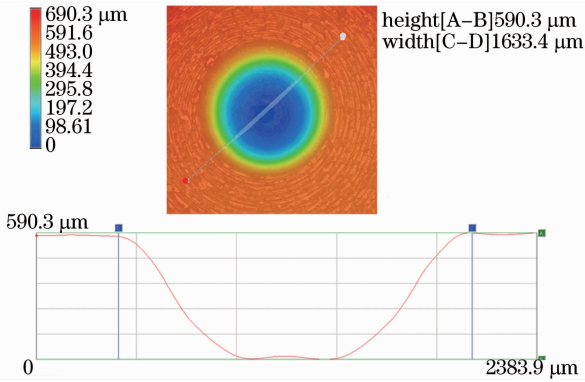


图 2 凹模尺寸

Fig. 2 Dimension of die

实验规划如表 3 所示,为了考察温度和激光器输出能量对成形精度的影响,温成形实验在成形温度分别为 25 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 脉冲激光能量分别为 1020, 1380, 1690, 1900 mJ 的条件下系统地研究了软膜、温度、激光器能量对工件成形性能的影响。

表 3 实验规划

Table 3 Experiment planning

Type	Value
Thickness of workpiece / μm	30
Thickness of flyer / μm	17
Temperature / °C	25, 100, 150, 200
Laser energy / mJ	1020, 1380, 1690, 1900
Defocusing amount / mm	110

3.2 纳米压痕实验

3.2.1 试样制备

纳米压痕技术被广泛应用于微机电系统中微型零件力学性能的测量^[21],是研究材料微塑性成形机械性能的可靠手段^[22-23]。实验中使用瑞士 CSM 公司 CPX+NHT+MST 型号纳米压痕仪,采用标准布氏金刚石三棱锥压头压入试样表面,线性加载方式。最大加载压力为 15 mN,加载速度和卸载速度都设置为 20 mN/min,压力保持 10 s。根据经典的 Oliver-Pharr 方法^[22]测试成形件表面微硬度与弹性模量。保持激光器能量为 1900 mJ 不变,选取 4 组不同成形温度下(25 °C ~ 200 °C)激光驱动飞片温

成形件作为试样进行测量。

将试样依次用丙酮和无水酒精清洗 30 min,烘干后使用氰基丙烯酸酯高强度粘结剂填充成形工件内腔,然后粘附在平整的试样载物钢块表面上。

3.2.2 测试点选择

研究微尺度激光冲击温成形,必须考虑激光诱导的冲击波的空间分布状态。Zhang 等^[24]在 Fabbro 模型的基础上,推导出了激光冲击波压力沿光斑径向方向变化的计算公式:

$$P(x,t) = P(t) \exp\left(-\frac{x^2}{2x_0^2}\right), \quad (1)$$

式中 $P(x,t)$ 表示冲击波压力, x 表示成形区域任意点与中心之距, x_0 表示光斑直径, 实验中 $x_0 = 1$ mm。

根据(1)式可知,激光能量在时间和空间上是类高斯分布的,即中心能量最大,成形过程受到的压力也最大,激光驱动飞片冲击强化效应在此位置最显著。通过测量成形区域中心处的硬度和弹性模量可以进一步理解激光驱动飞片温成形的机制。如图 3 所示对不同成形温度下的成形件分别选择 2 个位置(成形区域中心附近和基材)进行测量,每个位置取 3~5 个点然后取平均值。

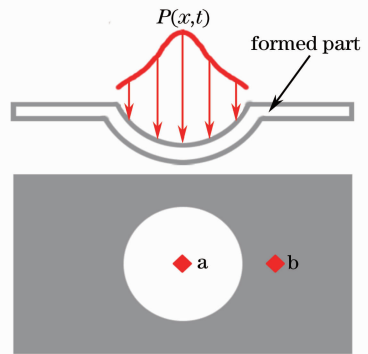


图 3 纳米压痕测试点位置

Fig. 3 Measurement position of nanoindentation

3.2.3 纳米压痕原理

测量材料的硬度和弹性模量是通过分析压痕实验加载-卸载过程得到的载荷-位移曲线实现的,材料的

硬度 H 和弹性模量 E 可以通过以下公式计算得到:

$$H = F/A, \quad (2)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2\beta \sqrt{A}}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}, \quad (4)$$

式中 F 为在任意压痕深度处的载荷; A 为在载荷 F 作用下压头与材料的接触面积; 对于 Berkovich 压头, β 取 1.034, 金刚石弹性模量 E_i 为 1141 GPa, 泊松比 $\nu_i = 0.07$ 。

4 结果与分析

4.1 软膜与成形温度对成形精度的影响

图 4 是成形温度为 200 °C 时使用硅橡胶软膜和使用飞片直接冲击成形的对比图。由于软膜具有避免金属飞片直接冲击受热的 T2 紫铜工件的作用, 因此可以提高成形件的表面成形质量, 如图 4(a) 所

示; 图 4(b) 显示飞片直接冲击工件后飞片粘附在成形件内腔而无法分离, 这可能是因为高应变率下的激光冲击成形过程伴随着剧烈的热耦合作用, 进而导致铝箔飞片表层温度达到熔点而烧蚀; 同时也表明硅橡胶软膜比较适用于微塑性成形, 可以提高工件的成形精度。文献[25]的研究结果得到了类似的结论: 采用硅橡胶薄膜可以制造出精度较高的微特征。实验中, 没有观察到软膜磨损、烧蚀、破裂等现象, 而且软膜具有高弹性有利于与成形工件快速分离。综上所述, 软膜有利于提高紫铜成形件的成形精度, 主要原因如下: 首先, 避免了工件与高速金属飞片直接接触; 其次, 防止受热工件成形过程直接暴露在空气中而导致过分氧化, 有利于提高成形表面质量; 再次, 耐热硅橡胶薄膜可以保护对温度敏感的黑漆(吸收层)防止变质而削弱能量吸收效果, 进而降低激光诱导的冲击波压力。

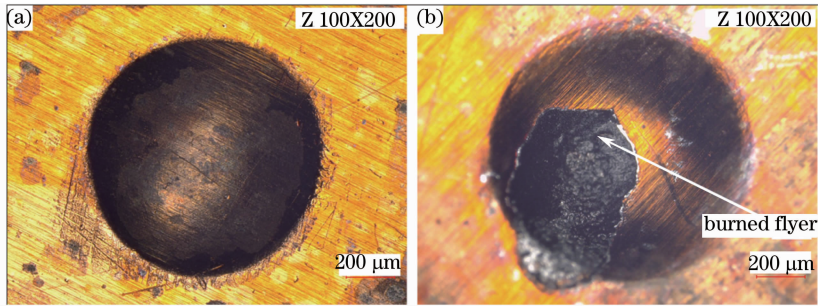


图 4 100 °C 时软膜对成形件表面质量的影响。(a) 有软膜; (b) 无软膜

Fig. 4 Influence of soft rubber on surface quality of shaped sheet at 100 °C. (a) With soft rubber; (b) without soft rubber

图 5 显示出 1900 mJ 能量时不同成形温度下成形件的超景深三维形貌观测结果。根据图 5(a) 中

显示的位移场分布可知, 工件的塑性变形不均匀性加强, 这可能与所谓的“尺寸效应”有关; 而图 5(d)

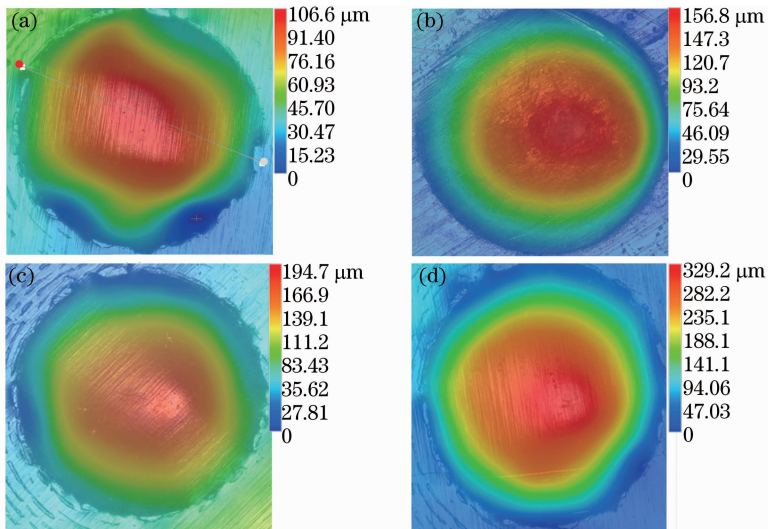


图 5 激光能量为 1900 mJ 时成形形貌图。(a) 25 °C; (b) 100 °C; (c) 150 °C; (d) 200 °C

Fig. 5 Topography of shaped sheet under 1900 mJ laser energy. (a) 25 °C; (b) 100 °C; (c) 150 °C; (d) 200 °C

同心圆形状的位移场分布显示随着成形温度的升高工件形变更均匀了,成形件具有相对更好的成形精度。文献[14]的研究结果发现,在微塑性成形过程中,随着温度升高,新的滑移系统被激发,工件的不均匀形变降低了,塑性得到提高,与实验中的观测结果一致。

微塑性成形精度是衡量成形能力的一个重要的指标,较高的成形温度提高了金属工件的塑性;一方面,硅橡胶软膜作为保护层可以降低受热工件表面氧化现象,避免了高速飞片和紫铜直接冲击;另一方面,软膜作为高弹性柔性体,具有良好的填充能力,这有利于提高工件的成形精度。此外,根据阻抗失配效应,当冲击波从低阻抗(软膜)传播到高阻抗(金属工件)时,冲击波压力会增大。文献[26]研究发现,利用软膜可以增大成形压力,进而提高工件的成形能力。因此,激光驱动飞片温成形工艺比较适合于微成形。

4.2 温度与激光器能量对成形深度的影响

成形温度和激光器能量对最大成形深度的影响如图 6 所示,最大成形深度随着温度的升高而增大,随着激光器能量的增强而增大。一方面,激光器能量为 1900 mJ 时,与 1020 mJ 相比不同成形温度下紫铜成形件成形深度分别是 125、150.3、165.8、202.3 μm ,分别提高了 169%、156%、152% 和 114%;另一方面,与常温下成形相比,成形温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 时不同激光器能量下(1020、1380、1690、1900 mJ)工件成形深度为 94.53、132.4、144.6、202.3 μm ,分别提高了 75.5%、66.5%、20.5% 和 39.5%。这说明工件在高应变率下微塑性变形,较高的激光器能量有利于提高成形深度;随着成形温度的逐渐升高,工件的塑性增强了,成形深度也得到较大提高。

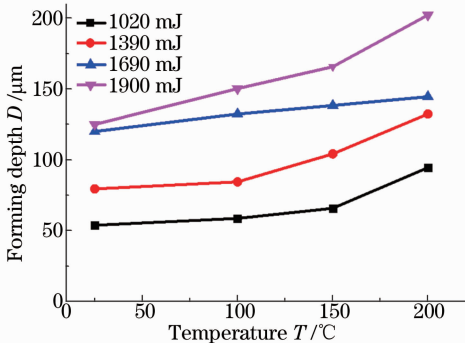


图 6 成形温度与激光器能量对成形深度影响

Fig. 6 Influence of forming temperature and laser energy on forming depth

4.3 成形温度对纳米压痕硬度和弹性模量的影响

为了探索激光驱动飞片温成形机制,选取 1900 mJ 能量下温度对成形件式样表面的纳米压痕硬度和弹性模量进行研究。图 7 显示出不同温度下载荷-压入深度载荷曲线。成形温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 时中心位置分别对应最大压入深度为 381.56 nm 和 491.24 nm,卸载后残余压深分别为 329.71 nm 和 409.54 nm。随着成形温度升高,成形区 a 与未成形区 b 处的卸载曲线存在“外移”(如图中箭头指向)现象,这是因为随着温度升高工件得到软化,表面硬度下降了,导致卸载曲线“滞后”。从图中还可以得出,工件冲击成形区 a(中心)硬度比未成形区 b(基材)大。

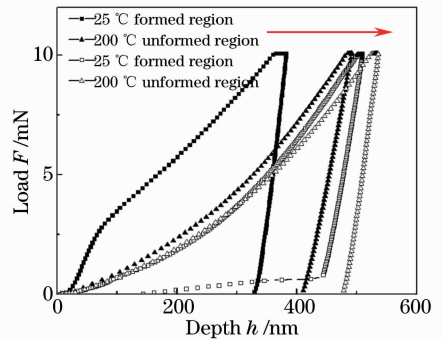


图 7 纳米压痕加载-压入深度曲线

Fig. 7 Loading-depth curves of nanoindentation

4.3.1 温度对纳米压痕硬度的影响

如图 8 所示,激光能量不变,材料在 a、b 处纳米压痕硬度随着温度的升高而下降,常温下最大,分别为 3329.144 MPa 和 2066.3 MPa;200 $^{\circ}\text{C}$ 最小分别为 2175.43 MPa 和 1681.92 MPa。相比于未成形区 b 处,成形温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 时 a 处纳米压痕硬度 E_a 分别提高了 61%、36%、28.6%、29.3%。随着温度的升高 a、b 处硬度都有明显下降的趋势,其中常温下成形区域 a 处硬度提

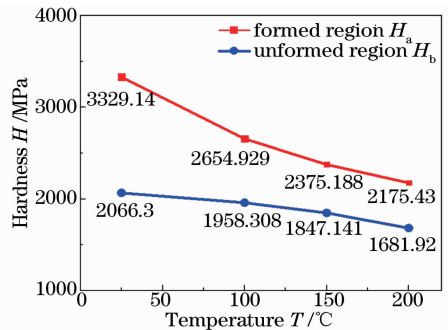


图 8 温度对纳米压痕硬度的影响

Fig. 8 Influence of temperature on the nanoindentation hardness

高幅度最大,这说明冷成形时,激光驱动飞片冲击强化作用较为显著;与常温下成形相比,200 ℃时虽然成形深度提高了 39.5%,但是表面硬度只提高 29.3%,表明较高成形温度下,紫铜塑性大幅提高,同时保留了冷成形下冲击强化的特点。文献[27]对铝箔(12.5 μm)在常温下成形件的表面硬度进行了纳米压痕实验,结果显示激光器能量密度为 0.63 GW/cm² 和 1.22 GW/cm² 时,硬底分别提高到 0.825 GPa 和 0.904 GPa。

4.3.2 温度对弹性模量的影响

从图 9 可以看出不同成形温度下成形区域 a 处和未成形基材 b 处表面纳米压痕硬度和弹性模量的变化情况。不同区域的弹性模量随着温度提高有降低的趋势,但都在 50~120 GPa 范围内变化;与基材 b 相比,成形区域 a 处弹性模量提高了,且随着成形温度的升高提高幅度有降低的趋势。一般认为弹性模量是材料的固有属性与材料的内部结构有关,随其微孔洞增多呈线性下降^[28]。常温下,成形区域 a 处弹性模量也增加到 120 GPa,提高了近 2 倍,这是由于在激光诱导强冲击波压力间接作用下成形,提高了工件的致密性。与常温下成形相比,200 ℃时成形区域 a 处硬度提高了 29%,弹性模量反而略有降低。分析认为这可能是由所谓的尺寸效应引起的。在纳米压痕实验中,即便对于均匀的材料,其测定的模量值也会随着载荷条件(压入深度)变化而发生变化^[29]。

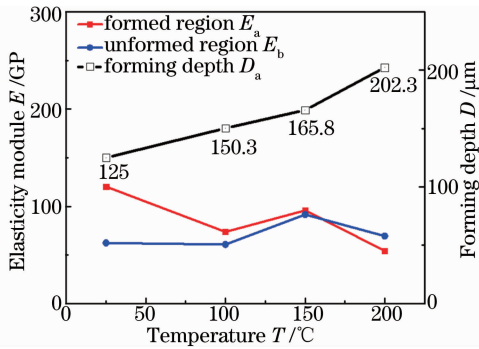


图 9 温度对弹性模量的影响

Fig. 9 Influence of temperature on elasticity modulus

纳米压痕实验结果显示,随着温度的升高,与未成形区 b 处相比,成形区域 a 处的弹性模量变化不大。这是因为较高初始成形温度下,工件受到剧烈冲击导致局部温度急剧升高,温度对工件的软化作用加强了,进而部分抵消了激光冲击过程由应变硬化、应变率强化以及晶粒细化主导的激光驱动飞片冲击强化作用,因而工件塑性变形更加均匀,弹性模量变化

不明显。这说明激光驱动飞片冲击紫铜微塑性温成形过程中温度对成形件力学性能有较大影响。

4.3.3 温成形机理讨论

一方面,大量的研究发现^[27,30-31],基于激光力效应的塑性变形可以改变材料的力学性能,因为极高应变率下(大于 10⁶ s⁻¹)塑性变形导致加工硬化和应变率强化,同时金属材料微观组织也发生变化,伴随着晶粒细化,材料的强度和硬度得到大大提高。另一方面,对于金属材料高速变形,当应变速率达到了 10⁵~10⁷ 时,整个成形过程的时间是很短的(几十纳秒),在如此短的时间内,90%左右的塑性功转化为热量并且来不及散失,局部温升高达 10² K~10³ K^[32]。因此在激光驱动飞片温成形过程中,由于绝热温升而引起的热软化效应不能忽略。当成形温度较高、应变率较大时,在温度场与应力场耦合作用下,成形区域局部温升较高甚至能达到紫铜的动态再结晶温度,进而削弱了激光驱动飞片冲击强化作用。研究认为,对于紫铜成形温度为 200 ℃时不仅成形深度提高,塑性较好,而且成形件表面得到一定强化,提高了材料的疲劳寿命和耐磨性能。分析认为,激光驱动飞片温成形过程是强化机制与温度软化机制共同竞争的结果,这方面值得深入研究。

5 结 论

1) 随着成形温度升高,成形深度增大;与基材硬度相比,25 ℃~200 ℃范围内,紫铜成形区域表面纳米压痕硬度相对于基材硬度都提高了,但提高幅度随着温度升高而下降。激光器能量为 1900 mJ,成形温度为 200 ℃时,成形深度最大为 202.3 μm,与常温(25 ℃)相比提高了 39.5%;成形中心区域表面硬度为 2175.43 MPa,增加了 29.3%。

2) 激光驱动飞片微塑性温成形是激光驱动飞片冲击强化机制与温度软化机制竞争的过程。温度较低时(25 ℃)时,强化作用起到主导作用,成形区域表面纳米压痕硬度提高较为明显,但塑性较低成形深度较小;随着成形温度提高至 200 ℃时,成形区域局部温升较高,成形深度变大,同时成形区域硬度相对于未成形区域提高了,保持了一定的激光强化作用。因此,微尺度下,合理的成形温度可以改善工件成形性能。

3) 激光驱动飞片温成形方法拓展了微塑性加工技术,比较适用于成形更薄、更难成形的金属箔板。温度对成形性能影响的机理有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 Peyre P, Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, 27(12): 1213–1229.
- 2 Peyre P, Scherpereel X, Berthe L, *et al.*. Current trends in laser shock processing[J]. *Surface Engineering*, 1998, 14(5): 377–380.
- 3 Gao H, Cheng G J. Laser-induced high-strain-rate superplastic 3-D microforming of metallic thin films [J]. *J Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(2): 273–281.
- 4 Cheng G J, Pirzada D, Ming Z. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(6): 063108.
- 5 Zhou J Z, Yang J C, Zhang Y K, *et al.*. A study on super-speed forming of metal sheet by laser shock waves[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1): 241–244.
- 6 Ocaña J L, Morales M, Porro J A, *et al.*. Laser shock microforming of thin metal sheets with ns lasers[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(8): 201–206.
- 7 Liu H, Shen Z, Wang X, *et al.*. Numerical simulation and experimentation of a novel laser indirect shock forming [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(6): 063107.
- 8 Wang Xiao, Yang Kun, Liu Huixia, *et al.*. Loading mechanism of metal foil forming under laser driven flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1569–1574.
王 霄, 杨 昆, 刘会霞, 等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形的加载机制[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1569–1574.
- 9 Wang Xiao, Yang Kun, Liu Huixia, *et al.* [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(1): 25–30.
王 霄, 杨 昆, 刘会霞, 等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形及数值模拟[J]. *塑性工程学报*, 2009, 16(1): 25–30.
- 10 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.
- 11 Zhou Jianzhong, Gao Bin, Huang Shu, *et al.*. Research on laser shock induced composite forming of copper foil flyer[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0703009.
周建忠, 高 彬, 黄 舒, 等. 激光冲击铜箔飞片及其复合成形研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0703009.
- 12 Liu H, Wang H, Shen Z, *et al.*. The research on micro-punching by laser-driven flyer[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 54: 18–24.
- 13 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.
- 14 Egerer E, Engel U. Process characterization and material flow in microforming at elevated temperatures [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2004, 6(1): 1–6.
- 15 Eichenhueller B, Egerer E, Engel U. Microforming at elevated temperature-forming and material behaviour [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33(1-2): 119–124.
- 16 Eichenhüller B, Engel U. Microforming of titanium-forming behaviour at elevated temperature [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2008, 222(1): 77–82.
- 17 Ye C, Liao Y, Cheng G J. Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in aluminum alloy 6160[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(4): 291–297.
- 18 Ye C, Cheng G J. Effects of temperature on laser shock induced plastic deformation: the case of copper [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(6): 061009.
- 19 Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775–784.
- 20 Rhim S H, Son Y K, Oh S I. Punching of ultra small size hole array[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2005, 54(1): 261–264.
- 21 Li Ming, Wen Shizhu. Theoretical methods on nanoindentation [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(3): 142–145.
黎 明, 温诗铸. 纳米压痕技术理论基础[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(3): 142–145.
- 22 Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564–1583.
- 23 Oliver W C, Pharr G M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology [J]. *Journal of Materials Research*, 2004, 19(1): 3–20.
- 24 Zhang W, Noyan I C, Yao Y L. Microscale laser shock peening of thin films, part 2: high spatial resolution material characterization [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, 126(1): 18–24.
- 25 Nagarajan B, Castagne S, Wang Z. Mold-free fabrication of 3D microfeatures using laser-induced shock pressure [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 268(1): 529–534.
- 26 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 and Manufacture*, 2013, 67: 8–17.
- 27 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.
- 28 Sanders P G, Eastman J A, Weertman J R. Elastic and tensile behavior of nanocrystalline copper and palladium [J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(10): 4019–4025.
- 29 Ren Mingxing, Li Bangsheng, Yang Chuang, *et al.*. Hardness and elastic modulus of microcastings by nanoindentation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(2): 231–236.
任明星, 李邦盛, 杨 闯, 等. 纳米压痕法测定微铸件硬度及弹性模量[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(2): 231–236.
- 30 Zhu Xiangqun, Zhou Ming, Dai Qixun, *et al.*. Investigation of surface ultra-refinement of austenitic stainless steel induced by laser shock processing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(17): 1581–1585.
朱向群, 周 明, 戴起勋, 等. 奥氏体不锈钢表面激光冲击晶粒超细化的研究[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(17): 1581–1585.
- 31 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.
- 32 Yang Yang, Cheng Xinlin. Current status and trends in researches on adiabatic shearing [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(3): 401–408.
杨 扬, 程信林. 绝热剪切的研究现状及发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(3): 401–408.

栏目编辑: 韩 峰