

文章编号 1004-924X(2014)09-2292-07

激光冲击软模大面积微弯曲成形方法

王 霄*, 张 迪, 顾春兴, 沈宗宝, 刘会霞
(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为了实现金属箔板大面积微弯曲成形, 本文结合激光冲击微弯曲成形技术与软模成形技术的优点, 提出了激光冲击软模大面积微弯曲成形方法。该方法是在脉冲激光冲击波压力下, 将软模作为柔性冲头作用于金属箔板来实现工件成形的。实验中使用了 Innolas Gmbit 公司生产的 Spitlight 2000 THG 脉冲激光器, 将 250 μm 厚的聚氨酯橡胶薄膜作为软模, 采用德国 LPKF-ProtoMat-C60 型雕刻机在印刷电路板上加工出深度为 120 μm 的 U 型多槽模具, 实现了在厚度为 30 μm 的铜箔板上一次性对 3 个 U 型凹槽冲击成形。用 KEYENCE VHX-1000C 超景深三维显微系统进行工件观测, 结果显示工件上的微成形槽具有良好的轮廓质量。以 ANSYS/LS-DYNA 为平台, 使用有限元建模(FEM)方法对微弯曲过程进行了数值模拟。实验和模拟结果均表明, 加载软模的工件与模具的 U 型凹槽特征在形状上更加接近, 成形工件更加均匀, 而且具有较好的表面质量, 其最大平均成形深度可达 110 μm , 大于激光直接冲击成形的最大深度(88 μm), 说明使用软模提高了充型能力。

关键词: 激光冲击; 金属箔板; 软模成形; 微弯曲成形; 大面积成形

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2292

Large area micro bending method by soft punch under laser shock wave based on multi-groove mold

WANG Xiao*, ZHANG Di, GU Chun-xing, SHEN Zong-bao, LIU Hui-xia

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

* Corresponding author, E-mail: wx@ujs.edu.cn

Abstract: To implement the large area micro bending forming of metal foils, this paper presents a large area micro bending method by laser shock wave based on advantages of laser shock bending forming and soft punch forming. With this method, the metal sheets would be deformed under the soft punch. In the experiments, a pulse Nd-YAG laser (Innolas Gmbit Spitlight 2000 THG) with Gaussian distribution beam was employed, and the polyurethane rubber with a thickness of 250 μm were used as the soft punch. The U-shaped grooves with a depth of 120 μm were machined on a printed circuit board with an engraving machine made in Germany(LPKF-ProtoMat-C60). After one impact, three U-shaped grooves were replicated from the mold on cooper foils with a thickness of 30 μm . Observed by the digital measurement system (KEYENCE VHX-1000C), the deformed micro grooves in the work piece own good contour shape. Besides, the numerical simulation was used to

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2014-01-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51175235); 江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2012712); 江苏高校自然科学基金资助项目(No. 13KJB460003); 江苏大学大学生科研立项资助项目(No. 12A396)

understand the micro-bending process by the ANSYS/LS-DYNA software. The experiment and simulation results show that the work pieces with soft punch have more uniform multi-groove contour shapes and good surface quality. The depth of the deformed micro grooves in the work piece reaches as deep as $110\ \mu\text{m}$, higher than that from the laser direct shock shape ($88\ \mu\text{m}$). Therefore, it implies that this kind of process improves the work piece forming ability and quality.

Key words: laser shock; metal sheet; flexible rubber forming; micro bending forming; large area forming

1 引 言

激光成形技术是近年来发展迅速的一项新技术,已广泛应用于材料成形及表面强化等研究领域^[1-4]。随着该技术研究的深入和应用范围的扩大,激光冲击微成形技术逐渐成为国内外学者的研究重点。Yao 等人在微机电系统(MEMS)领域运用激光冲击技术^[5-10],基于实验的方法研究了铜、铝等金属的激光冲击强化过程。Niehoff^[11-13]等人采用微凹模对铝、铜、不锈钢板材进行了激光冲击微拉深实验。车志刚等人分析研究了激光冲击作用下金属材料的微尺度效应,并探讨了高应变率下材料的非线性特性^[14-15]。Shen 等人提出使用搭接的激光脉冲实现铝箔的微成形^[16],并研究了铜箔的三维大面积成形^[17]。Liu 等人通过研究离焦量对烧蚀层的影响以及脉冲能量对成形性能的影响,进而对微成形进行了研究^[18]。

在激光冲击微成形过程中,为了提高激光的吸收率和避免工件的表面烧蚀,通常需要在工件表面涂抹吸收介质。然而,在激光冲击作用完成后,工件表面会残留一部分吸收介质,这些残留的吸收介质会影响工件的表面质量。若利用化学药剂清洗残留物质,不仅影响工件的形状,而且增加了成形工序和成本,降低了效率。为了解决这个问题,需要在工件和吸收层之间添加一层保护介质,既继承了激光冲击微成形的优点,同时保护了工件,提高了工件质量。

软模成形技术是利用柔性介质(如橡皮、合成橡胶或者自然橡胶等)作为软模来传递成形力的一种成形工艺,是一种特殊的成形金属薄板的方法^[19-21]。目前,国内外科研人员已开展了大量关于软模成形工艺方面的研究工作。Wang 等人^[22]通过数值模拟和实验的方法研究了微型激光动态柔性成形过程,揭示了软模的硬度和厚度、薄金属

片的厚度、刚性模具的纵横比,以及激光脉冲能量等工艺参数对微成形的影响。Peng 等人^[23]将软模成形工艺应用于成形微细薄板材料,并研究了模具的横截面比、软模硬度和摩擦条件对成形性能的影响。

本文结合激光冲击微弯曲成形技术与软模成形技术的优点,提出了激光冲击软模多槽大面积微弯曲成形方法。该方法采用弹性体作为软模在激光冲击作用下加载于工件来实现工件的微弯曲成形。文中讨论了工艺参数以及软模对成形的影响,并对激光冲击软模作用于工件与激光直接作用于工件两种方法进行了模拟和对比成形实验。

2 成形机理

激光冲击软模多槽大面积微成形方法是一种新型的微弯曲成形工艺,整个装置由压块、约束层、吸收层、软模、工件和一个 U 型多槽微模具组成,如图 1 所示。

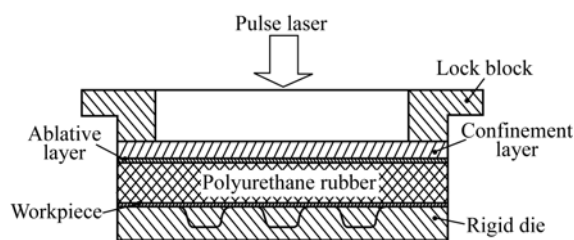


图 1 激光冲击软模 U 型多槽大面积微弯曲成形原理图

Fig. 1 Schematic of micro bending forming based on U-shape multi-groove mold by soft punch under laser shock wave

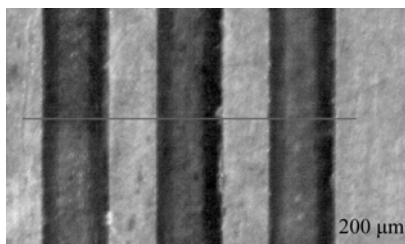
当高功率密度(W/cm^2 量级)、短脉冲(ns 量级)的强激光束透过约束层辐照到吸收层表面时,吸收层被加热并瞬间发生汽化。汽化的吸收层会产生等离子体,高温高压的等离子体会沿着激光辐射相反的方向迅速扩散,此时扩散的等离子体

受到约束层的约束而产生反弹,从而产生向软模层和工件层传播的冲击波,该冲击波的压力高达 GPa 量级。软模在高压冲击波的作用下产生强烈的弹性变形,由于软模的不可压缩性及超弹性特性,金属箔板会在软模和模具的双重作用下发生变形。在此过程中,弹性体软膜在激光诱导产生的冲击波压力下作用在工件表面,从而将激光光能转化成软模的弹性能;吸收层不仅吸收能量,而且保护软模和工件表面不受到激光的热损伤,约束层的存在大大提高了激光冲击波的压力和作用时间,将激光束的光能转化成冲击波机械能^[24-25]。

3 成形实验

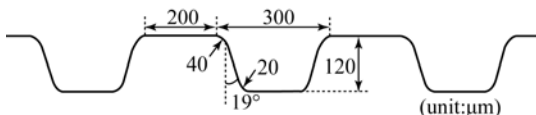
3.1 实验仪器及准备

该实验采用 Innolas Gmbit 公司生产的 Spitlight 2000 THG 脉冲激光器,其主要参数为:激光波长 1 064 nm,脉宽宽度 8 ns,重复频率 10 Hz,单脉冲能量 80~2 000 mJ,输出能量可控,光斑大小可调,激光束为准高斯分布。采用超景深三维显微系统 KEYENCE VHX-1000C 测量成形深度,在印刷电路板上,利用 LPKF-ProtoMat-C60 型雕刻机加工出 U 型多槽模具特征,图 2 为电路板 U 型多槽模具。



(a) 整体外形图

(a) Overall shape



(b) 二维图

(b) Two-dimensional drawing

图 2 电路板多槽模具

Fig. 2 Board groove mold

实验中采用厚度为 17 μm 的铝箔作为吸收层、厚度为 1.56 mm 的 K9 玻璃作为约束层、厚度为 250 μm 聚氨酯橡胶薄膜作为软模。工件选用厚度为 30 μm 的铜箔。由于模具上具有多个 U 型槽特征,所选择的激光光斑应该能够覆盖整体特征,因此,需要通过调节离焦量来控制激光光斑的大小。本实验中离焦量为 -10 mm,激光光斑为 2 mm。将铝箔裁剪成正方形作为吸收层,将铜箔裁剪成条状作为工件,将聚氨酯橡胶薄膜裁剪成正方形作为软模。为了保证工件、吸收层和软模的平面度与光洁度,用无水乙醇清洗工件、吸收层和软模的表面。按图 1 中的位置关系,从下往上依次为模具、工件、软模、吸收层、约束层,压块。需要特别注意的是,要将模具放置于激光器的工作台上;然后再把工件放置于 U 型多槽模具上方,在工件上放置软模,软模上方放置吸收层,在吸收层上放置 K9 玻璃;最后在 K9 玻璃上放置压块。压块的目的在于保证约束层、飞行腔、工件和模具之间的贴紧以消除空隙对微成形的影响,同时不影响激光辐照作用。

3.2 实验结果与分析

本文做了两组实验,第一组是激光冲击软模 U 型多槽大面积微弯曲成形(如图 3 所示),第二组是激光直接冲击 U 型多槽大面积微弯曲成形(如图 4 所示)。

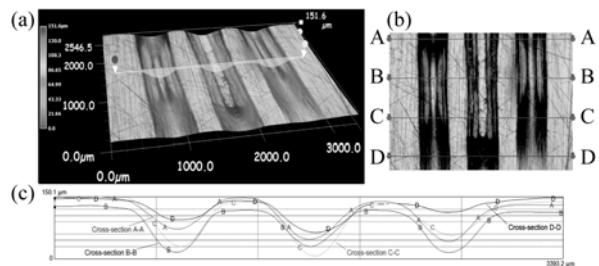


图 3 (a) 激光能量为 835 mJ 下,基于多槽模具特征的激光冲击软模大面积微弯曲成形工件的三维形貌图; (b) 成形工件的二维形貌图和 4 条剖切线; (c) 剖切线 A-A, B-B, C-C 和 D-D 处的剖面线图

Fig. 3 (a) 3D view of formed work piece after micro bending forming based on multi-groove mold by soft punch under laser shock wave; (b) 2D view of formed work piece and four section lines (marked with A-A, B-B, C-C and D-D); (c) Cross-sectional views in section lines

图 3(a)所示为在 835 mJ 激光能量的作用下基于多槽模具特征的激光冲击软模微弯曲成形工件的三维形貌图。图 3(b)标记出了剖切线 A-A, B-B, C-C 和 D-D 的位置。图 3(c)显示了不同剖切线处的剖面图。从图中可以看出,在工件表面成形了 3 个 U 型槽特征。从结果可知,3 个 U 型槽特征具有较为一致的深度和轮廓,而且是在单一脉冲情况下实现的,这一方面说明激光冲击软模微弯曲成形工艺具有较高的成形精度;另一方面说明只要激光光斑所能辐照的面积足够大,就能在单脉冲激光作用下实现工件的大面积批量成形,从而提高生产效率。

图 4(a)和 4(b)为基于 U 型多槽特征模具的激光直接冲击微弯曲成形工件的三维与二维形貌,激光直接作用在工件表面的吸收层上。图 4(c)显示了不同剖切线(剖切线 A-A, B-B, C-C 和 D-D 的位置如图 4(b)所示)处的剖面图。结果显示,激光直接冲击微弯曲成形也可以实现多槽特征的大面积成形。然而,实验中所成形的 3 个微凹槽深浅不一。

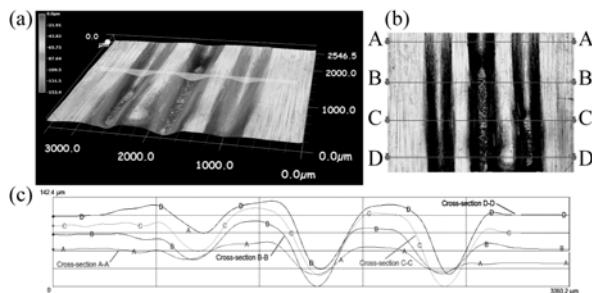


图 4 (a)激光能量为 835 mJ 下,基于 U 型多槽特征的激光直接冲击成形工件的三维形貌图;(b)成形工件的二维形貌图和 4 条剖切线;(c)剖切线 A-A, B-B, C-C 和 D-D 处的剖面线图

Fig. 4 (a) 3D view of formed work piece by laser direct shock micro-bending forming based on multi-groove mold; (b) 2D view of formed work piece and four section lines (marked with A-A, B-B, C-C and D-D); (c) Cross-sectional views in section lines

通过对比图 3 与图 4 发现,采用聚氨酯橡胶作为软模加载工件微弯曲成形获得的三槽特征轮廓的成形深度更加均匀,并且轮廓形状与 U 型模具更加相近;而激光直接冲击工件获得的三槽特征轮廓的成形深度很不均匀,这是因为软模在传播冲击波的过程中能够均化激光能量沉积^[26],使

得工件表面的压力比较均匀,从而提高了工件的成形质量。

为了进一步探索激光冲击软模大面积微弯曲成形过程,实验研究了激光能量对成形性能的影响。图 5 显示了激光能量分别为 565, 675, 835 mJ 时工件的最大变形量。从图中可以看出,工件的最大成形深度随着激光能量的增加而增大,但激光加载软模微弯曲成形工件的最大成形深度大于激光直接冲击成形的工件。这说明在相同激光能量的作用下,采用低阻抗的软模和高阻抗金属工件材料组合可以增大工件的成形深度,因为冲击波从低阻抗介质软模传播到高阻抗介质工作表面时,根据阻抗失配效应,在高阻抗介质金属工件表面会产生压力增大的冲击波,从而会产生增压效果^[22]。

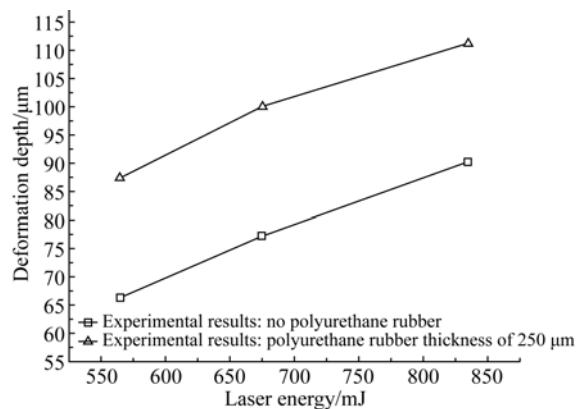


图 5 不同激光能量下激光冲击软模微弯曲成形与激光直接冲击微弯曲成形的最大深度对比图

Fig. 5 Relation between deformation depth and laser energy for copper foil with and without soft punches

4 数值模拟

激光冲击软模微弯曲成形的过程发生在极短的时间内,工件成形的尺寸又属于微观范围,所以难以找到合适的检测方法和设备来捕捉过程细节。因此,本文使用有限元法(FEM),以 ANSYS/LS-DYNA 为软件平台对激光冲击软模大面积成形工艺进行了数值模拟分析。

4.1 激光冲击波的时空分布

实验中所采用的光斑直径为 2 mm,由于激光能量在激光光斑范围内的分布并不均匀,因此需要考虑冲击载荷的空间分布。为了提高数值模拟的精度,本文在多槽特征模具成形载荷施加的

过程中综合考虑激光的平面模式和空间高斯模式,建立简化的加载模式以满足模拟要求。本文采用美国哥伦比亚大学 Yao 基于 Fabbro 模型修改定义的激光冲击波压力沿光斑径向的变化公式^[27]:

$$p_{(r,t)} = p_{(t)} \exp\left[-\frac{r^2}{2r_0^2}\right], \quad (1)$$

式中: $p_{(t)}$ 是 t 时刻由冲击波压力的时间变化曲线获得的压力值,即为此时此刻光斑中心处的压力值; $r_0 = 1 \text{ mm}$ 为光斑半径; r 为冲击波离激光光斑中心的距离。

从式(1)可以看出:激光冲击波的作用时间和距离光斑中心的半径决定了激光冲击波压力的大小。真实的脉冲激光在时间和空间位置均呈现准高斯分布,所以模拟分析时要将激光冲击波载荷作用的区域沿着光斑径向方向等距划分为多部分,然后在每个部分上施加随时间按高斯分布的载荷,同时在每一个相同时刻,每个部分上加载均布载荷。因此,激光冲击波载荷作用的区域划分得越密,模拟分析与实际加载的状况就越接近。综合考虑计算的时间、效率、精度和加载的难易程度,本文将 $2000 \mu\text{m}$ 的加载区域以 $20 \mu\text{m}$ 为间隔,等分为 100 个加载部分,计算每个部分的平均载荷。

4.2 软模微弯曲成形工艺

图 6(a)和 6(b)分别是激光能量在 835 mJ 时激光冲击软模 U 型多槽微弯曲成形工件与激光直接冲击 U 型多槽微弯曲成形工件的模拟分析结果。对比两图可以看出,采用软模使得工件的成型效果更好。

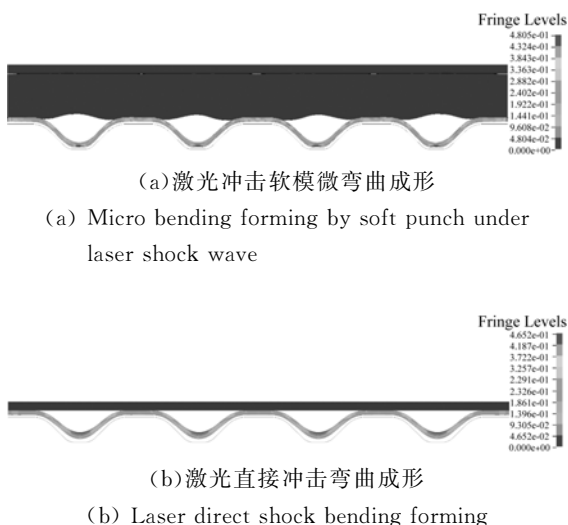


图 6 激光能量 835 mJ 下数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results under 835 mJ laser energy

通过观察激光冲击成形的模拟结果发现:在成形方法上,软模成形工艺在激光直接冲击的基础上采用柔性橡胶材料作为软模代替激光直接作用在工件上;在成形工艺上,激光直接冲击成形工艺一般只包含激光冲击波的形成与工件弯曲成形两个过程。而激光冲击软模成形则由图 7 所示的 4 个阶段组成:(1)软模自我变形阶段(图 7(a)),在激光冲击波的作用下,软模将会发生自变形;(2)工件拉深阶段(图 7(b)和 7(c)),这个阶段工件在软模材料剧烈弹性变形的作用下产生变形,并被迅速拉深直至刚性模具的底部;(3)工件的充模阶段(图 7(d)),在冲击波和惯性的作用下,工件将会继续向下运动直至与模具完全贴合;(4)软模与工件分离阶段(图 7(e)和 7(f)),这个阶段软模与工件自动分离直至恢复原状。从软模变形过程的应力图发现,软模在变形过程中将冲击波压力集中到工件的变形区域,同时整个成形过程中软模与工件相接触的底部受力比较均匀。由此说明软模的均压效果比较明显,能够提高工件的成型能力和成形质量。

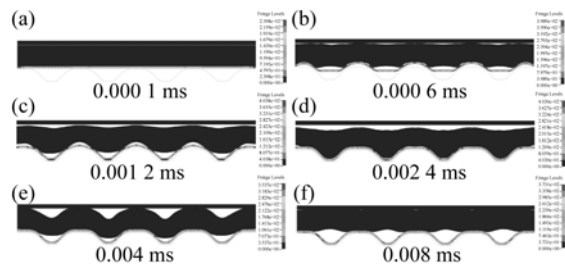


图 7 激光冲击软模大面积微弯曲成形的阶段示意图
Fig. 7 Stages of large area micro bending forming by soft punch under laser shock wave

通过数值模拟和实验得到能量随成形深度的变化,如图 8 所示。从图 8 可以看出,数值模拟结果中工件的最大成形深度随着激光能量的增大而增大;且在相同条件下,激光冲击软模 U 型多槽微弯曲成形均比激光直接冲击 U 型多槽微弯曲成形工件的成形深度大。数值模拟的结果稍高于实验数据,这主要是由于材料的力学性能参数在数值模拟分析中与实际实验存在一定的差异,而且数值分析中对模型的边界条件等也进行了相应的简化;但在总体上,数值模拟结果和实际实验结果的变化趋势是一致的,所以数值模拟和实验是可以相互验证的,两者都证明了采用聚氨酯橡胶作为软模

可以增大工件的成形压力,提高工件的成形能力。

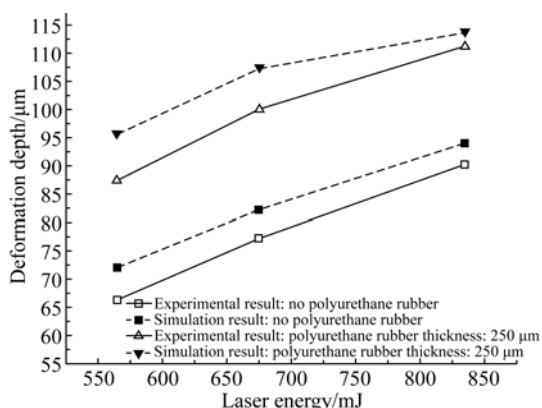


图8 激光冲击微弯曲成形实验和模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of results between numerical simulation and experiment of microbend forming under laser shock wave

参考文献:

- [1] 杨超君,周建忠,张永康,等. 激光冲击金属板料变形的最小激光能量估算及其实验研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 396-401.
YANG CH J, ZHOU J ZH, ZHANG Y K, *et al.*. Study on calculation of minimum laser energy of sheet metal deformation by laser shock forming [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 396-401. (in Chinese)
- [2] 周建忠,卫登辉,黄舒,等. 微尺度激光喷丸强化TiN涂层的表面性能[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2679-2684.
ZHOU J ZH, WEI D H, HUANG SH, *et al.*. Microscale laser shock peening on TiN coatings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2679-2684. (in Chinese)
- [3] 王续跃,许卫星,徐文骥,等. 硅片激光弯曲成形的数值模拟与实验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 605-610.
WANG X Y, XU W X, XU W J, *et al.*. Simulation and experiment of laser bending of silicon sheet [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 605-610. (in Chinese)
- [4] 吴东江,马广义,周秋菊,等. 长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1361-1365.
WU D J, MA G Y, ZHOU Q J, *et al.*. Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1361-1365.
- [5] ZHANG W, LAWRENCE Y Y. Microscale laser shock processing-modeling, testing, and microstructure characterization [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2001, 3(2): 128-143.
- [6] ZHANG W, YAO Y L. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124(2): 369-378.
- [7] CHEN H, WANG Y, KYSAR J W, *et al.*. Advances in microscale laser shock peening [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2004, 9(5): 506-518.
- [8] CHEN H, YAO Y L, KYSAR J W, *et al.*. Fourier analysis of X-ray micro-diffraction profiles to characterize laser shock peened metals [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(11): 3471-3485.
- [9] WANG Y, FAN Y, VUKELIC S, *et al.*. Energy-level effects on the deformation mechanism in microscale laser peen forming [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2007, 9(1): 1-12.
- [10] WANG Y, KYSAR J W, YAO Y L. Analytical solution of anisotropic plastic deformation induced by micro-scale laser shock peening [J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40(3): 100-114.
- [11] NIEHOFF H S, VOLLERTSEN F. Non-thermal

- laser stretch-forming [J]. *Adv. Mater. Res.*, 2005, 6-8:433-440.
- [12] SCHULZE N H, HU Z Y, VOLLERTSEN F. Mechanical and laser micro deep drawing [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 344:799-806.
- [13] VOLLERTSEN F, NIEHOFF H S, WIELAGE H. On the acting pressure in laser deep drawing [J]. *Production Engineering*, 2009, 3(1):1-8.
- [14] 车志刚, 熊良才, 史铁林, 等. 微尺度下激光冲击金属材料的特性分析与展望[J]. *激光技术*, 2008, 32(4):350-352.
- CHE ZH G, XIONG L C, SHI T L, *et al.*. Character analysis and development of metal material for microscale laser shock processing [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4):350-352. (in Chinese)
- [15] CHE Z, XIONG L, SHI T, *et al.*. *FEM Calculation of Microscale Laser Shock Processing on MEMS Material With Excimer Laser*[M]. London:Springer, 2008:785-792.
- [16] SHEN Z, GU C, LIU H, *et al.*. Fabricating three-dimensional array features on metallic foil surface using overlapping laser shock embossing [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(8):973-977.
- [17] 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]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, 26(9):1126-1129.
- [18] 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.
- [19] THIRUVARUDCHELVAN S. The potential role of flexible tools in metal forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(2):293-300.
- [20] DIRIKOLU M H, AKDEMIR E. Computer aided modelling of flexible forming process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 148(3):376-381.
- [21] PENG L, LAI X, NI J. Micro-groove forming by soft punch and its numerical simulation [C]. *1st International Conference on Micromanufacturing*, UIUC, USA, 13-15 Sep., 2006:192-197.
- [22] 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.
- [23] PENG L, HU P, LAI X, *et al.*. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process-simulation and experiments [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3):783-790.
- [24] BANAS G, ELSAYED A H E, LAWRENCE F V, *et al.*. Laser shock-induced mechanical and microstructural modification of welded maraging steel [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67(5):2380-2384.
- [25] SEALY M P, GUO Y B. Fabrication and finite element simulation of micro-laser shock peening for micro dents [J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2009, 10(2):134-142.
- [26] BATANI D, NAZAROV W, HALL T, *et al.*. Foam-induced smoothing studied through laser-driven shock waves [J]. *Physical Review E*, 2000, 62(6):8573-8582.
- [27] ARIF A F M. Numerical prediction of plastic deformation and residual stresses induced by laser shock processing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 136(1):120-138.

作者简介:



王 雷(1964—),男,陕西武功人,硕士,教授,1986年于陕西工学院获得学士学位,1995年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事微塑性成形、激光焊接与透射连接技术、数字化设计与制造等方向的研究。E-mail: wx@uj.edu.cn



张 迪(1987—),女,陕西兴平人,硕士研究生,2012年于西安工业大学获得学士学位,主要从事激光冲击复合成形等方面的研究。E-mail: dizhang@outlook.com