

文章编号 1004-924X(2015)03-0632-07

激光间接冲击下钛箔的微成形特性

王 霄, 邱唐标*, 顾宇轩, 张 迪, 马友娟, 刘会霞
(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:采用具有高应变率加载特征的激光驱动飞片间接冲击微成形技术对钛箔进行了微成形实验,以解决难成形材料的微塑性成形问题。从飞片完整性、工件贴模性以及厚度减薄率等方面探究了该工艺的成形性能。实验中采用微细电火花和曲面研磨技术制造微模具,材料为 AISI 1090 模具钢,飞片为 20 μm 的钛箔,成形工件为 35 μm 的钛箔。通过 KEYENCE VHX-1000C 超景深显微系统对飞片和工件进行了观测和分析,结果显示:飞片具有较好的完整性,能够提供均匀的冲击压力;成形后的工件具有良好的表面质量和贴模性。借助冷镶嵌工艺测量了工件的厚度分布,分析了工件厚度减薄率,其最大值为 19.8%,最小值为 2%,显示工件的厚度分布比较均匀。研究表明:激光间接冲击微成形技术对于难成形材料具有良好的成形效果并且能有效抑制厚度减薄。

关键词:激光冲击;间接冲击;飞片;微成形;钛箔;贴模性;厚度减薄

中图分类号:TN249;TG665 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0632

Micro-forming properties of Ti foil under laser indirect shock

WANG Xiao, QIU Tang-biao*, GU Yu-xuan, ZHANG Di, MA You-juan, LIU Hui-xia

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

* Corresponding author, E-mail:18361810087@163.com

Abstract: The micro-forming experiments of Ti foils were performed under a laser driven flyer indirect shock with high strain load features to overcome the micro-forming problems of difficult deformed materials. The forming properties of Ti foils under the laser indirect shock were explored from three aspects, the integrity of flyer, the fitability and the ratio of thickness to thinning of workpieces. In this experiment, the mold was fabricated by micro Electrical Discharge Machining (micro-EDM) and curved surface grinding. AISI 1090 die steel was used as the material of mold. The Ti foils with the thickness of 20 μm were employed as flyers. Furthermore, Ti foils with the thickness of 35 μm were used as workpieces. The flyers and workpieces were observed under a KEYENCE VHX-1000C digital microscope. The results indicate that the flyers show good integrity and provides a uniform shock pressure, so that the workpieces with good surface quality and fitability are fabricated. The cold-mounted technique was used to characterize the thicknesses of workpieces and to discuss the ratio of thickness to thinning, which shows that the maximum thinning rate is 19.8% and the minimum thinning rate is 2%. The results demonstrate that the workpieces have uniform thickness distribution. The laser indirect shock micro-forming technique has good forming properties on difficult deformed materials and reduces the thickness thinning effectively.

Key words: laser shock; indirect shock; flyer; micro-forming; Ti foil; fitability; thickness thinning

收稿日期:2014-10-21;修订日期:2014-11-14.

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);江苏省高校自然科学基金资助项目(No. 13KJB460003);江苏大学学生科研立项资助项目(No. 13A606)

1 引言

随着现代科学技术的发展,产品微型化已经成为一个趋势,特别是随着微系统技术(MST)和微机电系统(MEMS)的发展,微器件在航空航天、生物医学、通讯、电子、精密仪器等领域的应用越来越广泛^[1-3]。目前,微器件制造存在效率低、成本高、操作难度大、材料限制等问题,因此开发和探究新的微成形工艺成为研究者的共识^[2,4-5]。

近年来,激光以可控性好、精度高、工艺便捷等优势得到了快速的发展,并在冲击成形和表面强化方面得到了应用^[6-10]。其中,以激光驱动飞片作为微冲头而形成的激光间接冲击微成形技术是一种新型的高压高成形速率的微成形工艺。该技术在成形过程中利用高速飞行的飞片作为冲头与金属箔板发生碰撞,从而在碰撞界面上产生高压冲击波使得材料产生高速塑性变形^[11]。相比于激光直接冲击微成形,激光间接冲击微成形利用飞片作为冲头,激光不直接辐照工件,避免了工件表面被激光烧蚀。目前,这种方法已经拓展到微拉深^[12]、微冲裁^[13]、微压印^[14]工艺中。然而,激光间接冲击微成形研究的对象仅限于铜和铝等少数材料,对于较难成形的材料则涉及较少。另外,由于微零件的横截面厚度不易表征,使得微成形性能在工件厚度减薄率方面的研究还较少。Yang等^[15]通过数值模拟来探究微零件厚度的减薄率,但是数值模拟与实验的吻合程度还有待证明。Li和Gao^[16-17]利用聚焦离子束方法切割微成形工件得到了微零件的横截面,然后通过测量工件的厚度分布来研究厚度减薄率,但聚焦离子束切割工件不仅耗时长,而且费用昂贵。

本文利用激光间接冲击微成形技术对钛箔进行了微成形实验,以探究该工艺的成形性能。通过KEYENCE VHX-1000C超景深三维显微系统观测不同激光能量下飞片的表面形貌、工件的表面形貌和成形轮廓,研究了飞片的完整性和工件的贴膜性。最后借助冷镶嵌工艺表征成形工件的横截面厚度分布,研究了成形工件的厚度减薄率。

2 实验

图1所示为激光间接冲击微成形的实验原理示意图。实验装置主要由约束层、飞片、飞行腔、

工件和模具组成。

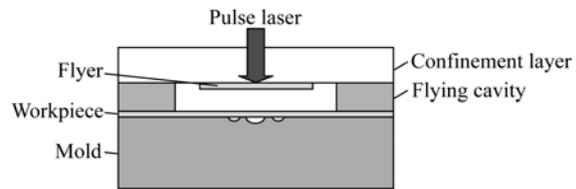
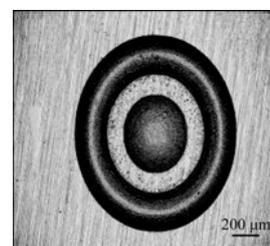


图1 激光间接冲击微成形的实验原理图

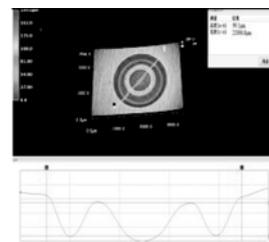
Fig. 1 Schematic diagram of micro-forming under laser indirect shock

约束层为透明度高、质轻、抗冲击的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),其厚度为3 mm。由于实验中的激光能量较大,飞片容易发生破裂,所以飞片选择机械性能较好的钛箔,其厚度为20 μm 。飞行腔的长度为300 μm 。工件为厚35 μm 的钛箔,其主要化学成分如表1所示。模具采用的是刚度、硬度以及韧性较好的AISI 1090模具钢,模具的轮廓尺寸为40 mm \times 40 mm \times 5 mm,硬度为65 HRC。模具的三维形貌如图2所示。模具由微细电火花(micro-EDM)加工,然后利用曲面磨研磨模具内腔。



(a) 模具表面形貌

(a) Surface topography



(b) 模具3维轮廓

(b) 3-D profile

图2 微模具

Fig. 2 Micro mold

激光间接冲击微成形时,高功率密度(10^9 W/cm^2 级)、短脉冲(10^{-9} s 级)的激光在ns级的时间内穿过透明的PMMA。

表 1 钛箔的化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of titanium foil (TA2)

(%)

Composition	Al	Si	Ni	Cr	Sn	C	N	O	Fe	Ti
Mass fraction	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.012	0.008	0.084	0.053	Balance

约束层照射到钛箔飞片表面上,使得飞片表面材料受热而迅速气化。飞片表面蒸气与激光继续作用,使得蒸气升温、电离产生高温高压的等离子体。等离子体在约束层的作用下产生爆轰波,在飞片表面形成 GPa 级的冲击压力。飞片在冲击压力的作用下高速通过飞行腔,最后高速撞击金属靶材。当金属靶材表面上冲击力的峰值大于材料的动态屈服极限时,金属靶材会在凹模中发生塑性变形。当冲击力足够大时,金属靶材将发生靠模成形,复制出模具特征实现板料成形。实验采用波长为 1 064 nm,重复频率为 0.5 Hz 的 Nd YAG-GAIA R 激光器,其最大单脉冲能量为 12.2 J,光斑大小可调(2~13 mm),激光束为平顶分布。实验中,激光光斑固定为 5 mm,激光能量分别为 2, 2.4, 2.8, 3.2 J。

3 实验结果与讨论

3.1 激光能量对飞片完整性的影响

在成形过程中飞片表面产生的等离子体冲击波作用在飞片和约束层上,约束层受到压块约束而保持静止,而飞片则会以较高的速度通过飞行

腔。在飞片通过飞行腔的过程中,存在着两个阶段:加速飞行阶段和匀速飞行阶段。飞片在 ns 级时间内由加速飞行阶段达到匀速飞行阶段,此过程中飞片内部冲击波沿运动方向的密度逐渐趋于均匀,在飞片冲击工件成形时,冲击波密度越均匀越有利于成形。在飞片冲击工件的过程中,飞片的完整性直接影响飞片运动方向冲击的波密度均匀性,完整性较好的飞片冲击工件能获得均匀冲击压力,使得工件变形均匀,并得到成形质量较好的工件。

图 3 为不同激光能量下飞片的表面形貌。图 3(a)显示,激光能量为 2 J 时,激光能量较小,可以看出飞片没有变形,具有较好的平面性和完整性;图 3(b)和(c)显示,当激光能量分别为 2.4 J 和 2.8 J 时,激光能量增加,飞片表面出现微小的均匀变形,但飞片完整性仍较好。图 3(d)显示,当激光能量为 3.2 J 时,飞片发生较大的塑性变形,均匀地复制出模具的部分特征,飞片完整性依然较好。图 3(e)为未受激光冲击的飞片材料形貌图。从图 3 中可以看出,随着激光能量的增加,飞片始终保持着较好的完整性,没有出现破裂,这说明飞片能够提供均匀冲击压力,为工件的均匀变形提供保障。

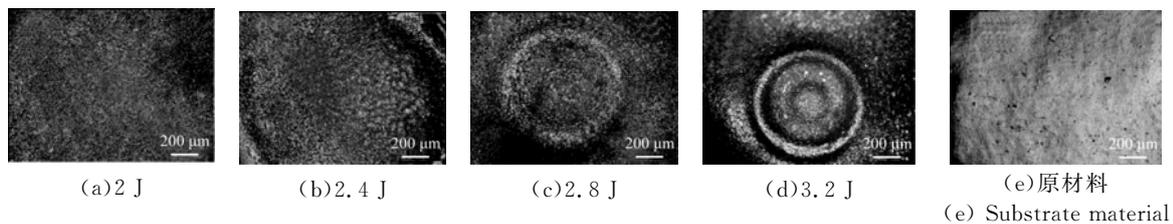


图 3 不同激光能量下的飞片表面形貌

Fig. 3 Surface topography of flyer under different laser energies

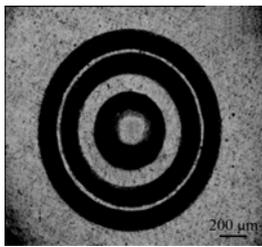
3.2 激光能量对工件贴模性的影响

板料的贴模性指板料在冲压成形过程中取得模具形状的能力,即通常所说的成形精度。贴模性是衡量板料冲压成形能力的一个重要指标,也是评价一个产品是否合格的重要参数。激光间接

冲击微成形工艺中,通过调节激光能量来控制激光间接冲击微成形中的飞片速度,而一定速度的飞片与金属靶材碰撞时在界面产生的冲击压力也一定。因此在激光间接冲击微成形过程中,可以通过调节激光能量的大小来精确控制冲击压力,

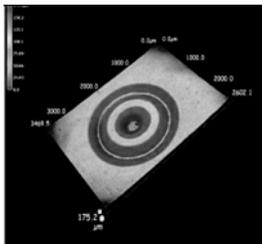
从而精确控制激光间接冲击微成形工艺的成形精度,进而得到贴模性很好的工件。

图 4(a) 和(b) 分别为典型的激光间接冲击微成形工件的表面形貌图和 3D 形貌图。图 4(a) 显示,钛箔工件表面的光洁度较好,表面质量较好,没有出现模具刮痕、破裂、皱曲等常规缺陷。图 4(b) 显示,工件塑性变形很大,与模具贴合较好,较好地复制出了模具特征。实验中采用不同激光能量下工件的横截面轮廓来表征工件的贴模性。图 5 是模具和不同激光能量下工件的横截面轮廓图。图 5(a) 为模具的横截面轮廓图,中心凹坑深度为 $99.3 \mu\text{m}$;图 5(b) 和(c) 是激光能量分别为 2 J 和 2.4 J 时的工件横截面轮廓图,中心凹坑深度分别为 $74.6 \mu\text{m}$ 和 $85.0 \mu\text{m}$,从图中可以看出工件轮廓与模具的贴合不是很好;图 5(d) 是激光能量为 2.8 J 时的工件横截面轮廓图,中心凹坑深度为 $97.2 \mu\text{m}$,工件轮廓较好地贴合模具;图 5(e) 为激光能量为 3.2 J 时的工件横截面轮廓图,中心凹坑深度为 $94.3 \mu\text{m}$,工件出现回弹现象,与模具贴合不完全。因此,当激光能量为 2.8 J 时,工件成形最好,能很好地复制出模具特征。



(a) 工件表面形貌图

(a) Surface topography of workpiece

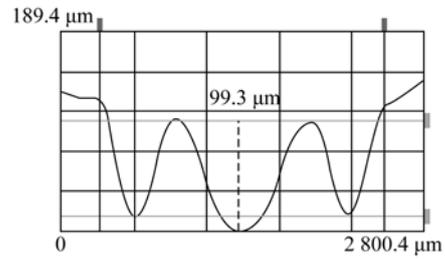


(b) 工件 3D 形貌图

(b) 3D topography of workpiece

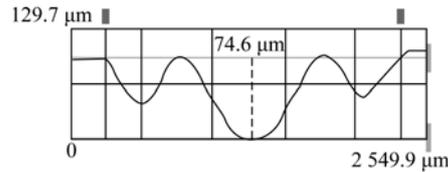
图 4 工件的形貌图

Fig. 4 Topography of workpiece

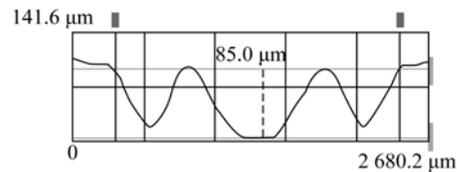


(a) 模具

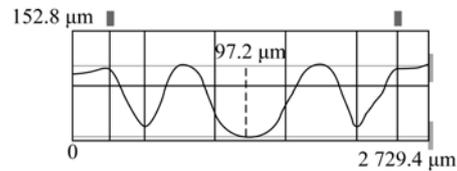
(a) Mold



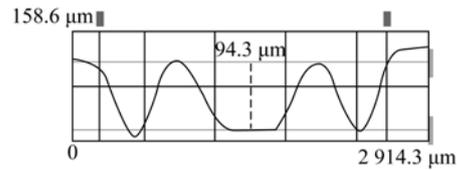
(b) 2 J



(c) 2.4 J



(d) 2.8 J



(e) 3.2 J

图 5 模具和不同激光能量下工件的横截面轮廓

Fig. 5 Sectional profiles of mold and workpiece under different laser energies

工件成形过程分为 3 个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段和回弹阶段。其中弹性变形和塑性变形过程中工件材料受到冲击压力作用流动到模具,工件复制出模具特征,当冲击压力释放时材料出现回弹。在图 5(b) 和(c) 中,激光能量较小,工件成形主要是弹性变形和塑性变形阶段;在图 5(d) 中,激光能量比较适合工件成形,工件成形主要是塑性变形阶段;在图 5(e) 中,激光能量较大,工件成形主要是塑性变形阶段和回弹阶段。在工件的成形过程中,塑性变形使得工件复制模具的

特征,所以要尽可能地使工件处于塑性变形。图 5 结果显示激光能量较小时,工件受到的冲击力较小,导致工件不能与模具完全贴合;激光能量适合时,工件能较好地与模具贴合,并完整地复制出模具的特征,成形精度较高;激光能量过大时会出现轻微的回弹现象。激光间接冲击微成形技术的可控性非常好,通过控制激光能量使得钛箔与模具很好地贴合,从而制造成形精度较高的钛箔工件。

3.3 激光能量对厚度减薄的影响

工件厚度均匀分布对工件的性能非常重要,局部厚度过度减薄会造成工件局部的颈缩,甚至导致工件失效。特别是在微零件的装配过程中,厚度均匀性尤其重要,厚度不均匀的微零件容易导致装配困难甚至不能装配。厚度的均匀性可以通过厚度减薄率来表征,厚度减薄率越小工件均匀性越好。厚度减薄率是评价板材冲压成形性能的重要指标之一。

在本次实验中采用冷镶嵌对工件进行处理。冷镶嵌模具的内直径为 3 cm,镶嵌剂为比例是 4:1 的低黏度环氧王树脂和固化剂。冷镶嵌过程中,先将工件裁剪到距离成形特征 2~4 mm 处,然后进行冷镶嵌。利用粗细不同的砂纸研磨冷镶嵌试样到工件成形特征中心标记处,最后对研磨后的试样进行抛光。通过 KEYENCE VHX-1000C 超景深显微系统测量抛光后冷镶嵌工件的厚度分布,进而计算出工件的厚度减薄率。

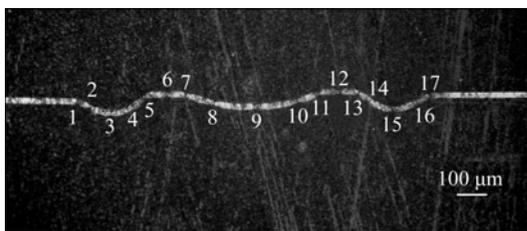


图 6 厚度减薄测试点

Fig. 6 Test points of thickness thinning measurement

图 6 为冷镶嵌抛光后的工件,其中厚度测试点 1,5,7,11,13,17 为模具圆角处厚度测量点;3,15 和 9 分布为外环和凹坑底部厚度测试点;2,4,14,16 和 8,10 分别为外环壁和凹坑壁厚度测量点;6,12 为外环与凹坑之间的厚度测量点。利用

公式 $T = \frac{t_0 - t_i}{t_0} \times 100\%$ 来表示厚度减薄率,其中 t_0 为钛箔成形前的厚度, t_i 为测试点的钛箔厚度。通过实验测得钛箔成形前的厚度,误差为 1.03 μm 。

激光能量对厚度减薄率的影响如图 7 所示。从图 7 可以看出,在同一激光能量下,最大厚度减薄率出现在模具圆角处(即测试点 1,5,7,11,13,17),厚度减薄率最小处为外环与凹坑之间的部分(6,12),外环和凹坑底部和侧壁部分的厚度减薄率比较明显。在靠模成形过程中,工件材料受到应力被拉伸,材料出现减薄现象,由于模具圆角处的应力是最大的^[16],而外环与凹坑之间部分的应力最小,因此模具圆角处的厚度减薄率最为明显,而外环与凹坑之间部分的厚度减薄率最小。对比图中不同激光能量下的工件厚度减薄率,发现工件的厚度减薄率在整体趋势上随着激光能量的增大而增加(个别由于实验误差,出现反常现象)。随着激光能量的增加,飞片表面产生的冲击波压力增大,工件受到的飞片冲击而产生的应力也越大,因此厚度减薄率随着激光能量的增大而增加。

从图 7 中还可以看出,最大厚度减薄率为 19.8%(激光能量为 3.2 J),最小厚度减薄率为 2%(激光能量为 2 J)。相比较于 Li 和 Gao^[16-17] 利用激光直接冲击微成形实验中得到的 50% 最大厚度减薄率,厚度不均匀得到了明显的改善。究其原因有两方面:第一,由于飞片具有很好的整体性,它作为激光能量的载体可以使得冲击压力尽可能地均匀分布,进而减小了局部应力集中;第二,成形工件钛具有优良的机械强度,不容易被拉伸减薄。上述研究结果表明,激光间接冲击微成形技术能够改善高应变率成形过程中工件的厚度减薄率,获得厚度分布比较均匀的钛箔工件。

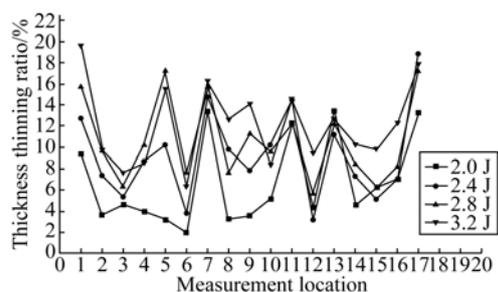


图 7 不同激光能量对厚度减薄的影响

Fig. 7 Thickness thinning ratios under different laser energies

4 结 论

本文进行了激光间接冲击微成形实验,研究了不同激光能量下这种新型高应变率加载钛箔工件的成形性能。实验中获得了表面质量和贴模性均较好的钛箔工件,证明该技术能够保证钛箔工件的

质量和成形精度;得到的工件厚度减薄率最大值为19.8%,最小值为2%,钛箔工件厚度均匀。实验结果表明,激光间接冲击微成形技术能够获得完整性较好的工件,有利于获得均匀的冲击压力,对于钛箔这种难成形的材料具有较好的成形效果,并且在一定程度上能有效抑制高应变率成形过程中过大的厚度减薄。

参考文献:

- [1] FU M W, CHAN W L. A review on the state-of-the-art microforming technologies [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 67(9-12): 2411-2437.
- [2] SAOTOME Y, IWAZAKI H. Superplastic backward microextrusion of microparts for microelectromechanical systems [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 119(1): 307-311.
- [3] 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.
- [4] SAOTOME Y, MIAW S, ZHANG T, et al.. The micro-formability of Zr-based amorphous alloys in the supercooled liquid state and their application to micro-dies [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(1): 64-69.
- [5] LIU H X, SHEN Z B, WANG X, et al.. Micro-mould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications [J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(14): 4687-4691.
- [6] 王霄, 张迪, 顾春兴, 等. 激光冲击软模大面积微弯曲成形方法 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2292-2298.
- WANG X, ZHANG D, GU CH X, et al.. Large area micro bending method by soft punch under laser shock wave based on multi-groove mold [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2292-2298. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 刘会霞, 杨坤, 王匀, 等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形实验研究 [J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1292-1295.
- LIU H X, YANG K, WANG Y, et al.. Research on micro-forming experiment of metal foil under laser driven flyer loading method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(5): 1292-1295. (in Chinese)
- [12] LIU H X, SHEN Z B, WANG X, et al.. Numerical simulation and experimentation of a novel laser indirect shock forming [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(6): 063107.
- [13] 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): 403004.
- LU M M, LIU H X, SHEN Z B, et al.. Experiment and simulation of multihole micro-punching with complex layouts by laser-driven flyer [J]. *Chinese J. La-*

- sers,2014,41(4):403004. (in Chinese)
- [14] LIU H X, SHEN Z B, WANG X, *et al.*. Feasibility investigations on a novel micro-embossing using laser-driven flyer [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1987-1991.
- [15] YANG CH J, YE ZH, LU J ZH, *et al.*. Laser shock forming of SUS304 stainless steel sheet with elliptical spot [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 56 (9-12): 987-993.
- [16] 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.
- [17] 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.

作者简介:



邱唐标(1990—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,2012年于湖南工业大学获得学士学位,主要从事激光冲击微成形方面的研究。E-mail: 18361810087@163.com

导师简介:



王 霄(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

(版权所有 未经许可 不得转载)