

激光微冲击成形技术分析与发展

范金荣¹ 黄舒^{1,2} 周建忠¹ 樊玉杰¹ 高彬¹ 朱伟¹ 徐增闯^{1,2}

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 镇江惟真激光技术有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要 激光微冲击成形(μ LSF)是利用微尺度脉冲激光和材料相互作用产生高幅冲击波压力实现材料微小塑性变形的技术,其综合了激光成形、冲击强化和塑性成形等技术的优点,通过控制激光工艺参数和合理的路径规划获得所需的微观几何形状和表面质量,具有良好的柔性,在材料微塑加工领域具有显著的技术优势。在介绍激光微冲击成形技术原理和特点的基础上,分析了微尺度激光冲击成形中的压力模型、本构模型及其工艺方法,讨论了激光微冲击成形中涉及的关键技术,综述了激光微冲击成形表面的质量及相关性能的研究现状,指出当前激光微冲击成形研究中存在的问题,并对今后的研究做了展望。

关键词 激光技术;激光微冲击;微塑性成形;压力模型;表面形貌

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.010003

Analysis and Expectation of Microscale Laser Shock Forming

Fan Jinrong¹ Huang Shu^{1,2} Zhou Jianzhong¹ Fan Yujie¹ Gao Bin¹
Zhu Wei¹ Xu Zengchuang^{1,2}

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² V-Zhen Laser Technology Corporation of Zhenjiang, Zhenjiang, Jiangsu, 212009, China)

Abstract A novel technology named microscale laser shock forming (μ LSF) is rapidly developing. During the process of μ LSF, micro plastic deformation is generated due to the high-amplitude shock wave pressure induced by the microscale laser-material interaction. It combines the advantages of laser forming, laser shock peening and plastic forming. The required micro geometry and satisfactory surface quality can be obtained by controlling the laser parameters and formulating a reasonable peening path. The μ LSF has significant advantages in micro-plastic manufacture due to its flexibility. Based on the introduction of principle and features of μ LSF, the pressure model, constitutive model and processing methods of μ LSF are analyzed, and the key technologies in μ LSF are discussed. After summarizing the research status about the quality and performance of the forming surface induced by μ LSF, the problems existing in current research of μ LSF are pointed out. Finally, expectations of future studies on μ LSF are brought forward.

Key words laser technique; microscale laser shock; micro plastic forming; pressure model; surface topography

OCIS codes 140.3390; 160.3380

1 引言

随着微机电系统(MEMS)在工业中的应用越来越广,机械微组件的可靠性和失效问题也越来越受关注。传统的微加工技术已不能满足加工更复杂零件的要求。现有的微器件加工方法主要有微拉伸、微膨胀、

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-09-12; 网络出版日期: 2011-11-22

基金项目: 教育部博士点基金(200802990004)、江苏省自然科学基金(BK2009219, BK2010351)、江苏省高校自然科学基金重大项目(08KJA460002)、江苏省高校自然科学基金(10KJB460002)、江苏大学研究生创新基金(CX09B_07XZ, CX08B_06x)、江苏省第六批“六大人才高峰”项目(2009)和江苏省高校优势学科建设工程项目(2010)资助课题。

作者简介: 范金荣(1987—),女,硕士研究生,主要从事激光冲击成形方面的研究。E-mail: fjr0827@126.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造和表面改性延寿技术等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

微弯曲和微冲击成形等。2005年,美国哥伦比亚大学 Fan 等^[1]观察了将微尺度激光束用于冲击箔材时的变形情况,完成了100 μm厚铜箔的微弯曲实验和数值模拟研究。德国学者 Vollertsen 等^[2]借助微凹模通过激光冲击完成了微拉伸和微胀形,他们认为尺寸效应不仅影响工艺过程,还会影响成形工艺链中的其他方面,其中摩擦系数随着试样尺寸的减小而增大。美国普渡大学 Gao 等^[3~5]开展了微激光动态成形(μLDF)的研究,对铜箔成形前后的微观组织、残余应力等进行了对比,发现成形后晶粒组织细化,硬度、屈服强度增大,残余应力在冲击中心处最大,且距离冲击中心越远残余应力越小,并且研究了凹模圆角率、凹模深宽比、薄膜厚度等因素对变形的影响。日本学者 Kutsuna 等^[6]将间接激光冲击技术加工的微凹坑用于改善活塞的摩擦能量损失,分别用脉冲能量为460,300 mJ,光斑直径为700,56.5 μm(分别对应能量密度15,10 GW/cm²)的激光对发动机活塞进行冲击处理,加工出微凹坑及微槽型阵列,冲击后对其进行摩擦实验,结果发现经过处理的活塞的内压减少12%~14%。美国的 Guo 等^[7,8]也利用激光冲击在合金表面制造出微凹坑,研究了微凹坑对材料各项性能的影响。国内也有部分学者从事激光微冲击成形(μLSF)的研究:山东大学季忠等^[9~12]采用数值模拟与实验相结合的方法对激光微冲击胀形进行了研究,取得了显著的进展;江苏大学刘会霞等^[13~15]采用激光驱动飞片进行μLSF及基于微模具的激光冲压微成形研究。

本文对μLSF技术的研究现状进行综述,在分析其成形机理的基础上,介绍目前常用的工艺方法,讨论材料微冲击成形表面的质量及其相关性能。对μLSF中涉及的关键技术进行分析,指出目前研究中存在的问题,并对今后的研究进行了展望。

2 激光微冲击成形理论

2.1 激光微冲击成形的原理及特点

μLSF基本原理是利用高功率、短脉冲的强激光作用于超薄板材上,使板材上覆盖的吸收层气化电离形成等离子体,并产生强冲击波向金属材料内部传播。吸收层的作用是把激光束产生的热能转变成机械能,约束层的作用是保护板材表面不受到热损伤,并且能提高激光冲击波的压力和作用时间。由于冲击波压力达到吉帕量级,远远大于材料的动态屈服强度,故可使材料产生屈服和冷塑性变形。

与一般冲击成形相比,μLSF具有很多优点。μLSF属无模或半模成形,成形精度高,对复杂异型凹模具有高贴模性;属于高应变率成形,成形速度快,成形效果比静态成形和准静态成形好,且惯性因素对极限塑性应变的增加影响显著;利用等离子体爆炸诱发的力效应成形,避免了激光热应力对材料组织和性能的影响;综合了激光冲击强化和塑性成形技术的优点,在材料内部形成有益的残余压应力,成形后产生大量位错和塑性变形,从而使组织均匀、细化,提高零件的强度、耐磨性、耐蚀性及疲劳寿命;激光微冲击加工的微凹坑可以用于改善材料的抗磨减摩性能^[7,8]。另外,由于激光参数精确可控,具有很大的柔性,μLSF更易于保证质量,便于自动化及大批量生产。

2.2 激光微冲击压力模型

2.2.1 Fabbro 模型

Fabbro模型^[16]假设激光照射是规则的且冲击波传播是一维的。Zhang等^[17]修改了Fabbro模型以满足微尺度激光冲击过程的要求。Fabbro模型广泛应用在冲击波压力的峰值估算中,假定冲击波传播是一维的,则其峰值压力计算公式

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{\gamma \times I_0}, \quad (1)$$

式中 P_{\max} 为峰值压力, α 为等离子体的比热比, Z 为折合声阻抗, γ 为吸收层对激光能量的吸收率, I_0 为脉冲激光的平均功率密度。

2.2.2 一维非均匀平面波压力模型

Zhang等^[18]在Fabbro压力模型的基础上,进一步考虑了等离子体、约束层、吸收层和靶材之间的质量交换过程,以及激光能量高斯分布的非均匀性和等离子体径向膨胀对冲击波压力的影响,将等离子体冲击波模型拓展为沿光束方向的一维非均匀的平面波模型。设 $P(t)$ 为冲击波压力, $R(t)$ 为等离子体半径, r 为计算点处径向半径,冲击波压力时空分布计算公式可写作

$$P(r, t) = P(t) \exp\left[-\frac{r^2}{2R^2(t)}\right]. \quad (2)$$

2.3 本构模型

Johnson-Cook 模型^[19]考虑了应变率和温度效应,对于大部分金属的塑性变形预测都比较准确,应用较广,尤其是在动态成形的模拟中。高应变率成形时,动态屈服强度与应变强度及应变率有关,其计算公式为

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] (1 - \hat{\theta}^m), \quad (3)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 为等效屈服强度; $\bar{\epsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ 为等效塑性应变率; A, B, n 和 m 是在低于转化温度时测量得到的材料参数;当 $m = 0$ 时, $\hat{\theta}$ 为非测量温度,不需考虑。

3 激光微冲击成形工艺方法

3.1 激光微冲击无模成形

在目前的研究中,多数是采用激光微冲击无模成形,其原理如图 1(a)^[7]所示,即利用高功率密度、短脉冲的强激光作用于覆盖在工件表面上的吸收层,形成冲击波作用于工件^[20]。冲击过程中冲击波产生的动量脉冲向材料内部传播,利用激光冲击产生的惯性力作为板料塑性成形的变形力,得到需要的加工形状^[21]。激光微冲击无模成形技术还可用于在材料表面上加工微凹坑,根据仿生学研究,表面并非越光滑摩擦越小越耐磨,微凹坑可以用于改善材料的抗磨减摩性能^[6~8]。目前,国外主要有日本的 Kutsuna 等^[6]、美国的 Guo 等^[7,8]从事微凹坑减摩抗磨性能研究。目前来看,激光微冲击无模成形在减摩抗磨方面的应用前景比较广阔。

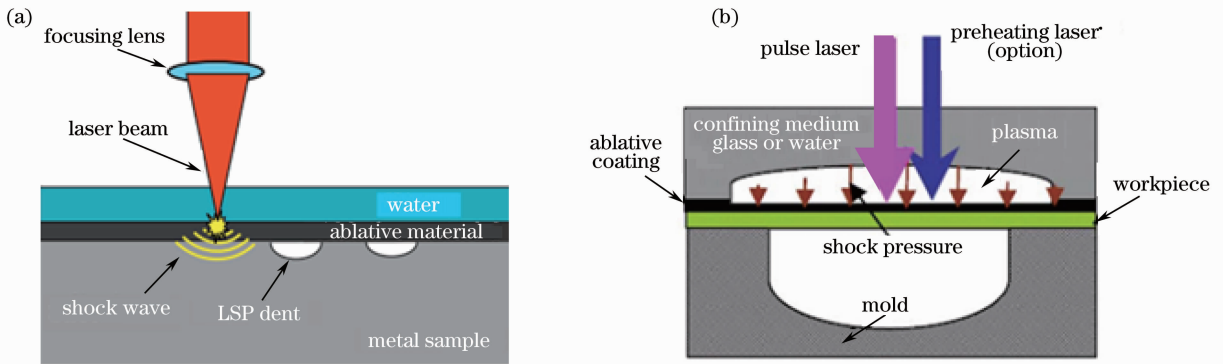


图 1 激光微冲击成形原理图。(a)激光无模成形; (b)激光半模成形

Fig. 1 Schematic diagram of the μ LSP process. (a) Laser micro forming without die; (b) laser micro forming with semi-die

3.2 激光微冲击凹模仿形

激光无模成形虽然柔性较好,但是由于激光诱导的冲击波在工件中传播速度很快,并且带来材料的速度、应力和密度的瞬变,很难控制板材的最终形状。当要求成形精度较高时,一般采用半模成形,即在工件下方放置一个凹模,当激光冲击后就能得到与凹模相似的形状,属于凹模仿形^[21]。图 1(b)^[4]为激光微冲击半模成形加工示意图。Gao 等^[3~5]对 μ LDF 的全过程进行了数值模拟,并且做了不同形式凹模下(即圆形凹模、微透镜阵列凹模、直槽型凹模)的 μ LDF 实验,成形后的试样形状与凹模形状有很好的一致性。山东大学 Zheng 等^[12]进行了激光微胀形的模拟及实验验证,凹模直径 1.2 mm,在激光能量为 400 mJ 时冲击 30 μ m 的铜箔,实验得到冲击中心处的最大变形深度为 159 μ m,与模拟得到的 158 μ m 非常接近,此时铜箔还未变形到凹模底部。

3.3 激光微冲击辅助成形

激光微冲击辅助成形工艺中,较为常见的是采用激光驱动飞片来成形。相比于激光冲击波直接作用于材料使其靠近凹模,利用激光驱动飞片冲击成形能得到更好的表面质量。激光驱动飞片加载金属箔板成形是利用高速运动的飞片作为激光能量的载体,与金属箔板发生碰撞,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。整个成形装置主要由约束层、飞片层、飞行腔、工件和模具组成,成形原理如图 2(a)^[22]所示。图 2(b)为用激光驱动飞片加工的成形件,采用短脉冲 Nd:YAG 激光器(脉宽 7 ns,波长 1064 nm,光斑直径 1 mm),模具由纳秒激光加工而成,尺寸为 $\phi 500 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,飞行腔选用厚度为 $170 \mu\text{m}$ 的医学盖玻片,利用纳秒激光雕刻机在盖玻片中心位置加工出 $\phi 2 \text{mm} \times 170 \mu\text{m}$ 的圆孔用作飞行腔。试样为 $15 \mu\text{m}$ 厚的铝箔,试样被切割成方形。飞片也用铝箔制成。实验结果采用立体显微镜和 Veeco 形貌仪观测,图 2 为铝微拉伸杯的前后视图。当脉冲能量为 50 mJ 时,变形深度达 $150 \mu\text{m}$ ^[22]。

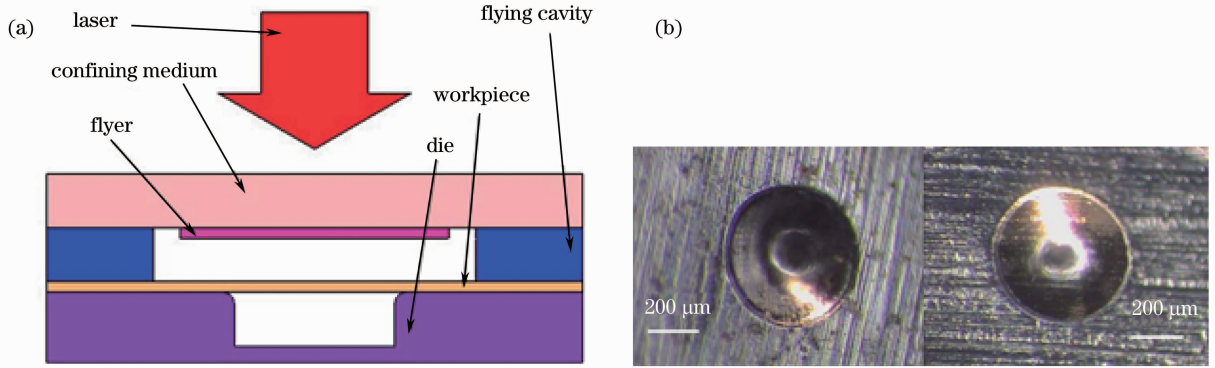


图 2 (a) 激光间接冲击成形原理图; (b) 铝的微拉伸杯(前后视图)

Fig. 2 (a) Schematic diagram of laser indirect shock forming; (b) microdeep drawing cup of Al (front and back view)

现有的微成形方法都有各自的优缺点,可以发展一些复合微成形方法,集各种方法的优点于一体,以达到更好的成形效果。目前的微成形大多还处于实验研究阶段,而将其应用到实际的批量生产中还需要很长时间的探索。

4 成形表面质量及性能

4.1 表面形貌

表面形貌是成形表面质量及性能的一个主要衡量指标。Guo 等^[7]测量的 Ti-6Al-4V 合金在不同激光能量 1, 2 和 3 W 下的表面形貌,如图 3 所示。为了研究凹坑的几何形貌,实验中冲击了 3 行,每行都对应不同的能量。为进行重复性研究,每个能量水平下有 10 个微凹坑,通过测试得到平均的凹坑性能。

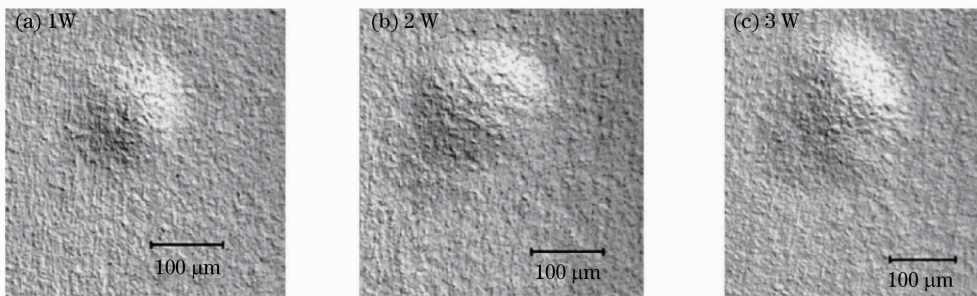


图 3 Ti-6Al-4V 合金在不同激光能量表面形貌

Fig. 3 Surface topography Ti-6Al-4V under different laser energies

Gao 等^[5]在其 μLDF 研究中也对成形后金属的表面形貌做了分析,如图 4 所示。他们使用的是苯乙烯玻璃显微透镜凹模,由边长 $80 \mu\text{m}$,高 $44 \mu\text{m}$ 的凹角锥阵列组成。靶材为 $12.5 \mu\text{m}$ 厚的铝箔。图中为通过光学轮廓仪和扫描电镜(SEM)测得的 μLDF 后薄膜的形貌。激光强度为 $1.23 \text{GW}/\text{cm}^2$,铝箔没有完全变形到凹腔底部,成形为光滑圆顶。变形深度达 $18.13 \mu\text{m}$,变形深宽比(变形深度/宽度)约为 0.22 ^[5]。

图 5 为激光微成形获得的典型微凹坑阵列及其三维(3D)轮廓图^[8]。表面微造型已成为当今表面工程领域的研究热点,它可以显著地改善摩擦副表面的摩擦磨损性能,且能有效地提高接触表面的疲劳寿命。

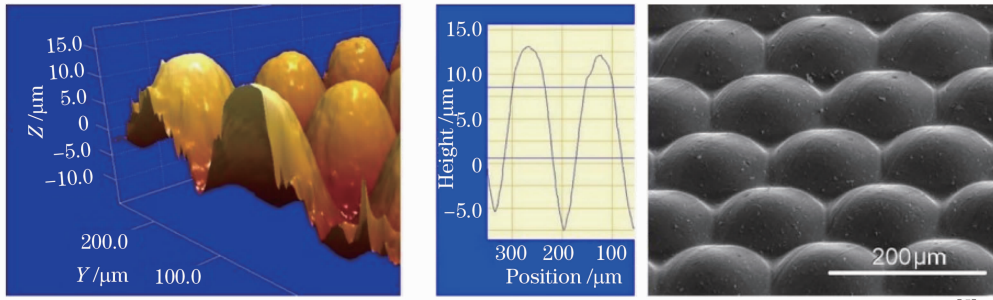


图4 凹模为微透镜,12.5 μm 铝箔在 μLDF 后的表面轮廓及 SEM 微形貌

Fig. 4 Surface profile and SEM micrograph of a 12.5- μm -thick Al thin film after μLDF using a polyglass microlens as mold

4.2 微观组织

板材及薄膜的微观组织特性包括晶粒取向、位错密度、点阵结构、点缺陷、晶粒大小和均匀性、晶界及亚晶组织等。目前,薄板 μLSF 前后的位错密度、晶粒取向及晶粒大小和晶界已有一些研究成果,而成形前后的点阵结构和点缺陷等微观变化还鲜有研究。

Cheng 等^[4]采用电子背散射衍射仪(EBSD)定量地分析了铜箔在 μLDF 前后晶粒大小、亚结构、晶粒取向等方面的变化。两试样对应的晶粒尺寸分别为 15~25 μm 和 8~17 μm ,而成形后两试样的晶粒尺寸分布大致相同。这表明成形后晶粒、亚晶粒结构及分布与激光冲击工艺参数有关,而与冲击前材料的内部晶粒尺寸无关。事实上,在激光动态成形前处理(如晶核形成)阶段,在冲击压力产生的偏应力作用下,杂乱的晶粒会因各向同性而形成晶核,位错的产生使应力分布不均,冲击波通过金属传播的同时产生新的位错,在高应变率加载下,位错密度比其他成形工艺,如旋转弯曲和深冲压要高很多^[4]。

4.3 残余应力

残余应力是材料成形表面的一个重要性能,一般用 X 射线衍射来测量。Zheng 等^[11]研究了微胀形中激光能量对残余应力分布的影响,分别用 200,300 和 400 mJ 三种能量进行模拟。图 6 为不同能量下径向残余应力在顶部和底部的分布,很明显在三种不同能量下残余应力的分布形式相似。在光斑内部,顶部一侧主要以拉应力为主,底部以压应力为主,其中拉应力是不可取的,且不易控制。回弹过程对残余拉应力的产生起着关键作用。激光能量进一步增加会在冲击表面获得残余压应力。但是激光能量不能太大以至超出材料的

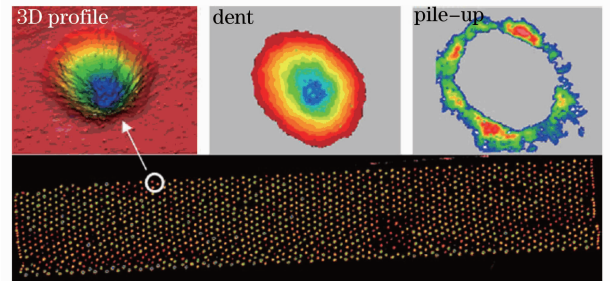


图5 凹坑阵列及单个凹坑的三维形貌

Fig. 5 3D topography of the dent array and individual dent

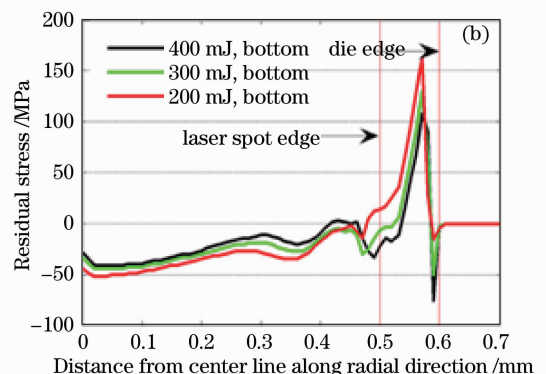
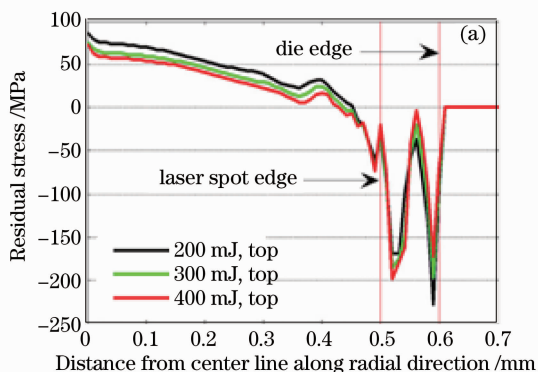


图6 径向残余应力在顶部(a)和底部(b)表面不同激光能量水平下的分布

Fig. 6 Distribution of radial residual stress on the (a) top and (b) bottom surfaces at different laser energy levels

成形极限。图 6(b)中,随着激光能量的增大,残余压应力会在一定程度上减小。这与激光冲击过程中有所不同。另外,底部表面的残余压应力的最大值并未出现在冲击中心处。

4.4 纳米硬度

纳米压痕测量已在多种材料性能测量中广泛应用,可测得材料的硬度、杨氏模量、场强、加工硬化指数等。图 7 显示了板厚为 $15\ \mu\text{m}$ 的铜箔在 LDF 后的表面硬度分布^[4](成形前为 $430\ \text{MPa}$)。LDF 后试样的硬度明显增加,试样中心处的硬度峰值增大 $6\sim 8$ 倍,这与较大的残余压应力及高位错密度有关。当成形过程中有残余压应力产生时,需要通过施加大的载荷来达到相同的渗透深度。LDF 后致密的位错和亚晶粒组织使得铜箔的流动应力相应增加。

目前对于成形表面质量及性能的研究只停留在成形前后单个性能的测试和对比上,而对于工艺参数与各项性能之间的具体关系研究较少。另外,对成形性能和质量进行精确表征也是今后的一个研究方向。

5 激光微冲击成形关键技术

5.1 涂层约束层技术

约束层能够阻碍等离子体的膨胀,增强激光能量的耦合,显著提高激光冲击波的峰值压力,并延长其作用时间。目前,国外在 μLSF 实验研究中一般采用蒸馏水作为约束层,厚度一般为 $1\sim 3\ \text{mm}$ ^[7];国内则常采用 K9 玻璃^[10]。另外,约束层的声阻抗对成形影响很大。

吸收层的作用,一是取代靶材气化电离形成等离子体,防止靶材表面发生熔融和烧蚀;二是提高激光入射能量的吸收率,进而提高冲击波峰值。黑漆、石墨、铝箔等是 μLSF 中最为常用的吸收层材料。任旭东等^[23]对吸收层厚度进行了优选研究,推导出了吸收层气化厚度的理论公式。目前,在 μLSF 实验研究中,吸收层厚度一般取 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 。另外,Cheng 等^[24]研究发现,应变率存在饱和厚度,超过这个厚度时峰值压力与厚度无关,等离子体不再增长;在多尺度位错动态塑性模拟中,吸收层厚度小于饱和值时,位错增殖速度随吸收层厚度增大而加快,大于饱和值时,位错密度无变化。

5.2 工艺参数优化及控性控形技术

目前, μLSF 的工艺参数优化已有诸多进展。Gao 等^[3~5]通过实验及模拟研究了激光参数和凹模参数对 μLDF 的成形深度、应力应变等的影响;Guo 等^[7,8]对不同激光能量水平下制作的微凹坑的形貌、硬度及残余应力等性能进行了研究;季忠等^[9~12]也进行了 μLSF 及微胀形方面的研究。激光参数对成形性能的影响以及控制成形性能与质量的途径和方法将成为今后研究的热点。

5.3 有限元模拟分析技术

有限元模拟技术是指采用 ABAQUS,ANSYS 等有限元软件对实验参数预先进行模拟并预测材料的塑性变形行为和残余应力分布等,将之与实验得出的结果相对比,可以有效地指导实验研究。目前,有限元模拟技术经常被采用,可以较为准确地预测实验结果,减少实验次数,降低实验成本。

Liu 等^[15]利用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行动态分析及静态分析的模拟,预测激光冲击后的表面变形,模拟了当激光诱导的冲击波作用在工件上时工件经历的快速初始变形。工件材料熔融起始时,成形速度主要取决于冲击波的速度,因此可以通过调整激光能量来控制成形速度。模拟计算得到的变形深度约为 $64\ \mu\text{m}$,而实验测得的深度为 $59\ \mu\text{m}$,原因可能是模拟时忽略了激光能量分散到涂层上的部分。模拟预测得到的三维表面微形貌,其结果与实验结果有很好的 consistency。

Gao 等^[3]研究了对 μLDF 中微凹模圆角率、深宽比及激光功率密度对成形深度、等效塑性应变等的影响,将成形过程划分为四个阶段,如图 8 所示。模拟得到了成形后薄膜各个位置不同点处的塑性应变,不同

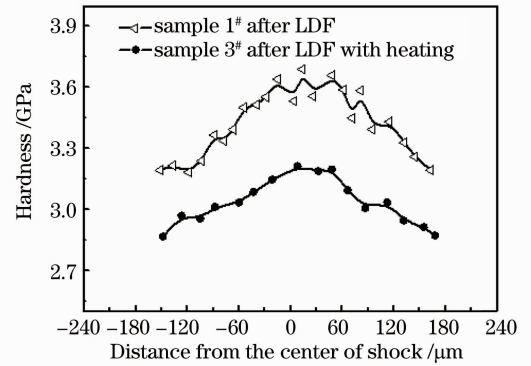


图 7 预热与未预热试样在 LDF 后的硬度分布对比
Fig. 7 Comparison of hardness distribution after LDF with and without heating

凹模尺寸和深宽比下的垂直位移及最大 Von Mises 应力、总塑性应变及颈缩率等,并且综合考虑了多因素的影响。根据模拟得到:1)对于特定的凹模深宽比,圆角率有限制,最小允许圆角率随凹腔深度增大而增大。2)最大等效塑性应变在最小允许圆角率接近 $15 \sim 1.6$ 时,几乎与凹模深宽比无关。随着圆角率增大,颈缩率也增大,尤其在最小允许值下,由于加工硬化导致材料流动和延展性丧失。3)给定一个特定的激光功率密度,薄膜变形深宽比在达到完全变形时存在上限值。4)总变形过程比冲击波沿薄膜厚度方向传播耗时更长。

刘晶等^[25]通过自主开发的有限元网格划分程序 MicroMesh,实现了对规则晶粒、晶界以及不规则晶粒、晶界的网格划分,并利用动态显式有限元法,对超薄板材 μ LSF 过程进行了晶粒级的数值模拟。

5.4 成形精度测量与表征

成形精度测量与表征对后期实验结果分析很有帮助。为满足微成形的需要,材料加工后器件的检测需要使用一些特殊的装置。

X 射线衍射仪可以检测出材料表面晶格的旋转,从而得到工件表面的残余应力变化情况,揭示激光高应变率冲击下材料的微观组织变化。Cheng 等^[4]应用 EBSD 研究晶粒微结构和取向误差,测量后得到三维成形结构的力学和微观组织特性。EBSD 可以定量地分析晶粒大小、亚结构、边界特征及位向方面的改变从而得出微观组织变化情况。使用纳米压痕仪可以测量机械性能特征,纳米压痕测量已在多种材料性能的测量中广泛应用,如硬度、杨氏模量、场强、加工硬化指数等。激光冲击影响区的变形较小,Khare 等^[26]用不同功率密度的激光冲击铜片后,利用原子力显微镜(AFM)测量材料的变形量,利用显微光波干涉仪测量微型件表面的弯曲程度和加工后表面的粗糙度。Cheng 等^[4]通过光学表面形貌仪(Wyko NT2000)测量三维微特征。这种非接触式光学形貌仪有两种模式,即移动相干涉测量模式(PSI)和垂直扫描干涉测量模式(VSI),可测量的表面高度范围广泛。PSI 模式下临近测量点的高度变化值限制在 160 nm 以内,而 VSI 模式下可达 2 mm。此外,还可以利用光学显微镜、SEM 等检测微器件的尺寸及拓扑关系。

目前研究中的关键技术主要包括上述几个方面,随着研究的深入及测试仪器精度的不断提高,可以逐步从定性研究发展到定量研究,量化各种参数对成形性能的影响。当然这需要有大量的模拟和实验数据作为支撑。

6 结束语

在 μ LSF 过程中,材料应变率高,是微尺度下的塑性变形,其适用的理论及模型相对较少,需要逐步建立和完善新的理论模型,同时在高应变率下材料的失效准则也有待于进一步规范。目前 μ LSF 主要包括微结构阵列成形及表面微造型减摩润滑等,对于微构件的精确成形还鲜有报道,因此今后有必要针对 μ LSF 工艺控制中的关键参数,对成形性能进行系统研究,对成形过程进行优化,并研究新的高效的控制方法,建立材料成形后的质量评估标准,为主动实现对激光微冲击精确成形的优化控制提供依据。

参 考 文 献

- 1 Y. Fan, Y. Wang, S. Vukelic *et al.*. Wave-solid interactions in laser shock induced deformation processes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(10): 4904~4914
- 2 F. Vollertsen, H. Schulze Niehoff. State of the art in micro forming[J]. *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 2006, **46**(11): 1172~1179
- 3 Huang Gao, Chang Ye, Gary J. Cheng. Deformation behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming [J]. *J. Manufacturing Sci. Engng.*, 2009, **131**(5): 051011
- 4 Gary J. Cheng, Daniel Pirzad, Ming Zhou. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after

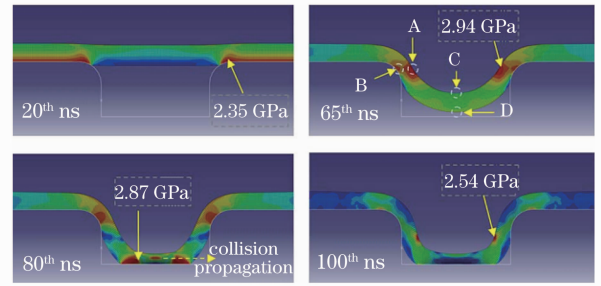


图 8 冲击波在薄膜厚度方向传播的四个重要阶段(高亮区为各阶段最大 Von Mises 应力的位置和数值)

Fig. 8 Four critical stages of deformation after the shock wave propagating through the thickness of the thin film (highlighted areas are the values and locations of the maximum Von Mises stress in each stage)

- microscale laser dynamic forming[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(6): 063108
- 5 Huang Gao, Gary J. Cheng. Laser-induced high-strain-rate superplastic 3-D microforming of metallic thin films[J]. *J. Micro Electro Mechanical Systems*, 2010, **19**(2): 273~281
- 6 M. Kutsuna, H. Inoue, K. Saito *et al.*. Improvement of fatigue strength and friction energy loss of machinery parts by indirect laser peening [J]. *Welding in the World*, 2009, **53**(special issue): 89~94
- 7 Y. B. Guo, R. Caslaru. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti-6Al-4V surfaces[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2011, **211**(4): 729~736
- 8 Michael P. Sealy, Y. B. Guo. Fabrication and finite element simulation of micro-laser shock peening for micro dents[J]. *Int. J. Computational Methods in Eng. Sci. Mechng.*, 2009, **10**(2): 134~142
- 9 Ji Zhong, Liu Ren, Sun Sheng. Advances in laser peen forming[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 061403
- 季 忠, 刘 韧, 孙 胜. 激光冲击成形研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(6): 061403
- 10 Zheng Chao, Sun Sheng, Ji Zhong *et al.*. Microscale laser peen forming of sheet metal and its research situation[J]. *J. Plasticity Engineering*, 2009, **16**(4): 59~67
- 郑 超, 孙 胜, 季 忠 等. 板材脉冲激光微冲击成形技术及研究现状[J]. 塑性工程学报, 2009, **16**(4): 59~67
- 11 Zheng Chao, Sun Sheng, Ji Zhong *et al.*. Effect of laser energy on the deformation behavior in microscale laser bulge forming[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **257**(5): 1589~1595
- 12 Zheng Chao, Sun Sheng, Ji Zhong *et al.*. Numerical simulation and experimentation of micro scale laser bulge forming[J]. *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, 2010, **50**(12): 1048~1056
- 13 Liu Huixia, Yang Kun, Wang Yun *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
- 刘会霞, 杨 昆, 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
- 14 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
- 15 Liu Huixia, Shen Zongbao, Wang Xiao *et al.*. Micromould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**(14): 4687~4691
- 16 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 17 W. Zhang, Y. L. Yao. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. *ASME J. Manuf. Sci. Engng.*, 2002, **124**(2): 369~378
- 18 W. Zhang, Y. L. Yao, I. C. Noyan. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: experiment, modeling and simulation[J]. *ASME J. Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(1): 10~17
- 19 G. R. Johnson, W. H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]. Proceedings of the Seven th International Symposium on Ballistics, 1983, 541~547
- 20 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 1996, **210**(1-2): 102~113
- 21 Yang Kun, Dong Peilong, Li Baochun. Microscale laser peen forming[J]. *Mechanical Manufacture*, 2007, **45**(12): 23~26
- 杨 昆, 董培龙, 李保春. 微尺度激光冲击成形技术[J]. 机械制造, 2007, **45**(12): 23~26
- 22 Huixia Liu, Zongbao Shen, Xiao Wang *et al.*. Numerical simulation and experimentation of a novel laser indirect shock forming[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(6): 063107
- 23 Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Thickness optimizing of surface coating for laser shock processing [J]. *J. Metal Heat Treatment*, 2006, **31**(7): 61~64
- 任旭东, 张永康, 周建忠 等. 激光冲击加工表面涂层厚度的优选[J]. 金属热处理, 2006, **31**(7): 61~64
- 24 G. J. Cheng, M. A. Shehadeh. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening: a multiscale simulation approach[J]. *Scripts Materialia*, 2005, **53**(9): 1013~1018
- 25 Liu Jing, Liu Ren, Ji Zhong *et al.*. Numerical analysis of micro laser peen forming based on grain and grain boundary element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 291~295
- 刘 晶, 刘 韧, 季 忠 等. 基于晶粒晶界有限元的激光微冲击成形数值分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 291~295
- 26 A. Khare, K. Alti, S. Das *et al.*. Application of laser matter intaction for generation of small sized materials[J]. *Radiat. Phys. Chem.*, 2004, **70**(4-5): 553~558