

激光微喷丸强化技术的研究与展望

(邀请论文)

周建忠 樊玉杰* 黄舒 阮鸿雁 朱伟 卫登辉 王呈栋 陈寒松

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光微喷丸强化是利用微尺度脉冲激光和材料相互作用诱导的冲击波压力实施表面改性的新技术,可适应于宏观和微观金属构件的表面处理。通过控制工艺参数和合理的路径规划能够在材料表层产生有益的残余压应力分布和规则的几何形貌,有效改善材料的耐磨、耐腐蚀和抗疲劳性能,从而有效提高结构零件的使用寿命。在介绍激光微喷丸技术原理和特点的基础上,分析了激光微喷丸工艺过程涉及和需解决的一些关键科学问题,概述了激光微喷丸强化在压力模型、相关试验、数值模拟和表面完整性等方面的研究成果和进展,指出了目前激光微喷丸强化改性研究中存在的问题,并对激光微喷丸技术的发展及其应用进行了展望。

关键词 激光技术;微尺度激光喷丸强化;表面改性;残余应力

中图分类号 TN249; TG156.99

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0601003

Research and Prospect on Micro-Scale Laser Shot Peening

Zhou Jianzhong Fan Yujie Huang Shu Ruan Hongyan Zhu Wei Wei Denghui

Wang Chengdong Chen Hansong

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

Abstract Micro-scale laser shot peening (μ LSP) is proposed as a new technology using shock wave pressure generated by the interaction between micro-scale laser beam and material to implement surface treatment, which can be adapted to macro and micro surface treatment of metal components. Process parameters controlling and a reasonable path planning are beneficial to generate useful residual stress distribution and regular geometric morphology, which can significantly change the material wear resistance and improve the anti-fatigue property as well as corrosion resistance. Based on the introduction of principles and characteristics of μ LSP technology, the key scientific problems in μ LSP process are analyzed, the research progress of shock wave pressure model, related experiments, numerical simulation and surface modification are described, the current existed problems are discussed, and applicative prospect as well as technology development of μ LSP is also looked forward.

Key words laser technique; micro-scale laser shot peening; surface modification; residual stress

OCIS codes 140.3440; 140.3538; 240.6760

1 引 言

微小型化技术作为重要的军民两用技术,已深刻影响民用和国防等科学技术的发展。微小型化产品,如微小机器人、微型飞行器、微惯性器件和微机电系统等,在生物医学、航空航天、国防及高科技电子产品等领域显示出广阔的应用前景。随着研究

的不断深入和应用的日益广泛,一方面,对微小型化产品的功能和可靠性等要求越来越高,从而使得对具有一定形状精度和表面质量的金属微小零件的需求日益迫切^[1,2];另一方面,微小型化产品的可靠性和失效问题也引起了越来越多的关注^[3,4]。微小型装置中一般包含金属微小构件、微齿轮和微开关等

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-03-31

基金项目: 教育部博士点基金(200802990004)、江苏省自然科学基金(BK2009219)、江苏省高校自然科学基金重大项目(08KJA460002)、江苏省青蓝工程(2008)和江苏高校优势学科建设工程(2010)资助课题。

作者简介: 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。E-mail: fanyujie@tom.com

执行器件,其作为主要承载部件,通常受到热、力等交变载荷的作用,易引起磨损、断裂和疲劳破坏,从而导致微小型化产品的失效,因而对微小结构零件的表面质量、耐磨和抗疲劳性能等提出了较高的要求^[5]。

微尺度激光喷丸(μ LSP)技术为解决微细结构表面的改性延寿提供了一种全新的方法,它是在激光喷丸的基础上发展起来的,利用高重复率的短脉冲激光束和材料相互作用诱导的冲击波压力进行表面改性的技术,通过强化作用^[6]和适度残余应力分布,可大幅改善微构件的力学性能^[7,8],从而提高结构可靠性,不同的是能量为微焦到毫焦量级,光斑为微米量级。2002年, Y. Lawrence Yao 课题组^[9,10]率先对微尺度激光喷丸技术进行了研究,采用脉冲宽度 50 ns,脉冲能量 280 μ J,光斑尺寸 12 μ m,重复率 1 kHz 的 3 倍频调 Q Nd:YAG 激光器,对单晶纯铝进行了 μ LSP 的初步试验,研究了靶材表面的微冲击响应,获得了几十微米深度分布的残余压应力;随后,对 μ LSP 过程建模进行了探索,在 Fabbro^[11]一维平面波假设的基础上,考虑了激光能量的时空分布特性,采用激光功率密度的等效二维分布来解决微尺度激光束带来的尺寸效应问题,并对 90 μ m 厚的铜箔进行了激光冲击诱导残余应力的试验研究和数值模拟分析,验证了利用 μ LSP 技术实现微小零件表面处理以改善其力学机械性能的可行性。2007 年以来, Chen 等^[12~14]通过衍射强度对比方法,实验分析了激光微喷丸冲击在铜薄膜中诱导的应力应变,用 X 射线微衍射结合电子反向散射衍射来表征激光微喷丸后的微结构性能,研究了微尺度激光喷丸诱导的各向异性塑性变形的求解方法。Michael 等^[15]用实验和数值模拟的方法对激光微冲击诱导微坑变形的特性进行了研究。Siniša 等^[16]研究了微尺度激光喷丸下铝晶界的响应特性,表明在高斯脉冲激光冲击加载下,晶界附近的潜在裂纹发生了闭合,从而可延长微构件在循环载荷下的疲劳寿命。

现有文献表明,激光微喷丸技术已逐渐引起国内外相关学者的关注。激光微喷丸在材料表面产生微塑形变,诱导微表面性能的改变,在微结构性能和薄膜改性方面具有潜在应用价值。本文对国内外相关研究作一综述,就激光微喷丸工程应用需解决的关键科学问题进行分析,并对今后的研究和应用作简要展望。

2 激光微喷丸技术原理及特点

典型的激光微喷丸试验系统如图 1 所示,主要由高重复率脉冲激光器、多轴运动工作台及其夹具装置、集成数控系统等组成。激光微喷丸采用的脉冲能量为微焦到毫焦量级,脉冲宽度在 5~8 ns,光斑尺寸在微米量级,所诱导的冲击波峰值压力达到吉帕量级。其技术原理如图 2 所示^[16],在靶材表面涂覆一层能量吸收层(铝箔、黑漆)作为烧蚀层,再在其上覆盖一层约束层(水、玻璃)。高重复率的脉冲激光束透过透明约束层辐照在工件材料表面的能量吸收层上,吸收涂层迅速气化、电离形成等离子体,继续吸收能量的等离子体急剧膨胀过程中因受到约束层的约束作用,产生向靶材内部传播的强冲击波。由于冲击波的峰值压力远远高于材料的动态屈服强度,引起材料表层及内部组织的改变,从而改善了材料的微观结构及其应力分布,提高其抗疲劳、抗磨损和应力腐蚀等性能。因此激光微喷丸是利用短脉冲激光束和材料相互作用诱导的冲击波压力实施表面处理的技术,属于“冷加工”工艺。

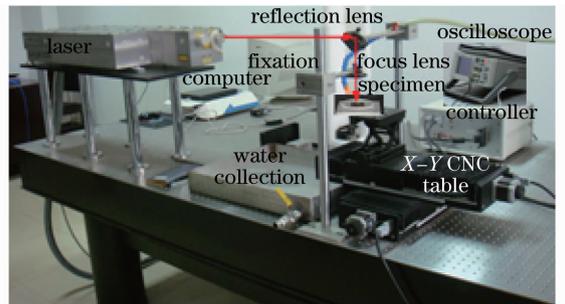


图 1 Spilight2000 激光微喷丸实验系统
Fig. 1 Spilight2000 experimental setup of μ LSP

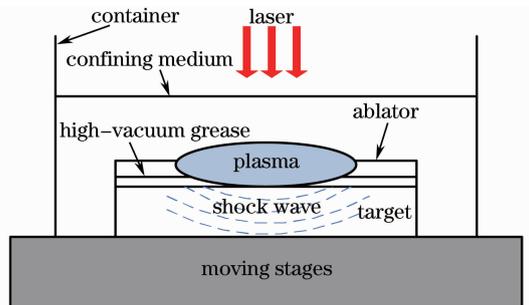


图 2 激光微喷丸原理示意图
Fig. 2 Schematic of μ LSP

激光微喷丸技术作为一种快速敏捷和具有良好柔性的先进表面强化工艺,在宏、微观表面工程领域具有较为显著的优势,其主要技术特点:

1) 超高压力:激光微喷丸过程虽然采用的脉冲能量只有微焦到毫焦量级,但由于其光斑尺寸聚焦

在微米量级,其诱导的冲击波峰值压力达到吉帕量级;

2)超快过程:采用的脉冲宽度只有几个纳秒,所产生的冲击波作用时间在纳秒量级,在如此短的时间内将光能转变成冲击波机械能,实现了能量的高效利用;

3)高应变率:应变率达到 10^7 s^{-1} 量级,比机械冲压高出 10000 倍,比爆炸冲击高出近 100 倍,在如此高应变率下材料微观组织及性能变化是常规方法无法比拟的;

4)极高柔性:由于激光参数、作用时间、喷丸轨迹及聚焦光斑尺寸精确可控,且处理过程是非接触性的,因此具有极大的柔性和可重复性,可适应不同场合、不同表面的选择性定域化处理;

5)适用范围广:不仅适应于常规的金属材料,还可应用于硬脆和陶瓷、硅基等非金属材料的表面改性处理,具有较高的强化效率和灵活性。

3 激光微喷丸强化涉及的关键问题

3.1 微尺度激光喷丸中的压力加载模型

建立微尺度激光喷丸过程中冲击波压力模型是激光微喷丸技术研究的重要内容,是理论分析冲击波压力与材料相互作用诱导微塑性变形和残余应力的基础,也是有限元数值模拟压力加载的关键。1990年,Fabbro等^[11]对宏观毫米尺度的激光冲击处理进行了理论研究,依据约束模式下激光诱导冲击波的一维轴向传播假设,提出激光冲击波的一维均匀平面波模型,对约束介质中冲击波压力进行了理论研究。Zhang等^[17,18]在研究 μLSP 过程中,在Fabbro等^[11]压力模型的基础上,进一步考虑了等离子体、约束层、能量吸收层和靶材之间质量交换过程,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,但该模型没有考虑径向冲击力对靶材的影响,且模型求解困难。实际上,两种不同尺度 LSP 之间的一个显著区别在于 μLSP 的微尺度效应, μLSP 过程中采用的光斑尺寸在微米量级,与能量吸收层厚度相当,此时激光诱导的等离子体冲击波不仅沿轴向传播,还沿径向扩张,激光冲击波对靶材同时施加轴向冲击力和径向冲击力,一维平面波假设已不再适用。因此,在 μLSP 过程建模中,必须考虑轴向和径向冲击力加载下对靶材微塑性变形的影响。

3.2 激光微喷丸表面的完整性及其力学性能

激光喷丸过程中,高幅冲击波压力引起材料表

面微观组织及其应力状态的改变,同时导致靶材表面产生强烈微塑形变。对于微小结构表面,如何在改善其微机械力学性能的同时,保证其原有的形状、尺寸和较好的表面完整性,这是微喷丸强化必须解决的问题。为此,必须从激光微喷丸诱导高应变率条件下的应力应变本构关系入手,考虑材料的非线性效应和有限尺度等多因素联合影响,揭示微尺度靶材变形中应力应变的变化规律。通过理论分析、数值模拟和实验验证相结合,研究激光冲击波加载下微结构表面完整性变化的物理机制,如微观组织、应变塑性、位错与相变、显微硬度和微观形貌的变化规律,探明材料的晶粒细化以及残余应力场分布和激光参数的定量关系,获得“波-固”耦合诱导材料晶格塑变的变形力生成与量化控制方法,实现对微结构表面强化性能的控制要求。

3.3 激光微喷丸工艺过程的控制方法

激光微喷丸过程是一个涉及等离子体物理、冲击波形成和传播以及冲击波与靶材相互作用等多个环节的复杂过程。激光参数、能量转换体材料以及靶材等诸多因素相互作用,并且以不同的方式影响激光微喷丸强化的结果。对此多因素相互作用的复杂过程,其中许多因素的作用机制还不十分明了,单纯采用机理建模难于保证模型的准确性,因而难以对过程进行有效控制。如何建立一个合适和稳健的过程控制模型亦是研究激光微喷丸技术的关键所在。为此,必须以激光微喷丸过程的主要工艺参数作为控制量,通过试验设计筛选出对过程变异存在重要影响的因素,采用过程控制技术,对激光微喷丸工艺过程进行多变量分析与建模,获得激光微喷丸过程对微结构性能影响的统计模型,进而对模型的合理性和可靠性进行检验,使之用于激光微喷丸工艺过程的控制。

4 相关研究与进展

4.1 微尺度激光冲击波压力模型

Fabbro等^[11]对约束模型下的冲击波进行了半理论的研究,建立了激光冲击波传播的经典一维模型,并给出了约束模式中等离子体行为的宏观方程式。Zhang等^[17]对Fabbro等的一维平面模型做了简单的修改,并且沿用了Fabbro等的假设。根据激光束能量在光斑径向服从准高斯分布,得到距光斑中心 r 处的冲击波峰值压力估算公式为

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right), \quad (1)$$

式中 $2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$, 为折合声阻抗, Z_1, Z_2 分别为约束层和金属靶材的声阻抗, α 为等离子体的比热比, Z 为声阻抗, I_0 为激光束功率密度, R 为激光光斑半径。

由于激光微喷丸中, 光斑尺寸在微米量级, 已有的激光能量一维均匀分布假设不再成立, 必须考虑冲击波半径的变化对冲击波压力的影响。为此, Zhang 等^[18] 在能量均匀分布的冲击波压力基础上, 考虑空间非均匀分布压力和水与靶材到等离子体的质量流入, 而这些质量的流动有助于等离子体演化和膨胀形成高压冲击波; 同时考虑激光微喷丸采用的光斑尺寸与能量层厚度相当, 对冲击波压力时空分布的理论模型进行了修正, 其修正的冲击波压力曲线如图 3 所示^[18], 其中 α_{AP} 为等离子体吸收系数, I 为激光功率密度, 公式为

$$P(t) = \begin{cases} t < T_r, & \begin{cases} P = P_{1D} \\ R = R_0 \end{cases} \\ T_z \geq t \geq T_r, & \begin{cases} P = P_{1D}(t/T_r)^{-4/5} \\ R = R_0(t/T_r)^{1/2} \end{cases} \\ t > T_z, & \begin{cases} P = P_{1D}(t_r/T_z)^{4/5}(T_z/t)^{6/5} \\ R = R_0(T_z/T_r)^{1/2}(T_z/t)^{-4/5} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$P(r, t) = P(t) \exp\left[-\frac{r^2}{2R^2(t)}\right], \quad (3)$$

式中 r 为到激光光斑中心的径向距离, $R(t)$ 为等离子体半径, $P(t)$ 为冲击波随时间变化的峰值压力, T_r 为冲击波径向传播时间, $T_r = R_0/a$, R_0 为光斑半径, a 为等离子体声速, T_z 为冲击波轴向传播时间, $T_z = T_p$, T_p 为脉冲宽度。

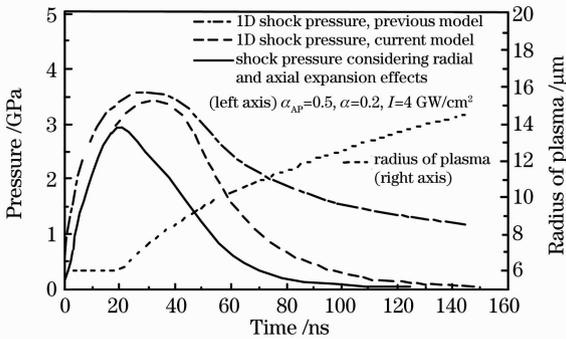


图 3 激光冲击波压力曲线

Fig. 3 Pressure curve of laser shock wave

在微尺度下, 以一维平面波理论为基础会带来很大的误差。文献^[19] 分析了实际等离子体的物理发展过程和空间结构特性, 如图 4 所示。表明在等

离子体形成初期具有显著的轴对称性质, 且轴向膨胀速度大于径向膨胀速度, 表现为沿激光入射方向上冲击波波前距中心的距离稍大些。随着冲击波的衰减, 径向膨胀的速度逐渐超过轴向膨胀的速度。因此, 采用旋转椭球体作为等离子体冲击波的三维模型更为合适^[20]。

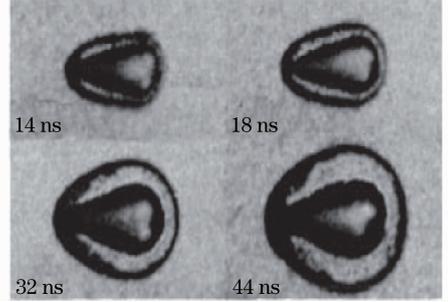


图 4 冲击波波前及等离子体的演化

Fig. 4 Shock wave front and plasma evolution

Wang 等^[21] 在椭球面波传播理论的基础上, 对激光微喷丸过程进行了建模。依据泰勒模型(完全中心对称的球面模型), 提出采用旋转椭球面对等离子体冲击波进行三维建模, 即: $\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} = 1$, $a > b$, 其中 b 为旋转椭球的半短轴, a 为旋转椭球的半长轴, 以激光入射方向 (z 轴) 为旋转轴 (见图 5^[20])。需要指出的是, 这里 a, b 不再是常数, 而是时间 t 和涂层、约束层介质马赫数 Ma 等相关变量的函数。经过初步探索, 得到椭球波压力时空分布的计算公式为

$$P(l, t) = P(t) \exp\left(-\frac{l^2}{c}\right), \quad (4)$$

式中 l 为椭球面任一点处距中心的距离; c 为椭球半焦距。与 Fabbro 等^[11] 建立的激光喷丸强化过程压力估算式相比, (4) 式更能真实反映激光微喷丸过程中冲击波压力的时空分布特性。

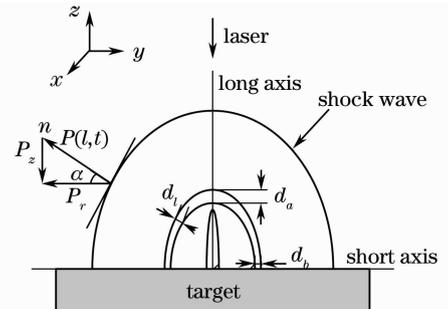


图 5 旋转椭球面波示意图

Fig. 5 Sketch of rotational ellipsoid wave

依据上述分析, 可推导激光微喷丸过程中径向压力空间分布的简化模型, 得到不同时刻的径向压

力空间分布曲线,如图 6 所示。从中可以看出冲击波压力的作用规律:在光斑中心附近,轴向压力起主导作用,径向压力在光斑中心处近似为零,并随光斑

中心的距离增大而增大,当离光斑中心的距离增加到一定值时,径向压力起主导作用。

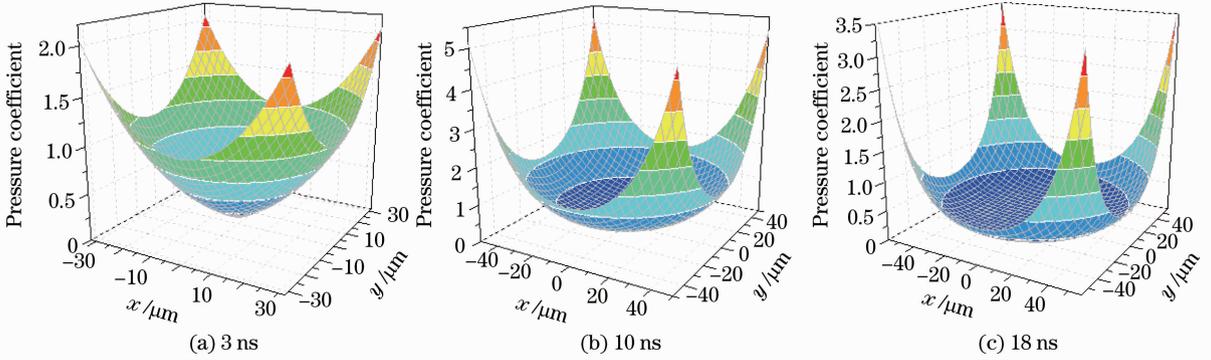


图 6 不同时刻波阵面上径向压力的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of radial pressure coefficient at different time

冲击波形成和传播的过程非常复杂,牵涉到激光诱导等离子体爆炸、冲击动力学、波-固耦合、冲击波传播和衰减及其测试等^[22],因此建立与实际相一致的冲击波压力模型十分困难。目前国内开展这方面的研究较少,一方面涉及多学科的理论研究,难度较大,另一方面冲击波的试验及其测量研究也遇到瓶颈。

4.2 激光微喷丸改性的相关试验

Chen 等^[23~25]对铜、镍和铝 3 种常用材料开展了激光微喷丸试验研究。试验采用 3 倍频 YAG 激光器,激光光斑直径约为数十微米,冲击能量为 160~240 μJ,所采用试样的几何形状、试验及其测试方案如图 7 所示^[24]。试验中采用光斑搭接的方式,冲击轨迹为 3 条平行的直线,间距 25 μm,在每个位置连续冲击 3 次。采用光学轮廓仪、原子力显微镜(AFM)及电子背散射衍射(EBSD)等检测手段研究了试样的塑性变形特征,包括表面凹痕、残余应力应变分布。晶格旋转场、单元胞状结构的形成等微观组织结构的变化,以此来更深入地理解表面强化的微观机理。图 8 给出了单晶铝(110)试样在喷丸后表面凹痕几何形状的实验和有限元模拟结果^[25],冲击变形范围为冲击线两侧±50 μm,影响深度最大达到 2.5 μm。Chen 等^[24]采用原子力显微镜测量 Al(001)喷丸区的几何变形,得到喷丸区域的宽度为 90 μm,厚度方向的影响深度约为 1.5 μm,但是原子力显微镜不能充分展示喷丸线边界区域的材料堆积。

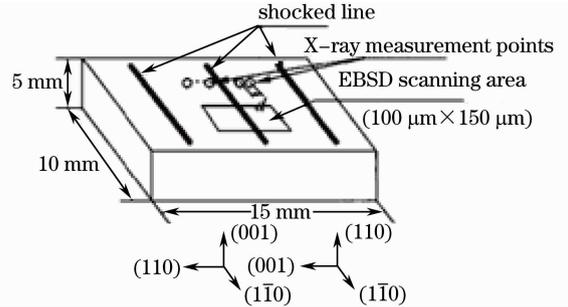


图 7 试样几何形状及实验条件

Fig. 7 Geometry of specimen and experimental condition

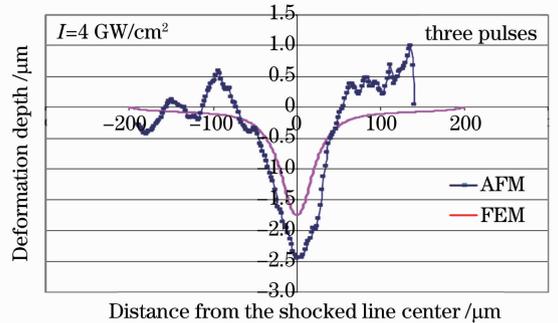


图 8 Al(110)试样凹痕轮廓测量与模拟的比较

Fig. 8 Comparison of sample dent profile by measured and simulated, 3 pulses, $I=4 \text{ GW/cm}^2$

果,蓝色区域代表逆时针旋转(CCW),而红色区域代表顺时针旋转(CW)(彩图见网络电子版)。在试样表面冲击线两侧±55 μm范围内,晶格旋转角度达到最大值±4°,在试样的横截面内,晶格旋转角度最大为±2.4°。

利用 X 射线微衍射(微米级空间分辨率)技术测量冲击区域内的残余应力分布^[26]。图 10 为 Al(110)试样表面残余应力实验结果与模拟结果比较^[26]。从图中可知,在冲击线两侧 30 μm 内为压应

图 9 为 S. Vukelic 等^[26]采用 EBSD 技术对 Al(110)试样进行晶格旋转的测试结果,图 9(a)为试样表面的测量结果,图 9(b)为试样横截面的测量结

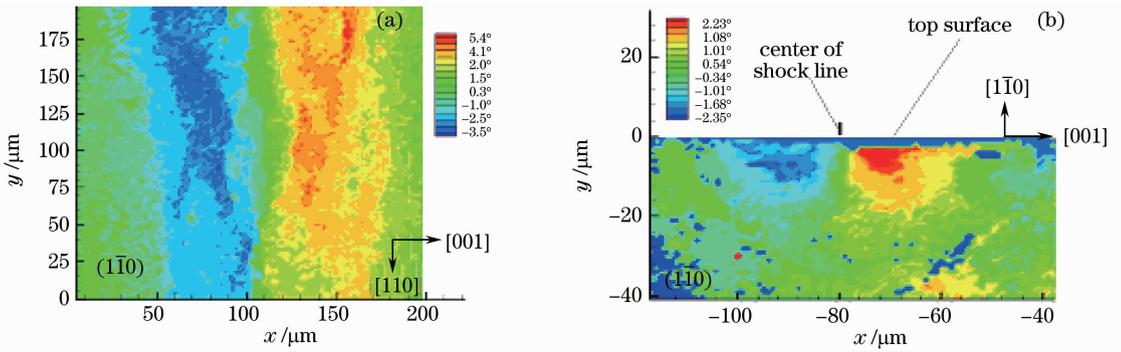


图 9 Al (110)试样表面(a)及横截面(b)晶格旋转场(冲击次数 3 次, 功率密度 4 GW/cm², 光斑直径 12 μm)

Fig. 9 Lattice rotation contour map on the (110) sample. (a) surface, (b) cross section
(three pulses, $I=4 \text{ GW/cm}^2$, $d=12 \text{ μm}$)

力, 而 30~60 μm 范围内为拉应力, 残余压应力在冲击中心±20 μm 范围内达到 -80~-100 MPa。Chen 等^[27]运用傅里叶变换对单晶体铝和铜试样 X 射线微衍射谱进行了测试, 将记录的每个位置不均匀和拓宽的衍射谱用传统和改进的 Warren and Averbach 方法进行分析, 评估了应变偏量和位错密度的变化, 特别指出测试结果更取决于材料和晶格取向。图 11 为对 Al(110)试样进行激光微喷丸强化试验后沿[001]、[110]和[111]晶向进行残余应力的测量结果, 表明不同晶向上的残余应力分布不同, [001]晶向的影响范围比[110]更大一些^[12]。

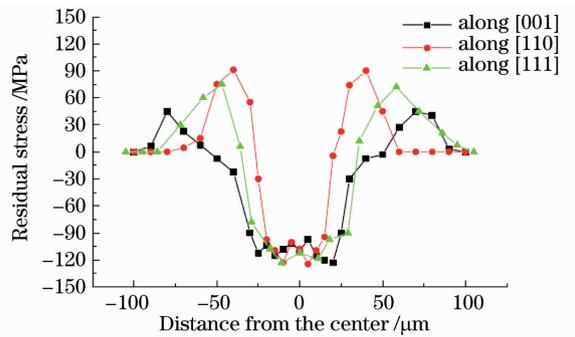


图 11 Al(110)试样 X 射线微衍射残余应力分布
Fig. 11 Color online lateral residual stress distribution from X-ray diffraction measurement for Al(110) sample

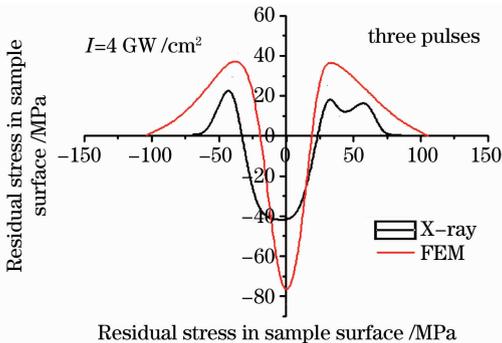


图 10 Al(110)试样表面残余应力分布
(光斑直径 12 μm)

Fig. 10 Typical spatial distribution of residual stress in Al(110) sample surface ($d=12 \text{ μm}$)

Wang 等^[28]对激光微喷丸的单晶硅基铜膜表面进行了 X 射线微衍射和 EBSD 观察。在应变区域, 测定并分析位错密度和微观结构变化, 包括晶体组织、晶粒尺寸和亚晶结构。此外, 分析了单晶硅对于微尺度激光喷丸的铜薄膜影响。图 12 和 13 分别为通过原子力显微镜观察得到的铜薄膜在微尺度激光喷丸前后的表面形貌图, 表明激光微喷丸后的晶粒明显得到细化, 而且分布更加均匀, 由此说明微喷丸区域得到有效强化。

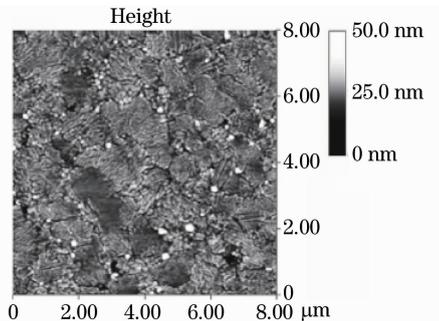


图 12 μLSP 前表面形貌图

Fig. 12 Surface topography of specimen without μLSP

采用纳米压痕仪对不同激光能量下的微喷丸 Cu 薄膜试样表面的硬度进行了测量, 结果如图 14 所示, 分析认为硬度增加的原因有 2 个: 1) 塑型变形引起的加工硬化, 2) 喷丸处理后产生的残余压应力分布^[9]。对激光微喷丸纯铜试样的弹性模量测量表明, 在喷丸中心其弹性模量值最大, 随着距光斑中心距离的增加呈减小趋势; 随着激光能量的增加, 纳米硬度和弹性模量呈增加的趋势。

4.3 激光微喷丸过程的数值模拟

由于激光微喷丸过程具有高瞬态压力、波-固耦合及在微米尺度下的高应变率等技术特征, 因而与

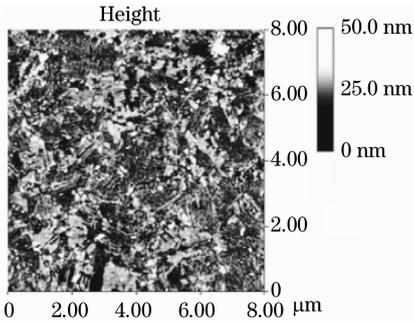


图 13 μ LSP 后表面形貌图(喷丸次数 3 次, 功率密度 4 GW/cm^2 , 光斑直径 $12 \mu\text{m}$)

Fig. 13 Surface topography of specimen with μ LSP (three pulses, $I=4 \text{ GW/cm}^2$, $d=12 \mu\text{m}$)

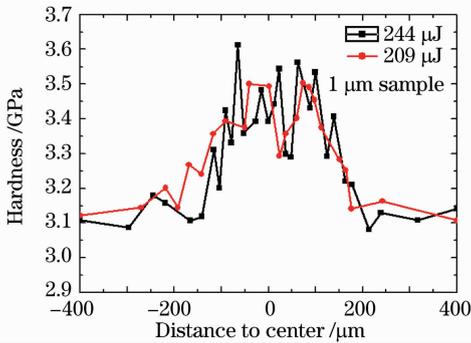


图 14 $1 \mu\text{m}$ 厚的试样表面硬度分布(喷丸次数 3 次, 功率密度 4 GW/cm^2 , 光斑直径 $12 \mu\text{m}$)

Fig. 14 Hardness distribution across shocked $1 \mu\text{m}$ samples measured using nanoindentation (three pulses, $I=4 \text{ GW/cm}^2$, $d=12 \mu\text{m}$)

宏观的数值模拟存在较大差异, 面临诸多需解决的关键技术: 微尺度激光冲击波压力分布及其加载模型, 应力应变本构关系, 微细网格划分及其边界条件处理, 模拟结果的输出和后处理等。此外, 针对一些特殊材料如单晶体材料, 模拟中还需考虑材料的塑性变形特征及各向异性。目前激光微喷丸模拟的工作大多基于 ABAQUS 软件平台, 由于尺度微小, 其单元网格划分对模拟结果影响较大。

2004 年, Chen 等^[27]在对单晶体铝材料进行了激光微喷丸数值模拟时考虑了如下 2 个方面: 1) 采用基于流体动力学的数值模型分析材料在冲击过程中的动态材料响应; 2) 采用基于单晶体塑性变形理论的数值模型来考虑激光微喷丸强化过程中的微尺度效应以及晶体的各向异性。两者皆借助于 ABAQUS 用户材料子程序 UMAT (Fortran 语言代码) 来实现^[29]。

2007 年以来, Warren 等^[30]基于冲击波压力始终垂直于材料表面的假设, 编写了用户加载子程序 VDLOAD 来考虑微尺度下激光诱导冲击波的轴向

和径向压力加载, 对铜箔材料进行了单面和双面激光微喷丸强化数值模拟。2010 年, Sealy 等^[31]在研究 Mg-Ca 材料的激光微喷丸数值模拟时, 则提出基于内部状态变量塑性模型 (ISV), 并编写了用户材料子程序 VUMAT 来考虑材料在高应变率下的塑性变形行为。

目前, 激光微喷丸强化的数值模拟分析中主要集中在单点或多点搭接激光喷丸后材料表面的微变形形貌, 残余应力/应变[包括 Mises 应力, S_{11} 、 S_{22} 、 S_{33} 应力分量, 等效塑性应变 (PEEQ)] 等力学响应沿材料表面或深度方向的分布, 以及各响应值与各激光参数之间的关系研究。

图 15 为模拟激光能量对残余应力大小和分布的影响, 当激光能量从 $180 \mu\text{J}$ 增加到 $240 \mu\text{J}$ 时, 表面残余应力 S_{11} 幅值从 -60 MPa 减少到 -45 MPa , 而距表面 $70 \mu\text{m}$ 处的残余应力幅值从 -125 MPa 增加到 -178 MPa 。同时, 深度方向残余应力的变化范围大于表面残余应力的变化范围。说明表面 S_{11} 对能量变化反应不敏感, 其原因是当压力结束时表面产生了应力松弛, 尽管能量增加, 但应力松弛仍然发生。这说明对试样进行激光微喷丸处理, 激光脉冲能量不是越大越好, 应该综合考虑表面和表面层以下的应力分布, 选择一个最佳的范围^[22]。

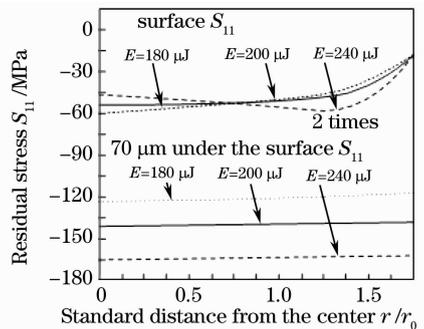


图 15 激光能量对残余应力分布的影响(光斑半径 $6 \mu\text{m}$)

Fig. 15 Distribution of residual stresses on the top surface and at $70 \mu\text{m}$ below the top surface. Distance from the center is normalized to the radius of laser beam r_0 , where $r_0=6 \mu\text{m}$

采用激光能量 $240 \mu\text{J}$, 光斑直径 $12 \mu\text{m}$ 参数进行不同喷丸次数的激光微喷丸模拟, 获得的残余应力分布如图 16 所示^[22]。可以看出表面残余应力 S_{11} 幅值从 1 次喷丸的 -50 MPa , 增加到 3 次喷丸的 -75 MPa 。而距离表面一定深度 $70 \mu\text{m}$ 的残余应力幅值有增大的趋势, 但变化并不是很明显。这说明表面残余应力对喷丸次数非常敏感, 而表面以下

由于加工硬化的原因,受喷丸次数影响不大。

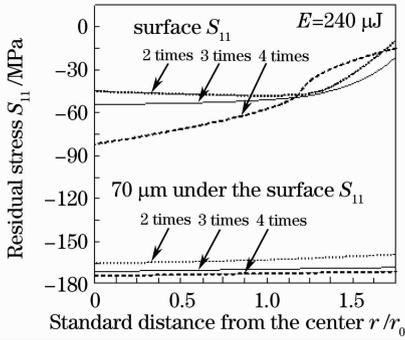


图 16 喷丸次数对残余应力分布的影响(光斑半径 $6 \mu\text{m}$)

Fig. 16 Distribution of residual stresses on the top surface and at $70 \mu\text{m}$ below the top surface. Distance from the center is normalized to the radius of laser beam r_0 , where $r_0 = 6 \mu\text{m}$

图 17 为有限元模拟残余应力分布与两种试验测量方案的比较^[25],图 18 是模拟所得激光微喷丸试样内部残余应力分布的云图^[26],表明在微喷丸区域的残余应力场为对称分布,在试样表面冲击中心区域为压应力,两侧则为拉应力。这表明通过模拟可以分析残余应力大小及其分布趋势,了解工艺参数对微喷丸处理前后机械性能的影响,从而进一步指导实验。

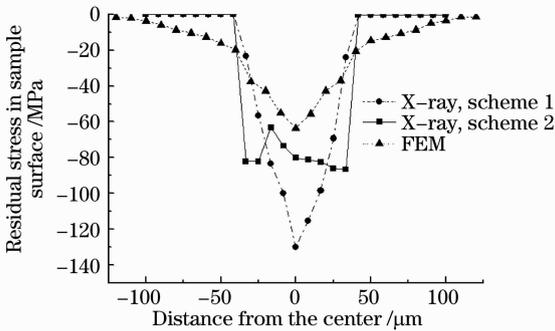


图 17 Al(110)表面残余应力分布两种测量方案与模拟的比较(光斑直径 $12 \mu\text{m}$, 能量 $300 \mu\text{J}$, 喷丸次数 3 次)

Fig. 17 Comparison of spatial residual stress distribution on sample surface by two measurement schemes of Al(110) sample ($d = 12 \mu\text{m}$, $E = 300 \mu\text{J}$, three pulses)

图 19 为激光微喷丸引起的试样表面晶格旋转空间分布的模拟^[24],这有助于更好地分析微喷丸试样的变形机制,得到完整的试样几何变形情况和晶格旋转域。然而,上述相关的激光微喷丸强化过程模拟,是在假设变形状态简化为二维,同时忽略了瞬时高压、波-固耦合和高应变效应的情况下进行的,

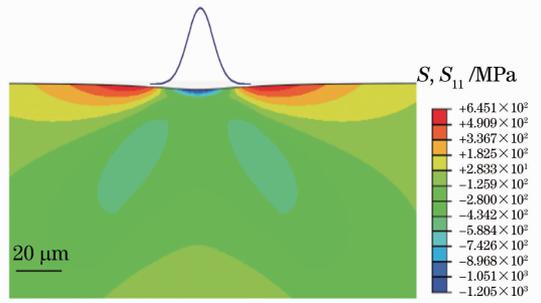


图 18 Al(110)试样残余应力模拟结果

Fig. 18 FEM simulation of residual stress distribution in the Al(110) case

因此模拟结果和真实状况有所差异,这些因素在以后的模拟过程中都需要进一步考虑。

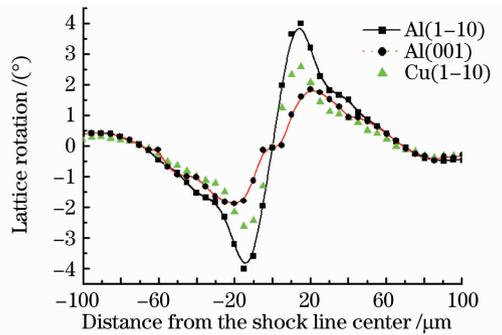


图 19 试样表面晶格旋转的空间分布模拟(光斑直径 $12 \mu\text{m}$, 功率密度 $4 \text{GW}/\text{cm}^2$, 喷丸次数 3 次)

Fig. 19 Spatially distribution of latticed rotation on sample surface from simulation ($d = 12 \mu\text{m}$, $I = 4 \text{GW}/\text{cm}^2$, three pulses)

4.4 激光微喷丸表面形貌和微力学性能

采用数控程序进行多点激光微喷丸处理,在受喷表面会产生规则的微观塑性形变区域,类似于表面微造型。图 20 为激光微喷丸获得的典型微凹坑阵列及其 3D 轮廓图^[32]。表面微造型是当今表面工程领域十分关注的表面织构技术,可以显著地改变摩擦副表面的摩擦性能。不仅能提高摩擦系数的稳定性,还能有效地提高接触表面的疲劳寿命。

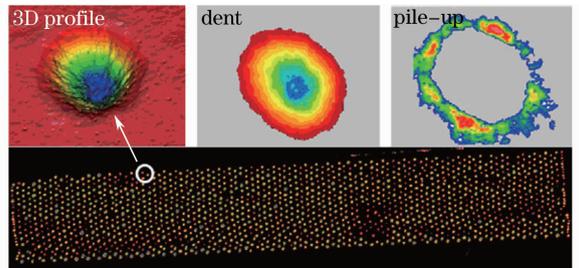


图 20 凹坑阵列和单个凹坑的 3D 形貌

Fig. 20 3D topography of the dent array and individual dent

文献[33]对激光微喷丸的铝块试样进行了研磨试验,对比了磨损情况,如图 21 所示。可以看出,经强化后试样表面耐磨性明显提高。在磨损减薄初期,磨损的厚度较大,第 3 次研磨量最小,表明试样的耐磨性最强,并沿深度方向逐渐减小。摩擦学和仿生学相关研究和实践表明,表面并非越光滑越耐磨,具有一定非光滑形态的表面反而具有更好的耐磨性能。在摩擦过程中,凹坑面造型能够使表面摩擦系数很快趋于稳定,使表面的接触疲劳强度得到明显提高;微凹坑可以吸收 2 种材料对磨产生的氧化磨损颗粒,提高摩擦副的使用寿命,延缓疲劳失效。

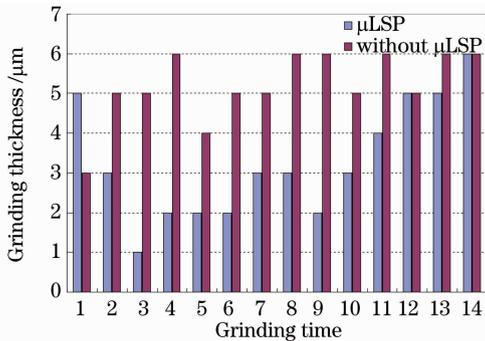


图 21 研磨厚度随研磨时间的变化示意图

Fig. 21 Grinding thickness varying with grinding time

在利用 CS300 型电化学测试系统分析的基础上,采用极化曲线法研究经 μ LSP 处理后材料的腐蚀规律和电化学行为。图 22 为 Cu 电极在 NaCl 溶液中的极化曲线,可以看出,在相同的极化电位下,0-0' 的阳极电流密度和阴极电流密度都较强化后的大,说明强化后材料的耐腐蚀性明显增强^[33]。

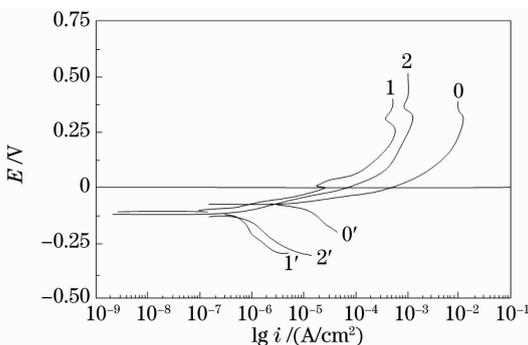


图 22 Cu 电极的极化曲线

Fig. 22 Polarization curve of Cu electrode

相对于激光微喷丸材料微观组织等研究,激光微喷丸后力学性能改善的研究工作还开展得不多,主要是目前针对微喷丸应用的对象尚不够明确,而针对微电子机械系统(MEMS)等微结构表面处理还存在工艺方法上的一些难题。另外,微结构件力

学性能的检测技术也存在诸多挑战。

5 展 望

微尺度激光喷丸技术不仅仅是对宏观激光喷丸技术的简单拓展,其在脉冲激光作用机理、激光冲击波加载、制造特征等方面与宏观喷丸工艺存在本质差别,它在微结构表面改性处理、宏观尺度零件表面微观造型、微喷丸成形等方面已显示出巨大潜力和应用前景。作为光-力制造在微观尺度领域的应用,目前的激光单元技术及其装备系统已经提供了硬件保障,但在理论上的研究才刚起步,系统的强化机理、工艺方法、数值模拟和测试表征等方面的研究还十分缺乏。为此,必须加强上述相关科学问题的研究,解决激光微喷丸工程应用若干支撑技术。

5.1 激光微喷丸表面的控性控形技术

激光微喷丸强化改善了微结构表面的性能,但同时由于在微构件表面产生的微塑变形和残余应力场,对微构件的尺寸和形状带来影响。如何在获得性能增长的同时又具有优异的表面形貌和完整性,必须研究微喷丸过程的控性、控形方法。通过理论、实验和数值模拟等方法相结合,研究应力强化结合组织强化条件下,金属结构改性延寿的机理,表面形貌对微力学性能的综合影响,掌握工艺参数对材料微结构改性的规律,建立激光微喷丸工艺准则及其过程控制技术。

5.2 激光微喷丸强化的合理表征方法

宏观尺度的激光喷丸强化可通过测试塑性变形深度、残余应力大小以及拉伸疲劳性能等方法来表征强化增益,而激光微喷丸区域的特征尺寸在微米量级,要求测量设备具有较高的时空分辨率,因此由于尺度效应的影响,针对激光微喷丸效果的检测较为困难,如残余应力测试,现有常规的 X 射线衍射仪采用的 X 光管口径在 1 mm 左右,无法直接测量微喷丸区域点的残余应力。为此必须探索激光微喷丸强化效果的共性表征方法,如通过纳米硬度和弹性模量等主要性能的测试,利用金属物理和力学理论建立起相关性关系,编制专用软件模块,实现微喷丸效果的分析 and 表征。

5.3 激光微喷丸过程的集成数字化分析技术

目前有关激光微喷丸的数值模拟都是以单晶体金属材料为研究对象,而常用的金属材料大多为多晶体。微尺度下,光斑尺寸和晶粒尺寸在一个数量级,激光微喷丸过程中,冲击波作用在几个晶粒的范围内,材料的流动应力和硬化受微小尺度的影响也

较大。需要满足变形协调、应力平衡等条件,为此需要从材料的微观结构出发,更加注重材料的局部行为研究,进行多晶体的激光微喷丸数值模拟,获得工艺过程中各个晶粒的动态响应情况。因此,必须综合考虑不同工艺条件下材料性能非线性、接触边界条件非线性、多界面相互作用、微观组织演变等因素,建立包括激光参数、微观组织、残余应力及表面形貌相耦合的集成化有限元分析模型,实现对激光微喷丸工艺参数的合理优化及其性能的数字分析,为工程应用提供指导。

5.4 基于激光微喷丸工艺的表面微造型技术

在摩擦副工作表面进行合适规则几何形貌的微观造型,可显著改善摩擦副表面摩擦性能,延长使用寿命。目前针对摩擦副表面的微造型减磨润滑,是利用基于激光热效应的刻痕技术,由于激光烧蚀去除过程的微沟槽比较粗糙,且在沟槽周围产生拉应力,易成为应力集中区。由此利用激光微喷丸技术在摩擦副表面产生规则的微塑性变形的凹坑形貌,进而实现对摩擦副表面的减磨润滑效果,已引起了国内外部分学者的关注,其综合激光微喷丸成形和微喷丸强化功能于一体,有望成为表面织构微造型的主要应用对象。但现有激光微喷丸的研究主要还是集中在改善微观组织和材料应力及疲劳特性等方面,较少关注对摩擦学性能的影响。如何进一步利用该工艺在摩擦副表面实现三维形貌的控制,形成规则优化的凹坑阵列,提高摩擦表面的摩擦学性能还需要深入研究。同时,建立多点喷丸条件下强化表面的摩擦磨损数学模型,对于分析多点喷丸强化改善摩擦磨损性能的机理,建立以激光喷丸工艺参数为变量的表面摩擦系数的数学模型具有指导意义。

参 考 文 献

- Linfa Peng, Xinmin Lai, Hye-Jin Lee *et al.*. Friction behavior modeling and analysis in micro/meso scale metal forming process [J]. *Mater. Des.*, 2010, **31**(2): 1953~1961
- Y. Nakamaru, H. Honma. Fabrication of three-dimensional microstructure by nickel plating and photolithography[J]. *Trans. Inst. Met. Finishing*, 2009, **87**(5): 259~263
- S. W. Han, H. W. Lee, H. J. Lee. Mechanical properties of Au thin film for application in MEMS/NEMS using microtensile test[J]. *Current Appl. Phys.*, 2006, **6**(s1): 81~85
- Ta-Hsuan Lin, Stephen Paul, Susan Lu *et al.*. A study on the performance and reliability of magnetostatic actuated RF MEMS switches[J]. *Microelectron. Reliab.*, 2009, **49**(1): 59~65
- J. Kimberley, I. Chasiotis, J. Lambros. Failure of microelectromechanical systems subjected to impulse loads[J]. *Int. J. Solids Struct.*, 2008, **45**(2): 497~512
- Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2662~2666
- 鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2662~2666
- Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 罗新民, 张静文, 赵广志等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- 李伟, 何卫锋, 李应红等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- Wenwu Zhang, Y. Lawrence Yao, I. C. Noyan. Microscale laser shock peening of thin films, part 2: high spatial resolution material characterization[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(1): 18~23
- Hongqiang Chen, Youneng Wang, Jeffrey W. Kysar *et al.*. Systematical characterization of material response to microscale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(4): 740~750
- R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~782
- Hongqiang Chen, Youneng Wang, J. W. Kysar *et al.*. Study of anisotropic character induced by microscale laser shock peening on a single crystal aluminum[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(2): 024904
- Youneng Wang, Yajun Fan, Sinisa Vukelic *et al.*. Energy level effects on deformation mechanism in micro-scale laser peening forming[J]. *J. Manuf. Processes*, 2007, **9**(1): 1~12
- Youneng Wang, Jeffrey W. Kysar, Y. Lawrence Yao. Analytical solution of anisotropic plastic deformation induced by micro-scale laser shock peening[J]. *Mech. Mater.*, 2008, **40**(3): 100~114
- P. Michael, Sealy, Y. B. Guo. Fabrication and finite element simulation of micro-laser shock peening for micro dents [J]. *Internat. J. Comput. Meth. Engng. Sci. Mech.*, 2009, **10**(2): 134~142
- Sinisa Vukelic, Jeffrey W. Kysar, Y. Lawrence Yao. Grain boundary response of aluminum bicrystal under micro scale laser shock peening[J]. *Int. J. Solids Struct.*, 2009, **46**(18-19): 3323~3335
- Zhang Wenwu, Yao Y. Lawrence. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2002, **124**(2): 369~378
- W. Zhang, Y. L. Yao. Microscale laser shock processing: modeling, testing and microstructure characterization [J]. *J. Manuf. Processes*, 2002, **3**(2): 128~143
- A. Vogel, S. Busch, U. Parlitz. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical break down in water [J]. *J. Acoustical Soc. Am.*, 1996, **100**(1): 148~165
- Chen Xiao. Studies on Mechanisms of the Interaction between High-Power Laser and Matter in Water[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. 34~36
- 陈笑. 高功率激光与水下物质相互作用过程与机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004. 34~36
- Wang Min, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Research on modeling of shock wave pressure in micro-scale laser shot peening [J]. *J. Harbin Inst. Technol. (New Science)*, 2010, **17**(s1): 119~122
- Fan Yujie, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Study on

- strengthening mechanism of microscale laser shock peening[J]. *Key Engng. Mater.*, 2010, **431-432**: 221~224
- 23 H. Chen, Y. Wang, J. W. Kysar *et al.*. Advances in microscale laser shock peening[J]. *Tsinghua Sci. Technol.*, 2004, **9**(5): 506~518
- 24 H. Chen, J. W. Kysar, Y. L. Yao. Characterization of plastic deformation induced by micro scale laser shock peening[J]. *J. Appl. Mech.*, 2004, **71**(5): 713~723
- 25 Chen Hongqiang, Yao Y. Lawrence, W. Kysar Jeffrey. Spatially resolved characterization of residual stress induced by micro scale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(2): 226~236
- 26 S. Vukelic, Y. Wang, J. W. Kysar *et al.*. Dynamic material response of aluminum single crystal under microscale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2009, **131**(3): 031015
- 27 Chen Hongqiang, Yao Y. Lawrence, W. Kysar Jeffrey *et al.*. Fourier analysis of X-ray micro-diffraction profiles to characterize laser shock peened metals[J]. *Int. J. Solids Struct.*, 2005, **42**(11): 3471~3485
- 28 Youneng Wang, Hongqiang Chen, Jeffrey W. Kysar *et al.*. Response of thin films and substrate to micro scale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Engng.*, 2007, **129**(3): 485~496
- 29 Y. Huang. A user-material subroutine incorporating single crystal plasticity in the abaqus finite program [R]. Boston: Harvard University, Division of Applied Sciences, 1997
- 30 A. W. Warren, Y. B. Guo, S. C. Chen. Massive parallel micro laser shock peening: simulation, validation, and analysis[J]. *Int. J. Fatigue*, 2008, **30**(1): 188~197
- 31 M. P. Sealy, Y. B. Guo. Surface integrity and process mechanics of laser shock peening of novel biodegradable magnesium-calcium (Mg-Ca) alloy [J]. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 2010, **3**(7): 488~496
- 32 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. Processing Technol.*, 2011, **211**(4): 729~736
- 33 Che Zhigang, Xiong Liangcai, Shi Tielin *et al.*. Experimental analysis of microscale laser shock processing on metallic material using excimer laser[J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2009, **25**(6): 829~834