

文章编号: 1001-3806(2008)04-0350-03

## 微尺度下激光冲击金属材料特性分析与展望

车志刚<sup>1,2</sup>, 熊良才<sup>1,2\*</sup>, 史铁林<sup>1,2</sup>, 杨立昆<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 华中科技大学武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 综述和分析了激光冲击套金属材料的微尺度效应、材料的弹塑性理论、材料的非线性。对于等离子体的物理发展过程及空间结构, 提出了旋转椭球体模型, 对进一步研究、建立微尺度激光冲击强化等离子体三维模型奠定了理论基础。展望了微尺度激光冲击处理技术的发展及应用前景。

**关键词:** 激光技术; 微尺度激光冲击处理; 径向冲击力; 材料非线性; 旋转椭球

中图分类号: O539.TG156.99 文献标识码: A

### Character analysis and development of metal material for microscale laser shock processing

CHE Zhirgang<sup>1,2</sup>, XIONG Liangcai<sup>1,2</sup>, SHI Tielin<sup>1,2</sup>, YANG Likun<sup>1,2</sup>

(1 School of Mechanical Science and Engineering Huazhong University of Science & Technology Wuhan 430074 China; 2 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074 China)

**Abstract** The microscale effect, elastic-plastic theory and material nonlinearity of laser shock processing were analyzed and discussed. The rotation ellipsoid model was put forward according to the physical development and space profile of plasma which lay a theory foundation for plasma three dimension model. The development of microscale laser shock processing was presented.

**Key words** laser technique; microscale laser shock processing; radial shock force; material nonlinear; rotation ellipsoid

### 引 言

随着微电子机械系统 (micro electro-mechanical system, MEMS) 的研究与应用的日益推广, MEMS 产品的失效及可靠性问题也引起了广泛的关注<sup>[1]</sup>。利用激光冲击处理 (laser shock processing, LSP) 技术可以从制作 MEMS 产品材料 (金属或金属薄膜) 着手根本解决 MEMS 产品的可靠性问题。LSP 是利用高功率 ( $10^9 \text{ W/cm}^2$  级)、短脉冲 (纳秒量级) 激光束辐射材料表面, 产生高温高压的等离子体, 等离子体急剧膨胀爆炸产生强应力波使材料表层及内部组织结构、应力状态发生改变。改善材料的强度, 提高其抗疲劳、抗磨损和应力腐蚀等性能<sup>[2-4]</sup>, 从而提高使用寿命、安全性及可靠性。

目前, 国内外学者对于毫米级 LSP 进行了大量的研究与应用, 然而相对于 MEMS 产品而言, 将激光光斑限制在微米量级, 甚至几微米进行微尺度激光冲击处理 (microscale laser shock processing,  $\mu\text{LSP}$ ) 的理论

研究与应用却鲜见报道。作者对激光光斑为微米的  $\mu\text{LSP}$  进行了讨论, 对于  $\mu\text{LSP}$  的微尺度效应、材料的弹塑性理论、材料非线性及等离子体冲击波模型进行了分析与探讨。正是这些因素的综合作用导致经  $\mu\text{LSP}$  后的材料呈现复杂的应力、应变分布, 从而大幅度提高 MEMS 产品材料的抗疲劳、抗腐蚀性性能。

### 1 微尺度 LSP 下的材料特性分析

#### 1.1 LSP 的微尺度效应

微尺度效应是设计、制造 MEMS 产品必须考虑的问题, 也是 LSP 在微尺度下首要考虑的因素之一。许多材料的性能与其在宏观形式下差别较大<sup>[5]</sup>。在微尺度下, 材料尺寸与光斑尺寸为同一数量级, 因此光斑能量的均匀分布假设不再成立, 必须考虑能量的空间分布; 对于材料本身来说, 均质性假设也不再成立, 尤其是对于合金材料, 必须考虑密度、热导率、波速的差异对作用过程的影响; 对于材料的性能特性, 如弹性模量、泊松比、断裂强度、屈服强度、硬度、疲劳特性、传导率等必须考虑微尺度效应使之保持为常量的条件。因此, 建立微尺度下材料数据库、建立健全材料性能评估体系, 包括标准的测试方法、高精度的测试仪器, 已经成为 MEMS 产品的必然<sup>[6]</sup>。

基金项目: 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目 (2003CB716207); 国家自然科学基金资助项目 (50575078)

作者简介: 车志刚 (1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为微制造及激光加工。

\* 通讯联系人。E-mail: lcx@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-05-14; 收到修改稿日期: 2008-06-10

### 1.2 μLSP 材料的弹塑性理论

对于 μLSP, 光斑尺寸、涂层厚度、材料厚度均为微米级, 冲击波在材料中传播速度多为几个 km/s, 则冲击波在材料中的传播时间为纳秒级。与激光脉宽相当, 故冲击载荷可视作动载荷。而对强动载荷的弹塑性形变问题, 材料的弹性模量是应力的函数, 广义胡克定律不再成立, 需考虑非线性弹性的应力-应变关系。而处于塑性状态随后松弛的材料重新加载时, 弹性状态的应变关系应作修正, 且材料的屈服应力也会提高, 见图 1。

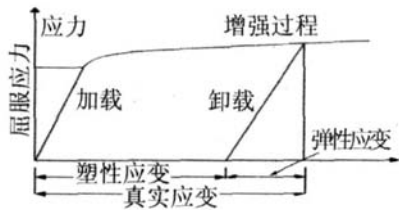


图 1 材料的弹塑性行为

此外, 在强动载荷作用下, 应力往往不仅与应变有关, 还与应变率及应变历史有关。通过估算<sup>[7]</sup>,  $\dot{\epsilon}$  为  $10^7 \text{ s}^{-1}$  量级。由 LINDHOLM<sup>[8]</sup> 的理论, μLSP 属于高速冲击范围。

### 1.3 μLSP 材料流体理论

强冲击载荷的 μLSP 不能简单地将应力波按单行波来近似, 应按材料应力波的双波结构来分析: 前面为弹性前驱波, 其后跟随较慢速度传播的塑性波。这里由于材料受到高能密度短脉冲辐照, 承受高强度的动载荷作用, 可使塑性波赶上或超过弹性波, 使固体材料逐渐显示出流体的某些特征, 因此可根据需要将材料处理成可压缩流体, 并应用脉冲束辐照凝聚态物质动力学方程质量、动量、能量守恒方程进行求解。

### 1.4 考虑轴向冲击力与径向冲击力

由于激光光斑尺寸为微米级, 与涂层的厚度相当, 因此冲击波一维平面波假设已不再成立。等离子体的径向膨胀不能忽略, 故建立激光诱导冲击波的三维模型已成为必然。同时, 等离子体诱导的冲击波对靶材作用的径向冲击力也不能忽略。此时, 应考虑径向冲击力对靶材的影响。因此, 需要对材料进行三维应力应变分布的研究。另外由于为微尺度 LSP, 光斑能量空间分布的均匀性假设不再合适, 应考虑冲击压力的空间不均匀分布。在考虑激光能量高斯分布的非均匀性基础上, 用下式<sup>[9]</sup>计算施加在靶材上等离子体冲击压力应力应变分析的载荷较为合适:  $p(0, r, t) =$

$$p(t) \exp\left[-\frac{r^2}{2R^2(t)}\right] \quad \text{其中, } p(t), R(t) \text{ 分别为:}$$

$$p = p_{FD}, R = R_0 \quad (t < T_r) \quad (1)$$

$$p = p_{FD} (t/T_r)^{-0.8}, R = R_0 (t/T_r)^{0.5}, (T_r < t < T_z) \quad (2)$$

$$p = p_{FD} (T_r/T_z)^{0.8} (T_z/t)^{1.2},$$

$$R = R_0 (T_z/T_r)^{0.5} (T_z/t)^{-0.8}, (t > T_z) \quad (3)$$

式中,  $T_r = R_0/a$  ( $R_0$  为光斑半径,  $a$  为等离子体声速),  $T_z$  为激光脉宽,  $r$  为计算点径向半径,  $t$  为时间,  $p_{FD}$  为一维模型计算的等离子体压力<sup>[10]</sup>。从物理过程上来分析, 在一个脉冲周期内, 在等离子体生成时, 侧向稀疏波以等离子体声速从边界向内部传播,  $T_r$  时间后, 稀疏波到达光斑中心, 等离子体压力下降, 从而偏离一维假设的压力值。在该次脉冲终止后  $T_z$  时刻, 等离子体开始轴向膨胀。

### 1.5 材料非线性

材料的非线性即材料的应力应变关系为非线性。在 μLSP 中, 靶材所受短时间 (小于 100ns)、高压 (1GPa~10GPa)、高应变率 (大于  $10^5 \text{ s}^{-1}$ ) 作用。因此, 应力分析中的材料本构关系应考虑应变率和超高压对材料屈服强度的影响效应。考虑加工硬化效应、应变率效应及压力对屈服强度的影响<sup>[2]</sup>, 有:

$$G = G_0 \left[ 1 + \left( \frac{G_p}{G_0} \right) p + \left( \frac{G_T}{G_0} \right) (T - T_0) \right],$$

$$Y = Y_0 (1 + C \ln \dot{\epsilon}) (1 + B \epsilon)^n \times \left[ 1 + \left( \frac{Y_p}{Y_0} \right) p + \left( \frac{G_T}{G_0} \right) (T - T_0) \right],$$

$$G_p' = \frac{dG}{dp}, G_T' = \frac{dG}{dT}, Y_p' = \frac{dY}{dp} \frac{Y_p'}{Y_0} \approx \frac{G_p'}{G_0} \quad (4)$$

式中,  $G$  为剪切模量,  $Y$  为屈服强度,  $p$  为压力,  $T$  为温度,  $T_0$  为初始温度,  $Y_0, G_0$  为初始状态  $T_0$  时  $Y, G$  的对应值,  $C$  为应变率  $1 \text{ s}^{-1}$  时 对数比率灵敏度,  $\epsilon$  为应变,  $\dot{\epsilon}$  为应变率,  $B$  和  $n$  为加工硬化效应材料参数。

## 2 μLSP 等离子体冲击波模型

对于 μLSP 继续沿用一维平面波假设冲击波模型显然不再合适。从最早的 FABBRO<sup>[10]</sup> 到 ZHANG 和 YAO 所推导的模型<sup>[2, 11]</sup> 及 ZHANG 和 YAO 建立的用水作约束层的五分理论<sup>[12]</sup> 和六分区理论<sup>[8]</sup>, 都以一维平面波理论为基础。在微尺度下显然会带来很大的误差。通过分析等离子体的物理发展过程、空间结构特性 (见图 2)<sup>[13]</sup> 可看出, 等离子体形成初期具有显著

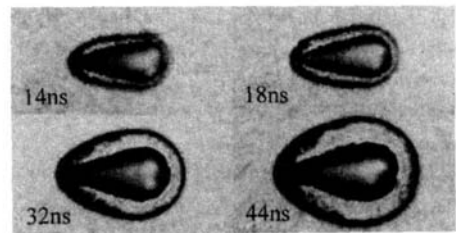


图 2 冲击波波前及等离子体的演化

的轴对称性质, 轴向膨胀速度大于径向膨胀速度, 表现为沿激光入射方向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。即:  $\frac{X^2}{B} + \frac{Y^2}{B} + \frac{Z^2}{A} = 1, A \gg B,$

这里  $B$  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。特别提出的是, 这里  $A, B$  不再为常数, 而是时间  $t$  及约束层介质马赫数  $Ma$  等相关变量的函数 (在以后的研究中将重点研究相关模型的建立及各参量的推导)。

### 3 结论与展望

为解决 MEMS 产品的可靠性问题, 对 MEMS 材料进行  $\mu$ LSP 是一种有效的途径, 也是值得大范围推广的技术手段。相对于 LSP,  $\mu$ LSP 在理论分析及复杂性上更有显著的不同。在微尺度效应、材料的弹塑性理论、材料非线性等方面尤其值得关注。对于  $\mu$ LSP 的等离子体冲击波模型, 采用旋转椭球面模型从等离子体的物理发展过程、空间结构特性, 都符合其实际的发展规律。为进一步地研究三维等离子体冲击波模型奠定了理论基础。

较之 LSP,  $\mu$ LSP 允许高的激光重复频率、较小的激光作用区域, 为处理 MEMS 组件, 特别是处理复杂几何外形的 MEMS 组件提供了灵活、独特的实用性。然而到目前为止,  $\mu$ LSP 的理论尚不成熟, 对于  $\mu$ LSP 的物理发展过程的相关模型尚不完善。随着 MEMS 的应用日益广泛, 必将推动  $\mu$ LSP 的研究更加深入与完善。

#### 参 考 文 献

[1] van SPENGEN W M, ROBERTS P, ROBERT M, *et al*. A low frequer

(上接第 342 页)

#### 参 考 文 献

- [1] D'GONNET M J F. Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers [M]. New York: Marcel Dekker, 2001: 313-340
- [2] WYSOCKI P F, D'GONNET M J F, KIM B Y, *et al*. Broadband fiber sources for gyros [J]. Proc SPIE, 1991, 1585: 371-382
- [3] XIE Ch X, LV F Y, ZHANG Sh M, *et al*. High power Er/Yb codoped fiber superfluorescent source [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 34-36 (in Chinese).
- [4] GUO X D, QIAO X G, JIA Zh A, *et al*. A simple high power L-band superfluorescent fiber source [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 364-369 (in Chinese).
- [5] WANG X L, MING H, HUANG W C. A novel two-stage erbium amplified spontaneous emission fiber source with 80nm bandwidth [J]. Proc SPIE, 2005, 6019: 601948-1-601948-8
- [6] LIU Y, WANG J, ZHAO Ch G, *et al*. Homemade broad bandwidth

cy electrical test setup for the reliability assessment of capacitive RF MEMS switches [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering 2003, 13(5): 604-612

- [2] ZHANG W W, YAO Y L. Microscale laser shock processing of metallic components [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 2002, 124(2): 369-378
- [3] YU Z L, GAO Ch Y, ZENG D Y, *et al*. Study of the surface qualities of laser shock processing zones using an artificial neural network [J]. Laser Technology, 2001, 25(1): 1-6 (in Chinese).
- [4] WANG F, YAO Zh Q. Experimental research of laser shock processing brass [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 511-513 (in Chinese).
- [5] SPEARING S M. Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS) [J]. Acta Materialia 2000, 48(1): 179-196
- [6] QIAN J, ZHAO Y P. Materials selection in mechanical design for micro-sensors and micro-actuators [J]. Materials and Design, 2002, 23(7): 17-19.
- [7] ZHOU N, QIAO D J. Material dynamics under pulse beam radiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 52-73 (in Chinese).
- [8] LINDHOLM U S. Techniques in metals research [M]. New York: Interscience Press, 1971: 178-181.
- [9] ZHANG W W, YAO Y L, NOYAN I C. Microscale laser shock peening of thin films: part II: experiment modeling and simulation [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 2004, 126(1): 10-17
- [10] FABRO R, FOURNIER J, BALLARD P, *et al*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. J A P, 1990, 6(2): 775-784.
- [11] ZHANG W W, YAO Y L. Improvement of laser induced residual stress distributions via shock waves [M]. New York: ICALAO, 2000: 183-192.
- [12] ZHANG W W, YAO Y L. Modeling and simulation improvement in laser shock processing [J]. New York: ICALAO, 2001: 221-223
- [13] VOGEL A, BUSCH S, PARLITZ U. Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water [J]. J Acoust Soc Amer 1996, 100(1): 148-165
- [1] source and its application in fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 392-394 (in Chinese).
- [7] PARK H G, D'GONNET M, KINO G. Er-doped superfluorescent fiber source with a  $\pm 0.5$  ppm long term mean-wavelength stability [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(12): 3427-3433.
- [8] WANG Y, PO H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high power pulse amplification [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2062-2070.
- [9] ZHAO SH, ZHAN Sh B, FU K, *et al*. Dynamic response of high power Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> codoped double-clad fiber amplifiers [J]. Optoelectronics Engineering 2006, 33(6): 124-129 (in Chinese).
- [10] LU X M. Effective numerical algorithm for fiber amplifiers [J]. Opt Engng 2005, 44(3): 035001-1-035001-7
- [11] SUN L F, LOU Q H, ZHOU J, *et al*. Frequency response and transient gain of Yb-doped double-clad fiber amplifier [J]. Acta Photonica Sinica 2004, 33(11): 1286-1289 (in Chinese).