

文章编号: 1001-3806(2016)04-0601-05

激光冲击铜薄膜的应力波传播特性模拟分析

张 建¹, 花银群^{1*}, 曹将栋²

(1. 江苏大学 材料工程与科学学院, 镇江 212013; 2. 南通航运职业技术学院 机电系, 南通 226010)

摘要: 为了研究冲击波的传播特性, 采用有限元分析方法模拟不同参量激光冲击铜薄膜的过程, 结合应力波理论分析了膜-基系统的动态应力波传播特性。结果表明, 激光能量为 30mJ 时, 冲击波为弹性波, 薄膜在单次冲击作用下, 其内质点速率最大为 $-0.018\text{mm}/\mu\text{s}$, 3 次冲击作用下, 薄膜内部质点速度与残余应变变化较小; 激光能量为 120mJ 时, 冲击波为弹塑性波, 3 次冲击比单次冲击质点最大速率减小了 26.44%, 残余应变深度增加了 35.48%。这对研究冲击波传播具有指导意义。

关键词: 激光技术; 应力波; 冲击波; 应变; 有限元分析

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.030

Simulation of propagation characteristics of stress wave in copper films with laser shock processing

ZHANG Jian¹, HUA Yinqun¹, CAO Jiangdong²

(1. School of Material and Science Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: In order to study the propagation characteristics of shock wave, shock processing of copper films under the different processing parameters was simulated with finite element software. Propagation characteristics of dynamic stress wave in film-substrate system were analyzed by using stress wave theory. The results show that when the laser energy is 30mJ, shock waves are elastic. The maximum velocity of particles in thin film with the single shock is $-0.018\text{mm}/\mu\text{s}$, the change of the velocity and the residual strain of particles in films is little with three shocks. When laser energy is 120mJ, shock waves are elastic-plastic. The maximum velocity of particles and the largest depth of the residual strain in the films with three shocks are respectively 26.44% lower and 35.48% higher than those with single shock. These have guiding significance to the study of propagation characteristics of shock wave.

Key words: laser technique; stress wave; shock wave; strain; finite element analysis

引 言

激光冲击处理 (laser shock processing, LSP) 技术是基于高强度脉冲激光在材料和周围介质中间产生等离子体伴随的高压冲击波, 冲击波在材料内部传播过程中与材料相互作用使材料产生弹性、塑形变形, 且在冲击区产生高密度位错、相变以及残余压应力等, 从而提高材料的机械和电学性能^[1-4]。随着对激光冲击技术和原理的不断深入探索, 学者对冲击波在靶材中传播过程进行了大量实验研究。REN 等人^[5]发现激光冲击强化后冲击区表层晶粒尺寸明显小于冲击之前的

晶粒尺寸, 晶粒细化能够抑制疲劳裂纹的成核, 提高了材料的疲劳寿命。XIONG 等人^[6]研究了激光冲击 TC11 钛合金, 冲击处理 10 次后, 材料表面形成了一层平均晶粒尺寸 20nm ~ 100nm 的纳米晶粒。CHEN 等人^[7]应用弹塑性力学理论对钢材的残余应力进行了估算。LIU 等人^[8]实验研究了在约束条件下冲击波在不锈钢中的传播过程, 得到冲击波平均传播速度与声波纵波的传播速度一致。WANG 等人^[9]利用压电膜传感器研究了铜靶材中纳秒脉冲诱导冲击波传播过程得到: 冲击压强随激光脉冲能量增加呈非线性上升, 而随靶材厚度的增加近似呈线性下降。但是未见冲击波在硅基纳米铜薄膜界面传播特性研究, 因此, 研究激光冲击硅基铜薄膜应力波的传播特性有重要意义。

LS-DYNA 是世界上著名的显示动力非线性分析程序, 可以精确处理瞬态冲击波在材料中传播过程。作者以硅基铜薄膜为例, 建立激光冲击硅基铜薄膜有限元

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175234)

作者简介: 张 建 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与材料纳米化的研究。

* 通讯联系人。E-mail: huayq@ujs.edu.cn

收稿日期: 2015-04-21; 收到修改稿日期: 2015-04-28

模型,运用 ANSYS/LS-DYNA 和应力波理论模拟分析激光冲击后薄膜、基体及界面的应力波传播特性。

1 实验材料与方方法

试样材料为利用磁控溅射方法在硅片上镀厚为 0.5mm 的铜薄膜,图 1 为硅基铜薄膜,图 2 为 YAG 强激光实验装置。激光冲击参量为:冲击波长 1.064μm,脉宽 10ns,光斑直径 1.5mm,冲击能量 30mJ。

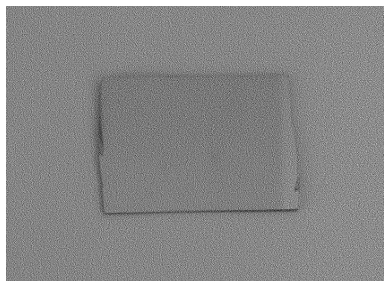


Fig. 1 Sample of thin copper films onto silicon

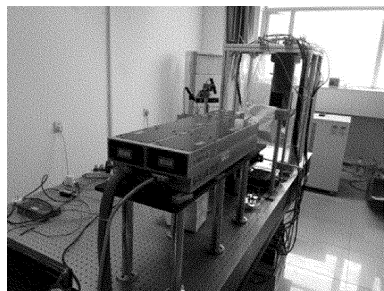


Fig. 2 YAG laser

2 有限元模型的建立

2.1 材料的本构模型

激光冲击作用使靶材内产生高达 10^6 s^{-1} 的应变率,这种条件下材料的塑性变形可用应力与应变或应变率等函数关系的本构方程来描述^[10]。在单轴应变条件下,把材料不发生塑性变形的最高弹性应力定义为弹性极限(hugoniot elastic limit, HEL),即激光冲击波压力大于材料的 HEL 时,材料内部出现屈服发生塑性变形。因此材料动态屈服强度可定义为:

$$\sigma_y^D = \text{HEL} \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \quad (1)$$

式中,ν 为泊松比。

设薄膜为遵循 Von Mises 屈服准则的理想弹塑性材料,在有限元软件中选择双线性各向同性弹塑性模型,材料的力学性能参见表 1。

Table 1 Mechanical properties of materials

materials	density/ (kg · m ⁻³)	Poisson ratio	elastic modulus/ GPa	hugoniot elastic limit/GPa
Cu	8900	0.3	120	0.7
Si	2330	0.28	180.5	

2.2 有限元模型

根据光斑的对称性,压力中心对称分布,只建立 1/4 模型 10mm × 10mm × 10mm,薄膜厚为 0.5mm,光斑直径为 1.5mm,以 z 轴为对称轴,x-y 平面为施加冲击载荷的平面。采用六面体八节点实体单元 SOL-ID164,在 ANSYS 中,时间步长是按照最小单元尺寸计算的,单元尺寸越小,对应的时间步长就会越短,计算效率降低,且同一模型中单元规格差异过大,容易引起计算不稳定,在模型中出现负体积影响计算结果。网格密度与分析结果相关,网格越密,计算结果精度越高,然而计算成本也会增加^[11]。因此在确保精度的基础上尽可能减少单元数量,本模型中采用在 x, y, z 方向上 2 倍的光斑长度进行网格细化。图 3 为有限元模型,根据对称性在其两个对称面 x-O-z 和 y-O-z 平面上施加对称边界条件,为了让应力波在底面和侧面处透射,在模型的底面和两个侧面施加无边界反射条件。

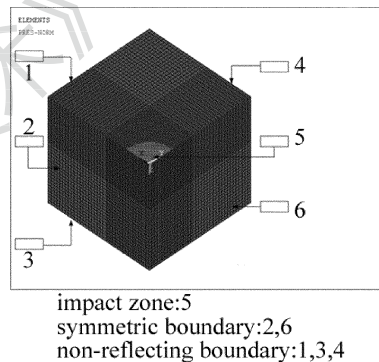


Fig. 3 Schematic configuration of 3-D model

2.3 加载的时间历程曲线

用 ANSYS/LS-DYNA 模拟过程中不涉及等离子压力脉冲形成的相关物理过程。本文中采用在单元表面施加压力的方法来近似模拟激光冲击,这一过程是通过把冲击波压力转化为时程曲线加载到光斑范围内所有单元表面上来实现的。将压力时程曲线简化为三角形,冲击波峰值压力根据(2)式^[12]计算得出,作用时间 t 取脉宽的 3 倍,因此模拟过程中压力的作用时间设为 30ns,图 4 为冲击压力加载时间历程,压力脉冲的半峰全宽时间内线性上升至峰值然后在另一个半峰全宽中

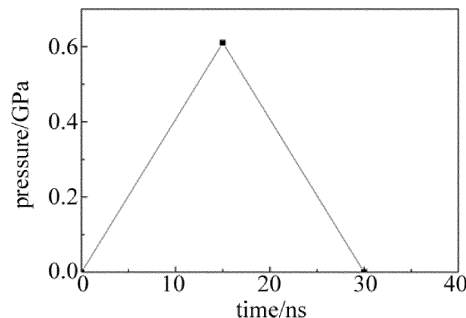


Fig. 4 Load curve of shock pressure

线性衰减到 0^[13]。通过 APDL 语言选择光斑内的单元并在相关单元表面上进行载荷的施加。

$$p_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I} \quad (2)$$

式中, p_{\max} 是峰值压力, α 为吸收参量, Z 为折合阻抗, I 为激光功率密度。

2.4 求解控制

在求解中设置模型的全局阻尼避免冲击造成的非真实振荡。激光脉宽压力脉冲产生的应力波使材料内部质点运动和发生变形, 当质点动能接近零时内能就会逐渐趋于稳定值, 即靶材内应力波相互作用变小, 动态应力才能趋于稳定, 靶料内部不发生塑形变形。HU 等人^[14]认为, 求解时间的设置必须大于压力脉冲宽度的两个数量级。因此本文中在单次冲击时设求解时间为 4000ns。

3 模拟结果分析与讨论

3.1 激光冲击波在界面传播模型

由于在激光冲击处理过程中, 薄膜的横向尺寸远大于其厚度, 因此可将薄膜的受力状态视为处于 1 维应变状态。由于应力波的主要变化发生在第一波程中, 因此后期应力波传播特性可视为第一波程传播特性的简化形式^[15]。图 5 为在膜-基系统中冲击波的第一波程传播示意图, 入射波 S 在薄膜表面会发生反射与透射, 反射波为 S_0 , 透射波 S_1 在薄膜内部传播时会形成平面波 P_1 , 同样在当透射波到达界面时会发生透射与反射, 则反射波为 S_2 , 透射波为 S_3 , 分别形成的平面波为 P_2, P_3 。

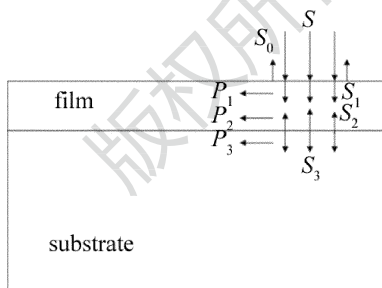


Fig. 5 Model of stress wave propagation at the interface

弹性加载阶段的弹性波速为:

$$C_e = \sqrt{\frac{(1 - \nu) E}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (3)$$

式中, E 为弹性模量, ρ 为材料密度。在理想塑性假设下, 塑性加载阶段的塑性波速为:

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{3\rho(1 - 2\nu)}} \quad (4)$$

在激光冲击作用下, 当冲击压力峰值大于薄膜弹性极限时薄膜表面诱导的高压冲击波包括弹性前驱波

和塑性加载波, 塑性加载波波速小于弹性前驱波的波速。塑性加载波与弹性前驱波在膜-基界面处反射回来的弹性稀疏波会发生迎面卸载, 塑性加载波被削弱。此外在 1 维应变问题中存在追赶卸载, 还会出现弹性卸载波与加载波相互作用后对塑性卸载干扰问题, 加载波与卸载扰动的边界就以一定的速度向前传播, 塑性加载波随着卸载波不断的追赶卸载, 峰值压力不断减小, 塑性加载波会在卸载扰动完全追上塑性加载波的过程中逐渐消耗^[16]。

3.2 激光能量对冲击波传播特性的影响

3.2.1 峰值压力小于薄膜弹性极限 图 6 为理论弹性波由阻抗大的介质传播到另一种声阻抗小的介质时在界面处的反射与透射示意图, 图中 C_1 和 C_2 为应力波分别在薄膜与基体内的波速, X 为质点, ρ_1 和 ρ_2 分别为薄膜与基体的密度, t 为时间, v 为应力波速率。设弹性波在阻抗不同的两种介质界面传播时传播方向垂直于界面。应力波在不同介质界面作用时会出现不同类型的反射与透射^[10]。

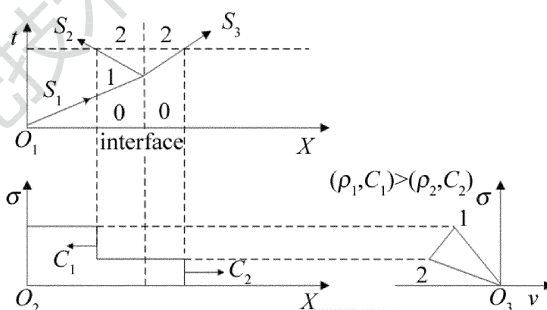


Fig. 6 Schematic diagram of elastic wave reflection and transmission at the interface

在图 6 中, (σ, v) 平面上的特征线 $O_3-1, 1-2, O_3-2$ 对分别对应入射扰动、反射扰动和透射扰动。当冲击波从阻抗高材料传播到阻抗低材料时, 反射波为拉伸波, 透射波仍为压缩波且强度小于入射波, 由于入射的应力扰动和反射的应力扰动互为异号因此应力波在介质内发生反射卸载。图 7 为能量 30mJ, 120mJ 作用下冲击波在第一波程中薄膜内部不同位置的质点速率。用能量为 30mJ 的激光冲击, 冲击波峰值压力为

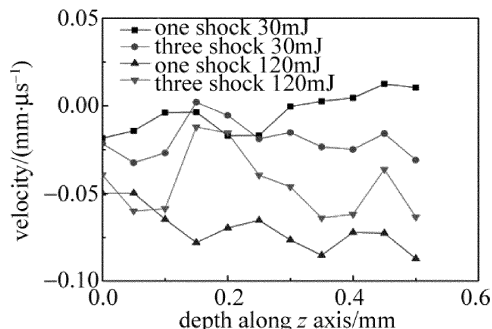


Fig. 7 Velocity of particle inside the thin film after laser shock

0.610GPa。由于峰值压力小于铜薄膜弹性极限,激光冲击铜薄膜后薄膜内部形成的应力波为弹性波,不发生塑性应变。冲击压力较小,薄膜内部引起的入射波扰动不大,因此质点速率最大只有 $-0.018\text{mm}/\mu\text{s}$ 且残余应变很小。

3.2.2 峰值压力大于薄膜弹性极限 用能量为80mJ,100mJ的激光单次冲击铜薄膜,由于冲击波峰值压力分别为0.990GPa和1.106GPa大于铜薄膜的弹性极限,激光冲击铜薄膜后薄膜内部形成的应力波为弹塑性波,内部会发生塑性变形。图8为有限长杆 l 中弹塑性波迎面卸载的示意图。其中 Y 表示绝对应力幅值,弹性波 $O-a$ 和 $l-a$ 为弹性前驱波 $O-b$ 和 $l-c$ 为塑性波分别对应1区,3区和2区,4区。由于前驱弹性波波速大于塑性波波速,塑性波在未到达界面之前弹性波在界面已完成反射,因此塑性波会被来自界面反射的卸载波有所消弱变为弹性波。

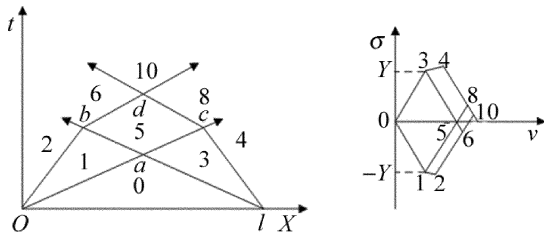


Fig. 8 Schematic of elastic-plastic wave unloading

从图7中可以看出,能量为120mJ激光单次冲击后对应质点的最大速率为 $-0.087\text{mm}/\mu\text{s}$,相对于能量为30mJ时,主要原因为能量较大冲击应力在薄膜内引起的入射扰动较大。当高压冲击波作用在材料表面并向内部传播,在材料表层形成稳定、密集的位错结

构,位错通过滑移进行塑性变形,且冲击波在晶界上反射和折射作用使冲击波在多个方向上作用于晶粒,从而位错进行复杂的滑移、集聚和湮灭形成微结构。图9、图10为能量80mJ和100mJ冲击后残余应力图,对应的应力最大分别为104MPa,113MPa,主要是薄膜内发生了塑性变形,且在一定范围内随着激光能量的增加应变深度不断增大,但塑性应变深度小于薄膜厚度。

3.3 冲击次数对传播特性的影响

从图7中还可以看出,能量为30mJ时,随着冲击次数的增加,冲击波质点速度没有多大变化,然而能量为120mJ时,多次冲击后质点速率为 $-0.064\text{mm}/\mu\text{s}$,出现减小的现象,主要是激光能量小时铜薄膜不发生塑性变形,而能量大时铜薄膜发生了塑性变形,薄膜内部部分微组织结构发生变化,冲击波发生了反射、卸载、弥散等。图11为用能量30mJ,80mJ,100mJ,120mJ的激光对铜薄膜进行1次~3次冲击后,薄膜内部残余应变的不同分布。在单次冲击情况下随着冲击能量的增加,薄膜内部的应变也会增大,其中在能量为120mJ时最大应变为 4.28×10^{-3} ,3次冲击时塑性应变 11.13×10^{-3} 。残余应变深度由0.31mm增加至0.43mm,表明冲击次数对应变深度影响很大。

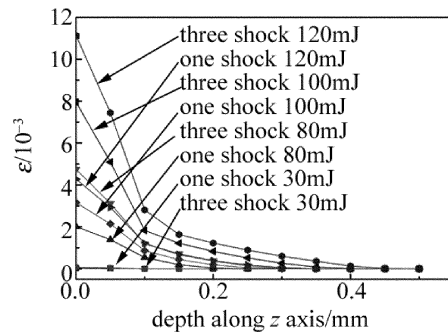


Fig. 11 Residual strain distribution of copper thin film after laser shock

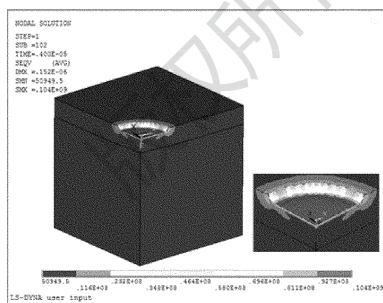


Fig. 9 Residual stress map after laser shocking at the power of 80mJ

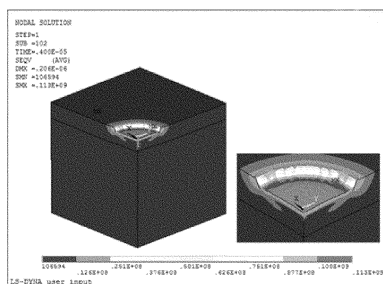


Fig. 10 Residual stress map after laser shocking at the power of 100mJ

4 结论

(1) 在能量为30mJ时,冲击波压力峰值为0.610GPa小于铜薄膜弹性极限,薄膜内部产生的应力波为弹性波,应力波通过反复反射与透射逐渐消弱,对薄膜组织影响极小,其内部的残余应变接近为0。

(2) 在能量为80mJ,100mJ,120mJ时,冲击波峰值压力分别为0.990GPa,1.106GPa,1.212GPa,大于铜薄膜弹性极限冲击波为弹塑性波,其中能量为120mJ单次作用下,其内残余应变深度为0.31mm,最大残余应变为 4.28×10^{-3} 。

(3) 弹塑性波作用下的薄膜内部发生塑性变形产生微组织,冲击能量为120mJ时,3次冲击时残余应变深度为0.43mm,最大残余应变为 11.13×10^{-3} 。由于微组织的耗散特性对应力波衰减影响很大,质点最大

速率为 $-0.064\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

参 考 文 献

- [1] FAIRAND B P, CLAUR A H. Laser generation of high-amplitude stress in materials [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(3): 1497-1502.
- [2] GERLAND M, HALLOUIN M, PRESLES H N. Comparison of two new surface treatment processes, laser-induced shock waves and primary explosive; application to fatigue behaviour [J]. Materials Science and Engineering, 1992, A156(2):175-182.
- [3] BERTHE L, FABBRO R, PEYRE P, *et al.* Shock waves from a water-confined laser-generated plasma [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(6):2826-2832.
- [4] MASSE J E, BARREAU G. Laser generation of stress waves in metal [J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 70(2): 231-234.
- [5] REN N F, YANG J Ch, CAN L, *et al.* Effects of laser shocking on the mechanical properties of metals [J]. Laser Technology, 1998, 22(4):235-238 (in Chinese).
- [6] XIONG Ch, LI Zh F, WANG X D. Thermal stability of microstructure of laser shock processed TC11 titanium alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(3):116-120 (in Chinese).
- [7] CHEN R F, HUA Y Q, CAI L. Estimate of residual stress of steel materials induced by laser shock wave [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(2):278-282 (in Chinese).
- [8] LIU L, WANG S B, WU H X, *et al.* Experimental study of high power laser induced shock waves [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 134-136 (in Chinese).
- [9] WANG J X, GAO X, SONG Ch, *et al.* Experimental study of shock waves induced by a nanosecond pulsed laser in copper target [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(4):045204 (in Chinese).
- [10] WANG L L. Stress wave theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985:149-159 (in Chinese).
- [11] KAN D, LIN Y. Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1):162-169.
- [12] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, *et al.* Physical study of laser produced plasma in confined geometry [J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2):775-784.
- [13] PEYER P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27(12):1213-1229.
- [14] HU Y X, ZHENG Q, YAO J H. 3-D-fem simulation of laser shock processing [J]. Surface and Coating Technology, 2006, 201(3): 1426-1435.
- [15] GUO W G. Foundation of stress wave guide [M]. Xi'an: Northwest Industrial University Press, 2007:111-119 (in Chinese).
- [16] FENG A X, ZHONG G Q, XUE W, *et al.* Dynamic stress-strain of film-substrate system induced by laser shock wave [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 67-72 (in Chinese).