

doi:10.3788/gzxb20154404.0414002

飞秒激光冲击 AZ31B 镁合金过程的数值模拟

姚红兵¹, 于文龙¹, 杨昭², 李强², 高原¹, 李亚茹¹, 倪文强¹

(1 江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

(2 连云港师范高等专科学校 物理电子系, 江苏 连云港 222006)

摘要:采用有限元分析法对飞秒激光冲击 AZ31B 镁合金进行数值模拟,研究了激光冲击处理对镁合金变形过程的影响,分析了单脉冲激光冲击下材料内部的位移、动能、应力和应变的分布情况,得到了材料的瞬态速度和应变率变化过程.仿真结果表明,单脉冲飞秒激光冲击镁合金产生的塑性变形,可在材料表面形成微米级凹坑,中心点处最大位移为 34 μm ,最大变形速度 390 m/s;在冲击初期,材料表面的应力和应变主要分布在冲击区域中心节点和边缘附近,并且得到镁合金的最大应力和最大应变率分别为 955 MPa 和 $1.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$.研究结果能够为深入分析飞秒激光与镁合金作用时材料变形参量的变化规律提供数值理论依据.

关键词:激光技术;飞秒激光;有限元分析;镁合金;特征量;板材成形

中图分类号:TN24

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0414002-6

Numerical Simulation of AZ31B Magnesium Alloy Shocked with Femtosecond Laser

YAO Hong-bing¹, YU Wen-long¹, YANG Zhao², LI Qiang², GAO Yuan¹,
LI Ya-ru¹, NI Wen-qiang¹

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

(2 Lianyungang Normal College, Lianyungang, Jiangsu 222006, China)

Abstract: The laser shocking processing of AZ31B magnesium alloy sheet by the femtosecond laser pulse is numerically simulated with the finite element method. In the simulation, the effect of laser shock processing on the deformation process of AZ31B magnesium alloy is studied, the distributions of characteristics within the material, such as displacement, stress and strain, are analyzed, and the dynamic variation process of velocity and strain rate is discussed. The results indicate that the plastic deformation of magnesium alloy sheet shocked by single femtosecond laser pulse led to a micrometer-scale pit on the material surface. The maximum displacement at the center of the pit is 34 μm . And the maximum speed reaches 390m/s. Stress and strain of material are mainly distributed near the central dot and the edge of laser shocked region. The maximum stress of the central dot is 955 MPa, and the maximum strain rate reaches $1.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. The results show that the numerical simulation of the laser shocking processing of AZ31B magnesium alloy sheet by the femtosecond laser pulse is able to provide the numerical references for analysis of the variation laws of materials by femtosecond laser loading.

Key words: Laser technique; Femtosecond laser; Finite element method; Magnesium alloy; Characteristics; Sheet forming

OCIS Codes: 140.3538; 320.2250; 320.7090; 350.3390

0 引言

激光冲击处理技术是利用高功率短脉冲激光与材

料相互作用产生强冲击波压力,使材料表面发生塑性变形,改变材料的微观组织,从而提高材料的硬度、耐磨性能和抗疲劳强度^[1-2].飞秒激光脉冲宽度极短、峰

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 50735001)、国家自然科学基金(Nos. 51405181, 50735001, 10804037)、连云港市工业攻关项目(No. CG1315)和中国博士后科学基金特别项目(No. 200902506)资助

第一作者:姚红兵(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为光电检测和激光技术及应用方面. Email: yaoye@ujs.edu.cn

通讯作者:于文龙(1988-),男,硕士,主要研究方向为激光技术. Email: ywl1314@126.com

收稿日期:2014-11-10; **录用日期:**2015-01-14

<http://www.photon.ac.cn>

值功率极高,其与物质相互作用时间极短,烧蚀过程几乎不发生热扩散,使加工表面平整和光滑,实现了真正意义上的冷加工^[3-4];而且加工准确度非常高,可以达到纳米量级;对材料无选择性.通过飞秒激光的多次冲击,可以得到更大的塑性变形.这些特性对于精密零件的成形和加工都非常有利,如飞秒激光喷丸薄金属板^[5]和不锈钢板^[6].

镁合金是实用金属中最轻的金属,其密度低、散热快、质量轻、刚性好、具有一定的耐蚀性和尺寸稳定性、抗冲击、耐磨、衰减性能好及易于回收;另外还具有高导热和导电性能、无磁性、屏蔽性好和无毒的特点.在汽车、机械、航空航天、计算机,以及家庭用品和运动器材等领域正得到日益广泛的应用^[7-8].

本文通过对飞秒激光冲击 AZ31B 镁合金过程进行有限元模拟,研究了激光冲击波在 AZ31B 镁合金内的作用规律以及材料的变形情况,对得到的材料表面应力、应变的变化以及位移情况进行了讨论,得到了激光冲击过程中材料的瞬时速度和动态应变率,为深入分析飞秒激光与镁合金作用时材料变形参量的变化规律提供数值理论依据.

1 单脉冲激光冲击模拟的过程

1.1 飞秒激光加工金属机理

当飞秒激光脉冲与金属发生作用时,金属中的自由电子首先吸收激光能量,并且瞬间(通常几个飞秒)达到超高的非平衡状态.非平衡电子在几个飞秒内通过相互碰撞弛豫达到热平衡.经过皮秒时间范围后,通过电声耦合方式,电子系统会把能量传递给局域的晶格,金属会因为晶格温度达到相爆温度而发生烧蚀破坏. Anisimov^[9]根据飞秒激光与金属作用的独特机理,提出了双温模型,用来描述金属中电子和声子被激发和弛豫的物理过程.由于传统双温模型不足以表述脉冲链与金属作用的热弛豫规律,杨青^[10]等人在传统双温模型中引入傅里叶热扩散机制,提出的时间序列热弛豫模型可以有效预测时间整形脉冲与金属作用跨时间尺度的热弛豫规律,即

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla(K_e \nabla T_e) - G(T_e - T_p) + Q \quad (1)$$

$$C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = G(T_e - T_p) \quad (2)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) d^{-1} \quad (3)$$

式(1)和式(2)描述激光能量沉积和非平衡双温弛豫过程,式(3)描述傅里叶热扩散机制统治的热弛豫过程.式中, T_e 和 T_p 分别为电子和声子温度; T 为电-声平衡态的温度; ε 为发射系数; σ 为 Stefan-Boltzmann 常量, d

是金膜厚度; T_0 为室温.

1.2 材料参量的选取

模拟中使用中心波长为 780 nm、脉冲宽度为 100 fs、单脉冲能量为 550 μ J、光斑半径为 1 mm 的飞秒激光作为光源.使用的材料为 AZ31B 镁合金,化学成分见表 1,机械性能见表 2.有限元模型尺寸为直径是 20 mm 的圆片,厚度为 1 mm.

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 The compositions of the AZ31B magnesium alloy (mass fraction/%)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
2.91	0.85	0.4	0.21	0.0015	0.0011	0.00084	Bal

表 2 AZ31B 镁合金的机械性能

Table 2 Mechanical properties of AZ31B magnesium alloy

σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
300	220	18

1.3 冲击波压力加载与网格划分

Fabbro 等人建立了激光冲击波传播的一维模型,并对靶材表面冲击波的峰值压力进行了估算,模拟激光冲击材料时,假设冲击波压力的加载过程是一个冲击压力随时间变化的曲线,并将其加载到模型上.冲击波压力峰值计算公式为^[13]

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\left(\frac{\alpha}{2\alpha+3}\right) Z(\text{g/cm}^2 \text{s}) I_0(\text{GW/cm}^2)} \quad (4)$$

式中 P 是冲击波压力峰值; α 是内能转化为热能的系数,取值一般在 0.1~0.2 之间; I_0 是入射激光功率密度^[15]; Z 是约束层和板材的联合声阻抗,定义为

$$2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 \quad (5)$$

式中 Z_1 和 Z_2 分别是金属板材和约束层的声阻抗.

文献[12]指出,式(4)主要应用于估算纳秒激光诱导冲击波的峰值压力.因为飞秒激光脉冲宽度很小,激光烧蚀和等离子体形成的微观过程都不同于纳秒激光.文献[13]中,激光诱导冲击波的建模是基于能量守恒(吸收的激光能量被用于增加等离子体的内能和使气体膨胀)和宏观气体膨胀理论,不需要考虑激光与靶材之间的微观作用过程.因此,飞秒激光与纳秒激光在冲击过程中的微观区别不会影响式(4)的使用范围,可以用来估计飞秒激光诱导冲击波的峰值压力.

根据 Fabbro 等人的研究,压力冲击波作用金属表面的时间一般是脉冲宽度的 3 倍左右^[14],模拟中取 300 fs.为了简化激光冲击加载模型,假设激光脉冲在整个加载过程中为恒载荷,使激光冲击成形的有限元模型变得简单.

网格的划分采用激光冲击中心区域细化,边缘较粗的形式,网格的最大单元尺寸为 0.001 6 m,最小单元尺寸 0.000 2 m,如图 1.

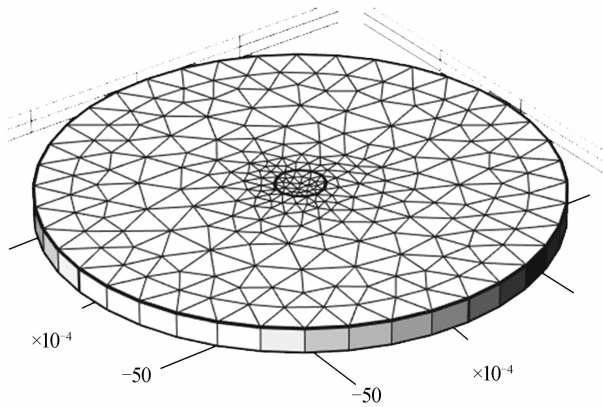


图 1 网格划分
Fig. 1 The meshed plat

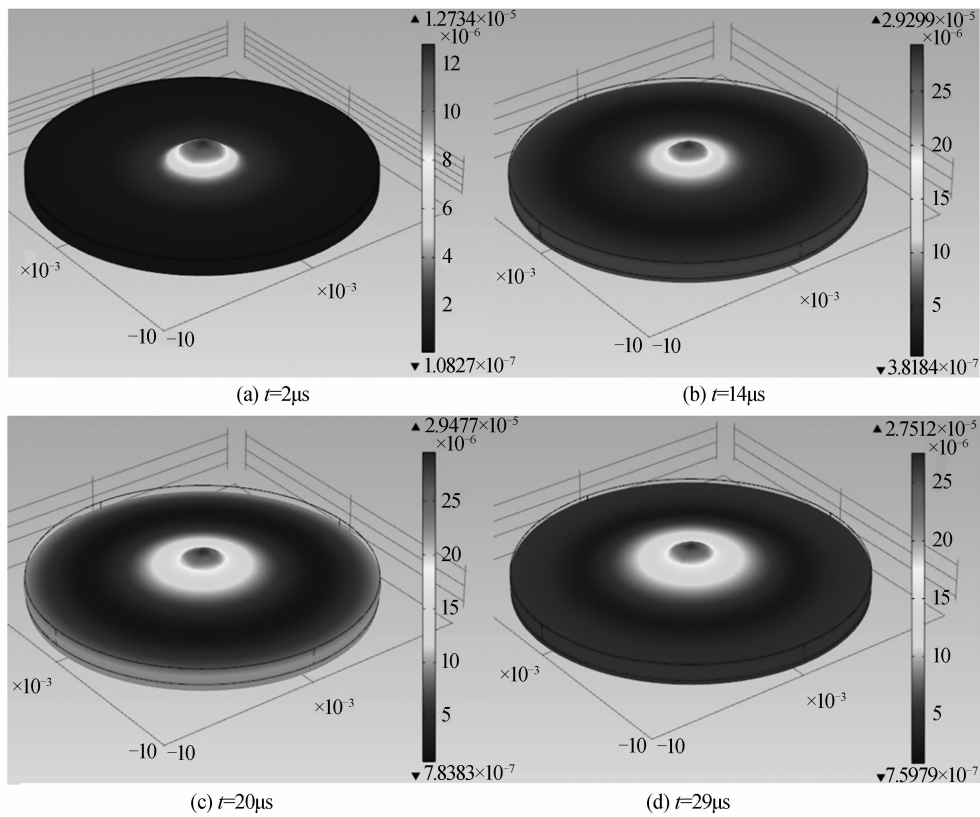


图 2 瞬态位移分布
Fig. 2 Temporal displacement distribution

场 Z 方向的位移. 对激光冲击成形的变形场进行模拟, 选择板材上比较典型的 3 个节点作为分析对象, 节点 1、2、3 分别位于板材中心原点处、距离中心点 1 mm 处、距离中心点 3 mm 处. 各节点在 1 ms 时期内的位移历史如图 3 所示, 从图中可以看出板材中心节点的位移大于远离中心位置的节点位移, 但各节点的总体变化趋势相同. 由于材料在受到激光冲击的作用时, 会偏离其平衡位置产生变形, 而材料会抵抗变形回到其原来的位置, 这时就会产生振动. 由于仿真分析的总时间只有 1 ms, 激光功率又非常大, 所以各节点的位移变化在 1 ms 内的衰减不明显. 影响振荡周期大小的激光参量还有待于进一步的研究.

2 有限元数值模拟结果与分析

2.1 瞬态位移场和速度场分布

图 2 依次显示了板材在 $2 \mu\text{s}$ 、 $14 \mu\text{s}$ 、 $20 \mu\text{s}$ 和 $29 \mu\text{s}$ 的位移分布情况. 从图中可以看出, 板材的位移分布大致以激光光斑半径为界线, 在激光冲击初期, 板材中心区域的变形不断增大, 冲击区域外部的板材变形量很小. 在 $20 \mu\text{s}$ 以后, 板材的变形才开始逐渐向外边缘扩展. 总体来说, 位移主要集中在冲击区域内部, 外部变形很小.

因为板材在 X 、 Y 平面的位移远远小于 Z 方向的位移, 故在位移场中, 可以只考虑板材上节点在主位移

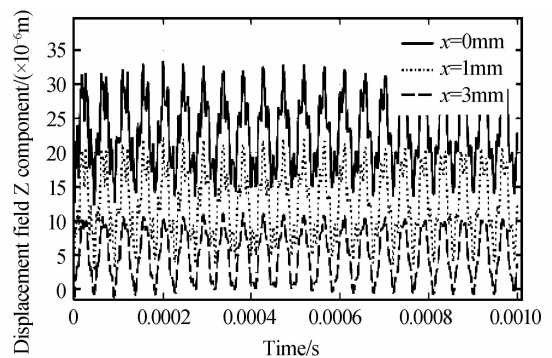


图 3 各节点在 1 ms 内的位移历史曲线
Fig. 3 The displacement history of the dots in 1 ms

图4为各节点在100 μs内的位移曲线图. 在0~15 μs过程中, 相对于节点2和3来说, 节点1的位移量更大, 最大位移为34 μm, 而且变化比较剧烈, 这就说明节点1的速度远大于2、3节点. 但是在15 μs以后3个节点的位移变化幅度基本一致.

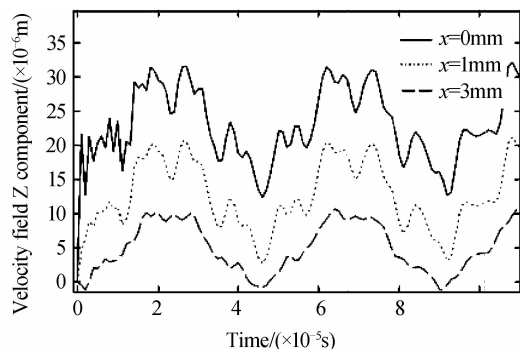


图4 各节点在100 μs内的位移历史曲线
Fig. 4 The displacement history of the dots in 100 μs

图5为各节点在50 μs内的瞬时速度变化曲线. 从图中可以看出, 节点1因为受到冲击压力的影响, 在4 μs时刻达到最大瞬时速度390 m/s. 受到阻尼的影响, 板材有一定的回弹, 速度开始衰减, 在20 μs以后, 振荡幅度渐渐趋于零. 节点2的瞬时速度和变化幅度相对节点1均比较小, 最大速度仅有40 m/s左右. 节点3因为在冲击区域外围, 激光冲击对它的影响很小, 位移不明显, 故其速度基本为零. 因此, 在理论上可以认为板材中心节点的速度最大.

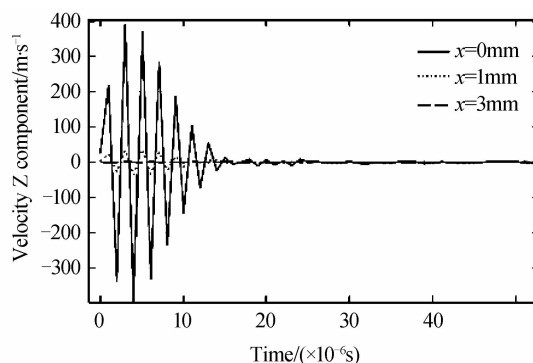


图5 各节点在50 μs内的速度历史曲线
Fig. 5 The velocity history of the dots in 50 μs

2.2 瞬态应力场的分布和系统的动能变化规律

激光作用于靶材的部分表面, 开始只有直接受到激光作用的介质离开初始位置, 使得其与相邻介质发生相对运动, 并给相邻介质相应的反作用力, 使相邻介质也偏离初始平衡位置而产生变形. 由于激光作用所产生的振动会在材料中逐渐传播, 所以形成应力波.

根据应力波理论, 材料中传播的弹性波波速 C_1^e 与塑性波波速 C_1^p 的计算公式为^[11]

$$C_1^e = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (6)$$

$$C_1^p = \sqrt{\frac{E}{3(1-2\nu)}} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

式中 ρ 为材料密度, E 为弹性模量.

图6显示了板材在4 μs、9 μs、16 μs和30 μs时的

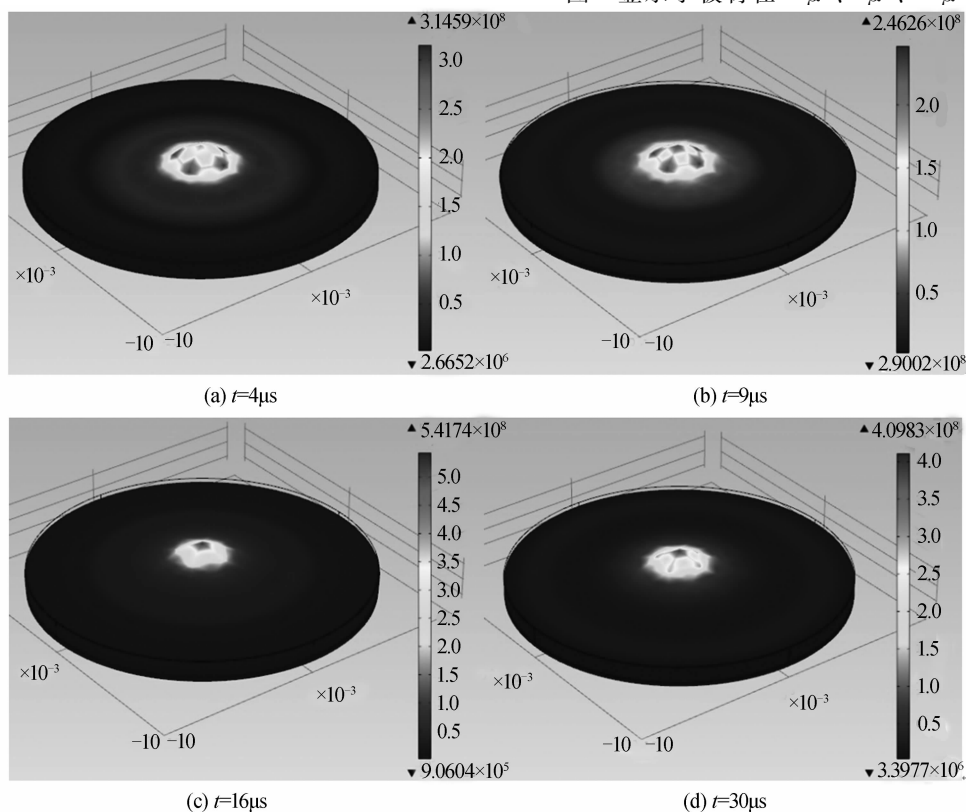


图6 瞬态应力分布
Fig. 6 The temporal stress distribution

瞬态应力分布情况. 应力的分布规律不同于位移的分布, 在冲击初期, 应力最大的区域主要产生在激光冲击区域的中心和冲击区域边缘附近. 随着变形的扩大, 到 $16 \mu\text{s}$ 以后应力才逐渐集中到冲击区域中心.

图 7 显示了在 $50 \mu\text{s}$ 内节点 1、2、3 的应力变化趋势, 同样可以看出应力主要集中在中心处和冲击边缘处. 在 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 过程中, 节点 1 的应力振荡幅度非常明显, 有限元仿真得到的最大应力值为 955 MPa , 但是在 $20 \mu\text{s}$ 以后, 应力趋于等幅振动状态, 应力值差别不大, 基本维持在 430 MPa 左右. 节点 2 的应力变化规律与节点 1 基本相似, 在 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 过程中, 个别时刻节点 2 的应力值会大于或者等于节点 1 的应力值, 震荡结束后节点 2 的应力值更加稳定. 节点 3 的应力值则始终保持在很低的水平. 因为各节点在 $20 \mu\text{s}$ 后的位移变化较为缓慢, 板材趋于相对稳定的状态, 所以各节点的应力值振荡幅度明显减弱.

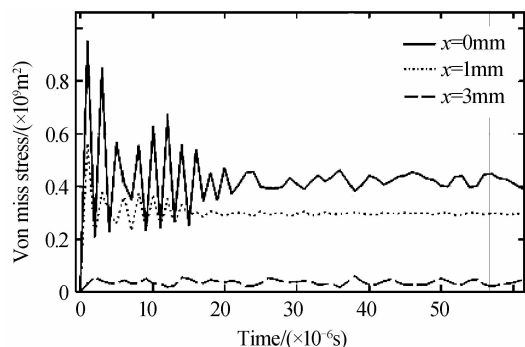


图 7 各节点的应力时间曲线
Fig. 7 The stress history of the dots

图 8 为模拟分析得到的动能时间变化曲线. 冲击压力加载过程中, 模型的总动能在 $5 \mu\text{s}$ 时刻迅速达到峰值 0.0135 J , 载荷结束后, 板材的变形越来越大, 应变能增加, 而系统的动能开始衰减, 在 $20 \mu\text{s}$ 时, 材料的动能降到最小, 逐渐趋于零, 这与动态应力趋于稳定的时间基本一致, 可以判断此时材料的内能已保持稳定, 材料中应力波的作用将十分微弱, 也不会再发生塑性变形.

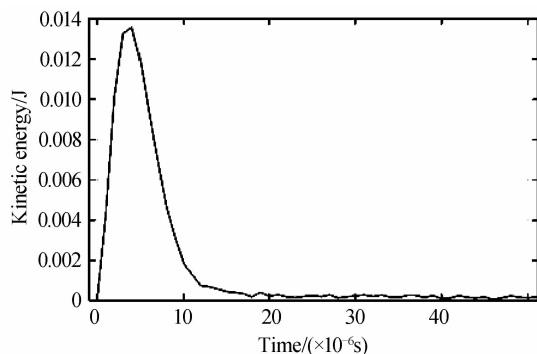


图 8 系统的动能变化过程
Fig. 8 The kinetic energy history

2.3 瞬态应变分布和应变率分析

在激光冲击过程中, 压力冲击波在材料表面上产生的外部做功转化为材料内部的动能和内能, 板材的应变主要出现在中心区域和约束边界区域附近. 激光冲击波作用过程中节点 1、2、3 处的动态应变曲线如图 9 所示, 在整个冲击过程中, 冲击波在材料表面诱导产生弹性拉伸波和塑性加载波. 在激光冲击初期, 由于弹性波的速度较快, 材料为弹性变形, 此时产生一个弹性应变的最大值 0.095 . 经过一定时间后, 弹性波与塑性波在传播过程中相遇, 此时材料处于弹塑性变形阶段, 节点 1 处的应变振荡幅度很大, 但总体处于衰减状态. 在 $20 \mu\text{s}$ 以后, 振荡基本停止, 接近静态, 应变值大约维持在 0.051 .

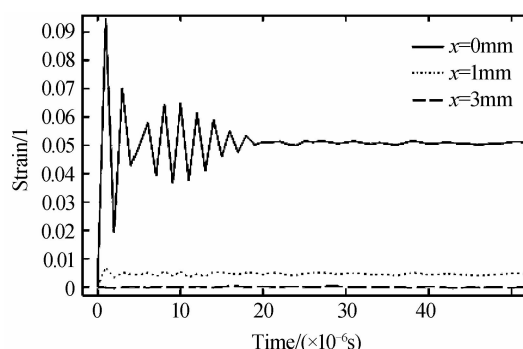


图 9 各节点的应变时间曲线
Fig. 9 The strain history of the dots

图 10 表示了激光冲击过程中各节点的应变率变化曲线. 在 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 的时间范围内, 在板材受到冲击发生振动时, 节点 1 处的应变基本属于直线上升和下降, 变化非常明显. 在这个过程中, 板材中心点处的应变率非常大, 最大应变率大约为 $1.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$, 但是在 $20 \mu\text{s}$ 以后, 由于板材的振荡减弱, 应变的变化幅度降低, 应变率逐渐趋于零. 在整个冲击过程中, 板材中心节点的最大应变率可达到 10^6 s^{-1} 量级.

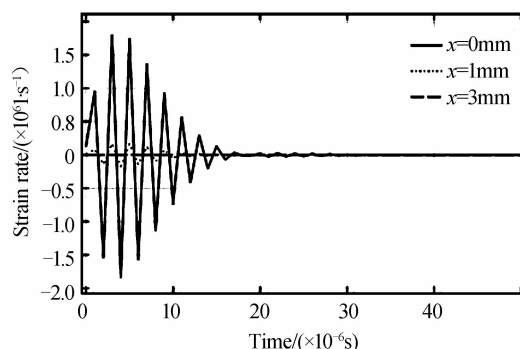


图 10 各节点的应变率时间曲线
Fig. 10 The strain rate history of the dots

3 结论

通过建立有限元模型和数值仿真对激光冲击过程

进行动态特性参量研究,分析了飞秒激光冲击成形中材料的位移、应力、应变、应变率等参量的变化过程.研究发现,对 AZ31B 镁合金进行单脉冲飞秒激光冲击处理,通过冲击产生的塑性变形,可在材料表面形成微米级凹坑.在此过程中,由于受到瞬时高压的冲击,板材中心区域的变形不断增大,经过一段时间的振荡,板材的变形才开始逐渐向外扩展,最后保持平衡状态.总体来说,变形主要集中在冲击区域内部,边界区域变形很小.中心节点处最大位移为 $34\ \mu\text{m}$;激光冲击成形的最大应变率大约在 $10^6\ \text{s}^{-1}$ 量级左右.

参考文献

- [1] IORDACHESCU M, VALIENTE A, CABALLERO L, *et al.* Laser shock processing influence on local properties and overall tensile behavior of friction stir welded joints[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, **206**(8): 2422-2429.
- [2] GANESH P, SUNDAR R, KUMAR H, *et al.* Studies on fatigue life enhancement of pre-fatigued spring steel specimens using laser shock peening[J]. *Materials & Design*, 2014, **54**: 734-741.
- [3] DACHRAOUI H, HUSINSKY W. Fast electronic and thermal processes in femtosecond laser ablation of Au[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(10): 104102. 1-104102. 3.
- [4] MUHAMMAD N, WHITEHEAD D, BOOR A. Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 313L stainless steel tubes for medical device applications[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**: 2261-2267.
- [5] SAGISAKA Y, KAMIYA M, MATSUDA M, *et al.* Thin-sheet-metal bending by laser peen forming with femtosecond laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(15): 2304-2309.
- [6] NAKANO H, MIYAUTI S, BUTANI N, *et al.* Femtosecond laser peening of stainless steel[J]. *Laser Micro/Nanoeng*, 2009, **4**(1): 35-38.
- [7] SHADANBAZS, DIAS G J. Calcium phosphate coatings on magnesium alloys for biomedical applications: a review[J]. *Acta Biomaterialia*, 2012, **8**(1): 20-30.
- [8] SATHIYANARAYANAN S, AZIM S S, VENKATACHARI G. Corrosion resistant properties of polyaniline - acrylic coating on magnesium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **253**(4): 2113-2117.
- [9] ANISIMOV S I, KAPELIOVICH B L, PEREL'MAN T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses[J]. *Zh Eksp Teor Fiz*, 1974, **66**(776): 375-377.
- [10] YANG Qing, Du Guang-qing, CHEN Feng, *et al.* Ultrafast thermal relaxation characteristics in gold film excited by shape femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(5): 502005.
杨青, 杜广庆, 陈烽, 等. 飞秒激光整形脉冲激发金膜的超快热弛豫特性[J]. *中国激光*, 2014, **41**(5): 502005.
- [11] 王礼力. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1985, 149-159.
- [12] YE Y X, FENG Y Y, LIAN Z C, *et al.* Plastic deformation mechanism of polycrystalline copper foil shocked with femtosecond laser[J]. *Applied Surface Science*, 2014, **309**: 240-249.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, *et al.* Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, **210**(1): 102-113.