

文章编号: 1001-3806(2016)01-0005-06

激光冲击强化 AZ31 镁合金表面残余应力分析

李兴成¹, 张永康^{2*}, 周金宇¹, 陈菊芳¹, 卢雅琳¹

(1. 江苏理工学院 机械工程学院, 常州 213001; 2. 东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

摘要: 为了优选激光冲击工艺参量以获得最大的表面残余压应力, 利用激光冲击和塑性变形理论推导出了激光冲击 AZ31 镁合金表面最大残余压应力公式, 并采用 ABAQUS 有限元软件分析了其激光冲击后的残余应力场。结果表明, 获得较大残余压应力场的激光冲击波载荷范围为 1.2 GPa ~ 1.7 GPa, 随着载荷的增加, 残余应力增加, 当载荷在 1.4 GPa ~ 1.6 GPa 时, 最大残余压应力为 125 MPa 左右; 冲击载荷在 1.8 GPa 时, 出现轻微的“残余应力洞”现象; 而在大于 1.9 GPa 时, 均出现明显的“残余应力洞”现象; 载荷 $p = 1.474$ GPa 时最大残余应力为 -128.5 MPa。理论推导和有限元分析结果基本一致。

关键词: 激光技术; 镁合金; 残余应力; 塑性变形; 有限元分析

中图分类号: TN249; TG174.1

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.002

Analysis of residual stress on surface of AZ31 magnesium alloy after laser shock processing

LI Xingcheng¹, ZHANG Yongkang², ZHOU Jinyu¹, CHEN Jufang¹, LU Yalin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To obtain maximum surface residual compressive stress by optimizing technological parameters of laser shock, the formula of residual compressive stress on the surface of AZ31 magnesium after laser shock process (LSP) was deduced from the theory of laser shock process and plastic deformation. Residual stress fields of AZ31 magnesium by LSP was simulated with ABAQUS software. Finite element analysis shows that laser shock wave pressure of optimal residual compressive stress field ranges from 1.2 GPa to 1.7 GPa. With the increase of load, residual stress on the surface of AZ31 magnesium increases. The maximum residual compressive stress is about 125 MPa with loading range from 1.4 GPa to 1.6 GPa. There is a slight residual stresses hole phenomenon impact when load is 1.8 GPa and a significant residual stresses hole phenomenon when load is more than 1.9 GPa. When the load is 1.474 GPa, the maximum residual stress is -128.5 MPa. Experimental results are consistent with finite element analysis.

Key words: laser technique; magnesium alloy; residual compressive stress; plastic deformation; finite element

引言

激光冲击强化 (laser shock process, LSP) 可有效延长工件的疲劳寿命, 最重要的原因是金属冲击表层区域存在残余压应力, 这种残余压应力在实际工程中可有效抵消工件所承受的部分拉应力, 从而延长工件的疲劳寿命^[1]。一般残余压应力值越大, 工件的疲劳寿命越长^[1], 从这一点来说, 残余压应力值越大越好。但根据 PEYRE^[2] 等人的研究表明, 并不是随冲击

波压力越大残余压应力就越大, 残余压应力随冲击波载荷 p 在雨贡纽弹性极限 (Hugoniot elastic limit, HEL) σ_{HEL} 的 $\sigma_{HEL} \sim 2\sigma_{HEL}$ 范围内线性增加, 而当载荷 p 超过 $2.5\sigma_{HEL}$ 时, 残余压应力反而减小, 甚至会产生残余拉应力, 激光冲击波压力与和冲击工艺参量直接相关, 因此需要合理确定激光冲击能量等工艺参量。激光冲击处理金属材料表面的过程仅为几十纳秒, 非常短暂, 材料在短时高能脉冲载荷作用下产生高应变率 ($10^7/s$) 塑性变形, 涉及激光与材料的相互作用机制、冲击波的传播机制、高应变率下的瞬态塑性变形等理论, 其瞬态响应极为复杂, 目前还无法对材料中产生的动态应力和残余应力进行实时监测。本文中采用 ABAQUS 有限元分析软件, 对激光冲击 AZ31 镁合金进行理论建模, 通过理论和有限元分析其残余应力场的分布特性,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275221)

作者简介: 李兴成 (1968-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事激光先进制造与检测技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2015-02-08; 收到修改稿日期: 2015-03-17

为优化激光冲击工艺参量提供一定的参考依据。

1 残余应力产生机理分析

激光冲击作用于材料,其塑性变形在周围材料的约束下可以近似按 1 维应变波处理,即可用 1 维应变弹塑性波等理论来分析其传播过程^[3]。

图 1 为材料在极短时间内理想弹塑性材料的应力-应变曲线,图中 σ_x 和 ε_x 分别为 x 轴方向的正应力和应变, G 和 K 分别为材料的剪切模量和体积弹性模量, ε_B 为 B 点最大应力对应的最大应变, ε_C 为卸载后 C 点对应的残余应变。激光冲击波在材料表面形成很高的应力,应力波在材料内部传播,首先产生沿 OA 曲线的弹性变形,材料内部应力进一步升高,当达到雨贡纽弹性极限 σ_{HEL} 时便产生沿 AB 曲线的塑性变形,加载完成后紧跟着塑性波后面的是系列卸载波^[3]。一般情况下,由于靶材的厚度均远大于材料的塑性变形层厚度和光斑尺寸,靶材背面的反射波到达塑性区时,靶材表面层的一系列卸载波已经完成卸载,不会发生反向塑性加载,甚至反向塑性变形,因此只考虑正向加载完成后的弹性回复变形,不考虑其反向屈服变形,卸载时沿图 1 的 BC 曲线卸载^[3-5]。

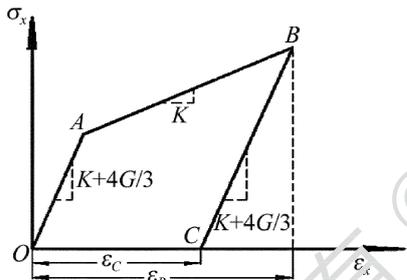


Fig. 1 Stress-strain curve of ideal elastic-plastic material under ultrashort laser pulses^[4-5]

当冲击结束后,材料中的弹性变形消失,塑性变形保留,工件的最终变形是图中 B 点的应变减去弹性回复的应变,即图中应变值 ε_C ,保留下来的残余应变在周围材料试图弹性回复作用下产生了残余压应力,其产生机理如图 2 所示^[3]。

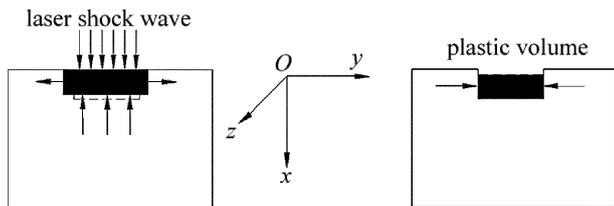


Fig. 2 Schematics of residual stress induced by LSP on the surface of material^[3]

a—during LSP b—after LSP

激光冲击波开始作用于材料时,内部应力未达到 A 点之前产生弹性变形,在弹性变形时,由广义虎克定

律可知,其应力和应变的关系如下式所示^[3-5]:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \quad (3)$$

式中, ν 为材料的泊松比; E 为材料的弹性模量。

$$\sigma_x = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_x \quad (4)$$

由于剪切模量 G 、体积弹性模量 K 和泊松比 ν 存在以下关系^[3-5]:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

将(5)式和(6)式代入(4)式得:

$$\sigma_x = \left(K + \frac{4}{3}G\right) \varepsilon_x \quad (7)$$

该方程即为弹性变形阶段 OA 段的直线方程。

当应力增加到雨贡纽弹性极限 σ_{HEL} 时,材料达到屈服状态,继续增加应力,材料沿图中 AB 直线段发生塑性变形, AB 段直线方程为^[3-5]:

$$\sigma_x = K\varepsilon_x + \frac{2}{3}\sigma_{dyn} \quad (8)$$

式中, σ_{dyn} 为动态屈服极限。

当塑性变形达到 B 点时开始弹性回复卸载,应力-应变曲线沿 BC 直线按照弹性模量 E 斜率发生弹性回复, BC 卸载直线方程为^[3-5]:

$$\sigma_x - \sigma_{x,B} = \left(K + \frac{4}{3}G\right) (\varepsilon_x - \varepsilon_{x,B}) \quad (9)$$

设 B 点对应材料的表面质点,假设不考虑横波的影响,即最大载荷全部为冲击波载荷,则由(9)式可得 B 点的应变为:

$$\varepsilon_{x,B} = \frac{1}{K} \left(p - \frac{2}{3}\sigma_{dyn}\right) \quad (10)$$

当沿 BC 直线卸载至 C 点时,其应力为 0,释放加载至 B 点时的弹性应变, C 点的应变即为残余应变 ε_ρ ,则由(9)式可得 C 点的残余应变 ε_ρ 为:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\frac{4}{3}G}{K\left(K + \frac{4}{3}G\right)} p - \frac{2\sigma_{dyn}}{3K} \quad (11)$$

虽然激光冲击波在材料中的传播按 1 维应变问题

处理,但实际上变形区域并非单纯的厚度方向的简单压缩,冲击加载过程可认为是1维应变过程,在回弹过程中可认为是3维立体应变状态。由于光斑为圆形光斑,因此可建立如图3所示的圆柱坐标系。在圆柱坐标系中,质点所处的应力状态为轴对称状态,通过旋转体轴线的每个子午面(即 θ 面)在变形过程中始终是平面,且各子午面夹角保持不变。

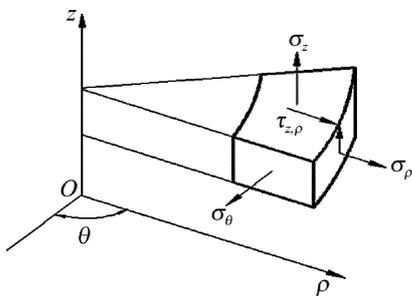


Fig. 3 Axisymmetrical stress state^[6]

激光冲击塑性影响区,类似于圆柱体的均匀墩粗,其径向应力 σ_ρ 和周向应力 σ_θ 相等,其中 σ_z 为 z 轴方向正应力, $\tau_{z,\rho}$ 为垂直于 z 轴方向的剪切应力。对于圆柱体的均匀墩粗,其径向位移分量 u 和坐标 ρ 成线性关系,则:

$$\frac{\partial u}{\partial \rho} = \frac{u}{\rho} \quad (12)$$

则径向应变 $\varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta$ 和周向应变 $\varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta$ 相等。

即:

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta \quad (13)$$

激光冲击波作用于塑性影响层,利用(11)式得到的应变是 z 方向上的最大残余应变,回弹时根据塑性变形时可以认为体积不变,即应变球胀量为0,即应变存在如下关系^[6]:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\rho + \varepsilon_\theta = 0 \quad (14)$$

式中, ε_z 为(10)式中的残余应变 ε_ρ ,将(13)式代入(14)式得:

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta = -\frac{\varepsilon_z}{2} \quad (15)$$

周向应变和径向应变欲恢复,但在 z 方向已经产生的形变约束下无法恢复,因此产生残余应力,其大小为:

$$\sigma_\rho = \sigma_\theta = E \frac{\varepsilon_z}{2} = \frac{E}{2} \left[\frac{\frac{4}{3}G}{K(K + \frac{4}{3}G)} p - \frac{2\sigma_{dyn}}{3K} \right] \quad (16)$$

将(5)式和(6)式代入(16)式化简得:

$$\sigma_\rho = \sigma_\theta = -E\varepsilon_\rho =$$

$$-\frac{(1-2\nu)^2}{1-\nu} p + (1-2\nu)\sigma_{dyn} \quad (17)$$

一般镁合金泊松比 $\nu = 0.33$,则径向和周向残余应力为:

$$\sigma_\rho = \sigma_\theta = -0.1725p + 0.34\sigma_{dyn} \quad (18)$$

激光冲击波载荷是瞬间作用在材料表面的强动载荷,产生高应变速率塑性变形,一般材料的动态屈服强度大约为静态屈服强度的2倍~4倍^[7]。本文中使用的AZ31镁合金,拉伸力学性能测试其1维应力静态屈服强度为126MPa,则AZ31强动载荷下的动态屈服强度 σ_{dyn} 可设定为370MPa,1维应变问题中,当纵向应力达到动态屈服强度729MPa时,材料才达到屈服状态,该屈服强度也称为雨贡纽弹性极限 σ_{HEL} 。按照参考文献[8]中的公式计算出冲击波载荷 p 应在1.458GPa~1.822GPa,当载荷 $p = 1.474$ GPa时,则最大残余应力为-129.5MPa。(18)式还进一步说明,只有激光冲击载荷大约超过动态屈服极限 σ_{dyn} 的1.97倍时,材料内才产生残余压应力,与PEYRE^[2]提出的结论也一致,即当冲击波载荷 p 在 $\sigma_{HEL} \sim 2\sigma_{HEL}$ 之间时,塑性变形线性增加,残余压应力值的大小线性增加。从(18)式还可以看出,激光冲击后残余应变仅与外加载荷和动态屈服强度有关,与材料常数没有关系。

2 有限元分析

材料的几何模型采用80mm×80mm×10mm,光斑直径选用6mm。由于激光冲击波的横波效应,通常激光冲击加载区域至少延长至光斑半径的1.25倍^[9],因此加载区域半径选为4mm。由于冲击载荷在光斑区域具有轴对称性,为节省计算时间,选取几何模型的1/4进行研究,即激光冲击区域为1/4圆弧区^[10]。创建部件结束后赋予部件材料属性。

参考文献[11]中采用聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)压电传感器测出激光冲击波随时间的变化曲线,呈准高斯分布。曲线表明激光冲击波压力持续作用时间约为激光脉冲持续时间的2倍~3倍,激光器脉冲持续时间为10ns,所以材料的激光冲击波加载时间设为30ns。在加载幅值中设定0ns,10ns,20ns和30ns时的幅值系数分别为0,1,0.55和0,以更接近波峰值压力的分布^[12]。为比较不同冲击波载荷对残余应力的影响,冲击波载荷 p 依次在0.8GPa~2.0GPa范围内取值进行模拟,覆盖前述所计算的冲击波压力1.458GPa~1.822GPa范围。

网格密度和单元类型决定模拟计算结果的精确度和分析时间。经过多次模拟比较,本次模拟将模型分为三部分:第一部分为半径为4mm的激光冲击波加载

区域,该区域设置较密的网格单元,网格单元尺寸大约为0.1,最大偏离系数为0.1,较细的网格单元有助于减小网格扭曲;第二部分为半径为8mm的区域,该区域设置中等密集的网格单元,网格单元尺寸大约为0.3,最大偏离系数为0.1,该区域有助于第一部分和第三部分方格单元的过渡;第三部分为剩余部分,该区域网格密度相对较疏,网格单元尺寸大约为0.5,最大偏离系数为0.1。

ABAQUS 模拟软件中的八节点、六面体、线性减缩积分 C3D8R 单元特别适用于高应变率的塑性变形过程分析。这种网格即使网格存在扭曲变形,分析精度也不会受到大的影响,但需要划分较细的网格来克服沙漏问题。

3 维实体模型分别有 $x-O-z$ 和 $y-O-z$ 对称面,底部 $x-O-y$ 面为与固定工作台相接触,在边界条件(boundary condition)中分别设置 $x-O-z$ 和 $y-O-z$ 对称面,同时设置底部 $x-O-y$ 面。经网格划分、加载和边界条件设定后的模型如图 4 所示。

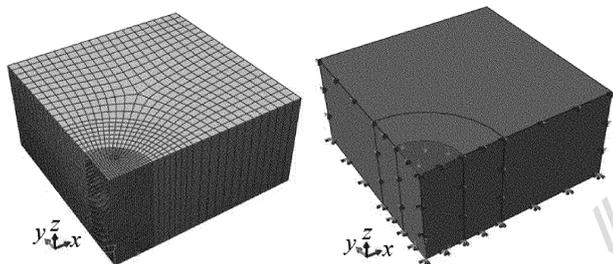


Fig. 4 Loading and meshing of finite element method analysis model

在 ABAQUS/Visualization 模块中的 Create xy data 可以得到能量场的输出,通过观察能量输出场的变化趋势是否稳定以确定求解时间。通过观察冲击载荷下材料内部的能量变化图确定动态分析求解时间为 10000ns。将 ABAQUS/Explicit 显式动态算法分析结果导入 ABAQUS/Standard 隐式静态分析模块进行静态分析,获得静态平衡的残余应力场。

3 模拟结果分析

3.1 残余应力分布纹图

分析完成后利用 ABAQUS 的后处理 Visualization 功能模块进行结果分析。图 5 和图 6 是不同载荷下沿光斑半径方向的表面残余应力分布纹图。从图 5a 中可以看到,当冲击载荷为 800MPa 时,半径方向表面最大残余压应力仅为 -19.2MPa,冲击区有少许残余压应力,冲击区之外的基体均处于零应力状态;当冲击载荷为 900MPa(如图 5b 所示)时,半径方向表面最大残余压应力仅为 -46.89MPa,冲击区大部分存在残余压应力,第二圆弧区开始出现残余应力;当冲击载荷依次

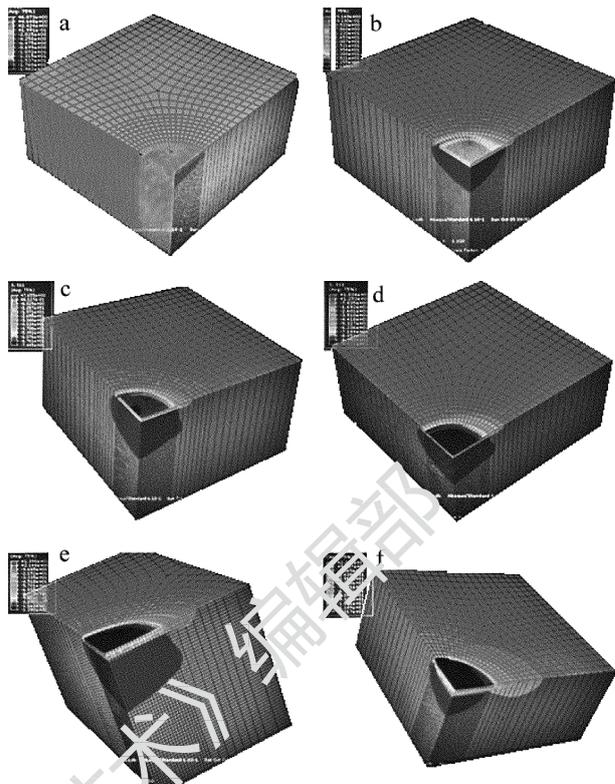


Fig. 5 Moiré topography of residual stress under different load (chart 1)

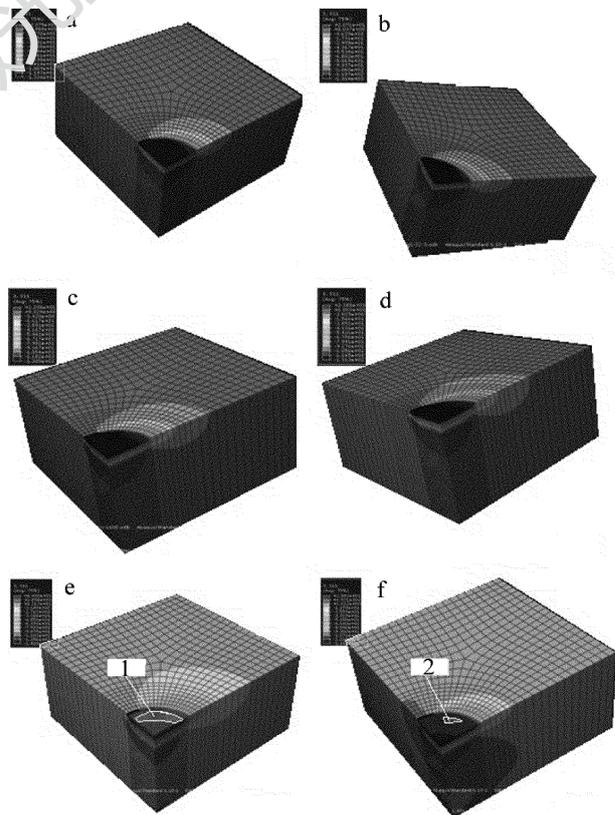


Fig. 6 Moiré topography of residual stress under different load (chart 2) 为 1000MPa, 1100MPa, 1200MPa 和 1300MPa (分别如图 5c、图 5d、图 5e 和图 5f 所示)时,表面最大残余压应力分别为 -74.45MPa, -98.71MPa, -128MPa 和

-131.7MPa;冲击区均存在残余压应力,载荷增至1300MPa时残余应力区域扩大到第二圆弧区边界处。根据前述冲击波载荷 p 应在1.458GPa~1.822GPa范围内,与PEYRE^[2]提出的冲击波载荷 p 在 $\sigma_{HEL} \sim 2\sigma_{HEL}$ 之间,残余应力线性增加的结论一致。

当冲击载荷依次为1400MPa,1500MPa,1600MPa,1700MPa时(分别如图6a、图6b、图6c、图6d所示),表面最大残余压应力分别为-132.4MPa,-131.4MPa,-130.9MPa和-131.3MPa;这说明随着激光冲击峰值压力的增加,残余应力趋于饱和。但当冲击载荷依次为1800MPa和1900MPa(分别如图6e和图6f所示)时,表面残余压应力反而减小,出现文献中所说的残余应力洞^[13-17]。这是因为当光斑半径一定时,随着载荷的增大,冲击波在光斑边缘处引起表面释放波,PEYRE等人^[2]称这种反射波是稀疏波。表面释放波沿材料表层向光斑内部和外部传播,向光斑外部传播,其波阵面逐渐扩大,能量迅速衰减,对光斑内部区域的残余应力影响很小,但向内部传播的表面释放波在光斑中心区域逐渐收缩并汇聚并放大,当冲击波载荷超过一定值时,向内传播的表面释放波强度超过材料的屈服强度,进行反向加载,引起材料的光斑中部近似环形区域产生反向塑性变形,导致反向应变,从而降低残余应力,导致残余应力洞形成^[16-17]。如图6e和图6f中光斑边缘向内的区域1和区域2所示,该区域即为残余应力洞区域。综合分析,激光冲击AZ31镁合金能产生残余压应力的最小冲击波压力0.8GPa,获得最佳残余压应力场的激光冲击波压力范围为1.2GPa~1.7GPa。

3.2 残余应力分析

图7为材料在不同冲击波载荷下经动态分析再静态分析后的表面残余应力分布图,图中水平轴 x 为距离光斑中心的距离,垂直轴表示残余应力 σ_r 的大小。从图中可以看到,冲击载荷为0.8MPa时,基本没有残余应力产生,这是因为材料的动态屈服强度为370MPa,雨贡纽弹性极限 $\sigma_{HEL} = 729\text{MPa}$,只有冲击载荷超过729MPa时才能发生弹塑性变形,弹性恢复后残余应变导致残余应力产生。载荷为0.8MPa时,载荷超过雨贡纽弹性极限729MPa较少,残余应变较小,因此残余应力很小。随着载荷的增加,残余应力增加,当载荷增加到1.4GPa时,残余应力基本稳定在125MPa左右。残余应力较均匀的区域为光斑作用区域,影响区域随加载载荷的增大而增大,当载荷增加到1.4GPa时,残余应力存在区域可扩大到9mm~10mm。

图8为材料在1.5GPa~1.6GPa范围内不同冲击波载荷下的表面残余压应力分布图。从图中可以看

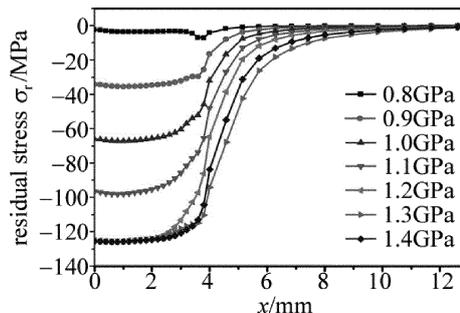


Fig. 7 Distribution of residual stress on the surface of AZ31 under different loads (chart 1)

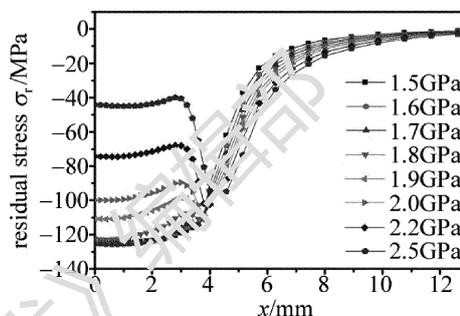


Fig. 8 Distribution of residual stress on the surface of AZ31 under different loads (chart 2)

到,载荷在1.5GPa和1.6GPa时,残余压应力分布和载荷1.4GPa时的一致,残余应力也基本稳定在125MPa左右。但当载荷超过1.7GPa时,在光斑边缘处即4mm处出现应力减小现象,再次说明光斑边缘处向内部传播的稀疏波向光斑中心区域逐渐收缩汇聚并进行反向加载导致反向应变,从而降低残余应力,导致“残余应力洞”形成。另一方面前述所计算的较优冲击波载荷 p 取值范围为在 $2\sigma_{HEL} \sim 2.5\sigma_{HEL}$ 之间^[2],即冲击波载荷 p 应在1.458GPa~1.822GPa之间,可以看出该范围在模拟结果范围之内。冲击载荷在1.8GPa时出现轻微的“残余应力洞”现象,而在大于1.9GPa时,均出现明显的“残余应力洞”现象。载荷为2.5GPa时,残余应力由光斑边缘4mm处的95MPa减小到3mm以内的44MPa左右,进一步说明载荷超过 $2.5\sigma_{HEL}$ 会出现“残余应力洞”现象^[18]。

由推导出的残余应力公式(18)式可知,当冲击波载荷 $p = 1.474\text{GPa}$ 时,则最大残余应力为-128.5MPa。模拟结果表明:当载荷在1.4GPa,1.5GPa和1.6GPa时,所获得的最大残余压应力为-125MPa左右,模拟结果与理论推导公式所得结果一致。ZHANG^[19]等人实验测试一次激光冲击所得最大残余压应力为130MPa,实验、理论推导和模拟结果三者基本一致,说明模拟仿真模型建立正确,理论公式推导均具有一定的正确性。

4 结论

(1)由激光冲击和塑性变形理论推导出了激光冲击 AZ31 镁合金表面最大残余压应力公式。由公式可知,当载荷 $p = 1.474\text{GPa}$ 时,则最大残余应力为 -128.5MPa 。模拟结果表明,当载荷在 1.4GPa , 1.5GPa 和 1.6GPa 时,所获得的最大残余压应力为 125MPa 左右,模拟结果与理论推导所得结果一致。

(2)通过在不同激光冲击波载荷作用下获得残余应力的分布,结果表明,获得最佳残余压应力场的激光冲击波载荷范围为 $1.2\text{GPa} \sim 1.7\text{GPa}$ 。随着载荷的增加,残余应力增加,当载荷增加到 $1.4\text{GPa} \sim 1.6\text{GPa}$ 时,残余应力基本稳定在 125MPa 左右。

参考文献

- [1] PEI X. The effects of mechanical property and structural changes in the surface material induced by laser shock processing on AZ91 magnesium [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010:31-32 (in Chinese).
- [2] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, *et al.* Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behavior [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A210(1): 102-113.
- [3] CHEN J F. Study on laser surface modification of AM50 magnesium alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008:71-74 (in Chinese).
- [4] YANG G T. Plastic dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011:115-120 (in Chinese).
- [5] GUO W G, LI Y L, SUO T. Stress wave basis concise tutorial [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007:105-108 (in Chinese).
- [6] YU H Q, CHEN J D. Metal plasticity forming theory [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999:103-105 (in Chinese).
- [7] ZHOU N, QIAO D J. Pulse irradiation dynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008:185-187 (in Chinese).
- [8] LI X C, ZHANG Y K, CHEN J F, *et al.* Effect of laser shock processing on stress corrosion cracking behaviour of AZ31 magnesium alloy at slow strain rate [J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(5):626-630.
- [9] ZHANG X Q, ZHANG Y K, GU Y Y. Finite element simulation of residual stress induced by laser peening [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(4):626-630.
- [10] WANG Y, FAN S X, GAN F, *et al.* Investigation into micro-extrusion forming based on laser shock in 3003 aluminum alloy [J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 820-824 (in Chinese).
- [11] LI Z Y, ZHU W H, CHEN J Y. Experimental study of high-power pulsed laser induced shock waves in aluminum targets [J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24(3): 259-262.
- [12] HUANG Y, JIANG Y F, JIN H, *et al.* Propagation of shock wave induced by ring laser and its effect on spalling [J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 301-305 (in Chinese).
- [13] BALLARD P. Residual stress induced by rapid impact-application of laser shocking [D]. Paris, France: Ecole Polytechnique, 1991:74-76.
- [14] HU Y X, GONG C M, YAO Z Q, *et al.* Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(23): 3503-3508.
- [15] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, *et al.* Laser shock processing of aluminum alloys: application to high cycle fatigue behaviour [J]. Materials Science and Engineering, 1996, A 210(1/2): 102-113.
- [16] JIANG Y F, LAI Y L, ZHANG L. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8):2073-2079 (in Chinese).
- [17] DAI F Z. Mechanism research of nano-second laser induced shock wave on the surface topography and performance of metals [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013:59-62 (in Chinese).
- [18] HUANG L W, LONG K, HUANG Y, *et al.* Research of spalling on 3003H16 aluminium alloy sheet under laser shock wave [J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 270-273 (in Chinese).
- [19] ZHANG Y K, YOU J, LU J Z, *et al.* Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.