

双面激光同时冲击 AM50 镁合金板料的厚度分析

罗开玉 陈 起 吕 刺 刘 娟 林 通

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 在双面激光同时冲击金属薄板过程中,板料厚度是影响其冲击强化效果的重要因素。利用 ABAQUS 软件对双面激光同时冲击不同厚度的 AM50 镁合金板料进行模拟,系统研究了板料厚度对双面激光同时冲击强化效果的影响机理,对比分析了不同模型沿表面径向和轴向的残余应力分布。结果表明,在激光光斑直径、脉冲宽度、峰值压力不变的情况下,随着板料厚度增大,模型内部的残余压应力分布渐趋均匀和有规律,残余压应力影响深度逐渐变深,当板料厚度达到某一阈值后,两者都达到饱和。在激光峰值压力 1600 MPa、光斑半径 3 mm 和压力脉冲宽度 57 ns 工艺参数下,双面激光同时冲击 AM50 镁合金薄板的理想厚度为 4 mm 及以上。

关键词 激光技术;双面激光同时冲击;AM50 镁合金;残余应力场

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0103003

Thickness Analysis of Two-Sided Simultaneous Laser Shock Processing on AM50 Mg Alloy

Luo Kaiyu Chen Qi Lü Ci Liu Juan Lin Tong

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

Abstract Sheet thickness is an important factor affecting shock effect when metal sheet is treated by two-sided simultaneous laser shock processing (LSP). AM50 Mg alloy sheets with different thicknesses are treated by two-sided simultaneous LSP, residual stress fields of all AM50 Mg alloy sheets are simulated by ABAQUS software. Influence mechanism of two-sided simultaneous LSP on metal sheet as a function of sheet thickness is systematically investigated, then residual stress distributions in the axial and radial direction are analyzed. Results show that under the same laser spot diameter, pulse width and peak pressure, with sheet thickness increasing, compressive residual stress in the model becomes more uniform and regular, and the influence depth turns deeper. When the sheet thickness reaches a threshold, both of them reach saturation. The appropriate thickness of AM50 Mg alloy sheet treated by two-sided simultaneous LSP should be 4 mm and more, when peak pressure is 1600 MPa, pulse width is 57 ns and laser spot diameter is 3 mm.

Key words laser technique; two-sided simultaneous laser shock processing; AM50 Mg alloy; residual stress field

OCIS codes 350.3390; 310.4925; 120.6660

1 引 言

镁合金因其密度小^[1]、强度高、刚性高、散热好等特点广泛应用于航空航天、运输、化工、汽车、火箭等工业部门。随着工业日益迅速的发展,对通过降低产品的自重以降低能源的消耗和减少污染提出了

更高的要求,这也恰恰给镁合金的发展带来了巨大的契机。镁合金是目前最轻的金属(镁的比重大约是铝的 2/3,是铁的 1/4),承受冲击载荷能力却比铝合金大^[2],耐有机物和碱腐蚀性能好,而被誉为“21 世纪新的绿色工程材料”^[1-4]。因此研究和开发更

收稿日期: 2013-06-21; 收到修改稿日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51105179, 51275220), 江苏省自然科学基金(BK2011478)、中国博士后特别资助项目(2012T50465)、江苏大学高层次人才启动基金(13JJD049)、江苏大学科研立项资助项目(12A383)

作者简介: 罗开玉(1975—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光冲击强化和激光复合再制造技术方面的研究。

E-mail: kyluo@mail. ujs. edu. cn

高强度的镁合金具有重要意义。研究表明,疲劳损伤是镁合金在服役期间主要的失效形式之一^[5]。传统表面处理方法如机械喷丸、超声喷丸等能够在金属表面产生高残余压应力从而提高疲劳强度以延长疲劳寿命。但是传统表面处理方法在金属表层诱导深度较浅,不能有效阻止表面裂纹的产生和扩大^[6]。激光冲击强化(LSP)是一种新的表面处理技术,它使表面材料发生塑性变形产生高幅残余压应力,从而提高金属材料的机械性能^[7-8]。激光冲击强化具有高压、高能、超快、超高应变率等鲜明特点,具有与常规加工方法无可比拟的优点,具有显著的技术优势,其在关键装备零部件的强化制造方面可发挥重要的作用,在某些场合具有不可替代性^[6-8]。

目前国内外对激光冲击合金的研究主要集中在板料单面受冲的情况^[9]。航空和民用飞机的涡轮、整体叶盘、汽轮机和在水轮机等部件由于叶片薄、弯扭大,单面激光冲击强化易造成叶片变形和破坏。另外,单面激光冲击在冲击面呈现高幅残余压应力的同时使冲击背面呈现拉应力状态,这些都对叶片激光冲击强化工艺和技术提出了更高的要求^[10]。Ding等^[11]通过采用双面激光同时冲击 Ti-6Al-4V,着重研究了残余压应力值和残余应力影响深度之间的关系,其研究并未涉及板料厚度与冲击强化效果的内在联系。张永康等^[12]实验获得单面单次冲击镁合金残余应力影响深度 0.8 mm。张磊等^[13-14]认为双面激光同时冲击强化薄板后,由于两个相对传播的冲击波的相遇叠加,材料中间层的内部拉应力增加,疲劳寿命下降,并且仅仅根据经验将薄板激光冲击的作用厚度定义为单面单次激光冲击影响深度的两倍以上,并未考虑双面激光同时冲击时冲击面和背面冲击波的传播耦合作用过程。

研究激光冲击过程中的冲击波传播和不同方向冲击波的耦合过程是揭示双面激光同时冲击作用机理的重要方法和手段,本文以 AM50 镁合金为研究对象,采用 ABAQUS 软件对不同厚度板料双面激光同时冲击镁合金试样表面和深度方向的残余应力进行模拟和分析,系统研究板料厚度对双面激光同时冲击强化效果的影响机理,对比分析不同模型沿表面径向和轴向的残余应力分布,并将单次冲击镁合金薄板的模拟残余应力场与已有文献中相同实验条件下的数据进行对比分析,验证模型的有效性。在此基础上,获得了双面激光同时冲击 AM50 镁合金薄板的理想厚度,给实际应用中的双面激光同时冲击金属和合金薄板提供了理论依据和指导。

2 有限元模型建立

2.1 有限元分析原理

在激光冲击镁合金板材的过程中,由于冲击波作用时间太短(纳秒量级),以及冲击波相互作用之间的不确定性,以现有试验条件很难获得冲击波传播机制,采用有限元模拟能够模拟冲击波在薄靶中的传播过程从而揭示激光冲击波传播机制。大型有限元分析软件 ABAQUS 自身携带两个分析模块,动态显示分析(ABAQUS/Explicit code)和隐式静态分析(ABAQUS/Standard code)^[15]。首先通过动态显示分析模块模拟短时间冲击过程中波的动态传播机制,把计算得到的动态数据导入隐式静态分析模块中进行回弹运算,最终得到板料达到稳态后材料内部的残余应力场^[15-16],实现激光冲击波在金属板料中的实时传播过程。

2.2 AM50 镁合金材料力学特性

试验和分析采用的目标板料为 AM50 镁合金,其具体化学成分为 4.83 Al, 0.32 Mn, 0.001 Cu, 0.001 Fe, 0.003 Si(质量分数),其余为 Mg^[1]。假定材料为弹塑性等向强化,采用 Von Mises 屈服准则。在激光冲击过程中材料的应变率高达 10^7 s^{-1} 以上,属于强动载荷^[6]。强动载荷作用下的材料的屈服极限一般为静态载荷的 2~4 倍^[7],而 AM50 镁合金的静态屈服极限为 125 MPa,这里假定材料的动态屈服强度(σ_y^{dyn})为 375 MPa^[3]。想要使材料发生永久的塑性变形以获得足够的残余压应力,激光冲击板材所产生的峰值压力必须大于 Hugoniot 弹性极限(HEL, f_{HEL}),材料的 Hugoniot 弹性极限定义为^[7]

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

将动态屈服强度 σ_y^{dyn} 代入(1)式即可算得 HEL 的值为 656 MPa。根据文献^[6]所述,为达到最佳的冲击强化效果,激光峰值压力 P 应介于 $2 f_{\text{HEL}} \leq P \leq 2.5 f_{\text{HEL}}$ 之间,故在模拟时峰值压力设为 1600 MPa。AM50 镁合金密度为 1800 kg/m^3 、弹性模量为 44800 MPa、泊松比为 0.3、动态屈服强度为 375 MPa、Houhonoit 弹性极限为 656 MPa。

2.3 模型的几何尺寸及细化网格参数

由于模拟双面激光同时冲击过程的计算量过于庞大,为了优化冲击过程的计算量,根据板材厚度采用了两种不同网格密度的 5 组二维轴对称计算模型^[15], H 为模拟的模型的高度, R 为模型半径尺寸。为了使模型能更加快速方便的从动态显示分析模块导入到隐式静态分析模块做回弹分析,采用足够大的

边界代替无反射边界^[15-16],使边界反射对结果产生的影响趋于零,因此根据计算量大小和模拟需要将模

型半径尺寸 R 设为 30 mm^[15-17](冲击光斑半径为 3 mm),5 组计算模型具体尺寸如表 1 所示。

表 1 5 组有限元模型尺寸

Table 1 Mesh size of finite element model for five groups

A	A1	A2	A3	A4	A5
$H \times R$ /mm	1×30	2×30	3×30	4×30	5×30
Density	0.01×0.01	0.01×0.01	0.02×0.02	0.02×0.02	0.02×0.02

2.4 加载曲线及其边界条件

压力脉冲持续时间一般为激光脉冲宽度的 2~3 倍,根据张永康等^[12]的研究,激光脉冲时间为 23 ns,则假设压力脉冲宽度为 57 ns。压力加载曲线是模拟激光冲击的关键因素之一,由于压力脉冲加载是一个非常短暂的过程,根据 Braisted 等^[16]的研究,可以用三角斜坡曲线代替高斯曲线,即在 0~28.5 ns 的时间段内压力沿直线由零升到峰值压力,再在 28.5~57 ns 的时间段内由峰值压力沿直线减小为零。由于 5 组模型都是 2D 轴对称模型,故在其右侧对称轴处添加对称边界条件,在上下底面靠近对称轴处施加半径为 3 mm 的脉冲压力。所有模型的动态分析时间设为 4000 ns,时间增量 Δt 设置为 1 ns。

速度,镁合金 $C_e = 5.74 \times 10^{-6}$ mm/s, $C_p = 4.44 \times 10^{-6}$ mm/s, t 为冲击波作用时间 57 ns, $\sigma_H = 656$ MPa。将 C_e, C_p, t, P, σ_H 代入(2)式,得到理论残余应力影响深度 $D \approx 0.84$ mm。

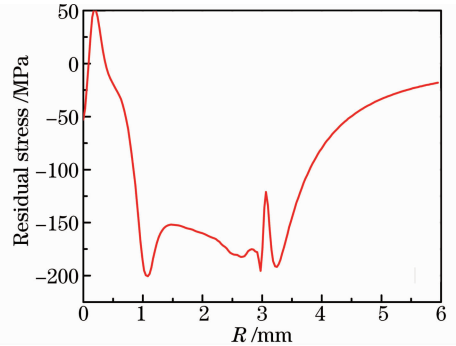


图 1 单次冲击 AM50 合金板料沿径向的残余应力分布图
Fig.1 Residual stress distribution of AM50 alloy treated by single LSP impact in the radial direction

3 残余应力场数值分析

3.1 单面冲击 AM50 镁合金的残余应力场

首先采用与双面冲击同等参数的激光束模拟 AM50 镁合金板料单面受冲的情况,所得的残余应力场沿模型表面径向的分布如图 1 所示,板料表面残余压应力峰值高达 -200 MPa,冲击区域稳定的表面残余压应力的均值约为 -160 MPa。根据文献^[12]中所述,在同样激光冲击工艺参数情况下,冲击处理 AM50 试样后,采用 X 射线应力仪测得激光冲击区表面稳定的残余压应力均值为 -145.9 MPa (误差为 ±18.2 MPa)^[12]。模拟与实验所得的表面残余压应力均值吻合较好。

在其深度方向,模拟所得沿中心轴的残余应力分布如图 2 所示,在其轴向深度方向,残余应力峰值高达 -250 MPa,残余应力影响深度约为 0.88 mm,与计算所得的理论残余应力影响深度 0.84 mm 吻合较好,与试验所得残余应力影响深度 0.8 mm 亦较好地吻合^[12]。通过以上分析可知,采用 2D 轴对称模型能够精确模拟激光冲击板料所产生的残余应力场。

激光冲击所产生的应力波在板料内部传播过程中,在刚刚接触板料表面时应力波最强,对板料的强化效果最好,随着应力波向板料内部传播距离的增加,强度逐渐衰弱,对材料的强化效果也逐渐减弱,直至产生反向的残余拉应力^[7-8]。

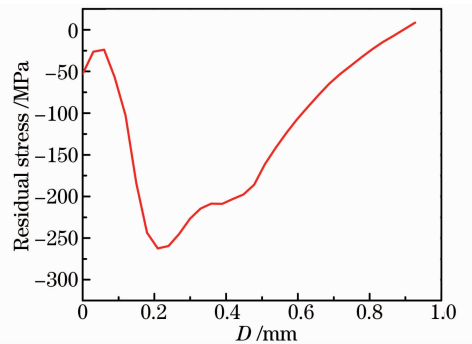


图 2 单次冲击 AM50 合金板料沿轴向的残余应力分布图
Fig.2 Residual stress distribution of AM50 alloy treated by single LSP impact in the axial direction

激光冲击作用下的理论残余应力影响深度 D 可按式估算^[8]:

$$D = \frac{C_e C_p t}{C_e - C_p} \left(\frac{P - \sigma_H}{2\sigma_H} \right), \quad (2)$$

式中 C_e, C_p 分别为弹性波和塑性波在板材中的传播

3.2 板材厚度对双面激光同时冲击所产生残余应力的影响机理

图 3(a)~(e)分别为 1 mm(模型 A1)、2 mm(模

型 A2)、3 mm(模型 A3)、4 mm(模型 A4)、5 mm(模型 A5)厚镁合金经双面激光同时冲击后的残余应力云图分布。试验所采用模型为 2D 轴对称模型,模型沿 S11 方向的应力分量即代表了模型内部主要的残余应力值。当 S11 小于零时表示模型在此处产生了残余压应力(蓝绿色部分),反之则为拉应力(橘红色部分),颜色越深则应力值越大。图 3(a)所示模型 A1 为激光冲击强化 1 mm 厚的镁合金板材在冲击表层产生的深度大约为 100 μm 残余压应力影响层,在冲击区域深度方向上基本呈现压应力和拉应力交错复杂(绿色和橘红色互相交织),残余拉应力数值最高达到 53.2 MPa,对于 1 mm 镁合金薄板来说,双面激光同时冲击基本没有起到强化板料作用^[13-14]。图 3(b)和图 3(c)分别是激光冲击强化 2 mm 厚(模型 A2)和 3 mm 厚(模型 A3)的镁合金板材在深度方向 1 mm 区域残余应力分布图,从图中可以看出,与如图 3(a)相比,激光冲击强化 2 mm

厚和 3 mm 厚的镁合金板材在冲击表层产生深度大约为 550 μm 和 650 μm 的残余压应力影响层,残余压应力影响层层深分别是模型 A1 的 5~6 倍,约 650 μm 层深处呈现残余压应力状态,残余压应力均值较小(蓝色部分颜色较浅)。模型 A2 激光双面同时冲击时,在离冲击表面约 700~1000 μm 区域,呈现残余不均匀拉应力状态,残余拉应力最大值达到 76.9 MPa。但是模型 A3 激光双面同时冲击时,残余应力随离冲击表面距离的增加呈现压应力逐步减小过渡到压应力逐步增大,残余拉应力最大值达到 93.1 MPa。图 3(d)和图 3(e)分别是激光冲击强化 4 mm 厚(模型 A4)和 5 mm 厚(模型 A5)的镁合金板材在深度方向 1.2 mm 区域残余应力分布图,从图中可以看出,激光冲击强化 4 mm 厚和 5 mm 厚的镁合金板材在冲击表层产生深度大约为 850~900 μm 残余压应力影响层,二者残余压应力影响层和分布基本一致。

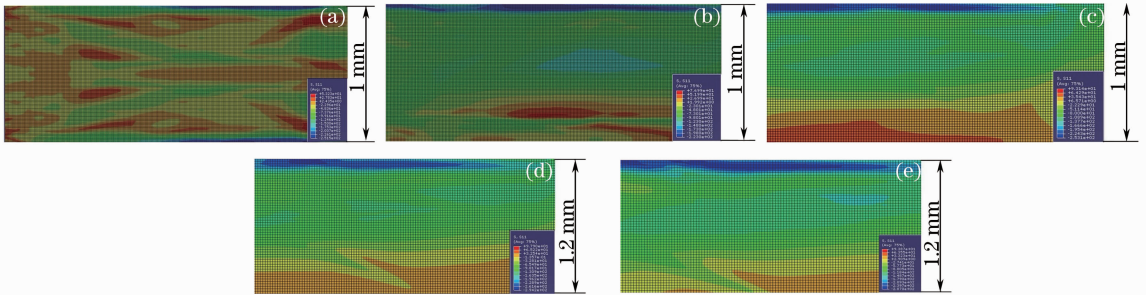


图 3 双面激光同时冲击不同厚度 AM50 合金板料的应力云图。(a) 1mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm
Fig. 3 Stress nephogram of AM50 alloys with different thicknesses treated by two-side simultaneous LSP.
(a) 1mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm

从图 3 的可知,模型 A1 和模型 A2 残余压应力分布不均匀,面积最小,残余压应力和拉应力交错,随着镁合金板材厚度增加,残余压应力分布逐步均匀,残余压应力影响深度逐步增加,并且残余压应力峰值逐渐增大;当镁合金板材厚度增加到 4 mm 左右时,激光双面同时冲击镁合金残余压应力影响深度为 850~900 μm ,当镁合金板材厚度继续增加到 5 mm 及以上,激光双面同时冲击镁合金残余压应力影响深度仍然维持在 850~900 μm 。

3.3 定量分析模型内部的最大残余压应力和拉应力

从图 3 可以看出,模型 A1-A5 内部最大残余压应力分别为 -251.5、-223、-253.1、-294.2、-287 MPa。由于模型 A1 的厚度太薄(接近单面冲击的残余应力影响深度),其残余压应力峰值发生突变。模型 A2~A5 随着镁合金板料厚度逐步变

大,残余压应力峰值也呈不断增大趋势。另外模型 A1~A5 内部最大残余拉应力分别为 53.23、76.99、93.14、97.9、93.8 MPa。可以看出,随着模型厚度逐步变大,残余拉应力峰值也在不断变大,当厚度达到 3~4 mm 时达到饱和,值为 95 MPa 左右。因为模型 A2~A5 的残余拉应力主要分布在模型中心内部,且拉应力的均值大小与分布面积相对于压应力小很多,故冲击所产生的残余拉应力对这 4 组模型表面强化效果的影响可以忽略不计^[16]。

通过以上分析可知,随着模型的厚度逐步变大,模型内部的残余压应力峰值不断增大,当模型厚度达到 4 mm 后峰值压应力达到饱和,值为 -290 MPa 左右。模型内部的残余拉应力峰值也会随着模型厚度变厚呈小幅上升趋势,当模型厚度达到 4 mm 后峰值拉应力达到饱和,在 95 MPa 左右浮动不再增大。

3.4 定量分析沿模型的表面径向方向的残余应力曲线

图 4 为模型 A1~A5(1~5 mm)沿表面径向的残余应力分布图。由图可知模型 A1 沿表面径向的残余应力曲线与其他 4 组模型差异较大,在模型 A1 的半径 R 为 2~2.5 mm 时,沿其表面径向的残余压应力值达到最大,压应力峰值为 -260 MPa。这是由于模型 A1 的厚度太薄,接近单面单次冲击的残余应力影响深度,板料正反两面同时作用相对的冲击波在板料内部发生了复杂的耦合作用,才导致了模型 A1 沿表面径向残余应力场的突变^[11,15]。模型 A2 沿径向的残余应力曲线波动较大,在模型半径 R 为 1.8 mm 处其残余压应力达到最大,值为 -225 MPa。模型 A3~A5 沿径向的残余应力曲线类似,残余压应力峰值均出现在 R 为 1 mm 处,其值分别为 -245、-295、-290 MPa。

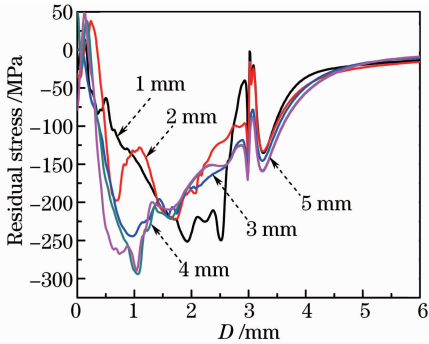


图 4 双面激光同时冲击不同厚度 AM50 合金板料沿径向的残余应力分布图

Fig. 4 Radial residual stress distribution of AM50 alloys with different thicknesses treated by two-sided simultaneous LSP impacts

由以上分析可知随着模型厚度逐渐增大,表面径向方向的残余压应力峰值点后移,最终稳定在 R 约为 1 mm 处。模型 A2~A5 表面的峰值压应力随着模型厚度的不断增大呈现不断增大的趋势,当模型厚度达到 4 mm 时,表面径向方向的残余压应力峰值达到饱和,值为 -290 MPa 左右。图 1 中激光单次单面冲击板料时沿其表面径向的残余应力峰值为 -200 MPa,由此可见双面激光同时冲击工艺会大幅提高板料表面的残余应力峰值。

3.5 沿模型的轴向深度方向残余应力曲线的定量分析

图 5 为 5 组模型沿轴向深度方向残余应力的分布图。由图可知模型 A1 和 A2 沿轴向的残余应力曲线波动性很大。两者相比,可以明显看出模型 A2 沿轴向的残余压应力均值大于模型 A1,模型 A1 沿

轴向的残余压应力峰值约为 -40 MPa,而模型 A2 沿轴向残余压应力峰值约为 -100 MPa。模型 A3、A4、A5 沿轴向深度方向残余应力分布曲线类似,三者的残余压应力峰值都为 -200 MPa 左右,远大于模型 A1 和 A2。模型 A5 较模型 A3、A4 的残余应力曲线的波动性更小,且模型 A5 沿轴向的残余压应力均值要略大于模型 A3 和 A4。

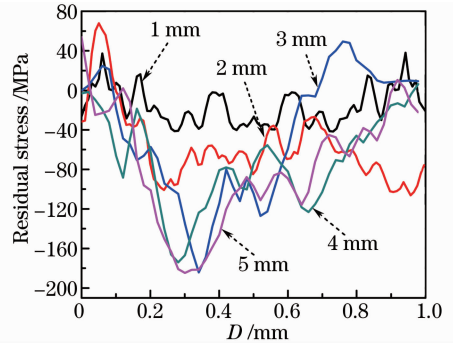


图 5 双面激光同时冲击不同厚度 AM50 合金板料沿轴向的残余应力分布图

Fig. 5 Axial residual stress distribution of AM50 alloy with different thicknesses treated by two-sided simultaneous LSP impacts

通过以上分析可知,当板料厚度越厚时,沿轴向深度方向的残余应力均值越大,强化效果越好^[13]。当板料厚度达到 3 mm 时,模型沿轴向深度方向的残余压应力峰值达到饱和,为 -200 MPa 左右并且不再增大。残余压应力影响深度也是判断激光冲击强化效果的一个很重要的衡量指标^[7-8],要使板料双面激光同时冲击板料的效果达到最佳,就要使双面激光同时冲击板料的表面残余压应力影响深度接近单面单次冲击的影响深度。由图 5 可知模型 A1 的残余应力曲线围绕 0 上下浮动,极不稳定,故模型 A1 的残余压应力影响深度忽略不计。模型 A2 和 A3 经过激光双面冲击后,残余压应力影响深度都为 600 μm 左右。模型 A4 的残余压应力影响深度为 870 μm ,模型 A5 的残余压应力影响深度为 850 μm ,略小于模型 A4。以上分析与应力云图所得结果一致,即当板料厚度达到 4 mm 时残余压应力影响深度已达饱和,接近单面单次冲击的 0.88 mm。

4 结 论

1) 采用有限元软件 ABAQUS 模拟激光双面冲击 AM50 镁合金,在 1600 MPa 激光峰值压力、3 mm 光斑半径和 57 ns 压力脉冲宽度工艺参数下,双面激光同时冲击镁合金厚度越大,残余应力分布

越均匀,波动性越小范围越广,残余压应力均值越大,强化效果越好。

2) 5组模型表面残余应力峰值随着厚度不断变大呈增大趋势,当模型厚度达到4 mm时,表面径向方向的残余压应力峰值达到饱和,峰值点稳定在模型半径 R 为1 mm处,值为-290 MPa左右。沿轴向深度方向随着模型厚度变大,残余压应力沿轴向的最大值也在不断变大,当模型厚度达到3 mm时饱和,值为-200 MPa左右。

3) 由于1 mm厚模型内部的残余于应力与残余压应力相互交错,故残余压应力影响深度忽略不计,2 mm和3 mm厚模型的残余压应力影响深度约为600 μm 。4 mm和5 mm厚模型的影响深度分别为870 μm 和850 μm ,都接近单面单次冲击的影响深度。综上可知,双面激光同时冲击AM50镁合金理想厚度在4 mm及以上。

参 考 文 献

- 1 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Jiang Suqin, *et al.*. Study on strain hardening and fatigue fracture of AZ31B magnesium alloy after laser shot peening[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0803002. 黄舒,周建忠,蒋素琴,等. AZ31B镁合金激光喷丸后的形变强化及疲劳断口分析[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803002.
- 2 Yu Shuisheng, Yao Hongbing, Wang Fei, *et al.*. Influence of interaction parameters on high power laser induced shockwave in magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1386-1390. 于水生,姚红兵,王飞,等. 作用参数对镁合金中强激光诱导冲击波的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1386-1390.
- 3 A Tharumarajah, P Koltun. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars? [J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(11-12): 1007-1013.
- 4 B L Mordike, T Ebert. Magnesium properties-applications-potential[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 302(1): 37-45.
- 5 Zhong Hao, Liu Peiying, Zhou Tietao. Applications and prospects of magnesium and its alloys in aerospace[J]. Aviation Engineering and Protection, 2002, (4): 41-42. 钟皓,刘培英,周铁涛. 镁及镁合金在航空航天中的应用前景

- [J]. 航空工程与维修, 2002, (4): 41-42.
- 6 S M Charles, W Tao, Y Lin, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. International J Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- 7 Y K Zhang, C L Hu, L Cai, *et al.*. Mechanism of improvement on fatigue life of metal by laser-excited shock waves[J]. Appl Phys A, 2001, 72(1): 113-116.
- 8 Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianjun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2925-2930. 葛茂忠,张永康,项建云. AZ31B镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2925-2930.
- 9 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing, *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(1): 125-128. 王声波,范勇,吴鸿兴,等. 7050航空铝合金结构材料激光冲击强化处理研究[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 125-128.
- 10 Hu Yaji, Chen Yanchu, Chen Dong. Research on the application of laser shock processing technology on aero-engine blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(3): 54-57. 胡雅骥,陈彦初,陈冬. 激光冲击强化技术在航空发动机叶片上的应用研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22(3): 54-57.
- 11 K Ding, L Ye. FEA simulation of two-sides laser shock peening of thin section of a Ti-6AL-4V alloy[J]. Surface Engineering, 2003, 19(2): 127-133.
- 12 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 1068-1072. 张永康,陈菊芳,许仁军. AM50镁合金激光冲击强化实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1068-1072.
- 13 L Zhang, J Z Lu, Y K Zhang, *et al.*. Effects of processing parameters on the fatigue properties of LY2 aluminum alloy subjected to laser shock processing[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(6): 061406.
- 14 L Zhang, J Z Lu, Y K Zhang, *et al.*. Effects of different shocked paths on fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy during two-sided laser shock processing[J]. Material & Design, 2011, 32(2): 480-486.
- 15 K Ding, L Ye. Laser Shock Peening Performance and Process Simulation [M]. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited, 2006. 1-159.
- 16 W Braisted, R Brockman. Finite element simulation of laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(8): 719-724.

栏目编辑:宋梅梅