

边界约束条件对薄板激光喷丸诱导残余应力和塑性变形的影响

黄志伟¹, 张兴权¹, 章艳¹, 裴善报¹, 黄志来¹, 陈彬²

(1. 安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032;
2. 安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 为研究不同边界约束条件对薄板多点激光喷丸诱导残余应力和塑性变形的影响, 采用数值模拟和试验结合的方法对 7075 铝合金薄板激光喷丸处理进行研究, 对比分析了板料在底部全约束和两端夹持两种边界约束条件下的变形形貌和残余应力分布。结果表明: 激光喷丸后, 板料冲击区域均产生微凹坑; 底部全约束的板料经激光喷丸后, 未发生整体变形, 仍然保持平整状态, 而两端夹持的薄板喷丸区域发生了整体向上的凸起变形。两种边界约束条件下, 最大残余压应力均出现在板料的冲击表面; 底部全约束时的最大残余压应力为 299.0 MPa, 大于板料两端夹持时的 251.6 MPa。在厚度方向上, 其残余应力分布也存在着明显差异, 底部全约束时, 厚度方向上的残余应力分布形式为“压应力-拉应力”, 而两端夹持时的分布形式为“压应力-拉应力-压应力”。

关键词: 激光喷丸强化; 边界约束条件; 残余应力; 塑性变形

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0806009

Effect of boundary constraint conditions of thin plate on residual stresses and plastic deformation induced by laser shock peening

Huang Zhiwei¹, Zhang Xingquan¹, Zhang Yan¹, Pei Shanbao¹, Huang Zhilai¹, Chen Bin²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;
2. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: The numerical simulations and experiments were employed to investigate the effect of boundary constraint conditions of thin plate on residual stresses and plastic deformation induced by laser shock peening. Two boundary conditions, bottom fully constrained and both ends clamped, were used to compare residual stresses distribution and deformation morphology of 7075 aluminum plates after impacted by multiple laser shock peening. The results show that micro-dents were generated in impacted regions of both cases after treated by laser shock peening. The plate still kept flat without cross-sectional deformation when its bottom surface was fully constrained, while the overall upward convex deformation was produced in the impacted region of plate with both ends clamped. Moreover, the maximum compressive residual stresses existed on the surface of both cases, which was 299.0 MPa in the plate with

收稿日期: 2016-12-06; 修订日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51675002, 51175002); 安徽省自然科学基金(1708085ME110);

安徽工业大学青年教师科研基金(QZ201518); 安徽工业大学研究生创新研究基金(2015043)

作者简介: 黄志伟(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光冲击强化等方面的研究。Email: zhiwei10270820@163.com

导师简介: 张兴权(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光表面强化和激光加工等方面的研究。Email: zhxq@ahut.edu.cn

bottom fully constrained and 251.6 MPa in the other case. Different styles of residual stresses field are also found in the thickness direction. The residual stresses from the impacted surface to the bottom was "compressive residual stresses -tensile residual stresses" in the plate with bottom fully constrained, while it was "compressive residual stresses-tensile residual stresses-compressive residual stresses" in the plate with both ends clamped.

Key words: laser shock peening; boundary constraint condition; residual stresses; plastic deformation

0 引言

激光喷丸强化(LSP)是一种新型的表面强化技术,它利用激光诱导的高压冲击波使金属板材表面发生塑性变形,使表层产生高幅残余压应力,以提高金属材料的抗疲劳性能。相比于机械喷丸等传统的表面喷丸强化技术,激光喷丸在材料表层诱导的残余压应力深度更深、残余压应力幅值更大,可有效地抑制裂纹的萌生且减缓裂纹扩展速度,显著提高金属材料的疲劳强度等性能^[1-2]。由于激光喷丸强化工艺具有易操控,参数可控性好,加工柔性大等技术优势,因而在零件表面强化的抗疲劳制造方面有着潜在的应用。

目前,国内外对于板料激光喷丸强化诱导的残余应力场进行了较为广泛的研究。胡永祥等^[3]对材料在激光喷丸下的动态响应过程及诱导的残余应力场进行了数值仿真,研究的结果表明激光喷丸诱导的残余应力可以用数值计算的方法进行预测。Kim等^[4]研究了激光脉冲宽度、光斑直径、冲击次数等参数对激光喷丸强化 35CD4 板料诱导残余应力场的影响。Warren等^[5]对板料多点激光喷丸强化诱导的残余应力场过程进行了数值模拟,讨论了功率密度、相邻光斑间距等参数对表面残余应力分布的影响,研究结果证明了多点激光喷丸强化可以获得更均匀、幅值更大的残余压应力。Luo等^[6]进一步利用数值模拟的方法探讨了在多点激光喷丸强化过程中,不同光斑搭接率对 LY2 铝合金表面形貌和残余应力场的影响。这些研究对于了解激光喷丸强化诱导残余应力的机理和分布规律具有重要意义,但是目前国内外关于板料激光喷丸强化的数值模拟和试验研究中,大多数都是将板料的边界约束条件设置为

底部全约束,而对于板料不同边界约束条件对激光喷丸诱导残余应力场的影响鲜有报道。

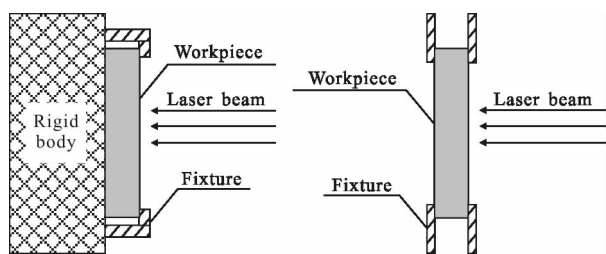
文中以 2 mm 厚的 7075 铝合金薄板为研究对象,利用 ABAQUS 有限元软件模拟和试验结合的方法,研究了在两种不同边界约束条件下,分别按照一定的冲击加载路径对板料进行多点激光喷丸强化处理,对比分析了靶板受冲击区域的变形形貌和残余应力分布。文中的研究结果为板料激光喷丸强化的实际应用提供参考依据。

1 激光喷丸强化原理

利用高功率(GW/cm^2)、短脉冲(ns)的强激光穿过透明的约束层(流水、玻璃等)辐照在吸收层表面时(铝箔、黑色胶带等),吸收层材料迅速汽化、电离产生等离子体,等离子体继续吸收后续的激光脉冲能量后形成高温高压等离子体,高温高压等离子体急剧膨胀形成高强度的冲击波,对材料的表面施加一个压力脉冲,并在材料内部诱导应力波,约束层的惯性约束可进一步提高应力波的压力。当材料内部应力波的峰值压力超过了材料的动态屈服极限时,金属材料将发生塑性变形,产生残余压应力,并伴随金属材料产生位错、孪晶等组织结构的变化,从而改善材料的力学性能,提高零件的疲劳寿命^[7-8]。

2 有限元分析

在板料激光喷丸强化零部件的过程中有两种最为常用的约束方式。方式一:板料放置在刚体工作台上,再用夹具固定住,使板料的底面全约束;方式二:夹具直接夹持板料的两边,使其处于简支的状态。两种约束方式如图 1 所示。



(a) 底部全约束

(b) 两端夹持

(a) Bottom fully constrained

(b) Both ends clamped

图 1 激光喷丸的两种约束方式

Fig.1 Two common constraints of laser shock peening

有限元软件 ABAQUS 已被广泛应用于模拟激光喷丸处理诱导的残余应力分布^[4,6,7,9],其模拟过程包括动态分析和静态分析。首先在 ABAQUS/Explicit 动态模块中分析材料与应力波的相互作用过程。当动态分析中动能趋于零时,表明材料中应力波的作用强度十分微弱,不再发生塑性变形,其动态应力状态也基本保持稳定。再将 ABAQUS/Explicit 瞬态响应的结果导入 ABAQUS/Standard 静态模块中,释放存储在动态结果中的弹性应变能,最终获得稳定的残余应力场。在模拟板料多点激光喷丸强化过程中,需要逐点依次进行动态和静态分析,即在第一点完成动态分析后,将包括变形、应力的动态结果作为初始状态导入到静态模块中计算,再将静态分析结果导入到动态模块中作为第二个点的初始状态,依此类推,直到完成所有点的喷丸模拟。

2.1 有限元模型

模拟时,建立的三维有限元模型如图 2 所示,模型的尺寸为 30 mm×30 mm×2 mm。在施加边界条件时,分别约束板料的底面和四条棱边(图 2 中点化线棱边)来模拟板料底部全约束和板料两端夹持约束的情况。为了保证计算精度同时节省计算时间,在划分网格时,冲击区域内的 XOZ 平面内的单元尺寸为 0.1 mm,而非冲击区域的单元尺寸为 0.35 mm。同时,沿板料厚度方向将模型分割为上下两部分,上半部分单元尺寸由 0.1 mm 依次增加到 0.15 mm,下半部分由 0.2 mm 依次增加到 0.35 mm,模型总共有 322 752 个单元,单元类型采用 C3D8R。图 2 中设置两条取值路径 Path-1 和 Path-2 来考察沿 X 方向和 Z 方向的表面形貌和残余应力值,模型上表面的粗实线包围部分为模拟多点激光喷丸的冲击区域。

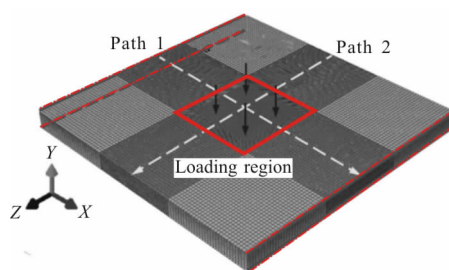


图 2 有限元模型和取值路径

Fig.2 Finite element model and measurement paths

2.2 材料的本构关系

激光冲击波会产生突加载荷,对材料的加载时间只有几十个纳秒,材料的应变率高达 10^6 s^{-1} 量级,在准静态条件下建立的材料本构关系将不再适用。工程中广泛采用 Johnson-Cook 模型,该模型能较好的反映应变、应变率、温度等因素对材料动态屈服应力的影响,关系式如下^[10]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) [1 - T^m] \quad (1)$$

式中: σ 为 Von Mises 流动应力; A 为屈服强度; B 、 n 为应变强化参数; C 为经验性应变率敏感系数; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为准静态下的应变率; $T = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ 为无量纲温度; T_0 和 T_m 分别为室温和材料的熔点; m 为温度软化因子。在激光喷丸过程中,由于靶材表面存在吸收层,可以屏蔽激光对金属材料表面的直接辐照,流动的约束层水也会带走大量的热,同时由于激光辐照时间很短(ns 量级),产生的热也难以传递给被冲击的金属材料,因此激光喷丸过程不需要考虑温度影响,属于冷加工范畴。模拟和试验的材料采用 7075 铝合金,其 Johnson-Cook 模型中各参数值如表 1 所示。

表 1 7075 铝合金的力学性能参数^[11]

Tab.1 Mechanical properties of 7075 aluminum alloy

Material	A/MPa	B/MPa	n	C	$\dot{\varepsilon}_0$
7075	430	350	0.4	0.12	1

2.3 加载压力及冲击顺序

激光喷丸诱导的峰值压力可以用 R.Fabbro^[12]的公式进行估算:

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (2)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (3)$$

式中： α 为内能转化热能部分的系数，一般取 0.1~0.2，文中取 α 为 0.15； I_0 为激光功率密度， GW/cm^2 ； Z 为折合声阻抗， $\text{g}/(\text{cm}^2\text{s})$ ； Z_1, Z_2 分别为吸收层和约束层的声阻抗，其中吸收层铝箔的声阻抗 $Z_1=1.41 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2\text{s})$ ，约束层水的声阻抗 $Z_2=0.165 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2\text{s})$ 。

模拟时，采用的激光光斑直径为 $\Phi 2.6 \text{mm}$ ，激光脉冲的半峰全宽(FWHM)为 8 ns，光斑搭接率为 50%，在面积约为 $7.8 \text{mm} \times 7.8 \text{mm}$ 的正方形区域内冲击加载，峰值压力为 1.5 GPa，冲击顺序如图 3(a)所示。已有研究表明^[13]，在约束模型下，约束层可以将冲击波压力脉冲宽度延长至激光脉冲宽度的 2~3 倍，则冲击波压力脉冲的半峰全宽约为 24 ns。根据冲击波峰值压力随时间的分布规律，模拟中采用的冲击波压力时程曲线如图 3(b)所示。

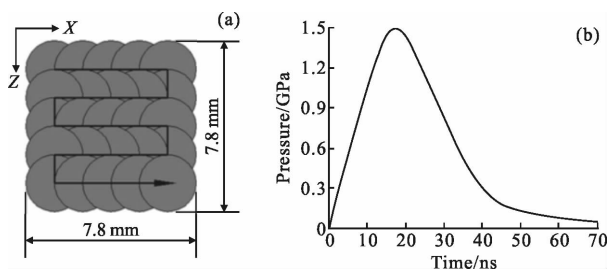


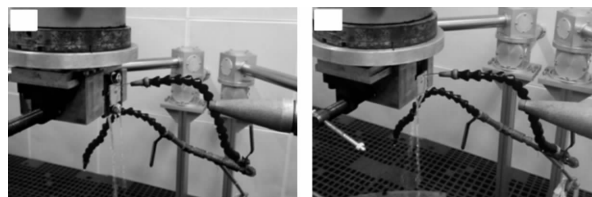
图 3 冲击顺序和加载曲线

Fig.3 Shocking sequence and loading curve

3 激光喷丸强化试验

采用线切割法直接从厚度为 2 mm 的 7075 铝合金板上切割出两个 $30 \text{mm} \times 30 \text{mm} \times 2 \text{mm}$ 的试样。首先分别用粒度为 1200# 和 2000# 的 SiC 砂纸将试样进行逐级打磨，用蒸馏水洗净，然后用乙醇去除试样表面的油污，再吹干。随后在试样表面贴上一层厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的专用铝箔作为吸收层，用厚度约为 2 mm 的流动水帘作为约束层。试验所用的激光器为调 Q 型 Nd:YAG 型激光器，频率为 1 Hz，波长为 1064 nm，其他参数与模拟时相同，单次脉冲能量为 2 J。在试验过程中，为了实现板料底部全约束，先用两个对称的紧固螺栓将试样固定于刚性夹具，再将夹具夹持在机械手的夹头上，如图 4(a)所示；对于板料两端夹持，可以直接用机械手的夹头轻轻夹住板料的侧面，如图 4(b)所示。喷丸强化时，通过控制机械手运动的

轨迹来实现图 3(a)所示的激光的冲击顺序和路径。



(a) 底面全约束

(b) 两端夹持

(a) Bottom fully constrained

(b) Both ends clamped

图 4 两种约束条件的试验方式

Fig.4 Two constraint conditions in experiments

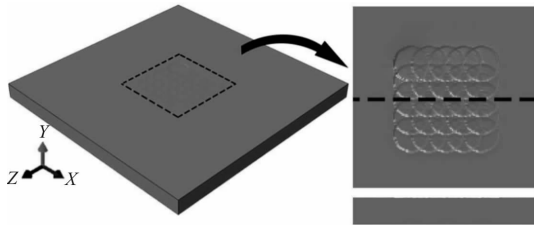
激光喷丸结束后，去除试样表面残留的铝箔，用 OLYMPUS DSX510 型超景深显微镜观察试样的表面形貌，试样的整体变形量使用 Almen 弧高测量仪测定。再使用 X-350A 型 X 射线应力仪测定试样表面方向上相应位置处的残余应力。测定方法采用侧倾固定 Ψ 法、交相关定峰法，设定的测试条件为管电压 20 kV，管电流 5.0 mA，Cr K α 辐射，准直管直径 1 mm，(422)衍射晶面， 2θ 角扫描范围 $130^\circ \sim 142^\circ$ ，其扫描步距 0.10° ，计数时间 1 s，应力常数 $-179 \text{MPa}/(^\circ)$ ， ψ 角为 $0^\circ, 24.2^\circ, 35.3^\circ, 45^\circ$ 。每个点上的残余应力测量三次，并取其平均值。

4 结果分析与讨论

4.1 表面形貌

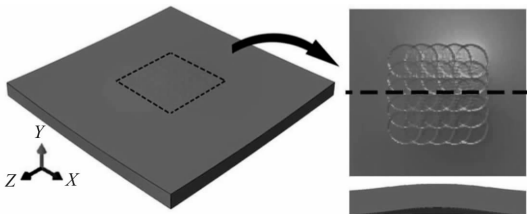
多点喷丸后，模拟得到试样的表面形貌(放大 50 倍)如图 5 所示。从图 5 可以看出，在两种边界约束条件下，冲击区域的表面皆产生塑性变形的微凹坑。在光斑搭接区域的变形更为明显，变形的深度较深，这是由于有些光斑搭接区域不仅受到两次冲击，还可能受到三次冲击，多次冲击诱导的塑性变形叠加使该区域的变形深度较深。从中间位置的截面图可知，当板料底部全约束时，喷丸后板料在厚度方向上没有发生明显的形变，仍然保持平整状态。而当板料两端夹持时，板料在厚度方向上整体发生了较为明显的凸起变形。这是由于激光诱导的冲击波与材料相互作用形成塑性凹坑的过程中，塑性凹坑附近材料向周围膨胀延展，发生拉伸塑性应变，从而产生驱动板料弯曲的弯矩^[14]。随着激光喷丸区域的增大，弯矩也逐渐增大，使板料被冲击区域发生了整体变形。当板料底部全约束时，弯矩由于模型边界条件的

限制作用而无法使其发生整体变形。



(a) 底面全约束

(a) Bottom fully constrained



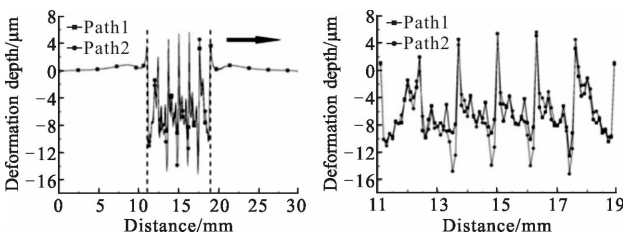
(b) 两端夹持

(b) Both ends clamped

图 5 冲击区域变形形貌

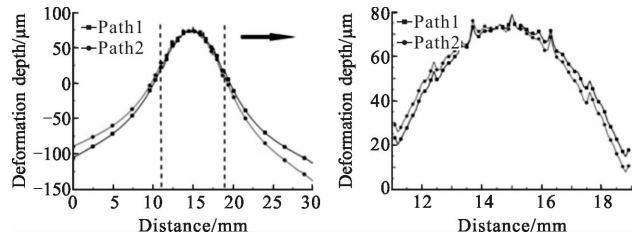
Fig.5 Deformation morphology of central impacted region

板料表面分别沿 X 方向和 Z 方向的变形深度曲线如图 6 所示。从图 6(a)中可以看出,在板料底部全约束条件下激光喷丸后,冲击区域内的微凹坑表面凹凸不平,沿 X 方向和 Z 方向微凹坑的最大变形深度分别约为 17.4 μm 和 20.9 μm 。从变形曲线的局部放大图中可以看出,在材料冲击区和非冲击区的交接处,存在微小的凸起变形,这是由于冲击区域内的材料受冲击波横向作用后向两边非冲击区塑性流动,但受到周围非冲击区域材料的阻碍,导致材料在两交接处产生凸起,但板料冲击区域周围仍然保持整体平整状态。由图 6(b)可以看出,当板料两端夹持时,板料表面沿 X 方向和 Z 方向均发生了整体凸起变形,冲击中心区域的变形最为显著,最大凸起变形量分别约为 187.2 μm 和 213.7 μm 。



(a) 底面全约束

(a) Bottom fully constrained



(b) 两端夹持

(b) Both ends clamped

图 6 取值路径处的表面变形深度

Fig.6 Surface deformation depth of measurement paths

图 7(a1)、(b1)和(a2)、(b2)分别为板料被冲击区域的表面形貌和三维微观形貌放大图。由图 7(a1)和(b1)可以发现,去除残余的吸收层铝箔后,在试样表面留有多个冲击凹坑组成的一个近似正方形的冲击区域,且冲击区域的表面非常光滑。从图 7(a2)和(b2)

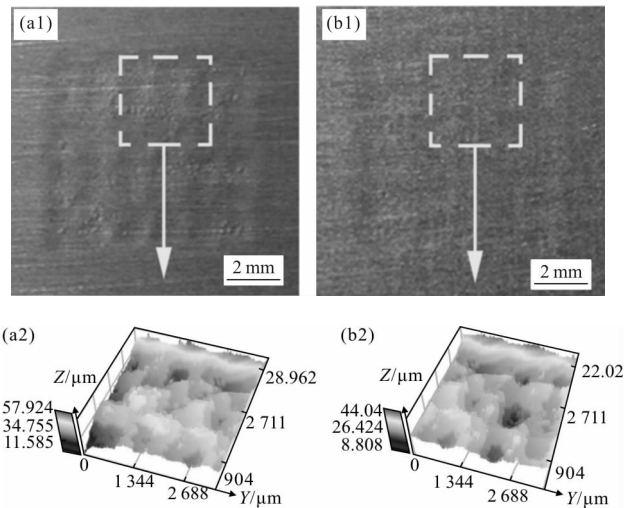


图 7 试样冲击区域的表面形貌和三维微观形貌放大图

((a1)~(a2)试样底面全约束;(b1)~(b2)试样两端夹持)

Fig.7 Surface morphology and magnified microscopic topography of the impacted region of the targets((a1)~(a2) bottom fully constrained; (b1)~(b2) both ends clamped)

所示的试样表面冲击区的局部三维微观形貌放大图中可以看出,冲击区域内大部分的凹坑变形深度较为均匀,在板料底面全约束的条件下,冲击凹坑的平均深度约为 23 μm ,接近于数值模拟的表面变形深度。板料在两端夹持条件下,冲击凹坑的平均深度约为 18 μm ,比板料底面全约束条件下的冲击坑的深度浅,这主要是由于冲击区域整体向上的凸起变形使冲击坑的深度变浅。试验测量值中,冲击区域内个

别凹坑的塑性变形深度较大,可能是激光器实际输出脉冲能量的不稳定,导致得在某些位置的能量输出值大于设定值,从而导致激光诱导冲击波的压力增大,使该位置的塑性变形深度较大^[15]。根据弧高测量仪测得激光喷丸后试样在 X 方向和 Z 方向的整体变形情况可知,底面全约束条件下板料基本保持平整状态,而两端夹持条件下板料在 X 方向和 Z 方向整体向上的最大变形高度皆为 0.2 mm 左右,与模拟结果较为吻合。

4.2 残余应力分布

激光喷丸后,板料表面的残余应力云图如图 8 所示。从图 8 可以看出,板料表面的残余应力云图均匀、层次清晰,冲击区域内为残余压应力,冲击区域外有幅值较小的残余拉应力。板料在两种边界约束条件下的表面最大残余压应力均位于冲击区域内,板料底部全约束和两端夹持时,最大残余压应力分别约为 299.0 MPa 和 251.6 MPa。对比图 8(a)和(b)可以看出,当板料底部全约束时,在板料中间形成近似正方形的应力分布区域;而当板料两端夹持时,在板料表面形成一个近似蝴蝶状的应力分布区域,参考文献[16]也报道了类似的结果。

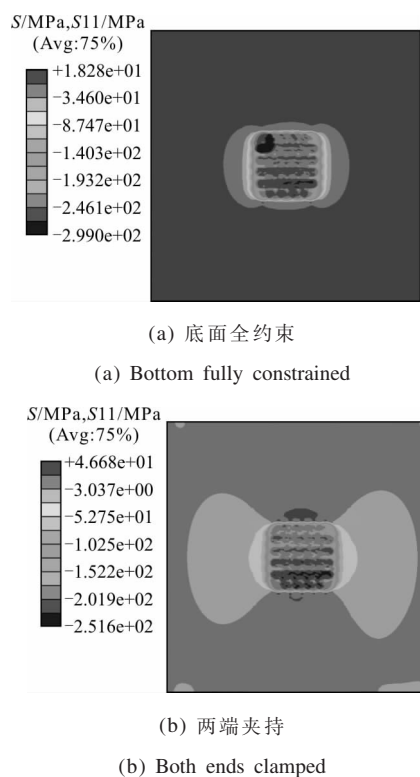


图 8 表面残余应力分布云图
Fig.8 Contours of surface residual stress distribution

板料厚度方向的残余应力分布如图 9 所示。由图 9 可以看出,两种不同约束条件下,最大残余压应力均出现在冲击表面,且残余压应力随着板料厚度的增加而逐渐减小。当板料底部全约束时,板料在厚度方向上的残余应力依次为压应力-拉应力,而当板料两端夹持时,残余压应力还存在于板料的下表面,

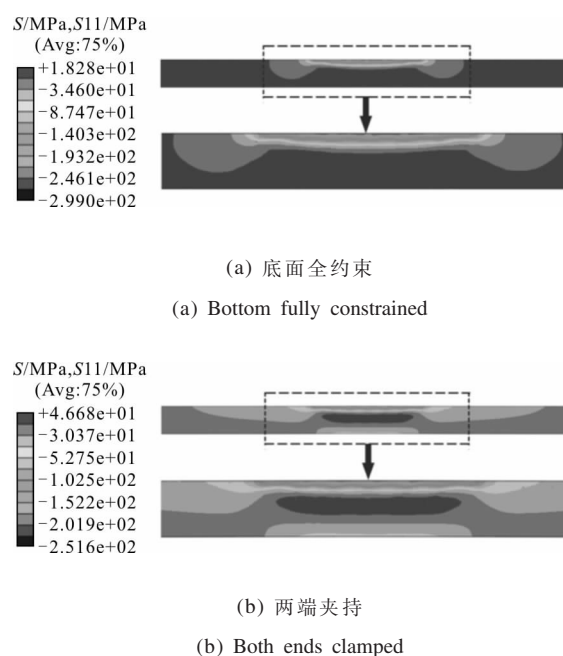


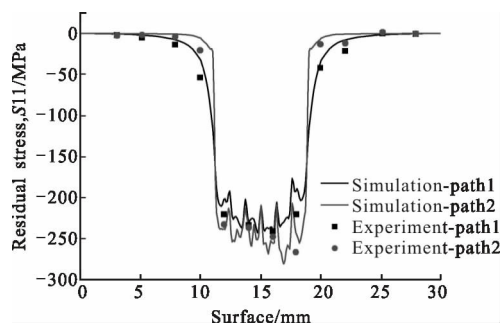
图 9 厚度方向残余应力分布云图

Fig.9 Contours of residual stress distribution along the thickness direction

其厚度方向的残余应力分布形式为压应力-拉应力-压应力。当激光诱导的应力波在板料内部传播时,其强度随传播的距离增加以指数形式的快速衰减,在极短的距离内衰减到材料的动态屈服极限以下^[9],弹塑性应力波转化为弹性波。当应力波传播到板料背面时,若背面与刚性垫块紧密接触,部分应力波会透射到刚性材料中,部分会反射回到材料内部继续传播,由于刚性材料的声阻抗较大,透射进入刚性物块的应力波强度远大于反射回板料内部的应力波强度。板料两端夹持时,板料的背面为自由面,应力波的绝大部分被自由面反射回板料内部而继续传播^[17]。由于试样的厚度较厚,激光诱导冲击波的峰值压力较低,因此应力波反射回板料内部是弹性应力波,其对先前在板料内部形成的应力场分布影响很小。在应力波和材料相互作用后,残余压应力只分布在板料的一侧,板料在厚度方向上受内力不平衡,有发生

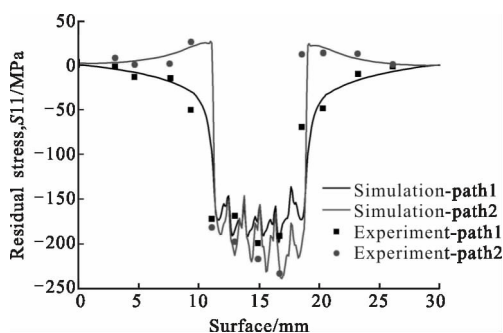
变形以维持自身平衡的趋势。当板料底部全约束时,其无法发生变形,残余压应力只分布板料的上表层。当板料底部为自由面时,不平衡的内力分布产生的弯矩使板料发生弯曲变形,板料上表面的残余应力值减小,同时板料下表面由于弯曲受压,也产生残余压应力。

板料表面分别沿 X 方向和 Z 方向的表面残余应力分布曲线如图 10 所示。由图可知,冲击区域内沿 Z 方向的残余压应力幅值均大于沿 X 方向的残余压应力幅值。当板料底部约束时,沿 Z 方向的表面残余压应力最大值为 280.6 MPa,大于板料两端夹持的 238.9 MPa。残余压应力值的幅值大,能有效地延缓疲劳裂纹的产生和扩展速度,延长零件的疲劳寿命;同时,两端夹持时,板料表面沿 Z 方向产生了抑制激光喷丸强化作用的残余拉应力。因此,板料底部全约束时激光喷丸强化效果更好。



(a) 底面全约束

(a) Bottom fully constrained



(b) 两端夹持

(b) Both ends clamped

图 10 取值路径处的残余应力分布

Fig.10 Residual stress distribution of measurement paths

5 结论

利用 ABAQUS 有限元分析软件对板料在不同边

界约束条件下的多点激光喷丸强化进行数值模拟,并结合相应条件下的试验结果研究边界约束条件对激光喷丸效果的影响。研究表明:在两种边界约束条件下板料经激光喷丸强化后,冲击区域的表面均产生塑性变形的微凹坑。当板料底部全约束时,板料未发生明显的形变,整体上仍然保持平面状态;而当板料两端夹持时,板料发生了整体的向上凸起变形。板料底面全约束时,板料中心冲击区域的应力分布呈近似正方形,厚度方向上的残余应力分布形式为“压应力-拉应力”;而板料两端夹持的冲击区域应力分布呈蝴蝶状,厚度方向残余应力分布形式为“压应力-拉应力-压应力”。在激光喷丸过程中,无论是底部全约束还是两端夹持,均能在板料表层诱导残余压应力,且板料在底部全约束条件下诱导的残余压应力值要高于两端夹持条件下的残余压应力值,前者强化效果更好。

参考文献:

- [1] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 736-740. (in Chinese)
孔德军,周朝政,吴永忠. 304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 736-740.
- [2] Zhang X Q, Li H, Yu X L, et al. Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate [J]. *Materials and Design*, 2015, 65: 425-431.
- [3] Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing [J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(6): 846-851. (in Chinese)
胡永祥,姚振强,胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. *中国激光*, 2006, 33(6): 846-851.
- [4] Kim J H, Kim Y J, Kim J S. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(7): 2025-2034.
- [5] Warren A W, Guo B Y, Chen S C. Massive parallel laser shock peening: Simulation, analysis, and validation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(1): 188-197.
- [6] Luo K Y, Lin T, Dai F Z, et al. Effects of overlapping rate on the uniformities of surface profile of LY2 Al alloy during massive laser shock peening impacts[J]. *Surface & Coatings*

- Technology*, 2015, 266: 49–56.
- [7] Zhang X Q, Chen L S, Li S Z, et al. Investigation of the fatigue life of pre-and post-drilling hole in dog-bone specimen subjected to laser shot peening [J]. *Material and Design*, 2015, 88: 106–114.
- [8] Li Jing, Li Jun, He Weifeng, et al. Microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy by laser shock peening with different impacts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2889–2895. (in Chinese)
李靖, 李军, 何卫锋, 等. TC17 钛合金激光多次冲击强化后组织和力学性能研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2889–2895.
- [9] Zhang Xingquan, Zuo Lisheng, Yu Xiaoliu, et al. Numerical simulation on attenuation of stress wave in copper target irradiated by intense laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 681–686. (in Chinese)
张兴权, 左立生, 余晓流, 等. 强激光诱导的应力波在靶板中衰减特性数值模拟 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 681–686.
- [10] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]//7th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541–547.
- [11] Peyre P, Sollier A, Chaieb I, et al. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2003, 23(2): 83–88.
- [12] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. *J Appl Phys*, 1990, 68(2): 775–784.
- [13] Hong X, Wang S B, Guo D H, et al. Confining medium and absorptive overlay: Their effects on a laser-induced shock wave [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1998, 29(6): 447–455.
- [14] Cao Ziwen, Zou Shikun, Che Zhigang. Bending deformation and surface characteristics of 2024 aluminum alloy processed by laser-induced shock wave [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 121405. (in Chinese)
曹子文, 邹世坤, 车志刚. 激光诱导冲击波加载下 铝合金弯曲变形规律与表面特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 121405.
- [15] Dai Mei, Jin Guangyong, Wang Chao, et al. 100MW high peak power and high beam quality Nd:YAG laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 612–616. (in Chinese)
戴梅, 金光勇, 王超, 等. 100MW 级高峰值功率高光束质量 Nd:YAG 激光器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 612–616.
- [16] Neila Hfaiedh, Patrice Peyre, Song H B, et al. Finite element analysis of laser shock peening of 2050–T8 aluminum alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 70: 480–489.
- [17] Wang Min. Principle & Technology of Anti-fatigue Manufacture [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999: 458–476. (in Chinese)
王珉. 抗疲劳制造原理与技术 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999: 458–476.