

平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验

余天宇¹ 戴峰泽¹ 张永康¹ 安中伟¹ Charles LOY² 张曙光¹ 王庆伟¹

(¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

²泰雷兹公司-激光解决方案部(法), 法国 Elancourt 78995)

摘要 对平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导的残余应力情况进行了有限元模拟与实验研究。改进了平顶光束诱导冲击波的压力分布模型,并将该模型用于残余应力场的有限元模拟。在实验室环境下获得了适合用于激光冲击的高质量平顶光束,并使用该光束进行激光冲击 2024 铝合金的实验,实验结果和模拟结果基本一致。研究发现平顶光束冲击 2024 铝合金有如下特点:存在一个阈值,当激光冲击波压力小于该阈值时,影响区内残余应力场近似均匀分布;当冲击波压力大于该阈值时会引起“残余应力洞”,但该“残余应力洞”内部近似均匀分布。在深度方向上,塑性影响深度和最大残余应力深度随激光冲击波压力的增加而增加。

关键词 激光技术;激光冲击处理;有限元分析;平顶光束;残余应力

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1003001

Simulation and Experimental Study on Residual Stress Field of 2024 Aluminum Alloy Induced by Flat-Top Laser Beam

Yu Tianyu¹ Dai Fengze¹ Zhang Yongkang¹ An Zhongwei¹ Charles LOY²

Zhang Shuguang¹ Wang Qingwei¹

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

² Laser Solutions Unit, Thales Optronique S.A. (France), Elancourt 78995, France)

Abstract Finite element simulation and experimental study on residual stress distribution of the 2024 aluminum alloy induced by flat-top laser shock are reported. Pressure distribution model of shock wave induced by flat-top laser beam is improved and applied to finite element simulation of residual stress field. High-quality flat-top laser beams, which are suitable for laser shock processing (LSP), are acquired and used for experiments of laser shock processing of 2024 aluminum alloy. The experimental results are consistent with the simulation results. The results show that the characteristics of flat-top laser beam shock processing of 2024 aluminum alloy can be concluded as follows. Residual stress distribution is almost even in the surface of impacted area of 2024 aluminum alloy when shock wave pressure is below a certain level; and once it exceeds this level, shock wave will produce residual stress hole, however, the distribution style is nearly equal. The results in the depth direction indicate that the impacted depth and the depth of maximum residual stress increase with laser shock pressure increasing.

Key words laser technique; laser shock processing; finite element analysis; flat-top beam; residual stress

OCIS codes 140.3300; 140.3390; 140.3430

1 引言

激光冲击处理(LSP)是随着激光技术逐渐发展

而兴起的一种先进的材料表面改性技术。高功率密度(吉瓦每厘米平方量级)、短脉冲(纳秒量级)激光

收稿日期: 2012-03-20; 收到修改稿日期: 2012-06-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50735001)资助课题。

作者简介: 余天宇(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光加工技术及设备自动化等方面的研究。

E-mail: yu_tian_yu@163.com

导师简介: 张永康(1963—),男,博士,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

辐照金属材料表面产生的高压冲击波作用在金属材料上使其表层发生塑性变形,在金属材料表面产生高水平的残余压应力,并形成密集、稳定的位错结构,从而显著提高金属材料的强度、抗疲劳寿命、耐磨和耐腐蚀能力^[1~4]。基模高斯光束是最常见的,也是较容易得到的激光能量分布形式,前人在激光冲击方面的实验研究也主要是基于能量高斯分布的激光^[5~8]。Peyre等^[1]指出:激光冲击波诱导的表面残余应力场主要取决于激光光斑形状,圆形光斑比方形光斑更容易产生“残余应力洞”(冲击区中心残余应力缺失);而“残余应力洞”的程度仅由冲击波压力决定。高斯光束诱导冲击波的压力在中心区域高于平均水平^[9],当提高激光功率密度,中心区域很容易因过大的压力形成明显的“残余应力洞”^[10],影响激光冲击效果。因此,探索更合适的激光能量空间分布形式对激光冲击强化是一项非常有意义的工作。

平顶光束是一类光能量空间分布有一均匀平顶区域的激光。可以通过对高斯光束空间整形的方法得到^[11],也可以利用激光器内部特殊的光谐振腔结构,例如超高斯函数反射镜腔或带梯度相位镜的光谐振腔^[12]产生。由于平顶光束能量分布均匀,能在靶材中产生平面性良好的冲击波^[13],因而与高斯光束相比,使用平顶光束进行激光冲击可能具有更大的优势。前人对平顶光束冲击强化方面的研究较少,尽管文献^[14]用平顶光束进行冲击处理方面的实验,但制造工艺和热透镜效应^[15]等因素导致固体激光器难以长时间工作在输出高能量、高质量平顶光束的状态,且该研究并未考虑光束平顶性对激光冲击处理的影响。本文提出了平顶光束诱导冲击波压力分布模型,设计并完成了高质量平顶光束激光冲击实验。通过有限元模拟(FEM)与实验相结合的方式,对平顶光束冲击 2024 铝合金诱导残余应力场进行研究。

2 理论模型

2.1 平顶光束诱导冲击波模型

Fabbro等^[3]对激光诱导冲击波进行了理论研究。利用质量守恒定律和能量守恒定律,理论推导出了可直接用于分析计算的一维解析模型 Fabbro 公式,并通过实验验证了该模型。Zhang等^[9,16]先后在 Fabbro 模型的基础上,提出了高斯型能量分布的激光冲击波压力分布模型。

Fabbro 公式能够较好的估计冲击波峰值压力,具有很强的实用价值。然而 Fabbro 模型假定激光

能量均匀辐照在靶材上的,而实际上即使是平顶光束,能量也不可能在整个辐照区域内均匀分布。使用恰当阶数的超高斯函数或平顶高斯函数描述实际的平顶激光束可能更合理^[12,17]。考虑激光能量密度分布对冲击波压力分布的影响,在 Fabbro 公式的基础上改进平顶光束冲击波压力分布模型。

对于横截面为圆形、能量对称分布的激光束,问题可简化为一维情况。平顶光束的场分布可描述为一维情形下的平顶高斯函数场分布^[12]

$$E(r) = E_0 \exp\left[-\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right] \times \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right]^n, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式中 E_0 为光斑中心处平顶激光光场量值, r_0 为平顶高斯光束的束腰宽度, N 为平顶高斯光束的阶数。当 $N = 0$ 时,平顶高斯光束退化为高斯光束。平顶高斯光束能量空间分布为

$$I_{\text{intensity}}(r, t) = E^2(r), \quad (2)$$

若考虑更一般的情况,关于时间、空间的 Fabbro 公式^[3,9]可描述为

$$P(r, t) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I(r, t)}, \quad (3)$$

式中 $P(r, t)$ 和 $I(r, t)$ 分别为 t 时刻距光斑中心 r 处激光冲击波压力的大小和激光功率密度, Z 为声阻抗, α 为热能与内能的比例系数。通常当材料介质确定, Z 和 α 可视作常数。

由于激光脉宽可视作常量,因此激光功率密度函数 $I(r, t)$ 与能量空间分布函数 $I_{\text{intensity}}(r, t)$ 成正比,与场分布的平方 $E^2(r, t)$ 也成正比,即

$$I(r, t) \propto I_{\text{intensity}}(r, t) \propto E^2(r, t). \quad (4)$$

由于激光诱导冲击波的压力与激光功率密度的平方根成正比,即与场分布 $E(r, t)$ 成正比,综合(1)、(3)、(4)式,得平顶光束诱导冲击波压力分布函数为

$$P(r, t) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0(t)} \times \exp\left[-\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right] \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right]^n = P(t) \exp\left[-\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right] \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right]^n \quad (5)$$

式中 $N = 1, 2, 3, \dots$, $P(t)$ 为 t 时刻冲击波中心压力, $I_0(t)$ 为平顶光束中心激光功率密度。在 Fabbro 公式适用范围内^[3], $P(r, t)$ 即为平顶光束诱导冲击

波压力分布模型。

2.2 有限元分析

有限元软件 ABAQUS 已成功应用于模拟材料在激光冲击波作用下诱导的残余应力场^[18~20]。激光冲击材料的过程是一个复杂的非线性动力学问题^[21]。模拟中使用 ABAQUS/Explicit 显式分析模块计算材料受应力波作用所产生的动力学响应,使用 ABAQUS/Standard 隐式分析模块计算材料的静态回弹过程。为使材料发生充分的塑性变形,需将显示算法的计算时间设置成大于激光诱导冲击波的持续时间。平顶光束诱导冲击波压力分布模型可由(5)式计算,为了更准确加载复杂冲击波压力场,在 ABAQUS 的用户自定义子程序 VDLoad 中进行二次开发。有限元分析的详细算法流程图如图 1 所示。

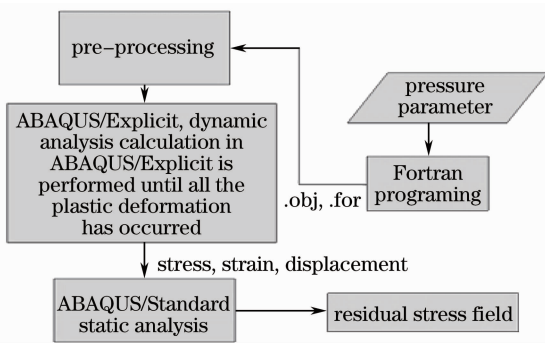


图 1 有限元模拟流程图

Fig. 1 FEM analysis procedure

2.2.1 模型建立及网格划分

由于二维轴对称模型已经可以较准确地模拟圆形、能量对称分布的激光冲击波诱导的残余应力场,并且能大大缩减计算数据量和耗时,故建立二维轴对称模型,如图 2 所示。采用有限元-无限元混合模型,模型中部为有限单元(CAX4R),是理想弹塑性的非线性接触单元,用于模拟中部受冲击区域,精确

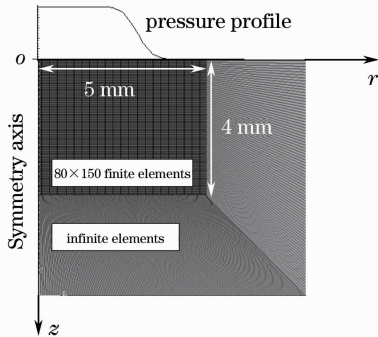


图 2 二维轴对称有限元-无限元混合模型

Fig. 2 Two-dimensional axisymmetric finite-infinite elements model

求解残余应力场;外侧为无限单元(CINAX4),是弹性单元,作为非反射边界,用于模拟边缘无反射效应。左侧为对称轴,底边作为轴向约束边界条件。模型尺寸为 5 mm×4 mm(模拟厚度大于 4 mm 的情况),单元数为 150×80,共 12000 个有限单元和 230 个无限单元。轴向、径向网格密度分别为 10~20 μm 和 60 μm。

2.2.2 材料力学性能

材料的动态特性对其残余应力场的形成有重要作用。材料在强激光诱导冲击波作用下的动态响应是一个高应变率冷塑性变形过程,其应变率高达 10^8 s^{-1} ^[22]。此时,冲击波对材料屈服强度的影响可用忽略温度效应的 Johnson-Cook 本构模型描述,其 Von-Mises 屈服应力表示为

$$\sigma_Y = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right], \quad \dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}, \quad (6)$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 代表应变率, ϵ 代表应变; A, B, C 和 n 为常数。2024 铝合金的基本材料参数如表 1 所示^[23]。

表 1 2024 铝合金的基本材料参数

Table 1 Basic material data of 2024 aluminum

Density / (g/cm ³)	Young's modulus / GPa	Poisson's ratio	A / MPa	B / MPa	C	n
2.77	73.1	0.33	369	684	0.0083	0.73

2.2.3 激光冲击波的加载

使用 Fortran 语言描述平顶光束诱导冲击波压力分布模型。一般地,当 $N \geq 5$ 时都能较好地描述平顶光束,本文计算取 $N=5$ 。激光脉宽为 10 ns,冲击波作用时间为激光脉宽的 2~3 倍^[3],近似认为冲击波加载时间为 30 ns。最后,利用 VDLoad 技术,将编译后的 Fortran 文件导入已建立好的有限元模型进行计算。计算得平顶光束冲击诱导残余应力场分布如图 3 所示。

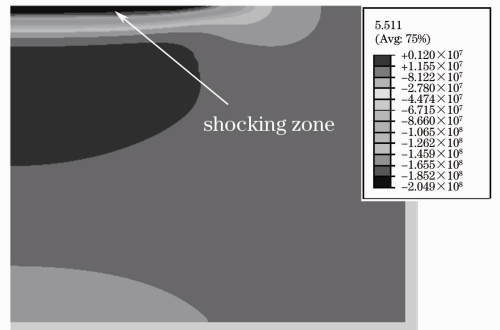


图 3 平顶光束诱导残余应力场分布

Fig. 3 Residual stress distribution induced by flat-top laser

3 实验研究

3.1 实验设备

Thales 公司(法国)研制的 GAIA-R 系列 Nd:YAG 固体脉冲激光器作为实验系统的激光光源。该激光器采用多模稳定谐振腔结构、普克尔晶体退压调 Q 工作方式。其主要技术参数为:输出为能量平顶分布光束,激光输出能量小于等于 12.2 J;能量稳定度小于等于 5.1 均方根(RMS)值;输出光斑直径约为 25 mm;中心波长为 1064 nm;激光脉宽(FWHM)约为 10 ns;发散角为 9.52 mm·mrad;最大重复频率为 5 Hz。

图 4 为平顶光束激光冲击实验系统的示意图。为精确控制激光冲击过程,实验系统在激光冲击处

理装置中增加了光电探测器、光束质量分析仪及与之匹配的光学元件(分光器、光衰减器)。保持聚焦透镜到 CCD 感光面的光程与到靶面的光程一致。光电探测器和 CCD 的信号输出口接入计算机,分析软件将显示当前用于激光冲击的激光能量时间、空间分布信息。为避免边缘衍射效应^[11],实验使用直径为 60 mm(大于光束直径 2 倍)的聚焦透镜。

高速光电探测器(Thorlab 公司),DET10A/M 型硅探测器,可响应波长范围为 200~1100 nm(包含了 Nd:YAG 的 1064 nm)。FireWire BeamPro 光束质量分析仪(PHOTON 公司),其 CCD 相机工作波长为 190~1100 nm。

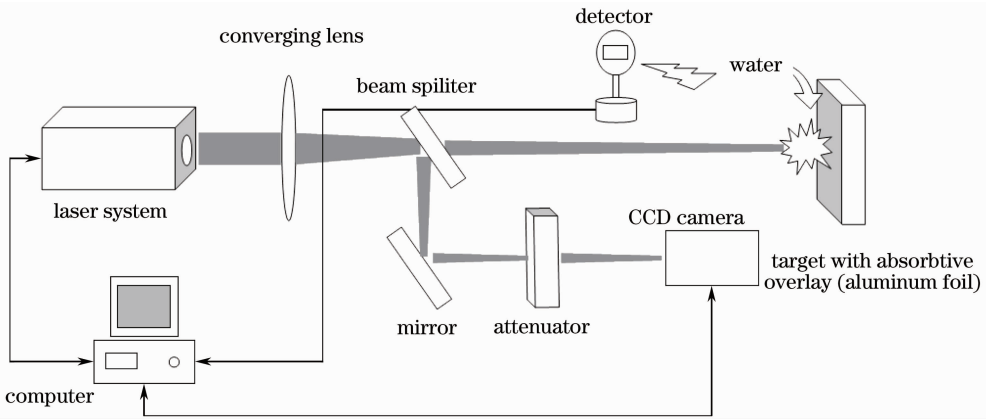


图 4 激光冲击实验系统结构图

Fig. 4 Configuration of laser shock processing experimental system

光束质量分析仪测量离焦位置处激光能量空间分布情况如图 5(a)所示。图 5(b)为 x 轴的能量分布情况,图中曲线 1 为光束质量分析仪在离焦位置上记录的激光能量分布情况,曲线 2 为平顶高斯函

数计算结果(经系数校正)。由于实测能量分布和平顶高斯函数曲线吻合很好,光束的平顶效果较好,可作为激光冲击实验光源。

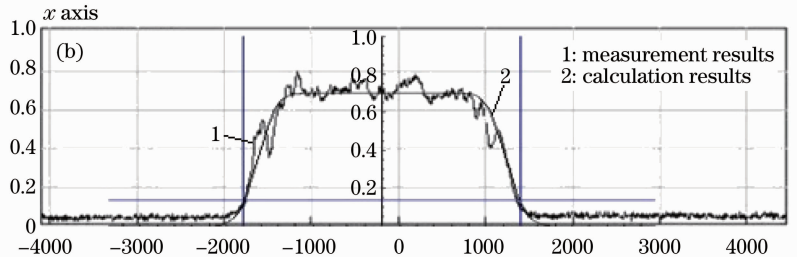
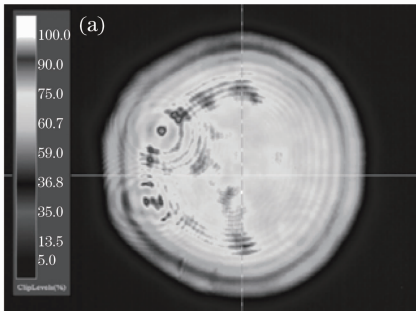


图 5 平顶光束的能量-空间分布情况。(a)离焦位置;(b) x 轴

Fig. 5 Energy spatial distribution of flat-top laser beam. (a) In the defocused position; (b) x axis

3.2 实验方法

把 2024 铝合金线切割加工成 40 mm×20 mm×5 mm 的小块。试样表面用 100~800 金相砂纸逐级打磨、乙醇冷风清洗吹干。铝箔作吸收层,厚度约

100 μ m,流水作约束层,厚度控制在 2 mm 左右。分别用功率密度为 3 GW/cm² 和 4 GW/cm² (根据 Fabbro 公式计算,冲击波压力约为 1.5 GPa 和 1.8 GPa)的平顶光束进行激光单次冲击实验。激

光冲击后试样冲击区形成较深的冲击凹坑,如图 6 所示。在光束质量分析仪的检测下进行平顶光束激光冲击实验。使用 X-350A 型 X 射线应力测量仪对成功实验的试样冲击区表面沿径向逐点地测量残余应力。

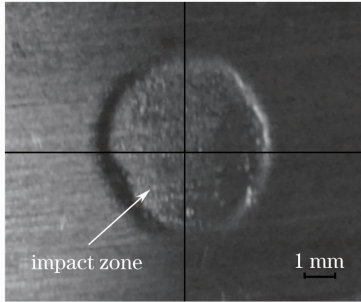


图 6 试样冲击区照片

Fig. 6 Impact zone after laser shocking

4 结果与讨论

4.1 残余应力模拟与实验

当加载的平顶激光冲击波中心压力为 1.5 GPa 和 1.8 GPa 时,2024 铝合金表面残余应力有限元模拟结果和实验结果如图 7 所示。

图 7 中,用平顶光束诱导冲击波压力模型的模拟结果与实验结果具有相似分布规律。模拟和实验结果均表明,当冲击波中心压力为 1.5 GPa 时,2024 铝合金冲击区表面残余应力近似均匀分布,残余应力水平的模拟结果和实验结果分别为 -183 MPa 和 -175 MPa;在冲击区外,模拟结果与实验结果也保持了较好的一致性,最大误差 35 MPa。当冲击波中心压力增大到 1.8 GPa 时,冲击区内的残余压应力水平略低于 1.5 GPa 时的水平,此时的冲击波压力使材料残余压应力的产生处于饱和状态。模拟残余应力分布也出现了类似的现象。

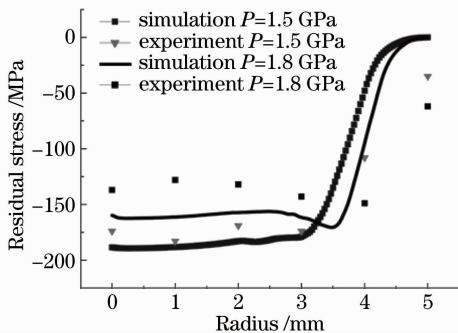


图 7 残余应力的模拟结果与实验结果的对比

Fig. 7 Residual stress comparison between simulation and experimental result

模拟结果与实验的误差,一方面在于实际平顶光束诱导激光冲击波的随机性,而所建立的模型只是它的期望值(平均值);另一方面可能因为实际的材料不可能是理想的各向同性介质,且任意位置的初始残余应力不可能全为零。此外,所建立的模型未考虑状态方程也可能是引起误差的原因。但总体来说,模拟结果能够较好地预测平顶光束冲击波诱导残余应力的实验结果。这说明所建立的平顶光束诱导冲击波模型是合理的,使用这种有限元方法能够较好地反映平顶光束冲击在材料中诱导残余应力场的情况。

4.2 残余应力演变规律

对不同功率密度的平顶光束冲击 2024 铝合金的有限元模拟结果见图 8。图 8(a)反映了材料冲击区表面残余应力场随冲击波中心压力的演变规律。在激光冲击波压力从 1.2 GPa 增加到 2.5 GPa 的过程中,材料冲击区表面残余应力始终存在一个均匀分布的区域。当冲击波压力约为 1.5 GPa 时,表面残余压应力水平最大,达到 -189 MPa,且分布均匀。当冲击波压力增大到 1.8 GPa 时,表面残余压应力水平略微下降,这可能是冲击波压力对材料残余压应力的产生出现饱和现象的临界水平,此时即使继续提高冲击波压力材料也不能发生更多的塑性变形,冲击波压力引起的表面稀疏波^[1,4,24]反而对残余应力场形成破坏。继续增加冲击波压力到 2.0 GPa、2.5 GPa,由于表面稀疏波的不断增强将形成破坏性的反向塑性变形,出现明显的“残余应力洞”,即冲击区域残余压应力峰值不出现在冲击区几何中心。平顶光束和高斯光束^[10,23]诱导材料表面残余应力场方面的特点如下:1) 高斯光束在冲击区域表面的残余应力分布符合中心区域大,周围小的总体规律;平顶光束冲击后形成的残余应力场则表现为明显的均匀分布特点。2) 当激光功率密度超过最佳冲击阈值后,高斯光束和平顶光束都会引起材料表层的“残余应力洞”,高斯光束形成的“残余应力洞”呈明显的尖峰状,这与平顶光束内部近似均匀分布的“残余应力洞”有很大区别。

图 8(b)为 2024 铝合金影响区中心处深度方向上残余应力分布演变情况。随着激光功率密度的提高,冲击波压力也将随之增大,冲击波的影响深度不断变深。当冲击波压力从 1.2 GPa 增加到 2.5 GPa 时,残余应力影响深度从 0.24 mm 增加到 0.63 mm。图 8(b)中,当冲击波压力由 1.8 GPa 增加到 2.5 GPa 时,残余压应力最大值不断变小,并向深处移动。

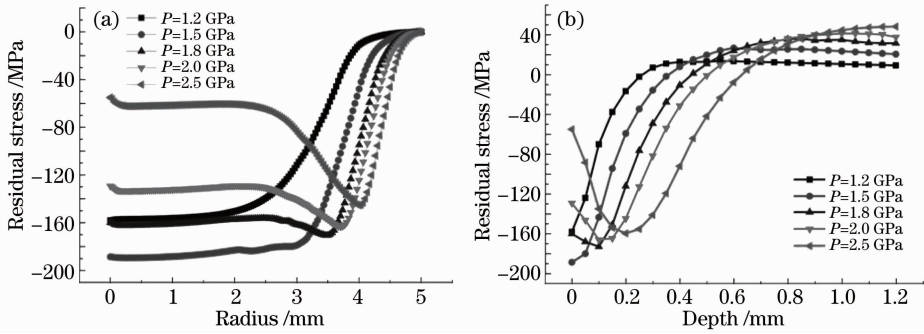


图 8 不同冲击波压力的模拟结果。(a)残余应力沿表面径向分布;(b)残余应力在深度方向分布
Fig. 8 Simulation results of different shock pressures. (a) Residual stress distribution in surface along radial direction; (b) residual stress distribution in depth

5 结 论

对平顶光束冲击处理 2024 铝合金的残余应力场进行了有限元模拟与实验研究,获得了下述结论:

1) 在 Fabbro 公式的基础上改进了平顶光束诱导冲击波的压力分布模型

$$\left\{ \begin{aligned} P(r,t) &= P(t) \exp\left[-\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right] \times \\ &\sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)r^2}{r_0^2}\right]^n, N = 1, 2, 3, \dots \\ P(t) &= 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0(t)} \end{aligned} \right.$$

2) 应用该模型对 2024 铝合金经平顶光束激光冲击后诱导的残余应力场进行有限元模拟,模拟结果与实验测量结果基本一致。验证了所建立的平顶光束诱导冲击波压力分布模型的合理性。

3) 研究中发现平顶光束冲击 2024 铝合金残余应力分布有如下特点:存在一个阈值(约为 1.8 GPa),当激光冲击波压力在这个阈值内,冲击区内残余应力场近似均匀分布;当冲击波压力大于这个阈值将在冲击区表面引起“残余应力洞”,但与高斯光束诱导的“残余应力洞”不同,这种“残余应力洞”内部分布也是近似均匀的。深度方向上,塑性影响深度和最大残余应力深度随激光冲击波压力的增加而增大。

鉴于平顶光束激光冲击诱导残余应力场的上述优点,在实际加工应用中,通过选择合适的激光能量参数能够在材料表面产生影响深度大,高水平且分布均匀的残余压应力场,提高激光冲击处理的效果。此外,有限元建模和分析的手段有助于探索优化激光冲击处理效果的方法。

参 考 文 献

- 1 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications[J]. *Opt. & Quantum. Electron.*, 1995, **27**(12): 1213~1229
- 2 C. S. Montross, T. Wei, L. Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 3 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 4 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien. Laser shock processing of aluminum alloys application to high cycle fatigue behaviour[J]. *Materials Science and Engineering*, 1996, **210**(1): 102~113
- 5 W. Zhang, Y. L. Yao. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: experiment, modeling and simulation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, **126**(1): 10~17
- 6 Y. K. Zhang, X. R. Zhang, X. D. Wang *et al.*. Elastic properties modification in aluminum alloy induced by laser-shock processing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, **297**(1-2): 138~143
- 7 B. S. Yibas, S. Z. Shuja, A. Arif *et al.*. Laser-shock processing of steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **135**(1): 6~17
- 8 Zou Shikun, Tan Yongsheng, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 371~373
- 9 邹世坤, 谭永生, 郭大浩 等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 371~373
- 9 W. W. Zhang, Y. L. Yao. Micro scale laser shock processing of metallic components[J]. *Journal of Manufacturing Scicene and Engineering*, 2002, **124**(2): 369~378
- 10 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2073~2079
- 11 姜银方, 来艳玲, 张磊 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2073~2079
- 11 Gao Yuhan, An Zhiyong, Li Nana *et al.*. Optical design of Gaussian beam shaping[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1464~1470
- 12 高琨含, 安志勇, 李娜娜 等. 高斯光束整形系统的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1464~1470
- 12 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 223~241

- 吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 223~241
- 13 Huang Xiuguang, Luo Pingqing, Fu Sizu *et al.*. Shockwave propagation stability in Al-Au impedance-matching target irradiated by high power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1832~1836
黄秀光, 罗平庆, 傅思祖 等. 激光驱动冲击波在铝金阻抗匹配靶中的传播稳定性[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11): 1832~1836
- 14 Y. F. Cao, Y. C. Shin, B. X. Wu. Parametric study on single shot and overlapping laser shock peening on various metals via modeling and experiments [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, **132**(6): 061010
- 15 An Jianzhu, Li Youkuan, Du Yangwan. Influence of laser window's thermal lensing effect on beam quality[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(4): 429~433
安建祝, 李有宽, 杜洋琬. 激光窗口热透镜效应对光束质量的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(4): 429~433
- 16 X. Q. Wu, C. G. Huang, X. Wang *et al.*. A new effective method to estimate the effect of laser shock peening [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, **38**(5): 322~329
- 17 M. Santarsiero, R. Borghi. Correspondence between super-Gaussian and flattened Gaussian beams [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, **16**(1): 188~190
- 18 K. Ding, L. Ye. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes[J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(5): 351~358
- 19 P. Peyre, I. Chaieb, C. Braham. FEM calculation of residual stress induced by laser shock processing in stainless steels [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2007, **15**(3): 205~221
- 20 Ni Minxiong, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. FEM simulation of residual stress field induced by laser shock wave based on ABAQUS[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 106~111
倪敏雄, 周建忠, 杨超君 等. 基于 ABAQUS 的激光冲击波诱导残余应力场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 106~111
- 21 Peng Weiwei, Ling Xiang. Residual stress field induced by laser peening a finite element analysis[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, **26**(6): 30~37
彭薇薇, 凌祥. 激光冲击残余应力场的有限元分析[J]. *航空材料学报*, 2006, **26**(6): 30~37
- 22 Zhou Nan, Qiao Dengjiang. Materials Dynamics under Pulse Beam Radiation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 13~18, 70~75
周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 13~18, 70~75
- 23 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Gu Yongyuan *et al.*. Numerical simulation and experimental investigation on laser shock processing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, **38**(12): 181~184
张兴权, 张永康, 顾永远 等. 激光冲击强化 2024-T3 铝合金的数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2007, **38**(12): 181~184
- 24 Hu Yongxiang. Research of the Numerical Simulation and Impact Effects of Laser Shock Processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. 76~80
胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. 76~80

栏目编辑: 宋梅梅