

激光冲击圆杆曲面诱导的残余应力数值模拟

张兴权, 纪看看, 王会廷, 戚晓利, 陈 彬, 童靳于, 方光武

(安徽工业大学 机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘 要: 采用有限元分析方法对激光冲击 2024 铝合金圆杆圆周曲面诱导的动态应力波及其残余应力进行了数值模拟。首先, 在 ABAQUS/Explicit 显式分析模块中模拟了峰值压力为 2 GPa 激光冲击波在 $\phi 16$ mm 杆中诱导的应力波的传播过程。随后, 在 ABAQUS/Standard 隐式分析模块中进一步计算在圆杆曲面上诱导的残余应力。在此基础上, 分析了圆杆直径的大小对应力波峰值衰减和残余应力分布的影响, 并进行了相关的试验验证。研究表明, 峰值压力为 2 GPa 冲击波在 $\phi 16$ mm 的杆中诱导的弹塑性的应力波, 应力波的峰值压力在 400 ns 时间内迅速衰减至 250 MPa。冲击后, 在距光斑中心小于 0.5 mm 冲击区域内分布不均匀残余应力, 在光斑中心处形成了残余拉应力, 轴向 S11 值为 42 MPa; 在半径为 0.5~1.5 mm 的冲击区域分布着残余压应力, S11 值大约在 250 MPa。应力波在传播过程中, 其压力峰值衰减的速率随着杆径的增大而减慢, 表面形成的残余压应力均随杆径的增大而增加。

关键词: 动态响应; 有限元分析; 曲面; 残余应力

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0706004

Numerical simulation of residual stresses induced by laser shock on the circumference surface of round rod

Zhang Xingquan, Ji Kankan, Wang Huiting, Qi Xiaoli, Chen Bin, Tong Jinyu, Fang Guangwu

(School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: The finite element method was employed to simulate the dynamic stress waves and residual stresses induced by laser impacting the cylindrical surface of round rod made of 2024 aluminum alloy. During simulation, the code ABAQUS/Explicit was firstly utilized to simulate the process of the stress wave propagation in the rod with the diameter 16 mm, which was induced by the laser shock wave with peak value 2 GPa. Subsequently, the other code ABAQUS/Standard was used to calculate further the residual stresses distributed in the cylindrical surface of rod. Based on the simulation results, the effects of the rod diameter on the attenuation of the peak pressure of the stress wave and the residual stress distribution were investigated. Corresponding experiments were carried out to validate the calculated results as well. The results indicate that the peak pressure of the stress wave induced by the 2 GPa shock wave decreases rapidly to 250 MPa within 400 ns in the round rod with diameter 16 mm. After laser

收稿日期: 2019-02-05; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51675002); 安徽省自然科学基金(1708085ME110); 安徽省重点研究与开发计划(201904a05020065); 安徽省高校自然科学研究(KJ2019A0084)

作者简介: 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: zhang20020313@163.com

shocking, an uneven residual stresses are distributed in central region of the impacted surface, and tensile residual stresses are formed at the center, where the value of residual stresses S_{11} reaches 42 MPa. While compressive residual stresses are formed in other impacted areas (radius from 0.5 mm to 1.5 mm), where the compressive residual stresses S_{11} are roughly 250 MPa. During the propagation of the stress wave, the decay rate of its peak pressure decreases with the enlarging rod diameter, and the compressive residual stresses distributed on the cylindrical surface increase with the increasing rod diameter.

Key words: dynamic response; finite element analysis; curved surface; residual stress

0 引言

轴类零件是机械装备中最常用的零件之一,其在使用过程中经常受到复杂循环载荷作用,如齿轮轴在使用过程中承受外载荷所引起的弯矩和扭矩等交变载荷的作用,在其表面形成交变的应力,且幅值达到最大。因此,在制造安全性能要求较高的轴类零件时,其表面不仅有较低的粗糙度等技术要求,而且常常对其表面进行强化处理,以消除切削过程中在其表面产生的有害拉应力以及由切削刀痕导致的表面加工缺陷,以延缓疲劳裂纹萌生及其扩展,延长零件的使用寿命,如:对飞机起落架表面进行喷丸强化处理,使其表层材料产生塑性变形,形成残余压应力,材料的硬度、屈服强度、抗疲劳特性等都得到了显著提高,防止其在使用过程中受到冲击载荷循环作用而过早失效^[1-2]。

激光冲击强化技术是近年来迅速发展的一项新型的表面改性技术,已开始应用于零件表面的强化^[3-6]。与传统的表面强化技术相比,激光冲击强化不仅能精确控制强化的位置和实施的强度,而且能产生较高的残余压应力值和较深的残余压应力层^[7],因而能显著提高零件抗疲劳和抗应力腐蚀的性能。目前,人们对激光冲击强化的研究主要集中在平面内激光冲击诱导的残余应力及其对疲劳寿命的影响,对曲面上的激光冲击强化涉足很少,因此人们对强激光在曲面上诱导的应力波的传播特性及其形成的残余应力的分布规律知之甚少。本课题组前期对激光冲击圆杆件进行了初步的研究^[8],但是冲击区域仅限于圆杆件的端面,本质上它仍然属于平面内激光冲击强化的范畴。

为了研究激光诱导的应力波在曲面体内的传播特

性,探讨曲率半径对残余应力分布的影响,文中以长度为 20 mm,直径分别为 $\varphi 12$ 、 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 、 $\varphi 24$ mm 的 2024-T351 铝合金圆杆件为研究对象,采用 ABAQUS 数值模拟软件研究了功率密度为 $2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$,光斑直径为 $\varphi 3$ mm 的激光束辐照在直径为 $\varphi 16$ mm 杆件圆周面上诱导的应力波的传播过程及其形成的残余应力,并比较了杆径对残余应力场分布的影响。研究结果不仅丰富了激光冲击强化理论,还为研究激光冲击强化其他不同材料(如高强钢)的轴类零件提供了参考。

1 激光冲击强化原理

在激光冲击强化过程中,为了提高对激光的吸收率,和避免激光直接辐照工件表面而造成表面材料的热损伤,需要在工件表面涂覆一层不透明的吸收层(如黑漆、铝箔等)。同时,为了延长激光诱导的冲击波作用时间,获得更高的峰值压力,需要在吸收层表面覆盖一层透明的约束层(如水、K9 玻璃等)。当高功率、短脉冲的强激光束穿过透明的约束层辐照在吸收层上时,吸收层材料吸收激光能量瞬间气化、电离产生高温高压的等离子体。高压等离子体迅速扩散产生的冲击波作用于工件表面,并产生向其内部传播的应力波。当应力波的峰值超过材料的动态屈服极限时,表层材料产生塑性屈服,并在表层形成一定深度的残余压应力场,从而使材料的抗应力腐蚀、抗疲劳性能都得到很大的提高。

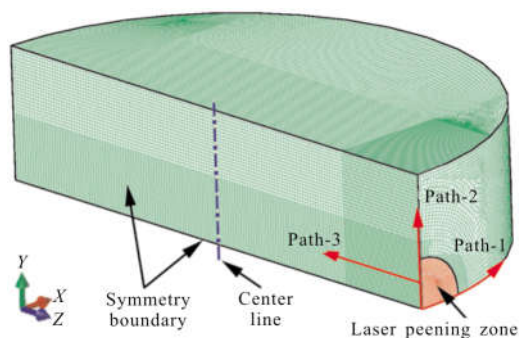
2 有限元分析

2.1 有限元模型及压力加载

在进行残余应力求解计算时,采用了 ABAQUS/Explicit 和 ABAQUS/Standard 两个求解模块。

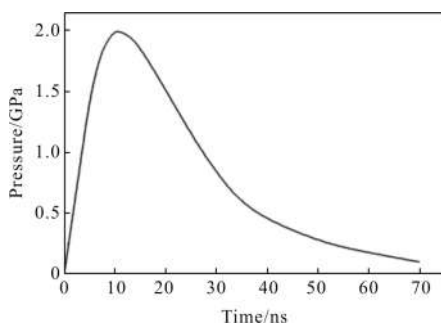
ABAQUS/Explicit 模块能够很好地模拟冲击、爆炸以及应力波传播过程等快速响应的过程,因此采用 ABAQUS/Explicit 模块对杆件在激光冲击作用下的动态响应过程进行了模拟。当材料内部的动态应力趋于稳定之后,将由 ABAQUS/Explicit 求解得到的动态应力及变形等结果导入到 ABAQUS/Standard 模块中进行动态应力的回弹分析,以获得稳定的残余应力场。两求解模块已被广泛用于预测激光冲击诱导的残余应力及变形^[9]。

在建立模型时,为了提高计算速度,节约计算时间,根据模型的对称性,用 ABAQUS 有限元软件建立了圆杆件的 1/4 几何模型,且在划分网格时采用不同的网格密度。激光冲击区域的网格尺寸为 0.05 mm,远离冲击区域的网格尺寸为 0.1 mm。采用的单元类型为 C3D8R。图 1(a)为直径 $\varphi 16$ mm 的圆杆件划分网格后的模型,图中红色区域为冲击波的加载区域,在 XOZ、YOZ 平面上施加对称约束的边界条件。



(a) 有限元模型

(a) Finite element model



(b) 加载曲线

(b) Loading curve

图 1 有限元模型和载荷曲线

Fig.1 Finite element model and loading curve

冲击波加载到曲面上上述的红色椭圆区域时,由于杆径较大,椭圆的面积和平面的圆形光斑的面积相差很小。与平面内光斑能量密度相比,曲面上椭圆光斑内的能量密度改变很小,因此仍然采用在平面中得到广泛使用的 R.Fabbro 等人建立的约束模型下峰值压力计算公式^[10]。在约束模型下激光诱导高压等离子体的压力峰值计算公式^[10]为:

$$P(\text{GPa})=0.01 \sqrt{\alpha/(2\alpha+3)} \cdot \sqrt{Z} \cdot \sqrt{I_0} \quad (1)$$

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

式中: α 为内能转化为热能部分的系数; I_0 为激光功率密度; Z 为折合声阻抗; Z_1 和 Z_2 分别为吸收层和约束层的声阻抗。文中采用的吸收层和约束层分别为黑色胶带和流水,激光功率密度 $I_0=2.34 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$,取 $\alpha=0.2$ ^[11], $Z_1=1.21 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $Z_2=0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[12]。由此可以计算出压力峰值 $P=2 \text{ GPa}$ 。根据试验中激光脉冲输出的能量时程曲线及相关的参数,所加载的冲击波压力时程曲线如图 1(b)所示。

2.2 材料的本构模型

激光冲击强化模拟中广泛采用材料的 Johnson-Cook 模型,该模型较好地描述了应变、应变率和温度等材料的动态屈服应力的影响。在激光冲击中,由于吸收层的屏蔽作用,使激光辐照产生的热量很难传给工件材料,同时作为约束层的流动水也带走绝大部分热量^[13]。因此,在冲击强化过程中,杆件材料受到的热影响较小,上述模型中的温度效应可以忽略不计,可采用简化的 Johnson-Cook 模型^[14]:

$$\sigma=(A+B\varepsilon^n)[1+C\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \quad (3)$$

式中: σ 为 Von Mises 流动应力; A 、 B 、 n 、 C 为材料常数; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。文中采用的材料为 2024-T351 铝合金,其 Johnson-Cook 模型中的参数值如下^[15]: $A=369 \text{ MPa}$, $B=684 \text{ MPa}$, $n=0.73$, $C=0.0083$, $\dot{\varepsilon}_0=1$ 。

3 模拟结果与讨论

3.1 动态应力

图 2 为采用 ABAQUS/Explicit 显式分析模块得到在不同时刻的动态应力分布云图。为了更好地观察应力波的传播过程,在后处理输出图像时,沿 XOZ 平面进行了镜像。由图 2 可以看出,在 33 ns 时,冲击载荷诱导的动态应力在加载区域的表层;在 100 ns

时,在加载方向上已产生了向材料内部传播的膨胀波,在冲击区域的圆周曲面上产生了沿光斑直径方向外部传播的瑞利波和向内传播的剪切波;在202 ns时,向光斑中心汇聚的剪切波也跟随膨胀波向材料内部传播,其剖面形状演化为一个八字形;在272 ns时,剪切波汇聚到冲击区域中心,其剖面形状演化为一个人字形;在351 ns时,剪切波完全汇聚到冲击区域中心;随后汇聚到一起的剪切波紧随膨胀波一起向材料内部传播。拉应力的剪切波从冲击区域周围的各个方向向光斑中心会聚,在中心处产生了一个较大的拉应力脉冲,使中点处附近的表面材料产生反向屈曲,产生了较大拉应力,它降低了初始冲击产生的压应力幅值,甚至使中心处为拉应力,产生了所谓的“残余应力洞”现象^[16]。

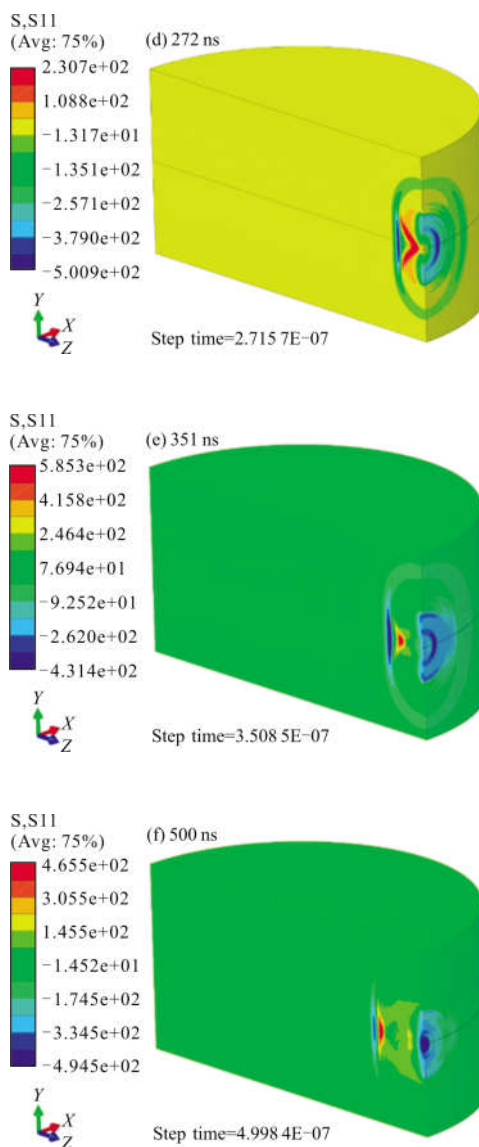
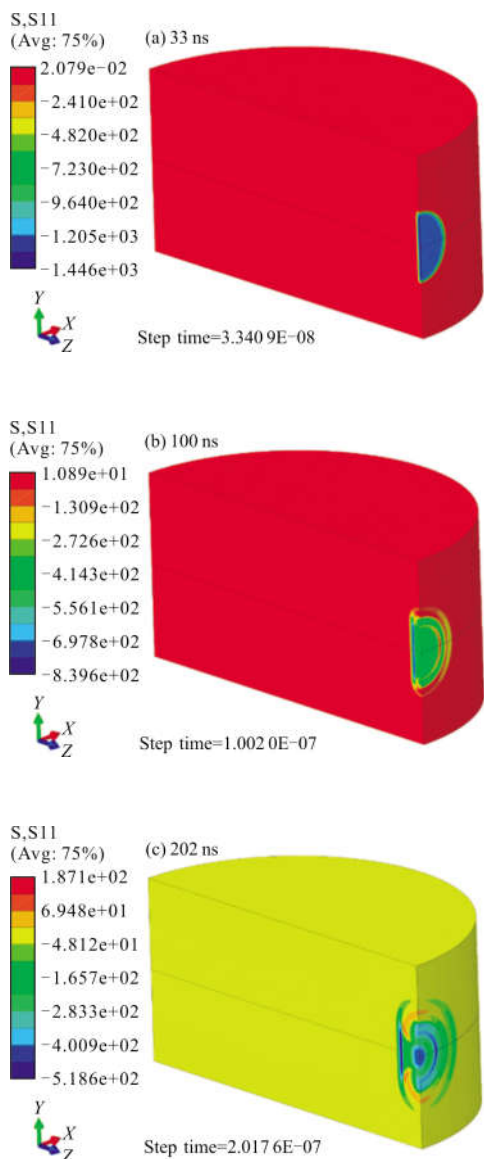


图 2 直径为 $\varphi 16$ mm 的圆杆件在不同时刻的应力分布云图

Fig.2 Contours of dynamic stress distribution in round rod with diameter of 16 mm at different times

图 3 为应力波在杆件径向(图 1(a)中 path-3, 距离光斑中心 1 mm 处)不同深度处的动态应力分布曲线。由图 2 和图 3 可知,在 33 ns 时,2 GPa 的冲击波在圆杆表面的诱导的动态应力峰值达到 1 440 MPa; 56 ns 时,压力峰值为 1 140 MPa; 在 398 ns 时,应力波的压力峰值迅速衰减到 250 MPa。这是由于应力波在材料内部传播时,材料内部参与运动的质点越来越多,应力波的能量密度随传播距离的增加而减小,导致了应力波的压力幅值也逐渐减小。将不同时刻的压力峰值连线,得到了应力波压力峰值的衰减

曲线,如图 3 所示。试验材料 2024 铝合金的静态屈服 σ_s 为 369 MPa,动态的屈服极限 σ_d 大约为其静态屈服 σ_s 的 1.7 倍,即动态的屈服极限大约为 627 MPa。当应力波压力峰值压力衰减至动态屈服极限以下时,材料不再发生塑性屈服,对照图 3,发现此阈值对应塑性强化的深度在 0.5 mm。这也是其他研究^[17]报道的激光冲击强化的塑性层仅在工件表层的原因所在。

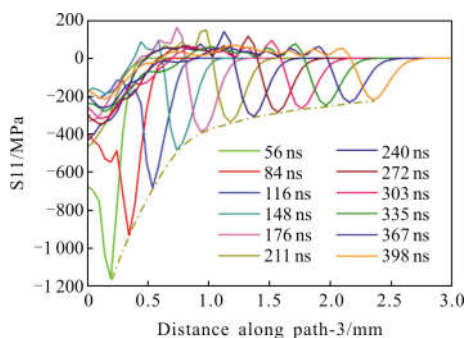


图 3 直径为 $\phi 16$ mm 的圆杆件在不同时刻的应力分布曲线
Fig.3 Distribution curves of dynamic stress in round rod with diameter of 16 mm at different time

为了探讨不同杆径对应应力波传播的影响,采用上述方法,分别对直径为 $\phi 12$ 、 $\phi 16$ 、 $\phi 20$ 、 $\phi 24$ mm 以及无限大的杆件进行了数值模拟,得到了不同直径中应力波峰值的衰减曲线,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,应力波压力峰值在材料内随传播距离的增加而迅速衰减,且杆径越大,应力波峰值的衰减速度越慢,当杆径无限大时,即冲击区域为平面时,应力波压力峰值衰减最慢。

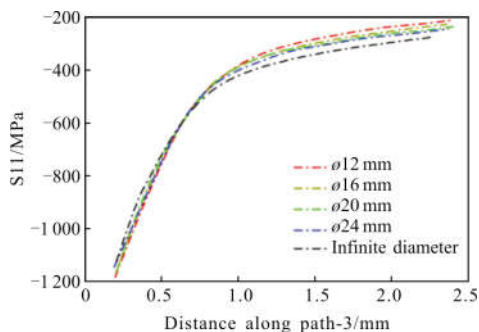


图 4 应力波峰值在不同直径圆杆中衰减曲线
Fig.4 Attenuation curves of the peak value of stress waves in round rods with different diameters

为了解释杆径大小对应应力波压力峰值衰减速率

的影响,对杆件沿光斑中心的横截面受力进行了分析,如图 5 所示。由于激光辐照产生的高压等离子体沿着曲面的法线方向喷发,因此加载的冲击波压力 P 垂直于杆件的表面,它在 X 和 Z 轴的方向上的两个分量为 P_x 和 P_z ,其中分量 P_z 产生了沿圆杆直径方向传播的膨胀波,而分量 P_x 是一对对称作用力,对材料产生压缩的作用,增大了材料内部粒子运动的阻力,从而加快了沿路径 3 传播的应力波峰值的衰减。显然,杆径越大,分量 P_z 越大,分量 P_x 越小,材料内部粒子运动的阻力就越小,应力波峰值的衰减速率也就越慢。

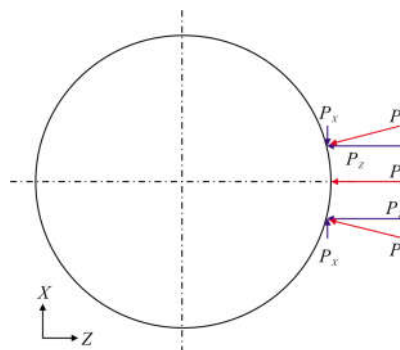
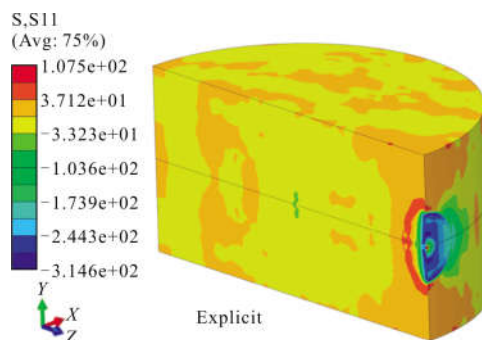


图 5 杆件横截面受力示意图

Fig.5 Schematic of pressure on the transverse section of rod

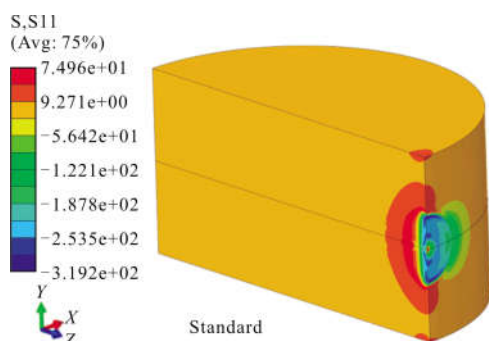
3.2 残余应力

在求解时间设置为 20 000 ns 时,杆件上的动态应力的幅值变化很小,趋于稳定,其分布的云图如图 6(a)所示。将上述的动态应力等导入到静态模块中进行回弹分析后得到的幅值不再变化的残余应力,其分布的云图如图 6(b)所示。由图可以看出,经过回弹分析之后,由于材料内部弹性应变能的释放,大部分冲击区域的表面应力有所减小,应力分布达到稳



(a) 显式动态分析

(a) Explicit dynamic analysis



(b) 隐式静态分析

(b) Standard static analysis

图 6 分布在直径为 16 mm 圆杆上的应力云图

Fig.6 Contours of stress distribution in round rod with the diameter 16 mm

定状态,残余应力S11 的最大值达到了 319 MPa。

同样,对不同杆径上的动态应力进行静态的回弹分析,通过后处理输出手段,得到了在不同杆径上残余应力分布曲线,如图 7 所示,其中输出路径 path-1、path-2 和 path-3 如图 1 所示,且 path-3 输出值为距离光斑中心 1 mm 处的残余应力值。

由图 7(a)可知,在 path-1 方向,在距离光斑中心 0.5 mm 冲击区域内,残余压应力较小,在光斑中心处出现了残余拉应力,S11 值达到 42 MPa;在冲击处的其他区域,存在着残余压应力,其随着杆径增大而增加。在距离光斑中心 0.64 mm 处,直径为 $\varphi 12$ 、 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 、 $\varphi 24$ mm 以及无限大的杆件上的残余压应力值最大,其 S11 值依次为 224、228、229、233、246 MPa。由图 7(b)可知,在 path-2 方向上,也存在着残余应力洞的现象;在距离光斑中心 0.6 mm 处,直径为 $\varphi 12$ 、 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 、 $\varphi 24$ mm 以及无限大杆件上的残余压应力 S11 的值分别为 251、261、264、261、280 MPa,残余压应力基本上也随杆径的增大而增大。在距 1.5 mm 处,不同杆径的残余应力趋于相等,达到了最大值 320 MPa,相比于平面激光冲击应力场的分布^[10],在应力场曲线在光斑边缘出现了尖点,可能是由于光斑内曲面最高处的母线(path-2 方向)受到急剧的压缩所引起的,确切的原因还有待于进一步研究。从图 7(c)可以看出,在 path-3 方向,在距光斑中心 1 mm 处,残余压应力值也随着杆径的增大而增加。在距离表面 0.15 mm 深度处,残余压应力值最大,分别为 228、233、239、247、278 MPa。

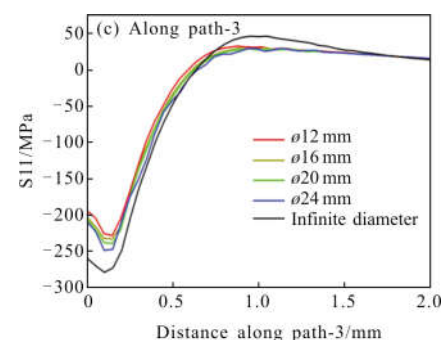
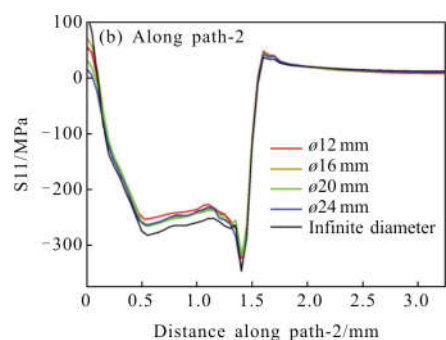
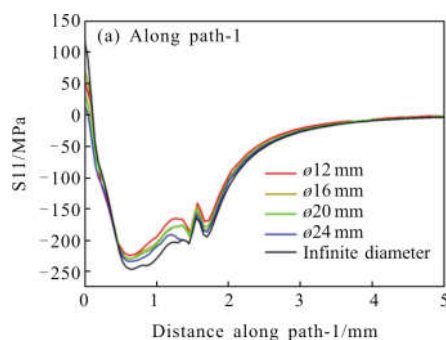


图 7 不同杆径上残余应力的分布曲线

Fig.7 Profiles of residual stresses in the rods with different diameters

根据前面图 5 分析可知,杆径变小,冲击波压力分量 F_x 增大,相互抵消导致应力波压力峰值衰减速率加快,应力波与材料相互作用的强度减小,产生的残余压应力值减小。假设使圆杆表层产生深度为 Δh 的塑性变形的能量为 ΔE ,激光光斑半径为 r ,圆杆半径为 R ,以光斑中心为截面,建立了的二维塑性影响区简化模型如图 8 所示,则冲击引起的塑性变形区域的夹角 $\theta = \arcsin(r/R)$,深度为 Δh 的塑性变形区域的环形面积约为 $A = 2\theta R \Delta h$,由此可得单位面积的能量密度为:

$$E_{\text{density}} = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta E}{2R\Delta h \arcsin(r/R)} \quad (4)$$

由此可知,对于不同直径的杆件,由于其几何形状的差异,将会对塑性变形区产生相应的影响。激光

能量相同时,圆杆直径越大,作用于相同深度的塑性变形区的能量密度就越大,产生的残余压应力值也就越高。

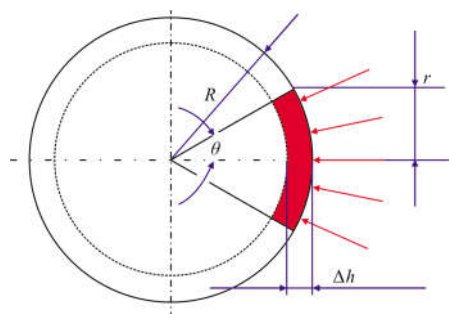


图 8 塑性影响区示意图

Fig.8 Schematic of plastically affected area

4 试验验证

在车床上将 2024-T351 的铝合金棒料加工成长度为 20 mm,直径分别为 $\varphi 12$ 、 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 、 $\varphi 24$ mm 的四种不同规格的圆杆件。由于在车削加工过程中切削力的作用往往会使圆杆件表面产生残余拉应力,这将会抵消由后续激光冲击产生的残余压应力的部分值,使冲击产生的残余应力值在测量时变小,产生系统误差。因此在激光冲击之前,先用粒度型号为 P1000 和 P2000 的金相砂纸对试样精车过的圆周表面进行打磨抛光,再用无水乙醇进行清洗、自然晾干。然后采用体积分数为 95 % 的 NH_4Cl 和 5 % 的 $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ 溶液对试样待冲击区域表面进行电解抛光 15 min,以消除由于车削和砂纸上磨粒微切削在圆周表面上所引起的残余拉应力,提高试验的准确性。由于冲击处理的区域是曲面,如果采用黑漆作为吸收层,涂覆的液态黑漆的流动会使吸收层厚度不均匀;如果采用 K9 玻璃作为约束层,固态的玻璃不能与杆件曲面很好地贴合,因此在冲击前,在试样表面粘贴一层厚度为 0.05 mm 的黑色专用胶带作为吸收层,它既保护试样表面材料不被激光烧蚀,同时也提高激光能量的吸收效率。装夹后,采用厚度约为 2 mm 的水流作为约束层。随后,采用脉宽为 23 ns,光斑直径为 $\varphi 3$ mm,功率密度 $2.34 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$,光斑内能量密度近似均匀分布的激光束分别对上述四种直径的试样进行激光冲击强化试验。在冲击时,脉冲激光诱导的冲击波峰值压力约为 2 GPa,以便将冲击得到的残

余应力值与数值模拟的结果进行直接比较。

试样冲击处理后,撕下其表面粘贴的吸收层胶带,并将试样用无水乙醇进行清洗,自然晾干。吸收层和试样的表面形貌如图 9 所示。从图 9 可以看出,激光辐照后,吸收层胶带的表面产生了烧蚀痕迹。由于吸收层的保护作用,圆杆表面没有被激光烧蚀的痕迹,但在冲击位置处留下了轮廓清晰的微凹坑。

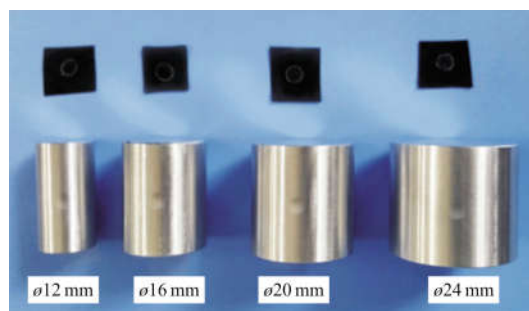


图 9 激光冲击后不同直径圆杆件的表面形貌

Fig.9 Surface morphology of round rod with different diameters after laser shocking

采用 X 射线衍射法测定试样表面的残余应力。测试时,X 射线衍射管的电压 26 kV、电流 6 mA,准直管直径 1 mm; $\text{CuK}\alpha$ 特征辐射,衍射晶面(422),扫描步距 0.1° ,计数时间 1 s,扫描起始角 133° 、终止角 140° 。由于 X 射线衍射法只能测量试样表面的残余应力,在沿着径向深度 path-3 方向上测量残余应力分布时,需要采用逐层电解抛光去除材料的方法。由于冲击处理的区域是曲面,在多次剥离抛光去除材料时,没有基准可依,因此很难保证去除材料沿着激光冲击的方向进行,从而导致测量的位置不准确,使测量结果出现较大误差。在沿着试样的 path-1 方向测量时,曲面会导致 X 射线的衍射角发生改变,这种曲壁效应也会导致较大的测量误差。因此在测量时,只测量了杆形件沿轴线 path-2 方向上的表面残余应力,测量结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出,激光冲击强化的效果明显,改变了表面的应力分布状态,在 0.5~1.5 mm 的冲击区域引入了较大幅度的残余压应力。在距中心 0.6 mm 处,直径为 $\varphi 12$ 、 $\varphi 16$ 、 $\varphi 20$ 、 $\varphi 24$ mm 的杆件的残余应力为压应力,S11 的测量值分别为 226、244、218、245 MPa,与数值模拟所得到的 251、261、264、261 MPa 相比,最大误差为 17.4 %。在加载的边缘处,测量值

与模拟值存在较大的误差,可能与确切位置有关。从总体来看,测得的数值分布在模拟拟合曲线的两侧。试验结果与模拟结果基本上是一致的,从而验证了模型的正确性,也间接验证了动态应力模拟结果的正确性。

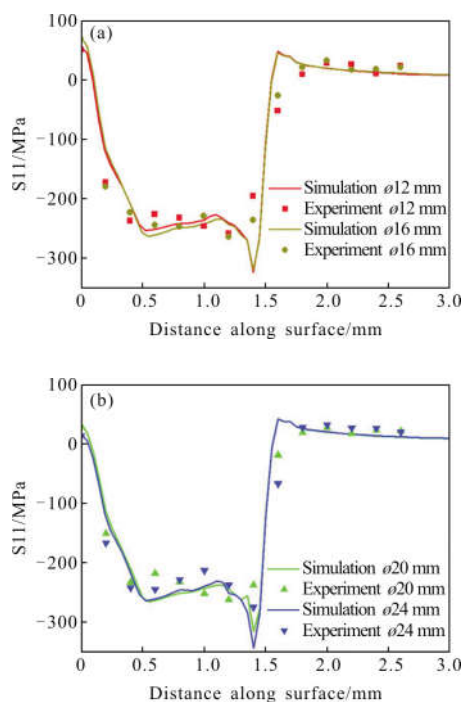


图 10 不同直径圆杆沿路径 2 的残余应力测量结果

Fig.10 Tested residual stresses for round rods with different diameters along path-2

试验研究也表明,激光冲击在圆杆曲面上诱导的残余应力分布曲线与平面的激光冲击诱导的残余应力分布曲线有着相似性。在冲击区内的诱导的残余应力分布不均匀,特别是光斑的中心处存在有害的拉应力,这种拉应力在强化过程中是不希望出现的,但它在单次冲击中无法避免。若在多点多次的大面积冲击强化,通过优化参数,合理安排相邻光斑的搭接率,依靠后续冲击产生的残余压应力能消除光斑中心的有害拉应力。

5 结 论

利用 ABAQUS 有限元分析软件对激光冲击强化 2024-T351 铝合金圆杆曲面诱导的应力波传播过程及残余应力进行了数值模拟,并进行了试验验证,得到如下结论:激光冲击在材料内部诱导应力波随

着传播距离的增大而迅速衰减,峰值压力为 2 GPa 冲击波在 $\phi 16$ mm 铝合金杆中诱导的应力波峰值在 400 ns 时间内迅速衰减至 250 MPa;应力波峰值衰减速率随着圆杆直径的增大而变慢。冲击后,在距光斑中心小于 0.5 mm 的区域内,残余应力分布不均匀,在光斑中心,分布着残余拉应力,S11 值为 42 MPa;在半径为 0.5~1.5 mm 的冲击区域分布着残余压应力,S11 值大约在 250 MPa。表面形成的残余压应力均随杆径的增大而增加。

参考文献:

- [1] Zhang Xingquan, Chen Liusan, Li Shengzhi, et al. Investigation of the fatigue life of pre-and post-drilling hole in dog-bone specimen subjected to laser shot peening [J]. *Materials and Design*, 2015, 88: 106-114.
- [2] Shen Xiaojun, Wang Cheng, An Zhibin, et al. Effects of oblique laser shock processing on rotary bending fatigue of aero-engine fan shaft [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3548-3553. (in Chinese)
沈晓骏, 汪诚, 安志斌, 等. 斜激光冲击对航空发动机风扇轴弯曲疲劳性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3548-3553.
- [3] Zhang Xingquan, Li Huan, Duan Shiwei, et al. Modeling of residual stress field induced in Ti-6Al-4V alloy plate by two sided laser shock processing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 280: 163-173.
- [4] 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.
- [5] Zhou Jianzhong, Wei Denghui, Huang Shu, et al. Microscale laser shock peening on TiN coatings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2679-2684. (in Chinese)
周建忠, 卫登辉, 黄舒, 等. 微尺度激光喷丸强化 TiN 涂层的表面性能[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2679-2684.
- [6] Xue Jun, Feng Jiantao, Ma Changzhen, et al. Influence of laser shock peening on microstructure and oxidation resistance of laser additive manufactured TC4 titanium alloy [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 198-205. (in Chinese)
薛军, 冯建涛, 马长征, 等. 激光冲击强化对激光增材 TC4 钛合金组织和抗氧化性的影响[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 198-205.
- [7] Zhang Xingquan, Chen Liusan, Yu Xiaoliu, et al. Effect of

- laser shock processing on fatigue life of fastener hole [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(4): 969–974.
- [8] Zhang Xingquan, Zhang Yan, Duan Shiwei, et al. Numerical simulation of dynamic response of round rod subjected to laser shocking [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0903009. (in Chinese)
张兴权, 章艳, 段士伟, 等. 圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0903009.
- [9] Huang Zhiwei, Zhang Xingquan, Zhang Yan, et al. Effect of boundary constraint conditions of thin plate on residual stresses and plastic deformation induced by laser shock peening [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0806009. (in Chinese)
黄志伟, 张兴权, 章艳, 等. 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 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0806009.
- [10] 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.
- [11] Zhang Wenwu, Yao Y Lawrence. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, 124 (2): 369–378.
- [12] Gao Huang, Ye Chang, Cheng Gary J. Deformation behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(5): 051011.
- [13] Graham Hammersley, Lloyd A Hackel, Fritz Harris. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34: 327–337.
- [14] Johnson Gordon R, Cook William H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48.
- [15] Ocaña J L, Correa C, García-Beltrán A, et al. Laser shock processing of thin Al2024–T351 plates for induction of through-thickness compressive residual stresses fields [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223: 8–15.
- [16] 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 A*, 1996, 210(1/20): 102–113.
- [17] Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, et al. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAl alloy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1766–1773. (in Chinese)
乔红超, 赵亦翔, 赵吉宾, 等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1766–1773.
- [18] Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(6): 931–936. (in Chinese)
陈瑞芳, 郭乃国, 花银群. 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2008, 35(6): 931–936.