

# 激光喷丸强化 IN718 合金孔周表面残余主应力分布特性

黄 舒, 王作伟\*, 盛 杰, 孟宪凯, 刘牧熙, 周建忠

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用 Abaqus 软件建立有限元模型, 分析了激光功率密度对孔周表面残余主应力分布的影响。进行了不同功率密度下的激光喷丸(LP)试验, 通过 X 射线应力分析仪测量了孔周区域特征点三个方向的残余应力值, 并计算了各点对应的主应力。结果表明, LP 之后孔周的残余应力呈现各向异性; 最小残余主应力可有效表征喷丸强化效果, 随着激光功率密度的提高, 最小残余主应力值减小。另外, LP 后小孔附近出现典型的残余压应力环, 最小残余主应力明显小于其他喷丸区域的; 当功率密度超过一定阈值时, 此环呈现远离孔壁的趋势。

**关键词** 激光光学; 激光喷丸强化; IN718 合金; 最小残余主应力; 激光功率密度

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0202004

## Characteristics of Residual Principal Stress Distribution on Surface around Hole of IN718 Alloy Subjected to Laser Peening

Huang Shu, Wang Zuowei, Sheng Jie, Meng Xiankai, Liu Muxi, Zhou Jianzhong

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

**Abstract** A finite element model is developed by Abaqus software to investigate the effect of laser power density on the residual principal stress distribution on the surface around the hole. Laser peening (LP) experiments under different power densities are conducted, and the residual stresses of feature points around holes are measured along three directions by X-ray diffraction stress analyzer, and the corresponding principal stress of each test point is calculated. The results indicate that the residual stress is anisotropic on the surface around the hole after LP. The minimum residual principal stress is an effective indicator to characterize the LP effect, which decreases with the increment of laser power density. In addition, a typical residual compressive stress ring occurs around the hole after LP, where the minimum residual principal stress value is obviously less than that in other peening zones. When the laser power density exceeds a certain threshold value, this ring has a tendency to be away from the hole wall.

**Key words** laser optics; laser peening; IN718 alloy; minimum residual principal stress; laser power density

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 350.3390; 350.3850

## 1 引 言

IN718 高温镍基合金是典型的航空材料, 在 650 °C 的高温环境下具有较高的屈服强度、力学稳定性和抗蠕变性能<sup>[1]</sup>, 广泛应用于航空航天领域。表面强化是提高产品服役寿命的有效手段, 通过在零部件表面引入有益的残余压应力来抑制疲劳裂纹的萌生, 从而提高零件抗疲劳性能。传统表面强化工艺包括机械喷丸<sup>[2]</sup>(SP)、深滚<sup>[3]</sup>(DR)等, 但这些工艺存在一定的局限性, SP 和 DR 诱导的残余压应力较小, 影响层深度也较浅, 难以应用于形状复杂的零部件。激光喷丸强化(LP)作为一种新型的表面强化工艺, 具有超高的应变率、

**收稿日期:** 2016-09-02; **收到修改稿日期:** 2016-10-25

**基金项目:** 国家自然科学基金(51405204)、中国博士后科学基金(2013M540417, 2014T70477)、江苏省博士后科研资助项目(1401065B)、江苏省大型工程装备检测与控制重点建设实验室开放课题(JSKLEDC201503)、江苏大学高层次人才启动基金(13JDG109)、江苏大学“青年骨干教师培养工程”资助项目(2016016)、江苏大学大学生科研立项资助项目(15A042)

**作者简介:** 黄 舒(1983—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事激光特种加工及材料疲劳特性方面的研究。

E-mail: huangshu11@sina.com

\* **通信联系人.** E-mail: wangzw1025@sina.com

优质的强化效果、易于实现自动化等特点,广泛应用于航空航天、车辆、船舶等重要领域。高能激光束透过约束层(水帘、K9 玻璃等)照射至靶材表面的能量吸收层(黑漆、铝箔等),靶材表面发生气电离,产生高压等离子体,等离子体受到约束层的约束发生爆炸产生高压冲击波,冲击波向靶材内部传播;当冲击波的峰值达到靶材的动态屈服强度时,零件表面发生塑性变形,形成有益的残余压应力分布。

然而,对零部件关键区域特别是小孔周围进行 LP 处理后,小孔周围的应力分布呈现奇异性。目前,已有学者对 LP 后小孔周围应力场分布进行了研究。Cuellar 等<sup>[4]</sup>研究了不同扫描路径下 Ti-6Al-4V 试样通孔周边区域孔壁附近深度方向的残余应力分布,发现环形喷丸路径在该方向的应力状态均为压应力,抗疲劳性能显著提高。Zhang 等<sup>[5]</sup>采用孔周表面环形 LP 路径,通过试验和数值模拟,对比研究了 LP 和钻孔工艺的先后顺序对 LY12CZ 铝合金试样紧固孔周边残余应力分布的影响。Achintha 等<sup>[6]</sup>对不同厚度的 7010-T7451 和 2024-T351 铝合金试样小孔周边区域分别进行了不同面积的 LP 处理,并结合有限元分析结果,对带孔试样的残余应力分布以及抗疲劳性能进行了研究。结果表明,15 mm 厚试样在冲击后的抗疲劳性能没有显著提高,而 5 mm 厚试样的孔周经局部 LP 处理后试样的抗疲劳性能有了大幅提升。

上述研究表明,孔周残余应力分布与带孔试样的抗疲劳性能密切相关,因此孔周残余应力分布特性的研究对准确预测零部件的服役寿命至关重要。然而,目前研究主要集中于 LP 处理后,孔周单一方向的残余应力分布,这不能准确地表征孔周残余应力分布特性。研究表明,特征点的主应力对应三个应力不变量,而应力不变量可以准确描述该特征点的应力状态<sup>[7]</sup>。关于 LP 后孔周产生的应力奇异性的研究鲜有报道。本文结合数值模拟与试验分析,研究了 LP 后孔周残余主应力的分布特性,同时讨论了激光功率密度对残余主应力分布的影响,揭示了小孔周边出现应力奇异性的内在机理,为后续研究 IN718 镍基合金单联中心孔试样的疲劳特性提供了理论参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料与尺寸

试验材料选用 4 mm 厚、热轧退火 IN718 板材,材料化学成分如表 1 所示,其部分机械性能参数为:密度 8.24 g/cm<sup>3</sup>,泊松比 0.3,弹性模量 204 GPa。试样加工采用线切割,单联中心孔标准矩形截面拉伸试样尺寸如图 1 所示。试样加工后,采用 SiC 砂纸对试样表面及侧面进行打磨,消除应力集中,随后将试样放置于盛有乙醇的超声波清洗机内进行清洗,并放入干燥箱烘干待用。

表 1 IN718 镍基合金化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition of IN718 (mass fraction, %)

Element	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Content	0.02-0.08	<0.35	0.35	<0.015	<0.015	17.0-21.0	50.0-55.0
Element	Mo	Nb	Ti	Al	Co	Cu	Fe
Content	2.80-3.30	4.40-5.40	0.65-1.15	0.30-0.70	<1.00	<0.30	Bal.

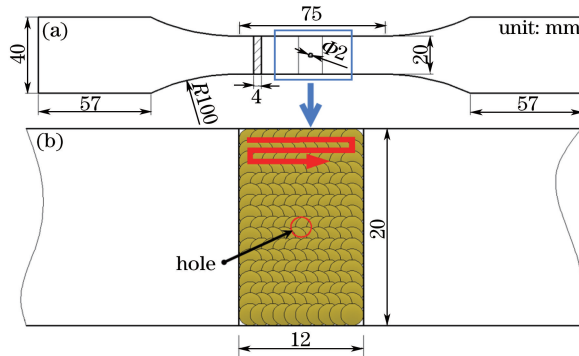


图 1 (a)带孔矩形截面拉伸试样尺寸;(b)LP 扫描方案示意图

Fig. 1 (a) Size of tensile specimen with rectangular section and center hole; (b) schematic diagram of LP scanning scheme

## 2.2 LP 试验

LP 试验采用 Nd:YAG 高功率激光器,试样喷丸区域尺寸为 12 mm×20 mm。激光工艺参数:激光波长为 1064 nm,脉宽为 20 ns,光斑直径为 2.2 mm,光斑搭接率为 50%,光斑能量分布为平顶分布,激光功率密度分别选取 6.05,6.58,7.37,8.73 GW/cm<sup>2</sup>,双面喷丸,选用美国 3M 公司 100 μm 厚的专用铝箔作为能量吸收层,约束层选用 1~2 mm 厚的水帘,喷丸区域大小以及扫描轨迹如图 1 所示。

## 2.3 残余应力测试

试样经 LP 处理后,采用加拿大 Proto 公司研发的 X 射线衍射应力分析仪对小孔周围进行残余应力检测,测试方案如图 2 所示。X 射线管选用 MnKα 辐射作为光源,该光在(3 1 1)晶面发生衍射<sup>[8]</sup>,X 射线管电压为 18 kV,管电流为 4 mA,布拉格角为 82.5°,弹性常数  $S_1$  和  $S_2/2$  分别为  $-1.56 \times 10^{-6}$  MPa<sup>-1</sup> 和  $6.50 \times 10^{-6}$  MPa<sup>-1</sup>。为研究孔周残余主应力的分布特性,对小孔周边区域三个方向的残余应力进行检测。如图 2 所示,对黑色测试点(5,6,7,8,13,14)进行 0°(x)和 90°(y)方向上的残余应力测试,其中 5 号点和 13 号点距离孔壁 3 mm,各点之间间隔为 1.5 mm;对红色测试点(1,2,3,4,9,10,11,12)进行 0°(x),45°和 90°(y)三个方向的残余应力测试,其中 1 号点和 9 号点距离孔壁 0.25 mm,相邻红点间隔为 0.5 mm,各个点的位置切换以及角度转变可通过工作台的移动和旋转来精确实现。

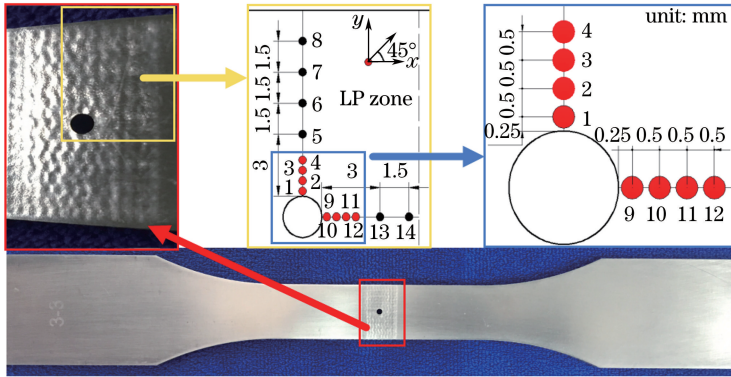


图 2 残余应力测量方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of residual stress measurement scheme

## 3 有限元建模及分析过程

### 3.1 模型建立

考虑到试样结构的对称性,建立 1/4 有限元简化模型,采用结构化网格划分方法,单元类型选择 C3D8R。为了节约计算成本及提高计算精度,对小孔周围进行规则化分块,并对小孔附近网格进行细化处理,单元尺寸设置为 125 μm,以获得较优的孔周应力应变结果,如图 3 所示。其他区域选择粗化网格,在模型边界布置稀疏种子,对称面处设定 XSYMM 和 YSYMM 两个对称边界。

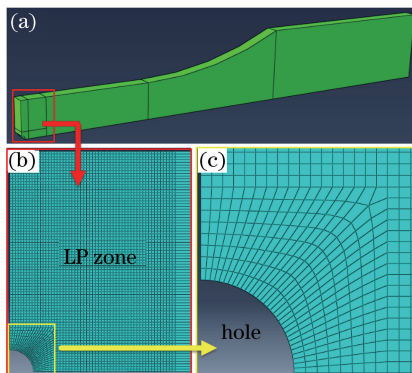


图 3 (a)1/4 简化模型;(b)喷丸区域网格划分;(c)小孔周边网格划分

Fig. 3 (a) 1/4 simplified model; (b) meshing at LP zone; (c) meshing around hole

### 3.2 材料本构模型

LP 工艺应变速率高( $10^6 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ ),为了准确模拟 LP 材料的动态响应过程,综合考虑加工硬化和应变率对材料塑性的影响,选择 Johnson-Cook(JC)模型为本构模型。该模型描述了流动应力与温度、应变、应变率之间的数学关系,广泛应用于 LP 过程的数值模拟<sup>[9]</sup>,即

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

式中  $\sigma$  为 Von Mises 流动应力;  $A$  为初始屈服应力;  $B$  为材料应变强化参数;  $n$  为硬化指数;  $C$  为材料应变率强化参数;  $m$  为材料热软化指数;  $\epsilon$ 、 $\dot{\epsilon}$  和  $\dot{\epsilon}_0$  分别为等效塑性应变、等效塑性应变速率和材料参考应变率( $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ );  $T$ 、 $T_r$  和  $T_m$  分别为温度、参考温度(室温)和材料熔点温度。在 LP 过程中,由于激光辐射至能量吸收层的时间极短,同时以水帘作为约束层,因此可以将 LP 视为冷加工,从而忽略温度对材料塑性变形的影响,将(1)式简化后可得

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)[1 + C\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)]. \quad (2)$$

LP 过程中 IN718 镍基合金的 JC 模型材料参数<sup>[10]</sup>如表 2 所示。

表 2 IN718 镍基合金的 JC 模型参数  
Table 2 JC model parameters of IN718 alloy

Parameter	A /MPa	B /MPa	n	C	m
Value	900	1200	0.6	0.0092	1.27

### 3.3 激光冲击波加载及其时间分布

法布罗压力估算模型可以准确地反映冲击波压力的变化过程,因而广泛运用于 LP 数值模拟中<sup>[11-13]</sup>,其峰值压力估算表达式为

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

式中  $\alpha$  为内能转化为热能的系数,取值 0.1;  $I_0$  为激光功率密度;  $Z$  为折合声阻抗,满足

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{water}}} + \frac{1}{Z_{\text{IN718}}}, \quad (4)$$

式中  $Z_{\text{water}} = 2.39 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,  $Z_{\text{IN718}} = 3.76 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ <sup>[14]</sup>。不同激光功率密度诱导的冲击波峰值压力如表 3 所示。

表 3 不同激光功率密度诱导的冲击波峰值压力

Table 3 Peak pressures of shock waves induced under different laser power densities

Laser power density /( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )	6.05	6.58	7.37	8.73
Peak pressure /GPa	2.91	3.04	3.22	3.50

冲击波压力加载曲线如图 4 所示。激光脉宽为 20 ns,由于约束层的作用,压力会持续 2~3 个脉宽时长<sup>[15]</sup>。

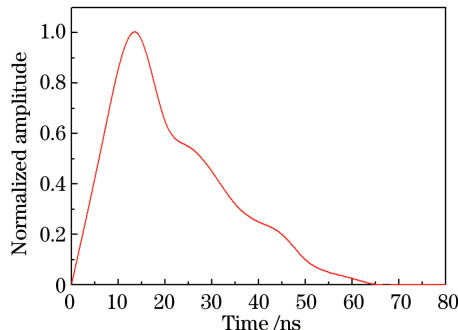


图 4 冲击波压力加载曲线

Fig. 4 Load curve of shock wave pressure



### 3.4 求解分析方法

在常规求解多点搭接喷丸中,需要针对单点喷丸需要进行一次显式求解和一次隐式求解,然后将试样的应力应变状态作为下一点喷丸求解的初始值,直到完成所有点的喷丸模拟,如图 5 中红色流程所示,该流程在喷丸点数较少的情况下容易实现,但对于大面积喷丸(喷丸点数较多),计算成本相当大且效率极低。为此,需要改进求解分析方法,在确保求解精度的前提下提高计算效率。采用图 5 中绿色流程所示的求解方法,对单点喷丸进行两次显式求解,第一次显式求解用于计算冲击波的传播和衰减,直至完成材料内部的所有塑性变形(时间步长为 5000 ns);第二次显式求解用于计算变形和应力场(时间步长取 500000 ns)<sup>[16]</sup>,使得材料内部的动能降低至接近初始状态的<sup>[17]</sup>,再进行下一点的计算,完成所有点的求解后,最终进行一次隐式求解以获得稳定的应力场。

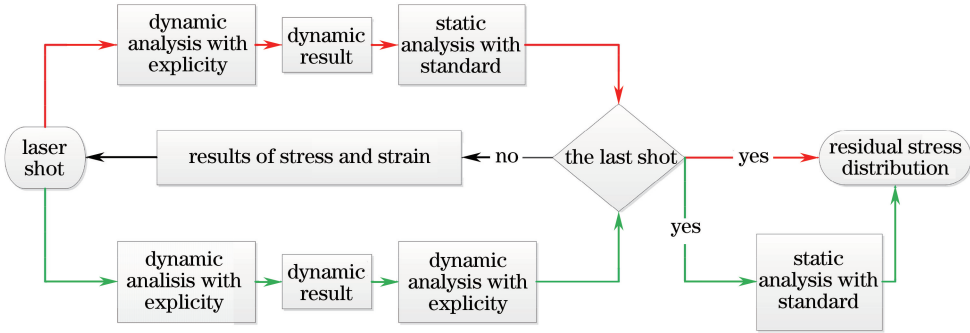


图 5 两种不同求解方法流程图

Fig. 5 Flow chart of two different solving methods

## 4 结果与分析

### 4.1 表面残余应力分布特性

当激光功率密度为  $6.05 \text{ GW/cm}^2$  时,单联中心孔试样的残余应力分布模拟结果如图 6 所示。由图 6(a) 可知,喷丸区域的表面残余压应力整体分布较均匀,同时由于材料内部的应力平衡,深度方向的中间区域出现了残余拉应力。图 6(b)、(c) 分别为喷丸区域 S11(平行于 CD) 和 S22(平行于 AB) 方向上的残余应力云

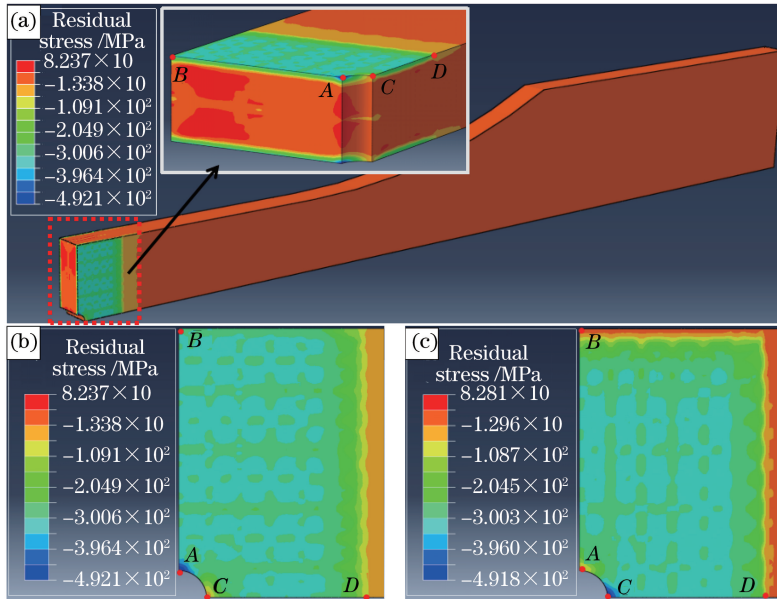


图 6 (a) 1/4 模型残余应力分布;(b) S11 方向残余应力分布;(c) S22 方向残余应力分布

Fig. 6 (a) Residual stress distribution of 1/4 model; (b) residual stress distribution along S11 direction; (c) residual stress distribution along S22 direction

图。可以发现,在不同方向上,孔周的残余应力分布存在各向异性。

在 AB 和 CD 路径上,沿 S11 和 S22 方向上的残余应力数值计算结果和试验结果的对比如图 7、8 所示。可以发现,数值计算结果和试验结果具有较好的一致性。点 A 沿 S11 方向的残余压应力值达 -492 MPa,而沿 S22 方向的值仅为 -25 MPa;点 C 沿 S22 方向的残余压应力值达 -490 MPa,而沿 S11 方向的残余压应力值仅为 -21 MPa。众所周知,在 LP 过程中,当高压冲击波作用于材料时,冲击波峰值压力大于材料动态屈服强度,引起材料发生不均匀塑性变形,产生高密度的位错等晶体缺陷,原子点阵受压产生畸变,在宏观上表现为一定的残余应力。同时,在高应变率加载下,材料发生绝热剪切滑移,在此过程中,应变硬化、应变率强化的交互作用也是材料产生残余应力的原因。试验所用试样存在通孔,对于点 A, S22 方向下侧由于缺少材料的约束和挤压, S22 方向的残余应力值很小,然而在 S11 方向上,点 A 受到左右两侧材料的双向多重挤压,因此残余压力值较大。可以发现,孔周区域(距离孔壁 2 mm 以内)各方向的残余应力值并不一致甚至出现较大差异,残余应力分布呈现各向异性,且越靠近孔壁差异越大。当给定坐标系变换时,每个应力分量也随之改变,这将增加对 LP 小孔试样残余应力分布特性研究以及强化效果评价的难度。

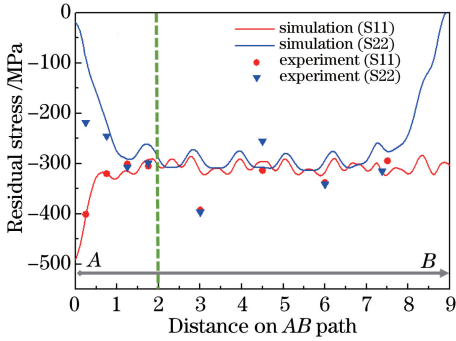


图 7 在 AB 路径上,沿 S11 和 S22 方向的残余应力分布  
Fig. 7 Residual stress distributions along S11 and S22 directions on AB path

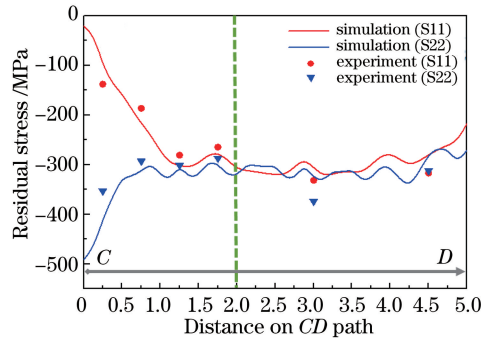


图 8 在 CD 路径上,沿 S11 和 S22 方向的残余应力分布  
Fig. 8 Residual stress distributions along S11 and S22 directions on CD path

任意一点均可找到三个相互垂直的主平面以及对应的主应力,当物体的形状和引起内力变化的因素确定时,主应力的大小和方向可以完全确定。此外,特征点的主应力对应着三个应力不变量,而应力不变量可以准确描述该特征点的应力状态。因此,可以通过 LP 后的残余主应力场来评价 LP 的强化效果。根据应力正负号规定,最小主应力是三个主应力的最小值,负值对应最大残余压应力,所以最小残余主应力可以用来表征 LP 的强化效果。图 9 为喷丸后的最小残余主应力分布云图。由图可知,在孔周出现了典型的残余压应力环,其颜色明显深于其他喷丸区域的,表明孔周附近出现了更大的残余压应力,最小残余主应力达 -490 MPa;而远离孔周区域其值约为 -300 MPa,孔周最小残余主应力提升了 163%,因此 LP 有利于增加带孔零部件的抗疲劳强度。

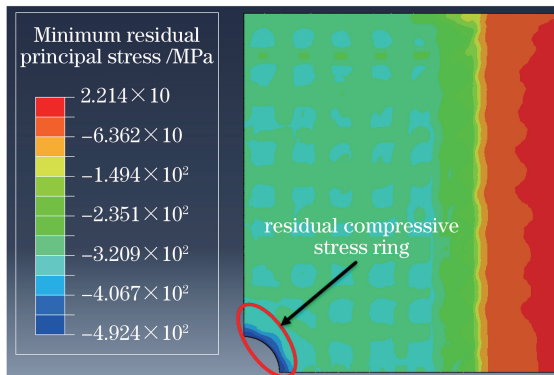


图 9 最小残余主应力分布云图  
Fig. 9 Cloud picture of minimum residual principal stress distribution

### 4.2 激光功率密度对残余主应力分布的影响

图 10、11 分别为不同激光功率密度下沿 AB 和 CD 路径的最小残余主应力分布的模拟结果。由图可知,最小残余主应力值出现在小孔附近,而在远离孔壁 2 mm 之外的其他喷丸区域,残余压应力分布相对平稳。不同功率密度下 AB 和 CD 路径上 2 mm 以外区域的最小残余主应力平均值如图 12 所示,当激光功率密度为 6.05,6.58,7.37,8.73 GW/cm<sup>2</sup> 时,最小残余主应力分别达到 -310, -360, -427, -502 MPa,可见最小残余主应力随激光功率密度的增加而增加。然而,小孔周围 2 mm 以内区域(对应残余压应力环位置)的最小残余主应力梯度则较大,下面着重对小孔附近 2 mm 范围内残余主应力进行研究,分析不同功率密度下残余主应力的分布规律及内在机理。

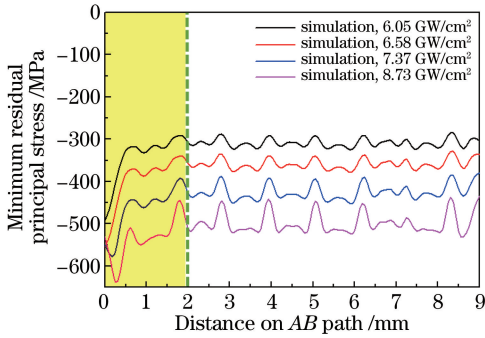


图 10 不同激光功率密度下,AB 路径上的最小残余主应力分布

Fig. 10 Distributions of minimum residual principal stresses on AB path under different laser power densities

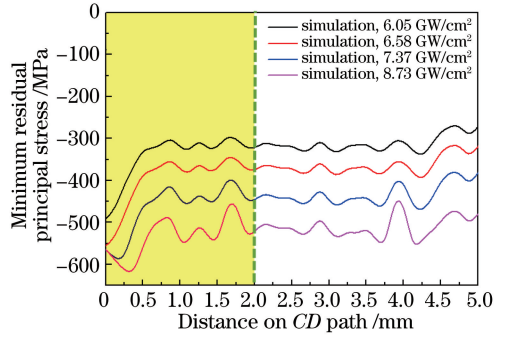


图 11 不同激光功率密度下,CD 路径上的最小残余主应力分布

Fig. 11 Distributions of minimum residual principal stresses on CD path under different laser power densities

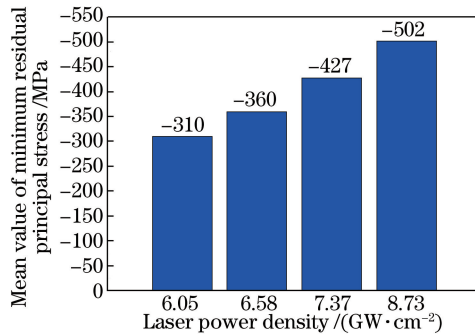


图 12 不同激光功率密度下的最小残余主应力平均值

Fig. 12 Mean values of minimum residual principal stresses under different laser power densities

利用 Proto X 射线衍射应力分析仪测量不同激光功率密度下各点(图 2 中点 1,2,3,4,9,10,11,12)在 0°,45°,90°三个方向上的残余应力值,具体测量结果如图 13 所示。

当试样内应力沿着垂直表面方向的应力梯度很小时,由于 X 射线的穿透深度很浅(约为 10 μm 数量级),可以假设试样表面为平面应力状态<sup>[18]</sup>。根据材料力学的平面应力分析,测得的每个点各个方向的残余应力值均满足<sup>[18]</sup>

$$\sigma_\alpha = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha - 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha, \quad (4)$$

式中  $\sigma_\alpha$  为法线与  $x$  轴成  $\alpha$  角的测量面的正应力; $\sigma_x$  和  $\tau_{xy}$  分别为法线与  $x$  轴平行的测量面上的正应力和切应力; $\sigma_y$  为法线与  $y$  轴平行面上的正应力。将同一点测得的三个方向的正应力值( $\sigma_{0^\circ}$ ,  $\sigma_{45^\circ}$  和  $\sigma_{90^\circ}$ )依次代入(4)式得到三个等式,联立可以求得对应的  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$  值。该点的两个残余主应力中最小主应力为<sup>[19]</sup>

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (5)$$

将前面不同点的三个方向的残余应力测量值代入(4)、(5)式,求得各点的最小残余主应力,计算结果如表 4 所示。

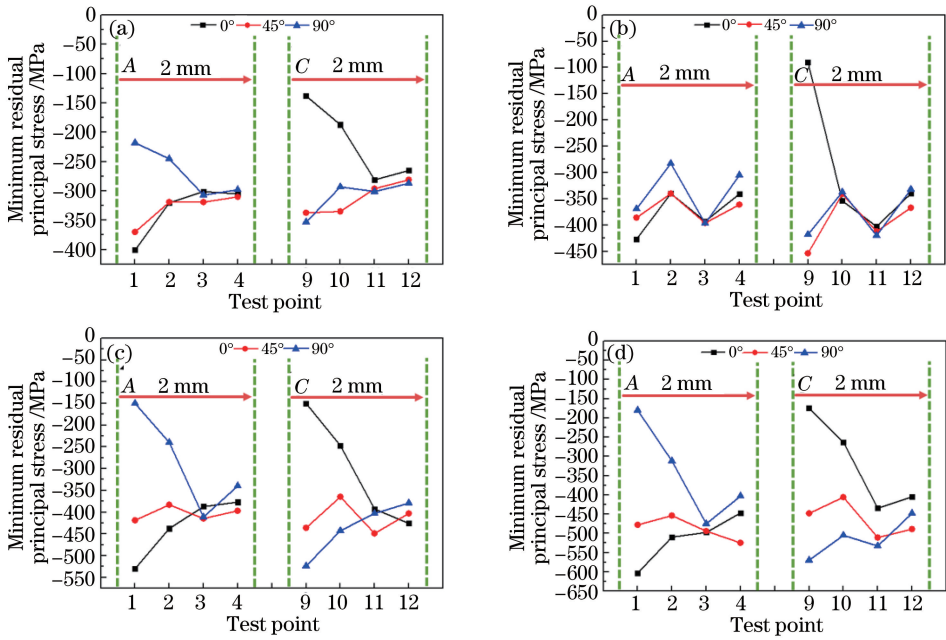


图 13 当激光功率密度为(a) 6.05 GW/cm<sup>2</sup>, (b) 6.58 GW/cm<sup>2</sup>,

(c) 7.37 GW/cm<sup>2</sup>, (d) 8.73 GW/cm<sup>2</sup> 时,0°,45°,90°方向的残余应力测量值

Fig. 13 Measured residual stress values along 0°, 45°, and 90° directions under laser power densities of (a) 6.05 GW/cm<sup>2</sup>, (b) 6.58 GW/cm<sup>2</sup>, (c) 7.37 GW/cm<sup>2</sup> and (d) 8.73 GW/cm<sup>2</sup>

表 4 不同点的最小残余主应力的计算结果

Table 4 Calculated results of minimum residual principal stresses at different points

Power density / (GW/cm <sup>2</sup> )	Minimum residual principal stress /MPa							
	1	2	3	4	9	10	11	12
6.05	-419	-335	-320	-311	-381	-349	-302	-288
6.58	-429	-352	-397	-365	-513	-355	-420	-367
7.37	-546	-447	-419	-401	-544	-445	-450	-426
8.73	-620	-519	-500	-527	-584	-507	-540	-493

测得的最小残余主应力值和模拟结果的对比如图 14、15 所示。可以发现,当激光功率密度较小时,表面最小残余主应力的最小值出现在孔壁位置,且其随着功率密度的增加而减小;当激光功率密度达到一定阈值时,表面最小残余主应力的最小值出现的位置开始偏离孔壁(即残余压应力环有远离孔壁的趋势)。由图可知,当功率密度为 7.37 GW/cm<sup>2</sup> 和 8.73 GW/cm<sup>2</sup> 时,AB 路径上最小残余主应力的最小值分别为

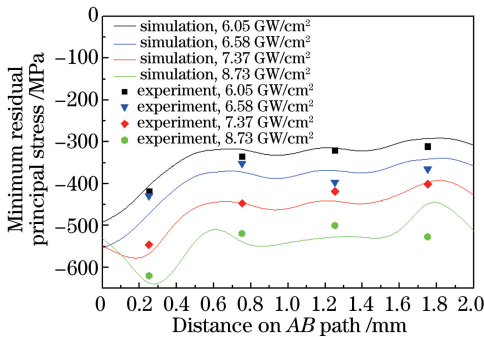


图 14 不同激光功率密度下,AB 路径的孔周最小残余主应力分布

Fig. 14 Distributions of minimum residual principal stresses on AB path under different laser power densities

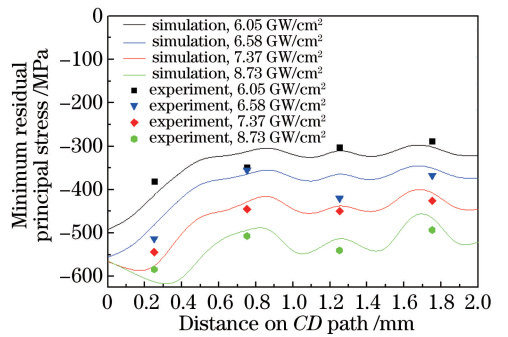


图 15 不同激光功率下,CD 路径的孔周最小残余主应力分布

Fig. 15 Distributions of minimum residual principal stresses on CD path under different laser power densities



-570 MPa和-640 MPa,最小值出现的位置分别距离孔壁约 0.2 mm 和 0.3 mm,CD 路径上也出现类似的偏离现象。表面孔壁位置处的最小残余主应力并不随着激光功率密度的增加而增加,当功率密度达到一定阈值时,其值稳定在-550 MPa 左右,说明随着功率密度的增加,LP 诱导的孔壁最小残余主应力的增加存在饱和效应。

为解释残余压应力环偏移现象,绘制不同功率密度下孔周残余主应力分布演变原理图,如图 16 所示。当孔周受到冲击压力作用时,冲击波压力峰值超过材料的动态屈服极限,使得材料发生塑性变形,而孔周区域径向内侧缺少材料的挤压,相比其他冲击区域发生了更为显著的塑性变形(图 16 中红色的区域),在紧贴孔壁处形成残余压应力环(图 16 中蓝色的区域)。一方面,功率密度越大,孔周的塑性变形越严重,获得的最小残余主应力水平也越高;另一方面,径向外侧有材料约束,使得孔周发生塑性变形时材料被挤压形成锐边,功率密度越大,锐边现象越显著,而锐边处的材料受到周边材料的约束与挤压较少,对应区域的最小残余主应力也就越低。上述两种机制是竞争关系,当作用的功率密度较小时,锐边现象不明显,孔周区域较大的塑性变形主导着残余主应力分布,此时残余压应力环紧贴孔壁;当作用的功率密度超过一定阈值时,锐边现象开始主导残余主应力分布,使得靠近孔壁处的最小残余主应力水平变低,从而出现残余压应力环远离孔壁的趋势。

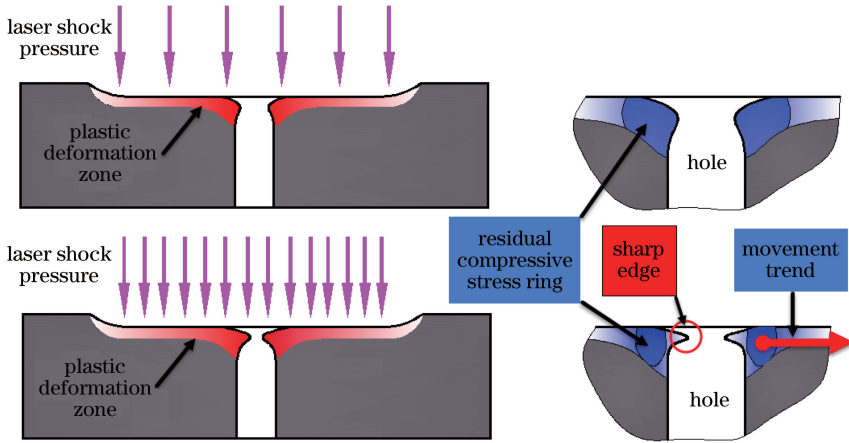


图 16 不同功率密度下,孔周残余主应力分布演变原理图

Fig. 16 Schematic diagram of distribution evolution of residual principal stress around hole under different laser power densities

## 5 结 论

利用 Abaqus 有限元分析软件建立了数值模型,分析了 LP 后带孔试样的残余应力分布。通过 X 射线衍射应力分析仪测量了喷丸区域孔周多个方向的残余应力值,并计算了对应点的主应力,得到如下结论:

- 1) LP 后小孔周边区域表面的残余应力呈现各向异性,且越靠近孔壁位置,应力梯度越大;
- 2) 由于孔周残余应力分布存在各向异性,选用喷丸区域的最小残余主应力表征 LP 的强化效果。远离孔壁 2 mm 以外的喷丸区域最小残余主应力分布相对平稳,而孔周 2 mm 内区域发生了较大塑性变形,出现明显的残余压应力环;
- 3) 孔周最小残余主应力随着激光功率密度的增加而增大,当功率密度超过一定阈值时,最小残余主应力的最小值出现的位置向远离孔壁方向偏移,即残余压应力环呈现远离孔壁的趋势。

## 参 考 文 献

[1] Jeong D H, Choi M J, Goto M, *et al.* Effect of service exposure on fatigue crack propagation of Inconel 718 turbine disc material at elevated temperatures[J]. *Materials Characterization*, 2014, 95: 232-244.

[2] Liu Y G, Li H M, Li M Q. Characterization of surface laser in TC17 alloy treated by air blast shot peening[J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 120-126.

[3] De Mello J D B, Goncalves J L, Costa H L. Influence of surface texturing and hard chromium coating on the wear of



- steels used in cold rolling mill rolls[J]. *Wear*, 2013, 302(1-2): 1295-1309.
- [4] Cuellar S D, Hill M R, Dewald A T, *et al.* Residual stress and fatigue life in laser shock peened open hole samples[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 44: 8-13.
- [5] 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]. *Materials & Design*, 2015, 88: 106-114.
- [6] Achintha M, Nowell D, Fufari D, *et al.* Fatigue behaviour of geometric features subjected to laser shock peening: Experiments and modelling[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 62: 171-179.
- [7] Wang Zhongren, Yuan Shijian, Hu Lianxi, *et al.* *Fundamentals of elasticity and plasticity*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 7-16.  
王仲仁, 苑世剑, 胡连喜, 等. *弹性与塑性力学基础*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 7-16.
- [8] British Standards Institution. BS EN 15305:2008 Non-destructive testing-test method for residual stress analysis by X-ray diffraction[S]. London: BSI Group, 2008.
- [9] Rule W K, Jones S E. A revised form for the Johnson-Cook strength model[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(8): 609-624.
- [10] Zhou Z, Gill A S, Qian D, *et al.* A finite element study of thermal relaxation of residual stress in laser shock peened IN718 superalloy[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(7): 590-596.
- [11] Zhou Z, Bhamare S, Ramakrishnan G, *et al.* Thermal relaxation of residual stress in laser shock peened Ti-6Al-4V alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(22): 4619-4627.
- [12] Zhang X Q, Li H, Duan S W, *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.
- [13] Wang Changyu, Luo Kaiyu, Lu Jinzhong. Effect of advancing direction on residual stress fields of AM50 Mg alloy specimens treated by double-sided laser shock peening[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0303002.  
王长雨, 罗开玉, 鲁金忠. 双面激光喷丸条件下冲击前进方向对 AM50 镁合金试样残余应力场的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0303002.
- [14] Pan Yinghui, Liu Yanbin, Dai Fengze, *et al.* Experimental investigation and finite element analysis on residual stress field in LSP Inconel 718[J]. *Journal of Fuzhou University*, 2012, 40(3): 370-375.  
潘应晖, 刘艳斌, 戴峰泽, 等. 激光冲击 718 镍铬合金残余应力场试验及有限元分析[J]. *福州大学学报*, 2012, 40(3): 370-375.
- [15] 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.
- [16] Zhang Xingquan, Li Huan, Huang Zhilai, *et al.* Numerical simulation of residual stress induced in 7075 aluminum alloy by repeated high-power laser pulses[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1203002.  
张兴权, 李欢, 黄志来, 等. 7075 铝合金激光多点冲击诱导残余应力的数值模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1203002.
- [17] Brockman R A, Braisted W R, Olson S E, *et al.* Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 36(1): 96-108.
- [18] Zhou Yu. *Analysis methods of materials*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 71-80.  
周玉. *材料分析方法*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 71-80.
- [19] Liu Hongwen. *Mechanics of materials*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 216-226.  
刘鸿文. *材料力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 216-226.