

文章编号: 0258-7025(2010)07-1850-06

双面激光喷丸强化 ZK60 镁合金的残余应力数值研究

周建忠 杨小东* 黄舒 胡玲玲 黄娟 戴亚春

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 以有限元分析软件 ABAQUS 为平台,利用用户子程序编制了单面和双面激光喷丸时冲击波压力的加载程序,建立了小孔试样双面激光喷丸过程诱导残余应力的有限元分析模型。分析了小孔对激光喷丸强化效果的影响,研究了单面和双面激光喷丸下 ZK60 镁合金小孔试样的三维残余应力场分布。结果表明,采用双面激光喷丸工艺时,在试样上下表面均产生有益的残余压应力分布,下表面残余压应力的幅值是单面激光喷丸时的 2 倍左右。将典型实验与模拟结果进行对比,其一致性较好。

关键词 激光技术;双面激光喷丸;有限元法;残余应力;镁合金

中图分类号 TN 249;TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1850

Residual Stress Field of ZK60 Specimen with Central Hole Induced by Both-Side Laser Shot Peening

Zhou Jianzhong Yang Xiaodong Huang Shu Hu Lingling Huang Juan Dai Yachun

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

Abstract The finite element analysis (FEA) software ABAQUS is applied to establish the finite element model (FEM) for one-side and both-side laser shot peening (LSP) of specimen with a central hole. User subroutine VDLOAD is used to program the loading model of shock wave pressure for both-side LSP. The influence of the hole on the peening effect is investigated, and the three-dimensional (3D) residual stress distribution of ZK60 magnesium alloy after one-side and both-side LSP is analyzed. The beneficial residual stress distribution was obtained after both-side LSP, with a stress value as two times high as that after one-side LSP on the bottom surface. The experimental results are compared with numerical simulation results and good consistency is observed.

Key words laser technique; both-side laser shot peening; finite element analysis; residual stress; magnesium alloy

1 引言

激光冲击/喷丸强化(LSP)是利用高功率密度(大于 10^9 W/cm²)、短脉冲激光诱导的高幅冲击波压力对材料表面实施改性的一种技术。与传统机械喷丸相比,LSP 最大的优点包括^[1~3]:残余压应力影响层更深,强化处理后试样表面质量更好,并可以对微构件进行表面强化。目前,国内外学者对 LSP 技术的研究大多是基于实验手段分析 LSP 机理及其对金属零件的力学行为和疲劳性能的影响。进入 21 世纪以来,有学者基于解析模型和有限元法开发

了适于激光喷丸强化的综合分析模型^[4,5]。K. Ding 等^[6]利用有限元软件 ABAQUS 对二维激光喷丸模型进行了模拟研究,模拟结果与实验结果比较吻合。Hu Yongxiang 等^[7]利用有限元软件 LS-DYNA 和 ANSYS 成功模拟了多次激光喷丸处理后模型的三维残余应力分布,表明随着喷丸次数的增加残余应力场的改变存在着一定的饱和效应。

在现有的数值模拟研究中,一般采用标准的三维立方体模型来模拟激光喷丸后模型三维残余应力的分布情况,而对小孔试样的模拟研究还鲜有报道。

收稿日期: 2009-10-14; 收到修改稿日期: 2009-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(50675090)、国家自然科学基金重点项目(50735001)、江苏省“青蓝工程”项目(2008)、镇江市工业支撑科技项目(SGY20090026)和江苏大学研究生创新基金(1291110037)资助课题。

作者简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yxd20044987@sina.com

小孔试样涉及到模型几何边界的处理,实际工程中应用的紧固孔和连接孔零件等的应力分析都可抽象为小孔模型,因而采用小孔试样进行激光冲击/喷丸强化过程的数值模拟研究更接近工程实际。邹世坤等^[8]对 1020 铝锂合金单联中心孔疲劳试样进行激光冲击处理,使其抗疲劳强度提高 30%,而在相同疲劳载荷下的疲劳寿命提高了 5 倍左右。王声波等^[9]采用双面两次叠加方式对 7050 铝合金小孔试样实施激光喷丸强化后,在强化区域均表现出明显的残余压应力分布,且试样疲劳性能也得到明显改善。然而实验过程及结果检测颇为费时,费用成本也较高。赵建飞等^[10,11]借助有限元疲劳分析软件,成功预测了单面激光喷丸后 2024-T3 铝合金小孔试样的疲劳寿命及裂纹扩展寿命。

本文以有限元分析软件 ABAQUS 为平台,通过用户子程序编制单面和双面激光喷丸的冲击波压力加载程序,建立小孔试样单面和双面激光喷丸强化过程的有限元模型,分析单面和双面不同激光喷丸条件下,小孔试样的三维残余应力场分布,为理论分析和实验研究中参数选择提供了相应的参考。

2 数值模拟方法

2.1 有限元模型及分析流程

为便于后续疲劳实验分析,选择单联孔试样为研究对象,其疲劳源一般位于上下表面小孔边的应力集中区,因此激光喷丸强化区域选择在距离孔边 1.5 mm 处,可以有效抑制该处疲劳裂纹的萌生和生长,如图 1 所示,其中 ϕ 为直径。由于试样模型和激光冲击加载均符合近似对称分布,故可选取中心区域 1/4 部分进行有限元建模,如图 2 所示。对激光喷丸区域进行网格细化,将模型平分为上下两块,厚度方向采用偏置法划分网格,最小单元尺寸为 99.33 μm ,单元总数为 15080。

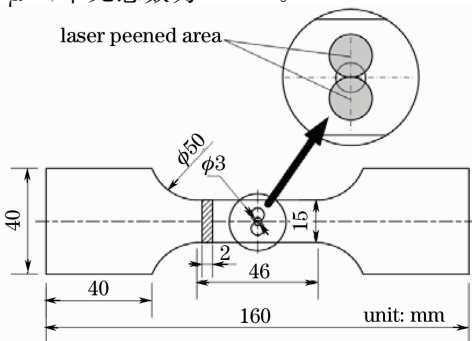


图 1 单联孔疲劳试样

Fig. 1 Fatigue specimen with central hole

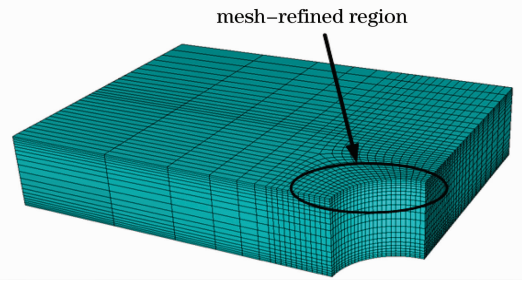


图 2 有限元模型网格

Fig. 2 Finite element model

有限元分析过程,首先是利用 ABAQUS/Explicit 动态分析模块完成对小孔试样在激光冲击波作用下动态响应过程的模拟,分析步设为 4000 ns^[6];随后,将 ABAQUS/Explicit 动态分析后的应力应变状态导入 ABAQUS/Standard 隐式分析模块,有效模拟小孔试样动态残余应力的回弹过程,获得稳定的残余应力场分布。

2.2 激光参数及冲击波压力

模拟选用的激光参数和实验基本一致,实验装置为江苏大学激光技术研究所的高功率钕玻璃激光系统,激光参数为:激光能量 20 J,光斑直径 5 mm,脉冲宽度 23 ns。

实验中激光脉冲宽度为 23 ns,冲击压力作用时间选择为 80 ns,激光冲击波压力在空间上符合高斯分布。利用 ABAQUS 用户子程序 VDLOAD 编制激光冲击压力的动态加载模型,该程序同时考虑了激光冲击波在时间和空间上的非均匀分布。激光冲击压力的时空分布可以表示为

$$P(r, t) = P_m A(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right), \quad (1)$$

式中 P_m 为激光冲击波的峰值压力,与激光功率密度的平方根成正比^[12]; $A(t)$ 为冲击波压力的幅值曲线,如图 3 所示; r 为激光喷丸区任一点到激光光斑中心的距离; R 为激光光斑直径。

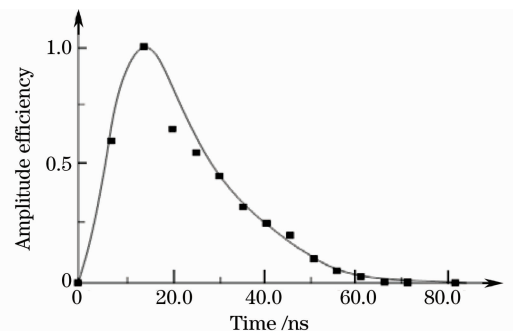


图 3 激光冲击波压力的幅值曲线

Fig. 3 Amplitude curve of laser shock wave pressure

冲击波传递方向的最高弹性极限被定义为 Hugoniot 弹性极限 L_{HE} , 当激光冲击波峰值压力超过 L_{HE} 时, 材料才会产生塑性应变。为了获得最优的激光喷丸强化效果, 通常激光冲击波压力选择 $2.0 \sim 2.5 L_{HE}$ 。假设在激光冲击波传递方向上峰值冲击波压力达到 L_{HE} 时, 材料发生屈服, 则单轴应力状态下的动态屈服强度可以表示为

$$\sigma_y^{dyn} = L_{HE} \frac{(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}, \quad (2)$$

式中 ν 为材料的泊松比。

2.3 材料性能

模拟所选用的材料为 ZK60 变形镁合金。考虑应变率和硬化影响, 认为材料为各向同性, 塑性应变服从 Von Mises 屈服准则, ZK60 镁合金的材料性能如表 1 所示。

表 1 ZK60 镁合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of ZK60 magnesium alloy

Material	ZK60
$P / (\text{kg} / \text{m}^3)$	1800
ν	0.35
E / GPa	44
$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	305
σ_b / MPa	355

3 结果与讨论

3.1 表面残余应力分布

图 4(a)和(b)分别表示小孔试样单面和双面激光喷丸后下表面残余应力的分布云图。深色区域表示残余压应力影响区域, 可以发现该区域呈“月牙”状, 这与采用三维实体模型时的模拟结果明显不同, 主要是因为孔边处于无约束状态, 故近孔处残余压应力明显小于喷丸中心, 图 4(b)中孔边还出现了轻微的残余拉应力分布; 同时可以看到, 双面激光喷丸时小孔试样下表面的最大残余压应力达 -179.41 MPa , 远高于单面激光喷丸时的 -95.27 MPa , 而且其残余压应力的影响区域也远大于单面激光喷丸。

图 5(a)和(b)分别表示小孔试样单面和双面激光喷丸后上下表面残余应力分量 S_{11} (径向)和 S_{22} (切向)的分布曲线。单面激光喷丸时, 上表面激光喷丸区域表现为明显的残余压应力分布, 最大残余压应力 S_{11} 为 -165.46 MPa , S_{22} 为 -114.6 MPa , 下表面的残余压应力水平要明显低于上表面, 其 S_{11} 为 -94.66 MPa , S_{22} 为 -62.12 MPa 。双面激光喷丸时, 上下表面喷丸强化区残余压应力都很明显, 上表面最大残余应力 S_{11} 为 -179.49 MPa , S_{22} 为 -99.66 MPa , 下表面最大残余应力 S_{11} 为 -176.47 MPa , S_{22} 为 -120.96 MPa 。无论是单面还是双面激光喷丸, 残余应力的变化趋势是相同的, 都表现为喷丸强化区域为残余压应力, 激光喷丸区以外由于应力平衡表现为轻微的残余拉应力, 残余压应力影响区域为 2 mm 左右。

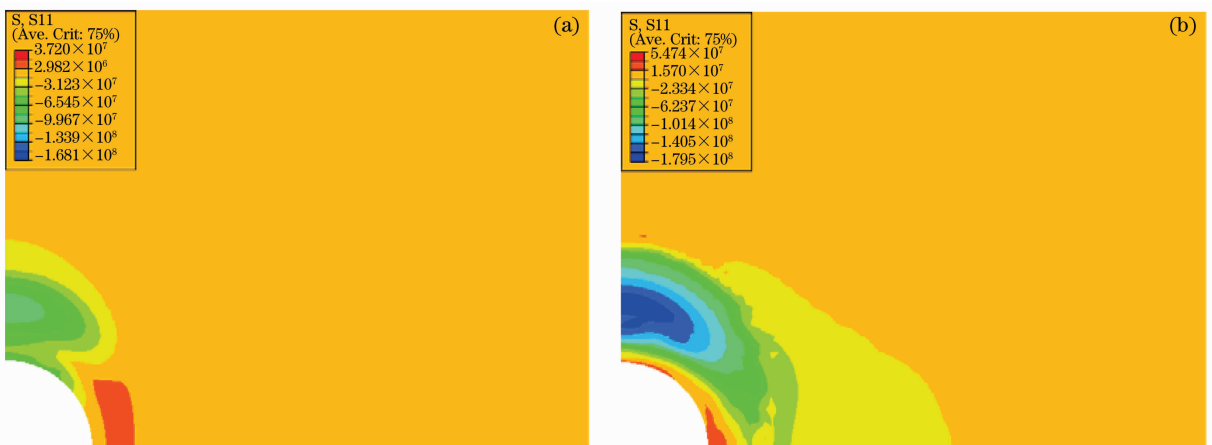


图 4 激光喷丸后下表面残余应力的分布云图。(a)单面喷丸;(b)双面喷丸

Fig. 4 Contour of residual stress distribution on bottom surface after LSP. (a) one-side peening; (b) both-side peening

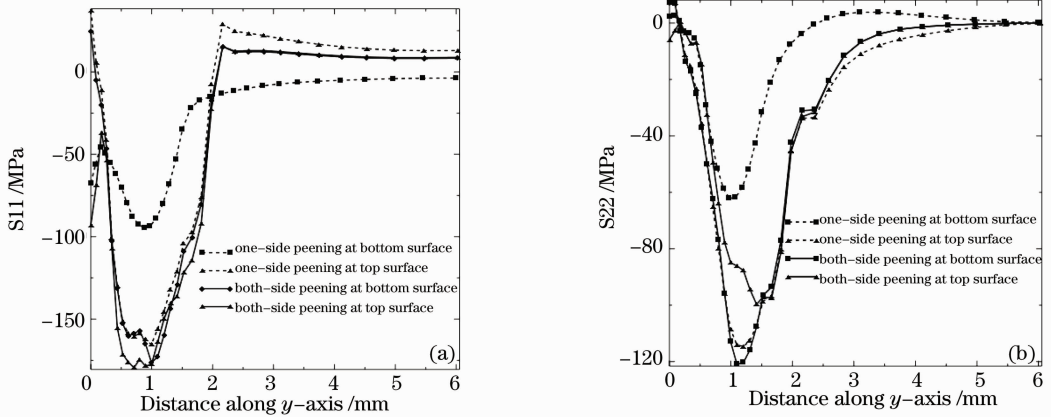


图 5 激光喷丸后上下表面残余应力的分布

Fig. 5 Residual stress distribution on top and bottom surfaces after LSP

3.2 厚度方向残余应力分布

图 6(a)和(b)分别表示小孔试样单面和双面激光喷丸后,厚度方向残余应力分布云图。可以看出,小孔试样双面激光喷丸后下表面最大残余应力为 -176.47 MPa ,明显高于单面激光喷丸时的 -94.66 MPa ,双面激光喷丸可以在试样上下表面均形成明显的残余压应力分布,这对提高小孔试样的疲劳寿命十分有益。

图 7(a)和(b)分别表示小孔试样单面和双面激光喷丸后,喷丸中心处厚度方向残余应力分量 S_{11} 和 S_{22} 的分布曲线。可以看出,双面激光喷丸时,残余应力相对于中心面呈对称分布,上下表面为残余压应力,内部表现为残余拉应力。上表面残余应力 S_{11} 为 -174.39 MPa , S_{22} 为 -63.79 MPa ,下表面 S_{11} 为 -156.95 MPa , S_{22} 为 -76.88 MPa ,而 S_{11} 和 S_{22} 沿厚度方向的变化趋势是一致的。双面激光喷丸时上

表面残余压应力影响深度为 0.64 mm ,与单面激光喷丸时相差不大,而下表面残余压应力影响深度为 0.64 mm ,远大于单面激光喷丸时的 0.29 mm 。

图 8(a)和(b)分别表示小孔试样单面和双面激光喷丸后,沿孔边厚度方向的残余应力分量 S_{11} 和 S_{22} 的分布曲线,可以看到小孔试样孔边厚度方向的残余应力分布形式与喷丸中心处明显不同。由图 8(a)可见,双面激光喷丸时,下表面出现 24 MPa 的轻微残余拉应力,这与单面激光喷丸的情况正好相反。而从图 8(b)可以看出,无论是单面还是双面激光喷丸, S_{22} 在厚度方向始终处于较低水平。双面激光喷丸时下表面出现 7.47 MPa 的轻微拉应力,之后在 0 上下轻微波动,这与单面激光喷丸的情况正好相反。残余应力分量 S_{22} 水平非常微弱,主要是因为孔内表面处于无约束状态,该处材料无法形成有效压缩。

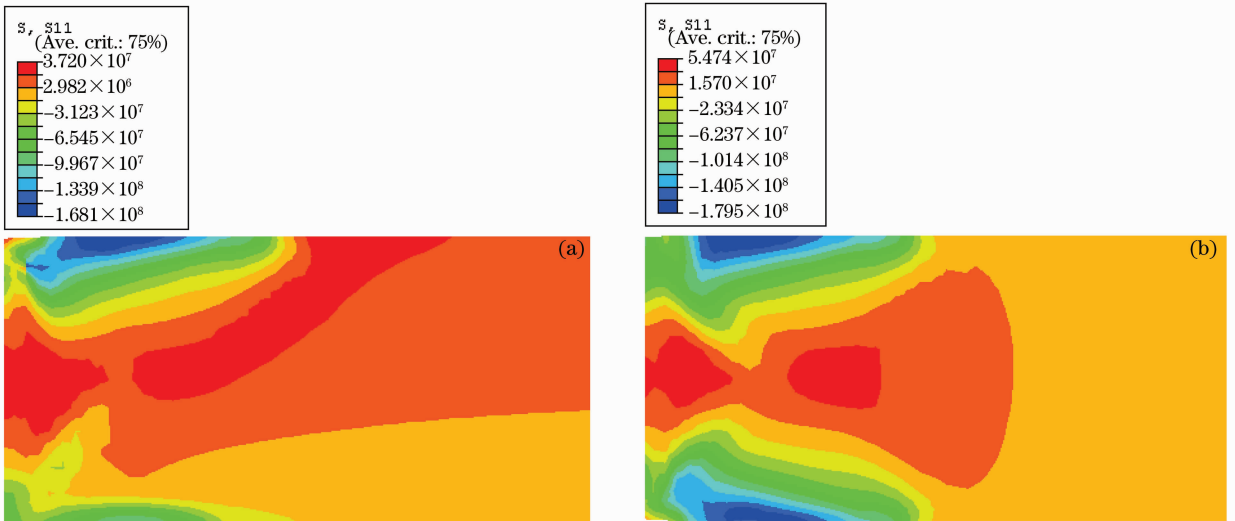


图 6 激光喷丸后沿厚度方向的残余应力分布云图。(a)单面喷丸;(b)双面喷丸

Fig. 6 Contour of residual stress distribution in depth after LSP. (a) one-side peening; (b) both-side peening

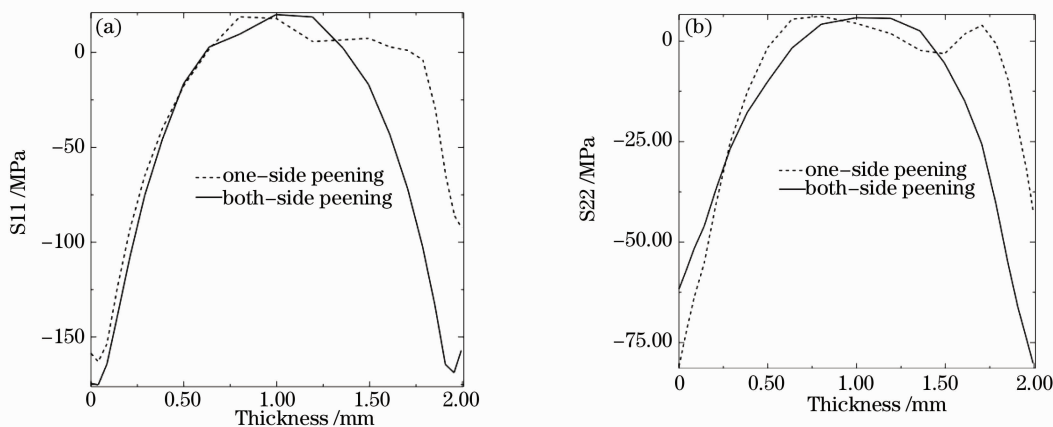


图 7 激光喷丸后厚度方向残余应力的分布(喷丸中心)

Fig. 7 Residual stress distribution in depth after LSP(at peening center)

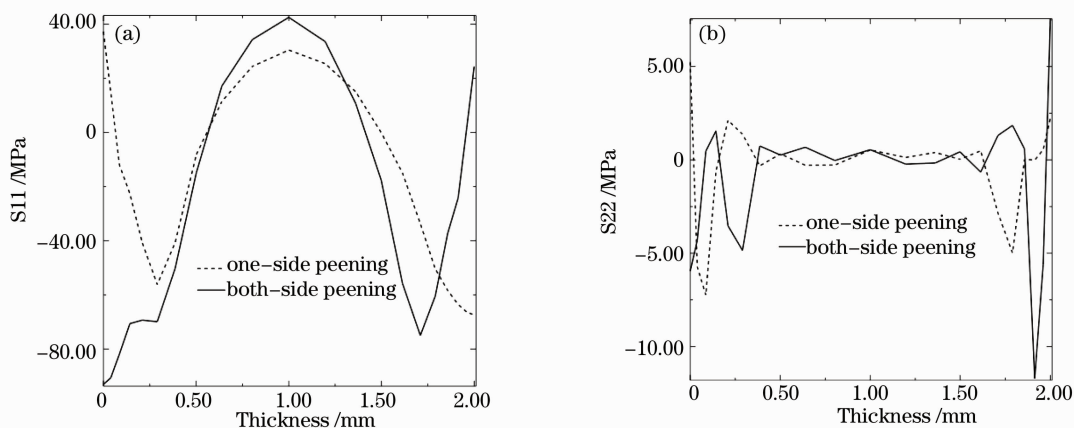


图 8 激光喷丸后厚度方向残余应力的分布(小孔边缘)

Fig. 8 Residual stress distribution in depth after LSP (at hole edge)

3.3 典型实验

实验采用的激光参数为:激光能量 20 J,光斑直径 5 mm,脉冲宽度 23 ns.用线切割加工出小孔试样,如图 1 所示.对小孔试样上下表面进行打磨处理,采用的能量吸收层和约束层为铝箔和 K9 玻璃,分别对小孔试样进行单面和双面激光喷丸处理.图 9为典型的小孔试样激光喷丸后表面形貌,可以看



图 9 激光喷丸后小孔试样的表面形貌

Fig. 9 Surface morphology of specimen with central hole after LSP

出激光喷丸后在处理区域形成较为明显的微凹陷区.

采用 X-350A 型 X 射线应力测定仪测量喷丸中心区的表面残余应力,侧倾角 ψ 分别取 0, 15°, 25° 和 35°, 允许测量误差为 ± 20 MPa. 表 2 为小孔试样激光喷丸后在冲击中心的残余应力测试结果.可以看出激光喷丸处理明显提高了处理区域的残余压应力水平,经过一次激光喷丸处理后残余压应力 σ 达到了

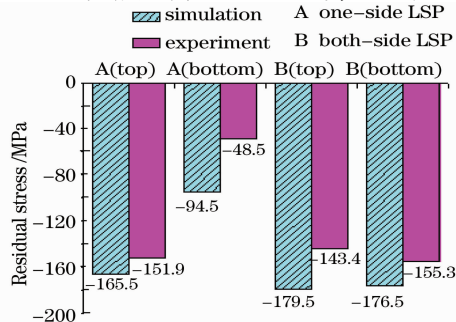


图 10 实验结果与模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of results from simulation and experiment

-151.9 MPa(误差 $\Delta\sigma$ 为 ± 18.6 MPa)。图 10 为小孔试样单面和双面激光喷丸后实验结果与模拟结果的对比图。得到双面激光喷丸处理时下表面残余应力为 -155.3 MPa(误差 ± 17.0 MPa), 远大于单面激光喷丸时的 -48.5 MPa(误差 ± 8.9 MPa), 与模拟结果基本一致。

表 2 单面激光后喷丸中心残余应力测试结果

Table 2 Test results of residual stress at the peened center after one-side LSP

ψ	0	15°	25°	35°
$2\theta_p$	134.604°	134.880°	134.898°	135.070°
Peak value	195	175	137	143
Half-height width	1.87°	1.95°	1.95°	1.93°
Integration strength	337	336	234	286
Integration width	1.93°	1.92°	1.71°	2.00°

4 结 论

建立了小孔试样激光喷丸强化应力场的有限元分析模型, 解决了双面激光喷丸强化模拟分析过程中的网格划分、边界条件设置、冲击波压力加载等一系列技术问题, 进行了小孔试样单面和双面激光喷丸诱导三维残余应力场的数值分析:

1) 小孔试样经双面激光喷丸后, 其下表面残余压应力水平比单面激光喷丸时明显增大, 表面最大残余应力 S_{11} 为 -176.47 MPa, S_{22} 为 -112.98 MPa, 而单面喷丸时则分别为 -94.66 和 -62.11 MPa。试样小孔对激光喷丸强化效果有一定的负面影响, 小孔内表面处于无约束状态, 因而孔边的残余压应力水平较低;

2) 模拟结果与典型实验结果基本一致。单面激光喷丸条件下在喷丸中心测得的残余应力为 -151.9 MPa, 相应的模拟结果为 -165.5 MPa。实验测得双面喷丸下表面残余应力为 -155.3 MPa, 远大于单面激光喷丸时的应力值。说明适当改进激光冲击/喷丸处理工艺, 可以在工件上下表面都能获得十分有益的残余应力分布, 防止疲劳裂纹的萌生, 从

而有效改善零件的使用性能。

3) 小孔试样双面激光喷丸强化应力场的有限元分析模型, 对于理解激光喷丸强化过程的机理, 分析工艺参数对材料中应力分布的影响具有一定的理论意义。数值模拟和典型实验相结合, 可为激光喷丸强化工程应用中工艺及参数的优化提供参考, 具有潜在的工程实用价值。

参 考 文 献

- 1 A. H. Clauer, D. F. Lahrman. Laser shock processing as a surface enhancement process [J]. *Key Eng. Mater.*, 2001, **197**: 121~142
- 2 Zhang Wenwu, Y. Lawrence Yao. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2002, **124**(2): 369~378
- 3 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]. *Int. J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 4 K. Ding, L. Ye. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes [J]. *Surf. Eng.*, 2003, **19**(5): 351~358
- 5 J. L. Ocana, M. Morales, C. Molpeceres *et al.*. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments [J]. *J. Appl. Surf. Sci.*, 2004, **238**(1-4): 242~248
- 6 K. Ding, L. Ye. Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy [J]. *J. Mater. Sci.*, 2006, **178**(1-3): 162~169
- 7 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. 3-D FEM simulation of laser shock processing [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 2006, **201**(3): 1426~1435
- 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
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 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 Zhao Jianfei, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Numerical simulation on fatigue crack growth of metal sheet induced by laser shot peening [J]. *Int. J. Mod. Phys. B*, 2009, **23**(6-7): 1646~1651
- 11 Zhou Jianzhong, Huang Shu, Zhao Jianfei *et al.*. Numerical analysis on fatigue properties of aluminum alloy induced by laser shock peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1735~1740
周建忠, 黄舒, 赵建飞等. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1735~1740
- 12 R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing [J]. *J. Laser Appl.*, 1998, **10**(6): 265~279