

典型孔结构激光冲击强化残余应力场特征及有限元分析*

罗懋钟¹, 曹子文², 代军义¹, 周文龙¹, 付雪松¹

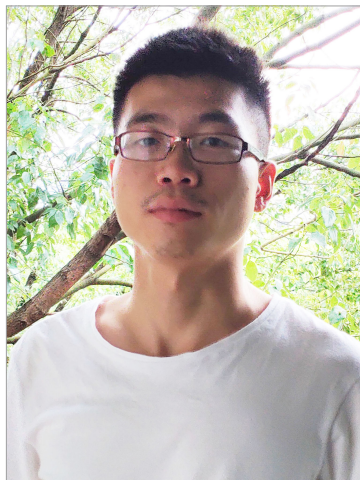
(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024;

2. 中国航空制造技术研究院高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 研究了TB6钛合金孔结构激光冲击强化后残余应力场分布特征。采用ABAQUS有限元软件建立激光冲击强化模型,运用恒定显式阻尼求解方法,分析激光冲击强化角度、搭接长度、冲击次数等工艺参数对孔结构残余应力场的影响,并与试验测试结果对比分析。结果显示:激光冲击角度对孔内壁位置残余应力值有重要影响,随着冲击角度的增加,残余应力值增加。搭接率对孔角的应力状态无明显影响,冲击次数增加,残余应力也随之增加,但是会逐渐趋于饱和;有限元数值解析的激光冲击残余应力值及演变趋势与试验测试结果吻合较好。

关键词: 激光冲击强化;孔结构;残余应力;有限元法;钛合金

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.17.047



罗懋钟

硕士研究生,主要从事激光冲击强化及抗微动疲劳的有限元仿真研究。

直升机旋翼系统连接孔结构长期处于高频交变载荷状态,其疲劳性能是这类零件的关键质量评价标准。而针对该类孔结构的抗疲劳措施主要从减小微动磨损和引入压应力场两个角度开展研究。近年利用激光冲击强化技术引入残余应力层的方法,逐渐成为提高材料抗疲劳性能的主要手段之一。激光冲击强化通过高能量密度、短脉冲的激光束照射金属表层,产生高压等离子体并快速膨胀,形成向材料内部传播的冲击波^[1]。当冲击波峰值超过材料动态屈服强度时,材料发生塑性变形,最终形成残余压应力场。为获得最佳激光冲击强化工艺参数,针对激光冲击强化的有限元仿真研究逐渐增多^[2-5],但研究对象多是简单平板试样,而针对孔结构的激光冲击强化有限元的研究甚少。实际上,针对孔结构的强化,激光冲击

强化具有明显优势^[6]。孔结构的冲击强化工艺有限元分析可大致分为两类,一种是针对孔周表面的激光冲击强化有限元分析^[7-8],但实际孔/螺栓接触过程中,裂纹多萌生于孔壁,而通过孔周表面的激光冲击强化难以在孔壁形成残余压应力场;另外一种是针对孔壁及倒角位置进行激光斜冲击强化。已经有学者针对不同曲面的激光冲击强化进行有限元仿真研究^[9-10],但是并没有考虑到实际工程中激光束入射角度问题,例如针对孔壁的激光冲击强化,激光束不能垂直入射,并且不同深度的入射角度也有所不同,因此有必要将激光冲击角度、曲面形状(柱面、倒角)综合考虑,才能准确预测孔结构的激光冲击强化残余应力场。

本文以TB6钛合金为研究对象,基于ABAQUS有限元仿真软件进行三

* 基金项目: 国家自然科学基金(51975084); 中央高校基本科研业务费专项(DUT19LAB16); 航空科学基金(20185425009、201936025001); 民用飞机专项科研(MJZ-2017-G-68)。

维数值模拟,应用 Johnson-Cook 本构模型,探讨了冲击角度、搭接率、冲击次数等工艺参数对孔结构残余应力的影响。

有限元模型

1 求解方法

激光冲击强化加载时间十分短暂,在材料内部存在应力波的反射和相互作用,因此需要较长的时间才能获得稳定应力场,求解过程多采用显式+隐式求解方法。本文采用单显式+隐式求解方法^[11-12],相比传统显式+隐式求解方法,该方法通过引入瑞利阻尼加速动能耗散,能极大地提高求解效率,并且其对塑性应变能力无影响,如图1所示。对孔壁进行激光冲击强化有限元计算,其求解结果与显式+隐式求解结果一致,如图2所示。

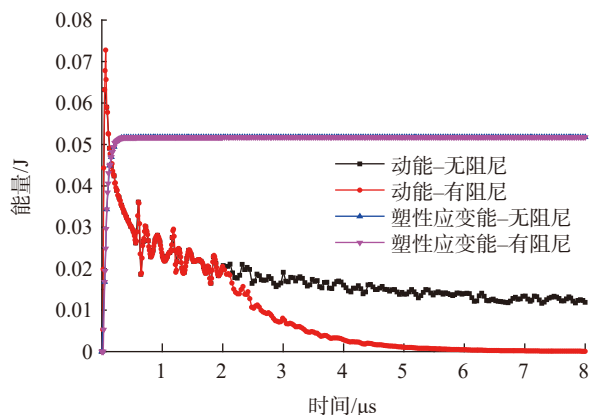


图1 能量随时间变化曲线

Fig.1 Energy versus time curve

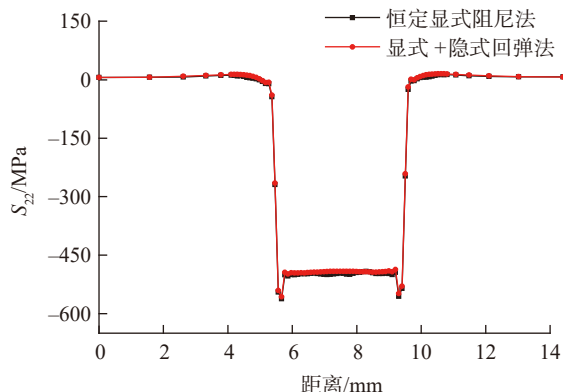


图2 孔壁不同求解方法的残余应力分布

Fig.2 Residual stress distribution for different solution methods in pore wall

2 模型几何尺寸及网格划分

图3为孔结构激光冲击强化示意图,孔径 $\phi=22\text{mm}$,孔深为19.8mm,孔倒角为 $1\text{mm}\times 45^\circ$,将孔结构分成孔角(图3(a))、孔壁(图3(b))两个部位进行单独研究,其中冲击角度 φ 定义为激光束与孔深度方向所成夹角($\varphi \leq 90^\circ$)。考虑激光冲击强化影响区域有限,分别对孔角、孔壁进行单光斑模型计算,如图4(a)和(b)所示,将该部分有限元结果与试验结果对比,作为后续有限元分析的基础。随后对孔结构的多光斑激光冲击强化进行有限元仿真计算,取1/8孔结构计算,如图4(c)所示。搭接率定义为两相邻光斑在倒角下边缘的搭接率,计算搭接率分别为10%、15%、20%的残余应力

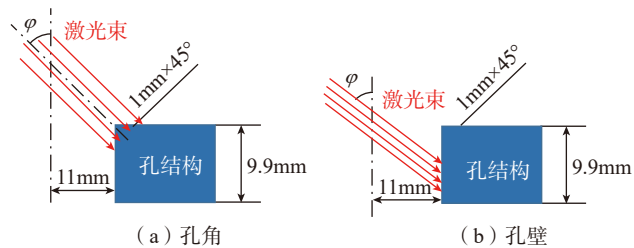


图3 孔结构激光冲击强化示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser shock peening of pore

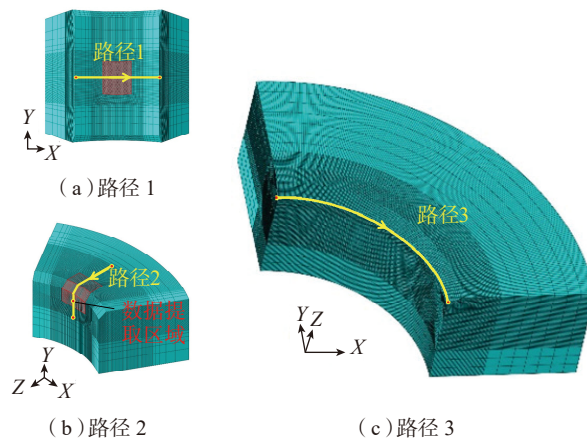


图4 模型网格划分及路径选取

Fig.4 Model meshing and path selection

场。经网格收敛性分析,确定激光冲击区域及周围细化区网格大小约为 $90\mu\text{m}$,单元类型为C3D8R。图4中路径1、路径2、路径3为残余应力提取路径。

3 材料属性

孔结构所用材料为TB6钛合金,激光冲击强化过程中应变率高达 10^6s^{-1} ,因此激光冲击强化有限元模拟材料本构方程采用 Johnson-Cook 模型,如式(1)所示:

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

在激光冲击强化过程中,忽略热效应对残余应力的影响^[9,13],式(1)

可写成:

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (2)$$

相关参数如表 1 所示^[14]。

4 载荷及边界条件

激光诱导冲击波峰值压强估算公式^[15],如式(3)所示:

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

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (4)$$

其中, P 是冲击波压强峰值; α 是内能转化热能的转化率; Z 是靶材声波阻抗 Z_1 和约束层的声波阻抗 Z_2 合成的冲击波声波阻抗; I_0 是激光功率密度。在试验中采用铝箔作为牺牲层,采用去离子水作为约束层,可将冲击波峰值压强估算公式简化为^[3]:

$$P = 1.02 \sqrt{I_0} \quad (5)$$

其中,使用波长为 1064nm 的 Nd:YAG 激光器进行激光冲击强化试验,其中激光脉冲能为 25J,脉冲宽度为 15ns,方形光斑,其长度为 3.5mm。由式(5)计算,得到不同冲击角度对应的压强大小,如表 2 所示。载荷为空间均布载荷,方向为曲面法向方向,冲击波持续时间约为激光脉冲宽度的 2~3 倍^[16],冲击波半高宽度取 30ns,简化其幅值曲线为简单三角波形,如图 5 所示。单光斑模型计算当中始终保持孔结构外侧圆柱面完全固定,多光斑模型添加对称边界条件。

为确保孔结构激光斜冲击载荷估算模型有效,首先在平板上进行激光冲击强化有限元仿真计算。同时进行激光冲击强化试验,随后使用 X 射线衍射进行残余应力测试,X 射线衍射仪型号为帕纳科 X'Pert 3 Powder,其管电压 40kV,管电流 40mA,准直管直径 $\phi=2\text{mm}$,因此测量值是光束区域的平均值。选用同倾 $\sin^2\psi$ 法测量残余应力值大小,测量的残余应力方向沿表面方向。试验测试结果与有

限元结果(区域内多点平均值,下同)对比,如图 6 所示,可以看到有限元解析结果和试验测试结果一致性良好,说明载荷估算模型有效。

结果与讨论

1 冲击角度对孔壁残余应力场的影响

图 7 为不同冲击角度对孔壁进行强化时,路径 1(图 4(a))上的周向残余应力分布。可以发现,在冲击区域,有明显残余压应力存在,并且冲击区域中间残余应力值先随着冲击角度的增加而增加,当冲击角度超过 60° 时,残余应力值减少,这可能是由于应力波的反射和相互作用

所导致,另外冲击角度不同,受载荷面形状也不同,而受载荷面形状的变化对残余应力场有一定影响^[17]。当冲击角度为 90° 时,残余应力值约为 -530MPa。

图 8 为孔壁位置试验测试结果与有限元结果对比,残余应力值随着冲击角度的增加而增加,这是因为当冲击角度为 90° 时,在孔壁位置的冲击区域面积最小,其对应的激光功率密度最大,通过压力估算模型所计算得到的载荷峰值也最大,有限元结果与试验测试结果一致性良好。从孔壁残余应力场切片云图(图 9),可以发现在孔壁的次表层均出现不同程度的拉应力场。

表 1 TB6 材料参数

Table 1 TB6 material parameters

E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	n
104	0.3	4620	797.457	574.432	0.1077

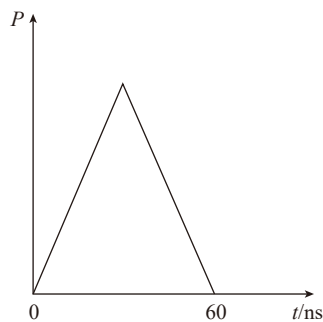


图 5 压强随时间变化曲线

Fig.5 Pressure versus time curve

表 2 不同冲击角度下压强峰值

Table 2 Pressure peak under different shakangles

$\varphi/(\circ)$	P/GPa
90	3.76
75	3.69
60	3.50
45	3.16
30	2.66

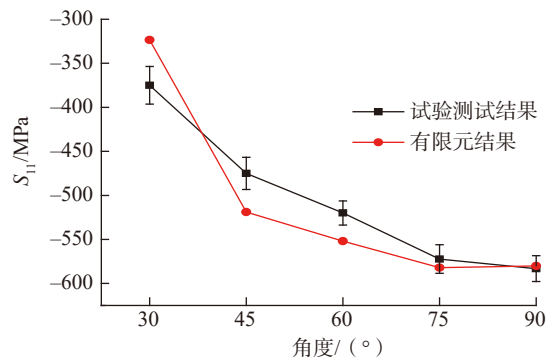


图 6 冲击角度对平板残余应力的影响

Fig.6 Effect of shock angle on residual stress in plate

2 冲击角度对孔角残余应力场的影响

图 10 为不同冲击角度对孔角进行强化时,路径 2 (图 4 (b))上的周向残余应力分布。可以发现,在激光冲击区域同样存在明显残余压应力,但是不同位置的残余应力值差别较大。在倒角上边缘,0°、30° 和 45° 冲击角度所得到的残余应力分布基本一致,并且在靠近倒角位置均出现残余应力值减少的现象。在倒角处,不同冲击角度所产生的残余应力无明显区别,在孔角下边缘,能看到 60°、75° 和 90° 所产生的残余应力大致相同,并

且应力值均较大,约为 -600MPa。

图 11 为孔角位置试验测试结果与有限元结果对比,数据提取区域见图 4 (b),可以发现应力值规律一致性较好。通过对倒角位置的残余应力场云图进行切片观察(图 12),可以看到在冲击角度为 45° 下,能得到相对均匀的应力场,其残余应力值约为 -450MPa。

3 搭接率对孔结构残余应力场的影响

图 13 为不同搭接率对孔结构进行激光冲击强化时,路径 3(图 4(c))上的周向残余应力分布。3 种不同

搭接率在搭接区域残余应力分布无明显变化。在冲击区域,残余应力最小值和残余应力最大值总是相邻出现。这是因为在冲击区域外侧呈小压应力甚至拉应力状态,并且伴随着少量塑性应变形成加工硬化,导致后一次在此区域冲击强化所形成的残余压应力小,而在激光冲击区域内侧,虽然同样存在加工硬化,但是应力状态呈较大压应力,后一次冲击强化相当于二次冲击,所以在此区域所形成的残余压应力值大。

沿中间光斑中心进行切片观察(图 14),3 种搭接率在整个模型中的

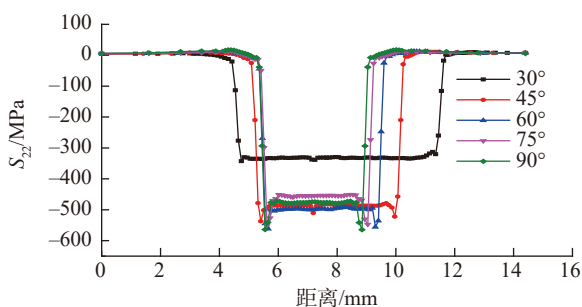


图7 不同冲击角度沿路径1残余应力分布

Fig.7 Residual stress distribution along path 1 under different shock angles

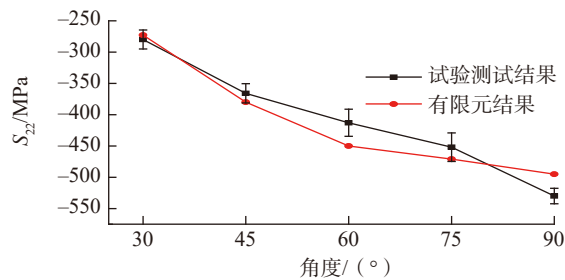


图8 冲击角度对孔壁残余应力的影响

Fig.8 Effect of shock angle on residual stress in pore wall

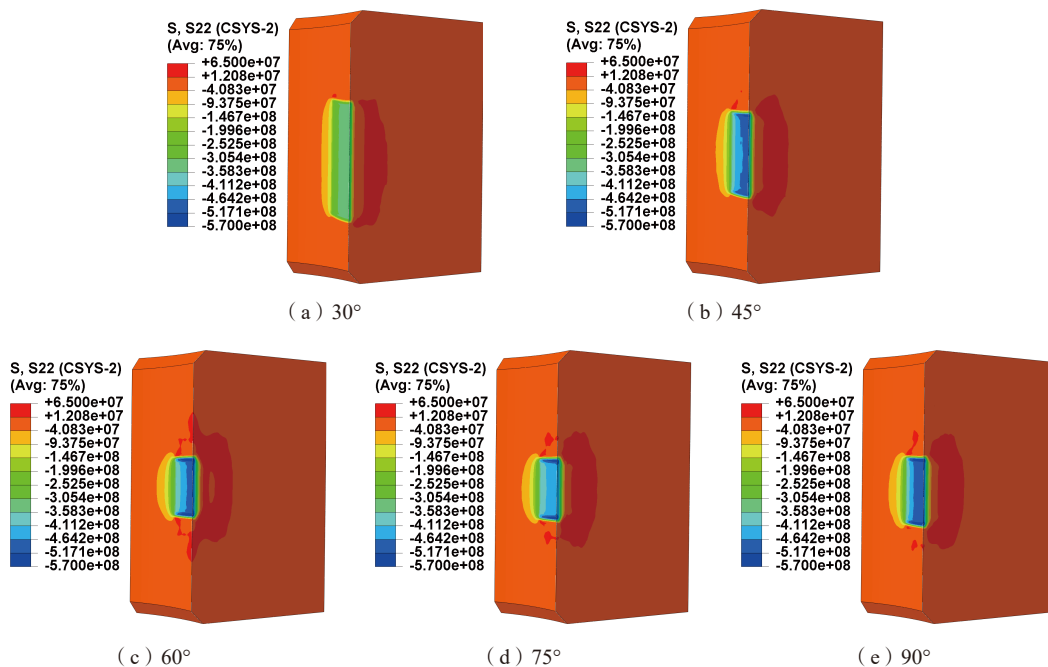


图9 不同冲击角度孔壁残余应力场

Fig.9 Residual stress field of pore wall under different shock angles

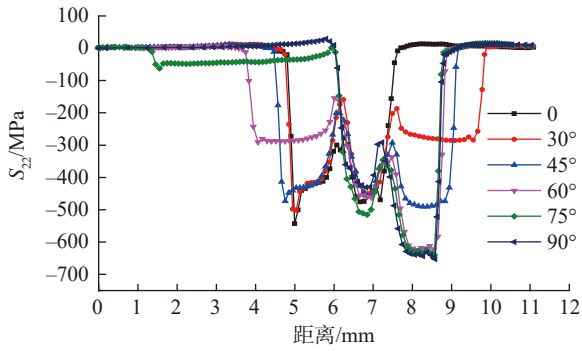


图10 不同冲击角度沿路径2残余应力分布
Fig.10 Residual stress distribution along path 2 under different shock angles

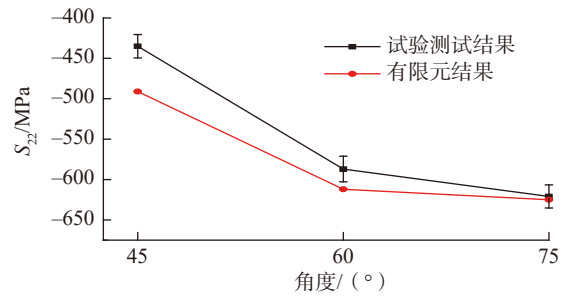


图11 冲击角度对孔角残余应力的影响
Fig.11 Effect of shock angle on residual stress in pore angle

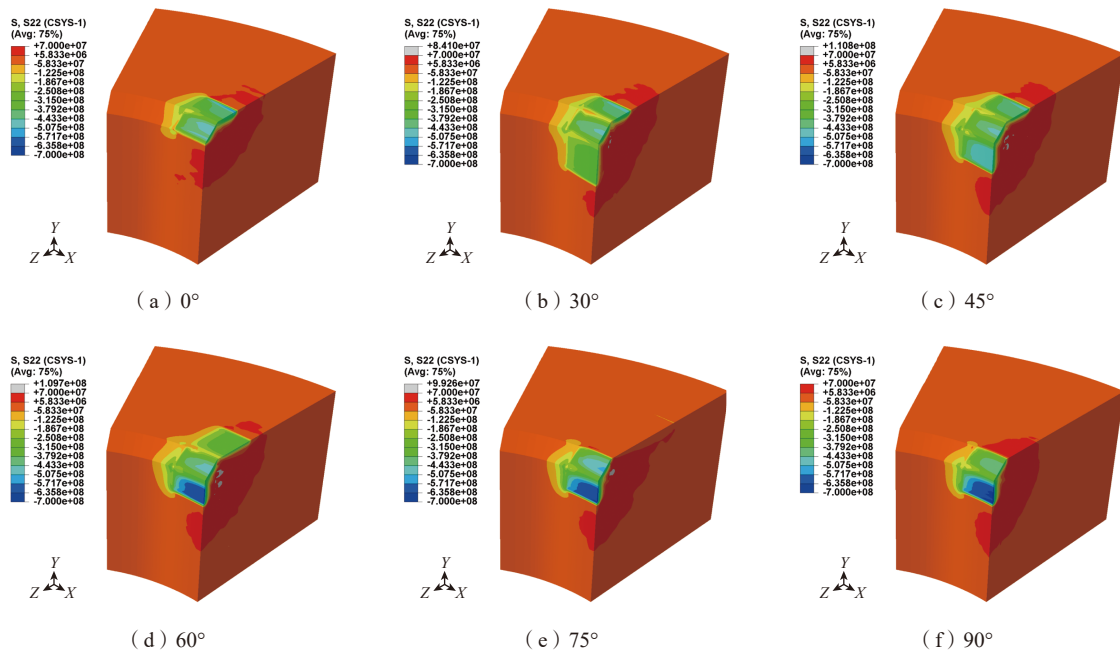


图12 不同冲击角度倒角残余应力场
Fig.12 Residual stress field at chamfered portion under different shock angles

应力分布较为一致,无明显差别。

4 冲击次数对残余应力场影响

由于冲击强化光斑路径对残余应力场的影响较小,本文主要考虑冲击次数对残余应力的影响。图 15 为冲击次数对孔壁位置残余应力场的影响,随着冲击次数的增加,残余应力值增加,增速逐渐降低。这是因为随着冲击次数增加,冲击波不断对金属变形层做功,材料应变量增加、加工硬化程度增加、应变不均匀性程度增加,残余应力值变大。但是,随激

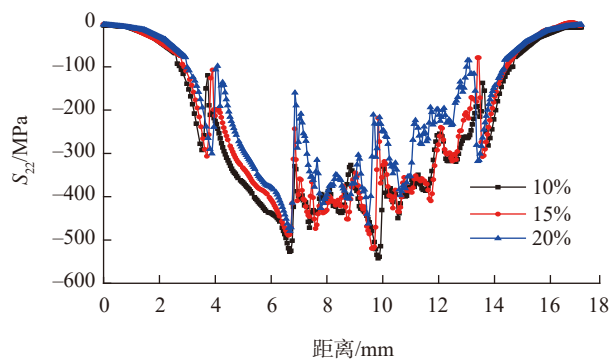


图13 不同搭接率沿路径3残余应力分布
Fig.13 Residual stress distribution along path 3 under different overlapping rates

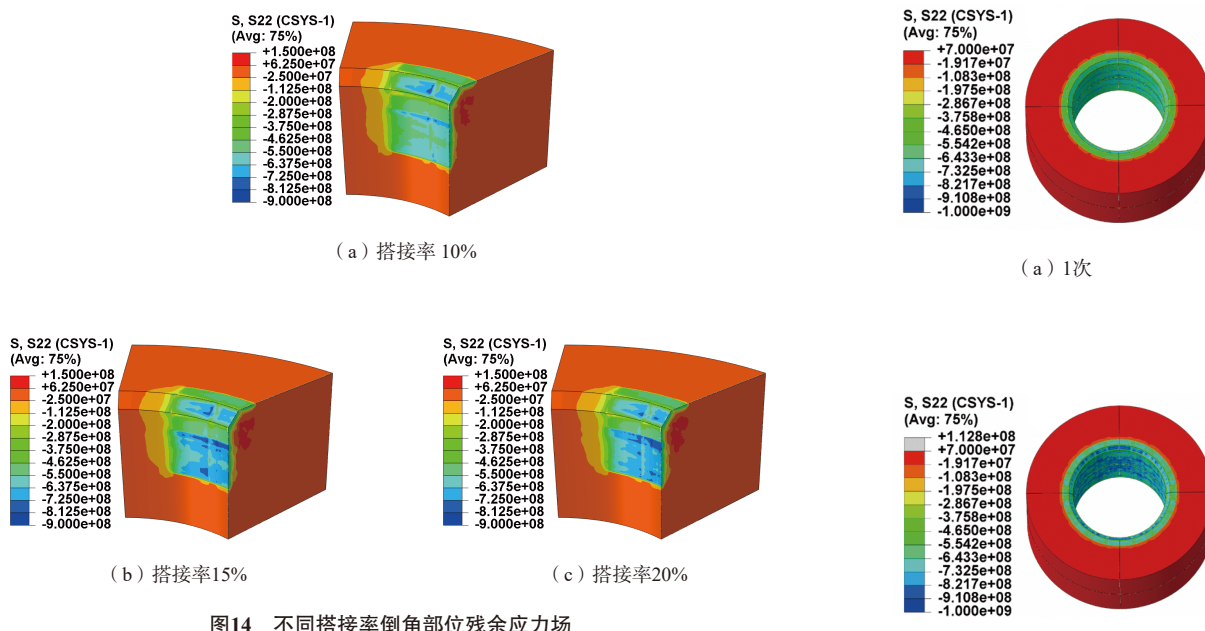


图14 不同搭接率倒角部位残余应力场

Fig.14 Residual stress field at chamfered portion under different overlapping rates

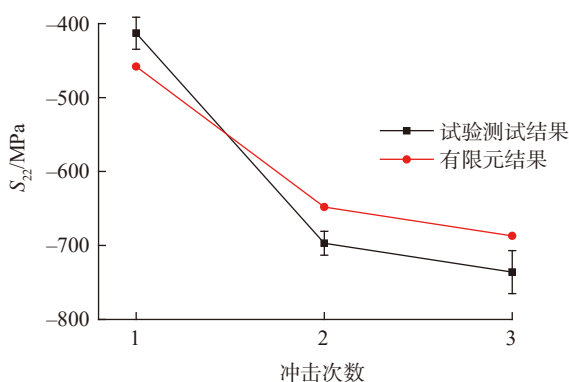


图15 冲击次数对孔壁残余应力的影响

Fig.15 Effect of shock times on residual stress in pore wall

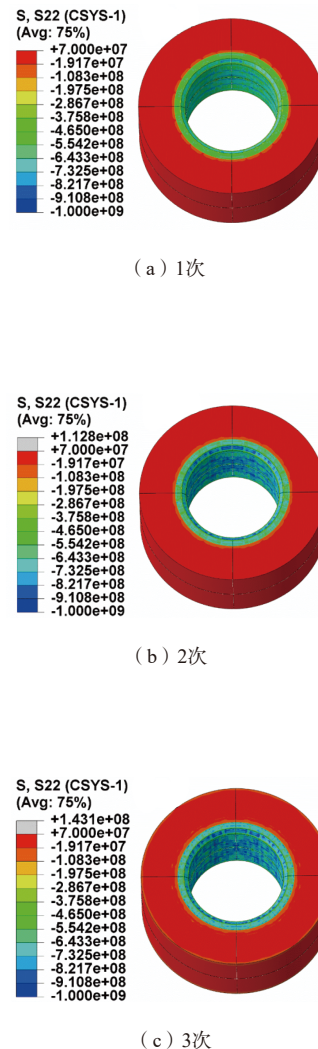


图16 不同冲击次数孔结构残余应力场

Fig.16 Residual stress field of pore structure under different shock times

光冲击次数增加,在冲击区域产生局部塑性变形会趋于饱和,亚结构组织发生动态回复,残余应力趋于饱和^[17-18]。有限元结果与试验测试结果一致性良好。图16为不同冲击次数得到孔结构残余应力场分布,同样可以看出,随着冲击次数的增加,残余压应力数值逐渐增大。

结论

(1)在孔壁位置,随着冲击角度的增加,残余应力值上升,90°入射时残余应力值约为-530MPa;在孔角位置,当激光冲击强化角度为45°

时,残余应力场均匀分布,应力值约为-450MPa。

(2)残余应力值与冲击次数呈正相关,随着冲击次数的增加,残余应力值增加,经3次激光冲击强化所得到的残余应力数值可达-750MPa。

(3)有限元解析残余应力结果与试验测试结果一致性良好,能有效预测激光冲击强化残余应力场。

参考文献

[1] 李伟,李应红,何卫锋,等.激光冲击强化技术的发展和应[J].激光与光电子

学进展,2008,45(12):15-19.

LI Wei, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19.

[2] 郭大浩,吴鸿兴,王声波,等.激光冲击强化机理研究[J].中国科学E辑:技术科学,1999,29(3):222-226.

GUO Dahao, WU Hongxing, WANG Shengbo, et al. Research on laser shock peening mechanism[J]. Science in China Series E: Technical Science, 1999, 29(3): 222-226.

[3] DING K, YE L. Laser shock peening: performance and process simulation[M]. NewYork: CRC Press, 2006.

[4] ACHINTHA M, NOWELL D. Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening[J]. Journal of

- Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1091–1101.
- [5] 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.
- [6] 钱晓明, 姜银方, 管海兵, 等. 飞机结构件紧固孔强化技术综述[J]. 机械强度, 2011, 33(5): 749–753.
- QIAN Xiaoming, JIANG Yinfang, GUAN Haibing, et al. Research and application of strengthening technology for fastening holes of aircraft structures[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(5): 749–753.
- [7] 凡进军. 激光冲击强化孔周表面的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- FAN Jinjun. Research on the surface around rivet holes of laser shock processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [8] JIANG Y F, JI B, GAN X D, et al. Study on the effect of laser peening with different power densities on fatigue life of fastener hole[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 106: 311–320.
- [9] VASU A, GRANDHI R V. Effects of curved geometry on residual stress in laser peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 218(1): 71–79.
- [10] SALVATI E, KORSUNSKY A M. A simplified FEM eigenstrain residual stress reconstruction for surface treatments in arbitrary 3D geometries[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138: 457–466.
- [11] HASSER P J, MALIK A S, LANGER K, et al. An efficient reliability-based simulation method for optimum laser peening treatment[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(11): 111001.
- [12] HATAMLEH M I, MAHADEVAN J, MALIK A, et al. Variable damping profiles using modal analysis for laser shock peening simulation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering: Translations of the ASME, 2018, 140(5): 051006.
- [13] 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.
- [14] 陈国定, 王涛, 程凤军. TB6 钛合金材料本构关系的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 157–159.
- CHEN Guoding, WANG Tao, CHENG Fengjun. Experimental study of the constitutive relationship of TB6 titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 157–159.
- [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] 杜建钧, 周建忠, 杨超君, 等. ABAQUS 在板料激光喷丸成形模拟过程中的应用[J]. 应用激光, 2005, 25(6): 371–373.
- DU Jianjun, ZHOU Jianzhong, YANG Chaojun, et al. Application of ABAQUS in simulation process of laser peen forming of sheet metal[J]. Applied Laser, 2005, 25(6): 371–373.
- [17] 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.
- HU Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effect of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [18] LUO K Y, LIN T, DAI F Z, et al. Effects of overlapping rate on the uniformities of surface profile of LY2Al alloy during massive laser shock peening impacts[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 266: 49–56.
- 通讯作者: 付雪松, 副教授、博士, 研究方向为材料塑性加工、微动损伤及防护技术、高温结构材料制备等, E-mail: xsfu@dlut.edu.cn。

Stress Field Characteristics and Finite Element Analysis of Typical Pore Structures Caused by Laser Shock Peening

LUO Maozhong¹, CAO Ziwen², DAI Junyi¹, ZHOU Wenlong¹, FU Xuesong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The distribution characteristics of the residual stress field caused by laser shock peening (LSP) were studied in TB6 pore structure. The finite element model of LSP was established by ABAQUS finite element software. The constant explicit damping method was used to analyze the influence of process parameters such as LSP angle, lap length and shock number on the residual stress field of the pore structure, and compared with the experimental test results. The results show that the LSP angle has an important influence on the residual stress value at the pore inner wall. The residual stress value increases with the increase of the LSP angle. The overlapping rate has no obvious effect on the stress state of the pore angle. As the number of shock increases, the residual stress also increases, but it will gradually become saturated. Finite element results including the residual stress value and evolution trend caused by LSP have a good agreement with the experimental test results.

Keywords: Laser shock peening; Pore structure; Residual stress; Finite element method; Ti alloy

(责编 古系)