

基于 Python 的 Abaqus 二次开发在高温合金 GH3039 激光冲击强化中的应用

杨俊茹¹, 徐昊¹, 王桂杰¹, 朱然^{1,2}, 邓大祥³, 吴清源⁴

(1. 山东科技大学, 山东 青岛 266590; 2. 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备
重点实验室, 浙江 金华 321004; 3. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055;
4. 广东工业大学, 广州 510006)

摘要: **目的** 提高高温合金 GH3039 激光冲击强化仿真建模的效率。**方法** 利用 Python 脚本语言对 Abaqus 进行二次开发, 利用插件对高温合金 GH3039 激光冲击强化过程进行仿真分析。采用侧倾固定 Ψ 法, 通过实验测量激光冲击强化后的残余应力, 并对仿真结果进行验证, 分析不同激光工艺参数作用下高温合金 GH3039 表面和深度方向残余应力的分布规律。**结果** 仿真插件界面简洁, 操作性强, 结果准确。在其他参数不变的情况下, 残余压应力受到光斑尺寸的影响较大。相较于光斑直径为 4、2 mm, 在光斑直径为 6 mm 时, 其中心位置残余压应力分别提高了 4.3%、53%。随着光斑尺寸的增大, 表面残余压应力增大, 且变化梯度减小, 深度方向的残余压应力增大。随着激光能量的增加, 表面残余压应力增大, 且变化梯度增大, 残余压应力峰值位于中心区域附近, 在激光能量为 6、7、8 J 时, 残余压应力层的平均厚度分别为 0.55、0.67、0.82 mm, 深度方向残余压应力层增厚。随着冲击次数的增加, 冲击区域表面残余压应力平均值高于单次冲击, 且波动梯度增大, 冲击 1、2、3 次后残余压应力层的平均厚度分别为 0.55、0.71、0.85 mm, 深度方向残余压应力层深度增大。**结论** 利用 Python 脚本语言对 ABAQUS 进行二次开发, 提高了仿真建模的效率, 可为快速预测不同激光工艺参数下高温合金 GH3039 残余应力的分布规律提供参考。

关键词: Abaqus 二次开发; Python; 激光冲击强化; 残余压应力; 光斑直径; 激光能量; 冲击次数

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)07-0435-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.07.040

收稿日期: 2022-06-09; 修订日期: 2022-12-28

Received: 2022-06-09; Revised: 2022-12-28

基金项目: 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备重点实验室开放课题基金 (ZSDRTKF2021002); 深圳市自然科学基金基础研究重点项目 (JCYJ20200109112808109); 中国博士后科学基金 (2020M682617); 广东省基础与应用基础研究基金 (2020A1515011553); 国家自然科学基金 (52105463); 山东省自然科学基金 (ZR2020QE182, ZR2022ME150, ZR2022ME129)

Fund: Opening Foundation of Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology & Equipment of Zhejiang Province (ZSDRTKF2021002); Fundamental Research on Shenzhen City Natural Science Foundation (Key Program) (JCYJ20200109112808109); China Postdoctoral Science Foundation (2020M682617); Research Foundation for Basis and Applied Basis of Guangdong Province (2020A1515011553); National Natural Science Foundation of China (52105463); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020QE182, ZR2022ME150, ZR2022ME129)

作者简介: 杨俊茹 (1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为机械制造及其自动化。

Biography: YANG Jun-ru (1969-), Female, Doctor, Professor, Research focus: teaching and scientific research of mechanical manufacturing and automation.

通讯作者: 朱然 (1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光冲击强化、激光冲击成形。

Corresponding author: ZHU Ran (1985-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser shock strengthening and laser shock forming.

引文格式: 杨俊茹, 徐昊, 王桂杰, 等. 基于 Python 的 Abaqus 二次开发在高温合金 GH3039 激光冲击强化中的应用[J]. 表面技术, 2023, 52(7): 435-443.

YANG Jun-ru, XU Hao, WANG Gui-jie, et al. Application of Python-based Abaqus Redevelopment in Laser Shock Peening of Superalloy GH3039[J]. Surface Technology, 2023, 52(7): 435-443.

Application of Python-based Abaqus Redevelopment in Laser Shock Peening of Superalloy GH3039

YANG Jun-ru¹, XU Hao¹, WANG Gui-jie¹, ZHU Ran^{1,2}, DENG Da-xiang³, WU Qing-yuan⁴

(1. Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China; 2. Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology & Equipment of Zhejiang Province, Zhejiang Jinhua 321004, China; 3. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Guangdong Shenzhen 518055, China; 4. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

ABSTRACT: In the simulation process of laser shock peening of superalloy GH3039 with different laser process parameters, one or several laser parameters need to be frequently changed for repeated modeling, which reduces the efficiency of simulation. The method of redevelopment of Abaqus with Python script can realize the parametric modeling of simulation process and significantly improve the efficiency of simulation analysis. With superalloy GH3039 as the research object, a simulation plug-in for laser shock peening of superalloy GH3039 was established by Python language, and the correctness of the plug-in results was verified by experiments. Through the comparison between the experimental results and the simulation data, it was known that the plug-in simulation results had high accuracy. Based on this plug-in, the distribution of residual stress in superalloy GH3039 with different laser process parameters was studied, and the distribution of residual stress in surface direction and depth direction of superalloy GH3039 with different laser spot sizes, laser energy and laser impact times was analyzed. The spot size had a greater effect on the distribution law of residual stress in the surface direction. Compared with the maximum residual stress under the spot diameter of 4 mm and 2 mm, the maximum residual stress under the spot diameter of 6 mm increased by 4.3% and 53% respectively. With the increase of the spot size, the residual compressive stress in the surface direction increased and the variation gradient decreased, and the residual compressive stress in the depth direction increased. This was because the large spot transmitted the shock wave in the form of plane wave and small spot transmitted shock wave in the form of spherical wave, while plane wave attenuated slowly when transmitting laser energy. With the increase of energy, the peak value of laser shock wave pressure changed. On the premise that other process parameters remained unchanged, the superalloy GH3039 was subject to laser shock peening with 6 J, 7 J and 8 J laser energy respectively, and the peak pressure was 2.3 GPa, 2.5 GPa and 2.68 GPa respectively. The average value of residual compressive stress in the impact area increased with the increase of laser energy, and the fluctuation gradient of residual compressive stress increased. The peak value of residual compressive stress was near the central region. This was because the surface wave of the circular spot converged to the center of the laser impact area, causing local reverse plastic strain and reducing the residual compressive stress level. The average depth of the plastic layer subject to 6 J, 7 J and 8 J laser energy was 0.55 mm, 0.67 mm and 0.82 mm, and the depth of the plastic layer increased. The samples were impacted once, twice and three times at the same position respectively. The average value of residual compressive stress in the surface direction of multiple impact peening was higher than that of single impact peening, but the difference was small between the average value of residual compressive stress in the second impact and the third impact. This was because the material was hardened after laser impact peening. With the increase of impact times, the degree of hardening and the fluctuation gradient of residual compressive stress both became larger. With the increase of impact times, the residual compressive stress increased. The average depth of plastic layer impacted once, twice and three times was 0.55 mm, 0.71 mm and 0.85 mm. Multiple impacts can increase the depth of plastic layer.

KEY WORDS: redevelopment of Abaqus; Python; laser shock peening; residual compressive stress; spot diameter; laser energy; impact times

高温合金 GH3039 是固溶强化型单相镍基奥氏体合金^[1], 具有致密的组织结构, 抗氧化性能良好, 冷成形性和焊接性能优异, 在发动机导向器、燃烧室、

涡轮增压器等热端部件的制造领域应用广泛。目前, 发动机热端部件的工作环境恶劣, 在生产作业中易出现腐蚀、磨损、疲劳断裂等问题^[2]。激光冲击强化是

一种新型的表面处理技术,通过激光诱导等离子体产生冲击波,使材料发生塑性变形,从而提高材料的表面性能^[3-5]。一些学者对金属材料的激光冲击强化进行了仿真和实验研究。韩培培等^[6]对铝合金 7075-T7451 进行了激光冲击强化研究,分析了功率密度、冲击次数对铝合金 7075-T7451 力学性能的影响。采用激光冲击强化技术可以大幅度提高试样表面的残余压应力,激光冲击强化对试样抗拉强度的影响较小,较大的激光功率密度对铝合金 7075-T7451 屈服强度的影响较大。焦清洋等^[7]研究了激光冲击强化后,不同激光工艺参数对钛合金 TA15 力学性能的影响。随着激光能量和冲击次数的增加,表面显微硬度和残余压应力逐渐增大。贾凯翔等^[8]利用 Abaqus 有限元软件对钛合金 TC4 进行了激光冲击强化数值模拟,后处理阶段利用 Python 脚本语言对仿真结果进行数据提取分析,发现并分析了“残余应力洞”现象。苟磊等^[9]在研究铝合金 2024-T351 激光冲击强化后残余应力场的分布规律时,提出一种连续显式动态冲击仿真策略,在后处理阶段通过 Python 脚本语言对残余应力仿真结果进行提取分析,发现仿真结果与实验数据的一致性较高,验证了该仿真策略的有效性。孙博宇等^[10]研究了钛合金在激光冲击下应力场的变化机制,研究表明,对于 TC17 钛合金板,当厚度增加时,激光冲击面的残余压应力增加,未冲击表面先增大后减小,这主要由拉伸波与压缩波的相互作用所致。李康妹等^[11]对铝锂合金搅拌摩擦焊接区域进行了激光冲击强化处理,搅拌摩擦焊在表面引入残余拉应力,激光冲击强化在表面引入残余压应力,2 种工艺复合作用,使得材料表面的残余拉应力减小。罗懋钟^[12]建立了钛合金孔 TB6 激光冲击强化仿真模型,在不同激光工艺参数下对孔结构残余应力场分布进行了研究,孔内壁残余压应力随着冲击角度的增加而增大,孔角处残余压应力随着冲击次数的增加而增大,最后趋于饱和。王春光等^[13]采用一种改进的数值模拟方法,只需进行显式分析,就可研究激光冲击强化作用下钛合金 TC17 的残余压应力和表面变形情况,结果表明,表面残余压应力和表面变形随着冲击次数的增加而增大。刘贵杰等^[14]通过仿真模型分析了不同激光工艺参数对残余应力洞的影响,冲击次数会增加残余应力洞的深度,随着光斑直径的增大,残余应力洞的宽度和深度增大。

目前,针对激光冲击强化残余应力场的数值模拟,基于 Python 脚本语言对 Abaqus 前处理阶段二次开发的研究鲜有报道。文中以高温合金 GH3039 为研究对象,利用 Python 脚本语言对 Abaqus 进行二次开发,建立高温合金 GH3039 的激光冲击强化仿真模型,研究高温合金 GH3039 表面和深度方向残余压应力的分布规律。

1 有限元模型

1.1 冲击波压力模型

Fabbro 等^[15]提出了约束层下激光冲击强化的峰值压力公式,如式(1)~(3)所示。

$$I = \frac{4Q}{\pi d^2 \tau} \quad (1)$$

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

$$p_{\max} = 0.01 \left(\frac{\xi}{2\xi + 3} \right)^{0.5} Z^{0.5} I^{0.5} \quad (3)$$

式中: p_{\max} 为冲击波峰值压力; ξ 为等离子体热能占内能的比例系数,取值范围为 0~1; I 为激光功率密度; Q 为激光的能量; d 为光斑直径; τ 为脉宽宽度; Z 为试样和约束层的折合声阻抗; Z_1 、 Z_2 分别为高温合金 GH3039 和水的声阻抗。水的声阻抗为 $0.165 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ^[16], 高温合金 GH3039 的声阻抗由式(4)估算。

$$Z_1 = \sqrt{\rho E} \quad (4)$$

式中: ρ 为金属材料的密度, kg/m^3 ; E 为金属材料的弹性模量, Pa。

在仿真过程中, $z=0$ 处光场强度 $E(x, y, 0)$ 空间分布计算见式(5)^[17-18]。

$$E(x, y, 0) = E_0 \times \exp \left[-2 \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega_0} \right)^N \right] \quad N = 1, 2, 3 \dots (5)$$

式中: E_0 为光斑中心处平顶光束的光场强度; ω_0 、 N 为光斑的尺寸和阶数。激光冲击波压力空间分布如图 1 所示,冲击波压力表达式见式(6)~(7)。

$$p = p_{\max} \times p(t) \times p(x, y) \quad (6)$$

$$p(x, y) = \exp \left[-2 \times \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\omega_0} \right)^{10} \right] \quad (7)$$

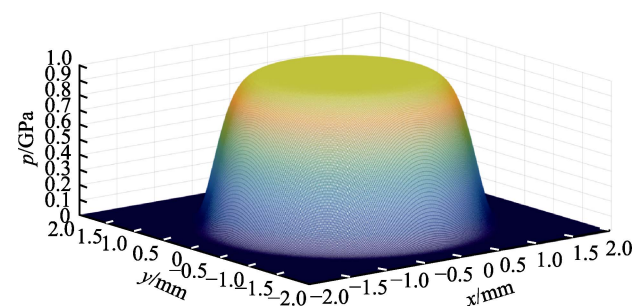


图 1 冲击波压力空间分布

Fig.1 Space distribution of shock wave pressure

式中: $p(t)$ ^[19-20] 为冲击波压力随时间变化的函数。根据冲击波压力随时间的变化趋势可知,冲击波压力随时间的变化规律近似为高斯分布,加载曲线如图 2 所示。

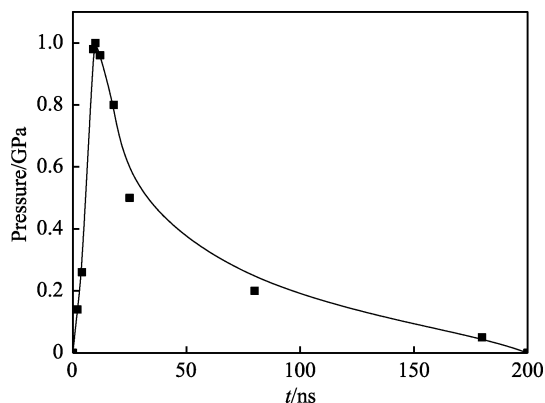


图2 冲击波压力加载曲线
Fig.2 Shock wave pressure loading curve

1.2 材料的屈服极限

在激光冲击强化过程中,产生了超高压冲击波,其作用时间较短。材料应变率与低载荷作用不同,材料屈服极限和强度极限随着应变率的增大而增大。综上所述,应变率对描述激光冲击强化过程至关重要,目前可以采用动态屈服强度模型来描述,见式(8)^[21-22]。

$$\sigma_{\text{dyn}} = E_{\text{HEL}} \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (8)$$

式中: σ_{dyn} 为动态屈服强度极限; E_{HEL} 为许贡纽动态屈服极限(Huguniot Elastic Limit); ν 为泊松比。在高应变率下,激光冲击波压力超过 E_{HEL} ,材料即发生塑性变形, E_{HEL} 与材料动态屈服强度和泊松比有关。

1.3 模型的几何尺寸及网格划分

建立了高温合金 GH3039 有限元模型,试样的几何尺寸为 25 mm×25 mm×1.5 mm,将冲击区域单元格类型设置为八节点减缩单元 C3D8R。在冲击边界区域,采用无限单元 CIN3D8 作为应力波无反射边界。材料的参数见表 1^[23],有限元网格划分模型如图 3 所示。

表 1 试样材料参数^[23]
Tab.1 Material parameters of sample^[23]

Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	E/GPa	ν	Yield strength/MPa
GH3039	8.4	196	0.3	735

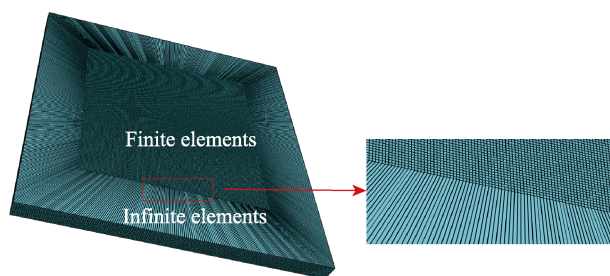


图3 有限元网格模型
Fig.3 Finite element meshing model

1.4 高温合金 GH3039 插件程序设计

1.4.1 ABAQUS/CAE GUI 插件程序

RSG 对话框生成器是 Abaqus/CAE 内嵌的 GUI 插件开发辅助工具,位于 Abaqus/CAE 主视图“Plug-ins”菜单下的“Abaqus”子菜单中。RSG 对话框生成器界面如图 4 所示,该界面具有可创建新的对话框、选择控件、关联内核程序等功能。该工具使用方便快捷,可以提高插件程序的开发效率。

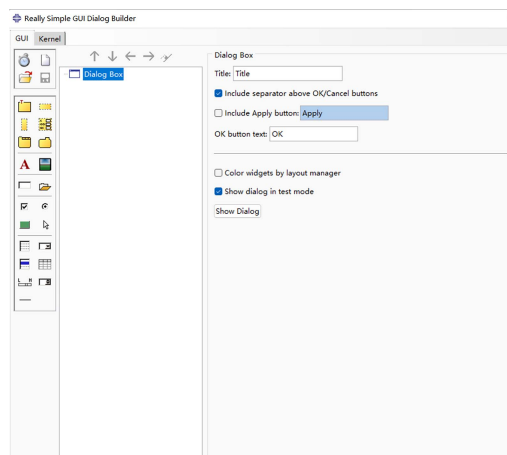


图4 RSG 对话框生成器
Fig.4 RSG dialogue builder

根据仿真建模需求设计的插件应满足如下功能:根据用户需求生成对应的三维模型;自动赋予模型对应的材料属性;自动对模型施加边界条件;自动完成激光冲击载荷的施加;自动完成网格的划分;自动提交作业,并分析计算。

1.4.2 高温合金 GH3039 内核程序及图形用户界面设计

在 ABAQUS/CAE 中建立激光冲击强化模型,并在工作目录中找到 jnl 文件,使用脚本编辑器 Pycharm 打开,并修改代码,得到高温合金 GH3039 参数化建模脚本。以定义试样尺寸为例,部分代码如下^[24-25]。

```
def part(self):
    mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name=
    '__profile__',sheetSize=200.0)
    mdb.models['Model1'].sketches['__profile__'].rect
    angle(point1=(0.0,0.0),point2=(self.length,self.width))
    .....
```

通过 RSG (Really Simple GUI) 对话框构造器构建图形用户界面,在 Kernel 标签页中,定义 1 个主函数,函数中的参数来源于对话框中的控件^[26]。对 GUI 中的关键字和脚本文件中的关键字进行关联,以试样尺寸为例,部分代码如下。

```
AFXForm.___init__(self,owner)
self.radioButtonGroups={}
self.cmd=AFXGuiCommand(mode=self,method='main',
objectName='GH3039', registerQuery=False)
pickedDefault=''
```

```
Self.lengthKw = AFXFloatKeyword (self.cmd, 'length',
True, 25)
self.wedthKw = AFXFloatKeyword (self.cmd, 'wedth',
True, 25)
self.heightKw = AFXFloatKeyword (self.cmd, 'height',
True, 1.5)
.....
```

激光冲击强化插件由 3 个界面组成: 界面 1 为模型参数输入界面, 定义了模型的长度、宽度、高度等参数; 界面 2 为模型材料参数, 定义了密度、弹性模量、泊松比等参数; 界面 3 为冲击强化工艺参数输入界面, 定义了脉冲能量、光斑半径、靶材声阻抗等参数。具体插件的使用界面如图 5 所示。

2 结果与分析

2.1 有限元模型的验证

在实验中, 激光能量为 6 J, 光斑直径为 4 mm, 脉冲宽度为 15 ns, 沿着光斑中心水平方向, 每隔 2 mm 取 3 个点 P_1 、 P_0 、 P_2 , 如图 6 所示。分别测量上述 3 个位置的表面残余压应力, 测量方法为侧倾固定 ψ 法, 顶峰方法为交相关法, 采用锰靶 Mn 辐射来测量残余应力, 衍射晶面为 (311), P_2 点测量数据如表 2 所示, 实验数据与仿真结果对比结果如图 7 所示。

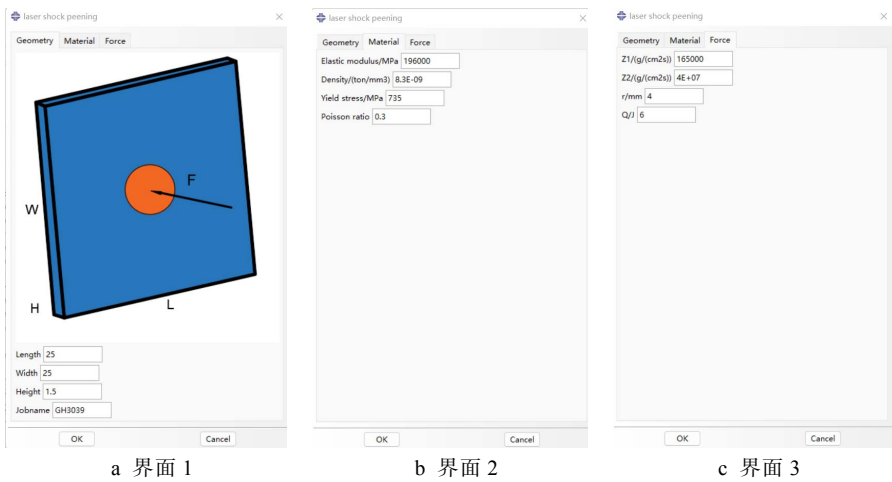


图 5 GH3039 激光冲击强化插件
Fig.5 GH3039 laser shock peening plug-in

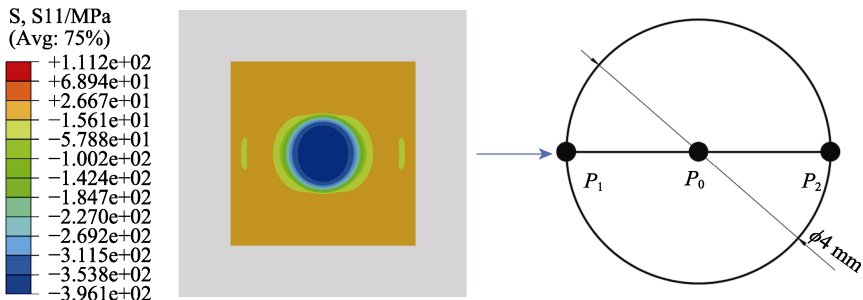


图 6 水平方向测量点
Fig.6 Measuring points in horizontal direction

表 2 P_2 点实验测量数据
Tab.2 Experimental measurement data of point P_2

$\psi/(^{\circ})$	$2\theta/(^{\circ})$	Peak count	Half height width/ $(^{\circ})$	Integral strength	Intergral width/ $(^{\circ})$
0	157.2	3 988	2.85	1 270.6	3.19
15.5	157.365	3 731	3.17	1 315.2	3.53
22.2	157.307	3 880	3.07	1 354.8	3.49
27.6	157.510	3 994	3.15	1 422	3.56
32.3	157.602	4 310	3.03	1 497.3	3.47
36.7	157.602	3 959	3.31	1 531.6	3.87
40.9	157.675	4 365	3.64	1 863.3	4.27
45.0	157.883	4 617	4.00	2 118.1	4.59

Stress value σ -332.5 MPa, Half width of confidence interval 26 MPa, Confidence probability 0.75

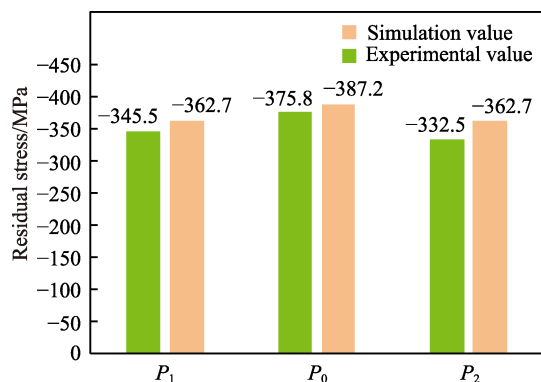


图7 仿真结果与实验数据的对比

Fig.7 Comparison of simulation results with experimental data

由图7可知, P_1 的误差为 4.7%, P_0 的误差为 2.9%, P_2 的误差为 8.3%; 仿真结果与实验数据相比, 误差较小, 说明该插件的仿真模拟准确性较高。

基于高温合金 GH3039 仿真插件研究了不同激光工艺参数对残余应力的影响, 表面取路径 P_1P_2 的应力, 深度方向取路径 L_1 、 L_2 、 L_3 方向残余压应力的平均值, L_1 、 L_2 、 L_3 路径如图8所示。

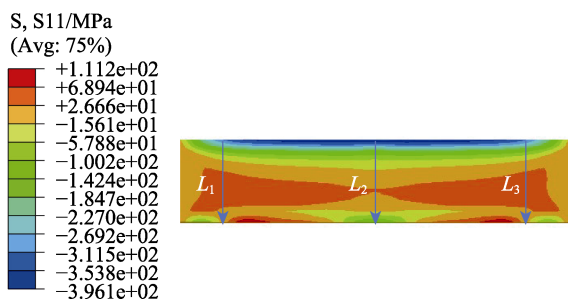
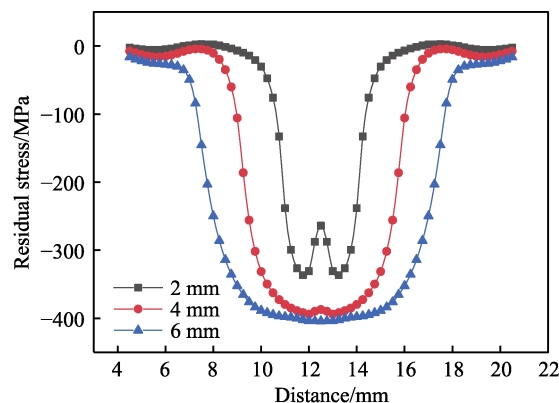


图8 深度方向测量路径

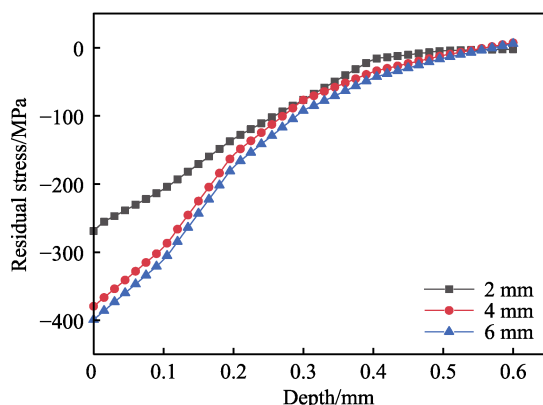
Fig.8 Measuring path in depth direction

2.2 光斑尺寸对残余应力分布的影响

在其他激光工艺参数不变的前提下, 当激光功率密度为 3.18 GW/cm^2 时, 取光斑直径分别为 2、4、6 mm 进行分析, 形成的残余压应力如图9所示。由图9a可知, 光斑尺寸对残余压应力的影响较大; 在直径为 6 mm 时, 中心位置的残余压应力为 -404 MPa, 比光斑直径 4、2 mm 中心位置的残余压应力分别高 4.3%、53%。随着光斑尺寸的增大, 表面的残余压应力增大。由表3可知, 残余压应力的波动梯度减小。由图9b可以看出, 在直径为 2、4、6 mm 时, 峰值压力分别为 -269、-379、-399 MPa, 增幅分别为 40.8%、48.3%, 残余压应力峰值随着光斑直径的增加而增大。这是由于大光斑冲击波的传播形式为平面波, 小光斑冲击波的传播形式为球面波, 平面波传递能量衰减较慢, 使材料表面发生了较大的塑性变形, 形成密度更高的位错和较大的畸变, 使大光斑冲击波形成的残余应力较大。



a 表面



b 深度方向

图9 不同光斑尺寸下 GH3039 残余应力场分布

Fig.9 Residual stress field distribution of GH3039 with different spot sizes: a) surface direction; b) depth direction

表3 不同光斑尺寸下中心值与最大值的对比

Tab.3 Comparison of the center value and the maximum value under different spot sizes

Spot size/ mm	Center value/ MPa	Max value/ MPa	D-value/ MPa
2	-263	-336	73
4	-387	-394	7
6	-404	-404	0

2.3 激光能量对残余应力分布的影响

由 Fabbro 公式可知, 随着激光能量的增加, 激光诱导等离子体产生的峰值压力增大, 调整激光能量的本质就是改变冲击波压力。激光光斑直径 $d=4 \text{ mm}$, 激光脉宽 $\tau=15 \text{ ns}$, 在其他工艺参数不变的前提下, 分别用 6、7、8 J 的激光能量对高温合金 GH3039 进行激光冲击强化, 产生的峰值压力分别为 2.3、2.5、2.68 GPa, 形成的残余压应力如图10所示。由图10a可知, 冲击区域的残余压应力平均值随着激光能量的增加而增加。由表4可知, 残余压应力的波动梯度增大, 残余压应力的峰值在中心区域附近。这是由于圆形光斑的表面波向激光冲击区域中心汇聚, 引起局部反向塑性应变, 降低了残余压应力水平。由图10b可知, 当激光能量为 6、7、8 J 时, 残余压应力层的平

均深度分别为 0.55、0.67、0.82 mm, 残余压应力层的深度增大。

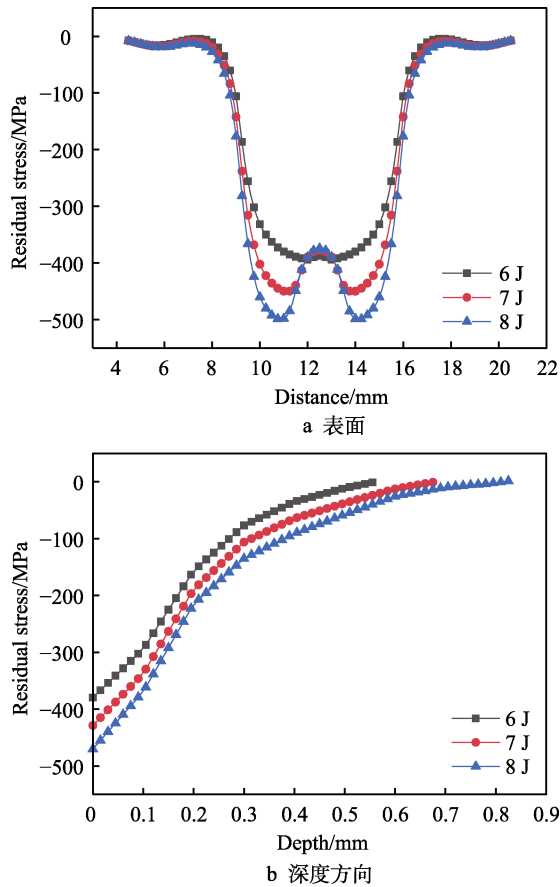


图 10 不同激光能量下 GH3039 残余应力场分布
Fig.10 Residual stress field distribution of GH3039 under different laser energy: a) surface direction; b) depth direction

表 4 不同激光能量中心值与最大值对比
Tab.4 Comparison of the center value and the maximum value under different laser energy

Laser energy/J	Center value/MPa	Max value/MPa	D-value/MPa
6	-387	-394	7
7	-377	-449	72
8	-374	-498	124

2.4 冲击次数对残余应力分布的影响

在同一位置分别对试样进行 1 次、2 次、3 次冲击, 冲击能量 $Q=6\text{ J}$, 激光光斑直径 $d=4\text{ mm}$, 激光脉宽 $\tau=15\text{ ns}$, 在保持其他激光工艺参数不变的情况下, 形成的残余压应力如图 11 所示。由图 11a 可知, 多次冲击强化的残余压应力平均值高于单次冲击强化的残余压应力平均值, 但冲击 2 次时残余压应力的平均值与冲击 3 次时残余压应力的平均值相差较小。这是由于在激光冲击强化后, 材料出现了硬化现象, 随着冲击次数的增加, 硬化程度越大。由表 5 可知, 残余压应力的波动梯度增大。由图 11b 可知, 随着冲

击次数的增加, 残余压应力增大, 冲击 1 次、2 次、3 次时残余压应力层的深度平均值为 0.55、0.71、0.85 mm, 多次冲击可以增大残余压应力层深度。

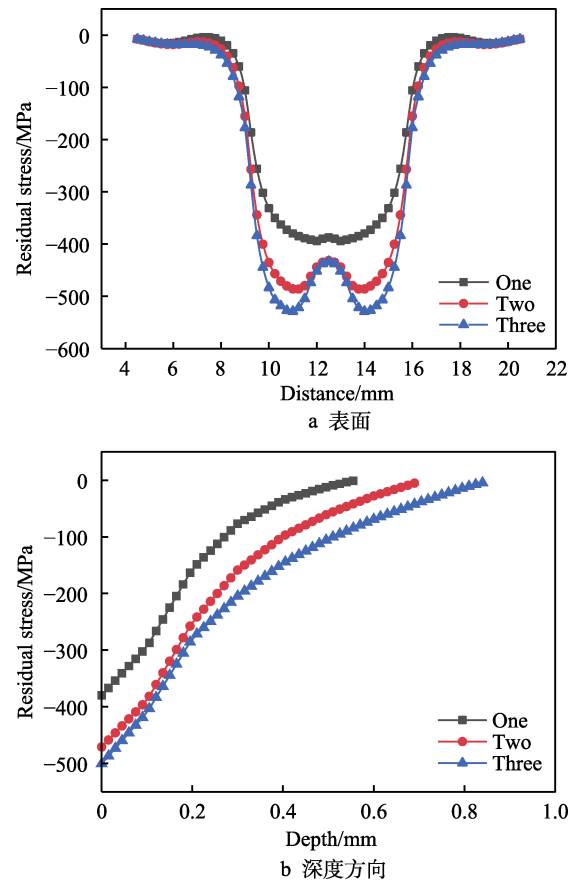


图 11 不同冲击次数下 GH3039 残余应力场分布
Fig.11 Residual stress field distribution of GH3039 under different impact times: a) surface direction; b) depth direction

表 5 不同冲击次数下残余应力中心值与最大值对比
Tab.5 Comparison of the center value and the maximum value under different impact times

Impact times	Center value/MPa	Max value/MPa	D-value/MPa
1	-387	-394	7
2	-431	-485	54
3	-433	-528	95

3 结论

基于 Python 脚本语言开发了高温合金 GH3039 激光冲击强化仿真插件, 得到了不同激光工艺参数作用下表面及深度方向残余应力的分布规律, 具体结论如下。

1) 该插件可以快速地建立激光冲击强化仿真模型, 自动完成材料属性施加、网格划分、载荷施加等前处理操作, 仿真结果误差小。

2) 随着光斑尺寸的增加, 表面残余压应力增大,

且分布波动梯度减小,深度方向残余压应力增大。

3) 随着激光能量的增加,表面残余压应力的最大值增大,且位于光斑中心附近,残余压应力的变化梯度增大,深度方向残余压应力层的深度增大。

4) 随着冲击次数的增加,表面残余压应力增大,且波动梯度增大,深度方向残余压应力层的深度增大。

参考文献:

- [1] 黄春峰. 高温合金(GH3039)环形件的锻造工艺[J]. 锻压技术, 1998, 23(4): 11-13.
HUANG Chun-feng. Forging Technology of Superalloy (GH3039) Ring Parts[J]. Forging and Stamping Technology, 1998, 23(4): 11-13.
- [2] SUN Wen-jun, WANG Shan-lin, XIN Ji-jun, et al. Microstructure and Mechanical Properties of the IC10/GH3039 Dissimilar Electron Beam Welded Joint[J]. Vacuum, 2020, 181: 109592.
- [3] RUBIO-GONZÁLEZ C, OCAÑA J L, GOMEZ-ROSAS G, et al. Effect of Laser Shock Processing on Fatigue Crack Growth and Fracture Toughness of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 386(1/2): 291-295.
- [4] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser Shock Processing of Aluminum Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 210(1/2): 102-113.
- [5] CLAUER A H, LAHRMAN D F. Laser Shock Processing as a Surface Enhancement Process[J]. Key Engineering Materials, 2001, 197: 121-144.
- [6] 韩培培, 权纯逸, 焦清洋, 等. 激光冲击强化对 7050-T7451 铝合金残余应力和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 190-195.
HAN Pei-pei, QUAN Chun-yi, JIAO Qing-yang, et al. Effect of Laser Shock Processing on Residual Stress and Mechanical Properties of 7050-T7451 Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(2): 190-195.
- [7] 焦清洋, 韩培培, 陆莹, 等. 激光冲击强化对 TA15 钛合金残余应力和力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(3): 146-152.
JIAO Qing-yang, HAN Pei-pei, LU Ying, et al. Effect of Laser Shock Peening on Residual Stress and Mechanical Properties of TA15 Titanium Alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(3): 146-152.
- [8] 贾凯翔, 张传伟, 聂祥樊. 激光冲击“残余应力洞”的参数影响[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 82-86.
JIA Kai-xiang, ZHANG Chuan-wei, NIE Xiang-fan. Sensitivity Analysis of "Residual Stress Hole" Induced by Laser Shock Peening[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(8): 82-86.
- [9] 苟磊, 马玉娥, 杜永. 多点连续动态激光冲击强化残余应力场数值分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2738-2744.
GOU Lei, MA Yu-e, DU Yong. Continuous Dynamic Numerical Analysis of Residual Stress Field under Multi-Point Laser Shock Peening[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2738-2744.
- [10] 孙博宇, 乔红超, 赵吉宾, 等. 高斯模激光冲击钛合金薄壁件应力场的演变机制[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 76-83.
SUN Bo-yu, QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, et al. Evolution Mechanism of Residual Stress Field in Gaussian Laser Shocking of Titanium Alloy Thin-Wall Workpieces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 76-83.
- [11] 李康妹, 何幸哲, 蔡宇, 等. 搅拌摩擦焊与激光冲击复合工艺的应力场仿真[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 68-79.
LI Kang-mei, HE Xing-zhe, CAI Yu, et al. Stress Field Simulation of Friction Stir Welding and Laser Peening Composite Process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 68-79.
- [12] 罗懋钟. 钛合金连接孔激光冲击强化及抗微动损伤有限元仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 25-32.
LUO Mao-zhong. The Finite Element Simulation Study of Laser Shock Peening and Fretting Fatigue Resistance of Titanium Alloy Connection Holes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 25-32.
- [13] 王春光, 宋亚杰, 朱然. 多点激光冲击强化对 TC17 钛合金表面残余应力和表面变形影响的数值模拟[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 475-481.
WANG Chun-guang, SONG Ya-jie, ZHU Ran. Numerical Simulation of Surface Residual Stress and Deformation of TC17 Titanium Alloy Under Multiple Laser Shock Peening[J]. Applied Laser, 2019, 39(3): 475-481.
- [14] 刘贵杰, 杨胜瑞. 激光冲击诱导的残余应力洞数值建模仿真分析[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(10): 241-247.
LIU Gui-jie, YANG Sheng-rui. Finite Element Simulation of Residual Stress Hole Induced by Laser Shock Processing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(10): 241-247.
- [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] 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): 150-156.
ZHANG Xing-quan, ZHANG Yan, DUAN Shi-wei, et al. Numerical Simulation of Dynamic Response of round Rod Subjected to Laser Shocking[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 150-156.
- [17] GORI F. Flattened Gaussian Beams[J]. Optics Communications, 1994, 107(5/6): 335-341.
- [18] COLLINS J S A. Lens-system Diffraction Integral Written in Terms of Matrix Optics[J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(9): 1168-1177.

- [19] 朱然. 平顶光束多点激光冲击薄壁件的强化与变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2019: 20-21.
ZHU Ran. Study on Strengthening and Deformation of Thin-Walled Components under Flattened Beam Multiple Laser Shock Processing[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 20-21.
- [20] CORREA C, RUIZ DE LARA L, DÍAZ M, et al. Effect of Advancing Direction on Fatigue Life of 316L Stainless Steel Specimens Treated by Double-Sided Laser Shock Peening[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 79: 1-9.
- [21] PEYRE P, CHAIEB I, BRAHAM C. FEM Calculation of Residual Stresses Induced by Laser Shock Processing in Stainless Steels[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2007, 15(3): 205-221.
- [22] ZHANG Yong-kang, YOU Jian, LU Jin-zhong, et al. Effects of Laser Shock Processing on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of AZ31B Magnesium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(24): 3947-3953.
- [23] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 194-202.
China Aviation Materials Manual Editorial Committee. China Aeronautical Materials Handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001: 194-202.
- [24] 陈飞, 王成雨, 李伟刚, 等. Abaqus 二次开发在航空弓形结构件喷丸强化模拟中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2020, 29(2): 55-60.
CHEN Fei, WANG Cheng-yu, LI Wei-gang, et al. Application of Abaqus Secondary Development in Shot Peening Strengthening of Aerospace Arc-shaped Frame[J]. Computer Aided Engineering, 2020, 29(2): 55-60.
- [25] 张梦梦, 陈泽中, 朱欢欢, 等. 基于 ABAQUS 二次开发的参数化型材拉弯前处理模块研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(5): 82-85.
ZHANG Meng-meng, CHEN Ze-zhong, ZHU Huan-huan, et al. Development of the Parametric Pre-process Module of Stretch Bending for Profile Based on ABAQUS with Python[J]. Manufacturing Automation, 2022, 44(5): 82-85.
- [26] 朱兆华, 黄菊花, 张庭芳, 等. ABAQUS 前、后处理模块二次开发的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(1): 30-33.
ZHU Zhao-hua, HUANG Ju-hua, ZHANG Ting-fang, et al. Application of Second-developed on ABAQUS Pre-Process and Post-process[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009(1): 30-33.

责任编辑: 彭颀

(上接第 357 页)

- [19] 杨旻, 魏昕, 谢小柱, 等. 微热管复合沟槽激光刻蚀工艺正交优化试验[J]. 机械设计与制造, 2017(S1): 198-200.
YANG Yang, WEI Xin, XIE Xiao-zhu, et al. Orthogonal Optimization Test of Laser Etching Process for Micro Heat Pipe Composite Grooves[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(S1): 198-200.
- [20] 江洋, 王宝雨. 芯棒对楔横轧厚壁空心轴成形质量及轧制力的影响[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 19-22.
JIANG Yang, WANG Bao-yu. Effect of Mandrel on Forming Quality and Rolling Force of Cross Wedge Rolling for Thick-Wall Hollow Axle[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(6): 19-22.
- [21] 苏永生, 李亮, 何宁, 等. 激光加工硬质合金刀具表面微织构的试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 60-66.
SU Yong-sheng, LI Liang, HE Ning, et al. Experimental Research on Laser Machining of Surface Micro-Textures of Carbide Cutting Tool[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 60-66.
- [22] 周建忠, 钟辉, 黄舒, 等. AZ31B 镁合金激光表面微凹坑效应及其电化学腐蚀行为[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303007.
ZHOU Jian-zhong, ZHONG Hui, HUANG Shu, et al. Surface Micro-Dimple Effect and Electrochemical Corrosion Behaviors of AZ31B Magnesium Alloy Treated by Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0303007.
- [23] 王文涛, 梁庭, 雷程, 等. 355 nm 全固态紫外激光加工玻璃通孔工艺[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(1): 59-65.
WANG Wen-tao, LIANG Ting, LEI Cheng, et al. Glass through Holes by 355 nm All-Solid-State Ultraviolet Laser Processing[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(1): 59-65.
- [24] CHOI H W, BONG S, FARSON D F, et al. Femtosecond Laser Micromachining and Application of Hot Embossing Molds for Microfluid Device Fabrication[J]. Journal of Laser Applications, 2009, 21(4): 196-204.
- [25] 潘嘉裕, 庄鹏, 于新海. 皮秒激光烧蚀 7075 铝合金数值模拟与实验研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 994-999.
PAN Jia-yu, ZHUANG Peng, YU Xin-hai. Numerical Simulation and Experimental Study on Picosecond Laser Ablation of 7075 Aluminum Alloy[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(7): 994-999.