

多点连续动态激光冲击强化残余应力场数值分析

苟磊, 马玉娥, 杜永
(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘 要: 为了提高激光冲击强化(LSP)数值模拟效率及计算精度,基于传统激光冲击仿真策略,提出了一种连续显式动态冲击仿真策略。使用显式动态分析完成多次冲击,再进行隐式静态分析得到稳定残余应力场;建立 ABAQUS 三维平板有限元模型,基于该策略研究了多次冲击后残余应力场的分布;Python 后处理后,残余应力模拟值与测量值吻合较好。结果表明:当激光功率密度为 1 GW/cm^2 时最大残余应力为 -212.5 MPa ,其测量均值为 -216.7 MPa ,误差为 1.9% 。激光功率密度从 1 GW/cm^2 增加至 4 GW/cm^2 ,残余应力层深度由 0.7 mm 增加至 1 mm 。验证了该策略的准确性,在大幅度提高仿真效率的基础上有效地提高了模拟精度,为大型结构大面积激光冲击强化数值模拟提供了一种仿真思路。

关键词: 激光冲击强化(LSP); 多点连续; 动态算法; 残余应力场; Python 后处理

中图分类号: V261.8

文献标志码: A

Continuous dynamic numerical analysis of residual stress field under multi-point laser shock peening

GOU Lei, MA Yu'e, DU Yong

(School of Aeronautics,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and accuracy of numerical simulation of laser shock peening (LSP), a continuous explicit-dynamic impact simulation strategy was proposed based on the traditional simulation strategy. The explicit-dynamic analysis was used directly to simulate the multiple shot peening. And then the implicit-static analysis was used to obtain the stable residual stress field after being balanced. The three-dimensional finite element model of a plate was established by ABAQUS. Based on this strategy, the distribution of residual stress field after repeated impacts was studied. After Python post-processing, the simulated values were in good agreement with the experimental measurements. It was shown that the maximum residual stress was -212.5 MPa ; the mean value was -216.7 MPa , and the error was 1.9% when the laser power density was 1 GW/cm^2 . With the increase of laser power density from 1 GW/cm^2 to 4 GW/cm^2 , the depth of residual stress layer increased from 0.7 mm to 1 mm . The simulation accuracy was effectively improved on the ba-

收稿日期:2019-06-10

基金项目:国家自然科学基金(11572250)

作者简介:苟磊(1995—),男,硕士生,主要从事航空结构疲劳研究。

通信作者:马玉娥(1975—),女,教授、博士生导师,博士,主要从事复合材料结构力学和结构强度研究。

E-mail:ma.yu.e@nwpu.edu.cn

引用格式: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.

sis of greatly improving the simulation efficiency, providing a simulation idea for large area LSP numerical simulation of large-scale structures.

Key words: laser shock peening(LSP); multi-point continuity; dynamic algorithm; residual stress field; Python post-processing

在航空航天领域,激光冲击强化(laser shock peening, LSP)作为一种重要的表面强化技术^[1-3],是改善构件疲劳性能的重要方法之一。相比于机械喷丸强化,LSP可获得较高的压残余应力和较深的残余应力影响层,微观结构损伤较小、可控性强^[4-6]。LSP在工业领域广泛应用,尤其是航空工业,通过激光强化技术对航空发动机叶片等应力集中关键部位进行处理或修复,可有效地提高构件的疲劳寿命^[7-8]。

国内外学者通过试验和数值模拟对激光冲击强化进行了广泛的研究。Fabbro等^[9]对约束条件下的冲击波进行了半理论的研究,给出了等离子体冲击压力的一维解析模型。该模型能够在给定激光脉冲功率密度与材料声阻抗的条件下,预测等离子体的压力、厚度与膨胀速度,被广泛应用于光斑尺寸为 mm 级的冲击压力预测中。William等^[10]提出使用有限单元和无限单元混合建模来分析激光冲击过程,在物理边界处使用无限单元可以限制应力波在边界处的反射,防止应力波重新进入模型影响整体残余应力分布。Robert等^[11]通过显隐式数据转换和增加阻尼的方法,对钛合金和铝合金进行多次冲击模拟后发现,有限元法得到的残余应力场具有“局部差异性”。而 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测量的残余应力为 X 射线光斑照射范围内的平均值,因此可以使用统计学方法提取有限元残余应力结果进行后处理。Amarchinta等^[12]通过分析对比了 JC (Johnson-Cook)、ZA(Zerilli-Armstrong)和 KHL (Khan-Huang-Liang)等材料模型对残余应力计算结果的影响。结果表明,JC 和 KHL 模型可以更准确地预测残余应力。胡永祥等^[13]建立了激光冲击强化处理的分析模型,结合应力波理论,提出显式分析求解时间的选择方法,其分析结果与试验测量结果非常接近。

目前多点连续激光冲击强化的数值仿真主要采用重复显隐式数据转换这一传统数值策略^[14]来模拟残余应力场(通常为几个点到几十个点),而实际应用中对于大型复杂结构件,一般需要成百甚至上千次冲击才能保证冲击区域的覆盖率。如果还是采用传统的数值模拟策略解决这种问题

时,则需要耗费大量的人力、物力及计算资源。

基于已有仿真策略,本文提出了一种连续显式动态冲击仿真策略。通过建立激光冲击强化有限元模型,研究了多点冲击后残余应力场的分布。将有限元应力结果进行后处理,并与文献[11]中有限元模拟结果和试验结果进行对比,验证了该仿真策略的准确性,在保证计算精度的基础上有效地提高了数值模拟效率,为大型结构件大面积激光冲击强化数值模拟提供了一种思路。

1 多点冲击数值模拟

1.1 多点冲击仿真策略

ABAQUS/Explicit 求解器采用非线性、弹塑性和显式时间积分进行分析,适合模拟高速动力学问题^[15]。对于激光冲击问题,可以同时应用于初始加载和最终残余应力场的确定,但是收敛到完全稳定状态时间过长。ABAQUS/Standard 模块也可以直接用于求解整个激光冲击过程,但是对于网格划分较密的有限元模型,由于其每一次迭代都需要求解大型方程组,需要更长的求解时间。如图 1(a)所示,使用传统仿真策略进行多次冲击数值模拟时,每一次冲击都需要在显式动态和隐式静态模块之间相互导入应力、应变数据,同时每一次都需要在 Fortran 子程序 VDLOAD 中修改冲击点的位置坐标,人为操作麻烦费时。

本文提出的显式动态连续冲击仿真策略,将单次激光冲击过程分解为激光冲击加载阶段和单次动态应力平衡阶段。如图 1(b)所示,多次冲击过程只使用 Abaqus/Explicit 求解器进行分析,即单次激光冲击加载完成后直接进行单次动态应力平衡,不需要将应力数据导入隐式静态模块进行自平衡。激光冲击加载时间为 2 倍的激光脉宽,在 Abaqus/Explicit 进行单次动态应力平衡时动态应力需要达到相对稳定的状态,才能进行下一次冲击,如此循环往复多次冲击。多次冲击完成后将应力数据从 Explicit 传递到 Standard 进行整体动态应力平衡,获得稳定的残余应力场。

在多点冲击过程中,应综合考虑动态应力和塑性变形状态选取单次动态应力平衡时间。如果

时间选取过短,动态应力还处于不稳定状态,会影响塑性变形大小进一步影响残余应力。如果时间选取过长,虽然可以保证动态应力趋于稳定,但是会使求解时间大大增加。

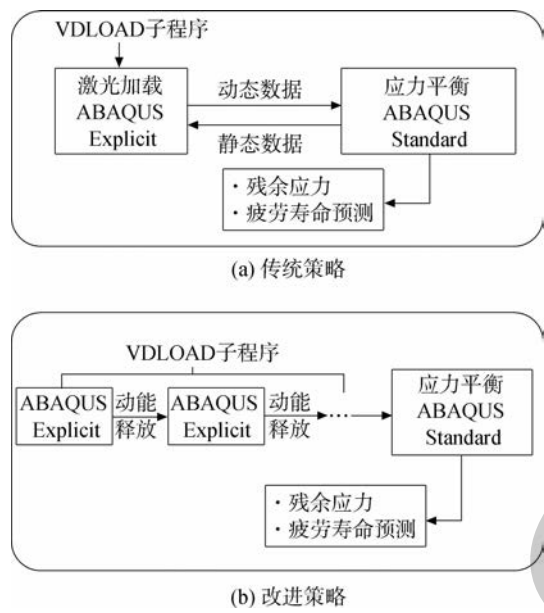


图 1 激光冲击强化仿真策略
Fig. 1 Simulation strategy of LSP

后续冲击过程中,虽然先前冲击的动能仍在释放,但是通过有限元分析后发现选取适当的应力平衡时间后其变化太小,不会对下一冲击过程产生明显的影响,因此可以忽略不同冲击之间动能的相互影响。具体应力平衡时间控制在 Fortran 子程序 VDLOAD 中完成,流程控制如图 2 所示。

1.2 材料本构模型

为验证上述模拟策略的正确性,选取文献 [11] 中的铝合金平板模型进行验证。多点冲击模型所采用材料为 2024-T351 铝合金。由于激光冲击具有瞬时性、高应变率等特点,因此采用 JC 流动应力模型作为材料动态响应的本构模型。该模型是材料屈服后应力-应变曲线的拟合表示,综合考虑了应变硬化、应变率效应和热效应对流动应力的影响。由于激光强化属于冷加工过程,一般不考虑温度所产生的影响^[16],因此该模型可简化为

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

式中 σ 为流动应力, A 为屈服强度, B 为硬化模量, n 为硬化指数, C 为应变强化系数, ϵ_p 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}$ 表示等效塑性应变速率, $\dot{\epsilon}_0$ 表示参考

塑性应变速率。2024-T351 铝合金的 JC 模型参数见表 1。

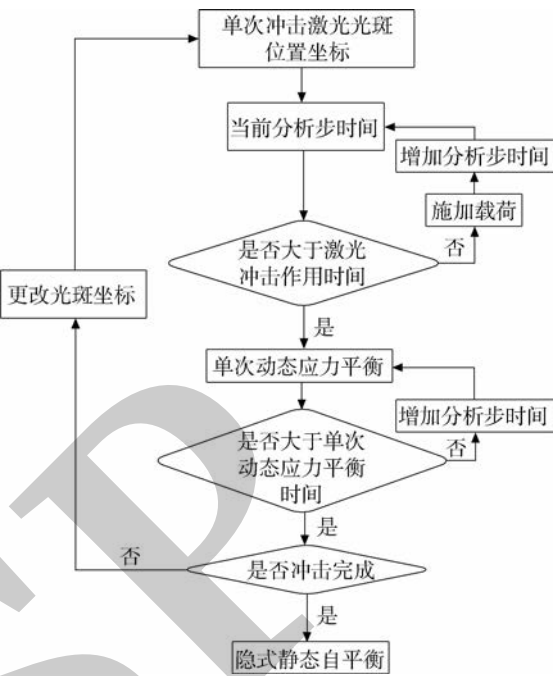


图 2 VDLOAD 子程序加载流程
Fig. 2 Flow chart for VDLOAD subroutine

表 1 Johnson-Cook 模型材料参数^[11]

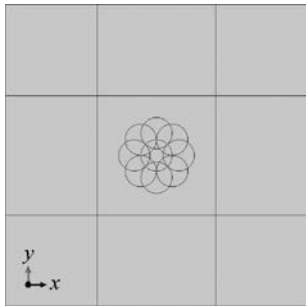
Table 1 Material parameters of Johnson-Cook model ^[11]				
材料	A/MPa	B/MPa	C	n
2024-T351	369	684	0.73	0.0083

1.3 有限元模型

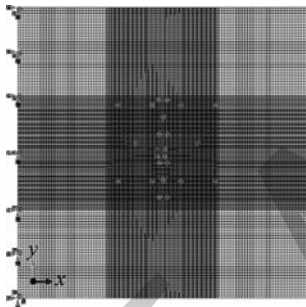
2024 铝板尺寸为 50.8 mm×50.8 mm×6.35 mm,激光光斑尺寸 $d=5.3$ mm,选取激光功率密度 1 GW/cm² 和 4 GW/cm² 进行冲击,具体载荷及冲击点位置坐标由 VDLOAD 子程序控制。如图 3(a) 所示,建立激光冲击强化有限元模型,依次冲击 9 次。如图 3(b) 所示,在冲击区域表面局部加密网格,同时沿厚度(激光冲击)方向设置网格局部加密,保证残余应力计算精度。经过网格收敛性分析后选取网格数量为 270 万,单元类型为 C3D8R,单元最小尺寸为 0.124 mm。在平板一端设置固定边界条件,边界条件和载荷施加情况如图 3(b) 所示。

该策略只需直接定义一个显式动态分析步,时间设置为总冲击时间与动态应力平衡时间之和。根据胡永祥等^[16-17]所提出显式求解时间的确定方法,将动态应力状态基本保持稳定的时间选择为单次冲击的求解时间。通过对单点激光冲击

进行有限元分析验证后,选择单次冲击的求解时间 $T_1=2000\text{ ns}$,即当求解时间到达 2000 ns 时,动态应力状态就基本不随体系动能的变化而变化,因此保持相对稳定的状态。选择显示动态分析步时间 $T_2=30\,000\text{ ns}$ 。为保证计算结果收敛,同时提高计算速度,根据最小单元尺寸及应力波速^[18]选择固定增量步时间 $\Delta T=2\text{ ns}$ 。



(a) 冲击位置



(b) 边界条件和网格划分

图 3 LSP 有限元模型

Fig. 3 Finite element model of LSP

1.4 冲击波加载模型

有限元分析中一般将激光诱导产生的冲击波简化为随时间变化的压力载荷,然后直接作用于靶材表面。冲击压力持续时间极短,冲击压力曲线可简化为三角波形^[19],如图 4 所示,图中 T 表示时间。采用 Fabbro 等^[9]推导的激光喷丸峰值压力估算式,可得对应的冲击波峰值压力为

$$p_{\max}=0.01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\cdot\sqrt{ZI_0}\tag{2}$$

式中 $p_{\max}$ 为峰值压力, α 为内能与热能比值,一般取 0.1 ^[13]; Z 为材料的折合声阻抗; I_0 为激光功率密度,激光功率密度计算公式为

$$I_0=\frac{4\gamma E}{\pi\tau d^2}\tag{3}$$

式中 γ 为等离子体的等熵指数,通常取 0.7 ; E 为激光能量; τ 为激光脉宽, $\tau=20\text{ ns}$ 。

由于平顶光束能量空间分布均匀,能在靶材

中产生平面性良好的冲击波,因此与高斯光束相比,使用平顶光束进行模拟激光冲击具有更大的优势^[20],因此本文选取平顶光束进行仿真。将激光功率密度 1 GW/cm^2 和 4 GW/cm^2 代入式(2)中,可得对应的冲击波峰压力值分别为 1.132 GPa 和 2.264 GPa 。

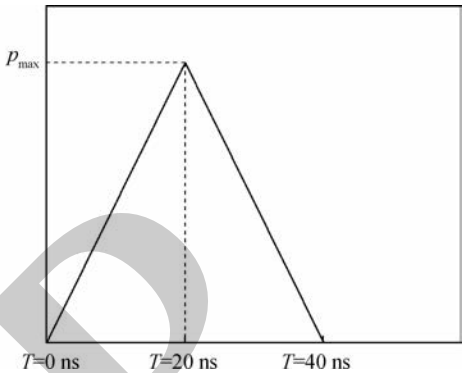


图 4 简化后的冲击波压力随时间的分布

Fig. 4 Simplified shock wave pressure distribution with time

2 多点冲击数值模拟结果与讨论

2.1 计算效率对比

本文所采用模型网格总数为 270 万,显式动态分析采用 8 核进行计算,隐式静态分析采用 18 核计算。与文献[11]对比,其网格总数为 91.87 万,显式动态分析采用 32 核计算,隐式静态分析采用 48 核计算。

文献[11]中数值模拟时采用 SGI(silicon graphics) Altix 4700 集群计算平台,以超标量 MIPs(million instructions per second)R10000 及更高一级的处理器运行,配置基于 Linux 的 64 位操作系统。而本文模型显式动态分析时仅采用微型电子计算机(8 核,主存 16 G),其各配置参数远低于 SGI Altix 4700。通过对比发现,文献[11]中显示动态计算效率为每万单元 0.072 h ,而本文策略其计算效率为每万单元 0.005 h ,对计算机 CPU(central processing unit)的占用率远低于文献[11]。进行隐式静态分析时,两者计算效率并不存在计算方法所导致的差别。本文模拟策略为了提高残余应力数值模拟精度,在增加单元总数的基础上,反而提高了计算效率。并且本文策略只需要一次导入数据操作,可减少工作量,降低人为操作失误率。因此综合来讲,本文策略仿真效率明显提高,且计算时间显著较少,大大减少了前处理工作量,对于一般研究人员也能满足其计算

的需要。

2.2 有限元结果

图 5(a)表示多点冲击后整体残余应力 S 的分布情况,图 5(b)表示冲击后表面塑性变形(PEEQ)情况。有限元分析可以得到整个残余应力场的分布,但与实际值相比,有限元残余应力场会产生“局部差异性”和“波动性”等现象。如图 5(c)所示,在试验测量范围内任意选取 4 组残余应力提取路径,其有限元应力结果存在着明显的差异性。XRD(X 射线衍射)测量的残余应力为 X 射线光斑照射范围内的平均值^[21],而有限元分析的结果是精确到划分的单元尺寸的,这也是模拟

值与试验值产生误差的原因之一。为了和试验测量条件一致,对有限元结果进行后处理,减小局部差异性及误差。

根据试验测量方法,在有限元结果中提取与试验测量范围内对应的残余应力值进行处理。采用式(3),通过对残余应力测量区域内的应力连续积分后,再进行“均化”处理,从而得到较理想的残余应力结果。

$$\sigma^{\text{avg}} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} \sigma_{ij} dA \tag{4}$$

式中 σ^{avg} 为残余应力均值, A_s 为残余应力测量区域面积; σ_{ij} 为单元积分点或节点上的应力; dA 为测量区域内微元面积。

Abaqus 实际计算得到的是单元积分点上的应力,而节点应力是通过平均化技术得到的,因此积分点上的应力更准确且易提取^[22]。本文利用 Python 分别提取单元积分点和节点上的应力^[23]进行处理。

2.3 多点冲击结果分析

如图 6 所示,虽然单次冲击后动能随时间逐渐衰减,但是总体动能随冲击次数的增加逐渐增加。最后一次冲击后,系统动能逐渐衰减至稳定状态。为了加速能量的释放,将动态应力场导入 Standard 模块进行自平衡,获得稳定残余应力场。

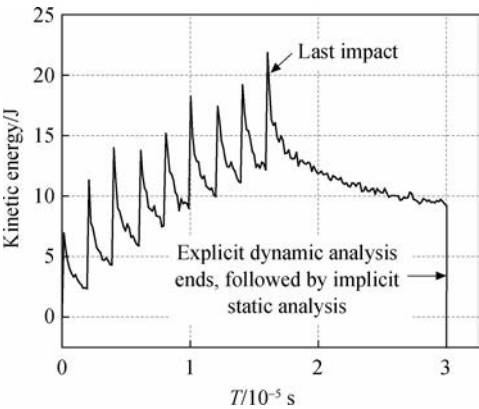


图 6 多点冲击系统动能随时间的分布
Fig. 6 Distribution of system kinetic energy of multi-point impacts with time

通过本文模拟值(图中红线)与文献[11] Robert 等的模拟值(图中黑线)和试验测量值(图中数据点,试样编号与文献[11]中一致,具体含义参见文献[11])对比,说明提取积分点应力的有效性以及本文所提出策略的准确性。如图 7(a)所示,激光功率密度为 1 GW/cm^2 时最大残余应力分布在表面,其模拟值为 -212.5 MPa ,测量均值

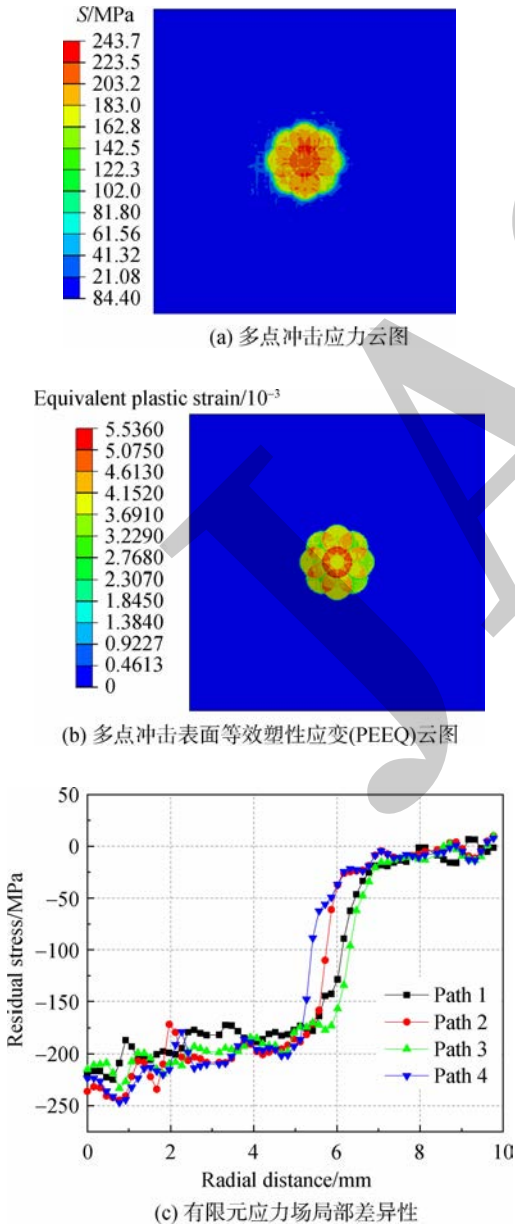


图 5 有限元结果
Fig. 5 Finite element solutions

为-216.7 MPa,两者误差为 1.9%。表面方向残余应力沿厚度分布整体趋势与试验结果吻合较好。

如图 7(b)所示,激光功率密度为 4 GW/cm² 时最大残余应力位于距冲击表面 0.1 mm 处,其模拟值为-330 MPa。测量均值为-287.5 MPa。模拟值与试验值的平均值误差为 14%。当激光功率密度为 1 GW/cm² 时,残余应力影响层深度约为 0.7 mm。当功率密度为 4 GW/cm² 时,残余应力影响层深度约为 1 mm。随着功率密度的增加,压缩残余应力的最大值在增加的同时,其影响层深度也在逐渐增加。整体有限元模拟结果相对于文献[11]模拟结果精度明显提高,且与试验测量结果接近,具有相同的变化趋势。

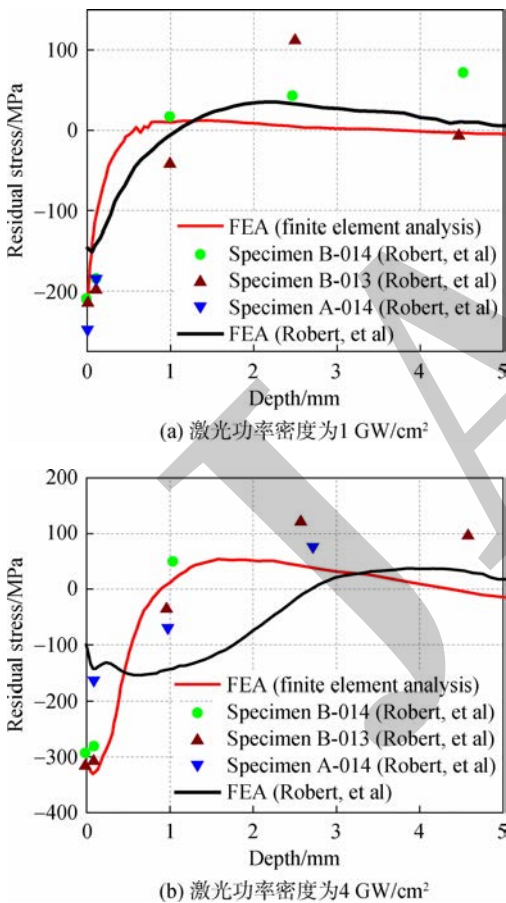


图 7 不同激光功率密度下残余应力沿厚度方向的分布
Fig. 7 Distribution of residual stress along thickness direction under different laser power densities

通过提取单元节点应力获得冲击区域表面残余应力。当激光功率密度为 1 GW/cm² 时,多次模拟值为-201.5、-212.7 MPa,平均值为-207.1 MPa。测量均值为-216.7 MPa,模拟值与试验值平均值误差为 4.4%,说明提取单元节

点应力也可以有效估计残余应力。通过直接以单元节点应力值作为材料的残余应力与 Python 后处理均化所得值对比,说明了直接提取冲击结果,应力分布表现出明显的“局部差异性和波动性”,而采用 Python 后处理可以有效地减缓这种现象。

3 结 论

1) 基于传统激光冲击强化仿真策略,提出了一种连续显式动态冲击仿真策略。直接在显式动态模块进行连续冲击有限元模拟,随后对整体冲击残余应力结果进行隐式静态自平衡分析。这种方法只需进行一次显隐式数据转换,突破了已有仿真策略需要重复多次显隐式数据转换这一局限性,可以节省大量人力、计算资源;

2) 对仿真结果进行“均化”处理后,与试验测量值对比发现,该策略在大量网格的基础上,数值模拟效率较已有策略大幅度提升,同时保证了残余应力的计算精度。验证了该策略的有效性,为大面积激光冲击强化数值模拟提供了一种分析思路。

参考文献:

[1] 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.
WANG Shengbo, FAN Yong, WU Hongxing, et al. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(1): 125-128. (in Chinese)
[2] 聂祥樊,何卫锋,臧顺来,等. 激光冲击对 TC11 钛合金组织和力学性能的影响[J]. 航空动力学报,2014,29(2):321-327.
NIE Xiangpan, HE Weifeng, ZANG Shunlai, et al. Effects on structure and mechanical properties of TC11 titanium alloy by laser shock peening [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 321-327. (in Chinese)
[3] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. Optical and Quantum Electronics, 1995, 27(12): 1213-1229.
[4] MONTROSS C S, WEI T, YE L, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
[5] HATAMLEH O, LYONS J, FORMAN R. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(3): 421-434.
[6] 高玉魁,仲政,雷力明. 激光冲击强化和喷丸强化对 FGH97 高温合金疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工

- 程,2016,45(5):1230-1234.
- GAO Yukui,ZHONG Zheng,LEI Liming. Influence of laser peening and shot peening on fatigue properties of FGH97 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2016,45(5):1230-1234. (in Chinese)
- [7] FANG Y W,LI Y H,HE W F, et al. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade[J]. Materials Science and Engineering,2013,559(1):683-692.
- [8] SEE D W,DULANEY J L,CLAUER A H, et al. The air force manufacturing technology laser peening initiative[J]. Surface Engineering,2002,18(1):32-36.
- [9] 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.
- [10] WILLIAM B,ROBERT B. Finite element simulation of laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue,1999,21(7):719-724.
- [11] ROBERT A B,WILLIAM R B,STEVEN E, et al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue,2012,36(1):96-108.
- [12] AMARCHINTA H K,GRANDHI R V,CLAUER A H, et al. Simulation of residual stress induced by a laser peening process through inverse optimization of material models[J]. Journal of Materials Processing Technology,2010,210(14):1997-2006.
- [13] 胡永祥,姚振强,胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光,2006,33(6):846-851.
- HU Yongxiang,YAO Zhenqiang,HU Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing[J]. Chinese Journal of Lasers,2006,33(6):846-851. (in Chinese)
- [14] DING K. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes[J]. Surface Engineering,2003,19(5):351-358.
- [15] 曹金凤,石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [16] HU Y,YAO Z,HU J. 3-D FEM simulation of laser shock processing[J]. Surface and Coatings Technology,2006,201(3):1426-1435.
- [17] HU Y,YAO Z. Numerical simulation and experimentation of overlapping laser shock processing with symmetry cell[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2008,48(2):152-162.
- [18] 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.
- 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)
- [19] 蒋聪盈,黄露,王婧辰,等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. 表面技术,2016,45(4):5-9.
- JIANG Congying, HUANG Lu, WANG Jingchen, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening[J]. Surface Technology,2016,45(4):5-9. (in Chinese)
- [20] 余天宇,戴峰泽,张永康,等. 平顶光束激光冲击 2024 铝合金诱导残余应力场的模拟与实验[J]. 中国激光,2012,39(10):25-31.
- YU Tianyu, DAI Fengze, ZHANG Yongkang, et al. Simulation and experimental study on residual stress field of 2024 aluminum alloy induced by flat-top laser beam[J]. Chinese Journal of Lasers,2012,39(10):25-31. (in Chinese)
- [21] 徐国平,尹志民,黄继武,等. X 射线衍射测试 PDC 表面残余应力的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2007,161(5):40-43.
- XU Guoping, YIN Zhimin, HAUNG Jiwu, et al. Experimental study on measuring residual stresses of PDC by X-ray diffraction[J]. Diamond and Abrasives Engineering,2007,161(5):40-43. (in Chinese)
- [22] 苏景鹤,江丙云. ABAQUS Python 二次开发攻略[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.
- [23] 任海峰,高鸣. Python-Matlab 联合编程 Abaqus 高级后处理技术研究[J]. 四川兵工学报,2015,536(7):133-138.
- REN Haifeng, GAO Ming. Research on Abaqus advanced post processing technology based on Python-Matlab programming[J]. Journal of Sichuan Ordnance,2015,36(7):133-138. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)