

# 激光冲击诱导应力波对残余应力孔洞形成的影响

盛湘飞<sup>a\*</sup>, 谭慧勇<sup>a</sup>, 袁文志<sup>a</sup>, 苟江龙<sup>a</sup>, 李智<sup>b</sup>

(南华大学 a.机械工程学院 b.土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** **目的** 揭示残余应力孔洞形成的影响机制。**方法** 采用有限元动力学仿真, 实现对激光冲击诱导应力波传播过程的捕捉和特性分析。**结果** 在 2 000 ns 以内的光斑作用区域, 材料的初始应力仅受到激光冲击诱导 II 类应力波的扰动作用, 此扰动作用由光斑中心向外依次减弱, 引起的应力波动幅值由 2 459 MPa 降至 224 MPa; 在其他工艺参数相同的情况下, 残余应力孔洞随着峰值压力和脉宽的增加而变得更加明显, 应力幅值差  $\sigma_k$  分别由 0、114 MPa 增至 454、568 MPa, 孔洞直径  $d_k$  分别由 0、0.8 mm 增至约 1.4 mm, 光斑直径的影响相对较弱。在激光能量 3 J 的作用下, 空间高斯分布对应结果存在应力孔洞,  $\sigma_k$ 、 $d_k$  分别为 190 MPa、1 mm。将空间平顶分布激光能量增至 7 J, 对应结果由 3 J 激光能量时的无应力孔洞转变为存在明显应力孔洞,  $\sigma_k$ 、 $d_k$  分别为 634 MPa、1.4 mm。另外, 在激光能量 3 J 的作用下, 材料 1 的应力孔洞最显著,  $\sigma_k$ 、 $d_k$  分别为 207 MPa、1.4 mm, 均高于材料 2 和材料 3 的对应值。凸圆面、平面和凹圆面对应的  $\sigma_k$  分别为 212、190、83 MPa,  $d_k$  均为 1 mm。**结论** 在圆形光斑激光冲击载荷作用下, 加载和卸载过程中形成的应力波在光斑中心的汇聚作用均较强, 导致光斑中心区域材料持续出现正反向屈服, 进而形成残余应力孔洞; 在相同参数条件下, 激光能量越高, 则材料的力学性能越低, 应力波扰动作用越强, 应力孔洞现象越明显。

**关键词:** 激光冲击; 应力波; 残余应力; 应力孔洞; 有限元分析; 镍基高温合金

**中图分类号:** TG178 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)19-0153-11

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.19.014

## Effect of Laser Shock Induced Stress Waves on Formation of Residual Stress Holes

SHENG Xiangfei<sup>a</sup>, TAN Huiyong<sup>a</sup>, YUAN Wenzhi<sup>a</sup>, GOU Jianglong<sup>a</sup>, LI Zhi<sup>b</sup>

(a. School of Mechanical Engineering, b. School of Civil Engineering, University of South China, Hunan Hengyang 421001, China)

**ABSTRACT:** In order to reveal the mechanism of the influence of laser shock induced stress waves on the formation of residual stress holes, the propagation process of laser shock induced stress wave were captured, and its characteristics were analyzed, by extracting node stresses at different times, based on the finite element dynamic simulation analysis. The results showed that within 2 000 ns, the initial stress of the material in the area affected by the light spot was only disturbed by the Class II stress wave induced by laser shock, and the disturbance gradually stabilized over time; The initial stress disturbance caused by Class

收稿日期: 2023-10-31; 修订日期: 2024-03-04

**Received:** 2023-10-31; **Revised:** 2024-03-04

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51575117); 湖南省自然科学基金 (2019JJ50519); 湖南省教育厅项目 (20C1601, 20C1607)

**Fund:** National Natural Science Foundation Project (51575117); The Hunan Natural Science Foundation Project (2019JJ50519); The Hunan Provincial Department of Education Project (20C1601, 20C1607)

**引文格式:** 盛湘飞, 谭慧勇, 袁文志, 等. 激光冲击诱导应力波对残余应力孔洞形成的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(19): 153-163.

SHENG Xiangfei, TAN Huiyong, YUAN Wenzhi, et al. Effect of Laser Shock Induced Stress Waves on Formation of Residual Stress Holes[J]. Surface Technology, 2024, 53(19): 153-163.

\*通信作者 (Corresponding author)

II stress wave was gradually weakened from the center of the light spot outward, the amplitude of stress fluctuation caused by it decreased from 2 459 MPa to 224 MPa (the amplitude of stress fluctuation in the central region exceeded the yield strength of the material itself); In cases where other process parameters were the same, the residual stress hole phenomenon became more pronounced with the increase of peak pressure and pulse width (the stress amplitude difference  $\sigma_k$  increased from 0 MPa and 114 MPa to 454 MPa and 568 MPa, respectively, and the stress hole diameter  $d_k$  increased from 0 mm and 0.8 mm to approximately 1.4 mm in the hole area). The influence of spot diameter on residual stress hole phenomenon was relatively weak. Under the action of 3 J laser energy, there was a stress hole in the residual stress result corresponding to the spatial Gaussian distribution, and  $\sigma_k$  and  $d_k$  were 190 MPa and 1 mm, respectively. By increasing the laser energy of the spatial flat top distribution to 7 J, the corresponding residual stress result changed from no stress holes at 3 J laser energy to an obvious stress hole,  $\sigma_k$  and  $d_k$  were 634 MPa and 1.4 mm respectively, and the characteristic values of stress holes were greater than the spatial Gaussian distribution under the same peak pressure condition; In addition, under the action of 3 J laser energy, the stress hole corresponding to material 1 was the most significant,  $\sigma_k$  and  $d_k$  were 207 MPa and 1.4 mm, respectively, which were higher than those of material 2 and material 3, and even exhibited secondary stress hole. The characteristic related to stress hole  $\sigma_k$  under the geometric conditions of convex circular surface, flat and concave circular surface were 212 MPa, 190 MPa and 83 MPa, respectively, and  $d_k$  were all 1 mm. In conclusion, under the action of circular spot laser shock load, the stress waves formed during the loading and unloading processes have a strong convergence effect at the center of the spot, resulting in continuous positive and negative yielding of the material in the center area of the spot, and the formation of residual stress holes; Under the same parameter conditions, the higher the laser energy, the lower the mechanical properties of the material, the stronger the stress wave disturbance action, and the more obvious the residual stress hole phenomenon. In addition, different surface geometric features mainly affect the stress amplitude difference in the hole area.

**KEY WORDS:** laser shock; stress wave; residual stress; stress hole; finite element analysis; nickel-based superalloy

国内外相关研究表明,在金属构件表层引入残余压应力可在一定程度上抑制表层裂纹的萌生和扩展,有效提高构件自身的力学性能,达到延长其疲劳寿命的目的<sup>[1-3]</sup>。激光冲击作为目前极具发展前景的表面强化技术,是通过激光诱导冲击波在金属材料表层产生较深的残余压应力场,并形成梯度纳米结构,以提升材料的抗腐蚀和疲劳性能。激光冲击强化工艺过程如图 1 所示<sup>[4]</sup>,目前已广泛用于航空航天、轨道交通、海洋工程、医疗等领域<sup>[5-7]</sup>。

近年来,研究学者开展了大量关于激光冲击强化工艺的应用及相关基础理论方面的研究,研究工作主要围绕激光冲击强化工艺参数(如激光能量、峰值压

力、光斑形状和大小、脉冲宽度及搭接率等)对强化构件的残余应力分布、显微组织结构及表面完整性的影响规律展开<sup>[8-14]</sup>。激光冲击诱导的残余应力分布对构件强化效果的影响显著, Peyre 等<sup>[15]</sup>在铸铝合金激光冲击强化过程中发现了“残余应力孔洞”,其应力分布特征如图 2 所示( $\sigma_k$  为孔洞区域的应力幅值差,  $d_k$  为残余应力孔洞直径),激光光斑作用中心区域的残余应力明显低于周围区域,甚至在光斑中心出现拉伸残余应力。为了降低残余应力孔洞对激光冲击区域的不利影响,胡殿印等<sup>[16]</sup>采用径向基神经网络代理模型和遗传算法相结合的方法对激光冲击工艺参数进行优化,在提高残余压应力的同时降低了光斑中心的拉伸应力; Zhou 等<sup>[17]</sup>使用 3 J 能量平顶分布激光冲击 2024-T351 铝合金,在激光冲击中心区域发现了残余拉应力,该残余拉应力幅值随着光斑直径的增加而增加; Yang 等<sup>[18]</sup>提出了一种由内到外的螺旋型激光冲击扫描路径,可降低冲击区域内的表面拉应力; Lu 等<sup>[19]</sup>提出了一种在激光能量空间分布中引入“能量空白区”来降低应力波对光斑中心残余压应力的卸载作用,达到抑制残余应力孔洞形成的目的; 杨俊茹等<sup>[20]</sup>分析了不同激光工艺参数对高温合金 GH3039 残余应力孔洞的影响,发现随着激光冲击能量、冲击次数的增加,孔洞效应愈发明显。

综上所述,尽管不少研究工作探索了激光冲击引起的残余应力孔洞现象,但均只研究了激光冲击工艺

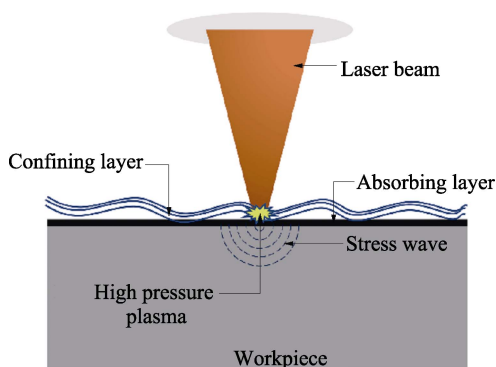


图 1 激光冲击强化示意图  
Fig.1 Schematic diagram of laser shock strengthening

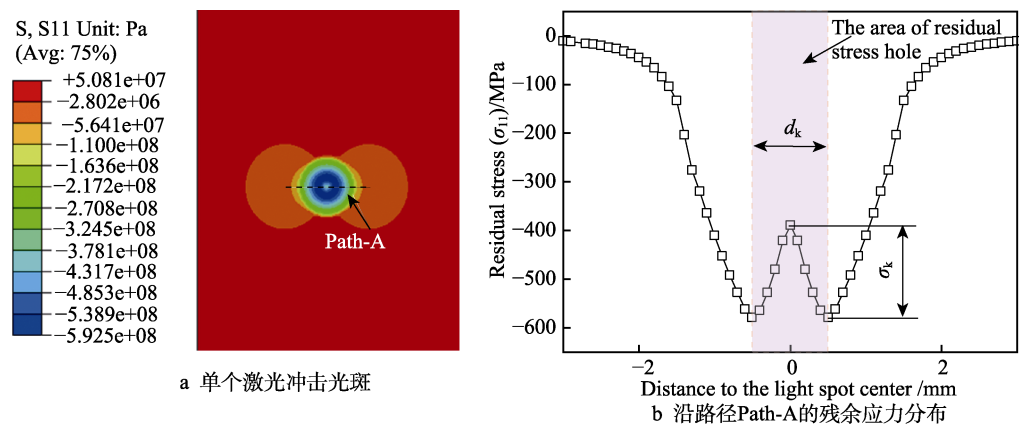


图 2 激光冲击诱导残余应力孔洞现象  
Fig.2 Residual stress hole phenomenon induced by laser shock: a) single laser shock spot; b) residual stress distribution along Path-A

条件对残余应力孔洞的影响规律, 针对残余应力孔洞形成机制方面的研究鲜有报道。本文采用应力幅值差  $\sigma_k$  和孔洞直径  $d_k$  对残余应力孔洞进行表征, 并借助有限元数值模拟深入分析激光冲击诱导应力波的动态传播过程及其对残余应力的作用机制, 在此基础上进一步探索激光冲击工艺参数、材料力学性能及强化构件表面几何特征等工艺条件对残余应力孔洞的影响, 拟进一步为激光冲击强化工艺的应用提供理论指导。

1 激光冲击强化工艺过程有限元建模

1.1 几何模型及约束条件

分别建立了平面、凸圆面和凹圆面 3 种有限元分

析模型 (如图 3 所示), 模型的相关几何尺寸见表 1。为了获得更加精确的有限元分析结果, 对所有模型沿厚度方向 1 mm 的区域进行了网格细化处理, 细化后网格尺寸约为 0.03 mm, 远小于激光冲击作用区域的尺寸。经 3 种几何模型处理后, 网络总数分别为 180 万 (当  $l$ 、 $w$  均取 20 mm 时, 其他尺寸的网格数据尺寸比例减少)、143 万、196 万。考虑到激光冲击作用下材料的变形程度相对平缓, 模型采用 C3D8R 线性减缩积分单元, 可在确保具备较高计算精度的前提下减少计算工作量。另外, 在激光冲击强化的实际工艺过程中, 单次冲击对应的时间历程范围内工件相对于激光光束的位置固定不变 (工件的自由度近似为完全限制), 本文所用模型将限制工件与工作台接触平面的 6 个自由度。

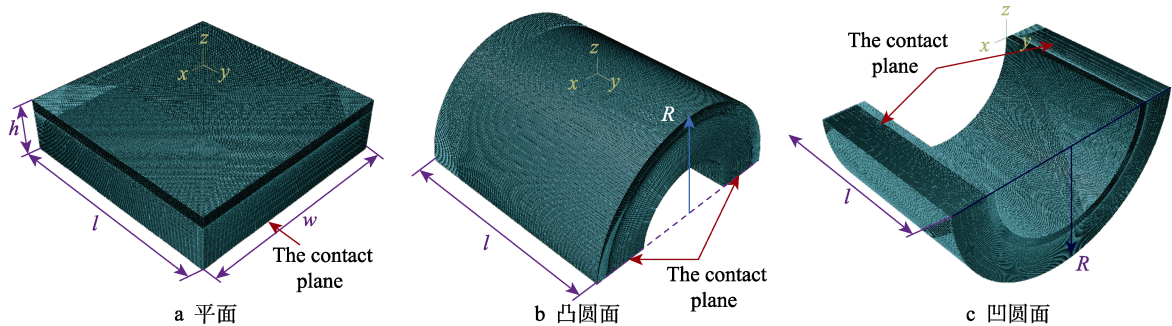


图 3 激光冲击强化有限元分析模型  
Fig.3 Finite element model for analyzing laser shock strengthening process: a) plane; b) convex circular surface; c) concave circular surface

表 1 相关模型的几何尺寸取值  
Tab.1 Geometric dimensions for relevant models

Geometric features	Length l/mm	Width w/mm	Arc radius R/mm	Height h/mm
Plane	3, 10, 20	3, 10, 20		5
Convex circular surface	20		10	5
Concave circular surface	20		10	5

1.2 材料模型

在激光冲击过程中, 材料的应变速率高达  $10^6 \text{ s}^{-1}$  以上<sup>[4, 21-23]</sup>, 变形具有明显的应变硬化和应变速率强化等效应, 本文采用 Johnson-Cook (JC) 模型来描述激光冲击条件下材料的形变特性<sup>[21]</sup>, 见式 (1)。

$$\sigma_Y = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中： $A$  为特定应变速率条件下的屈服强度； $B$  为加工硬化系数； $n$  为加工硬化模量； $C$  为应变速率强化参数； $\dot{\epsilon}$  为塑性应变速率； $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变速率； $T_0$  为参考温度； $T_m$  为材料的熔化温度； $m$  为热软化模量。

为了探索材料的力学性能对残余应力孔洞的影响，采用 3 种不同热处理条件下的镍基高温合金，具体材料参数如表 2 所示。

1.3 载荷

考虑到方形光斑激光能量在实际应用过程中的损耗较大，本文主要探索圆形光斑激光冲击载荷条件下的残余应力孔洞现象，并采用 Fabbro 模型计算激

光冲击区域内的峰值压力  $P_{\max}$ ，见式 (2) ~ (4) [26]。

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \tag{2}$$

$$Z = \frac{2}{\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right)} \tag{3}$$

$$I_0 = \frac{4E}{\pi D^2} \tag{4}$$

式中： $\alpha$  为相互作用效率，取值为 0.14； $Z$  为折合声阻抗， $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为强化构件材料和约束层介质的冲击阻抗； $I_0$  为激光光束的平均功率密度； $E$  为激光能量； $\tau$  为激光脉宽； $D$  为光斑直径。

表 2 不同热处理条件下镍基高温合金 Johnson-Cook 本构模型常数

Tab.2 Johnson-Cook constitutive model constants for nickel-based superalloy under different heat treatment conditions

Material	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$	$\dot{\epsilon}_0$
Material-1 [24]	337	1 642	0.783 5	0.049	1.2	0.03
Material-2	860	1 100	0.5	0.008 2	1.05	1
Material-3 [25]	1 138	1 324	0.5	0.009 2	1.27	1

与激光脉冲持续时间相比，等离子体急剧膨胀所产生的压力脉冲具有延迟的峰值和更长的持续时间（约为前者的 2~3 倍）。本文采用的压力脉冲  $P(t)$  随时间  $t$  的变化曲线分为 2 段，见式 (5) [27]。

$$P(t) = \begin{cases} (k\tau^{-2})(2k\tau - t)t & 0 \leq t \leq k\tau \\ \exp \left[ \ln 0.5 \sqrt{\frac{\frac{t-k}{\tau} - \frac{k}{\eta - \frac{k}{\sqrt{2}}}}{\frac{t-k}{\tau} - \frac{k}{\sqrt{2}}}} \right] & k\tau < t \leq M\tau \end{cases} \tag{5}$$

式中： $k$  为压力脉冲峰值滞后因子，取值为 1.5； $\eta$  为压力脉冲半高宽持续因子，取值为 2； $M$  为压力脉冲总持续时间因子，取值为 14。

在圆形光斑区域内，压力脉冲在空间上呈轴对称分布。压力脉冲经归一化后过光斑中心截面的空间分布如图 4 所示，压力脉冲随时间的变化曲线如图 5 所示。

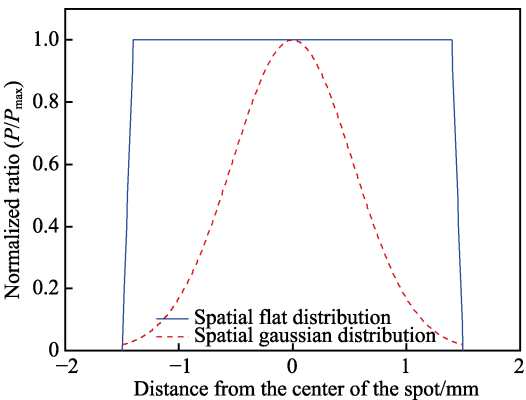


图 4 压力脉冲归一化的空间分布  
Fig.4 Spatial distribution profile of normalized pressure pulse

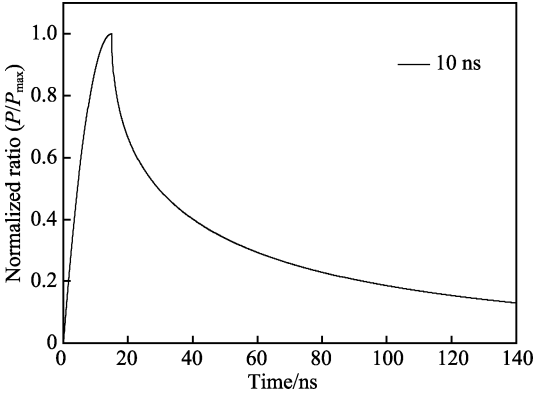


图 5 压力脉冲的时间变化曲线  
Fig.5 Time variation curve of pressure pulse

1.4 模型尺寸及边界效应

在小幅度增加有限元模型网格数量的基础上，进一步确保模拟分析结果的准确性。本文对模型尺寸效应及边界效应进行了分析，模型表面长度分别为 3、5、10、20 mm 及无限边界，高度  $h$  为 5 mm；工艺条件：激光能量为 3 J，峰值压力为 3.2 GPa，光斑直径为 3 mm，脉宽为 10 ns，空间呈高斯分布，结果如图 6 所示。当模型尺寸  $l$  大于 3 mm 时，残余应力沿着模型表面方向 Path-B 路径上的分布变化不大。当  $l$  取值为 3 mm 时，圆形光斑作用区域边界与模型四周侧面边界相切，因模型边界效应导致残余应力沿表面方向的分布与其他尺寸相比差别较大，如图 6a 所示。当模型尺寸  $h$  为 5 mm 时，沿模型厚度方向 Path-C 路径上的残余应力在离模型表面约 1 mm 深的区域内小幅变动，超过 1 mm 深的区域内的残余应力及其变化



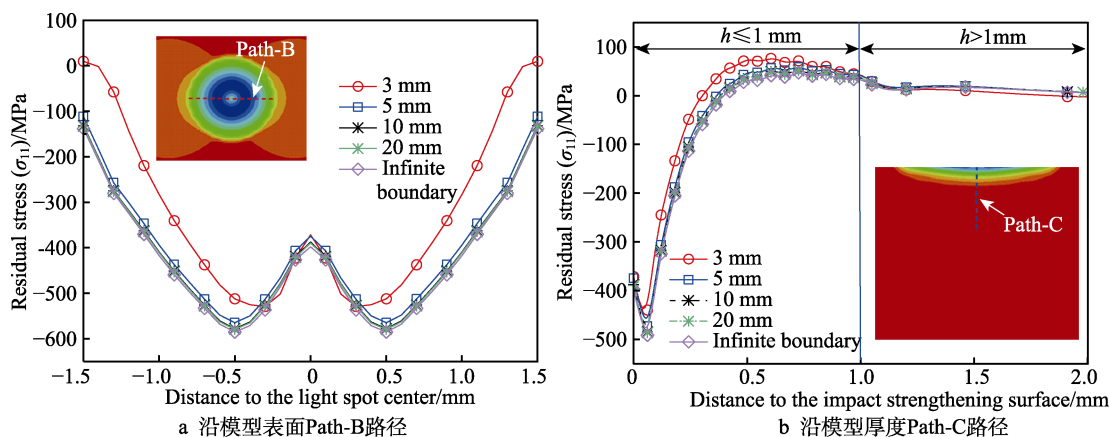


图 6 不同模型尺寸对应的残余应力分布

Fig.6 Residual stress distribution corresponding to different model sizes: a) Path-B on the model surface; b) Path-C through the thickness of the model

规律基本保持一致, 如图 6b 所示。上述结果表明, 在激光诱导的冲击压力作用下, 光斑作用区域的残余应力在模型表面方向分布范围比光斑直径略大, 在模型厚度方向的影响深度约为 1 mm。

### 1.5 实验验证

为了验证前文有限元模型的准确性, 采用能量为 12 J (接近本次使用的激光冲击强化设备的最高输出能量, 仅用于模型验证, 日常较少使用)、圆形光斑直径为 5 mm (便于采用 XRD 测量激光冲击作用区域内的残余应力)、激光脉宽为 10 ns、空间平顶分布的激光束对平面几何模型进行激光冲击工艺分析 (待冲击表面吸收层为绝缘胶带, 约束层为深度 1~2 mm 的去离子水), 实验试样 (选用前文表 2 中的材料 2 作为实验材料, 与有限元验证模型的材料类型保持一致) 和有限元模型尺寸均为 10 mm (长度) × 10 mm (宽度) × 5 mm (高度), 激光冲击区域位于材料表面中心。沿有限元模型表面 Path-D 路径由光斑中心向右提取节点应力, 并沿实验模型 Path-E 路径由光斑中心向右等距 (0.5 mm) 测量 4 个位置的残余应力。测量方法及参数: 使用酒精清洗激光冲击实验样品后通风干燥, 采用 LXR D 型 X-ray 测试仪测量应力, 测试光束直径为 1 mm, 靶材为 Cr 靶, 辐射类型为 Cr-Kα, 衍射面为 (311) 面, 衍射角为 142°~157°, 进给角为 0.04 (°)/s, 采用  $\sin^2\psi$  法对测量结果进行换算, 如图 7 所示。结果表明, 在相同的激光冲击作用区域内, 残余应力的模拟结果与测量结果较接近, 且在光斑中心区域均出现了应力孔洞。在光斑中心处两者的差值较大, 主要原因: 光斑中心附近有限元模拟的残余应力曲线变化陡峭, 而残余应力测量结果近似为一个区域的平均应力; 材料力学性能的各向异性, 造成圆形光斑冲击后的凹坑形状不规则, 导致光斑中心测量位置与理论位置存在偏差。

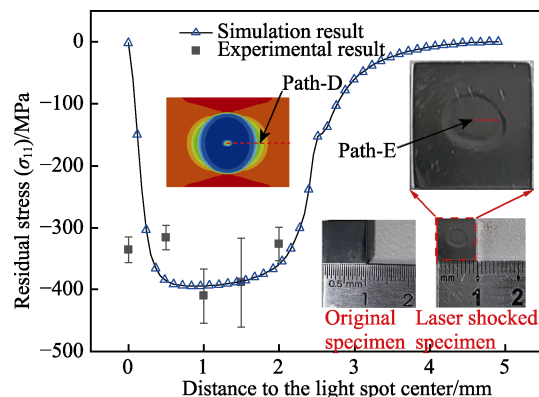


图 7 激光冲击强化工序有限元分析的实验验证 (材料 2)

Fig.7 Experimental verification of finite element analysis of laser shock strengthening process (material 2)

## 2 结果与分析

### 2.1 激光冲击诱导应力波对残余应力孔洞形成的影响机制

为了探究激光冲击诱导应力波在材料内部的传播规律及其对残余应力孔洞形成的影响机制, 借助前文有限元模型分析了激光冲击工艺过程。具体工艺条件: 峰值压力为 3.2 GPa, 光斑直径为 3 mm, 激光脉宽为 10 ns, 空间高斯分布, 平面几何模型, 材料 2。

根据前文所述压力脉宽与激光脉宽之间的关系可知, 压力脉宽加载总时长约为 140 ns。由图 8a~d 可知, 在载荷施加过程中, 激光冲击区域内材料峰值动态应力先增加后减少。在载荷施加结束后, 该峰值动态应力仍持续波动, 如图 8d~j 所示。

从图 8 可以看到, 在激光冲击作用区域及外围均出现了应力幅值高低交错的应力圆环, 该应力圆环由激光冲击载荷施加及卸载过程引起的应力扰动 (即入射应力波, 包括加载波和卸载波) 形成。其中, 位于激光冲击作用区域边界外围的应力圆环 (称为 I 类应

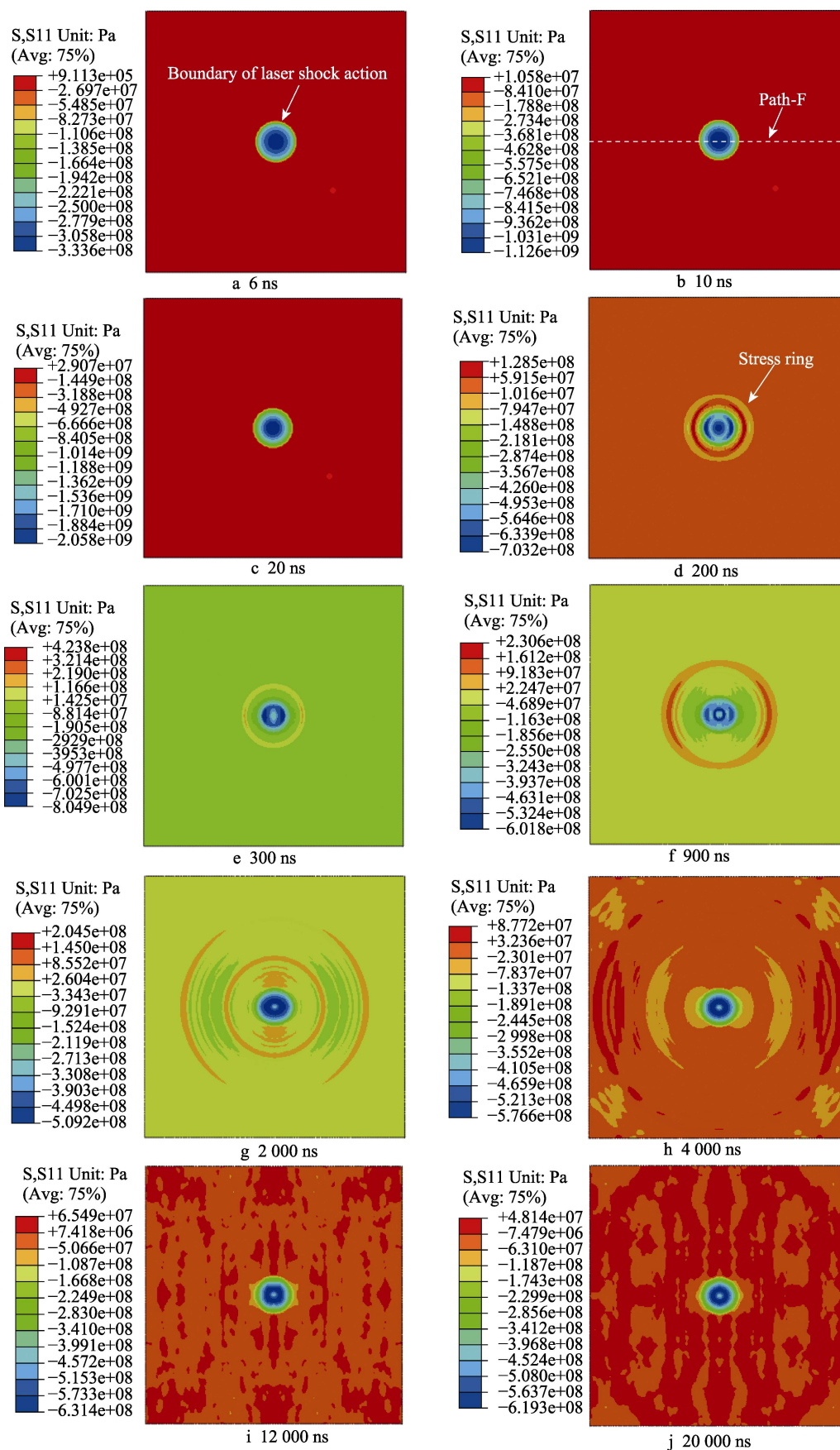


图 8 激光冲击诱导应力波传播云图

Fig.8 Propagation contours of laser shock induced stress wave

力波, 为入射波经过激光冲击作用边界时的透射波, 如图 9 所示) 逐渐向模型边界传播, 圆环直径越来越大, 而激光冲击作用区域内的应力波 (称为 II 类应力波, 为入射波经过激光冲击作用边界时的反射波, 如图 9 所示) 则向光斑中心传播, 与外围应力波传播方向相反, 并在光斑中心汇聚。本文所述的 I 类、II 类应力波均为入射应力波诱导形成的表面波。

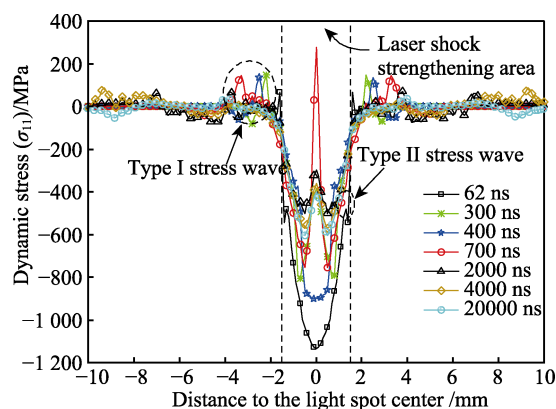


图 9 沿 Path-F 路径上节点的动态应力分布情况  
Fig.9 Dynamic stress distribution for nodes along Path-F

如图 8 和图 9 所示, 光斑区域内因压力脉冲加载在材料内部形成的初始应力属于压缩应力, 在卸载时为拉伸应力。I 类应力波延续了入射应力波的初始应力属性, 且传播方向与入射波相同。II 类应力波的应力属性由入射应力波的初始应力属性和激光冲击作用边界两侧传播介质的波阻抗共同决定。

根据应力波在金属材料中的传播速度, 粗略计算出 I 类应力波由光斑边界区域传播至模型边界, 并形成反射应力波反向传播至光斑区域, 大约需要 2 500~4 000 ns。如图 8d~g 所示, 表明光斑区域内的应力波动 (2 000 ns 以内) 仅受到 II 类应力波的影响, 与 I 类反射应力波无关。

为了进一步探索 II 类应力波对材料动态应力的影响, 沿着图 8b 中路径 Path-F 由光斑中心向外等距 (间隔 0.5 mm) 提取了 6 个节点的应力, 结果如图 10 所示。光斑区域内的 4 个节点 (即节点 1—4) 的应力幅值波动较大, 区域外的 2 个节点 (节点 5、6) 的应力幅值波动较小, 且都在 1 000 ns 后趋于稳定 (如图 10 所示), 应力波动幅值由光斑中心向外呈递减的变化趋势, 如图 11 所示。另外, 从动态应力变化情况看, 光斑中心及外围区域均出现了拉伸应力, 而光斑中心到作用边界的 2 个节点应力均为压缩应力。

出现上述现象的原因主要有以下几个方面: I 类应力波由光斑区域向模型边界传播, 其传播路径较长, 能量耗散较大, 形成的 I 类反射应力波幅值相对较低, 对各个区域的应力扰动作用有限; II 类应力波由载荷作用边界向光斑中心传播, 传播路径较短, 能量耗散较低, 对光斑区域内的扰动作用较强, 导致节

点 1—4 的应力波动幅值较大; 随着应力波作用时间的增加, 其能量不断转变为材料应变能和耗散能, 并最终趋于稳定, 如图 12 所示; 光斑中心受到 II 类应力波汇聚作用的影响, 在汇聚后动态拉伸应力超过初始压缩应力, 使得节点 1 在某些时刻出现拉伸属性的应力状态; 外围节点因初始应力幅值较低, 节点 5、6 的应力幅值主要受到应力波的影响, 因此在某些时刻同样出现了拉伸属性; 对于节点 2 和节点 3, 因该区域内具有拉伸属性的应力波的汇聚作用不强, 与初始压缩压力相互作用后, 仍表现为压缩属性。

结合前文分析可知, 激光冲击诱导的 II 类应力波在传播初期对材料初始应力具有较大的扰动作用。II 类应力波由弹性波 ( $C_e$ ) 和塑性波 ( $C_p$ ) 组成, 这 2 种应力波在光斑区域内单次传播引起材料初始应力的波动幅值如图 13 所示。假定  $C_e$  和  $C_p$  扰动后引起的应力波动幅值分别为  $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ , 根据文献[28]所述,  $C_e$  的传播速度大于  $C_p$  的传播速度, 圆环形  $C_e$  首先向光斑中心汇聚 (第 1 次交汇), 扰动引起的应力波动幅值由  $\Delta\sigma_1$  增至  $\Delta\sigma_3$ , 且  $\Delta\sigma_3$  超过材料的屈服应力  $\sigma_s$ 。此时, 汇聚后的  $C_e$  转变为  $C_p$ ; 汇聚后形成的应力波再与紧随的  $C_p$  交汇 (第 2 次交汇), 扰动引起的应力波动幅值为  $\Delta\sigma_4$ ; 在交汇后  $C_p$  亦会形成新的应力波, 并继续向光斑中心传播, 汇聚后 (第 3 次交汇) 引起的应力波动幅值为  $\Delta\sigma_5$ 。从图 13 中可见, II 类应力波在光斑区域内完成 1 次传播后, 在光斑中心引起的应力波动幅值最大, 向光斑边界方向依次减少。事实上, 光斑作用区域内的应力波传播过程比图 13 所表述的复杂, 涉及同号应力波的迎面加载和追赶加载, 异号应力波的迎面卸载和追赶卸载。正是由于光斑中心区域的应力波扰动作用较强, 引起材料正反向屈服, 导致初始压缩应力松弛, 进而引起前文所述应力孔洞的出现。

## 2.2 不同工艺条件对残余应力孔洞的影响

在前文分析残余应力孔洞形成机制的基础上, 进一步探索激光工艺参数、材料力学性能及强化构件表面几何特征等工艺条件对残余应力孔洞的影响。

### 2.2.1 工艺参数

分析了不同峰值压力、光斑直径及脉宽对残余应力孔洞的影响, 结果如图 14a~c 所示。在其他工艺参数相同的情况下, 残余应力孔洞现象随着峰值压力和脉宽的增加而变得更加明显 (孔洞区域的应力幅值差  $\sigma_k$  分别由 0、114 MPa 增至 454、568 MPa, 孔洞直径  $d_k$  分别由 0、0.8 mm 增至约 1.4 mm), 光斑直径对残余应力孔洞现象的影响相对较弱。事实上, 在其他工艺参数不变的情况下, 峰值压力、光斑直径和脉宽的增加均意味着激光诱导能量的增加, 可见影响残余应力孔洞的主要原因应归功于激光能量密度和作用时长。



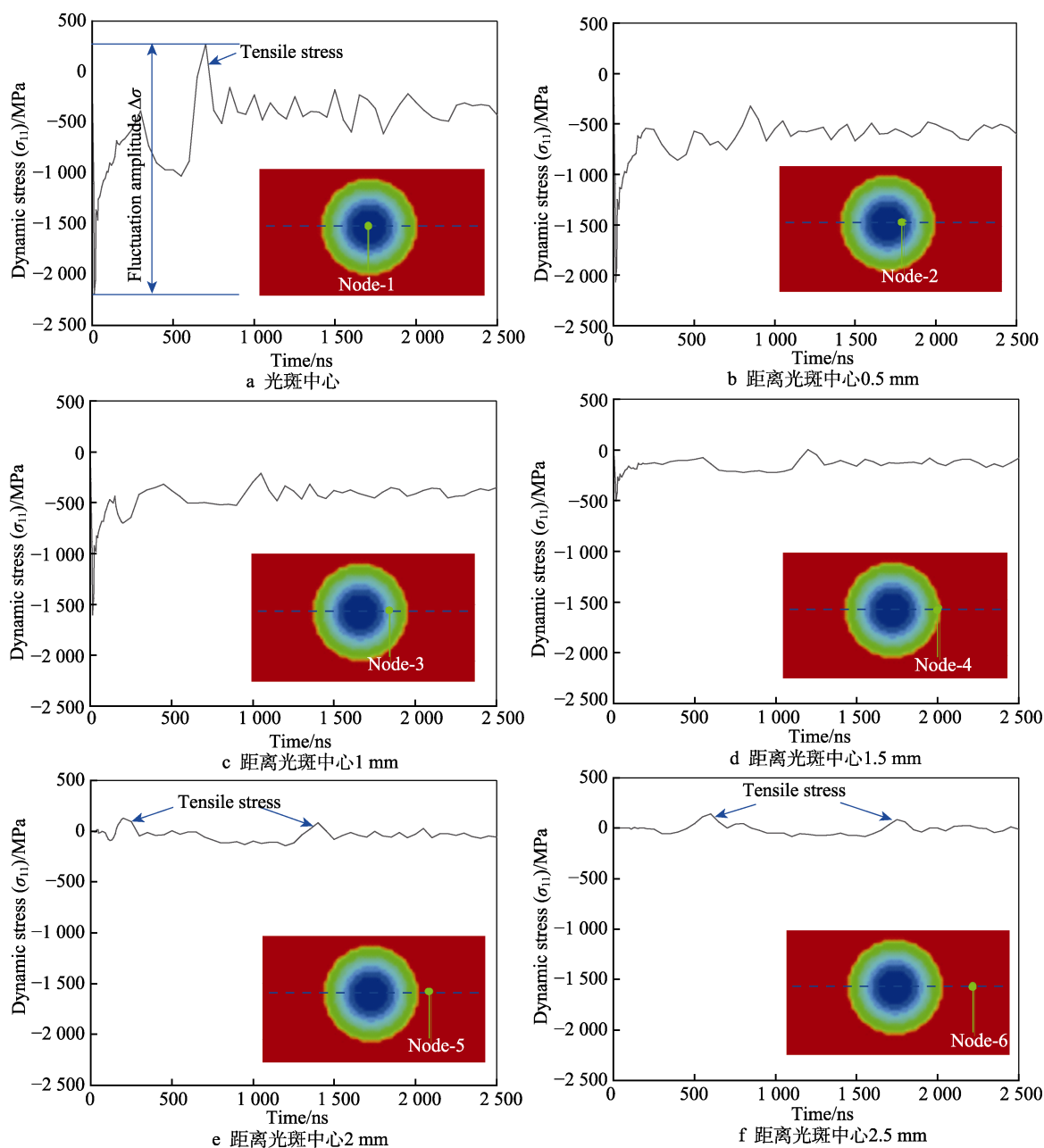


图10 Path-F 路径上6个节点的动态应力变化情况

Fig.10 Dynamic stress variations for six nodes on Path-F: a) spot center; b) 0.5 mm from spot center; c) 1 mm from spot center; d) 1.5 mm from spot center; e) 2 mm from spot center; f) 2.5 mm from spot center

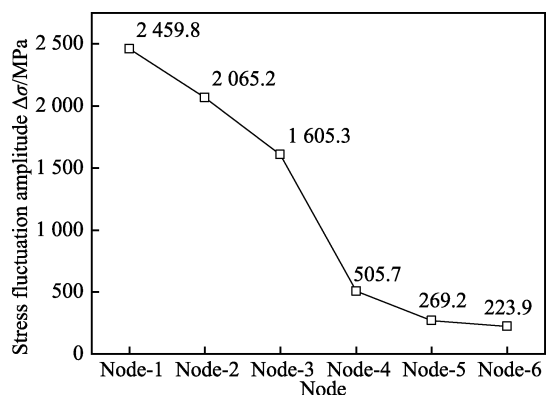


图11 Path-F 路径上6个节点的应力波动幅值

Fig.11 Stress fluctuation amplitude for six nodes on Path-F

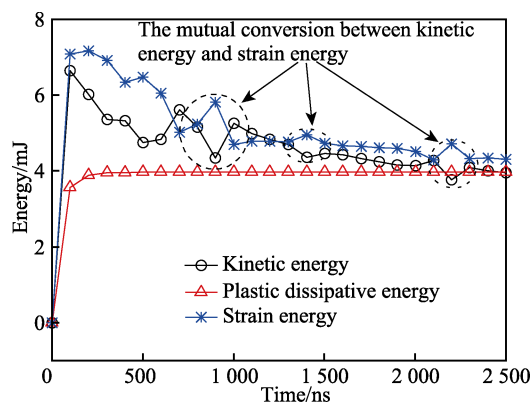


图12 激光冲击强化过程中的能量变化

Fig.12 Energy change during laser shock strengthening process



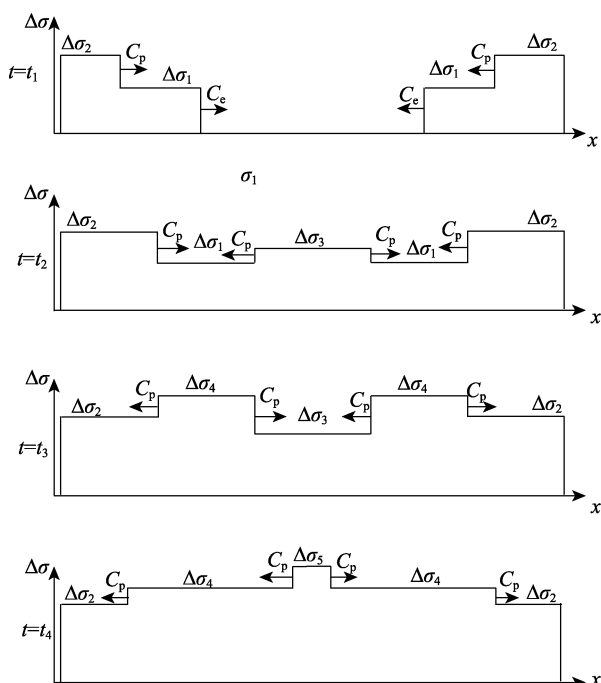


图 13 光斑作用区域内应力波沿表面  $x$  方向  
单次传播剖面图

Fig.13 Single propagation profile of stress waves along the  $x$ -direction of surface in area affected by light spot

进一步对比分析了不同激光能量、空间分布形态条件下的残余应力孔洞, 结果如图 14d 所示。在激光能量 3 J 的冲击载荷作用下, 空间平顶分布对应的激光冲击结果显示未明显观察到残余应力孔洞, 而空间高斯分布对应的激光冲击结果表明存在明显的残余应力孔洞 ( $\sigma_k$  为 190 MPa,  $d_k$  约为 1 mm)。出现上述现象的主要原因: 在相同激光能量条件下, 高斯分布对应的峰值压力约为平顶分布的 1.54 倍, 光斑中心区域在空间高斯分布的激光能量作用下承受着更大幅值的冲击载荷, 激光冲击诱导的应力波对光斑中心区域的扰动作用更强, 形成的残余应力孔洞更明显。当空间平顶分布的激光能量增至 7 J 时, 其峰值压力与 3 J 激光能量空间高斯分布相同, 残余应力结果表明同样出现了孔洞 ( $\sigma_k$  为 634 MPa,  $d_k$  约为 1.4 mm), 且在光斑中心出现了残余拉应力。上述现象表明, 在相同峰值压力作用下, 激光能量空间平顶分布所产生的应力孔洞现象比空间高斯分布更加明显, 激光诱导应力波对光斑中心区域的扰动作用更强。

## 2.2.2 材料的力学性能

对比分析了 3 种材料力学性能条件下的残余应力孔洞 (其他工艺条件与 2.1 节相同), 结果如图 15 所示。在激光能量 3 J 的冲击作用下, 材料 1 对应的

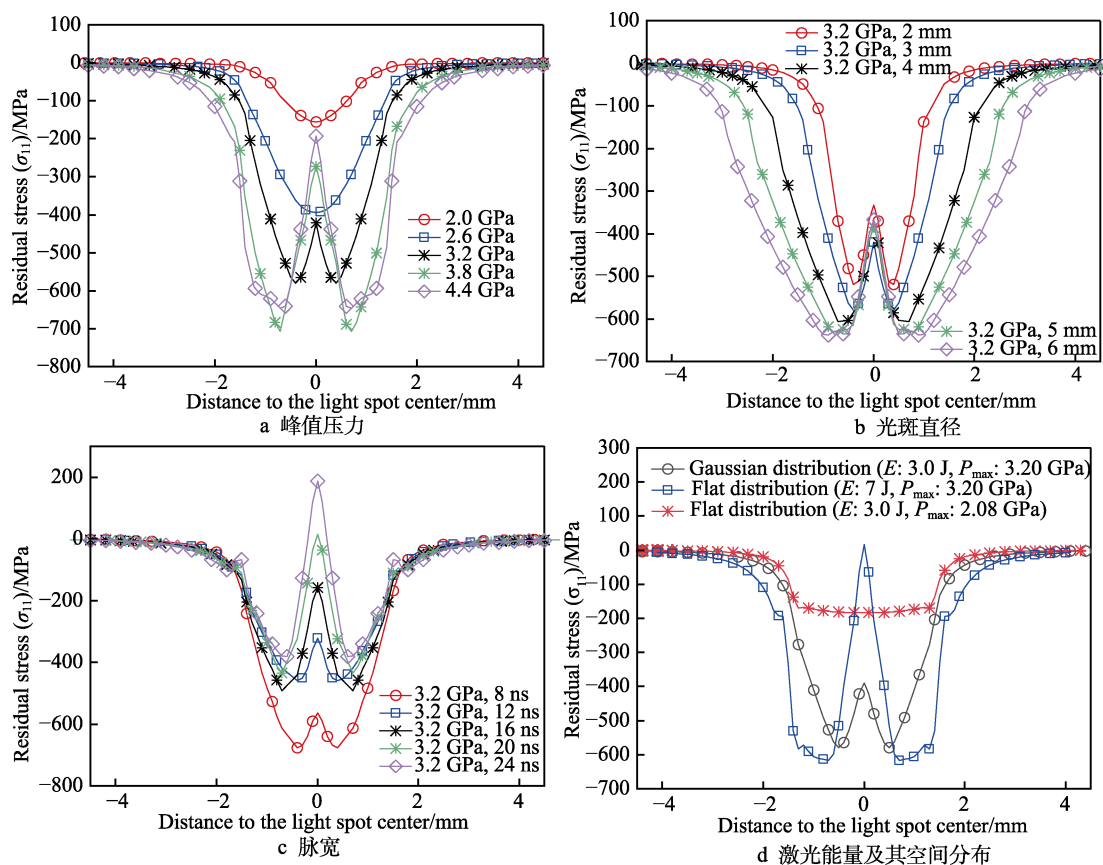


图 14 不同工艺条件对残余应力孔洞的影响 (材料 2)

Fig.14 Effect of different process conditions on residual stress hole (material 2): a) peak pressure; b) laser spot diameter; c) pulse width; d) laser energy and its spatial distribution

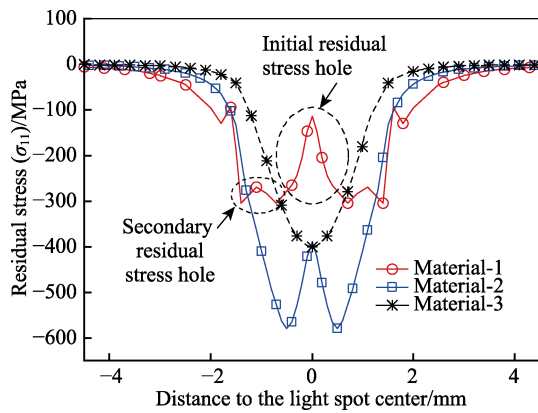


图 15 不同材料的力学性能对残余应力孔洞效应的影响  
Fig.15 Effect of different material mechanical properties on residual stress hole

残余应力分布曲线出现了双重应力孔洞现象(初次应力孔洞区域的应力幅值差  $\sigma_k$  为 207 MPa, 孔洞直径  $d_k$  约为 1.4 mm); 二次应力孔洞区域的  $\sigma_k$  为 36 MPa, 环形孔洞宽度约为 0.7 mm; 材料 2 对应的残余应力分布曲线亦出现了残余应力孔洞,  $\sigma_k$  为 190 MPa,  $d_k$  为 1.0 mm; 在材料 3 对应的残余应力分布曲线中未见应力孔洞。出现上述现象的原因: 材料 1 的屈服强度较低, 离光斑中心一定距离的环形区域仍受到应力波的扰动, 且扰动引起的应力波动幅值变化规律与初次应力孔洞区域相似, 并足以使该区域的材料发生正反向屈服, 导致初始应力松弛; 材料 3 的屈服强度较高, 在激光能量 3 J 的冲击诱导应力波相互作用过程中均未超过该材料的屈服应力, 应力波对初始应力的扰动作用有限。

### 2.2.3 表面几何特征

对比分析了凸圆面、平面和凹圆面 3 种不同表面几何特征对残余应力孔洞的影响(其他工艺条件与 2.1 节相同), 结果如图 16 所示。上述 3 种表面几何特征对应的残余应力孔洞的显著程度依次降低, 对应孔洞区域的应力幅值差  $\sigma_k$  分别为 212、190、83 MPa,

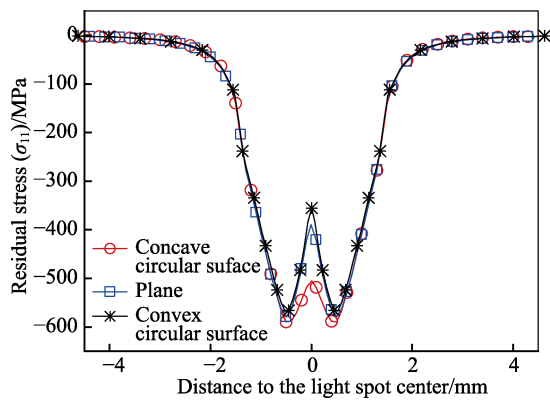


图 16 不同表面几何特征对残余应力孔洞效应的影响(材料 2)  
Fig.16 Effect of different surface geometry features on residual stress hole (material 2)

孔洞直径  $d_k$  均约为 1.0 mm。出现上述现象的主要原因: 凹圆面几何特征对激光诱导应力波传播的衰减作用比另外 2 种的几何特征强, 对应的应力波对初始应力的扰动作用较弱。

## 3 结论

通过建立激光冲击强化工艺的有限元分析模型, 深入探索了激光冲击诱导应力波对残余应力孔洞形成的影响机制, 并分析了不同工艺条件对残余应力孔洞的影响规律, 主要研究结论如下。

1) 激光冲击诱导的 II 类应力波对材料初始应力的扰动作用最明显, 并随着时间的增加, 其扰动作用趋于稳定。

2) 激光冲击诱导的 II 类应力波在圆形光斑中心的汇聚作用较强, 应力波在传播时伴随着加载和卸载过程, 导致光斑作用中心区域材料的正反向屈服, 进而形成残余应力孔洞。

3) 在圆形光斑激光冲击载荷作用下, 若其他工艺参数相同, 则激光能量越高, 材料的力学性能越低, 激光诱导应力波扰动作用越强, 残余应力孔洞现象越明显(即应力幅值差和孔洞直径越大), 甚至出现双重应力孔洞和残余拉伸应力。

4) 强化构件表面几何特征主要影响残余应力孔洞的应力幅值差。与另外 2 种表面几何特征相比, 凸圆面对应残余应力孔洞的应力幅值差较高。

### 参考文献:

- [1] ZHANG C Y, DONG Y L, YE C. Recent Developments and Novel Applications of Laser Shock Peening: a Review[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(7): 2001216.
- [2] 盛湘飞, 李智, 赵科宇, 等. 相同喷丸强度条件下喷丸强化效果的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 42-48.  
SHENG X F, LI Z, ZHAO K Y, et al. Numerical Simulation Research on Strengthening Effect of Shot Peening at Identical Intensity[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 42-48.
- [3] ELSHEIKH A H, SHANMUGAN S, MUTHURAMALINGAM T, et al. A Comprehensive Review on Residual Stresses in Turning[J]. Advances in Manufacturing, 2022, 10(2): 287-312.
- [4] DENG W W, WANG C Y, LU H F, et al. Progressive Developments, Challenges and Future Trends in Laser Shock Peening of Metallic Materials and Alloys: A Comprehensive Review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 191: 104061.
- [5] 聂祥樊, 李应红, 何卫锋, 等. 航空发动机部件激光冲击强化研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 293-305.  
NIE X F, LI Y H, HE W F, et al. Research Progress and

- Prospect of Laser Shock Peening Technology in Aero-Engine Components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(16): 293-305.
- [6] 肖值兴, 毛建兴, 田腾跃, 等. 涡轮盘榫槽激光冲击强化数值模拟与试验验证[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(11): 2448-2454.
- XIAO Z X, MAO J X, TIAN T Y, et al. Numerical Simulation and Experimental Verification on Laser Shock Peening for Turbine Mortise[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(11): 2448-2454.
- [7] 段煜松, 席乃园, 李新志, 等. TC4 钛合金选区激光熔化与层间激光冲击强化复合工艺[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(11): 31-38.
- DUAN Y S, XI N Y, LI X Z, et al. Preparation of TC4 Titanium Alloy via Hybrid Additive Manufacturing Process Combining Laser Shock Peening and Selective Laser Melting[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(11): 31-38.
- [8] ABHISHEK, PANDA S S, KUMAR S. Numerical Analysis on Residual Stress Hole Generation in Laser Shock Peening[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2022, 137(4): 461.
- [9] CAO Y P, WANG Z M, SHI W D, et al. Formation Mechanism and Weights Analysis of Residual Stress Holes in E690 High-Strength Steel by Laser Shock Peening[J]. *Coatings*, 2022, 12(2): 285.
- [10] 王博涵, 程礼, 李冬春. 激光冲击强化 TC4 微观组织演化及纳米晶形成[J]. *中国激光*, 2022, 49(8): 0802019.
- WANG B H, CHENG L, LI D C. Microstructure Evolution and Nanocrystal Formation of TC4 by Laser Shock Peening[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(8): 0802019.
- [11] ZHANG Z H, LIU M J, CAO Z W, et al. Numerical Investigation of Surface Textural Dimples of Titanium Alloy Subjected to Laser Shock Processing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 122(3): 1413-1429.
- [12] 俞延庆, 周留成, 宫健恩, 等. GH4169 高温合金激光冲击强化层微观结构和微动疲劳行为研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 38-48.
- YU Y Q, ZHOU L C, GUANG J E, et al. Microstructure and Fretting Fatigue Behaviour of GH4169 Superalloy after Laser Shock Peening[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(10): 38-48.
- [13] ZHOU L X, ZHU C Y, YUAN H, et al. Influence of the Laser Pulse Time Profile on Residual Stress Characteristics in Laser Shock Peening[J]. *Optics Express*, 2023, 31(11): 18039.
- [14] 徐明, 孙汝剑, 曹子文, 等. 激光冲击 TC17 钛合金叶片的微观组织/应力演变及缺口振动疲劳性能[J]. *表面技术*, 2023, 52(6): 429-438.
- XU M, SUN R J, CAO Z W, et al. Microstructure/Stress Evolution and Notch Vibration Fatigue Property of Laser Shock Peened TC17 Titanium Alloy Blades[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(6): 429-438.
- [15] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser Shock Processing of Aluminium Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 210(1/2): 102-113.
- [16] 胡殿印, 李金俊, 邓珊, 等. 基于残余应力的激光冲击强化参数多目标优化[J]. *推进技术*, 2018, 39(7): 1590-1596.
- HU D Y, LI J J, DENG S, et al. Multi-Objective Optimization on Laser Shock Peening Parameters Based on Residual Stress[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(7): 1590-1596.
- [17] ZHOU W F, REN X D, YANG Y, et al. Finite Element Analysis of Laser Shock Peening Induced Near-Surface Deformation in Engineering Metals[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105608.
- [18] YANG H, ZHAO J B, WU J J, et al. Research on a New Laser Path of Laser Shock Process[J]. *Optik*, 2020, 211: 163995.
- [19] LU G X, WANG L, LI H, et al. Methods for the Suppression of "Residual Stress Holes" in Laser Shock Treatment[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 28: 102486.
- [20] 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 J R, XU H, WANG G J, et al. Application of Python-Based Abaqus Redevelopment in Laser Shock Peening of Superalloy GH3039[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(7): 435-443.
- [21] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. A Computational Constitutive Model for Brittle Materials Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures[M]. Florida: CRC Press, 1992: 1075-1082.
- [22] 邹世坤. 激光冲击强化技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021: 1-18.
- ZOU S K. Laser Shock Peening Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021: 1-18.
- [23] LU G X, LUO X K, LI H, et al. Stepwise Varying of Laser Parameters to Enhance the Residual Stress Field in Multiple Laser Shock Processing: Numerical Verification of Single-Point Region[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 125(11): 5651-5667.
- [24] DEMANGE J J, PRAKASH V, PEREIRA J M. Effects of Material Microstructure on Blunt Projectile Penetration of a Nickel-Based Super Alloy[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(8): 1027-1043.
- [25] BRAR N S, SAWAS O, HILFI H. Johnson-Cook Strength Model Parameters for Inconel-718[D]. Dayton: University of Dayton, 1996.
- [26] LI X, HE W F, LUO S H, et al. Simulation and Experimental Study on Residual Stress Distribution in Titanium Alloy Treated by Laser Shock Peening with Flat-Top and Gaussian Laser Beams[J]. *Materials*, 2019, 12(8): 1343.
- [27] WANG C, WANG X G, XU Y J, et al. Numerical Modeling of the Confined Laser Shock Peening of the OFHC Copper[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 108: 104-114.
- [28] ANGULO I, CORDOVILLA F, GARCÍA-BELTRÁN A, et al. The Effect of Material Cyclic Deformation Properties on Residual Stress Generation by Laser Shock Processing[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 156: 370-381.