

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0106-06

# 基于 ABAQUS 的激光冲击波诱导残余应力场的有限元模拟

倪敏雄, 周建忠, 杨超君, 杜建钧, 曹向广

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 激光冲击处理(LSP)(或激光喷丸强化)是利用激光冲击波压力对材料表面实施强化处理的一种新型表面处理技术。经激光冲击后,残余压应力在材料表面和深度方向上的分布和大小是评价激光冲击效果的一个重要指标,而有限元模拟(FEM)是预测激光冲击处理后残余应力场分布和大小的一种有效方法。在利用 ABAQUS 软件对激光冲击处理 6061-T6 铝合金进行数值分析时,讨论了有限元模型、材料性能、冲击加载方式、分析时间等关键问题的处理方法,并分析了激光冲击后残余应力场的分布特点,最后利用有限元模拟考察了激光冲击次数对残余应力场的影响。

**关键词** 激光技术; 激光冲击波; 残余应力场; 有限元模拟

**中图分类号** TN249; TG665 **文献标识码** A

## FEM Simulation of Residual Stress Field Induced by Laser Shock Wave Based on ABAQUS

NI Min-xiong, ZHOU Jian-zhong, YANG Chao-jun, DU Jian-jun, CAO Xiang-guang

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

**Abstract** Laser shock processing (LSP) is a novel surface treatment technology which uses laser-induced shock wave to strengthen material surface. The magnitude of the surface residual stress and the depth of compressive residual stress are important indexes for the evaluation of LSP's effect. The finite element method (FEM) simulation is a valid means for predicting residual stress field distribution in the metal after LSP. The ABAQUS software is applied to simulate the laser shock processing of 6061-T6 aluminum alloy. It discusses how to deal with finite element model, material behavior, the loading of laser shock wave, solution time and so on during the FEM of LSP, and the distributions of residual stress field induced by shock wave are also analyzed. At last the effects of multiple LSP processes on the residual stress field were evaluated by using FEM.

**Key words** laser technique; laser shock wave; residual stress field; finite element method

## 1 引 言

随着工业技术的发展,表面处理技术在现代工业中已越来越重要,大约在 30 年前出现的激光冲击处理(LSP)现已成为一种新型的表面处理技术。经大量的实验表明,激光冲击处理能在金属处理表面以下产生明显的残余压应力<sup>[1~3]</sup>。残余压应力的存在能明显改进零件的机械性能,如抵抗裂纹的萌生和增长,延长零件的疲劳寿命等,同时激光冲击处理

也能对零件的疲劳关键部位,如孔、圆角、焊缝等进行精确冲击,因此激光冲击处理已被公认为是一种能够取代传统处理方法的新型技术<sup>[3~5]</sup>。

激光冲击后材料的动态响应非常复杂,用实验方法观测在材料中产生的动态应力和残余应力显得非常困难,同时这一复杂过程也不易用理论模型研究。在这种情况下,有限元模拟技术被认为是研究激光冲击处理的一种有效方法。本文利用 ABAQUS 软

**基金项目:** 国家自然科学基金(50675090,50475127)、江苏省自然科学基金(BK2004063)和教育部科学技术研究重点项目(204052)资助课题。

**作者简介:** 倪敏雄(1981-)男,江苏无锡人,硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: nmx003@163.com

**导师简介:** 周建忠(1964-)男,江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事激光加工原理及应用方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

件对激光冲击处理进行了有限元模拟,并考察了激光冲击次数对残余应力场的影响情况。

## 2 激光冲击处理的基本原理

激光冲击处理一般采用约束烧蚀模式,其基本原理如图 1 所示。在待处理工件上先涂覆一层吸收层(黑漆),然后在吸收层的上面再覆盖一层约束层(水或玻璃),当短脉冲(ns 量级),高强度( $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$  量级)的激光束辐照到涂有吸收层的金属靶材上时,吸收层部分瞬间气化,蒸气温度快速升高并形成等离子体爆炸,向外膨胀。由于约束层的存在,瞬间向外传播的等离子体受到约束,结果施与靶面一个冲击载荷,形成冲击波传入材料内部,当冲击波的峰值压力大于材料的动态屈服强度时,材料发生屈服,产生塑性变形,从而在变形区域内产生有益的残余压应力,起到强化材料的目的。由于涂层(黑漆)保护工件不发生熔化和气化,因此激光冲击是处理材料的一种冷加工工艺<sup>[3,4]</sup>。

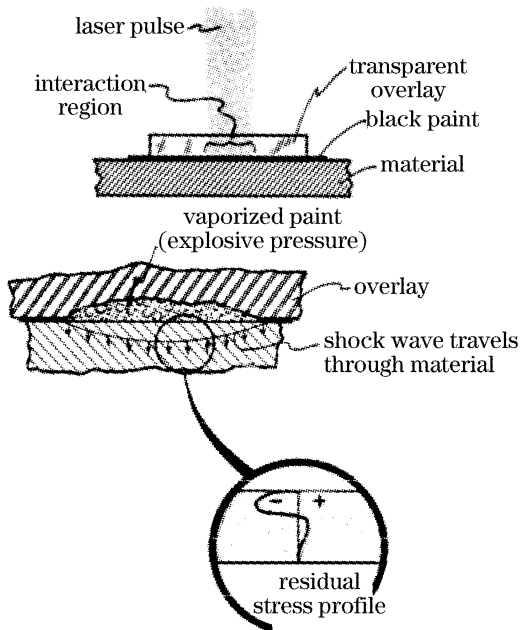


图 1 激光冲击处理原理图

Fig. 1 Sketch for laser shock processing

## 3 激光冲击处理的有限元模拟

### 3.1 有限元模型的建立

激光冲击处理时,一般采用圆形光斑进行冲击,可以认为载荷和模型是完全轴对称的,因而建立一个二维动态有限元模型,为了减少计算量,取截面的一半进行模拟,如图 2 所示。模型由有限单元和无限单元组成。有限单元的单元类型为 CAX4R 轴对称的弹塑性单元,用于确定残余应力场。无限单元

的单元类型为 CINAX4,为弹性单元,作为无反射边界。使用无反射边界将防止在边界上产生的应力波反射,重新进入模型,从而导致结果不正确。经过多次的分析计算后,有限单元区域的半径定为  $r_i = 6 \text{ mm}$ ,  $r_p$  为光斑半径,这里取为  $4 \text{ mm}$ 。同时在模型中心线上( $o-y$  平面上)采用轴对称边界条件。

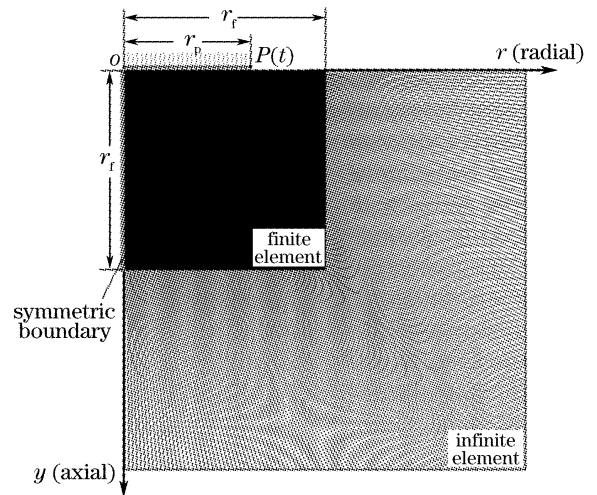


图 2 轴对称边界条件的有限元模型

Fig. 2 Finite element model with axisymmetric boundary conditions

精确计算激光冲击产生的残余应力场,在冲击区域应有细密的网格,但需要很高的计算成本。经多次模拟计算,并综合考虑计算精度和计算机资源后,最终取表 1 所示的网格配置,这里网格密度定义为单元尺寸  $L^e$  比上光斑半径尺寸  $r_p$ 。

表 1 有限元模型的网格配置

Table 1 Configuration of FE model's mesh

Finite element	100 × 100
Infinite element	2 × 100
Unit scale / mm	0.06
Gridding density / %	1.5

### 3.2 激光冲击波的加载

激光冲击处理过程中,由于吸收涂层的气化时间极短,因而在模拟中可完全忽略激光冲击时的热效应,仅考虑材料在冲击波力效应下的动态响应。故在模拟中,将激光诱导的冲击波简化为随时间变化的压力载荷,然后将其作为载荷直接作用在靶材表面。冲击波峰值压力  $p_{\max}$  可估算为<sup>[6]</sup>

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{i0} Z_{c0} \rho}{(2\gamma-1)(K_a Z_{c0} + K_c Z_{i0})}}, \quad (1)$$

(1)式是在 R. Fabbro 估算模型的基础上进行修正后得到的,其综合考虑了冲击波在约束层和吸收层中的传播和衰减问题,得出的冲击波峰值值与实测

峰值值较好地符合。式中  $A$  为吸收系数,在 0.80~0.95 之间,  $\gamma$  为等离子体的绝热指数,取 1.67,  $Z_{i0}$ ,  $Z_{c0}$  分别为靶材和约束层材料的声阻抗,  $K_a, K_c$  分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参量,  $\rho$  为等离子体的密度,可看作为是约束层、吸收层和工件材料气化蒸气的综合体,  $I_0$  为激光功率密度。

研究表明约束模式下冲击波压力的持续时间约为激光脉宽的 2~3 倍<sup>[3,7]</sup>。故对于激光冲击波的作用时间可按照激光脉宽的 3 倍确定。模拟时采用的激光脉冲宽度  $t_p$  为 23 ns,故冲击波加载时间定为 70 ns。模拟采用的冲击波压力的时空加载曲线如图 3 所示,这与图 4 实验记录的激光脉冲信号图相一致,它把冲击波载荷按照激光脉冲信号进行分布,并利用插值运算法计算出任意时间点处的载荷值,然后将相应载荷值加载到模型中。同时假设压力脉冲在整个光斑内为均匀分布,作用面积为光斑面积,从而实现激光脉冲载荷的加载。

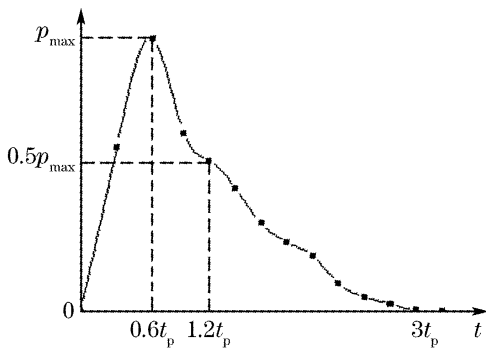


图 3 冲击波压力加载曲线

Fig. 3 Amplitude curve of shock pressure

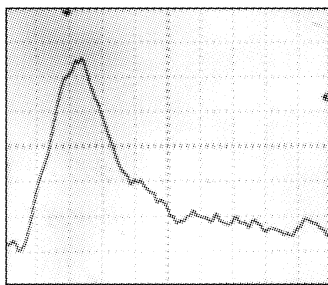


图 4 实验记录的激光脉冲信号

Fig. 4 Laser pulse signal recorded in the experiment

### 3.3 材料的本构模型

激光冲击波在靶材材料中产生的应变率超过  $10^6 \text{ s}^{-1}$ 。随着应变率的增加,材料的弹性模量通常变化很小,但材料的屈服强度却明显增加。在单轴应变状态下,冲击波为一维平面压缩波,冲击波传播方向上的最高弹性应力被定义为 Hugoniot Elastic Limit (HEL),当冲击波的峰值压力超过 HEL 时,材料将发生塑性变形,因此材料的动态屈服强度

$\sigma_y^{\text{dyn}}$  可定义为<sup>[8~10]</sup>

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

式中  $\nu$  为泊松比。6061-T6 铝合金材料的性能参数如表 2 所示。同时材料为各向同性,塑性应变服从 Von Mises 屈服准则,并根据冲击特点运用 ABAQUS 中强大材料本构关系和失效模型,定义相应的材料参数<sup>[11]</sup>。

表 2 6061-T6 铝合金材料的机械性能

Table 2 Mechanical properties of 6061-T6 aluminum

Material properties	Numerical value
Density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2672
Poisson ratio $\nu$	0.33
Young modulus $E / \text{GPa}$	72.4
Hugoniot elastic limit /GPa	1.02

### 3.4 有限元模拟过程

激光冲击处理的模拟过程主要分成两个步骤。第一步使用显式算法模块 ABAQUS/Explicit 模拟激光冲击在材料中产生的短时间冲击波。为使靶材获得饱和的塑性变形,需要比压力脉冲持续时间更长的分析时间,以确保在靶材中发生所有的塑性变形<sup>[9]</sup>。第二步是确定材料中的残余应力场,即把瞬时动态应力导入到隐式算法模块 ABAQUS/Standard 中进行隐式分析,以确定静态平衡下的残余应力场。在模拟多次激光冲击时,前次冲击得到的残余应力和应变保留在材料中成为下次冲击的初始应力和应变,并把每次冲击获得的动态应力在 ABAQUS/Standard 中进行静态平衡分析。模拟得到的结果数据传递到 ABAQUS/Viewer 中进行后处理,整个模拟过程如图 5 所示。

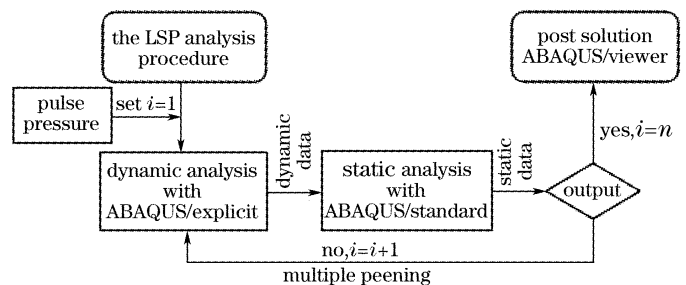


图 5 激光冲击的有限元模拟流程图

Fig. 5 A flowchart of the LSP FE simulation

## 4 有限元模拟结果与讨论

### 4.1 显式动态分析

在显式动态分析中,需确定合适的分析时间,以确保靶材内部塑性变形达到饱和且动态应力状态趋

于稳定。在激光功率密度为  $1.5 \text{ GW/cm}^2$ ，光斑直径为  $\phi 8 \text{ mm}$  条件下，取不同的分析时间，得到靶材表面径向应力  $\sigma_{rr}$  随分析时间的变化情况如图 6 所示。动态应力轮廓在 2000 ns 和 3000 ns 的分析时间上变化的非常明显，但在 4000 ns 的分析时间后，应力轮廓状态发生轻微震荡并趋于稳定(与 6000 ns 分析时间相比)，表明动态应力波在靶材中趋于稳定，故在显式分析中的分析时间设为 4000 ns。

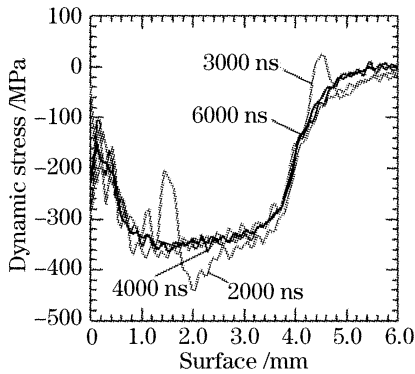


图 6 不同分析时间上表面动态应力轮廓

Fig. 6 Surface dynamic stress profiles at different time

在激光冲击过程中，压力脉冲在靶材表面上产生的整个外部功转化为材料内部的动能、内能和黏性耗散能<sup>[9,11]</sup>。内能  $W_i$  包括弹性存储能  $W_e$ ，塑性耗散能  $W_p$  和伪应变能  $W_a$ 。图 7 显示整个内能随时间的变化情况。塑性耗散能在 200 ns 的时间内急剧地增加，并在 2000 ns 以后稳定在 180 mJ，弹性存储能在 1000 ns 以后逐渐地从 50 mJ 减小到 20 mJ。而伪应变能在整个分析过程中稳定在零。伪应变能是控制沙漏变形所消耗的主要能量。如果伪应变能过高，说明过多的应变能被用于控制沙漏变形，那么得到的模拟结果不正确。塑性耗散能的饱和表明在 2000 ns 以后靶材中无进一步的塑性变形发

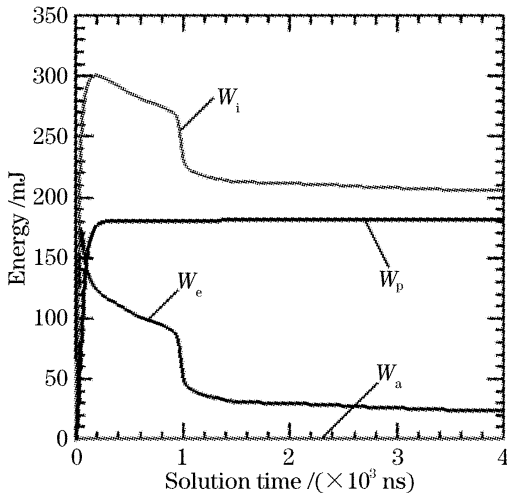


图 7 在激光冲击过程中能量的变化过程

Fig. 7 History of energies in the LSP

生，这也证实了选择分析时间 4000 ns 是可行的。

### 4.2 单次激光冲击的残余应力场分析

图 8 给出了单次激光冲击下径向应力的分布云图，为便于观察，把二维图形绕中心轴旋转一定角度后得到的立体图。由于弹性应变能的释放，最大为  $-364.7 \text{ MPa}$  的动态应力经过静态分析后得到最大为  $-348.8 \text{ MPa}$  的残余应力。

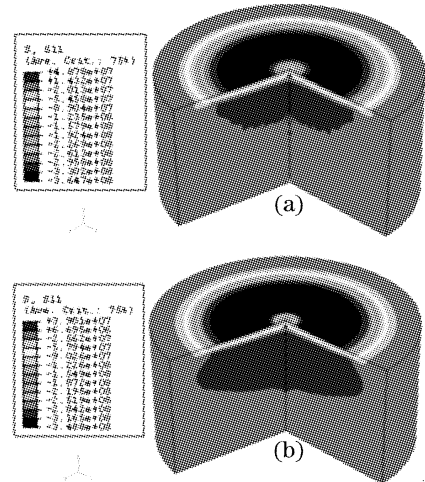


图 8 单次激光冲击过程中径向应力的分布云图

(a) 动态应力的分布；(b) 残余应力的分布

Fig. 8 Contour of radial stress field for the single LSP

(a) contour of dynamic stress; (b) contour of residual stress

图 9 为残余应力在表面和深度方向上的分布图。模拟结果表明残余压应力在冲击区表面上基本为均匀分布[图 9(a)]，但在光斑中心处残余压应力值相对较低。国外学者研究表明，利用圆形光斑冲击试样时，在圆形光斑周边上产生的表面波向中心传播，并在光斑中心聚合，从而引起局部的反向塑性应变，降低了此处的表面残余压应力值<sup>[3,8]</sup>。同时发现在光斑边缘，残余压应力明显急剧减小。在表面最大残余压应力值处( $r=1.5 \text{ mm}$ )得到残余应力在深度方向上的分布，如图 9(b)所示。残余压应力在上表面最大，随着离表面距离的增加，残余压应力值逐渐减小。在光斑以下的整个塑性影响深度  $L_p$  (残余压应力的深度)如图 10 所示。塑性影响深度几乎保持在  $0.48 \text{ mm}$  左右，这说明激光冲击能在材料表层中获得比较均匀的残余应力场。整个残余应力场的分布与许多激光冲击处理实验得到的残余应力分布相类似<sup>[1~4]</sup>，也与 William B. 等<sup>[8~10]</sup> 的模拟结果相接近。

### 4.3 激光冲击次数对残余应力场的影响分析

根据图 5 的流程图，利用相同的激光参数在模型的另一位置上分别进行 1, 2, 3 次的激光冲击。得

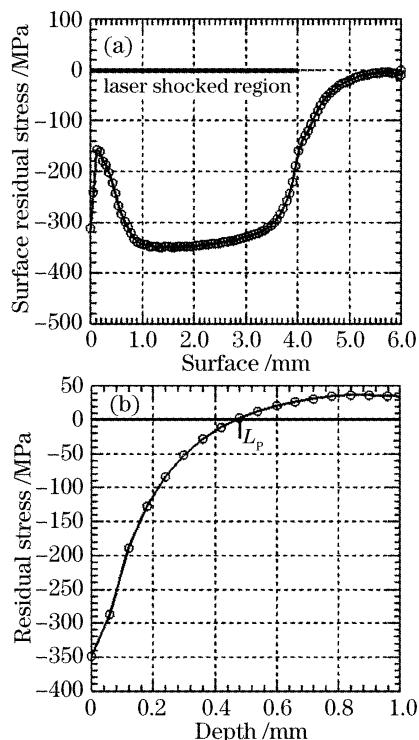


图 9 单次激光冲击得到的残余应力分布图  
(a) 在表面方向上; (b) 在深度方向上( $r=1.5$  mm)

Fig. 9 Residual stress distribution of single LSP  
(a) on the surface; (b) in depth ( $r=1.5$  mm)

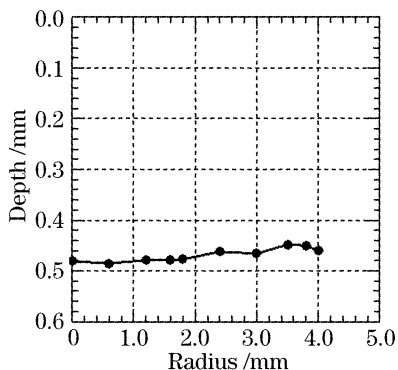


图 10 单次激光冲击下塑性影响深度沿半径方向上的分布  
Fig. 10 Distribution of plastically affected depth along the radius for single LSP

到残余应力在表面和深度方向上的分布,如图 11 所示。发现多次冲击后,表面残余压应力值和塑性影响深度都得到明显增加。经过两次冲击后表面峰值残余压应力和塑性影响深度分别增加了 18.6%(从 -349 MPa 增加到 -414 MPa)和 25%(从 0.48 mm 增加到 0.6 mm)。经过三次冲击后,表面峰值残余压应力增加到 -444 MPa,这与两次冲击后的残余压应力值相比仅增加了 7.2%,表明表面残余压应力值呈现出饱和趋势。三次冲击后塑性影响深度增加到 0.69 mm,如图 12 所示,表明三次冲击后仍能显著地增加残余压应力的深度。在激光冲击处理的实验中也得到了多次冲击能增加残余压应力值和压

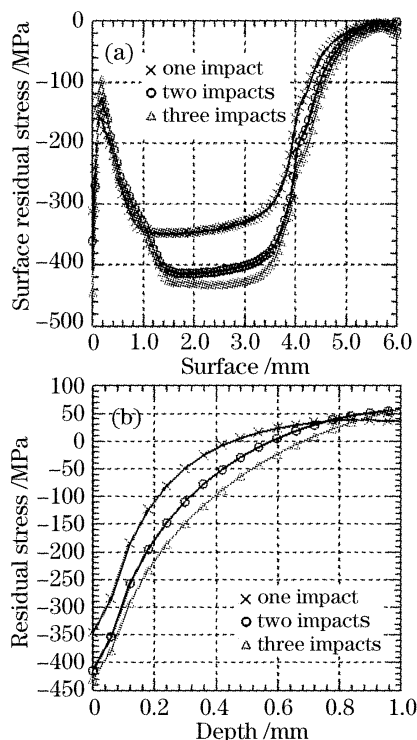


图 11 多次激光冲击下的残余应力分布图  
(a) 在表面方向上; (b) 在深度方向上

Fig. 11 Residual stress distribution for multiple LSP  
(a) on the surface; (b) in depth

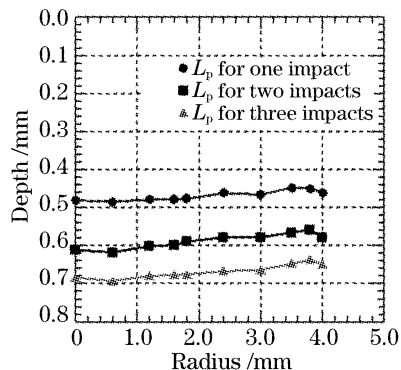


图 12 多次激光冲击下塑性影响深度沿半径方向上的分布  
Fig. 12 Distribution of plastically affected depth along the radius for multiple LSP

应力深度的结果。如对于 7070 铝合金,4 GW/cm<sup>2</sup> 的激光第一次冲击产生 -170 MPa 的残余压应力,第二次变为 -240 MPa,第三次增加到 -340 MPa,对于 0.55% 的碳钢,随着冲击次数从一次增加到三次,残余压应力的深度从 0.9 mm 增加到 1.8 mm<sup>[4]</sup>。

研究表明多次激光冲击增加残余压应力值和残余压应力深度与材料的加工硬化有关,前次激光冲击使表层材料产生硬化,减小了随后压力脉冲的衰减比率,从而在连续的激光冲击中使更高的冲击波峰值压力深入到材料的更深处。因此对零件的关键部位可以采用多次冲击,以提高表面残余压应力值。

## 5 结 论

利用 ABAQUS 软件研究了激光冲击处理有限元模拟中模型的建立,冲击波的加载,材料的本构关系和分析时间的确定等关键问题的处理方法,并考察了激光冲击后残余应力场的分布特点和多次激光冲击对残余应力场的影响。可以得出

1) 结合有限单元和无限单元建立了激光冲击处理的二维有限元模型。根据激光冲击的特点,模拟过程应包括显示动态分析和隐式静态分析两个部分,其中动态分析时间的确定是正确模拟的关键。

2) 使用圆形光斑进行激光冲击后,残余压应力在光斑冲击区表面上基本为均匀分布,但光斑中心区的表面残余压应力值较小,同时在光斑边缘上残余压应力值急剧减小。

3) 在同一位置处进行多次激光冲击后,残余压应力的幅值和深度得到明显增加。但经过多次冲击后,表面残余压应力值趋于饱和。

## 参 考 文 献

- 1 Jean-Eric Masse, Gérard Barreau. Laser generation of stress waves in metal [J]. *Surf. Coat. Technol.*, 1995, **70**(2): 231~234
- 2 Michael R. Hill, Adrian T. Dewald, Anne G. Demma *et al.*. Laser peening technology [J]. *Advanced Materials & Processes*, 2003, **161**(8): 65~71
- 3 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the

- physics and applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, **27**(12): 1213~1229
- 4 Charlec S. Montross, Wei Tao, Ye Lin *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 5 Jon E. Rankin, Michael R. Hill, Lloyd A. Hackel. The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, **349**(1~2): 279~291
- 6 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Min *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 135~138  
周建忠, 张永康, 周 明 等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 135~138
- 7 Duan Zhiyong, Wu Hongxing, Wang Shengbo *et al.*. Theoretically study on magnitude and time characteristics [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(3): 20~22  
段志勇, 吴鸿兴, 王声波 等. 激光冲击波的幅度和时间特性的理论研究 [J]. *激光杂志*, 2000, **21**(3): 20~22
- 8 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening [J]. *International J. Fatigue*, 1999, **21**(7): 719~724
- 9 K. Ding, L. Ye. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes [J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(5): 351~358
- 10 P. Peyre, A. Sollier, I. Chaieb *et al.*. FEM simulation of residual stresses induced by laser Peening [J]. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2003, **23**: 83~88
- 11 Zhuang Zhuo. Getting Started with ABAQUS Version 6. 4 ABAQUS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 62~100  
庄 茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 入门指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 62~100