

文章编号: 0258-7025(2006)06-0846-06

# 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析

胡永祥, 姚振强, 胡 俊

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘要** 有限元分析(FEM)是预测激光冲击强化处理(LSP)后材料的残余应力场、合理优化冲击参数非常有效的方法。通过对材料冲击响应过程的分析,建立了激光冲击强化处理的有限元分析模型,实现了激光冲击强化处理残余应力场的数值仿真。根据显式分析得到的材料内部各种能量变化过程,结合应力波理论,验证显式分析过程的正确性,提出显式分析求解时间的选择方法;分析了单次和多次冲击下材料内部的残余应力场分布,分析结果与实验结果非常接近。数值分析结果表明,表面残余应力在冲击区域内分布比较均匀,表层的残余应力梯度较小;多次重复冲击后,材料的残余压应力明显增加,残余压应力影响深度也显著加深;随着冲击次数的增加,材料的残余应力场趋于饱和。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化处理;有限元分析;残余应力

**中图分类号** TN 249;TG 178 **文献标识码** A

## Numerical Simulation of Residual Stress Field for Laser Shock Processing

HU Yong-xiang, YAO Zhen-qiang, HU Jun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** Finite element method (FEM) simulation of laser shock processing (LSP) is an effective method to predict the residual stress field and optimize the laser shock parameters. The FEM is applied to attain the numerical simulation of residual stress field of material treated by laser shock processing. The history of energies during explicit dynamic analysis is discussed and is well correlated with the result derived by shock wave theory. The method of solution time choosing for explicit analysis is presented based on the history of energies. Residual stress distribution of single and multiple laser shock is analyzed and validated by experimental result. The analysis results indicate that compressive residual stress of material is uniform on surface and the stress gradient in depth is small. Compressive residual stresses and plastically affected depth are extensively increased and gradually reach the saturated state by multiple laser shock.

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

## 1 引 言

近年来,为降低零件的制造成本,表面处理技术在生产制造中显得越来越重要。三十多年以前发现的激光冲击强化处理(LSP)技术现已在国外逐渐投入实际应用。与传统的喷丸强化工艺相比,激光冲击强化处理能够在零件表面附近产生更深的残余压应力层;而且由于激光束能够精确控制,尤其适用于一些如孔、缺口、导角、焊缝等局部易失效位置的表面强化。该技术可以大大提高金属材料的抗疲劳、腐蚀以及磨损性能<sup>[1~4]</sup>。

研究人员采用有限元软件 ABAQUES 对不同材料在激光冲击强化处理下,冲击波的传播以及残余应力场的分布进行了仿真分析,部分分析结果与实验取得较好的一致<sup>[5~8]</sup>。但是,由于激光冲击强化处理过程十分复杂,冲击压力持续时间极短,对激光冲击强化处理残余应力场的数值分析,仍然集中在如何建立准确的有限元模型上,对三维有限元仿真分析的研究也相对较少;而且,研究使用有限元软件局限在 ABAQUES。

与 ABAQUES 相比,LS-DYNA 和 ANSYS 是

收稿日期:2005-10-18;收到修改稿日期:2005-12-07

作者简介:胡永祥(1981—),男,江苏扬州人,上海交通大学博士研究生,主要从事激光加工技术研究。E-mail: huyx@sjtu.edu.cn

当今工程领域最常用的有限元分析软件,分别以显式分析和隐式分析方法见长。LS-DYNA 作为世界上最著名的显式动力分析有限元程序,可以精确处理瞬态冲击波在材料中的传播过程;且 ANSYS 为 LS-DYNA 提供了强大的前后处理工具,几何模型和分析结果可以在 ANSYS 与 LS-DYNA 之间相互转换。研究通过两种有限元软件之间的显式、隐式转换接口,实现单次和多次激光冲击强化处理过程的数值仿真,预测冲击处理后材料的残余应力场,具有很广泛的工程应用前景。合理地确定显式分析求解时间可以有效地提高有限元分析效率与准确性。文献[8]认为显式分析求解时间应比冲击压力持续时间大两个数量级,并根据应力变化的波动情况选择,但该判别方法不够直观,操作也较复杂。

本文通过对激光冲击强化处理过程中材料对冲击压力响应过程的分析,综合采用 ANSYS 与 LS-DYNA 有限元分析软件,建立了有限元分析模型。对显式分析得到的材料内部各种能量的变化以及显式求解时间的选择方法进行了讨论;分析了单次和多次冲击下材料的残余应力场,与实验结果进行了比较。

## 2 数值仿真模型

### 2.1 激光冲击强化技术

与其他激光技术的应用不同,激光冲击强化处理是通过在材料表面施加机械力来实现材料的表面强化的,而表面不会受到热影响。如图 1 所示,激光冲击强化处理一般采用带约束层的冲击结构,材料待强化的表面覆盖一层牺牲层(通常为黑色涂层),然后在其上覆盖一层透明约束层(如水等)。在高功率密度(一般为几个  $\text{GW}/\text{cm}^2$ )的激光照射下,金属材料表面的牺牲层吸收激光能量迅速气化电离,形成等离子体;等离子体快速膨胀,因约束层约束,在材料被冲击表面产生瞬态的冲击压力(大小一般为几个 GPa,持续时间 100 ns 左右),从而产生向材料

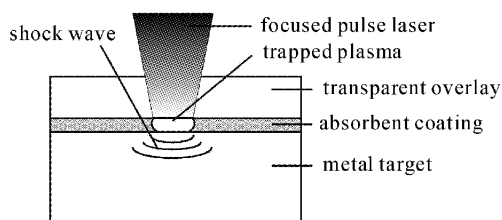


图 1 激光冲击强化处理示意图

Fig. 1 Schematic of the LSP

内部传播的冲击波。如果冲击波的压力高于材料的屈服强度,材料在短时间内以极高的应变率( $10^6 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ )变形并发生动态屈服,形成残余应力场<sup>[1]</sup>。

### 2.2 有限元分析过程

虽然冲击压力的加载时间非常短,但是由于冲击波传播过程中,材料内部会发生各种应力波的反射和相互作用,因而材料对冲击的响应需要持续相当长的时间才达到稳定。为得到稳定的残余应力场,有限元分析需要由两部分组成:显式动态分析与隐式静态分析。显式动态分析采用显式动力有限元算法,分析瞬态冲击下产生的冲击波在材料中的传播以及相互作用过程,得到材料动态响应。这种高速冲击过程的数值仿真需要采用显式有限元算法,实现瞬时、高速、非线性问题的快速求解,得到冲击波的波前并准确反映各种应力波的相互作用过程。隐式静态分析采用隐式有限元算法,释放显式动态分析后,材料内部弹性应变,计算材料内部的平衡状态,得到稳定的残余应力场。

激光冲击强化处理的有限元分析过程如图 2 所示。该分析方法充分利用了 LS-DYNA 与 ANSYS 分别在显式和隐式有限元分析上的优点,从而更易于得到准确的分析效果。

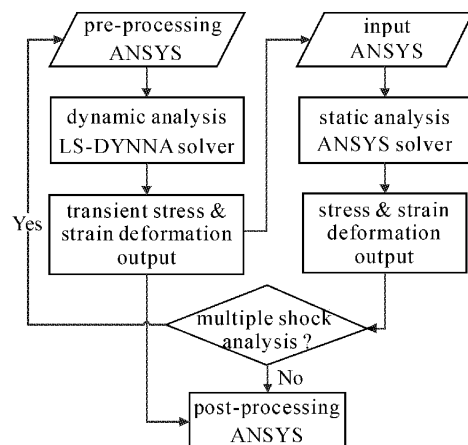


图 2 激光冲击强化处理有限元分析过程

Fig. 2 FEM analysis procedure

### 2.3 有限元模型的建立

#### 2.3.1 材料本构模型

激光冲击强化处理过程中,靶材的应变率高于  $10^6 \text{ s}^{-1}$ 。随着材料应变率的增加,材料的弹性模量基本不变,但是材料的屈服强度将发生变化。假设材料为各向同性理想弹塑性,遵循 Von Mises 屈服准则。在一维应变条件下,冲击波在半无限大物体中传播时最大弹性应力水平定义为 Hugoniot 弹性

极限(HEL)。当材料中应力波的压力大于 HEL, 将会发生永久的塑性变形。在一维应变下, 应力达到 HEL 时, 材料发生屈服, 则材料的动态屈服强度为<sup>[9]</sup>

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

其中  $\nu$  为材料的泊松比。

### 2.3.2 有限元模型

数值仿真需要的有限元模型为半无限大三体模型。由于冲击压力成中心对称, 为提高计算效率, 仅建立 1/4 模型进行分析计算, 并在对称面上施加对称边界条件。由于要模拟半无限大三体模型, 需要在模型的侧面和底面施加无反射边界条件, 防止应力波在边界处发生反射。

根据 LS-DYNA 与 ANSYS 实现显隐式分析转换的要求, 显式分析中模型单元选用 8 节点显式实体单元 Solid164; 在执行显隐式转换时, 该单元会自动转换为 ANSYS 中相应的隐式实体单元 Solid185。

数值分析的结果对网格密度非常敏感<sup>[8]</sup>。网格划分越密, 越容易获得准确的结果, 但是计算时间也会更长, 需要选择合理的网格划分方法以及显式分析中的时间步长。冲击区域附近网格要细化, 才能准确地预测残余应力场; 其余部分网格可相对较粗。如果在分析过程中发现塑性变形区域靠近两个不同网格划分密度的区域, 网格细化区域需要增大。

### 2.3.3 冲击压力的加载

为得到冲击压力的幅值与持续时间, 研究人员进行了大量的理论建模与实验测量<sup>[10,11]</sup>。由于有限元分析中不涉及冲击压力形成的物理过程, 因而假设冲击压力为已知条件, 并可根据需要对冲击压力的时程曲线作一定的简化。

## 3 激光冲击强化处理数值仿真算例

P. Ballard<sup>[12]</sup> 对 35CD4 50HRC 钢在进行激光冲击强化处理后的残余应力场以及失效行为进行了系统研究。采用的激光光斑为方形, 尺寸为 5 mm × 5 mm, 功率密度为 8 GW/cm<sup>2</sup>, 激光脉冲持续时间为 30 ns; 工件表面采用黑色涂层, 水作为透明约束层。冲击后采用 X 射线衍射(XRD)测量工件表层的残余应力分布。处理过程中得到的冲击压力随时间呈高斯分布, 半峰全宽(FWHM)为 50 ns, 峰值压力为 3 GPa。

分析需要的 35CD4 50HRC 钢的材料特性<sup>[8]</sup> 如表 1 所示。有限元模型尺寸为 10 mm × 10 mm ×

10 mm。图 3 给出了模型的网格划分、边界条件与加载。由于冲击压力持续时间很短, 根据实验测得的冲击压力峰值, 冲击压力时程曲线在加载时简化为在半峰全宽时间内线性上升到峰值, 并在其后的半峰全宽时间内线性下降到零点, 如图 4 所示。在冲击区域的两倍长度区域的三个坐标方向上, 将网格细化, 单元尺寸为 0.125 mm; 对于其余区域, 网格密度比前述区域粗 4 倍。模型的全部单元数为 125,000。

表 1 35CD4 50HRC 钢的材料特性

Table 1 Mechanical properties of 35CD4 50HRC steel

Material character	Size	Unit
Density, $\rho$	7800	kg · m <sup>-3</sup>
Poisson ratio, $\nu$	0.29	
Elastic modulus, $E$	210	GPa
Hugoniot elastic limit, HEL	2.1	GPa

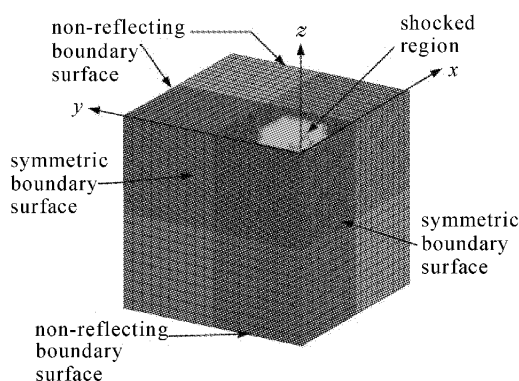


图 3 有限元模型

Fig. 3 Schematic configuration of 3D model

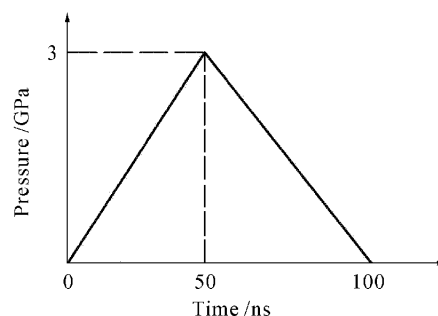


图 4 简化的冲击压力加载时程曲线

Fig. 4 Simplified load curve of shock pressure

## 4 单次激光冲击强化处理仿真结果与分析

### 4.1 显式动态分析结果讨论

材料对冲击的响应是应力波的传播、反射与相互作用的过程。材料各种能量的变化能够直观地反

映材料各种状态参数的变化。瞬时冲击压力产生的应力波,使材料质点发生运动,并引起材料变形,其程度可分别由材料质点的动能和材料的内能来反映。外部冲击压力做功传递给材料的总能量  $E_t$  主要转化为动能  $E_k$ ,内能  $E_i$  以及显式算法中因控制缩减积分实体单元的沙漏模式形成的沙漏能。

根据应力波理论,材料中传播的弹性波波速  $C_1^e$  与塑性波波速  $C_1^p$  的计算公式为<sup>[9]</sup>

$$C_1^e = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \cdot \frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

$$C_1^p = \sqrt{\frac{E}{3(1-2\nu)}} \cdot \frac{1}{\rho}, \quad (3)$$

其中  $\rho$  为材料密度,  $E$  为弹性模量。

两种不同性质的应力波传播到模型所需的时间可分别计算为

$$t_e = l_{\text{thick}} / C_1^e, \quad (4)$$

$$t_p = l_{\text{thick}} / C_1^p, \quad (5)$$

其中  $l_{\text{thick}}$  为有限元模型的厚度。

由于有限元模型的底面被定义为无反射边界,因此,传播到模型底部的应力波将会发生完全透射,从而会引起模型总能量的降低。仿真分析得到的各种能量的时间历程曲线如图 5 所示。冲击压力加载过程中,模型的总能量在前 100 ns 内迅速上升到峰值;然后在 100~1700 ns 范围内由于 LS-DYNA 中定义的沙漏控制能而略有下降;在 1700 ns 时,总能量发生一个突然的下降,这与根据式(4)计算得到的弹性波传播到底部的时间一致。分析得到的能量变化过程与理论分析结果相一致。

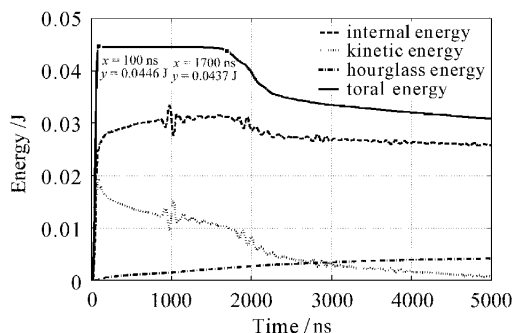


图 5 显式动态分析过程中材料能量的变化过程

Fig. 5 History of energies during explicit dynamic analysis

由图 5 可知,4500 ns 后材料的总能量与内能基本保持稳定,而动能逐渐趋于零。当求解时间到达 5000 ns 时,由于材料的动能趋于零,内能保持稳定,

材料中应力波的作用将十分微弱,也不会再发生塑性变形,其动态应力状态已基本保持稳定,因而可选择为显式动态分析的求解时间。图 6 给出了不同求解时间下,表面沿  $x$  轴的应力  $\sigma_x$  的变化。如果根据应力变化来选择求解时间,在 1000~2000 ns 过程中,应力变化非常明显,但是在 4000 ns 以后,应力呈现小幅波动现象,与根据能量分析得到的结果较一致。但是由于波动仍然存在,部分区域应力差别仍较大,不利于准确判断材料的响应是否已趋于稳定。

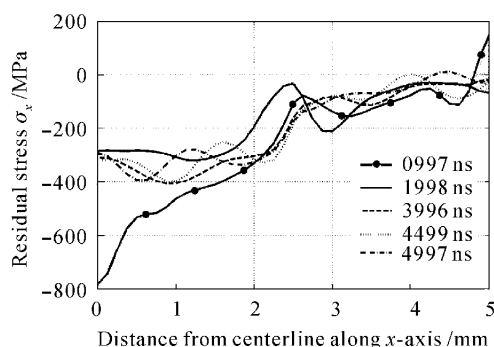


图 6 不同时间材料表面的应力状态

Fig. 6 Stress state on top surface at different time

由以上分析可知,显式动态分析能够准确地反映材料内部应力波的传播过程,为今后分析材料内部应力波的相互作用过程与残余应力的影响因素,优化冲击参数提供了有效的分析方法。根据显式分析得到的能量变化曲线选择材料在动能趋于零、内能趋于稳定的时间作为显式分析求解时间。与文献[12]中选择方法相比更直观,能量变化曲线的获取与应力变化曲线相比也更加方便。

## 4.2 残余应力场

将材料在 5000 ns 的应力应变状态导入到 ANSYS 中进行隐式静态分析。显式动态分析在 5000 ns 与隐式静态分析得到的 Von Mises 等效应力云图如图 7 所示。由图 7 可知, Von Mises 等效应力的最大值从 400.7 MPa 降低到 349.2 MPa,表明隐式静态分析释放了材料内部的弹性应变,得到了稳定的残余应力场。

图 8 和图 9 给出了对单次冲击分析得到的表面和深度方向的残余应力分布,并与文献[12]中的实验结果比较。深度方向  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  曲线基本重合。分析得到的残余应力场与实验结果接近。实验得到的残余压应力  $\sigma_x$  最大值约为 355 MPa,残余压应力影响深度为 0.8 mm;有限元仿真得到的残余压应力的最大值为 349 MPa,残余压应力影响深度为 0.67 mm,

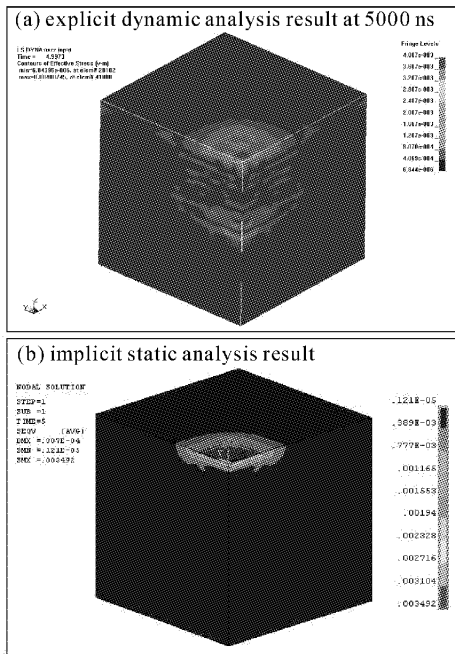


图7 显式、隐式分析的等效应力云图

Fig.7 Contour of Von Mises stress distribution of explicit dynamic and implicit static analysis

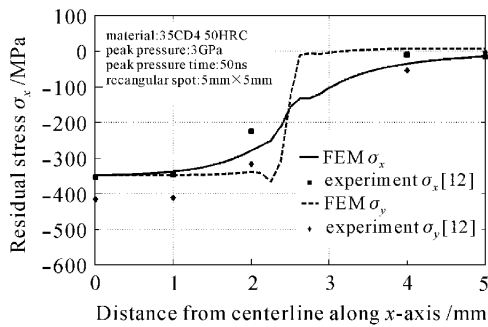


图8 单次冲击表面的残余应力分布

Fig.8 Residual stress distribution on top surface of single LSP

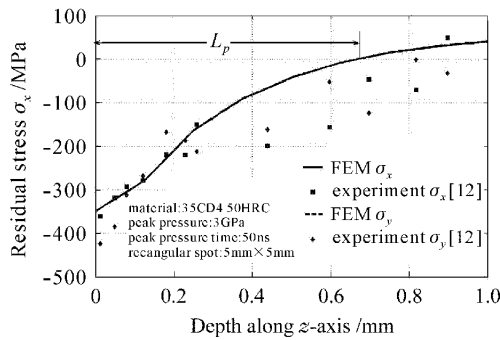


图9 单次冲击深度方向的残余应力分布

Fig.9 Residual stress distribution in depth of single LSP

分别比实验结果小了1.7%和16.3%。

分析结果表明,激光冲击强化处理能够在材料表层获得残余压应力,且在冲击区域内分布比较均匀,应力梯度也较小。这种残余应力分布特性有助于材料抗疲劳能力的提高。

### 5 多次重复激光冲击强化处理仿真结果与分析

根据图2所示的分析流程,在同一位置多次冲击得到的材料表面和深度方向的残余应力数值分析结果如图10和图11所示。残余压应力  $\sigma_x$  的最大值以及影响深度随冲击次数的变化如图12所示。进行第二次冲击后,残余压应力  $\sigma_x$  的最大值从349 MPa增加到433 MPa,增加了24.1%;残余压应力影响深度从0.67 mm增加到0.82 mm,增加了22.4%。5次重复冲击后,残余压应力  $\sigma_x$  的最大值增加到509 MPa,并趋于饱和;残余压应力影响深度增加到1.14 mm,它的增加趋势与冲击次数几乎成线性关系。

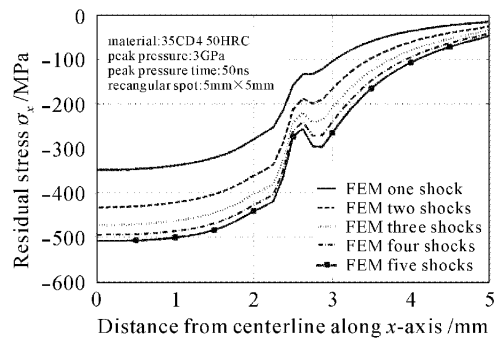


图10 多次冲击表面的残余应力分布

Fig.10 Residual stress distribution on top surface of multiple LSP

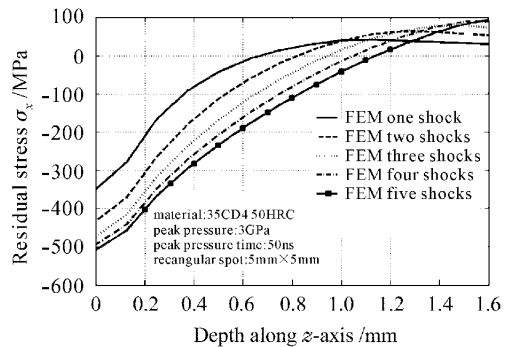


图11 多次冲击深度方向的残余应力分布

Fig.11 Residual stress distribution in depth of multiple LSP

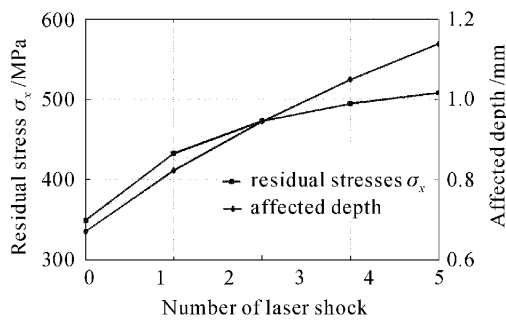


图 12 最大残余压应力与残余应力影响深度与冲击次数的关系

Fig. 12 Maximum compressive residual stress and the plastically affected depth against the number of shock

## 6 结 论

1) 通过激光冲击强化处理过程中材料对冲击响应过程的分析,建立了激光冲击强化处理的有限元分析模型,实现了激光冲击强化处理残余应力场的数值仿真,其分析过程包括 LS-DYNA 显式动态分析以及 ANSYS 隐式静态分析两个部分。

2) 根据显式动态分析得到的材料内部各种能量变化过程,结合应力波理论,验证了显式分析过程的正确性;提出根据显式分析得到的能量变化曲线,选择材料动能趋于零、内能趋于稳定的时间作为显式分析求解时间。

3) 利用激光方形光斑单点冲击处理 35CD4 50HRC 钢后材料表层获得的残余应力,仿真分析得到的残余应力场分布与实验结果非常接近,且在冲击区域内分布比较均匀,应力梯度也较小。

4) 经激光多次重复冲击后材料表面残余压应力明显增加,残余压应力影响深度也显著加深,随着冲击次数的增加,材料的残余应力场趋于饱和。

## 参 考 文 献

- Allan H. Clauer, David F. Lahrman. Laser shock processing as a surface enhancement process [J]. *Key Engineering Materials*, 2001, **197**:121~144
- Zou Shikun, Tan Yongsheng, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):371~373  
邹世坤,谭永生,郭大浩等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):371~373
- Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):125~128  
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
- Hua Yinqun, Chen Ruifang, Lu Miao *et al.*. Study on the experiment of 40Cr steel by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):495~498  
花银群,陈瑞芳,路森等. 激光冲击强化处理 40Cr 钢的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):495~498
- William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening [J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, **21**(7):719~724
- K. Ding, L. Ye. FEM simulation of two sided laser shock peening of thin sections of Ti-6Al-4V alloy [J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(2):127~133
- P. Peyre, A. Sollier, I. Chaieb *et al.*. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2003, **23**(2):83~88
- K. Ding, L. Ye. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes [J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(5):351~358
- Wang Lili. *Stress Wave Theory* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985. 149~159  
王礼力. *应力波基础*[M]. 北京:国防工业出版社, 1985. 149~159
- R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physics study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):775~784
- Zhang Yongkang, Deng Qilin, Tang Yaxin *et al.*. Stress wave measurement induced by laser shock [J]. *Electromachining & Mould*, 1994, **1**:29~32  
张永康,邓琦林,唐亚新等. 国外激光冲击诱导的应力波动态测量[J]. *电加工与模具*, 1994, **1**:29~32
- P. Ballard. Residual stresses induced by rapid impact-applications of laser shocking [D]. Palaiseau, France: Ecole Polytechnique, 1991