

文章编号: 0258-7025(2008)06-0931-06

# 激光冲击参数对残余应力场影响的三维数值模拟

陈瑞芳<sup>1</sup> 郭乃国<sup>2</sup> 花银群<sup>2</sup>

(江苏大学<sup>1</sup> 机械工程学院,<sup>2</sup> 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 数值模拟是预测激光冲击残余应力场、研究激光冲击参数对残余应力场影响的一种有效方法。采用显式动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对激光冲击处理(LSP)40Cr 钢残余应力场进行三维数值模拟;建立了激光冲击处理 40Cr 钢残余应力场有限元分析(FEA)模型,实现了激光冲击处理 40Cr 钢残余应力场的数值模拟;模拟研究了激光功率密度、激光脉冲持续时间、激光光斑尺寸对 40Cr 钢残余应力场的影响。数值模拟结果表明,残余应力模拟值与实测值之间有着较好的一致性;在激光脉冲持续时间一定的条件下,要想获得最大的表面残余压应力,存在一个最佳的激光功率密度;在激光功率密度一定并且脉宽大于 45 ns 的情况下,表面残余压应力随激光脉冲持续时间的增加而减小;在激光功率密度、激光脉冲持续时间一定的条件下,表面残余压应力随光斑直径增大而增大。

**关键词** 激光技术;激光冲击处理;残余应力;有限元;ANSYS/LS-DYNA

中图分类号 TN 249;TG 178 文献标识码 A

## Numerical Simulation of Effects of Laser Shock Parameters on Residual Stress Field Induced by Laser Shock Processing

Chen Ruifang<sup>1</sup> Guo Naiguo<sup>2</sup> Hua Yinqun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, <sup>2</sup>School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Numerical simulation is an effective way to predict the residual stress field induced by laser shock processing (LSP) and study the effects of laser shock parameters on the residual stress field. The finite element software ANSYS/LS-DYNA was applied to simulate the three-dimensional (3D) residual stress field of 40Cr steel surface layer induced by LSP. The 3D finite element model of laser shock processing 40Cr steel was built. The numerical simulation of residual stress field of 40Cr steel surface layer induced by LSP was realized. The effects of laser shock parameters, intensity, pulse width and beam spot, on the residual stress field of 40Cr steel surface layer were studied by simulation. The result of numerical simulation indicates that the value of residual stress from simulation has a good consistent with that from measurement. There is an optimum laser power density for inducing a maximum surface residual compressive stress when the duration of laser pulse was fixed. The surface residual compressive stress decreases as the duration of laser pulse prolongs while the laser power density is fixed and the pulse duration is over 45 ns; The surface residual compressive stress also increases as the size of laser beam spot increases when laser power density and duration of laser pulse are fixed.

**Key words** laser technique; laser shock processing; residual stress; finite element; ANSYS/LS-DYNA

## 1 引言

激光冲击处理(LSP)是利用激光诱发冲击波对材料表面进行改性,提高材料抗疲劳、磨损及应力腐蚀等性能的技术。与一般材料表面改性处理方法如喷丸硬化、冷挤压、激光热处理等相比,激光冲击处理具有非接触、高效灵活、无热影响区及强化效果显

著等特点<sup>[1~4]</sup>,已在航空航天、核工业、能源、汽车、工程机械等方面展示出广阔的应用前景。

在激光冲击处理过程中,激光冲击波在材料表面诱发的残余应力场对材料的机械性能有着至关重要的影响。而对材料表面残余应力场的优化还要取决于激光冲击处理的参数。本文基于激光冲击处理

收稿日期:2007-05-15;收到修改稿日期:2007-10-23

基金项目:国家自然科学基金(50451004)和总装备部预研基金(9140C4504020606)资助项目。

作者简介:陈瑞芳(1968—),女,湖南人,副教授,主要从事激光表面改性技术方面的研究。E-mail:huayq@ujs.edu.cn

40Cr 钢的实验,采用显式动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对激光冲击诱发的残余应力场进行三维数值模拟研究,模拟研究激光功率密度、激光脉冲持续时间、激光光斑尺寸对残余应力场的影响。

## 2 激光冲击处理实验

激光冲击处理试样材料为 40Cr 钢,它的化学成分如表 1 所示,试样尺寸为 30 mm × 20 mm × 10 mm。用 K9 玻璃作为约束层材料。吸收层材料为中国科学院上海光学精密机械研究所研制的 86-1 型黑漆。激光冲击处理的光束参数为:激光波长 1.06 μm,脉宽 23 ns,光斑直径 7 mm;激光脉冲功率密度 2.35 GW/cm<sup>2</sup>。应用 X350A 型残余应力测试仪测定残余应力,残余应力测试位置为激光冲击区的中心。

表 1 40Cr 钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 40Cr steel  
(mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr
0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10

## 3 建立有限元模型几个主要问题处理方法

### 3.1 冲击压力的加载

激光诱导产生冲击波的机制比较复杂,应用 ANSYS/LS-DYNA 模拟冲击波产生比较困难。本文对冲击波的加载是假设一个随时间变化的压力作为已知条件加载到模型上。至于压力随时间变化的关系曲线确定,则借鉴关于这方面报道的研究结果;一般认为冲击波压力时间关系曲线为近高斯形的曲线,冲击波的作用时间为激光脉宽的 3 倍左右<sup>[5]</sup>。这里将冲击波压力时间关系曲线简化为三角形或梯形。在模拟过程中,先根据激光冲击参数估算一个冲击压力过程曲线进行模拟,然后将激光冲击残余应力模拟结果和实验结果进行对比,再对冲击波的压力时间关系进行修正。本文对激光冲击诱发的冲击波峰值压力  $P_{\max}$  估算采用公式<sup>[6]</sup>

$$P_{\max}(\text{GPa}) = 0.8\rho^{1/2}(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})I^{1/2}(\text{GW}/\text{cm}^2), \quad (1)$$

式中  $2/\rho = 1/\rho_{\text{K9 glass}} + 1/\rho_{\text{40Cr steel}}$ ,  $I$  为激光功率密度,  $\rho_{\text{K9 glass}}$ ,  $\rho_{\text{40Cr steel}}$  分别表示 K9 玻璃和 40Cr 钢的密度。

### 3.2 材料本构模型

激光冲击处理的实质是激光冲击波与材料相互

作用的结果,冲击波与材料的相互作用是一个动态的力学过程。在激光冲击处理过程中,由于金属材料表面的黑漆吸收层保护材料不受热作用,因此处理过程仅受力作用。靶材的应变率高于  $10^6 \text{ s}^{-1}$ <sup>[1]</sup>,而材料的应变率对材料的力学性能有着重要的影响,但从目前来看,应变率仍是一个在深入研究中、且带一定争议的问题。这是由于不同应变率下材料性能的相关资料较少,而从半经验、半理论得出的速率相关的本构方程相当复杂,且包括的未知材料参数过多,况且要考虑材料的动力学响应一般又总是—个应变率过程<sup>[7]</sup>。在本文中,假设材料为各向同性理想弹塑性,材料遵循—维应变条件下的本构关系,当冲击波压力大于材料于戈尼奥(Hugoniot)弹性极限(HEL)时,材料产生屈服,其动态屈服强度  $\sigma_y$  表示为<sup>[8]</sup>

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

式中  $\nu$  为泊松比。

### 3.3 几何模型及网格划分

激光冲击处理的激光光斑尺寸与靶材尺寸相比要小得多,可以认为靶材是半无限三维实体。激光光斑为圆形,亦认为冲击波压力成中心对称,为了提高计算效率,仅建立 1/4 几何模型。对于一个有限元模拟分析来说,网格划分至关重要。依据保证精度,提高计算效率的原则,对冲击作用影响区采用较密的网格划分,其余部分采用相对粗的网格。在模拟的过程中,采用不同的网格密度进行尝试,直至找出合理的网格划分。

### 3.4 边界条件处理

由于采用的几何模型为 1/4 模型,模型的两个剖面需设置对称边界;模型的侧面与底面设置为无反射边界,让应力波在边界透射,以模拟半无限三维实体。

### 3.5 求解控制

在求解控制中,主要是求解时间与全局阻尼的设置,其余的一些控制项可先采用软件中的默认设置。为了准确地获得材料对冲击应力波的动力响应,求解时间必须要大大长于冲击应力波的时间,这是由于冲击应力波在模型中传播会出现各种波的反射及这些应力波间的相互作用。应力波在材料中作用时,材料质点发生运动与位移,这可以在材料的动能和内能上得到反映。当整个模型动能趋于零、内能趋于恒量时,表明材料中的应力波作用变得非常弱,应力趋于稳定状态;在这个时间后,材料中也不

会发生塑性变形<sup>[9]</sup>；因此，可以将材料动能趋于零的时间作为求解时间。在建模时可以预先设置一个时间值，然后以分析结果中模型能量时间曲线上动能为零的时刻作为最后的求解时间<sup>[10]</sup>。为使显式求解的中心差分法稳定，显式求解的时间步长必须小于某个临界时间步长  $\Delta t_{cr}$  ( $\Delta t_{cr} = l_{min}/C, l_{min}$  为最小单元长度,  $C$  为材料中的声速)，模拟中首先确定  $\Delta t_{cr}$ ，然后再进行适当的放缩(乘一比例系数)。

全局阻尼是用来阻止冲击造成的模型非真实振荡，对于模拟结果的影响很大。若全局阻尼设置不当，会使模拟结果严重失真。依据 LS-DYNA 理论手册，最佳的阻尼值应取模型第一阶固有频率的两倍，模型的第一阶固有频率可以应用 ANSYS 隐式程序进行模态分析得到。

### 4 有限元模型

在 ANSYS 前处理器中，建立尺寸为  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的立方体作为  $1/4$  几何模型， $y$  轴作为中心对称轴， $x-o-z$  面为冲击波压力加载面所在平面， $y-o-z$ ， $x-o-y$  面为模型的两个剖面所在平面；材料模型设置为理想弹塑材料，理想弹塑模型中用到的 40Cr 钢力学性能参数如表 2 所示；应用实体单元 SOLID164 对几何模型进行网格划分，在模型  $x, y, z$  坐标方向上将压力加载区半径两倍长度的范围划分为 40 等分，单元尺寸为  $0.175\text{ mm}$ ，其余部分划分为 10 等分

表 2 40Cr 钢的力学性能参数

Table 2 Parameters of mechanical properties of 40Cr steel

Material characteristics	Size
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7820
Poisson ratio $\nu$	0.277
Elastic modulus $E / \text{GPa}$	211
Hugoniot elastic limit (HEL) / GPa	2.37

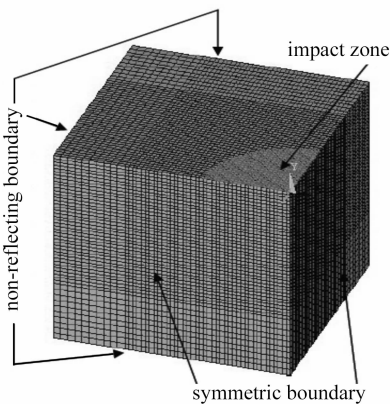


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

分，单元尺寸为  $0.3\text{ mm}$ ，模型共形成 125000 个单元；模型的两个剖面设置为对称边界，两个侧面与底面设置为无反射边界。图 1 为建立的有限元模型。冲击波压力的峰值根据(2)式估算，冲击波压力持续时间取激光脉冲持续时间的 3 倍，为  $70\text{ ns}$ ，图 2 为加载到模型上的冲击波压力时间关系曲线。

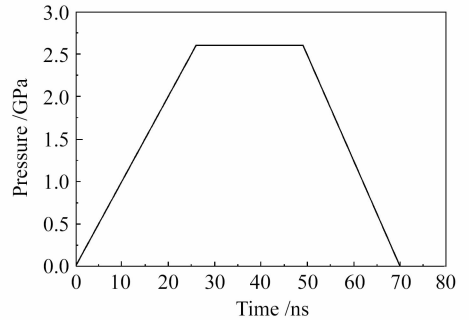


图 2 冲击波压力时间关系曲线

Fig.2 Pressure-time curve of shock-wave

### 5 模拟结果与分析

#### 5.1 模型能量

图 3 为模型各种能量随时间变化的曲线。冲击应力波与材料相互作用的过程中，应力波的能量主要转化为材料的内能、动能、阻尼能以及沙漏能。总能量在  $0 \sim 70\text{ ns}$  内由于冲击应力波做功而迅速达到最大值；在  $70 \sim 1600\text{ ns}$  内由于阻尼与沙漏的作用总能量缓慢下降，到  $1634\text{ ns}$  左右时突然下降，这是由于一部分弹性应力波从模型底部透过；到  $2000\text{ ns}$  以后总能量趋于稳定不发生变化；动能同样在  $0 \sim 70\text{ ns}$  内达到最大值，随后一直下降，到  $3600\text{ ns}$  左右趋于零，说明此时模型中已无应力波的作用，节点不会发生位移而趋于稳定，材料不再发生变形，此时模型中应力场也是最终稳定的残余应力场。

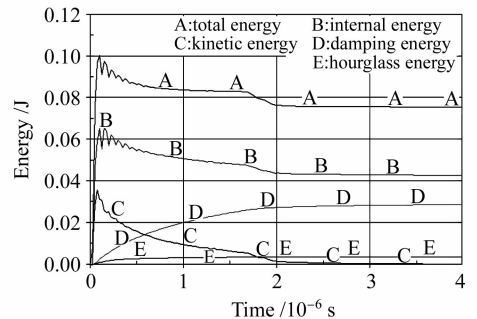


图 3 模型各种能量-时间关系曲线

Fig.3 Curves of energy-time

#### 5.2 残余应力

冲击波与材料相互作用后，最终在材料中形成

稳定残余应力场。图4为模型在4000 ns时的 Von Mises 等效应力云图。

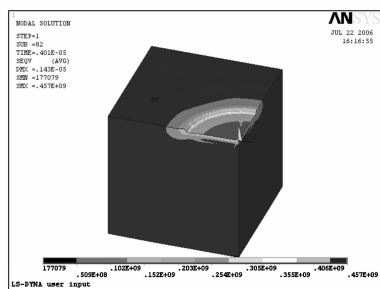


图4 模型4000 ns时的等效应力云图

Fig. 4 Contour of Von Mises stress distribution of model at 4000 ns

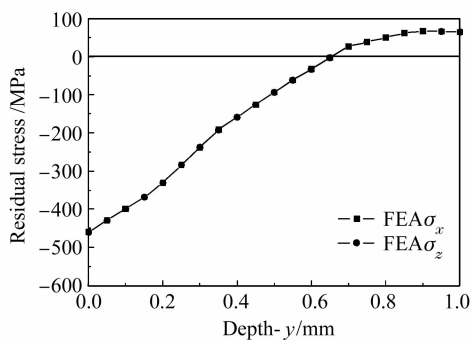


图5 沿y轴深度方向上残余应力分布

Fig. 5 Residual stress distribution in depth along y-axis

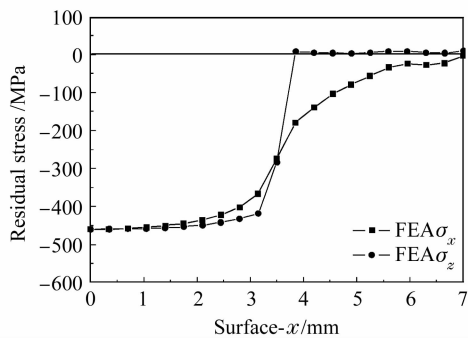


图6 沿x轴方向表面残余应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution on top surface along x-axis

图5为模型冲击区中心沿深度方向残余应力 $\sigma_x, \sigma_z$ 的分布,在表面的残余应力最大达459 MPa,残余压应力随深度增加而逐渐减小,约到0.7 mm处压应力减小为零,这也是激光冲击诱发的残余压应力区截止深度。图6为模型表面从冲击中心沿x轴方向上的残余应力 $\sigma_x, \sigma_z$ 分布曲线,可以看出冲击区表面的残余压应力分布比较均匀,在冲击区的边界处,表面残余压应力突变为零。

### 5.3 模拟值与实测值的比较

图7为激光冲击区中心点深度方向实测残余应

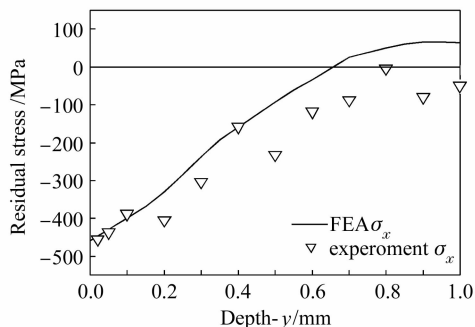


图7 沿y轴深度方向上残余应力 $\sigma_x$ 模拟值与实测值

Fig. 7 Simulated value and measured value of residual stress  $\sigma_x$  in depth along y-axis

力值与模拟残余应力值。实测表面残余应力最大值为457 MPa,模拟得到的表面残余应力最大为459 MPa,这两个值很接近。可以看到在0.4 mm深度范围内模拟值与实测值很接近;在0.4 mm深度以下,模拟值与实测值出现了偏差。实验得到的残余压应力区深度约为1 mm,而模拟得到残余压应力区深度为0.7 mm,要比实测值小约30%。总的来说,沿冲击区深度方向上的残余应力分布的实验数据与模拟数据之间有着较好的一致。

### 5.4 激光冲击参数对残余应力场影响的模拟研究

#### 5.4.1 激光功率密度

激光冲击诱发的冲击波峰值压力是激光功率密度的函数。靶材表面的冲击波峰值压力随激光功率密度提高而增加。分别将冲击波峰值压力取2.8 GPa,3.2 GPa,3.5 GPa,4.0 GPa进行残余应力场的模拟,模拟所用压力持续时间仍为70 ns。

图8(a),(b)分别显示了不同峰值冲击压力下模型表面与深度方向上的残余应力曲线。由图8(a)可以看出,在x轴坐标上0~3.5 mm范围即冲击区范围内,表面残余压应力分布比较均匀;当峰值压力P从2.8 GPa增加到3.2 GPa后,冲击区表面的残余压应力值略有增加;当峰值压力P从3.2 GPa分别依次提高至3.5 GPa,4.0 GPa时,残余压应力并没有随峰值压力的提高而提高,反而随之减小;这说明峰值压力P为3.2 GPa左右时,冲击区表面的塑性变形趋于饱和使得残余压应力难以提高。这与表面残余压应力最大值在峰值压力 $2 \times \text{HEL} \sim 2.5 \times \text{HEL}$ 之间取得有一定的误差,具体原因有待进一步的研究。同时由图8(b)可以看出在峰值压力增加的整个过程中,残余应力区深度也是一直增加的。

#### 5.4.2 激光脉冲持续时间

激光冲击处理中,激光系统发射的激光束脉冲

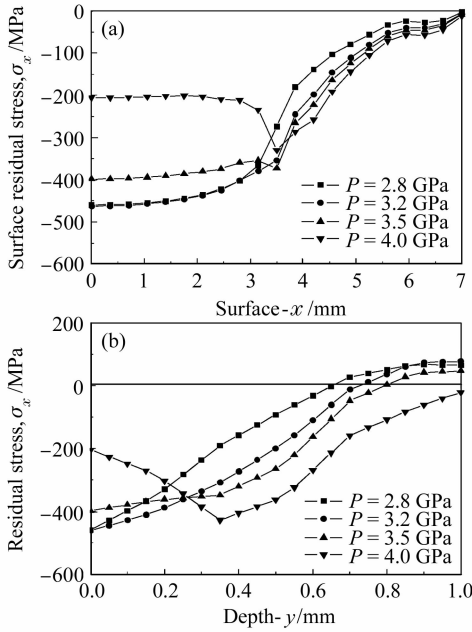


图 8 不同峰值冲击压力下的残余应力  
Fig. 8 Distribution of residual stresses ( $\sigma_x$ ) with respect to different peak pressures

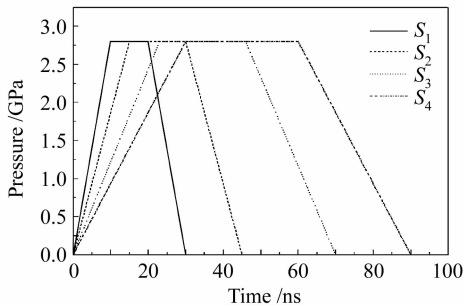


图 9 冲击波的压力时间关系曲线  
Fig. 9 Pressure-time curves of shock wave

持续时间能在一定范围内变化,可以通过控制激光脉冲的持续时间直接控制冲击波压力的持续时间,一般冲击波压力持续时间是激光脉冲持续时间的 2~3 倍。为了研究冲击压力持续时间对残余应力场的影响,采用峰值压力相同、压力持续时间不同的四个冲击波压力进行模拟。如图 9 所示,  $S_1, S_2, S_3, S_4$  分别为四个冲击波的压力时间关系曲线,压力持续时间  $t$  分别为 30 ns, 45 ns, 70 ns, 90 ns, 峰值压力都为 2.8 GPa。

图 10(a), (b) 分别显示了在不同压力持续时间下沿  $x$  轴的表面残余应力和沿  $y$  轴深度方向上的残余应力分布。由图可以看出,  $t = 30$  ns 与  $t = 70$  ns 时产生的残余应力分布较为近似。 $t = 45$  ns 压力持续时间下产生的表面残余压应力最大达 527 MPa,  $t = 90$  ns 下产生的表面残余应力最小为 404 MPa; 这

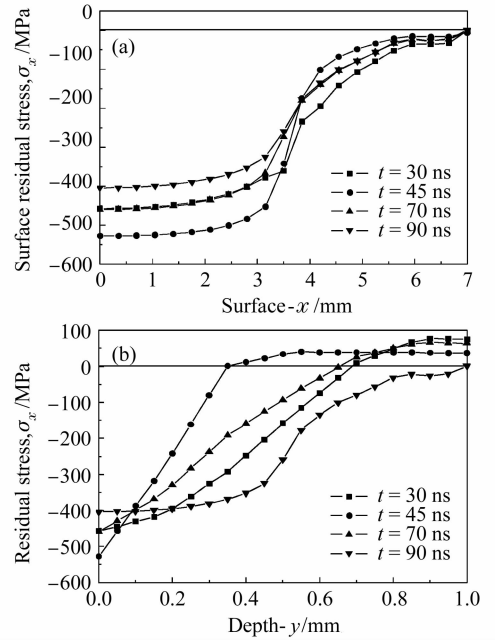


图 10 不同压力持续时间下的残余应力  
Fig. 10 Distribution of residual stresses ( $\sigma_x$ ) with respect to different durations of pressure

说明并非压力持续时间越长产生的表面残余压应力越大,压力持续时间越短产生的表面残余压应力越小。还可以看到,虽然 45 ns 压力持续时间下产生了最大的表面残余压应力,但是得到的残余压应力区深度是最小的,只有约 0.35 mm; 在 90 ns 的压力持续时间下所得到的残余压应力区深度最大,约达 1 mm。从压力持续时间的变化过程来看,压力持续时间从 45 ns 到 70 ns 再到 90 ns, 它们产生的表面残余应力分别为 527 MPa, 459 MPa, 404 MPa, 所得到的残余压应力区深度分别约为 0.35 mm, 0.7 mm, 1.0 mm。这说明在 45~90 ns, 残余压应力区深度随压力持续时间的增加而增加,表面残余压应力随压力持续时间的增加而减小。

#### 5.4.3 激光光斑尺寸

为了研究在相同冲击波压力时间关系曲线和激光冲击处理条件下激光光斑尺寸对残余应力场的影响,分别采用直径为 0.28 mm, 0.7 mm, 1.12 mm 的光斑进行模拟,其他冲击参数为功率密度为 2.35 GW/cm<sup>2</sup>, 脉宽为 30 ns。图 11(a), (b) 分别为不同激光光斑尺寸下得到的沿  $x$  轴表面残余应力分布和沿  $y$  轴深度方向上的残余应力分布。图 11(a) 中的结果显示,光斑尺寸对表面残余应力的影响较大,表面残余压应力随光斑的直径增大而增大; 在直径 1.12 mm 下的最大表面残余压应力达 500 MPa, 分别比直径为 0.28 mm, 0.7 mm 下的高 25%, 8%。

在沿  $y$  轴的深度方向上,直径从 0.28 mm 增加到 0.7 mm,整个深度上的残余压应力都得到了提高,继续增加直径至 1.12 mm,整个深度上的残余压应力变化很小。

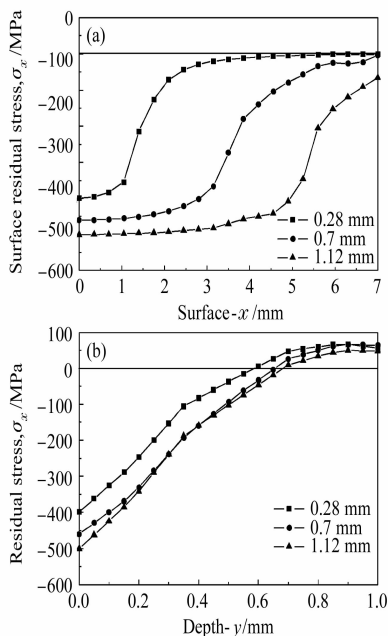


图 11 不同激光光斑尺寸下的残余应力

Fig. 11 Residual stresses ( $\sigma_x$ ) profiles for different laser spot size

## 6 结 论

基于激光冲击处理 40Cr 钢实验,在 ANSYS 环境下建立了激光冲击处理的有限元数值模拟模型,并利用 LS-DYNA 求解器实现了模拟计算,实现了激光冲击处理 40Cr 钢残余应力场的数值模拟。

将 ANSYS/LS-DYNA 模拟得到的激光冲击处理 40Cr 钢残余应力数据与实验测量数据相比,两者之间具有较好的一致性。

模拟研究了冲击波峰值压力、激光脉冲持续时间、激光光斑尺寸对 40Cr 钢激光冲击处理残余应力场的影响,模拟结果表明:1) 在冲击压力持续时间一定的条件下,要想获得最大的表面残余压应力,存在一个最佳的峰值压力  $P_0$  (模拟中对应 3.2 GPa); 当峰值压力  $P < P_0$  时,表面残余压应力随  $P$  的增大而增大;当峰值压力  $P > P_0$  时,表面残余压应力随  $P$  的增大而减小;激光冲击诱发的残余压应力区深度总随  $P$  的增大而增加。2) 在冲击波压力峰值  $P$  一

定并且在脉宽大于 45 ns 时,表面残余压应力随激光脉冲持续时间的增加而减小;激光冲击诱发的残余压应力区深度随压力脉冲持续时间的增加而增加。3) 在冲击压力一定的条件下,表面残余应力随光斑直径增大而增大;残余压应力区深度亦随光斑直径增大而增大,但光斑直径增大到一定程度后,对残余压应力区深度的影响就变得不明显。

## 参 考 文 献

- Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloy: a review [J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10):1021~1036
- C. Rubio-González, J. L. Ocaña, G. Gomez-Rosas *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Material Science and Engineering A*, 2004, **386**:291~295
- Hua Yinqun, Chen Ruifang, Yang Jichang *et al.*. Study experiments and mechanism of 40Cr steel surface by laser compound processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1445~1448  
花银群,陈瑞芳,杨继昌等. 40Cr 钢表面激光复合强化机理研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1445~1448
- Chen Ruifang, Hua Yinqun, Cai Lan. Estimate of residual stress of steel materials induced by laser shock wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):278~282  
陈瑞芳,花银群,蔡 兰. 激光冲击波诱发的钢材残余应力的估算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):278~282
- P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys, application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, **210**(1):102~113
- Duan Zhiyong. Study on laser shock wave and laser shock processing technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2002. 20~22  
段志勇. 激光冲击波及激光冲击处理技术的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2002. 20~22
- Zhou Nan, Qiao Dengjiang. *Materials Dynamics under Pulses Beam Radiation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 75~85  
周 南,乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 75~85
- Yang Guitong. *Dynamic Theory of Plasticity* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 442~448  
杨桂通. 塑性动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. 442~448
- K. Ding, L. Ye. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock processes [J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(5):351~358
- Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):846~851  
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