

文章编号: 0258-7025(2010)08-2073-07

激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析

姜银方 来彦玲 张 磊 唐振州 李志飞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光冲击后在其金属表面形成一定形式的残余压应力,可对材料表面进行改性处理。采用 ABAQUS 有限元软件,研究激光功率密度、光斑形状对板料表层残余应力场分布的影响,探索残余应力场机制。结果表明,提高激光功率密度可以增加板料表层残余应力场,但随功率密度增大大会产生“残余应力洞”现象;激光冲击后材料位移和表面应力动态响应分析表明,材料表面受冲击与材料弹性力作用产生振荡过程,冲击光斑边缘产生反射波(稀疏波)的反向加载,引起反向塑性变形,形成“残余应力洞”现象;光斑形状影响稀疏波向中心汇聚,造成中心残余压应力不同的缺失。该研究为工艺参数优化,减少冲击中心残余应力缺乏,获得更好的激光冲击处理强化效果提供依据。

关键词 激光技术;残余应力洞;激光冲击处理;功率密度;光斑形状

中图分类号 TN 249 ;TG156 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2073

Investigation of Residual Stress Hole on a Metal Surface by Laser Shock

Jiang Yinfang Lai Yanling Zhang Lei Tang Zhenzhou Li Zhifei

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

Abstract The compressive residual stresses are generated by laser shock processing (LSP) on the metallic surface, and laser shock processing is a new surface strengthening technology which can modify material surface. With the finite element simulation software ABAQUS, the effect of the laser power densities and the spot configurations on the distribution of residual stress field of the material surface is simulated. The results indicate that the compressive residual stress field can be enhanced by increasing the laser power densities, but the “residual stress hole” may appear with the increase of the power densities. From the analysis of material displacement and the dynamic response of the surface stresses after the laser shock, it is found that the shocking on material surface and the elastic force of material together form the oscillation process, and the reflection waves (rarefaction waves) load reversely on the shocking spot edges, inducing the reverse plastic deformation, which is the so-called “residual stress hole”. The focalizing of the rarefaction waves to the center is influenced by the spot configurations, and the residual stress deletion at the shocking center is different. The results can be used to reduce the residual stress deletion at the shocking center and optimize the process parameters, which provide a basis for obtaining the better strengthened effect of the laser shock processing.

Key words laser technique; residual stress hole; laser shock processing; power density; spot configuration

1 引 言

激光冲击处理(LSP)工艺基于应用高功率短脉冲激光作用在附有吸收层和约束层的靶材表面,靶材表面迅速气化达到 10000 °C,在短脉冲下生成非常高的压力等离子体(吉帕级),等离子体继续吸收激光能量,温度继续升高,便以一定的形式向外膨胀,由于

膨胀等离子体被限制在金属表面和约束层之间,因此导致高温高压的等离子体发生爆炸,产生一个高振幅、短脉宽的压力脉冲,压力脉冲以冲击波的形式传入金属内部,从而在金属表层形成一定分布特性的残余应力。通过激光冲击处理,材料表层产生一定深度的残余压应力,可以改善材料表面性能,能提高零件

收稿日期: 2009-10-16; 收到修改稿日期: 2010-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(50735001)和江苏省自然科学基金(BK2009203)资助课题。

作者简介: 姜银方(1962—),男,教授,主要从事激光冲击成形与强化处理等方面的研究。E-mail: yfjiang@ujs.edu.cn

的疲劳寿命,又能改善关键部位的耐磨性和抗腐蚀性^[1~5],而且这种工艺具有强化效果显著、无热影响区、非接触及高效灵活等特点,具有广泛的应用前景。由于激光冲击后在材料表面残余应力的大小及其分布影响了激光冲击处理的强化效果,因此激光冲击后材料表面层的残余应力的大小、分布、影响因素等成为研究的热点。文献[6,7]对激光冲击后的残余应力场进行了有限元模拟,研究了残余应力的分布及各因素对残余应力的影响;文献[8]通过试验对激光斜冲击后 LD31 残余应力分布进行了分析;文献[9]通过试验和有限元模拟相结合的方法研究了激光冲击 TC4 的残余应力场;文献[10]应用弹塑性力学理论对钢材的残余应力进行了估算;文献[11]指出激光束以倾斜一定角度辐照在试样表面,可以避免圆形光斑冲击区中心发生应力下降的现象。Peyre 等^[12]发现“残余应力洞”现象,由于研究条件限制没有说明具体原因。虽然激光冲击处理技术在某些工业生产中已经获得应用,但是作为新型的表面工程处理技术,激光冲击处理过程中对残余应力的研究还有很多问题需要解决。本文就激光冲击处理材料表面残余应力洞现象产生机制、影响因素及规律进行分析研究,以改善处理质量。

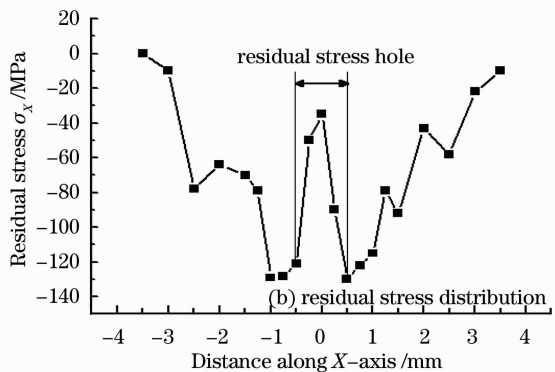
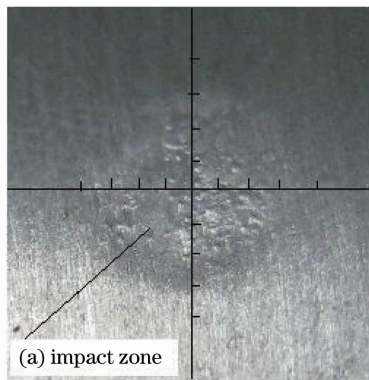


图2 表面残余压应力的纵向分布

Fig. 2 Residual stress longitudinal distribution on metal surface

3 激光冲击有限元建模

模拟采用激光冲击波峰值压力进行加载,它与激光功率密度的关系可根据 Fabbro 等^[13,14]建立的冲击波峰值压力与激光功率密度之间的关系进行换算

$$P_{\max} = 0.01 \left(\frac{\xi}{2\xi + 3} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right)^{\frac{1}{2}} I_0^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 P_{\max} 为冲击波峰值压力, Z_1 为约束层声阻抗,

2 激光冲击材料表面残余应力洞现象

试验采用高重复频率钕玻璃激光器,激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽为 20 ns,能量约为 50 J,呈高斯分布,光斑尺寸为 6 mm,试样表面施加吸收层(铝箔)后,试样放置在夹具(台虎钳)上固定,呈悬臂状,以水作为约束层。试验装置见图 1。试样为 $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 2024-T3 铝合金板料,参数见表 1。

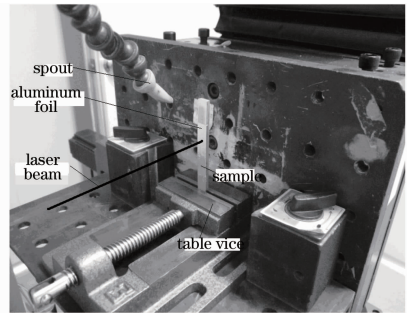


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

从图 2 残余压应力沿 X 方向分布中可以看出最大残余压应力没有出现在冲击中心,这种现象就是所谓的“残余应力洞”现象,其主要表现为表面冲击区域中心残余压应力的缺失。

Z_2 为靶材声阻抗, I_0 为激光能量密度。 ξ 为常数,约 0.1~0.2。对于水约束烧蚀模型下铝靶材, $\xi = 0.11$, $Z_1 = 0.165 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, $Z_2 = 1.5 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

有限元模型选择尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 2024-T3 铝合金板料,其材料参数见表 1。由于冲击压力成中心对称,模拟时采用四分之一模型,并在相应对称面上施加对称边界条件。

表 1 2024-T3 材料参数
Table 1 Parameters of 2024-T3

Density/ (kg/m ³)	Young's modulus/ GPa	Passion's ratio	Yield strength σ_s /MPa	Yield strength $\sigma_{0.2}$ /MPa
2770	68	0.35	265	325

一般认为冲击波的作用时间为激光脉宽的 3 倍左右^[13],而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 69 ns。根据冲击波峰值压力随时间演化的规律,模拟采用的冲击波压力的时空加载曲线如图 3 所示。同时将激光冲击波压力的空间分布处理为在光斑范围内的均布载荷,作用面积为光斑面积。

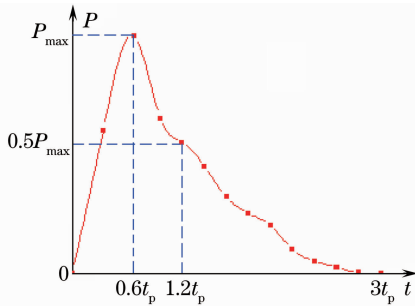


图 3 激光冲击波压力加载幅度曲线

Fig. 3 Amplitude curve of laser shock pressure

由于激光冲击成形是在一个高度非线性的瞬时动态完成,在激光诱导冲击压力作用下,材料的动态响应是一种高应变率超快冷塑性变过程,而 Johnson-Cook 模型可以较好地描述金属材料的加工硬化效应、应变

率效应和温度软化对材料屈服强度的影响,因此分析采用 Johnson-Cook 模型,其简化后的本构关系为

$$\sigma_Y = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right], \quad (2)$$

式中 σ_Y 是屈服应力, ϵ 是等效应变; $\dot{\epsilon}$ 是应变率; $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$; 常数 A, B 和 n 反映了材料的应变硬化特征; C 反映了应变率对材料性能的影响,其参数见表 2。

表 2 Johnson-Cook 模型参数

Table 2 Parameters of Johnson-Cook model

A /GPa	B /GPa	n	C
0.265	0.426	0.34	0.015

4 激光冲击材料表面残余应力洞的形成与分析

4.1 不同激光功率密度冲击材料表面残余应力的分布

分别采用激光功率密度为 3.94 GW/cm^2 和 10.08 GW/cm^2 , 直径为 6 mm 圆形光斑冲击板料,得到的残余应力分布如图 4(a)和(b)所示。由图可以看出功率密度为 3.94 GW/cm^2 冲击后的最大残余压应力值为 -43.65 MPa , 功率密度为 10.08 GW/cm^2 最大残余压应力值为 -105.5 MPa 。从图 5 残余压应力沿 X 方向分布中可以看出前者最大残余压应力在冲击中心处,而后者则在离中心大约 0.5 mm 处,残余压应力没有出现在冲击中心。

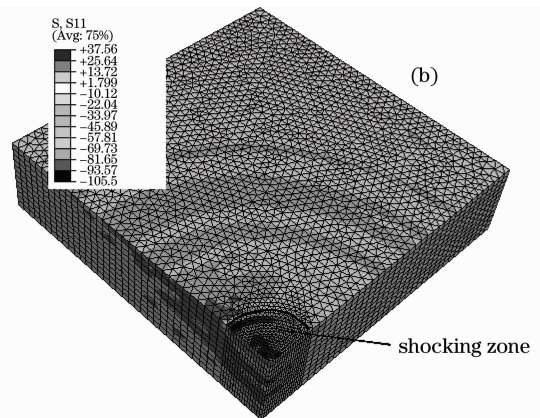
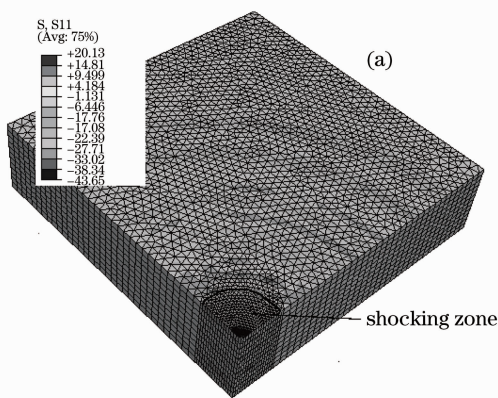
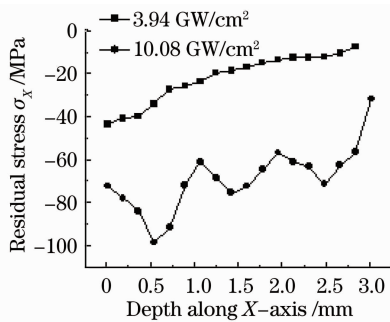


图 4 不同激光功率密度下残余压应力的分布云图。(a)功率密度 3.94 GW/cm^2 ; (b)功率密度 10.08 GW/cm^2

Fig. 4 Distributions of compressive residual stresses with different laser power densities

(a) power density of 3.94 GW/cm^2 ; (b) power density of 10.08 GW/cm^2

图5 表面 S_{11} 方向(即 X 方向)残余压应力分布Fig. 5 Distribution of compressive residual stresses along S_{11} direction (X direction)

4.2 残余应力洞的成形机制

因为 X 向和 Y 向是关于原点对称的,残余应力分布非常相似,取 X 向进行研究。在 X 向取两点: $X = 0.1765$ mm 处和 $X = 0.5294$ mm 处,前者是离冲击区域中心最近的一个单元节点,在功率密度为 10.08 GW/cm^2 下,隐式求解后残余压应力为 -56.84 MPa,后者是 X 向上残余压应力最大的节点,隐式求解后值为 -98.72 MPa。

图6给出两节点动态响应过程的 S_{11} 方向(即 X 方向)位移和 S_{11} 方向应力随时间 t 的动态响应过程。在冲击压力作用下,材料表面冲击区域受到挤

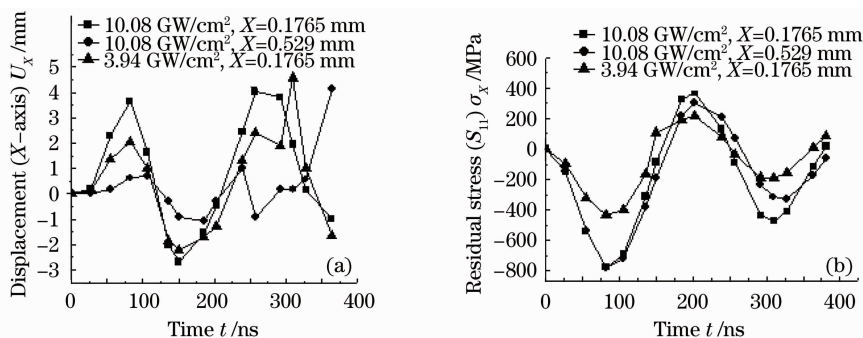
图6 S_{11} 方向节点的位移(a)和应力(b)Fig. 6 Displacement (a) and stress (b) along S_{11} direction

表3 不同功率密度及不同位置的最大反向位移比较

Table 3 Comparison of maximum opposite displacement under different power densities and displacements

Power densities / Displacements / (GW/cm^2)	mm	Maximum opposite displacement / μm
10.08	0.1765	-2.68
10.08	0.5294	-1.08
3.94	0.1765	-2.23

下面对残余应力洞现象中残余压应力的缺失区域的弹塑动态响应过程进行分析。表3为不同功率密度下冲击后,在卸载时侧向位移的大小。其中功

率密度为 10.08 GW/cm^2 时,发生残余压应力缺失的位置处($X = 0.1765$ mm)反向位移最大。图7显示了不同位置的等效塑性应变,可以看出:功率密度 10.08 GW/cm^2 下, $X = 0.1765$ mm 位置处在 150 ns 时(卸载),再次发生塑性变形,而 $X = 0.5294$ mm 位置处卸载时,没有出现塑性变形现象。分析认为,发生反向塑性变形是因为冲击波会在冲击区边缘产生反向反射波,Peyre 等^[12]称这种反射波是稀疏波,当稀疏波向冲击区域中心传播时,就产生反向加载,反向加载产生反向塑性变形,从而

压,冲击区的节点会侧向移动,产生位移 U_x ,其值为正,方向远离中心;当冲击压力作用消失后,开始由于惯性作用,位移 U_x 仍会不断增加。由图6(a)可知,在 $X = 0.1765$ mm 位置处,两种不同功率密度下都在 82 ns 时达到最大, $X = 0.5294$ mm 位置处大约在 106 ns 时达到最大。位移 U_x 达到最大值后,在材料弹性力的作用下减小,产生弹性振荡过程。振荡过程中,位移 U_x 可能产生正负两种值。而 S_{11} 方向应力振荡过程则与位移振荡基本相反,即当位移值为正时,应力值为负(压应力)。振荡过程可分为加载和卸载过程,加载时节点在侧向移动时会受到周围节点的约束,从而形成侧向压应力,卸载(或反向加载)时则相反,压应力减小或产生拉应力。

这种位移和应力随时间 t 的动态响应和振荡过程,会逐步衰减直至稳定在某一值,此值决定此位置的残余应力的性质。但事实上,在激光功率密度达到一定值(产生的冲击压力达到材料的动态屈服强度)时,弹性振荡过程中会出现塑性变形现象,在冲击区域材料局部的塑性变形和冲击区域边缘的弹性反力综合作用下,就在某些宏观区域产生了一定的残余压应力。

降低了残余压应力。而功率密度 3.94 GW/cm² 下没有发生这种现象。

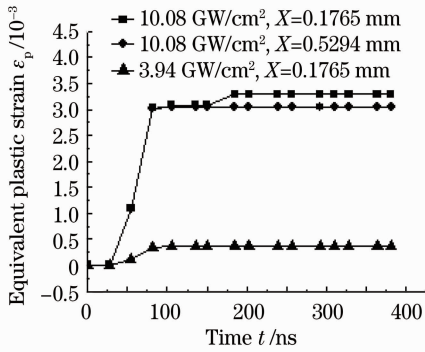


图 7 X 向节点的等效塑性应变

Fig. 7 Equivalent plastic strains of the nodes along X direction

以上现象可进一步采用图 8 说明,材料受冲击时,冲击区域内一点 A 会在压力作用下产生高速加载和卸载过程。加载时,A 点在 Z 向受压会收缩 ($U_z < 0$),X 向伸长 ($U_x > 0$),到 A' 位置处,如图 8(a)所示;加载结束后,在冲击区边界产生表面稀疏波,向冲击区中心传播,在稀疏波没有传播到该点之前,该点由于惯性作用会继续向 X 向伸长,直到 U_x 达到最大值 U_{max} ;当稀疏波传播到该点后,在稀疏波作用下,发生反向加载,A 点在 X 向受压 ($U_x < 0$),Z 向受拉 ($U_z > 0$),再到位置 A'' 处,如图 8(b)所示。如果稀疏波比较强,在反向加载过程会发生反向塑性变形,从而降低该位置在稳定状态的弹性残余压应力,出现残余应力洞现象。应力波的传播会出现反复振荡,由于波的衰减,此后一般不会出现塑性变形,直到稳定。

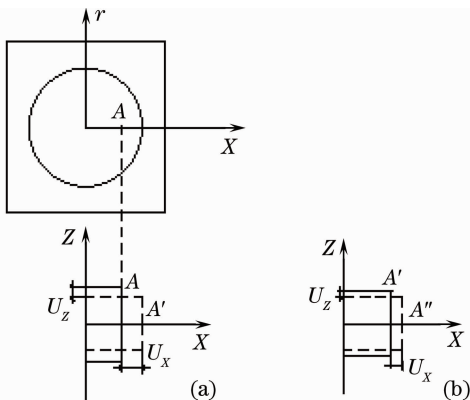


图 8 “残余应力洞”产生示意图。(a)加载过程 ($U_x > 0, U_z < 0$);(b)卸载过程 ($U_x < 0, U_z > 0$)

Fig. 8 Schematic diagram of the generation of “residual stress hole”. (a) loading process ($U_x > 0, U_z < 0$); (b) unloading process ($U_x < 0, U_z > 0$)

5 光斑形状对残余应力洞的影响

为了研究光斑边界效应对残余应力场的影响,采用不同形状的光斑,不同形状的光斑冲击区域的边界也不同。为保证分析比较的一致性,激光功率密度都采用 10.08 GW/cm²,圆形光斑直径为 6 mm,椭圆形光斑长径和短径分别为 8 mm 和 6 mm,正方形光斑边长为 6 mm,环形光斑外径 6 mm,内径 0.5 mm。

图 9 显示不同光斑形状下 X 向残余应力场的分布图,可以看出在大功率密度(10.08 GW/cm²)下,4 种光斑冲击都会出现冲击中心残余应力缺乏的现象。圆形光斑、椭圆形光斑、方形光斑和环形光斑冲击获得的中心处的压力分别为 -46.06, -51.06, -64.05 和 -65.08 MPa。可见,圆形光斑的残余应力洞现象最强;环形光斑的残余应力洞现象最弱。图 10 给出 4 种光斑形状,材料表面 X 向离中心最近的节点在 X 向位移 U_x 的动态响应变化过程,可以发现在反向加载过程中,4 种光斑形式中圆形光斑反向位移最大,而环形光斑反向位移最小,这和前面残余应力洞的机理是一致的,反向位移越大,产生的反向塑性变形也越大,从而降低冲击中心残余压应力。

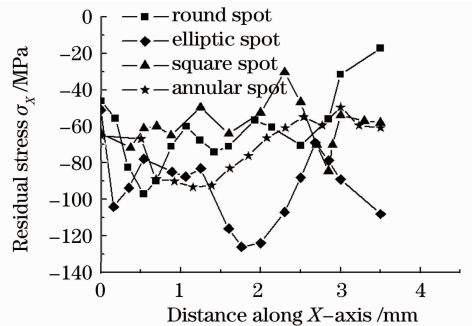


图 9 不同光斑形状下 X 向残余应力场的分布图
Fig. 9 Residual stress distribution along X direction with different spot configurations

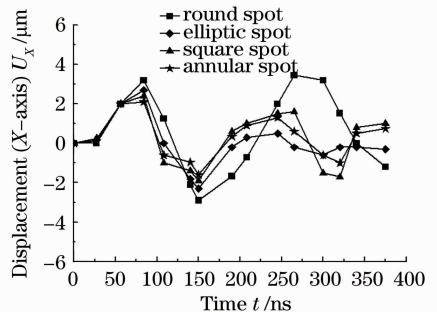


图 10 不同光斑形状下 X 向节点的侧向位移
Fig. 10 Lateral displacement of the nodes in X direction with different spot configurations

对于不同光斑形状下残余应力缺乏,其效果不一样,当冲击载荷在光斑边界产生的稀疏波反向传播时,其传播方向如图 11 所示。由图 11(a)和(b)看出,圆形边界和椭圆形边界产生的稀疏波,都会向冲击中心传播,在冲击中心进行汇聚,产生一个巨大的脉冲,这个脉冲将会降低光斑中心点附近的残余压应力。但是由于圆形和椭圆形光斑形状的不同,椭圆形边界产生的稀疏波在中心汇聚后引起的反向塑性变形要比圆形边界产生的稀疏波在中心汇聚后

引起的反向塑性变形小。对于方形光斑图 11(c),其边界产生的稀疏波也会向光斑内传播,但是不都是向冲击中心汇聚,所以其引起的反向塑性变形就最弱。另外,如果采用环形光斑图 11(d),其外边界产生的稀疏波也会向中心汇聚,内边界产生的稀疏波会向外发散,残余应力洞现象也会较小,但内环半径不可太大。总之,光斑形状对残余应力洞影响与光斑的形状有关,其产生的应力边界效应也就不同。

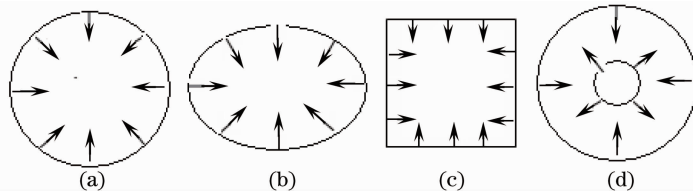


图 11 光斑边界效应影响机理。(a)圆形光斑;(b)椭圆形光斑;(c)方形光斑;(d)环形光斑

Fig. 11 Mechanism of the spot boundary effect. (a) round laser spot; (b) elliptic laser spot; (c) square laser spot; (d) annular laser spot

6 结 论

残余应力洞现象的主要表现为表面冲击区域中心残余压应力的缺失。激光冲击波使材料表面冲击区域受到挤压,与材料弹性力作用下产生振荡过程,振荡过程中发生加载和卸载过程,也即在冲击光斑边缘产生反射波,即稀疏波,当稀疏波向冲击区域中心传播时,就产生反向加载,反向加载产生反向塑性变形,从而降低该位置在稳定状态的弹性残余压应力。增加激光功率密度可以提高残余压应力的值,但同时增加稀疏波的强度,会引起更大的残余应力洞现象。冲击光斑边界产生的稀疏波向中心传播,汇聚后引起的反向塑性变形,不同形状的光斑,冲击后产生的稀疏波向中心汇聚的情况不同,中心残余压应力缺失不同。该研究为工艺参数优化,减少冲击中心残余应力缺乏,获得更好的激光冲击处理强化效果提供了依据。

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 alloys: a review[J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- Curt A. Lavender, Sung-Tae Hong, Mark T. Smith *et al.*. The effect of laser shock peening on the life and failure mode of a cold pilger die[J]. *J. Materials Processing Technology*, 2008, **204**(1-3): 486~491
- Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao *et al.*. Research of material modification in duced by laser shock processing on aluminum alloy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1352~1356

- 吴 边,王声波,郭大浩 等. 强激光冲击铝合金改性处理研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1352~1356
- C. Rubio-Gonza'lez, G. Gomez-Rosas, J. L. Ocaña *et al.*. Effect of an absorbent overlay on the residual stress field induced by laser shock processing on aluminum samples [J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(18): 6201~6205
- Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320
- 曹子文,邹世坤,刘方军 等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 316~320
- 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
- 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 J. Lasers*, 2008, **35**(6): 931~936
- 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
- Yin Sumin, Zhang Leihong, Yang Xinghua *et al.*. Experimental study on the surface residual of LD31 aluminium sheet formed by laser shock in oblique angle[J]. *J. Plastic Engineering*, 2006, **13**(6): 66~69
- 殷苏民,张雷洪,杨兴华 等. LD31 板料激光冲击成形后表面残余应力的实验研究[J]. *塑性工程学报*, 2006, **13**(6): 66~69
- Zhang Yongkang, Zhou Lichun, Ren Xudong *et al.*. Experiment and finite element analysis on residual stress field in laser shock processing TC4 titanium alloy [J]. *J. Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2009, **30**(1): 10~13
- 张永康,周立春,任旭东 等. 激光冲击 TC4 残余应力场的试验及有限元分析[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2009, **30**(1): 10~13
- 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. 激光冲击波诱发的残余应力的估算 [J]. 中国激光, 2006, **33**(2): 278~282
- 11 Lu Jinzhong, Zhang Yongkang, Kong Dejun *et al.*. Investigation on the experiment of LC4 duralum in alloy by laser two-point-shock[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, **37**(12): 206~208
鲁金忠,张永康,孔德军等. 激光两点冲击强化处理 LC4 合金的实验[J]. 农业机械学报, 2006, **37**(12): 206~208
- 12 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*, 1996, **210** (1-2): 102~113
- 13 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *American Institute of Physics*, 1990, **68**(2): 775~784
- 14 L. Berthe, A. Sollier, P. Peyre *et al.*. Physics of shock-wave generation by laser-plasma in water confinement regime [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 511~520