

## 激光冲击强化“残余应力洞”测试验证及抑制方法研究

薛彦庆 周鑫 李应红 赖志林

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要** 圆光斑激光冲击强化条件下由于冲击边界产生反向塑性加载效应,会产生“残余应力洞”现象。对 TC17、1Cr11Ni2W2MoV、LY2 和 K417 等 4 种材料进行圆光斑单点激光冲击试验,通过显微硬度和残余应力测试验证了“残余应力洞”的存在,并分析了激光功率密度和强化次数等参数对“残余应力洞”现象的影响。为了抑制“残余应力洞”对强化均匀性的影响,以 TC17 为对象,优化光斑搭接工艺并开展多遍强化试验,结果表明,与单个光斑强化相比,同样激光参数下,采用特殊光斑搭接和多遍强化可以有效抑制圆光斑残余应力洞现象,提高强化效果均匀性,残余应力和显微硬度平均值分别提高 60 MPa 和 30 HV<sub>0.2</sub>,极值差分别降低了 70 MPa 和 94 HV<sub>0.2</sub>。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;残余应力洞;搭接率;显微硬度;均匀性

**中图分类号** V252; TG146.2<sup>+</sup>3

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP49.121405

## Validation and Restraint of “Residual Stress Hole” Produced by Laser Shock Processing

Xue Yanqing Zhou Xin Li Yinghong Lai Zhilin

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract** In laser shock processing with circular laser spot, reverse plastic loading originating from the boundary of unaffected area will result in “residual stress hole” phenomenon. The “residual stress hole” phenomenon is proved by microhardness and residual stress test results of titanium alloy TC17, stainless steel 1Cr11Ni2W2MoV, aluminium alloy LY2 and Ni-based alloy K417 processed with single circular laser spot. Especially, the received effect laws of laser power density and impact times to “residual stress hole” phenomenon are studied. In order to reduce the influence of “residual stress hole” on the uniformity of strengthening, titanium alloy TC17 is chosen to study the optimized overlap rate and impact times. Results show that compared with single spot processing, with the same parameters, appropriate overlap rate and impact times could efficiently restrain the effect of “residual stress hole”. Particularly, with the overlap rate of 66% and impact times of three, the average value of microhardness and residual stress are increased by 60 MPa and 30 HV<sub>0.2</sub>, and the differences are reduced by 70 MPa and 94 HV<sub>0.2</sub>, respectively.

**Key words** laser technique; laser shock processing; residual stress hole; overlap rate; microhardness; uniformity

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390

### 1 引言

激光冲击强化(LSP),又称为激光喷丸,是一种新型表面强化技术,采用短脉冲激光为介质,利用激光诱导冲击波的力学效应,在金属表面形成较大、较深的残余压应力和组织结构细化,从而显著提高金属材料抗疲劳、抗应力腐蚀和抗微动磨损等性能<sup>[1~6]</sup>。在激光冲击强化生产和加工中,为了降低设备成本,往往采用圆光斑激光器。但是在圆光斑激光冲击强化研究和应用中发现,激光束会聚成圆形光斑冲击靶材表面,受到稀疏波反向会聚塑性加载作用,在单光斑冲击区域中心会出现“残余应力洞”现象,即强化效果最大的位置不是在光斑中心,而是出现一定的偏移。

对此现象,国内外很多学者都进行了有益的探索和研究。1996年,Peyre等<sup>[7,8]</sup>在实验研究7075-T7351铸造铝合金的激光冲击强化处理工艺时发现在同等工艺参数下,圆形光斑的“残余应力洞”现象比方形光斑严重,初步推断是由于冲击加载区域的边界效应引起的。Fabbro等<sup>[9~14]</sup>采取数值模拟的方法将残余应力洞的诱因归结为瑞利波(R-wave)和切变波(S-wave)的双重影响所致,并且得出在这两种波的作用下,影响距

**收稿日期:** 2010-06-05; **收到修改稿日期:** 2010-07-10; **网络出版日期:** 2012-12-16

**作者简介:** 薛彦庆(1987—),男,硕士研究生,主要从事等离子体制造工艺技术方面的研究。E-mail: yq6962@163.com

**导师简介:** 李应红(1963—),男,教授,主要从事等离子体航空应用方面的研究。E-mail: yinghong\_li@126.com

离一样,波峰到达时间相同,光斑的几何中心处甚至可能出现拉应力的结论。江苏大学姜银方等<sup>[15]</sup>通过ABAQUS软件具体研究了激光功率密度和光斑形状对板料表层残余应力场分布的影响;上海交通大学胡永祥等<sup>[16,17]</sup>通过分析光斑中心区域附近在动态响应过程中的侧向应力和侧向位移的变化情况,对“残余应力洞”产生的机制进行了数值模拟。

上述研究的结论均认为,“残余应力洞”现象是在激光诱导等离子体冲击波加载作用消失后,由于冲击区域的边界效应产生稀疏波向中心传播,引起中心区域发生反向塑性变形而引起反向加载导致的。由于受制于试验条件,以往的研究大多基于仿真分析<sup>[18,19]</sup>,试验验证开展很少。本文对4种不同合金航空材料进行了激光冲击强化处理,基于显微硬度与残余应力的相互关系,从单个圆光斑冲击显微硬度分布上验证了“残余应力洞”现象,并分析了激光功率密度和强化次数对残余应力洞现象的影响规律。此外,结合激光冲击强化加工生产需要,重点对光斑搭接和多遍强化等参数进行了优化,最大程度地抑制了“残余应力洞”的不利影响,有利于提高部件激光冲击强化质量。

## 2 试验过程

### 2.1 试验材料和试件加工

由于激光冲击强化成本较高,目前主要在航空工业高价值、高疲劳风险部件(如发动机叶片、盘、轴)中得到广泛应用。基于这个背景,选择4种航空工业中常见合金材料开展研究<sup>[20~23]</sup>,分别为LY2铝合金、1Cr11Ni2W2MoV马氏体不锈钢、K417镍基高温合金和TC17钛合金。其中,LY2多用于飞行器连接件、承力件和发动机的叶片,1Cr11Ni2W2MoV用于制造在600℃以下工作的发动机叶片、盘、轴等重要零部件,K417用于制造航空发动机的涡轮叶片(类似美国IN100合金),TC17主要用于制造新一代发动机风扇、压气机盘、叶片和大截面的锻件。材料化学成分如表1所示。

表1 试件材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of four kinds of materials (mass fraction, %)

TC17	Al	Mo	Cr	Sn	Zr	Ti
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo	4.5~5.5	3.5~4.5	3.5~4.5	1.6~2.4	1.6~2.4	
LY2	Cu	Mg	Mn	Fe	Be	Al
	2.6~3.2	2.0~2.4	0.45~0.7	0.3	0.05	
1Cr11Ni2W2MoV	Cr	Mo	Mn	Si	Ni	Fe
	11.09	0.43	0.11	0.32	1.6	Bal.
K417	Al	Co	Cr	Ti	V	Ni
	4.8~5.7	14~16	8.5~9.5	4.5~5.0	0.6~0.9	Bal.

将上述4种材料线切割成尺寸为40 mm×40 mm×4 mm的试件,采用180<sup>#</sup>航空汽油对试SU进行清洗,依次采用200<sup>#</sup>~1000<sup>#</sup>砂纸粗、细磨,磨面的磨削方向与前次的磨痕方向成90°,确保前道磨削留下的磨痕完全清除,最后采用电解抛光、超声清洗以保证表面质量。

### 2.2 显微硬度和残余应力测试方法

在激光冲击强化工业化应用中,最为重要的强化效果参数为残余应力和显微硬度值,金属材料表面残余压应力和显微硬度的提高,均为强冲击波作用下金属产生塑性变形的直接结果。一定条件下,显微硬度与残余应力具有一定对应关系<sup>[24]</sup>:

$$H = H_0 \left(1 - \frac{\sigma_R}{3\sigma_y}\right)^{-1}, \quad (1)$$

式中 $H_0$ 为试样初始硬度, $\sigma_R$ 为材料残余应力, $\sigma_y$ 为材料屈服强度。本文同时对显微硬度和残余应力进行了测试,二者互为补充,以期更为准确地获得残余应力洞分布特性。

采用MVS-1000JMT2型显微维氏硬度计对冲击强化前后的试样表面显微硬度进行测试,测量载荷为200 g,保荷时间15 s,间隔200 μm。

采用Proto-LXRD型设备进行残余应力测试,在相同点、相同衍射晶面测试3次,取其平均值作为有效值。测试采用 $\sin^2\Psi$ 法,执行ASTM E975-84标准,详细测试参数如表2所示。

表 2 4 种材料残余应力测试参数

Table 2 Residual stress test parameters for the four kinds of materials

Material	Test target	Collimator tube diameter /mm	Material constant $\frac{s_2}{2}/(10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N})$	Diffraction face of crystal	$2\theta /(^{\circ})$
LY2	Cr-K $\alpha$	0.5	19.54	(311)	140
1Cr11Ni2W2MoV	Cr-K $\alpha$	0.5	5.92	(211)	156
K417	Mn-K $\alpha$	0.5	7.18	(311)	155
TC17	Cu-K $\alpha$	0.5	11.9	(21 $\bar{3}$ 3)	140

## 2.3 激光冲击强化设备和方法

### 2.3.1 设备和参数选取

采用空军工程大学的 Nd:YAG 激光器,激光光斑直径 3~5 mm,激光器输出波长 1064 nm,最大输出能量单路 25 J(双路 12.5 J),脉宽 20 ns,工作频率 1~5 Hz。试件运动控制平台为直角坐标式五自由度机器人,重复定位精度 0.1 mm,最大负载 160 kg。激光冲击强化原理如图 1 所示。4 种材料的强化参数如表 3 所示。

### 2.3.2 单点强化

单点强化是在不同的激光功率密度下,分别进行 1、3、5 次冲击,显微硬度沿着光斑直径每间隔 200  $\mu\text{m}$  测试,如图 2 所示。

### 2.3.3 搭接强化

搭接强化是针对试片区域进行研究的方法,是在圆光斑下选取一定的光斑搭接率后按照一定的光斑走向进行强化,重点研究光斑搭接对残余应力场的抑制作用。显微硬度测试分别沿着光斑走向在光斑中心处和光斑搭接处每间隔 200  $\mu\text{m}$  取点测试,测试方法如图 3 所示。

表 3 4 种材料的激光冲击强化参数

Table 3 Laser shock processing parameters for four kinds of materials

Material	Laser spot diameter /mm	Laser pulse width /ns	Impact times	Laser density / ( $\text{GW}/\text{cm}^2$ )	Laser energy /J
LY2				6	11
1Cr11Ni2W2MoV	3	20	1	4	8
K417				6	11
TC17				10	19

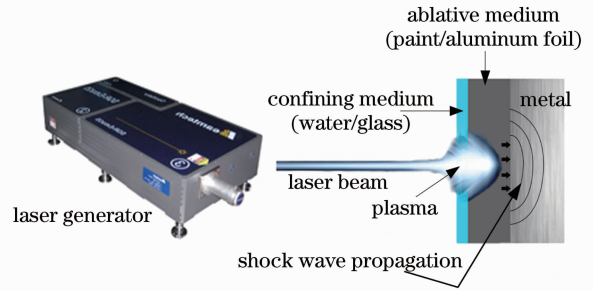


图 1 激光冲击强化原理图

Fig. 1 Principle of laser shock processing

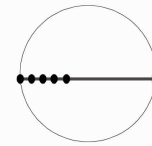


图 2 单点强化和显微硬度测试示意图

Fig. 2 Schematic of single point processing and microhardness test



图 3 搭接强化和显微硬度测试示意图

Fig. 3 Schematic of zone processing and microhardness test

2.3.4 多遍强化

在一定的搭接率和光斑走向下,对试片进行区域冲击,多次贴膜,多次强化,研究工艺对残余应力洞的抑制作用。强化路径和测试方法如图4所示。

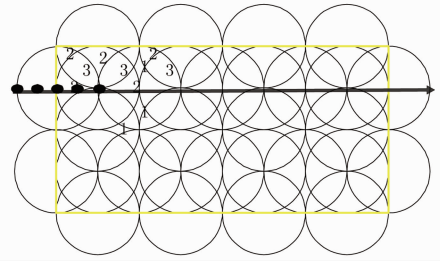
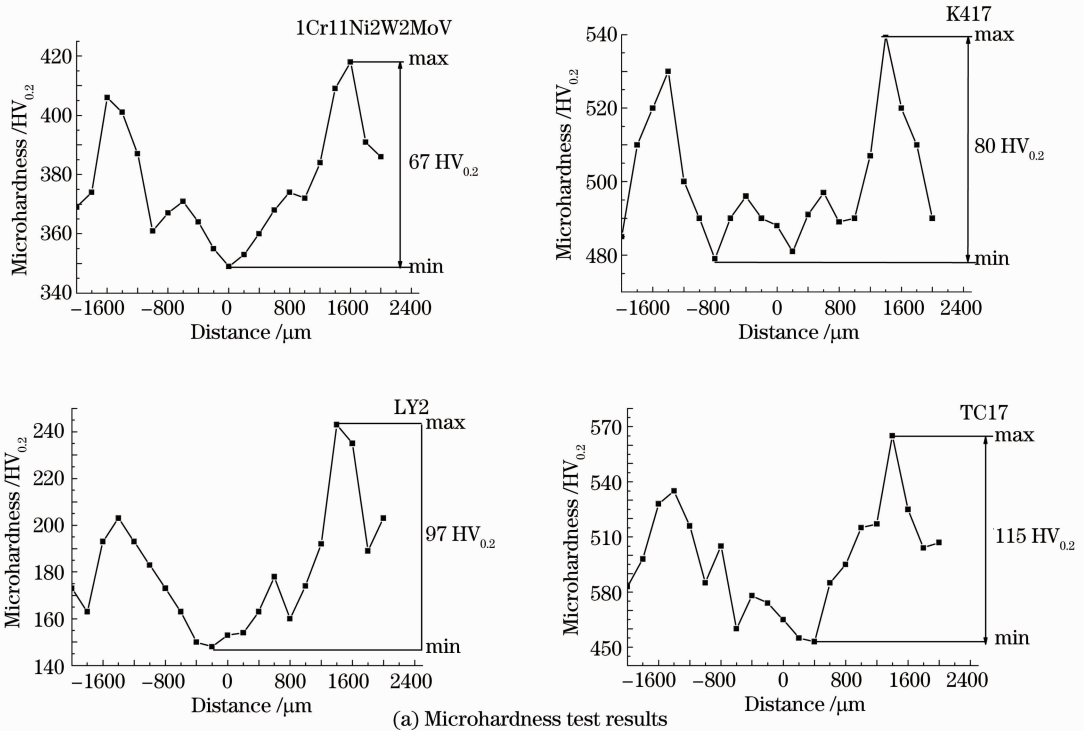


图4 多遍强化和显微硬度测试示意图  
Fig. 4 Schematic of repeated processing and microhardness test

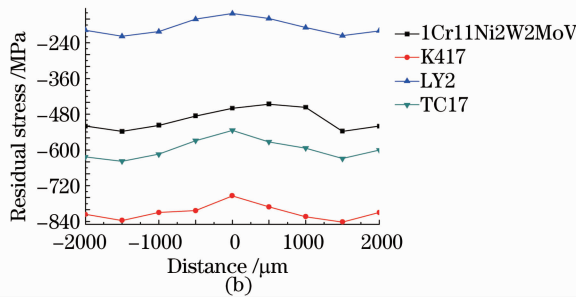
3 单个光斑显微硬度测试结果

3.1 4种材料单个圆光斑残余应力洞

4种材料单点激光冲击强化显微硬度和残余应力测试结果如图5所示。



(a) Microhardness test results



(b)

图5 1Cr11Ni2W2MoV, K417, LY2 和 TC17 材料单点强化残余应力洞现象。(a)显微硬度测试结果;  
(b)残余应力测试结果

Fig. 5 “Residual stress hole” phenomenon of 1Cr11Ni2W2MoV, K417, Ly2 and TC17. (a) Microhardness test results;  
(b) residual stress test results

由图可知,对于研究的4种不同的航空金属材料,经激光冲击强化后,在光斑中心处,显微硬度和残余应力均是最大,约在光斑直径2/3处,显微硬度和残余应力出现最小值。这说明“残余应力洞”普遍存在。

3.2 激光功率密度的影响

随着激光功率密度的增加,冲击波峰值压力  $P$  增加,因此可以产生更大的残余应力,相应的显微硬度

值也会更大。以 TC17 材料为例,如图 6 所示,可以看出,在 20 ns 脉宽下,功率密度 4.90 GW/cm<sup>2</sup> 时,光斑中心与直径 2/3 处残余应力值相差达到 91 MPa,光斑内残余应力平均值为 -560 MPa,光斑中心与直径 2/3 处显微硬度差值为 104 HV<sub>0.2</sub>,光斑内显微硬度平均值为 443 HV<sub>0.2</sub>;功率密度为 7.66 GW/cm<sup>2</sup> 时,光斑中心与直径 2/3 处残余应力值相差达到 114 MPa,平均值为 -590 MPa,光斑中心与直径 2/3 处显微硬度差值为 121 HV<sub>0.2</sub>,平均值为 490 HV<sub>0.2</sub>。图 6 说明,随着激光功率密度的增加,光斑内残余压应力最大值有所增加,平均值也得到一定程度的提高,强化效果更加明显。但是,残余应力和显微硬度极值差(光斑中心与直径 2/3 处)也明显增大,残余应力洞现象加重,均匀性也明显变差。

为了更好地研究搭接率等因素对残余应力洞的抑制作用,选择功率密度 7.66 GW/cm<sup>2</sup> 进行冲击强化研究。

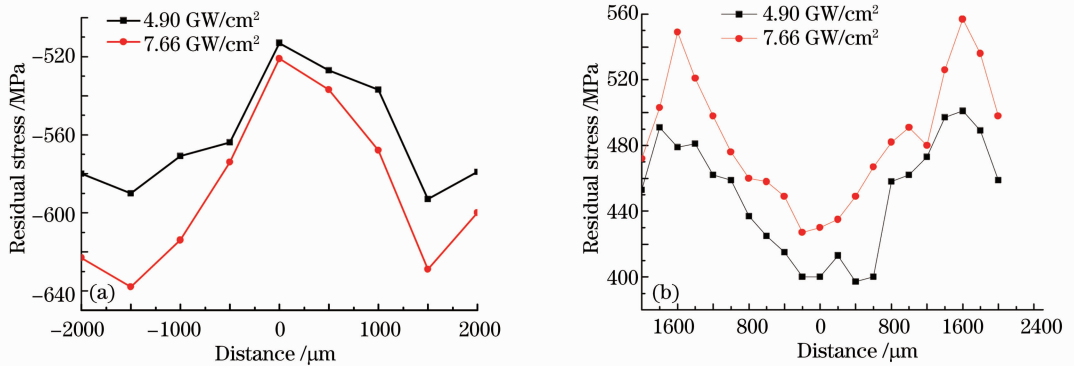


图 6 不同激光功率密度下的(a)残余应力和(b)显微硬度随功率密度的变化

Fig. 6 (a) Residual stress and (b) microhardness under different laser power densities

### 3.3 单点冲击次数影响

研究单点冲击次数的影响,选取激光功率密度 7.66 GW/cm<sup>2</sup>,分别进行 1、3、5 次冲击,测试显微硬度和残余应力,结果如图 7 所示。

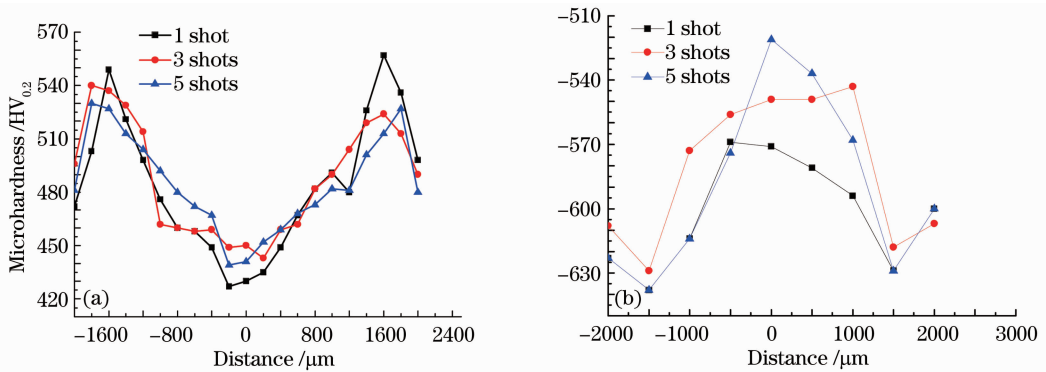


图 7 不同冲击次数下(a)显微硬度和(b)残余应力的变化

Fig. 7 (a) Microhardness and (b) residual stress under different impact times

由图 7 可知,随着冲击次数的增加,显微硬度和残余压应力均值都在增加,但是,1 次冲击后显微硬度差值为(548 - 427 =) 121 HV<sub>0.2</sub>,残余压应力差值为 114 MPa,3 次冲击后显微硬度差值为(540 - 443 =) 97 HV<sub>0.2</sub>,残余压应力差值为 81 MPa,5 次冲击后显微硬度差值为(539 - 430 =) 109 HV<sub>0.2</sub>,残余压应力差值为 73 MPa。可见随着冲击次数的增加,“残余应力洞”现象有所减弱,而且从图中也可以明显看到在 3 次冲击下,显微硬度和残余应力的均匀性相对较好。

综上所述,激光冲击强化中所选用的激光器功率密度(与激光器能量和光斑直径相关)和重复冲击次数都对冲击效果有显著影响,随着激光功率密度的增加,“残余应力洞”现象明显恶化;随着重复冲击次数的增加,“残余应力洞”现象有所减弱,但是减弱程度有限,3 次冲击时效果较好。



## 4 残余应力洞抑制措施研究

“残余应力洞”现象不仅不利于激光能量的充分利用,还会造成激光冲击强化区域残余应力场和显微硬度分布不均匀,甚至在表面出现极大影响材料疲劳强度的应力集中问题。因此,开展抑制“残余应力洞”现象的方法研究在工业应用中具有重要意义。

### 4.1 搭接率影响

为改善“残余应力洞”的不利影响,研究激光光斑搭接率参数选择的影响(图8)。强化参数为功率密度  $7.66 \text{ GW/cm}^2$ 、脉宽  $20 \text{ ns}$ 、光斑直径  $3 \text{ mm}$ 。

在冲击区域选取  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的区域进行显微硬度和残余应力测试,结果如图9所示。

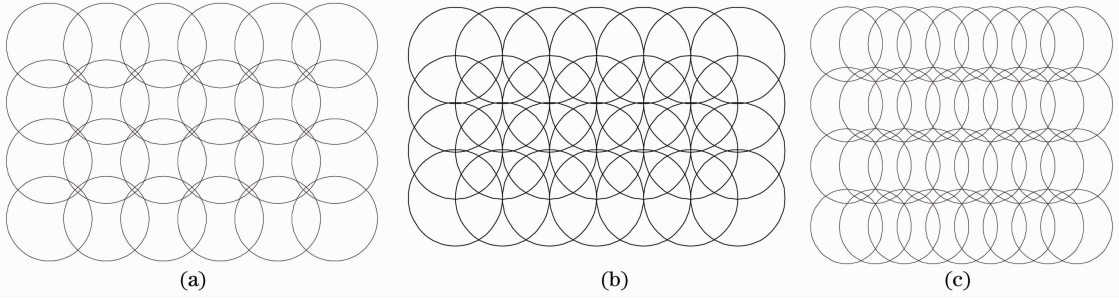


图8 搭接率示意图。(a) 33%; (b) 60%; (c) 66%

Fig. 8 Schematic of overlap rate. (a) 33%; (b) 60%; (c) 66%

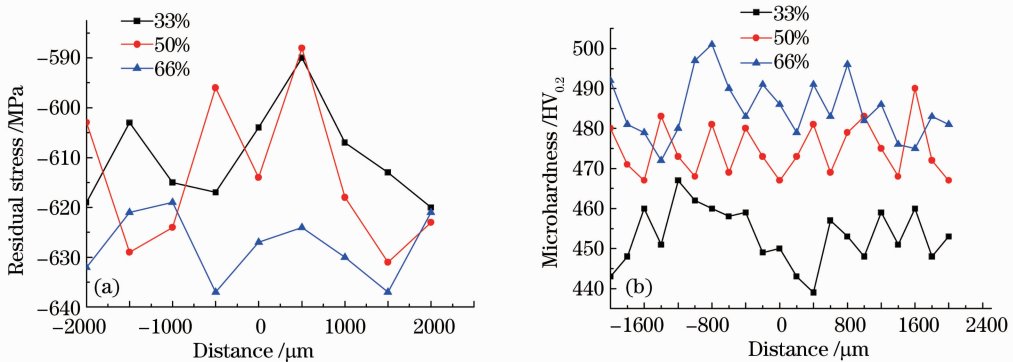


图9 (a)残余应力和(b)显微硬度在不同搭接率下的变化图

Fig. 9 (a) Residual stress and (b) microhardness changes with different overlap rates

由图9可知,使用圆光斑进行激光冲击强化时,光斑搭接冲击对“残余应力洞”均有一定的抑制作用,尤其是搭接率为66%时,试片表面残余压应力和显微硬度的平均值和均匀性都有明显的改善,试片表面残余压应力平均值达到  $-630 \text{ MPa}$ ,显微硬度平均值达到  $500 \text{ HV}_{0.2}$ ,更为重要的是残余压应力极值仅相差  $50 \text{ MPa}$ ,显微硬度差值为  $30 \text{ HV}_{0.2}$ ,试片材料整体性能均匀性有了明显改善。这对于提高金属的疲劳强度有着重要意义,可以有效抑制金属构件疲劳裂纹的萌生和扩展,进而可以大幅提高材料使用寿命。因此可以得出这样的结论:针对不同的金属构件和试片,采用一定的搭接率对于提高材料的残余压应力和显微硬度有着极为重要的作用。

### 4.2 重复冲击遍数的影响

选用激光功率密度  $7.66 \text{ GW/cm}^2$ 、脉宽  $20 \text{ ns}$ 、纵向搭接率66%、横向搭接率10%的圆形激光光斑对试片进行重复冲击1、3、5次,测试残余应力和显微硬度,结果如图10所示。

由图10可以观察到随着重复次数的增加,冲击区域的残余压应力会进一步增大,均匀性变好,“残余应力洞”现象有一定改善,能够获得更好的处理效果。但是从增加的趋势看,表面最大压应力的增加幅度却随着冲击次数的增加而变小,所以单纯依靠增加冲击次数并不能无限制地改善冲击效果。在3次冲击下,12次贴膜后,试片表面残余压应力平均值达到  $-650 \text{ MPa}$ ,极值差为  $34 \text{ MPa}$ ,显微硬度均值为  $510 \text{ HV}_{0.2}$ ,极值

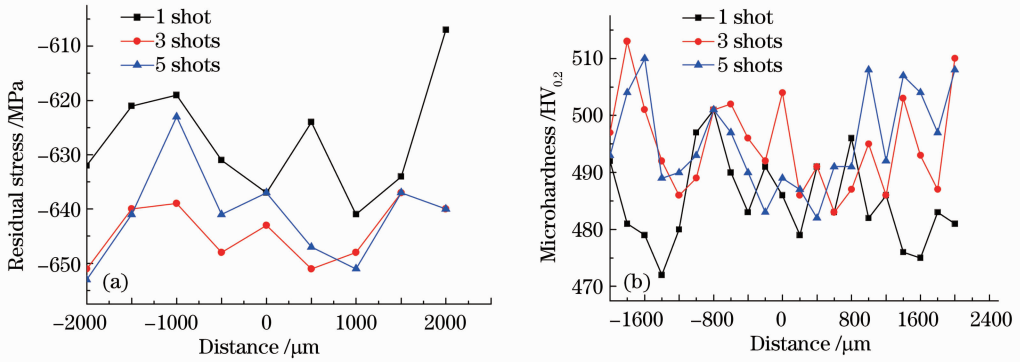


图 10 其他参数优化时不同冲击遍数下(a)残余应力和(b)显微硬度

Fig. 10 (a) Residual stress and (b) microhardness under different impact times with the other parameters optimized

差为 27 HV<sub>0.2</sub>, 可以获得较为理想的结果。因此, 对要求达到的冲击效果和冲击成本两者综合考虑, 可以通过适当地增加重复冲击次数, 即强化部位的覆盖率来改善冲击效果。

## 5 结 论

重点研究了激光功率密度、搭接率、搭接率光斑走向和重复冲击次数等工艺参数对“残余应力洞”的影响, 结果表明:

1) 准确设置激光功率密度值有利于提高试片材料表面的显微硬度和残余压应力。

2) 设置不同的搭接率对强化效果均匀性影响很大, 对于研究的 TC17 试片, 66% 的搭接率效果最好, 能够产生较为均匀的残余应力和显微硬度。

3) 通过增加重复冲击次数可以减弱“残余应力洞”现象, 并且提高靶材整体的强化处理效果, 但随着冲击次数的增加, 优化的效果逐渐减弱。所以使用增加强化部位冲击覆盖率的方法来提高强化效果还要综合考虑实际应用的经济性和时间因素。

4) “残余应力洞”现象的存在不利于材料表面获得一致的强化效果, 可以通过优化冲击处理工艺参数、采用方形光斑或者通过搭接冲击来减弱或者消除, 但是在工业应用中如何实施还需要针对如何控制反向加载中的塑性应变做具体分析。

## 参 考 文 献

- Zou Shikun. The latest development of laser shock processing [J]. *New Technology & New Process*, 2005, (4): 44~46  
邹世坤. 激光冲击处理技术的最新发展[J]. *新技术新工艺*, 2005, (4): 44~46
- Li Wei, LI Yinghong, He Weifeng *et al.*. Development and application of laser shock processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 15~19  
李 伟, 李应红, 何卫锋 等. 激光冲击强化技术的发展和应[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12): 15~19
- Zou Shikun, Cao Ziwen, Liu Fangjun. Laser shock processing of titanium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 4~7  
邹世坤, 曹子文, 刘方军. 激光冲击处理钛合金[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 4~7
- Zou Shikun, Wang Jian, Wang Huaming. The effects of laser shock processing on mechanical properties of welded joints [J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2001, **22**(3): 79~82  
邹世坤, 王 健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响[J]. *焊接学报*, 2001, **22**(3): 79~82
- B. P. Fairand, B. A. Wilcox, W. J. Gallaghr. Laser shock induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum[J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(9): 3893~3895
- S. Barradas, M. Jeandin, C. Bolis *et al.*. Study of adhesion of protel copper coating of Al2017 using the laser shock adhesion test (LASAT) [J]. *J. Mater. Sci.*, 2004, **39**(3): 2707~2716
- P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behavior. [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 1996, **210**(1-2): 102~113
- P. Peyre, P. Merrien, H. Lieurade *et al.*. Optimization of the residual stresses induced by laser shock treatment and fatigue life improvement of 2 cast alum alloys [C]. *The 5th International Conference on Shot Processing*, Oxford, 1993.

301~310

- 9 R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe *et al.*. Physics and applications of laser-shock processing[J]. *J. Laser Applications*, 1998, **10**(6): 265~279
- 10 A. H. Clauer, B. P. Fairand. Interaction of laser-induced stress waves with metals [C]. Proc. ASM Conference Applications of Lasers in Materials Processing, 1979. 291~315
- 11 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Applications of laser-induced stress waves [C]. Lasers in Modern Industry Seminar, 1978
- 12 B. P. Fairand, A. H. Clauer, R. G. Jung *et al.*. Quantitative assessment of laser-induced stress waves generated at confined surfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **25**(8): 431~433
- 13 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high amplitude stress waves in materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3): 1497~1502
- 14 Peng Weiwei, Ling Xiang. Residual stress field induced by laser processing: a finite element analysis [J]. *J. Aeronautical Materials*, 2006, **26**(16): 30~37  
彭薇薇, 凌 祥. 激光冲击残余应力场的有限元分析 [J]. 航空材料学报, 2006, **26**(6): 30~37
- 15 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2073~2079  
姜银方, 来彦玲, 张 磊 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析 [J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2073~2079
- 16 Hu Yongxiang. Research on the Numerical Simulation and Impact Effects of Laser Shock Processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008  
胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
- 17 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
- 18 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
- 19 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
- 20 Ma Zhuang, Li Yinghong, Ren Xudong *et al.*. Experiment research of LY2 aluminum alloy with laser shock processing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, **43**(3): 48~49  
马 壮, 李应红, 任旭东 等. LY2 铝合金激光冲击处理实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2007, **43**(3): 48~49
- 21 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
- 22 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong. The effects of laser shock processing on the vibration fatigue properties of K417 material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 2197~2201  
李 伟, 何卫锋, 李应红 等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 2197~2201
- 23 Wang Huaming, Li Xiaoxuan, Sun Xijun *et al.*. Study of surface mechanical properties of laser shock processed austenitic steel and Ni-based superalloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(8): 756~760  
王华明, 李晓轩, 孙锡军 等. 激光冲击处理不锈钢及镍基合金后表面力学性能的研究[J]. 中国激光, 2000, **27**(8): 756~760
- 24 C. Cellarda, D. Reira, M. Francois *et al.*. Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy; influence of process parameters [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, **532**: 362~372