

# 激光冲击强化对 304 不锈钢疲劳寿命的影响

汪军, 李民, 汪静雪, 张兴权\*, 魏伟, 戚晓利, 王会廷

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032

**摘要** 采用波长为 1064 nm、脉冲宽度约为 10 ns 的激光束对 304 不锈钢进行双面冲击强化处理(LSP),利用三维形貌仪观察 LSP 试样的表面形貌,采用 X 射线应力仪测量试样表面的残余应力;采用伺服液压疲劳试验机对试样进行疲劳试验,以得到疲劳裂纹扩展速率曲线;采用扫描电子显微镜观察试样裂纹扩展不同阶段的断口形貌。结果表明:激光冲击强化处理可使试样表面产生最大变形量约为 25  $\mu\text{m}$  的塑性变形,形成最大值为 -218 MPa 的残余压应力,并可使裂纹源向试样内部转移;激光冲击强化能显著降低冲击区域处的裂纹扩展速率。基于疲劳裂纹扩展速率曲线再次验证了激光冲击处理可显著提高 304 不锈钢的抗疲劳性能。

**关键词** 激光技术; 激光冲击强化; 304 不锈钢; 微观形貌; 残余应力; 疲劳寿命

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0102003

## Effects of Laser Shock Processing on Fatigue Life of 304 Stainless Steel

Wang Jun, Li Min, Wang Jingxue, Zhang Xingquan\*, Wei Wei, Qi Xiaoli, Wang Huitin

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

**Abstract** The 304 stainless steel plates are double-sided shocked by laser beam with a wavelength of 1064 nm and the pulse width of 10 ns, the surface morphology of sample treated by laser shock processing (LSP) is observed by a three-dimensional profilometer, and the residual stress of the specimen surface is measured by an X-ray diffractometer, respectively. And a servo-hydraulic fatigue test machine is employed to implement the fatigue experiments on samples without and with LSP to obtain the fatigue crack growth rate curves. In addition, a scanning electron microscope (SEM) is applied to detect the fracture morphology at different crack growth stages. The experimental results indicate that LSP can not only cause plastic deformation to a maximum value of 25  $\mu\text{m}$  and form compressive residual stress with a maximum value of -218 MPa on the sample surface, but also transfer the crack source to the inside of the sample. And the crack growth rate at the shocked region is significantly retarded by LSP. The validity of utilizing LSP to improve the fatigue resistance of 304 stainless steel can be verified according to the fatigue crack growth rate curves.

**Key words** laser technique; laser shock processing; 304 stainless steel; microscopic morphology; residual stress; fatigue life

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900

## 1 引 言

激光冲击强化处理(LSP)是一种将光能转化为机械能的先进的表面改性技术,可以提高材料的抗疲劳、耐磨损和抗应力腐蚀等性能<sup>[1-5]</sup>。与传统的加工工艺(如机械喷丸、滚压等表面强化技术)相比,激光冲击强化具有高压、高效以及超高应变率<sup>[6-7]</sup>等特

点,能够精确控制待冲击处理区域的位置,并能在离试样表面更深的位置处诱导产生残余压应力<sup>[8-9]</sup>。该技术自 20 世纪 70 年代问世来便受到了国内外学者的广泛关注,并得到了快速发展<sup>[10]</sup>。

近年来,激光冲击强化的研究对象主要是钛铝合金<sup>[2-6,8-9,11]</sup>。相对于钛铝合金而言,具有良好韧性、耐腐蚀性、耐热性及优良综合力学性能<sup>[12-14]</sup>的 ANSI304

收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-08-30; 录用日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51675002, 51175002)、安徽省自然科学基金(1708085ME110)、安徽省高校自然科学基金(KJ2016A813)、机械工程浙江省重中之重学科开放基金(ZSTUME02A05)、安徽工业大学研究生创新研究基金(2016073)

\* E-mail: zhxq@ahut.edu.cn

不锈钢具有更广泛的应用。孔德军等<sup>[15]</sup>探讨了激光冲击处理 304 不锈钢后残余应力产生的微观机理,认为材料表面产生的不能完全恢复的塑性变形是残余压应力产生的主要原因。柳沅汛等<sup>[16]</sup>采用短脉冲强激光对 304 奥氏体不锈钢表面进行冲击处理,得出了激光冲击工件表面形貌与塑性变形机制具有对应关系的结论。钟金杉等<sup>[17]</sup>系统研究了激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能及摩擦磨损性能的影响,发现激光冲击处理可以提高 AISI304 不锈钢的抗拉强度及磨损性能。李玉琴等<sup>[18]</sup>的研究表明,经激光冲击处理后,304 不锈钢的比磨损率减小,显微硬度从 200 HV 提高到 260 HV。Luo 等<sup>[13-14]</sup>的研究表明,ANSI304 奥氏体不锈钢的表面显微硬度、弹性模量等在激光冲击处理后均显著提高。然而,有关激光冲击处理对 304 不锈钢抗疲劳性能的影响鲜有报道。鉴于此,本文以 304 不锈钢为研究对象,探讨了激光冲击强化对其抗疲劳性能的影响。利用 Rtec Up 型三维形貌仪观察激光冲击试样的表面形貌,使用 X350A 型 X 射线应力仪对试样表面的残余应力进行测量;采

用 JSM-6490LV 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的断口形貌,并根据疲劳裂纹扩展速率曲线验证激光冲击强化的效果。

## 2 强化原理及试验

### 2.1 激光冲击强化的原理

激光冲击强化是利用具有 ns 量级脉冲宽度、GW 量级高功率密度的激光辐射靶材表面,使其表面的吸收层汽化产生高温高压等离子体,并在约束层的作用下形成向靶材内部传播高达 GPa 量级的应力波,迫使靶材表面产生不可逆的塑性变形,使靶材表层晶粒细化并形成一定深度的残余压应力层。

### 2.2 试样的准备及试验

304 不锈钢的化学成分及室温下的力学性能见表 1、2。试样尺寸示意图如图 1 所示。试样表面及切边需要进行打磨处理,以减小试样的表面粗糙度,并除去边缘残留的毛刺。将试样分成两组,未进行激光冲击处理的试样记为 un-LSP 试样,进行激光冲击处理后的试样记为 LSP 试样。

表 1 304 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel

Element	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Si	Nb	Fe
Mass fraction /%	0.06	1.54	18.47	0.30	8.3	0.37	0.48	0.027	Bal.

表 2 304 不锈钢的室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of 304 stainless steel at room temperature

Parameter	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Microhardness /HV
Value	520	289	40	200

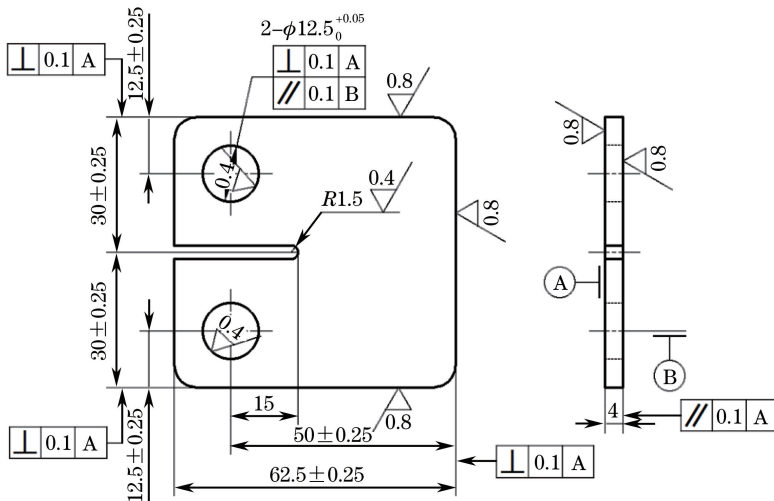


图 1 试样尺寸

Fig. 1 Size of specimen

利用激光束同时冲击试样两侧的指定区域。为了防止金属材料表面被高功率激光烧蚀,同时也为

了提高激光能量的利用率,在进行激光冲击试验前,在试样两侧待冲击区域粘贴一层均匀的吸收层。选

择 3M 公司的铝箔作为吸收层,厚度为 0.1 mm;将水作为约束层,厚度约为 2 mm。激光冲击设备如图 2 所示。激光的波长为 1064 nm,脉冲宽度约为 10 ns,光斑直径为 3 mm,重复频率为 1 Hz。激光冲击顺序如图 3 所示。试验采用的激光能量为 5 J,光斑的搭接率为 33.3%。试验时,将试样夹持于机械臂末端,通过控制机械臂的运动轨迹来实现光斑的冲击路径。激光冲击试验结束后,采用 Rtec Up 型三维形貌仪观察试样的表面形貌;采用 X350A 型 X 射线应力仪测量激光冲击区域的表面残余应力。

采用 PLN-100/500 型伺服液压机进行疲劳试验,试验设备如图 4 所示。施加的载荷为 7 kN,应力比为 0.5,载荷频率为 15 Hz。试验过程中,采用 S1UC04M 型工业相机记录裂纹的扩展过程,并记录下相应的载荷循环次数。采用 JSM-6490LV 型扫描式电子显微镜(SEM)观察试样的断口形貌。



图 2 激光冲击设备

Fig. 2 Experimental set-up for laser shock processing

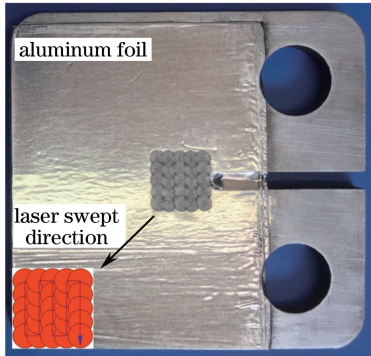


图 3 激光冲击顺序

Fig. 3 Laser impulse sequence

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 表面形貌及残余应力

经激光双面冲击后,试样的表面形貌如图 5 所示,其中, $Z_w$  为未冲击区域, $Z_p$  为激光冲击区域。从图 5(a)可以看出,除去残余铝箔吸收层后,试样表面无明显的热烧伤痕迹,这表明吸收层和约束层

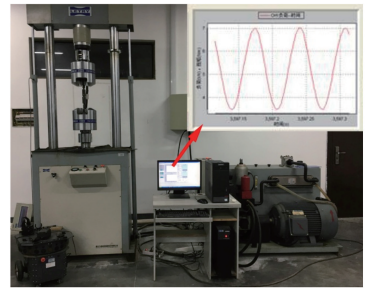


图 4 疲劳试验设备

Fig. 4 Experimental machine for fatigue test

对试样具有良好的保护效果;在冲击处存在一个由多个凹坑组成的近似正方形的区域,而该试样另一侧对应的位置处也存在一个相同的区域。

从图 5(b)、(c)可以看出:未冲击区域的  $Z_w$  处表面平整,没有凹坑,但存在平行纹理,表面最大深度为  $5.6 \mu\text{m}$ ,这是打磨试样过程由磨粒造成的;冲击区域的  $Z_p$  处表面高低起伏,表面相对光滑连续,无尖角产生,最大变形量为  $25 \mu\text{m}$ 。从轮廓曲线中可以看出,激光冲击后的试样表面存在明显的凹坑。激光冲击诱导的压力峰值的估算模型为

$$p = 0.01[\alpha / (2\alpha + 3)]^{1/2} Z^{1/2} I_0^{1/2}, \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为能量转化系数,取值为 0.15; $Z$  为折合声阻抗,且  $Z = 2Z_1Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ , $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为约束层及靶材 304 不锈钢的声阻抗,其值分别为  $0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $4.6 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[5,19]</sup>;  $I_0$  为激光的功率密度,取值为  $7.07 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。根据(1)式可计算得到激光冲击诱导的压力峰值约为 3.19 GPa,明显大于 304 不锈钢的 Hugoniot 弹性极限( $p_H = 1.52 \text{ GPa}$ )<sup>[16]</sup>,且大于  $2P_H$ ,这说明材料将发生完全塑性变形<sup>[20]</sup>,在激光冲击区域能够产生凹坑。此外,在激光冲击过程中,应力波的峰值压力沿深度方向不断减小,当其值小于材料的屈服极限时,次表层材料将产生弹性变形。当激光冲击结束后,沿深度方向离开平衡位置的表层材料会阻挡次表层材料的弹性回复,从而会对表层塑性变形区域产生一定的反作用力。而径向的形变会使得该区域受到沿径向的拉应力,最终,这些作用力在 304 不锈钢激光冲击区域形成残余压应力场。

图 6 所示为采用 X350A 型 X 射线应力仪按图 5(a)中路径 1 测得的 LSP 试样及 un-LSP 试样表面的残余应力分布。可以看出:激光冲击能够在 304 不锈钢试样表面产生最大值为  $-218 \text{ MPa}$  的残余压应力;冲击区域处的应力分布曲线起伏不断,这是因为除了测量误差外,部分区域被激光重复冲击

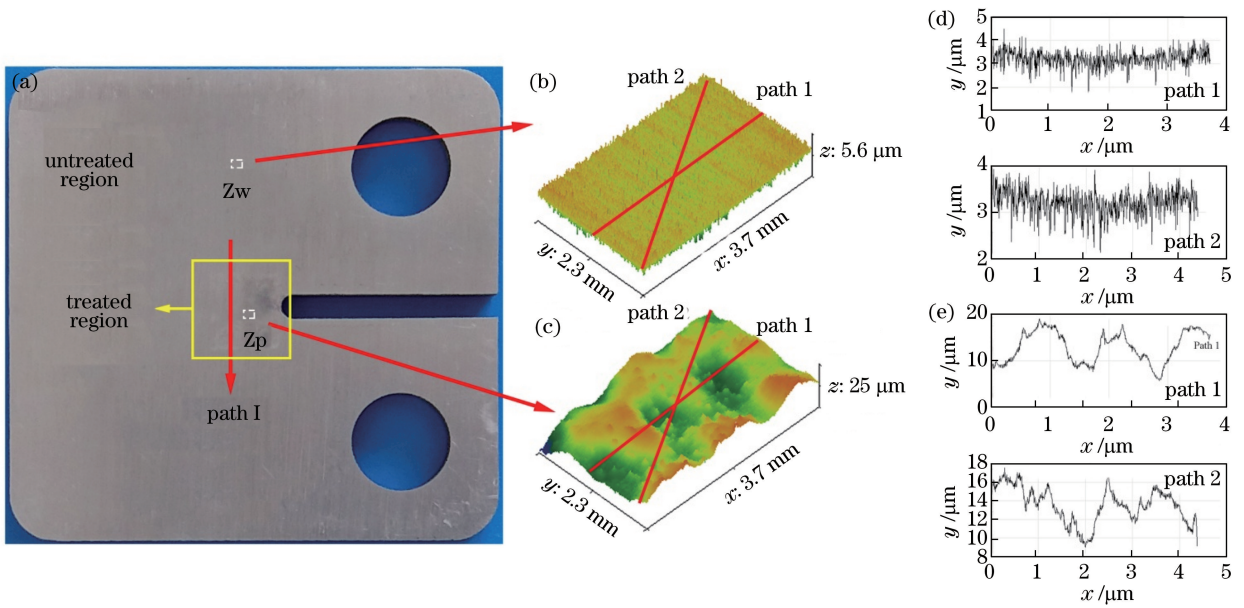


图 5 LSP 试样的表面形貌及轮廓曲线。(a) 表面宏观形貌；(b) 未冲击区的三维形貌；  
(c) 冲击区的三维形貌；(d) 未冲击区的轮廓曲线；(e) 冲击区的轮廓曲线

Fig. 5 Surface morphology and profile curves of LSP sample. (a) Macro morphology of sample surface; (b) 3D image of un-LSP region; (c) 3D image of LSP region; (d) profile curves of un-LSP region; (e) profile curves of LSP region

后会导致该处的残余压应力更大；未冲击试样表面存在拉应力，且最大值为 28 MPa，这是因为在打磨过程中磨粒对试样表面起到了微切削作用。由于对试样两侧进行激光冲击强化处理时的参数相同，因此，在试样另一侧对应位置处同样有残余压应力产生。产生的残余压应力有利于增加试样的疲劳寿命<sup>[15]</sup>。

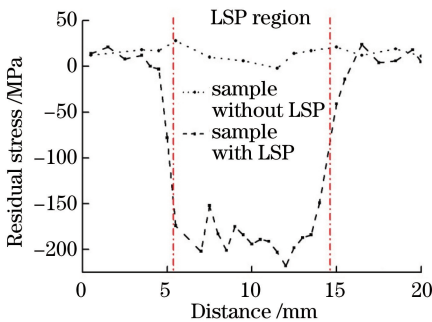


图 6 试样表面残余应力的分布

Fig. 6 Residual stress distribution along sample surface

### 3.2 疲劳断口形貌

LSP 试样疲劳断口的宏观形貌如图 7 所示，可以观察到裂纹扩展的若干不同区域。试样的断裂失效通常需要经历裂纹萌生、裂纹扩展及瞬间断裂三个阶段。在外部循环载荷的作用下，304 不锈钢试样的应力集中部位最先萌生出疲劳裂纹源，之后逐渐形成微裂纹；随着载荷循环次数不断增加，微裂纹

不断扩展，形成宏观裂纹，直至试样断裂。材料的渐进性破坏失效过程可从疲劳断口形貌上得以直接反映<sup>[21]</sup>。在疲劳断裂过程中，疲劳断口上留下的疲劳条带、台阶线等特征可以反映外界因素对试样疲劳寿命等的影响。

304 不锈钢试样断口上疲劳裂纹萌生区域的微观形貌如图 8 所示。可以看出：un-LSP 试样的裂纹源在槽壁与平面相交形成的槽角处萌生。这是因为槽角处于试样几何形状突变的位置，容易产生应力集中，此处的拉应力大于其他区域的拉应力，在外力作用下裂纹源更易在此处萌生。与铝合金在循环载荷作用下的疲劳裂纹源等相比<sup>[9]</sup>，304 不锈钢材料的裂纹源不明显，这主要是由材料特性决定的。

由图 8(b)可以看出，对于 LSP 试样，裂纹源在试样表层下约 0.6 mm 处萌生。这是因为经过激光冲击强化处理后，试样表面产生了可以抵消拉应力的残余压应力，使得材料表面由拉伸状态转变为压缩状态，从而抑制了裂纹源在试样表层的萌生。在深度方向上，残余应力的值不断减小，使得试样内部的实际拉应力不断增大。因此，试样内部的实际拉应力大于表层处的拉应力，裂纹更易在试样内部萌生<sup>[22]</sup>。

残余压应力对裂纹源萌生位置的影响如图 9 所示。其中  $\sigma_F$  为外载荷， $\sigma_r$  为激光冲击诱导产生的残余压应力。

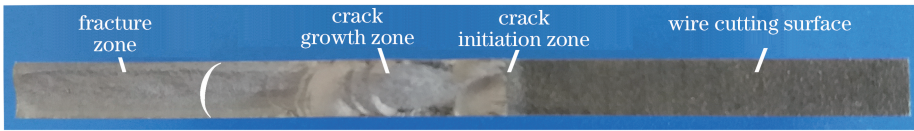


图 7 LSP 试样疲劳断口的宏观形貌

Fig. 7 Macro fatigue fracture of LSP sample

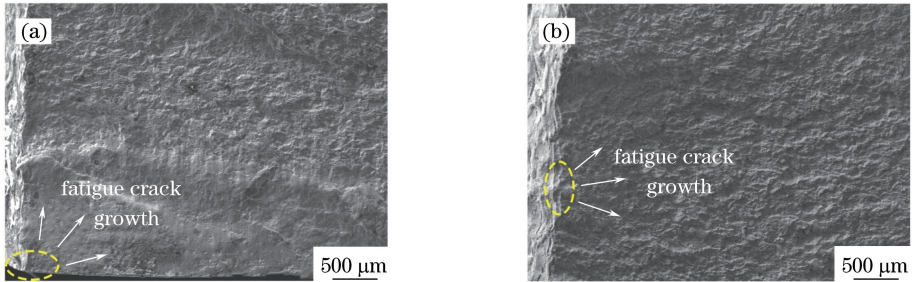


图 8 疲劳裂纹萌生区的微观形貌。(a) un-LSP 试样; (b) LSP 试样

Fig. 8 Morphology of fatigue crack initiation region. (a) Sample without LSP; (b) sample with LSP

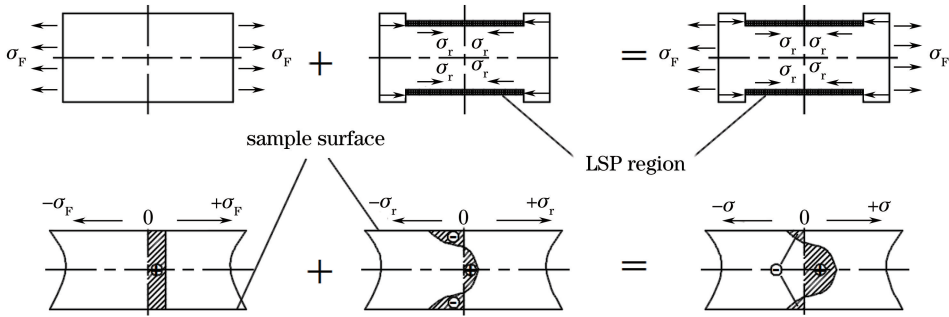


图 9 残余压应力对裂纹源萌生位置的影响

Fig. 9 Diagram of effect of compressive residual stress on crack initiation

裂纹扩展区的微观形貌如图 10 所示,可以看出,在裂纹扩展区域存在大量的疲劳条带和台阶。疲劳条带是疲劳裂纹前沿线瞬时微观塑性变形的结果,其法线方向大致为疲劳裂纹的扩展方向<sup>[23]</sup>。疲劳条带的间距是疲劳裂纹经历一次循环载荷后的扩展长度。测得 un-LSP 试样裂纹扩展区域的疲劳条带间距为 0.29~0.4 μm, LSP 试样的疲劳条带间距为 0.11~0.23 μm。可见, un-LSP 试样的裂纹扩展速率大于 LSP 试样的,这说明激光冲击强化处理能减小 304 不锈钢试样的裂纹扩展速率。

经过裂纹扩展阶段后,当裂纹扩展至临界尺寸时,试样将发生瞬间断裂。瞬断区的微观形貌如图 11 所示,可以看出,绝大部分断面结构粗糙呈颗粒状,且断口处无明显的塑性变形,也无韧窝存在。从图 11(c)、(d)中可以看出,在断口处存在少许撕裂痕及放射状解理台阶,表现为沿晶断裂。对比 un-LSP 试样及 LSP 试样瞬断区的微观形貌可知,两者

差异不明显。这一方面是由于随着裂纹的扩展,激光诱导产生的残余压应力的作用效果不断减弱;另一方面是由于试样瞬断区的表面未受到激光冲击强化处理,且该区域远离激光冲击区域,受到冲击的影响较小。

### 3.3 疲劳寿命

试样完全断裂时的载荷循环次数见表 3。从试样的圆孔中心处开始计算疲劳裂纹长度,初始裂纹长度为 15 mm。试样的载荷循环次数与裂纹扩展长度之间的关系如图 12 所示,可以看出:两组试样裂纹扩展长度的变化趋势相同;在裂纹扩展前期,两组试样的裂纹扩展均比较缓慢;当载荷循环次数达到一定值时,裂纹扩展速率迅速增大,直至试样断裂失效,但 LSP 试样的裂纹扩展速率迅速增大的载荷循环次数大于 un-LSP 试样,说明激光冲击强化处理对裂纹源的萌生具有明显的抑制作用;当载荷循环次数达到约 275000 时, un-LSP 试样发生瞬间断

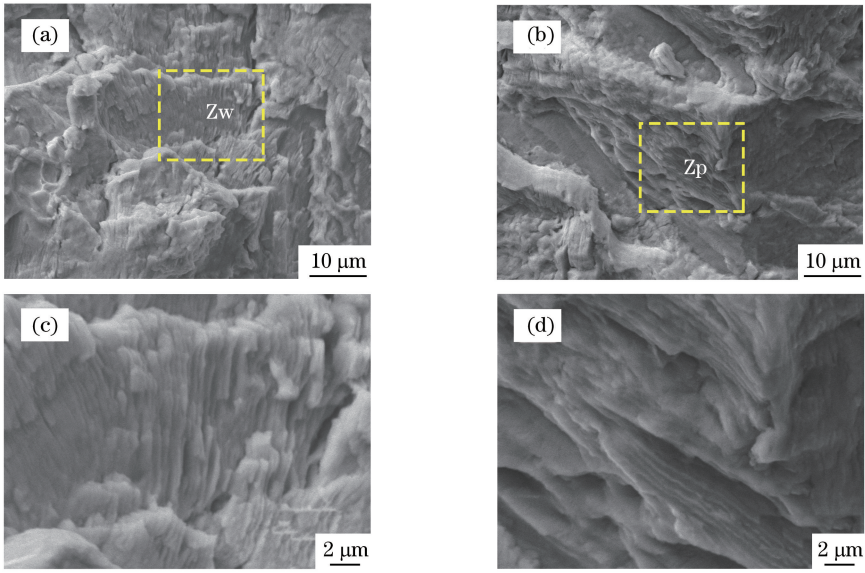


图 10 裂纹扩展区的微观形貌。(a) un-LSP 试样;(b) LSP 试样;(c) Zw 区的放大图;(d) Zp 区的放大图  
 Fig. 10 Morphology of crack growth zone. (a) Sample without LSP; (b) sample with LSP;  
 (c) enlarged image of Zw region; (d) enlarged image of Zp region

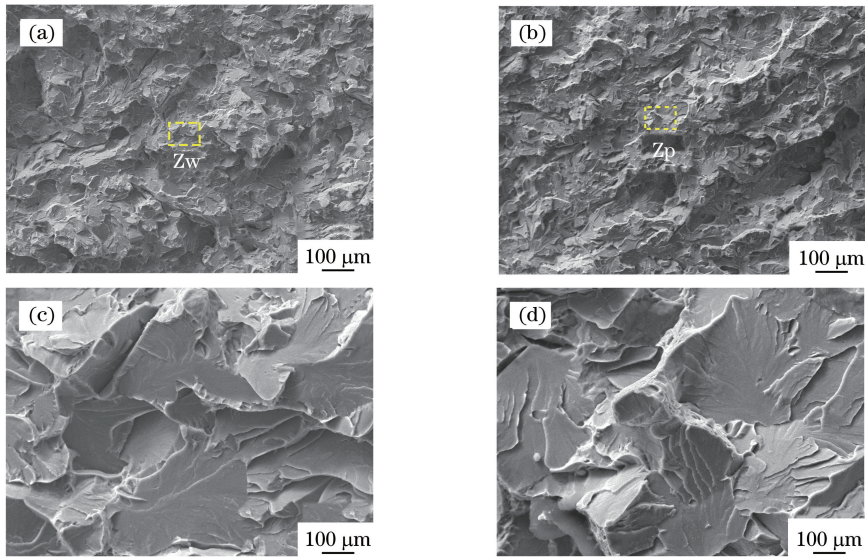


图 11 瞬断区的微观形貌。(a) un-LSP 试样;(b) LSP 试样;(c) Zw 区的放大图;(d) Zp 区的放大图  
 Fig. 11 Morphology of abrupt fracture zone. (a) Sample without LSP; (b) sample with LSP;  
 (c) enlarged image of Zw region; (d) enlarged image of Zp region

裂,此时的裂纹扩展长度约为 31.6 mm;而 LSP 试样的裂纹扩展长度约为 37 mm,对应的载荷循环次数约为 356000。由此可见,激光冲击强化处理能够有效地延长 304 不锈钢的疲劳寿命。

## 4 结 论

采用激光冲击强化技术对 304 不锈钢试样进行双面冲击强化处理,研究了激光冲击对试样断口形貌及疲劳性能的影响,得到以下结论:

表 3 试样完全断裂时的载荷循环次数  
 Table 3 Loading cycle numbers of the specimens in two groups

Number	Sample with LSP	Number	Sample without LSP
A-1	358219	B-1	283487
A-2	344435	B-2	268921
A-3	367324	B-3	274763
A-4	371217	B-4	282639
A-5	353128	B-5	270667
A-6	342264	B-6	274062

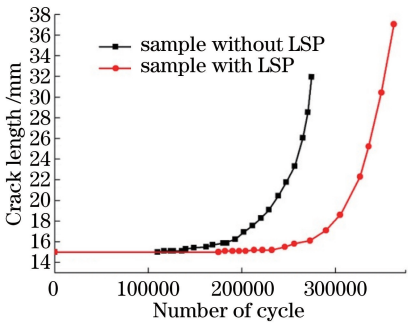


图 12 裂纹长度随载荷循环次数变化的曲线

Fig. 12 Crack length versus the loading cycle number

- 1) 激光双面多点搭接冲击处理可以使 304 不锈钢表面产生塑性强化区域；
- 2) 激光冲击处理能够使裂纹源移至试样内部，并减小裂纹的扩展速率；
- 3) 激光冲击处理能抑制裂纹源的萌生，有效提高 304 不锈钢的疲劳性能。

参 考 文 献

[1] Luo K Y, Zhou Y, Lu J Z, *et al.* Influence of laser shock peening on microstructure and property of cladding layer of 316L stainless steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402005.  
罗开玉, 周阳, 鲁金忠, 等. 激光冲击强化对 316L 不锈钢熔覆层微观结构和性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402005.

[2] Yang X W, Zhou J Z, Sheng J, *et al.* Microstructure evolution and surface strengthening mechanism of TC6 titanium alloy by laser peening [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0914001.  
杨祥伟, 周建忠, 盛杰, 等. TC6 钛合金激光喷丸组织演变与表面强化机理 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0914001.

[3] Zhu R, Zhang Y K, Sun G F, *et al.* Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0802007.  
朱然, 张永康, 孙桂芳, 等. 三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟 [J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802007.

[4] Li X, He W F, Nie X F, *et al.* Regularity of residual stress distribution in titanium alloys induced by laser shock peening with different energy spatial distributions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061402.  
李翔, 何卫锋, 聂祥樊, 等. 不同能量空间分布激光冲击钛合金残余应力的分布规律 [J]. 激光与光电子

学进展, 2018, 55(6): 061402.

[5] Zhang X Q, Li H, Huang Z L, *et al.* Numerical simulation of residual stress induced in 7075 aluminum alloy by repeated high-power laser pulses [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1203002.  
张兴权, 李欢, 黄志来, 等. 7075 铝合金激光多点冲击诱导残余应力的数值模拟 [J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1203002.

[6] King A, Steuwer A, Woodward C, *et al.* Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435/436: 12-18.

[7] Scherpereel X, Peyre P, Fabbro R, *et al.* Modifications of mechanical and electrochemical properties of stainless surfaces by laser shock processing [C]. Proceedings of SPIE, 1997, 3097: 546-557.

[8] Hammersley G, Hackel L A, Harris F. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4/5/6): 327-337.

[9] Zhang X Q, Li H, Yu X L, *et al.* Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate [J]. Materials & Design, 2015, 65: 425-431.

[10] Wu J J, Zhao J B, Qiao H C, *et al.* The application status and development of laser shock processing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(2): 170690.  
吴嘉俊, 赵吉宾, 乔红超, 等. 激光冲击强化技术的应用现状与发展 [J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170690.

[11] Luo M, Luo K Y, Wang Q W, *et al.* Numerical simulation of laser shock peening on residual stress field of 7075-T6 aluminum alloy welding [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0414003.  
罗密, 罗开玉, 王庆伟, 等. 激光冲击 7075-T6 铝合金焊缝的残余应力场数值模拟 [J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0414003.

[12] Zhang L, Luo K Y, Lu J Z, *et al.* Effects of laser shock processing with different shocked paths on mechanical properties of laser welded ANSI 304 stainless steel joint [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13/14): 4652-4657.

[13] Luo K Y, Lu J Z, Zhang Y K, *et al.* Effects of laser shock processing on mechanical properties and microstructure of ANSI 304 austenitic stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13/14): 4783-4788.

[14] Luo K Y, Yao H X, Dai F Z, *et al.* Surface textural features and its formation process of AISI 304

- stainless steel subjected to massive LSP impacts[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 136-142.
- [15] Kong D J, Zhou C Z, Wu Y Z. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 736-740.  
孔德军, 周朝政, 吴永忠. 304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 736-740.
- [16] Liu Y X, Wang X, Wu X Q, *et al.* Surface morphology and deformation mechanism of 304 stainless steel treated by laser shock peening [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0103004.  
柳沅汛, 王曦, 吴先前, 等. 激光冲击处理 304 不锈钢表面的形貌特征及其机理分析 [J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0103004.
- [17] Zhong J S, Lu J Z, Luo K Y, *et al.* Influence of laser shock processing on tensile properties and tribological behaviors of AISI304 stainless steel[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0503002.  
钟金杉, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503002.
- [18] Li Y Q, Wang X D, Song F L, *et al.* Study on microstructure and performances of 304 stainless steel treated by laser shock processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006005.  
李玉琴, 王学德, 宋飞龙, 等. 激光冲击 304 不锈钢微观组织和性能研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1006005.
- [19] Moćko W, Radziejewska J, Sarzyński A, *et al.* Analysis of the plastic deformation of AISI 304 steel induced by the nanosecond laser pulse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 90: 165-173.
- [20] Sun R J, Zhu Y, Guo W, *et al.* Effect of laser shock processing on surface morphology and residual stress field of TC17 titanium alloy by FEM method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24(1): 187-193.  
孙汝剑, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面形貌及残余应力场影响的有限元数值模拟研究 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24(1): 187-193.
- [21] Azzam D, Menzemer C C, Srivatsan T S. The fracture behavior of an Al-Mg-Si alloy during cyclic fatigue[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(20): 5341-5345.
- [22] Zhang X Q, Chen L S, Li S Z, *et al.* Investigation of the fatigue life of pre- and post-drilling hole in dog-bone specimen subjected to laser shot peening [J]. *Materials & Design*, 2015, 88: 106-114.
- [23] Srivatsan T S, Kolar D, Magnusen P. The cyclic fatigue and final fracture behavior of aluminum alloy 2524 [J]. *Materials & Design*, 2002, 23(2): 129-139.