

循环载荷下激光喷丸诱导的表面残余压应力释放特性研究

田清 周建忠 黄舒 盛杰 孟宪凯 戴磊 朱炜立

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 为了研究6061-T6铝合金激光喷丸后表面残余压应力在循环加载过程中的释放特性,对典型单联狗骨状试样进行激光喷丸处理及保温处理,利用MTS-809拉扭组合材料测试系统进行不同循环应力水平和循环周次的疲劳实验,并使用X-350A型X射线应力测定仪测量试样表面残余压应力的变化。结果表明,残余压应力的松弛主要发生在疲劳过程开始的100次循环周期内,1000次循环周期后残余压应力基本趋于稳定。不同应力水平下的松弛行为表明,循环应力较小时,残余压应力松弛的幅度和速率相对较小;当循环应力接近材料屈服强度时,残余压应力松弛的幅度和速率较大,循环后期残余压应力完全释放,在表面产生残余拉应力。与未经保温处理的激光喷丸试样相比,试样经过150℃保温处理10 min后,表面残余压应力下降,但在循环载荷作用下应力松弛的幅度和速率都较小,残余压应力的稳定性得以提升。

关键词 激光光学; 释放规律; 循环加载; 残余应力; 应力松弛; 保温处理

中图分类号 TN249 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.081403

Relaxation of Residual Stress on Laser-Peened Surface during Cyclic Loading

Tian Qing Zhou Jianzhong Huang Shu Sheng Jie Meng Xiankai

Dai Lei Zhu Weili

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

Abstract In order to investigate the relaxation rule of residual stress on laser-peening surface of 6061-T6 aluminum alloy during cyclic loading, laser-peening treatment and thermal insulation of 6061-T6 aluminum alloy has been carried out and the surface residual stress under different cyclic stress levels and circle times has been determined. The results show that most of the relaxation of residual stress occurs during the first 10 to 100 cycles, and the stress intends to be steady after 1000 cycles. Larger cyclic loading can cause greater value and rate of residual stress relaxation and even lead to complete release, especially when the peak stress is close to the yield stress. In addition, surface residual stress of the laser-peening specimens treated at 150℃ for 10 min is reduced and the magnitude and rate of the stress relaxation are lower. The stability of residual stress during cyclic loading is improved.

Key words laser optics; relaxation rule; cyclic loading; residual stress; stress relaxation; thermal insulation

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 120.6810

1 引言

激光喷丸(LP)是继机械喷丸、深滚等表面处理方法后新兴的一种材料改性技术^[1-3]。该技术利用高功率密度、纳秒量级的短脉冲激光辐照材料表面,在材料表面产生高幅残余压应力,可有效阻止表面疲劳裂纹的萌生和扩展,延长关键零部件的疲劳服役寿命^[4-6]。然而,已有研究表明,激光喷丸诱导的残余压应力在循环

收稿日期: 2014-02-15; 收到修改稿日期: 2014-03-15; 网络出版日期: 2014-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(51175236)、高等学校博士学科点专项科研基金(20123227110022)、江苏省科技支撑项目(BE2013097)、中国博士后科学基金54批面上一等资助项目(2013M540417)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG109)、江苏大学大学生科研立项(12A388)

作者简介: 田清(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光喷丸方面的研究。E-mail: tianqing16983@163.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

加载过程中会发生释放现象,降低了激光喷丸对于关键零部件的疲劳增益。众所周知,疲劳裂纹通常萌生于表面,因而研究激光喷丸后表面残余应力在疲劳过程中的松弛释放规律对于控制和改善零部件的服役寿命具有重要的理论意义和工程实用价值。

目前国内外学者对喷砂、机械喷丸、深滚等表面改性技术诱导的残余应力在疲劳加载过程中的释放规律进行了较多的研究。胡永会等^[7-9]研究了7075铝合金表面喷砂和机械喷丸后残余应力的松弛现象,结果表明循环加载过程中施加的应力越大,试样表面残余应力的松弛速率也越大。Juijerm等^[10-12]研究了深滚压AA6110铝合金在疲劳过程中残余应力的释放行为,结果表明残余应力的松弛主要发生在疲劳加载初期,随着循环周次的增加,松弛速率逐渐减小。Dalaei等^[13]研究了机械喷丸正火钢在不同拉伸应力下残余应力的循环释放行为,结果表明残余应力的释放程度随着加载应力幅值的增大而增大。Nalla等^[14-15]对比了深滚和激光喷丸Ti-6Al-4V在高温下的疲劳性能,表明激光喷丸后的钛合金在450℃疲劳加载100000个循环后,残余应力释放了63.2%。Nikitin等^[16]研究了深滚强化304不锈钢在高温循环载荷下的疲劳性能,结果表明在500℃~600℃的交变载荷下,残余应力释放了70%~80%。

然而,对于激光喷丸后表面残余应力在疲劳过程中的释放特性仍然缺乏系统研究。本文选取6061-T6铝合金作为研究对象,对激光喷丸后试样表面残余压应力在疲劳加载过程中的变化规律进行理论分析,在此基础上,开展相应的实验及相关测试研究,旨在揭示激光喷丸诱导的残余压应力在不同循环载荷水平和循环周次下的释放规律。

2 残余应力的产生和循环释放理论基础

激光喷丸过程中,传入材料内部的冲击波可设为一维的平面压缩波,单轴压应力在冲击波传播方向上产生,当冲击波的峰值压力超过材料动态屈服强度时,表层金属在纵向平面内发生伸长变形;冲击脉冲结束后,单元体保留一定的塑性变形,周围材料试图把变形后的材料推入原来位置,因此激光喷丸单元体受到周围材料的反作用推力,导致表层残余压应力的产生,如图1所示^[17]。

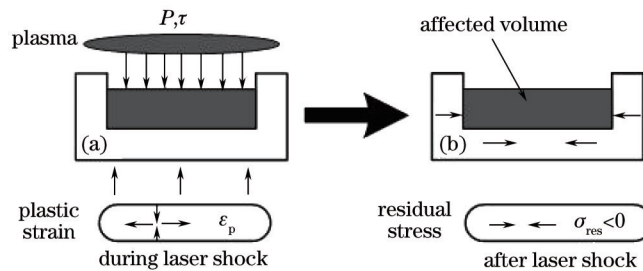


图1 激光喷丸产生残余压应力的原理图

Fig.1 Schematic of residual stress induced by laser peening

为了研究在循环载荷下残余应力的释放行为,文献[18]根据实验结果的统计规律和理论分析,获得了公式

$$\frac{\sigma_N^r}{|\sigma_0^r|} = \left(\frac{\sigma_{\max} \sigma_a}{(C_w \sigma_y)^2} \right)^m (N-1)^\beta - 1, \quad (1)$$

式中 \$\sigma_{\max}\$ 为循环过程中施加的最大压力, \$C_w\$ 为冷加工程度参数, \$m\$ 为材料常数(取决于循环加载力和应变响应), 常数 \$B\$ 为循环加载下残余应力释放程度, \$\sigma_a\$ 为外加应力幅值, \$\sigma_y\$ 为材料屈服强度, \$\sigma_0^r\$ 为初始残余应力, \$\sigma_N^r\$ 为循环 \$N\$ 次后材料表面残余应力。其中考虑到了激光喷丸强化过程的冷加工程度,因而更适合于解释激光喷丸后材料在循环载荷作用下表面残余应力释放的宏观机理。

为了得到加载应力比 \$R\$ 与应力释放的关系,可将(1)式改写成

$$\frac{\sigma_N^r}{|\sigma_0^r|} = \left(\frac{2\sigma_a^2}{(1-R)(C_w \sigma_y)^2} \right)^m (N-1)^\beta - 1, \quad -1 < R < 0.5. \quad (2)$$

该模型主要考虑了残余应力初始值、加载应力幅值、应力比、初始的冷加工程度和循环周期的影响,更直观地解释了金属材料在交变载荷下的残余应力释放行为,从(2)式中可以看出表面残余应力的释放程度随

着加载应力幅值和循环次数的增大而增大。

3 激光喷丸实验及应力测试

3.1 试样制备与激光喷丸参数

实验所用 6061-T6 铝合金的化学成分和力学性能如表 1 所示,其中 ν 表示泊松比。激光喷丸装置为江苏大学激光技术研究所研制的 ND:YAG GAIA-R 激光器系统,光斑直径为 3 mm、搭接率为 50%、激光能量为 6 J、激光波长为 1064 nm、激光频率为 1 Hz,能量吸收层为 0.1 mm 铝箔,约束层为 2 mm 流动水帘。激光喷丸处理前试样分别使用 180#到 1000#的金相砂纸进行打磨,并用无水乙醇清洗。所有试样的激光喷丸区域固定为 10.5 mm×12 mm,试样尺寸及激光喷丸区域如图 2 所示,试样激光喷丸效果如图 3 所示。

表 1 6061-T6 铝合金的化学成分及主要性能

Table 1 Elements and properties of 6061-T6 aluminum alloy

Element mass fraction	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Ti	Zn	Al
	0.90	0.62	0.33	0.28	0.17	0.06	0.02	0.02	Bal.
Mechanical property	σ_0 /Mpa	$\sigma_{0.2}$ /Mpa	δ / %	E /Gpa	P /(kg/m ³)	ν			
	356	299	13.5	72.4	2672	0.33			

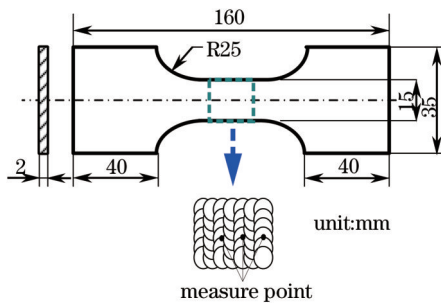


图 2 试样及喷丸区域

Fig.2 Sketch of the sample and the treated area

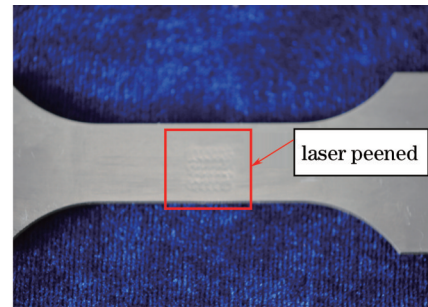


图 3 试样喷丸效果

Fig.3 Laser peened effect of the sample

3.2 循环应力加载与残余应力测试

疲劳实验在 MTS-809 拉扭组合材料测试系统中进行,采用拉-拉正弦波载荷谱轴向加载,应力比 $R=0.3$,交变频率 $f=5$ Hz,最大载荷 $F_{\max}=4.5$ kN 和 $F_{\max}=7$ kN,施加应力水平为 150 MPa 和 233 MPa,实验环境为空气、室温。

采用邯郸爱斯特应力技术有限公司 X-350A 型 X 射线应力测定仪,测量循环载荷作用下不同循环周次后试样表面残余应力值。测量时测试点为激光喷丸区域 measure point(图 2),取 3 个点的残余应力平均值作为测试结果,选取侧倾固定 Ψ 法,交相关法定峰,钴靶 $K\alpha$ 特征辐射。测试参数为衍射晶面(311), Ψ 角分别取 $0^\circ, 24^\circ, 35^\circ, 45^\circ$,应力常数 $K=-162$ MPa/ $^\circ$, 2θ 扫描起始及终止角分别为 142.5° 和 135.5° , 2θ 角扫描步距为 0.1° ,计数时间为 1.5 s,X 光管电流为 5 mA,X 光管电压为 20 kV,准直管直径 φ 为 1 mm。测试过程中,当测试误差超过所测值的 10%,则认为测试结果无效,重新取点进行测试。

为研究不同处理状态和不同应力水平下 6061-T6 铝合金试样激光喷丸表面残余压应力的释放行为,试样分组方案如表 2 所示。其中 1#和 2#为未经保温处理的激光喷丸样件,3#和 4#为 150 $^\circ\text{C}$ 下保温 10 min 的激光喷丸样件,5#和 6#为未经激光喷丸和保温处理的原始样件。

表 2 实验方案

Table 2 Experiment program

Group No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#
Treatment	LP	LP	LP+150 $^\circ\text{C}\times 10$ min	LP+150 $^\circ\text{C}\times 10$ min	Untreated	Untreated
Stress loading /MPa	150	233	150	233	150	233

4 实验结果及讨论

4.1 实验试样的残余压力分布

对试样的测量结果表明,激光喷丸前试样表面呈残余拉应力状态,应力值为 44 MPa;激光喷丸后试样表面呈残余压应力状态,应力值为-154 MPa;对激光喷丸试样作 150 °C 保温处理 10 min 后,试样表面残余压应力有所减小,应力值为-98 MPa,约为保温处理前残余压应力水平的 64%。对于保温处理试样,一方面保温过程中材料屈服强度降低,产生塑性变形,从而导致残余应力释放;另一方面激光喷丸后材料的位错由强化前的平衡状态变成强化后的相对平衡状态,温度升高,位错的可动性增大,导致位错由高能态向低能态发展,位错缠结逐渐展开,位错密度减小,造成了残余应力释放。6 组试样表面残余应力的释放规律如图 4 所示。为了更直观地观察激光喷丸后试样表面残余压应力释放行为,根据(2)式,绘制出材料表面残余应力和初始残余应力之比与循环周期的关系,如图 5 所示。作为对比样件的 5[#]和 6[#]分别在 150 MPa 和 233 MPa 的循环应力加载下进行疲劳实验,两组试样均在循环加载循环 100 周次后表面残余应力趋于稳定,一直维持在 20 MPa 左右的残余拉应力状态。

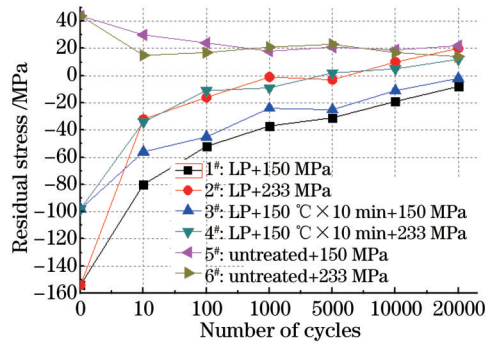


图 4 循环加载过程中试样表面残余应力的释放行为
Fig.4 Release of residual stress on specimen surface after different number of cycles

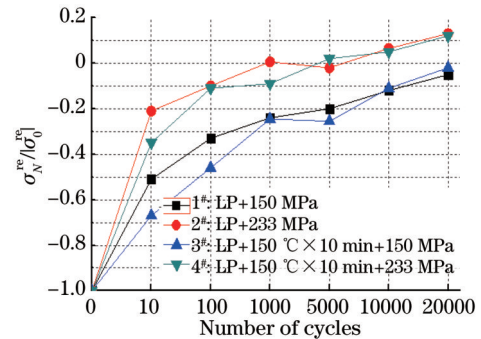


图 5 激光喷丸试样表面残余应力的释放程度
Fig.5 Release degree of residual stress on laser-peened specimen surface after different number of cycles

4.2 施加应力水平对残余应力释放的影响

1[#]和 2[#]分别在 150 MPa 和 233 MPa 的循环应力加载下进行疲劳实验,从图 4 可以看出,两组试样在疲劳载荷加载初期,残余压应力释放较为明显,循环 10 次后,经激光喷丸处理的 1[#]和 2[#]试样,其表面残余压应力从-158 MPa 分别下降至-80 MPa 和-32 MPa,下降率分别为 49%和 80%;循环 100 次后,1[#]和 2[#]试样表面残余压应力分别下降至-52 MPa 和-16 MPa,下降率分别为 35%和 50%,残余压应力释放速率有所降低;随着循环周期的增加,1[#]试样在经历 20000 次循环后表面仍然存在-8 MPa 的残余压应力,而 2[#]试样在 5000 次循环后残余压应力完全释放,最终在材料表面呈残余拉应力状态。从图 5 可明显看出,在表面初始残余压应力相同的情况下,2[#]试样明显比 1[#]试样表面残余应力松弛量更大,松弛的速率亦更高。对比 3[#]和 4[#]试样同样表明,外加应力越大则残余压应力松弛越快,随着循环次数的增加,释放程度逐渐减小。

分析结果表明,对于初始状态相同的试样,所施加的循环应力越大,其释放幅度和速率越大,当循环载荷接近材料屈服强度时,试样在疲劳加载初期即发生明显的应力松弛,后期会在表面产生残余拉应力。这是因为残余应力的释放规律取决于复合应力(材料表面的压应力与施加载荷应力的矢量叠加)与材料屈服强度间的关系。当复合应力接近甚至超过材料屈服强度极限时,材料将产生整体塑性变形,导致残余应力松弛明显;而当复合应力远小于材料屈服强度时,材料虽没有发生宏观塑性变形,但发生微观塑性变形,造成残余应力释放,其释放程度与速率较低。激光喷丸后材料表面晶粒尺寸较原始组织会发生明显的细化,且分布更加均匀,但在外加载荷作用下,可以引起材料微观上的位错移动和滑移,使晶体生长且晶粒尺寸变大,外加应力越大,则晶体长大趋势越明显,宏观上表现为残余应力松弛量越大。

4.3 保温处理对残余应力释放的影响

1[#]和 3[#]试样均在 150 MPa 的循环应力下进行疲劳实验,其中 3[#]试样在激光喷丸后经 150 °C 保温处理 10 min,而 1[#]试样未经保温处理。从图 4 可以看出,循环 10 次后,1[#]试样表面残余压应力从-158 MPa 下降

到-80 MPa,下降率为49%,而3#试样表面的残余压应力从-98 MPa下降到-66 MPa,下降率为33%;循环100次后,1#和3#试样表面残余压应力分别下降至-52 MPa和-45 MPa,下降率分别为35%和31%;循环1000次后,残余压应力释放速率显著降低,此时试样的表面残余压应力趋于稳定,经历20000次循环后,1#和3#试样表面仍然都呈残余压应力状态。从图5可明显看出,在外加应力相同的条件下,未经保温处理的1#在循环加载初期应力释放显著,经保温处理的3#试样虽然表面初始残余压应力较1#试样偏低,但是其在疲劳循环加载过程中应力释放较1#试样更为平缓,释放程度更低。对比2#和4#试样同样表明,与未经保温处理的2#试样相比,保温处理的4#试样在循环加载过程中应力释放较为平缓。对于材料来说,细化晶粒有利于提高其机械性能,激光喷丸后材料表面晶粒尺寸较原始组织会发生明显的细化,且分布更加均匀,而适当的保温处理则使材料微观组织结构更加稳定,形成了显微组织多边化,在疲劳加载过程中限制了材料微观塑性变形,从而可有效地减缓疲劳过程中残余压应力的松弛行为。

5 结 论

1) 在循环应力加载下,未经激光喷丸的6061-T6铝合金试样在循环加载100周次后表面残余应力趋于稳定,在随后的循环周次中一直保持在20 MPa左右的残余拉应力状态;而经激光喷丸的试样,在循环应力加载下,表面残余压应力发生释放,前10个周期的表面残余应力松弛速率相对较高,松弛主要发生在前100个循环周期以内,随着循环周期的增加,松弛速率逐渐减小,残余应力趋于稳定。

2) 对于初始应力状态相同的试样,所施加的循环应力越大,其表面残余压应力释放幅度和速率越大。当循环载荷接近或者超过材料屈服强度时,试样在疲劳循环加载初期即发生明显的应力松弛,后期则在表面产生残余拉应力。

3) 激光喷丸试样经150 °C保温处理10 min后,其表面初始残余压应力虽然较保温前降低,但由于保温处理使位错、层错处于稳定组态,限制了微观塑性变形,所以疲劳加载过程中残余应力的下降幅度和速率降低,松弛较为平缓,残余压应力在疲劳加载过程中的稳定性得以提升。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Jon E Rankin, Michael R Hill, Liyod A Hackel. The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy[J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 349(1-2): 279-291.
- 3 Zhou Jianzhong, Xu Zengchuang, Huang Shu, *et al.*. Effects of different stress ratios on fatigue crack growth in laser shot peened 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0903006.
周建忠, 徐增闯, 黄舒, 等. 基于不同应力比下激光喷丸强化6061-T6铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0903006.
- 4 A W Warren, Y B Guo, S C Chen. Massive parallel laser shock peening: simulation, analysis, and validation[J]. *International J Fatigue*, 2008, 30(1): 188-197.
- 5 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Zhang Yongkang, *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(11): 3984-3994.
- 6 Kiyotaka Masaki, Yasuo Ochi, Takashi Matsumura. Effects of laser peening treatment on high cycle fatigue properties of degassing-processed cast aluminum alloy[J]. *Mater Sci Eng A*, 2007, 468-470: 171-175.
- 7 Hu Yonghui, Wu Yunxin, Chen Lei. Relaxation rule of residual stress on peening surface of 7075 aluminum alloy during fatigue[J]. *Materials Research and Application*, 2010, 4(3): 174-179.
胡永会, 吴运新, 陈磊. 喷丸处理7075铝合金循环载荷下表面残余应力的松弛规律[J]. *材料研究与应用*, 2010, 4(3): 174-179.
- 8 Hu Yonghui, Li Yihua. Experiment of residual stress relaxation of 7075 aluminum alloy[J]. *Materials Research and Application*, 2011, 5(2): 114-116.
胡永会, 李益华. 7075铝合金残余应力松弛影响因素的实验研究[J]. *材料研究与应用*, 2011, 5(2): 114-116.
- 9 Hu Yonghui, Wu Yunxin, Guo Junkang. Relaxation rule of residual stress on shot peening surface of 7075 aluminum alloy during fatigue[J]. *Material & Heat Treatment*, 2010, 39(18): 24-27.

- 胡永会, 吴运新, 郭俊康. 7075 铝合金喷砂表面残余应力在疲劳过程中的松弛规律[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(18): 24-27.
- 10 P Juijerm, I Altenberger, B Scholtes. Fatigue and residual stress relaxation of deep rolled differently aged aluminium alloy AA6110[J]. Mater Sci Eng A, 2006, 426(1-2): 4-10.
- 11 P Juijerm, I Altenberger. Effect of temperature on cyclic deformation behavior and residual stress relaxation of deep rolled under-aged aluminium alloy AA6110[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 452-453: 475-482.
- 12 P Juijerm, I Altenberger. Fatigue behavior of deep rolled Al- Mg- Si- Cu alloy at elevated temperature[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(10): 943-946.
- 13 K Dalaei, B Karlsson. Influence of shot peening on fatigue durability of normalized steel subjected to variable amplitude loading[J]. International J Fatigue, 2012, 38: 75-83.
- 14 R K Nalla, I Altenberger, U Noster, *et al.*. On the influence of mechanical surface treatments—deep rolling and laser shock peening—on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 355(1-2): 216-230.
- 15 Igor Altenberger, Ravi K Nalla, Yuji Sano, *et al.*. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low-and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C[J]. International J Fatigue, 2012, 44: 292-302.
- 16 I Nikitin, B Scholtes, H J Maier, *et al.*. High temperature fatigue behavior and residual stress stability of laser-shock peened and deep rolled austenitic steel AISI 304[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(10): 1345-1350.
- 17 Zuo Lidang. Research on Fatigue Crack Growth Property of Ti- 6Al- 4V Aerospace Titanium Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. 21.
- 左力党. 激光喷丸强化 Ti-6Al-4V 航空钛合金疲劳裂纹扩展性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013. 21.
- 18 Wyman Z, Zhuang, Gary R. Halford. Investigation of residual stress relaxation under cyclic load[J]. International J Fatigue, 2001, 23: S31-S34.