

# 不同覆盖率下激光喷丸 6061-T6 铝合金疲劳 裂纹扩展的数值模拟研究

徐增闯<sup>1,2</sup> 黄舒<sup>1,2</sup> 周建忠<sup>1</sup> 左立党<sup>1</sup> 杨晶<sup>1</sup> 阮鸿雁<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013  
<sup>2</sup>镇江惟真激光技术有限公司, 江苏 镇江 212009)

**摘要** 为研究不同激光喷丸覆盖率对含预制裂纹试样疲劳裂纹扩展性能的影响,采用有限元软件 Abaqus 和疲劳分析软件 MSC. Fatigue 相结合,对 6061-T6 铝合金紧凑拉伸(CT)试样进行了三种不同喷丸区域即 15 mm×15 mm、34.5 mm×15 mm 和 15 mm×60 mm 的双面激光喷丸强化和疲劳裂纹扩展的数值模拟。分析不同覆盖率下激光喷丸强化诱导的残余压应力对裂纹闭合效应影响,探索不同覆盖率对疲劳寿命增益的影响。结果表明,经过激光喷丸后,三种不同覆盖率下的疲劳裂纹扩展速率较未处理试件都有一定的降低;喷丸覆盖区域的选择对激光喷丸后 CT 试样的疲劳寿命有显著影响,其中,对 15 mm×60 mm 区域进行喷丸后的疲劳裂纹扩展速率降低幅度最大,疲劳寿命增益最为明显。

**关键词** 激光技术;激光喷丸;数值模拟;覆盖率;疲劳裂纹扩展

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s103006

## Effects of Different Laser Shot Peened Coverage Areas on Fatigue Crack Growth of 6061-T6 Aluminum Alloy

Xu Zengchuang<sup>1,2</sup> Huang Shu<sup>1,2</sup> Zhou Jianzhong<sup>1</sup> Zuo Lidang<sup>1</sup>

Yang Jing<sup>1</sup> Ruan Hongyan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)  
(<sup>2</sup>Weizhen Laser Technology Corporation of Zhenjiang, Zhenjiang, Jiangsu 212009, China)

**Abstract** In order to investigate the effect of two-sided laser shot peening (LSP) on fatigue crack growth of 6061-T6 Aluminum alloy compact tension (CT) specimens under different coverage areas, finite element software Abaqus and MSC. Fatigue are used to establish the prediction model. Three different LSP coverage areas, i. e. 15 mm×15 mm, 34.5 mm×15 mm and 15 mm×60 mm are selected. The effects of compressive residual stress on the crack closure by different LSP coverage areas are studied, and the fatigue life increment is predicted. The simulation results indicate that the fatigue crack growth rates of laser peened CT specimens is decreased in comparison with the untreated ones. LSP coverage areas significantly affect the fatigue life of CT specimens, moreover, the specimens treated with 15 mm×60 mm LSP coverage area gain the most obvious fatigue life improvement.

**Key words** laser technique; laser shot peening; numerical simulation; coverage area; fatigue crack growth

**OCIS codes** 140.3440; 140.3538; 160.3900; 220.4610

收稿日期: 2011-07-18; 收到修改稿日期: 2011-09-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(51175236),江苏省自然科学基金(BK2010351),江苏省高校自然科学基金(10KJB460002),江苏大学研究生创新基金(CX09B\_07XZ),镇江市工业科技支撑项目(SGY20090026)和江苏省高校优秀学科建设工程项目(2010)资助课题。

**作者简介:** 徐增闯(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光表面改性及疲劳特性等方面的研究。

E-mail: xuzengchuang083087@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和表面改性延寿技术等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

# 1 引 言

激光喷丸强化(LSP)是继机械喷丸、滚压强化和冷挤压之后发展起来的一种新型抗疲劳制造技术,其利用高功率密度、短脉冲激光和材料相互作用诱导的高幅冲击波压力实施表面改性,从而提高金属零件的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀能力,在航空航天、核工业、汽车、国防装备等领域都有成功应用<sup>[1,2]</sup>。已有文献表明<sup>[3~5]</sup>,激光喷丸强化能大幅改善结构件的疲劳寿命,其主要原因是激光喷丸诱导的高幅残余压应力场降低了疲劳裂纹扩展速率。激光喷丸后疲劳裂纹扩展性能受到了国内外学者的广泛关注,而如何选择相关激光工艺参数使激光喷丸后的疲劳增益效果更好是目前相关研究的重要内容。

Yang等<sup>[6]</sup>研究了激光喷丸强化对2024-T3紧固孔和止裂孔试样疲劳特性的影响,指出激光喷丸能有效提高铝合金缺口型试样的疲劳寿命。王强等<sup>[7]</sup>研究了喷丸强化对TC18钛合金带孔零件疲劳寿命的影响,指出喷丸强化引入的残余压应力场和较好的表面完整性,使得疲劳裂纹源起于次表层,从而显著提高了带孔零件的疲劳寿命。Kim等<sup>[8]</sup>研究了不同应力比和搅拌摩擦焊方向对5083-H32和6061-T651铝合金疲劳裂纹扩展特性的影响,指出当应力 $R=0.1$ 时搅拌摩擦焊对疲劳裂纹扩展抑制作用比 $R=0.8$ 时更明显;同时指出残余压应力对 $\Delta K$ 处于较小值时的疲劳裂纹扩展速率影响较大;当 $\Delta K$ 较大时残余压应力对疲劳裂纹扩展的速率影响则不大。Rubio-González等<sup>[9]</sup>研究了不同功率密度下激光喷丸对2205双相不锈钢疲劳裂纹扩展性能的影响,结果表明激光喷丸能有效地提高其疲劳裂纹扩展寿命,但也指出激光喷丸对其显微硬度和微观组织影响不明显。

以往针对激光喷丸延寿的研究集中于如何优化激光参数以降低疲劳裂纹扩展速率<sup>[10,11]</sup>,对不同喷丸路径及覆盖率的研究则较少。本文从激光喷丸诱导的残余压应力引起裂纹闭合效应的机理出发,研究三种不同喷丸区域即 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 、 $34.5\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 和 $15\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 对6061-T6航空铝合金紧凑拉伸(CT)试样的疲劳裂纹扩展速率、最终断裂尺寸及疲劳寿命的影响。

## 2 冲击残余应力场下的疲劳裂纹扩展理论

### 2.1 疲劳裂纹扩展理论

在工程实际应用中,计算疲劳裂纹扩展速率大

多采用Paris的经验公式

$$da/dN = C(\Delta K)^m, \quad (1)$$

式中 $\Delta K$ 为应力强度因子幅值; $a$ 为裂纹长度; $N$ 为循环次数; $da/dN$ 表示裂纹扩展速率; $C$ 和 $m$ 为与材料性能、环境介质及试样几何尺寸有关的常数。

根据ELber裂纹闭合理论<sup>[12]</sup>,疲劳裂纹扩展速率 $da/dN$ 应由 $\Delta K_{\text{eff}}$ 控制,于是Paris公式改为

$$da/dN = C(\Delta K_{\text{eff}})^m = C(U\Delta K)^m = U^m C(\Delta K)^m, \quad (2)$$

式中 $U$ 为闭合参数,且有

$$U = \Delta\sigma_{\text{eff}}/\Delta\sigma = \Delta K_{\text{eff}}/\Delta K < 1. \quad (3)$$

### 2.2 应力场下的数学模型

Ballard等<sup>[13]</sup>提出了用于对激光冲击波诱导的残余应力值进行估算的分析模型:在一个半无限大的弹塑性物体中,取喷丸区域边长为 $a$ 的正方形,假设残余应力场是双轴(无切变效应)和各向同性,则由该模型能得到材料表面最大残余应力的计算式为

$$\sigma_{\text{smax}} = \sigma_0 - \left[ \frac{\mu\epsilon_p(1+\nu)}{(1+\nu)+\sigma_0} \right] \left[ 1 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi}(1+\nu)\frac{L_p}{a} \right], \quad (4)$$

式中 $\sigma_0$ 为初始残余应力, $\mu$ 为材料的拉梅常数, $\nu$ 为泊松比, $\epsilon_p$ 为塑性应变, $L_p$ 为塑性变形层深度,当用直径为 $d$ 的圆形光斑进行冲击,只需将上式中的 $a$ 用 $\sqrt{2}d$ 代替,即可得到圆形光斑冲击时表面残余应力的近似估算式。此模型对实际的激光喷丸处理具有一定的指导意义。

### 2.3 残余压应力场下疲劳裂纹扩展理论

激光喷丸在金属材料表层诱导的残余应力使材料实际受力情况发生改变,对于I型裂纹来说,所受拉应力 $\sigma_w$ 垂直于裂纹面,且与激光喷丸诱导的残余压应力 $\sigma_R$ 在同一方向上,如图1所示。所以残余压应力场下的实际等效应力为两者代数之和,表示为

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_R + \sigma_w, \quad (5)$$

式中 $\sigma_R$ 为负值;由于残余压应力 $\sigma_R$ 的存在,使得等效应力 $\sigma_{\text{eff}}$ 降低了,即 $\Delta K_{\text{eff}}$ 下降,从而使得残余压应力起到降低裂纹扩展速率的作用。而不同的残余压应力 $\sigma_R$ 的分布会对 $\sigma_R$ 总和产生影响,从而对疲劳裂纹扩展的速率变化产生影响。

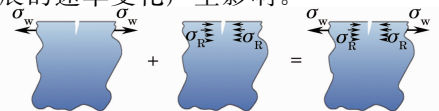


图1 残余压应力作用下的裂纹扩展示意图

Fig.1 Schematic diagram of crack growth under compressive residual stress

### 3 疲劳裂纹扩展的数值模拟研究

#### 3.1 材料与试样

数值模拟分析选用材料为 6061-T6 航空铝合

金。其具有良好的加工性能、抗腐蚀性、高韧度及加工后不易变形等特点,在航空航天、船舶和汽车等领域应用广泛。其化学成分和机械性能如表 1 所示。

表 1 6061-T6 铝合金的化学成分和机械性能

Table 1 Chemical composition and material properties of 6061-T6 aluminum alloy

Component	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Ti	Zn	Al
Mass fraction /%	0.90	0.62	0.33	0.28	0.17	0.06	0.02	0.02	Bal.
Mechanical property	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta$ /%	$E$ /GPa	$P$ /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				$\nu$
	356	299	13.5	72.4	2672				0.33

根据 GB6398-86 金属材料疲劳裂纹扩展速率试样方法中规定标准紧凑拉伸(CT)试样的参数,结合具体实验条件,本文采用如图 2(a)所示的 CT 试样,长 62.5 mm,宽 60 mm,厚 6 mm。激光喷丸的区域选为 15 mm×15 mm,34.5 mm×15 mm 和

15 mm×60 mm。相关的示意图如图 2(b)~(d)所示。为描述方便,将喷丸区域为 15 mm×15 mm,34.5 mm×15 mm,15 mm×60 mm 的激光喷丸工艺分别定义为 LSP-1,LSP-2 和 LSP-3,具体实验工艺安排如表 2 所示。

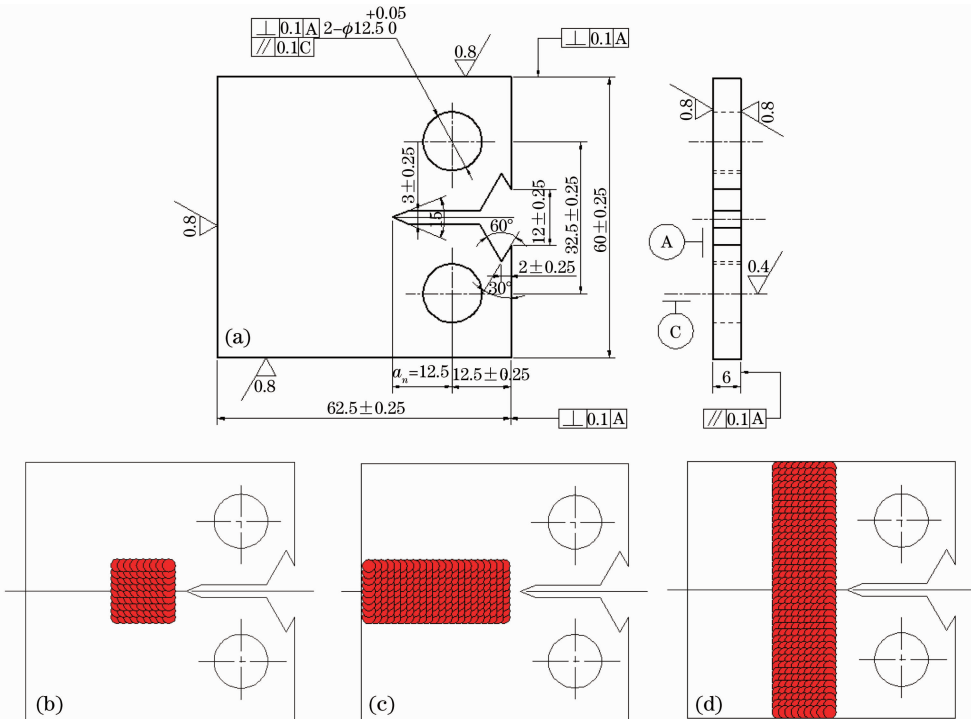


图 2 (a) 6061-T6 铝合金 CT 试样尺寸; (b) LSP-1 的喷丸区域; (c) LSP-2 的喷丸区域; (d) LSP-3 喷丸区域

Fig. 2 (a) Dimension of 6061-T6 aluminum alloy CT specimen; (b) coverage area of LSP-1; (c) coverage area of LSP-2;

(d) coverage area of LSP-3

表 2 三种不同的激光喷丸区域

Table 2 Three different kinds of LSP areas

LSP name	LSP-1	LSP-2	LSP-3
LSP area	15 mm×15 mm	34.5 mm×15 mm	15 mm×60 mm
Schematic of LSP	Fig. 2(b)	Fig. 2(c)	Fig. 2(d)

#### 3.2 CT 试样激光喷丸强化有限元模型的建立

对 6061-T6 铝合金 CT 试样模型进行多点多排激光喷丸有限元分析,考虑激光喷丸过程中冲击波压力的高应变率加载特征,故有限元模型网格的选

用采用 C3D8R(8 节点六面体线形减缩积分)单元,边界条件为底面全约束。为了比较不同喷丸区域对 CT 试样疲劳裂纹扩展速率的影响,三个试样均采用激光能量为 5 J,光斑直径 3 mm,搭接率为 50%,冲击波压力作用时间 40 ns,双面喷丸的激光冲击参数。激光喷丸的区域为(LSP-1,LSP-2,LSP-3)。经过激光喷丸后的残余应力图如图 3~5 所示。从图中可以看出,喷丸区域上下表层均是压应力分布,中部有拉应力。最大残余压应力距离表层有一定的距

离,而并不是试样表面。图 6 所示为疲劳裂纹扩展前裂纹尖端的残余应力分布情况,从图中可以看出未喷丸试样裂纹扩展路径上表面的残余拉应力均在 50 MPa 左右;激光喷丸后的 LSP-1, LSP-2, LSP-3 三者的残余压应力大致相同,均在 -90 MPa 左右。

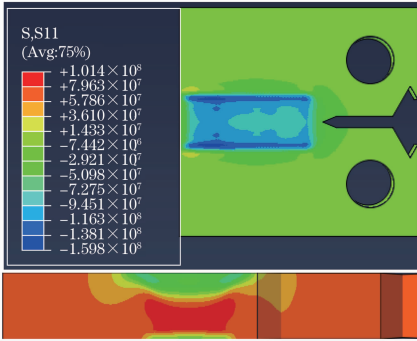


图 3 LSP-1 后 CT 试样的残余压应力分布

Fig. 3 Residual stress distribution of CT specimen after LSP-1

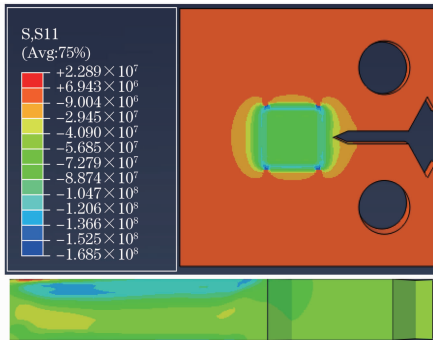


图 4 LSP-2 后 CT 试样的残余压应力分布

Fig. 4 Residual stress distribution of CT specimen after LSP-2



图 5 LSP-3 后 CT 试样的残余压应力

Fig. 5 Residual stress distribution of CT specimen after LSP-3

### 3.3 疲劳裂纹扩展模拟

激光喷丸后疲劳裂纹的扩展特性分析基于激光喷丸后的残余应力场进行,其分析步骤由以下两个部分构成:激光喷丸诱导的残余应力场模拟和疲劳

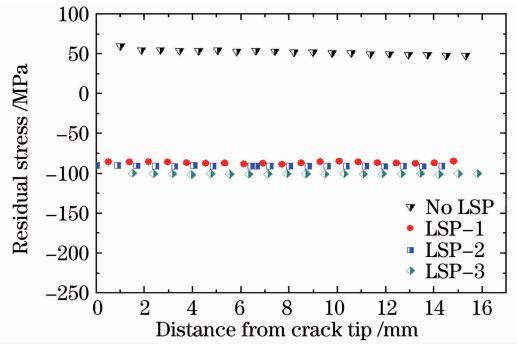


图 6 裂纹尖端的残余应力分布

Fig. 6 Residual stress distribution along the crack tip 裂纹扩展特性数值分析<sup>[14]</sup>。将 Abaqus 分析之后的残余应力状态及静态拉伸分析的结果文件. odb 文件导入到 MSC. Fatigue。它与 Abaqus 中的残余应力分布基本一致,这是由于模型采用 No mapping 技术,使得模型数据在转换过程中并无丢失。导入的单拉静态拉伸分析结果如图 7 所示。

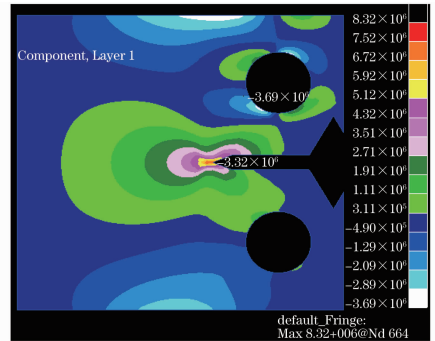


图 7 MSC. Fatigue 静态拉伸模型的应力分布图

Fig. 7 Static stress contours in MSC. Fatigue with static tension model

本模拟采用疲劳外载荷  $F_{max} = 3000$  N,加载频率  $f = 10$  Hz,应力比  $R = 0.5$ 。经过疲劳裂纹扩展性能分析后,激光喷丸前后 CT 试样的疲劳寿命曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,在不同喷丸区域下,激光喷丸后 CT 试样的疲劳寿命都有了一定

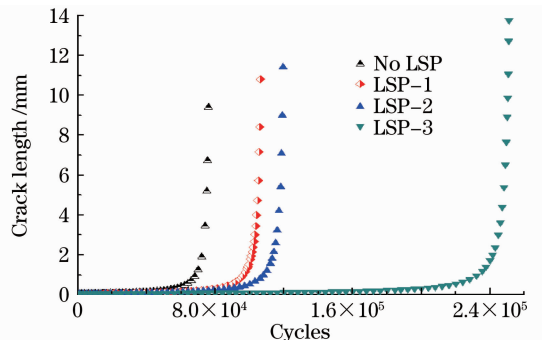


图 8 不同喷丸区域下的疲劳寿命曲线

Fig. 8  $a-N$  curves with different LSP coverage areas

的增加,而且喷丸后裂纹的最终尺寸均大于喷丸前。喷丸前的最终裂纹扩展长度是 9.4 mm,而经过 LSP-1 后的最终裂纹扩展长度是 10.813 mm。经过 LSP-2 后的最终裂纹扩展长度是 11.422 mm。经过 LSP-3 后的最终裂纹扩展长度是 13.763 mm。可见由于激光喷丸之后诱导的局部残余压应力,导致了裂纹扩展区域的实际受载水平的降低,在裂纹扩展路径上强化了材料,抑制了疲劳裂纹的扩展,提高了疲劳寿命;裂纹扩展长度的增加也说明激光喷丸使得材料的断裂韧性得到增加,从而延缓试样发生断裂的时间。

不同喷丸区域下的 CT 试样最终疲劳寿命如图 9 所示。从中可以看出,未处理件的寿命 75990 次循环。当喷丸区域为 LSP-2 时,疲劳寿命增加了 57.1%;当喷丸区域为 LSP-3 时,激光喷丸使 CT 试样的疲劳寿命增加了 230.2%。从而可以得出,喷丸区域 LSP-3 对 CT 试样疲劳裂纹扩展抑制效果最佳。

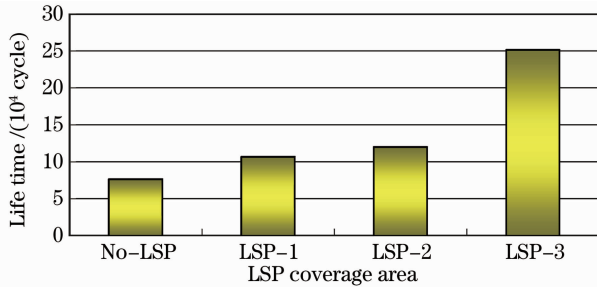


图 9 不同喷丸区域 CT 试样最终疲劳寿命对比

Fig. 9 Final fatigue life time of CT with different LSP coverage areas

不同喷丸区域下激光喷丸前后 CT 试样疲劳裂纹扩展速率曲线如图 10 所示。从中可以看出,当  $\Delta K$  处于较小值时,经过激光喷丸后三种不同喷丸区域下的 CT 试样裂纹扩展速率均有一定程度的降低。其中当喷丸区域为 LSP-3 时,其疲劳裂纹扩展速率比喷丸前有了明显的降低;当喷丸区域为 LSP-1 和 LSP-2 时裂纹扩展速率也有了一定的降低,但其效果没有 LSP-3 时显著;而且喷丸区域为 LSP-1 和 LSP-2 时,CT 试样的裂纹扩展速率几乎相同。原因是不同的喷丸区域会产生不同的残余压应力场分布。其中当喷丸区域为 LSP-3 时,在疲劳裂纹扩展驱动力方向上的残余压应力场最多,因此对疲劳裂纹扩展的驱动力抑制效果最明显,继而导致其对疲劳裂纹扩展的抑制性最强;虽然喷丸区域 LSP-2 和 LSP-1 相比,其产生的残余压应力场要大,但是 LSP-2 的残余压应力场很大一部分是在高  $\Delta K$  区

域,而在高  $\Delta K$  区域,残余压应力对疲劳裂纹扩展抑制效果很小。因而导致了 LSP-1 和 LSP-2 的疲劳裂纹扩展速率几乎相同。

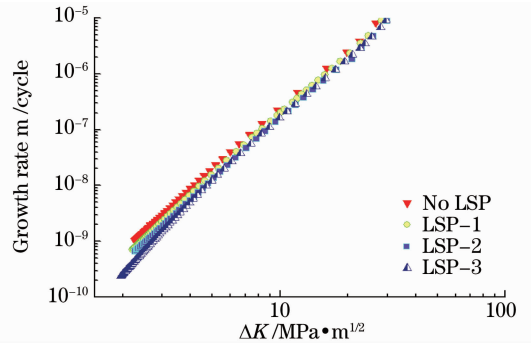


图 10 不同激光喷丸区域下的裂纹扩展速率对比

Fig. 10 Fatigue crack growth rates of CT with different LSP coverage areas

## 4 结 论

通过对 6061-T6 铝合金 CT 试样在不同喷丸覆盖率下疲劳裂纹扩展寿命的数值模拟研究,可以得到如下结果:

1) 经过激光能量为 5 J,光斑直径为 3 mm 的双面激光喷丸后,CT 试样疲劳寿命的提高效率随喷丸覆盖率的不同而改变。当喷丸区域为 LSP-1 时,其疲劳寿命提高了 39.7%,当喷丸区域为 LSP-2 时,其疲劳寿命增加了 57.1%;当喷丸区域为 LSP-3 时,激光喷丸则使 CT 试样的疲劳寿命增加了 230.2%。

2) 激光喷丸使得材料的断裂韧性得到增加,延缓了试样发生断裂的时间,使三种不同喷丸覆盖区域下 CT 试样裂纹最终长度大于喷丸前的裂纹扩展最终尺寸;

3) 对比 LSP-1 和 LSP-3 两种不同喷丸覆盖率可以看出,当  $\Delta K$  处于较小值时,激光喷丸对疲劳裂纹扩展速率有较好的抑制性;在疲劳裂纹扩展驱动力方向上的残余压应力场作用区域越大,其对疲劳裂纹扩展的抑制性越强。对比 LSP-1 和 LSP-3 两种不同喷丸覆盖率可以得出, $\Delta K$  处于较大值时,残余压应力对疲劳裂纹扩展的抑制性不强,这是由于随着裂纹长度的增加,残余应力会产生松弛现象,使得高  $\Delta K$  区域的疲劳裂纹扩展速率在激光喷丸前后几乎相同。

4) 不同喷丸覆盖率下激光喷丸强化对疲劳裂纹扩展性能影响的有限元模拟结果与 Kim 等<sup>[8]</sup>中实验结果有相似的一致性,因此也验证了本模拟的准确性。

## 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]. *Int. J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 2 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *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
- 3 Luo K. Y., Lu J. Z., Zhang L. F. *et al.*. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing [J]. *Mater. Des.*, 2010, **31**(5): 2599~2603
- 4 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K147 material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201  
李 伟, 何卫峰, 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**(8): 2197~2201
- 5 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3327  
罗新民, 张静文, 赵广志等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(12): 3323~3327
- 6 J. M. Yang, Y. C. Her, Nanlin Han *et al.*. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2001, **298**(1-2): 296~299
- 7 Wang Qiang, Wang Xin, Gao Yukui *et al.*. Effect of strengthened hole on the fatigue life of TC18 titanium alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010, (2): 84~86  
王 强, 王 欣, 高玉魁等. 孔强化对 TC18 钛合金疲劳寿命的影响[J]. 材料工程, 2010, (2): 84~86
- 8 Sangshik Kim, Chang Gil Lee, Sung-Joon Kim. Fatigue crack propagation behavior of friction stir welded 5083-H32 and 6061-T651 aluminum alloys [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2008, **478**(1-2): 56~64
- 9 C. Rubio-González, C. Felix-Martinez, G. Gomez-Rosas *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth of duplex stainless steel [J]. *Mater. Sci. Engng.*, 2011, **528**(3): 914~919
- 10 Omar Hatamleh, Llyod Hackel, Scott Forth. Effects of different R ratios on fatigue crack growth in laser peened friction stir welds [J]. *Mater. Sci. Forum*, 2008, (580-582): 675~680
- 11 G. Gomez-Rosas, C. Rubio-Gonzalez, J. L. Ocaña *et al.*. Laser shock processing of 6061-T6 Al alloy with 1064 nm and 532 nm wavelengths[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, **256**(20): 5828~5831
- 12 C. Y. Zhou. Fatigue and Fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002. 170~172  
周传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. 170~172
- 13 Ballard P., Fournier J., Fabbro R. *et al.*. Residual stresses induced by laser shocks[J]. *J. Physique*, 1991, **1**(3): 487~494
- 14 Zhao Jianfei, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Numerical simulation on fatigue crack growth of metal sheet induced by laser shot peening [J]. *Int. Modern Phys. B*, 2009, **23**(6-7): 1646~1651

栏目编辑: 胡 冰