

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

周建忠 徐增闯* 黄舒 杨小东 王呈栋 杨晶 左立党 季杏露

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了研究不同应力比下激光喷丸强化(LSP)对 6061-T6 铝合金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,对应力比为 0.1、0.3、0.5 条件下的 6061-T6 铝合金紧凑拉伸(CT)试样进行了激光喷丸强化疲劳裂纹扩展的数值模拟,分析残余压应力对高低应力比下的裂纹闭合效应,探索不同应力比对激光喷丸强化疲劳寿命增益的影响。结果表明,经过激光喷丸后,3 种不同应力比下的疲劳裂纹扩展速率较未处理试件都有一定的降低;应力比的取值对激光喷丸后 CT 试样的疲劳寿命有显著影响,应力比越小,激光喷丸对 CT 试样疲劳寿命的增益影响越明显。

关键词 激光技术;激光喷丸强化;裂纹扩展;残余应力;应力比;数值模拟

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0903006

Effects of Different Stress Ratios on Fatigue Crack Growth in Laser Shot Peened 6061-T6 Aluminum Alloy

Zhou Jianzhong Xu Zengchuang Huang Shu Yang Xiaodong

Wang Chengdong Yang Jing Zuo Lidang Ji Xinglu

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

Abstract In order to investigate the effect of laser shot peening (LSP) on fatigue crack propagation of 6061-T6 aluminum alloy under different stress ratios, finite element software ABAQUS and fatigue analysis software MSC. Fatigue are used to establish the prediction model to analyze the effects of different stress ratios ($R=0.1, 0.3, 0.5$) on crack propagation induced by LSP. The effects of residual compressive stress on the crack closure under different stress ratios are studied and the increase of fatigue life is predicted. The results show that fatigue crack growth rate decreases after LSP, compared with the untreated sample under three stress ratios. The value of stress ratio significantly affects the fatigue life of compact tension (CT) specimen after laser shot peening, however, the lower value of stress ratio is, the more the increase in fatigue life attained by LSP is.

Key words laser technique; laser shot peening; crack growth; residual stress; stress ratio; numerical simulation

OCIS codes 140.3440; 140.3538; 160.3900; 220.4610

1 引 言

工程实践表明,疲劳与磨损失效造成的经济损失十分惊人,占到了我国国内生产总值(GDP)的 9.5%,而在发达国家这一比例只有 4%~5%(参见

<http://www.metalimprovement.com>)。如何有效提高结构件的抗疲劳性能,改善零件表面的抗腐蚀能力和耐磨性能,已成为材料表面改性研究中的重要课题。激光喷丸强化(LSP)是继机械喷丸^[1]、滚

收稿日期: 2011-04-07; **收到修改稿日期:** 2011-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(50675090)、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)、江苏省 2008 青蓝工程资助项目和 2010 江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: xuzengchuang083087@163.com

压强化、冷挤压之后发展起来的一种新型表面改性技术,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^[2,3]。已有文献表明^[4~8],激光喷丸强化能大幅改善构件的疲劳寿命,其主要机理是激光喷丸诱导的高幅残余压应力降低疲劳裂纹扩展的驱动力,延长了疲劳裂纹扩展寿命。因此激光喷丸强化技术在航天、汽车等现代制造领域具有广阔的应用前景。

以往的研究集中于如何优化激光喷丸强化工艺参数以降低疲劳裂纹扩展速率^[9,10],主要针对单一应力比下激光喷丸前后的疲劳裂纹扩展特性进行相关研究,而对于不同的应力比下激光喷丸前后的疲劳裂纹扩展则研究得相对较少。裂纹的闭合效应可降低裂纹的扩展速率,裂纹闭合理论中的重要参数 U (闭合参数)则是应力比 R 的函数,而残余压应力的影响效果与裂纹的闭合效应也是密切相关的^[11]。因此研究不同应力比下残余压应力对疲劳裂纹扩展速率的抑制效果就显得十分必要。

本文从激光冲击波诱导残余应力场的机理出发,对激光喷丸前后的 6061-T6 铝合金紧凑拉伸(CT)试样在不同的常用应力比($R=0.1, 0.3, 0.5$)下进行疲劳裂纹扩展的数值模拟,探索不同应力比对激光喷丸强化疲劳寿命增益的影响,分析残余压应力对高低应力比下的裂纹闭合效应,为激光喷丸强化疲劳性能测试的应力比优化提供指导。

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 ΔK 为应力强度因子幅值, da/dN 为裂纹扩展速率, C 和 m 是与材料性能、环境介质及试样几何形状有关的常数。

在平面应力试件的拉-拉疲劳裂纹扩展实验中可观察到裂纹闭合现象,疲劳裂纹只有在完全张开

的情况下才可能扩展,裂纹扩展的有效驱动力-有效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 为^[12]

$$\Delta K_{\text{eff}} = \Delta K \times U. \quad (2)$$

根据裂纹闭合理论,疲劳裂纹扩展速率 da/dN 应由 ΔK_{eff} 控制,于是 Paris 公式改写为

$$da/dN = C(\Delta K_{\text{eff}})^m = C(U\Delta K)^m = U^m C(\Delta K)^m. \quad (3)$$

闭合参数 U 是与应力比 R 密切相关的函数,且有

$$U = \Delta\sigma_{\text{eff}}/\Delta\sigma = \Delta K_{\text{eff}}/\Delta K < 1. \quad (4)$$

在疲劳裂纹扩展过程中,应力比 R 明显影响疲劳裂纹扩展速率,在相同的应力强度因子幅值下,循环载荷的应力比越高,其裂纹扩展速率越大。

2.2 疲劳裂纹扩展模型

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 σ_w 垂直于裂纹面,且与激光喷丸诱导的残余压应力 σ_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之代数和

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

式中 σ_R 为负值。由于残余压应力 σ_R 的存在,使得等效应力 σ_{eff} 降低了,即 ΔK_{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。



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 residual compressive stress

3 疲劳裂纹扩展的数值模拟

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。该材料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、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	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	E / GPa	P / (kg/m ³)	ν			
Value	356	299	13.5	72.4	2672	0.33			

值。本文使用 MSC.Fatigue 进行激光喷丸强化后残余应力场下的疲劳裂纹扩展分析。对激光喷丸残余应力场下的疲劳裂纹扩展分析需要三方面的基本输入,即材料的疲劳属性、疲劳载荷的信息以及分析模型的几何特征,还要进行求解参数设置,之后才能提交疲劳分析作业。通过修改载荷参数中的应力比,从而实现不同应力比下激光喷丸对疲劳裂纹扩展速率影响的数值模拟。CT 试样的疲劳裂纹扩展特性分析流程如图 5 所示。

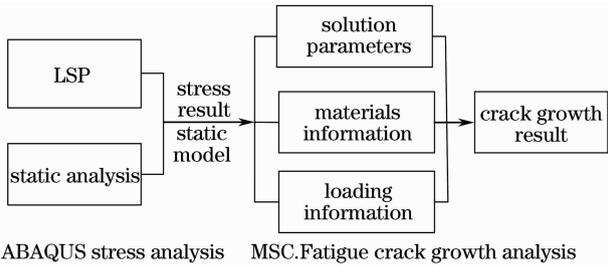


图 5 疲劳裂纹扩展预测分析流程

Fig. 5 Analysis process of crack growth

3.4 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,其分析步骤由两部分构成:激光喷丸诱导的残余应力场模拟和疲劳裂纹扩展特性数值分析^[13]。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 导入到 MSC.Fatigue,其中导入的残余应力结果如图 6 所示。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。

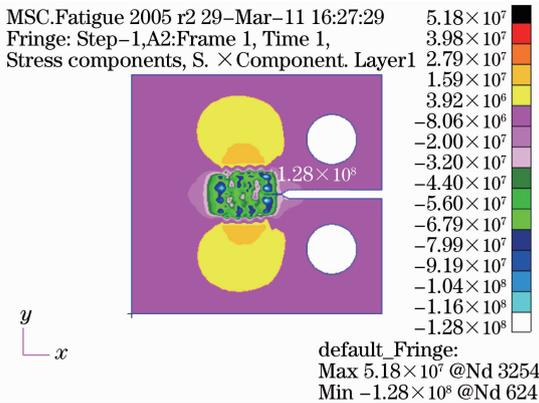


图 6 MSC.Fatigue 中的残余压应力分布情况

Fig. 6 Residual stress contours in MSC.Fatigue

为了对比不同应力比下激光喷丸对疲劳裂纹扩展效率的影响,分别取较常用的应力比 $R = 0.1, 0.3, 0.5$, 外载荷 $F_{max} = 3000\text{ N}$, 加载频率 $f =$

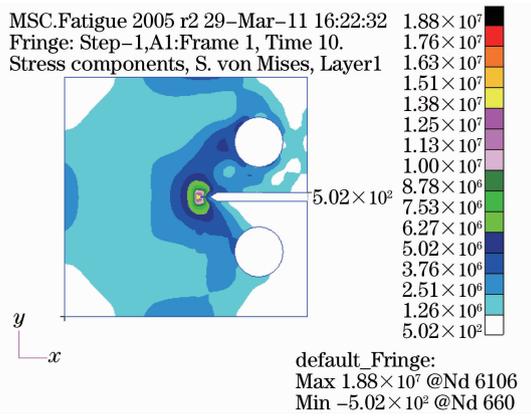


图 7 MSC.Fatigue 静态拉伸模型的应力分布云图

Fig. 7 Static stress contours of CTs in MSC.Fatigue 10 Hz。经过疲劳分析后,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,在不同应力比下,经过激光喷丸后,CT 试样的疲劳寿命都有了一定的增加,而且喷丸后裂纹的最终尺寸均大于喷丸前。其中当应力比 $R = 0.1$ 时,喷丸前的最终裂纹扩展长度是 6.86 mm,而喷丸后的最终裂纹扩展长度是 8.45 mm。可见由于激光喷丸之后诱导的局部残余应力,导致裂纹扩展区域的实际受载水平降低,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。

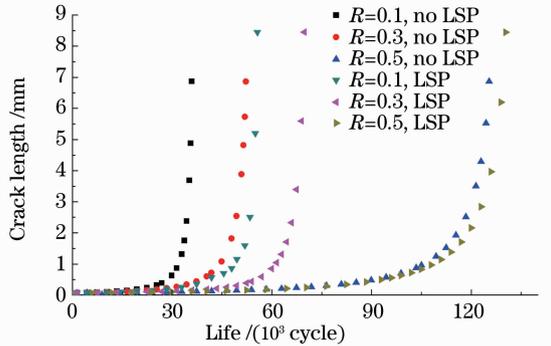


图 8 不同应力比下激光喷丸前后的疲劳寿命曲线

Fig. 8 Fatigue life curves with different stress ratios

不同应力比下激光喷丸前后的 CT 试样最终疲劳寿命如图 9 所示。从中可以看出,当应力比 $R = 0.1$ 时,激光喷丸使 CT 试样的疲劳寿命增加了 54.9%;当 $R = 0.3$ 时,疲劳寿命增加了 33.5%;当 $R = 0.5$ 时,激光喷丸只使 CT 试样的疲劳寿命增加了 4%。由此可知,激光喷丸处理对较低应力比下 CT 试样疲劳寿命的增益效果更为明显。

不同应力比下激光喷丸前后的 Paris 公式 C, m 值变化如表 2 所示,从中可以看出,激光喷丸前后不

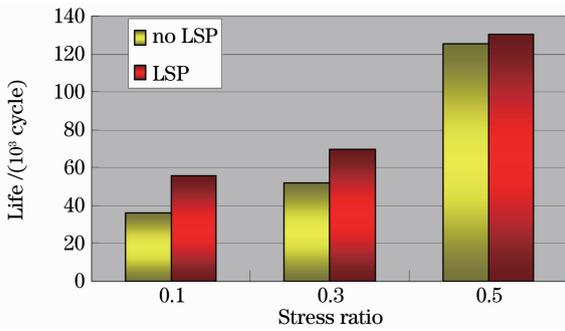


图9 不同应力比下 LSP 前后 CT 试样最终疲劳寿命对比

Fig. 9 Fatigue life of CTs with different stress ratios

同应力比下的 C 、 m 值是不同的。激光喷丸后,不同应力比下的 C 值均有所下降,而 m 值上升。其中当应力比 $R=0.1$ 时,激光喷丸后的 C 值降低了 24.1%, m 值增加了 1.24%; 应力比 $R=0.3$ 时,激光喷丸后的 C 值下降了 23.6%, m 值增加了 0.72%; 而当应力比 $R=0.5$ 时,激光喷丸后的 C 值降低了 7%, m 值则增加了 0.39%。这表明激光喷丸对较低应力比下 C 值, m 值的效果更明显。

表2 不同应力比下激光喷丸前后 Paris 公式中的 C 和 m 值的变化

Table 2 Fatigue performance for different stress ratios

Stress ratio	0.1		0.3		0.5		
	LSP	No	Yes	No	Yes	No	Yes
$C / 10^{-10}$	0.83	0.63	1.205	0.92	2.8	2.6	
m	3.431	3.453	3.454	3.479	3.06	3.072	

激光喷丸前后 CT 试样疲劳裂纹扩展速率曲线如图 10 所示。可以看出,在 ΔK 处于较小值时,经过激光喷丸后不同应力比下的裂纹扩展速率均有一定程度的降低。其中当应力比 $R=0.1$ 时,激光喷丸后的疲劳裂纹扩展速率比喷丸前有了明显的降低;当 $R=0.3$ 时裂纹扩展速率也有了一定的降低,但其效果没有 $R=0.1$ 时显著;而当应力比 $R=0.5$ 时,激光喷丸前后的疲劳裂纹扩展速率则变化不是特别明显。其中的原因是在激光冲击后残余应力场下,由于残余压应力场的存在导致了 ΔK 下降,而由(2)式可以看出, U 是与应力比有密切关系的参数,从而导致在不同应力比下 ΔK_{eff} 值的不同,造成不同应力比下激光喷丸对疲劳裂纹扩展效果影响的差异。

从图 10 还可以看出,当 ΔK 处于较大值时,相同应力比下,激光喷丸前后的裂纹扩展速率几乎相同,这是由于随着裂纹长度的增加,残余应力会产生松弛现象,从而产生高 ΔK 区域的疲劳裂纹扩展速

率几乎相同的结果。这与 Hatamleh 等^[14]对 7075-T7351 铝合金的激光喷丸强化实验的研究结果是一致的,从而也验证了有限元分析对于疲劳裂纹扩展过程预测的准确性。

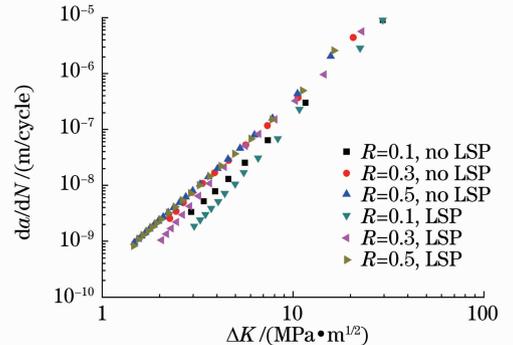


图10 不同应力比下激光喷丸前后裂纹扩展速率对比

Fig. 10 Fatigue crack growth rates with different stress ratios

4 结 论

通过对激光喷丸前后的 6061-T6 铝合金 CT 试样疲劳裂纹扩展寿命的数值模拟研究,可以得到如下结论:

1) 经过激光能量为 14.2 J, 光斑直径为 3 mm 的激光喷丸后,CT 试样的疲劳寿命的提高效率随应力比的增大而降低。当应力比 $R=0.1$ 时,CT 试样的疲劳寿命受激光喷丸的影响最大,疲劳寿命提高了 54.9%,而当应力比 $R=0.5$ 时,经过激光喷丸后,CT 试样的疲劳寿命只提高了 4%。

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,使激光喷丸后的裂纹最终长度大于喷丸前的裂纹扩展最终尺寸。

3) 当 ΔK 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,应力比越小,其抑制性越强,应力比越大,则其抑制裂纹扩展的效果越不明显,其原因是应力比较低时,残余压应力对裂纹闭合效应作用显著;当 ΔK 处于较大值时,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 ΔK 区域的疲劳裂纹扩展速率在激光喷丸前后几乎相同。

不同应力比下激光喷丸强化对疲劳裂纹扩展性能影响的有限元模拟,对相关实验的开展有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 P. Zhang, J. Lindemann, C. Leyens. Influence of shot peening on notched fatigue strength of the high-strength wrought

- magnesium alloy AZ80[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, **497**(1-2): 380~385
- 2 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 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
 - 3 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): 3323~3328
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): 3323~3328
 - 4 A. W. Warren, Y. B. Guo, S. C. Chen. Massive parallel laser shock peening: simulation, analysis, and validation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, **30**(1): 188~197
 - 5 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
 - 6 Zhou Jianzhong, Huang Shu, Zhao Jianfei *et al.*. Numerical analysis on fatigue properties of aluminum alloy induced by laser shock peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1735~1740
周建忠, 黄 舒, 赵建飞 等. 基于数值模拟的激光喷丸强化铝合金的疲劳特性研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1735~1740
 - 7 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. Engng. A*, 2007, (468-470): 171~175
 - 8 Zhou Jianzhong, Yang Xiaodong, Huang Shu *et al.*. Residual stress field of ZK60 specimen with central hole induced by both-side laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1850~1855
周建忠, 杨小东, 黄 舒 等. 双面激光喷丸强化 ZK60 镁合金的残余应力数值研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1850~1855
 - 9 Zou Shikun, Wang Jian, Wang Huaming *et al.*. Fatigue growth rate of laser shock processed metal sheet[J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(3): 188~191
邹世坤, 王 健, 王华明 等. 激光冲击处理金属板材后的裂纹扩展速率[J]. *激光技术*, 2002, **26**(3): 188~191
 - 10 C. Rubio-Gonzalez, J. L. Ocanab, G. Gomez Rosasa *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2004, **386**(1-2): 291~295
 - 11 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
 - 12 Zhou Chuanyao. 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 Zhao Jianfei, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Numerical simulation on fatigue crack growth of metal sheet induced by laser shot peening [J]. *Int. J. Mod. Phys. B*, 2009, **23**(6-7): 1646~1651
 - 14 Omar Hatamleh, Jed Lyons, Royce Forman. Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, **29**(3): 421~434