

文章编号: 0258-7025(2010)12-3192-04

# 激光冲击强化后 7050 铝合金疲劳寿命的数值模拟

张 洁 顾 祥\* 祝 乐 孙 爱 华

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 重点解决了激光冲击强化后试件的疲劳仿真,进一步深入研究了激光冲击强化对疲劳寿命的影响。对两组 7050-T7451 铝合金试件进行了拉拉疲劳试验,两组试件分为普通试件和激光冲击强化试件。试验结果表明,在 101.3 MPa 的加载应力水平下,两组平均疲劳寿命分别为 26024 和 108336 周次,疲劳寿命提高到原来的 416.3%。利用有限元软件对两组试件分别进行疲劳数值模拟。模拟结果显示,两种疲劳寿命分别为 25400 和 102870 周次,疲劳寿命提高到原来的 405%。试验结果和模拟结果符合得很好。研究表明,激光冲击强化后会在试件表层产生压应力,可以显著提高试件的疲劳寿命。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;疲劳寿命;数值模拟;7050 铝合金

中图分类号 TG665;TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103712.3192

## Numerical Simulation of Fatigue Life of 7050 Aluminum Alloy Processed by Laser Shock Processing

Zhang Jie Gu Xiang Zhu Le Sun Aihua

(Advanced Forming Technology Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** This paper mainly simulates the fatigue life of specimens treated by laser shock processing(LSP), and studies the effects of LSP on fatigue life. Two groups of 7050-T7451 aluminum alloy specimens pull-pull experiment are performed. One group of specimens is untreated, while another is treated. The results of experiment indicate that under the stress of 101.3 MPa, two groups of average fatigue life are 26024 and 108336 cycles respectively, raised to 416.3%. The results of numerical simulation indicate that two groups of average fatigue life are 25400 and 102870 cycles respectively, raised to 405%. The result of experiment agrees with that of numerical simulation quit well. The study shows that the residual stress is generated by LSP on the surface of specimen, thus the fatigue life increases obviously.

**Key words** laser technique; laser shock processing; fatigue life; numerical simulation; 7050 aluminum alloy

### 1 引 言

激光冲击处理是一种新兴的表面强化技术。经过激光冲击处理的试件,可以显著提高其疲劳寿命。目前,国内外研究的重点是激光冲击原理的研究和利用疲劳试验来研究激光冲击对于疲劳寿命的影响<sup>[1~4]</sup>。但是疲劳试验存在着试验周期长、成本高等缺点。随着有限元软件不断发展,功能不断增加,精度不断提高,利用有限元软件进行疲劳计算,

能够满足一定的要求。利用有限元软件来进行疲劳寿命的数值模拟<sup>[5,6]</sup>虽然取得了一定的成果,但是还未成熟,特别是激光冲击强化(LSP)后试件的疲劳数值模拟还需要进一步的研究。疲劳寿命的数值模拟不但可以节约试验以及研究成本,还可以进一步深入研究激光冲击对疲劳寿命的影响。本文利用有限元软件 Abaqus 和 MSC. Fatigue 对 7050 铝合金普通试件的拉拉疲劳寿命进行数值模拟,并且解

收稿日期: 2010-05-24; 收到修改稿日期: 2010-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(50735001)和江苏省高技术研究计划(BG2007033)资助课题。

作者简介: 张 洁(1964—),男,博士,教授,主要从事金属材料成形及表面工程等方面的研究。

E-mail: zhangjie\_ujs@163.com

\* 通信联系人。E-mail: gohand@163.com

决了激光冲击强化后试件的疲劳寿命的数值模拟。

用铝箔作为保护涂层,铝箔厚度为 0.1mm。冲击方式选为无重复单面处理和双面处理对比试验。为了效果的均匀性,采用圆形光斑,半圆搭接。激光冲击参数见表 1。

## 2 7050 铝合金的激光冲击强化和拉疲劳试验

根据工业化应用的需要选用水作为约束层,选

表 1 激光冲击参数

Table 1 Parameters of laser shock processing

Material	Power density / (GW/cm <sup>2</sup> )	Pulse period / ns	Spot diameter / cm <sup>2</sup>	Pulse energy / J
7050-T7451	2.91	20	0.09	12

疲劳试验在华东理工大学动力机械工程学院完成,试验机型号为 PLG-100 C 高频疲劳试验机。此次拉拉疲劳试验,最大拉力 4.71~5.75 kN,应力比  $R=0.1$ ,频率  $f=80$  Hz。

试验材料采用飞机上广泛使用的 7050-T7451 铝合金,试件分为两类:一类无激光冲击强化的普通试件;一类为激光冲击强化后的试件。试件的化学成分见表 2,试件样式见图 1。

表 2 试件材料的化学成分

Table 2 Chemical composition of specimen's material

Percentage (mass fraction %)											Al
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Zn	Ti	Others Single	Others Sum	
≤0.12	≤0.15	2.0~2.6	≤0.10	1.9~2.6	≤0.04	0.08~0.15	5.7~6.7	≤0.06	≤0.05	≤0.15	The rest

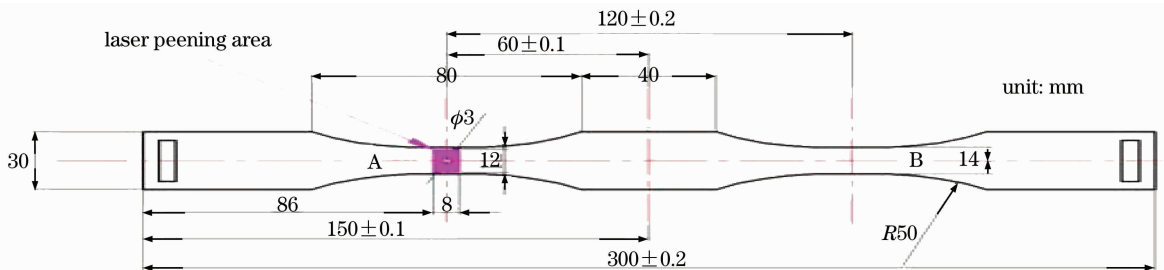


图 1 小孔试件和激光强化区域

Fig. 1 Specimen of keyhole and area of laser shock processing

对于处理后的试件,在 101.3 MPa 的应力水平下进行拉拉疲劳试验。双面冲击强化的疲劳性能与单面冲击强化相比,寿命反而有所下降。分析认为可能是由于试件较薄,反面冲击的效果与正面冲击的效果有一定的抵消。如果可以实现光纤分光,双面同时强化效果可能会提高。为了易于模拟激光冲

击强化和简化问题,这里只模拟单面激光冲击,也比较普通试件和单面冲击试件的疲劳寿命。所以只列出普通试件和单面冲击试件的疲劳寿命。

试件分为两组,每组各 6 个试件。在 101.3 MPa 加载应力水平下,试件的拉拉疲劳试验结果见表 3。

表 3 拉拉疲劳试验结果

Table 3 Pull-pull experimental result of different specimens

Processing status	LSP specimens						Unprocessed specimens					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Specimen No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fatigue life / cycle	93338	120000	81415	117021	131620	106622	25202	30466	22295	24205	29655	24324
Average / cycle	108336						26024					
Increase to / %	416.3						100					

### 3 疲劳寿命数值模拟方法

MSC. Fatigue 中计算疲劳寿命方法很多,每个方法都有其一定的适用范围。本次试件疲劳寿命属于低周疲劳,并且小孔处存在应力集中,所以采用应变-寿命(E-N)方法来计算试件的拉拉疲劳寿命<sup>[7~11]</sup>。

#### 3.1 激光冲击模拟

激光冲击模拟技术已经相当成熟,国内外也发表了很多相关论文<sup>[12~15]</sup>。由于这里的重点是疲劳仿真模拟,所以简单描述其过程:1)建立模型和网格划分。由于试件为对称结构,只需建立近似 1/8 模型。在 Abaqus/CAE 中建立模型,网格划分并对小孔周围进行了细分,整个模型的网格数量为 67170 个;2)输入材料的物理参数。弹性模量  $E=70.3$  GPa,泊松比  $\nu=0.33$ ,强度极限  $U_{TS}=500$  MPa,弹性极限  $H_{EL}=790$  MPa;3)施加冲击波压力载荷和边界条件。将冲击波压力简化为周期 60 ns,峰值压强为 1.66 GPa 的三角波;4)设置分析类型和求解。在 Abaqus/Explicit 模块中选择动态分析,求出一个周期的冲击波产生的残余应力;5)应力回弹。冲击波冲击靶材产生的应力波会在靶材内部发生反射和相互作用。为了获得稳定的残余应力,需要在 Abaqus/Standard 模块中进行隐式分析,从而获得静态平衡下的残余应力场。如图 2 所示,最大压应力为 269 MPa;6)导入 MSC. Fatigue。在 Abaqus 里计算得到后缀为 .odb 文件,然后导入时将 MSC. Fatigue 中的分析代码设置为 Abaqus,可以直接将上述文件导入 MSC. Fatigue 中。

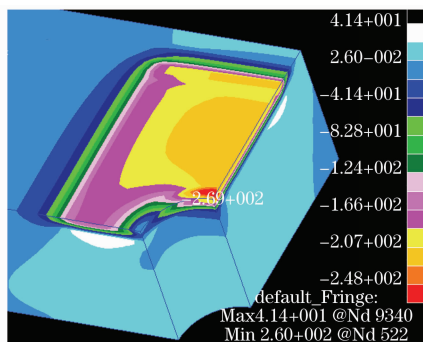


图 2 激光冲击后的残余应力图

Fig. 2 Residual stress after laser shock processing

#### 3.2 最大载荷线性应力图

为了计算疲劳寿命,根据 MSC. Fatigue 的要求,需要输入试件的最大载荷状态下的线性应力图。由于 101.3 MPa 加载应力水平是指加载在小孔中间截面的应力水平,为了便于求得最大载荷线性应

力图,将载荷转化为加载在试件端面的载荷,最大载荷为 67 MPa。求解得出最大载荷线性应力图如图 3 所示。

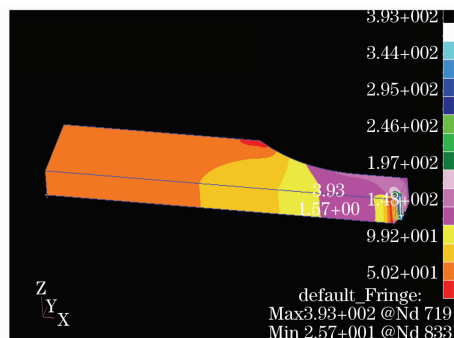


图 3 最大载荷线性应力图

Fig. 3 Linear stress diagram of maximum load

#### 3.3 在 MSC. Fatigue 中的后处理

为了计算试件的拉拉疲劳寿命,需将图 2,3 所示的应力状态文件导入 MSC. Fatigue 作为初始应力条件。将分析类方法设置为 E-N 方法,输入载荷曲线,7050-T7451 铝合金的应力应变曲线和应变寿命曲线。

##### 3.3.1 计算没有激光冲击强化试件的疲劳寿命

由于小孔是试件破坏的关键区域,为了便于查看结果,对小孔周围局部放大,截取了小孔周围的寿命云图如图 4 所示。图 4 中所显示的是疲劳寿命(单位:s)对数值。最终转化为周期为 25400 周次,和试验疲劳寿命的误差为 2.4%。图中灰色区域是试件疲劳寿命最低区域,说明试件将最先在该区域出现裂纹,最先失效,与试件的实际断裂情况相符合。

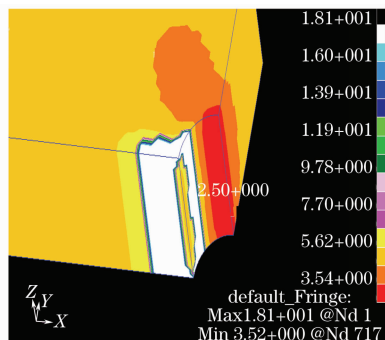


图 4 普通试件的疲劳寿命云图

Fig. 4 Fatigue life of normal specimen

##### 3.3.2 计算激光冲击强化后试件的疲劳寿命

计算出的疲劳寿命云图如图 5 所示。试件表层的疲劳寿命最低点的寿命转化周期为 102870 周次,寿命提升了 405%,和试验寿命的误差为 5%。仿真结果显示,试件最低疲劳寿命有所降低。原因是由

于试件经过激光冲击后,会在试件表层产生负值残余应力即压应力,超过一定的深度就会变成数值不大的正值残余应力即拉应力。在拉拉疲劳试验时,会在残余应力正负交界处产生微裂纹。但是由于试件在激光冲击强化后,表层位错会明显增加。尽管在试件内部会产生微裂纹,由于位错的增加而无法扩展至表层,所以研究激光冲击强化试件的疲劳寿命,主要是看强化后的试件的表层疲劳寿命。

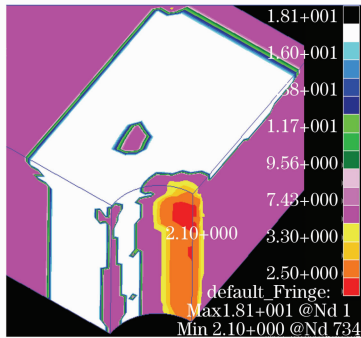


图 5 激光冲击试件的疲劳寿命云图

Fig. 5 Fatigue life of specimen processed by laser shock processing

## 4 结 论

激光冲击强化会在试件表层产生压应力,并且增加表层位错,从而提高试件的疲劳寿命。拉拉疲劳试验显示,在 101.3 MPa 的加载应力水平下,普通试件和激光冲击强化试件的平均疲劳寿命分别为 26024 和 108336 周次,疲劳寿命提高到原来的 416.3%。实现了激光冲击强化后试件的疲劳寿命的数值模拟。模拟结果显示,在 101.3 MPa 的加载应力水平下,普通试件和激光冲击强化试件的平均疲劳寿命分别为 25400 和 102870 周次,疲劳寿命提高到原来的 405%。试验结果和模拟结果相符合,验证了模拟仿真的可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 Chen Ruifang, Sang Yi, Wu Jingwei *et al.*. Experiment and numerical simulation of laser shock processing in 7050 aluminum alloy [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2009, **30**(2): 113~117  
陈瑞芳, 桑毅, 武敬伟等. 7050 铝合金激光冲击强化的试验和数值模拟[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2009, **30**(2): 113~117
- 2 Wang Shengbo, Fan Yong, Wu Hongxing *et al.*. Research of strengthening 7050 aerial aluminum alloy structural material with laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 125~128  
王声波, 范勇, 吴鸿兴等. 7050 航空铝合金结构材料激光冲击强化处理研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 125~128

- 3 Zhang Yongkang, Zhang Shuyi, Zhang Xiaorong. Investigation of the surface qualities of laser shock-processed zones and the effect on fatigue life of aluminum alloy [J]. *Surf. Coat. Tech.*, 1997, **92**(1-2): 104~109
- 4 X. C. Zhang, Y. K. Zhang, J. Z. Lu *et al.*. Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, **527** (15): 3411~3415
- 5 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. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1735~1740
- 6 Du Haiming, Zhou Xun, Yu Xiaoli *et al.*. Simulation of fatigue life of diesel engine cylinder block based on finite element analysis [J]. *Neiranji Gongcheng/Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2009, **30**(4): 48~51
- 7 Zhou Chuanyue, Zheng Hongxia, Luo Huiqiang. Applications and Examples of Fatigue Analysis on MSC. Fatigue [M]. Beijing: Science Press, 2005  
周传月, 郑红霞, 罗慧强. MSC. Fatigue 疲劳分析应用与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 8 S. K. Visvanatha, P. V. Straznicki, R. L. Hewitt. Influence of strain estimation methods on life predictions using the local strain approach [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, **22**(8): 675~681
- 9 M. Knop, R. Jones, L. Molent *et al.*. On the Glinka and Neuber methods for calculating notch tip strains under cyclic load spectra [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, **22**(9): 743~755
- 10 Ren Xudong. Study on the Mechanism of Crack Closure and Surface Hardening Characteristics Based on the Laser Shock Processing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010  
任旭东. 基于激光冲击机理的裂纹面闭合及强化特性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010
- 11 Zhao Jianfei, Zhou Jianzhong, Huang Shu *et al.*. Numerical simulation on fatigue crack growth of AZ31B magnesium alloy by laser shot peening [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, **12**: 117~119  
赵建飞, 周建忠, 黄舒等. AZ31B 镁合金激光喷丸强化后疲劳裂纹扩展的数值模拟研究 [J]. *机械设计与制造*, 2009, **12**: 117~119
- 12 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
- 13 Shang Deguang, Wang Ruijie. Fatigue life prediction based on dynamic response finite element simulation for spot-welded joint [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(5): 49~53
- 14 Zou Shikun, Tan Yongsheng, Guo Dahao *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of Al-Li alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 371~373  
邹世坤, 谭永生, 郭大浩等. 激光冲击处理对铝锂合金力学性能的影响 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 371~373
- 15 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