

文章编号: 1001-3806(2010)04-0482-04

激光喷丸强化 CT 试样疲劳裂纹扩展的数值研究

叶鸿伟, 周建忠*, 黄舒, 杨小东, 戴亚春, 黄娟
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了研究激光喷丸强化对疲劳裂纹扩展的影响, 采用有限元分析软件 ABAQUS 和 MSC. Fatigue 相结合, 以 6061-T6 铝合金 CT 件即紧凑拉伸试样为研究对象, 数值模拟其经 1 次~3 次激光双面喷丸处理后的残余应力大小、疲劳寿命、裂纹扩展速率及最终裂纹尺寸。在理论分析的基础上, 建立面向抗疲劳制造的激光喷丸工艺有限元分析模型, 首先在 ABAQUS 中模拟出激光喷丸诱导的残余应力场, 再将其导入疲劳分析软件 MSC. Fatigue 进行激光喷丸后疲劳裂纹扩展及其性能的数值模拟分析。结果表明, 激光喷丸处理可以有效抑制疲劳裂纹的扩展, 降低裂纹扩展速率和增大最终断裂尺寸长度, 从而达到延长疲劳寿命的目的, 喷丸次数的增加在一定程度上增大了激光喷丸强化的效果, 但增益的效果会减弱。这为激光喷丸强化抗疲劳制造的理论分析和后续试验提供了必要的依据。

关键词: 激光技术; 疲劳裂纹扩展; 数值模拟; 喷丸强化; 残余应力

中图分类号: TN249; TG665

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.014

Numerical study on fatigue crack growth of CT specimens treated by laser shot peening

YE Hong-wei, ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, YANG Xiao-dong, DAI Ya-chun, HUANG Juan
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to investigate the effect of laser shot peening upon the growth of fatigue cracks, definite element analysis softwares, i. e., finite element analysis code ABAQUS and MSC. Fatigue were used to simulate the distribution of compressive residual stress, the fatigue life, rate of crack growth and the size of final crack with different laser peening times from one to three on compact tension (CT) specimens of 6061-T6 aluminum alloy. Based on theoretical analysis, the forecasting model of fatigue life for laser shot peening (LSP) process was established. The residual stress field induced by LSP was analyzed with ABAQUS code firstly, and then the stress field model was imported into MSC. Fatigue code for the crack growth analysis. It showed that LSP could effectively inhibit the crack growth, decrease the rate of crack growth as well as the size of final crack, and then the fatigue life was extended. The increase of peening times could increase the effect of LSP to some extent. However, the effect gradually became weak. The results afford a foundation for theoretical analysis and experiments about the effect of laser shot peening upon the growth of fatigue cracks.

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

引言

工程应用中疲劳断裂破坏占力学破坏的 50%~90%^[1], 是机械失效的主要形式。表面强化技术作为提高材料疲劳性能的方法之一, 目前正逐步发展起来, 主要有喷丸强化、化学热处理、表面淬火等。其中新兴的激光喷丸强化工艺 (laser shot peening,

LSP) 更是显示了在抗疲劳制造方面的潜力, 其利用高功率密度 (大于 GW/cm^2)、短脉冲 (几十纳秒) 的强激光对金属靶材表面冲击所诱导的高幅冲击波压力使材料表层产生塑性屈服, 不均匀的塑性应变导致了材料表面晶粒的细化、硬度的提高, 同时形成残余压应力场, 此表面状态可以消除材料由于机械加工、热处理或焊接等形成的表面拉应力, 从而提高金属零件机械性能^[2-5]。

为分析激光喷丸对材料疲劳性能的影响机理, 国内外一些学者对激光喷丸试样的疲劳性能进行了部分实验研究。然而激光喷丸工艺涉及到激光工艺参量和零件几何尺寸等众多因素^[6], 若对每一种影响因素进行实验研究和验证, 不仅耗时耗力, 而且各种因素之间的相互影响和关系很难在同一个实验中

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675090); 江苏省 2008“青蓝工程”资助项目; 江苏大学研究生创新基金资助项目 (CX09B_07XZ)

作者简介: 叶鸿伟 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

收稿日期: 2009-08-18; 收到修改稿日期: 2009-09-08

得以体现;同时在实际生产及应用中,不可能对所有构件进行破坏性疲劳试验以检验强化效果。有限元模拟不仅计算分析方便,而且能适应各种复杂形状,因而成为行之有效的工程分析手段。本文中采用数值模拟方法对激光喷丸诱导的残余应力进行分析并对喷丸后的疲劳裂纹扩展性能进行预测,得到激光喷丸工艺对材料疲劳特性的影响,为激光喷丸强化抗疲劳制造的理论分析和后续试验提供了必要的依据。

1 疲劳裂纹扩展理论

疲劳裂纹扩展理论主要用于估算疲劳寿命,利用其可以算出从疲劳裂纹扩展到临界裂纹的疲劳寿命。目前疲劳裂纹扩展有数十种公式,其中 PARIS 的应力强度因子理论能够与试验结果较好地符合。PARIS 在应力强度因子中综合考虑了裂纹尖端的应力和应变场强度因素,并提出在工程界广泛采用的疲劳裂纹扩展速率经验公式^[7]:

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

式中, a 是裂纹长度, N 是疲劳循环周数; $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 为应力强度幅值, K_{max} 和 K_{min} 分别是对应于最大载荷 p_{max} 和最小载荷 p_{min} 的最大和最小应力强度因子; C 为 Paris 准则系数; m 为材料常数,对于金属材料, $m = 2 \sim 7$,对于绝大多数金属来说, $m = 2 \sim 4$ 。

2 有限元建模

2.1 激光喷丸强化后疲劳裂纹扩展的分析方法

激光喷丸后疲劳裂纹的扩展性能分析基于喷丸后的残余应力场而进行,因此,分析由以下两个部分构成:激光喷丸强化诱导的残余应力场模拟和疲劳裂纹扩展性能数值分析。首先,在 ABAQUS 中进行试样的静态模拟和激光喷丸模拟,得到静态加载后的应力分布以及喷丸之后的残余应力场分布,再将应力/应变分析结果连同几何信息,一起导入疲劳分析扩展模块中承受周期载荷。根据实际使用环境中的应力状态确定疲劳载荷历程,定义材料特性。接着利用其中基于线弹性断裂力学裂纹扩展模块进行疲劳裂纹扩展性能的分析。在 ABAQUS 软件中,可分别实现未强化和经过喷丸强化处理后的试样有限元分析,同时可以进行不同工艺参量条件下的激光喷丸强化过程的模拟,将上述结果导入疲劳分析软件 MSC. Fatigue 可用于进行疲劳裂纹扩展性能的对比。试样激光喷丸强化后疲劳裂纹扩展性能分析流程如图 1 所示。

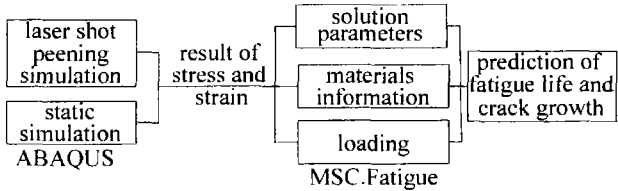


Fig. 1 Analysis process of fatigue

2.2 材料试样的选择及其有限元模型

数值模拟采用的材料为 6061-T6 铝合金,材料性能参量为:屈服强度 299MPa,抗拉强度 356MPa,泊松比 0.33,弹性模量 72GPa。其在汽车、航空航天领域具有广泛的应用,通常受到交变载荷的作用,易引起疲劳失效破坏。用于疲劳裂纹扩展研究的试样一般为紧凑拉伸(compact tension, CT)试样,由于该试样尺寸符合标准,易于取得准确的试验数据,并且利于进行其它分析,因而本试验中选用了 CT 试样,试样尺寸如图 2 所示。

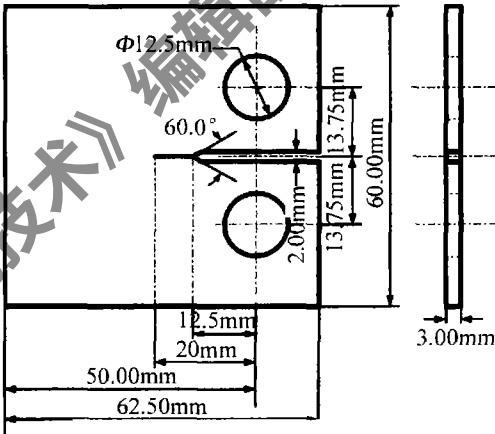


Fig. 2 CT specimens

试样有限元分析模型如图 3 所示,考虑激光喷丸

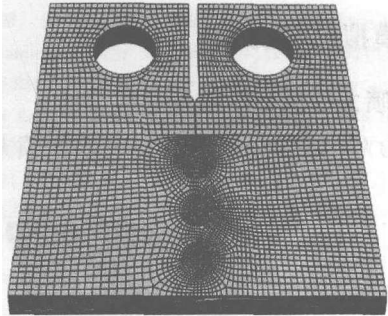


Fig. 3 Finite element analysis mode

过程中冲击波压力的高应变率加载特征,选用 C3D8R (8 节点六面体线形减缩积分) 单元。由于实验试样的疲劳裂纹扩展的发生区域一般为预制裂纹尖端,故考虑激光双面喷丸处理部位为裂纹尖端等间距的 3 个圆形(光斑大小)区域,处理后在裂纹扩展路径上形成强化区域。将未喷丸试样与喷丸 1 次,2 次及 3 次后的试样预制裂纹尖端的裂纹扩展特性进行对比分析。

2.3 激光冲击压力的时空加载

研究表明,在激光冲击波作用的时间其压力峰值

是随着时间不断变化的^[3],并且空间上在光斑范围内为高斯分布,在模拟中,建立激光喷丸的时空分布加载模型如下式所示:

$$f(x,y) = \exp[-(x^2 + y^2)/(2R^2)] \tag{2}$$

$$p = p_{\max} \times f(t) \times f(x,y) \tag{3}$$

式中, R 为光斑半径 (mm), $p_{\max}$ 为最大峰值压力 (MPa), $f(t)$ 为时间振幅曲线的时间系数, $f(x,y)$ 为高斯分布的空间位置的函数。在 ABAQUS 加载过程中,采用峰值压力 3GPa,光斑直径 6mm,喷丸压力作用时间 70ns,对裂纹近尖端的等间距 3 个圆形(光斑大小)区域进行双面不同次数的激光喷丸强化。

2.4 疲劳求解参量的设置

首先进行总体设置,其分析类型为裂纹扩展,并以节点应力分析结果为研究对象,在拉-拉载荷下,试样的有效寿命分为裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命两个部分。裂纹萌生寿命大约在 2 个~5 个晶粒之内^[8-9],即约 100μm~250μm,占全部寿命的 70%~90%。在裂纹萌生以后,裂纹扩展的时间很短,当裂纹达到断裂韧性时,会迅速导致试件失稳断裂。几何尺寸定义中选择标准试样,试样初始裂纹尺寸 a_0 值取 0.1mm,研究从 0.1mm 开始的裂纹扩展过程中激光喷丸诱导的残余应力的影响效果。对于静态分析和激光喷丸后的模型,在疲劳裂纹扩展模拟使用正弦函数波形,应力幅值 $p_{\max} = 50\text{MPa}$,频率 $f = 10\text{Hz}$,应力比 $R = 0.1$ 的拉-拉载荷,试验环境为大气条件和室温。

3 数值模拟结果分析

3.1 激光喷丸后的数值模拟结果分析

图 4 为 CT 试样经过 3 次激光双面喷丸后的残余

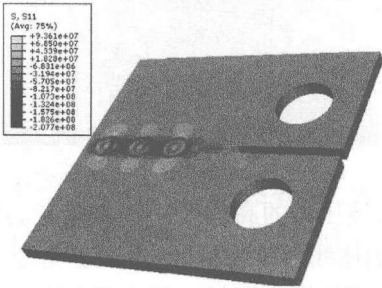


Fig. 4 Residual stress contours of CT specimens after three times double-sided LSP

应力云图,可以发现,试样表面最大残余压应力达到 -207.7MPa,激光喷丸在预制裂纹两侧产生了残余压应力,裂纹近尖端激光光斑大小区域产生残余压应力场,与未喷丸试样相比,裂纹尖端应力集中现象得到明显改善,有效地抑制裂纹进一步扩展。

3.2 疲劳寿命数值模拟结果分析

随着疲劳裂纹的不断增长,得到总裂纹增长曲线如图 5 所示,从图中可以看出,随着循环次数的增加,

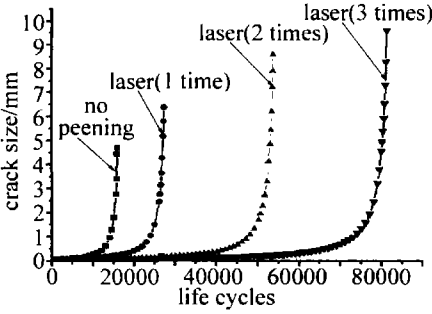


Fig. 5 Relationship between fatigue life and crack length with different peening times

裂纹不断扩展,裂纹尺寸增长;激光喷丸后的试件疲劳裂纹、疲劳寿命及最终破坏时的裂纹尺寸都得到了明显提高,可见,由于激光喷丸诱导产生了局部残余压应力,导致裂纹扩展区域的实际受载水平降低,使得材料在裂纹扩展路径上得到强化,抑制了疲劳裂纹的扩展,提高了疲劳寿命;激光喷丸后的试件裂纹增长曲线向右侧偏移,最终达到断裂韧性时的裂纹尺寸得以增大,这与 HATAMLEH^[8]的分析结果相一致。因此,可将激光喷丸强化提高疲劳裂纹扩展寿命的原因归纳为如下两个部分:裂纹增长速度的下降和最终断裂尺寸的增大。

根据断裂力学理论,疲劳性能可通过疲劳裂纹扩展速率来表征^[10]。疲劳裂纹扩展速率是决定构件疲劳行为的重要特征参量,在评估结构的安全性、可靠性及失效分析和寿命等方面有着重要的意义。将模拟得到的数据绘制成疲劳裂纹扩展速度 da/dN 对于应力强度因子范围 ΔK 的坐标图,见图 6。可以看出,激光

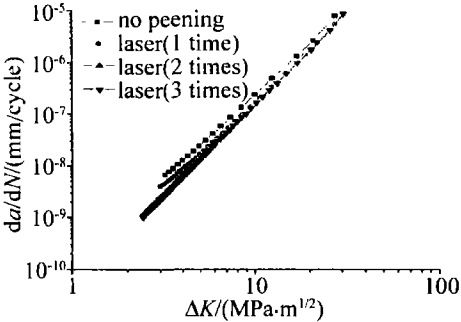


Fig. 6 Relationship between fatigue crack growth rates and ΔK with different peening times

喷丸强化后的拟合直线仍然呈线性分布,因此,激光喷丸强化之后的疲劳裂纹增长仍然符合 Paris 公式。在应力强度因子幅值比较低的情况下,疲劳裂纹扩展速度得到了明显的降低,而在高应力强度因子幅值范围内的裂纹扩展速度降低不明显,这与 HATAMLEH^[8]对 7075-T7351 铝合金的激光喷丸强化实验的研究结果是一致的,从而进一步验证了有限元分析对于疲劳裂

纹扩展过程预测的准确性。

3.3 喷丸次数对裂纹扩展性能的影响

采用不同的喷丸次数,得到如表 1 所示的结果列表。可以看出,激光诱导的残余应力最大值随着激光喷丸次数的增加,从 -114.3MPa 增长到 -207.7MPa,疲劳寿命也从 15938 周次增大到 81468 周次,但增长幅度都随喷丸次数增加而逐渐减弱,这可能是由于随着喷丸次数的增加,试样的塑性变形深度变化较小,近表面的塑性变形已经饱和。同时可以发现,残余应力增大导致最终破坏时的裂纹尺寸也从 4.714mm 增大

到 10.16mm,这也使裂纹扩展寿命在一定程度上得以增加。

采用模拟得到的数据可求解 Paris 公式的系数,表 1 显示了通过计算得到的强化前后的 C 和 m 值。可见,在残余压应力场存在情况下的疲劳裂纹扩展过程,其扩展规律仍然服从传统的 Paris 规律,只是由于残余应力场的存在,使公式中的系数 C 降低,而 m 值增大,在对数图中 m 为拟合直线段的斜率, C 值的降低使初始同等应力强度因子范围内的裂纹扩展速度下降, m 的增大使直线与原来的曲线越来越接近。

Table 1 The results of fatigue life after different LSP times

peening times	residual stress/MPa	fatigue life/cycle	final crack length/mm	C	m
0	0	15938	4.714	1.2624518E-10	3.316040021
1	-114.3	27172	6.376	0.845279E-10	3.323538803
2	-177.2	53587	8.59	0.5381977E-10	3.515742879
3	-207.7	81468	10.16	0.4352891E-10	3.606079691

4 结 论

通过对激光喷丸处理后的 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)激光喷丸处理是一种有效抑制裂纹扩展的方法,其诱导的残余压应力可以大幅增加 CT 试样的疲劳寿命。

(2)最终断裂时疲劳裂纹的尺寸和疲劳裂纹扩展速度与疲劳寿命有着密切的关系,在同等条件下,增加最终断裂尺寸和降低裂纹扩展速度,能延长试样的疲劳寿命,而激光喷丸产生的残余压应力能增加最终断裂尺寸和降低裂纹扩展速度。

(3)喷丸次数的增加在一定范围内可以增加表面残余压应力,也就是增加激光喷丸强化的效果,最后达到延长疲劳寿命的目的,但随着喷丸次数的增加,增益效果会减弱。

参 考 文 献

[1] CHENG Y R, MIAO L X, HOU B L. Fatigue strength [M]. Beijing: China Railway Press, 1992: 12-45 (in Chinese).
[2] VACCARI J A. Laser shock extends fatigue life [J]. American Ma-

chinist, 1992 (7): 62-64.
[3] WARREN A W, GUO Y B, CHEN S C. Massive parallel laser shock peening: simulation, analysis, and validation [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30 (1): 188-197.
[4] MASAKI K, OCHI Y, MATSUMURA T. Effects of laser peening treatment on high cycle fatigue properties of degassing-processed cast aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2007, A468/470: 171-175.
[5] 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, 2006, A435/436 (5): 12-18.
[6] SUN Y Q, ZHOU J Zh, LIANG Q L, et al. Optimization of laser peening parameters using Taguchi method [J]. Laser Technology, 2008, 32 (4): 377-379 (in Chinese).
[7] WANG M. Principle and technology of anti-fatigue manufacturing [M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1998: 41-52 (in Chinese).
[8] HATAMLEH O, LYONS J, FORMAN R. 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 (26): 421-434.
[9] RUBIO-GONZÁLEZ C, OCAÑA J L, GOMEZ-ROSAS G, et al. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2004, A386 (1/2): 291-295.
[10] HUO L X. Fracture behavior and evaluation of welding structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 350-360 (in Chinese).