

文章编号: 0258-7025(2008)11-1735-06

# 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析

周建忠 黄舒\* 赵建飞 蒋素琴 朱银波 杨建凤

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 激光喷丸强化(LSP)是一种基于冲击波力效应的非传统抗疲劳制造技术,目前关于激光喷丸强化的研究大多集中在机制和实验上。由于激光冲击过程是一个复杂的热力耦合过程,涉及的因素较多,实验方法难于全面理解各种参数对激光喷丸效果的关联影响。介绍了典型的激光喷丸强化过程的数字化分析方法,以有限元分析工具ABAQUS和MSC.Fatigue为平台,通过编制激光冲击波加载模块,解决了数据流传递中的接口问题。以2024-T3航空铝合金试样为例,对激光喷丸强化过程中激光冲击波的传播、残余应力大小以及疲劳特性行为等进行了数值分析,并对激光喷丸强化的疲劳寿命进行了预测,建立起了激光冲击波压力-残余应力-疲劳寿命之间的数字化分析方法,实现了激光喷丸过程和喷丸效果评价的可视化。

**关键词** 激光技术;喷丸强化;数值模拟;疲劳特性;残余应力

**中图分类号** TN 249;TG 665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1735

## Numerical Analysis on Fatigue Properties of Aluminum Alloy Induced by Laser Shock Peening

Zhou Jianzhong Huang Shu Zhao Jianfei Jiang Suqin Zhu Yinbo Yang Jianfeng

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

**Abstract** Laser shock peening (LSP) is a non-traditional anti-fatigue manufacturing technology based on mechanical effect of laser shock wave. Up to now, research on LSP mostly focuses on mechanism and experiment, whereas experimental method is hard to achieve comprehensive understanding on the correlative influence of various parameters to the effect of LSP. A numerical analysis method on typical LSP process is introduced, FEA code ABAQUS and MSC.Fatigue are used as platforms, laser shock loading module is programmed to solve the interface problem of data transfer. Taking 2024-T3 aluminum alloy samples for example, propagations of laser shock wave, size and distribution of compressive residual stress as well as the fatigue properties are studied by numerical analysis technique, and the fatigue life with LSP is predicted. The relationship between laser shock wave pressure, residual stress and fatigue life is established by digital analysis method. Visualization of LSP process and evaluation of peening effect could be achieved.

**Key words** laser technique; shock peening; numerical simulation; fatigue properties; residual stresses

## 1 引言

利用高能激光诱导的冲击波压力对材料表面进行改性,以提高零件的抗疲劳和应力腐蚀等性能,是当今国内外相关学者研究的热点和前沿,即为已得到公认的激光冲击处理,因其强化原理类似机械喷丸,也形象的称为激光喷丸<sup>[1]</sup>。目前,有关激光冲击波技术应用的研究十分广泛,主要体现在两个方面:一是工程应用研究,集中在激光喷丸强化(LSP)工

艺方面的大量实验,以获得改善金属零部件抗疲劳性能的规律;二是理论基础研究,追求深入理解激光喷丸的物理过程,冲击波和材料相互作用的机制和模型的建立等<sup>[2,3]</sup>。

影响激光喷丸强化效果的因素众多,涉及激光参数、喷丸工艺及参数和材料性能等,为此国内外学者开展了各种不同条件下激光喷丸强化的实验探索,并对实验结果进行了各种检测和分析,获得了一

收稿日期:2008-09-16;收到修改稿日期:2008-10-13

基金项目:国家自然科学基金(50675090)和国家自然科学基金重点基金(50735001)资助项目。

作者简介:周建忠(1964—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术研究。E-mail:zhoujz@ujs.edu.cn

\*通信联系人。E-mail:huangshu5188@163.com

定的进展和成果<sup>[4,5]</sup>。但由于激光喷丸过程是一个复杂的热力耦合过程,涉及激光诱导等离子体冲击波的产生和传播,冲击波压力对靶材的动态加载方式,靶材的力学响应及微观塑性变形,高应变率下残余应力产生等,这给 LSP 定量深入研究,特别是强化过程控制带来难度:一是至今尚无精确有效的手段用于检测冲击波压力的时空分布及其在靶材中的传播;二是大量的实验不但花费人力、时间和费用,而且因实验条件不同,导致结果的重复性和一致性较差。

随着数值模拟分析技术的发展,功能强大的 CAE 分析软件给激光冲击加载下靶材的完整性和变形特性及力学行为的数字化分析研究提供了条件。目前,有关激光喷丸强化数值模拟方面的研究,国内外已有文献报道,但主要集中在单点单次和多次激光喷丸下的二维/三维残余应力场<sup>[6~8]</sup>,激光喷丸后残余应力场的分布和材料表面的塑性变形<sup>[9~11]</sup>,以及多次激光喷丸下的光斑尺寸和喷丸间距对应力和应变的影响<sup>[12]</sup>等方面。但对于多点多次激光冲击波加载下的冲击波传播及其残余应力研究涉及很少,而激光多点连续喷丸的残余应力及其疲劳特性的数值分析研究目前尚未见报道。

本文基于 ABAQUS 和 MSC. Fatigue 软件平台,通过激光喷丸强化的有限元建模,编制专用的激光冲击波压力及其加载子程序模块,进行激光多点连续冲击动态过程的分析,建立起研究激光冲击波压力—残余应力—疲劳特性之间的数字化分析方法。

## 2 分析模型建立

激光喷丸强化的数值分析模型包括:1) 脉冲激光能量的时空分布模型,这是激光冲击波加载的前提,由于实验中一般采用的脉冲激光为高斯型分布,数值分析中采用的激光束三维分布如图 1 所示;2) 分析试样材料及其几何尺寸,主要讨论残余应力及其疲劳特性,为此采用典型的拉伸疲劳试样为分析对象,如图 2 所示;3) 有限元模型及网格划分,激光喷丸强化时,由于采用圆形激光光斑对中心孔周围进行喷丸处理,可以认为结构和载荷是完全对称的,因而可以取模型的 1/4 进行模拟分析。由于在交变载荷下,疲劳源多沿中心孔边缘处萌生,因此中心孔处的应力状态是我们关心的重点。所以把模型再简化为中心孔处附近区域的 1/4 模型进行分析,如图 3 所示;4) 激光冲击波压力的时空加载模型,主要

解决冲击波峰值压力和作用时间问题,具体描述参见文献<sup>[12~14]</sup>。

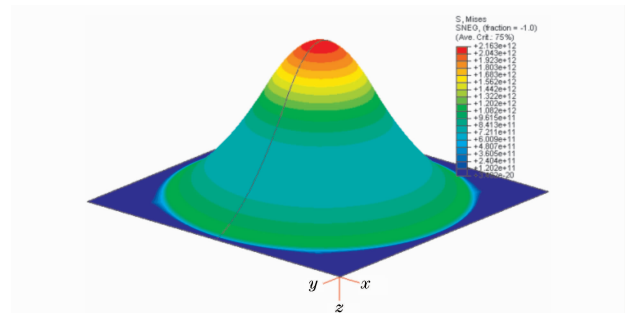


图 1 激光束三维准高斯分布图

Fig. 1 Three-dimensional (3D) Gaussian distribution of laser pulse

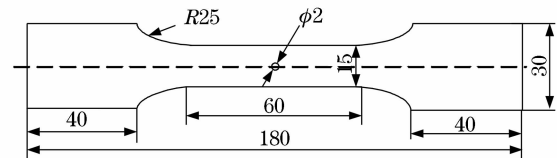


图 2 分析试样的几何尺寸

Fig. 2 Specimen geometric contour

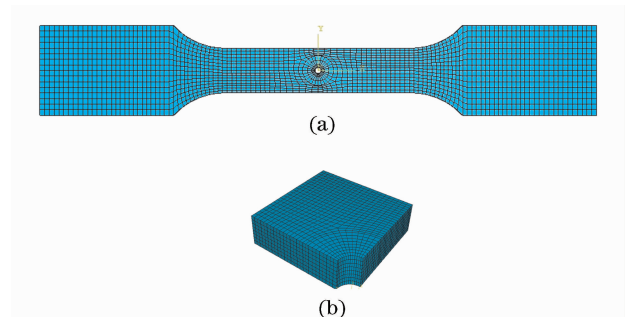


图 3 有限元分析模型

(a) 试样网格划分;(b) 1/4 模型

Fig. 3 Finite element analysis model

(a) specimen gridding; (b) a quarter of modelling

基于数值模拟的激光喷丸强化疲劳性能的分析过程主要分成三个步骤。第一步使用显式算法模块 ABAQUS/Explicit 模拟激光在材料中产生的高幅冲击波及其传播。由于在靶材中传播的各种冲击波发生反射和相互作用,为使靶材获得饱和的塑性变形,需要比压力脉冲持续时间更长的分析时间。第二步是确定冲击波加载下在材料中诱导的残余应力场,即把瞬时动态应力状态导入到隐式算法模块 ABAQUS/Standard 中进行隐式分析,从而确定在静态平衡下的残余应力场。在模拟多次激光喷丸的过程中,前次喷丸得到的残余应力和应变保持在材料中成为下次喷丸的初始应力和应变,并把每次喷丸获得的残余应力在 ABAQUS/Standard 中进行

静态平衡分析。模拟得到的结果传递到 ABAQUS/Viewer 中进行后处理。第三步,将在 ABAQUS 中产生的模型信息导入 MS. Fatigue 中,进行全寿命疲劳分析,需要输入材料信息、载荷信息和几何信息,详细描述材料和部件的循环疲劳特性,它可以由 MSC. Fatigue 材料数据库管理器 PFMAT 生成,模拟采用的材料为 2024-T3,输出材料的  $S-N$  曲线如图 4 所示。分析采用的载荷参数为:轴向加载,最大载荷  $P = 3.6 \text{ kN}$ ,应力比  $R = 0.1$ ,试验频率  $f = 14 \text{ Hz}$ ,载荷曲线如图 5 所示。

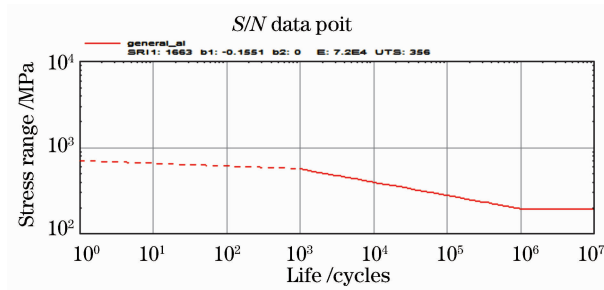


图 4 2024-T3 的  $S-N$  曲线  
Fig. 4  $S-N$  curve for 2024-T3

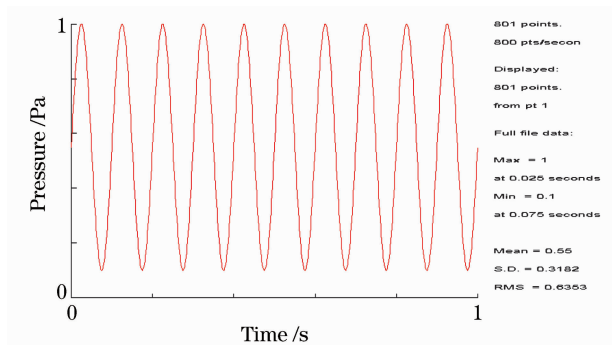


图 5 压力载荷曲线  
Fig. 5 Loading curve

### 3 激光冲击波的传播及衰减特性

选择和实验研究中常用的激光参数:束斑  $6 \text{ mm}$ ,脉冲能量选择  $35 \text{ J}$ ,脉冲宽度为  $23 \text{ ns}$ ,功率密度  $1.5 \text{ GW/cm}^2$  左右。分析结果如图 6 所示,可以看出随着时间的推移,激光冲击波 (LSW) 不断向材料内部移动,且在冲击波传播过程中,其峰值不断减小,说明冲击波在材料中是衰减传播的。拟合各曲线的峰值,得到冲击波峰值衰减曲线如图 7 所示。根据 Bodner-Partom 的将宏观连续的经典理论与微观的位错运动理论相结合的无屈服本够理论,在其模型中,对应变与应力之间的关系采用指数型形式,可以得到冲击波的衰减规律形式为:  $P(x) = ae^{-bx}$ 。为了加载的连续性,采用美国 Los Alamos 国家实

验室 C. R. Phipps 等<sup>[15]</sup>建议的形式,将不同能量下的激光冲击波峰压  $P_{\max}$  在某一个选定的标准能量下进行归一化处理。其中峰压  $P_{\max}$  与功率密度  $I_0$  之间的关系满足:  $P_{\max} \propto I_0^{3/4}$ ,表明模拟后对冲击波峰值的拟合曲线符合理论分析的指数衰减形式。

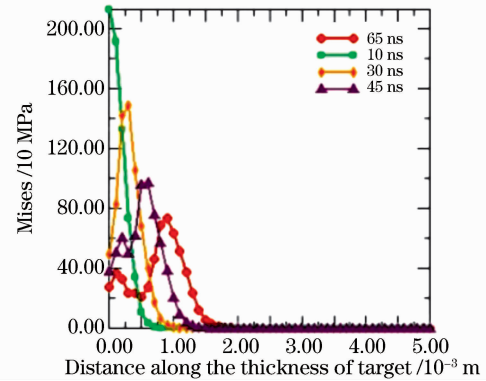


图 6 不同时刻激光冲击波曲线  
Fig. 6 LSW curve at different time

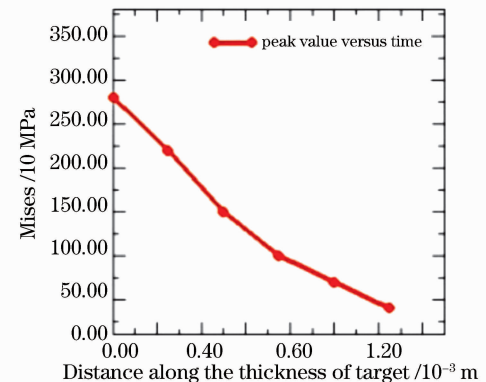


图 7 冲击波峰值衰减曲线

Fig. 7 LSW peak pressure attenuation curve

图 8 为不同时刻沿喷丸区表面冲击波压力变化曲线,从图中可以看出随着冲击波的传播,中间最大压力不断减小,但两侧是增加的,这是由于所加载的光斑为准高斯模式,压力与功率密度成正比,而冲击波横向的传播,使得光斑边缘的压力增加。

### 4 激光喷丸诱导的应力场

为了分析板料经激光喷丸强化后的力学效应,对板料进行单点单次喷丸和多次喷丸的数值模拟,所采用激光参数和上述相同。图 9 为沿厚度方向不同喷丸次数下的应力分布切片图。从中可以看出,随着喷丸次数的增加,应力层深度也逐渐增加。图 10 为不同喷丸次数下沿厚度方向残余应力变化曲线。其最大残余压应力从  $-200 \text{ MPa}$  增加到  $-500 \text{ MPa}$ 。

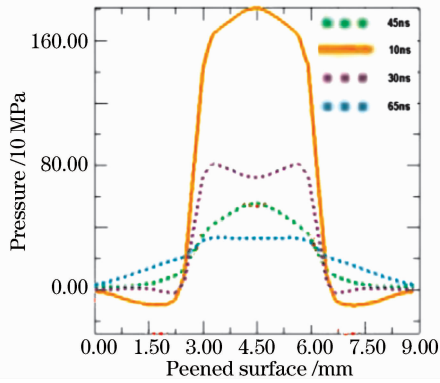


图 8 冲击区表面压力变化曲线

Fig. 8 Pressure variation at peened zone

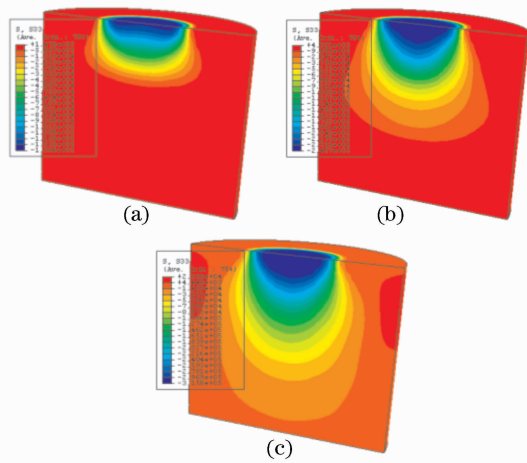


图 9 沿厚度方向的应力分布切片图。(a) 激光喷丸一次；(b) 激光喷丸二次；(c) 激光喷丸三次

Fig. 9 Cloud map of stresses distribution along depth. (a) single shot peening; (b) two shot peening; (c) three shot peening

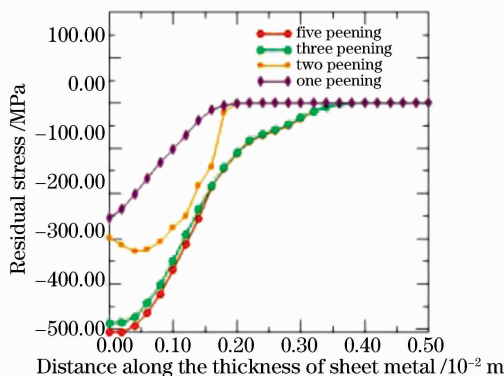


图 10 沿厚度方向残余应力变化曲线

Fig. 10 Residual stress distribution along depth

分析得到,对板料进行连续单点多次喷丸时,一开始应力随着喷丸次数的增加呈线性增加,但是单点连续喷丸四次以后,应力增加不明显,这可能由于材料硬化效应引起的原因,所以并不是喷丸次数越

多越好,而是需要综合考虑,其最佳喷丸次数在 3~4 次左右。

疲劳试样经激光喷丸后典型的残余应力分布如图 11 所示。从数值分析可以看出,激光喷丸后在疲劳中心孔周围产生了一定深度的残余压应力分布。一般认为激光喷丸在零件表面形成的残余压应力与疲劳载荷叠加是金属零件疲劳极限提高的主要原因。激光喷丸后,形变硬化层中存在残余压应力场,其与载荷造成的拉应力叠加,降低了工件表面实际的平均应力,从而提高了金属零件的疲劳性能。

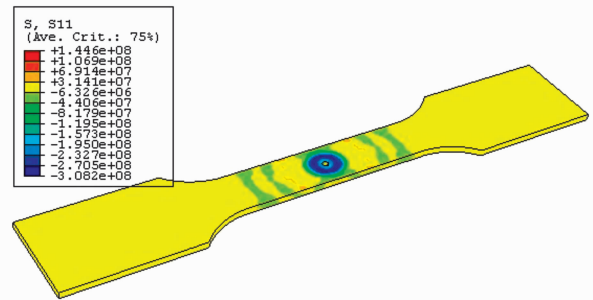


图 11 疲劳试样激光喷丸强化后的残余应力分布云图

Fig. 11 Stress map on the surface of fatigue specimen

### 5 疲劳特性分析

在应力数值分析的基础上,基于 MSC. Fatigue 软件平台进行疲劳性能分析。MSC. Fatigue 是一个通用性很强的基于有限元分析结果的疲劳分析设计工具,可灵活地用来预测各种复杂零件和结构的疲劳寿命。Pre&Post 是 MSC. Fatigue 基于有限元模型分析得出的应力或应变、载荷变化及材料的循环特性进行结构及组件的应力应变和疲劳寿命计算的系列产品之一。通过 MSC. Fatigue Pre&Post 用户可直接访问 MSC. Fatigue 提供的所有分析功能选项,并利用其先进的交互式图形功能,方便地建立疲劳寿命计算所需的 MCAE 环境。其强大的可视化后处理功能可方便地透视和诊断各种疲劳寿命问题,并且用户可通过改变相关的疲劳参数对设计模型的响应进行更深入的研究,Pre&Post 可直接获取相关的有限元信息。

分析试样的几何模型在 ABAQUS 里建立生成三维图形,将该文件输入到 ABAQUS/Standard 进行有限元分析,生成结果文件. odb,然后将其导入到 MSC. Fatigue 中,生成的有限元网格分析图和应力云图如图 12 和图 13 所示。

在拉伸载荷下,试样的有效寿命分两个部分:裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命。裂纹萌生寿命大约在

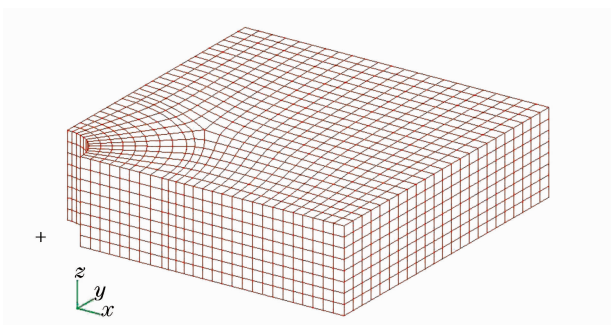


图 12 MSC.Fatigue 中导入的模型网格结点  
Fig. 12 Mesh grid node shown in MSC.Fatigue

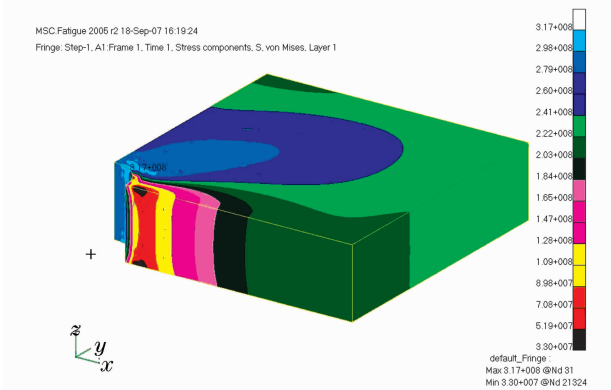


图 13 MSC.Fatigue 模型应力分析结果  
Fig. 13 Analysis results of model stress

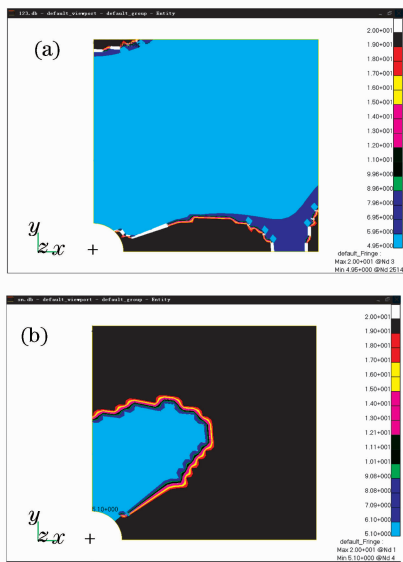


图 14 疲劳寿命云图。(a) 未喷丸前；(b) 喷丸后  
Fig. 14 Cloud maps of fatigue life with (a) unpeened and (b) peened

2~5 个晶粒之内,约 100~250  $\mu\text{m}$ 左右,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 100~250  $\mu\text{m}$ 时,会迅速导致试件失稳断裂。图 14 为对试样进行疲劳分析后生成的疲劳寿命云图。根据疲劳寿命云图,可以分析各

Listing of FE Fatigue results file simple-mn.fef

Node	Damage	Life Repeats	Life Repeats	Log life	Log damage	Log Eq. life
2514	1.131E-5	88381	8.8381E4	4.9464	-4.9464	4.9464
2519	1.131E-5	88381	8.8381E4	4.9464	-4.9464	4.9464
315	1.124E-5	88953	8.8953E4	4.9482	-4.9482	4.9482
239	1.124E-5	88953	8.8953E4	4.9482	-4.9482	4.9482
2516	1.122E-5	89133	8.9133E4	4.95	-4.95	4.95
2344	1.121E-5	89222	8.9222E4	4.9505	-4.9505	4.9505
2436	1.121E-5	89222	8.9222E4	4.9505	-4.9505	4.9505
2515	1.117E-5	89515	8.9515E4	4.9519	-4.9519	4.9519
2517	1.117E-5	89515	8.9515E4	4.9519	-4.9519	4.9519
25072	1.098E-5	91116	9.1116E4	4.9596	-4.9596	4.9596
26075	1.098E-5	91116	9.1116E4	4.9596	-4.9596	4.9596
26069	1.093E-5	91506	9.1506E4	4.9614	-4.9614	4.9614
26070	1.093E-5	91506	9.1506E4	4.9614	-4.9614	4.9614
26450	1.014E-5	96861	9.6861E4	4.9841	-4.9841	4.9841
26476	1.014E-5	96861	9.6861E4	4.9841	-4.9841	4.9841
2501	9.74E-6	1.027E5	1.027E5	5.0114	-5.0114	5.0114
2442	9.74E-6	1.027E5	1.027E5	5.0114	-5.0114	5.0114
2297	9.593E-6	1.042E5	1.042E5	5.0181	-5.0181	5.0181
2448	9.593E-6	1.042E5	1.042E5	5.0181	-5.0181	5.0181
26886	9.544E-6	1.048E5	1.048E5	5.0203	-5.0203	5.0203

Listing of FE Fatigue results file laser-mn.fef

Node	Damage	Life Repeats	Life Repeats	Log life	Log damage	Log Eq. life
44	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
25	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
25	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
27	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
29	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
29	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
188	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
189	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
190	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
196	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
196	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
197	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
202	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
202	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
678	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
688	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
689	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
700	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104
701	7.871E-6	1.271E5	1.2705E5	5.104	-5.104	5.104

图 15 节点疲劳寿命预测数值

(a) 未喷丸前；(b) 喷丸后

Fig. 15 Predicting value at nodes for fatigue life with

(a) unpeened and (b) peened

FCPOST - Results Summary

Life (Repeats)	1.4441E4
Life (cycles)	14441
Failure method:	Fracture toughness or critical K exceeded by K effective.
Start time of analysis	19:44:49 14-SEP-08
End time of analysis	19:44:49 14-SEP-08
Crack size (mm)	4.4
Growth rate (m/cycle)	8.101E-6
Stress range (Pascals)	1.371E8
Apparent delta K (MPam <sup>1/2</sup> )	26.79
Effective delta K (MPam <sup>1/2</sup> )	32.14
Current overload K (MPam <sup>1/2</sup> )	29.76
Residual K (MPam <sup>1/2</sup> )	0
K at crack closure (MPam <sup>1/2</sup> )	1.627
K from static fracture (MPam <sup>1/2</sup> )	5.511
Effective stress ratio	0.08456
Notch correction factor	1
Growth corrosion enhancement	1E-3

(a)

FCPOST - Results Summary

Life (Repeats)	1.9827E4
Life (cycles)	19827
Failure method:	Fracture toughness or critical K exceeded by K effective.
Start time of analysis	19:34:59 14-SEP-08
End time of analysis	19:35:01 14-SEP-08
Crack size (mm)	4.570
Growth rate (m/cycle)	7.539E-6
Stress range (Pascals)	1.267E8
Apparent delta K (MPam <sup>1/2</sup> )	26
Effective delta K (MPam <sup>1/2</sup> )	31.38
Current overload K (MPam <sup>1/2</sup> )	29.78
Residual K (MPam <sup>1/2</sup> )	0
K at crack closure (MPam <sup>1/2</sup> )	1.63
K from static fracture (MPam <sup>1/2</sup> )	5.537
Effective stress ratio	0.1075
Notch correction factor	1
Growth corrosion enhancement	1E-3

(b)

图 16 疲劳分析之后的数据列表

(a) 未喷丸强化；(b) 喷丸强化

Fig. 16 Analysis results for fatigue properties with

(a) unpeened and (b) peened

节点的疲劳寿命值,图 15 为在交变应力作用下典型节点的损伤和疲劳寿命值。可以看出,2024-T3 铝合金喷丸前的疲劳寿命为 88381 周次(取最小的寿命值进行评估),而经激光一次喷丸后的疲劳寿命为 127100 周次,疲劳寿命提高了 43.8%,显然激光喷丸强化能明显提高铝合金的抗疲劳性能。对比文献 [16]中的实验结果,数值分析结果具有较好的一致

性和参考性。

图 16 为中心孔带 0.1 mm 缺口裂纹的试样疲劳分析的数据列表,表明中心孔带缺口裂纹的试样疲劳寿命严重下降,但激光喷丸能使试件的疲劳裂纹扩展寿命从 14441 周次提高到 18827 周次,寿命提高了 30.4%,生成的疲劳裂纹增长曲线显示裂纹扩展速率下降,可见由于激光喷丸之后诱导的高幅残余压应力,导致了疲劳寿命的上升。

裂纹尺寸  $a$  与循环次数  $N$  之间的关系曲线如图 17,随着循环次数的增加,裂纹不断扩展,裂纹尺寸增长,最终结构发生失效。失效的形式为实际结构中的应力强度因子超过临界应力强度因子或断裂韧性。

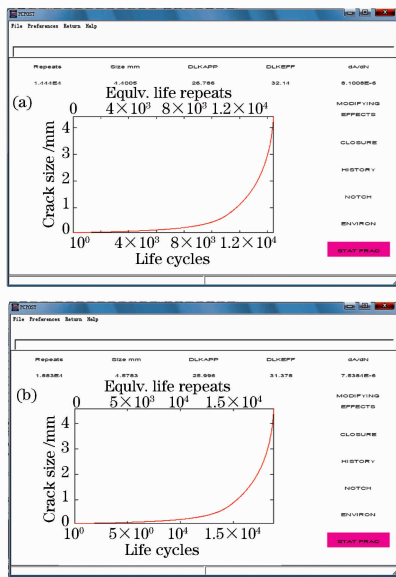


图 17  $a-N$  寿命曲线。(a) 未喷丸强化;(b) 喷丸强化

Fig. 17  $a-N$  fatigue life curve with (a) unpeened and (b) peened

## 6 结 论

根据激光喷丸强化的物理过程,以 ABAQUS 和 MSC. Fatigue 分析软件为平台,考虑多次激光喷丸过程中冲击波的加载特性,建立了面向疲劳性能评价的激光冲击波压力、残余应力和疲劳寿命集成的激光喷丸强化的数字化分析模型。对激光喷丸强化过程中激光冲击波的传播、残余应力大小及其分布以及疲劳特性行为等进行了数值分析,并对激光喷丸强化的疲劳寿命进行了预测。初步的研究表明,建立的激光冲击波压力—残余应力—疲劳寿命之间的数字化分析方法,可以定量分析激光喷丸强化过程中各种参数对强化效果的影响,实现了激光

喷丸过程和喷丸效果评价的可视化。为了提高数值分析的精度,还必须在激光冲击波加载模型、应力应变本构模型、应力场及其疲劳裂纹扩展实验验证等方面做进一步深入的研究。

## 参 考 文 献

- 1 P. Peyer, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and application [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, **27**:1213~1219
- 2 P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien *et al.*. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, **210**:102~113
- 3 J. Z. Zhou, H. X. Liu, C. J. Yang *et al.*. Non-tradition forming process of sheet metal based on laser shock wave [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, **329**:637~642
- 4 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):135~138  
周建忠,张永康,周明等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):135~138
- 5 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 Journal of Fatigue*, 2002, **24**:1021~1036
- 6 William Braisted, Robert Brockman. Finite element simulation of laser shock peening [J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, **21**:719~724
- 7 K. Ding, L. Ye. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening process [J]. *Surface Engineering*, 2003, **19**(5):351~358
- 8 Yongxiang Hu, Zhengqiang Yao, Jun Hu. 3-D FEM simulation of laser shock processing [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, **201**:1426~1435
- 9 J. L. Ocana, M. Morales, C. Molpeceres *et al.*. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments [J]. *Applied Surface Science*, 2004, **38**:242~248
- 10 Abul Fazal, M. Arif. Numerical prediction of plastic deformation and residual stress induced by laser shock processing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **136**:120~138
- 11 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**:188~197
- 12 Zhou Jianzhong, Du Jianjun, Huang Shu *et al.*. Visual numerical study on surface micro topography of sheet metal by laser peening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):728~732  
周建忠,杜建钧,黄舒等. 激光喷丸后板料表面微观形貌的可视化数值研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):728~732
- 13 Li Gao, Jiayang Yu, Yongkang Zhang. Numerical simulation and experiment of TA2 sheet forming under laser shock [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(8):472~475
- 14 S. Q. Jiang, J. Z. Zhou, S. Huang *et al.*. Numerical analysis on the process of laser continuous peen forming of metal plate [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, **375-376**:603~607
- 15 C. R. Phipps, Jr. T. P. Turner, R. F. Harrison *et al.*. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF and CO<sub>2</sub> single-pulselasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(3):1083~1096
- 16 Zhang Hong, Tang Yaxin, Yu Chengye *et al.*. Effect of laser shock processing on the fatigue life of faster holes [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A23**(12):1112~1116  
张宏,唐亚新,余承业等. 激光冲击处理对紧固孔疲劳寿命的影响[J]. *中国激光*, 1997, **A23**(12):1112~1116