

# 基于光纤布拉格光栅阵列的铝合金疲劳裂纹预测方法

孙玲玉, 刘长超, 姜明顺, 张雷, 张法业, 隋青美\*, 贾磊

山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061

**摘要** 针对铝合金结构服役过程中的疲劳裂纹监测问题, 提出了一种基于光纤光栅传感阵列的疲劳裂纹实时监测方法。首先, 结合扩展有限元技术获得裂纹扩展过程的应变场分布特征, 进行传感器布局设计; 其次, 通过疲劳加载实验获取加载次数、裂纹长度对波长峰峰值的响应特征, 采用三参数指数法进行疲劳扩展  $a-N$  (其中  $N$  为加载次数,  $a$  为裂纹长度) 曲线拟合; 在实验数据基础上, 采用梯度提升回归树算法搭建疲劳损伤预测模型, 并将其与线性回归、支持向量两种方法进行对比, 选取可释方差、平均绝对误差、平均方差、决定系数和五折交叉验证等多种指标进行模型评估。结果表明, 梯度提升回归树算法对疲劳裂纹长度的预测效果最佳。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅; 疲劳裂纹; 扩展有限元; 梯度提升回归树; 裂纹预测

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1306003

## 1 引言

航天器、高速列车和船舶等大型装备的金属结构件在长期疲劳载荷的作用下的应力集中部位易产生疲劳损伤, 早期裂纹在持续服役和交变载荷条件下, 会进一步发生扩展, 从而导致结构断裂失效, 造成重大生产安全隐患。因此, 运用合理的技术手段对疲劳裂纹进行及时识别和实时监测具有重要的工程意义。

在疲劳裂纹监测领域, 常用的技术手段包括声发射监测技术、超声导波检测技术和应变监测技术<sup>[1]</sup>等, 随着应变传感器制作工艺和性能的日益成熟, 应变监测法在结构健康监测和疲劳裂纹的识别中占据重要地位。与传统电气传感器相比, 光纤 Bragg 光栅 (FBG) 传感器凭借其高精度、高灵敏度、抗电磁干扰、检测范围广、易于埋入等特点<sup>[2-3]</sup>, 促进了应变监测技术向着准确灵敏、可靠便捷的方向进一步发展。国内外学者基于 FBG 传感器开展了对疲劳裂纹的应变监测研究, 在国外, Verstryngne 等<sup>[4]</sup>设计了一种用于裂缝监测的分布式传感和声发射集成系统, 验证了 FBG 传感器用于裂纹监测时的

高鲁棒性和高灵敏度; Bao 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于光纤光栅传感器阵列的疲劳裂纹频谱互相关分析 (SCCA) 和损伤特征因子在线监测方法; 在国内, 郑丁午等<sup>[6]</sup>基于 FBG 传感器获得了不同程度裂纹的应变场分布特征, 进行了裂纹扩展程度的预测; 常琦等<sup>[7]</sup>利用压电传感器和电阻应变片, 进行了被动、主动监测方法相结合的裂纹检测技术研究, 采用随机森林算法、D-S 证据理论及融合识别方法进行裂纹长度识别。

当前国内外针对疲劳损伤应变监测及裂纹扩展阶段的分类识别的研究较多, 对于疲劳扩展全过程的裂纹长度回归预测的研究较少, 本文结合有限元仿真模型及疲劳损伤演化分析, 设计了合理的 FBG 传感器阵列, 开展疲劳加载与裂纹扩展应变场监测实验, 通过对比多种回归算法实现了应变场反演, 进行了裂纹扩展预测。

## 2 基于 FBG 的疲劳裂纹应变监测机理

### 2.1 裂纹扩展基本理论

在断裂力学问题中, 根据不同的受力状况, 可将

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2020-12-11; 录用日期: 2021-01-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE02013)、国家自然科学基金(62073193, 61903224, 61873333)、山东省重点研发计划(2019TSLH0301, 2019GHZ004)

通信作者: \*qmsui@sdu.edu.cn

裂纹分为以下三种情况:张开型(I型)、滑开型(II型)以及撕开型(III型)。其中I型裂纹是最常见、最严重的开裂形式,本文主要对I型裂纹展开探讨。对于理想线弹性材料,在含有长度为 $a$ 的单边开口裂纹的无限大平板中,两侧承受垂直于裂纹面的拉应力 $\sigma$ 作用时,裂纹尖端附近一点 $M(r, \theta)$ 所受应力可表示为

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \quad (1)$$

式中: $K_I$ 为I型裂纹应力强度因子; $(r, \theta)$ 为 $M$ 点的极坐标; $\sigma_{ij}$ 为应力分量; $f_{ij}(\theta)$ 为与 $\theta$ 有关的方向参数。

由(1)式可知, $M$ 点应力大小与其与裂纹尖端的距离成反比,结合线弹性范围内小变形条件下各向同性材料的广义胡克定律,可得:当 $M$ 点无限趋近于裂纹尖端时,应变场表现为无穷大,裂纹尖端附近应变场具有 $r^{1/2}$ 奇异性<sup>[8]</sup>。由裂尖应力应变场分布可定义应力强度因子:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_{ij})_{\theta=0}。 \quad (2)$$

由(2)式可知,应力强度因子 $K_I$ <sup>[9-11]</sup>是表征材

料内部的应力集中程度及裂纹尖端附近弹性应力应变场分布强弱程度的物理参量。在有限宽度的平板中,其解析式为

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为应力; $a$ 为裂纹长度; $F$ 为长度因子,与裂纹形状、载荷形式、板材形状有关。

裂纹的扩展和断裂失效在微观上可看作裂尖附近应力应变场达到临界值的表现,即当 $K_I \geq K_{IC}$ ( $K_{IC}$ 为断裂韧度)时,裂纹会因失稳扩展产生断裂;当 $K_I < K_{IC}$ 时,裂纹不扩展或稳定扩展。裂纹失稳扩展前相当长的一个阶段中,应力与裂纹长度的关系满足 Paris 公式<sup>[12]</sup>,表达式为

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (4)$$

式中: $N$ 为疲劳加载次数; $\frac{da}{dN}$ 为裂纹扩展速率; $\Delta K$ 为应力强度因子幅度; $C, m$ 为材料常数,受环境因素如温湿度、加载频率介质影响,可由实验拟合得到。

## 2.2 基于 FBG 的疲劳裂纹预测原理

基于 FBG 的疲劳裂纹预测流程图如图 1 所示。

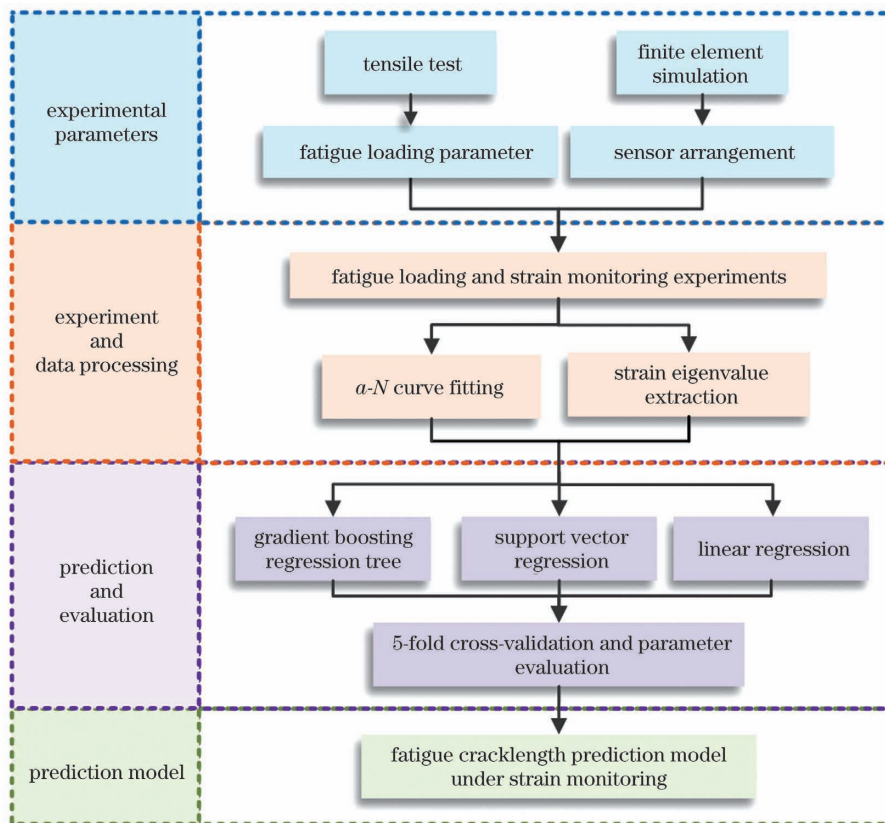


图 1 基于 FBG 的疲劳裂纹预测流程图

Fig. 1 Flow chart of fatigue crack prediction based on FBG

### 3 裂纹扩展有限元仿真

利用 ABAQUS 有限元分析软件进行扩展有限元 (XFEM)<sup>[13]</sup> 计算, 扩展有限元方法在保留传统有限元方法优点的基础上, 能获得独立于网格边界并沿任意路径扩展的裂纹, 克服了网格加密重构问题, 在减小计算量的同时更真实地模拟裂

纹生长过程。

仿真模型按照 1 : 1 比例建模, 试件为 6061 铝合金板, 厚度  $d=5$  mm, 单边预制  $1\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  圆角贯穿开口, 尺寸及细节图如图 2 所示。试件材料均匀, 各向同性, 材料基本属性及断裂属性如表 1 所示。试件右侧受到拉伸载荷  $a(t)$  的作用, 载荷峰值  $a(0)=80$  MPa, 网格大小定义为 2 mm。

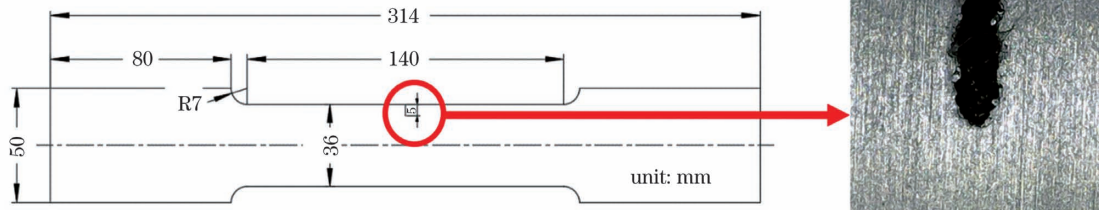


图 2 部件尺寸示意图

Fig. 2 Component size diagram

表 1 仿真实验材料属性

Table 1 Material properties of simulation experiment

Parameter	Value
Density / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2700
Young's modulus / MPa	69
Poisson's ratio	0.33
Max principal stress / MPa	84.4
Coefficient of damage viscosity	0.0001

裂纹生长过程的应变场仿真结果如图 3 所示, 其中图 3(a) 为微观裂纹产生时期, 此时未产生肉眼

可见的裂纹, 裂纹萌生处为应力中心, 图 3(b)~(d) 为宏观裂纹扩展时期, 可以看出应变场产生明显变化。

由仿真云图可知, 裂尖附近出现了应力集中效应, 表现出了应变场的尖端奇异性, 这与上文理论分析结果吻合。随着裂纹的生长, 应变中心逐渐下移, 这导致了 a、b、c 三样本点分别出现了应变值逐渐减小、先增大后减小、逐渐增大的变化趋势, 应变场的这种规律性变化表明某一时刻的应变值可用于预测反演裂纹长度。

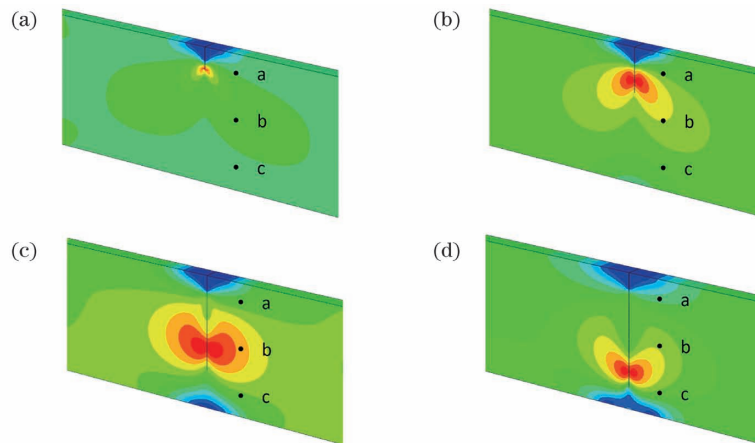


图 3 裂纹扩展不同阶段的应变场云图。(a) 裂纹萌生阶段; (b) 裂纹初始扩展阶段; (c) 裂纹稳定扩展阶段; (d) 裂纹临近失效阶段

Fig. 3 Strain field nephograms at different stages of crack propagation. (a) Crack initiation; (b) initial crack propagation; (c) steady crack propagation; (d) crack approaching failure

## 4 实验研究与分析

### 4.1 应变感知原理

FBG 传感器是以光为载体、光纤为媒质来感知

和传输外界信号的新型传感技术。光纤光栅是一种无光源器件<sup>[14-15]</sup>, 其相当于在光纤芯内形成一种窄带(透射或反射)滤光器或反射镜, 当一束宽带光经过中心波长为  $\lambda_B$  的布拉格光栅时, 波长等于  $\lambda_B$  的



单色光被反射,其余波长的光发生透射,根据耦合波模型,光纤光栅中心波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (5)$$

式中: $n_{eff}$  为栅区有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。

外界应变和温度的变化通过影响  $n_{eff}$  和  $\Lambda$  的变化而使光纤光栅波长  $\lambda_B$  发生偏移。在忽略外界温度变化的情况下,  $\Delta\lambda_B$  和轴向应变  $\epsilon$  的关系为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e) \cdot \epsilon \cdot \lambda_B = K \cdot \epsilon \cdot \lambda_B, \quad (6)$$

式中: $P_e$  为光纤光栅的有效弹光系数,实际应用中通常被认定为常数; $K=1-P_e$  为灵敏系数。

因此认为中心波长偏移量与轴向应变近似呈线性关系。

#### 4.2 实验系统搭建

疲劳加载及应变监测实验系统(图 4)由瑞士沃特拜公司的 LFV 250KN 多功能伺服液压动态疲劳试验机、6061 铝合金试件、6 支 FBG 传感器组成的传感阵列、多通道光纤光栅解调仪及光纤光栅高速采集软件构成。

实验系统所用的解调仪为自研仪器,通过激发可调谐窄带激光对 FBG 传感器进行波长解调,原理如图 5 所示,当可调谐激光器激发的窄带激光经准直器、耦合器、环形器进入光纤光栅内且窄带激光波长与 FBG 中心波长重合时,光电探测器检测到的光信号最为明显,此时的激发波长即为 FBG 的中心波长<sup>[16-17]</sup>。



图 4 疲劳裂纹扩展 FBG 监测实验系统

Fig. 4 Fatigue crack growth monitoring experimental system based on FBG

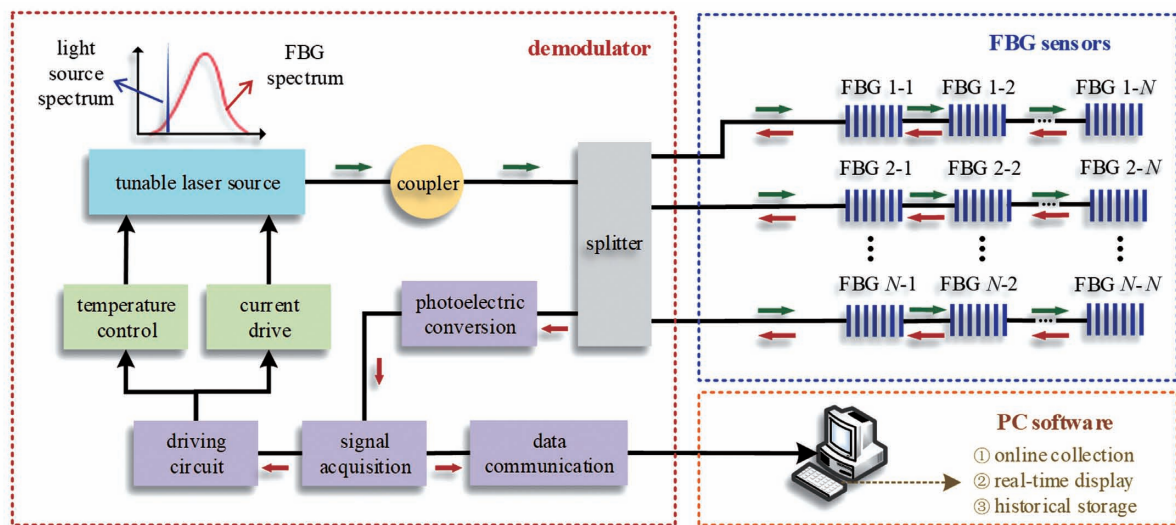


图 5 FBG 解调系统整体原理图

Fig. 5 Overall schematic diagram of FBG demodulation system

光纤光栅高速采集软件使用 LabVIEW 编写,可以实现的主要功能有:波长信号的在线采集、光谱信号的实时显示、历史数据的存储等。

#### 4.3 传感器阵列设计

为了获得更为准确可靠的信号,在设计 FBG 传感器阵列时需考虑两点:

1)将传感器分布在应变梯度变化较大的区域,结合图 3 的有限元仿真结果可知,将传感器布置在距裂纹较远处,会获得更为明显的信号;

2)在实际疲劳扩展过程中,受试件本身材料不均匀及预制开口制作工艺的限制,试件在受力时出现应力分布不均,导致疲劳裂纹并非一定沿铝板中

线生长,而是会发生向左或向右的偏移<sup>[18]</sup>。在应变监测过程中,若裂纹偏移扩展至 FBG 传感器所在位置,应变超限将会对 FBG 光谱信号的获得产生影响,甚至造成传感器的不可逆损伤。为尽量减少应变超限对测得信号的影响,可以考虑以下两种方法: 1) 适当增加传感器个数,以抵消个别信号损伤对整个应变场监测的影响,同时,损伤的传感器也可作为裂纹扩展位置的判定依据; 2) 设定裂纹扩展安全区,为进一步确定安全区位置,对 1~4 号试件进行

疲劳加载测试,结果如图 6 所示,裂纹尖端偏移的垂直距离分别为 1.8 mm(右)、3.4 mm(左)、1.5 mm(左)、3.2 mm(右)。

结合以上两点确定传感器阵列布局,将 6 个 FBG 传感器在距预制裂纹中心线左右各 10 mm 处分两列呈对称等间距排列,传感器尺寸为 25 mm×5.5 mm,传感器阵列的排布方式如图 7 所示,在 5 号试件表面粘贴 FBG 传感器,同时进行疲劳加载和应变监测实验,实物图如图 8 所示。

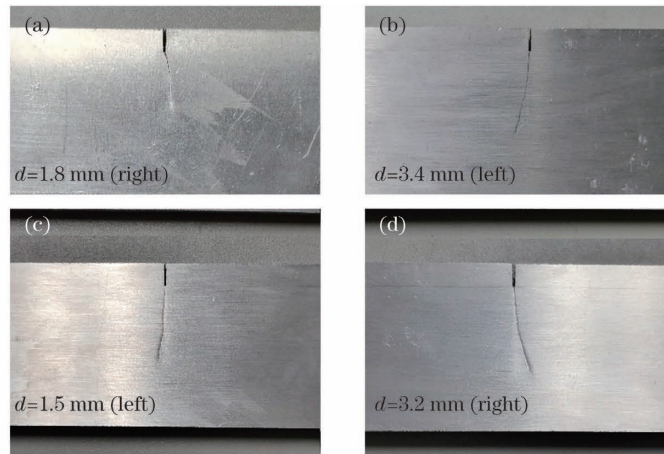


图 6 1~4 号试件疲劳拉伸结果

Fig. 6 Fatigue tensile results of samples 1-4

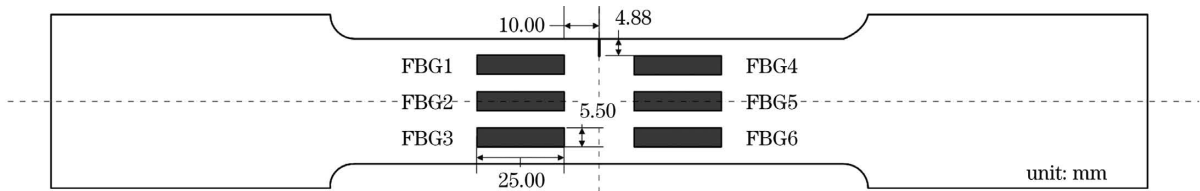


图 7 FBG 传感器阵列示意图

Fig. 7 Schematic diagram of FBG sensor array

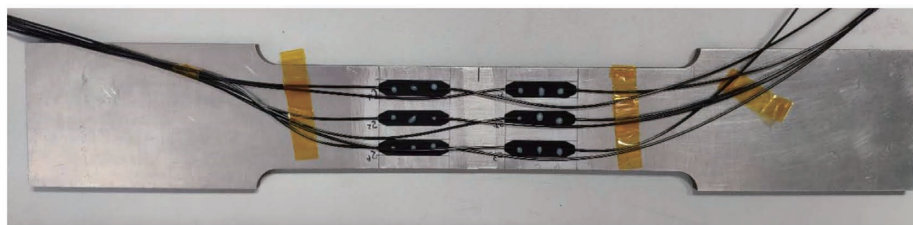


图 8 FBG 传感器阵列粘贴位置实物图

Fig. 8 Actual pasting position of FBG sensor array

#### 4.4 疲劳加载 $a-N$ 曲线拟合

裂纹扩展实验中,进行等幅正弦波载荷的分阶段加载,加载频率为 15 Hz,实验最大应力为 10 kN,应力比为 0.1,即平均应力为 5.5 kN,应力

幅值为 4.5 kN。使用光学数码显微镜观察裂纹长度并记录加载次数,当长度达到 21 mm 时,裂纹急剧扩展,裂缝明显张开,接近失效状态,此时停止加载,疲劳实验结果如表 2 所示。

表 2 疲劳拉伸实验结果  
Table 2 Results of fatigue tensile test

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cycle /10 <sup>4</sup>	0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.1
Crack length /mm	0	2.2	2.6	3.1	4.4	6.2	7.8	13.3	21.0

三参数指数函数拟合法<sup>[19]</sup>是一种具有高度物理解释性的  $a-N$  (其中  $N$  为加载次数,  $a$  为裂纹长度) 曲线拟合方法, 通常忽略裂纹萌生时期缓慢扩展阶段, 此时可将加载次数与裂纹长度间的关系表示为

$$N = N_c - B \exp[-T_1(a - a_1)] \quad (7)$$

式中:  $N_c$  为临界载荷循环次数;  $B$  为常数;  $a_1$  为回归的初始裂纹长度。

利用实验数据  $(x_i, y_i)$  建立回归分析方程, 得到  $N_c$ 、 $B$  和决定系数  $R^2$  的值, 在  $T_1 \in (-\infty, 0)$  范围内搜寻使  $R^2$  最大的值, 可得到最终的拟合结果为

$$N = 6.12 - 2.975 \exp[-2.780(a - 2.2)] \quad (8)$$

图 9 为疲劳扩展  $a-N$  曲线拟合结果。

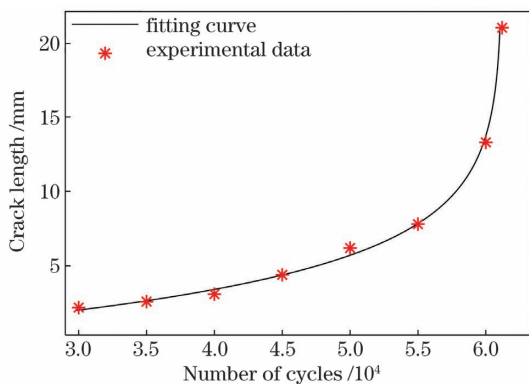


图 9 疲劳扩展  $a-N$  曲线拟合结果

Fig. 9 Fitting result of fatigue extension  $a-N$  curve

评价拟合结果时常用的指标有: 和方差 (SSE)、平均绝对误差 (MAE)、平均方差 (MSE)、可释方差分 (EV) 和  $R^2$ 。

SSE、MAE、MSE 的理想值为 0,  $R^2$  的理想值为 1, 由表 3 中的评估结果可知, (8) 式拟合度良好, 能很好地表征裂纹扩展过程中加载次数与裂纹长度的变化关系。

表 3 拟合曲线评估指标

Table 3 Evaluation indexes of fitting curve

Evaluation index	SSE	MAE	MSE	$R^2$
Value	0.0820	0.0713	0.0358	0.9912

#### 4.5 应变监测结果与分析

试件被正弦波形式的循环载荷加载时, 应变场

会随受力的变化而变化, 波长响应信号同样会以正弦波形式变化, 1 号 FBG 传感器测得的某一段时间内的波长变化如图 10 所示。

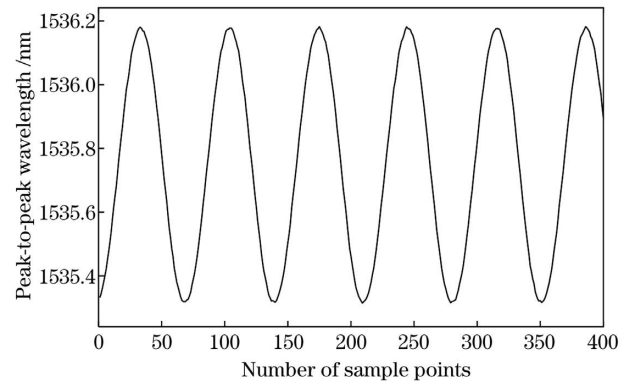


图 10 传感器 FBG1 测得某一段波长变化

Fig. 10 Wavelength change measured by sensor FBG1

直接采集到的波长数据中包含了温度、形变等诸多信息, 数据量巨大, 且直观性差。由 (6) 式可知, 波长偏移量与应变近似呈线性关系, 因此提取 61200 个加载周期中 6 个传感器的波长峰峰值作为特征值, 排除了温度和拉伸过程中的形变对检测结果的干扰, 循环加载周期数与波长峰峰值的关系如图 11 所示, 根据 (8) 式的拟合公式, 得到裂纹长度与波长峰峰值的关系如图 12 所示。

通过分析图 11、12 的波长峰峰值数据, 可知:

1) 对比裂纹同侧分布的 3 个传感器的波长峰峰值变化趋势可知, 当裂纹开始萌生时, 各传感器所在

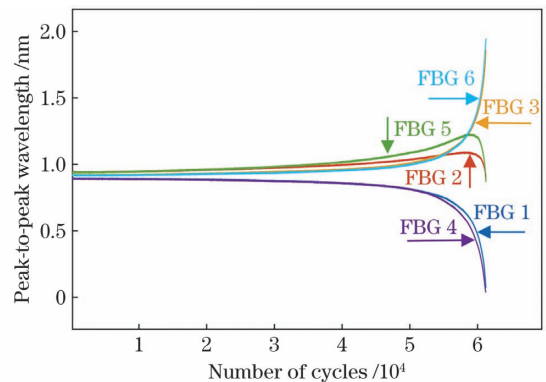


图 11 循环加载次数与波长峰峰值的关系曲线

Fig. 11 Relationship between peak-to-peak wavelength and cyclic loading times



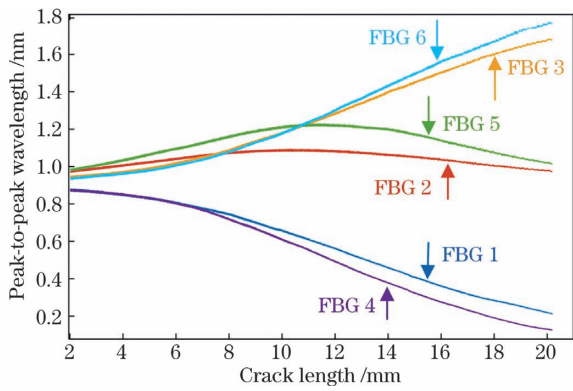


图 12 裂纹长度与波长峰峰值的关系曲线

Fig. 12 Relationship between peak-to-peak wavelength and crack length

部位所受应力基本相同,当裂纹逐渐扩展时,靠近裂纹萌生端即 FBG1、FBG4 传感器检测到的应变值逐渐变小,远离裂纹萌生端即 FBG3、FBG6 传感器检测到的应变值逐渐变大,铝板中间部位即 FBG2、FBG5 传感器检测到的应变值先变大后变小,这验证了应变场尖端奇异性的存在,证明高应力区会随裂纹的扩展而下移,这与上文仿真结果吻合。

2)通过对比同一水平位置两个传感器的波长峰峰值变化趋势,可以发现:位于铝板中心位置的 FBG2、FBG5 对裂纹偏移感知灵敏,其中 5 号传感器位置处波长峰峰值变化更为明显,这证明 5 号传感器位置处出现了明显的应力变化,表现出高应力区特性。图 13 所示的 5 号试件的疲劳拉伸结果表明,5 号传感器位于裂纹生长的延伸方向,高应力区随裂纹尖端的生长向 5 号位置处转移,从而导致 2 号、5 号传感器的检测信号产生差别,这与裂纹扩展

理论及仿真结果吻合,证明了裂纹生长方向的偏移是由两侧应力不均导致,裂纹的扩展行为是其周围应力改变的必然结果。

由此可以通过在铝板中间部位布设光纤光栅传感器进行裂纹扩展方向的预测。

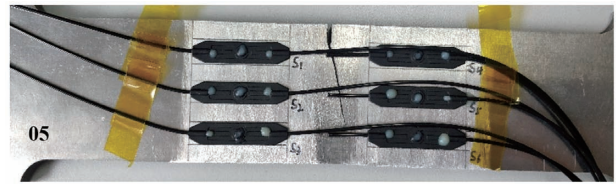


图 13 5 号铝合金试件拉伸结果

Fig. 13 Tensile results of aluminum alloy sample 5

## 5 预测模型与性能评估

梯度提升回归树 (GBRT)<sup>[20-21]</sup> 是一种集成算法,其原理为:串行生成多个决策树,利用损失函数不断减小残差,拟合成新的决策树并将其添加到模型中,加权累加所有决策树,从而集成更加稳定准确的回归模型,这种方法能同时降低方差和偏差,具有更高的精度和泛化能力。

在构建 GBRT 预测模型时,学习目标通常选取平方误差损失函数:

$$L [y_i, f(x)] = \min \sum_{i=1}^N [y_i, f(x)]^2, \quad (9)$$

式中: $y_i$  为真实值; $f(x)$  为预测模型值; $N$  为样本数量。

GBRT 算法原理图如图 14 所示。图中, $S$  表示数据集, $S_1 \sim S_5$  为五折交叉验证切分后的子数据集。

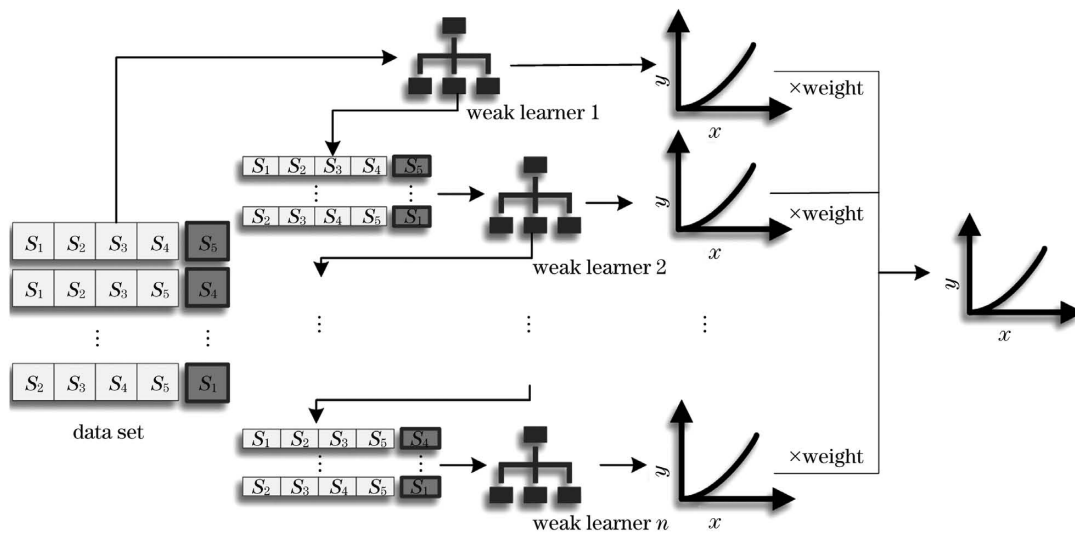


图 14 GBRT 原理图

Fig. 14 Principle diagram of GBRT

K 折交叉验证采用了无重复抽样技术,通常用于回归模型调优和模型泛化能力评估,将数据的 1/K 作为测试集进行 K 次训练和 K 次测试,以保证数据特征的充分挖掘,根据本实验数据量较大的特点,选择五折交叉验证,原理图如图 15 所示。

实验结果表明,裂纹扩展行为主要发生在 3~

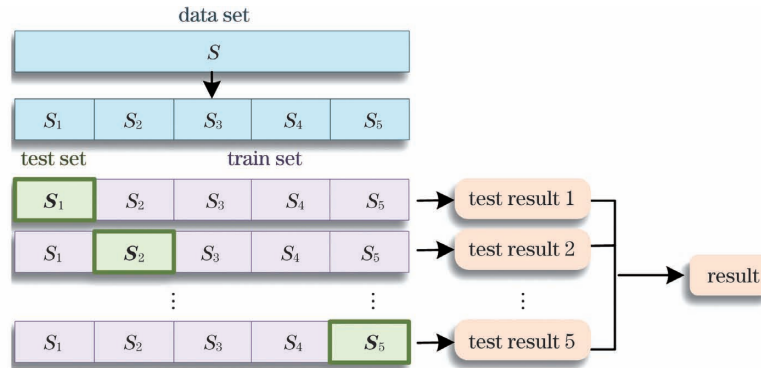


图 15 五折交叉验证原理

Fig. 15 Principle of 5-fold cross-verification

表 4 GBRT 模型的五折交叉验证结果

Table 4 5-fold cross-validation results of GBRT model

Model	0	1	2	3	4
GBRT	-0.486222	-0.279238	-0.402655	-0.632112	-4.465716

采用 EV、MAE、MSE、 $R^2$  4 种回归性能指标对 GBRT 模型进行评估,结果如表 5 所示, EV、 $R^2$  的理想值为 1, MAE、MSE 的理想值为 0, 评估结果表明,该模型的拟合度良好。

表 5 GBRT 模型的回归性能评估结果

Table 5 Regression performance evaluation results of GBRT model

Model	EV	MAE	MSE	$R^2$
GBRT	0.999947	0.018683	0.000699	0.999935

预测结果与真实值基本吻合,如图 16 所示。

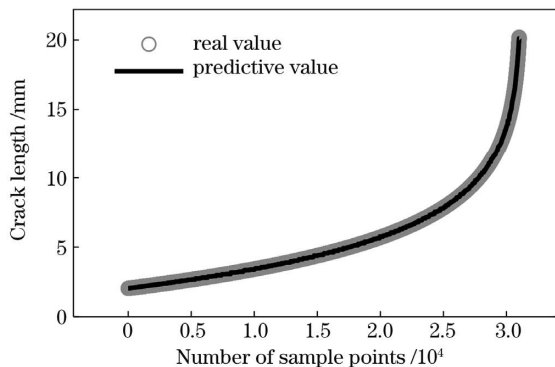


图 16 GBRT 算法的预测结果

Fig. 16 Prediction result of GBRT algorithm

6.1 万次加载的稳定扩展区间内。将此稳定扩展区间内含有 6 个特征的 3.1 万条应变数据导入 GBRT 模型,进行五折交叉验证,学习率设为 0.1,最大迭代次数为 150。

对 GBRT 模型的均方差回归损失 (NMSE) 进行五折交叉验证,得到的结果如表 4 所示,结果表明该模型具有较好的稳定性。

多元回归问题中,普通线性回归和支持向量回归 (SVR) 也是常用的方法。普通线性回归是基于最小二乘法的一种最常见的回归分析方法,具有良好的模型解释性;SVR 在进行回归分析时,采用支持向量和拉格朗日乘子法,能够很好地解决多重共线性变量回归效果差的问题。

采用多元线性回归法和支撑向量法对应变数据进行回归分析,支撑向量模型核函数选择高斯核函数 (RBF),松弛变量 C 为 100,参数 Gamma 值为 0.1。将三种回归算法的评估结果进行对比,GBRT 算法在 EV、MAE、MSE、 $R^2$  4 个指标上均表现出最佳的性能,如表 6 所示。

表 6 模型回归性能评估结果

Table 6 Regression performance evaluation results of model

Model	EV	MAE	MSE	$R^2$
Linear	0.999743	0.034250	0.002771	0.999743
SVR	0.999670	0.061197	0.004568	0.999577
GBRT	0.999947	0.018683	0.000699	0.999935

## 6 结 论

面向航天器、高速列车、船舶等长期服役的大型



装备的结构健康监测需求,开展了金属结构件的疲劳裂纹实时监测与损伤预测研究,该研究具有实际应用价值。研究从理论分析、数值仿真和应变实验阐明了利用应变场数据反演裂纹长度的可行性;提出的光纤光栅传感阵列是一种合理的裂纹扩展应变监测布局方法,能使采集到的局部应变在裂纹扩展的不同阶段呈现规律性和梯度性,在实现裂纹扩展程度预测的同时,实现了裂纹开裂方向的判别;提出疲劳裂纹长度的预测方法,对 GBRT 模型从交叉验证、EV、MAE、MSE、 $R^2$  等 5 个维度进行评估,结果表明,所提模型的稳定度高、拟合度良好。将所提模型与线性回归法、支持向量回归法进行对比,结果表明,GBRT 算法在应变场反演问题中有着更为优良的性能。

## 参 考 文 献

- [1] Sans D, Renart J, Costa J, et al. Assessment of the influence of the crack monitoring method in interlaminar fatigue tests using fiber Bragg grating sensors [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 84: 44-50.
- [2] Fu Q N. Research on on-line fatigue crack monitoring and life prediction based on strain analysis [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. 富倩妮. 基于应变分析的疲劳裂纹在线监测及寿命预测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [3] Jiang L, Zhang X Z, Wang J, et al. Real-time online detection of cutter wear based on fiber Bragg grating array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (12): 1206003. 蒋磊, 张学智, 王进, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的刀头磨损实时在线检测[J]. *光学学报*, 2019, 39 (12): 1206003.
- [4] Verstrynghe E, de Wilder K, Drougkas A, et al. Crack monitoring in historical masonry with distributed strain and acoustic emission sensing techniques[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 898-907.
- [5] Bao P Y, Yuan M, Dong S P, et al. Fiber Bragg grating sensor fatigue crack real-time monitoring based on spectrum cross-correlation analysis [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(1): 43-57.
- [6] Zheng D W, Zeng J, Xia Y B, et al. Distributed optical fiber monitoring and propagation prediction method for fatigue crack of aluminum alloy [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(5): 740-746. 郑丁午, 曾捷, 夏裕斌, 等. 铝合金疲劳裂纹分布式光纤监测与扩展预测方法[J]. *压电与声光*, 2019, 41(5): 740-746.
- [7] Chang Q, Yang W X, Zhao H, et al. A multi-sensor based crack propagation monitoring research [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41 (2): 231-242. 常琦, 杨维希, 赵恒, 等. 基于多传感器的裂纹扩展监测研究[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 231-242.
- [8] Zhu F, Ji X, He P F, et al. On stress singularity at crack tip in elasticity [J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102210.
- [9] Liu J J. Finite element simulation of fatigue crack growth behavior of 5E62 aluminum alloy [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. 刘家菊. 5E62 铝合金疲劳裂纹扩展行为的有限元模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [10] Li Y, Yi Z J, Wang M, et al. The stress intensity factor of a finite-width plate with a mode-I center crack subjected to uniform stress on the crack surface near the crack tip [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, 41(10): 1083-1091. 李亚, 易志坚, 王敏, 等. 裂纹面局部均布荷载下 I 型裂纹有限宽板应力强度因子[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(10): 1083-1091.
- [11] Lal A, Mulani S B, Kapania R K, et al. Stochastic critical stress intensity factor response of single edge notched laminated composite plate using displacement correlation method [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(14): 1223-1237.
- [12] Toribio J, Matos J C, González B, et al. Corrosion-fatigue crack growth in plates: a model based on the Paris law [J]. *Materials*, 2017, 10(4): E439.
- [13] Ma C P, Yu T T, van Lich L, et al. Detection of multiple complicated flaw clusters by dynamic variable-node XFEM with a three-step detection algorithm [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2020, 82: 103980.
- [14] Li H, Zhu L Q, Liu F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750. 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35 (8): 1744-1750.
- [15] Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104004. 权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104004.

- [16] Wei J T. Development of FBG demodulator based on tunable laser and its application in strain detection technology[D]. Jinan: Shandong University, 2018. 魏钧涛. 基于可调谐激光器的 FBG 解调仪研制及应变检测应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [17] Tian Y. Development of fiber grating dynamic demodulation system based on FPGA [D]. Jinan: Shandong University, 2019. 田园. 基于 FPGA 的光纤光栅动态解调系统研制[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [18] Han X H, Lei Z, Li R D, et al. Fatigue crack propagation of laser arc hybrid welded joint of bainitic steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002014. 韩晓辉, 雷正, 李仁东, 等. 贝氏体钢激光电弧复合焊接接头疲劳裂纹扩展[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1002014.
- [19] Xiong J J, Guo A M, Qiu H Y, et al. Orthogonal polynomial and three parameter exponent function model to treat fatigue crack growth curve [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2002, 19(2): 110-112, 147. 熊峻江, 郭爱民, 邱华勇, 等. 疲劳裂纹扩展曲线的正交多项式与三参数指数函数拟合法[J]. 应用力学学报, 2002, 19(2): 110-112, 147.
- [20] Hu G, Kwok K C S. Predicting wind pressures around circular cylinders using machine learning techniques [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104099.
- [21] Cheng J, Liang S L, Wang W H, et al. An efficient hybrid method for estimating clear-sky surface downward longwave radiation from MODIS data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 2616-2630.

## Fatigue Crack Prediction Method for Aluminum Alloy Based on Fiber Bragg Grating Array

Sun Lingyu, Liu Changchao, Jiang Mingshun, Zhang Lei, Zhang Faye,  
Sui Qingmei\*, Jia Lei

*School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*

### Abstract

**Objective** Under the action of long-term fatigue loading, the metal structures of the spacecraft, high-speed train, ship, and other large equipment are prone to fatigue crack in the stress concentrated part. Under the repeated action of alternating loading, the structure will be further extended, resulting in failure and fracture, causing major production safety hazards. In the fatigue crack monitoring field, the commonly used technical means are sound emission, ultrasonic guided wave, and strain monitoring. With the development of strain sensors, the strain monitoring method plays an important role in fatigue crack identification and life monitoring. Among them, the fiber Bragg grating (FBG) sensor is characterized by high precision, sensitivity, stability, and portability along with long monitoring range, promoting further development of strain monitoring technology toward higher accuracy, higher sensitivity, higher reliability, and better convenience. In this paper, a real-time continuous crack monitoring method based on the FBG sensor array is proposed for the fatigue crack monitoring of aluminum alloy structures in service.

**Methods** The research method of this paper is shown in a flow chart (Fig. 1), which is mainly divided into the following four parts: parameter selection, experiment and data processing, prediction and evaluation, and model building. First, fatigue loading test parameters and crack-propagation characteristics are obtained via tensile tests. The strain field distribution characteristics during crack propagation are obtained via extended finite element simulation. Based on the strain field analysis and fatigue loading experiment results of different crack-propagation stages, a reasonable layout of the FBG sensor array is designed. Through fatigue loading and strain monitoring experiments, the relationships among fatigue loading times, wavelength response, and crack length are obtained. Values of peak-peak wavelength are extracted as characteristic values to exclude the interference of temperature and deformation during the stretching process. The three-parameter exponential method is used to fit the  $a-N$  ( $a$  is the crack length, and  $N$  is the loading times) curve of fatigue expansion. Then, based on the experiment, the gradient boosting regression tree (GBRT) algorithm is used to build the prediction model, and the comparison is made using linear regression and support vector regression (SVR) methods. The three models are evaluated based on various

indicators, such as explain variance score (EVS), mean absolute error (MAE), mean square error (MSE),  $R^2$ , and five-fold cross-validation. Finally, the best performing method is selected as the final prediction model on the basis of the evaluation results.

**Results and Discussions** Combined with the finite element simulation, fatigue loading experiment, and machine learning algorithm, this paper presents a method of fatigue crack strain field inversion prediction based on the FBG sensor array. To study the strain field change in the crack-propagation process, the crack extension strain field change is obtained in the cloud via finite element simulation (Fig. 3). Simulation experiment results show that the crack tip is singularity and the strain center will shift with the growing crack tip. Based on the simulation results, a sensor layout method was designed with six FBG sensors equally spaced on both sides of the crack (Fig. 7). The experimental results show that this design can effectively monitor the strain field changes at various stages of crack growth.

After filtering the experimental results of fatigue loading and strain monitoring, peak-peak wavelength values are extracted as the characteristic values. The response curves of loading times, crack length, and wavelength peak-to-peak values can be obtained (Figs. 11–12). The simulation results can be verified via direct analysis of the graph. The direction of crack propagation can be determined by placing sensors in the crack-propagation position.

Based on the strain response data collected in the experiment, the GBRT algorithm was used to invert the strain field in the stable expansion stage. In total, 31000 data with six features were imported into the GBRT model for five-fold cross-validation. The learning rate was 0.1, and the maximum iterations was 150 times. The regression results were consistent with the real value (Fig. 16). To verify the predictive performance of the GBRT method, it is compared with the linear regression and SVR methods. The results of cross-validation show that the SVR and GBRT methods are stable. In the evaluation of EVS, MAE, MSE, and  $R^2$ , the results of the GBRT model were closest to the ideal value best.

**Conclusions** The study is aimed at the safety monitoring requirements of large equipment in long-term service state and realizes the full-life fatigue crack monitoring of the metal structure parts in its key parts, which is important from the practical application perspective. Based on theoretical analysis, numerical simulation, and strain experiment, using strain field data to invert the crack length is proved to have a reliable theoretical basis and practical feasibility. The proposed FBG sensor array is a good strain monitoring method, which makes the collected local strain show regularity and gradation at different stages of crack growth, and realizes the prediction of crack growth degree and the identification of crack cracking direction. Based on the prediction method of fatigue crack length from experimental data, the GBRT algorithm is compared with linear regression and SVR methods. The results show that the GBRT algorithm performs better in strain field inversion by the evaluation of EVS, MAE, MSE,  $R^2$ , and cross-validation.

**Key words** fiber optics; fiber grating; fatigue crack; extended finite element; gradient boosting regression tree; crack prediction

**OCIS codes** 060.2300; 060.3735; 060.2370