

引文格式:王岩,蒋浩,柳荣星,等.智能涂层裂纹传感器监测精度验证[J].航空制造技术,2026,69(18):25020413.

WANG Yan, JIANG Hao, LIU Rongxing, et al. Monitoring accuracy of crack sensors based on intelligent coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 25020413.

智能涂层裂纹传感器监测精度验证

王 岩^{1,2}, 蒋 浩³, 柳荣星⁴, 郭蔚依⁴, 刘马宝^{1,2}

(1. 西安交通大学, 西安 710049;

2. 西安交通大学复杂服役环境重大装备结构强度与寿命国家重点实验室, 西安 710049;

3. 招商局检测车辆技术研究院有限公司, 重庆 401329;

4. 航空工业第一飞机设计研究所, 西安 710089)

[摘要] 飞机结构完整性是保障航空器安全性与服役寿命的核心要素,而结构健康监测技术是实现这一目标的关键手段。智能涂层传感器因具备轻量化、全表面覆盖及原位监测等优势,在结构健康监测领域具有广阔的应用潜力。本研究基于随附损伤效应,设计并制备了两种具有高精度裂纹监测能力的智能涂层传感器,并通过精度试验验证了其裂纹监测能力。通过COMSOL电流场仿真验证了传感器的工作机理。在精度验证方面对组件级试验件(以中心单孔板和壁板大开口为例)开展疲劳加载试验,结果表明,在中心单孔板试验中,传感器对平均长度0.57 mm的裂纹测量误差为0.15 mm;在壁板大开口试验中,对平均长度0.67 mm的裂纹测量误差为0.17 mm,充分验证了传感器的高精度裂纹监测能力。

关键词: 结构健康监测;智能涂层;裂纹监测;疲劳试验;精度

中图分类号: V26; TP212.9

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020413

Monitoring Accuracy of Crack Sensors Based on Intelligent Coatings

WANG Yan^{1,2}, JIANG Hao³, LIU Rongxing⁴, GUO Weiyi⁴, LIU Mabao^{1,2}

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401329, China;

4. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] The structural integrity of aircraft is a core element in ensuring the safety and service life of aircraft, and structural health monitoring (SHM) technology is a critical means to achieve this goal. Intelligent coating sensors, with the advantages of lightweight design, full-surface coverage and in-situ monitoring, possess great application potential in the field of structural health monitoring. Based on the damage concomitant effect, this study designed and fabricated two types of intelligent coating sensors with high-precision crack monitoring capacity, and their performance was validated through precision tests. The working mechanism of the sensors was verified via COMSOL electric current field simulations. For precision verification, fatigue loading tests were carried out on component-level specimens (a center single-hole panel and a large opening panel were taken as examples). The results demonstrated that for cracks with an average length of 0.57 mm

收稿日期: 2025-12-23; 退修日期: 2026-01-28; 录用日期: 2026-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51175404);航空科学基金(2016347003);陕西省重点研发计划(2018ZDCXL-GY-03-01)

通信作者: 刘马宝, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 飞机结构健康状态监测, 新型材料、特种材料的疲劳、断裂性能, 材料表面纳米功能化处理, 特种成形技术。

in the center single-hole panel test, the measurement error of the sensor was 0.15 mm; In the large opening panel test, the measurement error reached 0.17 mm for cracks with an average length of 0.67 mm. The results fully verify the high-precision crack monitoring capacity of the sensors.

Keywords: Structural health monitoring; Intelligent coatings; Crack monitoring; Fatigue tests; Measurement accuracy

飞机结构健康监测系统通常包括传感器网络、信号采集与处理系统、通信系统、监控中心与报警设备4个组成部分^[1]。在结构健康监测系统中^[2],传感器采集到的数据内容、数据类型,以及数据的准确度都对整个健康监测环节有着举足轻重的影响^[3],而传感器网络能够动态监测结构应变、损伤、振动、温度等参数,精准识别裂纹萌生等损伤类型^[4-5]。飞机结构健康监测传感器一般可划分为两大类:第1类为应力应变监测传感器,典型代表包括电阻应变片、光纤光栅传感器^[6-7];第2类为裂纹直接监测传感器,涵盖断裂丝片、压电传感器^[8-11]、涡流阵列传感器^[12-13],以及智能涂层传感器^[14]等^[15-17]。

在众多结构健康监测传感器当中,智能涂层是一种基于复合材料与多层功能涂层集成的新型传感器,通过驱动层、传感层和保护层的协同作用,实时感知结构表面微裂纹的萌生与扩展^[18-19],并转化为可量化的电信号变化,实现裂纹损伤的在线动态监测,具有广泛的应用前景。然而,当前缺乏智能涂层传感器定量监测亚毫米级微裂纹的充分验证试验,难以实现该器件在飞机关键结构损伤监测中的推广应用。

针对该现状,本文研制了一款可实现亚微米级裂纹定量检测的智能涂层传感元件。基于随附损伤效应,该传感器通过设计多分支电阻栅丝并联网络结构以实现高灵敏度信号捕获,并采用电流场仿真与组件级试验件疲劳试验相结合的方法,在中心单孔板与壁板大开口两种典型的组件级试验件上验证了智能涂层传感器对亚毫米级裂纹的监测精度,为其在飞机关键结构损伤监测的应用奠定了良好的基础。

1 智能涂层裂纹传感器的设计与仿真验证

1.1 智能涂层裂纹传感器工作原理

本文研究的智能涂层裂纹传感器是在传统智能涂层裂纹传感器的基础上设计的,主要由驱动层、传感层和保护层组成。特别对传感层进行微电路重构,设计形成了多分支电阻栅丝并联网络。传感层结构示意图如图1所示。

智能涂层裂纹传感器的工作原理依托电阻栅丝的随附损伤特性,即监测表面结构损伤产生裂纹时,由于

驱动层、传感层和基体之间紧密粘接,电阻栅丝会随基体裂纹的萌生而产生裂纹。当裂纹沿预定方向萌生并扩展时,电阻栅丝随着裂纹扩展依次断裂。通过对电阻栅丝微电路电压以及电流的实时监测,可以得到传感器电阻信号的变化情况,工作原理如图2所示。

当裂纹萌生并穿过第1根电阻栅丝时,电阻栅丝断裂,此处电路断路,传感器微电路结构由3根电阻栅丝并联变成2根电阻栅丝并联,以此类推,可以得到传感器电阻信号 R_c 和裂纹长度 L_c 的关系:

$$R_c = \begin{cases} 1/(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}), & L_c < a \\ 1/(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}), & a \leq L_c < 2a + b \\ R_3, & 2a + b \leq L_c < 3a + 2b \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 为电阻栅丝的宽度; b 为两根电阻栅丝之间的距离; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为裂纹扩展方向各条栅丝的电阻。

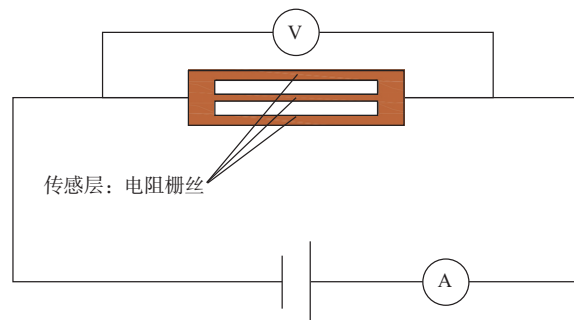


图1 智能涂层裂纹传感器传感层结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of sensing layer structure of intelligent coating crack sensor

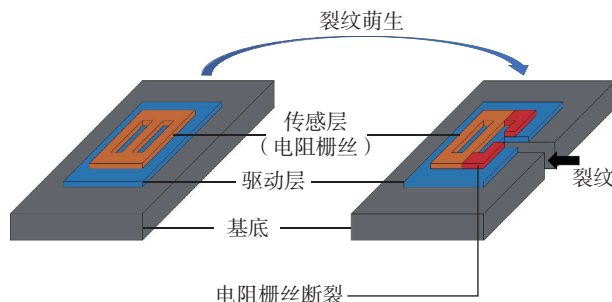


图2 智能涂层裂纹传感器工作原理图
Fig.2 Schematic diagram of working principle of intelligent coating crack sensor

1.2 智能涂层裂纹传感器的设计

在飞机结构中,由于应力集中,孔部位受复杂的受力环境影响,更容易萌生裂纹。根据统计数据,大约有80%的疲劳裂纹来自铆钉孔或者螺栓孔区域,对孔边裂纹进行监测成为飞机结构健康监测领域中最重要课题^[20]。本文根据智能涂层裂纹传感器的工作用途,设计并制造了针对孔边裂纹监测的圆孔型智能涂层裂纹传感器以及直条型智能涂层裂纹传感器。

(1)圆孔型。

本文设计的圆孔型智能涂层裂纹传感器结构如图3所示,结构由3根电阻栅丝并联组成,3根电阻栅丝的宽度均为0.1 mm,距离孔边最近的电阻栅丝半径为5.5 mm,每两根电阻栅丝之间的距离为0.4 mm,在裂纹监测过程当中,裂纹每扩展0.4 mm,会导致传感器的电阻信号发生突变,传感器监测范围为最内侧电阻栅丝内侧至最外侧电阻栅丝外侧,共1.1 mm。

(2)直条型。

本文设计的直条型智能涂层裂纹传感器结构如图4所示,结构由6根电阻栅丝并联组成,6条电阻栅丝的宽度均为0.1 mm,6根电阻栅丝之间的间距依次为0.1 mm、0.1 mm、0.4 mm、0.5 mm和0.8 mm,传感器监测范围为最内侧电阻栅丝外侧至最外侧电阻栅丝内侧,共2.5 mm。

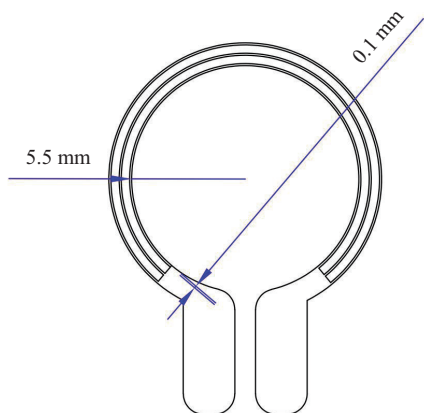


图3 圆孔型智能涂层裂纹传感器尺寸图

Fig.3 Dimensional drawing of circular-hole intelligent coating crack sensor

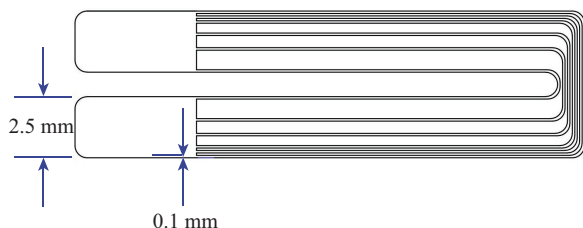


图4 直条型智能涂层裂纹传感器尺寸图

Fig.4 Dimensional drawing of straight-strip intelligent coating crack sensor

圆孔型传感器的3根栅丝采用小等间距排布,便于对工程中重点关注的孔边微裂纹开展监测。对于直条型传感器,将传统直线形状的电阻丝设计为U形,能够有效延长电阻栅丝,从而提高其电阻阻值,使传感器的信号变化更明显。6根栅丝采用了变间距分布,该设计在裂纹萌生阶段采用较小的栅丝间距,可提高对裂纹起始点的定位精度和监测灵敏度,便于早期预警。裂纹扩展区域采用递增的栅丝间距,在保证一定监测精度的前提下有效扩展了传感器的总体监测范围,同时能够避免监测后期裂纹扩展过快引发多根电阻栅丝同步断裂,进而导致数据不准确的问题。

1.3 智能涂层裂纹传感器的制造

圆孔型和直条型智能涂层裂纹传感器的制造均使用磁控溅射工艺。磁控溅射是一种真空镀膜技术,通过施加磁场约束电子,使氩离子轰击靶材溅射出原子,并在基底表面沉积成膜,如图5所示。该技术沉积速率高、薄膜均匀致密,且适配多种材料,广泛应用于传感器制备。

通过磁控溅射,利用高能等离子体轰击覆铜挠性电路板,在基体表面沉积出相应的图形,形成微米级别的铜材质薄膜^[21]。加工完成的智能涂层裂纹传感器通过以丙基丙烯酸为主要材质的速干胶固定在监测部位,圆孔型和直条型两种智能涂层裂纹传感器实物图如图6所示。

1.4 智能涂层裂纹传感器的仿真实验

为了从仿真层面验证智能涂层裂纹传感器的监测能力,本文使用COMSOL软件对直条型智能涂层裂纹传感器进行仿真验证。圆孔型与直条型传感器的工作原理、电学响应机制本质一致,均依靠电阻栅丝随基体裂纹扩展依次断裂,造成并联电路电阻阶跃变化,仅栅丝几何布局存在差异。圆孔型传感器栅丝等间距布置,直条型传感器前两处栅丝间距相同,后3处间距逐级增大。直条型传感器同时涵盖等间距与变间距两种排布形式,代表性更强,因此本文仅对直条型传感器开展仿真分析,圆孔型传感器的监测性能则通过疲劳试验进行验证。

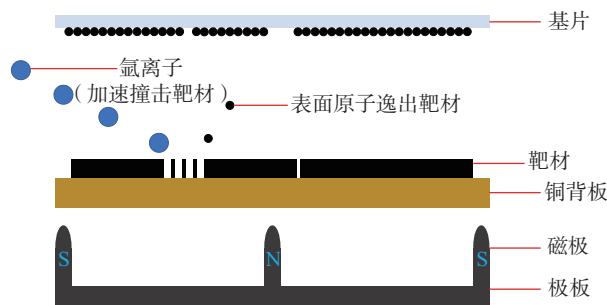


图5 磁控溅射原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of magnetron sputtering principle

(1)模型建立。

采用COMSOL 电流(ec)物理场进行稳态研究,然后按照直条型结构参数建立直条型智能涂层传感器的几何模型,为方便观察,将智能涂层裂纹传感器的厚度设置为0.1 mm。传感器材料选择铜,在智能涂层裂纹传感器的其中一个焊盘的边缘添加1 V的恒定电压,另外一个焊盘在同样的位置接地,以此来模拟智能涂层裂纹传感器的工作状态(图7)。

(2)裂纹扩展模拟。

在电流(ec)物理场下求解稳态方程,获取无损伤状态下智能涂层裂纹传感器的电势分布。结合传感器工作机理,利用COMSOL对裂纹萌生与扩展全过程开展仿真,分别提取单根栅丝断裂至全部栅丝断裂对应的计算结果,如图8所示。

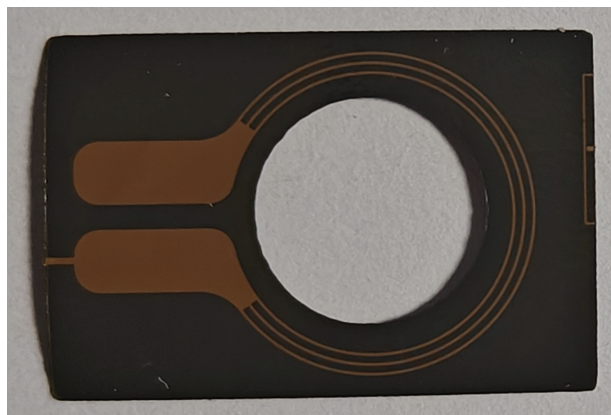
根据COMSOL的计算结果,绘制智能涂层裂纹传感器电阻信号与裂纹长度的关系,如图9所示。可以看到,当裂纹扩展时,电阻值信号会有一个明显的阶梯式变化,说明此时智能涂层裂纹传感器的电阻栅丝断裂,能够看到智能涂层裂纹传感器与裂纹长度对应关系明显,在仿真层面说明智能涂层裂纹传感器具有监测裂纹萌生与扩展的功能。

2 智能涂层裂纹传感器组件级试验精度验证

试验以飞机结构的两种典型组件级结构为试验件,



(a) 直条型



(b) 圆孔型

图6 智能涂层裂纹传感器

Fig.6 Intelligent coating crack sensor

进行了智能涂层裂纹传感器的中心单孔板试验及壁板大开口试验,对试验件进行疲劳加载,在试验件的关键部位安装智能涂层裂纹传感器,用于实时监测裂纹萌生及扩展,验证其具备监测亚毫米级别裂纹的能力。通过对比智能涂层裂纹传感器监测到的裂纹长度,以及电子显微镜所测量到的真实裂纹长度,对智能涂层裂纹传感器的监测精度进行验证。

2.1 中心单孔板试验验证

(1)中心单孔板试验件模型与材料参数如下。

中心单孔板试验件的材料为6061-T6铝合金,该材料是航空承力结构的常用材料,其疲劳性能数据公开且完善,试验结果可用于工程验证分析。中心单孔板作为常用试件,尺寸设计依据主要参考国家标准GB/T145—2001,宽度为40 mm,厚度为5 mm,中心孔半径为5.5 mm,试验件两侧有宽度为50 mm的夹持端,尺寸图及试验件实物图如图10所示,在圆孔处安装圆孔型智能涂层裂纹传感器。

(2)试验过程。

针对中心单孔板试验件,开展基于智能涂层传感器的结构裂纹检测试验,试验开展3次,如图11所示。首先将圆孔型智能涂层裂纹监测传感器安装在监测部位(图11(a)),通过MTS-880/25T电液伺服万能试验机对已安装试验件进行疲劳加载(最大应力 $S_{\max}=2$ kN,应力比 $R=0.1$,采样频率为4 Hz,载荷基于材料屈服强度、疲劳强度及试验件几何尺寸进行设计,并通过控制试验件的应力水平,使试件在数十万次疲劳循环后萌生亚毫米级裂纹),同时利用在线监测设备对智能涂层传感器的电阻信号实时监测,当传感器信号显示试验件出现裂纹时停止加载,读取在线监测系统的监测数据并计算裂纹长度。得出裂纹长度之后在不损坏试验件表面结构的情况下移除智能涂层传感器,使用DPT-5着色渗透探伤剂对试验件进行着色探伤,之后通过工业CCD电子视频显微镜测量裂纹真实长度并对比智能涂层传感器监测到的裂纹长度,以此验证

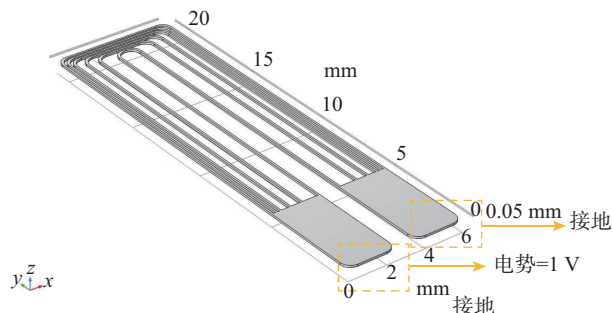


图7 直条型智能涂层裂纹传感器仿真建模

Fig.7 Simulation model of straight-strip intelligent coating crack sensor

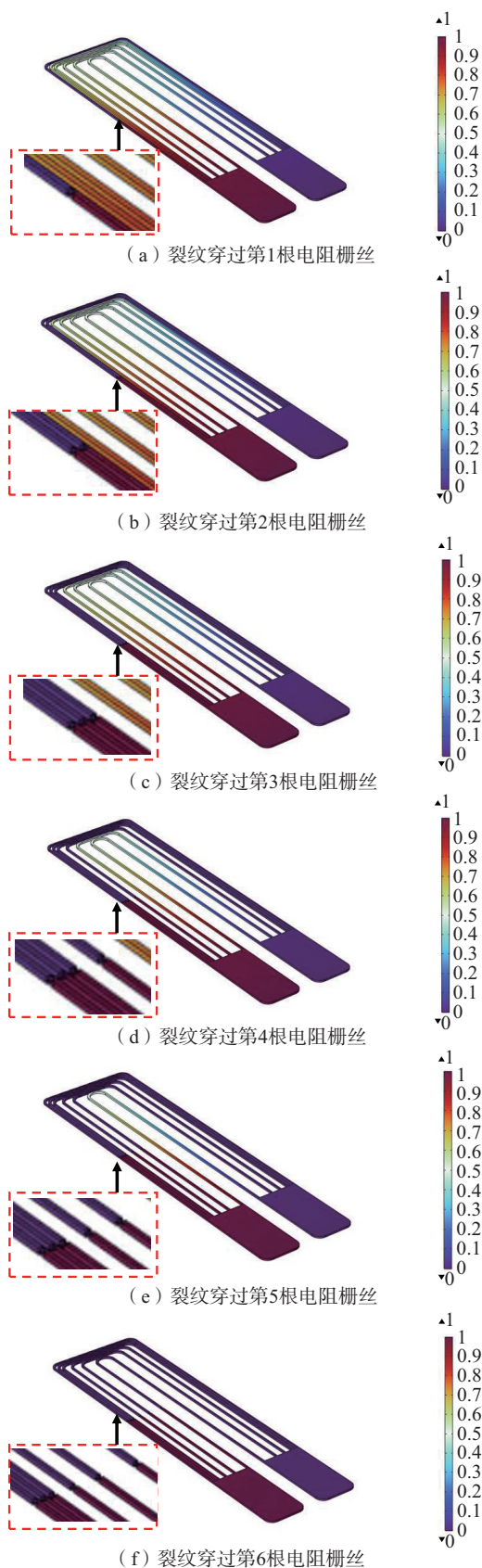


图8 智能涂层裂纹传感器裂纹扩展电势图

Fig.8 Potential distribution of intelligent coating crack sensor during crack propagation

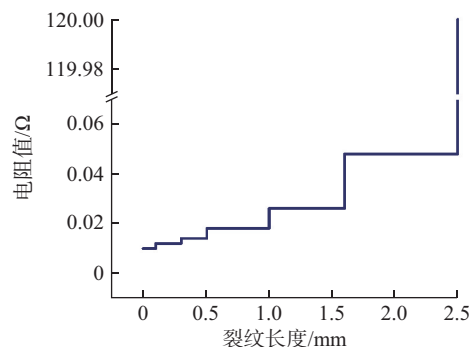
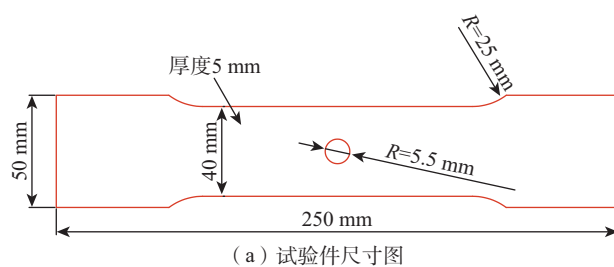


图9 智能涂层裂纹传感器电阻值与裂纹长度曲线

Fig.9 Curve of resistance versus crack length for intelligent coating crack sensor



(a) 试验件尺寸图



(b) 试验件实物图

图10 中心单孔板试验件

Fig.10 Center single-hole test specimen

智能涂层传感器是否具备监测 1 mm 以内裂纹的能力。

(3) 试验结果及分析。

本次试验总共在 3 件中心单孔板试验件布置了智能涂层裂纹传感器, 分别对 3 件试验件进行疲劳试验, 试验结果如图 12 所示。

传感器指示裂纹长度与视频显微镜下实际测量得到的裂纹长度数据如表 1 所示。

由试验结果可知, 在本次中心单孔板试验件开展的智能涂层裂纹传感器精度验证试验中, 传感器测量长度和真实裂纹长度的平均测量误差为 0.15 mm, 3 个圆孔型智能涂层裂纹传感器均监测到了 1 mm 以内裂纹的萌生, 说明圆孔型智能涂层裂纹传感器具备监测 1 mm 以内裂纹的能力。在试验件的关键含孔部位安装圆孔型智能涂层裂纹传感器, 用于实时监测裂纹萌生与扩展, 验证了其具备监测亚毫米级别裂纹的能力。

2.2 壁板大开口试验验证

(1) 壁板大开口试验件模型与材料参数如下。

壁板大开口试验件的材料为2024-T351铝合金^[22],宽度为100 mm,厚度为4 mm,长度为470 mm,试验件中心有椭圆形开口,宽度为52 mm,长度为130 mm。试验件图如13所示,在开口两侧各安装一个直条型智能涂层裂纹传感器。

(2) 试验方案。

针对壁板大开口试验件,开展基于智能涂层裂纹传感器的结构裂纹检测试验,试验开展3次,首先将

直条型智能涂层裂纹监测传感器安装在监测部位,传感器安装如图14(a)所示;通过MTS-880/50T电液伺服万能试验机对已安装试验件进行疲劳加载(最大应力 $S_{\max}=38$ kN,应力比 $R=0.04$,采样频率为4 Hz),如图14(b)所示;同时利用在线监测设备对智能涂层裂纹传感器的电阻信号实时监测,当传感器信号显示试验件出现裂纹时停止加载,读取在线监测系统的监测数据并计算裂纹长度。得出裂纹长度后,在不损坏试验

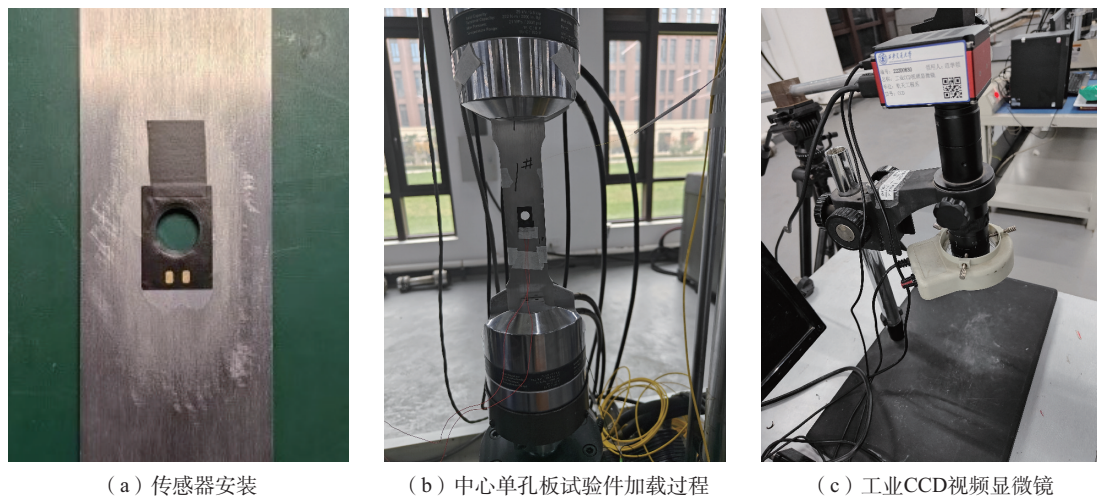


图11 中心单孔试验件试验图

Fig.11 Test setup of the center-single-hole specimen

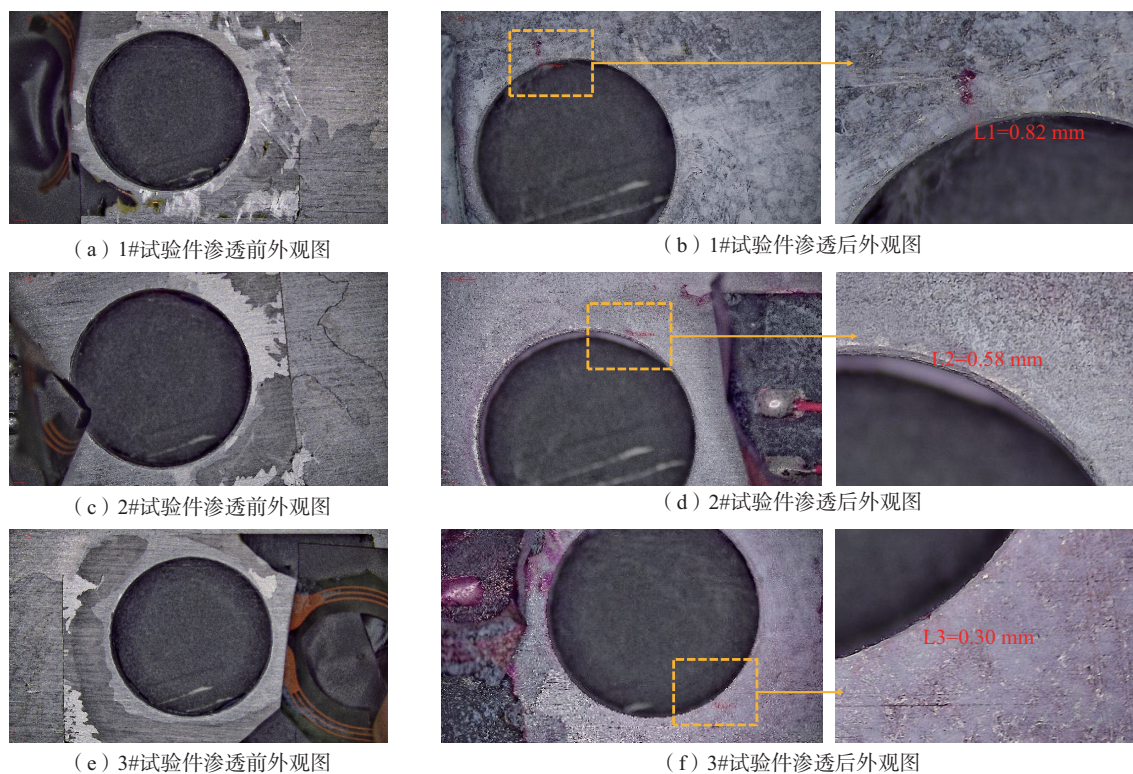


图12 3件试验件显像后采用视频显微镜观察到的裂纹测量图

Fig.12 Crack measurement images of three test specimens observed via video microscope after development

件表面结构的情况下移除智能涂层传感器,通过PET高精度透明菲林卡尺和W05电子数码显微镜测量裂纹真实长度,并对比智能涂层传感器所监测到的裂纹长度,如图14(c)和(d)所示,以此验证智能涂层传感器是否具备监测1 mm以内裂纹的能力。

(3)试验结果与分析。

壁板大开口试验件的疲劳试验在3件试验件上布置了6个传感器,分别对3个试验件进行了疲劳试验,试验结果如图15所示。

由于试验件裂纹从壁板开口的一侧开始萌生,所

以每件试验件记录到的数据只有一组。传感器指示裂纹长度与电子显微镜下实际裂纹长度数据如表2所示。

根据试验结果可知,本次在壁板大开口试验件上开展的智能涂层裂纹传感器精度验证试验中,传感器测量长度和真实裂纹长度的平均测量误差为0.17 mm,3件试验件上的传感器均监测到了1 mm以内裂纹的萌生,说明直条型智能涂层裂纹传感器具有监测1 mm以内裂纹的能力。在试验件的关键开口部位安装直条型智能涂层裂纹传感器,用于实时监测裂纹萌生与扩展,

表1 中心单孔板试验件裂纹长度数据
Table 1 Crack length data of center single-hole panel specimens

试验件编号	传感器信号指示的裂纹长度	电子显微镜测得的裂纹长度	平均裂纹真实长度	测量误差	平均测量误差
1#	0.60	0.82	0.57	0.22	0.15
2#	0.60	0.58	0.57	0.02	0.15
3#	0.10	0.30	0.57	0.20	0.15

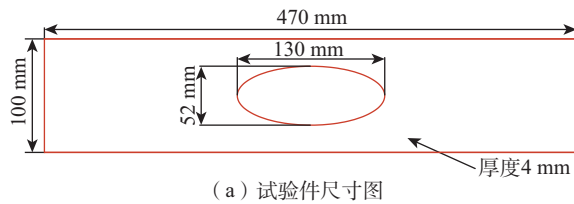


图13 壁板大开口试验件
Fig.13 Large-cutout panel test specimen

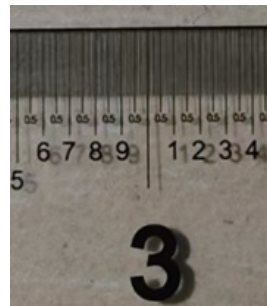
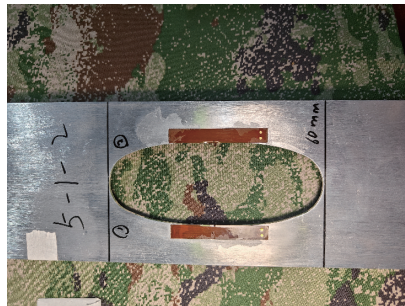


图14 壁板大开口试验过程图
Fig.14 Test process of large cutout panel specimen

验证了其具备监测亚毫米级别裂纹的能力。

3 结论

智能涂层传感器在结构健康监测领域具备广阔的应用前景。为推动该类裂纹监测传感器工程落地,本文设计并制备了可实现裂纹定量测量的智能涂层裂纹传感器。借助仿真分析验证其工作机理,同时开展精度标定试验,在组件级试验件上完成传感器监测精度考核。本文主要创新点与研究结论如下。

(1)基于随附损伤效应设计开发了具备亚毫米级裂纹监测能力的两种智能涂层传感器,其传感层采用多分

支电阻栅丝并联网结构,能够将裂纹扩展过程转化为离散的电阻阶跃信号,并在此基础上探讨了制作智能涂层裂纹传感器的流程和相关加工技术。

(2)利用 COMSOL 的电流模块对智能涂层裂纹传感器进行仿真验证,建立了传感器电阻信号变化与裂纹长度的对应关系,从仿真层面验证了智能涂层裂纹传感器具备监测亚毫米级裂纹的工作能力。

(3)通过开展典型组件级疲劳试验,验证了智能涂层裂纹传感器的监测精度。中心单孔板疲劳试验监测到的平均裂纹长度为 0.57 mm,传感器测量长度和真实裂纹长度的平均测量误差为 0.15 mm;壁板大开口疲劳

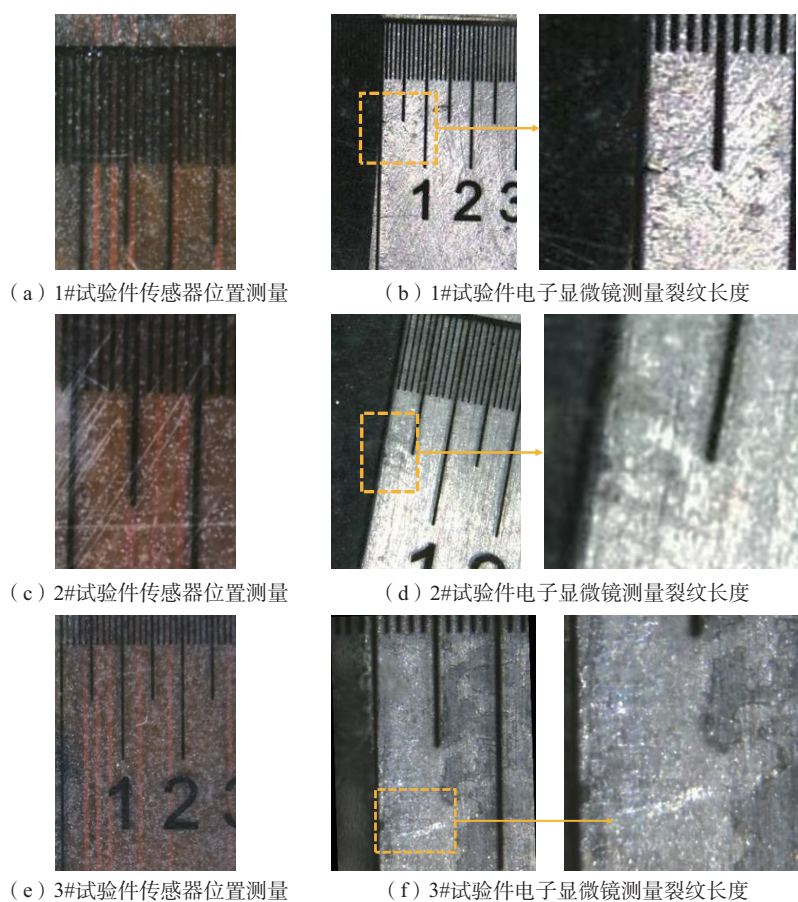


图 15 3件试验件用电子显微镜观察到的裂纹测量图

Fig.15 Crack measurement images of three test specimens observed via scanning electron microscopy

表 2 壁板大开口试验件裂纹长度数据

Table 2 Crack length data of large cutout panel specimens

mm

试验件编号	传感器信号指示的裂纹长度	电子显微镜测得的裂纹长度	平均裂纹真实长度	测量误差	平均测量误差
1#	0.4	0.7	0.67	0.3	0.17
2#	0.5	0.5	0.67	0	0.17
3#	0.6	0.8	0.67	0.2	0.17

试验监测到的平均裂纹长度为0.67 mm,平均测量误差为0.17 mm。

参考文献

[1] 刘雪蓉, 曹贺, 张宝珍. 飞机结构健康监测技术发展研究[J]. 计测技术, 2024, 44(2): 13–24.

LIU Xuerong, CAO He, ZHANG Baozhen. Research on the development of aircraft structural health monitoring technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(2): 13–24.

[2] 穆腾飞, 李忠剑, 戴喜妹. 飞机结构健康监测技术[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(3): 35–41.

MU Tengfei, LI Zhongjian, DAI Ximei. Aircraft structural health monitoring technology[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(3): 35–41.

[3] PITROPAKIS I, PFEIFFER H, GESANG T, et al. Crack detection in aluminium 2024–T3 plates and in an airbus A320 slat-track using electrical crack gauges[C]//World Conference on Nondestructive Testing. Incheon, 2012: 16–20.

[4] SCURO C, SCIAMMARELLA P F, LAMONACA F, et al. IoT for structural health monitoring[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2018, 21(6): 4–14.

[5] CHEN C D, CHIU Y C, HUANG Y H, et al. Assessments of structural health monitoring for fatigue cracks in metallic structures by using lamb waves driven by piezoelectric transducers[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2021, 34: 04020091.

[6] VAN STEENKISTE R J. Strain and temperature measurement with fiber optic sensors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2025.

[7] TAN X, DU J, ZHANG Q H, et al. Monitoring restrained shrinkage and cracks of ultra-high-performance concrete (UHPC) using distributed fiber optic sensors[J]. Construction and Building Materials, 2024, 422: 135789.

[8] LANGAT R K, DENG W K, DE LUYCKER E, et al. In-situ piezoelectric sensors for structural health monitoring with machine learning integration[J]. Mechatronics, 2025, 106: 103297.

[9] SHI Y N, DAI J K. Optimized design of a triangular shear piezoelectric sensor using non-dominated sorting genetic algorithm – II (NSGA-II)[J]. Sensors, 2025, 25(3): 803.

[10] YE F L, DING X H, MA T, et al. Application research of epoxy resin mortar composite encapsulated piezoelectric ultrasonic sensors in monitoring dynamic modulus of asphalt concrete[J]. Measurement, 2025, 246: 116642.

[11] AI L, MESARIC T, FLOWERS S, et al. Evaluation of impact energy in composites using acoustic emission sensing technique[J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(1): 016154.

[12] SONG Y J, FAN X H, LYU W M, et al. Fatigue crack monitored by flexible eddy current array sensor for invisible part of bolt hole edge[J]. Measurement, 2025, 239: 115465.

[13] SHAO Y C, XIA Z H, DING Y Q, et al. Eddy current sensor array for electromagnetic sensing and crack reconstruction with high lift-off in railway tracks[J]. Sensors, 2024, 24(13): 4216.

[14] LIU M B, LI B B, LI J T, et al. Smart coating sensor applied in crack detection for aircraft[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 330: 383–388.

[15] 景博, 黄崧琳, 王生龙, 等. 军用飞机PHM系统一体化设计架构分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 64–73.

JING Bo, HUANG Songlin, WANG Shenglong, et al. Analysis on integrated design of military aircraft prognostic and health management (PHM) system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 64–73.

[16] 刘凌峰. 金属结构弹性波波动特性仿真分析方法[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(4): 36–42.

LIU Lingfeng. Simulation analysis method for fluctuation characteristics of metal structures based on elastic wave[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(4): 36–42.

[17] 田童, 李建乐, 邓德双, 等. 飞行器结构健康监测技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 41–67, 98.

TIAN Tong, LI Jianle, DENG Deshuang, et al. Research progress of structural health monitoring technology for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 41–67, 98.

[18] ZHANG X, CUI C, CHEN J, et al. Electrical properties of low temperature-sensitive coating sensor for fatigue crack monitoring in steel bridges[J]. Construction and Building Materials, 2023, 406: 133422.

[19] SHAO S B, CUI C, CHEN J, et al. A sprayed grid coating sensor for the quantitative monitoring of fatigue cracks in steel bridges[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2025, 15(5): 1421–1437.

[20] 于翀, 宋昊, 刘春红, 等. 基于光纤光栅与BP神经网络的孔边裂纹监测研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 187–198.

YU Chong, SONG Hao, LIU Chunhong, et al. Research on hole edge crack monitoring based on optical fiber gratings and BP neural network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 187–198.

[21] 彭璵, 陈广琦, 宋宜驰, 等. 聚酰亚胺柔性基底上磁控溅射金属铜膜的电学性能研究[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 138101.

PENG Jin, CHEN Guangqi, SONG Yichi, et al. Study on electrical performance of metal copper films deposited by magnetron sputtering on polyimide flexible substrates[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 138101.

[22] 张天杨, 陈思源, MAZIAR Toursangsaraki, 等. 2024–T351 铝合金激光冲击微观组织强化机制分析[J]. 航空制造技术, 2023, 66(16): 111–116, 123.

ZHANG Tianyang, CHEN Siyuan, MAZIAR Toursangsaraki, et al. Analysis of microstructure strengthening mechanisms of laser peening on 2024 – T351 aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(16): 111–116, 123.

(责编 七七)