

一种金属结构裂纹监测的薄膜传感器设计

侯波 何宇廷 高潮 邓乐乐

(空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要:针对金属结构服役过程中裂纹实时监测的需求,设计了一种基于电位法原理的裂纹监测薄膜传感器。首先,建立了该薄膜传感器的有限元模型并对传感器输出特性进行了仿真分析。仿真结果表明:通过分析各监测点之间的电位差变化可以判断裂纹扩展方向和长度。其次,应用离子镀技术在铝合金中心孔试件表面制备了薄膜传感器,薄膜传感器与基体表面结合良好。最后,进行了基于薄膜传感器的裂纹监测试验。实验结果表明:通过分析相邻两次监测数据的变化程度可以判断裂纹所处的扩展阶段。

关键词:结构健康监测;薄膜传感器;离子镀;金属结构

中图分类号:TP212.1; V215.6

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)03-0419-06

Film Sensor Design for Metallic Structure Crack Monitoring

Hou Bo, He Yuting, Gao Chao, Deng Lele

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: According to the real-time crack monitoring demand of metallic structures during their service, a film sensor is presented to monitor the metal structure crack based on the electric potential method. Firstly, the corresponding finite element model(FEM) of the film sensor is established, and the output characteristics of the sensor are analyzed by FEM. The results indicate that the extension direction and the length of crack can be obtained through analyzing the electric potential differences between monitoring points. And then the film sensor is prepared on the surface of the 2A12 aluminum alloy specimen by ion plating technology, which can integrate with metal surface firmly. Finally, crack monitoring experiments are carried out with the film sensor. Experimental results show that the structural crack propagation stage can be learned through analyzing the change extent of the adjacent monitoring data of the film sensor.

Key words: structure health monitoring; film sensor; ion plating; metallic structure

金属结构作为航空装备中应用最广泛的承力结构,在使用过程中极有可能产生裂纹直至破坏。主承力金属结构一旦产生裂纹并扩展,将造成十分惨痛的后果,航空史上发生过多起因飞机金属结构断裂引起的重大事故。因此,为保证飞机结构的安全,必然要求发展金属结构裂纹监测技术^[1]。

目前,国内外结构健康监测领域的研究取得了大量的成果,例如光纤传感器、声发射技术、相对真

空传感器、压电传感器和涡流传感器等^[2-5]。然而,专门针对飞机金属结构裂纹监测的研究较少。实际飞机结构的工作环境往往比较恶劣,而且飞机金属结构的疲劳损伤大多发生在连接部位,经常会伴随载荷作用和相互磨损,这就要求传感器必须满足耐久性、稳定性、与结构相容性等要求,而现有的监测传感器很难满足这些需求。在众多检测技术中,电位技术具有原理简单、可以对结构进行在线实时

基金项目:国家自然科学基金(51201182)资助项目。

收稿日期:2013-12-24;**修订日期:**2014-04-03

通信作者:何宇廷,男,教授,博士生导师,E-mail:hyt666@tom.com。

监测等优点,近来受到了广泛的关注^[6-8]。电位技术直接将结构本身的导电特性作为损伤监测信号^[9],因此对结构形状的敏感性和难以对复杂结构的损伤定位限制了其应用。

本文提出了一种基于电位法原理的金属结构裂纹监测薄膜传感器设计方案,通过有限元模拟建立了薄膜传感器各监测点电位差与裂纹特征信息之间的量化关系,应用电弧离子镀技术在 2A12 铝合金试件表面制备了设计的传感器,基于该薄膜传感器进行了疲劳裂纹在线监测试验,对传感器的裂纹监测能力进行了验证。

1 薄膜传感器设计方案

飞机结构中螺栓连接结构的孔边是最容易出现裂纹的部位之一。因此,选用 2A12 铝合金板材中心孔试件作为监测对象设计传感器。裂纹监测薄膜传感器的设计位置和形状如图 1 所示。

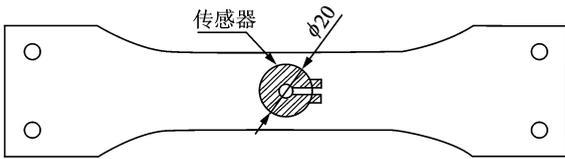


图 1 传感器示意图

Fig. 1 Schematic graph of sensor

设计的薄膜传感器具有三层结构:底层为与金属结构基体绝缘隔离的支撑层,中层为核心结构导电传感层,顶层为封装保护层。

薄膜传感器工作原理为:当基体结构出现表面裂纹时,具有随附损伤特性的薄膜传感器会出现相应的裂纹,并且随着基体结构裂纹不断扩展,引起裂纹区域电位场发生变化,通过监测传感器电阻(电位)数据的变化获得裂纹的相关信息。

2 传感器裂纹监测有限元模拟

为了确定裂纹长度与传感器各输出点间电位差的关系,运用有限元分析软件 ANSYS 对基于电位法原理的薄膜传感器监测特性进行有限元仿真分析。

2.1 传感器有限元模型

传感器几何模型如图 2 所示,其中恒定电流的大小为 1 A,从 A 点、B 点流入,C 电流出。假设传感器材料为各向同性材料,电阻率取 $0.085 \Omega \cdot \text{m}$ 。

运用有限元分析软件 ANSYS 建立传感器的

二维有限元仿真模型如图 3 所示。模型选用二维八节点的电学单元 PLANE230,采用映射划分法对模型进行网格划分,由于电场在裂纹尖端可能具有奇异性,对裂纹尖端区域的网格进行细化。

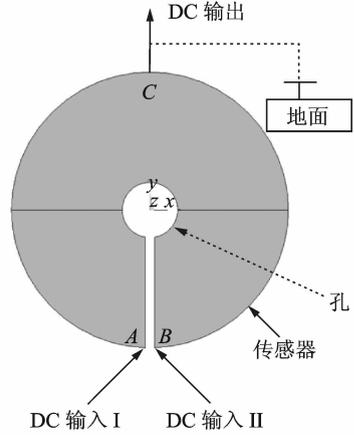


图 2 传感器几何模型

Fig. 2 Geometry model of the sensor

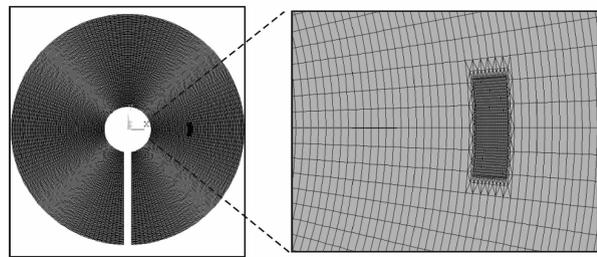


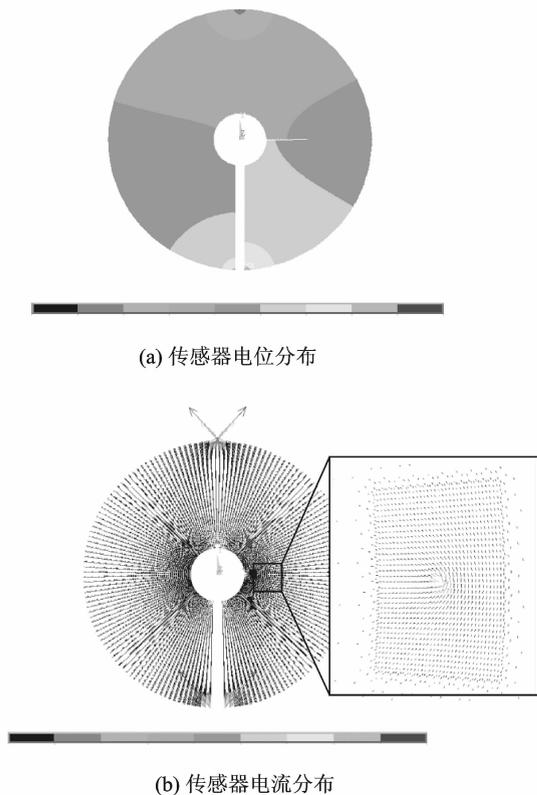
图 3 传感器有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the sensor

2.2 传感器输出特性分析

通过该有限元模型进行传感器输出特性仿真分析,传感器右侧存在 5 mm 的裂纹时,传感器的电位和电流分布如图 4 所示。由图 4(a)可知,由于传感器右侧存在裂纹,传感器中电位分布出现明显改变,B 点电位值明显高于 A 点的电位值。右侧的孔边裂纹造成传感器右侧的电阻值增加,进而引起电位值分布的变化。由图 4(b)可知,传感器中裂纹尖端的电流流动方向发生急剧变化。

在载荷作用下,传感器随着试件变形而发生“应变电阻效应”,当试件未产生裂纹时,通过分析传感器电位变化,可以得到试件本身的应变情况;当试件产生裂纹时,裂纹与应变都会引起传感器电位场的变化,应变对监测电位的影响相对于裂纹的影响较小,而且其随载荷水平变化而不断变化,因此,在 FEA 模型中进行了简化,忽略了应变对监测



(a) 传感器电位分布

(b) 传感器电流分布

图 4 仿真分析结果

Fig. 4 Result of simulation analysis

电位变化的影响。运用该模型计算孔边裂纹长度不断扩展,各监测点间的电位差随裂纹长度的变化情况,分别对裂纹单边扩展和双边扩展两种情况进行分析。

2.2.1 裂纹沿径向单边扩展时的输出特性

当裂纹只向孔边右侧扩展时,传感器监测点的电位值随裂纹长度的变化情况如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着裂纹的扩展,B 点的电位值逐渐增加,A 点的电位值略微减小。当孔边右侧裂纹从 1 mm 扩展到 5 mm,A 点的电位值只改变了大约 1 mV,而 B 点的电位值增加了 45 mV。据此推断孔边右侧裂纹对 AC 之间输出的电位差影响很小。

当裂纹只向孔边右侧扩展时,传感器监测点 BA 间的电位差随裂纹长度的变化情况如图 6 所示。

通过拟合,得到裂纹向右侧扩展时裂纹长度 a 与 BA 间电位差的关系为:

$$a = 0.166\ 98 + 0.203\ 63 \times U_{BA} - 0.004\ 11 \times U_{BA}^2 + 3.858\ 24E - 5 \times U_{BA}^3 \quad (1)$$

式中: a 的单位为 mm; U_{BA} 的单位为 mV。

同理,当裂纹向左侧扩展时,A 点的电位值增

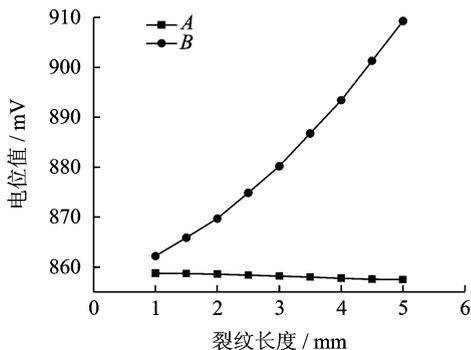


图 5 裂纹向右侧扩展时监测点 A,B 的电位值

Fig. 5 Potential value of the monitoring points A and B when a crack propagating from right side of the hole

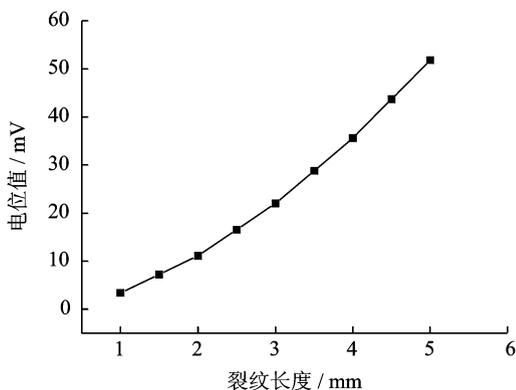


图 6 裂纹向右侧扩展时 BA 之间电位差

Fig. 6 Potential difference between B and A when a crack propagating from right side of the hole

加,B 点的电位值减小。裂纹向左侧扩展时,与裂纹向右侧单向扩展相比,传感器的裂纹及电场分布是关于传感器轴线对称的,AB 之间的电位差仅与裂纹的长度有关系,因此裂纹长度 a 与 AB 间电位差之间的关系同样服从式(1)。

对于裂纹沿径向单边扩展的情形,可以监测 BC,AC 和 AB 之间的电位差,通过 BC,AC 间电位差的变化趋势来判断裂纹的扩展方向,即 BC 递减、AC 递增为裂纹向左侧扩展,BC 递增、AC 递减为裂纹向右侧扩展,通过式(1)可以确定裂纹的长度。

2.2.2 裂纹沿径向双边扩展时的输出特性

作为原理分析,仅考虑了裂纹等长度地向两边扩展的情形。图 7 为裂纹向双边扩展时,监测点 AC(BC)间的电位差随裂纹长度的变化情况。

随着裂纹的扩展,AC 和 BC 之间的电位差逐

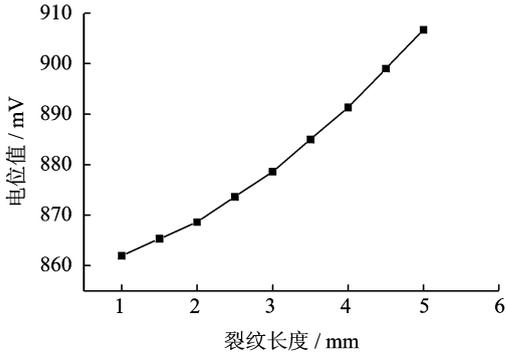


图7 裂纹向两边扩展时 AC 之间电位差

Fig. 7 Potential difference between A and C when cracks propagating from both sides of the hole

渐增加。通过拟合,得出裂纹沿径向两边扩展时裂纹长度 a 与 AC(BC)间电位差的关系为

$$a = 0.18372 + 0.22916 \times (U_{AC} - 859) - 0.00522 \times (U_{AC} - 859)^2 + 5.34574E - 5 \times (U_{AC} - 859)^3$$

式中: a 的单位为 mm; U_{AC} 的单位为 mV;859 mV 为没有裂纹时 AC(BC)间的电位差。

有限元仿真分析结果表明,薄膜传感器可以实现对结构裂纹扩展方向以及扩展长度的有效监测。

3 薄膜传感器制备

采用阳极氧化工艺^[10-11]制备 2A12 铝合金基体薄膜传感器的绝缘支撑层。所采用阳极氧化工艺的具体参数如表 1 所示。测量结果显示该层的厚度约为 10 μm 。

表 1 阳极氧化工艺参数

Tab. 1 Anodic oxidation parameters

参数	参数值
$\text{H}_2\text{SO}_4 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	40~60
$\text{H}_3\text{BO}_3 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	5~10
$\text{Al}^{3+} / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	<20
温度/ $^{\circ}\text{C}$	25~35
直流电压/V	12~20
电流密度/ $(\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	0.4~2.5
$\text{H}_2\text{SO}_4 / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	40~60

采用离子镀技术来制备导电传感层,选择铜作为传感层的组成材料。工艺流程如下:

(1)试件经砂纸打磨、抛光后放在四氯化碳溶剂中超声清洗 10 min;(2)将试件固定在夹具上置于离子镀炉中;(3)在 2.0 Pa 真空度下进行氩气轰

击清洗 10 min;最后应用电弧离子镀技术,在试件的表面沉积 2~8 μm 厚的铜镀层。具体工艺参数如表 2 所示。

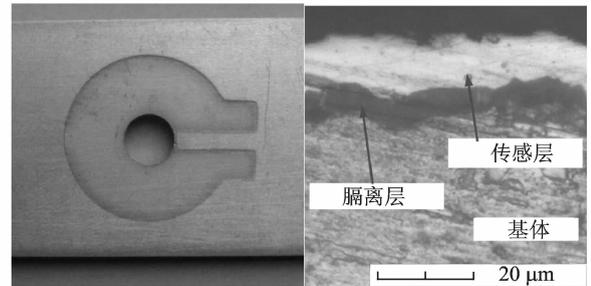
表 2 沉积工艺参数

Tab. 2 Deposition parameters

参数	参数值
温度/ $^{\circ}\text{C}$	<200
弧电流/A	40~70
氩气压强/Pa	2.0
工作压强/Pa	0.1~10
偏压/V	50~150
镀膜时间/min	根据厚度确定

当传感器膜层厚度过大,延展特性过强,并且微裂纹开口较小时,传感器虽然与被监测试样同时开裂,但裂纹处部分粘连,监测电位值会出现偏差,影响裂纹监测准确性。因此,需要选择合适的传感器厚度、控制镀膜时间,本文制备的传感器膜层为微米量级。

采用 704 硅胶对薄膜传感器进行封装保护。制备的薄膜传感器如图 8(a)所示,薄膜传感器的断面形貌如图 8(b)所示,由图 8(b)可知传感器各层的厚度均为微米量级,传感器与金属基体结合良好。



(a) 宏观形貌

(b) 断面形貌

图 8 薄膜传感器形貌

Fig. 8 Morphology of film sensor

4 薄膜传感器裂纹监测试验

基于薄膜传感器的裂纹监测试验在室温、空气环境中进行。试验采用 MTS810 型液压伺服疲劳试验机对试件加载常幅疲劳载荷。试验参数设定如下:试验加载频率 f 为 20 Hz,应力比 R 为 0.03,峰值载荷为 150 MPa。

试验过程中,将恒流直流电流引入薄膜传感器,采用 VICTOR86B 数字多用表对薄膜传感器的输出信号进行记录,通过分析传感器输出信号的

变化获得试件的裂纹信息。

裂纹监测试验结束后薄膜传感器的形貌如图9所示。由图9可知薄膜传感器并未与铝合金基体发生剥离,整个试验过程中薄膜传感器与基体结合情况良好。

薄膜传感器的输出信号随时间变化的情况如图10所示。图中每个点代表一个测量数据,横坐标与试验时间相对应,纵坐标与薄膜传感器的输出信号相对应,在此对实验数据的坐标轴做了量纲一处理,仅对监测信号的变化趋势进行分析和说明。

从图10可知,薄膜传感器监测数据出现了两次阶跃式突变。第一次阶跃上升包括3个测量信号,前后两个监测数据的变化量在6%左右;第二次阶跃上升包含两个测量信号,前后两个监测数据的变化量超过了20%。监测数据急剧下降段,前

后两个相邻测量数据变化量在14%左右。

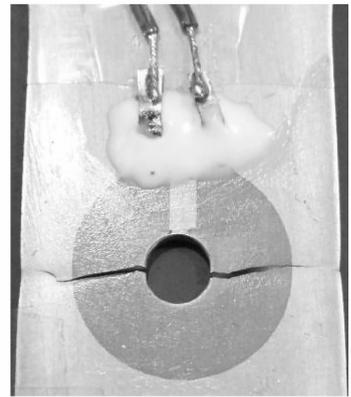


图9 监测实验结束后薄膜传感器形貌

Fig. 9 Morphology of film sensor after crack monitoring experiment

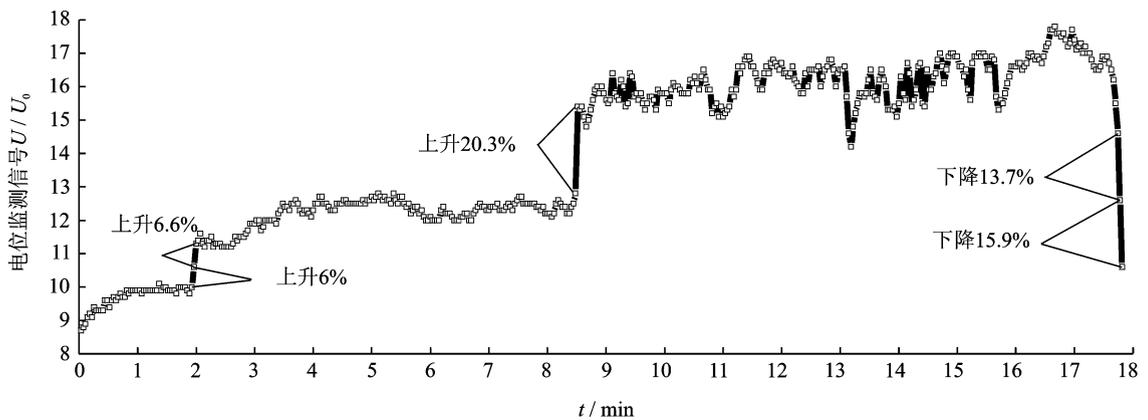


图10 薄膜传感器监测数据

Fig. 10 Monitoring data of the film sensors

分析认为第一次阶跃上升是由于结构塑性变形累积造成的,第二次阶跃式上升则反映了结构裂纹的萌生,而监测数据急剧下降则代表试件失稳断裂。因此,传感器前后两个相邻监测数据的变化程度可以作为判断结构表面裂纹扩展阶段的标准。

5 结 论

本文提出了一种基于电位法原理的裂纹监测薄膜传感器设计方案,并进行了传感器输出特性有限元模拟和基于薄膜传感器的裂纹监测试验研究。通过本文的研究可以得到以下结论:

(1)通过表面处理工艺在结构件疲劳危险部位制备薄膜传感器进行裂纹实时监测的方案具有可行性。

(2)通过对传感器输出特性进行仿真分析,拟合得到了裂纹长度与各监测点电位差的关系式。

(3)应用电位法原理,通过分析薄膜传感器各监测点电位差变化情况,可以判断裂纹的扩展方向和长度。

(4)通过考察传感器相邻监测数据的变化程度可以判断结构表面裂纹扩展所处的阶段。

(5)薄膜传感器与基体结合良好。

参考文献:

- [1] 袁慎芳. 结构健康监控[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
Yuan Shenfang. Structural health monitoring and damage control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [2] Ecke W, Grimm S. Optical fiber grating sensor network basing on high-reliable fibers and components for space-craft health monitoring[C]//Smart Structures and Materials 2001: Sensory Phenomena and

- Measurement Instrumentation for smart Structures and Materials. Newport Beach, California: SPIE, 2001, 4328:160-167.
- [3] Schubert F. Basic principles of acoustic emission tomography [J]. Journal of Acoustic Emission, 2004, 22(1):147-158.
- [4] Hisao Fukunaga, Ning Hu, Chang Fukuo. Structural damage identification using piezoelectric sensors [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(2):393-418.
- [5] Roach D. Real time crack detection using mountable comparative vacuum monitoring sensors[J]. Smart Structure and Systems, 2009, 5(4):317-328.
- [6] Angelidis N, Khemiri N, Irving P E. Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in CFRP laminates [J]. Smart Mater Struct, 2005, 14:147-154.
- [7] Todoroki A, Tanaka Y. Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method [J]. Compos Sci Technol, 2002, 62(6): 29-39.
- [8] Wang S, Shui X, Fu X, et al. Fatigue damage in carbon fibre composites observed by electrical resistance measurement[J]. J Mater Sciand, 1998, 33(38): 75-84.
- [9] Schueler R, Joshi S P, Schulte K. Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping [J]. Composites Sci and Technol, 2001, 61(9): 21-30.
- [10] 张胜宝, 师玉英, 张旭. 铝合金硬质阳极氧化工艺研究 [J]. 电镀与精饰, 2011, 33(8):43-46.
Zhang Shengbao, Shi Yuying, Zhang Xu. Hard anodizing technology of aluminum alloy [J]. Plating and Finishing, 2011, 33(8):43-46.
- [11] 韩克, 欧忠文, 蒲滕, 等. 铝及铝合金硬质阳极氧化的研究进展 [J]. 表面技术, 2011, 40(5):92-96.
Han Ke, Ou Zhongwen, Pu Teng, et al. Development of hard anodizing of aluminum and aluminum alloy [J]. Surface Technology, 2011, 40(5):92-96.