

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905680

基于 Lamb 波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料 传感器制备及应用*

沈意平¹, 刘 缘¹, 王 钢¹, 韩 斌², 蒋 帅^{1,3}

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室 湘潭 411201; 2. 华中科技大学 数字制造装备
与技术国家重点实验室 武汉 430074; 3. 湖南铁道职业技术学院 株洲 412001)

摘 要: 风力机叶片、飞机机翼等结构均为大面积曲面板类结构, 基于 Lamb 波的结构健康检测技术对细微损伤比较敏感, 是目前最具应用前景的技术之一。传统的 Lamb 波传感器大都采用 PZT 陶瓷制成, 质地脆且硬度大, 不能适应于曲面结构检测。将 PZT 陶瓷粉末与环氧树脂复合制备了一种新型柔性 0-3 型压电复合材料, 研究了质量比、极化电场、极化温度和极化时间等因素对压电复合材料性能参数的影响, 开展了多因素正交实验来确定材料制备的最优极化工艺参数。实验研究了该压电复合材料制成的传感器对 Lamb 波的传感响应特性, 与现有的 MFC、PVDF 和传统压电片等传感元件的响应特性进行了对比分析。将制备的传感器应用于翼型曲面板, 利用椭圆定位方法进行损伤检测。研究结果表明, PZT 陶瓷/环氧树脂压电复合材料传感器具有良好的传感响应特性, 能够很好地贴合于曲面板表面, 与只能部分耦合于曲面板的传统压电片相比, 采集的 Lamb 波信号更加准确, 从而为曲面板类结构健康监测提供一种新型的柔性压电传感技术。

关键词: 压电复合材料; 曲面结构; 正交实验; 柔性传感器; 传感响应特性

中图分类号: TH878 TB559 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Preparation and application of piezoelectric ceramic/epoxy resin composite sensor based on Lamb wave

Shen Yiping¹, Liu Yuan¹, Wang Gang¹, Han Bin², Jiang Shuai^{1,3}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The structure of wind turbine blades and aircraft wings is a kind of large-area curved plate-like structure. The structure health monitoring (SHM) technique based on Lamb wave is highly sensitive to slight damage, which is one of the techniques that have wide application prospect. The traditional Lamb wave sensors are generally made of piezoelectric ceramic, which features brittleness and high hardness, therefore traditional PZT ceramic sensors are not suitable for the detection on curved surface structures. In this study, a new type of flexible 0-3 piezoelectric composite was prepared by combining PZT ceramic powder with epoxy resin. The influences of mass ratio of PZT ceramic powder and epoxy resin, polarization electric field, polarization temperature, polarization time and etc. on the PZT composite performance parameters were investigated. Multiple factor orthogonal experiments were conducted to determine the optimal polarization processing parameters for material preparation. Experiments were performed to investigate the sensing response characteristics of the sensor made of the PZT composite to lamb wave. The sensing response characteristics were compared with those of the sensing elements made of MFC, PVDF and the traditional piezoelectric disc. The prepared sensor was applied to airfoil surface plate and the elliptic positioning method was used to carry out damage detection. The study results show that the fabricated piezoelectric composite

收稿日期: 2019-10-03 Received Date: 2019-10-03

* 基金项目: 国家自然科学基金(51705163)、湖南省重点研发计划(2018GK2044)、湖南省教育厅科学研究项目优秀青年项目(18B567)资助

material sensor possesses good sensing response characteristic. The sensor can nicely fit the curved plate surface. The acquired Lamb wave signal is more accurate compared with the Lamb wave signal acquired using traditional piezoelectric disc that can only partially fit the curved plate surface. So, the research provides a new type of flexible piezoelectric sensing technique for the SHM of curved plate structures.

Keywords: piezoelectric composite; curved surface structure; orthogonal experiment; flexible sensor; sensing response characteristic

0 引言

风力机叶片、飞机机翼等结构大都为复杂曲面板类结构, Lamb 波在板类结构中具有传播距离远、对细微损伤敏感等优点, 是目前应用最为广泛的结构损伤检测技术^[1-4]。Lamb 波技术常采用铅钛酸铅压电陶瓷^[5] (piezoelectric ceramic, PZT) 元件作为传感器, 然而传统的压电元件质地脆、密度和硬度大, 难以贴合于曲面结构表面。近年来学者们先后研制出了许多新型的柔性压电复合材料, 应用较多的压电聚合物, 如聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF)^[6-8]、1-3 型压电纤维复合材料^[9] 和 0-3 型压电复合材料^[10]。PVDF 压电薄膜厚度小、柔性大、质量轻, 但其压电性能受环境温度影响波动很大。1-3 型压电复合材料是将细小直径的压电纤维均匀排列在聚合物内, 如研究较多的 Smart Material 公司的压电纤维复合材料 (macro fiber composite, MFC)^[11]、MIT 研制的活性压电纤维复合材料 (active fiber composite, AFC)^[12] 和 Acellent 公司的 Smart Layer^[13] 等, 但其制备过程复杂、生产成本较高、整体效率不高, 应用于曲面结构仍然比较困难。

0-3 型压电复合材料是由不连续的 PZT 陶瓷粉末颗粒分散于三维连接的聚合物中, 兼具压电陶瓷相和聚合物相两相材料的优点。1978 年, Newnham 等^[14] 最早采用涂覆法制备了 0-3 型 PZT/聚合物薄膜材料。Egusa 等^[15] 采用 PZT 粉末和环氧树脂混合制成压电涂层并应用于结构损伤检测。Payo 等^[16] 采用 PZT 粉末和水性丙烯酸复合并研究其传感特性与极化电场、极化时间、极化厚度与 PZT 质量比的函数关系。Kang 等^[17] 将 PNN-PZT 粉末和环氧树脂复合, 并结合无线传输技术应用于风力机叶片鸟撞声发射信号监测。研究表面利用此材料制备的压电复合材料传感器, 具有柔性好、灵敏度高、频带宽、使用温度范围宽等良好的综合性能。国内学者们大多对其性能进行了研究, 张洪涛等^[18] 将不同 PZT 粉末与环氧树脂复合, 探究了极化参数和 PZT 粉末对压电常数 d_{33} 的影响。胡南等^[19] 采用热压成型法制备 PZT-PZN/PVDF 压电复合材料, 并探讨了不同极性与类型的高聚物及各种组合与工艺参数对 d_{33} 的影响。张鸿名^[20] 开展了 0-3 型 PZT 陶瓷/环氧压电复合材料的性能预报研究, 并将其应用于减振降噪与能量采集。

由于 0-3 型 PZT 陶瓷/环氧压电复合材料的性能参数影响因素较多, 主要包括 PZT 陶瓷/环氧树脂的质量比、极化电场强度、极化时间与极化温度等因素, 现有研究大多研究单一因素对其性能参数的影响, 没有探究多个影响因素的主次关系。本文采用正交实验^[21] 来研究多因素对 PZT 陶瓷/环氧压电复合材料性能参数的主次效应顺序, 从而提出材料制备的最优方案; 结合 Lamb 波技术, 将其制作为 Lamb 波接收传感器, 实验研究该传感器的传感响应特性, 并与现有的 MFC、PVDF 和传统压电片等传感元件的响应特性进行了对比分析。

1 材料制备

本文采用 PZT 陶瓷与环氧树脂材料复合来制备 0-3 型压电复合材料。PZT 陶瓷压电性好, 但质地脆、变形量较小; 而环氧树脂作为热固性聚合物, 力学性能好, 凝聚力强, 固化收缩率小, 粘结性强。PZT 陶瓷与环氧树脂复合可以制成薄膜/板状或设计成复杂形状的柔性压电复合材料, 从而易于贴合于复杂曲面结构表面。

本文的压电陶瓷粉末由江苏派州电子科技有限公司提供, 采用预烧过的 PZT-5a 压电陶瓷粉体, 平均粒径为 100 μm 。环氧树脂由深圳市达利森科技有限公司提供, 型号为 SY-3 150 A, 环氧树脂与固化剂配比为 10:1。将压电陶瓷粉末与环氧树脂按不同质量比混合, 采用真空搅拌机搅拌均匀形成糊状物, 如图 1(a) 所示。将糊状物均匀涂抹于成型模具中, 常温 10 MPa 压力下固化, 制成的复合材料如图 1(b) 所示, 其直径为 25 mm, 厚度为 1 mm。

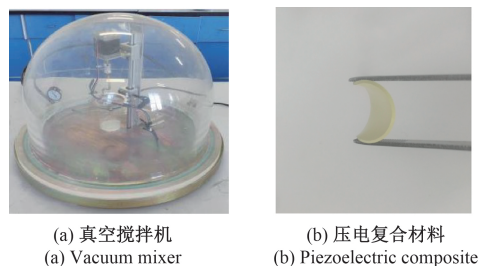


图1 压电复合材料制备

Fig.1 The piezoelectric composite preparation

压电复合材料的电极采用 ET500 磁控溅射仪进行喷镀, 极化方式为油浴极化。极化完成后室温静置 24 h, 采用 TH-2838 型精密阻抗仪和 ZJ-6 A 型准静态测量仪检

测其介电和压电性能参数,测量仪器如图 2 所示。

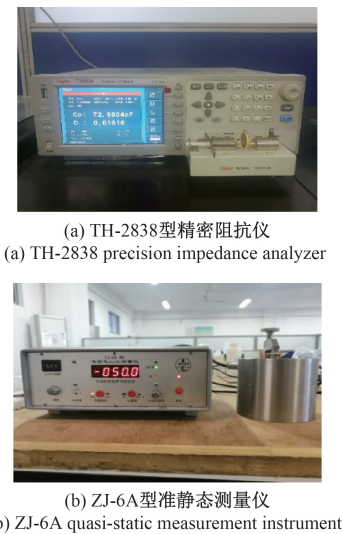


图 2 压电复合材料性能参数仪器

Fig.2 The instruments used for piezoelectric composite material parameter measurement

PZT 陶瓷/环氧树脂复合材料性能参数的影响因素包括 PZT 陶瓷粉末与环氧树脂两组分材料的质量比、极化电场强度、极化温度和极化时间,本文采用正交实验方法来分析各因素的主次顺序及最优方案。实验制备过程中发现,PZT 陶瓷粉末与环氧树脂质量比大于 7:1 时,PZT 陶瓷与环氧树脂复合困难,制备的材料气孔、间隙等缺陷增多,导致高压极化时容易发生击穿。本文首先研究了不同质量比下极化时间对材料性能参数的影响,再采用正交实验方法研究质量比(A)、极化电场(B)和极化温度(C)3 因素的主次顺序及优化方案。3 因素 5 水平的 L25(56) 正交设计实验方案详如表 1 和 2 所示。

表 1 正交实验的因素和水平

Table 1 Orthogonal experiment factors and levels

水平	因素		
	A	B	C
1	5:1	3	20
2	6:1	4	40
3	7:1	5	60
4	8:1	6	80
5	9:1	7	100

2 压电复合材料性能参数影响因素分析

2.1 质量比对复合材料介电性能的影响

介电常数是表征材料在外电场作用下极化程度的物

表 2 正交设计
Table 2 Orthogonal design

项目	因素			项目	因素		
	A	B	C		A	B	C
1	1	1	1	14	3	4	1
2	1	2	2	15	3	5	2
3	1	3	3	16	4	1	4
4	1	4	4	17	4	2	5
5	1	5	5	18	4	3	1
6	2	1	2	19	4	4	2
7	2	2	3	20	4	5	3
8	2	3	4	21	5	1	5
9	2	4	5	22	5	2	1
10	2	5	1	23	5	3	2
11	3	1	3	24	5	4	3
12	3	2	4	25	5	5	4
13	3	3	5				

理量,取决于压电复合材料两组分的质量比。本文制备了质量比为 5:1,6:1,7:1,8:1,9:1 的压电复合材料,测得 1 kHz 下的相对介电常数 ϵ_r 和介电损耗 $\tan \delta$ 如图 3 所示。从图 3(a)可以看出,当 PZT 陶瓷和环氧树脂质量比增加时, ϵ_r 显著增大,质量比为 7:1 时 ϵ_r 达到最大值 56.11;质量比继续增加, ϵ_r 减少。这是因为环氧树脂介电常数比 PZT 陶瓷小很多,随着质量比增加,环氧树脂含量减少,导致复合材料的相对介电常数增大;当质量比大于 7:1 时,现有方法制备的压电复合材料中气孔、间隙等缺陷增多,导致相对介电常数减少。从图 3(b)可以看出,不同质量比下材料的介电损耗均很小,满足压电传感器介电损耗小的要求,质量比为 6:1~8:1 时介电损耗稳定于最小值附近。

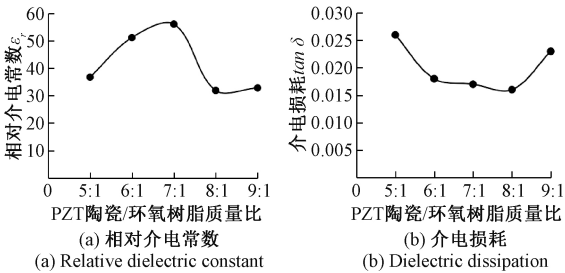


图 3 质量比对介电性能的影响

Fig.3 The influence of the mass ratio on material dielectric properties

2.2 极化时间和质量比对复合材料压电性能的影响

针对制备的质量比为 5:1,6:1,7:1,8:1,9:1 的压电

复合材料,在极化场强 5 kV/mm 下,分别极化 5、10、15、20、25 min,极化温度为 40℃,极化时间对压电常数 d_{33} 的影响如图 4 所示。从图 4 中可以看出:

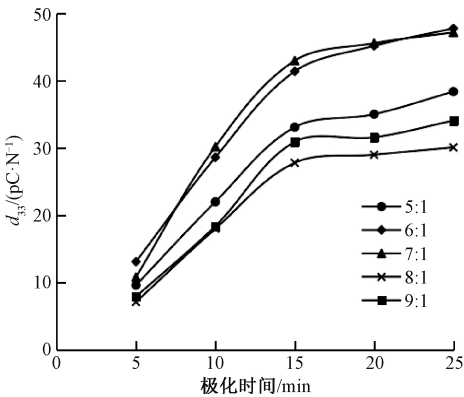


图 4 极化时间对 d_{33} 的影响

Fig.4 The influence of polarization time on d_{33}

1) 质量比从 5:1 增加到 7:1 时,复合材料 d_{33} 值增加达到最大值,当质量比继续增加至 9:1 时,复合材料 d_{33} 值减少。主要原因在于质量比较大时,材料中的气孔、间隙等缺陷增多。

2) 压电常数 d_{33} 随极化时间延长先大幅增大,在极化 15 min 后增长变缓。分析表明极化时间越长,电畴定向排列的程度越高,稳定性越好;极化时间到达一定值后,对复合材料压电常数 d_{33} 的提高贡献不大。本文后续正交实验的极化时间为 20 min。

2.3 多因素对复合材料压电性能影响

采用正交实验测得的压电复合材料压电常数如表 3 所示,方差分析和极差分析结果如表 4 和 5 所示。从分析结果可以看出,各因素对复合材料压电常数 d_{33} 影响顺序为 C>A>B,其中极化电场对 d_{33} 影响显著度不高 ($P>0.05$),极化温度和质量比影响显著 ($P<0.05$),极化温度为主要因素,质量比为次要因素;最优方案为 C5A3B3,即质量比为 7:1,极化电场为 5 kV/mm,极化温度为 100℃。本文对最优方案制备的复合材料进行稳定性实验,3 次实验测得的 d_{33} 分别为 72.96、75.12、74.36,平均值为 74.15,差值小于 2%,表明复合材料性能参数稳定。

图 5 所示为 3 个影响因素的不同水平均值下对复合材料压电常数 d_{33} 的影响。极化电场 $E<5$ kV/mm, d_{33} 随着极化电场的增加而增大,当 $E>5$ kV/mm, d_{33} 逐渐减少。随着极化温度的上升, d_{33} 先大幅增大,在 40℃~80℃ 间趋于平稳,80℃ 后又上升。由于压电常数 d_{33} 与相对介电常数 ϵ_r 成正比关系,不同质量比下 d_{33} 与 ϵ_r 的变化趋势大致相同,满足的关系表达式^[22] 如下:

$$d_{33} \cong d_c \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} \left(1 + \frac{\lambda \epsilon_c}{5 \epsilon_p + 2.5 \epsilon_c} \right) \quad (1)$$

表 3 正交实验结果

Table 3 Orthogonal experiment result

项目	压电常数 d_{33} 实测值 $/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	项目	压电常数 d_{33} 实测值 $/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	项目	压电常数 d_{33} 实测值 $/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$
1	32.4	10	45.12	19	35.49
2	44.85	11	51.23	20	35.81
3	51.73	12	55.2	21	57.79
4	50.58	13	76.46	22	29.93
5	52.1	14	40.07	23	47.55
6	51.05	15	58.57	24	43.32
7	59.57	16	42.68	25	45.11
8	54.19	17	56.44		
9	68.97	18	28.67		

表 4 方差分析

Table 4 Variance analysis

方差来源	自由度	均方	F	P	显著性
极化电场	4	18.70	1.00	>0.05	
极化温度	4	462.31	24.70	<0.05	*
质量配比	4	260.15	13.90	<0.05	*
误差	12	18.72			

表 5 极差分析

Table 5 Range analysis

水平	质量比	极化电场 $E/(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	极化温度 $T/^\circ\text{C}$
K1	46.33	47.03	35.24
K2	55.78	49.20	47.50
K3	56.31	51.72	48.33
K4	39.82	47.68	49.55
K5	44.74	47.34	62.35
极差	16.49	4.69	27.11
最优方案	3	3	5

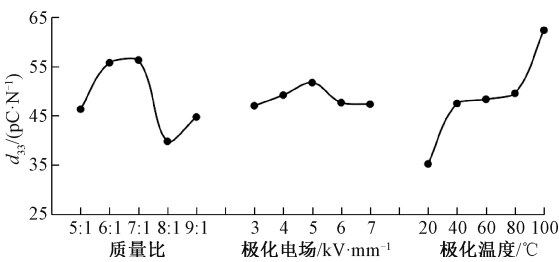


图 5 各因素下压电常数的分布

Fig.5 Distribution of piezoelectric constants under various factors

式中: d_e 为 PZT 陶瓷相的压电常数; ε_e 为 PZT 陶瓷相的相对介电常数; ε_p 为环氧树脂的相对介电常数; λ 为 PZT 陶瓷粉末和环氧树脂的质量比。

3 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器的应用实验

3.1 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器的制作

PZT 陶瓷/环氧树脂传感器的制作流程为裁剪、边缘处理、引出导线、绝缘处理和加保护层。通过裁剪和边缘处理将制备的压电复合材料制成特定形状,将信号导线焊接在压电复合材料上下两表面电极的引脚处,并均匀涂上导电银胶,保证连接点接触良好。传感器表面保护层为环氧树脂,防止实验测试时外界环境的干扰和表面电极层脱落。将 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器粘贴在被测工件的表面,粘结剂采用流动性较好且固化速度快的强力胶水,实现被测工件和传感器之间的应力传递,保证两者间良好的绝缘性。

3.2 不同压电传感器的响应电压幅值对比

本文将制备的 PZT 陶瓷/环氧压电复合材料传感器用于 Lamb 波信号传感检测,并与现有的 MFC、PVDF 和传统压电片等传感器响应特性进行对比。实验测试采用 1 m×1 m×1.5 mm 铝板,激励压电片布置在铝板中心。将 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器、PVDF、MFC、圆形压电片以激励点为中心环形阵列,其半径 200 mm。压电片来自 Piezo 公司,直径为 12.7 mm。MFC 为 Smart Material 公司的 M2814-P2,尺寸为 28 mm×14 mm×0.3 mm。PVDF 采用 MEAS 公司的 LDT0-028 K,尺寸为 22.5 mm×10.0 mm×0.125 mm。

激励信号为汉宁窗调制的五周正弦波,激励波中心频率为 20~120 kHz,通过功率放大器 EPA-104 进行电压放大后驱动激励压电片,不同压电传感器接收 Lamb 波信号采用 NI USB-6366 数据采集卡进行采集。压电传感器响应电压信号微弱、噪声大,实验测试时采用添置 PXPA3 型放大器和均值平滑滤波方法提高信号信噪比。中心频率为 20 kHz 下,PZT 陶瓷/环氧树脂传感器采集 100 次平均后的信号如图 6(a) 所示,采用 db5 小波进行离散小波变换,消噪后的信号如图 6(b) 所示。图 6 计算得到直达波 A_0 到达时间为 0.30 ms,与理论到达时间基本一致。

不同压电传感器测得的 Lamb 波幅值如表 6 所示。传统的压电陶瓷片在不同频率下响应电压幅值最高。相比 MFC 和 PVDF,PZT 陶瓷/环氧树脂传感器呈现出良好的传感响应特性,在 20~120 kHz 激励频率下其响应电压幅值均大于 PVDF;在 60 kHz 以下时 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器的响应电压幅值均大于 MFC,在大于 60 kHz 时两者幅值相当。

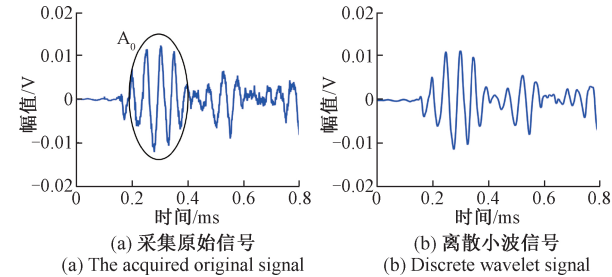


图 6 激励中心频率为 20 kHz 的原始信号及分析结果
Fig.6 The original signal and analysis result for the excitation center frequency of 20 kHz

表 6 不同压电传感器的响应电压幅值
Table 6 The voltage response amplitudes of different piezoelectric sensors (mV)

项目	频率/kHz					
	20	40	60	80	100	120
PZT 陶瓷/环氧树脂传感器	13.2	6.43	3.44	1.42	1.08	0.79
PVDF	4.97	1.59	1.15	0.24	0.31	0.14
MFC	5.45	1.29	2.02	2.71	1.33	1.20
圆形压电片	36.30	32.00	9.87	4.72	4.16	3.83

3.3 曲面板实验

曲面板实验件为外径 150 mm、厚 1.5 mm、长 1 m 的圆柱铝管,将激励压电片布置在中心,PZT 陶瓷/环氧树脂传感器和传统压电片布置在距离激励点 200 mm 的对称位置上。传统压电片直径为 28 mm,由于传统压电片质地脆,硬度高,难以与圆柱铝管表面紧密贴合,实验采用中部耦合、两侧悬空的粘贴方式,如图 7(a) 所示。激励波中心频率为 30 kHz,PZT 陶瓷/环氧树脂传感器和压电片采集的 Lamb 波信号进行幅值归一化处理后的图 7(b) 所示。从图 7 中可以看出,传统压电片的 Lamb 波直达波到达时间发生了变化,且出现了混叠的复杂波包。这主要是由于压电片与铝管只存在部分耦合,导致信号产生相位变化与波形失真。

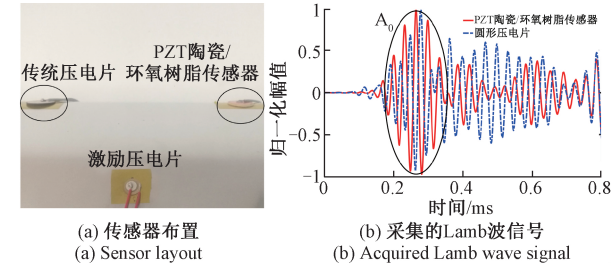


图 7 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器与传统压电片在曲面板检测
Fig.7 The detection of the PZT ceramic/epoxy resin sensor and traditional piezoelectric disc on curved panel

本文模拟损伤实验采用某翼型曲面板模拟件,由 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1.5\text{ mm}$ 铝板弯曲成型。将激励压电片和 3 个 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器分别粘贴在矩形 $150\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的 4 个角点,如图 8 所示。以激励点为坐标原点,通过在翼型曲面板 (125 mm , 150 mm) 处分别设置直径为 20 mm 的质量块和 $30\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的裂纹,进行损伤检测实验。

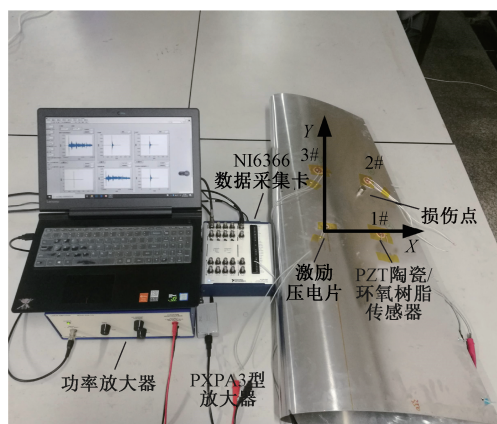


图 8 翼型曲面板模拟损伤实验系统

Fig.8 The experiment system for the airfoil curved plate simulated damage

激励波中心频率为 30 kHz ,损伤散射信号采用离散小波变换消噪,1 号传感器接收的损伤与健康信号如图 9 所示,可以找到损伤波包并提取其到达时间。利用椭圆定位方法计算出质量块位置为 (122 mm , 156 mm),裂纹中心位置为 (118 mm , 154 mm),估计的损伤位置与实际位置基本一致。

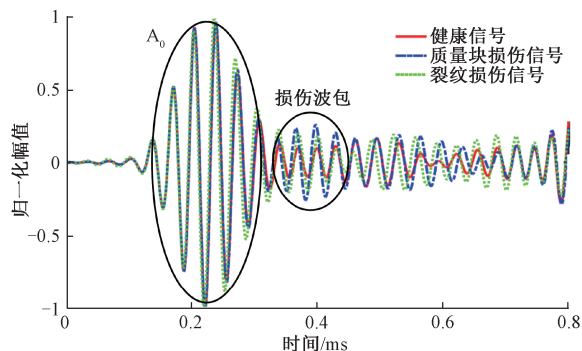


图 9 PZT 陶瓷/环氧树脂传感器的实验信号

Fig.9 The experiment signal measured with the PZT ceramic/epoxy resin composite sensor

4 结 论

本文通过正交实验对 PZT 陶瓷/环氧树脂压电复合

材料性能的影响因素进行了分析,各因素主次顺序为极化温度、质量比、极化电场,最优方案为 PZT 陶瓷/环氧树脂质量比 $7:1$,极化电场 5 kV/mm ,极化温度 100°C 。

相比 MFC 和 PVDF,PZT 陶瓷/环氧树脂压电复合材料传感器对 Lamb 波具有良好的传感响应特性;可以完全贴合于曲面板表面,与部分耦合的传统压电片相比,采集的 Lamb 波信号更加准确。研制的 PZT 陶瓷/环氧树脂压电复合材料传感器适用于翼型曲面板的不同损伤检测,将为曲面结构健康监测提供新型的柔性压电传感技术。

参考文献

- [1] GÓMEZ MUÑOZ C Q, GARCÍA MARQUEZ F P, HERNANDEZ CRESPO B, et al. Structural health monitoring for delamination detection and location in wind turbine blades employing guided waves [J]. Wind Energy, 2019, 22 (5): 698-711.
- [2] GIURGIUTIU V. SHM of aerospace composites-challenges and opportunities [C]. In CAMX Conference Proceedings, Dallas, TX, 2015:1-13.
- [3] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (8): 1713-1735.
- [4] HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [5] 黄松岭,王哲,王琬,等.管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J].仪器仪表学报,2018,39(3):1-12.
- [6] HUANG S L, WANG ZH, WANG K, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(3):1-12.
- [7] TIAN X Y, HE X F. Design and characterization of a low-cost piezoelectric vibration energy harvester with bulk PZT film [J]. Instrumentation, 2018, 5(4):32-40.
- [8] LONG J, SONGYUAN M, WEILI D, et al. Polarization-free high-crystallization β -PVDF piezoelectric nanogenerator toward self-powered 3D acceleration sensor [J]. Nano Energy, 2018, 50: 632-638.
- [9] 陈科,陈亚扣,郑红梅. 多层 PVDF 压电薄膜输出电压研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (1): 201-208.
- [10] CHEN K, CHEN Y K, ZHENG H M. Research on output voltage of multilayer PVDF piezo-films [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 201-208.
- [11] 郭雪培,侯晓娟,杨玉华,等. 基于 PVDF-TrFE 薄膜的

- 柔性自供电传感器[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 42-48.
- GUO X P, HOU X J, YANG Y H, et al. Flexible self-powered sensor based on PVDF-TrFE film[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 42-48.
- [9] STEPINSKI T, MAŃKA M, MARTOWICZ A. Interdigital lamb wave transducers for applications in structural health monitoring[J]. NDT & E International, 2017, 86: 199-210.
- [10] TANG J, LIU J, HUANG H. Dielectric, piezoelectric and ferroelectric properties of flexible 0-3 type PZT/PVDF composites doped with graphene[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(6): 4033-4039.
- [11] SODANO H A, PARK G, INMAN D J. An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(3): 683-697.
- [12] BENT A A, HAGOOD N W, RODGERS J P. Anisotropic actuation with piezoelectric fiber composites[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1995, 6(3): 338-349.
- [13] KESSON BÅ. PFVIBAT—a computer program for plane frame vibration analysis by an exact method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1976, 10(6): 1221-1231.
- [14] NEWNHAM R, SKINNER D, CROSS L. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites[J]. Materials Research Bulletin, 1978, 13(5): 525-536.
- [15] EGUSA S, IWASAWA N. Application of piezoelectric paints to damage detection in structural materials[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1996, 15(8): 806-817.
- [16] PAYO I, HALE J M. Sensitivity analysis of piezoelectric paint sensors made up of PZT ceramic powder and water-based acrylic polymer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 168(1): 77-89.
- [17] KANG S H, KANG L H. Development of wireless bird collision monitoring system using 0-3 piezoelectric composite sensor on wind turbine blades[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017: 1045389X17730925.
- [18] 张洪涛, 李波. PZT/环氧树脂 0—3 型压电复合材料性能的研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1998, 34(3): 48-51.
- ZHANG H T, LI B. The study of piezoelectric properties for PZT/epoxy resin 0-3 composites[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 1998(3): 48-51.
- [19] 胡南, 刘雪宁, 陈飞, 等. 0-3 型陶瓷/聚合物压电复合材料的压电性能研究[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 78-82.
- HU N, LIU X N, CHEN F, et al. Piezoelectric property of 0-3 Piezoelectric ceramic/polymer composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 78-82.
- [20] 张鸿名. 0-3 型 PZT/环氧压电复合材料性能预报及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- ZHANG H M. Studies on 0-3 type PZT/epoxy Piezoelectric composite performance prediction and applications[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
- LIU R J, ZHANG Y W, WEN CH W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.
- [22] LI X, ZHANG Y. Analytical study of piezoelectric paint sensor for acoustic emission-based fracture monitoring[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2008, 31(8): 684-694.

作者简介



沈意平(通信作者), 2003 年于湖南科技大学获得学士学位, 2006 年于湖南科技大学获得硕士学位, 2014 年于华中科技大学获得博士学位, 现为湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型压电传感技术、结构健康监测。

构健康监测。

E-mail: yiping1011@163.com

Shen Yiping (Corresponding author) received her B.Sc. degree in 2003 and M.Sc. degree in 2006 both from Hunan University of Science and Technology, received her Ph.D. degree in 2014 from Huazhong University of Science and Technology. Now, she is a professor and Ph.D. supervisor in Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology. Her main research interest includes novel piezoelectric sensing technology and structure health monitoring.