

文章编号: 1000-2278(2009)04-0432-06

1-3型压电陶瓷纤维复合材料性能的理论分析与实验研究

戴永^{1,2} 骆英²

(1.江苏省苏州中学, 苏州 215007 2.江苏大学机械工业机械结构损伤检测评估技术重点实验室, 镇江 212013)

摘要

针对1-3型正交异性压电陶瓷纤维复合材料(Piezoceramics Fiber Composite, PFC)的构造原理,通过建立有限元模型,分析了叉指形电极关键尺寸和压电陶瓷纤维直径等对其传感性能的影响,并通过实验对制备的1-3型PFC传感元件的正交异性特性进行了验证,仿真及实验结果表明该传感元件具有明显的正交异性,能区分不同方向的应力波,减小电极中心距和纤维直径能提高传感元件的传感性能。

关键词 PFC,有限元,性能参数,传感性能,正交异性

中图分类号:TQ174.75 文献标识码:A

1 前言

压电陶瓷复合材料是由压电陶瓷和聚合物按一定的连通方式、一定的体积或质量比,以及一定的空间几何分布复合而成的材料。采用合适的复合材料及连通结构形式,能优化材料的性能^[1],压电陶瓷纤维复合材料(Piezoceramics Fiber Composite, PFC)作为先进材料有许多传统材料所无法比拟的优越性,在航空航天、建筑、交通、机械、化工、电子技术等领域得到了越来越广泛的应用^[2]。目前,PFC主要有三种形式:1-3 Composites^[3],Active Fiber Composite (AFC)^[4],Macro Fiber Composite (MFC)^[5],这三种是埋置式,与传统的单片式压电陶瓷驱动器相比,机电耦合系数和强度韧性较高,但接收信号各方向反射干扰较大。在前人研究基础上,文中对自行设计的可粘贴式1-3型PFC传感元件传感性能的影响因素进行了有限元仿真分析,并通过实验验证了其独特的正交异性,能区分特定方向应力波信号,从而为叉指式1-3型PFC的优化设计提供了指导。

2 PFC有限元建模

2.1 理论基础

本文所设计的1-3型PFC是由一维连通的压电陶瓷纤维相平行排列于三维连通的聚合物中而形成的两相压电陶瓷复合材料,其结构形式如图1所示。

压电陶瓷材料压电效应的物态方程反映了晶体

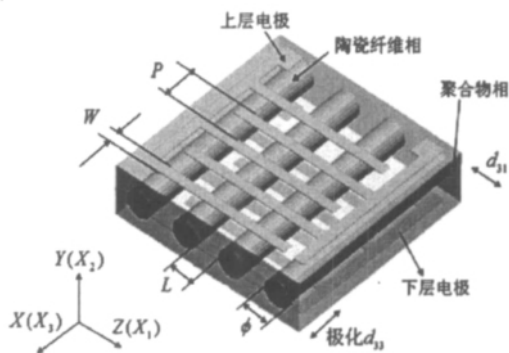


图1 1-3型PFC传感元件结构示意图

Fig.1 Structure of 1-3 mode PFC sensor element

电学量(E- 电场强度,D- 电位移)和力学量(σ - 应力, ε - 应变)之间的相互关系。根据传感元件使用方

收稿日期 2009-10-16

基金项目 国家“863”基金资助项目(编号 2009AA03Z107),国家自然科学基金资助项目(编号 50875114),江苏省研究生创新基金(编号 CX08B-037Z)

通讯联系人 骆英, E-mail: luoying@ujs.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

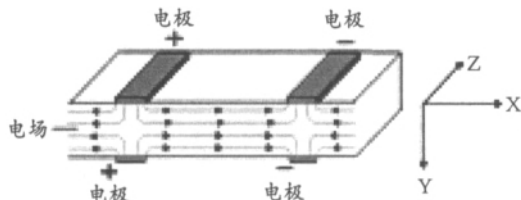


图 2 1-3 型 PFC 传感元件电场示意图

Fig.2 Electric field sketch of 1-3 mode PFC

式的不同,传感元件的传感性能体现的着重点不同。本文只讨论传感元件粘贴于结构表面时传感性能。

压电传感元件粘贴在结构表面时,其压电方程为

$$\begin{cases} D_i = d_{i\mu} \sigma_\mu + \epsilon_{ij}^E E_j \\ \epsilon_{\lambda\mu}^E = s_{\lambda\mu}^E \sigma_\mu + d_{j\lambda} E_j \end{cases} \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, 3; \lambda, \mu = 1, 2, \dots, 6$

式中 $d_{j\lambda}$ 为压电应变常数; ϵ_{ij}^E 表示应力 σ 为零或常量时的自由介电常数; $s_{\lambda\mu}^E$ 表示电场强度为零或常量时的短路弹性柔顺系数。

由此得出其本构方程为

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{33} & d_{31} & d_{31} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{33} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)知,电场强度 E 、压电常数 d (或 e)和介电常数 ϵ 决定了传感元件的传感性能。而压电常数决定于压电陶瓷的化学成分和传感元件的极化情况,传感元件 X 方向的电极化强度 $P_x^{[6]}$ 为:

$$P_x = (x_e)_{xx} \epsilon_0 E_x^p + (x_e)_{xy} \epsilon_0 E_y^p \quad (3)$$

式中, $(x_e)_{xx}, (x_e)_{xy}$ 为材料的电极化率, ϵ_0 为真空介电常数, E_x^p, E_y^p 为极化电场强度。

可见对传感性能起关键作用的是电场强度 E , E_x^p, E_y^p 。如图 2 所示叉指型传感元件电场分布,电场沿分支电极中心线对称,在电极附近,电场既非均匀也非线性^[7],只是在远场,电场才可看作近似均匀^[8]。在传感元件工作时,在一定信号激励下,电极附近的应力和应变方向复杂,大小分布不均匀,只有在异性电极对中心附近,变形才趋向均匀、线性。不管是极化

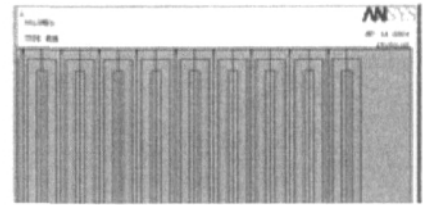


图 3 1-3 型 PFC 传感元件有限元模型(局部)

Fig.3 Finite element model of 1-3 mode PFC sensor element

电场还是工作电场,决定其结构的因素是分支电极结构、压电陶瓷纤维直径 Φ 和纤维间距 L 。分支电极的关键尺寸包括:电极中心距 P 、电极宽 W 。

2.2 有限元建模

采用 ANSYS 软件进行有限元分析时,可假设三个条件,忽略元件各个部分极化强度和极化方向的差别^[1,9]: (1)极化方向平行于 X 轴; (2)沿分支电极中心线,极化方向相反; (3)极化强度均匀分布。压电陶瓷纤维材料采用 PZT-5H,由于电极层忽略不计,建立有限元模型时,电压直接加在压电陶瓷材料表面。分析单元采用 10 节点四面体单元 SOLID98。模型平面结构尺寸为 $56\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。建立叉指式电极 PFC 传感元件有限元模型时,沿每个分支电极的中心线把整体划分为 $N+1$ 个 (N 为分支电极的个数) 部分几何体,对应每个部分实体分别建模。按照自底向上的原则,由点到线及面,在部分实体的上、下表面根据电极尺寸 P, W 建立电极面,用布尔运算划分不同电极区域,再粘接实体。在分配单元属性时,对相邻部分实体模型设定压电常数符号相反的材料常数,划分网格采用智能尺寸网格工具。建立的有限元模型如图 3 所示。

3 材料组分的几何尺寸对传感性能的影响

3.1 压电陶瓷纤维直径 Φ 对传感性能的影响

电极间距 $P = 1.2\text{mm}$, 相邻纤维间隔 $L = 0.2\text{mm}$, 分支电极面的宽度 $W = 0.1\text{mm}$, 陶瓷纤维直径 Φ 从 0.1mm 到 1mm 变化,陶瓷纤维直径变化与 PFC 传感元件感应的电位移之间关系如图 4 所示。

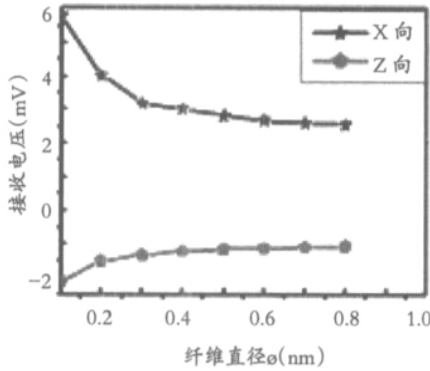


图 4 陶瓷纤维直径 ϕ 与电位移接收的关系

Fig.4 The relation of ϕ and electric displacement

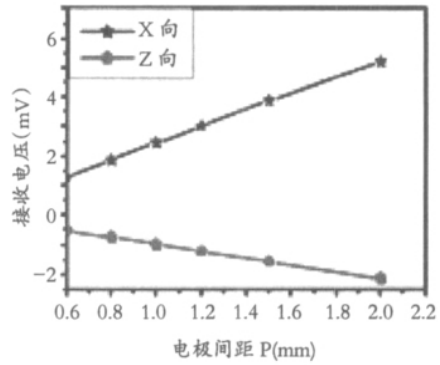


图 5 电极间距 P 与电压接收的关系

Fig.5 The relation of P and receiving voltage

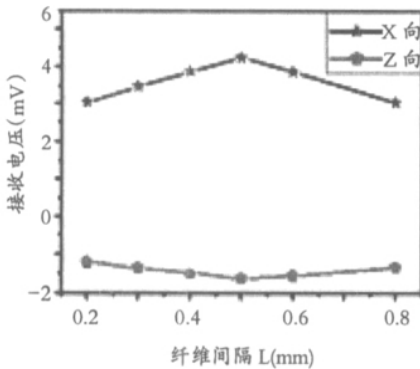


图 6 陶瓷纤维间隔 L 与电位移接收关系

Fig.6 The relation of L and receiving voltage

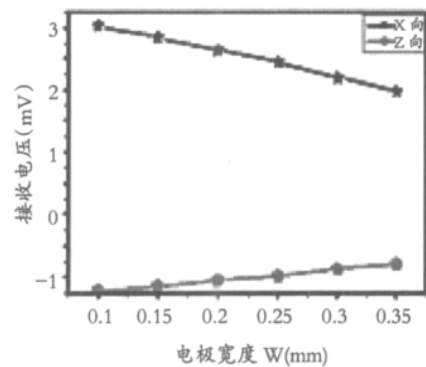


图 7 分支电极面宽度 W 与电压接收关系

Fig.7 The relation of W and receiving voltage

可见,随着压电陶瓷纤维直径的增大,在两个方向上电位移接收呈现出减小的趋势。当陶瓷纤维达到 0.4mm 时,这种趋势变小,可见陶瓷纤维直径越小,在陶瓷纤维长度方向上极化就越充分。

3.2 分支电极间距 对传感性能的影响

压电陶瓷纤维直径 $\phi=0.4\text{mm}$,相邻纤维间隔 $L=0.2\text{mm}$,分支电极面的宽度 $W=0.1\text{mm}$ 。电极间距从 0.6 到 2.0 变化,其变化规律如图 5 所示。

复合材料所采用的交叉电极间距越大,电极面上接收的电压值就越高。这种增幅的趋势几乎成线性增长。而且,在 x 和 z 这两个方向上,正交异性的特性较为明显。但是随着电极间距增大,压电相所需充分极化的电压随之增大,当极化电压超过压电陶瓷和环氧树脂的耐压强度时就容易击穿材料,破坏材料的性能。理论仿真时,假设材料充分极化,实际加工制作的结果与计算数值将有较大的差距。

3.3 陶瓷纤维间隔 对传感性能的影响

压电陶瓷纤维直径 $\phi=0.4\text{mm}$,电极间距 $P=1.2\text{mm}$,分支电极面宽度 $W=0.1\text{mm}$,纤维间隔 L 与接收电压间的变化规律仿真结果如图 6 所示。

随着陶瓷纤维之间间隔 L 的增大电极面两方向上接收的电位移在增大,但当 $L=0.5\text{mm}$ 以后,曲线呈下降趋势,在两方向上都表现得较为明显。复合材料中基体材料对压电陶瓷具有应力放大作用, L 的变化直接影响着复合材料中压电相与聚合物相的体积比 v_c 的变化,在 PFC 制备中,根据仿真结果,陶瓷纤维间隔为 0.5mm,经分析其体积比 v_c 一般控制在 30%~60%可以获得较优性能。

3.4 分支电极面宽度 对传感性能的影响

压电陶瓷纤维直径 $\phi=0.4\text{mm}$,交叉电极间距 $P=1.2\text{mm}$,陶瓷纤维间隔 $L=0.2\text{mm}$,分支电极面宽度 W 与接收电压间的变化关系仿真结果如图 7 所示。

可见,分支电极面宽度从 0.1mm~0.35mm 变化时,随着分支电极面宽度的增加,复合材料在 X 、 Z 方

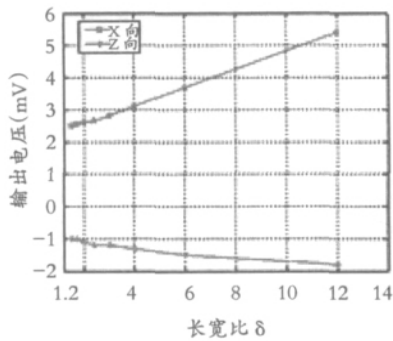
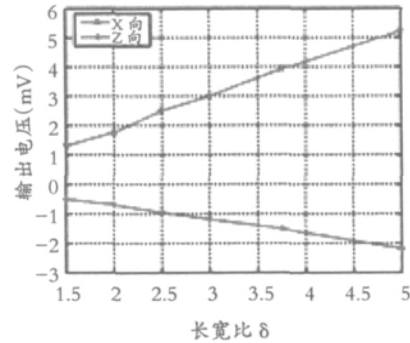
(a) 分支电极间距 b 一定时的变化规律(b) 分支电极间距 b 不同时的变化规律

图 8 材料的长宽比对复合材料性能影响

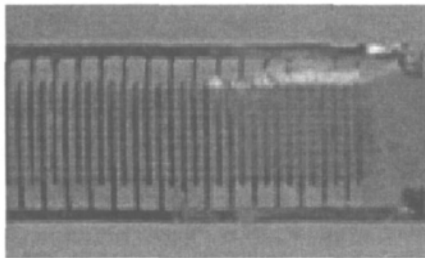
Fig.8 The effects on δ and compose material property

图 9 1-3 型 PFC 传感元件实物图(局部)

Fig.9 1-3 mode PFC sensor element product

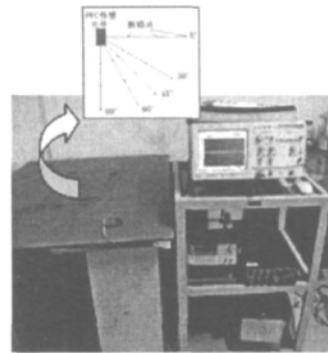


图 10 PFC 传感元件测试装置图

Fig.10 The testing equipment of PFC sensor element

向上的接收电位移下降,正交异性特性减弱,使用较小宽度的电极面,能够增强传感元件的传感性能和正交异性特性。

3.5 长宽比 对传感性能的影响

一定材料组分体积比条件下的长宽比指的是分支电极间距 b 和单根压电陶瓷纤维直径 a 之间的比值 δ 。陶瓷纤维直径不同,而其它条件相同的情况下(即分支电极间距相等、分支电极面宽度一定和纤维之间间隔相等)长宽比对材料性能的影响,如图 8(a)所示。分支电极间距一定($b=1.5\text{mm}$)的条件下,随着长宽比 δ (此时陶瓷纤维越来越细)增大,在 X 和 Z 两个方向上接收的电压值增大,在长宽比值为 4 之前,两个方向上接收的电压值增大趋势很小,之后两方向接收的电压值迅速增大,而 Z 方向上接收值增大的趋势没有 X 方向上大,从中可以看出这两个方向上存在着明显的正交异性特性。

压电陶瓷纤维直径一定($a=0.4\text{mm}$),分支电极间

距不同,而其它条件不变。如图 8 (b)所示,随着长宽比的增大,两个方向上接收的电压值几乎成线性增大,这时压电相和聚合物相的体积比是一个定值,因此接收的电压几乎成线性增长。

4 1-3 型 PFC 传感元件正交异性测试

按仿真分析结果制备的 PFC 传感元件如图 9 所示,尺寸为 $9\text{mm} \times 13\text{mm} \times 0.76\text{mm}$,电极间距 1.5mm ,纤维间距 0.5mm ,极化电压 2600V ,10 根纤维直径 0.4mm ,本实验是在环氧薄板 ($1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 5\text{mm}$)上采用断铅(铅芯直径为 0.5mm ,硬度 2H)的方式获得激励信号,验证其用作传感元件时的正交异性特性。试验布置如图 10 所示。将 PFC 传感元件粘贴于环氧树脂薄板上,沿着压电陶瓷纤维的纵向分别与其成 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° 方向画出测线,并在其线上以等间距 50mm 标出各个断铅

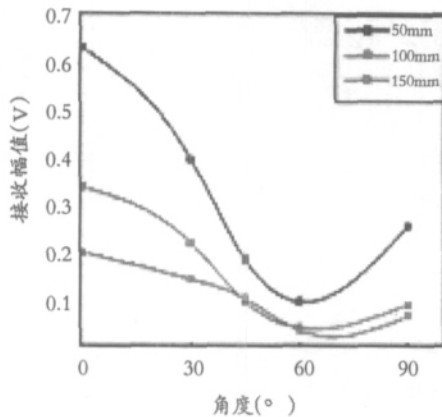


图 11 测试结果

Fig.11 Test results

点,采用 Agilent54820A 示波器采集信号。

测试结果如图 11 所示。在同一间距情况下,随着夹角增大,传感元件接收的电压变化非常明显。从 50mm 处的测试图线可以清晰的看出来,在 60° 方向至 90° 方向上,接收信号较弱,验证了 1-3 型 PFC 传感元件正交异性特性。在压电陶瓷纤维 X 方向(因交叉电极和陶瓷纤维纵向方向相垂直,极化方向沿着陶瓷纤维纵向,即 X 方向)接收应力波响应最强。但随着距离增大,其正交异性性能降低。

5 结论

基于 ANSYS 仿真分析与试验验证设计了一种 1-3 型正交异性 PFC 传感元件,通过仿真与测试结果分析表明:

(1) 压电陶瓷纤维越细,PFC 元件的接收电压越大,正交异性特性越明显,但极化电压也随之增大,当陶瓷纤维直径为 0.4mm,PFC 传感元件正交异性特性变化平缓时为最佳直径,故可通过减少陶瓷纤维直径来增大长宽比,从而提高 PFC 传感元件的正交异性性能。

(2) 分支间距增大时,PFC 传感元件两个方向的接收电压变化明显,但电极面宽度随之增大时,PFC 两个方向的接收电压都减小,其正交异性性能减弱。故分支电极间距与电极面宽度的确定应充分考虑与压电陶瓷纤维直径的长宽比及 PFC 所能承受的最大极化电压而定。同时,充分考虑环氧树脂层的厚度,夹

在电极和压电陶瓷纤维之间的环氧树脂厚度对电场的消弱程度是不可忽视的,这就要求有较高的工艺来调整环氧层厚度。

(3) 陶瓷纤维间距增大,PFC 传感元件在 X 和 Z 方向的接收电压都增大,压电陶瓷纤维间距直接影响 PFC 的体积比,当间距为 0.5mm 时,两方向的电压变化到最大,此时 PFC 传感元件正交异性性能为最佳。

(4) 通过对 PFC 元件进行不同距离的断铅测试试验可看出由仿真结果制备的 1-3 型 PFC 传感元件正交异性性能较好,适应于近距离的工程结构损伤测试。

参考文献

- 1 李光, 王丽坤. 1-3-2 型压电复合材料的研制. 压电与声光, 2005, 27(1): 71~73
Li Guang and Wang Likun. Development of 1-3-2 Type Piezoelectric Composite. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(1): 71~73
- 2 Satyajit Panda. Nonlinear finite element analysis of functionally graded plates integrated with patches of piezoelectric fiber reinforced composite. Finite Elements in Analysis and Design, 2008, 44(8): 493~504
- 3 Wilkie W, High J, Mirick P, Fox R, Little B, Bryant R, Hellbaum R and Jalink A. Low- Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications. Proceedings, SPIE's 7th International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, California, March 5-9, 2000
- 4 Rossetti Jr G, Pizzochero A and Bent A. Recent Advances in Active Fiber Composites Technology. Proceedings of 12th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2000: 753~756
- 5 High J and Wilkie W. Method of Fabricating NASA- Standard Macro- Fiber Piezocomposite Actuators. NASA/TM- 2003 -212427, ARL TR2833, June 2003
- 6 王光庆, 郭吉丰. 压电叠层传感 / 致动器的特性研究. 压电与声光, 2005, 27(4): 375~378
Wang Guangqing and Guo Jifeng. Research characteristics of piezoelectric stack sensor/actuator. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005, 27(4): 375~378
- 7 Ray M C and Reddy J N. Active control of laminated cylindrical shells using piezoelectric fiber reinforced composites.

- Composites Science and Technology, 2005, 65(7): 1226~1236
- 8 Hagood N W, Kindel R and Ghandi K. Improving transverse actuation of piezoceramics using interdigitated surface electrodes. SPIE, 1993, 25: 341~352
- 9 李邓化,居伟骏,贾美娟等.新型压电复合换能器及其应用.北京:科学出版社,2007:14~23

THEORY ANALYSIS AND EXPERIMENT STUDY ON THE PROPERTY OF 1-3 MODE PIEZOCERAMICS FIBER COMPOSITE

Dai Yong^{1,2} Luo Ying²

(1. Suzhou High School of Jiangsu Province, Suzhou 215007; 2. Chinese Machinery Industry Key Laboratory for Mechanical Structure Damage Detection Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract

The piezoceramics composite possesses wide application prospect for its specific electric-mechanical and designable properties and its characteristic of overcoming the brittleness that single piezoelectric ceramics material has. The structure principle of 1-3 mode orthotropic piezoelectric fiber composite (PFC) is proposed. By finite element modeling, the influences of the key dimensions of interdigital electrode and the diameter of piezoelectric fiber on its sensing property are analyzed. In addition, the orthotropic characteristic is verified through experiment. The results show that the sensor has obvious orthotropic characteristic and can distinguish stress wave from different directions. We also found that the sensor performance can be improved by reducing the fiber diameter and the center distance of the electrode.

Keywords piezoceramics fiber composite material, finite element, performance, sensor property, orthotropic