

OPCM AE传感器特性的理论仿真与实验研究*

吴爱军, 骆英, 顾建祖, 谈梅兰

(江苏大学理学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 基于均匀场和细观力学理论, 对应用于结构损伤声发射(AE)检测的1-1型压电复合材料(OPCM)AE传感器, 建立了它的等效力电模型, 在此基础上, 推出了其等效力、电参数, 通过这些参数的对比, 发现OPCM具有明显的正交异性的特性; 同时, 应用有限元仿真计算, 得到了在 x 和 z 两方向上传感器受到单向应力波荷载作用时, 电极面输出的电压存在明显差异; 所设计的实验表明: OPCM能够区分出不同方向的应力波, 并对特殊方向上的应力波具有强烈的响应, 再次证实了OPCM传感器的正交异性特性。

关键词: 等效力电参数; 有限元法; 压电复合材料声发射传感器; 正交异性; AE检测

中图分类号: TP212.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2007)05-0048-04

Principled simulation and test research on performance of OPCM AE sensor *

WU Ai-jun, LUO Ying, GU Jian-zu, TAN Mei-lan

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on the theories of uniform fields and micromechanics, for the 1-1 orthotropic piezoelectric composites materials (OPCM) sensors in structural damage acoustic emission (AE) test, equivalent electromechanical model is established and some equivalent electromechanical parameters are derived, comparing these parameters the distinct orthotropic performance of OPCM is discovered. The result is gained that the sensor electrode volt outputs have evidence difference under the actions of the unilateral stress wave in x and/or z direction by finite element methods simulation. The result of orthotropic performance that OPCM AE sensors can distinguish stress waves from the different directions is obtained further by the designed experiment. The experiment indicates that the OPCM AE sensor has strong response to stress wave from special direction.

Key words: equivalent electromechanical parameters; finite element methods; orthotropic piezoelectric composites materials(OPCM) acoustic emission(AE) sensors; orthotropic; AE test

0 引言

近年来, 声发射(AE)技术已被广泛应用于工程结构检测中, 其中, 接收损伤信号的关键技术元件——传感器至关重要。AE传感器一般是粘贴于被测构件的表面使用, 这要求它尽可能从被测构件表面的应力波传播情况中提取有价值的信息, 传统的压电陶瓷传感器较为突出的一个缺陷是平面的横观各向同性, 不具备测定特定方向应力波的能力, 提取有效的损伤信息有一定的难度^[1]。有鉴于此, 本文作者采用了自行研制的具有正交异性特征的1-1型压电复合材料(OPCM)传感器, 基本克服了这一缺陷^[2]。

这里, 利用均匀场和细观力学理论建立了等效力电模型, 确立了相应材料的本构关系, 推导出了模型的等效力、

电参数, 通过这些参数分析表明: OPCM传感器在平面内具有正交异性的特性; 同时, 应用有限元仿真计算, 得到了在 x 和 z 两方向上传感器受到单向应力波荷载作用时, 电极面输出的电压存在明显差异; 再次, 通过设计的实验进一步验证了这一特性。

1 OPCM AE传感器等效力电模型及其特性的理论研究

图1所示结构, 1-1型OPCM应用的是交叉电极, 压电相和聚合物相沿 x 方向分别呈周期性排列, 一对交叉电极间包含2个极性相反的压电体, 在 xz 平面内, 极化方向平行于 z (3)方向, 并与电极面垂直。所以, 取一个代表性特征体元, 如图2所示。这里的研究将基于如下假设^[3,4]:

1) 均匀场假设: 电场在压电相和聚合物相中分布和作

用均匀;

2) 细观力学假设:组分材料是均匀、连续的和各向同性的;组分材料和复合材料均为线弹性。

图1 1-1型OPCM AE传感器的结构图

Fig 1 Structure diagram of 1-1 OPCM AE sensor

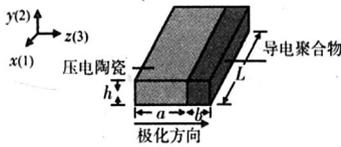


图2 特征体元模型

Fig 2 Model of representation bulk cell

这里采用d型压电方程较为方便

$$\begin{aligned} e_i &= s_j \sigma_j + d_m E_n, \\ D_n &= d_m \sigma_n + \epsilon_n E_i, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 e_i 为应变张量; D_n 为电位移; σ_j 为应力张量; E_n 为电场矢量; s_j 为恒电场柔度系数; d_m 为恒应力压电应变系数; ϵ_n 为恒应力介电常数。

OPCM AE 传感器在 xz 平面内的不同方向上有不同特性:

1) 在 $x(1)$ 方向(两相排列垂直于极化方向)上:

力学关系:压电相和聚合物相并联;

$$\text{静力关系: } \bar{\sigma}_1 = v_c \sigma_1^c + v_p \sigma_1^p; \quad (2)$$

$$\text{几何关系: } \bar{\epsilon}_1 = \epsilon_1^c = \epsilon_1^p. \quad (3)$$

这里,上标 c 表示压电相, p 是聚合物相, v_c, v_p 分别代表压电相、聚合物相所占体积比。

电学关系:压电相和聚合物相的电容是并联关系;

特征体元的电位移等于各相电位移的叠加

$$\bar{D}_1 = v_c D_1^c + v_p D_1^p. \quad (4)$$

压电相和聚合物相的电压相等

$$\bar{E}_1 = E_1^c = E_1^p. \quad (5)$$

2) 在 $z(3)$ 方向(两相排列平行于极化方向)上:

力学关系:压电相和聚合物相是串联关系;

$$\text{静力关系: } \bar{\sigma}_3 = \sigma_3^c = \sigma_3^p; \quad (6)$$

$$\text{几何关系: } \bar{\epsilon}_3 = v_c \epsilon_3^c + v_p \epsilon_3^p; \quad (7)$$

电学关系:特征体元各相的电位移相等

$$\bar{D}_3 = D_3^c = D_3^p; \quad (8)$$

特征体元的电压等于各相之和

$$\bar{E}_3 = v_c E_3^c + v_p E_3^p. \quad (9)$$

综合式(2)~式(9),复合材料的物理相可表示为

$$\begin{pmatrix} \bar{\epsilon}_1 \\ \bar{E}_1 \\ -\bar{\sigma}_3 \\ \bar{D}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1^c \\ E_1^c \\ \sigma_3^c \\ D_3^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1^p \\ E_1^p \\ \sigma_3^p \\ D_3^p \end{pmatrix}. \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{D}_1 \\ -\bar{\epsilon}_3 \\ \bar{E}_3 \end{pmatrix} = v_c \begin{pmatrix} \sigma_1^c \\ D_1^c \\ \epsilon_3^c \\ E_3^c \end{pmatrix} + v_p \begin{pmatrix} \sigma_1^p \\ D_1^p \\ \epsilon_3^p \\ E_3^p \end{pmatrix}. \quad (11)$$

从1-1型OPCM传感器结构图可以看出:压电相的极化方向是沿着 z 方向的,电极面与 z 方向垂直,所以,传感器输出的电位移在这个面上。式(10)和式(11)可简化为

$$\begin{pmatrix} \bar{\epsilon}_1 \\ -\bar{\sigma}_3 \\ \bar{D}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1^c \\ \sigma_3^c \\ D_3^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1^p \\ \sigma_3^p \\ D_3^p \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ -\bar{\epsilon}_3 \\ \bar{E}_3 \end{pmatrix} = v_c \begin{pmatrix} \sigma_1^c \\ \epsilon_3^c \\ E_3^c \end{pmatrix} + v_p \begin{pmatrix} \sigma_1^p \\ \epsilon_3^p \\ E_3^p \end{pmatrix}. \quad (13)$$

将式(12)、式(13)两式代入方程(1)得

$$\text{压电相} \begin{pmatrix} \epsilon_1^c \\ \epsilon_3^c \\ D_3^c \end{pmatrix} = A_c \begin{pmatrix} \sigma_1^c \\ \sigma_3^c \\ E_3^c \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$\text{聚合物相} \begin{pmatrix} \epsilon_1^p \\ \epsilon_3^p \\ D_3^p \end{pmatrix} = A_p \begin{pmatrix} \sigma_1^p \\ \sigma_3^p \\ E_3^p \end{pmatrix}. \quad (15)$$

其中

$$A_c = \begin{bmatrix} s_{11}^E - \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}} & s_{13}^E - \frac{d_{31}d_{33}}{\epsilon_{33}} & d_{31}^c \\ s_{13}^E - \frac{d_{31}d_{33}}{\epsilon_{33}} & s_{33}^E - \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}} & d_{33}^c \\ -d_{31}^c & -d_{33}^c & \epsilon_{33}^c \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{13} & 0 \\ s_{13} & s_{33} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^c \end{bmatrix}. \quad (17)$$

将式(2)、式(3)联合求解得到

$$\sigma_1^c = \frac{v_c s_{11}^E \bar{\sigma}_1}{v_c s_{11}^E + v_p s_{11}}, \sigma_3^c = \frac{v_p s_{11}^E \bar{\sigma}_1}{v_c s_{11}^E + v_p s_{11}}. \quad (18)$$

由式(12)~式(17)得特征体元的本构关系

$$\begin{pmatrix} \bar{\varepsilon}_1 \\ \bar{\varepsilon}_3 \\ \bar{D}_3 \end{pmatrix} = v_c \begin{pmatrix} \varepsilon_1^c \\ \varepsilon_3^c \\ D_3^c \end{pmatrix} + v_p \begin{pmatrix} \varepsilon_1^p \\ \varepsilon_3^p \\ D_3^p \end{pmatrix} = v_c A_c \begin{pmatrix} \sigma_1^c \\ \sigma_3^c \\ E_3^c \end{pmatrix} + v_p A_p \begin{pmatrix} \sigma_1^p \\ \sigma_3^p \\ E_3^p \end{pmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \bar{s}_{11} & \bar{s}_{13} & \bar{d}_{13} \\ \bar{s}_{31} & \bar{s}_{33} & \bar{d}_{33} \\ -\bar{d}_{31} & -\bar{d}_{33} & -\bar{\varepsilon}_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (19)$$

矩阵中的元素值分别如下

$$\bar{s}_{11} = \frac{v_c s_{11}^c}{v_c s_{11}^c + v_p s_{11}^p} \left(s_{11}^c - \frac{d_{31}^{c2}}{\varepsilon_{33}^c} \right) + \frac{s_{11}^p v_p}{v_c s_{11}^c + v_p s_{11}^p}, \\ \bar{s}_{13} = v_c \left(s_{11}^c - \frac{d_{31}^c d_{33}^c}{\varepsilon_{33}^c} \right) + v_p s_{13}^p; \\ \bar{d}_{13} = v_c d_{13}^c; \\ \bar{s}_{31} = \frac{v_c s_{11}^c}{v_c s_{11}^c + v_p s_{11}^p} \left(s_{13}^c - \frac{d_{31}^c d_{33}^c}{\varepsilon_{33}^c} \right) + \frac{s_{11}^p v_p}{v_c s_{11}^c + v_p s_{11}^p}, \\ \bar{d}_{31} = \frac{v_c s_{11}^c}{v_c s_{11}^c + v_p s_{11}^p} d_{31}^c; \\ \bar{\varepsilon}_{33} = v_c \varepsilon_{33}^c + v_p \varepsilon_{33}^p. \quad (20)$$

压电应变常数是压电材料重要的性能指标参数,可通过分析这些参数来研究复合材料的一些特性。将 \bar{d}_{31} 化简得到

$$\bar{d}_{31} = v_c d_{31}^c / (v_c + v_p s_{11}^p / s_{11}^c). \quad (21)$$

由于聚合物相的柔度系数相对于压电相而言很小,这样,得到 $\bar{d}_{31} \approx d_{31}^c$, 而 $\bar{d}_{33} / \bar{d}_{31} = v_c d_{33}^c / d_{31}^c$, 其中, $d_{33}^c / d_{31}^c \approx 2.5$ 。因此,调整压电相所占体积比 v_c 的大小,就可改变两压电应变常数比值,即可改变传感器的正交异性性能。

2 OPCM AE 传感器特性有限元仿真研究

这里,应用 ANSYS 有限元软件对 OPCM AE 传感器进行了仿真研究。基体材料相是由比压电陶瓷柔韧性要优越得多的环氧型 DAD-40 型导电胶(室温剪切强度为 14.7 MPa, 体积电阻率 $\leq 1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$), 它既可以作为聚合物基体材料又被用作交叉电极;压电相选用的是 p-51 压电陶瓷。

图 1 所示复合材料结构,其模型尺寸为 $a=0.4 \text{ mm}$, $b=1.0 \text{ mm}$, $L=14.0 \text{ mm}$, $h=0.6 \text{ mm}$, $w=6.0 \text{ mm}$ 。

应用谱响应分析,可分别得到在 x 和 z 两方向上电极面的电压值 V_x 和 V_z 。在相同频率下,对两电压比 V_x/V_z 进行了分析比较,得到了图 3 所示结果。由图 3 可以看出:在 x, z 这 2 个不同方向上存在着明显的差异,这个差异即正交异性特性。

3 OPCM AE 传感器特性实验研究

设计实验如下:取大小为 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 的各向同性铁板,厚度为 2 cm,在适当位置处粘贴传感元件,如图 4 所示,OPCM1 极化方向为 x 方向;OPCM2 为 y 方向^[5-7]。

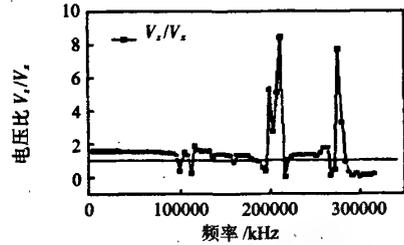


图3 两方向上电压比与频率关系

Fig 3 Relationship between voltate ratio and frequency in two directions

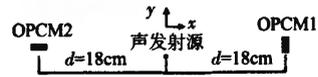
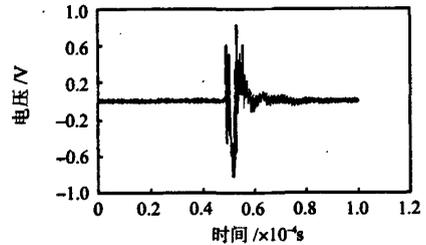


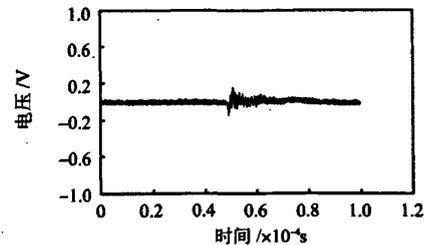
图4 声发射源及 OPCM 传感器布置图

Fig 4 Laying diagram of AE source and OPCM sensor

用断铅在距传感元件中心 18 mm 处的 A 点模拟声发射源^[8]。用 Aglient54820A 示波器采集信号(采样频率为 2.5 MHz),分别得到传感器 1 和传感器 2 上的时域信号如图 5 所示。



(a) OPCM1 输出时域信号
(a) OPCM1 output times signal



(b) OPCM2 输出时域信号
(b) OPCM2 output times signal

图5 断铅实验结果

Fig 5 Experimental result of broken leads

从实验的结果可以看出:OPCM AE 传感器对于平面应力波的响应,纵向的灵敏度比横向要高得多。

4 结论

1) 基于这些等效力电参数研究了 OPCM AE 传感器的正交异性的特性,从 $\bar{d}_{33} / \bar{d}_{31} = v_c d_{33}^c / d_{31}^c$ 看出:适当调整压电相的体积比 v_c ,可以增大 $\bar{d}_{33} / \bar{d}_{31}$ 比值,正交异性的性能也就增强;

2) 通过有限元仿真分析,在 x 和 z 两方向上,传感器受

到单向应力波荷载作用时,电极面上输出的电压比值存在明显差异,这个差异就是 OPCM AE 传感器的正交异性特性;

3)通过实验进一步验证这一特性,结果表明,OPCM AE 传感器都能够区分来自不同方向的应力波信号,即对来自不同方向的应力波表现出良好的正交异性特性。

综上,1-1 型 OPCM AE 传感器在平面内能够区分不同方向上的应力波,对特殊方向上的应力波具有咨询的能力,这一正交异性特性在结构损伤 AE 检测中应用前景广阔。

参考文献:

[1] Luo Ying. Research on orthotropic piezoelectric composite material strain sensing unit [C]//Proceedings of SPIE, 2000;93-95.
 [2] Luo Ying, Tao Baoqi. The OPCM strain gages for strain and stress measurement of orthotropic material structures[J]. *Alta Mechanical Solid Sinica*, 2000, 13(4):337-345.
 [3] Benveniste Y, Dvorak G J. Uniform fields and universal relation in piezoelectric composites[J]. *The Mechanics and Physics of So-*

lids, 1992, 40(6):1295-1312.

[4] 骆英. 正交异性压电复合材料功能元件的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2001;51-69.
 [5] 沈毅. 压电正交异性复合材料用于 AE 传感的初步研究[D]. 镇江:江苏大学, 2002;32-36.
 [6] Barbezat M, Brunner A J, Flueler P. Acoustic emission sensor properties of active fiber composite elements compared with commercial acoustic emission sensors[J]. *Sensor and Actuators A*, 2004(114):13-20.
 [7] Viresh k, Wickramasinghe, Hagood N W. Material characterization of active fiber composites for integral twist-actuated rotor blade application[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004(13):1155-1165.
 [8] 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1985;71-75.

作者简介:

吴爱军(1976-),男,江苏邳州人,硕士研究生,研究方向为智能材料与无损检测技术。

(上接第 44 页)

表 1 水分含量的实验数据

Tab 1 Experiment data of moisture content

序号	水分含量(%)	解调电平(μA)
1	31.5	40
2	19.2	58
3	10.7	78
4	5.6	96
5	0.9	97

3 结论

该衰减型水分微波检测系统精度高、速度快,且重复性好、性能稳定、抗干扰和抗冲击能力强。该方法的应用可以为纸板、布等有一定厚度的物料提供精确的水分检控,使工业效益最大化而损失极小化。是工业过程中在线水分实时测控的一种最佳选择。

参考文献:

[1] 李家伟,陈积慧. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002;521-575.

[2] 张胜全,张永林. 食品水分的在线微波测定技术[J]. *食品与机械*, 2005, 21(2):23-24.
 [3] Seichi Okamura, Ma Zhihong. Moisture content measurement by microwave attenuation and problems[J]. *IEEE Press*, 1998(5):189-192.
 [4] Giovanni Bianchi, Marco Dionigi, Daniele Fioretto, et al. A microwave system for moisture monitoring in wet powders for industrial applications[J]. *IEEE*, 1999(5):1603-1606.
 [5] Kim K B, Kim J H, Lee S S, et al. Measurement of grain moisture content using microwave attenuation at 10.5 GHz and moisture density[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(1):72-76.

作者简介:

徐浩(1978-),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事微波和射频电路方面的研究工作。

(上接第 47 页)

参考文献:

[1] 孙尧,贾波,张天照. 基于反馈环全光纤干涉的定位系统[J]. *传感器与微系统*, 2006, 25(1):44-46.
 [2] Hoffman R, Kuziy G. Position determination of an acoustic burst along a sagnac interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2):494-498.
 [3] Kurmer J P, Kingsley S A, Laudo S, et al. Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection[C]//Proceedings SPIE-the International Society for Optical Engineers, Distributed and Multi-

plexed Fiber Optic Sensors, 1991;117-128.
 [4] Cameron C B, Keolian R M, Garrett S L. A symmetric analogue demodulator for optical fiber interferometric sensors[C]//Proceedings of the 34th Midwest Symposium, 1991;666-2671.
 [5] 裴雅鹏,杨军,苑立波. 光纤干涉型传感器原理及其相位解调技术[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(3):16-21.

作者简介:

吴红艳(1981-),女,上海崇明人,硕士研究生,主要从事光纤通信和光纤传感的研究。

OPCM AE传感器特性的理论仿真与实验研究

作者: [吴爱军](#), [骆英](#), [顾建祖](#), [谈梅兰](#), [WU Ai-jun](#), [LUO Ying](#), [GU Jian-zu](#), [TAN Mei-lan](#)
作者单位: [江苏大学, 理学院, 江苏, 镇江, 212013](#)
刊名: [传感器与微系统](#) 
英文刊名: [TRANSDUCER AND MICROSYSTEM TECHNOLOGIES](#)
年, 卷(期): 2007, 26(5)
引用次数: 0次

参考文献(8条)

1. [Luo Ying](#) [Research on orthotropic piezoelectric composite material strain sensing unit](#) 2000
2. [Luo Ying](#). [Tao Baoqi](#) [The OPCM strain gangs for strain for strain and stress measurement of orthotropic material structures](#) 2000(04)
3. [Benveniste Y](#). [Dvorak G J](#) [Uniform fields and universal relation in piezoelectric composites](#) 1992(06)
4. [骆英](#) [正交异性压电复合材料功能元件的研究](#)[学位论文] 2001
5. [沈毅](#) [压电正交异性复合材料用于AE传感的初步研究](#)[学位论文] 2002
6. [Barbezat M](#). [Brunner A J](#). [Flueller P](#) [Acoustic emission sensor properties of active fiber composite elements compared with commercial acoustic emission sensors](#) 2004(114)
7. [Viresh k](#). [Wickramasinghe](#). [Hagood N W](#) [Material characterization of active fiber composites for integral twist-actuated rotor blade application](#) 2004(13)
8. [袁振明](#). [马羽宽](#). [何泽云](#) [声发射技术及其应用](#) 1985

相似文献(0条)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_cgqjs200705016.aspx

下载时间: 2010年6月21日