

基于BST微悬臂梁横向挠曲电系数的测定

李康, 骆英, 徐晨光, 许伯强, 王晶晶, 桑胜

(江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 挠曲电材料具有高力电耦合系数、尺度效应及对环境温度无特定要求等特点, 有望用于传感器、作动器及结构健康监测等领域。基于钛酸锶钡(BST)微悬臂梁结构, 实验分析了横向挠曲电系数对驱动频率的依赖关系, 并讨论了尺度效应。利用压电微驱动器的低频激振, 获得了横向挠曲电系数。结果表明, 作为传感器, 挠曲电材料在传感方面呈现出明显的尺度效应, 当梁的厚度减小到微纳米尺度时, 其传感特性将优于压电材料。

关键词: 钛酸锶钡(BST); 挠曲电效应; 应变梯度; 电极化; 微悬臂梁

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A

Measurement of the Transverse Flexoelectric Coefficient Based on BST Micro-cantilever Beam

LI Kang, LUO Ying, XU Chenguang, XU Baiqiang, WANG Jingjing, SANG Sheng

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Due to the high electromechanical coupling coefficient, scale effect and no strict requirements on the working temperature, the flexoelectric materials are expected to be used for sensors, actuators, structural health monitoring, etc. Based on the barium strontium titanate(BST) micro-cantilever beam structure, the dependence of driving frequency on the transverse flexoelectric coefficient was analyzed, and scale effect was discussed. The transverse flexoelectric coefficient was obtained by using the low-frequency vibration of the piezoelectric micro-actuator. The results show that flexoelectric materials present obvious scale effect in the aspect of sensing and the sensing property will be superior to piezoelectric materials when the thickness of the beam decreases to micro or nano scale.

Key words: barium strontium titanate(BST); flexoelectricity; strain gradient; electric polarization; micro-cantilever beam

0 引言

很多介电材料受外力作用时能产生电极化现象, 如压电材料。研究表明, 压电材料仅出现于非中心对称的介电材料中, 且工作温度应低于居里温度; 然而, 许多介电材料由于应变梯度的作用, 能诱发电极化现象, 这种特殊的力电耦合现象就是挠曲电效应^[1-2]。与压电效应不同, 挠曲电效应广泛存在于所有介电材料(包括中心对称介电材料)中, 不仅能在其居里温度以上工作, 且在特定条件下具有较大的力电耦合系数。因此, 非均匀应变导致的挠曲电效应明显区别于压电效应, 其在传感、驱动方面潜力大, 利用此特性将有利于拓展传感与驱动材料的选择面, 因而越来越受人们的关注^[3-5]。

1 挠曲电效应

1964年Kogan首次对挠曲电效应进行了研究, 他提出非均匀应变介电材料中的电极化强度不仅与应变有关, 还与应变梯度有关^[6], 即

$$P_i = d_{ijk}\sigma_{jk} + \mu_{ijkl}\frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial x_j} \quad (1)$$

式中: P_i 为电极化强度; d_{ijk} 为压电应变常数; σ_{jk} 为应力; μ_{ijkl} 为挠曲电系数; ϵ_{kl} 为应变; x_j 为位置坐标; $d_{ijk}\sigma_{jk}$ 为压电效应; $\mu_{ijkl}\frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial x_j}$ 为挠曲电效应。对于中心对称介电材料, 只存在挠曲电效应:

$$P_i = \mu_{ijkl}\frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: μ_{ijkl} 为一个四阶对称张量, 对于立方晶系, 仅

收稿日期: 2013-12-26

基金项目: 教育部博士点基金优先发展领域课题基金资助项目(20123227130002); 国家自然科学基金资助项目(11272138)

作者简介: 李康(1989-), 男, 江苏苏州人, 硕士生, 主要从事挠曲电材料及其应用的研究。骆英(1960-), 男, 江苏扬中人, 博士生导师, 博士, 主要从事结构健康检测和智能材料与结构的研究。E-mail: luoying@mail.ujs.edu.cn。

存在纵向挠曲电系数 μ_{1111} (μ_{11})、横向挠曲电系数 μ_{1122} (μ_{12}) 和切向挠曲电系数 μ_{1212} (μ_{44}) 3 个独立分量。

2 横向挠曲电系数的测定

开发挠曲电效应的关键不仅是材料的研制,材料各项参数的测试与评估也是挠曲电应用的关键。在众多材料中,铁电材料在居里温度附近具有很大的介电常数,其中,典型的 $m3m$ 点群晶体 BST 材料相比铅基陶瓷更易产生挠曲电效应,并兼具环保特性^[7-11]。本文以 BST 微悬臂梁研究挠曲电效应的横向挠曲电系数。

2.1 测定原理

为规避压电效应的影响,挠曲电系数的测定实验选择在高于 BST 居里温度时实施,采用图 1(a)所示的 BST 挠曲电微悬臂梁构建 μ_{12} 测试平台。图中 L 为悬臂梁的长度。

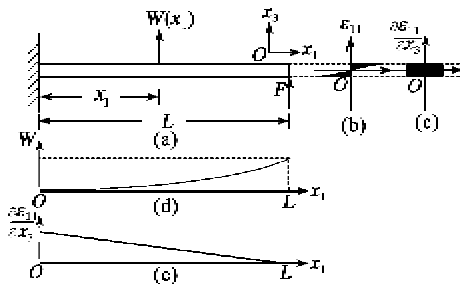


图 1 微悬臂梁的力学模型

对于 BST 微悬臂梁而言,式(2)可简化为

$$\mu_{12} = \frac{P_3}{(\partial \epsilon_{11} / \partial x_3)} \quad (3)$$

即通过测定微悬臂梁的应变梯度与相应电极化强度,可确定被测材料的横向挠曲电系数。如图 1(c)、(e)所示,微悬臂梁的应变梯度沿厚度均匀分布,沿轴向呈线性分布,应变梯度与挠度的关系为

$$\frac{\partial \epsilon_{11}}{\partial x_3} = \frac{\partial^2 W(x_1)}{\partial x_1^2} \quad (4)$$

为有效避免微电荷的泄漏,实验采用远低于被测梁的一阶共振频率的低频(几赫兹)动态测试法测定 μ_{12} ,以提高测试精度。微悬臂梁的一阶模态振型^[7]为

$$W(x_1) \approx A_1 [(\sin \beta_1 L - \sinh \beta_1 L) \times (\sin \beta_1 x_1 - \sinh \beta_1 x_1) + (\cos \beta_1 L + \cosh \beta_1 L) \times (\cos \beta_1 x_1 - \cosh \beta_1 x_1)] \quad (5)$$

式中 $A_1 = C_1 / (\sin \beta_1 L - \sinh \beta_1 L)$, $\beta_1 L = 1.875$, $\beta_1 =$

$\left(\frac{m\omega_1^2}{EI}\right)^{1/4}$, m 为悬臂梁单位长度的质量, ω_1 为第一阶固有振动圆频率, E 为杨氏模量, I 为截面惯性矩, EI 为抗弯刚度。

测定微悬臂梁自由端处的振幅 W_0 。即可确定 C_1 ,进而确定微悬臂梁的应变梯度分布为

$$\frac{\partial \epsilon_{11}}{\partial x_3} = W_0 [4 158.40 \times (\cos \beta_1 x_1 + \cosh \beta_1 x_1) - 3 052.38 \times (\sin \beta_1 x_1 + \sinh \beta_1 x_1)] \quad (6)$$

在动态激励下,电极化强度可通过测定电流获得,即

$$P_3 = \frac{i}{2\pi f A} \quad (7)$$

式中: i 为电流; f 为驱动频率; A 为电极面积。

联立式(3)、(6)、(7)可得横向挠曲电系数 μ_{12} 为

$$\mu_{12} = \frac{i}{2\pi f A W_0} [4 158.40 \times (\cos \beta_1 x_1 + \cosh \beta_1 x_1) - 3 052.38 \times (\sin \beta_1 x_1 + \sinh \beta_1 x_1)]^{-1} \quad (8)$$

2.2 样品准备

表 1 为实验所用 BST 试样的参数。

表 1 BST 试样参数

Ba : Sr 原子个数比/%	有效长度/mm	宽度/mm	密度/(g/cm ³)
75 : 25	20.56	11	5.8
杨氏模量/GPa	相对介电常数	居里温度/°C	厚度/mm
68.85	3 600	20	0.5~1.0

2.3 实验装置

基于上述测定原理,构建用于低频动态测定横向挠曲电系数的测试平台,如图 2 所示。压电微驱动器激励梁的自由端,使梁做横向振动;超景深三维显微镜测量微悬臂梁自由端处的微振幅,据此可计算应变梯度;利用锁定放大器读取相应的电流间接获得电极化强度,进而求得横向挠曲电系数。

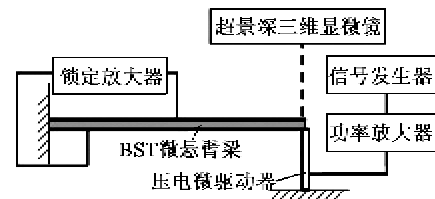


图 2 实验原理图

3 实验结果

3.1 横向挠曲电系数

采用厚为 0.5 mm 的试样进行实验,压电微驱

动器的驱动频率为 1 Hz, 基于上述原理测得的 $\mu_{12} = 5.87 \mu\text{C}/\text{m}$, 高于普通介电材料 4 个数量级以上, 可见铁电材料的性能优于普通介电材料^[1]。

3.2 横向挠曲电系数的频响特性

实验中采用厚 0.5 mm 的试样, 不断改变驱动频率得到不同低频率下的横向挠曲电系数, 如图 3 所示。随着频率的改变, 横向挠曲电系数的变化幅度很小, 在 1~10 Hz 低频范围呈良好的频响特性。

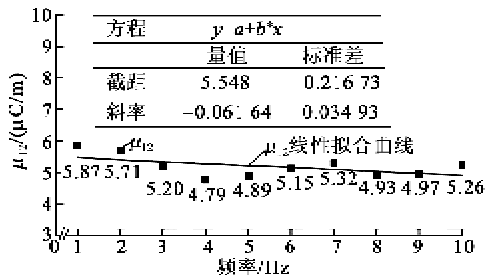


图 3 横向挠曲电系数随频率变化曲线

3.3 挠曲电材料的尺度效应

挠曲电效应耦合机理虽有别于压电效应, 然而用作传感元件时, 可参照压电材料中压电应变常数的物理含义来定义挠曲电材料中的等效压电应变常数 d_{33}^{eff} , 它是衡量传感特性的重要指标。BST 挠曲电微悬臂梁的等效压电应变常数^[12]为

$$d_{33}^{\text{eff}} = \frac{6\mu_{12}L^2}{Eh^3} \quad (9)$$

式中 h 为悬臂梁的厚度。

通过对 4 种不同厚度的试样分别进行测量, 获得横向挠曲电系数及等效压电应变常数随厚度变化的曲线, 如图 4、5 所示。由图 4 可知, 横向挠曲电系数与微悬臂梁的厚度无关。由图 5 可知, 等效压电应变常数随着微悬臂梁厚度的减小而增大, 表现出明显的尺度效应。鉴于 d_{33}^{eff} 与梁厚度的三次方呈反比, 可以预测, 当梁的厚度减小到微纳米尺度时, 等效压电应变常数就会急剧地增大, 比所有已知材料的双压电晶片大, 这与文献[9]的结论一致。

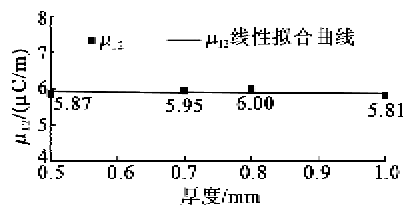


图 4 横向挠曲电系数随厚度变化曲线

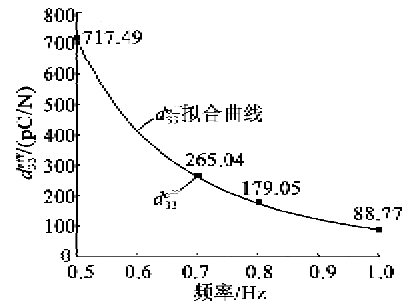


图 5 等效压电应变常数随厚度变化曲线

4 结论

本文基于 BST 微悬臂梁, 采用压电微驱动器、超景深三维显微镜、锁定放大器构建了横向挠曲电系数的测试平台, 对 BST 材料的横向挠曲电效应进行了测试, 得出如下结论:

- 1) 横向挠曲电系数 $\mu_{12} = 5.87 \mu\text{C}/\text{m}$, 比普通介电材料的系数高 4 个数量级。
- 2) 在 1~10 Hz 的低频范围内, 横向挠曲电系数呈现出良好的频响特性。
- 3) 挠曲电材料呈明显的尺度效应, 可预测当梁的厚度减小到微纳米尺度时, 其传感特性将远优于压电材料。

挠曲电材料用于传感、驱动、微纳机电系统、结构健康监测及能量收集等领域, 将具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] TAGANTSEV A K. Piezoelectricity and flexoelectricity in crystalline dielectrics[J]. Phys Rev B, 1986, 34(8):5883-5889.
- [2] CROSS L E. Flexoelectric effects: charge separation in insulating solids subjected to elastic strain gradients[J]. J Mater Sci, 2006, 44(1):53-63.
- [3] SHU L, WEI X, PANG T. Symmetry of flexoelectric coefficients in crystalline medium[J]. J Appl Phys, 2011, 110(10):104106.
- [4] KWON S R, HUANG W B, ZHANG S J, et al. Flexoelectric sensing using a multilayered barium strontium titanate structure[J]. Smart Mater Struct, 2013, 22(11):115017.
- [5] HUANG W, YAN X, KWON S R, et al. Flexoelectric strain gradient detection using $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ for sensing[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(25):252903.
- [6] KOGAN S M S. Piezoelectric effect during inhomogeneous deformation and acoustic scattering of carriers in crystals[J]. Phys Solid State, 1964, 5:2069.

(下转第 804 页)