

文章编号 1004-924X(2009)01-0118-08

功能梯度压电驱动器的结构设计、制备与功能验证

裘进浩, 姜 皓, 季宏丽, 朱孔军, 李勇君
(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要:根据作者早期研究中提出的一种新型功能梯度驱动器,设计并制备了该驱动器,建立了理论模型,并对驱动器的性能进行了测试。这种新型功能梯度驱动器由 4 种基于 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ 系列的材料复合而成,且 4 层材料的压电常数和介电常数在厚度方向上的梯度变化相反,这种梯度结构能使驱动器结构内部的应力分布优于传统弯曲驱动器。为了对驱动器进行优化设计,利用经典复合材料力学和压电方程建立了功能梯度压电驱动器的理论模型,并计算了不同厚度配比的驱动器受电压和自由端集中力单独作用时的准静态变形和应力分布,通过分析驱动器的内部应力,确定了各层最优厚度配比为 1:1:1:1。根据优化结果成功制备了功能梯度压电驱动器,并测量了驱动器自由端输出位移与输出力的关系。测量结果表明,功能梯度压电弯曲驱动器的输出位移和输出力呈线性关系,并且频率越低,输出位移和力就越大。

关键词:功能梯度材料;压电驱动器

中图分类号:TN384 **文献标识码:**A

Design, fabrication and performance evaluation of functionally gradient piezoelectric actuator

QIU Jin-hao, JIANG Hao, JI Hong-li, ZHU Kong-jun, LI Yong-jun

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: On the basis of a new type of functionally gradient (FG) piezoelectric actuator proposed by the authors in their former study, the new actuator is designed, fabricated, modeled and experimentally studied. The material compositions are selected from $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ family and they are used as the four layers in the new FG piezoelectric actuator. The piezoelectric constants and dielectric constants of the materials are gradated oppositely in the thickness direction, because this special structure of the FG piezoelectric actuator has an advantage over the traditional actuators in internal stress distribution. To optimize the structure of the FG piezoelectric actuator, an electromechanic model is derived from Classical Lamination Theory (CLT) and piezoelectric equation, and the static distortion and stress distribution of the actuator with different thickness ratios are computed when the voltage or concentrated force effects on it independently. The optimum thickness ratio is 1:1:1:1, which is determined by optimizing the internal stress distribution. According to the optimizing result, the FG piezoelectric actuator is fabricated successfully, also the relation between the output

收稿日期:2008-04-22;修订日期:2008-11-18.

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(No. BK2007200)

displacement and output force at the free end of the actuator is measured. The experimental results indicate that there is a linear relation between the output displacement and output force of the actuator, moreover, the lower vibration frequency is, the greater output displacement and output force are.

Key words: functionally gradient materials; piezoelectric actuator

1 引言

压电单、双晶片驱动器在实际应用中需要大的位移输出^[1-3],传统的驱动器是把一个或两个压电层粘结在一个金属垫片层上制成的。一方面,粘结交界面的强度低;另一方面,由于垫片和压电层的材料性质不同,在粘结界面处有较大的不连续集中应力产生。粘结界面处应力的集中和结构的变弱是压电单、双晶片驱动器在循环激励中被破坏的主要原因^[4]。

为了提高弯曲驱动器的寿命,Furman等提出了RAINBOW驱动器^[5-6]。在RAINBOW中,用化学还原的方法在高温下制备出垫片层,垫片层和压电层是以化学方法来结合的,所以交界面处有较高的强度。但是,由于材料特性的不连续而导致的应力不连续的状况并没有得到缓解。

功能梯度材料(Functionally Gradient Materials,简称FGM)^[7]是根据使用要求,选择多种不同性能的材料,应用先进的复合技术,使材料中间部分的组成和结构呈连续的梯度变化,而在内部不存在明显的界面,从而使材料的性质和功能沿空间也呈梯度变化的一种新型复合材料。FGM的研究,最初是为了满足航空航天领域恶劣的工作环境对结构材料的苛刻要求,然而随着研究的不断深入,其应用已扩大到能源、电子、光学、化学、生物医学、信息工程等诸多领域^[8]。

作者在以前的论文中曾提出一种新型的功能梯度压电驱动器^[9-10],该驱动器产生弯曲变形的原理是:在电场的作用下,压电材料在驱动器的相对边沿驱动器的厚度方向会产生不同的平面应变,当平面应变的分布在厚度方向呈线性变化时,就会在没有内部应力的情况下产生自然的变形。但是在实际的制备过程中,材料属性的连续变化是难以实现的,取而代之的是多层材料的渐变结构。在本研究中,从PNN-PZ-PT系中选择4种材料组分作为新型功能梯度压电驱动器的4个层,测试了这4种材料的属性参数,利用这些参数

对功能梯度压电驱动器进行建模和理论分析,并对该驱动器各层间的厚度配比进行优化,根据优化设计的结果制备驱动器,并对其进行性能测试。

2 材料组分与各层的特性

高的压电性可以产生较大的应变,但是介电性较小;相反,低的压电性产生较小的应变,但是介电性较大。为了得到大的弯曲变形,就需要把高压电性、低介电性、低刚度的压电材料和低压电性、高介电性、高刚度的压电材料按照一定的梯度变化组合起来^[7]。低应变压电材料中的高介电性可以降低电压损失。当电压沿厚度方向作用在由高应变和低应变材料组成的双层驱动器上时,就会在驱动器上产生弯曲变形,其产生机理和单晶片驱动器是一样的。然而,在两种材料的交界面处会产生大的不连续应力。为了增大所产生的变形,一方面,应该使驱动器两边材料的特性尽可能的不同;另一方面,材料特性相差越大,相应地,应力的不连续性就越大。



(a)驱动器的结构

(a)Structure of actuator



(b)加电压时各层的变形

(b)Deformations of layers



(c)驱动器的整体变形

(c)Deformation of actuator under electric field

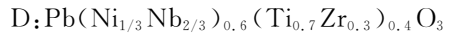
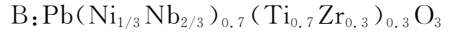
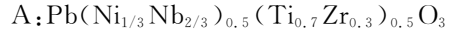
图1 弯曲偏转的机理

Fig. 1 Mechanism of bending deflection

为了降低应力的不连续性,材料的特性应该在厚度方向上平滑地梯度变化,但是材料特性平滑分布会增加制备的难度,因而在驱动器中通常用多层材料的渐变结构。一个 4 层的结构如图 1(a)所示;由于材料特性的梯度变化,当单独考虑各层时,它们将产生平面应变的梯度分布如图 1(b)所示;然而当各层组成一个整体时,就会产生

如图 1(c)所示的弯曲变形,并且有相对较小的内部应力。4 层材料组分的选择来自于 PNN-PZ-PT 系。

作者对图 2 所示的 PNN-PZ-PT 系中不同组分的压电常数、介电常数和机电耦合系数进行了测量,并从中选取了 A, B, C, D 4 种组分作为功能梯度驱动器四个层。4 种材料的组成分别是:



它们的材料属性如表 1 所示。

表 1 中材料特性的确定可参考 IEEE Standard on piezoelectricity^[11]。材料 A 有最大的压电常数 d_{31} 和最小的介电常数 ϵ_{33} ; 材料 B 有最小的压电常数 d_{31} 和最大的介电常数 ϵ_{33} 。4 种材料按 A—C—D—B 的顺序铺设。

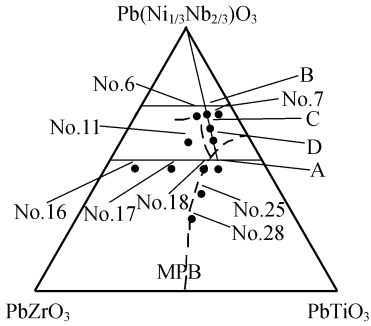


图 2 PNN-PZ-PT 系
Fig. 2 PNN-PZ-PT family

表 1 材料参数

Tab. 1 Material constants

	符号	单位	A	B	C	D
机电耦合系数	k_{31}		32.36			27.89
	k_{33}		72.72			22.44
	k_t	$\times 10^{-2}$	48.54			32.35
	k_{15}		63.83			29.80
	k_p		61.72			41.28
弹性模量	s_{11}^E		16.03	8.67	9.78	14.11
	s_{12}^E		-5.61	-2.68	-3.26	-5.36
	s_{13}^E		-8.88	-2.68	-3.26	-5.14
	s_{33}^E	$\times 10^{-12} \text{m}^2 \text{N}^{-1}$	20.34	8.67	9.78	12.31
	s_{44}^E		45.54	22.69	26.08	
	s_{66}^E		43.27	22.69	26.08	38.95
压电常数	d_{31}		-311	-61	-97	-281
	d_{33}	$\times 10^{-12} \text{mV}^{-1}$	786	155	245	486
	d_{15}		951	187	297	543
介电常数	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	5 516	22 751	18 351	9 649	
	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	6 496	20 971	16 469	11 288	
泊松比	σ^E		0.35	0.31	0.33	0.38
密度	ρ	$\times 10^3 \text{kgm}^{-3}$	8.00	8.04	8.03	7.93
居里温度	T_0	$^{\circ}\text{C}$	138	室温以下	室温以下	81

因为要把所有层烧结为一个整体,而且在各层之间没有插入内部电极,所以各层沿厚度方向的电位移 D_3 是一样的。第 i 层电场强度 $E_{3,i}$ 可以写成 $E_{3,i} = D_3 / \epsilon_{33,i}$, 其中 $\epsilon_{33,i}$ 是第 i 层厚度方向上的介电常数。若在两表面上的电极作用电压为 V , 那么 $V = \sum i E_{3,i} t_i$, 其中, t_i 是第 i 层的厚度。通过解上述关系式,可以得到各层的电场强度 $E_{3,i}$ 。可以看出,随着层的介电常数的增加,该层的电压损失会降低。

功能梯度驱动器的尺寸是 $8 \text{ mm} \times 42 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$, 如图 3 所示。当各层的形状和材料特性

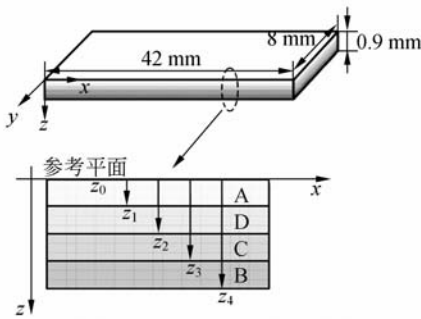


图 3 功能梯度驱动器的形状

Fig. 3 Shape of FG actuator

确定时,应力分布只依赖于各层的厚度比。理论上,各层厚度的最优化设计就是最大限度地降低驱动器中应力的不连续性。

3 驱动器的结构优化

根据经典层合板理论^[12],压电功能梯度驱动器上各点的位移可以用下式来表示,

$$u = u^0 + z \frac{\partial u}{\partial z} = u^0 - z \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (1)$$

$$v = v^0 + z \frac{\partial v}{\partial z} = v^0 - z \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (2)$$

在式(1),(2)中, u^0 和 v^0 分别表示参考平面上点在 x 和 y 方向的位移, w 表示驱动器的挠度。对位移场求一阶偏导数可得驱动器上各点的应变,如式(3)所示:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u^0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial v^0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ \frac{\partial v^0}{\partial x} + \frac{\partial u^0}{\partial y} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

根据 e 形式的压电方程可以得到驱动器第 i 层内部压电材料应力与应变的本构关系式:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{24} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{Bmatrix}_i, \quad (4)$$

由于设计的驱动器很薄,因此假设 z 方向正应力 σ_z 很小,约等于 0。利用式(4)展开计算 σ_z 得到:

$$\sigma_z = C_{13} \epsilon_x + C_{23} \epsilon_y + C_{33} \epsilon_z - e_{33} E_z = 0. \quad (5)$$

于是 ϵ_z 就可以用 ϵ_x, ϵ_y 和 E_z 3 个量来表示:

$$\epsilon_z = \frac{1}{C_{33}} (-C_{13} \epsilon_x - C_{23} \epsilon_y + e_{33} E_z). \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),同时考虑到 $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$, 式(4)最终可以简化为式(7):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & 0 \\ C'_{12} & C'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e'_{13} \\ 0 & 0 & e'_{13} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{Bmatrix}_i, \quad (7)$$

其中,

$$C'_{jk} = C_{jk} - \frac{C_{j3} C_{k3}}{C_{33}}, e'_{jk} = e_{jk} - \frac{C_{j3} e_{k3}}{C_{33}}. \quad (8)$$

当在功能梯度压电驱动器的两极加上电压 V 时,由于各层的介电常数不同,各层上的电场也不同,根据式(9)可以得到各层电场 E_i 与各层层厚 d_i , 各层介电常数 ϵ_i 以及总电压 V 的关系:

$$E_i = -V \frac{1}{\epsilon_i \sum d_j / \epsilon_j}. \quad (9)$$

取驱动器的任一横截面,对整个截面上的 x 向正应力求积分,得到截面上合力、合力矩与正应力的关系:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{z_0}^{z_n} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz, \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{z_0}^{z_n} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz, \quad (11)$$

将式(7)分别代入式(10),(11),得到:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} N^P \\ M^P \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中,

$$[A, B, D] = \sum_{i=1}^4 \int_{z_{i-1}}^{z_i} \begin{bmatrix} C_{11}' & C_{12}' & 0 \\ C_{12}' & C_{22}' & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (dz, z dz, z^2 dz), \quad (13)$$

$$[N^P, M^P] = \sum_{i=1}^4 \int_{z_{i-1}}^{z_i} \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{13}' \\ 0 & 0 & e_{13}' \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{Bmatrix} (dz, z dz). \quad (14)$$

在驱动器不受任何外力的情况下,其任意截面上的合力以及合力矩均为零,即 $N=0, M=0$, 于是方程(12)变为:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ \kappa \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N^P \\ M^P \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

利用已知条件,由式(13),(14)分别计算出 A, B, D, N^P, M^P , 便可根据式(15)求得驱动器的内部应变和弯曲曲率,再利用式(4)便可求出驱动器内部的应力分布情况。以本文提出并设计的驱动器为例,利用表 1 给出的各项参数求得任意结构组成的驱动器的内部应力分布,通过优化应力分布设计出性能最佳的功能梯度压电驱动器的结构配比,如图 4 所示。

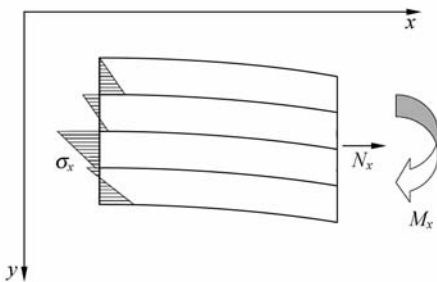


图 4 功能梯度驱动器的内力与外力

Fig. 4 Internal and external forces of FG actuator

图 5 显示了 4 种不同厚度比的驱动器在外加 500 V 电压时自由端输出力—输出位移关系的数值计算结果,四层厚度比分别取:1:1:0:0, 0.7:7:3:3, 1:1:1:1, 3:3:7:7, 对应于这 4 种形式的驱动器,约束条件均为一端固支,一端自由。从图中可以看出,在相同驱动电压下,变形和输出力最大的是厚度比为 7:7:3:3 的驱动器,其次是厚度比为 1:1:0:0 和厚度比为 1:1:1:1 的驱动器,而厚度比为 3:3:7:7 的驱动器的变形和输出力明显小于前三者。

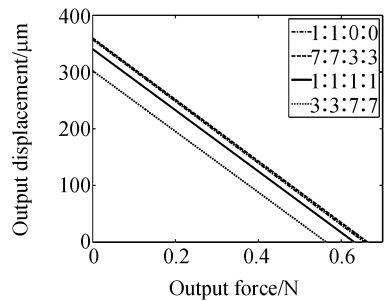


图 5 4 种驱动器的自由端输出力与位移关系

Fig. 5 Relation of output forces and output displacements at the free end of four types of FG actuators

图 6 显示了 4 种不同厚度比的驱动器在挠度相同时各自内部应力分布的数值仿真结果。从图 6 中可以发现,各层厚度比为 1:1:1:1 和 3:3:7:7 的驱动器,其内部正应力分布比其它两种驱动器更加平缓,而厚度为 1:1:1:1 需要的驱动电压比厚度比为 3:3:7:7 的驱动器更

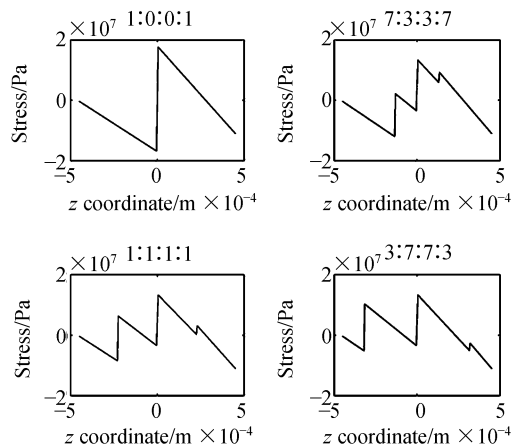


图 6 四种功能梯度驱动器的内部应力

Fig. 6 Interior stresses of 4 types of FG actuators

小,因此,作者选择制备厚度比为1:1:1:1的驱动器。

4 制备过程

在适当的质量百分比下,混合5种原料(PbO , ZrO_2 , TiO_2 , NiO_2 和 NbO_2)即可得到各层的材料组分。把混合料放在密封的坩埚中并装入电炉,加热至 950°C 并保温4 h,加热和冷却的速率为 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。冷却到室温后,把合成的粉压成粗糙的颗粒,并加水湿润,再球磨24 h以制得细粉。把粘结剂和分散剂加入细粉搅拌至泥浆状,通过对泥浆的挤压,就可以得到所需厚度的各种材料的薄片。

将4种组分的薄片按照给定的顺序叠放在一起,然后加热压片,最后再设计成所需的形状。对4层未烧结的驱动器进行排胶,先加热到 800°C ,并在该温度下保温5 h,然后再自然地冷却至室温。把排胶后的驱动器以 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率从室温加热至 600°C ,然后以 $100^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率从 600°C 加热至 1200°C ,并在该温度下烧结2 h(在密闭的容器中)。以 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率把温度从 1200°C 降至 600°C ,然后再自然地降至室温。烧成后在驱动器的下表面喷溅镍-铬电极,在上表面喷溅金电极,然后将驱动器在硅油槽中极化30 min,极化温度为 50°C ,极化电场强度为 $2\text{ kV}/\text{mm}$ 。

5 性能测试

首先,用图7所示的装置测量出制备好的功能梯度压电驱动器所产生的力与位移的关系,位移可以用激光位移传感器(Keyence, LC-2440)来测量,产生的力可以用力传感器(Kyowa, LVS-500GA)来测量。作用在功能梯度驱动器上的电压信号为三角波,其频率分别为0.5, 1, 1.5, 10和20 Hz,振幅为500 V,实验结果如图8所示。

由于只有两种特别的状态即端部完全自由的状态和自由端在Z方向上完全阻滞的状态是可测的,因此,其它状态可以通过在测得的两点作线性插值得到。当端部完全自由时,所产生的力为零,以最大挠度作为输出位移,即为图8所示纵轴上的点。当自由端在Z方向上被阻滞时,位移一直为零,此时,将保持位移为零所必需的最大力

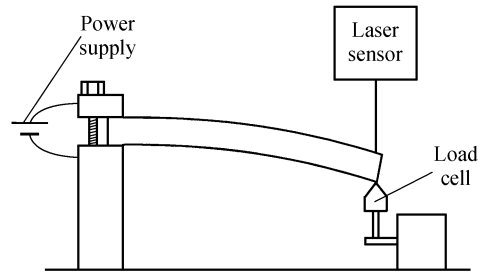


图7 测试系统

Fig. 7 Test system

称为输出力,这和图8中横轴上的点相对应。实验结果以及根据之前的数值计算结果在图8中给出。

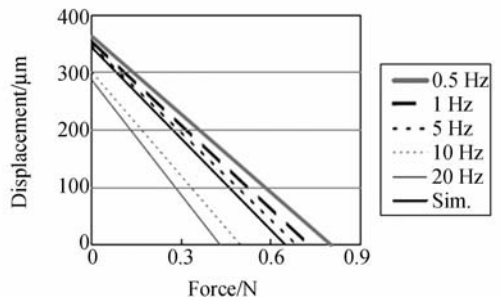


图8 力与位移的关系

Fig. 8 Relation of force and displacement

从图8中可以很明显地看到,驱动频率越低,输出位移和力越大,这可能与压电材料极化时的蠕变现象有关。在电场的作用下,压电材料产生位移与钙钛矿晶体的极化有关。在外电场的作用下,极化过程中会出现蠕变现象。三角波电压信号作用于压电驱动器时,位移的增长可能要持续几秒或几十秒。由于蠕变现象的作用,压电驱动器的振幅依赖于激励的频率,由于在测量中所用的频率都比功能梯度驱动器的共振频率低很多,所以振幅不受共振的影响,这就意味着实际的压电常数是频率的函数。数值计算中用到的压电常数是通过测量共振与反共振频率的方法间接得到的,并且这样得到的压电常数是频率无关的。如图8所示,数值计算结果与驱动频率较低时的实验结果能很好地吻合,这表明本文之前推导的理论模型是合理的,能够很好地反映功能梯度压电驱动器的准静态驱动特性,由该模型得到的数值计算结果可以为这种驱动器的优化提供设计依据。

6 结 论

在本研究中,作者设计了功能梯度压电驱动器的结构形式,建立了驱动器的理论模型,优化了驱动器的各层材料厚度配比,并制备了厚度配比为 1:1:1:1 的功能梯度压电弯曲驱动器,最后对制备出的驱动器进行了性能测试。通过对理论模型的分析发现,新型的功能梯度压电驱动器需

要很高的电压来驱动,但是内部应力集中现象得到缓解,厚度比为 1:1:1:1 的驱动器有较平缓的应力分布。通过对制备好的功能梯度驱动器的性能测试发现:驱动频率越低,驱动器的输出位移和力就越大,而且在低频驱动下得到的测试结果与理论计算结果比较吻合。今后需要进一步研究和制备薄型功能梯度压电驱动器,以降低驱动器的驱动电压,同时优化驱动器的结构形式,以及深入研究在烧结过程中各层之间组分的扩散现象。

参考文献:

- [1] UCHINO K. *Piezoelectric/Dielectric Actuators* [M]. Tokyo: Morikita Publishing, 1986. (in Japanese)
- [2] 叶会英,浦昭邦. 压电双晶片的能量传输特性分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(4): 345-350.
YE H Y, PU ZH B. Analysis of the capacity of energy transmission for piezoelectric bimorph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4): 345-350. (in Chinese)
- [3] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the Fundamental characteristics of Piezoelectric Element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [4] ABURATANI H, HARADA S, UCHINO K, *et al.*. A Destruction mechanism in ceramic multilayer actuators part 1[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 33: 3091-3094.
- [5] HEARTLING G H. RAINBOW ceramics—a new type of ultra-high-displacement actuator [J]. *Feature*, 1994, 73: 93-96.
- [6] FURMAN E, LI G, HEARTLING G H. An investigation of the resonance properties of RAINBOW actuators [J]. *Ferroelectrics*, 1994, 160: 357-369.
- [7] KOIZUMI M. The Concept of FGM [J]. *Ceramic Transactions Functionally Gradient Materials*, 1993, 34: 3-10.
- [8] 尹林,沈亚鹏. 压电类智能结构的力学行为和工程应用[J]. 力学进展, 1998, 28(2): 163-172.
YIN L, SHEN Y P. Mechanical Behavior and Engineering Applications of Piezo—intelligent Structures [J]. *Advances in Mechanics*, 1998, 28(2): 163-172.
- [9] QIU J, TANI J, WARKENTIN D J, *et al.*. Stress analysis of RAINBOW actuators and relief of stress by gradation of material composition [J]. *Japan. Soc. Appl. Electromagnet. Mech.*, 1999, 7: 185-192.
- [10] TANI J, QIU J, MORITA T. Functionally gradient piezoelectric actuators [J]. *Trans. Mater. Res. Soc. Japan.*, 2001, 26: 283-286.
- [11] ANSI/IEEE Std 176-1978, IEEE Standard on Piezoelectricity [S].
- [12] GEORGE Z V, PERTER I K. *Mechanics of Composite Materials with MATLAB* [M]. Berlin: Springer Publishing, 2005.

作者简介:



裘进浩(1963—),男,浙江嵊州人,工学博士,教授,博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,主要从事智能材料与结构研究,包括功能材料与器件的制备及其应用、压电器件的精密传感与驱动技术、振动与噪声控制等。
E-mail: qiu@nuaa.edu.cn



姜皓(1986—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事功能材料与器件的制备及其应用、压电器件的精密传感与驱动技术研究。
E-mail: jianghao@nuaa.edu.cn



季宏丽(1983—),女,江苏盐城人,博士研究生,主要从事智能材料与结构的振动噪声控制研究。Email: jihongli@nu-aa.edu.cn



李勇君(1983—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事压电功能材料的制备与性能表征。Email: yjli6273@163.com



朱孔军(1971—),男,山东临沂人,工学博士,硕士生导师。主要从事智能材料与结构的制备研究。Email: kjzhu@nuaa.edu.cn

● 下期预告

非球面成形致动器排布方法

曾春梅^{1,2}, 余景池^{1,2}

1. 苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

为了实现超薄球面镜的非球面成形,提出了一种采用非球面度梯度求致动器排布初始解的方法。首先,给出了该方法的理论依据、排布方法以及计算非球面度梯度的两种公式;接着,以一大口径离轴超薄非球面镜为例,用非球面度梯度的两种计算公式分别求出了致动器排布初始解,完成了非球面成形的有限元分析,得到了满足面形精度 RMS 值 21.09 nm 的最终解;然后,介绍了致动器排布的优化步骤。最后,比较了非球面梯度法、正方形法和环形法的差异。结果表明,用非球面度梯度平均值公式求出的初始解与最终解最接近,符合非球面度梯度变化率与致动器面密度的关系,而优化能进一步减少致动器数量和面形残差。在相同面形精度下,非球面梯度法排布的致动器个数约为正方形和环形排布的 1/2 或更少;在相同致动器个数下,非球面梯度法排布的面形残差 RMS 值约为正方形和环形排布的 1/3 或更小。非球面梯度法更适合在非球面成形领域用于求解致动器排布初始解。