

无铅压电叠层驱动器极化工艺及驱动性能研究

姚 萌,杜慧玲,史 翔,安群力,任广林

(西安科技大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘 要:为提升 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-K}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT-KBT) 系无铅压电陶瓷压电性能,开发新型无铅压电叠层驱动器,该文采用单因素方差分析与正交试验设计方法优化研究了 0.8NBT-0.2KBT 压电陶瓷的极化工艺,最优极化工艺为极化电场 6 kV/mm,极化温度 70 °C,极化时间 50 min,保压时间 21 min,测得压电系数 d_{33} 达到 108 pC/N;制备了无铅陶瓷叠层驱动器,并基于三角放大原理和柔性铰链结构设计一种新型外置放大机构,分别对有无外置放大机构的叠层驱动器微位移量进行对比测试,结果表明,与有外置放大机构的叠层驱动器相比,直接驱动的叠层驱动器位移量放大了 3.7 倍,在 150 V 驱动电压下位移量达到 25 μm 。这种无铅压电陶瓷驱动器具有大位移量、稳定性及低成本等特性,有望应用于微精密定位系统领域。

关键词:无铅压电陶瓷;正交实验;极化工艺;叠层驱动器;位移放大机构

中图分类号:TM359.9

文献标识码:A

Study on the Polarizing Technique and Driving Performance of Stack Actuator Based on Lead-free Piezoelectric Ceramic

YAO Meng, DU Huiling, SHI Xiang, AN Qunli, REN Guanglin

(College of Materials and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: To promote the performance of NBT-KBT lead-free piezoelectric ceramics and develop new lead-free piezoelectric stack actuators, the polarizing process of 0.8NBT-0.2KBT piezoelectric ceramics has been studied by the mono factor analysis of variance and the orthogonal test. The results showed that the piezoelectric constant d_{33} reached to 108 pC/N with the poling field of 6 kV/mm and temperature of 70 °C for the poling time of 50 mins and holding time of 21 mins. A lead-free piezoelectric stack actuator with a new type of external displacement magnifying mechanism was fabricated on the basis of triangle amplification principle and flexure hinge structure. The results showed that the displacement of the directly driving stack actuator has been magnified 3.7 times and the remarkable displacement of 25 μm was achieved under a driving voltage of 150 V comparing with the stack actuator with external displacement magnifying mechanism. The lead-free piezoelectric ceramic stack actuator has the features of large displacement, good stability and low-cost, and will start a new scope of application to the micro-precision positioning system.

Key words: lead-free piezoelectric ceramics; orthogonal test; polarizing process; piezoelectric actuator; displacement amplification

0 引言

伴随着科学技术的发展进步,传统的电磁驱动装置因为受到尺寸限制已经不能满足微小型领域驱动的需求,而压电驱动器有着许多符合超高精度驱动器要求的特性,如极高的分辨率,无间隙,较大的

输出力以及响应速度高的特点,同时具备尺寸较小,结构简单,安装便利,无电磁干扰及低速度大扭矩等优点,获得了极大的关注和快速的发展,已经在航空航天、医疗器械、精密仪表和数码产品等领域得到了广泛应用。但传统的压电陶瓷,如 $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$

收稿日期:2016-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51372197);陕西省重点科技创新团队基金资助项目(2014KCT-04);陕西省国际科技合作重点基金资助项目(2012KW-10)

作者简介:姚萌(1987-),男,河南三门峡人,硕士,主要从事压电陶瓷应用的研究。通信作者:杜慧玲,女,教授,博士。E-mail: hldu@fox-mail.com。

基的二元系、三元系陶瓷材料,虽然具有一系列优异的性能,但均含有大量的铅,导致此类陶瓷在制备、使用及废弃处理过程中都会散发有毒物质,对人体及环境造成较大的危害和污染。同时还具有由于铅的挥发,陶瓷成分的变化造成器件性能缺乏一致性和重复性,铅基材料需要密封烧结,成本较高的缺点。采用 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-K}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT-KBT) 系无铅压电陶瓷作为压电驱动器材料取代含铅压电陶瓷,具有制备成本低,制成产品性能稳定,对环境污染小的优点,使研究提高了 NBT-KBT 系无铅压电陶瓷的压电性能,开发无铅压电器件成为一项紧迫且具有重大实用意义的课题^[1-2]。

针对 NBT-KBT 系压电陶瓷相对于含铅压电陶瓷,所具有的压电性能不高、压电位移量较小等问题,为实现提高 NBT-KBT 系压电陶瓷的压电性能和探索使 NBT-KBT 系无铅压电陶瓷叠层驱动器走向实用化与市场化的目的,鉴于准同型相界附近 NBT-KBT 陶瓷具有最优异的压电性能,本文优选 0.8NBT-0.2KBT 无铅压电陶瓷作为研究对象,首先采用单因素方差分析法从影响无铅压电陶瓷压电性能的各个因素中筛选出与压电性能相关的极化因素作为正交实验的样本因素,利用正交实验法确定 NBT-KBT 无铅压电陶瓷的最优极化工艺条件;在此基础上采用正交放大原理与柔性铰链结构设计开发叠层压电驱动器的外置位移放大机构,研制无铅压电陶瓷叠层驱动器原型器件,提高了 NBT-KBT 基无铅压电陶瓷叠层驱动器的位移输出量。

1 0.8NBT-0.2KBT 基无铅压电陶瓷的极化工艺研究

1.1 实验过程

按照理论含量配比准确称量分析纯原料 K_2CO_3 , Na_2CO_3 , Bi_2O_3 , TiO_2 后,以无水乙醇为球磨介质球磨 4 h,干燥 5 h,在马弗炉 800 °C 预烧 2 h。取出粉料再次球磨 4 h 后,将干燥 24 h 的粉料加入质量分数为 5% 的 PVA 溶液造粒至 50 ~ 120 目,在 180 MPa 压力下压制成直径 $\varnothing 11$ mm,片厚 1 mm 的圆片,排胶后,以 200 °C/h 的升温速度至 1 100 °C 保温 2 h 烧制完成。采用排水法测试陶瓷的体积密度为 5.617 g/cm³,测试 XRD 衍射图谱计算出理论密度后得出陶瓷样片相对密度为 91.3%。将烧好的陶瓷圆片抛光,统一磨成 0.75 mm 厚度,被烧银电极后,使用 DZ2671A 耐压测试仪的直流电压档对

样品陶瓷圆片进行极化,以一半强度的极化电场对样品进行保压,然后室温铝箔包裹静置一昼夜后,采用 ZJ-3A 型准静态 d_{33} 测试仪测试样品压电系数 (d_{33}) 值。

1.2 无铅压电陶瓷极化的单因素方差分析

影响无铅压电陶瓷最终压电性能的极化因素很多,分为内在确定性因素和外在偶然因素。内在确定性因素是压电性能产生的基本条件,包括极化电场、极化温度、极化时间、保压时间和保压电场等,外在偶然因素包括在极化过程中,极化电场和极化温度的微小变化产生的偶然误差,绝缘媒质的杂质干扰等。本文采用 d_{33} 值作为评价指标,利用单因素方差分析法从影响陶瓷压电性能的极化因素中筛选出与极化结果相关的因素作为正交实验的样本因素,以便下一步的研究。

在单因素方差分析中,假设极化电场对无铅压电陶瓷片的压电性能影响显著,以 5 个不同水平的极化电场作为变量,极化温度、极化时间及保压时间(保压电场为极化电场强度的一半)保持不变,测试无铅压电陶瓷的 d_{33} 值,5 次实验所得结果如表 1 所示。

表 1 极化电场单因素方差分析数据表

电场水平/ (kV/mm)	$d_{33}/(\text{pC/N})$				
	1	2	3	4	5
4.5	45	50	60	65	57
5.0	52	55	63	60	65
5.5	61	53	67	70	72
6.0	85	93	90	81	78
6.5	81	84	79	74	78

$$S_{\text{因}} = \sum_i^n [k \times (\bar{x}_{ij} - \bar{y})^2] = 676.928 \quad (1)$$

$$S_{\text{误}} = \sum_i^n [(x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2] = 796.4 \quad (2)$$

式中: i, n 分别为当前水平和总水平数; k 为某水平实验的重复次数; x_{ij} 为各水平下的实验数据; $\bar{x}_{ij}$ 为在 i 实验水平下实验数据的平均值; $\bar{y}$ 为总平均值。自由度 $f_{\text{因}} = 4$, $f_{\text{误}} = 20$, 计算得最终的值 $F = 4.25$, 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时,查 F 分布表得到临界值 $F_{0.05}(4, 20) = 2.87$, 可见 $F > F_{0.05}$, 从而得出极化电场的大小对无铅压电陶瓷片的压电性能影响显著。

然后分别对极化温度,极化时间等因素进行单因素方差分析,从各个因素中筛选出对无铅压电陶瓷片压电性能显著的几个极化因素:极化电场(M)、

极化时间(N)、极化温度(X)和保压时间(Y)作为正交实验的样本因素进行研究。

1.3 正交实验因素水平极差分析

本次实验选用正交实验表 $L_{25}(5^6)$ 前四列制成所需的四因素五水平正交实验表,从与无铅压电陶瓷压电性能密切相关的 4 个极化因素(M、N、X、Y)中各选取 5 种水平,如表 2 所示。

表 2 正交实验因素水平一览表

因素 水平	正交因素			
	极化电场/ (kV/mm)	极化时间/ min	极化温度/ ℃	保压时间/ min
1	4.5	10	70	10
2	5.0	20	75	13
3	5.5	30	80	16
4	6.0	40	85	19
5	6.5	50	90	21

采用极差分析法对正交实验结果进行分析,结果如表 3 所示, K_i (K 代表 M、N、X、Y)表示几个因素在同一水平的 d_{33} 平均值,根据正交设计的特性,对 K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 来说,5 组实验的实验条件完全一样,可以直接进行比较。 R 表示极差,是指实验因素在其取值范围内实验指标变化的幅度, $R = \text{Max}(K_i) - \text{Min}(K_i)$, R 越大,说明该因素对实验指标的影响越大。根据极差 R 的大小,可以判断各个因素的主次顺序。

表 3 正交实验的 d_{33} 数据一览表

因素 水平	$d_{33}/(\text{pC/N})$			
	M	N	X	Y
K_1	51.6	56.6	72.4	69.0
K_2	61.8	68.0	70.4	61.4
K_3	69.8	63.2	65.6	67.6
K_4	73.8	61.4	55.6	60.0
K_5	65.4	73.2	58.4	64.4
R	22.2	16.6	16.8	9.0

根据表 3 中的数据,当极化电场因素,极化温度因素,极化时间因素,保压时间因素分别取 K_4, K_1, K_5, K_1 数据时,所得的 d_{33} 的平均值最高。所以在考虑各因素单独作用下,最佳工艺参数为 $M_4 N_5 X_1 Y_1$ 。考虑到事物总是有内在的联系,还要确定各因素对样品压电性能影响的主次顺序。根据实验数据可得 $R_M > R_X > R_N > R_Y$,由此可知,极化电场对样

品压电性能影响最显著,依次为极化温度、极化时间、保压时间对样品压电性能的影响最小,最后得出最优工艺方案为: $M_4 X_1 N_5 Y_1$,即在极化电场为 6 kV/mm、极化温度为 70 ℃、极化时间为 50 min、保压时间为 10 min 时可以获得压电性能最优的无铅压电陶瓷片(108 pC/N)。

2 无铅压电陶瓷叠层驱动器原理与结构设计

2.1 无铅压电陶瓷叠层驱动器的压电分析与制备

通常,相对铅基压电陶瓷,无铅系压电陶瓷的 d_{33} 较小,压电性能较差。如果采用单个无铅压电体作为驱动器,则其输出的位移量有限,驱动电压也较高。为了在较低电压驱动下获得较大的位移量,无铅压电驱动器设计就必须采取多层叠片式结构,将陶瓷片以机械上串联、电学上并联的方式一片片叠起来组成驱动元件^[3-4],如图 1 所示。给叠层驱动器加上电压(电场方向与极化方向一致),就会导致陶瓷片厚度增加,整个叠层结构伸长。在理想情况下,叠层型陶瓷驱动器的总位移输出量为单个压电陶瓷片输出位移的线性叠加^[5],即

$$\delta = n\delta_i = n(d_{33}U - F/k_i) = d_0U - F/k_0 \quad (3)$$

式中: δ 为叠层陶瓷柱的总位移; n 为压电陶瓷柱的片数; δ_i 为每片陶瓷的位移量; U 为加载在压电陶瓷片上的驱动电压值; $d_0 = nd_{33}$, $k_0 = k_i/n$ 分别为叠层陶瓷柱的等效压电系数和等效静态刚度。由式(3)可得叠层压电陶瓷柱的零应力输出位移 $\delta_0 = d_0U$,零位移输出力 $F_m = k_0d_0U$ 。

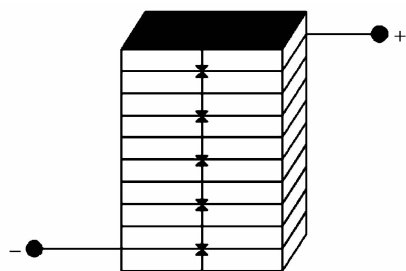


图 1 无铅压电陶瓷叠层驱动器示意图

叠层驱动器每个小单元由 $h \times w \times l = 0.5 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm} \times 7.9 \text{ mm}$ 规格的薄长方形陶瓷片(利用上述最优极化工艺条件进行极化,获得的 30 片压电陶瓷的 d_{33} 介于 98~108 之间,较一致)与 $h \times w \times l = 0.1 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm} \times 7.9 \text{ mm}$ 规格的薄黄铜片组成,共 30 层。先将陶瓷片与黄铜片用环氧树脂与聚酰胺树脂以 1:1 的比例配制成的黏合剂进行粘合^[6],再将陶瓷片与黄铜片组成的小单元以上述黏合剂按

图 1 中的顺序进行粘合。由于陶瓷片与黄铜片粘合的效果关系到叠层驱动器的输出性能,在粘合时需用力将陶瓷片与黄铜片压紧,以去除粘合层中的空气和空隙,再用特制夹具夹持叠层陶瓷片,保持压力 60 ℃ 烘干 1 h。制作完成的无铅压电陶瓷叠层驱动器如图 2 所示。

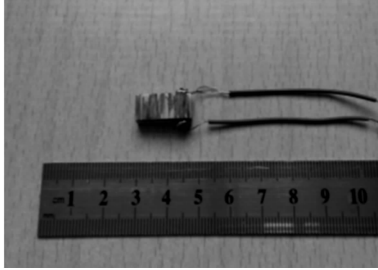


图 2 无铅压电陶瓷叠层驱动器实物图

2.2 压电陶瓷叠层驱动器放大机构的结构设计与优化

直接型压电陶瓷叠层驱动器的输出位移有限,本文基于三角放大原理为直接型压电陶瓷叠层驱动器设计了一种外置放大结构来增大其微位移的输出量。同时压电陶瓷叠层驱动器作为一个实用的驱动执行装置,为了保持输出位移的连续性,必须时刻保持被压状态^[7-8],在驱动器顶部外加一个 M2 的螺钉,通过调节此螺钉来控制陶瓷叠层驱动器所承受的压力大小,保持叠层陶瓷柱的受压状态,外置放大机构的压电陶瓷叠层驱动器结构设计示意图如图 3 所示。

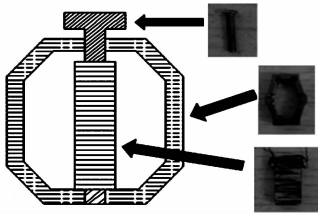


图 3 叠层驱动器放大机构设计示意图

根据三角放大原理

$$AB^2 + BC^2 = (AB - \Delta a)^2 + (BC + \Delta b)^2 \quad (4)$$

可得放大倍数

$$\mu = \frac{\Delta b}{\Delta a} \approx \frac{AB}{BC} = \cot \theta \quad (5)$$

式中: Δa 为叠层陶瓷柱在驱动电压下产生的微位移量; Δb 为通过放大机构放大得到的微位移量(见图 4)。根据式(5)中的 μ 只和直角边与斜边的夹角 θ 有关,而与直角边的长度无关,且随着 θ 角的变小,放大倍数会越来越大,增大的幅度也随之增加^[9]。综合考虑压电陶瓷叠层驱动器尺寸与放大机构加工成本,计算选择出最合理的放大机构夹角 $\theta = 15^\circ$ 。

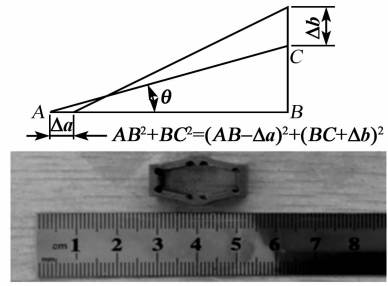


图 4 叠层驱动器放大机构放大原理与样品图

设计叠层驱动器放大机构时,放大机构的结构刚度是获得良好放大效果的关键因素,而放大机构的结构刚度在结构宽度确定的情况下与机构的厚度成正比;同时因为放大结构刚度过大将限制放大结构的弯曲伸张,进而影响叠层驱动器的位移输出性能^[10]。45 钢密度为 7.85 g/cm³,弹性模量为 210 GPa,且价格低,综合考虑选择 45 钢为放大机构基材。柔性铰链是一种利用其结构薄弱处的弹性形变实现类似普通铰链的运动传递,来转换或传递运动,力和能量的新型机构。它具有无摩擦、无间隙及运动灵敏度高等优点^[11]。综上考虑,本文采用柔性铰链结构来优化放大机构,基于正交三角放大原理与柔性铰链结构设计出的外置放大机构样品如图 4 所示。

3 无铅压电叠层驱动器样机性能测试

采用迈盛 MS1501D 直流电源提供驱动电压(0~150 V),DGS-6C 数显电感测微仪测量无铅压电叠层驱动器在驱动电压下产生的微位移量。直流电源控制驱动电源从 0 逐步升压到 150 V,每隔 5 V 记录一个位移量,分别测试外置放大机构与无放大机构的无铅压电陶瓷叠层驱动器(由于放大原理,其中外置放大机构测试值取绝对值),测试结果如图 5 所示。直接驱动无外置放大机构的压电陶瓷叠层驱动器最大微位移为 6.75 μm;无铅压电陶瓷叠层驱动器经放大结构放大后,最大微位移达到 25 μm。放大机构对叠层驱动器的微位移量放大约 3.7 倍,外置放大机构的叠层驱动器曲线线性度较高。

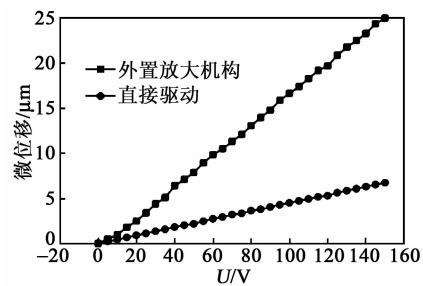


图 5 叠层驱动器驱动性能测试图

综上所述可知,NBT-KBT 系无铅压电陶瓷叠层驱动器相对于含铅驱动器具有位移量大,成本低及性能稳定等优点,在当今要求可持续发展与环境保护的社会大环境下,开发无污染,性能优良的新型无铅压电陶瓷驱动器具有重大而深远的意义。

4 结 束 语

本文采用正交实验法研究了 0.8NBT-0.2KBT 成分的无铅压电陶瓷极化工艺条件,在极化电场为 6 kV/mm,极化温度为 70 °C,极化时间为 50 min,保压时间 21 min 时获得了压电性能较优良的无铅压电陶瓷片,测得其压电应变系数 d_{33} 值达到了 108 pC/N;随后分析了叠层驱动器的原理与特性,利用正交放大原理与柔性铰链结构设计并制作了一种新型适于无铅压电陶瓷叠层驱动器的外置放大机构,最后测试了该无铅压电陶瓷叠层驱动器的电机性能,微位移曲线线性度较高,最大微位移量输出达到 25 μm ,外置放大机构放大比例约 3.7 倍,放大曲线线性度较高。该驱动器可应用在微米级超精密驱动领域,加上环境友好型的特点,使其应用前景广。

参考文献:

- [1] CHENG Renfei, ZHU Yalong, ZHU Lunan, et al. Microstructure and enhanced electrical properties of lead-free $\text{La}_2\text{CoMnO}_6$ ternary system ceramics[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(1): 124-129.
- [2] 王瑾, 杜慧玲, 张盼, 等. NBT-KBT-LBT 系无铅陶瓷的弛豫相变与介电性能研究[J]. *功能材料*, 2014, 45(2): 30-34.
WANG Jin, DU Huiling, ZHANG Pan, et al. Dielectric property and relaxor phase transition of NBT-KBT-LBT ceramics [J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(2): 30-34.
- [3] MAAS J, TEPEL D, HOFFSTADT T. Actuator design and automated manufacturing process for DEAP-based multilayer stack-actuators [J]. *Meccanica*, 2015, 50(11): 2839-2854.
- [4] 鄢珂, 金龙, 徐志科, 等. 叠层型压电驱动器技术及实验研究[J]. *微电机*, 2008, 41(5): 80-82.
- YAN Ke, JIN Long, XU Zhike, et al. Research on technique and application of piezoelectric stack actuator [J]. *Micromotors*, 2008, 41(5): 80-82.
- [5] TINOCO H A, SERPA A L. Voltage relations for debonding detection of piezoelectric sensors with segmented electrode [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 31(8): 258-267.
- [6] 王玉山, 龚立娇, 王锐. 粘接层对不同形状叠层压电振子发电性能影响[J]. *压电与声光*, 2014, 36(2): 234-236.
WANG Yushan, GONG Lijiao, WANG Rui. Effect of adhesive bonds on vibration generating capacity of triple layer piezoelectric vibrators with different geometries based on PZT [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(2): 234-236.
- [7] 黄卫清, 史小庆, 王寅. 菱形压电微位移放大机构的设计[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 803-809.
HUANG Weiqing, SHI Xiaoqing, WANG Yin. Design of diamond piezoelectric micro-displacement amplification mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(3): 803-809.
- [8] 李杨民, 孟大帅. 一种新型微位移放大机构设计与特性分析[J]. *天津理工大学学报*, 2015, 31(5): 5-9.
LI Yangmin, MENG Dashuai. Properties analysis and design of a new micro-displacement amplifying mechanism [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2015, 31(5): 5-9.
- [9] 连安志, 曹蕾蕾, 宋绪丁. 精密直线压电驱动器的设计与研究[J]. *压电与声光*, 2014, 36(6): 921-924.
LIAN Anzhi, CAO Leilei, SONG Xuding. Design and research on the precise linear piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(6): 921-924.
- [10] WANG Shupeng, ZHANG Zhihui, REN Luquan, et al. Design and driving characteristic researches of a novel bionic steeping piezoelectric actuator with large load capacity based on clamping blocks [J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(8): 1757-1765.
- [11] LOBONTIU N. Modeling and design of planar parallel-connection flexible hinges for in and out-of-plane mechanism applications [J]. *Precision Engineering*, 2015, 42(1): 546-549.