

毫米级微型机器人操作手的研制和操作特性

尹燕丽¹, 朱邦太¹, 陈海葵², 曹长江³

(1. 洛阳工学院 电气系, 河南 洛阳 471039;

2. 上海交通大学 复合材料研究所, 上海 200030;

3. 上海交通大学 信息存储研究中心, 上海 200030)

摘要: 采用单晶片型压电悬臂梁制作了一种双悬臂梁结构的微型夹持器, 用作毫米级微型机器人的微操作手。该微夹持器整体尺寸为 $15\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$, 重量为 100mg 。在分析该悬臂梁操作原理的基础上, 选用 $\text{PbNi}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}-\text{PbZrO}_3-\text{PbTiO}_3$ 三元系压电陶瓷准同型相界的配方作为悬臂梁压电驱动材料, 这种压电陶瓷具有高压电常数 (d_{31}) 和机电耦合系数 (K_p)。进一步研究了压电微夹持器的操作特性。结果表明: 50V 电场下, 其最大张口距离可以达到 $40\mu\text{m}$, 最大夹持力为 $25.7 \times 10^{-3}\text{N}$ 。

关键词: 微操作手; 微夹持器; 压电单晶片型悬臂梁; 操作特性; 微型机器人

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

1 引言

随着微机电系统(MEMS)技术的飞速发展, 制造具有微传感系统和微执行系统组合的多功能组合微系统越来越迫切, 研究人员采用现有的微加工技术制造单个微型器件, 然后采用人工进行精密装配多个具有一定功能的微系统^[9], 由于人工装配要求装配人员的专业性较高, 很难形成工业性生产, 同时受到人类本身能力的限制, 纯粹靠人来实现微纳米级器件的装配十分困难。为此, 对微装配技术的研究已成为一个国际热门课题^[1-3]。我们建立了一个 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的微装配实验平台, 利用 2mm 的电磁型微型电动机^[4, 10], 制作了 $8\text{mm} \times 6\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的微型机器人小车, 为了完成微型机器人对微型零件的操作, 需要为微型机器人小车装置一个可以对微器件进行操作的微机械手。我们分析了现有的微型操作器的设计方法, 结合我们的微型机器人操作系统, 研制了一个双悬臂梁式压电微夹持器。

本文在分析压电悬臂梁操作原理的基础上, 选用 $\text{PbNi}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}-\text{PbZrO}_3-\text{PbTiO}_3$ 三元系压电陶瓷准同型相界的配方^[5], 研制出高压电常数

和机电耦合系数的压电陶瓷作为悬臂梁压电驱动材料。在考察压电材料性能的基础上, 重点研究了微夹持器的操作特性。

2 压电微型夹持器的设计和制作

2.1 单晶片型压电悬臂梁的操作原理

采用单晶片型压电悬臂梁(Unimorph)作为微夹持器的驱动器, 单晶片型压电悬臂梁位移大, 制备工艺简单。悬臂梁结构如图1所示。



Fig. 1 Structure of the cantilever.

通过研究压电悬臂梁的操作特性, 从微夹持器的二悬臂梁结构出发, 即可推知微夹钳的操作特性。定义 z -方向为极化方向。 x -和 y -方向与 z -方向相互垂直。图中 p 和 m 分别代表压电 (piezoelectric) 层和金属 (metal) 基板层。

当给悬臂梁施加一与压电层极化方向相反的电场时,压电层由于逆压电效应而产生应变,压电层沿长度方向伸长,由于基板层没有产生伸长应变而限制压电层的伸长变形,从而压电层伸长变形带动双层悬臂梁产生伸长和弯曲两种变形。两种变形的复合即为悬臂梁的顶端位移 δ , 可表示为^[6]:

$$\delta = \frac{3L^2 d_{31} E_3}{h^2} \cdot \Psi \quad (1)$$

其中 L, h 为悬臂梁的长度和厚度, d_{31} 为压电陶瓷材料的横向压电常数, E_3 为施加在 z 轴方向的电场。 Ψ 为位移影响因子:

$$\Psi = \frac{2AB(1+B)^2}{A^2B^4 + 2A(2B + 3B^2 + 2B^3) + 1} \quad (2)$$

这里, $A = E_m/E_p$, $B = h_m/h_p$ 。 E_m, E_p 分别为悬臂梁金属层和压电层的杨氏模量; h_m, h_p 分别为两层的厚度。

如果想使悬臂梁不产生弯曲,必须有一力 F_{top} 作用于端部。根据悬臂梁理论^[7], 可以计算出悬臂梁的端部当力为:

$$F_{\text{top}} = \frac{3wh^2E_p}{8L} \cdot \frac{2AB}{(AB+1)(1+B)} \cdot d_{31}E_3 \quad (3)$$

w 为悬臂梁的宽度。该当力即是微夹持器的夹持力。

由上分析可知:微夹持器的张开距离和夹持力取决于应用在悬臂梁上的电场强度、压电悬臂梁尺寸和压电材料的性能。对于压电材料来说,提高横向压电常数能够增大微夹持器的张开距离和夹持力。

2.2 0.5PNN-0.5Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ 压电陶瓷材料的制备

用于悬臂梁驱动器的压电材料一般是“软性”压电陶瓷,具有高的压电常数和机电耦合系数^[6]。选 PbNi_{1/3}Nb_{2/3}-PbZrO₃-PbTiO₃(PNN-PZ-PT)三元系压电陶瓷准同型相界附近的配方:0.5PNN-0.5Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃。采用典型的压电陶瓷制备工艺。将分析纯的 PbO、NiO、Nb₂O₅、ZrO₂ 和化学纯的 TiO₂ 按摩尔比配料,掺入质量分数为 2% 分析纯的 Bi₂O₃, 球磨混合, 860℃/2h 下预合成原料, 然后再球磨混合, 粉料外加 5% PVA, 压制成块, 过筛造粒。100MP 的压力下压制成素坯, 经排粘后, 在 1260℃/2h 烧结后

研磨成所需尺寸。厚度方向被银电极, 在 120℃ 的硅油中进行极化, 电场强度为 3kV/mm。放置 24h 后测材料的性能。用 Agilent 4294A 精确阻抗分析仪测量和计算横向压电常数 (d_{31})、机电耦合系数 (K_p)、机械品质因子 (Q_m)、相对介电常数 (ϵ'/ϵ'') 和弹性柔顺系数 (S_{11}^E)。铁电参数测量采用 RT6000HVS 铁电压电综合测试系统。

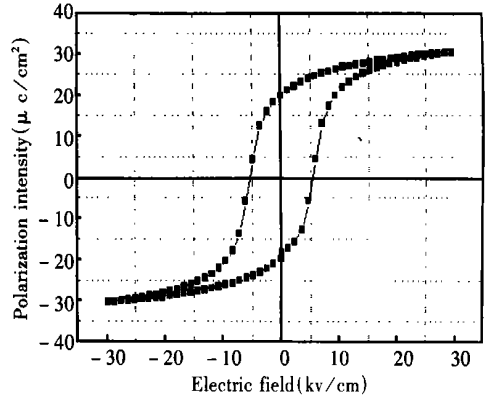


Fig. 2 Hysteresis loop of 0.5PNN-0.5Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃.

图2为该压电陶瓷的电滞回线。由图可知, 该材料为典型的“软性”压电陶瓷。矫顽场强 (E_c) 为 5.3kV/cm, 剩余极化 (P_r) 为 18.9 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。

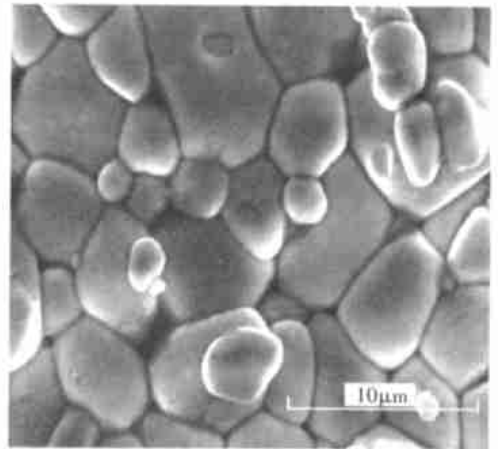


Fig. 3 SEM photograph of 0.5PNN-0.5Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})O₃ natural surface.

图3为该压电陶瓷自然表面放大 4000 倍时的 SEM 照片, 显示出该材料晶粒生长良好, 结构致密。它的主要性能示于表 1。

Table 1 Main parameters of 0.5PNN-0.5Pb($Zr_{0.3}Ti_{0.7}$)O₃ piezoelectric ceramics

Properties of the material	Measured values
Volume density, ρ (10^3 kg/m^3)	7.74
Dielectric constant, $\epsilon_{33}^T/\epsilon^0$	4000
Piezoelectric constant, d_{31} (10^{-12} C/N)	-260
Electromechanical coupling coefficient, K_p	0.71
Quality factor, Q_m	50
Flexible coefficient, S_{11}^E ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)	16.21

由表可以看出: 横向压电常数 (d_{31}) 达到 $-260 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, 机电耦合系数 (K_p) 达到 0.71。

2.3 压电悬臂梁和微夹持器的研制

我们研制的微夹持器为双悬臂梁结构的微型镊子, 结构如图 4 所示。

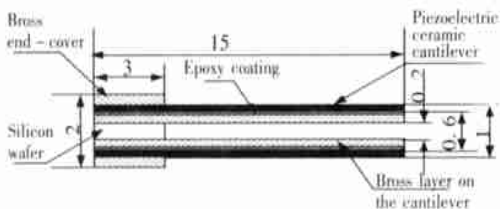


Fig. 4 Structure of the piezoelectric microgripper.

压电悬臂梁采用单晶片型, 将该陶瓷片加工成长 (L) 15mm, 宽 (w) 2mm, 厚 (h) 0.2mm 的矩形片, 用环氧树脂将其与同尺寸的黄铜片粘结在一起。

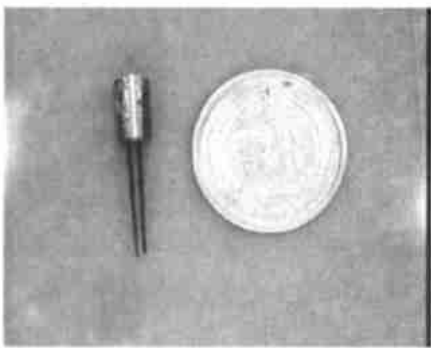


Fig. 5 Piezoelectric microgripper assembled in the micro-robot.

利用加工好的压电悬臂梁做为执行部件制作微型夹持器, 中间粘结一层厚度适当的绝缘体, 厚度的大小以实际应用中要夹持的物体大小决定, 本系统制作了一个 0.6mm 厚的硅片作为中间体。在两悬臂梁的两侧再分别粘结一个黄铜端盖, 既

起到夹持固定作用, 也用做微镊子的控制电极。已安装微镊子的机器人小车的实物见图 5。

3 压电微夹持器的操作特性

微位移的测量采用 RT6000HVS 铁电压电综合测试系统和 MTI-2000 Fotonic 传感器。结果如图 6 所示。

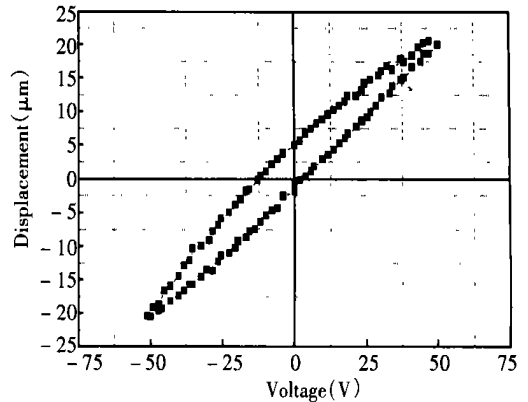


Fig. 6 Micro displacement curve at $\pm 50\text{V}$.

从图 6 可知: 在 $\pm 50\text{V}$ 时, 悬臂梁的微位移 $\delta = \pm 20.3 \mu\text{m}$, 按两倍关系计算, 微夹钳的顶端展开位移超过 $\pm 40 \mu\text{m}$ 。

黄铜的杨氏模量 (E_m) 取 $1.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 。由公式 (2) 计算悬臂梁的 $\delta = \pm 17.2 \mu\text{m}$, 误差 15.3%, 实测值比计算结果稍大, 这主要是由于压电非线性的影响造成的。美国宾州大学 Wang Qing-Ming 等也得到了类似的结果^[8]。由于压电非线性问题本身的复杂性, 文献没有针对这个问题给予圆满的解释。我们正在进行这方面的研究工作, 有关结果将在以后另文报导。

由公式 (3) 可计算在 50V 电压下微镊子的夹持力 $25.7 \times 10^{-3} \text{ N}$ 。其中: $E_p (= 1/S_{11}^E) = 6.17 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 。

4 结 论

采用 $\text{PbNi}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}-\text{PbZrO}_3-\text{PbTiO}_3$ 三元系压电陶瓷准同型相界的配方研制了具有高压电常数和机电耦合系数的压电材料, 它的横向压电常数 (d_{31}) 达到 $-260 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, 机电耦合系数 (K_p) 达到 0.71。用这种压电陶瓷设计制作了

双悬臂梁结构的微夹持器, 整体尺寸为 $15\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$, 重量为 100mg 。实测了微镊子的张开量, 与理论推导进行了对比, 初步分析了误差的

原因, 计算了该微夹持器的夹持力。结果表明: 在 50V 电场下, 其最大张口距离可以达到 $40\mu\text{m}$, 最大夹持力为 $25.7 \times 10^{-3}\text{N}$ 。

参考文献:

- [1] Sitti Metin, Hashimoto Hideki. Two dimension fine particle positioning using a piezoresistive cantilever as a micro/nano-manipulator[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. Detroit, Michigan. 1999, 2729- 2735.
- [2] Kasaya Takeshi, Miyazaki Hideki, Saito Shigeki, et al. Micro object handling under vision-based automatic control[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C], Detroit. Michigan. 1999, 2189 - 2196.
- [3] Yang Ge, Gaines James A, Nelson Bradley J. A flexible experimental workcell for efficient and reliable wafer-level 3D microassembly[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C], Seoul, Korea, 2001.
- [4] 张寿柏, 张琛. $\Phi 2\text{mm}$ 电磁型电动机的研究[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(9): 133- 166.
- [5] Zhu X H, Meng Z Y. The influence of the morphotropic phase boundary on the dielectric and piezoelectric properties of the PNN-PZ-PT ternary system[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31: 2171- 2175.
- [6] Wang Qing-ming, Eric Cross L. Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators[J]. Ferroelectrics, 1998, 215: 187- 213.
- [7] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [8] Wang Qingming, Zhang Qiming, Xu Baomin, et al. Nonlinear piezoelectric behavior of ceramics bending mode actuators under strong electric fields[J]. J. Appl. Phy. 1999, 86(6): 3352- 3360.
- [9] 郑巍, 徐毓娴, 李庆祥. 微器件装配系统体方案研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(4): 60- 64.
- [10] 陈寅, 颜国正, 戎荣, 等. 电磁驱动微小型机器人控制系统的研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(4): 70- 74.

Design and Operational Properties of a Manipulator for Minimeter size Microrobot

YIN Yanyan¹, ZHU Bangtai¹, CHEN Haiyan², CAO Changjiang³

(1. Department of Electricity, Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471039, China;

2. Institute of Composite Materials, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

3. Information Storage Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The piezoelectric unimorphs are used to fabricate a microgripper for the millimeter size microrobot. The size of the piezoelectric microgripper is about $15\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ and the weight is about 100mg . Based on analysis of operational principle of the piezoelectric microgripper, composition of morphotropic phase boundary of the $\text{PbNi}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ ternary ceramics is selected to fabricate the piezoelectric microgripper. The ternary piezoelectric ceramics have high piezoelectric modulus (d_{31}) and electromechanical coupling factor (K_p). Operational properties of the piezoelectric microgripper are investigated. Results show that the microgripper can achieve tip deflection of $40\mu\text{m}$ and gripping force of $25.7 \times 10^{-3}\text{N}$ when voltage of 50V is applied.

Key words: micromanipulators; microgrippers; piezoelectric unimorphs; operational properties; microrobots

作者简介: 尹燕丽(1975), 女, 河南省淮滨县人, 洛阳工学院电气系硕士生。