

高压应力下压电叠堆静态特性研究

刁卫东¹, 潘巧生², 冯志华^{1*}

(1.中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027;

2.合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 研究了 PZT5 软陶瓷压电叠堆在 100 MPa 高压应力下、PZT4 硬陶瓷压电叠堆在 300 MPa 高压应力下的位移输出特性变化, 分析了应力对它们压电性能的影响, 并对软陶瓷压电叠堆的重新极化问题和硬陶瓷压电叠堆的做功能力进行了讨论. 实验结果表明, 软陶瓷压电叠堆在适当的低压应力下, 压电性能显著提高, 较高的压应力下则出现退极化, 卸载后重新极化可以恢复大部分性能. 硬陶瓷压电叠堆在高压应力下压电性能有所提高, 做功能力远高于低应力时, 高压应力可更有利于发挥硬陶瓷的做功优势.

关键词: 压电叠堆; 高压应力; 硬陶瓷; 软陶瓷; 做功能力; 压电性能

中图分类号: TN384

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 04-0038-05

压电陶瓷具有压电系数大、响应速度快、效率高等优点, 是理想的精密位移驱动材料^[1]. 单个压电陶瓷形变量一般在 $1\ \mu\text{m}$ 以下, 为得到较大的位移, 通常将多层压电陶瓷薄片堆叠在一起, 采用机械串联、电气并联结构, 形成压电叠堆^[2]. 压电叠堆的轴向位移是每一层压电片位移的叠加, 因此能够获得足够大的位移输出. 但压电叠堆的结构特点决定了它能承受较高的压力, 却只能承受有限的拉力, 否则容易使层与层之间开裂, 而遭到损坏, 因此压电叠堆通常需要在一定的预压力下才能更好地工作^[3]. 实际应用中, 很多时候压电叠堆还会受到较高的机械应力场影响, 如大型天文望远镜所用的压电陶瓷致动器. 一定的预压力及较高的机械应力都会对陶瓷内部电畴结构及畴壁运动产生影响, 进而导致压电叠堆性能发生改变, 严重的可能还会造成压电器件性能衰减, 甚至失效, 影响其使用^[4]. 因此研究压电叠堆在不同压应力下的性能, 对于压电器件设计和应用至关重要.

诸多学者研究了压电陶瓷材料在压应力作用下性能的变化^[5-8], 但所用方法一般较复杂, 且几乎没有对压电陶瓷重新极化和做功方面进行讨论.

本文选用 PZT5 软陶瓷和 PZT4 硬陶瓷压电叠堆, 研究它们在高压应力下位移输出特性的变化; 分析了对压电性能的影响, 同时, 对 PZT5 压电叠堆退极化后的重新极化问题以及 PZT4 压电叠堆在高应力下的做功能力进行了讨论, 最后对 2 种压电叠堆的实际应用给出了建议.

1 软陶瓷和硬陶瓷介绍

压电陶瓷应用非常广泛, 为了调节和改善压电陶瓷的性能, 适应不同的用途, 通常在压电陶瓷中加入一些与原来晶格中离子化学价不同的元素离子, 称之为添加物, 根据添加物种类的不同, 通常可以将压电陶瓷分为软陶瓷和硬陶瓷^[9].

1.1 软陶瓷

软陶瓷是在压电陶瓷中添加一些“软性”添加物, 包括镧(La)、钕(Nd)、铋(Bi)等, 通常是加入它们的氧化物. 软性添加物使得压电陶瓷弹性柔顺系数增高, 矫顽场降低, Q_m 降低, 机电耦合系数、介电常数、介电损耗和体电阻率增大, 老化稳定性变好等. 其中, 矫顽场的降低能够使软陶瓷在相对较低的电场下进行极化, 体电阻率的增大使得软

收稿日期: 2019-03-20.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAK34B02).

第一作者: 刁卫东 (1994-), 男, 河南商丘人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 压电叠堆致动器应用研究. E-mail: dwdzkdeb@mail.ustc.edu.cn

*通信作者: 冯志华 (1964-), 男, 安徽亳州人, 教授, 主要研究方向: 压电致动与精密传感. E-mail: fff@ustc.edu.cn

陶瓷能够承受较高的电压,这两个特点决定了软陶瓷通常极化的比较充分,所以压电系数较高.常见的软陶瓷类型有PZT5、PZT5H、PZT5A等.

1.2 硬陶瓷

硬陶瓷是在压电陶瓷中添加一些“硬性”添加物,“硬性”添加物一般包括钾(K)、钠(Na)、铁(Fe)、钴(Co)等,通常也是添加它们的金属氧化物.“硬性”添加物与“软性”添加物的作用相反,使陶瓷更多地表现为“硬”的行为,如介电损耗降低, Q_m 提高,矫顽场增大,体电阻率变小等.常见的硬陶瓷类型有PZT4和PZT8.

2 实验过程

2.1 试样

选择商用 AL1.65×1.65×5DF 压电叠堆和自制压电叠堆作为实验材料. AL1.65×1.65×5DF 压电叠堆材料是 PZT5, 实际尺寸为 1.68 mm×1.72 mm×5 mm, 谐振频率为 260 kHz. 自制压电叠堆选用 26 片尺寸为 10 mm×10 mm×0.7 mm 的 PZT4 薄片, 经过粘接、打磨、绝缘、割缝、引电极、极化等工艺制成^[10], 实际尺寸为 10 mm×10 mm×18.2 mm, 谐振频率为 70 kHz. 2 种压电材料基本参数见表 1.

表 1 2 种压电陶瓷材料基本参数

材料	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$d_{33}/(\times 10^{-12}\text{C}\cdot\text{N}^{-1})$	$\varepsilon_{33}/(\times 10^{-8}\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$	$s_{33}/(\times 10^{-12}\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1})$
PZT5	7 450	400	1.86	9.0
PZT4	7 500	289	1.15	8.6

2.2 加压实验原理

实验装置如图 1 所示, 主要由加压装置、铁板、弹簧等构件组成. 压电叠堆放在加压装置和铁板间, 加压装置实现对压电叠堆的加压, 力的大小通过力传感器来监测. 弹簧刚度远小于实验所用压电叠堆刚度, 则压电叠堆的输出端相对非常柔软, 低频下压电叠堆的运动推动上铁板的运动, 上铁板的位移可反映压电叠堆的输出. 通过信号发生器(RIGOL DG1022)和电压放大器施加激励电压, 用激光位移传感器(optoNCDT 2300, 量程为 2 mm, 分辨率在采样速率为 20 kHz 时为 0.03 μm , 最大采样速率为 49 kHz)测量输出位移. 对于 PZT4 硬陶瓷压电叠堆, 加压装置使用液压机(鹤壁市利鑫仪器仪表有限公司), 力传感器使用 ZNLBU-5T(量程 5 t,

蚌埠市中诺传感器有限公司). 对于 PZT5 压电叠堆, 加压装置使用台虎钳, 力传感器使用 JHBU 型(量程 0.5 t, 蚌埠金诺传感系统工程有限公司).

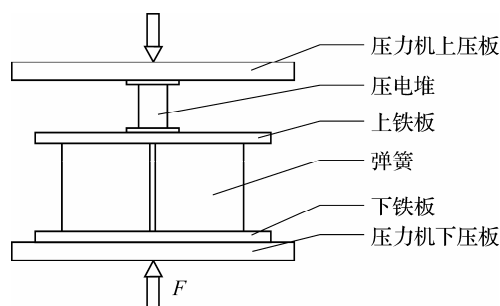


图 1 压电叠堆加压实验示意图

3 实验结果与分析

3.1 软陶瓷压电叠堆实验结果

3.1.1 加压前位移输出随激励电压变化

选择 3 个 PZT5 压电叠堆进行实验, 加压前测位移与激励电压的关系. 实验测得 3 个压电叠堆的输出特性如图 2 所示, 从图中可以看出, 选用的压电叠堆均能正常输出, 性能良好.

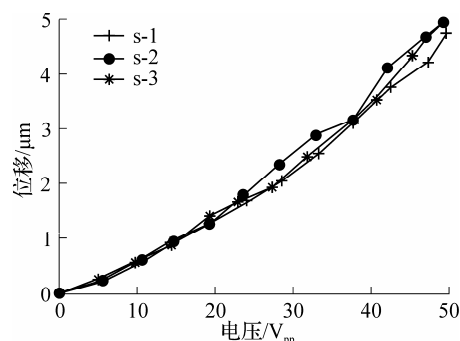


图 2 PZT5 压电叠堆压缩前输出特性

3.1.2 位移输出特性随压应力变化

进行加压实验, 在每个压应力下均施加 $44 V_{pp}$ @1Hz 的正弦信号作为激励电压, 测量压电叠堆在该应力下的输出位移. 加压至 100 MPa 左右, 得到不同压应力下压电叠堆输出位移(图 3). 由图可见, 由于压电叠堆本身差异以及测量误差等因素的影响, 实验结果存在一定差异. 但曲线的变化趋势依然可反映实验所用软陶瓷压电叠堆位移输出随压应力变化的规律. 随着应力的增大, 压电叠堆输出位移先增大然后减小. 在 40~60 MPa 范围内有最大值, 100 MPa 以后输出位移就变得很小. 说明适当的低压应力能使实验用软陶瓷压电叠堆压电性能

显著提高,而较高的压应力(如 100 MPa)则使其压电性能严重下降,原因可能是在较高压应力下,软陶瓷压电叠堆出现了退极化。

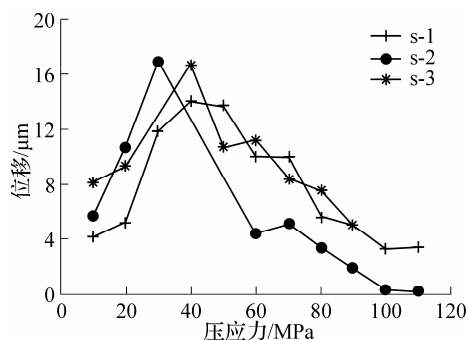


图3 PZT5 压电叠堆输出位移随压应力变化

3.1.3 重新极化的影响

由于添加物的影响,软陶瓷的矫顽场较低,比较容易进行极化,因此实验对经过 100 MPa 压缩的压电叠堆进行重新极化,极化过程选用直流电源(HSPY-120-1, 汉晟普源),给予压电叠堆施加 80 V 的直流电压,保持 2 min. 然后对比压缩前、压缩后以及压缩后重新极化 3 种情况下压电叠堆位移输出随激励电压的变化. 其中,PZT5 压电叠堆的实验结果如图 4 所示。

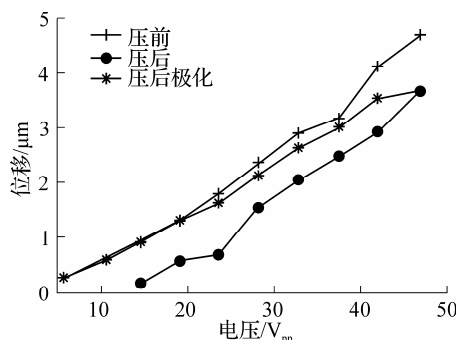


图4 PZT5 压电叠堆压缩前后及压缩后极化输出特性

由图可知,实验用压电叠堆经过 100 MPa 压应力压缩后,输出特性明显低于压缩前,而重新极化后,其输出特性与压缩前基本接近. 说明重新极化有一定的作用,经过压缩导致的退极化可以通过重新极化恢复大部分性能。

3.2 硬陶瓷压电叠堆实验结果

3.2.1 压缩前位移输出随激励电压变化

选用 3 个 PZT4 自制压电叠堆进行实验,施加压力前,测试了各压电叠堆在不同激励电压下的位移输出,结果如图 5 所示。

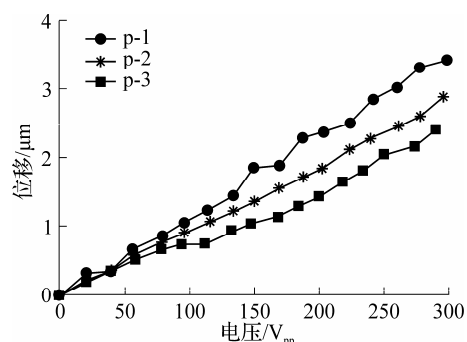


图5 PZT4 压电叠堆压缩前输出特性

由图可见,3 个压电叠堆的输出特性并不完全相同,存在一定差异,这与实验室条件下自己制作有关. 但输出位移与电压基本成线性关系,说明压电叠堆压电性能基本良好,可以用于实验。

3.2.2 位移输出特性随压应力变化

对选用的 3 个压电叠堆进行加压实验,利用液压机不断加压应力,加到 300 MPa 左右. 在不同压应力下,均施加 200 V_{pp} @1 Hz 的正弦电压进行激励,测量该应力下压电叠堆的输出位移,不同压应力下压电叠堆输出位移变化如图 6 所示。

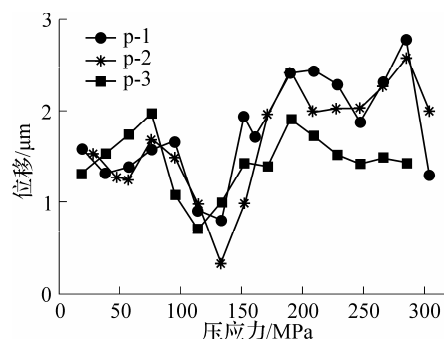


图6 PZT4 压电叠堆输出位移随压应力变化

由图可知,3 个压电叠堆的变化趋势基本一致,输出位移与压应力间存在明显的非线性关系. 在 70 MPa 前,输出位移随应力增大而增大,在 200~300 MPa 范围内,位移达到最大且基本保持不变. 表明硬陶瓷可以承受高达 300 MPa 的压应力,而且在高压应力下(200~300 MPa 范围内),不仅没有出现退极化,压电性能还有所提高. 75 MPa 之后输出位移下降,可能是自制压电叠堆粘接所用环氧树脂胶抗压强度有限,在该应力下开始失稳,导致压电陶瓷位移不能较好地传递输出. 较低应力下,胶层性能良好,压电陶瓷位移能很好地传递输出,而在非常高应力下,胶层可能已经被破坏,压电陶瓷

靠压力直接接触,位移也能较好地输出。

3.2.3 做功能力分析

压电叠堆的功率特性是其重要特性之一,做功一般是力与位移的乘积,对于压电叠堆来说,在某个负载 F 下输出位移为 Δl ,一个周期做功大小可以表示为 $W = F \times \Delta l$ 。

事实上,如果压电叠堆能承受 F 大小的力,则可认为能承受同等大小的负载,如果在此力或者此负载下产生相同位移所做的功是相同的,则可认为在做功方面该力与负载为等效。我们以此来研究压电叠堆的做功能力。为便于比较和分析,将 W 进行归一化,得到单位体积的做功大小:

$$W_0 = F \times \Delta l / (A \times l) = \sigma \times \varepsilon,$$

其中, A 为压电叠堆横截面积; l 为长度; σ 为压应力; ε 为应变。显然, W_0 与压电叠堆尺寸无关,与材料特性有关,能够反映该材料压电叠堆的做功特性,这里可以用其来表示压电叠堆的做功能力。

图7是计算得到的实验用硬陶瓷压电叠堆做功能力随压应力的变化曲线。由图可见, PZT4 压电叠堆的做功能力与压应力关系是非线性的,但在 100 MPa 前和 150~200 MPa 范围内可以认为近似成线性, 200 MPa 后基本稳定在较高值。显然,压应力小于 150 MPa 时,做功能力比较低, 200~300 MPa 范围内做功能力是 100 MPa 时的 2~3 倍。这说明 PZT4 压电叠堆有工作在高压应力下的潜力,高压应力下其做功能力可能会大大提高,有利于充分发挥硬陶瓷的做功性能,但其在交变应力作用下可能出现的问题有待进一步研究。

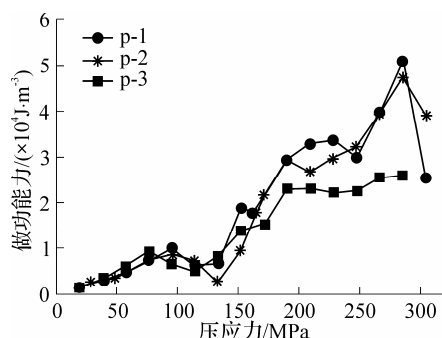


图7 PZT4 压电叠堆做功能力变化

4 讨论

软陶瓷和硬陶瓷压电叠堆在压应力下表现出不同的特性,软陶瓷压电叠堆在较窄的低压应力

范围内,压电性能明显提高,在稍高压应力下压电性能严重下降,而硬陶瓷压电叠堆在高压应力下,压电性能和做功能力显著提高,此差异与2种陶瓷内部电畴结构不同有关。在软陶瓷中,铅空位与掺杂物形成的缺陷偶极子不可移动,偏离陶瓷的极化方向,这给畴结构带来了阻碍,使得畴结构不是非常稳定。而在硬陶瓷中,氧空位与掺杂物形成的缺陷偶极子可移动,偶极子会随周围晶格的极化而逐渐排列,使畴结构变得非常稳定^[11]。当与极化方向相同的轴向应力作用于压电叠堆时,部分电畴将发生偏转,远离极化方向,畴结构也将发生变化。在压电陶瓷退极化前,这种畴结构的变化会引起材料压电响应的增加。低应力下,软陶瓷压电叠堆和硬陶瓷压电叠堆都没有发生退极化,压应力使得材料的压电性能提高,引起输出位移的增大。高压应力下,软陶瓷压电叠堆由于畴结构不稳定,出现退极化,压电性能严重下降。而硬陶瓷压电叠堆由于畴结构非常稳定,去极化应力很高,没有出现退极化,同时,高压应力还导致陶瓷内非 180° 畴壁运动增加,所以在很高压应力范围内,压电性能显著提高^[12]。这就是为何 PZT5 软陶瓷压电叠堆在 100 MPa 后几乎没有输出,而 PZT4 硬陶瓷压电叠堆在 300 MPa 时依然有较大输出的原因。另外,由于硬陶瓷压电叠堆能够承受非常高的压应力,且高压应力下压电性能更优异,硬陶瓷压电叠堆在高压应力下做功能力可能更强。

5 结论

研究了不同压应力下 PZT5 软陶瓷和 PZT4 硬陶瓷 2 种材料制成的压电叠堆位移输出特性的变化,分析了应力对压电性能的影响,并对软陶瓷压电叠堆重新极化和硬陶瓷压电叠堆的做功能力进行了讨论。实验结果表明 2 种压电叠堆在压应力下表现出不同的特性,软陶瓷压电叠堆在适当的低压应力下,压电性能显著提高,在较高压应力下则出现退极化,但可以通过重新极化恢复大部分压电性能。硬陶瓷压电叠堆在高压应力下压电性能和做功能力明显提高,说明硬陶瓷压电叠堆能够承受高压应力,且高压应力更有利于发挥压电材料做功优势。本文的研究结果对于压电叠堆设计和使用具有很好的指导意义,软陶瓷压电叠堆应

避免高压应力导致退极化,影响压电器件性能;硬陶瓷压电叠堆应给予适当的高预压应力以提高其性能。

参考文献:

- [1] 靳宏, 金龙, 徐志科, 等. 压电叠堆位移放大致动器的动态特性[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21):146-151.
- [2] Wang D H, Zhu W. A phenomenological model for pre-stressed piezoelectric ceramic stack actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(3):35018-35026.
- [3] Yong Y K. A new preload mechanism for a high-speed piezoelectric stack nanopositioner[J]. Mechatronics, 2016, 36:159-166.
- [4] Viehland D. Effect of uniaxial stress upon the electromechanical properties of various piezoelectric ceramics and single crystals[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(3):775-785.
- [5] Peng B, Yue Z X. Effect of uniaxial compressive stress on the partially fatigued soft lead zirconate titanate piezoelectric ceramics[J]. Key Engineering Materials, 2014, 602/603:817-821.
- [6] 董新龙, 周广宇, 严伟, 等. 压缩载荷下 PZT 铁电陶瓷的非线性变形[J]. 宁波大学学报(理工版), 2005, 18(1): 31-34.
- [7] Li Y W, Li Y H, Li F X. Creep behavior of soft and hard PZT ceramics during mechanical loading and unloading [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35 (14):3827-3834.
- [8] Audigier D, Richard C, Descamps C, et al. PZT uniaxial stress dependence: Experimental results[J]. Ferroelectrics, 1994, 154(1):219-224.
- [9] 山东大学压电铁电物理教研室. 压电陶瓷及其应用 [M]. 济南: 山东人民出版社, 1974:58-70.
- [10] 潘巧生. 基于偏心轮受迫振动的压电马达研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [11] Zhang Q M, Zhao J. Electromechanical properties of lead zirconate titanate piezoceramics under the influence of mechanical stresses[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, 46(6):1518-1526.
- [12] Ochoa D A, Garcia J E, Tamayo I, et al. Effect of uniaxial compressive stress on dielectric and piezoelectric responses in lead zirconate titanate based ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2012, 95(5): 1656-1660.

Static characteristics of high compressive stress on piezoelectric stacks

DIAO Weidong¹, PAN Qiaosheng², FENG Zhihua^{1*}

(1. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Generally, piezoelectric stacks need to work under a certain preload to improve the stability, and sometimes they are also subjected to external high compressive stress. The displacement output characteristics of soft PZT5 stacks under uniaxial compressive stress up to 100 MPa and that of hard PZT4 stacks under compressive stress up to 300 MPa were studied. Then the effects of the stress on piezoelectric properties were analyzed, meanwhile, the repolarization of soft PZT5 stacks and the work capability of hard PZT4 stacks were discussed. The experimental results show that the piezoelectric properties of the soft PZT5 stacks are significantly improved under appropriate lower compressive stress, and are deteriorated under higher compressive stress. However, the piezoelectric properties can be recovered mostly through repolarization after unloading. Piezoelectric properties of hard PZT4 stacks are improved under high compressive stress and their work capability under high stress should be much higher than that of low stress, demonstrating that high-pressure stress may be more conducive to giving full play to the work advantage of hard PZT.

Key words: piezoelectric stacks; high compressive stress; hard PZT; soft PZT; work capability; piezoelectric properties

(责任编辑 章践立)