

## 多层 PZT 陶瓷自热温度影响因素分析

宜亚丽<sup>1,2</sup>, 旷庆文<sup>2</sup>, 陈美宇<sup>2</sup>, 秦越<sup>2</sup>, 韩雪艳<sup>3</sup>, 褚祥诚<sup>4</sup>, 金贺荣<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学 起重机械关键技术全国重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学 工程训练中心, 河北 秦皇岛 066004;

4. 清华大学 材料学院 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 多层 PZT 陶瓷作为压电驱动器的核心组件, 其压电性能受自热温度影响, 在高交变电压作用下易发生失效。该文从交变电压特性、陶瓷多层结构角度对 PZT 陶瓷自热温度作用规律展开研究。首先基于扫描电镜下陶瓷断面结构形貌, 建立了多层 PZT 陶瓷细观结构仿真模型; 然后搭建了温度测量实验平台, 开展陶瓷表面自热温度测量实验进行验证; 最后分析了交变电压幅值、频率特性和陶瓷压电层、死层厚度对陶瓷表面自热温度的作用机理。结果表明, 陶瓷表面自热温度与交变电压幅值、频率呈近似线性增长; 自热温度极值分布在陶瓷表面中心区域和边缘区域, 温度差值小于 3 °C; 压电层越厚, 陶瓷表面自热温度越低; 表面自热温度随死层厚度的增加呈先降后增趋势, 且在死层厚度约 300  $\mu\text{m}$  时达到最低值。该结论为多层 PZT 陶瓷自热温度调控与工程应用提供了理论依据和实验基础。

**关键词:** 自热温度; 交变电压; 多层结构; 热模拟; PZT 陶瓷

**中图分类号:** TN304; TN384 **文献标识码:** A

## Analysis of Factors Affecting Self-Heating Temperature of Multilayer PZT Ceramics

YI Yali<sup>1,2</sup>, KUANG Qingwen<sup>2</sup>, CHEN Meiyu<sup>2</sup>, QIN Yue<sup>2</sup>, HAN Xueyan<sup>3</sup>,  
CHU Xiangcheng<sup>4</sup>, JIN Herong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Engineering Training Center of Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

4. State Key Lab. of New Ceramics and Fine Processing, School of Materials Science and Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As the core component of piezoelectric actuators, the piezoelectric performance of multilayer PZT ceramics is affected by the self-heating temperature. In addition, multilayer PZT ceramics are prone to failure under strong alternating voltage. This study investigates the factors affecting the self-heating temperature from the perspective of alternating voltage characteristics and multilayer structure of PZT ceramics. First, based on the scanning electron microscope cross-sectional structure morphology, a fine-structure simulation model of multilayer PZT ceramics was established. Then, a temperature measurement experimental platform was set up to conduct self-heating temperature measurements on the ceramic surface for validation. Finally, the effects of alternating voltage amplitude, frequency characteristics, piezoelectric layer thickness, and dead layer thickness on the self-heating temperature of the ceramic surface were analyzed. The results indicate that 1) the self-heating temperature of the ceramic surface increases linearly with the alternating voltage amplitude and frequency; 2) the extreme value of the self-heating temperature is distributed in the center and edge regions of the ceramic surface, and the difference in temperature is less than 3 °C; 3) the thicker the piezoelectric layer is, the lower the self-heating temperature of the ceramic surface is; and 4) the self-heating temperature of the surface decreases with the thickness of the dead layer and reaches its minimum when the thickness of the dead layer is approximately 300  $\mu\text{m}$ . This study provides a theoretical

收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52475596)

作者简介: 宜亚丽(1976-), 女, 山西省永济市人, 副教授, 博士。

basis and experimental foundation for regulating the self-heating temperature in multilayer PZT ceramics and supporting engineering applications.

**Key words:** self-heating temperature; alternating voltage; multilayer construction; thermal simulation; PZT

## 0 引言

压电驱动器具有机电转换效率优异、结构紧凑等特点,是目前机电系统中不可或缺的一种微驱动装置<sup>[1-3]</sup>。多层 PZT 陶瓷作为压电驱动器的核心部件,其压电性能决定着压电驱动器的工作效能<sup>[4-6]</sup>。但在高交变电压作用下,陶瓷压电性能因受自热温度影响而劣化,同时 PZT 陶瓷的多层结构加剧了自热温度的上升,更易引起压电变压器直接失效,严重阻碍了电路系统的稳定运行<sup>[7-8]</sup>。

目前已有对 PZT 陶瓷自热温度影响因素的相关研究。Song 等研究了 PZT 陶瓷薄膜在施加交变电压过程中不同衬底作用下的自热温度变化情况,发现高热导率、低厚度的衬底显著减小了薄膜自热效应<sup>[9]</sup>。Quattrocchi 等研究了压电陶瓷柔性贴片处于大气、聚合物板之间以及复合板封闭环境时的自热情况,评估了驱动电压幅值和频率对自热的影响<sup>[10]</sup>。Fragkiadakis 等对比了 PZT 陶瓷薄膜在 RTD 测量和 FEM 计算的不同工况(交流电压幅值、频率、直流偏置)下自热温升结果,发现电极欧姆热效应显著加剧了薄膜的自热温升<sup>[11]</sup>。Lundh 等通过高分辨率测温技术获取 PZT 陶瓷薄膜局部自热温度分布,分析表明,在交流电压双极操作下薄膜内部的畴切换过程产生了最大温升<sup>[12]</sup>。Wu 等研究了由粘接剂粘结的多层 PZT 陶瓷自热对压电性能损耗的影响,分析了粘接剂对热量产生和传递的作用<sup>[13]</sup>。Senousy 等通过实验和基于热力学第一定律的简化分析模型来评估多层 PZT 陶瓷在不同交变电压参数下自热温度变化<sup>[14-15]</sup>。综上所述,单层 PZT 陶瓷在交变电压作用下的自热效应已有深入研究,考虑了电压特性、衬底、电极及环境等因素对自热温度变化规律的影响,与单层陶瓷相比,多层 PZT 陶瓷通过增加层数来提升压电性能,但同时引入的压电层、死层和电极层等结构,导致其在交变电压作用下层间自热产生和传递机制更复杂,电压特性和结构层厚度变化下的自热温度规律更不清晰。

为了探究交变电压特性和多层结构对 PZT 陶

瓷自热温度的作用规律,选取电压幅值为 75~150 V、频率为 100~700 Hz 压电驱动器的多层 PZT 陶瓷作为研究对象,并基于扫描电镜下陶瓷断面结构形貌构建多层 PZT 陶瓷微观结构仿真模型;搭建温度测量实验平台,并开展陶瓷表面自热温度测量实验进行验证;从层间热产生和传递机制角度分析了交变电压幅值、频率特性以及陶瓷压电层、死层厚度对自热温度的作用机理。

## 1 多层 PZT 陶瓷结构表征与模型建立

### 1.1 结构表征

图 1 为多层 PZT 陶瓷示意图。由图可见,陶瓷呈方形片状,长度、宽度均为 7 mm,厚度为 3 mm,陶瓷两侧外电极与焊线相连。通过扫描电镜对陶瓷断面进行观察,如图 2 所示。由图 2 可见,陶瓷内部由相互交叉叠堆的压电层和电极层组成,单个电极层由陶瓷一侧引出且与外电极相连,上、下端面和侧面均存在一定厚度的未极化陶瓷层,考虑到上、下端面未极化陶瓷层厚度变化将导致位移损失和应力集中,故仅考虑侧面未极化陶瓷层厚度对自热特性的影响,并将侧面未极化陶瓷层称为死层。

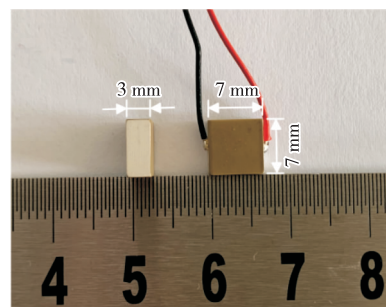
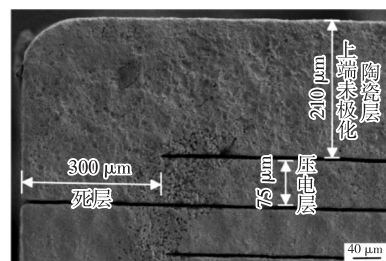
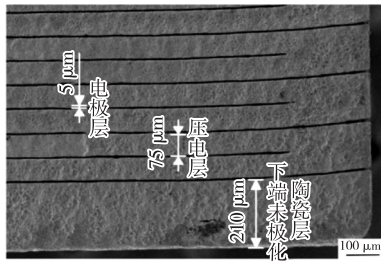


图 1 多层 PZT 陶瓷示意图



(a) 40 μm 分辨率



(b) 100 μm分辨率

图 2 多层 PZT 陶瓷断面扫描电镜图

1.2 模型建立

基于扫描电镜下陶瓷断面结构形貌建立了多层 PZT 陶瓷微观结构模型,如图 3 所示。其模型长度、宽度和厚度保持不变,通过调整电极层数和电极层离外电极的距离来改变压电层厚度和死层厚度。在保证仿真结果精度及准确性的情况下,忽略陶瓷表面的焊锡触点及陶瓷侧面外电极对自热特性的影响,模型结构尺寸和材料属性如表 1、2 所示。

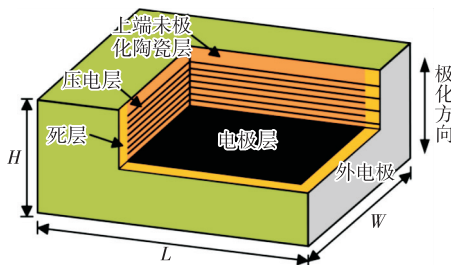


图 3 多层 PZT 陶瓷微观结构模型

表 1 模型结构尺寸

参数	参数值
陶瓷长度(L)/mm	3.000
陶瓷宽度(W)/mm	7.000
陶瓷厚度(H)/mm	7.000
压电层厚度/mm	0.750
死层厚度/mm	0.300
电极层厚度/mm	0.005
上、下端未极化陶瓷层厚度/mm	0.210

表 2 模型材料属性

属性	PZT 陶瓷	电极
密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	7 500.0	10 500.0
导热系数/[W · (m <sup>2</sup> · K) <sup>-1</sup> ]	1.5	429.0
比热容/[J · (kg · K) <sup>-1</sup> ]	420.0	235.0
相对介电常数	3 200	1.0

1.3 边界条件

为探究交变电压特性和多层结构对自热温度的影响,建立多层 PZT 陶瓷微观结构仿真模型,结

合固体力学、静电和固体传热边界条件,分析了交变电压幅值、频率以及陶瓷压电层、死层厚度对自热温度的作用规律。采用安捷伦 4294A 精密阻抗分析仪测量多层 PZT 陶瓷的介电损耗,如图 4 所示。

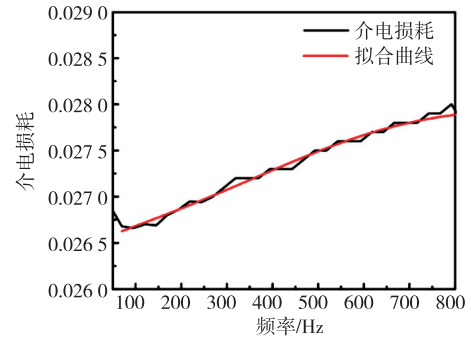


图 4 多层 PZT 陶瓷介电损耗

将介电损耗与频率变化曲线拟合成频率为自变量的介电损耗方程:

$$D = 0.02671 + 2.96 \cdot 10^{-22} \cdot f^6 + (-3.137 \cdot 10^{-18} \cdot f^5) + 1.324 \cdot 10^{-14} \cdot f^4 + (-2.843 \cdot 10^{-11} \cdot f^3) + 3.274 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 + (-1.696 \cdot 10^{-5} \cdot f) \quad (1)$$

式中:  $D$  为介电损耗;  $f$  为频率。

在 COMSOL Multiphysics 软件中定义  $D$  为压电层的介电损耗,并设置奇数和偶数压电层的极化方向相反且沿陶瓷厚度方向;设置偶数电极层为电压信号输入端,奇数电极层为接地,输入电压信号波形图如图 5 所示,图中  $T$  为信号周期,  $V_1$  为电压幅值。将频域计算所得总功耗密度定义为压电层和电极层的体热源,并定义陶瓷表面与环境的传热。

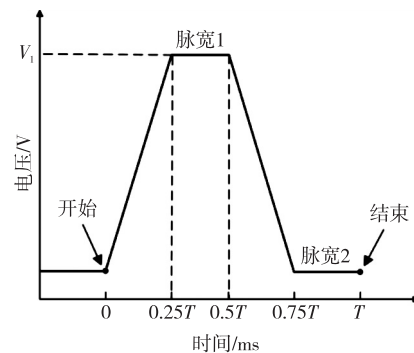


图 5 输入电压信号波形图

2 仿真结果及分析

2.1 交变电压特性对自热温度的影响

多层 PZT 陶瓷应用于压电驱动器时通常需要承受高交变电压驱动,易产生自热现象,不仅影响



驱动效率,还可能缩短其使用寿命,因此,研究交变电压特性对陶瓷自热温度的影响至关重要。在固定电压频率为 500 Hz 条件下,对不同电压幅值下多层 PZT 陶瓷自热现象进行仿真分析。图 6 为仿真所得陶瓷表面温度云图。由图可见,随着电压幅值从 75 V 增加到 150 V,陶瓷表面最高温度显著上升,分别为 43.48 °C、58.39 °C、70.31 °C 和 84.62 °C。此现象主要归因于电压幅值的增加导致电流密度增大,电极层的焦耳热随之增加,同时电场强度的增强使得陶瓷内部的极化过程更剧烈,进而产生了额外的内部摩擦热。另一方面,PZT 陶瓷的热传导系数随着温度的升高而降低,导致热传导效率下降,特别是在中心区域,层间界面热阻的存在限制了热量的有效传递,使得热量难以从中心区域传导至边缘。观察云图发现,陶瓷表面存在明显的温度梯度,尽管表面温差(分别为 0.56 °C、1.02 °C、1.38 °C 和 1.81 °C)小于 2 °C,说明未出现明显的热应力问题,但长期的热循环可能导致微裂纹的产生和扩展,影响陶瓷性能的长期稳定。

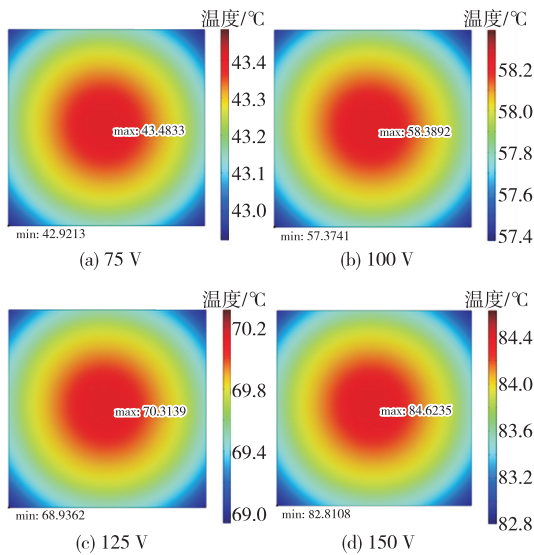


图 6 不同幅值下陶瓷表面温度仿真云图

图 7 为不同电压频率下多层 PZT 陶瓷表面温度的分布云图。固定电压幅值为 150 V,当频率分别为 100 Hz、300 Hz、500 Hz、700 Hz 时,陶瓷表面最高温度分别为 36.92 °C、60.77 °C、84.62 °C、108.47 °C。由此可见,随着电压频率的提升,陶瓷表面温度显著增加。此现象可归因于电压频率升高时,压电层在电极层间电场作用下内部电畴翻转频率加大,畴壁频繁克服微观缺陷如位错、空位等,

导致不可逆能量耗散,并以热能形式释放<sup>[16]</sup>。同时,电畴翻转伴随晶格重排和局部区域的相对滑动加剧,将产生更多的摩擦热<sup>[17]</sup>。此外,电压频率的提高可能加剧极化迟滞效应,进一步增加热能损耗,从而提升自热温度。由于陶瓷导热能力的限制以及表面与环境之间的热交换,不同电压频率下陶瓷表面最高和最低温度分别集中于中心区域和边缘区域,其温差值分别为 0.36 °C、1.09 °C、1.81 °C、2.54 °C,均保持在 3 °C 以下,表明在电压频率变化下,陶瓷表面未出现显著的热应力问题。

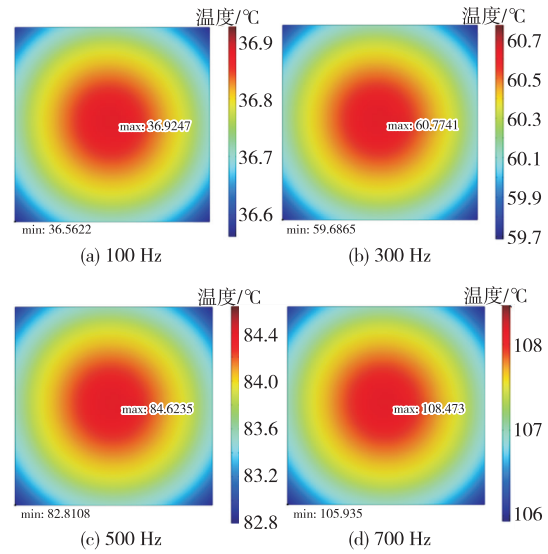


图 7 不同频率下陶瓷表面温度仿真云图

## 2.2 多层结构对自热温度的影响

在陶瓷总厚度  $H$  恒定的情况下,对多层 PZT 陶瓷在 150 V 电压幅值和 500 Hz 电压频率下的自热特性进行仿真。图 8 为不同压电层厚度下陶瓷表面温度的分布云图。由图可见,当压电层厚度分别为 50  $\mu\text{m}$ 、75  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$  时,陶瓷表面最高温度分别为 152.85 °C、84.62 °C、57.39 °C。图 9 为陶瓷表面最高温度随压电层厚度变化图。由图 9 可知,陶瓷表面温度随着压电层厚度的增加而降低。这是因为更厚的压电层具有更大的热容量,能在相同的输入功率下吸收更多的热量,从而降低自热温度。此外,压电层厚度的增加导致电阻升高,在输入电压恒定的情况下,通过压电层的漏电流强度增大,产生了更多的焦耳热。从层间分布均匀性角度进行分析,压电层厚度的增加意味着层数减少,这会降低电极层与压电层之间不均匀接触的可能性,导致局部电流密度降低,进而减少热量生成。

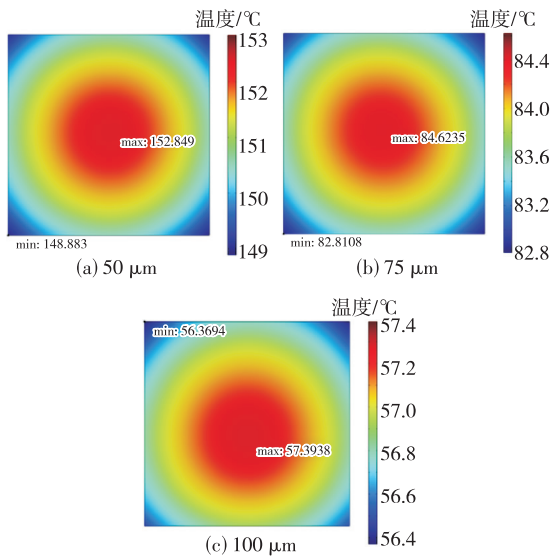


图 8 不同压电层厚度下陶瓷表面温度仿真云图

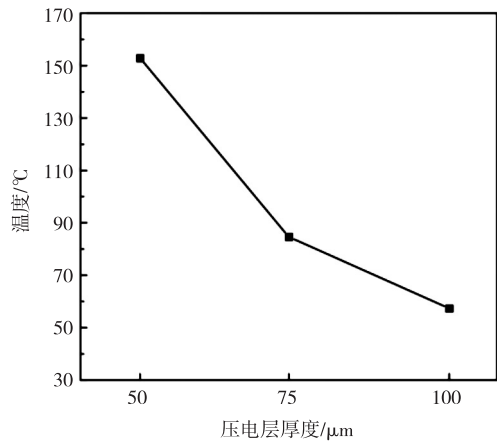


图 9 陶瓷表面最高温度随压电层厚度变化图

在陶瓷长度  $L$ 、宽度  $H$  恒定情况下,图 10 为不同死层厚度对陶瓷表面温度分布的影响。

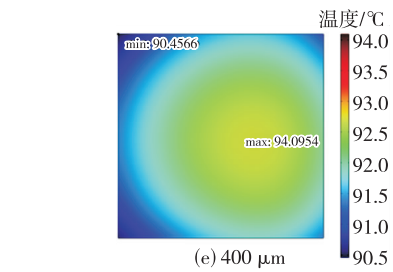
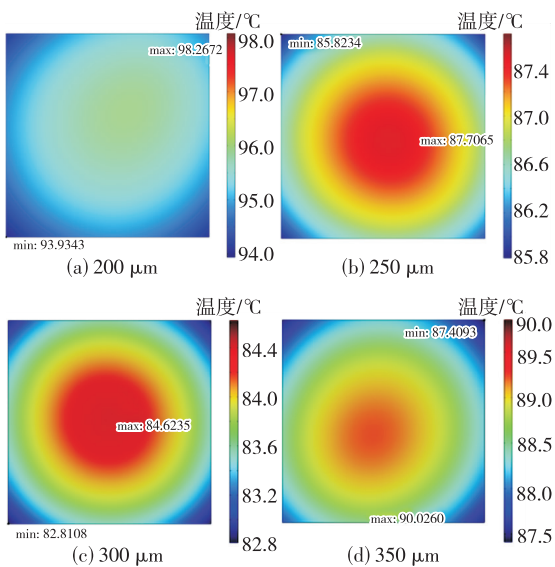


图 10 不同死层厚度下陶瓷表面温度仿真云图

由图 10 可见,当死层厚度分别为  $200\ \mu\text{m}$ 、 $250\ \mu\text{m}$ 、 $300\ \mu\text{m}$ 、 $350\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$  时,记录的表面最高温度依次为  $98.27\ ^\circ\text{C}$ 、 $87.71\ ^\circ\text{C}$ 、 $84.62\ ^\circ\text{C}$ 、 $90.03\ ^\circ\text{C}$ 、 $94.10\ ^\circ\text{C}$ 。绘制成温度变化图如图 11 所示。由图 11 可见,表面最高温度随着死层厚度的增加呈现先降低后上升的趋势,其中在死层厚度为  $300\ \mu\text{m}$  时达到最低值  $84.62\ ^\circ\text{C}$ 。其原因在于随着死层厚度的增加,内部压电层和电极层的总面积相对减少,导致整体产热体积减小,从而在初始阶段降低了自热温度。当死层厚度进一步增加时,热传导路径的延长使得热量传递速率跟不上热量产生的速率,导致内部热量积累,最终造成自热温度的上升。

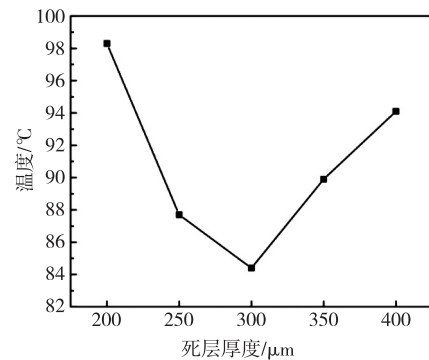


图 11 陶瓷表面最高温度随死层厚度变化图

### 3 自热温度测量实验及结果分析

#### 3.1 自热温度测量实验平台

图 12 为所构建的多层 PZT 陶瓷自热温度测量实验平台。该平台包括外部电源、手持式红外热像仪及专用的陶瓷底板。外部电源能够提供  $0\sim 150\ \text{V}$  可调电压幅值和  $0\sim 770\ \text{Hz}$  频率的梯形波信号。实验采用陶瓷底板作为固定支撑,以消除其他介质热导率差异对自热温度测量的影响。在实验操作过程中利用手持式红外热像仪记录不同电压信号作用下待测陶瓷表面温度变化。当温度变化不超过  $\pm 0.05\ ^\circ\text{C}$  时,则认为温度达到稳定状态,实验持续时间  $5\ \text{min}$ 。室温条件下,该热像仪的温差分辨率

小于 0.05 °C，确保了实验数据的精确性。

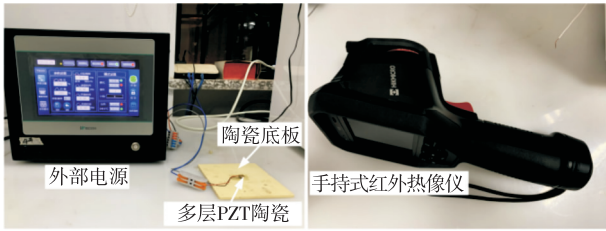


图 12 自热温度测量实验平台

### 3.2 输入电压信号对陶瓷表面自热温度的影响

固定频率为 500 Hz，观察不同电压幅值下多层 PZT 陶瓷表面的红外热像图，如图 13 所示。由图可见，陶瓷方形边界外的环境温度升高，表明陶瓷表面与周围环境发生了热量交换。在 75 V、100 V、125 V、150 V 电压幅值下，陶瓷表面区域的最大温度分别为 45.2 °C、60.2 °C、71.5 °C、84.4 °C，实测温度随着电压幅值的增加而上升。

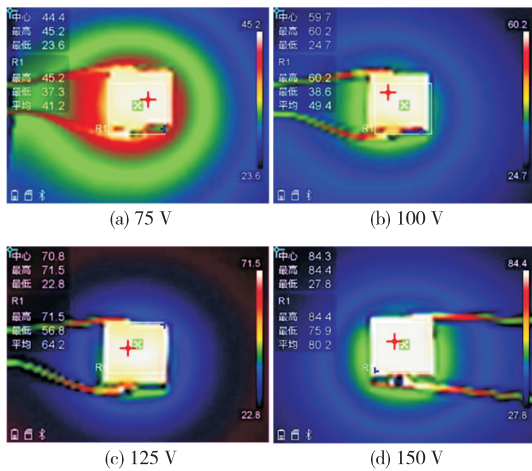


图 13 不同频率下陶瓷表面红外热像图

为了验证仿真结果，将不同电压幅值下的陶瓷表面仿真温度与实际最高温度进行对比，并绘制温度变化图如图 14 所示。

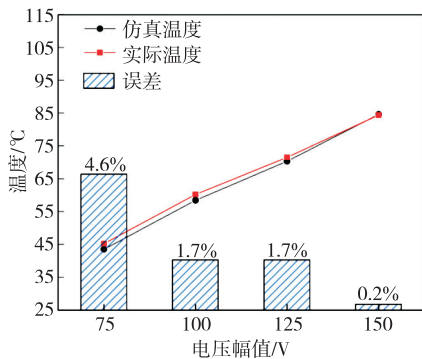


图 14 不同幅值下陶瓷表面温度变化图

由图 14 可见，仿真温度和实际温度均与电压幅

值呈近似线性增长关系。实际温度的增长率为 0.52 °C/V。在各电压幅值下，仿真与实际表面温度的最大误差仅为 4.6%，表明仿真模型具有高度的可靠性。

固定电压幅值为 150 V，对多层 PZT 陶瓷在不同频率下表面温度进行测量，结果如图 15 所示。由图可见，在 100 Hz、300 Hz、500 Hz 和 700 Hz 频率下，陶瓷表面的最高温度分别为 34.6 °C、59.1 °C、84.4 °C 和 108.7 °C，实际温度随着电压频率的增加而升高。

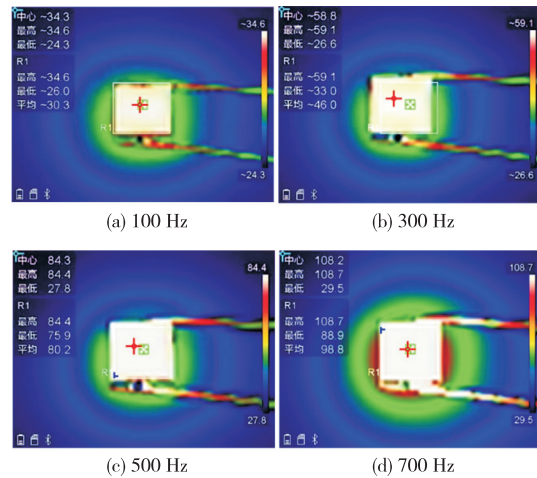


图 15 不同频率下陶瓷表面红外热像图

将仿真和实际的陶瓷表面温度变化数据绘制成图，如图 16 所示。由图可见，仿真温度和实际温度均随电压频率的增加呈线性增长趋势，实际温度增长率为 0.12 °C/Hz，各电压频率下的仿真温度与实际温度最大误差小于 6.7%，表明仿真较好地还原了实际情况。

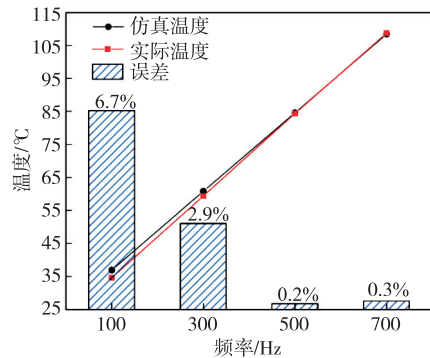


图 16 不同频率下陶瓷表面温度变化图

## 4 结论

基于扫描电镜下陶瓷断面结构形貌建立了多层 PZT 陶瓷细观结构仿真模型。搭建温度测量实



验平台,并开展了陶瓷表面温度测量实验;分析了交变电压幅值、频率特性以及陶瓷压电层、死层厚度对自热温度的作用机理和规律。得到如下结论:

1) 在 75~150 V 电压幅值和 100~700 Hz 频率下,仿真模型预测的陶瓷表面最高温度与实验测得的温度最大误差小于 6.7%,证实了仿真模型的可靠性。

2) 多层 PZT 陶瓷表面温差值均小于 3 °C,随着电压幅值和频率的增加,陶瓷表面最高温度呈近似线性增长,增长率分别为 0.52 °C/V 和 0.12 °C/Hz,说明电压幅值和频率是影响自热特性的关键因素。陶瓷表面未出现因电压特性变化而引起的显著热应力问题。

3) 在压电层厚度为 50~100 μm 时,随着压电层厚度的增加,陶瓷表面最高温度降低;而在死层厚度为 200~400 μm 时,陶瓷表面最高温度随死层厚度的增加而呈先降低后增加趋势,在死层厚度约为 300 μm 时达到最低值,表明通过优化压电层和死层厚度可有效控制多层 PZT 陶瓷的自热温度。

#### 参考文献:

- [1] 许有熊,庄广锋,陈星宇,等.基于液压放大的压电微动平台设计与试验[J].压电与声光,2024,46(2):273-279.  
XU Youxiong, ZHUANG Guangfeng, CHEN Xingyu, et al. Design and experiment of a piezoelectric micromanipulation platform based on hydraulic amplification [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2024, 46(2): 273-279.
- [2] 魏铭辰,张卫平,王晨阳,等.基于智能复合微结构的亚手掌尺度压电双驱扑翼微飞行器的研究[J].压电与声光,2020,42(3):326-329.  
WEI Mingchen, ZHANG Weiping, WANG Chenyang, et al. Study on sub-palm-scale piezoelectric dual-drive flapping-wing micro air vehicle based on intelligent composite microstructure [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2020, 42(3): 326-329.
- [3] 张段芹,冯炳昊,曹宁,等.压电驱动器的率相关迟滞特性建模与测试[J].压电与声光,2022,44(4):614-618.  
ZHANG Duanqin, FENG Binghao, CAO Ning, et al. Modeling and testing of rate-dependent hysteresis characteristics in piezoelectric actuators [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2022, 44(4): 614-618.
- [4] 张树良,刘永刚,李海吉,等.等间距螺旋电极压电驱动器制备与静态性能测试[J].压电与声光,2023,45(2):313-319.  
ZHANG Shuliang, LIU Yonggang, LI Haiji, et al. Preparation and static performance testing of piezoelectric actuator with equidistant spiral electrodes [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2023, 45(2): 313-319.
- [5] 王旭建,王新杰,李峰.引信用双工形压电驱动器的设计及其驱动特性[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(8):135-144.  
WANG Xujian, WANG Xinjie, LI Feng. Design and driving characteristics of a duplex-shaped piezoelectric actuator for cartridge primers [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(8): 135-144.
- [6] CAO Y, CHEN X B. A survey of modeling and control issues for piezo-electric actuators [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2015, 137(1): 014001.
- [7] 戚相成,任鹏荣,同向前.铌酸钾钠基电工新型压电陶瓷电致应变及温度稳定性研究进展[J].高电压技术,2023,49(7):2831-2840.  
QI Xiangcheng, REN Pengrong, TONG Xiangqian. Research progress on electrostrictive strain and temperature stability of potassium sodium niobate-based new piezoelectric ceramics for electrical engineering [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2831-2840.
- [8] THANG V V, KIM I, JEONG S, et al. Modeling and investigation of multilayer piezoelectric transformer with a central hole for heat dissipation [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2011, 6(5): 671-676.
- [9] SONG Y W, KANG K, TIPSAWAT P, et al. Substrate dependence of the self-heating in lead zirconate titanate (PZT) MEMS actuators [J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(16): 1-7.
- [10] QUATTROCCHI A, FRENI F, MONTANINI R. Self-heat generation of embedded piezoceramic patches used for fabrication of smart materials [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280: 513-520.
- [11] FRAGKIADAKIS C, SIVARAMAKRISHNAN S, SCHMITZ-KEMPEN T, et al. Heat generation in PZT MEMS actuator arrays [J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(16): 1-7.
- [12] LUNDH J S, ZHU W L, SONG Y W, et al. Local measurements of domain wall-induced self-heating in released  $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$  films [J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(21): 1-10.

- [13] WU Z B, COCHRAN S. Loss effects on adhesively bonded multilayer ultrasonic transducers by selfheating [J]. *Ultrasonics*, 2010, 50(5): 508-511.
- [14] SENOUSY M S, RAJAPAKSE R, MUMFORD D, et al. Selfheat generation in piezoelectric stack actuators used in fuel injectors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2009, 18(4): 1-11.
- [15] SENOUSY M S, LI F X, MUMFORD D, et al. Thermoelectro-mechanical performance of piezoelectric stack actuators for fuel injector applications [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(4): 387-399.
- [16] FISCHER J, HÄGELE D, RUDOLPH J. Direct simultaneous measurement of electrocaloric effect and hysteresis loss heating in ferroelectrics [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(17): 1-8.
- [17] HOU X, LI X K, ZHANG J T, et al. Effect of grain size on the electrocaloric properties of polycrystalline ferroelectrics [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(5): 1-7.

---

(上接第 120 页)

- [13] WANG Zexin, DUAN Huilong, ZHENG Yinfei. Multi-frequency broadband piezoelectric micromachined ultrasonic transducer utilizing Helmholtz resonance [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 249: 108267.
- [14] 赵英朴, 张纪光. 一种内嵌亥姆霍兹共鸣器的中空玻璃: 中国专利, CN123456789A [P]. 2023.
- [15] BLACKSTOCK D T. *Fundamentals of physical acoustics* [M]. John Wiley & Sons, 2000.
- [16] YU Hongyong, DU Taili, ZHAO Hongfa, et al. Conical Helmholtz resonator-based triboelectric nanogenerator for harvesting of acoustic energy [C] // *Xiamen, China: 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 2021: 1676-1679.