

T/SDASTC

团 体 标 准

T/SDASTC XXX—XXXX

超高温压电传感器用晶体材料的性能测试 方法

Test methods for properties of crystal materials used in ultra-high-temperature
piezoelectric sensors

征求意见稿

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX- XX- XX 发布

XXXX- XX- XX 实施

山东科技咨询协会 发布

目 次

| | |
|------------------------------|-----|
| 前 言 | III |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语和定义 | 1 |
| 4 基本要求 | 2 |
| 4.1 样品要求 | 2 |
| 4.2 测试环境要求 | 2 |
| 4.3 高温测试通用要求 | 3 |
| 4.4 样品准备及要求 | 3 |
| 4.5 仪器设备要求 | 3 |
| 4.5.1 通用设备 | 3 |
| 4.5.2 高温性能测试设备 | 3 |
| 5 测试方法 | 4 |
| 5.1 线热膨胀系数测试 | 4 |
| 5.1.1 测试原理 | 4 |
| 5.1.2 测试步骤 | 4 |
| 5.2 高温体积电阻率测试 | 5 |
| 5.2.1 测试原理 | 5 |
| 5.2.2 测试步骤（三电极法） | 5 |
| 5.2.3 注意事项 | 6 |
| 5.3 高温介电常数和介电损耗测试 | 6 |
| 5.3.1 测试原理 | 6 |
| 5.3.2 测试步骤 | 6 |
| 5.3.3 注意事项 | 6 |
| 5.4 压电系数和压电灵敏度测试（准静态法） | 6 |
| 5.4.1 测试原理 | 6 |
| 5.4.2 测试步骤 | 7 |
| 5.4.3 注意事项 | 7 |
| 5.5 压电系数温漂和压电灵敏度温漂测试 | 7 |
| 5.5.1 测试原理 | 7 |

| | |
|-------------------------|----|
| 5.5.2 测试步骤 | 9 |
| 5.5.3 注意事项 | 9 |
| 6 数据记录与结果表示 | 9 |
| 6.1 原始数据记录 | 9 |
| 6.2 数据处理 | 9 |
| 6.3 结果表示 | 9 |
| 7 测试报告 | 10 |
| 附录 A（规范性）不确定度计算方法 | 11 |
| 附录 B（资料性）测试报告示例 | 13 |
| 参 考 文 献 | 14 |

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。本文件为团体标准，供相关单位自愿采用。使用本文件时，应结合材料类型、晶体切型、使用温区及应用场景，合理确定其适用性。

请注意，本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东大学提出并由山东科技咨询协会归口。

本文件起草单位：山东大学、厦门大学、西安交通大学、中国计量科学研究院、济南量子技术研究院、济南先进动力研究所、青岛芯笙微纳电子科技有限公司、中国电子科技集团公司第二十六研究所、中电科技德清华莹电子有限公司、中国兵器工业集团第五三研究所、山东本源晶体科技有限公司和华东光电集成器件研究所。

本文件主要起草人：于法鹏、秦利锋、李妍璐、刘学良、杨丁汀、段秀兰、周大钊、刘子健、丁文皓、孔令美、陶继方、宋伟、王东周、李飞、马晋毅、石自彬、葛章琦、庞国栋、王永、蔡晨光、赵显。

超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法

1 范围

本文件规定了高温压电传感器用晶体材料性能测试的术语和定义、基本要求、测试方法、数据处理、结果表示和测试报告要求。

本文件适用于超高温压电传感器用晶体材料，包括但不限于LiNbO₃、GaPO₄、La₃Ga_{5.5}Ta_{0.5}O₁₄、YCa₄O(BO₃)₃等。

本文件主要适用于晶体材料或其加工得到的标准测试样件的性能测试，不适用于压电聚合物材料，不适用于非超高温环境用途压电敏感元件的性能测试，不适用于非压电原理传感器敏感元件的性能测试，也不直接作为传感器整机产品验收的唯一依据。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用构成本文件必不可少的条款。凡是注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3389 压电陶瓷材料性能测试方法 性能参数的测试

GB/T 31838.8 固体绝缘材料 介电和电阻特性第8部分：测定介电特性（AC方法）相对介电常数和介质损耗因数（频率1MHz~300MHz）

GB/T 31838.2 固体绝缘材料 介电和电阻特性第二部分：体积电阻和体积电阻率

IEEE Standard on Piezoelectricity ANSI/IEEE 176-1978

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超高温压电晶体 ultra-high temperature piezoelectric crystal

能够在650℃及以上高温环境下保持有压电效应的晶体材料。

3.2

热平衡 thermal equilibrium

样品被加热到设定温度点后，其表面温度与给定温度达到一致且稳定的状态。

3.3

线热膨胀系数 linear thermal expansion coefficient

单位温度变化所引起的材料长度相对变化量，单位为百万分之一每摄氏度（ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 或ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ）。

3.4

体积电阻率 volume resistivity

在给定的时间及电压下，直流电场强度与绝缘介质内部电流密度之比，通常表示为 ρ_v ，单位为欧姆·米（ $\Omega\cdot m$ ）或欧姆·厘米（ $\Omega\cdot cm$ ）。

3.5

居里温度 Curie temperature

压电材料由铁电相转变到顺电相的临界温度点，通常表示为 T_c 。

3.6

相对介电常数 relative permittivity

介质的绝对介电常数 (ϵ) 与真空介电常数 (ϵ_0) 之比, 通常表示为 ϵ_r , 是一个无量纲数。

3.7

介电损耗因数 dielectric dissipation factor

介电常数虚部与实部的比值, 通常表示为 $\tan\delta$ 。

3.8

压电系数 piezoelectric constant

表征压电材料机械效应与电效应之间耦合关系的物理量, 衡量压电材料将机械能转换为电能或电能转换为机械能的能力。

注1: 本标准主要涉及纵向压电应变系数 (如 d_{33})。

注2: 单位为皮库仑/牛顿 (pC/N)。

3.9

压电系数温漂 variation of piezoelectric constant with temperature

压电晶体在一定高温环境下 (温度为 T) 的压电系数 (如 $d_{ij}(T)$) 与其在室温环境下 (25°C) 的压电系数 ($d_{ij}(25^\circ\text{C})$) 的变化百分比。

3.10

压电灵敏度 piezoelectric sensitivity

压电材料有效压电系数 d_{ij} 与沿被测方向的受力面积之积。

注1: 本标准主要涉及纵向压电应变系数 (如 d_{33}) 的灵敏度。

注2: 单位为皮库仑/千帕 (pC/kPa)。

3.11

压电灵敏度温漂 variation of piezoelectric sensitivity with temperature

压电材料在一定高温环境下 (温度为 T) 的压电灵敏度 (如 $S_{ij}(T)$) 与其在室温环境下 (25°C) 的压电灵敏度 ($S_{ij}(25^\circ\text{C})$) 的变化百分比。

4 基本要求

4.1 样品要求

4.1.1 送检样品应为晶体材料标准测试样件, 样品材质、尺寸、切型及测量方向应明确。

4.1.2 样品表面应清洁、干燥, 不应有影响测试结果的明显污染、附着物、水渍或残留颗粒。

4.1.3 样品边缘不应有影响测试结果的明显崩边、裂纹或缺损。

4.2 测试环境要求

4.2.1 除另有规定外, 测试环境温度应为 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 。

4.2.2 除另有规定外, 测试环境相对湿度应为 $20\% \sim 75\%$ 。

4.2.3 除另有规定外, 测试环境大气压强应为 $86\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}$ 。

4.2.4 测试应在无明显振动、无强电磁干扰和无强气流扰动的环境中进行。

4.2.5 测试环境应满足相应仪器设备对洁净度和稳定性的要求。

4.2.6 高温测试环境应具备良好的通风条件和必要的安全防护措施。

4.3 高温测试通用要求

4.3.1 测试温度上限宜低于材料居里温度 (T_c) $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$; 对于无明显居里相变的材料, 应按材料稳定服役上限或供需双方约定执行。

4.3.2 测试温度点可根据材料类型和应用需求设置, 宜包含室温基准点以及若干高温测试点。例如, 以环境温度 $23\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 作为基准点, 逐步升高至 $100\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $200\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $300\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $400\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $500\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $700\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $800\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $900\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1000\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 等。

4.3.3 每个测试温度点宜恒温 $10\text{ min}\sim 30\text{ min}$ 至样品达到热平衡后再进行测量。

4.4 样品准备及要求

线热膨胀系数的测试样品尺寸宜为 $5\times 5\times 5\text{ mm}^3$, 体积电阻率、介电常数和介电损耗的测试样品尺寸宜为 $10\times 10\times 1\text{ mm}^3$, 压电系数和压电灵敏度的测试样品尺寸宜为 $3\times 3\times 10\text{ mm}^3$, 样品被测端面应镀铂金或者黄金电极, 电极厚度 $\geq 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。无特别要求时, 每项测试项目应不少于 3 个平行样。

4.5 仪器设备要求

测试所用仪器设备应经国家计量部门或法定机构检定、校准或计量确认合格, 并处于有效期内。

4.5.1 通用设备

- a) 千分尺: 用于测量样品的尺寸, 包括长度、宽度、厚度、直径等, 测量精度 0.01 mm ;
- b) 热膨胀仪: 用于线热膨胀系数测量, 控温精度优于 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, 位移分辨率优于 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$;
- c) 精密数字万用表: 用于测量电压、电流和电阻。电阻测量精度误差应低于 $\pm 0.5\%$, 电阻测量范围宜覆盖 $10^6\text{ }\Omega\sim 10^{13}\text{ }\Omega$;
- d) 高阻计: 用于测量微弱电流, 电流分辨率测量精度误差优于 1% , 电流测量范围宜覆盖 $10^{-14}\text{ A}\sim 10^{-3}\text{ A}$;
- e) 精密 LCR 测量仪: 用于测量电容、介电损耗和阻抗。测试频率范围宜覆盖 $20\text{ Hz}\sim 1\text{ MHz}$, 精度优于 $\pm 0.05\%$;
- f) 准静态 d_{33} 测量仪: 用于常温下压电系数 d_{33} 的快速测量, 量程范围宜覆盖 $0.1\text{ pC/N}\sim 10000\text{ pC/N}$, 施力频率宜为 100 Hz 或 110 Hz , 测量精度宜优于 $\pm 3\%$ 。

4.5.2 高温动态加载测试系统

4.5.2.1 高温温控箱

- a) 最高加热温度: 应高于被测压电晶体的最高测试温度至少 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 宜达到 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 及以上;
- b) 控温精度: 应不大于 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$;
- c) 均温区: 温控箱内应有一段足够长度的均温区域, 该区域内温度差异应不大于 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。测试样品应置于该均温区内;
- d) 升温速率: 应可编程控制, 升温速率范围宜控制在 $1\text{ }^\circ\text{C/min}\sim 10\text{ }^\circ\text{C/min}$, 以保证平稳升温, 避免热冲击。

4.5.2.2 高温测试夹具

- a) 应采用耐高温、高绝缘、低蠕变的材料制作 (优选高纯石英、高纯氧化铝陶瓷等);
- b) 夹具设计应确保样品受力均匀且电极接触良好, 宜提供对样品施加特定预紧力的夹持装置, 测力传感器的精度宜不高于 $\pm 0.5\%$ 。

4.5.2.3 引线屏蔽系统

a) 电极引线：电极引线应采用耐高温的同轴电缆或金属导线（宜铂金丝、镍铬丝），其绝缘层应能承受同等条件的测试温度；

b) 测温元件：宜采用热电偶进行测温，测温精度应不低于 I 级。宜采用 S 型（铂铑 10-铂）或 R 型（铂铑 13-铂）热电偶，其测量端应尽可能靠近被测样品；

c) 电磁屏蔽系统：应具有良好的电磁屏蔽和接地措施，特别是从温控箱内引出的测量线，应加以屏蔽处理，避免高温下的电磁干扰和漏电流对微弱信号的影响。

4.5.2.4 电荷放大器

用于测试压电元件在常温和变温条件下的电荷输出特性，标称频率范围宜覆盖 0.1 Hz~20 kHz（-3 dB），增益波动 $< \pm 0.5$ dB，输入阻抗 > 1 G Ω 。

4.5.2.5 压电致动器

用于提供周期性的压力信号给被测压电材料，推力应 ≥ 2000 N，最大行程应 ≥ 50 μ m，重复定位精度应 $\leq 0.01\%$ ，工作电压宜 ≤ 200 V。

表 1 测试项目及主要仪器设备

| 测试项目 | 主要仪器设备 |
|----------------|------------------------------------|
| 线热膨胀系数 | 千分尺、热膨胀仪 |
| 高温体积电阻率 | 千分尺、精密数字万用表、高温温控箱、高温测试夹具 |
| 高温介电常数和介电损耗 | 千分尺、精密 LCR 测量仪、高温温控箱、高温测试夹具、引线屏蔽系统 |
| 压电系数和压电灵敏度 | 千分尺、准静态 d_{33} 测量仪 |
| 压电系数温漂和压电灵敏度温漂 | 千分尺、高温动态加载测试系统 |

5 测试方法

5.1 线热膨胀系数测试

5.1.1 测试原理

参考 GB/T 16535-2008 精细陶瓷线热膨胀系数试验方法，采用推杆式热膨胀仪或光学式热膨胀仪，在特定气氛和升温程序下，测量样品长度随温度的变化关系，并计算线热膨胀系数。

5.1.2 测试步骤

- 将样品安装于热膨胀测试装置中；
- 在设定的气氛（如 N₂、Ar 等）下，以恒定速率（如 5 °C/min）从室温加热至最高温度；
- 记录长度变化 (ΔL) 与温度 (T) 的关系曲线 ($L-T$ 曲线)；
- 线热膨胀系数 α 按式 (1) 计算：

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} / \Delta T \quad (1)$$

式中：

α —线热膨胀系数；

ΔL —温度区间内的长度变化量；

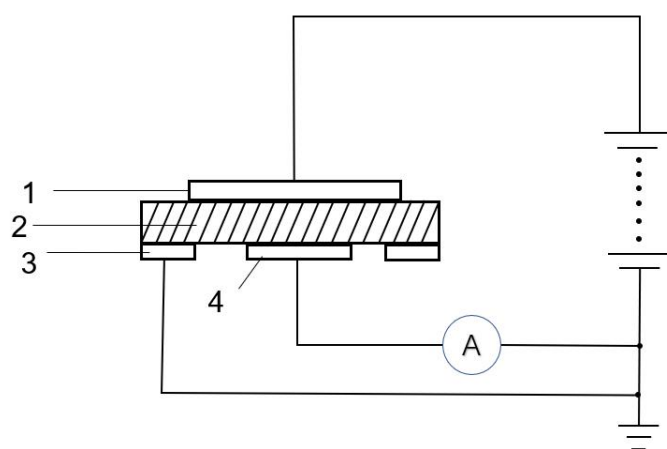
L_0 —样品在初始温度下的长度；

ΔT —温度变化量。

5.2 高温体积电阻率测试

5.2.1 测试原理

参考 GB/T 31838.2，在样品两端施加稳定直流电压 (V)，测量通过样品的微弱电流 (I)，根据欧姆定律 ($R = V/I$) 计算其绝缘电阻 (R)。结合样品尺寸计算体积电阻率 (ρ_v)。测试原理如图 1 所示，采用三电极系统（测量电极 L、高压电极 H、保护电极 G）夹具，保护电极 G 接地，能够消除表面漏电流对体积电阻率测量的影响。



1、高压电极 (H) 2、被测样品 3、测量电极 (L) 4、保护电极 (G)

图 1 三电极法测量电阻示意图

5.2.2 测试步骤

- a) 在温控箱内安装样品，确保各电极接触良好；
- c) 连接高压电极 (H)、测量电极 (L) 形成一个回路，测量电极 (L) 和保护电极 (G) 接地；
- d) 升温至目标温度 T_i 并保温，使样品处于稳定的温度环境中；
- e) 将规定的直流电压 (V ，推荐 $100 V$) 施加于样品的高压电极上，施加电压后，在 1 min 、 2 min 、 5 min 、 10 min 、 50 min 和 100 min ，利用高阻计读取稳定电流值 (I_v) 或精密数字万用表直接读取电阻值 (R_v)，如果两次测量得出同样的结果，结束测量；
- f) 体积电阻率按式 (2) 计算：

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot A}{t} = \frac{V \cdot A}{I_v \cdot t} \quad (2)$$

式中：

ρ_v —体积电阻率；

R_v —体积电阻；

V —施加电压；

I_v —稳定电流；

A —有效电极面积，单位平方米 [m^2]；

t —样品厚度，单位米 [m]。

5.2.3 注意事项

- a) 安全警示：测试涉及高电压，应在有屏蔽防护场所内进行操作；
- b) 测试系统的绝缘性至关重要，温控箱、夹具和引线之间的绝缘电阻应远高于样品电阻；
- c) 应记录测试电压和充电时间。

5.3 高温介电常数和介电损耗测试

5.3.1 测试原理

将样品视为平行板电容器介质，在施加规定频率交流电压下测量其等效电容（ C_f ）和介电损耗因数（ D ）。结合样品几何尺寸，计算相对介电常数（ ϵ_r ）和介电损耗因数（ $D = \tan\delta$ ）。

5.3.2 测试步骤

- a) 将高温测试夹具置于温控箱内，确保电接触良好；
- b) 将带电极样品安装于高温测试夹具中，连接电极引线，温控箱内的测温热电偶与被测样品的距离宜小于 2 mm；
- c) 以规定的升温速率（宜为 1 °C/min~10 °C/min）程序升温至目标温度点 T_i ，每个测试温度点宜恒温 10 min ~ 30 min；
- d) 每个测试温度点恒温结束后，使用精密 LCR 测量仪在指定频率 f （如 1 kHz、10 kHz 和 100 kHz）下测量样品的电容值 C_f 和介电损耗因数 D 值；
- e) 不同测试温度点 T_i 下的相对介电常数 ϵ_r 按式（3）计算：

$$\epsilon_r(T_i) = \frac{C_f \cdot t}{\epsilon_0 \cdot A} \quad (3)$$

式中：

C_f —温度为 T_i 时测得的电容，单位法拉[F]；

t —样品厚度，单位米[m]；

A —电极面积，单位平方米[m²]；

ϵ_0 —真空介电常数， 8.854×10^{-12} F/m。

f) 介电损耗因数以实测 $D = \tan\delta$ 表示。

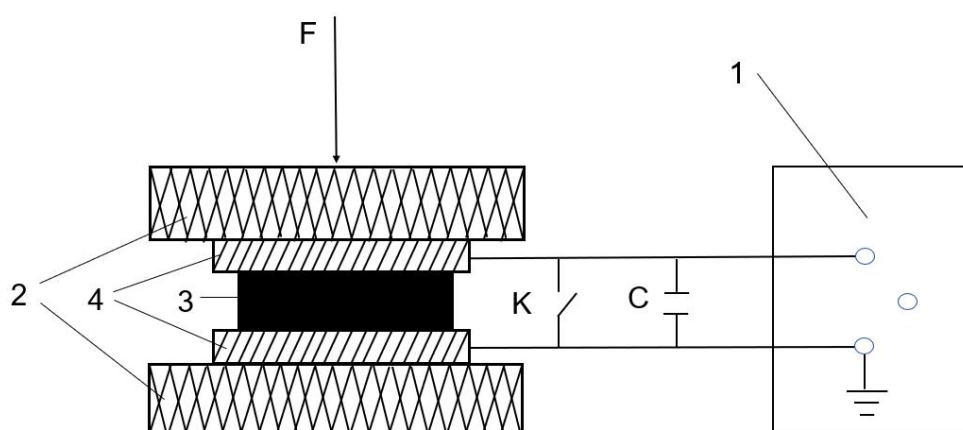
5.3.3 注意事项

- a) 电极引线应使用耐高温屏蔽线，以减小杂散电容和电磁干扰；
- b) 宜选择多个频率进行测试，以对比介电性能参数的频率特性。

5.4 压电系数和压电灵敏度测试

5.4.1 测试原理

采用符合国标GB/T 3389的准静态 d_{33} 测量仪进行测算，基本测试原理如图2所示。利用压电晶体的正压电效应，当晶体受到机械压力时，上下表面产生电荷，通过输入阻抗大于200 TΩ的静电计采集产生的电荷量，电荷与静压力比值即为压电系数（ pC/N ），压电系数和样品面积的乘积即为压电灵敏度（ pC/kPa ）。



1、静电计 2、加压装置绝缘座 3、压电晶体样品 4、电荷引出电极
K、短路开关 C、并联电容器 F、施加于被测样品上的压力

图 2 压电系数测试装置

5.4.2 测试步骤

- 将样品安装于加压装置的上下引出电极的中心位置；
- 合上短路开关 K；
- 缓慢加压，施加于试样上的应力宜为 $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \sim 1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ；
- 校准静电计的零点；
- 断开短路开关，在 1 s 之内迅速释放施加于试样上的压力；
- 记录静电计上电压的稳定读数；
- 根据测得的电压和施加于试样上的压力及并接在试样上的电容，按公式(4)和(5)计算纵向压电系数 d_{33} 和压电灵敏度 S_{33} 。

$$d_{33} = \frac{Q}{F} = \frac{CV}{F} \quad (4)$$

$$S_{33} = d_{33}A \quad (5)$$

式中：

Q —样品释放压力后所产生的电荷量数值，单位为库仑[C]或者皮库仑[pC]；

F —样品受力数值，单位为牛顿[N]；

C —并联电容数值，单位为法拉[F]；

V —静电计所测得的电压的数值，单位为伏特[V]。

A —样品受力面的面积，单位为平方米[m²]

5.4.3 注意事项

- 整个检测系统的绝缘电阻应大于 $1 \times 10^{10} \Omega$ ，并保持良好的接地；
- 并联电容器的电容量应大于试样自由电容 100 倍以上。

5.5 压电系数温漂和压电灵敏度温漂测试

5.5.1 测试与工作原理

压电系数温漂和压电灵敏度温漂测试采用如图3所示的高温动态加载测试系统进行。被测样品置于高温测试夹具中，由压电致动器通过传力杆向样品施加周期性正压力 $F(T)$ ，底部测力传感器同步测量实

际作用于样品上的动态力信号。样品在受力过程中基于正压电效应产生交流电荷信号 $Q(T)$ ，该电荷信号经低噪声屏蔽线缆输入电荷放大器，并转换为可采集的电压信号 $V_{out}(T)$ 。

电荷放大器的基本工作原理为反相积分式电荷—电压转换。其输入端近似为虚地，样品产生的电荷主要转移到反馈电容 C_f 上，在理想工作频段内，其输出电压与输入电荷近似满足：

$$V_{out}(T) = -\frac{Q(T)}{C_f} \quad (6)$$

或

$$Q(T) = -C_f V_{out}(T) \quad (7)$$

式中：

C_f —电荷放大器的反馈电容。

实际测试中，根据电荷放大器标定的电荷-电压转换系数 K_Q 将输出电压 $V_{out}(T)$ 换算为电荷量 $Q(T)$ ：

$$Q(T) = K_Q V_{out}(T) \quad (8)$$

式中：

K_Q —电荷放大器的标定转换系数，单位皮库伦/伏特[pC/V]。

根据每个设定温度点的动态电荷量 $Q(T)$ 和测力传感器输出的动态力 $F(T)$ ，压电系数 $d_{33}(T)$ 可由下式计算得到：

$$d_{33}(T) = \frac{Q(T)}{F(T)} \quad (9)$$

其中， $Q(T)$ 与 $F(T)$ 采用同一种幅值定义，例如峰值、峰-峰值的一半或有效值，测试过程中应保持一致。不同温度点下的压电灵敏度由压电系数与受力面积换算得到：

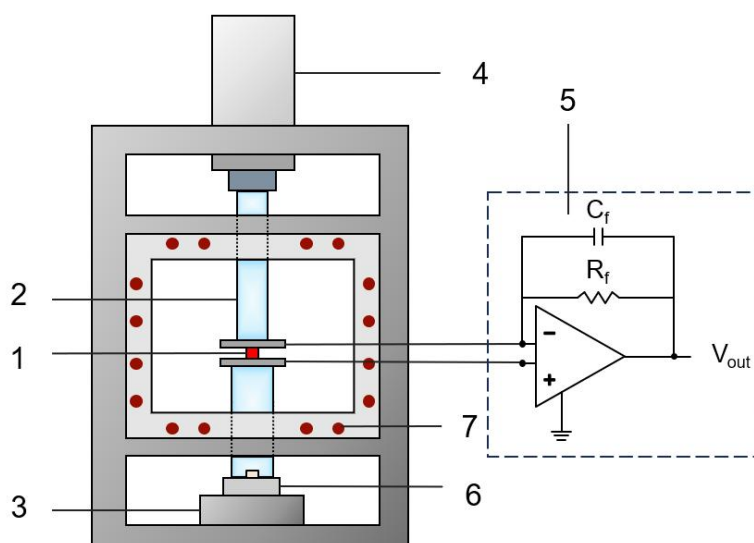
$$S_{33}(T) = \frac{Q(T)}{P(T)} = d_{33}(T) \cdot A \quad (10)$$

式中：

$P(T)$ —作用于样品表面的压强，单位千帕[kPa]；

A —样品受力面积，单位平方米[m²]。

在不同温度点重复上述测试，得到不同温度下被测样品的压电系数 d_{33} 和压电灵敏度 S_{33} 数值。通过绘制 $d_{33}-T$ 和 $S_{33}-T$ 曲线，计算得到压电系数温漂和压电灵敏度温漂。



1、被测样品 2、传力杆 3、稳定平台 4、压电致动器 5、电荷放大器 6、测力传感器

图 3 压电系数温漂和压电灵敏度温漂测试装置示意图

5.5.2 测试步骤

- a) 将被测样品安装于高温测试夹具的中心位置，使样品受力面与加载端面保持平行接触，热电偶测温端与被测样品距离宜小于 2 mm ；
- b) 连接测力传感器信号线、电荷放大器输入线和温控箱测温热电偶，检查线路连接、屏蔽接地和绝缘状态是否正常；
- c) 设置电荷放大器量程和时间常数，记录反馈电容 C_f 或电荷—电压转换系数 K_Q 、反馈电阻 R_f ，并校准测力传感器和电荷放大器零点；
- d) 升温至预定温度点并保温 $5\text{ min}\sim 10\text{ min}$ ，待温度稳定后进行测试；
- e) 通过压电致动器对被测样品施加低频周期性正压力 $F(T)$ ，加载频率不超过 110 Hz ，加载过程中应始终保证样品处于压紧夹持状态；
- f) 同步采集测力传感器输出信号和电荷放大器输出电压 $V_{out}(T)$ ，并根据电荷放大器设定值换算得到样品产生的电荷量 $Q(T)$ ；
- g) 取稳定周期内 $F(T)$ 和 $Q(T)$ 的幅值，按公式（9）和公式（10）计算被测样品在该温度点下的压电系数 $d_{33}(T)$ 和压电灵敏度 $S_{33}(T)$ ；
- h) 在设定的多个温度点重复步骤d)～g)，记录压电系数 d_{33} 和压电灵敏度 S_{33} 随温度 T 的变化，绘制 $d_{33}(T)$ 和 $S_{33}(T)$ 曲线；
- i) 根据 $d_{33}-T$ 和 $S_{33}-T$ 曲线，确定最大压电系数和最大压电灵敏度数值，并与起始温度点时的压电系数和压电灵敏度数值做对比，取相对变化率的绝对值，即为压电系数温漂和压电灵敏度温漂。

5.5.3 注意事项

- a) 应确保高温测试夹具材质的刚性、热稳定性和绝缘性；
- b) 应检查被测样品受力端面的平行度和表面粗糙度，平行度宜 $\leq 0.01\text{ mm}$ ，表面粗糙度宜 $\leq 10\text{ nm}$ ；
- b) 应严格校准测力传感器和电荷放大器的测量准确度。

6 数据记录与结果表示

6.1 原始数据记录

所有测试的原始记录应清晰、完整，应至少包括：

- a) 样品信息（编号、材料、尺寸、电极）；
- b) 测试设备信息（名称、型号、编号、校准状态）；
- c) 测试环境条件（环境温度、湿度）；
- d) 测试参数（温度点、升温速率、保温时间、测试频率、测试电压）；
- e) 原始测量数据（ C 、 D 、 R 、 I 、 F 、 Q 和 ΔL 等）；
- f) 计算后的最终结果 ρ_v 、 ϵ_r 、 $\tan\delta$ 、 d_{33} 和 S_{33} 等；
- g) 测试日期和测试人员签名。

6.2 数据处理

6.2.1 必要时宜测量不确定度，计算方法见附录 A。

6.2.2 数值修约应符合 GB/T 8170 的规定。

6.3 结果表示

测试结果宜采用表格、曲线或两者结合的方式表示；
高温测试结果宜给出性能参数随温度变化的关系曲线。

7 测试报告

测试报告应基于原始数据生成，至少应包括：

- a) 报告编号；
- b) 测试依据；
- c) 样品信息；
- d) 测试环境条件；
- e) 测试设备信息；
- f) 测试方法和关键参数；
- g) 原始数据和测试结果；
- h) 必要时不确定度说明；
- i) 测试日期和测试人员。

测试报告格式可参考附录 B。

附录 A
(规范性)
不确定度计算方法

A.1 计算方法

不确定度宜包含合成标准不确定度和扩展不确定度。测量不确定度的评定与表示可参照《JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示》进行。

重复测量引入的不确定度 u_a 可按式(A.1)计算:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (\text{A.1})$$

式中:

n — 测量次数;

x_i — 第 i 次测量的值;

\bar{x} — n 次测量的平均值。

仪器引入的不确定度 u_b 可根据检定/校准证书确定, 可按式(A.2)计算:

$$u_b = \frac{\alpha}{k} \quad (\text{A.2})$$

式中:

α —仪器在置信概率下可能的最大误差范围;

k —包含因子, 通常取 $\sqrt{3}$ 。

合成标准不确定度 u_c 按式(A.3)计算:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (\text{A.3})$$

扩展不确定度 U 按式(A.4)计算:

$$U = K u_c \quad (\text{A.4})$$

式中:

K —包含因子, 通常取 2。

则最终测量结果可表示为 $\bar{x} \pm U$ 。

A.2 计算示例

以某压电样品在室温条件下的压电电荷输出测量结果为例, 重复测量 5 次, 测得结果分别为 10.2 pC、10.4 pC、10.1 pC、10.3 pC 和 10.2 pC。

5 次测量结果都平均值为:

$$\bar{x} = 10.24 \text{ pC}$$

按式(A.1)计算得到重复测量引入的不确定度:

$$u_a = 0.051 \text{ pC}$$

已知测量系统最大误差范围为 $\pm 0.02 \text{ pC}$, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 仪器引入的不确定度为:

$$u_b = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.011 \text{ pC}$$

按式(A.3)计算合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} = 0.052 \text{ pC}$$

取包含因子 $K=2$ ，按式(A.4)计算扩展不确定度：

$$U = 2u_c = 0.104 \text{ pC}$$

则测量结果可表示为：

$$Q = 10.24 \pm 0.104 \text{ pC}。$$

附录 B
(资料性)
测试报告示例

报告编号：

送样单位： 样品信息：
 样品编号： 温度： 相对湿度：
 测试依据：
 主要测试设备：
 测试方法：
 测试数据与结果：

表 B.1 测试数据

| 测试参数 样品编号 | 样品尺寸 | 温度 (°C) | 保温时间 (min) | 电阻率 (MΩ) | 电容 (pF) | 介电损耗 (tanδ) | 电荷 (pC) | 压电系数 (pC/N) | 压电灵敏度 (pC/kPa) |
|--------------|------|------------|---------------|-------------|------------|----------------|------------|----------------|-------------------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

压电系数原始数据不确定度：

压电灵敏度原始数据不确定度：

测试人员：

审查：

批准：（授权签字人）

参 考 文 献

- [1] GB/T 1.1—2020 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则[S].
- [2] GB/T 3389 压电陶瓷材料性能测试方法 性能参数的测试[S].
- [3] GB/T 31838.2 固体绝缘材料 介电和电阻特性第二部分：体积电阻和体积电阻率[S].
- [4] GB/T 31838.8 固体绝缘材料 介电和电阻特性第8部分[S].
- [5] GB/T 16535-2008 精细陶瓷线热膨胀系数试验方法[S].
- [6] GB/T 11026.1 电气绝缘材料 耐热性 第1部分：老化程序和试验结果的评定[S].
- [7] JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示[S].
- [8] ASTM E228-17 Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Push-Rod Dilatometer[S].
- [9] IEEE Std 180-2010 IEEE Standard on Piezoelectricity[S].
- [10] IEC 60406:1977 Methods for the measurement of the equivalent electrical parameters of quartz crystal units[S].