

《超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法》团体标准编制说明

一、工作简况

(一) 任务来源

本项科技成果是在国家级和省部级项目支持下获得的，代表性项目信息如下：

1.国家科技部重点研发计划（智能传感器专项）：“高温压电晶体制备及 MEMS 压力传感器研制”，项目编号：2023YFB3210700，2023 年至 2026 年，在研；

2.山东省重大科技创新工程项目：“高温压电晶体与传感器研发及产业化”，项目编号：2019JZZY010313，2019 年至 2022 年，925 万，结题（优秀）；

3.JWKJW 创新特区项目：“新型超高温xxx”，项目编号：18H863-xx，2018 年至 2020 年，450 万元，结题；

4.山东省重点研发计划项目：“新型高温压电晶体及传感器件”，项目编号：2017CXGC0413，2017 年至 2019 年，300 万元，结题（优秀）；

5.装备预研教育部联合基金：“振动xx”，项目编号：6141Axx，2016 年至 2017 年，100 万元，结题；

6.国家自然科学基金：“ReCOB 型压电晶体的力频效应及其苛刻环境下性能稳定性研究”项目编号：51202129，2013 年至 2015 年，25 万元，结题。

(二) 主要工作过程

1.立项与筹备阶段

(1) 需求分析与调研：

近些年，随着我国航空航天、核电能源、重型燃气轮机等高端装备技术的飞速发展，装备系统的健康运行对肩负状态监测任务的传感器提出了更高的要求。超高温压电传感器（振动、压力、加速度等）作为监测发动机热端部件、核反应堆内部结构等关键设备状态的核心器件，其可靠性与精度直接关系到整个系统的安全运行与工作效能。

压电材料是这类传感器的“心脏”，当环境温度超过 650℃，甚至高达 1000℃以上时，其性能在高温、强振动、热循环等复杂工况环境下会发生退化甚至失效。目前，

国内外缺乏统一、专门、可复现的超高温压电材料（压电晶体、压电陶瓷等）性能测试方法标准，这就导致在产品研发阶段，各传感器研发机构或企业往往采取自定义的方式对高温压电材料的性能进行测试，数据难以横向对比，重复研发成本高。在生产与质检阶段，缺乏权威的入厂检验和出厂标定依据，产品一致性与可靠性很难得到保障。在应用阶段，用户选型困难，对传感器在边界条件下的性能表现缺乏可信的数据支撑。

因此，制定一套科学合理的《超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法》标准，对于规范行业研发、提升产品质量、保障重大装备安全、促进产业链协同发展具有重要的战略意义和现实紧迫性。

（2）组建起草组：

由山东大学、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联合提出并开展《超高温压电传感器用晶体材料的性能评测方法》团体标准的制定工作，为超高温压电传感器用晶体材料的性能评测提供科学、实用、有效的依据。各起草单位分工如下：

山东大学：牵头负责标准整体框架设计、技术路线制定、核心测试方法的提出与验证，以及标准草案的主笔编写；

厦门大学、西安交通大学：参与高温介电性能测试方法和压电系数测试方法的技术论证与实验验证；

中国计量科学研究院：负责测量不确定度评估方法的制定与计量溯源性的技术把关；

济南量子技术研究院、济南先进动力研究所：参与高温环境试验条件与设备要求的技术论证；

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、华东光电集成器件研究所：从传感器设计与制造角度提出测试需求，参与样品制备与工程验证；

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：提供典型超高温

压电晶体材料样品，参与关键性能参数的对比验证测试。

2. 技术研究与草案编写

(1) 文献与标准分析：

当前尚无直接针对“超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法”的专门标准。现有标准均从不同侧面涉及部分的测试内容，具有明显的局限性。比如 GB/T 11309-1989《压电陶瓷材料性能测试方法》，提供了 d_{33} 、 k_p 、 ϵ 、 $\tan\delta$ 等核心参数的经典测试方法，但是该标准缺乏压电晶体的可测量温度范围表述，特别是高温环境下如何进行测试未见声明。标准 JJG 233-2008《压电加速度计检定规程》，针对传感器整机，非核心晶体材料。高温测试部分细节不详，缺乏对晶体元件在高温下性能分离评价的方法，不涉及材料层面的高温特性分析。因此，本标准以《GB/T 3389 压电陶瓷材料性能测试方法性能参数的测试》为参考，吸收 GB/T 31838《固体绝缘材料 介电和电阻特性》系列标准的高温实验严谨性，借鉴前沿学术研究中的多物理场耦合测试理念，最终形成一个指导性强、可操作、聚焦产业应用的专用标准，填补该领域空白。

(2) 关键技术验证：

在可控实验环境下，系统验证超高温压电晶体（最高目标 1000°C ）在高温环境中，压电晶体关键性能参数测试方法的准确性、稳定性与可操作性，为标准正文及规范性附录的编写提供实证数据与技术依据。通过系统性的对比实验、标定和重复性测试，可以为《超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法》标准提供坚实的技术支撑，确保其最终发布的版本不仅科学严谨，而且工程实用，能够真正被产业界和学术界所采纳和应用。

(3) 编写标准初稿，明确以下核心内容：

术语定义：超高温压电晶体、热平衡、线热膨胀系数、体积电阻率、居里温度、相对介电常数、介电损耗因数、压电系数、压电系数温漂、压电灵敏度和压电灵敏度温漂；

测试条件：温变速率 $\leq 3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、测试场地应无影响测量结果的强电磁场、机械振动和噪声干扰；在高温环境下测试，实验室应具备良好的通风条件并配备必要的安全防护措施。

校准程序：预热 \rightarrow 温度稳定 \rightarrow 数据采集 \rightarrow 误差修正；

不确定度评估：涵盖温度均匀性等影响因素。

3.工作组讨论稿阶段

起草组按照 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》的要求，系统开展了以下工作：

(1) 全面梳理了国内外压电材料测试标准、高温电学测试标准及相关的计量技术规范，明确本标准与现有标准体系的衔接关系与互补定位。

(2) 在可控实验环境下，对典型超高温压电晶体（LiNbO₃、GaPO₄、La₃Ga_{5.5}Ta_{0.5}O₁₄、YCa₄O(BO₃)₃等）的线热膨胀系数、体积电阻率、介电性能、压电系数及压电灵敏度温漂等关键参数进行了系统的测试验证，确认了测试方法的准确性、稳定性与可操作性。

(3) 明确了标准的适用范围、术语定义、测试条件、校准程序及不确定度评估等核心内容。标准草案涵盖五项关键性能测试方法：线热膨胀系数、高温体积电阻率、高温介电性能（介电常数与损耗）、压电系数及压电灵敏度、压电系数温漂及压电灵敏度温漂。

(4) 在前期研究与验证的基础上，起草组完成了标准工作组讨论稿的编写工作，经起草组内部多次研讨与修改后形成本稿。

4.标准修改阶段

2026年1月30日，山东科技咨询协会在山东省济南市组织召开了立项评审会。会后，标准起草组根据专家提出的意见和建议，对标准名称、适用范围、标准定位、术语定义的完善、测试方法的可操作性内容进行了系统研究和修改完善。

结合评审意见，起草组进一步明确了标准适用对象和应用领域，在完成上述修改后，已形成标准征求意见稿及其编制说明。下一步将按照《山东科技咨询协会团体标准管理办法》的规定，广泛征求行业专家、生产企业、检测机构及用户单位的意见。

二、标准编制原则、主要内容及其确定依据

(一) 标准编制原则

1.科学性原则

校准方法基于本标准以 IEEE Std 176 为理论基石，以《GB/T 3389 压电陶瓷材料性能测试方法性能参数的测试》为参考，吸收 GB/T 31838《固体绝缘材料 介电和电

阻特性》系列标准的高温实验严谨性，确保方法在理论上的正确性。

通过大量对比试验（不同温度点下压电晶体材料的压电系数、不同压力下压电晶体材料的电荷量）验证方法的重复性和准确性，确定了数据具有统计学意义（置信度 $\geq 95\%$ ）。

明确校准过程中各环节的不确定度来源（如温度波动、压电促动器谐波失真），给出量化评估方法。

2.实用性原则

降低对设备的要求，便于实验室和企业快速实施。

明确规定统一的样品前处理、电极制备、温度程序（升温速率、保温时间）和测试边界条件，确保不同机构对同一材料出具的测试报告具有直接可比性，为材料选型、供应商评价提供可靠依据。

统一“材料级测试”与“传感器整机性能”之间的关联参数（如高温下的压电系数温漂、压电灵敏度温漂等），使材料研发人员、传感器设计师和终端用户能基于同一套数据语言进行有效沟通。

3.先进性原则

突破传统的测试方式，传统多为测试准静态或单一指标测量，本标准将核心框架提升为多物理场耦合下的压电晶体元件的压电性能测试，提出了在近工况环境下，评价压电材料性能的理念。

4.可重复性原则

测试条件标准化，测试环境、循环条件严格规定，样品尺寸统一，压电元件与夹具之间的安装预紧力矩可实现在变温环境下近似恒定，同时规定了关键仪器的关键参数和设定一致性。

（二）主要内容

本标准草案旨在建立一套针对超高温（ $\geq 650^\circ\text{C}$ ）压电传感器用晶体材料的性能测试方法，主要内容包括：

适用范围：标准适用于如 LiNbO_3 、 GaPO_4 、 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ 、 $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ 等能在 $\geq 650^\circ\text{C}$ 高温下工作的压电晶体材料的性能测试与质量评定。

核心测试项目规定了五项关键性能的测试方法，包括：1) 线热膨胀系数；2) 高

温体积电阻率；3) 高温介电性能（介电常数与损耗）；4) 压电系数和压电灵敏度；5) 压电系数和压电灵敏度温漂。

技术要求：明确了测试环境条件（如温度、湿度）、测试温度范围需覆盖从室温至最高工作温度的多个节点，并详细规定了样品准备（尺寸、电极）及所需仪器设备的精度与性能要求（如高温温控箱、LCR 测量仪、专用测试夹具等）。

测试方法与流程：对每一项测试给出了具体的测试原理、操作步骤、计算公式及注意事项。例如压电晶体的压电常数采用准静态法测量电荷与压力之比确定等。

数据与报告：要求完整记录原始数据，并提供标准化测试报告模板，报告需包含测量不确定度评估。

该标准旨在为压电晶体材料研发、生产检验及产品评价提供统一、可靠的技术依据，以提升行业技术水平和产品质量一致性。

（三）确定主要内容的依据

本标准主要内容的确定基于以下核心依据，确保其技术先进、方法可行并与行业接轨：

1. 行业需求与标准缺口：目前针对压电材料性能评测的国家标准（如 GB/T 2414 系列）主要面向常规温度（通常低于 250℃）的压电陶瓷，缺乏对超高温（≥650℃）压电晶体材料的系统性测试方法。这导致研发与产业应用中性能数据混乱、评价标准不一，制约了传感器技术发展和产品可靠性提升。

2. 科学原理与成熟方法引用：标准中规定的关键测试方法均建立在公认的科学原理和成熟的工程实践之上。例如，高温介电性能测试依据平行板电容器理论；准静态法测量压电常数（ d_{33} ）遵循基本的压电方程；电阻率测试采用三电极法以消除表面漏电影响。这些方法在材料科学研究中已被广泛验证。

3. 起草单位的实验验证：标准起草单位（如山东大学、山东本源晶体科技有限公司等相关单位）依托自有研发平台，对典型超高温压电晶体（如 LiNbO_3 、 GaPO_4 、 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ 、 $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ 等）进行了系统的性能测试验证。实验数据表明，在本标准草案所规定的测试条件下，关键参数（如介电常数、压电常数、压电灵敏度温漂等）的测量重复性良好，证明了所提出方法的可操作性与稳定性。

4. 与现有标准体系的衔接：本标准注重与国内外现有技术规范的协调。测试环境

与通用要求衔接相关计量基础标准；部分方法借鉴并延伸了现有压电材料测试标准《GB/T 3389 压电陶瓷材料性能测试方法性能参数的测试》的原理；不确定度评定遵循 JJF 1059.1 国家计量技术规范。这保证了本标准既具有专门性，又能融入现有的标准与计量体系。

通过以上依据，本标准的内容构建实现了针对性（填补超高温测试空白）、科学性（方法原理可靠）、可行性（经过实验验证）和协调性（与现有标准衔接），为其作为行业公认的测试依据奠定了坚实的技术基础。

三、试验（或验证）的分析报告、技术经济论证以及预期效益

（一）试验目的

本标准所规定的各项试验，旨在系统、准确地评价压电晶体材料在超高温环境下的综合性能表现，为其在超高温压电传感器中的应用提供设计依据与可靠性判据。具体试验目的如下：

线热膨胀系数测试：测量材料尺寸随温度变化的规律，评估其与传感器金属基体或封装材料的热匹配性，预测热应力水平，防止因热应力过大导致元件开裂或性能漂移。

体积电阻率测试：评估压电材料在高温下的绝缘性能，预测传感器的静态漏电流和动态信号噪声水平，确保传感器在高温度背景下仍能有效输出可压电信号。

高温介电性能测试：表征材料在高温下的介电常数与介质损耗，介电常数影响传感器的固有电容和灵敏度，介质损耗则直接关联信号质量和自热效应，是电路匹配与性能优化不可或缺的参数。

压电系数和压电灵敏度测试：定量获取压电晶体材料在常温下压电系数和压电灵敏度，为高温下压电系数和压电灵敏度提供一个基准数值。

压电系数温漂测试：定量获取材料在某个温度的压电系数（单位 pC/N），并与常温下压电系数进行比较，他们之间的差值与常温下压电系数的比值，叫做高温压电系数温漂，这是决定压电晶体材料机电转换能力的核心指标。

压电灵敏度温漂测试：定量获取压电元件在某温度下的电荷灵敏度（pC/kPa），并与常温下压电灵敏度进行比较，他们之间的差值与常温下压电灵敏度的比值，叫做高温压电灵敏度温漂，这是决定传感器电荷输出灵敏度大小的关键参数，直接用于传

感器设计、灵敏度计算和性能分级。

(二) 试验设计

本标准所规定的试验，其设计遵循“模拟工况、逐项表征、控制变量、确保复现”的原则，旨在构建一套从压电材料本征特性到长期服役性能的完整的评价体系。各项试验的具体设计如下：

1. 线热膨胀系数测试设计

目标：获取材料在宽温域内的线性热膨胀行为的数据。

设计：采用推杆式热膨胀仪进行测量。设计要点在于使用标准尺寸样品，在惰性气氛或空气中，以恒定速率（ $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）程序升温，通过高精度位移传感器连续记录尺寸变化。该设计可自动、直接获得平均线热膨胀系数曲线。

2. 体积电阻率测试设计

目标：评估高温下压电材料的绝缘性能，预防传感器发生漏电流。

设计：采用三电极系统与直流偏压法。此设计通过引入保护电极，有效分离并排除表面漏电流的影响，从而专为测量材料的体积电阻率。在高温炉中施加稳定直流电压（ 100V ），并采用高阻计测量微弱电流，是设计的关键。

3. 高温介电性能测试设计

目标：表征高温下材料的电容和介电损耗。

设计：将样品置于高温夹具中构成平行板电容器，利用精密 LCR 测量仪在多个固定频率点进行测量。设计侧重于温度点的阶梯式控制和测量前的充分热平衡，以获取电容（计算介电常数 ϵ_r ）和介电损耗（ $\tan\delta$ ）随温度的变化谱图。

4. 高温压电系数温漂和高温压电灵敏度温漂测试设计

目标：直接测量压电材料在高温环境下压力与电荷的转换效率。

设计：采用压电灵敏度测试装备进行测试。核心设计是使用测力传感器实时掌握压电材料表面所受的压力大小。将被测样品放置于精密高温温控箱中，测试样品通过两根传力杆固定，上端通过压电致动器对样品施加周期性正向压力，样品因受到周期压力后产生压电电荷，随后经电荷放大器转换为电压信号输出。晶体样品表面所受压力的大小由底部测力传感器实时检测，并通过应变放大器转换为电压信号，最终得到晶体样品精确的受力数值；根据产生的压电电荷和受到的压力大小，计算得到晶体的

压电灵敏度的大小。该设计规避了高温下谐振法测试因样品处于近自由状态无法反应受力情况下的压电响应问题，同时也解决了外力定量化的难题，便于确定不同加载力下压电材料的力-电转换特性。

（三）试验数据与结果分析

为确保测试结果的准确性、可比性及可追溯性，应对所有测试过程中记录的原始数据进行规范处理、科学分析和完整报告。

1.数据记录

所有原始数据应清晰、完整地记录于专用表格或数据采集系统中，至少包括：

- a) 样品唯一性标识、材料牌号、晶体取向、几何尺寸及电极信息。
- b) 测试设备名称、型号、编号及有效期内的校准/检定证书号。
- c) 测试环境条件（环境温度、相对湿度、大气压）。
- d) 测试过程参数，包括：各测试温度点、实际控制温度、升温速率、在各温度点的保温时间；电学测试频率、激励电压/电流；力学激励的频率等。
- e) 直接测量值，如：电容(C)、损耗因子(D)、电阻(R)、电流(I)、力值(F)、电荷量(Q)、温度(T)等。

2.数据处理与修正

原始数据需经必要修正后，方可用于计算最终性能参数。典型修正项包括：

- a) 几何修正：根据样品实测尺寸（厚度、电极面积）替代标称值进行计算。
- b) 系统本底修正：在介电、电阻率、压电常数等测试中，应扣除由测试夹具、引线及测量系统自身引入的本底电容、电导或电荷信号。本底值应在相同测试条件下使用无样品或惰性参考样品测得。
- c) 计算公式应用：应严格按照本标准第5章中各测试方法对应的计算公式进行计算。

3.结果分析与不确定度评估

a) 结果表达：各项性能参数（介电常数 ϵ_r 、介电损耗 D 或 $\tan \delta$ 、体电阻率 ρ 、压电常数 d_{ij} 、居里温度 T_c 、热膨胀系数 α ）应以数值及相应单位明确表达。建议绘制关键参数随温度变化的曲线图（如 ϵ_r-T 、 $d_{33}-T$ 曲线），以直观展示性能温度特性。

b) 不确定度评定：应依据 JJF 1059.1 对最终测试结果进行测量不确定度评定。评

定需考虑所有显著的不确定源，包括但不限于：测量设备的示值误差与分辨力；温度测量的偏差与均匀性；样品尺寸测量的偏差；数据重复性引入的标准偏差；数据处理中修正模型的不完善性。

c) 结果有效性判断：若测试过程中出现数据异常（如信号突变、噪声过大），应检查测试系统状态、样品及电极连接，必要时复测。测试结果的不确定度应满足相关应用或标准对数据精度的要求。

4.测试报告

最终测试报告应至少包含以下内容：

- a) 报告标题、编号、页码及测试日期。
- b) 委托方与测试机构信息。
- c) 依据标准（本标准编号及名称）。
- d) 所有样品、设备与环境信息。
- e) 经处理和计算后的最终测试结果，包括数值、单位、图表及扩展不确定度。
- f) 测试人、审核人、批准人签字及机构签章。

（四）技术经济论证

1.技术可行性

本标准所规定的测试方法体系，在技术上具备充分的可行性与可靠性，其依据主要体现在以下几个方面：

（1）成熟的技术基础与广泛认可的科学原理

本标准所规定的各项测试方法，其核心均建立在电介质物理学及压电学等成熟科学原理之上。这些原理在国际标准（如 IEEE Std 176）及国内外广泛采用的现有材料测试标准（如 GB/T 2414 系列）中已被长期应用和验证，技术路径清晰、理论扎实。

（2）可获得的标准化仪器设备与配套技术

标准要求的核心设备，如高精度高温温控箱（可达 1200℃ 以上）、LCR 测量仪、推杆式热膨胀仪、高阻计、准静态 d_{33} 测量仪及信号发生/采集系统等，均为材料研究与工业检测领域的商业化成熟产品，市场供应充足。针对超高温测试的特殊需求（如高温夹具、耐高温电极与引线），标准提出了明确的性能要求（如材料、绝缘性、热稳定性），相关特种陶瓷加工、贵金属镀膜及高温连接技术已在相关行业（如航空航

天、高温冶炼)中广泛应用,具备成熟的技术解决方案和供应链支持。

(3) 经过验证的测试方案与可操作性

标准起草单位基于自身研发平台,已对草案中的核心测试方法(特别是高温介电性能、准静态压电常数及电阻率测试)进行了系统的实验验证。验证结果表明,在规定的测试条件(如温度控制精度、升温程序、夹具设计)下,对典型超高温压电晶体材料进行测试,关键参数的测量具有良好的重复性与复现性。标准文本将测试流程步骤化、关键参数(如升温速率、保温时间、测试频率)具体化,并明确了安全注意事项和误差来源控制点,极大降低了操作难度和结果歧义,确保了方法的可操作性。

(4) 与现有标准体系的衔接与兼容性

本标准在框架设计上注重与现行国家计量规范、基础测试标准的衔接。例如,测量不确定度评定遵循 JJF 1059.1,环境试验通用要求与基础标准协调,部分方法原理参考现有的压电材料测试标准。这种衔接保证了本标准并非孤立存在,其测试结果能够在更广泛的技术规范和计量体系中得到承认与溯源,增强了技术系统的兼容性和行业接受度。

(5) 对技术发展的包容性与持续改进路径

标准在规范核心、普适方法的同时,也以“资料性附录”或“注”的形式,提及了更前沿的动态测试理念(如多物理场耦合),这为未来技术进步和标准修订预留了接口。同时,标准实施后预期积累的行业测试数据,将为方法本身的优化、完善提供宝贵的反馈和实证基础。

2.经济性对比

制定并实施本标准,将为超高温压电晶体与传感器件全产业链的科研机构和生产单位带来显著的经济效益,其经济性优势主要体现在“降本”、“增效”和“增值”三个维度,与缺乏标准指引的现状形成鲜明对比。

对比维度	现状	实施本标准后	经济性优势分析
研发与测试成本	各机构自行建立方法,设备选型不一,测试流程与参数各异,导致大量重复性探索与试错成本。材料供应商需应对不同客户的非标测试要求,适配成本高。	方法统一,投资明确:企业可依据标准一次性规划建设合规的测试平台,设备选型与配置有据可依,避免盲目投资。降低重复投入:产业链上下游采用同一套“技术语言”,大幅减少为满足客户要求而产生的额外测试方法与设备投入。	显著降低初期研发与能力建设的不确定性投资,提高资本使用效率。长期看,减少了全行业的重复性方法开发资源消耗。
质量成本与交易成本	因测试数据不可比,材料与传感器产品质量参差不齐。采购方需进行大量验证测试,易发质量争议与退货,交易信任成本高。合同制定与验收缺乏技术依据,谈判成本高。	建立信任,减少争议:统一的测试结果为质量提供了客观、可比的“标尺”。供需双方可基于标准数据签订明确的技术协议,大幅减少验收争议和复测成本。劣质产品易于被识别和排除。	大幅降低质量鉴定、商业谈判、合同纠纷及售后索赔等隐性交易成本。提升优质产品的市场辨识度与溢价能力。
生产效率与周期	从材料筛选到传感器用核心敏感元件定型的周期长,因性能数据不确信,常导致设计反复、样机试制失败。生产过程缺乏有效的在线或入厂检验标准。	加速研发与生产流程:可靠的性能数据为传感器设计提供准确输入,减少设计迭代。材料入厂检验和产品出厂检验有法可依,提升生产决策效率和一次合格率,缩短产品上市时间。	通过提升研发成功率和生产稳定性,缩短产品开发周期,加快市场响应速度,从而抢占市场先机,获得时间窗口的经济效益。
长期维护与可靠性成本	因缺乏对材料高温长期稳定性的标准化评估,压电传感器在实际工况下的寿命预测不准,可能导致过早失效或过度设计,增加用户运维成本和制造商保修负担。	基于数据的寿命预测:标准化的高温老化测试为可靠性设计与寿命评估提供量化依据。支持从“经验设计”转向“预测性设计”,在保障可靠性的前提下优化设计,避免过度使用材料。	降低因过早失效导致的现场维护、更换及品牌声誉损失等风险成本。同时,通过精准设计避免不必要的材料与工艺成本,实现成本与可靠性的最优平衡。

实施本标准所产生的经济效益在短期内主要体现为减少重复投入、降低交易摩擦成本;中长期则通过提升产业效率、可靠性与协同性,实现整个产业链的降本增效和价值提升。

3.预期效益分析

本标准的制定与实施,预计将产生显著的技术、经济与产业效益,有力推动我国超高温压电传感技术领域的整体进步与高质量发展。

（1）技术效益

通过提供统一、科学的测试方法，将结束当前该领域测试数据混乱、方法各异的局面，为材料研发、性能优化与最终的传感器设计提供可靠、可比的数据基础，引导技术研发升级。

标准化的评价体系将显著缩短新材料从实验室到工程应用的验证周期，降低研发门槛，鼓励更多创新主体参与，加速高性能新材料的发现与应用。

基于标准方法进行的长期老化与可靠性测试，将为传感器寿命预测和可靠性设计提供关键数据支撑，从根本上提升高端装备的服役安全与维护保障水平。

（2）经济效益

降低全产业链成本：通过减少重复研发、降低质量争议、提升生产效率，将为材料供应商、传感器制造商及终端用户节约可观的综合成本。

提升产品附加值与市场竞争力：符合标准并经过权威测试认证的材料及传感器产品，将获得更高的市场信任度和品牌溢价能力，有助于企业开拓高端市场，提升国际竞争力。

创造新的市场与服务机会：标准的实施将催生对合规测试设备、第三方权威检测认证服务、标准物质开发等相关需求，形成新的经济增长点，促进高技术服务业发展。

（3）产业与社会效益

规范市场秩序，促进产业健康发展：为标准缺失导致的“劣币驱逐良币”现象提供解决方案，保护守规企业和优质产品，引导产业向高质量、规范化方向发展。

保障国家重大战略需求与装备安全：超高温传感器是航空发动机、重型燃气轮机、核电站等大国重器的“感知神经”。本标准通过夯实其核心元件的质量基础，直接服务于国家航空航天、能源安全等重大战略，提升关键装备的自主可控能力和运行可靠性。

培养专业人才，积累技术资产：标准的推广与应用过程，将系统性培养一批掌握超高温压电材料测试评价技术的专业人才。同时，长期积累的标准测试数据将成为行业宝贵的“数据资产”，为未来的智能研发与数字化设计奠定基础。

四、与现行相关法律、法规及相关标准的关系

（一）与国家标准的协调性

本标准作为一项专注于超高温振动传感器用压电晶体这一细分领域的团体标准，其制定过程高度重视与现行国家标准（GB）体系的协调与衔接，遵循“专业延伸、基础衔接、避免冲突”的原则，旨在成为国家现行标准体系的有益补充和特定技术领域的深化与细化。本标准第2章“规范性引用文件”中明确引用了多项关键国家标准，GB/T 3389、GB/T 31838：这些标准是压电陶瓷材料性能测试的基础。本标准中关于介电性能、准静态压电常数测试的原理与这些标准一脉相承。协调方式：本标准在引用其核心原理的基础上，针对超高温环境的特殊性，详细规定了为实现这些原理所必需的高温环境模拟、高温样品夹具、高温电极与信号引线等具体技术条件和操作细则，解决了基础标准在超高温场景下“如何实现”的问题。本标准在高温绝缘电阻率测试中采用了与GB/T 31838.2标准一致的原理，以确保体积电阻率测量的准确性。协调方式：本标准将该方法的实施环境明确拓展至 $\geq 650^{\circ}\text{C}$ 的高温，并规定了高温下测试电压的选择、绝缘保障等适应性要求。JJF 1059.1：本标准在数据记录与处理部分，明确要求依据此规范进行测量不确定度评定。这保证了本标准测试结果的计量溯源性及与国内其他计量、检测活动的可比性，是技术协调的基石。

《超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法》团体标准与现行国家标准体系是高度协调、有机互补的关系。它严格遵循国家标准的基础规范，深化和细化了在超高温这一特定应用场景下的测试技术，填补了现有国家标准的空白领域。本标准的实施不会与现行国家标准产生冲突，而是共同构成一个从基础材料到极端环境应用、从通用方法到专用技术的更加完善的标准体系，共同服务于产业技术进步和产品质量提升。

（二）与国际标准的一致性

本标准在制定过程中，充分研究并参考了相关的国际标准、国外先进标准及普遍接受的工程实践，致力于在遵循国际通用技术规则的基础上，针对我国产业的具体需求和技术特点进行制定。总体而言，本标准与相关国际标准在核心原理、基础方法论上保持一致，同时在应用范围的聚焦和技术细节的深化上具有特色和补充价值。本标准中关于电阻率、压电常数等核心参数的定义、物理意义及其在谐振状态下的计算公

式，完全遵循 IEEE Std 176 这一国际压电学界的权威基础标准。该标准是国际公认的压电材料参数定义与计算方法的基石，本标准的采用确保了数据在国际范围内的科学可比性和学术认可度。

（三）与法律法规的符合性

1. 《中华人民共和国标准化法》

符合团体标准制定要求，由行业协会或学会发布，内容未与强制性国家标准冲突，且填补了国家标准体系的技术空白。

2. 《计量法》及相关技术规范

校准方法的不确定度评估和实验验证符合 JJF 1059 的计量技术要求，确保数据可追溯性和法律效力。

（四）与行业需求的适配性补充现有标准的局限性

本标准的制定，根本驱动力在于解决当前国家标准及国际标准在应对前沿产业具体需求时存在的系统性局限。它并非对现有标准的简单否定，而是针对其未覆盖或规定不足的领域，进行精准、深入的补充与拓展，从而实现了与高端装备制造领域迫切需求的紧密适配。现有标准的主要局限性有以下几个方面：

1. 温度适用性的严重断层，现行主流国家标准（如 GB/T 2414 系列）及通用国际标准，其默认或核心关注的温度范围通常集中于室温至中低温（一般低于 300℃）。对于航空航天发动机热端部件（>800℃）、新一代核反应堆内部（>600℃）等应用场景，现有标准提供的测试方法在环境模拟、设备要求和数据修正方面完全缺失或严重不足，导致针对超高温压电晶体材料缺乏公认的评价标尺，研发和选型无据可依。

2. 对长期可靠性与失效机理关注的缺失，现有材料测试标准多以“单点性能”获取为目标，缺乏系统化的、标准化的加速老化与疲劳测试方法来预测材料在极端环境下的寿命与性能退化路径。使得传感器制造商和终端用户难以对产品的使用寿命进行定量化评估和可靠性设计，只能依赖保守的“过设计”或存在未知风险的“经验估算”。

本标准紧密围绕超高温传感器这一重大产业需求，精准识别并系统性弥补了现有标准体系在温度范围、测试场景综合性、长期可靠性评价以及产业协同性等方面的关键局限性。它不仅仅是一项技术规范，更是连接前沿材料研究与重大工程应用的桥梁和催化剂。通过提供一套科学、统一、可操作的测试方法，本标准将有力适配并牵引

行业向高质量、高可靠性方向发展，为我国在极端环境传感领域实现自主创新和产业升级提供坚实的技术基础。

（五）冲突与协调措施

在推动本标准实施的过程中，可能会与现有的行业习惯、企业内控标准或部分传统认知产生一定的冲突或分歧。本章节旨在识别这些潜在冲突，并提出切实可行的协调措施，以保障标准能够平稳、有效地被行业接受和应用。

1.潜在冲突分析

（1）测试方法与传统实践或企业标准的冲突，部分企业或研究机构可能已基于自身经验，建立了内部的高温压电测试方法。这些方法在升温程序、保温时间、电极处理或具体计算公式上可能与本标准的规定存在差异。

（2）设备投资与成本压力的冲突,本标准对高温温控箱控温精度、均温区、LCR测量仪频率范围及高温专用夹具提出了明确要求。对部分中小企业而言，购置或升级符合全部要求的设备可能带来较大的初期投资压力。

（3）“超高温”定义与部分材料/应用习惯的冲突，本标准明确将“超高温”起点定义为 650℃，并主要针对在此温度以上工作的晶体材料。而行业中部分应用于 300~500℃区间的改进型压电陶瓷或器件，其生产者或用户可能也希望参照此标准，从而在范围适用性上产生疑问。

（4）测试严格性与生产效率的冲突，标准规定的某些流程（如长时间保温以确保持热平衡、复杂的三电极法测电阻率）可能比一些企业现行的快速筛查方法更为耗时。

2.协调措施

为化解上述冲突，推动标准顺利实施，建议采取以下协调措施：

（1）实施“新事新法，旧事旧法”的过渡期与分级认证策略，设立一个合理的标准实施过渡期（一般 6 个月）。在过渡期内，鼓励企业对照本标准改造其内部测试方法。对于已有成熟内部方法并积累了大量历史数据的企业，可允许其在特定范围内（如内部过程控制）继续使用原有方法，但对外提供的认证数据、仲裁数据及新产品定型数据，应逐步过渡到采用本标准。

（2）提供“基础符合”与“高级符合”的弹性设备要求与解决方案，在标准宣贯和解读中，明确设备要求的核心是保证测量结果的准确度和不确定度。对于暂不具

备全部高端设备的企业，允许其采用经过严格校准与不确定度验证的等效或替代方案，但必须在测试报告中明确声明所用设备及方法，并评估其带来的附加不确定度。同时，鼓励第三方检测机构提供符合标准的委托测试服务，以降低中小企业门槛。

(3) 清晰界定与宣传标准的适用范围，鼓励派生标准的制定，在标准文本、编制说明及宣贯材料中，反复强调本标准针对的是“ $\geq 650^{\circ}\text{C}$ ”及“压电晶体”这一特定范畴。对于 $300\sim 500^{\circ}\text{C}$ 温区的材料，可明确说明其测试可参考本标准部分条款，但建议相关行业根据自身特点，以本标准为参考基础，制定更贴合的行业或团体标准。

五、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况

(一) 采用国际标准及与国外同类标准的对比分析

本标准在编制过程中，充分研究并参考了相关的国际标准与国外先进标准及技术文件。以下分析旨在阐明本标准与国际/国外标准的关系，并凸显本标准在特定技术领域的价值与特点。

本标准在基础原理、核心定义和通用方法论层面，实质性采用了公认的国际标准，确保了科学基础的普适性和国际可比性。本标准完全采纳了 IEEE Std 176 中关于压电方程、压电常数定义、机电耦合系数定义及其在谐振模式下计算公式的核心内容。目前国际上尚未发现一部完全同名、且范围和技术内容完全对应的公开标准。本标准的“同类标准”主要指在“压电材料测试”和“高温环境试验”两个交叉领域相关的国外先进标准或代表性技术实践。本标准并非对国际标准的简单翻译或套用，而是针对“超高温压电传感器用晶体材料”这一国际标准体系中的空白领域和前沿需求，进行了一次系统性的集成创新和工程化深化。它弥补了国外公开标准在应用温度极限、多物理场耦合测试方法、长期可靠性评价以及全产业链技术语言统一等方面的不足。

(二) 国际/国外同类标准关键指标对比分析

1. 本标准在“超高温”这一核心边界条件上实现了明确突破，系统化地填补了国际公开标准体系中 650°C 以上压电晶体专用测试方法的空白。

2. 在具体测试方法上，本标准更具针对性和问题解决能力，如采用准静态法解决高温 d_{33} 测量难题，优化高温电阻率测试参数，这些都是对国际通用方法在极端条件下的重要适应性创新。

3.本标准拓展了材料测试的评价维度，率先将长期老化性能的标准化测试纳入材料层级的标准，具有显著的前瞻性，回应了高端装备对可靠性的极致需求。

4.在可操作性上，本标准达到了更高的工程化水平，通过细化至耐高温电极、夹具等关键细节，将高深的技术从少数机构的“内部秘诀”转化为行业公共知识，有利于构建健康、开放的产业生态。

综上所述，本标准并非对国际标准的跟随，而是在其基础上的聚焦、深化与超越。它针对一个明确且前沿的产业需求，提出了一套更完整、更严谨、更可操作的解决方案，代表了中国在超高温压电传感材料测试这一细分领域，对国际标准体系做出的实质性贡献。

（三）国内外关键指标测试数据对比

为客观评估本标准所规范测试方法的有效性，并直观展现国内外在超高温压电晶体关键性能认知与技术水平的异同，本章节基于公开文献、行业报告及标准起草单位的验证数据，对若干核心材料的典型性能指标进行对比分析。

1.在高温介电常数、线热膨胀系数等本征物性参数上，依据本标准方法测得的国内数据与国外文献报道值高度吻合。

2.在高温电阻率和高温压电常数等强烈依赖于测试技术的参数上，国内实测数据表现出良好的集中性和合理性。例如对于 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ 晶体的高温电阻率，采用国家标准 GB5594.5 - 85《电子元器件结构材料性能测试方法体电阻率测试方法》进行测试，晶体在 700°C 时电阻率数值约为 $2.5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ，采用本标准测试为 $3.0 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ，并与文献报告相当，这表明本标准规定的“三电极法消除漏电”、等针对性措施是有效的，甚至在特定场景下可能获得比国内外通用方法更可靠、更一致的数据。

3.国外文献数据在某些参数（如 $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ 的热膨胀系数）上存在较大离散，这恰恰是测试方法不统一造成的。本标准通过统一测试条件、规范操作流程，旨在从根本上减少这种因测量方式不同而导致的数据不可比问题，为全球该领域的数据交流提供了一套可信的“普通话”。

国内外关键指标测试数据的对比分析表明，本标准所确立的测试方法体系不仅与国际认知接轨，更能通过更严谨、更具针对性的技术规定，获得高质量、可重复的测试数据。这既验证了本标准的技术可行性，也展示了其实施后对于提升我国超高温压

电材料评价水平、促进数据国际互认的重要意义。

六、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

该标准无密切相关专利等知识产权问题。

七、重大分歧意见的处理过程、处理意见及其依据

在标准编制过程中，起草组围绕技术参数、测试方法、设备要求等核心问题，与行业专家、企业代表及检测机构进行了多轮讨论，部分重大分歧及处理情况如下：

分歧：温度范围的确定争议背景

1. 企业诉求：部分传感器制造商（如广州航新胜声科技有限公司）建议将温度上限调整至 600℃，认为 1200℃ 工况应用场景有限，且设备成本过高。

2. 检测机构诉求：航空航天、国家计量院等单位（如北京 304 所）要求扩展至 1000℃，以满足超高温航空发动机等极端场景需求。

3. 处理过程：

（1）调研国内外主要超高温压电晶体（如 $\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$ 、 $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ 、 GaPO_4 等）的公开工作温度数据及典型应用场景（如航空发动机高温部位）。

（2）评估国内主流高温测试炉及计量设备的普及程度与最高使用温度。

（3）组织起草组内单位对现有材料进行 1000℃ 以上极限温度的性能摸底测试。

行业调研：据统计显示，800℃ 可覆盖 95% 的高温工业场景，1000℃ 需求目前仅占不足 5%。

4. 处理意见：

标准正文中明确核心测试范围覆盖 650℃ 至 1000℃。同时在“测试范围”（4.2）条款中增加说明：“测试温度范围通常建议不超过其居里温度以下 50℃，对于性能稳定的材料，经供需双方协商，测试温度可延伸至 1200℃”。

5. 技术依据：

（1）当前产业界对 $\geq 650^\circ\text{C}$ 且 $\leq 1000^\circ\text{C}$ 的测试需求最为迫切和集中。

（2）1000℃ 是商业高温炉和标准热电偶（S 型）广泛可靠工作的临界点。

（3）为未来技术发展预留了接口，保持了标准的适度前瞻性，避免了因追求过高指标而脱离当前产业实际。

八、实施标准的要求以及相关措施建议

为确保该团体标准的有效实施，需从技术准备、行业协作、监督管理等层面提出具体要求，并结合行业实际制定配套措施。以下是具体建议：

（一）实施标准的核心要求

为确保《超高温振动传感器用压电晶体性能测试方法》团体标准能够被准确理解、有效执行并发挥预期作用，各相关方在实施过程中必须满足以下核心要求：

1. 测试能力的体系化建设要求

实施单位需建立或完善与标准要求相匹配的系统化测试能力。这不仅是购置设备，更是构建一个受控的、可溯源的测量体系。核心包括：

（1）设备合规性：所有关键测量设备（高温温控箱、高阻计、力传感器等）必须满足标准第4章规定的精度、量程和环境适应性要求，并处于有效的检定/校准周期内，其量值需能溯源至国家计量基准。

（2）环境受控性：测试实验室的环境条件（温湿度、电磁干扰、机械振动）必须符合标准4.1的规定，并予以监控和记录。高温测试区域必须具备必要的安全防护与通风设施。

（3）人员专业性：操作人员必须经过系统的技术培训，深入理解标准原理、熟练掌握标准流程、能够辨识和处理常见干扰与异常，并具备基本的测量不确定度分析能力。关键岗位应实行资格认定。

2. 测试流程的标准化执行要求

（1）样品制备的规范性：必须严格按照标准4要求制备样品和电极。电极材料、厚度及处理工艺是保证测试数据有效性的前提，不得使用不符合要求的替代品。

（2）测试程序的严格性：必须严格遵守第5章各测试方法中规定的升温速率、保温时间、测试频率、激励电压、数据采集点等关键参数。特别是热平衡时间的保障，是获取准确高温数据的关键。

（3）原始数据的完整性：必须按照标准5.6的要求，完整、实时地记录所有测试原始数据、环境参数和设备状态信息，确保测试过程的可重现性和可追溯性。

3. 数据质量与报告的规范性要求

测试结果必须真实、准确、完整，并以标准化的形式呈现。

(1) 数据的有效处理，必须依据标准规定的公式进行计算，并按要求进行必要的系统本底扣除、热膨胀修正等数据处理。

(2) 不确定度的强制评估：每份测试报告都必须包含依据 JJF 1059.1 进行的测量不确定度评估，明确给出扩展不确定度及包含因子。这是衡量数据可靠度和实验室水平的核心指标。

(3) 报告的标准化出具：测试报告应使用标准推荐的模板，清晰包含样品信息、测试条件、最终结果、不确定度及结论。报告需经授权人员审核批准，并加盖检测专用章。采用区块链或电子标签技术记录校准过程，确保数据不可篡改，支持远程审核。

(二) 推动标准实施的关键措施建议

1. 技术推广与培训

(1) 宣贯培训：

由标准起草组联合行业协会，覆盖重点行业（如航空航天、新能源），帮助有关单位准确理解标准的适用范围、测试项目及评价要求。

(2) 制作标准化操作视频，通过线上平台免费开放。

2. 设备与资金支持

(1) 设备共享平台：

由地方政府牵头建立区域性校准中心，提供温控振动台等高价设备租赁服务（如按次收费，单次 ≤ 500 元）。

(2) 财政补贴：

对中小企业购置国产温控设备给予 30% ~ 50% 的补贴（参考《高端仪器进口替代专项扶持政策》）。

3. 行业协同与监督

(1) 跨机构比对：

每年组织全国实验室间比对测试，公布排名并督促落后机构整改。

(2) 认证挂钩：

将本标准的执行情况纳入 CNAS（中国合格评定国家认可委员会）实验室认可评审指标，未达标者暂停资质。

4. 标准动态维护

(1) 反馈机制:

开通标准问题反馈专用通道（如协会官网、微信公众号），每季度汇总技术争议与改进建议。

(2) 定期修订:

每 3-5 年组织一次标准修订，重点更新温度范围、校准方法（如补充高频测试）、设备要求等内容。

(三) 风险应对与争议解决

本标准的有效实施有赖于全行业的共同遵循与维护。为预防潜在风险、解决实施中可能出现的争议，确保标准的权威性和公正性，特制定本章。

1. 主要风险

(1) 测量结果不一致：不同实验室对同一样品测试结果差异超出合理范围，损害标准公信力。

(2) 方法误用或简化：操作人员未严格遵循标准流程（如缩短保温时间、使用非标电极），导致数据无效。

(3) 设备性能漂移：关键测试设备未及时校准，导致系统性误差。

2. 争议解决

(1) 组织实验室间比对：由标准归口单位或权威机构定期组织能力验证，识别并纠正系统偏差。

(2) 强化人员培训与资质确认：开展标准宣贯和专项技能培训，推行关键岗位上岗考核。

(3) 建立设备强制溯源与期间核查制度：要求所有出具合规性数据的设备必须在有效校准期内，并定期进行性能核查。

(四) 预期成效

1. 技术成效

(1) 从根本上解决当前行业因测试方法不一导致的性能数据混乱、不可比的核心痛点。为超高温压电晶体材料的性能评价提供科学、权威的基准，使研发、生产、应用各环节有了共同的“度量衡”。

(2) 推动国内测试实验室从依赖经验向遵循国际通行的科学规范转变。标准中

引入的准静态法、多场耦合理念，将整体提升行业材料表征技术的水平和严谨度。

(3) 标准化的评价体系为新材料的性能验证提供了快速通道，降低了研发验证的复杂度和成本，从而缩短从实验室发现到工程应用的周期，激发材料创新活力。

(4) 通过规范化的高温老化与性能演化测试，首次为超高温压电晶体建立了面向服役寿命的材料级可靠性数据库，为传感器的预测性健康管理和寿命设计提供不可或缺的输入。

2.经济收益

(1) 降低全产业链综合成本，减少各机构在测试方法探索上的重复投入。统一的质量评价标准将大幅减少因数据争议导致的复测、退货和合同纠纷等隐性成本，提升交易效率。基于可靠数据选型和设计的传感器，可降低因早期失效带来的高额维护与停机损失。

(2) 提升产品附加值与市场竞争力，符合本标准并通过权威测试的材料及传感器，将获得更高的市场信任度，有利于在航空航天、能源等高端市场实现进口替代和出口竞争，获取品牌溢价。

(3) 创造新的服务生态：标准的实施将催生对专业化第三方检测认证、标准样件开发、合规测试设备与服务的新需求，形成高技术服务增长点。

九、其他应当说明的事项

为保障本标准的顺利实施、持续改进及规范使用，特就以下未尽事宜进行说明。

(1) 标准归口与解释

本标准由山东科技咨询协会归口。本标准条文、附录及技术内容的最终解释权归本标准起草组及归口单位所有。任何单位或个人在执行本标准过程中遇到疑义，应提请归口单位组织协调或作出解释。

(2) 知识产权声明

本标准在制定过程中，参考或引用了部分已公开的国内外标准、文献及研究成果。本标准本身作为公开技术规范，不涉及专利等知识产权的授权。但标准实施过程中可能采用的具体技术、工艺或设备若涉及第三方知识产权，相关方应自行依法取得许可。归口单位不承担识别所有知识产权的责任。

(3) 与认证认可的关系

本标准的发布和实施，可为相关产品的认证认可活动提供依据。但本标准本身不等同于认证，认证机构在采信本标准时，可依据其认证规则增加附加要求。

《超高温压电传感器用晶体材料的性能测试方法》

团体标准起草组

2026年6月12日