综述

高温压电振动传感器及其压电材料研究进展*

余慧芬1) 祁核1)† 涂小牛2) 张海波3) 陈大力4) 吴捷5) 陈骏1)5)‡

1)(北京科技大学,北京材料基因工程高精尖创新中心,北京 100083)
 2)(中国科学院上海硅酸盐研究所,人工晶体研究中心,上海 201899)

3) (华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074)

4) (中国航空发动机集团有限公司,湖南动力机械研究所,株洲 412002)

5) (海南大学,海口 570228)

(2024年6月30日收到; 2024年11月12日收到修改稿)

压电振动传感器与其他振动传感技术相比具有频率范围宽、动态范围大、结构简单、工作可靠、体积小 等优点,在核电行业、航空航天、轨道交通及国防军工等多个领域有着广泛的应用.然而,随着振动测试技术 的飞速发展以及应用领域的不断拓宽,对压电振动传感器在极端环境中长时服役的可靠性提出了更高要求, 如何提高压电振动传感器的服役温度满足极端环境下的应用需求是目前迫切解决的问题.本文综述了高温 压电传感技术应用场景和工作原理,讨论了常见的高温压电陶瓷和晶体材料,系统地总结了现有的压电振动 传感器工作模式、不同类型压电振动传感器结构及传感器振动校准装置,重点介绍了近年来国内外高温振动 传感器的研究进展.在此基础上,探讨了高温压电振动传感器当前面临的问题及未来发展趋势,为开发下一 代极端环境应用的超高温振动传感器提供了思路,有望促进国内高温压电振动传感技术的进一步研究.

关键词:振动传感器,高温压电材料,振动模式,振动校准装置 PACS: 77.55.-g,77.65.Dq,77.84.-s,77.84.Cg

DOI: 10.7498/aps.74.20240906

1 引 言

传感器技术广泛应用于生活中各种变化物理量的测量,并将其转化成电信号输出,是现代检测技术的重要组成部分,也是获取信息的重要手段^[1].加速度振动传感器(也称加速度计)是一种能够采集被测物体振动加速度的传感器,在其工作线性范围内,传感器产生的电信号与所需检测的加速度值成正比.根据振动传感器敏感元件的不同,可分为应变式^[2]、电容式^[3]、电感式^[4]、压阻式^[5]、谐振式^[6]及压电式^[7]等多种类型,其中压电式加速度传感器

CSTR: 32037.14.aps.74.20240906

具有出色的动态响应和线性度、频带宽、灵敏度 高、温度范围大、结构简单、性能稳定等优势, 广泛 应用于各种领域, 成为目前主流的振动传感器^[8].

随着测试技术的发展和测试要求的提高,在核 电行业、航空航天、交通、国防和工业等领域都用 到压电振动传感器进行振动测量,如图1所示.大 多数压电振动传感器的使用温度限制在500℃以 下,能够满足一般的振动测量需求,然而极端情况 下某些测试需求的温度高达1000℃以上,这就要 用到超高温压电加速度计^[9-12].在核电行业中,为 保障核电机组的结构安全需要大量的振动传感器 对核反应堆振动情况进行健康监测,因此要求压电

^{*} 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3204000) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qiheustb@ustb.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: junchen@ustb.edu.cn

^{© 2025} 中国物理学会 Chinese Physical Society



图 1 高温振动传感器应用场景 Fig. 1. Application scenarios of high-temperature vibration sensors.

振动传感器能在核反应堆内部高温、高真空、强辐 射环境下稳定工作[13,14]. 在航空航天领域,发动机 是飞机的核心部件,其性能和可靠性直接影响飞机 的飞行状况,为了实时获取发动机的振动状况信 息,需要压电振动传感器进行监测[15,16].发动机的 工作环境通常为高温、高压、高转速,这对压电振 动传感器的性能稳定性提出苛刻要求[17,18]. 国防领 域也需要应用高温加速度传感器,如高超声速飞行 器、军用飞机、导弹等设备在高速飞行过程中会与 空气摩擦生热,表面温度急剧升高,且在长时间飞 行过程中,机翼或金属外壳等部件会发生剧烈振 动,为了保证飞行安全需要高温压电振动传感器对 飞行状况实时监测[19-22]. 在汽车燃烧系统中要使 用高温压电振动传感器记录发动机的振动情况以 监测内燃机的效率和可靠性[23,24]. 在工业领域, 随 着自动化程度的不断提高,可以利用压电振动传感 器测量机械设备各组件的动态响应、监测运行状态 并展开故障分析和预测性维护.例如机器主轴、传 送带、分拣台和机床等设备可以通过分析振动信号 携带的信息判断是否存在缺陷和隐患,这种使用压 电振动传感器进行的无损监测,不仅能有效地维护 设备,还能显著地节约成本[18,25].因此,高温压电

振动传感器在许多行业和领域都有迫切需求.

高温压电振动传感器的研究始于 20 世纪 50 年 代,目前国外一些公司已能生产性能稳定成熟的高 温压电振动传感器产品,最高使用温度可达 815 ℃. 而国内关于高温压电振动传感器的研究起步较国 外晚二十年,当前仅具备 260 ℃ 和 482 ℃ 两种系 列传感器的批量生产能力,虽然已开发出最高使用 温度达 649 ℃ 的传感器,但还未能大批量应用,因 此国内使用的超高温压电振动传感器产品基本上 依赖于进口^[8,26-31].为了满足国内对高温压电振动 传感器的迫切需求,自主研发设计具有高灵敏度、 宽频响、高可靠性和稳定性的超高温压电振动传感 器具有重要意义.

2 压电振动传感器的工作原理

压电振动传感器通常由质量块、压电元件、弹 性元件和适调电路等组成^[32],一般采用磁吸、胶 粘、螺钉固定等方式连接在待测物体上.当待测物 体振动时,压电振动传感器的基座也会随之振动. 由于质量块的作用,压电材料会受到与待测物体振 动方向相反的惯性力,发生压电效应,在压电元件 两个表面产生异号电荷,进而形成电势差^[33].通过 导线将压电振动传感器的感应电荷传输到电荷放 大器进行放大并转换成电压信号,经计算机控制的 信号采集器高效实时采集,并对数据分析处理从而 得到被测物体的振动加速度.图2是压电振动传感 器的动态响应模型图,该系统由质量-弹簧-阻尼结 构和位移传感器组成,振动质量块通过弹簧和阻尼 元件附接到传感器壳体上,模拟了在激振器加速度 *x*_i作用下质量块和激振器之间相对位移*x*₀的频率 响应,振动系统的微分方程如下所示^[34,35]:

$$m\ddot{x}_i = m\ddot{x}_0 + c\dot{x}_0 + kx_0,\tag{1}$$

式中 m, c和 k分别为质量块质量, 阻尼系数和弹 性常数, 假设初始条件为 $x_0(0) = 0, \dot{x}_0(0) = 0,$ 通 过 (1) 式的拉普拉斯变换可以得到机械传递函数:

$$G_m(s) = \frac{x_0(s)}{\ddot{x}_i(s)} = S_m \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}, \quad (2)$$

其中 w_n 是结构的谐振频率; ζ 是阻尼比; S_m 是机 械灵敏度, 可由下式计算:

$$w_n = \sqrt{k/m},\tag{3}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}},\tag{4}$$

$$S_m = m/k. (5)$$

从谐振频率 w_n 与机械灵敏度 S_m 的表达式可以看 出二者存在负相关关系,所以在设计传感器时需要 在增大谐振频率拓宽工作频率带宽和增大灵敏度 提高传感器分辨率之间权衡.



图 2 压电振动传感器的典型系统模型 Fig. 2. Typical system model of piezoelectric vibration sensors.

传感器的电传输系统包括压电传感器、连接电缆和电荷放大器,图 3(a)为压电振动传感器系统的电路图.在电传输系统中,传感器的输出电荷与质量块和激振器之间的相对位移的关系为

$$Q = K_{\mathsf{q}} x_0, \tag{6}$$

其中 K_q是单位位移的电荷输出量.图 3(b)为简化的压电振动传感器系统等效电路图,等效模型中的电容和电阻关系及电气系统控制方程如下:

$$R = \frac{R_{\text{ampl}} R_{\text{leak}}}{R_{\text{ampl}} + R_{\text{leak}}} \cong R_{\text{ampl}}, \tag{7}$$

$$C = C_{\rm pzt} + C_{\rm wire} + C_{\rm ampl}, \qquad (8)$$

$$\dot{e}_0 = \frac{K_q}{C} \dot{x}_0 - \frac{e_0}{\tau},$$
(9)

其中 R_{ampl} 为放大器电阻; R_{leak} 为压电元件电阻, R_{leak} 通常比 R_{ampl} 大得多; C_{pzt} , C_{wire} , C_{ampl} 分别为 压电元件、导线和放大器电容; e_0 为传感器的输出 电压, τ 为RC时间常数.将上式进行拉普拉斯变 换即可得到相对位移和输出电压之间关系的电气 传递函数:

$$G_{\rm e}({\rm s}) = \frac{e_0(s)}{x_0(s)} = S_{\rm e} \frac{\tau s}{\tau s + 1},$$
 (10)

其中Se是电学灵敏度,可由下式计算:

$$S_{\rm e} = K_{\rm q}/C. \tag{11}$$

将机械传递函数与电气传递函数结合,得到完整的 传感器系统动态响应模型:

$$\frac{e_0(s)}{\ddot{x}_i(s)} = S_{\rm T} \frac{\tau s}{\tau s+1} \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2}, \qquad (12)$$

其中 $S_{\rm T}$ 为传感器的灵敏度,数值上等于机械灵敏 度与电学灵敏度的乘积. 压电振动传感器频率响应 的典型范围在 $3/\tau \, n \, w_n/5$ 之间. 低频响应受压电 传感器的 RC时间常数 τ 限制,而高频范围则受机 械谐振频率 w_n 的限制. 压电特性 $K_{\rm q}/C$ 和结构特 性 $1/w_n^2$ 决定了加速度传感器的灵敏度. 因此,在高 频响应和高灵敏度之间需要折中.



图 3 压电振动传感器系统 (a) 电路图; (b) 等效电路图 Fig. 3. Piezoelectric vibration sensor system: (a) Circuit diagram; (b) equivalent circuit diagram.

3 高温压电材料

压电振动传感器是基于压电材料的压电效应 制成的,一般情况下,压电材料的最高使用温度不 能超过居里温度的一半^[36,37].为了确保传感器能在 极端环境中稳定工作并保持良好的灵敏度,必须选 择高居里温度、高压电常数、高电阻率和低介电损 耗的压电材料作为传感器的敏感元件^[33,38].目前常 用的高温压电材料有压电陶瓷和压电单晶.高温压 电陶瓷材料具有高压电活性和高动态响应速度,制 备成本低,可大规模生产,是最受商业欢迎的传感 元件^[33].高温压电晶体的电阻率和高温可耐受性 远高于压电陶瓷材料,但生长工艺复杂,成本相对 较高,抗冲击性差,压电常数相对较小,这些缺点 限制了单晶加速度计设计的灵活性^[23].

3.1 高温压电陶瓷

最常研究的压电陶瓷材料主要有钙钛矿型、铋 层状型和钨青铜型等^[39], 经过特定的组分设计和 工艺处理, 大部分能应用于高温压电领域. 钙钛矿 是一种复合金属氧化物, 结构如图 4(a) 所示^[40], 化 学通式为 *AB*O₃. PbTiO₃(PT) 是一种常用铅基钙 钛矿结构压电陶瓷, 居里温度 490 ℃, 具有高极化 强度. 纯 PbTiO₃ 陶瓷烧结困难, 在降温冷却过程 中由于相变产生的应力易导致陶瓷内部出现裂纹. 将 PbTiO₃ 和 PbZrO₃ 进行固溶, 即可得到商用陶

瓷锆钛酸铅 PbZrO3-PbTiO3(PZT). PZT 不仅具 有出色的压电、介电性能,而且制备工艺简单成熟, 成本低廉,成功占据压电陶瓷的主要应用市场,但 居里温度较低仅有 386 ℃, 使用温度上限很难超 过 300 ℃, 限制了其在超高温领域中的应用^[41,42]. 2001年,具有高居里温度的 Bi(Me)O3-PbTiO3 钙 钛矿体系被首次报道^[43],其中 Me³⁺是半径相对较 大的 Sc³⁺, Y³⁺, Fe³⁺, Ga³⁺, Yb³⁺, In³⁺等离子. 随 着 Me3+离子半径的降低, 容差因子减小, 晶格畸变 增大,居里温度会升高,同时需要与更多的PbTiO3 才能形成准同型相界 (MPB), MPB 处的居里温度 也越高,如 BiYbO₃-PbTiO₃的 $T_{\rm C}$ 约为 650 °C, BiInO₃-PbTiO₃的 T_C约为 550 ℃, Bi(Mg_{1/2}Ti_{1/2}) O₃-PbTiO₃的 T_C约为 480 ℃. 但这些含铋钙钛矿 的压电常数通常较低,一般小于 200 pC/N. BiScO3-PbTiO₃(BS-PT)体系在 MPB 附近时表现出优异 的综合压电性能,居里温度可达450℃,压电常数 d33 为 460 pC/N, 介电常数达到 2000, 机电耦合系 数为 0.56^[43]. 通过化学改性、制备与烧结工艺优 化, 可以将 BS-PT 基陶瓷的居里温度和压电常数 分别提升至 500 ℃ 与 700 pC/N 以上^[44-46], 但由于 机械品质因子小、制备成本高且含有害元素 Pb 等 问题,限制了其使用范围. BiFeO3 具有高达 827 ℃ 的居里温度以及 100 μC/cm² 的极化强度使其成为 最具潜力的高温钙钛矿材料之一^[46-48].将 BaTiO₃ 与高居里温度的 BiFeO3 固溶, 掺杂 Mn 元素后制 备出 BiFeO₃-BaTiO₃(BF-BT) 陶瓷, 压电常数 d₃₃



图 4 (a) ABO₃ 钙钛矿结构示意图^[40]; (b) 钨青铜沿着 c 轴的结构示意图^[40]; (c) 铋层状结构氧化物的示意图^[40];

Fig. 4. (a) Schematic representation of the structure of ABO_3 perovskite^[40]; (b) schematic representation of the structure of tungsten bronze along the *c*-axis^[40]; (c) schematic representation of bismuth layered structural oxides^[40].

可达 116 pC/N, 居里温度能达到 619 ℃^[49-51]. 此外, 通过高温淬火工艺消除缺陷偶极子钉扎效应,可以 在 BF-BT-BiGaO3 陶瓷中获得 d33 约为 402 pC/N 和 $T_{\rm C}$ 约为 454 ℃ 的优异综合压电性能^[52]. 然而, 淬火工艺稳定性较差,且热震会在样品内部形成微 裂纹从而降低样品的机械性能,不适用于工业应 用. 在 BiFeO3-PbZrO3(BF-PT) 中掺杂稀土 Nd 元 素, 可将居里温度提升到 560 ℃^[53], 或者增加 PbZrO3 组元制备 BiFeO3-PbZrO3-PbTiO3 压电陶瓷, 居 里温度也能达到 560 ℃^[54]. 为突破压电常数与居里 温度间相互制约关系, Sun 等^[55]在 BiFeO₃-BaTiO₃-PbTiO₃ 三元体系中的三相点附近获得了具有大轴 比多级纳米畴的四方相结构,其在电场下会不可逆 的重构为三方-四方共存结构,从而获得了 daa 约 为 380 pC/N 和 T_C 约为 483 ℃ 的优异综合性能, 与此同时,该材料含铅量低且不需淬火等复杂工 艺,使得它在高温钙钛矿材料中展现出明显的优 势. 在可持续发展的大环境背景下, K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ (KNN)和 Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃(BNT)等环境友好型无 铅压电陶瓷成为研究的热点[56-59]. 但由于碱金属 元素高温易挥发,无铅压电陶瓷的压电性能和居里 温度较低、矫顽场高、机械加工性能差等限制了实 际应用[60]. 研究人员通过各种掺杂取代、引入新组 元及改善烧结条件的方法对其压电性能进行优化, 已取得不错的成果,然而对于提升居里温度的研究 较少,因此高温应用困难[57,58,61-66].

钨青铜结构化合物是仅次于钙钛矿结构的第 二大类铁电体, 化学通式为 $[(A_1)_2(A_2)_4C_4][(B_1)_2]$ $(B_2)_8]O_{30}$,其中 A 和 B 分别位于氧八面体形成的 间隙和氧八面体中心位置,结构如图 4(b) 所示^[40]. 钨青铜结构压电材料具有高居里温度、大自发极 化、低介电常数和良好的热释电性,但烧结密度 低、温度稳定性差等缺点限制了其使用. 偏铌酸铅 (PbNb₂O₆) 是最早发现的钨青铜结构铁电体, 居里 温度为 570 ℃,具有很强的抗退极化性能和较大 的压电常数各向异性,同时存在压电性能差、机电 耦合系数较低和烧结困难等缺点[67,68]. 现有的报道 常通过掺杂改性及工艺改进的手段提高 PbNb2O6 的压电特性和烧结性能. 偏铌酸铅中掺杂 Bi 和 Ti元素能使电学性能得到优化,压电常数达到 92 pC/N, 居里温度 T_C达到 593 ℃, 显著改善了 材料结构和压电性能的热稳定性^[69]. 通过用 Ba²⁺ 取代 PbNb₂O₆ 中 Pb²⁺, 并分别掺杂 Cr₂O₃, Y₂O₃, Sm₂O₃, Nd₂O₃和 CeO₂等不同化合物, 能使压电 性能和工艺稳定性均得到提高,居里温度达到 了 420—600 ℃^[70]. 在 PbNb₂O₆ 中掺杂 CuO 作为 烧结助剂,使陶瓷体密度显著提高11%,压电常 数 d₃₃提高到 190 pC/N^[71]. 在改进工艺方面, 可 以采用溶胶-凝胶法及两段式热处理法得到高密 度 PbNb₂O₆^[72]; 或是使用脉冲热处理技术保持 PbNb2O6 正交铁电相的稳定性[73];也可以运用模 板生长法控制 PbNb2O6 陶瓷晶粒取向保持高居里 温度[74]; 或是采用分层生长法制备出具有合适织 构度的晶粒取向 PbNb₂O₆^[75]. 使用这些工艺制备 的偏铌酸铅陶瓷相比于传统陶瓷来说,能有效提 升压电铁电性能. 除此之外, 在 A 位引入适量空位 缺陷能有效提高 PbNb₂O₆的介电和压电性能. Fang 等^[76] 在 PbNb₂O₆ 中通过非化学计量掺杂引 入 A 位空位, 有效地抑制晶粒异常长大, 在保持较 高 T_C (543 ℃) 的情况下, 将介电常数 ε_r 从 197 提 升到 523, 压电常数 d33 从 30 增加到 83 pC/N. 现 有的使用偏铌酸铅基压电陶瓷材料作为敏感元件 的加速度计使用温度范围可达 480 ℃.

高温应用最具潜力的压电陶瓷材料是铋层状 结构氧化物,它是由一个 $(A_{m-1}B_mO_{3m+1})^2$ 类钙钛 矿层与一个(Bi₂O₂)²⁺类萤石的氧化铋层沿 c 轴方向 有规律的交替排列而成,其中 A 为具有 12 配位的 +1,+2,+3价离子或它们的组合,B通常是适合于 八面体配位的阳离子, m 为整数, 是相邻 (Bi₂O₂)²⁺ 层之间的氧八面体层数,其值一般为1-5,结构如 图 4(c) 所示^[40]. 铋层状结构压电陶瓷材料种类繁 多,到目前为止,已报道50多种,具有高居里温 度、良好的温度稳定性、大自发极化、低介电常数、 高电阻率、高机械品质因数、低老化率等优点. 它 们的居里温度差别很大,一般而言 m 值越大居里 温度越低. 居里温度在 400 ℃ 以下的铋层状结构 压电陶瓷,压电性能远低于 BS-PT, KNN 基等压 电陶瓷体系.因此,对铋层状结构压电陶瓷的研究 多集中于具有较高居里温度的铋层状结构体系.按 居里温度高低, 主要分为三个系列: T_C 约为 600 ℃, $T_{\rm C}$ 约为800 °C, $T_{\rm C}$ 约为900 °C, 比如 m = 3的 Bi₄ $Ti_{3}O_{12}(T_{C}$ 约为600°C), m = 4的 Na_{0.5}Bi_{4.5}Ti₄O₁₅ $(T_{\rm C}$ 约为 600 °C), m = 4 的 CaBi₄Ti₄O₁₅ $(T_{\rm C}$ 约为 800 °C), m = 2的 CaBi₂Nb₂O₉($T_{\rm C}$ 约为 900 °C) 和 m = 2的 Bi₃TiNbO₉($T_{\rm C}$ 约为 900 ℃)^[77]. 然而, 铋层状结构压电陶瓷作为高温压电材料,存在诸多

问题,一是其特殊的晶体结构使自发极化的转向受 限于 a-b 面,导致压电常数 d₃₃ 较低^[78];二是其高 的矫顽场 Ec 不利于极化; 三是陶瓷在高温烧结过 程中, Bi 元素的挥发会导致组成偏离化学计量比. 为了提高铋层状压电陶瓷的压电性能,现阶段主要 采取以下几种方法:一种是掺杂改性,包括 A 位、 B位、AB位掺杂以及形成固溶体.掺杂可以引起 相结构转变,改变结构畸变大小,增大理论自发极 化强度,降低 E_C,降低体系内的氧空位进而减小介 电损耗、增强绝缘性能,增大击穿场强,提高铁电 压电等电学性能. Long 等^[79] 用稀土元素 Ce/Nd 和Li 共掺 Na_{0.5}Bi_{2.5}Nb₂O₉, 压电性能可以分别提 高到 31 pC/N 和 29 pC/N. 另一种是优化工艺, 比 如通过一些特殊的工艺处理控制晶粒的生长取向, 包括模板晶粒生长、火花等离子烧结、热压烧结等 方法,从而得到织构化的陶瓷. Li 等^[80] 使用模板晶 粒生长法得到高织构度 (98%) 的 Ca_{0.85}(LiCe)_{0.075} Bi4Ti4O15 压电陶瓷, 压电常数 d33 提升到了 33 pC/N. 铋层状压电陶瓷织构化可以使其具备高度的各向 异性,大大增强压电性能.或者还可以添加烧结助 剂,能在低于常规烧结温度下引入液相,降低陶瓷 的烧结温度, 避免 Bi 元素大量挥发, 也能引起铋 层状压电陶瓷晶胞参数的变化,进而影响其电学 性能. Pan 等^[81] 在制备 CaBi₂Nb₂O₀(CBN) 陶瓷 的过程中添加 B₂O₃ 作为烧结助剂, 引起了晶格 畸变和自发极化强度的增加,同时诱导出了一定 的(001)取向织构,提升了其压电性能(d₃₃约为 20.4 pC/N) 和电阻率. 总体而言, 铋层状结构氧化 物居里温度高,适合作为高温压电陶瓷材料应用, Endevco公司曾发布一款使用堆叠 CaBi₂Nb₂O₀ 陶瓷作为传感器敏感元件的加速度计样机,灵敏度 达到 4 pC/g, 可在 630 ℃ 高温下持续工作, 在较 宽温度范围内的热偏差约为10%[82].

图 5 对比了不同体系陶瓷的压电常数 *d*₃₃ 与居 里温度 *T*_C 之间的关系,可以看出大部分铅基陶瓷 的压电常数很高,但其居里温度低; BNT, KNN 等无 铅压电陶瓷经过掺杂改性后压电常数较高,居里温 度仍偏低,这些压电陶瓷材料使用温度往往低于 500 ℃,属于中低温压电材料范畴.BS-PT, BF-PT, BF-BT 等压电陶瓷具备较高的居里温度,压电性 能良好,普遍应用于高温传感器和驱动器^[44,83,84]; 钨 青铜结构压电陶瓷压电常数较高,但居里温度适 中,介电损耗大且容易老化; 铋层状结构压电陶瓷 虽然压电活性偏低 (约 20 pC/N), 但居里温度通 常在 500—1000 ℃ 之间, 普遍高于其他压电陶瓷, 具 有广泛应用于高温压电振动传感器的潜力^[77,85,86].



图 5 压电陶瓷的压电常数 d_{33} 与居里温度 $T_{\rm C}$ 关系图 Fig. 5. The relationship between piezoelectric constant d_{33} and Curie temperature $T_{\rm C}$ of the piezoelectric ceramics.

3.2 高温压电单晶

高温压电单晶是高温压电材料的重要组成部 分,压电晶体的性能稳定、均匀性好、居里温度高, 有些压电晶体甚至在熔化前不会发生相变,因此广 泛应用于高温压电领域.目前常见的高温压电单晶 材料有石英、电气石、黄长石、磷酸镓、铌酸锂、氮 化铝、硅酸镓镧系列、硅酸钛钡和硼酸氧钙稀土系 列晶体等.

石英晶体是最早被使用的压电材料, 主要成分 为 SiO₂. 它的化学物理性能稳定, 机械品质因子高, 电阻率良好 (室温可达 10¹⁷ Ω·cm), 机械损耗和介 电损耗低, 熔点高 (1750 ℃), 可以用水热法人工合 成, 制备成本低^[87]. 石英晶体元件能在宽的温度范 围内稳定工作, 热释电输出很低, 但最高应用温度 仅在 300 ℃, 高于此温度会有机械孪生发生, 介电 损耗增高且压电性能降低, 573 ℃ 时会发生结构相 变, 870 ℃ 时压电性能消失, 所以在高温压电领域 的应用受到限制^[88].

电气石是第一种被发现具有压电效应的材料, 属于三方晶系,化学通式为*XY*₃*Z*₆Si₆O₁₈(*B*O₃)₃*W*₄, 成分复杂.它具有良好的电阻率,1000 ℃时可达 10⁶ Ω·cm,熔点介于1105—1725 ℃之间,在熔点 之前没有相变和孪生,但会受到强烈的热电效应. 电气石的压电常数较低,仅在1.1—3.4 pC/N.由 于成分复杂且是天然晶体,很难人工合成,目前人 工生长的方法还在进一步摸索中^[89]. 矿物质黄长石是丰富的固溶体,存在于火成 岩、变质岩、陨石和高温炉炉渣中.黄长石的晶体 结构为四方对称,空间群为P42₁m.它的化学组成 范围很广,化学通式为(A₁A₂)₂{(B₁B₂)(C₁C₂)}₃O₇, 采用提拉法可以很容易生长出黄长石晶体^[90,91].黄 长石在 500 ℃以内具有优异的压电性能、弹性性 能和高电阻率,是高温压电传感应用的良好候选材 料^[90,92,93].

GaPO₄ 晶体性能良好, 具有高电阻率、高机械 品质因数、高机电耦合系数和良好的压电性能, 但 970 ℃ 左右时会发生相变^[94], 机械品质因数下降, 使工作温度限制在 700 ℃ 以下. GaPO₄ 晶体可用 高温助熔剂法制备, 但由于原料成本高, 生长困难, 可生产的晶体尺寸小限制了其高温应用^[95,96].

铁电晶体 LiNbO₃ 具有较高压电常数 (d_{15} 可 达 75 pC/N) 和高的机电耦合系数 0.6, 居里温度 高达 1150 ℃^[97], 用提拉法易于生长制备大尺寸单 晶, 但高温损耗大且电阻率降低, 600 ℃ 电阻率只 有 10⁶ Ω·cm, 使其应用温度限制在 600 ℃ 以下. 最近有研究表明如果能提高该晶体的高温电阻率, LiNbO₃ 有望应用于 600 ℃ 以上的环境中^[98].

AlN 为六方纤锌矿结构, 压电性能优异, 具有 高电阻率和高介电性能, 熔点很高, 可达 2200 ℃, 且从室温到熔点不存在相变^[99]. 通常采用物理气 相传输法制备, 故晶体中缺陷比较多, 难以获得大 尺寸优质单晶^[100,101].

硅酸镓镧 La3Ga5SiO14(LGS) 系列晶体化学通 式为 A₃BC₃D₉O₁₄ (又称 ABCD 结构), 属于三方 晶系^[102],不具有热电性,压电性能较好(d₃₃为4-7 pC/N), 稳定性高, 熔点最高达 1500 ℃, 采用提 拉法很容易生长出大尺寸晶体,但在高温下电阻率 较低,使用范围限制在800 ℃以下[103].目前,可以通 过掺杂改性和有序化晶体的方法提升 LGS 晶体 的性能[104-106]. 通过不同阳离子元素取代可获得 $La_{3}Nb_{0.5}Ga_{5.5}O_{14}(LGN)$ 和 $La_{3}Ta_{0.5}Ga_{5.5}O_{14}(LGT)$ 等无序型晶体,它们具有与 LGS 相当的优异压电 性能,但高温电阻率仅有限提高^[107-109].有序型 Ca₃TaGa₃Si₂O₁₄(CTGS) 晶体的高温电阻率相较 于无序型晶体有大幅提升,同时介电和机电性能的 热稳定性良好. 目前研究人员已制备了大量有序化 晶体,如Ca₃NbGa₃Si₂O₁₄(CNGS),Ca₃TaAl₃Si₂O₁₄ $(CTAS), Sr_3TaGa_3Si_2O_{14}(STGS), Sr_3NbGa_3Si_2O_{14}$ (SNGS)等,并证明了结构有序型晶体较无序型晶

体具有更好的高温电学性能,已成为高温压电晶体 材料的研究热点.

Ba₂TiSi₂O₈(BTS) 晶体属于四方晶系, 在熔点 1445 ℃ 之前没有发生结构相变, 具有良好的热稳定 性和高压电常数, 剪切压电常数 d_{15} 达到 18 pC/N, 600 ℃ 时沿 Z 轴方向的电阻率大于 10⁹ Ω·cm, 介 电常数高 (1 kHz 可达到 5000), 介电损耗低 (<4%), 可采用提拉法进行生长, 是高温传感应用的潜在候 选者^[110,111].

硼酸氧钙稀土类晶体 ReCa₄O(BO₃)₃(ReCOB) 属于单斜晶系,不存在对称中心^[112],具有良好的高 温压电性能、高机电耦合系数、高电阻率^[113],熔点 高达 1500 ℃,能在 1000 ℃ 高温环境中稳定工作, 可以通过提拉法生长高质量大尺寸晶体^[114],是超 高温传感应用的理想材料.其中,硼酸氧钙钇晶 体 YCa₄O(BO₃)₃(YCOB) 压电常数 d_{15} 达到 6— 10 pC/N,机械品质因数高达 10000 以上,介电损 耗低 (<0.1%)^[115], 1000 ℃ 时的电阻达到 10 MΩ, 比 LGS 晶体高了 2—3 个数量级^[116],已被用于制 作超高温振动传感器.

图 6(a) 总结了这些常见的高温压电单晶材料 压电常数 daa 与居里温度或熔点之间的关系, 可以 看出单晶压电常数基本不高. 对于高温压电材料来 说,实际最高使用温度受材料居里温度或相变温 度、熔点、电阻率、压电性能稳定性、介电损耗等因 素的影响.其中,电阻率尤为重要,压电材料的电 阻率会随着温度的升高而降低,当电阻率低于 10⁶ Ω·cm 时将直接导致传感器失效. 图 6(c) 和 图 6(d) 为高温压电晶体电阻率随温度的变化情况, 电阻率最高的是 ReCOB 类晶体, 基本上在 1000 ℃ 时电阻率仍保持在 10⁷ Ω·cm 以上^[117,118], 能应用 于 1000 ℃ 以上温度, 是最具应用潜力的超高温压 电材料. 图 6(b) 反映了不同压电材料的最大使用 温度范围,其中红色条纹部分表示相变温度或熔化 温度,紫色条纹部分表示可使用的温度范围[119],可 以发现, LiNbO3 晶体虽然居里温度超过 1150 ℃, 但由于电阻率较低,使用温度只能控制在 600 ℃ 以下; GaPO4 晶体具有较高的电阻率, 但其相变温 度限制在 970 ℃; 电气石熔点高且具有良好的电 阻率, 最高使用温度可达 1000 ℃, 但化学成分复 杂,人工合成困难,限制了其应用;虽然 LGS 晶体 在熔化之前不会发生相变,但电阻率的下降将使用 温度限制在 800 ℃ 以下; ReCOB 晶体综合性能最



图 6 (a) 单晶压电常数 d₃₃ 与居里温度/相变温度/熔点 T_{max} 关系图^[119]; (b) 不同压电材料最大使用温度范围^[119]; (c), (d) 高温 压电晶体电阻率随温度的变化^[117,118]

Fig. 6. (a) Plot of single crystal piezoelectric constant d_{33} versus Curie temperature/phase transition temperature/melting point $T_{\max}^{[119]}$; (b) maximum operating temperature range of different piezoelectric materials^[119]; (c), (d) variation of electrical resistivity of high-temperature piezoelectric crystals as a function of temperature^[117,118].

好,在1200—1300 ℃的温度范围内,电阻率保持在 10⁶ Ω·cm 左右,可用作超高温压电振动传感器的 敏感元件^[85,120].

4 压电振动传感器模式

压电振动传感器相较于其他压阻式、电容式、 应变式传感器,具有更好的线性度、长效稳定性和 动态测试特性,受到越来越广泛的关注.根据不同 应用场景的需求特性不同,压电振动传感器主要有 三种设计结构:弯曲模式(悬臂梁式)、压缩模式和 剪切模式^[34],图7展示了压电振动传感器三种模 式的结构简图.弯曲模式设计是由附在梁型质量块 的压电元件组成的,重量轻、灵敏度高、响应速度 快、分辨率高、背底噪声低、易于微型化集成,能够 实现微米级尺度微弱信号的高速度和高精度实时 检测,广泛用于需要测量低频和低加速度信号的工 作场景^[121,122].但由于压电材料存在固有的电荷泄漏现象,影响了弯曲模式传感器测量准静态微尺度力的精度^[123],整体结构比较脆弱,频率范围比较窄.压缩模式传感器结构简单、加工便捷、制作成本低,同时具有较高的强度、刚度,表现出更高的共振频率和更宽的频带,能承受高水平瞬态振动,但它的压电元件位于底座和质量块之间,振动信号直接通过底座作用于压电片,因此对外界力和温度



图 7 压电振动传感器三种基本结构 (a) 弯曲型; (b) 压 缩型; (c) 剪切型

Fig. 7. Three basic structures of piezoelectric vibration sensors: (a) Bending mode; (b) compression mode; (c) shear mode.

的变化更加敏感,底座的弯曲或热膨胀容易引起较 大测量误差,背底噪声高,横向灵敏度大,抗干扰 能力较差.剪切模式传感器结构较为复杂,它的压 电片与基座之间由于中心柱的作用多了一个缓冲 区域,压电片垂直于底座固定,与底座不直接接触, 抗干扰能力强,宽温度范围内的性能稳定.这种结 构提供了高电荷输出,有效地提高了传感器的灵敏 度,但也存在固有频率低、可用频率带宽窄等缺 点^[124].表1总结了不同结构类型压电振动传感器 的优缺点和应用场景.

4.1 弯曲模式

图 8 展示了弯曲模式压电振动传感器的四种 基本构型^[34],图 8(a) 是一种单悬臂梁结构,质量块 与基底的连接处只有一个梁,质量块除了沿 z 轴平 移之外,还会沿 x 轴和 y 轴旋转.图 8(b) 和图 8(c) 为双悬臂梁结构,两者区别在于图 8(c) 是对称双

Table 1

悬臂梁结构, 而图 8(b) 是不对称双悬臂梁结构. 图 8(d) 展示的是四对称悬臂梁结构, 存在四个压 电元件, 由四根对称悬臂梁悬挂的中心质量块只 沿 z轴方向振动, 在其他方向上的振动可以忽略不 记. 弯曲模式压电振动传感器中除了梁悬挂的弯曲 应力外, 还会存在拉应力, 但由于位移极小, 所以 拉应力对加速度计线性度的影响基本可以忽略不 记^[34].

弯曲模式压电振动传感器性能优异,适用于检测运动中的微小变化,是测量低频振动和稳态加速度的理想设备.近年来,随着微机电 (MEMS)加速度传感器的广泛应用,带悬臂梁的弯曲模式压电加速度计的研究得到进一步发展^[125].Guo^[126]设计了一种LGS声表面波温度-加速度传感器,如图 9(a)所示,在传感器中考虑了加速度灵敏度随温度变化的补偿方式,将加速度和温度完全解耦,实现了加速度温度补偿,提高了传感器在不同温度下的加速

表 1 不同结构类型加速度计的优缺点

Advantages and disadvantages of different construction types of accelerometers

Table 1. Advantages and disadvantages of different construction types of accelerometers.						
加速度计 结构	优点	缺点	应用场景			
弯曲式	重量轻、灵敏度高、响应速度快、分辨率 高、背底噪声低、易于微型化集成	频率范围窄、结构脆弱、抗冲击能力差、 存在固有电荷泄露	微米级尺度的微弱信号的实时检 测,低频、低加速度信号测量等			
压缩式	结构简单、加工便捷、制作成本低、强度 和刚度大、共振频率高、频带宽、可以承 受高水平瞬态振动	对力和温度变化敏感, 底座弯曲或热膨 胀易引起较大测量误差、背底噪声高、横 向灵敏度大、抗干扰能力较差	冲击测试等			
剪切式	信号噪声低、应变小、抗干扰能力强、热 性能稳定、电荷输出高、灵敏度高	结构复杂、固有频率低、可用频率带宽窄	微地震监测、钢水与钢渣、熔渣分离等			



图 8 弯曲模式压电振动传感器基本构型^[34] (a) 单悬臂梁; (b) 不对称双悬臂梁; (c) 对称双悬臂梁; (d) 四对称悬臂梁

Fig. 8. Basic configurations of bending mode piezoelectric vibration sensors^[34]: (a) Cantilever beam; (b) two cantilever beams; (c) two-symmetric-beam suspension; (d) four-symmetric-beam suspension.

度测试精度. Shi 等^[127] 制作了一种 d₃₁ 模式的四悬 臂梁集成拾振微球 MEMS 压电加速度计, 传感器 结构如图 9(b) 所示,包括框架基座,中心拾振微球 及四根结构对称的悬臂梁,该加速度传感器的电压 灵敏度在 1152 Hz 时可达到 13.8 mV/g, 具有良好 线性响应关系和抗干扰能力. Xu 等[128] 研制了一 种基于 PZT 薄膜的 d33 模式压电振动传感器,该 传感器中压电薄膜的极化方向与形变方向都是水 平的 (图 9(c)), 使用 d₃₃ 振动模式提高了加速度计 的灵敏度和固有频率,具有更好的实用性.图 9(d) 展示了通过超声微加工获得的 LGS 和 GaPO4 压 电振动传感器, Le Traon 等[129]介绍了该传感器具 有实现两种弯曲模态高绝缘的专用解耦结构,实验 结果表明 LGS 谐振器质量因子非常低, 而 GaPO4 谐振器具有高质量因子,应用潜力巨大. Li 等^[130] 提出了一种基于双 U 型槽复合梁的新型 ZnO 薄膜 振动传感器, 它由双 U 型槽压电复合悬臂梁和串 联结构的电极组成,如图 9(e) 所示,这种结构中 ZnO 薄膜的平均应力是常规压电复合悬臂梁结构 的 1.5 倍, 电学串联方式可以获得 3 倍的输出电压, 通过实验可知该双 U 型槽压电加速度计的灵敏度 是常规悬臂梁加速度计的 4.5 倍. Han 等^[131]介绍 了一种基于微分谐振梁和力平衡电容板的三轴加 速度计,由1个质量块、4个两端夹持且工作在弯 曲模式下的桥式谐振器、4个L型支撑梁、底板和 顶板组成 (图 9(f)). 它通过弯曲模式下的桥式谐振器检测沿 *x* 轴和 *y* 轴的平面内加速度,并在力平衡模式下使用差分板电容来检测 *z* 轴加速度.

4.2 压缩模式

压缩模式振动传感器的结构如图 10 所示 [132], 根据质量块和压电片的放置顺序不同,可分为中心 压缩式和倒装压缩式两种.由于发展历程较早,结 构简单,坚固耐用等因素,现有的对压缩式压电振 动传感器报道较多. Wang 等^[133]制作了一种基于 Ho 掺杂的 CNGS 晶体纵向 d₁₁ 模态的中心压缩式 压电振动传感器,结构如图 11(a) 所示,它的平均 灵敏度约为 0.722 pC/g, 极端工作温度可达 600 ℃, 最大灵敏度温度偏差小于 5.2%, 能够实现稳定的 高温传感应用. Chen 等^[134]提出采用 AlN 晶体作 为压电元件制作耐高温传感器,图 11(b)展示了 AlN 高温压电振动传感器结构示意图和实物图, 它 具有优于压电陶瓷振动传感器的高温灵敏度稳定 性,同时能够获得很好的灵敏度和频率响应特性. Zhang 等^[135] 设计并制作了一种六自由度压缩式加 速度传感器,简化模型和样机实物如图 11(c) 所示, 通过建立压电六自由度加速度计灵敏度的多参数 分析数学模型、进行有限元仿真分析及样机测试实 验,验证了所提出的多参数模型和方法的可靠性, 为进一步研究设计六自由度压电加速度计奠定了



图 9 弯曲模式压电振动传感器 (a) LGS 温度-三轴加速度传感器示意图^[126]; (b) 四悬臂梁集成中心拾振微球结构传感器示意图^[127]; (c) *d*₃₃模式四悬臂梁压电振动传感器的三维结构和激光扫描共焦显微镜图^[128]; (d) LGS(左)和GaPO₄(右)单晶传感器实物图^[129]; (e) 双U型槽压电加速度计原理图^[130]; (f) 三轴加速度计结构示意图^[131]

Fig. 9. Bending mode piezoelectric vibration sensors: (a) LGS temperature-triaxial accelerometer^[126]; (b) four-suspended-beam integrated center vibration microsphere structure sensor^[127]; (c) three-dimensional structure of the d_{33} -mode four-cantilever-beam piezoelectric vibration sensor and laser-scanning confocal microscope diagram^[128]; (d) LGS (left) and GaPO₄ (right) monocrystalline sensors^[129]; (e) double U-slot-type piezoelectric accelerometer^[130]; (f) triaxial accelerometer^[131].



图 10 压缩模式压电振动传感器基本构型^[132] (a) 中心压缩式; (b) 倒装压缩式

Fig. 10. Basic configuration of compressed mode piezoelectric vibration sensors^[132]: (a) Central compressed type; (b) inverted compressed type.



图 11 压缩模式压电振动传感器 (a) CNGS 中心压缩式传感器示意图和实物图^[133]; (b) AlN 高温压电振动传感器结构示意图和 实物图^[134]; (c) 六自由度压缩式加速度传感器简化模型和样机实物图^[135]; (d) 高温压缩式压电振动传感器实物图和内部结构图^[136] Fig. 11. Compression mode piezoelectric vibration sensors: (a) CNGS central compression sensor^[133]; (b) AlN high-temperature piezoelectric vibration sensor^[134]; (c) simplified model and prototype of the six-degree-of-freedom compression acceleration sensor^[135]; (d) physical and internal structure diagram of high-temperature compression piezoelectric vibration sensor^[136].

理论基础. 图 11(d) 为某型号高温压缩式压电加速 度传感器实物图及其内部结构图, Pan^[136]利用有 限元分析方法进行固有频率定量计算, 分析了传感 器在一定激励下的响应情况以及温度效应的影响, 在此基础上测试了使用两种不同切型的 YCOB 晶 体的传感器在高温下的灵敏度变化, 得出通过晶体 切型优化来提高传感器灵敏度的方法.

4.3 剪切模式

剪切模式的压电振动传感器是当前最流行的 设计,结构如图 12 所示^[137],主要由压电片、质量 块、底座、预紧螺栓和外壳组成,按结构可细分为 平面剪切式、三角剪切式和环形剪切式三种.剪切 型传感器一般使用多片压电片,采用电学并联方式 连接,结合电荷放大型电路从而获得大的电荷灵敏度.环形剪切型传感器采用了空心柱形的压电材料,将环状质量块置于压电柱外层,通常用于测量冲击加速度.三角剪切型传感器结构较为复杂,与其他类型剪切式传感器相比,具有最高的灵敏度和较高共振频率^[138].考虑到结构简易程度,目前最常用的还是平面剪切型压电振动传感器.

剪切型压电加速度传感器的性能要远远优于 压缩型压电加速度传感器,故近些年来对剪切模式 压电振动传感器的研究日益增多.Ding^[139]从传感 器螺栓预紧力和接触刚度、动力学模型和有限元仿 真等方面对剪切式高温压电加速度传感器进行了 研究,分析了传感器结构参数、材料以及温度对传 感器性能的影响,总结了一种完善的剪切式高温 压电加速度传感器设计方法,并分别设计了偏心剪 切式加速度计(图 13(a))和对称剪切式加速度计 (图 13(b)). Zeng 等^[140]通过优化 CTGS 晶体切型 设计并制备了基于 CTGS 的平面剪切式压电振动 传感器,结构如图 13(c)所示,它的质量块设计成弧 形结构以充分利用传感器内部空间,能在 600 ℃ 高温环境下稳定工作,1.1 kHz 时平均电荷灵敏度 为 2.56 pC/g,具有较高的频率稳定性. Shi 等^[141] 提出了一种三角剪切结构的微震监测用压电振动 传感器 (图 13(d)),谐振频率为 6150 Hz,工作频率 范围为 0.1—2050 Hz,电荷灵敏度高达 1600 pC/g, 满足微地震信号监测的频率范围和超高灵敏度要 求.图 13(e)展示了Wu等^[138]设计的平面剪切式 加速度计和三角剪切式加速度计,两者采用了不同 的预紧结构.平面剪切式结构将压电元件固定在中 心柱与质量块之间,通螺栓施加预紧力;三角剪切 式结构中三个质量块与压电元件通过预紧环进行 紧固,灵敏度和谐振频率更好.图 13(f)是美国 Dytran公司生产的一款环形剪切式高温加速度传 感器,采用圆柱形中心柱和环形压电元件,弯曲的 质量块与压电元件贴合并用预紧环固定,工作温 度范围为-51—649℃,灵敏度为1—2 pC/g,频率



图 12 剪切模式压电振动传感器基本构型[137] (a) 环形剪切式; (b) 平面剪切式; (c) 三角剪切式

Fig. 12. Basic configuration of shear mode piezoelectric vibration sensors^[137]: (a) Annular shear mode; (b) planar shear mode; (c) triangular shear mode.



图 13 剪切模式压电振动传感器 (a) 偏心剪切式压电加速度传感器结构图^[139]; (b) 对称剪切式压电加速度传感器结构图^[139]; (c) CTGS 平面剪切式高温加速度传感器结构示意图^[140]; (d) 三角剪切式压电振动传感器结构图^[141]; (e) 平面剪切式加速度计和 三角剪切式加速度计结构示意图^[138]; (f) 环型剪切式压电振动传感器结构示意图^[142]; (g) UHT-12TM 晶体 357D90 型剪切式高温加速度计 (左) 和 EX611A20 型差动剪切式高温加速度计 (右) 实物图^[143]

Fig. 13. Shear mode piezoelectric vibration sensors: (a) Eccentric shear piezoelectric accelerometer^[139]; (b) symmetric shear piezoelectric accelerometer^[140]; (c) CTGS planar shear high-temperature accelerometer^[140]; (d) triangular shear piezoelectric vibration sensor^[141]; (e) planar and triangular shear accelerometers^[138]; (f) ring shear piezoelectric vibration sensor^[142]; (g) physical drawings of UHT-12TM Crystal 357D90 shear type high-temperature accelerometer (left) and EX611A20 differential shear type high-temperature accelerometer (right)^[143].

响应范围能达到 2500 Hz, 重量仅 35 g. Kapusuz 等^[142] 将该加速度计应用于炼钢过程中从钢水中分 离钢渣及熔渣的监测, 有效地避免人工控制造成的 故障率及钢铁质量问题. Metz^[143] 介绍了两款成熟的 商用平面剪切式高温加速度计, 实物外形如图 13(g) 所示, 左边是 357D90 型剪切式高温加速度计, 已 成功应用于地面及航空衍生涡轮发动机, 右侧是该 系列新产品 EX611A20 型差动剪切式高温加速度 计. 两者均采用人工合成晶体 UHT-12TM 作为压 电元件, 该晶体具有较高的高温绝缘电阻和相对 较低的电容, 无热释电输出, 与差分电荷放大器一 起使用时, 工作噪声很低. 这两款剪切式高温振动 传感器均能长期安全可靠的工作于 649 ℃ 高温环 境中.

5 振动传感器校准装置

为了测试振动传感器的性能是否满足设计要 求,需要搭建振动传感器校准测试装置.校准测试 系统通常包括常温测试系统和高温测试系统.常温 测试系统比较简单,适合验证优化设计是否有效, 高温测试系统相对来说较为复杂,适合测试传感器 的高温特性.除高温测试系统所需的加热设备外, 一般都是由激励产生设备、信号采集设备和图形显 示设备组成的.激励产生设备包括信号发生器、功 率放大器和标准激振器,信号采集设备一般是由电 荷放大器和信号采集器组成,图形显示设备指的是 计算机或示波器,加热设备包含升温装置、温度测 试及控制电路.

目前常用的压电加速度传感器常温标定实验 测试平台如图 14 所示,图中展示了各个器件之间 的工作关系^[141].在测试系统中,首先采用激振器提 供稳态正弦激励,利用信号发生器和功率放大器对 产生的激励进行控制,通过信号发生器改变所需的 振动频率,通过控制功率放大器的增益调节加速度 的大小.然后使用电荷放大器对标准压电加速度传 感器和所设计的压电加速度传感器电信号进行放 大,经过信号调理后传送到信号采集器,再经过 A/D转换后传送到计算机进行数据处理,最后记 录压电加速度传感器和标准压电加速度传感器的 灵敏度测试曲线.





高温环境的测试装置如图 15 所示,这里展示 了报道过的两种传感器高温校准方法.一种是振动 比较法,如图 15(a)所示,它在常温测试平台的基 础上增加了高温炉和高温支架,从而为传感器提供 高温测试环境^[35].传感器通过氧化铝棒放置在垂 直管式炉中,将氧化铝棒通过铝螺栓连接到激振器 上.首先利用信号发生器产生正弦信号,经功率放 大器放大,再驱动激振器产生所需振动.从待测传 感器输出的电荷信号通过电荷放大器转换并放大 为电压信号被锁相放大器记录,同时电压信号也被 示波器记录,用于瞬态信号分析.然后使用一个标



图 15 传感器高温测试实验装置图 (a) 振动比较法校准装置图^[35]; (b) 绝对法校准装置图^[14]

Fig. 15. Experimental setup diagram for high-temperature testing of sensors: (a) Vibration comparison method calibration device^[35]; (b) absolute method calibration device^[144].

准加速度传感器作为参考来测量来自激振器的加 速度,通过信号调节器记录在示波器上.为了降低 电磁噪声,用铝箔对激振器进行屏蔽.最后对两个 传感器的输出信号进行比较和处理,即可得到待测 传感器的性能参数. 另一种是图 15(b) 展示的利用 激光干涉仪标定加速度传感器的激光干涉振动绝 对校准法,该标定系统由绝对法振动校准装置和智 能温度控制装置两部分组成[144,145]. 绝对法振动校 准装置包括信号发生器、功率放大器、激振器、信 号处理器、激光干涉仪、数据采集卡及计算机等, 智能温度控制装置包括半开放式温度室,其腔体顶 部用玻璃密封一个孔便于激光通过. 首先利用计算 机控制程序让温度室加热升温,创造传感器校准所 需的温度环境. 然后使用信号发生器产生稳定的激 励波形,利用功率放大器放大此信号并驱动标准激 振器产生振动, 传感器在振动台振动作用下敏感元 件输出相应的电信号,同时以激光干涉仪作为标定 标准,利用外差激光干涉仪对传感器的振动量值进 行测量,由数据采集卡对传感器的电信号和激光干 涉仪信号进行采集,利用计算机软件对这两个信号 解调计算,即可得到传感器的灵敏度幅值和相移情 况. 振动比较法校准本质上是将待测传感器与标准 传感器相比较而获得待测传感器灵敏度的方法,在 较窄频率范围内只能得到加速度计的灵敏度量级 偏差,校准的不确定度比较大,而振动绝对法校准 是通过激光干涉仪将振动量级及传感器的特征参

数直接溯源到长度和时间等基本物理量,振动校准的不确定度较小^[146].

6 高温压电传感器研究进展

高温压电振动传感器因高灵敏度、低复杂度、 低质量和低成本等因素广泛应用于高温领域.面对 一些超高温应用场景如航空航天发动机、核反应堆 核电机组、动力涡旋机燃烧室等,传感器需要承受 的温度可达到1000 ℃,这对传统压电振动传感器 的设计与研制提出了巨大的挑战.为了满足实际应 用的迫切需求,近年来国内外学者均开展了相关的 超高温压电振动传感器的研制工作,在现有的一些 基础研究中,高温振动传感器的应用温度范围也大 大提升.

6.1 弯曲式压电振动传感器

Paul 等^[147] 设计了一款宽加速度负载范围的 高温悬臂梁式加速度计, 能在室温至 538 ℃ 温度 范围内工作. 加速度计结构如图 16(a) 和图 16(b) 所示, 它包含不锈钢封装外壳, 纵向延伸的陶瓷横 梁及固定在横梁上的质量块. 当传感器受到振动加 速度时, 质量块由于惯性导致横梁发生偏移, 在横 梁上下表面产生相反的弯矩, 横梁内部产生拉伸和 压缩应力并转化为上下表面的最大应变, 由固定在 横梁上下表面的两组钨铂合金应变片感应, 从而产



图 16 高温悬臂梁式加速度计结构 (a) 加速度计俯视图^[147]; (b) 加速度计剖视图^[147]; (c) 横梁止动组件正视图^[147]; (d) 安装在 横梁止动组件底座框架上的缓冲组件剖视图^[147]; (e) 横梁止动组件后视图^[147]; (f) 含插入横梁通道的质量块^[147]

Fig. 16. High-temperature cantilever beam accelerometer: (a) Top view of accelerometer^[147]; (b) cutaway view of accelerometer^[147]; (c) front view of crossbeam stop component^[147]; (d) cutaway view of cushioning component installed on the base frame of the crossbeam stop component^[147]; (e) rear view of the crossbeam stop component^[147]; (f) mass block with inserted crossbeam channel^[147].

生与加速度成比例的信号.为防止横梁在高加速度 下无限制移动导致断裂,在外壳上固定止动组件 (图 16(c))将横梁端部固定在可释放的约束装置上 以防止横梁的横向位移.由图 16(d)可看出,横梁端 部插入安装柔性衬垫组件的缓冲件凹槽中,图 16(e) 中的约束装置位于缓冲件框架的背面,用于柔性衬 垫组件的固定.质量块由上下两块钨合金组成,热 膨胀系数与横梁兼容,下质量块结构如图 16(f)所 示,它与横梁对接固定在横梁上.由这些设计制成 的悬臂梁式加速度计能承受宽负载范围的加速度, 且稳定服役于高温环境,性能可靠、成本低,具有 良好的应用前景.

Brian 等^[148]提出了一种可温度补偿的悬臂梁 式加速度计,通过两个力传感元件约束质量块的运 动,有效地克服了悬臂梁式加速度计中振动梁和质 量块之间热膨胀的不利影响,能用于高温环境的振 动测试.如图 17(a)所示质量块包括主体部分和两 个横向延伸梁,通过挠性铰链安装在加速度计的外 壳上,两个力传感元件连接于外壳与质量块的两个 横向延伸梁之间.挠性铰链允许质量块沿敏感轴 SA方向上下移动,也允许质量块沿与 SA 垂直的 补偿轴 CA 方向做有限的旋转.当沿 SA 方向的加 速度作用于加速度计时,会在两个力传感元件上分

别产生压缩力和拉力,导致一个力传感元件的输出 信号频率降低,另一个力传感元件的输出信号频率 升高,从而得出加速度大小.当加速度计工作于高 温环境时,力传感元件与质量块、挠性铰链和外壳 之间的热膨胀或收缩差异也会产生力. 但这个力使 质量块绕 CA 旋转, 而不会影响 SA 方向的运动, 因 此热膨胀引起的频率变化将趋于抵消. Brian 等^[148] 将这种设计原理运用到矩形质量块 (图 17(b) 和 图 17(c))、圆柱形质量块 (图 17(d) 和图 17(e))和 方形质量块 (图 17(f) 和图 17(g)) 的三款悬臂梁式 加速度计中.圆柱质量块除了具有上述设计优势 外,由于质量块和空腔体都呈圆柱状,当其绕 CA 转动时,还具有质量块与外壳之间的阻尼间隙的宽 度不会随温度变化而改变的优势. 通过这种使用两 个振动梁力传感元件的结构设计,能消除许多与悬 臂梁加速度计相关的误差源,提高传感器的高温测 试精度.

近年来, Kubasov 等^[149]提出了一种用于探测 亚纳米级振幅振动的 LiNbO₃ 单晶低频振动传感 器. 它使用扩散退火后的 LiNbO₃ 单晶平板作为压 电元件,该 LiNbO₃ 单晶中形成有两种极性相反的 铁电畴 (简称为 B-LN). 传感器采用悬臂梁结构, 通过两个带螺母的不锈钢螺钉将 B-LN 单晶悬臂



图 17 (a) 可温度补偿的悬臂梁加速度计工作原理图^[148]; (b) 矩形质量块的悬臂梁加速度计横向截面图^[148]; (c) 矩形质量块的悬 臂梁加速度计纵向截面图^[148]; (d) 圆柱形质量块的悬臂梁加速度计横向截面图^[148]; (e) 圆柱形质量块的悬臂梁加速度计纵向截面图^[148]; (f) 方形质量块的悬臂梁加速度计横向截面图^[148]; (g) 方形质量块的悬臂梁加速度计纵向截面图^[148]

Fig. 17. (a) Operating principle diagram of temperature-compensated cantilever beam accelerometer^[148]; (b) transverse cross-section of cantilever beam accelerometer with rectangular mass block^[148]; (c) longitudinal cross-section of cantilever beam accelerometer with cylindrical mass block^[148]; (e) longitudinal cross-section of cantilever beam accelerometer with cylindrical mass block^[148]; (e) longitudinal cross-section of cantilever beam accelerometer with cylindrical mass block^[148]; (e) longitudinal cross-section of cantilever beam accelerometer with cylindrical mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148]; (g) longitudinal section of cantilever beam accelerometer with square mass block^[148].

梁夹持在多晶氧化铝基座上,再通过夹具和垫圈将两片铝箔压在钽电极上,如图 18(a)所示.图 18(b) 展示了传感器在不同位移幅值的正弦振动激励下 产生的电压,即使在位移幅值仅有 0.1 nm 时,产 生的电压也相对较强,该传感器在 38 Hz 以上频 率时,即使没有任何前置放大仍能够检测位移幅值 为 0.1 nm 的正弦振动.图 18(c)为传感器的频响 情况,在 97.25 Hz 的谐振频率下传感器的最高灵 敏度达到 2443 V/g.该传感器可检测到的最小振 动取决于激发频率,从 100 nm(7 Hz)到 0.1 nm (38 Hz 以上)不等.实验结果表明以铌酸锂单晶为 敏感元件的悬臂梁式传感器在宽温度范围和超低 频振动探测中具有广阔的应用前景.

6.2 压缩式压电振动传感器

Chen 等^[150] 用 0.75 BiFeO₃-0.25 BaTiO₃-1% MnO₂(BFBT25-Mn, 其中 Mn 的含量为原子百分

比) 陶瓷制作了一种压缩式高温压电传感器, 对 其在室温到 550 ℃ 的灵敏度变化情况进行了表 征.图 19(a) 为所制备的传感器结构示意图,将 BFBT25-Mn 压电陶瓷制成厚度为 1.2 mm 直径 为10mm的圆片并置于高纯氧化铝绝缘块中间, 选用镍铬铁合金作为质量块,并使用一对弹簧来提 供预紧力. 图 19(b) 比较了在1g加速度和 1000 Hz 频率下不同压电陶瓷材料所制传感器的温度敏感 性,压电传感器的灵敏度随温度的变化曲线先增加 再急剧下降, BFBT25-Mn 的最高工作温度比图中 其他压电陶瓷高且灵敏度表现出更好的热稳定性. 为了评估压电传感器在高温下的工作能力和可靠 性,图 19(c)展示了将传感器置于不同高温环境连 续工作 5 h 灵敏度随时间的变化情况. 当温度高 达 450 ℃ 时, BFBT25-Mn 压电传感器灵敏度随 时间变化稳定, 表明 BFBT25-Mn 压缩式传感器具 有较高的工作温度、良好的热稳定性和耐久性.



图 18 B-LN 低频振动传感器性能测试 (a) 传感器结构示意图 (上) 和传感器实物图 (左下) 及安装在激振器上的传感器 (右下)^[149]; (b) 传感器在不同位移幅值的正弦振动激励下产生的电压^[149]; (c) 传感器频率响应情况^[149]

Fig. 18. B-LN low-frequency vibration sensor performance test: (a) Schematic diagram of transducer structure (top), physical drawing of the transducer (bottom left), as well as the sensor installed on the exciter (bottom right)^[149]; (b) voltages generated by transducer under sinusoidal vibration excitation with different displacement amplitudes^[149]; (c) frequency response of the transducer^[149].



图 19 压缩式高温振动传感器测试 (a) 传感器结构示意图^[150]; (b) 不同压电材料所制传感器灵敏度随温度的变化^[150]; (c) BFBT25-Mn 所制传感器灵敏度在不同温度下长时间工作可靠性测试^[150]

Fig. 19. Compression mode high-temperature vibration sensor performance test: (a) Schematic of sensor structure^[150]; (b) the sensitivity of sensors made of different piezoelectric materials varies with temperature^[150]; (c) sensitivity reliability test of BFBT25-Mn sensor under long-term operation at different temperatures^[150].

Cavalloni 等^[151] 研究了一种 PiezoStar®商用 晶体 KI100 的高温稳定性情况并将其应用到高温 压缩式加速度传感器. KI100 晶体结构类似于 LGS 或 LGT, 具有优异的绝缘性能, 电阻非常高, 常温可 达到 10¹⁴ Ω, 800 ℃ 时仍有 10⁸ Ω, 灵敏度是石英晶 体的两倍,温度系数很小,没有热释电现象.KI100 晶体所制成的高温振动传感器使用温度可达 700 ℃, 实物如图 20(a) 所示,采用压缩模式将多个 KI100 晶体环堆叠在一起,使用晶体的 d₁₁模式工作. 该 传感器接地绝缘,为了减小电磁干扰,还配备了一个 对称电容的两引脚连接器连接到地. Cavalloni 等[151] 对传感器进行了高温稳定性测试, 首先将加 速度计在 500 ℃ 环境中老化 336 h, 接着在 600 ℃ 老化 672 h, 最后在 700 ℃ 老化 168 h, 每个老化阶段 的灵敏度和电阻随测试温度变化情况如图 20(b) 和图 20(c) 所示, 可知不同老化阶段传感器的灵敏 度和绝缘电阻变化存在差异,但差距基本不大.实 验结果表明 KI100 晶体可连续工作于 600 ℃ 高温 环境中,具有实现更高应用温度的潜力.

考虑到压电振动传感器压电元件与电极之间 的接触刚度会直接影响传感器的振动频率和动态 性能, Liu 等^[152]提出了压电振动传感器的刚度模 型并设计组装了一款 BTS 单晶压缩式高温压电振 动传感器,结构如图 21(a) 和图 21(b)所示.传感 器采用 ZX*l*/47°切型的 BTS 单晶圆片作为压电元 件,在镍电极片的表面溅射一层铂薄膜,通过螺栓 和螺母将压电圆片和质量块固定在底座上.它的底 座采用具有抗高温氧化和耐腐蚀的 Inconel 601 合 金制成,质量块与壳体以及金属底座之间是电隔离 的,并在充满纯氩气的手套箱通过激光焊接的方法 对传感器进行封装.图 21(c)展示了不同预紧扭矩 下传感器灵敏度随温度的变化,当扭矩为 0.4 N·m 时传感器在室温至 650 ℃ 的温度范围内灵敏度偏 差最小,将 BTS 压电振动传感器置于 500 ℃ 环境 中连续工作 72 h 灵敏度基本保持一致 (图 21(d)). 结果表明,适当的预紧扭矩可以降低灵敏度的温 漂,提高传感器的性能稳定性,所制造的压电振动 传感器具有良好的温度稳定性,与市场上现有的 482 ℃ 的同类产品相比稳定性更好.

此后,他们对传感器结构进行改进,设计了一 款倒装装配的 BTS 压缩式高温压电振动传感器 (图 22(a))^[153]. 该传感器由底座外壳、内部信号发 生部和侧面连接器组成,采用 ZX1/45°切型的 BTS 晶体作为敏感元件. 整个信号发生部倒装于底座外 壳上能有效地降低传感器装配和测试产生的横 向振动,避免底部基座变形对输出信号产生的干 扰,底座外壳两端的圆弧形钳口用于将传感器固 定到待测机械表面,能提高传感器与被测接触面的 接触刚度,降低装配不当引起传感器失效的风险. 图 22(b) 为传感器的温度响应情况, 随着测试温度 的升高, 传感器的热漂移率低于 5%, 由图 22(c) 可 以看出, 该传感器能在 600 ℃ 和 650 ℃ 稳定工作. 这种改进的传感器结构简单稳定、介电损耗低、热 释电小、灵敏度高、温漂低, 可在 600 ℃ 高温环境 中长时间服役.

Jiang 等^[154] 也使用 BTS 单晶制造了一款用 于 650 ℃ 高温结构健康检测的压缩式振动传感器, 如图 23(a) 所示. 传感器使用了三层 Z/47°切型的 BTS 晶体环,利用纵向 *d*₃₃ 振动模式工作,晶体环 两侧表面覆盖有铂电极且三个晶体环并联连接,直 立压缩设计将压电晶体夹在质量块和刚性基座 之间,具有灵敏度高、坚固耐用且易于制造的特点.



图 20 KI100 压缩式加速度计高温稳定性测试 (a) 加速度计实物图^[151]; (b) 加速度计在不同老化阶段后灵敏度随温度变化情况^[151]; (c) 加速度计在不同老化阶段后绝缘电阻随温度变化情况^[151]

Fig. 20. High temperature stability test of KI100 compression accelerometer: (a) Physical image of accelerometer^[151]; (b) the sensitivity of accelerometers changes with temperature after different aging stages^[151]; (c) variation of insulation resistance with temperature after different ageing stages of the accelerometer^[151].



图 21 BTS 压缩式压电振动传感器性能测试 (a) 传感器组件的展开视图^[152]; (b) 传感器实物图^[152]; (c) 不同预紧扭矩下传感器 的灵敏度温度稳定性^[152]; (d) 传感器灵敏度在 500 ℃ 时长时间工作的可靠性测试^[152]

Fig. 21. BTS compression piezoelectric vibration sensor performance test: (a) Unfolded view of the sensor component^[152]; (b) physical image of sensor^[152]; (c) temperature stability of the sensor sensitivity at different preload torques^[152]; (d) reliability test of the sensor sensitivity for long-term operation at 500 $C^{[152]}$.

图 22 倒装装配的 BTS 高温振动加速度传感器性能测试 (a) 高温振动加速度传感器的装配示意图^[153]; (b) 传感器的温度响应^[153]; (c) 传感器在高温下 (600 ℃ 和 650 ℃) 下的工作状况^[153]

Fig. 22. Performance test of BTS high-temperature vibration acceleration sensor with inverted assembly: (a) Assembly schematic of the sensor^[153]; (b) temperature response of the sensor^[153]; (c) operation of the sensor at elevated temperatures (600 °C and 650 °C)^[153].

为了隔离电磁干扰,每个晶体环产生的感应电荷通 过 Inconel 外壳和特殊的外部接入屏蔽电缆收集. 图 23(b)显示了传感器在不同温度和 160 Hz 频率 下随加速度变化的电荷输出情况,输出电荷线性增 加,表明噪声水平非常低.通过图 23(c)不同频率 下灵敏度随温度的变化情况可知,传感器从室温 到 650 ℃ 温度范围内具有良好的稳定性,平均灵 敏度约为 2.62 pC/g,变化低于 2%.此外,对传感 器在高温下长期性能稳定性进行了测试 (图 23(d)), 600 ℃ 时传感器的平均灵敏度可保持在 2.54 pC/g, 持续 200 h 以上. 与使用压电陶瓷或铁电晶体作为 敏感元件的传统商用传感器相比, 非铁电 BTS 晶 体的老化可以忽略不计, 使传感器工作时间更长, 大大提高了结构系统的耐久性和安全性.

Zhang 等^[155] 开发了使用单片 YCOB 单晶的 压缩式高温加速度传感器,结构如图 24(a) 所示, 它在 900 ℃ 高温环境中表现出良好的稳定性,且 灵敏度维持在 (2.4±0.4) pC/g. 传感器采用尺寸为 15 mm × 7 mm × 2 mm 的(XY*lw*)-15°/45°切YCOB 单晶作为压电元件,选用热膨胀系数与单晶、螺 栓、预紧套筒匹配的高密度 Inconel 高温合金作为 质量块材料,电气绝缘片为高纯氧化铝,上下电极 为铝箔制成.图 24(b)显示了加速度计的灵敏度随 频率和温度的变化,单片 YCOB 压缩式加速度计 的灵敏度在测试温度 (0—1000 ℃) 和频率 (100— 600 Hz) 范围内变化不大.图 24(c) 总结了传感器 900 ℃ 时不同频率下的灵敏度与工作时间的关系, 传感器在 900 ℃ 下连续工作 3 h 的平均灵敏度为 (2.4±0.4) pC/g. 该传感器温度稳定性高、温度系 数低,在高温传感应用中具有很好的发展前景.

图 23 BTS 压缩式压电振动传感器性能测试 (a) 传感器结构模型^[154]; (b) 传感器电荷随加速度的变化^[154]; (c) 不同频率下传感 器灵敏度随温度的变化^[154]; (d) 传感器在 600 ℃ 和 650 ℃ 时灵敏度与持续工作时长的关系^[154]

Fig. 23. BTS piezoelectric vibration sensor performance test: (a) Structure model of the sensor^[154]; (b) variation of sensor charge with acceleration^[154]; (c) variation of sensor sensitivity with temperature at different frequencies^[154]; (d) relationship between sensor sensitivity and duration of continuous operation at 600 °C and 650 °C^[154].

图 24 单片压缩模式加速度计性能测试 (a)加速度计组件示意图^[155]; (b)加速度计灵敏度随频率和温度的变化情况^[155]; (c) 900 ℃ 下不同频率的灵敏度与持续工作时长的关系^[155]

Fig. 24. Monolithic compression mode accelerometer performance test: (a) Schematic of the accelerometer components^[155]; (b) variation of accelerometer sensitivity with frequency and temperature^[155]; (c) sensitivity versus duration of continuous operation at 900 °C for different frequencies^[155].

近年来,还有一些其他构造的压缩式高温振动 传感器被提出. 图 25(a) 是一款带螺帽紧固部的高 温振动传感器,图 25(b)为该传感器的剖视图,在 传感器外壳上端增加了螺帽紧固部,可以通过转动 紧固部提高旋合强度,将传感器稳定安装在待测物 体上,除此之外传感器的固定座与中心轴是一体成 型的,外壳和固定座分离,方便引脚和压电导电片 组件连接,能降低装配难度,通过注入惰性气体进 行封装,有效地延长传感器在高温环境的使用寿 命^[156]. 图 25(c) 是一款改进的 450 ℃ 高温压电加 速度计,它在一般高温压电加速度计的结构上增加 了组合隔热套管和热应力垫圈,能将质量块与底 座、预紧螺母隔开,及时释放质量块产生的热应 力^[157]. 图 25(d) 和图 25(e) 为 Xu 等^[158] 提出的一 种耐高温高压的差分式压电加速度传感器,使用了 差分高温铠装电缆,将电缆内部导线作为传感器的 正负极输出信号,实现了整个传感器的电绝缘,该 传感器在常温至 400 ℃ 的灵敏度变化率低于 7%, 灵敏度温度系数不超过 0.2%, 可在 350 ℃, 17.5 MPa 的恶劣环境长期稳定服役.为了降低高温加速度计 的温度漂移, Zhang 等^[159] 设计了一种带温度补偿 的高温压电加速度传感器, 如图 25(f) 所示, 它的 压电元件由上面一层负温度系数 GdCOB 单晶和 下面五层正温度系数 YCOB 单晶堆叠而成, 传感 器在常温至 800 ℃ 全温度范围内灵敏度漂移小 于±3%, 这种设计能有效地降低传感器的灵敏度 温漂, 提高传感器在高温环境的测试精度.

6.3 剪切式压电振动传感器

Ochiai^[160] 早在 1998 年就研制了一种灵敏度 与温度无关的双边剪切型压电加速度计,结构如 图 26(a) 所示. 传感器包含一种特殊的复合元件, 由两个矩形板压电元件和一个矩形板电容元件组 成,均为铁电陶瓷材料,中心开有孔并通过螺栓连 接到底座中心柱上. 压电元件为掺杂摩尔分数 0.7% Nb₂O₅ 的 PbZr_{0.51}Ti_{0.49}O₃,电容元件为 Pb_{0.8}La_{0.2} (Zr_{0.4}Ti_{0.6})_{0.95}O₃ 或Pb_{0.7}Sr_{0.2}La_{0.1}(Zr_{0.5}Ti_{0.5})_{0.975}O₃. 在-50 ℃ 至 300 ℃ 温度范围内压电元件介电常数 的正温度依赖性被电容元件的负温度依赖性所 补偿,所制传感器的灵敏度为 42 pC/g, 偏差在 5%

图 25 压缩模式高温压电振动传感器 (a)带螺帽紧固部的高温振动传感器整体结构示意图^[156]; (b)带螺帽紧固部的高温振动 传感器剖视图^[156]; (c)高温 450 ℃压电加速度计剖视图^[157]; (d) 耐高温高压的差分式压电加速度传感器结构示意图^[158]; (e) 耐高 温高压的差分式压电加速度传感器内部放大示意图^[158]; (f)带温度补偿的高温压电加速度传感器示意图^[159]

Fig. 25. Compression mode high-temperature piezoelectric vibration sensors: (a) Schematic of the overall structure of high-temperature vibration sensor with nut fastening part^[156]; (b) cutaway view of high-temperature vibration sensor with nut fastening part^[156]; (c) cutaway view of high-temperature 450 °C piezoelectric accelerometer^[157]; (d) structure of high-temperature and high-pressure-resistant differential piezoelectric acceleration sensor^[158]; (e) internal enlarged schematic diagram of differential piezoelectric accelerometer^[158]; (f) high-temperature piezoelectric accelerometer with temperature compensation^[159].

以内. 图 26(b) 为传感器的温度依赖性曲线, 可看 出未经电容元件补偿的传感器灵敏度在-50 ℃ 至 300 ℃ 温度范围内变化很大,由 Pb_{0.8}La_{0.2}(Zr_{0.4} Ti_{0.6})_{0.95}O₃电容元件补偿的传感器比 Pb_{0.7}Sr_{0.2} La_{0.1}(Zr_{0.5}Ti_{0.5})_{0.975}O₃补偿的传感器在所测温度范 围具有更小的灵敏度偏差.图 26(c) 为传感器的频 响情况,灵敏度在 1 Hz—3 kHz 频率范围内下降, 然后由于基座和压电元件的机械共振而急剧上升 到 8 kHz,所制传感器可在 1 Hz—8 kHz 频率范围 内使用.

Qin 等^[161] 发明了一款全温区近恒预紧力的剪 切型压电加速度传感器,通过简单的结构设计来控 制预紧力变化改善传感器的高温性能. 图 27(a) 为 传感器示意图,结构简单紧凑,采用三角安装形式 的外壳,通过激光焊接的方式进行封装. 在传感器 截面图 27(b)中可以看出螺栓的头部具有一定锥 度,在螺栓头部与质量块中间增加了螺栓垫,能够 有效地缓解加速度传感器中金属部件与压电材料 由于热膨胀系数不一致造成的高温热失配,保证传 感器在全工作温区处于近恒预紧状态. 传感器的螺 栓预紧力随温度的变化如图 27(c) 所示, 从室温至 900 ℃ 螺栓预紧力的变化小于 10%, 表明通过螺 栓垫这个简单的结构设计可使传感器实现全温区 范围内的近恒预紧力, 提升传感器在高温时的线性 度及抗冲击能力, 降低传感器的灵敏度温漂.

Liu等^[162]制作了一种基于LGT单晶的横向 振动型压电加速度传感器,在 20—350 ℃ 温度范围 内 160 Hz 时传感器样机的平均灵敏度为 3.3 pC/g, 线性度达到 1.2%. 传感器的结构模型如图 28(a) 所示,选用具有良好温度稳定性的 XY 切型 LGT 单晶作为压电元件,四块单晶对称的组装在中心柱 两侧,采用其横向 d₁₂ 振动模态,传感器总体尺寸 为 34 mm × 30 mm × 20 mm.质量块和中心柱由 Inconel 601 合金制成,为避免薄膜电极在高温下 的降解,采用无电极设计,LGT 晶体产生的感应电 荷直接通过 Inconel 601 合金中心柱和质量块收 集.图 28(b) 为传感器在室温下测试的频率响应, 传感器的固有谐振频率为 2.8 kHz, 室温下 100—

图 26 电荷剪切型压电加速度计的性能测试 (a)电荷剪切型压电加速度计的结构^[160]; (b)电荷剪切型压电加速度计有无补偿 电容元件的灵敏度温度依赖性^[160]; (c)电荷剪切型压电加速度计的频率依赖性^[160]

Fig. 26. Charge-shear piezoelectric accelerometer performance test: (a) Structure of charge-shear piezoelectric accelerometers^[160]; (b) temperature dependence of the sensitivity of charge-shear piezoelectric accelerometers with and without compensating capacitive elements^[160]; (c) frequency dependence of charge-shear piezoelectric accelerometers^[160].

图 27 全温区近恒预紧力压电加速度传感器 (a) 传感器整体示意图^[161]; (b) 传感器截面示意图^[161]; (c) 传感器螺栓预紧力随温 度变化的示意图^[161]

Fig. 27. Near-constant preload piezoelectric acceleration sensor at full temperature: (a) Schematic of sensor^[161]; (b) schematic of sensor cross-section^[161]; (c) schematic of sensor bolt preload as a function of temperature^[161].

2000 Hz 的平均灵敏度约为 3.82 pC/g. 图 28(c) 为 160 Hz 时不同测试温度的传感器输出电荷随加速度的线性变化,所制传感器在测试加速度范围内的线性度小于 1.2%,表明基于 LGT 的压电振动传感器具有良好的线性度和高灵敏度.

Salazer 等^[163]设计制作了一种结构简单的剪 切式 YCOB 超高温压电振动传感器, 能稳定工作 于 1250 ℃ 超高温环境中. 该传感器选用具有最高 厚度剪切压电性能和机电性能的 YXt/30°切型 YCOB 单晶作为压电元件, 质量块、中心柱、螺栓 和螺母均由 Inconel 601 高温合金制成. 在螺母上 施加 0.6 N·m 的夹紧力矩将垫圈和压电元件紧紧 固定在中心柱和两个质量块上, 无电极的设计可以避 免更高温度下电极退化问题, 图 29(a) 展示了高温 测试后传感器的实物图. 传感器在室温至 1250 ℃, 100—300 Hz 条件下进行测试, 结果如图 29(b) 所 示,室温灵敏度为(0.99±0.19) pC/g,室温至1250 ℃ 范围内的平均灵敏度为(1.26±0.33) pC/g. 图 29(c) 为传感器在1250 ℃ 工作10 h 的灵敏度变化曲线, 尽管传感器的灵敏度在前两个小时急剧增加,但在 第4个小时后表现出非常稳定的性能,平均灵敏度 为(8.7±1.63) pC/g. 这些测试结果为开发具有 1500 ℃ 工作潜力的新一代压电传感器迈出了重要 的第一步.

上述基于 YCOB 单晶设计的高温压电振动传 感器灵敏度不高且尺寸相对较大,为避免这些因素 对测试结构动态响应的影响,Kim 等^[164]研制了一 种 AlN 单晶剪切型加速度计.它使用两片几何尺 寸为7 mm × 7 mm × 0.8 mm 的 AlN 单晶片作为压 电敏感元件,采用热膨胀率低 (1000 ℃ 时低于 1.78×10⁻⁵)的 Inconel 601 合金作为质量块和基础 结构.为了保持电气绝缘,将高温浆料沉积在 Inconel

图 28 横向振动型剪切式加速度传感器性能测试 (a) 传感器结构模型与实物图^[162]; (b) 传感器室温频率响应^[162]; (c) 160 Hz 时 不同温度下传感器输出电荷与加速度的函数关系^[162]

Fig. 28. Transverse vibration shear mode accelerometer performance test: (a) Sensor structure model and physical diagram^[162]; (b) room temperature frequency response of sensor^[162]; (c) sensor output charge as a function of acceleration for different temperatures at 160 Hz^[162].

图 29 剪切式 YCOB 高温振动传感器性能测试 (a) 高温工作后传感器实物图^[163]; (b) 传感器灵敏度在不同频率时随温度的变化情况^[163]; (c) 1250 ℃测试 10 h 传感器的平均灵敏度及高温测试前后传感器的室温灵敏度 (附图)^[163]

Fig. 29. Shear type YCOB high-temperature vibration sensor performance test: (a) Physical image of the sensor after high-temperature operation^[163]; (b) sensor sensitivity varies with temperature at different frequencies^[163]; (c) average sensitivity of sensor tested at 1250 °C for 10 h and the room temperature sensitivity of sensor before and after high-temperature testing (attached figure)^[163]. 601 镍铬铁合金面向压电元件的一侧表面, 再将铂 导线插入铂电极膜 (约 1 μm) 和 AlN 之间, 使用螺 栓和螺母固定, 如图 30(a) 所示.图 30(b) 展示了 不同温度下传感器的频率响应情况, 传感器在 40—600 Hz 频率范围内具有平坦的响应, 平均灵 敏度达到 9.2 pC/g. 传感器在可用频率范围内不 同温度下的响应情况如图 30(c), 随着温度不断增 加传感器始终保持稳定的灵敏度. 由图 30(d) 可知 在 1000 ℃ 高温暴露环境中传感器能稳定工作 10 h, 测试后未发现明显的机械损伤.图 30(e) 为该传感 器经γ射线辐照 1 个月后不同频率下的感应电荷 随加速度的变化情况, 灵敏度未发生明显变化.研 究表明这种 AlN 加速度计能在超过 1000 ℃ 的高 温和长期的γ射线暴露环境中工作, 是监测核电站 结构完整性的良好选择.

Kerrigan^[165] 在上述单轴 AlN 单晶剪切型加速 度计的基础上进行改进,制作出一款多轴 AlN 单 晶传感器,它由三个 AlN 单晶片组成,实物和模型 如图 31(a) 所示.该加速度计质量块同样为 Inconel 601 合金,使用 HexaTech 公司生产的 AlN 单晶片 作为压电元件,并在 AlN 晶体的侧壁上沉积了一 层金作为电极. AlN 单晶通过不锈钢螺钉固定在中 心质量块和三个相邻侧面基板之间,使用高温浆料 对其进行绝缘处理,再通过铂线连接到每个 AIN 传感元件进行电荷输出.通过对多轴加速度计的性 能进行仿真分析可知,当 x方向施加 1 g 加速度时 y 轴和 z 轴对此加速度无响应(图 31(b)所示),当 三轴方向均施加 1 g 加速度时,传感器各轴性能相 似,灵敏度均在 72 mV/g 附近,工作频率范围在 600 Hz 以下(图 31(c)所示).同样,这种多轴 AIN 单晶剪切型加速度计也适用于高温、辐照和腐蚀环 境,具有核电站检测等实际应用的潜力.

除此之外,还有一些其他的结构设计可保障剪 切式压电振动传感器的高温性能. 图 32(a) 为报道 过的一款在压电组件外部套设隔热罩的环形剪切 式微型集成电子压电加速度计 (IEPE 加速度计), 通过增设隔热罩能有效地降低压电元件和内部电 路板的温度,隔热罩的内外表面均涂有防热辐射 层,隔热罩和壳体处于真空状态,在传感器的安装座 内还设置了螺旋形结构的散热通道,通过这些结构 设计能将 IEPE 传感器的使用温度提升至 260 ℃^[166]. 图 32(b) 和图 32(c) 为 Howard 等^[167]提出的两种 LiNbO₃ 高温剪切式压电加速度计结构示意图,使 用 X 切型的 LiNbO₃ 晶体作为压电元件,具有很高

图 30 AlN 剪切式高温加速度计 (a) 加速度计实物图和模型图^[164]; (b) 不同温度时传感器的频率响应情况^[164]; (c) 传感器在不同温度和频率下的响应^[164]; (d) 长期高温下传感器灵敏度变化情况^[164]; (e) 传感器在 11.2 kGy (1 Gy = 1 J/kg) 照射后的灵敏度^[164]; (b) frequency response of accelerometer at different temperatures^[164]; (c) sensitivity response of accelerometer at different temperatures^[164]; (c) sensitivity response of accelerometer at different temperatures and frequencies^[164]; (d) sensitivity changes of accelerometer under long-term high temperature conditions^[164]; (e) sensitivity of accelerometer after irradiation at 11.2 kGy (1 Gy = 1 J/kg)^[164].

图 31 高温 AlN 多轴加速度计性能测试 (a) 加速度计实物图 (左) 和模型图 (右)^[165]; (b) 多轴加速度计对 x方向 1 g 加速度的 频率响应^[165]; (c) 多轴加速度计在每个轴都承受 1 g 加速度时的性能^[165]

Fig. 31. High-temperature AlN multi-axis accelerometer performance test: (a) Physical (left) and modeled (right) diagrams of accelerometer^[165]; (b) frequency response of multi-axis accelerometer to 1 g acceleration in the x-direction^[165]; (c) performance of multiaxis accelerometer under 1 g acceleration on each axis^[165].

的灵敏度和频率响应, 能在 538 ℃ 环境中有效工 作. 两者区别在于图 32(b) 传感器的中心柱两边包 含对称的压电元件和质量块,图 32(c)传感器仅单 边使用压电传感单元. 这两个传感器都使用了由氧 化铝和氮化硼制成的绝缘垫圈,不仅不导电,而且 摩擦系数很低,能有效地防止短路以及降低热膨胀 不匹配产生的应力. Denis 等^[168] 考虑到了氧化物 压电材料在真空或封闭容器会发生高温降解,使电 阻率严重损失,导电性增强,传感器失效,为避免 这种情况发生,他们利用金属银在一定活化温度下 允许氧扩散或渗透的特性设计了带有金属银窗的 高温压电加速度计,如图 32(d) 和图 32(e),利用金 属银窗来补偿和调节封装传感器内部的氧平衡.通 过实验验证了银窗结构能延长传感器高温使用寿 命,所制剪切式压电振动传感器能有效工作于 566 ℃ 高温环境. 图 32(f) 展示的是一种偏心剪切式小型 高温振动传感器,在压电元件两侧设置了陶瓷隔离 垫片进行电气绝缘,采用横向剪切式设计有效地改 善了传感器的抗高温冲击性能,所制传感器体积 小、质量轻, 耐高温能力达到 650 ℃[169].

表 2 汇总了近年来部分高温压电加速度传感 器的性能情况, 平面剪切式传感器是当前主流的压

电加速度计. 压电陶瓷材料 PZT. BF-BT 等由于 压电性能高、居里温度略低,作为敏感元件时加速 度计的灵敏度高,但只适用于中低温环境.CNGS, CTGS, BTS, AIN 和 YCOB 等压电单晶由于在高 温下性能良好且稳定而广泛应用于高温加速度计, 特别是 YCOB 高温加速度计, 即使在超过 1000 ℃ 超高温环境下也能表现出高度稳定和可靠的性能. 目前国内外还有许多生产高温压电加速度传感器 的商用公司包括 PCB Piezotronics, Endevco Corporation, B&K, Vibro-Meter, Kistler USA, Dytran Instruments、厦门乃尔、上海慧石测控和中国 电子科技集团公司第二十六研究所等[31,170]. 它们 生产的高温加速度计产品性能成熟稳定, 普遍采用 外接信号调理设备的电荷输出模式,通过外部设备 如电荷放大器或固定的在线电荷转换器等将传感 器的输出信号放大 🖲. 其中, 美国和西欧的一些公 司生产的用于实际应用的高温压电振动传感器产 品主要包含 260 ℃, 482 ℃, 538 ℃, 649 ℃, 760 ℃ 等不同系列, 最高可使用温度达到了 815 ℃. 而我 国国内高温振动传感器的研究由于起步较晚,与国 外产品存在一定差距, 迫切需求进一步自主研发设 计超高温压电振动传感器.

图 32 剪切模式高温压电振动传感器 (a)环形剪切式 IEPE 高温振动传感器内部结构示意图^[166]; (b) 铌酸锂双边剪切高温压 电加速度计结构示意图^[167]; (c) 铌酸锂单边剪切高温压电加速度计结构示意图^[167]; (d) 带有银窗的高温压电加速度计整体结构示 意图^[168]; (e) 带银窗的高温压电加速度计剖视图^[168]; (f)650 ℃ 小型高温振动传感器结构示意图^[169]

Fig. 32. Shear mode high-temperature piezoelectric vibration sensors: (a) Ring shear IEPE high-temperature vibration sensor^[166]; (b) lithium niobate bilateral shear high-temperature piezoelectric accelerometer^[167]; (c) lithium niobate unilateral shear high-temperature piezoelectric accelerometer ^[167]; (d) schematic of the overall structure of high-temperature piezoelectric accelerometer with silver window^[168]; (e) cutaway view of high-temperature piezoelectric accelerometer with silver window^[168]; (f) structure of a 650 °C compact high-temperature vibration sensor^[169].

rable 2. Feromatice comparison of high-temperature piezoelectric accelerometers.							
压电材料	加速度计结构	最高服役温度/℃	灵敏度/(pC·g ⁻¹)	频响范围/Hz	参考文献		
$PbZr_{0.51}Ti_{0.49}O_3$	平面剪切式	300	42	1-8000	[160]		
LGT	平面剪切式	350	3.82	100-2000	[162]		
BFBT25-Mn	压缩式	450	49	200—1000	[150]		
CNGS	压缩式	600	0.722	60—2000	[133]		
CTGS	平面剪切式	600	2.56	100-2000	[140]		
BTS	倒装压缩式	600	${\sim}12.5$	_	[153]		
$\rm UHT-12^{\rm TM}$	平面剪切式	649	10	—	[143]		
BTS	压缩式	650	2.62	120-3000	[154]		
YCOB	压缩式	900	~ 2.4	100—600	[155]		
AlN	平面剪切式	1000	9.2	40-600	[164]		
YCOB	平面剪切式	1000	${\sim}5.9$	1-335	[35]		
YCOB	平面剪切式	1250	${\sim}1.26$	1-320	[163]		

表 2 高温压电加速度计性能比较

erformance comparison of high-temperature piezoelectric accelerometer

7 总结与展望

本文介绍了高温压电振动传感器的实际应用 场景及压电传感技术工作原理;回顾了一些常见的 高温压电陶瓷和压电单晶材料;分析了不同类型的 压电加速度传感器结构、原理、优缺点和研究进展, 除此之外还对目前现有的传感器振动校准装置进 行了总结.高温压电振动传感器具有稳定性好、可 靠性高、结构简单、响应速度快、易于集成等优点, 是目前最具发展前途的传感技术之一.然而,在高 温振动传感器的实际应用过程中仍面临着一些困 难和挑战. 1) 作为高温振动传感器敏感元件的压电陶瓷 和单晶材料存在一些缺点. 陶瓷材料的压电性能和 居里温度两者基本上存在负相关关系, 如大部分铅 基陶瓷、铌酸钾钠和钛酸铋钠无铅陶瓷在掺杂改性 后压电性能优异但居里温度降低, 铋层状压电陶瓷 材料居里温度较高, 但压电常数小. 压电单晶材料 居里温度或熔点都很高, 但压电常数低且制备工艺 复杂. 在超高温环境中, 一般只能使用压电单晶材 料作为压电敏感元件, 如 YCOB 作为最具潜力的 超高温压电单晶材料可应用于 1000 ℃ 环境中, 但 由于热释电效应的存在会对传感器产生不良电噪 声干扰.

2) 压电材料作为压电振动传感器的关键核心 元件,它的性能变化决定了传感器的性能稳定性. 高温环境中压电材料的电阻率至关重要,为了防止 电阻率下降干扰到压电效应产生的表面电荷的迁移,一般情况下传感器使用时的极限电阻率不低 于 10⁶ Ω·cm,而且传感器的低频响应也需要考虑 电阻大小,所以必须保证压电材料的电阻率在极端 环境中足够大.然而某些氧化物压电材料在高温密 封环境中会缺氧产生氧空位,使电阻率大大降低, 严重影响传感器性能稳定性.目前关于高温压电陶 瓷和压电单晶材料在各种苛刻环境中电学性能稳 定性的研究相对较少,为了保障高温振动传感器的 正常稳定工作,需要进一步研究高温压电材料在各 种极端环境中长期服役的性能变化情况.

3)国内关于高温压电振动传感器的研究由于 起步较晚,还没有能应用于 600 ℃ 以上环境的成 熟高温压电振动传感器. 然而,目前国内对于高温 振动传感器需求很大,使用的超高温压电振动传感 器基本来自进口. 为了能突破目前面临的超高温振 动传感技术瓶颈,需要加快超高温宽频高灵敏度压 电传感器研发工作.

4) 对于高温压电振动传感器的研究不能仅停 留在基础研究水平,需要提高传感器在超高温环境 中的长时工作稳定性,结合应用场景不断优化设 计,在保证性能的基础上降低成本,将研究成果走 向应用,开发出成熟的高温压电振动传感器产品, 进一步加快国内压电传感技术发展.

5) 关于高温压电振动传感器的相关测试还没 有国家标准,需要联合相关单位一起研究起草制定 相关国家标准.

参考文献

- Lü Q 2006 Principles and Applications of Modern Sensors (Beijing: Tsinghua University Press) (in Chinese) [吕泉 2006 现代传感器原理及应用 (北京:清华大学出版社)]
- [2] Giuliani A, Drera L, Arancio D, Mukhopadhyay B, Ngo H D 2014 Procedia Eng. 87 720
- [3] Vandeparre H, Watson D, Lacour S 2013 Appl. Phys. Lett. 103 20
- [4] Tavakkoli H, Momen H G, Sani E A, Yazgi M 2017 proceedings of the 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering Bursa, Turkey, November 30-December 02, 2017 p459
- [5] Yao Z, Liang T, Jia P G, Hong Y P, Qi L, Lei C, Zhang B, Xiong J J 2016 Sensors 16 913
- [6] Roessig T A, Howe R T, Pisano A P, Smith J H 1997 proceedings of the Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference Chicago, United States, June 19, 1997 p859
- [7] Kim N I, Chang Y L, Chen J, Barbee T, Wang W, Kim J Y, Kwon M K, Shervin S, Moradnia M, Pouladi S, Khatiwada D, Selvamanickam V, Ryou J H 2020 Sens. Actuators, A 305 111940
- [8] Jiang X N, Kim K, Zhang S J, Johnson J, Salazar G 2013 Sensors 14 144
- [9] Yu F P, Zhang S J, Zhao X, Yuan D R, Qin L F, Wang Q M, Shrout T R 2011 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 58 868
- [10] Shrout T R, Yu F P, Zhang S J, Wang Q M, Fei Y, Chai B 2011 proceedings of the 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings San Francisco, United States, May 1–5, 2011 p82
- [11] Yang Y, Wang M H, Yu Z H, Yu Q X, Chen K P 2021 Sens. Actuator A-Phys. 321 112562
- [12] Yu F P, Duan X, Zhang S J, Lu Q, Zhao X 2014 Crystals 4 241
- [13] Yuan Y P, Mei Y, Qi L C, Zhang Z W, Li X F, Wang P D 2022 *Piezoelectrics & Acoustooptics* 44 940 (in Chinese) [袁 字鹏, 梅勇, 齐良才, 张祖伟, 李小飞, 王登攀 2022 压电与声光 44 940]
- [14] Wu Z D 1988 J. Exp. Mech. 3 329 (in Chinese) [吴宗岱 1988 实验力学 3 329]
- [15] Zhang Y F 2003 M. S. Thesis (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [张永峰 2003 硕士学 位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [16] Hall C L, Leary S, Lapierre L, Hess A, Bladen K 2001 proceedings of the 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings Montana, United States, March 10–17, 2001 p3069
- [17] Zhang X F 1990 Avionics Technol. 1 1 (in Chinese) [张福学 1990 航空电子技术 1 1]
- [18] Zhou J 2016 M. S. Thesis (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [周俊 2016 硕士学位论 文 (武汉: 华中科技大学)]
- [19] Wu D F, Zhao S G, Pan B, Wang Y W, Wang J, Mou M, Zhu L 2013 Acta Mech. Sin. 45 598 (in Chinese) [吴大方, 赵 寿根, 潘兵, 王岳武, 王杰, 牟朦, 朱林 2013 力学学报 45 598]
- [20] Crawley E F 1994 AIAA J. **32** 1689
- High-temperature modal survey of a hot-structure control surface, Spivey N D https://ntrs.nasa.gov/citations/2011002 3803 [2024-6-1]
- [22] Sun M X, Ji J Y, Shi Y F, Chen Y L, Zhang Q S 2019

Struct. Environ. Eng. 49 54 (in Chinese) [孙明晓, 季俊云, 史 岩峰, 陈玉玲, 张巧寿 2019 强度与环境 49 54]

- [23] Turner R, Fuierer P A, Newnham R, Shrout T R 1994 Appl. Acoust. 41 299
- [24] Fleming W J 2001 IEEE Sens. J. 1 296
- [25] Yuan Y P, Wang D P, Li X F, Li J, Hu Y, Zeng X B, Wang Y X, Zhang Z W 2019 *Piezoelectrics & Acoustooptics* 41 49 (in Chinese) [袁字鹏, 王登攀, 李小飞, 李军, 胡杨, 曾翔豹, 王 音心, 张祖伟 2019 压电与声光 41 49]
- [26] Bulst W E, Fischerauer G, Reindl L 1998 proceedings of the IECON'98 Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Aachen, Germany, August 31–September 04, 1998 p265
- [27] Wang S R 2000 Theory and Applications of Silicon Miniature Inertial Devices (Nanjing: Southeast University Press) (in Chinese) [王寿荣 2000 硅微型惯性器件理论及应用 (南京: 东南大学出版社)]
- [28] Kazys R, Vaskeliene V 2021 Sensors 21 3200
- [29] Meng Y F, Chen G Q, Huang M Y 2022 Nanomaterials 12 1171
- [30] Yu F P, Duan X L, Zhang S J, Yu Y G, Ma T F, Zhao X T 2012 proceedings of the 2012 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications Shanghai, China, November 23–25 2012 p293
- [31] Wang T Z, Zhou Z Y, Li W, Dong X L, Zhang L 2020 *Transducer Microsyst. Technol.* 39 1 (in Chinese) [王天资, 周志勇,李伟,董显林,张磊 2020 传感器与微系统 39 1]
- [32] Shan C X 1999 Theoretical and Design Basis of Sensors and their Applications (Beijing: National Defense Industry Press) (in Chinese) [单成祥 1999 传感器的理论与设计基础及其应用 (北京: 国防工业出版社)]
- [33] Bilgunde P N, Bond L J 2018 Ultrasonics 87 103
- [34] Yu J C, Lan C B 2001 Sens. Actuator. A 88 178
- [35] Kim K, Zhang S J, Salazar G, Jiang X N 2012 Sens. Actuator, A 178 40
- [36] Wang D Y, Wang A J, Wang W S, Li L, Zhang Y B, Zhai J
 W 2021 J. Ceram. 42 376 (in Chinese) [王丹钰, 王安玖, 王五
 松, 李荔, 张垚宾, 翟继卫 2021 陶瓷学报 42 376]
- [37] Luan G D, Zhang J D, Wang R Q 2005 Piezoelectric Transducers and Transducer Arrays (Beijing: Peking University Press) (in Chinese) [栾桂冬, 张金铎, 王仁乾 2005 压电换能器和换能器阵 (北京: 北京大学出版社)]
- [38] Li Q L, Cao J X, Zhao L Y, Lv J M, Fan G F 2008 Chem. Ind. Eng. Prog. 27 16 (in Chinese) [李庆利, 曹建新, 赵丽媛, 吕剑明, 范冠锋 2008 化工进展 27 16]
- [39] Zhang F Q, Li Y X 2014 J. Inorg. Mater. 29 449
- [40] Chen L, Liu H, Qi H, Chen J 2022 Prog. Mater. Sci. 127 100944
- [41] Jaffe B, Roth R, Marzullo S 1954 J. Appl. Phys. 25 809
- [42] Kumar A, Bhanu Prasad V V, James Raju K C, James A R 2015 J. Mater. Sci. -Mater. Electron. 26 3757
- [43] Eitel R E, Randall C A, Shrout T R, Rehrig P W, Hackenberger W, Park S E 2001 Jpn. J. Appl. Phys. 40 5999
- [44] Dong Y Z, Zou K, Liang R H, Zhou Z Y 2023 Prog. Mater. Sci. 132 101026
- [45] Zou T T, Wang X H, Wang H, Zhong C F, Li L T, Chen I W 2008 Appl. Phys. Lett. 93 19
- [46] Zhao H Y, Hou Y D, Yu X L, Zheng M P, Zhu M K 2018 J. Appl. Phys. 124 19
- [47] Kim Y M, Kumar A, Hatt A, Morozovska A N, Tselev A, Biegalski M D, Ivanov I, Eliseev E A, Pennycook S J, Rondinelli J M, Kalinin S V, Borisevich A Y 2013 Adv. Mater. 25 2497

- [48] Dho J H, Qi X D, Kim H, MacManus-Driscoll J L, Blamire M G 2006 Adv. Mater. 18 1445
- [49] Leontsev S O, Eitel R E 2009 J. Am. Ceram. Soc. 92 2957
- [50] Kim S, Miyauchi R, Sato Y, Nam H, Fujii I, Ueno S 2023 Adv. Mater. 35 11
- [51] Yang H B, Sun Y Y, Gao H Y, Zhou X Y, Tan H, Shu C 2022 IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 69 3102
- [52] Lee M H, Kim D J, Park J S, Kim S W, Song T K, Kim M H 2015 Adv. Mater. 27 6976
- [53] Hu H, Zhuang J, Weng Y X, Zhang N, Wang B Y, Wang D W, Feng G B, Ren W 2023 J. Eur. Ceram. Soc. 43 6815
- [54] Hu W, Tan X L, Rajan K 2011 J. Eur. Ceram. Soc. 31 801
- [55] Sun S D, Liu Y, Zhang Y Y, Wang L, Huo C R, Deng S Q, Liu H, Ren Y, Wu J, Oi H, Chen J 2022 Acta Mater. 239 118285
- [56] Wang K, Yao F Z, Jo W, Gobeljic D, Shvartsman V V, Lupascu D C, Li J F, ROEDEL J 2013 Adv. Funct. Mater. 23 4079
- [57] Yao F Z, Wang K, Jo W, Webber K G, Comyn T P, Ding J X, Xu B, Cheng L Q, Zheng M P, Hou Y D, Li J F 2016 Adv. Funct. Mater. 26 1217
- [58] Zhang M H, Wang K, Du Y J, Dai G, Sun W, Li G, Hu D, Thong H C, Zhao C L, Xi X Q, Yue Z X, Li J F 2017 J. Am. Chem. Soc. 139 3889
- [59] Li P, Zhai J W, Shen B, Zhang S J, Li X L, Zhu F Y, Zhang X M 2018 Adv. Mater. 30 1705171
- [60] Egerton L, Dillon D M 1959 J. Am. Ceram. Soc. 42 438
- [61] Zuo R Z, Fu J 2011 J. Am. Ceram. Soc. 94 1467
- [62] Zhang B Y, Wu J G, Cheng X J, Wang X P, Xiao D Q, Zhu J G, Wang X J, Lou X J 2013 ACS Appl. Mater. Interfaces 5 7718
- [63] Wu J G, Wang X P, Cheng X J, Zheng T, Zhang B Y, Xiao D Q, Zhu J G, Luo X J 2014 J. Appl. Phys. 115 114104
- [64] Rubio-Marcos F, Lopez-Juarez R, Rojas-Hernandez R E, del Campo A, Razo-Perez N, Fernandez J F 2015 ACS Appl. Mater. Interfaces 7 23080
- [65] Chen X F, Zhang D J 2014 Adv. Ceram. 4 28 (in Chinese) [陈秀峰, 张大军 2014 现代技术陶瓷 4 28]
- [66] Chen J, Liu H H, Yu D Y, Li Q N, Yuan C L, Xu J W, Cheng S, Zhao J T, Zhou C R, Rao G H 2024 Chem. Eng. J. 480 148202
- [67] Li Y M, Zhang Y P, Liao R H, Chen L 2006 J. Ceram. 27 205 (in Chinese) [李月明, 张玉平, 廖润华, 程亮 2006 陶瓷学 报 27 205]
- [68] Cai K, Jiang F, Deng P Y, Ma J T, Guo D 2015 J. Am. Ceram. Soc. 98 3165
- [69] Zhao X M, Liu C, Zhang D N, Huang D, Liu K, Zhang H W 2022 Ceram. Int. 48 35461
- [70] Zhou J, Zhao R, Chen W 2005 J. Ceram. 26 202 (in Chinese) [周静, 赵然, 陈文 2005 陶瓷学报 26 202]
- [71] Fang R R, Zhou Z Y, Liang R H, Dong X L 2020 Ceram. Int. 46 23505
- [72] Ray S, Günther E, Ritzhaupt-Kleissl H J 2000 J. Mater. Sci. 35 6221
- [73] Vasant Kumar C, Sayer M, Pascual R 1992 Appl. Phys. Lett. 60 2207
- [74] Jin R Q, Ren X D, Xu Z, Yan Y K 2023 Ceram. Int. 49 39516
- [75] Hagh N M, Nonaka K, Allahverdi M, Safari A 2005 J. Am. Ceram. Soc. 88 3043
- [76] Fang R R, Zhou Z Y, Liang R H, Dong X L 2021 Ceram. Int. 47 26942

- [77] Wu J G, Gao X Y, Chen J G, Wang C M, Zhang S J, Dong S X 2018 Acta Phys. Sin. 67 207701 (in Chinese) [吴金根, 高 翔宇, 陈建国, 王春明, 张树君, 董蜀湘 2018 物理学报 67 207701]
- [78] Chen H B, Zhai J W 2012 J. Electron. Mater. 41 2238
- [79] Long C B, Fan H Q, Li M M 2013 Dalton Trans. 42 3561
- [80] Li T, Li X L, Zhao Z H, Ji H M, Dai Y J 2015 Integr. Ferroelectr. 162 1
- [81] Pan C B, Zhao G C, Li S M, Wang X L, Wang J M Z, Tao M, Zhang X K, Yang C, Xu J P, Yin W, Yin L H, Song W H, Tong P, Zhu X B, Yang J, Sun Y P 2022 J. Mater. Chem. C 10 15851
- [82] Zhang H X 2007 proceedings of the 2007 Sixteenth IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics Nara, Japan, May 27–31, 2007 p751
- [83] Zhang S J, Alberta E, Eitel R E, Rehrig P W, Hackenberger W, Randall C A, Shrout T R 2005 proceedings of the Smart Structures and Materials 2005: Active Materials: Behavior and Mechanics, California, United States, March 07–10, 2005 p279
- [84] Zhao H Y, Hou Y D, YU X L, Zheng M P, Zhu M K 2020 J. Mater. Chem. C 8 1562
- [85] Zhang S J, Yu F P 2011 J. Am. Ceram. Soc. 94 3153
- [86] Belavic D, Bradesko A, Zarnik M S, Rojac T 2015 Metrol. Meas. Syst. 22 331
- [87] Gong M X 2001 Int. Electron. Ele 1 9 (in Chinese) [龚美霞 2001 国外电子元器件 1 9]
- [88] Philippot E, Palmier D, Pintard M, Goiffon A 1996 J. Solid State Chem. 123 1
- [89] London D 2011 Can. Mineral. 49 117
- [90] Shen C Y, Zhang S J, Cao W W, Cong H J, Yu H H, Wang J Y, Zhang H J 2015 Appl. Phys. 117 064106
- [91] Shen C Y, Zhang S J, Wang D L, Xu T X, Yu H H, Cao W W, Wang J Y, Zhang H J 2015 Crystengcomm 17 1791
- [92] Takeda H, Hagiwara M, Noguchi H, Hoshina T, Takahashi T, Kodama N 2013 Appl. Phys. Lett. 102 242907
- [93] Zhang Y Y, Yin X, Yu H H, Cong H J, Zhang H J, Wang J Y, Boughtont R I 2012 Cryst. Growth Des. 12 622
- [94] Haines J, Cambon O, Prudhomme N, Fraysse G, Keen D A, Chapon L C, Tucker M G 2006 Phys. Rev. B 73 14103
- [95] Fachberger R, Bruckner G, Knoll G, Hauser R, Biniasch J, Reindl L 2004 IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 51 1427
- [96] Giurgiutiu V, Xu B L, Liu W P 2010 Struct. Health Monit. 9 513
- [97] Chen L, Chen Y, Xiao D Q, Zhu J G 2005 J. Sichuan Univ.
 42 150 (in Chinese) [陈林, 陈异, 肖定全, 朱建国 2005 四川大 学学报 42 150]
- [98] Bouchy S, Zednik R J, Bélanger P 2022 Materials 15 4716
- [99] Kim N I, Yarali M, Moradnia M, Aqib M, Liao C H, AlQatari F, Nong M T, Li X H, Ryou J H 2023 Adv. Funct. Mater. 33 2212538
- [100] Sotnikov A V, Schmidt H, Weihnacht M, Smirnova E P, Chemekova T Y, Makarov Y N 2010 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 57 808
- [101] Zhao C L, Song B, Zhang X H, Han J C 2012 Mater. Rep.
 26 11 (in Chinese) [赵超亮, 宋波, 张幸红, 韩杰才 2012 材料 导报 26 11]
- [102] Oreshko A P, Ovchinnikova E N, Rogalev A, Wilhelm F, Mill B V, Dmitrienko V E 2018 J. Synchrotron Radiat. 25 222
- [103] Bohm J, Chilla E, Flannery C, Fröhlich H J, Hauke T, Heimann R B, Hengst M, Straube U 2000 J. Cryst. Growth

216 293

- [104] Sato J, Takeda H, Morikoshi H, Shimamura K, Rudolph P, Fukuda T 1998 J. Cryst. Growth 191 746
- [105] Nakao H, Nishida M, Shikida T, Shimizu H, Takeda H, Shiosaki T 2006 J. Alloys Compd. 408 582
- [106] Zhang S, Yoshikawa A, Kamada K, Frantz E, Xia R, Snyder D W, Fukuda T, Shrout T R 2008 Solid State Commun. 148 213
- [107] Takeda H, Shimamura K, Chani V, Kato T, Fukuda T 1999 Cryst. Res. Technol. 34 1141
- [108] Takeda H, Fukuda T, Kawanaka H, Onozato N 2001 J. Mater. Sci. -Mater. Electron. 12 199
- [109] Ren C K, Yin L B, Wang S, Chen W R, Wang S, Xiong K N, Tu X N, Bao N Z, Zheng Y Q, Chen J, Shi E W 2024 J. *Rare Earths* (received)
- [110] Shen C Y, Zhang H J, Cong H J, Yu H H, Wang J Y, Zhang S J 2014 Appl. Phys. 116 4
- [111] Taylor N T, Davies F H, Hepplestone S 2017 Mater. Res. Express 4 125904
- [112] Zhong D G, Teng B, Kong W J, Ji S H, Zhang S M, Li J H, Cao L F, Jing H L, He L X 2017 J. Alloys Compd. 692 413
- [113] Takeda H, Nakao H, Izukawa S, Shimizu H, Nishida T, Okamura S, Shiosaki T 2006 J. Alloys Compd. 408 474
- [114] Fei Y, Chai B H, Ebbers C, Liao Z, Schaffers K I, Thelin P 2006 J. Cryst. Growth 290 301
- [115] Zhang S J, Fei Y T, Frantz E, Snyder D W, Chai B H T, Shrout T R 2008 IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 55 2703
- [116] Yu F P, Zhang S J, Zhao X, Guo S Y, Duan X L, Yuan D R, Shrout T R 2011 J. Phys. D: Appl. Phys. 44 135405
- [117] Zhang S J, Yu F P, Xia R, Fei Y T, Frantz E, Zhao X, Yuan D R, Chai B H T, Snyder D, Shrout T R 2011 J. Cryst. Growth 318 884
- [118] Yu F P, Hou S, Zhao X, Zhang S J 2014 IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 61 1344
- [119] Zhang S J, Frantz E, Xia R, Everson W, Randi J, Snyder D W, Shrout T R 2008 Appl. Phys. 104 8
- [120] Yan C H, Huang X W 2024 J. Chin. Soc. Rare Earths 42 381 (in Chinese) [严纯华,黄小卫 2024 中国稀土学报 42 381]
- [121] Stephan A, Gaulden T, Brown A D, Smith M, Miller L, Thundat T 2002 Rev. Sci. Instrum. 73 36
- [122] Cao M S, Ye L, Zhou L M, Su Z Q, Bai R B 2011 Mech. Syst. Sig. Process. 25 630
- [123] Zang H Y, Zhang X M, Zhu B L, Fatikow S 2019 Sens. Actuator, A 296 155
- [124] Havelock D, Kuwano S, Vorlander M 2008 Handbook of Signal Processing in Acoustics (New York: Springer)
- [125] Wu J G, Shi H D, Zhao T L, Yu Y, Dong S X 2016 Adv. Funct. Mater. 26 7186
- [126] Guo X R 2021 M. S. Thesis (Shanxi: North Central University) (in Chinese) [郭欣榕 2021 硕士学位论文 (山西: 中北大学)]
- [127] Shi S Z, Geng W P, Liu Y, Bi K X, Li F, Chou J X 2022 Acta Armament. 43 1998 (in Chinese) [石树正, 耿文平, 刘勇, 毕开西, 李芬, 丑修建 2022 兵工学报 43 1998]
- [128] Xu M H, Zhou H, Zhu L H, Shen J N, Zeng Y B, Feng Y J, Guo H 2019 Microsyst. Technol. 25 4465
- [129] Le Traon O, Masson S, Chartier C, Janiaud D 2010 Solid State Sci. 12 318
- [130] Li D N, Fan Q Q, Li J H, Ren W, Wu L, Sun B, Yang Z 2019 proceedings of the 2019 13th Symposium on Piezoelectrcity, Acoustic Waves and Device Applications Harbin, China, January 11–14, 2019

- [131] Han J Q, Zhu Y S, Tao G H, Zhao Z Q, Yin Y J, Niu W J, Dong L Z 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 6602
- [132] Zeng H C 2021 M. S. Thesis (Sichuan: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [曾宏川 2021 硕士学位论文 (四川: 电子科技大学)]
- [133] Wang Y M, Liu X L, Bai L Y, Cheng R, Jiang C, Li Y Z, Zhang J Q, Chen H, Li Y L, Yu F P, Guo S Y 2023 J. Alloys Compd. 937 168449
- [134] Chen L J, Xu X Y, Lei Y H, Yang Y, Piao S C, Zhang L 2020 J. CAEIT 15 1212 (in Chinese) [陈丽洁, 徐兴烨, 雷亚 辉, 杨月, 朴胜春, 张丽 2020 中国电子科学研究院学报 15 1212]
- [135] Zhang D Z, Liu J, Qin L, Liu J C, Li M 2020 *IEEE Sens. J.* 20 7129
- [136] Pan R 2019 M. S. Thesis (Jinan: Shandong University) (in Chinese) [潘睿 2019 硕士学位论文 (济南: 山东大学)]
- [137] Zhu R J 2019 M. S. Thesis (Chengdu: University of Electronic Science and Technology) (in Chinese) [朱瑞浩 2019 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [138] Wu T Q, You D, Gao H Y, Lian P H, Ma W G, Zhou X Y, Wang C M, Luo J H, Zhang H B, Tan H 2023 Crystals 13 1363
- [139] Ding M P 2020 M. S. Thesis (Jinan: Shandong University) (in Chinese) [丁明鹏 2020 硕士学位论文 (济南: 山东大学)]
- [140] Zeng H C, Peng B, Zhang W L 2021 Piezoelectrics & Acoustooptics 43 320 (in Chinese) [曾宏川, 彭斌, 张万里 2021 压电与声光 43 320]
- [141] Shi Y N, Jiang S S, Liu Y, Wang Y Y, Qi P L 2022 Geofluids 2022 3964502
- [142] Kapusuz H, Güvenc M A, Mistikoglu S 2019 Int. Adv. Res. Eng. J. 3 144
- [143] Metz B 2014 Proceedings of the 50th AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference Cleveland, United States, July 28–30, 2014 p3974
- [144] Wang J H, Zuo A B, Peng Y X 2022 Acta Metrol. Sin. 43 1634 (in Chinese) [王佳豪, 左爱斌, 彭月祥 2022 计量学报 43 1634]
- [145] Zhu G, Yang X W, Liu X 2018 J. Phys. Conf. Ser. 1065 222003
- [146] Zhu G, Yang X W, Yan L, Liu X, Wu D J 2015 CN Patent CN204188258U [2015-03-04] (in Chinese) [朱刚,杨晓伟,闫 磊,刘鑫,武东健 2015 中国专利 CN204188258U [2015-03-04]]
- [147] Beckman P, Gerding B F, Jain P K 1975 U. S. Patent 3 884 085 [1975-05-20]
- [148] Norling B L, Wash M C 1988 US Patent 4 750 363 [1988-06-14]
- [149] Kubasov I V, Kislyuk A M, Turutin A V, Bykov A S, Kiselev D A, Temirov A A, Zhukov R N, Sobolev N A, Malinkovich M D, Parkhomenko Y N 2019 Sensors 19 614
- [150] Chen J G, Wu J E, Lu Y, Wang Y, Cheng J R 2022 Appl. Phys. Lett. 121 23
- [151] Cavalloni C, Sommer R, Waser M 2011 9th Eurppean Conference on Turbomachinery-Fluid Dynamics and Thermodynamics Istanbul, Turkey, March 21–25, 2011 p1555
- [152] Liu X L, Jiang C, Tian S W, Fang H R, Yu F P, Xian Z 2019 proceedings of the 2019 14th Symposium on

Piezoelectrcity, Acoustic Waves and Device Applications Shijiazhuang, China November 01–04, 2019 p214

- [153] Yu F P, Liu X L, Jiang C, Fang H R, Yang Y, Zhao X 2021 CN Patent CN111579815A [2021-07-13] (in Chinese) [于法鹏, 刘学良,姜超,房浩然,杨勇,赵显 2021 中国专利 CN111579815A [2021-07-13]]
- [154] Jiang C, Liu X L, Yu F P, Zhang S J, Fang H R, Cheng X F, Zhao X 2020 IEEE Trans. Ind. Electron. 68 12850
- [155] Zhang S J, Jiang X N, Lapsley M, Moses P, Shrout T R 2010 Appl Phys Lett. 96 1
- [156] Ren Z, Su G, Wang H Z, Yan C X 2020 CN Patent CN210269907U [2020-04-07] (in Chinese) [任政, 苏刚, 王红 战, 闫长新 2020 中国专利 CN210269907U [2020-04-07]]
- [157] Hu Z J, Li C E, Zhou J G, Li Y, Yan H X, Wang Z C 1999 *CN Patent* CN1226681A [1999-08-25] (in Chinese) [胡子俭, 李承恩,周家光,李毅,晏海学,王志超 1999 中国专利 CN1226681A [1999-08-25]]
- [158] Xu Y G, Zhu W X, Sun L, Xun Z L, Shen S Q, Li P Z, Huang Y P, Qiao H W 2023 CN Patent CN116298388A [2023-06-23] (in Chinese) [徐昱根,朱万霞,孙磊,郇正利,沈 双全,李朋洲,黄彦平,乔红威 2023 中国专利 CN116298388A [2023-06-23]]
- [159] Zhang Z H, Liu S H, He G, Wu L S, Zhang W Y, Teng F
 2023 CN Patent CN116660578A [2023-08-29] (in Chinese)
 [张振海,刘石豪,何光,吴缪斯,张文一,滕飞 2023 中国专利
 CN116660578A [2023-08-29]]
- [160] Ochiai T 1998 Jpn. J. Appl. Phys. 37 1964
- [161] Qin L F, Xia H, Li N, Yang C 2023 CN Patent CN115792276A [2023-05-12] (in Chinese) [秦利锋, 夏虎, 李 宁, 杨淳 2023 中国专利 CN115792276A [2023-05-12]]
- [162] Liu X L, Yu F P, Li F L, Tian S W, Cheng X F, Zhao X 2019 proceedings of the 2019 13th Symposium on Piezoelectrcity, Acoustic Waves and Device Applications Harbin, China, January 11–14, 2019
- [163] Salazar G, Kim K, Zhang S J, Jiang X N 2012 Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering 8347 40
- [164] Kim H, Kerrigan S, Bourham M, Jiang X N 2021 IEEE Trans. Ind. Electron. 68 5346
- [165] Kerrigan S P 2023 PhD Disertation Development, Fabrication, and Characterization of Piezoelectric Non-Intrusive Wireless Vibration Sensors for Nuclear Power Plant Applications (Raleigh: NC State University)
- [166] Yu K, Zhao C, Peng P, Huang W, Jin C, Feng T, Li J H
 2023 CN Patent CN219996335U [2023-11-10] (in Chinese)
 [余快,赵聪,彭鹏,黄伟,金城,冯婷,李菊红 2023 中国专利
 CN219996335U [2023-11-10]]
- [167] Epstein H C, Calif S P 1973 US Patent 3727084 [1973-04-10]
- [168] Chatsworth D V, Chatsworth P F 2013 US Patent 8375793B2 [2013-02-19]
- [169] Gu B L, Huang J M, Zhao Z P, Chen J B, Yan S J, Pan W
 2014 CN Patent CN203534825U [2014-04-09] (in Chinese)
 [顾宝龙,黄建民,赵振平,陈佳壁,晏生剑,潘威 2014 中国专利 CN203534825U [2014-04-09]]
- [170] Walter P L 2007 Sound Vib. 41 89

REVIEW

Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials^{*}

YU Huifen ¹⁾ QI He ^{1)†} TU Xiaoniu ²⁾ ZHANG Haibo ³⁾ CHEN Dali ⁴⁾ WU Jie ⁵⁾ CHEN Jun ^{1)5)‡}

1) (Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

2) (Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

3) (School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

4) (Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

5) (Hainan University, Haikou 570228, China)

(Received 30 June 2024; revised manuscript received 12 November 2024)

Abstract

Vibration sensor technology, especially piezoelectric vibration sensor, has been widely applied in various fields. This type of sensor has excellent dynamic response, linearity, wide bandwidth, high sensitivity, large temperature range, simple structure, and stable performance, so it can be applied in many cases such as nuclear power, aerospace, rail transportation, and defense industries. However, most of piezoelectric vibration sensors are limited to operating temperatures below 500 $^{\circ}$ C, which restricts their applications in extreme high-temperature environments encountered in nuclear reactors, aircraft engines, missile systems, and internal combustion engines. How to improve the operating temperature of piezoelectric vibration sensors to meet their application requirements in extreme environments is an urgent problem that needs to be solved.

High-temperature piezoelectric materials, as the core components of piezoelectric vibration sensors, play a decisive role in determining the overall performance of the sensor. Common high-temperature piezoelectric materials include piezoelectric ceramics and single crystals. To ensure stable operation and excellent sensitivity in extreme environments, it is essential to select piezoelectric materials with high Curie temperature, high piezoelectric coefficient, high resistivity, and low dielectric loss as the sensing elements of the sensor. There are usually three main types of piezoelectric vibration sensors: bending, compression, and shear. In addition to selecting the suitable piezoelectric material, it is also crucial to choose the optimal sensor structure suitable to the specific application scenarios.

In view of the urgent demand for ultrahigh-temperature vibration sensors, this paper mainly reviews the current research progress of high-temperature piezoelectric materials and high-temperature piezoelectric vibration sensors, summarizes the structures, advantages and disadvantages, and application scenarios of different types of high-temperature piezoelectric vibration sensors, explores the current problems and future development trends of high-temperature piezoelectric vibration sensors, and provides ideas for developing the next-generation ultrahigh temperature vibration sensors for extreme environmental applications, which is expected to promote the further development of high-temperature piezoelectric vibration sensing technology.

Keywords: vibration sensors, high-temperature piezoelectric materials, vibration modes, vibration calibration devices

PACS: 77.55.–g, 77.65.Dq, 77.84.–s, 77.84.Cg

DOI: 10.7498/aps.74.20240906

CSTR: 32037.14.aps.74.20240906

^{*} Project supported by the National Key Research and Developemnt Program of China (Grant No. 2022YFB3204000).

[†] Corresponding author. E-mail: qiheustb@ustb.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: junchen@ustb.edu.cn

物理学报Acta Physica Sinica

Institute of Physics, CAS

高温压电振动传感器及其压电材料研究进展

余慧芬 祁核 涂小牛 张海波 陈大力 吴捷 陈骏

Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials YU Huifen QI He TU Xiaoniu ZHANG Haibo CHEN Dali WU Jie CHEN Jun 引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 74, 027702 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20240906 在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.74.20240906 当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绝对重力测量中振动传感器振动补偿性能的分析

Analysis of vibration correction performance of vibration sensor for absolute gravity measurement 物理学报. 2022, 71(4): 049101 https://doi.org/10.7498/aps.71.20211686

一种耐高温的柔性压电/热释电双功能传感器

A flexible piezoelectric/pyroelectric dual-function sensor with high temperature resistance 物理学报. 2024, 73(20): 206801 https://doi.org/10.7498/aps.73.20241006

压电圆环径向弯曲振动与激励研究

Study of radial bending vibration and excitation of piezoelectric rings 物理学报. 2024, 73(19): 194301 https://doi.org/10.7498/aps.73.20240887

基于2-2型压电复合材料的新型宽频带径向振动超声换能器

A new broadband radial vibration ultrasonic transducer based on 2-2 piezoelectric composite material 物理学报. 2021, 70(1): 017701 https://doi.org/10.7498/aps.70.20201352

石墨烯谐振式力学量传感器研究进展

Research progress of electromechanical graphene resonant sensors 物理学报. 2022, 71(12): 126801 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220215

冰的氢键振动研究

Investigation of hydrogen bond vibrations of ice 物理学报. 2021, 70(14): 146301 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210013