材料、结构及工艺

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20251021003

敏感元支撑结构对热释电传感器抗干扰性能影响

王 鹏[1],张东雷[1],孟令晨[1],林 康[1],吴俊鹏[1],郭明楷[1],秦国帅[1,2*],卢春生[2,3]

(1. 河南工业大学 机电工程学院,郑州 450018; 2. 郑州大学 强度与事故预防工程研究中心,郑州 450018;
3. 澳大利亚科廷大学,珀斯 6845)

摘 要: 针对热释电红外探测器在外部振动与温度波动环境下易产生信号漂移及噪声增强的问题,文章从敏感元支撑结构设计出发,系统研究其对探测器抗干扰性能的作用机制。通过多物理场仿真与实验测试,对比分析了三类支撑结构对敏感元挠度及感应电势的响应特性。结果表明,五支撑柱结构能够显著降低敏感元在力-热耦合场中的挠曲变形,从而有效增强热释电效应主导的电荷生成,同时明显抑制压电效应引入的干扰信号。此外,进一步揭示了关键结构参数对抗干扰性能的影响机制,为高性能热释电红外探测器的设计与优化提供了理论基础与数据参考。

关键词: 热释电红外探测器; 热释电效应; 支撑结构; 多物理场仿真; 抗干扰

中图分类号: TN215 **文章编号:** 1001－5868(2026)01－0108－08

Influence of Sensitive Element Support Structure on the Anti-Interference Performance of Pyroelectric Sensors

WANG Peng[1], ZHANG Donglei[1], MENG Lingchen[1], LIN Kang[1], WU Junpeng[1], GUO Mingkai[1], QIN Guoshuai[1,2], LU Chunsheng[2,3]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450018, CHN;
2. Strength and Accident Prevention Engineering Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450018, CHN;
3. Curtin University, Perth 6845, AU)

Abstract: To address the limitations of signal drift and noise enhancement in pyroelectric infrared detectors under external vibration and temperature-fluctuation environments, this study systematically evaluated the action mechanism of the sensitive-element support structure on the anti-interference performance of pyroelectric detectors, beginning with the design of the sensitive-element support structure. Through multi-physics field simulations and experimental tests, the response characteristics of three types of support structures on the deflection and induced potential of the sensitive element were systematically compared and analyzed. The results show that a five-support-column structure can significantly reduce the flexural deformation of the sensitive element in the force - thermal coupling field. Thus, it effectively enhances the charge generation dominated by the pyroelectric effect while suppressing the interference signal introduced by the piezoelectric effect. In addition, the results further reveal the influence mechanism of key structural parameters on the anti-interference performance. This study provides a theoretical basis and data reference for the design and optimization of high-performance pyroelectric infrared detectors.

Key words: pyroelectric infrared detector; pyroelectric effect; support structure; multiphysics field simulation; anti-interference

收稿日期: 2025－10－21.

* **通信作者:** 秦国帅

0　引言

热释电红外探测器能够将特定波段的红外辐射转换为电信号，因其具备响应速度快、光谱响应宽、无需制冷与偏置电压、结构紧凑及成本低等优势，已广泛应用于远程测温、热成像、人体识别与气体探测等领域[1-5]。作为非制冷红外探测技术的研究与应用重点，该类探测器通常由红外吸收层、电极、热释电材料及绝热结构组成，其核心探测机理依赖于热释电材料在吸收红外辐射后因温度变化而产生极化电荷，进而通过外部电路实现信号读取[6-8]。

然而，在复杂服役环境（如振动、强光、背景辐射等）中，热释电探测器仍面临抗干扰能力弱、易误报警等严重问题[9-11]。为改善其性能，常从敏感元材料、支撑结构设计及后置电路等方面进行优化。其中，支撑结构不仅影响器件的热隔离性能，更直接关系到对外界机械振动所诱发“微音效应”的抑制能力——即因振动引起敏感元形变，进而通过压电效应产生干扰信号[12-13]。相较于传统的平面复合膜结构，悬空式支撑结构能有效降低热传导损耗，并在相同热流条件下获得更高的敏感元温升与更小的挠曲变形，从而在提升热释电响应的同时抑制压电噪声[14]。因此，支撑结构的合理设计对改善探测器综合性能具有关键作用。

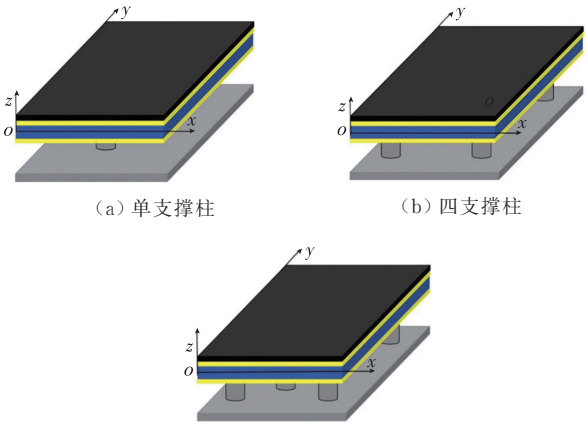
本文基于有限元仿真，系统研究不同支撑结构参数对探测器热学与力学性能的影响，揭示多种结构对敏感元挠度及温度变化率的作用机制，并确定较优参数组合。此外，依据优化结果制备样机并进行抗干扰性能测试，以验证所提结构参数的有效性，为热释电探测器在力-热耦合工况下的结构优化与抗干扰性的提高提供理论依据。

1　敏感元支撑结构仿真分析

1.1　支撑结构模型

钽酸锂（$LiTaO_3$，LT）因其优异的热释电性能，被广泛用作高灵敏度红外探测器的敏感元材料[15]。然而，LT 在具备显著热释电特性的同时，也表现出较强的压电效应。这种双重特性使得探测器在外界机械振动等扰动下，易因敏感元结构变形而产生额外的电荷信号，即“微音效应”，导致输出信号波动并影响探测稳定性。因此，在器件结构设计中，需在增强热释电响应的同时，有效抑制由压电效应引入的噪声。

为探究支撑结构对微音效应的抑制机理，本文通过分析敏感元在力、热及其耦合作用下的形变与电势分布，系统研究不同支撑结构对微音效应的抑制效果。研究选用各向同性且刚度远高于 LT 的超因瓦合金作为支撑材料，以有效限制敏感元在机械载荷下的形变量[16-17]。基于此，建立如图 1 所示的三类支撑结构的三维有限元模型：单支撑柱、四支撑柱及五支撑柱结构，旨在覆盖从基础到增强的设计谱系，以系统评估其抗干扰与综合性能。其中，单支撑热隔离性优但机械刚性及抗干扰性弱；四支撑是当前工程中普遍采用的稳结构，可作为性能对比的基准；五支撑则是在此基础上引入中心柱的增强构型，以期协同改善刚度与热隔离性，从而抑制微音效应。目前，五支撑结构的研究尚属薄弱，尤其缺乏对其关键几何参数在力-热耦合场中作用机制的系统分析与优化。本研究填补了这一空白，通过多物理场仿真与参数优化，明确了五支撑结构的最优构型，使其抗干扰能力获得实质性提升。该模型自上而下依次由敏感元、隔热层、补偿元、支撑结构及基板组成[18]，其中敏感元与补偿元上下表面均设有电极层，其厚度相对敏感元可忽略不计。

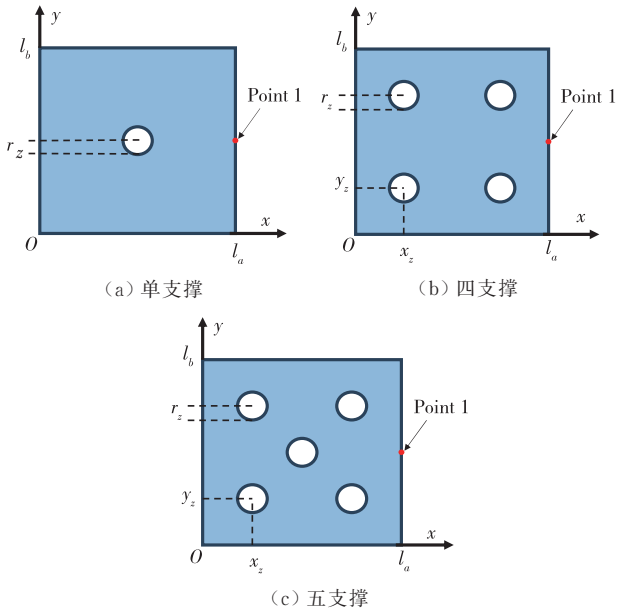


（a）单支撑柱　（b）四支撑柱　（c）五支撑柱

图 1　三类支撑结构的敏感元结构示意图

1.2　支撑结构边界条件

在支撑柱型敏感元结构中，其支撑柱的位置分布如图 2 所示。单支撑结构由 1 个位于板几何中心位置的支撑柱，四支撑结构由 4 个关于中心柱对称分布的支撑柱组成，五支撑结构分别为敏感元的长和宽，x_z，y_z 表示支撑柱的圆心坐标，r_z 为支撑柱半径，h_z 为高度，支撑柱圆心坐标分别为 $(l_a/2, l_b/2)$，(x_z, y_z)，(l_a-x_z, l_b-y_z)，(l_a-x_z, y_z)，(x_z, l_b-y_z)。



（a）单支撑　（b）四支撑　（c）五支撑

图2　三类支撑结构的位置分布示意图

其位移、热、力和电边界条件如下式。位移边界条件：

$$u^{(0)}=v^{(0)}=w=0 \tag{1}$$

式中，$u^{(0)}$，$v^{(0)}$分别表示板底面在x与y方向的位移，w表示板在z方向的位移（挠度）。

$$u^{(1)}=v^{(1)}=0 \tag{2}$$

式中，$u^{(1)}$，$v^{(1)}$分别表示板顶面在x与y方向的位移。

$$\begin{aligned}
&\text{at}\,(x-l_a/2)^2+(y-l_b/2)^2=r_z^2\\
&\text{at}\,(x-x_z)^2+(y-y_z)^2=r_z^2\\
&\text{at}\,(x-x_z)^2+(y-l_b+y_z)^2=r_z^2\\
&\text{at}\,(x-l_a+x_z)^2+(y-y_z)^2=r_z^2\\
&\text{at}\,(x-l_a+x_z)^2+(y-l_b+y_z)^2=r_z^2
\end{aligned} \tag{3}$$

热边界条件：

$$\begin{aligned}
&\theta=\theta_0+\Delta\theta, && \text{at}\,z=h\\
&\theta=\theta_0, && \text{at}\,z=0
\end{aligned} \tag{4}$$

式中，θ为温度场变量，θ_0为初始温度，$\Delta\theta$为温度增量。

力边界条件：

$$q=-0.1\,\text{MPa},\quad \text{at}\,z=h \tag{5}$$

式中，q表示施加在敏感元表面的机械载荷电边界条件。

$$\begin{aligned}
&\varphi=V_1, && \text{at}\,z=h\\
&\varphi=0, && \text{at}\,z=0\\
&\boldsymbol{D}_i^{(0)}\boldsymbol{n}_i=0, \text{at}\,x=0,\ x=l_a,\ y=0,\ y=l_b
\end{aligned} \tag{6}$$

式中，φ为电势，V_1为施加在敏感元表面的外加电压，$\boldsymbol{D}_i^{(0)}$电位移矢量在边界法向方向的分量，$\boldsymbol{n}_i$为边界法向量。

根据高斯定理，敏感元的上下表面总电荷量应相等。为此，需要引入电中性补充方程，确保在响应前后整体应保持电中性，其中S_{up}和S_{down}分别为板结构上下表面电极的面积，$S=S_{\text{up}}=S_{\text{down}}$。

$$\begin{aligned}
&\int_{S_{\text{up}}} D_3\,\text{d}S-\int_{S_{\text{down}}} D_3\,\text{d}S=\\
&\int_S\left[\bar{e}_{31}\left(hu_{,x}^{(1)}+hv_{,y}^{(1)}\right)-\right.\\
&\left.\frac{8\bar{k}_{33}}{h}\left(\frac{V_1}{2}-\varphi^{(0)}\right)+\bar{p}_3h\theta^{(1)}\right]\text{d}S=0
\end{aligned} \tag{7}$$

式中，D_3为沿厚度方向（z方向）的电位移分量，$\bar{e}_{31}$为有效压电常数，$u_{,x}^{(1)}$，$v_{,y}^{(1)}$分别表示中面沿x，y方向的一阶位移，$\bar{k}_{33}$表示有效介电常数，V_1为上下表面电极间的电压差，$\varphi^{(0)}$为中面处的零阶电势，$\bar{p}_3$表示等效极化强度；$\theta^{(1)}$为一阶转角变量，其与厚度h的乘积描述了由于板弯曲引起的附加极化效应。

为确保仿真分析结果与实验结果的可比性，在建模过程中严格采用与实验样机一致的材料参数和边界条件。在材料参数方面，仿真分析中所用钽酸锂敏感元及超因瓦合金支撑材料参数均取自实验所用材料的实测数据。在边界条件方面，仿真中施加的热流波形采用频率为2 Hz的正弦交变热流，与实验火焰辐射热流信号频率一致。综合考虑模型中支撑结构、夹具及封装等附加质量的惯性放大效应，力边界条件以实验振动台的加速度（0.5 g）为参考，在仿真中施加等效的周期性面压力（0.1 MPa）以表征相同强度的机械扰动。通过上述条件对齐，可确保仿真与实验在载荷类型、频率与材料参数上的一致性，从而保证两者结果的可比性与物理意义。

2　不同支撑结构抗干扰能力分析

支撑柱的半径和高度直接影响整体刚度与承载能力，若半径过小或高度过大，会导致结构过于柔顺，难以抑制敏感元件的过大挠度；若半径过大或高度过低，则可能引起局部应力集中，削弱器件的热机耦合响应，同时增加制造难度[19-20]。因此，在本研究中选取支撑柱的半径为0.15 mm，高度为0.4 mm，支撑柱中心间距为2 200 μm。考虑热释电探测器工作环境大多处于室温条件，模型的初始温度设置为20℃。为模拟真实的辐射情况，加载的激励热流为交替随时间变换的正弦波，此热流作用于敏感元上表面，其波形如图3所示。加载的载荷为

0.1 MPa，以模拟振动所受的压力载荷。采用多物理场瞬态求解方法进行分析，求解时间为 0.19 s，步长为 0.001 s。

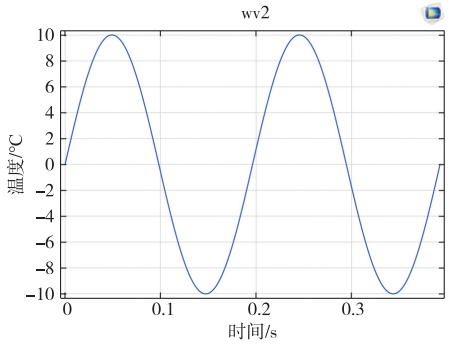
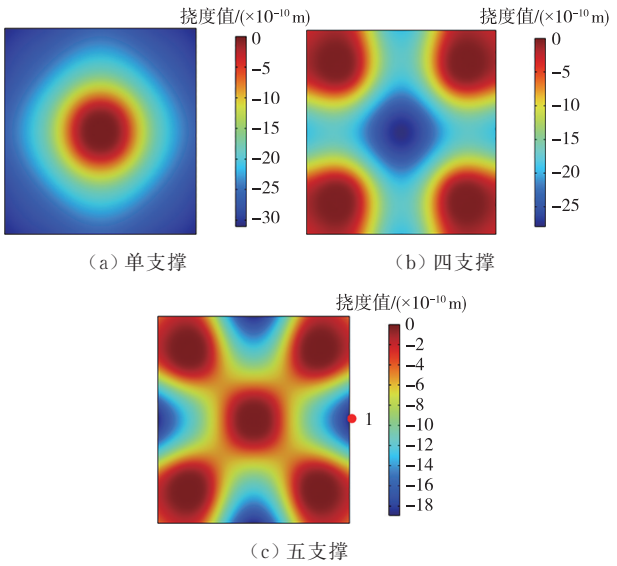


图 3　热流激励波形图

当探测器响应并处于振动状态时，热释电敏感元件受到热载荷与力载荷的联合作用，此时不同支撑结构下热释电敏感元的挠度分布情况及对刚度的影响如图 4 和表 1 所示。



（a）单支撑　　（b）四支撑

（c）五支撑

图 4　不同支撑结构下热释电敏感元的挠度分布云图

表 1　支撑结构形式对敏感元挠度与刚度的影响

支撑结构形式	最大挠度值/(×10⁻¹⁰ m)	挠度集中区域	结构刚度
单柱支撑柱	−30	四角	最低
四柱支撑柱	−27	中心	较低
五柱支撑柱	−18	四边中点	较高

可以看到，支撑柱与压电板连接处的挠度明显低于悬空部位的挠度值，单支撑结构下挠度集中于悬空部位，整体变形幅值较大，容易引入由压电效应导致的微音效应。相较之下，四支撑结构有所改善，但仍存在局部挠度集中，抗干扰性能有限。进一步比较发现，在五支撑柱结构中，距离支撑柱较远的点 1 处出现挠度最大值，但该值相较于其他两种结构的挠度最大值均显著降低。与单支撑和四支撑柱结构相比，五支撑结构不仅能够显著降低整体挠度幅度，还能有效减弱外界机械载荷引起的微音效应，大幅提升了探测器在复杂环境下的信号稳定性与抗干扰能力。因此，宜选用五柱支撑结构增强支撑结构对器件微音作用的抑制。

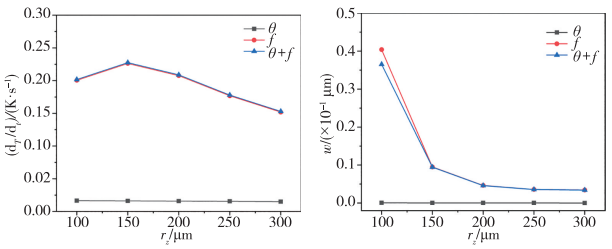
3　五柱支撑柱结构参数抗干扰能力优化分析

对于五柱支撑结构参数的设计与优化，需要进一步评估不同几何尺寸支撑结构的抗干扰性能。本节采用三维有限元方法对不同几何参数的敏感元支撑结构进行建模与仿真，分析对微音效应的抑制作用。结合热力学特性分析，优化支撑结构的尺寸参数，从而得到优化的支撑结构。

3.1　支撑柱直径的影响

为分析支撑柱直径 r_z 对传感器抗干扰能力的影响，在敏感元上表面分别施加力载荷与温度梯度（0.001 K）以及二者的共同作用。支撑柱直径 r_z 从 100 μm 至 300 μm 变化，步长为 50 μm，支撑柱高度 h_z 固定为 400 μm，支撑柱间距为 2 200 μm。

在力、热及力-热耦合作用下，支撑柱直径增大对敏感元件性能的影响如图 5 所示，图 5(a)和图 5(b)分别展示了 r_z 对敏感元件上表面温度变化率及其挠度的影响。图 5(b)表明，随着支撑柱直径增大，敏感元的最大挠度逐渐减小，且力载荷是引起变形的主要因素。同时，图 5(a)显示，在力与热共同作用下，温度变化率随直径增大呈先升后降的趋势，并当直径为 150 μm 时达到峰值。综合分析可知，适度增大支撑柱直径（横截面积）有助于提升传感器的抗干扰能力与机械稳定性。因此，选取支撑柱直径为 200 μm，可在控制温度变化率的同时有效减小挠度，优化整体性能。

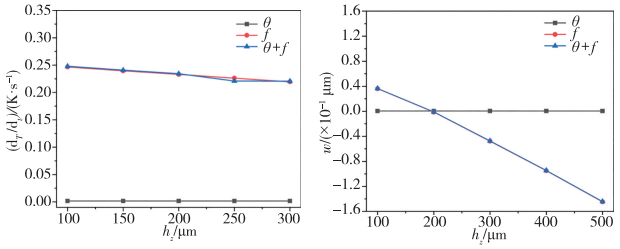


（a）温度变化率　　（b）挠度

图 5　支撑柱直径对敏感元件性能的影响

3.2 支撑柱高度的影响

为探究支撑柱高度h_z对传感器抗干扰能力的影响，在固定支撑柱直径r_z=200 μm、间距2 200 μm的条件下，于敏感元上表面分别施加力载荷、温度梯度及其联合作用，并令h_z以100 μm为步长自100 μm增至500 μm。结果如图6所示，在单一热作用下，温度变化率基本不随h_z改变；而在力载荷及力热耦合条件下，温度变化率随h_z增大呈下降趋势。同时，敏感元挠度随h_z增加显著减小，且力载荷为主要影响因素，热作用对挠度影响微弱，力热联合作用下的挠度行为与单一受力时高度一致。综合温度变化率、挠度响应及管帽高度、滤光片等工艺约束，最终确定支撑柱高度为300 μm，以实现优越的抗干扰性能与结构稳定性。

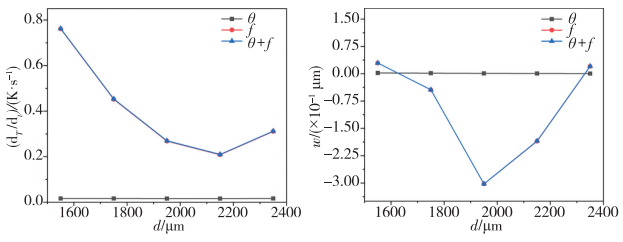


（a）温度变化率　　（b）挠度

图6　支撑柱高度对敏感元件性能的影响

3.3 支撑柱间距的影响

将支撑柱间距以200 μm为步长在1 550～2 350 μm范围内变化，同时固定支撑柱直径与高度分别为200 μm与300 μm，在COMSOL中通过边界探针分析热流、力载荷及其耦合作用下的响应。结果如图7所示，在单一热流作用下，温度变化率基本不随间距改变；而在力载荷及力热共同作用时，温度变化率随间距增大均呈现先降后升的趋势，且在2 150 μm处取得最小值，两者变化规律高度一致。就挠度而言，热流单独作用影响微弱，而力载荷及其与热共同作用均使挠度随间距先减小后增大，且二者变化趋势一致，进一步印证热流对挠度影响有限。综合考虑温度变化率、挠度响应及支撑柱在3D打印中的工艺精度限制，最终选定支撑柱间距d为1 950 μm，以在保证抗干扰性能的同时兼顾结构可制造性。



（a）温度变化率　　（b）挠度

图7　支撑柱位置对敏感元件性能的影响

结合以上仿真结果可知，支撑柱直径在150 μm时温度变化率达到最大值，但此时挠度仍偏大；当直径增至300 μm时，挠度最小，但温度变化率明显下降，不利于输出灵敏度。综合两者影响，选择200 μm作为最优直径，能够在保证较高温度变化率的同时有效降低挠度。对于支撑柱高度而言，温度变化率随高度的变化基本保持不变，而挠度随高度增加显著减小，在500 μm时达到最小值，但考虑器件封装及加工工艺限制，最终选取300 μm，在性能与可制造性之间取得平衡。对于支撑柱间距，随着间距增大，温度变化率在2 150 μm时达到最低值，而挠度在1 950 μm时最小，结合抗干扰性能与结构稳定性，确定1 950 μm为最优间距。将所得优化结果汇总于表2。

表2　支撑柱结构参数最优取值表

参数类型	变化范围	温度变化率最大点	挠度最小点	选用最优值
直径r_z/μm	100～300	150	300	200
高度h_z/μm	100～500	基本不变	500	300
间距d/μm	1 550～2 350	2 150	1 950	1 950

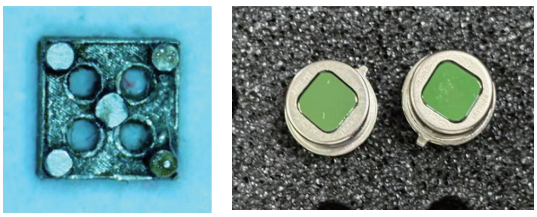
4　热释电传感器性能测试

4.1 器件制备

使用激光粉末床熔融技术打印五支撑柱支撑结构，为保证实验测试结果与数值仿真的一致性，样机制备过程中所选材料与仿真模型中参数设置完全对应。综合考虑挠度、压电板响应电势、生产过程中管帽高度等因素，最终选择五支撑柱的直径为200 μm、高度为300 μm、间距为1 950 μm，3D打印出的结构如图8(a)所示。

热释电红外火焰探测器的制备过程如下：首先完成敏感元件、电极及支撑结构等核心组件的加工；上述核心组件加工后，采用高精度贴片机将热释电敏感元、支撑结构、场效应管、电阻及TO-5管座等关键器件，精确贴装于电路板指定位置；在贴装完成后，利用多功能精密无铅回流焊设备（最高温度为245℃，升温速率为2.5℃/s）进行焊接，通过优化回流曲线与保温时间，确保焊点充分熔合并形成稳定可靠的电气连接，虚焊率控制在0.5%

以内。同时，为提升探测器在复杂环境下的稳定性，采用高气密性环氧树脂封装（气密性小于等于 1×10^{-6} Pa·m³/s），有效隔绝湿气、粉尘及腐蚀性气体对敏感元件的影响。此外，在封装过程前后进行了温度循环和机械振动测试，测试工况为 −40℃～85℃，循环 10 次，以保证器件在极端温度和外部振动环境下的可靠性。性能测试结果显示，封装后的探测器在室温下的平均响应时间为 53 ms，灵敏度达到 1.2×10^{3} V/W，能够在高温、强光和烟尘等工况下保持稳定工作，同批次器件灵敏度波动控制在 5% 以内，可满足工程应用需求。封装成品如图 8（b）所示。



（a）3D 打印支撑结构　　（b）封装完成的探测器

图 8　五柱支撑结构和封装成品

4.2　测试平台搭建

为评估封装完成后的热释电红外火焰探测器在灵敏度、响应时间及抗干扰性等方面的关键性能，依据图 9 所示流程搭建了测试平台（见图 10）。

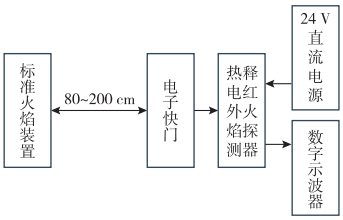
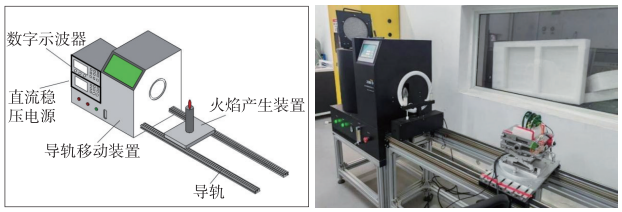


图 9　测试流程图



（a）测试系统示意图　　（b）测试装置平台

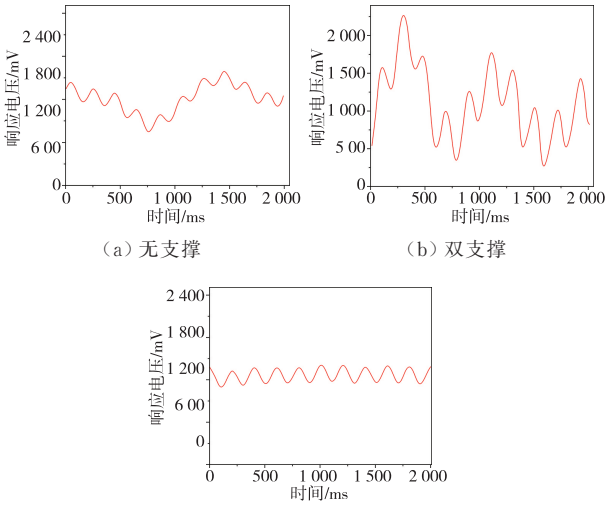
图 10　测试平台

该平台由标准火焰模拟装置、待测热释电红外火焰探测器、直流稳压电源及数字示波器等部分构成。其中，标准火焰装置严格参照 GB12791-2006《点型紫外火焰探测器》与 GB15631-2008《特种火灾探测器》相关标准研制，配备精密气体稳压系统以实现流量的稳定控制；其层流燃烧嘴与双电动位移轨道结构设计，在确保火焰状态稳定的同时，兼具大载荷承载能力与高定位精度，为探测器性能的准确评估提供了可靠条件。

4.3　性能测试

4.3.1　抗干扰响应波形测试

为评估探测器抗微音效应干扰测试，采用标准火焰装置产生稳定火焰作为信号源，选取基于相同工艺制备的无支撑柱、双支撑柱与五支撑柱结构热释电红外探测器，对比分析三者对微音效应的抑制能力。测试过程中，探测器被安置于带振动台的闭环温箱内，施加频率为 2 Hz，加速度为 0.5 g 的机械振动；同时开启标准火焰装置，保持火焰高度恒定在 3～5 cm 范围内，以模拟真实火灾场景中典型的火焰特征。通过数字示波器采集探测器输出的原始响应波形，并进一步分析其上升时间、峰值电压及信号衰减特性。探测器输出响应特性如图 11 所示，无支撑柱、双支撑柱与五支撑柱结构对应的输出电压平均值分别为 1 126 mV，1 177 mV 和 1 227 mV，其中五支撑柱结构具有最优的电压输出均值。从电压波形曲线可观察到，无支撑结构在 400～2 400 mV 范围内呈现剧烈波动，表明其受外界机械振动及微音效应影响显著；双支撑柱结构波动程度次之；而五支撑柱结构的输出波形整体更为平稳，信号波动幅度显著降低。该结果表明，五支撑结构有效抑制了微音效应所引起的信号干扰，与数值模拟中其整体挠度幅值下降的结果一致，进一步验证了该结构在提升探测器信号稳定性方面的优势。



（a）无支撑　　（b）双支撑

（c）五支撑

图 11　探测器输出响应波形图

4.3.2 响应时间测试

为评估含五柱支撑结构的热释电红外火焰探测器在不同距离下的响应速度与稳定性，开展了系统的响应时间测试实验。在测试过程中，将探测器与标准火焰源之间的初始距离设定为80 cm，随后以20 cm为间隔逐步增大至200 cm。在每个测试点保持火焰稳定燃烧，并实时记录探测器的响应时间。为降低偶然误差，对多组探测器进行重复测量，并以均值与标准差作为性能评价指标。

实验结果如图12所示，探测器响应时间随距离增加略有延长，但整体变化幅度较小，符合信号传播与探测器感应规律。在80～200 cm的探测距离范围内，三组探测器的平均响应时间分别为0.052 8 s，0.052 5 s和0.052 4 s，数值接近且标准差较低，表明探测器具备良好的一致性与稳定性，能够在不同距离下保持快速、可靠的响应能力。

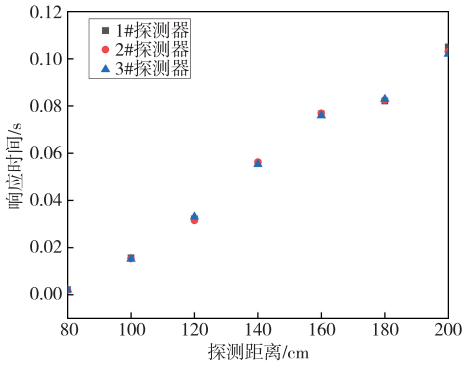


图12 响应时间测试结果

4.3.3 不同光谱干扰测试

利用标准火焰装置配套的灯环热释电红外火焰探测器的抗环境光干扰性能，通过调节其发光颜色与闪烁频率，模拟典型的环境光干扰场景，具体实验装置如图13所示。环境光干扰易引起热释电元件产生非火焰辐射响应，导致探测器误报，因此提升其抗光干扰能力对保障火灾报警系统的准确性与可靠性至关重要。

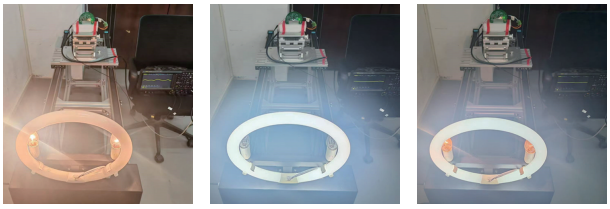


图13 环境光线干扰装置

实验设定探测器与干扰源距离分别为100 cm与200 cm，干扰光类型包括黄光、白光及两者交替闪烁，频率均为5 Hz。在不同角度下观察探测器报警状态，以“报警灯亮”为干扰试验不通过，“报警灯不亮”为通过，相关测试数据记录于表3。结果表明，在所有非火焰光干扰条件（白灯、黄灯及交替闪烁）下，探测器均未触发报警；而在甲烷火焰测试中，所有条件下均能稳定报警。这说明探测器具备良好的环境光抗干扰能力，在不同距离与角度下均能准确区分火焰信号与背景光干扰，表现出高灵敏性、高可靠性及良好的环境适应性，适用于对实时性与准确性要求较高的火灾预警与安全监测场景。

表3 抗干扰测试数据

测试内容	距离/cm	角度/(°)	探测器状态
白灯	100	0	不报警
		45	不报警
	200	0	不报警
		45	不报警
黄灯	100	0	不报警
		45	不报警
	200	0	不报警
		45	不报警
交替闪烁	100	0	不报警
		45	不报警
	200	0	不报警
		45	不报警
甲烷火焰	100	0	报警
		45	报警
	200	0	报警
		45	报警

5 结论

本文基于数值计算和实验方法，研究了不同支撑结构敏感元在力载荷与热流共同作用下的响应特性，系统分析了支撑结构及其几何参数对敏感元挠度、温度变化率及传感器抗干扰能力的影响规律。主要结论如下：

1）五支撑柱结构在响应过程中能够有效抑制敏感元挠度，相较于传统结构，表现出更优的力学稳定性，有助于降低微音效应带来的干扰。

2）力载荷对敏感元挠度的影响显著大于温度梯度作用；通过优化支撑柱几何参数可有效提升结构稳定性，确定最优参数组合：支撑柱直径为200 μm、高度为300 μm、间距为1 950 μm。

3）制备并测试了五支撑柱结构热释电探测器

的实际性能，实验结果表明其输出信号波形更为平稳，响应灵敏可靠，在复杂光照环境下未出现误报警现象，验证了该结构在抑制微音效应、增强信号稳定性与抗干扰能力方面的显著优势。

参考文献：

[1] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends[J]. Progress in Quantum Electronics, 2003, 27(2/3): 59-210.

[2] Rogalski A. Infrared detectors: an overview [J]. Infrared Physics & Technology, 2002, 43(3/5): 187-210.

[3] 刘普霖，褚君浩. 现代红外物理和技术的发展[J]. 科学，1996，48(6)：27-30，3.
Liu Pulin, Chu Junhao. Modern infrared physics and technology [J]. Science, 1996, 48(6): 27-30, 3.

[4] 董显林，毛朝梁，姚春华，等. 非制冷红外探测器用热释电陶瓷材料研究进展[J]. 红外与激光工程，2008，37(1)：37-41.
Dong Xianlin, Mao Chaoliang, Yao Chunhua, et al. Progress of research on the pyroelectric ceramic materials for uncooled infrared detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 37-41.

[5] Aggarwal M D, Batra A K, Guggilla P, et al. Pyroelectric Materials for Uncooled Infrared Detectors: Processing, Properties, and Applications[M]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2010.

[6] Rogalski A. History of infrared detectors[J]. Opto-Electronics Review, 2012, 20(3): 279-308.

[7] 周　炜，欧阳程，吴　敬，等. 锰钴镍铜氧薄膜红外探测器制备与性能研究[J]. 红外与激光工程，2014，43(4)：1073-1079.
Zhou Wei, Ouyang Cheng, Wu Jing, et al. Investigation on preparation method and performance of $Mn_{1.56}Co_{0.96-x}Ni_{0.48}Cu_xO_4$ thin film IR detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1073-1079.

[8] 刘盛纲，钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报，2009，38(5)：481-486.
Liu Shenggang, Zhong Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.

[9] 黄江平. 高温超导红外探测器的应用及发展前景[C]// 北京：第四届全国低温工程学术会议，2000：292-295.

[10] 罗文田，张德银，彭卫东，等. 钽酸锂薄膜红外探测器探测性能的模拟研究[J]. 半导体光电，2010，31(1)：60-63.
Luo Wentian, Zhang Deyin, Peng Weidong, et al. Simulation study on detecting property of lithium tantalate thin film infrared detector [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(1): 60-63.

[11] 谢明君. 钽酸锂薄膜红外探测器的研究[D]. 成都：电子科技大学，2007.

[12] 王清正，胡　渝，林崇杰. 光电探测技术——[修订版][M]. 北京：电子工业出版社，1994.
Wang Qingzheng. Photoelectric Detection Technology—[Revised Edition] [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994.

[13] Querner Y, Schulze A, Norkus V, et al. High-sensitive pyroelectric detectors with internal thermal amplification[J]. Procedia Engineering, 2010, 5: 629-632.

[14] 李　航. 柔性热释电单元器件设计与制备[D]. 成都：电子科技大学，2018.
Li Hang. Design and preparation of flexible pyroelectric cell devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

[15] Beerman H P. Investigation of pyroelectric material characteristics for improved infrared detector performance[J]. Infrared Physics, 1975, 15(3): 225-231.

[16] Zhang D, Du X, Song Y, et al. Oxidation mechanism and microstructure evolution of invar alloy with high temperature annealing process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 185-195.

[17] Rogalski A. Material considerations for third generation infrared photon detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 50(2-3): 240-252.

[18] 李　波，吴小清，姚　熹. 多层热释电薄膜红外探测器的PSPICE模型[J]. 半导体光电，2001，22(6)：415-419，424.
Li Bo, Wu Xiaoqing, Yao Xi. PSPICE model for multi-layer pyroelectric thin film infrared detector [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2001, 22(6): 415-419, 424.

[19] 阳　攀. 热释电探测器的PZT基陶瓷材料研究及单元结构仿真[D]. 贵阳：贵州师范大学，2020.
Yang Pan. PZT ceramic material research and cell structure simulation of pyroelectric detector [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.

[20] 朱惜辰，程　进. 红外探测器的进展[J]. 光子学报，2000(S1)：10-14.
Zhu Xichen, Cheng Jin. Development of infrared detectors[J]. Acta Photonica Sinica, 2000(S1): 10-14.

作者简介：

王　鹏(2000—)，男，河南省郑州市人，硕士研究生，研究方向为热释电红外传感器敏感元抗干扰性能；

秦国帅(1986—)，男，博士生导师，副教授，研究方向为智能材料与结构。