文章编号：1003-1480（2026）01-0008-06

基于内置MEMS传感器的单元火工品原位压力监测方法

陈 絮[1]，吴瑞德[1]，杨 莉[2]，郭晓荣[1]，陈小松[1]，丁茂元[1]，张 欣[1]

（1.陕西应用物理化学研究所，陕西 西安，710061；2.陆军装备部驻西安地区第一军代室，陕西 西安，710032）

摘 要：为破解单元火工品全寿命周期“不可检、不可修”导致的可靠性评价盲区，本文提出一种“零接口改动”的内置 MEMS 原位监测技术。以双桥四针电起爆器为载体，在电极塞对称双凹槽内同步贴装 SOI 压阻压力微传感器与半导体桥发火芯片。标定结果显示：0~5 MPa 范围内传感器平均灵敏度 1.636 mV·MPa^{-1}，线性度 $R^2 \geqslant 0.999$；1 A 安全电流下首次捕捉到 1.3 MPa 热-固体膨胀瞬态峰，揭示桥-药剂界面约束应力机制；5 A 发火状态下微传感器测得 21.7 MPa，较侧壁标准传感器高 6 MPa，响应滞后 < 0.3 ms。该方案将传统“桥丝电阻”间接判据升级为“温度-压力”直接物理量，具备通用接口、可扩展、可批量制造等优势，为火工品健康监测与数据驱动设计提供了通用、便携的新途径。

关键词：单元火工品；原位监测；MEMS 微传感器；热-固体膨胀；压力监测

中图分类号：TQ560.7；TP212.1 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.002

In-situ Pressure Monitoring Method for Unit Pyrotechnic Devices Based on Embedded MEMS Sensors

CHEN Xu[1], WU Rui-de[1], YANG Li[2], GUO Xiao-rong[1], CHEN Xiao-song[1], DING Mao-yuan[1], ZHANG Xin[1]

（1.Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute,Xi’an, 710061；2.The Military Representative Bureau of the Army Equipment Department in Xi’an Area, Xi’an, 710032）

Abstract: To address the reliability assessment blind spot caused by the “non-inspectable and non-repairable” nature of unit pyrotechnic devices throughout their life cycle, this paper presents a in-situ monitoring technique based on embedded microelectromechanical systems (MEMS) sensors that requires no interface modification. A dual-bridge, four-pin electric detonator is employed as the host platform. SOI piezoresistive pressure microsensors and semiconductor bridge (SCB) ignition chips are co-mounted into the symmetric dual cavities of the electrode plug. Calibration results show that the pressure sensor achieves a sensitivity of 1.636 mV · MPa^{-1} with linearity $R^2 \geqslant 0.999$ over the 0~5 MPa range. Under a safe current of 1 A, a transient pressure peak of 1.3 MPa, attributed to thermo-solid expansion, was observed for the first time, revealing the constrained stress mechanism at the bridge-energetic material interface. During ignition (5 A), the embedded sensor records a peak pressure of 21.7 MPa, approximately 6 MPa higher than that measured by a conventional side-mounted reference sensor, with a response lag of less than 0.3 ms. This approach upgrades reliability evaluation from indirect electrical indicators (e.g., bridge resistance) to direct physical measurements of temperature and pressure. With advantages such as interface compatibility, functional scalability, and batch manufacturability, the proposed method offers a versatile and practical solution for health monitoring and data-driven design of pyrotechnic devices.

Key words: Unit pyrotechnic device; In-situ monitoring; MEMS microsensor; Thermo-solid expansion; Pressure monitor

收稿日期：2025-10-31

作者简介：陈絮（2000-），女，在读硕士研究生，从事先进火工品技术研究。

通讯作者：吴瑞德（1972-），男，研究员，从事火工品研制工作。

基金项目：重点实验室基金项目（No. 6142602240401）。

引用本文：陈絮，吴瑞德，杨莉，等. 基于内置 MEMS 传感器的单元火工品原位压力监测方法[J]. 火工品, 2026(1): 08-13.

火工品作为将发火控制信号瞬时转化为发火能量的一次性关键元件，被称作“武器装备最敏感的起始节点”[1]。在导弹、运载火箭以及精确制导弹药等系统中，其不仅担负着首发动力生成、级间分离或引战毁伤等核心功能，更直接影响着全系统的安全性与作战效能[2]，因此，对其状态开展实时、精准监测具有重要意义。

然而，现有的监测方法存在明显不足：其一，性能参数大多依靠燃烧或爆炸试验获取，试件在试验后一次性损坏，仅能进行抽样检测，无法实现全面检测；其二，生产过程中通常运用桥丝电阻等电参量进行质量判定，在电性能正常的情况下，难以识别装药缺陷、界面脱粘或微裂纹等潜在风险，致使“带病服役”的风险长期存在。更为严峻的是，贮存、运输和服役阶段持续累积的界面老化、药剂分解、密封退化和微裂纹扩展，一旦发展到能量传递链出现不可逆缺口的临界状态，产品将突然丧失发火能力。

近年来，微机电系统（MEMS）技术在航天器健康监测领域取得突破，为火工品原位状态监测提供新思路[3]。如 Miller 等[4]将分布式应变传感器（DBST）嵌入固体发动机壳体内壁，确定推进剂药柱力学模量与无应力温度；美国 Midé 公司开发的低成本导弹环境监测系统（LCMEM）[5]，在“战斧”巡航导弹储运箱集成多种传感器，实现服役环境长期跟踪；西北工业大学研制的导弹载荷监测系统[6]，利用商用 MEMS 芯片，实现贮存期间多参数连续采集及超限报警。这些实践表明，MEMS 微传感器能在极端环境下对多物理量进行微秒级、原位、可重复测量，为火工品从“经验冗余设计”向“数据驱动可靠性评估”转变提供工程经验。

基于此，本研究提出一种内置 MEMS 微传感器的单元火工品原位监测技术。通过在标准双桥四针电起爆器电极塞内预留空间，同步集成温度/压力微传感器与半导体桥发火芯片，实现无接口改动的原位封装。该方案突破了传统毁伤式测试与间接电参量判据的局限，首次达成火工品内部热-力状态的直接、实时感知，为全寿命周期健康监测与智能化设计提供了通用、便携的技术途径。

1　监测载体选择与结构适配性分析

为达成火工品内部状态的原位监测目标，需在不改变其功能特性以及标准制造流程的前提下，将微型压力传感器集成至火工品内部。本研究选取电起爆器作为典型研究载体，并基于双桥四针结构展开集成设计，所选取电起爆器的结构如图 1 所示。

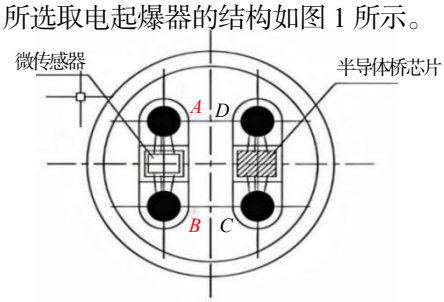


图 1　内置微传感器的起爆器结构

Fig.1　Detonator structure with built-in microsensor

如图 1 所示，在电极塞内腔对称设置的两个凹槽内，分别贴装 MEMS 温度/压力微传感器以及半导体桥（SCB）发火芯片。其中，MEMS 温度/压力微传感器连接 *AB* 电极，用于状态感知；半导体桥（SCB）发火芯片连接 *CD* 电极，用于实现正常发火功能。二者采用同步贴装工艺，共面集成于同一基底之上，从而实现半导体桥路电阻与微传感器输出信号的同步采集与独立监测。

该结构设计主要基于以下 3 方面优势：

（1）普适性高：电起爆器作为武器系统中使用数量最大、接口最为统一的最小发火单元，其典型构型（壳体-电极塞-始发装药-输出装药）包含了雷管、点火器及传爆序列等多数火工品的核心要素，具备良好的技术推广条件；

（2）功能兼容性好：现役产品普遍采用标准化的双桥四针电极布局（*AB*、*CD* 两对独立桥路），在保留传统单桥高可靠发火能力的同时，可在另一桥路嵌入微传感器，使火工品具备实时自检功能，且不降低原有安全裕度，具有显著工程示范意义；

（3）结构适配性优：双桥设计在电极塞内部自然形成对称双凹槽空间，恰好为 MEMS 传感器与 SCB

芯片的共面贴装提供机械容腔，无需更改外形尺寸或装配工艺，即可实现“一桥发火、一桥监测”的原位集成。本研究选用的起爆器主要由外壳体、内壳体、焊桥电极塞、始发装药、输出装药、密封片以及盖片等组成，结构如图 2 所示。

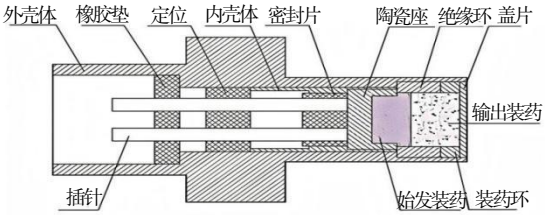


图 2　电起爆器基本结构

Fig.2　The basic structure of the electric detonator

2　MEMS 微传感器选型与性能对比

2.1　微传感器类别与结构特征

为满足单元火工品在 0 ~100 MPa 压力范围内的压力监测需求，本研究系统调研了 3 类具有代表性的微传感器：A 类压力传感器基于 SOI（绝缘体上硅）技术，通过刻蚀底层硅形成敏感膜片作为高灵敏度传感单元，并在顶层硅集成压敏电阻与金属焊盘。B 类压力传感器为 SOI 浮雕式压阻结构，具备 100 μm 矩形厚膜与浮雕式压敏电阻，结合 KOH 各向异性腐蚀背腔以提升灵敏度。C 类压力传感器则在柔性基底上设计平面螺旋线圈，借助腔体形变改变谐振频率，实现无线无源压力监测。

2.2　关键性能对比

从量程、过载能力、响应时间以及工艺兼容性 4 个维度，对上述 3 类微传感器开展了定量或半定量的比较分析，结果如表 1 所示。

表 1　3 类器件的性能对比

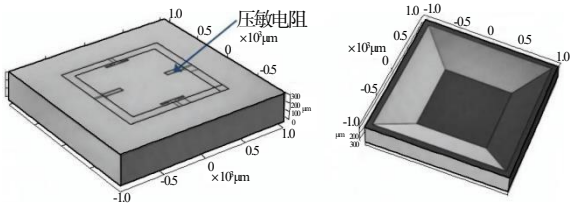
Tab.1　Performance comparison of the three types of devices

评价维度	A 类	B 类	C 类
压力量程 P/MPa	0-100	0-100	0-100
响应时间 t/ms	<3	<3	延迟>10
过载保护 P/MPa	1 000	100	无
工艺兼容性	同步贴装，与发火桥膜工位共用	胶粘键合，需定制夹具	无线封装，需解决金属屏蔽

通过对比分析 3 类微传感器性能，考量量程、过载能力、响应时间和工艺兼容性等维度，最终选 A 类微传感器作为单元火工品内置微传感器方案。A 类微传感器有 1 GPa 抗过载压力能力、可零改动嵌入、响应时间小于 3 ms 且与通用接口兼容，能满足火工品在极端环境下的监测需求。

2.3　微传感器基本结构

压力传感器是工业应用中应用最广泛的设备之一，主要分为应变式、石英晶体谐振式、光纤式和压阻式 4 种类型，近年来，硅压阻式压力传感器因其高灵敏度和卓越稳定性而在航空航天和海洋工程领域获得了广泛应用[7-10]。该传感器可采用标准 MEMS 工艺制造，具有工艺简单、精度高、可靠性强、微型化程度高、易于集成及环境适应性强等优点[11]，还能与玻璃基底温度传感单元阳极键合实现一体化集成，故本研究选用 SOI 压阻式压力传感器。



（a）正面　　（b）背面

图 3　压力传感单元设计图

Fig.3　Design drawing of pressure sensing unit

其工作原理是利用单晶硅的压阻效应，以 SOI 硅片作为弹性元件，顶层单晶硅经 MEMS 工艺制备压敏电阻，底层硅刻蚀成敏感膜片，顶层硅设置压敏电阻及金属焊盘。设计时需确定敏感膜片的结构尺寸、压敏电阻的掺杂浓度、长宽及位置尺寸，并选用铝作为金属焊盘材料，以保证硅与金属之间的欧姆接触，减小温度对输出的影响。

3　压力传感器实验与结果分析

3.1　实验装置

实验系统主要由起爆装置与测试装置两部分构成。起爆装置采用 4 路时序恒流脉冲起爆电源，用于驱动半导体桥发生电爆，起爆电流可精确控制；测试装置采用 DEWETRON 数据采集分析仪，用于实时采集并记录压力微传感器的输出信号。

3.1.1　起爆装置

试验样品为半导体桥火工品，采用电容驱动电路控制其放电过程，工作原理如图 4 所示：转换开关接通 a、c 端时，外部电源对电容器充电；充电完成后，

将开关切换至 b、c 端，闭合控制开关，即可使电容器对半导体桥放电，激发火工品发火并产生等离子体。

本次发火试验使用 4 路时序恒流脉冲起爆电源，可为半导体桥提供 5 A、50 ms 的高精度恒流脉冲。该电源具备低噪声与快速上升沿特性，有效保证了起爆过程的一致性。

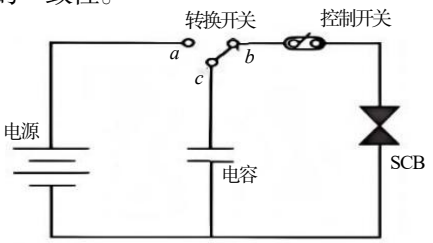


图 4　电容放电激发方式

Fig.4　Capacitor-discharge excitation method

3.1.2　测试装置

为验证内置微传感器在发火过程中的压力测量精度，实验采用密闭爆发器作为压力加载与测量平台。电起爆器安装于爆发器底部，其侧壁同时安装标准压力传感器，从而实现对待测火工品发火压力的同步比对测量。DEWETRON 数据采集分析仪为微传感器提供独立采集通道，并以 1 mA 恒流激励，实时记录其压力输出信号。

3.2　压力传感器的标定

采用数据采集仪与气压加载装置对封装后的压力传感器进行性能标定。将 10 发装配完成的电起爆器置于密闭压力腔内，通过插针引出传感器两电极，并施加 1 mA 恒流激励。空载条件下测得传感器输出差分电压为 1.12 V。随后以 0.5 MPa 为步长，将压力从 1 MPa 逐级增至 5 MPa，记录各压力点下传感器的输出电压。以 3 号样品为例，其标定数据如表 2 所示。

表 2　输出电压结果

Tab.2　Output voltage result

压力/MPa	输出变化ΔV/mV
0	0
0.5	0.792
1.0	1.695
1.5	2.356
2.0	3.245
2.5	4.165
3.0	4.969
3.5	5.695
4.0	6.599
4.5	7.305
5.0	8.223

根据表 2 数据绘制的标定曲线如图 5 所示。

得到传感器灵敏度 $S = 1.664$ mV·MPa^{-1}，线性拟合度 $R^2 = 0.999$。其余 9 发样品的测试结果均呈现相近的线性特性，线性度 $R^2 \approx 0.999$，灵敏度系数分布于 1.62~1.67 mV·MPa^{-1} 之间。

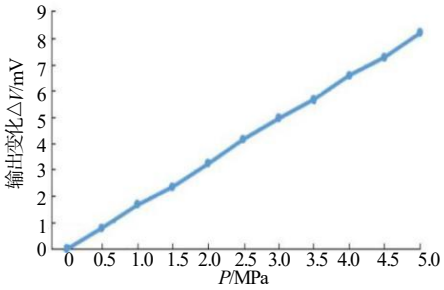


图 5　已封装压力传感器的标定曲线

Fig.5　Calibration curve of the encapsulated pressure sensor

裸片压力传感器的标定在恒压源下进行，其与 $R_0 = 2$ kΩ 电阻串联，共同对 5 V 电源分压。压力传感器电阻 $R_p \approx 1$ kΩ，实测灵敏度 $S = 1.818$ mV·MPa^{-1}。根据串联分压原理，有：

$$\frac{\Delta V}{\Delta R} = \frac{V_s \cdot R_p}{(R_0 + R_p)^2} = \frac{5\ \text{V} \cdot 2\,000\ \Omega}{(1\,000\ \Omega + 2\,000\ \Omega)^2} = \frac{10\,000}{9 \times 10^6}\ \text{V} \cdot \Omega^{-1} = 1.111\ \text{mV} \cdot \Omega^{-1} \tag{1}$$

据此推得电阻变化率 $\Delta R/P$：

$$\frac{\Delta R}{P} = \frac{S}{\Delta V / \Delta R} = \frac{1.818\ \text{mV} \cdot \text{MPa}}{1.111\ \text{mV} \cdot \Omega^{-1}} = 1.636\ \Omega \cdot \text{MPa}^{-1} \tag{2}$$

在 1 mA 恒流激励下，理论电压变化量为：

$$\Delta V(P) = I \cdot \Delta R(P) = 1\ \text{mA} \times 1.636\ \text{MPa}^{-1} = 1.636\ \text{mV} \cdot \text{MPa}^{-1} \tag{3}$$

式（1）~（3）中：$\Delta V/\Delta R$ 为传感器电阻每改变 1 Ω时分压节点电压的变化量，mV·Ω^{-1}；V_s 为恒压源输出电压，V；R_p 为压力传感器电阻，Ω；R_0 为串联分压电阻，Ω；$\Delta R/P$ 为压阻膜在压力 P 作用下的电阻相对变化，Ω·MPa^{-1}；S 为传感器灵敏度，mV·MPa。

封装后传感器的实测灵敏度分布于 1.62~1.67 mV·MPa^{-1} 之间，与裸片理论值 1.636 mV·MPa^{-1} 的偏差小于 ± 2%，表明封装工艺未对传感器压阻性能造成显著影响，满足后续测试要求。

3.3　稳定小电流下的压力变化

为验证微传感器在静态工况下对界面健康状态的检测能力，在已完成涂药的电起爆器成品上，依据按 GJB 1A-2001 火工品安全电流试验方法 安全框架执行试验[12]。将样品置于防爆箱内密闭环境，通过 DEWETRON 数据采集分析仪向半导体桥芯片远程施加 1.000 A ± 0.02 A 恒流，持续 5 min；同时对微传感

器施加 1 mA 恒流供电，以 10 kHz 采样率同步采集其电压信号，并基于 1.636 mV・MPa^{-1} 的灵敏度转换为压力曲线。全程压力变化如图 6 所示。

由图 6 可见，在约 3 s 处出现 1.3 MPa 的瞬态压力峰，随后压力迅速回落并稳定于 0.3 MPa 左右。为进一步分析电流阶跃影响，选取同批次样品，先施加 0.5 A 电流 30 s，再阶梯升至 1 A 并保持 5 min，微传感器同样通入恒流 1 mA 并监测两端电压，结果如图 7 所示。由图 7 可见，0.5 A 阶段仅出现约 0.3 MPa 的压力波动，无显著峰值；电流升至 1 A 后立即产生约 1.2 MPa 的压力峰，随后回落至 0.3 MPa 平台。进一步将恒流步级由 1 A 缓慢上升至发火电流，结果如图 8 所示。

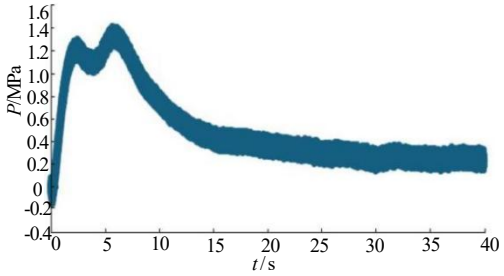


图 6 1A 电流下的压力曲线

Fig.6 Pressure curve under 1A current

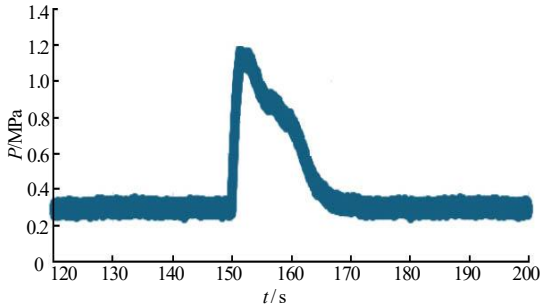


图 7 0.5 A 升至 1 A 电流的压力曲线

Fig.7 Pressure curve from 0.5 A to 1 A current

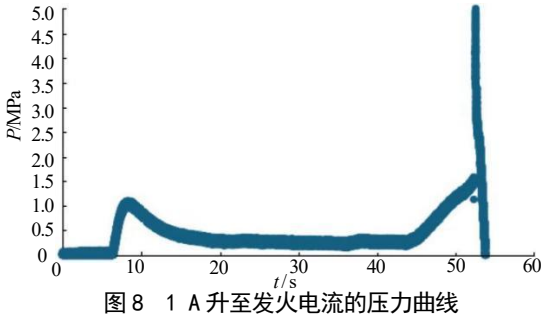


图 8 1 A 升至发火电流的压力曲线

Fig.8 1 A pressure curve up to ignition current

当电流升至 1 A 时，压力曲线出现约 1.3 MPa 的瞬态峰值，随后迅速回落并稳定在 0.2~0.3 MPa。该现象源于药剂层热膨胀并在电极塞与绝缘环约束下产生应力，同时孔隙内空气和挥发分受热膨胀，共同作用形成热-固体膨胀效应。在 0.5 A 电流下未观察到此峰值，表明 1 A 是触发该现象的临界电流。随着电流以 0.1 A 步长缓慢上升至 1.5 A，腔体内预压持续增加且热量累积难以及时散发，导致局部状态恶化；特别是在 1.5 A 激励下，压力在 0.5 ms 内从 1.4 MPa 跃升至超过 20 MPa（详见图 9 爆轰压力实测结果），样品随即发火。

实验结果显示，在 1.0~1.4 A 区间仅发生热-固体膨胀峰现象；而达到 1.5 A 时则达到了药剂分解临界点，压力变化由缓变转为阶跃。本实验通过电流激励直接观测到了半导体桥-药剂界面由于热膨胀和气体增压引发的瞬态压力响应，证实了可复现的热-固体膨胀效应。内置 MEMS 压力传感器提供了连续、高采样率的压力数据，使得传统依赖事后统计的“发火电流”转变为可通过实时读取的“压力阶跃斜率”，为界面可靠性评估提供了直接的力学依据。

3.4 发火实验

为获取真实爆轰瞬间的动态压力参数，在电起爆器输出端加装垫圈后，将其装入密闭爆发器；将标准压力传感器安装于爆发器侧壁同一压力接口，确保系统整体密封后移入防爆箱并闭锁。启动数据采集分析仪，对压力微传感器施加 1 mA 激励电流并实时监测其电压信号；同时利用高压电源向半导体桥电极输出 5 A 电流以触发起爆。微传感器感知内部压力变化并输出相应电压信号，采集系统记录全程数据，并依据 1.636 mV・MPa^{-1} 的灵敏度系数将其转换为压力值。实验结果如图 9 所示。

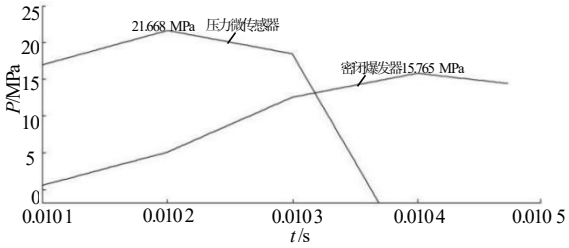


图 9 微传感器和标准传感器压力曲线对比

Fig.9 Comparison of pressure curves between microsensors and standard sensors

微传感器与标准传感器均在 1 ms 内捕捉到压力峰值，其中微传感器输出为 21.668 MPa，标准传感器输出为 15.765 MPa，前者高出约 6 MPa，且两者响应

同步、无明显滞后，表明微传感器在爆轰近场具备更高、更快的压力感知能力。由此可得如下结论：

（1）微传感器响应更快、峰值更高，与其紧贴药面、近乎零距离感应冲击波前沿的位置相符，所测为局部瞬时高压；标准传感器位于侧壁，距爆源较远，冲击波传播过程中发生能量衰减与散射，故峰值较低。

（2）两者均在<1 ms 内达到峰值，说明系统响应良好，爆炸过程极快，且微传感器本身频率响应性能满足测试需求，无明显滞后。

（3）微传感器数据可靠，3 发样品测试结果趋势一致，表明其量程、频率响应与抗冲击能力均满足爆压测试要求，可用于局部爆轰强度的评估，验证可原位获取动态作用瞬态参数。

4 结论

本文针对传统单元火工品“不可测、不可溯”的技术瓶颈，提出并验证基于双桥四针电起爆器的内置 MEMS 微传感器原位监测方案。依托电极塞双凹槽一体化设计，在不改变外形尺寸与标准电气接口下，实现 MEMS 温度/压力传感器与半导体桥发火单元共面原位集成，赋予火工品实时自检与状态感知能力。主要结论如下：

（1）结构与工艺可行性：采用对称双凹槽布局与四电极分路架构，结合相关工艺，实现微传感器与发火桥同步贴装等。该方案兼容现有装配流程，有零接口改动等优势，为火工品内置传感器提供通用路径。

（2）热-固体膨胀效应的原位观测（静态监测试验）：在 1 A 安全电流激励下，电极塞内腔约 3 s 后出现 1.3 MPa 瞬态压力尖峰，随后衰减至 0.3 MPa 稳态平台；而 0.5 A 电流仅引起微弱波动。当持续电流升至 1.5 A 时，样品发火，压力曲线从 1.4 MPa 跃升至大于 20 MPa。此结果证实半导体桥-药剂界面通电加热时有约束应力响应，明确了电流阈值，为界面可靠性评估提供了力学依据。

（3）爆轰近场感知性能验证（动态瞬态监测试验）：发火实验中，内置微传感器记录峰值压力达 21.668 MPa，比外置高约 6 MPa，响应滞后小于 0.3 ms，展现优异性能，能捕捉爆轰初始阶段关键压力特征。

（4）技术价值与应用前景：本方案将火工品安全性与可靠性评估依据从间接电参量升级为直接获取压力物理量，实现评估范式跨越。该技术通用性强、便于部署，为火工品相关监测及设计提供新方法，有重要推广价值。

参考文献：

[1] 李国新, 程国元, 焦清介. 火工品试验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.

[2] 蔡瑞娇.火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1997.

[3] 高鸣, 任海峰. 固体仪器发动机健康监测技术评述与研究[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(2): 278-284.

[4] Miller T C. Characterization of propellant modulus and rocket motor stress-free temperature using stress sensors [J]. Journal of Propulsion and Power, 2018, 34 (4): 901-908.

[5] 高倩.低成本导弹环境监测系统[J].飞航导弹, 2005 (11): 11-13.

[6] 李鹏飞, 王胜, 杜飞, 等. 导弹结构健康监测技术研究进展[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 59-70.

[7] WU R X, CHEN H, ZHOU Y C, et al. Advances in silicon carbides and their MEMS pressure sensors for high temperature and pressure applications[J].ACS Applied Materials Interfaces, 2025,17(18):26 117-26 155.

[8] Wejrzanowski T, Tymicki E, Plocinski T,et al. Design of SiC-doped piezoresistive pressure sensor for high-temperature applications[J]. Sensors,2021, 21(18): 6 066.

[9] LI T T, LI Z W, HAO Y F, et al. Ultrasensitive stretchable patches for joint motion monitoring[J].Journal of Measurement Science and Instrumentation,2024,15(3): 285-291.

[10] Gupta N, Adepu V, Tathacharya B M, et al. Piezoresistive pressure sensor based on conjugated polymer framework for pedometer and smart tactile glove applications[J]. Sensors and Actuators a-Physical,2023, 350: 114 139.

[11] 郑舒方,王玉印,张泽楷,等.石墨烯/聚合物泡沫压阻式应变传感器研究进展[J].精细化工,2023,40(12):2 597-2 608, 2 730.

[12] GJB 1A-2001 火工品安全电流试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会, 2001.