

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0001-09

# 电火工品换能元性能优化的策略与展望

王力<sup>1</sup>, 任炜<sup>1,3</sup>, 褚恩义<sup>1</sup>, 牛惠媛<sup>1</sup>, 李慧<sup>1,2</sup>, 李蛟<sup>1</sup>, 张文超<sup>3</sup>

(1. 陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 陕西 西安, 710061; 2. 杭州电子科技大学 微电子研究院, 浙江 杭州, 310018; 3. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094)

**摘要:** 伴随着高安全性、高可靠性、低能发火和高能输出等应用需求, 电火工品换能元的发展经历了技术交叉、融合创新的过程。本文从电火工品换能元的发展历程、技术发展热点和发展展望 3 个方面对其进行了梳理总结, 从内部需求牵引下的换能机制和外部技术驱动下学科交叉 2 个方面对电火工品换能元的发展历程进行了综合阐述。最后, 从本质机理探究、安全性和可靠性兼顾、功能拓展 3 个方面, 陈述了对电火工品换能元未来发展思路的一些见解。

**关键词:** 电火工品; 换能元; 机理探究; 学科交叉; 功能拓展

**中图分类号:** TJ450 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.001

## Strategy and Prospect for Performance Optimization of Electric Explosive Device Transducers

WANG Li<sup>1</sup>, REN Wei<sup>1,3</sup>, CHU En-yi<sup>1</sup>, NIU Hui-yuan<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1,2</sup>, LI Jiao<sup>1</sup>, ZHANG Wen-chao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061; 2. Micro-Electronics Research Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

**Abstract:** Along with the application requirements of high safety, high reliability, low-voltage ignition, and high-energy output, the development of transducers in electric explosive devices have experienced the process of continuous integration and innovation of technological progress. This article summarized the development of transducers in electric explosive devices from three aspects: development history, technical development hotspots, and development prospects. It comprehensively elaborated on the development process of transducers in electric explosive devices from two perspectives: the energy conversion mechanism driven by internal demands and interdisciplinary interactions driven by external technologies. Finally, from three aspects: exploring essential mechanisms, balancing safety and reliability, and expanding functionality, some insights into the future development of transducers in electric explosive devices were presented.

**Key words:** Electric explosive devices; Transducer; Mechanism exploration; Discipline crossing; Function expansion

火工品是实现起爆、点火和做功的一次性使用元器件、装置和系统的总称, 是武器装备中最敏感的首发单元, 对武器装备的安全性、可靠性和作战效能有重大影响<sup>[1-3]</sup>。换能元是火工品的基础器件及初始功能单元, 其性能优劣直接关系火工品的整体效能。电火

工品换能元作为最典型的火工品换能元, 主要通过直流或电容放电等电激励形式实现能量转换, 进而利用电热、电爆效应引发火工药剂作用, 实现引燃或引爆功能。鉴于电火工品在武器装备中的广泛应用, 近年来, 为提升其安全可靠、拓展功能及应用模式, 国

收稿日期: 2024-08-13

作者简介: 王力 (1994), 女, 工程师, 主要从事新材料火工品技术研究。

通讯作者: 任炜 (1982-), 男, 研究员, 主要从事先进火工品及器件技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (No.U2341249)。

引用本文: 王力, 任炜, 褚恩义, 等. 电火工品换能元性能优化的策略与展望[J]. 火工品, 2024(5): 01-09.

内外研究人员对其新体制换能技术、引发机制机理及环境响应规律等进行了大量研究<sup>[4-9]</sup>。随着作战环境越来越复杂,对武器装备提出了更高的性能要求,如敏感型电火工品换能元亟需升级,以满足高安全、高可靠及环境适应性的工作条件;钝感型电火工品换能元呈现高钝感化,以适应更宽域条件下使用场景。

本文基于电火工品换能元的技术发展历程、当前研究热点及未来发展趋势等多个方面,结合换能元在引发机制、结构效应以及与材料科学、电子工程技术学科交叉等方面的研究成果,对电火工品换能元技术进行综述分析,以冀为火工品性能提升拓展新的思路,为换能元器件技术发展提供参考。

## 1 电火工品换能元技术的发展

### 1.1 电火工品换能元的发展历程

电火工品换能元的发展历程是一个伴随着应用需求和技术进步不断融合创新的过程,它是武器装备应用环境要求更为苛刻和发展愈发现代化的一个缩影表现<sup>[10-12]</sup>。具体的发展趋势如图1所示。



图1 电火工品换能元伴随着应用需求的发展趋势

Fig.1 The development trend of the electrical transducer along with application demands

如图1所示,从发展时间历程来看,共经历3个阶段:

第1阶段为敏感型电火工品换能元。重点满足电气化武器装备对电火工品的使用需求,解决了弹药瞬时起爆快速换能引发的难题。该阶段电火工品换能元的发展以满足装备使用为前提,存在安全性差、可靠性不高等问题。

第2阶段为钝感型电火工品换能元。由静电、射

频、电磁干扰等引起的军械危险问题层出不穷<sup>[13-15]</sup>,导致敏感型电火工品的安全性问题越来越突出,已无法满足导弹、航天装备的使用需求。为解决敏感性问题,钝感火工品概念应运而生,钝感型电火工品换能元的特点是系统改进敏感桥丝电火工品的设计,提出并发展了半导体桥、爆炸箔技术概念。

第3阶段为高效能换能元。现代战争不仅需要武器装备在极端的气候条件、复杂的电磁环境以及高强度的对抗压力下稳定运行,还要求具备高的精准性和杀伤力,这对火工品的作用可靠性、钝感化、信息智能化能力提出了更高要求。其主要体现在安全性与可靠性平衡,既要确保贮存时不因复杂环境干扰能量馈入触发火工品意外作用、瞎火或性能降低等,又要确保使用时在输入能量下换能元输出的能量足够引发火工品作用。同时,信息技术、微纳米技术和微机电技术的兴起及融合,促使火工品换能元在设计制造、性能优化及智能灵巧化等方面实现了跃升。该阶段电火工品换能元的特点是换能信息化、结构微型化、序列集成化和功能多样化。

### 1.2 电火工品换能元技术发展热点

#### 1.2.1 高安全性与可靠性平衡

电火工品换能元需满足日益严苛的安全性和可靠性技术要求。在安全性方面,电火工品换能元必须能够在各种极端、复合条件下保持稳定,不发生意外作用或触发,以确保火工品安全。在可靠性方面,以深空深海设备为例,电火工品换能元需在极端温度、水压、腐蚀、辐射环境和有限的防护条件下长期稳定性,同时又要保证信号的准确接收传输和火工品的可靠发火。

#### 1.2.2 低能引发与高能输出并重

电火工品换能元需满足不断提升的低能引发与输出增效技术要求。低能引发技术要求换能元在较低的能量刺激下就能可靠引发,换能元应具有较高的灵敏度和稳定性,在各种环境下准确响应发火指令。同时,输出增效技术要求换能元作用时能够释放出更高效能量,以确保火工品的可靠引发和使用效能,这对于在远距离点火、多负载状态及极寒高压等恶劣环境下使用的火工品尤为重要。

## 2 电火工品换能元的内在技术突破

### 2.1 引发机制

电火工品换能元的引发机制是其技术核心, 关乎其能量转换效率和应用的可靠性。换能元电热和电爆引发方式的能量转化过程如图 2 所示。

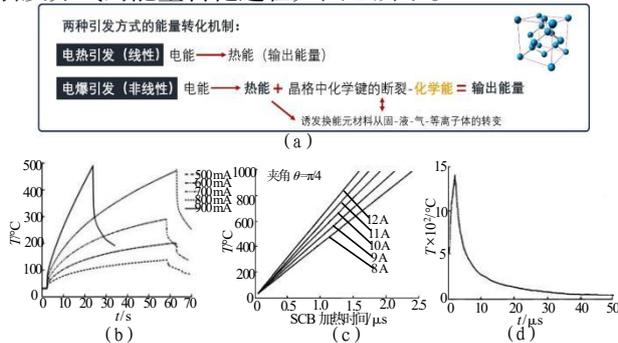


图 2 换能元电热和电爆引发方式的能量转化过程

Fig.2 Energy conversion processes of the electrothermal and electrical explosion initiation modes of the transducer

#### 2.1.1 电热引发机制

电热引发机制是火工品换能元传统且广泛应用的引发方式, 其代表类型为桥丝式火工品。工作原理主要是依靠电流通过桥丝时产生的热能来激发火工药剂, 如图 2 (a) 所示。电热引发机制相对成熟, 性能参数稳定, 操作简便, 且适用于多种火工品和含能材料的引发。但电能转化为热能的线性过程中会有较多的能量损失, 整体能量转换效率不高, 且响应速度相对较慢。易受环境温度的影响。西安交通大学赵玉龙<sup>[6]</sup>团队通过实验发现, 在 900 mA 的激励电流下, Pt 薄膜微结构换能元在约为 20 s 的激励时间内温度可升至 500 °C, 展示了电热引发机制的响应特性, 如图 2 (b) 所示。

#### 2.1.2 电爆引发机制

与电热引发机制不同, 电爆引发机制更加注重能量的瞬间释放和高效转换, 其代表类型为半导体桥火工品。在电爆引发机制中, 电能转化为热能, 并进一步诱发换能元材料由“固-液-气-等离子体”的物相转变, 从而迅速激发药剂并产生强烈的“电爆炸”效果。在等离子体的产生过程中, 换能元材料中化学键发生断裂, 并产生被剥夺电子的正负离子, 因此电爆引发

过程中输出能量是由输入的电能和断键的化学能共同组成, 这使得电爆引发机制具有能量密度高、响应速度快、可靠性好等优点。北京理工大学焦清介<sup>[7]</sup>团队为探究半导体桥的电热性质, 在恒流作用下测量了半导体桥的升温曲线, 当 V 型半导体桥的夹角为  $\pi/4$  时, 改变半导体桥的发火电流可以得到温度与时间的关系, 如图 2 (c) 所示。由图 2 (c) 可以看出, 相较于电热引发方式, 半导体桥的升温速率和温度有显著提高。焦清介<sup>[8]</sup>团队的另一项研究建立了电容放电和直流输入两种方式下半导体桥桥体的升温特性方程, 并通过理论计算模拟了半导体桥在涂覆斯蒂芬酸铅情况下的升温曲线, 如图 2 (d) 所示。南京理工大学张文超<sup>[9]</sup>团队建立了一种半导体桥发火过程超快响应温度模型, 结合焦耳定律、傅里叶定律和有效热容量法, 实现对半导体桥电热与电爆引发下温度分布和变化的可靠模拟。同时张文超<sup>[20]</sup>团队为厘清半导体桥芯片电击穿机制, 探究了强电场条件下载流子分布及性能。研究表明芯片“V”型尖端在电场强度为  $3 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  时发生电击穿过程, 桥区总电流密度最高可达  $1.16 \times 10^9 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。从以上恒流和电容放电方式下半导体桥的升温曲线中可以发现, 电爆引发可有效提高能量转换效率和输出能力, 从而有助于实现更加高效、可靠的火工品作用。

然而, 电爆引发机制也面临着一些挑战和问题需要解决。例如, 如何提高电爆过程的稳定性和可控性、如何降低电爆引发机制的制造成本等。

### 2.2 结构效应

电火工品换能元低能引发的特点, 使其本身十分敏感, 在生产和使用过程中易受杂散电流、静电等危害因素的影响, 导致安全性和可靠性问题。通过优化结构效应, 如改进沉积技术、优化桥形结构等, 一定程度上可以减少外部因素对换能元性能的影响, 提高其在恶劣环境下的稳定性和可靠性。此外, 还可以提升换能元的效率和输出能力。

#### 2.2.1 结构设计的研究进展

在换能元结构优化方面, 中北大学王锋等<sup>[21]</sup>通过对比不同桥区结构薄膜换能元, 发现倒“V”型桥区

结构的薄膜换能元在电爆输出能量、响应时间和电爆性能稳定性方面表现优异,具有不同桥区形状的换能元的电热仿真结果( $t=0.05\ \mu\text{s}$ )如图3(a)所示。陕西应用物理化学研究所李慧等<sup>[22]</sup>设计了具有不同夹角的V型微结构换能元,研究发现V型桥区中心角度处于 $50\sim 90^\circ$ 范围之内时薄膜换能元的发火电压最低。张彬等<sup>[23]</sup>的理论分析揭示了微尺度下薄膜电阻率的变化规律及调控机制,指出金属薄膜达到微米/纳米级时会出现明显的尺度效应,薄膜厚度越小,晶粒尺寸越小,薄膜电阻率越大。不同厚度Ni-Cr薄膜方块电阻及电阻率曲线如图3(b)所示。任小明等<sup>[24]</sup>的研究则讨论了氮化钽薄膜换能元的厚度对其发火电压的影响,发现存在一个 $0.9\ \mu\text{m}$ 的最优厚度,在此厚度时发火电压最低。但这项工作中并没有讨论薄膜厚度对发火电压的影响机制。笔者认为,探究换能元在微纳尺度上的电阻变化及影响机制是需要关注的研究方向之一。

### 2.2.2 阻值与材料的选择

除了换能元的结构优化,研究人员还对阻值、基底材料和制备工艺进行了调控。陕西应用物理化学研究所任炜等<sup>[4]</sup>研究了不同阻值对半导体桥点火器发火特性的影响,其中 $1\ \Omega$ 半导体桥点火器满足 $1\ \text{A}\ 1\ \text{W}\ 5\ \text{min}$ 不发火的要求, $3\ \Omega$ 半导体桥满足 $0.6\ \text{A}\ 1\ \text{W}\ 5\ \text{min}$ 不发火,且具有更高的瞬发度。此外,基底材料的选择<sup>[7-8]</sup>对热量传递和发火能量有重要作用,当基底材料的导热率较低时,有利于热量集中并传递到火工药剂上,并提高发火能量,不同基体桥丝爆发时间与刺激电压关系如图3(c)所示。

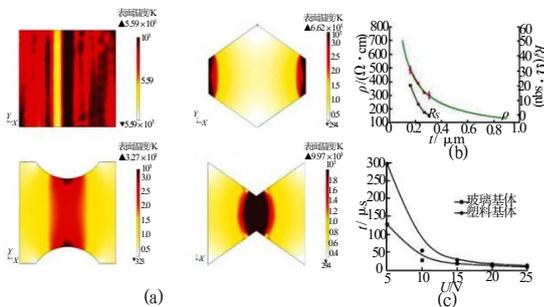


图3 结构及材料等对换能元响应的影响

Fig.3 The effect of structure, material etc. on the response of the transducer

在制备工艺研究中,发现多段式溅射工艺<sup>[25]</sup>可削

弱溅射工艺对厚膜光刻胶的影响,同时可调节热处理温度、减小厚膜内应力;适当的退火处理<sup>[26]</sup>也可消除桥膜内应力,增加附着力和稳定性。

### 2.2.3 封装技术的创新

在换能元封装技术方面,北京空天机电研究所宋婧等<sup>[27]</sup>研究了超声功率、键合压力和超声时间对半导体桥点火器引线键合强度的影响,研究表明键合最优工艺参数为超声功率 $0.35\ \text{W}$ 、键合压力 $0.30\ \text{N}$ 、超声时间 $30\ \text{ms}$ 。此外,采用芯片扣装灌埋孔表面组装技术,通过一道工艺即可完成芯片与印制电路板间的可靠电气连接。相较于传统表面封装结构,具有体积小、成本低、焊接强度高,易于系列化的批量生产等特点<sup>[28]</sup>。

## 3 电火工品换能元与外部技术的融合

电火工品作为火工品的核心部件,其研究与发展离不开多学科的交叉融合。这种交叉融合不仅推动了换能元技术的创新,还提升了其性能和应用范围。

### 3.1 与材料科学的融合

#### 3.1.1 宽禁带半导体材料的应用

宽禁带半导体材料,如碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN),具有高热导率、高击穿场强和高饱和电子漂移速率等特点,这些特性使得它们在高温、高压、高频等极端条件下表现出色。这种材料的高热稳定性和抗辐射特性,减少了温度变化和辐射干扰对性能的影响,实现了小体积、轻量化和快速响应的设计。宽禁带半导体材料的高频特性使得基于这些材料的换能元能够实现更快的响应速度,这对于电火工品的迅速启动和停止至关重要。

尽管宽禁带半导体材料在电火工品换能元中的应用研究尚处于起步阶段,但其在航天发动机点火材料等关联的技术领域已显示出巨大潜力。例如,2019年在金牛座纳星的碳化硅微机电系统(MEMS)微推力器阵列芯片接收地面点火指令成功点火<sup>[29]</sup>。金牛座纳星搭载的碳化硅MEMS微推力器阵列运行了37d,每天要经历12轮的高低温交替环境,并且所处空间存在

较强的电磁辐射,它的在轨点火成功,表明了碳化硅 MEMS 微推力器阵列能适应极端温度环境、低气压环境以及空间辐照环境。Ralf Falgen-hauer 等人将三维碳化硅材料设计为点火元件<sup>[30]</sup>,碳化硅点火元件的点火温度与时间的关系曲线如图 4 (b) 所示。试验结果表明点火元件在燃烧反应器中具有快速的动力学特征,在 800 ms 内可快速加热至远高于 1 000 °C 的高温,集成式点火元件反应温度分布如图 4 (c) 所示。

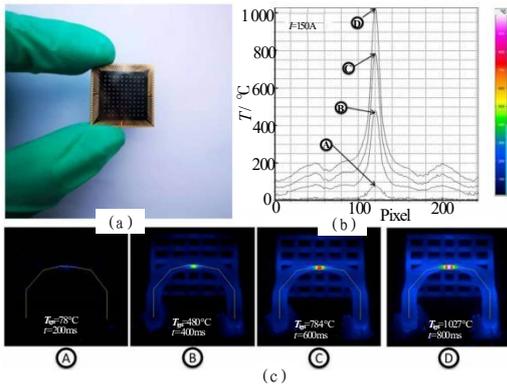


图 4 新型材料技术与火工品结合示例

Fig.4 Case of combining new material technology and initiating explosive devices

### 3.1.2 其他新型材料的应用

目前,新型换能材料如碳膜<sup>[31-32]</sup>、银膜<sup>[33]</sup>和氮化钽 (TaN)<sup>[25,34,35]</sup>等逐渐受到关注。南京理工大学沈佳驰等<sup>[31]</sup>通过采用气溶胶辅助化学气相沉积、激光切割、微笔直写等技术,制备了一种类石墨碳膜换能元。碳膜桥的实物与 AFM 图片分别如图 5 (a) ~ (b) 所示,碳膜桥蘸药发火过程的高速摄影图如图 5 (c) 所示。碳膜桥的成型工艺简单有效,其发火区间窄,抗静电能力强,作用时间长,安全性可靠性高,能够实现钝感药剂的点火。南京理工大学易镇鑫等<sup>[33]</sup>采用喷墨打印制备了银膜换能元,在不同输入能量下存在电热、电爆两种情况。银膜桥较易产生等离子体,蘸有斯蒂芬酸铅的银膜桥在 47  $\mu\text{F}$  脉冲放电下 50% 发火电压为 6.65 V,脚-脚间可以耐受 25 kV 静电放电,可通过钝感电火工品 1 A 1 W 5 min 测试。银膜桥在脉冲电压 25 V 下的电爆过程如图 5 (d) 所示。陕西应用物理化学研究所任小明等<sup>[34]</sup>利用射频电源溅射氮化钽薄膜,采用剥离工艺制备氮化钽换能元图形,获得满足完整性、一致性和重复性要求的氮化钽换能元。

并采用多次间隔溅射和热处理等工艺,实现了氮化钽桥膜换能元桥区的厚膜图形化,制作的氮化钽换能元可实现 3 A 9 W 5 min 不发火、直流 5 A 发火<sup>[25]</sup>。陕西应用物理化学研究所阚文星等<sup>[35]</sup>利用瞬态光学高温计,分别在恒定电压激励和电容激励下对不同结构尺寸的氮化钽薄膜换能元进行瞬态响应温度测试,电容激励下 (20 V/33  $\mu\text{F}$ ) 不同长度尺寸的氮化钽换能元温度响应曲线如图 5 (e) 所示。

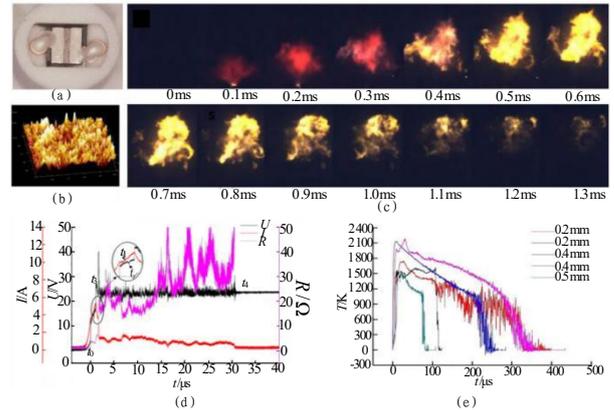


图 5 新型材料在换能元中的应用实例

Fig.5 Example of new materials applied in transducers

综上所述,火工品换能元与材料科学的交叉融合是推动火工品技术创新与发展的重要途径。

## 3.2 与电子工程技术的融合

随着武器系统的小型化、信息化趋势,火工品换能元朝着微型化和集成化的方向发展,这一进程促进了其与微纳制造和微电子技术的交叉融合。

### 3.2.1 薄膜换能元技术

薄膜换能元作为 MEMS 火工品的核心部件,其设计和制备技术取得了显著进展。利用磁控溅射等薄膜沉积技术<sup>[36-40]</sup>以及 3D 打印增材制造技术<sup>[33,41]</sup>,可以制备出具有优异性能的复合薄膜换能元。研究表明,这些薄膜换能元具有低起爆能量、高安全性、高可靠性和微型化等特点,其结构设计灵活性更高,便于实现能量输出的增效,满足火工品对高性能和小型化的需求<sup>[21]</sup>。

### 3.2.2 微型化与集成化技术

MEMS 工艺利用微米/纳米级加工技术,实现了火工品换能元的微型化和集成化。通过微纳加工技术和微电子技术的结合,可以将多个功能不同的元器件集成在一个芯片上,形成高度集成的微型系统。这种

设计不仅减小了火工品的体积和重量，还提高了其可靠性和灵活性<sup>[42-44]</sup>。将集成电路技术应用于换能元的设计中，可以实现换能元的智能化控制，拓展系统的使用性能。

陕西应用物理化学研究所陈建华等<sup>[42]</sup>针对传统电火工品桥丝焊接存在虚焊、人工效率低等问题，开展了基于 MEMS 工艺的电极塞换能元一体化集成技术研究。提出了电极塞换能元一体化集成设计的方案，工艺原理如图 6 (a) 所示。所设计的电极塞换能元具有平面结构、无需人工焊接、可批量化生产等特点，在 10  $\mu$ F/15 V 条件下能够可靠作用。为进一步提高集成换能元芯片的抗静电能力，陕西应用物理化学研究所李慧等<sup>[43]</sup>提出了一种集成静电防护电路的薄膜换能元芯片，集成芯片制备流程如图 6 (b) 所示。该研究基于微电子技术进行了火工品用薄膜换能元与功能电路的集成设计与制作，提高了薄膜芯片抗静电、抗电磁脉冲的能力，实现了薄膜芯片和功能电路的单片集成，且芯片尺寸与常规换能元一致，电磁安全性得以提升。为了提高半导体桥火工品的电流安全性，杭州电子科技大学程鹏涛等<sup>[44]</sup>通过片上集成方式，在半导体桥两端并联金属-绝缘体相变材料 VO<sub>2</sub> 对其进行分流防护；提出蛇形设计方法来降低 VO<sub>2</sub> 薄膜在金属态的电阻值，使其与半导体桥阻值相匹配，测试了不同长宽比的 VO<sub>2</sub> 薄膜及相应的集成芯片在室温 (25  $^{\circ}$ C) 至 100  $^{\circ}$ C 范围内的电阻曲线，并对集成芯片及单独半导体桥在 1 A 1 W 5 min 和 1.5 A 2.25 W 5 min 安流试验中的传热过程进行了仿真。1 A 1 W 5 min 条件下半导体桥+VO<sub>2</sub> 热传导模拟结果如图 6 (c) 所示。研究表明蛇形设计可以有效降低 VO<sub>2</sub> 薄膜电阻，其阻值与蛇形长宽比成反比，VO<sub>2</sub> 薄膜能够对半导体桥起到一定的分流防护作用。为提高爆炸箔的制造效率和产品一致性，南京理工大学郭菲等<sup>[45]</sup>设计并制造了一种基于柔性印刷电路结构效应的集成冲击波换能元。基于柔性印刷电路方法的集成芯片与传统方法芯片的 5 次飞片速度试验结果如图 6 (d) 所示。根据试验结果可知，在飞片驱动过程中，集成能量转换装置在能量效率和动作一致性方面具有显著的优势。

综上所述，电子工程技术的应用推动了电火工品换能元设计的微型化与集成化，为火工品的安全性、可靠性提升以及功能拓展注入强大动力。

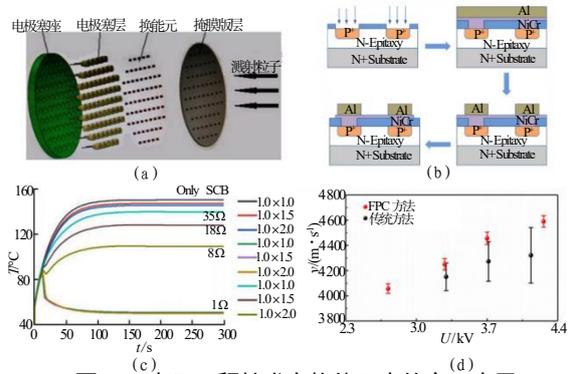


图 6 电子工程技术在换能元中的交叉应用

Fig.6 Cross application of electronic engineering technology in transducers

## 4 电火工品换能元的发展展望

### 4.1 本质机理探究与技术体系的建立

#### 4.1.1 微纳米尺度设计及能量转换机理探究

通过微纳米技术制备的换能元材料具有更高的比表面积，这意味着在相同体积下，纳米材料拥有更多的表面原子。这些原子对电流的反应更为敏感，在电热转换过程中可能表现出更高的效率。当材料的尺寸减小到纳米级别时，其电子结构会发生变化，量子尺寸效应开始显现，影响材料的电导率和热导率，进而影响电热转换的性能，如量子隧穿效应可能改变纳米材料的电导率。同时，纳米材料的热传导性能通常低于块体材料，低热导率特性有助于减少热量的散失，提高能量转换效率。

目前，电火工品换能元在微纳米尺度上的设计和能量转换机理研究尚处于起步阶段，通过精选材料、优化结构设计以及采用先进的微纳制造技术，有望实现换能元的微纳米化设计，并提高能量转换效率。深入探索微纳米尺度下的能量转换机理，将为电火工品技术的发展提供新的动力和方向。

#### 4.1.2 电爆转换过程的监测和机理探索

在电火工品换能元的工作过程中，可以采用原子发射光谱法 (AES)、激光诱导荧光光谱法 (LIF) 等高精度测温技术来实时监测等离子体温度，捕捉电

爆过程中的瞬态温度变化。结合微波干涉法、激光散射法等监测等离子体密度,可以全面评估电爆过程的物理特性。同时,深化电爆转换的理论模型,通过数值模拟可以预测能量转化突变点的位置和特性。

#### 4.1.3 完善电爆过程能量转换效率的概念

电爆过程中的能量转换效率不仅涉及电能向其他形式能量(如热能、化学能或机械能)的转换比率,还需深入考虑换能元本身的性质对转换效率的影响。换能元的材料特性(如导电性、热导率、化学稳定性)、结构设计(如尺寸、形状、电极间距)和制备工艺(如表面粗糙度、掺杂浓度)等因素,均会影响电爆过程中的能量传递与转换效率。

在完善能量引发、转换效率等概念时,需采用综合评估方法,深度揭示电爆过程中能量转换的微观机制与宏观表现。建立考虑换能元本征特性的理论模型,如基于材料物性的热力学模型,能够更准确地预测能量转换过程的变化趋势,并识别出影响能量转换效率的关键因素。此时,通过将现有知识、数据固化形成软件模型,也可为基础理论构筑提供支持。

#### 4.1.4 建立电火工品换能元标准体系

电火工品换能元标准体系的建立是一个深度整合设计、制造与校验各环节的综合性过程。首先需明确换能元器件分类标准,依据其功能、性能、用途等特征进行科学分类。在设计层面,需深入探索材料物理性质与能量转换效率的内在联系,制定严格的设计验证流程。制造规范需细化并固化工序参数,严格控制材料纯度、加工精度与表面质量。校验规范则强调高精度测量技术与物理场仿真技术的应用,构建全面的性能评估体系。此外,标准体系还需关注换能元的长期稳定性与可靠性,制定有效的维护保养与更新换代策略。

### 4.2 安全性与可靠性的平衡

#### 4.2.1 自含能一体化增效技术

自含能一体化增效技术通过将含能材料直接集成到换能元中,从而实现能量的高效转换和传输。这种技术不仅可以降低输入能量需求,还可以提高换能元的点火可靠性。由于自含能一体化增效技术中涉及

电磁场、热场等物理场分布和化学反应动力学过程,这些物化过程的理论分析可为换能元的优化设计提供科学依据<sup>[39-41,46-48]</sup>。

#### 4.2.2 新型换能材料的研制

深入探索具有高能量密度、高稳定性和多功能特性的新型材料,并研究这些材料在换能元中的作用机理,理解其在电刺激下的能量转化和释放机制,包括材料的电子结构、化学键合状态以及能量传递和转化过程。关注如何通过优化材料结构和组成,如调整材料的晶体结构、缺陷分布和界面特性,来实现更高效、更稳定的能量输出,并探索材料在复杂环境下的稳定性和可靠性,包括抗静电、抗电磁干扰以及长期使用寿命等方面的性能。

### 4.3 功能集成与信息化

#### 4.3.1 电磁兼容性设计

通过优化换能元的设计参数和制备工艺来降低其对电磁环境的敏感性,同时在电火工品中增加防护器件(如电磁屏蔽层、滤波器等)来吸收或旁路从电磁环境中耦合的能量,以提高电火工品的抗电磁干扰能力<sup>[49]</sup>。

#### 4.3.2 智能化技术

随着物联网、人工智能等技术的快速发展,电火工品换能元也开始向智能化方向发展。集成信号处理、控制等电路可以实现火工品的自检测、自校准和自适应等功能。这种智能化设计可提高火工品的响应速度和准确性,降低误操作和故障的风险。此外,建立换能元材料参数基因库,利用机器学习算法对换能元材料进行优化设计,有助于换能元的数字化设计实践。

#### 4.3.3 器件集成

未来的换能元将不仅仅是单一的能量转换器件,而是集成了多种功能的智能单元。通过与其他元器件(如传感器、执行器、微处理器等)的集成,换能元将具备数据采集、处理、分析和控制等多种功能。随着微加工技术的不断发展,新的工艺方法将被应用于换能元的集成中,如三维集成技术、纳米制造技术等,使得换能元能够在更小的尺度上实现更复杂的结构和功能。

## 5 结语

电火工品换能元对提升火工品性能至关重要,面临提升效率、响应速度和稳定性的挑战,在微型化、多功能化的同时需确保安全性和可靠性。未来研究方向包括:(1)探究微纳米尺度下的能量转换机理,优化换能元设计;(2)开发新型高能量密度材料,以适应极端及特殊应用环境需要;(3)建立换能元标准体系,规范生产流程,提高可靠性;(4)利用自含能技术和新材料提高换能元性能;(5)推动换能元智能化和多功能化,实现数据采集和控制一体化。

跨学科合作是推动电火工品换能元技术创新的关键。通过深入研究和应用新材料,有望推进换能元技术新突破,满足现代武器系统的发展需求。

### 参考文献:

- [1] 褚恩义,张方,张蕊,等.第四代火工品部分概念初步探讨[J].火工品,2018(1):1-5.
- [2] 褚恩义,张方,陈建华,等.第四代火工品概念补充探讨[J].火工品,2020(6):1-4.
- [3] 褚恩义,陈建华,张蕾,等.火工品的基础问题及技术发展[J].含能材料,2023,31(06):527-530.
- [4] 任炜,周智,刘举鹏.半导体桥点火器的设计与研究[J].火工品,2007(6):43-46.
- [5] 张文超,王文,周彬,等.半导体桥生成等离子体温度的测量[J].含能材料,2009,17(03):344-348.
- [6] 杨贵丽,焦清介.双V型半导体桥电阻计算方法研究[J].火工品,2009(3):1-5.
- [7] 焦清介,周庆,臧充光,等.塑料与玻璃基体Ni-Cr桥丝爆发规律研究[J].北京理工大学学报,2012,32(10):1 009-1 013.
- [8] 任炜,赵玉龙,褚恩义,等.微机电火工品薄膜结构换能元[J].光学精密工程,2018,26(09):2 320-2 326.
- [9] 杨贵丽,焦清介,沈瑞琪.恒流激励微型半导体桥发火临界性研究[J].火工品,2011(3):1-5.
- [10] 李慧,白颖伟,任炜,等.火工品换能元直流激励下温度响应特性仿真研究[J].兵工学报,2016,37(S2):138-143.
- [11] 任炜,白颖伟,褚恩义,等.铁氧体材料在火工品电磁波环境适应性设计中的应用[J].兵工学报,2014,35(09):1 375-1 380.
- [12] 李晨铭,冀小刚,王云鹏,等.高钝感半导体桥安全性能研究[J].火工品,2023(3):7-13.
- [13] 宁爵勇,简昊天,朱正旺,等.非晶合金新型换能元材料性能初探[J].含能材料,2023,31(06):577-588.
- [14] 顾伯南,徐建勇,石伟,等.电火工品换能元增效技术研究进展[J].含能材料,2023,31(03):251-265.
- [15] 焦清介,赵婉君,常英珂,等.电爆桥膜换能元设计研究[J].火工品,2023(6):14-20.
- [16] 张一中,韦学勇,张国栋,等.薄膜微结构换能元温度测量技术研究[J].传感技术学报,2022,35(8):1 011-1 017.
- [17] 胡剑书,焦清介.半导体桥电热性质初探[J].工程爆破,2006(01):90-91,47.
- [18] 胡剑书,焦清介.半导体桥升温方程研究[J].工程爆破,2008(2):77-79.
- [19] Zheng Z, Xu J, Zhang W, et al. An ultrafast temperature response analysis of a MEMS-based igniter using the finite-element method[J]. Energetic Materials Frontiers, 2022, 3(1): 18-25.
- [20] 顾伯南,韩忠博,徐建勇,等.基于TCAD的半导体桥芯片设计与仿真方法[J].火工品,2023(6):39-43.
- [21] 王锋,侯新鹏,彭志凌.不同桥区结构MEMS爆炸换能元电爆性能研究[J].火箭与制导学报,2022,42(04):12-16.
- [22] 李慧,任炜,骆建军,等.微结构换能元的低能化设计与性能研究[J].火工品,2022(1):20-23.
- [23] 张彬,褚恩义,任炜,等.厚度对MEMS换能元薄膜电阻率的影响研究[J].火工品,2018(1):49-53.
- [24] 任小明,刘兰,余可馨,等.氮化钽薄膜换能元低能化研究[J].火工品,2021(1):5-8.
- [25] 任小明,陈建华,丁跃伟,等.钝感氮化钽桥膜换能元制备研究[J].火工品,2021(5):6-9.
- [26] 彭志明,卢斌,解瑞珍,等.退火处理对Ni-Cr合金桥膜的影响[J].火工品,2011(1):5-8.
- [27] 宋婧,麻翠.半导体桥点火器芯片引线键合技术研究[J].火工品,2021(3):8-11.
- [28] 刘黎,刘宇韬.一种用于钝感电火工品半导体桥换能元的表面封装:中国,202321614982.4[P].2024-02-20.

- [29] 叶迎华,徐旭冉.国际首次碳化硅 MEMS 微推力器阵列在轨点火试验成功[EB/OL].<https://zs.njust.edu.cn/44/31/c4621a214065/page.htm>,2019-10-22/2024-07-10.
- [30] Ralf Falgenhauer, Patrick Rambacher, Lorenz Schlier, et al. Electrically heated 3D-macro cellular SiC structures for ignition and combustion application[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017(112): 1 557-1 565.
- [31] 沈佳驰,易镇鑫,张琳,等.碳膜桥作为点火装置的设计与可行性[J].*火工品*,2020(6):14-17.
- [32] 李东奇,沈李喙,陈岱松,等.类石墨桥膜的发火可靠性研究[J].*爆破器材*,2020,49(6):15-19.
- [33] 易镇鑫,李林,魏梦焱,等.银膜换能元的喷墨打印及其性能表征[J].*含能材料*,2023,31(03):215-221.
- [34] 任小明,苏谦,解瑞珍,等.氮化钽换能元的制备工艺研究[J].*火工品*,2020(1):26-28.
- [35] 阚文星,刘卫,任小明,等.氮化钽薄膜换能元微量级瞬态响应温度研究[J].*火工品*,2022(1):24-28.
- [36] 曾荣耀,丁喜冬,刘志宇,等.基于 MEMS 技术的微桥制备与共振频率测量[J].*半导体技术*,2010,35(06):584-588.
- [37] Tengjiang Hu, Wei. Ren., Yulong Zhao, Research status and development trend of MEMS detonators.[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57 (22): 359-368.
- [38] 解瑞珍,任小明,王可暄,等.Ni-Cr 桥膜换能元的制备[J].*含能材料*,2011,19(05):584-587.
- [39] Wu T, Singh V, Julien B, et al. Design and fabrication of a fast-response and low-energy input micro igniter[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024(376): 115 573.
- [40] Kan W, Liu W, Lou W, et al. High-safety energetic micro-igniter for micro-thrust system[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024(368): 115 056.
- [41] Yu C, Zheng Z, Gu B, et al. Aluminum/lead tetroxide nanothermites for semiconductor bridge applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023(451): 138 614.
- [42] 陈建华,刘兰,任小明,等.基于 MEMS 工艺的电极塞换能元一体化集成技术[J].*火工品*,2020(6):18-20.
- [43] 李慧,骆建军,任炜,等.集成 PN 结防护结构的薄膜换能芯片[J].*含能材料*,2023,31(03):222-228.
- [44] 程鹏涛,李慧,骆建军,等.基于金属-绝缘体相变材料的高钝感集成半导体桥芯片设计[J].*火工品*,2024(2):1-7.
- [45] 郭菲,吕建军,王窈,等.基于 FPC 工艺的集成冲击片换能元性能分析[J].*含能材料*,2018,26(09):791-795.
- [46] Zheng Z, Zhang W, Yu C, et al. Integration of the 3DOM Al/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanothermite film with a semiconductor bridge to realize a high-output micro-energetic igniter[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(5): 2 552-2 560.
- [47] Chen Y, Xia S, Ren W, et al. A favorable improvement in reactivity between n-Al and sheet-like porous CuO as a nanoenergetic composite by graphene oxide additives[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(29): 12 934 -12 942.
- [48] Xu J, Chen Y, Zhang W, et al. Direct ink writing of nAl/pCuO/HPMC with outstanding combustion performance and ignition performance[J]. *Combustion and Flame*, 2022 (236): 111 747.
- [49] 牛惠媛,任炜,李慧,等.半导体桥火工品电磁响应及其防护技术仿真研究[J].*火工品*,2024(1):43-47.