

文章编号: 1003-1480 (2024) 05-0010-10

电火工品换能元电磁损伤机理及防护技术研究进展

韩忠博^{1,2}, 贺孝严^{1,2}, 顾伯南^{1,2}, 徐建勇^{1,2}, 石伟^{1,2}, 俞春培^{1,2}, 张文超^{1,2}

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 江苏 南京, 210094; 2. 微纳含能器件工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京, 210094)

摘要: 随着战场空间的电磁环境日趋复杂, 火工品面临更高的电磁适应能力要求。本文综述了电火工品换能元在电磁损伤机理和防护技术研究方面的研究进展, 介绍了电火工品在不同电磁环境下的损伤机制, 探讨了静电、雷电脉冲、核电磁脉冲等干扰对火工品性能的影响, 并分析分立式电磁防护技术, 包括铁氧体材料、电容器和负温度系数热敏电阻等元件在电磁防护中的应用, 展示了其在不同电磁环境下的防护效果。同时, 讨论了集成式电磁防护技术的发展, 特别是 MEMS 工艺在换能元小型化和多功能集成化中的应用, 并针对电火工品换能元电磁防护技术未来发展陈述了一些见解。

关键词: 电火工品; 换能元; 复杂电磁环境; 微机电系统

中图分类号: TJ450.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.002

Research Progress on Electromagnetic Damage Mechanism and Protection Technology of Electric Explosive Device Transducers

HAN Zhong-bo^{1,2}, HE Xiao-yan^{1,2}, GU Bo-nan^{1,2}, XU Jian-yong^{1,2}, SHI Wei^{1,2}, YU Chun-pei^{1,2}, ZHANG Wen-chao^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094; 2. Key Laboratory of Micro/Nano Energetic Devices, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing, 210094)

Abstract: The electromagnetic environment of battlefield space is becoming more and more complicated, which poses higher demands on the electromagnetic adaptability of pyrotechnic devices. This paper reviewed and summarized the current research on the electromagnetic damage mechanisms and protective technologies for pyrotechnic transducer elements, the damage mechanisms of pyrotechnic devices under different electromagnetic environments were introduced, and the impact of interferences such as static electricity, lightning pulses, and nuclear electromagnetic pulses on their performance were explored, and the discrete electromagnetic protection technologies, including the application of ferrite materials, capacitors, and negative temperature coefficient thermistors in electromagnetic protection were analyzed, as well as their effectiveness in different electromagnetic environments were exhibited. Additionally, the paper discussed the development of integrated electromagnetic protection technologies, particularly the application of MEMS technology in the miniaturization and multifunctional integration of transducer elements, and presented insights on the future development of electromagnetic protection technologies for pyrotechnic transducer elements.

Key words: Electric explosive devices; Transducer; Complex electromagnetic environment; Microelectromechanical systems (MEMS)

火工品是指接收发火指令后, 以较小能量激发其内装敏感药剂产生燃烧或爆炸, 实现点火、起爆、做功等预定功能的一次性使用的元器件、装置和系统的总称, 其作用贯穿于武器装备发射到完成功能的全过

收稿日期: 2024-09-12

作者简介: 韩忠博 (1999-), 男, 在读博士生, 主要从事电火工品换能器件技术研究。

通讯作者: 张文超 (1977-), 男, 教授, 主要从事先进点火器件及微纳含能材料研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (No.22275091, No. 22205112, No. U2341249)。

引用本文: 韩忠博, 贺孝严, 顾伯南, 等. 电火工品换能元电磁损伤机理及防护技术研究进展[J]. 火工品, 2024(5): 10-19.

程^[1-3]。换能元作为火工品的首发基础元件,其性能在一定程度上决定了武器系统最终效能^[4]。在实际应用中,强电磁脉冲,如静电、核电磁脉冲,以其高强度、宽频谱、远距离传播等特点,极易通过天线、线缆等途径耦合进入武器系统内部,造成电火工品换能元意外起爆、瞎火或性能降低等意外事故。针对电磁损伤环境,美国建立了一系列军事标准,其中美军标 MIL-STD-461C 将电磁环境的内涵定义为电磁辐射(EMR)、电磁干扰(EMI)、电磁脉冲(EMP)、静电(ESD)、雷电(LE)和电源瞬变(PST),对电爆装置及系统的抗电磁能力提出了一系列要求^[5]。

随着武器系统小型化、集成化发展,现代战场信息化程度不断提高,大功率设备广泛部署以及电子战系统、高功率微波武器的出现,使得战场空间的电磁环境日趋复杂,武器装备对火工品的电磁环境适应能力提出了更高要求^[6-7]。在此背景下,针对桥丝、半导体桥等低发火能量电火工品换能元,国内外研究人员开展了一系列电磁损伤机理及安全防护技术的研究,本文主要从上述两个方面对国内外换能元电磁损伤机理和防护技术的研究现状进行分析和讨论。

1 电火工品电磁损伤机理

1.1 电磁损伤机理的发展历程

早在 20 世纪 50 年代,美国便提出了电磁辐射对军械装置的危害(Hazard of Electromagnetic Radiation to Ordnance, HERO)问题。随着技术的持续发展与完善,这一问题已经逐步扩展为现在的武器装备的电磁环境效应(Electromagnetic Environment Effects, E³)研究。1994 年, Pavlovskii 等^[8]针对连续电磁波辐射建立了电起爆装置开路等效模型,分析了射频场在不同频率下对电起爆装置的耦合效率,对电火工品装置电磁损伤机理开展了初步探索。

1.2 不同电磁环境下的损伤机制

在国内,谭伟等^[9]建立了灼热桥丝式电火工品的静电发火数学模型,充分考虑了静电刺激对药剂有效含量的影响,计算得出了不同静电刺激水平和刺激次数下电火工品换能元的临界发火能量。景晓强等^[10]

针对连续电磁波辐射,分析了其对电火工品的作用机制,初步给出了评估电火工品电磁危害的方法。陈亚洲等^[11]则从雷电电磁脉冲与电火工品的耦合机制出发,探讨了雷电电磁脉冲对电火工品的损伤机理。这些研究分别针对静电、连续电磁辐射和雷电 3 种不同的电磁环境,分析电磁环境对电火工品耦合作用机制,为电火工品在设计、运输、使用和贮存过程中防护措施的选择提供了依据。

1.3 电磁损伤等效模型和损伤分析

Fortov^[12]针对电磁辐射对电火工品的耦合机理,依据桥丝式火工品引脚的不同设计状态(短路或非短路),提出了两种状态下的等效天线模型和等效电路。Neuber 等^[13]基于连续电磁辐射特性,分析了其对桥丝式火工品的损伤机理,并构建了温升模型。陈明华等^[14]构建了桥丝式火工品在连续电磁波耦合条件下的热分析数理模型,并通过仿真分析研究了耦合电流大小对桥丝式火工品性能的影响,发现当电流达到 80 mA 时,会影响该火工品的作用效能。电火工品电磁损伤的等效模型和等效电路如图 1 所示。

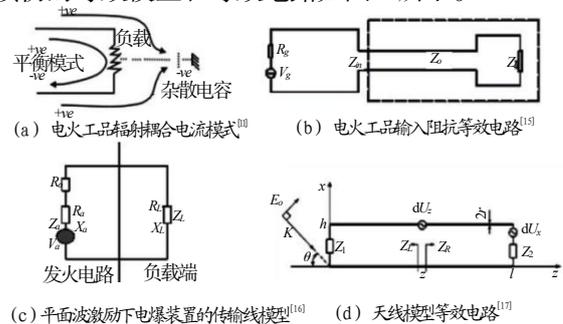


图 1 电火工品电磁损伤的等效模型和等效电路

Fig.1 Electromagnetic damage equivalent models and equivalent circuits of electric explosive devices

为进一步明确电磁环境对电火工品换能元的影响规律,蔡明娟等^[18]根据桥丝式火工品的电磁辐射耦合机制,构建了对称振子式的等效天线模型,分析了入射波极化方向、桥丝的电阻以及入射波的频率 3 方面对桥丝感应电流的影响。Lambrecht 等^[19]结合传输线理论,通过理论计算研究了平行脚线布局下,桥丝式火工品输入阻抗随频率变化的规律。李贵兰等^[17,20]采用场线耦合理论分析了电磁辐射环境下电火工品换能元的状态,并建立了电火工品的传输线模型,确定了耦合功率与入射场频率之间的数学关系,揭示了

电火工品的敏感频率与其脚线长度的显著相关性。姚成柱等^[21]基于 FEKO 软件分析了对称振子等效天线模型在单频连续波辐射场下的耦合电流及耦合功率，建立了理想状态下电磁环境影响模型。Mora 等^[22]基于热传导公式搭建了连续电磁辐射与桥丝式火工品换能元温升特性的关系模型。杨培杰等^[16]提出了偶极子天线与环形天线两种等效天线模型，并通过天线原理计算了电磁辐射对这两种模型的最大耦合功率，分析了电磁辐射强度和波长对桥丝式火工品换能元最大接收功率的影响。

Pantoja 等^[23]基于 3 类电火工品换能元的宽频带阻抗特性，搭建了开路等效天线模型，分析了入射场极化方向、阻抗匹配等因素对电火工品换能元的影响规律。于鸿源等^[24]基于美国电气和电子工程师协会标准和 Sandia 实验室的静电放电模型，利用 Pspice 软件分析了不同静电放电模型下镍铬桥丝换能元的损伤情况。吕智星^[25]分析了在几类典型静电放电模型下，静电脉冲意外起爆桥丝式火工品换能元的影响因素。赵团等^[26]结合理论计算和仿真模拟，对某典型桥丝式电火工品的射频阻抗进行了研究，获得了 $1 \times 10^{-5} \sim 20$ GHz 频率范围内的 5 个谐振频率点。

1.4 电磁耦合效应分析和安全阈值计算

张旭等^[27-28]针对舰载用电火工品换能元，利用 FEKO 软件模拟了舰载短波天线和相控阵雷达的辐射方向图，并通过 HFSS 软件研究了不同频率电磁辐射下桥丝式电火工品换能元感应电流的规律。马骏等^[29]以双脚线式和独脚脚壳式典型桥丝式火工品换能元为研究对象，建立了电火工品天线耦合的数学模型，获得了 RS103、RS105 和 HPM-UWB 3 种典型电磁辐射环境下桥丝式火工品的电磁耦合效应规律。孟冬旭等^[30]分析了超宽带脉冲作用下不同布线形式的桥丝式火工品感应电流幅值的变化规律，发现平行且靠近式布线方法能有效降低火工品的感应电流。马文韬^[31]分析了 HEMP 和 HPM-UWS 两种典型强电磁脉冲辐照下双脚桥丝式电火工品的耦合响应特性。陈鑫^[32]以桥丝式火工品和薄膜传输线式火工品为例，建立了等效 V 型振子接收天线模型及强电磁脉冲辐射场的快速计算方法，获得了以核电磁脉冲为代表的强电磁

脉冲对电火工品耦合效应的规律。李福强等^[33]基于 FEM-IE 算法，研究了电磁场对电火工品的作用规律，发现桥丝上感应电流的大小随着辐射源与火工品距离的增大而减小，在距离大于 5 m 时感应电流迅速衰减。电火工品的电磁耦合效应模型如图 2 所示。

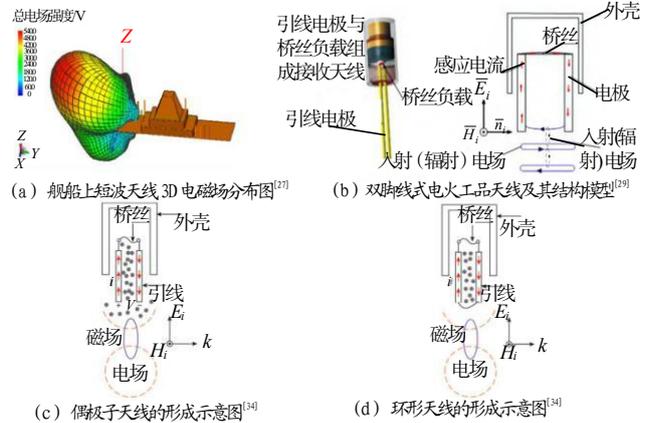


图 2 电火工品电磁耦合效应模型
Fig.2 Electromagnetic coupling effect models of electric explosive devices

牛慧媛等^[35]基于 COMSOL 软件建立了半导体桥丝电火工品的电磁响应仿真模型，明确了连续电磁波照射和核电磁脉冲辐照作用下半导体电火工品的响应特性。姚洪志等^[36]以电磁-热耦合模型为基础，通过分析电火工品在电磁场中的耦合效应、敏感性及其电磁响应之间的关系，形成了电火工品电磁场安全阈值的试验与计算方法。朱晓楠等^[34]分析了强电磁脉冲作用下桥丝式电火工品等效天线模型的形成机制，并通过 CST 软件模拟了强电磁脉冲作用下电火工品的感应电流现象，研究发现入射波的强度、频率、入射方向及等效天线的接收面积是影响感应电流的关键因素，而桥丝的电阻和感应电流共同决定了火工品内部的耦合能量。

电磁辐射对火工品影响的研究已有较长历史，经历了从最初关注 HERO 问题，到当今对 E³ 研究的不断深化，对电磁环境干扰的理解日益增强。国内外学者通过在不同电磁环境下（如静电放电、连续电磁辐射、核电磁脉冲等）构建电火工品的耦合机制模型，为电磁防护设计提供了重要的理论支撑。在静电环境下，耦合产生的热效应和材料损伤增加了火工品意外发火的风险；而在持续的电磁辐射下，耦合能量的累积导致桥丝温度升高，可能引发火工品的意外发火或

失效。相比之下,雷电脉冲和强电磁脉冲的瞬时冲击对电火工品换能元的影响尤为严重,可能瞬间带来电火工品换能元的结构失效或意外起爆。这些研究涵盖了桥丝式火工品、半导体桥式火工品等多种类型的换能元,深入探讨了电磁耦合效应、损伤机理及电磁环境下的安全阈值,逐步形成了较为系统的理论框架和仿真分析方法,为提升火工品在复杂电磁环境中的安全性能奠定了坚实基础。

2 电火工品换能元的电磁防护技术

2.1 分立式电磁防护技术

2.1.1 铁氧体材料与电容的安全加固设计

铁氧体材料因其在低频时呈现低阻抗、高频时呈现高阻抗的特性,广泛应用于火工品的电磁防护。通过在火工品内部烧结铁氧体或在脚线上串联铁氧体磁珠,可以有效地吸收和衰减高频信号和静电干扰。在低频环境下,铁氧体允许发火信号正常通过,而在高频环境下,铁氧体通过涡流损耗将高频电流转化为热能,有效降低电磁干扰,保证火工品在复杂电磁环境中的安全性。

Maurice^[37]和 Dow^[38]等最早通过采用铁氧体材料,设计了一种抗射频干扰火工品,用以吸收和衰减电火工品中的高频感应电流。尽管铁氧体材料在加工过程中存在填充、密封、焊接和体积控制等难题,显著增加了工艺的难度和成本,但随着工艺技术的不断完善,标准化的铁氧体电子元件如铁氧体磁珠逐渐普及,简化了铁氧体材料的应用,促进了其在电火工品电磁安全加固中的应用。例如,叶林^[39]在国内首次将铁氧体磁珠应用于低发火能量半导体桥火工品的射频安全加固,结果表明,在连续波注入条件下,片式磁珠能够将半导体桥的发火功率从 13 W 提高至 17 W。任炜等^[40]的电磁辐射效应测试结果显示,桥丝式火工品在敏感频率下产生的感应电流高达 160 mA,远超其安全电流限值 25 mA。为解决这一问题,在两根脚线上分别接入了两个层叠片式铁氧体磁珠,将火工品的感应电流降低了 30%。上述研究表明,无论射频能量通

过哪种方式耦合进入电火工品,铁氧体磁珠都能实现对射频环境耦合能量的有效削弱。

电容因其体积小、成本低等优势,广泛应用于火工品的电磁防护。在射频环境中,电容器作为滤波器的工作原理是:当电容器并联于换能元两端时,其容抗随频率变化而变化。在低频环境下,电容器的阻抗远大于换能元,电流主要流经换能元,不影响正常发火信号。而在高频环境中,电容器的阻抗较小,射频信号主要通过电容器分流,从而保护换能元免受干扰。通过选择合适的电容值,可以有效控制特定频段的射频信号,确保电火工品在电磁环境下的安全运行。

Novotney 等^[41]将 0.47 μF 的电容应用于半导体桥电火工品的射频防护,并依据 MIL-STD-1576 标准中的 2207 方法,使用连续波和脉冲波测试信号,对火工品在 1.5 MHz 到 33GHz 的频率范围内的射频敏感度进行评估。结果表明,电容有效提升了火工品脚-脚及脚-壳之间的抗射频干扰能力。任钢^[42]也通过使用贴片电容对半导体桥式电火工品进行射频防护,射频注入测试结果表明并联电容能够将半导体桥的抗射频功率从 14.15 W 提升至 20 W,并且通过对电容参数的合理筛选不会影响半导体桥的电爆性能。铁氧体材料与电容安全加固技术的应用实例如图 3 所示。

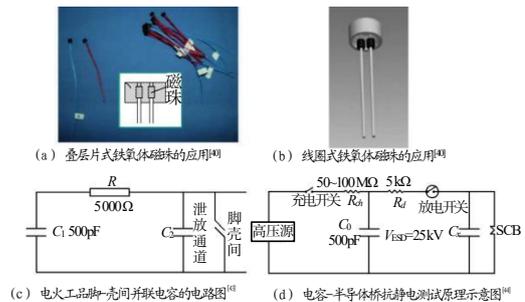


图 3 铁氧体材料与电容安全加固技术应用实例
Fig.3 Application examples of ferrite material and capacitor protection technologies

电容除了可用于电火工品换能元的射频防护外,还可用于电火工品换能元的静电防护。King 等^[45]采用电容器作为半导体桥式火工品的静电防护组件,在 Fisher 放电模型下对 1 μF 陶瓷电容器的静电防护效能进行了测试,结果表明电容器能够有效提升静电安全防护的效果。同样,杨洁等^[43]的研究也发现,仅在电火工品脚-壳间设计静电泄放通道的保护效果有限,

因此提出在脚-壳间增加电容器，通过电容器的充放电特性来减缓静电放电脉冲的上升速率，从而增强静电防护能力。测试结果显示，当电容值低于 1 000 pF 时防护效果不足，而高于 1 000 pF 时可能影响安全性。在该实验条件下，1 000 pF 的电容器是最佳选择。李黎明等^[44]将电容器用于微型半导体桥的静电安全加固设计中，通过并联 1 μ F 电容器，将微型半导体桥的静电防护水平从 500 pF/5 k Ω /16 kV 提高到 500 pF/5 k Ω /25 kV。

总的来说，铁氧体材料和电容器在电火工品换能元电磁防护中发挥了重要作用。也有研究表明，将铁氧体磁珠与电容器结合使用，能显著提高电火工品的射频防护能力^[46]，但对其能否应对其他类型电磁环境的研究还有待进一步的研究和完善。

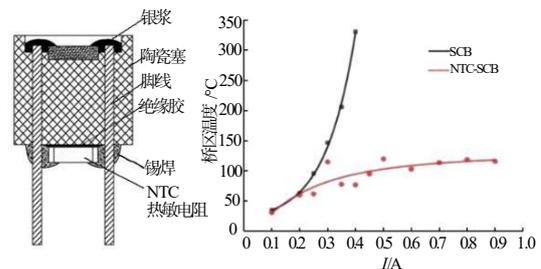
2.1.2 负温度系数热敏电阻的安全加固设计

负温度系数热敏电阻在电火工品换能元的热保护和射频保护中起着关键作用。在常温下，其阻值较高，但随着温度升高，阻值迅速降低。在射频环境中，热敏电阻能迅速吸收热量，减少对换能元的热积累，保持系统的安全运行。由于火工品的发火信号是短脉冲，热敏电阻的阻值变化不显著，从而在有效保护电火工品的同时，避免对换能元发火可靠性造成影响。叶林^[39]首次将热敏电阻用于半导体桥电火工品的射频防护中，通过并联热敏电阻，使得半导体桥电火工品成功通过 1 A 1 W 5 min 测试。Chen^[47]和李勇^[48]通过射频注入试验测试了热敏电阻对于半导体桥电火工品的电磁防护效果，结果表明，在未加防护的半导体桥电火工品的全发火射频功率下，加固后的半导体桥在射频测试中不会发火，防护效果明显。

郑子龙等^[49]通过热敏电阻加固设计，研制了能够承受最高 2 A 4 W 5 min 的高钝感半导体桥火工品，并对其电流分流机制进行了分析。金豪杰等^[50]研究了热敏电阻对敏感型半导体桥火工品换能元直流激励的影响规律，结果表明，通过热敏电阻的加固设计，能够将半导体桥的熔断电流提高 1 倍以上，为敏感型半导体桥火工品换能元在复杂电磁环境下的应用提供了支撑。负温度系数热敏电阻在电火工品电磁防护设计中展现出巨大潜力，但当前研究主要集中在其常温

下的防护能力以及对换能元发火性能的影响规律。在高、低温条件下，热敏电阻的电磁防护能力以及对换能元发火性能和可靠性的影响尚缺乏系统研究。此外，由于热敏电阻的工作原理与温度密切相关，封装时需与导热性能优异的基座（如陶瓷基座）配合使用。为确保热传导不会干扰热敏电阻的工作效果，封装过程中必须采用高导热性能的粘胶。

集成热敏电阻的半导体桥换能元结构及桥区温度变化如图 4 所示。



(a) 集成热敏电阻半导体桥换能元示意图^[49] (b) 集成热敏电阻前后半导体桥换能元桥区温度—电流变化曲线^[49]

图 4 集成热敏电阻的半导体桥换能元结构及桥区温度变化
Fig.4 Structure diagram and bridge area temperature change of semiconductor bridge transducers assembled thermistor

2.1.3 压敏电阻的安全加固设计

压敏电阻在正常工作条件下表现为高阻抗，但当电压超过其设定的阈值时，其阻抗迅速降低，以此导通电流，保护电火工品免受过电压的侵害。当过电压通过后，压敏电阻恢复常态，确保电火工品的发火可靠性不受影响。

Hansen 等^[51]采用烧结技术制备了一种空心圆柱形的压敏电阻，将其套在脚线上实现对电火工品的电磁辐射安全加固。为进一步提升防护效果，Duguet 等^[52]将压敏电阻和电容器相组合用于电火工品的静电放电防护设计，效果明显。Gaudinat 等^[53]通过结构创新，将压敏电阻封装在桥丝式电火工品内部，实现了体积不变的静电防护。杜培康^[54-55]首次将压敏电阻用于半导体桥电火工品的电磁防护设计，显著提升了静电和射频的防护能力。尽管压敏电阻在电磁辐射防护方面具有多种优势，如漏电流小、通流能力强、残压低和对称的伏安特性，但也存在寄生电容大、钳位电压高和响应时间稍慢等不足^[56]。因此，压敏电阻在电火工品换能元电磁防护设计中的实际应用效果，尤

其是其对换能元发火性能的影响规律,仍需进一步深入研究 and 验证。

2.1.4 齐纳二极管的安全加固设计

齐纳二极管具有特定的反向击穿电压,能在正向偏置条件下呈现低阻抗,在反向偏置且电压超过齐纳电压时迅速降低阻抗。利用这一特性,齐纳二极管被并联于电火工品换能元,以分流大部分静电能量,从而在静电脉冲结束后恢复高阻状态,实现电火工品换能元的电磁防护安全加固设计。

Novotney 等^[57]将齐纳二极管用于低发火能量半导体桥电火工品换能元的静电防护,全发火能量低于 0.3 mJ 的半导体桥电火工品换能元在加固后能够在 25 kV/500 pF/150 Ω 的静电脉冲条件下不发火。King 等^[45]探究了不同击穿电压齐纳二极管的静电防护效果,发现击穿电压过大的齐纳二极管将不会起到静电防护作用,击穿电压较小的齐纳二极管则会导致电火工品点火延迟或不发火。

Hayes 等^[58]设计了集成了 2 个齐纳二极管和 1 个电容器的电磁防护模块,确保静电脉冲峰值在低于齐纳击穿电压时不影响桥丝。电容则在射频环境下表现为低阻抗,能够有效分流射频能量,确保电火工品的安全。齐纳二极管凭借其较高的稳压精度和可调节的击穿电流,成为电火工品换能元电磁防护装置的选择之一。然而,在实际应用中,必须充分考虑齐纳二极管参数与电火工品换能元临界发火能量之间的匹配性问题,以确保防护效果和火工品的安全稳定性。

2.1.5 瞬态电压抑制二极管 (TVS) 的安全加固设计

瞬态电压抑制二极管 (TVS) 是一种专为保护电子设备免受瞬态过电压损害而设计的器件,具有快速响应和高能量的脉冲吸收能力,从而保护电路免受损害。与齐纳二极管相比,TVS 二极管具有更快的响应速度和更高的峰值脉冲功率,使其在应对快速上升的静电脉冲时更为有效。

Weinlein 等^[59]将 TVS 二极管与场效应结合,用于激光火工品换能元的静电防护,将激光点火器的峰值电流显著地从 120 A 降低到 3.5 A 以下,而场效应管则有效降低了电磁辐射带来的低压直流电对点火器

的损害。任钢^[42]使用 TVS 二极管提升半导体桥电火工品电磁辐射防护能力,通过射频实验和静电实验证明 TVS 二极管的防护效果显著。褚恩义等^[60-61]在脉冲电磁环境和连续电磁环境下对 TVS 二极管加固前后的电火工品进行测试,结果表明加固后电火工品抗脉冲电磁波能力从 35 kV 提高到了 65 kV,并且在敏感频率处对感应电流的衰减效果达到了 50%。关于 TVS 二极管的静电防护能力,左成林等^[62-63]采用直接静电放电模式(电容为 10 000 pF)进行测试,全发火电压为 8 kV 的半导体桥电火工品换能元经过 TVS 加固后,达到了 9 kV 不发火的技术指标。

此外,王军等^[64]研究了 TVS 参数与电火工品换能元电爆特性之间的关系,发现 TVS 二极管的击穿电压对半导体桥火工品的发火时间有显著影响。丁跃伟等^[65]对并联 TVS 二极管后半导体桥电火工品换能元的分流规律进行研究,研究表明经 TVS 二极管加固后,流经半导体桥火工品的电流约为总电流的 40%,加载到半导体桥上的能量比例随静电放电电压的增大而减小。瞬态电压抑制二极管因其快速响应和高能量吸收能力,使其成为保护电火工品换能元免受瞬态过电压损害的理想选择。随着技术的不断进步,TVS 二极管的性能和应用范围有望进一步扩大。

2.2 集成式电磁防护技术

随着现代信息技术及微纳技术在武器和航天等领域的深入应用,以换能信息化、结构微型化、序列集成化为主要特点的第四代火工品研究已经成为国内外研究的热点^[7]。在此背景下,MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 工艺技术的引入,加速了电火工品换能元从单一功能到多功能集成的转变,研究人员通过将防护器件与电火工品换能元进行芯片集成,实现了小体积下的高效电磁防护。

Baginski 等^[66]率先实现 MOS 电容结构与镍铬丝电火工品换能元的有效集成,该换能元由硅基底、二氧化硅氧化层、MOS 电容 (1 250 pF) 层和镍铬换能层组成,对高频 (大于 90 MHz) 电磁波的衰减率达 99%。但受限于换能元体积,MOS 电容容值难以实现 1 μF 以上的级别,所以该防护结构对低频电磁波效果

有限。

Martinez-Tovar 等^[67]设计了一种带有电压保护的半导体桥电火工品换能元。通过在半导体桥换能元中引入介电层作为熔断丝，防止在低电压下的意外激发，确保换能元仅在超过特定电压阈值时才会工作。该设计提高了半导体桥电火工品的安全性和可靠性，特别适用于易受杂散电压影响的环境。

Hartman 等^[68]将齐纳二极管与半导体桥芯片结合，设计并加工了 1 个与桥区并联的齐纳二极管，提高了半导体桥换能元的抗静电能力。该设计只集成了 1 个单向齐纳二极管，只能对 1 个方向的静电脉冲起到防护作用。Maeda 等^[69]研制了一种基于齐纳二极管的多层复合含能电火工品换能元，如图 5 (a) 所示。通过在硅基底上形成 PN 结结构，采用金属对刻蚀区域进行封闭，形成与桥区并联的两串联齐纳二极管，提高了换能元的电磁防护能力。同时，含能复合薄膜的存在也大大提升了换能元的输出性能。

Baginski 等^[70]首次将肖特基二极管与金属薄膜换能元进行集成设计，其结构如图 5 (b) 所示。该集成换能元通过在二氧化硅层进行刻蚀，形成 2 个三角形窗口并填充金属铝，利用铝-硅接触形成与桥区并联的肖特基二极管。该换能元在保持低发火能量 ($2 \mu\text{F}/30 \text{V}$) 的同时，具备了良好的静电防护能力 ($150 \text{pF}/150 \Omega/25 \text{kV}$)。

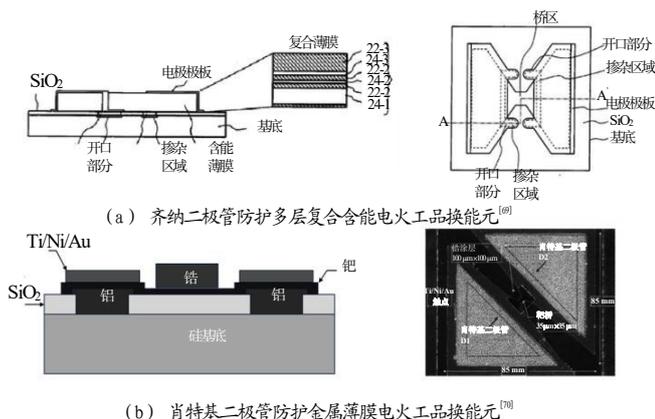


图 5 国外电火工品换能元集成防护技术

Fig.5 Integrated protection technologies for transducers of electric explosive devices abroad

与国外相比，国内关于电火工品换能元集成式防护设计的研究则起步较晚。韩大勇等^[71]在 2008 年提出了一种单片集成 CMOS 开关、肖特基二极管以及

MOS 电容的半导体桥换能元，其结构如图 6 (a) 所示。基于模拟仿真验证了防护能力实现的可能性，但受限于换能元体积要求，未能实际制造测试，只完成了版图设计工作。Wang 等^[72]设计并制造了一种平面集成 2 个 TVS 二极管阵列的半导体桥换能元，其结构如图 6 (b) 所示，采用平面双向结构的 TVS 二极管阵列实现了对静电脉冲的有效防护，同时保证换能元的点火能量不受影响。

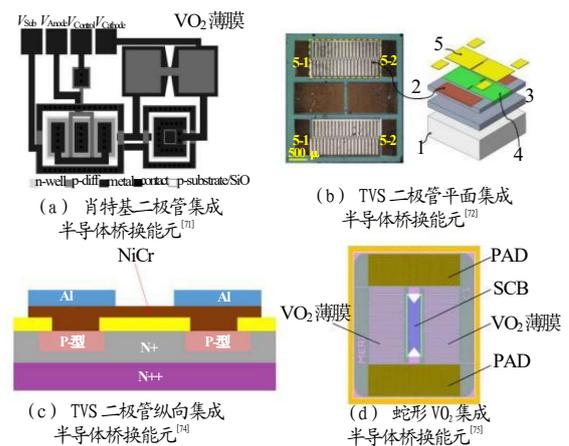


图 6 国内电火工品换能元集成防护设计

Fig.6 Domestic integrated design of protection for transducers of electric explosive devices

沈冲^[73]采用梳齿型平面肖特基二极管和 TVS 二极管，实现了对半导体桥换能元的电磁防护。通过调节电极间距实现了对击穿电压及静电防护能力的调节，但只能实现单次的静电防护。

李慧等^[74]采用平面纵向集成的 PN 结结构，实现了薄膜换能元与防护电路的芯片级集成。结构如图 6 (c) 所示，确保了芯片尺寸与传统电火工品换能元的一致性，同时将静电防护能力达到了 $500 \text{pF}/500 \Omega/25 \text{kV}$ 不发火的高水平。结果表明 PN 结的击穿电压直接关系到集成式换能元的发火性能与安全性能。

程鹏涛等^[75]采用片上集成的方式，将金属-绝缘体相变材料 VO_2 并联至半导体桥换能元两端。提出了蛇形设计方案，有效降低了 VO_2 薄膜在金属态的电阻值，使其与 SCB 阻值相匹配，结构如图 6 (d) 所示。结果表明蛇形设计可以有效降低 VO_2 薄膜电阻，其阻值与蛇形长宽比成反比， VO_2 薄膜能够对 SCB 起到有效的分流防护作用。

国内外在电火工品换能元的集成防护设计方面

均取得了一定进展。随着 MEMS 技术的发展,防护设计朝着多功能集成和微型化的方向演进,推动了电火工品性能的显著提升。国外的研究较早地实现了防护结构的集成设计,优化了高频电磁波和静电脉冲防护能力。国内研究虽起步较晚,但近年来在集成化和材料创新方面也有所突破,逐步增强了电火工品换能元的综合防护性能。这些研究为进一步提升电火工品的可靠性和实用性奠定了基础。

3 总结与展望

近年来,随着微电子机械系统(MEMS)技术的快速发展,电火工品换能元的电磁防护设计取得了显著的进展。通过集成防护设计不仅能够减小电火工品的体积,提高其响应速度,还能够增强其在复杂环境下的稳定性和安全性。

国内外研究者从电火工品的电磁损伤机制和电磁防护技术入手开展了大量基础研究,旨在提升电火工品换能元在电磁环境中的适应能力,增强其综合效能。虽然电火工品换能元电磁防护设计已经取得了重要进展,但仍然存在一些挑战和问题需要解决,建议未来的研究重点关注以下几个方面:

(1) 深入研究电磁损伤机制,进一步探讨不同频段、强度及脉冲类型的电磁干扰对换能元的具体影响,为防护设计提供更加精准的理论指导。

(2) 系统掌握电火工品换能元的综合效能与防护器件之间的关系,重点关注电磁防护设计对电火工品换能元临界发火能量、发火可靠性等的影响。将电火工品电磁耦合机制模型嵌入现有设计平台,实现不同电磁环境下换能元的快速匹配应用。

(3) 针对电火工品换能元在多物理场工作环境下的挑战,如高低温、强辐照等,开发综合性防护策略,充分考虑电磁防护与其他物理防护设计的协同作用,确保电火工品换能元在多重不利条件下的性能稳定。

(4) 探索智能化防护系统设计,通过集成传感器、微处理器等元件,结合数据分析和算法处理,实

现换能元对外部环境的智能感知和自动调整防护策略,扩大换能元在特定复杂环境下的应用效能。

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(6):527-530.
- [4] 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(3):251-265.
- [5] 王军,李勇,周彬,等.电火工品电磁环境适应性的研究进展及展望[J].含能材料,2017,25(11):954-963.
- [6] 褚恩义,贺爱锋,任西,等.火工品集成技术的发展机遇与途径[J].含能材料,2015,23(3):205-207.
- [7] 褚恩义,刘卫,韩瑞山,等.MEMS火工品设计方法探讨[J].火工品,2023(6):1-7.
- [8] Pavlovskii A I, Lyudaev R Z, Ashkevich V N. MCG Application for powered channeling neodym laser[J]. Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications, 1994(1): 969-976.
- [9] 谭伟,魏光辉,刘尚合.静电放电刺激对桥丝式电火工品发火可靠性的影响[J].火工品,1997(1):34-36.
- [10] 景晓强,马宏萱,王海.电火工品电磁危害评估[J].火工品,1999(4):44-47.
- [11] 陈亚洲,魏光辉,魏明,等.雷电电磁脉冲对电火工品的损伤机理[J].火工品,1999(1):18-21.
- [12] Fortov V Y. Explosive Generators[M].Moscow: Nauka, 2002.
- [13] Neuber A A, James C D. Magnetic flux compression generators[M].New York: Pulsed Power: Technology and Applications, 2004.
- [14] 陈明华,高敏,卢斌,等.射频电流对桥丝式电雷管安全性与可靠性影响数值计算[J].火工品,2007(4):22-25.
- [15] 李金明,安振涛,罗兴柏,等.射频对电火工品的影响及防护措施[J].爆破器材,2004(5):17-19.

- [16] 杨培杰, 李金明, 王阵. 电火工品等效天线模型的建立与分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 46-48, 53.
- [17] 李贵兰, 李国新, 汪佩兰. 电磁干扰下的电爆装置射频敏感频率研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(6): 647-650.
- [18] 蔡明娟, 曹兵, 汤仕平. 电磁辐射对电火工品桥丝电流的影响分析[C]//中国电子学会(Chinese Institute of Electronics), 2009.
- [19] Lambrecht M R, Cartwright K L, Baum C E, et al. Electromagnetic modeling of hot-wire detonators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(7): 1 707-1 713.
- [20] 李贵兰, 李国新, 汪佩兰. 基于场线耦合理论的电爆装置射频感应电流仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(2): 265-269.
- [21] 姚成柱, 李海军, 姜隼. 基于FEKO软件的电磁环境对电火工品安全影响仿真[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11): 89-90, 146.
- [22] Mora N., Vega F., Rachidi F., et al. Response of canonical ports to a high power electromagnetic excitation[C]// 2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2011.
- [23] Pantoja J J, Peña N, Rachidi F, Vega F, Román F. Characterization, modeling, and statistical analysis of the electromagnetic response of inert improvised explosive devices[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(2): 393-403.
- [24] 于鸿源, 严楠, 陈树肖, 等. 基于电路仿真的桥丝式电火工品静电危害预测[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 682-687.
- [25] 吕智星. 极端静电环境下电火工品危害及防护仿真研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2020.
- [26] 赵团, 姚洪志, 纪向飞, 等. 火工品高频阻抗计算与仿真分析[J]. 火工品, 2016(3): 13-16.
- [27] 张旭, 吕晓峰, 姚洪志, 等. 舰船短波天线对火工品安全影响[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(6): 553-558.
- [28] 张旭, 马志刚, 邱立军, 等. 舰载相控阵雷达对火工品安全影响[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(6): 123-127.
- [29] 马骏, 张瑞江, 高兴勇, 等. 典型桥丝式电火工品电磁耦合机理研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(2): 130-136.
- [30] 孟冬旭, 魏明, 胡小锋, 等. 电磁脉冲作用下电火工品感应电流仿真研究[J]. 安全与电磁兼容, 2022(2): 24-28.
- [31] 马文韬. 电起爆装置等效天线的电磁脉冲响应特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [32] 陈鑫. 典型电火工品强电磁脉冲耦合效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [33] 李福强, 路翠华, 张旭, 等. 基于FEM-IE混合算法的电火工品安全性仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(12): 213-217.
- [34] 朱晓楠, 潘进, 杨进候, 等. 桥丝式电火工品感应电流及电磁安全性分析[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(4): 749-756.
- [35] 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.
- [36] 姚洪志, 章云, 杜敬利, 等. 电火工品的电磁场安全阈值[J]. 含能材料, 2024, 32(1): 76-82.
- [37] Maurice A, Morse A O. Shielded initiator: US, 2821139 [P].1958-01-28.
- [38] Proctor P W, Dow R L. Electromagnetic and electrostatic insensitive blasting caps, squibs and detonators: US, 4378738[P].1983-04-05.
- [39] 叶林. 半导体桥火工品静电射频加固技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [40] 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(9): 1 375-1 380.
- [41] Martinez-Tovar B, Foster M C, Novotney D B. Voltage-protected semiconductor bridge igniter elements: US, 6199484[P].2001-05-13.
- [42] 任钢. 半导体桥火工品电磁兼容技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [43] 杨洁, 马宏萱, 王海. 电火工品防静电结构的研究[J]. 火工品, 2003(2): 40-43.
- [44] 李黎明, 尹国福, 姚洪志, 等. 微型半导体桥电容抗静电加固技术研究[J]. 火工品, 2012(4): 6-10.
- [45] King T L, Tarbell W W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges[R]. SNND2002-2213, 2002.
- [46] Henderson J H, Baginski T A. An RF-insensitive hybrid electroexplosive device incorporating an integral filter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(2): 465-470.
- [47] Chen F, Zhou B, Qin Z C, et al. EMC protection of SCB

- explosive devices by using smd-based NTC thermistors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(6): 1 216 - 1 221.
- [48] 李勇, 李凯, 刘恩良, 等. 负温度系数热敏电阻对半导体桥电爆性能影响[J]. 含能材料, 2014, 22(6): 808 - 812.
- [49] 郑子龙, 张文超, 秦志春, 等. 高钝感半导体桥发火性能研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 954 - 961.
- [50] 金豪杰, 牛惠媛, 任炜, 等. 并联热敏电阻对半导体桥换能元直流响应的影响研究[J/OL]. 火工品. <http://link.cnki.net/urlid/61.1179.TJ.20240822.1006.002>.
- [51] Hansen D D, Woodbury M B, Chandler V E, et al. High pressure resistant initiator with integral metal oxide varistor for electro-static discharge protection: US, 5932832[P]. 1999-08-03.
- [52] Duguet J R, Vedel J P. Electro-pyrotechnic initiation system protected against electrostatic discharges :US, 6220163 [P]. 2001-04-24.
- [53] Gaudinat F, Gallic Y L. Electropyrotechnic initiator:US, 7652868[P]. 2010-01-26.
- [54] 杜培康, 谭明, 李勇, 等. 压敏电阻对半导体桥火工品电爆性能的影响[J]. 含能材料, 2015, 23(8): 781 - 786.
- [55] 杜培康. 压敏电阻用于SCB火工品电磁防护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [56] 陈光海. 组合电磁防护器件的SCB火工品性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [57] Novotney D B, Welch B M, Ewick D W. Semiconductor bridge development for enhanced ESD and RF immunity[R]. AIAA99-2417, 1999.
- [58] Hayes M J, Hoopes, Thomas A, et al. Detonator ignition protection and detection circuit:US,9243877B2[P]. 2016-01-26.
- [59] Weinlein J, Sanchez D, Salas J, Electrostatic discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator[R]. ASND2003-2100, 2003.
- [60] 褚恩义, 白颖伟, 王可暄, 等. 电热火工品复杂电磁波环境综合适应性设计方法研究[J]. 火工品, 2016(3): 9 - 12.
- [61] 褚恩义, 白颖伟, 任炜, 等. 电热火工品脉冲电磁波环境适应性设计方法研究[J]. 火工品, 2013(4): 15 - 17.
- [62] 左成林. SCB火工品静电防护理论模拟及实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [63] 左成林, 周彬, 杜伟强. TVS二极管用于半导体桥静电安全性研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 62 - 64.
- [64] 王军, 李勇, 卢兵, 等. 瞬态电压抑制二极管对半导体桥换能元电爆特性影响的模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(10): 837 - 844.
- [65] 丁跃伟, 丁茂元, 赵伶俐, 等. 半导体桥火工品静电响应特性研究[J]. 火工品, 2023(4): 19 - 23.
- [66] Baginski T A, Baginski M E. A novel RF-insensitive EED utilizing an integrated metal-oxide-semiconductor structure[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1990, 32(2): 106 - 112.
- [67] Martinez-Tovar B, Foster M C, Novotney D B. Voltage-protected semiconductor bridge igniter elements: US, 6199484B1[P]. 2001-03-13.
- [68] Hartman J K, McCampbell C B. Zener diode for protection of integrated circuit explosive bridge:US,5309841[P].1994-05-10.
- [69] Maeda S, Mukunoki H. Semiconductor bridge device and igniter including semiconductor bridge circuit device: US, 7748323[P].2010-07-06.
- [70] Baginski T A, Taliaferro S L, Fahey W D. Novel electroexplosive device incorporating a reactive laminated metallic bridge[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(1): 184-189.
- [71] 韩大勇. 单片集成不发火电路的半导体桥的设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [72] Wang J, Zhou B, Ye S, et al. Novel electro-explosive device incorporating a planar transient suppression diode[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(9): 1 416 - 1 419.
- [73] 沈冲. 单片集成射频及静电防护电路的半导体桥火工品的设计与制备[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- [74] 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(3): 222 - 228.
- [75] 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.