

# NiCr 薄膜换能组件静电放电响应分析与防护

李博<sup>1</sup>, 章云<sup>1</sup>, 吴炳楷<sup>1</sup>, 解瑞珍<sup>2</sup>, 姚洪志<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 高性能电子装备机电集成制造全国重点实验室, 西安 710071;  
2. 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, 西安 710061)

**摘要:** 目的 针对 NiCr 薄膜换能组件易受到人体静电干扰的问题, 提出一种分析其静电放电响应特性的方法, 并设计一种基于瞬态电压抑制 (TVS) 二极管的静电防护方案, 提高其抗静电干扰的能力。方法 基于理论分析和 COMSOL 多物理场仿真软件, 构建 NiCr 薄膜换能组件的静电放电模型, 研究其在人体静电环境下的响应特性, 并设计 TVS 二极管作为防护措施。结果 通过研究 NiCr 薄膜换能组件的静电响应特性, 得到了其桥区温度及温度分布。结果显示, 采用 TVS 二极管的静电防护设计能显著降低静电干扰, 并表现出优异的防护效果。结论 在人体静电放电环境下, NiCr 薄膜换能组件的桥区长度对温度无显著影响, 但桥区温度随宽度和厚度的增加而降低。仿真和实验结果的峰值电流误差在 2.5% 以内, 且峰值电流降低了 40%, 验证了 TVS 二极管在静电防护中的有效性, 有助于提升 NiCr 薄膜换能组件的可靠性与安全性。

**关键词:** NiCr 薄膜换能组件; 静电放电; 静电防护; 静电响应; COMSOL; TVS

中图分类号: TJ450.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)11-0010-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.002

## Electrostatic Discharge Response Analysis and Protection of NiCr Thin Film Energy Conversion Components

LI Bo<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, WU Bingkai<sup>1</sup>, XIE Ruizhen<sup>2</sup>, YAO Hongzhi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electromechanical Integrated Manufacturing of High-performance Electronic Equipment, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics-chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problem that NiCr thin film transducer assembly is susceptible to human body electrostatic interference, the work aims to propose a method for analyzing its electrostatic discharge response characteristics, and design an electrostatic protection scheme based on transient voltage suppression (TVS) diode to improve its anti-static interference ability. Based on theoretical analysis and COMSOL multi-physics simulation software, an electrostatic discharge model of NiCr thin film transducer assembly was constructed, and its response characteristics in human body electrostatic environment were studied, and the TVS diode was designed as a protective measure. By studying the electrostatic response characteristics of NiCr thin film energy conversion components, the temperature and temperature distribution of the bridge area were obtained. The results

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-07-05

Received: 2024-05-07; Revised: 2024-07-05

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2023-YBGY-333); 陕西省创新能力支撑计划 (2023-CX-PT-30)

Fund: The Key Research and Development Program in Shaanxi Province (2023-YBGY-333); The Innovation Capability Support Program of Shaanxi (2023-CX-PT-30)

引文格式: 李博, 章云, 吴炳楷, 等. NiCr 薄膜换能组件静电放电响应分析与防护[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 10-18.

LI Bo, ZHANG Yun, WU Bingkai, et al. Electrostatic Discharge Response Analysis and Protection of NiCr Thin Film Energy Conversion Components[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 10-18.

showed that the electrostatic protection design using TVS diodes could significantly reduce electrostatic interference and showed excellent protection effect. In the human body electrostatic discharge environment, the bridge length of the NiCr film transducer assembly has no significant effect on the temperature, but the bridge area temperature decreases with the increase of width and thickness. The peak current error of simulation and experimental results is within 2.5%, and the peak current is reduced by 40%, which verifies the effectiveness of TVS diodes in electrostatic protection and helps to improve the reliability and safety of NiCr thin film energy conversion components.

**KEY WORDS:** NiCr thin film energy conversion component; electrostatic discharge; electrostatic protection; electrostatic response; COMSOL; TVS

NiCr 薄膜换能组件是指利用 MEMS 工艺制备的新型换能组件, 具有易于微小型化设计、规模化自动化生产等优势。近年来, 战场电磁环境日益复杂, 对武器装备的可靠性要求越来越高<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 静电能量可以通过放电回路发生电热转换, 对发火性能以及安全性能造成影响, 甚至导致瞎火或意外发火<sup>[3]</sup>。由此可见, 开展对 NiCr 换能组件静电防护研究的需求迫切。

近年来, 人体静电对电火工品的影响作为研究重点, 研究者们通过理论和试验等方法分析人体静电放电对电火工品的影响。解瑞珍等<sup>[4]</sup>通过试验发现, 不同静电放电电压下, 微起爆器的响应不同, 且对发火性能产生一定影响。Yan 等<sup>[5]</sup>通过理论分析构建了静电放电模型, 并通过试验验证了模型的有效性。于鸿源等<sup>[6]</sup>根据美国 Sandia 实验室<sup>[7]</sup>和 IEEE<sup>[8]</sup>发布的标准, 分析了静电能量泄漏对火工品的危害特性, 为电火工品的静电防护打下了理论基础。姚洪志等<sup>[9]</sup>通过数值计算、模拟仿真和试验分析了静电放电对电火工品的影响。Liu 等<sup>[10-11]</sup>通过数值模拟分析了静电放电对不同形状和尺寸的 NiCr 薄膜换能组件热响应特性的影响, 同时提供了一种新型集成瞬态电压抑制二极管的静电防护方案, 为 NiCr 薄膜换能组件静电防护设计提供了指导。

对目前现有电火工品静电防护技术研究可简要分为以下几种类别: 采用分立元件防护、改进电火工品结构和集成一体化防护<sup>[12]</sup>。采用分立元件防护作为电磁防护常规手段, 主要采用铁氧体磁珠<sup>[13]</sup>、TVS 二极管<sup>[14-16]</sup>、压敏电阻和热阻电阻<sup>[17]</sup>等方法, 在电火工品静电防护领域得到广泛应用。改进电火工品结构也是提高电火工品防护性能的一种手段, 包括使用静电钝感药剂<sup>[18]</sup>、设计不同桥区形状<sup>[19]</sup>、改变介电层<sup>[20-21]</sup>等方法来提高电火工品的抗静电能力。Li 等<sup>[22]</sup>设计了一种基于光纤通信的起爆系统, 使用将起爆信号和控制信号分开的方法提高电火工品电磁防护的能力。集成一体化防护随着半导体桥芯片技术的发展而蓬勃发展<sup>[23-28]</sup>。Wang 等<sup>[29]</sup>研究了掺杂浓度对结型半导体桥换能元静电防护的影响, 发现增加掺杂密度和降低电阻率能够提高换能元的抗静电能力。黄亦斌<sup>[30]</sup>设计了一款集成式背靠背肖特基二极管的半导体桥

芯片, 经过测试发现, 其防护性能优越, 发火性能不受影响。李慧等<sup>[31]</sup>设计并制备了一种平面集成 PN 结结构的 MEMS 薄膜换能元件, 并成功实现了薄膜芯片与功能电路的单片集成。

综上所述, 国内外研究者已经根据人体静电放电和静电防护原理在提高电火工品抗静电能力方面展开了大量工作, 以避免其误爆或瞎火。然而, 鲜有针对 NiCr 薄膜换能组件在人体静电放电条件下进行特性分析及防护方法的研究, 满足电火工品可靠性和安全性需要。因此, 本文基于 NiCr 薄膜换能组件人体静电放电原理和静电放电响应机理分析, 构建了 NiCr 薄膜换能组件静电放电模型, 并提出了一种提高 NiCr 换能组件抗静电能力的静电防护方案。

## 1 静电放电模型构建与响应特性分析

### 1.1 系统架构

本文的研究对象是如图 1a 所示的 NiCr 薄膜换能组件, 换能元是其核心能量转换器件(如图 1b 所示), 也是电磁环境干扰和作用的主要对象, 是决定整个薄膜换能组件的安全性和可靠性的重要因素。薄膜换能

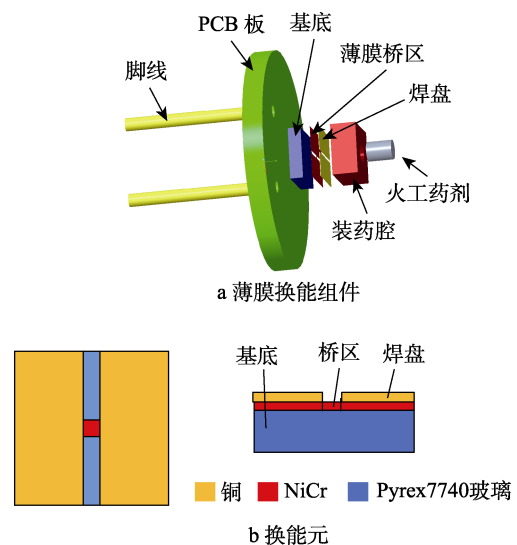


图 1 薄膜换能组件及其换能元  
Fig.1 Thin film energy conversion component and its energy conversion element: a) thin film energy conversion component; b) energy conversion element

元桥区符合焦耳定律, 当其有电流通过时, 会产生大量热量, 温度迅速升高, 从而使含能药剂达到发火温度, 从而完成引爆过程。

### 1.2 静电放电模型构建

人体静电放电是造成炸药、电火工品意外发火或者性能变化的主要危害源<sup>[32]</sup>。因此, 本文主要针对人体静电放电对 NiCr 薄膜换能组件的危害进行了分析。根据 GJB 736.11A—2019 中的规定<sup>[33]</sup>, 设定了电容的电容值为 500 pF, 将回路电阻设置为 5 000 Ω, 开关闭合时间被设定为 1 ns, 充电电压为 25 kV, 忽略了回路电感, 建立了如图 2 所示的人体静电放电模型。仿真得到的电流波形与标准中的电流波形对比如图 3 所示。

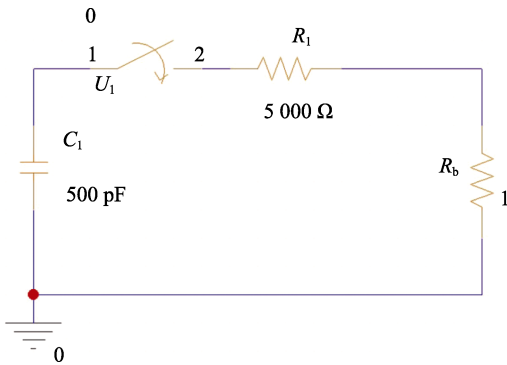


图 2 PSpice 人体静电放电仿真模型  
Fig.2 PSpice electrostatic discharge simulation model of human body

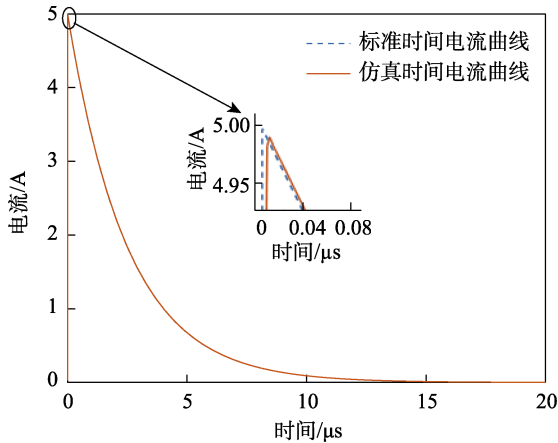


图 3 人体静电放电电流曲线  
Fig.3 Electrostatic discharge current curve of human body

从图 3 可以看出, 使用 PSpice 所建立的静电放电模型得到的电流-时间曲线与标准中基本一致, 两者在波形的形状、上升时间与衰减时间方面都非常相似, 因此可以认为 PSpice 所建立的人体静电放电仿真模型是可靠的。同时可以发现, 人体静电放电的能量在 10 μs 内迅速衰减, 这一时间尺度小于薄膜换能组件自身的热响应时间。为了便于计算, 将该过程进行简化和近似, 因此在热力学上可视为绝热响

应<sup>[34]</sup>。在进行建模时, 可以忽略电火工品的 PCB 板、脚线等, 直接建立 NiCr 薄膜换能组件的模型。在 COSMOL 中建立的简化的 NiCr 薄膜换能组件人体静电放电仿真模型如图 4 所示。NiCr 薄膜换能组件的材料参数见表 1。

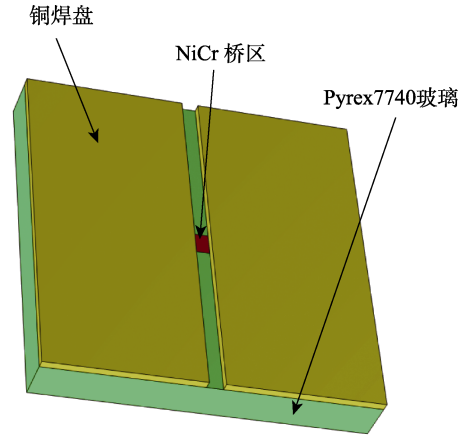


图 4 NiCr 薄膜换能组件人体静电放电仿真模型  
Fig.4 Simulation model of human body electrostatic discharge of NiCr thin film energy conversion component

表 1 NiCr 薄膜换能组件仿真模型材料参数  
Tab.1 Material parameters of NiCr thin film energy conversion component simulation model

材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	恒压热容/ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	电导率/ (S·m <sup>-1</sup> )	相对介电常数
NiCr	8 400	15	460	925 926	1
Pyrex7740	2 230	1.2	980	1×10 <sup>-8</sup>	6.5
铜	8 960	400	385	5.998×10 <sup>-7</sup>	1

### 1.3 人体静电放电响应特性分析

1) 桥区厚度与温升的关系规律。在人体静电放电条件下, 不同厚度 NiCr 薄膜换能组件桥区温升曲线如图 5a 所示, 其最高温度随着 NiCr 薄膜换能组件桥区的厚度变化的变化如图 5b 所示。图 5 的结果显示, NiCr 薄膜换能组件桥区上的最高温度随着 NiCr 薄膜换能组件桥区的厚度增加而减小。即 NiCr 薄膜换能组件桥区厚度越薄, 根据电阻公式, 可以得到其等效电阻越大, 发出的焦耳热越多, 人体静电放电对其威胁性越大, 越容易误发火。因此, 在设计 NiCr 薄膜换能组件时, 在发火感度允许的情况下, 尽可能地增加 NiCr 薄膜换能组件桥区的厚度。

2) 桥区长度与温升的关系规律。在人体静电放电条件下, 不同长度 NiCr 薄膜换能组件桥区温升曲线如图 6a 所示, 其最高温度随着换能元的长度变化的变化如图 6b 所示。从图 6 可以看出, NiCr 薄膜换能组件桥区长度在 0.05~0.3 mm 变化时, 其最高温度与温升曲线基本不变。表明人体静电放电条件下, 换能元桥区长度对其温升基本没有影响。

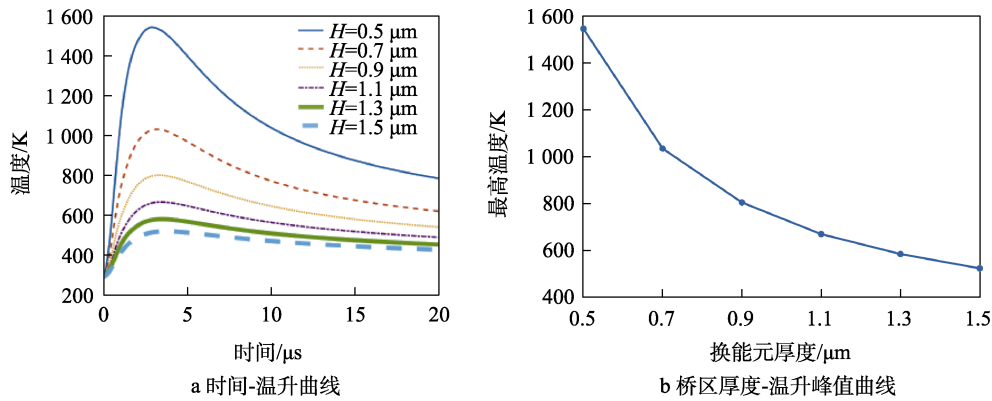


图 5 NiCr 薄膜换能组件桥区温升随桥区厚度的变化

Fig.5 The variation of temperature rise in the bridge area of the thin film transducer with the thickness of the bridge area: a) curve of time-temperature rise; b) curve of bridge area thickness-temperature rise peak

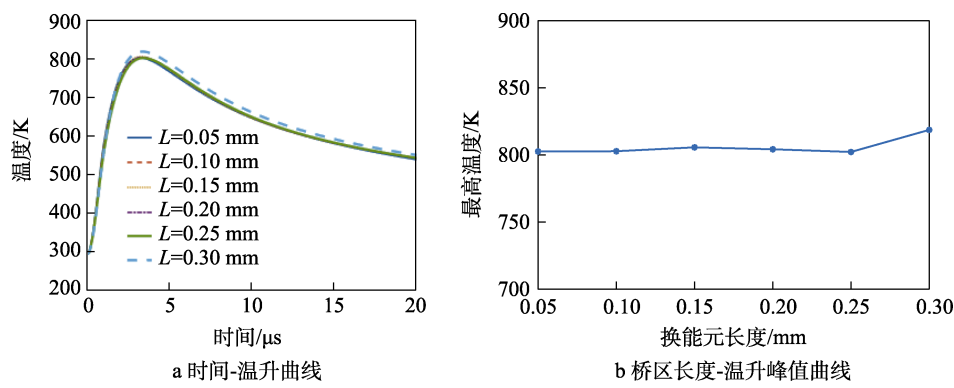


图 6 NiCr 薄膜换能组件桥区温升随桥区长度的变化

Fig.6 Temperature rise in bridge area of thin film transducer varying with length of bridge area: a) curve of time-temperature rise; b) curve of bridge area length-temperature rise peak

3) 桥区宽度与温升的关系规律。在人体静电放电条件下, 不同桥区宽度 NiCr 薄膜换能组件桥区温升曲线如图 7a 所示, 其最高温度随着换能元的宽度变化的变化如图 7b 所示。图 7 的结果显示, NiCr 薄膜换能组件桥区上的最高温度随着 NiCr 薄膜换能组件桥区的宽度增加而减小。因此, NiCr 薄膜换能组件桥区越窄, 根据电阻公式, 桥区的横截面越小, 其等效电阻越大, 人体静电放电对其威胁性越大, 越容

易误发火。这是因为在其他条件不变的情况下, 减小 NiCr 薄膜换能组件桥区的宽度, 不仅增加了其电阻, 且减少了 NiCr 薄膜换能组件与基底的接触面积, 因此对桥区的温升影响较大。在 NiCr 薄膜换能组件桥区的宽度为 0.05 mm 时, 其 NiCr 薄膜换能组件桥区温度在 2 500 K 左右, 远超其他宽度的温度。因此, 在进行 NiCr 薄膜换能组件设计时, 在发火感度允许的条件下, 尽量避免 NiCr 薄膜换能组件桥区的宽度太窄。

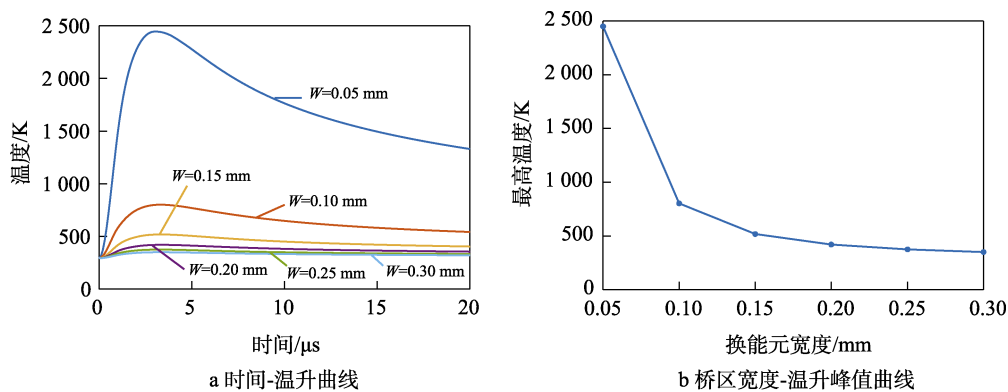


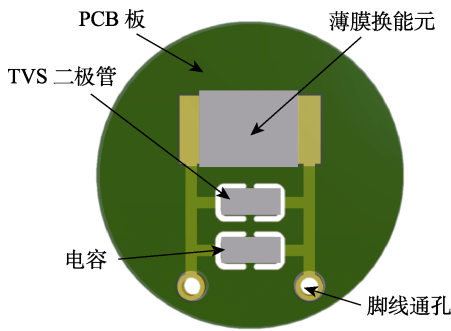
图 7 NiCr 薄膜换能组件桥区温升随桥区宽度的变化

Fig.7 Variation of temperature rise in bridge area of thin film transducer with width of bridge area: a) curve of time-temperature rise; b) curve of bridge area width-temperature rise peak

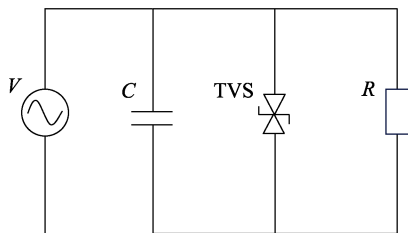
## 2 静电防护设计与仿真分析

### 2.1 静电防护设计

在人体静电放电条件下，可通过增加 NiCr 薄膜换能组件桥区的厚度及宽度来提高其抗静电能力。然而，上述抗静电干扰方法均存在一定的局限性，改变 NiCr 薄膜换能组件桥区的宽度、厚度，减小 NiCr 薄膜换能组件的阻值会导致 NiCr 薄膜换能组件的发火感度下降。因此，在需要薄膜换能组件具有低发火阈值的场合，要采用能量分流的方式来提高其抗电磁干扰能力，防止静电环境对薄膜换能组件产生危害。本文采用 TVS 二极管及电容对 NiCr 薄膜换能组件进行电磁防护。集成静电防护器件的薄膜换能组件 PCB 板布局以及等效电路如图 8 所示。在正常发火条件下，电容相当于断路，TVS 二极管处于未击穿状态，电流均通过 NiCr 薄膜换能组件回路，当静电浪涌脉冲电流通过时，TVS 二极管被击穿，起到防护作用。



a 并联 TVS 二极管和电容的 NiCr 薄膜换能组件



b 防护电路原理

图 8 静电防护电路及电路原理

Fig.8 Electrostatic protection circuit and circuit principle:  
a) NiCr thin film energy conversion component of parallel TVS diode and capacitor; b) schematic diagram of protection circuit

### 2.2 静电防护仿真分析

本文所建立的并联 TVS 二极管的人体静电放电电路模型如图 9 所示。NiCr 薄膜换能组件的长、宽、厚尺寸分别为 0.15 mm、0.15 mm、0.9 μm，材料为镍铬。经过计算，其等效电阻为 1.2 Ω，防护器件拟采用 SMBJ5.0CA、SMBJ6.5CA、SMBJ8.5CA、SMBJ10CA 等 4 种，4 种 TVS 二极管主要的区别在于击穿电压的不同，分别为 5、6.5、8.5、10 V。电

阻为 1.2 Ω 的薄膜换能组件并联 SMBJ5.0CA 前后桥区支路的电流曲线如图 10 所示。

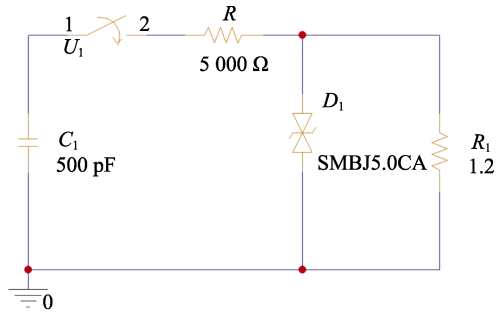


图 9 TVS 静电防护电路

Fig.9 TVS electrostatic protection circuit

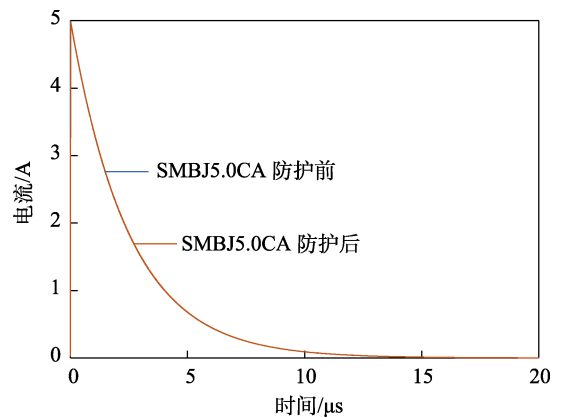


图 10 并联 SMBJ5.0CA 前后 1.2 Ω 桥区电流  
Fig.10 Current of 1.2 Ω bridge area before and after parallel SMBJ5.0CA

从图 10 可以看出，当 NiCr 薄膜换能组件桥区电阻为 1.2 Ω 时，并联击穿电压为 5 V 的 TVS 二极管前后，等效电阻回路的电流仅有略微减小，且变化不明显，因此 SMBJ5.0CA 此时并不能起到良好的防护效果。这是因为当等效电阻为 1.2 Ω 时，SMBJ5.0CA 支路上的电压并未达到 SMBJ5.0CA 的击穿电压，因此不能起到良好的防护效果。当 NiCr 薄膜换能组件桥区等效电阻为 2.4 Ω 时，并联 3 种 TVS 二极管后的仿真结果如图 11 所示。

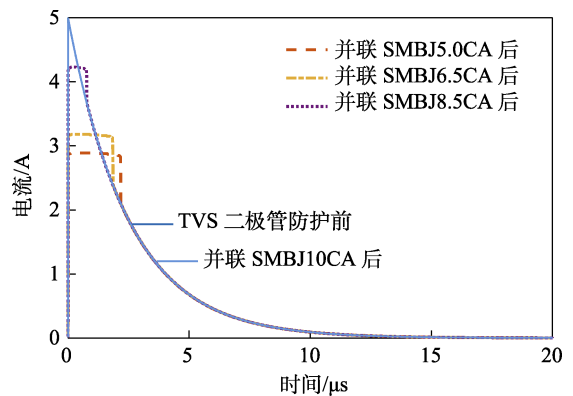


图 11 并联 TVS 二极管前后 2.4 Ω 桥区电流  
Fig.11 Current of 2.4 Ω bridge area before and after parallel TVS diode

图 11 结果显示, TVS 二极管相当于将电流的峰值削去, 且并联的 TVS 二极管击穿电压越小, 对桥区阻抗为  $2.4 \Omega$  的薄膜换能组件防护效果最好, 在人体静电放电作用下, TVS 二极管响应迅速, 能够迅速减小 NiCr 薄膜换能组件桥区上的电流。从图 11 可以看出, SMBJ10CA 型号的 TVS 二极管并未击穿, 未能达到静电防护的效果, 对阻抗为  $2.4 \Omega$  的薄膜换能组件无防护能力。利用 COMSOL 多物理场仿真软件仿真分析并联 TVS 二极管前后, NiCr 薄膜换能组件桥区上的温度变化, 仿真结果如图 12 所示。

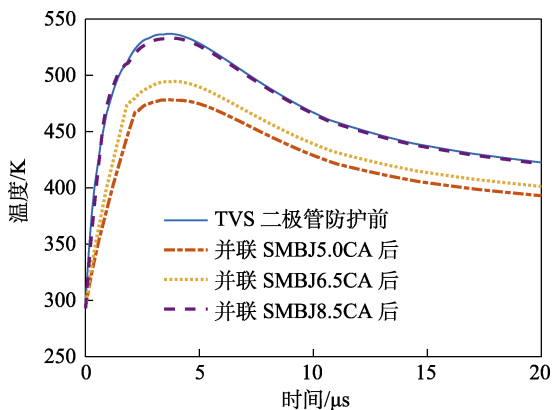


图 12 并联 TVS 二极管前后桥区温度变化  
Fig.12 Temperature changes in bridge areas before and after parallel TVS diodes

图 12 结果显示, 并联 SMBJ5.0CA 后, NiCr 薄膜换能组件桥区的温度从并联前的  $537 \text{ K}$  降低到了  $478.3 \text{ K}$ , 因此 TVS 二极管能够起到一定的防护效果。TVS 二极管的击穿电压越低, 防护效果越明显, 但可能会对薄膜换能组件的正常电容放电发火产生影响。综合以上并联 TVS 二极管前后的电流、温度结果, 薄膜换能组件在  $25 \text{ kV}$ 、 $500 \text{ pF}$ 、 $5\,000 \Omega$  的条件下, 在 NiCr 薄膜换能组件桥区等效阻抗为  $1.2 \Omega$  时, TVS 二极管并不能起到良好的防护作用。在增加 NiCr 薄膜换能组件桥区长度, 即改变其等效电阻为  $2.4 \Omega$  时, SMBJ5.0CA、SMBJ6.5CA、SMBJ8.5CA 均有一定的防护作用, 且 TVS 二极管的击穿电压越低, 对薄膜换能组件的静电防护效果越好。其中, SMBJ5.0CA 的防护效果最好, 并联后 NiCr 薄膜换能组件桥区的温度从  $537 \text{ K}$  降低到了  $478.3 \text{ K}$ 。

### 3 静电防护实验验证

#### 3.1 人体静电放电模型实验验证

为验证前述建立的人体静电放电模型的准确性, 依据 GJB 5309.14—2004<sup>[35]</sup> 搭建了人体静电放电实验平台, 研究静电在放电时对 NiCr 薄膜换能组件的作用, 可以等效地看成充电到一定电压的电容器, 对通过一规定电阻的火工品放电。人体静电放电实验

平台如图 13 所示, 在前述条件下, 进行人体静电放电实验。

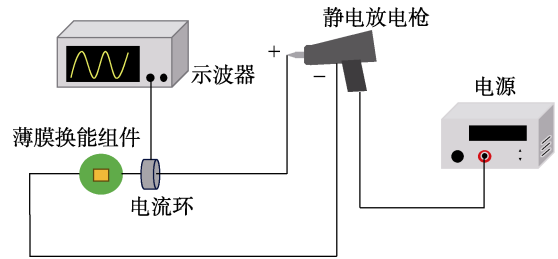


图 13 人体静电放电实验平台  
Fig.13 Human body electrostatic discharge test platform

静电放电实验值与仿真结果对比如图 14 所示, 所建立的人体静电放电模拟曲线与实验得到的人体静电放电电流结果基本一致, 两者均为到达峰值后以指数形式下降, 且峰值电流误差仅为  $6.2\%$ 。造成误差的原因可能是导线的电阻得到了忽略, 对电流的影响不大, 进一步证明了人体静电放电仿真电路的有效性。

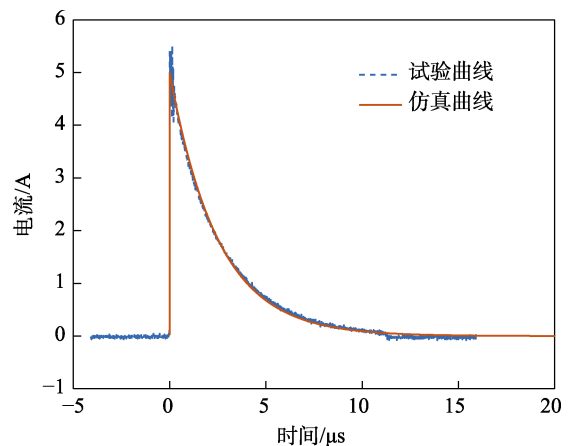


图 14 人体静电放电实验曲线与仿真曲线  
Fig.14 Human body electrostatic discharge test curve and simulation curve

#### 3.2 静电防护实验验证

采用前文描述的静电放电实验平台, 对 TVS 二极管在静电放电干扰下对薄膜换能组件的防护效果进行验证, 实验样品采取阻值为  $2.4 \Omega$  的薄膜换能组件, 实验系统如图 15 所示。

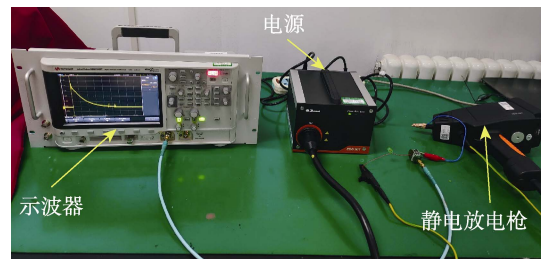


图 15 加载  $2.4 \Omega$  薄膜换能组件人体静电放电实验系统  
Fig.15 Human body electrostatic discharge test system for loading  $2.4 \Omega$  thin film conversion component

利用示波器测试薄膜换能组件上的电流大小, 研究在 GJB 736.11A—2019 规定的人体静电放电条件下, 薄膜换能组件在 TVS 二极管的防护效果。实验结果与仿真结果对比如图 16 所示。

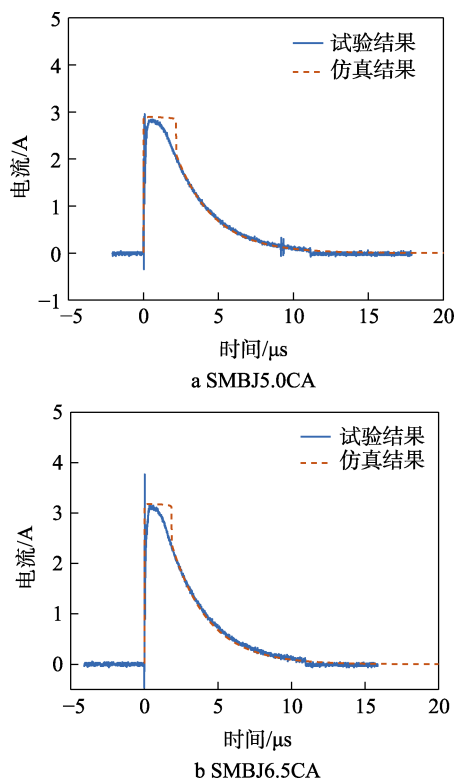


图 16 并联 TVS 二极管的仿真与实验结果对比  
Fig.16 Comparison of simulation and experimental results of parallel TVS diode

从图 16 的仿真与实验结果对比来看, 仿真结果与实验结果差距不大, 并联 SMBJ5.0CA 的 NiCr 薄膜换能组件桥区电流峰值的仿真结果为 2.88 A, 实验结果为 2.81 A, 误差仅为 2.4%; 并联 SMBJ6.5CA 的 NiCr 薄膜换能组件桥区电流峰值的仿真结果为 3.17 A, 实验结果为 3.12 A, 误差仅为 1.6%。造成误差的原因可能是, 实验中 TVS 的性能和仿真模型中 TVS 的性能不同, 受环境不均匀性的影响。因此, 经仿真结果与实验结果对比得知, 实验结果的防护效果较好, 仿真结果较为理想, 且实验与仿真的电流下降沿基本一致, 能够验证仿真结果的有效性。

## 4 结论

从以上仿真分析和实验结果, 可以得出以下结论:

1) 针对人体静电放电环境, 建立了 NiCr 薄膜换能组件静电放电模型。通过仿真和实验发现, NiCr 薄膜换能组件静电放电电流曲线基本一致, 验证了该模型的有效性。

2) 在人体静电放电条件下, NiCr 薄膜换能组件的桥区长度对桥区温度变化的影响不大。随着 NiCr

薄膜换能组件厚度的增加, 其在人体静电放电下的桥区温度越低; NiCr 薄膜换能组件的宽度越大, 其在人体静电放电下的桥区温度越低。

3) 利用 TVS 二极管对 NiCr 薄膜换能组件进行静电防护, 仿真得到 SMBJ5.0CA 表现最佳, 在标准人体静电放电条件下, 桥区温度从 537K 降至 478.3 K。通过实验得到仿真结果和实验结果误差较小, 防护效果较好, 验证了仿真结果的正确性和静电防护设计的有效性。

## 参考文献:

- [1] 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.  
YAO H Z, ZHANG Y, DU J L, et al. Electromagnetic Field Safety Threshold of Electro-Explosive Devices[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(1): 76-82.
- [2] 何立萍. 战场电磁环境及其对导弹武器装备的威胁[J]. 航天电子对抗, 2009, 25(1): 1-3.  
HE L P. Electromagnetic Environment and Its Threat to Missile Weapon Equipment in the Battlefield[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2009, 25(1): 1-3.
- [3] 王大为. 半导体桥火工品静电损伤规律及理论模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
WANG D W. Electrostatic Damage Law and Theoretical Simulation of Semiconductor Bridge Initiating Explosive Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [4] 解瑞珍, 刘兰, 李瑞, 等. 微起爆器静电响应特性[J]. 火工品, 2023(3): 18-22.  
XIE R Z, LIU L, LI R, et al. Electrostatic Response Characteristics of Micro Detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023(3): 18-22.
- [5] YAN N, LIANG Z, LV Z X. Simulation and Experiment on Pin-to-Pin Electrostatic Discharge Firing of Bridge-wire EED[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(1): 110-116.
- [6] 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.  
YU H Y, YAN N, CHEN S X, et al. Electrostatic Hazard Prediction of Bridge Wire Electro Explosive Device Based on the Circuit Simulation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(7): 682-687.
- [7] BERRY R B. Electrostatic Discharge Testing of Propellants and Primers[R]. Albuquerque: Sandia National Lab.(SNL-NM), 1994.
- [8] COMMITTEE S D. IEEE Guide on Electrostatic Discharge (ESD): ESD Withstand Capability Evaluation Methods (for Electronic Equipment Subassemblies)[K]. New York: IEEE, 1994.
- [9] 姚洪志, 李瑞, 赵团, 等. 典型桥丝式电火工品静电危

- 害影响分析[J]. 火工品, 2021(6): 18-22.
- YAO H Z, LI R, ZHAO T, et al. Analysis of the Electrostatic Hazards of Typical Bridge Wire Electro-Explosive Devices[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021(6): 18-22.
- [10] LIU W, ZHANG X R, WANG X Y. Effect of Electrostatic Discharge (ESD) on Heat Response Performance of NiCr Micro-Heater[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2478(2): 022004.
- [11] LIU W, REN X M, XIE R Z, et al. Fabrication and Performance of a Nickel-Chromium (NiCr) Igniter Integrated with TVS Diode for ESD Protection[J]. 2023, 13(3): 035207.
- [12] 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.
- WANG J, LI Y, ZHOU B, et al. Research Progress and Prospect of Electromagnetic Compatibility of Electro-Explosive Device[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(11): 954-963.
- [13] 张君德. 铁氧体磁珠用于 SCB 防射频技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- ZHANG J D. Study on Ferrite Beads Used in SCB Anti-Radio Frequency Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [14] 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.
- ZUO C L, ZHOU B, DU W Q. Electrostatic Safety of Semiconductor Bridge with External TVS Diodes[J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(3): 62-64.
- [15] 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.
- REN G. Research on Electromagnetic Compatibility Technology of Semiconductor Bridge Initiator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [16] KING T, TARBELL W. Pin-to-Pin Electrostatic Discharge Protection for Semiconductor Bridges[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2002.
- [17] 陈飞. SCB 火工品静电、射频损伤机理及其加固技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- CHEN F. Study on Electrostatic and Radio Frequency Damage Mechanism and Reinforcement Technology of SCB Initiating Explosive Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [18] 陈瑞民. 电火工品防静电研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- CHEN R M. Study on Anti-Static of Electric Initiating Explosive Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [19] BAGINSKI T A. Radio Frequency and Electrostatic Discharge Insensitive Electro-Explosive Devices: US6192802 [P]. 2001-02-27.
- [20] 高泽志. 某钝感电底火电磁环境适应性模拟研究及结构优化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- GAO Z Z. Simulation Study on Electromagnetic Environment Adaptability and Structural Optimization Design of a Insensitive Electric Primer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [21] MARTINEZ-TOVAR B, FOSTER M C, NOVOTNEY D B. Voltage-Protected Semiconductor Bridge Igniter Elements: US5992326[P]. 1999-11-30.
- [22] LI Y F, JIA N K, WU X L, et al. Design on Program-Controlled Initiation System of the SCB Explosive Devices Based on Optical Fiber Communication[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 563(4): 042083.
- [23] 袁玉红, 李军福, 周彬, 等. 半导体桥火工品的防静电与防射频设计[J]. *爆破器材*, 2024, 53(1): 30-35.
- YUAN Y H, LI J F, ZHOU B, et al. Anti-Static and Anti-RF Design of the Semiconductor Bridge Initiator[J]. *Explosive Materials*, 2024, 53(1): 30-35.
- [24] 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, 2020.
- SHEN C. Design and Preparation of Semiconductor Bridge Initiating Explosive Device with Monolithic Integrated RF and Electrostatic Protection Circuit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [25] 杜伟强. SCB 火工品电磁防护集成研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- DU W Q. Research on Electromagnetic Protection Integration of SCB Initiating Explosive Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] LI H, FENG C Y, LUO J J, et al. Research on the Electro-Magnetic Protection Technique of SCB Bridge Based on Vertical Punch through PN Junction[J]. *AIP Advances*, 2024, 14(2): 025129.
- [29] WANG J, ZHOU B, QIAO Z G, et al. Electromagnetic Susceptibility of Semiconductor Junction Igniter with Different Doping Density[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 59(1): 199-206.
- [30] 黄亦斌. SCB 火工品静电防护与集成设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- HUANG Y B. Research on Electrostatic Protection and Integrated Design of SCB Initiating Explosive Device[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [31] 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.
- LI H, LUO J J, REN W, et al. Thin Film Transducer Chip with an Integrated PN Junction Protective Structure[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2023, 31(3):



- 222-228.
- [32] 王凯民, 温玉全. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
WANG K M, WEN Y Q. Design of Initiators and Pyrotechnics for Weapon Systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [33] 国防科学技术工业委员会. 火工品试验方法 第 11 部分: 电火工品静电感度试验: GJB 736.11A—2019[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2019.  
National Defense Science, Technology and Industry Committee. Initial Explosive Test Methods—Part 11: Electrostatic Sensitivity Test of Electric Explosive: GJB 736.11A—2019[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Armament Department, 2019.
- [34] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.  
SHEN W D, TONG J G. Engineering Thermodynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [35] 国防科学技术工业委员会. 火工品试验方法 第 14 部分: 静电放电试验: GJB 5309.14—2004[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.  
National Defense Science, Technology and Industry Committee. Test Methods for Initiating Explosive Devices—Part 14 Electrostatic Discharge Test: GJB 5309.14—2004[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Armament Department, 2004.