

文章编号: 1003-1480(2024)05-0059-07

Ni-Cr薄膜换能组件静电响应特性与发火 概率预测研究

章云¹, 李博¹, 解瑞珍², 付禹龙¹, 任小明², 姚洪志²

(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, 陕西 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, 陕西 西安, 710061)

摘要: 针对电火工品在静电放电影响下可能发生误发火的问题, 以 Ni-Cr 薄膜换能组件为研究对象, 提出了一种分析其在人体静电放电下的响应特性, 并预测发火概率的方法。首先, 介绍了 Ni-Cr 薄膜换能组件系统架构, 并建立了电火工品静电放电等效电路模型; 其次, 研究了 Ni-Cr 薄膜换能组件静电放电响应特性, 分析了换能组件尺寸和放电电压对薄膜桥区温度的影响规律; 最后, 构建了 Ni-Cr 薄膜换能组件在统计特征下的输入条件, 确定了换能组件失效判据, 进而结合发火敏感度试验与数理统计方法, 实现了在静电放电条件下电火工品发火概率的预测。研究结果表明: 预测发火概率与试验值误差不超过 5%, 验证了本文方法的有效性。

关键词: 电火工品; Ni-Cr 薄膜; 静电放电; 失效判据; 发火概率

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.05.009

Study on the Electrostatic Response Characteristics and Ignition Probability Prediction of Ni-Cr Thin Film Energy Conversion Components

ZHANG Yun¹, LI Bo¹, XIE Rui-zhen², FU Yu-long¹, REN Xiao-ming², YAO Hong-zhi²

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

Abstract: Aiming at the problem of the misfiring of electro-explosive devices (EEDs) under the influence of electrostatic discharge (ESD), a method of analyzing the response characteristics of Ni-Cr thin film energy conversion component (ECC) and predicting the ignition probability under ESD was proposed. Firstly, the system architecture of Ni-Cr thin film ECC was introduced, and an equivalent circuit model for EEDs in ESD was established. Secondly, the response characteristics of Ni-Cr thin film ECC under human body model ESD were investigated, the influences of ECC dimensions and discharge voltage on the temperature of thin-film bridge region were analyzed. Finally, input conditions under statistical characteristics of Ni-Cr thin film ECC were constructed, and the failure criterion for the ECC was determined. By combining ignition sensitivity tests with mathematical statistical methods, the prediction of ignition probability under ESD conditions for EEDs was achieved. The study results indicate that the error between the calculated ignition probability and the experimental ignition probability does not exceed 5%, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: EEDs; Ni-Cr thin film; Electrostatic discharge; Failure criterion; Ignition probability

火工品作为民用爆破和武器系统的首发元件, 其安全性和可靠性至关重要。换能元是火工品的核心器

收稿日期: 2024-06-21

作者简介: 章云 (1983-), 男, 副教授, 主要从事微传感与执行器、电磁防护与换能技术研究。

通讯作者: 解瑞珍 (1977-), 女, 研究员, 主要从事含能微系统技术研究。

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)。

引用本文: 章云, 李博, 解瑞珍, 等. Ni-Cr 薄膜换能组件静电响应特性与发火概率预测研究[J]. 火工品, 2024(5):59-65.

件,常用桥膜换能元通过将材料沉积到绝缘基片上制作而成,可设计成多层复合式结构或特殊形式,以满足不同的功能要求。其中, Ni-Cr 薄膜换能元电阻范围广,与制备工艺兼容性好,是当前研究焦点。但其尺寸极小,易受静电放电失效,是制约火工品电磁环境适应性的关键环节。因此,亟需研究 Ni-Cr 薄膜换能元静电放电响应特性,开展换能元发火概率预测,以提升 MEMS 火工品的安全性与可靠性。

近年来,学者们通过试验测试,分析了电火工品在静电放电下的响应特征。郭晓荣等^[1]探究了静电对半导体桥火工品点火特性的影响,发现高静电电压会损伤桥膜。钟敏等^[2]利用高压静电放电模拟装置,研究了热桥丝与爆炸桥丝火工品的响应差异。姚则武等^[3]验证了静电放电后桥丝与上电极片非正常接触可能导致阻值下降。解瑞珍等^[4]通过试验表征了不同静电条件下微起爆器的响应特性。也有学者采用理论与试验相结合的方法,分析了静电放电对电火工品的影响。YAN Nan 等^[5]基于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。王大为^[6]研究了静电作用前后半导体桥的阻值变化,发现静电使半导体桥火工品的钝感特性增强。李志鹏^[7]探讨了低密度 PETN 炸药在静电放电下的响应特性。于鸿源等^[8]基于 IEEE^[9]和 Sandia 实验室标准^[10]仿真分析了静电泄放过程及其对电爆装置的损伤。吕智星^[11]针对极端静电条件下电火工品的危害特性进行了全面研究。姚洪志等^[12]通过数值计算、模拟仿真和试验分析了静电放电对桥丝式电火工品的影响。

在电火工品可靠性分析方面,学者们进行了深入的研究和优化。北京理工大学张天飞等^[13]利用蒙特卡洛法研究了升降法下标准差估计值的偏差。袁俊明^[14]探究了 Neyer D-最优化感度试验方法,并提出利用牛顿迭代法求解最大似然估计。吴蔚^[15]提出了 Langlie-D 优化方法,通过兰利法和 D 最优思想来提升估计精度。闫雪梅等^[16]修正了升降法参数估计,提高了标准差估计的精度。曹建华等^[17]基于桥丝式电火工品温升模型,提出利用能量平衡方程估算感度的新方法。周美林等^[18-19]发展了适用于火工品可靠度的可信下限估计方法,并通过模糊故障树分析了电火工品的可靠性。董

海平等^[20]提出了灼热桥丝式电起爆器发火可靠性设计方法,通过热量平衡方程评估发火可靠性。崔伟成等^[21]改进标准概率神经网络,提高了单发电火工品感度预测的准确性。伊泉剑等^[22]提出了基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法,实现了发火可靠性与安全性的兼容设计。

综上所述,国内外学者围绕静电放电原理与作用机制开展了大量工作,并探索了静电防护措施以避免电火工品的误爆或瞎火,然而,针对 Ni-Cr 薄膜换能元在静电放电条件下的响应特性分析及发火概率预测方法的研究相对较少。本文通过结合试验与仿真数据,建立静电下发火概率预测方法,以满足电火工品安全性和可靠性的需求。通过分析 Ni-Cr 薄膜换能元在人体静电放电下的响应特性,并结合发火感度试验与数理统计方法,实现 MEMS 火工品在静电放电条件下的发火概率预测。

1 系统架构与发火概率预测思路

1.1 Ni-Cr 薄膜换能组件系统架构

本文研究的 Ni-Cr 薄膜换能组件由火工药剂、装药腔、换能元、PCB 板和脚线等组成,如图 1(a)所示。换能元与 PCB 板通过脚线实现两级连通。

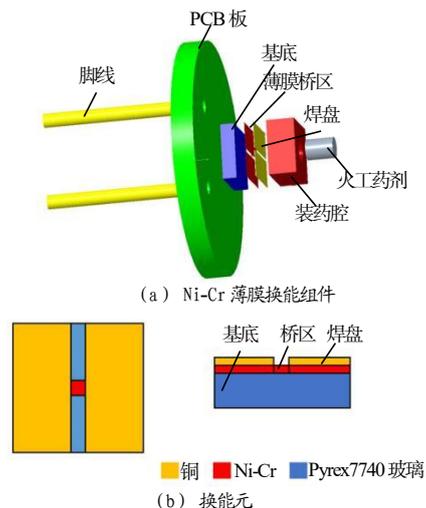


图 1 Ni-Cr 薄膜换能组件及换能元示意图

Fig.1 The schematic diagram of Ni-Cr thin film energy conversion component and its energy transducer

作为人体静电的主要干扰和作用对象,换能元由基底、桥区和焊盘 3 部分组成,如图 1(b)所示。在

外部激励信号作用下,换能元桥区温度迅速上升,促使药剂达到发火温度,完成发火。换能元各部件的材料性能参数如表1所示。

表1 换能元材料力学性能参数

Tab.1 Mechanical property parameters of energy transducer

结构	材料	电导率 (S·m ⁻¹)	相对介电常数	导热系数 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度 (kg·m ⁻³)	恒压热容 (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
桥区	镍-铬	9.3×10 ⁵	1	15	8 400	460
基底	Pyrex 7740	0	6.5	1.2	2 230	980
焊盘	铜	5.9×10 ⁷	1	400	8 960	385

1.2 发火概率预测思路

本研究的发火概率预测方法如图2所示。综合考虑火工品的物理特性,采用有限元分析技术构建静电环境下的电火工品特性分析模型。通过多物理耦合场仿真求解,获得换能元在静电作用下的电流和温度的分布特征。进一步结合实际测试数据和 GJB/Z 377 A-94^[23]规定的数理统计方法,对发火特性进行分析,从而计算得出发火概率分布曲线。利用 COMSOL 软件的不确定性量化模块,运用蒙特卡洛方法对 Ni-Cr 薄膜换能组件的发火概率进行预测。

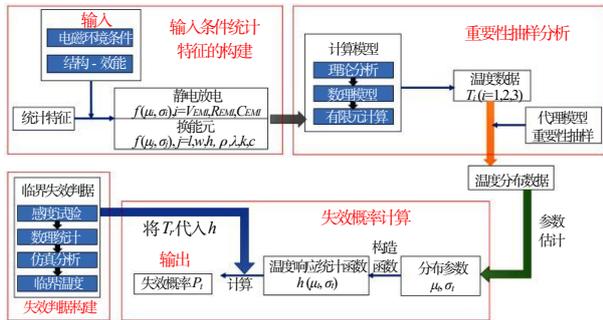


图2 发火概率预测研究思路

Fig.2 Ignition probability prediction scheme

2 静电放电响应特性分析

2.1 静电放电电源特性分析

根据 GJB 736.11A-2019^[24]标准的规定,人体静电放电试验装置由静电感度仪、500 pF 电容器、5 kΩ 无感电阻器等组成,基于此标准构建了单 RC 结构的人体静电放电模型,如图3所示。

通过试验验证了人体静电放电模型,试验数据与仿真结果对比如图4所示。由图4可见,模拟的人体静电放电电流曲线与试验电流曲线非常接近,两者都

呈现达到峰值后以指数形式衰减的特性,峰值电流的误差仅为 6.2%。仿真与试验的误差在可接受范围内,证明了静电放电仿真电路的有效性。

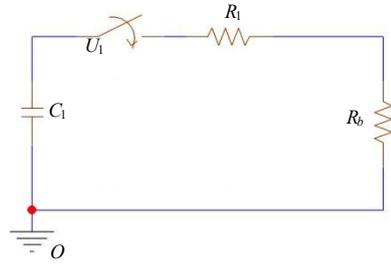


图3 静电放电电路模型

Fig.3 Electrostatic discharge circuit model

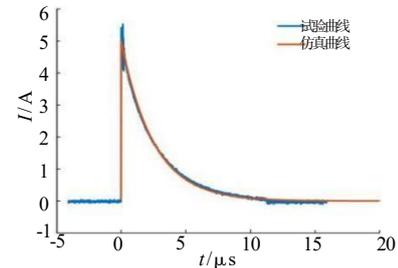


图4 静电放电仿真与试验曲线

Fig.4 Simulation and test curves of electrostatic discharge

运用基尔霍夫电压定律分析了人体静电放电模型中的电流、能量等参数,得出了放电过程中电感两端的电压等于电容两端的电压减去电阻两端的电压的关系。当放电回路开关导通时,回路方程为:

$$L \frac{di(t)}{dt} + (R_1 + R_b) i(t) - U(t) = 0$$

$$U(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

式(1)中: L 为回路电感; i 为回路电流; R_1 为人体静电放电的电阻; R_b 为薄膜换能元电阻; C 为人体静电放电电容; U 为人体静电放电电压。

根据式(1),在假设电压方程的初始条件为 $U(0) = U_0$, $i(0) = 0$, 且回路电感为 0 的情况下,推导出输入到薄膜换能元上的能量,如式(2)所示:

$$E = \int_0^{t_f} i^2 R_b dt = \frac{R_b}{(R_b + R_1)} \frac{CU_0^2}{2} \left\{ 1 - e^{-2t_f / [(R_b + R_1)C]} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: t_f 为人体静电放电时间。

流经薄膜换能元上的电流 I 如式(3)所示:

$$I = \frac{U_0}{(R_b + R_1)} e^{-t / [(R_b + R_1)C]} \quad (3)$$

式(3)中: U_0 为模拟人体静电放电电容的初始电压, V; R_1 为人体静电放电的串联电阻, Ω; R_b 为

薄膜桥区电阻, Ω ; C 为人体静电放电电容, pF。

从人体静电放电输入薄膜换能元上的能量方程(2)可知, 人体静电放电的能量受多种因素影响, 包括静电放电回路的结构、电容、电阻、初始电压等。且由能量方程可以看出, 能量与初始电压呈二次方关系, 说明初始电压对薄膜换能元的影响大于电容和电阻。从式(2)还能够看出, 人体静电放电的电阻越大, 则输入到薄膜换能元上的能量越小。

2.2 薄膜桥区静电放电响应影响因素分析

为了研究在静电放电条件下, 薄膜换能元的长度、宽度、厚度对温度的影响, 在薄膜换能元上加载前述的静电放电电流, 探究了不同尺寸薄膜桥区的温度变化。在规则形状下, 温度分布均匀, 主要提取最高点的温度变化特征^[25]。桥区尺寸设定为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.9 \mu\text{m}$, 仿真结果如图5所示。

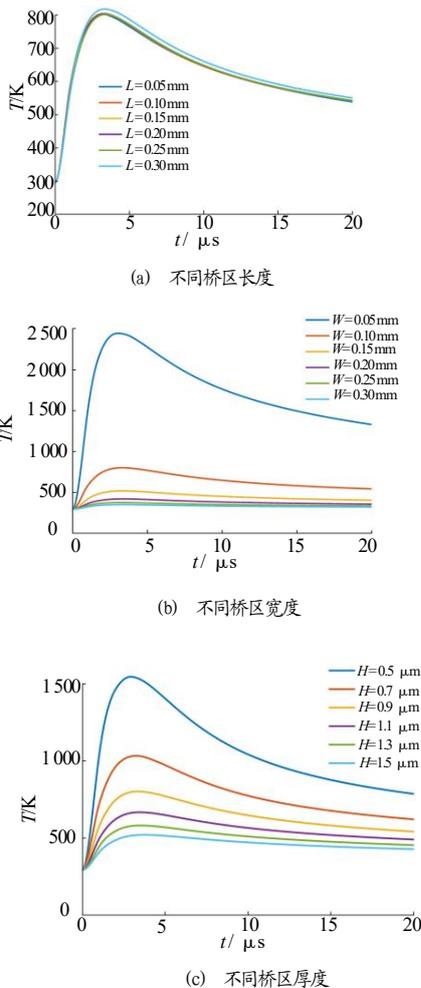


图5 不同桥区尺寸的温度—时间曲线

Fig.5 Temperature vs time curves of different bridge area sizes

从图5可见, 改变桥区的长度对其温度影响不大;

而增加宽度和厚度可显著降低静电放电条件下桥区的温度, 即桥区越宽、越厚, 其抗静电能力越强。但考虑到换能元设计需要满足发火感度要求, 不能无限制地增大尺寸以降低电阻, 只能在满足发火感度的条件下选择较宽和较厚的尺寸。

在此基础上, 选择薄膜换能元的长、宽、厚分别为 0.15 mm 、 0.15 mm 、 $0.9 \mu\text{m}$, 进行了不同静电放电电压下桥区温度计算。结果表明, 静电放电电压的增加会导致薄膜桥区的最高温度显著上升, 如图6所示。

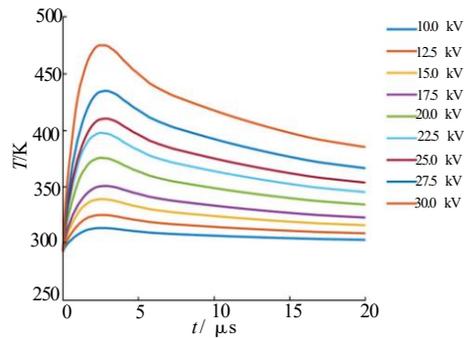


图6 不同人体静电放电电压下薄膜桥区温度变化

Fig.6 Temperature change of thin film bridge area under different human body electrostatic discharge voltages

3 Ni-Cr 薄膜换能组件发火概率预测

通过前述分析, 可以得到薄膜桥区的最高温度。假设当薄膜桥区的温度超过了药剂的发火温度, Ni-Cr 薄膜换能组件便会发火, 利用静电-温度响应模型, 结合 Ni-Cr 薄膜换能组件的静电放电试验参数进行数据抽样, 对抽样数据进行统计分析, 获得温度分布的规律和关键统计参数。基于这些参数, 可以构建概率函数, 结合温度相关的失效判据, 计算出在人体静电放电条件下 Ni-Cr 薄膜换能组件的发火概率。这一过程包括3个主要部分: 输入条件统计特征的构建、失效判据的建立, 以及发火概率的计算。

3.1 输入条件统计特征的构建

对输入条件参数进行了正态分布的表述, 直接关联参数包括换能元电阻值, 尺寸(长、宽、厚), 以及静电放电的电压和电容等。根据 GJB/Z 377A-94^[23], 可以选择正态分布、逻辑斯蒂分布等来描述这些参数。Ni-Cr 薄膜换能组件的发火概率符合正态分布, 正态

分布的具体表述如下,若连续型随机变量 X 的概率密度为:

$$f(X)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},-\infty < x < \infty \quad (4)$$

式(4)中: μ 和 σ ($\sigma > 0$) 为常数,则称 X 服从参数为 μ, σ 的正态分布或高斯分布,记为 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

考虑到本研究的实验采用同一生产批次的薄膜桥区,桥区的尺寸一致性很高,因此,不将薄膜桥区尺寸参数纳入统计分析。在发火概率的计算过程中,仅假设人体静电放电的初始电压、电容和电阻服从正态分布,取其各自的5%为标准差作为输入参数。

3.2 失效判据的构建

在构建失效判据时,认为当换能元的温度达到装药的发火点时,即可引发反应。因此,采用温度或与温度相关的函数作为发火或失效的判据。

$$D \sim f(T) \quad (5)$$

式(5)中,温度相关函数可以为温度的倒数、对数、指数等形式。通过静电-温度响应模型确定的药剂临界发火温度可作为判据,若薄膜桥区的温度超过这一临界值,则可认为发生了失效。

本文所选择的试验药剂为叠氮化铜,叠氮化铜的爆发点温度为 215°C [26]。根据 GJB/Z 377A-94[23]方法的103试验规则,针对2.2小节中采用的Ni-Cr薄膜换能组件进行试验,试验流程图如图7所示。

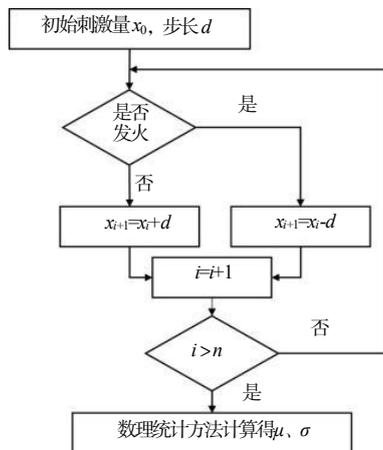


图7 静电感度试验流程图

Fig.7 Flow chart of electrostatic sensitivity test

本研究中的静电放电试验遵循 GJB 736.11A-2019

[24]的规定。试验设备包括电源、静电放电枪、示波器和电流环等,试验平台的布局如图8所示。

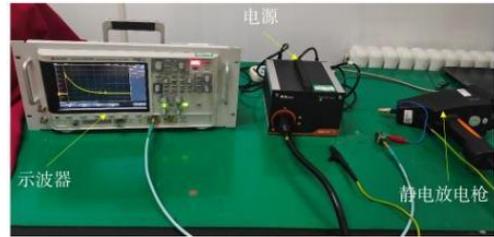


图8 静电放电试验平台

Fig.8 Electrostatic discharge test platform

将Ni-Cr薄膜换能组件放置在爆炸罐内,通过调节静电放电电压来进行起爆试验。感度试验数据如图9所示。

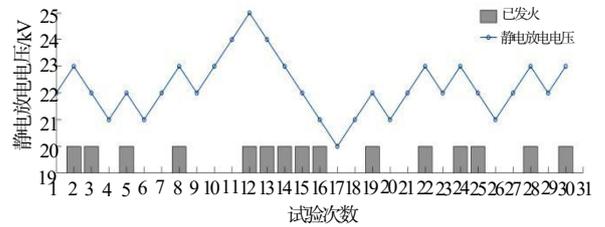


图9 试验数据记录

Fig.9 Test data recording

感度试验数据的统计结果表明,刺激量个数 $i=6$, 评估变量 $M=0.8622$,符合 GJB/Z 377A-94[23]的要求,确认试验数据有效。基于此,计算得到该尺寸Ni-Cr薄膜换能组件的发火均值 $\mu=22.23$ kV, 标准差 $\sigma=1.445$, 其正态概率密度分布如图10所示。

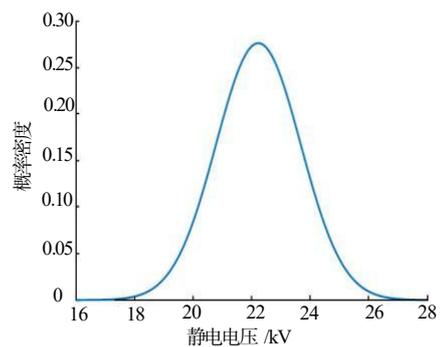


图10 概率密度分布图

Fig.10 Probability density distribution

根据概率密度分布图,Ni-Cr薄膜换能组件在静电放电条件下的0.1%概率发火电压为17.77 kV, 99.9%概率发火电压为26.69 kV, 而50%发火电压,即临界发火电压为22.23 kV。将此临界发火电压代入静电-温度响应模型,计算得到薄膜桥区的温度——

时间曲线,如图 11 所示。

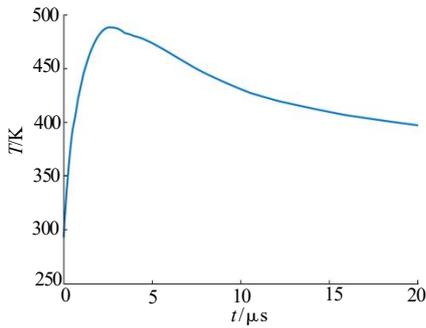


图 11 临界发火电压下温度—时间曲线

Fig.11 Temperature vs time curve under critical firing voltage

通过图 11 可以看出, 感度试验得到的 50% 概率发火电压下, 薄膜桥区的最高温度为 488.6 K, 与文献[26]中报道的叠氮化铜的爆发点温度 215 °C (488.15 K) 十分接近, 从而验证了静电-温度响应模型的准确性。

考虑到模型与试验结果的一致性, 将试验与静电-温度响应模型联合计算得到的 488.6 K 作为药剂的临界发火温度, 并以此作为失效判据。

3.3 发火概率计算

利用 COMSOL 的不确定性量化模块, 本文采用 Sobol 方法对输入参数进行了灵敏度分析, 以定量评估不同输入参数对桥区温度不确定性的贡献。灵敏度分析结果如图 12 所示。

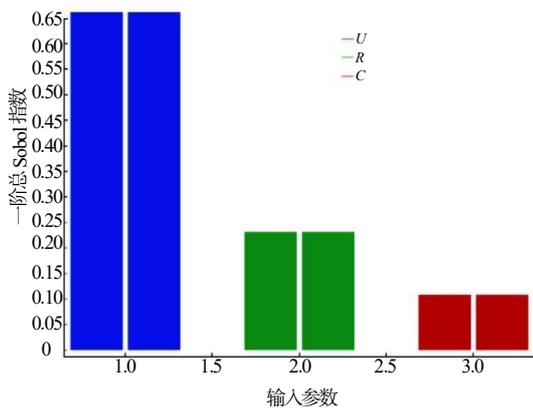


图 12 灵敏度分析结果

Fig.12 Sensitivity analysis results

从图 12 的灵敏度分析结果可以看出, 静电放电电压 U 对 Ni-Cr 薄膜换能组件的温度影响最为显著, 其次是静电放电电阻 R , 而静电放电的电容 C 对 Ni-Cr 薄膜换能组件的影响最小。

在进行概率分析时, 鉴于影响因素较多, 此处采用蒙特卡洛法进行分析。该方法不受输入变量数量的

限制, 适用于本研究中薄膜桥区尺寸一致性很高的情况。引入 3.1 小节中建立的人体静电放电电压、电容、电阻的统计特征, 以 3.2 小节确定的 488.6 K 为失效判据, 计算得到在不同静电放电电压下的发火概率。具体计算结果与试验结果的对比见表 2。

表 2 静电放电试验与预测发火概率对比

Tab.2 Comparison of ignition probability between electrostatic discharge test and predicted value

静电放电电压/kV	试验发火概率/%	计算发火概率/%
17.77	0.10	0.17
22.23	50.00	50.67
25.00	97.40	97.19

由表 2 可知, 当静电放电电压为 22.23 kV 时, 失效分析模型计算得到的发火概率为 50.76%, 与感度试验结果的 50.00% 相近。当静电放电电压为 25 kV 时, 失效分析模型计算的失效概率为 97.19%, 与感度试验结果的 97.40% 基本一致。在较低电压 17.77 kV 下, 失效分析模型计算的失效概率为 0.17%, 与试验结果 0.10% 也相吻合。这些数据证明了本文失效分析模型的可靠性。

4 结论

根据以上分析和试验结果, 可以得到如下结论:

(1) 在人体静电放电条件下, Ni-Cr 薄膜换能组件的桥区长度对其温度的变化影响不大; 桥区厚度的增加有助于降低静电放电下的桥区温度; 桥区宽度的增加也有助于降低其温度; 人体静电放电电压的增大会导致桥区的最高温度显著上升。

(2) Ni-Cr 薄膜换能组件的发火概率与人体静电放电电压、电容、电阻均有一定的关系, 其中电压影响最大, 电容影响最小。分析结果表明: Ni-Cr 薄膜换能组件试验发火概率与预测发火概率误差不超过 5%, 验证了本文发火概率预测方法的有效性。

参考文献:

- [1] 郭晓荣, 朱顺官, 张琳, 等. 半导体桥静电作用前后点火特性[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 99-104.

- [2] 钟敏, 李志鹏, 龙新平, 等. 典型桥丝火工品静电放电响应研究[J]. 火工品, 2015(3): 22-25.
- [3] 姚则武, 成语, 江海洋. 静电放电对某电火工品电阻值的影响分析[J]. 火工品, 2021(2): 16-18.
- [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.
- [5] YAN Nan, LIANG Zhang, LV Zhi-xing. Simulation and experiment on Pin-to-Pin electrostatic discharge firing of bridgewire EED[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018,46(1): 110-116.
- [6] 王大为. 半导体桥火工品静电损伤及理论模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [7] 李志鹏. 低密实 PETN 炸药静电放电响应特性及机制研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
- [8] 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.
- [9] IEEE Std C62.38-1994 IEEE guide on electrostatic discharge (ESD): ESD withstand capability evaluation methods (for Electronic Equipment Subassemblies) [S]. IEEE Standards Board, 1994.
- [10] Berry R B. Electrostatic discharge testing of propellants and primers[R]. SAND-92-2416, 1992.
- [11] 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, 2016.
- [12] 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.
- [13] 张天飞, 蔡瑞娇, 董海平, 等. 升降法试验下标准差 σ 估计的 Monte Carlo 分析[J]. 火工品, 2004(2): 43-47.
- [14] 袁俊明. Neyer D-最优化感度试验方法及其应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- [15] 吴蔚. 基于兰利法和 Neyer_D 法的一种新感度试验方法[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [16] 闫雪梅, 董笑, 何斌. 升降法参数估计公式的理论分析与计算机模拟[J]. 火工品, 2017(1): 14-17.
- [17] 曹建华, 蔡瑞娇, 董海平, 等. 电火工品桥丝与药剂升温模型及在可靠性设计中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2004,24(1): 90-95.
- [18] 周美林, 蔡瑞娇, 韩敦信. 基于样本最大概率失败数的火工品可靠度估计[J]. 含能材料, 2006,14(3): 205-208.
- [19] 周美林, 蔡瑞娇, 韩敦信. 火工品可靠性的模糊故障树分析与计算[J]. 战术导弹技术, 2006(05): 20-25.
- [20] 董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜, 等. 灼热桥丝式电火工品发火可靠性设计方法[J]. 含能材料, 2008,16(5): 560-563.
- [21] 崔伟成, 孟凡磊, 刘林密. 基于概率神经网络的电火工品感度性能预测[J]. 火工品, 2012(2): 1-4.
- [22] 伊泉剑, 董海平, 翟志强, 等. 基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法[J]. 北京理工大学学报, 2014,34(10): 1 007-1 011.
- [23] GJB/Z 377A-94 感度试验用数理统计方法[S]. 国防科学技术工业委员会, 1994.
- [24] GJB 736.11A-2019 火工品试验方法第 11 部分:电火工品静电感度试验[S]. 国防科学技术工业委员会, 2019.
- [25] ZHANG Yun, XIAO Zong-lin, LIU Lan, et al. Research on the output characteristics of energy conversion elements under external excitation[J]. Micromachines, 2023,14(3): 549.
- [26] Lide, David R. Handbook of chemistry and physics 87[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1998.