

桥丝式电火工品电磁环境失效规律

刘跃仪^{1,2}, 姚洪志^{1*}, 赵团¹, 吕江³, 赵甲¹, 安崇伟²

(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, 西安 710061;

2. 中北大学 环境与安全工程学院, 太原 030051; 3. 西安北方庆华机电有限公司, 西安 710025)

摘要: **目的** 确保桥丝式电火工品在电磁环境下能够安全可靠地工作, 降低其在不同应用场景中的失效风险, 探索失效判据并研究失效特征, 以获得失效规律。 **方法** 采用天线理论、传输线理论以及电路理论相结合的方式, 对 1# 桥丝式电火工品在 10 kHz~18 GHz 的感应电流分布进行解析计算, 并在敏感频率下开展试验研究。通过试验, 获得在不同电场强度下该型桥丝式火工品的失效概率分布情况。 **结果** 随着电磁场强度的增大, 桥丝式感应电流不断增加, 基本呈现出线性增加的规律。当感应电流超过桥丝式火工品最小全发火电流的 20% 时, 产品逐渐出现失效现象, 且感应电流越大, 失效概率越高; 当感应电流超过桥丝式火工品最大不发火电流的 15% 时, 安全性风险逐步增加。桥丝式电火工品在电磁场中失效的界面主要集中在桥丝以及与桥丝接触的药剂上, 失效模式分为物理失效和化学失效。 **结论** 采用电阻超差 10% 作为失效判据的方法是可行的。不同频率和强度的电磁场对桥丝感应电流的影响程度各不相同, 在敏感频率条件下探讨桥丝式电火工品的失效问题, 对实际应用具有更重要的指导意义。

关键词: 电火工品; 电磁环境; 耦合模型; 故障模式; 失效规律; 失效概率

中图分类号: TJ450 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)11-0025-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.004

Failure Law of Electromagnetic Environment for Bridge Wire Electro-explosive Devices

LIU Luoyi^{1,2}, YAO Hongzhi^{1*}, ZHAO Tuan¹, LYU Jiang³, ZHAO Jia¹, AN Chongwei²

(1. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Institute of Physics and Chemistry, Xi'an 710061, China; 2. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Xi'an Northern Qinghua Electromechanical Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The work aims to ensure the safe and reliable operation of bridge wire electro-explosive devices (EEDs) in electromagnetic environments, reduce the risk of failure in different application scenarios, and explore their failure law. By combining antenna theory, transmission line theory, and circuit theory, the induced current distribution of 1 # bridge wire EED in 10 kHz-18 GHz was analyzed and calculated. Experimental research was conducted at sensitive frequencies to obtain the failure probability distribution of this type of bridge wire EEDs with different electric field strengths. As the electromagnetic field strength increased, the induced current of the bridge wire EED continued to increase, showing a linear increase pattern. When the induced current exceeded 20% of the maximum firing current of the bridge wire EED, the product gradually failed, and the

收稿日期: 2024-09-11; 修订日期: 2024-11-18

Received: 2024-09-11; Revised: 2024-11-18

引文格式: 刘跃仪, 姚洪志, 赵团, 等. 桥丝式电火工品电磁环境失效规律[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 25-32.

LIU Luoyi, YAO Hongzhi, ZHAO Tuan, et al. Failure Law of Electromagnetic Environment for Bridge Wire Electro-explosive Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 25-32.

*通信作者 (Corresponding author)

failure probability increased with the increase of the induced current. When the induced current exceeded 15% of the maximum firing current of the bridge wire EED, the risk of safety increased gradually. The interface where the bridge wire EED failed in the electromagnetic field was mainly concentrated on the bridge wire and the agent in contact with the bridge wire. The failure modes included physical failure and chemical failure, respectively. It is feasible to use a resistance deviation of 10% as the failure criterion method. The impact of electromagnetic fields of different frequencies and intensities on the induced current of bridge wires varies. Exploring the failure of bridge wire EEDs under sensitive frequency conditions is more instructive for practical applications.

KEY WORDS: electro-explosive devices; electromagnetic environment; coupling model; failure pattern; failure law; probability of failure

桥丝式电火工品在航天、兵工、船舶等领域有着广泛的应用,然而在电磁环境中,常常会出现意外事故以及失效瞎火的现象。随着科学技术的进步,电子通信设备的应用范围急剧扩大,与此同时,辐射高功率电磁能量的设备也日益发展繁荣。电磁发射技术的进步以及在装备系统设计中越来越多地使用更灵敏的低功率集成电路的趋势,使得装备弹药所面临的电磁环境效应危害长期存在。由电磁环境与装备弹药系统中包含的电火工品或火工系统之间存在的兼容问题,相互作用导致的危害称为电磁辐射对军械危害问题(Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance,简称HERO问题)^[1]。一旦装备弹药发生HERO问题,所导致的损失是不可估量的。20世纪60年代美国福莱斯特航空母舰以及20世纪80年代末F15战机的事故^[2]仍让人记忆犹新,损失惨重,教训深刻,这也促使针对装备弹药电磁环境失效的研究广泛开展。

陈亚洲等^[3-4]、魏光辉等^[5]针对雷电电磁环境下火工品的危险特性、特征规律以及失效分析等内容展开研究,系统地剖析了火工品在雷电电磁环境中的耦合特征,获取了雷电冲击下火工品的响应特征。姚洪志等^[6-7]对电爆装置电磁脉冲的响应规律进行了研究,通过仿真与实验相结合的手段,在电磁脉冲环境下分析了电爆装置的响应特征和影响机理,得出了电磁脉冲环境下不同引线对火工品响应的影响规律。杜斌等^[8-9]开展了典型火工品在电磁场中的耦合模型和响应规律研究,在电磁场理论和限定的边界条件下,获得了典型火工品电磁场数值计算模型,解析了火工品对电磁场的特征规律,给出了火工品电磁场下的电流响应与频率的传递函数。Lambrecht等^[10]同样开展了桥丝式电雷管的电磁模型研究,尤其在火工品的阻抗特性与电磁波频率的耦合规律方面,获得了DC-9 GHz火工品阻抗特性的变化规律。Biswal等^[11]就电磁辐射对军械危害问题展开了计算研究,分析了电磁辐射危害源与电雷管之间的耦合途径,同时在外电磁环境不断增强的情况下,提出了电雷管电磁场防护设计思路。Datt等^[12]对火工品电磁辐射的测试方法进行了研究,分析了不同频率范围火工品的测试方法,采用光

纤传感器探测了火工品感应能量的表征,测试精度达到10%。电火工品是武器系统的重要组成部分,一旦其发生失效,将会导致整个武器系统无法实现预定功能。前期的研究工作主要集中在模型构建、参数表征、机理探索等方面,但在失效判据和失效特征研究方面相对较少,缺乏对失效判据和失效特征的深入分析。

本文以1#桥丝式电火工品为研究对象,充分考量桥丝式电火工品对电磁环境的耦合特征,基于电磁场电磁波理论以及光纤测量方法,对电火工品在电磁环境下的失效模式和失效概率展开分析研究。通过耦合计算模型指导失效实验,获取了不同频率特征、不同强度特征下电火工品的失效形式,可为电火工品在电磁环境下的预测和失效分析提供一定的参考。

1 失效研究

1.1 失效机制

桥丝式电火工品电磁环境失效的主要原因集中在桥丝和药剂2个界面。在桥丝界面,随着电磁场强度的持续增强,会出现桥丝缩径现象,且该现象在桥丝中心区域往往更为明显,甚至会出现桥丝断裂现象,如图1所示。在药剂界面,与桥丝接触的药剂部分受热效应最为显著,会引发药剂分子发生变化,从视觉上表现为药剂颜色的改变,如图2所示。这2种失效特征通常会致使火工品的性能下降,甚至可能引发电火工品的意外作用。

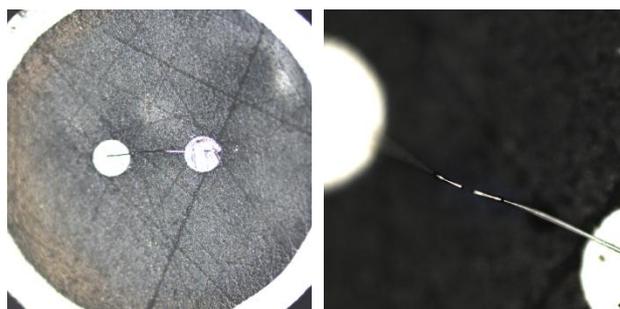


图1 桥丝失效特征

Fig.1 Bridge wire failure characteristics

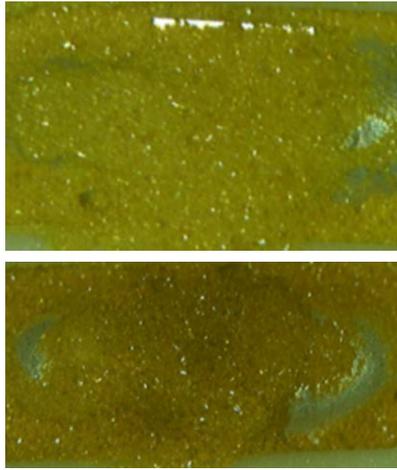


图 2 药剂失效特征

Fig.2 Initiating explosive failure characteristics

1) 桥丝失效。在强电磁环境条件下, 桥丝式电火工品可能出现桥丝断裂的情况, 从而使电火工品丧失相应的功能。不过, 这种情况相较于药剂失效发生的概率较低。通常在电火工品设计时, 会保留一定的裕度, 桥丝一般会在药剂发挥作用后才出现断裂。桥丝失效主要有 2 种表现形式: 一是桥丝直接断裂, 致使功能丧失; 二是桥丝直径缩小, 引起阻值发生变化, 进而影响正常功能。

2) 药剂失效。在强电磁环境下, 电火工品中与桥丝接触的部分药剂会出现钝化现象, 从而致使电火工品发生失效。火工药剂通常为斯蒂芬酸铅, 在强电磁环境的作用过程中, 斯蒂芬酸铅的价态会发生变化。实验结果表明, 在未经电磁环境作用之前, 斯蒂芬酸铅中的铅元素为+2 价; 而经电磁环境作用后, 铅元素变为+4 价, 且局部氧元素含量增加。由此可以得知, 在强电磁环境条件下, 桥丝周边发生了剧烈的电磁-热耦合作用, Pb—O 键断裂, 火工药剂发生分解, 其性能发生改变, 进而导致失效。

1.2 失效规律

依据前期研究成果可知, 桥丝式电火工品在电磁环境下产生失效主要与电磁环境的 2 个因素相关, 即电磁波的频率和强度。

将电火工品引线等效成偶极天线, 其对电磁波的耦合方程^[13]可表示为:

$$\begin{cases} P = \bar{P} \times A_e \\ \bar{P} = \frac{E^2}{377} \\ A_e = \frac{1.64\lambda^2}{4\pi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 为电火工品引线接收的电磁功率, W ; \bar{P} 为电火工品所处位置功率密度, W/m^2 ; A_e 为电火工品引线等效天线有效孔径, m^2 ; E 为电火工品所处位置的电场强度, V/m ; λ 为电磁波波长, m 。

电磁波在电极塞中传输基于电磁波波动方程^[14]可表示为:

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - \gamma^2V(z) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - \gamma^2I(z) = 0 \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4)$$

式中: $V(z)$ 、 $I(z)$ 为图 3 所示不同位置的电压与电流; γ 为复传播系数, 它与频率相关。

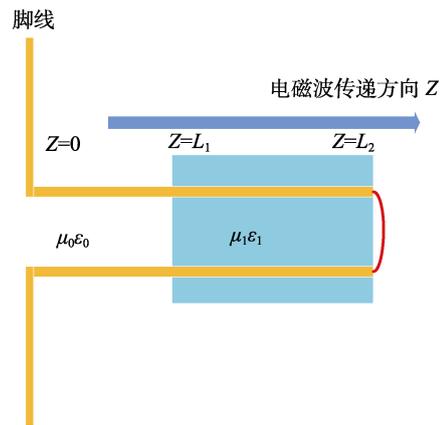


图 3 电磁波在桥丝式电火工品内传播路线

Fig.3 Propagation route map of electromagnetic waves in bridge wire electro-explosive devices

将图 3 电火工品各段看成平行双线传输线, 根据公式 (2) 和 (3), 传输线任意点的电压与电流可用下面的矩阵方程表示^[15]:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & R + j\omega L \\ G + j\omega C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V(z) \\ I(z) \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式 (5) 可得:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} V(1) \\ I(1) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & R_{01} + j\omega L_{01} \\ G_{01} + j\omega C_{01} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{令: } M_{01} = - \begin{bmatrix} 0 & R_{01} + j\omega L_{01} \\ G_{01} + j\omega C_{01} & 0 \end{bmatrix}, \quad M_{12} = - \begin{bmatrix} 0 & R_{12} + j\omega L_{12} \\ G_{12} + j\omega C_{12} & 0 \end{bmatrix}$$

则根据常微分方程数值解法得:

$$\begin{bmatrix} V(1) \\ I(1) \end{bmatrix} = e^{\int_0^{L_1} M_{01} dz} \cdot \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (7)$$

同理获得:

$$\begin{bmatrix} V(2) \\ I(2) \end{bmatrix} = e^{\int_{L_1}^{L_2} M_{12} dz} \cdot \begin{bmatrix} V(1) \\ I(1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

电极塞输入端 $\begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix}$ 与桥丝两端 $\begin{bmatrix} V(2) \\ I(2) \end{bmatrix}$ 电压、电流的关系式^[16]:

$$\begin{bmatrix} V(2) \\ I(2) \end{bmatrix} = e^{\int_{L_1}^{L_2} M_{12} dz} \cdot e^{\int_0^{L_1} M_{01} dz} \cdot \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

基于式(1)~(9)能够计算得出桥丝式电火工品在电磁场中耦合的能量以及在桥丝上形成的电特性。通过计算在相同电场强度、不同频率下桥丝式电火工品的感应电流,可以大致得到桥丝式电火工品的敏感频率和感应电流。

在电场强度为 1 V/m 的条件下,计算了 1#桥丝式电火工品(其结构如图 5 所示)在 10 kHz~18 GHz 的感应电流分布情况,如图 5 所示。可以看出,感应电流在 200、640、980 MHz 这 3 个频率时相对较大。因此,在这 3 个频率下开展失效规律的研究,能够更直观地观测失效特征,从而获得失效规律。1#桥丝式电火工品结构参数见表 1,试验结果见表 2。

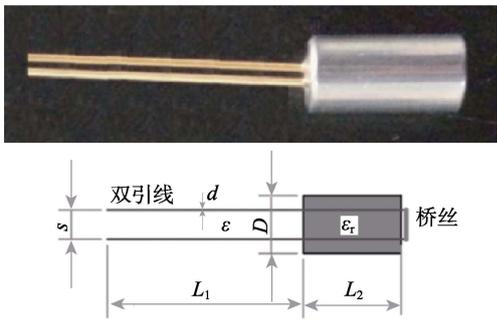


图 4 电火工品结构(1#)
Fig.4 Structural diagram of EED (1#)

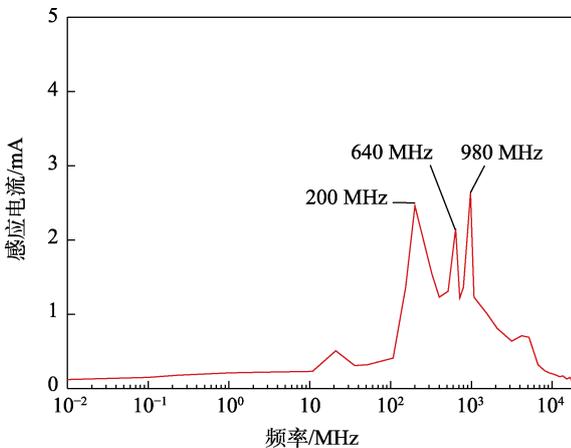


图 5 桥丝式电火工品 10 kHz~18 GHz 感应电流情况
(1 V/m 电场强度)

Fig.5 Induced current of 10 kHz-18 GHz bridge wire electro-explosive device (1 V/m electric field strength)

表 1 1#电火工品结构参数
Tab.1 Structural parameters of 1#EED

电火工品结构参数	参数值
s/mm	3.6
d/mm	0.6
L ₁ /mm	25.6
L ₂ /mm	9.8
D/mm	6.8
桥丝直径/μm	10

表 2 桥丝式电火工品电磁环境失效规律
Tab.2 Coupling relationship between external electromagnetic environment and induction energy of EEDs

序号	频率/ MHz	电场强度/ (V·m ⁻¹)	数量/发	电阻超差 10% 数量/发
1	200	10	10	1
		20	10	1
		30	10	3
		40	10	3
		50	10	6
2	640	10	10	0
		20	10	1
		30	10	2
		40	10	3
		50	10	5
3	980	10	10	1
		20	10	1
		30	10	2
		40	10	4
		50	10	6

依据表 2 试验结果可知,经过电磁环境实验后,直流电阻发生超差的产品数量为 39 发,按照 GJB 5309.9—2004《火工品试验方法第 9 部分:电发火感度试验》^[17]以及 GJB 5309.21—2004《火工品试验方法第 21 部分:雷管作用时间测定》^[18]进行试验,同时测量直流发火感度和直流作用时间,发现绝大部分经电磁场照射过的产品发生了性能的改变,具体结果见表 3。

表 3 桥丝式电火工品电阻超差和失效特征比对
Tab.3 Comparison of resistance exceeding tolerance and failure characteristics of bridge wire electro-explosive devices

电阻超差	发火结果分析
39 发	直流发火异常 17 发
	作用时间异常 19 发
	发火正常 3 发

注:原始产品直流最小全发火指标为 6.8 V,作用时间在 5~6 ms;发火异常为 6.8 V 未正常发火,作用时间异常超过 6 ms。

通过表 3 可以看出,当电阻超差 10%以上时,通常会影响到电火工品的正常功能。因此,将电阻超差 10%作为电火工品在电磁场中失效的一个判据是可行的。当然,产生失效有可能是桥丝性能所致,也有可能是与桥丝接触的药剂所致,在此将其作为一个整体进行考虑。

1.3 失效预测

基于上述试验数据,将电阻超差的方法作为桥丝

式电火工品失效的判据是值得考虑的。经过分析可知, 导致这种变化的因素是电火工品在电磁场中产生的感应电流。因此, 电火工品在电磁场中的情况可以通过式 (1)~(9) 进行预测分析。只要建立起电火工品与电磁场的耦合关系, 即可获得感应电流情况, 通过与桥丝式电火工品自身的敏感参数进行比对, 就能够实现对桥丝式电火工品在电磁场中失效的预测。

在《电火工品的电磁场安全阈值》^[19]一文中, 构建了电火工品电磁场和直流响应的函数关系, 通过分析可知, 在电火工品桥丝上相同直流能量和电磁能量一致时, 两者产生的效应是相同的。根据这一思路, 可以使用桥丝式电火工品的直流特征参数来作为失效预测的基础。

对 1#桥丝式电火工品进行了直流敏感度的试验, 初始刺激量为 150 mA, 步进为 10 mA, 进行了 30 发次的感度试验。依据 GJB 377B—2022《感度试验用数理统计方法》^[20]: 1#桥丝式电火工品电流敏感度的均值为 145.00, 标准差为 9.11, 99.9%发火点为 173.15, 0.1%发火点为 116.85。其中 0.1%发火点通常被称作最大不发火电流, 99.9%发火点通常被称作最小全发火电流。当桥丝式电火工品感应电流介于最大不发火电流和最小全发火电流之间时, 其存在失效的概率, 当感应电流数值越接近最小全发火电流时, 失效概率就越大, 同时意外作用概率也会增大。桥丝式电火工品的感应电流测试需在电磁兼容暗室中进行, 测试配置如图 6 所示。在试验过程中, 电火工品处于最佳接收状态, 其试验状态配置如图 7 所示。

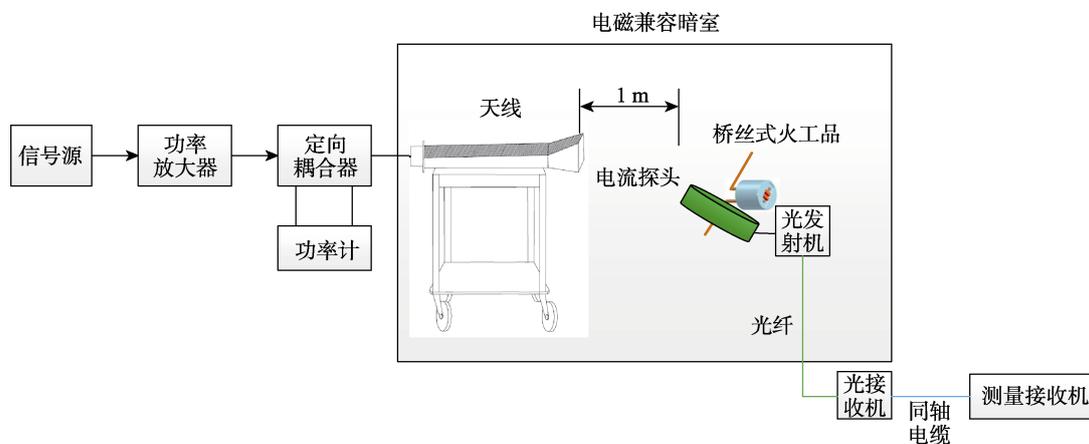


图 6 桥丝式电火工品电磁场感应电流测试的试验配置

Fig.6 Test configuration for electromagnetic field induced current testing of bridge wire electro-explosive devices



图 7 桥丝式电火工品电磁试验配置状态

Fig.7 Electromagnetic test configuration status of bridge wire EEDs

采用由电流探头、光纤传输系统以及测量接收机组成的感应电流测试系统, 对桥丝式电火工品在电磁场中的感应电流进行直接测量, 以获得不同频率条件、不同电场强度下桥丝式电火工品的感应电流。试验针对 3 个频率、5 种电场强度的感应电流的实际测量结果见表 4。

2 结果及分析

通过试验, 发现了在典型频率和相同场强条件下桥丝式电火工品的感应电流与失效概率之间的关系 (每个频率电场强度感应电流测试数量为 3 发), 结

表 4 外界电磁环境与电火工品感应能量间耦合关系
Tab.4 Coupling relationship between external electromagnetic environment and induction energy of EEDs

序号	频率/ MHz	电磁场强度/ (V·m ⁻¹)	单脚线长度/ cm	感应电流/ mA
1	200	10	35	26.33
		20	35	52.66
		30	35	78.99
		40	35	105.32
		50	35	131.65
2	640	10	10	23.36
		20	10	46.69
		30	10	70.11
		40	10	93.46
		50	10	116.83
3	980	10	7	27.28
		20	7	54.51
		30	7	81.82
		40	7	109.16
		50	7	136.41

果如图8所示。在同一电磁场频率下,随着电磁场强度的增加,桥丝式电火工品发生失效的概率会升高,同时桥丝式电火工品的感应电流也会呈线性增加。

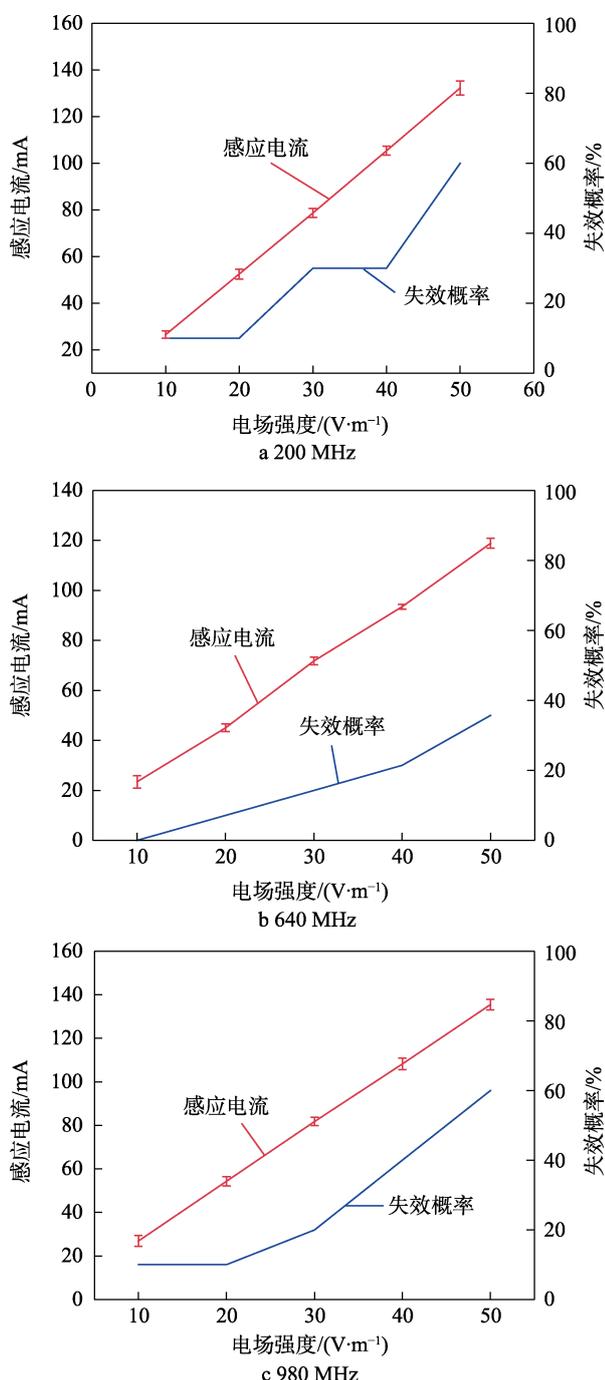


图8 不同频率时施加电场强度、感应电流与失效概率关系

Fig.8 Relationship between applied electric field strength, induced current, and failure probability at different frequency

依据失效数据及图8可以看出,在不同频率条件下,当感应电流处于23~26 mA时,本文所研究的桥丝式电火工品开始出现失效现象。在此,取中间数值24.5 mA进行说明。24.5 mA是1#桥丝式电火工品最小全发火电流173.15 mA的14.1%,同时也是1#桥丝

式电火工品最大不发火电流116.85 mA的20.9%。

GJB 786—1989《预防电磁场对军械危害的一般要求》^[21]和GJB 1389B—2020《系统电磁环境效应要求》^[22]中指出,对于需要确保系统安全的电起爆装置,其最大不发火激励(MNFS)应具有16.5 dB的裕度。GJB 8848—2016《系统电磁环境效应试验方法》给出了安全裕度的计算方法。

以电流形式计算的安全裕度采用式(10)^[23]:

$$M = 20 \lg \left(\frac{I_R}{I_c} \right) \quad (10)$$

式中: M 为安全裕度, dB; I_R 为火工品最大不发火电流, A; I_c 为给定电磁环境下火工品感应的电流, A。

按照上述标准要求,当电火工品在电磁场中感应的电流超过其最大不发火电流的15%时,就会存在安全隐患。然而,目前并没有相应的数据支撑来明确具体存在什么样的安全隐患,对于安全隐患发生的概率也没有明确的说法。在本文中,获得了1#桥丝式电点火头在电磁场中的感应电流超过其最大不发火电流20.9%时会逐渐出现失效的结果,这也间接验证了标准中关于火工品在电磁场中安全裕度要求的准确性。

3 结论

1) 桥丝式电火工品在电磁场中产生失效与电磁场的频率和强度相关。当火工品处于敏感频率范围内时,桥丝式电火工品发生失效的概率相对较大,此时主要影响因素与电场强度呈线性关系。

2) 桥丝式电火工品在电磁场中失效的界面主要集中于桥丝以及与桥丝接触的药剂上,失效模式分为物理失效和化学失效。然而,当桥丝式电火工品封装成产品后,对药剂失效模式的探索难度增大。采用电阻超差10%这一判据来验证产品是否失效是可行的。

3) 获得了1#桥丝式电火工品在电磁环境中的失效规律,同时也间接验证了标准中对于电火工品电磁环境中安全裕度的设置是非常科学合理的。

参考文献:

- [1] 成伟兰, 汤仕平, 曹兵. 军械电磁辐射危害试验方法[J]. 船舶工程, 2007, 29(6): 92-95.
CHENG W L, TANG S P, CAO B. Test Method of Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance[J]. Ship Engineering, 2007, 29(6): 92-95.
- [2] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(1): 1-6.
LIU S H. Effect of Electromagnetic Environment to Weaponry and Its Trend of Development[J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2005, 16(1): 1-6.
- [3] 陈亚洲, 乔治军, 刘尚合, 等. 雷电电磁脉冲对电火工

- 品的发火危险性研究[J]. 兵工学报, 2001, 22(3): 419-422.
- CHEN Y Z, QIAO Z J, LIU S H, et al. A Study on the Hazard of Lightning Electromagnetic Pulse (Lemp) Upon electro-Explosive Devices (Eed)[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(3): 419-422.
- [4] 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): 17-20.
- CHEN Y Z, WEI G H, WEI M, et al. Damage Mechanism of Lightning Electromagnetic Pulse to Electric Initiating Device[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1999(1): 17-20.
- [5] 魏光辉, 潘晓东, 孙永卫, 等. 窄带电磁辐射对无线电引信的作用规律[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 593-598.
- WEI G H, PAN X D, SUN Y W, et al. Effect Laws of Narrowband Electromagnetic Radiation on Radio Fuze[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(6): 593-598.
- [6] 姚洪志, 张蕊, 封青梅, 等. 电爆装置的电磁脉冲响应[J]. 微波学报, 2012, 28(S3): 301-304.
- YAO H Z, ZHANG R, FENG Q M, et al. Electromagnetic Pulse Response of Electric Explosion Device[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(S3): 301-304.
- [7] YAO H Z, FENG Q M, ZHAO T, et al. Pulse Sensitivity of EED[C]// 2009 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. Xi'an: IEEE, 2009.
- [8] 杜斌. 井下电磁场与煤矿许用电雷管的能量耦合模型研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- DU B. Study on Energy Coupling Model of Underground Electromagnetic Field and Permissible Electric Detonator in Coal Mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016.
- [9] 杜斌, 颜事龙, 姚洪志. 电雷管电磁场中差模响应特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 419-424.
- DU B, YAN S L, YAO H Z. Differential Mode Response Characteristics of Electric Detonators in Electromagnetic Field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 419-424.
- [10] 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): 1707-1713.
- [11] BISWAL M R, SINGH M, PATRA S K, et al. RADHAZ and HERO Safety in the Vicinity of High Power RF Transmitters[C]// 2019 International Conference on Range Technology (ICORT). Balasore: IEEE, 2019.
- [12] DATT S, SHARMA K. Fluoroptic Thermometry: Its Potential for Testing EED's Against HERO[C]// 1995 International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC). Madras: IEEE, 1995.
- [13] 姚洪志, 赵团, 陈建华, 等. 电火工品时谐电磁场响应数值计算[J]. 火工品, 2020(5): 23-26.
- YAO H Z, ZHAO T, CHEN J H, et al. Numerical Calculation of Time Harmonic Electromagnetic Field Response of EEDs[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(5): 23-26.
- [14] YE J, LI G L, ZHAO L F. Quantitative Evaluation for Radio-Frequency Effects of Electro-Explosive Device[C]// 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). Dresden: IEEE, 2015.
- [15] 姚洪志, 赵团, 纪向飞, 等. 电火工品电磁兼容时域响应特性[J]. 火工品, 2020(2): 25-28.
- YAO H Z, ZHAO T, JI X F, et al. Electromagnetic Compatibility Time Domain Response Characteristics of EEDs[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(2): 25-28.
- [16] 赵团, 封青梅, 姚洪志, 等. 电火工品感应电流定量测试技术研究[J]. 火工品, 2013(5): 50-52.
- ZHAO T, FENG Q M, YAO H Z, et al. Study on the Quantitative Test Technique of EED Induced Current[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(5): 50-52.
- [17] 中央军委装备发展部. 火工品试验方法第9部分: 电发火感度试验: GJB 5309.9—2004[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2004.
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Test Methods of Initiating Explosive Devices-Part 9: Electric-Fire Sensitivity Test: GJB 5309.9—2004[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2004.
- [18] 中央军委装备发展部. 火工品试验方法第21部分: 雷管作用时间测定: GJB 5309.21—2004[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2004.
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Test Methods of Initiating Explosive Devices-Part 21: Measurement for Function Time of Detonator: GJB 5309.21—2004[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2004.
- [19] 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.
- [20] 中央军委装备发展部. 感度试验用数理统计方法: GJB 377B—2022[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2022.
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Statistical Methods for Sensitivity Tests: GJB 377B—2022[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2022.
- [21] 中央军委装备发展部. 预防电磁场对军械危害的一般要求: GJB 786—1989[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 1989.
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Preclusion of Ordnance Hazards in Electromagnetic Fields, General Requirements for: GJB 786—1989[S]. Beijing: National

Military Standards Publishing and Distribution Department, 1989.

[22] 中央军委装备发展部. 系统电磁环境效应要求: GJB 1389B—2022[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2022.

Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems: GJB 1389B—2022[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2022.

[23] 中央军委装备发展部. 系统电磁环境效应试验方法: GJB 8848—2016[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2016.

Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Electromagnetic Environmental Effects Test Methods for Systems: GJB 8848—2016[S]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2016.