

采用互易性原理的桥丝型电火工品瞬态电磁脉冲场 辐照效应发火规律

张博渊, 梁涛, 薛婉婷, 谢彦召
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为高效评估瞬态电磁脉冲场(TEMP)辐照时桥丝型电火工品(EED)的安全限值,揭示单次及重复频率 TEMP 作用下的发火机制与规律,提出了一种基于互易性原理的 EED 电磁耦合高效计算模型,并利用全波仿真进行验证。将此计算模型与 EED 发火判据相结合,构建了 EED 在 TEMP 辐照下的电弧/温升发火评估模型。利用该评估模型系统地研究了单次、重频 TEMP 辐照下的 EED 发火规律。研究表明:单次 TEMP 辐照下,EED 主要发火机制为电弧发火。重频 TEMP 辐照下,发火机制取决于单脉冲强度与脉冲间隔,当单周期内电磁脉冲强度足够时,EED 脚-壳间出现瞬态电击穿,直接触发电弧点火,后续重频脉冲周期仅维持电弧稳定;当单周期内电磁脉冲强度不满足电击穿条件时,若桥丝热平衡时间远大于重频脉冲周期,桥丝处通过不断热积累可导致温升点火;在重频 TEMP 辐照下,发火方式同入射电场强度以及持续时间密切相关,两类发火机制均有可能发生。该研究成果可对于定量分析 EED 的电磁安全性提供一定的参考。

关键词: 桥丝型电火工品;互易性原理;电弧发火;温升发火;瞬态电磁脉冲场;发火规律

中图分类号: TJ450.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603019 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0198-12

Ignition Characteristics of Bridge-Wire Electro-Explosive Devices Under Transient Electromagnetic Pulse Irradiation via Reciprocity Principle

ZHANG Boyuan, LIANG Tao, XUE Wanting, XIE Yanzhao
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To efficiently evaluate the safety limits of bridge-wire electric explosive devices (EEDs) under transient electromagnetic pulse field (TEMP) irradiation and reveal their ignition mechanisms and characteristics under single and repetitive-frequency TEMP effects, this study proposes an efficient electromagnetic coupling calculation model for EEDs based on the reciprocity principle, which is verified using full-wave simulation. By combining this calculation model with the EED ignition criterion, an arc/temperature-rise ignition assessment model for EEDs under TEMP irradiation is established. This assessment model is used to systematically examine the ignition characteristics of EEDs under single and repetitive-frequency TEMP irradiation. The results show that under single TEMP irradiation, the primary ignition mechanism for EEDs is arc ignition. Under repetitive-frequency TEMP irradiation, the ignition mechanism depends on the single-pulse intensity and pulse interval. When the electromagnetic pulse intensity within a single

cycle is sufficient, transient electrical breakdown occurs between the EED's pins and casing, directly triggering arc ignition, and subsequent repetitive-frequency pulse cycles only sustain the arc stability. When the electromagnetic pulse intensity within a single cycle does not meet the electrical breakdown condition, if the bridge wire's thermal equilibrium time is much greater than the repetitive-frequency pulse period, continuous heat accumulation at the bridge wire can lead to temperature-rise ignition. Under repetitive-frequency TEMP irradiation, the ignition mode is closely related to the incident field intensity and duration, and both types of ignition mechanisms can potentially occur. The findings can provide valuable insights for the quantitative analysis of electromagnetic safety in EEDs.

Keywords: bridge wire electro-explosive device; reciprocity principle; arc ignition; thermal ignition; transient electromagnetic pulse; ignition characteristic

桥丝型电火工品(EED)作为一种小型化的电磁敏感元件,是爆炸系统主控起爆单元^[1],已广泛应用于精确爆破、航天装备等领域^[2]。作为以电能为激励的器件,桥丝型电火工品非常敏感,本身及其相连的有关线路和部件都会起到接收天线的作用,把周围环境中的电磁能量引入装备^[3],当电磁能量通过引脚耦合进入EED时,可能触发两类失效机制:桥丝过热导致的温升发火^[4],或引脚-壳体间电击穿引发的电弧发火^[5]。电磁辐射易导致EED意外发火,存在严重的安全隐患,近年来,美国及欧盟成员国已发生多起因电磁干扰导致的误引爆事故^[6-7]。

现有研究多针对于EED在射频电磁辐射下的桥丝感应电流计算及桥丝温升损伤效应。例如,Li等^[8]利用传输线理论,计算EED在射频电磁辐射下桥丝处的感应电流,其结果与三维电磁场仿真(CST)具有良好的一致性。Wang等^[9]建立EED在射频连续场作用下桥丝接受辐射功率模型,并结合热平衡方程,得到EED桥丝温升与电场强度的关系。王瑾等^[10]采用CST仿真软件建立EED等效模型,计算不同频率下电磁辐射耦合到EED内部的射频功率,得到了某种EED型号的安全使用频段。

随着现代电磁环境复杂化程度加剧,EED在瞬态电磁辐射作用下的安全可靠性问题愈发凸显^[11-12]。研究表明,由静电放电^[13]、雷电放电^[14]等产生的瞬态电磁干扰,已成为诱发EED意外起爆的重要环境因素。此类瞬态电磁场在时域特性上各不相同,虽可依据能量特征划分为单次脉冲型和重复频率型两类^[15],但其上升沿时间、脉冲宽度等关键参数存在显著差异,导致辐射下的EED发火机制、耦合效率、发火阈值差异巨大,这给EED的安全防护带来了巨大的挑战^[16]。因此,研究典型瞬态电磁脉冲场(TEMP)辐照下EED的发火规律,对

预防意外起爆及支撑装置电磁防护设计具有重要意义。

关于TEMP辐照下EED发火机制研究较少,例如,Chen等^[17]利用CST研究了高空电磁脉冲作用下EED的耦合效应,获得了引脚角度与桥丝耦合电流及能量的关系;Reale等^[18]利用多物理场耦合分析软件(COMSOL)模拟了自由空间瞬态电场对EED的影响,得到了给定瞬态场波形下商用火工品最低发火能量阈值。此类研究普遍采用商业级电磁仿真平台开展数值模拟,而针对不同入射电场参数,例如入射角、脉冲波形特征等,需反复调整仿真配置并进行重复建模运算,致使计算资源重复消耗、整体研究周期延长,严重制约了EED电磁耦合效应的研究效率。吕旭旭等^[19]研究脉冲电流激励下EED的温升发火规律,得出脉冲激励参数对EED临界发火电流的影响规律,但其研究并未涉及电磁场耦合作用对EED的传递过程。

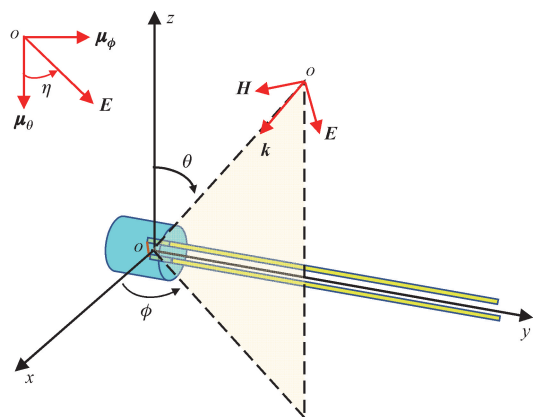
研究表明,TEMP辐照过程中,耦合至EED的电磁能量主要在引线与外壳间形成共模干扰电压^[20],这会导致EED内部脚-壳间承受过高电压,造成EED电弧发火爆炸,从而出现安全事故,但是当前EED的安全性要求多针对于温升发火,对于电弧发火鲜有涉及,而电弧发火更难预测,其危害更为严重。张博渊等^[5]研究了直流激励下EED电弧发火特性,提出了EED电弧发火预测模型,并用实验进行验证,但该研究尚未延伸至瞬态电磁脉冲耦合场景。

虽然前人开展过TEMP辐照下EED发火特性研究,但仍存在显著不足:数值建模效率偏低且发火场景较为局限,尚未建立TEMP辐照下场耦合到EED的高效解析算法,也尚未揭示对TEMP辐照下EED两类发火方式的临界判别机制,致使复杂电

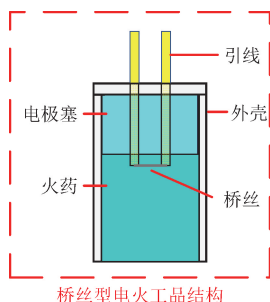
磁环境下 EED 的发火方式判定缺乏理论支撑。本文以桥丝型电火工品为研究对象,提出了一种 TEMP 辐照下 EED 发火预测模型,该模型通过融合基于互易性原理的感应电压计算方法和温升发火/电弧发火模式的特定判据,实现了给定 TEMP 条件下 EED 发火模式的定量化预测,为电磁易损性评估提供了实用化分析工具。利用此预测模型对 EED 在单次 TEMP 辐照和重频 TEMP 辐照下的两类发火规律进行研究,可为 EED 安全性评估及电磁防护设计提供重要理论依据。

1 基于电磁互易性的 EED 场耦合建模

桥丝型电火工品的具体结构及线性平面电磁波辐照 EED 示意图如图 1 所示。 k 为波矢量; H 为磁场矢量; μ_θ 、 μ_ϕ 分别为球坐标系下仰角方向和方位角方向单位矢量;入射方向由方位角 ϕ 和仰角 θ 确定,入射电场矢量 E 的极化方向由极化角 η 定义。为分析 TEMP 对 EED 的辐照作用,可将作用在球坐标系 (r, θ, ϕ) 原点处 EED 的 TEMP 建模为线极化平面波入射^[21]。



(a) 电磁波入射示意图



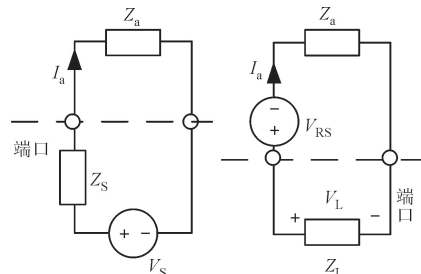
(b) EED 的结构示意图

图 1 线性平面电磁波辐照 EED

Fig. 1 Linearly polarized plane-wave electromagnetic field impinging on an EED

基于电磁互易性原理,首先将桥丝型电火工品

等效为天线,其辐射特性由两个关键参数决定:EED 输入阻抗 Z_a 与发射模式下的复辐射方向图函数 F 相互关联,该模式对应的等效电路模型如图 2 所示。为求解 F 、 Z_a ,依据互易性原理,将 TEMP 实际作用的负载端口位置替换为一个具有内阻抗 Z_s 与电压 V_s 的有源激励,进而开展全波电磁分析以求解 F 和 Z_a 。



(a) 发射模式

(b) 接收模式

图 2 互易性原理等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model based on the reciprocity principle

在接收模式下,当入射电场 E 作用于 EED 系统时,可基于图 2(b)所建立的等效电路模型,采用频域分析方法^[22]求解目标负载两端的感应电压,其表达式如下

$$V_L = -\frac{Z_L}{Z_a + Z_L} \frac{2j\lambda_0}{Z_0 I_a} (F \cdot E) \quad (1)$$

式中: F 可用仰角方向和方位角方向的单位矢量表示, $F = F_\theta \mu_\theta + F_\phi \mu_\phi$, F_θ 为仰角方向单位矢量的值, F_ϕ 为方位角方向单位矢量的值;辐射电磁场 E 同样可以表示为 $E = E_i (\cos \eta \mu_\theta + \sin \eta \mu_\phi)$, E_i 为某个方向角度对应的电场的值; Z_L 为目标负载阻抗; I_a 为与 F 相关的馈电电流。波长参数由 λ_0 表征,自由空间波阻抗取 $Z_0 \approx 377 \Omega$ 。为简化表征,基于式(1)定义频域传递函数耦合长度为

$$L = \frac{V_L}{E_i} = -\frac{Z_L}{Z_a + Z_L} \frac{2j\lambda_0}{Z_0 I_a} (F_\theta \cos \eta + F_\phi \sin \eta) \quad (2)$$

针对发射模式问题的求解,采用基于有限积分技术的电磁仿真软件进行全波分析。鉴于 TEMP 通常包含百兆赫兹量级的宽频能量^[23-24],为准确表征 TEMP 的影响,考虑计算的带宽为 $[0, 1]$ GHz,在此基础上,建立桥丝式电火工品的电磁响应模型,进而评估其在复杂电磁环境下的安全限值。

为在发射模式下求解关键参数,在仿真中设置两个负载端口:其一位于脚-壳之间,另一位于两引脚之间,脚-壳端口和脚-脚端口示意图如图 3 所示。通过对此设置开展全波仿真计算,同时存储关键参

数(复辐射方向图函数 F 和输入阻抗 Z_a), 通过对这些数据进行处理, 可以计算耦合长度 L 。

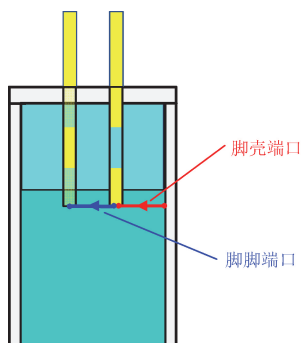


图3 脚-壳端口和脚-脚端口示意图
Fig. 3 Pin-to-shell port and pin-to-pin port

基于前期参数敏感性计算, 选定 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $\eta = 0^\circ$ 作为电磁耦合最敏感的入射条件^[25], 基于此, 在温升发火与电弧发火的对比研究中, 均固定此入射角进行辐照计算, 以同步评估电磁辐射对两类发火机制的差异化影响。计算中使用的电火工品尺寸参数见表1, 本文所选取的桥丝型电火工品尺寸、材料是符合标准且较为常规的, 具有典型代表性。

表1 电火工品几何结构参数

Table 1 Geometrical parameters of an EED

结构	材料	外径/mm	内径/mm	长度/mm
外壳	铝	3.80	3.5	7.0
电极塞	有机玻璃	3.50		2.3
引线	铜	0.40		60.0
桥丝	镍铬合金	0.01		1.5

电火工品脚-壳端口、脚-脚端口耦合长度如图4和图5所示。基于式(2)并应用互易定理, 计算得到端口处耦合长度的幅值响应, 为验证该计算方法的准确性, 采用全波仿真软件对场耦合问题进行了独立建模仿真。两种方法所得结果高度吻合, 有效验证了基于互易定理计算方法的准确性。

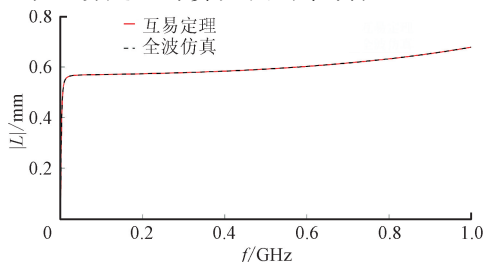


图4 电火工品脚-壳端口耦合长度
Fig. 4 EED pin-to-shell coupling length

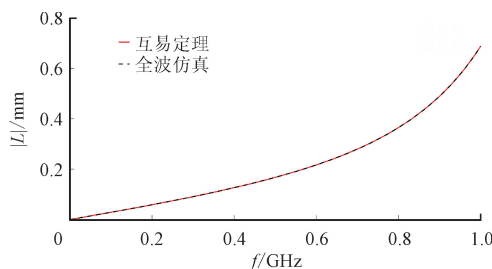


图5 电火工品脚-脚端口耦合长度
Fig. 5 EED pin-to-pin coupling length

本节所提方法的优势在于只需对电火工品在传输模式下进行一次数值全波仿真得到复辐射方向图函数 F 和输入阻抗 Z_a , 然后便可利用式(1) 计算出任意入射角 θ, ϕ, η 以及任意入射电场特征辐照下电火工品的端口感应电压。

2 EED 发火预测模型

本节将建立全面的 EED 发火预测模型, 该模型通过结合场耦合效应与 EED 临界发火判据, 实现对典型 TEMP 辐照下电弧发火和温升发火模式的量化预测。

2.1 电弧发火模型

直流激励下桥丝型电火工品电弧发火判据为^[5]

$$b = \int_0^d \alpha ds > 17.7 + \ln d \quad (3)$$

式中: b 为电击穿系数; α 为电子电离系数, 表征单个电子沿电场方向单位路径产生的平均电离碰撞次数, $\alpha = Ape^{-Bp/E(x,y)}$, 其中 $E(x,y)$ 是电火工品脚-壳间截面处电场强度分布, p 为气压, A 为比例系数, B 为电离电位系数; d 为脚-壳距离。

在 TEMP 辐照下, EED 引脚-壳体间感应电压为瞬态脉冲。相较于直流激励, 瞬态激励作用下的流注放电起始条件更为严格。除要求激励电压在引脚附近形成的电场强度达到流注起始的阈值外, 还必须同时满足两个关键条件: 其一, 流注头部区域的电场强度需足够高, 以形成满足放电发展的电离临界体积; 其二, 在该临界体积内需存在有效的自由电子。现有理论难以描述这一瞬态过程, 因此需建立适用于瞬态激励的桥丝型电火工品电弧点发火理论模型与判据。

对于瞬态脉冲激励, 定义其在脚壳间引起电击穿所需的最小电场强度峰值为 E_p , 该值高于直流稳

态击穿电场强度 E_s , 两者之差为 $\Delta E = E_p - E_s$ 。假设脉冲激励在脚壳间产生的电场强度波形前沿为快速上升的斜坡, 此电击穿过程可描述为: 电场强度首先达到 E_s , 但此时并未立即击穿; 电场强度继续上升, 经过一段时延 t_c 后达到峰值 E_p , 脚壳间发生电击穿。因此, 在击穿发生前, 脉冲激励在脚壳间产生的电场强度波形可近似为

$$E_d(t) = E_s + \Delta E = E_s + E'_d(t)t_c + O(t_c^2) \quad (4)$$

式中: $E'_d(t)$ 是电场的一阶导数; $O(t_c^2)$ 为电场的高阶导数。

若 m 为电子的质量, e 为电子的电荷, 根据牛顿第二定律, 可以求解电子在电场强度 $E_d(t)$ 中的运动方程

$$m \frac{dv(t)}{dt} = eE_d(t) \quad (5)$$

得到电子的速度 $v(t)$ 和位移 $x(t)$, 表达式分别为

$$v(t) = \frac{e}{m} \left(E_s t + \frac{E'_d(t)}{2} t^2 \right) \quad (6)$$

$$x(t) = \int_0^t v(t') dt' = \frac{e}{m} \left(\frac{E_s}{2} t^2 + \frac{E'_d(t)}{6} t^3 \right) \quad (7)$$

因此, 电子在电场中获得的能量 $\epsilon(t)$ 为

$$\epsilon(t) = \int_0^t eE_d(t')v(t')dt' = \frac{e^2}{m} \left(\frac{E_s^2}{2} t^2 + \frac{E_s E'_d(t)}{2} t^3 + \frac{E'_d(t)^2}{8} t^4 \right) \quad (8)$$

在 $t = t_c$ 时, 电子形成电子崩所需的电离能量为 ϵ_c , 即 $\epsilon(t_c) = \epsilon_c$, 联立式(8)并忽略低阶项进行简化处理, 可近似估算出形成电子崩所需的时延为

$$t_c \approx \frac{(8m\epsilon_c)^{1/4}}{\sqrt{eE'_d(t)}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(4)可得

$$E_p = E_s + R_1 \sqrt{E'_d(t)} \quad (10)$$

式中: R_1 为表征动态脉冲特性产生影响的系数, $R_1 = (8m\epsilon_c/e^2)^{1/4}$ 。

瞬态脉冲击穿电场强度与直流击穿电场强度及瞬态电压波形上升率均呈正相关关系, 由于 EED 表现为一个线性系统, 其电场强度分布与激励电压保持简单的函数关系, 可类比推断脉冲击穿电压 U_p 应满足

$$U_p = U_s + \Delta U = U_s + R_2 \sqrt{U'(t)} \quad (11)$$

式中: ΔU 表示脉冲击穿电压在直流稳态击穿电压 U_s 上的增量; 系数 R^2 同时涵盖了 R_1 及电场强度分

布 $E_d(t)$ 与脉冲激励电压 $U(t)$ 之间的函数映射关系。最后, 与式(3)形式保持一致, 将瞬态脉冲激励下 EED 电弧发火判据表示为

$$b_e = \int_0^d \alpha ds - C \sqrt{\frac{dU}{dt}} > 17.7 + \ln d \quad (12)$$

式中: C 是陡度系数; $dU/dt = (U_2 - U_1)/(t_2 - t_1)$, U_2 和 U_1 分别为脉冲波形上升沿对应 90% 和 10% 峰值电压的幅值; t_2 和 t_1 分别为 U_2 和 U_1 对应的时间点。 $\int_0^d \alpha ds$ 这一项用于表征脚-壳间瞬态感应电压幅值对电弧发火的影响; $C\sqrt{dU/dt}$ 这一项则反映瞬态感应电压上升沿对电弧发火的影响, 当感应电压同时具备高幅值与较缓上升沿时, 能够在脚-壳间隙中形成持续且充分发展的电场, 从而显著提高引发电弧发火的概率。研究团队已经实验验证了式(12), 理论计算结果与实验结果的误差在 7.2% 以内。本研究计算所用到的电火工品脚壳距离为 0.1 cm, $A=8.4$, $B=134.9$, $C=4\ 563.088^{[5]}$, 式(12)等式右边结果为 15.39, 即当电击穿系数大于 15.39 时, 可认为发生电弧发火。

进一步分析 b_e 可知, 电击穿系数呈非线性凹函数特性, 基于此特性, 可将电击穿过程分为两个阶段。第一阶段(低电压区), 当感应电压 U 较低时, b_e 中表征脉冲上升速率的 $C\sqrt{dU/dt}$ 占据主导地位, 此时电击穿系数呈负值且随 U 增加持续下降, 无法形成有效导电通道。第二阶段(临界击穿区), 当 U 突破临界阈值时, 式(12)中表征幅值影响的 $\int_0^d \alpha ds$ 迅速主导电击穿进程, 电击穿系数开始呈现指数增长特性且由负转正, 直到脚-壳间局域电场强度超越介质击穿阈值, 发生电击穿。

EED 的电弧发火现象发生在引脚与外壳之间, 在发射模式下将如图 3 所示的脚壳间隙设置为负载端口, 并利用互易性耦合模型计算脚-壳间感应电压。TEMP 建模为前沿时间 40 ns、脉宽 550 ns 的双指数波形, 幅值为 50 kV/m, 平面波入射角为: $\theta=90^\circ$, $\phi=0^\circ$, $\eta=0^\circ$ 。计算得到的脚-壳感应电压时域波形如图 6 所示, 将该电压波形代入电弧发火判据方程式(3)后, 可判定此时是否发生电弧发火, 计算得到电击穿系数为 -2.49, 不会发生电弧发火。

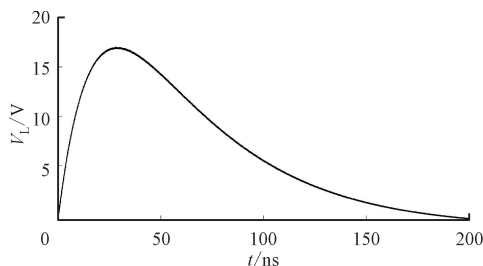


图6 脚-壳间感应电压

Fig. 6 Induced voltage of pin-to-shell

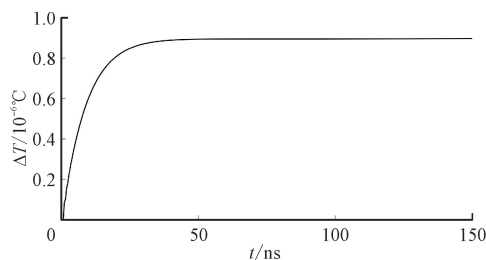


图8 桥丝处温升曲线

Fig. 8 Temperature rise curve at bridge wire

2.2 温升发火模型

在 TEMP 辐照下,桥丝感应出瞬态电压,其产生的焦耳热效应导致桥丝温度升高。当桥丝温度达到所封装药剂的点火温度阈值时,即引发温升点火。为分析此电磁-热耦合过程,采用下式建立输入电功率与桥丝温升之间的定量关系模型^[26-28]

$$C_T \frac{d\Delta T}{dt} = P - \frac{1}{R_T} \Delta T \quad (13)$$

式中: C_T 是桥丝热容,取值为 $6.56 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; R_T 是桥丝热阻,取值为 $2534 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$; ΔT 为桥丝处的温升; P 为桥丝处的馈电功率。

模型忽略了药剂化学放热及温度梯度(影响精确点火阈值分析),但鉴于本文聚焦 TEMP 辐照下 EED 的温升发火规律,此简化不影响核心研究结论。

进一步可求得桥丝处的温升为

$$\Delta T = e^{-t/(C_T R_T)} \int_0^t e^{\zeta/(C_T R_T)} \frac{P(\zeta)}{C_T} d\zeta \quad (14)$$

基于已定义的入射电场特征参数($\theta=90^\circ$, $\phi=0^\circ$, $\eta=0^\circ$),计算桥丝感应电压时域波形如图7所示,桥丝的温升曲线如图8所示。

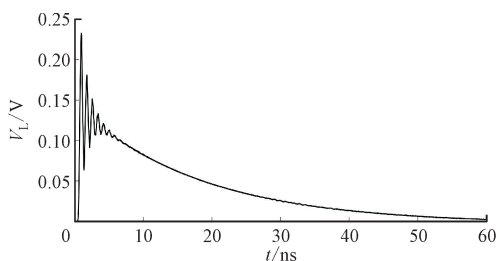


图7 桥丝处感应电压

Fig. 7 Induced voltage at bridge wire

计算结果表明,桥丝温升仅为 $8.96 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}$,此时感应电压为 0.23 V ,该温升值远未达到约 $320 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的常用火药的起爆温度^[29]。

3 单次 TEMP 辐照对 EED 发火的影响

TEMP 来源广泛,含雷电电磁脉冲^[30]、核爆电磁脉冲^[31]等,脉冲宽度范围可涵盖 ns 到 μs 级^[32],其时域特性对耦合效应具有决定性作用,不同参数 TEMP 会显著影响脚-壳及桥丝间产生的感应电压,因此本节在固定入射电场幅值及能量约束条件下,研究单次 TEMP 辐照参数对 EED 发火的影响,并尝试找出极端 TEMP 波形。

3.1 单次 TEMP 辐照对电弧发火的影响

为准确分析电弧点火规律(确保式(12)在电击穿第二阶段成立),设定入射电场幅值为 9.5 MV/m ,研究固定幅值下 TEMP 参数对电弧点火的影响。根据第2节的求解步骤,得到前沿时间 $0.5 \text{ ns} \sim 5 \text{ } \mu\text{s}$ 和脉宽 $30 \text{ ns} \sim 50 \text{ } \mu\text{s}$ 的单次 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压以及电击穿系数,见表2。后续分析均采用此参数范围。

从表2可以看出,在固定入射电场幅值下,电击穿系数随入射电场前沿时间和脉宽增加呈现先增后减的非单调变化,最大值出现在前沿时间 20 ns ,脉宽 200 ns ,简记为 $20/200 \text{ ns}$,下文同。且随着入射电场前沿时间和脉宽持续增大,电击穿系数呈现下降趋势,这源于电击穿过程第二阶段的作用机理。此时幅值影响项占据主导地位,脉冲前沿时间和脉宽的会增加会显著降低感应电压幅值,导致电击穿系数衰减。当入射电场前沿时间大于 300 ns ,脉宽大于 3000 ns ,电击穿系数虽仍处于负值区间,但其衰减速率呈现显著减缓趋势,这一拐点的出现标志着电击穿重新进入以上升率主导的第一阶段。

表 2 约束入射电场幅值时单次 TEMP 辐照下
电击穿系数计算结果

Table 2 Breakdown calculation results under single TEMP
irradiation with constrained incident field amplitude

入射电场 前沿时间/ns	入射电场 脉宽/ns	电击穿系数	是否击穿
0.5	30	-55.98	否
0.5	40	-46.24	否
0.5	50	-39.23	否
2.0	50	-11.83	否
5.0	50	-1.84	否
10.0	100	17.10	是
20.0	200	20.14	是
40.0	400	13.35	否
60.0	600	7.38	否
80.0	800	2.88	否
100.0	1 000	-1.29	否
300.0	3 000	-9.80	否
500.0	5 000	-9.16	否
800.0	8 000	-7.09	否
1 000.0	10 000	-6.26	否
3 000.0	30 000	-3.17	否
5 000.0	50 000	-1.56	否

为确定极端 TEMP 波形,聚焦 20/200 ns 区域进一步计算。结果显示:当入射波形为 20/100 ns 时,电击穿系数达峰值 22.175(超过阈值 15.39),触发电弧点火。20/100 ns 单次 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压波形如图 9 所示,前沿时间为 17.8 ns,幅值为 4.22 kV。电弧发火本质上由感应电压幅值与上升率博弈主导,二者的竞争关系形成了非单调的电击穿演化规律。从典型间隙的伏秒击穿特性规律来看,在相同间隙距离下,脉冲上升速率越快,其击穿阈值越高;相同幅值下,脉冲上升越缓慢,电子崩发展越充分,击穿发生概率显著增大。

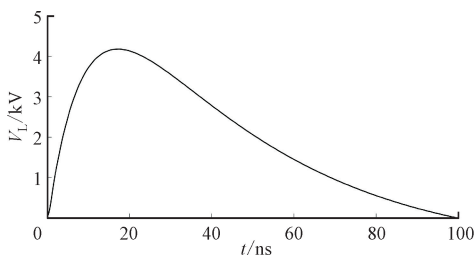


图 9 20/100 ns 单次 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压
Fig. 9 Pin-to-shell voltage induced by 20/100 ns TEMP

接下来探究固定入射电场能量约束条件下不同参数 TEMP 对电弧发火特性的影响规律,为确保电击穿过程出现在第二阶段,固定入射电场能量为 35 kJ/m^2 ,计算结果如下。固定入射电场能量为 35 kJ/m^2 时单次 TEMP 辐照下电击穿系数计算结果见表 3,可以看出,0.5/30 ns 入射电场辐照下电击穿系数最大,触发电弧发火。0.5/30 ns 单次 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压波形如图 10 所示,前沿时间为 2.04 ns,幅值为 14.85 kV。当入射电场前沿时间大于 70 ns 且脉宽大于 700 ns 时,电击穿系数回升,回到电击穿第一阶段,无法触发电弧点火。

表 3 约束入射电场能量时单次 TEMP 辐照下
电击穿系数计算结果

Table 3 Calculation results of breakdown under single TEMP
irradiation with constrained incident field energy

入射电场 前沿时间/ns	入射电场 脉宽/ns	电击穿系数	是否击穿
0.5	30	81.32	是
0.5	40	78.75	是
0.5	50	74.19	是
2.0	50	72.35	是
5.0	50	69.38	是
10.0	100	48.12	是
20.0	200	15.44	是
30.0	300	-1.00	否
40.0	400	-8.98	否
50.0	500	-13.02	否
60.0	600	-14.82	否
70.0	700	-15.41	否
80.0	800	-14.65	否
90.0	900	-14.21	否
100.0	1 000	-13.80	否

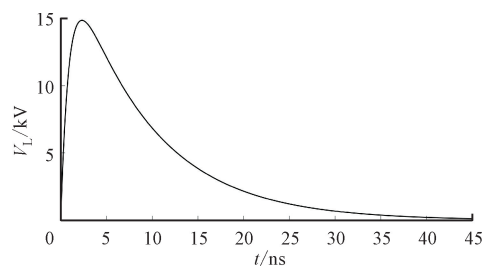


图 10 0.5/30 ns 单次 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压
Fig. 10 Pin-to-shell voltage induced by 0.5/30 ns TEMP

入射电场能量恒定时,前沿时间和脉宽增大导致感应电压幅值衰减,进而降低脚-壳间感应电压。

结合固定幅值下前沿时间和脉宽增大使电击穿系数减小的规律,可知能量恒定时电击穿系数随前沿时间/脉宽增大而单调递减。因此,相同能量下,窄脉宽、快前沿时间的 TEMP 波形更易引发电弧点火。

3.2 单次 TEMP 辐照对温升发火的影响

基于电弧点火分析步骤,首先研究固定入射电场幅值(9.5 MV/m)下 TEMP 参数对温升点火的影响规律,参数范围同前,计算结果如下。固定入射电场幅值为 9.5 MV/m 时单次 TEMP 辐照下桥丝温升计算结果见表 4,可以看出,0.5/30 ns 入射电场辐照下温升最大,0.5/30 ns 单次 TEMP 辐照下桥丝处感应电压波形如图 11 所示。在固定入射电场幅值条件下,随入射电场前沿时间和脉宽的增大,桥丝温升呈现先降后升的非线性变化趋势,此变化趋势是由于当脉冲前沿时间和脉宽较小时,尽管电磁耦合作用时间短暂,但是桥丝处感应电压的幅值较高,导致短时间内电流密度骤增,引发较高温升;而当脉冲参数较大时,尽管感应电压幅值降低,但持续作用时间延长使得电磁能量通过焦耳热效应不断累积,最终仍形成较高的温升。因此,在场强约束条件下,窄脉宽、快前沿时间以及大脉宽、缓前沿时间的 TEMP 可导致更大的桥丝温升。

表 4 约束入射电场幅值时单次 TEMP 辐照下桥丝温升计算结果

Table 4 Temperature rise of bridge wire under single TEMP irradiation with constrained incident field amplitude		
入射电场前沿时间/ns	入射电场脉宽/ns	温升/℃
0.5	30	2.104 0
0.5	40	2.082 4
0.5	50	2.065 3
2.0	50	0.648 7
5.0	50	0.308 5
10.0	100	0.233 2
20.0	200	0.143 5
40.0	400	0.085 4
60.0	600	0.062 3
80.0	800	0.055 0
100.0	1 000	0.032 8
300.0	3 000	0.054 9
500.0	5 000	0.069 6
800.0	8 000	0.097 2
1 000.0	10 000	0.111 0
3 000.0	30 000	0.292 3
5 000.0	50 000	0.582 0

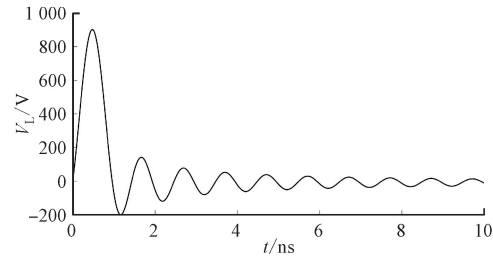


图 11 固定入射电场幅值下单次 TEMP 辐照下桥丝处极端感应电压波形

Fig. 11 Extreme induced voltage at bridge wire under single TEMP with fixed incident field amplitude

探究固定入射电场能量条件下不同 TEMP 对温升发火特性的影响规律,固定入射电场能量为 35 kJ/m², 计算结果见表 5。

表 5 约束入射电场能量时单次 TEMP 辐照下桥丝温升计算结果

Table 5 Temperature rise of bridge wire under single TEMP irradiation with constrained incident field energy		
入射电场前沿时间/ns	入射电场脉宽/ns	温升/℃
0.5	30	13.464 2
0.5	40	10.234 4
0.5	50	8.242 3
2.0	50	2.394 8
5.0	50	1.823 1
10.0	100	0.914 4
20.0	200	0.245 2
40.0	400	0.039 9
60.0	600	0.020 7
80.0	800	0.127 0
100.0	1 000	0.009 2
300.0	3 000	0.003 3
500.0	5 000	0.002 5
800.0	8 000	0.002 2
1 000.0	10 000	0.002 0
3 000.0	30 000	0.001 7
5 000.0	50 000	0.001 4

由表 5 可知,0.5/30 ns 入射电场辐照下温升最大,感应电压波形如图 12 所示。当固定入射电场能量时,桥丝温升随入射电场脉冲前沿时间和脉宽的增加呈现持续下降趋势。与固定入射电场幅值计算结果不同,在能量约束条件下,尽管脉冲前沿时间和脉宽的增加会延长电磁耦合作用时间,但入射电场幅值随之衰减,导致桥丝处感应电压幅值显著降低。这一幅值衰减效应使焦耳热功率密度下降,最终导

致热积累效率被大幅削弱。因此,在能量约束条件下,单纯增加脉冲时域参数无法补偿幅值衰减带来的能量沉积损失,因此窄脉宽、快前沿时间的 TEMP 对桥丝温升具有更强的激发能力。

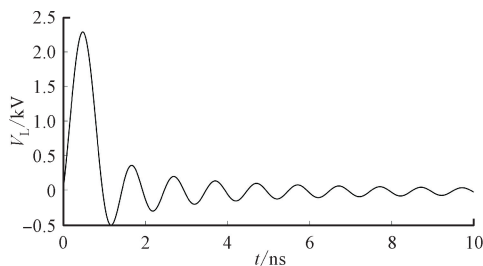


图 12 固定入射电场能量下单次 TEMP 辐照下桥丝处极端感应电压波形

Fig. 12 Extreme included voltage at bridge wire under single TEMP with fixed incident field energy

综合本节的研究结果可知,在单次 TEMP 辐照下,电火工品优先发生电弧发火而非温升发火,这表明瞬态电磁能量主要通过脚-壳间的共模耦合路径注入。当单次 TEMP 辐照时,脚-壳共模干扰强度可达桥丝差模耦合值的数 10 倍,脚-壳结构对入射电场具有更高的电磁敏感度,这为电火工品单次 TEMP 下的电磁防护设计提供了关键路径优化方向。

4 重频 TEMP 辐照对 EED 发火的影响

本节利用第 3 节得到的单次极端 TEMP 波形,分析在重复频率 TEMP^[33] 辐照下电火工品发火特性的差异性影响。

4.1 重频 TEMP 辐照对电弧发火的影响

本小节研究固定入射电场幅值为 9.5 MV/m、20/100 ns 的重频 TEMP 以及固定入射电场能量为 35 kJ/m²、0.5/30 ns 的重频 TEMP 对电火工品电弧发火的影响,感应电压计算结果如图 13 和图 14 所示。

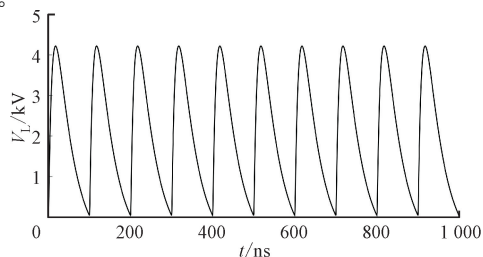


图 13 20/100 ns 重频 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压

Fig. 13 Pin-to-shell voltage induced by 20/100 ns repetitive TEMP

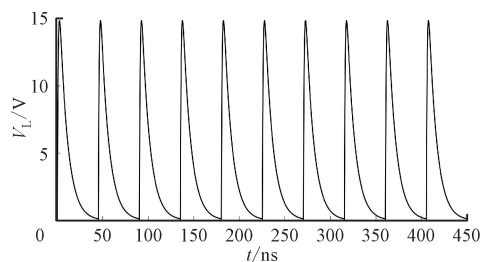


图 14 0.5/30 ns 重频 TEMP 辐照下脚-壳间感应电压

Fig. 14 Pin-to-shell voltage induced by 5/50 ns repetitive TEMP

由计算结果可知,重频 TEMP 辐照下脚-壳间单周期感应电压的幅值和前沿时间与单次 TEMP 辐照时一致,因此电击穿系数计算结果相同,重频 TEMP 辐照对电弧发火的影响与单次 TEMP 辐照一致。

4.2 重频 TEMP 辐照对温升发火的影响

本小节研究固定入射电场幅值为 9.5 MV/m、前沿时间为 0.5/30 ns 的重频 TEMP 以及固定入射电场能量为 35 kJ/m²、0.5/30 ns 的重频 TEMP 对电火工品温升发火的影响,温升计算结果如图 15 和图 16 所示。

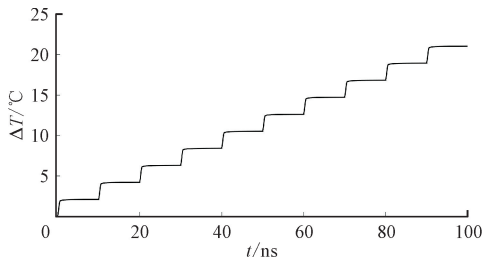


图 15 固定入射电场幅值下重频极端 TEMP 辐照下桥丝处温升

Fig. 15 Temperature rise at bridge wire under repetitive extreme TEMP with fixed incident field amplitude

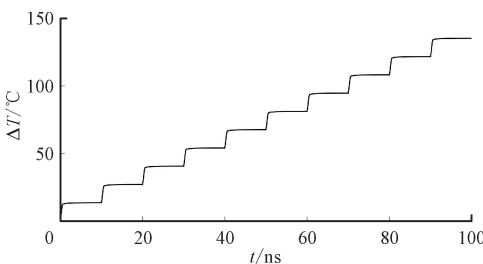


图 16 固定入射电场能量下重频极端 TEMP 辐照下桥丝处温升

Fig. 16 Temperature rise at bridge wire under repetitive extreme TEMP with fixed incident field energy

由计算结果可知,重复频率 TEMP 辐照下的热积累效应具有显著的时间依赖性。虽然单周期造成的感应电压幅值与前沿时间参数和单次 TEMP 工况引起的感应电压相同,但焦耳热的周期性叠加使桥丝能量持续积累,导致桥丝温度呈现阶梯式上升,当桥丝热平衡时间远大于脉冲周期 T 时(绝热状态),其总温升可达单次 TEMP 辐照作用的 n 倍(n 为脉冲重复次数)。

由本节分析结果可知,重复频率 TEMP 辐照下电火工品的发火机制存在两种典型模式。当单周期造成的脚-壳间感应电压不足以触发电弧击穿时,若脉冲重复周期小于桥丝热平衡时间(即热耗散速率远低于能量注入速率),桥丝温度通过逐脉冲叠加效应突破热发火阈值,此时出现温升发火;反之,若单周期造成的脚-壳间感应电压已超越电弧击穿临界值,则脚-壳间开始出现瞬态电击穿过程,重复频次脉冲周期仅维持电弧通道的稳定性,此时出现电弧发火。

5 结 论

本研究利用互易性原理和 EED 发火判据提出了一个 TEMP 辐照下 EED 发火预测模型,该模型可以有效预测脚-壳间感应电压和桥丝处温升,从而判断是否发生电弧发火以及温升发火。在此基础上,本文探究了单次 TEMP 辐照下和重频 TEMP 辐照下脉冲参数对 EED 电弧发火和温升发火的影响,研究结果如下。

(1)当单次 TEMP 辐照时,针对电弧发火,固定入射电场幅值,最易引起 EED 电弧发火的是参数为前沿时间 20 ns、脉宽 100 ns 的 TEMP;固定入射电场能量,窄脉宽、快前沿时间的 TEMP 更易引发电弧发火。针对温升发火,固定入射电场幅值,窄脉宽、快前沿时间以及大脉宽、缓前沿时间的 TEMP 对桥丝温升具有更强的提升能力。固定入射电场能量,窄脉宽、快前沿时间的 TEMP 对桥丝温升具有更强的激发能力。在相同单次 TEMP 辐照条件下,EED 优先触发电弧击穿而非温升效应,其本质源于脚-壳间显著的共模耦合效应,单次 TEMP 辐照时脚-壳共模耦合强度可达桥丝差模耦合的数 10 倍量级。

(2)当重频 TEMP 辐照时,针对电弧发火,两类约束条件下,重频 TEMP 辐照对电弧发火的影响与单次 TEMP 辐照相同;针对温升发火,两类约束条件下,当桥丝热平衡时间远大于脉冲周期 T 时(绝

热状态),其总温升可达单次 TEMP 辐照时的 n 倍。在重频 TEMP 辐照下,若单周期电磁脉冲强度已满足击穿条件,则直接触发电弧,后续脉冲仅维持电弧稳定。当单周期电磁脉冲强度不足时,若重复脉冲间隔极短(热耗散速率远低于能量累积速率),周期性热积累将逐渐升高桥丝温度,直至突破温升发火阈值。

本文所提模型为定量评估桥丝型 EED 系统的电磁脆弱性提供了技术方案,对桥丝型 EED 单次 TEMP 辐照下和重频 TEMP 辐照下的电磁防护设计具有指导意义。需要强调的是,本研究得出的定量结论严格适用于所分析的具体桥丝型 EED 结构,并可推广至典型桥丝式 EED,但不一定适用于所有 EED 结构类型(如半导体桥结构 EED、冲击片雷管 EED)。

参考文献:

- [1] WANG Jun, ZHOU Bin, YE Shuqin, et al. Novel electro-explosive device incorporating a planar transient suppression diode [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(9): 1416-1419.
- [2] PARATE B A, CHANDEL S, SHEKHAR H. Lumped parameter analysis of bridge wire in an electro explosive device of a power cartridge for water-jet application: a case study [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2020, 17(3): 408-427.
- [3] CHEN Hengshuai, ZHU Dezhan, ZHU Yanli, et al. Calculation, simulation, and measurement of input impedance and RF-induced current of bridge wire electro-explosive device [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2025, 73(4): 2259-2271.
- [4] SHI Lan, YANG Anmin, ZHANG Yingchun, et al. Study on the temperature of the bridge wire in the initiator used in nuclear explosion valve [J]. American Journal of Analytical Chemistry, 2016, 7(12): 908-917.
- [5] 张博渊,梁涛,薛婉婷,等. 直流激励下桥丝型电火工品电弧发火预测模型 [J]. 含能材料, 2024, 32(12): 1334-1342.
ZHANG Boyuan, LIANG Tao, XUE Wanting, et al. A prediction model of arc ignition for bridge wire electro explosive device under direct current excitation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(12): 1334-1342.
- [6] U. S. Department of Defense. DoDM 6055.09—2019 department of defense manual: DoD ammunition and

- explosives safety standards [S]. Washington, D. C., USA; U. S. Department of Defense, 2019.
- [7] European Commission. Assessment of electromagnetic threats on civil explosives, JRC125489 [R]. Brussels, Belgium; European Union, 2021.
- [8] LI Jinpeng, ZHOU Zhongyuan, HU Peng, et al. Calculating method for RF induced current of electric-explosive device based on Agrawal model and non-uniform transmission line[C]//2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2019: 736-741.
- [9] WANG Biao, SUN Yongwei, ZHOU Shuai, et al. Analysis of the electromagnetic effect mechanism of EED under continuous wave radiation [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2024, 2024(1): 9317622.
- [10] 王瑾, 王汉昌, 沈建森, 等. 某型电火工品弹药电磁环境下使用安全性分析 [J]. 海军航空大学学报, 2023, 38(4): 331-337.
- WANG Jin, WANG Hanchang, SHEN Jiansen, et al. Safety analysis of a type of ammunition equipped with EED in electromagnetic environment [J]. Journal of Naval Aviation University, 2023, 38(4): 331-337.
- [11] 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.
- ZHU Xiaonan, PAN Jin, YANG Jinhou, et al. Analysis of induced current and electromagnetic safety of bridge-wire electric explosive device [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(4): 749-756.
- [12] PANTOJA J J, VEGA F, ROMÁN F, et al. On the differential input impedance of an electro-explosive device [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(2): 858-864.
- [13] 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 Hongzhi, LI Rui, ZHAO Tuan, et al. Analysis of the electrostatic hazards of typical bridge wire electro-explosive devices [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2021(6): 18-22.
- [14] 陈启鹏. 火工品防静电防雷执行标准应对辨析 [J]. 中国标准化, 2023(22): 72-76.
- CHEN Qipeng. Analysis of the measures of standards for electrostatic and lightning protection of initiating explosive devices [J]. China Standardization, 2023(22): 72-76.
- [15] 段鑫沛, 朱云娇, 殷亚楠, 等. 电磁脉冲对半导体器件影响机制研究概述 [J]. 中国集成电路, 2025, 34(3): 43-49.
- DUAN Xinpei, ZHU Yunjiao, YIN Yanan, et al. An overview of the influence mechanism of electromagnetic pulse on semiconductor devices [J]. China Integrated Circuit, 2025, 34(3): 43-49.
- [16] 刘趺仪, 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 Liyi, 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.
- [17] CHEN Xin, QIU Yang, TIAN Jin, et al. Coupling effect of high-altitude electromagnetic pulse of two-pin electric explosive device based on a V-type antenna model [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(12): e23417.
- [18] REALE D V, MANKOWSKI J, DICKENS J. Susceptibility of electro-explosive devices to high pulsed electric fields [C]//2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2012: 211-214.
- [19] 吕旭旭, 魏光辉, 杜雪, 等. 灼热桥丝式电火工品脉冲电流激励发火规律分析 [J]. 含能材料, 2023, 31(6): 589-597.
- LYU Xuxu, WEI Guanghui, DU Xue, et al. Analysis on ignition law of hot bridge wire electro explosive device under pulse current excitation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(6): 589-597.
- [20] JIA Jin, RINAS D, FREI S. Predicting the radiated emissions of automotive systems according to CISPR 25 using current scan methods [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(2): 409-418.
- [21] 席志豪, 梁涛, 谢彦召, 等. 基于时域 BLT 方程的带绝缘线缆束场-线耦合模型 [J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 758-764.
- XI Zhihao, LIANG Tao, XIE Yanzhao, et al. Field-to-line coupling model for insulated wiring bundle based on time-domain BLT equation [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 758-764.
- [22] SPADACINI G, LIANG Tao, GRASSI F, et al. Worst case and statistics of waveforms involved in wideband intentional electromagnetic attacks [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1436-1444.
- [23] GIRI D V, TESCHE F M. Classification of intentional

- electromagnetic environments (IEME) [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 322-328.
- [24] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC): part 2-13 environment-high-power electromagnetic (HPEM) environments-radiated and conducted; IEC 61000-2-13; 2005 [S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2005.
- [25] 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.
- MENG Dongxu, WEI Ming, HU Xiaofeng, et al. Simulation study on induced current of electric explosive device under electromagnetic pulse [J]. Safety & EMC, 2022(2): 24-28.
- [26] 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 Hongzhi, ZHANG Yun, DU Jingli, et al. Electromagnetic field safety threshold of electro-explosive devices [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2024, 32(1): 76-82.
- [27] 吕旭旭,魏光辉. 实装灼热桥丝式电火工品电磁辐射敏感度测试方法评述 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35 (6): 49-58.
- LÜ Xuxu, WEI Guanghui. Comments on the electromagnetic safety assessment method for hot bridge wire electro-explosive device [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(6): 49-58.
- [28] JUAN Ye, GUILAN Li, LONGFEI Zhao. Quantitative evaluation for radio-frequency effects of electro-explosive device [C]//2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2015: 417-421.
- [29] U. S. Department of the Army. Military explosives (field manual No. TM 9-1300-214) [M]. Washington, D. C., USA; Headquarters, Department of the Army, 1984.
- [30] SONG Haisheng, ZHAO Jiachen, HUANG Zhengyu, et al. The coupling of lightning electromagnetic pulse on ships with a novel FDTD modeling scheme [C]//2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2021: 1-2.
- [31] YI Tao, WANG Feng, GUO Xiaodong, et al. Prediction of electromagnetic pulse radiation at high power laser facility [C]//2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2022: 327-330.
- [32] RADASKY W A, HOAD R. Recent developments in high power EM (HPEM) standards with emphasis on high altitude electromagnetic pulse (HEMP) and intentional electromagnetic interference (IEMI) [J]. IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, 2020, 2(3): 62-66.
- [33] XU Jianjun, REN Chuan, XIAO Kaiqi, et al. High repetition frequency, high power electromagnetic pulses generation [C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2019: 18-21.

(编辑 武红江)