

文章编号:1006-9941(2023)06-0589-09

## 灼热桥丝式电火工品脉冲电流激励发火规律分析

吕旭旭,魏光辉,杜雪,卢新福,孙江宁

(陆军工程大学石家庄校区,电磁环境效应国家重点实验室,河北石家庄 050003)

**摘要:** 为研究灼热桥丝式电火工品的脉冲激励安全性,建立了灼热桥丝式电火工品的温升数理模型,研究了灼热桥丝式电火工品的发火判据,设计了灼热桥丝式电火工品临界发火电流的计算流程,揭示了单脉冲和脉冲串电流的激励参数对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响规律。结果表明,在单脉冲激励下,当脉冲宽度小于 $5\ \mu\text{s}$ 时,灼热桥丝式电火工品的临界发火能量固定,即桥药系统处于绝热状态,灼热桥丝式电火工品是否发火与桥丝输入的能量有关;而当脉冲宽度大于 $15\ \text{ms}$ 时,灼热桥丝式电火工品临界发火电流固定,其发火状态与桥丝的电功率有关。在窄脉冲串电流激励下,临界发火电流随重复周期变化曲线的时间常数与脉宽无关,且当重复周期大于 $1.25\ \text{ms}$ 时,桥药系统无热累积效应,其临界发火电流与单脉冲电流作用情况一致;而当重复周期小于 $1.25\ \text{ms}$ 时,桥药系统出现热累积效应,该效应导致临界发火电流随重复周期降低而迅速衰减。

**关键词:** 灼热桥丝;电火工品;数理模型;脉冲激励;热累积效应

中图分类号: TJ5; TJ450.1

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022280

### 0 引言

灼热桥丝式电火工品(electro explosive device, EED)<sup>[1-3]</sup>是电触发元件,其响应快,性能稳定,生产使用方便,被广泛用于航空航天、武器装备和民用爆破等领域<sup>[4-5]</sup>,但较低的发火感度导致其对电磁干扰和静电放电相对敏感<sup>[6-10]</sup>,在射频或高功率微波等电磁环境中可能导致意外发火,危害设备和人员安全。为此必须对灼热桥丝式电火工品的发火规律及安全性进行研究,近年来相关人员已进行了一系列积极探索,取得了一些进展<sup>[11-16]</sup>。姚洪志<sup>[17]</sup>和 Faria P C D C 等<sup>[18]</sup>采用 Rosenthal 集总方程<sup>[19]</sup>研究了灼热桥丝式电火工品的时域响应特性,研究表明射频电流造成的桥丝温升与恒流注入类似,而在脉冲电流作用下,仅当其重复频率远大于桥丝热时间常数时桥丝温升才与恒流注入类似,然而研究<sup>[20]</sup>表明由于

Rosenthal 集总方程忽略了药剂的分解放热以及温度梯度等因素,导致理论计算与试验结果会产生较大误差;Li<sup>[21]</sup>和 Lambrecht M R 等<sup>[22]</sup>将灼热桥丝式电火工品等效为3段均匀传输线,通过传输线理论和叠加原理计算了桥丝的感应电流,结果表明灼热桥丝式电火工品在射频场中具有明显的选频特性,谐振频率与其脚线长度有关,这与白颖伟等<sup>[23]</sup>试验测试的结论一致,但上述研究均没有考虑药剂的放热因素,数值计算结果不准确;针对上述问题,陈瑞民等<sup>[24]</sup>根据传热学理论建立了灼热桥丝式电火工品在电容放电(RC电路)作用下的发火模型,并讨论了RC电路的放电常数和药剂的理化参数对临界发火能的影响规律;YAN 等<sup>[25]</sup>根据傅里叶温控方程,考虑药剂放热等因素建立了灼热桥丝式电火工品的温升方程,并对其在静电放电作用下的发火规律进行了数值研究,结果表明该模型准确度较高,但其没有给出灼热桥丝式电火工品的发火判据,仿真时需要人为判断桥丝和药剂的温度曲线是否出现突升才能确定电火工品是否发火,导致临界参数的求解过程较繁琐且可能出现误判情况。

根据以上分析,灼热桥丝式电火工品的脚线在外界电磁环境中充当天线角色,射频场辐射下其温度响

收稿日期:2022-11-18;修回日期:2022-12-25

网络出版日期:2023-05-05

作者简介:吕旭旭(1995-),男,博士研究生,主要从事电磁环境效应试验评估技术研究。e-mail:lyuxuxu@163.com

通信联系人:魏光辉(1964-),男,教授,主要从事静电与电磁防护技术、电磁环境效应试验评估技术研究。e-mail:wei-guanghui@sohu.com

引用本文: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 Xu-xu, WEI Guang-hui, 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 (Hanneng Cailiao), 2023, 31(6):589-597.

应与恒流注入时一致,而在高功率微波辐射下,由于高功率微波是脉冲调制的高频连续波,故其温度响应与脉冲注入等效,目前对灼热桥丝式电火工品脉冲发火规律的研究相对较少且不够全面。为此,本研究在前期研究成果<sup>[26]</sup>以及文献研究<sup>[25]</sup>的基础上,根据热传导理论<sup>[16]</sup>,考虑药剂放热和消耗等因素建立灼热桥丝式电火工品的温升模型,提出其发火判据和临界参数仿真流程,在此基础上分别对单脉冲(矩形波)和脉冲串(重复矩形波)电流激励下,脉冲电流的激励参数对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响规律进行研究,为其生产使用和安全性评估及防护提供支持。

## 1 模型与求解

对灼热桥丝式电火工品温升模型及求解方法已有较详细的研究<sup>[26]</sup>,由于温升模型并非本研究重点,为了后续说明的完整性,本节作简单推导。灼热桥丝式电火工品由桥丝和含能药剂组成,其结构如图1所示,药剂紧密地包裹在桥丝周围,分析时可采用圆筒传热模型<sup>[30]</sup>处理,建立如图1所示的柱坐标系。

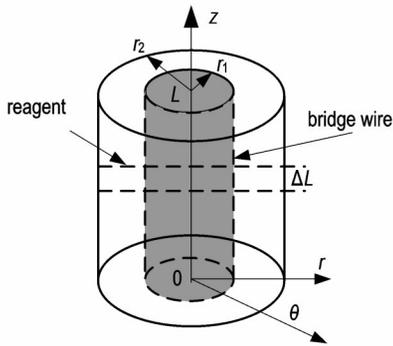


图1 灼热桥丝式电火工品模型( $r_1$ 为桥丝直径, $r_2$ 为桥丝中心到药剂边界的径向距离, $L$ 为桥丝长度, $\Delta L$ 为所选研究对象的轴向宽度)

**Fig. 1** Hot bridge wire EED model ( $r_1$  is the diameter of the bridge wire,  $r_2$  is the radial distance from the centre of the bridge wire to the reagent boundary,  $L$  is the length of the bridge wire and  $\Delta L$  is the axial width of the research object)

对模型作如下假设:1)由于桥丝轴向中点区域散热少,最易形成热点导致发火<sup>[27]</sup>,且轴向温度梯度较小,故选桥药系统中点、轴向宽度为 $\Delta L$ 的区域为研究对象;2)考虑到桥丝的导热系数相对较高,研究对象轴向宽度较小且电火工品中部轴向温度梯度相对较小,故忽略桥丝的温度梯度和轴向散热,只考虑桥丝径向同药剂传热;3)同上,也忽略药剂轴向散热,只考虑

其径向散热及自身化学反应放热,并假定药剂理化属性各向同性均匀且不随温度变化,其热分解反应符合零次阿伦尼乌斯(Arrhenius)定律<sup>[28]</sup>,且认为药剂为理想绝缘体;4)由于灼热桥丝式电火工品的生产制作过程中,桥丝及其周围的含能药剂贴合十分紧密,因此不考虑桥药交界面的热容和热阻,交界面处药剂与桥丝同温;5)根据热点火理论桥药系统传热仅在桥丝及其周围微小薄层内的药剂中进行,假定径向20倍的桥丝半径处药剂温度与环境同温;6)传热部分只考虑热传导,不考虑热辐射和热对流。

对于径向轴距 $r$ ( $r_1 \leq r \leq 20 \cdot r_1$ ),径向步长为 $\Delta r$ 的药剂薄层,流入其中的热量与该区域药剂的热分解放热之和等于该薄层流出的热量和其自身温升所需热量,即:

$$\begin{aligned} -2\pi r \Delta L \lambda \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} + 2\pi r \Delta L \Delta r Q \rho_2 m A e^{\frac{-E}{R T_2(r+\Delta r, t)}} = \\ -2\pi(r+\Delta r) \Delta L \lambda \frac{\partial T_2(r+\Delta r, t)}{\partial r} + 2\pi r \Delta L \Delta r c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2(r+\Delta r, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $t$ 为时间,s; $r$ 为径向轴距,m; $\Delta r$ 为计算时选取的药剂薄层径向步长,m; $T_2(r, t)$ 为药剂温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $T_0$ 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $\lambda$ 为药剂的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; $Q$ 为单位质量药剂的反应热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; $\rho_2$ 为药剂密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; $c_2$ 为药剂比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; $A$ 为频率因子, $\text{s}^{-1}$ ; $E$ 为药剂的活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; $m$ 为药剂的有效含量,与温度和时间有关,并且不同位置处的数值不同, $m(r, 0) = 1$ ; $R$ 为普适气体常数,数值为 $8.3144 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

对于桥丝,当有电流 $i(t)$ 通过时,符合式(2)。

$$\begin{aligned} \pi r_1^2 \Delta L \rho_1 c_1 \frac{dT_1(t)}{dt} - 2\pi r_1 \Delta L \lambda \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \\ i^2(t) \frac{\Delta L}{\sigma \pi r_1^2} [1 + \alpha(T_1(t) - T_0)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $T_1(t)$ 为桥丝温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $r_1$ 为桥丝半径,m; $\alpha$ 为桥丝电阻的温度系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; $\rho_1$ 为桥丝密度; $c_1$ 是桥丝比热容; $\sigma$ 为桥丝电导率,S。

式(1)和式(2)可采用有限差分法进行离散化数值求解。式(1)的差分格式为:

$$\begin{aligned} T_2(i+1, j+1) = \frac{\lambda \Delta t}{c_2 \rho_2 \Delta r^2} [T_2(i+2, j) - 2T_2(i+1, j) + T_2(i, j)] + \\ \frac{\lambda \Delta t}{r \Delta r c_2 \rho_2} [T_2(i+2, j) - T_2(i+1, j)] + \frac{\Delta t m Q A}{c_2} e^{\frac{-E}{R T_2(i+1, j)}} + T_2(i+1, j) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\Delta t$ 为时间步长,s; $m$ 的表达式为:

$$m(i+1, j+1) = m(i+1, j) \cdot (1 - A\Delta t e^{\frac{-E}{R^*T_2(i+1, j)}}) \quad (4)$$

式中,  $i$  与径向轴距对应,  $j$  与时间对应, 二者均为仿真时的无量纲计数变量。

对于式(2), 其差分格式为:

$$\frac{dT_1(t)}{dt} = i^2(t) \frac{1 + \alpha [T_1(t) - T_0]}{\sigma \pi^2 r_1^4 \rho_1 c_1} + \frac{2\lambda}{r_1 \rho_1 c_1} \frac{T_2(r_1 + \Delta r, t) - T_2(r_1, t)}{\Delta r} = f(t, T_1(t)) \quad (5)$$

式(5)可由四阶龙格库塔法<sup>[26]</sup>求得。

桥药系统的初始和边界条件的差分表达式为:

$$\begin{cases} T_1(0) = T_0 \\ T_2(i = r_1/\Delta r, j) = T_1(j) \\ T_2(i = 20r_1/\Delta r, t) = T_0 \\ T_2(i, 0) = T_0 \end{cases} \quad (6)$$

根据古典显式差分形式的收敛性分析可知, 保证数值计算结果收敛的条件为<sup>[28]</sup>:

$$\frac{\lambda \Delta t}{\rho_2 c_2 (\Delta r)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (7)$$

根据式(3)~(6), 通过 MATLAB<sup>®</sup>编写程序对任意激励电流作用下灼热桥丝式电火工品桥丝和药剂温度进行数值求解, 其求解流程图见图 2。

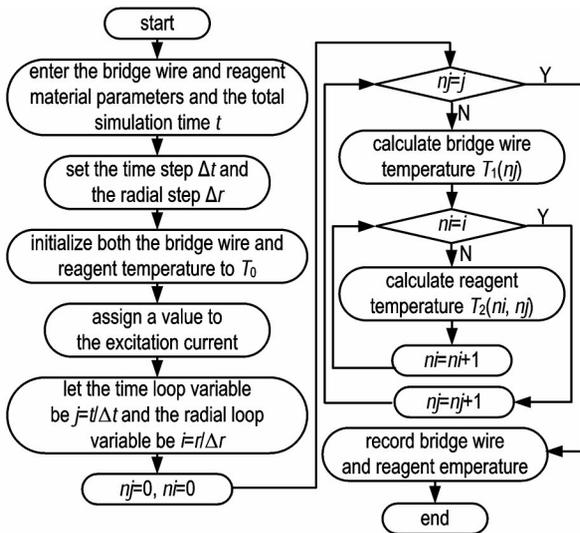


图 2 桥丝及药剂温度计算流程图

Fig.2 Flow chart for the temperature calculation of the bridge wire and reagent

## 2 发火判据

典型灼热桥丝式电火工品的桥丝材料为 6J20 合金。表 1 列出了仿真时灼热桥丝式电火工品的桥丝和药剂材料基本参数。

表 1 桥丝和药剂材料属性

Table 1 Material properties of the bridge wire 6J20 and reagent

properties	bridge wire 6J20 <sup>[29]</sup>	reagent <sup>[30]</sup>
$r_1 / \mu\text{m}$	5	-
$\lambda / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	-	0.88
$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	8300	1468
$c / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$	460	1023
$\sigma / \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$9.26 \times 10^5$	-
$\alpha / \text{°C}^{-1}$	$150 \times 10^{-6}$	-
$Q / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	-	$6.90 \times 10^6$
$E / \text{R}^* \text{K}^{-1}$	-	9600
$A / \text{s}^{-1}$	-	$1 \times 10^9$

Note:  $r_1$  is the radius of the bridge wire.  $\lambda$  is the thermal conductivity of the reagent.  $\rho$  is for density.  $c$  is for specific heat capacity.  $\sigma$  is the bridge wire conductivity.  $\alpha$  is the temperature coefficient of the bridge wire resistance.  $Q$  is the combustion heat per unit mass of the reagent.  $E$  is the activation energy of the reagent.  $R^*$  is the universal gas constant.  $A$  is the frequency factor.

前期研究<sup>[26]</sup>中定义药剂温度的径向分布曲线刚出现“鼓包”为灼热桥丝式电火工品的发火判据, 但并未对该发火判据进行深入研究。药剂温度的径向分布曲线刚出现“鼓包”, 表明药剂温度径向分布刚出现极大值, 即此时药剂温度对径向轴距的一阶导数大于零, 因此本研究先假定药剂温度对径向轴距的一阶导数大于零为发火判据, 通过数值仿真分析该发火判据的正确性和准确性。由于灼热桥丝式电火工品在稳恒临界发火电流激励下, 发火时间相对较长(一般在毫秒量级), 径向温度梯度相对较小, 取时间步长为 5 ns, 径向步长为 0.4  $\mu\text{m}$ , 该步长组合满足式(7)的收敛条件, 具体仿真步骤如下:

步骤 1: 设置起始激励电流为  $I$ ;

步骤 2: 将初始激励步长, 最大不发火电流 (maximum No Fire Current, MNFC) 和最小发火电流 (minimum All Fire Current, MAFC) 初始化为 0;

步骤 3: 确定激励电流幅值  $I = I + \Delta I$ , 更新下次激励步长  $\Delta I = I$ ;

步骤 4: 根据图 2 流程数值求解桥丝和药剂温度;

步骤 5: 根据假设的发火判据, 判断灼热桥丝式电火工品是否发火;

步骤 6: 若灼热桥丝式电火工品不发火, 更新 MNFC =  $I$ , 重复步骤 3~5, 直至灼热桥丝式电火工品发火;

步骤 7: 若灼热桥丝式电火工品发火, 更新 MAFC =  $I$ , 并判断 MAFC 和 MNFC 差值是否小于 0.1 mA;

步骤 8: 若 MAFC - MNFC > 0.1 mA, 则令激励电流

幅值  $I=(MAFC+MNFC)/2$ , 并重复步骤 4~7;

步骤 9: 若  $MAFC-MNFC \leq 0.1$  mA, 则令 MAFC 为临界发火电流。

经仿真得临界发火电流(MAFC)为 182.6 mA, 最大不发火电流为 182.5 mA, 与采用升降法程序测试的稳恒条件 50% 发火电流(189.3 mA)<sup>[31]</sup> 的误差为 3.54%, 表明了温升模型的正确性。为分析灼热桥丝式电火工品的发火判据, 需研究灼热桥丝式电火工品在发火和未发火时的药剂径向温度特征。图 3 描述了在 182.5 mA(未发火)和 182.6 mA(发火)激励下不同时刻的药剂径向温度分布特征。

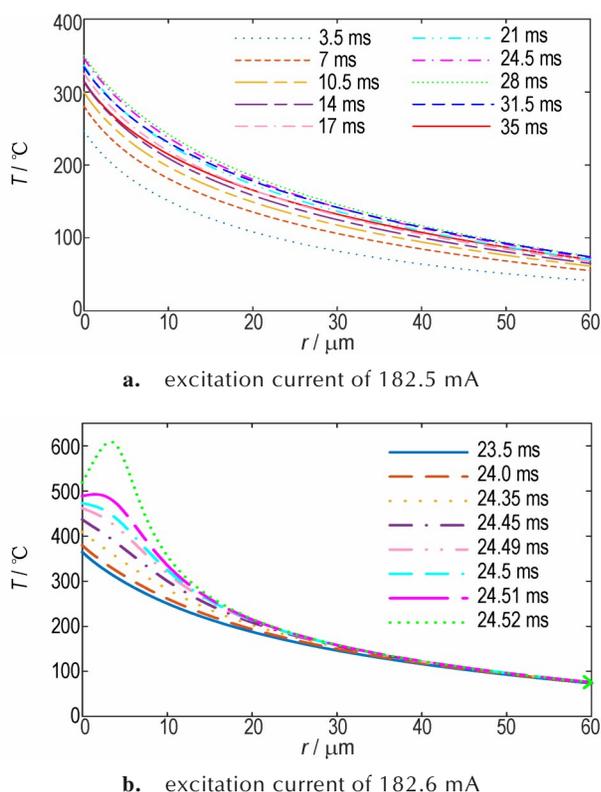


图 3 不同时刻药剂温度径向分布

Fig. 3 Radial distribution of reagent temperature at different moments

从图 3a 可以看出, 在灼热桥丝式电火工品未发火时, 任意时刻药剂温度随径向轴距单调递减; 从图 3b 可以看出, 当其发火时, 在通电时间小于 24.50 ms 时, 药剂温度随径向轴距单调递减, 24.51 ms 之后, 药剂温度随径向轴距曲线出现了明显的凸起, 药剂温度出现了极大值。对比图 3a 和图 3b 易知若灼热桥丝式电火工品未发火, 则其药剂温度随径向轴距单调递减, 只有其发火时, 药剂温度随径向轴距的一阶导数才会出现大于零, 药剂温度随径向轴距的一阶导数大于零与

灼热桥丝式电火工品发火一一对应, 即假设成立。据此定义灼热桥丝式电火工品的发火判据为: 药剂温度对径向轴距的一阶导数首次大于零的时刻为发火时刻  $t_e$ , 热点所在区域为  $r_e$ , 该时刻药剂温度为发火温度  $T_e$ , 即:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_e, t=t_e} > 0 \\ T_e = T_2(r_e, t_e) \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8), 得灼热桥丝式电火工品在临界发火电流(182.6 mA)激励下的发火时间为 24.506 ms, 发火温度为 481.52 °C, 发火点距桥药交界面一个步长。

为了验证发火判据的正确性, 设计仿真如下:

仿真一: 对灼热桥丝式电火工品施加 182.6 mA 稳恒激励, 并在发火时刻(24.506 ms)断开激励, 判断灼热桥丝式电火工品发火状态;

仿真二: 对灼热桥丝式电火工品施加 182.6 mA 稳恒激励, 找到使其发火的最小作用时间, 将该时间与由式(8)判断得出的发火时间(24.506 ms)作比较。

图 4 描述了仿真一中的激励电流以及距交界面一个径向步长处药剂温度曲线。

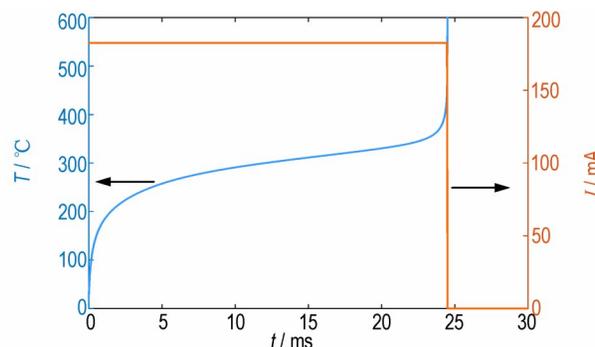


图 4 药剂温度及激励电流随时间的变化曲线

Fig. 4 Reagent temperature and excitation current versus time curves

由图 4 和式(8)的判断可知, 在 182.6 mA 的稳恒电流激励下, 若 24.506 ms 之后断开激励, 药剂温度仍满足发火判据, 即灼热桥丝式电火工品可发火; 根据仿真二可知, 在 182.6 mA 的稳恒电流激励下, 使灼热桥丝式电火工品发火的最小作用时间为 24.430 ms, 与 24.506 ms 的误差为 0.31%, 由此验证了发火判据的正确性和准确性, 根据发火判据可设计灼热桥丝式电火工品临界发火电流的仿真流程图见图 5。

据此仿真流程, 在 MATLAB® 中可快捷地对灼热桥丝式电火工品的临界发火电流进行自动化求解。

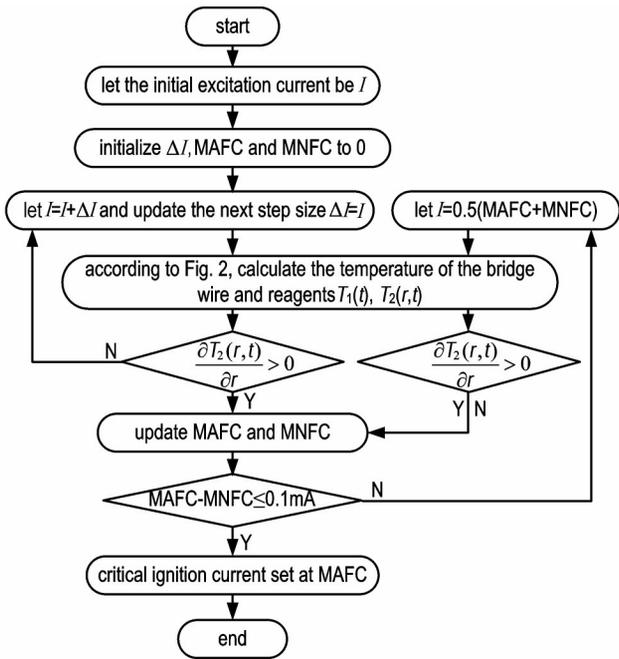


图5 临界发火电流仿真流程图

Fig. 5 Flow chart for the simulation of the critical ignition current

### 3 脉冲作用下发火规律

#### 3.1 单脉冲

根据灼热桥丝式电火工品在单脉冲电流作用下实际的发火需求,脉冲宽度范围可涵盖纳秒到毫秒级,为了探究脉冲宽度对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响,根据图5的仿真流程,得到40 ns到100 ms脉宽的单脉冲电流激励下,灼热桥丝式电火工品的临界发火电流见表2。需注意的是,当脉冲宽度较小时(脉冲宽度  $t_{on} < 10.0$  ms),灼热桥丝式电火工品发火迅速,药剂径向温度梯度较大,为减小误差,取时间步长为1 ns,径向步长为0.04  $\mu\text{m}$ ;而脉冲宽度较大时(脉冲宽度  $t_{on} \geq 10.0$  ms),其温度梯度较小,为减小内存和计算时间消耗,仿真步长与稳恒条件下保持一致。经验证,以上步长组合均满足式(7)的收敛条件。

从表2可以看出,当激励类型为脉冲电流时,临界发火电流随脉宽增大而单调减小,且在脉宽大于24.43 ms时,临界发火电流保持不变。图6为脉冲宽度与临界发火电流的数据点,由于脉宽和发火电流的变化范围较大,故采取对数坐标。

从图6中数据点可以看出,单脉冲激励下,在对数坐标中脉冲宽度与灼热桥丝式电火工品临界发火电流变化总体呈3个趋势,开始为线性变化,中间为非线性

表2 不同脉宽的单脉冲激励下临界发火电流的数值结果

Table 2 Numerical results of the critical ignition current under single pulse excitation with different pulse widths

$t_{on}/\text{ns}$	$I_i/\text{A}$	$t_{on}/\mu\text{s}$	$I_i/\text{A}$	$t_{on}/\text{ms}$	$I_i/\text{A}$
40	20.4689	1.00	4.1090	0.50	0.3103
100	13.0143	1.50	3.3587	1.00	0.2658
200	9.1827	2.00	2.9142	5.00	0.2030
300	7.4939	5.00	1.8610	10.0	0.1889
400	6.4812	7.00	1.5831	20.0	0.1831
500	5.8046	10.0	1.3368	24.43	0.1826
600	5.2996	30.0	0.8136	30.0	0.1826
700	4.9075	50.0	0.6574	40.0	0.1826
800	4.5916	100	0.5044	100.0	0.1826
900	4.3277	300	0.3548		

Note:  $I_i$  is the critical ignition current.  $t_{on}$  is the pulse width.

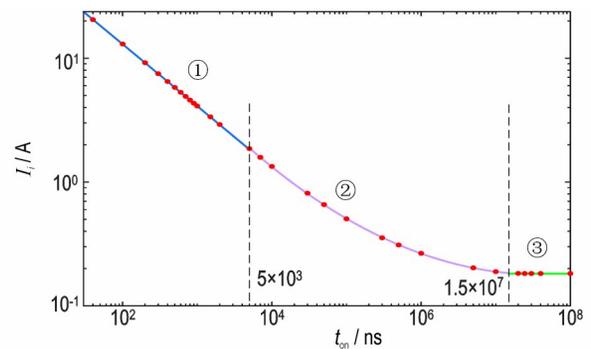


图6 临界发火电流与脉宽的数据点及拟合曲线

Fig. 6 Data points and fitted curve of critical ignition current versus pulse width

变化,最后保持恒定值。为确保拟合准确,采用分段函数进行拟合,为确定分段区间,首先对线性和恒定部分进行拟合,拟合时电流单位取安培(A),时间单位取纳秒(ns)。

根据拟合结果,在拟合优度为1时线性阶段的拟合函数为:

$$I_i = \frac{129.72}{\sqrt{t_{on}}} \quad (9)$$

恒定阶段的函数为:

$$I_i = 0.1826 \quad (10)$$

选取仿真数据与拟合曲线误差为1%作为依据,根据计算得线性阶段的分段点为  $t_{on} = 5 \mu\text{s}$ ,而恒定阶段的分段点为  $t_{on} = 15 \text{ms}$ 。

在  $5 \mu\text{s} < t_{on} \leq 15 \text{ms}$  区间对非线性阶段进行拟合,拟合优度为0.999时的拟合曲线为:

$$\lg(I_i) = 0.0677 \lg^2(t_{on}) - 1.027 \lg(t_{on}) + 3.147 \quad (11)$$

综上,单脉冲激励下,脉冲宽度与灼热桥丝式电火

工品临界发火电流的拟合关系式为:

$$I_i = \begin{cases} \frac{129.72}{\sqrt{t_{on}}} & t_{on} \leq 5\mu s \\ 0.0677 \lg^2(t_{on}) - 1.027 \lg(t_{on}) + 3.147 & 5\mu s < t_{on} \leq 15\text{ ms} \\ 0.1826 & t_{on} > 15\text{ ms} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12)可做出其拟合曲线见图6,根据图6和式(12)可进一步分析,在单脉冲电流激励下,当脉冲宽度很短时,临界发火电流较高,此时桥丝上的电功率较高,由于通电时间短且桥丝导热系数远高于药剂,故可忽略通电期间桥丝向药剂的传热,桥药系统可认为处于绝热状态;当脉冲宽度逐渐变大时,临界发火电流降低,桥丝的电功率也随之降低,灼热桥丝式电火工品的发火时间也会变长,桥药系统的绝热条件逐渐丧失;当脉冲脉宽大于一定程度时,灼热桥丝式电火工品的临界发火电流不再随脉宽的增大而降低,电火工品的发火与否取决于桥丝上的电功率。

综上所述结合仿真数据有以下结论:当脉冲宽度  $t_{on} \leq 5\mu s$  时,  $I_i^2 t_{on}$  为常数,即灼热桥丝式电火工品的临界发火能量是固定的,表明此时桥药系统可看作绝热状态,发火状态取决于桥丝上的能量;而当脉冲宽度  $t_{on} > 15\text{ ms}$ ,  $I_i = 0.1826\text{ A}$  为定值,即桥丝上的电功率固定,表明此时灼热桥丝式电火工品的发火状态与桥丝的电功率有关。

### 3.2 脉冲串

在脉冲串电流激励下,为了探究重复周期  $T_r$  对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响,根据图5的仿真流程,可获得不同重复频率的脉冲串作用下的临界发火电流。由于高功率微波的脉冲宽度一般在微秒级以下,重复周期一般不小于  $1\text{ ms}$  (重复频率小于  $1\text{ kHz}$ ),故选取重复周期范围  $0.01 \sim 5\text{ ms}$ ,典型脉冲宽度为  $40, 400\text{ ns}$  和  $900\text{ ns}$ ,取时间步长为  $1\text{ ns}$ ,径向步长为  $0.04\mu\text{m}$ ,表3为仿真结果。

图7为脉冲宽度为  $400\text{ ns}$ ,重复周期为  $5\text{ ms}$  和  $0.1\text{ ms}$  的脉冲串电流激励下药剂温度随时间的变化曲线,由于药剂温度范围较大,故纵轴取对数坐标。

从图7可以看出,当重复周期为  $5\text{ ms}$  时,在临界发火电流激励下,灼热桥丝式电火工品在第一个重复周期内发火,若激励电流小于临界值,则其不会发火,即桥药系统无热累积效应;而当重复周期为  $0.1\text{ ms}$  时,在临界发火电流激励下,灼热桥丝式电火工品在第289个重复周期时发火,表明此时桥药系统具有热累积效应,因此其临界发火电流相比单脉冲作用下要

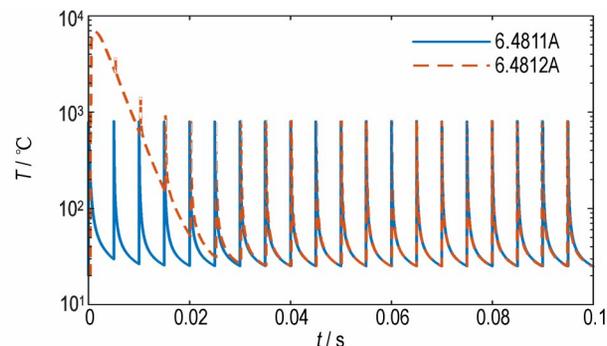
小。课题组<sup>[7]</sup>前期采用INS4040噪声发生器对灼热桥丝式电火工品在脉冲激励下的临界发火电压进行了试验测试,结果表明在重复频率为  $12.5\text{ Hz}$ ,脉宽为  $50\text{ ns}$  的脉冲激励下,其  $50\%$  发火电压为  $1250\text{ V}$ ,根据

表3 不同重复周期脉冲串激励下临界发火电流的数值结果

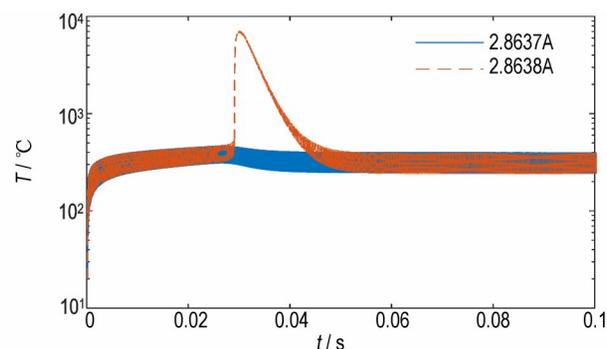
Table 3 Numerical results of the critical ignition current under pulse train excitation with different repetition periods

$T_r / \text{ms}$	$I_i / \text{A}$		
	40 ns	400 ns	900 ns
5	20.4689	6.4812	4.3277
2	20.4689	6.4812	4.3277
1.6	20.4689	6.4812	4.3277
1.5	20.4689	6.4812	4.3277
1.4	20.4689	6.4812	4.3277
1.25	20.3152	6.4230	4.2902
1	19.8653	6.3747	4.2496
0.8	19.6806	6.2643	4.1803
0.5	18.0041	5.7795	3.8484
0.3	15.0632	4.7732	3.1790
0.1	8.9945	2.8638	1.9076
0.01	2.8800	0.9111	0.6069

Note:  $T_r$  is the repetition period of the pulse train,  $I_i$  is the critical ignition current.



a.  $T_r = 5\text{ ms}$



b.  $T_r = 0.1\text{ ms}$

图7 不同重复频率脉冲串激励下药剂温度随时间变化曲线

Fig.7 Reagent temperature over time under pulse train excitation with different repetition periods

INS4040的仪器手册可知其输出电阻为 50 Ω,而灼热桥丝式电火工品的产品手册标注其桥丝电阻为 10~15 Ω,经过换算可得其 50% 发火电流为 19.2308~20.8333 A,与仿真得到的临界发火电流(18.4947 A)误差最小仅为 3.83%,进一步表明了本研究构建温升模型的正确性。为更深入地研究重复周期对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响,图 8 中描绘了重复周期和临界发火电流的数据点。

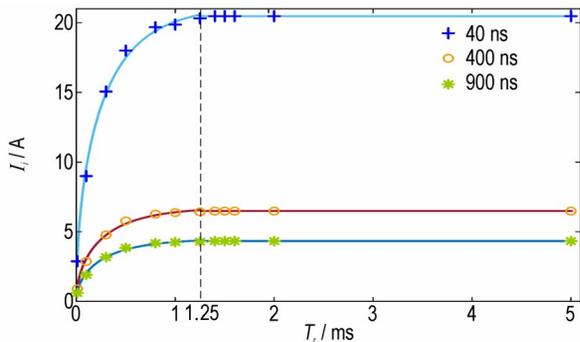


图 8 临界发火电流与重复周期的数据点及拟合曲线

Fig.8 Data points and fitted curves for critical ignition current vs. repetition period

从图 8 的数据点可以看出,脉宽不变时,随着重复周期增大,灼热桥丝式电火工品的临界发火电流也增大,当重复周期大于一定值时,临界发火电流不再随重复周期变化,而是与相同脉宽的单脉冲电流作用下一致。此外可以发现在窄脉冲(脉冲宽度小于 5 μs 且远远小于重复周期)激励下,临界发火电流随重复周期的变化曲线特征与脉宽基本无关,这是因为窄脉冲激励下桥药系统处于绝热状态,而当重复周期远远大于脉宽时,不同脉宽对于桥药系统热累积效应的影响差异可以忽略,热累积效应仅由重复周期决定,因此为保证拟合的准确性和物理意义,采取分段拟合的同时还应保证不同脉宽的拟合曲线仅在幅值上有差异,拟合时电流单位取安培(A),时间单位取毫秒(ms)。首先确定脉宽为 40,400 ns 和 900 ns 时恒定区域的表达式分别为:

$$I_i = 20.4689 \tag{13}$$

$$I_i = 6.4812 \tag{14}$$

$$I_i = 4.3277 \tag{15}$$

以计算值和拟合值误差为 1% 为分段依据,得三者的分段点均为  $T_r=1.25$  ms。然后对指数区域分别进行拟合。当  $T_r=40$  ns,在拟合优度为 0.997 时拟合曲线的表达式为:

$$I_i = 21.18 \sqrt{1 - \exp^{-\frac{T_r}{0.4365}}} \tag{16}$$

脉宽为 400 ns 时,在拟合优度为 0.996 时拟合曲线的表达式为:

$$I_i = 6.749 \sqrt{1 - \exp^{-\frac{T_r}{0.4365}}} \tag{17}$$

脉宽为 900 ns 时,在拟合优度为 0.996 时拟合曲线的表达式为

$$I_i = 4.501 \sqrt{1 - \exp^{-\frac{T_r}{0.4365}}} \tag{18}$$

从图 8 可以看出,当重复周期  $T_r > 1.25$  ms 时,临界发火电流在 1% 的相对误差内均为定值,这表明此时灼热桥丝式电火工品临界发火电流与重复周期无关,此时桥药系统没有热累积效应,其临界发火电流与单脉冲激励下一致;而当重复周期  $T_r \leq 1.25$  ms 时,桥丝和药剂出现热累积效应,临界发火电流随重复周期降低而迅速衰减,三者的拟合曲线见图 8。

#### 4 结论

(1)研究了单脉冲电流激励下脉冲宽度对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响规律。结果表明当脉宽小于 5 μs 时,桥药系统处于绝热状态,灼热桥丝式电火工品发火状态取决于能量;当脉宽大于 15 ms 时,临界发火电流不变,灼热桥丝式电火工品的发火状态取决于桥丝的电功率。

(2)揭示了脉冲串电流激励下重复周期对灼热桥丝式电火工品临界发火电流的影响规律。研究表明在窄脉冲串激励下,灼热桥丝式电火工品临界发火电流随重复周期的变化曲线特征与脉宽基本无关。当脉冲串的重复周期大于 1.25 ms 时,桥药系统无热累积效应,其临界发火电流与单脉冲激励一致,与重复频率基本无关;当重复周期小于 1.25 ms 时,桥药系统出现热累积效应,其临界发火电流随重复周期减小而迅速衰减。

(3)由于高功率微波的典型脉冲宽度小于 1 μs,重复频率大于 1 ms,故根据研究结果可知在高功率微波照射下,典型灼热桥丝式电火工品的桥药系统处于绝热状态且无热累积效应,即典型灼热桥丝式电火工品在高功率微波辐射下的发火感度与重复频率无关。下一步将搭建试验平台,通过感度试验对本研究结论进行进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 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): 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] LV Z, YAN N, BAO B. Pin-pin ESD protection for electro-explosive device under severe human body ESD [J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 75: 37-42.
- [4] SHI L, YANG A, ZHANG Y, 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] 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: 560-563.  
DONG Hai-ping, CAI Rui-jiao, MU Hui-na, et al. Firing reliability design of hot bridge-wire electro-explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16: 560-563.
- [6] COOPER E F. Electro-explosive devices [J]. *IEEE Potentials*, 2000, 19(4): 19-22.
- [7] WANG B, SUN Y, WEI G, et al. Research on test method of ignition temperature of electric explosive device under electromagnetic pulse [J]. *Radioengineering*, 2021, 30(3): 510-516.
- [8] LU X, Wei G, SUN Y, et al. Temperature rise test method of hot bridgewire EED under steady conditions [C]//2019 IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC), 2019: 1-4.
- [9] 赵团, 张蕊, 姚洪志, 等. 射频电磁环境中火箭弹安全性评估 [J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 299-304.  
ZHAO Tuan, ZHANG Rui, YAO Hong-zhi, et al. Estimation on the safety of rocket projectile in RF electromagnetic environment [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(S2): 299-304.
- [10] 白瑞祥, 严楠. 静电放电对电火工品桥丝影响的实验研究 [J]. 火工品, 2012(3): 9-12.  
BAI Rui-xiang, YAN Nan. Experimental study on the effect of ESD on EED bridgewire [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(3): 9-12.
- [11] WANG R, TANG E, YANG G, et al. Experimental simulation of self-powered overload igniter based on Lead Zirconate Titanate [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314: 112222.
- [12] 白颖伟, 李慧, 陈震, 等. 碳化硅导电胶对电火工品性能的影响 [J]. 含能材料, 2018, 26(5): 426-431.  
BAI Ying-wei, LI Hui, CHEN Zhen, et al. Effect of silicon carbide conductive adhesive on the performance of electric-explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(5): 426-431.
- [13] 周煜韬, 庄劲武, 武瑾, 等. 高速开断器用桥丝式电火工品引燃特性分析 [J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(4): 50-55.  
ZHOU Yu-tao, ZHUANG Jin-wu, Wu Jin, et al. Analysis of ignition characteristics of bridge-wire electric explosive device for high speed interrupter [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2021, 33(4): 50-55.
- [14] 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 Jun, LI Yong, ZHOU Bin, et al. Research progress and prospect of electromagnetic compatibility of electro-explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(11): 954-963.
- [15] 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 Hong-yuan, YAN Nan, CHEN Shu-xiao, et al. Electrostatic hazard prediction of bridge wire electro explosive device based on the circuit simulation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(7): 682-687.
- [16] XU Q, YANG Z, ZHANG Q, et al. Simulation and characterization of a thin film Au/Ni micro hot bridge-wire ignition element under capacitor discharging [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 102: 100-110.
- [17] 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 Hong-zhi, ZHAO Tuan, Ji Xiang-fei, et al. Electromagnetic compatibility time domain response characteristics of EEDs [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(2): 25-28.
- [18] FARIA P C D C, IHA K, ROCCO J A F F. An analysis of the initiation process of electro-explosive devices [J]. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2012, 4: 45-50.
- [19] Rosenthal L A. Thermal response of bridgewires used in electroexplosive devices [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1961, 32(9): 1033-1036.
- [20] PANTOJA J, PENA N, MORA N, et al. On the electromagnetic susceptibility of hot wire-based electroexplosive devices to RF sources [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(4): 754-763.
- [21] LI J, ZHOU Z, HU P, 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), 2019: 736-741.
- [22] 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.
- [23] 白颖伟, 任炜, 刘举鹏, 等. 电热火工品感应电流与连续电磁波频率的关系 [J]. 含能材料, 2014, 22(4): 521-524.  
BAI Ying-wei, REN Wei, LIU Ju-peng, et al. Relationship between continuous electromagnetic wave frequency and EED induced current [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(4): 521-524.
- [24] 陈瑞民. 电火工品防静电研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
CHEN Rui-min. Antistatic study of electro explosive device [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [25] YAN N, LIANG Z, LV Z. Simulation and experiment on pin-to-pin electrostatic discharge firing of bridgewire EED [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(1): 110-116.
- [26] 徐义根, 魏光辉, 刘尚合. 灼热桥丝式电火工品静电发火数理模型 [J]. 四川兵工学报, 1998(1): 1-5.  
XU Yi-gen, WEI Guang-hui, LIU Shang-he. Hot bridge wire EED electrostatic ignition mathematical model [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 1998(1): 1-5.
- [27] YE J, LI G, ZHAO L. Quantitative evaluation for radio-frequency effects of electro-explosive device [C]//2015

- IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015: 417-421.
- [28] 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.
- LV Zhi-xing. Simulation Study on the harm characteristics and protection design of EED under extreme ESD environment[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [29] 国防科学技术工业委员会. GJB 1667-93: 火工品用精密电阻合金规范[S]. 北京: 军用标准出版社, 1993.
- Commission for Science, Technology and Industry for National Defense of China. GJB 1667-93: Specification for precision electrical resistance alloy of initiating explosive device[S]. Beijing: Military Standard Publishing Department, 1993.
- [30] 谭伟, 高本庆, 刘波. 桥丝式电火工品静电发火过程的数值模拟[J]. 火工品, 2003(3): 1-5.
- TAN Wei, GAO Ben-qing, LIU Bo. Numerical simulation of electrostatic firing sequence of bridgewire EED[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2003(3): 1-5.
- [31] WANG B, SUN Y, WANG X, et al. Equivalent test method for strong electromagnetic field radiation effect of EED[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 2021: 7331428.

## Analysis on Ignition Law of Hot Bridge Wire Electro Explosive Device Under Pulse Current Excitation

LYU Xu-xu, WEI Guang-hui, DU Xue, LU Xin-fu, SUN Jiang-ning

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effects, Army Engineering University of PLA Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** To study the safety of pulse excitation of hot bridge wire EED, we established a numerical model for the temperature rise of the hot bridge wire EED, and the ignition criterion of hot bridge wire EED was obtained. Based on the above, we designed the calculation procedure for the critical ignition current of the hot bridge wire EED and revealed the influence of single pulse and pulse train current excitation parameters on the critical ignition current of hot bridge wire EED. The results showed that under single pulse excitation and when the pulse width was less than 5  $\mu\text{s}$ , the ignition energy of the hot bridge wire EED was fixed, which suggested that the bridge wire-reagent system was in an adiabatic state. So the ignition state was related to the energy input to the bridge wire. However, when the pulse width was greater than 15  $\mu\text{s}$ , the critical ignition current of the hot bridge wire EED was fixed. So the ignition state was related to the electric power of the bridge wire. Another difference was that under narrow pulse train current excitation, the time constant of the curve for critical ignition current with repetition period was independent of the pulse width. Furthermore, when the repetition period was greater than 1.25 ms, the bridge wire-reagent system exhibited no thermal accumulation effect, and the critical ignition current was the same as the single pulse current excitation. However, when the repetition period was lower than 1.25 ms, the bridge wire-reagent system exhibited the thermal accumulation effect, which resulted in rapid decrease of the critical ignition current as the repetition period decreased.

**Key words:** hot bridge wire; electro explosive device; numerical model; pulse excitation; thermal accumulation effect

**CLC number:** TJ5; TJ450.1

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022280

(责编:王馨逸)