

文章编号:1006-9941(2024)12-1334-09

## 直流激励下桥丝型电火工品电弧发火预测模型

张博渊<sup>1,2</sup>,梁涛<sup>1,2</sup>,薛婉婷<sup>1,2</sup>,王哲<sup>1,2</sup>,穆亚茹<sup>1,2</sup>,谢彦召<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为了研究桥丝型电火工品在直流激励下的电弧发火特性,预测其电弧发火安全阈值,采用模拟电荷法计算了脚-壳二维切面电场强度,利用电击穿理论计算了脚-壳电击穿系数,提出了桥丝型电火工品电弧发火的量化判据并建立模型。结果表明,环境温度在25°左右,气压为大气压强时,桥丝型电火工品脚-壳之间距离对其电弧发火阈值影响较大,脚-壳距离越短,电弧发火阈值越低。桥丝型电火工品脚-壳间电击穿电压预测模型计算结果与实测值相对误差不超过3.3%,且利用COMSOL仿真计算所得电击穿系数与预测模型计算结果相对误差约1%。

**关键词:** 桥丝型电火工品;模拟电荷法;预测模型;电弧发火;缩比实验;脚-壳距离

**中图分类号:** TJ5;TJ45

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2024163

### 0 引言

电火工品(EED, Electro-Explosive Device)是依靠电能起爆的一次性火工装置<sup>[1]</sup>,其利用恒定或脉冲电流通过换能元发热来激发火工药剂<sup>[2]</sup>,在资源开采、定向爆破、车辆点火、材料切割等民爆作业中应用十分广泛。电火工品按照作用机理方式不同被分为桥丝式、火花式、薄膜式等多种类型,其中桥丝型电火工品是应用最广泛的一种,桥丝型电火工品一般由外壳、桥丝、起爆药和引线等结构组成,在直流激励作用下,可能存在两类发火机制<sup>[3]</sup>:一是温升发火,即桥丝型电火工品脚线间流过大电流,加热终端桥丝,桥丝局部温度大于药剂爆炸点,引起电火工品发火,温升发火是桥丝型电火工品最常见的发火方式,通常是低电压大电流作用所致。二是电弧发火,即桥丝型电火工品的脚-壳间受高电压作用,使得脚-壳间发生空气间隙击穿,脚-壳电击穿引起的电弧引燃药剂,属于非正常发火,

可导致严重的安全事故,在电火工品存储、运输、安装过程中应尽量避免<sup>[4]</sup>。然而,当前关于电火工品电弧发火的理论和实验研究都比较少,M Wilson等<sup>[5]</sup>利用有限元分析软件Ansoft分析了火工品特定结构在空间上的电场分布,并根据空气的击穿场强估算该结构中的击穿电压,但与实测击穿电压差别较大。于鸿源等<sup>[6]</sup>利用Ansoft研究了脚-壳电场强度分布,分析了多种药剂填装下的情况,给出了不同药剂切面的电场分布。吕智星等<sup>[7]</sup>研究了静电环境下电火工品脚-壳静电危害,对电火工品脚-壳建模仿真分析,通过实验得出药剂种类对脚-壳静电击穿电压影响较小,说明脚-壳击穿由空气击穿机制主导,为脚-壳静电防护提供了理论指导。

可见,尽管前人开展过电火工品电击穿的建模研究<sup>[8-10]</sup>,但尚未提出涵盖电流加载-电场分布-击穿判定全物理过程的定量化火工品电弧发火预测模型,无法支撑火工品的安全阈值设计,防范电弧击穿误爆事故的发生。由此,本课题组研究了直流激励下桥丝型电火工品电弧发火预测模型,基于电击穿计算模型,提出了直流激励下电火工品的电弧发火预测模型,分析验证了模型的准确性,为判定直流加载下发火方式、对比不同火工品结构设计下的电弧发火条件提供了分析工具,以期能为瞬态电磁环境下电火工品防护研究<sup>[10]</sup>等提供帮助。

收稿日期:2024-06-20;修回日期:2024-07-19

网络出版日期:2024-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52207015)

作者简介:张博渊(1999-),男,硕士生,主要从事火工品电磁安全评估研究。e-mail: Zbyuan@stu.xjtu.edu.cn

通信联系人:梁涛(1991-),男,副教授,主要从事电磁环境与电磁安全领域研究。e-mail: tao.liang@xjtu.edu.cn

引用本文: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 Bo-yuan, LIANG Tao, XUE Wan-ting, et al. A Prediction Model of Arc Ignition for Bridge Wire Electro Explosive Device Under Direct Current Excitation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(12):1334-1342.

### 1 电弧发火理论

直流激励下,电火工品的脚-脚-壳结构之间会形成电场,当脚-壳间电场强度大于脚-壳间介质本身所能承受的静态击穿强度时,会引发电弧发火。对于电火工品而言,其脚-壳结构模型构成了不均匀电场,而在不均匀电场下,电击穿过程及理论分析都更为复杂,为此,本研究借鉴电击穿计算理论<sup>[11]</sup>,建立了桥丝型电火工品的内部电击穿判据。由实际桥丝型电火工品结构(图1)可知,电极塞、药剂、结合界面均有可能是闪络发生点,文献[7]研究表明电火工品在装药时,由于制造和装配的复杂性,壳体内往往不可避免地会混入少量的空气,这时空气成为了一种重要的电介质,当局部的电场强度增加到一定程度,超过了该间隙内空气的击穿场强时,空气间隙将发生电击穿现象,空气间隙转变成为导体,残余通道承受了全部电场场强,逐步形成崩溃式电击穿,产生电弧并引爆火药,因此,气体击穿主导了电火工品中电弧发火的产生机制,是决定是否发生电弧发火的关键,可借鉴流注击穿理论构建电火工品的电弧击穿判据<sup>[12]</sup>。

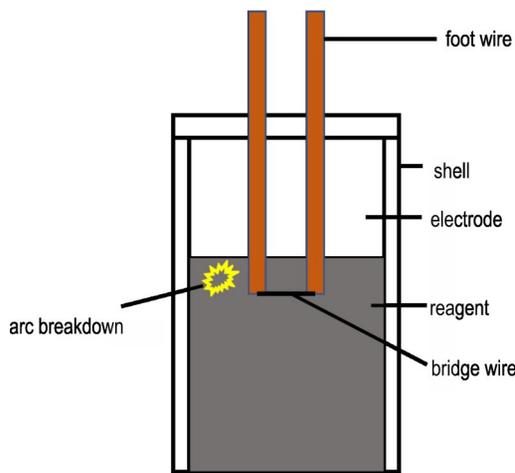


图1 桥丝型电火工品结构模型  
Fig.1 Structure model for bridge wire electro explosive device

在电击穿理论中,为了分析气体放电过程中的电子碰撞电离过程,引入了电子电离系数 $\alpha$ ,它代表单个电子沿着电场方向行经1 cm长度发生碰撞电离的平均次数。

$$\alpha = Ape^{-\frac{Bp}{E}} \quad (1)$$

式中, $E$ 是电场强度, $V \cdot m^{-1}$ ;  $p$ 是当前环境下的气压, Pa;  $A$ 为比例系数,  $(133 Pa \cdot cm)^{-1}$ ;  $B=AV_i$ ,  $V_i$ 为气体分

子的电离电位,  $V$ 。同时,二次发射系数 $\gamma$ 定义为折算到每个碰撞阴极表面的正离子,阴极金属平均释放出的自由电子数。可见,在均匀场中电子电离系数 $\alpha$ 不随空间位置变化而变化,而在不均匀场中,需同时考虑 $\alpha$ 过程和 $\gamma$ 过程引起的电流影响<sup>[13]</sup>,则气体自持放电的击穿条件为:

$$\gamma(e^{\int_0^d \alpha ds} - 1) = 1 \quad (2)$$

式中, $s$ 为不均匀场作用下电子的轨迹长度, cm;  $d$ 是电击穿距离, cm。

研究表明当电子崩头部电荷达到一定数量时,间隙中会出现流注放电,流注放电的判定条件如下:

$$\int_0^d \alpha ds > k \quad (3)$$

式中, $k$ 为流注放电判据系数,  $k=17.7+\ln d$ ,此时会引发流注击穿,电火工品脚-壳间隙出现电击穿,若此时电火工品内部装有火药,便会引起电弧发火,造成电火工品爆炸。

综上所述,得到当前环境下桥丝型电火工品脚-壳间电子电离系数 $\alpha$ 后,对其进行路径积分可得到电击穿系数,将其与 $k$ 做比较,可判定桥丝型电火工品脚-壳之间是否发生电击穿。

### 2 基于模拟电荷法计算 EED 电场分布 (E)

#### 2.1 模拟电荷法计算 EED 内电场分布

EED脚-壳间的电场分布是判定电击穿的关键,考虑到EED结构的复杂性,采用数值方法求解EED内任意位置的电场强度,主要有模拟电荷法、边界元法、矩量法等,其中模拟电荷法在电磁场计算中因其求解方便、结果准确等显著优点占据了重要地位,为此,采用模拟电荷法对EED中电场分布进行数值分析。模拟电荷法基于静电场的唯一性定理<sup>[14]</sup>,在求解场域外,用一组虚设的离散分布的模拟电荷等效替代电极表面连续分布的电荷,并应用这些模拟电荷的电位或电场强度的解析计算公式计算电场。根据叠加原理和静电场中计算电位的解析公式,求电位系数矩阵 $P$ ,建立模拟电荷与匹配,点电位的线性代数方程组为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} P_{11}Q_1 + P_{12}Q_2 + \dots + P_{1n}Q_n = \varphi_1 \\ P_{21}Q_1 + P_{22}Q_2 + \dots + P_{2n}Q_n = \varphi_2 \\ \vdots \\ P_{m1}Q_1 + P_{m2}Q_2 + \dots + P_{mn}Q_n = \varphi_n \end{cases} \quad (4)$$

式中, $Q_y$ 为设置的第 $y$ 个模拟电荷; $P_{xy}$ 为匹配点位置 $x$

上模拟电荷  $Q_n$  的电位系数<sup>[16]</sup>, 电位系数只与两点之间的位置和介电常数有关, 与电荷量无关;  $\varphi_n$  为第  $n$  个电荷的电位。矩阵形式为:

$$[P][Q] = [\varphi] \quad (5)$$

通过设置与模拟点数量相同的匹配点, 可构建满秩的线性方程组, 从而求解模拟电荷, 进而获得电场分布。

基于模拟电荷法的 EED 电场分布计算遵循以下步骤<sup>[17]</sup>。EED 击穿发火主要通过电弧引燃药剂产生, 因此选取药剂包裹引脚的二维切面为分析对象(图 2), 在图 3 模拟电荷法计算域中,  $R$  为内筒半径,  $r$  为引脚半径, 令圆 C3 的电势为 0, C1, C2 的电势为  $U$ 。其中 C1, C2 对应于引脚的切面, C3 对应于火工品内筒中火药的切面。

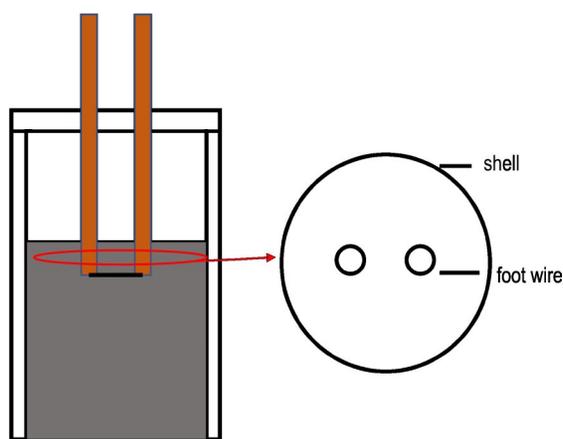


图 2 桥丝型电火工品脚-壳二维切面

Fig. 2 Two-dimensional foot-shell section for bridge wire electro explosive device

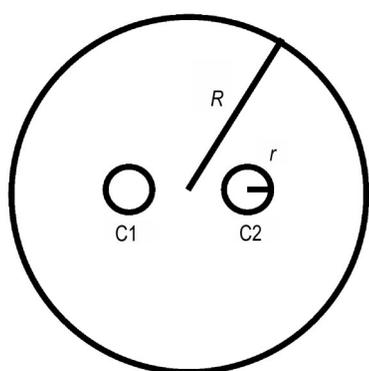


图 3 模拟电荷法计算域

Fig. 3 Computational domain of the charge simulation method

具体流程图如图 4 所示:

1) 选定圆 C2 模拟电荷的类型、位置和数量, 其中 C1、C2 模拟电荷选取方式一样。选取模拟电荷类型为线电荷, 其横纵坐标按照公式(6)进行选取:

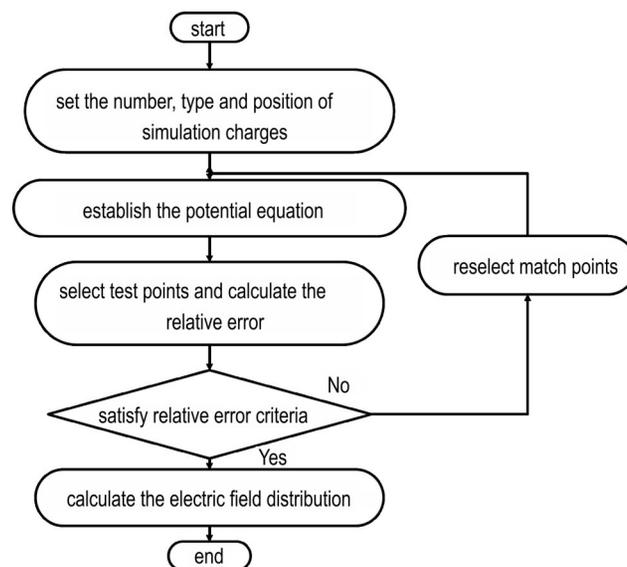


图 4 模拟电荷法求解流程图

Fig. 4 Solution flowchart for the charge simulation method

$$x_1(k) = \sum_{k=1}^N D + r_1 \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \quad (6)$$

$$y_1(k) = \sum_{k=1}^N r_1 \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right)$$

其中,  $r_1$  为模拟电荷距 C2 圆心的距离, 取  $r_1 = 0.8r$ ,  $N$  为模拟电荷的数量,  $D$  为 C3 圆心与 C2 圆心的距离。图 5 为圆 C2 模拟电荷示意图

2) 为使得圆 C3 的电势为 0, 需考虑圆 C2 模拟电荷对圆 C3 的镜像电荷, 其横纵坐标按照公式(7)进行:

$$x_2(k) = \sum_{k=1}^N \frac{R^2 x_1(k)}{(x_1(k))^2 + y_1(k)^2} \quad (7)$$

$$y_2(k) = \sum_{k=1}^N \frac{R^2 y_1(k)}{(x_1(k))^2 + y_1(k)^2}$$

3) 选取 C2 匹配点, 其数量与模拟点一致, 其横纵

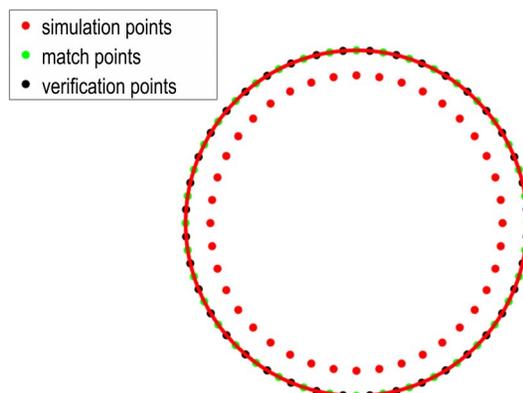


图 5 圆 C2 模拟电荷示意图

Fig. 5 Illustration of simulated charges on circle C2

坐标按照公式(8)进行:

$$x_3(k) = \sum_{k=1}^N D + r \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right)$$

$$y_3(k) = \sum_{k=1}^N r \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right)$$
(8)

结合叠加定理以及式(8)选取的匹配点建立式(4)电位矩阵方程,根据方程求解出所选取的N个模拟电荷值。

4)选择圆C2若干个电位已知的点作为检验点,其横纵坐标按照公式(9)进行:

$$x_4(k) = \sum_{k=1}^N D + r \cos\left(\frac{2k\pi}{N} + \frac{\pi}{N}\right)$$

$$y_4(k) = \sum_{k=1}^N r \sin\left(\frac{2k\pi}{N} + \frac{\pi}{N}\right)$$
(9)

核对上述的计算结果是否在允许的误差范围内,若不满足则需重新选择模拟电荷和匹配点,重复以上步骤,直至满足求解精度要求为止。

5)计算目标场域位置中任意一点的电场强度

求任意一点 $k(x, y)$ 的电场强度,设圆C2模拟电荷坐标为 $M_1(x_1(k), y_1(k))$ ,圆C1模拟电荷坐标为 $M_2(-x_1(k), y_1(k))$ , $M_1$ 关于圆C3的镜像电荷坐标为 $Q_1(X_1(k), Y_1(k))$ , $M_2$ 关于圆C3的镜像电荷坐标为 $Q_2(-X_1(k), Y_1(k))$ ,据叠加定理,待求点的电场强度 $x$ 和 $y$ 分量分别为<sup>[18]</sup>:

$$E_x = \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \left( \frac{x-x_1(k)}{R_1^2} + \frac{x+x_1(k)}{R_2^2} - \frac{x-X_1(k)}{R_3^2} - \frac{x+X_1(k)}{R_4^2} \right)$$

$$E_y = \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \left( \frac{y-y_1(k)}{R_1^2} + \frac{y+y_1(k)}{R_2^2} - \frac{y-Y_1(k)}{R_3^2} - \frac{y+Y_1(k)}{R_4^2} \right)$$
(10)

则EED二维切面内任意位置的电场强度 $E$ 为:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$
(11)

式中, $R_1, R_2, R_3, R_4$ 分别是待求点到 $M_1, M_2, Q_1, Q_2$ 的距离。

### 2.2 模拟电荷法计算结果验证

模拟电荷法计算得到电场强度分布结果如图6,为了验证模拟电荷法求解的准确性,采用COMSOL进行电场强度仿真求解<sup>[19]</sup>,并将典型位置电场结果(图7)进行对比。

脚-壳间电场强度分布决定电击穿计算的准确性,因此,选取脚-壳电击穿路径的起点(引线处)、终点(内壳处)、以及路径中点进行结果对比,如表1所示。

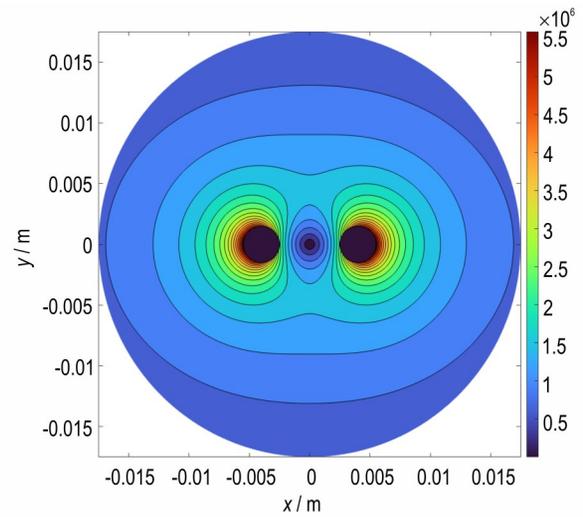


图6 模拟电荷法电场结果

Fig.6 Electric field results from simulated charge method

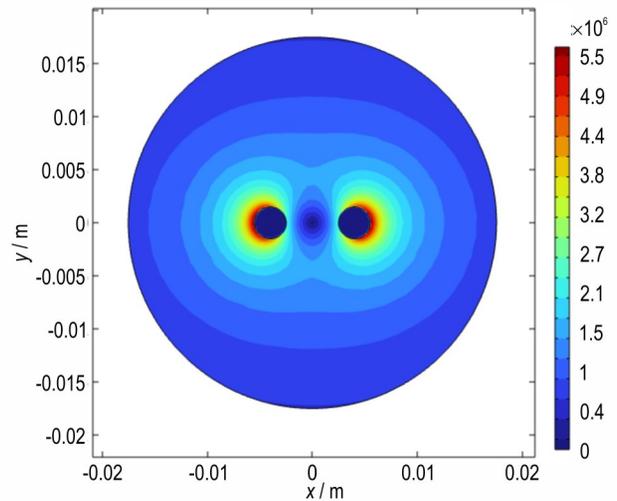


图7 COMSOL电场结果

Fig.7 Electric field result by COMSOL modeling

表1 电场强度对比结果

Table 1 Comparison of the electric field strength

position	charge simulation method / $V \cdot m^{-1}$	COMSOL / $V \cdot m^{-1}$	relative error
starting point	$5.55 \times 10^6$	$5.52 \times 10^6$	0.5%
endpoint	$8.83 \times 10^5$	$8.87 \times 10^5$	0.4%
midpoint	$1.39 \times 10^6$	$1.38 \times 10^6$	0.7%

在选择的三个典型位置中,模拟电荷法与COMSOL仿真得到的电场结果误差为0.7%,低于文献值(0.87%)<sup>[15]</sup>,因此验证了模拟电荷法计算电场强度的准确性。

### 3 基于耐压试验的电击穿参数A和B

由于A、B值是实验实测值,受实验室环境、空气

密度、产品材料、尺寸等各方面影响,因此需要设计缩比实验进行参数修正。由文献[7]可知,同一脚-壳材料下电火工品脚-壳电击穿特性与脚-壳之间的距离关系密切,与桥丝无关,药剂种类对脚-壳电击穿的影响较小,因此在实验中,电火工品无桥丝与药剂,电击穿实验温度 25 °C 左右,在大气压条件下进行。

### 3.1 EED 结构电击穿缩比实验

图 8 为缩比火工品加工尺寸图,图 9 为缩比火工品实物图,本研究采用的缩比尺寸为 1:10。

利用正极性高压直流发生装置进行电火工品电击穿实验,直流发生装置输入端接电火工品引脚,电火工品外壳接地,连接好实验装置,对电火工品引线进行加压,观察到电火工品脚-壳间出现电火花如图 10 所示,记录一次实验数据,同一脚-壳距离情况下记录 4~5 次数据后求平均值得到最终的电击穿电压结果,本研究采用 4 种不同脚-壳距离的桥丝型电火工品,实验结果如图 11 所示。

电火工品脚-壳距离越小,电击穿电压越低,达到预期,利用求得的电击穿电压值便可进行下一步 A、B 的求解。

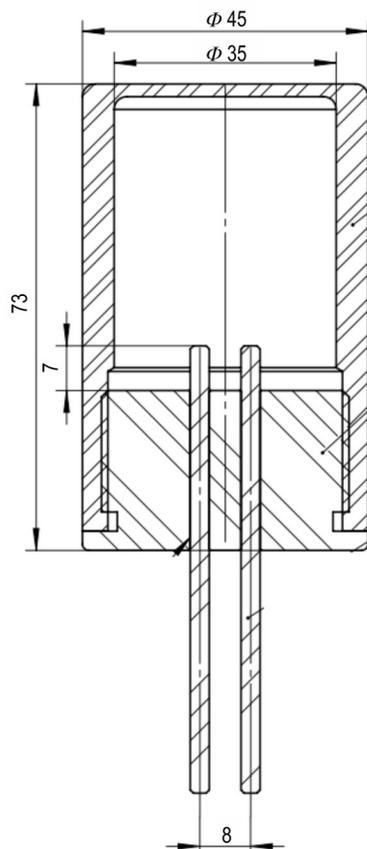


图 8 缩比火工品加工尺寸图(单位:毫米)

Fig.8 Dimensional drawing of scaling electro explosive device(unit: mm)



图 9 缩比火工品实物图

Fig.9 Scaling structure and actual item of the electro explosive device



图 10 电击穿过程电弧现象

Fig.10 Photo of the electric arc phenomenon during electrical breakdown process

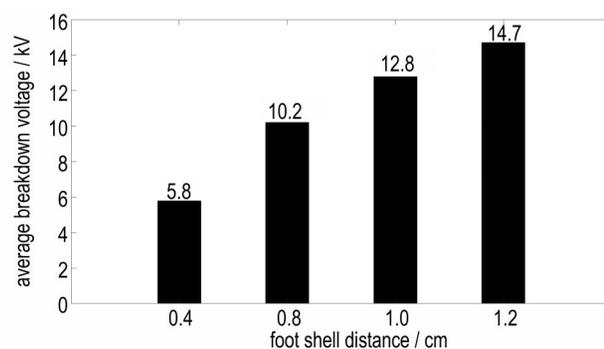


图 11 脚-壳电击穿实验结果

Fig.11 Foot-shell electrical breakdown experiment results

### 3.2 参数 A 和 B 计算

对于 A、B 值的求解通过图 11 的脚壳电击穿实验数据进行拟合<sup>[20-21]</sup>, 求解过程如图 12, 通过缩比实验得到不同脚-壳距离下电火工品的击穿电压, 将击穿电压代入利用式(3)并将误差控制在 1% 内, 对 A、B 进行循环计算得到最优解, 最终结果如表 2。

从计算结果可以看出, 各情况下 A 值相差不大, 为了减小拟合两个参数带来的误差, 控制 A 参数不变, A=8.4, 对 B 值进行多项式拟合可得:

$$B = -171.9l^3 + 393.1l^2 - 204.3l + 132 \quad (12)$$

式中, l 为电火工品脚与外壳之间的距离, cm。

由上述分析, A=8.4, 按照式(12)可求得电火工品在某脚-壳距离下的 B, 此时利用式(3)可求得电击穿系数, 并与流注放电判据系数 k 做比较, 便可知道在此电压情况下电火工品脚-壳间是否发生电击穿。

表 2 脚-壳系数 A、B 求解结果

Table 2 Solution results for foot-shell coefficients A and B

foot shell distance/cm	A/(cm*133Pa) <sup>-1</sup>	B/(V·cm <sup>-1</sup> )·(133Pa) <sup>-1</sup>	breakdown coefficient	k	relative error
1.2	8.4	156	17.89	17.88	0.10%
1	8.4	149	17.73	17.70	0.20%
0.8	8.4	132.2	17.51	17.47	0.20%
0.4	8.4	102.2	16.81	16.78	0.20%

## 4 电弧发火预测模型准确性验证

### 4.1 预测模型验证

在建模部分, 利用四种不同电火工品结构实验下得到的数据完成了模型搭建, 为了确保模型的准确性, 还需要新的实验数据进行验证和支撑, 为此, 本研究选取另一种脚-壳距离为 0.6 cm 的火工品, 利用上述预测模型来预测其电弧发火电压并与实测值进行对比, 具体如下:

1) 利用式(12)计算得到脚-壳距离 0.6 cm 时 B=113.8056, A=8.4, 再利用式(3)可以计算出电弧发火电压为 7.736 kV, 实测正极性电击穿电压为 8 kV 左右, 实测电压与模型计算结果误差为 3.3%, 达到预测目的。

2) 另将实测电击穿电压 8 kV 代入模型中计算得到电击穿系数为 18.5832, 其值大于流注放电判据系数  $k = 17.7 + \ln(d/1\text{cm}) = 17.189$ , 说明此时脚-壳间会发生电击穿, 这很好的验证了上述所提电弧发火预测模型的准确性。

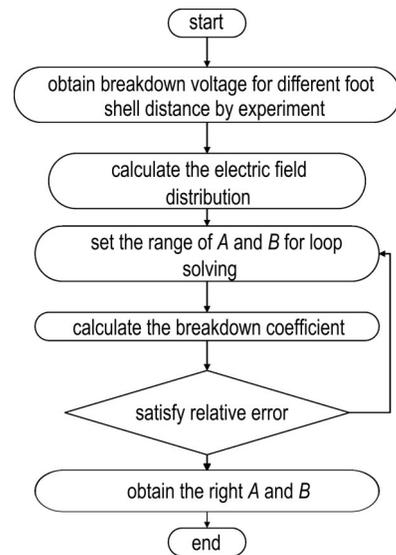


图 12 A、B 求解过程

Fig.12 A, B evaluation process

### 4.2 基于 COMSOL 仿真的电弧发火模型验证

COMSOL 在电磁学计算中准确度较高, 有很多学者利用 COMSOL 来计算电击穿过程<sup>[22-24]</sup>, 因此为了进一步验证模型的准确性, 本研究在 COMSOL 中建立模型进行仿真验证, 利用 COMSOL 中等离子体模块下的电击穿检测模块判断是否会发生电击穿, COMSOL 无需计算完整等离子体模型, 仅通过沿电场线积分求解电击穿系数, 根据 COMSOL 仿真结果中的击穿指示器和电击穿系数来判断是否发生电击穿<sup>[25]</sup>, 流程如图 13 所示。

利用 COMSOL 多物理场联合仿真验证所提的电火工品电弧发火预测模型, 涉及静电场模块和等离子体电击穿检测模块, 观察脚-壳距离为 0.6 cm 情况下的电击穿仿真结果, 具体如下:

1) 仿真模型与实物结构保持一致, 去除桥丝进行仿真。

2) 将实验中获得脚-壳距离 0.6 cm 击穿电压 8 kV 施加给两根引脚, 外壳接地, 进行静电场仿真得到电火工品电场强度分布结果。

3) A=8.4, 由式(12)求出脚-壳距离 0.6 cm 时的

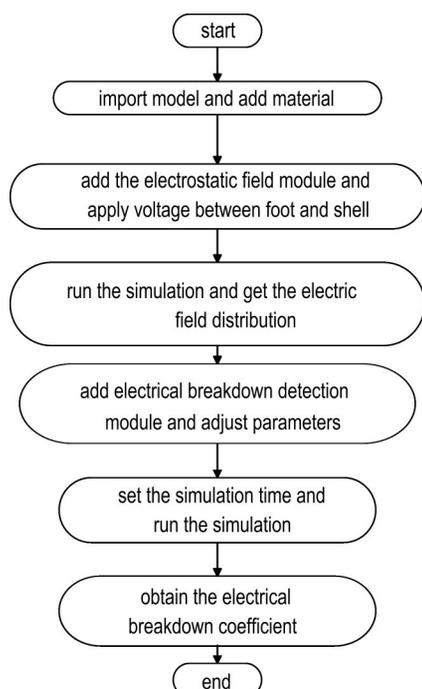


图13 COMSOL 仿真流程图

Fig.13 COMSOL simulation Flowchart

$B=113.8056$  代入电击穿检测模块,将引线靠近外壳的一面设置为粒子计数器,将外壳设置为阴极,运行仿真得到电击穿仿真结果(图14)。

COMSOL电击穿指示器值为0代表不放电,其值为1代表自持放电,其值为2代表发生流注击穿。

图15和16分别为击穿指示器仿真结果图和击穿指示器仿真结果图电击穿系数仿真结果图,从仿真结果中可以得到,电击穿出现在0.97~0.98 ms之间,0.97 ms时电击穿指示器为0.33,此时未出现电击穿,电击穿系数为2.7501。0.98 ms时发生流注击穿,击穿位置在与引线底部对应的外壳处,此时电击穿系数

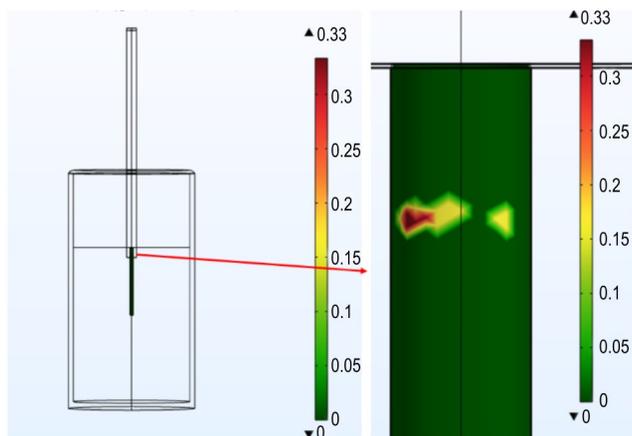


图14 火工品外壳处电击穿指示器仿真结果图

Fig. 14 Electrical breakdown indicator simulation result at shell of EED

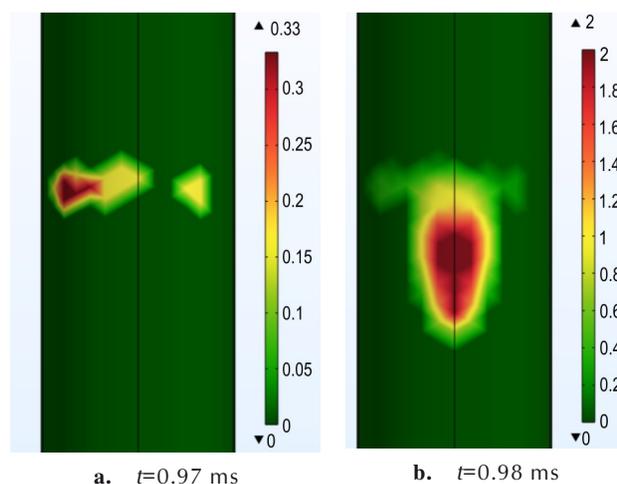


图15 击穿指示器仿真结果图

Fig.15 Breakdown indicator simulation result

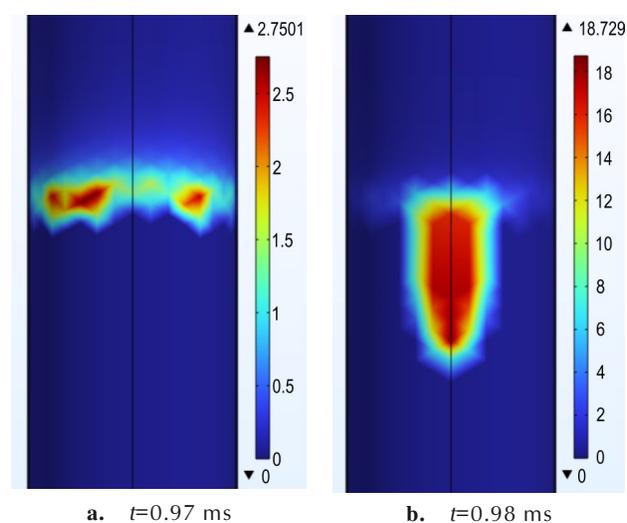


图16 电击穿系数仿真结果图

Fig.16 Breakdown coefficient simulation result

为18.729,电弧发火预测模型结果为18.5832,COMSOL模拟结果与电弧发火预测模型结果相对误差为1%。

由此,电弧发火预测模型计算结果与COMSOL多物理场计算结果以及理论公式结果吻合,验证了研究所提电火工品电弧发火预测模型的准确性。

## 5 结论

本研究探索了一种预测桥丝型电火工品在直流激励下电弧发火的方法:

(1)在借鉴电击穿计算理论的基础上,提出了桥丝型电火工品的电弧发火理论判据,利用模拟电荷法求解了EED脚-壳结构下的电场强度分布,模拟电荷法

计算电场强度的结果与COMSOL仿真的结果相对误差小于1%。

(2)针对电击穿判据中关键参数 $A$ 、 $B$ 的求解,开展了缩比电火工品电击穿实验,得到了电火工品在不同脚-壳距离下的电击穿电压,通过进一步数据反演获得了EED不同结构下的 $A$ 、 $B$ 参数取值,实现了桥丝型电火工品电弧发火预测模型的构建。

(3)利用电弧发火预测模型计算结果和实测桥丝型电火工品脚-壳间电击穿电压数据相比,误差为3.3%,利用COMSOL静电场和电击穿检测模块联合仿真计算的桥丝型电火工品脚-壳间电击穿系数与电弧发火预测模型计算结果相对误差为1%,验证了所提电弧发火模型的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 黄晓龙,张鹏,王耀利.桥丝型火工品安全感应电流测量方法研究[J].国外电子测量技术,2021,40(1):5-8.  
HUANG Xiao-long, ZHANG Peng, WANG Yao-li. Research on the method of measuring the safety induced current of bridge wire electric explosives[J].*Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021, 40(1):5-8.
- [2] 王鹏,杜志明.桥丝型电火工品热点火理论[J].火工品,2007(04):26-30.  
WANG Peng, DU Zhi-ming. Thermal ignition theory of electric hot wire initiating devices[J].*Pyrotechnics*, 2007(04):26-30.
- [3] 相辉,孙东阳,韩军.电磁脉冲作用下电火工品感应电流的仿真研究[C]//第22届全国电磁兼容学术会议论文选.西北核技术研究所,2012:5.  
XIANG Hui, SUN Dong-yang, HAN Jun. Simulation study of induced currents in electro explosive device under the action of magnetic pulses[C]//Selected papers from the 22nd National Conference on Electromagnetic Compatibility. Northwest Institute of Nuclear Technology, 2012:5.
- [4] 吕旭旭,魏光辉.实装灼热桥丝型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):53-62.  
LV Xu-xu, WEI Guang-hui. Comments on the electromagnetic safety assessment method for hot bridge wire electro explosive device[J].*High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(6):53-62.
- [5] MICHAEL J W. Projected Response of Typical Detonators to Electrostatic Discharge (ESD) Environments [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [6] 于鸿源.桥丝型电火工品的静电作用机理与防护研究[D].北京:北京理工大学,2013.  
YU Hong-yuan. Research on the mechanism of electrostatic action and protection of bridge wire electro explosive device[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2013.
- [7] 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.  
LYV Zhi-xing. Simulation study on the harm characteristics and protection design of EED under extreme ESD environment [D].Beijing:Beijing Institute of Technology, 2016.
- [8] YANG M, SUN Y, ZHOU L. Summary of electrostatic sensitivity of EED and anti-electrostatic measures [C]//2017 7th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), Xi'an, China, 2017.
- [9] YAN N, LIANG Z, Lü 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.
- [10] 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(06):18-22.  
YAO Hong-zhi, LI Rui, ZHAO Tuan, et al. Analysis of the electrostatic hazards of typical bridge wire electro explosive devices[J].*Pyrotechnics*, 2021(06):18-22.
- [11] WARNE L, JORGENSEN R, NICOLAYSEN S. Ionization coefficient approach to modeling breakdown in nonuniform geometries[M]. SAND, 2003-4078:918222.
- [12] 徐学基,诸定昌.气体放电物理[M].上海:复旦大学出版社,1996.  
XU Xue-ji, ZHU Ding-chang. Gas Discharge Physics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996.
- [13] 严璋,朱德恒.高电压绝缘技术[M].北京:中国电力出版社,2015.  
YAN Zhang, ZHU De-heng. High Voltage Insulation Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [14] 丁道军,张广宏,张博.高压交流输电线路电场建模与实时监测系统研究[J].电工电气,2023(11):33-40+49.  
DING Dao-jun, ZHANG Guang-hong, ZHANG Bo. Research on electric field modeling and real time monitoring system of HVAC transmission lines [J].*Electrotechnics Electric*, 2023(11):33-40+49.
- [15] 沈瑶,王超,赵彦珍,等.以提高学生解决实际问题能力为目标的电磁场实验改革[J].实验室研究与探索,2022,41(7):243-246+252.  
SHEN Yao, WANG Chao, ZHAO Yan-zhen, et al. Reform of electromagnetic field experiments with goal of improving students' ability of solving real problems[J].*Research and Exploration in Laboratory*, 2022, 41(7):243-246+252.
- [16] 刘建军,王鹤,崔国宇,等.一种基于矢量电场的多电极电场梯度计算优化方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(13):113-119.  
LIU Jian-jun, WANG He, CUI Guo-yu, et al. A study on an optimization method of multi-electrode electric field gradient calculation based on vector electric field[J].*Power System Protection and Control*, 2018, 46(13):113-119.
- [17] 王珍雪,马力.模拟电荷法在UHVDC输电线路中的优化及应用[J].高压电器,2016,52(1):15-21.  
WANG Zhen-xue, MA Li. Optimization and application of charge simulation method for UHVDC transmission lines [J].*High Voltage Apparatus*, 2016, 52(1):15-21.
- [18] 马向国,顾文琪.基于Matlab语言的静电场模拟电荷法分析[J].电瓷避雷器,2005(3):41-46.  
MA Xiang-guo, GU Wen-qi. Charge simulation method analysis of static field based on MATLAB language [J].*Insulators and Surge Arresters*, 2005(3):41-46.
- [19] 杨文翰,吕英华.用模拟电荷法求解高压输电线路附近电磁场[J].电网技术,2008,32(2):47-51.  
YANG Wen-han, Lü Ying-hua. Application of emulation charge method in calculation of electromagnetic environment near to HV transmission lines [J].*Power System Technology*,

- 2008, 32(2):47-51.
- [20] HUANG Y, LIU W. Regression Analysis Model Based on Data Processing and MATLAB Numerical Simulation[C]//2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Dalian, China, 2022.
- [21] ZHU J, ZHANG H, DANG W, et al. The Application of MATLAB Data Preprocessing Member Portrait Description of the Large Department Store[C]//2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, 2022.
- [22] 王齐斌,范晓舟,高宇轩,等.氮化铝/氮化硼复配改性间位芳纶绝缘纸的使役性能及机理分析[J/OL].电工技术学报,2024:1-12. WANG Qi-bin, FAN Xiao-zhou, GAO Yu-xuan, et al. Service Performance and Mechanism of Aluminum Nitride/Boron Nitride Co-Modified Meta-Aramid Insulation Papers[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024: 1-12.
- [23] 程洋,夏令志,牛雷,等.500 kV 双联耐张瓷绝缘子串的串间放电现象[J/OL].中国电力,2024:1-7. CHENG Yang, XIA Ling-Zhi, NIU Lei, et al. Research on Discharge Phenomenon of a 500 kV Double Tension Porcelain Insulator String[J/OL]. *Electric Power*, 2024: 1-7.
- [24] 白丽丽.等离子体钻井脉冲放电击穿破坏岩石机理研究[D].大庆:东北石油大学,2023. BAI Li-li. Study on the mechanism of rock initiation and propagation in pulsed plasma fracturing[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [25] ZHANG B, LIANG T, XIE Y Z. Electrical Breakdown Simulation for Microwave Power Amplifier[C]//2023 2nd International Conference on Power Systems and Electrical Technology (PSET), Milan, Italy, 2023.

## A Prediction Model of Arc Ignition for Bridge Wire Electro Explosive Device Under Direct Current Excitation

ZHANG Bo-yuan<sup>1,2</sup>, LIANG Tao<sup>1,2</sup>, XUE Wan-ting<sup>1,2</sup>, WANG Zhe<sup>1,2</sup>, MU Ya-ru<sup>1,2</sup>, XIE Yan-zhao<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To investigate the arc ignition characteristics of bridge wire electro-explosive devices (EEDs) under DC excitation and predict the arc ignition safety threshold, the simulated charge method was exploited to calculate the cross-sectional electric field strength between the foot-wire and shell of bridge wire EEDs, following a scaled experiment for EEDs to solve unknowns in the electrical breakdown model, which is the electrical breakdown coefficient between the foot-wire and shell of EEDs, leading to a quantitative criterion and arc ignition prediction model. Results indicate that when the laboratory temperature is around 25° and the air pressure is atmospheric pressure, the distance between the foot-wire and shell of bridge wire EEDs significantly influences the arc ignition threshold, and the shorter the foot-shell distance is, the lower the arc ignition threshold is. The relative error between the measured breakdown voltage and the calculated results from the predictive model does not exceed 3.3%. Furthermore, the relative error between the foot-shell breakdown coefficient simulated in COMSOL and the calculated results from the predictive model is within 1%, verifying the model's accuracy. This research provides a reliable tool for predicting arc ignition safety thresholds, potentially enhancing the design and safety of EEDs.

**Key words:** bridge-wire electro-explosive device; charge simulation method; electrical breakdown calculation model; arc ignition; scaling experiment; foot-shell distance

**CLC number:** TJ5; TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024163

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (No. 52207015)

(责编:高毅)