

# 场畸变气体开关寿命预测

王虎, 危瑾, 常家森, 刘凤莲, 张乔根, 邱爱慈

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## Lifetime Prediction of Field-distortion Gas Switch

WANG Hu, WEI Jin, CHANG Jiasen, LIU Fenglian, ZHANG Qiaogen, QIU Aici

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Gas spark switch is one of the key parts in pulsed power devices. Lifetime prediction of gas switch has a great influence on determining the maintenance cycle of gas switch and pulsed power system, and on preventing accidents. The self-breakdown voltage and trigger jitter were used to describe the performance of the gas switch. The lifetime of the gas switch was predicted on the basis of a definition of switch failure ratio and an established lifetime calculation model. The experiment of the triggered discharge with different charge quantities and current peaks was carried out. The results indicate that the lifetime of the switch can be divided into stable stage and failure stage. The model can be used to predict the maximum switch shots, which is defined as the switch lifetime.

**KEY WORDS:** lifetime of switch; lifetime prediction; self-breakdown voltage; trigger-delay time; jitter

**摘要:** 气体开关是脉冲功率装置的关键元件之一, 快速准确地预测开关的工作寿命, 对于确定开关乃至脉冲功率装置的维修周期、预防事故的发生等具有重要的作用。选取自击穿电压和触发放电抖动表征开关性能, 定义开关失效率, 建立开关寿命计算模型, 预估气体开关寿命。进行不同放电电荷量和电流峰值时的触发放电验证实验, 结果表明, 开关工作寿命可以分为稳定和失效 2 个阶段, 所建模型能够有效地预测开关最大放电次数, 即开关工作寿命。

**关键词:** 开关寿命; 寿命预测; 自击穿电压; 触发延时; 触发放电抖动

## 0 引言

随着脉冲功率技术在大功率激光、Z 箍缩、高功率微波、材料合成等领域的广泛应用, 开关元件

作为脉冲功率装置的关键元件之一, 对其性能的要求越来越高<sup>[1-2]</sup>。目前场畸变气体开关主要向大容量、高电压、高可靠性、长寿命等方向发展<sup>[3]</sup>。

目前, 国内外对于气体开关寿命的研究主要集中于定性的理论分析, 尚无法对开关寿命准确评估。本文建立了气体开关工作寿命的计算模型, 并预估了气体开关寿命。

快速准确地预测场畸变气体开关的工作寿命具有重要的意义: 一方面, 可以指导电极的选材、开关结构的选取等, 设计出耐高温、耐高压、耐大电流、长寿命、高可靠性的气体开关<sup>[4-5]</sup>; 另一方面, 可以帮助确定开关乃至脉冲功率装置的维修周期, 预防事故的发生, 降低运行成本。

## 1 场畸变气体开关寿命计算模型

### 1.1 概念

开关运行期间, 开关电极间隙放电<sup>[6]</sup>, 在电极表面形成蚀坑<sup>[7-9]</sup>, 大量蚀坑分布在电极表面, 电极表面粗糙度系数增加<sup>[10-11]</sup>, 开关性能(本文开关性能采用自击穿电压和触发放电抖动 2 个参数表示)下降, 直至开关不能正常工作。

在建立场畸变气体开关寿命计算模型前, 首先定义开关寿命和失效率 2 个相关概念。

#### 1) 开关寿命。

本文在不考虑开关绝缘结构等因素的情况下研究开关电极烧蚀对开关寿命的影响。定义开关寿命为在一定的条件下, 开关能够正常工作的最大放电次数。其中, 工作条件指电流幅值、电流波形、放电电荷量等参数。

开关正常工作的判断条件有很多, 本文采用以

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50637010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50637010).

下2种: ①自击穿电压阈值  $U_c$  与自击穿电压概率阈值  $P_{uc}$ 。在开关工作期间, 如果自击穿电压  $U_b$  不大于  $U_c$  的概率大于等于  $P_{uc}$ , 则认为开关已经不能正常工作; ②触发抖动阈值  $t_{jc}$  与触发抖动概率阈值  $P_{jc}$ , 在开关工作期间, 如果触发抖动  $t_j$  不小于  $t_{jc}$  的概率大于等于  $P_{jc}$ , 则认为开关已经不能正常工作。触发抖动是在相同实验条件(包括工作条件和触发放电次数)下, 多次测量获得的触发延时的标准偏差。

当上文2个判据中的任何一个满足时, 认为开关已经不能正常工作。

## 2) 失效率。

开关寿命计算模型中, 失效率是一个相当重要的概念。它是指在一定的实验条件下, 开关不能正常工作的概率。本文中, 失效率指开关自击穿电压不大于自击穿电压阈值  $U_c$  或触发抖动不小于触发抖动阈值  $t_{jc}$  的概率。

自击穿电压失效率  $P_u$  为开关自击穿电压  $U_b$  不大于自击穿电压阈值  $U_c$  的概率。

当电流幅值  $I_m$  较大( $I_m > 10$  kA)时, 开关自击穿电压  $U_b$  服从正态分布<sup>[12]</sup>, 即  $U_b \sim N(\mu_u, \sigma_u)$ , 其中  $\mu_u$  为自击穿电压均值,  $\sigma_u$  为自击穿电压方差。其概率密度为:

$$f_u(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} e^{-(x-\mu_u)^2/(2\sigma_u^2)}, \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

则自击穿电压失效率为

$$P_u = P(X \leq U_c) = \int_{-\infty}^{U_c} f_u(x) dx \quad (2)$$

触发抖动失效率  $P_j$  为触发抖动  $t_j$  不小于触发抖动阈值  $t_{jc}$  的概率。

开关触发延时  $t_t$  服从正态分布<sup>[12]</sup>, 即  $t_t \sim N(\mu_t, \sigma_t)$ , 其中  $\mu_t$  为触发延时均值,  $\sigma_t$  为触发延时方差。其概率密度为

$$f_t(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-(x-\mu_t)^2/(2\sigma_t^2)}, \quad -\infty < x < \infty \quad (3)$$

开关触发抖动  $t_j$  为触发延时的标准偏差:

$$t_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_t)^2}{n-1}} \quad (4)$$

式中:  $X_i$  为一次实验的样本, 即一次测量得到的触发延时的结果;  $n$  为一定实验条件下, 测量触发延时的次数。

记  $j = (n-1)t_j^2 / \sigma_t^2$ , 可知:

$$j = \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_t)^2 / \sigma_t^2 \sim \chi^2(n), \quad t_j \geq 0 \quad (5)$$

$j$  的概率密度为

$$f_j(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{n/2} \Gamma(n/2)} x^{n/2-1} e^{-x/2}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

如果触发延时实验次数  $n$  确定, 则触发抖动失效率为

$$P_j = P(X \geq j_c) = \int_{j_c}^{+\infty} f_j(x) dx \quad (7)$$

式中  $j_c = [(n-1)t_{jc}^2] / \sigma_t^2$ 。

由失效率的定义可知失效率为

$$P_f = 1 - (1 - P_u)(1 - P_j) \quad (8)$$

根据开关正常工作判断条件, 可计算失效率阈值:

$$P_{fc} = 1 - (1 - P_{uc})(1 - P_{jc}) \quad (9)$$

综上所述, 在开关工作期间, 如果失效率大于等于失效率阈值, 则认为开关不能正常工作。

## 1.2 场畸变气体开关寿命计算模型

本文建立场畸变气体开关寿命计算模型时不考虑开关绝缘结构等因素, 研究电极烧蚀对开关寿命的影响规律。该模型是建立在场畸变气体开关触发放电实验的基础上, 但也可应用于计算其他气体开关寿命。

### 1) 开关寿命计算模型的建立。

用模型计算出在相同工作条件、不同的放电次数时的开关失效率, 并与失效率阈值相比较。若失效率大于等于失效率阈值, 则认为开关已经不能正常工作。

在相同的工作条件下, 随着开关触发放电次数的增加, 开关性能改变, 即开关自击穿电压均值、方差和触发抖动均值、方差改变。自击穿电压失效率  $P_u$  和触发抖动失效率  $P_j$  改变, 会引起开关失效率  $P_f$  改变, 因此, 失效率是触发放电次数的函数。

在场畸变气体开关触发放电时, 每一次放电都会在一定区域内随机形成一个蚀坑。本文实验中, 蚀坑分布区域如图1所示。这是从正面拍摄的触发电极和主电极的蚀坑分布照片, 主电极的蚀坑全部位于触发电极在主电极投影的环形区域内, 即每一次触发放电形成的蚀坑都随机落在该环形区域。

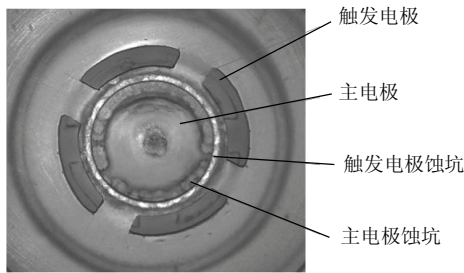


图 1 电极蚀坑分布图

Fig. 1 Distribute figure of Etch pit of electrode

多次触发放电形成的蚀坑交错重叠，相互作用，使得电极表面粗糙度增大或减小，改变了开关性能，最终使得开关失效率发生变化。

场畸变气体开关寿命计算模型通过有限次触发放电实验，测量不同触发放电次数时开关的自击穿电压和触发放电次数，计算出开关失效率，使用数学方法拟合出触发放电次数-失效率的函数关系，并与开关失效率阈值比较，可以得出开关能正常工作的最大放电次数。

## 2) 模型相关参数的选取。

### ①拟合方法及拟合函数。

本文所建模型从实验出发，在实验中测量获得的数据，只是理论数据的近似值，因此拟合出的曲线不需严格地经过每一点。常用的数学拟合方法有多种，其中最小二乘法<sup>[13]</sup>能拟合出一条曲线，该曲线不严格经过每一个实验数据点，与数据点之间的误差最小，满足本模型的要求。

拟合所选用的函数采用工程上较为常用的一种指数函数，其形式为

$$p(x) = e^{(\alpha_0 + \alpha_1 x + \dots + \alpha_n x^n + \dots)}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (10)$$

### ②阈值。

根据式(9)，失效率阈值通过自击穿电压阈值、自击穿电压概率阈值、触发放电阈值和触发放电概率阈值计算获得。自击穿电压等阈值的选取与开关所处的系统特性有关，包括工作电压、开关误动作率、开关连接方式、多个开关的同步特性要求等。

本文没有特定的系统，为了检验计算模型而人为设定了阈值。自击穿电压概率阈值和触发放电概率阈值均取 0.0001，则失效率概率阈值为 0.0002；自击穿电压阈值选取开关初始状态时自击穿电压均值的 80%；触发放电阈值选取开关初始状态时触发放电的 4 倍。其中，开关初始状态指开关刚完成老练时的状态。本文实验把开关 300 次触发放电后

的状态作为开关初始状态。

### ③自击穿电压和触发延时测量实验次数。

实验中，每进行一定次数的触发放电实验，需测量开关性能，即测量开关自击穿电压均值、方差和触发延时均值、方差。

开关的自击穿放电会在电极表面形成蚀坑，若实验的次数过多，会影响到实验结果。开关触发放电是在相同实验条件下测量触发延时后计算得到的。触发延时实验次数可计入总的触发放电次数，但是实验次数过多会影响到触发延时的测量结果。自击穿电压测量和触发延时测量次数如果过少，则不能形成统计规律，实验结果与理论结果会有较大偏差。

因此，每进行 300 次触发放电实验，测量自击穿电压和触发延时各 30 次，统计计算出该实验条件下的开关性能。

### 3) 开关寿命的计算。

基于气体开关触发放电实验，通过开关寿命计算模型可以计算出开关最大放电次数。

为了满足模型计算的需求，总触发放电次数必须足够多。总触发放电次数与单次放电烧蚀量有关，即与放电电流幅值、脉宽等参数有关。本文实验中，总触发放电次数选择 4 000~8 000 次，每隔 300 次触发放电实验测量出自击穿电压和触发延时后，根据式(8)求出开关失效率。

开关失效率阈值是开关性能逐渐变差，直至失效的临界值。本文选取的失效率阈值根据式(9)可以计算得出，约为 0.0002。

在进行有限次开关触发放电实验和开关性能测量实验后，开关性能与开关触发放电次数的函数关系曲线可以通过最小二乘法，使用自制软件拟合得出，即以开关触发放电次数为自变量，开关失效率为因变量，使用最小二乘法拟合出开关触发放电次数与开关失效率的函数关系，并取开关失效率恰好等于开关失效率阈值时的开关触发放电次数作为开关寿命。

## 2 实验及分析

### 2.1 实验装置

图 2 为一种典型的场畸变气体开关结构示意图<sup>[14-18]</sup>。上下 2 个主电极为球冠结构，半径为 60 mm，主电极间隙距离为 8 mm；触发电极位于主

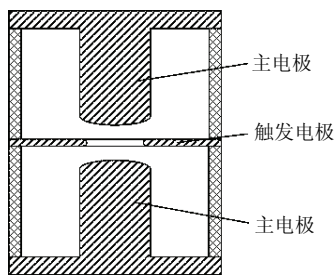


图2 场畸变气体开关结构示意图

Fig. 2 Figure of configuration of gas switch

电极间隙中央,为圆环结构,内径为30mm,厚度为1mm。2个主电极和触发电极同轴纵向排列,间隙中电场不均匀系数为1.267,即为稍不均匀场。主电极正负双边充电,触发电极通过一个阻值约为3kΩ的水电阻接地,对间隙电场分布的影响很小。

为了更好地通过实验手段获得开关电极烧蚀对开关性能的影响规律,利用SF<sub>6</sub>对不均匀电场的敏感性<sup>[19]</sup>,将开关内充纯SF<sub>6</sub>气体,并且在实验前使用细砂纸抛光电极表面。

模拟场畸变气体开关在工程中的工作环境<sup>[18-20]</sup>,开关2个主电极上加幅值相同、极性相反的直流电压。触发电极通过水电阻R<sub>0</sub>接地,触发电压峰值与开关主电极上施加的工作电压幅值相同,为正极性脉冲。电路如图3所示,回路电感为853nH。

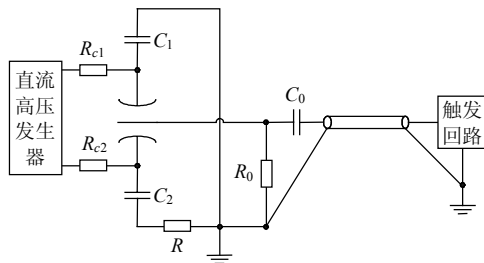


图3 实验电路图

Fig. 3 Experimental circle diagram

## 2.2 实验结果与分析

根据场畸变气体开关寿命计算模型的理论分析,开关性能的评估参数为自击穿电压和触发电抖动,因此,需在开关触发放电一定次数后,测量这2个开关性能参数。

测量开关自击穿电压时,先快速升压,速度约为5kV/s,电压升至开关自击穿电压的80%左右时,停止升压,等待约20s,然后采用0.5kV/s的速度缓慢升压。

直流高压发生器配有数显电压表,显示当前发生器的输出电压值。当按照上述方法升压时,开关

主电极上的电压与数显电压表显示值基本一致,测量误差小于1.5kV。图4为电流峰值为15.7kA、电荷量为17.7mC时,气体开关触发放电次数与自击穿电压均值的函数关系图。

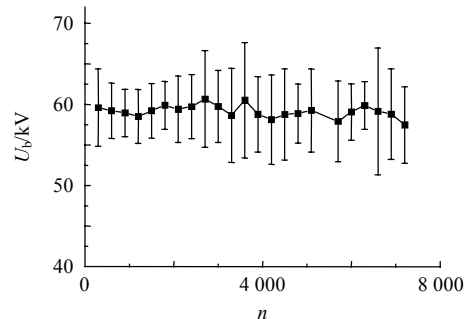


图4 开关触发放电次数与自击穿电压均值的关系

Fig. 4 Relation graph of self-breakdown voltage and discharge times

测量场畸变气体开关的触发延时,即测量场畸变气体开关放电电流滞后于触发电压的时间。使用罗氏线圈测量放电电流,电阻分压器测量开关触发电压。罗氏线圈为空心绕制,变比为1/478A。选取触发电压开始上升并且过零点的时刻作为起始时刻,放电电流开始上升并且过零点的时刻作为终止时刻,2个时刻的差值即为触发延时。图5为电流峰值为15.7kA、电荷量为17.7mC时,气体开关触发放电次数触发延时均值函数关系图。

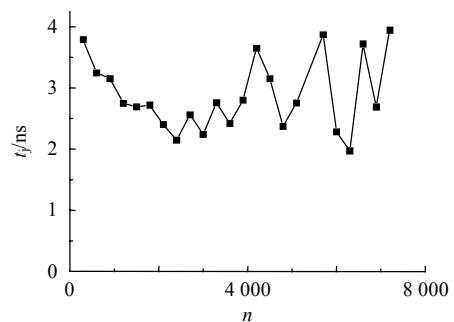


图5 开关触发放电次数与触发延时均值的关系

Fig. 5 Relation graph of trigger-delay and discharge times

在实验获得开关自击穿电压和触发延时数据的基础上,根据开关寿命计算模型,计算出在不同触发放电次数时的开关失效率,拟合出开关性能的变化规律,即开关触发放电次数-失效率函数。图6为电流峰值为15.7kA、电荷量为17.7mC时,开关触发放电次数-失效率的拟合函数关系。

模型计算得到电流峰值为15.7kA、电荷量为17.7mC时,开关寿命为4001次放电。在该工作条件下,本文进行了7200次放电实验,测量获得的

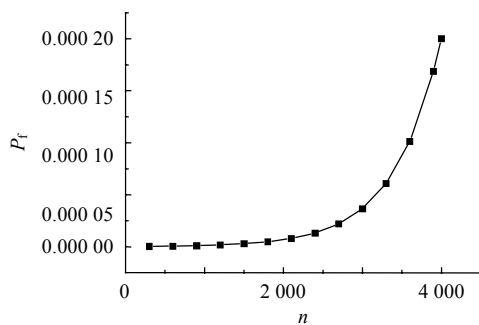


图 6 电流峰值为 15.7 kA 时开关触发放电次数与失效率的拟合关系

Fig. 6 Fitting figure of probability of failure and discharge times

失效率如图 7 所示，图中失效率阈值为 0.0002。可见，当放电次数小于 4 001 次时，不同放电次数时测量计算获得的开关失效率均小于失效率阈值 0.0002；当放电次数大于 4 001 次时，开关失效率均大于失效率阈值。当放电 7 200 次时，开关失效率高达 0.059。

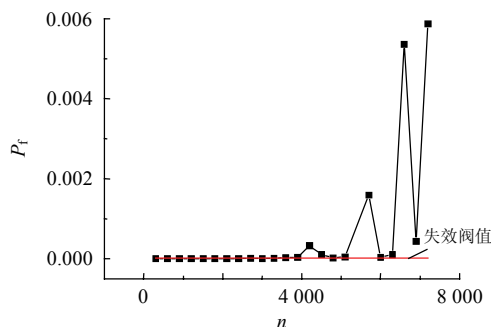
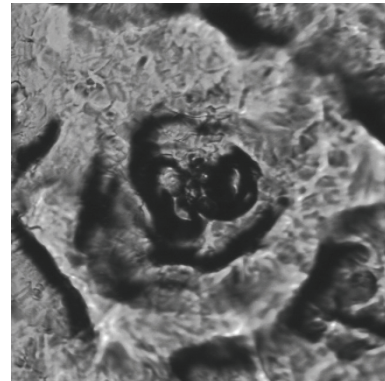


图 7 开关触发放电次数与开关失效率的关系

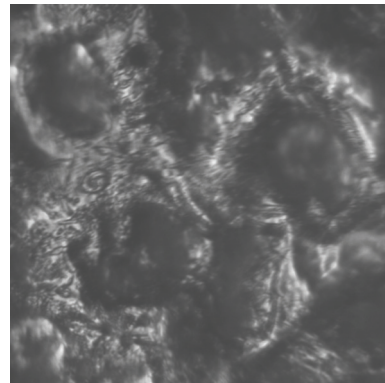
Fig. 7 Figure of probability of failure and discharge times

开关工作寿命可以分为 2 个阶段。1) 稳定阶段。随着放电次数增加，失效率几乎不变，上升缓慢。由图 6 可见，在约 2 400 次放电之前，随着放电次数的增多，开关的失效率缓慢上升。自击穿电压以振荡方式缓慢降低，触发抖动则在初始阶段降低，一定放电次数后，以振荡方式缓慢增大。其原因是当放电一定次数后(次数与放电电流峰值和电荷量等有关)，如图 8(a)所示，电极表面存在蚀坑或毛刺(蚀坑边沿的凸起即毛刺)，新的放电会改善或劣化开关性能，因此自击穿电压和触发抖动随放电次数增加而振荡变化。2) 失效阶段。在此阶段，失效率快速上升直至开关失效。如图 6 所示，在约 2 400~4 000 次放电内，开关失效率突然增大到 0.0002，开关失效。自击穿电压和触发抖动振荡幅度较大，自击穿电压总体呈下降趋势，触发抖动总

体呈上升趋势。其原因是，当开关放电次数较多时，开关电极表面已存在一些较大、较深的蚀坑，如图 8(b)所示，开关继续放电时，电弧更多地落在这些蚀坑区域，增大或加深蚀坑，电极表面粗糙度急剧增加，开关性能总体上向劣化方向发展，因此，开关失效率迅速上升，直至开关失效。



(a) 15.7 kA、17.7 mC 时，单次放电电极蚀坑



(b) 多次放电后蚀坑部分区域

图 8 电极表面蚀坑(1600×)

Fig. 8 Etch pits(1600×)

国内外常用的表面粗糙度表示方法有 3 种：最大粗糙度  $R_y$ 、十点平均粗糙度  $R_z$  和算术平均粗糙度  $R_a$ 。本文中，由于蚀坑最高峰和最低谷对电极表面电场强度影响最大，即对开关性能影响最大，因此选择最大粗糙度  $R_y$  作为表征电极表面状态的参数。表面粗糙度  $R_y$  定义为从轮廓线上沿某方向选取一段长度  $l$ (称为评定长度)，在这部分中最高峰与最低谷的距离以  $\mu\text{m}$  为单位。本文使用金相显微镜(目镜 40×，物镜 4×、20×、40×和 60×)测量电极表面蚀坑深度。当电流峰值 15.7 kA、电荷量 17.7 mC、放电 7 200 次时，测量得最大凹坑深度为 54.3  $\mu\text{m}$ ，计算得  $R_y=37.79 \mu\text{m}$ 。

### 3 结论

本文通过实验研究场畸变气体开关在不同放

电次数时开关性能的变化规律,建立了场畸变气体开关工作寿命计算模型。实验研究表明:随着放电次数增加,自击穿电压振荡降低,触发动抖振荡增大,振荡幅度逐渐增加。开关生命周期分为2个阶段:在稳定阶段,失效率几乎不变;在失效阶段,失效率快速上升,直至开关失效。本文的计算模型能够有效地预测在相同工作条件下开关能够正常工作的最大放电次数即气体开关的工作寿命。

## 参考文献

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 5-24.  
Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 5-24(in Chinese).
- [2] 林福昌, 蔡礼, 李黎, 等. 石墨型气体开关电接触面的温升分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 30(33): 96-102.  
Lin Fuchang, Cai Li, Li Li, et al. Temperature rise analysis on electrical contact interface of graphite spark gap switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 30(33): 96-102(in Chinese).
- [3] 李黎, 刘刚, 林福昌, 等. 石墨型高能气体开关的电极使用寿命分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 109-115.  
Li Li, Liu Gang, Lin Fuchang, et al. Analysis on electrode lifetime of high power graphite spark gap switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 109-115 (in Chinese).
- [4] 郭良福, 周圣, 李志鹏, 等. 高库仑量大电流两电极气体火花开关研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 877-880.  
Guo Liangfu, Zhou Sheng, Li Zhipeng, et al. High coulomb and high current gas spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 877-880(in Chinese).
- [5] 何孟兵, 王清玲, 潘垣. 高库仑量大电流脉冲闭合开关的研制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 131-136.  
He Mengbing, Wang Qingling, Pan Yuan. Study on high coulomb and current pulse power closing switch [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 131-136(in Chinese).
- [6] 张贇, 曾嵘, 黎小林, 等. 大气中短空气隙流注放电过程数值仿真[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 6-12.  
Zhang Yun, Zeng Rong, Li Xiaolin, et al. Numerical simulation on streamer discharge of short air gap of atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 6-12(in Chinese).
- [7] Peters J, Yin Fei, Borges C F M, et al. Erosion mechanisms of hafnium cathodes at high current [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2005, 38(11): 1781-1794.
- [8] Watson A, Donaldson A I, Ikuta K, et al. Mechanism of electrode surface damage and material removal in high current discharges[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1986, 22(6): 1779-1803.
- [9] Donaldson A L, Kristiansen M, Krompholz H, et al. Analysis of electrode surface damage in high energy spark gaps[C]//Proceedings of the 5th IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, America: IEEE, 1985: 457-460.
- [10] Donaldson A L, Hagler M O, Kristiansen M, et al. Electrode erosion phenomena in a high-energy pulsed discharge[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1984, 12(1): 28-38.
- [11] Jackson G, Hatfield L, Kristiansen M, et al. Surface studies of dielectric materials used in spark gaps [J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(1): 262-268.
- [12] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003: 14-35.  
Zeng Zhengzhong. An introduction to applied high power pulse technology[M]. Xi'an: Shannxi Science and Technology Press, 2003: 145-350(in Chinese).
- [13] 陈明逵, 凌永祥. 计算方法教程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996, 107-118.  
Chen Mingkui, Ling Yongxiang. Calculation method course[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996, 107-118(in Chinese).
- [14] 梁天学, 孙才新, 邱爱慈, 等. 200 kV 多级多通道火花开关[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 56-58.  
Liang Tianxue, Sun Caixin, Qiu Aici, et al. Multi-gap multi-channel 200 kV gas spark switch for fast LTD [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 56-58(in Chinese).
- [15] Shimonura N, Tawa I, Nagata M, et al. Numerical analysis of multichannel gap switch in pulsed power generators [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1999, 27(4): 1213-1215.
- [16] 李艳, 李胜利, 李劲. 场畸变火花开关电极优化设计及其触发特性[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 71-74.  
Li Yan, Li Shengli, Li Jin. Electrode optimum design and experimental study of triggering feature of field distortion spark switch[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 71-74(in Chinese).

- [17] Gerasimov A I. Multichannel spark gaps with control bar electrodes: their development and application(a review) [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2004, 47(1): 1-31.
- [18] 黄勇. 百千安三电极气体火花开关自击穿特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2008.  
Huang Yong. Study on the self-breakdown characteristics of three electrodes and hundred-kilo ampere current of gas spark switches[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008(in Chinese).
- [19] 全永刚, 赵玉柱. 稍不均匀电场中 SF<sub>6</sub> 气体的工程基础场强[J]. 华通技术, 2005(4): 34-37.  
Tong Yonggang, Zhao Yuzhu. Engineering breakthrough field intensity of SF<sub>6</sub> gas in a slightly uneven electrical field[J]. Huatong Technology, 2005(4): 34-37(in Chinese).
- [20] 高贵山. 700 kV 激光触发多级多通道开关技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2009.  
Gao Guishan. A study on the 700 kV laser-triggered multi-

stage multi-channel switch[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009(in Chinese).



王虎

收稿日期: 2011-03-27。

作者简介:

王虎(1975), 男, 博士研究生, 从事场畸变气体开关电极烧蚀特性研究, tiger.king@stu.xjtu.edu.cn;

张乔根(1965), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事脉冲功率技术及电力系统外绝缘等方向的研究, hvzhang@mail.xjtu.edu.cn;

邱爱慈(1941), 女, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事脉冲功率技术的研究, qac@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 张玉荣)