

## FLTD 三电极场畸变气体开关寿命特性<sup>\*</sup>

李 颖<sup>1</sup>, 靳建伟<sup>2</sup>, 陈 立<sup>1</sup>, 孙凤举<sup>3</sup>, 李兴文<sup>1</sup>, 王志国<sup>3</sup>,  
姜晓峰<sup>3</sup>, 吴 坚<sup>1</sup>, 李鹏辉<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西安近代化学研究所, 西安 710065; 3. 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 针对设计的一种场畸变气体开关, 研究中间电极材料分别为不锈钢和黄铜条件下的烧蚀特性, 结合开关寿命期间静态与触发特性的变化规律, 获得决定开关寿命的关键因素, 为三电极场畸变气体开关的性能优化提供理论支撑。研究表明, 采用不锈钢和黄铜作为中间电极的烧蚀区域以及表面粗糙度均随着放电次数增加而增大, 黄铜电极烧蚀较为严重且表面有明显的烧蚀圆斑, 不锈钢电极则具有更高的表面粗糙度, 阴阳极表面烧蚀存在明显差异, 随着放电次数的增加, 击穿点向电极边缘区域集中, 影响开关的沿面绝缘特性, 是导致开关寿命终结的主要原因。

**关键词:** 快脉冲直线变压器驱动源; 气体开关; 工作寿命; 电极烧蚀; 触发延时

中图分类号: TM85; TN78

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190339

## Lifetime characteristic of three-electrode field-distortion gas switch of fast linear transformer driver

Li Ying<sup>1</sup>, Jin Jianwei<sup>2</sup>, Chen Li<sup>1</sup>, Sun Fengju<sup>3</sup>, Li Xingwen<sup>1</sup>, Wang Zhiguo<sup>3</sup>,  
Jiang Xiaofeng<sup>3</sup>, Wu Jian<sup>1</sup>, Li Penghui<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China;

3. Northwest Insulation of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Three-electrode field-distortion gas switch is a crucial element of modular fast linear transformer driver (FLTD). Electrode erosion affects the trigger jitter during the lifetime of the switch, which in turn can affect the output characteristics of FLTD. Therefore, studying the impact of electrode erosion on the trigger jitter of the switch is of great significance to optimize the switch structure and predict the switch life. This paper studies the erosion characteristic of intermediate electrode of three-electrode switch, and the electrode materials are stainless steel and brass. The key factors affecting the lifetime of switch are obtained by considering the changing rules of trigger and erosion characteristics, which provides theoretical support for the optimization of the performance of the three-electrode switch. The results show that the erosion area and surface roughness of stainless steel and brass electrodes increase with discharge times. The brass electrode is ablated more seriously and the stainless steel electrode has higher surface roughness. With the increase of discharge times, the breakdown point moves to the electrode edge area, which affects the insulation performance of the switch.

**Key words:** fast pulse linear transformer driver; gas switch; lifetime of switch; electrode erosion; trigger delay

快脉冲直线型变压器驱动源(FLTD)是一种新型的初级储能装置, 其结构紧凑、串并联方便, 可直接驱动负载, 在闪光照相、Z 箍缩、聚变能源等领域具有重要的应用前景<sup>[1-3]</sup>。气体开关作为高功率能量控制器, 能够实现功率的放大, 是脉冲功率装置中关键元件之一。大型 FLTD 中存在着数万只气体开关, 其工作特性及其寿命影响 FLTD 的输出性能, 而工作寿命是开关综合性能评价的关键指标。电极烧蚀引起电极表面微观形貌变化、电极质

\* 收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51790523); 国家自然科学基金青年基金项目(51807157)

作者简介: 李 颖(1994—), 女, 硕士, 初级, 从事脉冲功率技术研究; liying1994@stu.xjtu.edu.cn。

量损失、开关内部环境污染,导致开关的静态和触发性能劣化,是制约开关寿命的主要因素<sup>[4-8]</sup>。

目前国内外学者对三电极开关以及电极表面烧蚀开展了大量的研究,美国圣地亚国家实验室的 Woodworth 等人利用分幅相机和光谱分析等手段研究了三电极场畸变开关的触发击穿过程,分析了开关多通道形成及影响因素<sup>[5,6]</sup>。国内西北核技术研究所魏浩等设计了一种用于直线变压器驱动源的三电极场畸变气体火花开关,研究了不同材料触发电极的击穿特性<sup>[8]</sup>。王虎等根据场畸变开关的自击穿特性和触发时延变化规律以及电极烧蚀参数变化规律两种方法来预测气体开关的寿命<sup>[7,9]</sup>。翟戎骁等人针对一种环形电极两间隙实验开关,研究了不同触发电压、工作系数、电极材料下的触发间隙和过压间隙的击穿特性<sup>[10]</sup>。西安交通大学李晓昂研究了纳秒脉冲下气体火花开关电极融蚀形貌特征并且构建了蚀坑几何模型<sup>[11]</sup>。中国工程物理研究院罗敏等人研究了相同工作条件下三种常用电极:铜、钨与铝的烧蚀情况,以及中间电极材料在不同工作条件下的击穿特性和烧蚀特性<sup>[12]</sup>。目前国内外学者对三电极开关开展了大量的研究,获得了脉冲电压幅值、工作系数、开关气压等工作条件下的静态特性和触发特性,中间电极材料在不同条件下的触发特性,以及电极烧蚀对自击穿电压的影响。缺少对 FLTD 三电极场畸变开关在工作寿命期间电极表面烧蚀对开关工作特性及寿命影响的系统性研究。

本实验采用三电极场畸变开关,开关中间电极选用黄铜和不锈钢两种电极材料,研究开关的静态特性和触发特性,分析触发击穿时延的组成及影响因素。同时研究两种电极材料阴阳极的烧蚀情况,包括电极表面烧蚀程度、表面粗糙度以及烧蚀区域的变化规律,并根据实验结果分析电极烧蚀对开关静稳态性能的影响进而对开关寿命的影响。

## 1 实验平台

图 1 所示为单支路 FLTD 气体开关实验平台,该平台主要由放电回路、触发回路、直流高压电源、供气系统、电压电流测量设备、示波器和工控机等部分组成。触发实验时,开关充  $6.21 \times 10^5$  Pa 的干燥空气,开关工作系数为 60%,直流高压电源通过  $20 \text{ M}\Omega$  保护电阻分别向两只  $100 \text{ nF}$  电容器充  $\pm 80 \text{ kV}$  的直流高压,触发器再通过  $300 \Omega$  的隔离电阻向开关的触发电极提供  $100 \text{ kV}$  的正极性触发脉冲,触发电极与  $-80 \text{ kV}$  的负极性主电极之间形成过电压,间隙 1(称之为触发间隙,在此间隙触发电极为阳极)首先击穿,触发间隙击穿后触发电极迅速由正高压变为负高压,触发电极与  $+80 \text{ kV}$  的主电极之间形成过电压,间隙 2(称之为过压间隙,其对应的触发电极为阴极)随之击穿,回路电流上升。使用电阻分压器测量触发脉冲,同轴分流器测量负载电流,图 2 所示为触发电极电压和电流波形图,  $T_1$  为触发间隙击穿时延(脉冲电压过零点上升至脉冲下降零点),  $T_2$  为过电压击穿时延(脉冲电压下降零点至电流起始零点)、 $T$  为总的触发时延,抖动  $t_{d1}$  和  $t_{d2}$  表示相应间隙击穿时延的平均标准偏差。

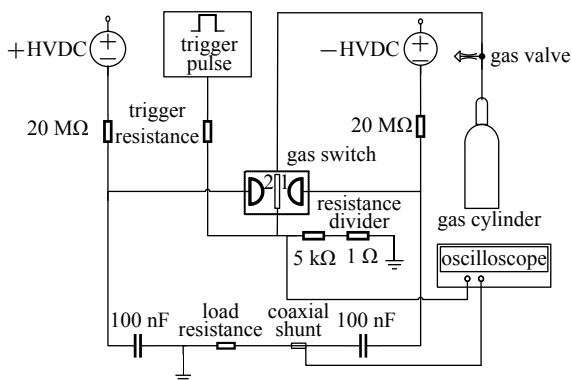


Fig. 1 Schematic of switch of experiment circuit

图 1 放电回路原理图

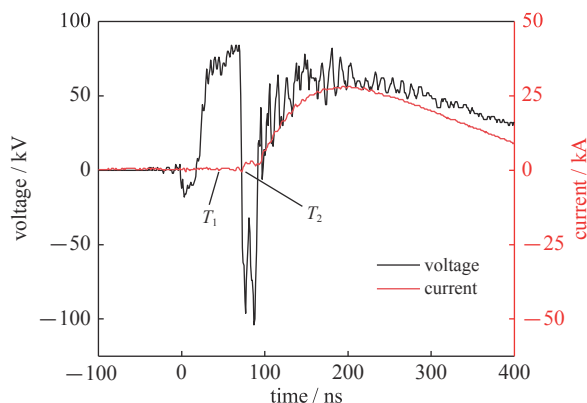


Fig. 2 Typical waveforms of circuit current and voltage in trigger electrode

图 2 触发电极电压以及回路电流图

## 2 实验结果与分析

### 2.1 开关击穿特性

三电极场畸变开关中间电极为黄铜和不锈钢时,每 400 次触发放电后测量开关工作气压  $1.01 \times 10^5$  Pa 至  $3.51 \times 10^5$  Pa 下的自击穿电压幅值,每隔  $0.5 \times 10^5$  Pa 测量 15 组数据,并绘制自击穿电压幅值(平均值)随气压的变化趋势图。图 3 为气体开关在不同触发放电次数后自击穿电压的变化趋势。黄铜和不锈钢的自击穿电压均随着气压的增大而增大,正自击穿电压变化曲线的分散性较大,而负自击穿电压值有较好的一致性。在高气压( $2.51 \times 10^5$  Pa~

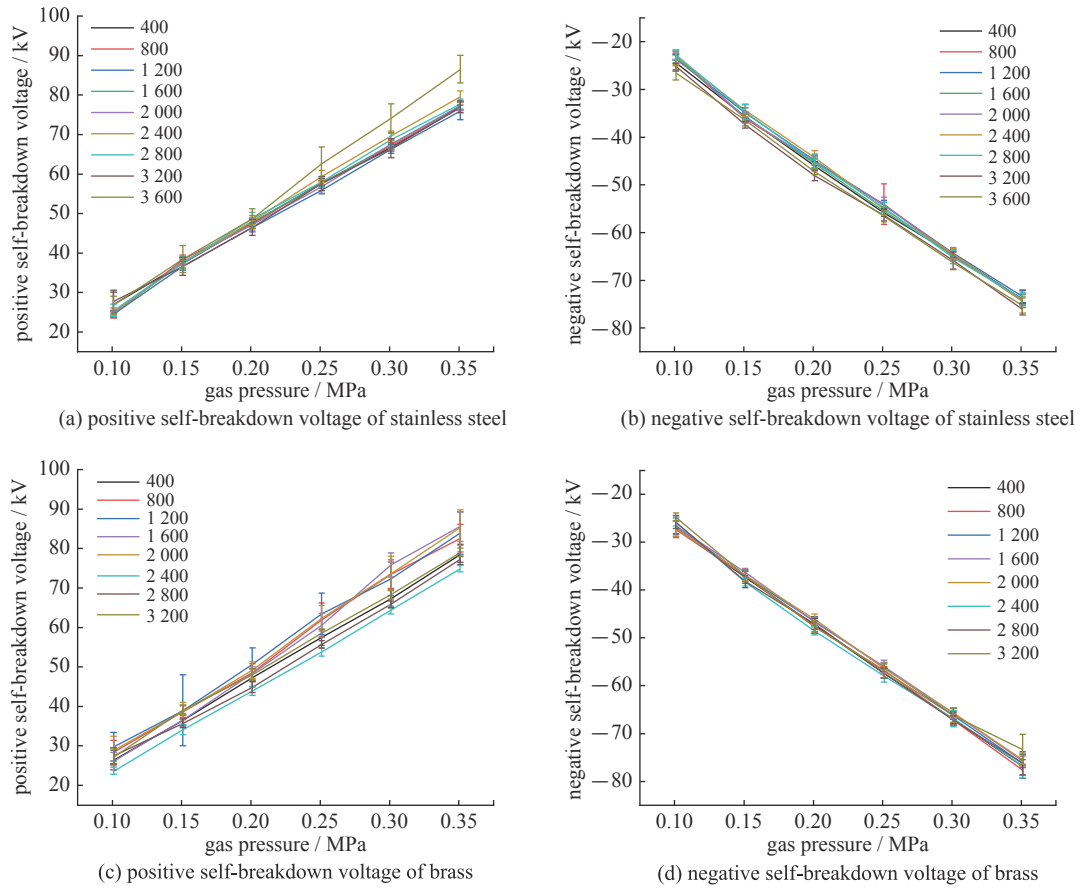


Fig. 3 Relationships between self-breakdown voltages and discharge times

图 3 触发次数与不同中间电极材料的自击穿电压关系

3.51 × 10<sup>5</sup> Pa)时,不同放电次数后不锈钢电极正自击穿电压变化范围为 6~10 kV,低气压时 <3 kV;负自击穿电压在不同触发放电后电压变化范围 <4 kV;不锈钢在高气压时正负自击穿电压差值均 <4 kV。黄铜中间电极正自击穿电压与负自击穿电压差值可达 10 kV,而低气压最高压差为 4 kV。随着放电次数的增大,黄铜和不锈钢的自击穿电压均为振荡变化。黄铜电极正、负自击穿电压均高于不锈钢电极,其数值范围为 5~10 kV,并且黄铜正自击穿电压分散性高于不锈钢。

图 4 所示为总击穿时延  $T$ 、触发间隙击穿时延  $T_1$ 、过压间隙击穿时延  $T_2$  及抖动与触发放电次数的关系。不锈钢的触发时延呈现先下降后上升的变化趋势,而黄铜为先上升后下降。不锈钢的触发间隙击穿时延  $T_1$  占总击穿时延的 65%~75%,最大值为 59.7 ns,数值变化范围 <20 ns;  $T_2$  最大值仅为 20.7 ns,数值变化范围在 6 ns 之内;抖动  $t_{d1}$  在 3 600 发触发放电后达到最大值 10.26 ns,而  $t_{d2}$  最大值仅为 2.11 ns。黄铜触发间隙的击穿时延  $T_1$  在总击穿时

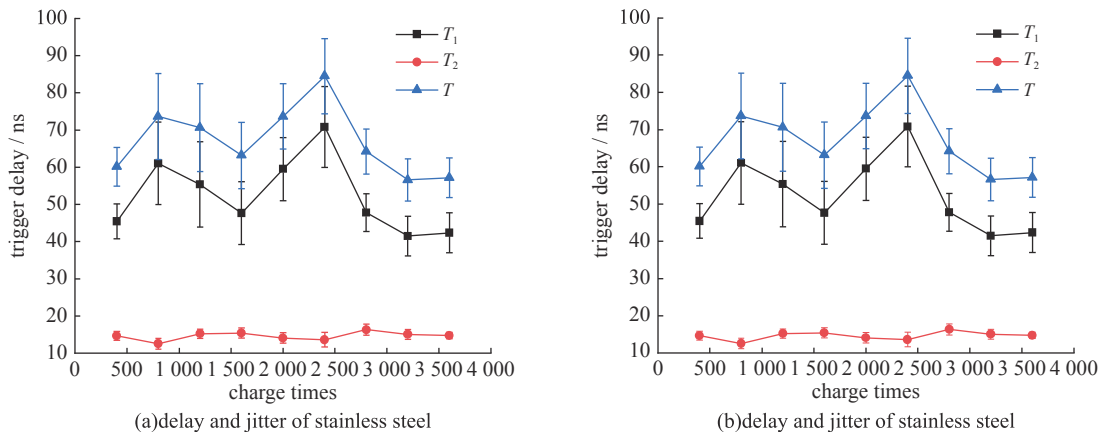


Fig. 4 Variation trend of trigger time delay of intermediate electrode stainless steel and brass

图 4 中间电极为不锈钢和黄铜时触发时延的组成及变化趋势

延中所占比值范围为 73%~83%,  $T_1$  最大值 70.8 ns, 时延最大可相差 29 ns;  $T_2$  最大值为 16.4 ns, 数值最大相差仅为 3.8 ns。不锈钢和黄铜的抖动变化趋势与击穿时延具有一致性, 随着击穿时延的增大而增大, 减小而减小。黄铜触发击穿时延平均高于不锈钢, 相反过压间隙击穿时延低于不锈钢, 自击穿电压幅值分散性更高, 触发稳定性差, 总体来说不锈钢的输出特性要高于黄铜。

## 2.2 电极表面宏观和微观烧蚀形貌的变化规律

### 2.2.1 宏观烧蚀形貌

本实验分别于 1 200 次、2 400 次、3 600 次触发以及自击穿放电后, 对电极表面进行宏观烧蚀形貌观测。图 5 所示为 2 400 次放电后不锈钢和黄铜触发电极的阴极、阳极的宏观烧蚀形貌, 不锈钢和黄铜的电极表面均能够观察到明显的烧蚀区域划分, 区域内清晰可见的烧蚀斑点以及一些肉眼可见的蚀坑与凸起。表 1 为不同放电次数后电极表面烧蚀宽度( $d$ )的变化规律, 随着放电次数的增加烧蚀区域宽度不断增大, 且阳极烧蚀区域宽度高于阴极, 黄铜烧蚀区域宽度高于不锈钢。3 600 次放电后, 不锈钢阴极烧蚀区域宽度由 5.50 mm 增加到 8.36 mm, 阳极烧蚀区域宽度由 6.50 mm 增至 8.63 mm。1 200 次放电后黄铜电极的阴极、阳极的烧蚀区域分别为 6.10 mm, 7.36 mm; 3 600 次触发放电后黄铜的阴极、阳极的烧蚀区域宽度分别增加至 7.90 mm, 9.05 mm。

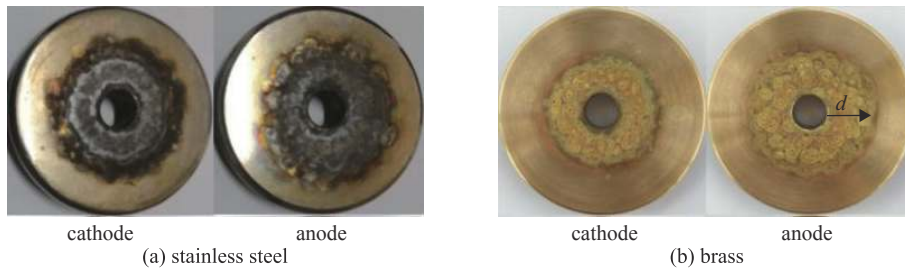


Fig. 5 Macrographs of stainless steel and brass electrode surfaces after 2 400 discharges

图 5 2 400 次放电后不锈钢和黄铜电极表面宏观图

表 1 不同放电次数后电极表面烧蚀区域宽度

Table 1 Width of ablation area on electrode surface after different discharge times

discharge times	width of stainless steel/mm		width of brass/mm	
	cathode	anode	cathode	anode
1 200	6	6.5	6.1	7.36
2 400	7.77	7.95	7.19	8.67
3 600	8.36	8.63	7.9	9.05

### 2.2.2 电极表面微观烧蚀特性

不锈钢电极材料经过抛光, 阴极阳极初始轮廓无明显差距。从原始电极微观形貌观察, 黄铜电极阴极机械加工的粗糙度大于阳极, 其凸起多于阳极。在 1 200 次放电后, 黄铜电极表面存在明显的烧蚀圆斑, 在圆斑中心有直径约为 100  $\mu\text{m}$  的融坑, 圆斑内存在直径约为 50  $\mu\text{m}$  的蚀坑。如图 6 所示, 随着放电次数的增加, 黄铜电极表面的蚀坑数目增加, 少数蚀坑尺寸也略微增加; 不锈钢电极表面的凸起、裂纹数目也随着放电次数的增加而增加。由于电极材料特性不同, 不锈钢电极表面无明显的烧蚀圆斑, 并且无明显的蚀坑和中心融坑, 取而代之的为大量的凸起。开关工作条件相同, 又由于工程实际中其工作条件无法固定到某一固定值带有一定的误差范围, 因此触发放电时其烧蚀圆斑直径在某一范围内变化。黄铜电极阴极烧蚀圆斑的平均直径为 2 223.39  $\mu\text{m}$ , 而阳极的烧蚀圆斑平均直径为 2 539.73  $\mu\text{m}$ 。

## 2.3 电极表面的轮廓线及粗糙度分析

表面缺陷与表面粗糙度、表面波纹度、表面宏观形状一起综合形成了零件的表面轮廓特征。使用非球面测量仪 PGI3D 软件测量电极表面轮廓, 去除表面波纹度与宏观形状参数, 计算轮廓算术平均偏差  $R_a$ 、最大轮廓峰高  $R_p$  与最大轮廓谷深  $R_v$ 。图 7 和图 8 所示为 3 600 次触发试验后不锈钢和黄铜电极表面轮廓线。图 9 所示为不锈钢、黄铜阴阳极烧蚀区域的波峰、波谷以及波峰谷差的变化趋势。

由图 7 可知, 不锈钢电极 1 200 次放电后, 阴极、阳极烧蚀区域出现大量毛刺、凸起、蚀坑以及少量裂纹, 不锈钢阴极阳极的最大波峰谷差  $R_z$  升至 6.847 2  $\mu\text{m}$ , 6.363 6  $\mu\text{m}$ ; 表面的轮廓粗糙度  $R_a$  分别为 0.773 1  $\mu\text{m}$ , 0.757 7  $\mu\text{m}$ 。



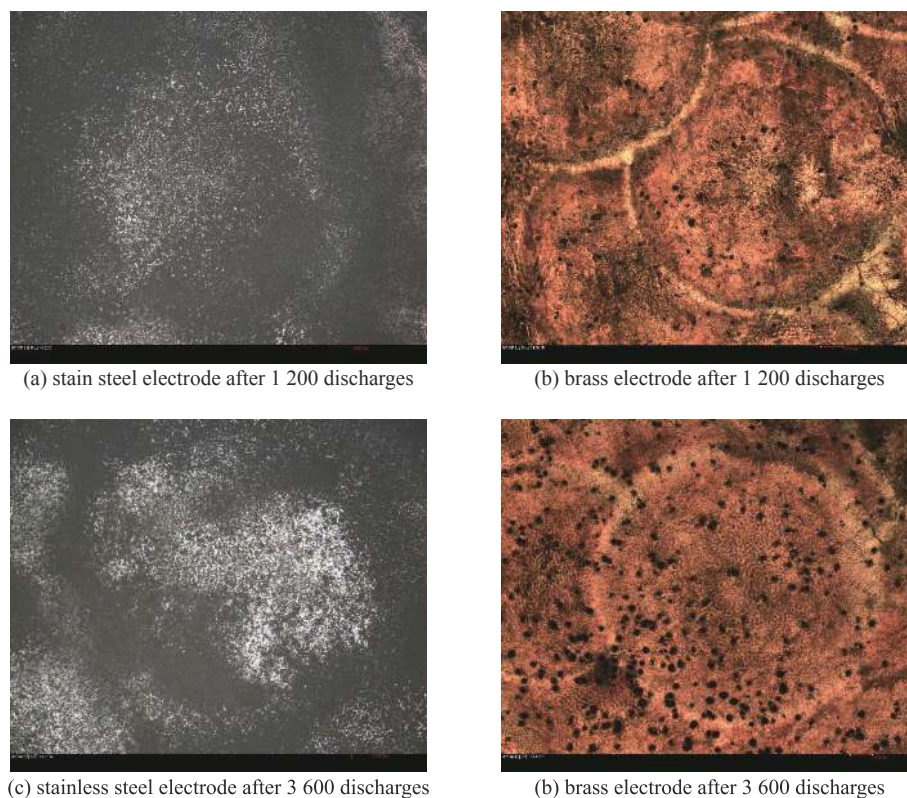


Fig. 6 Surface microstructure of stainless steel and brass anode

图 6 不锈钢、黄铜阳极表面微观形貌

由图 8 可知黄铜电极阴极阳极中心烧蚀区域的最大波峰谷差  $R_z$  为  $5.523\ 5\ \mu\text{m}$ ,  $3.684\ 6\ \mu\text{m}$ ; 表面轮廓粗糙度分别为  $0.889\ 3\ \mu\text{m}$ ,  $0.675\ 8\ \mu\text{m}$ 。

2 400 次放电后, 不锈钢和黄铜烧蚀区域表面轮廓线增长, 不锈钢电极阴极面  $R_z$  为  $6.896\ 7\ \mu\text{m}$ , 而阳极  $R_z$  为  $7.765\ 4\ \mu\text{m}$ ; 阴极和阳极  $R_a$  分别增加至  $0.890\ 6\ \mu\text{m}$ ,  $1.026\ 9\ \mu\text{m}$ ; 同时裂纹的深度增加约  $0.5\ \mu\text{m}$  并且数量也略微增加。黄铜阴极、阳极的  $R_z$  增至  $3.925\ 5\ \mu\text{m}$ ,  $4.863\ 1\ \mu\text{m}$ ; 阴极和阳极电极表面轮廓粗糙度为  $0.461\ 5\ \mu\text{m}$ ,  $0.536\ 95\ \mu\text{m}$ 。

在 3 600 次放电后, 不锈钢电极裂纹深度和数量明显增加, 阴极、阳极中心烧蚀区域的  $R_a$  增加至  $1.005\ \mu\text{m}$ ,  $1.179\ 8\ \mu\text{m}$ ; 而  $R_z$  分别为  $7.916\ 8\ \mu\text{m}$ ,  $8.481\ 0\ \mu\text{m}$ 。而黄铜阴极、阳极烧蚀区域的粗糙度增加至  $0.663\ 8\ \mu\text{m}$ ,  $0.834\ 3\ \mu\text{m}$ ; 最大波峰谷差分别为  $6.648\ 8\ \mu\text{m}$ ,  $8.363\ 5\ \mu\text{m}$ 。

随着触发次数的增加, 不锈钢电极轮廓线毛刺数量增加, 并且蚀坑深度增加, 而外边缘的轮廓线相对光滑, 变化幅度小。黄铜电极的烧蚀区域约在  $0\sim 7\ \text{mm}$  之间, 起始阶段烧蚀区域相对于边缘区域轮廓线毛刺少、更加光滑, 但随着触发放电次数的增加, 蚀坑深度以及数量明显增加。不锈钢电极表面烧蚀区域和表面粗糙度均随着触发次数的增加而增大, 而黄铜电极表面粗糙度呈现先下降后上升的趋势。

### 3 分析与讨论

由上述结果可知, 两种电极材料的自击穿电压均随着气压的增大而增大, 这是由于空气中均匀电场的击穿电压与间隙距离、空气密度成正比。其它工作条件不变时, 空气密度增大缩短电子的平均自由行程, 削弱电离程度, 从而导致击穿电压升高。电极材料对自击穿性能和触发性能有着重要的影响, 不同电极材料逸出功不同, 黄铜的电子发射率以及发射稳定性要低于不锈钢, 导致黄铜的自击穿电压与触发时延抖动高于不锈钢。开关间隙的过压倍数影响其击穿时延, 在本实验中过压间隙的过压倍数是触发间隙的  $1.1\sim 1.3$  倍, 同时触发间隙击穿时的辐射光子经过电极中心圆孔照射过压间隙, 过压间隙经过预电离缩短有效电子产生的时间, 缩短击穿时延, 减小抖动, 导致触发间隙的击穿时延  $T_1$  和抖动  $t_{d1}$  均高于过压间隙的击穿时延  $T_2$  和抖动  $t_{d2}$  [10-11,13]。

电极微观形貌的改变表现为产生大量毛刺、凸起与蚀坑, 形成局部极不均匀场, 有利于电子崩的产生与发展, 使击穿条件更容易满足, 局部电场不均匀也会使流注易从局部缺陷处产生, 后续电弧也会进一步烧蚀缺陷处, 最终导致电极宏观烧蚀形貌的改变。放电时电弧等离子体的加热作用, 使得液态电极材料流向融坑中央, 部分液态电

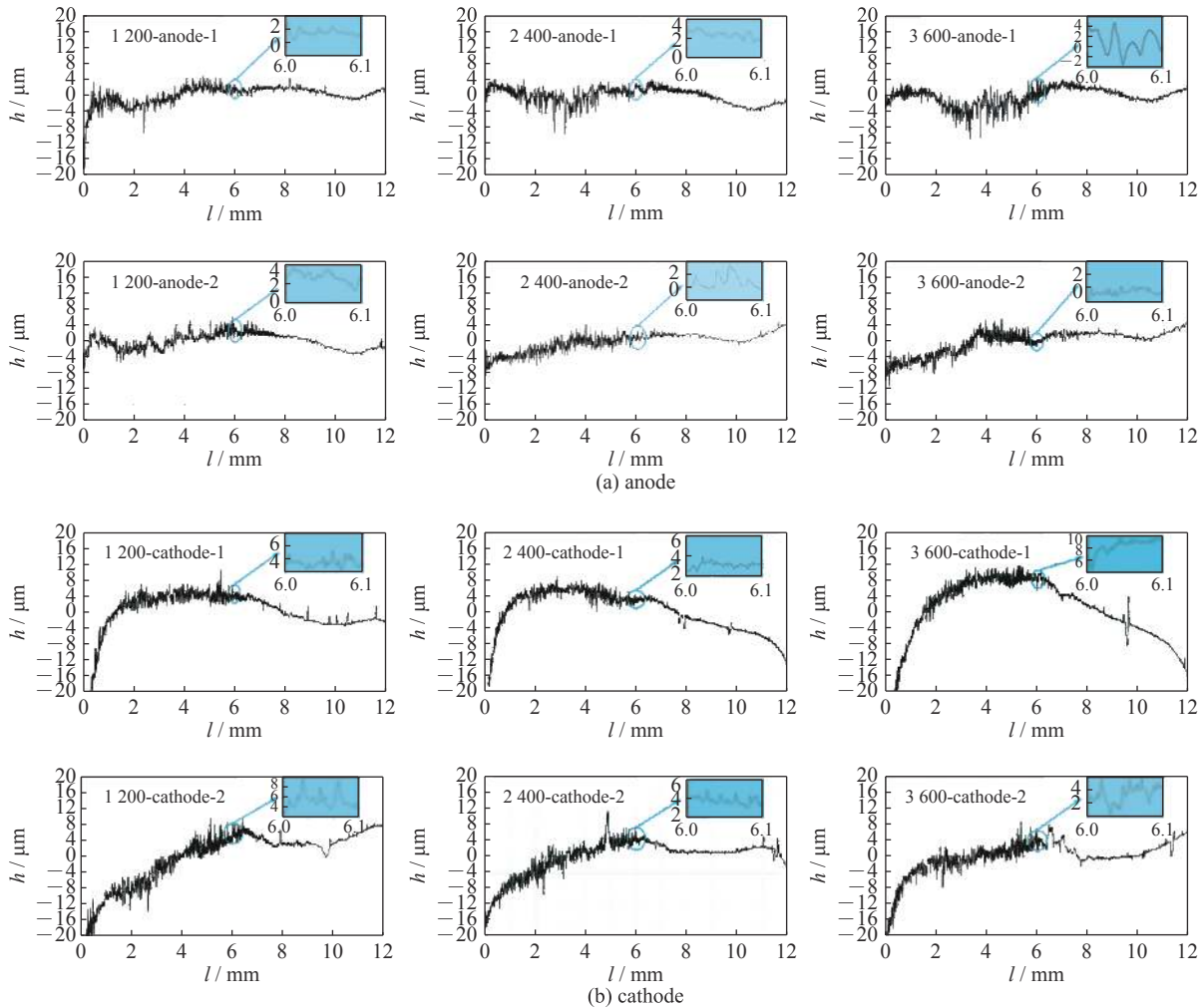


Fig. 7 Actual contours of anode and cathode after different discharge times (stainless steel electrodes)

图7 中间电极为不锈钢时阴极、阳极表面轮廓线

极材料流向蚀坑边缘其它区域, 形成一个以电极-电弧接触点为中心外边沿可能有突起, 内部近似为球冠状或圆柱状蚀坑<sup>[13-15]</sup>。黄铜的熔沸点低, 放电时电极表面液体材料易熔沸溢出、喷溅, 从而流向其它区域, 黄铜电极表面烧蚀圆斑更加明显; 而不锈钢熔沸点高, 电极材料不易熔沸溢出、喷溅, 在烧蚀圆斑区域冷凝, 以此叠加, 导致不锈钢电极表面烧蚀区域的粗糙度高于黄铜<sup>[14,16-17]</sup>。触发脉冲放电为多电子发射, 易形成多电子通道放电, 因此阳极的烧蚀区域面积大于过压放电的阴极。多电子放电通道也使黄铜阳极电极表面烧蚀圆斑直径高于阴极。不锈钢阳极表面轮廓粗糙度高于阴极, 这是由于阳极表面烧蚀大于阴极, 致使凸起高度、蚀坑深度普遍较高。在1 200次放电后黄铜的表面轮廓粗糙度是阴极高于阳极, 这是由于黄铜初始表面加工痕迹存在, 又由于阳极烧蚀较阴极严重, 使得阳极表面相对光滑; 2 400次放电后, 阳极表面轮廓粗糙度高于阴极, 是由于阳极烧蚀程度、烧蚀速度高于阴极, 蚀坑和凸起叠加最终使阳极表面粗糙度上升并且高于阴极。由于阳极烧蚀程度高于阴极, 阳极电极表面形成的极不均匀场高于阴极, 使得阳极所对应的负主电极更利于击穿, 因此负自击穿电压有更好的一致性。

由于 $T_1$ 包括脉冲电压上升沿和间隙1击穿时延, 因此影响触发间隙时延及抖动变化原因有两种, 一是触发脉冲上升沿及脉冲幅值的变化, 二是电极烧蚀对表面微观形貌的影响。影响过压间隙击穿时延及抖动的主要因素为电极表面微观形貌和开关工作系数<sup>[16,18]</sup>。电极烧蚀可能加大毛刺和凸起, 也可能削平毛刺扩大蚀坑深度和宽度, 再加上脉冲波形变化的不确定性, 使得触发间隙击穿时延及抖动震荡变化。不锈钢自击穿电压与过压间隙击穿时延的变化趋势具有一致性, 呈现先下降后上升震荡变化, 由图9(a)可知最大波谷波峰值逐渐增大, 这是由于电极烧蚀使中间电极表面烧蚀区域内存在大量的凸起和蚀坑, 施加高压时凸起场强较高, 更容易发射电子, 降低开关的击穿电压, 从而降低击穿时延; 随着触发次数的增加, 新的放电削平毛刺, 扩大蚀坑面积, 击穿电压又会升高; 电极烧蚀使得电极表面凸起高度增加或者溶液流入蚀坑内减小蚀坑深度, 烧蚀的不确定性使得过压间隙击穿时延震荡变

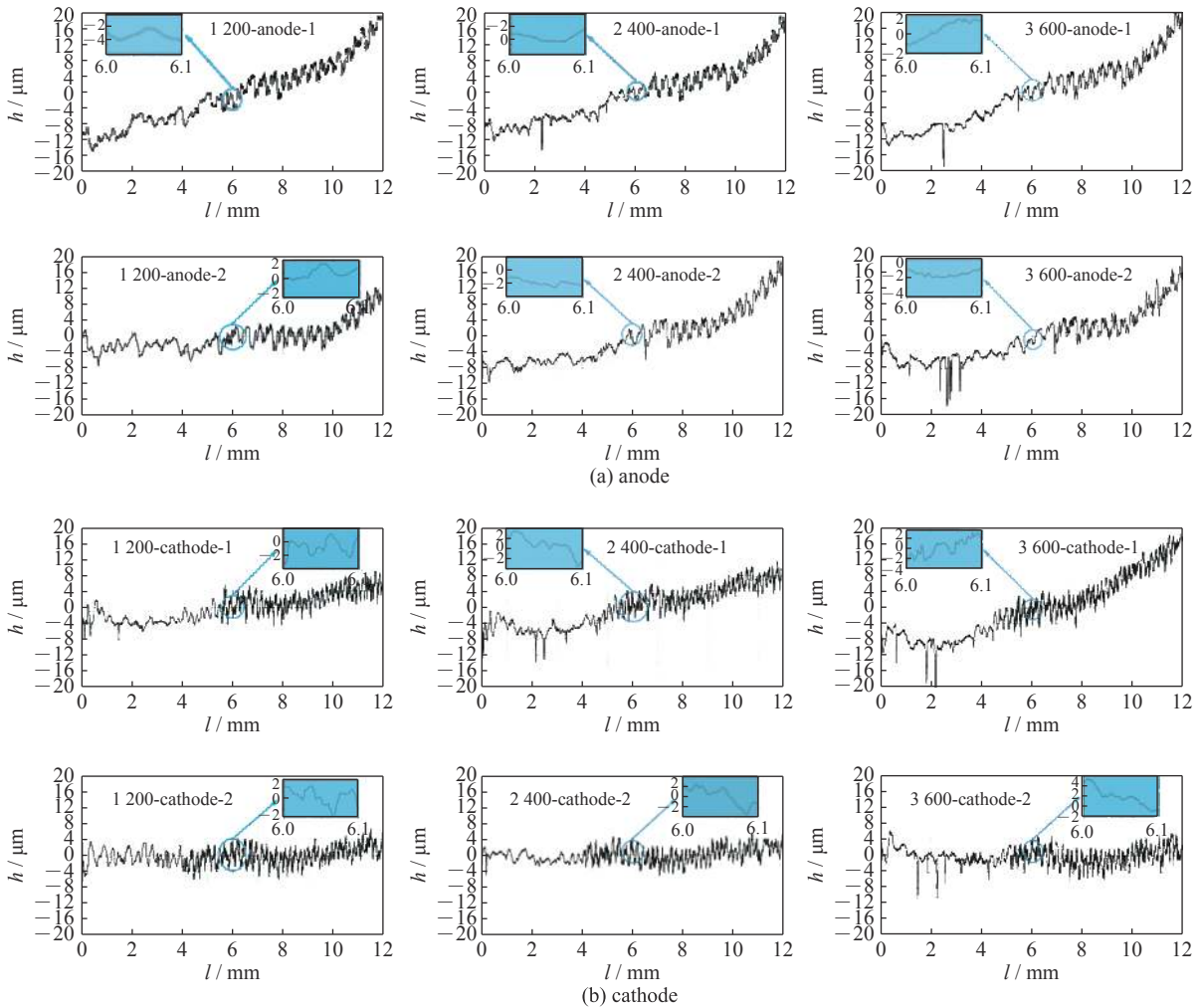


Fig. 8 Actual contours of anode and cathode after different discharge times (brass electrodes)

图 8 中间电极为黄铜时阴极、阳极表面轮廓线

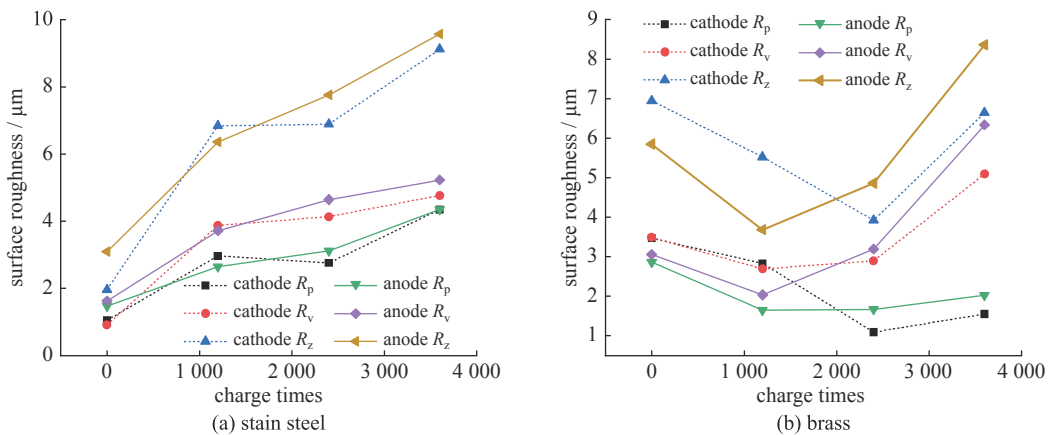


Fig. 9 Variation of surface roughness of intermediate electrode

图 9 中间电极表面粗糙度的变化趋势

化<sup>[12-14]</sup>。黄铜自击穿电压和过压间隙时延呈现为先上升后下降再上升的变化趋势，图 9(b) 所示最大波峰波谷值变化趋势为先下降后上升。在初始触发实验中电极烧蚀使黄铜电极表面的加工线溶蚀磨平，电极表面较原始轮廓线光滑，最大波峰值下降，使自击穿电压升高， $T_2$  击穿时延增加；随着触发次数的增加，电极表面出现大量的毛刺和凸起，此时电极表面波峰值增加，自击穿电压下降，击穿时延下降；3 600 发触发实验后，新的放电使放电坑尺寸和深度增大，导致自击穿电压升高， $T_2$  及  $t_{d2}$  增大。

触发间隙时延  $T_1$  及其抖动  $t_{d1}$  是击穿时延  $T$  和抖动  $t_d$  的主要来源，触发间隙是影响开关工作特性主要因素。



由于电极表面烧蚀严重导致放电向边缘移动,电极材料的喷溅污染绝缘子,导致其绝缘性能劣化,最终绝缘子损坏导致气体开关寿命终结。

## 4 结 论

本文对一种所研究的三电极场畸变开关进行开关寿命实验,研究其中间电极材料分别为不锈钢和黄铜时的静态和触发特性,同时研究两种电极材料分别作为阴阳极时烧蚀的微观形貌、粗糙度以及烧蚀点分布的变化规律。结果表明:(1)电极烧蚀改变电极表面微观形貌,不锈钢和黄铜材料烧蚀机理不同使得两种材料的自击穿电压有不同的震荡变化规律。触发间隙击穿时延及抖动均高于过电压间隙,是总触发时延及抖动的主要来源;触发间隙下阳极表面烧蚀更加严重,且阳极的烧蚀区域宽度和表面粗糙度均高于过电压间隙下的阴极。(2)不锈钢阴阳极烧蚀程度、烧蚀区域以及表面粗糙度均随着触发次数的增加而增大。黄铜电极表面粗糙,电极表面的烧蚀区域随着放电次数的增加而增大,但电极表面粗糙度随着放电次数的增加呈现先下降后上升的趋势。黄铜电极表面烧蚀较为严重并且电极表面有明显边界轮廓的烧蚀圆斑,而不锈钢则具有更高的表面粗糙度。(3)触发放电放电时,电极表面烧蚀程度随着放电次数的增加而严重,大量的毛刺和凸起改变电极表面微观形貌,影响开关工作特性,触发放电逐渐向边缘移动,最终沿面放电使触发间隙处绝缘子损坏。

## 参考文献:

- [1] 丛培天,邱爱慈.快脉冲直线变压器气体开关技术[J].强激光与粒子束,2012,24(6):9-14.(Cong Peitian, Qiu Aici. Review on gas switch developed for fast linear transformer driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 9-14)
- [2] Zhou L, Li Z, Wang Z, et al. Design of a 5-MA 100-ns linear-transformer-driver accelerator for wire array Z-pinch experiments[J]. Physical Review Special Topics—Accelerators & Beams, 2016, 19: 030401.
- [3] Douglass J D, Hutsel B T, Leckbee J J, et al. 100 GW linear transformer driver cavity: Design, simulations, and performance[J]. Phys Rev Accel Beams, 2018, 21: 120401.
- [4] 孙铁平,丛培天,曾正中,等.快前沿直线脉冲变压器驱动源多间隙气体开关技术[J].强激光与粒子束,2010,22(7):1673-1676.(Sun Tieping, Cong Peitian, Zeng Zhengzhong, et al. An experimental study of the multi-gap switch for fast linear transformer driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1673-1676)
- [5] Woodworth J R, Hahn K, Alexander J A, et al. Gas switch studies for linear transformer drivers[C]//16th International Pulsed Power Conference, 2007: 250-253.
- [6] Woodworth J, Stygar W, Bennett L, et al. New low inductance gas switches for linear transformer drivers[J]. Physical Review, 2010, 13(8): 1-17.
- [7] 王虎,危瑾,常家森,等.场畸变气体开关寿命预测[J].中国电机工程学报,2011,31(19):153-159.(Wang Hu, Wei Jin, Chang Jiasen, et al. Lifetime prediction of field-distortion gas switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 153-159)
- [8] 魏浩,孙凤举,刘鹏,等.±100 kV三电极场畸变气体火花开关[J].强激光与粒子束,2012,24(4):881-884.(Wei Hao, Sun Fengju, Liu Peng, et al. ±100 kV three-electrode field-distortion gas spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(4): 881-884)
- [9] Wang H, Chang J S, Tong X, et al. Study on the characteristics of the gas switch electrode erosion[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 6-11.
- [10] 翟戎骁,黄涛,丛培天,等.气体开关触发间隙与过压间隙击穿特性研究[J].原子能科学技术,2018,52(10):182-188.(Zhai Rongxiao, Huang Tao, Cong Peitian, et al. Study on breakdown characteristic of trigger gap and overvoltage gap in gas switch[J]. Auto Energy Science and Technology, 2018, 52(10): 182-188)
- [11] 李晓昂.纳秒脉冲下电极熔蚀对气体开关性能劣化过程的影响研究[D].西安:西安交通大学,2016.(Li Xiaoang. Investigations on the influences of electrode erosion on performance degradation process in gas spark switch under nanosecond current pulse. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2016)
- [12] 罗敏,江金生,常安碧,等.高功率气体火花开关电极烧蚀机理研究[J].强激光与粒子束,2004,16(6):781-786.(Luo Min, Jiang Jinsheng, Chang Anbi, et al. Study on mechanism of electrode erosion of high power gas spark gap switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6): 781-786)
- [13] 陈维青,曾正中,邹丽丽,等.100 kA微秒级气体火花开关电极材料熔蚀研究[J].强激光与粒子束,2004,16(2):239-242.(Chen Weiqing, Zeng Zhengzhong, Zou Lili, et al. Selection of gas spark gaps electrode material under microsecond 100 kA current pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(2): 239-242)
- [14] 谢昌明,谈效华,杜涛,等.气体火花开关电极烧蚀形貌研究[J].电工技术学报,2015,30(20):246-251.(Xie Changming, Tan Xiaohua, Du Tao, et al. Microstructure characteristics in electrodes of gas spark gap after erosion[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 246-251)
- [15] Engel T G, Wester S L, Kristiansen M, et al. Review of the mechanisms of electrode and insulator erosion and degradation in high current arc environments[J]. IEEE Trans Magnetics, 1995, 31(1): 709-713.
- [16] 罗维熙,丛培天,孙铁平,等.电极材料对气体火花开关静态性能的影响[J].强激光与粒子束,2016,28:015022.(Luo Weixi, Cong Peitian, Sun Tieping, et al. Influence of electrode materials on static performance of gas spark switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 015022)
- [17] 吴佳玮,韩若愚,丁卫东,等.长寿命铜钨合金气体开关电极的烧蚀形貌[J].中国电机工程学报,2017(8):2465-2468.(Wu Jiawei, Han Ruoyu, Ding Weidong, et al. Surface morphology of Cu-W alloy electrodes in a Long lifetime gas spark switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2017(8): 2465-2468)
- [18] Ramirez J J. Effect of electrode surface conditions on the self - breakdown strength and jitter of a high pressure pulsed gas switch[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(5): 1925-1928.