

短间隙的击穿及其短路放电特性研究

钟久明^{1,2}, 刘树林¹, 王玉婷¹, 段江龙¹

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;
2. 海南师范大学物理与电子工程学院, 海南 海口 571158)

摘要: 为研究 IEC 安全火花试验装置短路放电的击穿放电机制, 针对室温 1 atm 下不同浓度的甲烷空气混合气体, 对几百微米~几毫米范围内的击穿实验进行了设计。分析表明对于不同浓度甲烷空气混合气体, 击穿电压与电极间距的关系曲线均呈现马鞍形; 室温 1 atm 下 8.5% 甲烷空气混合气体在几百微米~几毫米间隙范围内的最低击穿电压表明试验装置的电容短路放电过程在巴申定律的适用范围之外且其临界击穿间距在几百微米以下。可见, 该放电过程中间隙内的碰撞电离效应并不突出, 阴极电子发射是其击穿放电的主导机制, 该放电过程类似真空放电, 通过安全火花试验装置得出不同介质环境的电容电路短路放电波形对此进行了验证。

关键词: 短间隙; 短路放电; IEC 安全火花试验装置; 击穿特性

中图分类号: TM85 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2016)04-0030-05

1 引言

IEC 安全火花试验装置 (IEC-SSTA) 是进行电路本质安全 (简称本安) 性能测试、评价及鉴定的标准设备, 也是从事本安电路研究最基本的实验设备^[1,2]。运动电极下的微间隙是该装置形成火花放电的重要组成部分, 也是研究装置短路放电特性、揭示短路放电机理的关键性难点。

目前对于各种放电的研究多针对高电压长间隙开展^[3-5]且多为仿真或实验研究^[6,7], 而关于低电压短间隙放电特性的研究较为罕见。IEC-SSTA 的短路放电过程中, 钨丝电极以一定的速率向镉盘电极靠近直至短路, 极间距离在放电过程中逐渐变小直至为零。由于电极结构及短路方式的特殊性加之极间距较为微小, 而且极间距在放电过程中不断变化, 因此, 该试验装置的短路放电过程较为复杂。

关于 IEC-SSTA 的短路放电过程多为定性描述或实验研究^[1,8,9]。文献[8,9]对其短路放电机理进行了分析, 认为该放电过程是以碰撞电离及电子雪崩为主要特征的气体放电, 而这也是国内外本质安

全研究领域相关专家学者的普遍共识^[8-10]。然而, 实验及理论分析均表明, IEC-SSTA 的电容短路放电过程中间隙内的碰撞电离效应并不突出, 碰撞电离并非其击穿放电的主导机制, 阴极电子发射是其击穿放电的主导机制, 该放电过程类似真空放电。而气体放电与真空放电有本质差别, 其研究方法与侧重点也截然不同^[10-12]。因此, 研究 IEC-SSTA 的短路放电特性及机理, 必须首先搞清楚该放电过程的击穿放电机理。

本文将针对该放电试验中的特定放电体系进行击穿特性分析及放电实验, 研究气体介质对间隙击穿放电的影响。为深入研究 IEC-SSTA 的短路放电机理及特性分析奠定理论基础。

2 间隙及实验原理设计

IEC-SSTA 的电容短路放电试验是一个复杂的动态放电过程: 密闭的容器内充满特定的气体介质 (如 I 类环境为 $(8.3 \pm 0.3)\%$ 的室温常压甲烷空气混合气体), 其中布置一对钨丝和镉盘电极, 钨丝由电机驱动以约 0.25 m/s 的速率向旋转镉盘电极

收稿日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50977077; 51277149); 海南自然科学基金面上项目 (20165199)

作者简介: 钟久明 (1975-), 男, 江西籍, 副教授, 博士研究生, 研究方向为安全火花电路及气体放电;

刘树林 (1964-), 男, 四川籍, 教授, 博士生导师, 主要从事开关变换器的研究和功率集成电路设计工作 (通讯作者)。

靠近直至短路, 放电系统结构如图 1 所示。

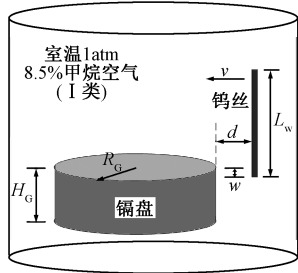


图 1 IEC-SSTA 短路放电系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of short circuit discharge with IEC-SSTA

其中, $H_c = 8\text{mm}$ 和 $R_c = 15\text{mm}$ 分别为铜盘的高度和半径, 钨丝直径 0.2mm 、长度 $L_w = 11\text{mm}$, 钨丝与铜盘的间距为 d , 两者相交部分的长度 $w = 1\text{mm}$ 。

考虑到钨丝及铜盘电极微观表面的粗糙度, 几百微米及以下量级的电极间距难以准确定位。为研究 IEC-SSTA 的电容短路放电击穿特性, 针对室温 1atm 下不同浓度甲烷空气混合气体, 可对几百微米~几毫米的短间隙击穿性能进行实验测试。

由于 IEC-SSTA 的试验电压规定不超过 300V , 而几毫米间隙的击穿电压应远高于 300V , 为避免损坏装置, 可设计一密封室, 其内布置与 IEC-SSTA 装置结构相似、间距可调的钨丝与铜盘电极系统, 电极系统结构如图 2 所示。

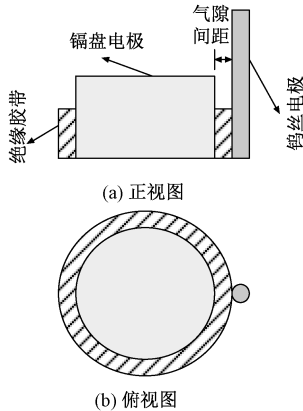


图 2 设计的电极系统示意图
Fig.2 Design of electrode system schematic diagram

运用重新设计的电极系统进行击穿实验, 具体实验方案如下。

用 0.5mm 厚的高压绝缘胶带紧紧缠绕在铜盘的外侧圆柱面, 使铜盘侧面上端距上平面约 1mm 的环带空白作为打火电极之一。将 $\varnothing 0.2\text{mm}$ 钨丝的

自由长度由 11mm 延长至 18mm , 作为另一打火电极。首先对钨丝进行矫直, 然后用粘性胶带将钨丝固定于铜盘外侧圆柱面的高压绝缘胶带上。调整高压绝缘胶带的缠绕层数便可改变钨丝与铜盘电极的放电间隙长度。

为减小采用游标卡尺测量绝缘胶带厚度时的误差, 测量时在胶带的两面各垫上一定厚度 (如 1mm 厚) 的薄金属片, 测量值减去 2mm 即为所测绝缘胶带的实际厚度。

在钨丝和铜盘电极两端施加直流可调电压, 并在回路串联一微安表和 $1 \sim 2\text{M}\Omega$ 电阻, 调整直流电压, 以使微安表指针突然摆动到 $100\mu\text{A}$ 时的电压作为间隙击穿电压。设计的实验方法原理示意图如图 3 所示。

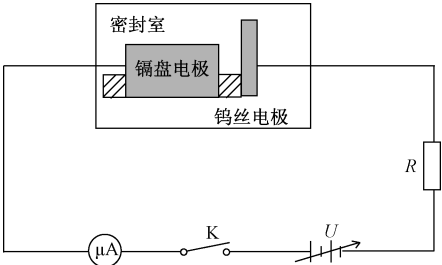


图 3 设计的实验原理示意图
Fig.3 Schematic circuit in experimental program

其中 U 为直流可调电压源 ($0 \sim 10\text{kV}$), μA 为直流微安表, R 为限流电阻。密封室预留抽真空及进气口, 室内电极由引出端与外电路相连。为提高实验安全性, 在电路回路中串联一高压开关 K 。

3 间隙击穿试验方案及其分析

调整绝缘胶带的缠绕圈数改变间隙长度, 将密封室抽真空后充入不同浓度的甲烷空气混合气体, 可测出相应击穿电压。对于不同浓度甲烷空气混合气体, 击穿电压与电极间距的关系曲线大致呈现马鞍形, 即气体放电中典型击穿曲线——巴申曲线。说明室温一个大气压下, 当电极间距大于几百微米时, 不同浓度甲烷空气混合气体的击穿放电过程中, 气体介质对击穿放电起主导作用, 此放电过程符合气体放电的汤生理论, 属于气体放电。

汤生理论认为, 在均匀电场中, 气体放电击穿主要由自由电子与气体分子碰撞电离以及正离子碰撞阴极而使其发射二次电子的 γ 过程共同作用的结果。其放电击穿曲线由巴申定律给出, 即

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln\left[\frac{Apd}{\ln(1+1/\gamma)}\right]} \quad (1)$$

式中, $A = k\sigma/T$, $B = AU_i$ 为气体常数, 其中 k 为玻尔兹曼常数, $\sigma = \pi r_B^2$ 为碰撞截面 (r_B 为气体分子半径), U_i 为气体电离电位, T 为温度; p 为气体压强; d 为电极间距; γ 为第三碰撞电离系数。

将式(1)对 pd 取微分并令其等于零, 可得

$$(pd)_{\min} = \frac{2.718}{A} \ln(1 + \frac{1}{\gamma}) \quad (2)$$

$$V_{b\min} = 2.718 \frac{B}{A} \ln(1 + \frac{1}{\gamma}) \quad (3)$$

根据式(1)和式(2), 当 $pd = (pd)_{\min}$ 时击穿电压最小即 $V_{b\min}$ 。气体放电的巴申曲线以 $(pd)_{\min}$ 和 $V_{b\min}$ 为界分为左半支和右半支, 左半支随着 pd 值的减小击穿电压单调增大, 而右半支随着 pd 值的增大击穿电压单调增大。其原因主要是: 随着 pd 值增大, 空间粒子碰撞总次数增多, 使碰撞电离的几率增大而有利于放电的发展; 另一方面, 随着 pd 值的增大, 吸附、复合等去电离因素明显加强, 使得碰撞时电子能量损失增大, 碰撞电离的几率减小, 从而不利于放电的发展。对巴申曲线的左半支, 前者起主导作用, 而对其右半支, 后者起主导作用, 从而决定了巴申曲线为马鞍形。

根据上述分析可知, 当间隙距离为几百微米~几毫米时, 相同的温度与压强下, 随着甲烷浓度的降低, 巴申曲线的基本形状保持不变, 即各混合气体的放电击穿特性均符合气体放电汤生理论的巴申定律, 只是曲线整体往右、往上偏移, 相应的 $V_{b\min}$ 及其对应的 d 值增大。这主要是由于甲烷的电离电位较空气的电离电位低, 随着混合气体中甲烷浓度的降低, 混合气体的整体击穿电位增大, 碰撞电离概率降低, 因而表现为 $V_{b\min}$ 及其对应的 d 值增大。

对于室温 1atm 下的 8.5% 甲烷空气混合气体, 当间隙距离大于几百微米时, 间隙击穿特性大致呈马鞍形曲线, 符合气体放电巴申曲线的基本形状, 说明此情形下的击穿放电以气体介质的碰撞电离为主导放电机理, 属于气体放电的范畴。然而, 在以碰撞电离为主导放电机理的气体放电范围内, 最低击穿电压为数百伏, 其所对应的间隙距离约为几毫米。

根据巴申定律可以推断, 在临界击穿间距小于几百微米的左半支巴申曲线范围内, 其击穿电压必然近千伏甚至更高。这是因为当气压保持 1atm 不变时, 随着间隙距离的减小, 总的碰撞次数及有效碰撞电离

次数均较少, 当间隙减少至几十或几百微米时, 间隙距离已可与混合气体中电子碰撞的平均自由程相比拟, 间隙内的总碰撞次数十分有限, 有效碰撞电离次数极少, 因而其临界击穿电压势必大大增加。

在临界击穿间距大于几毫米的右半支巴申曲线范围内, 其击穿电压势必大于几千伏。这主要是由于随着间距的增大, 碰撞时电子能量损失增大从而使电离碰撞减弱, 不利于放电的发展, 因此击穿电压增大。

IEC-SSTA 所测试与研究的电路电压一般为几十伏, 甚至几伏, 可见, IEC-SSTA 的短路放电过程在巴申定律的适用范围之外。这说明仅依赖空间游离电荷的碰撞电离及阴极的二次电子发射无法使该间隙发生击穿放电, 即“雪崩”气体放电理论与实验现象不一致。

理论分析表明, 气体压强一定的情况下, 当电极间距太小或太大时, 巴申定律已不再适用。显然, 当电极电压为直流几十伏甚至几伏时, 其临界击穿间距不可能大于几毫米, 因此, 该放电过程的临界击穿间距必小于几百微米。

一般认为, 一定气压下当 d 太小时, 击穿属于真空击穿。因为 d 太小, 一方面, 电子的平均自由程已可与间隙距离相比拟, 在整个间距范围之内有效碰撞电离的概率极低; 另一方面, 阴极表面场强达到一定数值时, 会出现场致发射, 破坏巴申曲线。

综上分析可知, IEC-SSTA 的电容短路放电过程中, 间隙中的碰撞电离效应并不突出, 碰撞电离并非其击穿放电的主导机制, 该放电过程类似真空放电, 阴极电子发射才是其击穿放电的主导机制。

4 实验验证

为研究 IEC-SSTA 电容短路放电过程中气体介质对击穿放电的影响, 运用 IEC-SSTA 在 1atm 的氧气、氢气、8.5% 的甲烷空气混合气体及真空四种不同介质环境下进行了简单电容电路的短路放电实验, 电容初始电压为 18V, 电容值为 10μF, 示波器测得各种介质环境下的典型放电波形, 如图 4 所示。

其中 u 、 i 、 w 分别为放电电压、电流及能量波形。从图 4 可以看出, 不同介质下的典型放电波形极为相似, 均出现双峰形的放电电流波形及双台阶式的放电电压波形, 即出现两次放电现象且两次放电间隔期间放电电压近似维持 9V 不变。分别测量两次放电持续时间及电流峰值、两次放电间隔持续时间及期间的电压等放电特征参量, 计算各参量的统计

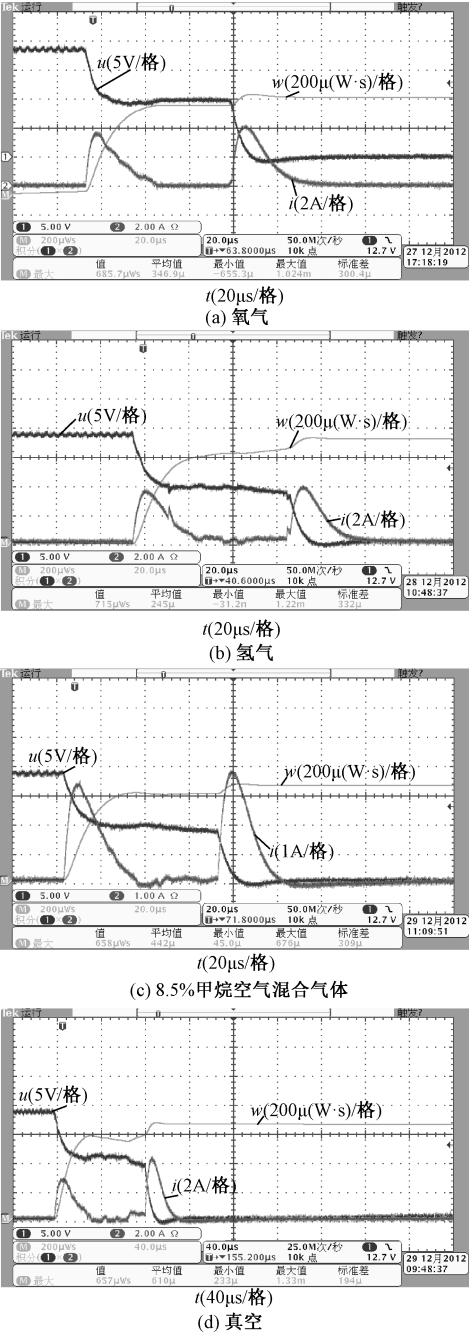


图4 部分介质的典型放电波形

Fig. 4 Typical discharge waveforms of some media

平均值,结果表明描述放电特征的各项统计平均值并无明显差异。

不同介质环境下(包括真空)的放电曲线特征参量良好的一致性,进一步表明气体介质对放电本身的影响可以忽略不计,这也说明基于该试验装置的电容短路放电过程属于真空放电范畴,而不属于气体放电范畴。

需要指出的是,由于 O_2 具有强氧化性,易从

周围气体介质中吸附电子,所以其击穿电压较高,并远高于 H_2 的击穿电压^[13],因此,若该放电过程中气体介质的影响不能忽略, O_2 、 H_2 及 CH_4 等气体环境下的放电特性应显著不同,而以上三种气体介质与真空条件下的放电特征则差异更大,这与图4的实验结果明显相悖,从而说明 IEC-SSTA 的电容短路放电过程中,气体介质对放电的影响可以忽略不计。

综上所述,无论是从放电波形还是放电的特征参量来看,室温 1atm 下的氧气、氢气或 8.5% 的甲烷空气混合气体等三种介质下的放电特性与真空条件基本一致,说明 IEC-SSTA 的电容短路放电过程中,气体介质对放电的影响可忽略不计,该放电过程类似真空放电过程。

5 结论

对于室温 1atm 下不同浓度的甲烷空气混合气体,击穿电压与电极间距的关系曲线均呈现典型气体放电曲线马鞍形;室温 1atm 下 8.5% 甲烷空气混合气体在几百微米~几毫米范围内的最低击穿电压远高于试验装置测试电路的工作电压。

IEC-SSTA 的电容短路放电过程中,间隙中的碰撞电离效应并不突出,碰撞电离并非其击穿放电的主导机制,该放电过程类似真空放电,阴极电子发射是其击穿放电的主导机制。

本文确定了气体介质对间隙击穿放电的影响,为深入研究 IEC-SSTA 的容性电路短路放电机理及特性分析明确了方向,奠定了基础。

参考文献 (References):

[1] 于月森,戚文艳,伍小杰 (Yu Yuesen, Qi Wenyan, Wu Xiaojie). 软火花电路的本安特性及优化分析 (Intrinsically safe characteristics and optimization analysis of soft-spark circuit) [J]. 煤炭学报 (Journal of China Coal Society), 2014, 39 (10): 2134-2140.

[2] 钟久明,刘树林,崔强 (Zhong Jiuming, Liu Shulin, Cui Qiang). IEC 火花试验装置的电容短路放电特性数学仿真分析 (Short circuit discharge behavior of capacitive circuit and its mathematical simulation analysis) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (2): 29-34.

[3] 张永明,来定国,程亮,等 (Zhang Yongming, Lai Dingguo, Cheng Liang, et al.). 纳秒脉冲电压下气体开关的击穿特性 (Breakdown characteristics of gas switch under nanosecond pulse voltage) [J]. 强激光与

- 粒子束 (High Power Laser and Particle Beam), 2009, 21 (8): 1267-1270.
- [4] 章程, 邵涛, 许家雨, 等 (Zhang Cheng, Shao Tao, Xu Jiayu, et al.). 120kV 下常压空气纳秒脉冲电晕放电特性 (Characteristic of nanosecond-pulsed corona discharge at 120kV in atmospheric-pressure air) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beam), 2012, 24 (3): 597-601.
- [5] Y Hirata, K Ozaki, U Ikeda, et al. Field emission current and vacuum breakdown by a pointed cathode [J]. Thin Solid Films, 2007, 515 (9): 4247-4250.
- [6] 李静, 曹云东, 邹积岩, 等 (Li Jing, Cao Yundong, Zou Jiyan, et al.). 直流气体放电过程中的离子分子碰撞模型 (Ion-molecule collision modeling in direct current gas discharge) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2009, 35 (7): 1677-1682.
- [7] 董丽芳, 申中凯, 王永杰, 等 (Dong Lifang, Shen Zhongkai, Wang Yongjie, et al.). 介质阻挡放电中四边发光斑图的时空结构 (Spatiotemporal structure of luminous square superlattice pattern in dielectric barrier discharge) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2012, 38 (7): 1582-1587.
- [8] 刘树林, 钟久明, 樊文斌, 等 (Liu Shulin, Zhong Jiuming, Fan Wenbin, et al.). 电容电路短路火花放电特性及其建模研究 (Short circuit discharge behavior of the capacitive circuit and its mathematical model) [J]. 煤炭学报 (Journal of China Coal Society), 2012, 37 (12): 2123-2128.
- [9] 刘建华 (Liu Jianhua). 爆炸性气体环境下本质安全电路放电理论及非爆炸评价方法的研究 (Study on intrinsically safe circuit discharge theory in explosive gas environment and its non-explosive evaluating method) [D]. 徐州: 中国矿业大学 (Xuzhou: China University of Mining & Technology), 2008. 4.
- [10] 章良海, 宋雅婷 (Zhang Lianghai, Song Yating). 安全火花原理及应用 (The principle and application of the safe spark) [M]. 北京: 煤炭工业出版社 (Beijing: Coal Industry Publishing House), 1984.
- [11] Edgcombe C J, Valdr U. The enhancement factor and the characterization of amorphous carbon field emitters [J]. Solid State Electronics, 2001, 45 (6): 857-863.
- [12] G N Fursey. Field emission and vacuum breakdown [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1985, EI-20 (4): 659-670.
- [13] Miura T, Arakawa I. Gas discharge caused by triboelectricity around a contact during friction between insulators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14 (3): 560-565.

Study on breakdown and short circuit character of short gaps

ZHONG Jiu-ming^{1,2}, LIU Shu-lin¹, WANG Yu-ting¹, DUAN Jiang-long¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Physic and Electronics Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

Abstract: Aiming at the methane-air mixtures at room temperature and one bar pressure, the breakdown tests in 500 μm ~ 5mm range of clearance have been performed to study the effect of gas dielectric on the breakdown of short circuit discharge with the IEC safety spark test apparatus (IEC-SSTA). The experimental results show that the relationship between the breakdown voltage and gap distance fits to the typical gas-breakdown chart with changing the methane-air mixtures. For 8.5% methane-air mixtures, the lowest voltage is about 300v which is far larger than the operation voltage of the test circuits with IEC-SSTA. It is also shown that the discharge process does not belong to the category of gas discharge, and the effect of gas dielectric on the breakdown of the gap can be ignored. It is pointed out that the discharge process can be categorized into vacuum discharge rather than gas discharge, and the dominant breakdown mechanism of the discharge is the cathode electron emission. Short circuit discharge experiments of capacitive circuit in different media environment with the IEC-SSTA are performed, The experiment results are in good agreement with the analysis showing the feasibility of the proposed methods.

Key words: short gaps; short-circuit discharge; IEC safety spark test apparatus; breakdown character