

介质阻挡放电中气隙击穿电压计算研究

陈 昀 毕海岩

(国网天津市电力公司城东供电分公司 天津 300250)

(收稿日期:2016-05-05)

摘要:介质阻挡放电是产生低温等离子体的一种典型装置,在工业领域得到了广泛应用.其气隙上的电压是一个非常重要的参数,直接决定了气隙的场强.但在实验过程中,通常直接测量得到的是外加电压和电路中的电流,其气隙上的电压往往需要通过计算得到,因此分析了稳态击穿时刻的气隙电压的计算方法和首次击穿时刻的气隙电压的计算方法,为气体放电研究者提供一定的参考.

关键词:介质阻挡放电 气隙击穿电压 计算

1 引言

当谈到“大气压介质阻挡放电”(Dielectric Barrier Discharge: DBD)由于其不需昂贵的真空系统,易于产生大气压下的非平衡态等离子体,大大降低了生产成本,已在材料表面改性、薄膜生长、杀毒灭菌等工业领域上得到广泛应用^[1~4].

图1是介质阻挡放电实验装置的典型原理图,它主要包括交变电源、电气诊断系统和放电室.放电室内为两个平行平板电极,其表面覆盖着石英等介质材料,本试验中所用介质材料的厚度为1 mm,相对介电常数为3.9.放电室中充满了实验气体,本文中用气体为氖气,其相对介电常数为1.000 56.一般使用交流电压作为电源,放电电流和所加电压分别通过电流检测电阻 R 和电容分压器测量.电压和电流信号均利用示波器记录.

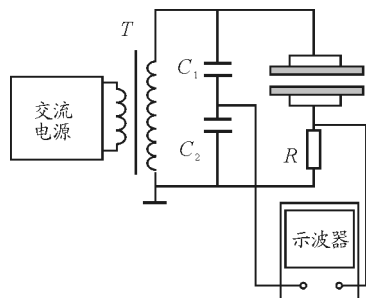


图1 介质阻挡放电实验装置原理图

2 气隙击穿电压的确定

图2所示,其为典型的大气压氖气介质阻挡均匀放电的稳态放电波形图.图中 U_a 为外加电压, i 为气隙电流,它们可以直接测量得到.除了稳态放电,在放电初始,还有一过渡过程,即从不放电到气隙击穿的过渡过程:如图3所示.图中所示的外加电压头两个半周期内,气隙没有击穿,电流为位移电流.在外加电压的第3个半周期内,大约在 $t = -12 \mu\text{s}$ 时刻,电流波形上出现了第一个放电电流尖峰,这表明气隙首次击穿.气隙首次击穿后,在外加电压的每半个周期内都出现了一个放电电流脉冲(即击穿一次),并且电流脉冲幅值逐次增大,直至达到9 mA左右稳定下来,表明气隙进入了稳态击穿阶段.而图2所示的稳态击穿阶段的外加电压和电流波形图是在首次击穿发生15个电压周期之后记录下来的.

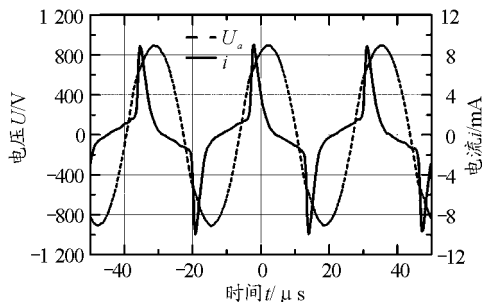


图2 气隙稳态击穿阶段的放电波形图

(频率 $f = 20 \text{ kHz}$,气隙间距 $d = 6 \text{ mm}$)

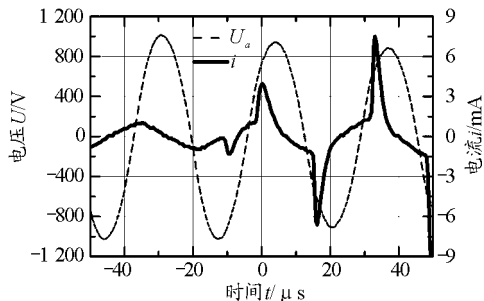


图3 气隙从首次击穿向稳态击穿的过渡过程
($f = 20 \text{ kHz}, d = 6 \text{ mm}$)

在这两种情况下,测量得到的电压都为外加电压,但是,真正对气隙击穿起作用的是气隙上的电压 U_g ,但人们难以直接测量 U_g ,而只能通过实验测量和电路计算相结合的方法间接得到 U_g ,得到气隙电压后就可以计算击穿场强等物理量.因此,如何得到气隙电压是介质阻挡放电中首先要解决的问题.

2.1 稳态击穿电压的确定

图4是介质阻挡放电的等效电路,其中 C_m 和 C_g 分别是阻挡介质等效电容和气隙等效电容,它们的数值可以通过平板电容公式计算得到. R_g 是气隙的等效电阻,它是一个可变电阻,气隙击穿前, R_g 趋于无穷大;气隙击穿时, R_g 迅速减小为放电等离子体的电阻. U_a 和 i 是电极两端的外加电压和回路放电电流,如图4所示,外加电压 $U_a(t)$ 和电路电流 $i(t)$ 是可以直接测量的.

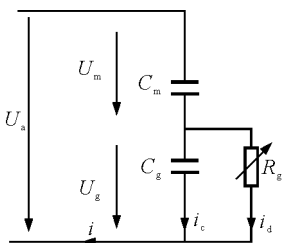


图4 介质阻挡放电等效电路图

对图4列电路方程如下

$$U_g(t) = U_a(t) - U_m(t) \quad (1)$$

$$U_m(t) = \frac{1}{C_m} \int_{t_0}^t i(t) dt + U_m(t_0) \quad (2)$$

其中 $U_m(t_0)$ 是常数,它表示 t_0 之前的放电在介质表面积累电荷的影响.在计算中要取恰当的平均值为零,即介质没有自极化.

由于 $U_a(t)$ 和 $i(t)$ 是实验中已经测量得到的,将它们代入式(1)和(2),可以数值计算得到 $U_g(t)$.

图5是确定 U_g 的示意图,图中给出了测量得到的外加电压波形,计算得到的气隙电压波形(黑色粗实线).稳态击穿电压 U_b ,可以直接从图5中的气隙电压 U_g 波形上读取, U_g 突然急剧下降时对应的电压即为 U_b .显然, U_b 约为 800 V.

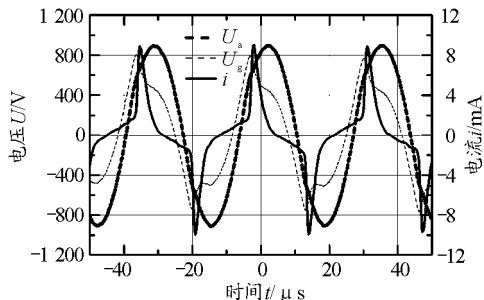


图5 气隙稳态击穿阶段确定 U_g 的示意图

2.2 首次击穿电压的确定

首次击穿电压的算法和稳态击穿电压有所不同,由于首次击穿之前气隙中无放电,根据图3,首次击穿之前,气隙等效电容 C_g 和阻挡介质等效电容 C_m 呈串联关系,它们对外加电压 $U_a(t)$ 分压.由于首次击穿发生在 $U_a(t)$ 的峰值 U_{am} 附近,首次击穿电压 U_{b0} 可用下式计算

$$U_{b0} = \frac{C_m}{C_m + C_g} U_{am} \quad (4)$$

从图3可知, $U_a(t)$ 的峰值 U_{am} 的峰值约为 1 000 V. C_m 和 C_g 都可用平板电容公式 $C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d}$ 来计算,计算后 $C_m = 3.3 \times 10^{-11} \text{ F}$ 和 $C_g = 0.21 \times 10^{-11} \text{ F}$,将这些参数代入式(4),最终可得 $U_{b0} = 940 \text{ V}$.

3 结论

首次击穿电压和稳态击穿电压的计算方式是不同的,这一点在实际应用中要特别注意.另外首次击穿和稳态击穿相比,首次击穿电压要明显高于稳态击穿电压.差异原因在于气隙中放电残留的活性粒子不同.首次击穿之前,气隙中没有放电,因此不存在有助于击穿的放电残留活性粒子.稳态击穿阶段,气隙中存在前一次放电的残留活性粒子.尤其是当外加电压频率较高时,意味着前后两次击穿的间隔很短,前一次放电将在气隙中留下数量可观的并且有助于下一次击穿的残留活性粒子.因此,气隙的稳态击穿电压 U_b 将低于首次击穿电压 U_{b0} .

(下转第 129 页)

福模型称为尚吾生(J. J. Thomson)的模型,将卢瑟福-玻尔原子模型称为托马斯-玻尔原子模型。

(5) 内容的深度不一。

(6) 编者所涉及的新知识存在不确定性、不完备性,随着科学的不断发展,编者对教科书的编著也逐步走向深化和完善,如介绍质子电子模型,以解释原子的电中性。

随着人类对微观世界的探索,人们所获得的微观领域的知识尚在发展之中,与此同时,中国的科学教育也不断发展着。这使得诸教科书的编者对原子结构、核结构及其成分的表达尚难以统一,甚至有些概念也有些含混,这导致教科书的内容表现得有些混乱,这反映了自然科学的认识的曲折性,而这也体现在中国教科书的编写之中,这是我们所未能预料的。

致谢:本文得到了尹晓冬老师的悉心指导,此外,在写作过程中,刘树勇老师给出了宝贵修改意见,刘辛味、张辉同学亦给了我很大启发,特此感谢。

(上接第 110 页)

参考文献

- 1 Roth J R. Industrial Plasma Engineering, V. 1. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1995
- 2 王新新. 介质阻挡放电及其应用. 高电压技术, 2009, 35(1): 1 ~ 11. WANG Xinxin. Dielectric Barrier Discharge and Its Applications. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 1 ~ 11

参考文献

- 1 周昌寿. 新时代高中教科书物理学 下册. 上海: 商务印书馆, 1930
- 2 仲光然. 高中物理学(下册). 上海: 中华书局, 1941
- 3 陈愧. 适用教科书物理学. 上海: 商务印书馆, 1918
- 4 吴传绂. 新制物理学教本. 上海: 中华书局, 1918
- 5 密尔根, 盖尔. 汉译密尔根盖尔物理学. 屠坤华, 译. 上海: 商务印书馆, 1921
- 6 沈星五. 文化高中教科书高中物理. 北平: 文化学社, 1934
- 7 Lewis, Gilbert N. (1916 - 04 - 01). "The Atom and the Molecule.". Journal of the American Chemical Society 38 (4): 762 ~ 785
- 8 Langmuir, Irving (1919 - 06 - 01). "The Arrangement of Electrons in Atoms and Molecules.". Journal of the American Chemical Society 41 (6): 868 ~ 934
- 9 周昌寿. 新撰初级中学教科书物理学. 上海: 商务印书馆, 1926
- 10 倪尚达. 高中物理学(下册). 南京: 钟山书局, 1933
- 11 严济慈. 高中物理学(下册). 中国科学图书仪器公司印行, 1948

- 3 Kogelschatz U. Dielectric - barrier discharges; their history, discharge physics, and industrial applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1 ~ 46
- 4 Massines F, Gouda G. A comparison of polypropylene surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharge in helium at atmospheric pressure. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(24): 3 411 ~ 3 420

Study and Calculation on Air Gap Voltage

Chen Yun Bi Haiyan

(Chengdong Electric Power Supply Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300250)

Abstract: Dielectric barrier discharge (DBD) is a typical device for generating low-temperature plasma. It has been widely used in industrial field. The voltage of the air gap is a very important parameter for DBD. It determine the field strength of the air gap. But it can't be directly measured. In the experimental process, we usually obtained is applied voltage and the current in the circuit by direct measurement. The air gap voltage often obtained by calculation. The calculation method is analyzed of the steady breakdown voltage and the first breakdown voltage of the air gap. It provides a reference for the research of gas discharge.

Key words: dielectric barrier discharge; the voltage of the gap; calculation