

大气中电极结构对介质阻挡放电的影响

许金豹, 李成榕, 詹花茂, 李明

(华北电力大学电力工程系, 北京 102206)

摘要: 笔者研究了平行平板电极、柱-板电极、斜板-平板电极三种电极结构 DBD 的放电特性, 通过测量电压-电流波形图及放电发光图比较了他们的区别, 并从放电机理角度对实验结果进行了讨论。结果发现: 柱-板电极 DBD 中, 随柱电极外径的增大, 正负半周起始放电电压增大。

关键词: 介质阻挡放电; 平行平板电极; 柱-板电极; 斜板-平板电极

中图分类号: TM213; O461

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0132-03

Effect of Electrode Structure on Dielectric Barrier Discharge in Air

XU Jin-bao, LI Cheng-rong, ZHAN Hua-mao, LI Ming

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The dielectric barrier discharge characteristics of three electrode configurations, i.e. parallel-board, pole-board and slope-board, were investigated by means of the measured voltage-current oscillograms and discharge photos. Based on discharge mechanism, the experiment results were analyzed. It is found that in pole-board electrodes DBD, starting discharge voltage of positive and negative periods grows along with increasing radius of pole electrodes.

Key words: dielectric barrier discharge(DBD); parallel-board electrode; pole-board electrode; slope-board electrode

0 引言

介质阻挡放电 (DBD) 能在大气压下产生大体积、高能量密度的等离子体, 相对于当前工业生产中广泛应用的低气压放电具有十分广阔的应用前景, 近年来受到国内外研究人员的广泛重视。目前, DBD 在臭氧合成、印染、医疗卫生和废气处理等方面均获得了广泛的应用^[1-3]。DBD 是固体绝缘介质插入放电空间的一种气体放电形式 (APGD)^[4]。电极可采用不同的结构, 采用的电极结构不同, DBD 所表现出的放电特性也不同, 在一些电极结构下甚至可以表现为均匀、稳定的无细丝出现的放电形式, 称为大气压辉光放电。研究和比较不同电极结构 DBD 的放电特性, 对于优化 DBD 等离子体反应器设计和扩大其应用范围具有十分重要的意义。

笔者研究了平行平板电极、柱-板电极和斜板-平板电极 3 种电极结构 DBD 的放电特性, 比较了他们的电压-电流波形图及发光图的区别, 并从机理上讨论了放电特性不同的原因。

1 实验装置及测量方法

实验中, 市电接自耦调压器输入端, 自耦调压器输出端接高频高压发生器。高频高压发生装置采用智能电子冲击机, 此装置可产生 20~50 kHz 的高频电压, 并且在此范围内频率可连续调节, 发生电压最高可达 9 000 V (峰-峰) 以上。该实验电压频率为 29.98 kHz。记录仪器是 Tektronix TDS220 示波器。实验中利用分压比为 929.75:1 的电容分压器获得电压信号, 利用 10⁴ Ω 无感电阻获得电流信号, 通过示波器的自动测量系统读取, 波形通过串口将数据读至计算机中以备处理, 实验装置及电气接线见图 1。

收稿日期: 2007-09-25; 修回日期: 2008-01-07

基金项目: 大气压辉光放电判断方法的研究, 教育部博士点基金资助 (20050079006); 空气中纳秒级脉冲辉光放电形成机理的研究, 国家自然科学基金面上项目 [青年科学基金 (50507003)]; 大气压辉光放电的机理研究, 国家自然科学基金重点项目 (50537020); 利用预电离技术实现空气中大气压下均匀辉光放电, 国家自然科学基金专项基金项目 [科学部主任基金 (50347024)]。

作者简介: 许金豹 (1981-), 男, 主要从事气体放电方面的研究。

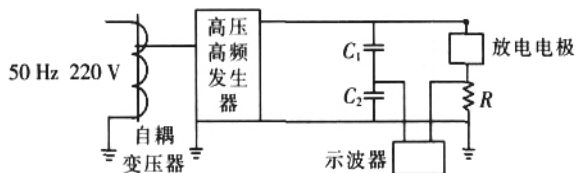


图1 实验装置及电气接线图

1.1 平行平板电极

电极为直径5 cm的圆柱铝电极, 介质阻挡层用两片厚度1.00 mm、直径10 cm的石英玻璃。

1.2 柱-板电极

该实验中, 下电极为直径5 cm的圆柱铝电极, 下阻挡层为1.00 mm厚的石英玻璃; 上电极用自做的4个不同外径的柱电极(见图2、3), 制作方法如下: 取4支中空石英玻璃管, 壁厚均为0.10 mm, 长度均为15 cm, 内径分别为: 13.00、12.00、10.00、8.64 mm, 把石英玻璃管一端用硅橡胶封住1~2 cm长度, 然后在硅橡胶外表面涂上密封胶, 达到此端的完全密封, 加铝粉过程中为了排净铝粉空隙中的空气, 取一高杯, 加入90°左右的热水(刚烧开的即可), 将上述玻璃管竖立于杯中(已封口端在下), 注意不要进水, 取铜心导线, 从一端将绝缘层去掉12 cm, 将导线从未封口端插入, 直至抵至另一端硅橡胶。为了保证灌装的一致性, 用纸漏斗缓缓加入铝粉使铝粉充分充满玻璃管内部空间, 直至离此端口面1~2 cm, 用密封胶将未封口端封住后取出, 在铜心导线另一端做上线鼻(接高压端), 静置3~4天, 待密封胶凝固后即可用于实验。

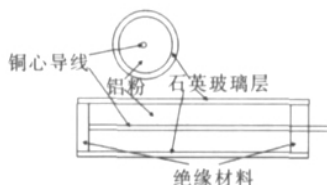


图2 柱状上电极结构

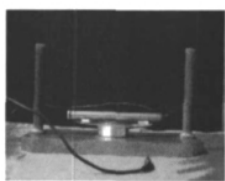


图3 柱-板电极实物

1.3 斜板-平板电极

将石英片($\phi 17$ cm, 厚度1.50 mm)用双面胶固定于下电极板上, 将高压导线的一端用面积3 cm \times 3 cm铝箔纸粘在石英片($\phi 12$ cm, 厚度1 mm)的上面并确保牢固。两电极的布置情况见图4、5, 倾斜角度5.022°; 其中1.50 mm的高度差由标准厚度为1.50 mm的陶瓷玻璃垫片所得, 12 mm高度差由6片2 mm陶瓷玻璃垫片所得。

2 放电特性比较

2.1 电气特性比较

图6给出了平行平板电极 DBD 电压-电流波形。

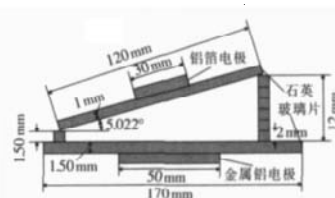


图4 斜板-平板电极



图5 斜板-平板电极

试验条件为: 电源频率如前述, 气隙距离2.00 mm, 电压峰值9 669.4 V。上下阻挡层为1.00 mm厚石英玻璃。由图7可以看出, 平行平板电极 DBD 的电流波形表现为分布在电压正负半周内的许多细丝状的脉冲, 但并不对称, 正负半周起始放电电压(电极两端)基本一致, 放电持续时间均在7 μ s左右, 均在峰值附近停止放电, 正半周放电电流脉冲个数较为清晰, 重叠程度较小; 负半周放电脉冲次数较多, 重叠程度较大。这些电流脉冲与放电空间内的放电细丝是相对应的。

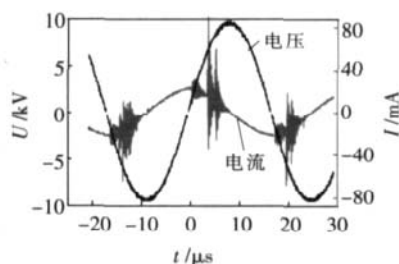


图6 平行平板电极, 空气间隙2 mm

对4种柱-板电极均进行了试验, 发现电压-电流波形较为一致。图7给出了典型的柱-板电极 DBD 电压-电流波形。试验条件为: 电源频率如前述, 电压峰值13 109.5 V, 柱电极外径13.00 mm, 气隙距离2.00 mm。柱-板电极 DBD 电压-电流波形表现为分布在电压正负半周内的许多细丝状的脉冲, 但不对称, 正半周起始放电电压要小于负半周, 放电持续时间要稍大于负半周, 负半周放电在波谷处截止, 而正半周有时要在波峰处仍会出现一些较小的放电脉冲, 正负半周放电次数均较多, 重叠程度较大。随着柱电极外径的增大, 柱-板电极正负半周起始放电电压增大, 见表1。

表1 起始放电电压与柱电极外径对应表

电极种类	外径/间隙/mm	正半周/V	负半周/V
柱-板电极	13.00/2.00	1 300	1 480
	12.00/2.00	1 210	1 290
	10.00/2.00	1 004	1 120
	8.64/2.00	920	990

注: 正半周表示正半周起始放电电压, 负半周同。

图8给出了斜板-平板电极 DBD 电压-电流波形。试验条件为: 电源频率如前述, 电压峰值7 159.1 V, 电极布置情况见图5, 上电极为面积3 cm \times 3 cm铝箔, 上阻挡层石英玻璃厚1.00 mm, 下阻挡层石英玻

璃厚 1.50 mm, 倾斜角度为 5.022°。斜板-平板电极 DBD 电压-电流波形, 表现为正负半周并不对称的许多细丝状脉冲。正负半周起始放电电压基本一致, 正半轴放电持续时间要大于负半周, 不论正半个周期还是负半个周期, 都是中间的几个电流脉冲峰值较大, 正半周放电总是在电压峰值处停止, 而负半周在电压达波谷前数个微秒前已停止放电, 故正半周放电持续时间要大于负半周。

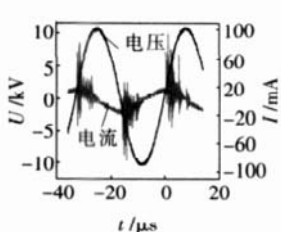


图 7 柱-板电极, 柱电极外径 13 mm

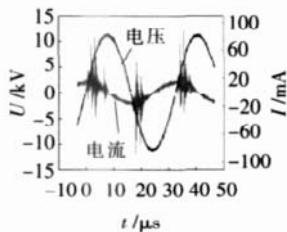


图 8 斜板-平板电极

2.2 发光特性比较

图 9~12 给出了曝光时间为 1 ms 的发光图。从放电外观上看, 三者均为丝状流注放电, 但也存在明显差异: 平行平板电极 DBD 图片表现为放电空间内均匀分布的细丝状的放电通道, 黑暗的条件下可以看到放电空间内是一些随机出现的明亮的、跳动的细丝, 细丝两头较细中间有一直径约 0.50 mm 的亮区, 呈锥形, 不同细丝的中间发光区连成一片; 柱-板电极 DBD 放电较之平行平板 DBD 要柔和, 呈雾状, 细丝呈现两头粗中间细, 但下端明显要比上端亮许多, 随柱电极外径的增大, 该亮区大小变化不大; 对于斜板-平板 DBD, 放电丝状外径较大, 上下两端亮区已连成一片, 气隙愈小细丝愈密集, 气隙愈大, 细丝分布愈稀疏。

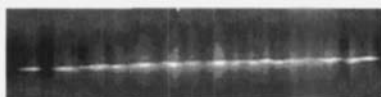


图 9 平行平板电极介质阻挡放电图像

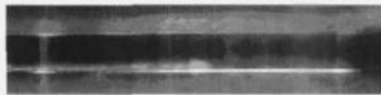


图 10 柱-板电极介质阻挡放电图像



图 11 斜板-平板电极介质阻挡放电正面图像



图 12 斜板-平板电极介质阻挡放电侧面图像

3 讨论

(1) 平行平板电极 DBD 可以用流注理论进行解释: 在大气压下, 气压 P 和放电距离 d 的乘积很大,

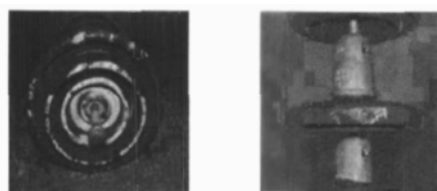
电子在外加电场作用下与气体频繁碰撞, 电子雪崩发展很快, 并向阳极快速移动, 当电子雪崩发展到一定程度后, 电子雪崩中的空间电荷足以使外加电场畸变, 促进了二次电子崩的形成。二次电子崩和主电子崩汇合, 最后产生一个贯穿放电空间的高电导率的细丝放电通道。因此在大气压下, 平行平板 DBD 一般表现为丝状的流注放电形式^[5]。由于介质的存在, 空间电荷在介质上积累, 产生了一个与外加电场相反的电场。随着介质上积聚电荷的增加, 附加电场的作用也在增强, 气隙中总的电场强度就会下降, 当气隙内场强下降到小于气体的击穿场强时, 放电中断。因为 DBD 采用的是交流电源, 所以放电中断后在电源的下半个周期还会再次出现, 因此, 平行平板电极 DBD 的电流波形表现为交替出现在电压正负半周其的许多脉冲。

(2) 柱-板电极 DBD 属于非均匀电场放电, 极性效应较明显。其放电机理分析如下: 电压的正半周期 (柱极为正极性) 柱电极附近电场强度高, 电离产生的电子在柱电极附近首先形成电子崩。因为柱极为正极性, 电子崩崩头的电子迅速往柱极运动而聚集在介质上, 而正离子则向极板运动, 但速度很慢, 柱极附近积聚起正电荷, 这些正电荷削弱了柱极附近的电场强度而加强了正离子群外部空间的电场, 因此, 柱极附近难以形成流注, 而外部空间由于电场的加强, 有利于流柱的发展。负半周由于柱极为负极性, 电子崩中电子迅速向平板电极运动而积聚在介质上, 正电荷由于速度慢, 留在柱极附近, 这些正电荷加强了柱极场强而削弱了外部场强, 阻碍了流注发展, 因此较正半周击穿电压较高。在同样空气间隙情况下, 随柱状上电极外径的增大起始放电电压与自持放电电压均增大。这是由于外径愈小, 柱极附近电场分布愈不均匀, 较大外径的电极表面起始放电电压与自持放电电压要小一些。

(3) 斜板-平板电极情况, 其放电机理讨论如下: 由于存在倾斜角度, 放电总是从最短间隙附近开始, 其发展过程如流注理论, 电子定向移动后留下的空间电荷的分布沿整个柱极附近要不均匀的多, 间隙愈大处电荷密度愈小, 气隙电场畸变程度沿间隙距离的增大而愈加减弱, 故间隙距离愈大的放电通道, 其电子复合程度较弱, 再加上扩散作用, 其放电细丝的亮度愈暗、外形愈发散。

4 结语

笔者研究了不同电极结构大气压下空气中 DBD 的放电特性, 从放电电压-电 (下转第 138 页)



(a) 高压端 (b) 中间部分

图 5 PRTV 涂料表面烧伤情况

间大很多,更容易产生局部放电。

在覆冰期,绝缘子表面的冰层处于冻结状态,虽然冰凌桥接但泄漏电流不大,因而绝缘子串覆冰期的冰闪电压相对融冰期要高。涂有 PRTV 的绝缘子串冰闪电压的降低程度比融冰期时要小一些。这是因为在融冰期,绝缘子表面有高电导率的融冰水存在,引起泄漏电流增大,加上冰层内部又容易产生局部放电,使涂有 PRTV 的绝缘子串更容易从内部形成放电途径,使得其泄漏电流更大,因而其冰闪电压也比覆冰期时降低得更快。

因此,PRTV 涂层的憎水性引起覆冰状态的改变,使得冰层内部易于产生局部放电是 PRTV 涂料绝缘子串冰闪电压降低的主要原因。

4 结论

(1) PRTV 涂料具有良好的憎水性,对于防污闪有一定作用,但在覆冰条件下,对提高覆冰绝缘子串的冰闪电压没有效果。

(2) 在同等覆冰环境条件下,涂有 PRTV 的绝缘子串的冰闪电压低于未涂时的情况,其降低的比例约为 10%。

(3) PRTV 涂料的憎水性使覆冰后冰层内部存在大量微小的气隙,容易产生局部放电,从而烧坏 PRTV 涂层,使其丧失憎水性。因此,在重冰区应慎用 PRTV 涂料。

参考文献:

[1] 蒋兴良, 易 辉. 输电线路覆冰及防护 [M]. 北京: 中国电力

出版社, 2002.

- [2] PHAN C L. Accumulation Du Verglas Sur Les Nouveaux Types D Isolateurs Sous Haute Tension [J]. Canadian Electrical Engineering Journal, 1977: 2(4): 24-28
- [3] 蒋兴良, 舒立春. 覆冰绝缘子长串交流闪络特性和放电过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 7(14): 128-132.
- [4] KHALIFA M M, MORRIS R M. Performance of Line Insulators Under Rime Ice [J]. IEEE Trans. on Power Application and systems, Vol. PAS-86, 1967: 692-698
- [5] 苑吉河, 蒋兴良, 张志劲, 等. 低气压下 3 种覆冰支柱绝缘子直流闪络特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 12-15.
- [6] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境条件下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002: 22(11): 115-120.
- [7] SUN Cai-xin, JIANG Xing-liang. Study of Flashover Performance and Voltage Correction of DC Insulator in Icing Districts of Altitude of 2 500 m and Below [C]// International Conference on Power System Technology Proceedings. Yunnan Science and Technology Press, 2002: 251-257.
- [8] S Cai-xin, J Xing-liang, S Wen-xia, et al. Study of Flashover Performance and Voltage Correction of DC Insulator in Icing Districts of Altitude of 2 500 m and Below [C]// AWAIIS, 2002: 149-154.
- [9] 蒋兴良, 武利会, 司马文霞, 等. 低气压下 XZP/XZWP4-160 直流绝缘子覆冰闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 111-115.
- [10] 关志成, 贾志东. RTV 硅橡胶涂层耐污闪性能及憎水迁移特性[J]. 高电压技术, 1990, 19(4): 22-28.
- [11] FARZANEH M, BAKER T. Insulator Icing Test Methods and Procedures - a Position Paper Prepared by the IEEE Task Force on Insulator Icing Test Methods [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2003, (18) 14: 1 503-1 515.
- [12] 蒋兴良, 孙才新. 10 kV 合成绝缘子覆冰交流闪络特性及冰闪过程的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 58-61.
- [13] GB/T 4585.2-1991. 交流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法-固体层法[S].

(上接第 134 页)

流波形图和放电发光图上比较了他们的差异。可以看出, 3 种电极结构下 DBD 均为丝状放电, 但细丝形状各不相同。柱-板电极 DBD 中, 随柱电极曲率半径的增大, 正负半周起始放电电压增大。最后从放电机理角度对实验结果作了讨论。

参考文献:

[1] KOGELSCHATZ U. Dielectric-barrier Discharge: their History, Discharge Physics, and Industrial Application [J]. Plasma

Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.

- [2] MA H, QIU Y. A Study of Ozone Synthesis in Coaxial Cylinder Pulse Streamer Corona Discharge Reactors [J]. Ozone Science and Technology, 2003, 25(1): 127-135.
- [3] 孙岩洲, 石兴民, 王 辉. 介质阻挡放电杀灭枯草杆菌芽孢的电镜观察[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 10-11.
- [4] 方 志. 大气压辉光放电及其在材料表面改性中的应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [5] 邱毓昌, 张文元, 施 围. 高电压工程 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.