

正脉冲电压下水中流注放电特性的研究

朱太云¹, 王秀环¹, 张乔根¹, 杨兰均¹, 贾江波²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 中国电力工程顾问集团公司, 100120, 北京)

摘要: 采用介质涂覆的球-板电极结构, 研究了不同电导率、气压和脉冲电压幅值条件下水中流注放电的特性. 结果表明, 水的电导率和脉冲电压幅值对水中流注速度、图像亮度等有较大影响. 不同电导率条件下, 气压由 0.1 MPa 降至 0.006 5 MPa 对水中超音速流注发展平均速度并无明显影响. 在低气压时, 纯净水中间隙为 10% 击穿电压(U_{10})降低, 约为一个大气压条件下的 80%, 而在高电导率的水中, U_{10} 几乎不受气压影响. 由放电图像和放电电流波形分析可知, 在低电导率的水中, 流注发展是不连续的分步发展, 在每一步的发展中形成一个或多个微小的气泡.

关键词: 水中流注放电; 介质涂覆; 流注速度; 脉冲电压

中图分类号: TM89 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0096-05

Characteristics of the Streamer Discharge in Water under Positive Pulse Voltage

ZHU Taiyun¹, WANG Xiuhuan¹, ZHANG Qiaogen¹, YANG Lanjun¹, JIA Jiangbo²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Power Engineering Consulting Group Corporation, Beijing 100120, China)

Abstract: Adopting a dielectric-coated electrode configuration, the characteristics of streamer discharge in water with different conditions such as conductivity, ambient pressure, and voltage amplitude are investigated under pulse voltages. The experimental results demonstrate that water conductivity and applied voltage amplitude exert a great influence on mean velocity and brightness of the streamer discharge. When the ambient pressure decreases from 0.1 MPa to 0.006 5 MPa, the pressure affects slightly the mean velocities of the supersonic streamer in both distilled and tap water. Also, the 10% breakdown voltage(U_{10}) is decreased by 20% in distilled water under the pressure of 0.006 5 MPa than that under the pressure of 0.1 MPa, while in tap water the U_{10} is almost the same under different pressures. Based on the analysis of the discharge images and current waveforms, it can be concluded that the streamer development in low conductivity water gets discrete and steps forward.

Keywords: streamer discharge in water; dielectric coating; streamer velocity; pulse voltage

近年来, 由于各种原因^[1], 水中流注放电的特性及流注发展机理成为人们研究的热点. 水中放电已被广泛应用于有机物降解^[2]、杀菌消毒^[3]、水下声源等各个领域^[4].

在高压毫微秒脉冲作用下, 液体介质尤其是水中放电特性及其相关机理已被广泛研究^[5-8]. 虽然国

内外有很多研究, 但迄今为止, 对于放电时流注通道的形成及其发展机理仍未得到很好的解释. 以前的研究认为, 水中流注的发展与流注头部的电场有关, 是一个热的或电的过程. 流注的起始由电极表面状况决定, 需要一个很高的电场强度(大于 10^6 V/cm). 为了产生流注起始所需要的高场强, 以

前的研究在较大的电极间距下大都采用尖-板电极或类似结构,只有在很小的电极间距条件下才能采用平板电极或类似的结构.这样流注起始和发展均在极高的电场中进行,因此高场强对流注的发展和特性的影响是无法避免的.

电极表面涂覆介质(如硅橡胶)对水中放电有着重要影响^[9].介质的存在大大降低了流注放电的起始和间隙击穿电压,为在较低电压和较大间隙稍不均匀电场条件下研究水中放电特性提供了可能.本文采用介质涂覆的球-板电极结构,通过研究不同电导率、气压和电压条件下水中流注放电的特性,以期掌握水中流注通道发展的机理.

1 实验装置和方法

实验采用介质涂覆的球-板电极结构,电极结构和放电容器如图1所示.

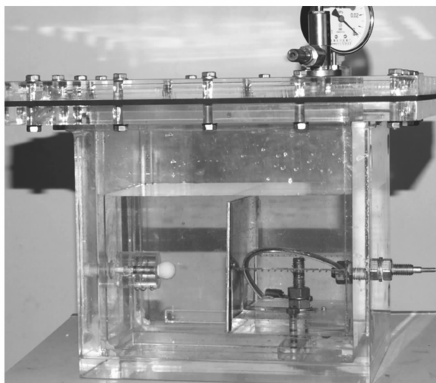


图1 实验装置

高压电极为直径2 cm的钢球,电极表面涂覆一层0.2~0.25 mm厚的硅橡胶,通过直径为6 mm的铜杆固定在容器内壁上,铜杆则用直径为25 mm的有机玻璃圆柱绝缘起来,地电极为100 mm×150 mm×3 mm的不锈钢板,电极间距 d 可在0~6 cm之间调节.所用自来水电导率为 $140 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ S/cm,所用纯净水电导率为 $2.4 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ S/cm.为了模拟水中气泡压力对放电特性的影响,放电容器可以充气或抽气,压力范围为0.2~0.006 5 MPa.

图2为整个实验装置的结构示意图,包括放电容器、脉冲发生器、测量记录系统.脉冲发生器产生10~100 kV可调的指数型高压脉冲,脉冲宽度取决于所用水的电导率.放电电压、电流通过电阻分压器和分流器进行测量,由泰克示波器(Tektronix DPO4054)进行记录,示波器带宽为500 MHz.电阻

分压器和分流器的响应时间分别为20 ns和30 ns,放电现象用富士数码相机(S6500fd)进行记录.

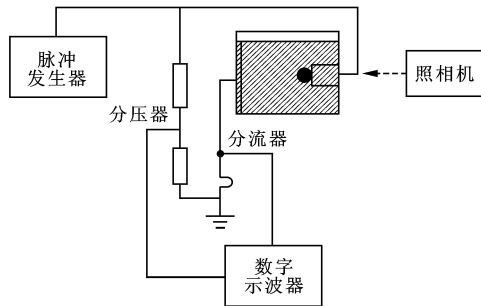


图2 实验装置结构图

2 实验结果

2.1 电导率的影响

实验研究了水中不同电压条件下间隙击穿时的电压、电流特性,典型的电压、电流波形如图3所示.

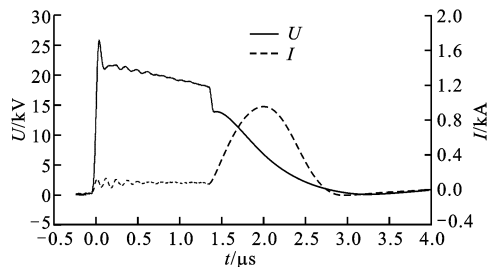


图3 典型的电压、电流波形($d=1$ cm, $\delta_{\text{water}} = 148 \times 10^{-6}$ S/cm)

纯净水中间隙为10%击穿电压 U_{10} 由所加电压与击穿概率所决定.通过计算一定脉冲数目中发生击穿的次数来确定 U_{10} ,在此电压下,间隙击穿的概率为10%.

如图3所示,当间隙发生击穿时,从电压、电流波形可得到间隙的击穿时延 t_{br} ,因此击穿过程中流注通道发展的平均速度为

$$v_m = d/t_{\text{br}} \quad (1)$$

图4所示为不同电导率(δ_{water})条件下, v_m 与所加电压的关系.在自来水中,当电压在 U_{10} 附近时,平均流注速度为1.5~2.5 km/s,对应为超音速流注.当电压超过 U_{10} 后,流注速度随电压升高而迅速增大,当所加电压达到饱和电压(U_c)时,流注速度达到最大值,之后流注速度随电压升高几乎保持不变.由图5中的放电图像可知,当电压大于 U_c 后,流注通道数目随电压升高而增加,通道之间的相互影响导致流注头部电场保持恒定,因而流注的发展速度亦保持不变.

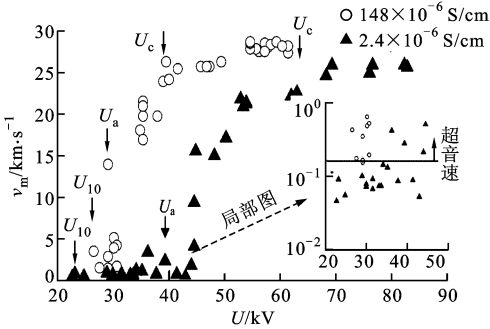
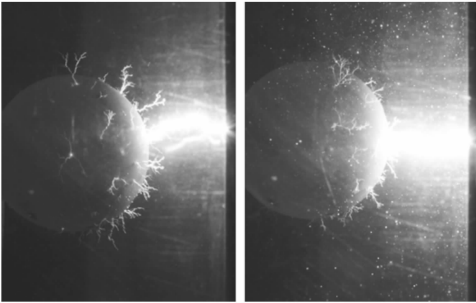
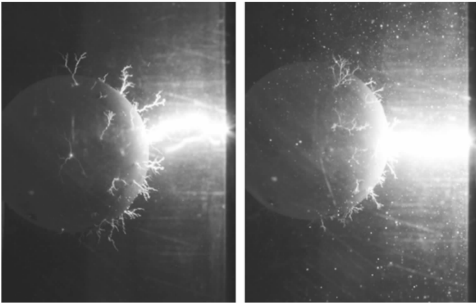


图 4 不同电导率情况下流注平均速度与电压的关系($d=1\text{ cm}$)



(a)29.1 kV, 3.3 km/s (b)29.6 kV,13 km/s



(c)43 kV, 26.3 km/s (d)52 kV, 26.6 km/s

图 5 对应于图 4 中不同阶段的放电图像

在纯净水中,当电压在 U_{10} 附近时,流注的平均速度仅为 $0.4\sim0.5\text{ km/s}$,对应为亚音速流注.当电压超过 U_{10} 后,流注速度随电压增加缓慢上升,直到所加电压超过加速电压(U_a)之后,流注速度才随电压升高而以较快速度增加,并且当电压达到 U_c 时,流注速度达到最大值.

当所加脉冲电压幅值大于 U_c 后,无论是自来水还是纯净水中,流注速度均与文献[6]中给出的数值相近.当所加电压幅值小于 U_c 时,两者速度相差非常明显,尤其当电压处于 U_{10} 与 U_a 之间时,此时自来水中流注速度是纯净水中的 $4\sim5$ 倍.可以看出,电导率对流注的发展有着重要影响,而不像

Lisitsyn 等人给出的研究结果认为电导率对流注发展速度没有影响[6].

2.2 气压的影响

为进一步研究水中流注通道发展的机理,实验研究了气压对流注发展速度的影响,结果如图 6、图 7 所示.

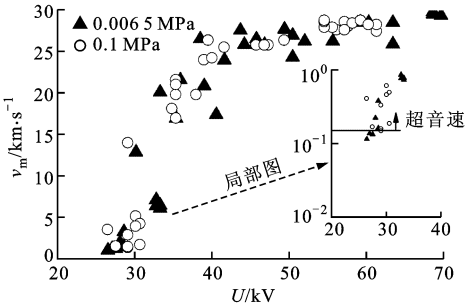


图 6 不同气压下流注平均速度与电压关系($d=1\text{ cm}, \delta_{\text{water}}=148\times10^{-6}\text{ S/cm}$)

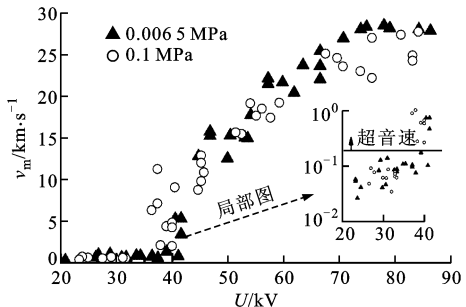


图 7 不同气压下流注平均速度与电压关系($d=1\text{ cm}, \delta_{\text{water}}=3\times10^{-6}\text{ S/cm}$)

由实验结果可见,在所选择的气压变化范围内,无论在自来水还是纯净水中,对于超音速流注,流注平均速度均无明显变化.但是,在纯净水中,当气压为 0.0065 MPa 时, U_{10} 比 0.1 MPa 气压下约降低了 20% ,在自来水中 U_{10} 则几乎不受气压的影响.因此,虽然外界气压对超音速流注发展影响甚微,但其对于低电导率水中流注(亚音速流注)的发展有着较大影响.这表明对于这两种不同性质的流注,其发展机理是不同的.

2.3 流注形状

不同电导率水中流注放电图像见图 8. 由图中可看出,无论是否发生击穿,自来水中流注通道均比纯净水中通道要明亮,因此自来水中流注通道的温度和带电粒子密度均比纯净水中的要高.图 8e 中,未能贯通两极的流注通道由一系列的微小气泡连接而成,而对于图 8d 自来水中的放电图像,仅在流注通道的末端才能观察到这种现象.从图 9 所示电流

波形可见,在流注发展过程中,电流波形由许多小的电流脉冲组成.这意味着在低电导率的水中流注通道是逐步向前发展的,在每一次向前发展的过程中,都形成一个或若干个小的气泡,然后放电在气泡中发生,从而促进流注通道进一步向前发展.这种气泡

中放电形成的电流脉冲造成了图 9 中电流脉冲波形的不平滑.在自来水中,由于电导率高,电流主要由离子运动造成的泄漏电流组成,放电电流则被泄漏电流淹没,无法从电流波形上表现出来,因此放电电流波形与图 3 中电流波形类似,是光滑的.

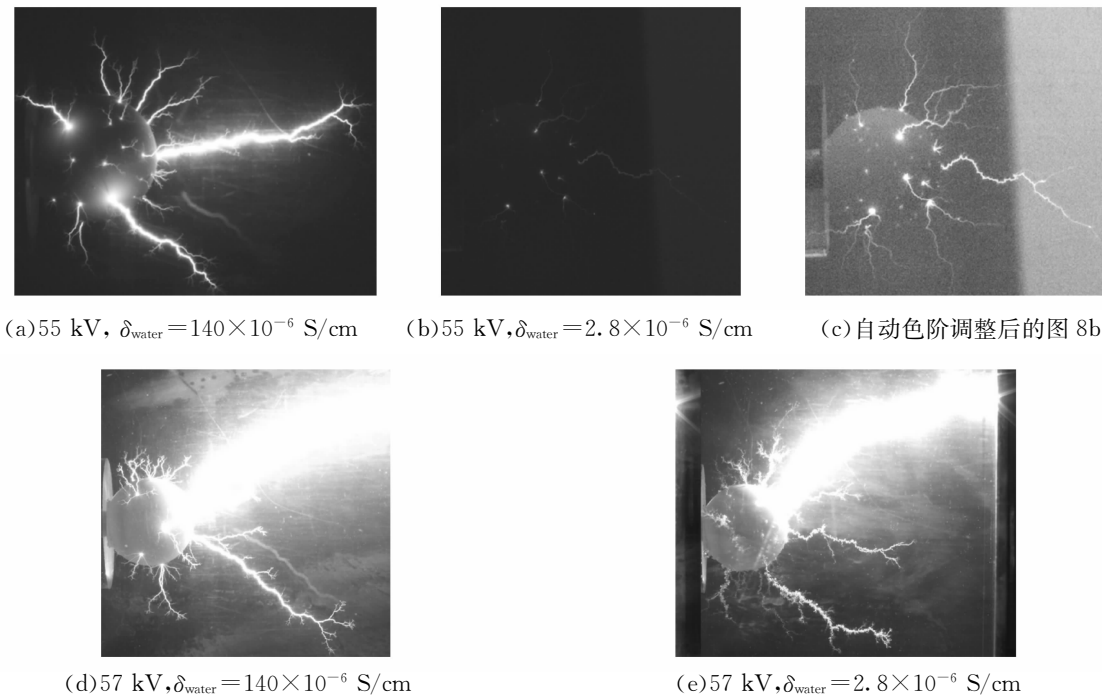


图 8 不同电导率水中流注放电图像

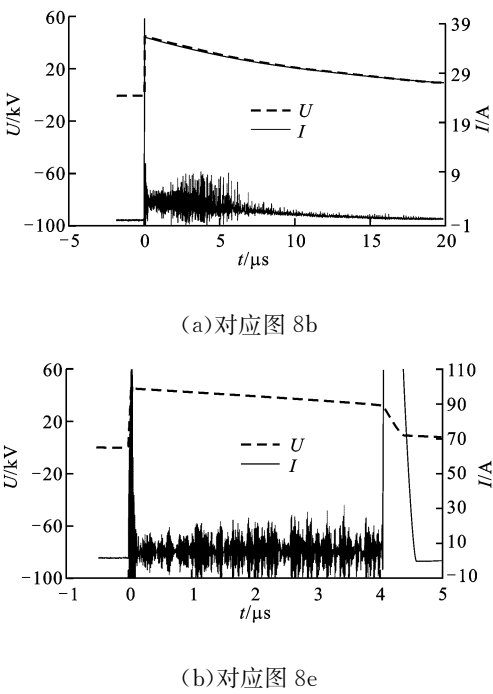


图 9 对应于图 8b、图 8e 的电压、电流波形

3 讨 论

对于微秒高压脉冲作用下液体介质中正极性流注的发展机理,文献[6-8]中已有较详细的论述.文献[6]认为,通道中电场作用下向流注头部高速运动的带电粒子,尤其是质子与流注通道和水的界面的作用是正流注向前发展的动力.文献[8]认为,强电场作用下水分子的裂解与电离是流注向前发展的动力.尽管目前的实验不能验证这些机理的正确性,但是从电压幅值、水的电导率和气压对水中流注发展速度的影响看,流注通道发展应该是电离、裂解、焦耳热、带电粒子流以及流注通道之间相互作用等多个因素共同作用下的结果.

另一方面,虽然没有统一的理论,但仍可认为,流注的发展取决于通道头部的电场强度.假设流注通道为圆柱形且其头部为半球形,那么流注头部电场^[7]

$$E=\frac{2U-l\Delta U}{r\ln(4h/r)}\tag{2}$$

式中: U 、 ΔU 、 l 、 r 、 h 分别为所加电压、沿通道方向单

位长度压降、流注通道长度、流注头部半径、流注头部与地电极之间的距离. 由于 ΔU 取决于流注通道中的电阻率和流过通道的电流, 这两者又取决于所加电压和水的电导率, 因此随所加电压和水的电导率的不同, 造成流注发展过程中头部电场强度的差异, 从而导致在不同的条件下, 电离、裂解、焦耳热、带电粒子流以及流注通道之间相互作用等多个因素中的一个或若干个因素对流注的发展起支配作用. 对于低速流注(亚音速流注), 流注发展可能主要取决于流注头部发生的汽化过程. 对于高速流注(超音速流注), 流注发展可能主要取决于流注头部前端的场致电离过程.

4 结 论

(1) 在不同电导率的水中, 流注通道特性差异比较大.

(2) 在实验所用的气压变化范围内, 气压对超音速流注发展平均速度几乎没有影响, 随气压降低, 低电导率的水中, U_{10} 降低.

(3) 在低电导率的水中, 流注通道发展是不连续的, 逐步向前的, 在每一步发展中, 形成一个或若干个气泡.

(4) 水中流注发展是多个因素共同作用下的结果, 在不同的条件下, 其发展机理可能是不同的.

参考文献:

- [1] AKIYAMA H. Streamer discharges in liquids and their applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(5): 646-653.
- [2] SUN B, SATO M, CLEMENTS J S. Use of a pulsed

high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(15): 1908-1915.

- [3] ABOU-GHAZALA A, KATSUKI S, SCHOENBACH K H, et al. Bacterial decontamination of water by means of pulsed-corona discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(4): 1449-1453.
- [4] SUNK A P. Pulse electrical discharges in water and their applications[J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(5): 2587-2594.
- [5] JONES H M, KUNHARDT E E. Development of pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(1): 178-188.
- [6] LISITSYN I V, NOMIYAMA H, KATSUKI S, et al. Thermal processes in a streamer discharge in water [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 351-356.
- [7] LESANT O, JUNG M. On the relationship between streamer branching and propagation in liquids: influence of pyrene in cyclohexane[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(11): 1360-1368.
- [8] AN W, BAUMUNG K, BLUHM H. Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(5): 053302-053312.
- [9] 朱太云, 王秀环, 杨兰均, 等. 水中大体积放电产生方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 723-727. ZHU Taiyun, WANG Xiuhuan, YANG Lanjun, et al. Generation of large volume discharges in water [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6): 723-727.

(编辑 杜秀杰)

西安交通大学获得 2008 年度国家科学技术奖 5 项

2008 年度国家科学技术奖励大会于 1 月 9 日在北京召开, 西安交通大学材料学院李长久、王卫泽、李京龙、李文亚、王豫跃等完成的“热喷涂涂层形成机制、结构与性能表征的应用理论”获国家自然科学奖二等奖, 电气学院王建华、荣命哲、郑军、耿英三、宋政湘、王小华、张国钢、张杭、游一民、张永等完成的“智能电器理论、关键技术及系列产品开发”获国家科技进步二等奖. 胡锦涛、温家宝等国家领导人出席大会, 并为获奖人员颁奖.

2008 年度我校共有 5 个项目获奖(合作 3 项), 居全国高校第 6 位, 其中以第一完成单位获得 2 项, 居全国高校第 8 位, 这也是我校获得国家科学技术奖连续第四年居全国高校前 10 位.

(来源: 西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>)