

水中大体积放电产生方法的研究

朱太云, 王秀环, 张乔根, 杨兰均
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 研究了一种脉冲电压下采用涂覆介质的球-环电极结构在水中产生多通道、辐射状、大体积流注放电的新方法. 与以前方法相比, 该方法能在较低电压幅值下在水中产生大体积放电. 采用光学和电学手段, 对流注放电通道的长度、数量、脉冲电压参数(如电压幅值和脉冲宽度)对放电的影响进行了研究. 对电极介质涂覆条件下流注的产生与发展做出了理论解释. 研究表明, 水中放电的最大流注长度和通道起始点数均随脉冲电压幅值和脉冲宽度增加而增加. 介质涂覆中局部电场的增强和微小缺陷的局部放电在水中形成气泡是水中流注放电起始的根本原因.

关键词: 水中放电; 大体积放电; 流注放电; 脉冲功率

中图分类号: TM89 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)06-0723-05

Generation of Large Volume Discharges in Water

ZHU Taiyun, WANG Xiuhuan, ZHANG Qiaogen, YANG Lanjun
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new method using dielectric-coated sphere-ring electrode was put forward to generate multiple, radial streamer discharges in tap water by applying a pulse voltage. Different from the previous methods by means of extremely high electric strength, this kind of electrode configuration enables to generate large volume streamer discharges in water easily under lower voltage. The effect of the pulse parameters, such as pulse amplitude and pulse width, on streamer channels length is investigated, and the influence mechanism of the coated-dielectric on the streamer initiation and propagation is discussed. The results demonstrate that with the increment of applied pulse amplitude and pulse width, the maximum length and the number of origin points of the streamer increase. The streamer discharges in water originate from the appearance of micro bubbles formed by the intensified electric field and the partial discharges in the dielectric coating.

Keywords: discharge in water; large volume discharge; streamer discharge; pulsed power

近年来,水中放电由于其广泛的应用前景而引起研究者的极大兴趣. 对水中脉冲放电产生的 H、OH、H₂O₂、紫外线等有许多研究. 水中脉冲放电技术已应用于消毒杀菌、有机物降解及多细胞生物的灭活等领域^[1-4], 放电产生的声波、压力波也已被广泛研究^[5-6].

对于上述应用来说, 主要的问题是处理效率, 因此水中产生大体积放电的方法成为研究的重点. 脉冲电压下, 水击穿所需电场强度远大于气体

击穿所需电场强度. 空气中大气压下均匀场的平均击穿场强约为 3×10^4 V/cm, 但在水中, 根据不同的水的特性和电极结构, 击穿场强为 $3 \times 10^5 \sim 10^6$ V/cm^[7]. 为获取如此高的场强, 常用的方法是采用特殊的电极结构, 用尖端或细丝结构增强局部电场来满足水中放电场强的要求, 从而在水中产生较大体积的放电^[8-9].

与上述方法不同, 本文使用介质覆盖的球-环电极, 以较低幅值的脉冲电压在自来水中产生了大体

积的流注放电,同时对电压脉冲参数对流注放电的影响以及介质覆盖层的作用进行了研究。

1 实验装置和方法

实验采用了与常用方法不同的电极结构在水中产生大体积放电,放电腔结构如图1所示。放电电极为球-环结构,球电极直径为8 mm,环电极内径为130 mm,球电极表面覆盖一层厚度为0.4~0.5 mm的硅橡胶。实验时,球电极作为高压电极,环电极接地。整个电极结构浸入盛有自来水的有机玻璃箱中,所用自来水电阻率在 $2.3 \times 10^3 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ 之间。由于水中放电受压力的影响,水箱中水的深度在实验中保持恒定^[10]。

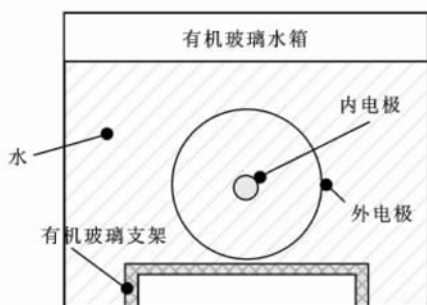


图1 放电腔示意图

整个实验装置包括放电腔、脉冲发生器、测量记录系统、高速摄影机及控制部分,见图2。脉冲发生器可产生10~100 kV、脉冲半宽100 ns~1.3 μs 可调的指数型高压脉冲。通过高速摄影机(MotionPro HS-4)对放电现象进行观察和研究,在512×512的分辨率下,拍摄速度最高可达5 000幅/s。放电电压和电流通过电阻分压器和分流器进行测量,电阻分压器和分流器的响应时间分别为20 ns和30 ns,由泰克示波器(Tektronix DPO4054)进行记录,示波器带宽为500 MHz。

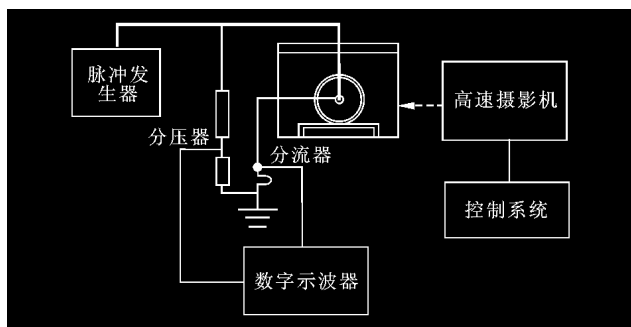


图2 实验装置结构图

2 实验结果和讨论

2.1 放电形态

从图3可看出,电压脉冲幅值和脉冲宽度的增大有利于流注通道在水中的发展,形成大体积的放电。随着电压脉冲幅值的逐渐增大,水中放电逐渐增强,并最终由流注放电转变为火花放电。

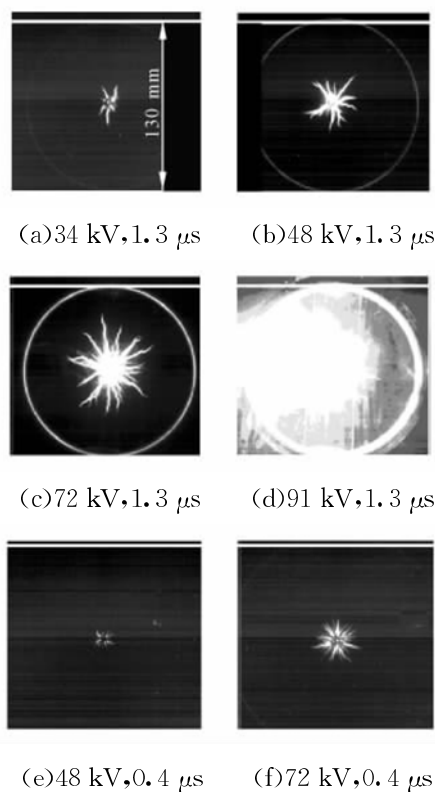


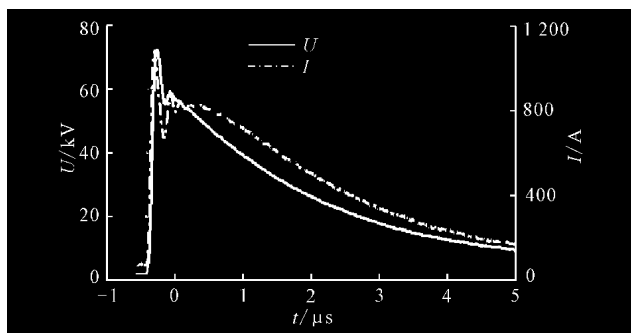
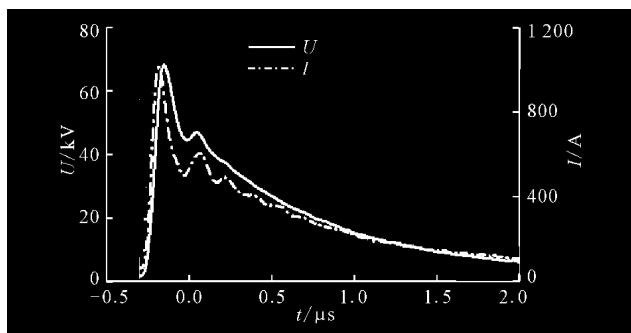
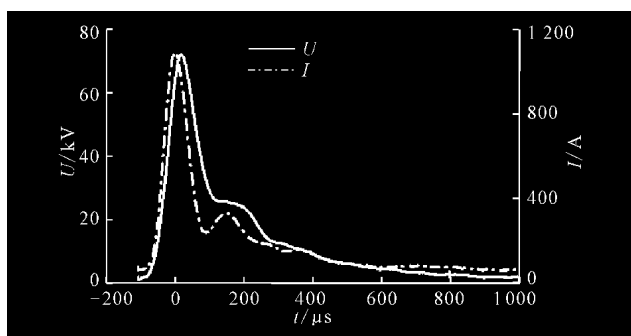
图3 不同电压脉冲下的放电图像

2.2 水中放电的电学特征

通过对比图4中的电压、电流波形可以发现,当脉宽大于1 μs 时,流过放电腔的电流波形宽度比施加的电压波形的宽度要大,该现象与通常气体中的放电不同。放电电流通常由容性电流和电导电流两部分组成。电导电流又包括泄露电流和由于放电造成的电流。由于自来水的电阻率较小,当没有发生击穿时,流注放电电流基本被泄露电流和容性电流所湮没。只有水中放电体积足够大,流注放电电流可以与泄露电流相比拟时,才能从电流波形上表现出来。当放电足够强时,放电时流注通道内形成大量的带电粒子,而带电粒子在水中的迁移速率比空气中的慢得多,从而造成电流脉冲宽度大于电压脉冲宽度。

为研究介质作用并减小泄露电流的影响,采用完全涂覆的球电极进行了实验,此时典型的电压电流波形如图5所示。从图中可看出,电流可分为3个

阶段:在脉冲的前沿(图中阶段Ⅰ),电流主要是容性电流;在第二阶段(图中阶段Ⅱ),电流几乎为0,意味着此时没有放电发生;经一段时间后,电流开始逐渐增大(图中阶段Ⅲ),说明在涂覆介质中逐渐形成了贯穿性的导电通道,并且随着时间的发展该通道逐渐发展到水中,引起电流增加和水中流注放电的形成。

(a) 1.3 μs 脉宽(b) 0.4 μs 脉宽

(c) 100 ns 脉宽

图4 放电时的典型电压、电流波形

2.3 电压脉冲对放电的影响

通过研究不同电压脉冲下流注放电的图像可以发现,流注的起始电压有一个阈值,对于不同的电压脉宽,该阈值不同,脉冲宽度越宽,阈值越小。当电压低于电压阈值时,没有放电现象出现,当高于电压阈值后,最初放电现象仅表现为介质表面上的一些光点,随着电压的升高,光点逐渐向前发展,形成流注通道。对于相同的电压幅值,流注通道的长度随脉冲宽度的增加而增加。

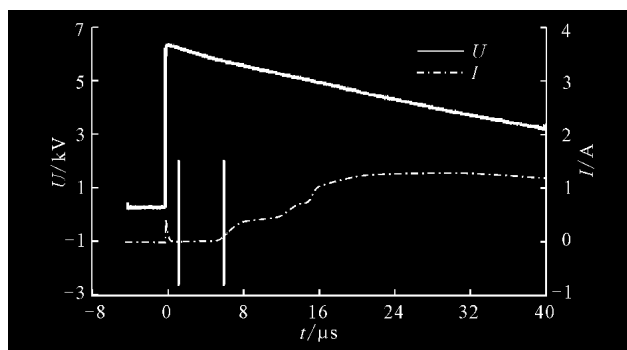


图5 采用完全涂覆电极时的电压、电流波形

图6、图7为流注长度和流注通道起始点数与所加电压脉冲的关系图。从图中可知,流注的起始和发展与所加电压脉冲关系非常密切。

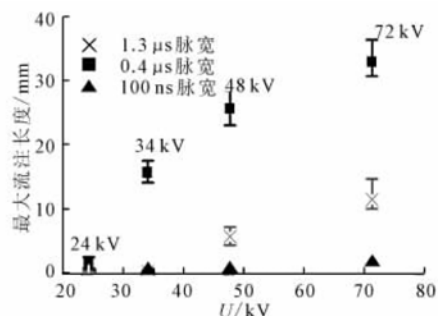


图6 流注长度与脉冲电压的关系

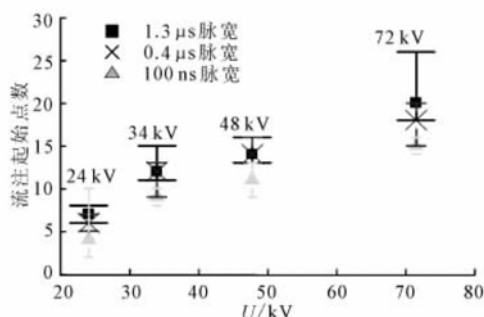


图7 流注起始点数与脉冲电压的关系

根据文献[11]的研究结果,水中流注放电可分为传播过程和膨胀过程。在传播过程中,由于汽化、超声、电解等作用在流注通道头部不断形成气泡,紧接着气泡中发生放电,放电电流流过放电通道,形成导电性通道,同时在流注头部形成新的气泡,流注通道逐步向前发展。为定量分析流注的发展过程,假设气泡只由汽化作用产生,且假设流注通道为圆柱形,流注头部半径在流注发展过程中保持不变,形成一个流注通道所需能量可表示为

$$W = \pi r^2 l \rho_w W_{\text{vap}} \quad (1)$$

式中: r 为流注头部半径; ρ_w 为水的密度; W_{vap} 为水的比汽化热,其值为 $2.3 \times 10^6 \text{ J/kg}$; l 为流注通道的长度。因此,形成 n 个流注通道的总能量为

$$W_T = \sum_{i=1}^n \pi r_i^2 l_i \rho_w W_{\text{vap}} \quad (2)$$

从式(2)可看出,流注通道的数量越多,长度越长,所需能量就越多,在相同的电导率情况下,需施加的电压脉冲的幅值和脉宽也就越大。

2.4 介质作用

图8所示为 Namihira T 等人采用尖-板电极结构获得的水中流注放电图像^[12]。

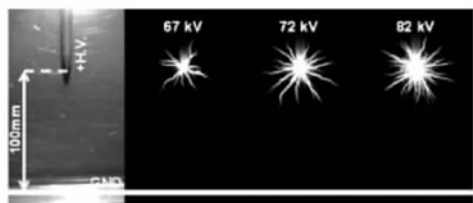


图8 尖-板电极在不同电压下的放电图像^[12]

根据文献^[12],产生图8中放电所用脉冲宽度大约为 $3 \mu\text{s}$,对比图8和图3,同时考虑脉冲宽度的影响,与尖-板电极相比,本文所采用的介质覆盖的球-环电极更易于在水中产生大体积的流注放电。尖-板电极要求尖的曲率半径非常小,以使其表面能够产生足够大的场强而引起水中的流注放电。与之相比,本文所用球电极直径为 8 mm ,在没有介质层存在时,其表面电场强度远低于尖-板电极表面电场强度,因此介质层在水中流注的形成和发展过程中具有重要作用。

当在空气中涂覆介质时,由于表面张力、气体吸附等原因,很容易在介质中以及介质与电极的接触面上形成缺陷。缺陷存在时的球-环电极模型如图9a所示,其等效电路如图9b所示。

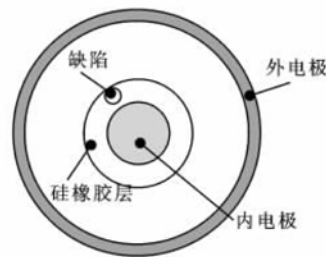
当在电极上施加如图4a所示脉冲时,脉冲前沿介质中场强为

$$E_r(r) = Ur \left(\ln \frac{r_1 + d}{r_1} + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_w} \ln \frac{r_2}{r_1 + d} \right)^{-1} \quad (3)$$

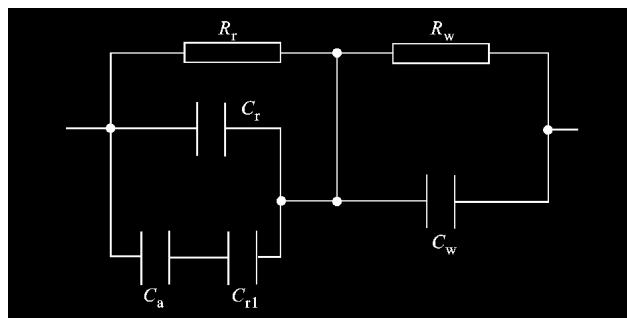
式中: U 为所加电压; r_1 为球电极半径; r_2 为环电极半径; d 为介质层厚度; ϵ_r 、 ϵ_w 分别为介质层和水的相对介电常数; r 为距球电极中心的距离。当 $r_1 < r < r_1 + d$,考虑前述实验中所用电极结构, r_1 为 4 mm , r_2 为 65 mm ,取介质厚度为 0.5 mm ,电极间电场强度分布如图10所示。

由图10可看出,当存在硅橡胶涂层时,由于水和涂层材料介电常数的差异,硅橡胶中的电场被极大地增强。当介质中存在微小缺陷时,考虑缺陷体积远小于介质体积,缺陷中场强 E_c 可以认为是均匀场

$$E_c = \frac{3\epsilon_r}{2\epsilon_r + 1} E_r(r) \quad (4)$$



(a)放大的缺陷和电极结构



(b)等效电路

R_r 和 R_w 分别为介质层电阻和介质层与地电极之间水的电阻;

C_w 为介质层与地电极之间的电容; C_a 为介质层与缺陷间的电容; C_{rl} 为介质中缺陷的电容; C_r 为除去缺陷所在部位后剩余介质与球电极之间的电容

图9 球-环电极结构及其等效电路

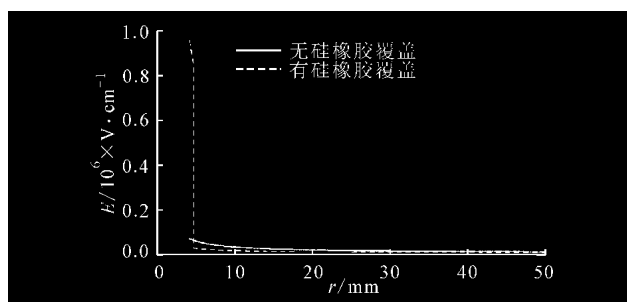


图10 电极间电场强度 E 与 r 的关系(电压 72 kV)

由式(4)可知,缺陷中场强进一步增强,可达 10^6 V/cm ,因此缺陷中气体首先发生放电,产生大量的电子和离子。这些粒子进入水中,与水分子碰撞,使水汽化形成气泡,同时放电产生的超声波也会对气泡的形成起到一定的辅助作用。由于气泡中的电场强度远高于气体击穿所需的电场强度,因此一旦水中气泡形成以后,在气泡中即会发生放电。水中放电出现后,气泡中放电形成的带电粒子在电场作用下继续与水分子碰撞,产生更多的气泡。当每次气泡中发生放电时,流注通道即进一步向前发展。流注通道的每一次发展都形成更多新的丝状放电,也意味着需要注入更多的能量,用于水的汽化、分子的电离以及压力波的形成等。当电极注入能量不能形成新的气泡时,流注发展即告终止。

3 结 论

(1)采用介质覆盖的球-环电极结构,在水中产生了大体积的放电,由于介质的存在,使水中流注的起始和发展较无介质覆盖的电极结构更容易进行,从而能够在较低电压下产生水中的大体积放电。

(2)流注通道的长度和数目随电压脉冲幅值和脉冲宽度增大而增大。当电压脉冲幅值和脉宽超过一定限度后,间隙发生击穿,放电转化为电弧放电。

(3)在介质覆盖情况下,介质层中的缺陷局部放电在水中形成气泡,从而引起水中流注放电的产生,但流注起始判据尚需进一步的研究。

参考文献:

- [1] SUN Bing, SATO M, CLEMENTS J S. Use of a pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution [J]. J Phys D: Appl Phys, 1999, 32(15): 1908-1915.
- [2] ABOU-GHAZALA A, KATSUKI S, SCHOENBACH K H, et al. Bacterial decontamination of water by means of pulsed-corona discharges [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2002, 30(4): 1449-1453.
- [3] MIZUNO A, HORI Y J. Destruction of living cells by pulsed high-voltage application [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1998, 24 (3): 387-394.
- [4] LI Z, SAKAI S, YAMADA C, et al. The effects of pulsed streamerlike discharge on cyanobacteria cells [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2006, 34(5): 1719-1724.
- [5] 卢新培,张寒虹,潘垣,等. 水中脉冲放电的压力特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4): 282-286.
- LU Xinpei, ZHANG Hanhong, PAN Yuan et al. Study on the pressure characteristics of pulsed discharge in water [J]. Explosion and Shockwaves, 2001, 21(4): 282-286.
- [6] GUSTAFSSON G. Experiments on shockwave focusing in an elliptical cavity [J]. J Appl Phys, 1987, 61 (1): 5193-5195.
- [7] XIAO S, KOLB J, KONO S, et al. High power water switches: postbreakdown phenomena and dielectric recovery [J]. IEEE Trans on Dielectr Elect Insul, 2004, 11(4): 604-612.
- [8] KATSUKI S, AKIYAMA H, ABOU-GHAZALA A, et al. Parallel streamer discharges between wire and plane electrodes in water [J]. IEEE Trans on Dielectr Elect Insul, 2002, 9(4): 498-506.
- [9] MUHAMMAD A M, YASUSHI M, SHU Xiao, et al. Streamers in water filled wire-cylinder and packed-bed reactors [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2005, 33(2): 490-491.
- [10] JONES H M, KUNHARDT E E. Pulsed dielectric breakdown of pressurized water and salt solutions [J]. J Appl Phys, 1995, 77(2): 795-805.
- [11] LISITSYN I V, NOMIYA H, KATSUKI S, et al. Thermal processes in a streamer discharge in water [J]. IEEE Trans Dielectr Elect Insul, 1999, 6(3): 351-356.
- [12] NAMIHIRA T, SAKAI S, YAMAGUCHI T, et al. Electron temperature and electron density of underwater pulsed discharge plasma produced by solid-state pulsed-power generator [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2007, 35(3): 614-618.

(编辑 杜秀杰)