

脉冲放电激发反电晕的研究

谢辉林, 李 孜

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对高压脉冲电源反电晕放电进行实验研究。采用正极性固态 Marx 脉冲发生器作为放电电源, 以中间添加蜂窝介质的针板作为放电电极, 设置正极性矩形高压脉冲输出电压为 0~20 kV 可调, 工作频率为 0~1000 Hz 可调, 脉冲宽度为 10~500 μ s 可调, 进行反电晕放电实验, 并根据电源和电极参数对影响放电电流大小的因素进行分析。进一步, 在相同放电电极参数条件下, 将高压脉冲反电晕与直流反电晕进行了对比研究。研究结果表明: 介质厚度、针板间距、脉冲宽度和放电频率均对反电晕放电电流有一定影响; 在脉冲放电频率为 100~1000 Hz 时, 发生反电晕的相同电压下, 脉冲反电晕放电电流大于直流反电晕放电电流, 证明高压脉冲激发反电晕放电效果更好。

关键词: 低温等离子体; 反电晕; 脉冲功率技术; 高压脉冲

中图分类号: TM 81 **文献标志码:** A

Study on back-corona excited by pulsed discharges

XIE Huilin, LI Zi

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An experimental study on the back-corona discharge of high voltage pulse power supply was carried out. The positive solid Marx pulse generator was used as the discharge power supply, and the needle plate with honeycomb medium in the middle was used as the discharge electrode. The positive rectangular high voltage pulse output voltage was adjusted in 0~20 kV adjustable; the working frequency was adjusted in 0~1000 Hz; the pulse width was adjusted in 10~500 μ s. The back-corona discharge experiment was carried out. The factors affecting the discharge current were analyzed according to the power supply and electrode parameters. Furthermore, under the same discharge electrode parameters, the high-voltage pulse back-corona and direct current (DC) back-corona were compared. The results show that the dielectric thickness, needle plate spacing, pulse width and discharge frequency all have certain effects on the back-corona discharge current. When the pulse discharge frequency is 100~1000 Hz and the back-corona occurs at the same voltage, the pulse back-corona discharge current is greater than the DC back-corona discharge current. This proves that the back-corona discharge effect excited by high voltage pulse is better.

收稿日期: 2022-01-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0119100)

第一作者: 谢辉林(1996-), 男, 硕士研究生。研究方向: 脉冲功率技术。E-mail: xhljim@126.com

通信作者: 李 孜(1972-), 女, 副教授。研究方向: 脉冲功率技术。E-mail: lz7209@163.com

Keywords: *non-thermal plasma; back-corona discharge; pulsed power technology; high voltage pulse*

当前，低温等离子体技术在空气污染治理领域有着广泛的应用^[1-4]。通常，空气中的电晕放电用于产生低温等离子体。直流、交流和脉冲电源均可用于产生电晕放电^[5-6]。许多研究人员致力于探索新的放电方法来生成低温等离子体。国外研究者^[7]研究了气体放电现象和反电晕放电下粉尘层的光谱特征，结果得出，正负放电激发的反电晕放电现象能产生大量的活性粒子。国内一些大学实验室^[8-9]通过直流电源在多孔材料上实现了反电晕放电，结果表明，它能产生均匀、强烈的反电晕放电。蜂窝通道中产生的活性粒子数比电晕放电和反电晕流光放电区域中产生的活性粒子数还要多，电流大小是衡量产生等离子体数量的一个关键指标参数，可以反映反电晕放电的强度。在发生反电晕时，电流显著增大，在相同的电压条件下，反电晕电流是经典的电晕放电电流的2倍以上。与直流电源相比，具有快速上升沿和下降沿的高压脉冲电源可以激发更强烈的电晕现象。本研究采用高压脉冲电源产生反电晕放电，并对蜂窝材料的反电晕放电原理进行了研究和分析。实验中采用了不同的电源参数和不同的放电电极参数，研究了其对反电晕放电电流的影响，并使用合适的脉冲参数与相同放电电极参数下的直流反电晕放电电流进行对比分析。

1 实验系统

1.1 反电晕放电原理

图1为使用针-板电极^[8]的正极性蜂窝介质电晕放电与反电晕放电原理图。如图1(a)所示，正极性高压连接到针电极，将蜂窝介质放置在板电极上，并将板电极接地。针电极处达到一定电压后会发生电晕放电并电离空气产生离子和电子。电子附着在空气中的中性粒子上，产生负离子。正离子和负离子在电场力的作用下开始移动。负离子向针尖移动，正离子向接地板移动。一部分正离子附着在蜂窝介质表面，其余一些正离子进入蜂窝孔洞附着在狭窄的孔洞上，逐渐累积并减慢后续正离子向地面的运动。正离子的累积使蜂窝介质形成电场强度 E_D 。如果继续累积，介质的电场强度将达到临界击穿场强 E_{DB} ，蜂窝介质孔洞中的空气将会发生击穿，并发生反电晕放电，生成更多的离子和电子，如图1(b)所示。从孔道中出来的电子会附着在空气中的中性粒子上形成负离子，在电场力的作用下向针尖移动，负离子和正极性高压的针尖之间会形成放电。孔洞中剩下的正离子会继续累积直至再次达到击穿场强，继续发生反电晕放电。

通过上述原理介绍可知，蜂窝介质反电晕放电是基于电晕放电的气体放电，其中电晕放电为

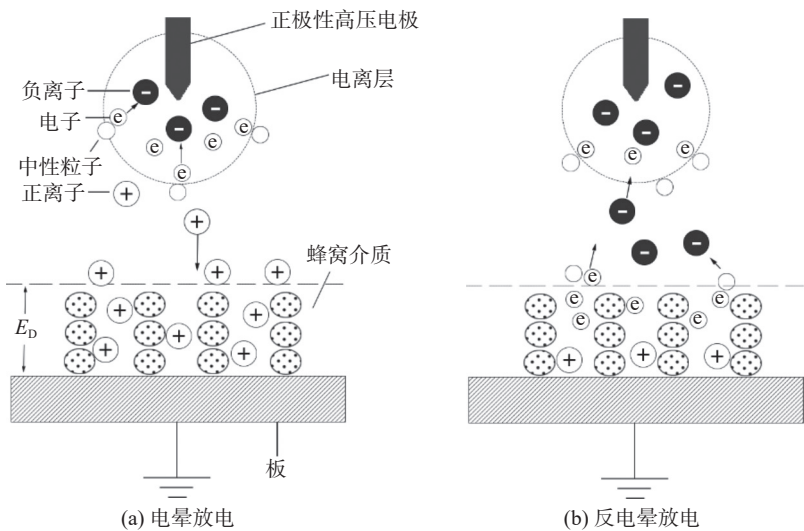


图1 电晕放电和反电晕放电的原理图

Fig.1 Schematic diagram of corona discharge and back-corona discharge

放电频率为 1000 Hz。这些实验参数为后续实验中的常规实验条件。

图 4 展示了反电晕放电的电流波形。可以看出, 如果放电电压低于 8 kV, 输出电流非常小且平稳, 则不会发生反电晕放电。当电压幅值上升到 12 kV 时, 会发生反电晕放电, 在电流上会出现许多独立的随机电流脉冲。当电压增加到 16 kV 时, 电流脉冲会出现得更多, 幅值也更大。

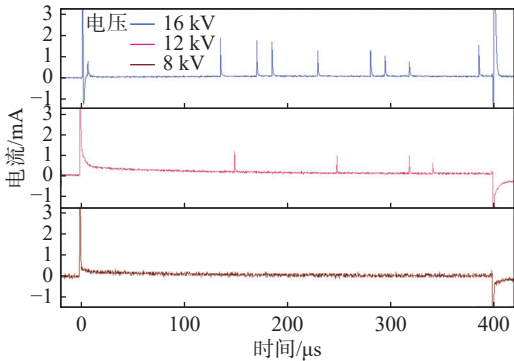


图 4 反电晕电流波形

Fig.4 Current waveforms of back-corona current

采样电阻以及电路等效 RC 参数会导致放电电流上升沿和下降沿的振荡。实验中, 由上升沿振荡对测量造成的影响在大约 120 μs 内迅速衰减, 在 200 μs 之后, 电流波形基本不受振荡影响而趋于稳定。

反电晕放电现象如图 5 所示, 常规实验条件下反电晕放电的伏安特性曲线如图 6 所示。在实验数据的测定中, 每组实验都会被重复测量 10 次以上, 然后计算平均值以表示数据图中的每个点。如果电极处的电压低于 5 kV, 则电流将非常低。当电压上升到 5 kV 以上时, 电晕放电会发生在针尖周围。如果电压增加到 7 kV, 电晕将变得更亮, 如图 5(a) 所示, 其现象发生在图 6 中电压为 7 kV 的位置。当电压范围为 5~8 kV 时, 蜂窝介质表面无放电。如果电压从 8 kV 增加到 10 kV, 介质表面会出现一些明亮的辉光点, 并会发生反电晕放电, 使电流从低于 10 μA 迅速增加到高于 20 μA , 如图 6 所示。如果电压进一步增加到 16 kV, 则在针尖周围的电晕和介质表面上的辉光之间会形成流光通道, 如图 5(b) 所示, 其现象发生在图 6 中电压为 16 kV 的位置。当施加电压达到 17 kV 时, 反电晕电流增加至 167.4 μA , 如图 6 所示。当电压从 17 kV 增加到 18 kV 时, 会发生火花放电, 如图 5(c) 所示, 其现象发生在图 6 中

电压为 18 kV 的位置。放电电流迅速上升到近 1 mA, 由于连续的火花放电, 电流不稳定。火花放电会导致 Marx 发生器中的过电流, 应避免这种情况。因此, 实验中的最大电压幅值限制在 17 kV 以内。

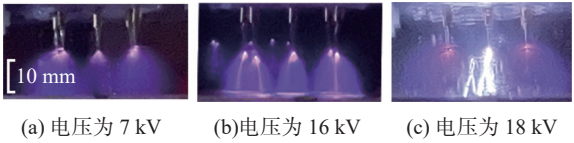


图 5 反电晕放电现象

Fig.5 Phenomenon of back-corona discharges

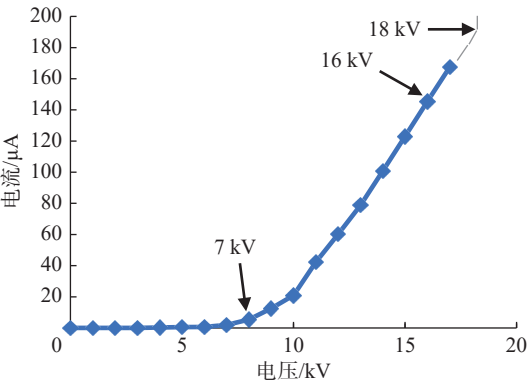


图 6 反电晕放电的伏安特性

Fig.6 V-A characteristic of back-corona discharges

2.2 参数分析

通过改变电极和电源参数, 研究了各种参数对反电晕放电电流的影响。实验参数范围为: 针数为 5 根; 介质厚度为 8, 12mm; 针板厚度为 15, 20, 30 mm; 脉冲宽度为 300, 400, 500 μs ; 放电频率为 100, 500, 1000 Hz。其中常规实验参数为: 针数为 5 根; 介质厚度为 8 mm; 针板厚度为 20 mm; 脉冲宽度为 400 μs ; 放电频率为 1000 Hz。

图 7 展示了不同介质厚度下反电晕放电的伏安特性。蜂窝介质的厚度分别为 8 mm 和 12 mm。

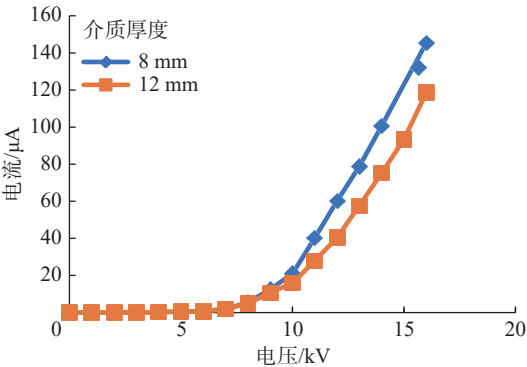


图 7 不同蜂窝材料厚度下反电晕放电的伏安特性

Fig.7 V-A characteristics of back-corona discharges for different honeycomb material thicknesses

可以看出, 在常规实验条件下, 材料越薄, 电流越大, 而较厚的介质需要更高的电压才能达到相同的电流。因此, 在相同的电压下, 较薄介质的放电电流将高于使用较厚介质的放电电流。

图 8 为不同针板间距下反电晕放电的伏安特性图。可以发现, 同等电压下, 针与板之间的距离越小, 电流越大, 反之, 间距越大, 电流越小。如果距离超过 30 mm, 放电电流将过低, 无法测量。

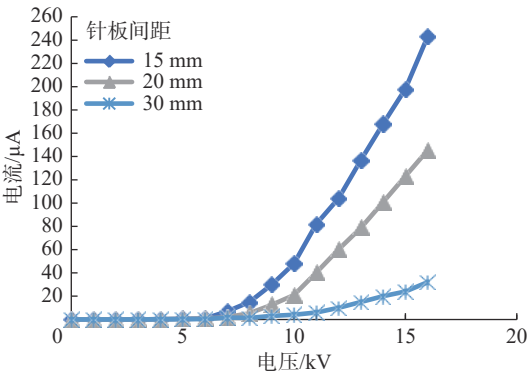


图 8 不同针板间距下反电晕放电的伏安特性
Fig.8 V-A characteristics of back-corona discharges for different needle-to-plate distances

如图 9 所示, 由于采样电阻和电路等效 RC 参数引起的振荡, 只有脉冲宽度大于 200 μs 时, 放电电流才能准确测量。相同电压的情况下, 脉冲宽度从 300 μs 增加到 500 μs 时, 放电电流随之增大。本实验的放电频率为 1000 Hz, 脉冲宽度为 500 μs 时, 其电流虽然比 400 μs 时大, 但增幅变小。可以得出, 相同电压下, 放电电流随脉冲宽度增加而增大, 脉冲宽度越接近半周期, 电流增幅越小。

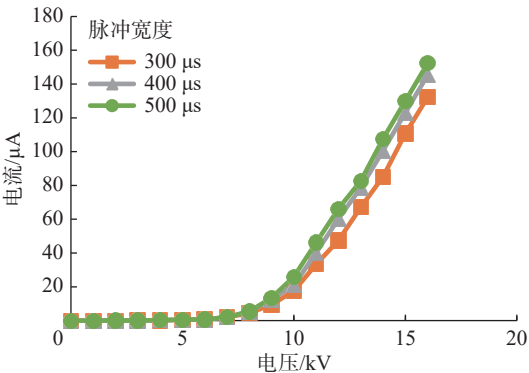


图 9 不同脉冲宽度下反电晕放电的伏安特性
Fig.9 V-A characteristics of back-corona discharges for different pulse widths

图 10 展示了不同放电频率下反电晕放电的伏安特性。可以得出, 在相同电压情况下, 放电频率在 100~1000 Hz 范围内时, 放电频率越低, 其放电电流越大。

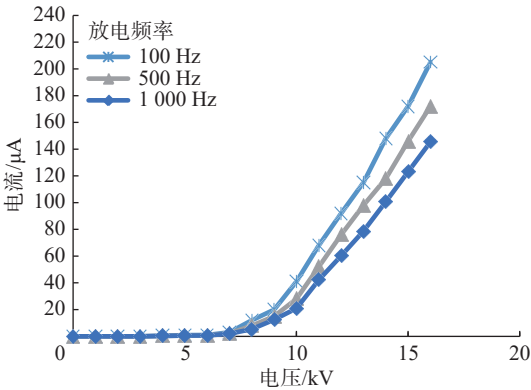


图 10 不同放电频率下反电晕放电的伏安特性
Fig.10 V-A characteristics of back-corona discharges for different discharge frequencies

如图 11 所示, 使用脉冲放电下最小的反电晕电流数据 (1000 Hz) 与直流反电晕电流作对比分析, 实验表明, 在 8 kV 电压下, 脉冲反电晕放电与直流放电之间的电流差异不显著。随着放电电压的进一步提高并伴随着反电晕放电的发生, 脉冲放电的电流大小会逐步高于直流放电。

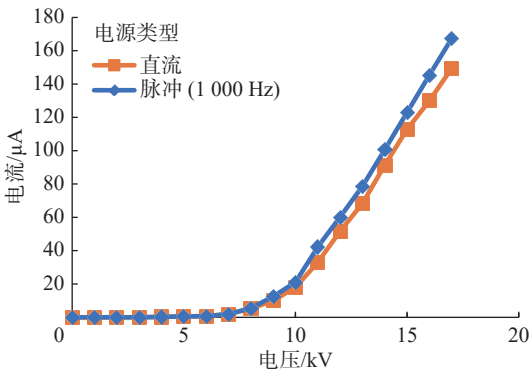


图 11 不同电源反电晕放电的伏安特性
Fig.11 V-A characteristics of back-corona discharges for different power supplies

3 结 论

本文进行了高压脉冲激发反电晕放电的实验研究。采用的固态 Marx 发生器可以产生工作频率 0~1000 Hz 可调、脉冲宽度为 10~500 μs 可调、输出电压为 0~20 kV 可调的矩形高压脉冲。使用针板电极中间添加蜂窝介质的形式进行了反电晕

放电实验。放电电流是衡量产生等离子体数量的一个关键指标参数，可以反映出反电晕放电的强度。针对蜂窝介质厚度、针板间距两类电极参数，放电脉冲宽度、放电频率两类脉冲电源参数对反电晕放电电流的影响进行了详细的分析。进一步，与同等条件下的直流电源反电晕放电电流进行对比分析，研究结果表明，介质厚度越薄、针板间距越近、脉冲宽度越宽、放电频率越低，反电晕放电电流越大。脉冲频率在 100~1 000 Hz 范围内，发生反电晕后的同等电压下，脉冲反电晕的放电电流大于直流反电晕的放电电流，证明高压脉冲激发反电晕放电有进一步的研究空间。

后续研究将主要集中在探究最佳脉冲反电晕放电的参数范围，并将其应用于处理有害气体的实验中，以反电晕放电电流强度对有害气体的处理效果分析作为切入点，对其最佳处理参数条件和机理进行研究。

参考文献：

[1] 鲁娜, 张楚珂, 夏芸, 等. 等离子体转化 CO₂ 的研究进展 [J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 351–361.

[2] JOLIBOIS J, TAKASHIMA K, MIZUNO A. Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NO_x removal[J]. *Journal of Electrostatics*, 2012, 70(3): 300–308.

[3] 刘群群, 齐汝宾, 赵赫, 等. SF₆ 气体检测技术的研究进展及发展趋势 [J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 88–94.

[4] 朱新强, 白松春. 一种在线同时分析一氧化氮和二氧化氮含量的方法 [J]. 光学仪器, 2018, 40(2): 11–17.

[5] 梁旭, 周伟, 王梓鑫, 等. 介质阻挡放电协同光催化降解

硫化氢废气 [J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(9): 190–195.

[6] SCHIAVON M, TORRETTA V, CASAZZA A, et al. Non-thermal plasma as an innovative option for the abatement of volatile organic compounds: a review[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(10): 388.

[7] CZECH T, SOBCZYK A T, JAWOREK A. Optical emission spectroscopy of point-plane corona and back-corona discharges in air[J]. *The European Physical Journal D*, 2011, 65(3): 459–474.

[8] 冯发达. 反电晕等离子体发生方法及协同催化处理挥发性有机物的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[9] 冯发达, 黄逸凡, 刘振, 等. 基于直流电晕放电和催化剂反电晕的等离子体发生法 [J]. *高电压技术*, 2017, 43(6): 1822–1829.

[10] CZAPKA T. Back-corona discharge phenomenon in the nonthermal plasma system[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(11): 2242–2243.

[11] 饶俊峰, 曾彤, 李夜, 等. 固态 Marx 发生器的过流保护研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31(12): 125001.

[12] LIU H T, RAO J F, JIANG S, et al. A novel drive circuit for solid-state rectangular pulse generator[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). Jackson: IEEE, 2018: 81–84.

[13] LI Z, LIU H T, RAO J F, et al. Gate driving circuit for the all solid- state rectangular Marx generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(8): 4058–4063.

[14] RAO J F, ZENG T, JIANG S, et al. A synchronous drive circuit with over-current protection for solid-state pulsed power modulators[J]. *IET Power Electronics*, 2020, 13(1): 60–67.

(编辑：丁红艺)