

气流对微秒脉冲滑动放电特性的影响

牛宗涛 章程 马云飞 王瑞雪 陈根永 严萍 邵涛

Effect of flow rate on the characteristics of repetitive microsecond-pulse gliding discharges

Niu Zong-Tao Zhang Cheng Ma Yun-Fei Wang Rui-Xue Chen Gen-Yong Yan Ping Shao Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 195204 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.195204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.195204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压氦气平行极板击穿电压实验研究

Experimental study on breakdown voltage between parallel plates in high-pressure helium

物理学报.2015, 64(10): 105101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.105101>

高压耦合高功率脉冲磁控溅射的增强放电效应

Enhanced discharge of high power pulsed magnetron sputtering coupling with high voltage

物理学报.2014, 63(18): 185207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.185207>

高功率脉冲磁控溅射的阶段性放电特征

Phasic discharge characteristics in high power pulsed magnetron sputtering

物理学报.2014, 63(17): 175201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.175201>

纳秒脉冲气体放电中逃逸电子束流的研究

Runaway electron beams in nanosecond-pulse discharges

物理学报.2014, 63(8): 085208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085208>

磁控溅射辉光放电特性的模拟研究

Computer simulation of the glow discharge characteristics in magnetron sputtering

物理学报.2012, 61(16): 165101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.165101>

气流对微秒脉冲滑动放电特性的影响*

牛宗涛¹⁾²⁾ 章程^{2)3)†} 马云飞¹⁾²⁾ 王瑞雪²⁾³⁾ 陈根永¹⁾
严萍²⁾³⁾ 邵涛^{2)3)‡}

1)(郑州大学电气工程学院, 郑州 450001)

2)(中国科学院电工研究所, 北京 100190)

3)(中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190)

(2015年1月30日收到; 2015年5月14日收到修改稿)

脉冲电源驱动的滑动放电能够在大气压下产生高能量、高功率密度的低温等离子体. 为了研究微秒脉冲电源在针-针电极结构中产生滑动放电的特征, 本文采用电压幅值为0—30 kV, 脉冲宽度约8 μ s, 脉冲重复频率为1—3000 Hz的微秒脉冲电源, 通过测量电压、电流波形和拍摄放电图像, 研究了微秒脉冲滑动放电的电特性. 实验结果表明, 随着施加电压的增加微秒脉冲滑动放电存在三种典型的放电模式: 电晕放电、弥散放电和类滑动放电. 不同放电模式的电压、电流波形和放电图像之间差异显著. 脉冲重复频率对微秒脉冲滑动放电特性有影响, 表现为当气体流量较小(2 L/min)时, 类滑动放电的放电通道随着脉冲重复频率的增大逐渐集中, 而当气体流量较大(16 L/min)时, 类滑动放电的放电通道随着脉冲重复频率的增大逐渐分散. 不同气流下重复频率对滑动放电特性的影响与放电中粒子的记忆效应和气流的状态有关.

关键词: 微秒脉冲, 滑动放电, 脉冲重复频率, 气流量

PACS: 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Hc, 52.80.Mg

DOI: 10.7498/aps.64.195204

1 引言

滑动放电作为一种常见的气体放电, 可以在大气压下产生周期性的非平衡态等离子体^[1-3]. 它的基本原理是施加电压于一对或者多个电极上, 并在电极间隙内通入气流, 使电极之间产生初始放电通道, 这些放电通道在气流作用下沿着气流方向滑动, 从而形成滑动放电^[4,5]. 由于滑动放电能够产生持续、稳定的非平衡态低温等离子体, 且等离子体中的电子和中性分子的碰撞会引起分子的解离、激发和电离, 产生大量的活性原子和基团, 具有较高的化学活性. 因此, 滑动放电等离子体技术已经广泛应用于挥发性有机物的降解、高浓度有机废水的处理、点火和辅助燃烧等领域^[6-8].

滑动放电的特性与电源种类、电极结构和气

体流速密切相关. 目前常用的电源主要是交、直流电源. Fridman等^[9-11]将幅值1 kV的直流电源施加在刀型电极结构上, 研究了不同气流下滑动放电的特性, 并将其用于杀菌、消毒和水处理. 章程等^[12,13]分别采用交流电源和高频高压电源作用在针-针电极结构上, 研究在气体流速为0—10 L/min下滑动放电特性, 发现滑动放电只有在小间隙(小于3 mm)内产生小电流的火花放电, 大多情况下放电表现为类辉光模式. Aldén等^[14]采用高频高压交流电源激励水冷的管状电极, 通过选择合适的电源功率和气体流量, 获得交流滑动放电抑制火花产生的方法. 然而由于电源拓扑和功率与能量的限制, 放电很难获得持续的火花放电. 且交直流放电可控性较差, 无法实现应用中对放电等离子体产生时间与作用时间的优化控制. 近年来, 随着

* 国家自然科学基金(批准号: 51222701, 51477164)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangcheng@mail.iee.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: st@mail.iee.ac.cn

民用脉冲功率技术的发展,以脉冲功率电源为激励源所进行的研究引起国内外研究人员的广泛关注.利用脉冲功率电源的快上升沿、窄脉宽、高瞬时功率和较低能量等特点,邵涛等^[15-20]对微秒和纳秒脉冲气体放电的击穿和放电的特性进行了研究,发现与常规电源(直流、交流)相比,脉冲电源激励的放电等离子体具有高能量与高活性自由基强度.Pai等^[21-24]采用纳秒脉冲电源激励针-针结构的放电,研究了大气压下气流中电晕放电、弥散放电和火花放电的特征,以及它们之间的转换规律.Korolev等^[25]采用毫秒脉冲电源作用在刀型电极上,通过改变气体流量,研究阴极光斑的变化规律.Zhang等^[26,27]采用纳秒脉冲电源作用在针-针电极上,研究在气体流速为0—10 L/min下滑动放电特性,并对比了纳秒脉冲和交流滑动放电的特征,发现纳秒脉冲电源受负载影响较小,能够提供足够高的功率与能量激励持续的火花放电.

实际脉冲电源设计中,电源拓扑和开关种类与组合方式众多,脉冲电源的输出参数(上升沿、脉宽和重复频率等)多样,其驱动的放电特性也不尽相同.我们前期研究发现微秒与纳秒脉冲电源激励的滑动放电在不同气流下表现出不同的放电图像.为了深入研究微秒脉冲滑动放电的特性,本文采用电压幅值为0—30 kV,脉冲宽度约为8 μs ,脉冲重复频率为1—3000 Hz的微秒脉冲电源激励大气压下滑动放电.研究了微秒脉冲滑动放电的电特性及影响因素.

2 实验装置与测量系统

实验在大气压下敞开的空间内进行,装置如图1所示.电源具体参数为:电压幅值0—30 kV,脉冲宽度约8 μs ,上升沿约0.5 μs ,脉冲重复频率1—3000 Hz.由于钨针具有硬度高、熔点高、导电性好等特点,因此选用钨针作电极.且选用的钨针电极直径为2 mm,长度为15 cm,实验时保证两电极处于同一轴心位置,电极间隙可调,为保证滑动放电的发生,实验时调节电极间隙为10 mm.气流喷嘴放置在电极间隙中心位置正下方15 mm处,且喷嘴的内直径为8 mm.喷出空气由空气压缩机产生,并经过浮子流量计进行测量和控制.为保证气体流速精度,实验选用两种浮子流量:量程分别为10 L/min和45 L/min.当气体流速小于等于10 L/min时,选用小量程的浮子流

量计(10 L/min),当气体流速大于10 L/min时,选用大量程的浮子流量计(45 L/min).电压由分压比为1000:1的TEK分压探头(P6015)测量,电流由Pearson线圈测量,其变比为1 V/A.测量所得的电压和电流通过3 m长的同轴电缆输送到Lecroy WR204Xi示波器,该示波器的采样率和带宽分别为10 G/s和2 GHz.放电图像由Canon EOS500D数码相机和腾龙镜头(ModelA001)拍摄,相机拍照方向与电极轴线方向垂直且与电极高度一致,相机放置在距离电极间隙1 m处,且放电区域完全处于其视野内,保证相机可以从水平方向拍摄到放电图像.

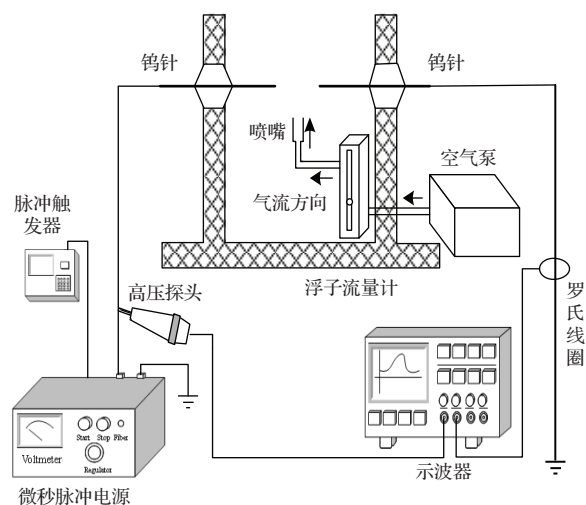


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic view of the experimental set-up.

3 微秒脉冲滑动放电特性研究

保持气体流速为16 L/min、电极间隙为10 mm和脉冲重复频率为1000 Hz不变,设置相机的曝光时间为1 s.实验中发现随着施加电压的增大,微秒脉冲滑动放电出现三种稳定的放电模式,即电晕放电、弥散放电和类滑动放电模式.图2给出了这三种放电模式的电压、电流波形和放电图像.这三种放电模式的电压、电流波形和放电图像之间有着很大的区别.当施加电压为12 kV时,可以得到稳定的电晕放电.电晕放电电压、电流波形如图2(a)所示,其电压波形与电源空载时电压波形相似,电流幅值较小,约为30 mA,波形为双极性;电晕放电的放电图像如图2(b)所示,由图可见电晕放电区域仅存在于具有小曲率半径的高压电极(阳极)周围,光强较弱^[28].

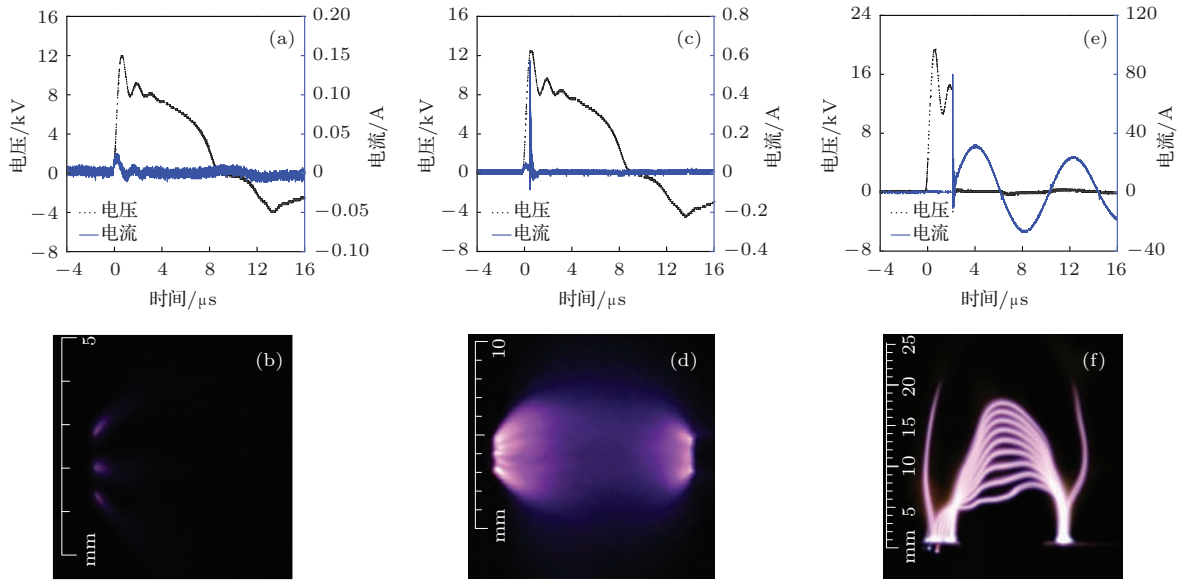


图2 (网刊彩色) 微秒脉冲滑动放电典型波形以及相应放电图像 (a), (b) 电晕放电; (c), (d) 弥散放电; (e), (f) 类滑动放电
 Fig. 2. (color online) Typical voltage-current waveforms and discharge images in microsecond-pulse gliding discharges (a-b) corona mode; (c-d) diffuse mode; (e-f) gliding-like mode.

当施加电压增加至 13.5 kV 时, 微秒脉冲滑动放电进入稳定的弥散放电模式. 弥散放电电压、电流波形如图 2(c) 所示, 当发生弥散时, 电压幅值略有降低. 而弥散放电的电流幅值增大到 600 mA, 脉宽较窄, 约 100 ns. 一般说来弥散放电电流由位移电流和传导电流组成, 故图中电流有两个阶段^[29]. 第一阶段, 电流缓慢增加, 没有发生弥散放电, 这一部分的电流主要是位移电流; 经过一段时间的积累, 进入第二阶段, 弥散放电发生. 此时电流迅速增大至最大值, 这一部分电流是位移电流和传导电流之和^[13]. 弥散放电的放电图像如图 2(d) 所示, 图中高压电极端部向四周各个方向发出弥散放电通道互相交叠, 并贯穿整个气隙, 未观察到明显的放电细丝, 此时放电表现为弥散模式^[29].

当施加电压增加至 20 kV 时, 微秒脉冲滑动放电进入稳定的类滑动放电模式, 电压、电流波形如图 2(e) 所示. 此时在针-针电极间隙发生击穿时, 产生的火花通道在气流的作用下, 沿着气流的方向移动, 形成彼此分散的放电通道. 此时放电形式与常规的滑动弧放电类似, 故本文称之为类滑动放电. 图中可见类滑动放电的电压波形与电源空载时电压波形有显著区别. 在形成火花通道的瞬间, 电压下降时间迅速减小, 电压脉宽减小至约 2.8 μ s. 而电流幅值迅速增大, 约为 80 A, 形成一个脉宽约 40 ns 的窄脉冲. 类滑动放电的放电图像如图 2(f) 所示, 此时相机的曝光时间为 1/100 s. 图中可以观

察到火花通道的高度达到 20 mm. 由于气流的作用, 火花通道由阳极靠近端面的上侧面发出, 沿着气流的方向移动, 并且彼此分散, 在阴极靠近端面的上侧面结束, 在距离电极最远处的火花通道有被吹断的可能, 这表明下一个火花通道最有可能在电极间隙最短处发生. 类滑动放电等离子体区域较大, 且火花通道的亮度较强, 放电较剧烈.

研究微秒脉冲滑动放电的瞬时功率和能量对分析其放电特性具有重要意义. 瞬时功率 $W(t)$ 和 0— t 时间内积累的能量 $E(t)$ 的计算公式为

$$W(t) = V(t) \times I(t), \quad (1)$$

$$E(t) = \int_0^t W(t) dt. \quad (2)$$

式中 $V(t)$, $I(t)$ 分别是 t 时刻的电压和电流. 结合图 2 中的电压电流波形和 (1), (2) 式可以得出不同放电模式下微秒脉冲滑动放电典型的瞬时功率和能量曲线, 如图 3 所示. 由图可知, 微秒脉冲滑动放电中电晕放电模式的单个脉冲瞬时功率的最大值约为 0.18 kW, 能量的最大值约为 0.09 mJ. 弥散放电模式单个脉冲的瞬时功率是电晕放电的 40 倍左右, 最大值达到 7.2 kW, 能量的最大值约为 0.65 mJ. 而类滑动放电单个脉冲的瞬时功率远远大于电晕放电与弥散放电的功率, 最大值达到 500 kW, 此外类滑动放电能量的最大值约 38 mJ, 远大于电晕放电和弥散放电的能量, 这表明类滑动放电更为剧烈.

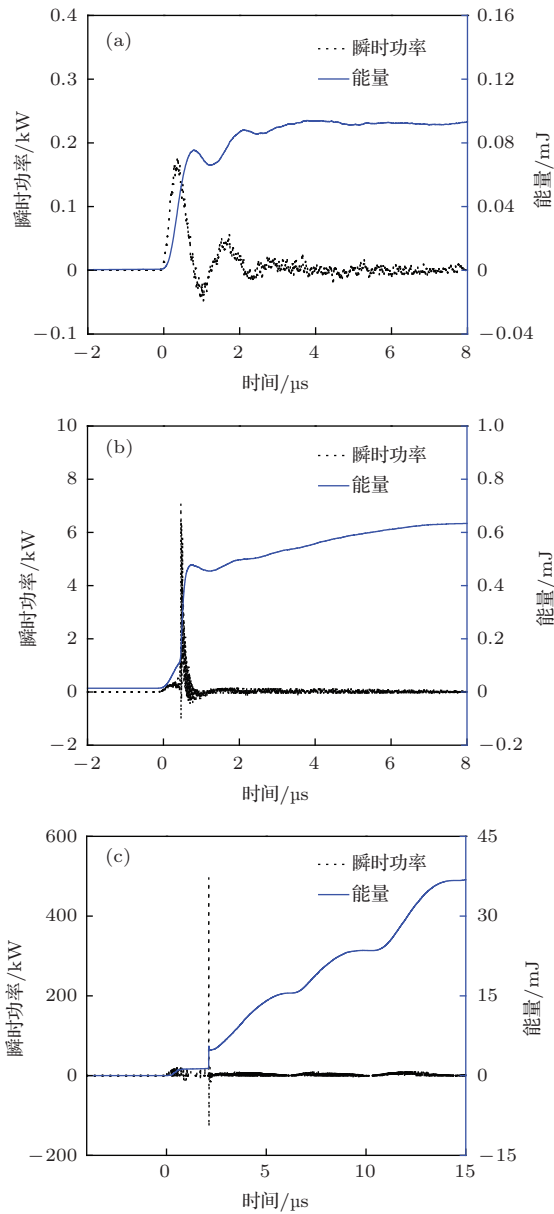


图3 (网刊彩色) 微秒脉冲滑动放电的瞬时功率和能量 (a) 电晕放电; (b) 弥散放电; (c) 类滑动放电
Fig. 3. (color online) Power and energy waveforms for microsecond-pulse gliding discharges: (a) corona discharge; (b) diffuse discharge; (c) gliding-like discharge.

4 脉冲重复频率对放电特性的影响

脉冲重复频率作为一个重要的参数, 可以有效地调节放电等离子体的产生与作用时间, 因此本文研究了脉冲重复频率对微秒脉冲滑动放电特性的影响. 实验中脉冲重复频率的调节范围为 500—3000 Hz. 当电极间隙为 10 mm, 气体流量为 10 L/min 时, 调节施加电压, 使微秒脉冲滑动放电分别处于弥散放电点火和击穿, 并测量获得 10 组数据, 求其平均值和方差, 做出脉冲重复频率对弥

散放电点火电压、击穿电压的影响曲线和弥散放电范围柱状图, 如图 4 所示. 其中图 4 (a) 是不同脉冲重复频率的弥散放电点火电压和击穿电压分布曲线, 图 4 (b) 是不同脉冲重复频率的弥散放电电压范围分布图. 由图 4 可知, 随着脉冲重复频率的增大, 击穿电压逐渐减小, 击穿电压的波动也逐渐减小, 并且弥散放电点火电压也逐渐减小, 在频率大于等于 1500 Hz 时, 弥散放电点火电压的减小速率逐渐变缓, 此外, 弥散放电点火电压的波动也逐渐减小. 而弥散放电电压范围先增大, 在 1500 Hz 时达到最大值, 为 5.4 kV, 然后逐渐减小, 最后趋于稳定值为 4.6 kV.

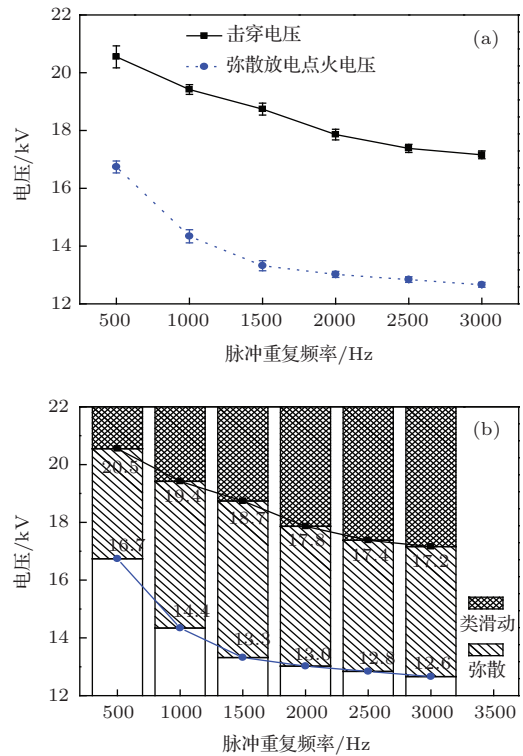


图4 (网刊彩色) 脉冲重复频率对放电模式的影响 (a) 弥散放电点火电压和击穿电压; (b) 弥散和类滑动放电范围
Fig. 4. (color online) Effect of the pulse repetition frequency on the discharge mode: (a) breakdown voltage and the ignition voltage of diffuse discharges; (b) the scope of diffuse and gliding-like discharges.

为了保证每次拍摄到放电图像的脉冲个数相同, 在改变脉冲重复频率的同时, 调节相机的曝光时间, 使得拍摄到的放电图像是 10 个脉冲的积分. 实验条件为电极间隙 10 mm, 气体流量 2 L/min, 施加电压 20 kV. 当气体流量为 2 L/min 时, 不同脉冲重复频率的类滑动放电图像如图 5 所示. 图中可见随着脉冲重复频率的增大, 类滑动放电的放电通道越来越集中. 当脉冲重复频率小于等于 1000 Hz

时, 在电极间隙内能看到分散的火花放电通道, 当脉冲重复频率大于 1000 Hz 时, 火花通道集中成一条较宽且十分明亮的通道, 并且火花通道周围出现了晕光, 脉冲重复频率越大, 晕光范围越大, 高度越高.

保持其他实验条件不变, 调节气体流量为

16 L/min, 图 6 给出了气体流量 16 L/min 时, 不同脉冲重复频率的类滑动放电图像. 此时, 随着脉冲重复频率的增大, 形成了典型的类滑动放电图像, 并且火花放电通道逐渐分散, 放电等离子体区域逐渐增大, 放电的位置由电极端面逐渐向靠近端面的上侧面发展.

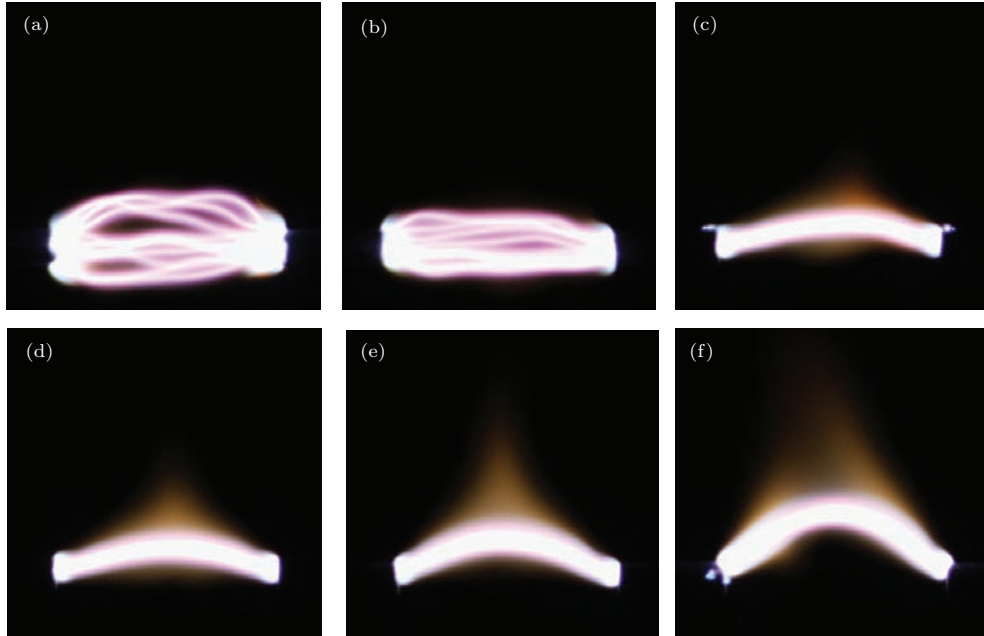


图 5 (网刊彩色) 气体流量 2 L/min 时, 不同脉冲重复频率的类滑动放电图像 (脉冲个数为 10)

Fig. 5. (color online) Images of the gliding-like discharge at different pulse repetition frequency in flow rate of 2 L/min (10 pulses).

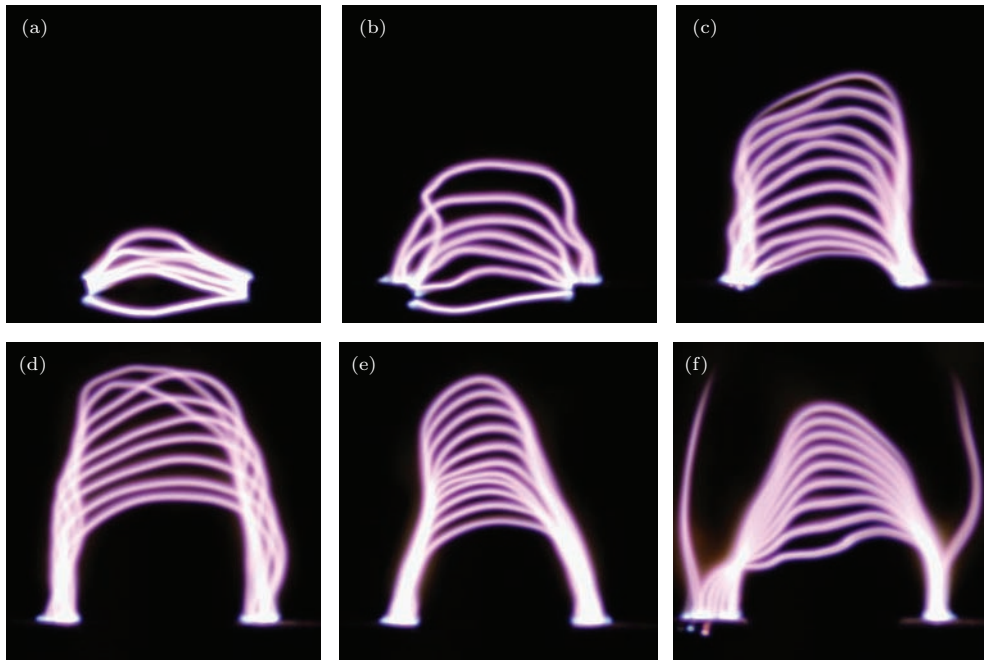


图 6 (网刊彩色) 气体流量 16 L/min 时, 不同脉冲重复频率的类滑动放电图像 (脉冲个数为 10)

Fig. 6. (color online) Images of the gliding-like discharge at different pulse repetition frequency in flow rate of 16 L/min (10 pulses).

通过图5和图6的对比可知气体流量不相同,随着脉冲重复频率的增大,类滑动放电的放电图像呈现出不同的特点.气体流量较小(2 L/min)时,放电通道越来越集中,并出现光晕.气体流量较大(16 L/min)时,放电通道越来越分散.我们可以从气体流量和脉冲重复频率这两方面分析这一现象.而气体流量与雷诺数^[30]有关,脉冲重复频率与放电粒子的记忆效应^[26]有关.雷诺数是一个表征流体流动情况的无量纲数,用 Re 表示.利用雷诺数可以区分流体的流动状态(层流、湍流),也可用来确定流体流动所受到的阻力.雷诺数的计算公式如下所示:

$$Re = \frac{VD}{v} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu A} = \frac{4\rho Q}{\mu\pi D}, \quad (3)$$

式中 V 为气体流速,单位为m/s; D 为喷嘴内直径,单位为m; v 为运动黏度系数,单位为 m^2/s ; ρ 为空气密度,单位为 kg/m^3 ; μ 为气体动力黏度系数,单位为 Ns/m^2 ; Q 为气体流量,单位为 m^3/s ; A 为喷嘴横截面的面积.可以用(3)式计算空气雷诺数的大小,空气雷诺数参数表如表1所示.当 $Re < 2000$ 时,气流处于层流状态,流体分层流动,互不混合,气流稳定.当 $2000 < Re < 4000$ 时,气流处于层流向湍流转化的状态,气流场的流线开始出现波浪状的摆动,摆动的频率和振幅随着流速的增加而增加,气流不稳定.当 $Re > 4000$ 时,气流处于完全的湍流状态,此时气流场中有许多小漩涡,层流被破坏,相邻流层间不但有滑动,还有混合,气流紊乱.放电粒子的记忆效应是指在下一个脉冲来临时,放电区域内残余的粒子(离子和亚稳态粒子)对放电发生的影响.在放电熄灭后,前一次放电产生的这些粒子可能在放电区域内存在几百微秒或者更久,而在这些粒子中,电子的漂移速度远远大于正离子的漂移速度,因此,在下一个脉冲来临时,滞留在放电区域的带电粒子会辅助放电通道的发展.当脉冲重复频率较高时,两个脉冲之间的时间间隔较小,粒子的扩散受到限制,此时在放电区域内残余大量的带电粒子,因此,在脉冲重复频率较高时,记忆效应更加显著.

表1 空气雷诺数参数表

Table 1. Parameters of air Reynolds number.

参数	空气
密度(ρ)/(kg/m^2)	1.209
喷嘴内直径(D)/m	8×10^{-3}
动力黏度系数(μ)/(Ns/m^2)	17.9×10^{-6}
运动黏度系数(v)/(m^2/s)	14.8×10^{-6}

当气体流量为2 L/min时,通过计算可知,相应的雷诺数(Re)为358,由于当 $Re < 2000$ 时气流处于层流状态,气流稳定^[30],因此,当气体流量为2 L/min时,雷诺数对类滑动放电通道的影响较小.此时,重频微秒脉冲放电中粒子的记忆效应占主导.前一次放电激发产生的带电粒子在放电结束后会驻留在气隙中,当紧接着的脉冲来临时,驻留的带电粒子会辅助放电通道的发展,使得放电通道易于沿着前一次的放电通道发展^[26].此外,两个脉冲之间的间隔时间越短,驻留的带电粒子越多,放电通道越容易重合.因此,放电通道随着脉冲重复频率的增大而集中.当气体流量为16 L/min时,相应的 Re 为2864,由于当 $2000 < Re < 4000$ 时气流处于层流向湍流转变的不稳定状态^[30],因此,当气体流量为16 L/min时,雷诺数对类滑动放电通道的影响较大.此时气体流量对类滑动放电的影响占主导.电极间产生的火花通道,在气流的作用下,沿着气流的方向移动,并且移动距离较大.当频率较低时,相邻两个脉冲之间的时间间隔较长,放电激发产生的带电粒子有较长的时间可以向周围扩散发展.此外,由于气体流量较大且不稳定,使得扩散更加充分,电极间隙内驻留的带电粒子大大减少,因此下一次放电可能不再沿着前一次的放电通道发展,而是在电极间隙内随机产生放电通道,这就是频率较低时放电通道主要集中在电极间隙周围的原因.当脉冲重复频率较高时,相邻两个脉冲之间的时间间隔较短,放电激发产生的带电粒子向周围扩散发展的时间也较短,由于气体流量较大且不稳定,因此,前一次放电产生的带电粒子沿气流方向略有扩散.这样使得下一次火花放电通道沿气流方向,在前一次的放电通道上方产生,形成典型的类滑动放电.此外,由于气流不稳定,火花通道比较分散.

5 结 论

本文对微秒脉冲滑动放电特性及其影响因素进行了实验研究,结果表明随着施加电压的增大,微秒脉冲滑动放电依次出现三种典型的放电模式:电晕放电模式、弥散放电模式和类滑动放电模式.其中电晕放电模式表现为放电区域仅在高压电极周围,光强较弱.弥散放模式表现为阳极端部向四周各个方向发出弥散放电通道,并贯穿整个气隙.气隙内弥散放电通道相互交叠,未观察到明显的放

电细丝. 类滑动放电表现为连续的火花放电. 脉冲重复频率对微秒脉冲滑动放电特性影响显著, 且气体流量不同, 滑动放电图像呈现出不同的特性. 当气体流量较小(2 L/min)时, 随着脉冲重复频率的增大, 火花放电通道越来越集中. 而在气体流量较大(16 L/min)时, 火花放电通道越来越分散, 等离子体区域逐渐增大, 发生放电的位置由气隙沿着气流方向发展. 这是因为不同气流下重复频率对滑动放电特性的影响与放电中粒子的记忆效应和气流的状态有关. 当气体流量较小(2 L/min)时, 气流处于层流状态, 气流稳定, 此时重频微秒脉冲放电中粒子的记忆效应占主导. 而在气体流量较大(16 L/min)时, 气流处于层流向湍流转变的不稳定状态, 此时气体流量对类滑动放电的影响占主导.

参考文献

- [1] Mutaf Y O, Saveliev A V, Fridman A A, Kennedy L A 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 041632
- [2] Zhu J J, Sun Z W, Li Z S, Ehn A, Aldén M, Salewski M, Leipold F, Kusano Y 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 295203
- [3] Korolev Y D, Frants O B, Geyman V G, Landl N V, Kasyanov V S 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 123319
- [4] Ni M, Yu L, Li X, Tu X, Wang Y, Yan J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 015101 (in Chinese) [倪明江, 余量, 李晓东, 屠昕, 汪宇, 严建华 2011 物理学报 **60** 015101]
- [5] Czernichowski A 1994 *Pure Appl. Chem.* **66** 061301
- [6] Du C M, Yan J H 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 061648
- [7] Fridman A, Gutsol A, Gangoli S, Ju Y, Ombrello T 2008 *J. Propul. Power* **24** 061216
- [8] Kalra C S, Gutsol A F, Fridman A A 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 0132
- [9] Fridman A, Nester S, Kennedy L A, Saveliev A, Mutaf Y O 1998 *Prog. Energ. Combust.* **25** 0211
- [10] Wright K C, Kim H S, Cho D J, Rabinovich A, Fridman A, Cho Y I 2014 *Desalination* **345** 64
- [11] Nunnally T, Tsangaris A, Rabinovich A, Nirenberg G, Chernets I, Fridman A 2014 *Int. J. Hydrogen Energ.* **39** 2311976
- [12] Zhang C, Shao T, Xu J, Ma H, Duan L, Ren C, Yan P 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 112843
- [13] Xu J, Zhang C, Shao T, Duan L, Ren C, Yan P 2012 *High Voltage Engineering* **38** 071803 (in Chinese) [许家雨, 章程, 邵涛, 段立伟, 任成燕, 严萍 2012 高电压技术 **38** 071803]
- [14] Zhu J, Gao J, Li Z, Ehn A, Aldén M, Larsson A, Kusano Y 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 234102
- [15] Shao T, Zhang C, Long K, Wang J, Zhang D, Yan P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 040601
- [16] Zhang C, Shao T, Niu Z, Zhang D, Wang J, Yan P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 035202 (in Chinese) [章程, 邵涛, 牛铮, 张东东, 王珏, 严萍 2012 物理学报 **61** 035202]
- [17] Shao T, Tarasenko V F, Yang W, Beloplotov D V, Zhang C, Lomaev M I, Yan P, Sorokin D A 2014 *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** 054018
- [18] Shao T, Yang W, Zhang C, Niu Z, Yan P, Schamiloglu E 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 071607
- [19] Shao T, Huang W, Li W, Zhang C, Zhou Y, Yan P, Schamiloglu, E 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 061721
- [20] Zhang C, Ma H, Shao Tao, Xie Q, Yang W, Yan P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085208 (in Chinese) [章程, 马浩, 邵涛, 谢庆, 杨文晋, 严萍 2014 物理学报 **63** 085208]
- [21] Pai D Z, Stancu G D, Lacoste D A, Laux C O 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 045030
- [22] Pai D Z, Lacoste D A, Laux C O 2010 *Plasma Sources Sci. Technol.* **19** 065015
- [23] Stauss S, Pai D Z, Shizuno T, Terashima K 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 06159
- [24] Pai D Z, Lacoste D A, Laux C O 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 093303
- [25] Korolev Y D, Frants O B, Landl N V, Bolotov A V, Nekhoroshev V O 2014 *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** 054016
- [26] Zhang C, Shao T, Yan P, Zhou Y 2014 *Plasma Sources Sci. Technol.* **23** 035004
- [27] Zhang C, Shao T, Ma H, Ren C, Yan P, Zhou Y 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 102354
- [28] Liu X, He W, Yang F, Wang H, Liao R, Xiao H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 075201
- [29] Zhang C, Shao T, Yan P 2014 *Chinese Science Bulletin* **59** 201919 (in Chinese) [章程, 邵涛, 严萍 2014 科学通报 **59** 201919]
- [30] Zhang H, Li F, Cao Y, Kunugi T, Yu B 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024703

Effect of flow rate on the characteristics of repetitive microsecond-pulse gliding discharges*

Niu Zong-Tao¹⁾²⁾ Zhang Cheng^{2)3)†} Ma Yun-Fei¹⁾²⁾ Wang Rui-Xue²⁾³⁾ Chen Gen-Yong¹⁾
Yan Ping²⁾³⁾ Shao Tao^{2)3)‡}

1) (School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

2) (Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 30 January 2015; revised manuscript received 14 May 2015)

Abstract

Gliding discharges driven by microsecond-pulse power supply can generate non-thermal plasmas with high energy and high power density at atmospheric pressure. However, the flowing air significantly influences the characteristics of the microsecond-pulse gliding discharges in a repetitive mode. In this paper, in order to obtain the characteristics of the microsecond-pulse gliding discharges in a needle-to-needle gap, a microsecond-pulse power supply with an output voltage up to 30 kV, a pulse width $\sim 8 \mu\text{s}$, and a pulse repetition frequencies 1–3000 Hz is used to investigate the electrical characteristics of gliding discharges by analyzing the voltage-current waveforms and obtaining the discharge images. Experimental results show that there are three typical discharge modes in the microsecond-pulse gliding discharges as the applied voltage increases, i.e. corona discharge, diffuse discharge, and gliding-like discharge. Both voltage-current waveforms and the discharge images at different discharge modes have significantly different behaviors. Corona discharge only exists near the positive electrode with a small radius of curvature. Diffuse discharges behave as the overlapped plasma channels bridge the entire gap. The channel of diffuse discharge is full of gap, which starts from the positive electrode, spreads in all directions, and ends at the negative electrode. Gliding-like discharge behaves as a continuous spark channeling, showing a continuous spark, which is discharging strongly and influenced by flow rates. Furthermore, both pulse repetition frequency (PRF) and flow rate remarkably affects the characteristics of microsecond-pulse gliding discharges. When the flow rate is small (2 L/min), the spark channels of gliding-like discharge gradually concentrate with the increase of the PRF. However, when the flow rate is larger (16 L/min), the spark channels of gliding-like discharge behave dispersively when the PRF increases. In our opinion, different characteristics of microsecond-pulse gliding discharge at different flow rates are closely related to the memory effect of the residual particles in the discharges and the state of the air flow. When the flow rate is small (2 L/min), the air flow is stable, and the discharge is generated in a laminar flow state. In this case, the memory effect of particles in repetitive microsecond-pulse gliding discharges dominates the formation of the discharges. These particles could enhance the electric field strength for the next pulse. Because the time interval between two pulses at high PRF is shorter than that at low PRF, there are fewer particles leaving the air gap at high PRF. Thus, memory effect is more significant at high PRF. As a result, the channel of spark discharge concentrates with the increase of the PRF. When the flow rate increases to 16 L/min, the calculated Reynolds number increases to 2864, indicating the transition from laminar state to turbulence state. The residual particles are more likely to escape from the gap. Thus, memory effect slightly affects the characteristics of the microsecond-pulse gliding discharges. In this case, the state of the air flow dominates the formation of the discharge. The spark channels spread towards the top in the direction of the gas flow, making the region of the spark channels gradually disperse as the PRF increases.

Keywords: microsecond-pulse, gliding discharges, pulse repetition frequency, flow rate

PACS: 52.80.-s, 51.50.+v, 52.80.Hc, 52.80.Mg

DOI: 10.7498/aps.64.195204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51222701, 51477164).

† Corresponding author. E-mail: zhangcheng@mail.iee.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: st@mail.iee.ac.cn