



旋转滑动弧放电等离子体滑动放电模式的实验研究

雷健平 何立明 陈一 陈高成 赵兵兵 赵志宇 张华磊 邓俊 费力

Experimental study on gliding discharge mode of rotating gliding arc discharge plasma

Lei Jian-Ping He Li-Ming Chen Yi Chen Gao-Cheng Zhao Bing-Bing Zhao Zhi-Yu Zhang Hua-Lei
Deng Jun Fei Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 195203 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200672

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200672>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

放电参数对爆燃模式下同轴枪强流脉冲放电等离子体的影响

Influence of discharge parameters on pulsed discharge of coaxial gun in deflagration mode

物理学报. 2019, 68(10): 105203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190218>

同轴枪放电等离子体电流片的运动特性研究

Motion characteristics of coaxial gun discharge plasma current sheet

物理学报. 2019, 68(3): 035203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181832>

同轴枪脉冲放电等离子体输运过程中密度变化的实验研究

Experimental study on coaxial gun pulse discharge plasma density change in transport process

物理学报. 2017, 66(5): 055203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.055203>

亚大气压六相交流电弧等离子体射流特性研究:实验测量

Characteristics of meso-pressure six-phase alternative current arc discharge plasma jet: Experiments

物理学报. 2018, 67(4): 045201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172556>

亚大气压六相交流电弧放电等离子体射流特性数值模拟

Numerical modelling for characteristics of the meso-pressure six-phase alternative current arc discharge plasma jet

物理学报. 2018, 67(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172557>

同轴枪正、负脉冲放电等离子体特性的对比

Comparative study of positive and negative pulsed discharge plasma characteristics of coaxial gun

物理学报. 2020, 69(3): 035202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191321>

旋转滑动弧放电等离子体滑动放电模式的实验研究*

雷健平¹⁾ 何立明¹⁾ 陈一¹⁾ 陈高成¹⁾ 赵兵兵^{1)†}
赵志宇¹⁾ 张华磊²⁾ 邓俊¹⁾ 费力¹⁾

1) (中国人民解放军空军工程大学航空工程学院, 西安 710038)

2) (中国人民解放军空军航空大学航空作战勤务学院, 长春 130022)

(2020年5月6日收到; 2020年6月27日收到修改稿)

交流旋转滑动弧放电能够在大气压下产生大面积、高活性的非平衡等离子体. 为了研究交流旋转滑动弧的滑动放电模式、放电特性及光谱特性, 本文采用高速相机与示波器同步采集旋转滑动弧的放电图像和电信号, 采用光谱仪采集光谱信号, 分析旋转滑动弧运动过程中电弧的动态行为、电信号及光谱信号特征. 实验结果表明, 旋转滑动弧放电过程中存在两种不同的滑动放电模式, 即伴随击穿滑动放电模式(B-G模式)与稳定滑动放电模式(A-G模式). 其中B-G模式以电弧旋转滑动过程中伴随击穿-熄灭-击穿的高频击穿现象为主要特征, 而A-G模式以持续稳定的连续电弧滑动为主要特征. 本文讨论了工作参数影响滑动弧放电模式、放电特性及光谱特性的工作机制. 研究发现, 电弧的放电模式和放电特性是激励电压与气体流量共同作用的结果. 当气体流量较大、激励电压较小时, 滑动弧为B-G模式主导的高频击穿不稳定放电; 而当激励电压较大、气体流量较小时, 滑动弧则为A-G模式为主导的稳定滑动放电.

关键词: 旋转滑动弧, 放电模式, 击穿频率, 击穿电流

PACS: 52.80.-s, 51.50.+v, 52.30.-q, 52.75.-d

DOI: 10.7498/aps.69.20200672

1 引言

滑动弧放电是指两电极在高压电场激励下产生电弧通道, 电弧被气流驱动着沿气流方向向下游滑动的一种放电形式, 图1是滑动弧放电原理示意图. 滑动弧放电等离子体的电子温度较低但电子数密度较高, 具有典型的低温等离子体特征, 相比于电弧放电等其他放电产生等离子体的方式, 滑动弧放电具有电极结构简单、持续放电无电极烧蚀、无须水冷等优点^[1,2]. 此外, 滑动弧放电过程中产生的高能电子、活性基团具有高度的化学活性^[3], 这些活性粒子可以提高化学反应速率、加快化学反应进

程. 因此, 滑动弧放电等离子体在燃料重整^[4-8]、污染物降解^[9-11]、污水处理^[12,13]、等离子体点火助燃^[14-17]等方面具有广泛的应用前景.

滑动弧放电是一种动态的电弧放电, 与其他放电方式相比, 滑动弧放电最大的特点在于其放电过程中需要气流驱动, 而电弧与气流的相互作用会显著影响滑动弧放电特性. 当前, 关于滑动弧放电特性的研究主要以二维刀型电极结构为主, 如图1(a)所示. 二维刀型电极滑动弧放电的实验研究发现, 在电弧运动过程中电场、气流与滑动弧的运动特征相互影响. 电弧滑动速度随来流速度的增大而增大, 电场脉冲重复频率增大使得滑动弧滑动传播距离增大, 电弧放电通道更集中, 实验还观测

* 国家自然科学基金(批准号: 51436008, 51806245)和中国博士后科学基金(批准号: 2019M653961)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaobing186@163.com

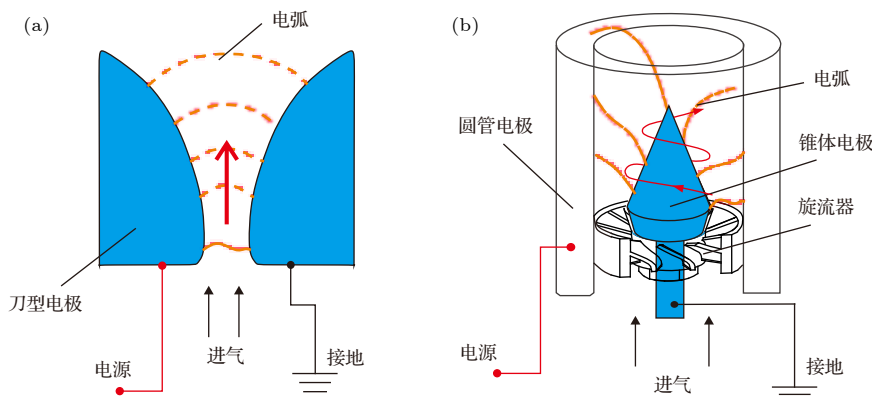


图 1 滑动弧放电示意图 (a) 二维刀型电极滑动弧放电示意图; (b) 三维旋转滑动弧放电示意图

Fig. 1. Schematic diagram of gliding arc discharge: (a) Schematic diagram of two-dimensional knife-type electrode gliding arc discharge; (b) schematic diagram of three-dimensional rotating gliding arc discharge.

到滑动弧放电过程中存在的短路击穿现象^[18-20]. 此外, 研究人员还开展了二维刀型电极滑动弧的二维 (2D) 和三维 (3D) 数值模拟研究, 讨论了滑动弧放电中的击穿发生机制, 并研究了电弧在高电流和低电流条件下运动过程的传热机制的差异^[21,22]. 上述研究作为滑动弧放电等离子体的应用提供了坚实的理论依据.

不足的是, 二维刀型电极反应器中滑动弧与介质气体的接触面积较小、反应气体在反应器中停留的时间较短, 导致反应气体转化率较低, 限制了二维刀型滑动弧放电等离子体的工业应用. 与之相比, 图 1(b) 中的旋转滑动弧放电优势明显, 旋转气流增加了气体在旋转滑动弧激励器中的驻留时间, 同时周向分布的旋转滑动弧产生的等离子体活性粒子分布均匀, 可以让所有介质气体完全与等离子体相互作用. 然而, 旋转滑动弧放电中旋流带来的复杂湍流流动对滑动弧的放电特征产生显著影响, 与二维刀型滑动弧放电相比, 旋转滑动弧放电等离子体的放电特性及调控规律更复杂. 当前, 研究人员针对旋转滑动弧放电开展了部分研究工作, Ananthanarasimhan 等^[23] 发现气体流量、雷诺数影响旋转滑动弧动力学特征, 尤其是对电弧旋转频率以及放电电压波形影响较大. Wu 等^[24] 对滑动弧放电进行了光谱测量, 计算了旋转滑动弧的电子密度、振动温度, 证实了旋转滑动弧的非平衡等离子体特征, 并发现随着气体流速增加, 振动温度先升高后降低. Zhang 等^[25] 对大气压下旋转滑动弧放电等离子体的动力学特性和电学特性进行了研究, 发现增大气体流量, 电弧的旋转频率加快、电弧长度增加. 本研究团队针对旋转滑动弧的放电特

性开展了研究工作, 发现气体流量增大引起电弧滑动速度增大, 滑动放电周期缩短, 从电信号分析中发现了两种不同的放电形式, 并对这两种放电形式的电信号差异进行了分析^[26]. 鲁娜等^[27] 实验研究发现旋转滑动弧放电正半周期与负半周期的伏安特性存在差异, 且随着气流增大, 旋转滑动弧放电电流峰值显著增大. 上述研究工作验证了旋转滑动弧放电等离子体的非平衡特性, 分析了气体流量对旋转滑动弧旋转频率、电弧长度、运动速度等特性的影响规律, 但对滑动弧放电力学过程、调控规律及其影响机制研究的不足, 使得应用旋转滑动弧的反应装置转化率较低, 工作稳定性、可靠性低^[28].

本研究采用高速相机与示波器同步监测滑动弧的放电过程, 设计高速相机采集频率高于电源频率, 用于精确采集滑动弧放电过程中电弧图像的变化过程. 研究了滑动弧放电过程中放电模式差异及放电特性; 分析了旋转滑动弧重复击穿频率、电弧击穿电流以及旋转滑动弧的光谱特性及其影响因素; 此外, 还对旋转滑动弧放电等离子体的工作特性影响机制及其调控规律进行了讨论分析. 本研究的目的是通过对旋转滑动弧形成和维持过程中不同的滑动弧放电模式及其工作特性进行研究, 获得滑动弧放电的调控机制及其变化规律, 为旋转滑动弧放电等离子体的调控提供理论依据.

2 实验系统

旋转滑动弧放电等离子体实验装置主要包括旋转滑动弧放电激励器、单高压毫秒电源、供气装置、示波器、高速 CCD 相机等, 图 2 为旋转滑动弧

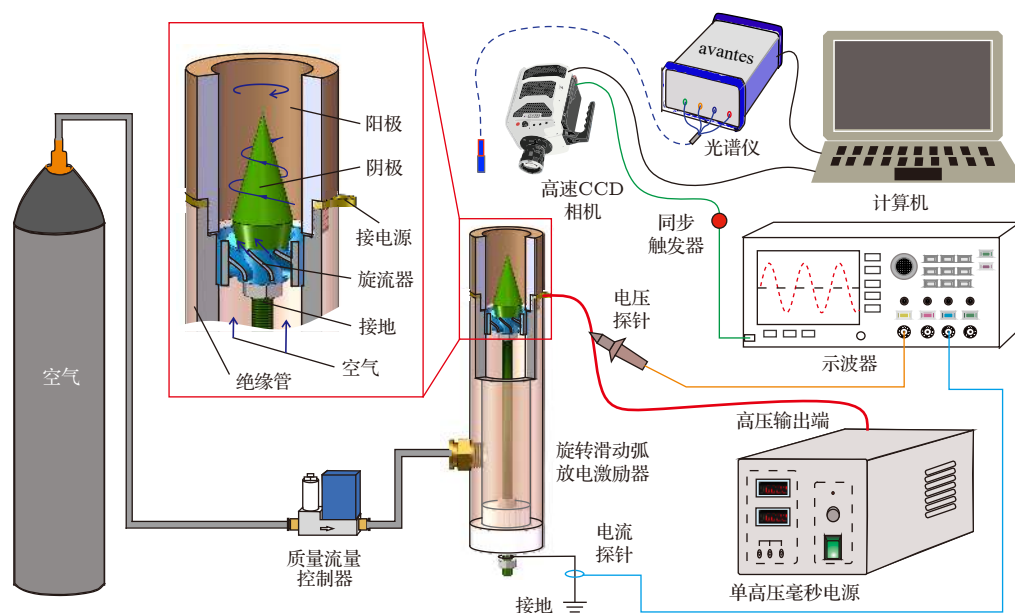


图 2 旋转滑动弧放电实验系统示意图

Fig. 2. Schematic diagram of rotating gliding arc discharge experiment system.

放电实验系统示意图. 本实验在大气压下进行, 采用空气作为介质气体. 采用高频高压交流单高压毫秒电源作为旋转滑动弧放电等离子体驱动电源, 输出频率为 10—20 kHz, 电压为 8—15 kV 的正弦高频高压交流电信号. 电源输出端连接滑动弧放电激励器圆管壁面电极, 中心锥形电极接地, 电源接通后, 产生低电流交流滑动弧放电, 得到大气压下低温非平衡等离子体. 供气系统主要由空气钢瓶和质量流量控制器组成, 本实验采用的质量流量控制器为 CS230A 型数字质量流量控制器, 量程为 300SLM, 重复精度为 ± 0.6 SLM. 压缩空气减压后经过质量流量控制器调节空气流量后经管路进入旋转滑动弧放电激励器.

如图 2 所示, 旋转滑动弧放电激励器主要由中心锥形电极、圆管壁面电极以及旋流器等组成. 中心锥形电极接地, 圆管壁面电极接单高压毫秒电源输出端, 等离子体电源启动后, 电弧在两电极距离最小处击穿. 气流通过旋流器后在中心锥形电极与圆管壁面电极之间形成旋向气流, 驱动电弧在电极之间旋转着向出口滑动, 当电弧运动到最远端后被气流吹断, 随后在最小距离处再次击穿, 再次被气流驱动旋转滑动, 如此循环往复, 周而复始.

本实验采用高速 CCD 相机与示波器同步采集旋转滑动弧放电过程中的电弧运动图像特征与电压、电流信号, 采用光谱仪采集旋转滑动弧放电光谱信号. 示波器与高速 CCD 相机通过外部触发器

同步触发, 保证示波器与高速 CCD 相机数据采集时序同步. 放电电压信号通过高压探针 (Tektronix P6015A) 测量, 放电电流通过电流探针 (Tektronix TCP0030) 测量, 高压探针与电流探针连接示波器 (Tektronix DPO4104B) 进行数据采集, 电压电流采样频率均为 10 MHz. 本文采用高速相机 (Phantom V2512) 采集电弧运动图像, 采集频率为 25000 Hz, 每张图像曝光时间为 40 μ s. 需要指出的是, 本实验设置高速相机曝光时间低于电源输出的正弦高压信号的正弦周期 (50 μ s), 目的是使高速相机能够详细地拍摄到每个正弦电压周期内滑动弧放电电弧的图像变化情况, 便于准确地分析滑动弧放电过程. 此外, 采用 Avantes 公司生产的 AvaSpec-ULS2048-4-USB2 四通道光纤光谱仪和三维数字坐标架采集旋转滑动弧放电光谱信号, 该光谱仪的波长测量范围为 200—950 nm, 狭缝宽度为 10 μ m, 光谱分辨率为 0.1—0.16 nm, 内部有 4 个独立的通道, 分别采用不同类型的光栅, 对不同波长范围的发射光谱信号进行测量.

3 实验结果与分析

3.1 滑动弧滑动放电模式的分析

为了揭示滑动弧放电过程中电弧的变化特征, 本文设置高速相机以高于电源频率的帧速 (25000 帧/s) 拍摄滑动弧滑动放电的具体过程以及

电弧的发展变化情况, 示波器同步高速相机采集滑动弧的电信号, 分析、研究滑动弧运动过程电弧的形态变化与电信号变化之间的联系.

如图 3 所示为气体流量 (Q) 为 120 SLM, 激励电压 (U_0) 为 100 V 时的滑动弧放电的电信号及电弧运动图像, 其中图 3(a) 为滑动弧击穿-延伸-熄灭一个完整的运动周期 (2 ms) 的电压电流曲线. 观察发现, 滑动弧放电电压为频率为 20 kHz 的高压交流信号, 且电压峰峰值随着电弧长度的延伸发展而增大, 最大值约为 10 kV; 放电电流呈现出周期约为 100 μ s 的脉冲信号. 图 3(b) 右图是高速相机同步拍摄的和图 3(a) 对应的滑动弧运动图像, 可以看出滑动弧从阴、阳极的最小间距处 (AB) 击穿之后, 被气流驱动着蜿蜒向下游旋转滑动, 直至运动到激励器出口与锥形电极尖端处 (OC), 电弧长度达到最大值, 在气流的吹熄作用下, 最终熄灭, 进入下一个周期后再次在最小间距处击穿, 重复上一过程. 观察电弧运动发展过程图像 (图 3(b) 右侧) 可以发现, 在电弧的运动过程中伴随有击穿-熄灭-击穿的过程. 结合图 3(b) 中左侧佳能相机拍摄的放电图像 (曝光时间 30 ms), 发现电弧旋转速度极快, 电弧在激励器内分布均匀, 电弧通道清晰可见. 图 3(c) 是截取图 3(a) 中 1.1—1.4 ms 时间段 (G 区域) 的电流电压曲线及其对应的电弧运动图像, 可以看出, 电压曲线每隔两个正弦周期 (100 μ s) 发生一次电压骤降, 同时相位初始化, 即电压从峰值处骤然急剧下降至零, 相位回到 0 相位的现象, 在电压骤降的同时电流出现单个脉冲峰, 结合高速相机同步采集到的此时刻电弧放电图像可知, 电弧在此刻发生了击穿, 该脉冲为放电击穿时刻的电流脉冲, 这表明电弧在运动过程中出现了周期性的击穿现象. 具体表现为, 滑动弧运动过程中伴随击穿-熄灭-击穿现象, 如图 3(c) 中在 1.23 ms 时电弧明亮, 然而在 1.25—1.32 ms 时间段电弧在图像中消失, 电弧在此时刻被气流吹熄了. 而在间隔 100 μ s 之后的 1.33 ms 时刻, 电弧又出现在图像中, 说明空气在此刻被重新击穿, 形成了新的电弧通道. 在 1.1—1.4 ms 之间的电弧图像中滑动弧呈现出击穿-熄灭-击穿的周期性现象, 经计算电弧发生重复击穿的周期约为 100 μ s, 这与对应的电压信号骤降周期、电流脉冲信号周期相同. 该状态下的滑动弧放电模式称之为伴随击穿滑动放电模式 (B-G 模式).

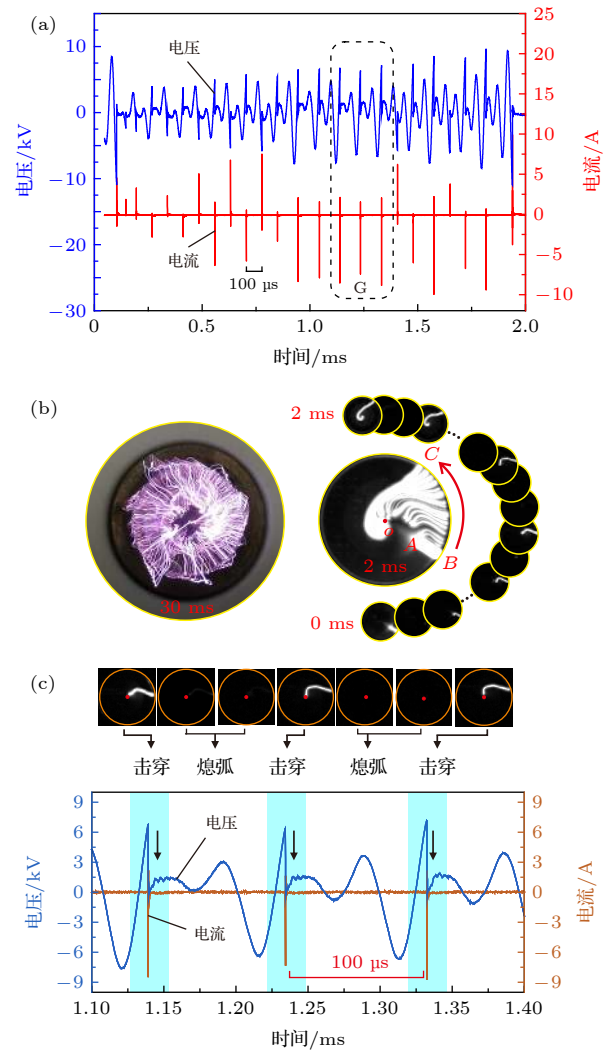


图 3 B-G 模式下的滑动弧放电的电信号及电弧运动图像 ($U_0 = 100$ V, $Q = 120$ SLM) (a) 一个完整滑动周期的电信号曲线; (b) 滑动弧放电图像 (左) 及完整周期的滑动弧运动过程图像 (右); (c) 滑动弧运动图像和电信号同步特征

Fig. 3. Electric signal and arc image of rotating gliding arc discharge in B-G mode ($U_0 = 100$ V, $Q = 120$ SLM): (a) The electrical signal curve of a gliding period; (b) gliding arc discharge image (left) and a cycle of gliding arc motion process image (right); (c) synchronization of gliding arc moving image and electric signal.

在改变气流条件后, 旋转滑动弧放电呈现了与上述滑动弧放电特征完全不同的另一种滑动放电模式. 如图 4 所示为将气体流量降低为 40 SLM, 激励电压仍为 100 V 时滑动弧的电信号及电弧运动图像, 其中图 4(a) 是一个完整的滑动弧运动周期 (2 ms) 的电压电流变化曲线. 电压曲线呈现出周期性的正弦信号, 频率约为 20 kHz, 电压峰峰值基本保持固定不变; 电流曲线整体平稳, 存在微弱的锯齿状波动, 电流变化幅值为 0—0.5 A 左右, 与图 3 所示不同的是, 电流信号未出现脉冲信号.

图 4(b) 右图为与图 4(a) 同步拍摄的一个完整的滑动弧运动周期的电弧运动图像. 观察发现, 滑动弧的运动过程与图 3(b) 存在显著差异, 该工况下的滑动弧在最小距离处初次击穿后, 电弧在激励器出口某一位置附近稳定滑动, 其中电弧一端弧根始终位于锥形阴极的尖端 (O 点), 电弧另一端的弧根则在阳极壁面出口位置滑动 ($D \rightarrow E$ 点), 电弧亮度较弱, 且不再发生熄灭现象, 即没有熄灭-重新击穿的过程. 结合图 4(b) 左侧相机拍摄 (曝光时间 30 ms) 的放电图像发现, 在该工况下滑动弧放电等离子体呈弥散状, 未见清晰的电弧通道. 值得关注的是,

该工况的滑动弧运动速度较慢, 滑动弧放电电弧仅仅在激励器出口截面处运动, 形成的等离子体区域仅仅集中在激励器出口附近, 等离子体影响区域较小. 图 4(c) 是图 4(a) 中 1.1 — 1.4 ms 之间的电压电流局部信号曲线和对应的电弧运动图像. 分析可知, 电压曲线为周期为 50 μ s 的正弦信号, 电流曲线为锯齿状的稳定信号. 通过对应的电弧运动图像可以发现, 在滑动弧滑动放电过程中电弧图像在整个周期中都未出现明显的击穿-熄灭的过程, 且电弧亮度较暗, 电弧一直在激励器出口位置旋转滑动. 这种状态下的滑动弧放电模式称之为稳定滑动放电模式 (A-G 模式).

综上所述, 本文通过高速相机拍摄的电弧运动图像证实了滑动弧放电过程中存在两种不同的滑动放电模式, 即 B-G 模式和 A-G 模式, 两种不同的滑动放电模式的运动特征存在显著差异. B-G 模式下滑动弧主要特征为: 滑动弧从电极最小间距处击穿后旋转滑动至电极距离最大处熄灭的过程中伴随有周期性的击穿-熄灭-击穿现象, 且电弧击穿瞬间发出强烈弧光, 出现周期性的大电流脉冲, 滑动弧放电等离子体覆盖阴阳极之间的三维空间区域; A-G 模式下滑动弧主要特征为: 滑动弧从最小间距处击穿后运动至激励器出口位置, 此后在出口位置保持稳定滑动, 电弧亮度较暗, 且滑动弧为微电流锯齿波, 不再出现击穿-熄灭现象, 滑动弧放电等离子体仅位于激励器出口截面区域.

上述结果表明旋转滑动弧呈现明显的特征差异的原因是气流流量的改变. 这表明, 电弧周边的流场变化造成电弧的传热传质发生变化, 进而影响了电弧行为特性. 滑动弧运动过程中, 阳极电压达到峰值时, 两电极间电势差大, 具备击穿条件, 发生击穿并形成电弧通道释放能量, 这时电弧核心区及周围气体电离度大, 温度较高. 在较大的气流 (120 SLM) 作用下, 电弧的传热传质速率快, 电弧通道形成的电子和离子在高速气流作用下很快被吹至下游位置, 那么原来形成电弧通道的位置不再具备电弧通道持续存在的条件, 电弧被吹熄. 在下游位置, 气流带来的电子、离子形成了更有利于电弧通道形成的区域, 那么当阳极电压达到下一个交流周期的峰值时, 再次发生击穿, 形成电弧通道, 形成了滑动弧运动过程中伴随有击穿-熄灭-再击穿现象, 即 B-G 模式. 由于每次击穿都发生在电压峰值处, 因此, 击穿周期往往是交流电压周期的整数

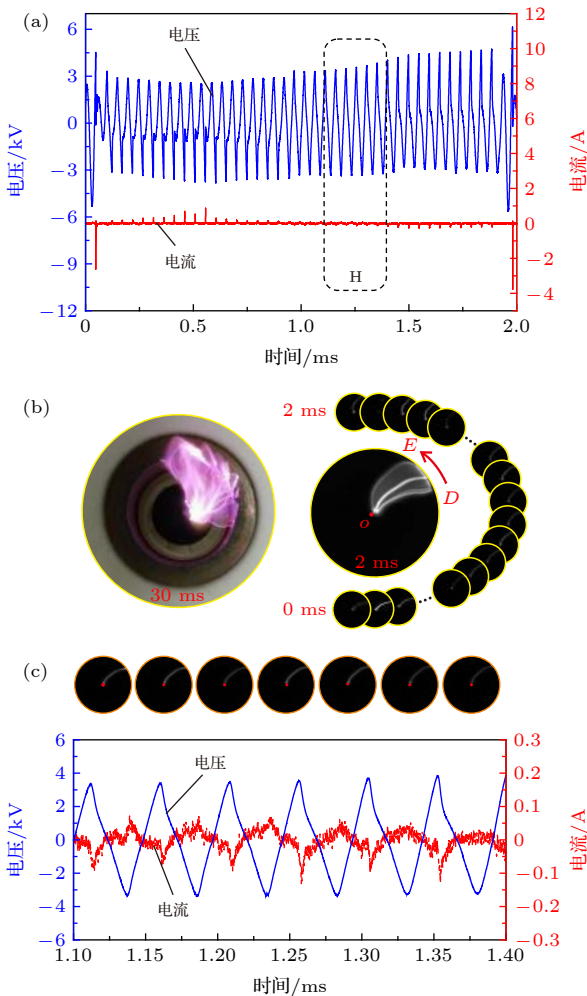


图 4 A-G 模式下的滑动弧放电的电信号及电弧运动图像 ($U_0 = 100$ V, $Q = 40$ SLM) (a) 完整滑动周期的电信号曲线; (b) 滑动弧放电图像 (左) 及完整周期的滑动弧运动过程图像 (右); (c) 滑动弧运动图像和电信号同步特征

Fig. 4. Electric signal and arc image of rotating gliding arc discharge in A-G mode ($U_0 = 100$ V, $Q = 40$ SLM): (a) The electrical signal curve of a gliding period; (b) gliding arc discharge image (left) and a cycle of gliding arc motion process image (right); (c) synchronization of gliding arc moving image and electric signal.

倍. 与之相对应的, 在气流流量较小 (40 SLM) 时, 滑动弧在最小距离处击穿, 电弧通道形成后, 低速气流对电弧通道周围电离的电子、离子扩散作用有限, 电源提供的能量大于电弧通道散失的能量, 能够维持电弧的持续存在, 因此电弧一直随着气流驱动的高电离度区域移动, 而不被吹熄灭. 电弧缓慢旋转移到出口位置, 电弧长度发展到最大, 仍然没有被吹熄灭, 保持一直在出口处滑动的状态, 形成了这种电弧旋转运动过程中电弧保持稳定存在不发生重复击穿的现象, 即 A-G 模式.

滑动弧放电被用作气体处理、燃料重整、辅助燃烧时, 滑动弧放电等离子体与介质气体的相互作用范围和时间是影响设备转化效率的主要因素. 因此, 滑动弧放电电弧的行为特性也必将影响滑动弧放电等离子体激励器的使用性能产生影响. 从滑动弧放电的宏观角度对比图 3(b) 与图 4(b) 可以发现, 相同时间段内, 滑动弧的运动范围差距较大. 图 3(b) 中, B-G 模式下, 滑动弧旋转速度快, 且轴向覆盖了从最小距离处到激励器出口, 等离子体与介质气体相互作用区域为整个激励器 3 D 区域. 而图 4(b) 中, A-G 模式下, 滑动弧旋转速度极慢, 电弧在相同的时间段内运动范围较小, 且电弧仅仅在出口端面上旋转滑动, 放电等离子体仅仅在出口端面处与介质气体相互作用, 这对于滑动弧放电等离子体的应用存在不利影响. 因此, 从宏观角度分析, B-G 模式下的滑动弧放电等离子体覆盖空间大. 至于 B-G 模式与 A-G 模式电弧特性的微观差异对滑动弧工业应用的影响, 还有待进一步的研究.

3.2 工作参数对滑动弧放电模式、放电特性的影响分析

如前文所述, 滑动弧放电模式的差异会影响滑动弧放电等离子体的产生, 除此之外, 滑动弧运动过程中电弧的击穿频率、击穿电流的大小, 同样也影响着放电等离子体的产生与作用时间. 因此, 为了进一步研究滑动弧放电的工作参数 (气体流量、激励电压) 对滑动弧放电模式、放电特性的影响, 本文设计如表 1 所列的工况条件开展实验, 研究气体流量、激励电压对滑动弧放电模式、击穿频率以及击穿电流的影响规律. 需要说明的是, 本文中的激励电压为等离子体电源激励电压, 表征的是等离子体电源的能量输出能力, 而不是实际的放电电压.

表 1 实验工况表

Table 1. Experimental conditions table.

工况	压力 P/kPa	激励电压 U_0/V	气体流量 Q/SLM
1	101	100	40
2	101	100	60
3	101	100	90
4	101	100	120
5	101	150	40
6	101	150	60
7	101	150	90
8	101	150	120

图 5 为气体流量 120 SLM, 激励电压为 100 V 时的滑动弧放电信号曲线及电弧运动图像. 对比图 3 中相应的图像可以看出, 在该工况下滑动弧同样以 B-G 模式滑动放电, 在旋转滑动的同时伴随击穿, 不同之处在于, 该工况下滑动弧每隔一个正弦周期 (50 μs) 击穿一次, 击穿周期约为图 3 中击穿周期 (100 μs) 的一半. 这表明, 增大电源激励电压后, 滑动弧的重复击穿频率明显提高了. 在实验过程中, 发现增大气体流量和提高激励电压对滑动弧放电击穿频率及电弧滑动模式存在较大影响. 因此, 本文针对不同工况下旋转滑动弧的滑动模式、击穿频率进行统计分析, 得到旋转滑动弧放电特性统计数据如图 6 所示.

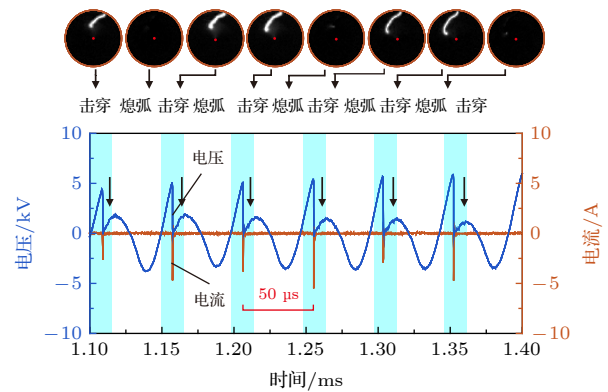


图 5 滑动弧电弧运动图像和电信号变化的同步特征
Fig. 5. Synchronization characteristics of gliding arc electric image and electric signal changes.

通过图 6 中的统计结果可以看出, 气体流量对滑动弧的放电模式与击穿频率影响显著. 整体而言, 当气体流量小于 60 SLM 时, 滑动弧放电模式以 A-G 模式为主, 滑动弧的重复击穿频率较低, 且气体流量越小重复击穿频率越低, 最低为 0.47 kHz. 而当气体流量大于 60 SLM 后, 滑动弧放电模式全

部为 B-G 模式, 滑动弧重复击穿频率较高且随着气体流量增大而增大, 在气体流量为 120 SLM 时, 重复击穿频率最大为 21.7 kHz. 这是因为在气体流量偏小时, 滑动弧放电以 A-G 模式为主, 电弧滑动弧稳定不易发生熄灭, 因此重复击穿频率较低, 而气体流量增大后, 电弧以 B-G 模式滑动为主, 气流流速较高使得电弧在运动过程中被频繁吹熄, 因此重复击穿频率较高.

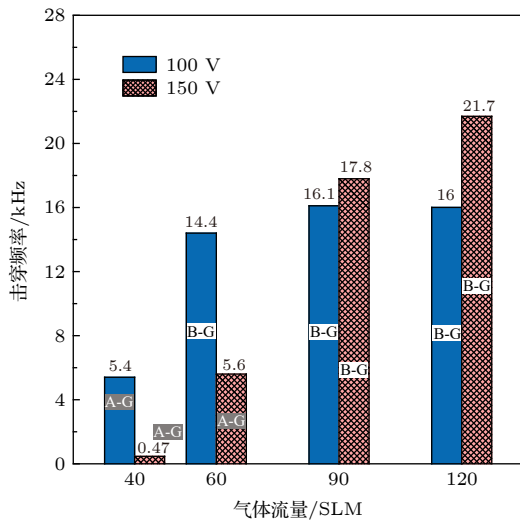


图 6 旋转滑动弧放电模式及击穿频率统计图

Fig. 6. Statistical diagram of rotational gliding arc discharge mode and breakdown frequency.

对比激励电压对滑动弧放电模式的影响规律可以发现, 在较大的激励电压下, 滑动弧放电模式更倾向于 A-G 模式. 典型的工况如当气体流量为 60 SLM 时, 在激励电压为 100 V 时, 滑动弧以 B-G 模式为主导, 而当激励电压增大至 150 V 时, 滑动弧放电则以 A-G 模式为主导. 激励电压对滑动弧重复击穿频率的影响也同样显著, 在气体流量小于 60 SLM 时, 提高激励电压降低了滑动弧的重复击穿频率, 而当气体流量大于 60 SLM 时, 提高激励电压后重复击穿频率也相应提高了. 这是因为, 在较低的气流条件下, 滑动弧激励电压的提高, 增大了电源对电弧的能量供应, 维持了电弧的稳定滑动, 使得滑动弧以 A-G 模式为主, 击穿频率较低. 而在较高的气体流量下, 滑动弧主要以 B-G 模式滑动, 激励电压的提高不足以改变滑动弧的运动特征, 但激励电压的提高使得电弧能量供应充足, 能够支持电弧在每个正弦交流电压峰值处发生击穿, 因此击穿频率更高.

总而言之, 气体流量和激励电压在一定程度上决定了滑动弧的行为特性, 激励电压处于滑动弧能量的输入端, 而气体流量的大小决定了电弧能量的耗散速度, 处于滑动弧能量的输出端, 当气体流量增大时, 滑动弧由稳定滑动的 A-G 模式向伴随击穿滑动的 B-G 模式发展, 滑动弧重复击穿频率也随之增大, 当激励电压增大时, 电源能量增大, 在小气流条件下滑动弧更倾向于向稳定滑动的 A-G 模式发展, 而在大气流条件下, 未能改变电弧滑动模式, 却提高了电弧的重复击穿频率. 在激励电压和气体流量发生变化时, 滑动弧的行为特性随之改变, 以实现能量输入和电弧运动的动态平衡. 因此, 可根据不同的工作要求, 动态调整滑动弧的工作参数, 改变滑动弧行为特点, 获得高效的等离子体源.

滑动弧放电过程中击穿现象是 B-G 模式下滑动弧放电的显著特征, 击穿电流的大小往往与击穿瞬间能量的释放密切相关, 因此本文采用电信号分析与图像处理技术针对滑动弧放电 B-G 模式下的数个完整滑动周期电信号及 CCD 图像进行处理, 获得击穿电流峰值大小和电弧投影长度, 并对滑动弧放电过程中不同气体流量、不同激励电压下的滑动弧电弧投影长度及其对应的击穿电流大小进行统计分析.

图 7 为滑动弧在 B-G 模式下的三个典型工况的击穿电流对应电弧投影长度的散点图及其拟合曲线. 图中对比了在不同气体流量、不同激励电压下, 击穿电流随电弧投影长度的变化规律. 观察发现, 在不同工况下, 滑动弧放电的击穿电流均随着电弧长度的发展而增大. 根据汤生放电理论, 击穿电流与电弧长度存在正相关关系. 本文中, 气流的驱动作用使电弧向下游滑动, 电极间距增大, 电弧长度增大, 从而击穿电流增大. 对比图 7(a) 与图 7(b), 发现在相同的激励电压 ($U_0 = 100$ V) 下, 将气体流量由 90 SLM 增大至 120 SLM 后, 电弧的投影长度明显增大. 这是因为, 气体流量增大至 120 SLM 后, 气流的流速大, 高速气流对电弧的驱动作用明显增强, 电弧被有效拉长, 造成电弧长度增大. 此外, 由于高速气流加速了电弧的传热传质, 在相同的电弧长度下, 电弧击穿所需消耗的能量更大, 这也导致了在相同的电弧长度下, 气体流量更大的工况中, 击穿电流也较大, 从图 7(a) 与图 7(b) 中击穿电流的拟合线对比可以看出, 气体流量为 120 SLM

时, 击穿电流也较大, 即滑动弧的击穿电流随电弧投影长度的增长更快.

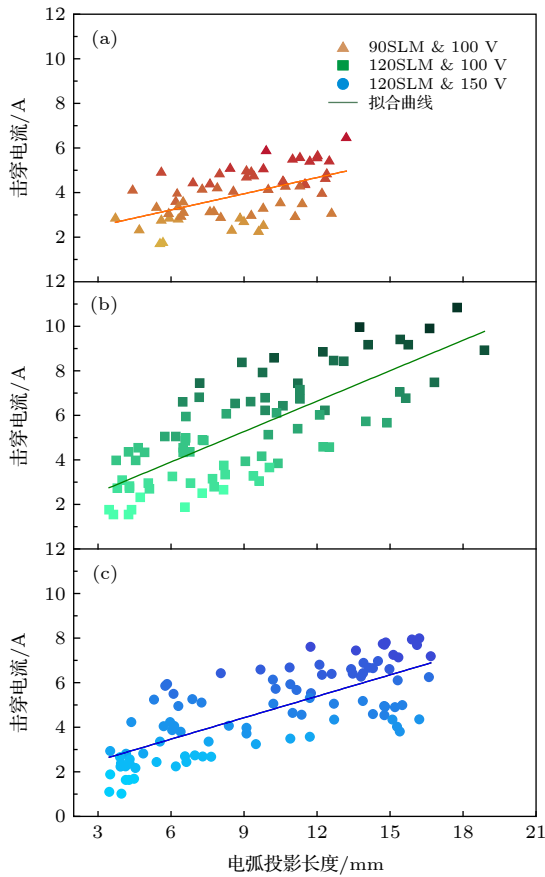


图 7 不同工作参数下滑动弧击穿电流随电弧长度变化的统计图

Fig. 7. Statistical diagram of the variation of gliding dynamic arc breakdown current with arc length under different working parameters.

对比图 7(b) 与图 7(c) 可以看出, 在保持气体流量不变 ($Q = 120$ SLM) 的条件下, 激励电压由 100 V 提高至 150 V 后, 滑动弧放电电弧的击穿电流随电弧长度的增速变缓, 表明激励电压增大后击穿电流反而变小了, 其原因是激励电压为 100 V 时, 电弧击穿为间隔击穿, 击穿频率低, 两电极间积累的能量较大, 造成单次击穿能量密度大, 从而击穿电流增大, 而激励电压为 150 V 时电弧击穿频率较高, 能量释放频率较高, 单次击穿能量密度小, 击穿电流相对较小. 综上, 滑动弧在 B-G 模式下电弧击穿电流随着电弧长度的增大而增大, 而气流流量、激励电压的变化均对击穿电流大小产生一定程度的影响, 其中, 随着激励电压的增大, 击穿电流有一定程度的增大, 但不明显, 而气体流量的增大对击穿电流的影响较显著, 随着气体流量的增大,

滑动弧电弧击穿电流明显增大.

3.3 工作参数对旋转滑动弧光谱特性的影响

在等离子体点火助燃、污染物降解、污水处理等应用中, 等离子体的化学效应发挥了重要作用, 空气放电产生的重要化学活性粒子被认为是放电等离子体的重要中间产物. 为了研究滑动弧放电产生的等离子体活性粒子种类及相对强度, 本文开展了光谱特性实验. 通过光谱仪光纤探针在滑动弧激励器出口截面采集旋转滑动弧放电等离子体发射光谱信号, 获得各波段光谱的相对发射强度, 并针对活性粒子的光谱相对发射强度进行分析.

图 8(a) 所示为光谱测量点分布图, 光纤探针在激励器出口周向均布分布的 8 个测量点采集滑动弧放电的光谱信号, 实验结果处理时取 8 个采集点光谱发射强度均值. 图 8(b) 为当激励电压为 100 V 时, 气体流量为 120 SLM 的放电图像. 图 9 为激励电压为 100 V 时空气流量为 90 SLM 时的 1#—8# 共 8 个点 0—1000 nm 波长范围内的发射光谱曲线. 观察光谱曲线, 在波长为 309 nm 处出现了 $\text{OH}(A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi)$ 分子谱峰值, 在光谱波长为 777.4 与 822.2 nm 处出现了 O 原子谱线.

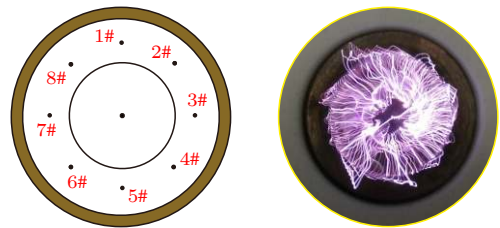


图 8 光谱采集位置分布示意图及滑动弧放电图像
Fig. 8. Schematic diagram of the spectrum acquisition position distribution and gliding arc discharge image.

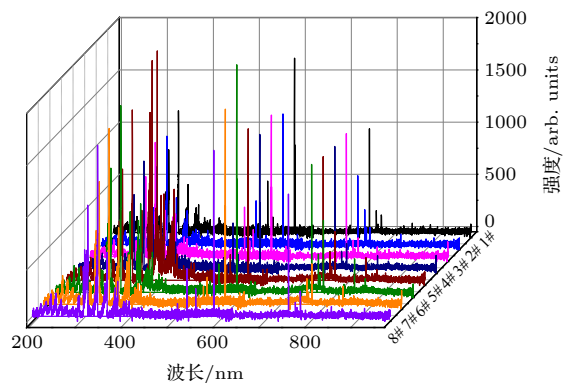


图 9 8 个光谱信号采集点的光谱曲线
Fig. 9. 8-point spectral curve.

在等离子体应用中, OH基、O原子发挥着重要的化学催化作用, 因此, 本文对 OH(309 nm), O(777.4 nm), O(822.2 nm) 3个特征波长的光谱相对发射强度进行统计分析, 研究工作参数以及滑动放电模式对旋转滑动弧放电等离子体中 OH和O的相对发射光谱强度的影响, 统计结果如图10所示. 图10(a)为 OH(309 nm)在不同激励电压、不同气体流量下的光谱发射强度. 观察发现 OH(309 nm)的光谱相对强度较小, 约为 5000—7000 arb.units. 且在不同气流下变化较小, 几乎不受气流变化的影响. 但激励电压增大明显增强了 OH(309 nm)的相对发射强度, 如当激励电压为 100 V时, OH(309 nm)的相对发射强度约为 5000 arb. units, 而激励电压增大至 150 V时, 相对发射强度增大至约 7000 arb.units. 图10(b)和图10(c)分别为 O原子在 777.4 和 822.2 nm 处的光谱相对发射强度. 对比观察发现, 氧原子位于 777.4 nm 波长处的光谱发射强度较大最高达 20000 arb.units, 而 822.2 nm 波长处的 O原子发射光谱强度较低, 小于 10000 arb.units. 而气体流量、激励电压对这两个波长的发射光谱强度的影响基本一致, 一方面, 气流量的增大, 使得发射光谱发射强度明显增大, 气流由 40 SLM 增大至 120 SLM 后, 777.4 nm 处的光谱发射强度增大了约 7 倍. 值得注意的是, 当气体流量为 40 SLM 时, O(822.2 nm)处未出现特征峰, 这表明, 气体流量特别小时, 未能电离产生 O(822.2 nm). 另一方面, 激励电压的增大使得氧原子在 777.4 与 822.2 nm 处的光谱发

射强度降低了, 如激励电压为 150 V 时相比激励电压为 100 V 时的光谱发射强度降低了约 2000—3000 arb.units.

综上, 气体流量对活性粒子 O(777.4 nm) 和 O(822.2 nm) 的光谱发射强度影响显著, 随着气体流量的增大, O(777.4 nm) 和 O(822.2 nm) 的发射光谱强度均显著增大; 而激励电压对上述 3 种活性粒子的发射光谱强度的影响存在差异, 对于 OH(309 nm), 增大激励电压增强了 OH 的光谱发射强度, 而对于 O(777.4 nm) 和 O(822.2 nm) 效果却相反, 增大激励电压后 O 原子光谱发射强度的降低.

根据前文研究可知, 随着气体流量增大, 滑动弧放电更倾向于以 B-G 模式滑动放电, B-G 模式下滑动弧电弧的运动速度快且伴随重复击穿, 拍摄的 CCD 图像显示电弧的亮度较强. OH(309 nm), O(777.4 nm) 和 O(822.2 nm) 等活性粒子主要是空气在电离状态下的产物, 电弧击穿瞬间的瞬时电流大, 从而电离作用强, 对空气的电离更剧烈, 且随着气体流量的增大, 重复击穿频率提高, 空气在高频次、高强度的电离下产生的活性粒子更多, 其特征光谱的相对发射强度更大, 因此随着气体流量的增大, 活性粒子的光谱相对发射强度随之增大, 本文中 OH 基主要由空气中的水分子电解而来, 空气中水蒸气的含量较少限制了 OH 基的大量产生, 因此气体流量对 OH 基的发射光谱强度影响有限. 同理, 当激励电压较大时, 滑动弧更倾向于以 A-G 模式滑动放电, 该模式下, 电弧运动主要集中在出

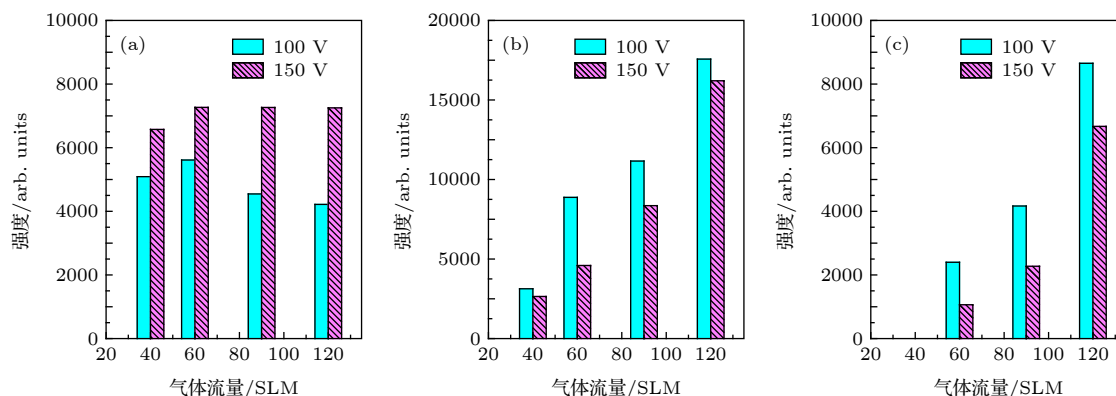


图 10 不同气体流量、激励电压下的 OH 和 O 的特征波长的光谱发射强度 (a) OH (309 nm) 光谱发射强度; (b) O (777.4 nm) 光谱发射强度; (c) O (822.2 nm) 光谱发射强度

Fig. 10. Spectral emission intensity of OH and O characteristic wavelengths under different gas flow rates and excitation voltages: (a) OH (309 nm) spectral emission intensity; (b) O (777.4 nm) spectral emission intensity; (c) O (822.2 nm) Spectral emission intensity.

口位置未形成广泛的空间分布,且重复击穿频率较低,拍摄的 CCD 图像显示电弧的亮度较暗,因此产生的活性粒子量较少,其光谱的相对发射强度较弱.

4 讨论

如前文所述,滑动弧放电过程中,若工作参数(激励电压、气体流量)发生改变,滑动弧的放电模式、击穿频率、击穿电流等电弧的行为特性也将产生变化.分析发现,在滑动弧放电过程中,放电模式、击穿频率、击穿电流的大小往往是相互关联、相互影响的,其实质是滑动弧在放电过程中为维持能量输入和能量耗散之间平衡而产生的动态调节行为.

众所周知,滑动弧在气流中放电、运动的过程中必然伴随与空气的能量交换及物质传递,图 11 为滑动弧放电工作机制示意图,观察发现,放电电弧通道中存在大量的电子、离子及中性粒子,并且与环境介质存在热传递.本文中,电弧的能量输入主要由等离子体电源的激励电压决定,而能量转化的途径主要是电弧的发光发热及电解化学反应,电弧中的部分能量也通过对流传热被气流带走.前人研究发现,电弧的击穿与熄灭主要取决于电极之间的电场强度和阴、阳极之间的导电粒子密度及局部

环境温度^[29].在本文中,激励电压的增大使得阴、阳极之间的电场强度增大,即滑动弧的能量输入增大,这有利于维持滑动弧的自持稳定放电^[30];而气体流量的增大导致气流速度增大,加速了电极间导电粒子的漂移扩散,降低了电极间电子、离子的密度,同时高速气流加速了电弧与空气的对流传热,降低了局部温度,这加速滑动弧能量的耗散过程,增加了电弧的不稳定性.因此,当气体流量 Q 较大或激励电压 U_0 较低时,电源提供的能量不足以支持电弧通道的保持,滑动弧不稳定性增大,电弧在旋转滑动过程中极易被气流吹熄,因此电弧更趋向于以伴随击穿模式 (B-G) 滑动放电.而当气体流量较小或激励电压较高时,滑动弧输入能量大,能量消耗低,电弧稳定能力增强,倾向于以稳定滑动模式 (A-G) 放电.同时,前文研究发现, B-G 模式下,滑动弧的能量消耗主要集中在高频击穿瞬间,能量释放表现为脉冲式的集中释放,而滑动弧放电在 A-G 模式下时,能量的耗散途径主要是维持电弧持续存在而不熄灭,能量释放平稳且持续.此外,受气体流量和激励电压的影响, B-G 模式击穿频率远大于 A-G 模式,重复击穿频率高可以使滑动放电过程产生多次强烈电离,从而产生更多的活性粒子.李晓东等^[31]在滑动弧促进甲烷干重整的研究中发现,电弧的重复击穿增加了等离子体的不稳定性,有利于反应进行.

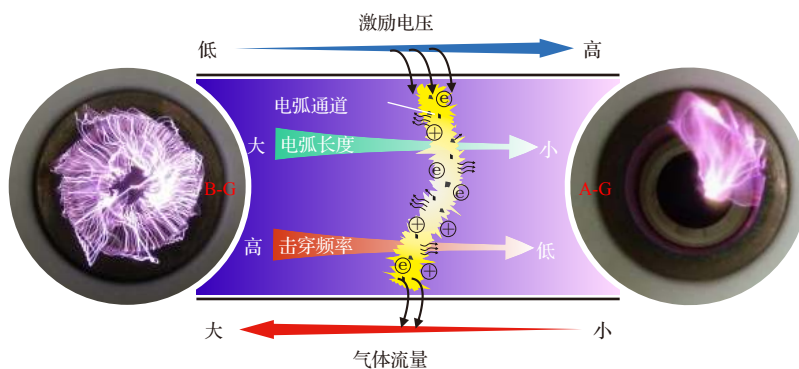


图 11 滑动弧放电的工作机制示意图

Fig. 11. Schematic diagram of control mechanism of gliding arc discharge characteristics.

5 结论

为了探索旋转滑动弧的放电模式及其特性,本文采用电信号和高速 CCD 相机同步采集旋转滑动弧放电的电信号和图像信息,实验证实了滑动弧放

电等离子体中存在的两种不同放电模式,并研究了工作参数对滑动弧放电特性的影响,得到以下主要结论.

1) 通过高速 CCD 相机同步采集电弧放电图像,证实了滑动弧放电过程中存在两种滑动放电模式,即伴随击穿模式 (B-G 模式) 与稳定滑动模式

(A-G 模式). 其中, B-G 模式是指电弧滑动过程中伴随有击穿-熄灭-击穿现象的滑动弧放电, 而 A-G 模式是指电弧在旋转滑动过程中未出现较高频次的重复击穿现象.

2) 研究了工作参数 (激励电压、气体流量) 对滑动弧放电特性的影响规律. 发现随着气体流量的增大滑动弧以 B-G 模式为主导的具有高频击穿特征的动态放电形式为主, 而随着激励电压的增大, 滑动弧以 A-G 模式为主导的具有高度稳定的放电形式为主, 电弧击穿频率极低.

3) 滑动弧放电过程中, 滑动弧放电模式、放电特性是气体流量和激励电压工作作用的结果. 增大气体流量提高了 B-G 模式下滑动弧的击穿频率, 同时电弧长度及击穿电流相应增大. 而激励电压的提高限制了电弧的不稳定发展, 电弧长度和击穿电流相对较小.

4) 旋转滑动弧在空气中放电产生的等离子体中存在 OH 基、O 原子等活性粒子的发射光谱线. 研究发现, 气体流量、激励电压对 OH 基、O 原子的光谱发射强度存在影响, 气体流量增大, 使得 O 原子谱带光谱发射强度明显增强, 而激励电压增大, 提高了 OH 基谱线的光谱发射强度, 却降低了 O 原子谱带光谱发射强度.

本文的研究结果和相关结论为调控滑动弧的工作特性提供了理论支撑, 实际工作中可以根据滑动弧使用需要改变工作参数调节滑动弧的放电模式、击穿频率等工作特性, 获得不同特征的等离子体源.

参考文献

- [1] Czernichowski A 1994 *Pure Appl. Chem.* **66** 061301
- [2] Czernichowski A, Czernichowski M 2005 *17th International Symposium On Plasma Chemistry* Toronto, Canada, August 7-12, 2005 p001
- [3] Fridman A, Nester S, Kennedy L A, Saveliev A, Mutaf Y O 1998 *Prog. Energy Combust.* **25** 0211
- [4] Slaets J, Aghaei M, Ceulemans S, Van Alphen S, Bogaerts A 2020 *Green Chem.* **22** 04
- [5] Wu A J, Li X D, Yan J H, Zhu F S, Lu S Y 2016 *Int. J. Hydrogen Energy* **41** 2222
- [6] Xia Y, Lu N, Wang B, Li J, Shang K F, Jiang N, Wu Y 2017 *Int. J. Hydrogen Energy* **42** 001
- [7] Whitehead J C, Prantsidou M 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 154001
- [8] Shao T, Zhang C, Wang R X, Yan P, Ren C Y 2016 *High Voltage Engineering* **42** 685 (in Chinese) [邵涛, 章程, 王瑞雪, 严萍, 任成燕 2016 高电压技术 **42** 685]
- [9] Zhang H, Zhu F S, Li X D, Xu R Y, Li L, Yan J H 2019 *J. Hazard. Mater.* **369** 244
- [10] Xu R Y, Zhu F S, Zhang H, Ruya P M, Li L, Li X D 2020 *Energy Fuels* **34** 2045
- [11] Li H P, Yu D R, Sun W T, Liu D X, Li J, Han X W, Li Z Y, Sun B, Wu Y 2016 *High Voltage Engineering* **42** 3697 (in Chinese) [李和平, 于达仁, 孙文廷, 刘定新, 李杰, 韩先伟, 李增耀, 孙冰, 吴云 2016 高电压技术 **42** 3697]
- [12] Pawlat Joanna, Terebun P, Kwiatkowski M, Tarabová B, Kovařová Z, Kučerová K, Machala Z, Janda M, Hensel K 2019 *Plasma Chem. Plasma Process.* **39** 627
- [13] Hameed T A, Kadhem S J 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **757** 012045
- [14] Ju Y G, Sun W T 2015 *Prog. Energy Combust.* **48** 21
- [15] Feng R, Li J, Wu Y, Jia M, Jin D 2020 *Aerosp. Sci. Technol.* **99** 105752
- [16] Kong C D, Gao J L, Zhu J J, Andreas E, Marcus A, Li Z S 2018 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47** 403
- [17] Gray J A T, Lacoste D A 2019 *Combust. Flame* **199** 258
- [18] Niu Z T, Zhang C, Ma Y F, Wang R X, Chen G Y, Yan P, Shao T 2015 *Acta Physica Sinica* **64** 195204 (in Chinese) [牛宗涛, 章程, 马云飞, 王瑞雪, 陈根永, 严萍, 邵涛 2015 物理学报 **64** 195204]
- [19] Kikuchi Y, Nakagawa T 2020 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **99** 001
- [20] He L M, Chen Y, Liu X J, Wu Y, Liu P X, Zhang Y H 2016 *High Voltage Engineering* **42** 1921 (in Chinese) [何立明, 陈一, 刘兴建, 吴勇, 刘鹏飞, 张一汉 2016 高电压技术 **42** 1921]
- [21] Sun S R, Kolev S, Wang H X, Bogaerts A 2016 *Plasma Sources Sci. Technol.* **26** 015003
- [22] Kolev S, Bogaerts A 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27** 125011
- [23] Ananthanarasimhan J, Rao L, Shivapuji A, Dasappa S 2019 *International Plasma Chemistry Society*, Naples, Italy, June 9-14, ISPC-24
- [24] Wu A J, Zhang H, Li X D, Lu S Y, Du C M, Yan J H 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 836
- [25] Zhang H, Zhu F S, Tu X, Bo Z, Li X D 2016 *Plasma Sci. Technol.* **18** 473
- [26] He L M, Lei J P, Chen Y, Liu X J, Chen G C, Zeng H 2017 *High Voltage Engineering* **43** 3061 (in Chinese) [何立明, 雷建平, 陈一, 刘兴建, 陈高成, 曾昊 2017 高电压技术 **43** 3061]
- [27] Lu N, Sun D F, Wang B, Li J, Wu Y 2018 *High Voltage Engineering* **44** 1930 (in Chinese) [鲁娜, 孙丹凤, 王冰, 李杰, 吴彦 2018 高电压技术 **44** 1930]
- [28] Li L, Zhang H, Li X D, Kong X Z, Xu R Y, Tay K, Tu X 2019 *J. CO₂ Util.* **29** 296
- [29] Li H P, Ostrikov K K, Sun W T 2018 *Phys. Rep.* **770** 001
- [30] Li X C, Geng J L, Jia P Y, Wu K Y, Jia B Y, Kang P C 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 075201 (in Chinese) [李雪辰, 耿金伶, 贾鹏英, 吴凯玥, 贾博宇, 康鹏程 2018 物理学报 **67** 075201]
- [31] Li X D, Zhang M, Zhu F S, Zhang H, Bo Z 2015 *High Voltage Engineering* **41** 2022 (in Chinese) [李晓东, 张明, 朱凤森, 张浩, 薄拯 2015 高电压技术 **41** 2022]

Experimental study on gliding discharge mode of rotating gliding arc discharge plasma*

Lei Jian-Ping¹⁾ He Li-Ming¹⁾ Chen Yi¹⁾ Chen Gao-Cheng¹⁾ Zhao Bing-Bing^{1)†} Zhao Zhi-Yu¹⁾ Zhang Hua-Lei²⁾ Deng Jun¹⁾ Fei Li¹⁾

1) (*Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China*)

2) (*Institute of Aviation Operation Service, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

(Received 6 May 2020; revised manuscript received 27 June 2020)

Abstract

Alternating current rotating gliding arc discharge can produce large-scale, wide-range non-equilibrium plasma at atmospheric pressure. In order to investigate the gliding discharge mode, discharge characteristics and Spectral characteristics of AC rotating gliding arc discharge plasma, high speed camera, oscilloscope and spectrometer are used to collect discharge images and electrical signals of rotating gliding arc synchronously. Thus the dynamic behavior of arc and the characteristics of electric signal in the process of rotating gliding arc can be analyzed. The experimental results show that there are two different discharge modes in the rotating gliding arc discharge process, namely the breakdown gliding discharge mode (B-G mode) and the stable gliding discharge mode (A-G mode). The B-G mode is mainly characterized by high-frequency breakdown phenomenon (breakdown-extinguish-breakdown) during the arc gliding process, while the A-G mode is mainly characterized by stable continuous arc sliding. The paper also discusses the working mechanism in which the working parameters influence the gliding arc discharge characteristics. It is shown that the discharge mode and discharge characteristics of arc are the result of the combined action of excitation voltage and gas flow. When the gas flow is large and the excitation voltage is small, the gliding arc is an unstable discharge dominated by the B-G mode. Conversely, when the excitation voltage is large and the gas flow is small, the gliding arc is a stable gliding discharge dominated by the A-G mode. In addition, in B-G mode, the energy consumption is mainly concentrated in the breakdown moment, and the energy release is mainly pulsed. However, when the gliding arc discharge is in A-G mode, the energy dissipation is mainly used to maintain the continuous existence of the arc without extinguishing, and the energy release is stable and continuous. Affected by the gas flow rate and excitation voltage, the breakdown frequency of the B-G mode is greater than that of the A-G mode. Higher repeat breakdown frequency can cause multiple ionization in the process of gliding arc discharge, which produces more active particles. The research conclusions in this paper provide theoretical support for regulating the operating characteristics of the gliding arc discharge. In engineering application, the discharge mode, breakdown frequency and breakdown current of the gliding arc can be adjusted by changing the working parameters to obtain plasma sources with different characteristics.

Keywords: rotating gliding arc, discharge mode, breakdown frequency, breakdown current

PACS: 52.80.-s, 51.50.+v, 52.30.-q, 52.75.-d

DOI: 10.7498/aps.69.20200672

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51436008, 51806245) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M653961).

† Corresponding author. E-mail: zhaobing186@163.com