

低气压极不均匀场二次流注形态及机理研究

杨亚奇* 阚常涛 秦昌龙 李莉 顾世龙
(国网济南供电公司电力调度控制中心 济南 250012)

Secondary Streamer Profile and Mechanism under Low Pressure and Extreme Non-Uniform Field Conditions

YANG Yaqi*, KAN Changtao, QIN Changlong, LI Li, GU Shilong
(Power Dispatch Control Center of State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China)

Abstract In order to study the characteristics of the secondary streamer profile and development mechanism under low pressure and extreme non-uniform field condition, this paper conducted laboratory investigations of 200 mm rod-plane gap AC discharges by low-pressure discharge test platform within 10 ~ 30 kPa. The transition process of primary streamer to secondary streamer under different pressures is obtained, and the initiation mechanism, profile and development characteristics of secondary streamer are analyzed. The results show that the quenching of the primary streamer and its transition to the secondary streamer is caused by the combined effect of stochastic disturbance in the field in front of rod anode and Joule heating due to cathode electron injection. With pressure decreasing, the extension limitation, radial expansion capability and speed of the secondary streamer under an extreme non-uniform field are decreasing gradually. The bifurcation of the primary streamer could significantly decrease the velocity of the secondary streamer. These results have reference value for the study of discharge characteristics of high voltage equipment under low pressure conditions.

Keywords Low pressure, Primary streamer, Secondary streamer, AC voltage, Non-uniform field

摘要 为研究低气压极不均匀场下二次流注形态特征及延伸机制,利用低气压放电实验平台对 10~30 kPa 气压范围内 200 mm 棒-板间隙进行工频放电实验研究,得到不同气压下初始流注向二次流注转化的过程,并对二次流注的起始机制、整体形态特征及延伸特性进行分析。研究表明:初始流注猝灭或向二次流注转化是阳极前方局部场强随机扰动和阴极注入电子的焦耳热效应共同作用的结果。极不均匀场下随气压降低二次流注延伸极限、分叉径向扩展能力、发展速度逐渐降低,且初始流注分叉点的存在对二次流注发展具有显著的降速作用。研究成果为探讨空间环境下高压设备空气间隙绝缘特性提供参考。

关键词 低气压 初始流注 二次流注 交流电压 不均匀场

中图分类号: TM852

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202209009

空气由于其良好的绝缘性和环保性而成为常见的高压设备绝缘介质。近年来随着我国西电东送工程的建设,许多超、特高压设备的实际应用海拔已达 4000 m,而国内外电网运行经验均表明低气压条件对空气间隙绝缘特性影响显著^[1-4]。随着空间技术的发展高压设备也逐渐应用于空间环境,然而低气压、射线照射、微重力、高能粒子碰撞等原因均可能严重削弱空气间隙绝缘性能^[5-6]。由于低

气压下设备绝缘间隙放电形态主要涉及流注范畴,因此低气压下流注放电特征备受关注。

流注被 Loeb、Meek 等描述为贯穿电极的细丝状明亮导电通道,流注理论在考虑了光电离和空间电荷畸变电场作用后可对短间隙通道型放电形态进行合理解释^[7]。国内外许多学者都对低气压下流注特性展开过深入研究,例如 Bazelyan、Raizer 等分析了 30 kPa 下 45.6 cm 间隙流注起始和流注-先导

转化过程;孟晓波等利用“三电极”结构研究流注传播速度与气压和场强间的关系;冉慧娟等对真空中光敏树脂沿面闪络特性进行研究;文献[8-12]探讨了流注传播速度和发光强度和空气分子密度之间关系。上述关于低气压下流注特性的研究均仅限于传统意义上的流注即初始流注,然而早在1983年挪威学者 Sigmond 便提出初始流注并不会造成间隙击穿,而由其引发的二次流注和回击过程才是导致绝缘丧失的直接原因^[13]。由此可见搞清低气压下二次流注发展机理对于提高设备绝缘结构设计的可靠性十分必要。

近年来日本、欧美部分国家学者已开始关注二次流注问题。Kojima、Hotta 等认为二次流注起始依赖于阴极入射电子对通道的加热作用,Abahazem 等提出二次流注与热效应有关^[14-15]。Ono、Oda 等^[16]研究了不同极性脉冲电压下 13 mm 棒-板间隙二次流注特征,提出二次流注发展程度与施加电压幅值呈线性关系。Matsuoto 等^[17-18]在研究流注分叉与放电频率时也观察到了二次流注,但并未对其进行深入探讨。

目前针对短间隙放电的研究大都限于初始流注,而关于二次流注的研究也仅针对大气条件且对二次流注的延伸机制描述并不清晰。由此可见低气压下二次流注通道延伸机理方面仍然存在许多空白。本文利用自主搭建的低气压放电实验平台

对 10~30 kPa 气压范围内 200 mm 棒-板间隙进行工频放电实验,并着重对低气压下二次流注起始和延伸机制进行分析。研究成果为探索空间环境下高压设备空气间隙绝缘丧失机制提供参考。

1 实验设备和测量方法

1.1 实验设备

实验平台连接如图 1 所示。电源方面采用 YDTW-10/100 无局放工频变压器和 HZTC-104D 工频控制台(电压频率为 50 Hz)。数据测量部分采用低阻尼电容分压器(高压臂 600 pF, 低压臂 417 pF, 校验分压比 736 : 1)、Tektronix TDS-2024(200 MHz, 2 GS/s)示波器、温度传感器(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)、高频电流互感器。气压控制部分采用 2XZ-8B 型直联旋片式真空泵和 DL-10 A 型真空计(量程 $5\times 10^{-1}\sim 10^5\text{ Pa}$)。图像采集方面选用基于 CMOS 的千眼狼 2F04M 高速摄像机(全幅分辨率 2320 $\times$ 1720, 最高帧率 54000 fps)和基于 LM 339 芯片的高速触发模块。

图 2 为不锈钢实验腔体和电极。腔体内部有效半径 400 mm, 棒-板电极垂直布置于腔体内部。棒电极直径 10 mm 且顶端为带 15 mm 长针尖的半球头棒结构, 针尖头曲率半径 50 μm 。板电极直径 400 mm, 边缘倒半径 5 mm 圆弧。电极表面光洁度 1.6 μm 。

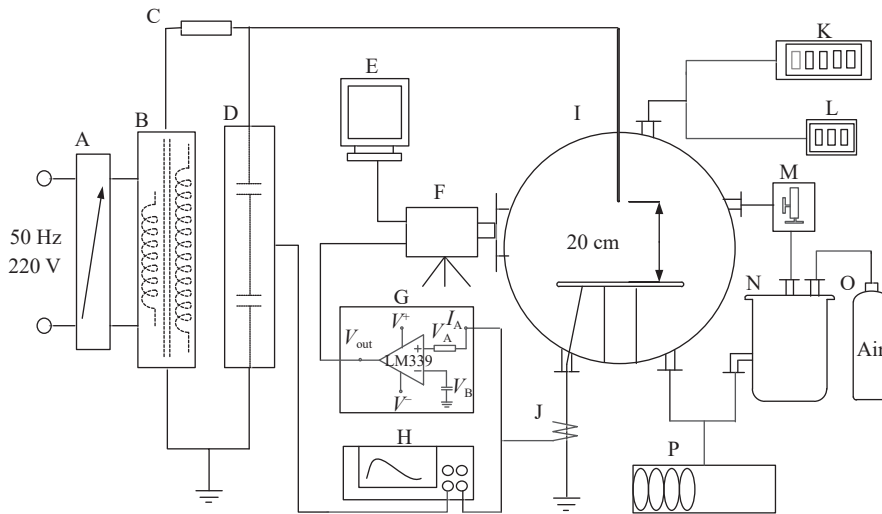


图1 实验平台布置。A-工频控制台; B-工频实验变压器; C-保护电阻(40 k Ω); D-电容分压器; E-电脑; F-高速摄像机; G-高速触发模块; H-示波器; I-实验腔体; J-高频电流互感器; K-真空计; L-温度传感器; M-高真空调节阀; N-储气腔体; O-高压气瓶; P-真空泵

Fig. 1 Connection of test platform. A-Operating console; B-AC transformer; C-Protective resistance (40 k Ω); D-Voltage divider; E-Computer; F-High-speed camera; G-High-speed trigger circuit; H-Oscilloscope; I-Test chamber; J-High frequency CT; K-Vacuum gauge; L-Temperature sensor; M-High vacuum regulating valve; N-Gas tanks; O-High pressure cylinder; P-Vacuum pump

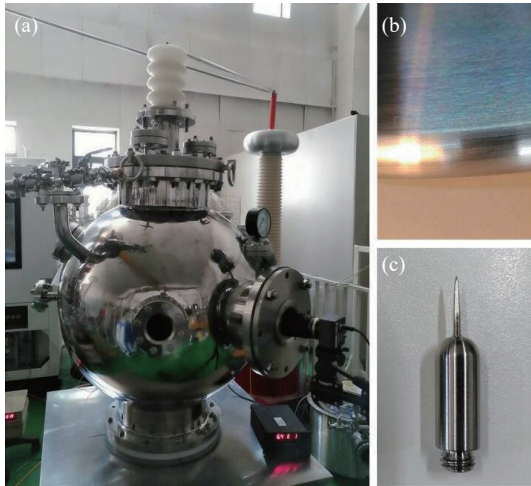


图2 实验腔体和电极。(a) 实验腔体, (b) 板电极, (c) 棒电极

Fig. 2 Discharge chamber and electrode. (a) Test chamber, (b) plan electrode, (c) rod electrode

1.2 实验方法

本研究针对 10~30 kPa 气压范围内 200 mm 针尖头棒-板间隙进行 50 Hz 工频放电实验, 实验过程中腔体内部温度维持 25℃。由于水分子的光子吸收特性将显著抑制流注通道的延伸和分叉程度, 因此实验气体选用标准干燥空气。在气压测量与控制方面, 真空计探针利用真空法兰连接于实验腔体外壳, 探针头部伸至腔体内部, 利用真空泵将腔体内部气压抽至目标气压值以下, 通过高精度放气阀将气压调节至目标气压值。在击穿电压测试方面参照 GB/T 16927.1-2011《高电压试验技术第 1 部分: 一般定义及试验要求》, 各气压值点下放电 20 次且相邻两次放电间隔 5 分钟, 为避免臭氧等放电产物的影响每放电 5 次后进行换气处理。当标准差 $\sigma < 3\%$ 时则认为测得数据有效。在图像采集方面采用电压比较器高电平触发方式, 保存自触发前 1 ms 至触发后 10 ms 时长的放电过程。由于低气压下流注放电较暗, 因此需对摄像机和观察窗进行遮光处理。

2 实验结果与分析

2.1 低气压极不均匀场二次流注起始机制

目前关于极不均匀场下流注放电过程的描述大都可概括为: 当极间电压达到击穿电压时首先由大曲率电极前方发展电子崩并形成流注, 随后在空间电荷畸变电场和光电离的作用下流注自持发展

至对面电极^[19-20]。该描述实质为初始流注的起始和延伸过程, 然而初始流注并非造成间隙绝缘丧失的直接原因。

图 3 以 10 kPa 下 50 mm 间隙为例说明初始流注的两种发展趋势。图 3(a)、3(b) 分别为取 $\Delta t = 500 \mu s$ 时排列出的某次放电发展过程及电压波形, 图 3(a) 放电起始时刻对应图 3(b) 中 t_0 和 t_1 , 其中 a、b 为出现的两次初始流注, 其发生时刻对应图 3(b) 中电压波形峰值附近的位置 a 和 b。由图 3(a)、3(b) 可见当极间电压幅值接近击穿电压时某个正半周期峰值附近连续出现了两次初始流注且在到达板电极后便猝灭, 而工频电压波形峰值附近的两次截波对应初始流注。图 3(c) 给出了某个工频电压波形正半周期峰值附近出现的另一种初始流注发展趋势, 其中 d 为初始流注起始位置、e 为贯穿间隙后的初始流注通道、c 为开始发展的二次流注通道,

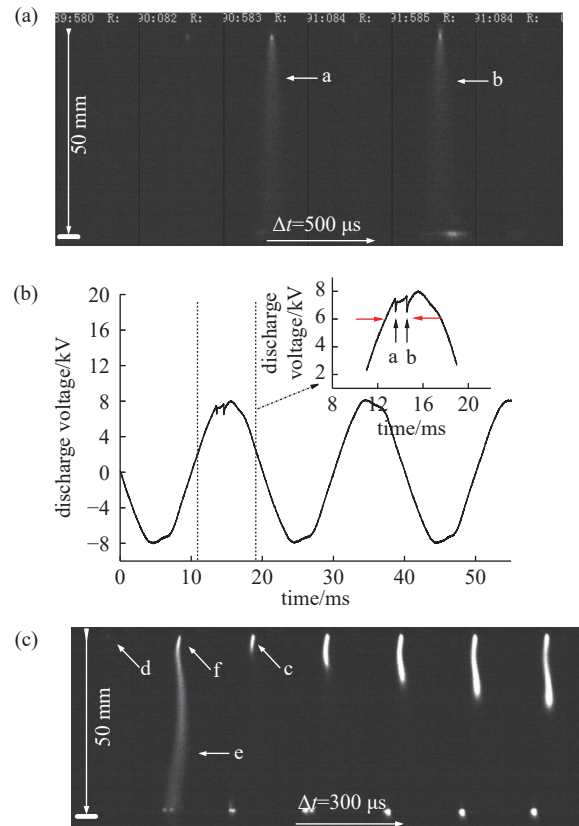


图3 10 kPa 下 50 mm 间隙初始流注发展趋势。(a) 初始流注放电过程, (b) 电压波形, (c) 初始流注向二次流注转化

Fig. 3 Development trend of 50 mm primary streamer under 10 kPa. (a) Discharge process of primary streamer, (b) voltage waveform, (c) transition process of primary streamer to secondary streamer

可见初始流注到达板电极后便开始向二次流注转化, 另外二次流注的延伸路径为初始流注痕迹。

目前关于初始流注向二次流注转化原因的解释分为电子吸附不稳定性和阴极注入电子两种观点: ①文献 [13] 认为由于初始流注内电子吸附率与场强成正比, 随机的局部场强正向扰动将增大电子吸附率即减少电子密度。其直接影响为增大流注内部局部电阻从而使该处场强继续增大直至产生新的电离形式。该种观点下的作用过程可表示为:

$$\Delta E \uparrow \rightarrow v_a(E) \uparrow \rightarrow n_e \downarrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow v_i \uparrow \quad (1)$$

式中, ΔE 为场强扰动量、 $v_a(E)$ 为与场强有关的电子吸附率、 n_e 为电子密度、 R 为流注通道局部电阻、 v_i 为电子碰撞电离率。此外随机的局部场强负向扰动将导致电子碰撞电离率降低直至初始流注猝灭。②文献 [14]、[15] 借助介质阻挡放电的方法证明阴极注入初始流注的电子是触发二次流注的必要条件, 并提出注入电子使棒电极前方场强重新分布从而导致新的碰撞电离产生。然而该种观点并未从机理上解释注入电子导致新碰撞电离产生的原因, 且仅从注入电子的角度无法解释图 3(a) 中初始流注的猝灭现象。由此可见以上两种关于二次流注形成机理的解释均不完善。

本研究认为初始流注贯穿间隙后阴极注入电子的实质为增大了流注通道传导电流密度, 在电流焦耳热效应的作用下流注内部空气膨胀, 因此前述观点②仅考虑注入电子对 E 值的改变并不合理。由电子能量和碰撞电离频率定义可推得与电子温度有关的电子碰撞电离率^[21], 即:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}mv_e^2 = kT_e \Rightarrow v_i(T_e) = N_0\sigma_i\left(\frac{2kT_e}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \\ v_i = N_0\sigma_i v_e \end{cases} \quad (2)$$

式中, m 为电子质量, v_e 为电子平均迁移速度, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, N_0 为初始流注通道内气体分子密度, σ_i 为电子与气体分子碰撞有效电离截面。由图 3、4 可见对于棒-板间隙极不均匀场

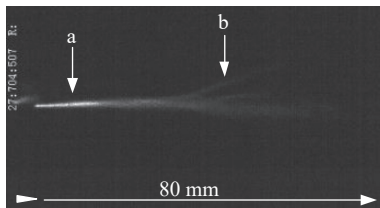


图4 23 kPa 下 200 mm 间隙初始流注向二次流注的过渡

Fig. 4 Transition process of 200 mm primary streamer to secondary streamer under 23 kPa

而言, 初始流注贯穿间隙后参与电子注入的阴极表面积显著大于流注阳极端, 因此注入电子巡初始流注运动至阳极时电流密度已达最大值, 且该处在电流焦耳热效应作用下气体分子局部密度 N 值降低。由 Einstein 关系可得电子温度与 E/N 的关系为:

$$\begin{cases} \frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT_e}{e} \\ D_e = \frac{1}{3}\lambda_e v_e \Rightarrow T_e = \frac{e\lambda_e E}{3k} \propto \frac{E}{P} \propto \frac{E}{N} \\ \mu_e = \frac{v_e}{E} \end{cases} \quad (3)$$

式中, D_e 为电子扩散系数, μ_e 为电子迁移率, λ_e 为电子平均自由行程。由此可见阴极注入电子的实质影响为增大初始流注阳端端的局部 E/N 值, 即该处电子迁移速度增大而利于发生碰撞电离。图 4 以 23 kPa 下 200 mm 间隙为例展示初始流注向二次流注的过渡形态, 图中 a 部分为起始后的二次流注, b 部分为初始流注。

考虑到初始流注的猝灭和向二次流注转化两种趋势, 本研究提出二次流注的产生机制为场强扰动因素和注入电子焦耳热效应因素共同作用的结果。图 5 为考虑场强扰动情况时初始流注发展趋势 (不涉及数量关系), 焦耳热效应影响 $E/(-\Delta N)$ 与 E/N 近似呈二次关系而场强扰动 $(\Delta E)/N$ 对 E/N 的

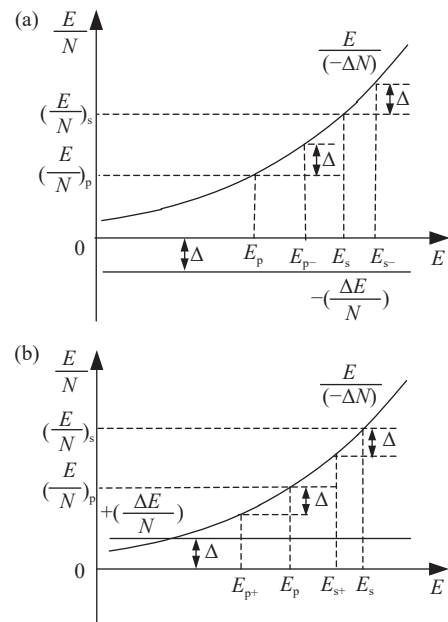


图5 初始流注发展趋势。(a) 局部场强负扰动情况, (b) 局部场强正扰动情况

Fig. 5 Development tendency of primary streamer. (a) Negative disturbance in the field, (b) positive disturbance in the field

影响近似看做恒定值。图中 E_p 、 E_s 分别为初始流注和二次流注起始场强, E_{p-} 、 E_{s-} 分别为受局部场强负扰动作用时起始场强, E_{p+} 、 E_{s+} 分别为受局部场强正扰动作用时起始场强, $(E/N)_p$ 、 $(E/N)_s$ 分别为初始流注和二次流注起始 E/N 值。由图 5(a) 可见当初始流注阳极端无局部场强扰动时, 场强一旦达到 E_p 便开始向二次流注转化。而当初始流注阳极端出现场强负向扰动时, 由电子吸附率降低造成的场强削弱使二次流注的起始场强推移至 E_{p-} , 即 $E_p \sim E_{s-}$ 范围内出现的初始流注都将猝灭。另外, 二次流注仅沿着初始流注的轨迹延伸。文献 [17] 认为这是由于受传导电流焦耳热效应的影响, 初始流注通道内的平均 E/N 值高于周围, 且可为碰撞电离提供充分的初始电子。由相同方法分析图 5(b) 可知初始流注内部局部场强正向扰动将使其向二次流注转化的起始场强值将为 E_{s+} 。

根据上述分析, 图 6 给出考虑局部场强负扰动和注入电子两因素时初始流注向二次流注的转化过程。该过程可概括为: (1) 棒尖端前方达到初始流注起始场强时, 初始流注起始并逐渐向板电极延伸。(2) 初始流注延伸至板电极, 此时的流注为电荷密度较低的等离子体通道, 而由异号电荷复合和电子吸附作用而发射的光子较少。(3) 初始流注贯穿间隙后, 阳极前方出现的场强负扰动降低了电子吸附率即减小了 E/N 值, 而阴极发射电子增大了初始流注内部电流密度, 棒尖端前方空气分子密度在电流焦耳热效应的影响下降低即增大了 E/N 值。(4) 当初始

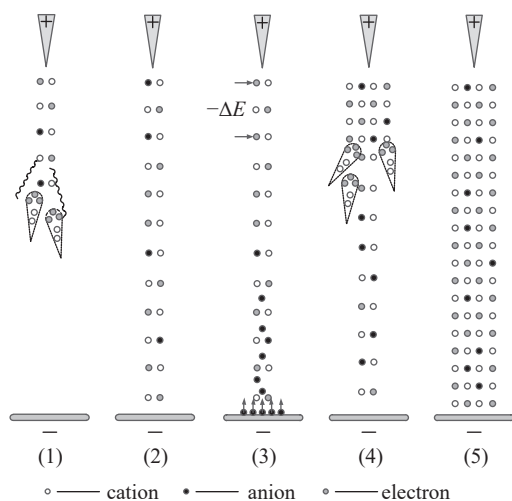


图6 初始流注向二次流注转化过程

Fig. 6 Transition process of primary streamer to secondary streamer

流注阳极端的局部 E/N 值高至一定值时便促使此处电子引发更加强烈碰撞电离并大量光子, 该强烈电离区不断向阴极延伸并形成二次流注。(5) 当二次流注延伸至阴极时, 极间被高电荷密度等离子体通道导通, 此时间隙击穿完成。

2.2 低气压下二次流注形态及延伸特性

相对标准大气或高压条件而言, 由于低气压气体放电中的某些微观过程发展较缓慢且低粒子密度电离区发射光子数量较少, 因此分辨放电推进过程和形态细节较易实现^[22-23]。本研究以 10~30 kPa 气压范围内 200 mm 棒-板间隙为例说明低气压工频电压下二次流注形态及延伸特性。图 7 为 10~30 kPa 气压范围内击穿电压幅值 U 随气压 P 的变化, 可见在该气压范围内 $U-P$ 近似呈线性关系。

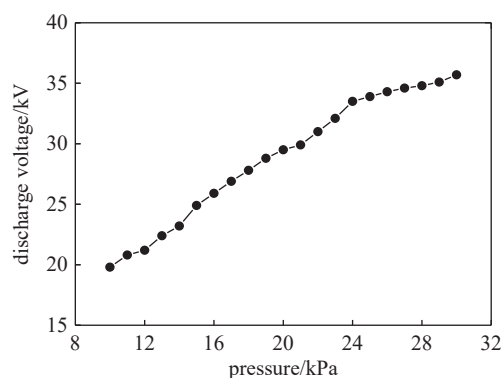


图7 200 mm 棒-板间隙 $U-P$ 曲线

Fig. 7 $U-P$ curve of 200 mm rod-plane gap discharge

图 8 首先以 30 kPa 为例说明交流电压下二次流注延伸过程, 其中图 8(a) 为 300 μ s 时间间隔下的二次流注延伸过程, 图 8(b) 为对应的电压波形, 放电起始时刻对应图中 t_0 和 t_1 。由于流注发展过程中存在轴向场强屏蔽作用, 仅通过图 8(a) 无法清晰展现流注发展过程中的完整电离通道, 因此本研究将不同阶段流注形态进行重叠处理而形成图 8(c), 即完整的二次流注延伸路径。由图 8(a) 可见当初始流注贯穿间隙后, 二次流注由阳极端起始并沿初始流注的残余电荷“轨迹”逐渐向阴极延伸。值得注意的是由于初始流注本身具有分叉特征, 因此分叉点后的不同分支可同时发展二次流注并形成二次流注分叉点(图 8(a) 中的点 A~J)。二次流注的分叉特征在大气压条件直流电压下的二次流注形态中也有所体现^[24-25]。由图 8(c) 可见二次流注更趋向于沿贴近轴向初始流注通道发展, 而偏离轴向的初

始流注虽具有引导二次流注的作用,但沿其发展的二次流注电离强度较弱。本研究将最终延伸至阴极的二次流注定义为有效二次流注,其余的无效二次流注将受有效二次流注通道的强轴向场强的屏蔽作用而消失。

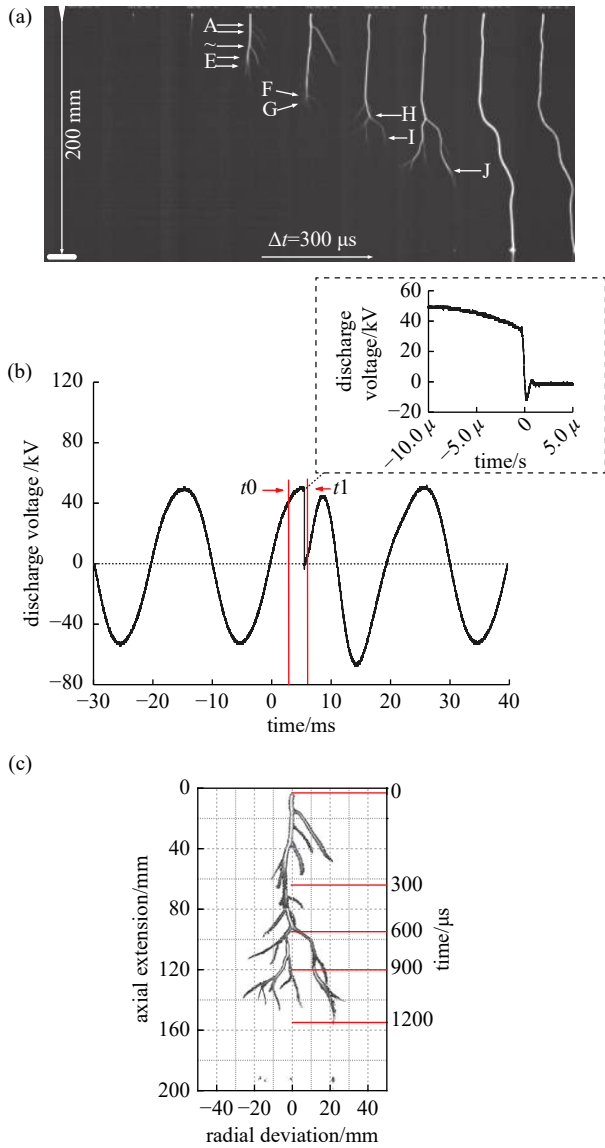


图8 200 mm 棒-板间隙 30 kPa 下二次流注形态。(a) 二次流注延伸过程, (b) 电压波形, (c) 二次流注整体形态

Fig. 8 The images of discharge channel of 200 mm rod-plane gap under 30 kPa. (a) Discharge process of secondary streamer, (b) voltage waveform, (c) the shape of secondary streamer

为分析低气压条件对二次流注形态及延伸特性的影响,图 9 给出 12~28 kPa 气压范围内二次流注分支的二维分布和延伸速度变化,各气压值下均为二次流注起始至主放电前一帧的整体形态。由

于高速摄像机曝光间隔和曝光时长均为 300 μs , 首个 $\Delta t = 300 \mu s$ 时长内二次流注的延伸长度应不小于首帧 300 μs 时刻所表示的二次流注位置,因此在发展速度方面 $t = 300 \sim 1500 \mu s$ 时间范围更具参考性。

由图 9 可见低气压交流电压下随气压降低二次流注形态具有以下特征: ①二次流注径向扩展能力降低且分支数量逐渐减少,当气压低于 18 kPa 后仅存在沿轴向伸长的有效二次流注。②随气压降低击穿电压近似呈线性关系下降,此时二次流注沿初始流注的延伸极限也近似呈线性关系降低,例如由 28 kPa 下的 80% 降低至 12 kPa 时的 20%。有关研究表明由阳极棒尖端起始的二次流注延伸长度随击穿电压升高而近似线性增加^[26]。

图 10 给出 12~30 kPa 气压范围不同帧区间 $\Delta t_1 \sim \Delta t_5$ ($\Delta t = 300 \mu s$) 内有效二次流注通道延伸速度和分叉点数量之间对应关系(首个帧区间数据缺乏参考性)。由图 10 可见固定气压值下二次流注发展速度逐渐降低,且随气压降低二次流注发展速度显著降低。而关于二次流注发展速度方面早在文献 [13] 中已有描述: 二次流注发展速度不稳定,但其轴向延伸速度显著小于初始流注。值得注意的是本实验条件下的二次流注较标准大气条件下的初始流注发展速度约慢四个数量级,相同气压条件下二次流注除了首个帧区间的起始速度存在随机性(受观测条件限制无法准确捕捉二次流注起始时刻),其余帧区间二次流注发展速度较为稳定,而速度数量级的降低也使测量误差不明显。另外某帧区间内分叉点数量的明显变化将对二次流注发展速度造成显著影响,例如 24 kPa 下 Δt_3 内因分叉数量显著增加而导致速度骤降,20 kPa 下 Δt_3 内因未出现分叉点而速度激增。本研究认为产生该现象的原因为: 当二次流注沿初始流注轨迹延伸并经过分叉点时将由主通道分裂出不同分支,因此每途径一处分叉点都将分割二次流注头部空间电荷区内的电荷总量从而降低主通道发展速度。

3 结论

本文利用低气压放电实验平台进行了 10~30 kPa 气压范围内 200 mm 棒-板间隙工频放电实验,对低气压极不均匀场下二次流注延伸机制和形态特征进行分析并得出以下结论:

(1) 二次流注的起始机制为阳极前方局部场强扰动因素和阴极注入电子焦耳热效应因素共同作

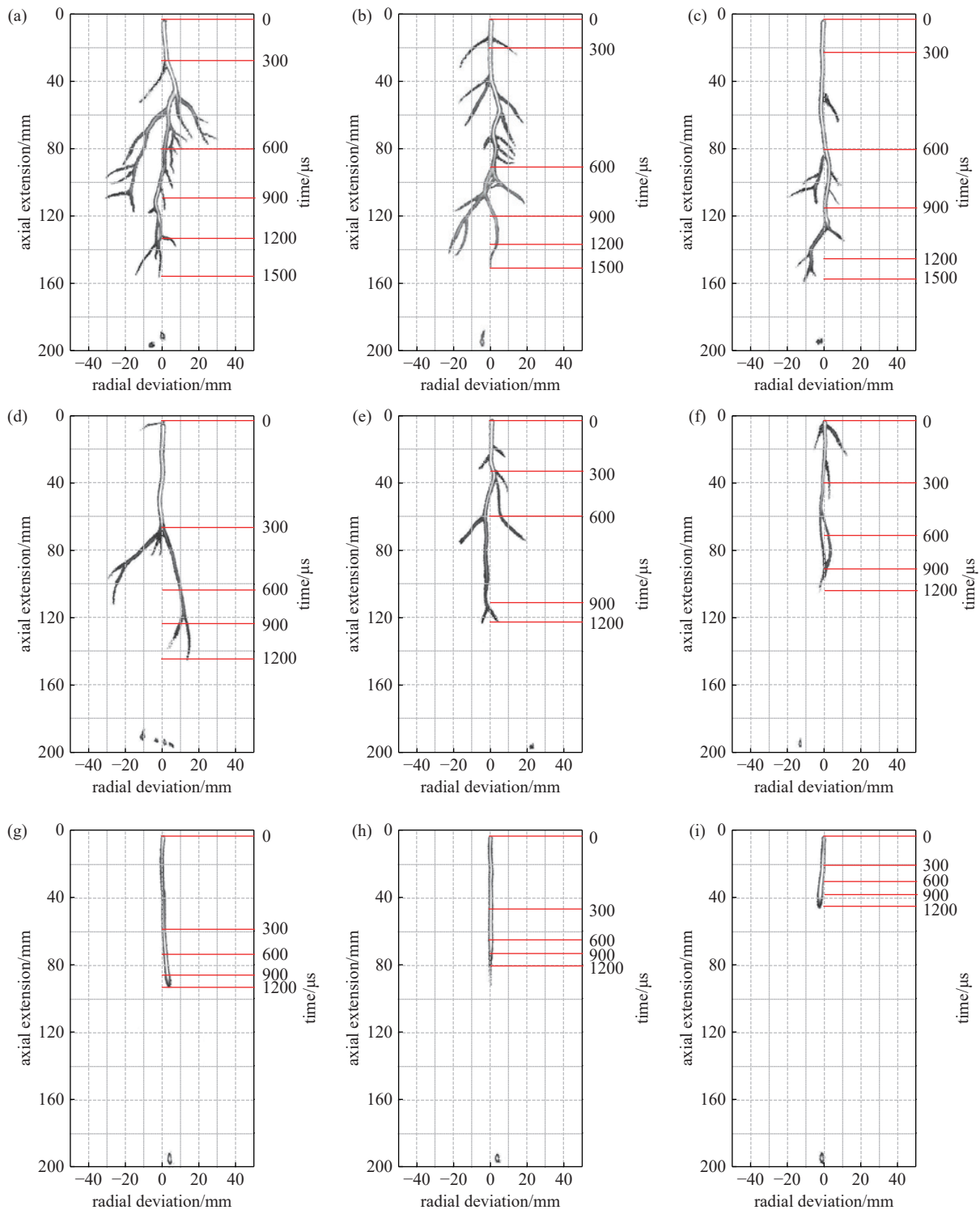


图9 200 mm 棒-板间隙 12~28 kPa 下二次流注形态

Fig. 9 The images of secondary streamer of 200 mm rod-plane gap within 12~28 kPa. (a) 28 kPa, (b) 26 kPa, (c) 24 kPa, (d) 22 kPa, (e) 20 kPa, (f) 18 kPa, (g) 16 kPa, (h) 14 kPa, (i) 12 kPa

用的结果。初始流注猝灭或向二次流注转化取决于上述两因素间的制衡关系。

(2) 低气压极不均匀场交流电压下, 随气压降低二次流注分叉的径向扩展能力逐渐减弱、分支数

量逐渐减少且延伸极限近似呈线性关系下降。

(3) 极不均匀场中二次流注延伸速度逐渐下降, 随气压降低二次流注发展速度同样下降。另外分叉点的出现对二次流注发展具有明显的降速作用。

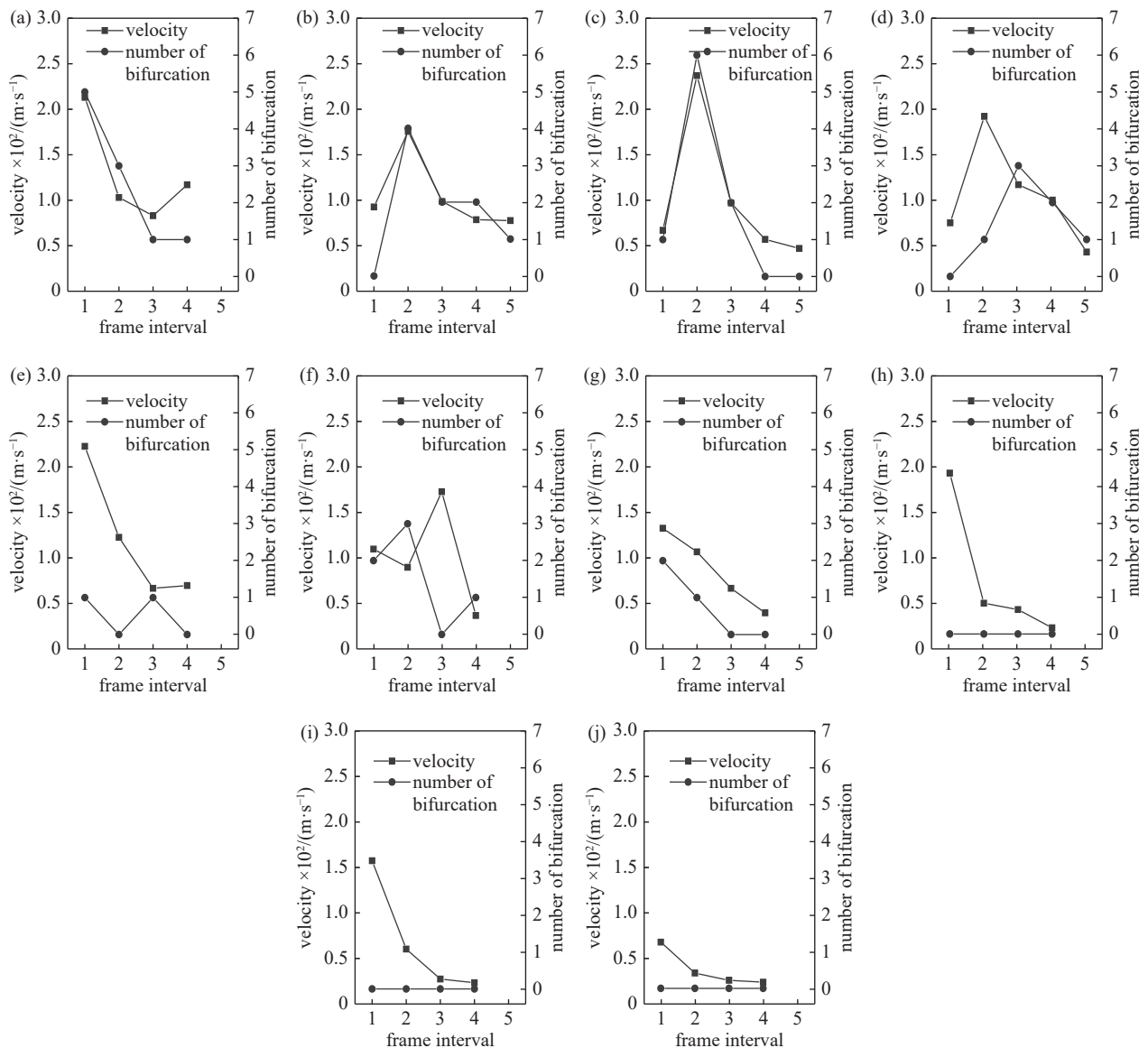


图10 12~30 kPa 二次流注延伸速度和分叉点数量

Fig. 10 The bifurcation and velocity of secondary streamer within 12~30 kPa. (a) 30 kPa, (b) 28 kPa, (c) 26 kPa, (d) 24 kPa, (e) 22 kPa, (f) 20 kPa, (g) 18 kPa, (h) 16 kPa, (i) 14 kPa, (j) 12 kPa

参 考 文 献

- [1] Hao Y P, Mao C L, Wang G L, et al. Flashover criterion based on the leader propagation model of composite insulators in high-altitude Areas[J]. *Proceedings of the Csee*, 2012, 32(34): 158-164 (郝艳捧, 毛长庚, 王国利, 等. 高海拔地区复合绝缘子先导发展法闪络判据[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(34): 158-164(in chinese))
- [2] Wang L, Su J, Gu S Q, et al. Lightning impulse discharge characteristics and invalidation of long insulator strings with parallel gap at high altitude area[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(5): 1365-1373 (王磊, 苏杰, 谷山强, 等. 高海拔长绝缘子串并联间隙雷电冲击放电特性及其失效性[J]. *高电压技术*, 2014, 40(5): 1365-1373(in chinese))
- [3] Yang Q, Yue D, Xuan Y E, et al. Insulating coordination between composite insulator and parallel gap device of 500 kV transmission line at high altitude area[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(2): 407-414 (杨庆, 董岳, 叶轩, 等. 高海拔地区500kV输电线路用复合绝缘子与并联间隙的绝缘配合[J]. *高电压技术*, 2013, 39(2): 407-414(in chinese))
- [4] Liao Y L, Li R H, Li X J, et al. Experimental research on typical air gap test voltage correction[J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2012, 32(28): 171-176 (廖永力, 李瑞海, 李小建, 等. 典型空气间隙放电电压修正的试验研究[J]. *中国电机工程学*

- 报, 2012, 32(28): 171-176(in chinese))
- [5] Yang Y Q, Li W G, Xia Y, et al. Research of AC and DC discharge characteristics of long gap under low pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1143-1150 (杨亚奇, 李卫国, 夏喻, 等. 低气压下长间隙交直流放电特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1143-1150(in chinese))
- [6] Yang Y Q, Li W G, Xia Y, et al. Research of AC and DC discharge characteristics of long gap under low pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3080-3088 (杨亚奇, 李卫国. 低气压直流电压下流注放电特性与极性效应的反转[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3080-3088(in chinese))
- [7] Loeb L B. Electrical Coronas-Their basic physical mechanisms[M]. Los Angeles: University of California Press, 1965
- [8] Wang C J, Mei H W, Tang W X, et al. Characteristics of positive streamer in air: Effect of low temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2086-2092
- [9] Bzaelyan E M, Raizer Y P, Aleksandrov N L. The effect of reduced air density on streamer-to-leader transition and on properties of long positive leader[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2007, 40: 4133-4144
- [10] Meng X B, Hui J F, Bian X M, et al. Research on the characteristic of streamer discharge at low air pressure[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2011, 31(25): 139-149 (孟晓波, 惠建峰, 卞星明, 等. 低气压下流注放电特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 139-149(in chinese))
- [11] Ran H M, Zhang J L, Geng S Y, et al. Photosensitive resin surface flashover and discharge aging characteristics in vacuum[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3583-3590 (冉慧敏, 张金梁, 耿召阳, 等. 真空中光敏树脂的沿面闪络和放电老化特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3583-3590(in chinese))
- [12] Li Y T, Wang X X, Zou X B, et al. Effect of positive column of glow discharge on the similarity of hollow cathode discharge[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 849-854 (李雨泰, 王新新, 邹晓兵, 等. 辉光放电正柱区对中空阴极放电相似性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 849-854(in chinese))
- [13] Sigmond R S. The residual streamer channel: Return strokes and secondary streamers[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(5): 1355-1370
- [14] Abahazem A, Merbahi N, Ducasse O, et al. Primary and secondary dynamics in pulsed positive corona discharge [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 924-925
- [15] Kitamura T, Kojima H, Hayakawa N. Influence of space charge by primary and secondary streamers on breakdown mechanism under non-uniform electric field in air[C]. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, 2014: 122-125
- [16] Ono R, Oda T. Optical diagnosis of pulsed streamer discharge under atmospheric pressure[J]. International Journal of Plasma Environment Science and Technology, 2007, 1(2): 123-129
- [17] Matsumoto T, Omori T, Sasamoto R, et al. Localized residual heat and formation of nonbranched positive streamer with highly repetitive streamer discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(1): 113-120
- [18] Matsumoto T, Kijima K, Nishijima K, et al. Formation of nonbranched positive streamer with high-frequency impulse voltage in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2418-2419
- [19] Rizk F A M, Trinh G N. High voltage engineering[M]. New York: CRC Press, 2014
- [20] Xiao D M. Gas discharge and gas insulation[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [21] Yang J J. Gas Discharge[M]. Beijing: Science Press, 1983 (杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983(in chinese))
- [22] Li M, Wang F, Xu S Z, et al. Simulation discharge on SF₆/N₂ gas mixtures based on fractal theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 88-95 (李敏, 汪枫, 许松枝, 等. 基于分形理论的 SF₆/N₂混合气体放电仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 88-95(in chinese))
- [23] Geng Y N, Zhuang C J, Zeng R, et al. Streamer inception characteristics under positive lightning impulse voltage[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2012 32(19): 148-153 (雷电冲击电压下流注起始特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 148-153(in chinese))
- [24] Komuro A, Tsukada H, Ando A. Slow gas heating process in an atmospheric-pressure streamer discharge visualized by high-speed schlieren method[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(2): 1164-1171
- [25] Sasamoto R, Matsumoto T, Izawa Y, et al. Gas heating and streamer-to-leader transition of impulse surface discharge on quartz glass in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(12): 4210-4215
- [26] Teramoto Y, Fukumoto Y, Ono R, et al. Streamer propagation of positive and negative pulsed corona discharges in air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2218-2219