

# 环保型绝缘气体逃逸束流特性研究

许元博, 武绍琮, 陈 庚, 屠幼萍

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 为了获得纳秒脉冲电压作用下环保型绝缘气体的逃逸束流特性, 对洁净空气、 $\text{SF}_6$  和  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  混合气体中逃逸电子的产生规律进行研究。通过搭建逃逸电子收集平台, 检测在不同气压的纯净空气、 $\text{SF}_6$  和  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  混合气体条件下, 施加不同幅值的纳秒脉冲电压时产生逃逸电子的电荷量。结果表明: 纳秒脉冲作用下低能电子会加速转变为逃逸电子, 纳秒脉冲电压幅值越高, 气体压强越低, 绝缘气体产生的逃逸电子电荷量越大。洁净空气对逃逸电子产生的抑制效果相对较弱,  $\text{SF}_6$  和  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  混合气体对逃逸电子产生有明显的抑制效果, 随气压升高,  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  混合气体相对于  $\text{SF}_6$  对逃逸电子产生的抑制效果更加明显。

**关键词:** GIS; 纳秒脉冲; 逃逸电子; 气压

## Escape beam characteristics of environmentally friendly insulating gas

XU Yuanbo, WU Shaocong, CHEN Geng, TU Youping

(State Key Laboratory of Renewable Electrical Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In order to obtain the escape beam characteristics of environmentally friendly insulating gas under the action of nanosecond pulse voltage, the generation laws of the escape electrons in clean air,  $\text{SF}_6$ , and  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  gas mixture were studied. An escape electron collection platform was built, and the charge amount of the generated escape electrons was measured when different amplitudes of nanosecond pulse voltages were applied to clean air,  $\text{SF}_6$ , and  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  gas mixture under different gas pressures. The results show that the low-energy electrons will accelerate and transform to escape electrons under the action of nanosecond pulse. The higher the nanosecond pulse voltage amplitude, the lower the gas pressure, and the larger the charge amount of escape electrons generated by insulating gas. The clean air has relatively weak inhibition on the generation of escape electrons, and the  $\text{SF}_6$  and  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  gas mixture have obvious inhibition effect on the generation of escape electrons. As the pressure increases, the inhibition effect on the generation of escape electrons of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  gas mixture is more obvious than that of  $\text{SF}_6$ .

**Key words:** GIS; nanosecond pulse; escape electron; gas pressure

## 0 引言

气体绝缘变电站(gas insulated substation, GIS)因其可靠性高、故障率低等优点, 已经在我国得到越来越广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。 $\text{SF}_6$  凭借良好的绝缘性能和灭弧性能成为 GIS 中主要的绝缘气体, 然而  $\text{SF}_6$  具有极强的温室效应, 是 6 种受限制气体之一, 因此寻找绝缘环保的替代气体已经成为当前趋势。压缩空气和  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  混合气体因同时满足环保和绝缘性能要求, 成为了具有较高潜力的  $\text{SF}_6$  替代气体<sup>[5-10]</sup>。

当 GIS 应用于交流输电系统时, 隔离开关、断路器和接地开关的开断会产生快速暂态过电压(very

fast transient over voltage, VFTO), 导致盆式绝缘子发生沿面闪络, 对设备的绝缘性能产生损伤<sup>[11-12]</sup>。VFTO 具有纳秒级的波前时间, 频率很高, 电压幅值可以达到设备额定值的 2.5~3.0 倍, 且具有多次连续脉冲的特点<sup>[13-14]</sup>。如果用环保型绝缘气体替代  $\text{SF}_6$ , 需要考虑环保型绝缘气体在纳秒级快速暂态过电压条件下的放电特性。

为了解释纳秒脉冲下的放电特性, 人们提出了逃逸电子理论: 在电压幅值较高的纳秒脉冲电压作用下, 一些电子所受到的等效碰撞阻力随电子能量的升高而下降, 当电子通过电场加速获得的能量大于和气体分子发生碰撞所损失的能量时, 电子能量将持续上升, 速度不断增大, 即转化为逃逸模式, 形

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51877080)。

成逃逸电子<sup>[15-16]</sup>。由逃逸电子理论可知,在GIS中,当纳秒级快速暂态过电压作用在盆式绝缘子上时,会产生逃逸电子束流,逃逸电子束流可能会导致绝缘子表面电荷积聚等后果,从而对设备的安全产生严重威胁,因此研究环保型绝缘气体在纳秒脉冲作用下的逃逸电子束流特性对GIS的安全运行具有重要意义。

学者们对纳秒脉冲放电的特性进行了研究。邵涛等<sup>[17-18]</sup>对纳秒脉冲作用下逃逸电子的产生进行了研究,发现外加电场越高,发生逃逸的电子越多,同时气压对电子的逃逸过程会造成很大的影响。他们还发现基于高能电子的逃逸击穿理论可以很好地解释纳秒脉冲下的放电现象。章程等<sup>[19]</sup>则在理论分析的基础上,采用上升沿和半宽高分别为15、30 ns的纳秒脉冲电压在极不均匀的电场条件下对大气压空气进行放电测试。实验发现纳秒脉冲放电中存在X射线,结合理论分析得出,在极不均匀的电场条件下场致发射产生初始电子,初始电子在电场的作用下转化为逃逸模式,与气体分子碰撞产生二次电子,同时辐射出X射线,这间接证明了逃逸电子的存在。LIC等<sup>[20]</sup>用三维混合模型对氮气中负极性放电产生的高能逃逸电子进行了仿真研究,发现放电过程中产生了能量超过1 keV的高能电子,并认为高能电子会从流注中发生逃逸,形成新的电子雪崩。为了能直接检测到逃逸电子,章程等<sup>[21]</sup>研制了纳秒脉冲作用下逃逸电子束流的收集器,对在脉宽为3 ns、上升沿为1.6 ns的纳秒脉冲电压下产生的高能电子进行收集,有效测得了逃逸电子束流,并且计算出逃逸电子的数目,为研究逃逸电子束流特性提供了方法。李雨泰等<sup>[22]</sup>对纳秒脉冲放电下的逃逸电子进行了数值模拟,发现当纳秒脉冲电压为负极性时,产生逃逸电子的充分条件是电子前行的电场峰峰值达到电子进入到持续加速模式所需要的临界电场。另外,逃逸电子在放电通道前到达阳极的预电离通道是气隙快速击穿的原因。

上述研究主要集中于纳秒脉冲放电下逃逸电子的产生机制和测试方法,对于不同种类气体条件下的逃逸电子束流特性研究较少,为了寻找可靠的环保型绝缘气体代替SF<sub>6</sub>,需要考虑环保型绝缘气体在纳秒级快速暂态过电压条件下抑制逃逸电子产生的能力,以证明环保绝缘气体可以有效地抑制绝缘子发生沿面闪络,提高设备的安全性和可靠性。为此,本文主要探讨环保型绝缘气体的逃逸束

流特性,并与SF<sub>6</sub>气体的逃逸束流特性进行对比,以期环保型绝缘气体代替SF<sub>6</sub>提供理论参考。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

图1为逃逸电子束流实验装置示意图。实验装置包括纳秒脉冲电压源、高气压密封腔体、针尖、法拉第杯和测量系统。纳秒脉冲电压源的输出脉冲极性为负,频率在10 kHz内可调,脉宽为240 ns,上升沿为95 ns,输出电压幅值为0~20 kV,纳秒脉冲电压源输出的脉冲频率、时间、个数均由脉冲触发器控制。高气压密封腔体的材料为不锈钢,内部为高380 mm、直径360 mm的圆柱体空间,可充入气体的最大气压为1.0 MPa。高气压密封腔体的右侧为可拆卸盆式绝缘子,盆式绝缘子中央的金属法兰可以将纳秒脉冲电压引入腔体内。高气压密封腔体的外壁上设有气阀、陶瓷法兰和数字式气压表,数字式气压表量程为-0.1~1.0 MPa,陶瓷法兰用于保证腔体内部气密性,同时传输内外控制信号和测量信号。在实验过程中,腔体的外壳始终接地,隔绝外界的电磁干扰,保证实验结果的准确性。腔体内部放置一个环氧架,环氧架上部固定的针尖作为电极,针尖通过导线与盆式绝缘子中间的金属法兰相连,以保证纳秒脉冲电源可以作用在针尖电极上,针尖下方7 mm处放置法拉第杯用于收集逃逸电子束流信号。法拉第杯的工作原理:当电子束入射到由高纯度石墨制作的电荷吸收体时,电子会被石墨吸收形成电荷沉积,产生电位差从而形成电流。用示波器对输出的电流进行测量,由于电流与入射的电子量成正比,从而间接地完成对逃逸电子束流的测量。

### 1.2 实验方法

选用纯净的SF<sub>6</sub>气体和两种环保气体——纯净

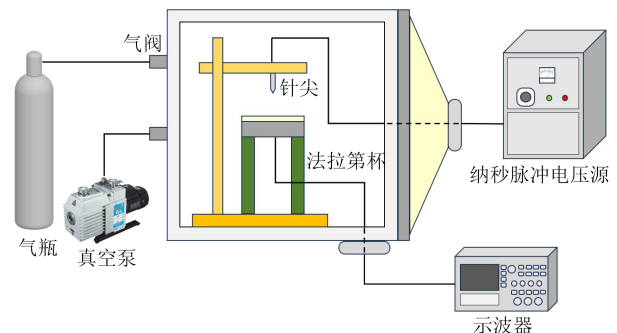


图1 逃逸电子束流实验装置图

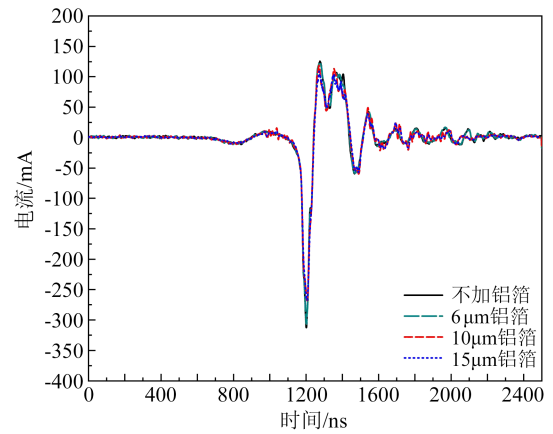
Fig.1 Diagram of escape electron beam experimental setup

空气(79%N<sub>2</sub>/21%O<sub>2</sub>混合气体)和91%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/9%CO<sub>2</sub>混合气体为研究对象。为研究气压条件对实验结果的影响,先用真空泵将腔体抽为真空,再将每种气体分别充入腔体至气压为101.325、303.975、405.300、506.625 kPa。纳秒脉冲电压源重复频率设置为1 000 Hz,电压幅值分别设为10.0、12.5、15.0、17.5、20.0 kV,在同一条件下对逃逸电子束流进行10次测量,最终结果取10次测量结果的平均值。

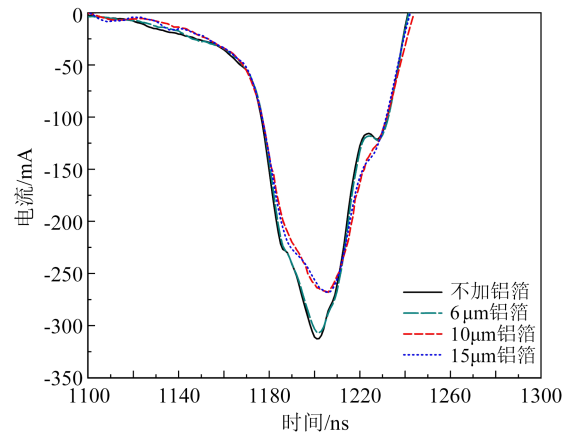
由于测得的波形中包括了位移电流和逃逸电子束流两种波形,为了测得逃逸电子引起的束流变化,实验中在以上条件下分别测量了法拉第杯出口不加铝箔,以及覆盖厚度为6、10、15 μm铝箔时的逃逸电子束流波形,其中铝箔的作用是阻挡逃逸电子入射至法拉第杯,此时仅测得位移电流的波形,进而可在后续测试结果中排除位移电流。

图2(a)为101.325 kPa洁净空气条件下电压幅值为20.0 kV时法拉第杯口没有铝箔,以及覆盖厚度为6、10、15 μm铝箔时的逃逸电子束流原始波形。由逃逸电子理论可知,电子若想转化为逃逸状态,需要很高的场强提供能量,而逃逸电子束流电流峰值与纳秒脉冲电压峰值相对应,电压峰值处电场最强,此时才能产生逃逸电子,因此在电流峰值处才会收集到逃逸电子波形。观察图2(a)可以发现,不同曲线的波形峰值存在差异,对波形峰值处进行放大得到图2(b)。由图2(b)可知,不加铝箔时逃逸电子束流波形峰值处的电流幅值明显高于覆盖铝箔时的电流幅值,证明铝箔可以阻挡逃逸电子入射到法拉第杯中。其中铝箔厚度在10 μm及以下时,逃逸电子电荷量随着铝箔厚度的增加而减小,而覆盖10 μm和15 μm铝箔两种情况下测得的逃逸电子束流几乎相同,随铝箔厚度的增加波形没有明显变化,因此10 μm及以上厚度的铝箔在实验条件下可以阻挡所有的逃逸电子入射到法拉第杯中。

为了获得逃逸电子的电荷量,选取不加铝箔的波形和覆盖15 μm铝箔的波形进行计算,其中不加铝箔可以收集到所有的逃逸电子,而覆盖15 μm铝箔可以阻挡所有的逃逸电子,不加铝箔的波形减去覆盖15 μm铝箔的波形可以消除位移电流对实验结果的影响,获得所有逃逸电子引起的电流变化,进而得出逃逸电子电荷量(Q<sub>e</sub>),计算公式如式(1)所示。同理可以计算出其他条件下产生的逃逸电子电荷量。



(a) 原始电子束流波形



(b) 放大后电子束流波形

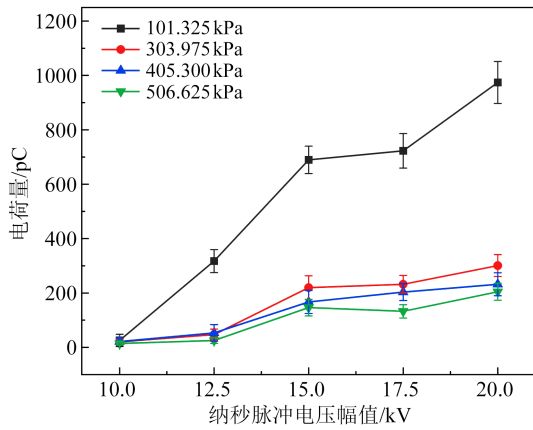
图2 101.325 kPa 洁净空气的逃逸电子束流波形(20 kV)  
Fig.2 Escape electron beam waveform of clean air at 101.325 kPa (20 kV)

$$Q_e = \int_{T_1}^{T_2} I_e dt \quad (1)$$

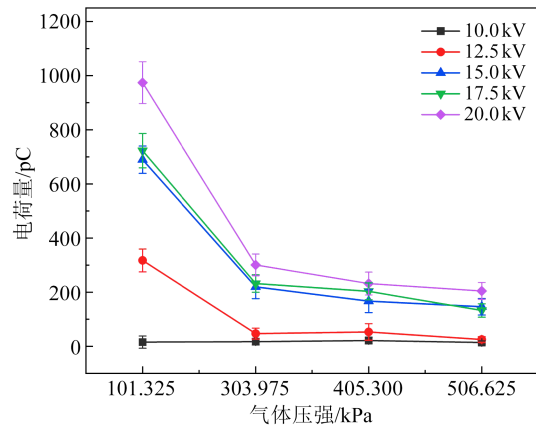
式(1)中: $I_e$ 为逃逸电子电流; $T_1$ 为逃逸电子出现时间; $T_2$ 为逃逸电子消失时间。

## 2 逃逸电子束流实验结果与分析

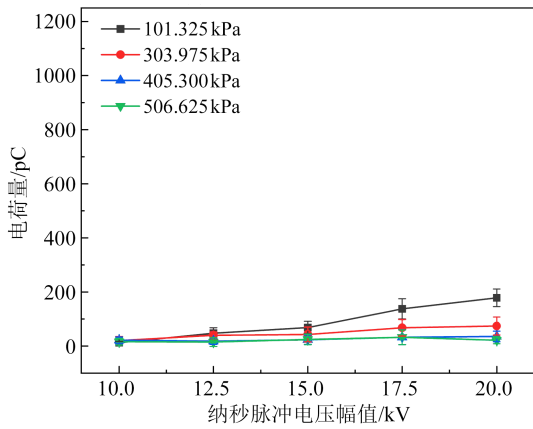
图3为不同气体条件下逃逸电子的电荷量随纳秒脉冲电压幅值的变化。从图3可以看出,在不同气体条件下,逃逸电子的电荷量均随纳秒脉冲电压幅值的升高呈现上升趋势,在101.325 kPa条件下逃逸电子电荷量随纳秒脉冲电压幅值的变化更明显。其中在101.325 kPa洁净空气条件下,纳秒脉冲电压为10.0 kV时几乎没有逃逸电子产生,而当电压升高到12.5 kV时,产生的逃逸电子电荷量达到了317.4 pC,随后电压的每一次升高都会使产生的逃逸电子明显增多,但气压升高之后,逃逸电子电荷量随纳秒脉冲电压升高而增大的速度变缓。



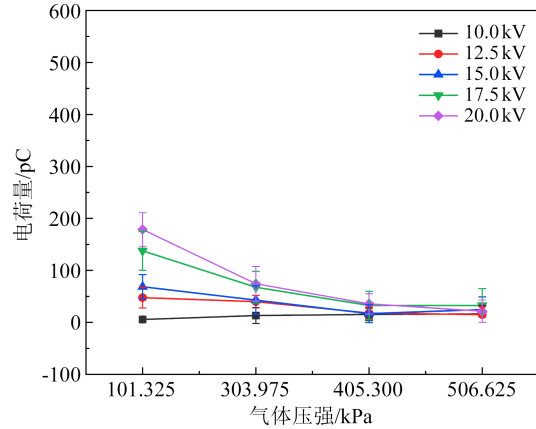
(a) 洁净空气



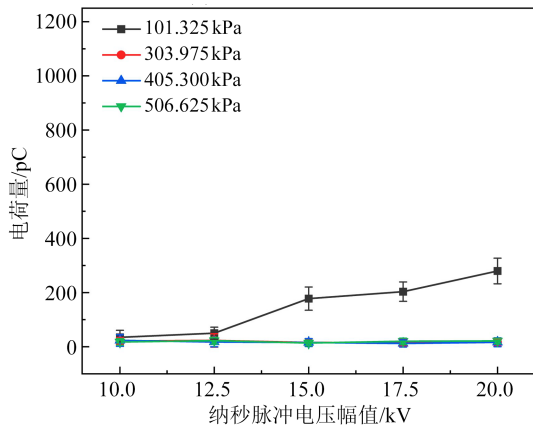
(a) 洁净空气



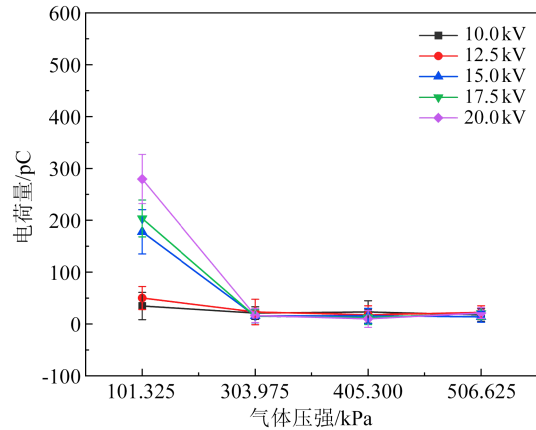
(b) SF<sub>6</sub>



(b) SF<sub>6</sub>



(c) C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体



(c) C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体

图3 不同气体条件下逃逸电子电荷量随纳秒脉冲电压幅值的变化

Fig.3 Variation of escape electron charge amount with the amplitude of nanosecond pulse voltage under different gas conditions

图4为不同气体条件下逃逸电子电荷量随气压的变化。从图4可以看出,3种气体的气压越高,产生的逃逸电子电荷量越小。当纳秒脉冲电压幅值为20.0 kV,洁净空气的气压由101.325 kPa上升到

图4 不同气体条件下逃逸电子电荷量随气压的变化  
Fig.4 Variation of escape electron charge amount with gas pressure under different gas conditions

303.975 kPa时,产生的逃逸电子电荷量由974.2 pC减小到300.9 pC,说明前期气压升高对逃逸电子产生的抑制作用特别明显;而当气压升高到405.3 kPa、506.625 kPa时,对应的逃逸电子电荷量分别为232.1 pC和203.6 pC,逃逸电子电荷量减小速度减缓。在纳秒脉冲电压幅值为20.0 kV条件下, SF<sub>6</sub>气

压的升高对逃逸电子产生也有较明显的抑制效果，随着气压逐渐升高，逃逸电子电荷量缓慢减小。在C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体条件下，当气压为101.325 kPa、纳秒脉冲电压幅值为20.0 kV时，产生的逃逸电子电荷量为279.6 pC，但当气压升高到303.975 kPa及以上时，几乎不再有逃逸电子产生，说明C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体随气压升高对逃逸电子产生的抑制效果更明显。

纳秒脉冲电压幅值为20.0 kV时，不同气体条件对产生的逃逸电子电荷量的影响如图5所示。由图5可知，相同条件下洁净空气中产生的逃逸电子电荷量明显高于SF<sub>6</sub>和C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体中产生的逃逸电子电荷量，且洁净空气气压需提升到506.625 kPa才能产生与101.325 kPa SF<sub>6</sub>对逃逸电子产生的抑制效果。对比SF<sub>6</sub>和C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体可以发现，气压为101.325 kPa时SF<sub>6</sub>对逃逸电子产生的抑制效果要优于C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体，但当气压提升到303.975 kPa时，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体对逃逸电子产生的抑制效果明显提升，甚至优于SF<sub>6</sub>。

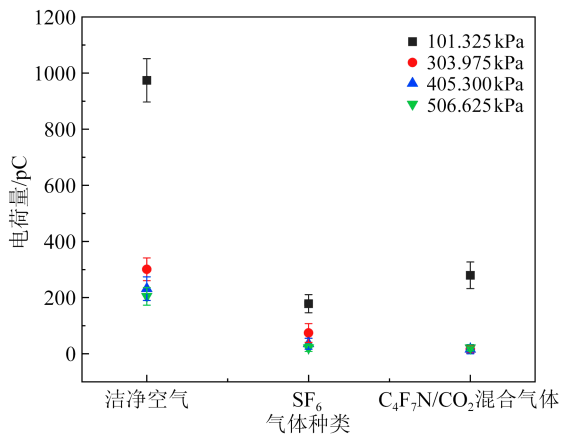


图5 不同气体条件下逃逸电子的电荷量

Fig.5 The charge amount of escape electron under different gas conditions

通过以上分析发现，纳秒脉冲电压幅值、气压和气体的种类都会对逃逸电子的产生有影响：电压幅值越高，产生的逃逸电子电荷量越大；气压升高可以抑制逃逸电子的产生；在相同气压条件下洁净空气对逃逸电子产生的抑制效果要远低于SF<sub>6</sub>和C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体，洁净空气条件下只有提升气压才能明显抑制逃逸电子的产生，SF<sub>6</sub>和C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体本身对逃逸电子的产生就有明显的抑制效果，其中C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体随气压升高对逃逸电子产生的抑制效果提升更明显。

### 3 讨论

当电压幅值很高的纳秒脉冲电压作用在针尖上时，会使得针尖附近的电场强度极高，当电场足够高时会使得电子的能量持续增大，电子运动速度将变得极快，当这些电子在电场中运动所获得的能量大于非弹性碰撞所损失的能量时，电子会进入持续加速状态，变成逃逸电子，结合等效碰撞阻力的公式和牛顿力学的公式，电子是否能进入持续加速状态由公式(2)决定<sup>[15]</sup>。

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = e \cdot E(x) - F(\varepsilon) > 0 \quad (2)$$

式(2)中： $\varepsilon$ 为电子的能量， $\varepsilon=mv^2/2$ ，其中 $m$ 为电子的质量， $v$ 为电子的运动速度； $e$ 为电子电荷量，其值为 $1.602 \times 10^{-19}$  C； $E(x)$ 为电子所在位置的电场强度； $F(\varepsilon)$ 为电子在气体中运动所受到的等效碰撞阻力。

等效碰撞阻力可以由Bethe公式给出，如式(3)所示<sup>[15]</sup>。

$$F(\varepsilon) = k^2 \cdot \frac{\pi N Z e^4}{\varepsilon} \cdot \left( 2 \ln \frac{\varepsilon}{I} - (\ln 2) + 1 \right) \quad (3)$$

式(3)中： $k$ 为库伦常数，其值为 $8.988 \times 10^9$  N·m<sup>2</sup>·C<sup>-2</sup>； $N$ 为单位体积内的气体分子数； $Z$ 为分子内的电子数； $I$ 为分子平均非弹性碰撞能量损失。

以洁净空气条件为例，当实验温度为常温，气压为101.325 kPa时， $N=2.688 \times 10^{25}$  个/m<sup>3</sup>， $I=80$  eV。将以上数据代入公式(3)，得到等效碰撞阻力和电子能量的关系如图6所示。

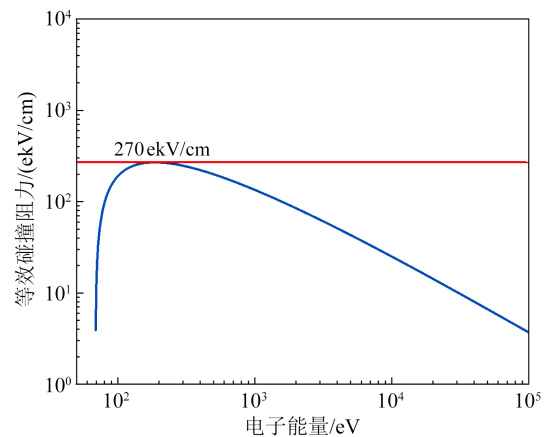


图6 等效碰撞阻力和电子能量的关系

Fig.6 Relationship between equivalent collision resistance and electron energy

由图6可以看出，等效碰撞阻力随电子能量的升高先增大后减小，存在一个最大值 $F_{max}$ 。结合式(2)和式(3)可以推断出，当气隙内的电场强度 $E$ 高

于临界场强  $E_{cr}$  (如式(4)所示)时,电子才会不断地积累能量,最终完成逃逸。

$$E > E_{cr} = \frac{F_{\max}(\varepsilon)}{e} = k^2 \cdot \frac{\pi N Z e^3}{\varepsilon} \cdot \left( 2 \ln \frac{\varepsilon}{I} - (\ln 2) + 1 \right) \quad (4)$$

分析式(4)可知,单位体积内的气体分子数  $N$  是电子发生逃逸的重要影响因素:单位体积内分子数越多,电子发生逃逸所需要的临界场强越高。而  $N$  主要与上述实验中的气压有关。当气压很低时,单位体积内的气体分子数少,该条件下的电子平均自由行程更长,电子与气体分子发生碰撞的次数更少,在外加电场的作用下电子更容易实现能量的积累,易于变为逃逸电子。而在气压升高之后,单位体积内存在大量的中性气体分子,电子平均自由行程短,电子在运动过程中会频繁地与气体分子发生碰撞并损失能量,不易于变为逃逸电子。以洁净空气为例,将 101.325 kPa、506.625 kPa 洁净空气的对应条件分别代入式(4),可以得到电子发生逃逸的临界场强分别为 270 kV/cm 和 1 310 kV/cm,506.625 kPa 洁净空气的逃逸电子临界场强显著高于 101.325 kPa 洁净空气的逃逸电子临界场强,说明气压升高更难产生逃逸电子,与图 4 中的实验结果相符合。

影响等效碰撞阻力的因素除了单位体积内的气体分子数之外,还有分子中的电子数。洁净空气中的气体为  $N_2$  和  $O_2$ ,分子中的电子数分别为 14 和 16; $SF_6$  分子中的电子数为 70; $C_4F_7N/CO_2$  混合气体中  $C_4F_7N$  分子中的电子数为 94, $CO_2$  分子中的电子数为 22, $SF_6$  和  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体中分子的总电子数要大于洁净空气中分子的电子数,所以相同条件下空气中产生逃逸电子所需要的临界场强更低。此外, $SF_6$  和  $C_4F_7N$  分子的尺寸大于  $N_2$  和  $O_2$  分子的尺寸,使得  $SF_6$  和  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体条件下电子的平均自由行程更短,电子在一个自由行程内积累的能量更少,电子更难发生逃逸。同时考虑到  $SF_6$  和  $C_4F_7N$  气体都呈电负性,可以吸附场致发射的初始电子形成负离子,负离子由于质量大在电场下难以加速,进而不会与气体分子发生碰撞,进一步减少了逃逸电子的产生。因此,在相同的电压条件下,洁净空气中产生逃逸电子的电荷量均高于另外两种气体中产生逃逸电子的电荷量,与图 5 中的结果相吻合。

$C_4F_7N$  分子中的电子数大于  $SF_6$  分子中的电子

数,电子与  $C_4F_7N$  分子碰撞的等效碰撞阻力大于电子与  $SF_6$  分子碰撞的等效碰撞阻力,但是由于  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体中  $C_4F_7N$  分子的体积分数只有 9%,在 101.325 kPa 条件下没有足够多的  $C_4F_7N$  分子与电子发生碰撞,抑制了电子能量的提升,同时也没有足够多的电负性气体分子去吸附电子,所以对逃逸电子产生的抑制程度相对  $SF_6$  较小。随着气压的升高,不仅电子的平均自由行程变短, $C_4F_7N$  分子数量也随之增加,大量的  $C_4F_7N$  气体分子能够与电子发生碰撞,抑制电子能量提升的同时,还能吸附更多电子,进一步抑制逃逸电子的产生。由逃逸电子理论可知,电子转化为逃逸模式后会从电子崩的头部逃逸出来,逃逸出来的电子会将电子崩头部的区域进行电离,并在电场的作用下形成更多的逃逸电子,这些逃逸电子在电场的作用下会继续向阳极运动,上述过程会循环往复,直到逃逸电子抵达阳极<sup>[23]</sup>。当气压升高后,能发生逃逸的电子数量变少,能级降低,从电子崩头部逃逸出来的电子难以形成新的电子崩,进而不能产生新的逃逸电子,最终削弱了逃逸电子产生的可能。综上可知,气压升高对提升逃逸电子产生的抑制效果是非线性的,相对于  $SF_6$  气体, $C_4F_7N/CO_2$  混合气体随气压升高对逃逸电子产生的抑制效果更加明显。

## 4 结论

本文搭建了逃逸电子收集平台,对不同气体条件下逃逸电子电荷量进行了测量,主要得到以下结论:

(1)气压是逃逸电子产生的重要影响因素,气压越高,分子间的平均自由行程越短,电子越难实现能量的积累,进而产生的逃逸电子电荷量越低。

(2)洁净空气由于分子中电子数较少,对逃逸电子产生的抑制效果相对较弱, $SF_6$  和  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体由于分子中的电子数量多且呈电负性,能够有效地抑制逃逸电子的产生。其中  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体随气压升高对逃逸电子产生的抑制效果相对于  $SF_6$  更明显,且在高气压条件下对逃逸电子产生的抑制效果要优于  $SF_6$ 。

(3)在针尖电极施加脉冲幅值为 20.0 kV、脉冲频率为 1 000 Hz 的纳秒脉冲电压所产生的场强下,303.975 kPa 的  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体可以有效地抑制逃逸电子的产生。因此选择  $C_4F_7N/CO_2$  作为绝缘气体时,压强条件可以选择在 303.975 kPa 及以上。

## 参考文献 References

- [1] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术,2015,41(5):1466-1473.  
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering,2015,41(5):1466-1473.
- [2] CHEN G, TU Y, WANG C, et al. Environment-friendly insulating gases for HVDC gas-insulated transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2019,7(3):510-529.
- [3] ZHENG Y, HAO Y, LIU L, et al. An ultrasonic nondestructive testing method for density uniformity of basin-type insulators in GIS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021,70:1-8.
- [4] LI C, HU J, LIN C, et al. Surface charge migration and DC surface flashover of surface-modified epoxy-based insulators[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2017,50(6):065301.
- [5] CHEN G, TU Y, WU S, et al. Intrinsic hetero-polar surface charge phenomenon in environmental friendly  $C_3F_7CN/CO_2$  gas mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(18): 18LT03.
- [6] TU Y, CHEN G, WANG C, et al. Feasibility of  $C_3F_7CN/CO_2$  gas mixtures in high-voltage DC GIL: a review on recent advances [J]. High Voltage,2020,5(4):377-386.
- [7] LI C, ZHU Y, HU J, et al. Charge cluster triggers unpredictable insulation surface flashover in pressurized  $SF_6$ [J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2020,54(1):015308.
- [8] 汤昕,廖四军,杨鑫.  $SF_6$  混合/替代气体绝缘性能的研究进展[J]. 绝缘材料,2014,47(6):18-22.  
TANG Xin, LIAO Sijun, YANG Xin. Research progress in insulating property of  $SF_6$  mixing/substituting gases[J]. Insulating Materials,2014,47(6):18-22.
- [9] 白玮,贺永明,王刚,等.  $SF_6/N_2$  混合气体 GIS 隔离接地开关绝缘及压力承受水平的设计分析[J]. 绝缘材料,2020,53(5):97-100.  
BAI Wei, HE Yongming, WANG Gang, et al. Design and analysis of insulation and pressure bearing level of  $SF_6/N_2$  mixed gas GIS [J]. Insulating Materials,2019,53(5):97-100.
- [10] 刘伟,韩冬,朱姗,等. 典型放电缺陷下的  $C_4F_7N/CO_2$  分解特性 [J]. 高电压技术,2023,49(11):4498-4506.  
LIU Wei, HAN Dong, ZHU Shan, et al. Decomposition characteristics of  $C_4F_7N/CO_2$  under typical discharge defects[J]. High Voltage Engineering,2023,49(11):4498-4506.
- [11] 潘绍明,张磊,赵坚,等. 快速暂态过电压老化对环氧树脂电气强度的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(1):46-50.  
PAN Shaoming, ZHANG Lei, ZHAO Jian, et al. Effect of VFTO ageing on the electric strength of epoxy resin[J]. Insulating Materials,2024,57(1):46-50.
- [12] LEE C H, HSU S C, HIS P H, et al. Transferring of VFTO from an EHV to MV system as observed in Taiwan's No.3 nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(2):1008-1016.
- [13] 张文斌,胡洋. GIS 中快速暂态过电压 VFTO 的抑制研究进展 [J]. 高电压技术,2023,49(1):418-431.  
ZHANG Wenbin, HU Yang. Research progress in suppression of fast transient overvoltage VFTO in GIS[J]. High Voltage Engineering,2019,49(1):418-431.
- [14] 谢施君,穆舟,丁卫东,等. 纳秒级上升沿 100 kV 方波发生装置研制[J]. 高电压技术,2021,47(6):2169-2176.  
XIE Shijun, MU Zhou, DING Weidong, et al. Development of the 100 kV square wave generator with nanosecond rise time[J]. High Voltage Engineering,2019,47(6):2169-2176.
- [15] LI Y, FU Y, LIU Z, et al. Observation of electron runaway in a tip-plane air gap under negative nanosecond pulse voltage by PIC/MCC simulation[J]. Plasma Sources Science and Technology,2022,31(4):045027.
- [16] 肖江平,戴栋,VICTOR F T, 等. 大气压空气纳秒脉冲板-板放电中逃逸电子产生机理[J]. 物理学报,2023,72(10):239-247.  
XIAO Jiangping, DAI Dong, VICTOR F T, et al. Mechanism of runaway electron generation in nanosecond pulsed plate-plate discharge at atmospheric-pressure[J]. Acta Physica Sinica,2023, 72(10):239-247.
- [17] 邵涛,孙广生,严萍,等. 纳秒脉冲下高能量快电子逃逸过程的计算[J]. 物理学报,2006,55(11):5964-5968.  
SHAO Tao, SUN Guangsheng, YAN Ping, et al. Calculation on runaway process of high-energy fast electrons under nanosecond-pulse[J]. Acta Physica Sinica,2006,55(11):5964-5968.
- [18] 邵涛,严萍,张适昌,等. 纳秒脉冲气体放电机理探讨[J]. 强激光与粒子束,2008,20(11):1928-1932.  
SHAO Tao, YAN Ping, ZHANG Shichang, et al. Review on nanosecond-pulse discharge mechanism in gases[J]. High Power Laser and Particle Beams,2008,20(11):1928-1932.
- [19] 章程,邵涛,马浩,等. 基于高能电子逃逸行为的纳秒脉冲放电特性分析[J]. 高电压技术,2012,38(7):1648-1654.  
ZHANG Cheng, SHAO Tao, MA Hao, et al. Analysis of the characteristics of nanosecond-pulse discharge based on runaway behaves of high-energy electrons[J]. High Voltage Engineering, 2012,38(7):1648-1654.
- [20] LI C, EBERT U, HUNSDORFER W. 3D hybrid computations for streamer discharges and production of runaway electrons[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2009,42(20):202003.
- [21] 章程,马浩,邵涛,等. 纳秒脉冲气体放电中逃逸电子束流的研究[J]. 物理学报,2014,63(8):322-328.  
ZHANG Cheng, MA Hao, SHAO Tao, et al. Runaway electron beams in nanosecond-pulsed discharges[J]. Acta Physica Sinica, 2014,63(8):322-328.
- [22] 李雨泰,刘志刚,付洋洋,等. 逃逸电子对纳秒短脉冲大气压空气击穿的影响[J]. 高电压技术,2023,49(12):5228-5236.  
LI Yutai, LIU Zhigang, FU Yangyang, et al. Effect of runaway electrons on the breakdown of nanosecond short pulse in atmospheric air[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5228-5236.
- [23] 邵涛. 重复频率纳秒脉冲气体击穿研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2006.  
SHAO Tao. Research on gas breakdown in repeat frequency nanosecond pulse[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences,2006.

收稿日期:2024-02-21;修回日期:2024-04-02.

作者简介:

许元博(1998-),男(汉族),黑龙江牡丹江人,硕士生,研究方向为输电设备的绝缘特性;

通信作者:屠幼萍(1966-),女(汉族),浙江宁波人,教授,研究方向为输电设备的绝缘特性。