

# 悬浮电极缺陷不同局部放电强度下的 C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> 混合气体分解特性研究

饶夏锦<sup>1,2</sup>, 张晓星<sup>1</sup>, 黎大健<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 彭博雅<sup>1</sup>, 黄炜<sup>1</sup>

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023;

2. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 广西 南宁 530023)

**摘要:** C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O 是一种具有潜力的 SF<sub>6</sub> 替代气体, 为了探究 C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> 混合气体在悬浮电极缺陷不同局部放电强度下的分解特性, 搭建了局部放电分解实验平台, 在不同外施电压下对 C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> 混合气体进行 96 h 局部放电分解实验, 利用气相色谱法对分解组分进行定量分析, 对分解组分含量、产气速率、特征气体比值与局部放电强度的关系分别进行了研究。结果表明: 4 种典型产物 (CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H) 浓度、产气速率的变化规律上存在差异, 可选择作为判断局部放电强度的特征组分; 特征组分浓度关系为  $c(\text{CF}_4) > c(\text{C}_2\text{F}_6) \approx c(\text{C}_3\text{F}_8) > c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ , 产气速率关系与之相类似; 特征组分浓度随放电强度增加呈“线性-饱和”的增长关系; 初步认为可以利用  $c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$  作为辅助依据,  $c(\text{CF}_4 + \text{C}_2\text{F}_6 + \text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$  作为主要依据, 结合组分浓度以及产气速率, 可以进一步判断 PD 强度和缺陷严重程度, 研究结果为找出适用于 C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> 混合气体绝缘设备的运维监测手段提供了参考。

**关键词:** C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> 混合气体; 局部放电; 悬浮电极缺陷; 分解特性; 含量比值

**中图分类号:** TM855 **DOI:** 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.11.014

## Decomposition characteristics of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> mixed gas with different partial discharge intensity under floating electrode defect

RAO Xiajin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoxing<sup>1</sup>, LI Dajian<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, PENG Boya<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China; 2. Guangxi; Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, China)

**Abstract:** C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O is a potential substitute gas for SF<sub>6</sub>. To explore the decomposition characteristics of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> mixed gas under floating electrode defect and different partial discharge intensity, a partial discharge decomposition test platform was built, and 96 h partial discharge decomposition experiments were conducted on C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> mixed gas under different applied voltages. The decomposition components were quantitatively analyzed by gas chromatography. The relationship between the decomposition components content, gas production rate, characteristic gas ratio and partial discharge intensity was studied respectively. The results show that the change rule of concentration, gas production rate of four typical products (CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H) are different, which can be used as the characteristic component to judge the partial discharge intensity. The concentration relationship of characteristic components is  $c(\text{CF}_4) > c(\text{C}_2\text{F}_6) \approx c(\text{C}_3\text{F}_8) > c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ , and the gas production rate relationship is similar. The concentration of characteristic components shows a “linear-saturated” growth with the increase of discharge intensity. It is preliminarily suggested that using  $c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$  as the auxiliary basis, and  $c(\text{CF}_4 + \text{C}_2\text{F}_6 + \text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$  as the main basis, the PD intensity and defect severity can be judged combined with component content and gas production rate, which provide reference for finding out the operation and maintenance monitoring methods applicable to C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> mixed gas insulation equipment.

**Key words:** C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> mixed gas; partial discharge; floating electrode defect; decomposition characteristic; content ratio

## 0 引言

SF<sub>6</sub> 因其具有容易实现三工位、开断小电流不易

产生截流过电压等优势, 广泛应用于 10 kV 配网开关柜类设备中<sup>[1]</sup>。但 SF<sub>6</sub> 温室效应潜在值 (global warming potential, GWP) 是 CO<sub>2</sub> 的 23 500 倍<sup>[2]</sup>, 《巴黎协定》规定在 20 世纪下半叶实现温室气体零排放, 以应对日益严重的温室效应<sup>[3]</sup>。目前, 我国电网建设在快速发展, 对中低压等级气体绝缘电气设备

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (52277144); 湖北省自然科学基金资助项目 (2021CFA025); 广西电网科技项目 (GXKJXM20210302)。

的需求逐年增加,为应对“双碳”战略及绿色工业的挑战,寻找环保型绝缘替代气体一直是近年研究的热点<sup>[4-5]</sup>。

$C_6F_{12}O$  是一种环境友好型替代气体,其 GWP 约为 1,臭氧消耗潜势 (ozone depletion potential, ODP) 为 0,是极有潜力的  $SF_6$  替代气体绝缘介质<sup>[6-8]</sup>。受液化温度的影响, $C_6F_{12}O$  需要与  $N_2$ 、 $CO_2$  或干燥空气混合使用<sup>[9]</sup>。J D MANTILLA 等<sup>[10]</sup> 研究发现  $C_6F_{12}O$  与空气或  $CO_2$  的混合气体作为缓冲气体时,其在交流和雷电冲击电压下的击穿特性与  $SF_6$  相似。本课题组前期研究发现在 0.10 MPa 的气压下, $C_6F_{12}O$  体积分数为 3% 的  $C_6F_{12}O/N_2$  混合气体在 100 次击穿实验中绝缘性能并没有下降的趋势<sup>[11]</sup>。同时经实验证明, $C_6F_{12}O$  与  $CO_2$  存在正协同效应,在满足绝缘要求的条件下, $C_6F_{12}O$  体积分数为 4% 的  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体更具有液化温度的优势<sup>[12]</sup>。综上所述, $C_6F_{12}O$  在环保和电气强度方面有替代  $SF_6$  的可能性,具备应用于中低压气体绝缘开关柜的潜力。

受制造工艺、运输条件、内部颗粒等影响,气体绝缘开关柜内部可能会产生绝缘缺陷,引起局部放电 (partial discharge, PD) 故障<sup>[13-16]</sup>。不同放电条件下绝缘气体的分解特性是评价气体绝缘性能的重要指标,分解产物的生成规律也可为设备运维提供重要参考<sup>[17-20]</sup>。目前对环保绝缘气体的分解特性研究也取得了初步的成果。杨圆等<sup>[21]</sup> 在悬浮放电下对不同微氧及气压的  $C_4F_7N/CO_2/O_2$  混合气体分解特性进行了研究。杨韬等<sup>[22]</sup> 在局部放电、局部过热和火花放电条件下对  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体分解产物进行了实验研究。赵明月等<sup>[23]</sup> 对  $C_6F_{12}O/N_2$  与  $C_6F_{12}O/空气$  混合气体的局部放电分解产物进行了分析。本课题组前期探索了工频交流电压下  $C_5F_{10}O/N_2$ 、 $C_6F_{12}O/N_2$ 、 $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体的击穿分解特性以及分解产物的生成过程<sup>[24-27]</sup>。总体而言,目前对环保绝缘气体的局部放电分解特性研究较少,尤其对于  $C_6F_{12}O$  混合气体的局部放电严重程度与分解产物种类和浓度的关系仍不明确。

本文以  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体为实验对象,针对中低压气体绝缘开关柜实际运行中可能出现的悬浮电极缺陷,搭建了局部放电分解实验平台,借助气相色谱质谱联用仪 (GC-MS),开展  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体 PD 分解特性实验,定量分析分解产物的浓度与产气速率,建立特征气体的产气规律与缺陷放电严重程度之间的关联,为找出适用于  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体绝缘设备的新运维检测手段提供参考。

## 1 实验

### 1.1 局部放电分解实验平台

局部放电分解实验平台包括感应调压器、工频实验变压器、缺陷模型、反应气室、局部放电检测回路等,如图 1 所示。

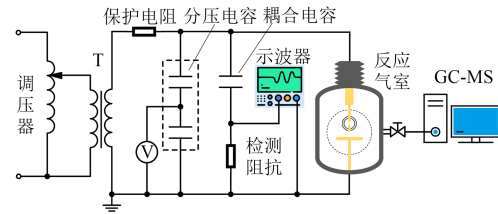


图 1 局部放电分解实验平台

Fig.1 The experimental platform of partial discharge decomposition

调压器型号为 YDTW-50 kVA/100 kV,最大输出电压为 100 kV,额定容量为 50 kVA,提供交流高电压。保护电阻阻值为 4 k $\Omega$ ,用于电路的过流保护。分压电容用于检测变压器提供的工频交流电压。检测阻抗 (阻值为 8.2 k $\Omega$ )、耦合电容、电极共同构成局部放电检测回路,将局部放电的电流信号转换成电压信号,利用示波器采集局部放电信号,示波器采样频率为 2.5 MHz/s。

悬浮电极缺陷模型如图 2 所示,实验中设置悬浮电极与板电极距离为 25 mm,板电极接地,材料设置为黄铜。



图 2 悬浮电极缺陷模型及实物图

Fig.2 Floating electrode defect model and physical drawing

### 1.2 气体分解产物检测

采用岛津公司生产的 P-2020NX 型气相色谱质谱联用仪,对  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体分解组分进行分析,配备特制毛细柱 (型号为 CP-Sil5CB),采用纯度为 99.999% 的 He 作为载气,进样量为 300  $\mu$ L,进样口温度为 200 $^{\circ}C$ ,流量控制采用恒线速度控制,分流比为 50:1,柱流量为 0.99 mL/min,离子源温度为 200 $^{\circ}C$ 。

$C_6F_{12}O/CO_2$  局放分解产物的分析基于标准气体和相应的 GC-MS 化合物库,进而得到具体的化学成分。图 3 为  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体局放分解组分 GC-MS 检测结果,从图中可以看出典型分解产物包括  $CF_4$ 、 $C_2F_6$ 、 $C_3F_8$  和  $C_3F_7H$  等。

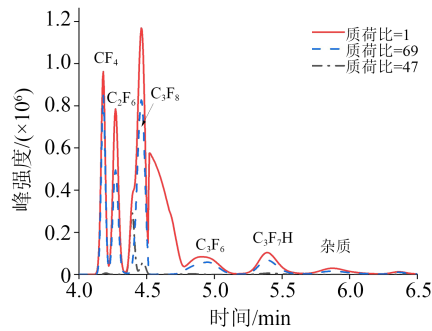
图3  $C_6F_{12}O/CO_2$ 混合气体局放分解组分GC-MS检测结果

Fig.3 GC-MS detection results of  $C_6F_{12}O/CO_2$  mixed gas decomposition component under partial discharge

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 实验条件

实验前首先用无水乙醇仔细清洗罐体内壁和人工缺陷模型,将悬浮电极缺陷模型放入实验气室,抽至真空(相对气压 $<100$  kPa),再充入高纯干燥  $CO_2$  吹扫罐体,静置 10 min 后再抽真空,反复 3 次抽真空-吹扫操作,排除微量  $H_2O$ 、 $O_2$  等对放电强度的影响。实验过程中的环境温度约为  $15^\circ C$ ,环境湿度为  $30\% \sim 35\%$ 。

实验通入压力为  $0.14$  MPa、 $C_6F_{12}O$  体积分数为  $4\%$  的  $C_6F_{12}O/CO_2$  混合气体,采用逐步升压法对缺陷模型缓慢加压,确定该缺陷模型下局放起始电压  $U_0$  为  $10.5$  kV,再选取  $1.52U_0$  ( $16$  kV)、 $1.90U_0$  ( $20$  kV)、 $2.29U_0$  ( $24$  kV) 3 个电压等级分别进行实验,以便产生不同的放电强度,利用回路无感电阻监测放电脉冲和放电量。在不同电压等级下分别进行  $96$  h 气体分解试验,每隔  $12$  h 采集 1 次放电量,同时采集放电分解气体,利用 GC-MS 对分解组分进行定量分析。

#### 1.3.2 PD 特征量的选取

实验采用脉冲电流法检测气体绝缘介质的局部放电特性。采用脉冲电流法检测 PD 电信号时,缺陷的视在放电量  $q$  与脉冲电压幅值  $U$  成正比,定义刻度因数  $K_c$  如式(1)所示。

$$K_c = q/U \quad (1)$$

通过求得刻度因数  $K_c$ ,便可以得知示波器 PD 脉冲幅值对应的放电量数值。

在图 1 所示的电路中,将可调的校正脉冲发生器与缺陷模型并联,分别施加  $5$ 、 $10$ 、 $20$ 、 $50$  pC 的校正脉冲信号,记录脉冲信号峰值的平均值,并对其数据进行拟合,绘制对应缺陷下的视在放电量  $q$  与脉冲电压幅值  $U$  的关系,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,所得拟合直线误差在允许的范围。

由脉冲检测单元获取 3 组不同电压等级下的放电信号,对放电信号进行统计计算,选用每秒平均放电量  $Q_{SEC}$  和单次放电量的最大值  $Q_{MAX}$  来表征放

电强度,结果如表 1 所示。

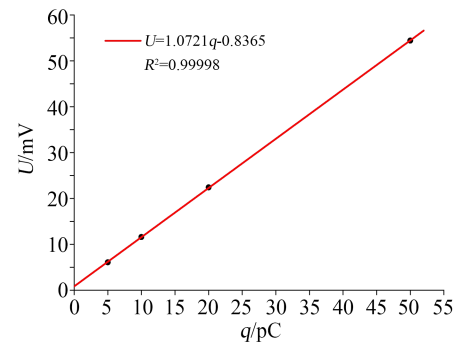


图4 放电量校准曲线

Fig.4 Calibration curve of partial discharge quantity

表1 不同电压下PD特征值

Tab.1 PD characteristic value under different voltages

施加电压/kV	$Q_{MAX}/pC$	$Q_{SEC}/pC$
16	213 875.95	146 595.76
20	320 343.50	250 536.88
24	451 036.99	325 949.36

## 2 结果与讨论

### 2.1 分解组分浓度与PD强度的关系

对 3 组实验电压下的  $C_6F_{12}O/CO_2$  放电分解样气进行检测,对 4 种典型的分解组分进行定量测试,得到不同 PD 强度下组分浓度变化曲线。

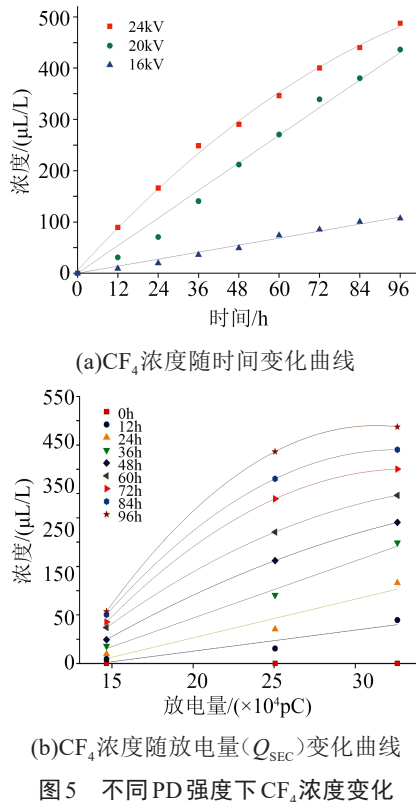
#### 2.1.1 不同 PD 强度下 $CF_4$ 浓度变化情况

不同 PD 强度下  $CF_4$  浓度变化如图 5 所示。由图 5(a)可知,随着外加电压等级的上升,即 PD 强度的增加,以及放电时间的延长, $CF_4$  浓度总体上呈增加趋势,在 PD 强度较低 ( $16$  kV、 $20$  kV) 时, $CF_4$  浓度在短时间 ( $t \leq 96$  h) 内基本以线性增长为主,出现饱和和增长趋势可能需要更长的时间 ( $t > 96$  h),只有在较高电压等级 ( $24$  kV) 下, $CF_4$  浓度在短时间 ( $t \leq 96$  h) 内出现饱和增长趋势。

$CF_4$  的反应途径如式(2)~(6)所示<sup>[28]</sup>。



从式(2)~(6)中可以看出, $CF_4$  的浓度与体系中  $C_6F_{12}O$  的分解程度有密切关系。由于  $16$  kV、 $20$  kV 实验组中整体放电强度低, $CF_3$ 、F 浓度限制了  $CF_4$  的生成,表现为  $CF_4$  浓度少。随着放电强度逐渐增加, $C_6F_{12}O$  电离分解程度加剧, $CF_4$  生成速率加快。因此, $CF_4$  可作为判断 PD 强弱的特征组分。

图5 不同PD强度下CF<sub>4</sub>浓度变化Fig.5 The change of CF<sub>4</sub> concentration under different PD intensity

由图5(b)可知,CF<sub>4</sub>浓度随Q<sub>SEC</sub>呈“线性-饱和”的增长关系:在36 h之内呈线性增长,36 h之后呈饱和和增长。因此,将整个实验以36 h为界限,近似分为“放电时间较短”及“放电时间较长”两个阶段:

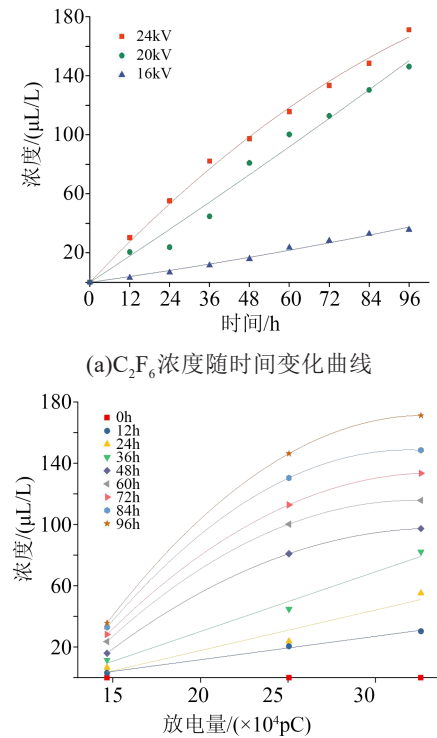
①放电时间较短阶段( $t \leq 36$  h)。CF<sub>4</sub>浓度随Q<sub>SEC</sub>呈线性增长关系。这是因为悬浮电极缺陷下PD稳定,放电频率变化较小,PD强度成为CF<sub>4</sub>产量的决定性影响因素。实验检测的Q<sub>SEC</sub>代表相应PD脉冲每秒平均放电量,与PD中的活跃电子数对应,而活跃电子的碰撞必然引起各种粒子间的相互反应,故在一定时间内一定数量的活跃电子必然产生一定浓度的CF<sub>4</sub>,可认为放电时间较短( $t \leq 36$  h)时,CF<sub>4</sub>浓度随Q<sub>SEC</sub>呈线性增长关系。

②放电时间较长阶段( $t > 36$  h)。CF<sub>4</sub>浓度随Q<sub>SEC</sub>呈饱和增长关系,相关研究表明,绝缘气体PD分解反应是双向的<sup>[28]</sup>,即C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>在PD分解的同时也存在复合还原反应,在一定的放电能量和分子密度下,分解-复合反应会达到一个平衡值。即CF<sub>4</sub>的浓度在更大的PD强度、更长的放电时间下,体现出饱和的趋势。

### 2.1.2 不同PD强度下C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度变化情况

不同PD强度下C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>与C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度变化分别如图6和图7所示。从图6(a)和图7(a)可以看出,C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>与

C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度变化规律较为类似,均表现为在电压等级较低(16 kV)时,气体浓度增长较为缓慢,在电压等级较高(20 kV、24 kV)时,气体浓度成倍增长,达到饱和所需时间较长,说明PD强度对C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>与C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>产生有明显的促进作用。

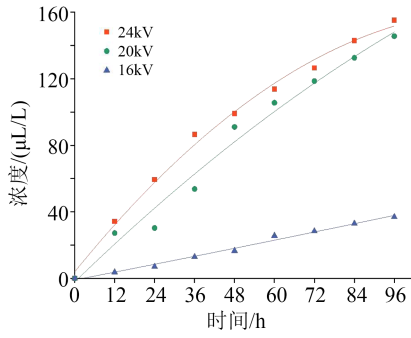
图6 不同PD强度下C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>浓度变化Fig.6 The change of C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> concentration under different PD intensity

C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>的反应途径如式(7)~(10)所示。

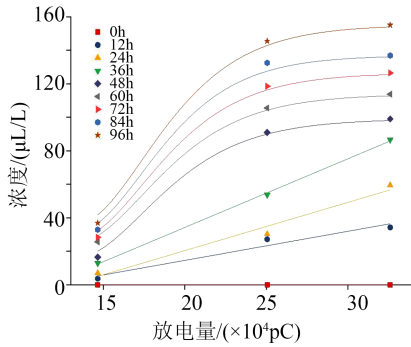


从式(7)~(10)可以看出,自由基CF<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>易与氧化性强的F原子自由反应,生成C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>等反应物,放电强度的增加促进了自由基粒子的大量生成,从而使得C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>与C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度激增。因此可以利用C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>与C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>作为判断PD强弱的特征组分,利用它们的浓度变化或增长速率来判断PD的情况。

由图6(b)和图7(b)可以看出,C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度与放电量的关系曲线与CF<sub>4</sub>类似,在放电时间较短( $t \leq 36$  h)时,C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度与Q<sub>SEC</sub>呈线性增长关系,放电时间较长( $t > 36$  h)时,C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>浓度与Q<sub>SEC</sub>呈饱和和增长关系,但是整体饱和程度弱于CF<sub>4</sub>。



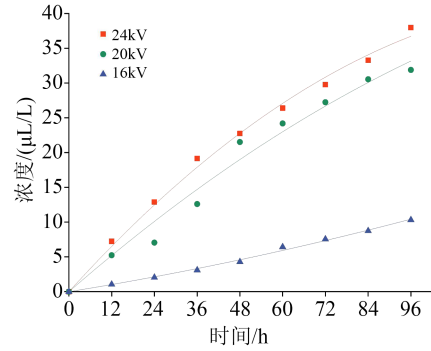
(a) C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 浓度随时间变化曲线



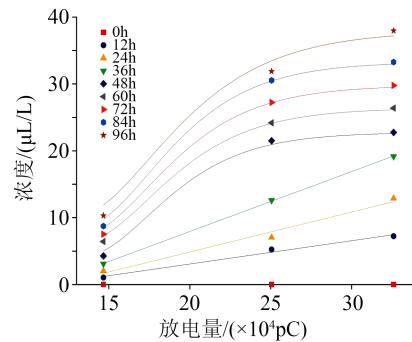
(b) C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 浓度随放电电量(Q<sub>SEC</sub>)变化曲线

图7 不同PD强度下 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 浓度变化

Fig.7 The change of C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> concentration under different PD intensity



(a) C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度随时间变化曲线



(b) C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度随放电电量(Q<sub>SEC</sub>)变化曲线

图8 不同PD强度下 C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度变化

Fig.8 The change of C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H concentration under different PD intensity

### 2.1.3 不同放电强度下 C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度变化情况

不同放电强度下 C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度变化如图 8 所示。从图 8 可以看出, C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 的浓度变化与 CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 3 种气体的浓度变化相似, 且同样以 36 h 为界限, 气体浓度随 Q<sub>SEC</sub> 呈“线性-饱和”关系, 因此, C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 同样可作为判断 PD 强弱的特征组分。

不同的是, CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 浓度均在 24 kV 出现饱和趋势, 而 C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度在 20 kV 即出现饱和趋势, 且饱和浓度远低于 CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>。

C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 主要形成途径如式(11)所示。



式(11)中 H 原子主要来源于有机绝缘材料和气室中的微量 H<sub>2</sub>O, 因此反应体系中的 H 原子非常有限, 在 PD 强度较弱时更容易出现饱和趋势, C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 整体浓度也远低于 CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>。

### 2.1.4 C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> 混合气体分解组分含量特点

总体来看, 悬浮电极缺陷下 4 种气体组分浓度关系为 c(CF<sub>4</sub>) > c(C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) ≈ c(C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>) > c(C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H)。由文献[28]可知, 从微观反应能量角度分析, CF<sub>4</sub> 的生成反应能量为 -122.289 kcal/mol, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 生成路径的能量变化较为接近, 且两者均小于 CF<sub>4</sub> 的能量变化, 因此可大致判断 CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 较容易生成。C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 浓度主要受有机绝缘材料和微量 H<sub>2</sub>O 中 H 原

子制约, 总体产量最小。

### 2.2 分解组分产气速率与 PD 强度的关系

上述分析中, 分解组分的浓度随着 PD 时间的延长稳定增加, 不同的 PD 强度下曲线斜率变化趋势各不相同, 因此可以根据分解组分产气速率与放电量的关系来判定 PD 强度。悬浮电极缺陷在各个时段下的产气速率可以用绝对产气速率来表征, 其公式如式(12)所示。

$$v_a = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t} \quad (12)$$

式(12)中: v<sub>a</sub> 为绝对产气速率; v<sub>i</sub> 为第 i 次采集的气体浓度; v<sub>i-1</sub> 为 i 前一次采集的气体浓度, Δt 为两次采集气体体积浓度的间隔时间, 即 12 h, 共 8 个数据。

为使产气速率更具有统计性, 采用气体产气速率的均方根值来表征悬浮电极缺陷在各个时段下的产气速率 v<sub>m</sub>, 其公式如式(13)所示。

$$v_m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^8 v_{aj}^2}{8}} \quad (13)$$

式(13)中, v<sub>aj</sub> 为第 j 个时间段内的绝对产气速率, 单位为 (μL/L)/12 h。

根据式(13)计算的结果, 可以绘制分解组分产气速率均方根值与放电量的关系曲线, 如图 9 所示。

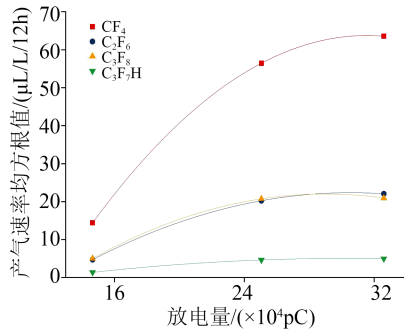


图9 4种分解组分产气速率与放电量的关联特性

Fig.9 Correlation between gas production rate and  $Q_{\text{SEC}}$  of four decomposition components

C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体的PD分解过程比较复杂,是一个强烈的吸热反应过程,因此 $Q_{\text{SEC}}$ 的增加可以促进分解组分的生成,随着放电电量增加,生成速率也有一定的增加。从图9可以看出,CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H的产气速率随 $Q_{\text{SEC}}$ 增加呈饱和趋势,CF<sub>4</sub>的产气速率最大,远高于其他3种组分,C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>的产气速率几乎相同,C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H的产气速率随 $Q_{\text{SEC}}$ 变化不明显,各组分产气速率的关系为: $v(\text{CF}_4) > v(\text{C}_2\text{F}_6) \approx v(\text{C}_3\text{F}_8) > v(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ 。产气速率的关系与上文中C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体分解组分含量的分析密切相关,反应能量变化大,产物相对更容易生成,产气速率越大。

### 2.3 特征气体比值与PD强度的关系

在局部放电研究中,经常使用特征气体之间的比值作为特征量来衡量PD的严重程度。参考该方法,对C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体PD分解的CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 4种组分的比值进行分析。尽管悬浮电极缺陷在不同电压下PD强度不同,4种分解组分浓度的变化存在差异,但4种组分浓度比值仍具有统计学意义。本文对 $c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ 、 $c(\text{C}_2\text{F}_6)/c(\text{C}_3\text{F}_8)$ 、 $c(\text{CF}_4+\text{C}_2\text{F}_6+\text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$  3组分浓度比值进行计算分析,结果如表2所示。

由表2可知, $c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ 的值整体稳定在9~13,其中16、20、24 kV电压等级下比值分别位于9~11、11~12、12~13,随不同PD强度体现出差异性,但其整体数值差异化较小,可作为PD强度判断的辅助依据。

$c(\text{C}_2\text{F}_6)/c(\text{C}_3\text{F}_8)$ 的变化范围较为稳定,几乎都分布在0.8~1.1区间内,比值波动小,表明C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>产气速率相近且稳定,受PD强度影响较小,不适合作为判断PD强度的依据。

由于CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>和C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H的生成特性与产气速率存在差异,前3种分解产物主要生成路径来源

表2 悬浮电极绝缘缺陷下分解组分浓度比值

Tab.2 Concentration ratio of decomposed components under floating electrode insulation defect

浓度比	时间/h	施加电压/kV			
		16	20	24	
$c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$	12	8.67	5.89	12.37	
	24	9.59	10.04	12.88	
	36	11.58	11.17	12.99	
	48	11.45	9.85	12.77	
	60	11.50	11.19	13.12	
	72	11.32	12.45	13.44	
	84	11.50	12.45	13.23	
	96	10.39	13.68	12.83	
	$c(\text{C}_2\text{F}_6)/c(\text{C}_3\text{F}_8)$	12	0.83	0.76	0.88
		24	0.95	0.79	0.93
36		0.89	0.83	0.95	
48		0.96	0.89	0.98	
60		0.92	0.95	1.02	
72		0.99	0.95	1.05	
84		1.00	0.98	1.04	
96		0.97	1.00	1.10	
$c(\text{CF}_4+\text{C}_2\text{F}_6+\text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$		12	229.73	225.03	453.65
		24	264.55	313.47	474.28
	36	378.58	360.23	475.04	
	48	361.94	318.16	457.78	
	60	366.70	387.75	475.98	
	72	353.82	438.66	491.34	
	84	361.69	443.50	483.48	
	96	303.59	521.39	459.13	

于C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体的PD分解反应,而C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H的生成主要受反应体系中有有机绝缘材料和微量H<sub>2</sub>O的影响。因此对CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>与C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H的比值进行分析,为了增加其差异性,采用浓度的平方进行计算。在16、20、24 kV 3组实验中,随着PD强度的增大, $c(\text{CF}_4+\text{C}_2\text{F}_6+\text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$ 的变化区间可近似划分为260~360、360~440、450~490,差异性较为明显,可作判断PD强度的主要依据。

综上所述,可以初步认为悬浮电极缺陷下 $c(\text{CF}_4+\text{C}_2\text{F}_6+\text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$ 可作为判断PD强度和缺陷严重程度的主要依据,将 $c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ 作为辅助依据,根据特征量大小的变化判断缺陷局部放电是否有加剧的趋势。

### 3 结论

本文通过局部放电分解实验,探究了悬浮电极缺陷下C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体的分解组分特性,主要得到如下结论:

(1) 悬浮电极缺陷下的局部放电会使C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体发生分解, 典型产物为CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H等, 且这4种产物浓度、产气速率的变化规律上存在差异, 可选择作为判断PD强度的特征组分。

(2) 当PD强度较低时, CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H 4种特征组分浓度呈线性稳定增长, 随着PD强度增加, 4种组分浓度成倍增长, 且在放电后期呈现饱和趋势; 4种特征组分浓度与Q<sub>SEC</sub>的关联特性类似, 均表现为以36 h为界, 随着放电时间延长, 特征组分浓度随Q<sub>SEC</sub>增加呈“线性-饱和”的增长关系。

(3) 4种特征组分浓度关系体现为 $c(\text{CF}_4) > c(\text{C}_2\text{F}_6) \approx c(\text{C}_3\text{F}_8) > c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ , 产气速率关系为 $v(\text{CF}_4) > v(\text{C}_2\text{F}_6) \approx v(\text{C}_3\text{F}_8) > v(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ , 与C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>混合气体放电分解产物形成的理论分析结果相印证。

(4) 讨论了悬浮电极缺陷下PD强度对分解组分浓度比值变化的影响, 可利用 $c(\text{CF}_4)/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})$ 作为辅助依据,  $c(\text{CF}_4 + \text{C}_2\text{F}_6 + \text{C}_3\text{F}_8)^2/c(\text{C}_3\text{F}_7\text{H})^2$ 作为主要依据, 同时结合组分含量变化以及产气速率进一步判断PD强度和缺陷严重程度, 为气体绝缘设备的状态评估提供参考。

## 参考文献:

- [1] 李子全, 吴司颖, 董曼玲, 等. SF<sub>6</sub>气体绝缘设备局部放电分解特征组分三角形诊断法[J]. 绝缘材料, 2022, 55(11): 86-92.
- [2] 邓军波, 董俊豪, 陈俊鸿, 等. SF<sub>6</sub>替代气体界面绝缘特性的研究进展[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 661-673.
- [3] 高克利, 颜湘莲, 王浩, 等. 环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3105-3113.
- [4] 沈腾达, 周文俊, 王宝山, 等. SF<sub>6</sub>替代气体的分子构效关系研究进展[J]. 绝缘材料, 2022, 55(6): 1-5.
- [5] 刘伟, 宋玉梅, 张晓星, 等. 环保绝缘气体C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O的急性吸入安全性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(12): 92-97.
- [6] LI D J, RAO X J, ZHANG X X, et al. Experimental study on the effect of O<sub>2</sub> on the decomposition characteristics of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> gas mixture[J]. AIP Advances, 2021, 11(9): 095212.
- [7] LI Y, ZHANG X X, TIAN S S, et al. Insight into the compatibility between C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O and metal materials: Experiment and theory[J]. IEEE Access, 2018, 6: 58154-58160.
- [8] WANG Y, TIAN S S, ZHANG X X, et al. Theoretical calculation of total electron-impact ionization cross section of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O[J]. AIP Advances, 2020, 10(3): 035217.
- [9] TIAN S S, ZHANG X X, XIAO S, et al. Application of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> mixture in 10kV medium-voltage switchgear[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(9): 1225-1230.
- [10] MANTILLA J D, GARIBOLDI N, GROB S, et al. Investigation of the insulation performance of a new gas mixture with extremely low GWP[C]//2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2014.
- [11] ZHANG X X, TIAN S S, XIAO S, et al. Insulation strength and decomposition characteristics of a C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O and N<sub>2</sub> gas mixture[J]. Energies, 2017, 10(8): 1170.
- [12] TIAN S S, ZHANG X X, XIAO S, et al. Experimental research on insulation properties of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/N<sub>2</sub> and C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub> gas mixtures[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(3): 417-422.
- [13] 王世玮. GIS典型缺陷的局部放电特性研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2022.
- [14] 苗玉龙, 谢刚文, 邱妮, 等. GIS设备局部火花放电故障SF<sub>6</sub>分解特性[J]. 绝缘材料, 2020, 53(2): 76-83.
- [15] 王璁, 周福文, 屠幼萍, 等. 直流电压下CF<sub>3</sub>I/N<sub>2</sub>混合气体的放电副产物[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1268-1275.
- [16] 邹阳, 周求宽, 刘明军, 等. GIS绝缘垫片分层间隙中局部放电检测及形成机理研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(8): 82-88.
- [17] 唐炬, 陈长杰, 刘帆, 等. 局部放电下SF<sub>6</sub>分解组分检测与绝缘缺陷编码识别[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 110-116.
- [18] 齐波, 李成裕, 骆立实, 等. GIS中局部放电与气体分解产物关系的试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 957-963.
- [19] 唐炬, 任晓龙, 张晓星, 等. 气隙缺陷下不同局部放电强度的SF<sub>6</sub>分解特性[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 40-45.
- [20] 林福海, 颜湘莲, 粮业员, 等. 基于SF<sub>6</sub>酸性分解物与特高频结合的GIS绝缘故障诊断[J]. 绝缘材料, 2020, 53(9): 101-106.
- [21] 杨圆, 高克利, 毕建刚, 等. 悬浮放电下微氧及气压对C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>混合气体分解特性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3566-3580.
- [22] 杨韬, 张博雅, 李兴文, 等. 不同故障工况下C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体分解产物的实验研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4216-4228.
- [23] 赵明月, 韩冬, 韩先才, 等. C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/N<sub>2</sub>与C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/空气混合气体的电晕放电分解产物分析[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(11): 1-8.
- [24] 田双双, 张晓星, 肖淞, 等. 工频交流电压下C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O与N<sub>2</sub>混合气体的击穿特性和分解特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 3125-3132, 3165.
- [25] ZHANG X X, LI Y, XIAO S, et al. Decomposition mechanism of C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O: An environmentally friendly insulation medium[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(17): 10127-10136.
- [26] LI Y, ZHANG X X, XIAO S, et al. Theoretical evaluation of the interaction between C5-PFK molecule and Cu(111)[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2018, 208: 48-54.
- [27] RAO X J, LI D J, XIA X F, et al. Study on discharge decomposition characteristics of environmentally friendly gas C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/CO<sub>2</sub>[J]. Vacuum, 2021, 186: 110004.
- [28] 田双双. 环保型绝缘气体C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O绝缘性能和分解特性的研究及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.

收稿日期: 2023-01-18; 修回日期: 2023-02-24。

作者简介: 饶夏锦(1991-), 女(汉族), 广西玉林人, 工程师, 博士, 主要从事绿色电工装备的研究; 通信作者: 张晓星(1972-), 男(汉族), 湖北潜江人, 教授, 博士, 主要从事电气设备的在线监测与故障、绝缘状态评估、环保绝缘材料等工作。