

电极材料对 C_4F_7N/CO_2 混合气体电晕放电分解特性的影响

王浩¹, 颜湘莲¹, 韩冬², 姚尧³, 马德英⁴, 刘晓波⁵

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;

3. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430015;

4. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;

5. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430070)

摘要: 全氟异丁腈(C_4F_7N)的环保和绝缘性能优良,是替代 SF_6 气体的主流环保气体。本文首先利用针-板电极对 C_4F_7N/CO_2 混合气体开展了一系列工频交流电晕放电实验,然后基于气相色谱-质谱仪分析了不同电极材料(不锈钢、铝和黄铜)和施加电压对 C_4F_7N/CO_2 混合气体分解特性的影响。结果表明: C_4F_7N/CO_2 混合气体特征分解气体的含量随施加电压的升高而增大,且受金属材料化学活性的影响明显,其中铝电极下的分解产物总量最高。特征分解气体含量比值 $c[C_2F_6]/c[CF_4]$ 和 $v[C_2F_4]/v[C_3F_6]$ 对电极材料和电晕放电程度具有较好的识别度。

关键词: C_4F_7N/CO_2 混合气体;电晕放电;分解特性;电极材料;特征气体

Effects of electrode materials on decomposition characteristics of C_4F_7N/CO_2 gas mixture under corona discharge

WANG Hao¹, YAN Xianglian¹, HAN Dong², YAO Rao³, MA Deying⁴, LIU Xiaobo⁵

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430015, China;

4. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China;

5. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nanrui Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: Perfluoroisobutyronitrile (C_4F_7N) has excellent eco-friendly and insulation properties, and is the mainstream environmentally friendly gas to replace SF_6 gas. In this paper, a series of power frequency AC corona discharge experiments were conducted on C_4F_7N/CO_2 gas mixture by needle-plate electrode, and then the influences of different electrode materials (stainless steel, aluminum, and brass) and applied voltages on the decomposition characteristics of C_4F_7N/CO_2 gas mixture were analyzed based on gas chromatography/mass spectrometry. The results show that the contents of the characteristic decomposition gases of C_4F_7N/CO_2 gas mixture increase with the increase of applied voltages, and are obviously affected by the chemical activity of metal materials, among them, the total amount of decomposition products under aluminum electrode is the highest. The content ratios of characteristic decomposition gases, that is $c[C_2F_6]/c[CF_4]$ and $v[C_2F_4]/v[C_3F_6]$, have good recognition degree for electrode materials and corona discharge degree.

Key words: C_4F_7N/CO_2 gas mixture; corona discharge; decomposition characteristics; electrode materials; characteristic gas

0 引言

六氟化硫(SF_6)气体是气体绝缘电气设备中主要的绝缘和灭弧介质,其全球增温潜势(global warming potential, GWP)是二氧化碳(CO_2)的 24 300 倍,大气寿命约为 3 200 年。因 SF_6 的温室效应高、

大气寿命长,被《京都议定书》列为严格限制使用的气体,欧美发达国家也纷纷推出 SF_6 禁用时间表,因此 SF_6 的环保替代势在必行^[1-2]。

全氟异丁腈($(CF_3)_2CFCN$,分子简式为 C_4F_7N)的 GWP 值为 CO_2 的 2 750 倍,绝缘强度约为 SF_6 的 2.2 倍,在环保和绝缘性能方面表现优异,是 SF_6 替代气体的研究热点^[3-10]。国内外学者就 C_4F_7N 混合气体的绝缘性能、灭弧性能、分解特性与相容性等开

展了大量研究^[3-6],结果表明对于C₄F₇N体积分数为4%~10%的C₄F₇N/CO₂混合气体工频电气强度为同气压下SF₆的75%及以上,而C₄F₇N体积分数为20%的C₄F₇N/CO₂混合气体工频电气强度与SF₆相当。国内外相关设备厂家也研制出C₄F₇N混合气体设备样机,如气体绝缘输电管道(GIL)、气体绝缘组合电器(GIS)和断路器等^[7-8]。在气体绝缘电气设备中,气体绝缘介质被许多固体材料包围,如果气体绝缘介质与这些材料出现化学不兼容,则会危害电气设备的长期稳定运行。考察某一替代气体能否应用于实际的电气设备中,除电气性能外,其分解特性与相容性也是必须考虑的因素。美国GE公司、武汉大学、西安交通大学、西安理工大学、武汉理工大学、华北电力大学、中国电力科学研究院、中国科学院电工研究所等单位对C₄F₇N的分解特性与相容性进行了探索^[9-24],主要聚焦于热力学性质、分解机理、典型缺陷识别、气体检测,以及C₄F₇N混合气体与电气设备常用橡胶、固体绝缘、金属等材料的相容特性。结果表明,C₄F₇N及其混合气体的分解特性和主要分解产物含量与缺陷类型、故障严重程度、缓冲气体及混合比例等密切相关,除部分密封材料和吸附剂外,其与设备常用材料的相容性良好。而基于C₄F₇N及其混合气体分解特性的故障判据与检测技术可为C₄F₇N混合气体电气设备的运维提供有力支撑。

设备运行中典型的局部放电是电晕放电,主要由导体上的尖端或突起所致,长时间持续电晕放电可造成电气设备的绝缘劣化或故障。电晕放电下,绝缘气体分子因碰撞电离将发生裂解,并产生稳定的分解产物。为此,本研究采用针-板电极模型模拟工频交流电晕放电,基于气相色谱-质谱(gas chromatography/mass spectrometry, GC/MS)仪,分析不同电极材料和施加电压等因素下C₄F₇N/CO₂混合气体的特征分解气体含量及含量比值的变化趋势,以期对C₄F₇N混合气体绝缘电气设备的缺陷识别与诊断提供理论支撑和参考。

1 电晕放电下的气体分解特性实验

1.1 电晕放电实验平台

图1为电晕放电实验平台示意图。采用150 kV试验变压器提供工频交流高压电源(局部放电量<1 pC);试验变压器连接500 pF的耦合电容和10 kΩ的限流电阻。数字局放仪用来测量电晕放电的局

部放电量,精度为0.1 pC,采样率为5 MHz,非线性误差为5%。

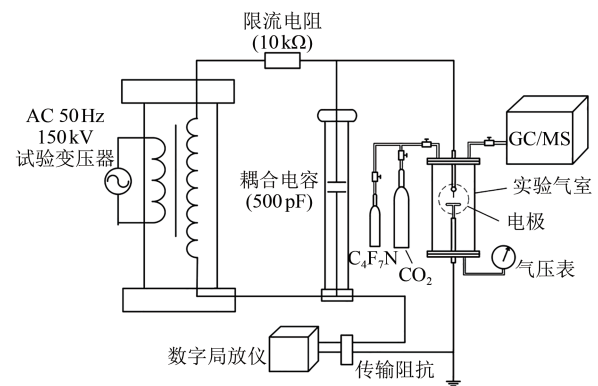


图1 电晕放电实验平台示意图

Fig.1 Diagram of corona discharge experimental platform

针-板电极模型置于实验气室中,用来模拟交流电晕放电,其电极形状及尺寸如图2所示。3种针电极材料分别为304不锈钢、铝或黄铜,针尖曲率半径约为0.3 mm;板电极直径为30 mm,厚度为5 mm;针、板电极距离为10 mm。实验气体体积约为1.7 L。

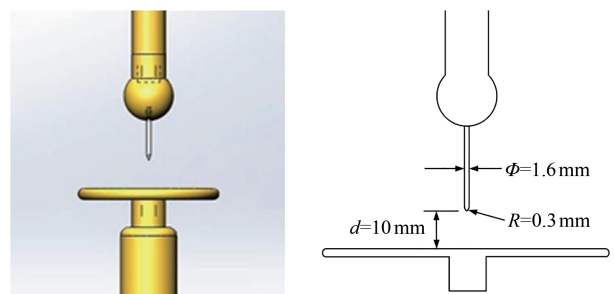


图2 针-板电极示意图

Fig.2 Needle-plane electrode diagram

实验前,为尽可能减少水分、空气、固体颗粒等杂质的影响,重复抽真空-洗气步骤3~4次对实验气室进行充分清洗,其中抽真空时间为30~40 min。根据道尔顿分压定律,按分压比先充入C₄F₇N气体,再充入缓冲气体CO₂。将实验气室放置于室温下24 h,使各组分气体充分混合。本文实验用的C₄F₇N气体纯度为99.9%以上,CO₂气体纯度为99.995%。

1.2 检测方法

采用QP 2010 SE型GC-MS仪对C₄F₇N/CO₂混合气体的分解产物进行定性和定量检测,其中,定性分析采用全扫描(Scan)方式,与美国国家标准与技术研究院(NIST)质谱数据库的标准气体对照后确定气体组分;定量分析采用离子扫描(single ion

monitoring, SIM)方式,分析分解产物特性碎片离子的色谱峰。

C₄F₇N混合气体的分解产物大多为全氟烷烃,含量为10⁻⁶级。通过对多种色谱柱进行全面分析比较,最终选用Gas Pro毛细管柱作为分解产物的分析柱。色谱柱的尺寸为30 m×0.32 mm。表1为C₄F₇N/CO₂混合气体分解产物的气相色谱-质谱检测参数。

表1 气相色谱-质谱检测参数
Table 1 GC-MS detection parameters

项目	设置条件
分析程序	35℃保持18 min,以10℃/min升高至150℃保持5 min
载气	氦气,纯度>99.999%
载气流速/(mL/min)	1.55
进样方式	六通阀分流进样,六通阀体积为250 μL
分离比	50:1
注入室温度/℃	120
电离方式	70 eV 电子轰击电离源(EI)
离子源温度/℃	200
扫描质量范围/amu	12~360
溶剂延迟时间/min	0.65

2 实验结果与讨论

2.1 分解气体组分

在电晕放电条件下,C₄F₇N初步裂解为CF₃·、F·、CN·、CF₃CFCN·、(CF₃)₂CF·和(CF₃)₂CCN·等自由基,这些自由基可相互结合形成稳定的化合物;也可在电场作用下进一步裂解生成小分子自由基或中间体,再相互结合形成稳定的化合物。

采用不锈钢电极时,C₄F₇N/CO₂混合气体电晕放电后的色谱总离子流如图3所示。实验条件如下:施加电压为35 kV,放电持续时间为5 h,气压为200 kPa,C₄F₇N体积分数为15%。采用铝或黄铜电极时C₄F₇N/CO₂混合气体的电晕放电分解产物与采用不锈钢电极时的基本相同。由图3可知,电晕放电下,C₄F₇N/CO₂混合气体的分解产物主要包括CO、CF₄、C₂F₄、C₂F₆、C₃F₆、C₃F₈、i-C₄F₁₀、CF₃CN、C₂F₅CN和CNCN等。

2.2 分解气体含量及影响因素

2.2.1 电极材料的影响

不锈钢、铝和黄铜电极材料对C₄F₇N/CO₂分解产物含量的影响如图4所示,其中SS代表不锈钢电极,Al代表铝电极,Cu代表黄铜电极。实验时,

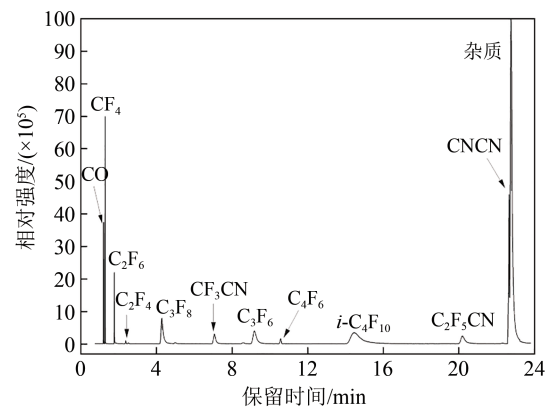
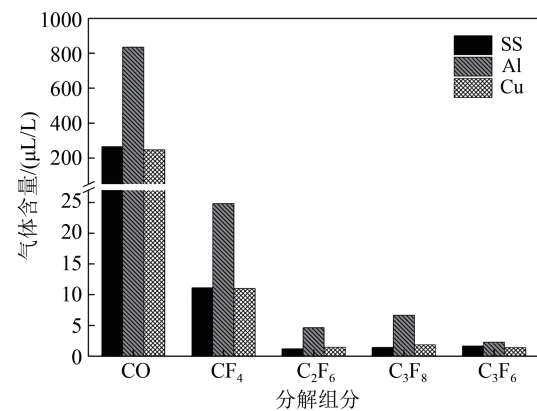
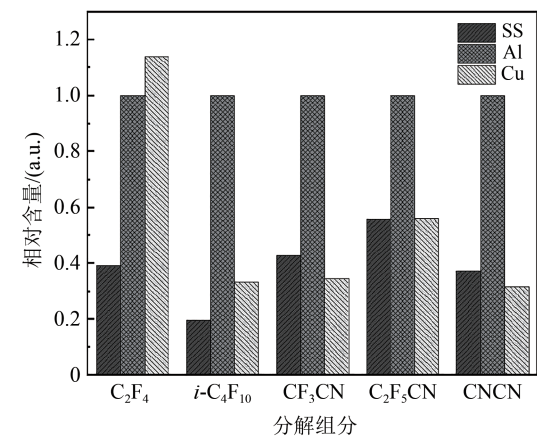


图3 不锈钢电极下C₄F₇N/CO₂混合气体电晕放电后的色谱总离子流

Fig. 3 Total ion chromatogram of C₄F₇N/CO₂ gas mixture with stainless electrode after corona discharge



(a) 标准气体分解产物



(b) 非标准气体分解产物

图4 电极材料对C₄F₇N/CO₂分解产物含量的影响

Fig.4 Influence of electrode materials on the content of C₄F₇N/CO₂ decomposition by-products

C₄F₇N的体积分数为5%,气压为200 kPa,施加电压为30 kV,放电持续时间为5 h。从图4可以看出,在同一施加电压下,CO和CF₄是C₄F₇N/CO₂电晕放电的主要分解产物。

对于CO、CF₄、C₂F₆、C₃F₆和C₃F₈等标准气体分解产物,采用外标定量法检测其含量,而对于C₂F₄、*i*-C₄F₁₀、CF₃CN、C₂F₅CN、CNCN等非标准气体分解产物,通过它们特征离子的色谱峰面积进行含量比较(以铝电极下产生的分解产物含量为基准)。每种电极材料各重复3次实验,测量结果取平均值。

由图4可知,铝电极下绝大部分标准气体分解产物含量是不锈钢电极下的两倍以上,只有C₃F₆气体的含量略高于不锈钢电极。采用不锈钢电极时,4种可定量氟碳气体的含量由高到低依次为CF₄、C₃F₆、C₃F₈、C₂F₆。采用纯铝电极时,4种可定量氟碳气体的含量由高到低依次为CF₄、C₃F₈、C₂F₆、C₃F₆。对于非标准气体分解产物,铝电极下产生的分解产物含量相同且较高,除铜电极下产生的C₂F₄含量最高外,不锈钢电极和铜电极下产生的分解产物含量约为铝电极下产生的一半及以下。

根据SF₆分解特性的相关研究,金属电极材料的化学活性会影响气体的放电分解特性^[10,15]。化学活性高的金属材料会促进C₄F₇N和CO₂分子的分解,导致生成的CF₃·、CN·、CF₃CFCN·、F·等自由基增多,进而加快分解产物的生成速率,使对应的分解产物含量增加。实验所采用的不锈钢电极为304不锈钢,在加工过程中会通过钝化处理以增强其耐腐蚀性,相应地其化学活性显著降低,因此不锈钢电极下电晕放电产生的分解产物总量最低。与不锈钢相比,铝的化学活性最高,因此铝电极下电晕放电产生的分解产物总量最高。黄铜活性介于不锈钢和铝之间,因此黄铜电极下电晕放电产生的分解产物总量居中。

2.2.2 施加电压的影响

图5为不同施加电压下,采用铝电极和不锈钢电极时C₄F₇N/CO₂分解产物含量的变化趋势。实验时,C₄F₇N体积分数为15%,施加电压分别为30、35、40 kV,放电量为200~300 pC,放电持续时间为5 h,气压为200 kPa。每个施加电压下各重复3次实验,测量结果取平均值。从图5可以看出,随着施加电压增大,C₄F₇N/CO₂分解产物的含量持续增加,分解产物含量与施加电压呈正相关。这主要是因为当施加电压增大时,针尖附近辉光放电区的范围以及电场强度均会相应增大,使得C₄F₇N、CO₂分子与电子发生碰撞电离的概率增大。因此,CF₃·、CN·、CF₃CFCN·、F·等自由基随着施加电压的增大而增

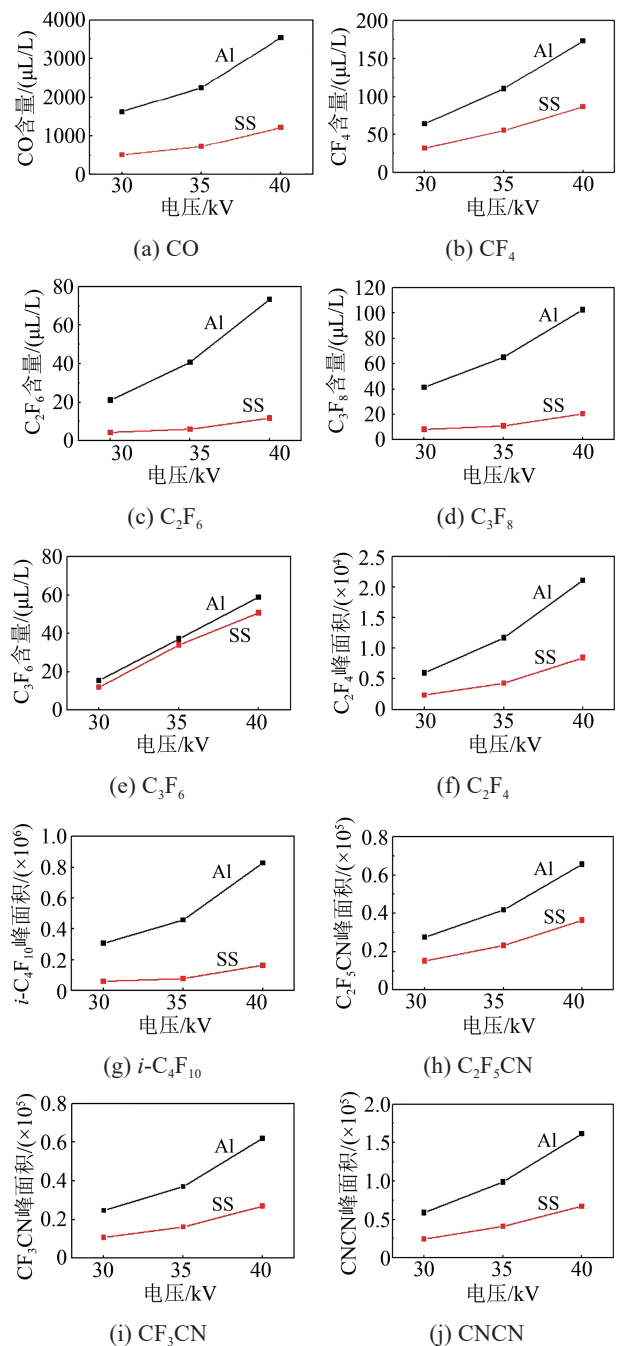


图5 施加电压和电极材料对C₄F₇N/CO₂分解产物含量的影响

Fig.5 Influence of applied voltages and electrode materials on the content of C₄F₇N/CO₂ decomposition by-products

多,相应地经自由基耦合反应生成的稳定产物含量升高。

2.3 分解产物含量比值的变化趋势

图6为C₄F₇N解离路径及主要分解物的生成路径^[14,16],其中TS表示过渡态。从图6可以看出,CF₄和C₂F₆分别主要来自于CF₃·与F·、CF₃·的自由基耦合反应,即CF₄和C₂F₆的生成存在“竞争”关系。电

晕放电条件下, $\text{CF}_3\cdot$ 中的 C-F 共价键断裂所需能量来源于电子碰撞反应中电子加速获得的动能, 因此这种“竞争关系”在不同的放电程度下存在差异。本研究将 C_2F_6 与 CF_4 含量比值记为 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 。 C_2F_4 可由 $\text{CF}_3\text{CF}\cdot$ 异构化生成, C_3F_6 可由 $\text{CF}_3\text{CF}\cdot$ 与 $\text{CF}_2\cdot$ 结合生成, C_2F_4 与 C_3F_6 之间可经异构化反应互相生成, 因此二者也存在“竞争”关系。由于 C_2F_4 无法定量, 本研究采用特征碎片离子的峰面积获得 C_2F_4 和 C_3F_6 的峰面积比值, 相应的其含量比值记为 $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$, C_2F_4 和 C_3F_6 特征碎片离子的质荷比 (m/z) 分别为 81 和 131。

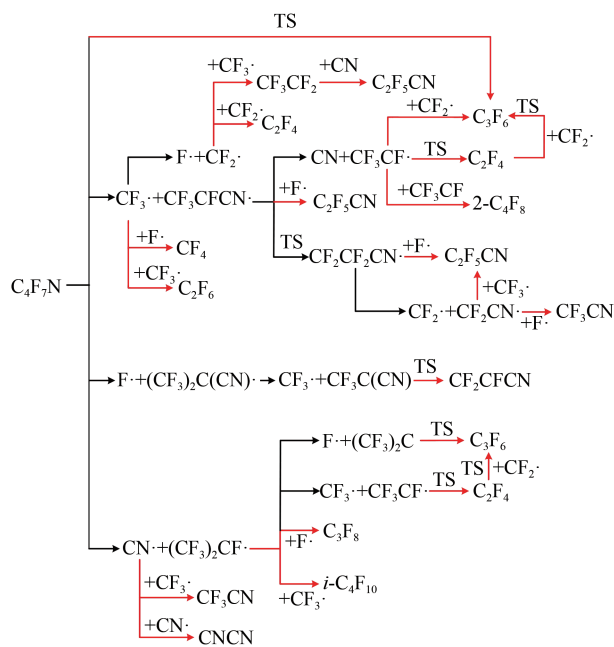


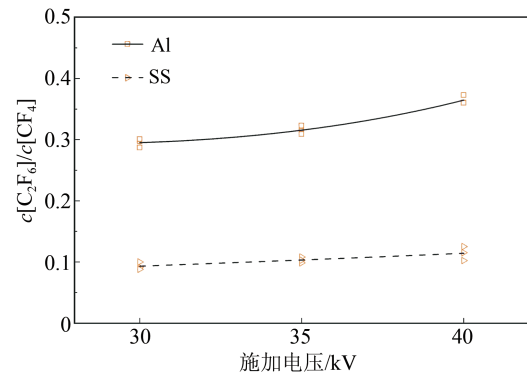
图6 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 解离及主要分解物生成路径

Fig.6 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ decomposition and primary by-product generation paths

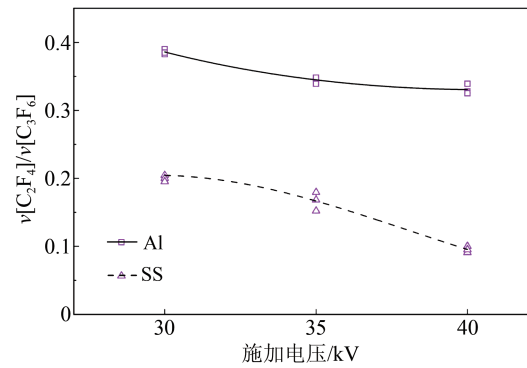
图7为特征分解气体含量比值 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 和 $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 随施加电压的变化趋势。其中, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 体积分数为 10%, 放电持续时间为 5 h。

归因于金属材料的化学活性, 由图4可知, 铝电极下 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 电晕放电产生的 C_2F_4 、 CF_4 和 C_2F_6 气体含量均高于不锈钢电极下的气体含量, 而两种电极下产生的 C_3F_6 含量很接近。因此, 铝电极下的 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 和 $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 含量比值均高于不锈钢电极, 与图7描述的一致。

当施加电压升高时, 电子能够获得更高的动能, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 分子产生的 $\text{CF}_3\cdot$ 含量增加, 经自由基耦合反应生成的 C_2F_6 含量逐渐增大, 进而 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 也相应增大。此外, 施加电压越高, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 分子获得能量跨越能垒而异构化生成 C_3F_6 的概率越高, C_3F_6



(a) $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$



(b) $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$

图7 不同电极材料下分解产物含量比值随施加电压的变化

Fig.7 Change of the content ratio of decomposition by-product with applied voltage under different electrode materials

的含量增大, 使得 $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 减小。因此, 在特定电极材料下, 随放电程度增加, $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 呈现下降趋势。

将 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 和 $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 作为“特征对”, 记为 $\{c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4], v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]\}$, 对不锈钢电极和铝电极下的电晕放电实验数据进行分析, 其二维空间的特征分布如图8所示。实验时气压为 200 kPa 和 300 kPa, 施加电压为 25、30、35、40 kV, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 体积分数为 5%、10%、15% 和 20%。

从图8可以看出, 不锈钢电极下 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 分布在 [0.05, 0.15] 内, $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 分布主要在 [0.08, 0.3] 内; 铝电极下 $c[\text{C}_2\text{F}_6]/c[\text{CF}_4]$ 分布在 [0.18, 0.4] 内, $v[\text{C}_2\text{F}_4]/v[\text{C}_3\text{F}_6]$ 分布在 [0.22, 0.53] 内。采用不同的电极材料时, 其分解产物含量比值在二维空间中有较明显的区域分布, 该“特征对”对电极材料具有一定的识别度。

3 结论

本文通过针-板电极的电晕放电实验, 分析了不同电极材料、施加电压对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体分

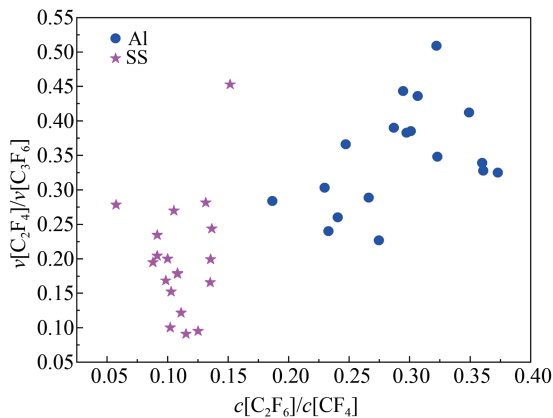


图8 特征对 $\{c[C_2F_6]/c[CF_4], v[C_2F_4]/v[C_3F_6]\}$ 与电极材料的关系

Fig.8 Relationship between the characteristic pair $\{c[C_2F_6]/c[CF_4], v[C_2F_4]/v[C_3F_6]\}$ and electrode materials

解特性的影响,主要得到以下结论:

(1) 电晕放电条件下, C_4F_7N/CO_2 混合气体的分解产物主要为 CO、氟碳类气体及微量的腈类气体,分解产物含量随施加电压的升高而增大。

(2) 分解产物含量受金属材料化学活性的影响较显著。化学活性高的金属材料可在一定程度上促进 C_4F_7N 和 CO_2 分子的解离以及主要分解物的生成。铝电极下的分解物总量最高,铜电极下次之,不锈钢电极下最低。

(3) 分解产物的含量比值 $c[C_2F_6]/c[CF_4]$ 和 $v[C_2F_4]/v[C_3F_6]$ 对电极材料和电晕放电程度具有较好的识别度。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change 2021: the physical science basis. contribution of Working Group I to the IPCC sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK:Cambridge University Press,2021.
- [2] 肖登明. 气体绝缘与GIS[M]. 上海:上海交通大学出版社,2016. XIAO Dengming. Gas insulation and GIS[M]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University Press,2016.
- [3] 李祎,张晓星,傅明利,等. 环保绝缘气体 C_4F_7N 研究及应用进展 I:绝缘及电、热分解特性[J]. 电工技术学报,2021,36(17):3535-3552. LI Yi, ZHANG Xiaoxing, FU Mingli, et al. Research and application progress of eco-friendly gas insulating medium C_4F_7N , part I: insulation and electrical, thermal decomposition properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(17):3535-3552.
- [4] 颜湘莲,郑宇,黄河,等. C_4F_7N/CO_2 混合气体对局部不均匀电场的敏感特性[J]. 电工技术学报,2020,35(1):43-51. YAN Xianglian, ZHENG Yu, HUANG He, et al. Sensitivity of C_4F_7N/CO_2 gas mixture to partial inhomogeneous electric field [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 43-51.
- [5] 刘一树,丁卫东,李志闯,等. C_4F_7N/CO_2 混合气体中绝缘子工频沿面闪络特性[J]. 高电压技术,2019,45(12):3854-3859. LIU Yishu, DING Weidong, LI Zhichuang, et al. Surface flash-over discharge under power frequency voltage in C_4F_7N/CO_2 [J]. High Voltage Engineering,2019,45(12):3854-3859.
- [6] 王凌志,周文俊,张天然,等. C_4F_7N/CO_2 混合气体在均匀和极不均匀电场下的工频绝缘性能[J]. 高电压技术,2019,45(4):1101-1107. WANG Lingzhi, ZHOU Wenjun, ZHANG Tianran, et al. Power frequency insulation experiments of C_4F_7N/CO_2 mixture under uniform and extremely non-uniform electric field[J]. High Voltage Engineering,2019,45(4):1101-1107.
- [7] KIEFFEL Y, BIQUEZ F. SF₆ alternative development for high voltage switchgears[C]//2015 IEEE Electrical Insulation Conference. Seattle, USA:IEEE,2015:379-383.
- [8] 唐晓杰,张荣伟,李龙,等. 新型环保绝缘气体 C_4F_7N/CO_2 的制备及检测研究[J]. 绝缘材料,2024,57(6):102-107. TANG Xiaojie, ZHANG Rongwei, LI Long, et al. Research on preparation and detection of new environmentally friendly insulating gas C_4F_7N/CO_2 [J]. Insulating Materials,2024,57(6):102-107.
- [9] TU Youping, CHEN Geng, LI Chengyong, 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.
- [10] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等. SF₆ 替代气体分解特性的研究综述[J]. 电工技术学报,2020,35(23):54-70. ZHOU Zhenrui, HAN Dong, ZHAO Mingyue, et al. Review on decomposition characteristics of SF₆ alternative gases[J]. Transaction of China Electrotechnical Society,2020,35(23):54-70.
- [11] FU Yuwei, YANG Aijun, WANG Xiaohua, et al. Theoretical study of the decomposition mechanism of C_4F_7N [J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2019,52(24):245203.
- [12] LI Yi, ZHANG Xiaoxing, ZHANG Ji, et al. Study on the thermal decomposition characteristics of C_4F_7N/CO_2 mixture as eco-friendly gas-insulating medium[J]. High Voltage,2020,5(1): 46-52.
- [13] CHEN Li, ZHANG Boya, XIONG Jiayu, et al. Decomposition mechanism and kinetics of iso-C4 perfluoronitrile (C_4F_7N) plasmas[J]. Journal of Applied Physics,2019,126(16):163303.
- [14] KIEFFEL Y. Characteristics of g3—an alternative to SF₆[C]// 2016 IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier, France:IEEE,2016:880-884.
- [15] 赵明月,韩冬,荣文奇,等. 电晕放电下二元全氟异丁腈 ($(CF_3)_2CFCN$ 混合气体的分解特性分析[J]. 高电压技术,2019, 45(4):1078-1085. ZHAO Mingyue, HAN Dong, RONG Wenqi, et al. Decomposition characteristics of binary mixtures of $(CF_3)_2CFCN$ buffer gases under corona discharge[J]. High Voltage Engineering, 2019,45(4):1078-1085.
- [16] WANG Cong, AI Xin, ZHANG Ying, et al. Decomposition products and formation path of C_3F_7CN/CO_2 mixture with suspend-

- ed discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(6):1949-1955.
- [17] 颜湘莲,高克利,韩冬,等. C_4F_7N/CO_2 混合气体与环网柜中固体材料相容性试验[J]. 电网技术,2023,47(11):4790-4800.
YAN Xianglian, GAO Keli, HAN Dong, et al. Experiments on compatibility of C_4F_7N/CO_2 gas mixture and the solid materials in ring main unit[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4790-4800.
- [18] 颜湘莲,何洁,黄印,等. 氟化硫酰(SO_2F_2)和氟化亚硫酰(SOF_2)气体的中红外光谱特性检测分析[J]. 高电压技术,2022,48(7):2688-2697.
YAN Xianglian, HE Jie, HUANG Yin, et al. Detection and analysis of mid-infrared spectral characteristics for sulfuryl fluoride (SO_2F_2) and thionyl fluoride (SOF_2) gases[J]. High Voltage Engineering,2022,48(7):2688-2697.
- [19] KESSLER F, SARFERT-GAST W, ISE M, et al. Interaction of low global warming potential gaseous dielectrics with materials of gas-insulated systems[C]//Proceedings 20th International Symposium High Voltage Engineering. Buenos Aire, Argentina: ISH,2017.
- [20] 王浩,颜湘莲,高克利,等. C_4F_7N/CO_2 及其分解气体与橡胶密封材料的相容性实验[J]. 高电压技术,2022,48(7):2625-2634.
WANG Hao, YAN Xianglian, GAO Keli, et al. Experiments for compatibility characteristics of C_4F_7N/CO_2 and its gas byproducts with commonly used rubber sealing materials[J]. High Voltage Engineering,2022,48(7):2625-2634.
- [21] 郑哲宇,李涵,周文俊,等. 环保绝缘气体 C_3F_7CN 与密封材料三元乙丙橡胶的相容性研究[J]. 高电压技术,2020,46(1):335-341.
ZHENG Zheyu, LI Han, ZHOU Wenjun, et al. Compatibility of eco-friendly insulating medium C_3F_7CN and sealing material EPDM[J]. High Voltage Engineering,2020,46(1):335-341.
- [22] 颜湘莲,高克利,郑宇,等. SF_6 混合气体及替代气体研究进展[J]. 电网技术,2018,42(6):1837-1844.
YAN Xianglian, GAO Keli, ZHENG Yu, et al. Progress of gas mixture and alternative gas of SF_6 [J]. Power System Technology, 2018,42(6):1837-1844.
- [23] 黄印,颜湘莲,高克利,等. C_4F_7N/CO_2 混合气体绝缘环网柜的接地开关关合性能模拟试验[J]. 高电压技术,2023,49(7):2858-2867.
HUANG Yin, YAN Xianglian, GAO Keli, et al. Experiments on switching performance of grounding switch in C_4F_7N/CO_2 mixture gas-insulated ring main unit[J]. High Voltage Engineering, 2023,49(7):2858-2867.
- [24] 肖焱艳,李洪涛,丁然,等. 分子筛物理结构和化学改性对 C_4F_7N 及其分解产物吸附特性的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(9):26-36.
XIAO Hanyan, LI Hongtao, DING Ran, et al. Effect of physical structure and chemical modification of molecular sieves on adsorption properties of C_4F_7N and its decomposition products[J]. Insulating Materials,2024,57(9):26-36.

收稿日期:2024-08-27;修回日期:2024-10-17。

作者简介:

王浩(1983-),男(汉族),河北保定人,高级工程师,主要从事特高压GIS中VFTO防护、特高压GIL设计制造及运行监测、环保型开关设备等研究工作;

通信作者:颜湘莲(1977-),女(汉族),湖南郴州人,教授级高级工程师,博士,主要从事 SF_6 及替代气体、新型高压开关设备设计与研发、高压开关设备运行维护等研究工作。