

微水对 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体绝缘性能和分解特性的影响

田双双¹, 陈艺萌¹, 靳小平¹, 汪颖翔², 李陈莹³, 王家浩¹, 陈辉¹

(1. 湖北工业大学 新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430068;

2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: C₆F₁₂O 具有良好的环保特性和绝缘性能, 在中低压气体绝缘设备中具有良好的应用前景。为探究气体绝缘设备内部的微水对 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体绝缘性能和分解特性的影响, 本文搭建气体工频击穿试验平台, 测试 0~1 000 μL/L 微水浓度范围内 0.14 MPa 气压下 4% C₆F₁₂O/96% CO₂ 混合气体的击穿电压, 分析不同微水浓度对混合气体工频击穿特性的影响。使用气相色谱质谱联用仪 (GC-MS) 定性定量分析 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体工频击穿后分解产物的种类和浓度, 获得微水浓度对击穿分解产物浓度和有效产气速率的影响规律。结果表明: 微水会降低 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体的工频击穿电压。C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体的主要击穿分解产物为 CF₄、C₂F₆、C₃F₆、C₃F₈、C₃F₇H、CF₂O、C₄F₁₀、C₅F₁₂ 和 CF₃H, 其中 CF₄、C₂F₆ 和 C₃F₇H 的浓度及有效产气速率与微水浓度呈正相关, CF₄、C₂F₆、C₃F₆、C₃F₈、C₃F₇H 的浓度与击穿次数呈正相关。综合考虑绝缘性能和分解特性, 建议在工程应用中严格控制 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体设备内部微水的浓度, 同时提高设备微水的检测频率。

关键词: C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体; 微水; 绝缘性能; 分解特性

Effect of micro-water on insulation properties and decomposition characteristics of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture

TIAN Shuangshuang¹, CHEN Yimeng¹, JIN Xiaoping¹, WANG Yingxiang²,
LI Chenying³, WANG Jiahao¹, CHEN Hui¹

(1. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Economic and Technical Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;

3. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: C₆F₁₂O has good environmental protection characteristics and insulation properties, and has good application prospects in medium and low voltage gas-insulated equipment. In order to explore the influence of micro-water inside the gas-insulated equipment on the insulation performance and decomposition characteristics of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture, a gas power frequency breakdown test platform was set up, and the breakdown voltage of 4% C₆F₁₂O/96% CO₂ gas mixture under 0.14 MPa pressure within the range of 0–1 000 μL/L micro-water concentration was studied. The influence of different micro-water concentration on the power frequency breakdown characteristics of gas mixture was analyzed. The types and concentrations of the decomposition products of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture were analyzed quantitatively and qualitatively by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) after breakdown, and the influence laws of micro-water concentration on the concentration of breakdown decomposition products and effective gas production rate were obtained. The results show that micro-water will reduce the power frequency breakdown voltage of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture. The main breakdown decomposition products of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture are CF₄, C₂F₆, C₃F₆, C₃F₈, C₃F₇H, CF₂O, C₄F₁₀, C₅F₁₂, and CF₃H, among them, the concentration and effective gas production rate of CF₄, C₂F₆, and C₃F₇H are positively correlated with the micro-water concentration, and the concentration of CF₄, C₂F₆, C₃F₆, C₃F₈, and C₃F₇H are positively correlated with the breakdown times. Considering the insulation performance and decomposition characteristics, it is recommended to strictly control the concentration of micro-water inside the C₆F₁₂O/CO₂ gas mixtures equipment during engineering application, and increase the test frequency of micro-water in the equipment.

Key words: C₆F₁₂O/CO₂ gas mixtures; micro-water; insulation properties; decomposition characteristics

0 引言

自 20 世纪 60 年代以来,六氟化硫(SF₆)因其优异的绝缘性能广泛应用于绝缘设备中^[1-3]。然而 SF₆ 是一种温室气体,其全球增温潜势(global warming potential, GWP)是 CO₂ 的 23500 倍,大气寿命为 3 200 年,会造成全球变暖。因此,亟需寻找一种新型绝缘介质来替代 SF₆^[4-9]。

ABB 公司开展了 C_nF_{2n}O 类新型环保气体的研究,发现 C_nF_{2n}O 类气体中 C₆F₁₂O 电气性能优越,理化性质较稳定,GWP 约等于 1,绝缘强度大约为纯 SF₆ 气体的 2.7 倍以上,具有优良的绝缘性能和环保特性^[10-12]。该公司在 2014 年将 C₆F₁₂O 与空气或 CO₂ 混合,并测试了 C₆F₁₂O 混合气体的击穿电压^[13]。唐炬等^[14]选用表面粗糙程度不同的电极对 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体进行工频击穿实验,发现随着电极表面粗糙程度的增大,C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体的击穿电压呈现下降趋势。本团队^[15-16]探究了 0.10~0.30 MPa 下 C₆F₁₂O/CO₂、C₆F₁₂O/N₂ 混合气体的绝缘性能,发现 3% C₆F₁₂O/N₂ 混合气体的击穿电压与 10% SF₆/N₂ 混合气体的击穿电压相近,6% C₆F₁₂O/N₂ 混合气体的局部放电起始电压略低于 10% SF₆/N₂ 混合气体的局部放电起始电压。另外国内研发的首台以 C₆F₁₂O/CO₂ 为主要绝缘介质的环保气体绝缘金属封闭开关设备已挂网示范运行^[17]。

气体绝缘设备在更换绝缘介质、运输、组装、维修和运行过程中,难免会有微量水分混入设备内部^[18-21]。当 SF₆ 气体绝缘设备发生故障时,在局部放电或局部过热情况下, SF₆ 气体会发生分解,生成 SF₂、SF₃ 等低氟硫化物,这些低氟硫化物会与气体绝缘设备中的水和氧发生反应,生成 HF、SO₂、SOF₂ 等气体,而这些气体会腐蚀绝缘设备的内部组件^[22-26],加速绝缘劣化,危害绝缘设备的安全可靠运行^[24]。因此,在气体绝缘设备长期运行中,需要密切关注设备中微水的浓度,保证设备的安全稳定运行。

环保气体绝缘设备内微水的存在也会威胁设备的安全运行,因此在研究新型环保气体绝缘介质电学性能时也有必要考虑微水的影响。目前关于微水对新型环保气体绝缘介质的研究主要集中于 CF₃I、C₄F₇N 和 C₅F₁₀O。肖淞^[24]从试验和仿真两方面研究了微水对 CF₃I 绝缘性能的影响,发现微水会抑制 CF₃I 的自恢复过程,影响其绝缘性能。杨圆等^[19]

通过试验探究了微水对 C₄F₇N/CO₂ 混合气体绝缘性能和分解特性的影响,发现微水的存在会降低 C₄F₇N/CO₂ 混合气体的绝缘性能。李应文等^[20]研究了微水对 C₅F₁₀O 分解特性的影响,发现微水的存在会促进 C₅F₁₀O 的分解,进而影响 C₅F₁₀O 混合气体的绝缘性能。C₆F₁₂O 作为一种新型的气体绝缘介质,关于微水对 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体电学性能影响的研究较少。

本研究搭建气体工频击穿试验平台,使用球-球电极模拟准均匀电场,对 4% C₆F₁₂O/96% CO₂ 混合气体开展多次工频击穿试验,测试在 0.14 MPa 气压下,0~1 000 μL/L 微水浓度范围内 4% C₆F₁₂O/96% CO₂ 混合气体的击穿电压,基于试验结果分析微水对混合气体击穿电压的影响。采用气相色谱质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测气体分解产物的种类和浓度,根据试验结果分析微水浓度对击穿分解产物浓度和有效产气速率的影响。

1 试验平台及方法

C₆F₁₂O 在大气压下的液化温度为 49℃,很难直接应用于绝缘设备中,通过引入缓冲气体 CO₂ 可以降低混合气体的液化温度^[27-30]。基于本课题组此前开展的 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体绝缘性能和分解性能研究^[30],若要满足其最低运行温度(-15℃)的要求,C₆F₁₂O 的体积分数应低于 5%。开关柜正常运行时常见的气压范围在 0.1~0.2 MPa^[29],考虑到实际工程应用,一般将 C₆F₁₂O 的体积分数选择为 4%。因此,本文选择气压为 0.14 MPa 的 4% C₆F₁₂O/96% CO₂ 混合气体为研究对象。参考 SF₆ 气体绝缘设备微水浓度标准(见表 1),将工频击穿试验的理论微水浓度设置为 0、300、500、750、1 000 μL/L,实际微水浓度分别为 78、325、534、741、980 μL/L。

搭建气体工频击穿试验平台,使用球-球电极模拟准均匀电场进行试验。试验平台示意图如图 1 所示,主要由变压器、调压器、电容分压器、反应气室、GC-MS 组成。调压器调压范围为 0~380 V,变压器二次侧最高输出电压为 100 kV,保护电阻阻值为 4 kΩ,虚线框中为电容分压器,用于测量气室两端的电压值。

试验前使用无水乙醇将反应气室和电极清洗干净,然后在清洁干燥的环境中静置 6 h 完全风干

表1 SF₆气体绝缘设备的微水浓度标准

Table 1 Micro-water concentration standard for SF₆ gas-insulated equipment

标准名称	微水浓度/(μL/L)	
	灭弧气室	非灭弧气室
GB/T 8905—2012	交接验收值≤150	交接验收值≤250
	运行允许值≤300	运行允许值≤500
DL/T 603—2017	交接验收值≤150	交接验收值≤250
	运行允许值≤500	运行允许值≤800
Q/CSG 1206007—2017	交接验收值≤150	交接验收值≤250
	运行允许值≤300	运行允许值≤1000

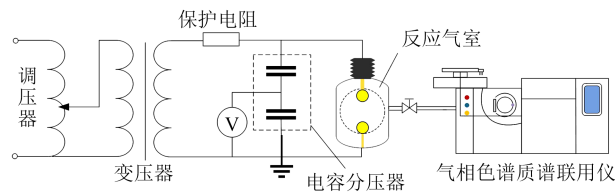


图1 气体工频击穿试验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the gas power frequency breakdown test platform

后,组装电极并将气室密封,检查气密性。完成气密性检查后,将微水进样装置(如图2所示)连接反应气室,通入氮气清洗气室3次并抽真空,接着使用进样针抽取所需的液态水注入真空气室内,通过加热和真空汽化将C₆F₁₂O充入气室,再按照气体混合比通过高压气瓶将CO₂充入气室。本试验采用逐步升压法逐步升高电压,当气室内气体被击穿时,调压器自我保护发生跳闸,记录此时调压器显示的击穿电压值,重复以上试验操作5次,最后数据取5次测量结果的平均值。

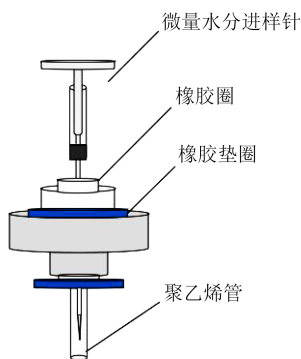


图2 微水进样装置结构图

Fig.2 Structure diagram of micro-water injector

2 微水对C₆F₁₂O/CO₂工频击穿特性的影响

在准均匀电场中对微水浓度为0~1000 μL/L的C₆F₁₂O/CO₂混合气体开展工频击穿试验,根据试

验结果绘制混合气体工频击穿电压随微水浓度的变化曲线,如图3所示。

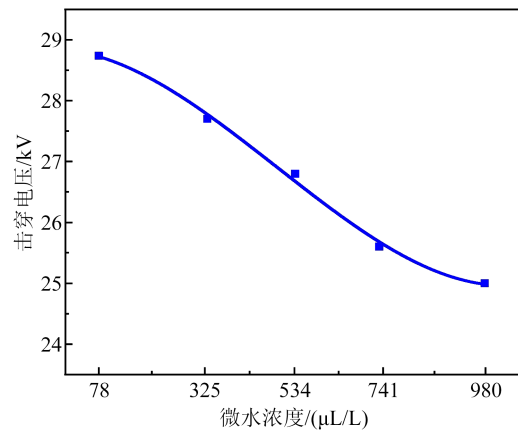
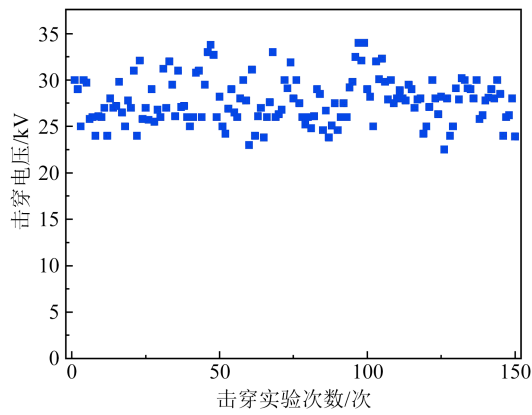


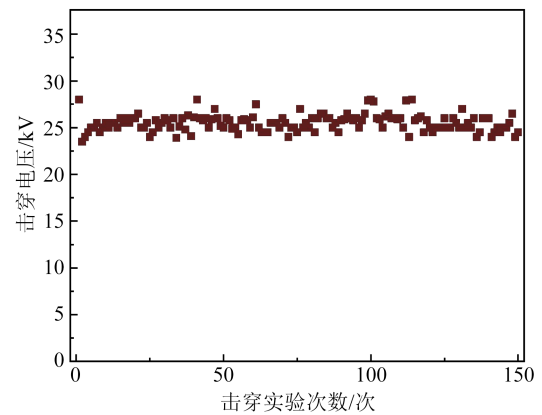
图3 不同微水浓度下C₆F₁₂O/CO₂混合气体的工频击穿电压
Fig.3 Power frequency breakdown voltage of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture under different micro-water concentration

由图3可知,在准均匀电场中,随着微水浓度的增加,0.14 MPa下C₆F₁₂O/CO₂混合气体的击穿电压呈下降趋势。不加水试验组(微水浓度为78 μL/L)C₆F₁₂O/CO₂混合气体的工频击穿电压为28.74 kV,微水浓度为325、534、980 μL/L的C₆F₁₂O/CO₂混合气体工频击穿电压分别为不加水时的96.18%、93.25%、86.97%。产生这种现象的原因如下:根据文献[32]计算电离能的方法得出C₆F₁₂O的电离能为12.145 eV,H₂O的电离能为12.749 eV,C₆F₁₂O与H₂O的电离能相差不大,但H₂O的电子吸附能力弱于C₆F₁₂O分子,因此微水浓度越高,发生电离的水分子数量越多,使得气室中自由移动的电子数量增加,加快气体放电发展过程,最终导致C₆F₁₂O/CO₂混合气体的击穿电压显著下降。因此,实际应用中需要严格控制气体绝缘设备内部微水的浓度。

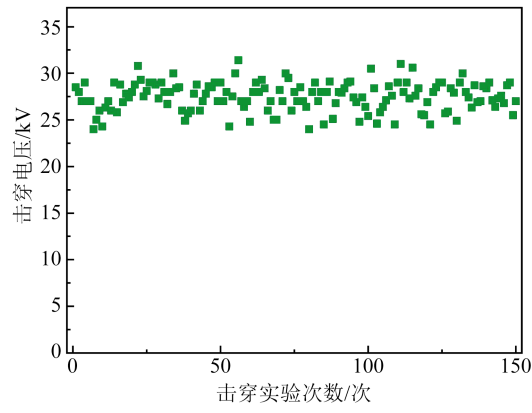
本研究还对微水浓度为0~1 000 μL/L的C₆F₁₂O/CO₂混合气体开展了150次工频击穿试验,结果如图4所示。由图4可知,微水浓度为78、325和534 μL/L的C₆F₁₂O/CO₂混合气体的150次工频击穿电压具有一定的离散性,微水浓度为741 μL/L、980 μL/L的C₆F₁₂O/CO₂混合气体的150次工频击穿电压的离散性较小。不加水的C₆F₁₂O/CO₂混合气体的工频击穿电压离散性现象与文献[31]的研究结果大体一致。随着微水浓度的增加,击穿电压的离散性更小,这可能是由于微水的存在会影响C₆F₁₂O气体的局部化学反应,进而影响电击穿的发生,另外微水与分解产物反应的稳定结合物可能改变了击



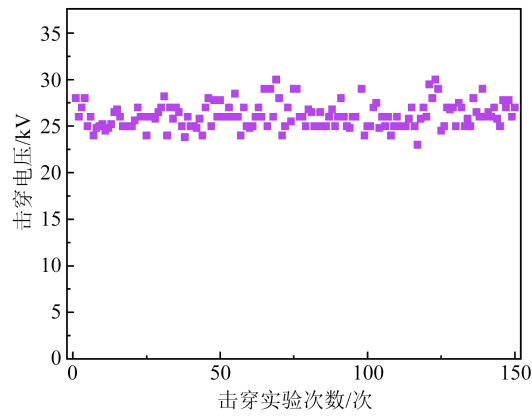
(a) 78 μL/L



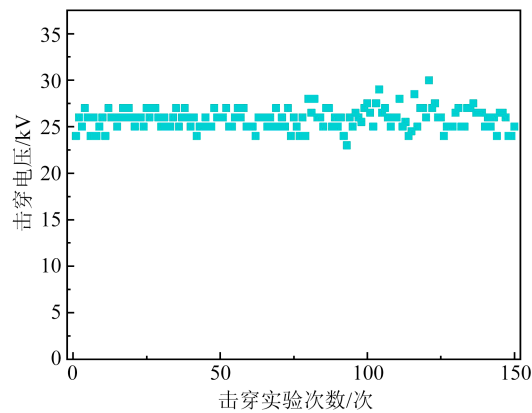
(e) 980 μL/L



(b) 325 μL/L



(c) 534 μL/L



(d) 741 μL/L

图4 不同微水浓度下 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体工频击穿次数与击穿电压的关系

Fig.4 Relationship between power frequency breakdown times and breakdown voltages of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture under different micro-water concentration

穿通道的特性。此外微水还可能会对反应气室内自由电子和离子的运动产生影响,从而改变气体的电导率。因此,随着微水浓度的增加,C₆F₁₂O/CO₂混合气体的工频击穿电压离散性更小。

3 微水对 C₆F₁₂O/CO₂ 击穿分解特性的影响

采用 GC-MS 检测击穿分解试验后的 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体,并对混合气体的分解产物进行定性分析。图5为 534 μL/L 微水浓度下 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体 150 次击穿后的气相色谱图。从图5可以看出,C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体的主要击穿分解产物有

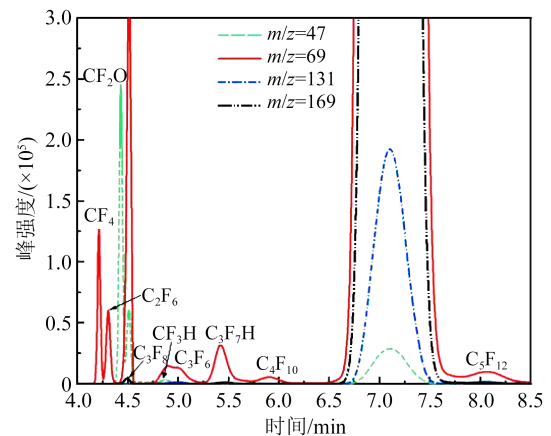


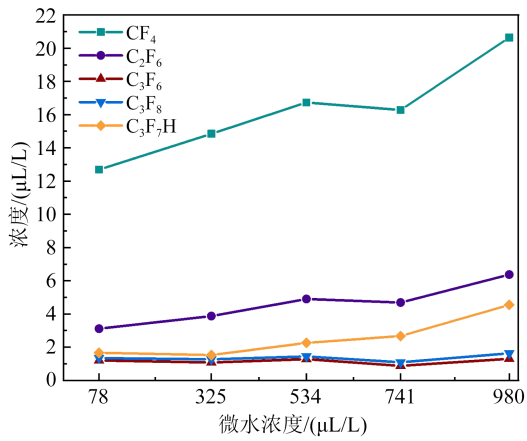
图5 534 μL/L 微水浓度下 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体击穿分解组分检测结果

Fig.5 Detection results of breakdown decomposition components of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture under 534 μL/L of micro-water concentration

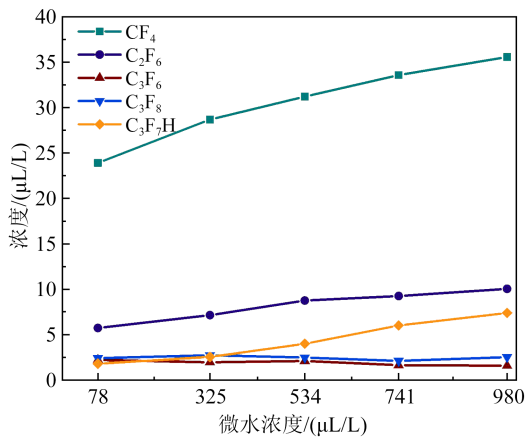
CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 、 CF_2O 、 C_4F_{10} 、 C_5F_{12} 和 CF_3H 。

3.1 分解产物与微水浓度及击穿次数的关系

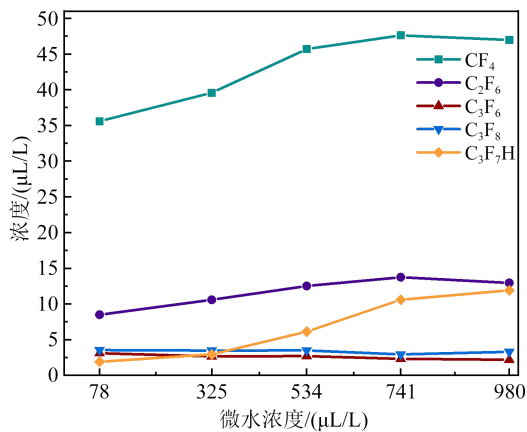
采用外标法研究不同击穿次数下 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体分解产物 CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 浓度随微水浓度的变化,结果如图6所示。由图6可知,不同微水浓度下 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体的5种分解产物浓度大小关系基本一致,从高到低依次为 CF_4 、 C_2F_6 、



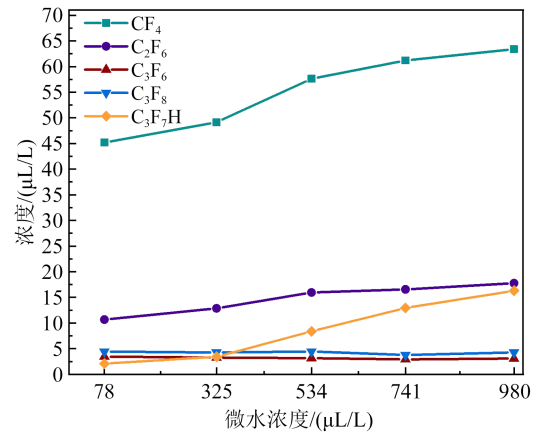
(a) 30次



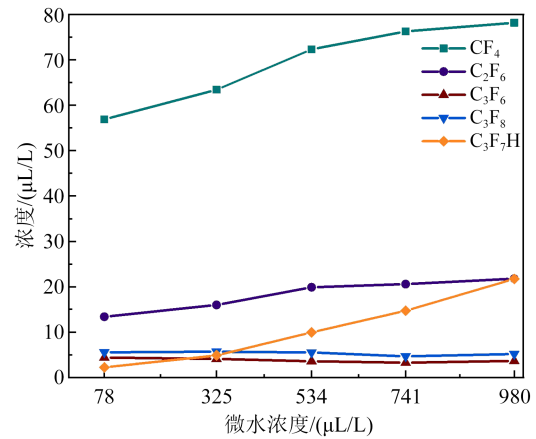
(b) 60次



(c) 90次



(d) 120次



(e) 150次

图6 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体的分解产物浓度随微水浓度变化曲线

Fig.6 Decomposition product concentration of $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}/\text{CO}_2$ gas mixture varying with micro-water concentration

$\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 、 C_3F_8 、 C_3F_6 。在相同击穿次数情况下,随着微水浓度的增大,击穿分解产物 CF_4 、 C_2F_6 和 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 的浓度大体上呈上升趋势。随着击穿次数的增加, CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 和 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 的浓度整体上增大,即击穿次数越多,击穿分解产物浓度越高。

本团队曾基于第一性原理的密度泛函理论计算了 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 混合气体分解产物的生成过程^[34],发现 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 分子中4个C-C键断裂时,相较于 $\text{C}_2\text{F}_5\cdot$ 和 $\text{C}_3\text{F}_7\cdot$,生成 $\text{CF}_3\cdot$ 粒子需要吸收的能量较少,因此会分解出较多的 $\text{CF}_3\cdot$,另外生成 CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 这4种产物释放的能量分别为-122.289、-120.270、61.135、-103.733 kcal/mol,由于 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 分解产生的 $\text{CF}_3\cdot$ 数量较多且生成 CF_4 时释放的能量最多,因此 CF_4 最容易生成。

CF_4 、 C_2F_6 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 、 C_3F_8 、 C_3F_6 的浓度变化可以从

两方面进行解释。从粒子数量方面看: C₆F₁₂O → C₃F₇· + C₃F₅O· 分解反应生成的 C₃F₇· 粒子会进一步发生 H· + C₃F₇· → C₃F₇H 反应, 生成稳定产物 C₃F₇H。且随着微水浓度的上升, 击穿时水电离出的 H· 粒子数量增加, 生成的 C₃F₇H 浓度升高。这会促进反应 C₆F₁₂O → C₃F₇· + C₃F₅O· 的发生, 使得 C₃F₅O· 粒子生成数量增加, 进而导致 C₃F₅O· 的主要分解反应 C₃F₅O· → CF₃· + C₂F₂O 的发生次数增多, CF₃· 粒子生成数量增加, 最终使得更多的 CF₄ 和 C₂F₆ 生成。此外, 反应 CF₃· + C₂F₅· → C₃F₈ 是产物 C₃F₈ 的主要生成路径之一, 由于 H· + C₃F₇· → C₃F₇H 反应的存在, 反应 C₃F₇· + F· → C₃F₈ 的发生次数减少, 但由于 CF₃· 粒子浓度上升, 使得反应 CF₃· + C₂F₅· → C₃F₈ 的发生次数增多, 因此总体上 C₃F₈ 的浓度变化幅度较小。从能量方面分析: C₃F₇· 粒子与 H· 粒子反应过程释放的能量最多, 为 461.128 kJ/mol, 且无需活化能^[20], 而 C₃F₇· → C₃F₆ + F· 反应不仅要吸收能量, 还存在 54.296 kcal/mol 的势垒能量^[35], 因此 C₃F₇· 更倾向于生成 C₃F₇H, 从而减少 C₃F₇· 与 F· 反应或再次分解的概率。

采用相对量比较法对 CF₂O、C₄F₁₀、C₅F₁₂ 和 CF₃H 这 4 种分解产物进行分析, 图 7 为不同微水浓度下 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体 150 次击穿后击穿分解产物 CF₂O、C₄F₁₀、C₅F₁₂ 和 CF₃H 的气相色谱特征峰面积变化曲线。

由图 6 可知, 在 150 次击穿后的采样气体中, 随着 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体中微水浓度的升高, 稳定产物 C₃F₇H 浓度升高, 被 H· 粒子固定的 C₃F₇· 粒子数量增加。由上文可知, 随着微水浓度的增加, 反应 C₆F₁₂O → C₃F₇· + C₃F₅O· 生成的 C₃F₅O· 粒子数量增加, 导致 C₃F₅O· 的主要分解反应 C₃F₅O· → CF₃· + C₂F₂O 发生次数增多, CF₃· 粒子生成数量增加, 最终使得 CF₃H 的主要生成反应 CF₃· + H· → CF₃H 发生次

数增加, 即微水能促进 CF₃H 的生成, 如图 7 所示。从图 7 还可以看出, C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体的工频击穿产物 CF₂O、C₄F₁₀ 和 C₅F₁₂ 的生成量与微水浓度呈负相关。C₅F₁₂ 的浓度降低可能是因为它的主要生成反应 C₂F₅· + C₃F₇· → C₅F₁₂ 中的反应物 C₃F₇· 被 H· 固定, 造成反应发生次数减少。从能量方面看: CF₃· + H· → CF₃H 反应释放的能量为 480.485 kJ/mol, CF₃· 生成 C₂F₆ 释放的能量为 370.584 kJ/mol, CF₃· 生成 CF₃H 释放的能量高于 C₂F₆, 另外 CF₂· + O· → CF₂O^[31] 是 CF₂O 生成的主要路径, 而 CF₃· → CF₂· + F· 反应生成 CF₂· 需要吸收能量 83.409 kcal/mol^[35], 综合而言, CF₃· 与 H· 的反应相对容易发生^[20]。CF₂O、C₃F₁₀ 与 C₄F₁₀ 的生成分别需要 CF₃·、C₃F₇· 的参与, 而 CF₃·、C₃F₇· 则更倾向于生成 CF₃H、C₃F₇H, 因此随着微水浓度的增加, CF₂O、C₄F₁₀ 与 C₅F₁₂ 浓度下降。

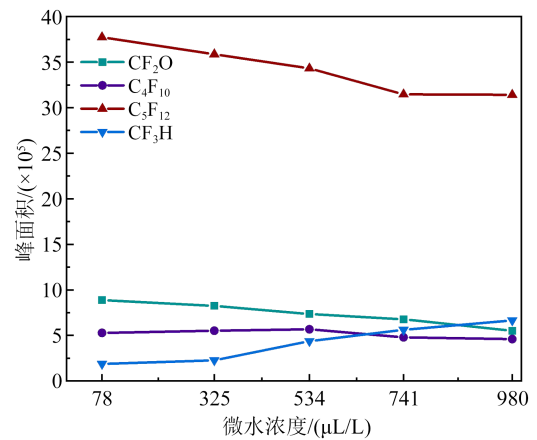


图 7 CF₂O、C₄F₁₀、C₅F₁₂ 和 CF₃H 的特征峰面积变化曲线
Fig.7 Characteristic peak area curves of CF₂O, C₄F₁₀, C₅F₁₂, and CF₃H

3.2 C₆F₁₂O/CO₂ 击穿分解产物的有效产气速率

分解产物的有效产气速率是气体分解特性的重要参数之一, 气体的绝缘性能、运行状态检测及安全维护等方面与气体分解产物的有效产气速率相关。有效产气速率计算公式如式(1)所示^[35]。

$$V_p = \left[\frac{\left(\frac{V_{30}}{30}\right)^2 + \left(\frac{V_{60} - V_{30}}{30}\right)^2 + \left(\frac{V_{90} - V_{60}}{30}\right)^2 + \left(\frac{V_{120} - V_{90}}{30}\right)^2 + \left(\frac{V_{150} - V_{120}}{30}\right)^2}{5} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式(1)中: V_p 为某一气体的有效产气速率; V_n 为该气体第 n 次击穿时的浓度, $n=30, 60, 90, 120, 150$ 。

图 8 为 C₆F₁₂O/CO₂ 混合气体的 5 种定量分解产物 CF₄、C₂F₆、C₃F₆、C₃F₈ 和 C₃F₇H 的有效产气速率随微水浓度的变化曲线。由图 8 可知, C₆F₁₂O/CO₂ 混

合气体分解产物的有效产气速率整体上从高到低依次为 CF₄、C₂F₆、C₃F₇H、C₃F₈ 和 C₃F₆。CF₄、C₂F₆、C₃F₇H 的有效产气速率随着微水浓度的增大呈现出上升趋势, 说明微水的存在会促进混合气体分解生成这 3 种气体。加水后 C₃F₆ 的有效产气速率均低于

加水前的产气速率,说明微水浓度与 C_3F_6 的有效产气速率呈负相关。随着微水浓度的增加, C_3F_8 的有效产气速率幅值变化不大。

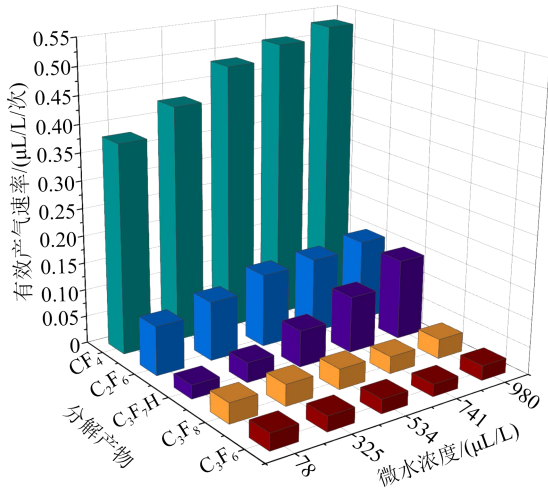


图8 $C_6F_{12}O/CO_2$ 混合气体击穿分解产物的有效产气速率变化曲线

Fig.8 Variation curves of effective gas production rate of breakdown decomposition products for $C_6F_{12}O/CO_2$ gas mixture

4 结论

通过在准均匀电场中开展工频击穿试验,分析了0~1 000 $\mu L/L$ 微水浓度下4% $C_6F_{12}O/96\%CO_2$ 混合气体的绝缘特性和工频击穿分解特性,得出主要结论如下:

(1)在准均匀电场中,随着微水浓度的增大,0.14 MPa下4% $C_6F_{12}O/96\%CO_2$ 混合气体的击穿电压呈现下降趋势。微水浓度为534 $\mu L/L$ 的4% $C_6F_{12}O/96\%CO_2$ 混合气体工频击穿电压相当于不加水混合气体的93.25%,此时4% $C_6F_{12}O/96\%CO_2$ 混合气体绝缘性能虽有所降低但仍保持在较高水平。

(2)不同微水浓度下4% $C_6F_{12}O/96\%CO_2$ 混合气体的击穿分解产物主要有 CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 、 C_3F_7H 、 CF_2O 、 C_4F_{10} 、 C_5F_{12} 和 CF_3H 。随着微水浓度的增加, CF_4 、 C_2F_6 和 C_3F_7H 的浓度及有效产气速率整体呈上升趋势,说明微水浓度的增加会促进 $C_6F_{12}O$ 的分解。随着击穿次数的增加, CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 和 C_3F_7H 的浓度大体上增大,即击穿次数越多,击穿分解产物浓度越高。

(3)综合考虑微水对4% $C_6F_{12}O/96\%CO_2$ 混合气体绝缘性能和分解特性的影响,同时结合设备实际条件及工作环境,建议在工程应用中应严格控制设备内部微水的浓度,运维人员应当提高设备微水的

检测频率。

参考文献 References

- [1] ZHANG B, XIONG J, CHEN L, LI X, et al. Fundamental physicochemical properties of SF_6 -alternative gases: a review of recent progress[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2020,53(17): 173001.
- [2] YE F C, ZHANG X X, XIE C, et al. Effect of oxygen and temperature on thermal decomposition characteristics of $C_4F_7N/CO_2/O_2$ gas mixture for MV equipment[J]. IEEE Access,2020,8:221004-221012.
- [3] ZENG F, WU S, LEI Z, et al. SF_6 fault decomposition feature component extraction and triangle fault diagnosis method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020, 27(2):581-589.
- [4] 罗运柏,高占阳,高克利,等. 环保绝缘气体七氟异丁腈(C_4F_7N)的制备技术现状与发展[J]. 高电压技术,2019,45(4):1009-1017. LUO Yunbai, GAO Zhanyang, GAO Keli, et al. Current status and development of preparation technology of environment friendly insulating gas heptafluoroisobutyronitrile(C_4F_7N) [J]. High Voltage Engineering,2019,45(4):1009-1017.
- [5] CHEN L, ZHANG B, LI X. Decomposition pathway and kinetic analysis of perfluoroketone $C_5F_{10}O$ [J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2020,53(41):415502.
- [6] 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.
- [7] RAO X J, LI D J, ZHANG X X, et al. Study on partial discharge characteristics of $C_6F_{12}O$ mixed gas[J]. Scientific Reports,2022, 12:6265.
- [8] KIEFFEL Y, BIQUEZ F, PONCHON P, et al. SF_6 alternative development for high voltage switchgears[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver,USA:IEEE,2015:1-5.
- [9] 叶凡超,湛慕,田双双,等. $C_4F_7N/CO_2/O_2$ 混合气体PD作用下气体和固体副产物生成特性[J]. 高电压技术,2023,49(11):4507-4516. YE Fanchao, ZHAN Ao, TIAN Shuangshuang, et al. Gas and solid by-product generation properties of $C_4F_7N/CO_2/O_2$ gas mixture under partial discharge[J]. High Voltage Engineering,2023,49(11): 4507-4516.
- [10] 周文俊,郑宇,高克利,等. 环保型绝缘气体电气特性研究进展 [J]. 高电压技术,2018,44(10):3114-3124. ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, GAO Keli, et al. Progress in researching electrical characteristics of environment-friendly insulating gases[J]. High Voltage Engineering,2018,44(10):3114-3124.
- [11] TIAN S S, ZHANG X X, CRESSAULT Y, et al. Research status of replacement gases for SF_6 in power industry[J]. AIP Advances, 2020,10:50702.
- [12] 张晓星,田双双,肖淞,等. SF_6 替代气体研究现状综述[J]. 电工技术学报,2018,33(12):2883-2893.

- ZHANG Xiaoxing, TIAN Shuangshuang, XIAO Song, et al. A review study of SF₆ substitute gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2883-2893.
- [13] 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. Philadelphia, USA: IEEE, 2014: 469-473.
- [14] 唐炬, 邹几欢, 唐博文, 等. 电极表面粗糙程度对环保型绝缘气体C₆F₁₂O/CO₂工频击穿电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3769-3776.
- TANG Ju, ZOU Jihuan, TANG Bowen, et al. Effect of surface roughness of electrode on power frequency breakdown voltage of environmental protection insulation gas C₆F₁₂O/CO₂[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3769-3776.
- [15] TIAN S S, ZHANG X X, XIAO S, et al. Experimental research on insulation properties of C₆F₁₂O/N₂ and C₆F₁₂O/CO₂ gas mixtures[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(3): 417-422.
- [16] TIAN S S, ZHANG X X, WANG Y, et al. Partial discharge characteristics of C₆F₁₂O/CO₂ mixed gas at power frequency AC voltage[J]. AIP Advances, 2019, 9: 95057.
- [17] 唐炬, 雷志城, 万兆丰, 等. 环保型C₆F₁₂O气体绝缘介质过热分解的反应热力学特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5257-5262, 5306.
- TANG Ju, LEI Zhicheng, WAN Zhaofeng, et al. Reaction thermodynamics of overthermal decomposition of C₆F₁₂O[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5257-5262, 5306.
- [18] YANG Y, GAO K L, BI J G, et al. Influence of micro-water on AC breakdown characteristics of C₄F₇N/CO₂ gas mixture under non-uniform electric field[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1059-1068.
- [19] 杨圆, 高克利, 丁立健, 等. 微水对环保型C₄F₇N/CO₂混合气体绝缘和分解特性的影响规律[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2402-2410.
- YANG Yuan, GAO Keli, DING Lijian, et al. Influence law of micro-water on insulation and decomposition characteristics of eco-friendly C₄F₇N/CO₂ gas mixture[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2402-2410.
- [20] 李应文, 邓载韬, 黄华勇, 等. 微水对环保型绝缘介质C₃F₁₀O分解的影响[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 10-15.
- LI Yingwen, DENG Zaitao, HUANG Huayong, et al. Influence of trace water on decomposition of environmental insulating medium C₃F₁₀O[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 10-15.
- [21] XIAO S, LI Y, ZHANG X X, et al. Effects of micro-water on decomposition of the environment-friendly insulating medium C₃F₁₀O[J]. AIP Advances, 2017, 7: 65017.
- [22] 汲胜昌, 钟理鹏, 刘凯, 等. SF₆放电分解组分分析及其应用的研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2318-2332.
- Ji Shengchang, ZHONG Lipeng, LIU Kai, et al. Research status and development of SF₆ decomposition components analysis under discharge and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2318-2332.
- [23] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF₆放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 664-669, 747.
- ZHANG Xiaoxing, YAO Yao, TANG Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of SF₆ decomposed products under partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 664-669, 747.
- [24] 肖淞. 工频电压下SF₆替代物CF₃I/CO₂绝缘性能及微水对CF₃I影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- XIAO Song. Research on insulation performance of SF₆ substitute CF₃I/CO₂ under power frequency voltage and the influence of micro-moisture on CF₃I[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [25] 蒋庆明, 张艳妹, 王明祥, 等. SF₆分解组分的气体传感器检测方法综述[J]. 绝缘材料, 2024, 57(3): 1-14.
- JIANG Qingming, ZHANG Yanmei, WANG Mingxiang, et al. Review of gas sensor detection methods for SF₆ decomposition components[J]. Insulating Materials, 2024, 57(3): 1-14.
- [26] 沈腾达, 周文俊, 王宝山, 等. SF₆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.
- SHENG T D, ZHOU W J, WANG B S, et al. Research progress of molecular structure-activity relationship of SF₆ substitute gas[J]. Insulating Materials, 2022, 55(6): 1-5.
- [27] 田双双, 张晓星, 肖淞, 等. 工频交流电压下C₆F₁₂O与N₂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.
- TIAN Shuangshuang, ZHANG Xiaoxing, XIAO Song, et al. Breakdown characteristics and decomposition characteristics of C₆F₁₂O and N₂ mixed gas under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3125-3132, 3165.
- [28] 李学妨, 史俊, 刘晓波, 等. 环保型绝缘气体技术经济性能综合评估研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 52-60, 68.
- LI Xuefang, SHI Jun, LIU Xiaobo, et al. Research on comprehensive assessment of technical and economic performance of environmentally friendly insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 52-60, 68.
- [29] 田双双, 靳小平, 张晓星, 等. O₂对C₆F₁₂O/CO₂混合气体绝缘性能和分解特性的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(3): 27-32.
- TIAN Shuangshuang, JIN Xiaoping, ZHANG Xiaoxing, et al. Influence of O₂ on insulation performance and decomposition characteristics of C₆F₁₂O/CO₂ gas mixture[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3): 27-32.
- [30] BERTOLINI M, VIGNALI G. An analytical method for halon alternative selection in fire suppression systems design[J]. International Journal of Decision Sciences, Risk and Management, 2009, 1(3-4): 180-198.
- [31] 田双双. 环保型绝缘气体C₆F₁₂O/CO₂绝缘性能和分解特性的研究及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- TIAN Shuangshuang. Study on insulation properties and decomposition characteristics of environmentally friendly insulating

- gas $C_6F_{12}O/CO_2$ for application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.
- [32] 田双双,李晓涵,陈康,等. 外电场对HFO-1234ze(E)分子的结构和性质的影响[J]. 高电压技术,2022,48(7):2650-2658.
TIAN Shuangshuang, LI Xiaohan, CHEN Kang, et al. Effect of external electric fields on the structure and properties of HFO-1234ze(E) [J]. High Voltage Engineering,2022,48(7):2650-2658.
- [33] 陈琪,张晓星,李祎,等. O_2 对 $C_4F_7N-N_2-O_2$ 混合气体绝缘和放电分解特性的影响[J]. 高电压技术,2020,46(3):1028-1036.
CHEN Qi, ZHANG Xiaoxing, LI Yi, et al. Effects of O_2 on the insulation and discharge decomposition characteristics of $C_4F_7N-N_2-O_2$ gas mixture[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1028-1036.
- [34] TIAN S S, ZHANG X X, XIAO S, et al. Experimental research on insulation properties of $C_6F_{12}O/N_2$ and $C_6F_{12}O/CO_2$ gas mixtures[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2019,13(3):417-422.
- [35] 陈琪,张晓星,李祎,等. 环保绝缘介质 $C_4F_7N/CO_2/O_2$ 混合气体的放电分解特性[J]. 电工技术学报,2020,35(1):80-87.
CHEN Qi, ZHANG Xiaoxing, LI Yi, et al. The discharge decomposition characteristics of environmental-friendly insulating medium $C_4F_7N/CO_2/O_2$ gas mixture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(1):80-87.

收稿日期:2024-03-24;修回日期:2024-04-24。

作者简介:

田双双(1989-),女(汉族),湖北武汉人,副教授,博士,研究方向为气体绝缘设备在线检测与故障诊断、 SF_6 替代气体;

通信作者:陈辉(1981-),男(汉族),湖北武汉人,讲师,主要从事可再生能源电力系统建模与控制、高压技术及在电力系统中的应用。