

CF₃SO₂F 三元混合气体的工频击穿特性研究

郑宇¹, 郝东昕¹, 刘伟², 任书波¹, 颜湘莲³, 高克利³, 周文俊¹

(1. 电网环境保护全国重点实验室(武汉大学), 湖北省 武汉市 430072; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽省 合肥市 230000; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Power Frequency Breakdown Characteristics of CF₃SO₂F Ternary Mixed Gas

ZHENG Yu¹, HAO Dongxin¹, LIU Wei², REN Shubo¹, YAN Xianglian³, GAO Keli³, ZHOU Wenjun¹

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection (Wuhan University), Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Supply Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui Province, China;

3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: To optimize gas formulations for reducing the gas pressure in eco-friendly gas-insulated equipment, this study investigates the power frequency breakdown characteristics of CF₃SO₂F ternary gas mixtures. Experiments are conducted to obtain the breakdown characteristics of CF₃SO₂F ternary mixtures in slightly non-uniform electric fields under pressures ranging from 0.1 to 0.5 MPa. The effects of buffer gas type, pressure, mixing ratio, and low temperature on insulation strength are analyzed. Results show that under identical mixing ratios and pressures, CF₃SO₂F mixtures with N₂ exhibit higher breakdown voltages than those with CO₂. Breakdown voltages demonstrate linear growth with increasing pressure from 0.1 to 0.5 MPa. The insulation strength remains stable when temperature decreases from 20°C to -20°C but significantly declines below -20°C. The optimized 20%CF₃SO₂F/10%C₄F₇N/70%N₂ ternary mixture demonstrates an insulation strength 15% higher than that of SF₆ at 0.5 MPa while its liquefaction temperature remains below 20°C. This research provides valuable references for developing alternative gases of eco-friendly gas-insulated equipment.

KEY WORDS: SF₆ alternative gas; replacement at equal pressure; CF₃SO₂F ternary gas mixture; discharge characteristics; liquefaction temperature

摘要: 为优化气体配方以降低环保气体绝缘设备中的气体压力, 该文开展 CF₃SO₂F 三元混合气体工频击穿特性研究。试验获得 0.1~0.5 MPa 气压范围内, CF₃SO₂F 三元混合气体在稍不均匀电场中的工频击穿特性, 并研究缓冲气体类型、

气压、比例以及低温对其绝缘强度的影响规律。结果表明, 在相同混合比例和气压下, 混合 N₂ 的 CF₃SO₂F 三元混合气体击穿电压高于混合 CO₂ 的三元混合气体; 0.1~0.5 MPa 范围内, CF₃SO₂F 三元混合气体的工频击穿电压均随气压增大而呈线性增大趋势; 从 20°C 降温至 -40°C 过程中, 其绝缘强度在温度高于 -20°C 时基本保持不变, 温度低于 -20°C 时其绝缘强度显著降低。优选得到 20%CF₃SO₂F/10%C₄F₇N/70%N₂ 的三元混合气体配方, 其在 0.5 MPa 下的绝缘强度可达到相同气压下 SF₆ 气体的 1.15 倍, 且液化温度不高于 -20°C。该文可为环保气体绝缘设备的配方优化提供一定参考。

关键词: SF₆ 替代气体; 等压替代; CF₃SO₂F 三元混合气体; 放电特性; 液化温度

0 引言

气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)、气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)等气体绝缘电气设备是电力系统的核心装备^[1], 其使用的 SF₆ 气体具备优异的绝缘和灭弧性能^[2-3], 电力设备中每年使用近万吨 SF₆ 气体^[4]。然而 SF₆ 气体的全球变暖潜势(global warming potential, GWP)高达 CO₂ 的 24 300 倍^[5]。《巴黎协定》对包括 SF₆ 气体在内的 6 种温室气体的使用和排放进行了严格限制^[6]。我国也已在国家政策层面提出了加强电力行业温室气体管控、降低温室气体排放的目标^[7-8]。研究低温室效应环保绝缘气体逐渐替代 SF₆ 已成为国家重大需求, 对实现我国“双碳”目标具有重要意义^[9]。

近年来, C₄F₇N 混合气体和压缩空气两种替代路线开始逐渐在实际工程中应用。在 C₄F₇N 混合气

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2401400); 国家电网有限公司科技项目(SGAHDK00LFJS2200332)。

National Key R&D Program of China (2021YFB2401400); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGAHDK00LFJS2200332).

体方面, 主要包括采用 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 、 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ 以及 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2/\text{O}_2$ 等二元或三元配方^[10]。其中 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ 主要用于灭弧室, 充气压力高达 0.85 MPa^[11-12], $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2/\text{O}_2$ 和 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 主要用于 GIL 或 GIS 母线绝缘, 充气压力也高于现有 SF_6 气体绝缘设备。但 9% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/85\%\text{CO}_2/6\%\text{O}_2$ 在 0.55 MPa 气压条件和稍不均匀电场条件下, 其工频绝缘强度仅为相同气压 SF_6 的 74%^[13]。日立能源提出的 5% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/82\%\text{CO}_2/13\%\text{O}_2$ 在 0.6 MPa 下的绝缘强度才与 0.5 MPa SF_6 相当。因此 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2/\text{O}_2$ 混合气体无法同时满足在低温环境下使用且达到与相同气压 SF_6 相当的绝缘强度。由于气体压力提升, 使得环保气体绝缘设备需要在 SF_6 气体绝缘设备基础上, 调整设备结构强度, 才能确保安全运行^[14]。在压缩空气方面, 主要采用压缩空气绝缘与真空灭弧的路线, 但由于空气绝缘强度低, 在应用中需大幅提高空气压力并适当增加设备尺寸和结构强度才能使用。上述两种技术路线对于新增或扩建设备可以进行试点应用, 但无法针对现有 SF_6 气体绝缘设备使用上述方案进行直接换气, 这是由于其均无法实现在等气压下替代 SF_6 。因此, 研究等气压替代 SF_6 的环保绝缘气体配方具有重要意义。

等气压替代 SF_6 气体的方案需要兼顾高绝缘强度、低液化温度和低 GWP 等核心性能指标^[15-16]。目前, 国内外研究较多的绝缘气体包括: $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ ^[17-18]、 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ ^[19]、 CF_3I ^[20-21]、 $\text{c-C}_4\text{F}_8$ ^[22]等, 近几年来 HFO-1336mzz(E)(结构式: $\text{CF}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CF}_3$)^[23]、HFO-1234ze(E)(结构式: $\text{CF}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{F}$)^[24]、 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ ^[25]、K6(结构式: $\text{CF}_3-\text{O}-\text{CF}=\text{CF}_2$)、 CF_3SCF_3 等气体逐渐被关注。其中 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体绝缘强度是相同条件下 SF_6 的 1.3~1.6 倍, 0.1 MPa 下的液化温度为 -22°C 。 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体在绝缘强度、液化温度、GWP 等方面综合较优, 是一种有潜力实现等气压替代 SF_6 的备选气体。

针对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 及其二元混合气体的研究目前已有报道, 龙云翔等^[26]使用稳态汤逊(steady state Townsend, SST)实验测量了 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体的约化电离 α/N 和约化吸附 η/N 值, 得出 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体的临界约化场强 $(E/N)_{\text{lim}}$ 为 578.8 Td, 约为 SF_6 的 1.6 倍; 周文俊等^[17]试验研究发现 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体在 0.1~0.4 MPa 范围的绝缘强度约为相同气压下 SF_6 的 1.4 倍, 相同条件下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 和 N_2 混合的绝缘强度优于和 CO_2 ; 向志辉等^[27]测量 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混

合气体的有效电离系数, 得到 40% $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/60\%\text{N}_2$ 混合气体的 $(E/N)_{\text{lim}}$ 约为 SF_6 的 1.01 倍, 具有代替 SF_6 气体的潜力; 胡世卓等^[28]计算发现当混合气体中 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 的占比为 40% 时, 在 0.4 MPa 下的液化温度约为 -10°C , 环境适用性较差。目前针对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 二元混合气体的研究表明, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 二元混合气体尚无法实现等气压替代 SF_6 。

受 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 三元混合气体启发, 发现三元混合相比二元混合可以使混合气体在维持较低液化温度下提升绝缘强度^[29-31], 因此, 本文从工频电压下的绝缘特性角度重点探讨 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 三元混合气体等气压替代 SF_6 的可行性。根据 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 三元混合气体的研究发现, 目前主要以低液化温度的 O_2 作为第 3 种混合气体成分, 缺少添加具有强绝缘性能且液化温度相对较低的绝缘气体作为第 3 种混合气体成分的三元混合气体研究, 因此本文主要研究在 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 二元混合气体中添加绝缘性能的 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体, 组成三元混合气体替代 SF_6 的可能性。首先, 根据最低温度要求计算 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 三元混合气体中 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体的含量约束; 然后进行工频放电试验, 获得混合比例、气压、缓冲气体等因素对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 三元混合气体绝缘强度的影响, 提出可能实际应用的方案; 最后, 针对该方案进行不同温度下的放电击穿试验, 并取气分析多次放电后的分解气体成分, 计算三元混合气体的 GWP, 从而对其实际使用的耐低温性能、稳定性、环保性进行综合评估。本文可为环保气体绝缘电气设备的配方优化设计提供一定参考。

1 放电试验平台及流程

1.1 试验平台

放电试验电路原理如图 1 所示, 主要由隔离变压器、调压器、试验变压器、保护电阻、分压器、数字电压表、试验腔体及电极组成。试验变压器容量为 30 kVA, 额定输出电压为 250 kV; 电容分压器的分压比为 1000:1。当气体间隙击穿时, 变压器过流保护动作, 将回路断开, 此时的电压记为击穿电压。

使用可调温气体放电试验腔体进行低温下的绝缘气体放电试验, 实物如图 2 所示, 该装置主要由温度调节及控制系统、腔体及电极、高压套管等组成。腔体内部气体温度可以达到的温度范围为 $-50\sim 100^\circ\text{C}$ 。

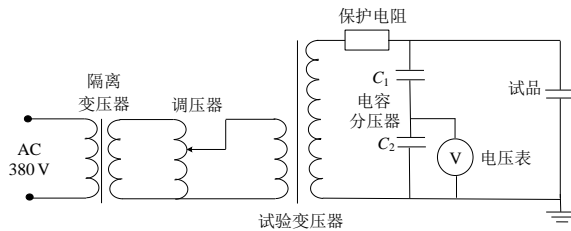


图1 工频放电试验回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of power frequency discharge test circuit



图2 可调温气体放电试验腔体

Fig. 2 Gas discharge chamber with temperature control

GIS 和 GIL 的典型电极结构为同轴圆柱, 电极间隙的电场分布为稍不均匀电场^[32]。本文采用半球头棒板电极进行稍不均匀电场模拟, 电极结构如图 3 所示。其中棒电极半径为 5 mm, 板电极半径为 12.5 mm, 间隙距离设置为 5 mm, 电场不均匀度为 1.8, 属于稍不均匀电场。电极材料为耐烧蚀的钨铜, 采用电极支架将电极固定于腔体内, 棒电极接高压, 平板电极接地。

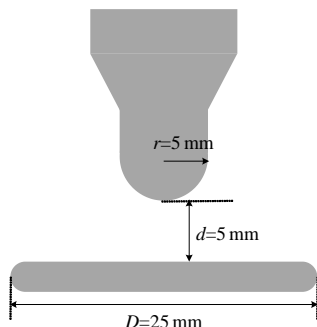


图3 电极结构

Fig. 3 Electrode structure

1.2 试验流程及设计依据

1) 试验前的准备工作: 主要包括打磨电极、清洁腔体、检查气密性、洗气、配气等过程。电极打磨是为了避免由于电极表面毛刺以及击穿放电痕迹而导致击穿电压异常。清洁腔体是避免空气中的粉尘等颗粒影响试验结果。气密性良好是试验顺

利进行的关键, 若腔体漏气, 会严重影响试验结果的科学性和准确性。每次试验之前, 均重复 3 次洗气操作, 以避免腔体内的水分和空气对试验结果产生影响。使用分压法进行配气。

2) 常温 20℃ 下的放电试验: 先快速加压到预估击穿电压 U_b 的 70%, 再以 3% U_b /s 的速度升压, 直到气体间隙放电击穿, 记录此时数字电压表显示的击穿电压数值。等待 3 min 后, 进行下一次放电试验。完成绝压 0.5 MPa 下的 10 次工频击穿放电试验后, 降低气压, 再依次进行 0.4、0.3、0.2、0.1 MPa 的试验。

间隔时间 3 min 设计依据: 0.5 MPa 气压下的试验开始之前, 分别进行间隔时间为 2、3、5 min 的试验, 每个间隔时间进行 10 次, 获得工频击穿电压, 以 SF₆ 为例, 如表 1 所示。

表1 不同间隔时间下的工频击穿电压及其标准差

Table 1 Power frequency breakdown voltage and standard deviation at different intervals

间隔时间/min	工频击穿电压峰值/kV	标准差/%
2	82.72	4.76
3	85.54	4.24
5	86.27	3.98

对于气体绝缘, 其合适的试验间隔时间基本一致, 为 3 min, 若缩短放电试验间隔时间至 2 min 均会使得工频击穿电压下降, 且击穿电压数据标准差增大; 若延长试验间隔时间至 5 min, 其工频击穿电压相比 3 min 基本一致, 且击穿电压数据标准差也变化很小。因此进行工频击穿试验选择试验间隔时间为 3 min。低温下的工频击穿试验间隔按照同样方法进行设计, 选择试验间隔时间为 3 min。

3) 低温下的放电试验: 在进行工频击穿试验之前, 需要先将温控箱调整为特定温度, 运行 3 h 使气体温度达到设定的温度, 再进行工频击穿试验。本文低温试验的温度设置为: 20(对照组)、-15、-20、-25、-30、-35、-40℃。所有温度下的工频击穿试验完成之后, 再调整气体温度到 20℃, 逐渐降低气压, 进行室温 20℃ 下的工频击穿实验, 试验完成后检测腔体内的气体成分。

温控箱运行 3 h 时间的设计依据: 设置 -30℃ 为设定温度, 从 20℃ 开始降温, 试验气体温度随时间的变化如图 4 所示。可见 3 h 后温度可达到 -29.1℃, 再运行 20 min, 温度仅降低 0.1℃。因此, 试验选择设置的特定温度将比实际温度低 1℃, 温控箱运行时间为 3 h。

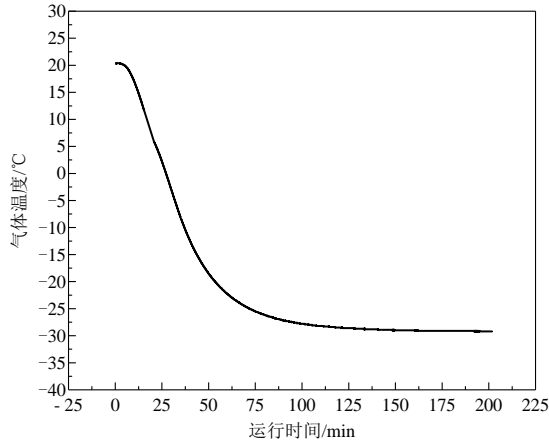


图 4 试验气体降温曲线

Fig. 4 Temperature drop curve of the test gas

1.3 液化温度约束下 CF₃SO₂F 气体占比计算

当温度下降时混合气体中液化温度较高的气体成分将先发生液化^[33]。因此,可采用各气体的分压及饱和蒸气压特性来计算三元混合气体的最低使用温度。

结合 Clapeyron-Clausius 方程和 Trouton 规则,可得到混合气体饱和蒸汽压的计算式^[28]为

$$p_v = \frac{1}{10k} \exp[A(1 - \frac{T_b}{T_{mb}})/R] \quad (1)$$

式中: p_v 为混合气体饱和蒸气压, MPa; k 为气体的摩尔分数; T_{mb} 为混合气体在气压 p_v 下的液化温度, K; T_b 为气体在常压 0.1MPa 下的液化温度, K; R 为理想气体常数, 为 8.314 J/(mol K); A 为 Trouton 常数, 在计算中 A 取 85 J/(mol K)。

由式(1)得出混合气体的液化温度为

$$T_{mb} = T_b / [1 - \frac{R}{A} \ln(10kp_v)] \quad (2)$$

通过计算三元混合气体的液化温度,可以得到三元混合气体的液化温度与混合气体中 CF₃SO₂F 和 C₄F₇N 两种绝缘气体组分占比与其液化温度之间的关系。在 20°C 时,若混合气体的气压为绝压 0.5 MPa,计算得到 CF₃SO₂F、C₄F₇N 绝缘气体的临界占比与液化温度之间的关系,如图 5 所示。可知,在 -25°C 约束下,CF₃SO₂F 三元混合气体中 CF₃SO₂F 摩尔占比不能超过 20.88%,若添加 C₄F₇N 气体则其摩尔占比不能超过 10.24%。考虑 C₄F₇N 气体的高绝缘性能,本文通过配置 CF₃SO₂F+C₄F₇N+缓冲气体组成三元混合气体进行进一步试验研究,其中 CF₃SO₂F 气体占比固定在 20%,调节 C₄F₇N 气体和缓冲气体占比,缓冲气体选择 N₂ 和 CO₂ 两种进行研究。

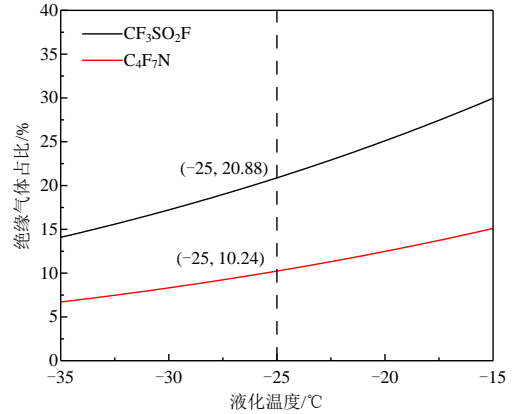


图 5 绝缘气体在不同液化温度下的临界占比计算结果

Fig. 5 Calculation results of the critical proportion of insulating gas at different liquefaction temperatures

2 CF₃SO₂F 三元混合气体放电特性

本文进行试验的 CF₃SO₂F 三元混合气体配比方案如表 2 所示,为便于表述,根据混合气体中 N₂ 或 CO₂ 气体的占比不同,将不同三元混合气体以 N 或 C 加上其占比进行编码表示,如 N74 表示混合气体中 N₂ 占比为 74%。由于 CF₃SO₂F 占比固定为 20%,因此当 N₂ 或 CO₂ 占比确定后,C₄F₇N 气体占比随之确定,表 2 中的编码方式具有唯一性。

表 2 CF₃SO₂F 三元混合气体配方

Table 2 Gas scheme of CF₃SO₂F gas mixtures 单位: %

气体编码	CF ₃ SO ₂ F	C ₄ F ₇ N	N ₂ 或 CO ₂
N74	20	6	74
N72	20	8	72
N70	20	10	70
C74	20	6	74
C72	20	8	72
C70	20	10	70

不同类型 CF₃SO₂F 三元混合气体的工频击穿试验结果如图 6 所示。可见,在 10 次击穿条件下,不同混合气体的击穿电压基本稳定,未出现随击穿次数增加而下降的趋势。

由图 6 和 7 可以看出,气压为 0.5 MPa 时,混合气体和 SF₆ 的 10 次击穿电压值波动较大,这是因为在稍不均匀电场下,气体的击穿电压受气压与棒电极头部电晕电荷的影响,经过电晕起始、电晕发展和电晕平衡被破坏的过程,击穿过程的复杂性增加导致了击穿电压的分散性增大^[34]。

图 8 和 9 分别给出采用 N₂(简称 N 系气体)或 CO₂(简称 C 系气体)作为主要缓冲气体时 CF₃SO₂F 混合气体的击穿特性,并与 SF₆ 进行对比。可见,

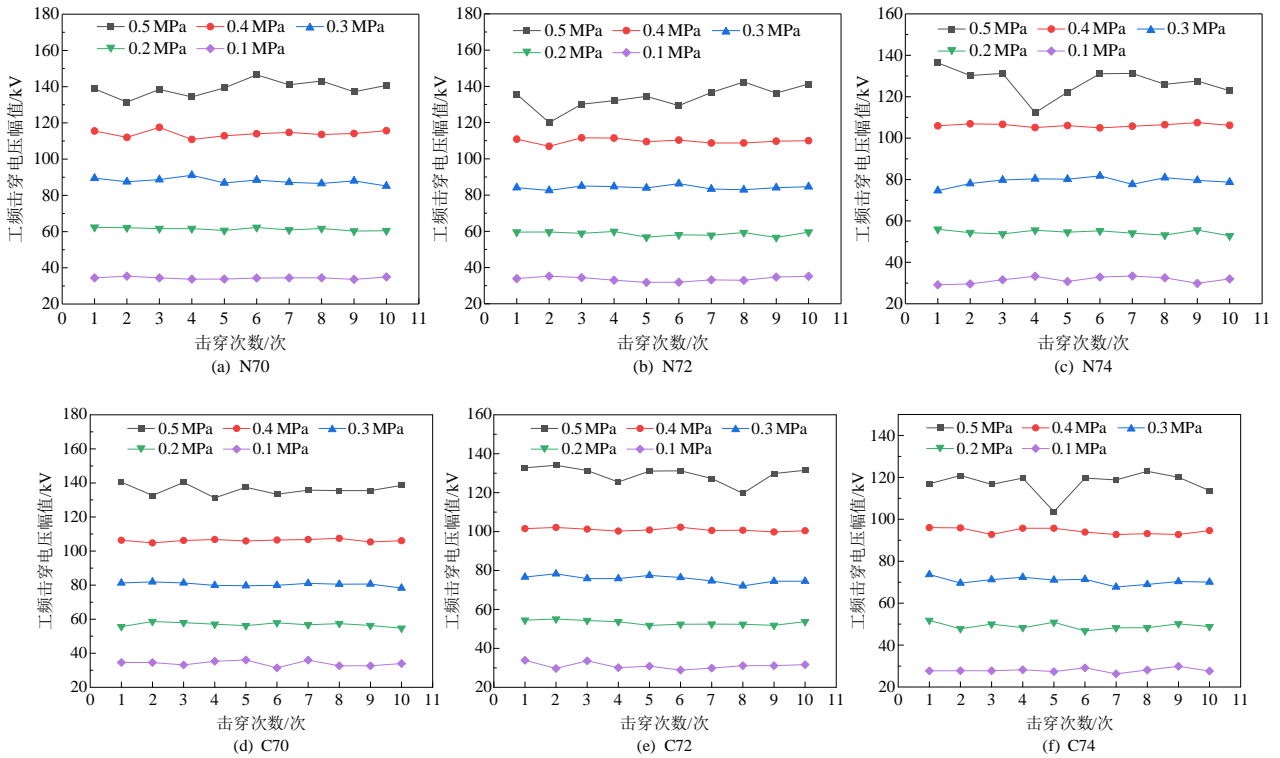


图6 不同类型CF₃SO₂F三元混气的工频击穿特性

Fig. 6 Power frequency breakdown characteristics of different CF₃SO₂F ternary gas mixture

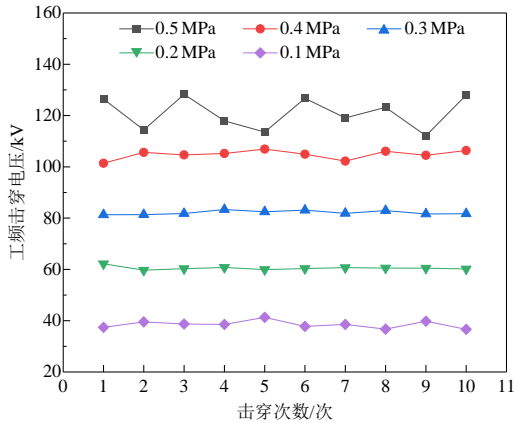


图7 SF₆的工频击穿特性

Fig. 7 Power frequency breakdown characteristics of SF₆

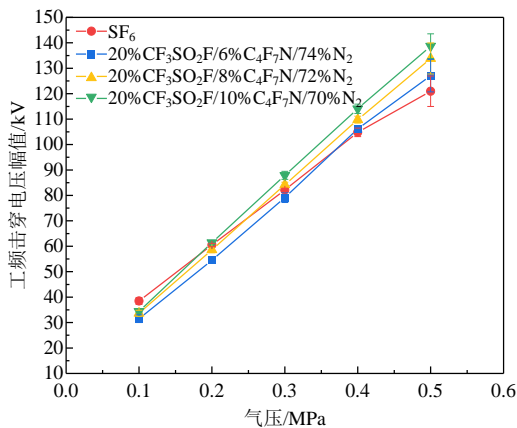


图8 N系CF₃SO₂F混合气体的工频击穿电压
Fig. 8 Power frequency breakdown voltage of N series CF₃SO₂F gas mixtures

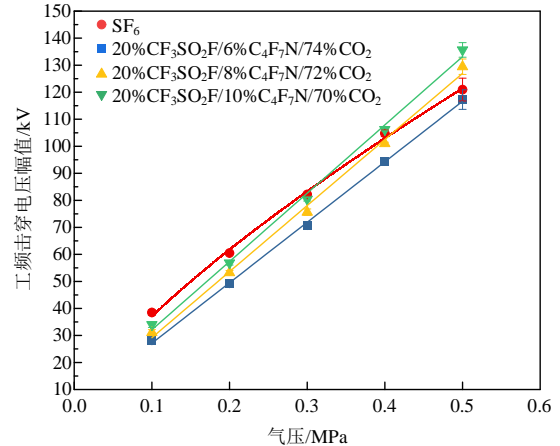


图9 C系CF₃SO₂F混合气体的工频击穿电压
Fig. 9 Power frequency breakdown voltage of C series CF₃SO₂F gas mixtures

在0.5 MPa相同气压下, 3种N系气体的绝缘性能都优于SF₆; C72、C70这2种C系气体的绝缘性能优于SF₆。因此可推荐上述5种气体作为等气压替代SF₆的配方, 其相对于SF₆的绝缘强度如表3所示。

此外, 从图8和9可看出, 在0.1~0.5 MPa范围内, 无论N系还是C系CF₃SO₂F混合气体, 其击穿电压均随气压增大而线性增大。而SF₆气体的击穿电压随气压增大呈现一定饱和增长趋势, 这是因为SF₆气体在高气压下对电场变化更加敏感, 而CF₃SO₂F混合气体的主要成分为N₂或CO₂, 其对

表 3 CF₃SO₂F 三元混合气体相对于 0.5 MPa SF₆ 的绝缘强度

Table 3 Insulation strength of CF₃SO₂F ternary gas mixture relative to SF₆ at 0.5 MPa

气体类型	相对 0.5MPa SF ₆ 的绝缘强度	是否推荐
N74	1.051	是
N72	1.106	是
N70	1.146	是
C74	0.970	否
C72	1.070	是
C70	1.121	是

电场变化的敏感性不如 SF₆ 气体, 因此在 0.5 MPa 及以下气压范围内使得 CF₃SO₂F 混合气体的击穿电压随气压呈线性增大趋势。

从表 3 可以看出, N70 气体相对 0.5 MPa SF₆ 的绝缘强度达到 1.146 倍, 这是由于 N70 气体可以看作是将 20%CF₃SO₂F/80%N₂ 混合气体中的 N₂ 换为 12.5%C₄F₇N/87.5%N₂ 混合气体。原本 20%CF₃SO₂F/80%N₂ 混合气体的绝缘强度可以达到相同气压 SF₆ 的 82%^[28], 而 12.5%C₄F₇N/87.5%N₂ 混合气体的绝缘强度约为相同气压 N₂ 的 2.2 倍^[35]。因此, 用 12.5%C₄F₇N/87.5%N₂ 混合气体替换 20%CF₃SO₂F/80%N₂ 混合气体中的 N₂, 可使得混合气体的绝缘强度大幅度提升, 达到相同气压下与 SF₆ 气体相当甚至更优的水平。

此外, 在相同混合比例和气压等条件下, 混合 N₂ 的三元混合气体绝缘强度高于混合 CO₂。考虑绝缘性能最优, 本文选取 N70 气体进行低温下的放电试验研究, 以验证其在低温下仍具备不低于相同气压 SF₆ 气体的绝缘性能, 并通过试验得出其最低使用温度。

3 低温下 CF₃SO₂F 混合气体绝缘特性

根据 GB/T 7674-2020 规定, 气体绝缘金属封闭设备在户内运行时周围环境最低温度为-25℃, 户外运行时周围环境最低温度为-40℃^[36]。因此进行了最低-40℃条件下 N70 气体的工频放电试验研究。

3.1 试验结果

不同温度下绝压 0.5 MPa 的 N70 气体的试验结果如图 10 所示。可见, 在 20、-15 和-20℃下, 0.5 MPa 的 N70 气体工频击穿电压随温度降低基本不变。从低温下的绝缘性能变化规律来看, 当温度低于-20℃时, N70 气体的击穿电压随温度降低而

快速降低, 表明混合气体中的 CF₃SO₂F 或 C₄F₇N 气体已经出现部分液化。但即便部分液化, 在-25℃下, N70 气体的绝缘强度也接近于 0.5 MPa 的 SF₆ 气体, 为 SF₆ 气体的 98%。

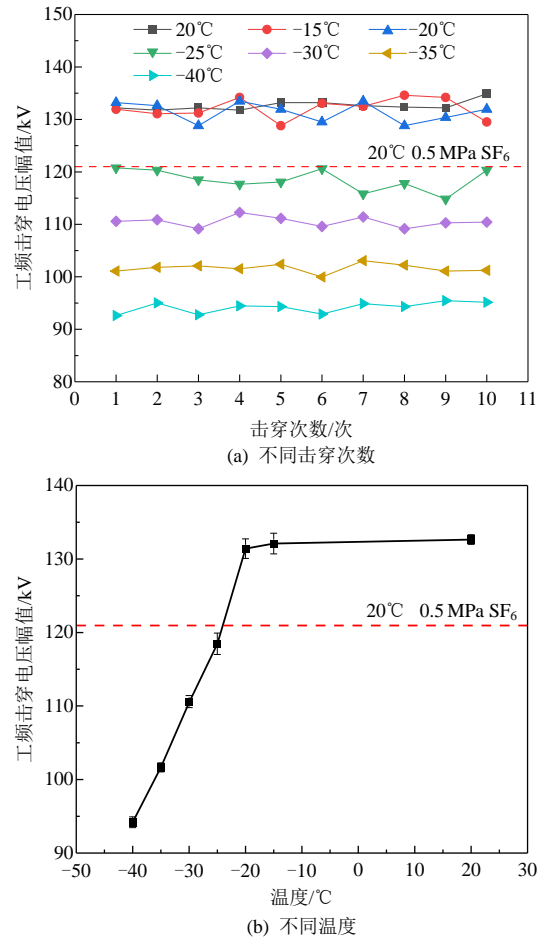


图 10 低温下 N70 气体的击穿特性

Fig. 10 Breakdown characteristics of N70 gas at low temperatures

3.2 液化后再升温时的绝缘特性

若在实际设备中使用 0.5 MPa 的 N70 气体, 当环境温度降低至气体发生部分液化, 为探索当环境温度回升后 N70 气体绝缘性能能否恢复。本文在进行最低-40℃的试验后, 又将温度提升至 20℃, 在 20℃下进行了 N70 气体的击穿试验, 试验结果如图 11 所示。

对比液化后再升温 N70 气体与未液化时的击穿特性, 结果如图 12 所示。可见, 液化后再升温, N70 气体的绝缘强度无明显变化, 甚至略有升高。这一方面是因为在低温液化过程中, 气体中的悬浮微粒将以凝结核的形式随液滴沉积到容器壁上, 从而一定程度上净化了绝缘气体; 另一方面, 在多次击穿试验后, 电极表面微小毛刺被去除, 使得其击穿电压出现上升趋势。

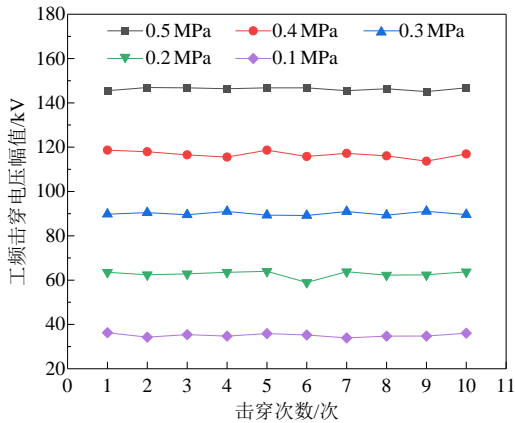


图 11 液化后再恢复至 20°C 时 N70 气体的击穿特性
Fig. 11 Breakdown characteristics of N70 gas after liquefaction and returning to 20°C

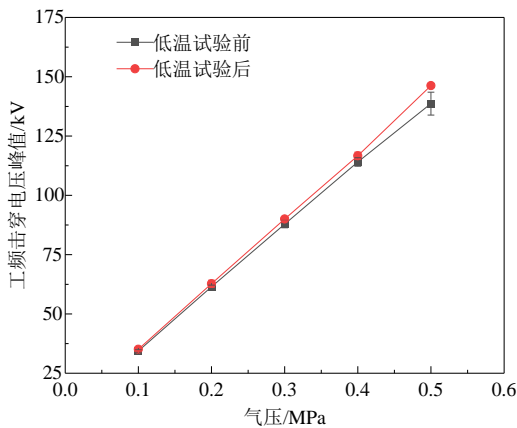
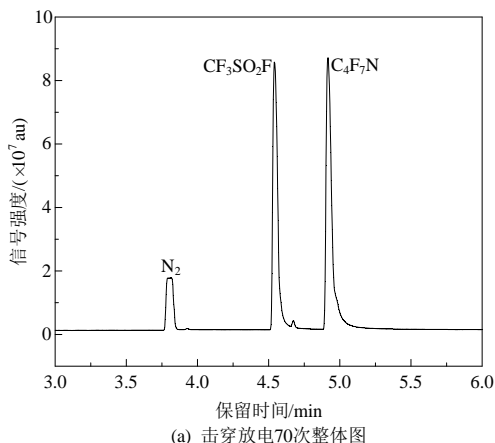


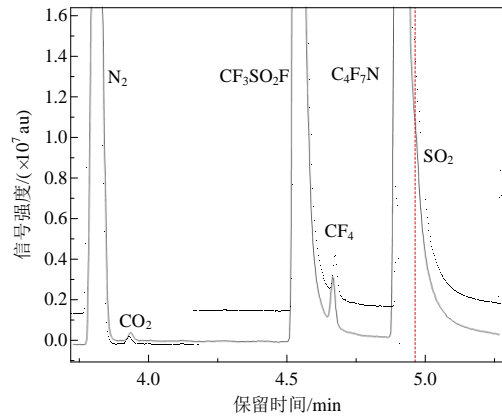
图 12 低温试验前后 N70 气体在 20°C 下的放电特性
Fig. 12 Discharge characteristics of N70 gas at 20°C before and after low temperature test

3.3 放电后的气体成分分析

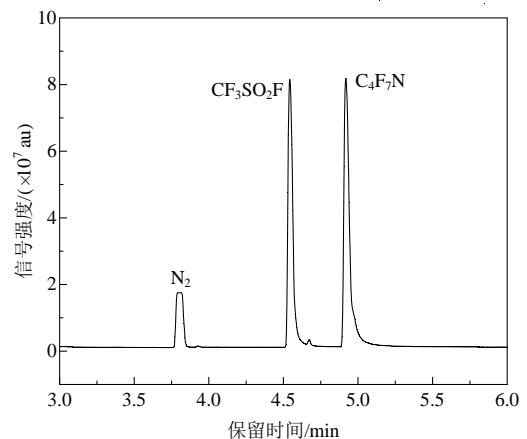
绝缘气体的稳定性也是决定其能否应用于实际设备的关键要素之一。为评估 N70 气体在放电条件下的稳定性，在完成不同温度下的放电试验之后（击穿放电 70 和 110 次），取气使用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)对 N70 气体进行成分分析，结果如图 13 所示。



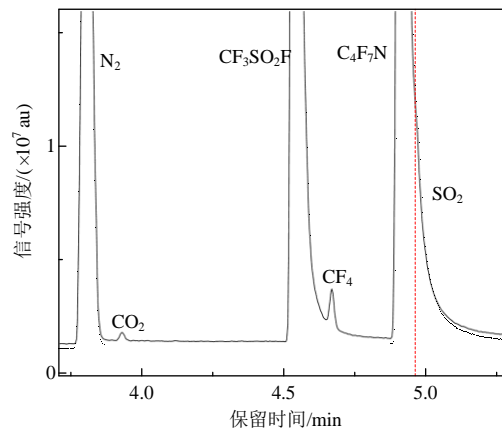
(a) 击穿放电70次整体图



(b) 击穿放电70次局部放大图



(c) 击穿放电110次整体图



(d) 击穿放电110次局部放大图

图 13 N70 气体放电后的成分检测结果

Fig. 13 Gas analysis results after discharges of N70 gas

由图 13 可知，0.5 MPa 的 N70 气体在进行 70 次击穿之后，检测到少量 CO₂ 和 CF₄ 气体。由于 C₄F₇N 混合气体放电会产生分解气体 CO₂^[37]，检测到的 CO₂ 气体为 N70 放电产生的分解气体。由于 CF₃SO₂F 和 C₄F₇N 在放电试验后均会产生 CF₄ 气体^[38-39]，检测到的 CF₄ 气体为 N70 放电产生的分解气体，根据前期研究建立的标准曲线计算，70 次击穿之后 CF₄ 气体含量约为 47 μL/L，110 次击穿之后 CF₄ 气体含量约为 52 μL/L。均检测到分解气体 SO₂，

但其信号峰与 C₄F₇N 的信号峰有重叠,未完全分开,目前尚无法计算其含量。此外,多次击穿放电后电极表面未出现明显碳沉积现象。结果表明, N70 气体中 CF₃SO₂F 气体和 C₄F₇N 气体总体上分解较少,具有应用于电力设备绝缘所需的良好稳定性。

3.4 雷电冲击电压下的绝缘强度

开展雷电冲击电压下混合气体的放电试验,在相同电极结构下采用“升降法”针对 0.5 MPa 的 N70 绝缘气体与 SF₆ 气体下进行放电试验,获得正负极性下 2 种气体的 U_{50%} 放电电压,结果如图 14 所示。可见, N70 气体的极性效应与 SF₆ 气体类似,且无论在正极性还是负极性下, N70 气体的 U_{50%} 放电电压均略高于 SF₆ 气体,结果表明, N70 气体在雷电冲击电压下的绝缘强度也优于 SF₆ 气体,具有一定应用潜力。

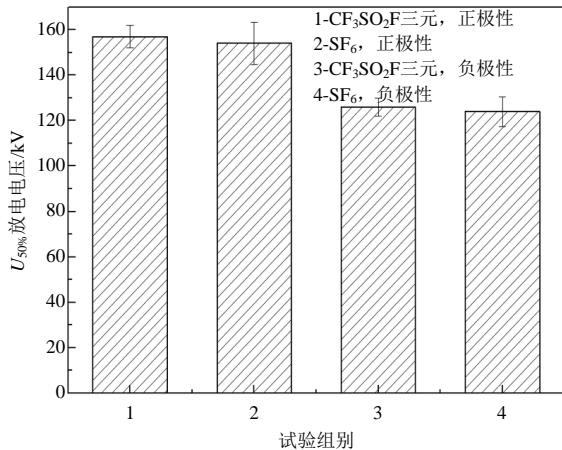


图 14 0.5 MPa 两种气体雷电 U_{50%} 放电电压对比
Fig. 14 Comparison of U_{50%} lightning discharge voltage of two gases at 0.5 MPa

4 CF₃SO₂F 混合气体综合性能分析

除液化温度和绝缘强度外, GWP 也是绝缘气体需要关注的重要指标之一,代表气体的环保性能。国际上通常采用单一气体的 GWP 按质量分数加权相加来计算混合气体的 GWP 值^[40],对于三元混合气体,计算式为

$$G_z = k_1 \times G_1 + k_2 \times G_2 + k_3 \times G_3 \quad (3)$$

式中: G_z 为混合物的 GWP 值; k₁、k₂、k₃ 为 3 种气体组分对应的质量分数; G₁、G₂、G₃ 为 3 种气体组分对应的 GWP 值。

根据式(3)计算得到 N70 及目前常见气体配方的 GWP 值,如表 4 所示,同时也列出使用气压、相对于 0.5 MPa SF₆ 气体的绝缘强度、最低工作温度等核心指标参数。其中, CF₃SO₂F 的 GWP 值取

1^[41], C₄F₇N 的 GWP 值为 2750, SF₆ 的 GWP 值为 24300, CO₂ 的 GWP 值为 1, N₂ 和 O₂ 的 GWP 值视为 0 进行计算。

表 4 不同气体配方的综合性能对比

Table 4 Comprehensive performance of different mixtures

气体类型	气压/MPa	相对绝缘强度	工作温度/℃	GWP
N70	0.5	1.15	-20	<2000
9% C ₄ F ₇ N/91% CO ₂	0.7	1	-20	<2000
10% C ₄ F ₇ N/85% N ₂ /5% O ₂	0.65	1	-20	<2000
干燥空气	0.8	0.55	-50	—
30% SF ₆ /70% N ₂	0.7	1	-50	16787

由表 4 可知,本文提出的 N70 气体与现有常见的气体配方 C₄F₇N/CO₂、C₄F₇N/N₂/O₂ 等混合气体相比,具有更高的绝缘强度、相当的液化温度和 GWP,因此能在与 SF₆ 气体气压相同下使用。从绝缘性能、液化温度和 GWP 角度出发, N70 气体具有等气压替代 SF₆ 的潜力,有望实现对现有以 SF₆ 气体作为绝缘的 GIL 或 GIS 母线等进行直接换气。

含氟气体与缓冲气体的协同主要体现在,含氟气体(比如 SF₆、C₄F₇N 等气体)通常主要吸附电子能量 <1 eV 的低能量电子;含氟气体与缓冲气体混合后,缓冲气体如 N₂、CO₂ 等,具有大量碰撞激发截面,因此能充当减速剂作用使电子减速到 1 eV 以下,促进含氟气体对电子的吸附,进而增强混合气体的绝缘强度。

上述协同效应在含氟气体含量较低时更加明显,其原因是大量电子被缓冲气体减速而处于可被含氟气体吸附的低能量状态,此时决定混气绝缘强度的主要因素为含氟气体含量,因此混气绝缘强度随着含氟气体含量上升而迅速增加,对外呈现出显著的协同效应。然而,随着含氟气体含量增大到一定程度,大部分低能量电子被吸附,再增加含氟气体含量也难以吸附高能量电子,因而增加含氟气体含量对混气绝缘强度的增加有限,对外呈现出协同效应减弱的趋势。

本文提出的 CF₃SO₂F/C₄F₇N/N₂ 三元混合方案,充分利用了 C₄F₇N 二元混合的饱和段,即 C₄F₇N 占比 10% 以上时再增加 C₄F₇N 气体对混气绝缘强度的提升有限,反而还会大幅提升液化温度,使其不具有实用性。但如果控制 C₄F₇N 占比为 10%,再加入部分 CF₃SO₂F 气体,因其与 C₄F₇N 气体具有不完全一致的吸附截面分布,而使其能够吸附部分 C₄F₇N 气体难以吸附的电子,从而可以进一步提升混气绝

缘强度。另一方面,由于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体液化温度远低于相同气压的 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体,因此增加 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体并不会大幅提升混合气体的液化温度,最终使其能够在具有较高绝缘强度的同时还能具有足够低的液化温度。

5 结论与展望

本文得出主要结论如下:

1) 提出一种有可能等气压替代 SF_6 气体的环保绝缘气体配方,该气体为 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体、 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体和 N_2 组成的三元混合气体(简称 N70)。N70 气体在 0.5 MPa、工频电压下的绝缘强度可以达到 SF_6 的 1.15 倍,液化温度可达到 -20°C ,即便出现部分液化,在 -25°C 下的绝缘强度也与现有 0.5 MPa SF_6 气体接近。且液化后再升温时,其绝缘强度仍可恢复。

2) N70 气体与现有常用气体配方相比具有具有高绝缘性能、低液化温度、低 GWP 等综合优势,多次击穿放电后的分解气体以 CF_4 为主,且绝缘性能未出现明显降低,主气成分基本未变,表明其具有较好的稳定性。

未来研究展望如下:

1) 针对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 三元混合气体的冲击绝缘特性、沿面绝缘特性开展深入研究。

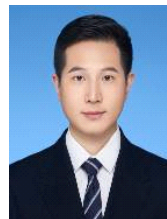
2) 针对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 三元混合气体状态评估和气体处理等设备运维(如:混合比例检测、泄漏检测、局放检测等)相关技术开展进一步研究。

参考文献

- [1] 高克利,杨圆,周文俊,等. SF_6 替代型环保绝缘气体:研究、应用和展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7395-7411.
GAO Keli, YANG Yuan, ZHOU Wenjun, et al. SF_6 alternative environmentally friendly insulating gas: research, application and outlook[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7395-7411(in Chinese).
- [2] 张晓星,肖淞,张博雅,等. PFAS 及含氟气体管控下环保绝缘气体研究与电力装备应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 362-376.
ZHANG Xiaoxing, XIAO Song, ZHANG Boya, et al. Challenges and prospects for the research of environmentally friendly insulating gases and applications of power equipment under control policies of PFAS and fluorine gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 362-376(in Chinese).
- [3] 崔兆仑,郝艳捧,阳林,等. SF_6 废气无害化降解研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7720-7736.
CUI Zhaolun, HAO Yanpeng, YANG Lin, et al. Review on harmless abatement of SF_6 waste gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7720-7736(in Chinese).
- [4] SOVACOOOL B K, GRIFFITHS S, KIM J, et al. Climate change and industrial F-gases: a critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options for reducing synthetic greenhouse gas emissions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110759.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. The Earth's energy budget, climate feedbacks and climate sensitivity [M]/Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023: 923-1054.
- [6] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [7] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671(in Chinese).
- [8] 肖淞,石生尧,林婧桐,等. “碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF_6 控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 339-357.
XIAO Song, SHI Shengyao, LIN Jingtong, et al. Analysis on the control strategy of the strong greenhouse insulating gas SF_6 in high-voltage electrical equipment under the goal of “emission peak and carbon neutrality” [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 339-357(in Chinese).
- [9] 周孝信,赵强,张玉琼,等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析:绿电替代与绿氢替代[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6707-6720.
ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong, et al. Analysis of the development trend of China's energy and power system under the dual carbon target: green electricity substitution and green hydrogen substitution [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6707-6720(in Chinese).
- [10] 郑宇,陶子林,周文俊,等. 欧盟含氟气体法规对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体应用的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4471-4479.

- ZHENG Yu, TAO Zilin, ZHOU Wenjun, et al. Impact of F-gas regulations in EU on the application of $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ gas[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4471-4479(in Chinese).
- [11] MEYER F, HUGUENOT Y, KIEFFEL L, et al. Application of fluoronitrile/ CO_2/O_2 mixtures in high voltage products to lower the environmental footprint[C]// CIGRE. Paris, 2018: D1-201.
- [12] LINDNER C, GAUTSCHI D. Application of a fluoronitrile gas in a 123kV GIS pilot substation[C]// CIGRE. Paris, 2018: B3-107.
- [13] 杨圆. 氧气和微水对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体工频绝缘和分解特性的影响规律[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
YANG Yuan. Influence of oxygen and trace water on power frequency insulation and decomposition characteristics of $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ gas mixtures[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022(in Chinese).
- [14] KIEFFEL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF_6 in electrical grids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(2): 32-39.
- [15] 陶子林, 郑宇, 高克利, 等. 低温下 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体的绝缘特性与参数配置[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 832-841.
TAO Zilin, ZHENG Yu, GAO Keli, et al. Insulation characteristics and parameter configuration of $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ gas mixture at low temperature[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 832-841(in Chinese).
- [16] 王宝山, 余小娟, 侯华, 等. 六氟化硫绝缘替代气体的构效关系与分子设计技术现状及发展[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 21-33.
WANG Baoshan, YU Xiaojuan, HOU Hua, et al. Review on the developments of structure-activity relationship and molecular design of the replacement dielectric gases for SF_6 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 21-33(in Chinese).
- [17] 胡世卓, 周文俊, 郑宇, 等. $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 和 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$ 混合气体工频击穿实验与协同效应分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3562-3570.
HU Shizhuo, ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, et al. Power frequency breakdown experiments and synergistic effect analysis of $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ and $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{N}_2$ mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3562-3570(in Chinese).
- [18] 曾福平, 陈日荣, 李昊天, 等. 氧气对 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体绝缘介质局部过热分解的影响特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 305-312.
ZENG Fuping, CHEN Rirong, LI Haotian, et al. Influence of oxygen on partial over-thermal decomposition of $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ mixed gas insulating medium[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 305-312(in Chinese).
- [19] 田双双, 张晓星, 肖淞, 等. 工频交流电压下 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ 与 N_2 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.
TIAN Shuangshuang, ZHANG Xiaoxing, XIAO Song, et al. Breakdown characteristics and decomposition characteristics of $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ and N_2 mixed gas under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 3125-3132(in Chinese).
- [20] 王璁, 屠幼萍, 罗颜, 等. 应用于直流 GIL 中环境友好型气体的绝缘性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6711-6717.
WANG Cong, TU Youping, LUO Yan, et al. Insulation performance of environmentally friendly gas applied to HVDC-GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6711-6717(in Chinese).
- [21] 张晓星, 周君杰, 唐炬, 等. $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ 与 $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ 两种混合气体局部放电绝缘特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1948-1956.
ZHANG Xiaoxing, ZHOU Junjie, TANG Ju, et al. Experimental research on the partial discharge insulation properties of $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ and $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ gas mixtures[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1948-1956(in Chinese).
- [22] 满林坤, 高靖, 邓鑫阳, 等. $\text{c-C}_4\text{F}_8/\text{CO}_2$ 混合气体的绝缘子沿面闪络性能研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(1): 22-28.
MAN Linkun, GAO Jing, DENG Xinyang, et al. Research on insulator surface flashover properties of $\text{c-C}_4\text{F}_8/\text{CO}_2$ mixed gas[J]. Insulating Materials, 2019, 52(1): 22-28(in Chinese).
- [23] 任书波, 周文俊, 郑宇, 等. HFO-1336mzz(E)/X 混合气体工频绝缘特性试验研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4527-4534.
REN Shubo, ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, et al. Research on power frequency insulation characteristics tests of HFO-1336mzz(E)/X mixture[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4527-4534(in Chinese).
- [24] 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(in Chinese).
- [25] WANG Yi, GAO Zhanyang, WANG Baoshan, et al. Synthesis and dielectric properties of trifluoromethanesulfonyl fluoride: an alternative gas to SF_6 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(48): 21913-21920.
- [26] LONG Yunxiang, GUO Liping, WANG Yi, et al. Electron swarms parameters in $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ as an alternative gas to SF_6 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(24): 11355-11358.
- [27] 向志辉, 郑宇, 任书波, 等. $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的电离特性试验研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1331-1339.
XIANG Zhihui, ZHENG Yu, REN Shubo, et al. Experimental study on the ionization characteristics of

- CF₃SO₂F/N₂ gas mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1331-1339(in Chinese).
- [28] HU Shizhuo, WANG Yi, ZHOU Wenjun, et al. Dielectric properties of CF₃SO₂F/N₂ and CF₃SO₂F/CO₂ mixtures as a substitute to SF₆[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(35): 15796-15804.
- [29] 成毅, 王璁, 周福文, 等. 0.1~0.25 MPa 气压下 SF₆、CF₃I 及其二元三元混合气体的击穿特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 795-800.
CHENG Yi, WANG Cong, ZHOU Fuwen, et al. Breakdown characteristics of SF₆ and CF₃I as well as their binary and ternary gas mixtures from 0.1 MPa to 0.25 MPa gas pressures[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 795-800(in Chinese).
- [30] 徐玲玲, 程林, 杜玮杰, 等. CF₃I 三元混合气体绝缘特性的 Boltzmann 分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 721-726.
XU Lingling, CHENG Lin, DU Weijie, et al. Analysis of the insulation characteristic of CF₃I ternary gas mixture using Boltzmann's equation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 721-726(in Chinese).
- [31] 陈琪, 张晓星, 李祎, 等. O₂ 对 C₄F₇N/N₂/O₂ 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): 1027-1035.
CHEN Qi, ZHANG Xiaoxing, LI Yi, et al. Effects of O₂ on the insulation and discharge decomposition characteristics of C₄F₇N/N₂/O₂ gas mixture[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1027-1035(in Chinese).
- [32] 郑宇. C₄F₇N/CO₂ 混合气体的工频放电规律研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020: 18.
ZHENG Yu. Study on power frequency discharge law of C₄F₇N/CO₂ mixed gas[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020: 18(in Chinese).
- [33] WADA J, UETA G, OKABE S, et al. Dielectric properties of gas mixtures with per-fluorocarbon gas and gas with low liquefaction temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 838-847.
- [34] 杨圆, 高克利, 袁帅, 等. 典型电场下 C₄F₇N/CO₂/O₂ 混合气体工频击穿特性研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15): 3913-3922.
YANG Yuan, GAO Keli, YUAN Shuai, et al. Research on the power frequency breakdown characteristics of C₄F₇N/CO₂/O₂ gas mixture under typical electric fields [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15): 3913-3922(in Chinese).
- [35] 李英楠. C₄F₇N/CO₂ 和 C₄F₇N/N₂ 混合气体在不同电压形式下的绝缘特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LI Yingnan. Study on insulation characteristics of C₄F₇N/CO₂ and C₄F₇N/N₂ mixed gases under different voltage forms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [36] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 额定电压 72.5kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB/T 7674-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB/T 7674-2020[S]. Beijing: China Standard Press, 2020(in Chinese).
- [37] 赵明月, 韩冬, 荣文奇, 等. 电晕放电下二元全氟异丁腈(CF₃)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 (CF₃)₂CFCN buffer gases under corona discharge[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1078-1085(in Chinese).
- [38] 杨景刚, 丁然, 赵科, 等. 13X 分子筛对 C₄F₇N 混合气体碳氟分解产物吸附性能研究[J]. 高压电器, 2024, 60(9): 20-26.
YANG Jinggang, DING Ran, ZHAO Ke, et al. Adsorption performance of 13X molecular sieve on carbon fluorine decomposition products of C₄F₇N mixed gas[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(9): 20-26(in Chinese).
- [39] 逯思敏, 汤贝贝, 高克利, 等. 电晕放电下三氟甲基磺酰氟的分解特性与成因分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4556-4562.
LU Simin, TANG Beibei, GAO Keli, et al. Decomposition characteristics and by-product formation of trifluoromethyl sulfonyl fluoride under corona discharge [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4556-4562(in Chinese).
- [40] 张震, 林莘, 余伟成, 等. C₄F₇N/CO₂ 和 C₄F₇N/N₂ 混合气体热力学物性参数计算[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 250-256.
ZHANG Zhen, LIN Xin, YU Weicheng, et al. Thermodynamic calculation of physical properties of C₄F₇N/CO₂ and C₄F₇N/N₂[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 250-256(in Chinese).
- [41] 高克利, 郑宇, 颜湘莲, 等. 新型环保绝缘气体三氟甲基磺酰氟(CF₃SO₂F)研究进展[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 4060-4075.
GAO Keli, ZHENG Yu, YAN Xianglian, et al. Research progress of the novel eco-friendly insulating gas trifluoromethylsulfonyl fluoride(CF₃SO₂F)[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4060-4075(in Chinese).



郑宇

在线出版日期: 2025-04-08。

收稿日期: 2024-11-07。

作者简介:

郑宇(1992), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事环保绝缘气体、电气设备数字孪生与故障诊断等方面的研究工作, zywhuee@whu.edu.cn。

(编辑 张蕾)