

# 新环保绝缘气体应用于高压电气设备的研究进展

颜湘莲<sup>1</sup>, 高克利<sup>1</sup>, 王雯<sup>1</sup>, 黄印<sup>1</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 姚尧<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司 电网环境保护全国重点实验室, 北京 100192;

2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430015)

**摘要:** 本文综述了国内外关于新环保绝缘气体的研究进展, 重点围绕国际主流推广的全氟异丁腈(C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N)气体及其在电气设备中的应用, 总结了C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N混合气体的间隙、沿面绝缘特性并提出了相关设备绝缘的设计依据, 分析了其在不同工况下的分解特性与气-固相容性评价指标, 介绍了C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N及其混合气体灭弧性能的研究进展和系列环保设备的研发及应用情况, 为当前阶段SF<sub>6</sub>电气设备环保化升级提供理论参考。同时指出目前国内外仍在开展性能优异的新环保绝缘气体研发攻关, 为绿色低碳电网建设提供技术支撑。

**关键词:** 新环保绝缘气体; 高压电气设备; C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N环保气体; 绝缘设计; 气-固相容性评价

## Research progress on application of new eco-friendly insulating gas in high-voltage electrical equipment

YAN Xianglian<sup>1</sup>, GAO Keli<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, HUANG Yin<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, YAO Yao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430015, China)

**Abstract:** In this paper, the research progress on new eco-friendly insulating gases at home and abroad was reviewed, and the international mainstream promotion of perfluoroisobutyronitrile (C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N) gas and its application in electrical equipment were expounded emphatically. The gap and surface insulation characteristics of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N gas mixture were summarized, and the design criteria of the related equipment insulation was proposed. The decomposition characteristics and gas-solid compatibility evaluation indices of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N gas mixture under different operating conditions were analyzed. Additionally, the research progress on arc-quenching performance of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N and its gas mixture and the development and application of a series of eco-friendly equipment were introduced, so as to provide a theoretical reference for the environmental protection upgrade of SF<sub>6</sub> electrical equipment in the current stage. Meanwhile, it was noted that the research and development efforts on new eco-friendly insulating gases with superior performance were still ongoing at home and abroad, which can provide technical support for the construction of a green and low-carbon power grid.

**Key words:** new eco-friendly insulating gas; high-voltage electrical equipment; C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N eco-friendly gas; insulation design; gas-solid compatibility evaluation

## 0 引言

SF<sub>6</sub>是高压电气设备中应用最广泛的绝缘气体, 但其全球增温潜势(GWP)为CO<sub>2</sub>的24 300倍, 大气寿命长达3 000年以上, 已被《京都议定书》明确限制使用和排放<sup>[1-2]</sup>。美国海洋与环境保护局(NOAA)统计显示, 2015年全球SF<sub>6</sub>气体泄漏排放等效为CO<sub>2</sub>当量达到1.93亿吨。近年来, 英美等发达国家

陆续制定了SF<sub>6</sub>退出计划, 从2026年起将逐步禁止新增设备使用SF<sub>6</sub>气体。我国SF<sub>6</sub>设备规模高居世界第一, 每年新增用量超1万吨<sup>[3]</sup>, SF<sub>6</sub>环保替代势在必行。

自20世纪80年代以来, SF<sub>6</sub>替代技术一直是国际环保气体领域的研究热点。CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和空气等天然气成为SF<sub>6</sub>替代的首选, 但其绝缘和灭弧性能难以满足设备运行要求。21世纪以来, 随着国际降碳减排力度的不断增大, 研究人员开展了CF<sub>3</sub>I、c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>等新环保气体应用于电气设备中的研究, 但

一直未取得技术突破,大多停留于实验室研究阶段。2020年我国提出了“双碳”战略和建设新型电力系统目标,国内外相继开发了 $C_4F_7N$ 、 $C_5F_{10}O$ 、HFO等系列新环保绝缘气体<sup>[4]</sup>,攻克了这些气体在设备中应用的技术难题,研发了系列环保电工装备并实现工程应用。

$C_4F_7N$ 气体是目前国际上主流推广的应用于高压电气设备的工程化 $SF_6$ 环保替代气体<sup>[5]</sup>。本文立足于新环保绝缘气体在设备中应用的现状,对 $C_4F_7N$ 环保气体的应用技术及其装备研究进展进行综述,并分析面临的技术挑战和取得的研究成果,为研发性能更优异的新环保绝缘气体提供技术参考。

## 1 新环保绝缘气体特性

传统环保气体 $CO_2$ 、空气、 $N_2$ 主要来源于自然界,而新环保绝缘气体大多由人工合成。自然气体的环保性能优异(GWP值 $\leq 1$ )、液化温度低(沸点低于 $SF_6$ ),但其绝缘性能仅为 $SF_6$ 气体的30%~50%,且灭弧性能差,应用于电气设备时可能改变设备结构并增大尺寸,从而导致经济性差和可靠性低等问题,增加了工程应用的难度。

早期国内外关于新环保绝缘气体的研究主要集中于 $CF_3I$ 和 $c-C_4F_8$ ,近年主要有 $C_4F_7N$ 、 $C_5F_{10}O$ 、 $C_6F_{12}O$ 、HFO-1234ze(E)/1336mzz(E)<sup>[4-11]</sup>,这些气体与 $SF_6$ 气体的关键参数对比列于表1中。其中 $CF_3I$ 环保性能优异,但其放电后会析出碘单质污染电极,可靠性不足; $c-C_4F_8$ 的稳定性稍差,长期运行中会出现碳沉积现象,采用这两种气体研发的电气设备均未实现工程应用。对于应用较多的新环保绝缘气体,全氟酮类气体( $C_5F_{10}O$ 、 $C_6F_{12}O$ )的环保性能优异,但液化温度较高,限制了其在高电压等级设备中的应用;氢氟烯烃(HFO-1234ze(E)/1336mzz(E))具有易燃性,绝缘强度低或液化温度高,主要适用于中压设备;而 $C_4F_7N$ 的综合性能优异,绝缘强度高,GWP值和大气寿命均较 $SF_6$ 气体显著降低,可应用于10~1 000 kV全电压等级设备。

## 2 $C_4F_7N$ 环保气体的应用技术和装备

由于 $C_4F_7N$ 气体液化温度( $-4.7^\circ C$ )较高,需与 $CO_2$ 、 $N_2$ 等低液化温度的天然气(称为缓冲气体)混合使用,以满足设备的使用环境温度要求。国内外开展了大量关于 $C_4F_7N$ 及其混合气体在电气设备

表1 新环保绝缘气体与 $SF_6$ 气体的关键参数比较

Table 1 Key parameter comparison between new eco-friendly insulating gases and  $SF_6$

气体	相对绝缘强度	沸点/ $^\circ C$	GWP值	大气寿命
$SF_6$	1.0	-63.8	24 300	3 000年
$CF_3I$	1.2	-22.5	1	2天
$c-C_4F_8$	1.3	-6.0	8 700	1 400年
$C_4F_7N$	2.2	-4.7	2 750	30年
$C_5F_{10}O$	2.0	26.5	<1	16天
$C_6F_{12}O$	2.7	49.0	1	5天
HFO-1234ze(E)	0.8	-19	6	10天
HFO-1336mzz(E)	1.8	7.5	18	/

注:“/”表示未见公开文献报道。

与装备中应用技术的研究,主要包括绝缘特性和设计依据、分解特性与气-固相容性评价、灭弧性能及系列环保设备方面取得的研究进展。

### 2.1 绝缘特性和设计依据

标准气压下 $C_4F_7N$ 气体的绝缘强度是 $SF_6$ 的2.2倍。电气设备设计主要涉及间隙绝缘特性和沿面绝缘特性, $C_4F_7N$ 混合气体的绝缘特性与缓冲气体、电场分布、电压波形等因素密切相关,需要综合考虑这些因素从而提出设备绝缘设计依据。

#### (1) 间隙绝缘特性

在均匀和稍不均匀电场中,工频电压作用时,0.88 MPa、1.04 MPa下3.7% $C_4F_7N$ /96.3% $CO_2$ 的放电电压分别与0.55 MPa、0.65 MPa下 $SF_6$ 的放电电压接近<sup>[12]</sup>;与3种典型缓冲气体混合时, $C_4F_7N$ 混合气体绝缘协同效应从高到低依次为 $C_4F_7N/Air$ 、 $C_4F_7N/CO_2$ 、 $C_4F_7N/N_2$ <sup>[13]</sup>。雷电(LI)冲击电压作用时,9% $C_4F_7N$ /91% $CO_2$ 的放电电压约为相同气压下 $SF_6$ 的80%<sup>[14]</sup>。直流电压作用时,0.7 MPa下4% $C_4F_7N$ /96% $CO_2$ 的放电电压约为0.5 MPa下 $SF_6$ 的81.2%<sup>[15]</sup>。

在极不均匀电场中雷电冲击电压作用时,0.7 MPa下9% $C_4F_7N$ /91% $CO_2$ 的放电电压约为0.4 MPa下 $SF_6$ 的80%<sup>[14]</sup>。与提高气压相比,增加 $C_4F_7N$ 体积占比对 $C_4F_7N/N_2$ 混合气体的工频放电电压提升更明显。

#### (2) 沿面绝缘特性

大量的试验结果表明,与间隙绝缘特性相比,气-固界面绝缘强度在设备设计中处于决定性作用。对于10 mm沿面绝缘,工频电压作用下,5% $C_4F_7N$ /95% $CO_2$ 的闪络电压约为相同气压下 $SF_6$ 的70.5%,而当 $C_4F_7N$ 体积分数为13%时,混合气体

的闪络电压提高到SF<sub>6</sub>的87.5%。LI冲击电压作用下，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>与SF<sub>6</sub>的相对绝缘强度增大，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N体积分数为13%的C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体闪络电压约为SF<sub>6</sub>的93%<sup>[16]</sup>。直流电压作用下，0.7 MPa下4%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/96%CO<sub>2</sub>的闪络电压为0.5 MPa下SF<sub>6</sub>的96%<sup>[15]</sup>。

采用252 kV盆式绝缘子开展沿面放电真型试验，工频电压作用下，0.6 MPa下9%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/95%CO<sub>2</sub>的放电电压与0.5 MPa下SF<sub>6</sub>的接近。LI冲击电压作用下，0.7 MPa下C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N体积分数为5%、9%的C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体放电电压分别为0.5 MPa下SF<sub>6</sub>的92%、98%<sup>[17-18]</sup>。

### (3) 绝缘设计依据

综合C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体间隙和沿面绝缘特性，发现放电电压随气压、C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N体积分数的增加逐渐趋于饱和，其中间隙场强随气压和C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N体积分数的变化如图1所示。结合设备使用环境温度不高于-15℃或-25℃的要求，参考SF<sub>6</sub>高压电器内绝缘设计原则<sup>[19]</sup>，提出C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>设备的绝缘设计依据，即在0.7 MPa气压下，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体的间隙、沿面场强控制值分别为26.4 kV/mm和12.5 kV/mm。

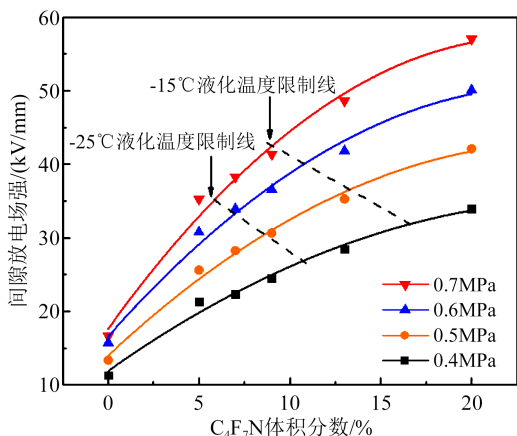


图1 间隙放电场强随气压和C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N体积分数的变化  
Fig.1 The electric field strength of gap discharge varying with pressure and the volume fraction of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N

## 2.2 分解特性与气-固相容性评价

电气设备运行中需经受电、热等应力作用，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N气体的稳定性稍弱于SF<sub>6</sub>，其在不同工况下的分解特性及与设备常用固体材料的相容性对设备设计和长期可靠运行具有重要意义。

### (1) 不同工况下的分解特性

分子反应动力学计算结果表明，局部过热时，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N在高温下可能先分解成C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、CF<sub>3</sub>C(F)CN及少

量的CF<sub>4</sub>与C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>。放电过程中，H<sub>2</sub>O解离生成的OH·和H·自由基会加速C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N的分解，进一步生成CF<sub>3</sub>H、CF<sub>2</sub>O、C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H、C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>等产物<sup>[20-21]</sup>。

C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N混合气体在不同工况下的分解特性试验结果表明，工频放电时，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>会分解产生CO、CF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>10</sub>、C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、CF<sub>3</sub>CN、C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>CN和HF，且试验后在气室和电极表面发现了固体产物，主要元素为氟、氮、硅和铜(电极材料)<sup>[22]</sup>。C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/N<sub>2</sub>放电后在电极表面析出了棕色固体物质，如加入体积分数为4%~6%的O<sub>2</sub>可抑制固体产物的产生，加入2%~8%的O<sub>2</sub>可降低气体产物含量<sup>[23]</sup>。局部过热条件下，C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>的初始热分解温度约为650℃，在880℃左右C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N完全分解，其中在650℃时检测到CO，700℃时检测到C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>和HF，800℃以上检测到COF<sub>2</sub>、CF<sub>3</sub>CN和C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>CN<sup>[24]</sup>。

### (2) 气-固材料相容性及评价

采用热加速和电热联合试验方法，开展了C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N混合气体与设备常用金属导体、环氧树脂和密封橡胶的相容性试验。在温度120~220℃下，10%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/90%CO<sub>2</sub>与纯铜、铝和铜镀银作用40 h后，铝和铜镀银表面颜色保持稳定，纯铜在120℃下颜色未发生显著变化，但随着金属界面温度上升，纯铜颜色明显加深，说明铜表面受到腐蚀<sup>[25-26]</sup>，需引起关注。

C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>与环氧树脂在90~160℃下进行热加速试验后，环氧树脂的沿面闪络电压稳定，表面未检测到晶体析出或明显断层，当温度升至160℃时，9%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/91%CO<sub>2</sub>发生分解。5%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/95%CO<sub>2</sub>在环氧树脂沿面局放缺陷下会产生CF<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>6</sub>、CF<sub>3</sub>CN、C<sub>12</sub>F<sub>7</sub>H<sub>17</sub>O<sub>2</sub>等<sup>[27]</sup>。在10%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/90%CO<sub>2</sub>与双酚A型环氧树脂的热加速试验中，环氧树脂表面被轻微腐蚀，表面电阻率变化较小，二者相容性良好<sup>[28]</sup>。

C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>与非金属材料在75~220℃下进行热加速试验后，其与弹性体反应生成了C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H，而与干燥剂反应生成了C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>H和C<sub>3</sub>F<sub>6</sub><sup>[29]</sup>。C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N与三元乙丙橡胶(EPDM)在130℃下老化42 d后，检测到CO<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>等，EPDM的力学性能显著下降，微观形貌显示EPDM出现多层断面裂痕并析出亚硫酸盐晶体。10%C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/90%CO<sub>2</sub>与EPDM在80℃下作用90 h后，检测到C<sub>3</sub>F<sub>6</sub>、CF<sub>3</sub>H、C<sub>2</sub>F<sub>5</sub>N，EPDM表面析出大量颗粒状晶体并伴有氟元素沉

积<sup>[30]</sup>。以上结果说明 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 混合气体与 EPDM 的相容性不满足要求。

基于上述研究结果,提出了 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体与设备材料的相容性评价指标,列于表 2 中,确定了 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 环保设备工程化的材料选型方案:推荐采用氟橡胶替换 EPDM,采用 4A 或 5A 分子筛作为吸附剂。

表 2 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体的气-固材料相容性评价指标  
Table 2 Evaluation indicators for gas-solid material compatibility of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> gas mixture

评价对象	相容性良好指标	相容性不足指标
绝缘气体	气体主成分无变化: C <sub>4</sub> F <sub>7</sub> N 体积占比 减少≤1%	产生分解气体(如 CF <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> 等),含量 具有明显增长趋势
金属	表面形貌和元素 成分无明显变化	材料性能变化较大, 不满足设备现场 运行要求
环氧树脂	沿面闪络电压 降幅≤10%	
橡胶	随温度变化压缩 永久变形率≤1%	

### 2.3 气体灭弧性能

由于气体固有性能的限制,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 的恢复能力较差,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 及其混合气体的灭弧性能与大容量开断技术面临较大挑战。国外关于这方面的公开文献报道较少,现有研究主要采用磁流体动力学(MHD)方法仿真计算气体在不同电压等级、开断电流下的灭弧性能,试验研究集中于小电流开合场景,大容量开断技术正在攻关中。

MHD 仿真结果表明,在 12 kV 负荷开关中,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 表现出较好的熄弧能力,电弧电流过零前的熄弧尖峰较高<sup>[31]</sup>,通过外加磁场或加深绝缘栅槽,可提高混合气体的电弧电压和电弧稳定性<sup>[32]</sup>。对于 126 kV 隔离开关,5% C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/95% CO<sub>2</sub> 具有开合 1 600 A 母线转移电流的能力<sup>[33]</sup>。在大电流开断场景中<sup>[34-36]</sup>,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体的熄弧性能出现明显下降趋势,充入少量 O<sub>2</sub> 有助于提高弧后热开断能力。对 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合气体的燃弧过程进行 MHD 仿真,研究表明,在 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 中混入 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 后,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合气体的绝缘恢复速度得到显著提升,其绝缘恢复能力优于 C<sub>3</sub>F<sub>10</sub>O/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合气体和 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合气体,当击穿延时<100 μs 时,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 的绝缘恢复能力较 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 提高了 40%~100%<sup>[37-39]</sup>。

C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体的灭弧性能模拟实验结果

表明<sup>[37]</sup>,自由燃弧期间其电弧能量累积量减小,电流过零前的能量耗散系数降低,增加气吹和拉弧可显著提升小电流阶段的弧后热开断能力。对于 12 kV 环网柜,0.14 MPa C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 混合气体的开断能力满足 IEC 标准要求,通过优化灭弧结构,可进一步提高开断能力<sup>[40]</sup>。与磁吹式、金属去离子栅式灭弧负荷开关相比,压气式灭弧负荷开关的开断性能最优,可多次开合 12 kV/650 A 有功负载电流,提高 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 体积占比可提升混合气体的灭弧性能。在 126 kV、420 kV 隔离开关中,对比测试 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 与 SF<sub>6</sub> 的灭弧性能,通过 100 次 1 600 A 母线转移电流试验结果表明,0.55 MPa 下 5% C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/95% CO<sub>2</sub> 的平均燃弧时间更短,较 SF<sub>6</sub> 燃弧时间减少 3 ms,尽管混合气体隔离开关的开断性能弱于 SF<sub>6</sub>,但均通过试验。5% C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/89% CO<sub>2</sub>/6% O<sub>2</sub> 混合气体可通过 25 kA 短路电流下单分、重合闸和合分完整循环试验,具备大电流灭弧能力<sup>[41]</sup>。

上述仿真与试验结果表明,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 混合气体具有开合数 kA 及以下小电流的灭弧性能,对 SF<sub>6</sub> 设备结构影响较小<sup>[42-44]</sup>;但对于大容量开断场景,需开展设备灭弧结构优化、机械特性与气体参数适配及性能调控技术攻关,以满足断路器短路开断要求。

### 2.4 环保设备及应用

C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 气体以其优异的综合性能,代替 SF<sub>6</sub> 在高压电气设备中得到了推广应用。美国 GE 公司、日立能源(原 ABB 高压公司)等国际设备厂商基于 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 气体技术路线,研发了断路器、GIS、GIL、PT 等系列设备并实现工程应用,国内科研机构与设备厂家联合研发了 12 kV 至特高压的全电压等级环保设备<sup>[45-53]</sup>,正在开展示范应用。

2017 年,美国 GE 公司率先研发了采用 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体的 420 kV 环保 GIL,并在英国曼宁变电站投运,GIL 工程应用超过 10 km;随后推出了采用 6% C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/89% CO<sub>2</sub>/5% O<sub>2</sub> 混合气体的 145 kV GIS,其在欧洲应用的电压等级覆盖 50~145 kV,运行最低环境温度为-25℃,目前该设备在全球应用超过 500 个间隔,另外 420 kV GIS 也正在开发中。2020 年,C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 被欧盟推荐为不改变高压开关设备结构前提下 SF<sub>6</sub> 的最优替代气体。日立能源与 GE 公司采用 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 混合气体技术路线,联合研发了 170 kV GIS,并于 2023 年在上海宁国站投运,另外还推出了采用 3.5% C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/86.5% CO<sub>2</sub>/10% O<sub>2</sub> 混合气体的 420 kV/

63 kA 罐式断路器及 GIS,运行环境温度为 $-30^{\circ}\text{C}$ ,在美国已应用 10 余个间隔。此外,2024 年日立能源在 CIGRE 大会上发布了采用  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2/\text{O}_2$  混合气体的 550 kV GIS。同年,韩国晓星研发了采用  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  混合气体的 170 kV/50 kA GIS。

2017 年,中国电力科学研究院牵头的团队承担了国家重点研发计划项目“环保型管道输电关键技术”,掀起了国内研究  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  等新环保绝缘气体及其在设备中的应用研究热潮。该项目团队研制了国际首台采用  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  的 1 100 kV 特高压环保 GIL,于 2020 年在特高压交流基地开展了带电运行试验;还研发了采用  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  混合气体的绝缘环网柜、126~252 kV GIS 母线和隔离/接地开关、550 kV GIL 和 10 kV 变压器等系列装备<sup>[54-63]</sup>。南方电网公司等其他团队开展了大量的  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  及其设备技术与安全应用研究,研发了采用  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  混合气体的 12 kV 柱上开关、负荷开关柜、40.5 kV GIS 等中压开关设备及 126~252 kV 环保 GIS<sup>[64-68]</sup>。目前,这些环保设备已陆续在安徽、河南、河北、湖北、广东和云南等地的多个电网工程示范应用,促进了电网的绿色低碳转型。

国外厂商研发的  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  环保设备解决了灭弧和开断技术难题,国内仍在加紧开展大容量开断技术攻关,目前 126 kV  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  气体断路器已通过关键性能试验考核。

### 3 结论

本文总结了替代  $\text{SF}_6$  用于高压电气设备的新环保绝缘气体研究进展,重点围绕  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  环保气体的应用技术和装备开展了详述,主要结论和展望如下:

(1) 工程化应用的新环保绝缘气体主要有  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 、 $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$  及 HFO-1234ze(E),其中后 3 种气体及探索中的 HFO-136mzz(E)仅适用于 10~35 kV 电压等级, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  混合气体则可覆盖 10~1 000 kV 全电压等级。

(2)  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  及其混合气体在电气设备中应用的绝缘设计、分解特性与气-固相容性等技术研究已取得突破,研发的电气装备覆盖 10~1 000 kV 绝缘应用场景,550 kV 及以下设备实现了示范运行,国内正开展灭弧和开断技术攻关,加快研发 126 kV 断路器及 GIS 并实现工程应用。

(3) 新环保绝缘气体的研发及应用是一个长期探索的过程,韩国提出了全氟甲基乙烯基醚( $\text{C}_3\text{F}_6\text{O}$ ,K6)气体,国内有团队开发了双氟甲基甲硫醚( $\text{CF}_3\text{SCF}_3$ )气体,本项目团队开发了三氟甲基磺酰氟( $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ )气体,这些气体的关键性能及在设备中的应用技术仍在测试和开发中,有望提出性能更优异的电气设备用新环保气体。

### 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 inter-governmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK:Cambridge University Press,2021.
- [2] REILLY J, PRINN R, HARNISCH J, et al. Multi-gas assessment of the Kyoto Protocol[J]. Nature,1999,401(6753):549-555.
- [3] 黄少中,韩水,李化强,等.六氟化硫等非二氧化碳温室气体控制相关标准研究[R].北京:中国能源研究会,2021:3-7.  
HUANG Shaozhong, HAN Shui, LI Huaqiang, et al. Research on standards related to the control of non- $\text{CO}_2$  greenhouse gases such as sulfur hexafluoride[R]. Beijing: China Energy Research Society,2021:3-7.
- [4] KNOL P, GAUTSCHI D. Application of non- $\text{SF}_6$  gases or gas-mixtures in medium and high voltage gas-insulated switchgear [R]. Paris:CIGRE,2020:20-23.
- [5] SMEETS R, LATHOUWERS A. Current interruption in  $\text{SF}_6$ -free switchgear[R]. Paris:CIGRE,2022:187-225.
- [6] 颜湘莲,高克利,郑宇,等. $\text{SF}_6$ 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  $\text{SF}_6$ [J]. Power System Technology, 2018,42(6):1837-1844.
- [7] 高克利,杨圆,周文俊,等. $\text{SF}_6$ 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.  $\text{SF}_6$  alternative environmentally friendly insulating gas: research, application and outlook[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(18):7395-7411.
- [8] 高克利,颜湘莲,刘焱,等.环保气体绝缘管道技术研究进展[J].电工技术学报,2020,35(1),3-20.  
GAO Keli, YAN Xianglian, LIU Yan, et al. Progress of technology for environment-friendly gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(1):3-20.
- [9] 唐晓杰,张荣伟,李龙,等.新型环保绝缘气体  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  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  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ [J]. Insulating Materials,2024,57(6):102-107.
- [10] 胡德雄,汪枫,刘杰,等.HFO-1336mzz(E)应用于气体绝缘输电线路的温升特性研究[J].绝缘材料,2023,56(12):104-110.  
HU Dexiong, WANG Feng, LIU Jie, et al. Research on temperature rise characteristics of HFO-1336mzz(E) applied in gas insu-

- lated transmission line[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(12): 104-110.
- [11] 靳国豪,秦川,靳婷蕾,等. $c\text{-C}_4\text{F}_8$ 和 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 应用于气体绝缘输电线路的温升特性分析[J]. *绝缘材料*,2020,53(9):81-86.  
JIN Guohao, QIN Chuan, JIN Tinglei, et al. Temperature rise characteristics of  $c\text{-C}_4\text{F}_8$  and  $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$  applied in gas insulated transmission line[J]. *Insulating Materials*,2020,53(9):81-86.
- [12] NECHMI H E, BEROUAL A, GIRODET A, et al. Fluoronitriles/ $\text{CO}_2$  gas mixture as promising substitute to  $\text{SF}_6$  for insulation in high voltage applications[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2016,23(5):2587-2593.
- [13] 胡世卓,周文俊,郑宇,等.3种缓冲气体对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体绝缘特性的影响[J]. *高电压技术*,2020,46(1):224-232.  
HU Shizhuo, ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, et al. Influence of three buffer gases on dielectric strength of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$  mixtures[J]. *High Voltage Engineering*,2020,46(1):224-232.
- [14] ZHANG Tianran, ZHOU Wenjun, YU Jianhui, et al. Insulation properties of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  mixtures under lightning impulse[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2020, 27(1):181-188.
- [15] TU Youping, CHENG Yi, WANG Cong, et al. Insulation characteristics of fluoronitriles/ $\text{CO}_2$  gas mixture under DC electric field [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018,25(4):1324-1331.
- [16] 刘一树,丁卫东,李志闯,等. $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 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  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ [J]. *High Voltage Engineering*,2019,45(12):3854-3859.
- [17] 李志闯,郑忠波,刘一树,等. $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体中252 kV盆式绝缘子工频沿面闪络特性研究[J]. *电工技术学报*,2020,35(1): 62-69.  
LI Zhichuang, ZHENG Zhongbo, LIU Yishu, et al. Surface flashover characteristics of the 252 kV conical insulator in  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  gas mixtures under AC voltage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2020,35(1):62-69.
- [18] 姜旭,金海云,张文兵,等.环保型 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体在极不均匀电场下的雷电冲击绝缘特性[J]. *中国电机工程学报*,2020,40 (3):1030-1037.  
JIANG Xu, JIN Haiyun, ZHANG Wenbing, et al. Lightning impulse insulation properties of eco-friendly  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  mixed gas under extremely non-uniform electric field[J]. *Proceedings of the CSEE*,2020,40(3):1030-1037.
- [19] 黎斌. $\text{SF}_6$ 高压电器设计[M].第5版.北京:机械工业出版社, 2019:54-60.  
LI Bin. Design of high-voltage electrical apparatus[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press,2019:54-60.
- [20] GAO W Q, POSADA L, SHIRAVAND V, et al. Decomposition characteristics of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ -based  $\text{SF}_6$ -alternative gas mixtures[J]. *Journal of Applied Physics*,2024,135(6):063302.
- [21] ZHANG Xiaoxing, LI Yi, XIAO Song, et al. Theoretical study of the decomposition mechanism of environmentally friendly insulating medium  $\text{C}_3\text{F}_7\text{CN}$  in the presence of  $\text{H}_2\text{O}$  in a discharge [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2017,50(32):325201.
- [22] ZHANG Boya, LI Chenwei, XIONG Jiayu, et al. Decomposition characteristics of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  mixture under AC discharge breakdown[J]. *AIP Advances*,2019,9(11):115212.
- [23] LI Yi, ZHANG Xiaoxing, CHEN Qi, et al. Influence of oxygen on dielectric and decomposition properties of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{N}_2-\text{O}_2$  mixture[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2019,26(4):1279-1286.
- [24] 李祎.环保绝缘气体 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{CO}_2$ 电热分解及金属相容性机理研究[D].武汉:武汉大学,2021.  
LI Yi. Electrical thermal decomposition and metal compatibility mechanism of eco-friendly insulating gas  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{CO}_2$ [D]. Wuhan:Wuhan University,2021.
- [25] KESSLER F, SARFERT-GAST W, KUHLMANN L, et al. Compatibility of a gaseous dielectric with Al, Ag, and Cu and gas-phase synthesis of a new *N*-acylamidine copper complex[J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*,2020, 2020(20):1989-1994.
- [26] FU Yuwei, YANG Aijun, WANG Xiaohua, et al. Theoretical study of the decomposition mechanism of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2019,52(24):245203.
- [27] WANG Cong, AI Xin, ZHANG Ying, et al. Decomposition characteristics and marker products of  $\text{C}_3\text{F}_7\text{CN}/\text{EP}$  insulation system with long-term surface discharge[J]. *Engineering Failure Analysis*,2020,116:104719.
- [28] 段竣然,颜湘莲,高克利,等. $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 及其分解气体与环氧树脂的相容特性分析[J/OL]. *电工技术学报*,2024.DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240176.  
DUAN Junran, YAN Xianglian, GAO Keli, et al. Compatibility analysis of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  and its gas byproducts with epoxy resin [J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240176.
- [29] 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.
- [30] 郑哲宇,李涵,周文俊,等.环保绝缘气体 $\text{C}_3\text{F}_7\text{CN}$ 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  $\text{C}_3\text{F}_7\text{CN}$  and sealing material EPDM[J]. *High Voltage Engineering*,2020,46(1):335-341.
- [31] CHEN Ru, LI Wei, DONG Enyuan, et al. Analysis of arc characteristics of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  mixed gas ring main unit[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*,2022,50(6):1948-1956.
- [32] LUO Yan, WANG Wei, ZHOU Ran, et al. Current interruption characteristics of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  mixture in a load switch[C]//*Proceedings of 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. Beijing,China:IEEE,2020:1-4.
- [33] ZHANG Boya, ZHOU Ran, WANG Kai, et al. Arc interruption performance of  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}-\text{CO}_2$  mixture in a 126 kV disconnecter[J].

- IEEE Transactions on Power Delivery,2023,38(2),1197-1207.
- [34] 宋宇,林莘,徐建源,等.高压断路器中 $C_4F_7N/CO_2$ 混合气体的开断性能[J].高电压技术,2023,49(3):971-981.  
SONG Yu, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Interruption performance of  $C_4F_7N/CO_2$  gas in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering,2023,49(3):971-981.
- [35] 张博雅,周然,郝迈,等. $C_4F_7N$ 混合气体在40.5 kV断路器中的应用研究(一):燃弧特性仿真与灭弧性能评估[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8750-8761.  
ZHANG Boya, ZHOU Ran, HAO Mai, et al. Research on application of  $C_4F_7N$  gas mixture in 40.5 kV circuit breaker(part I): simulation and evaluation of arc extinguishing performance[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(23):8750-8761.
- [36] YE X, DHOTRE M T, MANTILLA J D, et al. CFD analysis of the thermal interruption process of gases with low environmental impact in high voltage circuit breakers[C]//Proceedings of 2015 IEEE Electrical Insulation Conference. Seattle,USA:IEEE, 2015:375-378.
- [37] 贾申利,赵虎,李兴文,等. $SF_6$ 替代气体灭弧性能的研究进展综述[J].高压电器,2011,47(11):87-97.  
JIA Shenli, ZHAO Hu, LI Xingwen, et al. Survey of recent researches on the arc quenching characteristics of  $SF_6$  substitute gases[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(11):87-97.
- [38] LI X, ZHAO H, MURPHY A B.  $SF_6$ -alternative gases for application in gas-insulated switchgear[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2018,51(15):153001.
- [39] 李兴文,贾申利,张博雅.气体开关电弧物性参数计算及特性仿真研究与应用[J].高电压技术,2020,46(3):757-771.  
LI Xingwen, JIA Shenli, ZHANG Boya. Research and application on physical parameters calculation and behavior simulation of gas switching arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 757-771.
- [40] 唐念,郭泽,张博雅,等.气吹作用对 $CO_2$ 、 $CO_2/C_4$ -PFN、 $CO_2/C_5$ -PFK混合气体燃弧特性的影响[J].高电压技术,2021,47(1):338-342.  
TANG Nian, GUO Ze, ZHANG Boya, et al. Effects of air-blowing on the arcing characteristics of  $CO_2$  and  $CO_2/C_4$ -PFN,  $CO_2/C_5$ -PFK mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 338-342.
- [41] ZHU Yu, DONG Enyuan, LI Zhibin, et al. Research on arc extinguishing performance of  $C_4F_7N/CO_2$  gases with slight positive pressure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(2): 410-416.
- [42] KIEFFEL Y, BIQUEZ F, PONCHON P, et al.  $SF_6$  alternative development for high voltage switchgears[C]//Proceedings of 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, USA: IEEE,2015:1-5.
- [43] ZHANG Boya, UZELAC N, CAO Yang. Fluoronitrile/ $CO_2$  mixture as an eco-friendly alternative to  $SF_6$  for medium voltage switchgears[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1340-1350.
- [44] 张博雅,周然,郝迈,等. $C_4F_7N$ 混合气体在40.5kV断路器中的应用研究(二):灭弧性能实验与弧后分解特性[J].中国电机工程学报,2022,42(24):9147-9159.  
ZHANG Boya, ZHOU Ran, HAO Mai, et al. Research on the application of  $C_4F_7N$  gas mixture in a 40.5kV circuit breaker (part II): arc extinguishing performance tests and decomposition property[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(24):9147-9159.
- [45] LEE W Y, JUN J U, OH H S, et al. Comparison of the interrupting capability of gas circuit breaker according to  $SF_6$ ,  $g^3$ , and  $CO_2/O_2$  mixture[J]. Energies,2020,13(23):6388.
- [46] YE Fanchao, ZHANG Xiaoxing, LI Yi, et al. Arc decomposition behavior of  $C_4F_7N$ /air gas mixture and biosafety evaluation of its by-products[J]. High Voltage,2022,7(5):856-865.
- [47] ZHANG Boya, WANG Sunsiqin, CHEN Li, et al. Influence of oxygen on the solid carbon formation during arcing of eco-friendly  $SF_6$ -alternatvie gases[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2023,56(36):365502.
- [48] 李伟,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):3535-3551.  
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): 3535-3551.
- [49] 侯华,颜湘莲,余小娟,等.分子筛吸附 $C_4F_7N/CO_2$ 混合绝缘气体及其分解产物的理论研究[J].高电压技术,2019,45(4):1040-1047.  
HOU Hua, YAN Xianglian, YU Xiaojuan, et al. Theoretical investigation on the adsorption of  $C_4F_7N/CO_2$  dielectric gas and decomposition products in zeolite[J]. High Voltage Engineering, 2019,45(4):1040-1047.
- [50] 杨圆,高克利,丁立健,等.环保型 $C_4F_7N/CO_2$ 混合气体分解仿真与实验研究[J].中国电机工程学报,2023,43(1):380-388.  
YANG Yuan, GAO Keli, DING Lijian, et al. Simulation and experimental research on decomposition of eco-friendly  $C_4F_7N/CO_2$  gas mixtures[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (1):380-388.
- [51] YE Fanchao, ZHANG Xiaoxing, LI Yi, et al. Effect of  $O_2$  on AC partial discharge and decomposition behavior of  $C_4F_7N/CO_2/O_2$  gas mixture[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2021,28(4):1440-1448.
- [52] 杨圆,高克利,王宝山,等. $C_4F_7N/CO_2/O_2$ 混合气体交流电晕放电分解特性[J].高电压技术,2023,49(3):955-961.  
YANG Yuan, GAO Keli, WANG Baoshan, et al. Decomposition characteristics of  $C_4F_7N/CO_2/O_2$  gas mixture in AC corona discharge[J]. High Voltage Engineering,2023,49(3):955-961.
- [53] 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.
- [54] 杨韬,张博雅,李兴文,等.不同故障工况下 $C_4F_7N/CO_2$ 混合气体分解产物的实验研究[J].高电压技术,2021,47(12):4216-4228.

- YANG Tao, ZHANG Boya, LI Xingwen, et al. Experimental study of decomposition products of  $C_4F_7N/CO_2$  mixture under different fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4216-4228.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- GAO Keli, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Progress in environment-friendly gas-insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3105-3113.
- [61] 高克利,颜湘莲,黄印,等. 全氟异丁腈环保气体环网柜设计关键技术[J]. 高压电器, 2024, 60(9):104-113.
- GAO Keli, YAN Xianglian, HUANG Yin, et al. Key technologies for the design of perfluoroisobutyronitrile eco-friendly gas-insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(9): 104-113.
- [62] 赵明月,韩冬,荣文奇,等. 电晕放电下二元全氟异丁腈( $CF_3$ )<sub>2</sub>CFCN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 ( $CF_3$ )<sub>2</sub>CFCN buffer gases under corona discharge[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4):1078-1085.
- [63] WANG Cong, AI Xin, ZHANG Ying, et al. Decomposition products and formation path of  $C_3F_7CN/CO_2$  mixture with suspended discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6):1949-1955.
- [64] 张绍立,赵秋琳,王璁,等. 基于基团贡献的气体绝缘强度预测模型[J]. 绝缘材料, 2022, 55(9):68-73.
- ZHANG Shaoli, ZHAO Qiulin, WANG Cong, et al. Gas insulation strength prediction model based on group contribution[J]. Insulating Materials, 2022, 55(9):68-73.
- [65] 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 II:相容性、安全性及设备研发[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4567-4579.
- LI Yi, ZHANG Xiaoxing, FU Mingli, et al. Research and application progress of eco-friendly gas insulating medium  $C_4F_7N$ , part II: material compatibility, safety and equipment development[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21):4567-4579.
- [66] 李兴文,邓云坤,姜旭,等. 环保气体  $C_4F_7N$  和  $C_5F_{10}O$  与  $CO_2$  混合气体的绝缘性能及其应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(3):708-714.
- LI Xingwen, DENG Yunkun, JIANG Xu, et al. Insulation performance and application of environment-friendly gases mixtures of  $C_4F_7N$  and  $C_5F_{10}O$  with  $CO_2$ [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3):708-714.
- [67] 张引,张晓星,傅明利,等. 基于红外光谱技术的  $C_4F_7N$  及其分解产物定量分析方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(5):1836-1845.
- ZHANG Yin, ZHANG Xiaoxing, FU Mingli, et al. Quantitative analysis method of  $C_4F_7N$  and its decomposition products based on infrared spectroscopy technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5):1836-1845.
- [68] 傅明利,王勇,卓然,等.  $SF_6$  替代气体在隔离开关中的开断性能仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(3):41-47.
- FU Mingli, WANG Yong, ZHUO Ran, et al. Simulation study on interruption performance of  $SF_6$  alternative gas in disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3):41-47.

收稿日期:2024-11-20;修回日期:2024-11-26。

作者简介:

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  $SF_6$  环保替代气体及输变电设备、高压开关设备等研究工作;

通信作者:高克利(1966-),男(汉族),河北沧州人,教授级高级工程师,主要从事  $SF_6$  环保替代技术与装备、高压设备运行技术等研究工作。