

环保型C₅F₁₀O混合气体设备研制现状与展望

夏亚龙^{1,2}, 李富祥^{1,2}, 兰新生^{1,2}, 廖丽娟³, 易选泽³, 张晨萌⁴, 谢施君^{1,2}, 刘涛^{1,2}

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司资阳供电公司, 四川 资阳 641300; 4. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 电气设备中温室气体 SF₆ 对全球气候变暖的影响愈来愈受到重视, 新型绝缘介质全氟戊酮 C₅F₁₀O 因优异的环境性能成为本领域的研究热点。纯 C₅F₁₀O 液化温度高, 不宜直接在电气设备中应用, 需要与液化温度较低的缓冲气体混合使用。文中通过总结 C₅F₁₀O 混合气体理化特性、绝缘特性、放电分解特性及其与电气设备内部常见金属材料的相容特性, 发现 C₅F₁₀O 混合气体具有优良的分解特性; 通过选择合适的混合方案, 选用与 C₅F₁₀O 相容性良好的材料, C₅F₁₀O 混合气体具备作为绝缘介质在电气设备中应用的潜力。现阶段国内外已经有环保型 C₅F₁₀O 混合气体绝缘设备工程示范应用案例, 相关成果可为 C₅F₁₀O 混合气体设备的扩大应用提供支撑, 助推中国能源行业绿色低碳转型。

关键词: 环保绝缘气体; C₅F₁₀O 混合气体; 绝缘特征; 分解特征; 相容性

中图分类号: TM 854 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)04-0001-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230401

Research and Consideration on Equipment Development of Eco-friendly C₅F₁₀O Mixed Gases

XIA Yalong^{1,2}, LI Fuxiang^{1,2}, LAN Xinsheng^{1,2}, LIAO Lijuan³, YI Xuanze³, ZHANG Chenmeng⁴, XIE Shijun^{1,2}, LIU Tao^{1,2}

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Ziyang Electric Power Supply Company, Ziyang 641300, Sichuan, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The impact of SF₆ greenhouse gas on global climate change in electrical equipment is increasingly receiving attention. The new insulating medium, C₅F₁₀O, has become a research hotspot in this field due to its excellent environmental performance. C₅F₁₀O has a high liquefaction temperature and is not suitable for direct use in electrical equipment. It needs to be mixed with a buffer gas with a lower liquefaction temperature. The physicochemical properties, insulation properties, discharge decomposition properties, and compatibility with common metal materials inside electrical equipment of C₅F₁₀O mixed gases are summarized. It is found that C₅F₁₀O gas mixture have excellent decomposition characteristics, and by selecting a suitable mixing scheme and materials that are compatible with C₅F₁₀O, C₅F₁₀O gas mixture has the potential to be used as insulating medium in electrical equipment. At present, there are engineering demonstration applications of environmentally friendly C₅F₁₀O gas mixture insulating equipment at home and abroad. The relevant achievements can provide support for the expansion of C₅F₁₀O gas mixture equipment applications and promote the green and low-carbon transformation of energy industry in China.

Key words: environmentally friendly insulating gases; C₅F₁₀O mixed gases; insulation characteristics; decomposition characteristics; compatibility

0 引言

SF_6 气体因优异的绝缘和灭弧性能被广泛应用于电力设备中^[1], 但它是迄今为止发现温室效应最强的气体^[2-3], 被联合国政府间气候变化专门委员会在多项条款中限制排放^[4-5]。近年来全球气候变暖日益严重, 积极应对气候变化、推动绿色低碳发展, 已成为全球共识和大势所趋。2020 年 9 月 22 日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会表示: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 争取在 2060 年前实现碳中和”。目前全球 SF_6 年排放量已达 8100 t, 相当于约 1 亿辆新车每年产生的碳排放量。 SF_6 造成的温室效应不容忽视, 亟需寻找一种环境友好型介质替代电气设备中的温室气体 SF_6 。2022 年 8 月 24 日, 工信部等五部门联合发文《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》, 明确提出要加快开展新型低温室效应环保绝缘气体等相关装备的研制。

近期学者们发现了绝缘能力极佳的新型环保绝缘介质 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$, 其全球变暖潜能值 (global warming potential, GWP) 仅为 1, 大气寿命低至 0.04 年, 表现出优异的环保性能。尽管其液化温度相对较高, 但与液化温度较低的 N_2 、 CO_2 、空气等气体混合使用, 具备作为绝缘介质替代 SF_6 的潜力^[6-8]。 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体中缓冲气体含量越多, 液化温度越低, 其绝缘性能也会降低。找到一种合适的混合方案, 既能保证设备的绝缘水平, 又能满足运行环境温度, 是混合气体工程应用的关键核心技术。另一方面, 由于气体绝缘设备不可避免地会发生一些放电缺陷, 混合气体在放电后还应该具备优良的分解特性, 其分解产物不会对设备和运维人员造成危害, 也不会腐蚀设备内部固体材料, 避免固体材料因腐蚀导致绝缘水平下降^[9-13]。

为此, 下面总结了针对不同混合方案下 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体的理化特性、绝缘特性、分解特性及其与设备内金属材料的相容性, 结合国内外环保型 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体绝缘设备示范应用案例, 发现 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体具备工程应用的潜力, 相关成果可为进一步开

发环保型 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体绝缘设备及其扩大应用提供支撑。

1 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体理化特性

1.1 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体液化温度

通过求解安托万方程, 可计算混合气体的饱和蒸气压曲线, 进而获取混合气体在不同压强下的液化温度。不同 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压下 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体的液化温度随压强变化规律如图 1 所示。

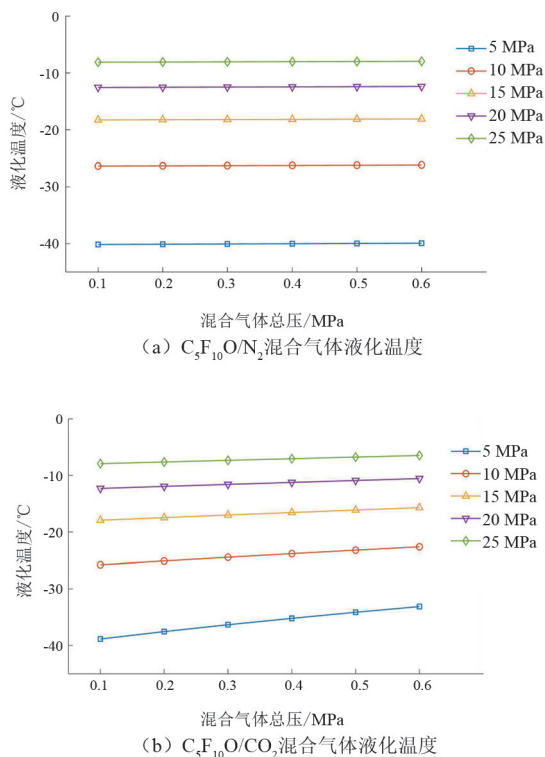


图 1 不同 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压下混合气体液化温度

由于 N_2 液化温度低于 CO_2 , 相同混合方案下, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 的液化温度低于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体。相同分压下, 随着混合气体总压的升高, 一方面液化温度较高的 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 体积分数减小使得混合气体液化温度降低; 另一方面混合气体压强的升高引起液化温度上升, 两者的共同作用使得相同分压下, 混合气体的液化温度受总压的影响不大。可以看出, 当 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压小于 20 kPa 时, 0.1~0.6 MPa 下 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 和 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体的液化温度都低于 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体 GWP

欧洲议会和理事会关于某些氟化温室气体的第 842/2006 号条例 (EC) 提出了混合气体的 GWP 计算

方法。由于 C₅F₁₀O 和纯 CO₂混合气体的 GWP 为 1, 因此 C₅F₁₀O/CO₂混合气体的 GWP 也为 1。N₂不是温室效应气体,其 GWP 为 0, C₅F₁₀O/N₂混合气体的 GWP 小于 C₅F₁₀O/CO₂混合气体。图 2 为 C₅F₁₀O/N₂混合气体的 GWP。当 C₅F₁₀O 分压小于 25 kPa 时, C₅F₁₀O/N₂混合气体的 GWP 整体小于 0.76。C₅F₁₀O 混合气体表现出极佳的环保性能,相比于 GWP 高达 23 500 的传统温室气体 SF₆,其 GWP 下降超过 99.99%。

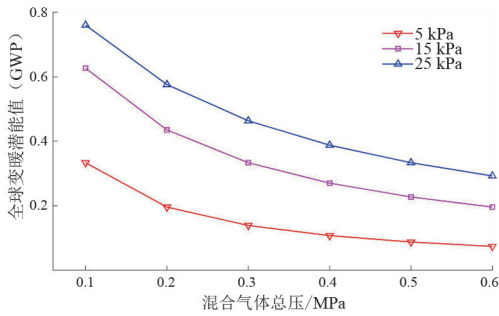
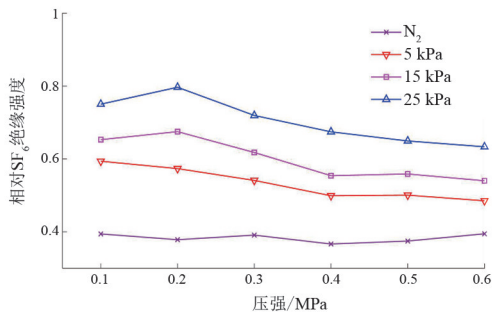


图 2 C₅F₁₀O 混合气体 GWP

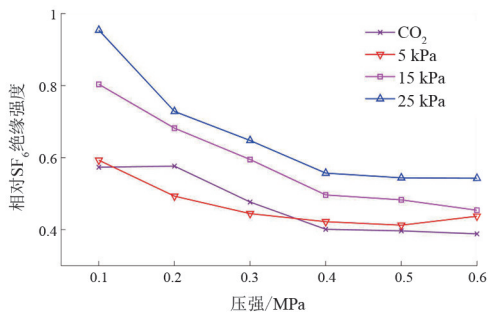
2 C₅F₁₀O 混合气体绝缘特性

2.1 C₅F₁₀O 混合气体工频绝缘特性

通过试验测量球-球电极间隙 2 mm 下 C₅F₁₀O 混合气体工频击穿电压,对比混合气体与相同压强



(a) C₅F₁₀O/N₂混合气体



(b) C₅F₁₀O/CO₂混合气体

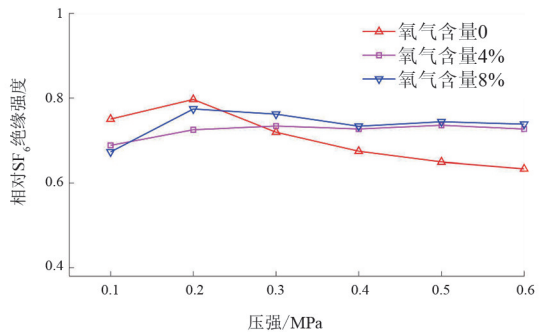
图 3 C₅F₁₀O 混合气体相对 SF₆工频绝缘强度

下纯 SF₆的绝缘强度。C₅F₁₀O 混合气体相对 SF₆绝缘强度如图 3 所示。

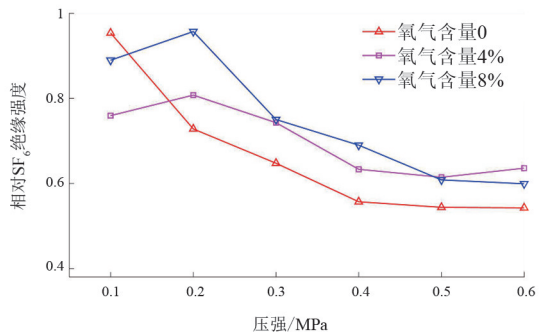
在混合气体压强小于 0.2 MPa 时, C₅F₁₀O/CO₂混合气体绝缘性能优于 C₅F₁₀O/N₂; 0.1 MPa、分压 25 kPa 下 C₅F₁₀O/CO₂混合气体的绝缘水平达到相同压强下纯 SF₆的 95.40%。混合气体压强大于 0.2 MPa 后, C₅F₁₀O/N₂的绝缘水平高于相同工况下的 C₅F₁₀O/CO₂,但仍低于相同压强下 SF₆气体的绝缘强度;压强 0.2 MPa 时, 15 kPa 分压 C₅F₁₀O 混合气体的绝缘水平仅约为 SF₆的 70%左右。

2.2 O₂对 C₅F₁₀O 混合气体工频绝缘特性影响

环保型 C₅F₁₀O 混合气体电气设备发生放电后,由于碳元素的存在会在电极表面析出黑色的固体颗粒,这些析出物破坏了电极表面光滑的结构,使得电极间的放电电压大幅降低,进而降低电气设备的绝缘水平。试验发现,在混合气体中加入适当的 O₂可有效抑制固体颗粒的析出,同时还可以提升混合气体绝缘水平。当 C₅F₁₀O 所占比例为 4.17%时,不同含量 O₂下混合气体相对 SF₆绝缘强度如图 4 所示。



(a) C₅F₁₀O/N₂混合气体



(b) C₅F₁₀O/CO₂混合气体

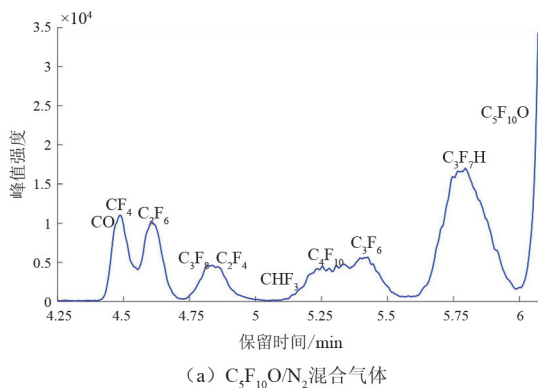
图 4 O₂对 C₅F₁₀O 混合气体绝缘水平影响规律

C₅F₁₀O 混合气体绝缘水平整体上低于相同压

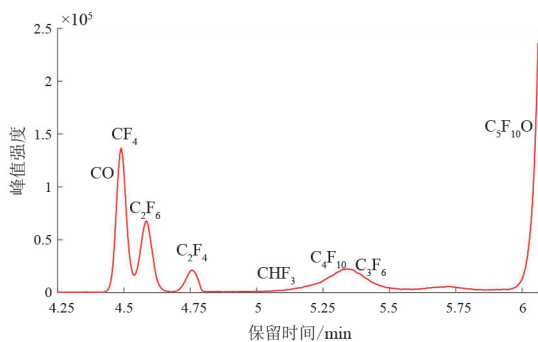
强下 SF_6 , 加入 O_2 后混合气体整体绝缘水平得到提升, 通过选择合适的混合比例并适当提高充入设备的压力, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体绝缘水平有望达到 SF_6 相当水平。

3 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体分解特性

搭建气体放电分解试验特性平台, 分别对 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压依次为 10 kPa、20 kPa 和 30 kPa 以及混合气体总压为 0.1~0.6 MPa 的 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 和 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体进行 20 次击穿试验, 采集击穿后的气体并利用气相色谱质谱联用仪对分解产物进行定性与定量分析, 评估 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体的稳定性, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体击穿 20 次后分解产物定性分析结果如图 5 所示。



(a) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体

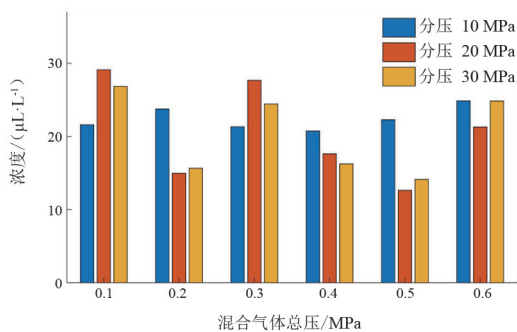


(b) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体

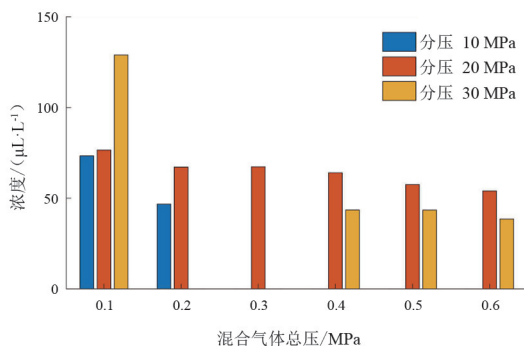
图 5 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体击穿后分解产物定性分析结果

$\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体在多次击穿后主要分解产物包括: CO 、 CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_8 、 C_2F_4 、 CHF_3 、 C_4F_{10} 、 C_3F_6 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 等。其中, C_2F_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 浓度较低, 均小于 $3.5 \mu\text{L}/\text{L}$; CF_4 浓度随着 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压的升高不断增加, 最大值也仅为 $4.35 \mu\text{L}/\text{L}$ (分压

30 kPa、总压 0.1 MPa); CHF_3 浓度随着混合气体总压的升高整体呈现出减小的规律, 分压 20 kPa、总压 0.1 MPa 时, 浓度最高值为 $9.37 \mu\text{L}/\text{L}$ 。分解产物中 CO 的浓度最高, 在 $15\sim 30 \mu\text{L}/\text{L}$ 范围内, 如图 6(a) 所示。对于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体, 定性分析结果显示分解产物种类更少, C_3F_8 和 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 没有检测到, CO 浓度相对较高, 如图 6(b) 所示, 其余分解产物整体上含量要低于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体。



(a) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体



(b) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体

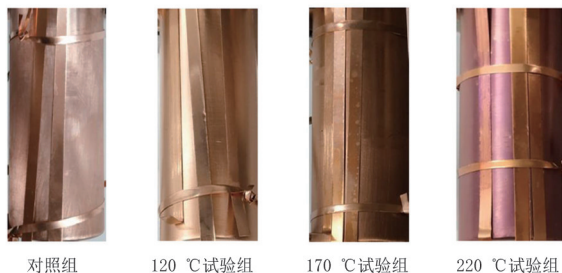
图 6 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体击穿后分解产物定性分析结果

4 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体与金属材料相容性

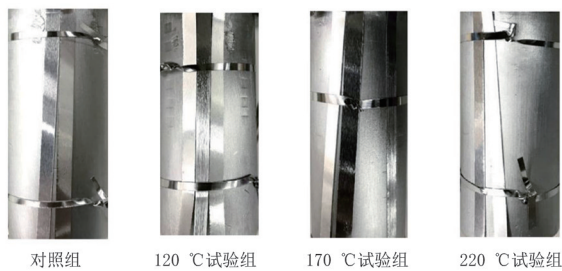
武汉大学唐炬教授团队搭建了 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 与金属材料气固界面相互作用试验平台, 测试了 $120\sim 220 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体与铜、铝和银等金属的气固界面相互作用, 评估了 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 与电气设备中常见金属的相容性^[14-17]。图 7 给出了 3 种常见金属铜、铝、银与 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体加热老化后表面颜色变化。

对照实验组中金属铜材料为紫红色且色泽鲜亮, 试验温度为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 时铜表面颜色逐渐

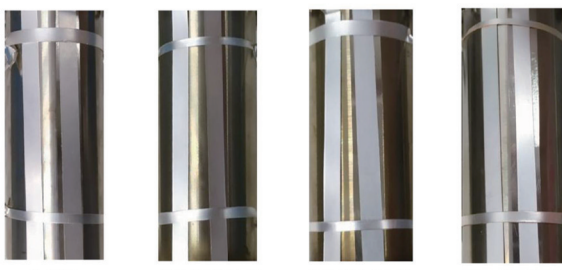
变为金黄色,其中,试验温度为 170 ℃时铜片表面有部分区域颜色变暗,试验温度为 220 ℃时铜表面呈现粉红色。试验前后金属铝、银表面的颜色并没有发生类似铜表面明显的颜色变化。进一步对其微观形貌的试验测试发现,金属铜会被 C₅F₁₀O 腐蚀,不适合在 C₅F₁₀O 混合气体绝缘设备中应用,金属铝和银具有良好的相容性,可以用作 C₅F₁₀O 混合气体绝缘设备金属材料。



(a) 试验前后金属铜表面颜色变化



(b) 试验前后金属铝表面颜色变化



(c) 试验前后金属银表面颜色变化

图 7 常见金属与 C₅F₁₀O/N₂ 混合气体接触后表面颜色

5 C₅F₁₀O 混合气体设备研制与应用

5.1 国外 C₅F₁₀O 混合气体设备示范应用

2014 年,ABB 公司以 C₅F₁₀O/空气混合气体为绝缘介质,研制出 22 kV 环保型 C₅F₁₀O 混合气体环

网开关柜,其结构如图 8 所示。2015 年,该环保型开关柜在苏黎世的一个变电站进行挂网试运行^[18-19]。

5.2 国内 C₅F₁₀O 混合气体设备示范应用

2022 年,国网四川省电力公司电力科学研究院、武汉大学等团队以 C₅F₁₀O、N₂ 和 O₂ 混合气体为绝缘介质,研制出 35 kV 环保型 C₅F₁₀O 混合气体电流互感器,并在国网资阳供电公司 110 kV 宝林变电站实现首次示范应用,如图 9 所示。截至目前 3 台互感器运行状况良好。



图 8 ABB 公司研制的 C₅F₁₀O 混合气体开关柜结构



图 9 35 kV 环保型 C₅F₁₀O 混合气体电流互感器示范应用

6 结 论

现有研究表明,环保型 C₅F₁₀O 混合气体有望作为绝缘介质在气体绝缘设备中广泛应用。研究团队

将持续跟踪目前已示范应用的 35 kV 环保型电流互感器运行情况,定期对运行后气体进行定量和定性分析,指导环保型 $C_5F_{10}O$ 混合气体设备的研制和优化。为推动 $C_5F_{10}O$ 混合气体的扩大应用,该领域还亟需开展以下工作:

1) 研究 $C_5F_{10}O$ 混合气体与电气设备中吸附剂、绝缘件等非金属固体材料间的相容性,指导研发其他新型环保气体绝缘设备提供支撑;

2) 开展基于 $C_5F_{10}O$ 混合气体特征分解产物的绝缘缺陷识别和诊断技术,为环保型 $C_5F_{10}O$ 混合气体绝缘设备运维提供指导。

参考文献

- [1] 林莘,王飞鸣,冯凯,等.高压 SF_6 断路器介质绝缘强度恢复机理研究[J].中国电机工程学报,2017,37(20):6118-6125.
- [2] 高克利.新环保气体设计与环保 GIL 关键技术研究进展[R].沈阳:中国电机工程学会高电压专业委员会,2019.
- [3] 肖登明.环保型绝缘气体的发展前景[J].高电压技术,2016,42(4):1035-1046.
- [4] KIEFFEI 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.
- [5] RABIE M, FRANCK C M. Assessment of eco-friendly gases for electrical insulation to replace the most potent industrial greenhouse gas SF_6 [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(2):369-380.
- [6] HYRENBACH M, ZACHE S. Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear [C]. 2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe). IEEE,2016:1-9.
- [7] STOLLER P C, DOIRON C B, TEHLAR D, et al. Mixtures of CO_2 and $C_5F_{10}O$ perfluoroketone for high voltage applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(5):2712-2721.
- [8] 王小华,傅熊雄,韩国辉,等. $C_5F_{10}O/CO_2$ 混合气体的绝缘性能[J].高电压技术,2017,43(3):715-720.
- [9] 唐炬,唐博文,李祎,等.环保绝缘气体 $C_5F_{10}O$ 分解及复原性能研究现状及展望[J].中国电机工程学报,2022,42(3):1210-1223.
- [10] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等.电晕放电下 $C_5F_{10}O$ 混合气体的分解特性[J].电工技术学报,2021,36(2):407-416.
- [11] 张然植. $C_5F_{10}O$ 气体放电分解组分在 Cu(110) 表面吸附特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2021.
- [12] 唐炬,代靓君,李晨,等.环保型 $C_5F_{10}O$ 绝缘介质过热分解后的自还原特性[J].中国电机工程学报,2020,40(21):7123-7132.
- [13] 李祎,张晓星,肖淞,等.环保型绝缘介质 $C_5F_{10}O$ 放电分解特性[J].中国电机工程学报,2018,38(14):4298-4306.
- [14] LI Yalong, ZHANG Xiaoxing, XIA Yalong, et al. Study on the compatibility of eco-friendly insulating gas $C_5F_{10}O/N_2$ and $C_5F_{10}O/Air$ with copper materials in gas-insulated switchgears[J]. Applied Sciences, 2020,11(1):197.
- [15] ZENG Fuping, Feng Xiaoxuan, LEI Zhicheng, et al. Thermal decomposition mechanism of environmental-friendly insulating gas $C_5F_{10}O$ on Cu(111) surface[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2021,41:1455-1469.
- [16] LI Yi, ZHANG Xiaoxing, CHEN Dachang, et al. Theoretical study on the interaction between $C_5F_{10}O$ and Al(111), Ag(111): A comparative study[J]. Applied Surface Science,2019,464:586-596.
- [17] SHE Congdong, TANG Ju, CAI Rijian, et al. Compatibility of $C_5F_{10}O$ with common-used sealing materials: An experimental study[J]. AIP Advances, 2021,11(6):65220.
- [18] HYRENBACH M, ZACHE S. Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear[C]. 2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe). IEEE,2016.DOI:10.1109/PCICEurope.2016.7604648.
- [19] HYRENBACH M, HINTZEN T, MÜLLER P, et al. Alternative Gas Insulation in Medium-voltage Switchgear[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution, June 15-18, 2015, Lyon:0587.

作者简介:

夏亚龙(1989),男,博士(后),高级工程师,研究方向为 SF_6 及其混合气体特性、新型环保绝缘气体设备研制与应用;
李富祥(1973),男,硕士,教授级高级工程师,长期从事电网发展规划、环保化学、物资检测、通信信息等专业管理工作;
兰新生(1979),男,硕士,教授级高级工程师,从事电网环境保护和化学专业技术及管理工作。

(收稿日期:2023-04-13)