

低分压下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘性能研究

夏亚龙¹, 李富祥¹, 毛 姝¹, 王 燕¹, 靳梦磊², 唐 炬², 肖 淞²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:为评估 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体在低分压条件下替代现有干燥空气或氮气应用于绝缘设备的可行性,本研究系统分析了 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘性能。结果表明:在准均匀电场下, $C_5F_{10}O$ 分压为 5~10 kPa 时, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘强度分别为相同条件下干燥空气和氮气的 1.1~1.9 倍和 1.4~2.3 倍,表明即使在低分压下, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体仍表现出较强的绝缘性能,相较于干燥空气或氮气具有技术优势。此外,低分压下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体在多次击穿测试中表现出良好的稳定性,击穿电压与击穿次数的拟合曲线斜率接近于零,表明其绝缘性能未发生显著劣化。

关键词: $C_5F_{10}O$ /干燥空气; 绝缘性能; 气体绝缘; SF_6 替代气体; 击穿电压

Insulation performance of $C_5F_{10}O$ /dry air gas mixture under low partial pressure conditions

XIA Yalong¹, LI Fuxiang¹, MAO Hua¹, WANG Yan¹, JIN Menglei², TANG Ju², XIAO Song²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to assess the feasibility of using $C_5F_{10}O$ /dry air gas mixture to replace existing dry air or nitrogen in insulation equipment under low partial pressure conditions, we analyzed the insulation performance of $C_5F_{10}O$ /dry air gas mixture systematically. The results show that in a quasi-uniform electric field, when the partial pressure of $C_5F_{10}O$ is 5–10 kPa, the insulation strength of the $C_5F_{10}O$ /dry air gas mixture is 1.1–1.9 times and 1.4–2.3 times bigger than that of dry air and nitrogen under the same condition, respectively, which indicates that even at low partial pressures, the $C_5F_{10}O$ /dry air still demonstrates strong insulation performance and has technical advantages compare to dry air or nitrogen. Furthermore, the $C_5F_{10}O$ /dry air shows good stability in multiple breakdown tests, and the slope of fitting curves between breakdown voltage and breakdown times approaches zero, indicating that its insulation performance has not significantly deteriorated.

Key words: $C_5F_{10}O$ /dry air; insulation performance; gas insulation; SF_6 alternative gas; breakdown voltage

0 引言

六氟化硫(SF_6)凭借其卓越的绝缘和灭弧特性,广泛应用于中高压电气设备中^[1]。据了解,电力行业使用的 SF_6 占全球总产量的 80%^[2]。然而由于其强大的温室效应,早在 1997 年,《京都议定书》便已将 SF_6 列为限制使用的 6 种温室气体之一^[3-4]。此外,2016 年签署的《巴黎协定》要求将 21 世纪全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2℃ 以内。欧盟及其他立法机构也将 SF_6 列为逐步淘汰的对象^[5]。目前 SF_6 在大气中的浓度仍以每年 8.7% 的速度递

增,为减少 SF_6 的使用,研究人员已广泛探讨氮气、空气、二氧化碳及 SF_6 混合气体等的替代可行性^[6-11]。近年来,全氟戊酮($C_5F_{10}O$)及其混合气体因优异的绝缘性能和环保特性而备受关注。研究表明, $C_5F_{10}O$ 的电气强度可达 SF_6 的两倍,全球变暖潜值仅为 1,大气寿命约为 15 天^[12-16]。尽管 $C_5F_{10}O$ 的常压液化温度较高(26.9℃),但与缓冲气体如干燥空气混合后,可大幅降低混合气体的液化温度,以满足不同工程应用的液化温度要求^[17]。

目前,国内外对 $C_5F_{10}O$ 及其混合气体的研究仍在不断深入。例如,ABB 公司测试了 $C_5F_{10}O$ /空气混合气体的绝缘特性,发现纯 $C_5F_{10}O$ 的绝缘性能约为 SF_6 的两倍。气压为 0.7 MPa 的 $C_5F_{10}O$ (39 kPa)/空

气混合气体的绝缘强度约为气压为0.45 MPa的SF₆的95%^[17]。ABB公司还测试了C₅F₁₀O/CO₂/O₂混合气体的绝缘性能和开断性能,结果显示,C₅F₁₀O/CO₂/O₂混合气体的绝缘性能略低于SF₆,电弧开断性能比SF₆低约30%。但通过提高C₅F₁₀O混合气体的总压强,混合气体的绝缘强度可达到与SF₆相当的水平^[18]。ZHONG Jianying等^[19]测试了C₅F₁₀O/CO₂混合气体的工频耐压和雷电冲击性能,发现增加C₅F₁₀O浓度可有效提高混合气体的绝缘强度,而提升总压强可提高混合气体的雷电冲击放电电压。LI Xingwen等^[20]计算了C₅F₁₀O/CO₂混合气体的热力学性质和传输系数,发现随着C₅F₁₀O浓度的增大,C₅F₁₀O/CO₂混合气体的大部分物理性质(包括导热性和电导率)逐渐接近SF₆。M SAXEGAARD等^[21]研究发现,采用液化温度为-25℃的C₅F₁₀O/空气混合气体可以将空气开关设备的额定电压从12 kV提升至24 kV。P SIMKA等^[17]通过对比准均匀电场下低压C₅F₁₀O、C₅F₁₀O/干燥空气与SF₆的直流击穿电压,发现C₅F₁₀O/干燥空气在特定条件下的绝缘强度与SF₆相当,这表明C₅F₁₀O混合气体有望替代中低压电气绝缘设备中的SF₆。M AINTS等^[22]通过计算得出了C₅F₁₀O的有效电离系数,认为C₅F₁₀O与干燥空气的混合气体具有在许多中高压设备中替代SF₆的潜力。在应用方面,ABB公司开发了一种以C₅F₁₀O/空气混合气体为绝缘介质的22 kV环网开关柜,并于2015年在苏黎世的一座变电站投入使用^[23],2016年该公司推出的AirPlus™产品也采用C₅F₁₀O与空气的混合气体作为绝缘介质^[24]。

然而,在实际应用中,过高的C₅F₁₀O分压会导致混合气体液化温度升高,限制其使用范围。因此,研究C₅F₁₀O/干燥空气混合气体在低分压条件下的绝缘特性,并评估其在环境温度较低、绝缘气体液化风险较高的电气设备中应用的可行性具有重要的实际意义。压强为5~10 kPa的低分压C₅F₁₀O混合气体不仅可以降低液化风险,还能减少设备对气体压力调控的要求,从而提升其在工程应用中的经济性和适用性。

本研究基于气体绝缘性能测试平台,分析低分压条件下C₅F₁₀O/干燥空气混合气体的绝缘特性,具体研究不同电场条件(准均匀电场与非均匀电场)、C₅F₁₀O分压对击穿电压的影响,以及混合气体在多次击穿后的稳定性与分散性,从而为C₅F₁₀O/干燥空

气混合气体在中低压电气设备中的实际应用提供数据支持和理论依据。

1 试验平台及方法

1.1 试验平台

本研究使用的气体绝缘性能测试平台如图1所示。感应调压器(0~380 V)用于控制测试变压器的输出电压。工频变压器的额定容量为100 kVA,能够提供0~100 kV的工频电压。使用保护电阻(10 kΩ)防止放电后过电流对变压器造成损坏。分压电容器用于测量施加在放电室两端的实际电压。反应气室是一个容积为20 L的圆柱形腔室,能够承受0.8 MPa的压力。反应气室、管道、法兰和球阀的材料为304L不锈钢,该材料因具有优异的抗腐蚀性和出色的力学性能而在工业中广泛使用。密封圈等固体绝缘件均由聚四氟乙烯(PTFE)制成,该材料是高分子材料中化学性质最稳定的材料之一。

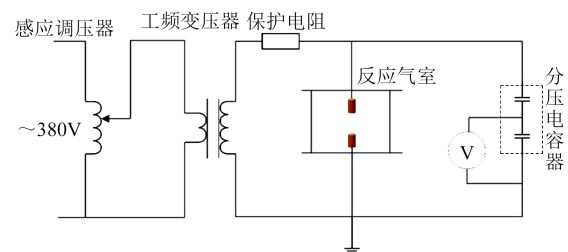


图1 气体绝缘性能测试平台

Fig.1 Testing platform of gas insulation performance

为了模拟电气设备内部常见的准均匀电场条件,采用球-球电极进行试验。球电极由黄铜制成,具体模型如图2所示。球电极直径为50 mm,电极与导杆之间通过内螺纹结构连接。通过旋动上下电极,将球电极间隙固定为2 mm,使放电间隙处于准均匀电场状态,不均匀系数为1.02^[25],与设备内部的电场均匀度相一致。为了避免电极表面因多次工频击穿而受到烧蚀,进而影响试验结果,试验过程中定期更换电极,以确保球电极表面尤其是放电点附近区域的清洁和光滑。

为了模拟电气设备内部常见的非均匀电场条件,采用针-板电极进行试验。针电极由钨铜合金制成,因钨具有高熔点、耐腐蚀、高密度以及优良的导热和导电性能,能够在长时间局部放电过程中有效防止针尖被烧蚀,从而保持针尖的尖锐度,确保局部放电电荷量测量的准确性。针电极的总长度为17 mm,底部直径为5 mm,针尖部分长度为5 mm。

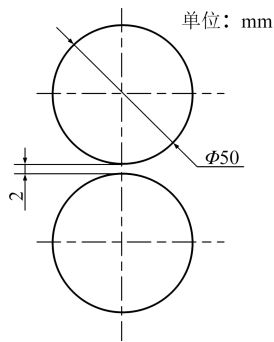


图2 球-球电极
Fig.2 Ball-ball electrode

由于针尖越尖锐,越容易发生局部放电,为避免不同针电极给试验结果造成误差,并减少放电过程中针尖的烧蚀程度,本试验将针电极针尖的曲率半径统一设定为0.3 mm。板电极采用黄铜材质,厚度为8 mm,直径为70 mm。试验时,将针电极针尖与板电极中心的距离设置为10 mm,以模拟真实设备中的非均匀电场条件。针-板电极的模型如图3所示。

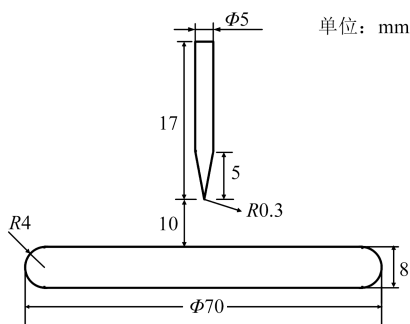


图3 针-板电极
Fig.3 Needle-board electrode

1.2 试验条件

本试验采用干燥空气作为缓冲气体研究 $C_5F_{10}O$ 混合气体的绝缘特性。 $C_5F_{10}O$ 的液化温度高于干燥空气(由80%氮气和20%氧气组成的混合气体)的液化温度。根据道尔顿分压定律,这些气体可以视为理想气体,在气体混合物中,每一组分的分压与该组分单独填充同一容器时所产生的气压相同,且总气压等于各组分分压之和^[26]。因此, $C_5F_{10}O$ 混合气体的液化温度可以看作与 $C_5F_{10}O$ 在相应分压下的液化温度相同。此外,根据理想气体定律,在气体体积和温度保持不变的条件下,气体的分压与其物质的量成正比,而物质的量与其在混合气体中的摩尔分数成正比。因此, $C_5F_{10}O$ 的分压占比等效于其摩尔分数,也即等效于其浓度。根据相关报道, $C_5F_{10}O$ 在不同液化温度下的饱和蒸气压如图4所

示^[27]。考虑到低分压 $C_5F_{10}O$ 电气绝缘设备的要求,本研究将 $C_5F_{10}O$ 的分压设定为5、6、7、8、9、10 kPa,总气压设定为0.13 MPa。与此同时,在相同条件下测试干燥空气和氮气的绝缘性能,以便进行对比分析。

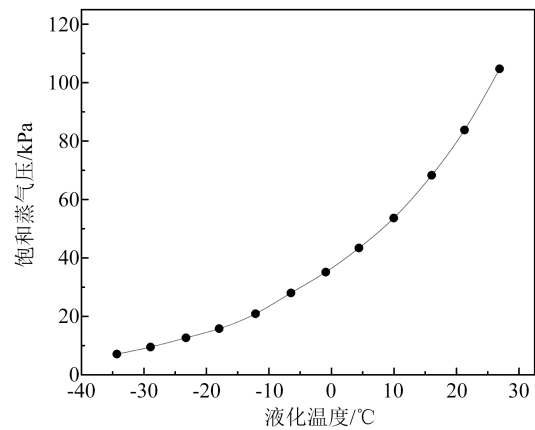


图4 $C_5F_{10}O$ 在不同液化温度下的饱和蒸气压
Fig.4 Saturated vapor pressure of $C_5F_{10}O$ under different liquefaction temperature

1.3 试验方法

在进行测试前,首先用无水乙醇擦拭反应气室的内壁3次,以确保内部的清洁和干燥。安装好球形电极并设置好间隙距离后,对放电室进行抽真空处理,并检测气室的气密性。然后充入缓冲气体至气室内部呈正压状态,再次抽真空,此过程重复3次,以确保反应气室内不含杂质气体。由于 $C_5F_{10}O$ 的饱和蒸气压较低,根据道尔顿分压定律,应先根据设定的分压充入 $C_5F_{10}O$,再充入缓冲气体至总气压的设定值。充气后,让放电室静置24 h,以确保气体混合均匀,从而获得更为准确的测试结果。

采用逐步升压法对试验电极施加交流电压,每隔1 min通过感应调压器逐步升高施加在电极两端的工频电压,升压步长不超过0.5 kV,直至气隙被击穿。每次击穿测试的间隔时间设定为5 min,以提供足够的时间给绝缘气体进行自恢复和内部循环,防止因击穿导致电极之间局部区域的气体绝缘强度下降,提高测试数据的可靠性。为了确保测试的严谨性和数据的准确性,每组数据均取自30次测试结果的平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体击穿电压的影响

在研究 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘性能

时,低分压条件下的击穿电压表现尤为重要。本研究分别在准均匀电场和非均匀电场下测试了不同 $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体击穿电压的影响,结果如图5~6所示。

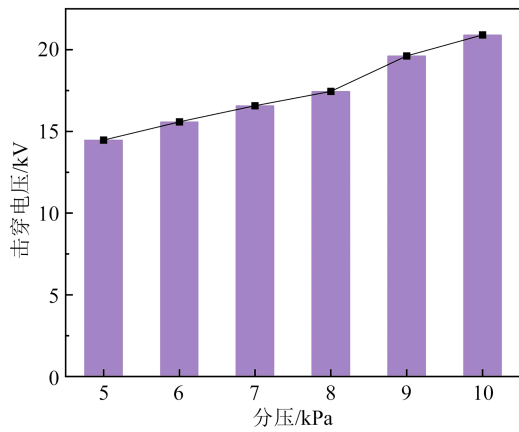


图5 准均匀电场下 $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压的影响

Fig.5 Effect of $C_5F_{10}O$ partial pressure on the breakdown voltage of $C_5F_{10}O$ /dry air under quasi-uniform electric field

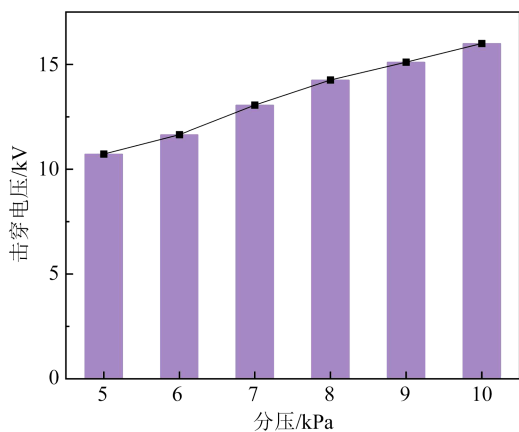


图6 非均匀电场下 $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压的影响

Fig.6 Effect of $C_5F_{10}O$ partial pressure on the breakdown voltage of $C_5F_{10}O$ /dry air under non-uniform electric field

从图5可以看出,在准均匀电场中,随着 $C_5F_{10}O$ 分压的逐渐增大,混合气体的击穿电压呈现出线性上升趋势。这种现象说明 $C_5F_{10}O$ 分子具有较高的电负性,能够有效捕获自由电子,减少气体中的自由电子数,从而增强绝缘能力。文献[27]研究发现,在0.1 MPa条件下,当 $C_5F_{10}O$ 的分压从15 kPa增大至45 kPa时, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的击穿电压提高了1倍。在本研究中,当 $C_5F_{10}O$ 的分压从5 kPa增大至10 kPa时,混合气体的击穿电压提高了44%。因此,在本研究的低分压范围内,混合气体的

击穿电压随 $C_5F_{10}O$ 分压的增大增幅较为明显,表明 $C_5F_{10}O$ 的电负性在低分压条件下对混合气体绝缘强度的提升效果显著。

从图6可以看出,在非均匀电场中, $C_5F_{10}O$ 分压的增大同样导致了混合气体击穿电压的提升,但由于非均匀电场中的局部高电场效应,击穿电压的增幅相对较小。尽管如此,随着 $C_5F_{10}O$ 分压的逐步增大,混合气体的绝缘强度仍然能够保持提升,这意味着通过调整 $C_5F_{10}O$ 分压,可以在不同电场条件下有效提高混合气体的击穿电压。

综合来看, $C_5F_{10}O$ 分压的增大对 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的击穿电压具有显著提升作用,特别是在准均匀电场下表现尤为突出。随着 $C_5F_{10}O$ 分压的增大,气体中 $C_5F_{10}O$ 分子的浓度增大,其电负性作用更为显著,能够有效捕捉自由电子并抑制电子流动,从而提高气体的击穿电压。此外, $C_5F_{10}O$ 分压的增大还优化了气体分子间的相互作用,改善了电场中的能量分布,进一步提升了气体的绝缘性能。通过调节 $C_5F_{10}O$ 的分压不仅能够显著增强混合气体的绝缘性能,还能使其更好地适应不同类型的电场环境。

2.2 低分压条件下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的击穿稳定性与分散性

在低分压条件下, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的击穿稳定性对于其在电气设备中的应用具有重要意义。图7和图8分别展示了在准均匀电场和非均匀电场条件下, $C_5F_{10}O$ 分压为10 kPa时 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体工频击穿电压随击穿次数的变化情

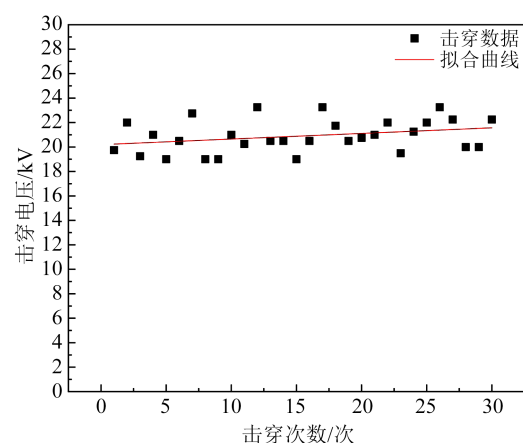


图7 准均匀电场下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压随击穿次数的变化

Fig.7 Change of breakdown voltage of $C_5F_{10}O$ /dry air with breakdown times under quasi-uniform electric field

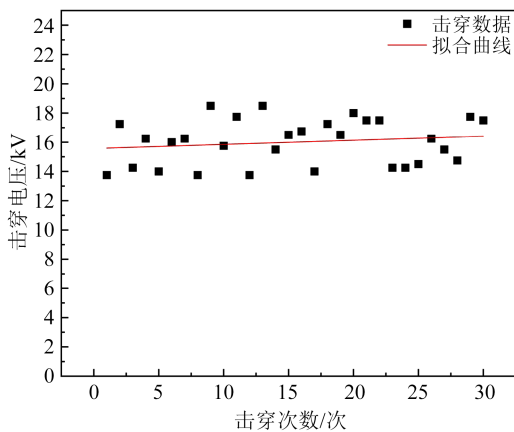


图8 非均匀电场下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压随击穿次数的变化

Fig.8 Change of breakdown voltage of $C_5F_{10}O$ /dry air with breakdown times under non-uniform electric field

况。通过计算得出准均匀电场下混合气体击穿电压与击穿次数的拟合曲线斜率为0.045 83,而非均匀电场下的拟合曲线斜率为0.028 25,这两个值接近于零,表明混合气体在多次击穿后的绝缘性能没有显著劣化,可以保持稳定的绝缘水平。

此外,试验中还发现,当 $C_5F_{10}O$ 分压较低时,混合气体的绝缘性能波动相对较小。具体数据显示,准均匀电场和非均匀电场下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的击穿电压标准差分别为1.33和1.56,绝缘性能的分散性相对较小,这意味着在不同的工作条件下,低分压 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体能够维持稳定的绝缘强度,从而提升其在电气设备中的应用可靠性。

2.3 低分压条件下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘性能与应用可行性

图9和图10分别为 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体与当前中低压设备中常用氮气、干燥空气的绝缘性能对比结果。从图9~10可以看出,在低分压(5~10 kPa)条件下, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘强度是氮气的1.4~2.3倍,是干燥空气的1.1~1.9倍。这表明即使在较低分压下, $C_5F_{10}O$ /干燥空气仍具有较强的绝缘性能,相较于氮气或干燥空气具有明显的技术优势,足以满足中低压电气设备的基本绝缘要求。

相比于高分压条件,低分压条件下 $C_5F_{10}O$ 混合气体的一个显著优势是其液化温度较低,从而降低了液化风险。例如,当 $C_5F_{10}O$ 的分压为10 kPa时, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的液化温度接近 $-30^{\circ}C$,

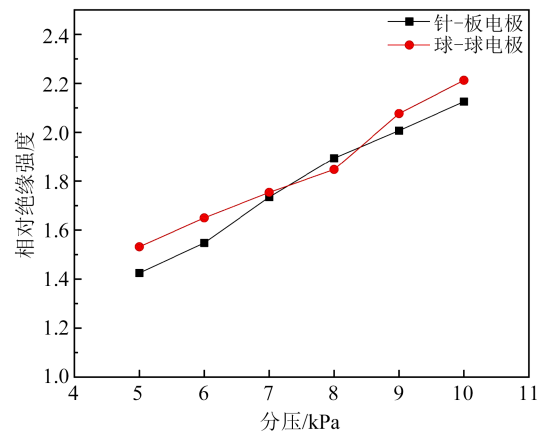


图9 $C_5F_{10}O$ /干燥空气相对氮气的绝缘强度

Fig.9 Insulation strength of $C_5F_{10}O$ /dry air relative to N_2

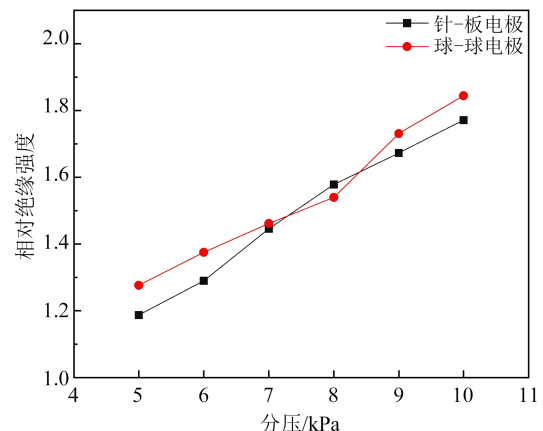


图10 $C_5F_{10}O$ /干燥空气相对干燥空气的绝缘强度

Fig.10 Insulation strength of $C_5F_{10}O$ /dry air relative to dry air

使得气体能够在大部分环境温度较低的场景下正常使用,而无需配备额外的气体温度调控设备,不仅降低了设备成本,还减少了对复杂环境下温度控制的依赖,对于工程应用而言具有较高的经济性和实用性。

此外,通过适当控制 $C_5F_{10}O$ 的分压,能够在不显著提高液化风险的前提下,提高 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘强度。将低分压 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体应用于中低压设备中,不仅能够有效替代干燥空气或氮气,还具有良好的可操作性,尤其适合温度较低或对气体压力控制要求较低的应用场景。

因此,在低分压条件下, $C_5F_{10}O$ /干燥空气具有良好的绝缘性能与应用可行性,特别是在既需要控制液化风险又需要兼顾绝缘性能的中低压电气设备中,这一气体为替代干燥空气或氮气提供了可靠的解决方案。

3 结论

本研究系统探讨了 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体在低分压条件下的绝缘性能,主要得到以下结论:

(1)随着 $C_5F_{10}O$ 分压的增加, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的击穿电压显著提升。在准均匀电场下, $C_5F_{10}O$ 分压为 5~10 kPa 时, $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体的绝缘强度约为相同条件下干燥空气的 1.1~1.9 倍,氮气的 1.4~2.3 倍,表明即使在低分压下, $C_5F_{10}O$ /干燥空气仍表现出较强的绝缘性能。

(2)低分压 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体在准均匀电场和非均匀电场下经过多次击穿测试后绝缘性能几乎未发生显著劣化,仍保持良好的绝缘性能,这表明在低分压下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体在长时间使用中具有较好的稳定性和可靠性。

(3)总气压为 0.13 MPa、 $C_5F_{10}O$ 分压为 10 kPa 的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体液化温度可低至 $-30^{\circ}C$,能够在大部分温度较低的场景下使用。

参考文献 References

- [1] CHEN Dachang, ZHANG Xiaoxing, TANG Ju, et al. Pristine and Cu decorated hexagonal InN monolayer, a promising candidate to detect and scavenge SF_6 decompositions based on first-principle study[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2019,363:346-357.
- [2] COOK E. Lifetime commitments: why climate policy-makers can't afford to overlook fully fluorinated compounds[M]. Washington, USA: World Resources Institute,1995.
- [3] XIAO Song, GAO Bing, PANG Xuanpei, et al. The sensitivity of C_4F_7N to electric field and its influence to environment-friendly insulating gas mixture C_4F_7N/CO_2 [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2020,54(5):055501.
- [4] REILLY J, PRINN R, HARNISCH J, et al. Multi-gas assessment of the Kyoto Protocol[J]. *Nature*,1999,401(6753):549-555.
- [5] MONG R. Investigation of electrical properties of a new low-GWP insulation gas-comparison of airplus and synthetic air[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology,2018.
- [6] DEVINS J C. Replacement gases for SF_6 [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*,1980,EI-15(2):81-86.
- [7] NIEMEYER L. A systematic search for insulation gases and their environmental evaluation[M]. Boston, USA: Springer US, 1998: 459-464.
- [8] ZHANG Xiaoxing, LI Yi, TIAN Shuangshuang, et al. Decomposition mechanism of the C5-PFK/ CO_2 gas mixture as an alternative gas for SF_6 [J]. *Chemical Engineering Journal*,2018,336:38-46.
- [9] ZHAO Hu, LI Xingwen, ZHU Kai, et al. Study of the arc interruption performance of SF_6-CO_2 mixtures as a substitute for SF_6 [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016,23(5):2657-2667.
- [10] GUO Ze, LI Xingwen, LI Bingxu, et al. Dielectric properties of C5-PFK mixtures as a possible SF_6 substitute for MV power equipment[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2019,26(1):129-136.
- [11] YOUSFI M, De URQUIJO J, JUAREZ A, et al. Electron swarm coefficients in CO_2-N_2 and CO_2-O_2 mixtures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*,2009,37(6):764-772.
- [12] 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.
- [13] KIEFFEL Y. Characteristics of g^3 -an alternative to SF_6 [C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier, France:IEEE,2016,2:880-884.
- [14] ZHANG Xiaoxing, CUI Zhaolun, LI Yalong, et al. Abatement of SF_6 in the presence of NH_3 by dielectric barrier discharge plasma [J]. *Journal of Hazardous Materials*,2018,360:341-348.
- [15] 刘伟,宋玉梅,张晓星,等. 环保绝缘气体 $C_5F_{10}O$ 的急性吸入安全性研究[J]. *绝缘材料*,2022,55(12):92-97.
- LIU Wei, SONG Yumei, ZHANG Xiaoxing, et al. Study on acute inhalation safety of eco-friendly insulating gas $C_5F_{10}O$ [J]. *Insulating Materials*,2022,55(12):92-97.
- [16] 王悠,雷志城,吴司颖. 环保型气体绝缘介质 $C_5F_{10}O$ 过热分解产物的生成过程分析[J]. *绝缘材料*,2020,53(5):83-89.
- WANG You, LEI Zhicheng, WU Siying, et al. Formation process analysis on over-thermal decomposition products of environmentally friendly gas insulation medium $C_5F_{10}O$ [J]. *Insulating Materials*,2020,53(5):83-89.
- [17] SIMKA P, RANJAN N. Dielectric strength of C5 perfluoroketone[C]//Proceedings of the 19th International Symposium on High Voltage Engineering. Pilsen, Czech Republic: ISH, 2015: 23-28.
- [18] 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.
- [19] ZHONG Jianying, FU Xiongxiang, YANG Aijun, et al. Insulation performance and liquefaction characteristic of $C_5F_{10}O/CO_2$ gas mixture[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Xi'an, China: IEEE, 2017:291-294.
- [20] LI Xingwen, GUO Xiaoxue, MURPHY A B, et al. Calculation of thermodynamic properties and transport coefficients of $C_5F_{10}O-CO_2$ thermal plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017,122(14):143302.
- [21] SAXEGAARD M, KRISTOFFERSEN M, STOLLER P, et al. Dielectric properties of gases suitable for secondary medium voltage switchgear[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon,France:CIREN,2015:926.
- [22] AINTS M, JOGI I, LAAN M, et al. Effective ionization coefficient of C5 perfluorinated ketone and its mixtures with air[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*,2018,51(13):135205.
- [23] HYRENBACH M, HINTZEN T, MÜLLER P, et al. Alternative

- gas insulation in medium-voltage switchgear[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, France: CIRED,2015:15-18.
- [24] HYRENBACH M, ZACHE S. Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear[C]//2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe. Berlin,Germany:IEEE,2016:1-9.
- [25] 张晓星,陈琪,张季,等. 高气压下环保型 C_4F_7N/CO_2 混合气体工频击穿特性[J]. 电工技术学报,2019,34(13):2839-2845.
ZHANG Xiaoxing, CHEN Qi, ZHANG Ji, et al. Power frequency breakdown characteristics of environmental friendly C_4F_7N/CO_2 gas mixtures under high pressure conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(13):2839-2845.
- [26] 邓云坤,马仪,陈先富,等. CF_3I-N_2 混合气体在稍不均匀和极不均匀电场中的工频击穿特性[J]. 高电压技术,2017,43(3):754-764.
DENG Yunkun, MA Yi, CHEN Xianfu, et al. AC breakdown characteristics of CF_3I-N_2 gas mixtures in condition of quasi-homogeneous and extremely non-uniform electric field[J]. High Voltage Engineering,2017,43(3):754-764.
- [27] 卓然,柯锟,张跃,等. 准均匀电场下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气与 $C_5F_{10}O/N_2$ 的绝缘特性[J]. 电力工程技术,2021,40(3):159-165.
ZHUO Ran, KE Kun, ZHANG Yue, et al. Insulation characteristics of $C_5F_{10}O$ /air and $C_5F_{10}O/N_2$ under quasi-uniform electric field[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 159-165.

收稿日期:2024-09-23;修回日期:2024-12-02。

作者简介:

夏亚龙(1989-),男(汉族),甘肃陇南人,高级工程师,博士,主要从事 SF_6 气体设备绝缘与熄弧特性、新型环保气体设备与应用相关的研究工作。