

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.024

准均匀电场下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气与 $C_5F_{10}O/N_2$ 的绝缘特性卓然^{1,2}, 柯锐¹, 张跃³, 傅明利², 王邸博², 向吉祥¹, 张晓星¹

(1. 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510000;

3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: SF_6 因优异的电气特性广泛应用于电器绝缘设备中, 但其产生的温室效应对大气环境具有极大损害。近年来, $C_5F_{10}O$ 作为一种环保型 SF_6 潜在替代气体受到国内外科研工作者的关注。为进一步探究 $C_5F_{10}O$ /干燥空气与 $C_5F_{10}O/N_2$ 的绝缘特性, 文中利用气体绝缘性能测试平台, 对不同气压、不同 $C_5F_{10}O$ 分压下的 2 种混合气体在准均匀电场下进行工频击穿试验。实验结果表明, $C_5F_{10}O$ 混合气体绝缘强度随气体压强的增大而增大; 提高 $C_5F_{10}O$ 分压亦可提高两类缓冲气体的绝缘强度, 且对 N_2 绝缘强度提升相对值大于干燥空气。从绝缘强度考虑, 适当增大 $C_5F_{10}O$ 混合气体气压和 $C_5F_{10}O$ 分压, $C_5F_{10}O$ /干燥空气比 $C_5F_{10}O/N_2$ 混合气体更具潜力替代室内中低压设备中的 SF_6 。

关键词: $C_5F_{10}O$ 混合气体; 绝缘特性; 准均匀电场; SF_6 替代气体; 气体绝缘

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)03-0159-07

0 引言

SF_6 因其优异的绝缘特性及灭弧特性, 广泛应用于各类电气绝缘设备中^[1-4]。然而, SF_6 具有很强的温室效应, 其温室效应潜在值 (global warming potential, GWP) 高达 CO_2 的 23 500 倍, 在大气中的寿命超过 3 000 a^[5-6]。虽然《京都协议书》明确限制 SF_6 的排放^[7-8], 但大气中 SF_6 的含量仍以每年 8.7% 的速度增长, 其中电力工业领域所使用的 SF_6 气体占全球 SF_6 总产量的 80%^[9]。为减少其使用量和排出量, 国内外的科研工作者们不断寻找可替代 SF_6 的绝缘气体。

替代气体的研究首先是将缓冲气体与 SF_6 进行混合^[10-12], 但这无法从根本上解决 SF_6 的温室效应。近期, $C_5F_{10}O$ 因良好的绝缘特性备受研究者关注。 $C_5F_{10}O$ 的分子结构式为 $CF_3C(O)CF(CF_3)_2$, 化学性质稳定, GWP 值为 1, 大气寿命仅为 15 d^[13-15], 对环境的影响远远小于 SF_6 。不过由于在常压条件下, $C_5F_{10}O$ 的液化温度为 26.9 °C^[13,16], 为满足工程应用环境中不同的液化温度要求, 需将其与 CO_2 、 N_2 、干燥空气等液化温度较低的大气成分混合之后再投入使用^[17]。

国内外针对 $C_5F_{10}O$ 及其混合气体作绝缘介质的研究已取得了一些成果。文献[17]通过比较准均匀电场下低压 $C_5F_{10}O$ 、 $C_5F_{10}O$ /干燥空气与 SF_6 直

流击穿电压, 得知在一定条件下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气能够与 SF_6 的绝缘强度相当, 说明 $C_5F_{10}O$ 混合气体有潜力替代中低压电气绝缘设备中的 SF_6 ; 文献[18]证明了应用液化温度为 -25 °C 的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气混合气体可将空气开关柜的额定电压从 12 kV 提升至 24 kV。文献[19]指出 $C_5F_{10}O$ 与 O_2 、 CO_2 的混合物的绝缘强度接近 SF_6 , 但其灭弧能力低于 SF_6 至少 30%; 文献[20]分析不均匀电场下 $C_5F_{10}O$ / CO_2 混合气体的工频击穿特性, 得知提高 $C_5F_{10}O$ 体积浓度能够有效提升该气体的绝缘性能; 文献[21]分析计算了 $C_5F_{10}O$ 等离子体成分、热力学参数及传输特性, 对其灭弧特性进行评估, 并在分析 $C_5F_{10}O$ 、 SF_6 、 CF_4 、 CO_2 和 N_2 的分子表面静电势和电气强度的基础上, 得知分子表面的正电位面积同绝缘强度具有强相关性; 文献[22]利用改进的 Deutsch-Märk 公式计算了 $C_5F_{10}O$ 的电子碰撞电离截面, 对 $C_5F_{10}O$ 气体混合物的绝缘强度进行了进一步研究。

目前国内外关于 $C_5F_{10}O$ 混合气体的气体绝缘性能的研究还有待进一步深入。为更系统地探究 $C_5F_{10}O$ 作为 SF_6 替代气体应用于电气绝缘设备的可行性, 文中利用气体绝缘性能测试平台, 分析了分别以 N_2 和干燥空气作为缓冲气体形成的 $C_5F_{10}O$ 混合气体的绝缘特性, 并同 SF_6 对比, 分析了缓冲气体类型、 $C_5F_{10}O$ 分压及气压 3 个因素对 $C_5F_{10}O$ 混合气体绝缘特性的影响, 相关研究成果可为 $C_5F_{10}O$ 混合气体的工程应用提供重要参考。

收稿日期: 2020-11-28; 修回日期: 2021-01-07

1 试验平台和条件及方法

1.1 试验平台

试验所用气体绝缘性能测试平台的原理如图 1 所示。工频变压器副边额定电压为 100 kV,副边额定电流为 0.5 A,可为试验提供所需的工频电压;保护电阻的阻值为 10 kΩ,用于限制绝缘气隙击穿时产生的短路电流,以防损害试验设备;分压电容用于测量反应气室两端的实际电压。

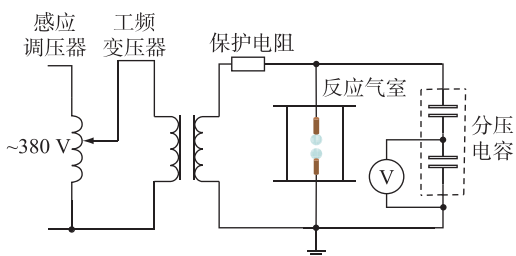


图 1 气体绝缘性能测试平台原理

Fig.1 Schematic diagram of gas insulation testing platform

反应气室内部采用图 2 所示的球-球电极模拟均匀电场,电极材质为黄铜,半径为 25 mm,球间隙取 2 mm,此时放电间隙为准均匀场,不均匀系数为 1.02^[23],与设备内电场均匀度一致,因此文中研究结果适用于分析环保气体在设备内运行的绝缘强度。反应气室所能承受的最高气压为 0.8 MPa。

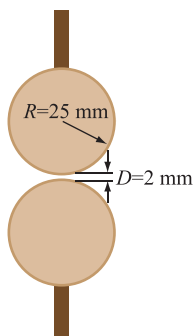


图 2 球-球电极

Fig.2 Ball-ball electrode

1.2 试验条件

实验采用 N₂ 和干燥空气来研究不同缓冲气体对 C₅F₁₀O 混合气体绝缘特性的影响。

由于我国南方地区温度一般在 -10 ℃ 以上,而且电力设备应用要求的最低温度为 -15 ℃^[16],因此 C₅F₁₀O 混合气体若要投入工程应用,必须满足以上 2 个温度限制。由文献[15]可以得到 C₅F₁₀O 在不同饱和蒸汽压下的液化温度,具体如图 3 所示。

因为 C₅F₁₀O、N₂ 和干燥空气三者的液化温度相差很大,所以在混合气体中可将这 3 种气体看作理

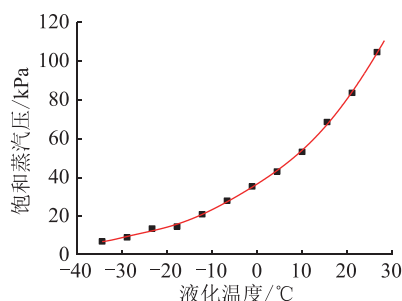


图 3 C₅F₁₀O 的饱和蒸汽压特性

Fig.3 Saturated vapor pressure characteristics of C₅F₁₀O

想气体进行分析^[24]。由道尔顿分压定律可知,在理想气体条件下,混合气体中某一成分气体的分压等于该成分气体填充相同体积容器时产生的气压,即混合气体的总气压等于各成分气体的分压之和。因此,C₅F₁₀O 混合气体的液化温度可看作与 C₅F₁₀O 在相应分压下的液化温度相等。

考虑到电气绝缘设备内部气压要求,本次试验中 C₅F₁₀O/干燥空气和 C₅F₁₀O/N₂ 的气压分别设置为 0.1 MPa,0.2 MPa,0.3 MPa,0.4 MPa,0.5 MPa,其中 C₅F₁₀O 分压依次设置为 15 kPa,25 kPa,35 kPa,45 kPa,测试不同条件下 2 种混合气体的绝缘特性,并设置 N₂、干燥空气以及 SF₆ 作为对照组。

1.3 试验方法

试验前先用无水乙醇擦拭反应气室内壁,保证内部清洁干燥。安装好球形电极并设置间隙距离后,抽空反应气室,直至内部气压为 -101.3 kPa,再充入对应缓冲气体至气室内部为正压,再次将内部抽成真空,如此重复 3 次,保证气室内部无杂质气体存在。由于 C₅F₁₀O 液化温度远高于 N₂ 和干燥空气,充气时应首先通入 C₅F₁₀O 使其分压达到试验设定值,再通入对应缓冲气体,直到反应气室总填充压达到试验设定值。充气完毕后,需将反应气室静置 24 h,确保内部混合气体充分混合均匀。

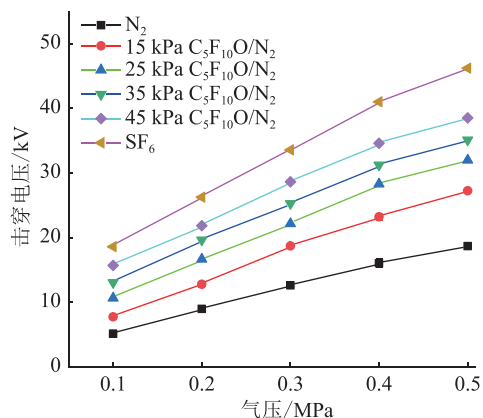
为保证试验的规范性,每隔 1 min 按动感应调压器,从 0 kV 逐步升高施加在球-球电极两端的工频电压,升压步长不得超过 0.5 kV,直至气隙被击穿。每次记录击穿电压后,需等待 5 min 使气室内混合气体恢复绝缘强度后再重新加压,保证数据的准确性。为减少偶然误差,每组工频击穿电压数据取 10 次击穿电压的平均值进行计算分析。

2 C₅F₁₀O 混合气体绝缘性能分析

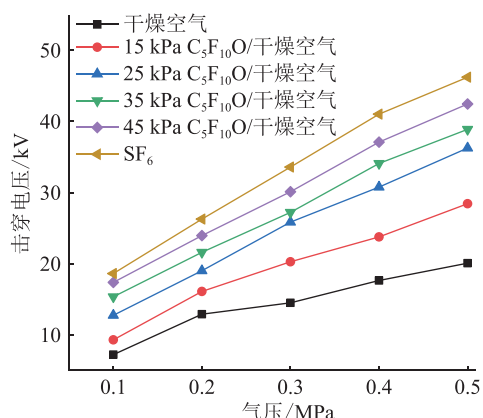
2.1 气压对 C₅F₁₀O 混合气体击穿电压的影响

如图 4 所示,C₅F₁₀O 混合气体、SF₆、N₂ 以及干

干燥空气的击穿电压均随着气压的增大而增大,且近似呈线性趋势。这是因为反应气室内总填充压增大后,单位体积内气体分子数目增多,虽然发生碰撞的几率增大,但电子的平均自由行程减少,其在电场中所获动能减少,降低了碰撞电离的概率。增大气压会削弱气隙的气体电离过程,最终导致气隙击穿电压升高。



(a) $C_5F_{10}O/N_2$ 击穿电压与气压的关系



(b) $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压与气压的关系

图4 不同分压下 $C_5F_{10}O$ 混合气体击穿电压与气压的关系

Fig.4 Relation between breakdown voltage and pressure of $C_5F_{10}O$ mixture under different pressure

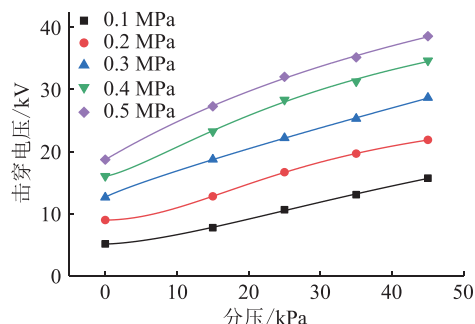
但击穿电压并非随着气压的增大而无限制提升。当气压增大到 0.4 MPa 以上时, $C_5F_{10}O/N_2$ 的击穿电压随气压增大所呈现的增长趋势出现饱和现象,而同一条件下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气与 SF_6 饱和现象并没有 $C_5F_{10}O/N_2$ 明显。

由实验数据可知, $C_5F_{10}O$ 的加入极大地提高了干燥空气与 N_2 的绝缘强度,例如 0.3 MPa 气压时,分压为 25 kPa $C_5F_{10}O/N_2$ 混合气体的击穿电压是 0.3 MPa N_2 的 1.75 倍,相同条件下 $C_5F_{10}O$ /干燥空气的击穿电压是干燥空气的 1.78 倍。虽然相同气压条件下 $C_5F_{10}O$ 混合气体的绝缘强度弱于 SF_6 ,但气压较高的 $C_5F_{10}O$ 混合气体绝缘强度可以与气压

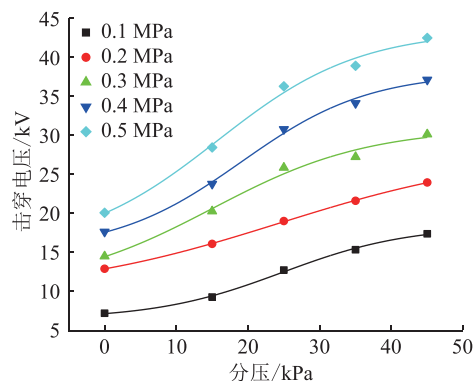
较低的 SF_6 绝缘强度相当。例如,0.2 MPa 气压,35 kPa 的 $C_5F_{10}O/N_2$ 击穿电压只有气压为 0.2 MPa 的 SF_6 的 0.75 倍,而气压为 0.3 MPa 的 $C_5F_{10}O/N_2$ 是气压为 0.2 MPa 的 SF_6 的 0.96 倍。

2.2 $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O$ 混合气体击穿电压的影响

图 5 为不同 $C_5F_{10}O$ 分压对混合气体击穿电压的影响。由图 5 可以看出,随着 $C_5F_{10}O$ 分压的增大, $C_5F_{10}O/N_2$ 与 $C_5F_{10}O$ /干燥空气的击穿电压逐渐增大。原因为: $C_5F_{10}O$ 作为一种全氟酮类气体,具有很强的电负性,在电场中运动时易吸附自由运动的电子形成负离子,导致气隙间的电子数目减少。且 $C_5F_{10}O$ 的分子量为 266.03,其他条件相同的情况下,分子量越大,其在电场内的运动速度就越慢,吸附了电子的 $C_5F_{10}O$ 负离子越容易与气隙间的正离子发生复合,导致气隙间的正离子数目减少。所以,增大 $C_5F_{10}O$ 分压会减小气隙间的带电粒子数目,从而导致气隙击穿电压升高。



(a) $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O/N_2$ 击穿电压的影响



(b) $C_5F_{10}O$ 分压对 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压的影响

图5 $C_5F_{10}O$ 混合气体击穿电压与 $C_5F_{10}O$ 分压的关系
Fig.5 Relation between breakdown voltage of $C_5F_{10}O$ mixture and $C_5F_{10}O$ partial pressure

为定量分析 $C_5F_{10}O$ 分别对 N_2 与干燥空气绝缘强度的影响情况,定义绝缘强度提升相对值 p 为同一气压下缓冲气体加入 $C_5F_{10}O$ 前后击穿电压之差与缓冲气体原击穿电压的比值,即:

$$p = (U_p - U_0) / U_0 \quad (1)$$

式中： U_p 为一定分压下 $C_5F_{10}O$ 混合气体的击穿电压； U_0 为同一气压下缓冲气体的击穿电压。 p 值越大， $C_5F_{10}O$ 对缓冲气体绝缘强度的提升效果越好。不同条件下 $C_5F_{10}O$ 对 2 种缓冲气体绝缘强度提升相对值如表 1 和表 2 所示。

表 1 $C_5F_{10}O$ 对 N_2 绝缘强度提升的相对值

Table 1 The relative value of different partial pressure $C_5F_{10}O$ for improving the insulation strength of N_2

压强/MPa	不同 $C_5F_{10}O$ 分压下的 p 值			
	15 kPa	25 kPa	35 kPa	45 kPa
0.1	0.506 8	1.066 5	1.536 4	2.051 0
0.2	0.423 8	0.853 8	1.186 0	1.431 5
0.3	0.483 0	0.755 3	1.001 3	1.268 3
0.4	0.447 0	0.763 3	1.946 6	1.156 0
0.5	0.457 6	0.711 0	0.878 2	1.060 0

表 2 $C_5F_{10}O$ 对干燥空气绝缘强度提升的相对值

Table 2 The relative value of different partial pressure $C_5F_{10}O$ for improving the insulation strength of dry air

压强/MPa	不同 $C_5F_{10}O$ 分压下的 p 值			
	15 kPa	25 kPa	35 kPa	45 kPa
0.1	0.287 4	0.766 1	1.127 6	1.409 2
0.2	0.247 2	0.472 9	0.674 4	0.855 6
0.3	0.397 2	0.782 1	0.876 6	1.076 8
0.4	0.347 7	0.744 8	0.933 6	1.103 7
0.5	0.416 8	0.806 5	0.937 5	1.115 2

可以看出,当气压较低(≤ 0.4 MPa)时, $C_5F_{10}O$ 对 N_2 绝缘强度的提升效果更显著;当气压达到 0.5 MPa 时, $C_5F_{10}O$ 对两者提升强度相当。因为在低气压下,干燥空气的击穿电压本就高于 N_2 的击穿电压(0.1 MPa 时干燥空气绝缘强度约为 N_2 的 1.4 倍),不过随着气压逐渐增大, N_2 的绝缘强度逐渐接近于干燥空气(0.1 MPa 时干燥空气绝缘强度约为 N_2 的 1.07 倍)。这与图 5 中 2 种缓冲气体绝缘强度先增长后饱和的趋势相符合。

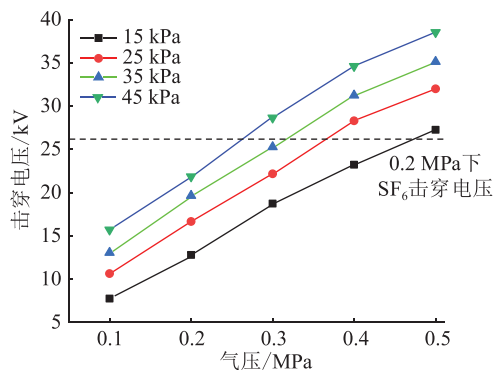
然而,混合气体的击穿电压随着 $C_5F_{10}O$ 分压增大直到存在饱和现象,且 $C_5F_{10}O$ /干燥空气的饱和现象比 $C_5F_{10}O$ / N_2 更加显著。由于气隙内带电粒子的数目有限,当 $C_5F_{10}O$ 分压增大到一定值时,对带电粒子的吸附作用并不明显,反而有可能因为过高的 $C_5F_{10}O$ 分压提高 $C_5F_{10}O$ 混合气体的液化温度。

3 $C_5F_{10}O$ 混合气体替代 SF_6 的可能性

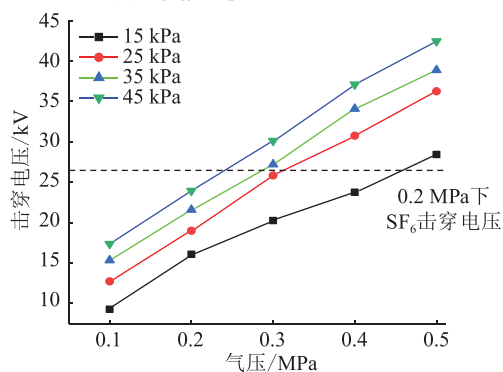
由试验数据可以看出,可以从增大 $C_5F_{10}O$ 混合气体气压以及增大 $C_5F_{10}O$ 分压 2 种方法着手探讨 $C_5F_{10}O$ 混合气体替代 SF_6 的可能性。

如图 6 所示,以 0.2 MPa 下 SF_6 的击穿电压值为

例进行分析,气压为 0.2 MPa, $C_5F_{10}O$ 分压为 35 kPa 的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压是 0.2 MPa 下 SF_6 击穿电压值的 0.92 倍,相同条件下 $C_5F_{10}O$ / N_2 为 0.75 倍;而当混合气体气压升为 0.3 MPa 时,分压为 35 kPa 的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气击穿电压是 0.2 MPa 下 SF_6 击穿电压值的 1.04 倍,相同条件下 $C_5F_{10}O$ / N_2 为 0.96 倍。这说明高压的 $C_5F_{10}O$ 混合气体可以替代较低气压的 SF_6 。不过,总填充压升高必将对电气设备的气密性以及承受压强提出更高的要求,增加工程成本。出于经济性考虑, $C_5F_{10}O$ 混合气体更适用于替代室内中低压电气设备内的 SF_6 。



(a) $C_5F_{10}O$ / N_2 不同气压下击穿电压



(b) $C_5F_{10}O$ /干燥空气不同气压下击穿电压

图 6 $C_5F_{10}O$ 混合气体与不同电压下的击穿电压

Fig.6 Breakdown voltage of $C_5F_{10}O$ mixture under different pressure

如图 7 所示,气压为 0.3 MPa, $C_5F_{10}O$ 分压为 15 kPa(液化温度为 -17.78 $^{\circ}C$)的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气的绝缘强度仅为同气压下 SF_6 的 0.60 倍,相同条件下 $C_5F_{10}O$ / N_2 为 0.56 倍;若将 $C_5F_{10}O$ 分压提升为 45 kPa(液化温度为 5.56 $^{\circ}C$),其他条件不变, $C_5F_{10}O$ /干燥空气的绝缘强度为 SF_6 的 0.90 倍,相同条件下 $C_5F_{10}O$ / N_2 为 0.85 倍。通过提高 $C_5F_{10}O$ 分压来提高 $C_5F_{10}O$ 混合气体绝缘强度时,应考虑 $C_5F_{10}O$ 混合气体的液化温度是否满足应用环境的温度要求。若 $C_5F_{10}O$ 分压过高,反而可能降低气体绝缘强度,无法满足实际工程需求。此时需在室内气体绝缘

设备的工作环境中加装气体调温设备,人为提高环境温度。

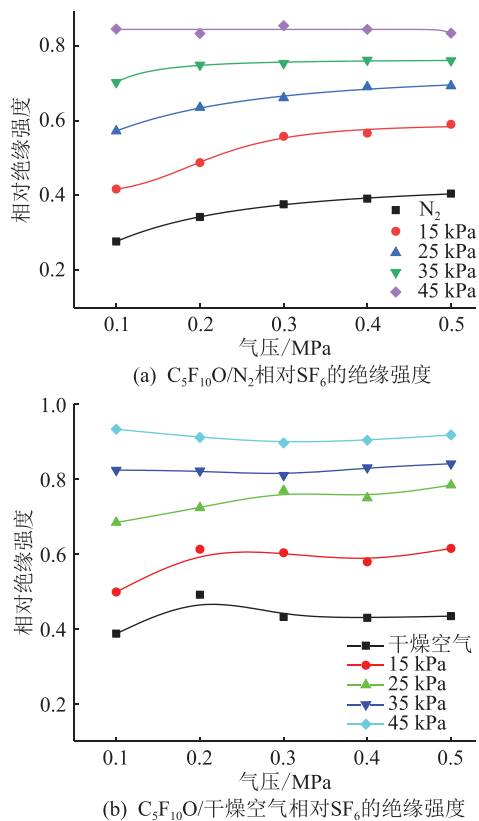


图7 $C_5F_{10}O$ 混合气体相对 SF_6 的绝缘强度

Fig.7 Insulation strength of $C_5F_{10}O$ mixture relative to SF_6

综合考虑工程应用的经济性与实际性,通过增大气压和 $C_5F_{10}O$ 分压 2 种途径, $C_5F_{10}O$ 混合气体可以达到与 SF_6 相当的绝缘强度。例如,气压为 0.3 MPa, $C_5F_{10}O$ 分压为 25 kPa (液化温度为 $-8.22\text{ }^\circ\text{C}$) 的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气绝缘强度为 0.2 MPa 下 SF_6 的 0.98 倍,相同条件下 $C_5F_{10}O/N_2$ 的绝缘强度为 0.84 倍。因此可用该条件下的这两类气体替代 SF_6 ,应用于设备工作环境温度较高的室内中低压电气设备中。

4 结论

文中利用气体绝缘性能测试平台,从缓冲气体类型、混合气体气压以及 $C_5F_{10}O$ 分压 3 个方面,探究了准均匀电场下 $C_5F_{10}O/N_2$ 和 $C_5F_{10}O$ /干燥空气的绝缘特性,并得出以下结论:

(1) 在试验气压范围内, $C_5F_{10}O$ 分压不变时,2 种 $C_5F_{10}O$ 混合气体的绝缘强度与混合气体气压呈正相关。

(2) 低气压 ($\leq 0.4\text{ MPa}$) 条件下,相比于干燥空气, N_2 的绝缘强度受 $C_5F_{10}O$ 提升的效果更显著,

高压时 $C_5F_{10}O$ 对两者的提升效果接近。混合气体气压一定时,2 种 $C_5F_{10}O$ 混合气体的绝缘强度在试验范围内随着 $C_5F_{10}O$ 分压的增大而增大,并且在 $C_5F_{10}O$ 分压达到 0.4 MPa 后出现饱和现象,其中, $C_5F_{10}O$ /干燥空气的饱和现象较 $C_5F_{10}O/N_2$ 更为显著。

(3) 气压为 0.3 MPa, $C_5F_{10}O$ 分压为 25 kPa 的 $C_5F_{10}O$ /干燥空气和 $C_5F_{10}O/N_2$ 的绝缘强度分别为 0.2 MPa 下 SF_6 的 0.98 倍和 0.84 倍。从绝缘强度考虑, $C_5F_{10}O$ /干燥空气比 $C_5F_{10}O/N_2$ 混合气体更具有替代室内中低压设备中 SF_6 的潜力。

参考文献:

- [1] 张晓星,田双双,肖淞,等. SF_6 替代气体研究现状综述[J]. 电工技术学报,2018,33(12):2883-2893.
ZHANG Xiaoxing, TIAN Shuangshuang, XIAO Song, et al. A review study of SF_6 substitute gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2883-2893.
- [2] 赵科,王静君,刘通,等. 直流 GIL 绝缘设计及局部放电检测研究进展[J]. 电力工程技术,2017,36(5):98-102,108.
ZHAO Ke, WANG Jingjun, LIU Tong, et al. A review of insulation design and partial discharge detection of DC gas insulated line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 98-102, 108.
- [3] 文韬,张乔根,赵军平,等. 特高压 GIS 设备现场标准雷电冲击耐压试验技术的应用[J]. 电力工程技术,2017,36(1):30-33,53.
WEN Tao, ZHANG Qiaogen, ZHAO Junping, et al. Application of on-site standard lightning impulse test technology for UHV GIS equipment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 30-33, 53.
- [4] 王娜娜,刘晓瑞,王刚,等. 1 000 kV GIS 布置关键问题探讨[J]. 智慧电力,2019,47(1):1-5,12.
WANG Nana, LIU Xiaorui, WANG Gang, et al. Discussion on key issues of 1 000 kV GIS layout[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 1-5, 12.
- [5] 屠幼萍,袁之康,罗兵,等. 0.4~0.8 MPa 气压下二元混合气体 SF_6/N_2 和 SF_6/CO_2 露点温度计算[J]. 高电压技术,2015,41(5):1446-1450.
TU Youping, YUAN Zhikang, LUO Bing, et al. Calculation on dew temperatures of binary gas mixtures SF_6/N_2 and SF_6/CO_2 under 0.4~0.8 MPa gas pressures[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1446-1450.
- [6] 肖淞,张晓星,戴琦伟,等. CF_3I/N_2 混合气体在不同电场下的工频击穿特性试验研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6276-6285.
XIAO Song, ZHANG Xiaoxing, DAI Qiwei, et al. Experimental research of CF_3I/N_2 gas mixtures on power frequency breakdown performances under different electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6276-6285.
- [7] KIEFFEL Y, BIQUEZ F, PONCHON P, et al. SF_6 alternative de-

- velopment for high voltage switchgears[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA. IEEE, 2015:1-5.
- [8] 焦俊韬,肖登明,赵谏,等. 低比例 CF_3I 的 CF_3I-CO_2 混合气体在极不均匀电场中的绝缘特性[J]. 高电压技术,2017,43(3):772-779.
- JIAO Juntao, XIAO Dengming, ZHAO Su, et al. Insulation characteristics for CF_3I-CO_2 gas mixtures with low proportion of CF_3I in extreme non-uniform electric field[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3):772-779.
- [9] COOK E. Lifetime commitments: why climate policy-makers can't afford to overlook fully fluorinated compounds[M]. World Resources Institute, 1995.
- [10] ROKUNOHE T, YAGIHASHI Y, ENDO F, et al. Fundamental insulation characteristics of air; N_2 , CO_2 , N_2/O_2 , and SF_6/N_2 mixed gases[J]. Electrical Engineering in Japan, 2006, 155(3):9-17.
- [11] WADA J, UETA G, OKABE S. Evaluation of breakdown characteristics of CO_2 gas for non-standard lightning impulse waveforms-breakdown characteristics under double-frequency oscillation waveforms and single-frequency oscillation waveforms in the presence of bias voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5):1799-1809.
- [12] MEIJER S, SMIT J J, GIRODET A. Comparison of the breakdown strength of N_2 , CO_2 and SF_6 using the extended up-and-down method[C]//2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia. IEEE, 2006:653-656.
- [13] HYRENBACH M, HINTZEN T, MÜLLER P, et al. Alternative gas insulation in medium-voltage switchgear[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, France, 2015: 15-18.
- [14] 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]//2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Seattle, WA, USA. IEEE, 2015:375-378.
- [15] 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.
- WANG Xiaohua, FU Xiongxiang, HAN Guohui, et al. Insulation performance of $C_5F_{10}O/CO_2$ gas mixture[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3):715-720.
- [16] 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.
- [17] SIMKA P, RANJAN N. Dielectric strength of C_5 perfluoroketone[J]. 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015:23-28.
- [18] 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, 2015: 15-18.
- [19] 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.
- [20] ZHONG J Y, FU X X, YANG A J, 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 (ICEPE-ST). Xi'an, China. IEEE, 2017:291-294.
- [21] WU Y, WANG C L, SUN H, et al. Evaluation of SF_6 -alternative gas C_5 -PFK based on arc extinguishing performance and electric strength[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(38):385202.
- [22] WANG F, DUN Q W, CHEN S, et al. Calculations of total electron impact ionization cross sections for fluoroketone and fluoronitrile[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5):1693-1700.
- [23] 张晓星,陈琪,张季,等. 高压下环保型 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.
- [24] 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.

作者简介:



卓然

卓然(1986),男,博士,高级工程师,从事变压器设备绝缘状态检测及诊断技术、环保型绝缘气体应用技术、新型电力设备应用及检测技术相关工作;

柯锲(1995),男,硕士在读,研究方向为电气设备在线检测与故障诊断;

张跃(1995),男,硕士在读,研究方向为高压设备绝缘在线监测。

Insulation characteristics of $C_5F_{10}O$ /Air and $C_5F_{10}O/N_2$ under quasi-uniform electric field

ZHUO Ran^{1,2}, KE Kun¹, ZHANG Yue³, FU Mingli², WANG Dibo², XIANG Jixiang¹, ZHANG Xiaoxing¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. China Southern Power Grid Scientific Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

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

Abstract: SF_6 is widely used in electrical insulation equipment due to its excellent electrical properties, but its greenhouse effect is extremely detrimental to the atmospheric environment. In recent years, $C_5F_{10}O$, as an environmentally friendly SF_6 potential substitute gas, has attracted the attention of researchers around the world. In order to further explore the insulation properties of $C_5F_{10}O$ /Air and $C_5F_{10}O/N_2$, a gas insulation performance test platform are used to conduct power-frequency breakdown tests under two quasi-uniform electric fields for two gas mixtures under different pressures and different $C_5F_{10}O$ partial pressures. The experimental results show that the insulation strength of $C_5F_{10}O$ mixed gas increases with the increase of gas pressure. Increasing the partial pressure of $C_5F_{10}O$ can also increase the insulation strength of the two types of buffer gases, and the relative increase in insulation strength of N_2 is greater than that of dry air. From the viewpoint of dielectric strength, $C_5F_{10}O$ / Air has more potential to replace SF_6 in indoor low-voltage equipment than $C_5F_{10}O/N_2$ mixed gas by appropriately increasing the $C_5F_{10}O$ mixed gas pressure and $C_5F_{10}O$ partial pressure.

Keywords: $C_5F_{10}O$ mixed gas; insulation property; quasi-uniform electric field; SF_6 replacement gas; gas insulation

(编辑 方晶)

(上接第 119 页)

Temperature characteristics of typical polluted porcelain insulator cleaned by pulse laser

SUN Wei¹, TAO Yuning¹, FANG Chunhua¹, CHEN Jie², CAO Jingying²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

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

Abstract: Pulse laser cleaning of porcelain insulator surface pollution will produce strong thermal effect, and the analysis of temperature characteristics in the cleaning process is very important. In this paper, the contaminated porcelain insulator is taken as the research object. By the method of simulation and experiment, the change rule of temperature field under different typical pollution, different pollution water content, different laser energy density and wavelength are studied. The results show that the temperature is directly proportional to the pollution water content, laser energy density and inversely proportional to the laser wavelength, and the laser wet cleaning is more efficient than the dry cleaning. Under the premise of ensuring the thermal stability of insulator ceramic material, the laser energy density is $2.52 \sim 3.81 \text{ J/cm}^2$, and the scanning speed is $1\ 000 \text{ mm/s}$, which will not damage the insulator base material and can achieve the best cleaning.

Keywords: pulse laser; porcelain insulator; temperature characteristics; typical pollution; energy density

(编辑 方晶)