

不均匀电场下CF₃SO₂F混合气体的工频击穿特性

胡世卓^{1,2}, 周文俊², 罗 贇¹, 黄宇婧¹, 邱 睿²

(1. 南宁职业技术学院 智能制造学院, 广西 南宁 530008;

2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:在球-球和尖-板电极下测量了新型环保绝缘混合气体CF₃SO₂F/N₂和CF₃SO₂F/CO₂的工频击穿电压,分析了气压、电极间距和电场不均匀度等因素对混合气体工频击穿特性的影响,并与SF₆进行了对比。结果表明:稍不均匀电场下CF₃SO₂F混合气体的工频击穿电压与气压为正向线性关系,随间距增长击穿电压出现微弱的饱和趋势。极不均匀电场下CF₃SO₂F混合气体的工频击穿电压随气压变化呈现“上升-下降-上升”的“驼峰”曲线,“驼峰”峰值对应的气压值在0.2~0.35 MPa之间。其中CF₃SO₂F/N₂混合气体的工频击穿电压整体大于CF₃SO₂F/CO₂混合气体。在0.3 MPa及以上,CF₃SO₂F/N₂混合气体在极不均匀电场下仍可保持较高的相对SF₆绝缘水平,具备良好的应用潜力。

关键词:CF₃SO₂F混合气体;不均匀电场;击穿特性;“驼峰”现象

中图分类号:TM213 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.12.017

Power frequency breakdown characteristics of CF₃SO₂F mixtures under non-uniform electric field

HU Shizhuo^{1,2}, ZHOU Wenjun², LUO Yun¹, HUANG Yujing¹, QIU Rui²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Nanning College for Vocational Technology, Nanning 530008, China;

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

Abstract: The power frequency breakdown voltages of a new eco-friendly insulation CF₃SO₂F/N₂ and CF₃SO₂F/CO₂ mixtures were measured under sphere-sphere and needle-plate electrodes. The effects of pressure, electrode spacing, and electric field non-uniformity on the power frequency breakdown characteristics of the CF₃SO₂F mixtures were analyzed and compared with SF₆. The results show that under slightly non-uniform electric field, the power frequency breakdown voltage of CF₃SO₂F mixtures is linearly related to pressure, and the breakdown voltage show weak saturation trend with the increase of electrode spacing. Under extremely non-uniform electric field, the power frequency breakdown voltages of CF₃SO₂F mixtures exhibits "hump" curves of "rising-falling-rising" as the pressure increases, and the corresponding pressure of "hump" peak is between 0.2 MPa and 0.35 MPa. The overall power frequency breakdown strength of the CF₃SO₂F/N₂ mixture is greater than that of the CF₃SO₂F/CO₂ mixture. At 0.3 MPa and above, CF₃SO₂F/N₂ mixtures can maintain a highly insulation level relative to SF₆ under extremely non-uniform electric fields, which has good application potential.

Key words: CF₃SO₂F mixtures; non-uniform electric field; breakdown characteristics; "hump" phenomenon

0 引言

SF₆具有良好的绝缘、灭弧特性,在气体绝缘电气设备中得到了大规模应用。但SF₆的全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)为24 600^[1],是已知GWP值最高的气体。为践行绿色低碳发展和助力实现“双碳”目标,亟需研发新环保绝缘气体^[2-4],逐步减少使用、取代电气设备中的SF₆,直至实现SF₆零应用。

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1966211);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2023KY1049)。

三氟甲基磺酰氟(CF₃SO₂F)是具有应用前景的潜在SF₆替代气体,国内外学者对CF₃SO₂F及其混合气体的特性已开展了部分研究。早在1980年代,就有少量关于CF₃SO₂F气体介电性能试验研究和液化温度的报道。A W BAUER等^[5]和R E WOOTON等^[6]的研究结果显示,CF₃SO₂F的绝缘强度是SF₆的1.41~1.49倍,而且在CCl₄中添加相同含量的CF₃SO₂F和CF₃NO₂时,CF₃SO₂F抑制碳元素生成的效果更好^[7]。YU X J等^[8]建立了单一气体的绝缘强度构效关系模型,通过杂化方法设计了一系列绝缘强度高于或与SF₆相当且液化温度和GWP均较低的分子结构,提出沸点为-22℃、GWP预测值为

3 678的CF₃SO₂F具备应用潜力。WANG Y等^[9]在实验室合成了CF₃SO₂F气体并开展了工频击穿试验,研究发现纯CF₃SO₂F气体在均匀电场下的工频击穿电压为SF₆的1.38倍。ZHANG L等^[10]对CF₃SO₂F气体进行4 h急性吸入毒性测试,结果表明CF₃SO₂F的半致死浓度(LC₅₀)值为3 400~4 000 mg/m³,属低毒气体,在暴露程度较高的场合需要使用自吸过滤式全面罩防毒面具,但CF₃SO₂F占比小于68%时,其与N₂、CO₂等的混合气体属无毒气体^[11]。LONG Y X等^[12]通过稳态汤逊实验获得了CF₃SO₂F的放电参数,结果表明CF₃SO₂F的临界击穿场强约为SF₆的1.6倍。HU S Z等^[13]在稍不均匀电场下研究了CF₃SO₂F混合气体的工频击穿特性,指出40%CF₃SO₂F/60%N₂和45%CF₃SO₂F/55%CO₂混合气体的工频击穿电压与SF₆相当,CF₃SO₂F/N₂混合气体的协同效应更显著。郑宇等^[14]采用稳态汤逊法分别测量了CF₃SO₂F占比为10%、20%、30%、40%、100%CF₃SO₂F/N₂混合气体的有效电离系数,研究发现40%CF₃SO₂F/60%N₂混合气体的临界约化场强约为SF₆的1.01倍。除低气压下的电离特性外,他们还研究了CF₃SO₂F/N₂混合气体分别与3A、4A、5A、13X分子筛和活性氧化铝等5种常用吸附剂的相容性,结果表明CF₃SO₂F/N₂混合气体与上述5种吸附剂不发生化学反应、不产生吸附,相容性良好^[15]。万旭昊等^[16]研究了CF₃SO₂F与铜、氧化铜、氧化铝和环氧树脂等常见电工设备表面的气固相容特性,计算模拟和实验结果显示,CF₃SO₂F气体与金属铝表面的相容性较差,与其他电工设备表面的相容性良好。

综上所述,研究人员从不同方面评估了CF₃SO₂F及其混合气体的特性,取得了不少成果。但目前仍未有CF₃SO₂F混合气体在极不均匀电场下击穿特性的报道,而电力设备在制造、运输、安装以及运行过程中,难以避免尖端、毛刺和导电微粒等的产生,此时局部电场将发生畸变,形成极不均匀电场。新型CF₃SO₂F混合气体在缺陷条件下是否会造成绝缘水平的大幅下降,需要通过试验进一步确认。因此本文用尖-板电极模拟电气设备中可能出现的局部电场集中的场景,研究CF₃SO₂F/N₂和CF₃SO₂F/CO₂混合气体在极不均匀电场下的工频击穿特性,并与稍不均匀电场下的放电特性进行对比,研究结果可为CF₃SO₂F混合气体的工程配置与应用提供参考。

1 气体间隙工频击穿试验研究平台与方法

1.1 工频击穿试验平台

气体间隙工频击穿试验回路如图1所示。其中无局放试验变压器额定容量为10 kVA,额定输入电压为220 V,最高输出电压为100 kV,保护电阻为

50 kΩ,C₁、C₂分压比为1 000:1。

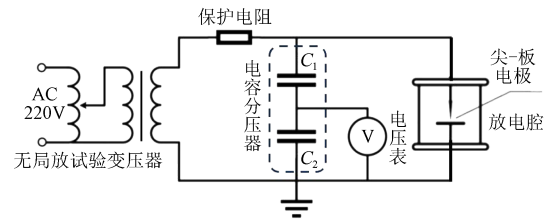


图1 工频击穿试验回路图

Fig.1 Power frequency breakdown test circuit

试验腔体如图2所示。腔体设计最高充气压力为0.5 MPa。采用螺旋测微仪进行电极间距调节,调节精度为±0.01 mm。高、低压电极均为非固定结构,可拆卸更换。试验电极材料为钨铜合金,所用尖电极和球电极尺寸参数如图3所示。电场不均匀度由有限元仿真获得,当尖-板电极间距分别为5 mm、10 mm时,电场不均匀度*f*分别为11.2、18.4,属极不均匀电场;当球-球电极间距分别为2.5、5、7.5、10 mm时,电场不均匀度*f*分别为1.21、1.30、1.36、1.46,属稍不均匀电场。

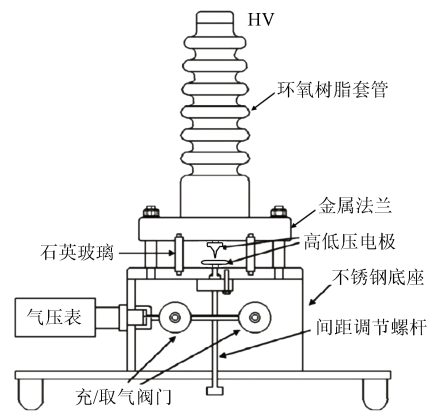


图2 试验腔体示意图

Fig.2 Schematic diagram of test chamber

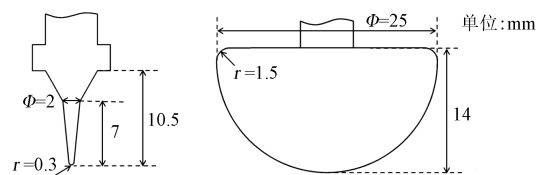


图3 尖电极和球电极尺寸参数

Fig.3 Size parameters of needle and sphere electrode

1.2 试验预处理与试验方法

试验前准备及充配气和静置:采用5 000目砂纸对电极表面进行处理,打磨完成后,用无水酒精对电极进行擦拭、清洁,然后将电极安装到腔体上,同时避免对电极及腔体造成二次污染。试验腔体、电极置于无尘、干燥环境下自然风干后,进行正、负

压气密性检查验证。对气密性合格的放电腔体进行3次洗气处理,然后采用道尔顿分压定律配置 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体,为了确保任一比例混合气体都混合均匀,充配气完成后静置3 h。

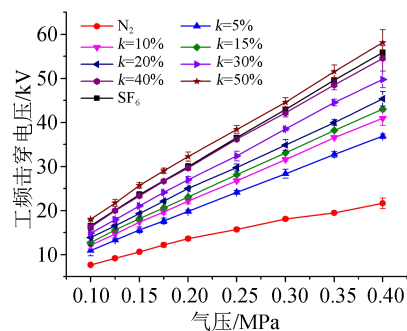
试验方法与流程:气体间隙的工频击穿试验按照 GB/T 16927.1—2011“附录 A.1.3 第三类 连续放电试验”方法^[17]开展。采用快速升压法进行5次击穿试验,取5组有效数据的算术平均值作为工频击穿电压(本试验获得的击穿电压值均为有效值)。为确保气隙击穿后绝缘强度得到充分恢复,两次击穿间隔5 min。

2 试验结果与分析

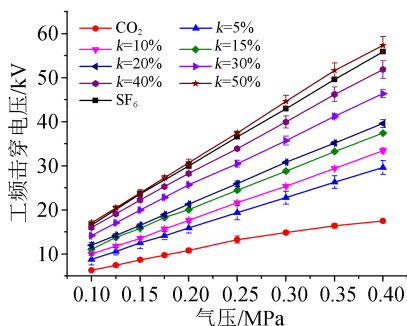
2.1 稍不均匀电场下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的工频击穿特性

2.1.1 气压的影响

稍不均匀电场下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 、 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体及 SF_6 的工频击穿电压与气压的关系如图4所示,其中 k 为 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 在混合气体中的占比。从图4可以看出, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 和 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体的工频击穿电压均随气压增大呈线性增大,



(a) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体



(b) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体

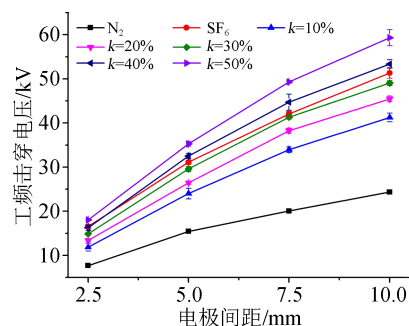
图4 球-球电极下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体工频击穿电压与气压的关系

Fig.4 Relationship between power frequency breakdown voltage and pressure of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ mixtures under sphere-sphere electrode

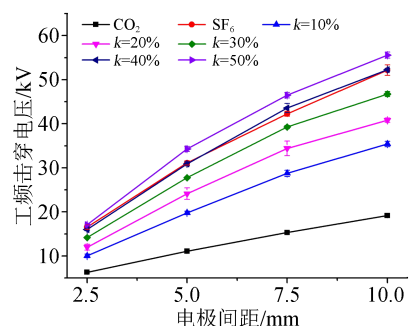
$\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体工频击穿电压的上升率高于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体。在 0.10~0.40 MPa 范围内,向 N_2 中加入 5% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 后,混合气体的工频击穿电压相对于 N_2 的提升量为 42%~70%,相对于 CO_2 的提升量为 39%~69%。相比于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 各比例混合气体的工频击穿电压曲线较“密集”,差异较小,即在较低的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比下也可以获得较高的绝缘强度,相同 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的绝缘强度优于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体。

2.1.2 间距的影响

0.1 MPa 下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 、 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体及 SF_6 的击穿电压与间距的关系如图5所示。



(a) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体



(b) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体

图5 球-球电极下 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体工频击穿电压与电极间距的关系

Fig.5 Relationship between power frequency breakdown voltage and electrode spacing of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ mixtures under sphere-sphere electrode

从图5可以看出, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 、 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体和 SF_6 的工频击穿电压随间距增大均出现了微弱的饱和现象,即击穿电压偏离了巴申曲线。 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比越高,则 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的击穿电压饱和趋势越明显。若要求绝缘强度与 SF_6 相当,则 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体中 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 的占比在 30%~40%;对于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比则需要提高到 40% 左右。

2.2 极不均匀电场下 CF_3SO_2F 混合气体的工频击穿特性

2.2.1 气压的影响

CF_3SO_2F 的占比分别为 30%、50% 时 CF_3SO_2F/N_2 和 CF_3SO_2F/CO_2 混合气体及 SF_6 在尖-板电极下的工频击穿电压与气压的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出, 随气压升高, CF_3SO_2F/N_2 、 CF_3SO_2F/CO_2 混合气体及 SF_6 在极不均匀电场下的工频击穿电压都呈现出“上升-下降-上升”的变化规律, 因类似单驼峰, 被称为“驼峰”曲线。早在 1983 年, 就已经有学者发现了 SF_6 的雷电冲击放电电压呈“驼峰”现象, 并归因于空间电荷的稳定化作用^[18]。

CF_3SO_2F/N_2 混合气体的“驼峰”曲线极大值对应的气压范围在 0.25~0.35 MPa; CF_3SO_2F/CO_2 混合气体的极大值对应的气压范围稍宽, 为 0.20~0.35 MPa; 而 SF_6 的极大值对应的气压范围为 0.20~0.25 MPa。 CF_3SO_2F 混合气体的极小值在 0.40 MPa 及以上; SF_6 的极小值在 0.35~0.40 MPa。

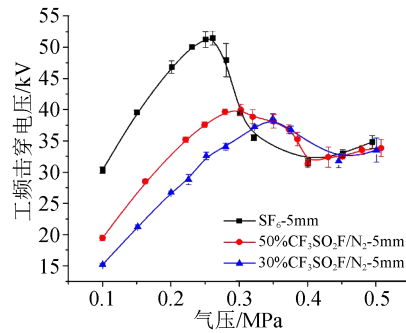
对于 CF_3SO_2F 混合气体, 当 CF_3SO_2F 占比增加时, “驼峰”峰值呈左移趋势。在“驼峰”曲线极值点的左侧区域, CF_3SO_2F 占比越大则绝缘强度越高, 符合一般规律; 但在“驼峰”曲线极值点右侧, 因不同比例 CF_3SO_2F 混合气体极大值点对应的气压不完全相同, 这一现象可能发生反转, 即 CF_3SO_2F 占比低反而击穿电压更高, 表明试验条件的变化会显著影响气体的击穿特性。

由图 4 可知, 在稍不均匀电场中, CF_3SO_2F 占比为 50% 的混合气体绝缘强度已与 SF_6 相当或者优于 SF_6 。但图 6 中极不均匀电场下的试验结果显示, 在 0.1~0.3 MPa 范围内, 50% CF_3SO_2F 混合气体的击穿电压与 SF_6 有较大差距, 即电场不均匀度增大时, CF_3SO_2F 混合气体击穿电压的下降幅度大于 SF_6 。

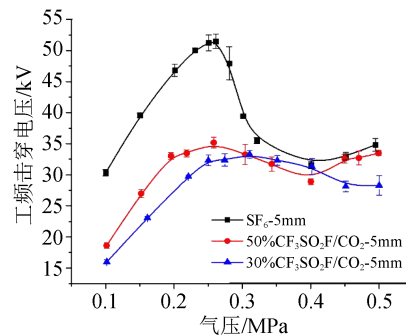
此外, 在试验时发现, 因极不均匀电场下气体间隙的击穿电压存在“驼峰”特性, 为获得较为准确的击穿电压曲线, 应增加在极大值、极小值附近的试验气压点数, 不宜继续采用较大间隔的等距气压点进行试验。

2.2.2 间距和混合比例的影响

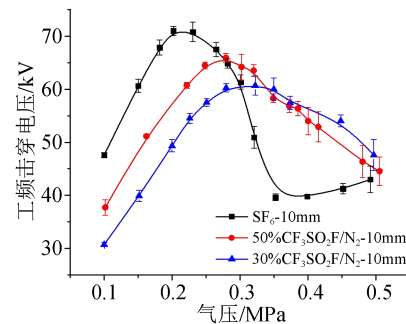
图 7 对比了不同间距和混合比例下 CF_3SO_2F/N_2 和 CF_3SO_2F/CO_2 混合气体的工频击穿电压“驼峰”特性。从图 7 可以看出, 当间隙距离从 5 mm 增大到 10 mm 时, CF_3SO_2F 混合气体和 SF_6 的“驼峰”区域面积均增大, 且 SF_6 的变化范围较为明显。此外, 随间距增大, CF_3SO_2F 混合气体和 SF_6 的“驼峰”峰值也呈现出左移趋势。当 CF_3SO_2F 在混合气体中的占比由



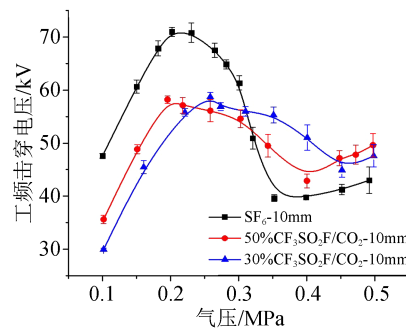
(a) CF_3SO_2F/N_2 混合气体-5 mm



(b) CF_3SO_2F/CO_2 混合气体-5 mm



(c) CF_3SO_2F/N_2 混合气体-10 mm



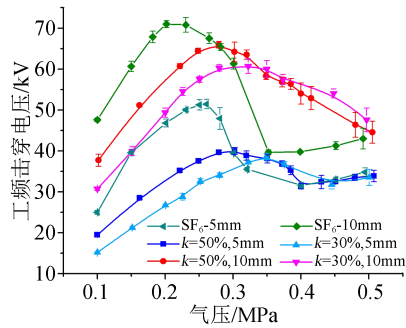
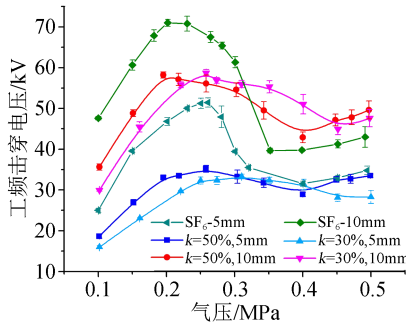
(d) CF_3SO_2F/CO_2 混合气体-10 mm

图 6 尖-板电极下 CF_3SO_2F 混合气体工频击穿电压与气压的关系

Fig.6 Relationship between power frequency breakdown voltage and pressure of CF_3SO_2F mixtures under needle-plate electrode

30% 增加至 50% 时, “驼峰”峰值左侧对 CF_3SO_2F 混合气体绝缘强度的提升效果大于“驼峰”峰值右侧。

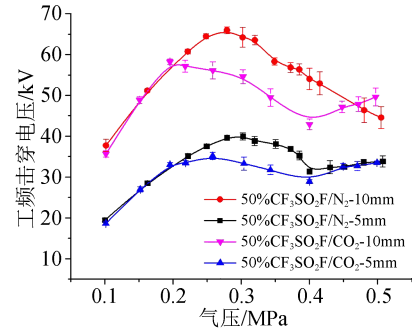
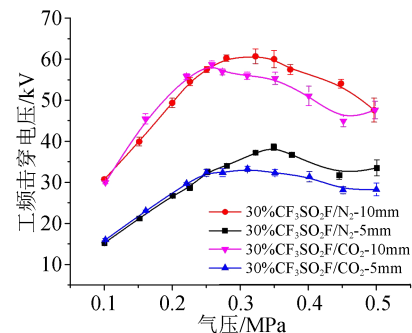
当气压大于 0.3 MPa (“驼峰”峰值右侧) 且间距

(a) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体(b) $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体图7 尖-板电极下间距和混合比例对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体工频击穿电压的影响Fig.7 Influence of electrode spacing and mixing ratios on the power frequency breakdown voltage of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ mixtures under needle-plate electrode

为 5 mm 时, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的工频击穿电压与 SF_6 相当; 间距为 10 mm 时, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的工频击穿电压均大于 SF_6 。表明电场不均匀度增加时, 较高气压下的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体具有较好的绝缘性能。

2.2.3 间距和缓冲气体类型的影响

进一步分析缓冲气体类型对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体工频击穿特性的影响, 结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 在相同的混合比例和间距下, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的工频击穿电压“驼峰”峰值及其对应气压均大于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体。在 0.1~0.2 MPa 范围内, 不同 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比下的混合气体工频击穿电压基本一致; 随气压继续增大, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体先达到“驼峰”峰值, 然后击穿电压开始下降并低于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体; 当气压继续上升, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的击穿电压达到峰值点后开始下降; 当气压大于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体击穿电压极小值点对应的气压后, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体的工频击穿电压曲线率先上拐, 并有可能大于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的工频击穿电压。但 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 的工频击穿电压曲线积分大于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$, 可认为 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的工频绝缘表现总体优于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体。

(a) 50% $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体(b) 30% $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体图8 尖-板电极下间距和缓冲气体类型对 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体工频击穿电压的影响Fig.8 Influence of electrode spacing and buffer gas on the power frequency breakdown voltage of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ mixtures under needle-plate electrode

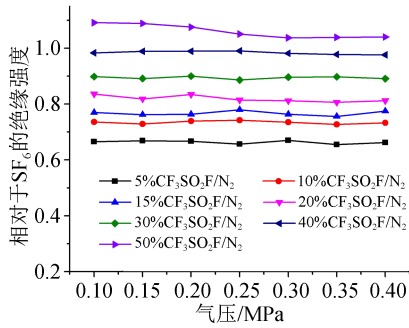
2.3 与 SF_6 的对比

2.3.1 稍不均匀电场下相对 SF_6 的绝缘强度

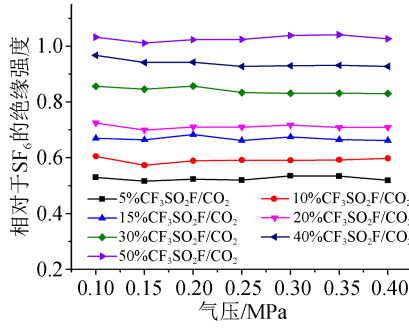
在球-球电极下, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 和 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体的工频击穿电压与 SF_6 的工频击穿电压之比称为相对于 SF_6 的绝缘强度, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 50% $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的绝缘强度优于相同压力下的 SF_6 。在 0.1~0.4 MPa 范围内, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比为 5%~50% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 和 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体相对于 SF_6 的绝缘强度随气压变化时波动不大, 表明 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体随气压变化的工频击穿特性与 SF_6 相似。 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比为 30%、50% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体相对于 SF_6 的绝缘强度平均值分别为 0.89 和 1.06, 而 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比为 30%、50% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体相对于 SF_6 的绝缘强度平均值分别为 0.84 和 1.03。表明 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的工频击穿电压高于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体, 为优选混合气体。

2.3.2 极不均匀电场下相对 SF_6 的绝缘强度

在尖-板电极下, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 和 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体相对于 SF_6 的绝缘强度如图 10 所示。从图 10 可以看出, 在 0.1~0.3 MPa 范围内, 两种 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混



(a)CF₃SO₂F/N₂混合气体



(b)CF₃SO₂F/CO₂混合气体

图9 球-球电极下 CF₃SO₂F 混合气体相对 SF₆ 的绝缘强度
Fig.9 Dielectric strength of CF₃SO₂F mixtures relative to SF₆ under sphere-sphere electrode

合气体相对于 SF₆ 的绝缘强度均低于稍不均匀电场。但当气压大于 0.3 MPa 时, 30%、50% 的 CF₃SO₂F/N₂ 混合气体的绝缘强度已与 SF₆ 相当或超过 SF₆, 最高可达 1.47 倍; 相同占比下 CF₃SO₂F/CO₂ 混合气体的绝缘强度则在 SF₆ 的 80% 及以上。

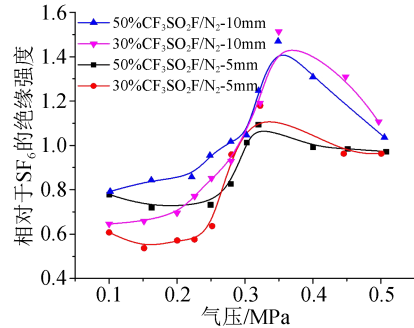
当相对 SF₆ 绝缘强度曲线取得极大值时, 认为对应的气压为 CF₃SO₂F 混合气体的优化气压值。CF₃SO₂F 占比为 30%、50% 的 CF₃SO₂F/N₂ 混合气体优化气压值分别约为 0.3 MPa 和 0.35 MPa, 在该气压下, 无论是在稍不均匀电场还是极不均匀电场下 (电场不均匀度 f 变化范围为 1.21~18.4), CF₃SO₂F/N₂ 混合气体相对于 SF₆ 的绝缘强度较高且相对稳定。当气压大于 0.3 MPa 时, CF₃SO₂F 占比为 30% 及以上的 CF₃SO₂F/N₂ 混合气体绝缘强度在 SF₆ 的 89% 以上。

2.3.3 相对 SF₆ 的电场敏感性

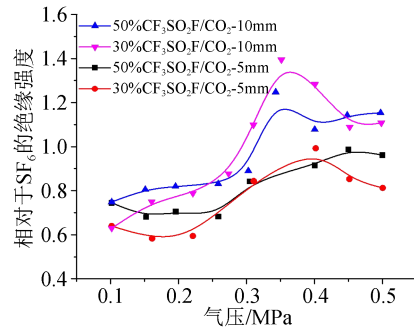
为定量比较 CF₃SO₂F 与 SF₆ 对电场不均匀度变化时的敏感程度, 定义混合气体相对 SF₆ 的电场敏感度 S_r 为式(1)。

$$S_r = \frac{E_{rs} - E_{re}}{E_{rs}} \quad (1)$$

式(1)中, E_{rs} 、 E_{re} 分别为稍不均匀、极不均匀电场下相对于 SF₆ 的绝缘强度。当 $S_r=0$ 时, 表示混合气体的电场敏感度与 SF₆ 相同; 当 $S_r>0$ 时, 表示混合气体



(a)CF₃SO₂F/N₂混合气体



(b)CF₃SO₂F/CO₂混合气体

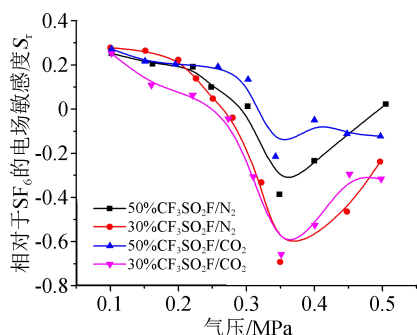
图10 尖-板电极下 CF₃SO₂F 混合气体相对 SF₆ 的绝缘强度
Fig.10 Dielectric strength of CF₃SO₂F mixtures relative to SF₆ under needle-plate electrode

对电场的敏感度高于 SF₆, 且 S_r 值越大, 相对敏感程度越高; 当 $S_r<0$ 时, 表示混合气体的电场敏感度低于 SF₆。

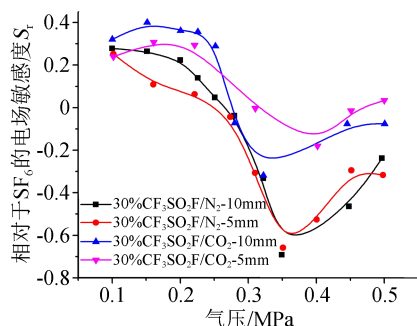
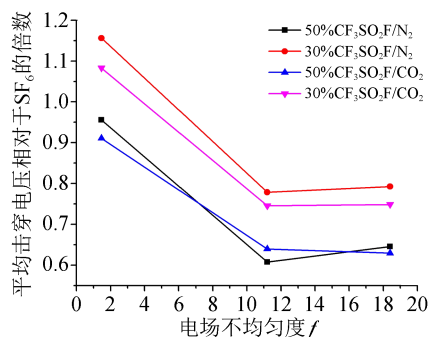
假设稍不均匀电场下, 间隙距离在 2.5~10 mm 范围内时, CF₃SO₂F 混合气体相对于 SF₆ 的绝缘强度基本不变, 则 CF₃SO₂F 混合气体相对 SF₆ 的电场敏感性 S_r 与气压的关系如图 11 所示。从图 11 可以看出, 在 0.1~0.3 MPa 范围内, CF₃SO₂F 混合气体相对于 SF₆ 表现出较高的电场敏感性, 击穿电压受电场畸变影响下降的幅度较大。其原因可能是 CF₃SO₂F 是强电负性气体, 吸附截面大于 SF₆^[13], 相同的尖电极表面场强下产生的稳定化电晕半径小于 SF₆, 对尖电极附近畸变电场的均匀化作用较弱, 导致 CF₃SO₂F 混合气体的击穿电压较低。在 0.35 MPa 附近 CF₃SO₂F 混合气体相对 SF₆ 的电场敏感度 S_r 最小, 这是由于此时 SF₆ 在该气压下的击穿电压为“驼峰”极小值, 放电形式可能已由流注转化为先导, 而 CF₃SO₂F 混合气体仍处于“驼峰”区间, 为流注放电范畴^[19]。

2.4 电场不均匀度对 CF₃SO₂F 混合气体工频击穿特性的影响

0.1 MPa 下, 电场不均匀度为 1.46~18.4 时, CF₃SO₂F 混合气体的平均击穿电压变化情况如图 12



(a) 尖-板电极距离为 10 mm

(b) 30% $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体图 11 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体相对 SF_6 的电场敏感度 S_r 与气压的关系Fig.11 Relationship between electric field sensitivity relative to SF_6 S_r and pressure of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ mixtures图 12 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体击穿电压与电场不均匀度的关系
Fig.12 Relationship between breakdown strength and electric field non-uniformity of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ mixtures

所示。从图 12 可以看出,随电场不均匀度的增加, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的平均击穿电压出现了饱和下降趋势。该特性与文献[20]中类似,在达到“临界电场不均匀度”后,混合气体相对 SF_6 的击穿电压不再随电场不均匀度的增加而降低,趋于稳定。具体为:当电场不均匀度由 1.46 增大到 11.2 时, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比为 30%、50% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体平均击穿电压下降程度分别为 38% 和 34%, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比为 30%、50% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体平均击穿电压下降程度分别为 32% 和 33%,稍好于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混

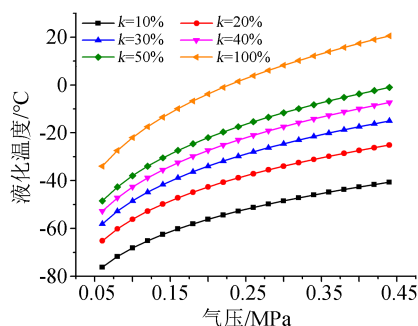
合气体;由于空间电荷对尖电极附近电场的畸变作用,当电场不均匀度大于 11.2 后,平均击穿电压基本不变。

2.5 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体的液化温度-气压曲线

一个标准大气压下, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 的液化温度为 -22°C 。基于 Clausius-Claperyron 方程与 Trouton 规则,混合气体的液化温度可以由式(2)估算^[21]。

$$T_{\text{Mb}} = \frac{T_b}{1 - \frac{R}{X} \ln(10kp_v)} \quad (2)$$

式(2)中: T_{Mb} 为混合气体的液化温度,单位为 K; k 为 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 的占比; p_v 是气体的蒸气压,单位为 MPa; T_b 是气体的沸点(或液化温度),单位为 K; R 是理想气体常数,其值为 $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; X 代表 Trouton 常数,通常为 $85\sim 88 \text{ J}\cdot\text{K}$,本文取 $X=85 \text{ J}\cdot\text{K}$ 。 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 及其混合气体的液化温度-气压曲线计算结果如图 13 所示。从图 13 可以看出,在相同压力下,随着 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 含量的增加,混合气体液化温度增长幅度变缓。在典型限制温度 -10°C 下(参考 GB 50545—2010^[22]的要求),气压为 0.3 MPa 时 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 混合气体中的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比可提升至 50%,结合 2.3 节,该比例下的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的绝缘强度优于 SF_6 。

图 13 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 及其混合气体的液化温度-气压曲线
Fig.13 Liquefaction temperature-pressure curve of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ and its mixtures

3 结论

(1) 在球-球电极构成的稍不均匀电场下, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 和 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体的工频击穿电压均随气压增大呈线性变化, $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的工频击穿电压高于 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体。 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 占比分别为 5%、10%、15%、20%、30%、40%、50% 的 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体相对于 SF_6 的绝缘强度分别约为 0.66、0.73、0.77、0.82、0.89、0.98、1.06 倍。

(2) 在尖-板电极构成的极不均匀电场下,

$\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 和 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ 混合气体的工频击穿电压均随气压增大呈“驼峰”曲线。 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 混合气体的“驼峰”曲线极大值对应的气压范围在 0.25~0.35 MPa, 优化气压值为 0.30~0.35 MPa。

(3) 综合稍不均匀和极不均匀电场下的工频击穿特性, 0.30 MPa 及以上的新环保绝缘混合气体 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ 具有较大的应用潜力。

参考文献:

- [1] Working Group I Contribution to the IPCC sixth assessment report (AR6). IPCC Climate Change 2021: The physical science basis[R]. IPCC,2021.
- [2] 沈腾达, 周文俊, 王宝山, 等. SF_6 替代气体的分子构效关系研究进展[J]. 绝缘材料, 2022, 55(6): 1-5.
- [3] 汪雪逸, 杨帅, 夏涵怡, 等. 基于福井函数参量的气体介质绝缘强度的构效关系模型研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 89-95.
- [4] 刘伟, 宋玉梅, 张晓星, 等. 环保绝缘气体 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 的急性吸入安全性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(12): 92-97.
- [5] BAUER A W, LEE A. Gases superior to SF_6 for insulation and interruption[R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1982.
- [6] WOOTTON R E, DALE S J, ZIMMERMAN N J. Electric strength of some gases and gas mixtures[C]//Proceedings of the Second International Symposium on Gaseous Dielectrics, Gaseous Dielectrics II. Knoxville, Tennessee, USA: Elsevier, 1980: 137-148.
- [7] WOOTTON R E, MURRYSVILLE P. Dielectric gas mixture containing trifluoronitromethane and/or trifluoromethanesulfonyl fluoride: US4275260A[P]. 1981-06-23.
- [8] YU X J, HOU H, WANG B S. A priori theoretical model for discovery of environmentally sustainable perfluorinated compounds [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2018, 122(13): 3462-3469.
- [9] WANG Y, GAO Z Y, WANG B S, 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.
- [10] ZHANG L, PENG R C, HUANG Y J, et al. Toxic study on the new eco-friendly insulating gas trifluoromethanesulfonyl fluoride: A substitute for SF_6 [J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5239-5249.
- [11] 全国气体标准化技术委员会混合气体分技术委员会. 混合气体的分类 第一部分: 毒性分类: GB/T 34710.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [12] LONG Y X, GUO L P, WANG Y, 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.
- [13] HU S Z, WANG Y, ZHOU W J, et al. Dielectric properties of $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{N}_2$ and $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}/\text{CO}_2$ mixtures as a substitute to SF_6 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(35): 15796-15804.
- [14] 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/OL]. 高电压技术: 1-10[2023-05-11]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230271>.
- [15] 吕混尘, 郑宇, 朱太云, 等. 五种吸附剂与 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体及 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 气体的相容性试验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(S1): 196-203.
- [16] 万旭昊, 郭宇铮, 高克利, 等. 基于第一性原理的新型环保绝缘介质 $\text{CF}_3\text{SO}_2\text{F}$ 相容性评估[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2848-2857.
- [17] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. 高电压试验技术 第1部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] FARISH O. Corona controlled breakdown in SF_6 and SF_6 mixtures[C]//16th International Conference on Phenomenon in Ionized Gases. Dusseldorf, USA: 1983: 187-195.
- [19] ZWICKY M. Breakdown phenomena in SF_6 and very inhomogeneous large rod-plane gaps under 50 Hz-AC and positive impulse voltages[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1987, 22(3): 317-324.
- [20] GUO C, ZHANG Q, YOU H, et al. Influence of electric field non-uniformity on breakdown characteristics in SF_6/N_2 gas mixtures under lightning impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2248-2258.
- [21] YAMAMOTO O, TAKUMA T, HAMADA S, et al. Applying a gas mixture containing *c*- C_4F_8 as an insulation medium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 8(6): 1075-1081.
- [22] 中国电力企业联合会. 110kV-750kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.

收稿日期: 2023-07-31; 修回日期: 2023-09-25。

作者简介: 胡世卓(1994-), 女(汉族), 广西贵港人, 助理研究员, 博士, 主要从事环保型 SF_6 替代气体、气体绝缘评估模型及机理研究。