

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.017

# 基于一维电弧模型的 SF<sub>6</sub> 混合气体灭弧性能评价

顾琦, 仲林林

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** SF<sub>6</sub>混合气体是广受关注的 SF<sub>6</sub>替代气体方案之一。为定量评估 SF<sub>6</sub>混合气体的灭弧性能,文中采用一维衰减电弧模型和玻尔兹曼方程相结合的方法,将电弧熄灭过程划分为热恢复阶段、弧前介质恢复阶段和弧后介质恢复阶段,分别引入热恢复率、弧前介质恢复率和弧后介质恢复率作为各阶段的评价参数,并计算三者的调和平均数作为综合评价参数,以此来评估 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>以及 SF<sub>6</sub>-Air 混合气体的灭弧性能。基于上述方法,文中初步探讨 SF<sub>6</sub>含量、背景气体种类和压强大小对 SF<sub>6</sub>混合气体灭弧性能的影响。结果表明,随着 SF<sub>6</sub>含量的减少,混合气体的灭弧性能整体上呈现下降趋势;当 SF<sub>6</sub>含量为 10%~50%时,4种混合气体中 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>的灭弧性能最优,其次分别为 SF<sub>6</sub>-Air、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>和 SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>。

**关键词:** SF<sub>6</sub>替代气体; SF<sub>6</sub>混合气体; 电弧; 灭弧性能; 一维衰减电弧模型; 玻尔兹曼方程

**中图分类号:** TM561

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)06-0140-07

## 0 引言

SF<sub>6</sub>气体因其卓越的绝缘和灭弧性能被广泛应用于各种高压电力设备中。但作为《京都议定书》中明确规定需要限制使用的六大温室气体之一, SF<sub>6</sub>气体的温室效应指数(global warming potential, GWP)是 CO<sub>2</sub>的 23 900 倍<sup>[1-3]</sup>, 大气寿命约为 3 200 a。国家电网公司发布的“碳达峰、碳中和”行动方案也对 SF<sub>6</sub>气体的回收处理提出要求。因此,寻找环境友好的 SF<sub>6</sub>替代气体,减少温室气体排放,已成为我国高压电力设备绿色低碳化转型的必然需求。

目前, SF<sub>6</sub>替代气体主要有 3 种方案<sup>[4-7]</sup>: 常规气体、新型环保气体和 SF<sub>6</sub>混合气体。常规气体化学性质稳定, 具有较低的 GWP, 但绝缘强度较低, 仅在部分中低压设备中有应用<sup>[8-9]</sup>。新型环保替代气体以 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N 和 C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O 为主要代表, 其 GWP 低、绝缘强度高, 具有广阔的应用前景, 但目前这类气体分解机理不够清晰, 还存在固体析出现象, 需要进一步探索以确保其工程应用的安全性。SF<sub>6</sub>混合气体替代方案则是指将常规气体与 SF<sub>6</sub>混合后作为替代气体使用, 虽然该方案只能部分减少 SF<sub>6</sub>的排放, 但其作用机理清晰, 基本满足绝缘性能, 是“碳达峰”时期的最佳过渡方案。

目前, SF<sub>6</sub>混合气体的研究大都集中在绝缘领域<sup>[10-12]</sup>, 对灭弧性能的关注较少, 特别是缺少对各类 SF<sub>6</sub>混合气体灭弧性能的系统性对比研究。评估

气体灭弧性能的方法主要包括试验法<sup>[13-15]</sup>和数值仿真法<sup>[1, 16-19]</sup>。试验方法要投入大量的人力、物力和财力, 存在试验周期长、可重复率低、受环境因素影响大等缺点, 不宜用于大规模筛选性研究。数值仿真方法主要基于二维和三维电弧磁流体模型, 相较于试验方法虽然成本有所下降, 但因涉及到多维磁流体动力学模拟, 计算量大、时间成本高, 也无法对大量混合气体灭弧性能开展高效的系统性研究。

因此, 为对各类 SF<sub>6</sub>混合气体进行系统性筛选和对比分析, 文中在前期工作<sup>[20-21]</sup>的基础上, 采用一维衰减电弧模型和玻尔兹曼方程相结合的方法, 通过设计并计算灭弧性能评价参数, 实现对不同混合比例、不同压强条件下 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和 SF<sub>6</sub>-Air 共 4 类混合气体灭弧性能的快速定量评价, 可为 SF<sub>6</sub>混合气体的工程应用提供参考依据。

## 1 一维衰减电弧模型

电弧是一种导电流体, 因此可以综合流体运动基本方程和麦克斯韦方程建立电弧流体模型。相较于二维、三维电弧模型, 一维衰减电弧模型计算简单, 能够快速得到电弧熄灭过程中温度和电弧电导的变化情况, 非常适合对不同种类、不同配比、不同压强下的 SF<sub>6</sub>混合气体开展大规模筛选性研究。

文中的一维衰减电弧模型基于如下假设:

- (1) 电弧等离子体处于局部热力学平衡状态;
- (2) 电弧等离子体具有圆柱对称性;
- (3) 电弧等离子体中的压强不随时空变化;
- (4) 忽略电弧等离子体的轴向流动。

结合流体守恒定律和欧姆定律可以得到一维

收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51907023)

衰减电弧模型的控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) = 0 \quad (1)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \sigma \frac{i^2}{g^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) - u \quad (2)$$

$$g = \int_0^R 2\pi r \sigma dr \quad (3)$$

式中: $r$ 为径向距离; $\rho$ 为质量密度; $v_r$ 为径向速度大小; $C_p$ 为定压比热; $T$ 为电弧温度; $\sigma$ 为电导率; $k$ 为热导率; $i$ 为电流; $g$ 为电弧电导; $u$ 为辐射能量; $R$ 为电弧半径。

根据假设条件,上述方程存在以下边界条件:

(1) 电弧中心区域( $r=0$ )温度梯度和径向速度为0,即 $\partial T/\partial r = 0$ ,  $v_r = 0$ ;

(2) 电弧边界处( $r=R$ )没有质量交换,即 $\partial(\rho v_r)/\partial t = 0$ ;

(3) 边界处( $r=R$ )温度为环境温度(300 K)。

此外,文中设置电弧半径 $R=2.5$  mm,初始电流为200 A,采用有限体积法对上述方程组进行数值求解,得到电弧温度和电弧电导的变化情况。

为对SF<sub>6</sub>混合气体的灭弧性能进行定量分析,文中将整个熄弧过程分为3个阶段:热恢复阶段、弧前介质恢复阶段和弧后介质恢复阶段。各阶段的划分依据在文献[20-21]中有详细阐述,此处仅简要介绍各阶段的定义。

热恢复阶段定义为电弧平均温度 $T_{\text{avg}} > 4000$  K的阶段。电弧平均温度计算公式如下:

$$T_{\text{avg}} = \frac{1}{R} \int_0^R T(r) dr \quad (4)$$

式中: $T(r)$ 为描述电弧温度和径向距离关系的函数。

弧前介质恢复阶段定义为 $T_{\text{avg}} \leq 4000$  K且 $g > 10^{-7}$  S·m的阶段。基于上述定义,图1给出标准大气压条件下背景气体含量为50%的4种SF<sub>6</sub>混合气体电弧平均温度和电弧电导随时间的变化情况,并据此对热恢复阶段和弧前介质恢复阶段进行划分。

由图1可知,给定条件下的SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-Air混合气体热恢复阶段持续时间分别为258 μs、262 μs、223 μs和259 μs,弧前介质恢复阶段持续时间分别为188 μs、208 μs、241 μs和209 μs。

## 2 玻尔兹曼方程分析

在弧后介质恢复阶段,电弧温度较低且随时间变化缓慢,一维电弧模型已无法有效描述熄弧过

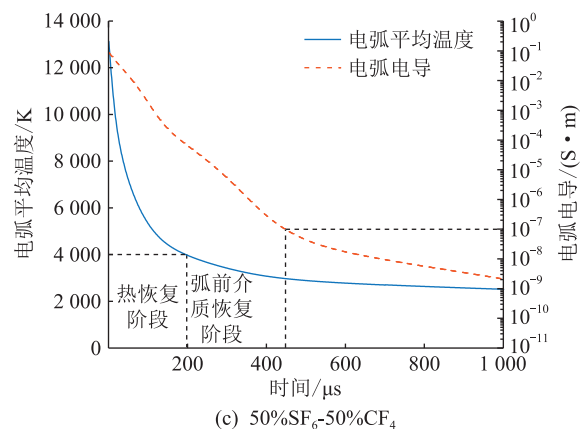
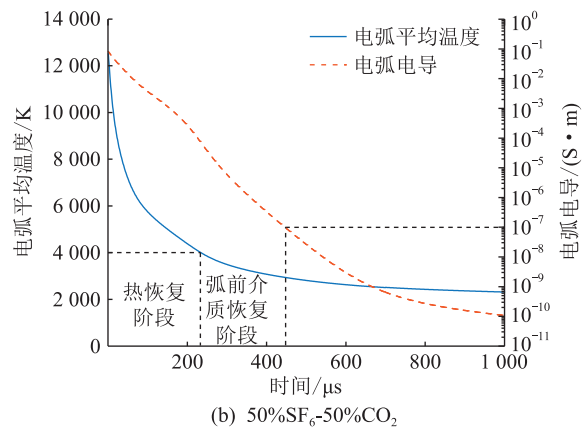
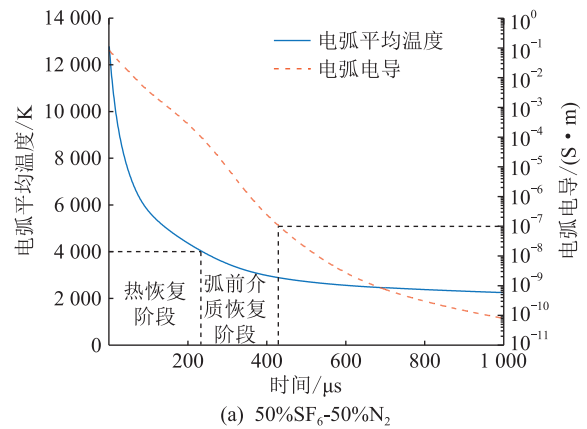
程。考虑到此时电弧与普通弱电离气体类似,可将一维电弧模型与玻尔兹曼方程结合起来对弧后阶段的介质恢复进行分析。

玻尔兹曼方程可描述电弧等离子体内部的电子输运过程,其表达式如下:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f - \frac{e}{m_e} \mathbf{E} \cdot \nabla_v f = C[f] \quad (5)$$

式中: $f$ 为电子在六维相空间的分布函数; $\mathbf{v}$ 为电子速度; $e$ 为电子电荷量; $m_e$ 为电子质量; $\mathbf{E}$ 为场强; $\nabla_v$ 为速度梯度运算符; $C[f]$ 为与 $f$ 相关的碰撞项。

文中考虑弧后等离子体中电子与中性粒子之间的弹性、激发、电离以及吸附碰撞,采用经典两项近似方法求解玻尔兹曼方程,得到电子能量分布函数(electron energy distribution function, EEDF),进而



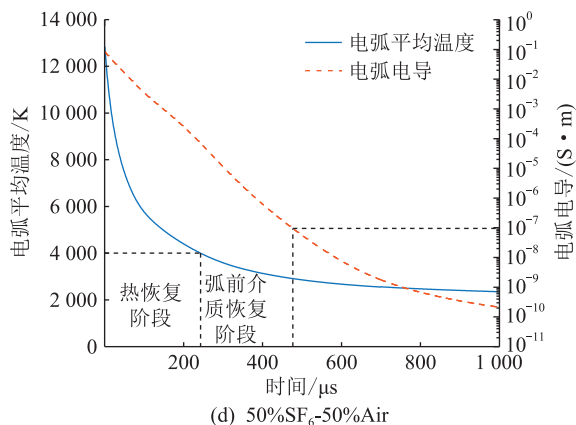


图1 标准大气压下背景气体含量为50%的SF<sub>6</sub>混合气体电弧热恢复阶段和弧前介质恢复阶段

Fig.1 Thermal recovery and pre-dielectric recovery stages in the arcs of SF<sub>6</sub> gas mixtures with 50% buffer gases at ambient pressure

获得电子电离系数和电子吸附系数。当电子电离系数与吸附系数相等时,其电场强度大小即为临界电场强度大小( $|E|/N$ )<sub>cr</sub>。

根据文献[21],弧后介质恢复阶段定义为弧前介质恢复阶段结束到平均临界电场强度大小 $E_{avg}$ 上升50%的阶段。平均临界电场强度大小计算公式如下:

$$E_{avg} = \frac{1}{R} \int_0^R (|E|/N)_{cr} \cdot N dr \quad (6)$$

式中: $N$ 为中性粒子数密度。

基于一维电弧模型和玻尔兹曼方程,图2给出标准大气压条件下背景气体含量为50%的4种SF<sub>6</sub>混合气体电弧平均临界电场强度大小随时间的变化情况,并据此对弧后介质恢复阶段进行划分。

由图2可知,给定条件下的SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-Air混合气体弧后介质恢复阶段持续时间分别为424 μs、510 μs、586 μs和362 μs。

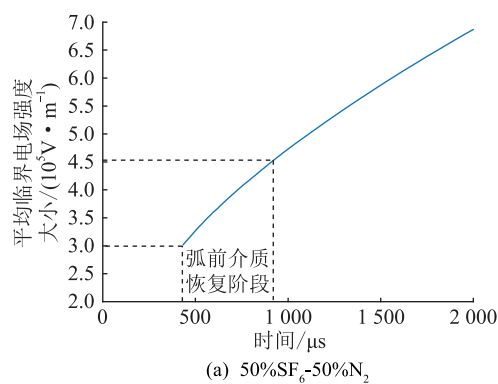
### 3 计算流程与结果分析

#### 3.1 计算流程

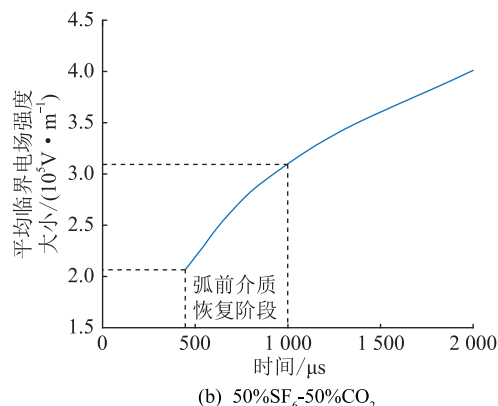
在上述熄弧过程三阶段划分的基础上,为进一步对气体灭弧性能进行定量评价,分别引入评价参数:热恢复率 $R_{th}$ 、弧前介质恢复率 $R_{pre}$ 和弧后介质恢复 $R_{post}$ ,并计算三阶段评价参数的调和平均数 $R_{avg}$ 作为混合气体灭弧性能的综合评价指标。该指标数值越大表明混合气体的整体灭弧性能越好。该评价方法的整体计算流程如图3所示。

其中,热恢复率 $R_{th}$ 定义为相同压强下对照气体(SF<sub>6</sub>)热恢复阶段持续时间 $M_{SF_6}^{th}$ 和待评价气体热恢复阶段持续时间 $M_{gas}^{th}$ 的比值,如式(7)所示。

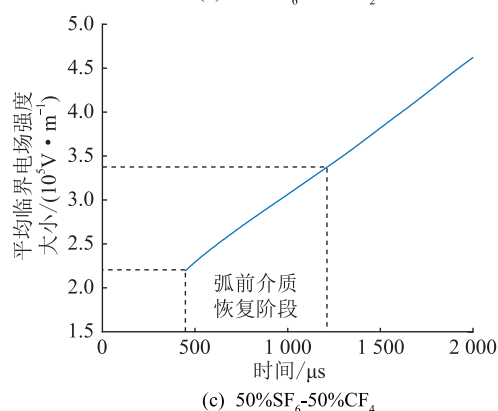
$$R_{th} = \frac{M_{SF_6}^{th}}{M_{gas}^{th}} \quad (7)$$



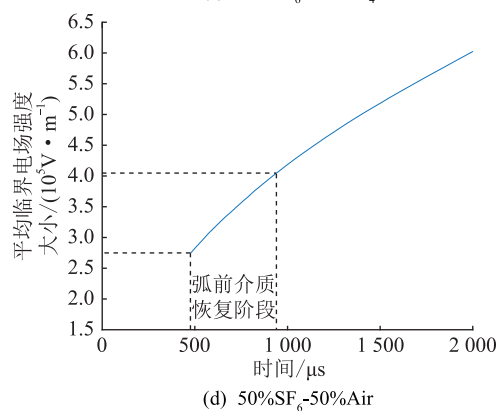
(a) 50%SF<sub>6</sub>-50%N<sub>2</sub>



(b) 50%SF<sub>6</sub>-50%CO<sub>2</sub>



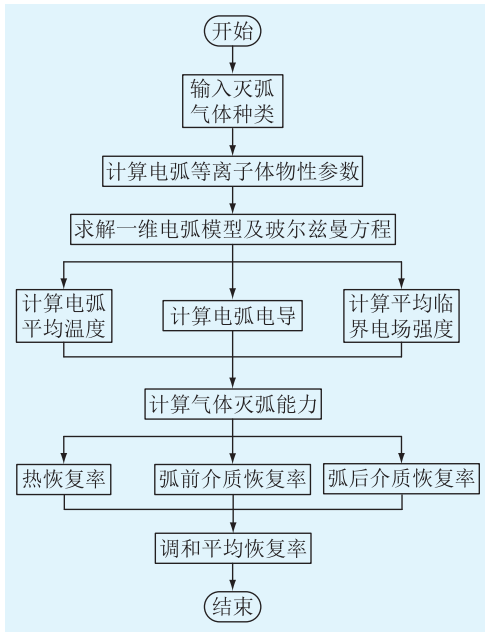
(c) 50%SF<sub>6</sub>-50%CF<sub>4</sub>



(d) 50%SF<sub>6</sub>-50%Air

图2 标准大气压下背景气体含量为50%的SF<sub>6</sub>混合气体电弧弧后介质恢复阶段

Fig.2 Post-dielectric recovery stage in the arcs of SF<sub>6</sub> gas mixtures with 50% buffer gases at ambient pressure

图3 SF<sub>6</sub>混合气体灭弧性能评价流程Fig.3 Evaluation process of arc extinguishing performance for SF<sub>6</sub> gas mixtures

类似地,可以定义弧前介质恢复率  $R_{pre}$  和弧后介质恢复率  $R_{post}$ :

$$R_{pre} = \frac{M_{SF_6}^{pre}}{M_{gas}^{pre}} \quad (8)$$

$$R_{post} = \frac{M_{SF_6}^{post}}{M_{gas}^{post}} \quad (9)$$

式中:  $M_{SF_6}^{pre}$ ,  $M_{gas}^{pre}$  分别为相同压强下 SF<sub>6</sub> 气体和待评价气体弧前介质恢复阶段的持续时间;  $M_{SF_6}^{post}$ ,  $M_{gas}^{post}$  分别为相同压强下 SF<sub>6</sub> 气体和待评价气体弧后介质恢复阶段的持续时间。

最后,调和平均恢复率  $R_{avg}$  表示为:

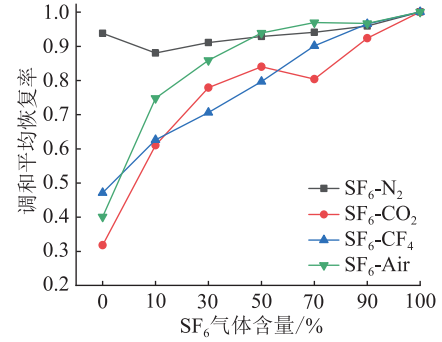
$$R_{avg} = \frac{3}{\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_{pre}} + \frac{1}{R_{post}}} \quad (10)$$

### 3.2 计算结果及分析

按照上述计算流程,文中计算 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> 和 SF<sub>6</sub>-Air 共 4 类混合气体电弧的三阶段恢复率及其调和平均恢复率。其中, SF<sub>6</sub> 含量(即体积分数)变化范围为 0~100%, 压强计算范围为 1~8 bar。此外,由于 N<sub>2</sub> 分子吸附电子能力非常弱,没有电子吸附截面,无法通过玻尔兹曼方程分析计算其临界击穿电场,因此文中以 1% SF<sub>6</sub>-99% N<sub>2</sub> 替代 100% N<sub>2</sub> 进行对比分析。

#### 3.2.1 背景气体及混合比例对灭弧性能的影响

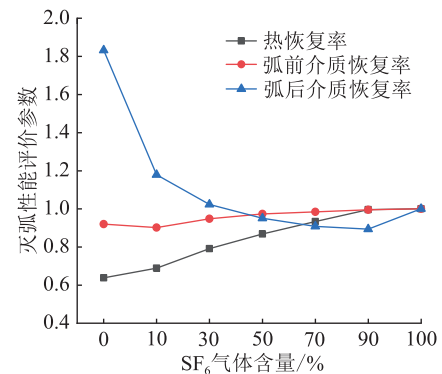
图 4 给出标准大气压下 4 种混合气体电弧调和平均恢复率随 SF<sub>6</sub> 含量的变化曲线。

图4 标准大气压下不同混合比例 SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>、SF<sub>6</sub>-Air 和 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 混合气体电弧的调和平均恢复率Fig.4 Harmonic recovery rate of various SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>-Air and SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> arcs at ambient pressure

整体来看,4 种混合气体电弧的调和平均恢复率随 SF<sub>6</sub> 含量的增加而呈现上升趋势,但无论混合比例如何,4 种混合气体的灭弧性能均不如纯 SF<sub>6</sub> 气体。当 SF<sub>6</sub> 含量分别达到 30%、50%、70% 和 90% 时, SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-Air、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> 和 SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> 混合气体的灭弧性能能够达到纯 SF<sub>6</sub> 气体的 90%。

纵向来看,当混合气体的 SF<sub>6</sub> 含量在 10%~50% 范围内时,4 种混合气体的灭弧性能排序为 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> > SF<sub>6</sub>-Air > SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> > SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>。当 SF<sub>6</sub> 含量增加到 50%~90% 时,4 种混合气体的灭弧性能排序发生变化,为 SF<sub>6</sub>-Air > SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> > SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> > SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>。此外,文中还发现 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 混合气体电弧的调和平均恢复率受 SF<sub>6</sub> 含量影响最小,各混合比例下 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 混合气体均表现出较好的灭弧性能。

综合考虑环境效应和灭弧性能,4 种混合气体中 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 表现更为优异。为深入探究其灭弧机理,图 5 给出 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 各阶段灭弧性能评价参数随 SF<sub>6</sub> 含量的变化曲线。

图5 标准大气压下不同比例 SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> 混合气体灭弧性能三阶段评价参数Fig.5 Three-stage evaluation parameters of arc quenching performance for various SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures at ambient pressure



从图5中可以发现,随着SF<sub>6</sub>的增加,SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>混合气体电弧的热恢复率和弧前介质恢复率逐渐上升,而弧后介质恢复率则呈现下降趋势。为解释该现象,文中以标准大气压下1:1混合的SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>电弧为例,绘制混合气体电弧等离子体的粒子组分见图6。可以发现,在弧后恢复阶段,随着电弧温度的迅速下降,N<sub>2</sub>相比于SF<sub>6</sub>其分解产物能够在更高的温度下通过复合反应恢复成N<sub>2</sub>,这也意味着N<sub>2</sub>能够更快地对弧后介质的恢复起到积极作用。同时文中还发现,当SF<sub>6</sub>含量小于等于30%时,SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>混合气体电弧的弧后介质恢复率高于纯SF<sub>6</sub>电弧,这可归因于SF<sub>6</sub>与N<sub>2</sub>的协同效应<sup>[22-23]</sup>,即混合气体击穿电压高于各组分击穿电压按比例的加权之和。

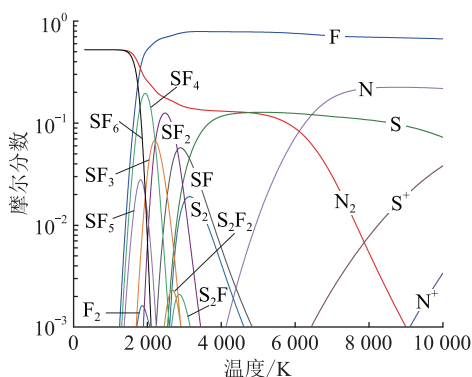


图6 标准大气压下1:1混合的SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>电弧等离子体粒子组分

Fig.6 Molar fraction of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> arc plasma with mixing ratio of 1:1 at ambient pressure

### 3.2.2 压强对灭弧性能的影响

文中分别以1:1混合的SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-Air混合气体为例,计算压强在1~8 bar范围内的SF<sub>6</sub>混合气体调和平均恢复率,见图7。

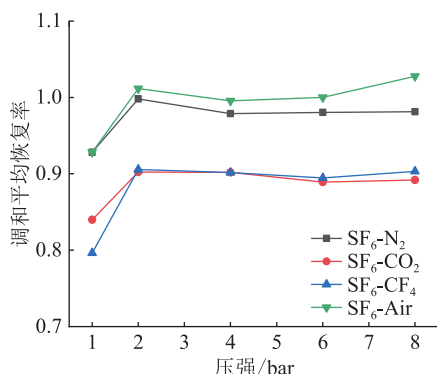


图7 不同压强下1:1混合的SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-Air混合气体调和平均恢复率

Fig.7 Harmonic recovery rate in the arcs of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> and SF<sub>6</sub>-Air mixtures with mixing ratio of 1:1 at different pressures

从图7中可知,当压强从1 bar增加至2 bar时,4种SF<sub>6</sub>混合气体的灭弧性能与同压强下纯SF<sub>6</sub>气体的灭弧性能更加接近,说明加压对于缩短4种混合气体的灭弧性能与纯SF<sub>6</sub>气体的差距有积极影响。当压强在2~8 bar范围内变化时,SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>的灭弧性能可以达到同压强下纯SF<sub>6</sub>气体的90%,SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>灭弧性能可以达到纯SF<sub>6</sub>气体的95%,而SF<sub>6</sub>-Air的灭弧性能和同压强下纯SF<sub>6</sub>气体相当。

## 4 结论

文中将一维衰减电弧模型与玻尔兹曼方程分析相结合,通过调和平均恢复率定量评估SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-Air共4种混合气体的整体灭弧性能,为SF<sub>6</sub>混合气体的工程应用提供参考依据。文中探索了SF<sub>6</sub>含量、背景气体种类和气体压强对混合气体灭弧性能的影响,可以得到以下结论:

(1) 在标准大气压下,随着混合气体中SF<sub>6</sub>含量的增加,4种混合气体的灭弧性能整体呈现上升趋势,其中SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>混合气体的灭弧性能受SF<sub>6</sub>含量的影响较小。

(2) 同样在标准大气压下,当SF<sub>6</sub>含量为10%~50%时,4种混合气体灭弧性能的排序为:SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>>SF<sub>6</sub>-Air>SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>>SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>;当SF<sub>6</sub>含量增至50%~90%时,灭弧性能排序变为:SF<sub>6</sub>-Air>SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>>SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>>SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>。

(3) 综合考虑4种混合气体的环境效应和灭弧性能,SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>混合气体表现最为优异。随着SF<sub>6</sub>含量的增加,SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>混合气体的热恢复和弧前介质恢复性能逐渐提升,而弧后介质恢复性能有所下降,但也保持在纯SF<sub>6</sub>气体性能的90%左右。

(4) 在1:1混合比例下,4种SF<sub>6</sub>混合气体的灭弧性能在加压条件下均与同压强纯SF<sub>6</sub>气体更为接近。当压强为2~8 bar时,SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub>和SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>混合气体灭弧性能可以达到同压强下纯SF<sub>6</sub>气体的90%,SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>可达到纯SF<sub>6</sub>气体的95%,SF<sub>6</sub>-Air则与同压强下纯SF<sub>6</sub>相当。

### 参考文献:

[1] 傅明利,王勇,卓然,等. SF<sub>6</sub>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<sub>6</sub> alternative gas in disconnector [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3): 41-47.  
[2] FRANCK C M, CHACHEREAU A, PACHIN J. SF<sub>6</sub>-free gas-insulated switchgear; current status and future trends[J]. IEEE E-

- lectrical Insulation Magazine, 2021, 37(1):7-16.
- [3] 周倩,柯锟,张晓星,等. 基于SF<sub>6</sub>混合气体绝缘性能的设备补气策略研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4):175-181.  
ZHOU Qian, KE Kun, ZHANG Xiaoxing, et al. Air supply strategy of equipment based on SF<sub>6</sub> mixed gas insulation performance[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4):175-181.
- [4] 杨韬,张博雅,李兴文,等. 不同故障工况下C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>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<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> mixture under different fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4216-4228.
- [5] 张晓星,田双双,肖淞,等. SF<sub>6</sub>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<sub>6</sub> substitute gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12):2883-2893.
- [6] ZHANG B Y, XIONG J Y, CHEN L, et al. Fundamental physico-chemical properties of SF<sub>6</sub>-alternative gases: a review of recent progress[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(17):173001.
- [7] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等. SF<sub>6</sub>替代气体分解特性的研究综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23):4998-5014.  
ZHOU Zhenrui, HAN Dong, ZHAO Mingyue, et al. Review on decomposition characteristics of SF<sub>6</sub> alternative gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23):4998-5014.
- [8] RABIE M, FRANCKC M. Comparison of gases for electrical insulation: fundamental concepts[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2):649-656.
- [9] ZHANG B Y, CHEN L, LI X W, et al. Evaluating the dielectric strength of promising SF<sub>6</sub> alternatives by DFT calculations and DC breakdown tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4):1187-1194.
- [10] 陈远东,郑宇,孟辉,等. 温度对SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>气体间隙工频放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(12):4169-4176.  
CHEN Yuandong, ZHENG Yu, MENG Hui, et al. Effect of temperature on power frequency breakdown characteristics of SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> mixed gas[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4169-4176.
- [11] HE Y L, DING W, SUN A B, et al. Effect of gas-mixture ratio on the characteristics of positive DC corona discharge in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> gas mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3):829-837.
- [12] AMBO N F, ZAINUDDIN H, KAMARUDIN M S, et al. AC breakdown performance analysis of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> gas mixtures for ring main unit (RMU) switchgear application [C]//2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids. Roma, Italy. IEEE:1-4.
- [13] 付鲁军,邵先军,辛昭昭,等. C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体在中压负荷开关中的开断性能实验研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8):86-91.  
FU Lujun, SHAO Xianjun, XIN Zhaozhao, et al. Experimental research on breaking performance of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> mixed gas in medium voltage load switch [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):86-91.
- [14] 付鲁军,谢成,辛昭昭,等. 不同灭弧方式C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N混合气体负荷开关的开断实验研究[J]. 高压电器, 2021, 57(6):49-55.  
FU Lujun, XIE Cheng, XIN Zhaozhao, et al. Study on breaking experiment of load switch with C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N gas mixture at different arc extinguishing modes[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6):49-55.
- [15] 黄若栋,黄慧红,傅明利,等. 新型环保气体在35 kV断路器中灭弧性能的仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2021, 57(3):54-59.  
HUANG Ruodong, HUANG Huihong, FU Mingli, et al. Simulation and experimental study on arc extinction performance of new eco-friendly gas in 35 kV circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3):54-59.
- [16] 唐念,赵虎,黎晓淀,等. CO<sub>2</sub>气体断路器弧后击穿特性计算分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(3):790-798.  
TANG Nian, ZHAO Hu, LI Xiaodian, et al. Calculation and analysis of post-arc breakdown characteristics of CO<sub>2</sub> gas circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3):790-798.
- [17] 姜仁卓,何柏娜,颜雅迪,等. 双能式SF<sub>6</sub>高压断路器灭弧室结构设计及熄弧特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(6):2040-2048.  
JIANG Renzhuo, HE Baina, XIE Yadi, et al. Structural design of arc extinguisher for dual-energy SF<sub>6</sub> high voltage circuit breaker and simulation research of its arc-extinguishing characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2040-2048.
- [18] 钟建英,赵晓民,胡超崎,等. CO<sub>2</sub>、SF<sub>6</sub>以及C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N气体电弧特性的仿真对比研究[J]. 高压电器, 2021, 57(3):60-64.  
ZHONG Jianying, ZHAO Xiaomin, HU Chaoqi, et al. Simulation and comparison study on arc characteristics of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N, CO<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3):60-64.
- [19] 王成丽,李静,曹云东,等. 直流C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体电弧灭弧性能研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(6):1-6.  
WANG Chengli, LI Jing, CAO Yundong, et al. Study on arc extinguishing performance of DC C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> mixed gas[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(6):1-6.
- [20] ZHONG L L, CRESSAULT Y, TEULET P. Evaluation of arc quenching ability for a gas by combining 1-D hydrokinetic modeling and boltzmann equation analysis[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(4):1835-1840.
- [21] ZHONG L L, GU Q, ZHENG S Z. An improved method for fast evaluating arc quenching performance of a gas based on 1D arc decaying model [J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(10):103507.
- [22] 李鑫涛,林莘,徐建源,等. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体电击穿特性仿

真及实验[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 42-52.

LI Xintao, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Simulations and experiments of dielectric breakdown characteristics in SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> gas mixtures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 42-52.

- [23] HOU Z Q, GUO R C, HE C, et al. Synergistic effect of SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> gas mixtures on surface partial discharge under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 692-699.

作者简介:



顾琦

顾琦(1996),女,硕士在读,研究方向为环保型替代气体(E-mail: aiqiminsheng@seu.edu.cn);

仲林林(1990),男,博士,副研究员,研究方向为高电压技术、放电等离子体技术、人工智能技术。

## Evaluation of the interruption capability of SF<sub>6</sub> gas mixtures based on one-dimensional arc model

GU Qi, ZHONG Linlin

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** SF<sub>6</sub> gas mixture is one of the popular SF<sub>6</sub> alternatives. For the purpose of quantitatively evaluating the arc extinguishing performance of SF<sub>6</sub> mixtures, one-dimensional arc decaying model and Boltzmann equation are combined to divide the whole arc extinguishing process into thermal recovery stage, pre-dielectric recovery stage and post-dielectric recovery stage, which are evaluated by three parameters, namely thermal recovery rate, pre-dielectric recovery rate and post-dielectric recovery rate, respectively. The harmonic mean of the above three parameters is calculated as the harmonic average recovery rate to evaluate the arc extinguishing performance of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> and SF<sub>6</sub>-Air mixtures. Based on the proposed method, the effects of SF<sub>6</sub> proportion, buffer gas type and gas pressure on the interrupting performance of the SF<sub>6</sub> mixtures are preliminarily investigated. The results show that the overall arc quenching ability of the gas mixtures presents a decreasing trend as the lowering of SF<sub>6</sub> proportion. Among the four gas mixtures with SF<sub>6</sub> proportion ranging from 10% to 50%, the SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> gas mixture has the best interrupting performance, followed by SF<sub>6</sub>-Air, SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>, and SF<sub>6</sub>-CF<sub>4</sub> successively.

**Keywords:** SF<sub>6</sub> alternative gas; SF<sub>6</sub> gas mixtures; arc; arc extinguishing performance; one-dimensional arc decaying model; Boltzmann equation

(编辑 李栋)