第 49 卷 第 3 期：1038-1045 高电压技术 Vol.49, No.3: 1038-1045
2023 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220847

环境友好型 HFO-1336mzz(E)混合气体在负荷开关中的灭弧性能仿真研究

王 凯[1]，周 然[1]，张博雅[1]，李兴文[1]，曹闽川[1]，邓竣巍[1]，唐 念[2]
（1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049;
2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院，广州 510080）

摘 要：为了减少 SF_6 在电力设备中使用量，研究了环境友好型 SF_6 替代气体 HFO-1336mzz(E)气体作为灭弧介质在 12 kV 负荷开关中的应用可行性，建立了 2 维磁流体动力学仿真模型，在压气式负荷开关结构下进行负荷电流开断过程仿真，对比了 0.12 MPa 下 30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体与 0.1 MPa 下 SF_6 气体燃弧过程中的电弧电压、灭弧室内温度场、气流场分布以及弧后热击穿特性。研究表明，HFO-1336mzz(E)混合气体熄弧尖峰略大于 SF_6，且电弧在轴向上扩散速率大于 SF_6。电流快过零时，混合气体的电弧温度比 SF_6 低 1400 K。通过弧后热击穿评估，30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的热开断能力分别可以达到 SF_6 的 95%和 96%。研究结果可为 HFO-1336mzz(E)混合气体作为灭弧介质在中压开关设备中的应用提供参考。

关键词：环保气体；SF_6 替代气体；负荷开关；灭弧性能；磁流体动力学

Simulation Study on the Arc Extinguishing Performance of Eco-friendly HFO-1336mzz(E) Mixture Gas in a Load Switch

WANG Kai[1], ZHOU Ran[1], ZHANG Boya[1], LI Xingwen[1], CAO Minchuan[1], DENG Junwei[1], TANG Nian[2]
(1. State Key Lab. of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to reduce the use of SF_6 in power equipment, we investigated the application feasibility of eco-friendly SF_6-alternative gas HFO-1336mzz(E) as the arc extinguishing medium in a 12 kV load switch. We established a two-dimensional magnetohydrodynamic simulation model and calculated the current interruption process in the puffer-type load switch. Moreover, we studied and compared the arc voltage, temperature field, airflow field distribution in the arc extinguishing chamber during the arcing period and the thermal interruption capability during the post-arc period for the 30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 (0.12 MPa), 30%HFO-1336mzz(E)/air (0.1 MPa) and SF_6 (0.1 MPa). The studies show that the arc quenching peak of HFO-1336mzz(E) gas mixtures is slightly greater than that of SF_6, and the arc diffusion in the axial direction is greater than that of SF_6. When the current nearly exceeds zero, the arc temperature of HFO-1336mzz(E) gas mixtures is 1400 K lower than that of SF_6. By analysis, the thermal interruption capability of 30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 and 30%HFO-1336mzz(E)/air gas mixture can reach 95% and 96% that of SF_6, respectively. The results can provide reference for HFO-1336mzz(E) gas mixtures as arc extinguishing medium in medium voltage switchgears.

Key words: eco-friendly gas; SF_6-alternative gas; load switch; arc extinguishing performance; magnetohydrodynamic

0 引言

自 20 世纪 70 年代以来，六氟化硫(SF_6)气体因其高绝缘强度和良好的灭弧性能，成为电力开关中应用最广泛的绝缘和灭弧介质[1-2]。然而，SF_6 是一种强温室效应气体，其全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)约为 CO_2 的 25 200 倍，在大气中的寿命长达 3200 年[3-5]。1997 年签订的《京都议定书》和 2016 年签署的《巴黎协议》明确规定

基金资助项目：国家自然科学基金(51825702；51907154)；南方电网公司科技项目(GDKJXM20220361)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51825702, 51907154), Science & Technology Project of China Southern Power Grid Co. (GDKJXM20220361).

SF_6 是限制排放的温室效应气体之一。2020 年，我国提出了“碳达峰、碳中和”的目标。因此，减少 SF_6 的使用和排放是绿色发展的必然需求[6-7]。

目前，电力领域采取了一系列针对 SF_6 气体的减排措施，如气体回收、气体检漏等。但这些措施无法从根本上避免 SF_6 气体在电力设备中的应用。所以，寻找在电气性能上接近 SF_6 且安全环保的气体介质成为近些年研究的热点。国内外对 SF_6 替代气体的研究一直没有中断，已经提出的替代气体包括常规气体(干燥空气、CO_2、N_2 等)及其与 SF_6 混合气体[8]、碳氟化合物及其卤代物(c-C_4F_8、CF_3I 等)[9-10]、其它含氟化合物(C_4F_7N、$C_5F_{10}O$、HFO-1234ze(E)、HFO-1336mzz(Z)等)[11-15]。但是这些替代气体都有各自的优缺点，例如，常规气体电气性能较差，无法适应于高压领域电力设备小型化的发展需求；碳氟化合物及其卤代物存在碳析出或碘析出的问题；含氟化合物具有良好的绝缘和灭弧性能，但是它们的液化温度也较高，无法在电力开关中单独使用，需要加入缓冲气体混合才能应用。所以国内外研究者仍在不断地通过各类方法探索新型环保气体。

本文提出高绝缘性能气体 HFO-1336mzz(E)作为 SF_6 替代气体，HFO-1336mzz(E)为反式-1,1,1,4,4,4−六氟−2−丁烯，分子式为 $C_4H_2F_6$(CF_3—CH═CH—CF_3)[16]。HFO-1336mzz(E)是一种无色、不易燃、不爆炸、热稳定性高的气体，目前主要作为新型热泵工质和制冷剂进行研究[17]。该气体的 GWP 值仅为 18、臭氧消耗潜能值(ozone depletion potential，ODP)值为 0，毒性很低[18]。同时，其大气寿命约为几天到几周，环保性能好。最重要的是，这种气体绝缘性能约为 SF_6 的 1.8 倍[19-20]。但是 HFO-1336mzz(E)的液化温度较高，约为 7.58 ℃，在实际应用中需要加入缓冲气体[21]。然而，加入缓冲气体后，需要考虑混合气体的液化温度和绝缘性能。初步研究表明，HFO-1336mzz(E)混合气体可以达到与 SF_6 相当的绝缘水平，且满足最低运行温度的要求，适用于中压开关设备。

中压负荷开关作为一种结构简单、安装维护方便、安全可靠、经济技术指标比较合理的开关设备，在 10~35 kV 供电系统，尤其在城市配网中已得到广泛的应用。负荷开关是带有简单灭弧装置的一种开关电器，能够关合、开断、承载线路正常负荷或规定的过负荷电流，并具有一定短路关合能力。按照灭弧介质或方式的不同，负荷开关主要分产气式、压气式、真空式和 SF_6 式，4 种负荷开关的结构各不相同，性能也有差别[22-23]。本文选择灭弧性能较强的压气式负荷开关(吹弧气体为 HFO-1336mzz(E)混合气体)作为研究对象，此类负荷开关有明显断开点，其工作原理是在触头分开时通过气室内的气缸与活塞之间的相对运动来压缩灭弧腔内的气体，使得气体的压力逐渐增加，利用气体在喷口中进行流动的过程吹动电弧来实现气吹灭弧，开断小电流性能较好，灭弧效果比较稳定[24-25]。

目前，已有研究者针对 HFO-1336mzz(E)混合气体的绝缘性能开展了初步研究，表明其具有替代 SF_6 作为绝缘介质的潜力。但是，HFO-1336mzz(E)气体及其混合气体的灭弧性能还有待进一步验证。因此，本文对 SF_6、HFO-1336mzz(E)混合气体在 12 kV 负荷开关中的灭弧性能开展了系统的仿真研究。首先根据饱和蒸气压特性和绝缘性能确定了 HFO-1336mzz(E)混合气体的配比方案和充气压力，然后建立了电流开断过程的二维磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)电弧模型，分析了开断负荷电流过程中电弧压力、温度、速度矢量的变化规律。同时，通过 Mayr 电弧模型对电弧能量耗散系数与电弧时间常数进行计算，得到了 SF_6 和 HFO-1336mzz(E)混合气体弧后临界恢复电压上升率(rising rate of recovery voltage, RRRV)的关系，定量分析了 HFO-1336mzz(E)混合气体的热开断性能。

1 仿真方法

磁流体动力学电弧模型自 20 世纪 90 年代起一直得到广泛的应用，尤其在开关电器的辅助设计和研究方面卓有成效。二维轴对称电弧磁流体动力学模型能够很好地结合高压开关的结构特点，节省大量计算时间，因此在工程应用中常作为电弧仿真及开断特性研究的首选模型。通过 MHD 仿真，可以提取灭弧室内丰富的物理信息，对气体灭弧性能的研究具有重要意义。

1.1 混合气体配比方案

本文采用饱和蒸气压特性结合绝缘特性选泽了混合气体的配比方案。首先，根据文献[18]，当气压为 0.12 MPa 时，30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的液化温度分别为–15.6 ℃和–15.8 ℃，可以满足最低操作温度为–15 ℃的要求。其次，对 HFO-1336mzz(E)/CO_2、

HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体进行雷电冲击实验，如图 1 所示为不同配比方案下 HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的实验结果。当 HFO-1336mzz(E)体积比例占 5%~20%时，混合气体的绝缘强度在各充气压力下均小于 SF_6。当充气压力为 0.1 MPa 时，SF_6、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的雷电冲击击穿电压分别是 48.42、42.7 kV，该充气压力下 30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气绝缘强度是 SF_6 的 88.2%；当 30% HFO-1336mzz(E)/干燥空气气体充气压力增加到 0.12 MPa 时，其雷电冲击击穿电压可以达 52.04 kV，超过充气压力为 0.1 MPa 下 SF_6 的击穿电压。HFO-1336mzz(E)/CO_2 的绝缘强度与 HFO-1336mzz(E)/干燥空气有相同的规律。也就是说，从绝缘水平来看，对于额定充气压力 0.1 MPa 的 SF_6 负荷开关，30% HFO-1336mzz(E)/CO_2 和 30% HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体在充气压力 0.12 MPa 时具有替代 SF_6 的潜力。因此，本文主要针对 0.12 MPa 的上述两种混合气体开展灭弧性能研究。

1.2 物理模型和边界条件

负荷开关的具体结构如图 2 所示，本文选择灭弧性能较强的压气式负荷开关结构作为仿真研究对象。压气式负荷开关由动弧触头、静弧触头、喷口、压气式、活塞等组成，喷口材料为聚四氟乙烯。该负荷开关具体的参数如下：

1）额定有功负载电流有效值为 630 A，起弧时刻为标准正弦电流 1 ms。

2）额定电压为 12 kV，额定频率 50 Hz。

3）额定短时耐受电流 25 kA，峰值耐受电流(关合电流)63 kA。

此外，在计算中气流场初始径向速度和轴向速度为 0 m/s，初始温度为 300 K，初始气压与充气压力保持一致；将静弧触头末端设置为通量即第二类边界，施加电流密度，动弧触头末端设置为电势值即第一类边界，电位为零。为简化模型，采用相对运动法，将静弧触头设为运动部件，动弧触头和喷口设为静止部件。考虑到触头运动速度远小于气体的音速，相对运动法引入的误差可以忽略。

如图 3 所示为负荷开关仿真模型图，被研究的灭弧介质分别为 SF_6、30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气，灭弧室充气压力(绝对压力)分别为 0.1、0.12、0.12 MPa，出口压力设为腔体充气压力，环境温度为 300 K。

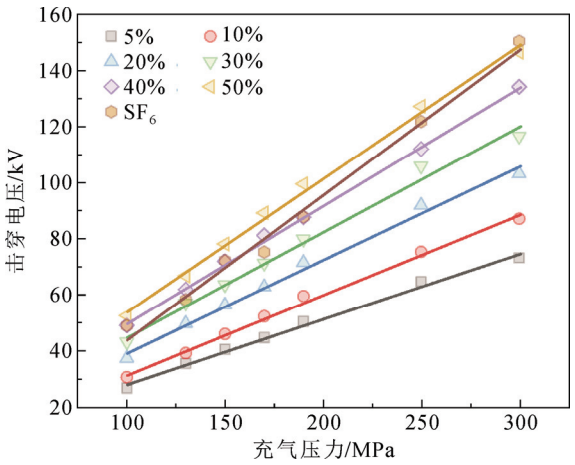


图 1 HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体与 SF_6 的击穿电压

Fig.1 Breakdown voltage of HFO-1336mzz(E)/air mixed gas and SF_6

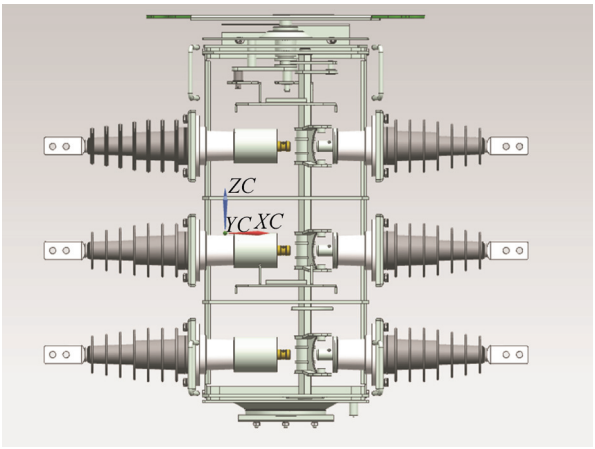


图 2 负荷开关三维结构模型图

Fig.2 Three-dimensional structure model diagram of load switch

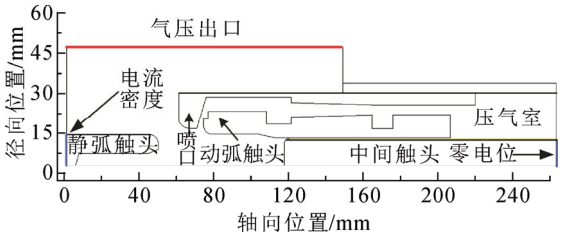


图 3 负荷开关仿真模型图

Fig.3 Simulation model of the load switch

1.3 控制方程组

电弧和气流场的动态发展过程可以用质量守恒、动量守恒、能量守恒的 Navier-Stokes 方程组、

电磁场方程、辐射模型和湍流模型来进行描述。其基本形式如下：

1）质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{V})=0 \tag{1}$$

2）轴向动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{V}\omega)-\nabla\cdot((\mu_{\mathrm{l}}+\mu_{\mathrm{t}})\nabla\omega)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\nabla\overline{\overline{\tau}}+J_r B_\theta \tag{2}$$

3）径向动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho\upsilon)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{V}\upsilon)-\nabla\cdot((\mu_{\mathrm{l}}+\mu_{\mathrm{t}})\nabla\upsilon)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\nabla\overline{\overline{\tau}}+J_z B_\theta \tag{3}$$

4）能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{V}h)-\nabla\cdot(\frac{k_{\mathrm{l}}+k_{\mathrm{t}}}{c_{\mathrm{p}}}\nabla h)=\nabla(\overline{\overline{\tau}}\boldsymbol{V})+\sigma E^2-q \tag{4}$$

5）电磁场方程

$$\nabla\cdot(\sigma\cdot\nabla\varphi)=0 \tag{5}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rB_\theta)=\mu_0 J_z \tag{6}$$

式中：z、r、θ 分别表示轴向、径向、角向坐标；t 为时间；ρ 为密度；V 为速度矢量；v、ω 分别为径向速度和轴向速度；μ_{l}、μ_{t} 分别为层流黏度和湍流黏度；q 为辐射源项；k_{l}、k_{t} 分别为层流热导率和湍流热导率；h 为焓值；c_{p} 为定压比热；E 为电场强度；p 为气压；σ 为电导率；φ 为电势；$B\theta$ 为磁感应强度角向分量；J_z、J_r 分别为轴向电流密度和径向电流密度；μ_0 为真空磁导率；$\nabla\overline{\overline{\tau}}$ 为粘性项；$\nabla(\overline{\overline{\tau}}\boldsymbol{V})$ 为粘性扩散项。

1.4　物性参数

物性参数是反应气体属性的关键数据，了解气体的物性参数有利于对气体介质的固有微观属性进行系统的对比，也可从微观角度定性地评估介质的灭弧能力。由于高温下电弧等离子体的物性参数很难通过实验直接测得，本文基于局部热力学平衡理论，采用吉布斯自由能最小化法计算了 SF_6、30% HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气 3 种灭弧介质在 300~30 000 K 范围内的等离子体组分，并进一步计算了电弧等离子体的物性参数，包括热力学性质(密度、焓、定压比热)和输运系数(音速、热导率、电导率、粘性系数等)。计算所得的物性参数作为电弧磁流体动力学仿真的基础输入参数为燃弧仿真提供了重要的数据支撑[24]。由于本文篇幅所限，具体数据不在正文中给出。此外，由介质的热力学性质可知，定压比热 c_{p} 和密度 ρ 对等离子体的径向热传导过程影响较大，因此采用 ρc_{p} 作为一个评估介质灭弧特性的重要参数，径向热传导能力越强，电弧能量越容易沿径向扩散。同时，焓 h 对能量耗散起重要作用，所以 ρh 可以影响等离子体在轴向的热对流能力。将 ρc_{p} 和 ρh 结合起来讨论可以更有效地分析电弧能量耗散方式。如图 4 所示为 0.1 MPa 下混合气体与 SF_6 的 ρc_{p} 和 ρh 对比，可以看出，燃弧时，此时温度较高(7500~17 500 K)，混合气体的 ρc_{p} 接近，在径向进行扩散的能力与 SF_6 相当，而混合气体的 ρh 大于 SF_6，此时电弧在轴向上会被拉长，此时更容易在弧后快速冷却。

1.5　弧后热击穿特性评估

为了对弧后击穿特性进行深入分析，本文利用如图 5 所示的弧后热击穿特性评估方法，综合考虑弧后热恢复过程，对不同灭弧介质的热开断性能进行了定量评估[27]。经典的 Mayr 电弧模型认为电弧

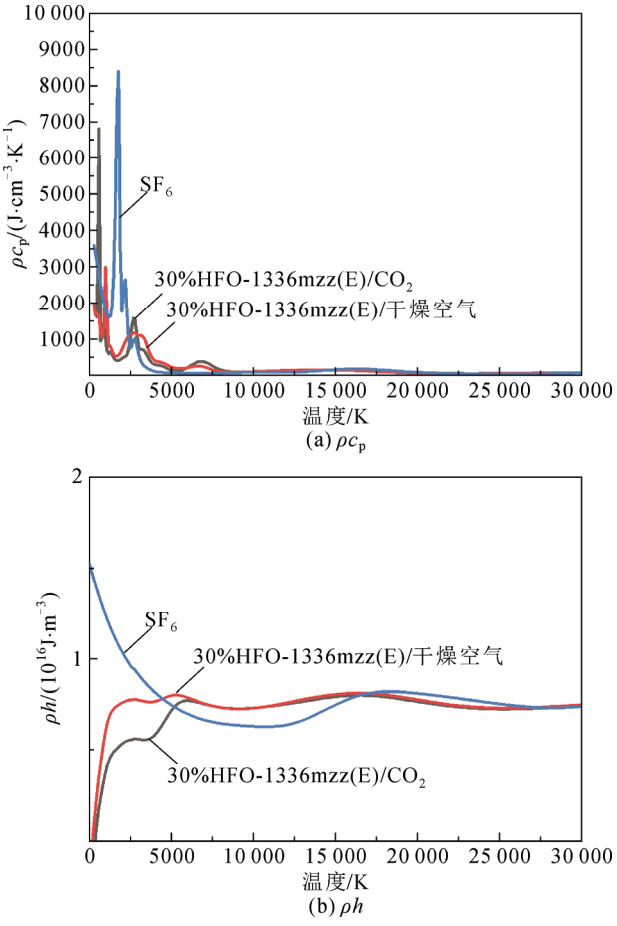


图 4　0.1 MPa 下混合气体与 SF_6 的 ρc_{p} 和 ρh 对比

Fig.4　The ρc_{p} and ρh of mixed gas and SF_6 at 0.1 MPa

能量的耗散由小电流时的热传导引起，电弧电导与电弧温度有着很紧密的联系，而与电弧的横截面积无关。因此，Mayr 电弧模型常被用于电弧零区的分析。根据电弧 MHD 仿真结果可得到电流过零前数十微秒内电弧电压和电弧电流，采用如式(7)所示的 Mayr 电弧模型对其进行线性拟合[28]，可以求得 Mayr 方程中的电弧时间常数 θ_t 和电弧能量耗散系数 Q。Mayr 电弧模型中，弧后热击穿是否会发生取决于在考虑反映电弧热惯性的 θ_t 后，弧隙注入能量 ui 和 Q 的相对关系。通过施加不同的 RRRV，根据该模型可进一步计算得到电流过零后 20 μs 内的弧后电流。当弧后电流无法衰减到零时对应的 RRRV 为临界 RRRV，可以将其作为弧后热开断性能的定量指标[7]。

$$\frac{1}{g}\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\theta_t}\left(\frac{ui}{Q}-1\right) \tag{7}$$

式中：u 为电弧电压；i 为电弧电流；g 为电弧电导；θ_t 和 Q 分别为电弧时间常数和能量耗散系数。

2 仿真结果与分析

2.1 电弧电压

开断性能研究中，电弧电压是较为容易获得的电参数。在电流过零阶段，电弧电压反应了弧隙内气体介质的恢复状态，电弧电压越高，说明介质强度恢复越好，对于电弧的熄灭且不发生重燃更有利。零前的电弧电压越大，说明触头间隙的导电通道越狭小，反映了此时间隙的电导更低，耐受弧后恢复电压的能力越强。电流过零前的熄弧尖峰大小对于弧后介质热恢复的影响重大。

图 6 所示为 SF_6 与混合气体燃弧期间的电弧电压的建立过程。从图中可见，在燃弧时间、机构运动等条件都保持一致的情况下，在燃弧过程中 SF_6 电弧燃烧更不稳定，弧压出现的波动更大。同时，可以看到 SF_6 的电弧电压在 1.6~8 ms 的区间内都是略大于混合气体的，而且 30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 混合气体的电弧电压最小。在 8.2 ms 之后，由于电弧趋于熄灭，电弧电压迅速增加至最大值(熄弧尖峰)，但 3 种气体熄弧尖峰基本一致，混合气体略大于 SF_6。

2.2 温度分布

电弧会随着触头的拉开自然产生，从而实现电流能量的转移。高温高亮是电弧弧柱最为显著的特征，通过灭弧室内的温度分布可以最为直观地观察

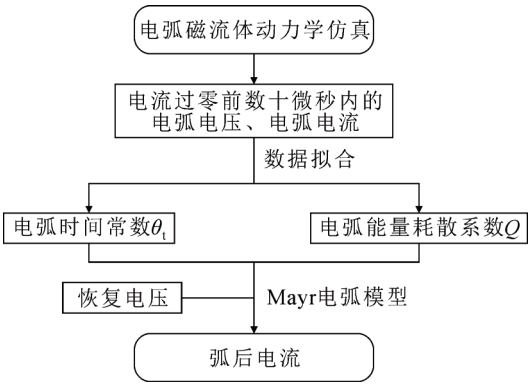


图 5 弧后热击穿特性的评估方法

Fig.5 Evaluation method for the thermal interruption capability in the post arc period

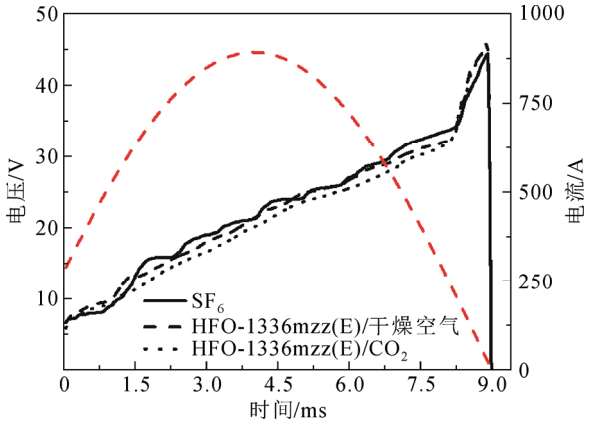


图 6 燃弧期间混合气体与 SF_6 电弧电压与电流

Fig.6 Arc voltage and current of mixed gases and SF_6 during arcing period

到整个燃弧阶段电弧形态的动态变化过程。如图 7 所示为 SF_6 和混合气体燃弧期间电弧温度分布图。考虑到仿真计算的是一个 9 ms 燃弧时间的短燃弧算例，图中从上到下均匀选取了 1、4、8 ms 3 个典型燃弧时刻进行分析，左侧为纯 SF_6 气体，中间为 30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 混合气体，右侧为 30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体。

当燃弧到 1 ms 时，触头间距逐渐拉开，此时负荷电流为 523.7 A，电弧开始膨胀扩张，同时可以发现，混合气体电弧高温气体向外扩张得更远，但是与 SF_6 电弧半径相差并不大。值得注意的是，混合气体电弧的最高温度为 13 800 K 和 14 400 K，低于 SF_6 气体电弧的最高温度 15 400 K。且 30% HFO-1336mzz(E)/CO_2气体电弧的温度最低，这说明 SF_6 气体电弧燃烧更加剧烈。

当燃弧到 4 ms 时，电流增加到峰值，为 890.9 A。在这一阶段，注入电弧的能量大幅增加，电弧将迅

速扩展并扩展到更远的气体区域。虽然电流增加，但电弧温度基本保持不变。随着喷嘴和动触头继续移动，气体被压缩，从而气体将不断从压气室吹向弧芯。同时可以看出，混合气体电弧在轴向上扩散速率大于 SF_6，说明混合气体的能量耗散速率更强。此时电弧温度仍然是 SF_6 最高为 16 900 K。

当燃弧到 8 ms 时，电流衰减到 275.3 A，电弧输入能量减少，电弧处于收缩减弱状态，且混合气体电弧的压缩效果更明显，电弧的高温区更集中在轴附近，电弧变细变长。电弧温度也有所下降，混合气体的电弧温度仅为 14 400 K，比 SF_6 低 1400 K，有利于避免电弧重燃。

2.3　速度矢量

气体的流速情况能很好的显示出灭弧室内能量耗散的情况，研究各个时刻下的气体速度矢量分布可以从一定程度上了解能量耗散的规律，从而分析不同气体灭弧性能的差异。图 8 所示为不同时刻 SF_6 和混合气体灭弧室内速度矢量分布图。

当燃弧到 1 ms 时，SF_6 和混合气体的流速最快出都在静触头端部，此时 SF_6 和混合气体气流流速由大到小分别是 SF_6 气体、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体、30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 混合气体，速度依次为 109、108、97.5 m/s。

在电流持续加热的情况下，流速分布的情况有所改变。当燃弧到 4 ms 时，气体流速最快处依然在静触头端部，SF_6 弧芯的流速为 155 m/s，混合气体的流速高达 162~173 m/s，这充分说明混合气体电弧中的能量耗散速度更快，对流引起的能量耗散可以迅速流向较冷的气体区域。对于喷嘴通道出口的速度，混合气体的流速仍然略高于 SF_6 气体的流速。当燃弧到 8 ms 时，电弧收缩减弱，SF_6 电弧芯的流速已降至 114 m/s，但是 SF_6 的喷口通道出口的气体流速与弧芯流速是最高的。此时，30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 混合气体、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的流速分别为 70.9、60.9 m/s。SF_6 气体、30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 混合气体、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体在喷口通道内的流速分别为 34.7、25.1、25.5 m/s，故而 SF_6 和混合气体在过零阶段将形成强烈的气吹作用，这也是该负荷开关灭弧的重要原理之一。总的来说，混合气体具有与 SF_6 相当的能量耗散能力。

2.4　弧后介质恢复情况分析

图 9 所示为计算所得的 SF_6 和混合气体在不同

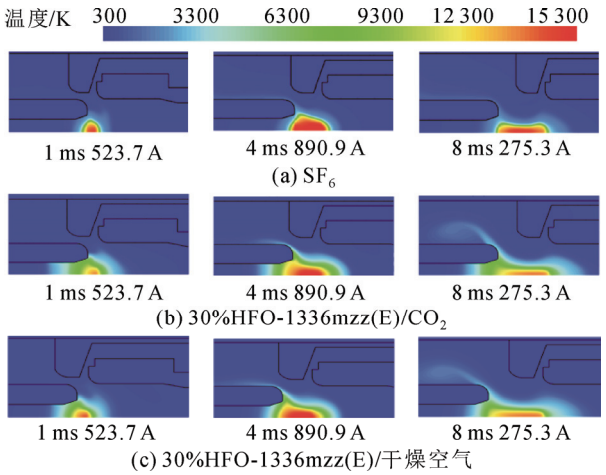


图 7　SF_6 和混合气体燃弧期间电弧温度分布

Fig.7　Distribution of arc temperature during arcing period in SF_6 and mixed gas

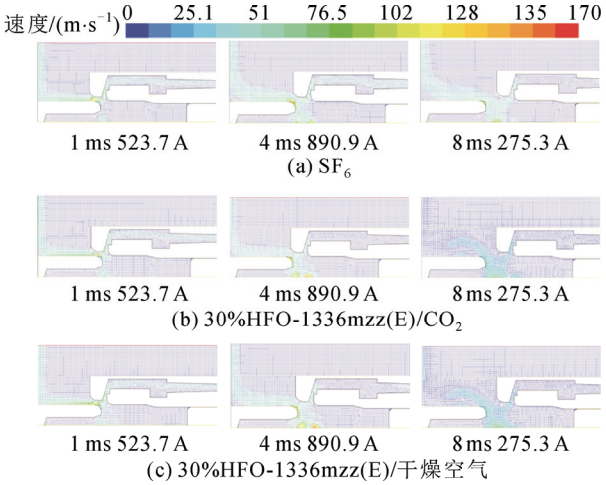


图 8　SF_6 和混合气体燃弧期间气流流速分布图

Fig.8　Distribution of airflow velocity during arcing of SF_6 and mixed gas

RRRV 下的弧后电流。可以看出，SF_6、30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气气体的最大耐受 RRRV 分别为 0.132、0.126、0.127 kV/μs。由此得到，SF_6 和混合气体在上述充气压力条件下，开断负荷电流时的热开断能力基本相同，30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的热开断能力分别可以达到 SF_6 的 95%和 96%。同时可以得出在相同条件下，空气作为缓冲气体的混合气体热开断能力要略大于 CO_2 作为缓冲气体的混合气体。

3　结论

本文研究了 HFO-1336mzz(E)混合气体作为灭弧介质在 12 kV 负荷开关中的灭弧特性，并将其与

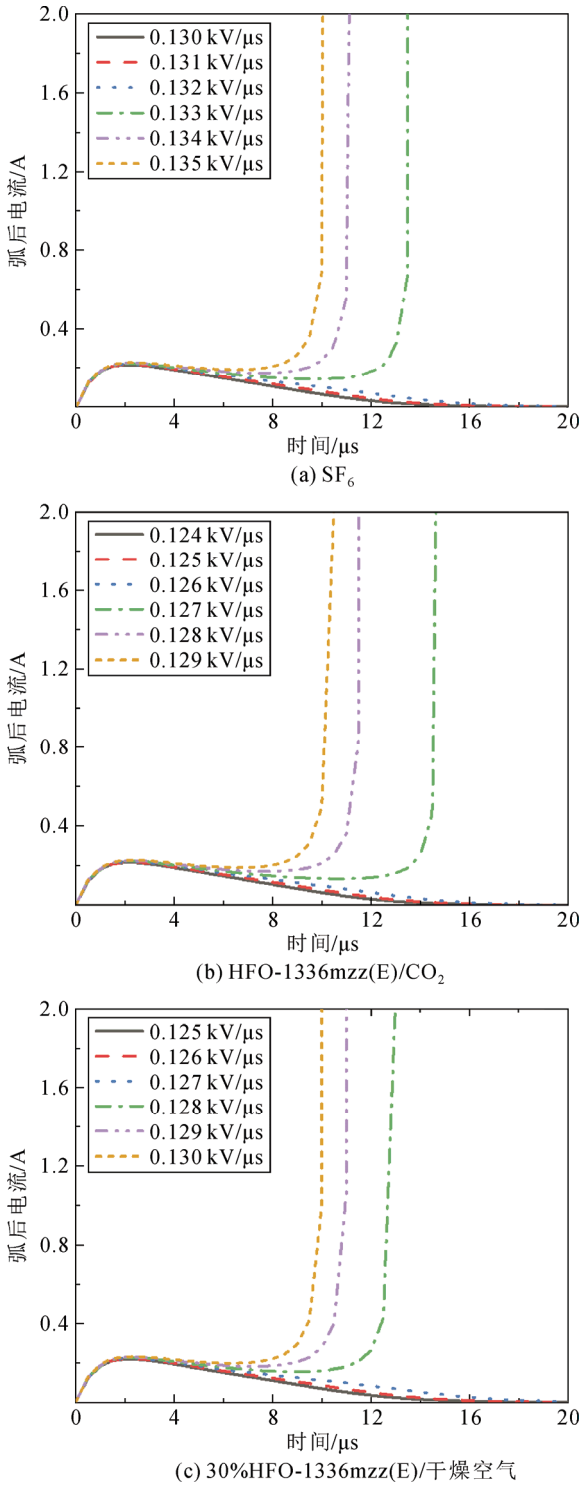


图 9 SF_6 和混合气体在不同恢复电压变化率下的弧后电流计算结果

Fig.9 Calculation results of post arc current of SF_6 and mixed gas under different RRRVs

SF_6 进行了对比。得到的主要结论如下：

1）燃弧阶段，SF_6 的电弧电压在大部分时间区间内都是略大于 HFO-1336mzz(E)混合气体，而混合气体熄弧尖峰略大于 SF_6。

2）由电弧温度分布可知，混合气体电弧在轴向上扩散速率大于 SF_6，电流快过零时，混合气体的电弧温度比 SF_6 低 1400 K，有利于避免电弧重燃；由气体速度矢量分布可知，混合气体有与 SF_6 相当的能量耗散能力。

3）根据弧后热击穿评估结果，0.12 MPa 的 30%HFO-1336mzz(E)/CO_2 、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的热开断能力分别可以达到 0.1 MPa SF_6 气体热开断能力的 95%和 96%。

通过上述对比分析可以得到，在 0.12 MPa 充气压力下，30%HFO-1336mzz(E)/CO_2、30%HFO-1336mzz(E)/干燥空气混合气体的负荷电流开断性能基本和 0.1 MPa SF_6 的开断性能相当。所以，两种混合气体可以作为环保型气体灭弧介质应用于 12 kV 负荷开关。未来我们将进一步在负荷开关样机上开展实验研究全面验证 HFO-1336mzz(E)混合气体的负荷电流开断性能。

参考文献 References

[1] 李兴文，赵 虎. SF_6 替代气体的研究进展综述[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1695-1701.
LI Xingwen, ZHAO Hu. Review of research progress in SF_6 substitute gases[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1695-1701.

[2] 邓军波，董俊豪，陈俊鸿，等. SF_6 替代气体界面绝缘特性的研究进展[J]. 高电压技术，2022，48(2)：661-673.
DENG Junbo, DONG Junhao, CHEN Junhong. Research advances in interface insulation characteristics of SF_6 alternative gases[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 661-673.

[3] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[R]. Geneva, Switzerland: WMO, 2021.

[4] 田双双，李晓涵，陈 康，等. 外电场对 HFO-1234ze(E)分子的结构和性质的影响[J]. 高电压技术，2022，48(07)：2650-2658.
TIAN Shuangshuang, LI Xiaohan, CHEN Kang, et al. Effect of External Electric Fields on the Structure and Properties of HFO-1234ze(E). High Voltage Apparatus, 2022, 48(07): 2650-2658.

[5] 林 莘，李鑫涛，李璐维. 环保型 SF_6 替代介质研究进展[J]. 高压电器，2016，52(12)：1-7.
LIN Xin, LI Xintao, LI Luwei. Research progress of environmentally friendly SF_6 substitute medium in electrical equipments[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(12): 1-7.

[6] 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.

[7] ZHANG B Y, CHEN L, LI X W, et al. Evaluating the dielectric strength of promising SF_6 alternatives by DFT calculations and DC breakdown tests[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1187-1194.

[8] GUO Z, LIU S G, PU Y J, et al. Study of the arc interruption performance of CO_2 gas in high-voltage circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5): 2742-2751.

[9] YOKOMIZU Y, OCHIAI R, MATSUMURA T. Electrical and thermal conductivities of high-temperature CO_2-CF_3I mixture and transient conductance of residual arc during its extinction process[J]. Journal of

Physics D: Applied Physics, 2009, 42(21): 215204.

[10] 张晓星，邓载韬，傅明利，等. 少量 O_2 对 c-C_4F_8/N_2 混合气体击穿与分解特性的影响[J]. 高电压技术，2019，45(3)：708-715.
ZHANG Xiaoxing, DENG Zaitao, FU Mingli, et al. Effect of small amount of O_2 on breakdown and decomposition characteristics of c-C_4F_8/N_2 mixture gas[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 708-715.

[11] NECHMI H E, BEROUAL A, GIRODET A, et al. Fluoronitriles/CO_2 gas mixture as promising substitute to SF_6 for insulation in high voltage applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2587-2593.

[12] 杨　韬，张博雅，李兴文，等. 不同故障工况下 C_4F_7N/CO_2 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_4F_7N/CO_2 mixture under different fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4216-4228.

[13] GUO Z, LI X W, LI B X, 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.

[14] 李　峰，李　凯，赵文彬，等. 电场不均匀度对 C_4F_7N/空气混合气体工频绝缘性能的影响[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2659-2667.
LI Feng, LI Kai, ZHAO Wenbin, et al. Influence of electric field inhomogeneity on power frequency insulation performance of C_4F_7N/air mixed gas[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2659-2667.

[15] TANAKA K, ISHIKAWA J, KONTOMARIS K K. Thermodynamic properties of HFO-1336mzz(E) (trans-1, 1, 1, 4, 4, 4-hexafluoro-2-butene) at saturation conditions[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 82: 283-287.

[16] JUHASZ J R. Novel working fluid, HFO-1336mzz(E), for use in waste heat recovery application[C]// 12th IEA Heat Pump Conference. Rotterdam, the Netherlands: IEA, 2017.

[17] 欧阳洪生，史俊茹，郭智恺，等. HFO-1336mzz(E)的物性及其在数据中心重力热管系统中的应用试验研究[J]. 制冷与空调，2020，20(2)：81-84，89.
OUYANG Hongsheng, SHI Junru, GUO Zhikai, et al. Experimental study on physical properties of HFO-1336mzz(E) and its application to gravity heat pipe system in data center[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2020, 20(2): 81-84, 89.

[18] 唐　念，熊嘉宇，周永言，等. 环保气体 HFO-1336mzz(E)及其混合气体的绝缘性能研究[J]. 电工技术学报，2021，36(13)：2871-2879.
TANG Nian, XIONG Jiayu, ZHOU Yongyan, et al. Insulation performance of environmental-friendly gas HFO-1336mzz(E) and its mixtures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2871-2879.

[19] RABIE M, FRANCK C M. Computational screening of new high voltage insulation gases with low global warming potential[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 296-302.

[20] 张博雅，李兴文，唐　念，等. 新型环保绝缘气体研发回顾与展望[J]. 高压电器，2022，58(4)：1-7.
ZHANG Boya, LI Xingwen, TANG Nian, et al. Review and outlooks on development of new environmentally-friendly insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 58(4): 1-7.

[21] XIAO S, HAN P, LI Y. Insulation performance and electrical field sensitivity properties of HFO-1336mzz(E)/CO_2: a new eco-friendly gas insulating medium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 1938-1948.

[22] 付鲁军，谢　成，辛昭昭，等. 不同灭弧方式 C_4F_7N 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_4F_7N gas mixture at different arc extinguishing modes[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 49-55.

[23] 李建基. 环网柜与负荷开关的发展[J]. 江苏电器，2008(11)：1-5.
LI Jianji. Development of ring main unit and load switch[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2008(11): 1-5.

[24] 郭瑞艳，曾大生，杜晓晖，等. 一种直动压气式负荷开关机械特性的研究[J]. 高压电器，2014，50(6)：70-74，80.
GUO Ruiyan, ZENG Dasheng, DU Xiaohui, et al. Research on mechanical performance characteristics of a vertical puffer type load-breaking switch[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 70-74, 80.

[25] 邬　钢，任红春. 中压负荷开关及其应用[J]. 电气开关，2007(1)：33-35.
WU Gang, REN Hongchun. Medium voltage load switch and its application[J]. Electric Switchgear, 2007(1): 33-35.

[26] 李兴文，贾申利，张博雅. 气体开关电弧物性参数计算及特性仿真研究与应用[J]. 高电压技术，2020，46(3)：757-771.
LI Xingwen, JIA Shenli, ZHANG Boya. Research and application on physical farameters calculation and behavior simulation of gas switching arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 757-771.

[27] 张博雅，周　然，郝　迈，等. C_4F_7N 混合气体在 40.5 kV 断路器中的应用研究：(一)燃弧特性仿真与灭弧性能评估[J]. 中国电机工程学报，2022，42(23)：750-8762.
ZHANG Boya, ZHOU Ran, HAO Mai, et al. Research on the application of C_4F_7N gas mixture in a 40.5 kV circuit breaker: part I. Simulation and evaluation of arc extinguishing performance[J]. Proceedings of the CSEE, 22, 42(23): 8750-8762.

[28] YOKOMIZU Y, MOROOKA I, MATSUMURA T. Arc parameters around current zero in CO_2-blast quenching chamber and their dependences on filled pressure[J]. IEEJ Transactions on Power and Energy, 2007, 127(6): 699-704.



王　凯
1997—，男，硕士生
主要从事 SF_6 替代气体方面的研究工作
E-mail: wk0729@stu.xjtu.edu.cn

WANG Kai



张博雅(通信作者)
1990—，男，博士，副教授，博导
主要从事高电压与大电流、气体放电与等离子体方面的科研工作
E-mail: zhangby@xjtu.edu.cn

ZHANG Boya
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2022-05-31　修回日期　2022-09-14　　编辑　曹昭君