

微量 O_2 对 SF_6 过热分解影响机理的同位素示踪分析

何 清¹, 王 伟², 邓万婷¹, 胡丹晖¹, 张施令³, 曾福平⁴

(1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 3. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123; 4. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:利用同位素示踪技术,使用稳定性同位素示踪剂 $^{18}O_2$ 进行 SF_6 局部过热分解实验,模拟 SF_6 在持续性高温作用下的分解情况,通过获取 ^{18}O 标记的主要含氧产物的体积分数变化来分析微量 O_2 对 SF_6 过热分解的影响机制。结果表明:在过热状态下,微量 O_2 优先与 SF_3 、 SF_2 、 SF 分别反应并生成 SOF_3 、 SOF_2 、 SOF ,其次 SF_2 与 O_2 反应生成少量的 SO_2F_2 ,即 O_2 是生成 SOF_2 主要的氧元素来源;并且,在过热条件下 SF_6 可以彻底裂解生成 S 单质,并与微量 O_2 反应生成 SO_2 。

关键词:气体绝缘设备; SF_6 ;过热分解;微量 O_2 ;同位素示踪

中图分类号:TM214;TM852 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)10-0080-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.10.013

Isotopic Tracing Analysis on Influence Mechanism of Trace O_2 on Over-thermal Decomposition of SF_6

HE Qing¹, WANG Wei², DENG Wanting¹, HU Danhui¹, ZHANG Shiling³, ZENG Fuping⁴

(1. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China; 4. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: According to isotope tracing technology, we used stable isotope tracer $^{18}O_2$ to carry out SF_6 partial over-thermal decomposition experiments to simulate the decomposition of SF_6 under sustained high temperature. The influence mechanism of trace O_2 on the overheating decomposition of SF_6 was analyzed by obtaining the changes in the volume fractions of the main oxygen-containing products labeled by ^{18}O . The results show that under overheating conditions, trace O_2 preferentially reacts with SF_3 , SF_2 , and SF to generate SOF_3 , SOF_2 , and SOF , followed by generating a small amount of SO_2F_2 . It is said that O_2 is the main source of oxygen for the formation of SOF_2 . Besides, under overheating conditions, SF_6 can be completely decomposed to generate elemental S , which reacts with trace O_2 to generate SO_2 .

Key words: gas insulated equipment; SF_6 ; over-thermal decomposition; trace O_2 ; isotope tracing

0 引言

以 SF_6 气体作为绝缘介质的气体绝缘开关

(GIS)、气体绝缘线路(GIL)、气体绝缘变压器(GIT)等设备广泛应用于电力系统中^[1-3]。但是,运行经验表明: SF_6 气体绝缘设备在长期运行中可能会出现弹簧松动或导杆接触不良等现象,导致设备内部发生局部过热性故障^[4]。在局部过热性故障的持续作用下, SF_6 会逐步分解生成低氟硫化物 $SF_x(x=1,2,\dots,5)$,生成的这些 SF_x 又会进一步与设备内的杂质气

收稿日期:2021-10-12 修回日期:2021-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607127);国网湖北省电力有限公司科技项目(512532210001)

作者简介:何清(1978-),女(汉族),湖北武汉人,正高级工程师,主要从事绝缘介质性能检测及高压电气设备故障诊断与分析的研究。

体(尤其是氧气和水气)发生反应生成 SO_2F_2 、 SOF_2 、 SO_2 、 SOF_4 、 HF 、 H_2S 等分解产物^[5-7]。一方面,生成的这些分解产物大多具有毒性或腐蚀性,会腐蚀气体绝缘设备部件、威胁运维人员的安全健康,并导致设备整体绝缘性能下降,诱发停电事故;另一方面,这些分解产物的生成又与设备内部绝缘状态密切相关,通过对这些分解产物的监测,可以实现对气体绝缘设备内部绝缘状态的实时监测^[8-10]。

但是,为了准确掌握气体组分情况与设备故障状态之间的关系,需要全面掌握 SF_6 在故障状态下的分解特性和分解机理,进而根据 SF_6 故障分解机理提取出表征故障属性的组分特征量。目前对于 SF_6 在不同故障类型下的局部放电分解特性已有较多研究^[11-13],但是对于 SF_6 在局部过热故障下分解并与微水、微氧反应的作用机理尚不明确。

为探究 O_2 对 SF_6 过热分解的作用机制,本文采用同位素示踪法^[14-16],研究 SF_6 主要含氧分解产物在微量 O_2 条件下的生成过程,尝试揭示微量 O_2 对 SF_6 过热分解的作用机制。通过检测 ^{18}O 标记产物的含量,验证 O_2 是否参与产物的生成过程,再结合标记产物随注入氧气含量的变化规律,分析主要反应路径。

1 实验

1.1 实验平台

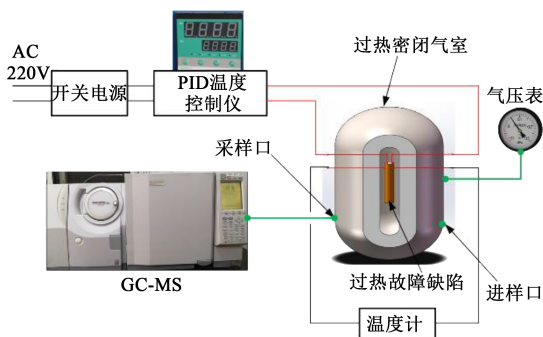


图1 实验平台

Fig.1 Experimental platform

模拟GIS局部过热故障的实验平台如图1所示。主要由PID温度控制仪、密闭罐体(容积为2.07 L)、过热故障缺陷模型、气压表、温度计和气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)组成。使用色谱-质谱联用技术,可以有效分离 SF_6 过热分解的气体产物并对其进行准确(体积分数低至 10^{-9})的含量测定。本研究使用的GC-MS型号为岛津GCMS-QP2010 UI-

tra,使用六通阀进样,每次进样量为1 mL。GC-MS所使用的色谱柱型号为CP-SIL 5 CB 60 $m \times 0.32$ mm,载气为纯度高于99.999%的氦气。

过热故障缺陷模型为棒状热源,其加热温度(外表面温度)最高可达1 000 $^{\circ}C$,内置k型温度传感器,与温度控制仪连接,通过PID实时控制加热温度,在实验中可以保持加热温度不变。实验罐体选用不锈钢材质,具有良好的气密性,可以在0~0.5 MPa气压下安全使用,无明显漏气。

1.2 实验方法

为了掌握 O_2 对于 SF_6 分解反应的作用机制,需要减少气室内残留空气、水分对实验的影响,并使用含示踪原子的 $^{18}O_2$ 气体作为反应物,与纯净的 SF_6 新气充分混合,开展实验。

相关研究和案例表明,当GIS内部局部热点温度达到300 $^{\circ}C$ 以上时, SF_6 开始出现明显的分解并生成少量的气体产物(SOF_2 、 SO_2 、 SO_2F_2 、 SOF_4 、 CO_2 等)^[17]。以这些气体为特征组分,可以间接掌握设备内部故障程度^[18]。研究表明,随着温度的升高,分解产物的生成速度明显加快^[19]。一般情况下,局部过热性故障发生时,局部高温的范围是300~660 $^{\circ}C$ 。当达到660 $^{\circ}C$ 时,局部高温已足以使金属铝发生熔化,并且导致 SF_6 快速分解,产生大量危害性气体,可视之为严重、难以挽回的故障。目前的研究主要通过在前期故障阶段对故障进行及时的诊断,从而避免故障不断恶化。综合考虑以上因素,本文选择400 $^{\circ}C$ 作为实验温度,一方面是因为在此温度下 SF_6 发生明显的分解,产生多种含氧特征产物,从而可分析各组分的生成过程;另一方面是为了避免损坏设备、产生过多有害气体,威胁实验人员的安全。

主要的实验条件设置如下:实验室温度保持20 $^{\circ}C$,加热时间设置为6 h, SF_6 可以完成较为充分的分解。气压为0.2 MPa(绝对值), $^{18}O_2$ 气体的注入量分别为100、200、300、400 mL。由于连续的高温加热会使 SF_6 分解并生成分解产物,气室内部压力会明显增加。另外,若提高气压可能导致操作过程中有害气体泄露、实验后反应废气过多等问题。本研究适当降低气压,虽然可能会影响反应速率,但不会干扰 SF_6 分解反应的路径和 O_2 的作用机制。实验室环境湿度维持在45%。

进行6 h的局部过热实验,实验完成后关闭温度控制系统,并立即打开采样口的气阀,采集样品气体并通入GC-MS进行样品的定量分析。完整的

实验操作步骤如下:①每次实验前,使用无水乙醇浸湿的脱脂棉擦拭罐体内壁及局部过热缺陷模型的表面,避免杂质和前一次实验后的产物残留干扰;②将气室抽至真空,然后将纯净的SF₆气体充入气室,至气压达到0.2 MPa(绝对值)后,静置10 min,再次抽至真空,重复3~4次,以充分排出气室内可能存在的杂质残留,最后将气室抽至真空状态;③向真空的气室内充入实验所需微量¹⁸O₂气体,随后匀速充入SF₆纯净气体,至实验所需气压0.2 MPa(绝对值),然后再静置12 h,使SF₆气体与¹⁸O₂在气室内充分混合均匀;④静置后,检查气室气压是否符合实验要求,检查无误后使用温度控制仪将局部热源的温度调至400℃,开始实验。实验持续6 h,实验结束后从采样口采集气室内样品气体,并通入GC-MS对分解产物进行定性定量检测;⑤所有检测完成后,将气室抽至真空状态,回收处理反应废气。实验罐体真空静置24 h,以便被气室内壁吸附的残留分解产物充分释放,为下次实验做准备。

由于每次实验步骤相同,进行步骤①、②之后,气室内所残留的¹⁶O₂和H₂¹⁶O的含量近似相等。认为每次实验时气室内¹⁶O的含量保持不变。

使用GC-MS定量分析之前,首先需使用标准气体对目标产物(CO₂、SO₂、SOF₂、SO₂F₂、SOF₄)进行标定,确定目标产物的保留时间,如表1所示。

表1 特征分解组分的保留时间及质荷比参数

Tab.1 Retention time and mass-to-charge ratio of characteristic decomposition components

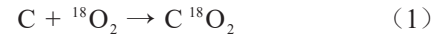
目标产物	开始-结束时间/min	质荷比
CO ₂	4.40-4.70	44,46,48
SO ₂ F ₂	4.70-5.10	83,85,87
SOF ₂	5.10-5.30	67,69
SOF ₄	4.70-5.10	105,107
SO ₂	6.70-7.05	64,66

设置GC-MS的柱箱温度为32℃,进样口温度为200℃,分流进样,分流比设置为10:1。利用GC-MS对不同质荷比的离子碎片的分离作用,可以识别出同种物质的不同同位素物质。例如,C¹⁶O₂的特征离子碎片的质荷比为44,而C¹⁸O₂的特征离子碎片的质荷比为48,这是由于其分子中包含了两个¹⁸O原子。通过GC-MS的分离作用,可以检测不

同同位素化合物的相对含量。

2 结果与分析

CO₂含有两个氧原子,理想情况下反应生成的CO₂都应该以C¹⁸O₂的形式存在。但在实验室条件下难以实现绝对的真空。因此,实验罐体的气室内部依然不可避免地存在着一定含量的H₂O和O₂,自然条件下,¹⁸O的丰度仅为0.3%,因此H₂O和O₂所含的氧原子可近似地视为都是¹⁶O。实验充入的¹⁸O₂和气室残留的H₂¹⁶O、¹⁶O₂作为部分反应物,与气室内部的含碳元素的部件发生反应,生成CO₂气体,并被¹⁸O原子标记,CO₂含量的变化规律如图2所示。在气体绝缘设备中,这些碳原子可能来自于固体绝缘材料和含碳金属导体部件的表面。具体的反应过程如式(1)~(2)所示。



从图2可以看出,随着实验中加入的¹⁸O₂含量增加,生成的被标记的CO₂的体积分数也明显增大,并在¹⁸O₂含量为300~400 mL的区间内有最大的增幅,CO₂的体积分数由360.2×10⁻⁶增大到1 408.8×10⁻⁶,增长率高达291.1%,说明高含量下的¹⁸O₂与罐体内部的含碳部件接触更加充分,反应更为剧烈,在同样的温度和反应时间下,CO₂生成量增加了2倍以上。另外,当¹⁸O₂含量较低时,生成量较小,仅有62.3×10⁻⁶。这可能是由于O₂优先与其他物质发生反应,而CO₂是在反应后期生成的。

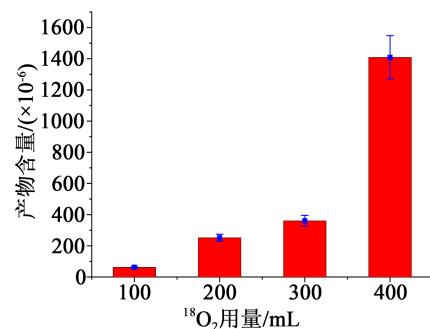


图2 标记的CO₂随¹⁸O₂含量的变化规律

Fig.2 Content of labelled CO₂ with content of ¹⁸O₂

对气体绝缘设备进行故障监测时,CO₂可以作为辅助参考的特征气体,虽然CO₂并不直接来自于氟硫化物的反应,但是其含量也与设备内部的温度、杂质(尤其是空气)有密切的关系。当设备内部出现局部热点时,CO₂含量会不断增加,如图2所

示, 当其含量较高时, 可能同时伴随设备内部空气含量超标等问题。

图 3 是标记的 SO₂F₂ 随 ¹⁸O₂ 含量的变化规律。从图 3 可以看出, SO₂F₂ 的生成量与 CO₂ 接近。充入 100 mL 的 ¹⁸O₂ 时, 生成的 SO₂F₂ 仅有 10.4×10⁻⁶。200 mL 与 300 mL 的 ¹⁸O₂ 下 SO₂F₂ 的生成量较为接近, 在 400×10⁻⁶ 左右。当 ¹⁸O₂ 含量达到 400 mL 时, SO₂F₂ 含量达到 1 385×10⁻⁶。

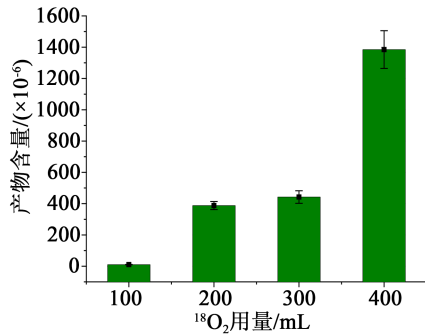


图3 标记的 SO₂F₂ 随 ¹⁸O₂ 含量的变化规律
Fig.3 Content of labelled SO₂F₂ with content of ¹⁸O₂

SO₂F₂ 是 SF₆ 发生分解的重要产物。由于其性质稳定, 被视为表征设备故障的重要特征气体。研究认为, SO₂F₂ 来自氟硫化物 SF_x 与 H₂O 的反应^[20]。反应过程如式(3)~(5)所示。

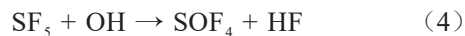


图 3 直观地证明了 SO₂F₂ 可以由氟硫化物 SF_x 与 O₂ 反应生成^[21]。根据图 3 的含量变化规律, 在 ¹⁸O₂ 低含量时 SO₂F₂ 生成量增加不明显(200~300 mL), 而 300 mL 之后出现大幅增加。可能的原因为 ¹⁸O₂ 在 400℃ 条件下发生裂解产生大量 ¹⁸O 原子的难度较大, 需要吸收较多的能量^[22]。因此, 只有当 ¹⁸O₂ 含量增加到一定程度时, 设备内部温度最高点附近具有足够的 ¹⁸O₂ 与低氟硫化物分子充分碰撞、反应, 从而生成被标记的 SO₂F₂, 含量出现大幅增加。在高温区域, 一部分 ¹⁸O₂ 和 H₂¹⁶O、¹⁶O₂ 都可能发生裂解, 并产生单个的 ¹⁸O 或 ¹⁶O 原子, 这些处于活跃状态的原子迅速与低氟硫化物结合并生成稳定的反应产物 SO₂F₂。反应过程如式(6)~(7)所示。

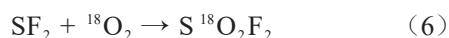


图 4 为被标记的 SOF₂ 含量的变化情况。从图 4 可以看出, 相比于 CO₂ 和 SO₂F₂ 两种产物, SOF₂ 在

低 ¹⁸O₂ 含量的条件下, 具有最高的含量为 357.4×10⁻⁶。并且随着 ¹⁸O₂ 含量增加, 其含量也有显著的增长。在 ¹⁸O₂ 充入量达到 400 mL 时, S¹⁸OF₂ 的体积分数达到最大值(5 531.5×10⁻⁶), 显著高于 CO₂ 与 SO₂F₂。结果表明 O₂ 是生成 SOF₂ 的反应的重要反应物, 且 O₂ 与氟硫化物生成 SOF₂ 的反应优先级较高。即在含量不充足时, O₂ 首先与氟硫化物反应生成 SOF₂, 优先于 SO₂F₂。

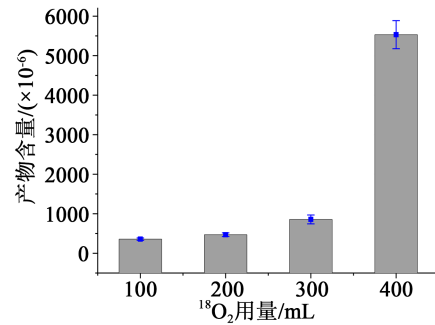
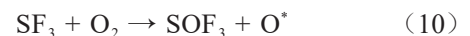
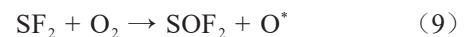
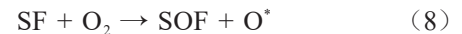


图4 标记的 SOF₂ 随 ¹⁸O₂ 含量的变化规律
Fig.4 Content of labelled SOF₂ with content of ¹⁸O₂

分析 SOF₂ 的生成过程, 主要来自 SF₂ 与 O₂ 的反应。但是如前所述, SF₂ 也可以与 O₂ 直接发生合成反应, 生成 SO₂F₂。实验结果显示 SO₂F₂ 的含量低于 SOF₂, 可能的原因是 SF、SF₂、SF₃ 可以各自与 O₂ 发生反应, 分别如式(8)~(10)所示。



其中, SOF 和 SOF₃ 两种物质化学性质较为不稳定, SOF 容易与气室内部由于 SF₆ 裂解等反应产生的活性 F 原子结合, 生成相对稳定的 SOF₂; 而 SOF₃ 也容易脱去一个 F 原子而生成 SOF₂。另外, 反应生成的活性 O 原子易于再次与氟硫化物发生以上反应, 从而促进式(8)~(10)反应向正方向发展; 总体反应过程可以理解为低氟硫化物(SF、SF₂、SF₃)与 O₂ 分子的反应, 如式(11)所示。实验结果验证了 O₂ 在 SOF₂ 生成过程中的重要作用, 在已有研究的基础上, 证明 SOF₂ 不止来自 SF₄ 与 H₂O 的反应, 也来自于低氟硫化物 SF、SF₂、SF₃ 与 O₂ 的反应。当 ¹⁸O₂ 用量为 400 mL 时, 根据图 1~4 可以看到, SO₂ 的含量最高, 而 SOF₂ 的含量在主要含氧产物中位于第二位, 说明 O₂ 对其生成的贡献程度较大。当环境内 O₂ 为主要杂质时, 可以与低氟硫化物反应生成大量的 SOF₂。



此外, SOF₂化学性质较为稳定, 但遇水容易发生液化, 生成SO₂和HF, 如式(12)所示。该反应也被视为SO₂的主导生成路径^[17,21]。

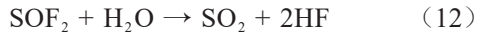


图5是被标记的SO₂含量的变化情况。从图5可以看出, SO₂生成量较大, 随¹⁸O₂充入量的增加不断大幅增长。当¹⁸O₂用量为400 mL时, 被标记的SO₂最多达到了17 605.7×10⁻⁶, 是CO₂、SO₂F₂、SOF₂、SO₂这4种气体中产量最多的。

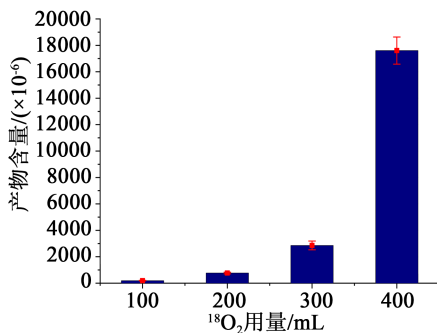
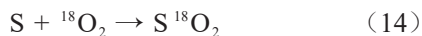
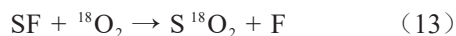


图5 标记的SO₂随¹⁸O₂含量的变化规律

Fig.5 Content of labelled SO₂ with content of ¹⁸O₂

比较图4和图5可以看出, SO₂生成量远高于SOF₂。实验通过步骤①、②重复的充气、抽真空以及静置的操作, 已在很大程度上控制了气室内残留水分的含量。通过精密露点仪的实际测量, 只充入SF₆气体至0.2 MPa时, 气室内部的微量水分含量低于45×10⁻⁶, 符合SF₆新气标准的要求^[23]。因此, 气室内的残留水分极其有限, 仅为痕量级水平, 实验后产生的大量SO₂并非来自于SOF₂的水解, 即反应(12)。

根据反应机理分析, S¹⁸O₂和S¹⁸O¹⁶O的生成来自SF或S单质与O原子的反应, 如式(13)~(15)。



首先, 结果证明了较多的SF₆分子在高温和氧气的作用下, 已完成连续的分解反应SF_x→SF_{x-1}+F, 并最终生成S单质。另外, 结果说明SO₂不止来自SOF₂的水解反应, O₂与S的反应也具有重要贡献。

3 结论

(1)检测到了被标记的4种含氧产物CO₂、SO₂F₂、SOF₂、SO₂, 并且含两个O原子的产物既有⁻¹⁸O₂-的存在形式, 也有⁻¹⁸O¹⁶O-的存在形式。说

明氧气可以直接参与4种产物的生成过程, 并且在局部过热故障的作用下已裂解生成两个O原子, 可以单独参与反应。

(2)CO₂主要来自于核心高温区域O₂或O原子与C的反应; 实验结果证明SO₂F₂可以从O₂获得两个O原子, 反应路径是SF₂+O₂→SO₂F₂, 但是该反应并非主要路径, 即SO₂F₂获得氧元素的主要来源不是O₂。

(3)S¹⁸OF₂生成量大, 说明大量¹⁸O₂参与其生成过程。根据实验结果总结其生成路径为2SF₂+O₂→2SOF₂, 反应机制为在O₂含量不充足时, 两个SF₂分子各获得一个O原子, 加速氧气分子化学键断裂。从产物含量占比和O₂的促进作用方面分析, 该反应是SOF₂的重要生成路径。

(4)S¹⁸O₂和S¹⁸O¹⁶O的大量生成说明在实验的过热故障条件下, 部分SF₆分子发生彻底的分解, 并生成S单质。在O₂的作用下, SO₂主要来自于S单质或SF分子与O₂的直接反应, 可以视为SF₆局部过热故障下最重要的分解产物。

参考文献:

- 钟建英, 陈刚, 谭盛武, 等. 高压开关设备关键技术及发展趋势[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2769-2782.
- 石磊, 于彤, 方烈, 等. SF₆放电分解机理及其在故障分析领域的研究进展[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 1-9.
- 胡长猛, 程林, 张川, 等. 电力设备SF₆气体状态检测典型案例剖析[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 228-232, 239.
- 文豪, 程林, 江翼, 等. 环氧树脂对SF₆过热分解组分浓度变化的影响[J]. 绝缘材料, 2020, 53(10): 82-88.
- 陈晓琳, 赵天成, 陈林聪, 等. GIS设备局部过热故障程度与SF₆分解的关联特性[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 109-115.
- 唐炬, 黄秀娟, 曾福平, 等. 微量O₂对SF₆过热分解组分形成过程的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2617-2624.
- 唐炬, 曾福平, 孙慧娟, 等. 微H₂O对过热故障下SF₆分解特性的影响及校正[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2342-2350.
- 唐炬, 杨东, 曾福平, 等. 基于分解组分分析的SF₆设备绝缘故障诊断方法与技术的研究现状[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 41-54.
- 汲胜昌, 钟理鹏, 刘凯, 等. SF₆放电分解组分分析及其应用的研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2318-2332.
- TANG J, ZENG F, ZHANG X, et al. Relationship between decomposition gas ratios and partial discharge energy in GIS, and the influence of residual water and oxygen[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 1226-1234.
- GAO Q, WANG X, YANG A, et al. Influence of H₂O and O₂ on the main discharge mechanism in 50Hz AC point-plane corona discharge[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(3): 033508.

- [12] LIN T, HAN D, ZHANG G, et al. Influence of trace O_2 on SF_6 decomposition characteristics under partial discharge based on oxygen isotope tracer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3):1600-1607.
- [13] 朱宁,曹政钦,赵荣普,等. 气压对 SF_6 正极性直流局部放电分解特性的影响及作用机制[J]. 绝缘材料,2019,52(7):50-55.
- [14] 曾福平,李昊天,冯孝轩,等. 微水对 SF_6 过热分解含氧生成物影响同位素示踪实验研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3971-3978.
- [15] VAN BRUNT R J, SIDDAGANGAPPA M C. Identification of corona discharge-induced SF_6 oxidation mechanisms using $SF_6/^{18}O_2/H_2^{16}O$ and $SF_6/^{16}O_2/H_2^{18}O$ gas mixtures[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,1988,8(2):207-223.
- [16] 赵明月,林涛,颜湘莲,等. 基于氧同位素示踪法的电晕放电中 H_2O 和 O_2 对 SF_6 分解气体形成的影响[J]. 电工技术学报,2018,33(20):4722-4728.
- [17] ZENG F, TANG J, ZHANG X, et al. Study on the influence mechanism of trace H_2O on SF_6 thermal decomposition characteristic components[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(2):766-774.
- [18] ZENG F, TANG J, FAN Q, et al. Decomposition characteristics of SF_6 under thermal fault for temperatures below 400°C [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(3):995-1004.
- [19] ZENG F, TANG J, ZHANG X, et al. SF_6 Partial overthermal decomposition characteristics of thermal fault in organic insulating materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(2):829-837.
- [20] DERVOS C T, VASSILIOU P, MERGOS J A. Thermal stability of SF_6 associated with metallic conductors incorporated in gas insulated switchgear power substations[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2007,40(22):6942-6952.
- [21] WANG J, DING W, YAN J, et al. Decomposition characteristics of SF_6 under overheating conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(6):3405-3415.
- [22] ZHONG L, JI S, WANG F, et al. Theoretical study of the chemical decomposition mechanism and model of Sulfur hexafluorid (SF_6) under corona discharge[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2019,220:61-68.
- [23] 中国电力企业联合会. DL/T 596—2005 电力设备预防性实验规程[S]. 北京:中国计划出版社,2005.