

文章编号: 1000-582X(2013)01-055-07

## 2 种局部放电类型下 SF<sub>6</sub> 分解组分检测及特性分析

唐 炬<sup>1</sup>, 胡 瑶<sup>1</sup>, 裘吟君<sup>2</sup>, 袁静帆<sup>2</sup>, 曾福平<sup>1</sup>, 张晓星<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;  
2. 海南电网公司, 海口 570100)

**摘 要:** 为研究不同绝缘缺陷引起的局部放电下 SF<sub>6</sub> 气体的分解特性, 探索识别不同绝缘缺陷的分解气体特征量, 笔者在研制的 SF<sub>6</sub> 气体分解试验平台上, 模拟了金属突出物和绝缘子金属污染物 2 种典型绝缘缺陷引起的局部放电下 SF<sub>6</sub> 气体的分解, 检测了 2 种缺陷下 CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub> 3 种分解气体的含量随时间的变化规律, 并研究了 2 种缺陷下 SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub>、SOF<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> 3 组组分含量比值的特性。结果表明, 2 种局部放电下 SF<sub>6</sub> 分解生成的主要稳定衍生物中均能检测到 SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 CF<sub>4</sub>, 但 2 种缺陷下这些组分的变化规律具有显著的差异, 同时研究表明, 2 种绝缘缺陷下 SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub>、SOF<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> 3 组组分含量比值具有明显的不同, 因此, 可以将 SF<sub>6</sub> 分解气体的含量比值作为识别 2 种绝缘缺陷类型的特征量。

**关键词:** 六氟化硫; 绝缘缺陷; 局部放电; 分解气体; 特征量

**中图分类号:** TM835

**文献标志码:** A

### Measurement and analysis of SF<sub>6</sub> decomposition products under two types of partial discharges

TANG Ju<sup>1</sup>, HU Yao<sup>1</sup>, QIU Yinjun<sup>2</sup>, YUAN Jingfan<sup>2</sup>, ZENG Fuping<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoxing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Hainan Power Grid Corporation, Haikou 570100, China)

**Abstract:** In order to recognize partial discharge by analysis of SF<sub>6</sub> decomposition products, the decomposition characteristic of SF<sub>6</sub> under different partial discharges should be investigated, and also the feature parameters of decomposition products should be found. The decomposition of SF<sub>6</sub> is simulated under partial discharge generated by needle defect and contamination defect respectively on the SF<sub>6</sub> decomposition equipment made especially for the experiment. Three kinds of byproducts namely CF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> and SOF<sub>2</sub> are detected, and their concentration changes with time are also studied. After that, the characteristics of three kinds of concentration ratios namely SOF<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> and SOF<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> under two defects are analyzed. The results show that SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> and CF<sub>4</sub> exist in the byproducts under both the two defects. Moreover, the increase rules of the three kinds of byproducts under two defects are obviously different. Meanwhile the results illustrate that the three contamination ratios under the two defects have a notable disparity. Therefore the concentration ratios of the decomposition products can be used as feature parameters for partial discharge recognition.

**收稿日期:** 2012-08-05

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB 724506); 全国优秀博士学位论文基金资助项目(200749)

**作者简介:** 唐炬(1960-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 973 首席科学家, 主要从事高压电气绝缘在线监测及故障诊断研究, (Tel)023-65112739, (E-mail)cqtangju@vip. sina. com。

**Key words:** SF<sub>6</sub>; insulation defects; partial discharge; decomposition products; feature parameters

SF<sub>6</sub> 气体作为优良的绝缘介质已广泛应用于气体绝缘组合电器 (Gas Insulated Switchgear, 简称 GIS) 中<sup>[1]</sup>。在正常情况下, SF<sub>6</sub> 化学性质十分稳定、不易分解, 但在 GIS 设备内部出现绝缘缺陷<sup>[2]</sup> 并引发局部放电 (Partial Discharge, 简称 PD) 时, SF<sub>6</sub> 气体会发生分解, 生成微量的分解气体。随着现代分析技术的发展, 以 SF<sub>6</sub> 气体分解物作为诊断 GIS 设备绝缘缺陷的特征参量很快成为国内外的研究热点<sup>[3-7]</sup>。

目前, 国外对 SF<sub>6</sub> 在放电作用下的分解现象进行了一定的研究, 主要集中在电弧放电<sup>[8]</sup>、火花放电<sup>[9-10]</sup> 及 PD<sup>[11-12]</sup> 作用下的分解机理, 并取得了初步的成果, 但对如何利用 SF<sub>6</sub> 在放电作用下的分解特性对 SF<sub>6</sub> 电气设备进行故障诊断的研究未见报道。国内对该问题的研究尚处于起步阶段, 大多只是讨论 PD 能量、杂质气体及吸附剂等对 SF<sub>6</sub> 分解生成物的影响<sup>[13]</sup>。尽管文献<sup>[14]</sup> 通过对 SF<sub>6</sub> 分解气体中 SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 的含量检测, 成功发现了多次 GIS 绝缘故障, 但对不同绝缘缺陷引起 PD 产生的分解气体含量、产气特性等还缺乏系统研究。

大量研究和实例已初步表明, SF<sub>6</sub> 放电分解产物与绝缘缺陷类型有关联<sup>[15]</sup>, 但这种关联关系至今还在研究之中, 如何建立 SF<sub>6</sub> 放电分解产物与绝缘缺陷类型之间的关系以及提取识别不同缺陷的分解气体特征量是目前还未解决的课题。笔者利用建立的 SF<sub>6</sub> 气体分解试验装置和气相色谱气体检测系统, 对 GIS 中 2 种典型绝缘缺陷 PD 下的 SF<sub>6</sub> 分解气体组分进行了定性和定量测量, 成功检测到 SF<sub>6</sub> 在 PD 作用下的主要稳定产物, 得出了这些主要产物随时间的变化规律, 并对比了 2 种缺陷下分解气体的生成特性和分解气体的含量比值的区别, 探索了表征两类绝缘缺陷的特征参量, 为实现用 SF<sub>6</sub> 特征分解组分诊断 GIS 设备绝缘故障奠定了基础。

## 1 SF<sub>6</sub> 在 PD 下的分解机理

在 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备中, 引起 SF<sub>6</sub> 分解主要有电效应和热效应。高能放电 (例如电弧放电和火花放电) 同时有电效应和热效应存在, 而低能放电 (如 PD) 因发生放电的部位温度不会太高, 一般只有电效应<sup>[16]</sup>。

在 GIS 设备气室内所产生的 PD 电子碰撞平均能量为 5~100eV<sup>[17]</sup>, 而 SF<sub>6</sub>-F 的键能为 3.5~4eV, 因此, 在电子发生有效碰撞的条件下必将导致 SF<sub>6</sub> 气

体发生分解形成相关低氟硫化物 SF<sub>x</sub> (x=1~5)。同时 SF<sub>6</sub> 的分解与放电能量分布有关, 而无论怎样的 PD 形式, 按照 PD 能量分布情况都可分为辉光放电区、离子漂流区和主气室区, 如图 1 所示<sup>[11-12]</sup>。在 PD 产生的辉光放电区, 能量较为集中, SF<sub>6</sub> 在高电场能作用下分解生成离子团和原子团。研究发现辉光放电区主要的分解产物是 SF<sub>5</sub>, 而 SF<sub>2</sub>、SF<sub>4</sub> 占未复合分解产物的绝大部分<sup>[18]</sup>, 比较稳定。因此, 辉光放电区的分解反应主要为

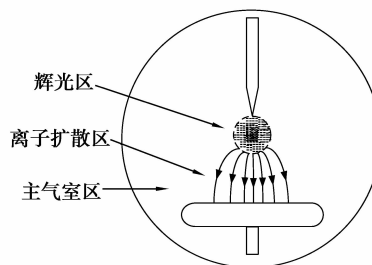
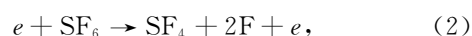
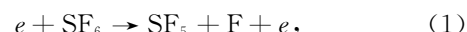
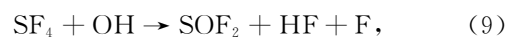
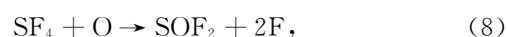
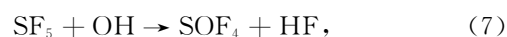
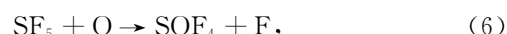
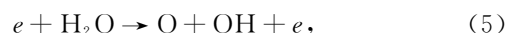
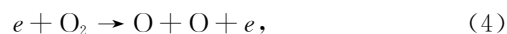


图 1 PD 下 SF<sub>6</sub> 气体分解机理

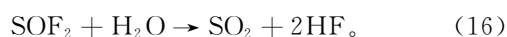
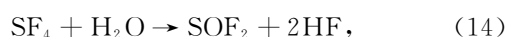
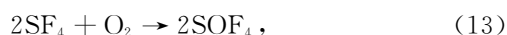
如果 SF<sub>6</sub> 气体中存在微氧、微水以及金属等, SF<sub>6</sub> 分解-复合的平衡将被破坏, 反应生成的 F 原子、O 原子和多种低氟硫化物与电子碰撞产生的能量为其他反应提供了条件<sup>[19]</sup>, 可生成如下的物质:



产生的 F 与金属材料接触还可发生如下反应:



在主气室中各种 F 化物与微氧和微水接触可发生如下氧化、水解反应:



当放电涉及有机绝缘材料时, 会有 CF<sub>4</sub> 生成:



由以上分析可知, SF<sub>6</sub> 分解生成的主要组分为 CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>4</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、HF。其中, HF 是强酸性物质, 极易与设备内的材料反应生成稳定的氟化物, 不适合作为表征 PD 的分解气体, SOF<sub>4</sub> 很不稳定, 易水解生成 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, 因此选取 CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 作为研究 PD 作用下 SF<sub>6</sub> 分解的特征组分。

## 2 局部放电下 SF<sub>6</sub> 分解试验

### 2.1 SF<sub>6</sub> 气体分解试验系统

SF<sub>6</sub> 分解试验系统主要由高压交流无晕试验电源、SF<sub>6</sub> 放电气室<sup>[20]</sup>、绝缘缺陷模型、检测阻抗、示波器和气相色谱检测系统等组成, 如图 2 所示。

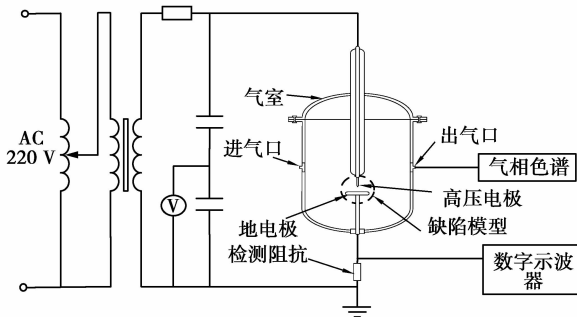


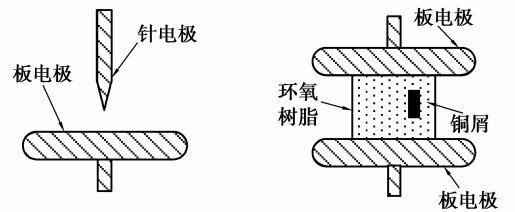
图 2 SF<sub>6</sub> PD 分解试验系统

### 2.2 绝缘缺陷模型

GIS 中的 PD 是由各种绝缘缺陷引起的, 笔者针对 GIS 中 2 种典型绝缘缺陷, 即金属突出物和绝缘子金属污染物, 进行 SF<sub>6</sub> PD 分解研究。

1) 金属突出物绝缘缺陷 (Needle)。所谓金属突出物是指 GIS 中可能存在的金属异常突出点 (如装配过程中留下的焊疤、检修时遗留的螺丝钉等), 其突出部位分布在电场中形成局部高场强, 当局部电场强度大于气体的电离场强时, 就会引发局部放电。笔者采用针板电极模拟金属突出物缺陷, 如图 3(a) 所示, 针尖端部曲率半径约为 0.3 mm, 锥尖角 30°, 接地板电极直径为 60 mm、厚度为 10 mm 的 Bruce 电极, 材料为黄铜。

2) 绝缘子金属污染物绝缘缺陷 (Metal)。所谓绝缘子金属污染物是指 SF<sub>6</sub> 设备气室内残留的金属微粒受静电力作用吸附于盆式绝缘子上, 使盆式绝缘子表面电场发生畸变, 从而引起 PD。笔者针对实际检修时发现的盆式绝缘子表面金属污染的特征, 并考虑模拟试验的稳定性和规律性, 采用圆柱形环氧树脂表面粘贴一定尺寸长方形 (5 mm × 18 mm)



(a) 金属突出物缺陷 (b) 绝缘子金属污染物缺陷

图 3 绝缘缺陷模型

的铜屑, 将其放入板电极间。电极与圆柱形绝缘子的接触面抛光粘接, 以避免接触面出现明显的气隙放电, 如图 3(b) 所示。极板电极结构为上述的 Bruce 电极。圆柱形环氧树脂直径为 45 mm, 高为 25 cm。

### 2.3 SF<sub>6</sub> 分解气体组分检测

气相色谱仪主体选用美国 Varian CP-3800 型, 配备脉冲氦离子化检测器 (PDHID), 检测精度可达  $\mu\text{L/L}$  级, 采用特制 CP-Silica 毛细管色谱柱 (60 m × 0.32 mm), 载气为 99.999% 的高纯氦气。采用程序升温方式, 选择载气流速为 2 mL/min、载气压力为 0.4 MPa, 定量环体积为 1 mL, 以 10 : 1 分流方式进样。

在进行组分检测之前, 必须用标准气体对气相色谱系统进行标定<sup>[21]</sup>。笔者用保留时间法定性判断各组分气体色谱峰位置, 用标准曲线法定量测定各组分气体含量<sup>[22]</sup>。

$$c_i = \frac{c_{s,i}}{A_{s,i}} A_i = K_i A_i, \quad (26)$$

式中:  $A_i$ 、 $A_{s,i}$  分别为样品、标样中第  $i$  组组分气体峰面积;  $c_i$ 、 $c_{s,i}$  分别为样品、标样中第  $i$  组组分气体含量;  $K_i$  为校正曲线的斜率, 即绝对校正因子。测得各特征组分的保留时间如表 1 所示, 绝对校正因子如表 2 所示 (试验中, SO<sub>2</sub> 因受烃类影响而出峰异常, 未进行定量标定)。

表 1 各组分的保留时间

组分	Air	CF <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	SOF <sub>2</sub>
保留时间/min	5.0	5.1	7.9	13.3

表 2 各组分的绝对校正因子

组分	CF <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	SOF <sub>2</sub>
$K_i$	1.033 9e-4	2.176e-5	4.128e-5

## 2.4 试验步骤

首先要测试装置的固有 PD 特性,即确保未加人工模拟绝缘缺陷时,在试验电压范围内,装置本身不产生 PD。测试得到:装置在充入 0.2 MPa SF<sub>6</sub> 后,外施电压 40 kV 以内无 PD 产生。试验时,将绝缘缺陷模型置入放电室内,通入 SF<sub>6</sub> 反复冲洗腔体,使气室内的空气充分排出,再真空充入 0.2 MPa 高纯 SF<sub>6</sub> 绝缘气体,稳定数小时后,用逐步升压法对缺陷模型施加试验电压,至其产生稳定的 PD。试验进行了 96 h 跟踪,每 12 h 采集一次 SF<sub>6</sub> 混合气体进行组分分析。

## 3 局部放电信号检测

在模拟金属突出物绝缘缺陷实验中,当针板间距为 10 mm、外施电压为 20 kV 时,可用脉冲电流监测系统检测到稳定的 PD 信号,其 PD 脉冲平均峰-峰值约为 21.6 mV,信号波形如图 4(a)所示。在模拟绝缘子金属污染物绝缘缺陷实验中,当外施电压为 16.5 kV 时,脉冲电流监测系统可以检测到稳定的 PD 信号,其 PD 脉冲平均峰-峰值约为 22 mV,信号波形如图 4(b)所示。在实验中,用紫外成像仪对发生的 PD 进行监测,均能观察到缺陷模型处有稳定紫外光子存在,如图 5 所示,说明所设计的绝缘缺陷模型能够产生稳定的 PD。

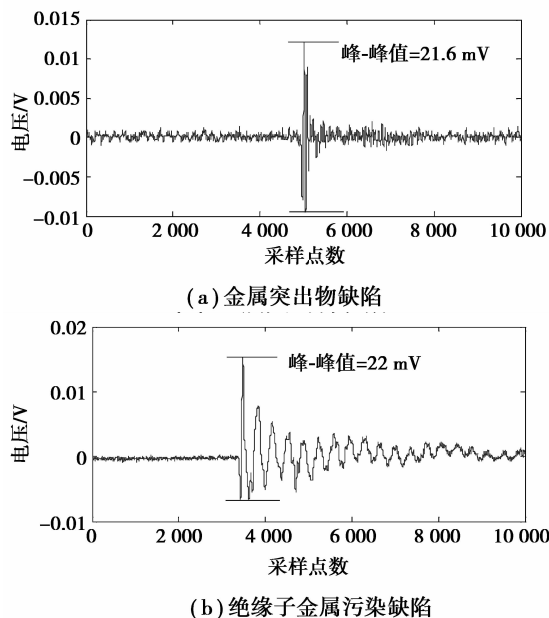


图 4 PD 脉冲波形

## 4 2 种缺陷下分解气体检测结果

### 4.1 特征组分色谱图及杂质气体检测

利用气相色谱仪对 2 种绝缘缺陷试验下 SF<sub>6</sub> 气

体放电分解组分进行了检测,其色谱图如图 6 所示。

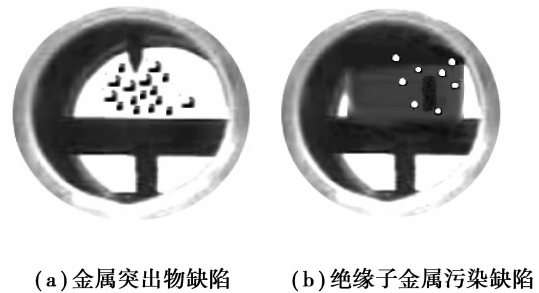


图 5 局部放电紫外成像

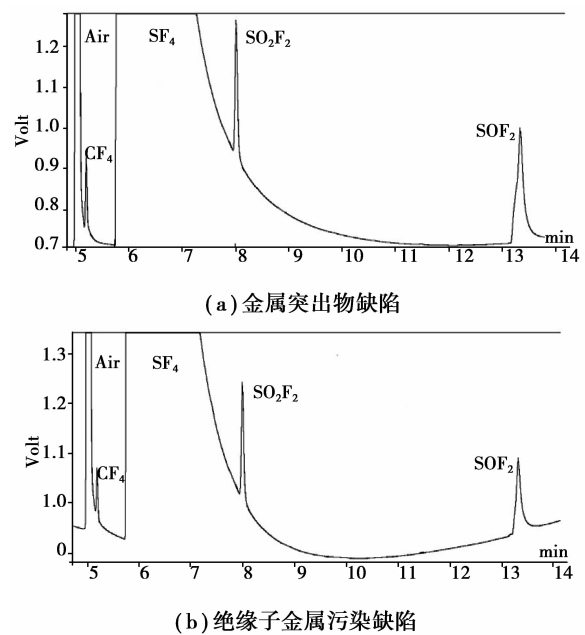


图 6 分解组分色谱图

为了对放电前后气体组分进行准确地对比分析,有必要测量试验前 SF<sub>6</sub> 新气的杂质含量。测试表明放电前主要杂质气体为 CF<sub>4</sub> 和空气,CF<sub>4</sub> 含量为 26 μL/L,空气含量为 30 μL/L,其他杂质含量很低,均可忽略。

### 4.2 特征组分检测结果

为得到各特征组分含量随时间的变化关系,实验进行了 96 h,在 96 h 的 PD 试验中,每 12 h 采集一次分解气体,共采集了 8 次分解气体。扣除放电前的 CF<sub>4</sub> 含量,对检测数据进行曲线拟合,得到各特征组分的变化规律如图 7 所示。2 种典型绝缘缺陷产生 PD 下 SF<sub>6</sub> 分解的产物中均检测到了 CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>。各组分的含量均随放电时间的延长而增加,但变化趋势有明显的差异。

图 7(a)是 2 种绝缘缺陷下 CF<sub>4</sub> 的变化趋势,可以看出,在金属突出物绝缘缺陷试验中,CF<sub>4</sub> 含量增

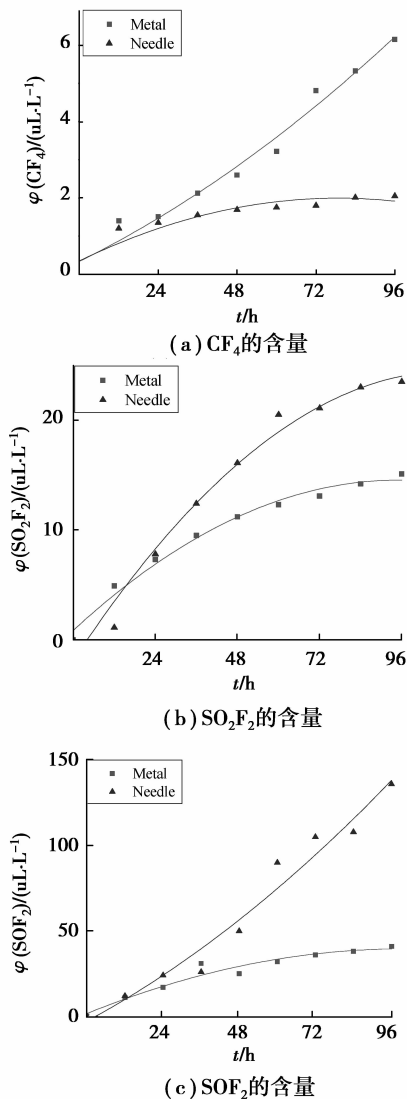


图 7 分解组分的含量

加缓慢,且很快趋于饱和,而在绝缘子金属污染物绝缘缺陷试验中,CF<sub>4</sub>始终保持增长趋势,且随 PD 时间的增长有加快趋势。初步判断 CF<sub>4</sub> 中 C 的来源是装置内部有机绝缘材料,由于前者套管离绝缘缺陷的 PD 高能量区较远,引发绝缘材料释放的 C 含量较少,且增量变化不大。而后者环氧树脂绝缘材料处于 PD 的高能量区,引发绝缘材料释放的 C 含量较多,且增量变化较大,导致随 PD 时间的增长 CF<sub>4</sub> 含量不断增加。

SF<sub>6</sub> 在高低 E/N 下都可分解出 SF<sub>5</sub>,该分子团与杂质反应生成的氟氧化物水解成最终的稳定组分 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>。图 7(b)是 2 种绝缘缺陷 PD 下 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 的变化趋势,其含量均随放电时间的增长呈饱和趋势增加。但在金属突出物绝缘缺陷模型试验下,随着放电时间增长,SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 含量明显高于绝缘子金属污染

物绝缘缺陷模型的试验。原因是前者放电稳定,放电能量较大,使 SF<sub>6</sub> 自身分解速度加快,且由于 O、OH 等元素的存在,使 SF<sub>6</sub> 分解-复合得平衡不断被打破,从而增大了 SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 的产气速率和总含量。

图 7(c)是 2 种绝缘缺陷下 SOF<sub>2</sub> 的变化趋势。可以看出,金属突出物绝缘缺陷模型下,SOF<sub>2</sub> 增长趋势明显,而绝缘子金属污染物绝缘缺陷模型下,SOF<sub>2</sub> 产气量增长缓慢,且很快趋于饱和,前者 SOF<sub>2</sub> 的含量大大高于后者,且 2 种绝缘缺陷下,SOF<sub>2</sub> 的含量都高于其他分解组分。原因是在金属突出物绝缘缺陷试验下,PD 能量集中,SF<sub>6</sub> 在高电场能作用下分解出较多的 SF<sub>2</sub>、SF<sub>4</sub> 分子团,两者在辉光区与 O 和 OH 结合生成了更多的 SOF<sub>2</sub> 组分。

综上所述,在 2 种典型绝缘缺陷模型下产生的 PD 都能够引起 SF<sub>6</sub> 气体发生分解,但各组分的生成量和增长趋势存在明显的差异。

## 5 2 种缺陷下分解气体含量比值

由上述分析可知,2 种不同绝缘缺陷下 SF<sub>6</sub> 分解气体的含量及增长规律具有明显差异,可以作为识别不同绝缘缺陷的特征,但由于同一绝缘缺陷其分解气体的含量也是随时间变化的,且变化幅度非常大,因此直接将分解气体的含量作为识别不同绝缘缺陷的特征量具有较大的弊端。由于分解气体的比值不包含量纲,为此,笔者分析了 2 种绝缘缺陷下各分解气体的含量比值随时间的变化趋势,如图 8 所示。

由图 8(a)可以看出,总体上,金属突出物缺陷下  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)$  的值要大于绝缘子金属污染缺陷,绝缘子金属污染缺陷下  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)$  的值保持在一个较为稳定的水平,而金属突出物缺陷下  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)$  的值变化范围较大;由图 8(b)可以看出,金属突出物缺陷下  $\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)/\varphi(\text{CF}_4)$  的比值也比绝缘子金属污染缺陷大,且随着时间的增长而增长,最后维持在一个较为稳定的水平,而绝缘子金属污染缺陷下  $\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)/\varphi(\text{CF}_4)$  的值始终保持在一个稳定的水平。由图 8(c)可以看出,金属突出物缺陷下  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{CF}_4)$  的值要远远高于金属突出物缺陷,且随着时间的增长逐渐增长,而绝缘子金属污染缺陷下  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{CF}_4)$  的值保持在一个稳定的范围之内。由以上分析可以看出,2 种缺陷下分解组分的含量比值具有明显的差异,可以将这些比值用来作为识别不同绝缘缺陷的特征量。

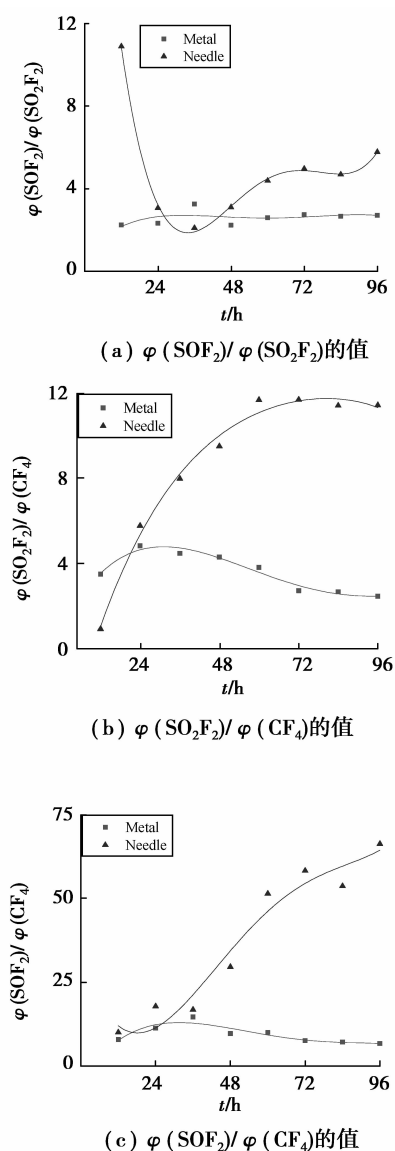


图 8 组分含量的比值

## 6 结 论

1) 分析了 PD 引起  $\text{SF}_6$  气体发生分解的机理, 当  $\text{SF}_6$  气体中存在微水、微氧、固体绝缘材料时, 稳定的气态衍生物有  $\text{CF}_4$ 、 $\text{SO}_2\text{F}_2$ 、 $\text{SOF}_4$ 、 $\text{SOF}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{HF}$  等, 同时阐明了气相色谱检测系统的检测方法, 为进行  $\text{SF}_6$  在 PD 作用下分解气体定性定量研究奠定了基础。

2) 成功模拟了 2 种典型绝缘缺陷产生的 PD 下  $\text{SF}_6$  气体的分解, 对  $\text{SF}_6$  气体分解组分进行了 96 h 跟踪测量, 在 2 种缺陷下  $\text{SF}_6$  分解物中均检测到了  $\text{CF}_4$ 、 $\text{SO}_2\text{F}_2$ 、 $\text{SOF}_2$ , 但 2 种缺陷下这些分解气体的变化规律具有明显的差异。

3) 金属突出物绝缘缺陷放电能量集中且放电稳

定,  $\text{SO}_2\text{F}_2$  和  $\text{SOF}_2$  增长率大, 总含量高, 而绝缘子金属污染物绝缘缺陷因放电紧靠固体绝缘材料,  $\text{CF}_4$  增长趋势明显, 因此, 可通过分析  $\text{SO}_2\text{F}_2$ 、 $\text{SOF}_2$  和  $\text{CF}_4$  相对变化速率和总含量大小识别 2 种绝缘缺陷。

4) 2 种绝缘缺陷下, 3 组分解组分含量比值  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)$ 、 $\varphi(\text{SO}_2\text{F}_2)/\varphi(\text{CF}_4)$  和  $\varphi(\text{SOF}_2)/\varphi(\text{CF}_4)$  具有明显的差异, 可作为识别 2 种绝缘缺陷的特征量。

## 参考文献:

- [1] 唐炬. 组合电器局放在线监测外置传感器和复小波抑制干扰的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [2] 汪泓, 马江泓, 王建生, 等.  $\text{SF}_6$  气体绝缘全封闭开关设备的早期绝缘故障诊断[J]. 电力设备, 2002, 3(1): 34-36.  
WANG Feng, MA Jianghong, WANG Jiansheng, et al. Diagnosis of early insulation defects of  $\text{SF}_6$  gas insulated switchgear (GIS) [J]. Electrical Equipment, 2002, 3(1): 34-36.
- [3] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等.  $\text{SF}_6$  放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. 高电压技术, 2007, 34(4): 664-669.  
ZHANG Xiaoxing, YAO Yao, TANG Ju, et al. Actuality and perspective of proximate analysis of  $\text{SF}_6$  decomposed products under partial discharge [J]. High Voltage Engineering, 2007, 34(4): 664-669.
- [4] 张仲旗, 连鸿松. 通过检测  $\text{SO}_2$  发现  $\text{SF}_6$  电气设备故障[J]. 中国电力, 2001, 34(1): 77-80.  
ZHANG Zhongqi, LIAN Hongsong. Using  $\text{SO}_2$  detection for failure checking of  $\text{SF}_6$  electricity equipment [J]. Electric Power, 2001, 34(1): 77-80.
- [5] 刘有为, 吴立远. 输变电设备特征参量的研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
- [6] Hanai M, Nakamoto T, Ikeda H. Dielectric breakdown characteristics of an insulator with a sharp edge in  $\text{SF}_6$  gas under lightning impulse voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 321-327.
- [7] Sauers I, Cacheiro R A. A cryogenic enrichment technique for gas chromatographic detection of  $\text{S}_2\text{F}_{10}$  in  $\text{SF}_6$  discharges [C] // Proceedings of the Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 7-10, 1992, Baltimore, MD. Piscataway: IEEE Press, 1992: 7-10.
- [8] Chu F Y, Stuckless H, Braun J M. Generation and effects of low level contamination in  $\text{SF}_6$  insulated equipment [M] // Christophorou L G, Marshall O P.

- Gaseous dielectrics IV. [S. I.]: Pergamon Press, 1984:462-472.
- [9] Sauers I. By-product formation in spark breakdown of SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub> mixtures [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1988, 8(2): 247-262.
- [10] Frees L C, Sauers I, Ellis H W, et al. Positive ions in spark breakdown of SF<sub>6</sub> [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1981, 14(9): 1629-1642.
- [11] Brunt R J V, Herron J T. Fundamental processes of SF<sub>6</sub> decomposition and oxidation in glow and corona discharges [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(1): 75-94.
- [12] Brunt R J V, Herron J T. Plasma chemical model for decomposition of SF<sub>6</sub> in a negative glow corona discharge [J]. Physica Scripta, 1994, 53: 9-29.
- [13] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS设备气体分解物及其影响因素研究 [J]. 电网技术, 2009, 33(5): 58-61.  
LIU Youwei, WU Liyuan, GONG Yanpeng. Investigation on SF<sub>6</sub> decomposition products in GIS and affecting factors [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 58-61.
- [14] 连鸿松. 根据 SF<sub>6</sub> 气体分解产物诊断电气设备故障 [J]. 福建电力电工, 2005, 23(3): 21-23.  
LIAN Hongsong. Diagnose faults of electric facility according to the decomposition products [J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering, 2005, 23(3): 21-23.
- [15] 卢立秋, 郭军科, 张桂贤, 等. 放电故障的 SF<sub>6</sub> 设备分解产物总量分析 [J]. 华北电力技术, 2007 (1): 150-152.  
LU Liqiu, GUO Junke, ZHANG Guixian, et al. Analyzing amount of SF<sub>6</sub> facilities decomposition product by electric discharge fault [J]. North China Electric Power, 2007(1): 150-152.
- [16] Chen C L, Chantry P J. Photo-enhanced dissociative electron attachment in SF<sub>6</sub> and its isotopic selectivity [J]. Journal of Chemical Physics, 1979, 71(10): 38-97.
- [17] Lee J Y, Khang S J, Keener T C. The effects of pulsed corona discharge on SO<sub>2</sub> absorption into water [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(9): 2030-2032.
- [18] Mark T D. Ionization by electron impact [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 1992, 34(13): 2083.
- [19] Brunt R J V, Sauers I. Gas-phase hydrolysis of SOF<sub>2</sub> and SOF<sub>4</sub> [J]. The Journal of Chemical Physics, 1986, 85(8): 4377-4380.
- [20] 唐炬, 李涛, 万凌云, 等. SF<sub>6</sub> 气体分解组分的多功能试验装置研制 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (8): 1583-1588.  
TANG Ju, LI Tao, WAN Lingyun, et al. Device of SF<sub>6</sub> dissociation apparatus under partial discharge and gaseous decomposition components analysis system [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1583-1588.
- [21] 唐炬, 李涛, 胡忠, 等. 两种常见局部放电缺陷模型的 SF<sub>6</sub> 气体分解组分对比分析 [J]. 高电压技术, 2009, 25(3): 487-492.  
TANG Ju, LI Tao, HU Zhong, et al. Analysis of SF<sub>6</sub> gaseous decomposition components under two kinds of PD defects [J]. High Voltage Engineering, 2009, 25(3): 487-492.
- [22] 梁汉昌. 气相色谱法在气体分析中的应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

(编辑 王维朗)