

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200825

封闭环境空气局部放电组分研究

刘宝升¹, 王涤², 马爱军², 归宇², 张秋实³, 张军⁴, 龚立⁵, 田猛⁵, 王先培⁵

(1. 国家电网有限公司, 北京 100033; 2. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司, 浙江 湖州 313000;
3. 武汉科迪奥电力科技有限公司, 湖北 武汉 430056; 4. 国家电网电力科学院武汉分院,
湖北 武汉 430070; 5. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 大量电力设备长期工作在封闭或半封闭环境中, 经常发生局部放电, 导致放电区域空气组分发生变化。为研究在局部放电条件下封闭环境中空气组分的变化规律, 设计3种不同的缺陷模型模拟电力设备常见放电故障类型, 搭建局部放电实验平台, 基于电化学检测技术对系统进行标定。分析持续放电条件下空气组分的变化规律, 根据局部放电过程中放电电量大小表征放电阶段。建立空气组分浓度、电压、放电量和放电时间的关系, 为电力设备故障预警提供理论依据。实验结果表明: 封闭环境空气发生分解时, C、N、O元素参与电离过程, S元素基本不参与反应, CO、NO₂、O₃在放电前后变化明显, 且气体浓度、产出速率、增长趋势与不同缺陷模型稳定局部放电时电压、放电电量有关。

关键词: 封闭环境; 局部放电; 缺陷类型; 气体组分

Study on the components of air under partial discharge condition in closed space

LIU Baosheng¹, WANG Di², MA Aijun², GUI Yu², ZHANG Qiushi³, ZHANG Jun⁴, GONG Li⁵, TIAN Meng⁵, WANG Xianpei⁵

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100033, China; 2. Huzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou 313000, China; 3. Wuhan Kedio Power Technology Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 4. State Grid Electric Power Academy Wuhan Branch, Wuhan 430070, China;
5. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Much electrical equipment works in a closed or semi-closed space for a long time. Partial discharges often occur, and lead to the changes of air composition in the partial discharge area. To study the change law of air components in the closed space when the partial discharges occur, this paper designs three different defect models to simulate common failure types of electrical equipment, and builds a partial discharge experiment platform calibrated based on electrochemical detection technology. Then it analyzes the change law of air composition under continuous discharge conditions, and uses the discharge volume in the partial discharge process to represent the discharge stage. Finally, the relationship between the concentration of air component, voltage, discharge volume and discharge time is established. This provides a theoretical basis for early warning of electrical equipment failure. The experimental results show that the elements of C, N and O participate in the ionization process when the air in the closed space decomposes. The S element does not participate in the reaction. The CO, NO₂ and O₃ change significantly after a partial discharge. The gas concentration, output rate, and growth trend are related to the voltage and discharge volume when the partial discharge is stabilized in different defect models.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51707135) and the Science and Technology Support Program of Hubei Province (No. 2015BCE074) and the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. SGZJPX00PGJS).

Key words: closed space; partial discharge; type of defect; gas composition

0 引言

电力设备发生局部放电时^[1-2], 气体在强电磁场

作用下会发生分解, 导致放电区域内气体组分发生改变, 这一特征成为电力技术人员将化学检测法用于电力设备故障诊断的依据^[3-6]。以 SF₆ 为例^[7-10], 在实验室条件下, 研究不同条件下的分解特性, 通过分析分解产物可以识别多种故障缺陷, 但鲜有文献研究多缺陷模型下空气绝缘介质的分解特性。

为研究电力设备在局部放电条件下封闭环境中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707135); 湖北省科技支撑计划项目资助(2015BCE074); 国家电网浙江省电力公司科技项目资助(SGZJPX00PGJS)

空气组分的变化规律, 本文设计 3 种不同缺陷模型模拟电力设备常见故障类型, 以电化学法作为检测手段, 搭建局部放电实验平台和气体检测平台, 提出对系统各环节标定, 初始化检测参数后进行实验, 根据局部放电过程中放电量大小表征放电阶段, 在稳定局部放电条件下, 研究封闭环境空气组分局部放电时的变化趋势, 建立空气组分浓度、电压、电流、放电量 and 放电时间的关系, 为电力设备故障预警提供理论依据。

1 实验平台

1.1 局部放电实验平台

局部放电实验平台主要包括调压台、无电晕变压器、限流电阻、耦合电容、测量阻抗、数字式局部放电监测仪、空气分解气室等, 模拟缺陷类型内置于空气分解气室内。

在封闭环境中, 电力设备在长期工作过程中将不可避免地产生缺陷^[11-14], 这些缺陷产生畸变电场降低气体绝缘性, 并逐渐形成放电通道, 最终造成严重事故。本文针对上述电力设备常见故障缺陷, 选择金属突出物缺陷、金属-绝缘子间气隙缺陷、绝缘子表面金属污染缺陷作为分析对象^[15-17], 并设计物理缺陷模型用于实验。

1.2 气体检测平台

气体检测平台主要包括空气分解气室、PVC 软管、气泵、检测室、采集器、上位机等。

电力设备发生局部放电时, 空气主要产生 O₃、NO₂、N₂O₅ 等分解产物^[18-20], NO、N₂O₅ 等组分是容易分解的中间产物, 当固体绝缘材料受损后产生 CO、CO₂ 等气体^[21], 但空气中 CO₂ 体积份数偏大, 不能作为局部放电检测的特征组分。CO、NO₂ 在空气中较为稳定, 并与局部放电特征紧密相关, 可作为本文检测局部放电的主要特征组分, 此外, 本文将 O₃ 作为主要生成特征组分进行检测。

1.3 缺陷模型设计

本文设计三种物理模型尺寸如表 1 所示。

表 1 分解气室参数

Table 1 Decomposition chamber parameters

故障缺陷类型	气室外壳尺寸	气室主要参数
金属突出物缺陷	260×260×305 mm	
金属-绝缘子间气隙缺陷	250×250×300 mm	耐压区间 0~50 kV; 抗压区间 0~8 MPa;
绝缘子表面金属污染缺陷	250×250×300 mm	耐温区间: 0~85 ℃。

如图 1 所示, 金属突出物缺陷中高压电极采用铝制材料(一端为光滑圆柱, 另一端为光滑圆锥),

接地电极采用不锈钢材料(圆柱状)。高压电极针尖曲率为 3 mm, 锥尖角为 30°; 接地电极直径为 120 mm, 厚度为 10 mm; 高压电极与接地电极间距可在 0~20 mm 调整。



图 1 金属突出物缺陷

Fig. 1 Metal protrusion defect

如图 2 所示, 金属-绝缘子间气隙缺陷由一块表面打磨光滑的环氧树脂作为主体, 在其上表面均匀打磨出一条形状规则的凹槽, 置于高压电极与接地电极之间, 并且确保其紧密贴合在电极表面。复合环氧树脂板直径 140 mm, 厚度 15 mm; 表面气隙深度 2.5 mm, 圆弧中心角 0.87 rad, 长度等于复合环氧树脂板的直径; 高压电极、接地电均为圆柱状, 直径 120 mm, 厚度 10 mm。



图 2 金属-绝缘子间气隙缺陷

Fig. 2 Metal-insulator air gap defect

如图 3 所示, 绝缘子表面金属污染缺陷主要包括两块电极板、一块圆柱形环氧树脂、一块长方形铜片。铜片通过环氧树脂胶被紧密粘合在圆柱形环氧树脂块的外侧面, 模拟附着在绝缘子上的金属污秽。圆柱形环氧树脂直径为 60 mm, 高度为 30 mm; 长方形铜片长宽高分别为 12 mm、5 mm、2 mm; 电极板直径为 120 mm, 厚度为 10 mm。

空气分解气室外壳均采用无色透明的有机玻璃



图3 绝缘子表面金属污染缺陷

Fig. 3 Metal contamination defects on the surface of insulators

制成的罐体, 在外壳上下表面分别嵌入红电木将高压电极和接地电极与壳体隔离开, 同时外置四个导电杆将外壳与地面相连, 并在外壳外壁上开槽用于安装气管、节流阀、气压表、螺纹阀门等。

2 系统标定

2.1 参数标定

2.1.1 放电量标定

为有效检测气室内气体绝缘情况, 本文采用脉冲电流法检测局部放电过程中放电量, 根据放电大小判断室内局部放电阶段。此外本文设计缺陷类型中金属突出物缺陷能观察到明显局部放电现象, 金属-绝缘子间气隙缺陷、绝缘子表面金属污染缺陷局部放电不明显, 需借助其他手段辅助测量, 判断气室内局部放电情况。

其标定过程为: 依次连接好校准信号发生器、空气分解气室、耦合电容、检测阻抗、数字式局部放电监测仪, 由校准信号发生器发送标准脉冲信号, 在数字式局部放电监测仪上位机界面中分析采集的数据, 在标定界面设置标定值及步长用于标定放电量。

2.1.2 传感器标定

为有效检测室内局部放电时的伴生气体, 本文采用线性变化的电化学传感器, 利用电解池原理将待测气体组分浓度转化为电信号, 实现非电量至电量检测。由于不同环境下探头模组输出不一致, 需对其标定, 提高检测精度, 为此本文设计标定方案, 提高检测精度。

其标定过程为: 用聚四氟乙烯管依次连接标气瓶、减压阀、节流阀、流量计、标气罩, 将待标定探头模组置于标气罩内, 打开标气瓶取出标准气体并控制气体压力、流速, 在表盘仪处读取气体浓度,

当示数稳定且与流量计上显示浓度一致时标定完成。

2.2 系统补偿

2.2.1 温度补偿

温度对电化学传感器影响较大。化学法测量气体组分数据需要在一定准许范围内, 而温度的变化最大会造成传感器输出电流值 20% 的浮动变化, 无法满足气体组分分析法要求。在本文实验条件下, 局部放电所产生气体组分含量较小, 需以 ppm 作为基本测量单位, 硬件温度补偿无法精确至此数量级, 需引入单化学传感器温度补偿公式进行软件补偿。以 CO 电化学传感器的温度特性曲线为例, 如图 4 所示, 一般采用三阶最小二乘拟合。

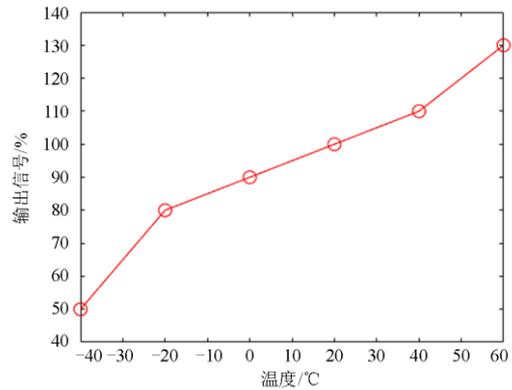


图4 CO 传感器温度特性曲线

Fig. 4 CO sensor temperature characteristic curve

传感器温度补偿算法适合采用矩阵法^[22], 进行三阶最小二乘拟合, 生成温度补偿矩阵。如式(1)、(2)所示。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & & & \\ & k_2 & & \\ & & \vdots & \\ & & & k_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & p_{n3} & p_{n4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $I_i (i=1, \dots, n)$ 为化学传感器在 20 °C 输出电流信号幅值; I'_i 为在 t 温度下传感器输出电流信号幅值; $K = k_i (i=1, \dots, n)$ 为化学传感器在 20 °C 输出电压信号幅值; t^2 、 t^3 为温度补偿 t 的高阶项; $P = P_{ij} (i=1, \dots, n, j=1 \dots 4)$ 为拟合曲线的系数。通过式(1)、式(2), 只需得到当前温度和当前传感器输

出值,就可以将其转化为 20 °C 时电化学传感器的标准输出。

2.2.2 交叉干扰

实际检测环境中,气体组分含量复杂,可以认为是混合气体,同种原理的传感器会受到化学性相似气体的干扰,导致测量数据不准确^[23],而本文的电化学传感器不存在其他组分干扰,即交叉系数 c 为已知的常数。以 20 °C 为例、CO 电化学传感器为例,其环境浓度量确定方法如式(3)所示。

$$N_{CO} = N'_{CO} - c \cdot N_{NO_2} \quad (3)$$

式中: N_{CO} 为环境温度为 20 °C 混合气体中一氧化碳真实浓度; N'_{CO} 为存在 NO_2 气体干扰下显示的浓度值。

2.2.3 灵敏度

如图 5 所示,电化学传感器的响应周期为 300 s,当环境中气体组分发生改变时,一个周期内输出一次待测组分信息,在 40~160 s 其输出特性稳定。

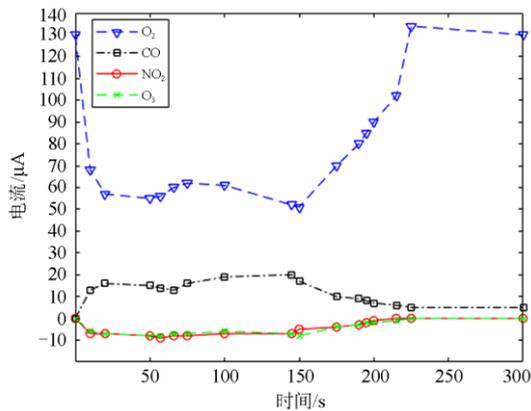


图 5 传感器灵敏度特性图

Fig. 5 Sensor sensitivity characteristic diagram

3 不同缺陷模型特性分析

本文依托于国家电力科学研究院武汉分院高压实验室开展实验,研究封闭空间内气体局部放电时组分的变化趋势,各缺陷模型稳定放电时持续采集组分信息直至气体完全电离。

3.1 实验步骤

1) 搭建空气分解实验平台,打开气室外壁节流阀,用真空泵抽至真空后用气泵向气室内注入空气,达到标准大气压时关闭节流阀(螺纹阀门一直处于关闭状态)。

2) 调压台开闸、合闸后对气室加压,同时打开局部监测仪观察室内放电情况:采用逐步加压法,当能观察到稳定放电现象时,保持电压不变。

3) 打开分解气室外壁螺纹阀门和气泵,待气体在分解气室和检测台间循环 15 min 后,开始采集气体组分信息,在上位机界面显示并存储。

4) 保持气室间两端电压不变,当能观察明显放电现象(观察持续电弧信号或在局部放电仪上放电电量突变)时,认为当前气室内气体完全电离,关断电,更换缺陷模型重复试验。

3.2 实验现象

如表 2 所示,本文以金属突出物缺陷为例介绍现场实验环境。记录当前针尖与下极板间距离,并用螺纹固定保持间距不变,将分解气室接入实验平台并逐步加压,同时打开局部监测仪检测室内放电电量,此时针间与极板间距为 4 mm,环境温度为 22~25 °C,空气相对湿度为 35%~38%。

如图 6、图 7 所示,当升压至 3.1 kV 时,气室内观察持续的闪络放电现象,此时放电量为 800 Pc。

表 2 金属突出物缺陷放电参数统计

Table 2 Statistics on discharge parameters of metal protrusion defects

故障缺陷类型	稳定局部放电		剧烈局部放电	
金属突出物缺陷	电压 3.1 kV	放电量 800 Pc	电压 3.1 kV	放电量 840 Pc



图 6 放电早期

Fig. 6 Early discharge

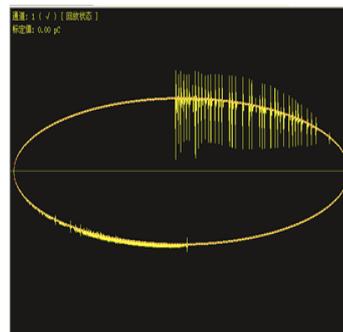


图 7 放电早期的放电信息

Fig. 7 Early discharge information

如图 8、图 9 所示, 持续加压约 25 h, 气室内拉弧越来越明显, 且室内放电现象越来越剧烈, 可认为室内气体组分完全电离。

因为使用金属-绝缘子间气隙缺陷、绝缘子表面金属污染缺陷进行现场实验时, 无法观察明显的放电现象, 故通过放电量表示气室内放电情况, 局部放电时上下极板与环氧树脂板紧密贴合。如表 3 所示, 金属-绝缘子间气隙缺陷达到稳定局部放电时



图 8 放电末期

Fig. 8 Late discharge

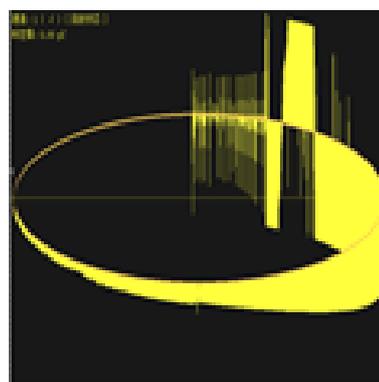


图 9 放电末期的放电信息

Fig. 9 Late discharge information

气室两端电压高达 15 kV, 电流为 2 A, 若继续提高电压导致电流由 2 A 突变至 10 A, 为保证实验环境安全, 以 15 kV 作为稳定局部放电电压, 环境温度为 22~28 °C, 空气相对湿度为 32%~47%; 绝缘子表面金属污染缺陷持续加压时, 电流与电压呈线性关系, 当气室间电压达到 5 kV 时, 电流高达 20 A, 为保证实验环境安全, 以 5 kV 作为稳定局部放电电压, 环境温度为 17~22 °C, 空气相对湿度为 20%~22%。

表 3 现场检测参数统计

Table 3 Statistics of on-site inspection parameters

金属-绝缘子间气隙缺陷	电压: 0 kV	电压: 15 kV	电压: 15 kV
	放电量: 2.3 Pc	放电量: 77.2 Pc	放电量: 85.8 Pc
绝缘子表面金属污染缺陷	电压: 0 kV	电压: 5 kV	电压: 5 kV
	放电量: 4.5 Pc	放电量: 129.3 Pc	放电量: 460.8 Pc

3.3 结果分析

3.3.1 金属突出物缺陷

如图 10 所示为金属突出物缺陷下 CO、NO₂、O₃ 气体浓度随时间变化曲线, 可以看出 CO、NO₂、O₃ 气体浓度随着放电延长浓度逐渐变多, CO 浓度

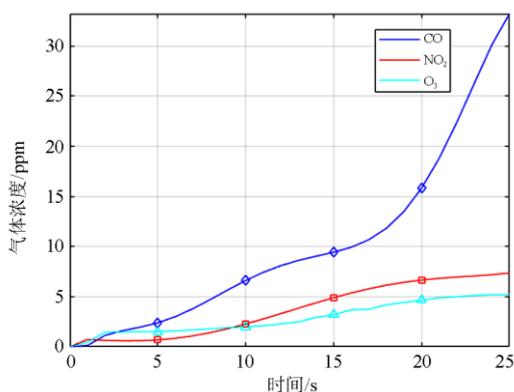


图 10 气体浓度时间曲线图

Fig. 10 Gas concentration-time graph

增长趋势越来越剧烈, 而 NO₂、O₃ 越来越稳定并接近饱和, 造成这样结果有两方面的原因: 一方面空气中 C 元素比率较高导致 CO 浓度较高, 且随着放电现象加剧, 含 C 元素气体达到分解条件产生更多的 CO, 另外一方面 NO₂、O₃ 相对活跃, 不断参与氧化还原反应达到动态平衡。

从图 11 可明显观察到放电完成后气室、气管呈黄色, 长时间放置后仍可在内壁观察到淡黄色物质, 本文怀疑气室可能存在 S 元素, 以 SO₂、H₂S 作为检测对象。从图 12 可知, 稳定放电前后可观察到少量 SO₂、H₂S 的产生, 逐步趋于饱和, 而气室内 O₂ 相对体积份数略微下降。

为提高气体组分采集可信度, 本文单次实验结束后金属突出物缺陷后将气室抽至真空, 充入空气保持极板间距不变, 重复性开展实验。如图 13 所示, 对比图 10 可知, CO、NO₂、O₃ 气体组分变化趋势基本一致, 放电时间内气体浓度略微变化: CO 下降约 4 ppm, NO₂、O₃ 增长约 1 ppm。重复实验过

程中，当观察到稳定局部放电时局部仪上放电量存在差异，导致相同时间内气体生成速率、含量产生差异，综合考虑放电电压、电流、温湿度等其他外界环境因素，气体检测平台采集气体组分信息具有良好的可靠性。

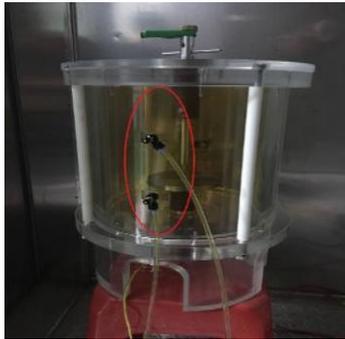


图 11 放电后气室情况

Fig. 11 Gas chamber after discharge

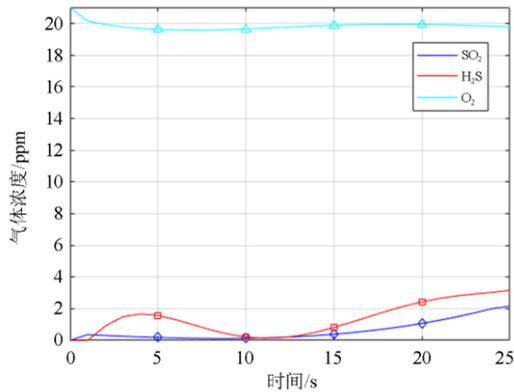


图 12 气体浓度-时间曲线图

Fig. 12 Gas concentration-time graph

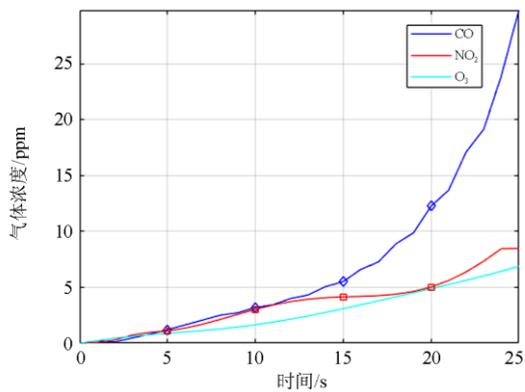


图 13 重复试验：气体浓度-时间曲线图

Fig. 13 Repeat test: gas concentration-time graph

3.3.2 金属-绝缘子间气隙缺陷

由图 14 可知，CO、NO₂、O₃ 随着局部放电的

进行浓度越来越高，CO 呈波浪状增长，NO₂ 增长趋势逐渐缓慢，O₃ 到达峰值后开始缓慢下降。在强电场作用下，CO 不易稳定存在，会参与组分间分解反应，导致 CO 不能稳步增长，但空气中 C 元素含量较高，参与反应消耗的 CO 小于产生的 CO，故 CO 含量一直增多；N 元素在 15 kV 电压下参与电离反应显著增加，导致 NO₂ 含量偏高，但电压造成的影响无法改变分解反应的趋势，NO₂ 最终达到动态平衡；在放电早期 O 元素参与电离逐渐产生 O₃，而随着放电的进行及 O₃ 活泼的化学性质，当 O₃ 浓度达到峰值后会参与电离过程导致浓度下降。

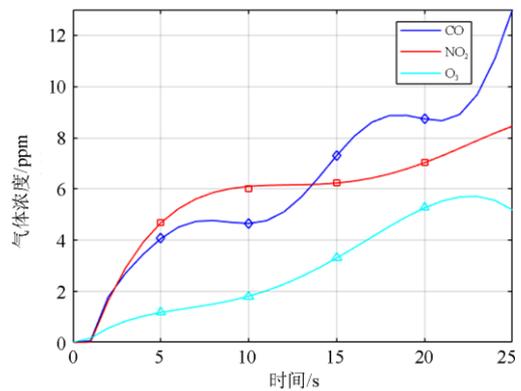


图 14 气体浓度-时间曲线图

Fig. 14 Gas concentration-time graph

3.3.3 绝缘子表面金属污染缺陷

由图 15 可知，CO、NO₂、O₃ 与局部放电时间呈正相关，CO 波峰式增加，NO₂、O₃ 接近线性增长，在放电结束时均有剧烈增长的趋势。空气中各元素参与电离过程导致特征组分气体浓度增加，随着时间的推移浓度越来越高，现场实验时该缺陷模型电流随电压线性增加，5 kV 时电流高达 20 A，该缺陷热效应不可忽视，放电时间越长热效应越剧烈

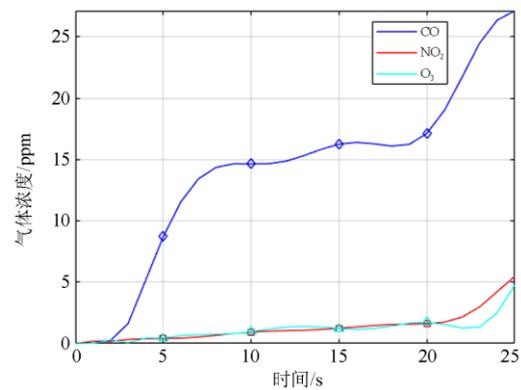


图 15 气体浓度-时间曲线图

Fig. 15 Gas concentration-time graph

促进气室内更多组分分解, 导致在放电末期特征气体浓度并未达到饱和, 相反出现爆发增长的趋势。

3.3.4 统计分析

为深入研究封闭环境下空气局部放电时气体组分变化规律, 本文考虑放电电压、放电量、放电时间、浓度间的关系, 如表 4 所示, 类别 1 代表金属突出物缺陷, 类别 2 代表金属-绝缘子间气隙缺陷, 类别 3 代表绝缘子表面金属污染缺陷。

由表 4 可知, 当发生局部放电时, 金属突出物缺陷对于击穿电压要求最低、绝缘子表面金属污染缺陷次之, 金属-绝缘子间气隙缺陷对放电电压最高, 但放电量会越来越小, 这表明在实际情况中, 金属突出物缺陷更加容易被击穿, 比如在电力设备内发现焊接带来的毛刺时, 需及时排查避免事故的

发生; CO、NO₂、O₃ 作为主要特征组分气体, 其浓度变化趋势可作为区分不同缺陷模型的依据, CO、O₃ 在金属突出物缺陷中变化最为明显, NO₂ 在金属-绝缘子间气隙缺陷变化最为明显, 但 CO 浓度增长趋势随着电压的升高而逐渐减小, NO₂、O₃ 在各缺陷模型中浓度增率基本保持不变, 同时, 金属突出物中 NO₂ 提前达到饱和、O₃ 在放电结束时达到饱和、CO 有饱和的趋势, 这表明各组分会随着局部放电的加剧逐渐达到平衡, 而金属-绝缘子间气隙缺陷、绝缘子表面金属污染缺陷各组分均有持续增长的趋势, 本文认为由于局部放电时间及放电过程中热效应加剧导致组分并未达到饱和, 如继续放电实验, CO、NO₂、O₃ 气体均会达到饱和。

表 4 各缺陷模型放电参数统计表

Table 4 Statistical table of discharge parameters of each defect model

缺陷类别	放电电压/kV	放电量/Pc	CO		NO ₂		O ₃	
			浓度 n/ppm	速率 v/(ppm/h)	浓度 n/ppm	速率 v/(ppm/h)	浓度 n/ppm	速率 v/(ppm/h)
1	3.1	840	33.2	1.4	7.3	0.3	5.2	0.2
	3.5	815	29.7	1.2	8.4	0.35	6.8	0.28
2	15	85.8	13	0.5	8.5	0.35	5.2	0.2
3	5	460.8	27.1	1.1	5.4	0.225	4.8	0.2

4 结论

本文设计 3 种缺陷模型模拟电力设备常见故障, 搭建局部放电实验平台并进行标定, 采用电化学检测技术收集持续放电条件下组分信息, 将脉冲电流法作为辅助测量手段, 根据放电量大小表征局部放电阶段, 研究封闭环境空气变化趋势, 得到以下结论:

1) 实验平台在标定时, 需要对设备的检测值进行标定, 且考虑环境中温度、交叉干扰、灵敏度的影响;

2) 空气发生分解时会稳定产生 CO、NO₂、O₃, 且不同缺陷模型稳定局部放电时放电电压、电流放电量不同, 对气体浓度、生成速率、增长趋势影响较大, CO 变化最为明显;

3) 随着局部放电加剧, 气室内热效应不可忽视, 其对空气电离分解起促进作用。

参考文献

[1] 陶诗洋, 冯义, 张天辰, 等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测装置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 145-149.
TAO Shiyang, FENG Yi, ZHANG Tianchen, et al. High-voltage switch cabinet partial discharge on-line monitoring device based on pulse current method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 145-149.

[2] 陈秀珍, 郭伟, 高凡夫, 等. 基于气体分解产物检测技术发现的 SF₆ 电气设备放电缺陷分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 87-92.
CHEN Xiuzhen, GUO Wei, GAO Fanfu, et al. Analysis of partial discharge defects in SF₆ electrical equipment by detecting gas decomposition products[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 87-92.

[3] 田凤兰, 张恩泽, 潘思蓉, 等. 基于特征量优选与 ICA-SVM 的变压器故障诊断模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 163-170.
TIAN Fenglan, ZHANG Enze, PAN Sirong, et al. Fault diagnosis model of power transformers based on feature quantity optimization and ICA-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 163-170.

[4] 韩赛赛, 刘宝柱, 艾欣. 基于 MCMC 方法和油色谱数据的变压器动态故障率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 1-8.
HAN Saisai, LIU Baozhu, AI Xin. Transformer dynamic failure rate model based on MCMC method and oil chromatographic data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 1-8.

[5] 李龙, 张迪, 汤俊, 等. 非等间隔 GM(1,1) 幂模型在变压器故障气体预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 118-124.
LI Long, ZHANG Di, TANG Jun, et al. Application of unequal interval GM (1,1) power model in prediction of dissolved uses for power transformer failure[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 118-124.

- [6] 张波, 吴锦鹏, 肖红, 等. 变电站内短路电流分流系数影响因素分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 720-728.
ZHANG Bo, WU Jinpeng, XIAO Hong, et al. Analysis of affecting factors on fault shunt coefficient in substation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 720-728.
- [7] 陈希. 开关柜内部绝缘缺陷的检测与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
CHEN Xi. Detection and research on the switchboard's internal insulation fault[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [8] ZHANG X X, TANG J Z, TANG J, et al. Relationship between UHF PD detection and apparent charge quantity of metal protrusion in air[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(4): 266-270.
- [9] YAMANO Y, ITO S, KATO K, et al. Charging characteristics and electric field distribution on alumina as affected by triple junctions in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2002, 9(2): 173-177.
- [10] ARUMUGAM S, SCHRODER P, NEUBAUER Y, et al. Dielectric and partial discharge investigations on ceramic insulator contaminated with condensable hydrocarbons[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(6): 2512-2524.
- [11] 唐炬, 梁鑫, 姚强, 等. 微水微氧对 PD 下 SF₆ 分解特征组分比值的影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 78-84.
TANG Ju, LIANG Xin, YAO Qiang, et al. Influence of oxygen and moisture on feature concentration ratios of SF₆ decomposition products under partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 78-84.
- [12] 唐炬, 胡瑶, 姚强, 等. 不同气压下 SF₆ 的局部放电分解特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2257-2263.
TANG Ju, HU Yao, YAO Qiang, et al. Decomposition characteristics of SF₆ under partial discharge at different gas pressures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2257-2263.
- [13] TANG J, LIU F, ZHANG X X, et al. Characteristics of the concentration ratio of SO₂F₂ to SOF₂ as the decomposition products of SF₆ under corona discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(1): 56-62.
- [14] 唐炬, 陈长杰, 刘帆, 等. 局部放电下 SF₆ 分解组分检测与绝缘缺陷编码识别[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 110-116.
TANG Ju, CHEN Changjie, LIU Fan, et al. Detection of constituents from SF₆ decomposition under partial discharge and recognition of insulation defect coding[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 110-116.
- [15] KUMPULAINEN L, HUSSAIN G A, LEHTONEN M, et al. Preemptive arc fault detection techniques in switchgear and control gear[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2013, 49(4): 1911-1919.
- [16] JI H X, MA G M, LI C R, et al. Influence of voltage waveforms on partial discharge characteristics of protrusion defect in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1058-1067.
- [17] 齐波, 李成榕, 郝震, 等. GIS 绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 101-108.
QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 101-108.
- [18] 胡辉, 杨旗, 陈卫鹏, 等. 电弧放电合成 NO 的等离子体化学动力学模型[C] // 中国电机工程学会高电压专业委员会 2009 年学术年会, 2009 年 4 月 20 日, 武汉, 中国: 1458-1464.
HU Hui, YANG Qi, CHEN Weipeng, et al. Plasma chemical kinetics model for synthesis of NO by arc discharge[C] // China Electrical Engineering Society High Voltage Professional Committee 2009 Academic Annual Meeting, April 20, 2009, Wuhan, China: 1458-1464.
- [19] YAGI S, TANAKA M. Mechanism of ozone generation in air-fed ozonisers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1979, 12(9): 1509-1519.
- [20] B E, M H, U K. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(11): 1421-1437.
- [21] 张晓星, 周磊, 裘吟君, 等. 针-板缺陷开关柜电气设备局部放电与空气分解组分的关联特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3948-3954.
ZHANG Xiaoxing, ZHOU Lei, QIU Yinjun, et al. Correlation character between switch gear's partial discharge quantity and air decomposition components under needle-plate defect model[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3948-3954.
- [22] 李剑. 局部放电灰度图象识别特征提取与分形压缩方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
LI Jian. Study on methods of recognition feature extraction and fractal compression for partial discharge gray intensity images[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [23] 牛勃, 马飞越, 丁培, 等. 臭氧浓度检测技术在开关柜局部放电检测中的应用[J]. 绝缘材料, 2018, 51(8): 69-74.
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Application of ozone concentration detection technology in partial discharge detection for switchgear[J]. Insulating Materials, 2018, 51(8): 69-74.

收稿日期: 2020-07-13; 修回日期: 2020-12-21

作者简介:

刘宝升(1966—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统安全监督管理等方面研究。E-mail: mian0734145@163.com

(编辑 周金梅)