

低碳型 SF₆ 气体综合检测技术与应用

周海龙, 魏存金, 金佳美

(国网安徽省电力有限公司阜阳供电公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要: 我国社会经济的不断发展, 带动了电力行业的发展。在电力行业快速发展的过程中, SF₆ 电气设备的使用量大量增加。在具体的使用过程中, SF₆ 电气设备内部经常会存在一定的潜伏性故障或者发生闪络等问题。常规的电气试验却很难发现设备存在的缺陷, 要想全面地判断设备是否存在相应的故障问题, 就需要采用 SF₆ 气体综合检测技术。基于此, 本文提出一种综合 SF₆ 气体检测、回收、净化技术, 可直接净化、回收、利用检测后的 SF₆ 气体, 并介绍了低碳型 SF₆ 气体检测技术原理及其应用情况。

关键词: 低碳; SF₆ 气体; 综合检测技术; 技术与应用

中图分类号: TM564

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2023.11.009

基于推动如期实现“双碳”目标的要求, 作为温室效应最强的气体——电气设备中的绝缘介质 SF₆ 气体, 如何在检测后完全回收, 助力“双碳”目标意义巨大。电力检修人员如何将温室效应最强的气体、在电气设备中应用日益广泛的绝缘介质 SF₆ 气体, 在检测后完全回收利用, 助力“双碳”目标实现, 成为设备检修人员的责任。为判断含 SF₆ 气体的电气设备是否健康运行, 需要定期对电气设备内的 SF₆ 气体进行检测, 目前市场上通用的检测仪器不具备自动回收检测后的气体回收功能, 有可能在检测过程中出现泄露或者直接排放到大气中的情况。因此, 对 SF₆ 混合气体检测技术进行探讨具有重要意义。

1 概述

SF₆ 气体具有良好的绝缘性能、灭弧性能, 在我国电力系统中主要应用于 GIS 气体绝缘开关设备、SF₆ 绝缘输电管路、SF₆ 断路器、SF₆ 负荷开关设备、SF₆ 变压器及 SF₆ 绝缘变电站。SF₆ 气体绝缘设备运行中如出现放电等潜伏性故障, 会使 SF₆ 产生 SO₂、H₂S、CO、CF₄ 等分解物。为判断含 SF₆ 气体的电气设备运行质量, 需定期检测电气设备内的 SF₆ 气体品质。

目前, 电力检修人员使用的检测仪器不具备直接回收检测后气体的功能, 导致检测后的气体不能妥善处置, 导致环境被污染和破坏。即使做到在检测过程中回收, 也需要在 SF₆ 检测装置上外接独立回收装置, 其操作过程繁琐, 同时也增加了检修人员的工作量和接触有毒气体的风险^[1]。直接排放到大气中也会造成环境污染和破坏, 具体影响如下。(1) SF₆ 气体在水分、杂质以及放电的影响下会产生多种有毒、有害、有腐蚀性的物质。排放至大气的 SF₆ 气体会极大地威胁电气设备的稳定运行和工作人员的健康安全。(2) SF₆ 是全球暖化系数最高的气体, 以 CO₂ 为例, SF₆ 气体是其 23900 倍, 排放 SF₆ 气体将产生极

强的温室效应。直接排放检测后的 SF₆ 气体会严重污染、破坏大气环境, 影响国家的“双碳”目标实现。(3) SF₆ 气体价格昂贵, 排放 SF₆ 气体本身就是资源浪费。

目前 SF₆ 电气设备的在电力系统中的应用俯拾皆是, 而市面上的 SF₆ 气体检测仪器不具备回收检测气体的功能, 检测后的气体大多直接排放或是间接回收。鉴于以上问题, 为改进 SF₆ 检测和尾气回收的方法, 降低 SF₆ 气体排放风险, 本文研究了一种低碳型 SF₆ 气体综合检测技术, 既能对 SF₆ 气体进行综合检测, 又能加以回收、循环利用。

2 低碳型 SF₆ 气体综合检测技术

低碳型 SF₆ 综合检测技术不仅要精准检测电气设备中的 SF₆ 气体, 还要净化回收检测后的气体, 以达到低碳环保的目标。

低碳型 SF₆ 综合检测技术包括 SF₆ 气体纯度、SF₆ 气体湿度和 SO₂、H₂S、CO、CF₄ 分解物的检测。

SF₆ 气体净化回收技术主要是对 SF₆ 电气设备检测进行尾气压缩存储、净化回收, 做到零排放。

2.1 SF₆ 气体纯度检测技术

SF₆ 气体纯度检测采用热导检测技术进行检测。由于不同气体的热传导能力不同, 测定不同气体的热导系数可计算该气体的含量。热电阻测温利用金属导体的电阻值变化曲线、温度变化曲线成正比这一特性进行测量。采用一对阻值相同的热电阻 R 和 M, R 和 M 分别位于 2 个分析室内, 其中, R 为参考热电阻, M 为测量热电阻。通过给予恒定的直流电源, 加热热导池内的热电阻。热电阻快速升温, 一部分热能被载气带走; 另一部分热能被池体吸收。热导池用特殊隔热材料利用热辐射技术最大限度地与外界环境隔离, 减少热辐射影响。当热电阻所产生的热量与散失的热能平衡时, 热电阻的温度、阻值就在一定数值上稳定。由于参比池、测量池通入的是具有相同热导率

的同一气体，因此两臂具有相同的电阻值，电桥因平衡而无电压信号输出。当有试样进入热电阻时，因待测组分混合气体的热导率变化，分析室中的散热情况会产生变化，热电阻阻值亦随之产生差异，打破电桥平衡，从而有电压信号输出，输出电压信号强度与样品浓度成正比，SF₆气体纯度就是依据此原理检测的SF₆纯气。

恒温法检测SF₆气体纯度。当气体浓度变化时，传感器工作温度也随之变化，此时调整传感器工作电流，利用电流热效应维持传感器温度恒定，消除在气体检测过程中热导传感器检测灵敏度低的缺陷，测量精度可达±0.1%之内。

2.2 SF₆气体湿度检测技术

SF₆气体湿度是衡量绝缘气体质量的重要指标之一。研究表明，SF₆气体湿度影响电气设备的绝缘性能、灭弧性能及其使用寿命，给电气设备的安全运行带来安全隐患。SF₆气体湿度检测方法有多种，但适宜于现场检测、检测速度较快的还是阻容法。阻容法测试SF₆气体湿度，具有反应速度快、重复性好、结构简单等优点。

阻容法检测是采用薄膜测湿传感器、电阻型测温传感器组合的方法。测湿传感器在分子膜上蒸镀电极膜片，上部的电极为多孔性材料，可以吸收水分，高分子薄膜吸收水分后，其介电系数发生变化，致使感湿组件的电容量发生改变。由电容量的变化量可得出相对湿度；测温传感器感知测湿传感器表面温度，经过微处理，从这两个参量计算得出露点；测湿传感器通过聚合物薄膜背靠背紧密靠近测温传感器，一方面便于测温传感器准确测取湿度传感器的温度；另一方面大幅度降低了外部电场产生的感应电容，故而测量精度得到了提高，具有测试范围广、测试精准、误差小、灵敏度高优点。

2.3 SF₆气体分解物检测技术

目前用于SF₆分解物检测的技术主要包括电化学传感器法、红外光谱法、气相色谱法、检测管法等，针对不同的分解物筛选合适的检测方法开展分解物检测，来达到所需精度要求。

(1) SF₆分解物——SO₂、H₂S、CF₄检测技术

红外光谱法可检测CF₄、H₂S、SO₂等多个组分，检测方法为利用红外光穿过待测气体进行检测^[2]。

根据量子力学原理，气体分子选择性吸收红外光束中某些频率的光子，其态势发生从低到高的跃迁，表现特征为：气体吸收红外光束能量，使得透射过气体的红外光束的强度变小。根据不同气体特定的吸收光谱不同的特性，当待测气体被特定波长的红外光束照射时，由于分子振动频率与其特性有关，该气体的分子只吸收特定频率对应波长处的光子能量，从而在对应波长处形成显著吸收峰，可知待测气体浓度与红外光的吸收量之间呈线性关系。根据这一特点，依据朗伯-比尔定律可定量分析SF₆分解物各组分。用红外光照射样气，当样气中含有

分解物时，其能量会降低，且吸收红外光的能量与其浓度有关，利用这一点可以测量分解物对红外光的吸收量，根据红外光的能量来判定浓度。

该方法具有检测用时短、重复性好、无须样品分离和预处理、可定性定量分析等优点。以CF₄为例，采用红外检测技术进行检测时，如图1所示。

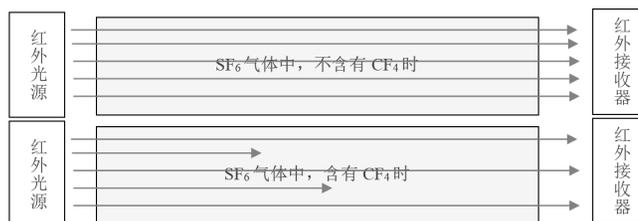


图1 红外光谱法检测原理

(2) SF₆分解物——SO₂、H₂S、CO检测技术

SO₂、H₂S、CO检测采用电化学传感器法。电化学传感器利用电解池原理，在传感器内部构造一个稳定的电能和化学能的转换机构，气体流经传感器内部发生氧化还原反应（电极反应）产生电信号，该电信号的电流*i*如式（1）所示。

$$i = n f \delta \quad (1)$$

式中：*n*为在电极反应过程中转移的电子数；*f*为法拉第常数； δ 为电极反应速度。

当气体的流速一定时， δ 与气体的浓度有关，通过检测电信号电流的强弱可进行定量分析。

该方法的优点是功耗低、体积小、传感器技术成熟稳定，对SO₂、H₂S、CO的最小检测精度可达到0.5μL/L。电化学传感器分析法得益于其操作简单、数据容易处理等优点，适于在现场快速、准确定位设备内部的故障点位和潜在故障。

2.4 SF₆检测气体净化回收技术

SF₆检测气体净化回收系统主要由进气阀、流量计、高精度差压传感器、自动控制系统、缓冲罐、电动针阀、压缩机、净化装置、快插接口、回收瓶组成。

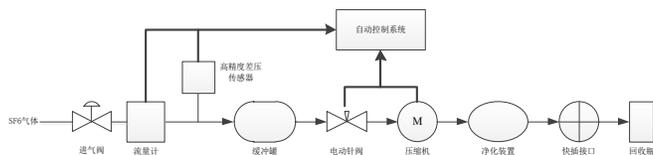


图2 检测、净化、回收系统结构

经湿度、纯度和分解物检测后的SF₆尾气进入缓冲罐，高精度差压传感器根据缓冲罐压力变化自动开启电动针阀、压缩机，将通过净化装置净化后的气体充入回收瓶。

(1) 缓冲罐

缓冲罐是回收系统的第一级回收容器，其优先选用不易腐蚀的高强度不锈钢材质，耐压强度应大于3.0Mpa，在缓冲罐两侧装有气路管道连接装置，在缓冲罐一侧安装压力传感器，压力达到一定的值时设置启动压缩机运转回收气体到回收瓶。

(2) 净化装置

电气设备中的绝缘气体 SF₆ 在运行过程中会混入水分、SF₆ 分解物。鉴于 SO₂、H₂S 等分解物有极强的腐蚀特性，选用耐酸碱腐蚀材料制作净化装置本体最为适宜。净化装置中的净化物为多种吸附剂，比如吸附水分的硅胶，吸附分解物的活性氧化铝、分子筛等。不同的吸附剂在工作后会产生性质变化，应当分层叠放。水分会降低活性氧化铝及分子筛对有害气体的吸附能力，故应在气体通道的上流放置硅胶、活性氧化铝，在气体通道的下游放置分子筛，由此可保证水分、SF₆ 分解物可以被完全吸附。

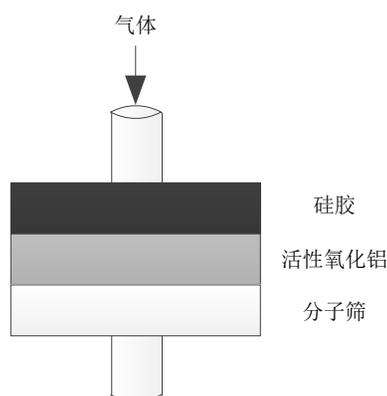


图3 吸附剂叠放示意图

(3) 低碳型 SF₆ 气体综合检测装置净化回收的实现

电气设备中的 SF₆ 气体经过四通连接器分别送入基于阻容法、恒温法、红外光谱法、电化学传感器法等传感器（检测器），从而测得气体的湿度、纯度、分解物。为了实现检测气体净化回收的自动化，缓冲罐进口的高精度差压传感器监测检测气体进入缓冲罐后的压力变化信号并上传到自动控制系统。自动控制系统根据差压信号自动开启电动针阀、压缩机，将通过净化装置净化后的气体充入回收瓶^[1]。

3 低碳型 SF₆ 综合检测技术对环保的意义

SF₆ 气体是一种温室气体，它的暖化系数为 CO₂ 的 23900 倍，是被国际环境保护京都会议明确表示为限制排放的气体。已累计有超过 70 个国家和地区针对温室气体排放进行了碳排放交易、征收排放税等措施，更有部分先进国家提出了 SF₆ 气体禁止使用时间，因此通过技术手段避免大量电器设备内的 SF₆ 气体在测量后排向大气，对环境造成污染，减少 SF₆ 气体的使用量和排放量势在必行。

3.1 低碳型 SF₆ 综合检测技术节省检测用气量

根据便携式 SF₆ 检测仪电化学传感器的工作原理，为保证检测数据的准确性，湿度传感器、纯度传感器、分解产物传感器，一般需要保持 0.2 ~ 0.3L/min 的检测流量，维持 3 ~ 5min，如果使用传统的单体类仪器，即使不考虑管路冲洗，切换仪器的损耗，完成一个电气设备气室的检测，需要从设备中释放

1.8 ~ 4.5L 的 SF₆ 气体。

低碳型 SF₆ 综合检测技术针对 SF₆ 气体中微水含量、纯度、分解物等多种检测需求，采用多模块综合测量模式，能够节省检测气体的用量。在常规检测模式下，低碳型 SF₆ 综合检测装置可同时进行微水、纯度、分解产物检测，待检测气体经过流量计，保持 0.3 ~ 0.5L/min 的检测流量，待检气体进入露点模组后，通过电磁阀组将气体分流到纯度模组和分解产物模组，维持 3 ~ 5min，即在使用低碳环保型 SF₆ 综合检测装置时，完成一个电气设备气室的检测，只需要从设备中释放 0.9 ~ 2.5L 的 SF₆ 气体。能够比传统检测模式减少 50% 的 SF₆ 气体使用量。

3.2 低碳型 SF₆ 综合检测技术的减排规模

低碳型 SF₆ 综合检测技术在实现现场检测 SF₆ 气体湿度、纯度、分解物的同时，通过增加净化回收装置、回收检测尾气，能够实现检测尾气的零排放。以一个普通的 220kV 变电站为例，其重要的电气设备气室约有 90 个，按运行规程，每年要进行一次 SF₆ 气体检测，使用低碳型 SF₆ 综合检测技术最多可减少 2.67kGSF₆ 气体排放，相当于减少了 63.8 吨的 CO₂ 排放或种植了 3653 棵树。

4 结语

综上所述，随着含 SF₆ 气体的电气设备运行时间的拉长，需要使用各种便携式仪器定量检测 SF₆ 气体纯度、湿度、分解物，跟踪监测可能存在故障设备，在这样的现实情况下，相对于将检测样本气体直接排空的传统便携式仪器，低碳型 SF₆ 综合检测设备未来在电气设备绝缘气体检测领域具有更高的推广价值。自本文所述低碳型 SF₆ 综合检测、回收、净化技术应用以来，实现了 SF₆ 检测气体零排放，减少了环境污染，达到了真正意义上的低碳、环保。

参考文献：

- [1] 周海龙, 徐振, 张智. 六氟化硫检测气体回收净化技术与应用 [C]. 电力行业化学检测技术及中心化验室建设论坛. 中国电力技术市场协会, 2015.
- [2] 张帆, 张立萍. 红外吸收光谱法在气体检测中的应用 [J]. 唐山师范学院学报, 2005, 27 (05): 62-64.
- [3] 国网安徽省电力有限公司阜阳供电公司, 国家电网有限公司. 一种环保型六氟化硫综合检测装置: CN202210417211.X[P].2022-07-22.

作者简介: 周海龙 (1969-), 男, 安徽阜阳人, 高级工程师, 大学本科, 主要从事化学分析和油气监督研究; 魏存金 (1990-), 男, 安徽阜阳人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事化学分析和高压试验研究; 金佳美 (1993-), 女, 安徽阜阳人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事化学分析和高压试验研究。