

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.026

六氟化硫气体质量现场一体化检测技术及装置研发

张晓琴, 杜子韦华, 朱洪斌, 余翔, 孙磊

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: SF₆气体具有优异的绝缘、灭弧性能,广泛应用于超、特高压气体绝缘开关、封闭式组合电器等设备中。文中针对SF₆气体全分析耗时长、步骤繁琐、无法在变电站现场开展等难题,首创了SF₆气体酸度、可水解氟化物、矿物油含量仪器化检测方法,创新了纯度、水分、毒性物质小型化稳流分析方法,发明了6项质量指标并行全自动检测方法及装置,实现了SF₆气体质量的现场精确快速检测。采用文中研发的方法及装置,单个SF₆气体样品检测时间由18 h缩短至40 min,检测用气量由100 L减少至20 L,且避免了SF₆高压钢瓶在现场与实验室之间来回运输,对保证重大工程建设周期、保障充气设备可靠运行具有重要意义。

关键词: 六氟化硫; 酸度; 可水解氟化物; 矿物油; 现场一体化检测

Research and Development of On-site Integrated Detection Technology and Device for Sulfur Hexafluoride Gas Quality

ZHANG Xiaoqin, DU Ziweihua, ZHU Hongbin, YU Xiang, SUN Lei

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: SF₆ gas is widely used in such equipment as extra and ultra-high-voltage gas insulated switchgear and gas insulated metal enclosed switchgear due to its excellent insulation and arc interruption performance. To address the challenges of time-consuming procedures, cumbersome steps and the infeasibility of on-site analysis at substation for comprehensive SF₆ gas analysis, in this paper the instrumental detection methods for SF₆ gas acidity, hydrolyzable fluorides, and mineral oil content are pioneered. The miniaturized steady-flow analysis methods for purity, moisture, toxic substances are innovated, the parallel fully automated detection method and device for six quality indicators are invented and the accurate and rapid on-site detection of SF₆ quality is achieved. With the use of method and device developed in this paper, the detection time of single SF₆ gas sample is reduced from 18 h to 40 min, the detection gas consumption is reduced from 100 L to 20 L, and the back-and forth transportation of high pressure SF₆ cylinders between the site and the laboratory is eliminated. This is of great significance for ensuring the construction schedule of major projects and guaranteeing the reliable operation of gas-filled equipment.

Key words: SF₆; acidity; hydrolyzable fluoride; mineral oil; on-site integrated detection

0 引言

六氟化硫(SF₆)气体具有优异的绝缘、灭弧功能,作为绝缘介质被广泛应用于超、特高压气体绝缘开关、封闭式组合电器等设备中,可显著缩小变电设备空间体积以及变电站占地面积^[1-5]。作为主

要的绝缘介质之一, SF₆气体质量会影响设备的整体绝缘性能,可能导致设备击穿或损毁,甚至还会危及人员安全及电网稳定运行^[6-12]。SF₆气体质量控制是防止此类事件发生的唯一方法^[13-14]。国内外相关标准(如:IEC 480:2019、IEC 376:2018、GB/T 8905—2012、GB/T 12022—2025)对电气设备内SF₆气体的酸度、可水解氟化物、矿物油含量、纯度、水分、毒性6项指

收稿日期:2025-01-09; 修回日期:2025-09-22

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2024104)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (J2024104).

标限值提出了明确要求^[15-16]。

针对SF₆气体的6项管控指标开展检测,传统方法主要存在以下3方面问题:①SF₆气体中的杂质分离技术依赖人工操作,因此SF₆气体酸度及可水解氟化物含量检测只能在实验室依赖人工手动开展,速度慢、耗时长、效率低;②SF₆气体中的矿物油含量依赖实验室大型仪器检测分析,但在变电站和实验室之间来回运输高压SF₆气瓶不仅费时费力,长途运输危险品还存在安全隐患;③SF₆新气质量验收需针对6项性能指标分别开展独立检测,即使除去运输时间且不包含毒性试验,也至少需要18 h,而毒性试验耗时更长,需要96 h才能完成^[17-22]。

随着电网规模不断扩大,SF₆充气设备数量逐年增加,SF₆气体质量检测工作量也随之急剧增加;此外,紧凑的工程建设计划也对SF₆气体质量检测的时效性提出了更高要求。例如在苏通GIL管廊工程建设过程中,短期内就面临800 T以上的SF₆新气验收任务及后续气体运维监督管控工作。因此受检测方式、效率和技术的制约,传统检测方法已难以满足电网建设对SF₆气体检测工作的现实需求^[23-30]。

文中针对电气设备中SF₆气体的6项质量管控指标,通过在气体酸度、可水解氟化物含量、矿物油含量、纯度、水含量、毒性物质方面开展并行全自动检测方法及装置的发明创新,实现了SF₆气体质量现场一体化检测分析。

1 酸度、可水解氟化物含量检测方法创新

1.1 传统酸度检测方法分析

依据电力行业标准DL/T 916—2005推荐方法^[31],现有SF₆气体中酸度检测用3份体积为2.00 mL、质量分数为0.01 mol/L的氢氧化钠溶液依次吸收10 L的SF₆气体中的酸性物质,再利用0.01 mol/L硫酸标准溶液滴定吸收后的氢氧化钠溶液,与滴定未吸收SF₆气体的氢氧化钠溶液所消耗的硫酸溶液体积作对比,从而计算出SF₆气体酸度。该方法必须在实验室开展,配制4种试剂,搭建一套吸收装置并进行酸碱滴定(试验装置实物见图1、2),使用玻璃器皿复杂多样,试验过程较为繁琐。

标准中滴定反应方程式为



依据化学反应平衡关系,滴定空白氢氧化钠溶液所需硫酸标准溶液体积为3.00 mL。假设SF₆气体酸度为0,那么滴定所需的硫酸标准溶液体积V₀为3.00 mL。



图1 酸度吸收装置实物图

Fig. 1 Diagram of acidity absorption device



图2 酸碱滴定使用器材

Fig. 2 Equipment of acid-base titration

进一步假设SF₆气体中酸度已远超准规定的上限值 0.2×10^{-6} (质量分数,合格的SF₆气体酸度应不大于该值)^[9],达到 0.4×10^{-6} ,即使10 L的SF₆气体中酸性物质完全被氢氧化钠溶液所吸收,计算滴定该溶液所需硫酸标准溶液的体积V₁。根据式(1)存在的平衡关系,计算得到V₁=2.939 2 mL,即从SF₆气体酸度为0到酸度达到远超标准所规定限值,两次滴定所需硫酸标准溶液体积仅相差 $\Delta V = V_0 - V_1 = 0.060 8 \text{ mL}$ 。已知1滴溶液体积约为0.05 mL,可见滴定过程中,即使只有一滴溶液的偏差,也会直接影响气体酸度指标合格与否的判定,从而导致最终结果出现极大误差。试验人员可通过增加SF₆气体通气量或降低硫酸标准溶液质量分数来尽可能缩小误差,但方法本身无法避免滴定操作技能要求高、耗费试验时间长、溶液吸收不完全、手动操作误差大等一系列缺陷。

1.2 传统可水解氟化物检测方法分析

现有电气设备内SF₆气体的可水解氟化物检测主要依据电力行业标准DL/T 918—2005推荐方法^[32],用0.1 mol/L氢氧化钠溶液吸收SF₆气体与碱液共同振荡水解产生的氟化物离子,再通过比色法或氟离子选择电极法测定氟离子质量分数。

与吸收酸性物质类似,检测可水解氟化物也需搭载吸收装置,见图3。吸收过程同样存在耗时长、目标组分吸收不完全等问题。此外,可水解氟化物的定量必须绘制工作曲线,需配制络合试剂、指示剂、标准溶液等23种试剂,导致传统检测方法极其繁

琐、耗时,且只能在实验室进行,无法在现场开展。



图3 可水解氟化物吸收装置图

Fig. 3 Diagram of hydrolyzable fluoride absorption device

1.3 一次吸收、分步测量的酸度及可水解氟化物含量检测方法研究

由1.1、1.2节分析可知,检测 SF_6 气体内酸度及可水解氟化物所采用的吸收原理一致,均是利用氢氧化钠溶液吸收气体中的目标组分。因此,为简化检测装置及流程,使其适用于在充气设备现场开展快速检测,文中提出了一种“一体化”检测方法,同时吸收 SF_6 气体内酸性物质与氟化物离子,再分步测量酸度和可水解氟化物含量,将两项指标检测过程整合,具体阐述如下。

基于气体组分在气、液两相中的分配定律,已知系统气压越大,溶于液相中的目标组分质量分数越高。文中创新性提出酸性物质、可水解氟离子的“微正压”吸收法,利用 SF_6 气体本身在吸收池内形成的压力,增大目标组分在氢氧化钠溶液中的可溶解质量分数,使其更易被碱性溶液吸收(反应),见图4。 SF_6 气体自进气口进入吸收池后,排气口先处于关闭状态,当压力传感器达到某一数值时,再开启排气口,使吸收池一直处于带压状态;此外,将气体吸收池设计为高度与径向尺寸之比为8:1的细长柱状,在提供满足要求的氢氧化钠溶液体积的前提下,为 SF_6 气体设置流量下气泡在吸收池中运行的最佳尺寸,使得气体与氢氧化钠溶液的接触面积最大,更好地促进目标组分的吸收。以上设计为 SF_6 气体中酸度、可水解氟化物的仪器一体化检测奠定基础。

为有效吸收 SF_6 气体中的酸性物质及可水解氟离子,选取0.01 mol/L的氢氧化钠稀溶液作为吸收液,根据pH值计算公式

$$\text{pH} = -\lg c(\text{H}^+) = 14 + \lg c(\text{OH}^-) \quad (2)$$

由式(2)可知,此时稀碱溶液的pH值为12。“pH值—质量分数”平移分析技术见图5。图5中,pH值基于离子质量分数变化的对数曲线可以看出,在pH值为12附近的“吸收区”内,pH值随溶液中 OH^- 离子质量变化的趋势较为平缓;此外,文中1.1节也提

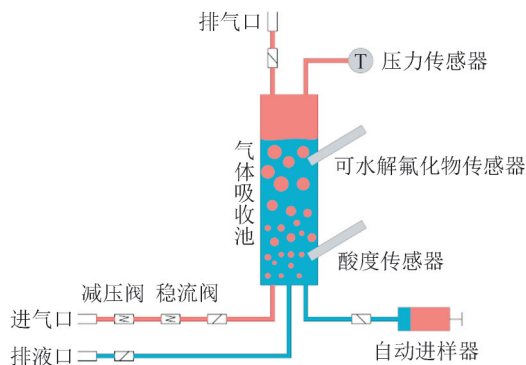


图4 SF_6 酸度、可水解氟化物一体化检测方法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of SF_6 acidity and hydrolyzable fluoride integrated detection method

到,标准中规定 SF_6 气体中酸度(以 HF 计)值应不大于 0.2×10^{-6} (质量分数),由于酸性物质含量较低,所能消耗的 OH^- 根离子非常有限。因此碱性溶液吸收酸性物质后溶液pH值变化较小,目前常用的酸度传感器无法准确检测出溶液中pH值的变化。

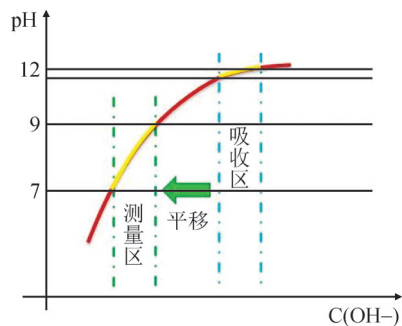


图5 “pH值—质量分数”平移分析技术

Fig. 5 Analysis technique depending on pH-concentration translation

针对以上问题,文中创新性提出“pH值—质量分数平移分析技术”。具体实施方案为:首先在吸收池内加入体积为 V_{OH^-} 的氢氧化钠溶液,再通入10 L SF_6 气体充分吸收,吸收完全后加入硫酸标准溶液直至吸收池内pH值在7.5左右,准确记录此时实际的pH值 pH_1 及加入硫酸标准溶液的体积 V_{H^+} ,加入缓冲溶液至淹没可水解氟化物传感器,读数得到溶液中可水解氟离子质量分数,即可得到 SF_6 气体中可水解氟化物质量分数。将吸收池内溶液完全放出,并清洗完全,再次加入体积为 V_{OH^-} 的氢氧化钠溶液,不再通入 SF_6 气体,而是加入同样体积的硫酸标准溶液 V_{H^+} ,再读出此时的pH值,记为 pH_2 ,由两次pH值的差值($\text{pH}_2 - \text{pH}_1$)即可计算得到 SF_6 气体吸收完后溶液中 H^+ 离子质量分数的变化,从而得到 SF_6 气体酸度。该方法巧妙地将由 SF_6 气体中酸性物质引起的溶液pH值变化区域由图5中的“吸收区”平移至“测量区”。显然,在测量区内 OH^- 离子质量分数变化引

起的pH值变化趋势更为显著,因此可利用传感器检测酸度,实现了酸度、可水解氟化物的仪器一体化分析。

2 矿物油含量检测方法创新

2.1 传统矿物油含量检测方法分析

传统矿物油检测依据电力行业标准 DL/T 919—2005 推荐方法^[33],将两个装有四氯化碳溶液的吸收瓶串联, SF₆ 气体样品通过吸收瓶,其中的矿物油被四氯化碳完全吸收,见图6,再通过红外光谱法测定该溶液在 2 930 cm⁻¹ 吸收峰的吸光度,根据工作曲线查出吸收液中矿物油浓度,从而计算 SF₆ 气体中矿物油含量,完成单次试验至少需 6 h。



图6 传统矿物油吸收系统示意图

Fig. 6 Diagram of mineral oil absorption device

该方法采用的矿物油分离手段具有一定局限性。一方面,气体经过溶液的吸收方式容易造成矿物油吸收不完全;另一方面,四氯化碳吸收液极易挥发,在吸收及检测过程中易损失,影响矿物油含量检测的准确性。此外,每次试验均需配制 8 种试剂,并重新绘制矿物油工作曲线,步骤极其繁琐,必须由专业的化学技术人员开展。因此,传统矿物油含量的检测同样依赖大量人工手动操作,须采用玻璃容器及实验室大型仪器,不便于在现场开展。

2.2 基于聚四氟乙烯(PTFE)半透膜分离技术的矿物油含量仪器化检测方法研究

已知矿物油为混合物,由多种有机长链大分子化合物组成,这些化合物分子大小远大于 SF₆ 气体分子及其余气体分子。以此为基础,文中提出了基于 PTFE 半透膜的 SF₆ 气体中悬浮矿物油微粒分离技术。孔径为 0.01 mm 的 PTFE 膜可保证气体顺利通过,而气体中的矿物油大分子被完全阻隔在膜的一侧,并在 PTFE 膜表面形成均匀油膜,将 2 930 cm⁻¹ 的单波长红外二极管发生器和红外检测器分别置于 PTFE 膜的两侧,油膜质量可通过红外检测器的信号衰减量同步测量出来,见图7。

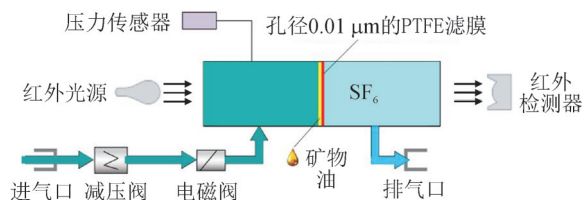


图7 SF₆气体中矿物油自动化检测方法原理图

Fig. 7 Schematic diagram of automated detection method for mineral oil in SF₆

针对红外检测矿物油含量过程中需要绘制工作曲线对照矿物油质量分数这一现状,文中创新提出了将分离出的油膜质量直接溯源到质量校准的定量技术,见图8。在 6 张滤膜表面喷洒一定质量分数的矿物油—四氯化碳溶液,6 张膜分别喷洒 1、2、3、4、5、6 次矿物油—四氯化碳溶液,待溶液完全挥发后恒重,分别准确称量以得到 6 张膜增加的重量,再利用红外分光光度计分别测定其吸光度,绘制吸光度与增重关系标准曲线,并将此标准曲线内置到矿物油检测仪器中,实现红外光谱所测吸光度与油膜上矿物油质量的准确对应。

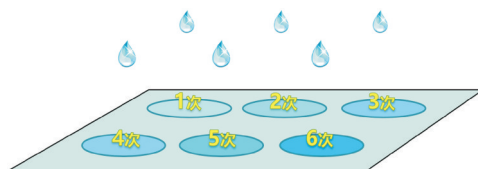


图8 溯源到质量的不同增量油膜制作过程

Fig. 8 Making process of oil films in different increments tracing to the mass

3 纯度检测方法创新

3.1 传统 SF₆ 气体纯度检测方法分析

SF₆ 气体纯度检测涉及空气、四氟化碳(CF₄)、六氟乙烷(C₂F₆)、八氟丙烷(C₃F₈) 4 种物质体积分数的检测,传统方法^[15]无论是便携式色谱仪或电化学原理仪器,都只能在现场开展空气、CF₄ 含量检测,六氟乙烷(C₂F₆)和八氟丙烷(C₃F₈)需在实验室采用精密仪器检测,因此必须在实验室进行。

3.2 SF₆ 气体中空气、四氟化碳、六氟乙烷、八氟丙烷现场检测方法创新

文中研发了基于 Porpark-Q、Porpark-N 多种新型材料的填充色谱柱,使得原先无法分离的 C₂F₆、C₃F₈ 能够分离。此外,将热导检测器和氢火焰离子检测器相结合以用于 SF₆ 气体纯度分析,并通过外标法定量,实现了 SF₆ 气体中空气、CF₄、C₂F₆、C₃F₈ 含量的现场准确分析,原理见图9。

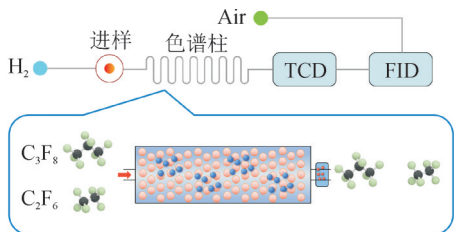


图9 SF₆气体纯度现场检测系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of field test system for SF₆ gas purity

4 六氟化硫一体化检测技术及装置

酸度、可水解氟化物、矿物油、纯度方法创新后,由于水分已有现场检测方法,要实现六氟化硫的现场检测,还有生物毒性的检测需要现场化。文中提出在现场首先筛查SF₆气体分解产物是否含有毒性物质以进行毒性判定。当未检测出毒性物质时,可无需将气体运至实验室开展生物毒性试验,因此该方法可简化现场毒性指标检测步骤,缩短检测时间。文中进一步设计了毒性物质分析腔体结构,将毒性检测功能小型化。对于SF₆气体中的水分检测,文中基于露点法原理,对现有检测方法进行改进,研制了微型制冷器件和配套镜面,方便嵌入一体化检测装置。

基于上述自主创新研发的SF₆气体酸度、可水解氟化物、矿物油含量检测方法,以及对现有毒性物质和水分检测方法的小型化、快速化、现场化改进,文中创新设计了可检测SF₆气体6项质量指标的“并行气路”模式,研制了SF₆气体一体化自动检测装置,系统原理图见图10。该装置可实现SF₆气体6项质量指标的一体化快速现场分析,使原来需要一个完整SF₆气体检测实验室来实现的功能高度集成到一个体积仅为0.21 m³的一体化仪器中,见图11。

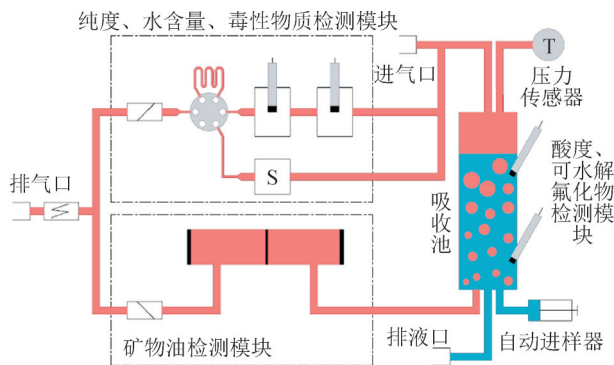


图10 SF₆气体质量一体化检测装置系统原理图

Fig. 10 System principle diagram of integrated detection device for SF₆ gas mass



图11 SF₆气体质量现场一体化检测装置实物图

Fig. 11 Real product image of on-site integrated detection device for SF₆ gas mass

5 数据校验及比对

5.1 纯度、水分、毒性物质试验结果比对

文中研发的SF₆气体质量现场一体化检测装置中,纯度、水分和毒性物质检测模块主要是基于传统检测方法加以现场化和小型化改进。为验证改进后检测方法的有效性,文中将所研发仪器检测数据与传统检测方法所得结果进行比对。取同一瓶SF₆新气,每项指标分别测量3次取平均值,结果见表1。显然文中所提改进后新方法与传统方法的检测结果具有较好的一致性。

表1 纯度、水分、毒性物质试验比对数据

Table 1 Comparison data of purity, moisture and toxic substance test

项 目	新方法3次 平均值	传统方法3次 平均值
空气体积分数/10 ⁻⁶	86.60	85.26
CF ₄ 体积分数/10 ⁻⁶	0.00	0.00
C ₂ F ₆ 体积分数/10 ⁻⁶	20.11	20.97
C ₃ F ₈ 体积分数/10 ⁻⁶	0.00	0.00
水分质量分数/10 ⁻⁶	2.24	2.45
毒性试验	无毒	无毒

5.2 酸度、可水解氟化物、矿物油含量试验结果比对

由于SF₆新气中酸度、可水解氟化物、矿物油含量基本比较低,接近于0,所以特选取多瓶SF₆回收气体进行比较,比对结果见表2。文中所提新方法与传统方法检测结果存在明显差异。从文中前述讨论可以看出,传统方法在检测过程中存在诸多不可避免的误差,不能作为验证新方法准确性的依据。

表2 酸度、可水解氟化物、矿物油试验比对
Table 2 Comparison data of acidity, hydrolyzable fluoride, mineral oil test

序号	酸度质量 分数/10 ⁻⁶		可水解氟化物 质量分数/10 ⁻⁶		矿物油质量 分数/10 ⁻⁶	
	新方法	传统方法	新方法	传统方法	新方法	传统方法
1	0.38	0.15	0.63	0.38	1.78	0.96
2	0.12	0.29	0.75	0.52	1.56	1.05
3	0.17	0.35	0.19	0.10	0.66	0.29
4	0.40	0.30	0.54	0.77	2.62	1.87
5	0.33	0.16	0.49	0.28	1.23	0.64

为验证文中所提新方法在检测酸度、可水解氟化物、矿物油方面的准确性,文中作者已分别发

明了SF₆气体中氟化氢(HF)标准气^[32]、矿物油含量标准气配置方法及装置^[33]、可水解氟化物含量直接定量校验方法^[34-35]。经校验,新方法具有较好的准确性和可靠性,相关方法均已获得发明专利授权,文中不再赘述。

5.3 一体化检测装置技术先进性对比

围绕SF₆气体质量管控的6项指标,包括酸度、可水解氟化物、矿物油、纯度(空气、CF₄、C₂F₆、C₃F₈)、水分、生物毒性,文中将所提新方法与传统检测方法进行综合对比,结果见表3。可见新检测方法用气量少、检测时间大幅缩短、试验环境更为灵活、自动化程度更高,可以更好地完成一线生产工作任务^[9-10]。

表3 技术先进性对比情况
Table 3 Technological advancement comparison

指标	国内外传统技术水平			文中技术水平		
	检测方式	检测时间/h	用气量/L	检测方式	检测时间	用气量
酸度	实验室分项吸收后由人工手动滴定或仪器检测	5.00	10	现场自动吸收后由	总时间仅 40 min	总用气量 只需 20 L
可水解氟化物		6.00	40	一体化装置自动		
矿物油		6.00	30	检测		
纯度	仪器化检测,但现场只能检测空气和CF ₄ 含量	0.50	5	现场双气路并行同时自动化检测		
水分	仪器化现场检测	0.25	10			
生物毒性	实验室生物毒性试验	96.00	300	现场毒性物质筛查		
SF ₆ 新气质量全分析	现场无法完成检测			现场一体化自动快速准确检测		

6 结论

文中针对传统方法在检测SF₆气体6项管控指标时存在的问题,创新性提出了SF₆气体质量现场一体化检测技术并研发检测装置,与传统检测方法相比存在以下优势:

1)所提方法可实现SF₆新气6项验收指标的现场一体化快速检测,将一个SF₆气体样品的检测总时间缩短至仅需40 min,与传统方法至少18 h(不包括生物毒性试验)相比,检测效率提升了约27倍。

2)所提检测方法采用气路并行检测,因此所需SF₆气体用气量大幅降低,仅需20 L气体即可完成所有项目检测,提高了气体利用率,从而可减少SF₆温室气体排放。

3)所研发装置操作简便,与传统方法相比,此前传统试验方法须有化学基础的专业人员才能开展,而对于一体化检测装置,零专业背景技术人员仅需一小时以内简单培训即可完成SF₆气体全分析工作。

4)一体化检测装置携带方便,体积仅相当于两个

计算机主机大小,可携带至有气体检测需求的工作现场直接使用,无需将SF₆气体钢瓶运输至专业SF₆检测实验室,从而避免了高压钢瓶远距离运输的安全风险。

目前,文中的成果已经在苏通 GIL 综合管廊、1 000 kV 交流特高压淮南—南京—上海、蒙西—天津南,±800 kV 蒙西—长沙、锡盟—泰州等6个工程建设过程中得到应用,在较短时间内即可完成大批量SF₆新气质量验收,确保了国家重点工程建设进度,对推动行业技术进步、保障电力安全可靠供应等方面发挥了重要作用。

参考文献:

[1] 曾福平,朱可馨,冯孝轩,等. SF₆故障分解及特征组分检测研究进展[J]. 高电压技术,2023,49(8):3240-3257.
Zeng Fuping, Zhu Kexin, Feng Xiaoxuan, et al. Progress in SF₆ decomposition and detection of its characteristic decomposition components[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3240-3257.
[2] 尹凯强,陈 功,安韵竹,等. 气压和温度对SF₆气体绝缘性能的影响[J]. 电瓷避雷器,2023,23(2):71-77.
Yin Kaiqiang, Chen Gong, An Yunzhu, et al. Influence of pressure

- and temperature on SF₆ insulation performance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023, 23(2): 71-77.
- [3] 王秀君, 罗林, 于森, 等. 基于马尔可夫转移场的SF₆分解气体紫外吸收光谱检测[J]. 浙江电力, 2025, 44(3): 116-124.
Wang Xiujun, Luo Lin, Yu Miao, et al. Detection of SF₆ decomposition gases using ultraviolet absorption spectroscopy based on Markov transition fields[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(3): 116-124.
- [4] 陆森, 吴欣烨, 胡海敏, 等. SF₆变压器气体冷却循环风机智能监测系统[J]. 变压器, 2024, 61(12): 61-67.
Lu Miao, Wu Xinye, Hu Haimin, et al. SF₆ transformer gas cooling circulating fan intelligent monitoring system[J]. Transformer, 2024, 61(12): 61-67.
- [5] 李昊天, 曾福平, 颜伊鸣, 等. Ag表面对SF₆初级分解产物氧化反应的影响作用研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2841-2850.
Li Haotian, Zeng Fuping, Yan Yiming, et al. Study on the effect of Ag surface on Oxidation of SF₆ primary decomposition products[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2841-2850.
- [6] 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.
Tang Ju, Yang Dong, Zeng Fuping, et al. Research status of SF₆ insulation equipment fault diagnosis method and technology based on decomposed components analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 41-54.
- [7] 马径坦, 张乔根, 游浩洋, 等. SF₆电气设备中微水对固体绝缘材料闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1822-1827.
Ma Jingtan, Zhang Qiaogen, You Haoyang, et al. Influence of moisture on flashover voltage of solid insulating materials in SF₆ electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1822-1827.
- [8] 马凤翔, 赵跃, 赵新瑜, 等. 基于紫外光声光谱的SF₆特征分解组分SO₂的高灵敏度检测技术[J]. 光子学报, 2023, 52(3): 198-206.
Ma Fengxiang, Zhao Yue, Zhao Xinyu, et al. High sensitivity detection technology of SF₆ characteristic decomposition component SO₂ based on UV photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3): 198-206.
- [9] Okubo H, Beroual A. Recent trend and further perspectives in electrical insulation techniques in relation to SF₆ substitutes for high voltage electric power equipment[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 34-42.
- [10] 徐长福, 赵新冬, 梁伟, 等. 基于数字孪生技术的GIL综合管廊气体泄漏与排除全过程风险性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 160-171.
Xu Changfu, Zhao Xindong, Liang Wei, et al. Risk assessment of gas leakage and elimination in GIL utility tunnels based on digital twin technology[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 160-171.
- [11] 张博雅, 唐念, 孙东伟, 等. 新型SF₆替代气体全氟甲基乙烯基醚的绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 165-170.
Zhang Boya, Tang Nian, Sun Dongwei, et al. Research on insulation performance of a new CF₃OCF=CF₂ alternative gas to SF₆[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 165-170.
- [12] 谢声益, 吴芳芳, 朱珉, 等. 三相共箱气体绝缘输电线路多物理场数值仿真分析[J]. 浙江电力, 2025, 44(8): 111-118.
Xie Shengyi, Wu Fangfang, Zhu Min, et al. Numerical simulation and analysis of multi-physics fields in three-phase enclosed GIL[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(8): 111-118.
- [13] 王昊, 张长虹, 杨旭, 等. 420 kV及以上高压断路器电寿命试验中SF₆气体分解产物及其影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 88-95.
Wang Hao, Zhang Changhong, Yang Xu, et al. Study on the effect of SF₆ gas decomposition products in electrical endurance test of 420 kV and above circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 88-95.
- [14] 杨韧, 张晓, 彭雅楠, 等. SF₆断路器开断过程中固体分解产物研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 21-27.
Yang Ren, Zhang Xiao, Peng Yanan, et al. Study on solid decomposition products during interruption period of SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 21-27.
- [15] GB/T 12022—2025 工业六氟化硫[S].
GB/T 12022—2025 Industrial sulfur hexafluoride[S].
- [16] GB/T 8905—2012 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则[S].
GB/T 8905—2012 The guide for management and measuring SF₆ gas in electrical equipment[S].
- [17] 张国治, 胡栩焜, 邓广宇, 等. SF₆及SF₆故障分解气体与局部放电柔性特高频天线传感器基底相容性实验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4050-4062.
Zhang Guozhi, Hu Xukun, Deng Guangyu, et al. Experimental study on substrate compatibility of SF₆ and SF₆ fault-decomposing gases with partial discharge flexible UHF antenna sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4050-4062.
- [18] 张利燕, 杜黎明, 张若飞, 等. 六氟化硫气体酸度测定干扰因素分析[J]. 河北电力技术, 2012, 31(3): 30-32.
Zhang Liyan, Du Liming, Zhang Ruofei, et al. Influencing factors analysis on sulfur hexafluoride acidity determination[J]. Hebei Electric Power, 2012, 31(3): 30-32.
- [19] 梁真镇, 付梦月, 高英武, 等. 六氟化硫中可水解氟化物的吸附试验及分析[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2011, 9(4): 89-90.
Liang Zhenzhen, Fu Mengyue, Gao Yingwu, et al. Adsorption test and analysis of hydrolysable fluorides in sulfur hexafluoride[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011, 9(4): 89-90.
- [20] Van Heyst A, Vanlancker M, Vercammen J, et al. Analysis of mineral oil in food: results of a belgian market survey[J]. Food Additives & Contaminants. Part A, Chemistry, Analysis, Control, Exposure & Risk Assessment, 2018, 35(10): 2062-2075.
- [21] 唐亮. 六氟化硫电气设备特征气体气相色谱分析方法的研究[J]. 分析仪器, 2016(3): 57-60.
Tang Liang. Study on method for determination of characteristic gas in sulfur hexafluoride SF₆ electrical equipment by gas chromatography[J]. Analytical Instrumentation, 2016(3): 57-60.
- [22] 顾琦, 仲林林. 基于一维电弧模型的SF₆混合气体灭弧性能评价[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 140-146.

- Gu Qi, Zhong Linlin. Evaluation of the interruption capability of SF₆ gas mixtures based on one-dimensional arc model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 140-146.
- [23] 陶风波, 王 帅, 贾勇勇, 等. 特高压气体绝缘金属封闭式组合电器的现场冲击耐压试验方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3936-3943.
- Tao Fengbo, Wang Shuai, Jia Yongyong, et al. Method of on-site tests for the withstand voltage of ultra-high-voltage GIS lightning impulse[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3936-3943.
- [24] 赵 科, 王静君, 刘 通, 等. 直流 GIL 绝缘设计及局部放电检测研究进展[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 98-102.
- Zhao Ke, Wang Jingjun, Liu Tong, et al. A review of insulation design and partial discharge detection of DC gas insulated line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(5): 98-102, 108.
- [25] 薛光辉, 王一凡, 于 浩, 等. 基于恒定应力加速寿命试验的 SF₆ 气体密度表可靠性研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 194-202.
- Xue Guanghui, Wang Yifan, Yu Hao, et al. Reliability study of SF₆ gas density meter based on constant stress accelerated life test[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 194-202.
- [26] 赵丽娜, 赵丽娟, 宁子达, 等. 一种 SF₆ 压力指针式仪表的定位识别方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(2): 210-216.
- Zhao Lina, Zhao Lijuan, Ning Zida, et al. A positioning recognition method for SF₆ pressure pointer meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 210-216.
- [27] 范建斌, 李 鹏, 李金忠, 等. ±800 kV 特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 1-7.
- FAN Jianbin, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Study on key technology of ±800 kV UHVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 1-7.
- [28] 齐 波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
- Qi Bo, Zhang Guixin, Li Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
- [29] 张 彬, 张周胜, 于瑞冬, 等. 直流均匀电场下金属微粒运动状态与识别[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 265-273.
- Zhang Bin, Zhang Zhousheng, Yu Ruidong, et al. Motion state and identification of metal particles in a uniform DC electric field[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2025, 40(1): 265-273.
- [30] 杨 帆, 高有华. Mayr 电弧模型下 GIS 中快速暂态过电压的仿真分析[J]. 电器与能效管理技术, 2024, (2): 28-32.
- Yang Fan, Gao Youhua. Simulation analysis of fast transient overvoltage in GIS under Mayr arc model[J]. 2024, (2): 28-32.
- [31] DL/T 916—2005 六氟化硫气体酸度测定法[S].
- DL/T 916—2005 Determination of acidity in sulphur hexafluoride[S].
- [32] DL/T 918—2005 六氟化硫气体中可水解氟化物含量测定法[S].
- DL/T 918—2005 Determination of hydrolyzable fluoride content in sulfur hexafluoride gas[S].
- [33] DL/T 919—2005 六氟化硫气体中矿物油含量测定法(红外光谱分析法)[S].
- DL/T 919—2005 Determination of mineral oil content in sulphur hexafluoride by infrared spectrum method[S].
- [34] 国家电网公司, 江苏省电力公司, 江苏省电力公司电力科学研究院, 山东中惠仪器有限公司. 一种六氟化硫气体中可水解氟化物含量标准气的配制装置及方法: CN104793277A[P]. 2015-07-22.
- State Grid Corporation of China, Jiangsu Electric Power Company, Jiangsu Electric Power Research Institute, Shandong Zhonghui Instrument Co., Ltd. A preparation device and method for a standard gas with specified hydrolyzable fluoride content in sulfur hexafluoride: CN104793277A[P]. 2015-07-22.
- [35] 国家电网公司, 江苏省电力公司, 江苏省电力公司电力科学研究院, 山东中惠仪器有限公司. 一种 SF₆ 气体中矿物油含量标准气的配制装置及方法: CN104807682A[P]. 2015-07-29.
- State Grid Corporation of China, Jiangsu Electric Power Company, Jiangsu Electric Power Research Institute, Shandong Zhonghui Instrument Co., Ltd. A preparation device and method for a standard gas of mineral oil content in SF₆ gas: CN104807682A[P]. 2015-07-29.
- 张晓琴(1989—), 女, 硕士研究生, 从事电力绝缘介质智能化分析方法研究(通信作者)(E-mail: 15850736276@126.com)。