

电气设备用全氟异丁腈环保绝缘气体检测技术

何 洁¹, 颜湘莲¹, 刘 伟², 黄 印¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:全氟异丁腈(C₄F₇N)具有优异的绝缘性能和较低的温室效应,是当前用于电气设备绝缘的主流环保气体。由于 C₄F₇N 与 SF₆ 的理化特性差异较大,现有 SF₆ 检测技术及设备无法满足 C₄F₇N 混合气体的应用需求。本文参考运行设备中 SF₆ 气体的带电检测技术,开展 C₄F₇N/CO₂ 气体的检测方法研究。提出了采用基于高精度氦离子化检测器的气相色谱检测气体纯度和组分、采用热导原理检测 C₄F₇N 占比和阻容传感器法监测微水含量、采用非分光红外技术结合朗伯-比尔定律定量监测漏气故障等现场检测方案,开发了相应的检测装置,并对气体状态开展检测和验证试验。结果表明:各项检测方案都具有较高的检测精度,可支撑 C₄F₇N 环保电气设备的运维检测和现场应用。

关键词:全氟异丁腈;环保电气设备;纯度;混合比;泄漏

Detection technology of environment-friendly insulating gas heptafluoroisobutyronitrile for electrical equipment

HE Jie¹, YAN Xianglian¹, LIU Wei², HUANG Yin¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: Heptafluoroisobutyronitrile (C₄F₇N) has excellent insulation properties and low greenhouse effect, and is currently the mainstream environment-friendly gas used for electrical equipment insulation. Because of the large differences in physical and chemical properties between C₄F₇N and SF₆, the current SF₆ detection technology and equipment can not meet the application requirements of C₄F₇N gas mixture. In this paper, the detection method of C₄F₇N/CO₂ gas mixture was studied by referring to the live detection technology of SF₆ gas in operating equipment. The field detection schemes were proposed, which included using gas chromatography to detect purity and composition of gas based on high-precision helium ionization detector, using thermal conductivity principle to detect C₄F₇N ratio, using resistance capacitance sensor method to monitor micro-water content, and using non-spectral infrared technology combined with Lambert-Beer rule to quantitatively monitor gas leakage fault, and the corresponding detection devices were developed to carry out the detection and verification test for gas state. The results show that all detection schemes have high detection accuracy and can support the operation and maintenance testing and field application of C₄F₇N environment-friendly electrical equipment.

Key words: heptafluoroisobutyronitrile; environment-friendly electrical equipment; purity; mixing ratio; leakage

0 引言

自 20 世纪 50 年代以来, SF₆ 气体因具有优异性能被作为灭弧和绝缘介质广泛应用于电气设备中。但 SF₆ 是一种强温室效应气体,其全球升温潜势(GWP)达到 CO₂ 的 24 300 倍,且大气寿命约为 3 200 年, SF₆ 的排放对大气环境可能带来永久性的破坏,因此在 1997 年通过的《京都议定书》中其被列为限制排放的温室气体之一,在使用过程中需要严格加

基金项目:国家电网有限公司科技项目(GY7122007)。

以控制^[1-2]。随着国际上对低碳、减排等环保要求的提高,化工行业、电力行业相继制定了削减甚至禁止使用 SF₆ 的计划^[3-5]。我国的 SF₆ 气体绝缘设备规模高居世界第一, SF₆ 气体用量占全球的 40% 以上,而随着输、变、配电系统的高速发展,尤其是超/特高压电气设备的应用, SF₆ 的使用量仍在持续增长,因此开发应用基于环保绝缘气体的电气设备成为电力行业关注的热点。

近年研究表明,全氟异丁腈(C₄F₇N)气体是最具潜力的 SF₆ 替代环保气体,其绝缘强度达到 SF₆ 的

2倍以上, GWP为 SF_6 的10%以下^[6-8]。将 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 与 CO_2 的混合气体用于电气设备的可行性已被充分论证, 国外GE公司和ABB公司研发了采用 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体的145/170 kV气体绝缘开关设备(GIS)和断路器、245 kV电流互感器、420 kV气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)和充气柜(环网柜), 均投入了工程应用^[9-10]。2017年以来, 国内多家科研院所、高校和设备制造企业陆续完成了 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体绝缘电气设备的设计研发、生产制造、示范应用和推广落地, 先后研制成功 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体绝缘的110 kV环保输电管道、12 kV环保环网柜、12 kV开关柜、10 kV气体绝缘变压器、126 kV GIS母线等设备并实现工程应用, 目前正积极开展110~500 kV变电站用 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体绝缘环保断路器、GIS和GIL的研制和应用研究^[11-13]。

为了全面支撑 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 环保电气设备的工程应用, 提供运维检测技术方案和现场应用依据, 本文开展 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 气体的带电检测方法研究, 包括气体的纯度及组分检测、 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合比及微水检测和泄漏检测, 研制出相应的检测装置并对气体状态开展检测和验证试验。

1 气体纯度及组分检测

1.1 技术原理及方案

$\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体纯度决定其绝缘性能, 应用于电气设备前应对气体成分进行检测, 确定气体纯度。电气设备在运行中若发生放电、过热等故障时, $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体会分解产生气体, 对分解气体的组分进行检测有助于判别故障类型和严重程度。目前 SF_6 气体纯度及组分的检测方法有化学检测管法、传感器法、气相色谱法、光声光谱法和红外光谱法等^[14]。对于 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 的组分检测, 目前常用的检测方法有热导检测器法、红外光谱法等, 但不能检测其分解产物的特征组分, 而且检测效率较低、检出限不理想。

参考 SF_6 气体纯度及组分的检测, 选择气相色谱法检测 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 纯度及其混合气体的分解产物组分, 一次进样就可以完成 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体中各种杂质的分析, 避免多次进样引入的仪器和人为误差, 具有耗气量少、检测限低、准确性高、分析时间短等优点。

利用气体作为流动相的气相色谱法, 要求载气和被测物不发生作用, 一般采用氢、氦等惰性气体来载送试样进入色谱柱中。被测气体进入色谱柱

后, 由于不同气体在流动相和固定相间的分配系数不同, 在两相间的溶解、吸附等作用力不同, 通过反复多次吸附和脱附的分配过程, 使原来分配系数差异微小的各组分产生较大的分离效果进而实现分离, 并按照被分离的时间顺序流入检测器中检测并形成色谱流出曲线, 实现定量检测。

1.2 检测装置研制及测试

首先, 针对特定的杂质组分选择合适的色谱柱进行分离, 避免杂质之间的干扰。一方面要考虑采用不同的合成技术路线生产 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 时产生的杂质; 另一方面要考虑在电气设备发生内部放电或过热故障时 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 混合气体的分解产物, 大致可分为两类: 一类是与缓冲气体 CO_2 相关的产物, 如 CO 、 CO_2 、 $\text{C}_2\text{O}_3\text{F}_6$; 另一类是与 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 自身相关的产物, 如全氟烷烃(CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_8 、 C_3F_6 、 C_2F_4 、 C_4F_6 、 C_4F_8 、*i*- C_4F_{10})和腈类物质(CF_3CN 、 $\text{C}_2\text{F}_5\text{CN}$ 、 CNCN)。

其次, 针对 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 气体中较低含量的杂质选择合适的检测器, 以满足更高的检出限要求。常用的检测器包括热导检测器(TCD)、电子捕获检测器(ECD)、氦离子化检测器(HID)、脉冲放电氦离子化检测器(PDHID)、质谱检测器(MSD)、火焰光度检测器(FPD)和氢火焰离子化检测器(FID)^[15]等。其中PDHID是基于潘宁效应(Penning effect), 利用 β 射线、高压直流放电、脉冲放电、光辐射等能量将被测组分电离, 再收集电离后的微离子流并放大形成电流信号, 对电流信号进行记录并分析, 获得不同组分的检测结果。选用PDHID替代常用的热导检测器可提高检测灵敏度和检测限。

最后, 通过对各个切换阀进行合理切换, 简化色谱分析流程, 缩短色谱分析时间, 提高色谱分析的工作效率。

本研究基于PDHID的气相色谱原理研发了 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 气体成分检测装置, 采用了4个切换阀和2个PDHID, 第一色谱柱为 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 专用分析预柱, 第二色谱柱为 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}$ 专用分析柱、第三色谱柱为氟碳化合物分析毛细柱。

气相色谱检测流程如图1所示, 图中1~4为切换阀, 5~7为色谱柱, 8~12为载气, 13~14为定量管, 15是样品进气口, 16是样品出口, 17~20为针阀, 21为三通, 22为检测器1, 23为检测器2。切换阀1采用自动进样方式, 经过定量管13的 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体中氟碳化合物利用色谱柱7来分离,

进入检测器1分析,此时 C_4F_7N 和 CO_2 被放空。切换阀3为十通反吹进样方式,经过定量管14的 C_4F_7N/CO_2 混合气体,先通过色谱柱5实现样品的预分离,放空 CO_2 气体,使得 N_2 、 CO 、 CF_4 、 CO_2 、 C_2F_6 先进入色谱柱6进行分离再由检测器2分析。最终可实现10余种气体组分的检测分析。

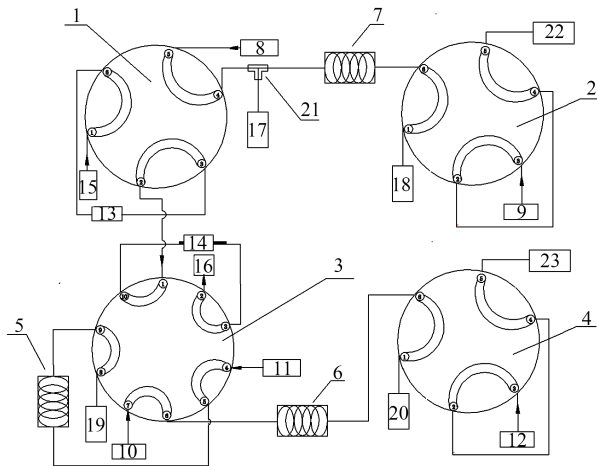


图1 气相色谱检测流程图

Fig.1 Gas chromatography detect flow chart

1.3 典型色谱图

采用外标法(峰面积归一法)对气体成分进行定量检测,配置的主要标气包括 N_2 、 CO 、 CF_4 (R14)、 C_2F_6 (R116)、 C_3F_8 (八氟丙烷)、 CHF_5Cl (R125)、 CH_3F_3 (R143a)、 CH_2F_4 (R134a)、 C_3F_6 (六氟丙烯)、 C_2F_5CN (五氟丙腈)、 C_3HF_7 等,气体浓度为 $5\sim 50\ \mu L/L$ 。检测器1可检测分析7种气体: C_3F_8 、 CHF_5Cl 、 C_3F_6 、 CH_3F_3 、 CH_2F_4 、 C_2F_5CN 、 C_3HF_7 ,检测器2可检测分析4种气体: N_2 、 CO 、 CF_4 、 C_2F_6 ,相应的典型色谱图如图2所示,各组分的出峰时间、分离度和检测限如表1所示。从表1可以看出,本研究的 C_4F_7N/CO_2 气体成分检测装置可实现上述气体组分的分离检测,检测限均低于 $0.10\ \mu L/L$ 。

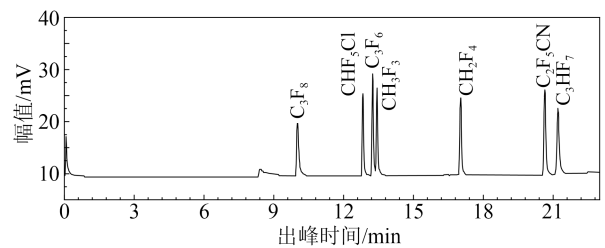
1.4 试验验证

用 C_4F_7N/CO_2 气体成分检测装置分析某制造厂的 C_4F_7N 新气,得到色谱图如图3所示。从图3可以看出, C_4F_7N 新气中杂质组分主要有 N_2 、 CO 、 CF_4 、 C_3F_8 、 C_3F_6 、 C_2F_5CN 、 CH_2F_4 等,各组分含量列于表2中,得到 C_4F_7N 气体的纯度为99.63%。

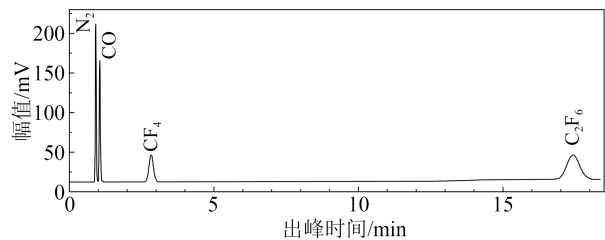
2 气体混合比及湿度检测

2.1 气体混合比检测原理

C_4F_7N/CO_2 气体的混合比是指 C_4F_7N 与 CO_2 的体积比,与检测组分相比,检测 C_4F_7N/CO_2 混合比仅



(a) 检测器1的色谱图



(b) 检测器2的色谱图

图2 各组分的典型气相色谱图

Fig.2 Typical gas chromatogram of each component

表1 各组分的出峰时间、分离度和检测限

Table 1 The peak time, separation degree, and detection limit of each component

检测器	气体	出峰时间/min	分离度	检测限/ $(\mu L/L)$
1	C_3F_8	9.965	0	0.04
	CHF_5Cl	12.715	17.49	0.04
	C_3F_6	13.193	3.49	0.03
	CH_3F_3	13.382	1.55	0.04
	CH_2F_4	16.977	26.48	0.03
	C_2F_5CN	20.595	23.51	0.04
	C_3HF_7	21.160	3.16	0.03
2	N_2	0.903	0	0.03
	CO	1.042	1.93	0.09
	CF_4	2.817	9.04	0.06
	C_2F_6	17.393	23.66	0.06

需要对 C_4F_7N 和 CO_2 两种气体含量进行标定,且对检测限要求较低,因此可选择热导法进行检测。

热导法是一种基于热传导原理的检测方法。各种气体具有不同的导热系数即不同的热传导速度,因此可以基于被测气体与纯净空气导热性的差异,利用电路将其转化为电阻的变化从而得到被测气体的含量。热导气体传感器检测示意图如图4所示,将被测气体送入图4(a)所示的检测气室后,对气室中央的热导传感器进行加热,达到一定温度后,如果被测气体的导热系数较高,就会散发热量使其电阻变小,输出电流通过图4(b)所示的信号调理与转换电路转变为不平衡电压的输出,通过电压的变化体现被测气体导热系数的变化,从而实现被测气体体积含量的检测^[16-17]。

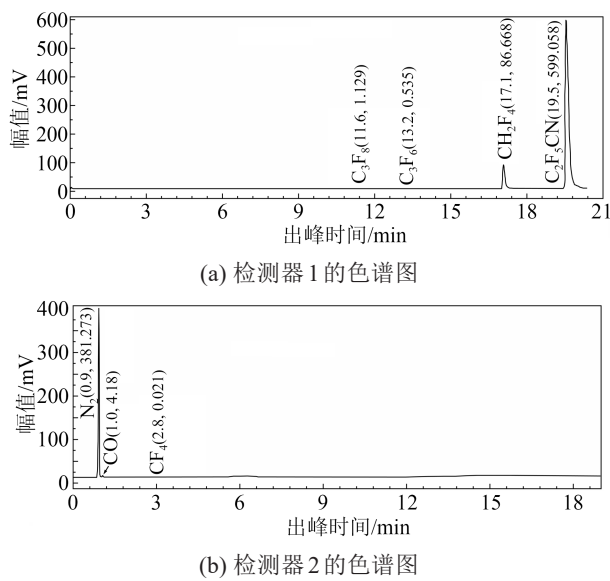


图3 C₄F₇N新气色谱图
Fig. 3 Gas chromatogram of new C₄F₇N

表2 C₄F₇N新气各组分含量

Table 2 Each component content of new C ₄ F ₇ N			
气体组分	含量/(μL/L)	气体组分	含量/(μL/L)
N ₂	297	CHF ₅ CL	—
CO	1.42	CH ₂ F ₄	343
CF ₄	0.006	C ₄ F ₈	—
C ₂ F ₆	—	C ₃ F ₆	1.45
C ₃ F ₈	0.19	C ₂ F ₅ CN	3025
C ₂ H ₃ F ₃	—	C ₃ HF ₇	—

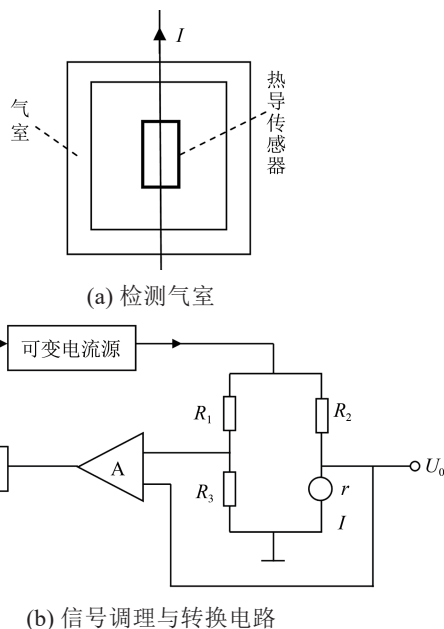


图4 气体热导传感器检测示意图
Fig.4 Thermal conductivity gas sensor detection diagram

2.2 微水检测原理

目前,现场检测SF₆气体中微水含量普遍应用的方法主要包括露点法(冷镜法)和阻容传感器法。

冷镜法是通过制冷对镜面进行降温,使镜面达到水汽凝结露需要的温度,即气体的露点温度,然后测得冷凝水含量。由于C₄F₇N气体的液化温度为-4.7℃,与微水的露点温度较为接近,该方法不适用于C₄F₇N及其混合气体的微水检测。

阻容传感器的基本结构如图5所示,由上电极、阻容式湿敏电容、下电极、玻璃底球组成,其中阻容式湿敏电容是由高分子薄膜制成的元件。当环境的相对湿度发生改变时,湿敏电容的高分子薄膜介电常数和电阻率发生变化,使其电容量和电阻值也发生变化,电容变化量与相对湿度成正比,电阻变化量与相对湿度成反比,通过电容和电阻的变化可实现微水含量的检测。

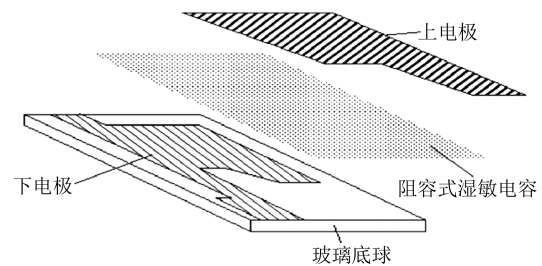


图5 高精度阻容传感器结构
Fig.5 The structure of resistance-capacitance sensor with high precision

2.3 联合检测装置研制及测试

基于热导原理检测气体混合比和传感器检测微水的特点,可将二者集成于同一个仪器内。本研究研制了C₄F₇N/CO₂气体的混合比和微水联合检测装置,可检测C₄F₇N/CO₂气体中C₄F₇N、CO₂、混入的空气及微水含量。

采用O₂传感器检测设备中的空气含量。基于电化学原理,采用模糊控制技术进行精确控温来实现恒温。采用高精度带温度补偿的热导传感器,结合双重恒温绝热系统,最大限度地保证测量过程不受气体温度和环境温度影响,快速获取稳定可靠的C₄F₇N体积占比。CO₂含量为气体总量(100%)减去C₄F₇N和空气的含量得到。采用外标法标定,使用已知混合比的系列标准物质(C₄F₇N/CO₂气体)对输出信号进行标定校准,得到相应的标定曲线,用于测量待测C₄F₇N/CO₂气体的混合比。

通过上述恒温绝热系统,不同温度的被测气体可快速升温到高于环境温度的特定温度,再用特殊的绝热材料将传感器与环境隔离,可最大限度地减少热辐射,消除环境温度变化引起的误差。采用高

分子膜湿度传感器及零点自动校准、增益回归技术,可准确测量微水含量。

采用该检测装置对出厂的 C_4F_7N/CO_2 气体(标示的 C_4F_7N 体积分数为 10%、微水浓度 $<100 \mu L/L$) 进行检测,检测结果如图 6 所示。从图 6 可知,所测 C_4F_7N/CO_2 混合气体中 C_4F_7N 体积分数为 9.9%,微水浓度为 $90.98 \mu L/L$,与气体出厂标示的结果接近。



图6 C_4F_7N/CO_2 混合气体的混合比和微水检测结果
Fig.6 Mixing ratio and micro-water test results of C_4F_7N/CO_2 mixed gas

对开展绝缘试验前后的 12 kV C_4F_7N/CO_2 混合气体绝缘负荷开关环网柜的气体混合比和微水含量进行检测。首先向环网柜中充入 6% $C_4F_7N/94\%CO_2$ 混合气体至气体压强为 0.14 MPa,用装置检测到 C_4F_7N 的体积分数为 5.7%,微水浓度为 $111.0 \mu L/L$,然后对环网柜进行工频耐压和雷电冲击耐压试验,再次检测得到 C_4F_7N 的体积分数为 5.8%,微水浓度为 $571.4 \mu L/L$,结果如图 7 所示。可以看出气体混合比检测结果在装置的检测误差范围内,未发生改变;由于试验未放置吸附剂,微水浓度检测结果有所提高。



图7 环网柜绝缘试验前后气体混合比和微水含量的检测结果

Fig.7 Detection results of gas mixing ratio and micro-water content of ring cabinet before and after insulation test

3 泄漏检测

3.1 技术原理

当电气设备中 C_4F_7N/CO_2 气体出现泄漏,设备的绝缘性能会降低而引起其内部缺陷或故障,因此需定期对 C_4F_7N/CO_2 气体电气设备进行泄漏检测。传统的 SF_6 电气设备泄漏检测方法包括抽真空

检漏法、皂水法、包扎法、压力降法、“卤素效应”检漏法、热导检测器法等。这些传统检测方法虽然成本低,但其共同的缺点在于精度较低且需要测试人员接近设备进行检测。近年来,国内外开发了超声检测法、激光成像法、红外成像检测法、红外吸收检测法等非接触式光学泄漏检测方法。其中红外吸收检测法具有测试设备寿命长、体积小、易于集成、可定量检测等优点,在 SF_6 气体设备泄漏检测中得到了广泛应用^[8],本研究选择该技术对 C_4F_7N/CO_2 气体设备进行泄漏检测。

红外吸收检测法是利用中红外滤光片结合宽带红外光源获取 C_4F_7N/CO_2 气体特定波段的红外光,从而实现两种气体的定量检测。当红外光源发出宽波长范围的红外光穿过被测气体时, C_4F_7N 气体会对红外光进行选择性吸收导致光强度衰减,而光强度的衰减程度与被测气体的浓度成正比,通过测量光强度的衰减量就可以计算得到被测气体中 C_4F_7N 的含量。根据朗伯-比尔定律,假设入射光是平行光,其强度为 I_0 ,出射光的强度为 I , L 为入射点到出射点的光路距离,则待测气体浓度 c 满足式(3)。

$$c = -\frac{1}{kL} \ln \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

式(3)中, k 为摩尔吸光系数,与吸收气体的性质及入射光的波长 λ 有关。

由式(3)可知,在波长为 λ 的入射光下,若测得气体的吸光系数 k ,则可求得 C_4F_7N 的浓度。

3.2 检测装置研制及测试

研制基于红外吸收检测技术的检测装置除了需要确定合适的探测器、红外吸收波段外,还应解决光源和光路的不稳定、探测器的噪声、电路器件的零漂以及环境的变化对检测灵敏度影响的问题。

目前常用的气体探测器分为分光型和非分光型。分光型气体探测器是通过分光系统分离出单色光之后将光线导入气室内,再由探测器进行光强度检测,其检测精度高,可以分离出波段很窄的单色光,但是由于分光系统复杂、体积大,通常用于实验室的光谱分析仪器中;非分光型气体探测器是在光源直接把具有连续光谱的红外光输入气室后,通过探测器上所安装的滤光片对所需要的波段进行选择吸收,其系统简单,对红外光源没有要求。考虑到现场检测小型化、便携性的应用需求,采用非分光型气体探测器,滤光片选择对应气体的吸收

波段。

C_4F_7N 气体的红外光谱(IR)如图8所示。由图8可知, C_4F_7N 的主要吸收谱带位于 $980\sim 1\ 400\text{ cm}^{-1}$,为了与 C_2F_6 、 CF_3CN 及其他分解产物的主要吸收谱带基本无重叠,选取 $1\ 240\sim 1\ 290\text{ cm}^{-1}$ 波段作为 C_4F_7N/CO_2 气体泄漏的检测波段。

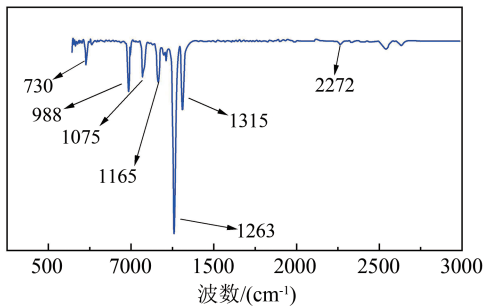


图8 C_4F_7N 气体的红外光谱图

Fig.8 Infrared spectrum of C_4F_7N gas

在实际应用中, C_4F_7N 气体在红外波段吸收的光强度很小,只占红外光源光强度的几千分之一,要克服外界的干扰并精确地检测 C_4F_7N 气体的浓度非常困难。本研究采用差分吸收检测技术将光源发出的光分成信号信息和参考信息来解决上述问题,前者包含待测气体的特征吸收波长,后者包含待测气体未被吸收的波长。另外由于光源光路的不稳定性及电路器件零漂等对各路信息的影响相同,通过对比消除它们的影响,可获取比较准确的气体浓度信息。

综上,选取 $1\ 263\text{ cm}^{-1}$ 作为红外光检测波数,采用非分光型气体探测器和差分吸收检测技术研制了用于检测电气设备中 C_4F_7N 气体泄漏量的气体泄漏检测装置,该装置对于 C_4F_7N 气体泄漏的浓度检测范围为 $0\sim 200\ \mu\text{L/L}$ 。

通过动态配气仪配制不同 C_4F_7N 浓度(5、10、20、50、100、200 $\mu\text{L/L}$)的 C_4F_7N/CO_2 混合气体,设置标准泄漏源,然后采用 C_4F_7N 气体泄漏装置进行检测,检测结果如表3所示,可以看出检测误差低于5%,检测限小于 $1\ \mu\text{L/L}$,检测效果较好。

4 结论

(1)综合考虑 C_4F_7N 气体杂质及电气设备发生内部放电或过热故障时 C_4F_7N/CO_2 混合气体的分解产物选择合适的色谱柱,采用具有高灵敏度的脉冲放电氦离子化检测器,通过合理地各个切换阀进行切换,研制了 C_4F_7N/CO_2 气相色谱检测装置,一次

表3 C_4F_7N 气体浓度检测结果

Table 3 Test results of C_4F_7N gas concentration

项目	浓度/ $(\mu\text{L/L})$					
	5.0	10.0	20.0	50.0	100.0	200.0
检测值/ $(\mu\text{L/L})$	5.1	10.4	20.5	50.6	102.1	201.3
误差/%	2.0	4.0	2.5	1.2	2.1	0.7
重复性/%	0.25					
检测限/ $(\mu\text{L/L})$	0.65					
响应时间/s	28					

进样就可以完成对各种杂质的分析,避免多次进样引入的仪器和人为误差,且耗气量少、检测限低,提高了 C_4F_7N 混合气体组分分析的准确性。

(2)基于热导法和阻容传感器法研制电气设备中 C_4F_7N 与 CO_2 气体混合比及微水联合检测装置,采用高精度带温度补偿的热导传感器并通过模糊控制技术精确控温,最大限度地保证测量过程不受气体温度和环境温度影响,提高了检测精度。通过对绝缘试验前后的环网柜进行气体混合比及微水含量检测,初步验证了检测装置良好的检测效果。

(3)排除主要分解物的吸收谱带重叠,选取 $1\ 240\sim 1\ 290\text{ cm}^{-1}$ 波段红外光作为 C_4F_7N 气体检测波段。综合考虑便携、易于集成及精度等因素,采用非分光型气体探测器和差分吸收检测技术研制了 C_4F_7N 气体泄漏检测装置,对不同浓度的混合气体进行检测,实现了低于 $1\ \mu\text{L/L}$ 的检测限且检测误差低于5%。

参考文献 References

- [1] IPCC. 2021: The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity[M]. New York, USA: Cambridge University Press,2021:923-1054.
- [2] OKUBO H, BEROUAL A. Recent trend and future perspectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride (SF_6) substitutes for high voltage electric power equipment [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2011,27(2):34-42.
- [3] 周原冰,江涵,肖晋宇,等. 清洁低碳发展背景下跨国互联电力系统规划方法[J]. 中国电力,2020,53(10):1-9.
ZHOU Yuanbing, JIANG Han, XIAO Jinyu, et al. Plan methods for transnationally interconnected power systems under the background of clean low-carbon development[J]. Electric Power,2020, 53(10):1-9.
- [4] 颜湘莲,高克利,郑宇,等. SF_6 混合气体及替代气体研究进展[J]. 电网技术,2018,42(6):1837-1844.
YAN Xianglian, GAO Keli, ZHENG Yu, et al. Progress of gas mixture and alternative gas of SF_6 [J]. Power System Technology, 2018,42(6):1837-1844.

- [5] 张博雅,李兴文,唐念,等. 新型环保绝缘气体研发回顾与展望[J]. 高压电器,2022,58(4):1-7.
ZHANG Boya, LI Xingwen, TANG Nian, et al. Review and outlooks on development of new environmentally-friendly insulating gas[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(4):1-7.
- [6] 周文俊,郑宇,高克利,等. 环保型绝缘气体电气特性研究进展[J]. 高电压技术,2018,44(10):3114-3124.
ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, GAO Keli, et al. Progress in researching electrical characteristics of environment-friendly insulating gases[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3114-3124.
- [7] 胡世卓,周文俊,郑宇,等. C_4F_7N/CO_2 和 C_4F_7N/N_2 混合气体工频击穿实验与协同效应分析[J]. 高电压技术,2019,45(11):3562-3570.
HU Shizhuo, ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, et al. Power frequency breakdown experiments and synergistic effect analysis of C_4F_7N/CO_2 and C_4F_7N/N_2 mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3562-3570.
- [8] 张英,陈琪,张晓星,等. C_3F_7CN/CO_2 混合气体在准均匀电场中的绝缘性能[J]. 高电压技术,2018,44(10):3158-3164.
ZHANG Ying, CHEN Qi, ZHANG Xiaoxing, et al. Insulation performance of C_3F_7CN/CO_2 gas mixture in quasi-uniform electric field[J]. High Voltage Engineering,2018,44(10):3158-3164.
- [9] KIEFFEL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF_6 in electrical grids[J]. IEEE Power & Energy Magazine,2016, 14(2):32-39.
- [10] MANTILLA J, CLAESSENS M, KRIEGEL M, et al. Environmentally friendly perfluoroketones-based mixture as switching medium in high voltage circuit breakers[C]//CIGRE 2016. Paris, France:CIGRE,2016.
- [11] 高克利,颜湘莲,王浩,等. 环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J]. 高电压技术,2018,44(10):3105-3113.
GAO Keli, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Progress in environment-friendly gas-insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering,2018,44(10):3105-3113.
- [12] 高克利,颜湘莲,刘焱,等. 环保气体绝缘管道技术研究进展[J]. 电工技术学报,2020,35(1):3-20.
GAO Keli, YAN Xianglian, LIU Yan, et al. Progress of technology for environment-friendly gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(1):3-20.
- [13] 肖淞,石生尧,林婧桐,等. “碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF_6 控制策略分析[J]. 中国电机工程学报,2022,43(1):339-358.
XIAO Song, SHI Shengyao, LIN Jingtong, et al. Analysis on the control strategy of the strong greenhouse insulating gas SF_6 in high-voltage electrical equipment under the goal of "emission peak and carbon neutrality"[J]. Proceedings of the CSEE,2022, 43(1):339-358.
- [14] 颜湘莲,王承玉,宋杲,等. 气体绝缘开关设备中 SF_6 气体分解产物检测与设备故障诊断的研究进展[J]. 高压电器,2013,49(6):1-9.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, SONG Gao, et al. Recent progress in detection of SF_6 decomposition products and fault diagnosis for gas insulated switchgears[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(6):1-9.
- [15] 唐晓杰,张荣伟,李龙,等. 新型环保绝缘气体 C_4F_7N/CO_2 的制备及检测研究[J]. 绝缘材料,2024,57(6):102-107.
TANG Xiaojie, ZHANG Rongwei, LI Long, et al. Research on preparation and detection of new environmentally friendly insulating gas C_4F_7N/CO_2 [J]. Insulating Materials,2024,57(6):102-107.
- [16] 全国电气化学标准化技术委员会. 六氟化硫混合气体绝缘设备气体检测技术规范:DL/T 1986—2019[S]. 北京:中国电力出版社,2019.
National Electrical Chemistry Technical Committee for Standardization. Technical specification for gas detection of sulfur hexafluoride mixed gas insulation equipment: DL/T 1986—2019 [S]. Beijing:China Electric Power Press,2019.
- [17] 全国电气化学标准化技术委员会. 六氟化硫混合绝缘气体混气比检测方法:DL/T 1985—2019[S]. 北京:中国电力出版社, 2019.
National Electrical Chemistry Technical Committee for Standardization. Determination of mixing ratio of SF_6 gas mixture: DL/T 1985—2019[S]. Beijing:China Electric Power Press,2019.
- [18] 马凤翔,袁小芳,程登峰,等. 基于红外吸收原理的 SF_6 气体泄漏检测技术应用研究[J]. 电气技术,2021,22(10):51-56.
MA Fengxiang, YUAN Xiaofang, CHENG Dengfeng, et al. Study on application of SF_6 gas leakage detection technology based on infrared absorption principle[J]. Electrical Engineering, 2021,22(10):51-56.

收稿日期:2024-08-14;修回日期:2024-10-17。

作者简介:

何洁(1983-),女(白族),贵州毕节人,高级工程师,主要从事电气设备 SF_6 环保替代及检测技术、高压开关设备的研究工作。