

基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体 在线监测技术研究

刘远超, 叶炳均, 董晓虎, 程 强, 蔡文凯

(国网湖北省电力有限公司 超高压公司, 武汉 430050)

摘要: 在光谱作用下, H₂S 产物快速挥发, 且挥发行为表现极为明显, 根据光谱效果准确分析 H₂S 产物在 SF₆ 分解气体中的含量具有一定的难度; 因此, 研究一种基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测技术; 通过将红外测量单元、紫外测量单元与多通道光谱脉冲幅度分析器连接在一起, 并采用气体分离特性函数和吸附等温线等方法, 准确分析 SF₆ 分解气体中 H₂S 成分的含量; 实验结果表明, 该方法的 H₂S 气体产物含量检测结果与真实气体含量之间的差值始终为零, 实现了对 SF₆ 分解气体中 H₂S 成分含量的准确测量。

关键词: 红外光谱; 紫外光谱; SF₆ 分解气体; 在线监测; 脉冲幅度分析器; 气体分离特性; 自扩散系数; 吸附等温线

On-line Monitoring Technology of SF₆ Decomposition Gas Based on Infrared and Ultraviolet Spectrum Analysis

LIU Yuanchao, YE Bingjun, DONG Xiaohu, CHENG Sheng, CAI Wenkai

(EHV Company State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: Under the influence of spectroscopy, H₂S products evaporate quickly, with a very obvious volatilization behavior. Based on spectral effects, it is difficult to accurately analyze the content of H₂S products in SF₆ decomposition gas. Therefore, an SF₆ decomposition gas online monitoring technology based on infrared and ultraviolet spectroscopy analysis is studied. By connecting the infrared measurement unit, ultraviolet measurement unit, and multi-channel spectral pulse amplitude analyzer together, and using gas separation characteristic functions and adsorption isotherms, the content of H₂S component in SF₆ decomposition gas is accurately analyzed. Experimental results show that by using this method, the difference between the detection result of H₂S gas products and that of the actual gas is always zero, achieving an accurate measurement for H₂S component in SF₆ decomposition gas.

Keywords: infrared spectrum; ultraviolet spectrum; SF₆ decomposition gas; on-line monitoring; pulse amplitude analyzer; gas separation characteristics; self-diffusion coefficient; adsorption isotherm

0 引言

SF₆ 是一种广泛应用于电力设备中的绝缘介质, 具有优异的电气绝缘性能。然而, 由于其对环境的潜在危害和温室效应, SF₆ 的使用受到了越来越多的关注和限制。在电力设备长期运行过程中, SF₆ 容易发生分解产生一系列分解气体, 如 H₂S、SO₂ 等, 从而导致设备内部腐蚀和机械损坏等^[1]。因此, 为了确保电力设备的正常运行和人员的安全, 对 SF₆ 分解气体在线监测是非常重要的。

基于以上背景, 为了提高电力设备的运行可靠性和安全性, 国内众多学者对 SF₆ 分解气体成分含量检测展开大量研究。许侃等人^[2]检测 SF₆ 分解后的混合气体成分, 根据互补性条件, 确定 SF₆ 分解气体的传输能力, 采用自加热金属板方法, 分析温度对分解后气体成分的影响。由于整

个分解过程完全在红外热成像仪元件的监测下完成, 因此并不会出现气体成分漏检现象。周永言等人^[3]确定每一类气体分子峰面积的相对标准偏差水平, 在绝缘开关设备的配合下, 分解后气体不会出现明显外泄情况, 因此在脉冲色谱中, 只要保证双通道组织的完整闭合, 就可以确定 SF₆ 分解气体中各项气体分子的含量水平。

红外光谱也叫分子振动光谱或振转光谱, 其能够选择性吸收特定波长的红外光线, 具有较强的分子能量, 在检测红外光波时, 能量水平与谱线相同的光波信号可以直接被红外光谱所吸收。紫外光谱能够吸收紫外光区内的光线信号, 且不论被吸收信号的电子能力是否发生转移, 光谱内所有光线信号都保持波长短、能量高的传输特性^[4]。相较于红外光谱, 紫外光谱对光线传输信号的吸收能力更强,

收稿日期: 2023-10-12; 修回日期: 2023-11-27。

基金项目: 湖北省科技项目(202022030001)。

作者简介: 刘远超(1985-), 男, 大学本科, 高级工程师。

通讯作者: 叶炳均(1993-), 男, 硕士, 助理工程师。

引用格式: 刘远超, 叶炳均, 董晓虎, 等. 基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 9-15.

且对于同一光源设备而言,紫外光谱内光波信号的波长值水平明显小于红外光谱内的光波信号。融合两种光谱中的光线传输特征,定义一种全新的光谱分析原则,以此研究一种新型的基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测技术,并通过对比实验的方式,突出该项技术手段准确分析 SF₆ 分解气体成分方面的应用能力。

1 SF₆ 分解气体成分确定

由于不同的分解产物具有不同的性质和危害程度,因此对其成分展开分析,能够更好地评估设备的运行状况和潜在风险。应用红外和紫外光谱分析方法确定 SF₆ 分解气体成分,联合红外测量单元、紫外测量单元,设置多通道光谱脉冲幅度分析器连接结构,利用分配后的混合气体,得到具体的 SF₆ 分解气体组分检测结果,以确认分解产物的种类,从而实现 SF₆ 分解气体在线监测。

1.1 红外测量单元设置

在电力设备中,由于工作状态或设备故障,会产生 SF₆ 分解气体,这些气体对设备性能和安全性的评估非常重要。红外测量技术可以实时监测和测量 SF₆ 分解气体的成分。在红外测量单元中,激发源的作用是激发红外射线荧光,可以根据混合气体中待测对象的含量水平,对光线信号放大处理,从而使得光谱仪元件能够准确捕捉到 SF₆ 分解气体的核心气体分子成分。

激发源阳极、探测器阴极所使用的材料相同,通常为含有 Cr、Au、Mo 元素的合金类物质,高速的光波信号撞击会产生连续的红外射线,而连续的红外射线具有较强的标记作用,可以标记 SF₆ 分解气体中的标准测量成分,从而使得光谱仪元件能够准确掌握气体分子在监测过程中的传输行为^[5]。对于 SF₆ 分解气体待测样本而言,红外激发源同时提供了激光信号与光波传输信号,使得探测器装置能够准确记录关键监测成分所处的实时传输位置。在气体分子传输过程中,红外探测器所测得气体信号的分子体积相对较小,因此为实现对气体成分的分类处理需求,还需对分解后的气体分子信号放大处理。红外测量单元内的 SF₆ 分解气体监测原则如图 1 所示。

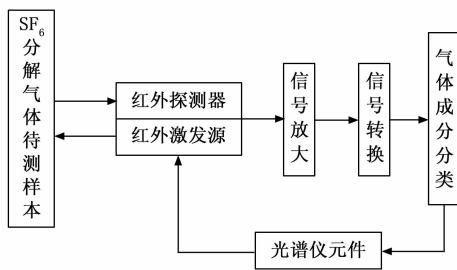


图 1 红外测量单元内 SF₆ 分解气体的监测原理

光谱仪元件负责收集完成分类后的 SF₆ 分解气体成分,对红外测量单元而言,其所能标记的最主要气体成分为 H₂S。初次分类的气体成分经由光谱仪元件再次返回至红外激发源装置之中,再次标记未被完全分离的气体成分^[6]。

1.2 紫外测量单元设置

红外测量单元对于 SF₆ 分解产物具有高灵敏度和准确性,而紫外光谱对光线传输信号的吸收能力更强,对于某些特定的分解产物,如一氧化碳 (CO)、二氧化硫 (SO₂)、SF₂ 与 SF₃ 等,其在紫外光谱区域具有明显的吸收峰,可以通过紫外测量单元检测和监测,以提供更全面的 SF₆ 分解气体成分。紫外测量单元接收紫外入射光线,能够在偏压供应传输光线的作用下,控制反应堆内的 SF₆ 气体分解反应速度,并可以在激发源装置的配合下,完成对核心待测气体产物的紫外标记。

硅漂移二极管是紫外测量单元中的核心反应结构,具有阳极、阴极两个连接通路。在紫外入射光线直接作用于 SF₆ 气体分解反应堆时,硅漂移二极管阳极接收经过紫外光线标记的气体电离信号,并可以在核心二极管元件的去电处理后,将不带电的气体电离信号传输至阴极平面内,以便于紫外探测器可以直接分析 SF₆ 气体分解产物^[7]。紫外探测器提供了硅漂移二极管所需的紫外光线信号,其运行状态受到激发源连接形式的影响,特别是当紫外光线信号在硅漂移二极管元件中快速集合时,只有保证探测器元件与激发源元件的完全接入状态,才能够使紫外测量单元实现对气体信号的实时标记。如果阴极平面、阳极平面不能保持完全连通状态,则会出现紫外光线信号过量累积的问题。因此,为保证硅漂移二极管对 SF₆ 气体分解成分的监测能力,还应使光线偏压供应行为保持在可控状态之内^[8]。

在紫外光线偏压供应行为的支持下, SF₆ 分解反应堆中并不会出现光波信号快速传输的情况,对于紫外测量单元而言,该反应状态是指二极管元件能够在紫外光谱内完成对气体监测成分的精准标记。

1.3 多通道光谱脉冲幅度分析器连接

通过将红外测量单元与紫外测量单元连接,以获取更全面、准确的 SF₆ 分解气体成分信息,提高对 SF₆ 分解气体的检测能力。多通道光谱脉冲幅度分析器是用于测量红外、紫外光谱脉冲信号的核心装置,其是 SF₆ 分解气体光谱实验的核心部件,为红外测量单元、紫外测量单元提供了稳定的连接环境。在红外和紫外光谱分析的过程中,多通道光谱脉冲幅度分析器的主要作用是提取光波谱线幅值,并借助上位机端口,将谱线信号返回至光谱探测器元件之中,以便于红外测量单元、紫外测量单元能够准确标记 SF₆ 分解气体中的核心测量成分^[9]。经过光线放大处理后,两种信号都保持脉冲波的输出形式,由于光谱信号 A/D 转换装置的存在,成型后的光谱始终与 SF₆ 分解气体光谱幅值保持匹配状态,即两种光波都不会表现出脉冲波长频繁变化的表现情况。完整的多通道光谱脉冲幅度分析器连接结构如图 2 所示。

为实现对 SF₆ 分解气体的监测,多通道光谱脉冲幅度分析器在处理红外、紫外光波信号时所需进行的操作包括脉冲放大、成型与幅值提取,如果一个脉冲周期波长完全包含放大光谱信号所需的全部信息,那么 FPGA 部件就可

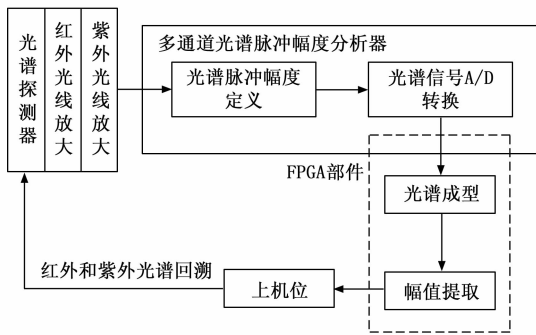


图 2 多通道光谱脉冲幅度分析器连接结构图

以根据成型后的光谱直接确定光波信号的幅值水平^[10]。多通道光谱脉冲幅度分析器内的光谱探测器负责放大红外与紫外光线,且在气体脉冲信号传输的过程中,放大后的光线波可被 FPGA 部件直接记录。

1.4 混合气体分配

混合气体分配是指将待测气体样品与已知浓度的标准气体混合,以确保对不同成分响应校准和标定。按照红外和紫外光谱分析原则完成 SF₆ 分解气体在线监测时,所选用的混合气体分配设备由预处理、实时监测、气体反应 3 部分共同组成。预处理部分负责协调 SF₆ 分解气体的进气与出气行为,进气指分解气体输入贮藏罐,出气则是指分解气体由贮藏罐输出至外界环境之中,在分解反应的过程中,进气行为、出气行为同时存在,所以 SF₆ 分解贮藏罐内的气体压力始终保持相对稳定的数值状态^[11]。监测部分包括防逆阀、监测点、分配阀与采样点。其中,防逆阀控制 SF₆ 分解气体的出气与进气速度,为保持气体平衡状态,该元件具有较强的自主调节能力,可以根据实时压强数值,完成对气体传输速率的配比与控制。监测点、采样点分布在分配阀两端,且二者与分配阀的间隔距离完全相等。分配阀具有一定的气体敏感性,可以根据 SF₆ 分解产物的采样情况,完成对气体分解反应的实时监测^[12]。气体反应部分由 SF₆ 分解反应器组成,是气体分解产物的核心生成部件。完整的 SF₆ 分解混合气体分配模式如图 3 所示。

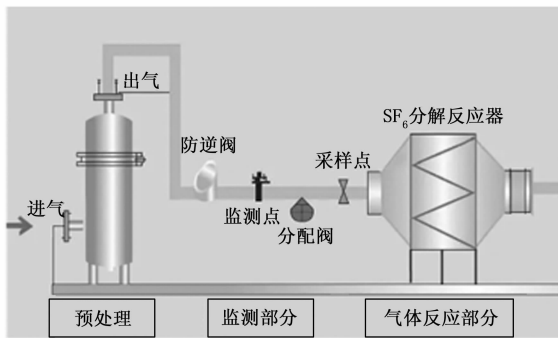


图 3 SF₆ 分解后的混合气体分配模式

在防逆阀元件的控制下, SF₆ 分解后的混合气体不具备反向传输的能力,特别是在完成预处理后,分配阀对于气

体分子的承载能力达到极限值状态,当前情况下,分解反应器中的气体压强相对较大,贮藏罐内的气体分子不再向外输出,直至红外光谱、紫外光谱的脉冲幅度都恢复至初始数值状态。

1.5 SF₆ 分解组分检测

SF₆ 分解后的气体组分包括 H₂S、SF₂、SF₃ 等多种产物,但由于红外和紫外光谱对于 H₂S 气体成分的敏感性最强,所以在后续监测过程中,规定 H₂S 气体为 SF₆ 分解后的主要成分。SF₆ 分解后的 H₂S 气体产物具有独特的分子结构和形状,在被红外和紫外光谱监测时,多通道光谱脉冲幅度分析器对 H₂S 气体的捕捉具有选择性,即只有波长值达到监测标准的气体分子才符合光谱记录需求^[13-14]。当 H₂S 气体分子被红外与紫外光谱捕捉到时, SF₆ 分解后的混合气体化学性质与电离特性都会发生改变。

规定 m 表示参与 SF₆ 分解反应的 H₂S 气体分子质量,其计算式如下:

$$m = n \cdot N^a \tag{1}$$

其中: N^a 为阿伏伽德罗常数(取值通常为 6.02×10^{23} 或 6.022×10^{23}), n 为红外和紫外光谱所记录的 H₂S 气体分子数量。

根据获取的 H₂S 气体分子质量,将基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解组分检测表达式定义为:

$$B = \frac{1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\beta n}{2bv}} \tag{2}$$

其中: α 为红外和紫外光谱对于 H₂S 气体成分的敏感性标记参数, β 为 SF₆ 分解后气体中 H₂S 气体成分的取样系数, b 为 H₂S 气体成分的光谱特征, v 为 H₂S 气体分子在红外和紫外光谱中的实时传输速度。

综上所述,红外测量技术在电力设备中发挥着重要作用,特别是实时监测和测量 SF₆ 分解气体的成分。SF₆ 分解后的气体组分包括 H₂S、SF₂、SF₃ 等多种产物,但由于红外和紫外光谱对于 H₂S 气体成分的敏感性最强,所以在后续监测过程中,规定 H₂S 气体为 SF₆ 分解后的主要成分。通过阿伏伽德罗常数和红外和紫外光谱所记录的 H₂S 气体分子数量,可以计算出参与 SF₆ 分解反应的 H₂S 气体分子质量。基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解组分检测表达式定义了对于 H₂S 气体成分的敏感性标记参数、SF₆ 分解后气体中 H₂S 气体成分的取样系数、H₂S 气体成分的光谱特征以及 H₂S 气体分子在红外和紫外光谱中的实时传输速度。这些技术为评估电力设备的性能和安全性提供了重要手段。

2 SF₆ 分解气体在线监测方法设计

在红外和紫外光谱分析原则的支持下,分析气体分离特性,根据自扩散系数的具体数值水平,定义吸附等温线,再联合分解气体中的阳离子径向分布条件,实现对 SF₆ 分解气体的在线监测。

2.1 气体分离特性分析

为了获取 SF₆ 气体分解产物的传输能力,分析气体分

离特性。在红外和紫外光谱中,分解前、分解后气体成分所具有的传输能力不同,但在自然环境中,受到氧气、二氧化碳等气体流动行为的影响,两种气体成分之间还存在明显的对流作用。气体对流指 SF₆ 气体与分解后 H₂S 产物之间的气体交换作用,由于气体分子传导过程中必然有一部分粒子会出现分离表现,所以并不是所有气体产物都能由一个监测区域传输至另一个监测区域^[15-16]。分解后的 H₂S 气体成分中存在红外光谱散失、紫外光谱散失作用,且散失表现的行为能力受到分解后 H₂S 气体成分实时累积量的直接影响。相较于分解后的气体成分, SF₆ 原气体中的光谱表现较为稳定,随着气体传导行为的进行,红外测量单元、紫外测量单元中的光谱计量值都不会出现明显的变化状态。SF₆ 气体传输行为分离特性原理如图 4 所示。

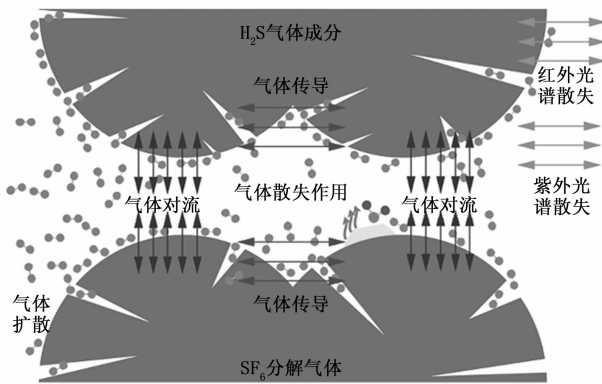


图 4 SF₆ 气体分离特性原理图

设 δ 为红外和紫外光谱内的气体扩散参数, ϵ 为同一监测区域内的气体传导系数, χ 为光谱散失率向量, ΔX 表示可进行对流交换的气体成分单位累积量。在上述物理量的支持下,利用 SF₆ 分解组分检测结果,推导 SF₆ 气体分离特性函数表达式为:

$$C = (\delta \cdot B)^2 \sum_{\epsilon=1}^{+\infty} (\chi - 1)^2 \cdot |\Delta X| \quad (3)$$

由于分解后气体成分的化学性能更加稳定,所以扩散现象只存在于 SF₆ 气体之中,且这种扩散行为必然带来气体对流反应强度的变化。

2.2 自扩散系数计算

由于仅分析气体分离特性并不能确保 SF₆ 分解气体在线监测结果的准确性,因此还应在分离特性函数的基础上,参考红外和紫外光谱分析原则,确定自扩散系数的实际取值范围。所谓自扩散系数是指气体分子运动轨迹内,描述粒子运动轨迹的物理量,其取值具有明显的时间性特征,即 SF₆ 分解气体频繁交换时间周期内,粒子运动速度相对较快,当前情况下自扩散系数的求解结果也就相对较大^[17]。由于红外和紫外光谱只限定两条完整的气体扩散通道,所以在求解自扩散系数时,还应确定 SF₆ 分解气体所属的实际传输环境。

光谱通路定义项是在计算自扩散系数时考虑到的一个

重要参数,其代表光通过样品气体的距离,该距离决定了气体在监测设备中传输和扩散的时间。用 z 表示光谱通路定义项,其计算式如下:

$$z = \frac{1}{2A_\gamma} \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{C}{\vec{a}} \sum [\varphi(S_{\max} - S_{\min})]^2 \quad (4)$$

式中, γ 为实时气体扩散特征, A_γ 表示基于参数 γ 的 SF₆ 分解气体扩散传输行为向量, \vec{a} 为光谱通路内的 SF₆ 气体分解向量, φ 为气体扩散行为定义参数, S_{\max} 为扩散轨迹内气体分子运动行为项的最大取值, S_{\min} 为气体分子运动行为项的最小取值。

由于光谱通路内, SF₆ 分解气体在时间尺度上的扩散能力会受到影响,所以为避免分解后的 H₂S 气体成分扩散至光谱范围内,还应保证光谱通路定义项参数的取值同时小于红外光源、紫外光源谱线半径的长度水平^[18]。

根据光谱通路定义项,推导基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体自扩散系数计算式为:

$$D = \frac{\varphi}{z \cdot \sqrt{f |d_1^2 - d_2^2|}} \quad (5)$$

式中, φ 为 SF₆ 分解气体在时间尺度上的扩散参数, f 为光谱通路内的 H₂S 气体成分扩散行为阈值, d_1 为红外光源的谱线半径, d_2 为紫外光源的谱线半径。

综上所述,通过计算 SF₆ 分解气体的自扩散系数,可以更深入地了解这些气体在电力设备中的扩散行为和传输特性。这有助于提高 SF₆ 分解气体在线监测的准确性,从而更好地评估电力设备的性能和安全性。

2.3 吸附等温线建立

在实际操作过程中,红外和紫外光谱内 SF₆ 分解气体传输行为总是与温度值变化状态同时出现,因此为保证监测结果的准确性,根据自扩散系数,应在相邻光谱线之间建立吸附等温线。为了利用红外和紫外光谱分析原则准确监测 SF₆ 分解气体,要求吸附等温线平面必须存在于一个完整光谱区域内部。吸附等温线是一个非真实存在的温度平面,平面两侧的气体温度具有明显差异性,但随着 SF₆ 分解气体累积量的增加,平面两侧气体的温度差值也在不断增大^[19]。若不存在等温线,红外和紫外光谱很难统计 SF₆ 分解过程中的温度变化行为;但在已知等温线的情况下,则可以分别统计平面两侧的温差数值,再通过数值匹配的计算方式,实现对分解后气体成分含量在线精准监测^[20]。按照 SF₆ 分解气体在线监测需求所建立的吸附等温线平面如图 5 所示。

规定 λ 为 SF₆ 分解气体的实时累计参数,在红外和紫外光谱中, $\lambda > 0$ 的不等式取值条件恒成立, F 为温度反应区域内的气体分子吸附向量, g 为 SF₆ 分解反应过程中的气体分子标记系数, κ 为等温值判别向量, h 为吸附等温线平面内的气体标准反应温度值,利用 SF₆ 分解气体自扩散系数,求解吸附等温线定义式为:

$$G = \sqrt{\lambda |FD|} / g \cdot (\kappa h)^{-1/2} \quad (6)$$

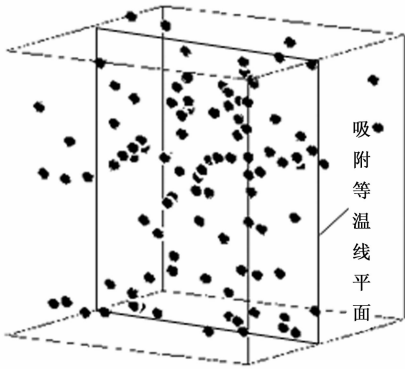


图 5 吸附等温线平面

设 H_1 、 H_2 分别为吸附等温线平面两端的实际反应温度。 $h > \frac{H_1 + H_2}{2}$ 成立时, 表示吸附等温线平面内的标准反应温度大于 SF₆ 气体分解的实际反应温度, 气体分子由光谱传输至吸附等温线平面的过程具有升温特性; $h < \frac{H_1 + H_2}{2}$ 成立时, 表示吸附等温线平面内的标准反应温度小于 SF₆ 气体分解的实际反应温度, 气体分子由光谱传输至吸附等温线平面的过程具有降温特性。

通过建立吸附等温线的方法, 实现了对 SF₆ 分解气体在线监测的精准度和准确性。吸附等温线是一个虚拟的温度平面, 根据 SF₆ 分解气体的自扩散系数和光谱分析原则, 在相邻光谱线之间建立。通过统计吸附等温线平面两侧的温差数值, 可以实现气体成分含量的在线监测。这种方法不仅提高了监测的准确性, 而且对于评估电力设备的性能和安全性具有重要意义。

2.4 SF₆ 分解气体中的阳离子径向分布定义

通过构建吸附等温线, 获取气体分子由光谱传输至吸附等温线平面的传输特性, 由此定义 SF₆ 分解气体中的阳离子径向分布情况, 以及及时掌握 SF₆ 分解气体中阳离子的变化情况, 以判定 SF₆ 分解气体组成形式。阳离子成分决定了 SF₆ 分解气体的组成情况, 在监测分解气体时, 在线主机可以根据混合气体中所包含阳离子的具体类型, 判断分解后气体产物在红外和紫外光谱中的扩散传输能力。阳离子径向分布就是指阳离子成分在径向状态下的局域性光谱长度, 其取值越大, 就表示分解后气体中所包含的阳离子数量越多, 对气体在线监测时, 可以选定的离子对象就越多^[21]。

根据吸附等温线求解结果, SF₆ 分解气体中阳离子径向分布的定义表达式如下:

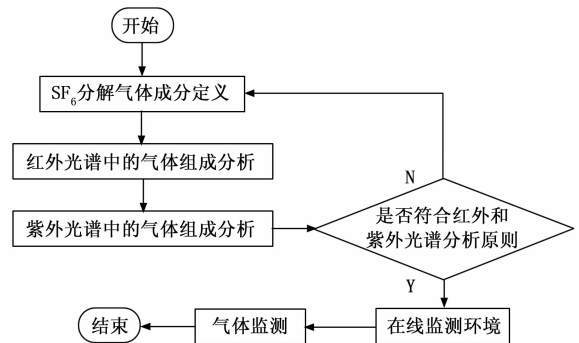
$$L = \int_{\epsilon=1}^{+\infty} \frac{\vec{j} \cdot \eta \cdot \vec{l}}{G \cdot l} \cdot H \quad (7)$$

其中: ϵ 为所监测阳离子的光谱长度, \vec{j} 为局域性光谱向量, η 为 SF₆ 气体的实时分解效率, \vec{l} 为 SF₆ 分解气体在红外和紫外光谱中的扩散效应特征, 为 SF₆ 分解气体阳离子的光谱扩散传输参数。

SF₆ 分解是一种连续性的气体传输与扩散行为, 而阳离子作为混合气体中的主要分子成分, 其组成形式影响分解反应的行为速度^[22]。在 SF₆ 分解气体成分中, 所包含的主要阳离子为 H⁺、S⁺、主要阴离子为 S²⁻、F⁻, 从元素相对质量的角度来看, 阳离子质量水平明显高于阴离子, 因此阳离子成分可作为判定 SF₆ 分解气体组成形式的主要因素的直接原因。

2.5 监测算法完善

完善 SF₆ 分解气体在线监测算法就是指借助在线监测环境, 得到与 SF₆ 分解气体成分相关的监测结果。红外和紫外光谱分析原则规定, 吸附等温线处气体分子的光谱形式完全相同, 且越远离等温线所在平面的气体分子的光谱发散能力越强^[23-24]。H₂S 是 SF₆ 分解气体的主要成分, 在线监测过程中, 该类型气体分子的光谱组成形式明显区别于气体类型的气体成分。完整的 SF₆ 分解气体在线监测流程如图 6 所示。

图 6 SF₆ 分解气体在线监测流程

设 ν 为等温线光谱中的 SF₆ 分解气体分子标记向量, μ 为基于自扩散条件的气体分子长度计量值, \bar{O} 为单位时间内的 SF₆ 气体分解量数值, i 为气体成分监测指数, y 为基于红外和紫外光谱分析条件所选取的 H₂S 气体成分含量监测阈值。在上述物理量的支持下, 根据 SF₆ 分解气体中阳离子径向分布情况, 获取基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测表达式为:

$$P = \nu \sqrt{\frac{L}{2}} \cdot \bar{O} \left| \frac{y}{i} \right| \quad (8)$$

基于红外和紫外光谱完成对 SF₆ 分解气体的在线监测, 以 H₂S 气体作为主要监测对象, 特别是在混合气体扩散能力较强的情况下, 保障吸附等温线平面的完整性, 并以此为基础, 准确定义阳离子径向分布条件, 才能得到与实际气体光谱组成形式相符合的监测结果。

3 实例分析

为验证基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测技术的监测效果, 选取 OriginPro 作为实验环境, 其是一款广泛应用于科学数据分析和绘图的软件, 适用于基于光谱的气体分析研究, 其提供了丰富的数据处理、统计分

析和图形绘制工具,可用于对光谱数据进行可视化和定量分析。并将其与红外热成像型监测方法、双通道气相色谱-脉冲监测方法进行对比实验,并根据数值记录结果,分析不同方法在监测 SF_6 气体分解产物含量方面的应用能力。

3.1 实验准备

SF_6 气体分解是一项连锁反应,整个反应流程必须在发生器部件中进行,且整个实验过程中,气压泵表示数必须保持较为稳定的数值状态。实验所需的具体装置如图 7 所示。

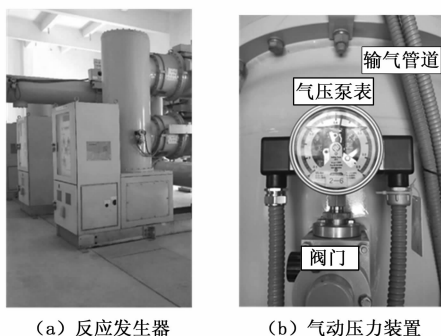


图 7 SF_6 分解气体实验装置

气体分解反应发生器两端分别与不同的输气管道相连,其中左侧管道为进气通路、右侧管道为出气通路,为避免实验过程中出现烟气泄露的情况,出气管道的宽度水平必须大于进气管道。气动压力装置与 SF_6 气体分解反应发生器之间的连接也需借助输气管道,实验过程中,阀门在气体压强作用下呈现出上升或下降状态。通常情况下,阀门上升表示 SF_6 气体分解反应发生器内的压强较大,气压泵表示数也就相对较大;而阀门下降则表示 SF_6 气体分解反应发生器内的压强较小,气压泵表示数也就相对较小。由于分解反应发生器元件的气密性较好,所以气压泵表并不会出现过于明显的示数变化状态。

3.2 实验流程

实验的具体实施流程如下:

1) 将基于红外和紫外光谱分析的 SF_6 分解气体在线监测技术的执行程序输入中控主机,记录在该方法作用下, H_2S 气体成分在 SF_6 分解产物中的含量水平,所得结果为所提方法检测结果。

2) 将红外热成像型监测方法的执行程序输入中控主机,记录在该方法作用下, H_2S 气体成分在 SF_6 分解产物中的含量水平,所得结果为文献 [2] 方法检测结果。

3) 将双通道气相色谱-脉冲监测方法的执行程序输入中控主机,记录在该方法作用下, H_2S 气体成分在 SF_6 分解产物中的含量水平,所得结果为文献 [3] 方法检测结果。

4) 将所提方法检测结果、文献 [2] 方法检测结果、文献 [3] 方法检测结果 H_2S 气体产物含量检测值与该气体在 SF_6 分解物中的真实含量进行对比,并根据差值结果总

结实验规律。

3.3 数据与结论

实验过程中, H_2S 气体产物含量检测值与该气体在 SF_6 分解物中真实含量之间的差值水平越小,就表示当前所应用方法对于 SF_6 分解气体的准确监测能力越强。 H_2S 气体产物含量检测结果、真实气体含量的具体数值情况如图 8 所示。

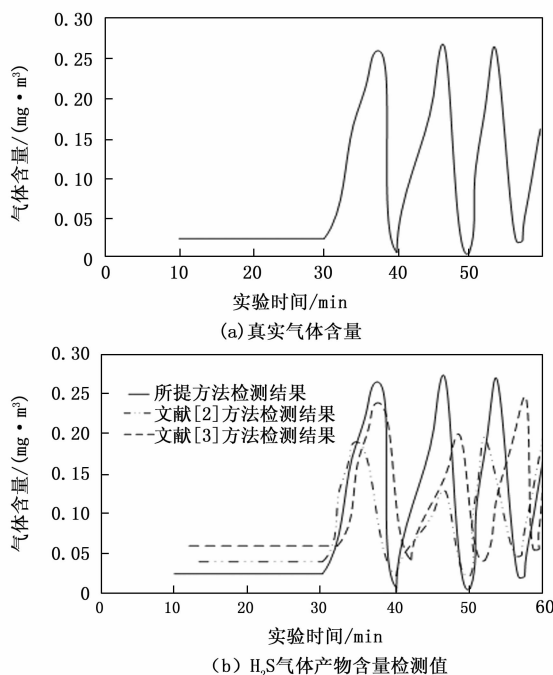


图 8 SF_6 分解气体中的 H_2S 成分监测

根据图 8 中的监测结果,分析 H_2S 气体产物含量检测结果与真实气体含量之间的差值,详情如表 1 所示。

表 1 H_2S 气体产物含量的差值统计

实验时间 /min	实验组 /(mg/m^3)	文献[2]方法检测结果 /(mg/m^3)	文献[3]方法检测结果 /(mg/m^3)
10	0	0.02	0.02
20	0	0.01	0.03
30	0	0.01	0.03
40	0	0.02	0.10
50	0	0.02	0.07
60	0	0.05	0.05

分析表 1 可知,整个实验过程中实验组 H_2S 气体产物含量检测结果与真实气体含量之间的差值始终为零,表示实验组气体产物检测值始终与真实气体含量相等。第 60 min 时,文献 [2] 方法检测结果 H_2S 气体产物含量检测结果与真实气体含量之间的差值水平最高。这是因为该方法在监测过程中受到了自扩撒系数的影响。自扩撒系数是描述气体在吸附剂表面扩散速率的重要参数,其数值大小直接影响气体的吸附和脱附过程。当自扩撒系数较大时,气体在吸附剂表面的扩散速率较快,有利于气体在吸附剂表面

吸附和脱附过程的进行。但是, 如果自扩散系数过大, 会导致气体扩散过快, 使得气体在吸附剂表面的停留时间缩短, 降低了吸附剂对气体的吸附量。这导致文献 [2] 方法在监测过程中错过了某些气体成分的峰值, 从而导致监测结果出现偏差。第 40 min 时, 文献 [3] 方法检测结果 H₂S 气体产物含量检测结果与真实气体含量之间的差值水平最高, 与文献 [2] 方法检测结果最大差值结果相比, 增大了 0.05 mg/m³。这导致文献 [3] 方法在监测过程中过度响应某些气体成分的变化, 从而导致监测结果出现偏差。由此说明, 自扩散系数的数值对 SF₆ 分解气体在线监测的准确性和可靠性具有重要影响。在实际应用中, 需要根据实际情况选择合适的自扩散系数值, 以保证 SF₆ 分解气体在线监测的准确性和可靠性。应用基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测技术, 准确定义了 H₂S 产物在 SF₆ 分解气体中的含量水平, 在光谱作用下, 不会因气体快速挥发, 而导致错误分析气体组成成分的问题, 符合实际应用需求。

4 结束语

基于红外和紫外光谱分析的 SF₆ 分解气体在线监测技术的设计同时借助红外测量单元、紫外测量单元, 完成对混合气体的分配处理, 通过建立气体分离特性函数的方式, 定义吸附等温线平面, 从而在准确计算自扩散系数的同时, 完善具体的监测技术执行流程。实用性方面, 在光谱作用下, 应用基于红外和紫外光谱分析原则监测方法, 可以准确定义 H₂S 产物在 SF₆ 分解气体中的含量, 并不会因气体产物挥发而造成非精准监测的问题, 在准确分析 SF₆ 分解气体组成成分方面, 具有突出作用价值。

参考文献:

- [1] 万留杰, 马凤翔, 汪胜和, 等. SF₆ 气体中 H₂S 光声检测及 FFT 滤波在检测信号噪声抑制中的应用 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (7): 2564-2571.
- [2] 许侃, 高凯, 邓先钦, 等. 极端环境下 SF₆ 气体红外热成像检测技术在 GIS 带电检测中的效果加强方法研究 [J]. 高压电器, 2021, 57 (3): 191-197.
- [3] 周永言, 谢颀, 唐念, 等. 双通道气相色谱-脉冲氦离子化检测器对 SF₆ 电力设备中 17 种气体组分的检测 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2015, 54 (3): 74-79.
- [4] 李彦飞, 韩冬, 邱宗甲, 等. 空气电晕放电发展过程的特征发射光谱分析与放电识别 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42 (9): 2956-2962.
- [5] 吴春霞, 马剑秋, 高志山, 等. 基于像差补偿的近红外显微干涉硅通孔测量 [J]. 光学精密工程, 2023, 31 (3): 301-312.
- [6] 白沙沙, 王欢, 陈玉静, 等. 消除溶剂水吸收峰干扰的红外光谱测量新方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35 (4): 894-898.
- [7] 苏天宁, 刘峰阁, 王强, 等. 紫外像增强器的调制传递函数测试系统设计 [J]. 红外技术, 2022, 44 (5): 469-474.
- [8] 李泳谊, 赵晓含, 李晓, 等. 离子色谱紫外及脉冲安培法快速检测废水中 I⁻ 含量 [J]. 离子交换与吸附, 2021, 37 (5): 435-444.
- [9] 梁彦, 易友建, 朱坪, 等. 基于全光纤光谱干涉的多路超短脉冲时间同步单次测量技术 [J]. 中国激光, 2021, 48 (16): 88-96.
- [10] 谢卓, 温智琳, 司明奇, 等. 双激光脉冲打靶形成 Gd 等离子体的极紫外光谱辐射 [J]. 物理学报, 2022, 71 (3): 213-220.
- [11] 杨圆, 高克利, 丁立健, 等. 环保型 C4F7N/CO₂ 混合气体分解仿真与实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (1): 380-389.
- [12] 于恒懿, 王军凯, 黄珍霞, 等. V₂CO₂MXene 从 CO₂/N₂ 混合气体中选择性吸附 CO₂ 的第一性原理计算 [J]. 原子与分子物理学报, 2023, 40 (6): 47-52.
- [13] 张瑞恩, 李欣然, 陈林聪, 等. 基于第一性原理的 Mo₃N₂ 晶体对 SF₆ 分解组分吸附特性研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43 (2): 84-89.
- [14] 颜湘莲, 姚强, 苗玉龙, 等. 基于 FTIR 的 GIS 气室中 SF₆ 分解产物 SO₂F₂ 的检测 [J]. 化学试剂, 2021, 43 (10): 1393-1398.
- [15] 鲁军辉, 李俊明. CO₂/H₂O 混合气体在水平管外凝结换热与分离特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42 (3): 706-711.
- [16] 滕达, 李昂, 李铁林, 等. 基于无机多孔膜气体分离的燃煤机组烟气脱水传质特性分析 [J]. 动力工程学报, 2021, 41 (3): 173-181.
- [17] 李晓侠, 孙长库, 孙玉晶, 等. 结合描述子信息的多约束散斑扩散匹配方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (6): 192-199.
- [18] 郝帅, 安倍逸, 付周兴, 等. 基于小波变换和各向异性扩散的红外和可见光图像融合算法 [J]. 西安科技大学学报, 2022, 42 (1): 184-190.
- [19] 颀亚玮, 黄静杰, 蒋毅恒, 等. Fe/Ti-MIL-NH₂ 吸附-光催化降解 NDPHA [J]. 中国环境科学, 2022, 42 (4): 1652-1662.
- [20] 陈博亚, 李明宴, 朱雨航, 等. 利用二维流体分子热力学模型计算气体混合物在固体界面的吸附等温线 [J]. 化工学报, 2021, 72 (2): 913-920.
- [21] 汪潇, 金彪, 张小婷, 等. 氯盐体系下阳离子对脱硫石膏晶须水热结晶的影响及其机理 [J]. 化工进展, 2022, 41 (7): 3957-3965.
- [22] 刘建华, 陈磊, 吴绍明, 等. 阳离子类型对粉煤灰混凝土氯离子扩散性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (6): 1920-1929.
- [23] 刘伟玲, 闫子琪. 基于 NI-CompactRIO 的气体数据并行采集及监测 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (4): 437-440.
- [24] 徐红萍, 刘巧娟, 唐荣安, 等. 一维简谐势阱中超冷费米气体的孤子解及其稳定性 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2021, 57 (3): 52-56.