

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.02.010

# 高压电缆缓冲层烧蚀气体红外光谱分析方法

门业堃<sup>1</sup>, 任志刚<sup>1</sup>, 郭卫<sup>1</sup>, 陈平<sup>1</sup>, 汤晓君<sup>2,3</sup>, 王诗航<sup>2</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075; 2. 西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049; 3. 西安交通大学仪器科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷是导致电力电缆故障的重要原因。缓冲层烧蚀会释放气体, 释放气体的成分及浓度能够表征缓冲层的烧蚀缺陷程度。傅里叶变换红外光谱技术应用于缓冲层烧蚀气体分析时具有快速、灵敏、无损的独特优势。针对缓冲层烧蚀气体检测存在的噪声影响、基线漂移及交叉干扰问题, 文中提出一种高压电缆缓冲层烧蚀气体红外光谱分析方法, 以  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  作为特征气体, 分别通过标准浓度气体分析和烧蚀特征气体分析实验对该方法进行验证。实验结果表明, 3种特征气体浓度与缓冲层烧蚀缺陷有关, 所提方法可从红外光谱中精准分析特征气体的浓度。混合气体中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  的相对误差分别为 8.90%、17.60% 和 4.32%, 检测周期小于 15 s。文中方法为快速、高精度诊断高压电缆缓冲层烧蚀缺陷提供了关键技术支撑。

**关键词:** 高压电缆; 烧蚀; 红外光谱; 噪声; 基线漂移; 交叉干扰; 特征气体

**中图分类号:** TM75

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2026)02-0093-08

## 0 引言

高压电缆在供电系统中具有重要地位, 其可靠性对于维护城市电网的安全稳定至关重要<sup>[1-2]</sup>, 一旦发生故障, 可能引起大面积停电事故, 严重危害人民生命财产安全。近年来, 由于缓冲层烧蚀所导致的交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆故障事故频发, 引起了行业内的广泛关注<sup>[3-12]</sup>。评估高压电缆缓冲层状态, 对烧蚀缺陷进行诊断, 有助于预警电缆事故, 保障电力电缆安全运行。

目前高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的检测方法主要有高次谐波法<sup>[13]</sup>、超声检测法<sup>[14]</sup>、宽频阻抗法<sup>[15]</sup>、局部放电法<sup>[16]</sup>、X射线成像技术<sup>[17-18]</sup>等, 但这些方法在重复性、安全性、识别率等方面有待提高。高压电缆阻水缓冲层发生烧蚀时会产生气体, 主要包括  $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$  等。这些气体与缓冲层烧蚀缺陷的劣化程度密切相关<sup>[19]</sup>, 分析这些气体浓度能够诊断缓冲层烧蚀缺陷。缓冲层烧蚀的气体产物会随时间累积, 因此这种方法不要求检测时发生局部放电, 适用于具有长期、间歇性、低能量的局部放电特征的缓冲层烧蚀。

近年来, 也有研究人员开展了基于特征气体诊断高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的研究。文献<sup>[19]</sup>采用气相色谱分析缓冲层烧蚀的特征气体, 表明烧蚀过程中的电流密度与气体产物存在明显关联。文

献<sup>[20]</sup>提出一种基于  $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$  的缓冲层状态评估方法。文献<sup>[21]</sup>将甲苯、邻苯二甲酸二丁酯等芳香烃类气体作为特征, 提出一种缓冲层烧蚀缺陷分析方法。文献<sup>[22-23]</sup>通过在铝护套波峰处钻孔取气, 进一步验证了分析缓冲层烧蚀缺陷释放气体的可行性。但目前这些成果均采用气相色谱仪分析缓冲层烧蚀缺陷释放的特征气体, 这种方法的检测周期长、便携性差、操作复杂、维护困难, 难以实现对烧蚀缺陷释放的多组分气体的快速检测。

电缆烧蚀特征气体的成分复杂, 且目前关于缓冲层烧蚀特征气体检测的研究较为缺乏。傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)作为一种快速、灵敏、无损的检测技术, 在气体分析方面具有优势<sup>[24-26]</sup>, 可用于缓冲层烧蚀特征气体分析。然而, 在实际分析中, 受光谱仪自身特性和外界环境因素等影响, 原位光谱不可避免地含有噪声<sup>[27-28]</sup>。这些噪声会影响分析结果, 淹没低浓度气体的光谱信息。由于光源、温度、湿度、气流等因素, 以及仪器自身特性漂移的影响, 光谱的基线可能发生倾斜与波动, 进而导致光谱吸收峰处的吸光度产生偏差<sup>[29-30]</sup>。同时, 缓冲层烧蚀特征气体为多组分混合气体, 各组分的红外光谱存在严重的交叉干扰<sup>[31-32]</sup>。因此, 如何提高光谱信噪比, 消除各组分间的交叉干扰, 准确地从光谱中提取气体浓度信息仍是有待解决的重要难题。

针对以上问题, 文中提出一种用于高压电缆缓冲层烧蚀特征气体的 FTIR 光谱分析方法。采用改

收稿日期: 2025-07-27; 修回日期: 2025-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2066204); 国家电网有限公司科技项目(520223230014)

进的 Savitzky-Golay(SG)平滑消除光谱中的噪声,采用改进的自适应迭代重加权惩罚最小二乘(adaptive iterative re-weighted penalized least squares, airPLS)进行基线校正,采用竞争自适应重加权采样(competitive adaptive re-weighted sampling, CARS)筛选特征变量,采用偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)建立烧蚀特征气体浓度的定量分析模型。通过标准气体分析和模拟烧蚀气体分析验证方法的有效性。结果表明,该方法能够有效解决高压电缆缓冲层烧蚀缺陷特征气体红外光谱分析所面临的噪声影响、基线漂移和交叉干扰问题,提高烧蚀特征气体分析的准确性,为高压电缆缓冲层烧蚀缺陷诊断提供数据支撑。

## 1 缓冲层特征气体 FTIR 光谱分析方法

### 1.1 FTIR 光谱分析法

FTIR 光谱分析的核心原理是朗伯比尔吸收定律<sup>[33]</sup>。当特定频率的光垂直穿过固定厚度的均匀介质时,透射光的强度与入射光满足式(1)。

$$A(\nu) = \ln \frac{I_0(\nu)}{I_t(\nu)} = \ln \frac{1}{T(\nu)} = K(\nu)LC \quad (1)$$

式中:  $A(\nu)$  为频率  $\nu$  处的吸光度;  $I_0(\nu)$  为入射光频率  $\nu$  处的强度;  $I_t(\nu)$  为透射光频率  $\nu$  处的强度;  $T(\nu)=I_t(\nu)/I_0(\nu)$ , 为透射比(透光度);  $K(\nu)$  为摩尔吸收系数;  $L$  为介质厚度;  $C$  为气体浓度。

根据朗伯比尔定律,当  $L$  不变时,  $A(\nu)$  与  $C$  之间成正比关系。通过分析  $A(\nu)$ , 可以得到不同气体的浓度。光谱吸收峰的横坐标(频率/波数)反映了气体的种类,光谱吸收峰的纵坐标(强度)反映了气体的浓度,能够实现气体的定性、定量分析。

高压电缆缓冲层烧蚀会产生  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $CO_2$  等气体<sup>[22,34]</sup>。 $H_2$  为对称型分子,在红外波段无吸收;环境空气中的  $CO_2$  浓度较高,容易对测量产生干扰;缓冲层烧蚀所产生的  $C_2H_2$  浓度较低,不易被测定<sup>[19,22,34]</sup>。因此,文中选择  $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$  作为缓冲层烧蚀的特征气体。由 HITRAN 光谱数据库得到特征气体在  $500\text{ cm}^{-1}$  至  $4\,000\text{ cm}^{-1}$  波数区域的吸收线,如图 1 所示。这些特征气体的吸收峰存在严重交叠,如在  $3\,000\text{ cm}^{-1}$  波数位置附近,3 种特征气体均存在较强的吸收。其中  $C_2H_6$  的主要吸收区域均存在  $CH_4$  和  $C_2H_4$  的干扰,难以有效准确分离。因此,采用数据校正技术分离不同气体的光谱特征。

通过数据分析解决缓冲层烧蚀特征气体红外吸收光谱的噪声影响、基线漂移和交叉干扰问题,分析过程如图 2 所示。采用标准浓度气体的红外

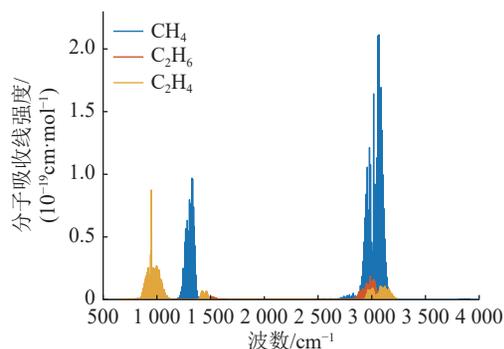


图 1 高压电缆缓冲层烧蚀特征气体的红外光谱

Fig.1 Infrared spectra of characteristic gases from high-voltage cable buffer layer ablation

吸收光谱建立数据库,首先对测量得到的光谱进行平滑去噪,消除高频噪声干扰;接着通过自适应基线校正方法消除光谱的基线漂移;然后筛选特征变量,降低数据量的同时消除各组分间的交叉干扰;最后建立定量分析模型,得到缓冲层烧蚀特征气体各组分的浓度。

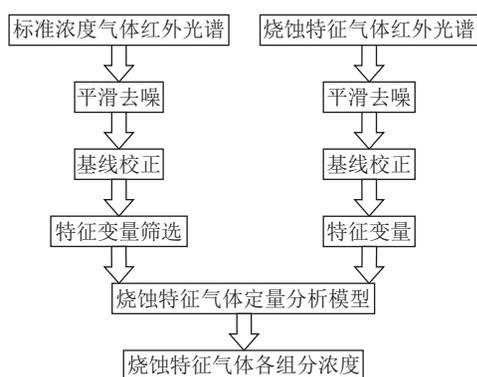


图 2 缓冲层烧蚀特征气体红外光谱分析过程

Fig.2 Infrared spectral analysis process of buffer layer ablation characteristic gases

### 1.2 光谱预处理

#### 1.2.1 平滑去噪

采用改进的分段 SG 平滑消除光谱中的高频噪声,通过局部多项式拟合实现光谱平滑。在窗宽为  $2w+1$  的窗口内,通过式(2)所示  $n$  阶多项式对光谱进行拟合。

$$f_j = \sum_{t=0}^n h_t j^t = h_0 + h_1 j + h_2 j^2 + \dots + h_n j^n \quad (2)$$

式中:  $n$  为多项式拟合阶数;  $h_t$  为第  $t$  个拟合系数;  $j$  为窗口内的波数变量,  $j \in [-w, w]$ ;  $f_j$  为窗口内在波数  $j$  处的多项式拟合值。在窗口内,共有  $2w+1$  个式(2),构成了  $n+1$  元线性方程组。通过最小二乘拟合确定拟合系数  $h_t$ , 得到:

$$\mathbf{H} = \mathbf{e}_1^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为设计矩阵,也是范德蒙矩阵,如式(4)所示;  $\mathbf{e}_1^T$  为单位基向量,如式(5)所示;  $\mathbf{H}$  为通过最小

二乘拟合得到的平滑系数向量, 如式(6)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & -w & \cdots & (-w)^n \\ 1 & -w+1 & \cdots & (-w+1)^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & w & \cdots & w^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_1 = (1, 0, 0, \cdots, 0)^T \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = (h_{-w}, h_{-w+1}, \cdots, h_w) \quad (6)$$

最终, 根据平滑系数将原始光谱加权求和, 得到平滑光谱, 平滑后的光谱通过式(7)计算。

$$x_{i,s} = \frac{1}{H} \sum_{j=-w}^w x_{i+j} h_j \quad (7)$$

式中:  $x_{i,s}$  为平滑后光谱在波数  $i$  处的吸光度;  $H$  为归一化因子, 是平滑系数的和, 通过式(8)计算;  $x_{i+j}$  为原始光谱在波数  $i+j$  处的吸光度;  $h_j$  为平滑系数, 通过式(6)所示的最小二乘多项式拟合计算。

$$H = h_{-w} + \cdots + h_j + \cdots + h_w \quad (8)$$

对含有 3 个吸收峰的模拟光谱进行分析, 不同窗宽的平滑结果如图 3 所示。随着窗宽的增加, 噪声变得更低, 光谱更平滑, 但吸收峰的强度也变低。窗宽过小时, 消除噪声的效果较差; 窗宽过大时, 可能会丢失部分光谱信息。为了在保留光谱信息的同时有效消除噪声, 文中根据缓冲层烧蚀特征气体的红外光谱特征对原始光谱进行分段, 在有峰区域和无峰区域采用不同的窗宽。

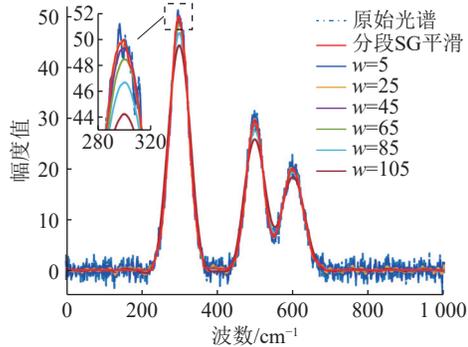


图 3 不同窗宽的 SG 平滑结果

Fig.3 SG smoothing results for different window widths

### 1.2.2 基线校正

FTIR 光谱分析中应用最广泛的基线校正方法是 airPLS<sup>[35]</sup>, 但其校正结果受平滑参数  $\lambda$  影响。在吸收峰区域, 过小的  $\lambda$  会过分拟合基线, 如图 4 所示。人为选择合适的  $\lambda$  十分困难。在峰重叠和包含复杂基线的情况下, airPLS 的校正效果不理想。

为了解决这一问题, 引入惩罚因子以自适应地调整  $\lambda$ 。惩罚因子计算如下:

$$\alpha_i = \frac{|x_i - z_i|}{\max(|\mathbf{X} - \mathbf{Z}|)} \quad (9)$$

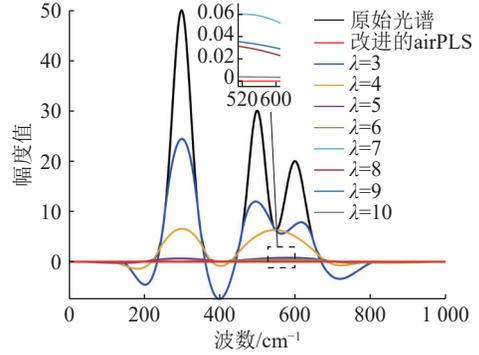


图 4 不同平滑参数下的 airPLS 基线估计结果

Fig.4 Baseline estimation results of airPLS with different smoothing parameters

式中:  $\alpha_i$  为第  $i$  个波数的惩罚因子;  $x_i$ 、 $z_i$  分别为第  $i$  个波数的吸光度和基线值;  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Z}$  分别为光谱和基线向量。

拟合的基线向量计算如下:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{W} + \alpha \mathbf{L} \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{W} \mathbf{X} \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  为惩罚因子向量, 且  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_i)$ ;  $\mathbf{D}$  为二阶差分矩阵;  $\mathbf{W}$  为权重矩阵, 且  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \cdots, w_i)$ 。权重  $w_i$  的初始值全为 1, 且通过式(11)进行迭代更新。

$$w_i = \begin{cases} \text{logistic}(x_i - z_i, m_d, \sigma_d) & x_i \geq z_i \\ 1 & x_i < z_i \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $d$  为拟合误差  $x_i - z_i$  中小于 0 的集合;  $m_d$ 、 $\sigma_d$  分别为  $d$  的平均值和标准差。

### 1.3 特征变量筛选

采用 CARS<sup>[36]</sup> 筛选烧蚀特征气体红外光谱中的特征变量。首先, 对所有光谱数据进行建模, 采用蒙特卡洛采样法进行  $N$  次采样, 并建立偏最小二乘回归模型。然后, 通过指数衰减函数去除回归系数较小的波数。保留率计算如下:

$$R_n = a e^{-bn} \quad (12)$$

式中:  $R_n$  为第  $n$  次采样的保留率;  $a$ 、 $b$  为常数。

$$\begin{cases} a = \left(\frac{M}{2}\right)^{\frac{1}{N-1}} \\ b = \left(\ln \frac{M}{2}\right) / (N-1) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $N$  为采样总次数;  $M$  为光谱总数。

最后, 对回归系数绝对值较大的波数进行回归, 并建立回归模型。交叉验证均方根误差最小的变量子集为最优结果。

### 1.4 定量分析模型

采用 PLSR<sup>[37]</sup> 建立浓度定量分析模型。首先, 根据式(14)对光谱矩阵  $\mathbf{X}$  和浓度矩阵  $\mathbf{Y}$  进行分解。

$$\begin{cases} X = TP^T + E_X = \sum_{k=1}^f t_k p_k^T + E_X \\ Y = UQ^T + E_Y = \sum_{k=1}^f u_k q_k^T + E_Y \end{cases} \quad (14)$$

式中： $f$ 为主因子数； $t_k$ 、 $u_k$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 中第 $k$ 个主因子的得分； $p_k$ 、 $q_k$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 中第 $k$ 个主因子的载荷； $T$ 、 $U$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 的得分； $P$ 、 $Q$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 的载荷； $E_X$ 、 $E_Y$ 分别为 $X$ 和 $Y$ 的拟合残差矩阵。

然后，通过式(15)对 $T$ 和 $U$ 进行线性回归。

$$\begin{cases} U = TB \\ B = (T^T T)^{-1} T^T Y \end{cases} \quad (15)$$

式中： $B$ 为回归系数矩阵。

最后，预测各组分气体浓度。与式(14)类似，根据 $P$ 得出预测光谱矩阵 $X_n$ 的预测得分矩阵 $T_n$ ，如式(16)所示。最终，通过式(17)得到预测浓度矩阵 $Y_n$ ，进而得出各组分气体浓度的预测值。

$$T_n = X_n P (P^T P)^{-1} \quad (16)$$

$$Y_n = T_n B Q \quad (17)$$

## 2 缓冲层烧蚀气体红外光谱分析实验

### 2.1 标准浓度气体分析实验

标准浓度气体分析实验平台如图5所示。光谱仪的光程为10 cm，扫描波数分辨率为 $1 \text{ cm}^{-1}$ ，每张光谱图扫描16次。以标准浓度的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 作为目标气体。所采用的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 和 $\text{C}_2\text{H}_4$ 浓度分别为 $20 \times 10^{-6}$ 、 $5 \times 10^{-6}$ 、 $50 \times 10^{-6}$ ，多组分气体为3种标准浓度气体的混合，背景气体为高纯度 $\text{N}_2$ 。

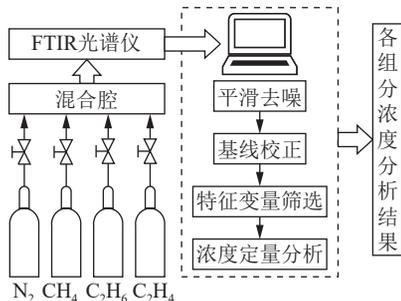


图5 标准浓度气体分析平台

Fig.5 Standard concentration gases analysis platform

### 2.2 缓冲层模拟烧蚀气体分析实验

通过模拟烧蚀实验，得到不同烧蚀缺陷程度下的多组烧蚀特征气体。实验装置如图6所示。试样的上层为缓冲层，下层为绝缘屏蔽层，尺寸为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ，缓冲层厚度为2 mm。缓冲层上方为电气铝球电极，绝缘屏蔽的下方为黄铜平板电极。试

样置于密闭容器内，防止气体扩散。上下电极之间施加1 kV、50 Hz的电压，模拟铝护套与缓冲层接触位置的烧蚀情况。分别采用FTIR与气相色谱仪分析烧蚀0~3 min(步长0.5 min)时实验腔内的特征气体浓度。将FTIR光谱分析结果与气相色谱的分析结果进行对比，以验证光谱分析结果的准确性。气相色谱仪型号为ZF-301B，采用氢火焰离子检测器，载气为 $\text{N}_2$ ，每次气体进样量为1 mL。

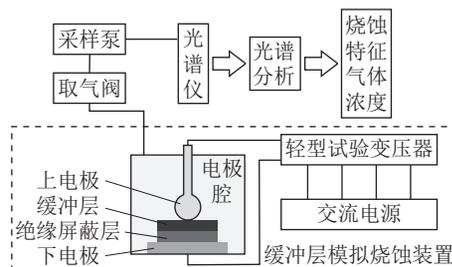


图6 缓冲层模拟烧蚀气体分析平台

Fig.6 Buffer layer ablative gas analysis platform

## 3 实验结果分析

### 3.1 单组份气体分析结果

对单组份标准浓度气体分析所得到的 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 红外吸收光谱进行预处理，预处理后的红外光谱如图7所示。3种特征气体的光谱基线基本重合且位于零线附近。预处理后的光谱并未发生基线漂移与畸变现象。

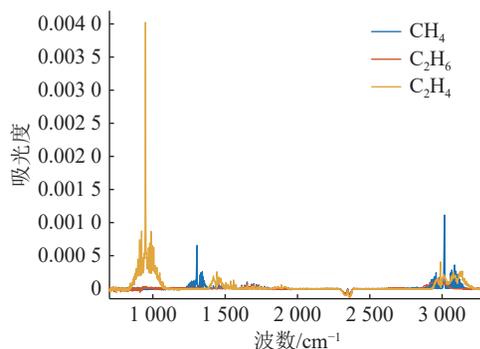


图7 单组份气体的红外光谱

Fig.7 Infrared spectra of single-component gases

每组特征气体测量5次，单组份标准浓度气体的分析结果和分析误差如表1和表2所示。3种特征气体的测量均值均接近于标准浓度。其中， $\text{C}_2\text{H}_6$ 的平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)最小，分别为 $0.66 \times 10^{-6}$ 和 $0.752 \times 10^{-6}$ 。 $\text{C}_2\text{H}_4$ 的平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)最小，仅为4.04%。 $\text{C}_2\text{H}_6$ 的浓度最低，因此其绝对误差较小。而 $\text{C}_2\text{H}_4$ 的浓度最高，因此其相对误差较小。3种特征气体的MAPE均小于15%，满足高

压电缆缓冲层烧蚀特征气体分析的要求。

表 1 单组份气体的分析结果

Table 1 Analytical results for single-component gases

测量次数	各组分浓度测量结果/ $10^{-6}$		
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
1	17.5	4.7	47.3
2	19.3	4.0	48.7
3	20.7	3.9	49.6
4	19.3	4.8	47.4
5	18.9	4.3	46.9

表 2 单组份气体的分析误差

Table 2 Analytical errors for single-component gases

气体种类	测量均值/ $10^{-6}$	MAE/ $10^{-6}$	MAPE/%	RMSE/ $10^{-6}$
CH <sub>4</sub>	19.14	1.14	5.70	1.336
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.34	0.66	13.20	0.752
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	47.98	2.02	4.04	2.259

### 3.2 多组份混合气体分析结果

混合特征气体预处理后的红外光谱如图 8 所示。经过预处理, 红外光谱不存在基线漂移。混合气体在  $950\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 305\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\ 954\text{ cm}^{-1}$  附近分别出现 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的吸收峰。由于 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的浓度较低, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的吸收峰不明显, 且 CH<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的吸收峰重叠严重。

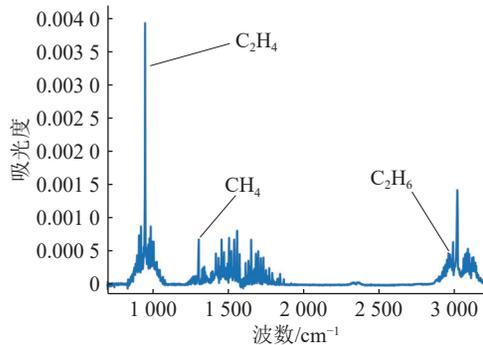


图 8 多组份混合气体的红外光谱

Fig.8 Infrared spectra of multi-component gas mixtures

多组分混合气体的分析结果和分析误差如表 3 和表 4 所示。混合气体中 3 种特征气体的分析结果均值均与标准浓度接近。C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的 MAE 和 RMSE 最小, 分别为  $0.88 \times 10^{-6}$  和  $0.955 \times 10^{-6}$ 。C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的 MAPE 最小, 仅为 4.32%。各组分的 MAPE 均小于 20%, 满足缓冲层烧蚀特征气体分析要求。表明所提出的方法能够准确分析 3 种特征气体混合时的各组分浓度。

### 3.3 烧蚀特征气体分析结果

模拟烧蚀实验得到的特征气体分析结果如图 9—

表 3 多组分混合气体的分析结果

Table 3 Analytical results for multi-component gases

测量次数	各组分浓度测量结果/ $10^{-6}$		
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
1	22.3	5.3	52.2
2	19.2	6.1	49.6
3	23.1	5.9	52.1
4	22.5	5.7	53.3
5	20.2	6.4	52.8

表 4 多组分混合气体的分析误差

Table 4 Analytical errors for multi-component gases

气体种类	测量均值/ $10^{-6}$	MAE/ $10^{-6}$	MAPE/%	RMSE/ $10^{-6}$
CH <sub>4</sub>	21.46	1.78	8.90	2.089
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.88	0.88	17.60	0.955
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	52.00	2.16	4.32	2.372

图 11 所示。随着烧蚀时间的增加, 3 种特征气体的浓度均呈上升趋势。其中, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的浓度上升最快, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的浓度上升最慢。表明这 3 种特征气体的浓度能够表征缓冲层的烧蚀程度。以气相色谱仪的分析结果为标准, FTIR 光谱的分析结果与气相色谱接近, 分析误差满足测量需求。此外, 经时序分析, 光谱分析与特征气体浓度输出的耗时小于 15 s。

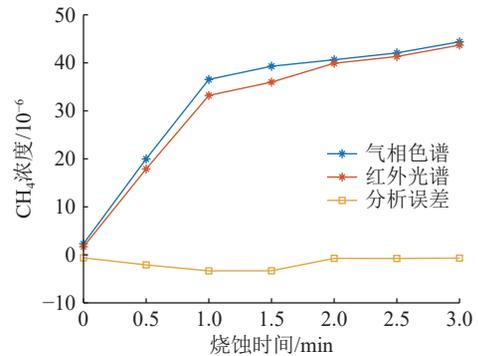


图 9 烧蚀特征气体中 CH<sub>4</sub> 的分析结果

Fig.9 Analytical results of CH<sub>4</sub> in the ablation characteristic gases

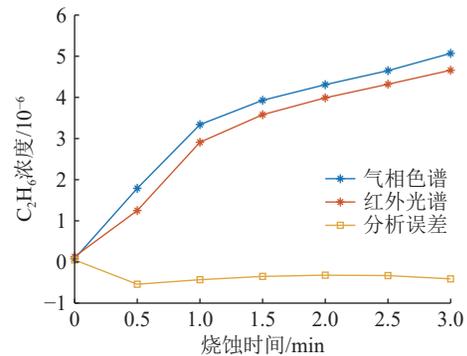


图 10 烧蚀特征气体中 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的分析结果

Fig.10 Analytical results of C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> in the ablation characteristic gases

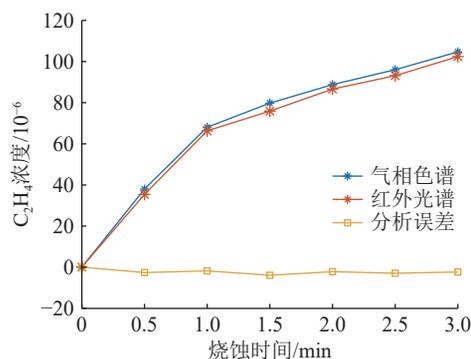


图 11 烧蚀特征气体中 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的分析结果  
Fig.11 Analytical results of C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> in the ablation characteristic gases

#### 4 结论

文中建立高压电缆缓冲层烧蚀特征气体红外光谱分析模型,并通过单组分、多组分混合气体及缓冲层模拟烧蚀气体实验验证其有效性,主要结论如下:

(1) 提出高压电缆缓冲层烧蚀气体红外光谱分析方法,通过自适应平滑去噪、基线校正、特征变量筛选和定量分析建模,有效解决红外光谱用于缓冲层烧蚀缺陷特征气体浓度测量的噪声影响、基线漂移、交叉干扰问题。

(2) 开展单组份和多组分混合气体分析实验,结果表明所提出方法可在 15 s 内同时准确得到 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的浓度,混合气体中的相对误差分别为 8.90%、17.60% 和 4.32%。

(3) 开展缓冲层模拟烧蚀特征气体分析实验,结果表明随着烧蚀时间的增加,CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的浓度均呈上升趋势。红外光谱具有检测速度快、准确性高的优势,为高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的早期诊断提供了高效的解决方案。

#### 参考文献:

[1] 周松霖,刘若溪,姜磊,等. 高压 XLPE 绝缘电力电缆护层烧蚀机理分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 171-176.  
ZHOU Songlin, LIU Ruoxi, JIANG Lei, et al. Ablation mechanism analysis on metal sheath of high voltage XLPE insulated power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 171-176.

[2] 钱梦迪,任志刚,陈平,等. 110 kV 高压平滑铝护套结构和皱纹铝护套结构交流电缆综合性能对比研究[J]. 高压电器, 2025, 61(8): 155-160.  
QIAN Mengdi, REN Zhigang, CHEN Ping, et al. Comparison research on electrical and mechanical properties of 110 kV high voltage AC cables with smooth and corrugated aluminum sheath structures[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(8): 155-160.

[3] 刘英,陈佳美. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层电-热场分析及模

拟烧蚀试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1260-1271.

LIU Ying, CHEN Jiamei. Electro-thermal field analysis and simulated ablation experiments for the water-blocking buffer layer in high voltage XLPE cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1260-1271.

[4] 欧阳本红,李文杰,刘英,等. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层烧蚀机理[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3153-3162.  
OUYANG Benhong, LI Wenjie, LIU Ying, et al. Ablation mechanism of water-blocking buffer layer in HV XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3153-3162.

[5] 冯尧,赵鹏,李文杰,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障机理分析与结构优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 242-249.  
FENG Yao, ZHAO Peng, LI Wenjie, et al. Ablative fault mechanism analysis and structure improvement of buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 242-249.

[6] 张泽晋,陈彦伊,廖雁群,等. 高压电缆外护套特征阻抗建模及破损检测方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(9): 78-87.  
ZHANG Zejin, CHEN Yanyi, LIAO Yanqun, et al. Characteristic impedance modeling and damage detection method for high-voltage cable sheath[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9): 78-87.

[7] 刘亚茹,张雨若,郭子哈,等. 热老化对 XLPE 电缆电树枝特性的影响研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 279-288.  
LIU Yaru, ZHANG Yuruo, GUO Zihan, et al. Study on effect of thermal aging on electrical tree characteristics of XLPE cables[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 279-288.

[8] 戴明浩,赵铜鑫,赵薇,等. 高压直流电缆系统交联聚乙烯/三元乙丙橡胶界面的匹配特性研究[J]. 高压电器, 2025, 61(7): 179-188, 196.  
DAI Minghao, ZHAO Tongxin, ZHAO Wei, et al. Study on matching characteristic of XLPE/EPDM interface in HVDC cable system[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(7): 179-188, 196.

[9] 门业堃,张竟成,郭卫,等. 高压 XLPE 电缆缓冲带动态导电特性与机理[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 163-171.  
MEN Yekun, ZHANG Jingcheng, GUO Wei, et al. Dynamic conductive property and mechanism of buffer tape in HV XLPE cables[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 163-171.

[10] 张静,王伟,徐明忠,等. 高压电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障机理分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 180-184.  
ZHANG Jing, WANG Wei, XU Mingzhong, et al. Analysis of axial ablation failure mechanism of buffer layer of high voltage power cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 180-184.

[11] 严有祥,徐子峻,尤天鹏,等. 高压电缆缓冲层烧蚀的成因分析[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 184-189.  
YAN Youxiang, XU Zijun, YOU Tianpeng, et al. Cause analy-

- sis of buffer layer ablation in high voltage cable[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 184-189.
- [12] 胡丽斌, 陈杰, 赖庆波, 等. 高压电缆缓冲层白斑缺陷引发放电的机理研究[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 155-164.  
HU Libin, CHEN Jie, LAI Qingbo, et al. Study on discharge mechanism by white spot defect in cable buffer layer[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 155-164.
- [13] 刘凤莲, 夏荣, 李文杰, 等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266, 274.  
LIU Fenglian, XIA Rong, LI Wenjie, et al. Research on detection method of buffer layer ablation defect in high voltage XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 259-266, 274.
- [14] 何维晟, 吴照国, 邓帮飞, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测技术仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 230-237, 260.  
HE Weisheng, WU Zhaoguo, DENG Bangfei, et al. Simulation research on ultrasonic detection technology of buffer layer ablation defects in high voltage cables[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 230-237, 260.
- [15] 郑建康, 苏小婷, 李庚, 等. 高压电缆阻水缓冲层电化学腐蚀特性及失效研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 91-96.  
ZHENG Jiankang, SU Xiaoting, LI Geng, et al. Electrochemical corrosion properties and failure analysis of water-blocking buffer layer in high voltage power cables[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2): 91-96.
- [16] 刘宏亮, 刘若溪, 陈平, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀及白斑模拟试验研究[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 135-142.  
LIU Hongliang, LIU Ruoxi, CHEN Ping, et al. Study on simulation experiment of ablation and white powder of buffer layer in high-voltage cable[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 135-142.
- [17] 谢亿, 刘维可, 刘三伟, 等. 高压电缆阻水缓冲层烧蚀缺陷的射线检测[J]. 无损检测, 2020, 42(12): 56-58.  
XIE Yi, LIU Weike, LIU Sanwei, et al. X-ray detection of the ablation defect of water blocking buffer layer in high-voltage cable[J]. Nondestructive Testing Technology, 2020, 42(12): 56-58.
- [18] 冯超, 李伟, 曹先慧, 等. 220 kV 电缆缓冲层烧蚀缺陷射线检测方法[J]. 湖南电力, 2020, 40(5): 43-46.  
FENG Chao, LI Wei, CAO Xianhui, et al. Radiographic detection method of ablative defects in 220 kV cable buffer layer[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(5): 43-46.
- [19] 郭卫, 门业堃, 任志刚, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀过程中电流密度与气体产物浓度的关联性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 71-76.  
GUO Wei, MEN Yekun, REN Zhigang, et al. Study on correlation between current density and gas product concentration of buffer layers for high-voltage cable during ablation process[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 71-76.
- [20] 周凯, 赵琦, 李原, 等. 基于分阶段产气的高压电缆阻水缓冲层状态评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3882-3890.  
ZHOU Kai, ZHAO Qi, LI Yuan, et al. Evaluation technology of water-blocking buffer layer of high voltage cable based on stages classification of gases evolution[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3882-3890.
- [21] 刘顺满, 王健, 程皓, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀缺陷特征气体分析[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 116-125.  
LIU Shunman, WANG Jian, CHENG Hao, et al. Analysis on characteristic gas of ablative defect in buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 116-125.
- [22] 张浩然, 高建, 武康宁, 等. 基于温度测量和气体分析的高压电缆缓冲层烧蚀故障检测技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 4929-4937.  
ZHANG Haoran, GAO Jian, WU Kangning, et al. Detection technology of buffer layer ablation failure in high voltage cables based on temperature measurement and gases analysis[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4929-4937.
- [23] ZHOU W Q, CHENG H, HUI B J, et al. Key process of the deflection of PET buffer layer in XLPE power cable by a case study: thermo-oxidative degradation[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 146: 107131.
- [24] 张渤海, 邹可园, 张晓星. 高压电气设备绝缘气体分解产物光学检测技术研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2806-2815.  
ZHANG Chaohai, ZOU Keyuan, ZHANG Xiaoxing. Review on optical detection technology of insulating gas decomposition products for high voltage electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2806-2815.
- [25] 张引, 蔡逸杰, 李晓涵, 等. 基于开放光路 FLRDS 技术的  $C_2H_2$  和  $C_2H_6$  气体检测[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 56-62.  
ZHANG Yin, CAI Yijie, LI Xiaohan, et al.  $C_2H_2$  and  $C_2H_6$  detection based on open-path fiber loop ring-down spectroscopy technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 56-62.
- [26] KWAME B B, 王毅, 田双双, 等. 环保绝缘介质  $C_6F_{12}O$  混合气体 FTIR 检测技术研究[J]. 高压电器, 2024, 60(9): 126-134.  
KWAME B B, WANG Yi, TIAN Shuangshuang, et al. Research on infrared spectrum characteristics and detection technology of environmentalfriendly insulating medium  $C_6F_{12}O$ [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(9): 126-134.
- [27] LIU L X, HUAN H T, LI W, et al. Highly sensitive broadband differential infrared photoacoustic spectroscopy with wavelet denoising algorithm for trace gas detection[J]. *Photoacoustics*, 2021, 21: 100228.
- [28] 朱思聪, 高西娅, 张朱珊莹, 等. 红外光谱数据划分比例及预处理方法研究[J]. 分析化学, 2022, 50(9): 1415-1429.  
ZHU Sicong, GAO Xiya, ZHANG Zhushanying, et al. Partitioning proportion and pretreatment method of infrared spec-

- tral dataset[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(9): 1415-1429.
- [29] 王海朋, 褚小立, 陈瀑, 等. 光谱基线校正算法研究与应用进展[J]. 分析化学, 2021, 49(8): 1270-1281.  
WANG Haipeng, CHU Xiaoli, CHEN Pu, et al. Research and application progress of algorithms for spectral baseline correction[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49(8): 1270-1281.
- [30] CHEN T J, SON Y, PARK A, et al. Baseline correction using a deep-learning model combining ResNet and UNet[J]. *Analyst*, 2022, 147(19): 4285-4292.
- [31] 沈恩泽, 张周胜, 张磊. 变压器油中溶解气体光声光谱检测交叉干扰抑制方法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2022(10): 104-110, 115.  
SHEN Enze, ZHANG Zhousheng, ZHANG Lei. Research on cross-interference suppression method for photoacoustic spectroscopy detection of dissolved gas in transformer oil[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(10): 104-110, 115.
- [32] 方祺, 瞿殿桂. 电力变压器油多组分气体检测及交叉干扰特性研究[J]. *电力与能源*, 2021, 42(6): 664-670, 698.  
FANG Qi, QU Diangui. Multicomponent gas detection and cross interference characteristics of power transformer oil[J]. *Power & Energy*, 2021, 42(6): 664-670, 698.
- [33] 赫树开, 曾晓哲, 齐汝宾, 等. 基于 FTIR 的高压电器用 T 型电缆插头热解行为研究[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(4): 91-94.  
HE Shukai, ZENG Xiaozhe, QI Rubin, et al. Pyrolysis behavior of T-type cable plugs for high voltage devices based on FTIR[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(4): 91-94.
- [34] KONG J M, ZHOU K, CHEN Y D, et al. A novel condition assessment method for corrugated aluminum sheathed XLPE cables based on evolved gas analysis[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2023, 30(2): 883-891.
- [35] LI Y Q, PAN T H, LI H R, et al. Non-invasive quality analysis of thawed tuna using near infrared spectroscopy with baseline correction[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(8): e13445.
- [36] 李艳坤, 董汝南, 张进, 等. 光谱数据解析中的变量筛选方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(11): 3331-3338.  
LI Yankun, DONG Runan, ZHANG Jin, et al. Variable selection methods in spectral data analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(11): 3331-3338.
- [37] 陈图南, 马凤翔, 袁小芳, 等. SF<sub>6</sub> 气体绝缘电气设备故障分解物检测的多组分交叉干扰及校正算法综述[J]. *电工电能新技术*, 2021, 40(1): 43-54.  
CHEN Tunan, MA Fengxiang, YUAN Xiaofang, et al. Review on cross interference and its modification in multiple component gas detection for SF<sub>6</sub> insulated equipment[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2021, 40(1): 43-54.

作者简介:



门业堃

门业堃(1990),男,硕士,工程师,从事高压与绝缘技术工作(E-mail: [yekun.men@foxmail.com](mailto:yekun.men@foxmail.com));

任志刚(1983),男,硕士,高级工程师,从事电缆设备状态检测工作;

郭卫(1988),男,博士,高级工程师,从事电力电缆设备试验检测工作。

### Infrared spectroscopic analysis of ablative gases in the buffer layer of high-voltage cables

MEN Yekun<sup>1</sup>, REN Zhigang<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>1</sup>, TANG Xiaojun<sup>2,3</sup>, WANG Shihang<sup>2</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Company Research Institute, Beijing 100075, China; 2. Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China; 3. School of Instrument Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Ablative defects in the buffer layer of high-voltage cables are important causes of power cable failures. Buffer layer ablation releases gases, and some components of these gases and their concentrations can characterize the degree of buffer layer ablation defects. Fourier transform infrared spectroscopy for buffer layer ablation gas analysis has the unique advantages of speed, sensitivity, and non-destructiveness. To address the challenges in the detection of gases from high-voltage cable buffer layer ablation, namely noise interference, baseline drift and cross-interference, a buffer layer ablation gas Fourier transform infrared spectroscopy analysis method is proposed. The proposed method is validated by standard concentration gas analysis and ablation characteristic gas analysis experiments, using CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> as characteristic gases. The experimental results show that the three characteristic gas concentrations are related to the buffer layer ablation defects, and the proposed method can accurately analyze the concentration of the characteristic gases from infrared spectra, with relative errors of 8.90%, 17.60% and 4.32% for CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> in mixed gas, and the detection period is less than 15 s. This method can provide critical technical support for rapid, high-precision diagnosis of buffer layer ablation defects in high-voltage cables.

**Keywords:** high-voltage cables; ablation; infrared spectroscopy; noise; baseline drift; cross-interference; characteristic gases

(编辑 陈雯嘉)