

基于气体化学计量特征的高压电缆缓冲层烧蚀评估方法研究

任志刚¹, 郭卫¹, 门业堃¹, 张竞成¹, 赵鸽², 高建²

(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)

摘要: 高压电缆缓冲层烧蚀伴随有特征气体逸出现象, 故特征气体有望作为烧蚀故障检测评估指标, 但目前逸出气体的种类和浓度与烧蚀程度的关联性仍不明确。本文搭建缓冲层烧蚀模拟实验平台, 综合考虑后选择 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 以及 CO 作为缓冲层烧蚀评估的特征气体, 并分析其化学计量特征随缓冲层烧蚀程度和受潮程度的变化规律。结果表明: 特征气体的平均摩尔质量随缓冲层含水率提高而降低, 潮湿条件下的烃类特征气体中 C 与 H 原子数量之比高于干燥条件; C 原子与 H 原子的浓度随烧蚀时间的增加而不断提高。且随着烧蚀时间的增加, C 原子与 H 原子的浓度随潮湿程度的增大先减小, 再增大再减小, 最后单调增大。分析认为, 不同条件下缓冲层材料结构烧蚀破坏的差异是导致逸出气体化学计量特征变化的原因。

关键词: 高压电缆; 缓冲层烧蚀; 特征气体; 化学计量特征

Evaluation method for buffer layer ablation of high voltage cable based on gas stoichiometric characteristics

REN Zhigang¹, GUO Wei¹, MEN Yekun¹, ZHANG Jingcheng¹, ZHAO Ge², GAO Jian²

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

Abstract: The ablation of the buffer layer of high-voltage cables is accompanied by the release of characteristic gas, so the characteristic gas can be used as an indicator for the detection and evaluation of ablation faults. However, the correlation between the type and concentration of released gas and the degree of ablation is still unclear. In this paper, a buffer layer ablation simulation experiment platform was established. After comprehensive consideration, C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , and CO were selected as the characteristic gases for buffer layer ablation evaluation, and the change law of their stoichiometric characteristics with buffer layer ablation degree and moisture content were analyzed. The results show that the average molar mass of characteristic gas decreases with the increase of moisture content in buffer layer, and the ratio of C to H atoms in characteristic gases under humid conditions is higher than that under dry conditions. The concentrations of C and H atoms continuously increase with the burning time, and with the increase of burning time, the concentrations of C and H atoms first decrease, then increase and then decreases, and finally monotonically increase with the increase of moisture degree. Analysis suggests that the differences of damage to the buffer layer structure under different conditions are the reasons for the change in the stoichiometric characteristics of the released gas.

Key words: high voltage cable; buffer layer ablation; characteristic gas; stoichiometric characteristics

0 引言

高压电缆是城市的重要基础供电设备, 其运行可靠性对城市电网的安全稳定至关重要。近年来, 北京、上海、广州等各大城市频繁出现因阻水缓冲层烧蚀而导致高压电缆本体击穿事故, 已经严重

影响城市输电系统的安全与稳定运行^[1-3]。因此, 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的及时检出对于提升高压电缆的运行可靠性具有重要意义。

目前国内已研发出多种电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法, 包括 X 射线成像、宽频阻抗谱、局部放电、超声波检测等。但这些检测方法均存在不足, 其中 X 射线成像检测操作难度较大、检测灵敏度不

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(520223230014)。

高,且对人体有一定的伤害^[5-8]。宽频阻抗谱仅能粗略地反映出烧蚀故障点的位置范围,无法进行故障点的精准定位^[9-11]。局部放电检测暂未形成标准化方法,不同设备检测的结果有较大区别,并且缺乏烧蚀严重程度的诊断依据^[12-15]。另外由于多孔结构的缓冲层材料具有吸声特性,并且多层缓冲层绕包时层间存在间隙,会导致声波能量剧烈衰减,使得超声波检测技术在检测烧蚀缺陷时灵敏度较低^[16]。从上述分析可以看出,现阶段的缓冲层烧蚀缺陷检测方法在准确度及推广度等方面均难以满足存量在运高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的检测要求。因此,针对电缆缓冲层烧蚀缺陷的检测开展相关科研工作具有重要工程意义。

现阶段电缆缓冲层烧蚀故障的相关研究表明,缓冲层在烧蚀过程中会释放氢气、乙烷、乙烯、乙炔、一氧化碳等特征气体产物,且特征气体产量与缓冲层烧蚀严重程度密切相关^[18-22]。因此,缓冲层烧蚀的特征气体的种类和浓度有望作为高压电缆缓冲层烧蚀故障检测与诊断的重要参量。然而,目前一方面对于缓冲层烧蚀特征气体在烧蚀过程中的演变规律尚不明确,另一方面由于缓冲层材料本身的不均匀结构^[23],在实验室采用片状试样进行模拟烧蚀实验时,相同条件下产生特征气体的浓度可能存在较大差异,难以探明其变化规律。

化学计量学是一种将数学、统计学等与化学相结合的交叉学科。化学计量中的化学成分主要是指物质、材料或样品中某种成分的含量或浓度^[24],在气体检测分析方面具有广泛应用。例如在生态领域中,根据生态系统呼吸过程中两种碳产物(二氧化碳和甲烷)的化学计量比建立生态系统碳交换模型^[25];在化学领域中采用化学计量分析聚合物燃料热解气体产物的特征^[26];以及电气绝缘测试领域中对绝缘油中的气体进行检测后利用三比值法判断电力设备的故障类型等^[27-28]。可见,气体的化学计量特征能够反映混合气体的特征或系统的运行状态。因此,研究缓冲层烧蚀产生气体的化学计量特征,对于评估缓冲层烧蚀的严重程度具有重要意义。

基于上述研究现状,本文对缓冲层烧蚀特征气体的演变规律进行研究,基于各烧蚀特征气体均来自于缓冲层的分解的事实,结合化学计量学在气体的检测分析方面的应用,选择对各特征气体进行综

合分析。通过搭建实验室缓冲层烧蚀模拟平台,获得缓冲层烧蚀特征气体随烧蚀程度的演变规律,并结合化学计量学对特征气体进行定量分析,探究特征气体的化学计量随时间与缓冲层含水率的变化规律。本文的研究结果可为高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的特征气体检测提供实验基础与应用参考。

1 实验

1.1 模拟烧蚀实验平台

本文实验采用的模拟烧蚀实验平台如图1所示,腔体由有机玻璃制成,形成密封环境,避免烧蚀气体在实验过程中泄露。实际烧蚀涉及到的电缆结构主要包括皱纹铝护套、阻水缓冲层和绝缘屏蔽层,因此模拟平台的电极材料选用铝,实验试样包括阻水缓冲层与绝缘屏蔽。实验采用的阻水缓冲层材料主要由导电聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维(PET)、阻水粉(聚丙烯酸钠)颗粒、炭黑组成;绝缘屏蔽片由110 kV电力电缆屏蔽材料制备而成。

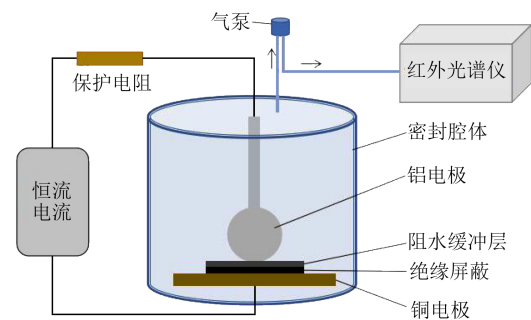


图1 模拟烧蚀实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of ablation simulation experimental platform

1.2 模拟烧蚀实验

阻水缓冲层在使用前需存放于干燥柜中,使用时将其裁剪成尺寸为50 mm×50 mm的实验试样,并将此时未经任何处理的缓冲层(含水率为0%)作为干燥缓冲层。用电子天平称量干燥缓冲层质量 m_0 ,使用喷壶使缓冲层均匀受潮,并再次称量缓冲层质量 m_1 ,即得到含水率为 $(m_1 - m_0)/m_1$ 的缓冲层。由于实验过程中水分蒸发、分解、渗出等因素,缓冲层的含水率会发生变化,因此本文所述含水率均为缓冲层初始含水率。

根据图1将绝缘屏蔽和三层缓冲层试样依次放置于实验平台,铝电极借助自身重力与阻水缓冲层自然接触,实验过程中保持腔体为密封状态。参考文献[29]中的仿真结果,铝护套与缓冲层紧密接触

的情况下电流密度最大处约为 448 mA/m^2 ，亦有模拟实验结果表明皱纹铝护套套谷嵌入缓冲层深度为 0.1 mm 时，电流密度最大值约为 $650 \text{ mA/m}^{2[30]}$ 。根据上述研究结果，计算得到流过本实验试样的电流为 $1\sim 2 \text{ mA}$ ，为加快模拟烧蚀进程，持续对缓冲层施加 50 mA 工频恒流电压进行烧蚀，定期检测一次腔体内气体产物及浓度。

1.3 烧蚀气体检测

本实验采用傅里叶变换红外光谱仪对缓冲层烧蚀过程中产生的小分子气体进行区分与含量测定^[31-32]。每次模拟烧蚀实验后，借助气泵将适量腔体内的气体抽入光谱仪的气体腔室内，通过扫描光谱，读取缓冲层烧蚀气体 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等的浓度。用空气作为扫描光谱的背景气体，得到的烧蚀气体浓度为缓冲层发生烧蚀后密封腔内气体与空气中相应气体的浓度之差。

1.4 烧蚀气体的化学计量特征分析

得到各烧蚀气体的浓度后，烧蚀气体的平均摩尔质量(M_G)可由式(1)计算^[26,33]。

$$M_G = \sum_{i=1}^n M_i \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (1)$$

式(1)中： M_i 是第 i 种烧蚀气体的摩尔质量，具体数值可以从 NIST 的在线数据库中获得； N_i 为第 i 种烧蚀气体的浓度。

利用式(2)~(3)可以分别计算烧蚀气体中 C 原子与 H 原子的浓度 N_C 、 N_H ^[26,34]。

$$N_C = \sum_{i=1}^n S_{Ci} \times N_i \quad (2)$$

$$N_H = \sum_{i=1}^n S_{Hi} \times N_i \quad (3)$$

式(2)~(3)中： S_{Ci} 、 S_{Hi} 分别为第 i 种烧蚀气体分子中含 C 原子、H 原子的数量； n 为选定烧蚀气体的数量。

烃类气体中 C 与 H 的比值 $R_{C/H}$ 可由式(4)计算^[35-36]。

$$R_{C/H} = \frac{\sum_{j=1}^m S_{Cj} \times N_j}{\sum_{j=1}^m S_{Hj} \times N_j} \quad (4)$$

式(4)中： N_j 为第 j 种烧蚀气体的浓度； m 为选定烧蚀特征气体中烃类气体的数量。

2 结果与分析

通过傅里叶红外光谱法检测发现，缓冲层在烧蚀过程中生成的小分子气体包括 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、CO 和 CO_2 。以缓冲层含水率为 10%、烧蚀时

间为 60 min 的试样红外光谱为例，烧蚀气体的红外光谱检测结果如图 2 所示。其中 H_2 分子量极小，在实际电缆中容易扩散且难以区分电缆对应部位的烧蚀程度，同时 H_2 主要来自于电化学腐蚀，不直接对应缓冲层结构的破坏程度； CH_4 是高压 XLPE 电缆绝缘的交联副产物之一； CO_2 是空气的固有成分，难以区分它们是否源于缓冲层烧蚀。因此 H_2 、 CH_4 、 CO_2 不适合作为特征气体进行缓冲层烧蚀的检测与诊断。故选择 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 以及 CO 作为缓冲层烧蚀故障的特征气体进行分析，4 种特征气体的摩尔质量如表 1 所示。

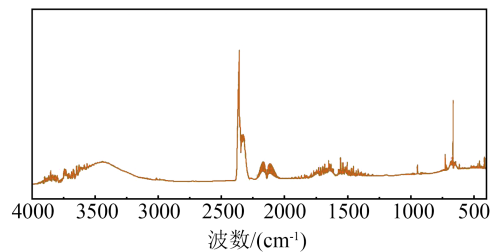


图2 烧蚀特征气体的红外光谱检测结果

Fig.2 Infrared spectrum results of ablative characteristic gas

表1 烧蚀特征气体的摩尔质量

Table 1 Molar mass of the ablative characteristic gas

特征气体	摩尔质量/(g/mol)	特征气体	摩尔质量/(g/mol)
C_2H_6	30.069 0	C_2H_4	28.053 2
C_2H_2	26.037 3	CO	28.010 1

本文采用烧蚀特征气体的平均摩尔质量 M_G 、特征烃类气体中 C 原子与 H 原子数量的比值 $R_{C/H}$ 、烧蚀特征气体中 C 原子与 H 原子的浓度 $N(N_C$ 和 $N_H)$ 作为化学计量特征参量，研究 3 种特征参量随烧蚀时间和缓冲层含水率的变化规律。

2.1 平均摩尔质量 M_G

根据式(1)计算缓冲层不同含水率条件下，模拟烧蚀实验产生的特征气体平均摩尔质量 M_G 随烧蚀时间的变化如图 3 所示。从图 3 可以看出，烧蚀特征气体的 M_G 都集中在 28 g/mol 附近， C_2H_6 的摩尔质量高于此值， C_2H_2 的摩尔质量则低于此值，因此 M_G 可以在一定程度上反映特征气体中 C_2H_6 与 C_2H_2 的相对含量。整体而言，烧蚀特征气体的 M_G 随时间的变化不明显，干燥缓冲层烧蚀 60 min 后特征气体的 M_G 仅比烧蚀 5 min 时降低了 0.20%，含水率为 20% 的缓冲层在相同情况下仅提高了 0.14%。

从图 3 还可以看出，缓冲层不同潮湿程度下特征气体的 M_G 有较为明显的区别。干燥情况下的 M_G

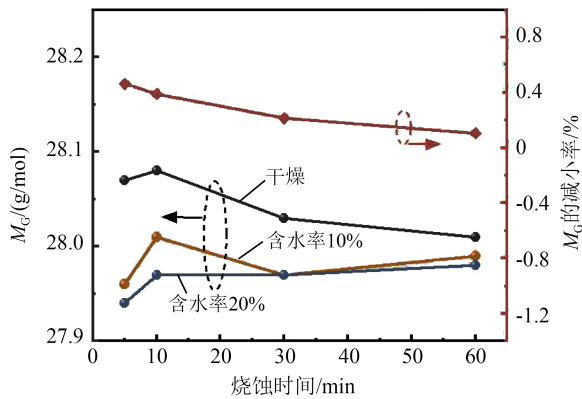


图3 烧蚀特征气体平均摩尔质量 M_G 及其减小率随烧蚀时间的变化

Fig.3 The change of the average molar mass M_G of ablative characteristic gas and its decreasing rate with ablative time (注：“减小率”指含水率为20%时相比干燥情况 M_G 的减小率。)

均高于潮湿情况下,且烧蚀时间较短时,这一区别较大,而经过长时间烧蚀后,不同潮湿情况下的 M_G 基本相同。 M_G 随缓冲层含水率的提高而降低,这一规律在实验烧蚀时间范围内均成立。烧蚀 5 min 时,缓冲层从干燥到含水率为 20%, M_G 下降幅度较大,从 28.07 g/mol 下降到了 27.94 g/mol,下降了 0.46%;随着烧蚀时间的增加,这一下降幅度明显减小,烧蚀 60 min 时,仅下降了 0.11%。

2.2 烃类气体中 C 与 H 的原子数量比值 R_{CH}

3 种烃类气体中 C 原子与 H 原子数量的比值 R_{CH} 可以体现不饱和烃的含量。 R_{CH} 的数值越大,表示不饱和烃的含量越高,这一比值随烧蚀时间的变化规律如图 4 所示。从图 4 可以看出,特征烃类气体的 R_{CH} 都集中在 0.50 附近,且随烧蚀时间的变化不大。但不同潮湿程度下的 R_{CH} 存在差异,潮湿条件下的 R_{CH} 都高于干燥条件,这一规律同样在实验烧蚀时间范围内均成立。含水率为 20% 的缓冲层试样烧蚀后 R_{CH} 与干燥条件相比在烧蚀 5 min 时增大了 12.5%,在烧蚀 60 min 时增大了 5.88%。

如 2.1 中所述, M_G 可以反映特征气体中 C_2H_6 与 C_2H_2 的相对含量,该值越大,说明饱和气体 C_2H_6 含量越高。 M_G 随含水率的提高呈下降趋势,而 R_{CH} 随含水率的提高成上升趋势,二者的变化都体现了在潮湿情况下缓冲层烧蚀会生成更多的不饱和气体。

2.3 C 原子与 H 原子的浓度 N

烧蚀特征气体中 C 原子与 H 原子的浓度 N_C 、 N_H 随烧蚀时间的变化如图 5 所示。

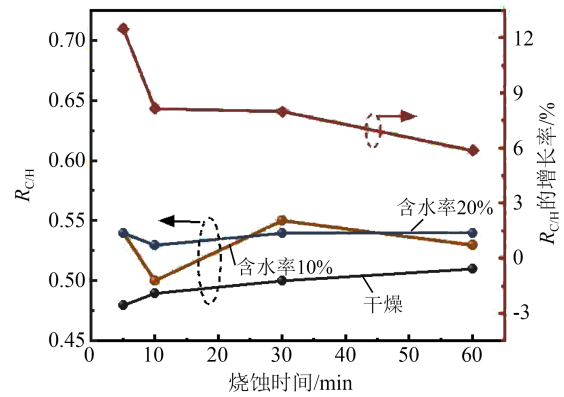
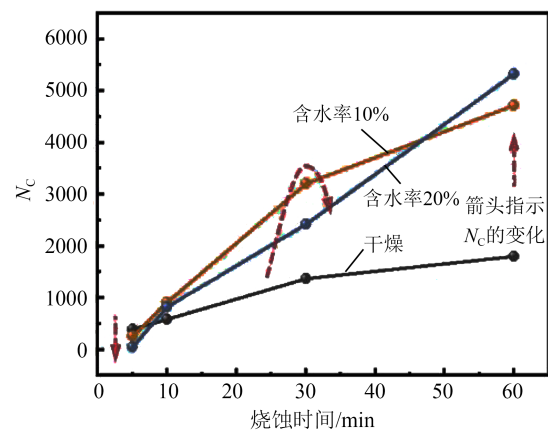


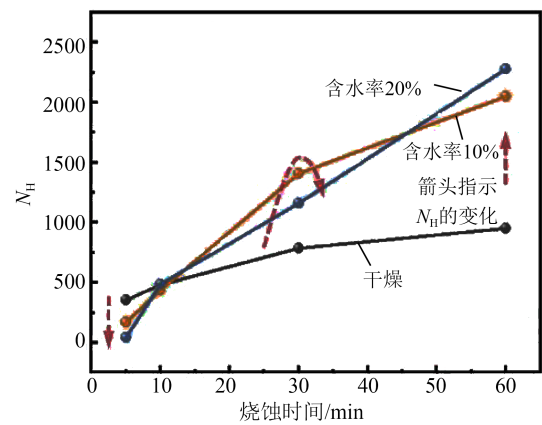
图4 烃类气体 R_{CH} 及其增长率随烧蚀时间的变化

Fig.4 The changes of hydrocarbon gas R_{CH} and its growth rate with ablation time

(注：“增长率”指含水率为20%时相比干燥情况 R_{CH} 的增长率。)



(a) C 原子浓度



(b) H 原子浓度

图5 特征气体中 C 原子与 H 原子浓度随烧蚀时间的变化
Fig.5 The changes of concentration of C and H atoms in the characteristic gas with ablation time

从图 5 可以看出,在不同潮湿程度情况下,烧蚀特征气体中 N_C 、 N_H 都随烧蚀时间的增加而不断提高,表明随着烧蚀的发展,缓冲层破坏程度增大,分

解产生的特征气体浓度升高。同时可以发现,缓冲层在干燥情况下,烧蚀初始的5 min内 N_C 与 N_H 提高速率很快,但后续的提高速率相比潮湿缓冲层较缓慢。烧蚀时间从10 min增加到60 min,含水率为20%的缓冲层试样对应 N_C 与 N_H 分别提高了550.19%与365.71%,而干燥缓冲层相应增加了209.24%与98.02%。

观察 N_C 和 N_H 随缓冲层含水率的变化,烧蚀时间较短时(5 min),随潮湿程度增大, N_C 、 N_H 逐渐降低;增加烧蚀时间, N_C 、 N_H 随潮湿程度的变化呈非单调变化趋势,实验范围内在缓冲层含水率为10%时达到最高;烧蚀时间达到60 min时, N_C 、 N_H 随潮湿程度的增大单调升高。

分析认为,由于干燥缓冲层蓬松网络结构中存在的氧气可以促进缓冲层材料的热分解过程。而在潮湿情况下,阻水粉颗粒膨胀并填充缓冲层蓬松网络中的孔隙,阻碍了氧气的进入,进而抑制了缓冲层的热氧化降解;同时由于水分的存在,水分的蒸发与分解会消耗部分电流热效应产生的能量,减轻了缓冲层材料的分解程度。因此,烧蚀的初始阶段 N_C 、 N_H 随缓冲层含水率的提高呈下降趋势。

随着烧蚀时间增加到30 min,含水率为10%的缓冲层试样对应的 N_C 、 N_H 在3种潮湿程度中最高。这是由于水分在经过较长时间的烧蚀后已基本耗尽;同时水分存在时会发生电化学腐蚀,这一过程生成的高阻性白色物质(如图6所示)增大了缓冲层的体积电阻^[13,17],由于模拟实验过程中采用的是恒流源,体积电阻的增大将导致电流热效应产生的能量更多,从而表现为缓冲层材料分解程度更严重, N_C 、 N_H 更高。当烧蚀时间长达60 min时,含水率为20%的缓冲层试样对应的 N_C 、 N_H 达到最高,这与水分的耗尽、高阻性白色粉末的产生都密切相关。

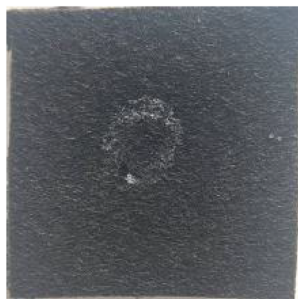


图6 缓冲层表面生成的白色物质

Fig.6 The white substance formed on the surface of the buffer layer

缓冲层体积电阻是否增大可以通过监测模拟烧蚀实验过程中试样两端的电压进行验证,结果如图7所示。从图7可以看出,随着缓冲层含水率的提高,最终电压稳定值逐渐提高,干燥时试样的电压在较长时间内维持在约74 V,含水率为10%与20%的缓冲层试样对应稳定电压分别约为95 V与107 V。由于使用的是恒流电源,电压的提高表明试样的体积电阻增大。

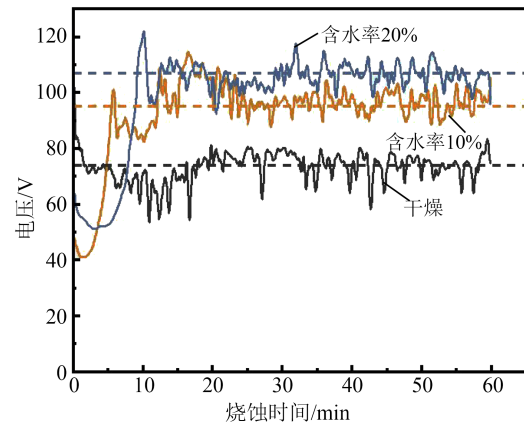


图7 模拟烧蚀实验中试样两端电压的变化

Fig.7 The change of voltage at both ends of the sample in simulated ablation experiment

此外,电压曲线中存在许多“毛刺”,这是由于半导电聚酯纤维丝作为缓冲层中的导电通路,在电流热效应下发生熔断的瞬间,原本纤维丝中流通的电流被阻断导致电压突变,表现为电压曲线上出现“毛刺”^[37-38]。在潮湿情况下缓冲层烧蚀的初始阶段,则几乎没有“毛刺”出现,电压曲线较为平滑,且含水率为20%的缓冲层试样对应平滑段更长。平滑段代表缓冲层材料的分解较少,这与潮湿情况下 N_C 、 N_H 在初始阶段较低的现象一致。

3 气体化学计量特征与烧蚀的关联性分析

小分子气体往往来自于高分子材料的热分解。高压电缆缓冲层由蓬松棉、阻水粉和无纺布3层结构组成。蓬松棉和无纺布的主要成分均为聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),阻水粉的主要成分是聚丙烯酸钠。为了验证烧蚀过程中产生的温升能否造成缓冲层的热分解,测试缓冲层蓬松棉与阻水粉的热重曲线,结果如图8所示。从图8可以看出,蓬松棉即PET材料在370℃左右开始分解;阻水粉即聚丙烯酸钠材料在70℃附近出现质量下降,约350℃开始快速分解。相关研究显示,局部集中径向电流

产生的温升可达到476℃^[29],此温度已经达到甚至超过了缓冲层蓬松棉纤维与阻水粉材料的起始分解温度,完全有可能引起缓冲层的热分解。

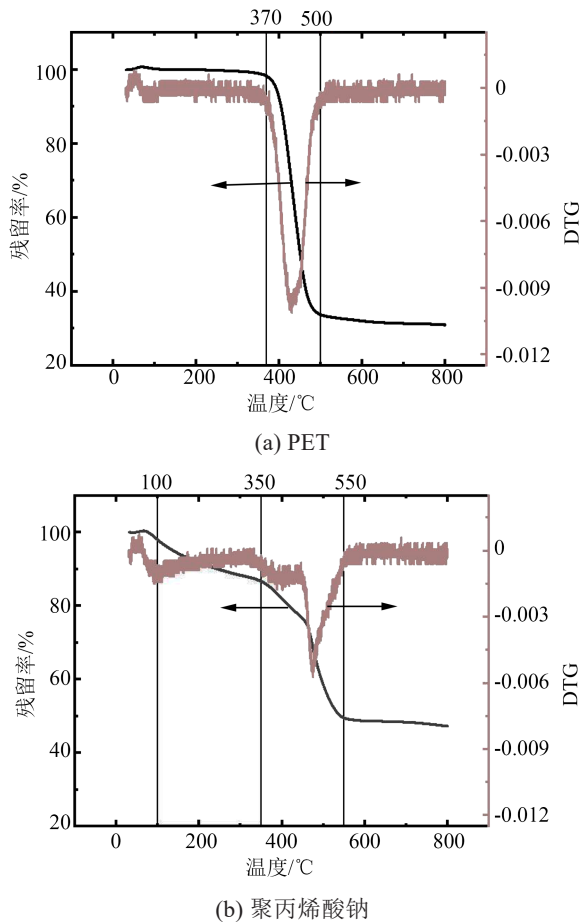


图8 PET和聚丙烯酸钠的热重分析曲线

Fig.8 Thermogravimetric analysis curves of PET and water-blocking powder

HUANG J B等^[39]基于密度泛函理论方法,研究了聚对苯二甲酸乙二醇酯二聚体的热降解机理,产物中的小分子气体包括 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 等。K SOVOVÁ等^[40]研究了空气流作用下PET的热分解过程,通过红外光谱发现高温下的分解产物中含有 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_2H_4 等小分子气体。文献[41-42]研究了聚丙烯酸钠的热分解产物,其中包括 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_4 、 H_2 等。本缓冲层烧蚀模拟实验测得 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 等气体产物,同缓冲层材料的受热分解产物具有较好的一致性,表明气体产物来自于缓冲层材料的分解过程。

随着烧蚀时间的增加或受潮生成白色粉末导致电流热效应的增强,缓冲层材料受损程度增大,缓冲层分解逸出的气体产物增多,随之特征气体中

的C原子与H原子浓度也有所提高,即 N_C 、 N_H 增大。而生成的特征气体种类不变,仍为 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 和 CO ,因此平均摩尔质量 M_G 、烃类气体中C与H原子数量的比值 R_{CH} 变化不及 N_C 、 N_H 明显。

特征气体中饱和烃与不饱和烃的相对含量可能与 C_2H_6 、 C_2H_4 和 C_2H_2 在缓冲层材料热分解过程中生成的难易程度有关。文献[43-44]研究表明,由乙二醇二苯甲酸酯生成 C_2H_4 需要经历1个活化能为177.01 kJ/mol的反应,生成 C_2H_2 需要分别经历活化能为185.75 kJ/mol与110.80 kJ/mol的反应,而 C_2H_6 的生成相对更加困难。因此,潮湿缓冲层与干燥缓冲层相比,由于水分的阻碍作用,产生 C_2H_6 相对更少,表现为特征气体的平均摩尔质量 M_G 较小,烃类气体中C与H原子数量的比值 R_{CH} 较大。而随着烧蚀时间的增加,潮湿缓冲层中水分耗尽,烧蚀的发展情况与干燥缓冲层的情况类似,不同潮湿程度的缓冲层烧蚀气体的特征参量 M_G 、 R_{CH} 差异缩小。

4 结论

本文借助实验室缓冲层烧蚀模拟平台,基于化学计量学研究了缓冲层在不同受潮情况下烧蚀过程中烧蚀气体特征参量的演变规律,为研判当前高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的严重程度提供了更丰富的参考依据。具体结论如下:

(1)选择 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 以及 CO 作为缓冲层烧蚀的特征气体,烧蚀气体的平均摩尔质量 M_G 以及烃类气体中C与H原子数量的比值 R_{CH} 随时间的变化不明显;特征气体中C原子与H原子的浓度 N_C 、 N_H 则随烧蚀时间的增加而不断提高。潮湿条件下的 M_G 低于干燥条件,而 R_{CH} 则高于干燥条件;随着烧蚀时间的增加, N_C 、 N_H 随潮湿程度的增大先减小,增大再减小,最后单调增大。

(2)气体产物来自于缓冲层材料聚对苯二甲酸乙二醇酯与聚丙烯酸钠的分解过程,且饱和烃 C_2H_6 的产生相对 C_2H_4 和 C_2H_2 更加困难; N_C 、 N_H 的变化趋势与水分的蒸发与分解消耗能量以及潮湿情况下发生电化学腐蚀生成高阻性白色物质密切相关。

参考文献 References

- [1] 赵琦,周凯,孔佳民,等.高压XLPE电缆阻水缓冲层烧蚀机理研究现状[J].绝缘材料,2022,55(4):20-28.
ZHAO Q, ZHOU K, KONG J M, et al. Research status of ablation mechanism of water-blocking buffer layer in high voltage XLPE power cable[J]. Insulating Materials,2022,55(4):20-28.

- [2] HUI B J, ZHAO P, ZHU W B, et al. Impedance analysis of buffer layer of high voltage XLPE cables[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers,2022,5:3604-3607.
- [3] JIANG L, XIN Y, YAN W B, et al. Study on ablation between metal sheath and buffer layer of high voltage XLPE insulated power cable[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019,2:372-375.
- [4] 程卓林,武康宁,王佳乐,等. 稳定型氧化锌压敏电阻高温直流老化的转变特性[J/OL]. 电工技术学报(2025-01-28)<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240759>.
CHENG Z L, WU K N, WANG J L, et al. Transition characteristics of stabilized zinc oxide varistors during DC Aging at high temperature[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society (2025-01-28). <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240759>.
- [5] LIU S W, ZHANG JUN, XIE YI, et al. High voltage cable X-ray digital image depth processing and technology of buffer layer defect intelligent recognition[C]//2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation. Tianjin, China:IEEE,2020.
- [6] 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 Y, LIU W K, LIU S W, et al. X-ray detection of ablative defects in water buffer layer of High Voltage cable[J]. Non-destructive Testing,2020,42(12):56-58.
- [7] XIU Y, LIU J J, FENG C, et al. Study on technical parameters of X-ray stereoscopic imaging of ablative defects for water blocking buffer layer in high voltage cable[J]. Journal of Physics: Conference Series,2022,2401(1):012057.
- [8] 刘三伟,谢亿,张军,等. 高压电缆X射线数字影像深度处理和缓冲层缺陷智能识别技术[J]. 南方电网技术,2020,14(12):72-76.
LIU S W, XIE Y, ZHANG J, et al. Deep processing of X-ray digital image of high voltage cable and intelligent defect identification of buffer layer[J]. China Southern Power Grid Technology, 2019,14(12):72-76.
- [9] 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 F L, XIA R, LI W J, et al. Research on detection method of ablative defect in buffer layer of high voltage crosslinked cable [J]. High Voltage Apparatus,2022,58(8):259-266,274.
- [10] ZHAO X F, QU L Q, MU H B, et al. Analysis of XLPE cable buffer layer defects localization based on impedance spectroscopy[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers,2022,4: 686-689.
- [11] HIRAI N, YAMADA T, OHKI Y. Comparison of broadband impedance spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia:IEEE,2012.
- [12] 李志坚,李旭,杜晓雨,等. 湿度对不同电场类型下电缆缓冲层局部放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2021,54(7):102-109.
LI Z J, LI X, DU X Y, et al. Effect of humidity on partial discharge characteristics of cable buffer layer under Different electric field types[J]. Insulating Materials,2021,54(7):102-109.
- [13] 宫瑞磊,汪建成,王兆珉,等. 110 kV XLPE 绝缘电力电缆局部放电的探讨[J]. 电线电缆,2006(3):31-33.
GONG R L, WANG J C, WANG Z M, et al. Discussion on partial discharge of 110 kV XLPE insulated power cable [J]. Wire and Cable,2006(3):31-33.
- [14] 陈云. 高压 XLPE 电缆缓冲层故障特征与机理[D]. 广州:华南理工大学,2019.
CHEN Y. Fault characteristics and mechanism of buffer layer of high voltage XLPE cable[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2019.
- [15] 魏占朋,方静,林国洲,等. 内置测温光纤导致的高压电缆本体故障解析[J]. 山东电力技术,2020,47(4):15-19.
WEI Z P, FANG J, LIN G Z, et al. Fault analysis of high voltage cable body caused by built-in temperature measurement fiber[J]. Shandong Electric Power Technology,2020,47(4):15-19.
- [16] 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 W S, WU Z G, DENG B F, et al. Simulation study on ultrasonic detection of ablative defects in buffer layer of high voltage cable[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(11):230-237,260.
- [17] 高建,张浩然,张可,等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测实验[J]. 电力工程技术,2024,43(1):174-180.
GAO J, ZHANG H R, ZHANG K, et al. Ultrasonic detection of ablative defects in buffer layer of high voltage cable[J]. Electric Power Engineering Technology,2024,43(1):174-180.
- [18] 赵西元. 气隙放电与电化学腐蚀诱发高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障机理研究[D]. 西安:西安交通大学,2021.
ZHAO X Y. Study on mechanism of buffer layer ablation failure induced by air gap discharge and electrochemical corrosion in high voltage XLPE cable[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2021.
- [19] 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 K, ZHAO Q, LI Y, et al. State evaluation of water buffer layer for high voltage cable based on Phased gas production[J]. High Voltage Engineering,2022,48(10):3882-3890.
- [20] 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 S M, WANG J, CHENG H, et al. Gas analysis of ablative defects in buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. Guangdong Electric Power,2022,35(6):116-125.
- [21] 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 W, MEN Y K, REN Z G, et al. Study on the relationship between current density and gas product concentration during the ablation of buffer layer of high voltage cable[J]. Insulating Materials,2019,56(9):71-76.
- [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 H R, GAO J, WU K N, et al. Ablation fault detection technology of buffer layer of high voltage cable based on temperature measurement and gas analysis[J]. High Voltage Engineering,2019,49(12):4929-4937.
- [23] ZHANG H R, GAO J, WU K N, et al. Effects of the inhomogeneous microstructures on buffer layer ablation failure in high

- voltage cables[J]. *Engineering Failure Analysis*,2023,152:107491.
- [24] 李云巧. 化学计量知识讲座化学计量及其特点和核心[J]. *中国计量*,2011(8):90-91.
LI Y Q. *Chemometrics and its characteristics and core*[J]. *China Metrology*,2011(8):90-91.
- [25] 王维奇,曾从盛,全川,等. 闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比[J]. *生态学报*,2012,32(14):4396-4402.
WANG W Q, ZENG C S, TONG C, et al. *Stoichiometric ratios of carbon dioxide and methane emissions from tidal wetlands in the minjiang river estuary*[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(14):4396-4402.
- [26] HONUS S, KUMAGAI S, FEDORKO G, et al. *Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET-part I: production and physical properties*[J]. *Fuel*, 2018, 221: 346-360.
- [27] 刘宏领,田克强,李继攀,等. 天然酯绝缘油中溶解气体研究现状[J]. *绝缘材料*,2022,55(1):12-18.
LIU H L, TIAN K Q, LI J P, et al. *Research status of dissolved gases in natural ester insulating oils*[J]. *Insulating Materials*, 2022,55(1):12-18.
- [28] 王政,郭峰,杨锬,等. 一起基于油色谱分析的变压器过热故障分析[J]. *山东电力技术*,2020,47(6):52-55,58.
WANG Z, GUO F, YANG K, et al. *Analysis of transformer overheating fault based on oil chromatography*[J]. *Shandong Electric Power Technology*,2020,47(6):52-55,58.
- [29] 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 Y, CHEN J M. *Electrothermal field analysis and simulation ablation test of water buffer layer in high voltage XLPE cable* [J]. *Proceedings of the CSEE*,2022,42(4):1260-1271.
- [30] 刘宏亮,刘若溪,赵西元,等. 径向电流集中诱发的高压交联聚乙烯电缆缓冲层烧蚀研究[J]. *绝缘材料*,2021,54(8):94-101.
LIU H L, LIU R X, ZHAO X Y, et al. *Study on buffer layer ablation induced by radial current concentration in high voltage crosslinked polyethylene cable*[J]. *Insulating Materials*,2021,54(8):94-101.
- [31] TANG X J, LI Y J, ZHU L J, et al. *On-line multi-component alkane mixture quantitative analysis using fourier transform infrared spectrometer*[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*,2015,146,371-377.
- [32] LI X S, TANG X J, WANG B, et al. *An adaptive extended Gaussian peak derivative reweighted penalised least squares baseline correction method*[J]. *Analytical Methods*, 2023, 15: 6048-6060.
- [33] 杨红梅. 例谈化学平衡移动与混合气体平均摩尔质量的变化[J]. *试题与研究(教学论坛)*,2019(2):112-113.
YANG H M. *An example of chemical equilibrium shift and the change of average molar mass of gas mixtures*[J]. *Questions and Research(Teaching Forum)*,2019(2):112-113.
- [34] 谢佳析,谭光天,高春光,等. 碳氢比测井应用效果分析[J]. *测井技术*,2003(1):85-89.
XIE J X, TAN G T, GAO C G, et al. *Application effect analysis of hydrocarbon ratio logging*[J]. *Well Logging Technology*,2003(1):85-89.
- [35] 吴萍,楚纪正,张勤. 碳氢比和蒸汽压的新关联式[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*,2014,41(3):15-19.
WU P, CHU J Z, ZHANG Q. *New correlation between C-H ratio and vapor pressure* [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*,2014,41(3):15-19.
- [36] 何中盛,崔志刚,陈光辉,等. 利用碳氢比测井技术评价剩余油及水淹程度[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*,2016,38(5):41-49.
HE Z S, CUI Z G, CHEN G H, et al. *Evaluation of remaining oil and water flooding degree using hydrocarbon ratio logging technology* [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition)*,2016,38(5):41-49.
- [37] 任志刚,郭卫,门业堃,等. 受力不均匀性对高压电缆缓冲层烧蚀故障发展过程的影响[J]. *绝缘材料*,2023,56(8):80-86.
REN Z G, GUO W, MEN Y K, et al. *Influence of stress non-uniformity on the development process of ablative fault in buffer layer of high voltage cable*[J]. *Insulating Materials*,2023,56(8):80-86.
- [38] 门业堃,张竟成,郭卫,等. 高压XLPE电缆缓冲层动态导电特性与机理[J]. *电力工程技术*,2022,41(6):163-171.
MEN Y K, ZHANG J C, GUO W, et al. *Dynamic conductivity characteristics and mechanism of high voltage XLPE cable buffer Strip*[J]. *Electric Power Engineering Technology*,2022,41(6):163-171.
- [39] HUANG J B, MENG H X, LUO X S, et al. *Insights into the thermal degradation mechanisms of polyethylene terephthalate dimer using DFT method*[J]. *Chemosphere*,2022(291):3-9.
- [40] SOVOVÁ K, FERUS M, MATULKOVA I, et al. *A study of thermal decomposition and combustion products of disposable polyethylene terephthalate (PET) plastic using high resolution fourier transform infrared spectroscopy, selected ion flow tube mass spectrometry and gas chromatography mass spectrometry*[J]. *Molecular Physics*,2008,106(9-10):1205-1214.
- [41] BUZANOWSKI W C, SUTIE S S, HOWELL R, et al. *Determination of sodium polyacrylate by pyrolysis-gas chromatography* [J]. *Journal of Chromatography A*,1994,677(2):355-364.
- [42] LEPINE L, GILBERT R. *Thermal degradation of polyacrylic acid in dilute aqueous solution*[J]. *Polymer Degradation and Stability*,2002,75(2):337-345.
- [43] MA T Y, WANG R, WANG W Q, et al. *Studies on the thermal degradation mechanism of polyethylene terephthalate and its 2-carboxy ethyl (phenyl) phosphinic acid copolymers*[J]. *Polymer Degradation and Stability*,1979,17:269-272.
- [44] BEDNAS M E, DAY M, HO K, et al. *Combustion and pyrolysis of poly(ethylene terephthalate). I. the role of flame retardants on products of pyrolysis*[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1981,26:277-289.

收稿日期:2024-04-24;修回日期:2024-05-15。

作者简介:

任志刚(1983-),男(汉族),内蒙古赤峰人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术、高压电缆的研究;

通信作者:赵鹤(2002-),女(汉族),河南洛阳人,硕士生,主要从事高压电缆缓冲层烧蚀的检测与修复相关研究工作。