

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

郭 卫¹, 门业堃¹, 任志刚¹, 陈 平¹, 高 建², 张浩然², 李建英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, 陕西 西安 710049)

摘 要: 高压电缆缓冲层在烧蚀过程中会生成气体产物, 然而目前对于烧蚀过程中气体产物浓度与缓冲层导电性能的关联性尚不明确。为此本文开展了电缆缓冲层烧蚀模拟实验, 研究缓冲层烧蚀过程中电流密度与气体产物浓度的演变规律。结果表明: 在干燥与潮湿条件下, 缓冲层的电流密度均随烧蚀时间延长呈现出双指数函数衰减的规律, 且电流密度衰减速率随烧蚀时间增加呈先快速降低后基本不变的趋势, 仅潮湿试样在烧蚀初期电流密度出现峰值。气相色谱测试结果表明, 潮湿条件下缓冲层在烧蚀过程中的气体产物包括 CO₂、H₂、CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂ 共 7 种。在干燥与潮湿条件下, 缓冲层烧蚀的气体产物浓度均随烧蚀时间延长先迅速增大后趋于稳定, 气体浓度增长时间与电流密度下降时间一致, 二者随烧蚀时间的变化规律密切相关。分析认为, 烧蚀过程中缓冲层电流密度的衰减速率与气体产物的生成速率具有关联性, 烧蚀气体产物浓度的变化反映了缓冲层烧蚀破坏的严重程度。

关键词: 缓冲层烧蚀; 电流密度; 气体产物浓度; 演变规律; 关联性

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.09.013

Study on correlation between current density and gas product concentration of buffer layers for high-voltage cable during ablation process

GUO Wei¹, MEN Yekun¹, REN Zhigang¹, CHEN Ping¹, GAO Jian², ZHANG Haoran², LI Jianying²

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The buffer layer of high-voltage cable will generate gas products during the ablation process. However, the correlation between the gas product concentrations and conductive property of buffer layer during the ablation process is still unclear at present. Therefore, we conducted a simulated ablation experiment on cable buffer layer and studied the evolution law of current density and gas product concentrations during the ablation process of buffer layer. The results show that under both the dry and wet conditions, the current density of buffer layer exhibits a bi-exponential function decay law with the increase of ablation time, and the decay rate of current density shows a trend of decrease rapidly at first and then unchanged basically with the increase of ablation time, only the wet sample exhibits peak current density during the initial stage of ablation. The gas chromatographic test results show that under the wet condition, the gas products during the ablation process of buffer layers are CO₂, H₂, CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, and C₂H₂. Under both the dry and wet conditions, the gas product concentrations increase rapidly at first and then tend to a stable value with the increase of ablation time, and the increase time of gas concentration is consistent with the decrease time of current density, which indicates the change laws of current density and gas concentration with the ablation time is closely related. It is analyzed that there is a correlative relationship between the current density decay rate and the gas products generation rate during the ablation process of buffer layer, and the variation of gas product concentration can reflect the severity of buffer layer ablation.

Key words: buffer layer ablation; current density; gas product concentration; evolution law; correlation

0 引言

高压电缆是城市电网安全供电系统的重要组

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-353-XG)

成部分, 其运行可靠性至关重要^[1-2]。然而, 近年来国内外频繁出现因阻水缓冲层烧蚀而导致的高压电缆本体击穿事故, 且目前仍有大量潜伏性烧蚀缺陷未被检出, 为城市供电系统埋下了极大的安全隐患, 引起了社会的广泛关注^[3-4]。

目前国内外已在高压电缆阻水缓冲层烧蚀机理方面开展了大量的实验与仿真研究^[5-8],揭示了烧蚀过程中缓冲层的体积电阻率变化、电气接触情况以及白色固体烧蚀产物等对烧蚀过程的影响。门业堃等^[9]通过烧蚀模拟实验研究发现,在干燥条件下缓冲层的体积电阻率随烧蚀时间延长逐渐增大,且缓冲层的电流密度在烧蚀过程中会出现短时激增现象;而潮湿条件下缓冲层的体积电阻率在烧蚀初期会先显著减小,随后逐渐增大。刘英等^[10]通过电-热耦合仿真研究,发现当电缆皱纹铝护套与缓冲层间轴向连续接触不良长度达到2 m以上时,缓冲层与铝护套接触的部位会产生严重的电流集中并导致急剧升温,温升最高可达476℃,从而引发缓冲层的过热烧蚀分解。欧阳本红等^[11]通过电缆轴向有限元仿真,发现当缓冲层的电阻率为 $5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$,且铝护套与缓冲层间存在0.3 mm的气隙时,气隙内最大电场强度将超过空气击穿场强(3 kV/mm),引发局部放电,导致缓冲层烧蚀故障。WU Z等^[12]通过构建高压电缆电压分布计算模型,研究了缓冲层烧蚀白斑的位置、数量、厚度和最大面积对电缆电压分布的影响,发现烧蚀白斑缺陷数量的变化对电缆电压的影响较大。

还有研究发现,缓冲层在烧蚀过程中会产生特征性气体产物。赵西元^[13]通过烧蚀模拟实验发现,阻水缓冲层在受潮条件下的烧蚀过程中会产生标志性气体产物——氢气。周凯等^[14]通过缓冲层烧蚀模拟实验,发现电缆缓冲层的状态可分为腐蚀阶段以及烧蚀阶段,在腐蚀阶段缓冲层会释放出大量 H_2 ,而在烧蚀阶段还会额外产生 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 以及 C_2H_2 气体。刘顺满等^[15]基于针-板模型开展了缓冲层放电烧蚀模拟实验,发现缓冲层在剧烈的电弧灼烧作用下会产生甲苯、邻苯二甲酸乙二丁酯等芳香烃气体。然而,目前的研究仅针对烧蚀过程中气体产物的变化,缺少结合烧蚀过程中气体产物与缓冲层导电性能变化的研究,从而难以掌握缓冲层在烧蚀过程中性能的变化与气体产物之间的关联。

本文通过开展缓冲层烧蚀模拟实验,研究干燥与潮湿条件下缓冲层烧蚀过程中电流密度以及气体产物浓度的演变规律,探究烧蚀气体产物浓度的变化与缓冲层电流密度的关联性,并对其机理进行分析。

1 实验

1.1 缓冲层烧蚀模拟实验

采用BHZD200型商用缓冲层材料进行研究,

试样尺寸为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 2 \text{ mm}$ 。实验前将缓冲层试样置于 50°C 烘箱内烘干12 h以充分去除水分。通过向缓冲层试样中注射1 mL去离子水以模拟缓冲层受潮时的情况。在缓冲层的上下两侧分别放置电工铝片(尺寸为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 2 \text{ mm}$)以及半导体屏蔽层试样(尺寸为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 1 \text{ mm}$),并放入电极腔体中,以模拟实际电缆中缓冲层的结构,如图1所示。

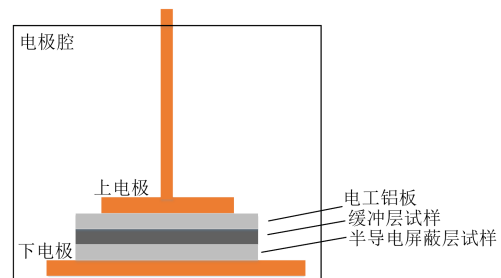


图1 缓冲层烧蚀模拟实验示意图

Fig.1 Simulated ablation experiment diagram of buffer layer

在电极两端施加30 V的交流电压^[16],对缓冲层试样进行模拟烧蚀。烧蚀过程中实时记录缓冲层试样的电流密度,计算电流密度的面积约为 9 cm^2 ,采样时间间隔为5 s。每组烧蚀实验时长为6 h,实验过程中,每隔1 h在实验腔体中采集一次气体。

1.2 气相色谱实验

采用河南中分仪器公司的ZF-301B型气相色谱仪研究烧蚀过程中的气体产物成分,仪器配备有热导检测器和火焰离子化检测器,用于检测 H_2 和低分子量烃。气体进样量为1 mL,每组测试8 min。根据色谱峰的面积,结合奥氏系数折算出气体浓度。

1.3 微观形貌与元素组成分析

采用天美科学仪器有限公司的SU3500型钨灯丝扫描电镜对烧蚀后缓冲层试样表面的微观形貌以及元素组成进行分析。

2 结果与讨论

2.1 缓冲层烧蚀过程中电流密度的演变规律

干燥条件下缓冲层电流密度随烧蚀时间的变化如图2所示。从图2可以看出,干燥缓冲层在加压烧蚀过程中的电流密度随烧蚀时间呈类似于指数型的衰减规律,起始时刻的电流密度约为 33.5 A/m^2 ,烧蚀1 h时的电流密度下降至约 20.3 A/m^2 ,相比于起始时刻下降了约39.4%,而当烧蚀时间为2 h时,缓冲层的电流密度下降至约 17.7 A/m^2 ,相比于起始时刻下降了约47.2%。此外可以看出,缓冲层电流密度的衰减速率也随烧蚀过程逐渐降低。

为了定量描述缓冲层电流密度随烧蚀时间的

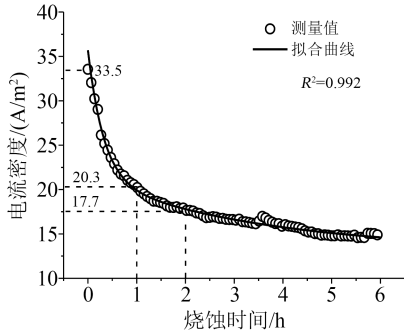


图2 干燥条件下缓冲层电流密度随烧蚀时间的变化
Fig.2 The change of current density of buffer layer with ablation time under dry condition

衰减过程,采用式(1)所示双指数函数对电流密度随烧蚀时间的变化规律进行拟合,拟合结果如图2所示。

$$J = A_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + A_3 \quad (1)$$

式(1)中: J 为缓冲层电流密度; t 为烧蚀时间; A_1 、 A_2 、 A_3 、 τ_1 、 τ_2 均为拟合参数。

从图2可以看出,拟合的相关系数 $R^2=0.992$,拟合效果良好,表明双指数函数能够用于描述干燥状态下缓冲层电流密度随烧蚀时间的衰减过程。

潮湿条件下缓冲层电流密度随烧蚀时间的变化如图3所示。

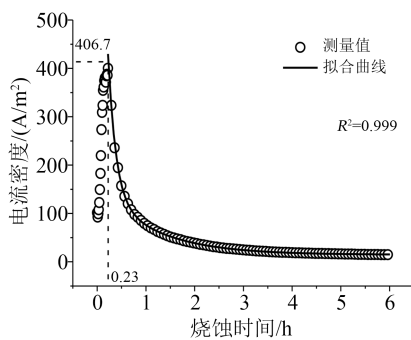


图3 潮湿条件下缓冲层电流密度随烧蚀时间的变化
Fig.3 The change of current density of buffer layer with ablation time under wet condition

从图3可以看出,受潮后缓冲层电流密度随烧蚀时间的变化规律与干燥条件下有显著的区别。在烧蚀过程中,受潮缓冲层的电流密度会先迅速升高,在到达峰值后呈指数型衰减趋势,到达峰值的时间约为0.23 h,峰值电流密度约为406.7 A/m²。烧蚀初期缓冲层电流密度的激增过程可能与受潮后缓冲层中的载流子浓度短时增大有关^[9]。当缓冲层受潮后,其中的阻水粉会吸水电离出大量可自由迁移的Na⁺,Na⁺会作为载流子参与缓冲层的导电过程,从而导致缓冲层电流密度在烧蚀初期剧烈

攀升。

同样采用式(1)对潮湿条件下缓冲层电流密度随烧蚀时间的衰减过程进行拟合,拟合结果如图3所示。从图3可以看出,拟合的相关系数 $R^2=0.999$,拟合效果良好,表明缓冲层在潮湿条件下烧蚀过程中的电流密度衰减过程同样可以通过双指数函数进行定量描述。

从式(1)可知,参数 τ_1 、 τ_2 反映了电流密度从初始时刻的衰减速率衰减到0 A/m²时所需的时间,能够反映电流密度的衰减速率。干燥与潮湿条件下缓冲层电流密度的拟合参数分别如表1所示。从表1可以看出, τ_1 、 τ_2 在干燥条件下的值是潮湿条件下的2~3倍,表明在干燥条件下缓冲层电流密度在烧蚀过程中的衰减速度相对于潮湿条件下更缓慢。

另外,拟合参数 A_1 和 A_2 反映了缓冲层电流密度在衰减过程中的幅值,而 A_3 则反映了缓冲层电流密度衰减至稳定后的稳定值。从表1可以看出,潮湿条件下缓冲层电流密度在衰减过程中的幅值要远高于干燥条件下,而干燥与潮湿条件下缓冲层电流密度的稳定值相差不大。

表1 烧蚀过程中缓冲层电流密度随烧蚀时间变化的拟合参数

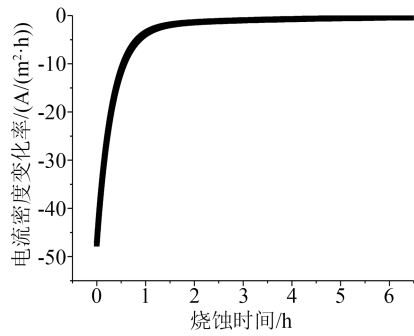
Tab.1 Fitting parameters of current density change with ablation time of buffer layer during ablation process

拟合参数	干燥条件下	潮湿条件下
τ_1	0.32	0.16
τ_2	3.50	1.11
A_1	14.35	146.52
A_2	8.21	1 209.17
A_3	13.13	14.65

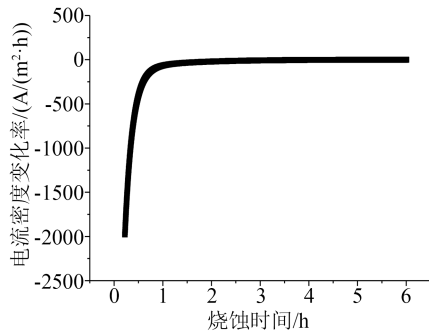
将缓冲层电流密度的拟合结果对烧蚀时间进行微分,即可进一步得到缓冲层的电流密度衰减速率随烧蚀时间的变化规律,结果如图4所示。从图4可以看出,在干燥与潮湿条件下,缓冲层电流密度的衰减速率随烧蚀时间呈相同的变化趋势,即随着烧蚀过程的进行,电流密度的衰减速率先快速降低,在烧蚀持续约1 h后逐渐趋于稳定,并且干燥与潮湿条件下缓冲层电流密度衰减速率的稳定值相差不大,干燥条件下约为-0.34 A/(m²·h),潮湿条件下约为-0.57 A/(m²·h)。

2.2 缓冲层烧蚀过程中气体产物的演变规律

干燥条件下缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度随烧蚀时间的变化如图5所示。从图5可以看出,在干燥条件下,缓冲层在烧蚀过程中会产生CO₂、CO、C₂H₄、CH₄、C₂H₆、C₂H₂等6种气体产物。这些气



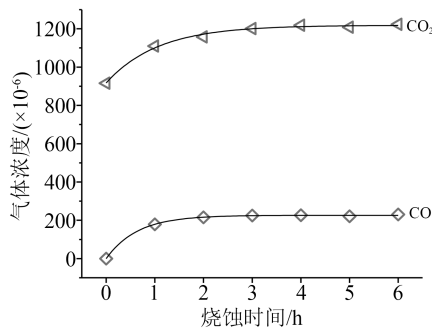
(a)干燥条件下



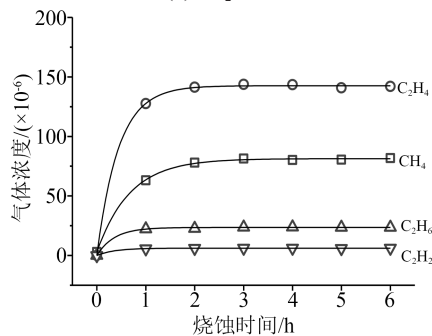
(b)潮湿条件下

图4 烧蚀过程中缓冲层电流密度衰减速率随烧蚀时间的变化

Fig.4 The change of current density decay rate with ablation time of buffer layers during ablation process



(a)CO₂、CO



(b)CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂

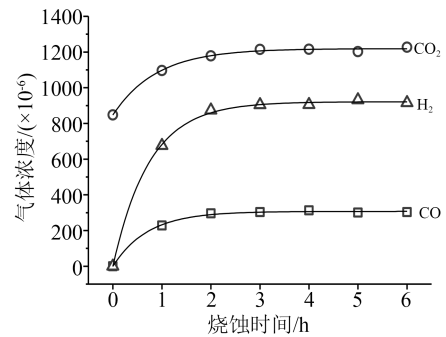
图5 干燥条件下缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度随烧蚀时间的变化

Fig.5 The change of gas product concentrations with ablation time of buffer layer during ablation process under dry condition

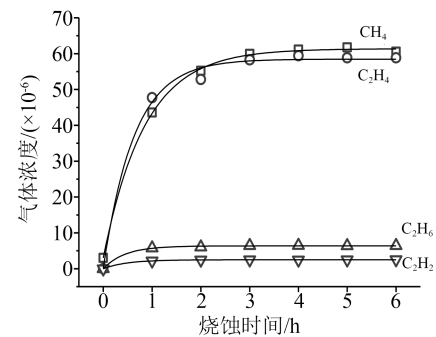
体的浓度随着烧蚀时间的延长均呈现出先快速增大后趋于稳定的变化趋势,而气体浓度增长时间与

干燥条件下电流密度衰减时间相一致,二者随烧蚀时间的变化趋势存在明显关联性。

受潮条件下,缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度随烧蚀时间的变化如图6所示。从图6可以看出,缓冲层受潮后在烧蚀过程中会产生CO₂、H₂、CO、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂等7种气体产物,相比于干燥条件下额外产生了H₂,气体产物的浓度均呈现出随烧蚀时间先迅速增大后趋于稳定的变化规律,与潮湿条件下缓冲层电流密度先大幅衰减后趋于稳定的变化趋势存在对应关系。



(a)CO₂、H₂、CO



(b)CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂

图6 潮湿条件下缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度随烧蚀时间的变化

Fig.6 The change of gas product concentrations with ablation time of buffer layer during ablation process under wet condition

干燥与潮湿条件下缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度的稳定值如图7所示。从图7可以看出,在干燥与潮湿条件下烧蚀后,CO₂的浓度相差不多,相比于烧蚀前均增大了约36%。H₂仅在潮湿条件下烧蚀后产生,其浓度稳定值约为915.19×10⁶。对于CO,在干燥条件下烧蚀后的浓度稳定值(约230.57×10⁶)明显低于潮湿烧蚀后的稳定值(约303.15×10⁶)。而对于C₂H₄、CH₄、C₂H₆、C₂H₂,在干燥条件下烧蚀后的浓度稳定值均明显高于潮湿条件下烧蚀后的稳定值。表明缓冲层在干燥与潮湿条件下烧蚀后气体产物浓度的稳定值具有明显的差别。

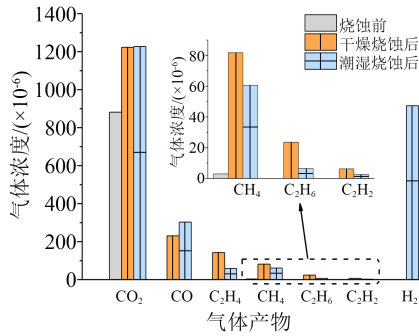


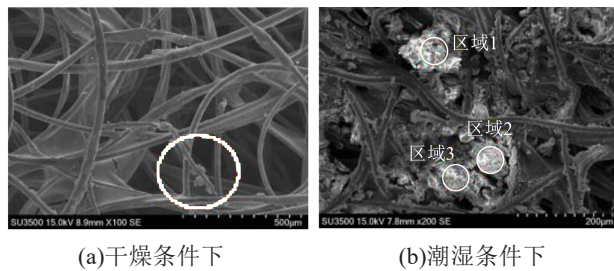
图7 缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度稳定值

Fig.7 Stable concentration values of gas products of the buffer layer during ablation process

2.3 缓冲层烧蚀过程中电流密度与气体产物浓度演变规律的关联性分析

根据缓冲层材料的组成结构可知,缓冲层的导电过程主要取决于蓬松棉与无纺布中的导电纤维网络以及蓬松棉和无纺布之间夹杂的阻水粉^[16-17]。已有研究表明,缓冲层烧蚀过程中的气体产物可能源自于缓冲层导电纤维的热分解^[18-20]以及阻水粉与铝护套之间的电化学反应^[21-23],说明缓冲层的导电纤维以及阻水粉是烧蚀过程中生成气体产物的反应物。

干燥与潮湿条件下缓冲层烧蚀后的表面微观形貌如图8所示。



(a)干燥条件下 (b)潮湿条件下

图8 烧蚀后缓冲层表面的微观形貌

Fig.8 Surface morphology of buffer layer after ablation

从图8可以看出,干燥条件下缓冲层烧蚀后出现了纤维丝断裂的现象,表明干燥烧蚀过程中可能由于热分解破坏了缓冲层的导电纤维网络,从而造成缓冲层的电流密度随时间延长逐渐减小。而潮湿条件下缓冲层烧蚀后表面出现了明显的白色物质。通过能谱分析得到图8(b)中不同区域内白色物质的元素组成及质量分数如表2所示。从表2可以看出,该白色物质中存在大量Al元素,对应于潮湿条件下烧蚀过程中电化学反应过程生成的高阻性Al₂O₃^[21-23]。从图8(b)还可以看出,白色物质填充于缓冲层的导电网络中,可能会阻断其导电路径,导致潮湿条件下缓冲层的电流密度逐渐减小。

除了电化学反应,潮湿条件下缓冲层在烧蚀过程中也可能伴随有导电纤维丝的分解过程,导致其电流密度随时间延长逐渐减小。

表2 潮湿烧蚀后缓冲层表面白色物质元素组成

Tab.2 Element composition of white materials on the surface of buffer layer after the wet ablation

元素	质量分数/%		
	区域1	区域2	区域3
C	21.07	0	22.97
O	48.04	27.92	26.13
Na	0.76	0	0
Al	26.44	59.74	37.83
S	2.57	12.34	8.45
Cl	1.12	0	4.62
总量	100	100	100

从图4可以看出,无论是干燥还是潮湿条件下,缓冲层烧蚀过程中电流密度的衰减速率均呈现出先快速降低后基本不变的趋势。而对比缓冲层烧蚀过程中气体产物浓度的变化可以发现,在干燥与潮湿条件下的烧蚀过程中,气体产物的浓度也均呈现出先快速增大之后趋于稳定的变化趋势,与缓冲层电流密度衰减速率的变化趋势相对应。因此,缓冲层在烧蚀过程中电流密度与气体产物浓度的演变规律之间具有一定的关联性。

当缓冲层产生强烈的导电纤维热分解或电化学反应时,烧蚀气体产物迅速生成。此时,缓冲层的导电通路被破坏,或高阻性物质含量迅速增加,导致其电流密度迅速降低,同时烧蚀气体产物的浓度迅速增加。而当缓冲层中的导电纤维网络热分解速率或电化学反应速率较低时,缓冲层材料的导电通路处于相对稳定的状态,对应于烧蚀气体产物的浓度稳定不变。因此,缓冲层烧蚀气体产物浓度的增长速率反映了缓冲层材料的烧蚀破坏的速度。

进而,根据烧蚀气体产物的生成速率可推断出缓冲层的烧蚀破坏速率。当检测发现缓冲层烧蚀的气体产物浓度在短时间内迅速增加时,缓冲层很可能正在发生剧烈的导电纤维热分解或电化学反应,表明缓冲层正处于剧烈的烧蚀破坏过程,电流密度迅速降低,导致缓冲层电阻率显著增加;当检测到烧蚀气体产物的浓度在一段时间内均趋近于一个稳定值时,表明此时缓冲层中的导电纤维网络的热分解速率或电化学反应速率较低,缓冲层材料处于相对比较稳定的状态,电流密度保持稳定,电阻率无明显变化。

另外,根据前述分析可知,干燥与潮湿条件下缓冲层的电流密度和气体浓度的变化速率以及气体浓度的稳定值均具有显著的区别,表明干燥与潮湿条件下缓冲层的烧蚀破坏速率有所差异。通过分析缓冲层烧蚀气体浓度的变化速率范围以及烧蚀气体浓度的稳定值范围有助于判断缓冲层的烧蚀故障类型。

3 结论

本文开展了高压电缆缓冲层烧蚀模拟实验,研究了干燥与潮湿条件下,缓冲层的电流密度以及气体产物浓度随烧蚀时间的演变规律,并分析了其机理,主要得到以下结论:

(1)干燥条件下,缓冲层的电流密度随烧蚀时间延长逐渐衰减;而潮湿条件下,缓冲层的电流密度在烧蚀初期会出现电流密度峰值,随后逐渐衰减。在干燥与潮湿条件下,电流密度的衰减过程均可以通过双指数函数进行定量描述,且衰减速率随烧蚀时间均呈先快速降低后基本不变的趋势。

(2)在干燥与潮湿条件下,缓冲层烧蚀的气体产物浓度随烧蚀时间延长均呈先快速增大后趋于稳定的变化规律。缓冲层烧蚀气体产物的生成速率以及浓度稳定值在干燥与潮湿条件下均有差异。

(3)缓冲层烧蚀过程中电流密度的衰减过程与气体的产生过程可能具有一定的关联性。当缓冲层发生剧烈的半导体纤维网络热分解或电化学反应时,烧蚀气体的产物浓度将迅速增大;而当缓冲层半导体纤维网络的热分解速率或电化学反应的速率较低时,烧蚀气体产物的浓度则趋于稳定。通过分析烧蚀气体产物的浓度变化速率一定程度上能够推断出缓冲层当前的烧蚀速率。

参考文献:

- [1] 严智民,杨凯,王诗航,等. 硅脂对硅橡胶电树枝劣化特性的影响机制研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):604-611,657.
- [2] 高建,严智民,李建英,等. 温度对硅橡胶电树枝自恢复特性的影响机制[J]. 西安交通大学学报,2022,56(9):176-184.
- [3] 齐伟强,李华春,谭磊,等. 一起高压电缆半导体缓冲层烧蚀故障分析[J]. 高电压技术,2019,45(z2):98-101.
- [4] 王伟,欧阳本红,徐明忠,等. 电缆缓冲层烧蚀现象初步分析[J]. 电线电缆,2019(5):5-10.
- [5] 刘洋,陈杰,胡丽斌,等. 高压XLPE电缆缓冲层放电烧蚀机理与实验研究[J]. 绝缘材料,2021,54(8):102-108.

- [6] 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.
- [7] 吴科,邓旭东,别桦,等. 高压电力电缆绝缘屏蔽烧蚀机理分析及应对措施[J]. 绝缘材料,2020,53(2):97-101.
- [8] SU C Q. Failure analysis of three 230kV XLPE cables[C]//2010IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Sao Paulo,Brazil:IEEE,2011.
- [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研究[J]. 电力工程技术,2022,41(6):163-171.
- [10] 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):1260-1270.
- [11] 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.
- [12] WU Z, LAI Q, ZHOU W, et al. Analysis of influencing factors on buffer layer discharge for high-voltage XLPE cable[J]. IET Generation, Transmission and Distribution,2022,16:4142-4157.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] CHEN Y, HUI B, CHENG Y, et al. Effects of connections between insulation screen and Al sheath on the buffer layer failures of high-voltage XLPE cables[J]. Engineering Failure Analysis,2021,122:105263.
- [17] 邓声华,江福章,刘和平,等. 高压电缆缓冲层材料及结构特性研究[J]. 电线电缆,2019(2):19-27.
- [18] 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.
- [19] 严有祥,张玮玮,王蕾,等. 高压XLPE电缆缓冲层灼伤问题仿真及试验研究[C]//福建省电机工程学会2019年学术年会. 福建,2020.
- [20] LIU Y, CHEN J, ZHANG H. Study on the current concentration and local heating of the buffer layer in HV XLPE cables[C]//International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Chongqing,China:IEEE,2021.
- [21] 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.
- [22] 陈熠东,周凯,雷清泉,等. 高压电缆阻水缓冲层的白斑现象及析氢腐蚀机理[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4830-4840.
- [23] CHEN Y, HUI B J, CHENG Y T, et al. Failure investigation of buffer layers in high-voltage XLPE cables[J]. Engineering Failure Analysis,2020,113:104546.

收稿日期:2022-11-14 修回日期:2023-01-14

作者简介:郭卫(1984-),男(汉族),湖北大冶人,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术;通信作者:高建(1996-),男(汉族),辽宁大连人,博士生,研究方向为高电压与绝缘技术。