高压皱纹铝护套电缆缓冲层电烧蚀机理与改进

郭欢欢[1]， 高俊国[1]， 王 猛[2]， 臧德峰[2]， 龙海泳[2]
（1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院，哈尔滨 150080；2. 特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司，山东 新泰 271219）

摘 要：为了保障高压皱纹铝护套电缆线路的安全运行，研究清楚缓冲层烧蚀机理并提出改进意见已迫在眉睫。采用有限元仿真软件，对500kV电缆典型结构的电场和电压进行研究，探究电缆中电场和电压分布规律关系及缓冲层与铝护套接触不良导致的电场集中而引发电烧蚀的可能性。同时设计了模拟烧蚀实验，分析了缓冲层与铝护套在不同接触方式下的烧蚀现象。结果表明：缓冲层电压和电场强度的最大值位置与接触方式和状态有关。阻水粉析出对电缆烧蚀影响最大，尤其是析出的阻水粉完全覆盖住铝护套与缓冲层接触面时，气隙放电量最大。缓冲层与铝护套过盈接触，一定程度上可以降低电烧蚀发生的概率。用金布和平滑铝护套可有效降低电缆烧蚀的发生概率。最后提出分析电烧蚀的电路模型，总结出电烧蚀可能的机理，并设计出可降低电烧蚀的缓冲层，为电力行业发展提供了理论依据。

关键词：缓冲层烧蚀；有限元仿真；模拟烧蚀实验；电路模型；电烧蚀机理
DOI：10.15938/j.jhust.2026.03.008
中图分类号：TM247 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2026)03-0076-13

Mechanism and Improvement of Electric Ablation of Buffer Layer of High Voltage Corrugated Aluminum-Sheathed Cable

GUO Huanhuan[1], GAO Junguo[1], WANG Meng[2], ZANG Defeng[2], LONG Haiyong[2]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. TBEA Shandong Luneng Taishan Cable Co., Ltd., Xintai 271219, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of high-voltage corrugated aluminum-sheathed cable lines, it is imperative to investigate the ablation mechanism of the buffer layer and propose improvement suggestions. Finite element simulation software is utilized to analyze the electric field and voltage distribution in a typical 500kV cable structure, exploring the relationship between electric field concentration due to poor contact between the buffer layer and aluminum sheath, and potential electric ablation. Additionally, a simulated ablation experiment is designed to examine different contact modes' impact on the ablation phenomena of the buffer layer and aluminum sheath. The results indicate that water-blocking powder precipitation significantly affects cable ablative behavior, particularly when the precipitated powder completely covers the contact surface between the aluminum sheath and buffer layer leading to increased air gap discharge. Interference fit contact between the buffer layer and aluminum sheath can mitigate the probability of electric ablation to some extent. Furthermore, using gold cloth or smooth aluminum sheaths effectively reduces cable ablation. Finally, a circuit model for electric ablation is proposed along with a designed buffer layer aimed at reducing electric ablation risk in support of theoretical advancements for the power industry development.

Keywords: buffer layer ablation; finite element simulation; simulated ablation test; circuit model; electric ablation mechanism

收稿日期：2024-07-10
基金项目：国家自然科学基金(51577045)；山东省新旧动能转换重大产业攻关项目(鲁ICP备10017206).
作者简介：郭欢欢(1999—)，男，硕士研究生；
王 猛(1990—)，男，博士.
通信作者：高俊国(1980—)，男，教授，博士研究生导师，E-mail：gaojunguo@hrbust.edu.cn.

0　引　言

高压输电线路在现代电力系统中扮演着关键的角色[1]。为满足线路电缆的机械性能,高压电缆大多采用皱纹铝护套和缓冲层结构[2]。缓冲层可纵向阻水并缓冲电缆弯曲、热膨胀时产生的机械应力[3];皱纹铝护套可增强电缆对外界机械应力的抵抗,避免施工中由于拖拽弯曲或挤压造成的机械损伤[4]。但最近我国南方各地频频发生高压皱纹铝护套电缆缓冲层烧蚀事故,严重威胁电力安全运行[5]。因此,迫切需要找出引发烧蚀的原因,分析出烧蚀的可能机理,采取针对性措施。

李陈莹等[5]通过对3 起电缆缓冲层放电典型案例展开分析,认为缓冲层为非导电材料及缓冲带材长期进水是造成烧蚀现象的主要原因。刘英等[6]通过电热场耦合仿真,认为缓冲层与铝护套出现故障段时,紧密接触位置存在集中电流,造成缓冲层局部温升过高而引发烧蚀。王伟等[7]通过建立缓冲层等值电路,认为工频电压下电容电流使缓冲层局部产生热量引发烧蚀。刘晓东等[8]通过实验测量,发现故障电缆缓冲层的交、直流电阻偏大,导致绝缘屏蔽与金属护套之间存在较大电势差而造成放电。然而,目前对烧蚀机理的分析,没有系统分析清楚烧蚀现象,也并未给出有效的改进措施。

本文利用 COMSOL 有限元仿真软件,从电烧蚀的角度,讨论缓冲层与铝护套接触不良状态下,缓冲层电压及皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度最大值及最大值位置,定量分析不同接触不良状态引发电烧蚀的可能性及烧蚀时对应接触状态参数阈值。构建了模拟烧蚀实验,复现了缓冲层与铝护套不同接触状态下的烧蚀现象。基于烧蚀的电路模型总结电烧蚀的机理,并设计出防止电烧蚀的高压电缆缓冲阻水带,可为皱纹铝护套电缆的安全运行提供保障。

1　缓冲层电烧蚀仿真研究

1.1　模型说明及建立

仿真时用型号为 ZC－YJLW03－290/500－1×1000 的单芯电缆来建立模型,研究电缆整体结构的电场和电压分布。半导电丁基胶缓冲带、缓冲带电热参数相近且结构相连,仿真时将二者共同设置为缓冲层[9]。在故障电缆解体中发现,沥青防腐层基本涂敷于皱纹铝护套的外表面。该层较薄,暂不考虑其对电场和电压分布的影响[10],为了提高计算效率,仿真时不添加沥青。根据分析内容,建立可分析烧蚀的模型,如图 1 所示。仿真时采用的电缆尺寸和材料参数分别如表 1 ~2 所示。剖分时,空气、缓冲阻水层、皱纹铝护套采用超细化三角形单元进行网格剖分,其余结构均采用常规三角形单元进行网格剖分[11],这种剖分方式满足电场分布研究的需要。

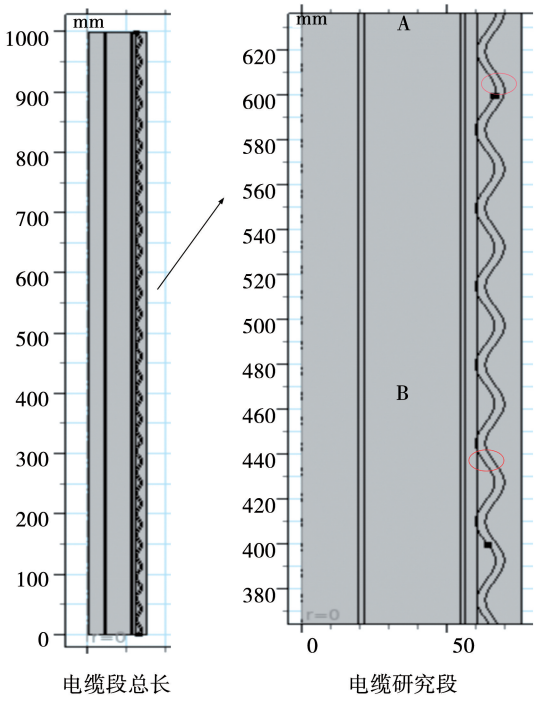


图 1　仿真模型

Fig. 1　Simulation model

表 1　电缆尺寸参数

Tab. 1　Size parameters of the cable

结构	设计参数/mm
导体	19. 5
导体屏蔽	2
XLPE 绝缘	33
绝缘屏蔽	1. 5
缓冲阻水层	4. 25
铝护套	厚度 3,节距 35,纹深 6. 5
外护套	6

文中的研究对象为 500 kV 电缆,单相额定电压有效值为 290 kV,电压波动系数为 1. 1。因此,需要在导体线芯上施加的交流电压幅值为 448 kV,同时将铝护套接地。仿真时,电缆段长取1 000 mm,频率

设置为 50 Hz。由于工频电压下电场随时间变化缓慢且材料的电阻率和介电常数同时影响电场分布，计算时可按电准静态场来处理[12]。仿真时对缓冲层电烧蚀定义如下：皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度达到空气击穿场强 3 kV·mm^{-1}[13]，空气就会放电发热，缓冲层就有被烧蚀的风险。

表 2 电缆材料参数

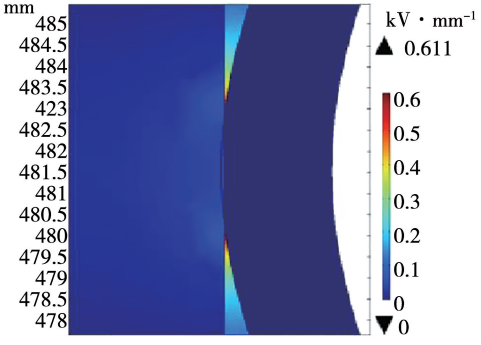
Tab. 2 Material parameters of the cable

结构层	相对介电常数	电导率 /(S·m^{-1})	导热系数 /(W·m^{-1}·K^{-1})	恒压热容 /(J·kg^{-1}·K^{-1})	密度 /(kg·m^{-3})
铜导体	1×10^4	5.997×10^7	400	235	8 890
导体屏蔽	700	20	0.4	2 180	1 150
XLPE 绝缘	2.3	1×10^{-14}	0.286	2 600	930
绝缘屏蔽	700	20	0.38	2 301	940
皱纹铝护套	1×10^4	3.774×10^7	238	900	2 700
外护套	2.34	1×10^{-14}	0.14	1 005	1 450

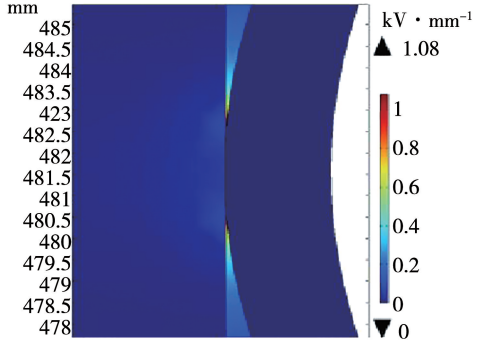
1.2 电缆缓冲层的电烧蚀仿真分析

1.2.1 缓冲层与铝护套波谷的间隙对电烧蚀的影响

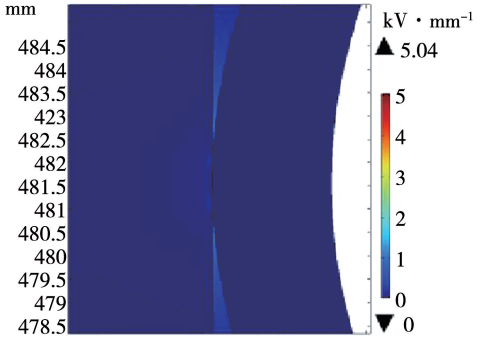
设定故障段电缆长 200 mm，故障段起点坐标(63.4，400)，终点坐标(63.4，600)，其余段皱纹铝护套与缓冲阻水层过盈接触 0.1 mm。缓冲阻水层体积电阻率为1×10^5 Ω·m，间隙宽度分别为 −0.1、−0.05、0、0.01、0.03、0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35 mm 时，皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度最大值及最大值位置如图 2 所示。



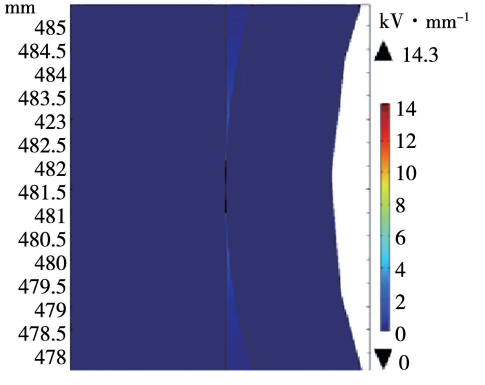
(a) −0.1 mm



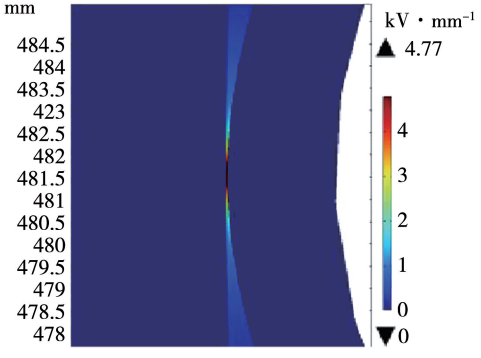
(b) −0.05 mm



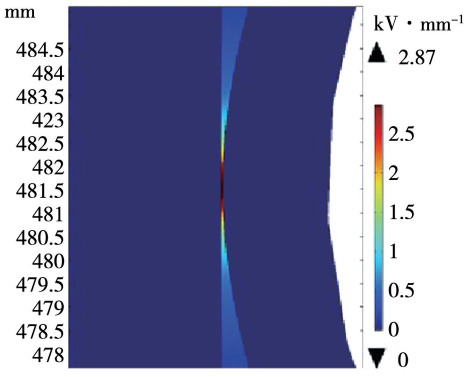
(c) 0 mm



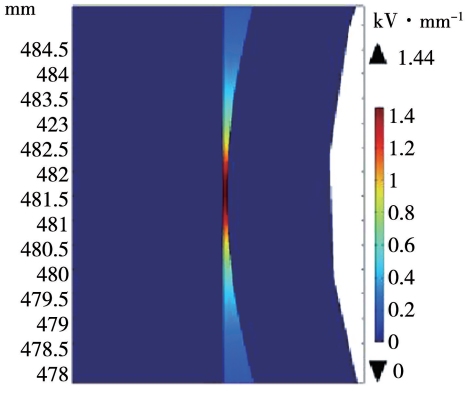
(d) 0.01 mm



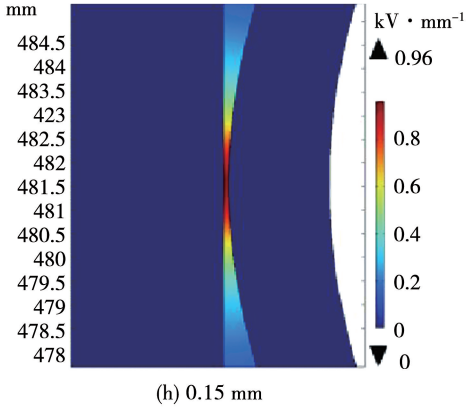
(e) 0.03 mm



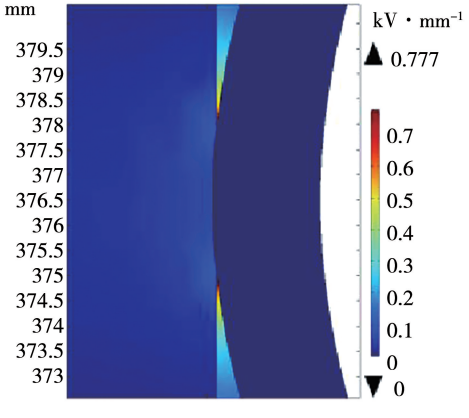
(f) 0.05 mm



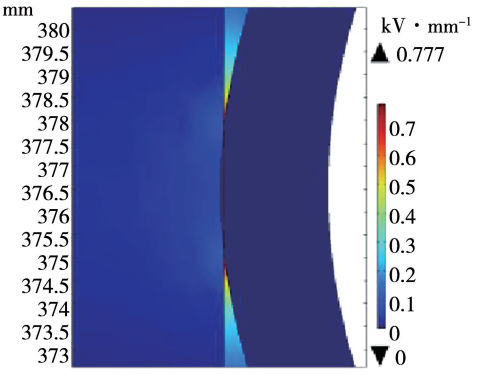
(g) 0.1 mm



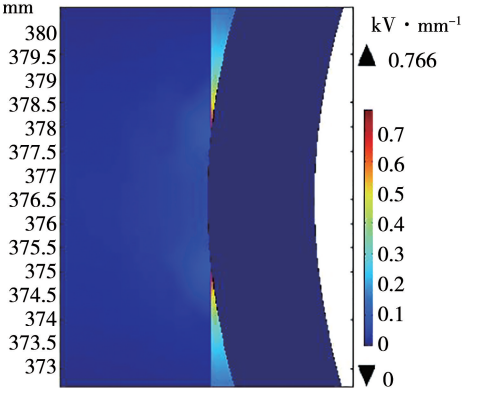
(h) 0.15 mm



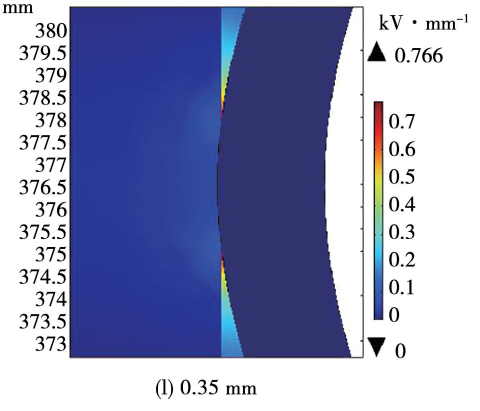
(i) 0.2 mm



(j) 0.25 mm



(k) 0.3 mm



(l) 0.35 mm

图 2　体积电阻率 1×10^5 Ω·m 的缓冲层在不同间隙下的电场

Fig. 2　Electric field of buffer layer with volume resistivity of 1×10^5 Ω·m under different gaps

体积电阻率为1×10^3、1×10^4、1×10^5 Ω·m 的电场强度随气隙及电阻率的变化曲线如图3所示。

由图 2 可见,在不同间隙下,气隙承受的电场强度最大值位置不固定,间隙宽度为 −0.1、0.2 mm 时,最大值出现在故障段中间波谷位置;间隙宽度为 0.2、0.35 mm 时,最大值出现在故障段两段最近的接触良好位置。缓冲层与皱纹护套接触良好时,随着过盈接触面减小,电场增大,但是电场强度最大值

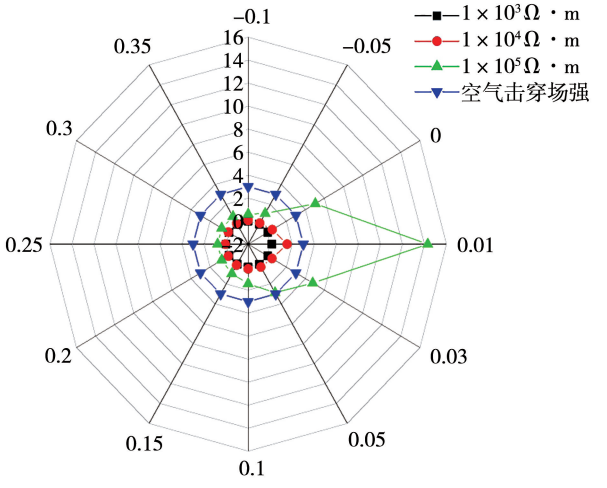


图 3 电场强度随气隙及电阻率的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of electric field strength with air gap and resistivity

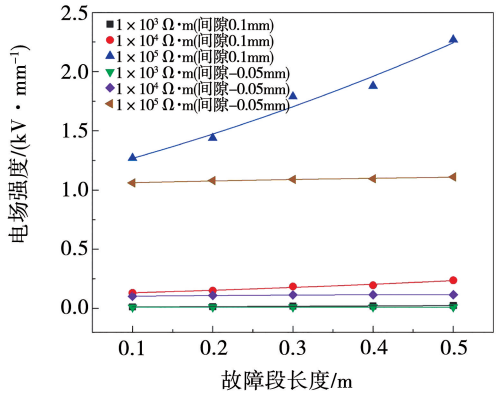


图 4 电场强度随气隙及电阻率变化的拟合预测曲线

Fig. 4 Fitting prediction curve of electric field strength with air gap and resistivity

始终小于 3 kV·m^{-1},缓冲层不会发生电烧蚀。缓冲层与铝护套波谷接触不良时,随着间隙宽度增大,电场强度最大值先增大后减小最后趋于稳定。当间隙为 0.01 mm 时,最大值达到 14.33 kV·mm^{-1},之后开始减小;当间隙大于 0.05 mm 时,最大值开始小于 3 kV·mm^{-1};当间隙大于 0.2 mm 时,最大值逐渐稳定于 0.777 kV·mm^{-1}附近,缓冲层不会发生电烧蚀。由图 3 可知,体积电阻率为 1×10^3 和 1×10^4 Ω·m 的缓冲层,电场强度最大值与电阻率为 1×10^5 Ω·m 的缓冲层具有相同的分布规律。但是相比于体积电阻率为 1×10^5 Ω·m 的缓冲层,体积电阻率为1×10^3 和 1×10^4 Ω·m 的缓冲层在故障段为200 mm 长时,电场强度最大值一直都远小于 3 kV·mm^{-1},缓冲层不会发生电烧蚀。由此可见,电缆电烧蚀和缓冲层与铝护套波谷的间隙密切相关。

为了将电场强度随间隙和电阻率的变化规律更直观地表示且分析出发生烧蚀需要的故障段长度,设定缓冲层与铝护套波谷的间隙为 0.1、−0.05 mm,探究缓冲层体积电阻率分别为 1×10^3、1×10^4、1×10^5 Ω·m,故障段长度分别为 100、200、300、400、500 mm 时,缓冲层电压及皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度最大值,获得拟合曲线图,如图 4 所示。缓冲阻水层与铝护套波谷的间隙为 0.1 mm 且缓冲层体积电阻率分别为 1×10^3、1×10^4、1×10^5 Ω·m 时,电场强度 E 最大值随间隙长度 L 的变化公式如式(1)~(3)所示。缓冲阻水层与铝护套波谷的间隙为 −0.05 mm 且缓冲阻水层体积电阻率分别为 1×10^3、1×10^4、1×10^5 Ω·m 时电场强度 E 最大值随间隙长度 L 的变化公式如式(4)~(6)所示。

$$E_{0.1-E3}=0.018L^2-0.007L+0.02 \tag{1}$$

$$E_{0.1-E4}=0.022L^2+0.082L+0.172 \tag{2}$$

$$E_{0.1-E5}=1.29L^2-0.46L+0.33 \tag{3}$$

$$E_{-0.05-E3}=0.016L^2-0.003L+0.018 \tag{4}$$

$$E_{-0.05-E4}=0.028L^2+0.075L+0.101 \tag{5}$$

$$E_{-0.05-E5}=0.032L^2+0.173L-1.95 \tag{6}$$

由上式可知,体积电阻率为 1×10^3 Ω·m 的缓冲层,当其与铝护套波谷的间隙为 0.1 mm 时,电场强度最大值达到 3 kV·mm^{-1}需要电缆故障段长度为 13.2 m。随着体积电阻率增大,电场强度最大值达到 3 kV·mm^{-1}需要的电缆故障段长度大幅度缩短。当体积电阻率为 1×10^5 Ω·m,仅需要 1.63 m 的故障段长度,电场强度最大值就达到 3 kV·mm^{-1}。而缓冲层与铝护套波谷过盈接触且间隙为 −0.05 mm 时,电场强度随着电缆故障段长度增加变化非常小,即使体积电阻率为 1×10^5 Ω·m,也需要 5.6 m 的故障段,电场强度最大值才能达到 3 kV·mm^{-1}。因此,缓冲层与铝护套波谷过盈接触在一定程度上可以减少缓冲层电烧蚀的发生。此外,相比于气隙,电阻率的变化对缓冲层的电烧蚀影响更大。总之,电阻率和间隙引起的电烧蚀需要一定长度的故障电缆。

1.2.2 阻水粉析出对电烧蚀的影响

图 5 为析出的阻水粉在皱纹铝护套与缓冲层分布图,d 为阻水粉填充长度;D 为皱纹铝护套波谷凸入缓冲阻水层的长度。

实际测量可得:阻水粉的电阻率为 1×10^{10} Ω·m,相对介电常数为 20;阻水粉附近的缓冲层电阻率为

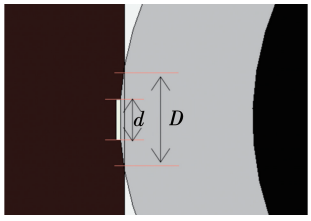


图 5　阻水粉在皱纹铝护套与缓冲层的分布图

Fig. 5　Distribution diagram of water-blocking powder between corrugated aluminum sheath and buffer layer

$2.75\times10^5\ \Omega\cdot m$,相对介电常数为 50,其他处缓冲层体积电阻率为 $1\times10^5\ \Omega\cdot m$[14]。仿真探究缓冲层与铝护套波谷过盈接触 0.1 mm、阻水粉厚度为 0.1 mm、析出个数分别为 1、2、3、4、阻水粉长度占皱纹铝护套波谷凸入缓冲层长度 1/4、1/2、3/4、1 倍时,缓冲层电压及皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度最大值,结果如表 3 所示。为了直观表明值的分布和阻水粉长度之间的关系,建立如图 6 所示的散点中线。图 7(a)、(b)为析出 1 处阻水粉且长度为波谷凸入缓冲层长度 1 倍时电压和电场强度最大值及最大值位置,图 7(c)、(d)为析出 1 处阻水粉且长度为波谷凸入缓冲层长度 3/4 倍时电压和电场强度最大值及最大值位置。

表 3　电压、电场强度最大值

Tab. 3　The maximum of voltage and electric field intensity

阻水粉个数	阻水粉长度	电场强度/(kV·mm^{-1})	电压/V
1	1/4*D*	1.916	30.6
	1/2*D*	2.229	30.65
	3/4*D*	3.27	30.9
	1*D*	22.7	33
2	1/4*D*	1.921	30.7
	1/2*D*	2.264	30.9
	3/4*D*	3.355	31.2
	1*D*	57.17	34.5
3	1/4*D*	1.933	30.8
	1/2*D*	2.276	31.1
	3/4*D*	3.375	31.4
	1*D*	67.17	34.9
4	1/4*D*	1.952	30.9
	1/2*D*	2.286	31.2
	3/4*D*	3.386	31.6
	1*D*	73.17	35.2

续表 3

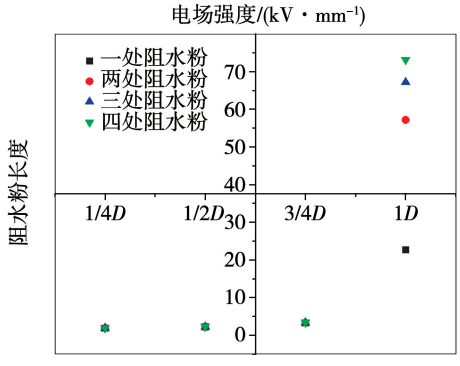
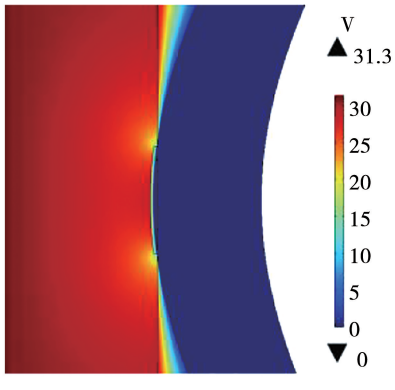
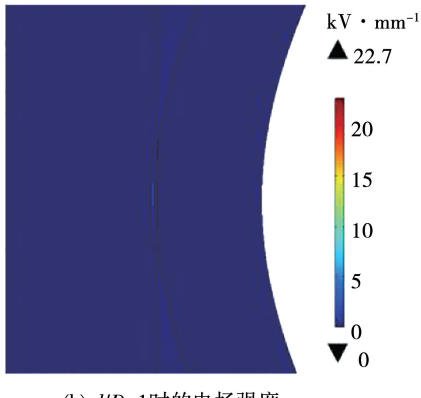


图 6　电场强度随阻水粉长度变化关系图

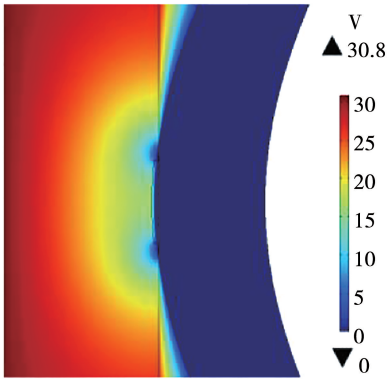
Fig. 6　Relationship between electric field intensity and water-blocking length



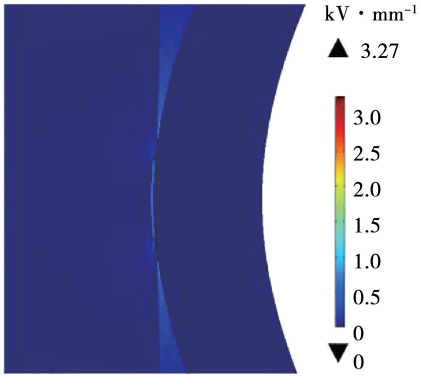
(a) *d*/*D*=1时的电压



(b) *d*/*D*=1时的电场强度



(c) d/D=3/4时的电压



(d) d/D=3/4时的电场强度

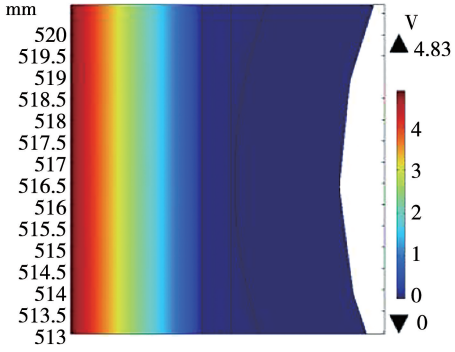
图 7 阻水粉析出时电压电场分布图

Fig. 7 Voltage and electric field distribution of water-blocking powder precipitation

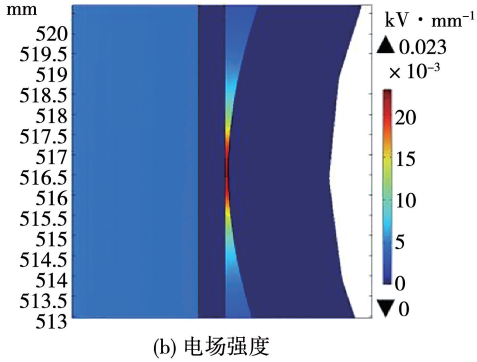
由图 6 和表 3 可知,电压、电场强度最大值随阻水粉析出个数增多而变大。当阻水粉长度小于皱纹铝护套波谷凸入缓冲阻水层长度时,变化不明显;当阻水粉长度等于皱纹铝护套波谷凸入缓冲阻水层长度时,电压及电场强度变化较大,尤其是电场强度,呈倍数增大。由图 7 可知,缓冲层电压及皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度最大值随阻水粉长度的增大而变大。当阻水粉长度小于皱纹铝护套波谷凸入缓冲阻水层长度时,电压及电场强度增大较小,此时电场强度最大值位于阻水粉析出位置,电压最大值位于铝护套两波谷的中间位置;当阻水粉长度等于皱纹铝护套波谷凸入缓冲阻水层长度时,电压及电场强度变化非常大,电场强度远超空气击穿场强,此时电场强度和电压最大值均位于阻水粉析出位置。

1.2.3 金布对电烧蚀的影响

目前,国内电缆厂家为了降低烧蚀发生概率,尝试在缓冲阻水层外绕包金布(铜丝编织布)[15],但效果目前仍处于论证阶段。通过对某厂家金布实际测量可得:电阻率为 5 Ω·m,相对介电常数为 500,厚度为 0.75 mm。仿真设定缓冲层电阻率为 1×10^5 Ω·m,相对介电常数为1 000,金布参数依据实际测量值。设定故障段缓冲层与皱纹铝护套波谷存在 0.1 mm 间隙,其余段皱纹铝护套与缓冲阻水层过盈接触 0.1 mm,探究缓冲阻水层外绕包金布后,气隙对电压及电场强度最大值及最大值位置的影响,如图 8 所示。设定缓冲层有 1 处阻水粉析出且阻水粉析出厚度为 0.1 mm,探究缓冲阻水层外绕包金布后,阻水粉对电压及电场强度最大值及最大值位置的影响,如图 9 所示。由图 8 可见,缓冲带外绕金布可以明显降低间隙和阻水粉对电缆烧蚀的影响,电场强度最大值几乎为 0,且位于故障段中间气隙处,电压降为 4.84V。由图 9 可知,缓冲层外绕金布,阻水粉析出电场强度同样几乎为 0,不会发生电烧蚀。



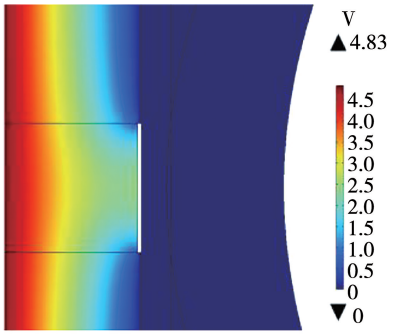
(a) 电压



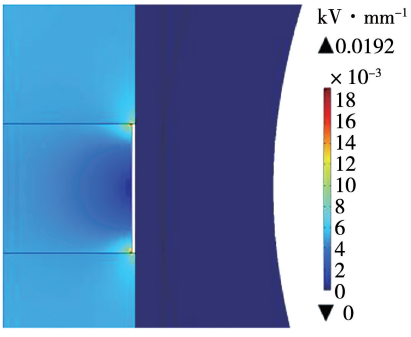
(b) 电场强度

图 8 绕包金布后气隙电场电压的变化图

Fig. 8 Figure of changes in air-gap electric field and voltage after gold-conductive cloth wrapping



(a) 电压



(b) 电场强度

图 9　绕包金布后阻水粉析出时电场电压的变化图

Fig. 9　Figure of changes in electric field and voltage during water-blocking powder precipitation after gold-conductive cloth wrapping

2　模拟烧蚀实验

仿真模拟了缓冲层与皱纹铝护套接触不良导致的电场集中现象,并计算了不同接触方式及接触状态下,缓冲层电压及皱纹铝护套波谷附近气隙承受的电场强度最大值及最大值位置,初步证明了发生缓冲层电烧蚀的可能性。通过在实验室搭建模拟烧蚀实验装置,复现不同接触方式下的烧蚀现象,对仿真结果进一步分析验证。

2.1　实验装置

实验装置如图 10 所示。实验时,可动钢板单元作为高压电极,皱纹铝护套作为接地极。将缓冲层光滑面与铝护套相对,粗糙面与钢板相对,以此来对应高压电缆中绝缘屏蔽、缓冲层、铝护套三者的实际相对位置。缓冲层电阻率的变化通过喷水次数调节。

烟雾断路器、电流断路器保护着电路安全,监控记录仪记录整个烧蚀过程,秒表记录烧蚀发生时间,可调变压器提供实验电压。实验结束后,观察并记录缓冲层和铝护套不同接触方式下的烧蚀点个数、烧蚀点面积、烧蚀形状及烧蚀位置。

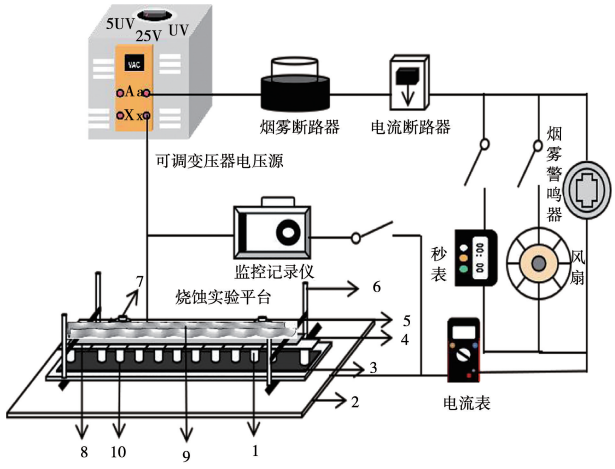


图 10　模拟烧蚀实验装置图

Fig. 10　Schematic diagram of simulated ablation experimental device

2.2　实验条件

通过改变电源输出电压幅值、试样构成(有/无金布)、铝护套类型(平滑铝/皱纹铝)、缓冲层故障段电阻率,设置不同实验条件进行分组实验,如表 4 所示。电压取值为 0.5、1、10、20、30、35 V 来模拟缓冲层上的悬浮电压,取缓冲层长为 245 mm,即 7 个皱纹铝护套波谷长,设定中间 3 个波谷接触不良且气隙大小为 1.5 mm,观察规定时间内缓冲层烧蚀现象。

表 4　模拟实验条件设置

Tab. 4　Setting of simulation test conditions

组别	电压/V	缓冲带电阻率/(Ω·m)	试验材料	时间/min
1	0.5	1×10^{3}	缓冲阻水带	300
2	1	5×10^{3}	缓冲阻水带	300
3	10	5×10^{3}	缓冲阻水带	300
4	20	1×10^{4}	缓冲阻水带	300
5	30	5×10^{4}	缓冲阻水带	60
6	35	1×10^{5}	缓冲阻水带	20
7	30	1×10^{5}	缓冲阻水带 + 金布	20
8	35	1×10^{5}	缓冲阻水带 + 金布	20
9	35	1×10^{5}	缓冲阻水带 + 平滑铝护套	20
10	35	1×10^{5}	缓冲阻水带 + 平滑铝护套 + 金布	20

2.3 实验结果

图 11 为对应 10 组实验结果图。

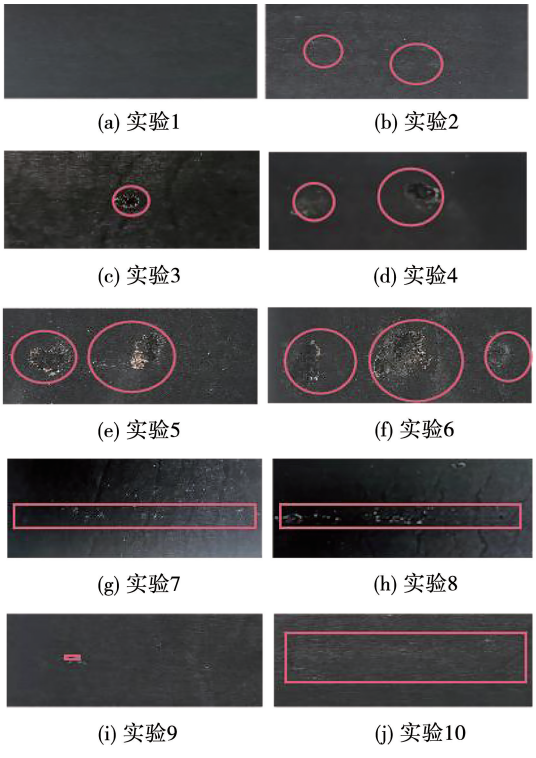


图 11 不同实验条件烧蚀结果图

Fig. 11 Diagram of ablation results under different test condition

对比前 6 组实验结果可知,电压为 0.5 V 和 1 V 时,即使烧蚀时间为 300 min,也不会发生烧蚀现象,但 1 V 时,会有阻水粉颗粒析出。电压为 10、20、30、35 V 时都会发生烧蚀,出现明显烧蚀现象的时间及烧蚀现象严重程度不同。电压为 10 V 时,接触不良段铝护套波谷对应处缓冲层出现 1 处圆形烧蚀且面积较小,同时波谷对应处会有阻水粉析出。随着电压增大,烧蚀个数增多,烧蚀面积变大,电压为 30、35 V 时,烧蚀点所在轴线附近有大片阻水粉白斑出现,且部分阻水粉有发黄的现象。同时,烧蚀首先出现在接触不良中间波谷对应位置处,然后由中间向两端延伸,当电压为 30、35 V 时,两端烧蚀也变得严重,且 30 V 时,中间和两端烧蚀严重程度差不多。

对比后 5 组实验结果可知,缓冲层外绕金布和平滑铝护套替代皱纹铝护套可以降低缓冲层烧蚀的发生概率。绕包金布后,无论 30 V 还是 35 V,烧蚀发生处由护套波谷对应处变为护套波谷所在轴线处,烧蚀仅为空气击穿时产生的密集微小电烧蚀点,且 35 V 时烧蚀更为严重。护套为铝护套时,烧蚀现象仅为几个烧蚀小点,且烧蚀点形状由圆形变为极细矩形,同时再外绕金布后,缓冲层蓬松面表面只会有少许阻水粉析出。整个电烧蚀过程中可以断断续续听到空气击穿发出的声音。

3 模拟烧蚀实验

总结仿真和实验结果,建立如图 12(a)所示的缓冲层局部放电的烧蚀等效分析模型。整个过程可等效为:绝缘屏蔽和电性能良好的缓冲层区作为高压极,铝护套作为接地极,介质为空气和接触不良缓冲层(阻水粉析出、受潮严重、缓冲层与铝护套波谷有空隙)。a 为接触不良区域,b 为与气泡相邻的其他部分,c 为空气。由于 1 次放电时间很短,在分析放电过程中这种高频信号的传递时,可以把电阻都忽略,只考虑由电容组成的等效回路,如图 12(b)所示。

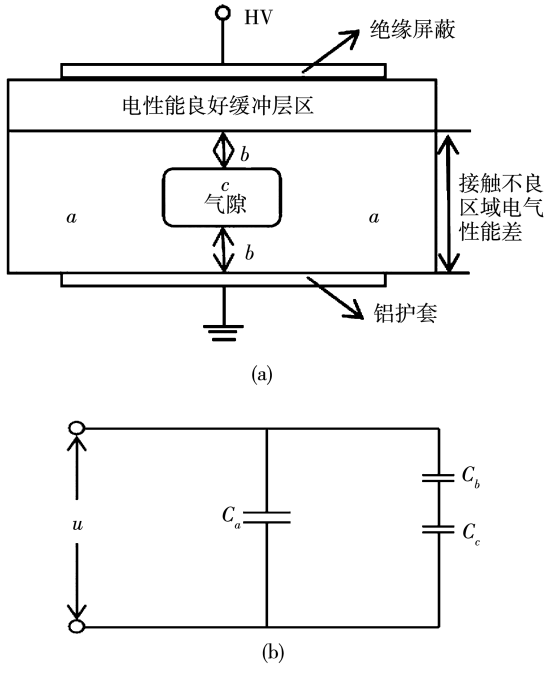


图 12 样式缓冲层局部放电的烧蚀等效分析图

Fig. 12 Ablation equivalent analysis diagram of buffer layer partial discharge

当气隙放电时,气隙两端电荷的变化即为实际放电电荷:

$$q_c = \Delta u_c \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \tag{7}$$

$$q_c = \Delta u_c (C_c + C_b) \tag{8}$$

由于 $C_a >> C_b$,放电时间很短,电源来不及补充电荷,C_a、C_b 电荷重新分配,C_a 两端电压成为 ΔU_a,C_b 两端电压变化为 ΔU_b。

$$\Delta U_c = \Delta U_a + \Delta U_b = \Delta U_a \frac{C_a + C_b}{C_b} \tag{9}$$

空气两端瞬变的电荷即为在放电电荷

$$q_a = \Delta U_a \left(C_a + \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} \right) \approx \Delta U_a C_a \tag{10}$$

气隙放电时,气隙上的电压由 U_{ab} 下降到 U_r

$$q_a = \frac{C_b}{C_b + C_c} \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) (U_{ab} - U_r) \tag{11}$$

式中:C_a、C_b、C_c 分别为各部分对应电容。由公式可知,C_a、C_b 的大小会影响气隙放电程度,气隙放电越剧烈,缓冲层就越有可能发生烧蚀。

为了分析清楚烧蚀机理,基于现有研究烧蚀原因的方式[6,16],构建了高压电缆缓冲层电路模型来分析可能发生电烧蚀的机理,如图 13 所示。在模型中,共有 3 处铝护套与缓冲层接触,两侧为接触良好区域,中间为故障段区域。C_1 为绝缘等效电容,R_1 为绝缘屏蔽层固有电阻,R_2 为绝缘屏蔽层与缓冲层接触电阻,C_2 为绝缘屏蔽层与缓冲层间等效电容,R_3 为缓冲层固有电阻,R_{41}、R_{42} 为缓冲层与铝护套接触电阻,C_{41}、C_{42} 为缓冲层与铝护套间等效电容,R_6 为铝护套固有电阻,Z_3 为缓冲层与铝护套间的阻抗,C_{31}、C_{32} 为缓冲层径向等效电容。红色方框指的是故障段缓冲层与缓冲层间的等效电容,蓝色方框指的是故障段缓冲层与铝护套间的等效电容。箭头指的是接触不良时的径向电流流向,沿缓冲层表面流入与铝护套的过盈接触点 A、B 点等。需要特别说明的是:模型参量与所在单元接触对象的材料性质、接触形式、状态等因素相关[17-18],不同单元的数值并不相同。

模型中,当缓冲层与铝护套有间隙或者阻水粉析出时,故障段中绕包层与铝护套间的电容 C_{42} 分别可表示为[19]

$$C_{42(1)} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln \dfrac{D_2}{D_1}} \tag{12}$$

$$C_{42(2)} = \frac{\theta\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln \dfrac{D_2}{D_1}} \tag{13}$$

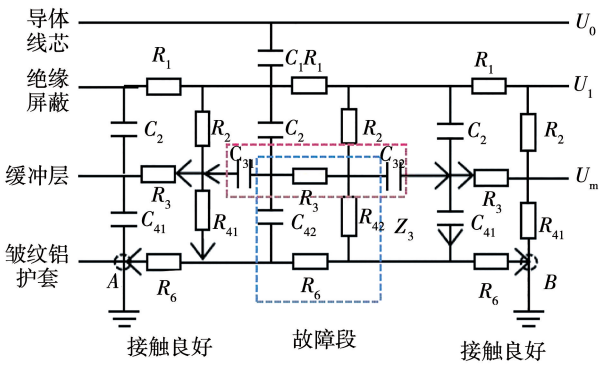


图 13　高压电缆缓冲层电烧蚀电路模型

Fig. 13　Model diagram of electric ablation circuit for high voltage cable buffer layer

当阻水粉析出或缓冲层受潮时,故障段缓冲层径向等效电容 C_{32} 可表示为

$$C_{32} = \frac{\varepsilon_0 A_d}{t} \tag{14}$$

式中:ε_r 为相对介电常数;ε_0 为绝对介电常数;D_2 为电缆铝护套波谷处直径;D_1 为缓冲层外直径;θ 为接触面对应的圆心角;A_d 为缓冲层上析出阻水粉的厚度;t 为缓冲层上析出阻水粉的长度或缓冲层变质的长度。

由式(12)~(13)可得:间隙、阻水粉析出和缓冲层受潮都会导致电容 C_{42} 减小,且和气隙长度、宽度及阻水粉析出长度成反比。由式(14)可知,电容 C_{32} 也随着阻水粉析出长度、受潮长度的增加而减小。

气隙放电时的电场强度可表示为

$$E = \frac{Kq_a}{r^2} \tag{15}$$

式中:K 为静电力常量(库仑常数);q_a 为产生电场的点电荷的电荷量;r 为测试点到点电荷的距离。

当缓冲层与铝护套电气接触不良时,C_a、C_b 随 C_{42}、C_{32} 减小而减小,导致气隙处缓冲层容抗增大,阻抗 Z_3 增大,悬浮电压增大。当电压达到气隙放电电压时,气隙发生击穿放电,放电时伴随着放热,引发了缓冲层的烧蚀。

烧蚀机理的讨论:由图 3~4 可知,电压和电场的最大值位置不全相同,电场强度最大值位置与气隙宽度有关。由式(15)可知,气隙宽度的平方与电场强度成反比,但当气隙宽度小于 0.2 mm 时,最大值位置始终位于接触不良中间位置;而气隙宽度大

于0.2 mm时,由于容性电流的存在,两侧良好接触处的悬浮电压也较大,最大值位置变为距离故障段最近的良好接触处。因此,在实际烧蚀过程中,电缆烧蚀点的分布多种多样。缓冲层受潮与阻水粉析出,本质上都是隔绝铝护套与缓冲层的电气接触,使得缓冲层上既存在径向电容也存在轴向电容,且由式(12)~(14)得,随着析出阻水粉量的增加和受潮加重,缓冲层电容减小,容抗增大,阻抗增大,悬浮的电压增大,使得缓冲层更容易发生烧蚀。径向放电的结果会作用于轴向放电,使烧蚀更为严重并发生得更快。析出阻水粉的长度小于铝护套波谷凸入的缓冲层的长度时,缓冲层与铝护套仍然存在电气接触;随着长度增大,电场强度微弱增加,这是因为接触面积减小,容性电流密度增大使得悬浮电压有微弱增加,但整体变化不大。即使连续2处有少量阻水粉析出,电场强度也没有明显变化,说明容性电流对电场的影响远小于故障导致的接触不良对电场的影响。缓冲层与铝护套过盈接触、缓冲层外绕金布及平滑铝替代皱纹铝既可以增加电气接触能力,也可以弱化电场分布。电路烧蚀模型从电场集中角度,同时考虑缓冲层轴向电场放电和径向电场放电,并加入容性电流对电场集中的影响分析,得出可能的烧蚀机理。

4 防止电烧蚀的缓冲带设计

基于前文对缓冲层烧蚀原因的分析,提出可以降低烧蚀发生概率的结构,如图14所示。

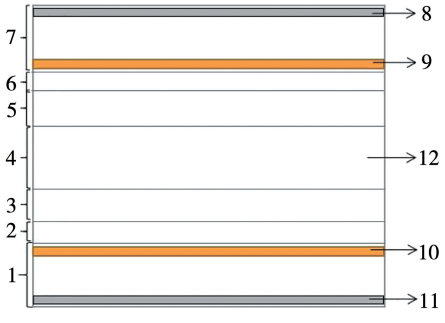


图14 可降低烧蚀的缓冲层的结构图

Fig. 14 Structure diagram of buffer layer to reduce ablation

具体结构如下:1、7-蓬松棉,蓬松棉两面分别插有镀锡铜丝层(9、10)和镀锡铝丝层(8、11)及经碳化处理后的石墨纤维;2、6-活性炭过滤棉,该结构被醋酸蒸汽喷蚀过且均匀填充适量石墨;3-蓬松棉,该结构中添加经碳化处理后的石墨纤维;5-无纺布,该结构添加导电高分子型纤维、聚苯胺和聚乙炔;4-阻水粉,该结构中添加碳化钨和碳化铬等强导电性粉末。

1、7-双面蓬松棉层结构可以保证其优异的缓冲弹性性能,采用双金属布填充。里侧采用铜布填冲,由于铜的电性能优异,可以均化电场并弥补缓冲阻水带里层其他结构的电性能;外侧采用铝布填充,价格、密度较低,可以在保证电性能的同时,保证蓬松棉固有的蓬松性。实际生产时,绕包缓冲阻水带会采用紧压方式,因此,双金属布间隔非常小。同时,在蓬松棉上添加经碳化处理后的纤维,保证蓬松棉层导电性能好、耐热、耐化学腐蚀,降低热收缩能力,提高缓冲阻水带的使用寿命。2、6-活性炭过滤棉既可以起到导电作用,同时又可以吸附水中杂质,防止发生化学腐蚀。最重要的是,活性炭过滤棉上喷有醋酸蒸汽,一旦有水渗透到阻水粉中,阻水粉遇水会呈弱碱性,长时间会腐蚀铝护套。但是,醋酸蒸汽的存在会起到中和的作用,保证中性环境。而且阻水粉遇水会迅速膨胀,活性炭过滤棉可以减少渗透到缓冲层表面的阻水粉颗粒。5-无纺布中添加高分子导电纤维,可以很好地确保电学性能。4-阻水粉中添加导电性能优于石墨的碳化物,可以保证在阻水粉膨胀后仍然有优异的电性能。

5 结 语

缓冲层电烧蚀是气隙放电的必然结果,气隙放电发生在缓冲层上,包括径向放电和轴向放电。容性电流的存在会影响轴向气隙放电,使得烧蚀位置随缓冲层与铝护套波谷间距发生变化。间距在0、2 mm时,电场强度最大值位于故障段中间位置;大于2 mm时则位于缓冲层与铝护套紧密接触处,实际缓冲层烧蚀位置多种多样。

缓冲层因受潮导致电阻率变大时,过盈接触对防止电烧蚀发生有一定作用,但仍然有被烧蚀的风险。可通过在缓冲层结构中增加1层隔绝阻水粉析出的导电过滤棉,保证在缓冲层受潮时,缓冲层与铝护套仍然有较好的电气接触能力。

缓冲层与铝护套电气接触不良是烧蚀的本质原因,缓冲层外绕金布和平滑铝替代皱纹铝对改善烧蚀有明显的效果,也可以考虑减小皱纹铝节距和纹深、改进缓冲层来降低烧蚀发生概率。

参 考 文 献:

[1] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2593.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key Technical Analysis and Prospect of High Voltage and Extra-high Voltage Power Cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593.

[2] 杜伯学, 韩晨磊, 李进, 等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1):179.
DU Boxue, HAN Chenlei, LI Jin, et al. Research Status of Polyethylene Insulation for High Voltage Direct Current Cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 179.

[3] 朱煜峰, 许永鹏, 陈孝信, 等. 基于卷积神经网络的直流 XLPE 电缆局部放电模式识别技术[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 659.
ZHU Yufeng, XU Yongpeng, CHEN Xiaoxin, et al. Pattern Recognition of Partial Discharges in DC XLPE Cables Based on Convolutional Neural Network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(3): 659.

[4] 谢声益, 杨帆, 黄鑫, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的交联聚乙烯电缆绝缘层气隙检测分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2698.
XIE Shengyi, YANG Fan, HUANG Xin, et al. Air Gap Detection and Analysis of XLPE Cable Insulation Based on Terahertz Time Domain Spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,35(12): 2698.

[5] 李陈莹,李鸿泽,陈杰,等. 高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 61.
LI Chenying, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Analysis of High Voltage XLPE Power Cable Buffer Layer Discharge Problem[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018,37(2): 61.

[6] 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.
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.

[7] 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, 62(5): 5.
WANG Wei, OUYANG Benhong, XU Mingzhong, et al. Basic Preliminary Study of Erosion Phenomena on Buffer Layer of Cable[J]. Wire & Cable, 2019, 62(5): 5.

[8] 刘晓东, 刘培镇. 高压电缆缓冲层交、直流电阻测试与绝缘屏蔽烧伤研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(11): 142.
LIU Xiaodong, LIU Peizhen. Study for Measurement of AC & DC Resistance of High Voltage Cable Related to Insulation Screen Burn[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(11): 142.

[9] 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.
LIU Yang,CHEN Jie, HU Libin, et al. Mechanism and Experimental Study on Discharge Ablation in Buffer Layer of High Voltage XLPE Cable Buffer Layer[J]. Insulating Materials,2021,54(8): 102.

[10] 万利,周凯,蔡钢,等. XLPE 电缆终端绝缘气隙缺陷的局部放电烧蚀特征[J]. 绝缘材料,2014,47(6): 65.
WAN Li,ZHOU Kai,CAI Gang,et al. Partial Discharge and Ablation Characteristics of Air Gap Defects in XLPE Cable Termination Insulation[J]. Insulating Materials, 2014,47(6): 65.

[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.
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.

[12] 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.
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.

[13] 金维芳. 电介质物理学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000:139.

[14] 施楠楠,徐晓峰,夏俊峰,等. 高压电缆半导电缓冲层新型评价方法探讨[J]. 电线电缆,2021,64(4):9.
SHI Nannan, XU Xiaofeng, XIA Junfeng. et al. Discussion on New Evaluation Method of Water Blocking Buffer Layer in High-voltage Cable[J]. Wire & Cable, 2021,64(4):9.

[15] 金金元, 陈志忠, 陈朝晖, 等. 平滑铝护套电缆涂覆技术及安全性能分析[J]. 电力安全技术, 2022, 24(4): 42.
JIN Jinyuan, CHEN Zhizhong, CHEN Zhaohui, et al. Analysis on the Coating Techniques and Safety Performance of Smooth Aluminum Sheathed Cables[J]. Electric Safety Technology, 2022, 24(4): 42.

[16] 杨帆,朱宁西,刘晓东,等. 基于阻抗评估电缆缓冲层间隙状况的实验与分析[J]. 广东电力,2018,31(12): 93.
YANG Fan, ZHU Ningxi, LIU Xiaodong, et al. Experiment and Analysis of Evaluating Buffer Layer Gap Condition of Cable Based on Impedance[J]. Guangdong Electric Power,2018,31(12): 93.

[17] SUZUOKI Y, SAITO T, MORITZ M, et al. Inception and Propagation of Electrical Tree from Water Tree Degradation, Polyethylene Cable in Sulation[C]//The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004: 302.

[18] 李文杰,欧阳本红,宋鹏先,等. 电力电缆缓冲层烧蚀故障分析及试验研究[J]. 合成材料老化与应用,2021,50(6):38.
LI Wenjie, OUYANG Benhong, SONG Pengxian, et al. Analysis and Experimental Study on Erosion Failure of Cushion Layer of Power Cable[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021,50(6):38.

[19] KUBIS A, REHTANZ C. Application of a Combined Electro-thermal Overhead Line Model in Power Flow and Time-domain Power System Simulations[J]. IET Generation Transmission & Distribution,2017,11(8): 2041.

(编辑:温泽宇)