

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.026

## 高压电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障机理分析

张静<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 徐明忠<sup>3</sup>, 宋鹏先<sup>4</sup>, 李文杰<sup>3</sup>, 欧阳本红<sup>3</sup>

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106;2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司,湖北 武汉 430074;3. 中国电力科学研究院有限公司,湖北 武汉 430074;4. 国网天津市电力公司电力科学研究院,天津 300384)

**摘要:**为了研究运行电压下电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障机理,建立了高压电缆轴向沿面烧蚀数学模型,根据110 kV 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆结构及实际尺寸,计算了电缆发生放电现象时电缆金属护套与绝缘外屏蔽的脱离距离,分析了高压电缆轴向沿面烧蚀的影响因素。结果表明:金属护套与电缆绝缘外屏蔽脱离是引起电缆缓冲层及绝缘屏蔽层烧蚀的主要原因。缓冲层电阻率对脱离距离影响显著,降低缓冲层电阻率可增加允许脱离距离,当电阻率达到 $10^5 \Omega \cdot \text{mm}$ 以下时,允许的脱离距离达1 186 mm,不易发生轴向沿面放电。此外,允许纵向电压及缓冲层结构尺寸也是控制缓冲层缺陷的特征参数。

**关键词:**电缆;缓冲层;波纹铝护套;烧蚀;脱离距离

**中图分类号:**TM75

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)03-0180-05

### 0 引言

电力电缆的运行可靠性直接关系到电网的本质安全。近年来,浙江、广州、福建、北京、上海、新疆等地区发生了几十起因缓冲层烧蚀引发的高压交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)绝缘电缆故障<sup>[1-6]</sup>,新加坡、澳大利亚也有类似报道<sup>[7]</sup>。该故障严重时甚至出现绝缘屏蔽层完全穿透,引发电缆绝缘击穿,造成停电事故<sup>[8]</sup>。

不同XLPE绝缘电力电缆在结构上的最大差异就在于电缆缓冲层,缓冲层的功能、选材、生产工艺、结构参数以及与电缆缆芯和金属护套的配合等对电缆本体性能有重要影响<sup>[9-12]</sup>。我国现行的高压XLPE绝缘电力电缆国家标准GB/T 11017、GB/T 18890、GB/T 22078对电缆缓冲层有规定<sup>[13-15]</sup>:(1)缓冲层位于挤包的绝缘半导体屏蔽层外,并与绝缘屏蔽层和金属屏蔽层保持电气上接触良好,缓冲层厚度应能满足补偿电缆运行中热膨胀的要求;(2)缓冲层与纵向阻水材料应与其相接触的其他材料相容。可以看出标准对缓冲层的具体技术指标不够明晰,且未对缓冲层的材料及结构要求进行规定。

目前,国内相关研究机构正在针对运行中的高压与超高压XLPE绝缘电缆故障开展缓冲层材料、缓冲层结构、金属屏蔽(套)结构设计及工艺控制的研究。文献[16]分析了运行环境中过电压作用下

缓冲层分压、产热过程,并利用电化学分析阐述了电压极性对皱纹铝护套的危害。文献[17]通过仿真计算不同缓冲层结构高压电缆的载流量,提出缓冲层采用阻水带外绕包金布再与平直铝护套紧密接触的结构,该结构可显著提升电缆的载流量。文献[18]对6条不同间隙状况的目标电缆进行实验分析,提出通过绘制对应阻抗曲线反映电缆缓冲层间隙特征的方法。文献[19]仿真计算了高压电缆的电场分布,从缓冲层介电性能及结构尺寸方面提出了电缆缓冲层与金属护套结构设计优化建议。文献[20]建立半导电阻水缓冲层等效电路,分析阻水缓冲带与皱纹铝套之间的接触电阻及接触点热阻系数对缓冲层烧蚀的影响,提出电缆生产工艺和相关标准改进方法。

通过分析缓冲层故障特征,从电缆缓冲层轴向沿面放电的角度建立电力电缆等值电路数学模型,研究缓冲层的材料、结构及运行工况等因素对缓冲层脱离距离的影响,旨在降低因参数控制不合理导致界面接触不良的烧蚀缺陷,提高电缆性能,增加运行寿命。

### 1 高压电缆轴向沿面烧蚀故障特征

统计我国自2001年至今的26起电缆缓冲层烧蚀故障发现,因高压电缆缓冲层轴向沿面烧蚀引发的电缆故障已涉及多个厂家、不同结构、运行年限的电缆,电压等级涉及110~220 kV,电缆截面覆盖500~2 000 mm<sup>2</sup>。故障发生时负荷电流大多在40%以下,故障期间未承受系统操作、雷电过电压,无道

收稿日期:2019-12-11;修回日期:2020-01-14

基金项目:国家电网有限公司科技项目“电力电缆潜伏性隐患检测防护与产品施工质量评价技术研究”

路挖掘活动,且通过故障电缆解体分析发现,同部位非故障相也存在不同程度的烧蚀现象或征兆,如图1所示,其具有以下重要的特征:

(1) 紧贴于波纹铝护套波谷的电缆缓冲层外侧明显被电蚀,且非电缆圆周方向 $360^\circ$ 烧损,故障电缆电蚀仅发生在一定长度上,通常在1 m以内;

(2) 电缆缓冲层与绝缘屏蔽层之间存在放电痕迹,绝缘屏蔽层放电形成的凹坑均位于波纹铝护套波谷处,在轴向长度上呈现对称分布,且沿对称中心向两端烧蚀情况减轻;

(3) 波纹铝护套波谷处存在与电缆缓冲层对应的电腐蚀留下的细小凹坑痕迹。



图1 电缆金属护套与绝缘外屏蔽层缺陷  
Fig.1 Defect of metal sheath and insulation outer shielding layer of cable

## 2 高压电缆轴向沿面烧蚀数学模型

缓冲层广泛存在于目前高压与超高压XLPE绝缘电缆中,其绕包带不仅导电且具有吸水膨胀性能,一般采用导电的聚脂纤维无纺布内添加遇水可迅速膨胀的聚丙烯酸酯吸水膨胀粉复合带材绕包,从而当电缆金属护层有缺陷时能阻止水分沿电缆纵向扩散时实现纵向阻水的目的。具有缓冲层的电力电缆典型结构如图2所示。为简化分析,文中将电缆的缓冲层与绝缘屏蔽层等效为一层,称为复合层,由于绝缘屏蔽层与缓冲层在材料特性上均为半导体材料,且有直接的电气连接,因此等效是合理的。图2中 $d_1$ 为导体屏蔽层外径; $d_2$ 为绝缘层外径; $\delta$ 为复合层厚度; $D$ 为复合层平均直径, $D = d_2 + 2\delta$ ;  $2L$ 为波纹铝护套与复合层允许脱离接触距离,单位均为mm。

为分析电缆轴向长度上沿面烧蚀原因,建立电力电缆等值电路即图3,该等值电路用于描述电缆缓冲层表面电位 $\varphi$ 沿轴向长度 $x$ 分布的变化。其中, $C$ 为绝缘层电容; $I$ 为绝缘层电容电流; $R$ 为复合层电阻。当轴向中间有一段接地不良时,分布电容电流在两接地点 $A, B$ 间形成高电位区,而越靠近两端产生的电压降 $U$ 越大。由于单位长度半导体层

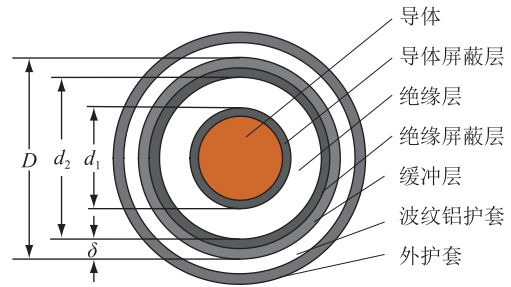


图2 电缆结构及参数

Fig.2 Cable structure and parameter

材料电阻 $R$ 都一样,因而 $A, B$ 的中点处可能形成高电位,引起电晕并导致放电,放电电流流经 $A, B$ 两点形成烧蚀。

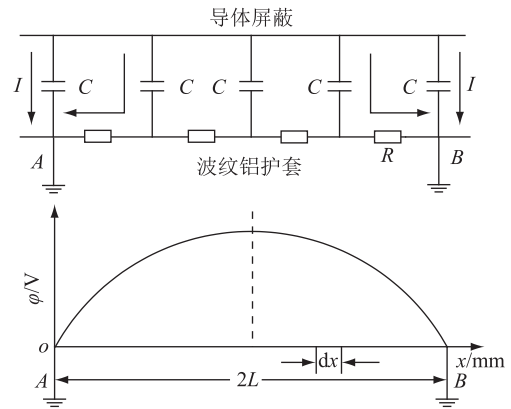


图3 电力电缆等值电路

Fig.3 Cable equivalent circuit

为了防止轴向放电,波纹铝护套与复合层不宜脱离接触过长,设此距离为 $2L$ ,则由图2与图3可推导出波纹铝护套与复合层允许脱离节距 $L$ 值。

单位长度XLPE电缆的电容 $C$ 和电容电流 $I$ 为:

$$\begin{cases} C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(d_2/d_1)} = \frac{55.6\epsilon}{\ln(d_2/d_1)} \times 10^{-14} \\ I = U_0\omega C = 2\pi fCU_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\epsilon$ 为绝缘层介电常数; $\omega$ 为角频率; $U_0$ 为系统运行电压; $f$ 为电网运行频率。

单位长度XLPE电缆复合层的电阻 $R$ 和电压 $U_x$ 为:

$$\begin{cases} R = \frac{\rho}{\pi D\delta} \\ U_x = IR \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为复合层电阻率。

以复合层与波纹铝护套两端的接触点为电位参考点,得到 $A, B$ 的中点电压 $U$ 表达为:

$$U = \int_0^L dU_x = \int_0^L Ix\rho \frac{dx}{\pi D\delta} =$$

$$\int_0^L \omega C U_0 \rho \frac{x}{\pi D \delta} dx = \frac{\omega C U_0}{2\pi D \delta} \rho L^2 \quad (3)$$

若允许纵向电压为  $U_s$ , 应使  $U \leq U_s$ , 即:

$$\frac{\omega C U_0}{2\pi D \delta} \rho L^2 \leq U_s \quad (4)$$

进一步可得:

$$L \leq \sqrt{\frac{1.8 \times 10^{12} U_s \delta (d_2 + \delta) \ln(d_2/d_1)}{f U_0 \varepsilon \rho}} \quad (5)$$

需要说明的是, 式(5)用于描述波纹铝护套 A, B 两点间距离  $2L$  中的电容电流  $I$  沿复合层轴向流入波纹铝护套, 引起两点间部分电位升高。由式(5)可知, 允许脱离节距  $L$  与  $\delta, U_s$  成正比, 与 XLPE 材料的  $\varepsilon, \rho, U_0$  成反比。

### 3 影响电缆轴向沿面烧蚀的因素

为定量分析各因素影响, 文中以 110 kV 630 mm<sup>2</sup> XLPE 电缆的结构为例, 计算不同复合层厚度、允许纵向电压及复合层电阻率下的允许脱离距离。电缆具体参数如下: 导体直径 30 mm; 导体屏蔽层直径 32.8 mm; 绝缘层外径 65.8 mm; 波纹铝护套内径 75.8 mm; XLPE 绝缘材料的介电常数为 2.3, 相电压  $U_0$  为 64 kV。

#### 3.1 复合层厚度

根据上述尺寸参数, 在绝缘层与金属套内径之间有 5 mm 的空间可以填充复合层, 令  $U_s$  取 100 V,  $\rho$  取  $10^6 \Omega \cdot \text{mm}$ , 代入式(5)计算复合层厚度对电缆允许节距的影响, 如图 4 所示。由图 4 可见, 在一定范围内, 电缆允许节距随复合层厚度增大而增大。这一结论的前提是电缆结构为比较理想的同心圆且复合层电阻率均匀, 而现场敷设的电缆极易出现偏心, 因此实际工程应用中复合层厚度的选取还应考虑电缆热膨胀及阻水性能的要求。

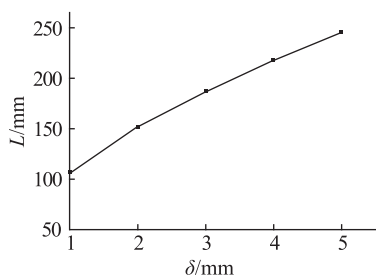


图 4 复合层厚度与允许节距的关系

Fig.4 The relationship between composite layer thickness and allowable pitch

#### 3.2 允许纵向电压

$U_s$  是指电缆波纹铝护套与绝缘外屏蔽层之间能够承受不发生击穿的电压, 其大小直接影响允许

脱离节距  $L$ 。目前, 国家及行业标准并未规定  $U_s$  的大小及测试方法, 缺少相关测试数据。为确定允许纵向电压研究范围, 文中搭建了图 5 所示的模拟试验回路, 选用某厂家 110 kV 630 mm<sup>2</sup> XLPE 电缆, 截取电缆长度 1 m, 利用交流电压源在电缆绝缘外屏蔽层及波纹铝护套间施加一定电压, 通过电压表及电流表测量回路中的电压及电流, 得到数据如表 1 所示。

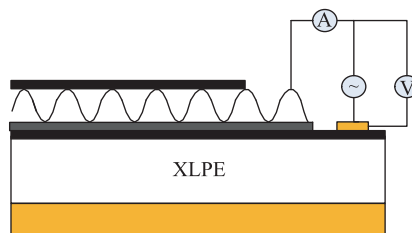


图 5 模拟试验示意

Fig.5 Schematic diagram of simulation test

表 1 允许纵向电压与复合层电流的关系

Table 1 Relation between permissible longitudinal voltage and composite layer current

电压/V	电流/mA	电压/V	电流/mA
40	138	80	413
60	229	100	862

测试时, 当电流达到 200~400 mA, 会出现复合层电流突然增大的现象, 因此选取 40~100 V 为  $U_s$  的研究范围。令  $\rho$  取  $10^7 \Omega \cdot \text{mm}$ ,  $\delta$  取 3 mm, 将参数代入式(5)计算  $U_s$  与  $L$  的关系, 如图 6 所示。由图 6 可见,  $U_s$  越大,  $L$  越大。根据电力电缆的结构, 提高  $U_s$  是否可取, 有待进一步研究, 但是若  $U_s$  为零, 即波纹铝护套与复合层电气上紧密连接, 那么  $L$  也为零, 此时电缆也不会产生表面放电, 国外的一些电缆供应商(如普睿司曼公司)已经利用该原理研制出相应类型的电缆。

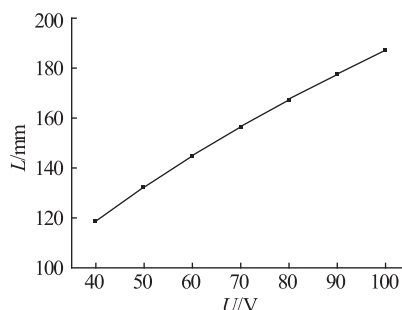


图 6 允许纵向电压与电缆允许节距的关系

Fig.6 The relationship between allowable longitudinal voltage and allowable pitch of cable

#### 3.3 复合层电导率

令  $U_s$  取 100 V,  $\delta$  取 3 mm, 将参数代入式(5)计



算 $\rho$ 与 $L$ 的关系如图7所示。

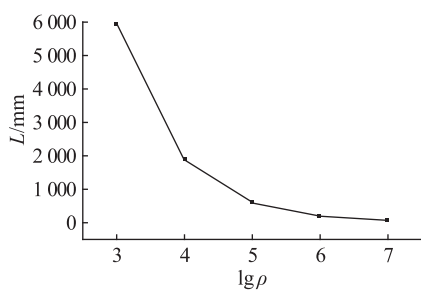


图7 复合层电阻率与电缆允许节距的关系

Fig.7 Relation between resistivity of composite layer and allowable pitch of cable

由图可见, $\rho$ 增大,将减少 $L$ ,这不利于防止轴向放电。当 $\rho$ 达到 $10^7 \Omega \cdot \text{mm}$ 时, $L$ 为59.28 mm,即电缆允许脱离距离 $2L$ 为118.56 mm。而当 $\rho$ 控制在 $10^6 \Omega \cdot \text{mm}$ 时, $L$ 为187.5 mm,即电缆允许脱离距离 $2L$ 为375 mm。当 $\rho$ 达到 $10^5 \Omega \cdot \text{mm}$ 时, $2L$ 达1 186 mm,不易发生轴向沿面放电。关于复合层电阻率,由于缓冲层电阻率较绝缘外屏蔽层的大,因此文中主要考虑缓冲层的电阻率对允许脱离距离的影响。目前,JB/T 10259—2014《电缆和光缆用阻水带》规定电缆阻水带体积电阻率不应超过 $1.0 \times 10^6 \Omega \cdot \text{mm}$ 的要求,而国内某电力公司对成盘电缆进行测试发现,多盘阻水带体积电阻率超标,最大测量值达到 $1.69 \times 10^7 \Omega \cdot \text{mm}$ 。可见,控制电阻率对预防电缆缓冲层故障效果显著。进一步地,如果控制了缓冲层的电阻率,那么电缆绝缘屏蔽层的电阻率也是需要被考虑的,因为其半导体材料会随着运行时间性能发生较大的变化。

#### 4 结论

文中通过建立高压电缆轴向沿面烧蚀数学模型,分析了电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障机理,计算了复合层厚度、允许纵向电压及复合层电阻率对允许脱离距离的影响,得到以下结论:

(1) 电缆在实际运行时金属护套与电缆绝缘外屏蔽脱离,使电场分布发生改变,在脱离间隙内产生轴向沿面放电,引起电缆缓冲层及绝缘屏蔽层烧蚀;

(2) 允许脱离距离和绝缘材料介电常数、复合层电阻率以及工作电压成反比,与允许纵向电压、复合层厚度成正比;

(3) 缓冲层电阻率对脱离距离影响显著,降低缓冲层电阻率可增加波纹铝护套与缓冲层允许脱离距离,因此可通过控制缓冲层材料的电阻率,避免高压电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障。

#### 参考文献:

- [1] 陈智勇,张静. 高压 XLPE 电缆金属护套与绝缘外屏蔽层放电特性研究[J]. 电缆技术,2013(3):3-9.  
CHEN Zhiyong,ZHANG Jing. Discharge characteristics of metal sheath and insulation shield of high voltage XLPE cable[J]. Cable Technology,2013(3):3-9.
- [2] 陈智勇,张静. 不同截面的 110 kV XLPE 电力电缆缓冲层放电特性[J]. 电缆技术,2014(3):1-5.  
CHEN Zhiyong,ZHANG Jing. Discharge characteristics of buffer layer of 110 kV XLPE power cables with different cross sections[J]. Cable Technology,2014(3):1-5.
- [3] 张静,范永生. 110 kV XLPE 电缆缓冲层放电特性分析[C]//全国第十次电力电缆运行经验交流会. 2016:302-306.  
ZHANG Jing,FAN Yongsheng. Analysis of discharge characteristics of 110 kV XLPE cable buffer[C]//The Tenth National Power Cable Operation Experience Exchange Conference. 2016:302-306.
- [4] 周智鹏,林国健,陈真林. 高压 XLPE 电缆绝缘外屏蔽与金属护套件放电特征及检测方法[J]. 电缆技术,2018(1):36-41.  
ZHOU Zhipeng,LIN Guojian,CHEN Zhenlin. Discharge characteristics and detection methods of external insulation shield and metal sheath of high voltage XLPE cable[J]. Cable Technology,2018(1):36-41.
- [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):61-66.  
LI Chenying,LI Hongze,CHEN Jie,et al. Analysis of buffer layer discharge problem of high voltage XLPE power cable[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(2):61-66.
- [6] 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.  
DENG Shenghua,JIANG Fuzhang,LIU Heping,et al. Study on material and structural characteristics of buffer layer for high voltage cable[J]. Wire and Cable,2019(2):19-27.
- [7] CHARLES Q S. Failure analysis of three 230 kV XLPE cables[C]//2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Latin America;22-25.
- [8] ZHAO Jiankang. Study of the design and process of the buffer in HV power cables[J]. Electric Wire & Cable,2010,3(3):17-20.
- [9] 赵健康,樊友兵. 高压电缆缓冲层的设计与工艺研究[J]. 电线电缆,2010(3):17-20.  
ZHAO Jiankang,FAN Youbing. Design and technology research of high voltage cable buffer[J]. Wire and Cable,2010(3):17-20.
- [10] 周智鹏,林国健,陈真林. 高压 XLPE 电缆绝缘外屏蔽与金属护套件放电特征及检测方法[J]. 电缆技术,2018(1):36-41.  
ZHOU Zhipeng,LIN Guojian,CHEN Zhenlin. Discharge characteristics and detection methods of external insulation shield and metal sheath of high voltage XLPE cable[J]. Cable Technology,2018(1):36-41.
- [11] 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 Ruilei,WANG Jiancheng,WANG Zhaomin, et al. Study on partial discharge of 110 kV XLPE insulated power cables [J]. Wire and Cable,2006(3):31-33.
- [12] 蒋晓娟,何伟. 一起通过局放在线检测技术成功发现的 110 kV 电缆本体缺陷[C]//全国第九次电力电缆运行经验交流会. 2012;283-287.
- JIANG Xiaojuan,HE Wei. Detect the defect of 110 kV cable through on-line PD detection technology[C]// The Ninth National Power Cable Service Experience Conference. 2012; 283-287.
- [13] 额定电压 110 kV( $U_m = 126$  kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件:GB/T 11017—2014[S].
- The rated voltage 110 kV ( $U_m = 126$  kV) XLPE insulated power cable and its accessories:GB/T 11017—2014[S].
- [14] 额定电压 220 kV( $U_m = 252$  kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件:GB/T 18890—2015[S].
- The rated voltage of 220 kV ( $U_m = 252$  kV) XLPE insulated power cable and its accessories:GB/T 18890—2015[S].
- [15] 额定电压 500 kV( $U_m = 550$  kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件:GB/T 22078—2008[S].
- The rated voltage of 500 kV ( $U_m = 550$  kV) XLPE insulated power cable and its accessories:GB/T 22078—2008[S].
- [16] 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.
- WANG Wei,OUYANG Benhong,XU Mingzhong, et al. Basic preliminary study of erosion phenomenon on buffer layer of cable [J]. Wire and Cable,2019(5):5-10.
- [17] 李珊珊,严有祥,陈丽安,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J]. 供用电,2019,36(1):87-92.
- LI Shanshan,YAN Youxiang,CHEN Li'an, et al. Study on the influence of buffer layer structure of high-voltage XLPE cable on carrying capacity [J]. Distribution & Utilization,2019,36(1):87-92.
- [18] 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):93-98.
- YANG Fan,ZHU Ningxi,LIU Xiaodong, et al. Experiments and analysis of cable buffer gap based on impedance evaluation [J]. Guangdong Electric Power,2018,31(12):93-98.
- [19] 汪传斌,金海云. 高压 XLPE 绝缘电力电缆缓冲层与金属护层结构设计仿真计算与优化[J]. 电线电缆,2018(3):6-12,16.
- WANG Chuanbin,JIN Haiyun. Structural design simulation and optimization of buffer and metal cladding for high voltage XLPE insulated power cable [J]. Wire and Cable,2018(3):6-12,16.
- [20] 黄宇,尹毅,吴长顺. 高压电缆阻水缓冲层电性能研究[J]. 电线电缆,2018(6):6-9,19.
- HUANG Yu,YIN Yi,WU Changshun. Study on electrical properties of water-blocking buffer layer for high-voltage cables [J]. Wire and Cable,2018(6):6-9,19.

作者简介:



张静

张静(1986),女,硕士,高级工程师,从事 XLPE 电力电缆及附件的设计、试验及检测技术相关工作(E-mail:hnhzj2008@163.com);

王伟(1960),男,学士,高级工程师,从事电力电缆及附件运行维护技术研究工作;

徐明忠(1971),男,博士,高级工程师,从事高电压与绝缘技术研究工作。

### Analysis of axial ablation failure mechanism of buffer layer of high voltage power cable

ZHANG Jing<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, XU Mingzhong<sup>3</sup>, SONG Pengxian<sup>4</sup>, LI Wenjie<sup>3</sup>, OUYANG Benhong<sup>3</sup>

(1. NARI Group(State Grid Electric Power Research Institute) Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China;2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan NARI Co.,Ltd.,Wuhan 430074,China;3. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074,China;4. State Grid Tianjin Electric Power Company Research Institute,Tianjin 300384,China)

**Abstract:**In order to study the mechanism of axial ablation failure of cable buffer layer under operating voltage,a mathematical model of axial ablation of high voltage cables is established. According to the structure and actual size of 110 kV XLPE cable, the requirement for the separation length of the metal sheath and the outer insulation shield is calculated,and the influencing factors of the axial ablation along the surface of the high voltage cable are analyzed. The results show that the main reason for the ablation of cable buffer layer and insulation shield layer is the separation of metal sheath and cable insulation shield,and the buffer layer resistivity has a significant effect on the detachment length. Reducing the buffer layer resistivity can increase the allowable detachment length. When the resistivity is  $10^5 \Omega \cdot \text{mm}$ ,the allowable detachment length is 1 186 mm. In addition,the allowable voltage of the buffer layer and the structure size of the buffer layer are also the characteristic parameters to control the fault of the buffer layer.

**Keywords:** cable;buffer layer;corrugated aluminum sheath;ablation;separation distance

(编辑 钱悦)