

考虑高压 XLPE 电缆缓冲层电阻率形变特性的过盈配合距离确定方法

王丰润^{1,2}, 张程华^{1,2}, 邵可韧^{1,2}, 欧阳本红^{1,3}, 蓝磊^{1,2}, 鲁海亮^{1,2}

(1. 电网环境保护全国重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 3. 武汉大学新型电力系统与国际标准研究院, 武汉 430072; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

摘要: 电缆铝护套与缓冲层之间合适的过盈配合距离可以降低烧蚀故障发生的可能性。该文开展了不同形变距离下缓冲层电阻率的测试, 并基于曲线的最优两段线性拟合结果, 提出了缓冲层电阻率形变特性曲线转折点的确切方法, 建立了缓冲层局部压缩变形导致其电阻率空间上分布不均匀的高压皱纹铝套电缆电-热场计算模型, 分析了缓冲层不同形变距离和接触不良点个数对缓冲层电流密度和温升最大值的影响规律, 最终提出了缓冲层的过盈配合距离的推荐值。研究表明, 在文中最恶劣计算条件下, 即接触不良点个数 49 个, 过盈配合 0.1 mm, 计及缓冲层电阻率形变特性的缓冲层电流密度和温升最大值, 分别是现有文献缓冲层均匀电阻率模型的 1.3 倍和 26.6 倍。同时, 研究结果解释了缓冲层电流密度向其与铝护套良好接触位置集中的现象, 并为烧蚀故障多发生在此处提供了理论依据。接触不良点个数增多会导致缓冲层电流密度和温升均有所增大, 但仅当缓冲层形变距离小于临界形变距离时, 增加才较为明显。因此缓冲层电阻率形变特性的临界形变距离可以作为缓冲层过盈配合距离的推荐值, 该文计算条件下 2 层缓冲层与金属护套之间的过盈配合推荐为 0.72 mm 左右。

关键词: 半导体阻水缓冲层; 烧蚀故障; 电阻率形变特性; 过盈配合距离; 电-热场仿真

Interference Fit Distance Determination Method Considering Resistivity Deformation Characteristics of Buffer Layer of HV XLPE Cable

WANG Fengrun^{1,2}, ZHANG Chenghua^{1,2}, SHAO Keren^{1,2}, OUYANG Benhong^{1,3}, LAN Lei^{1,2}, LU Hailiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Institute of Next Generation Power Systems and International Standards, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In recent years, the ablative failure of buffer layer of HV corrugated aluminum-sheathed cable occurs frequently. The suitable interference fit distance between the cable aluminum sheath and the buffer layer can reduce the possibility of ablation failure. This paper carries out the test of the resistivity of the buffer layer under different deformation distances. Based on the optimal two-segment linear fitting results of the curve, this paper puts forward a method of determining the turning point of the deformation characteristic curve of buffer layer resistivity, establishes an electric-thermal field computation model of HV corrugated aluminum-sheathed cables with spatially non-uniform distribution of the resistivity of the buffer layer due to the local compression and deformation of the buffer layer. This paper analyzes the influences of different deformation distances and the number of bad contact points on the maximum value of current density and temperature rise of the buffer layer, and finally puts forward the recommended value of the interference fit distance of the buffer layer. The results show that the maximum values of current density and temperature rise of the buffer layer, when taking into account the resistivity deformation characteristics of the buffer layer, are 1.3 and 26.6 times higher than those of the uniform resistivity model of the buffer layer in the existing literature under the worst calculation conditions of this paper, i.e., the number of bad contact points is 49, and the interference fit distance is 0.1 mm, respectively. At the same time, the results explain the phenomenon that the current density of the buffer layer concentrates towards its good contact position with the aluminum sheath, and provide a theoretical basis for the fact that ablation failures mostly occur here. The increase in the number of poor contact points will lead to an increase in the buffer layer current density and temperature

rise; however, only when the buffer layer deformation distance is less than the critical deformation distance, the increase is more obvious. Therefore, the critical deformation distance of the buffer layer resistivity deformation characteristics of the buffer layer can be used as the recommended value of the buffer layer interference fit distance. The interference fit distance between the 2 buffer layers and the metal sheath is recommended to be about 0.72 mm.

Key words: semi-conducting resistive water buffer layer; ablative failure; resistivity deformation characteristics; interference fit distance; electro-thermal field simulation

0 引言

近年来, 城市对电网输送容量和可靠性的要求不断提高, 高压电缆输电网络成为构建新型环境友好型输电工程的重要路线^[1]。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆因其优良的电气性能、耐热性能和机械特性而得到广泛使用^[2]。国内以及部分亚洲地区使用的高压 XLPE 电缆以皱纹铝套结构为主, 并在金属护套与线芯之间设置半导电缓冲阻水层。缓冲阻水层由聚酯纤维分别构成蓬松棉和无纺布, 并在二者之间添加阻水粉, 同时对整个结构掺杂炭黑构成^[3]。半导电缓冲阻水层可以为铝护套和绝缘屏蔽之间提供良好的电气接触, 同时可以吸收绝缘径向热膨胀, 以及提供纵向阻水功能^[3-4]。

国内上海^[5-6]、广州^[5]、南京^[7-8]和长沙^[9]等多地频发高压皱纹铝套电缆缓冲层烧蚀故障, 国外亚洲和澳大利亚等国也有类似事故报道^[10-11]。此类故障潜伏性较高, 故障后果严重, 且目前尚无高效可行的检测手段, 国内大量学者针对缓冲层的烧蚀机理开展了研究工作^[12-14]。

国网北京市电力公司的周松霖等和厦门理工学院的张玮玮等分别建立了高压皱纹铝套电缆本体的二维和三维模型, 并对缓冲层电场强度进行仿真, 结果发现当铝护套和缓冲层没有紧密配合时或缓冲层因为受潮导电能力下降时, 会引起空气层局放的临界轴向气隙长度减小^[15-17]。国网厦门供电公司的严有祥等考虑了由于缓冲层预留间隙、阻水带柔软材质、铝护套皱纹结构、重力作用等因素, 阻水带上方与铝护套之间存在空气间隙, 而下方与铝护套保持紧压的复杂结构^[18], 建立了非对称的皱纹铝套电缆模型, 进行缓冲层电流密度的计算。结果表明当铝护套与缓冲层接触不良时的缓冲层最大电流密度是二者接触良好时的约 3 倍, 导致缓冲层发热增加, 发生烧蚀的可能性增大。西安交通大学刘英从电流集中的角度对 110 kV 皱纹铝套电缆进行了电-热耦合仿真, 发现受潮情况下, 径向容性电流集中

会引起缓冲层较高的温升^[19]。

部分学者在建立高压电缆电流场计算模型时考虑了缓冲层与铝护套过盈配合的问题。国网厦门供电公司的严有祥等考虑了重力影响下的皱纹铝套电缆计算模型, 将缓冲层上方设置与铝护套间隙为 1 mm, 下方二者过盈配合 1 mm^[18]。西安交通大学刘英建立的皱纹铝套电缆的电-热场计算模型时, 设置金属护套与缓冲层之间的良好接触点位过盈配合 0.1 mm, 对电缆电流密度和温度进行了计算^[19]。

同时, 标准 JB/T 10259—2014《电缆和光缆用阻水带》中对于缓冲层体积电阻的测量是在固定的 10.2 kPa 下进行测试^[20]。部分学者也注意到缓冲层因其多孔蓬松的结构, 其电阻率随压强变化明显。北京电科院的门业堃对缓冲层的动态导电机理进行了研究, 测试了 3 个不同压强下的缓冲层电阻率, 发现电阻率与压强具有负相关关系^[21]。重庆电科院的吴照国进行了压力作用下的高压电缆表面电阻特性及等效模型的研究, 测试了不同压强下的体积电阻率和表面电阻, 结果表明随着压强的增大, 缓冲层电阻率减小速度先快后慢, 最终趋于稳定^[22]。

然而, 学者在进行高压皱纹铝套电缆缓冲层烧蚀机理的仿真研究工作时, 忽略了缓冲层受压发生形变后其电阻率会发生较大变化且电阻率分布不均匀对电流场和热场计算结果的影响^[19]。文献中缓冲层电阻率均匀分布模型的计算结果表明, 缓冲层电流密度呈现“双驼峰分布”。

本文测试了不同形变距离下的缓冲层电阻率, 然后将其电阻率和形变距离曲线外推至缓冲层的理想厚度范围内, 并进行两段割线的线性拟合, 以拟合的线性段与原始数据点之间平均相对误差(mean relative error, MRE)最小为目标, 确定缓冲层电阻率和形变距离曲线的转折点。然后, 建立缓冲层电阻率随其形变距离变化的高压 XLPE 电缆的电-热场计算模型, 分析了缓冲层形变距离和接触不良个数对电流密度和温度的影响, 以及转折点对应的形变距离前后计算结果的差异, 考虑了缓冲层电阻率形变特性对电流密度分布的影响, 最终依据缓冲层

既要与铝护套电气接触良好,也要有缓冲绝缘热膨胀的能力,得到了缓冲层过盈配合距离的推荐值。

1 缓冲层电阻率形变特性实验

缓冲层导电机理主要是通过炭黑填料实现载流子的迁移,单位厚度内炭黑的数量越多,则缓冲层的电阻率就越低。压缩前后的缓冲层蓬松棉的微观示意图如图1所示。可以发现,缓冲层受到压缩后,厚度减小,单位厚度内的炭黑数量增多,更多的炭黑之间可以形成电流通道,从而降低了缓冲层的电阻率^[22]。本试验对缓冲层不同形变距离下的电阻率进行了测试。

1.1 实验平台搭建及试样制备

缓冲层电阻率形变特性试验平台包括压力机、高度尺和万用表,其中高度尺的测量精度为0.02 mm。实验布置示意图如图2所示,实物图如图3所示。

实验中所使用的半导体缓冲阻水带样品尺寸为70 mm×70 mm×2 mm,实际高压电缆中缓冲层常绕包多层,因此缓冲层层数分别设置为1、2和3层。实验前使用45℃恒温干燥缓冲层试样6 h,取出后尽快进行实验,避免缓冲层受潮,实验时室温为20℃。缓冲层的导电性能由聚酯纤维布中的碳粉完成,碳在20℃下的温度系数仅为-0.000 5,干燥温度与实验温度下,缓冲层电阻率变化仅有1.25%,因此忽略温度对电阻率测试结果的影响。

实际电缆缓冲层压缩后厚度测量如图4所示,所测电缆使用2层缓冲层。通过对两段电缆,4个端面的测量,缓冲层压缩后厚度均为2 mm左右,因此设置1层、2层和3层缓冲层的形变距离分别至少达到1、2和3 mm。

实验前连接测试回路,安装好高度尺并记录其读数,实验过程中形变距离每0.02 mm记录一次电阻值,并结合缓冲层的截面积和厚度进行电阻率计算。每组实验重复3次。

1.2 实验结果分析

实验得到的3层、2层和1层缓冲层的电阻率和形变距离关系曲线如图5(a)、(b)和(c)所示。由图可得,缓冲层电阻率随着形变距离的增大而递减,且减小的速度先快后慢。重复实验结果之间的误差也随着形变距离的增大而减小。同时,形变距离在0到1 mm之间时,缓冲层的电阻率存在一个明显的转折点。

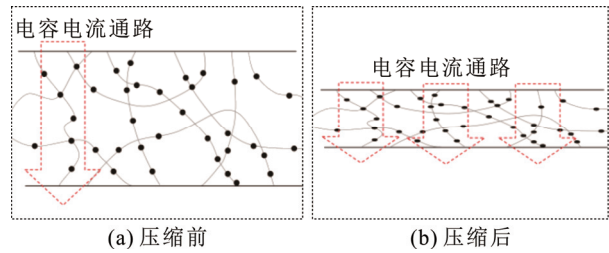


图1 压缩前后缓冲层微观示意图

Fig.1 Microscopic diagram of buffer layer before and after compression

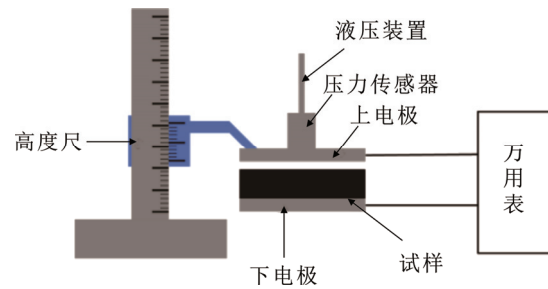


图2 实验布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental arrangement

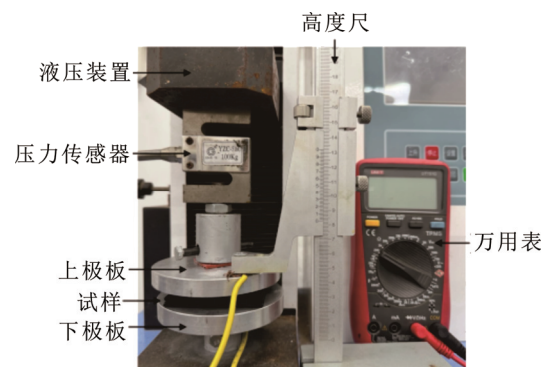


图3 实验布置实物图

Fig.3 Physical diagram of the experimental setup

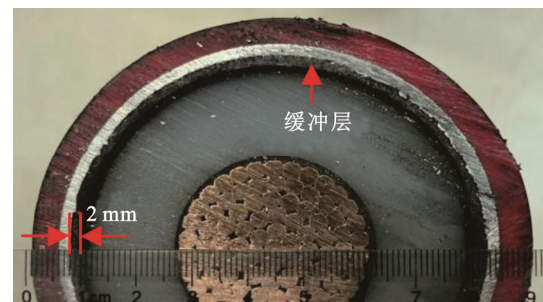


图4 实际电缆缓冲层压缩厚度测量

Fig.4 Measurement of actual cable buffer layer compression thickness

不同层数缓冲层的电阻率测试结果转化为单层缓冲层电阻率和形变距离的关系曲线, 如图 5(d) 所示。可以发现, 不同层数下缓冲层的电阻率测试结果相近, 在形变距离为 0 时, 缓冲层电阻率约为 $35\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$, 随着形变距离增大, 电阻率逐渐减小至数十欧米。其中 1 层缓冲层的电阻率在曲线的前半段略大于 2 层和 3 层的测试结果。推测是因为多层缓冲层在每层的形变距离与单层缓冲层相同时, 多层缓冲层受到的压力更大, 导致缓冲层表面与极板接触得更加良好, 接触电阻更低。2 层和 3 层测试结果几乎重合, 说明压力使极板与缓冲层之间接触电阻减小的规律具有饱和效应。

测试过程中得到的 1 层、2 层和 3 层缓冲层在 500 N 压力下的形变距离分别为 1.5、2.74 和 4 mm, 几乎与层数呈线性增长关系。其对应的单层缓冲层形变距离分别为 1.5、1.37 和 1.33 mm, 呈逐渐减小的趋势, 说明增加缓冲层层数可提高其抗形变能力。

2 缓冲层电阻率和形变距离曲线拐点的确定

前文通过测试得到了缓冲层电阻率和形变距离关系曲线, 可以发现随着形变距离的增加, 缓冲层的电阻率持续减小, 并存在一个明显的转折点。在转折点之前, 缓冲层电阻率下降较快, 但是电阻率数值较大, 难以保证金属护套与绝缘屏蔽之间良好的电气接触; 在转折点之后, 缓冲层的电阻率下降速率放缓。因此, 此转折点对应的形变距离(下称临界形变距离)即可作为判断, 缓冲层是否起到维持金属护套和绝缘屏蔽之间良好电气接触作用的判据。同时, 转折点应该在曲线上以保证其横、纵坐标具有物理意义。

然而, 通过人为观察选取转折点会受到主观因素的干扰, 且可靠性和重复性较差。注意到如图 6 所示, 曲线在转折点 B 的两侧均近似线性变化, 因此通过曲线的两个端点 A 和 C, 以及曲线上任意一点的连线对曲线进行两段割线的线性拟合时, 使用转折点 B 的拟合效果应该最好。本文提出一种确定此转折点的方法, 首先假设缓冲层电阻率和形变距离关系曲线上的任意一点为转折点, 然后与曲线两端点连线, 得到曲线的两条割线 AB 和 AC, 计算每个原始数据点与两条线段 AB 和 BC 上电阻率的 MRE 并记录, 最终得到的平均相对误差最小的点即为转折点 B。为了避免由于设备限制导致曲线左右两侧的未测数据对转折点确定造成影响, 首先需要

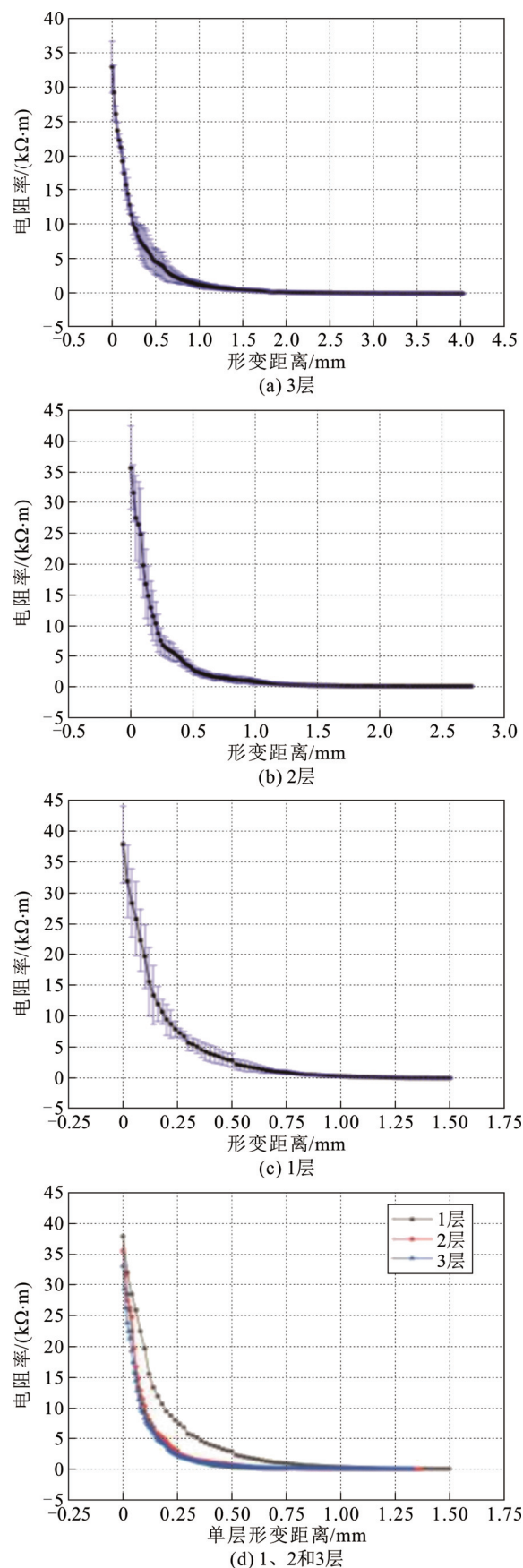


图 5 缓冲层电阻率形变特性测试结果

Fig.5 Test results of buffer layer resistivity deformation characteristics

将缓冲层电阻率-形变距离曲线外推至整个缓冲层厚度，然后再进行转折点的选取。

数学模型如下所示，参数含义及单位如表 1 所示。假设第 i 个点为转折点，转折点前后的线性段在原始数据点处的函数值满足：

$$\frac{y_c^1 - y_c^i}{x_c^1 - x_c^i} = \frac{y_L^j - y_c^i}{x_c^j - x_c^i}, \quad j \leq i \quad (1)$$

$$\frac{y_c^i - y_c^{\text{end}}}{x_c^i - x_c^{\text{end}}} = \frac{y_L^j - y_c^{\text{end}}}{x_c^j - x_c^{\text{end}}}, \quad j > i \quad (2)$$

在假设第 i 个点为转折点时，由式(3)可得线性段与原始曲线之间的 MRE，记为 E^i ：

$$E^i = \frac{\sum_{j=1}^n \left| \frac{y_L^j - y_c^i}{y_c^i} \right|}{n} \quad (3)$$

然后再假设第 $i+1$ 个点为转折点，重复计算此时的 E_{i+1} 。当 i 从 1 增加至 n 时，寻找 MRE 最小值对应的转折点坐标：

$$(E^i)_{\min} \Rightarrow (x_c^i, y_c^i), \quad 1 \leq i \leq n \quad (4)$$

最终得到缓冲层电阻率和形变距离关系曲线的转折点。

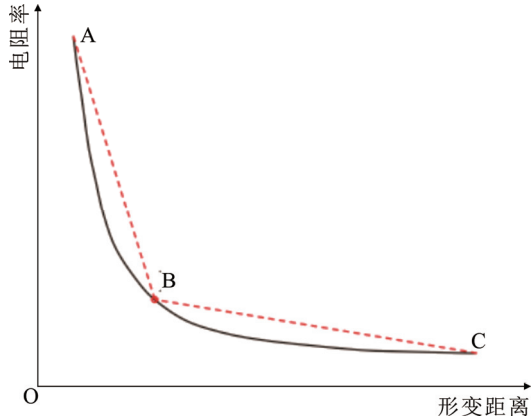


图 6 转折点示意图

Fig.6 Schematic of turning point

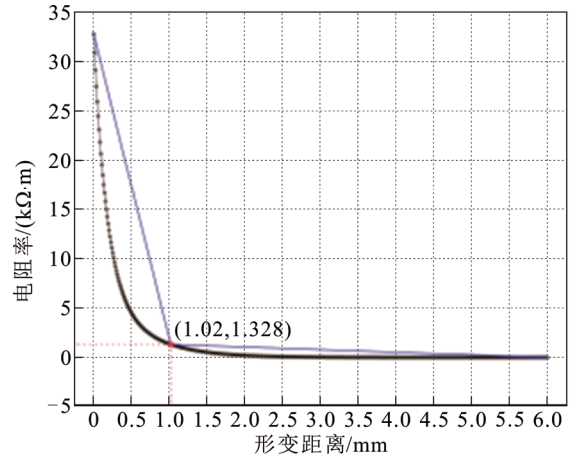
表 1 参数含义及单位

Table 1 Parameter meaning and unit

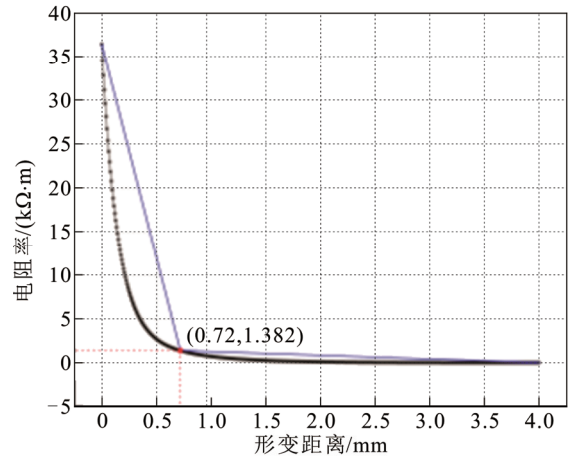
参数	含义	单位
y_c	原始曲线上所有数据点的电阻率	$\Omega \cdot m$
y_L	线性段上所有数据点的电阻率	$\Omega \cdot m$
x_c	原始曲线上所有数据点的形变距离	mm
x_L	线性段上所有数据点的形变距离	mm
n	原始数据点个数	—
E	原始曲线和线性段的平均相对误差	—

注：上标 $i, j, 1$ 和 end 分别表示原始曲线或线性段上的第 $i, j, 1$ 个和最后一个数据点。

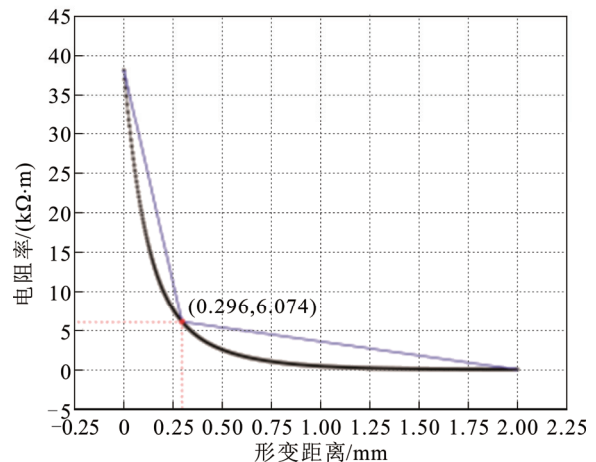
应用上述数学模型对 1.2 节的实验结果进行处理，分别得到 1 层、2 层和 3 层缓冲层电阻率和形变距离关系曲线的转折点结果如图 7、表 2 所示。3 层、2 层和 1 层的缓冲层电阻率和形变距离关系曲线分别外推至 6、4 和 2 mm，并使用上述方法确定转折点所对应的形变距离，近似随层数呈线性增长关系。



(a) 3层



(b) 2层



(c) 1层

图 7 转折点计算结果

Fig.7 Turning point calculation results

表 2 转折点坐标

Table 2 Turning point coordinates

缓冲层层数	转折点形变距离/mm
1	0.296
2	0.72
3	1.02

3 考虑缓冲层电阻率形变特性的电缆电-热耦合仿真

3.1 模型及参数

仿真建立的 110 kV 高压皱纹铝套电缆二维轴对称模型, 进行电-热场耦合仿真^[19]。模型中的皱纹铝护套使用正弦函数进行拟合, 皱纹铝套轧纹深度为 5 mm, 节距 20 mm^[19]。二维模型长度 1 000 mm, 共有 50 个波节, 即 50 个接触点。电缆长度改变时, 良好接触点的电容电流大小均与不良接触点占所有接触点的比例呈正相关。模型设置了 50 个接触点, 得到的不良接触点占所有接触点比例的分辨率为 2%。接触良好位置铝护套与缓冲层之间存在不同程度的过盈配合, 接触不良处二者之间存在 0.1 mm 的空气间隙。

本文所提及的铝护套与缓冲层之间的过盈配合距离是指单个接触点处, 缓冲层受压凹陷后的最低点与其外表面之间的径向距离, 如图 8 所示。

模型中使用的尺寸和材料参数如表 3 所示^[19]。

实验组使用 1.2 节中 2 层缓冲层电阻率-形变距离的关系曲线。假设其每个横截面上的缓冲层形变距离相同, 则缓冲层电阻率 ρ 沿电缆轴向长度随其形变变化, 如图 7(b)所示。对照组的缓冲层电阻率 ρ 设置与现有研究一致, 为 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ ^[19], 其余条件均与实验组一致, 几何模型如图 9 所示。

其中接触不良点个数 $[0, 49]$ 和缓冲层形变距离(铝护套与缓冲层过盈配合距离) $[0.1\ \text{mm}, 1\ \text{mm}]$ 设置为模型的变量。根据电流场的控制方程(5), 在本模型中电导率 σ 要远大于 $\omega\epsilon_0\epsilon_r$, 相对介电常数对缓冲层电流密度分布影响较小, 为了简化计算, 忽略缓冲层形变对相对介电常数影响, 将其设置为 500^[24]。

$$J = \sigma E + j\omega D + J_c = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)E + J_c \quad (5)$$

式中: J 为总电流密度, A/m^2 ; σ 为电导率, S/m ; E 为电场强度, V/m ; ω 为电流相量的角速度, rad/s ; D 为电位移矢量, C/m^2 ; J_c 为传导电流密度, A/m^2 。

正常运行时, 缓冲层的热量来源主要有线芯电流产热沿径向扩散和径向容性电流产热^[19,25]。由于

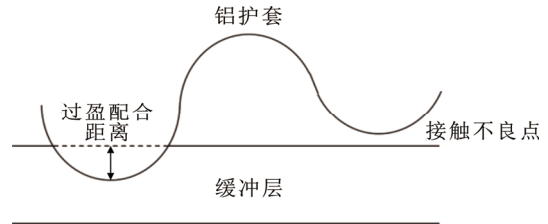


图 8 过盈配合距离示意图

Fig.8 Diagram of interference fit distance

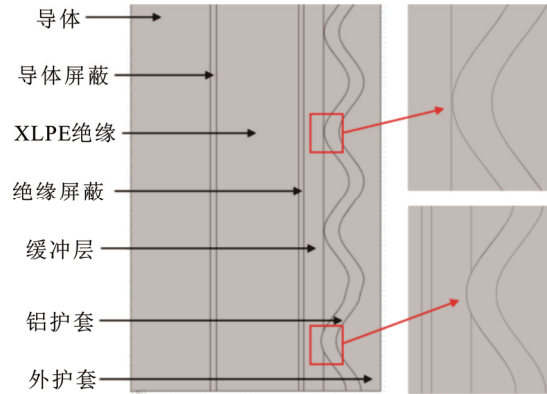


图 9 电缆二维对称模型及接触点状态

Fig.9 2D symmetric model of the cable and contact status

表 3 电缆模型参数及尺寸^[19]

Table 3 Cable model parameters and dimensions^[19]

结构	相对介电常数	电阻率/ $(\Omega\cdot\text{m})$	导热系数/ $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	恒压热容/ $(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	外径/mm
导体	1	1.8×10^{-6}	400	385	8 890	31.9
导体屏蔽	700	5	0.4	2 180	1 150	34.4
XLPE 绝缘	2.3	1×10^{16}	0.286	2 600	930	67.4
绝缘屏蔽	700	5	0.4	2 180	1 150	69.4
阻水缓冲层	500	ρ	0.05	2 120	140	77.4
空气	1	1×10^{16}	0.026	1 005	1.2	87.3
铝护套	1	2.8×10^{-6}	238	900	2 700	95.5
外护套	2.3	1×10^{16}	0.17	2 000	200	100.3

缓冲层形变导致其中气隙减少, 导热能力提升, 因此忽略其热学参数受形变的影响时, 计算出的温升结果较为严格。同时, 忽略缓冲层电阻率变化对线芯电流产热的影响。本文模型对导体施加相电压有效值 63.5 kV, 计算缓冲层形变导致的电阻率变化对径向容性电流以及温升的影响, 环境温度 20 °C。

3.2 电流密度计算结果

实验组和对照组的缓冲层电流密度分布如图 10 所示, 缓冲层电流密度最大值分布在缓冲层与铝护套波谷和空气二者相交处, 这是因为径向容性电流在缓冲层中向良好接触点集中时在路径 1 和 2 上分流, 由于路径 1 的电阻更小, 因此出现电流密度

的最大值。实验组较对照组，在铝护套波谷的正下方，由于此处电阻率较小，因此也会出现电流密度集中的现象。随着过盈配合距离的增加，由路径 2 流入铝护套的电流占比也在增加。同时，实验组缓冲层电流密度最大值明显大于对照组，这是因为在考虑缓冲层的形变特性时，其电阻率会有明显下降，因此会造成电流路径的整体电阻降低，导致电流密度最大值增大。

随着缓冲层过盈配合距离的增加，其整体的电流密度有所减小。这是因为每个仿真模型的径向容性电流几乎一致，随着铝护套与缓冲层之间的过盈配合距离逐渐增加，铝护套与缓冲层之间的接触面积逐渐增加，因此电流密度整体呈现下降趋势。

只计及缓冲层的电阻参数时，缓冲层中的容性电流分布见图 11^[23]。其中 R_1 表示缓冲层未压缩时的单位长度电阻， R_2 表示缓冲层过盈配合时的单位长度电阻， I_{C1} 、 I_{C2} 和 I_{C3} 分别表示缓冲层与铝护套不同接触位置的径向容性电流， I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 分别表示不同路径进入铝护套的容性电流。当不良接触点处和铝护套波峰处的容性电流进入缓冲层后会向良好接触点位流动，在靠近良好接触点位时会重新分布，如图 11 中红框所示。由 1.2 节缓冲层电阻率形变特性的测试结果可得，图 11(a)中 $R_1/R_2=1.55$ ，图 11(b)中 $R_1/R_2=47.36$ 。经计算，图 11(a)中 $I_1:I_2:I_3=0.167:0.274:0.559$ ，图 11(b)中 $I_1:I_2:I_3:I_4=0.247:0.251:0.251:0.251$ 。不同路径进入铝护套容性电流的比例表明，由图 10 中路径①流入铝护套的容性电流最多，且随着过盈配合距离增加，由图 10 中路径②流过的电流占比增加，此处的电流密度最大。

实验组和对照组的缓冲层电流密度最大值与接触不良点个数和形变距离之间的关系如图 12 所示。实验组和对照组的电流密度最大值均与接触不良点个数呈正相关，且接触不良点个数超过 40 后，电流密度最大值增长速度明显加快，同时，缓冲层电流密度最大值与形变距离呈负相关。

对照组在最恶劣的工况下(接触不良点 49 个，形变距离 0.1 mm)，电流密度的最大值仅有 17 A/m^2 ，而实验组有 22 A/m^2 ，是对照组的 1.3 倍。对照组的不同形变距离之间的计算结果分散性较小，实验组缓冲层最大电流密度与过盈配合距离的关系如图 13 所示，当形变距离小于临界形变距离(0.72 mm)时电流密度最大值的增速明显变快；当形变距离小

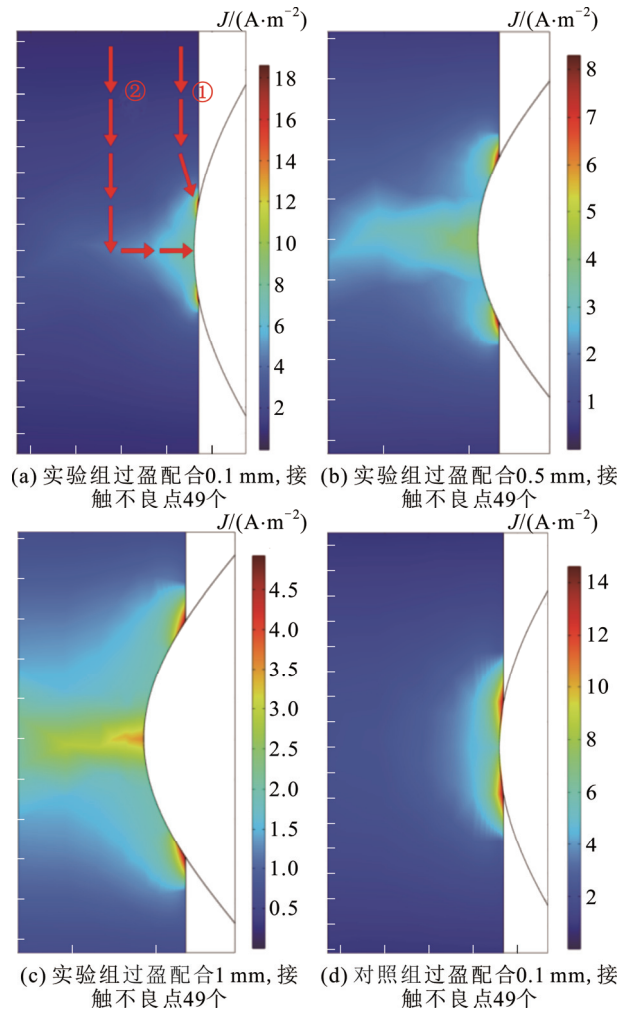


图 10 典型电流密度分布

Fig.10 Current density distribution

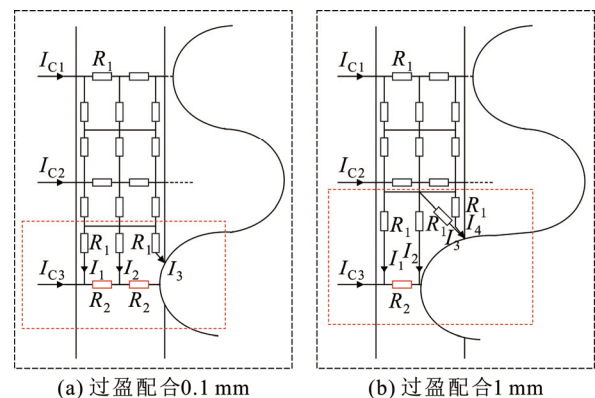


图 11 容性电流分布示意图

Fig.11 Schematic diagram of capacitive current distribution

于临界形变距离时，电流密度最大值的增速较慢，说明此时随着缓冲层与铝护套之间有良好的电气接触。

通过实验组和对照组的对比分析可以得到，当计及缓冲层的电阻率受到与铝护套之间过盈配合距离的影响时，缓冲层的电流密度的计算结果会增大，

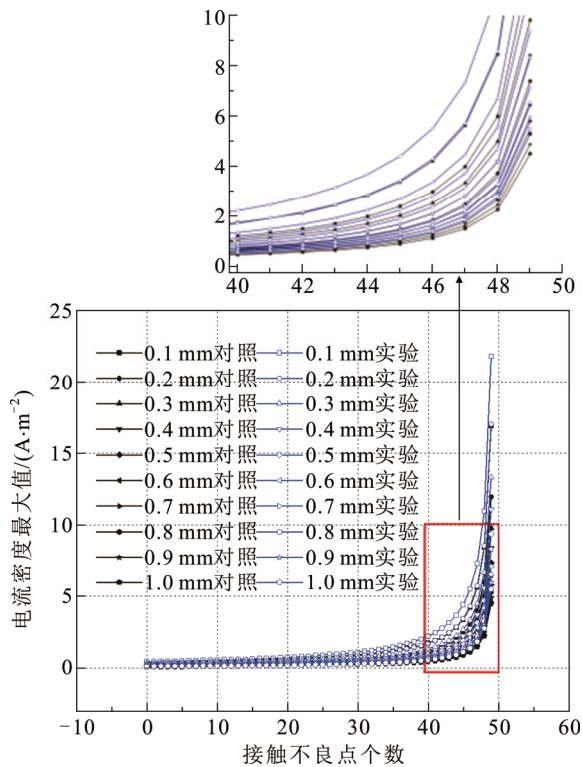


图 12 缓冲层电流密度最大值与接触不良点个数和形变距离关系

Fig.12 Maximum current density of buffer layer versus number of bad contact points and deformation distance

且随着工况的渐恶劣(接触不良点个数增多或过盈配合距离减小), 电流密度增幅变大。因此, 实际工况下的缓冲层电流密度会大于已有研究模型的计算结果。

3.3 温升计算结果

热场采用稳态计算条件, 热源由电场计算结果耦合, 外护套的外边界作为散热边界, 散热条件为对流热通量, 传热系数由模型几何参数进行计算。

实验组和对照组的缓冲层温度分布情况如图 14 所示, 其最大值均分布在铝护套波谷的正下方, 且实验组明显大于对照组。同时, 随着过盈配合距离的增加, 缓冲层温度最大值有明显下降。这是因为, 考虑缓冲层形变特性后, 电流回路的电阻随着过盈配合距离增加而下降, 电流增加, 导致此处发热增加。

缓冲层温升最大值与接触不良点个数的关系如图 15 所示, 同样的接触不良条件和形变距离的条件下, 实验组缓冲层温升最大值明显大于对照组。实验组在最恶劣的工况下, 缓冲层温升最大值达到 8°C (接触不良点 49 个, 形变距离 0.1 mm), 较环境

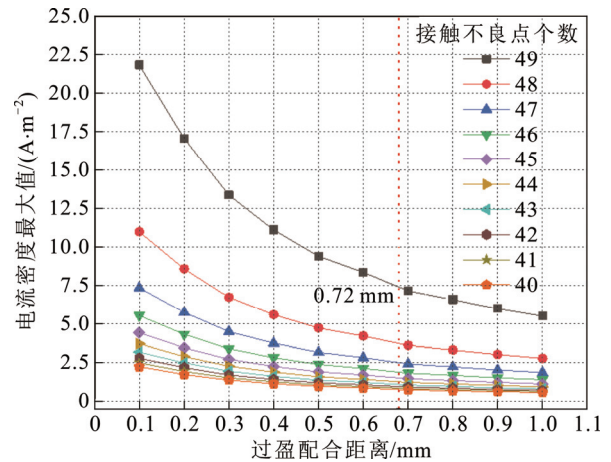


图 13 实验组缓冲层电流密度最大值与过盈配合距离关系
Fig.13 Relationship between the maximum value of buffer layer current density and the distance of interference fit in the experimental group

温度有明显增加; 对照组仅为 0.3°C , 二者相差 26.6 倍。实验组缓冲层温升最大值与过盈配合距离关系如图 16 所示, 当缓冲层形变距离小于临界形变距离 (0.72 mm) 时, 缓冲层温升最大值有明显增加; 当缓冲层形变距离大于临界形变距离时, 温升最大值变化较小。

综上所述, 当缓冲层形变距离小于临界形变距离时, 缓冲层电流密度和温度都会有较明显的增加; 而当缓冲层形变距离大于临界形变距离时, 形变距离基本对缓冲层电流密度集中和温升没有影响。此时如果继续增加二者过盈配合程度, 一方面对减小电流密度集中和温升以及加强缓冲层和铝护套之间电气接触的作用不明显, 另一方面还会减小绝缘受热膨胀时缓冲层的吸收能力。因此, 转折点所对应的形变距离可以作为缓冲层过盈配合距离的推荐值。同时, 考虑到实际生产工艺的不稳定性, 2 层缓冲层的过盈配合距离推荐为 0.72 mm 左右。

皱纹铝套电缆的径向容性电流与电缆长度呈正相关。实际工况下, 电缆长度可达数公里, 径向容性电流增加, 且由于铝护套的螺旋皱纹结构以及重力等因素, 铝护套和缓冲层之间可能存在大量不良接触位置, 导致容性电流向接触良好的低阻区域集中, 温度升高, 从而引发烧蚀故障。

4 结论

1) 缓冲层电阻率具有明显的形变特性, 随着

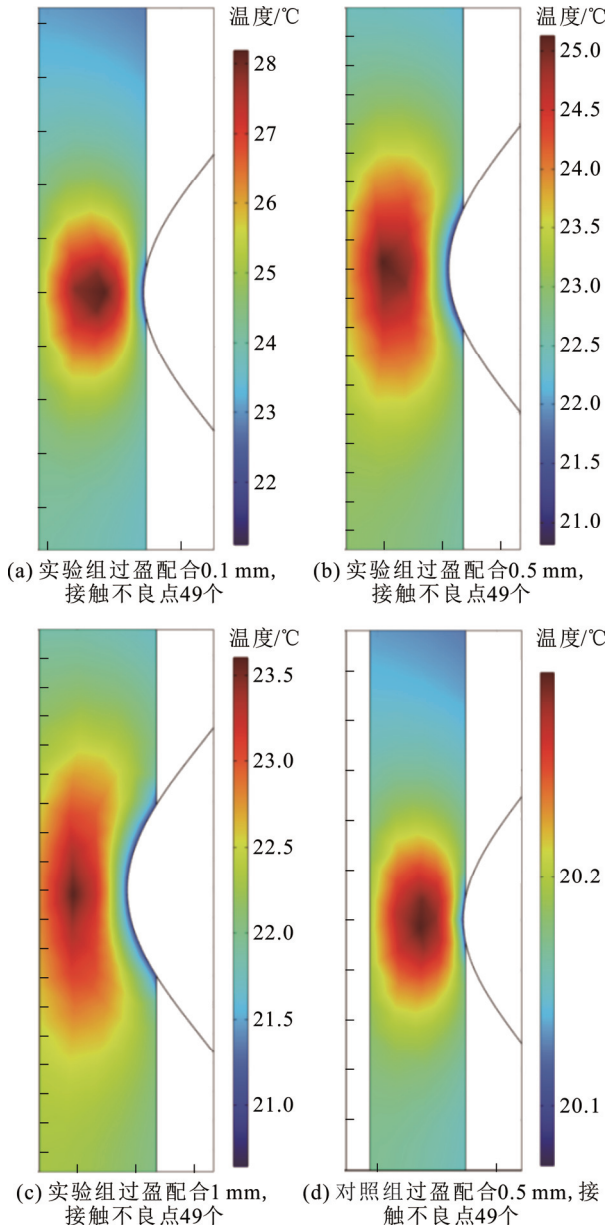


图 14 温度分布

Fig.14 Temperature distribution

其形变距离的增加,电阻率先快速减小然后趋于稳定,且存在明显的转折点。对缓冲层电阻率和形变距离曲线进行两段割线的线性拟合,并计算其结果与原始数据点之间 MRE,得到 1 层、2 层和 3 层缓冲层临界形变距离分别为 0.296、0.72 和 1.02 mm。

2) 本文计及缓冲层电阻率形变特性,导致其电阻率分布不均匀的皱纹铝套电缆电-热场计算模型更接近实际,且能对烧蚀故障发生在铝护套波谷下方的缓冲层的事实进行解释。仿真结果表明,计及缓冲层电阻率形变特性时,在本文最恶劣计算条件下,缓冲层的电流密度和温升分别是缓冲层均匀电阻率模型的 1.3 倍和 26.6 倍。同时,缓冲层电流

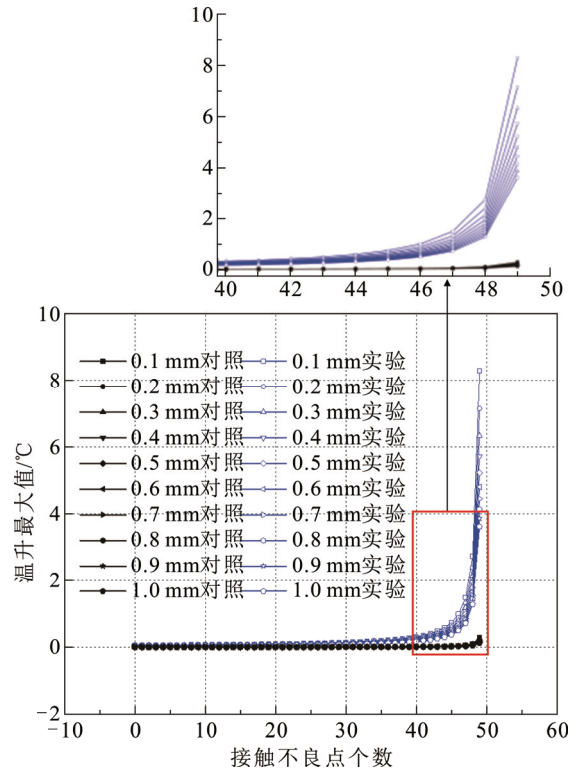


图 15 缓冲层温升最大值与接触不良点个数和形变距离关系

Fig.15 Maximum buffer layer temperature rise versus the number of bad contact points and deformation distance

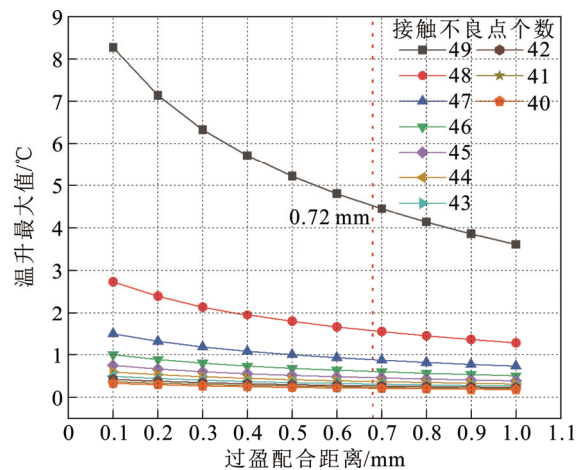


图 16 实验组缓冲层温升最大值与过盈配合距离关系

Fig.16 Relationship between the maximum value of buffer layer temperature rise and the distance of interference fit in the experimental group

密度会向与其接触的铝护套波谷下方集中,并伴随有双驼峰分布的现象。因此,现有文献中的缓冲层电阻率均匀的模型是保守的,实际工况下,缓冲层的电流密度和温升会大于已有文献模型的计算结果。

3) 缓冲层电阻率形变特性的临界形变距离可

以作为缓冲层与铝护套电气接触是否良好的判据, 当缓冲层形变距离增大大于临界形变距离时, 铝护套与缓冲层接触良好, 即使接触不良点增多, 电流密度和温升增加幅度也较小, 在小于临界形变距离时, 接触不良点增多会引起电流密度和温升的明显增加。在本文的计算条件下, 2 层缓冲层的过盈配合距离推荐为 0.72 mm 左右。

参考文献 References

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2021[R]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021.
China Electricity Council. Annual development report of China's power industry 2021[R]. Beijing, China: China Building Materials Industry Press, 2021.
- [2] 李厚玉, 李长明, 孙伟峰. 紫外光引发聚乙炔交联技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3356-3367.
LI Houyu, LI Changming, SUN Weifeng. Research progress in the UV-initiated polyethylene cross-linking technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3356-3367.
- [3] 张洪亮, 张建民, 谢书鸿, 等. 高压直流陆缆及海缆用大截面型线导体纵向阻水方式研究及验证[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3626-3633.
ZHANG Hongliang, ZHANG Jianmin, XIE Shuhong, et al. Study and verification of large section and longitudinally water-blocking heteromorphic conductor for HVDC land and submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3626-3633.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 额定电压 110 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第 1 部分: 试验方法和要求: GB/T 11017.1—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Power cables with cross-linked polyethylene insulation and their accessories for rated voltage of 110kV-Part 1: test methods and requirements: GB/T 11017.1—2002[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2003.
- [5] 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): 142-144.
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): 142-144.
- [6] 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[J]. 华东电力, 2011, 39(11): 1960-1963.
JIANG Xiaojuan, HE Wei. A 110kV cable body defect successfully discovered by partial discharge online inspection technology[J]. East China Electric Power, 2011, 39(11): 1960-1963.
- [7] 李陈莹, 李鸿泽, 陈杰, 等. 高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 61-66.
LI Chenying, LI Hongze, CHEN Jie, et al. Analysis of high voltage XLPE power cable buffer layer discharge problem[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2018, 37(2): 61-66.
- [8] 柏仓. 一起 110 kV 电缆缓冲层烧伤原因分析[C]/2014 年江苏省电机工程学会高压技术专委会学术年会论文集. 南京: 江苏省电机工程学会, 2014: 17-20.
BAI Cang. Analysis of the causes of burns in the buffer layer of a 110kV cable[C]/Selected Works on High Voltage Technology. Nanjing, China: Jiangsu Electrical Engineering Society, 2014: 17-20.
- [9] 段肖力, 王海跃, 周挺. 电缆主绝缘半导体层受损原因分析[C]/全国第九次电力电缆运行经验交流会. 上海: 中国电力科学研究院, 2012: 806-808.
DUAN Xiaoli, WANG Haiyue, ZHOU Ting. Analysis of the causes of damage to the main insulating semi-conductive layer of the cable[C]/The 9th National Power Cable Operation Experience Exchange Conference. Shanghai, China: China Electric Power Research Institute, 2012: 806-808.
- [10] GUSTAVSEN B, HØYER-HANSEN M, HATLO M, et al. Voltages and AC corrosion on metallic tubes in umbilical cables caused by magnetic induction from power cable charging currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 596-605.
- [11] NORDAS S, HELLESØ S M, HVIDSTEN S. Measurements and modeling of water diffusion in water blocking tapes for high voltage extruded cables[C]/Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Yokkaichi, Japan: IEEE, 2008: 263-266.
- [12] CHEN Y D, ZHOU K, KONG J M, et al. Hydrogen evolution and electromigration in the corrosion of aluminium metal sheath inside high-voltage cables[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 260-268.
- [13] 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.
- [14] 冯尧, 邓显波, 李文杰, 等. 高压电缆铝套结构与缓冲层烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 4919-4928.
FENG Yao, DENG Xianbo, LI Wenjie, et al. Ablative properties of buffer layer in aluminum sheath structure of high voltage cable[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4919-4928.
- [15] 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.
- [16] 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 Hongliang, LIU Ruoxi, ZHAO Xiuyuan, et al. Study on ablation of buffer layer in high voltage XLPE cable induced by concentrated radial current[J]. Insulating Materials, 2021, 54(8): 94-101.
- [17] 张玮玮, 严有祥, 王蕾, 等. 110kV XLPE 电缆缓冲层放电灼伤问题的理化分析与仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 155-162.
ZHANG Weiwei, YAN Youxiang, WANG Lei, et al. Physical and chemical analysis and simulation study on discharge burn defect of buffer layer in 110 kV XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 155-162.
- [18] 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 年学术年会获奖论文集. 厦门: 福建省电机工程学会, 2020: 318-328.
YAN Youxiang, ZHANG Weiwei, WANG Lei, et al. Simulation and experimental study on burn problem of buffer layer of high voltage XLPE cable[C]/Awards Proceedings of the 2019 Academic Annual Meeting of Fujian Electrical Engineering Society. Xiamen, China: Fujian Society of Electrical Engineering, 2020: 318-328.
- [19] 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.
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): 1260-1270.
- [20] 中华人民共和国工业和信息化部. 电缆和光缆用阻水带: JB/T 10259—2014[S]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Waterblocking tape for electric cables and optical fiber cables: JB/T 10259—2014[S]. Beijing, China: China Machine Press, 2014.
- [21] 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.
- [22] 吴照国, 黄会贤, 王谦, 等. 压力作用下高压电缆缓冲层表面电阻特性及等效模型[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 133-141.
WU Zhaoguo, HUANG Huixian, WANG Qian, et al. Surface resistance characteristics and equivalent model of buffer layer in HV cable under pressure[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 133-141.
- [23] 诸嘉慧, 栗会峰, 丘明, 等. 故障电流冲击下高温超导电缆磁-热耦合特性数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3176-3181.
ZHU Jiahui, LI Hui Feng, QIU Ming, et al. Numerical analysis on coupled magneto-thermal properties of high temperature superconducting cables subjected to fault currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3176-3181.
- [24] 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.
- [25] 郑良华, 于建立, 周晓虎, 等. 直埋电缆群载流量和稳态温度场计算新方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2833-2837.
ZHENG Lianghua, YU Jianli, ZHOU Xiaohu, et al. New method to

calculate ampacity and the steady-state temperature field of direct buried cable system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2833-2837.



WANG Fengrun

王丰润

2001—, 男, 硕士生

主要从事电磁兼容、电力系统接地技术和高压电缆缓冲层故障机理方面的研究工作

E-mail: wangfengrun@whu.edu.cn



ZHANG Chenghua

张程华

1999—, 男, 硕士生

主要从事高压电缆缓冲层故障机理和高压电缆过电压计算方面的研究工作

E-mail: outsidersation@outlook.com



LU Hailiang

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author

鲁海亮(通信作者)

1982—, 男, 博士, 副教授, 博导

主要从事电力系统接地技术和高电压与绝缘技术方面的研究工作

E-mail: luhailiang@whu.edu.cn

收稿日期 2024-09-04 修回日期 2025-01-22 编辑 曹昭君