

基于电磁-热耦合的中压电缆热缩终端异常发热机理及状态监测研究

唐庆华¹, 方静², 李旭¹, 宋鹏先¹, 李季², 于洋¹

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要:中压电缆热缩终端常出现局部异常发热现象,该现象会加速电缆绝缘老化,甚至导致电缆绝缘过早失效。为了揭示中压电缆热缩终端异常发热原因,本文基于电磁-热耦合对电缆热缩终端在各种典型故障条件下的电热场进行仿真。结果表明:在电缆长期运行过程中,当应力控制管发生老化,会导致绝缘局部温升现象,且老化越严重,温升值越高。此外,当终端外表面因积尘受潮形成污秽且污秽层位于外半导体层断口附近时会形成明显热点,而当污秽层远离断口时,则热点衰退。进一步分析应力控制管内外部受潮下的终端热场分布发现,只有内部受潮时才会引起热点出现。根据所建立的考虑终端内部缺陷热点的热路模型,实施温度反演对热缩终端内部绝缘界面最高温度点进行监测,验证了该方法的有效性。

关键词:中压电缆;热缩终端;异常发热;电磁-热耦合;温度反演

Research on abnormal heating mechanism and state monitoring of medium-voltage cable heat-shrinkage terminal based on electromagnetic-thermal coupling

TANG Qinghua¹, FANG Jing², LI Xu¹, SONG Pengxian¹, LI Ji², YU Yang¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: Local abnormal heating often occurs in the heat-shrinkable terminals of medium-voltage cables, leading to localized overheating and accelerated ageing of cable insulation, which even causes premature insulation failure. To elucidate the causes of abnormal heating in medium-voltage cable heat-shrinkable terminals, the electric-thermal field of cable heat-shrinkable terminals under various typical fault conditions was simulated by electromagnetic-thermal coupling. The results show that during the long-term operation of the cable, the ageing of the stress control tube leads to localized temperature rise in the insulation. The more severe the ageing, the higher the temperature rise. Furthermore, when the outer surface of the terminal becomes contaminated due to dust accumulation and moisture, a significant hot spot forms near the break of the outer semiconductive layer; however, the hot spot diminishes when the contamination layer is far from the break. Further analysis on the thermal field distribution of the terminal with moisture on the stress control tube reveals that hotspots only appear when the inside of tube is moist. A thermal circuit model considering internal defect hotspots was built, and temperature inversion was implemented to monitor the highest temperature point at the internal insulation interface of heat-shrinkable terminal. It is verified that the method is effective.

Key words: medium-voltage cable; heat-shrinkable terminal; abnormal heating; electromagnetic-thermal coupling; temperature inversion

0 引言

电力电缆因其优良的电气、力学、热稳定性能,广泛应用于城市输配电网中,成为电力网络重要组

成部分^[1]。其中,电缆附件是电缆系统的薄弱点^[2]。在电缆的长期运行过程中,受电、热、机械等多应力作用,电缆附件绝缘会逐渐产生缺陷^[3-4]。局部缺陷的发展可能会引起异常温升,造成局部绝缘过热现象,从而降低绝缘性能^[5]。近年来,中压电缆热缩终端异常发热问题引起了运维人员的注意^[6]。2022

年,国网天津市公司在度夏检测期间发现多个220 kV主变35 kV侧热缩电缆终端异常发热,目前对热缩终端发热原因以及发热对附件绝缘影响规律的认识不足,导致运维人员难以做出科学的运维决策,给电网供电可靠性带来很大风险。因此研究电缆终端异常发热机理,对电网供电可靠性具有重要意义。

针对电缆异常发热问题,目前国内外研究学者已经开展了相关研究。赵庆杰等^[7]研究了高频谐波对机车电缆终端异常发热的影响,发现高频谐波作用下热缩终端出现明显升温现象,这与应力控制管的非线性介电特性相关。陈新岗等^[8]仿真分析了电缆典型缺陷下的热场分布,发现缺陷的产生会升高局部温度,且金属尖端缺陷处温度大于气隙缺陷与划痕缺陷处的温度。刘海龙等^[9]发现应力控制管安装工艺不合格会导致热缩电缆终端异常发热。徐涛^[10]与ZHOU L J等^[11]分别发现瓷套式电缆终端与冷缩电缆终端异常发热原因可能与终端受潮有关。然而,35 kV中压电缆热缩终端运行工况不同于机车电缆终端,且结构与冷缩终端和瓷套式终端有所区别,在内置应力控制管的特殊情况下,热缩终端发热机理及终端内部温度监测技术需要进一步研究。

因此,本文首先基于有限元分析,结合电磁-热耦合,研究35 kV热缩电缆终端在不同运行状况下的热场分布,揭示热缩终端异常发热的可能原因,其次基于温度反演对电缆终端内部异常热点进行监测,最后通过实验验证方法的可行性。

1 电磁-热耦合原理及仿真模型搭建

1.1 电磁-热耦合原理

电气设备的绝缘性能与运行温度密切相关^[12],电磁损耗的增大可能会导致设备异常热点的出现。COMSOL多物理场仿真软件内置有电磁-热耦合接口,能够计算焦耳热、感应加热等多种电磁热源热量。电缆终端异常发热故障主要与焦耳热有关。COMSOL焦耳热物理场耦合接口涵盖了固体传热与电流接口,可以计算导体或绝缘介质内部的传导电流与介质损耗产生的热量^[8]。电缆终端内部热源主要有线芯产生的电流焦耳热 Q_c 与电场作用下绝缘材料产生的介质损耗热量 Q_i 。 Q_c 与线芯导热系数 h 、负荷电流 i 有关,如式(1)所示。

$$Q_c = hi^2 \quad (1)$$

电缆终端绝缘材料在交流电场下的介质损耗

热量计算如式(2)所示。

$$Q_i = JE \quad (2)$$

式(2)中: E 为电场强度; J 为总电流密度,包括电导电流密度 J_c 与位移电流密度 J_D ,相应计算公式如式(3)~(5)所示。

$$J_c = \sigma E \quad (3)$$

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

$$D = \varepsilon E \quad (5)$$

式(3)~(5)中: σ 为绝缘的电导率; D 为电位移矢量; t 为时间; ε 为绝缘的介电常数。

1.2 电缆终端仿真模型搭建

为了分析电缆终端异常发热原因,首先进行中压电缆热缩终端模型搭建。由于电缆热缩终端是轴对称结构,几何建模过程使用二维轴对称模型。考虑到实际中压热缩终端热点分布位于外半导体层断口附近,因此建立仿真模型如图1所示,即图中局部放大区域。模型尺寸参照YJLV-26/35 kV-3×95 mm²型终端1:1搭建,考虑到应力控制管电导率与电场强度之间存在非线性关系(抑制外半导体层断口处的电场畸变),仿真过程中需设置应力控制管电导率随场强变化,变化规律如式(6)所示。

$$\sigma(E) = \sigma_0 \exp^{K|E|} \quad (6)$$

式(6)中: σ_0 是初始电导率; K 为常数。参考文献[13],设置 σ_0 为 $3.154\ 94 \times 10^{-13}$ S/m, K 为 $7.701\ 98 \times 10^{-5}$ 。其余各部分材料参数如表1所示^[14]。仿真模型中,省略了伞裙结构。

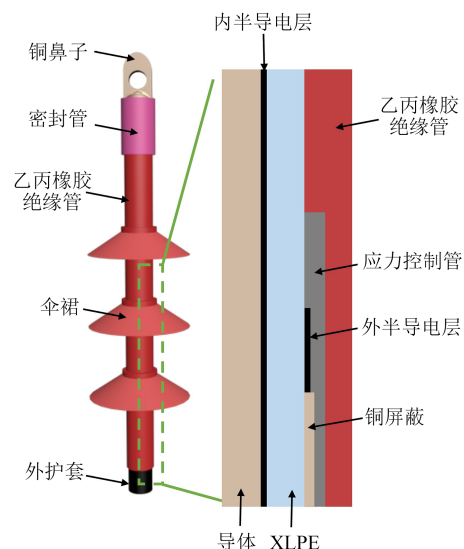


图1 中压电缆热缩终端仿真模型
Fig.1 Simulation model of medium-voltage cable heat-shrinkable terminal

表1 仿真材料参数
Table 1 Simulated material parameters

	电导率 /(S/m)	相对介电常数	恒压热容 /(J/(kg·K))	密度 /(kg/m ³)	导热系数 /(W/(m·K))
缆芯/铜屏蔽	5.99×10 ⁷	1×10 ⁵	385	8 920	400
外半导体层	1×10 ⁻⁴	100	1 470	1 350	0.32
XLPE	1×10 ⁻¹⁵	2.3	2 250	1 200	0.4
应力控制管	$\sigma(E)$	50	800	1 500	0.8
绝缘管	1×10 ⁻¹²	4.3	1 700	1 150	0.27

1.3 电缆终端仿真缺陷设置

考虑到实际电缆缆芯一般不会有长时间幅值较大的负荷电流,且负荷电流产生的焦耳热只会导致绝缘整体温度上升,不会出现异常热点情况,因此本文设置负荷电流为0,只考虑其他电缆终端故障条件在电场的作用下可能导致的异常发热状况。

近年来,随着安装人员的素质上升,电缆终端安装过程引入的人工缺陷已经越来越少,因此本文重点关注电缆运行过程常出现的电缆终端故障问题,并进行温度仿真分析。随着电缆运行年限增长,电缆终端可能出现的问题有:应力控制管老化(XLPE主绝缘整体老化不会导致热点发生)、终端外表面脏污与受潮、终端内部受潮,如图2所示。因此,本文针对以上几种情况开展中压电缆热缩终端异常发热研究。仿真过程中,环境温度设为30℃,终端与外界接触面设置为自然对流,缆芯电压设为额定电压26 kV。针对应力控制管老化缺陷,分别设置老化参数如表2所示。

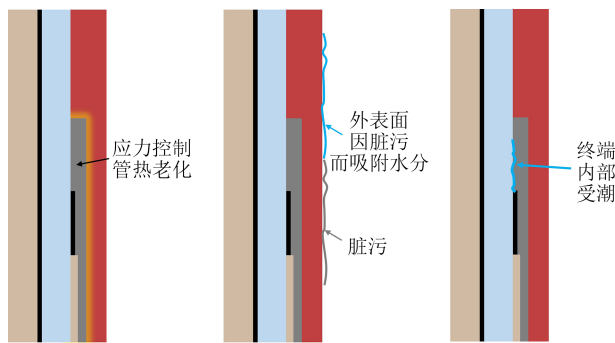


图2 电缆终端缺陷模拟
Fig.2 Simulation of cable terminal defects

表2 应力控制管老化参数设置

类别	相对介电常数	电导率/(S/m)
1(轻微老化)	32.8	1×10 ⁻⁶
2(中度老化)	24.3	1×10 ⁻⁴
3(严重老化)	11.3	1×10 ⁻³

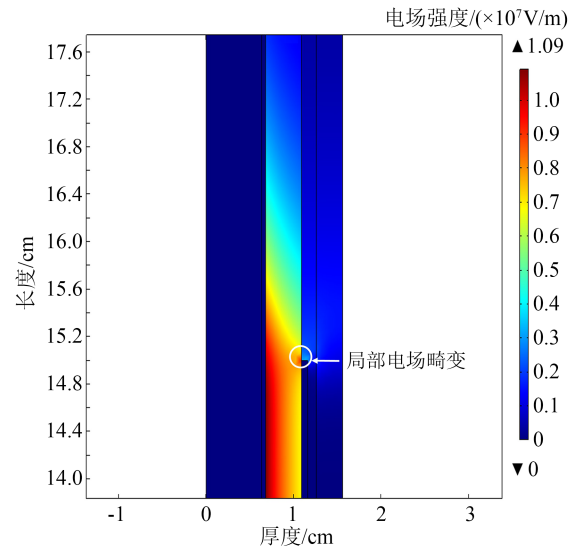
2 基于电磁-热耦合的电缆终端异常发热分析

2.1 终端无缺陷

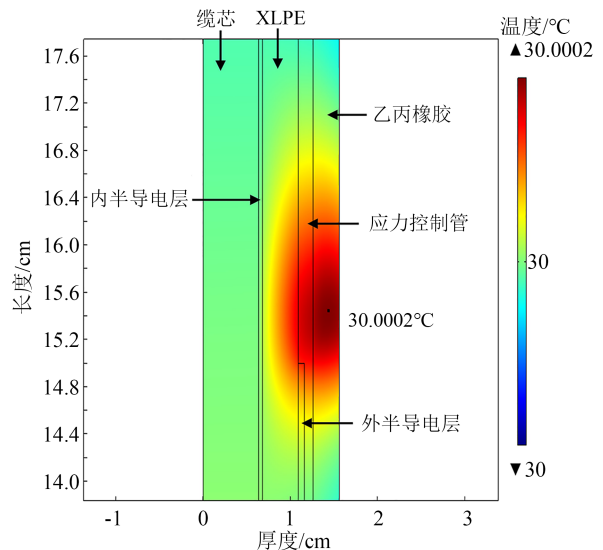
电缆热缩终端无缺陷时的电热场分布如图3所示。从图3(a)可以看出,最大场强位于靠近缆芯处的XLPE绝缘内部,且在外半导体层断口处存在局部电场畸变。从图3(b)可以看出,电缆热缩终端无缺陷时最高温度与最低温度相差极小,没有明显热点出现。

2.2 应力控制管老化

在长期电热应力作用下,应力控制管发生热老



(a) 电场分布



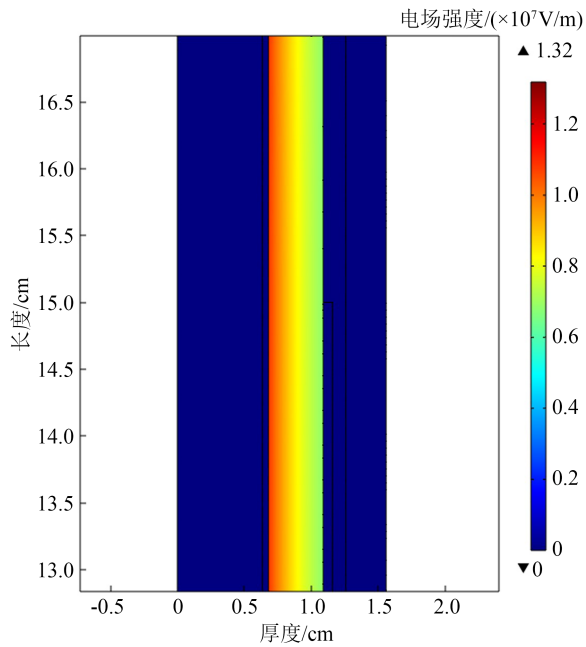
(b) 热场分布

图3 电缆热缩终端无缺陷时的电热场分布

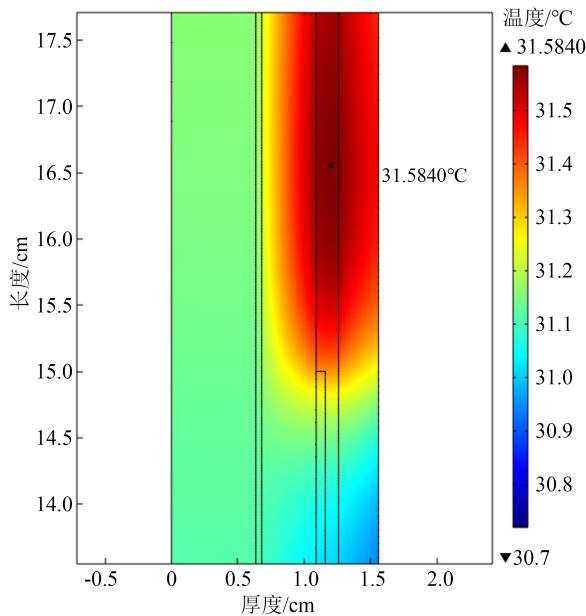
Fig.3 Distribution of electric and heating field of cable heat-shrinkable terminal without defect

化。老化使得应力控制管相对介电常数与电导率发生改变。应力控制管相对介电常数随老化程度增加而减小,电导率随老化程度增加而增加^[15],如表2所示。仿真得到电缆终端应力控制管老化时的电热场分布如图4~6所示。

从图4~6可以看出,随着应力控制管相对介电常数的减小、电导率的增加,电场分布变化相对较



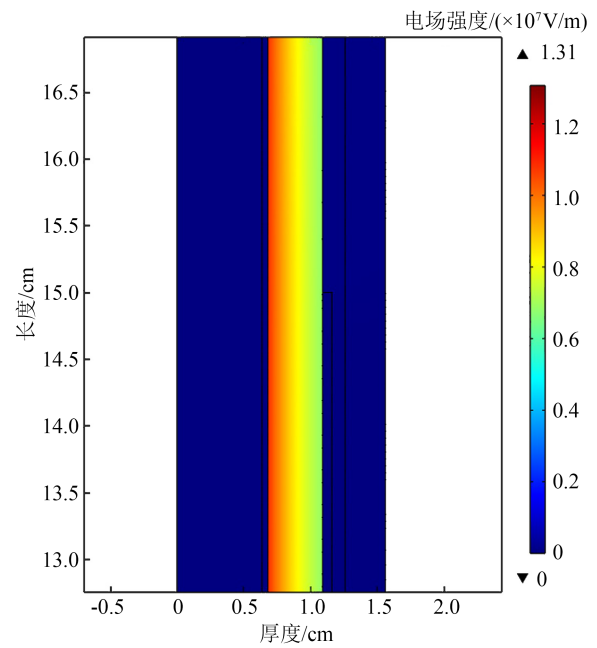
(a) 电场分布



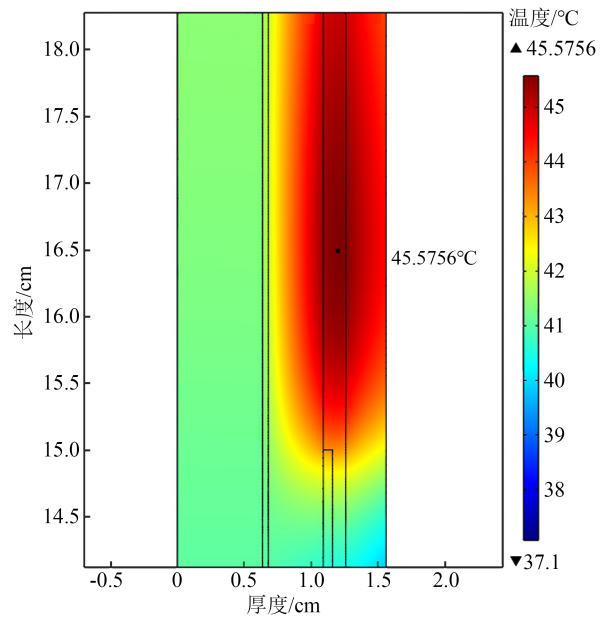
(b) 热场分布

图4 应力控制管轻微老化时的电热场分布

Fig.4 Distribution of electric and heating field when the stress control tube is slightly aged



(a) 电场分布



(b) 热场分布

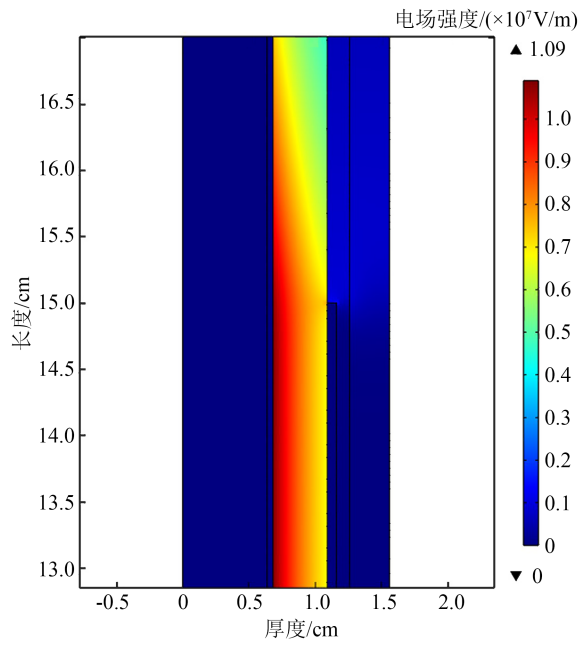
图5 应力控制管中度老化时的电热场分布

Fig.5 Distribution of electric and heating field when the stress control tube is moderate aged

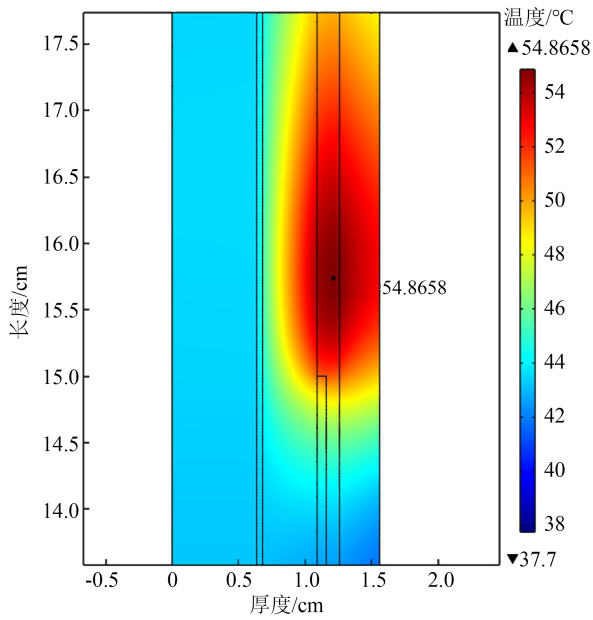
小,最高场强略有降低;但应力控制管处温度变化幅度较大,随着老化程度加深,温度明显升高,类别2较类别1局部热点增加约14°C,类别3较类别1增加约23°C。因此,应力控制管老化对电缆热缩终端温度分布的影响较大。

2.3 终端外表面脏污与受潮

在电缆终端长期运行期间,环境中的灰尘长期



(a) 电场分布

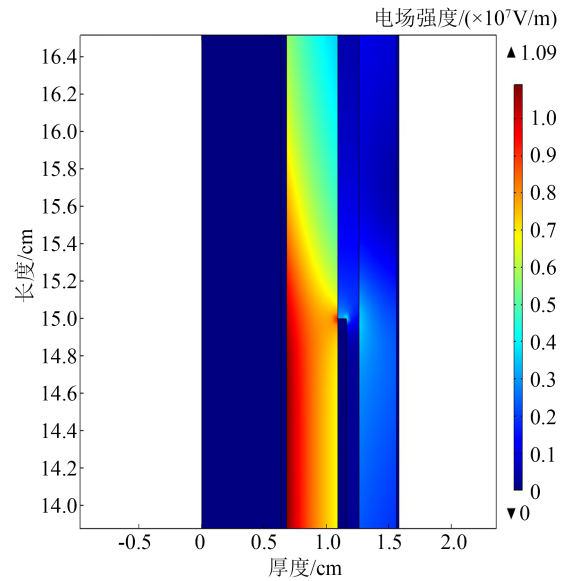


(b) 热场分布

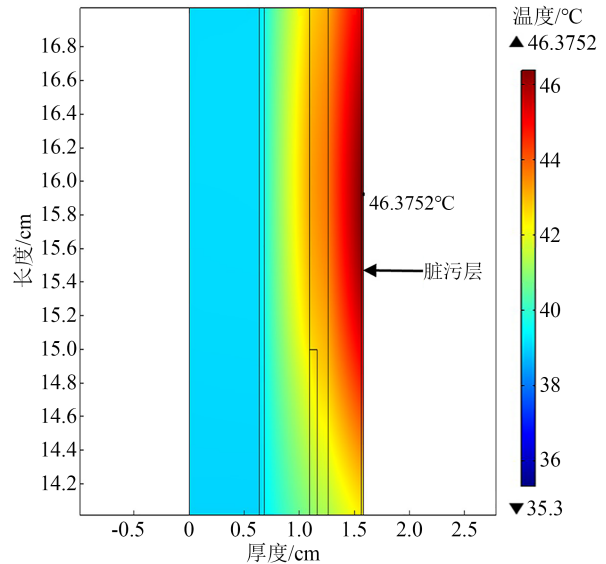
图6 应力控制管严重老化时的电热场分布

Fig.6 Distribution of electric and heating field when the stress control tube is severe aged

依附在终端外表面，容易吸附水分形成脏污层。仿真中在外半导体层断口处的终端外表面设置一层厚度为0.2 mm、长度为2.5 cm的脏污层，其相对介电常数设为83，电导率设为 1×10^{-5} S/m，仿真得到的电场与温度分布如图7所示。从图7可以看出，最大电场畸变值较正常电缆终端没有明显变化，但最高温度点转移至外层脏污层，形成明显异常热点。当设置脏污层远离半导体层截断处时，所得仿真结



(a) 电场分布



(b) 热场分布

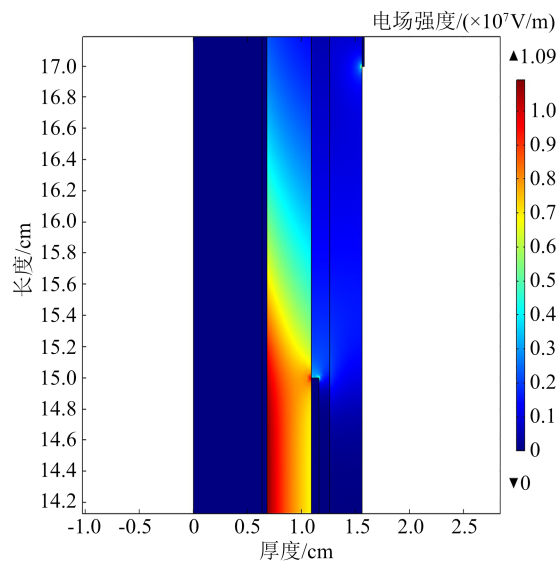
图7 脏污层靠近半导体层断口时的电热场分布

Fig.7 Distribution of electric and heating field when the dirty layer is near the semi-conductive layer fracture

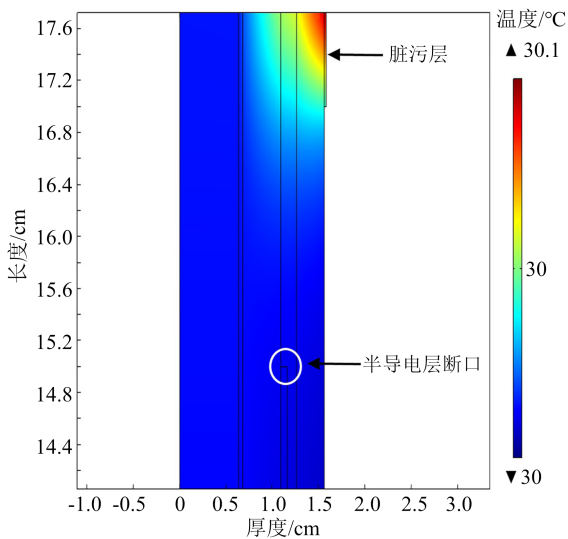
果如图8所示。从图8可以看出，温度畸变率明显降低，最高温度与最低温度仅差0.1℃，并无明显热点出现。

2.4 终端内部受潮

通过设置水膜来模拟终端内部受潮，依据水膜分布位置，分别设置应力控制管内外受潮两种状况，如图9所示。通过在应力控制管内部设置长度为1 cm、宽度为0.035 cm的矩形区域为水膜，仿真得到应力控制管内部受潮时的电热场分布如图10所示。从图10可以看出，应力控制管内部受潮时电



(a) 电场分布



(b) 热场分布

图8 脏污层远离半导体层断口时的电热场分布

Fig.8 Distribution of electric and heating field when the dirty layer is far away from the semi-conductive layer fracture

场畸变幅值变化不大,但会导致内部温升,最高温度点位于水膜内部,可达34℃。通过在应力控制管外设置长度为1 cm、宽度为0.17 cm的矩形区域为水膜,仿真得到应力控制管外部受潮时的电热场分布如图11所示。从图11可以看出,电场与热场变化都较小。

3 基于热路模型的电缆终端异常发热温度监测

3.1 电缆终端热路模型建立

电缆热缩终端的主要热源是缆芯,当电缆处于运行状态时,缆芯中的电流产生焦耳热。为了简化

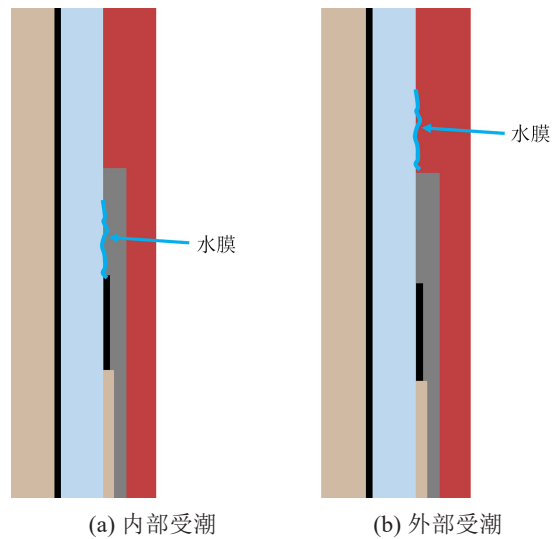
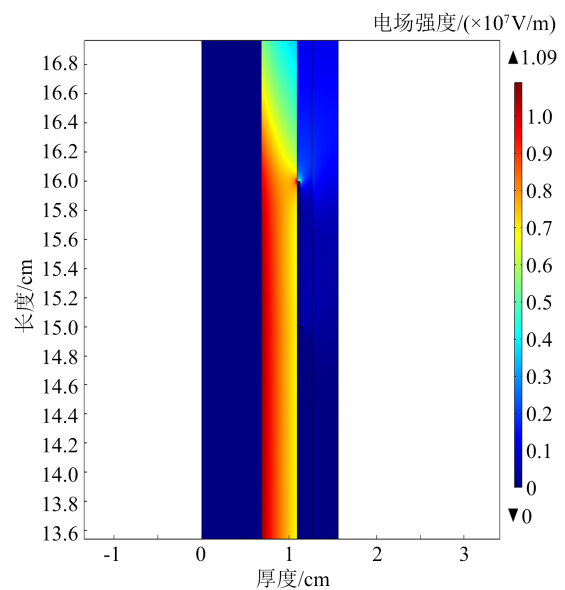


图9 应力控制管受潮位置

Fig.9 Damp location of stress control tube

分析过程,将电缆热缩终端多层结构中较薄、热容和热阻较小的层与相近层进行合并。此外,电缆热缩终端表面的温度受环境温度影响,令环境温度热容取较大值,因此在热路模型中可以将环境温度的影响等效为热动势,热动势的值取决于外界环境温度,可由红外温度监测设备测量得到^[15]。

电缆热缩终端热路模型如图12所示,图中, W_1 为电缆缆芯导体电阻产生的热流; C_1 为以绝缘层为主的电缆导体到绝缘层表面之间各层热容的总和; C_2 为以护套层为主的绝缘层表面到外界环境之间的热容; R_1 为以绝缘层为主的电缆导体到绝缘层表面之间的热阻; R_2 为以护套层为主的绝缘层表面到



(a) 电场分布

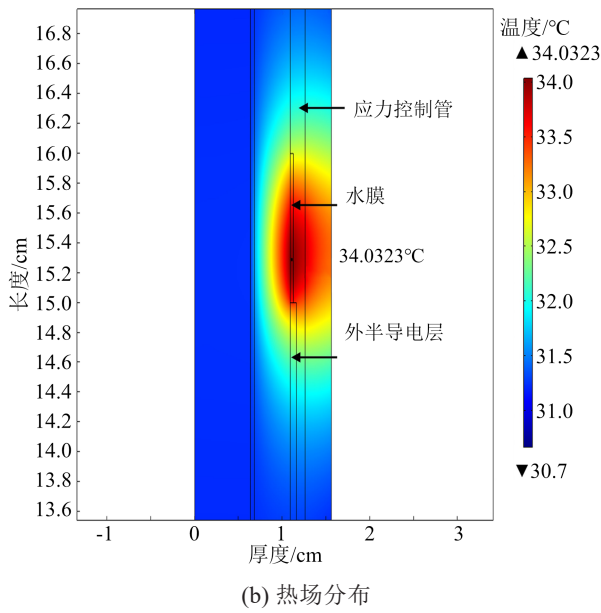


图10 应力控制管内部受潮时的电热场分布

Fig.10 Distribution of electric and heating field when moisture is inside the stress control tube

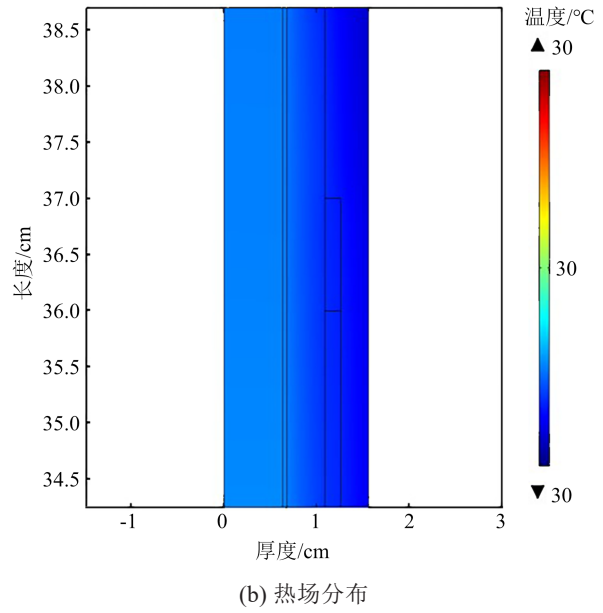


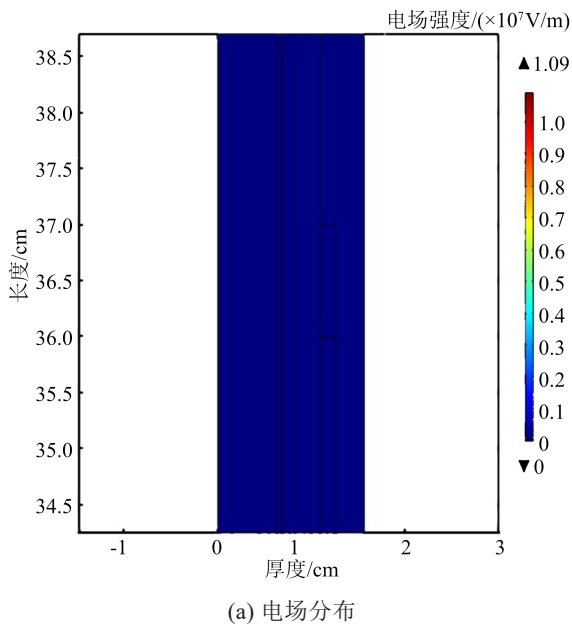
图11 应力控制管外部受潮时的电热场分布

Fig.11 Distribution of electric and heating field when moisture is on the outside of the stress control tube

外界环境之间的热阻； T_1 为导体处的温度； T_2 为绝缘层与护套层之间的界面温度； T_3 为外界环境的温度。

求解图12中的热路模型。由于环境温度在短时间内的变化幅值有限且变化速度缓慢，可以利用环境温度 T_3 为基准来衡量导体层和绝缘界面的温升，如式(7)~(8)所示。

$$T_1 = T_3 + \Delta T_1 \quad (7)$$



(a) 电场分布

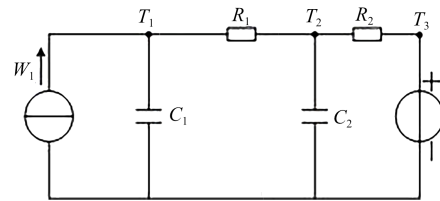


图12 电缆热缩终端热路模型

Fig.12 Thermal circuit model of cable heat-shrinkable terminal

$$T_2 = T_3 + \Delta T_2 \quad (8)$$

式(7)~(8)中： ΔT_1 、 ΔT_2 分别为电缆在运行时缆芯和绝缘界面的温升。

考虑电缆载流量变化时的暂态温升过程，为了简化分析，将连续变化的电缆电流近似为阶跃变化，假设变化起始时刻为 t_0 ，将图12电流进行拉普拉斯变换，得到图13所示的暂态热路模型。

对图13电路进行求解，可得式(9)~(11)。

$$\Delta T_2 = W_1 R_2 + \frac{\Delta T_2(t_0)(p_1 C_1 C_2 R_2 R_1 - C_2 R_2)}{p_1 - p_2} e^{-p_1 \Delta t} - \frac{\Delta T_1(t_0) C_1 R_2 + p_2 W_1 R_2}{p_1 - p_2} e^{-p_1 \Delta t} + \frac{\Delta T_2(t_0)(C_2 R_2 - p_2 C_1 C_2 R_1 R_2)}{p_1 - p_2} e^{-p_2 \Delta t} + \frac{\Delta T_1(t_0) C_1 R_2 - p_2 W_1 R_2}{p_1 - p_2} e^{-p_2 \Delta t} \quad (9)$$

$$\Delta T_1 = W_1(R_2 + R_1) + \frac{\Delta T_1(t_0)(p_1 C_1 C_2 R_2 R_1 - C_1 R_2 - C_1 R_1)}{p_1 - p_2} - \frac{\Delta T_2(t_0) C_2 R_2 + p_2 W_1(p_1 C_2 R_2 R_1 + R_2 + R_1)}{p_1 - p_2} e^{-p_1 \Delta t} + \left(\frac{\Delta T_2(t_0) C_2 R_2 + \Delta T_1(t_0)(C_1 R_2 + C_1 R_1 - p_2 C_1 C_2 R_2 R_1)}{p_1 - p_2} - \frac{p_1 W_1(p_2 C_2 R_2 R_1 + R_2 + R_1)}{p_1 - p_2} \right) e^{-p_2 \Delta t} \quad (10)$$

$p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p[C_1(R_1 + R_2) + C_2 R_2] + 1 = 0$ (11)
 式(9)~(10)中: t 代表任意时候的时间, $\Delta t = t - t_0$;
 p_1, p_2 为式(11)特征方程的两个根。

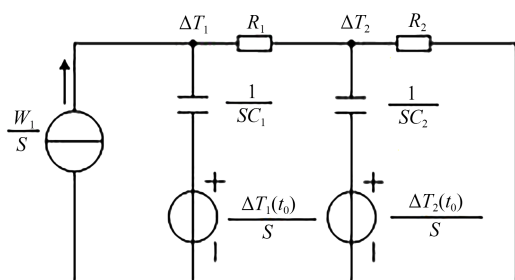


图 13 电缆热缩终端暂态热路模型

Fig.13 Transient thermal circuit model of cable heat-shrinkable terminal

由式(9)和式(10)可知,当 $\Delta t \rightarrow \infty$ 时,即电缆接头温度分布进入稳态,可得式(12)和式(13)。

$$\Delta T_2 = W_1 R_2 \quad (12)$$

$$\Delta T_1 = W_1(R_2 + R_1) = (1 + \beta_1)\Delta T_2 \quad (13)$$

式(13)中, $\beta_1 = R_1/R_2$ 。

由此可以发现当电缆线路中载流量稳定时,缆芯的温度变化与绝缘层表面温度变化成比例关系,同理,电缆终端中不同层表面之间的温度变化也应当成比例关系。

当电缆终端内部存在缺陷时,缺陷在电场作用下会产生损耗,导致缺陷点处形成局部热点,此时热路模型如图14所示。图14中 W_2 为界面缺陷处损耗的等效热流,由于实际中仅能测到护套层外表面温度,这里引入了护套层外表面温度 T_c ; C_2' 为以护

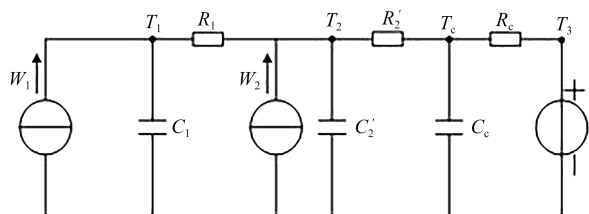


图 14 含缺陷的电缆热缩终端热路模型

Fig.14 Thermal circuit model of cable heat shrinkable terminal with defect

套层为主的绝缘层表面到护套层表面之间的热容; R_2' 为以护套层为主的绝缘层表面到护套层表面之间的热阻; C_c 为以护套层为主的护套层表面温度检测点到外界环境之间的热容; R_c 为以护套层为主的护套层表面到环境的热阻。由电路叠加定理^[6]可知,温度结果是热流 W_1 和热流 W_2 单独作用时结果的叠加,因此含缺陷时的温度结果可以看作终端正常时的温度与缺陷单独作用时的温度叠加。终端正常时的温度可由仿真得到,由前文分析可得,终端正常时绝缘层表面温度和护套层表面温度关系为式(14)。

$$\Delta T_2 = (1 + \beta_c)\Delta T_c \quad (14)$$

式(14)中: ΔT_c 为护套层表面相对于环境温度的变化量; β_c 为绝缘层温度变化与护套层温度变化的比例系数。

因此含缺陷的电缆终端绝缘表面温度可由式(15)求得。

$$\Delta T_2 = (1 + \beta_c)\Delta T_c + (1 + \beta_c')(\Delta T_{cr} - \Delta T_c) \quad (15)$$

式(15)中: ΔT_{cr} 为实际测量的护套层表面温度; β_c' 为缺陷单独作用时的比例系数。在已知电缆终端载流量和外界环境温度时,可利用仿真求得 ΔT_c 的值。

3.2 基于热路模型的电缆终端内部界面异常温度监控

中压电缆热缩终端异常发热会导致绝缘过热老化,因此监测绝缘最高温度点至关重要。对于外部发热故障,发热点位于外表面,容易进行观测与缺陷处理,故重点应关注内部热点缺陷。由第二节缺陷异常发热分析可知,对于因应力控制管老化与内部受潮引起的内部热点,应重点关注XLPE主绝缘侧最高温度点(耐热性能差)。

在已知护套层外表面温度以及温度比例系数的情况下,利用式(15)可以求得电缆绝缘层表面相对于环境的温度差,从而实现对电缆绝缘层表面异常热点温度进行检测,为求取式(15)中的比例系数,进行了仿真。在实际工况下,电缆终端内部热源主要由缆芯焦耳热与内部异常热点主导,如图15

(a)所示。其中,将缺陷等效为一热点,分布于电缆终端绝缘界面(热点出现最多),以简化分析。设置缆芯热源热流量为 $5\,000\text{ W/m}^3$,缺陷点热源热流量为 $50\sim 500\text{ W/m}^3$,环境温度为 10°C ,得到终端径向温度分布如图15(b)所示,由终端正常时温度分布数据可求得比例系数 $\beta_c=0.060\,6$ 。将缆芯热源与缺陷热源共同作用下引起的温度分布数据减去终端正常时温度分布数据,即可得到缺陷热源单独作用下的温度分布如图16所示,图16中绝缘层表面温度与护套层表面温度如表3所示,可求得比例系数 $\beta_c'=1.172\,41$,说明温度变化幅度极小,与前文分析一致。

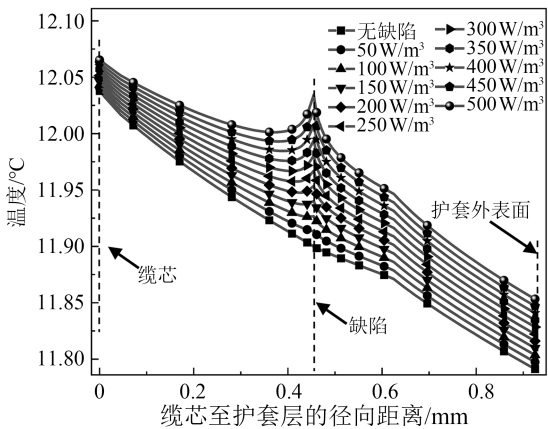
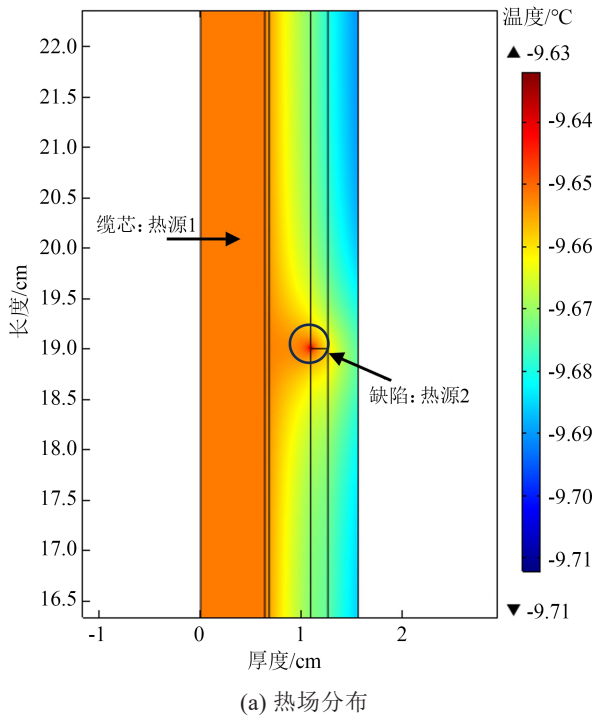


图15 等效热源分布

Fig.15 Distribution of equivalent heat sources

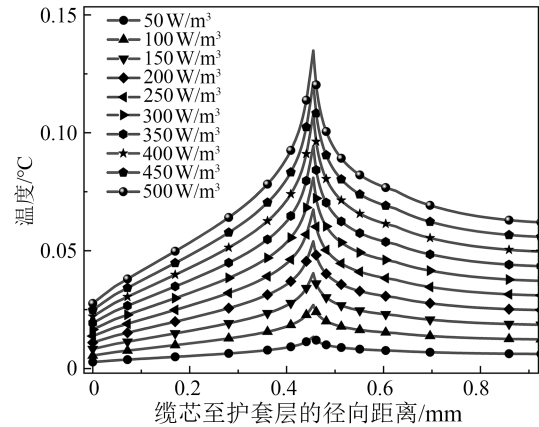


图16 缺陷热源单独作用时的温度分布

Fig.16 Temperature distribution when a defect heat source acting alone

表3 缺陷热源单独作用时的温度及 β_c'

Table 3 Temperature and β_c' when a defect heat source acting alone

$\Delta T_2/^\circ\text{C}$	$(\Delta T_{cr} - \Delta T_c)/^\circ\text{C}$	β_c'
0.013 49	0.006 21	1.172 41
0.026 97	0.012 42	1.172 41
0.040 46	0.018 62	1.172 41
0.053 95	0.024 83	1.172 41
0.067 43	0.031 04	1.172 41
0.080 92	0.037 25	1.172 41
0.094 41	0.043 46	1.172 41
0.107 89	0.049 67	1.172 41
0.121 38	0.055 87	1.172 41

在实际运行中,已知参数有电缆负载电流 i_{cable} ,环境温度 T_3 ,终端外表面最高温度 T_{outmax} ,需要求解内部XLPE绝缘最高异常温度点。本文借助于有限元分析进行内部温度反演,主要流程如下:

(1)有限元仿真模型构建:构建电缆热缩终端COMSOL有限元仿真模型,输入实际缆芯电流 i_{cable} ,设置环境温度 T_3 ,使用电磁-热耦合模块求解电缆终端温度分布,得到无缺陷下的外护层温度 T_c 。将 T_c 减去环境温度 T_3 便可得到温升 ΔT_c ,并利用模拟热源的方式求得比例系数 β_c 与 β_c' 。

(2)测量实际外护层表面温度 T_{cr} 并减去环境温度 T_3 ,得到外护层温升 ΔT_{cr} ,将求得的 ΔT_{cr} 、 ΔT_c 、 β_c 与 β_c' 代入式(14)~(15),便可求得此时缺陷热点位置的温升 ΔT_2 。

(3)将温升 ΔT_2 加上环境温度 T_3 便可得到此时缺陷点的温度,实现对热缩终端异常发热的温度监测。

为了验证该方法有效性,在热缩终端内放置一个可调温度电阻加热片,如图17(a)所示,考虑到施加电压可能会击穿加热片,因此本文实验过程只考虑缺陷热源引起的发热。实验中设置热源温度为 93°C 。通过红外测温得到外表面最高温度为 53.1°C ,环境温度为 19.9°C ,如图17(b)所示。由于此时缆芯未施加电流, $\Delta T_c = 0$,代入式(15)可得式(16)。

$$T_2 = (1 + \beta_c')\Delta T_{cr} + T_3 = 95.343\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

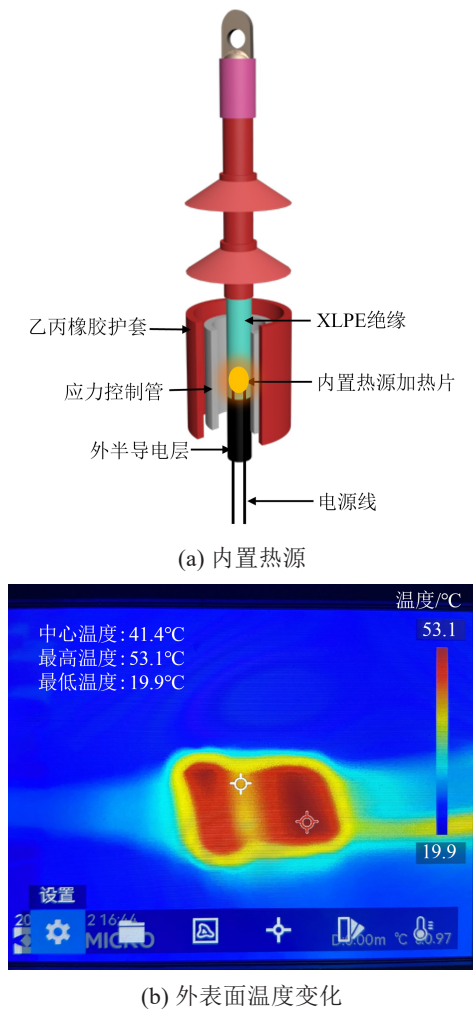


图17 实验模拟电缆终端内部热源

Fig.17 Experimental simulation of internal heat source in cable terminal

使用上述温度反演法,得到的绝缘层表面温度与实际设置温度相近,误差为 $2.343\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有较高的准确度,验证了本文方法的有效性。

4 总结

(1)中压电缆热缩终端内部的应力控制管能抑

制外半导体层断口处的电场畸变,因此应力控制管老化极大影响着终端绝缘性能。随着应力控制管老化程度的加深,容易导致终端内部热点出现,且热点温度与应力控制管老化程度呈正相关。

(2)受外半导体层断口处电场畸变的影响,当终端外表面污秽层靠近断口时会引起污秽层发热,而远离则不会导致热点产生。同样现象发生在应力控制管内外受潮时,当应力控制管内部受潮时,由于水分靠近断口会引起明显绝缘局部温升现象,而当外部应力控制管受潮时,由于水分远离断口热点消失。

(3)本文完善了电缆热缩终端内部绝缘界面存在缺陷热点时的热路模型理论推导与温度反演思路,并基于有限元仿真与实验验证了该方法的可行性,可以作为电缆异常发热监测手段。

参考文献 References

- [1] 陈新岗,李宁一,马志鹏,等.基于电应力损伤特征值的XLPE绝缘电压耐受指数评估方法研究[J].绝缘材料,2024,57(3):82-88.
CHEN Xingang, LI Ningyi, MA Zhipeng, et al. Study on evaluation method of XLPE insulation voltage endurance coefficient based on electrical stress damage characteristic value[J]. Insulating Materials,2024,57(3):82-88.
- [2] 胡丽斌,张传升,谭笑,等.退役电缆附件微观结构与电荷特性研究[J].中国电机工程学报,2021,41(2):770-781.
HU Libin, ZHANG Chuansheng, TAN Xiao, et al. Research on microstructure and charge characteristics of cable accessories out of service[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):770-781.
- [3] 范在乾,咸日常,冷学冰,等.35 kV XLPE 电力电缆终端结构参数优化[J].绝缘材料,2023,56(11):73-79.
FAN Zaiqian, XIAN Richang, LENG Xuebing, et al. Optimization on structural parameters of 35 kV XLPE power cable terminal[J]. Insulating Materials,2023,56(11):73-79.
- [4] 杜光旭,方春华,夏荣,等.电缆硅橡胶附件温度和热老化对接头界面压力的影响[J].绝缘材料,2022,55(11):100-108.
DU Guangxu, FANG Chunhua, XIA Rong, et al. Effect of temperature and thermal ageing of cable silicone rubber accessories on interface pressure of cable joints[J]. Insulating Materials, 2022, 55 (11):100-108.
- [5] 李传瑾,赵兴永,付兆升,等.35 kV 单芯电缆终端发热原因剖析[J].电世界,2019,60(9):33-35.
LI Chuanjin, ZHAO Xingyong, FU Zhaosheng, et al. Analysis of heating causes in 35 kV single-core cable terminals[J]. Electrical World,2019,60(9):33-35.
- [6] 程帆,曾浩松.电缆终端异常发热案例分析[J].电气技术,2015(11):122-124.
CHENG Fan, ZENG Haosong. Abnormal heat of transmission cable termination case simulation and analysis[J]. Electrical

- Engineering2015(11):122-124.
- [7] 赵庆杰,周凯,吴科,等.牵引机车过分相时高频谐波分析及对电缆终端发热问题研究[J].电测与仪表,2017,54(6):17-22,43.
ZHAO Qingjie, ZHOU Kai, WU Ke, et al. The analysis of high frequency harmonic and the research of the problem for cable termination during passing natural section of traction locomotive[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(6):17-22,43.
- [8] 陈新岗,宋欣,马志鹏,等.基于电磁-热耦合的XLPE电缆缺陷暂态温度分布研究[J].绝缘材料,2024,57(4):122-129.
CHEN Xingang, SONG Xin, MA Zhipeng, et al. Study on transient temperature distribution of defects in XLPE cables based on electromagnetic-thermal coupling[J]. Insulating Materials,2024,57(4):122-129.
- [9] 刘海龙,张建飞,谭湘海,等.35kV电缆终端局部发热解体分析及缺陷发展过程推演[J].电工技术,2017(7):97-98.
LIU Hailong, ZHANG Jianfei, TAN Xianghai, et al. Analysis of local heating decomposition and defect development process in 35 kV cable terminals[J]. Electric Engineering,2017(7):97-98.
- [10] 徐涛.基于电-热场仿真和红外检测的瓷套式电缆终端局部异常发热研究[D].广州:华南理工大学,2017.
XU Tao. Study on local over-heat of porcelain type cable terminal based on electric-thermal field simulation and infrared detection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [11] ZHOU Lijun, YANG Han, LIU Cong, et al. Research on the electrical-thermal field characteristics of XLPE cable terminal under damp defects[C]//2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering. Chengdu, China: IEEE,2021.
- [12] 何宁辉,马波,沙伟燕,等.热老化对配电网电缆绝缘等温松弛电流及阈值电场的影响[J].绝缘材料,2023,56(8):51-57.
HE Ninghui, MA Bo, SHA Weiyan, et al. Effect of thermal aging on isothermal relaxation current and threshold electric field of distribution cable insulation[J]. Insulating Materials,2023,56(8):51-57.
- [13] 李广建.车载高压电缆终端应力控制管热老化特性研究[D].成都:西南交通大学,2021.
LI Guangjian. Study on thermal aging characteristics of stress control tube of vehicle high voltage cable terminal[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University.
- [14] 李蓉,周凯,万航,等.基于频域反射法的10kV配电电缆中间接头受潮定位[J].电网技术,2021,45(2):825-832.
LI Rong, ZHOU Kai, WAN Hang, et al. Moisture location of 10 kV cable joints in medium voltage distribution grid based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology,2021,45(2):825-832.
- [15] 高云鹏,谭甜源,刘开培,等.电缆接头温度反演及故障诊断研究[J].高电压技术,2016,42(2):535-542.
GAO Yunpeng, TAN Tianyuan, LIU Kaipei, et al. Research on temperature retrieval and fault diagnosis of cable joint[J]. High Voltage Engineering,2016,42(2):535-542.
- [16] 詹清华,肖微,罗容波,等.基于暂态热路模型及反演算法的电缆接头导体温度监测[J].南方电网技术,2014,8(2):83-87.
ZHAN Qinghua, XIAO Wei, LUO Rongbo, et al. The temperature monitoring of cable joint conductor based on transient thermal circuit model and inversion algorithm[J]. Southern Power System Technology,2014,8(2):83-87.

收稿日期:2024-06-02;修回日期:2024-06-24。

作者简介:

唐庆华(1979-),男(汉族),广西桂林人,高级工程师,主要从事电力电缆运行检测及高压绝缘试验的研究工作;

通信作者:李旭(1987-),男(汉族),天津人,高级工程师,主要从事电力电缆运维检测技术的研究工作。