

引用格式:张东东,万慧娟,张翼,等.含防爆盒电缆中间接头温度分布特性及其发热识别方法研究[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):298-306.

Citation: ZHANG Dongdong, WAN Huijuan, ZHANG Yi, et al. Temperature distribution characteristics and heat identification method of cable intermediate joints with explosion-proof boxes[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 298-306.

# 含防爆盒电缆中间接头温度分布特性及其发热识别方法研究

张东东<sup>1</sup>, 万慧娟<sup>1</sup>, 张翼<sup>1</sup>, 余佶成<sup>2</sup>, 叶桐琿<sup>1</sup>, 乔新涵<sup>3</sup>,  
焦婷<sup>4</sup>, 汪垠衫<sup>1</sup>, 王若曦<sup>1</sup>

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074;

3. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116; 4. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200080)

**摘要:**三芯电缆中间接头是电缆系统中的薄弱部位, 加装防爆盒在有效防止接头发生故障后影响其余电缆正常工作的同时也会对接头表面温度分布产生影响。建立 35 kV 含防爆盒电缆中间接头三维真型模型, 基于有限元理论建立多物理场耦合仿真模型, 研究了接触电阻对防爆盒内接头温度的影响以及灌胶防爆盒对接头载流量的影响; 通过模拟绝缘老化以及发热缺陷情况, 得出含防爆盒电缆中间接头表面温度分布规律。结果表明: 灌胶防爆盒因热阻效应导致导体载流量较裸接头工况下降 12.77%, 绝缘老化对表面温升影响较小; 接续管处出现发热缺陷时, 灌胶防爆盒的存在会使接头表面温度极值区由传统端部集中迁移至接续管对应外表面区域, 单相、两相缺陷分别使温升提高 11.65、13.3 °C; 通过监测接续管中心外接头表面六点位置的温升幅度可以识别灌胶防爆盒内电缆接头发热缺陷。该成果为电缆中间接头的状态监测与可靠性评估提供了理论依据, 对智能电网设备状态检修规程的优化具有参考价值。

**关键词:**中间接头; 防爆盒; 接触电阻; 绝缘老化; 有限元理论

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.028 中图分类号: TM247 文章编号: 1673-9140(2026)01-0298-09

## Temperature distribution characteristics and heat identification method of cable intermediate joints with explosion-proof boxes

ZHANG Dongdong<sup>1</sup>, WAN Huijuan<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, YU Jicheng<sup>2</sup>, YE Tonghui<sup>1</sup>,  
QIAO Xinhan<sup>3</sup>, JIAO Ting<sup>4</sup>, WANG Yinshan<sup>1</sup>, WANG Ruoxi<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Electric Power Science Research Institute, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200080, China)

**Abstract:** The three-core cable intermediate joint is a vulnerable component of the cable system. The addition of an explosion-proof box can effectively prevent joint failure from affecting the normal operation of other cables, and also affects the surface temperature distribution of the joint. In this paper, a three-dimensional full-scale model of a 35 kV cable intermediate joint with an explosion-proof box is developed, and a multiphysics coupled simulation model based on finite element theory is established. The influence of contact resistance on the temperature of the joint inside the explosion-proof box and the influence of the gel-filled explosion-proof box on the current-carrying capacity of the joint are studied. By simulating insulation aging and heating defect conditions, the surface temperature distribution characteristics of cable intermediate joints with explosion-proof boxes are obtained. The results show that, due to the thermal resistance effect, the conductor current-carrying capacity

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 湖北省自然科学基金(2023AFB074); 江苏高校“青蓝工程”(SJS202414); 中国博士后科学基金(2023M732412)

通信作者: 张翼(1994—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力设备状态评价与检测方面的研究; E-mail: zhangyi@njit.edu.cn

of the gel-filled explosion-proof box decreases by 12.77% compared with the bare joint condition, and insulation aging has little effect on the surface temperature rise. When a heating defect occurs at the splice tube, the presence of the gel-filled explosion-proof box causes the maximum temperature region on the joint surface to shift from the traditional end region to the outer surface corresponding to the splice tube. Single-phase and two-phase defects increase the temperature rise by 11.65 °C and 13.3 °C, respectively. Heating defects of cable joints inside gel-filled explosion-proof boxes can be identified by monitoring the temperature rise amplitudes at six positions on the outer surface of the joint at the center of the splice tube. The results provide a theoretical basis for condition monitoring and reliability evaluation of cable intermediate joints and have reference value for optimizing condition-based maintenance procedures for smart grid equipment.

**Key words:** intermediate joint; explosion-proof box; contact resistance; insulation aging; finite element theory

三芯电缆中间接头是电力输配系统中重要的连接元件,其运行状态直接影响电力传输的稳定性<sup>[1-2]</sup>。由于中间接头长期处于高电流、高电压的环境中,容易因电热耦合作用而产生局部过热现象,其故障发生率明显高于电缆本体<sup>[3-5]</sup>。因此,对电缆中间接头的状态进行监测是保障电力系统安全运行的重要措施,有助于提前发现隐患,降低故障风险,提高系统可靠性。

为了研究电缆中间接头的温度特性分布,文献[6]建立了三芯电缆头的仿真模型,深入研究了环境温度及载流量对电缆中间接头导体温升、表面温升以及电缆本体温升的影响规律;文献[7]通过对 10 kV 三芯电缆的多场耦合研究发现,存在压接缺陷的电缆接头的发热机理主要是接触电阻产热,且温度梯度场相较于温度场对缺陷的识别灵敏度更高;文献[8]通过改变接头及本体材料的单参数影响因子,分析发现材料的导热系数对温度感知模型的灵敏度系数影响较大;文献[9]研究发现,自熔式电缆中间接头的绝缘老化后,界面电场及温度均会增加,且气隙处变化更为明显;文献[10]研究发现电缆外表面和线芯的最大温差随老化程度加剧而增大。上述研究结果表明,电缆中间接头缺陷发热存在明显温升,监测表面温度可有效反映内部故障缺陷。

近年来,随着电力设备防爆需求的不断提升,现有配网三芯电缆大多加装防爆盒。防爆盒不仅可以避免电缆中间接头遭受外力破坏,还能防止故障蔓延至其他电缆<sup>[11-12]</sup>。然而,关于防爆盒对劣化缺陷电缆中间接头发热机制的影响的研究仍然较少,目前大多研究聚焦于防爆盒填充物、环境温度、空气传热系数等因素对中间接头线芯温度及载流量的影响。例如,文献[12]研究了防爆盒内填充物对中间接头运行时温度的影响,发现接头在正常工况下,加装空腔防爆盒会导致中间接头的大幅温升,而在防爆盒内部填充石英砂则可以降低温升;

文献[13-14]研究发现不同的防爆设备对电缆中间接头载流量有不同影响,安装铝镁合金防爆防火保护盒会导致接头载流量降低约 4%,不锈钢防爆盒使载流量下降超过 10%,而防爆毯对载流量的影响仅为 1% 左右;文献[15]建立三维简化仿真模型,研究发现环境温度对加装防爆盒前后线芯最高温度变化影响不大,空气换热系数增大会加大接头加装防爆盒前后的峰值温差。综上所述,防爆盒内电缆的表面温升特性尚不明确,如何通过监测防爆盒内电缆表面温度来发现接头内部缺陷仍有待研究。

建立三维简化仿真模型,研究发现环境温度对加装防爆盒前后线芯最高温度变化影响不大,空气换热系数增大会加大接头加装防爆盒前后的峰值温差。综上所述,防爆盒内电缆的表面温升特性尚不明确,如何通过监测防爆盒内电缆表面温度来发现接头内部缺陷仍有待研究。

## 1 35 kV 含防爆盒电缆中间接头模型

### 1.1 仿真模型建立

本文的研究对象是 YJV-26/35-3×240 型三芯高压电缆以及 XJW-FBH-35KV-G19 型电缆接头防爆盒,参考电缆以及防爆盒的结构参数建立含防爆盒电缆头三维模型<sup>[16-17]</sup>。仿真模型及材料的电场、温度特性参数<sup>[18]</sup>如图 1、表 1、2 所示。

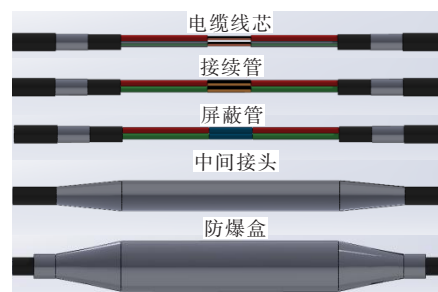


图 1 含防爆盒电缆中间接头模型

Figure 1 Cable intermediate joint model with explosion-proof box

表 1 电缆中间接头及防爆盒温度特性参数

Table 1 Temperature characteristic parameters of cable intermediate joint and explosion-proof box

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	恒压热容/ ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ )
铜	8 960	385.0	400.00
交联聚乙烯	1 200	2 260.0	0.33
聚氯乙烯	1 450	1 005.0	0.28
钢	7 850	450.0	45.00
聚丙烯纤维	910	1 900.0	0.40
聚氨酯	90	1.8	0.16
玻璃钢	1 800	535.0	0.25

表 2 电缆中间接头及防爆盒电场特性参数

Table 2 Electric field characteristic parameters of cable intermediate joint and explosion-proof box

材料	电导率/( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	相对介电常数	相对磁导率
铜	$5.80\text{e-}7$	8 000.0	1
交联聚乙烯	$1.00\text{e-}15$	2.15	1
聚氯乙烯	$1.00\text{e-}15$	2.2	1
钢	$1.03\text{e-}7$	7.8	1
聚丙烯纤维	$1.00\text{e-}15$	2.2	1
聚氨酯	$1.00\text{e-}15$	1.5	1
玻璃钢	$1.00\text{e-}8$	5.0	1

## 1.2 网格划分

COMSOL 中的网格划分是数值仿真中的关键步骤,将仿真模型的几何结构分解为小的、离散的元素,以便于数值求解。精细的网格划分模式使得计算成本巨大,考虑三维立体模型内部结构较为复杂,综合计算结果的准确率以及计算效率两方面因素,本文采用自适应网格划分策略中的更细模式,其中划分网格顶点共 93 087 个,四面体网格共 514 720 个,三角形网格共 141 576 个。含防爆盒中间接头三维模型网格划分如图 2 所示。

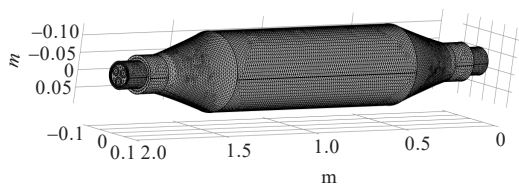


图 2 含防爆盒中间接头三维模型网格划分

Figure 2 Three-dimensional model mesh of intermediate joint with explosion-proof box

## 1.3 控制方程及边界设置

含防爆盒中间接头的稳态温度场解析问题可归结于多物理场耦合系统的热传导建模问题。其

中,导体材料的焦耳热效应诱发的热源分布构成温度场控制方程的非齐次项,而温度场对材料电导率的非线性调制作用则形成电磁-热场的双向耦合机制。

温度场的控制方程基于傅里叶定律和能量守恒推导,在直角坐标系中的表达式为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{\text{th}} \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$ 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\lambda$ 为导热系数; $Q_{\text{th}}$ 为载流导体产生的热量。对流散热主要包括热传导、热对流以及热辐射三部分,电流场边界设置为电绝缘,模型两端设置为热绝缘。

防爆盒内部灌注聚氨酯胶的电缆中间接头外表面视为与空气直接接触。对流散热公式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_f - T_{\text{amb}}) \quad (2)$$

式中, $h$ 为空气传热系数,本仿真取 10;  $n$ 为沿法线方向;  $T_f$ 为外表面温度, $\text{K}$ ;  $T_{\text{amb}}$ 为初始环境温度, $\text{K}$ 。

## 1.4 接触系数

接续管与铜芯通过压接工艺连接在一起,金属表面虽肉眼看似光滑,在微观尺度上,二者接触面的粗糙度并不一致,实际接触面存在细小的凸起和凹陷,接触的实际物理面积因而减小,只有部分表面直接接触形成导电通路,未接触的区域则产生附加电阻。

接头连接处接触电阻原理<sup>[12]</sup>如图 3 所示。定义接续管长度为  $l$ ; 铜芯导体半径为  $r_0$ ,电阻率为  $\rho_0$ ; 接续管半径为  $r_1$ ,电阻率为  $\rho_0$ ,电导率为  $\sigma_0$ 。接续管与铜芯压接后,可等效为一个整体,该整体具有等效电阻半径  $r_{\text{eq}}$ ,等效电阻率  $\rho_{\text{eq}}$ ,等效电导率  $\sigma_{\text{eq}}$ 。故引入一个接触系数  $k$  来反映接触电阻变化程度。

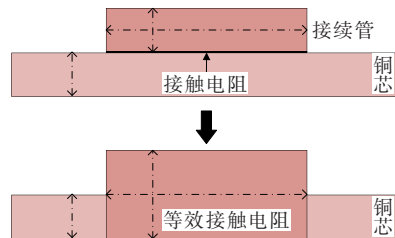


图 3 接触电阻原理

Figure 3 Contact resistance principle

根据电阻定义公式可得  $k$  为

$$k = \frac{\rho_{\text{eq}}/l/\pi r_{\text{eq}}^2}{\rho_0/l/\pi r_0^2} \quad (3)$$

带入三维模型尺寸数据,可得:

$$\rho_{eq} = 2.38k\rho_0 \quad (4)$$

电导率与电阻率成倒数关系,等效电导率为

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_0}{2.38k} \quad (5)$$

通过改变接触系数  $k$  值可模拟不同接触电阻下的温度分布计算。以 300 A 三相负荷电流为例<sup>[19]</sup>,环境温度为 25 °C,空气传热系数为 10 W/(m<sup>2</sup>·K),对加装灌胶防爆盒的电缆中间接头模型进行仿真。压接良好、压接不良等情况可通过接触系数大小来表现,故  $k$  分别取 1、3.5、6、8.5、11。

线芯温度测量路径选取单相导体的中心轴线,电缆表面测温路径如图 4 所示。

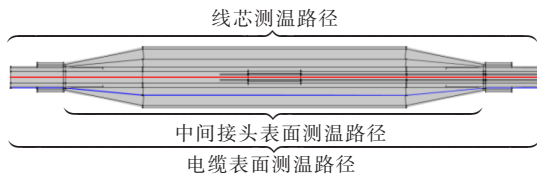
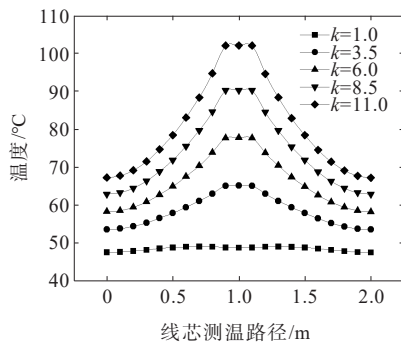


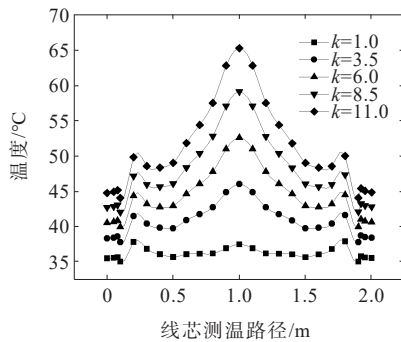
图 4 温度测量路径

Figure 4 Temperature measurement path

不同接触系数下,加装灌胶防爆盒后电缆线芯及表面轴向温度分布如图 5 所示。



(a) 电缆线芯温度轴向分布



(b) 电缆表面温度轴向分布

图 5 不同接触系数下含防爆盒电缆温度轴向分布

Figure 5 Axial distribution of cable temperature with explosion-proof box under different contact coefficients

当接触系数  $k$  等于 1 时,代表理想压接工艺下接触电阻较小,线芯及表面温度分布相对均匀,线芯温度与接头表面温度在不同部位差异较小。

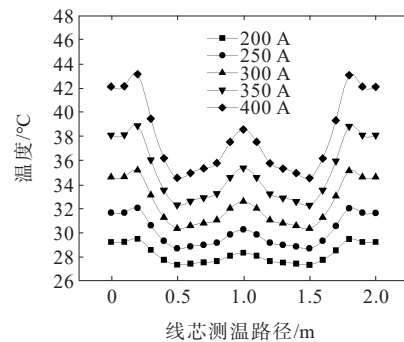
接触电阻引起电缆中间接头发生局部焦耳热效应,接续管处内外温升幅度明显,两端远离热源,温升幅度较小。300 A 电流下, $k$  大于 8.5 时,线芯温度超过 90 °C,易导致附近绝缘材料发生热老化。

因此,可通过改变接触系数来模拟内部接续管压接缺陷,参考文献[20]中的实测结果,取  $k=2.3$  为最接近实际的接触系数进行仿真。

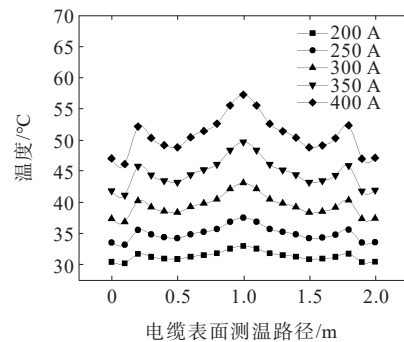
## 2 防爆盒对电缆发热特性影响分析

### 2.1 对中间接头载流量的影响

保持环境温度、空气传热系数等仿真条件不变,考虑接触电阻的影响(接触系数取 2.3),三相负荷电流分别取 200、250、300、350、400 A。不同负荷电流下加装灌胶防爆盒前后电缆表面温度轴向分布如图 6 所示。



(a) 无防爆盒



(b) 加装灌胶防爆盒

图 6 不同负荷电流下电缆表面温度轴向分布

Figure 6 Axial distribution of cable surface temperature under different load current

不同负荷电流下的线芯温度如表 3 所示。由表 3 可知,在不加装防爆盒的情况下,随负荷电流的增大,电缆中间接头表面有明显温升。接头结构导致外露面积较大,空气的自然对流效果及辐射散热能

力更强;电缆接头两端与电缆本体相连接,热量传导在过渡区域遇材料不均匀在两端局部积累,故电缆中间接头表面温度呈“U”型分布特征。

加装灌胶防爆盒后,相同电流工况下表面温度较加装防爆盒前整体大幅上升。聚氨酯胶的导热系数低于绝缘材料,覆盖后使得自然对流散热受阻,电缆接头区域的热量难以快速传导和散发。

表 3 不同负荷电流下的线芯温度

Table 3 Core temperature under different load current

电流/A	电缆本体线芯温度/℃		接头线芯最高温度/℃	
	不含防爆盒	灌胶防爆盒	不含防爆盒	灌胶防爆盒
200	34.39	36.85	36.73	40.42
250	39.67	43.51	43.38	49.10
300	46.12	51.55	51.46	59.70
350	53.75	61.29	61.02	72.23
400	62.55	72.40	71.96	86.68
450	72.52		84.54	
470	76.84		89.68	

考虑实际压接工艺的影响<sup>[21-22]</sup>,接触系数 $k$ 取2.3,电缆中间接头在470 A负荷电流下,接续管处线芯最高温度为89.68℃,故最大载流量为470 A。根据IEC 62067标准,交联聚乙烯绝缘电力电缆正常运行时导体最高工作温度不高于90℃,故加装灌注聚氨酯胶的防爆盒后,电缆中间接头最大载流量降至410 A,相较于加装防爆盒前载流量下降了12.77%。

## 2.2 对绝缘老化温升的影响

对电缆中间接头及灌胶防爆盒内电缆中间接头绝缘材料老化进行仿真,老化后XLPE的导热系数为0.4<sup>[9]</sup>,相对介电常数为2.35,电导率为 $1 \times 10^{-4}$  S/m,其余仿真条件保持不变。绝缘老化后含防爆盒中间接头温度分布如图7所示。

由图7径向温度分布可知,高温区集中在电缆头中间接续管附近,三根铜芯导体相当于3个热源,温度由铜芯向防爆盒外表面逐渐降低。绝缘材料老化后的含防爆盒中间接头,热量更容易散发至外部环境,线芯温度下降,接续管处最高温度由89.9℃下降至87.5℃,接头两端最高温度下降2℃。

老化前后中间接头表面温差如图8所示。可知,当加装灌胶防爆盒的电缆中间接头老化后<sup>[19]</sup>,温差分布整体呈“M”型。与未装防爆盒相比,老化过程导致中间接头表面温升幅度增大,而接触电阻产生的发热相对减小,削弱了绝缘老化对表面温度的影响。

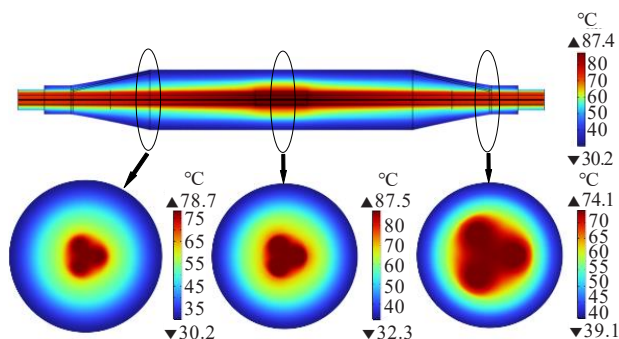


图 7 绝缘老化后含防爆盒中间接头温度分布

Figure 7 Temperature distribution of intermediate joint with explosion-proof box after insulation aging

在相同老化条件下,聚氨酯胶防爆盒会放大材料老化对中间接头表面温度的影响,且接续管外表面的温度变化受防爆盒影响较其他部位更小<sup>[23-26]</sup>。电流通过接触电阻产生的焦耳热是主要的温升来源,而在无接触电阻的区域,温升主要受外界环境条件的影响。

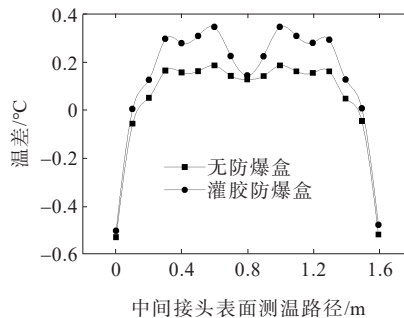


图 8 老化前后中间接头表面温差

Figure 8 Surface temperature difference of intermediate joint before and after aging

## 2.3 对接续管发热温升的影响

仿真条件为300 A三相交流电,环境温度为25℃,空气对流传热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在正常工况下,接触系数取值为2.3;当接触系数分别取6、11时,分别用于模拟中度发热缺陷和重度发热缺陷,设置存在单相、两相发热缺陷情况。电缆中间接头存在发热缺陷的仿真结果如图9所示。

在中度发热缺陷的情况下,发热缺陷处电缆接头表面存在局域化高温热点。未加装防爆盒时,接头表面温度最高的部位为接头两端;加装防爆盒后,发热缺陷处温度最高,单相、两相发热缺陷下最高温度分别为47.85、50.6℃。在单相及两相重度发热缺陷情况下,接头表面峰值温度分别为64.7℃和67.9℃,对比正常表面峰值温度43.6℃,峰值温度位置不变,表面峰值温度分别上升了48.39%和55.73%。

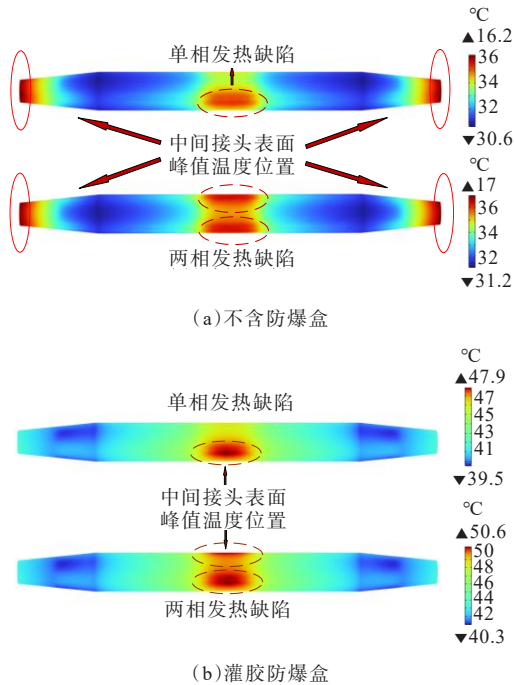


图 9 中度发热缺陷下中间接头表面温度分布

Figure 9 Surface temperature distribution of intermediate joint under moderate heating defect

### 3 讨论

本文通过模拟绝缘老化及接续管发热缺陷,根据仿真结果分析,提出了含防爆盒的电缆中间接头异常发热监测方法及判据。

当灌胶防爆盒内中间接头绝缘材料老化,表面温度变化较小,温升峰值在接续管两端位置,发现绝缘老化现象对于实际温度监测精度要求较高。

灌胶防爆盒内电缆中间接头接续管处存在发热缺陷,表面温度峰值均出现在发热缺陷处,即接续管对应外表面。单相、两相中度及重度发热缺陷等情况下峰值温度相较无缺陷中间接头分别上升 9.75%、16.06%、48.39%、55.73%,具体温度分布如图 10 所示。

在实际电缆中间接头温度监测时,难以精确定位存在发热缺陷的接续管发热峰值的实际位置<sup>[27]</sup>,故测量中间接头接续管中心处中间接头外表面径向一圈的多点温度来判断缺陷。电缆线芯呈三相对称分布,且仿真结果表明单相发热缺陷会导致接头外表面周向约六分之一区域内的出现异常温升。基于此,沿圆周方向以 60°为间隔均匀布设 6 个测温点,以实现周向热梯度特征的全域监测。

傅里叶级数在电缆接头表面温度分布建模中展现出显著优势,其基于正交性与谐波分解原理,

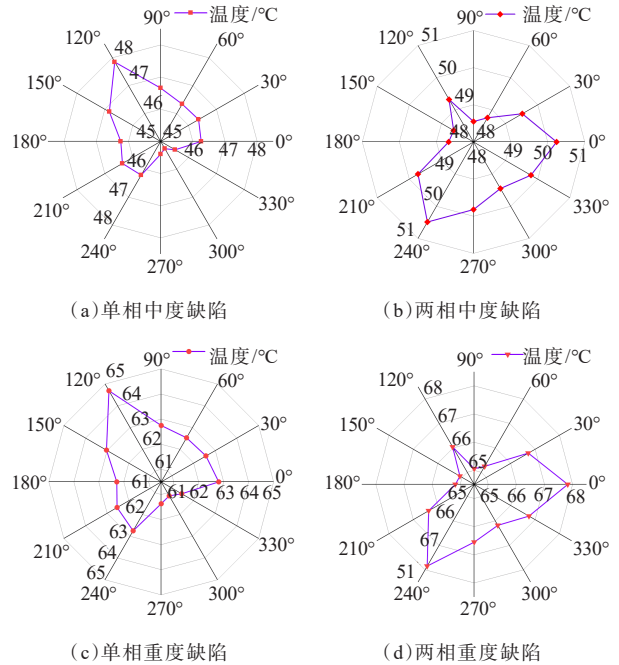


图 10 不同发热缺陷下接续管中心处接头表面径向温度

Figure 10 Radial temperature distribution of joint surface at center of splice tube under different heating defects

通过叠加不同频率的正弦和余弦基函数,能够严格满足周期性边界条件,并高保真度逼近非线性温度分布特征(如局部极值、多峰形态)。经过多次仿真数据拟合发现,傅里叶三次谐波模型拟合度最优,得到拟合函数为

$$T(\theta) = a_0 + \sum_{k=1}^3 (a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)) \quad (6)$$

式中, $\theta$ 为位置角度变量; $a_0$ 为直流分量; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别为一次、二次、三次谐波正弦项系数; $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 分别为一次、二次、三次谐波余弦项系数。

以存在单相中度缺陷的试样为例,提取 0°(360°)、60°、120°、180°、240°、300°位置对应的温度数据,具体拟合结果如图 11 所示。

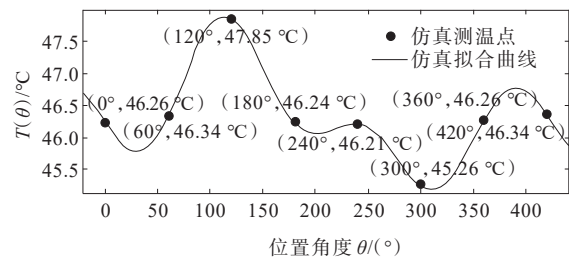


图 11 仿真数据拟合结果

Figure 11 Simulation data fitting results

由拟合结果可知,该拟合度极高,可以较为准确地拟合出表面温度径向分布。对拟合函数求极值,得到表面峰值温度为 47.9°C,与仿真峰值温度

47.85 °C 误差仅为 0.1%。

故灌胶防爆盒内电缆中间接头接续管处异常发热缺陷判别流程如图 12 所示。

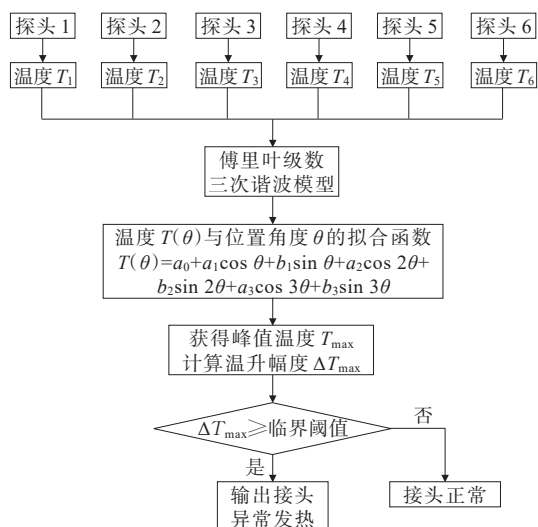


图 12 发热缺陷判别流程

Figure 12 Heating defect identification process

中间接头由 YJV-26/35-3×240 型号电缆压接得到, JY-1000 交直流大电流发生器给中间接头提供 300 A 三相交流电, 通过热电偶得到接头表面温度数据, 现场试验平台及结果如图 13、14 所示。

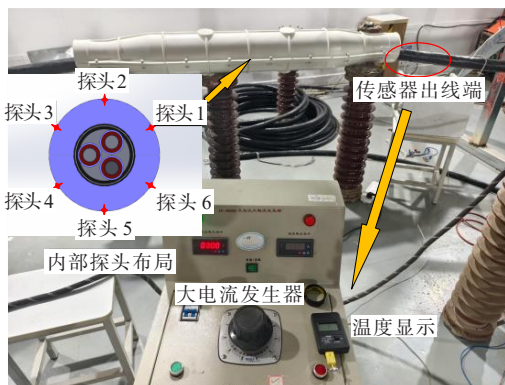


图 13 现场试验平台

Figure 13 Field test platform

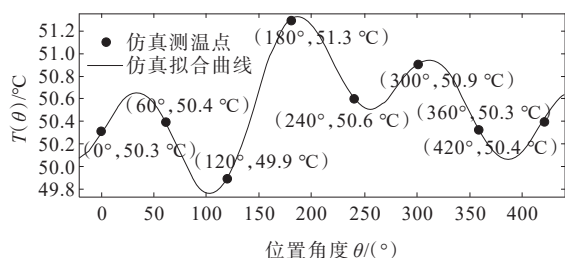


图 14 试验数据拟合结果

Figure 14 Experimental data fitting results

试验电缆中间接头接续管部位存在显著的压接缺陷, 现场在接头表面设置 6 个测温点, 根据实验数据进行傅里叶三次谐波模型拟合得到如图 14 所示, 拟合度为 1, 求解极值得出接头表面峰值温度为 51.43 °C, 峰值温度处的温升幅度为 17.96%, 符合典型中度发热缺陷特征, 故试验验证 6 点测温对于实际监测电缆接头缺陷处的发热情况具有可行性。

### 4 结语

本文对 35 kV 含防爆盒三芯电缆中间接头三维模型进行多物理场仿真研究, 考虑接触电阻的影响, 模拟绝缘老化、发热缺陷等情况, 得出以下结论。

1) 加装灌注聚氨酯胶的防爆盒使电缆中间接头载流量下降 12.77%; 对于加装灌胶防爆盒的电缆中间接头, 绝缘老化对表面温升影响较小。

2) 灌胶防爆盒高热阻界面引发的热边界层重构效应使得轻中度发热缺陷下, 接头表面温度极值区由传统端部集中迁移至接续管对应外表面区域, 单相、两相缺陷温升分别达到 11.65、13.3 °C; 当缺陷热源强度超过临界阈值时, 热穿透效应占据主导, 温度场极值点与缺陷位置呈现强空间耦合特性。

3) 对防爆盒内电缆中间接头异常发热监测提出一种基于傅里叶拟合的 6 点温度分布识别方法, 通过利用傅里叶级数展开至三次谐波对 6 个温度数据进行拟合, 求解极值得到峰值处温升幅度, 以此判断发热缺陷, 实验验证监测方法有效。

防爆盒内电缆中间接头发热缺陷识别方法基于仿真结果得到, 实验室的试验验证环境较为理想化, 而电缆的实际运行环境更加复杂, 后续将针对运行环境、负荷电流的变化对识别方法及判据进行优化改进。

### 参考文献:

[1] 秦睿, 杨鑫, 黎昊聪, 等. 10 kV 交流三芯电缆改直流运行下的载流量研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(7): 83-93.

QIN Rui, YANG Xin, LI Haocong, et al. A study on the current carrying capacity of the 10 kV AC three-core cable under DC operation[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(7): 83-93.

[2] 何宁辉, 周秀, 马波, 等. 基于神经网络和温度特性曲线的电缆故障率估计[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 169-174.

HE Ninghui, ZHOU Xiu, MA Bo, et al. Cable failure

- rate estimation based on neural network and temperature characteristic curve[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(4): 169-174.
- [3] 张成,李洪飞,杨延滨,等.交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J].*绝缘材料*, 2020, 53(7): 1-11.  
ZHANG Cheng, LI Hongfei, YANG Yanbin, et al. Research progress in ageing, evaluation, and rejuvenation of XLPE cable insulation[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(7): 1-11.
- [4] WU R N, CHANG C K. The use of partial discharges as an online monitoring system for underground cable joints [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(3): 1585-1591.
- [5] 唐科,阮江军,唐烈峥,等.三芯电缆接头温度场计算[J].*高电压技术*, 2019, 45(11): 3571-3578.  
TANG Ke, RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, et al. Temperature field calculation of three core cable joint[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(11): 3571-3578.
- [6] 闫先国,王静芝,林莉,等.电缆中间接头温度场特性研究[J].*电工技术*, 2023(21): 139-142.  
YAN Xianguo, WANG Jingzhi, LIN Li, et al. Study on temperature field characteristics of cable intermediate joints[J]. *Electric Engineering*, 2023(21): 139-142.
- [7] 徐翀,王鹏博,杨帆,等.三芯电缆中间接头压接缺陷多物理场及温度梯度场分析[J].*高电压技术*, 2024, 50(4): 1769-1780.  
XU Chong, WANG Pengbo, YANG Fan, et al. Analysis of multi-physics field and temperature gradient field of crimping defects on intermediate joints on the three-core cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(4): 1769-1780.
- [8] 曾令诚,刘永,孟晨旭,等.110 kV单芯电缆中间接头温度轴向感知模型的材料参数敏感性[J].*电网与清洁能源*, 2024, 40(3): 41-50.  
ZENG Lingcheng, LIU Yong, MENG Chenxu, et al. A study on the material parameter sensitivity of the intermediate joint temperature axial sensing model of 110 kV single core cable[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2024, 40(3): 41-50.
- [9] 孙源文,江丽,张卫东,等.绝缘老化对自熔式电缆中间接头界面电场及温度场分布的影响[J].*电工技术*, 2023(9): 165-169.  
SUN Yuanwen, JIANG Li, ZHANG Weidong, et al. Effect of insulation aging on the distribution of electric field and temperature field at the interface of self-melting cable intermediate joint[J]. *Electric Engineering*, 2023(9): 165-169.
- [10] 韩忠辉,杨宝东,杨博盛.基于表面温度场的电缆老化红外诊断研究[J].*舰船电子对抗*, 2015, 38(3): 117-120.  
HAN Zhonghui, YANG Baodong, YANG Bosheng. Research into infrared diagnose of cable aging based on surface temperature field[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2015, 38(3): 117-120.
- [11] 胡丽斌,陈杰,赖庆波,等.高压电缆缓冲层白斑缺陷引发放电的机理研究[J].*高压电器*, 2025, 61(1): 155-164.  
HU Libin, CHEN Jie, LAI Qingbo, et al. Study on discharge mechanism by white spot defect in cable buffer layer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(1): 155-164.
- [12] 侯澳港,董旭柱,阮江军,等.基于主热流分析的三芯电缆接头热点温度反演辨识方法及试验验证[J/OL].*高压电器*, 1-13[2025-03-14]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20240307.1017.002>.  
HOU Aogang, DONG Xuzhu, RUAN Jiangjun, et al. Inversion identification method and experimental verification of hot spot temperature in three-core cable joints based on main heat flow analysis[J/OL]. *High Voltage Apparatus*, 1-13[2025-03-14]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20240307.1017.002>.
- [13] 邓显波,朱淳,王立壮,等.防爆防火保护盒对电缆接头载流量的影响[J].*电工技术*, 2019(24): 18-20.  
DENG Xianbo, ZHU Chun, WANG Lizhuang, et al. Effect of explosion-proof and fire-proof protection box on current carrying capacity of cable joints[J]. *Electric Engineering*, 2019(24): 18-20.
- [14] 陶怡青,舒胜文,董懿飞,等.防火防爆装置对10 kV三芯电缆中间接头温升及载流量的影响[J].*福州大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(5): 642-649.  
TAO Yiqing, SHU Shengwen, DONG Yifei, et al. Influence of fire-proof and explosion-proof devices on temperature rise and ampacity of 10 kV three-core cable middle joint[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(5): 642-649.
- [15] 陈杰,李陈莹,陶风波,等.防火防爆盒安装状态下三芯电缆中间接头温度场仿真研究[J].*高压电器*, 2024, 60(11): 123-130.  
CHEN Jie, LI Chenying, TAO Fengbo, et al. Study on temperature field simulation of three-core cable joint with installation of fire-proof and explosion-proof box [J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(11): 123-130.
- [16] 孙欣宇,王宜静,杨浩烁,等.10 kV电缆中间接头结构参数统计分析[J].*南方电网技术*, 2023, 17(6): 136-144.  
SUN Xinyu, WANG Yijing, YANG Haoshuo, et al. Statistical analysis of structural parameters of 10 kV cable intermediate joints[J]. *Southern Power System Technology*, 2023, 17(6): 136-144.
- [17] 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.

- [18] 梁栋,王琪瑄,白晓焯,等. 聚氨酯发泡胶热传导性能研究及其在 110 kV 电缆接头中的应用[J]. 绝缘材料, 2024, 57(12): 116-123.  
LIANG Dong, WANG Qixuan, BAI Xiaoye, et al. Research on thermal conductivity of polyurethane foam adhesive and its application in 110 kV cable joints[J]. Insulating Materials, 2024, 57(12): 116-123.
- [19] 王雪倩, 聂一雄, 李哲, 等. 基于工频磁场的电缆路径定位及其影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 96-104.  
WANG Xueqian, NIE Yixiong, LI Zhe, et al. Analysis of cable path location and its influencing factors based on power frequency magnetic field[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 96-104.
- [20] 曾令诚, 孟晨旭, 罗海鑫, 等. 三芯电缆接头轴向温度反演模型及其材料参数敏感性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(8): 94-103.  
ZENG Lingcheng, MENG Chenxu, LUO Haixin, et al. An inverse model for axial temperature in three-core cable joints and sensitivity analysis of material parameters[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 94-103.
- [21] 邓红雷,李力行,涂画,等. 基于改进TFDR法的核电站仪控电缆断裂缺陷检测[J]. 电力工程技术,2024,43(4): 177-185.  
DENG Honglei, LI Lixing, TU Hua, et al. Fracture detection of I&C cable in NPP based on improved TFDR method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024,43(4):177-185.
- [22] 余建宁, 江波, 唐玲, 等. 一种三芯电缆状态在线监测与短路故障定位方法的研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 91-97+105.  
SHE Jianning, JIANG Bo, TANG Ling, et al. Method for on-line monitoring and short-circuit fault location of three-core cables[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 91-97+105.
- [23] KIM W J, KIM H J, CHO J W, et al. Electrical and mechanical characteristics of insulating materials for HTS DC cable and cable joint[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 7701004.
- [24] 张帆,王景兵,齐朋帅,等. 高低温和硬度对电缆附件硅橡胶材料绝缘性能的影响及机理分析[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 102-110.  
ZHANG Fan, WANG Jingbing, QI Pengshuai, et al. Influence of hot-cold temperature and hardness on insulation performance of silicone rubber material of cable accessories and mechanism analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 102-110.
- [25] 张东东, 江成洲, 张金华, 等. 基于改进自适应滤波的隧道磁电阻传感器外磁场干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4327-4334.  
ZHANG Dongdong, JIANG Chengzhou, ZHANG Jinhua, et al. External magnetic field interference suppression method for tunnel magnetoresistive sensor based on improved adaptive filtering[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4327-4334.
- [26] 黄博, 杨铭远, 聂永杰, 等. 绝缘材料热老化对电缆终端接头典型缺陷处电场畸变的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 124-132.  
HUANG Bo, YANG Mingyuan, NIE Yongjie, et al. Effect of insulating materials thermal aging on electric field distortion of typical defects in cable terminal joints [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 124-132.
- [27] 郭永玉, 方春华, 周固, 等. 基于超声的高压电缆中间接头多层结构定位检测[J]. 现代电子技术, 2024, 47(18): 35-40.  
GUO Yongyu, FANG Chunhua, ZHOU Gu, et al. Ultrasonic based multi-layer structure location detection of high-voltage cable intermediate joint[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(18): 35-40.