

基于 COMSOL 的电缆附件温度场与电势分布仿真研究及细节分析

李嘉成 吴非 李汶璇 王琦 谭咏诗

广东电网有限责任公司肇庆供电局

DOI:10.12238/pe.v3i3.13621

[摘要] 为深入研究电缆附件在不同载流量条件下的温度分布及电势特性,本文基于COMSOL Multiphysics建立了电缆接头的三维有限元仿真模型,系统分析了电缆附件内部的温度场与电势分布特征。研究表明,随载流量增加,电缆缆芯区域的温度和电势显著升高,成为温度和电势分布的热点区域;绝缘层与金属屏蔽层的温度和电势分布呈现出明显的梯度特性,体现了良好的热缓冲与电场均化效果。同时,研究通过仿真数据建立了载流量与接头最高温度的预测模型,为电缆附件的安全运行与优化设计提供理论指导和工程依据。

[关键词] COMSOL; 温度场; 有限元仿真; 温升预测模型

中图分类号: O354.7 **文献标识码:** A

Study and detail analysis of temperature field and potential distribution of cable accessories based on COMSOL

Jiacheng Li Fei Wu Wenxuan Li Qi Wang Yongshi Tan

Guangdong Power Grid Co., LTD. Zhaoqing Power Supply Bureau

[Abstract] To conduct an in-depth study on the temperature distribution and potential characteristics of cable accessories under different current-carrying conditions, this paper establishes a three-dimensional finite element simulation model for cable joints based on COMSOL Multiphysics. It systematically analyzes the temperature field and potential distribution characteristics within the cable accessory. The research shows that as the current-carrying capacity increases, the temperature and potential in the core area of the cable significantly rise, becoming hot spots for temperature and potential distribution. The temperature and potential distribution in the insulation layer and metal shielding layer exhibit clear gradient characteristics, demonstrating excellent thermal buffering and electrical averaging effects. Additionally, the study establishes a predictive model for current-carrying capacity and the highest temperature at the joint through simulation data, providing theoretical guidance and engineering basis for the safe operation and optimized design of cable accessories.

[Key words] COMSOL; temperature field; finite element simulation; temperature rise prediction model

引言

随着电力系统负荷的持续增长,高压电缆广泛应用于大容量、高密度输电网络中。作为电缆系统的重要连接单元,电缆接头长期处于复杂的运行工况下,其运行状态直接影响整个输电网络的安全性与可靠性。然而,由于接头结构复杂、材料界面多样且热电特性差异明显,局部电流密度易于集中,导致电缆附件易出现局部过热现象,诱发绝缘材料的热老化、局部放电甚至发生热击穿事故,严重威胁电力系统的运行安全。

针对上述问题,目前针对电缆附件运行状态的研究主要采

用试验测试与数值仿真两种方法。试验测试方法虽然能够提供真实可靠的数据,但普遍存在成本高、周期长、难以捕捉内部细节信息的不足;而数值仿真尤其是有限元方法(FEM)则可有效实现电缆附件内部热电状态的精细化分析,具有灵活性高、分析周期短且可重复性强的优势。其中,COMSOL Multiphysics多物理场耦合仿真平台能够有效实现电磁场与温度场之间的耦合计算,适用于复杂的电热多物理场分析,为深入研究电缆附件热效应问题提供了强有力的技术手段。

然而,目前已有研究中,多数仅关注电势场或温度场的单独

分析,缺乏对两者内在耦合机制与相互作用的深入探讨。因此,深入揭示电缆附件在不同载流条件下温度与电势之间的耦合关系,成为亟待解决的科学与工程问题。基于此,本文依托COMSOL Multiphysics软件平台,构建了高压电缆接头的三维有限元仿真模型,系统分析了电缆附件内部温度场和电势分布特性,并进一步探索了二者之间的内在联系与耦合机理。此外,本文在仿真分析基础上提出载流量-最高温度预测模型,可实现电缆附件运行温升的快速预测与评估。

1 理论基础与仿真方法

1.1 电缆接头发热机理

电缆接头内部的热量主要来源于以下两部分:

- (1) 导体电阻发热,即欧姆损耗;
- (2) 绝缘界面介质损耗,尤其在交界区域尤为明显。

在高负荷条件下,接头内部由于结构过渡、材料变化导致局部电流密度集中,进而形成热点区,加速绝缘老化。

电缆接头发热问题的根本原因在于电流通过导体与绝缘材料交界面时产生的电阻损耗和介质损耗,这在高压电缆附件中尤为突出。已有研究表明,电缆接头内部热量主要来自导体的欧姆损耗及绝缘层交界处的介质损耗,这两种损耗直接受到材料导电性能、电流密度分布、载流量大小的影响^[1]。尤其在高负荷运行时,电流密度的不均匀分布极易在局部区域形成热点区,加速绝缘材料老化甚至诱发局部放电事故^[3]。

针对电缆接头的温度场分析,通常基于傅里叶热传导定律与能量守恒定律建立数学模型,计算过程中需综合考虑热源分布、材料导热性能及边界传热方式等因素^[4]。傅里叶定律为温度场求解提供了基本框架,进而可构建电-热耦合仿真模型^[5],此外,电势分布的分析一般基于电磁场理论,常通过求解麦克斯韦方程组来实现^[6]。本文的研究对象高压电缆接头,温度场与电势场之间的相互作用尤为重要,因为温度的升高会明显影响材料的电导率,进而改变电缆内部的电势分布。

本文采用有限元方法(Finite Element Method, FEM)进行电缆接头的电热耦合分析,这是由于FEM在处理复杂边界条件和非均质材料结构方面具有明显优势,已被广泛应用于电力系统的多物理场分析中。特别是COMSOL Multiphysics多物理场仿真软件,因其强大的耦合计算能力以及友好的操作界面,已成为工程领域解决电热耦合问题的重要工具。

为确保仿真结果的准确性与工程适应性,模型中详细引入了接头结构真实参数及关键物理属性,包括导热系数、电导率、介电常数等,所用数值参考相关文献与国家标准,确保了模拟边界与材料行为的物理一致性^[7]。

从热传导角度出发,为准确获取电缆接头内部温度场分布,需明确其发热机制、传热路径及边界热交换特性。接头在运行过程中主要通过导体内部电阻损耗及绝缘界面介质损耗产生热量,内部各层材料之间以热传导为主,而外表面则通过与环境空气间的自然对流进行散热^[2]。热量从导体核心沿径向扩散,形成非均匀的稳态或瞬态温度分布,为后续的热风险评估与老化预

测提供了基础数据支撑。

1.2 温度场边界条件

在分析电缆接头内部温度场时,傅里叶定律与能量守恒原理构成数值计算的理论基础。在直角坐标系下,温度场的控制方程可表示为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q_v = 0$$

式中, ρ 代表表示材料密度(单位: kg/m^3); c 表示比热容(单位为: $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) T 代表时间变量; T 表示为温度随时间的函数(单

位: K); λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别代表分别表示材料在 x 、 y 、 z 三

个方向上的导热系数(单位: $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); Q_v 表示单位体积内部的热源项(单位: W/m)。该控制方程用于描述电缆接头内部热量传递的平衡状态,即单位时间内导体与绝缘材料各层之间的热交换过程应满足内能变化率等于导入与导出热量之差的关系。

2 仿真结构

2.1 几何与材料建模

在我国新建的高压电缆工程中,整体预制型电缆接头被广泛采用。此类接头在制造过程中,将半导体层、主绝缘及应力锥预制为一个整体结构,并根据电缆附件的实际几何尺寸进行精确匹配。根据电缆附件的实际几何形状,由于电缆中间接头呈回旋体结构,其几何形状和边界条件均具有轴对称特性,因此可将其简化为二维模型以进行数值分析。同时,基于轴截面的建模方式可显著降低计算复杂度。本文借助COMSOL Multiphysics软件的几何建模功能,构建了二维仿真模型。该模型全面考虑了缆芯、绝缘层、金属屏蔽层等关键结构,准确设定了各部件的尺寸及其相对位置。 $\pm 10\text{kV}$ 高压直流电缆中间接头的仿真模型如图1所示。

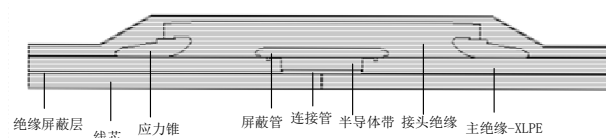


图1 电缆中间接头仿真模型

仿真模型中各结构层自内向外的材料组成及其尺寸参数详见表1-1。

表1 电缆中间接头仿真模型材料及尺寸

名称	材料	厚度	长度
屏蔽管	半导体材料	15	290
线芯	铜	-	900
连接管	铜	18	234
主绝缘	XLPE	16	-
应力锥	半导体材料	-	70
半导体带	半导体材料	5	-
绝缘屏蔽层	半导体材料	1	-
接头绝缘	EPDM	40	-

根据电缆附件的实际材料,详细设置了相应的材料属性,包括导热系数、电阻率、介电常数等。这些参数对于仿真结果的准确性具有重要影响。例如,对于绝缘材料,我们查阅了相关文献和资料,获取了其在不同温度下的导热系数和介电常数,并将其输入COMSOL模型中。

表2 电缆接头材料参数

结构	电导率	相对介电常数	导热系数 /(W/(m·K))	密度 /(kg/m ³)	恒压热容 /(J/(kg·K))
屏蔽管	1e-8	200	0.17	1030	2000
线芯	σ_c	1e6	400	8940	385
连接管	σ_c	1e6	400	8940	385
主绝缘	1e-15	2.3	0.4	1200	2500
半导体带	2	500	0.29	2500	1100
应力锥	1.59e-8	200	0.29	2500	1100
绝缘屏蔽层	1e-6	500	0.29	1100	2500
接头绝缘	1e-16	2.78	2.78	1100	2500

由于温度与金属导体的电导率相互关联,导体的电导率会随着温度的变化而发生改变,其关系可通过如下函数形式表达:

$$\sigma_c = \frac{5.99 \times 10^7}{(1 + 3.86 \times 10^{-3} (T_c - 20))}$$

式中, T_c 代表当前变化的温度值,单位为℃。

2.2 边界条件及载荷设置

在仿真过程中,载流量通过电流密度边界条件施加于电缆缆芯,以模拟不同工况下的运行状态;环境温度则通过温度边界条件设定为恒定的20℃,用于反映实际运行环境。由于电缆接头直接与空气接触,采用自然对流换热方式,设置对流换热系数为12.5W/(m²·K)。此外,为模拟电缆附件内部的电场分布,还引入了电势边界条件。假设电缆附件外部边界电势为零,通过对缆芯电势分布的求解,进而获得整个电缆附件内部的电场分布情况。此外,为了模拟电缆附件内部的电场分布,我们还设置了电势边界条件。在仿真过程中,我们假设电缆附件的外部边界电势为零,通过计算电缆缆芯的电势分布,得到了整个电缆附件内部的电场分布。

2.3 网格划分与求解器设置

网格划分是有限元仿真中的关键步骤之一,为确保仿真结果的准确性与稳定性,对电缆附件模型进行了精细化处理。在三维电缆接头模型中,采用用户控制网格方式进行划分,并选用四面体单元作为离散单元类型,以兼顾求解精度与计算效率。

鉴于电缆接头各结构层中电场与温度场的梯度分布差异明显,本文采用了分区域精细化网格划分策略。在缆芯导体、金属

屏蔽层及不同材料交界位置,电场梯度变化显著,尤其是绝缘层的界面区域作为本文研究的重点区域,因此在此类位置采用高密度网格划分,最小单元尺寸设置为0.3mm。相较之下,在介质性质均匀、场强和温度梯度变化平缓的区域,为提升计算效率,则选取较为疏松的网格结构,最小单元尺寸为6mm。该区域分级划分方案在保证模拟精度的前提下,显著提升了整体计算效率。三维电缆接头的最终网格生成效果如图2所示。

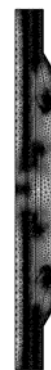


图2 网格划分图

3 仿真结果与分析

电缆缆芯在高载流条件下因电流密度集中而迅速升温,这种局部温升进一步导致金属导体电导率的变化,使得局部区域电势显著升高。由此形成的电热耦合现象不仅加剧了绝缘材料的电场不均匀性,也增加了局部热点区域的热应力,这种互相强化的机制成为电缆附件老化乃至发生热击穿事故的重要诱因之一。

通过COMSOL Multiphysics有限元仿真软件,对电缆缆芯在不同载流量下的电缆附件温度场与电势分布进行了详细模拟与分析。

3.1 电势分布分析

仿真结果表明,随着载流量的增加,电缆附件内部各结构层的电场分布亦发生了相应变化,具体表现如下:

缆芯区域由于承载主电流,其电势随载流量的增大而逐步升高,成为整个电缆附件中电势最高的部位,且电势集中现象明显增强。

绝缘层内部的电势分布受缆芯电势变化影响,整体呈现随缆芯电势升高而缓慢上升的趋势。沿径向方向,绝缘层电势呈现出由内向外逐渐递减的梯度分布,靠近缆芯的区域电势较高,远离缆芯的区域电势较低,电势变化梯度较为平滑。

金属屏蔽层由于具有优异的导电性能,能够快速均匀地分散电荷,因此其电势分布在不同载流量条件下保持高度均匀,变化幅度极小。仿真过程中观测到,金属屏蔽层整体电势基本保持恒定,且与缆芯、绝缘层之间形成清晰的电势过渡界面。

上述变化规律反映出电缆接头内部不同材料层在电磁负载变化下的电场响应特性,为后续温升分析和绝缘设计提供了理论依据。

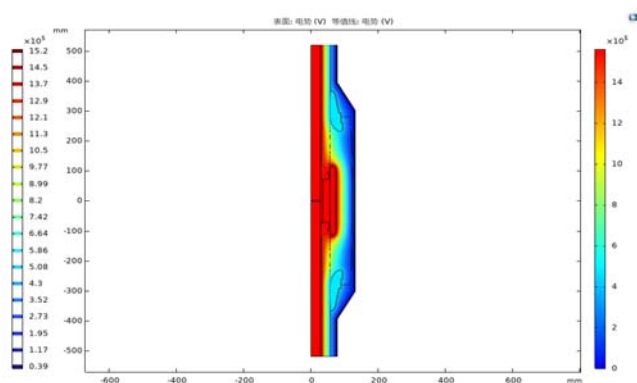


图3 电势分布

3.2温度场分布分析

仿真结果显示,随着载流量的增加,电缆附件的温度逐渐升高,且温度场分布呈现出明显的梯度

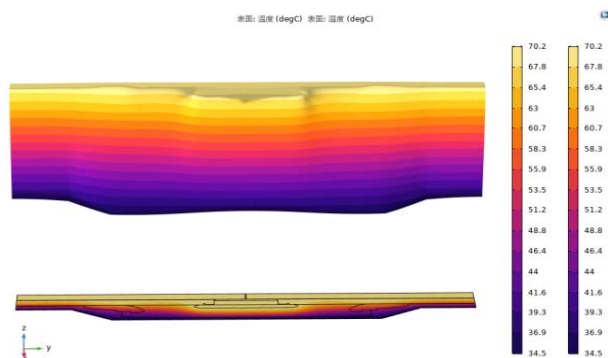


图4 1600A下电缆中间接头温度整体分布及高度图

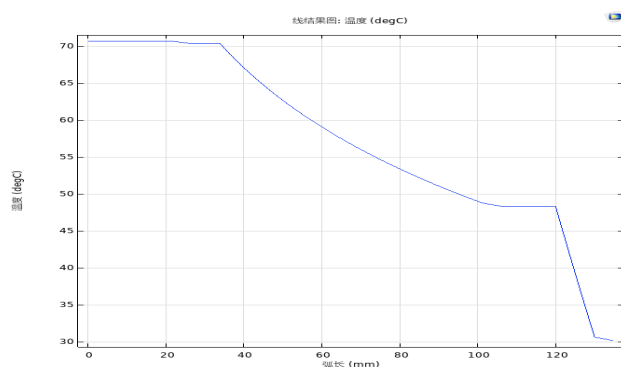


图5 轴向温度图

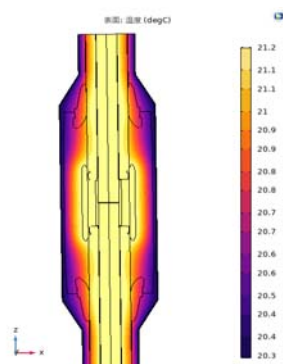


图6 不同载流量(50A、600A、1600A)下温度分布

在不同载流量条件下,电缆接头内部各结构层的温度分布规律存在明显差异。具体表现如下:

缆芯区域由于承载主电流,其温度随载流量增加而迅速上升,成为电缆接头内部温度最高的部位。温度峰值通常出现在接头连接管中心附近,并呈现出向两端逐渐递减的分布趋势。随着距离接头中心位置的增加,导体内部温度梯度逐渐减小,体现出典型的轴向导热特性。

绝缘层的温度受缆芯热量传导影响,整体呈现随缆芯温升而缓慢上升的趋势。温度分布上,靠近缆芯一侧温度较高,远离缆芯一侧温度逐步降低,形成明显的径向温度梯度。绝缘层内部温度变化平缓,升温速率低于导体区域,表现出良好的热缓冲作用。

金属屏蔽层由于材料热导率较高,其内部温度分布相对均匀。虽然随着载流量增加整体温度水平同步上升,但升温幅度较小,且各位置温度差异不明显,表现出良好的热扩散特性。

此外,仿真结果显示,导体与绝缘层交界面处温度梯度的形成伴随着显著的电势梯度增加。这种梯度相互作用显著提高了局部电场强度,增加了绝缘界面发生局部放电的风险;同时,高温区域进一步降低了绝缘材料的耐电性能,两者叠加效应明显,直接影响电缆附件的安全运行可靠性。

接头导体轴向温度分布如图5所示,进一步验证了上述分析结论。

3.3温升预测模型建立

依据不同载流量下仿真提取的最高温度数据,采用三次多项式进行拟合,其拟合公式如下所示:

$$T_{\max} = 4.91 \times 10^{-9} I^3 + 1.94 \times 10^{-6} I^2 + 0.014 I + 23.38$$

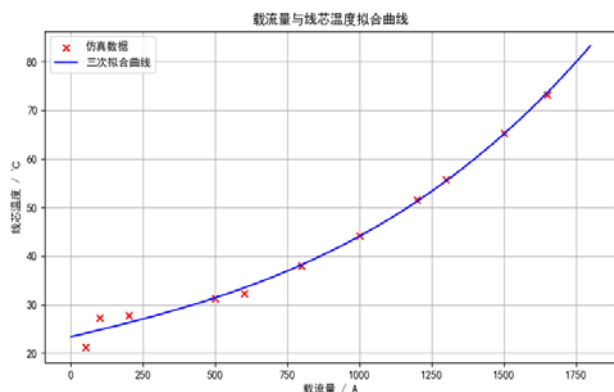


图7 载流量与线芯温度拟合曲线图

4 结论与展望

本文通过COMSOL Multiphysics有限元仿真软件,对电缆缆芯在不同载流量下的电缆附件温度场与电势分布进行了详细模拟与分析。仿真结果表明,随着载流量的增加,电缆附件的温度逐渐升高,且温度场分布呈现出明显的梯度变化。同时,电缆附件内部的电场分布也受到载流量的影响,呈现出相应的变化趋势。这些仿真结果对于提高电缆附件的性能稳定性与安全性具有重要意义。

未来研究可以进一步考虑更多影响因素,如电缆附件的老化、环境因素(如湿度、腐蚀等)对温度场和电势分布的影响。此外,还可以将仿真结果与实验结果进行对比分析,以验证仿真模

型的准确性。同时,随着计算机技术的不断发展,我们可以探索更先进的仿真技术和方法,以提高仿真效率和精度。

[基金项目]

国家自然科学基金(52007094);广东电网有限责任公司科技项目(031200KC2303000(GDKJXM20230277))。

[参考文献]

[1]但京民,李文清,崔戎舰,等.油纸及XLPE绝缘高压直流电缆的电场分布特性研究[J].绝缘材料,2024,57(07):84-93.

[2]郭家虎,苏宁.基于COMSOL仿真的终端电磁热场缺陷温度场分析[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2024,44(05):54-63.

[3]郝云倩.含缺陷的XLPE电缆接头电磁-热特性研究[D].成都:成都理工大学,2023.

[4]蒲路,段玮,孙骥.基于有限元法的单芯电缆接头线芯温度计算[J].电网与清洁能源,2021,37(02):57-63.

[5]魏艳慧,郑元浩.绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J].电工技术学报,2022,37(15):3932-3940.

[6]张玉,江思傲,罗强.基于电-磁-热耦合的脐带缆截面温度场分析[J].船舶工程,2024,46(12):148-154.

[7]王昱力,黄凯文,王格,等.基于Comsol仿真的高压直流电缆附件材料电导率特性研究[J].高压电器,2023,59(09):258-267.

作者简介:

李嘉成(1995--),男,汉族,广东广州人,本科,工程师,研究方向:输电电缆。