

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.019

110 kV 交联聚乙烯电缆载流量提升方法

朱 婷^{1,2}, 林宇辰^{1,2}, 严有祥³, 陈 果⁴, 陈 龙^{1,2}

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024;

2. 厦门市高端电力装备及智能控制重点实验室, 福建 厦门 361024;

3. 国网福建省电力公司厦门供电公司, 福建 厦门 361006; 4. 太阳海缆(东山)有限公司, 福建 漳州 363400)

摘要: 针对电缆沟敷设方式土地资源利用率低和排管沟敷设方式散热能力不良的问题, 为提高有限空间范围的电缆载流量, 构建了 110 kV 交联聚乙烯电缆磁-热-流多物理场耦合有限元仿真模型, 分别模拟计算了电缆沟与排管两种典型敷设方式的电缆载流量和排管敷设方式下管外敷设混凝土、使用高导热排管、管内添加回填材料 3 种方法对提升电缆载流量的影响, 并基于正交试验对回填材料进行改进, 得到回填材料最优配比。研究结果表明, 在高导热排管外浇筑混凝土、管内添加最优配比的改进回填材料能大幅提升电缆载流量, 相较于电缆沟敷设方式单回路提升了 31.64%, 双回路提升了 18.49%。

关键词: 交联聚乙烯电缆; 载流量; 多物理场耦合; 回填材料

中图分类号: TM757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)06-0158-08

Method for improving current carrying capacity of 110 kV cross-linked polyethylene cable

ZHU Ting^{1,2}, LIN Yuchen^{1,2}, YAN Youxiang³, CHEN Guo⁴, CHEN Long^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Xiamen Key Laboratory of Frontier Electric Power Equipment and Intelligent Control, Xiamen 361024, China;

3. State Grid Fujian Electric Power Company Xiamen Power Supply Company, Xiamen 361006, China;

4. Sun Submarine Cable (Dongshan) Co., Ltd., Zhangzhou 363400, China)

Abstract: To address the issues of low land resource utilization efficiency in cable trench installation and poor heat dissipation in conduit trench installation, a magnetic-thermal-current multiphysics coupled finite element simulation model of a 110 kV cross-linked polyethylene cable was constructed. The current carrying capacity of both the cable trench and the conduit trench installation methods was simulated and calculated. The effects of three methods, laying concrete outside the conduit in the conduit trench installation method, using high thermal conductivity conduits, and adding backfill materials inside the conduit, on increasing the current carrying capacity of the cable were investigated. Based on the orthogonal experiment, the backfill material was improved to obtain the optimal ratio of the backfill material. The research results show that by pouring concrete outside the high thermal conductivity conduits and adding improved backfill materials with the optimal proportion inside the conduit, the current carrying capacity of the cable can be significantly enhanced. Compared with the cable trench installation method, this approach increases single-circuit capacity by 31.64% and dual-circuit capacity by 18.49%.

Key words: cross-linked polyethylene cable; current carrying capacity; multiphysics coupled; backfill material

随着“双碳”目标的深入实施, 现代城市建设对电力电缆传输能力提出了更高的要求^[1-2]。载流量是电力电缆传输能力的直接表征参数, 不同的敷设方式和周围环境对电缆载流量有显著影响, 进而影响其传输的经济性^[3-4]。排管与电缆沟是最为常见的两种电缆敷设方式, 其中电缆沟具有容纳线路数量多、便于运维检修等优点, 在电力线路走廊建设中得到了广泛应用^[5-6]。电缆沟占地面积大、成本高, 而排管具有占地面积小、施工方便等优点, 适用于城镇或土地利用率要求高的地方。但排管内部空间狭小使得电缆敷设间距相应减小, 限制了电缆的散热能力, 导致排管敷设方式下的电缆载流量降低^[7-9]。如何兼顾两种敷设方式的优点,

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2022J011259)

作者简介: 朱婷(1992—), 女, 讲师, 博士, 主要从事高电压与绝缘技术研究。E-mail: 501520956@qq.com

引用本文: 朱婷, 林宇辰, 严有祥, 等. 110 kV 交联聚乙烯电缆载流量提升方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 158-165.

ZHU Ting, LIN Yuchen, YAN Youxiang, et al. Method for improving current carrying capacity of 110 kV cross-linked polyethylene cable [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 158-165.

在有限的空间范围提升电缆载流量具有现实意义。

采用回填材料改善电缆线路外部散热环境是提升排管敷设方式电缆载流量的有效措施之一,如马跃等^[10-14]根据 IEC 标准建立地下电缆传热的数学模型,模拟研究了土壤热导率和回填材料热导率对电缆载流量的影响;刘士利等^[15-17]研究了土壤孔隙率、渗透率等因素对电缆载流量的影响;于建立等^[18-19]通过大电流试验与有限元仿真模型分析了电缆载流量与低热阻回填材料热阻系数的关系。上述研究通过试验与仿真手段揭示了回填材料热物性参数对电缆载流量的影响规律,但尚未系统阐明材料组成与导热性能之间的耦合关系,亦缺乏针对低热阻回填材料的定量配方设计与优化研究。

本文以 110 kV 交联聚乙烯电缆为研究对象,建立电缆磁-热-流多物理场耦合有限元仿真模型(以下简称“仿真模型”)探究电缆排管外浇筑混凝土、使用高导热排管和排管内添加回填材料对电缆载流量的影响,旨在为新建电缆排管敷设工程提升载流量提供参考。

1 仿真模型构建

1.1 电缆结构与敷设方式

本文以一截面积为 800 mm² 的 110 kV 交联聚乙烯电缆为研究对象,具体结构尺寸与材料参数如表 1 所示,电缆共考虑 7 层结构,长度为 1 m。

110 kV 双回路交联聚乙烯电缆的两种敷设方式如图 1 所示。在电缆沟敷设方式下同回路 3 条电缆垂直放置于金属支架上,相邻两相之间中心距离为 0.3 m,两回路中心间距为 1.1 m;在排管敷设方式下同回路电缆水平放置在排管内,相邻两相之间中心距离为 0.26 m,两回路中心间距为 0.25 m,排管内部为空气,排管热导率为 0.18 W/(m·K)。

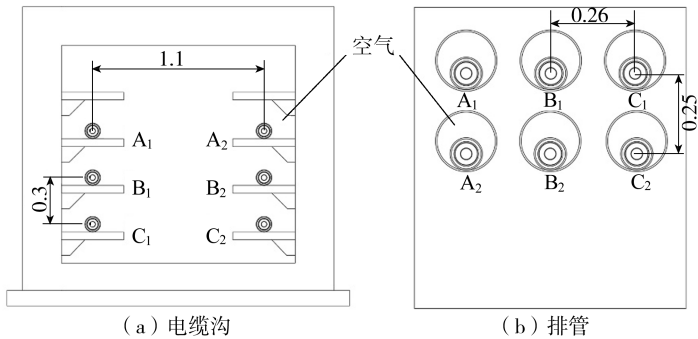


图 1 电缆敷设方式(单位:m)
Fig. 1 Installation method of cable (unit: m)

1.2 磁-热-流场控制方程

为考虑在空气流动条件下计算不同敷设方式下电缆内部磁场和热场的分布,并获得它们的最大载流量,本文首先通过有限元法构建 110 kV 交联聚乙烯电缆磁-热-流场耦合模型,其中电磁场控制方程为^[20]

$$\begin{cases} \nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} \\ \boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} + \boldsymbol{j} \omega \boldsymbol{D} + \sigma \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} + \boldsymbol{J}_e \\ \boldsymbol{E} = -\boldsymbol{j} \omega \boldsymbol{A} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度, A/m; $\boldsymbol{J}$ 为电流密度, A/m²; $\boldsymbol{B}$ 为磁通密度, T; σ 为电导率, S/m; $\boldsymbol{E}$ 为电场强度, V/m; ω 为角频率, rad/s; $\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量, C/m²; $\boldsymbol{J}_e$ 为外部激励电流密度, A/m²。

固体和流体传热场控制方程为

$$\begin{aligned} \rho C_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \boldsymbol{q} &= Q + Q_{\text{ted}} \\ \boldsymbol{q} &= -k \nabla T \end{aligned} \quad (2)$$

其中

式中: $\boldsymbol{q}$ 为热流密度矢量, W/m^2 ; ρ 为材料密度, kg/m^3 ; C_p 为材料比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\boldsymbol{u}$ 为流体速度, m/s ; Q 为电缆导体产生的焦耳热, W/m^3 ; Q_{led} 为电缆其他部分损耗产生的附加热量, W/m^3 ; k 为材料的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为材料温度, K 。

流场求解的方程是动量守恒的纳维-斯托克斯方程和质量守恒的连续性方程,其控制方程为

$$\begin{cases} \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla) \boldsymbol{u} = \nabla \cdot \{ -p \boldsymbol{I} + \mu [\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T] \} + \boldsymbol{F} \\ \rho \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{F}$ 为流体单位体积所受的体积力矢量, N/m^3 ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为流体压力, Pa ; $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

磁场模块可以获得焦耳热和磁损耗,并以热源形式作用于热场:

$$\rho C_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \tag{4}$$

其中

$$Q_e = Q_{\text{th}} + Q_{\text{ml}} \quad Q_{\text{th}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\boldsymbol{J} \cdot \boldsymbol{E}^*) \quad Q_{\text{ml}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\boldsymbol{j} \omega \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{H}^*)$$

式中: Q_e 为电磁的总发热源项, W/m^3 ; Q_{th} 为由电流引起的焦耳热, W/m^3 ; Q_{ml} 为磁损耗, W/m^3 。

由于流体会传递热量,因此热场也会受到流场变化的影响,其耦合方程为

$$Q_{\text{vd}} = \tau : \nabla \boldsymbol{u} \tag{5}$$

式中 Q_{vd} 为流体热源项, W/m^3 。

1.3 仿真模型的边界条件及其计算流程

考虑仿真计算中地面温度为 30°C , 深层土壤温度为 25°C , 左右两侧土壤热绝缘, 地面空气传热系数取 $12.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。流体场中电缆沟内部流体速度取 $0.6 \text{ m}/\text{s}$, 排管内部流体速度取 $0 \text{ m}/\text{s}$ 。根据 IEC 60287 可知, 高压交流交联聚乙烯电缆最大载流量应同时满足两个约束条件^[21]: ①导体温度不超过最高工作温度 90°C ; ②绝缘层温差不超过最大允许温差 20°C 。

将以上约束作为模型收敛条件, 并计算电缆的最大载流量, 计算过程如下: ①根据实际敷设情况建立仿真模型; ②设置初始线芯电流; ③计算考虑风速影响条件下的电缆电磁场、热场分布; ④判断是否满足收敛条件, 若满足则此电流即为最大载流量, 若不满足则进一步修正线芯电流, 并回到③进行下一个循环直至满足收敛条件。

2 不同敷设方式下电缆载流量计算

2.1 电缆沟单、双回路电缆载流量仿真计算

由于磁场和流场是通过影响热场的分布来改变电缆载流量的, 因此后文计算结果仅展示热场部分。图 2 为电缆沟单回路敷设方式下的仿真结果, 3 条电缆 B 相温度相比于 A、C 两相要高出 5.6°C , 这是因为 B 相受到上下 A、C 两相发热和临近效应的影响, 使得 B 相的损耗最大, 且散热条件最差^[22], 故该回路电缆的最大载流量取决于 B 相内部温度分布。当 B 相线芯电流为 1394 A 时, 其导体内部最大温度为 90°C 且绝缘层温差不超过 20°C , 满足约束条件。故此 110 kV 交联聚乙烯电缆在电缆沟单回路敷设方式下的最大载流量为 1394 A 。

电缆沟双回路敷设方式下的温度分布如图 3 所示, 双回路敷设方式下的电缆最大载流量为 1287 A 。由

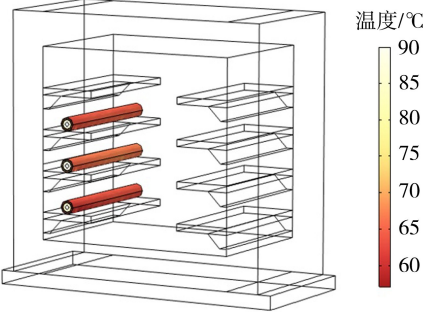


图 2 电缆沟单回路敷设方式下温度分布云图
Fig. 2 Temperature distribution contour map for single-circuit cable trench installation

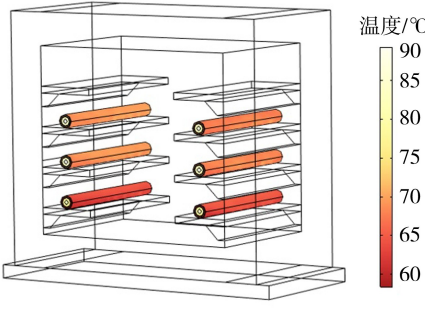


图 3 电缆沟双回路敷设方式下温度分布云图
Fig. 3 Temperature distribution contour map for dual-circuit cable trench installation

于双回路敷设方式电缆数量较多,电缆之间存在一定的热耦合效应,导致温度升高,因此相比于单回路,双回路电缆载流量下降了 7.68%。

2.2 排管单、双回路电缆载流量仿真计算

在排管单回路敷设方式下,电缆与地面相距 0.7 m,计算结果如图 4 所示,电缆载流量为 1 153 A。由于排管内空间较小,散热条件差,因此电缆载流量低于电缆沟敷设方式。

排管双回路敷设方式下仿真结果如图 5 所示,由于地表温度的影响,靠近地面的回路将高于另一回路,且中间相电缆温度更高,是决定电缆载流量的关键部位。该敷设方式下电缆载流量为 985 A,相较于单回路,双回路电缆载流量下降了 14.57%。

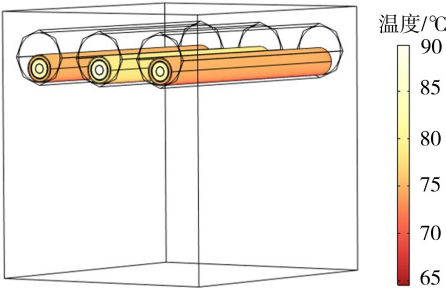


图 4 排管单回路敷设方式下温度分布云图
Fig. 4 Temperature distribution contour map for single-circuit conduit installation

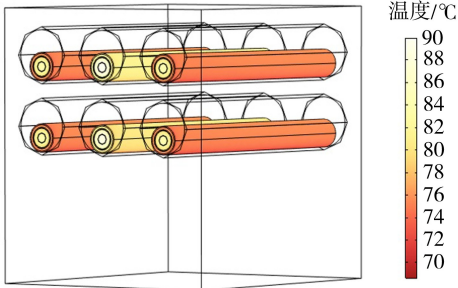


图 5 排管双回路敷设方式下温度分布云图
Fig. 5 Temperature distribution contour map for dual-circuit conduit installation

由于电缆沟环境较为宽敞,有良好的散热条件,且电缆间距大,电缆间热耦合效应小,因此电缆沟敷设方式下的电缆载流量大于排管敷设方式,排管单回路敷设方式下电缆载流量(1 153 A)比电缆沟单回路敷设方式下电缆载流量(1 394 A)小 17.29%,而排管双回路敷设方式下电缆载流量(985A)比电缆沟双回路敷设方式下电缆载流量(1 287 A)小 23.47%。

3 排管敷设方式下电缆载流量提升措施

3.1 排管外部浇筑混凝土与使用高导热排管对电缆载流量的影响

由前面仿真分析结果可知排管敷设方式下电缆载流量低于电缆沟敷设方式,但电缆沟施工工艺复杂,涉及挖掘、支护、排水、防水、土方回填等多个环节,在城市还需要与其他市政设施进行协调,以避让地下管线和建筑物,施工难度增大而导致工程费用上升。如果施工场地的地质条件较为复杂,如存在岩石层、地下水位较高等问题,也会增加施工成本和时间,因此电缆沟工程造价远高于排管工程^[23]。因此提高排管敷设方式下电缆载流量对于节省电缆建设的投资和保证电缆运行的经济性具有重要意义。混凝土是一种具有较低热阻系数的材料,其热阻系数为 0.5 m·K/W,而土壤热阻系数是其 2 倍,使用混凝土替代排管外部土壤有利于散热,能提高排管的电缆载流量。为分析混凝土替代排管外部土壤对电缆载流量的提升效果,在模型中将排管外部土壤改为混凝土进行填埋。仿真计算结果表明,当管外材料为混凝土时,单回路敷设方式下电缆载流量为 1 230 A,相比土壤环境提升了 6.68%;双回路敷设方式下电缆载流量为 1 068 A,相比土壤环境提升了 8.43%。

随着材料科学的不断发展,近年来有学者开始研发高导热排管材料以改善电缆的散热能力,但目前研究仍处于起步阶段。陈文教等^[24]研发了一种石墨烯微片与石墨片改性高密度聚乙烯的高导热电缆排管材料,其热导率为 1.4 W/(m·K)。本文在混凝土浇筑的基础上使用此高导热排管来提升电缆载流量,能将单回路电缆载流量提升至 1 325 A,双回路电缆载流量提升至 1 130 A,分别提升了 7.72%和 5.81%,但仍小于电缆沟敷设方式下的电缆载流量。

3.2 排管内部填充回填材料对电缆载流量的影响

排管内填充回填材料是提升电缆载流量的有效方法之一。回填材料一般由土壤、砂土、砾石等材料组成,具有以下特点:①回填材料散热性比空气好,可以在一定程度上削弱电缆受外界环境温度的影响,提升电缆载流量;②回填材料可以保护电缆,减少外部机械损伤,起到压实电缆的作用,能够延长电缆的使用寿命。不同成分回填材料的热阻系数有较大差异,现有回填材料热阻系数一般在 0.5~1.5 m·K/W 的区间内。为进一步提

升电缆载流量,在高导热排管外浇筑混凝土的基础上在排管内填充回填材料,回填材料热阻系数取 $1\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 。仿真计算结果表明,在排管敷设方式下,有回填材料时单回路电缆载流量为 $1\,778\text{ A}$,较无回填材料电缆载流量($1\,325\text{ A}$)提升了 34.19% ;双回路电缆载流量为 $1\,484\text{ A}$,较无回填材料电缆载流量($1\,130\text{ A}$)提升了 31.33% 。可见在高导热排管外浇筑混凝土的基础上在排管内再填充回填材料,能够进一步提升电缆载流量,且此时载流量已超过电缆沟敷设方式下的载流量。

为研究电缆载流量与回填材料热阻系数的关系,根据现有材料的热阻系数范围,将模型中热阻系数由 $0.5\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 逐渐提高到 $1.5\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$,电缆载流量仿真计算结果如图 6 所示。由图 6 可见,单、双回路电缆载流量随着回填材料热阻系数的增大而减小,当热阻系数取 $1.5\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 时,电缆载流量最低,但仍大于电缆沟敷设方式下的电缆载流量。因此,在排管敷设条件下,将电缆安置于回填材料中十分必要。

4 回填材料的改进

参照 DL/T 1721—2017《电力电缆线路沿线土壤热阻系数测量方法》,在实验室搭建如图 7 所示的试验装置对回填材料热阻系数进行测量。通过设计正交试验探究不同材料对回填材料热阻系数的影响,以寻找最优的回填材料配比区间。正交试验作为一种基于统计学原理的研究多因素多水平的试验设计方法,具有分布均匀性和整齐可比性等特点,每个因素之间存在交互作用,讨论某个因素时,不论因素水平如何,仅分析极差便可判断其影响程度^[25]。

具体试验步骤如下:①将试样置于圆柱体容器中并压实;②将加热棒插入试样中并保持良好接触,同时在其旁边插入温度计,保持 $5\sim 10\text{ min}$,使加热棒与周围试样达到热平衡;③启动电源让加热棒开始加热,同步记录时间、温度,试验过程总计 20 min ;④停止加热,倒出加热棒与试样进行散热,每种试样测量 3 组数据;⑤以时间对数 $\ln t$ 为横坐标,温度 θ 为纵坐标,绘制 $\ln t-\theta$ 曲线,选取曲线 $1\sim 20\text{ min}$ 的线性区域,根据式(6)计算试样的热阻系数 ρ ,3 组数据取平均值。

$$\rho = \frac{4\pi}{2.303q} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln t_2 - \ln t_1}$$

(6)

式中: q 为加热棒单位长度的加热功率, W/m ; θ_1 、 θ_2 分别为 t_1 ($t_1 = 1\text{ min}$) 和 t_2 ($t_2 = 20\text{ min}$) 时刻探针的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据文献[14]可知,随着孔隙率的增大,土壤内部气体含量升高,而气体导热性能较差,会显著提高热阻系数,导致难以通过土壤进行散热。因此在回填材料中适当添加能降低孔隙率的低热阻材料,可改进回填材料散热性能。

石英砂的热阻系数通常在 $0.8\sim 1.0\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 的区间内,具有良好的导热性能,在回填材料中添加不同孔径的石英砂会对其孔隙率有显著影响,较大孔径的石英砂颗粒通常会形成更大的颗粒间隙,但可以提高回填材料的硬度,而较小孔径的石英砂则可以填充这些大颗粒间的空隙,因此可以将两者混合后加入回填材料中,然后考虑添加水泥进一步减小孔隙率,并使回填材料固化,从而降低材料的热阻系数。为探究改进回填材料的最优配比,设计含有 6 因素 3 水平的正交试验(表 2)进行分析,以石英粉、2~4 目石英砂、6~8 目石英砂、土壤、沙子、水泥作为正交试验的 6 个因素,每个因素根据不同质量设置低、中、高 3 个水平。表 3 为不同回填材料组合下的热阻系数测量结果,可看出绝大多数添加了石英砂和水泥的改进回填材料热阻系数稳定在 $0.2\sim 0.4\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 的区间内,最低可达到 $0.17\text{ m}\cdot\text{K}/\text{W}$ 。

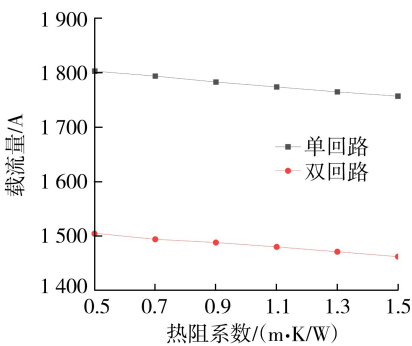


图 6 电缆载流量与回填材料热阻系数的关系
Fig. 6 Relationship between cable current carrying capacity and thermal resistance coefficient of backfill material

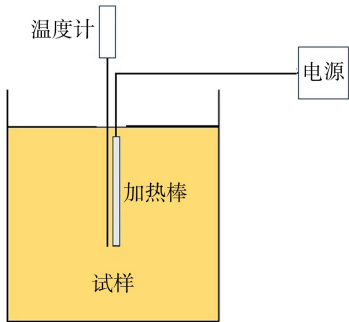


图 7 热阻系数测量试验装置
Fig. 7 Thermal resistance coefficient measurement experiment

表 2 正交试验设计						单位:g
Table 2 Orthogonal experiment design						unit: g
水平	石英粉	2~4 目石英砂	6~8 目石英砂	土壤	沙子	水泥
低	20	40	60	40	40	20
中	40	100	100	60	60	40
高	60	140	140	80	80	60

表 3 正交试验结果							
Table 3 Orthogonal experiment results							
组次	石英粉	2~4 目石英砂	6~8 目石英砂	土壤	沙子	水泥	热阻系数/(m·K/W)
1	低水平	低水平	低水平	低水平	低水平	低水平	0.47
2	低水平	低水平	中水平	中水平	中水平	中水平	0.21
3	低水平	低水平	高水平	高水平	高水平	高水平	0.21
4	低水平	中水平	低水平	中水平	高水平	高水平	0.20
5	低水平	中水平	中水平	高水平	低水平	中水平	0.17
6	低水平	中水平	高水平	低水平	中水平	低水平	0.35
7	低水平	高水平	低水平	高水平	中水平	中水平	0.23
8	低水平	高水平	中水平	低水平	低水平	高水平	0.36
9	低水平	高水平	高水平	中水平	中水平	低水平	0.28
10	中水平	低水平	低水平	高水平	中水平	高水平	0.20
11	中水平	低水平	中水平	中水平	高水平	低水平	0.18
12	中水平	低水平	高水平	低水平	低水平	中水平	0.17
13	中水平	中水平	低水平	低水平	高水平	中水平	0.25
14	中水平	中水平	中水平	高水平	中水平	高水平	0.26
15	中水平	中水平	高水平	中水平	低水平	低水平	0.25
16	中水平	高水平	低水平	中水平	高水平	低水平	0.27
17	中水平	高水平	中水平	低水平	低水平	高水平	0.30
18	中水平	高水平	高水平	高水平	中水平	中水平	0.32
19	高水平	低水平	低水平	中水平	低水平	高水平	0.34
20	高水平	低水平	中水平	高水平	高水平	低水平	0.29
21	高水平	低水平	高水平	低水平	中水平	中水平	0.39
22	高水平	中水平	低水平	高水平	低水平	中水平	0.30
23	高水平	中水平	中水平	低水平	高水平	高水平	0.20
24	高水平	中水平	高水平	中水平	高水平	低水平	0.31
25	高水平	高水平	低水平	中水平	低水平	中水平	0.20
26	高水平	高水平	中水平	高水平	中水平	高水平	0.20
27	高水平	高水平	高水平	低水平	高水平	低水平	0.23

正交试验统计结果如表 4 所示,表中 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为表 3 中某因素水平为低、中、高时对应的热阻系数之和,极差 R 为某因素水平为低、中、高时对应的热阻系数平均值中的最大值与最小值之差,极差代表某种因素对结果的影响程度,极差越大表示其对结果的影响程度越大。由表 4 中 R 值可知,对回填材料热阻系数影响程度由大到小依次为土壤、沙子、水泥、6~8 目石英砂、石英粉、2~4 目石英砂。比较这 6 个因素低、中、高水平对应的热阻系数平均值,根据它们最大值对应的质量,得到回填材料最优配比为石英粉、2~4 目石英砂、6~8 目石英砂、土壤、沙子、水泥的比例为 1:2:7:2:2:1。按照此配比重复试验,测得回填材料在此最优配比下的热阻系数为 0.17 m·K/W。由表 3 可知,试验组 5 和 12 的热阻系数均为 0.17 m·K/W,但最优配比试验组成本更低,具有更好的经济性。

以改进后的回填材料热阻系数 0.17 m·K/W 进行排管敷设方式仿真分析,得到单、双回路电缆载流量分别为 1 835 A 和 1 525 A,相较于原回填材料单、双回路电缆载流量 1 778 A 和 1 484 A 分别提升了 3.21%和 2.76%,此时载流量相较于单、双回路电缆沟敷设方式下电缆载流量分别提升了 31.64%和 18.49%。

表 4 正交试验统计结果				
Table 4 Statistical results of orthogonal experiment				
因素	热阻系数/(m·K/W)			
	K_1	K_2	K_3	R
石英粉	2.48	2.20	2.46	0.031
2~4 目石英砂	2.46	2.29	2.39	0.019
6~8 目石英砂	2.46	2.17	2.51	0.038
土壤	2.72	2.24	2.18	0.060
沙子	2.56	2.44	2.14	0.047
水泥	2.63	2.24	2.27	0.043

5 结 论

- a. 排管敷设方式下的电缆载流量小于电缆沟敷设方式,排管单、双回路敷设方式下电缆载流量比电缆沟单、双回路敷设方式分别小 17.29% 和 23.47%。
- b. 在管外浇筑混凝土、使用高导热排管材料和在管内填充回填材料,能够提升排管敷设方式下的电缆载流量。管外浇筑混凝土可使单、双回路电缆载流量分别提升 6.68% 和 8.43%,使用高导热排管可进一步提升 7.72% 和 5.81%,而进一步在管内填充回填材料可再次提升 34.19% 和 31.33%,使得排管敷设方式下的电缆载流量超过电缆沟敷设方式。
- c. 基于正交试验得到了改进回填材料的最优配比为石英粉、2~4 目石英砂、6~8 目石英砂、土壤、沙子、水泥的比例为 1 : 2 : 7 : 2 : 2 : 1,其热阻系数降低至 0.17 m · K/W,使用该配比的回填材料后,排管单、双回路敷设方式下电缆载流量分别比原回填材料提升了 3.21% 和 2.76%,比电缆沟单、双回路敷设方式下电缆载流量分别提升了 31.64% 和 18.49%。因此认为在未来电缆敷设选型中,可以采用在新型高导热排管外浇筑混凝土、管内填充改进回填材料的方案,从而实现在有限空间范围条件下最大程度地提升电缆载流量。

参考文献:

[1] 张继生,俞诗琪,张灿,等.潮流能水轮机阵列水动力与布局优化研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):79-87. (ZHANG Jisheng,YU Shiqi,ZHANG Can,et al. Research progress on hydrodynamics and layout optimization of tidal stream turbine array[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(3):79-87. (in Chinese))

[2] 靳春玲,苏旸,贡力,等.碳排放约束下的水工隧洞施工机群配置优化[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):84-90. (JIN Chunling,SU Yang,GONG Li,et al. Configuration optimization of construction machine group for hydraulic tunnel under carbon emission constraint[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(3):84-90. (in Chinese))

[3] 张延伟.不同敷设方式下 XLPE 电力电缆温度场与载流量仿真研究[D].汉中:陕西理工大学,2023.

[4] 吴晶晶,陈丽安,严有祥,等.±500 kV 高压直流 XLPE 电缆温度分布及其影响因素研究[J].高压电器,2023,59(2):113-119. (WU Jingjing,CHEN Li'an,YAN Youxiang,et al. Study on temperature distribution of ±500kV HVDC XLPE cable and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(02):113-119. (in Chinese))

[5] 胡列翔,欧阳本红,刘宗喜,等.交流 500 kV 海底电缆登陆段载流能力提升[J].高电压技术,2019,45(11):3421-3428. (HU Liexiang,OUYANG Benhong,LIU Zongxi,et al. Improvement in current carrying capacity of landing section of AC 500kV submarine cable[J]. High Voltage Engineering,2019,45(11):3421-3428. (in Chinese))

[6] 刘刚,许志锋,王鹏宇,等.基于磁热流多场耦合的双沟四回路电缆温度场分布与载流量计算[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(12):10-17. (LIU Gang,XU Zhifeng,WANG Pengyu,et al. Temperature field distribution and ampacity calculation of double-channel four-circuit cables based on multi-field coupling of electromagnetic-thermal-fluid[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2020,48(12):10-17. (in Chinese))

[7] 李俊,刘刚,李立涅.排管集群敷设电缆热评估模型优化研究[J].广东电力,2023,36(5):115-125. (LI Jun,LIU Gang,LI Lichen. Study on optimization of thermal evaluation model for pipe cluster laying cable[J]. Guangdong Electric Power,2023,36(5):115-125. (in Chinese))

[8] 梁永春,闫彩红,赵静,等.排管敷设电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算[J].高电压技术,2011,37(4):1002-1007. (LIANG Yongchun,YAN Caihong,ZHAO Jing,et al. Numerical calculation of transient temperature field and short-term ampacity of group of cables in ducts[J]. High Voltage Engineering,2011,37(4):1002-1007. (in Chinese))

[9] 李俊.配网集群敷设电缆热评估及负荷能力提升措施研究[D].广州:华南理工大学,2023.

[10] 马跃,吴文克,李智,等.基于有限元法对分布式光纤电力电缆载流量的分析计算[J].陕西电力,2017,45(6):78-81. (MA Yue,WU Wenke,LI Zhi,et al. Load capacity calculation of distributed fiber-optic power cable based on finite element method [J]. Shaanxi Electric Power,2017,45(6):78-81. (in Chinese))

[11] RERAK M, OCŁONP. The effect of soil and cable backfill thermal conductivity on the temperature distribution in underground cable system[J]. E3S Web of Conferences,2017,13:02004.

[12] DE LIETO VOLLARO R, FONTANA L, VALLATI A. Experimental study of thermal field deriving from an underground electrical power cable buried in non-homogeneous soils[J]. Applied thermal engineering,2014,62(2):390-397.

[13] 王彦楠,李铮,杨鹏飞,等.基于电磁热多场耦合的直埋电缆导体温度与载流量计算[J].计量学报,2022,43(7):877-884. (WANG Yannan,LI Zheng,YANG Pengfei,et al. Calculation of conductor temperature and ampacity of directly buried cable

based on electromagnetic thermal multi field coupling[J]. Acta Metrologica Sinica,2022,43(7):877-884. (in Chinese))

[14] 刘俊博,杨宁,宋余来,等. 回填土高热阻系数下电缆集群敷设载流量的解析计算[J]. 东北电力大学学报,2019,39(3):23-28. (LIU Junbo, YANG Ning, SONG Yulai, et al. Analytical calculation of carrying capacity of cable cluster laying under high thermal resistance coefficient of backfill soil[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2019,39(3):23-28. (in Chinese))

[15] 刘士利,罗英楠,刘宗烨,等. 饱和和多孔介质对流特性对高压交流海底电缆载流性能的影响[J]. 电工技术学报,2023,38(4):1023-1031. (LIU Shili, LUO Yingnan, LIU Zongye, et al. The influence of convective characteristics of saturated porous media on ampacity performance of submarine cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(4):1023-1031. (in Chinese))

[16] 刘文博,谢茂杰,周游,等. 土壤微观结构参数对埋地电缆温度与载流量的影响分析[J]. 高电压技术,2024,50(2):749-757. (LIU Wenbo, XIE Maojie, ZHOU You, et al. Effects of microstructural parameters of soil on temperature and ampacity of the buried cables[J]. High Voltage Engineering,2024,50(2):749-757. (in Chinese))

[17] 鲍玲玲,靳鹏飞,王雪,等. 非饱和和多孔介质有效导热系数模型[J]. 科学技术与工程,2022,22(19):8327-8332. (BAO Lingling, JIN Pengfei, WANG Xue, et al. Model of effective thermal conductivity of unsaturated porous materials based on fractal theory[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(19):8327-8332. (in Chinese))

[18] 于建立,隋琳琳,田际平,等. 预埋管电缆载流量的有限容积法计算和分析[J]. 东北电力大学学报,2013,33(3):43-46. (YU Jianli, SUI Linlin, TIAN Jiping, et al. Calculation and analysis of cable ampacity lay in pipe based on FVM[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2013,33(3):43-46. (in Chinese))

[19] 李红发,程绍兵,王金城,等. 回填低热阻材料对排管敷设电缆载流量的提升研究[J]. 绝缘材料,2022,55(3):84-92. (LI Hongfa, CHENG Shaobing, WANG Jincheng, et al. Study on improving ampacity of cables laid in pipes by backfilling low thermal resistance materials[J]. Insulating Materials,2022,55(3):84-92. (in Chinese))

[20] 曲名新,邓少平,翟学,等. 基于电-热-流多场耦合仿真的海底电缆载流量分析[J]. 电力勘测设计,2022(7):17-24. (QU Mingxin, DENG Shaoping, ZHAI Xue, et al. Ampacity analysis of submarine cable based on electric- thermal-flow multiphysics coupling simulation[J]. Electric Power Survey & Design,2022(7):17-24. (in Chinese))

[21] 陈振新,徐蓓蓓,乐彦杰,等. XLPE 交流电缆线路改为直流运行的载流量设计与分析[J]. 高压电器,2020,56(4):165-171. (CHEN Zhenxin, XU Beibei, LE Yanjie, et al. Design and analysis of current ratings of XLPE cable AC lines transformed into DC operation[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(4):165-171. (in Chinese))

[22] 邱超. 双回路单芯电力电缆不同敷设与排列方式下温度场与载流量计算[D]. 广州:华南理工大学,2013.

[23] 徐晋卿,王琼,熊坤,等. 高压电缆在不同敷设方式下经济技术的比较[J]. 江西电力,2020,44(10):12-15. (XU Jinqing, WANG Qiong, XIONG Kun, et al. Comparison of economic and technical aspects of high voltage cable installation in different ways[J]. Jiangxi Electric Power,2020,44(10):12-15. (in Chinese))

[24] 陈文教,郑志豪,徐研,等. 基于高导热管道提升排管敷设下的电力电缆载流量的研究[J]. 绝缘材料,2022,55(2):97-103. (CHEN Wenjiao, ZHENG Zhihao, XU Yan, et al. Research on improving cable capacity under duct laying based on high thermal conductivity pipeline[J]. Insulating Materials,2022,55(2):97-103. (in Chinese))

[25] 石大城,李乾,余志强,等. 基于电磁-热-流体耦合的隧道敷设电缆载流量分析[J]. 绝缘材料,2022,55(12):111-118. (SHI Dacheng, LI Qian, YU Zhiqiang, et al. Current carrying capacity analysis of cables laid in tunnel based on electromagnetism-heat-fluid coupling[J]. Insulating Materials,2022,55(12):111-118. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-14 编辑:熊水斌)

(上接第 89 页)

[21] 邓斌,黄皎凤,徐拓,等. 基于竖缝隔板的大底坡鱼道水力优化数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):17-23. (DENG Bin, HUANG Jiaofeng, XU Tuo, et al. Numerical simulation of a large-slope fishway based on vertical slot sills for hydraulic optimization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):17-23. (in Chinese)).

[22] 缪婧娴,王晓刚,辛沛,等. 进口口水深不足时竖缝式鱼道水力特性及进出口允许最大水深差[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):99-105. (MIAO Jingxian, WANG Xiaogang, XIN Pei, et al. Hydraulic characteristics of vertical slot fishway and allowable maximum water depth difference between inlet and outlet subject to insufficient inlet water depth[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):99-105. (in Chinese))

[23] 张文传,高乐,王翔,等. 西藏拉洛水利枢纽工程鱼道设计研究[J]. 水利水电快报,2022,43(11):100-104. (ZHANG Wenchuan, GAO Le, WANG Xiang, et al. Design and research on fishway of Laluo Hydro Project in Tibet[J]. Express Water Resources & Hydropower Information,2022,43(11):100-104. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-23 编辑:刘晓艳)