

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

陈文教¹, 郑志豪¹, 徐 研¹, 李 俊³, 刘国权², 张婧婧², 刘 刚³

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510310; 2. 广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006; 3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:为了解决排管敷设电缆在运行过程中由于高热阻环境造成载流量大幅低于设计标准的问题,本文研发了一种高导热电缆管道材料石墨烯微片与石墨片改性高密度聚乙烯(PG-GNPs-HDPE),并建立仿真模型验证目前城市配网常用的排管敷设工况下电缆采用PG-GNPs-HDPE高导热管道后的载流量提升效果。结果表明:与普通HDPE管道相比,采用PG-GNPs-HDPE高导热管道后,对于2×4排管敷设110 kV 500 mm²电缆群,其载流量提升了9.32%;对于3×4排管敷设10kV 3×400 mm²电缆群,其载流量提升了7.42%。

关键词:电力电缆;载流量;排管敷设;外部热阻;高导热管道

中图分类号:TM247;TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)02-0097-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.02.014

Research on Improving Cable Capacity Under Duct Laying Based on High Thermal Conductivity Pipeline

CHEN Wenjiao¹, ZHENG Zhihao¹, XU Yan¹, LI Jun³, LIU Guoquan², ZHANG Jingjing², LIU Gang³

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510310, China; 2. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to solve the problem that the cable capacity much lower than the design standard due to the high thermal resistant environment in the running process of duct cable laying, this paper developed the cable pipe materials that graphene microchip and graphite flake modified HDPE (PG-GNPs-HDPE) with high thermal conductivity, then established a simulation model and verified the improving effect of using the high thermal conductive pipeline of PG-GNPs-HDPE under the common duct laying condition of the current urban distribution network. The results show that compared with the ordinary HDPE pipe, the carrying capacity of 110kV 500mm² cable group with 2×4 laying is increased by 9.32% after using PG-GNPs-HDPE high thermal conductivity pipe; for 10 kV 3×400 mm² cable group with 3×4 laying, the carrying capacity increases by 7.42%.

Key words: power cable; carrying capacity; duct laying; exterior thermal resistance; high thermal conductive pipe

0 引言

电缆载流量是电缆线路运行的重要指标,影响电缆载流量的因素较多,其中电缆线路外部环境热

阻和热容是主要因素之一^[1-3]。电力电缆的敷设方式主要有穿管敷设、土壤直埋敷设、电缆沟敷设、电缆隧道敷设等。目前,在城市电网中大量采用穿管直埋和排管敷设方式,这两种敷设方式常用在变电站出线、电缆线路穿越马路等敷设情况下^[4-5]。

电缆隧道敷设因配备强制的排风散热设备,不存在电缆载流温度过高的问题;排管敷设方式下,管道内空间狭小,空气流速非常慢,因而对流传热

收稿日期:2021-04-06 修回日期:2021-05-11

基金项目:广州供电局输电类科技项目(GZHKJXM20190049)

作者简介:陈文教(1984-),男(汉族),广东韶关人,高级工程师,主要从事高压电力电缆的运行维护工作。

速度慢,管道内主要依靠空气热传导散热,而空气本身的导热系数很小,管内的密闭空气又将形成保温瓶效应,影响电缆载流能力的提升。当电缆采用密集排管等电缆群敷设方式时,由于电缆群之间的相互热影响,导致电缆外部散热环境较差,严重限制了电缆线路的载流量。综上所述,电缆埋管的保温瓶效应及多回路电缆之间的相互热效应致使排管敷设段电缆载流量出现瓶颈,限制了整条电缆的载流量,使电缆的实际载流能力大幅低于设计标准^[6-7]。

为了解决排管敷设电缆在运行过程中由于高热阻环境限制了电缆线路载流量的相关问题,国内外研究人员进行了一系列研究。一方面为改善电缆套管内的高热阻环境而开发了一系列低热阻填料,另一方面开发高导热电缆套管以改善热量从管内向管外的散热能力^[8]。

目前,对于以高密度聚乙烯(HDPE)为聚合物基体,填充高导热无机填料来制备高导热复合材料的研究在如火如荼地进行中。王琪等^[9]对石墨进行表面处理,使得石墨在HDPE中均匀分布,从而改善复合材料的导热性能。IKRUPA等^[10]使用不同粒径的石墨颗粒填充HDPE,并对HDPE/石墨复合材料的导热性能进行了研究,结果表明,HDPE/石墨复合材料的导热性能随着石墨颗粒粒径的增加而增加。阎洁^[11]通过改性HDPE来提高HDPE/石墨复合体系中的相容性,提高石墨在HDPE基体中均匀分散与分布的程度,从而改善复合材料的导热性和力学性能。冯博等^[12]研究了在HDPE中石墨与碳纤维复合体系导热通道搭建的情况,发现随着石墨添加量的增加,复合材料的导热系数增大,但是当石墨的质量分数超过10%时,复合材料的力学性能降低。为了进一步提高复合材料的导热性能,纳米材料逐渐成为复合材料填料新的替代品。一维纳米材料如碳纳米管(CNTs)具有极高的导热系数和电导率,常用作填料来改善复合材料的导热性能和导电性能^[13]。

以上研究都没有考虑材料的制作成本及大批量工业化生产的难度,无法使电缆管道材料同时具有高导热性和低成本的特点,距离实现高导热电缆管道的工业化生产还有一段距离。因此,一方面要考虑到复合材料的导热性能,另一方面要对复合材料填料种类以及添加量进行探索从而制定适合的材料配方,而完成以上工作对于整个电缆管道市场

具有非常重要的意义。

为此,本研究针对城市中常用的电力电缆排管敷设方式,分析影响排管敷设电缆载流量的因素,开发石墨烯微片(GNPs)与石墨片(PG)改性高密度聚乙烯(PG-GNPs-HDPE)的高导热电缆管道,改善排管敷设电缆的散热环境,从而提高排管敷设电缆的载流量,解决城市配电网中排管敷设电缆段载流量瓶颈问题。以实际工程中高压电缆常用的2×4水泥排管预制件和中低压电缆常用的3×4水泥排管预制件为例建立仿真模型,验证PG-GNPs-HDPE高导热管道对排管敷设电缆载流量的提升效果。结合仿真结果推算出最热电缆的等效外部热阻,分析PG-GNPs-HDPE高导热管道改善排管敷设电缆散热环境的机理。

1 高导热塑料管道材料配方研究

1.1 高导热管道材料开发

在聚合物基体中,随着石墨烯微片或者石墨片添加量的提高,复合材料的导热系数会逐步提高。但是,添加了石墨片的复合材料导热系数提高的幅度远不如添加了石墨烯微片的复合材料。其中重要的原因是石墨烯微片的片径较大,厚度较石墨片小,更容易桥接搭建成为导热网络,而一旦形成多条导热通路,即使聚合物基体会阻碍热的传输(热量主要通过声子进行传输),声子也较容易从石墨烯微片构成的导热网络中进行传输,而石墨片可能由于厚度较大,容易团聚在一起,影响其分布在聚合物基体中,因此严重影响其导热系数。

本研究采用以高密度聚乙烯(HDPE)为基体,石墨烯微片、石墨片和碳纤维进行复配,在降低成本的同时尽可能提高导热系数。

1.1.1 材料开发实验原材料及设备

材料开发实验所需用到的材料为高密度聚乙烯、石墨烯微片、石墨片,材料参数如表1所示。

实验设备:南京广达化工装备有限公司生产的SHJ-35型同向双螺杆挤出机,螺杆直径为35 mm,长径比为40;瑞典Hot Disk AB公司生产的TPS500S型热常数分析仪。

1.1.2 材料复配方案

根据表2所示的复配方案,其中石墨烯微片与石墨片的质量比分别为8:2、5:5、2:8。采用同向双螺杆挤出机混炼制备HDPE基复合材料,从料斗到出口不同区域的挤出温度分别为155、165、180、

表1 实验原材料

Tab.1 Experimental raw material

材料名称	材料参数
高密度聚乙烯 (HDPE)	熔体指数为 6.4 g/10 min(190℃/21.6 kg), 吉林石化公司
石墨烯微片 (GNPs)	片径约 100 μm, 厚度小于 100 nm, 厦门凯纳石墨烯技术有限公司
石墨片 (PG)	片径分别为 8 μm、40 μm 和 100 μm, 上海喜丽碳素有限公司

表2 复合材料的复配方案

Tab.2 The sample codes of nanocomposites

方案代号	填料种类	填料质量分数
PG-GNPs	石墨烯微片	4%, 7%, 10%, 13%
PG-G	石墨片(40 μm)	4%, 7%, 10%, 13%
PG-GNPs-LG	石墨烯微片, 石墨片(100 μm)	13%
PG-GNPs-MG	石墨烯微片, 石墨片(40 μm)	13%
PG-GNPs-SG	石墨烯微片, 石墨片(8 μm)	13%

190、190、195、195、195、190℃。螺杆的转速为 200 r/min。挤出造粒后在 80℃ 下干燥 3 h。干燥后粒料模压成直径为 20 mm、厚度为(4.0±0.5) mm 的圆片, 用于导热系数测试。

1.2 材料复配实验结果分析

图 1 显示了不同石墨烯微片和石墨片含量的 HDPE 基复合材料的导热系数。

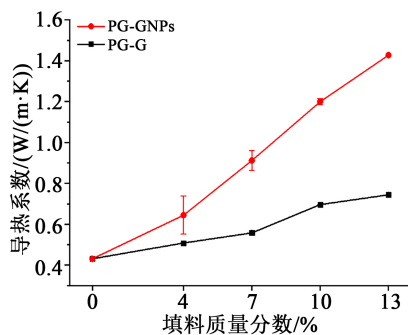


图1 石墨烯微片和石墨片填充 HDPE 复合材料的导热系数

Fig.1 Thermal conductivity of GNP and PG-filled HDPE composites

从图 1 可以看出, 相同含量下石墨烯微片填充的复合材料导热系数明显高于石墨片填充的复合材料。这是由于石墨烯微片的片径较大, 厚度较石墨片小, 较容易桥接搭建成导热网络, 同时, 石墨烯

微片本身的导热系数比石墨片的高。一旦形成多条导热通路, 声子较容易从石墨烯微片构成的导热网络中进行传输, 而石墨片可能由于厚度较大, 容易团聚在一起, 分散不均匀, 使得其构建的导热网络较少, 因此严重影响了其导热系数。然而, 石墨烯微片的价格较高, 不利于工业化应用, 因此, 本研究通过复配石墨烯微片和不同片径的石墨片作为填料, 以构建更多的导热通路。

图 2 显示了填料总质量分数为 13% 时, PG-GNPs-LG、PG-GNPs-MG 和 PG-GNPs-SG 导热系数与填料比之间的关系。从图 2 可以看出当石墨烯微片与石墨片质量比为 8:2 时, 尺寸为 40 μm 的石墨片与石墨烯微片复配下的导热系数十分接近以全部石墨烯微片为填料的复合材料, 比纯 HDPE 的导热系数提高了约 200%; 当石墨烯微片与石墨片质量比分别为 5:5 和 2:8 时, 3 种复配方案制备的复合材料导热系数都十分接近。这表明, 40 μm 的石墨片在石墨烯微片之间充当了桥梁作用, 将相邻的石墨烯微片搭接起来形成更多的导热网络, 有利于声子的传输。PG-GNPs-LG 复合材料的导热系数整体较低, 原因是石墨片直径太大时团聚严重, 极大地降低了导热系数。

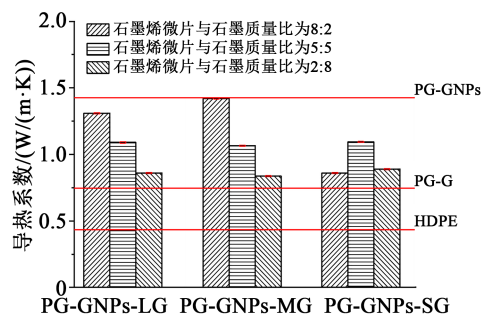


图2 石墨烯微片与石墨在不同复配方案下复合材料的导热系数

Fig.2 Thermal conductivity of composites under different compositional formulation of GNPs and PG under different mixtures

以 HDPE 为基体, 当石墨烯微片与石墨片质量比为 8:2 时, 复配制作的电缆管道的导热系数可以达到 1.4 W/(m·K), 比纯 HDPE 的导热系数提高了约 200%, 在降低管道制作成本的同时大幅提高了导热系数, 说明采用 PG-GNPs-HDPE 高导热管道替换排管敷设电缆中的普通 HDPE 管道可以改善电缆外部散热环境, 提升电缆载流量。同时, PG-GNPs-HDPE 高导热管道可以与低热阻填充材料组合使用, 从而

大幅降低排管敷设电缆表面与周围介质之间的热阻,进一步提升排管敷设电缆的载流量^[14]。PG-GNPs-HDPE 高导热管道生产成本较低,并能提升排管敷设电缆的载流量,对解决城市配电网载流量瓶颈问题和实现高导热管道的工业化生产具有重要意义。

2 排管敷设电缆多物理场耦合仿真模型的构建

为了验证 PG-GNPs-HDPE 高导热管道对排管敷设电缆载流量的提升效果,需要计算排管敷设电缆的载流量。一般通过实验法进行计算,然而,实验法的实验平台搭建非常困难,资金消耗较大,且实验结果容易受到众多可变性因素如环境的复杂性的影响。数值计算法具有计算速度快、能模拟各种环境热参数变化等优点,数值计算法通常为边界元法、有限元法和有限差分法^[15-17]。有限元法可以任意设置节点和网格,具有很强的灵活性,本研究采用有限元法来验证高导热材料对排管敷设电缆载流量的影响。

2.1 几何模型

以实际工程中高压电缆常用的2×4水泥排管预制件和中低压电缆常用的3×4水泥排管预制件为例建立仿真模型,其具体结构参数如图3和图4所示,其中2×4排管预制件下层中间两个孔为备用孔,两种预制件中的排管厚度均为8mm。

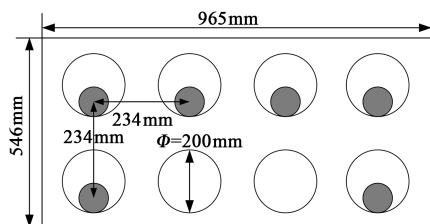


图3 2×4水泥排管预制件结构示意图

Fig.3 Layout of 2×4 duct banks

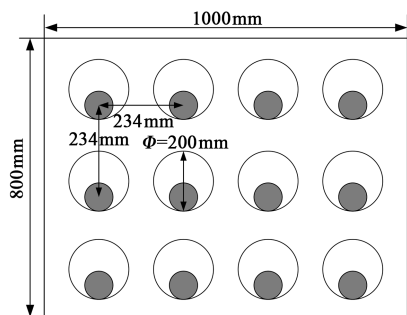


图4 3×4水泥排管预制件结构示意图

Fig.4 Layout of 3×4 duct banks

2.2 物理场控制方程

假设电缆各层材料以及外部敷设环境均为各项同性介质,在电缆轴向长度较长情况下,可忽略轴向传热的影响,建立二维模型。排管敷设电缆的散热涉及热传导、热对流以及热辐射3种传热方式,通过 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件中的 AC/DC 模块建立电缆沟模型的电磁场,在缆芯导体处设置电磁热源,为模型添加激励;在传热模块中分别设置固体域与流体域,建立温度场,并设置电缆外护套表面与电缆沟内壁的表面发射率模拟辐射传热;通过流体场模块模拟沟内空气受热导致的自然对流。

电缆加载工频电流时,可视为稳态场处理,其电磁场控制方程为式(1)。

$$\frac{1}{u} \nabla^2 A = -J_s + j\omega\sigma A \quad (1)$$

式(1)中: u 为磁导率,H/m; ∇ 为拉普拉斯算子; A 为磁矢位,Wb/m; J_s 为源电流密度,A/m²; ω 为角频率,rad/s; σ 为电导率,S/m。

电磁损耗表达式为式(2)。

$$\begin{cases} q_v = \frac{1}{\sigma} \int J^2 dS \\ J = -j\omega\sigma A + J_s \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: q_v 为体积生热率,W/m³; S 表示截面积,m²; J 为电缆截面电流密度,A/m²。

模型中温度场控制方程如式(3)所示,对于电缆绝缘层、外护套、电缆沟壁等没有损耗的部分,式(3)中的 q_v 为零。

$$\nabla^2 T + q_v = 0 \quad (3)$$

式(3)中: T 表示介质温度,K。

受电缆散热影响,电缆沟内空气属于自然对流,需要结合质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程对其控制方程进行描述,其控制方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mathbf{F} + \eta \nabla^2 \mathbf{u} \\ \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T_f = \lambda \nabla^2 T_f \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: ρ 为流体密度,kg/m³; \mathbf{u} 为流体速度矢量,m/s; \mathbf{F} 为流体单位体积所受的体积力矢量,N/m³; p 为流体压力,Pa; η 为流体动力黏度,Pa·s; T_f 为流体介质温度,K; λ 为流体的导热系数,W/(m·K); c_p 为流体比热容,J/(kg·K)。

金属电阻率是温度的函数,不同温度下电阻率

不同,因此导体的热源损耗与温度相关。导体工作温度受负荷电流以及环境条件的影响,是个未知量,因此在本研究构建的模型中,将耦合模型中温度场因变量引入,作为导体工作温度 T ,从而建立材料的温度依赖性。铜导体的电导率 σ 与温度的函数为式(5)。

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{ref}(1 + \alpha_{Cu}(T - T_{ref}))} \quad (5)$$

式(5)中: T 为导体工作温度; T_{ref} 为导体初始参考温度; ρ_{ref} 为导体在初始温度下的参考电阻率; α_{Cu} 为铜导体电阻率温度系数。

2.3 边界方程

排管内的电缆散热具有一定的影响范围,因此可以将原本属于开域场的外部环境转变为闭域场进行求解,即设置边界条件进行约束。现有研究结果表明外部土壤温度仅在距离电缆 2 m 以内变化较为剧烈,远离电缆时,土壤温度将与环境温度相同。因此,本研究取左右边界和下边界距离电缆轴心 3 m,如图 5 所示。

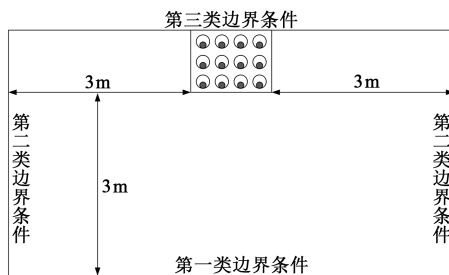


图5 边界条件示意图

Fig.5 Diagram of boundary conditions

电缆传热问题的边界条件可归结为3类:第1类为已知边界温度;第2类为已知边界法向热流密度;第3类为对流边界条件。依据仿真模型边界特点,深层土壤温度几乎不变,符合第1类边界条件;左右土壤边界的法向热流几乎为零,符合第2类边界条件;表层土壤与空气接触,存在对流散热符合第3类边界条件。3类边界条件方程分别如式(6)~(8)所示。

$$T = T(x,y) \Big|_{\Gamma_1} \quad (6)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} + q = 0 \quad (7)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha(T - T_f) \Big|_{\Gamma_3} \quad (8)$$

式(6)~(8)中: T 为温度; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为边界温度的梯度即

热流密度; Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 分别为3类边界条件的积分边界; λ_s 为土壤的导热系数, $W/(m \cdot K)$; α 为表层土壤与空气的对流换热系数。

3 仿真结果分析

3.1 电缆本体结构参数及环境热参数取值

分别以 110 kV YJLW03 1×500 mm² 和 10 kV YJV22 3×400 mm² 电缆为例进行计算。其中2×4水泥排管预制件内放置 110 kV 电缆,3×4水泥排管预制件内放置 10 kV 电缆。电缆本体结构参数如表3和表4所示,环境热参数取值如表5所示。

表3 110 kV 电缆结构参数

Tab.3 Construction parameter of 110 kV cable

项目	数值
导体外径/mm	26.6
绝缘屏蔽外径/mm	74.1
金属套外径/mm	84.6
外护套外径/mm	92.6

表4 10 kV 电缆结构参数

Tab.4 Construction parameter of 10 kV cable

项目	数值
导体外径/mm	24
绝缘屏蔽外径/mm	45
金属屏蔽外径/mm	47.7
成缆外径/mm	103.1
外护套外径/mm	112.3

表5 外部环境热参数取值

Tab.5 The thermal parameters of external environment

材料	导热系数/($W/(m \cdot K)$)
普通HDPE管道	0.40
PG-GNPs-HDPE高导热管道	1.40
水泥预制件	0.80
土壤	0.83

3.2 PG-GNPs-HDPE 高导热管道优化效果

设置缆芯导体损耗为模型唯一的电磁热源,不计护套损耗,基于前述物理场,对2×4水泥排管预制件几何模型及3×4水泥排管预制件几何模型构建仿真模型。设置外界环境温度为20℃,以排管内一相

电缆达到 90℃ 即认为此时加载电流达到电缆载流量。采用 PG-GNPs-HDPE 高导热管道后电缆的载流量提升效果如表 6 所示, 各条件下水泥排管预制件的温度场分布如图 6 所示。

表 6 采用高导热管道后电缆载流量提升效果

项目	HDPE 管道	PG-GNPs-HDPE 高导热管道	载流量提升效果/%
110 kV 1×500 mm ² 电缆载流量/A	590	645	9.32
10 kV 3×400 mm ² 电缆载流量/A	256	275	7.42

从图 6 可以看出, 2×4 排管敷设 110 kV 1×500 mm² 电缆中, 第一排中间两相电缆由于受到排管内其他相电缆的相互热效应影响, 电缆外部散热环境最差, 为最热相电缆, 达到将近 90℃。3×4 排管敷设 10 kV 3×400 mm² 电缆中, 第二排中间两相电缆为最热相电缆, 电缆外部散热环境最差, 达到将近 90℃。

从表 6 可以看出, 常规敷设条件下, 2×4 排管敷设 110 kV 500 mm² 电缆载流量仅为 590 A, 当采用高导热管时, 电缆载流量提升到 645 A, 提升幅度达到 9.32%; 常规敷设条件下, 3×4 排管敷设 10 kV 3×400 mm² 电缆载流量仅为 256 A, 当采用高导热管时, 载流量为 275 A, 提升幅度为 7.42%。

3.3 排管敷设电缆外部热阻分析

在排管敷设情况下, 电缆表面和周围环境之间的热阻主要由电缆表面到管道内壁之间热阻、管道热阻以及管道外部环境热阻组成。PG-GNPs-HDPE 高导热管道通过降低管道热阻达到降低电缆表面和周围介质之间总热阻的效果, 从而改善电缆外部的散热环境。

由 IEC 60287-1-1:2006^[18] 可知电缆导体高于环境温度的温升表达式如式(9)所示。

$$\Delta\theta = (I^2R + 1/2W_d)T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4) \quad (9)$$

式(9)中: I 为导体中流过的电流; $\Delta\theta$ 为高于环境温度的导体温升; R 为最高工作温度下导体单位长度的交流电阻; W_d 为每根单位长度的导体周围的绝缘介质损耗; T_1 为一根导体和金属套之间单位长度的热阻; T_2 为金属套和铠装之间内衬层单位长度的热阻; T_3 为电缆外护套单位长度的热阻; T_4 为电缆表面和周围介质之间单位长度的热阻; n 为电缆的缆

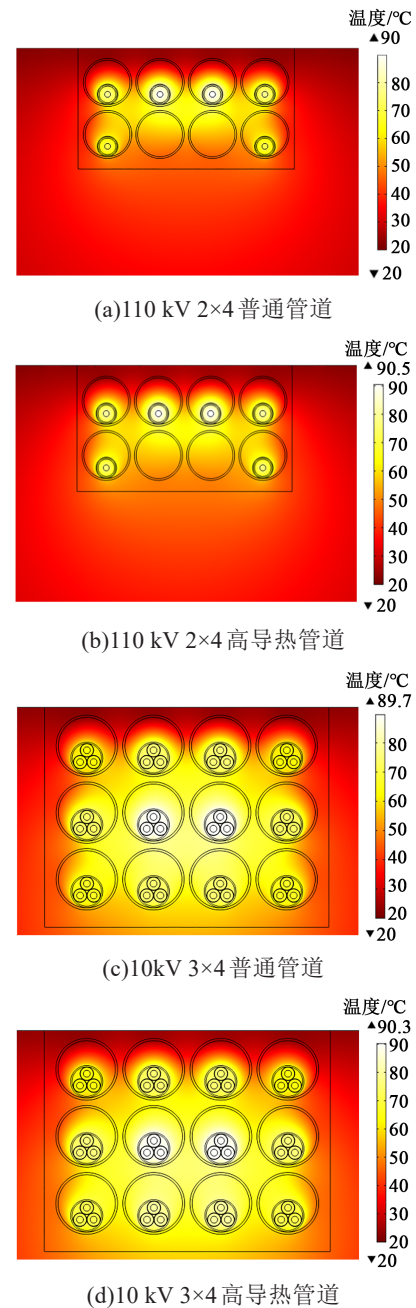


图 6 水泥排管预制件温度场分布图

Fig.6 Distribution of temperature field in duct banks

芯数; λ_1 为电缆金属套损耗相对于所有导体总损耗的比率; λ_2 为电缆铠装损耗相对于所有导体总损耗的比率。

当忽略电缆介质损耗、电缆护套损耗及铠装损耗时, 根据上式可以推算出单芯与三芯电缆外部热阻 T_4 的表达式分别如式(9)和式(10)所示。

$$T_4 = \frac{\Delta\theta - I^2R(T_1 + T_2 + T_3)}{I^2R} \quad (10)$$

$$T_4 = \frac{\Delta\theta - I^2R(T_1 + 3T_2 + 3T_3)}{3I^2R} \quad (11)$$

通过已知的电缆本体热参数,可以用上述表达式推导出排管敷设电缆在相同排列方式下,采用普通HDPE管道和PG-GNPs-HDPE高导热管道时达到90℃的电缆的等效外部热阻 T_4 ,结果如表7所示。从表7可以看出,采用PG-GNPs-HDPE高导热管道替代排管敷设电缆中的普通HDPE管道能有效降低电缆的外部热阻,2×4排管敷设110 kV 500 mm²电缆中最热电缆外部等效热阻 T_4 降低了17.9%;3×4排管敷设10 kV 3×400 mm²电缆中最热电缆外部等效热阻 T_4 降低了11.6%;PG-GNPs-HDPE高导热管道通过降低电缆外部等效热阻 T_4 ,改善电缆的外部散热环境,从而提升电缆载流量。

表7 最热电缆等效外部热阻变化

Tab.7 Thermal resistance of the hottest cable in duct banks before and after using high conductivity pipe

项目	HDPE管道	PG-GNPs-HDPE 高导热管道	外部热阻 降低率/%
110 kV 2×4排管敷 设最热电缆等效外 部热阻 $T_4/(K/(m \cdot W))$	3.82	3.14	17.8
10 kV 3×4排管敷 设最热电缆等效外 部热阻 $T_4/(K/(m \cdot W))$	6.54	5.78	11.6

4 结论

(1)采用石墨烯微片与石墨片在填料总质量分数为13%的复配方案制作的高导热管道,既能控制生产成本,满足市场需求使用,又能大幅提升导热性能,相较于普通HDPE管道0.4 W/(m·K)的导热系数,PG-GNPs-HDPE高导热管道的导热系数达到了1.4 W/(m·K),导热性能提升了250%。

(2)在本研究的仿真验证下,2×4排管敷设110 kV 500 mm²电缆采用PG-GNPs-HDPE高导热管道后,电缆载流量由590 A提升到645 A,载流量提升了9.4%。3×4排管敷设10 kV 3×400 mm²电缆采用PG-GNPs-HDPE高导热管道后,电缆载流量由256 A提升到275 A,载流量提升了7.42%。

(3)通过分析仿真结果可知,利用PG-GNPs-HDPE高导热管道置换排管敷设中的普通HDPE管道能够降低排管敷设电缆外部热阻,改善排管敷设

电缆散热环境,从而有效提升排管敷设电缆的载流量。在本研究的仿真条件下,2×4排管敷设110 kV 500 mm²电缆中最热电缆外部等效热 T_4 降低了17.8%;3×4排管敷设10 kV 3×400 mm²电缆中最热电缆外部等效热阻 T_4 降低了11.6%。

参考文献:

- [1] 樊友兵,张丽,蒙绍新,等. 中低压交联电缆集群敷设载流量的计算[J]. 高电压技术,2005,31(10):62-63.
- [2] ORTON H. 电力电缆技术综述 [J]. 高电压技术,2015,41(4):1057-1067.
- [3] 孟凡凤,张兵,方晓明,等. 影响直埋电缆载流量的因素研究[J]. 绝缘材料,2007,40(3):64-66.
- [4] 曾征. 110kV 电缆穿管的敷设在城市电缆工程中的应用[J]. 湖北电力,2012,36(2):55-57.
- [5] 陈斌,房祥玉,郎需军,等. 电力电缆的排管敷设方式[J]. 电力建设,2011,32(3):121-123.
- [6] 梁永春,王忠杰,刘建业,等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术,2010,36(3):763-768.
- [7] 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.
- [8] 江福章. 电力电缆载流量计算及提升的研究现状及展望[J]. 电线电缆,2020(3):6-9,17.
- [9] 王琪,高峻,王茹,等. 石墨填充高密度聚乙烯基复合材料导热性能的研究[J]. 高等学校化学学报,1999,20(9):1480-1482.
- [10] KRUPA I, NOVAK I, CHODAK I. Electrically and thermally conductive polyethylene composites and their mechanical properties[J]. Synthetic Metals,2004,145(2-3):245-252.
- [11] 阎洁. HDPE/石墨导热复合材料的制备与性能[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [12] 冯博,冷金华,陈弦,等. 高密度聚乙烯/石墨/碳纤维导热复合材料性能的研究[J]. 塑料工业,2013,41(6):78-82.
- [13] 赵春宝,汪信,杨绪杰. 碳纳米材料在导热聚合物复合材料中的应用[J]. 电子元件与材料,2012,31(1):82-86,90.
- [14] 张鸣,樊友兵,刘松华,等. 采用低热阻系数回填材料提升穿管敷设电缆载流量[J]. 高电压技术,2016,42(8):2394-2398.
- [15] 梁永春,李彦明,李延沐,等. 地下电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算方法[J]. 电工技术学报,2009,24(8):34-38.
- [16] 于建立,常树生,牛远方,等. 地下电力电缆温度场及载流量的数值计算[J]. 东北电力大学学报(自然科学版),2008(4):62-65.
- [17] 梁永春,赵静,闫彩红. 沟槽电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 高电压技术,2012,38(11):3048-3053.
- [18] International Electrotechnical Commission. Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - General: IEC 60287-1-1:2006[S]. Geneva:IEC,2006.