

回填低热阻材料对排管敷设电缆载流量的提升研究

李红发¹, 程绍兵², 王金城¹, 董志聪¹, 王荣鹏¹, 刘秉军², 曾 含³, 刘 刚³

(1. 广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400; 2. 广东电网有限责任公司培训与评价中心, 广东 广州 510000; 3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510000)

摘 要:针对排管敷设电缆散热效果差而导致电缆线路载流量瓶颈的问题,以2×3排管敷设2回路110 kV电力电缆为研究对象,通过热路模型和大电流试验分析了管内回填低热阻材料前后电缆载流量的变化情况,并基于有限元仿真模型分析了电缆载流量与回填材料导热系数的关系。结果表明:2×3排管敷设2回路110 kV 630 mm²电缆时,相比于管内无回填的情况,管内回填低热阻材料后电缆载流量可提升25.22%。随着回填材料导热系数的增大,电缆的载流量不断增加,但增加的速度越来越缓慢,电缆载流量最终趋于稳定。当回填材料的导热系数由1 W/(m·K)增至7 W/(m·K)时,电缆载流量的提升率为8.99%;当回填材料的导热系数由7 W/(m·K)增至13 W/(m·K)时,电缆载流量的提升率仅为2.00%。

关键词:排管敷设;低热阻材料;大电流试验;有限元仿真;载流量

中图分类号:TM726 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)03-0084-09

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.03.012

Study on Improving Ampacity of Cables Laid in Pipes by Backfilling Low Thermal Resistance Materials

LI Hongfa¹, CHENG Shaobing², WANG Jincheng¹, DONG Zhicong¹,
WANG Rongpeng¹, LIU Bingjun², ZENG Han³, LIU Gang³

(1. Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400, China;
2. Training and Evaluation Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the poor heat dissipation effect of the cable laying in piping leads to the cable line appear ampacity bottleneck, we use the 2×3 piping laying of 110 kV power cable with two loops as research object. The changes of cable ampacity before and after backfilling low thermal resistance materials in the pipes was studied through thermal circuit models and large current tests, and the relationship between the ampacity of cable and the thermal conductivity of backfill material was analyzed based on finite element simulation model. The results show that when two circuits of 110 kV 630 mm² cables are laid with 2×3 rows of pipes, compared with the case without backfilling in the pipes, the ampacity of cables after the pipes are backfilled with low thermal resistance materials increases by 25.22%. With the continuous increase of thermal conductivity of the backfill material, the ampacity of cable also continues to increase, but the increase rate is slower and slower, and the ampacity of cable tend to be stable eventually. When the thermal conductivity of backfill material increases from 1 W/(m·K) to 7 W/(m·K), the increase rate of cable ampacity is 8.99%. When the thermal conductivity of backfill material increases from 7 W/(m·K) to 13 W/(m·K), the increase rate of cable ampacity is only 2.00%.

收稿日期:2021-05-08

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(CDKJXM20172813)

作者简介:李红发(1987-),男(汉族),湖北黄冈人,高级工程师,研究方向为输电电缆运行维护;通信作者:曾含(1997-),男(汉族),江西丰城人,硕士生,研究方向为电缆载流量及热参数。

Key words: pipe laying; low thermal resistance materials; high current test; finite element simulation; ampacity

0 引言

随着城市化进程的加快,现代城市配电网中电力电缆的应用越来越广泛。载流量是反映电缆运行可靠性与经济性的重要参数之一,其影响因素较多,其中电缆的敷设方式与电缆周围回填媒质的导热系数直接影响电缆的散热环境,引起载流量的差异。在实际运行中,城市电缆输配电网大量采用穿管直埋以及排管群敷设方式。精确计算电缆载流量与温度场,研究如何提高排管敷设段电缆载流量、改善电缆温度场分布对提高城市输配电网的输送功率,最大限度发挥电缆经济效益具有重大的现实意义。

为改善电缆线路外部散热环境,国内外学者对电缆回填不同材料做了相关的研究。戴南洲等^[1]成功研制出一种提高穿管敷设电缆线路载流量的介质——SH凝胶体,该介质具有初始黏度小、经一段时间后黏度变大、碱度低、稳定性好、泌水率小的特点,通过大电流试验,管道内填充SH凝胶体后电缆线芯温度降低了6.5℃,电缆表面温度降低了7.2℃。徐党国^[2]描述了地下电缆铺设时土壤填充方法及填充材料选择对电缆线路安全运行的影响,介绍了如何选择合适的热填充法。王晓兵等^[3]向管道填充导热介质以提高电缆载流量,试验结果表明,灌浆提高了线路载流量近5%、降低了电缆线芯运行温度约5℃。张国光^[4]通过实验发现在中压电缆结构中采用低热阻的矿物质来代替纤维型材料进行填充在制造工艺上是可行的,并在增大传输容量和减少线损、延长使用寿命方面有卓越的效果。鲁志伟等^[5]采用有限差分法编制了预埋管敷设地下电缆温度场数值的计算程序,分析了单回路和多回路电缆集群管道内填充介质对温度场和载流量的影响,结果发现单回路填充导热介质,缆芯温度降低约7℃,载流量提高约5.6%;多回路电缆由于电缆间的互热效应,填充导热介质对提高载流量的作用显著减小。O E GOUDA等^[6]研究确定最合适的人造土壤,用来填充地下配电网电缆周围的空白,以最大程度地减少干燥区域对电缆绝缘造成热失效的影响。张鸣等^[7]通过理论和试验分析研究了低热阻回填材料对提升穿管敷设电缆载流量的作用,试验结果表明,与填充前相比,回填后3×3排管群敷设电缆的载流量提升了17.2%,单根穿管敷设电缆的载流量提

升了14.5%,3×3穿管电缆群最热电缆外部热阻下降了23.4%,与IEC 60287的分析结果相符。上述研究中回填材料后电缆载流量的提升率都在20%以下,且没有分析回填材料的导热系数与电缆载流量的关系。

因此,本研究介绍一种新型低热阻材料,并以常见的2×3排管敷设110 kV 630 mm²电缆为例,基于热路模型分析管内回填低热阻材料提升电缆载流量的可行性,通过大电流试验分析管内回填低热阻材料前后电缆载流量的变化情况,并基于有限元仿真模型分析电缆载流量与回填材料导热系数的关系。

1 新型低热阻材料简介

采用水、膨润土、石灰粉、水泥、细砂、无机保水材料、聚合物保水材料、无机碱、防水剂等组分配制而成的JT-3型电缆低热阻保护填充介质,具有较好的初始流动性、低热阻和碱度,泌水率低、不腐蚀电缆线路、耐久性长、防火阻燃等技术特点。

新型低热阻材料导热系数的测定参照GB/T 10297—2015《非金属固体材料导热系数的测定热线法》,浆体强度的测定参照GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检测方法(ISO法)》,耐火试验的测定参照GBT 22459.7—2019《耐火泥浆 第7部分:其他性能试验方法》,新拌浆体性质的测定参照GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法》、GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性性能试验方法标准》,最后得到的新型低热阻材料的主要技术性能指标如表1所示。

2 回填低热阻材料提升排管敷设电缆载流量的原理分析

根据IEC 60287^[8-10],忽略绝缘介质损耗、金属护套损耗,单芯电缆的稳态温升公式为式(1)~(2)。

$$\theta_c - \theta_0 = I^2 R \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_0}{R \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4)}} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: θ_c 为导体的工作温度,℃; θ_0 为环境温度,℃; T_1 为绝缘及内外屏蔽单位长度热阻,(m·K)/W; T_2 为绕包带及气隙单位长度热阻,(m·K)/W; T_3 为电缆外护层单位长度热阻,(m·K)/W; T_4 为电缆表面和

表1 新型低热阻材料主要性能指标

Tab.1 Main performance indicators of new low thermal resistance materials

试验项目	试验数据	参考方法
热阻系数/(cm·K/W)(初始态)	15~18	GB/T 10297—2015
热阻系数/(cm·K/W)(潮湿态)	30~40	
抗压强度/MPa(潮湿态)	2.0~3.0	GB/T 17671—1999
抗压强度/MPa(干燥态)	2.2~3.3	
耐火实验	无可燃物	GB/T 22459.7—2019
抗渗实验(长期态)	pH>8	GB/T 50082—2009
抗渗实验(初始态)	pH>13	
温度适应性/℃	0~90	—
密度/(g/cm ³)	1.55	GB/T 50080—2016

周围介质之间单位长度热阻, (m·K)/W; I 为导体中流过的电流, A。

当采用排管敷设电缆时, T_4 采用式(3)计算^[11-13]。

$$T_4 = T_{41} + T_{42} + T_{43} \quad (3)$$

式(3)中: T_{41} 为电缆表面至管道内壁面的单位长度热阻; T_{42} 为管道壁的单位长度热阻; T_{43} 为管道外部单位长度热阻。 T_{41} 、 T_{42} 、 T_{43} 的计算公式分别如式(4)、(5)、(6)所示。

$$T_{41} = \frac{\rho_f}{2\pi} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{r_1^2 + r_2^2 - D^2}{2r_1 r_2} \right) \quad (4)$$

式(4)中: ρ_f 为管道填充介质的热阻系数, (m·K)/W; r_1 为电缆外半径, mm; r_2 为管道内半径, mm; D 为电缆中心点到管道中心点的距离, mm。

$$T_{42} = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D_o}{D_d} \right) \quad (5)$$

式(5)中: ρ_T 为管道材料的热阻系数, (m·K)/W; D_o 为管道外径, mm; D_d 为管道内径, mm。

$$T_{43} = \frac{\rho_w}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{4L_b}{D_o} F_b \right) + \frac{\rho_w - \rho_b}{2\pi} N_b \ln G_b \quad (6)$$

式(6)中: L_b 为混凝土槽距离地面距离, mm; N_b 为负荷电缆根数; G_b 为混凝土槽的几何因素; ρ_b 为混凝土的热阻系数, (m·K)/W; ρ_w 为土壤热阻系数, (m·K)/W; F_b 为混凝土槽(电缆群)的集聚因素。

由式(2)可知, 当电缆本体参数及外界环境温度确定时, 电缆载流量与外界环境热阻呈负相关关系, 电缆载流量随着外界环境热阻的增大而减小。根据式(3), 采用排管敷设电缆时, 电缆的外界环境

热阻为电缆表面至管道内壁面的热阻、管道壁的热阻、管道外部热阻三者之和, 根据式(5)和式(6)可知, 当敷设条件确定时, 管道壁的热阻、管道外部热阻不变, 则电缆的外界环境热阻与电缆表面至管道内壁面的热阻呈正相关关系。根据式(4), 电缆表面至管道内壁面的热阻与管道填充介质的热阻系数呈正比关系, 故电缆的外界环境热阻与管道填充介质的热阻呈正相关关系, 电缆的外界环境热阻随着管道填充介质热阻的减小而减小。

综上所述, 当电缆本体参数、管道参数及管道外界环境确定时, 电缆载流量与管道填充介质的热阻呈负相关关系, 电缆载流量随着管道填充介质热阻的减小而增大, 故回填低热阻材料能够有效提升电缆载流量。

3 大电流试验评估回填新型低热阻材料对排管敷设电缆载流量的效果

为了评估回填低热阻材料对排管敷设电缆载流量的效果, 选取 110 kV 630 mm² 的单芯 XLPE 电缆作为试验对象, 根据文献[14], 电缆的结构参数和材料参数如表 2 所示。搭建两段排管敷设电缆(一段排管内无回填, 另一段排管内回填低热阻材料)同时试验, 排管管长 10 m。两段排管内均放置 2 回路电缆线路, 电缆编号为 1~12。

表2 YJLW0364/110 1×630 电缆参数

Tab.2 YJLW0364/110 1×630 cable parameters

结构	材料	内径 /mm	外径 /mm	厚度 /mm	热阻率 /(m·K)/W
导体	铜	0	30.3	15.15	2.5×10 ⁻³
导体屏蔽	半导体	30.3	32.9	1.3	3.5
绝缘层	XLPE	32.9	65.9	16.5	3.5
绝缘屏蔽	半导体	65.9	67.9	1.0	3.5
绕包层	阻水带	67.9	70.9	1.5	6.0
气隙层	空气	70.9	74.9	2.0	34.0
金属护套	铝	74.5	88.5	2.0	4.2×10 ⁻³
外护层	PE	88.5	99.5	5.5	3.5

3.1 升流电路

试验采用由升流变压器、调压器、电流控制器、电容补偿器和电流互感器组成的升流电路给试验电缆施加设定负荷, 其升流电路原理如图 1 所示^[15]。

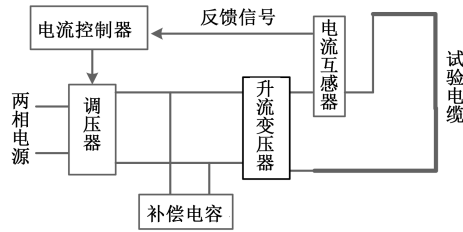


图1 试验电缆升流电路原理图

Fig.1 Schematic diagram of test cable up-current circuit

在升流电路中,电流互感器、电流控制器和调压器组成了试验电缆加载负荷的控制系统,根据电流互感器测量的试验电缆实际电流和电流控制器设定的试验电缆预期电流间的差值,调节调压器的电压输出从而实现对试验电缆的负荷控制。由于110 kV单芯电缆回路的电感较大,为充分利用试验供电电源的功率,需要在升流变压器上并联电容补偿器。

3.2 试验电缆回路

无回填的排管段为对比排管段,回填低热阻材料的排管段为验证排管段,电缆接线电路原理图如图2所示。

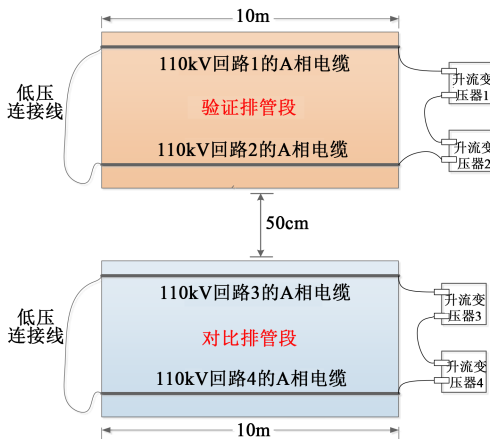


图2 电缆接线原理图

Fig.2 Schematic diagram of cable wiring

由图2可知,对110 kV单芯电缆,将两根电缆串联两台升流变压器形成一个回路,两根电缆通过低压连接线相连,两台升流器通过串联磁路的方法相连接,试验时一个排管段的6根电缆一起加载电流,两个排管段同时试验。电缆排管试验回路截面示意图如图3所示。试验回路实物图如图4所示。

3.3 试验回路测温系统

本试验采用T型热电偶和无纸记录仪组成的测温系统实现对温升过程中电缆和环境温度的监测,

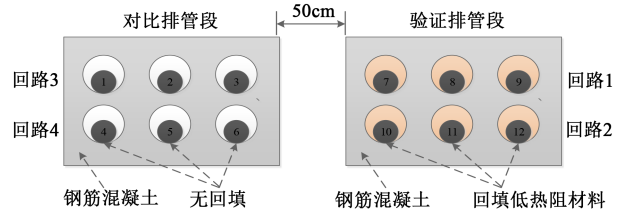


图3 试验回路排管截面示意图

Fig.3 Schematic diagram of the cross-section of test loop pipe



图4 试验回路排管实物图

Fig.4 The physical diagram of test loop pipe

试验时为减小轴向传热对测量结果的影响,所有电缆的测温位置均设置在电缆沟或排管的中部0.5 m范围内,包括电缆测温和环境测温。测量信号通过长引线传输到外部的无纸记录仪,如图5所示。电缆各层测温取点示意图如图6所示。

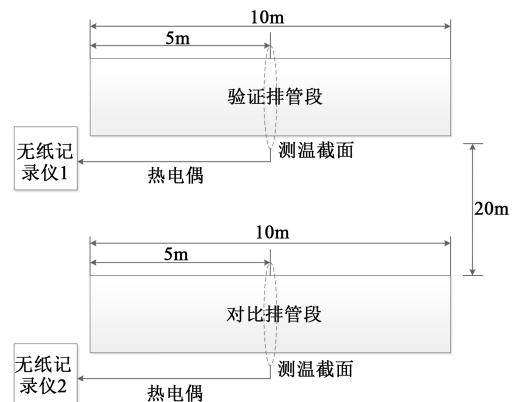


图5 测温系统接线示意图

Fig.5 Wiring diagram of temperature measurement system

4 试验结果分析

当电缆各层温度稳定时,各电缆的导体温度、表皮温度和导体中模拟的负荷电流值如表3所示。选取两个排管段中导体温度最高的电缆进行对比,

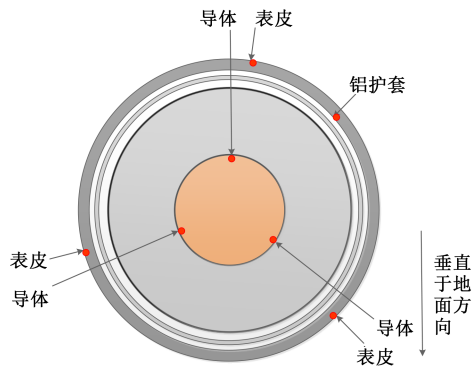


图6 单芯电缆本体测温取点示意图

Fig.6 Schematic diagram of temperature measurement point for single-core cable body

表3 试验电缆的负荷电流、导体温度和表皮温度

Tab.3 Load current, conductor temperature, and skin temperature of test cable

回填材料	电缆编号	负荷电流 /A	导体温度 /°C	表皮温度 /°C
—	1	996.6	90.1	62.2
	2	996.8	90.8	63.4
	3	998.0	89.2	61.3
	4	996.6	88.7	60.8
	5	996.8	89.9	62.6
	6	998.0	85.1	59.7
低热阻材料	7	1247.6	81.3	51.4
	8	1248.2	84.5	56.1
	9	1250.4	85.5	56.2
	10	1247.6	84.5	53.4
	11	1248.2	92.6	57.1
	12	1250.4	79.4	52.4

则对比排管段选取电缆2,验证排管段选取电缆11,如图7所示。

由图7可知,当管内无回填,给电缆施加996.8 A的负荷电流时,电缆导体温度达到了90.8°C,略高于90°C,即可认为该敷设条件下电缆的载流量为996.8 A。而回填低热阻材料后,给电缆施加1248.2 A的负荷电流时,电缆导体温度达到了92.6°C,略高于90°C,即可认为该敷设条件下电缆的载流量为1248.2 A。相比于管内无回填的情况,管内回填低热阻材料后,电缆的载流量提升了25.22%。

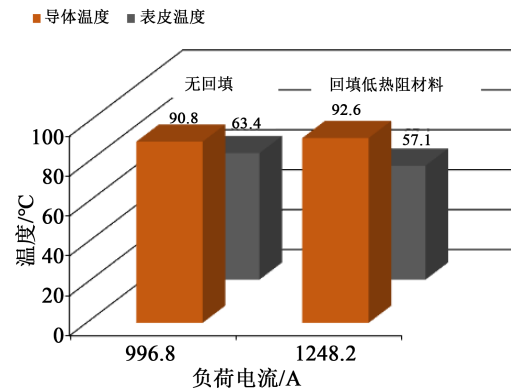


图7 排管敷设电缆回填低热阻材料前后的载流量变化

Fig.7 The ampacity changes before and after backfilling the low thermal resistance material of the cable laying in the piping

从两种情况下电缆的表皮温度分析电缆载流量提升的原因。由图7可知,无回填情况下电缆的表皮温度为63.4°C,回填低热阻材料后电缆的表皮温度为57.1°C,由于两组排管内电缆所处环境温度相同,回填低热阻材料情况下电缆表皮温度与环境温度的温差低于无回填情况,而回填低热阻材料的电缆负荷电流大于无回填的情况,说明回填后电缆的外部环境热阻小于回填前的电缆外部环境热阻。由式(2)可知,相同环境温度下,电缆的外部环境热阻越低,电缆载流量越大,因此回填低热阻材料后电缆的载流量能够得到有效提升。

5 基于有限元仿真模型分析回填材料的导热系数与排管敷设电缆载流量的关系

以第3节试验所用的双回路110 kV 630 mm²电缆敷设于2×3地下排管为例建立有限元计算模型,分析回填材料的导热系数与排管敷设电缆载流量的关系,排管的结构参数如图8所示。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的情况下,可忽略轴向传热的影响。排管敷设电缆的散热涉及电缆本体和土壤的热传导、管内空气的自然对流以及电缆表面与管内壁的辐射3种传热方式。

5.1 物理场控制方程

电缆加载工频电流时,缆芯导体处为电磁热源,可视为稳态场处理,其电磁场控制方程为式(7)^[6]。

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = -J_s + j\omega\sigma A \quad (7)$$

式(7)中: μ 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,

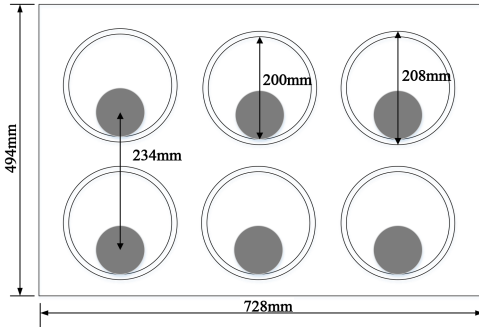


图8 2×3排管敷设电缆结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of 2×3 piping laying cable structure

rad/s; σ 为电导率, S/m。

电磁损耗表达式为式(8)。

$$\begin{cases} q_v = \frac{1}{\sigma} \int_s J^2 dS \\ J = -j\omega\sigma A + J_s \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: q_v 为体积生热率, W/m^3 ; S 表示截面积, m^2 ; J 为电缆截面电流密度, A/m^2 。

有热源区域(如电缆导体、金属护套)的热传导控制方程为式(9)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v = 0 \quad (9)$$

式(9)中, T 为介质温度。

无热源区域(如电缆其他层、土壤、管道等)的热传导方程为式(10)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (10)$$

排管内空气自然对流过程可以用微圆体的质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律描述。质量守恒定律如式(11)所示。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

式(11)中, u 、 v 分别为流场速度向量在 x 轴和 y 轴上的分量。引入 Boussinesq 假设: ①流体中的黏性耗散略而不计; ②除密度外其他物性为常数; ③对密度仅考虑动量方程中与体积力有关的项, 其余各项中的密度作为常数。同时引入有限压力的概念, 则得到的动力方程如式(12)和(13)所示^[18]。

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + \rho g \alpha (T - T_{ref}) \cos \theta \quad (12)$$

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + \rho g \alpha (T - T_{ref}) \sin \theta \quad (13)$$

式(12)~(13)中: T_{ref} 为流体参考温度, K ; α 为体积膨胀系数, K^{-1} ; ρ 为流体密度, g/cm^3 ; p 为流场的压力, Pa ; g 为重力加速度, m/S^2 。

当单物质在不计黏性扩散、辐射和内热源的情况下达到稳态时, 其能量方程可表示为式(14)。

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) = 0 \quad (14)$$

式(14)中, λ 为流体的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

电缆外表面和排管内表面间的热辐射公式为式(15)。

$$Q_I = K \varepsilon_i F_{IJ} A_I (T_i^2 + T_j^2) \times (T_i + T_j)(T_i - T_j) \quad (15)$$

式(15)中: Q_I 为表面 I 的单位面积传热率; K 为 Stefan-Boltzman 常数; ε_i 为有效热辐射率; F_{IJ} 为角系数; A_I 为表面 I 的面积; T_i 和 T_j 为表面 I 与表面 J 的绝对温度值。其中该单元与其他表面上单元的角系数 F_{IJ} 采用非隐藏法计算, 具体方程为式(16)。

$$F_{IJ} = \frac{1}{A_I} \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^n \left[\frac{\cos \theta_{Ip} \cos \theta_{Jq}}{\pi r^2} \right] A_{Ip} A_{Jq} \quad (16)$$

式(16)中: A_{Ip} 为表面 I 上第 p 个单元的面积, $p=1, 2, 3, \dots, m$; A_{Jq} 为表面 J 上第 q 个单元的面积, $q=1, 2, 3, \dots, n$; θ_{Ip} 为单元 p 、 q 间连线与单元 p 法线方向的夹角; θ_{Jq} 为单元 p 、 q 间连线与单元 q 法线方向的夹角; r 为单元 p 与单元 q 间的距离。

5.2 边界条件

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 3 m。

电缆传热问题的边界条件可归结为三类: 第一类为已知边界温度, 如式(17)所示; 第二类为已知边界法向热流密度, 如式(18)所示; 第三类为对流边界条件, 如式(19)所示。深层土壤温度几乎不变, 符合第一类边界条件; 左右土壤边界的法向热流几乎为零, 符合第二类边界条件; 表层土壤与空气接触, 存在对流散热, 符合第三类边界条件, 如图 9 所示^[18-20]。

$$T = T(x, y)|_{\Gamma_1} \quad (17)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} + q = 0 \quad (18)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = h(T - T_{ref}) \Big|_{\Gamma_3} \quad (19)$$

式(17)~(19)中： Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 分别为三类边界条件的积分边界； λ_s 为土壤的导热系数， $W/(m \cdot K)$ ； h 为表层土壤与空气的对流换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ 。

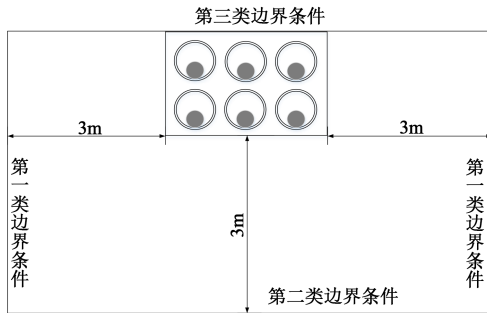


图9 边界条件示意图

Fig.9 Schematic diagram of boundary conditions

5.3 仿真结果分析

将土壤导热系数设置为 $2 W/(m \cdot K)$ ，对流换热系数设置为 $16 W/(m^2 \cdot K)$ ，表面辐射率设置为 0.9 ，环境温度设置为 $20^\circ C$ 。设置回填材料的导热系数初始值为 $0.1 W/(m \cdot K)$ ，按步长 0.1 增加，直至达到 $10 W/(m \cdot K)$ ，以排管内导体温度最高的一相电缆达到 $90^\circ C$ 左右，即认为此时加载电流达到排管敷设电缆载流量，评估回填材料的导热系数与电缆载流量的过程如图10所示。以无回填、回填导热系数为 $1 W/(m \cdot K)$ 的材料为例，回填前后 2×3 排管敷设电缆的温度场分

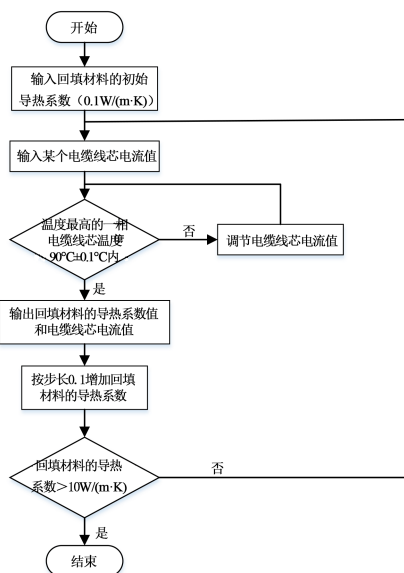
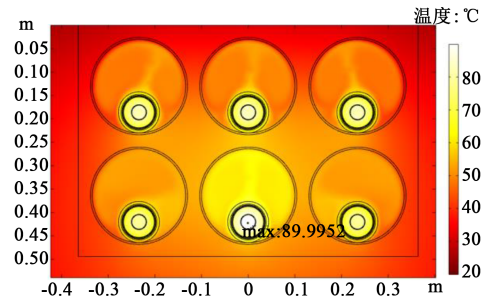


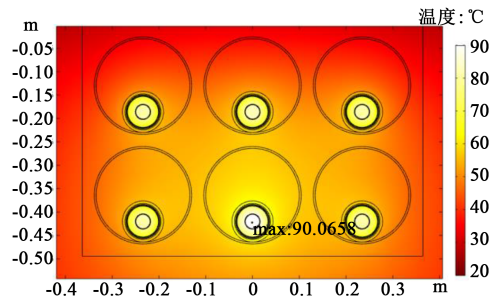
图10 评估回填材料导热系数与电缆载流量的流程图

Fig.10 Flow chart for evaluating the thermal conductivity of backfill materials and the ampacity of cables

布如图11所示，回填不同导热系数材料时电缆的载流量如图12所示。



(a)无回填



(b)回填导热系数为 $1 W/(m \cdot K)$ 的材料

图11 2×3 排管敷设电缆温度场分布

Fig.11 Temperature field distribution of 2×3 piping laying cable

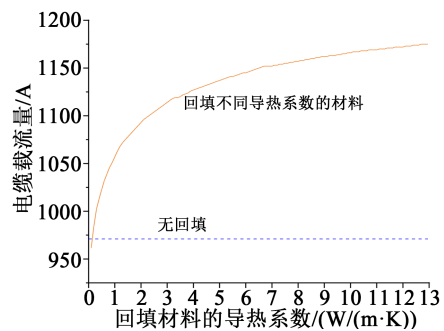


图12 2×3 排管敷设 $110 kV 630 mm^2$ 电缆回填不同导热系数材料时电缆的载流量

Fig.12 The ampacity of the cable when laying $110 kV 630 mm^2$ cables with 2×3 rows of pipes and backfilling materials with different thermal conductivity

从图12可以看出，随着回填材料导热系数的不断增大，电缆的载流量也不断增加，但增加的速度越来越缓慢，电缆载流量最终将趋于稳定。对此种现象解释如下：根据式(3)可知，回填材料的导热系数越大，电缆表面至管道内壁面的热阻越小，电缆的外部环境热阻就越小，根据式(2)，电缆的外部环境热阻越小，电缆载流量就越大，故电缆载流量与回填材料导热系数的关系呈正相关关系，电缆载流

量随着回填材料导热系数的增大而增大。根据式(2)~(6)可知,电缆载流量是关于回填材料导热系数的增函数,其一次导数大于零,二次导数小于零,故电缆载流量增加的速度越来越慢,最终将趋于稳定。

从图12中选取无回填以及回填材料导热系数为0.1、0.2、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13 W/(m·K)的点,得到表4结果。

表4 2×3排管敷设110 kV 630 mm²电缆回填材料前后电缆载流量的提升率

Tab.4 The improving rate of ampacity of the laying 110 kV 630 mm² cable with 2×3 rows of pipes before and after backfilling material

回填材料的导热系数/(W/(m·K))	电缆载流/A	提升率/%
—	971	—
0.1	962	-0.93
0.2	985	1.44
1	1 057	8.86
2	1 092	12.46
3	1 113	14.62
4	1 127	16.07
5	1 137	17.10
6	1 145	17.92
7	1 152	18.64
8	1 157	19.16
9	1 162	19.67
10	1 166	20.08
11	1 169	20.39
12	1 172	20.70
13	1 175	21.01

从表4可以看出,2×3排管敷设110 kV 630 mm²电缆时,管内无回填的情况下,电缆的载流量仅为971 A,管内回填导热系数为0.2 W/(m·K)的材料后,电缆的载流量达到了985 A,超过了无回填的情况。当回填材料的导热系数由1 W/(m·K)增大为7 W/(m·K)时,电缆载流量的提升率为8.99%;当回填材料的导热系数由7 W/(m·K)增大为13 W/(m·K)时,电缆载流量的提升率仅为2.00%,提升效果不明

显,越往后效果越不明显。而回填材料的导热系数越大,所需的材料费用就越高,出于经济效益考虑,回填材料的导热系数为7 W/(m·K)时比较合理。

6 结论

以2×3排管敷设的2回路单芯110 kV 630 mm²电缆为研究对象,通过大电流试验分析了管内无回填的常规敷设条件下和管内回填低热阻材料下电缆载流量的变化规律,并通过热路模型和有限元仿真软件分析了回填材料的导热系数与电缆载流量的关系,得到以下结论:

(1)理论分析结果表明,排管内回填低热阻材料能够减小电缆的外部环境热阻,有效提升排管敷设电缆的载流量。

(2)大电流试验结果表明,2×3排管敷设2回路110 kV 630 mm²电缆时,相比于管内无回填的情况,管内回填低热阻材料后电缆载流量可提升25.22%。

(3)有限元仿真结果表明,2×3排管敷设2回路110 kV 630 mm²电缆时,随着回填材料导热系数的不断增大,电缆的载流量不断增加,但增加的速度越来越缓慢,电缆载流量最终趋于稳定。当回填材料的导热系数由1 W/(m·K)增大为7 W/(m·K)时,电缆载流量的提升率为8.99%;当回填材料的导热系数由7 W/(m·K)增大为13 W/(m·K)时,电缆载流量的提升率仅为2.00%。

参考文献:

- [1] 戴南洲,刘坚,王晓兵.一种提高电缆载流量的管道填充介质[J].广东电力,1999(3):56-57.
- [2] 徐党国.地下电缆敷设的回填方法[J].国际电力,2005(4):49-51.
- [3] 王晓兵,蚁泽沛.管道内填充介质提高电缆载流量的研究[J].高电压技术,2005(1):79-80.
- [4] 张国光.改变电缆填充材料提高电缆传输能力[J].河南电力,2006(3):63-64.
- [5] 鲁志伟,于建立,葛丽婷,等.管道内填充导热介质提高电缆载流量[J].高电压技术,2009,35(11):2826-2831.
- [6] GOUDA O E, DEIN A Z. Improving underground power distribution capacity using artificial backfill materials[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2015,9(15):2180-2187.
- [7] 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.
- [8] International Electrotechnical Commission. Electric cables-calculation of current rating-Part 1-1: Current rating equation (100% load factor) and calculation of losses: General: IEC 60287-1-1: 2014[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2014.
- [9] International Electrotechnical Commission. Electric cables-Calculation of current rating-Part 2-1: Thermal resistance: Calculation

- of thermal resistance: IEC 60287-2-1:2015[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2015.
- [10] International Electrotechnical Commission. Electric cables-Calculation of the current rating-Part 3-1: Operating conditions-Site reference conditions: IEC 60287-3-1:2017[S]. Geneva, Switzerland: IEC,2017.
- [11] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国水利水电出版,2003.
- [12] 陶文铨. 传热学(第五版)[M]. 北京:高等教育出版社,2019.
- [13] GAGGIDO C, OTERO A F, CIDRAS J. Theoretical model to calculate steady state and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(3):667-677.
- [14] 赵健康,樊友兵,王晓兵,等. 高压电力电缆金属护套下的热阻特性分析[J]. 高电压技术,2008,34(11):2483-2487.
- [15] 王荣鹏,李红发,聂文翔,等. 提升110kV电缆载流量的试验研究[J]. 新型工业化,2020,10(2):45-49.
- [16] 王雅妮,张洪亮,吴建东,等. 不同敷设方式下高压直流电缆温度场与电场仿真计算研究[J]. 绝缘材料,2017,50(7):71-78.
- [17] 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.
- [18] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等. 基于有限元法的XLPE电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 重庆大学学报,2010,33(5):72-77.
- [19] 孟凡凤,张兵,方晓明,等. 影响直埋电缆载流量的因素的研究[J]. 绝缘材料,2007,40(3):64-66.
- [20] 张洪麟. 基于有限元法的地下电缆温度场和载流量的计算及仿真[D]. 重庆:重庆大学,2009.