第 50 卷 第 2 期：749-758　　高电压技术　　Vol.50, No.2: 749-758
2024 年 2 月 29 日　　High Voltage Engineering　　February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230126

土壤微观结构参数对埋地电缆温度与载流量的影响分析

刘文博[1]，谢茂杰[1]，周　游[1]，马国庆[2]，韩明明[2]，张　皓[2]
（1. 长沙理工大学电气与信息工程学院电网防灾减灾全国重点实验室，长沙 410114；
2. 国网山东电力科学研究院，济南 250003）

摘　要：土壤内部结构影响埋地电缆传热过程和电缆载流能力。该文考虑埋地电缆实际敷设工况，建立了土壤微观结构参数下的电–热–流多物理场耦合仿真模型。首先基于多孔介质传热理论构建了土壤导热系数评估模型。然后以典型±500 kV 高压直流电缆为对象，依次研究埋地电缆在不同土壤孔隙率、水气比、渗透率下温度场与载流量的变化情况。最后将结果与 IEC 标准进行比较，分析了 IEC 标准的使用局限性。结果表明：土壤孔隙率的增大和水气比的减小使得孔隙内气–液占比增大，导致土壤导热系数减小和电缆温度上升。在极端干燥土壤中，电缆稳态温度随孔隙率变化最大可相差 25 ℃左右。土壤渗透率的增大则使得传热方式由单一热传导变为热传导与热对流共同传热，由此引起的电缆稳态温度变化最大可相差约 20 ℃。因此 IEC 标准计算载流量仅适用于土壤渗透率低且孔隙率低、水气比高的土壤环境。研究结论可为复杂环境下电缆敷设选址提供理论依据，最大限度利用直埋型电缆的载流能力，提高运行可靠性。

关键词：孔隙率；渗透率；水气比；载流量；温度场分布；埋地电缆

Effects of Microstructural Parameters of Soil on Temperature and Ampacity of the Buried Cables

LIU Wenbo[1], XIE Maojie[1], ZHOU You[1], MA Guoqing[2], HAN Mingming[2], ZHANG Hao[2]
(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: The internal structure of soil affects the heat transfer process and the ampacity of buried cables. Therefore, the laying conditions are taken into consideration, and an electro-thermal-fluid fields model is established for studying the internal structure's effects of soil on the operation of buried cable. Firstly, a thermal conductivity model of soil was established based on the heat transfer theory in porous medium. Secondly, the variations of temperature distribution and ampacity of ±500 kV high-voltage DC cable were studied under different soil porosity, water-air ratio and permeability. Finally, the results were compared with those from the model of IEC standard to analyze the limitations of IEC model. The results show that the increase of soil porosity and the decrease of water-air ratio enhance the ratio of air-liquid within the pores, leading to a decrease in the soil thermal conductivity. This, in turn, results in an elevated cable temperature. In extremely case of dry soils, the maximum elevated temperature in steady-state cable is about 25 ℃. The increase in soil permeability changes the heat transfer mode from single heat conduction to heat conduction and convection composite processes, thus the steady state temperature changes in cable can vary by up to approximate 20 ℃. As a result, the IEC standard for cable ampacity calculations can be specifically applied to conditions with low soil permeability, low porosity, and high water-air ratios. The research findings can provide a theoretical basis for the selection of cable laying locations in complex environments, maximizing the ampacity of buried cables, and enhancing their operational reliability.

Key words: porosity; permeability; water-air ratio; ampacity; temperature field distribution; buried cable

基金资助项目：国家自然科学基金 (52177015；51607012)；国家电网有限公司科技项目 (52060022002H)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177015; 51607012), Science and Technology Project of SGCC (52060022002H).

0 引言

高压电缆是输送电能的关键设备，因其具有输送容量大、损耗低、传输距离远等优点广泛应用在电力工程领域[1]。电缆负荷在载流量之内是电缆安全运行的前提条件，而电缆的载流量又受到绝缘材料的散热性能和耐热等级的限制。以目前广泛使用的高压交联聚乙烯电缆为例，其载流量按照导体最高温度为 70 ℃进行设计和敷设[2-3]。埋地敷设是长距离输电中常用的一种敷设方式，因其工艺简单、施工成本低而被广泛使用。然而，对于埋地电缆，除敷设方式会影响电缆的散热及载流量外[4]，土壤的不同结构、组分等也会对电缆传热产生较大影响。

以往评估埋地电缆载流量大多根据现场工况通过试验方法来确定。此类方法尽管较准确，但需对整段线路分多段测量。随着输电电压等级的提高，长距离输电线路增多，导致测量成本大幅上升，无法大面积推广[5]。除此之外，工程上还采用基于 IEC 60287 标准形成的解析法评估电缆载流量[6-8]。但该方法将模型中的环境热阻简化成一个定值，无法反映实际的复杂环境散热。相比解析法，数值法可通过建立电–热–流耦合模型结合特定边界条件，反复迭代求解电缆温度场分布进而可反演出不同复杂情形下电缆载流量[9]。但以往利用此方法研究时，土壤传热过程被概括为单一热传导，而未曾考虑上覆植被变化或土质变迁时由于渗透率改变引起的传热方式的改变。

土壤是典型的多孔介质，其孔隙率和水气比的变化会影响其热阻变化。文献[10]利用分形理论分析了土壤孔隙率与热阻系数的关系，指出孔隙率增大将引起热阻系数变大。文献[11]指出回填材料中水气比与孔隙率变化对热阻系数有较大影响。文献[12]试验发现，土壤渗透性对土壤的蓄热能力有重要影响，同时也会影响其导热性能。文献[13]虽然对海底电缆沉积物渗透性开展了研究，但研究将孔隙率视为定值，未考虑孔隙率与水气比变化对电缆温度场分布和载流量的影响。目前还鲜有研究综合考虑土壤内部微观参数变化对埋地电缆温度场和载流量的影响。

本文以±500 kV 高压直流电缆作为研究对象，提出一种综合评估土壤孔隙率、水气比、渗透率变化对埋地电缆温度场分布和载流量影响的模型。首先，基于传热学原理构建了改进后的导热系数评估模型[14]，利用该模型评估了不同土壤孔隙率与水气比下土壤导热系数的数值。然后通过构建的电–热–流多物理场耦合模型，依次研究了不同土壤孔隙率、水气比与渗透率对埋地电缆温度场的影响变化规律，并根据所得结果给出相应的敷设建议；最后，综合分析了土壤微观参数变化对电缆载流量的影响。通过与 IEC 60287 标准对所构建的解析模型对比，确立了 IEC 解析法的适用范围。

1 模型构建与研究方法

1.1 机理分析与数学模型

电缆发热因素可归结于 4 个层面：金属套损耗、铠装层损耗、绝缘损耗、导体损耗[15]。对直流电缆，其金属套层和铠装层不会出现涡流及环流现象，故金属套损耗和铠装层损耗不纳入计算。而正常运行无明显缺陷的电缆其绝缘损耗亦可忽略不计[16]。因此，直流电缆发热因素主要归结于导体损耗。其中，直流电缆的导体损耗主要考虑导体自身的焦耳损耗而无需考虑邻近效应和集肤效应。

当直流埋地电缆内通电流后，导体内部产生的焦耳损耗致使温度不断升高。热量经电缆绝缘传至土壤，再由土壤向外传递热能。由于金属导体电导率是温度的函数，温度的变化将引起电导率的变化，电导率的变化又会引起焦耳损耗的重新分布。因此，温度场与电场是互相耦合的物理场。另一方面，作为典型的多孔介质，土壤内部包含固、液、气 3 种物质形态。不同形态的物质在热性能参数上表现出较大差异。通常用孔隙率和水气比侧面反映土壤内部相态分布情况。其中孔隙率是指孔隙体积与土壤总体积之比的百分率；水气比则是指孔隙内水分体积与空气体积之比。除此之外，用渗透率表征水分在土壤中自由流动的难易程度，其值与土壤孔隙率和砂质大小有关。渗透率的增大会加强对流散热过程，从而影响埋地电缆的温度分布。当电缆周围土壤内覆积水且内部渗透率较高时，土壤温度变化将改变孔隙中水的密度。密度差的存在导致水在孔隙中发生对流而加强换热，进而影响土壤内部温度分布。因此温度场和流场也是互相耦合的物理场。电缆在多孔土壤内部换热多物理场耦合关系见图 1。

电缆缆芯中电场强度和电流密度[17]关系为：

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{J}}{\sigma(\theta)} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，V/m；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度，A/m^2；$\sigma(\theta)$为电导率，S/m，其值受温度 θ 影响。

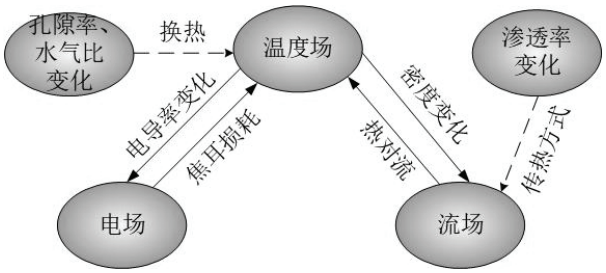


图 1　电缆在多孔土壤中的换热多物理场耦合关系

Fig.1　Multi-physical field coupling of heat transfer for cables in porous soil

金属导体的电导率随温度变化的函数关系式可表示为：

$$\sigma(\theta)=\frac{\sigma_{20}}{1+\alpha(\theta_{\mathrm{c}}-20)} \tag{2}$$

式中：σ_{20}为导体 20 ℃时的电导率，S/m，取 5.81×10^{7} S/m；α 为温度系数，1/℃，取 0.003 94 1/℃；θ_{c} 为导体温度，℃[18]。

根据能量守恒定律，温度场的控制方程由如下方程[19]表示：

$$(\rho C)_{\mathrm{e}}\frac{\partial\theta}{\partial t}+(\rho C)_{\mathrm{p}}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\theta=\nabla\cdot(\lambda_{\mathrm{e}}\nabla\theta)+Q \tag{3}$$

$$(\rho C)_{\mathrm{e}}=(1-\varepsilon_{\mathrm{p}})(\rho C)_{\mathrm{s}}+\varepsilon_{\mathrm{p}}(\rho C)_{\mathrm{p}} \tag{4}$$

式中：ρ 为密度，kg/m^3；θ 为温度，℃；t 为时间，s；C 为热容，J/(kg·℃)；λ 为导热系数，W/(m·℃)；下标 e、p 和 s 分别代表等效参数、孔隙与固体；$\boldsymbol{u}$ 为流体速度，m/s；Q 为热源，J；ε 为孔隙率，无量纲。

式(3)中左侧第 1 项为热累积项，表征传热介质的储热能力；第 2 项为流体对流项，用以描述孔隙内气液热对流过程。右侧第 1 项为热传导项，λ_{e}表征介质的传热能力，其值可通过 1.3 节改进导热系数评估模型求得；第 2 项代表热源，本研究中直流电缆产生的焦耳损耗作为唯一热源参与计算，其值由电场强度和电流密度共同决定：

$$Q=\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E} \tag{5}$$

联立式(1)—式(5)可得电–热耦合方程：

$$\begin{aligned}&((1-\varepsilon_{\mathrm{p}})(\rho C)_{\mathrm{s}}+\varepsilon_{\mathrm{p}}(\rho C)_{\mathrm{p}})\frac{\partial\theta}{\partial t}+(\rho C)_{\mathrm{p}}\boldsymbol{u}\cdot\nabla\theta=\\&\nabla\cdot(\lambda_{\mathrm{e}}\nabla\theta)+\frac{|\boldsymbol{J}|^{2}}{\sigma(\theta)}\end{aligned} \tag{6}$$

式(6)第 3 项流体速度 u 由流体的连续性方程和运动方程共同控制[20]。连续性方程本质归属于质量守恒定律，任何流体运动都必须满足连续性条件，即：

$$\rho_{\mathrm{p}}\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{7}$$

宏观尺度下描述多孔介质流体运动多使用 Darcy 定律[21]。在本研究中，土壤渗透率的增大将引起流体速度的增大。流速的增大使得 Darcy 定律中压力梯度和流速不再满足线性关系。因此需要对 Darcy 定律做出相应修正。本文引入 Binkman-Forchheimer 方程作为流体的运动方程。该方程是基于 Darcy 定律的扩展，能很好地模拟土壤多孔介质内流体的流动情况[22]。

$$\begin{aligned}&\nabla\cdot\frac{\mu}{\varepsilon_{\mathrm{p}}}(\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}})-\nabla\cdot P\boldsymbol{I}-\frac{\rho_{\mathrm{p}}\varepsilon_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{z}}}{\sqrt{\kappa}}\boldsymbol{u}|\boldsymbol{u}|-\\&\frac{\mu}{\kappa}\boldsymbol{u}|\boldsymbol{u}|+\rho_{\mathrm{p}}g=0\end{aligned} \tag{8}$$

式中：μ 为流体粘度，Pa·s；P 为压强，Pa；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵，无量纲；C_{z} 为孔隙内阻力系数，无量纲；κ 为渗透率，m^2。考虑到渗透率的数量级非常小，工程上多采用达西单位制 d 表示，1 d=1.02×10^{-12} m^2；g 为重力加速度，m/s^2，本文取 9.8 m/s^2；。左侧第 1 项为 Brinkman 修正项，用以表征多孔介质与固态骨架间流体无滑移流动；第 2 项为压强梯度，表征流体压强的变化情况；第 3 项为 Darcy 阻力项，用以描述流体中粘性阻力的作用效果；第 4 项为 Forchheimer 修正项，用以描述流体中惯性力的作用效果；第 5 项为流体的浮力项，用以模拟流体在孔隙中升浮情景。

由于孔隙中流体密度不会出现较大变化，为简化计算，可在重力项中引入 Boussinesq 近似[23]。Boussinesq 近似将流体中除密度外的其他参数均视为常数，方程如下：

$$\rho_{\mathrm{p}}g=\rho_{0}g(1-\beta(\theta-\theta_{\mathrm{r}})) \tag{9}$$

式中：ρ_0 为参考密度，kg/m^3；　β 为热膨胀系数，1/℃；　θ_{r} 为参考温度，℃。

1.2　土壤导热系数评估模型

为评估土壤孔隙率、水气比改变对土壤导热系数的影响，本节提出基于传热学原理的土壤导热系数评估方法。模型基于以下几个假设：1）土壤近似划分成多个物理网格，将孔隙和固相外形模拟成规则分布的正方形网格；2）忽略土壤温度、气压因素变化引起土壤导热系数的变化；3）忽略温度变化造成土壤的热胀冷缩现象；4）水分分布在土壤孔隙中，不考虑水分向固态渗透的情形。

在无外部热源情况时，2 维稳态热传导由如下方程[23]表示：

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \tag{10}$$

式中：λ_x与λ_y分别表示x方向与y方向的导热系数，W/(m·℃)。

对任何传热问题，边界条件可归结为如下3类情形：已知边界温度；已知边界法向热通量；已知换热系数与流体温度。其表达式依次如下：

$$\theta(x,y)\big|_{\Gamma} = f(x,y)\big|_{\Gamma} \tag{11}$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial \boldsymbol{n}}\bigg|_{\Gamma} - q = 0 \tag{12}$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial \boldsymbol{n}}\bigg|_{\Gamma} = \psi(\theta - \theta_{\mathrm{f}})\big|_{\Gamma} \tag{13}$$

式中：$f(x,y)$为边界位置，无量纲；Γ为边界温度值，℃；q为热流密度，W/m²；ψ为对流换热系数，W/(m·℃)；θ_{f}为流体温度，℃；$\boldsymbol{n}$为法相单位向量，无量纲。

研究区域的上下侧为第一类边界条件，上侧取50 ℃，下侧取10 ℃；左右侧为热绝缘边界。相对于土壤截面来说，土壤径向宽度可近似无穷大，且土壤在3维模型的径向方向上，解变量分布几乎没有梯度变化[23]。为减少计算量，缩短计算时间，本文采用2维简化模型进行计算，土壤导热系数数值仿真模型如图2所示。模型共100个网格，每个单元长0.01 m。根据土壤的孔隙率大小随机赋值孔隙与固体骨架参数。模拟水气比分布可再将每个单元划分为4等分，用以模拟不同孔隙率下水气比例为0(干燥)、1:3、1:1、3:1、∞(饱和)时导热系数的变化。图3为孔隙率为10%、20%和30%时随机生成孔隙分布示意图(其中，孔隙率10%部分绘制了当水气比为1:3的示意图)，图中黑色、灰色和白色部分表示固体骨架、水和空气。本文土壤固体骨架导热系数取1 W/(m·℃)，水的导热系数取0.6 W/(m·℃)，空气导热系数取0.026 W/(m·℃)[24-25]。

结合式(10)、式(12)可知，对上述模型只需在某一截面处求解每个节点的热流密度，即可反解出该模型的导热系数。本文取底端截面并进行归一化计算，导热系数计算式如下：

$$\lambda_{\mathrm{e}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=11} q_i}{11} \cdot \frac{L}{\Delta\theta} \tag{14}$$

式中：L为模型边长，m，本文L为0.1 m；$\Delta\theta$为温差，℃，本文为40 ℃；q_i为各个节点处的热流分布密度分布，W/m²，利用导热系数测量模型可求得特定孔隙率、水气比下热流分布密度分布，典型结果如图4所示。

将求解的结果代入式(14)。重复进行上述5次操作，除去最大值与最小值后对求取系数平均值即为所求的土壤导热系数。

1.3 电缆结构模型与参数

本文选取±500 kV高压直流电缆作为研究对象，典型的结构和相关参数如图5和表1所示[26]。

埋地电缆敷设深度通常在0~3 m之间[27]，因此本文埋地电缆敷设深度取1 m。文献[28-29]指出当测量点距离埋地电缆20 m后，土壤温度的变化将不再明显，而求解域大于3倍电缆直径时，流体流

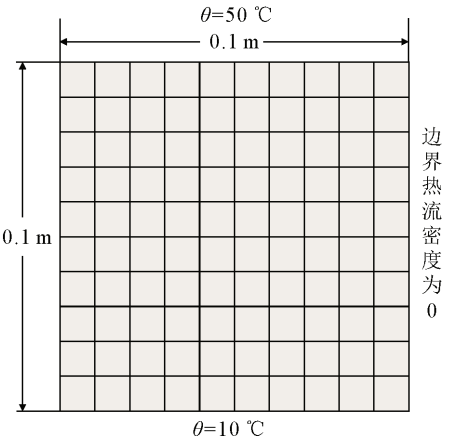
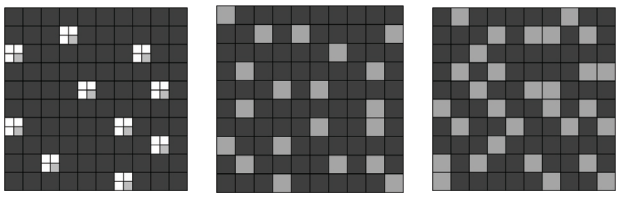


图2 土壤导热系数测量模型

Fig.2 Soil thermal conductivity measurement model



(a)孔隙率10% (b)孔隙率20% (c)孔隙率30%

图3 土壤孔隙率、水气比划分示意图

Fig.3 Division of soil porosity and water-air ratio

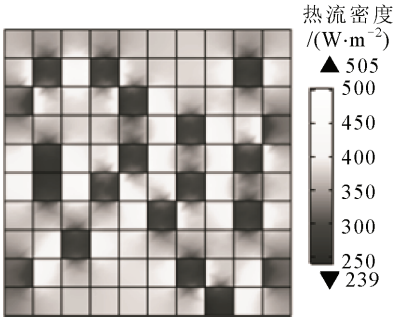


图4 土壤热流密度分布

Fig.4 Heat flux distribution in soil

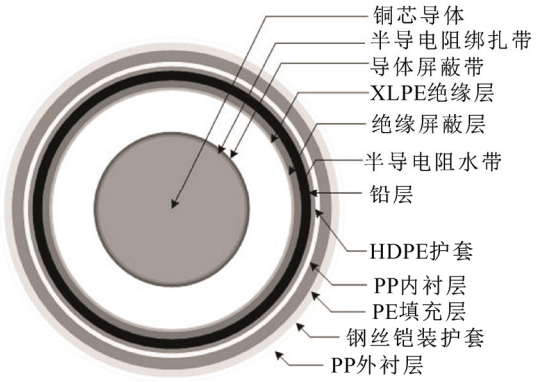


图 5　±500 kV 高压直流电缆结构

Fig.5　Structure of ±500 kV HVDC cable

动受电缆的影响将减少。因此，本文选取 40 m×20 m 的土壤面积进行求解。考虑到实际土壤孔隙率变化范围为 0~66.93%[30]，本文分别研究了 0~70%的孔隙率对土壤热阻的影响；水气比依次选取 0(干燥)、1:3、1:1、3:1、∞(饱和)，土壤渗透率取 10^{-2}~10^{5} d[19]用以模拟不同湿度和渗透性的土壤环境。

1.4　边界条件与网格划分

电缆铜芯处施加外部电流 I_0，电缆外壁处设置磁绝缘，矢量磁位 A=0 (V·s)/m；电缆外壁设置无滑移，认为其速度 u=0 m/s。土壤左右距离电缆较远，在边界处施加第二类边界条件，热通量 q_0=0 W/m^2；左右侧流体流速较小，认为法相流速 u=0 m/s；右侧取一边界点，设置压力约束的 P=P_0。底部距离电缆较远，认为其温度θ与环境温度θ_0 相近，在底部设置第一类边界条件，θ=θ_0；同理，认为底部法相流速 u=0 m/s。土壤上部设置第三类边界条件，对流换热系数ψ=6.5 W/(m·℃)[31]。土壤内部施加重力项模拟水分升浮。求解域的边界示意图如图 6 所示。

网格采用三角形网格进行划分求解。为缩短求解时间同时了兼顾精确求解[32]。其中距离电缆较远的区域采用常规网格，在电缆周围采用较为精密的网格划分。网格划分方式如图 7 所示。

2　结果与分析

2.1　孔隙率、水气比对电缆换热的影响

土壤孔隙率与水气比的变化将引起土壤导热系数发生改变，而导热系数的改变间接影响电缆的换热过程。图 8 展示了在不同水气比下孔隙率与土壤导热系数的变化情况。当孔隙率超过 60 %时，相应曲线都发生一定弯折，导热系数下降的斜率略微平缓，且水气比越小该现象越明显。该特性与

表 1　电缆结构参数

Table 1　Cable structural parameters

结构	厚度/mm	半径/mm	导热系数/(W·(m·℃)$^{-1}$)	恒压热容/(J·(kg·℃$^{-1}$))	密度/(kg·m^{-3})
铜芯导体		31.5	385	400	8700
半导电阻捆绑带	0.6	32.1	0.23	2000	1150
导体屏蔽层	2	34.1	0.5	2700	1120
XLPE 绝缘层	30	64.1	0.35	2300	1200
绝缘屏蔽层	1.8	65.9	0.5	2700	1120
半导电阻水带	2.5	68.4	0.23	2000	1150
铅层	5.3	73.7	35	128	11 340
HDPE 护套	4.6	78.3	0.5	1900	980
PP 内衬层	1	79.3	0.23	1850	910
PE 填充层	6.5	85.8	0.42	2302	900
钢丝铠装护套	8.05	93.85	58.2	450	7780
PP 外衬层	4.2	98.05	0.23	1850	910

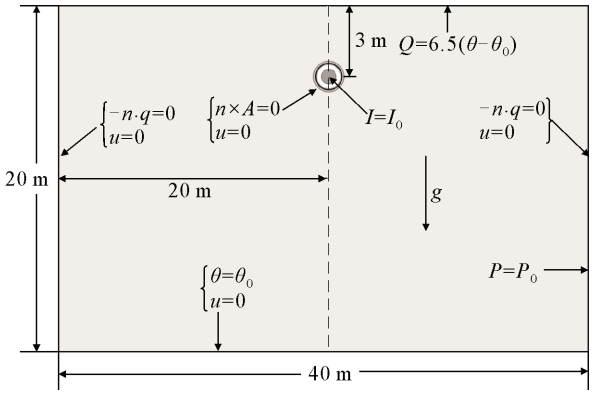


图 6　求解域边界划分示意图

Fig.6　Diagram of boundary partition

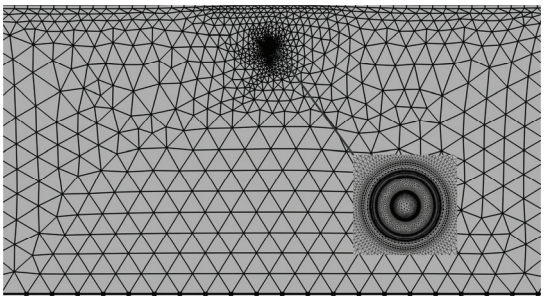


图 7　网格划示意图

Fig.7　Diagram of meshing

Mandelbrot 划分逾渗分形网络渗流的临界值一致[33]。当水气比为∞时，不同孔隙率下土壤导热系数的变化情况与 Prasad 等所测数据结论基本一致，相对误差最大不超过 3 %，证明了该模型的有效性[34]。

固定水气比下，孔隙率增大会导致土壤导热系数减少。且水气比越小，土壤导热系数受孔隙率影响越大，最大变化幅值可达 0.95 W/(m·℃)；反之，

水气比越大，导热系数随孔隙率的变化幅度越小。造成此类现象的原因是：土壤内部不同空隙间的空气和水难以流动，换热主要以热传导为主，水和空气的导热系数均小于固体骨架的导热系数。随着孔隙率的增大，土壤中固态物质占比减少，水和空气逐渐占据主导地位，使得土壤的导热系数呈现下降趋势。另一方面，由于空气的导热系数较小，对应的导热能力较差，仅为固体骨架的约 1/38。当水气比较低时，不良热导的空气成为热量传递的主要介质，土壤导热系数大幅下降。随着水气比逐渐升高，土壤孔–固相间导热系数的差异减小，导热系数变化幅度变小。

为进一步分析电缆温度场变化，外部环境取 30 ℃，土壤渗透率取 10^{-2} d，电缆流过的负载电流 I_0 取 2000 A。依次求得不同水气比、孔隙率下电缆温度场变化情况如图 9 所示。

研究表明孔隙率增加与水气比下降均会导致电缆温度上升。土壤孔隙率的增加使得土壤中水和空气占比增大，对应的土壤导热系数降低，电流因损耗产生的热量难以通过土壤传导出去，因此埋地电缆温度呈现上升趋势。而水气比的降低进一步使得电缆温度对孔隙率变化的敏感性增大，受导体和绝缘材料最高运行温度限制，埋地电缆所能承受的孔隙率变化范围将减小。另一方面，土壤的水气比越低，电缆温度上升趋势越明显，电缆承受孔隙率变化区间越小。这是由于水气比下降致使土壤中导热系数较差的空气占比增大，因此热量容易在土壤中堆积，土壤温度增加，这反过来使得电缆产生的热量难以通过土壤快速消散，从而导致电缆温度上升更明显。

综上所述，对目前已投入运行的埋地电缆，应在其瓶颈段处重点关注土壤内部孔隙率与水气比的变化情况。在外部环境出现极端炎热和干旱时期，应注意加强对电缆瓶颈段的温度监测。对正在施工的埋地电缆，预设线路时应绕开干燥、疏松土质段，尽量选择湿润、紧实的地段进行敷设。需要指出的是，敷设地段的水气比并非越大越好。土壤水气比的增大将使埋地电缆长期服役在潮湿环境中，加速电缆老化过程，甚至导致电缆护套出现绝缘损坏，影响电缆稳定运行[35]。

2.2 渗透率对电缆传热方式的影响

为探究土壤渗透率对电缆传热方式的影响，本节首先分析了不同渗透率下电缆温度场分布的变化

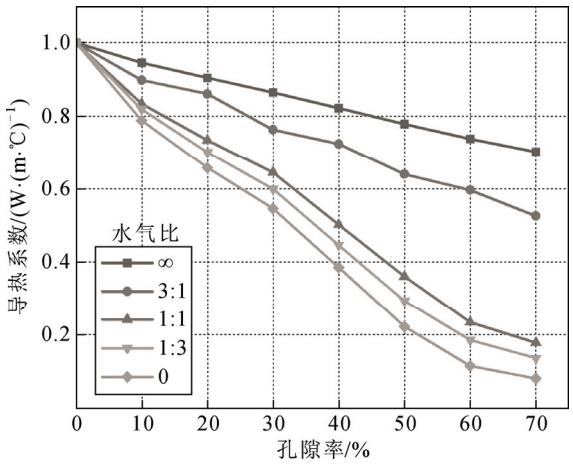


图 8 土壤导热系数随孔隙率与水气比变化

Fig.8 Soil thermal conductivity variation with porosity and water-air ratio

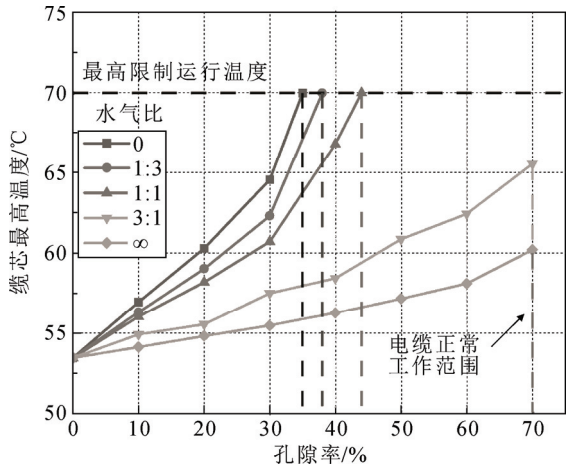


图 9 不同水气比、孔隙率下电缆温度场变化

Fig.9 Cable temperature under different water-air ratio and porosity

情况。其中土壤的孔隙率取中间值 40%，外部温度取 30 ℃。由于饱和土壤下导热系数变化幅值小、变化幅度缓，为便于分析默认选取饱和土壤进行讨论。土壤导热系数根据图 9 结果取孔隙率 40%时 0.82 W/(m·℃)，电缆流过的负载电流 I_0 取 2410.3 A。典型的不同渗透率下电缆的温度场分布如图 10 所示。图中灰色箭头表示土壤中水分流动，箭头的大小代表流速。

当渗透率为 10^{-2} d 时，土壤中的水分流动较缓慢，此时电缆发出的热能基本以热传导形式向外传递。此过程与未考虑渗透率时的电缆换热过程一致。电缆的最高温度为 70.0 ℃。渗透率增大到 10^{2} d 时，土壤中水的流速明显增大，一部分热量因水分的流

动被传递出去，电缆周围温度下降致 63.6 ℃。

图 11 进一步绘制了不同渗透率下缆芯内最高温度变化趋势。随着渗透率逐渐增大，缆芯温度一开始变化并不明显；当渗透率进一步增大到某一零界点时，缆芯温度出现明显降低；当渗透率到达某一阈值时，其增大对缆芯温度影响不再明显。这是因为渗透率的增大促使土壤中的水分流动过程加快。当渗透率较小时，土壤内部水分几乎不流动，热量单纯以热传导形式向外传递能量。随着渗透率的增加，水分流动加快，电缆周围的土壤水分因温度升高密度减小而向土壤上侧流动。而向上流动的水又挤压上部温度较低的水向下流动，此时热过程由单纯的热传导变成由热传导加热对流两种形式作用下的传热。而受水自身热容限制，当水储热达到饱和时，对流散热过程不再明显，此时缆芯温度将趋于恒定值。

我国土壤包括红壤、黄壤等多种类型，而一般土壤的渗透率大约在 30~140 d 之间[19]。典型土壤的渗透率变化范围正处于图 11 温度变化最明显的区间段。在此区间内，渗透率的细微变化均将引起埋地电缆温度的较大改变。因此，施工人员在预设线路时应充分考虑敷设段渗透率的变化情况。对于瓶颈段处恰在土壤渗透率变化敏感地段时，可在电缆附近增设相应在线监测装置用以掌握该段区域电缆温度的变化情况。

2.3　综合土壤微观参数对电缆载流量的影响

根据导体最高运行温度(70 ℃)可反演出电缆对应的载流量，进而可为电缆安全、高效运行提供相应依据。本节综合考虑土壤孔隙率、水气比、渗透率 3 者变化时引起的电缆载流量变化。外部温度取 30 ℃，孔隙率取 10%~70%，水气比依次取 0、1:3、1:1、3:1、∞，渗透率依次取 30、50、100、140 d 进行计算。结合工程实际，对不适宜敷设的地段(土壤导热系数<0.5 W/(m·℃)[36])适当进行删减，具体结果详见附录 A。

土壤孔隙率的增大和水气比的下降均使得电缆载流量有所下降。这是由于两者的变化均使得土壤导热系数下降，间接导致电流因损耗产生的热量难以通过土壤传导出去。即使电缆内流经较小的电流也能很快到达导体最高运行温度，从而电缆载流量呈现下降趋势。而在同一土质下，渗透率的增大则使得电缆载流量增加。这是因为渗透率的增加使得传热方式增加了热对流过程，电缆产生的热量更容易通过土壤传递出去，因此对应的电缆载流量上升。

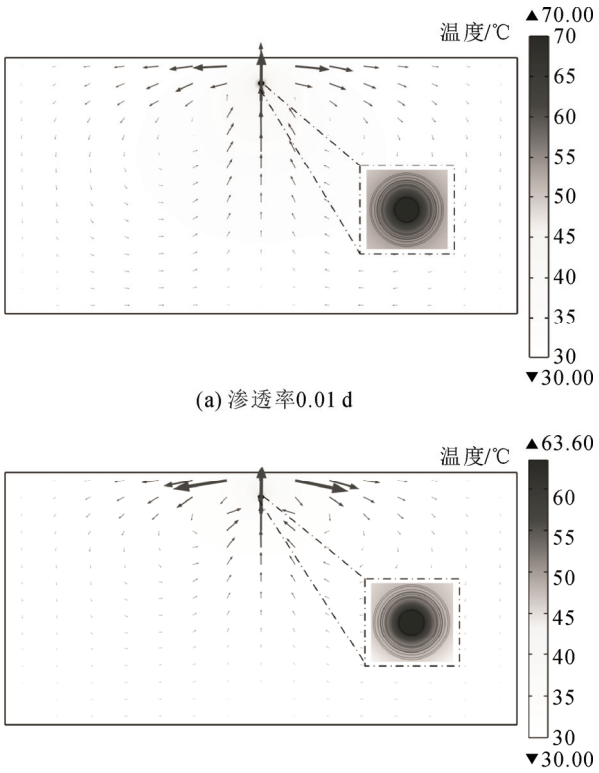


图 10　典型渗透率下电缆温度场分布

Fig.10　Distribution of cable temperature field under typical permeability

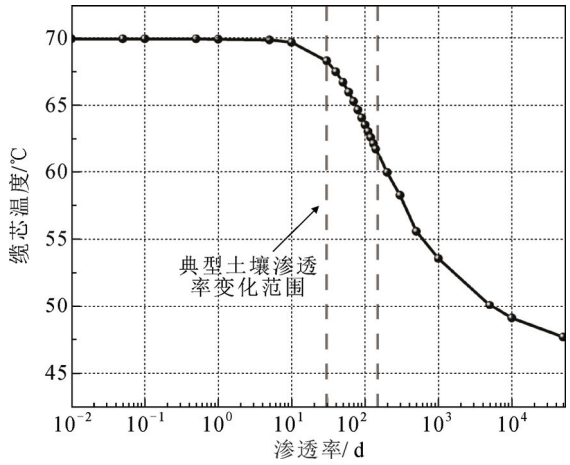


图 11　不同渗透率下电缆温度变化情况

Fig.11　Cable temperature under different permeability

表 2 对比计算了典型土壤参数下埋地电缆载流量以及利用 IEC 解析法计算的载流量之间的差异。由于 IEC 标准解析法没有考虑土壤结构的不同实际情况，仅将现场测得的土壤导热系数视作恒定值进行计算。因此在渗透率低、孔隙率低和水气比高的

表 2 不同土壤参数下计算模型与 IEC 标准的差异比较

Table 2 Results comparison of differences between calculation models and IEC standards under different soil parameters

水气比	孔隙率/%	计算载流量相对差异/%			
		渗透率 (30 d)	渗透率 (50 d)	渗透率 (100 d)	渗透率 (140 d)
1:3	10	1.23	3.55	9.46	12.05
	20	2.33	5.46	11.98	15.86
	30	3.73	9.46	18.15	19.98
	40	7.50	13.60	24.18	29.22
1:1	10	1.23	3.42	8.62	11.74
	20	2.06	4.89	11.08	14.81
	30	3.04	6.57	13.80	17.77
	40	5.94	11.33	20.85	25.69
3:1	10	0.80	2.59	7.16	10.09
	20	1.01	3.04	7.92	11.01
	30	1.74	4.36	10.29	13.79
	40	2.15	5.06	11.42	15.10
	50	3.13	6.75	14.13	18.26

土壤中，IEC 标准计算结果与本文的计算模型差异不大。但是当渗透率高于 100 d 时，由于热对流效应在换热过程中的比重增大，使得 IEC 标准计算结果与本文模型出现的偏差均大于 5%，且土壤孔隙率的增加和水气比的降低都会加剧这种差异。这表明当采用 IEC 标准法计算电缆载流量时，应该先综合判定该电缆的敷设段土壤渗透率是否较低，其对土壤传热效果的影响是否可忽略。当在土壤渗透率较高时，要进一步根据土壤孔隙率和水气比的变化，充分考虑热对流效应对电缆载流量的影响。

3 结论

1）土壤孔隙率的增大会使得电缆温度呈现上升趋势。而土壤水气比越小，电缆温度随土壤孔隙率的变化越明显。在极端干燥土壤中最为明显，本算例下电缆稳态温度随孔隙率变化最大可相差 25 ℃左右。

2）土壤渗透率的增大使传热方式由单一热传导变为热传导与热对流共同传热，而在土壤典型渗透率取值范围内，渗透率的细微变化均将引起埋地电缆温度的较大改变，最大可相差约 20 ℃。

3）IEC 标准仅适用于渗透率低且孔隙率低和水气比高的土壤情况。当渗透率大于 100 d 时，IEC 标准法的计算结果最大相对偏差均大于 5%，且土壤孔隙率的增加和水气比的降低都会加剧这种差异。因此对于土壤渗透率较高的地区，需考虑对流换热效应对电缆温度及其载流量的影响。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 夏泠风，周 挺，许 斌，等. 高土壤电阻率条件下的高压直流输电接地极系统接地电阻限值分析[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1720-1728.
XIA Lingfeng, ZHOU Ting, XU Bin, et al. Analysis of ground resistance limitation value of HVDC electrode system under high soil resistivity condition[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1720-1728.

[2] 王海田，雷宪章，周明瑜，等. 基于国产基料的交联聚乙烯高压直流电缆绝缘材料电性能研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(13)：3980-3989.
WANG Haitian, LEI Xianzhang, ZHOU Mingyu, et al. Research on electrical performances of HVDC cross-linked polyethylene cable using Chinese base material[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3980-3989.

[3] HUANG Z Y, PILGRIM J A, LEWIN P L, et al. Thermal-electric rating method for mass-impregnated paper-insulated HVDC cable circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 437-444.

[4] 吴志祥，周 凯，何 珉. 高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案[J]. 电力科学与技术学报，2020，35(3)：135-140.
WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 135-140.

[5] 梁永春，王婧雅. 基于热路模型和瞬态伴随模型的直埋电缆暂态缆芯温升计算[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3517-3525.
LIANG Yongchun, WANG Jingya. Transient temperature rise calculation of buried power cable based on thermal circuit model and transient adjoint model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3517-3525.

[6] IEC. 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—2014[S]. Genève, France: International Electrotechnical Commission, 2014.

[7] IEC. Electric cables-calculation of the current rating-part 2-1: thermal resistance-calculation of thermal resistance: IEC 60287-2-1[S]. Geneva, France: International Electrotechnical Commission, 2002.

[8] IEC. Electric cables - calculation of the current rating - part 3-1: sections on operating conditions-reference operating conditions and selection of cable type: IEC60287-3-1[S]. Geneva, France: International Electrotechnical Commission, 1999.

[9] 马建伟，尹轶珂，王 磊，等. 基于三维温度场的电缆登杆对电缆群载流量的影响研究[J]. 电力科学与技术学报，2019，34(1)：88-95.
MA Jianwei, YIN Yike, WANG Lei, et al. 3D temperature field simulation of underground cables' ampacity influenced by the climbing-pole cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 88-95.

[10] 鲍玲玲，靳鹏飞，王 雪，等. 非饱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.

[11] 王志国，梁 卫，杨文哲，等. 基于表征体元的空心型回填多孔结构导热模型[J]. 科学技术与工程，2022，22(25)：11012-11017.
WANG Zhiguo, LIANG Wei, YANG Wenzhe, et al. thermal conductivity model for hollow-type backfilled porous structures based on representative elementary volume[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25): 11012-11017.

[12] 许智隼，胡五龙. 基于三维 X-CT 图像的结皮土壤孔隙结构特征与渗透率[J]. 农业工程学报，2021，37(14)：89-97.
XU Zhisun, HU Wulong. Characteristics of pore structure and permeability in soil crust using 3D X-CT images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2021, 37(14): 89-97.

[13] 肖冬萍，包 杨，杨 帆，等. 计及沉积物渗透性的捆绑式高压直流海底电缆载流量评估模型[J]. 中国电机工程学报，2021，41(14)：

5066-5076.
XIAO Dongping, BAO Yang, YANG Fan, et al. A model for estimating the ampacity of bundled HVDC submarine cables considering sediment permeability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 5066-5076.
[14] 李守巨，范永思，张德岗，等. 岩土材料导热系数与孔隙率关系的数值模拟分析[J]. 岩土力学，2007，28(增刊 1)：244-248.
LI Shouju, FANG Yongsi, ZHANG Degang, et al. Numerical simulation of relationship between thermal conductivity of geotechnical material and its porosity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Supplement 1): 244-248.
[15] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术，2016，42(4)：1142-1150.
LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1142-1150.
[16] GIOVANNI M, MASSIMO M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: advances in research and development[M]. New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.
[17] 赵凯华，陈熙谋. 新概念物理教程：电磁学[M]. 北京：高等教育出版社，2003：10-68.
ZHAO Kaihua, CHEN Ximou. New concept physics course: Electromagnetism[M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2003: 10-68.
[18] 黄吉超. 高压直流交联聚乙烯电缆电热耦合研究和稳态载流量计算[D]. 广州：华南理工大学，2016.
HUANG Jichao. Study on electro-thermal coupling and steady-state rating computation of HVDC XLPE cable[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2016.
[19] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京：科学出版社，1995：56-88.
LIN Ruitai. Introduction to heat and mass transfer in porous media[M]. Beijing, China: Science Press, 1995: 56-88.
[20] 高　歌. 计算流体力学[M]. 北京：机械工业出版社，2015：23-88.
GAO Ge. Computational fluid dynamics[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2015: 23-88.
[21] SHAPIRO A A. A three-dimensional model of two-phase flows in a porous medium accounting for motion of the liquid-liquid interface[J]. Transport in Porous Media, 2018, 122(3): 713-744.
[22] BECKERMANN C, RAMADHYANI S, VISKANTA R. Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a. porous layer inside a rectangular enclosure[J]. Journal of Heat Transfer, 1987, 109(2): 363-370.
[23] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京：高等教育出版社，2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. 4th ed. Beijing, China: Higher Education Press, 2006.
[24] 孙始财，于得津，刘昌岭，等. 冰生消过程体系导热系数动态变化特性[J]. 制冷学报，2018，39(4)：69-74.
SUN Shicai, YU Dejin, LIU Changling, et al. Dynamic characteristic of system thermal conductivity during the process of water-ice phase change[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 69-74.
[25] 郭建业，赵英民，吴朝军，等. 温度对石英纤维毡隔热性能的影响[J]. 材料导报，2020，34(12)：24019-24022，24033.
GUO Jianye, ZHAO Yingmin, WU Chaojun, et al. Effect of temperature on thermal insulation performance of quartz fiber felt[J]. Materials Reports, 2020, 34(12): 24019-24022, 24033.
[26] XUE H Y, MAHSEREDJIAN J, MORALES J, et al. An investigation of electromagnetic transients for a mixed transmission system with overhead lines and buried cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4582-4592.
[27] 乔镜琪，赵学童，夏　源，等. 不同敷设方式下±500 kV 高压直流海缆稳态载流量仿真分析[J]. 高电压技术，2023，49(2)：597-607.
QIAO Jingqi, ZHAO Xuetong, XIA Yuan, et al. Simulation analysis of steady-state ampacity of ±500 kV high-voltage DC submarine cables under different laying methods[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 597-607.
[28] GARRIDO 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): 667-678.
[29] BEJAN A, FOWLER A J, STANESCU G. The optimal spacing between horizontal cylinders in a fixed volume cooled by natural convection[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(11): 2047-2055.
[30] 庞润芳，石莹莹，郑坤灿，等. 土壤、岩样、水泥和煤的多孔介质结构特征研究进展[J]. 科学技术与工程，2017，17(15)：157-166.
PANG Runfang, SHI Yingying, ZHENG Kuncan, et al. Researh progress in structure characteristics of porous medium of soil, rock, cement and coal[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(15): 157-166.
[31] 郝艳捧，陈　云，阳　林，等. 高压直流海底电缆电–热–流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术，2017，43(11)：3534-3542.
HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.
[32] 张云鹏，杨新生，邵定国，等. 基于自适应区域分解的电磁场有限元求解方法研究[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2754-2761.
ZHANG Yunpeng, YANG Xinsheng, SHAO Dingguo, et al. Research on the adaptive domain decomposition finite element method for electromagnetic field analysis[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2754-2761.
[33] KAYE B H. 分形漫步[M]. 徐新阳，译. 沈阳：东北大学出版社，1994：15-188.
KAYE B H. A random walk through fractal dimensions[M]. XU Xinyang, translated. Shenyang, China: Northeastern University Press, 1994: 15-188.
[34] PRASAD V, KLADIAS N, BANDYOPADHAYA A, et al. Evaluation of correlations for stagnant thermal conductivity of liquid-saturated porous beds of spheres[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9): 1793-1796.
[35] 李　蓉，周　凯，饶显杰，等. 配电电缆本体受潮缺陷定位及受潮特性分析[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3470-3480.
LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Localization of damp defects and analysis of moisture characteristics for cable body in the distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3470-3480.
[36] 陈向荣，王启隆，于竞哲，等. 10 kV 交流 XLPE 电缆在不同直流拓扑结构和敷设方式下的直流载流量仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4044-4054.
CHEN Xiangrong, WANG Qilong, YU Jingzhe, et al. Simulation research on DC ampacity of 10 kV AC XLPE cable under different DC operation topologies and laying modes[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4044-4054.



LIU Wenbo

刘文博
1996—，男，硕士
主要研究方向为电缆载流量提升、绝缘材料改性
E-mail: yukinagenki@163.com

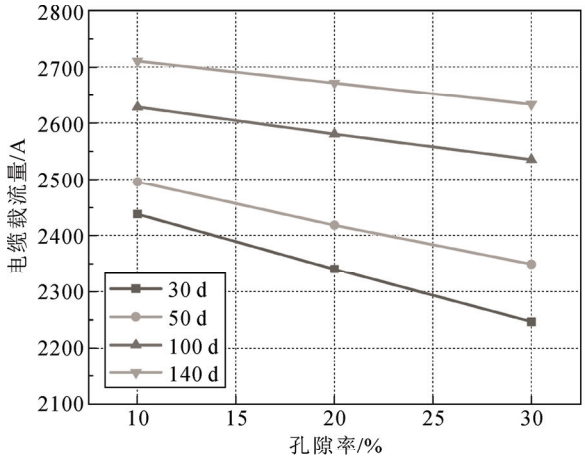


ZHOU You
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

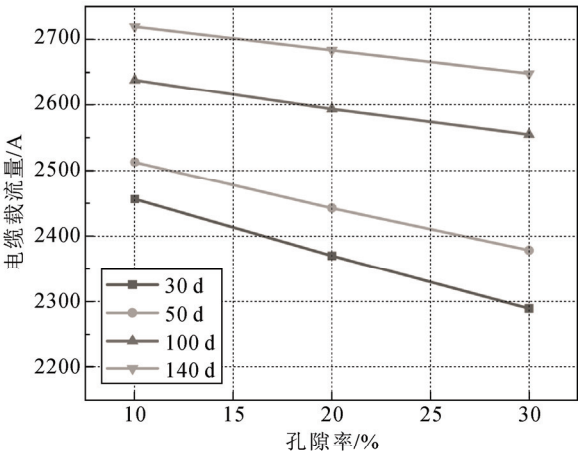
周　游(通信作者)
1987—，男，博士，副教授
主要从事高电压绝缘技术方面的研究工作
E-mail: zhouyou243@163.com

收稿日期　2023-02-02　修回日期　2023-03-15　　编辑　卫李静

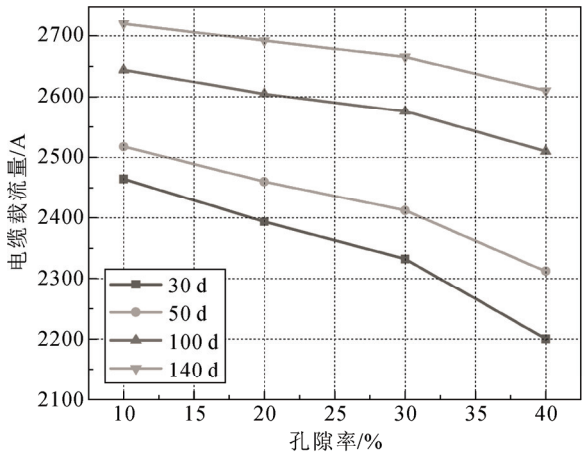
附录 A



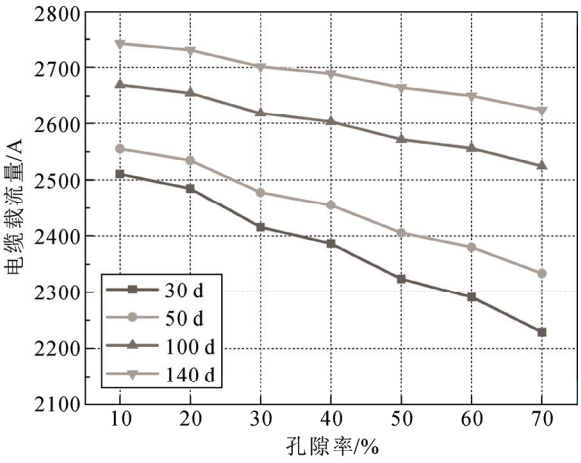
(a) 水气比0



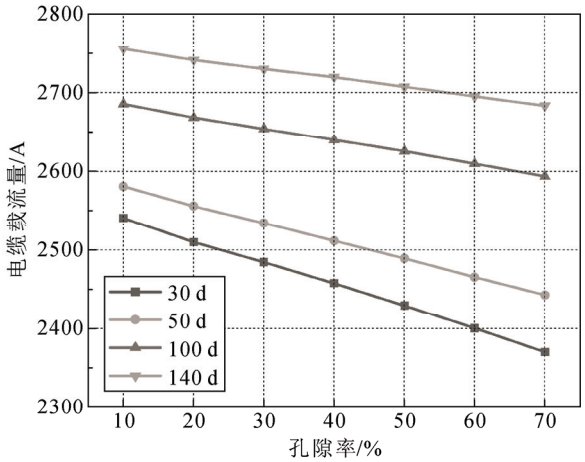
(b) 水气比1:3



(c) 水气比1:1



(d) 水气比3:1



(e) 水气比∞

图 A1　综合土壤微观参数变化对电缆载流量的影响

Fig.A1　Influence of comprehensive soil micro-parameter variations on cable ampacity