

基于热棒功率变化下多年冻土区输电塔 热棒桩基的长期降温效果预测

周亚龙^{1,2}, 郭春香¹, 王旭¹, 蒋代军¹, 刘德仁¹, 何菲¹, 胡渊¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 青藏铁路建设中输电塔穿越多年冻土地区, 最大的难题是解决输电塔桩基的长期热稳定性问题。为研究热棒应用于输电塔桩基的长期降温效果, 基于冻土传热学相关知识, 考虑全球气候变暖、冻土相变、混凝土水化放热、热棒功率变化等因素, 结合青藏铁路望昆—不冻泉段电力塔热棒桩基的现场试验, 建立热棒桩基的三维有限元模型。计算分析 50 a 内热棒功率和桩土体系温度场。计算结果表明: 最初 2 a 内的计算值与实测值吻合度较高, 说明数值计算能较好的模拟此场地桩土体系温度的动态变化; 在热棒的全寿命周期 30 a 内, 热棒功率呈非连续波浪递减式变化; 热棒桩基能有效增加冷储量, 降低土体地温, 第 5 年桩周土地地温降至最低, 融化深度最小, 第 30 年可提高冻土上限 48 cm; 建议在热棒寿命结束后的第 2 年更换新的热棒或进行其他工程处理措施保持输电塔基础的热稳定。

关键词: 土力学; 多年冻土; 电力塔基; 热棒; 降温效果

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)07 - 1461 - 09

Prediction of long-term cooling effect of thermal pipe foundation of transmission tower in permafrost regions considering the change of thermal pipe power

ZHOU Yalong^{1,2}, GUO Chunxiang¹, WANG Xu¹, JIANG Daijun¹, LIU Deren¹, HE Fei¹, HU Yuan¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Road and Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: For power transmission towers along Qinghai—Tibet railway line which runs across permafrost regions, the biggest problem is to solve the long-term thermal stability of transmission tower pile foundation. In order to study the long-term cooling effect of thermal pipes applied to the pile foundation of transmission towers, a three-dimensional finite element analysis model of thermal pipe foundation was established based on frozen soil heat transfer theory and field test of thermal pipe foundation of power tower in the Wonkhu—Budongquan section of Qinghai—Tibet railway and considering global warming, frozen soil phase change, hydration heat release of concrete and change of thermal pipe power factors, et al. The power of thermal pipes and the temperature of the pile-soil system in 50 years were calculated and analyzed. The calculation results show that, in the first two years, the calculated and measured values are in good agreement with each other, which indicates that the proposed

收稿日期: 2018 - 10 - 21; **修回日期:** 2019 - 02 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51268033); 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201607); 兰州交通大学青年科技基金项目(2016016)

Supported by the National Science Fund Subsidized Project(Grant No. 51268033), National Key Laboratory of Frozen Soil Engineering Open Fund, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS(Grant No. SKLFSE201607) and Youth Science and Technology Fund of Lanzhou Jiaotong University(Grant No. 2016016)

作者简介: 周亚龙(1992 -), 男, 2016 年毕业于兰州交通大学道路与铁道工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事寒区岩土工程数值计算方面的研究工作。E-mail: 1486855869@qq.com。通讯作者: 王旭(1965 -), 男, 博士, 现任教授, 主要从事寒区岩土工程方面的研究工作。E-mail: publicwang@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1211

model can reasonably simulate the dynamic change of the temperature of the pile-soil system in this site. Within 30 years of the whole life cycle of the thermal pipe, the power of the thermal pipe decreases in a discontinuous wave form. The thermal pile foundation can effectively increase the cold reserve of the foundation and reduce the soil temperature. In the fifth year, the soil temperature around the pile is the lowest and the melting depth is the least. The thermal pile foundation can increase the permafrost upper table by 48 cm in the thirtieth year. In order to maintain the thermal stability of the transmission tower foundation, it is recommended that thermal pipes are replaced by new ones or that other engineering measures are adopted in the second year after the end of the life of the thermal pipes.

Key words: soil mechanics; permafrost; power tower foundation; thermal pipe; cooling effect

1 引言

在多年冻土区建造电力输电杆塔,最大的难题就是如何解决电力杆塔基础的热稳定性问题^[1]。由于太阳辐射的作用,多年冻土的上表层在暖季形成一定深度的融化层。融化层在寒季冻结时将会对杆塔基础产生冻拔力。经过几个或长期冻融循环后,地基土与杆塔基础的相互作用,产生冻拔现象,造成输电杆(塔)变形甚至倾覆,作用在基础侧面的切向冻胀力甚至会使基础被拔出而破坏^[2]。如何降低土体地温,增加桩侧冻结力,很多学者提出了多种措施并对其进行深入研究,其中热棒桩基可以有效增加冷储量,解决电力杆塔基础的热稳定性问题^[3]。

目前热棒降温技术在国内外冻土区得到了广泛应用^[4],现场试验和数值理论分析都取得了很多的研究成果。现场试验方面:李永强^[5]在青藏高原风火山地区进行了热棒的实测效果分析。蒋代军等^[6]在青藏铁路望不段设置热棒桩基试验段工程,持续2 a的观测获得了一些重要的成果。大多现场测试由于试验条件的限制,只进行了短期的监测,得到了热棒的短期降温效果。数值模拟分析方面:郭春香等^[7]考虑热棒材料本身的高导热性、阴阳坡、冻土相变等因素,采用有限单元法计算分析热棒对填土路基的降温效果。李永强^[8]对热棒直径与产冷量和降温效果的关系进行了深入的研究。武俊杰等^[9]用估算热收支的方法评价热棒制冷效果。汪双杰^[10]假设热棒在不同的工作阶段具有不同的导热系数,采用等效传热模型,对热棒的降温效果进行了数值模拟。可查阅的文献分别从不同的角度分析了热棒的降温效果。但是,热棒功率是随着大气温度、蒸发段土体温度的变化而变化的,随着全球气候变暖和蒸发段土体地温的降低,热棒的功率和其降温效果在它的全寿命周期30 a内是如何变化的。30 a之后热棒寿命结束,随着气候变暖,桩土体系的热稳定

性又将会如何变化。

鉴于此,本文将针对热棒桩基,结合青藏铁路望昆~不冻泉段电力塔热棒桩基的现场地温测试试验,考虑全球气候变暖、冻土相变、混凝土水化放热、热棒工作功率变化等因素,建立热棒桩基的三维非线性有限元数值计算模型。运用迭代的计算方法首先计算热棒桩基运行2 a的结果和现场实测数据对比,计算结果吻合程度较高,然后在此基础上计算分析热棒桩基在全寿命周期30 a内的功率变化情况和其降温效果,最后计算在前面热棒作用30 a的基础上,第30~50 a热棒寿命结束后桩土体系的温度场变化情况。

2 计算模型与边界条件

以青藏铁路望昆—不冻泉段试验电力塔热棒桩基为分析模型,桩为混凝土灌注桩,热棒被浇筑在混凝土桩壁,桩长8.0 m,直径0.8 m。热棒型号为TPA I/a 76-2.5/10.5-C-GB/T 27880-2011,其设计使用寿命为30 a,热棒直径76 mm,冷凝段长度2.5 m,绝热段3.0 m,蒸发段5.0 m,冷凝段全部置于大气中,绝热段位于0~3.0 m处,蒸发段位于3.0~8.0 m处。桩壁测温孔(桩土界面测温孔)深8.0 m,桩侧测温孔(距桩壁30 cm处)深8.5 m,热棒基础平面图和各测温元件具体位置如图1所示,地温测试元件采用热敏电阻,地温观测测试仪器采用高精度FLUKE电子万用表。电力杆塔热棒桩基试验场地工程地质情况见图2。表1为计算模型中各土层物理力学参数。鉴于电力输电杆塔基础的特点,本问题可视为轴对称问题,计算模型范围经试算确定,土体半径取10 m,厚度取20 m。图3有限元计算模型。

2.1 热棒计算

现场试验段热棒采用氨工质且垂直放置,启动温差为0.8 °C^[11]。在模型计算中假定绝热段与周围

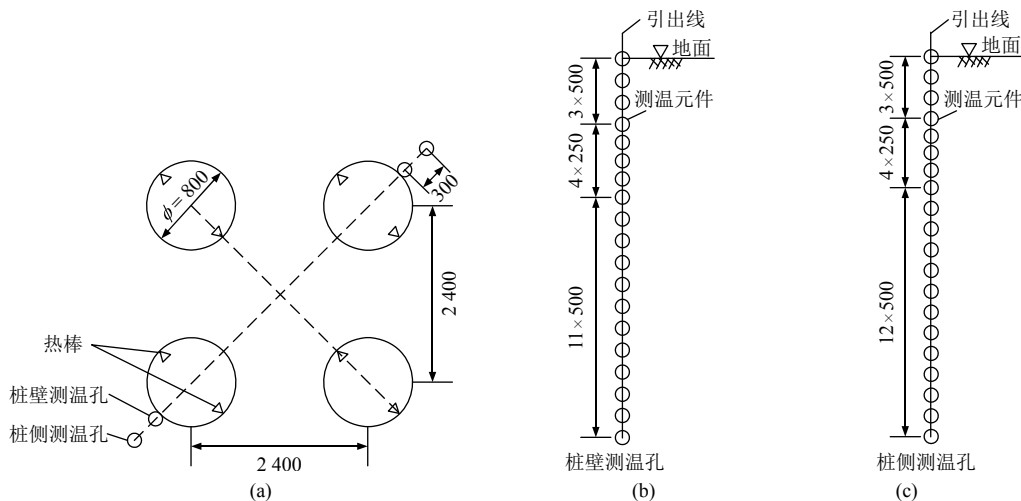


图 1 电力杆塔热棒桩基平面图及测温元件布置图(单位: mm)

Fig.1 Plane map of power tower thermal pile foundation and testing components layout(unit: mm)

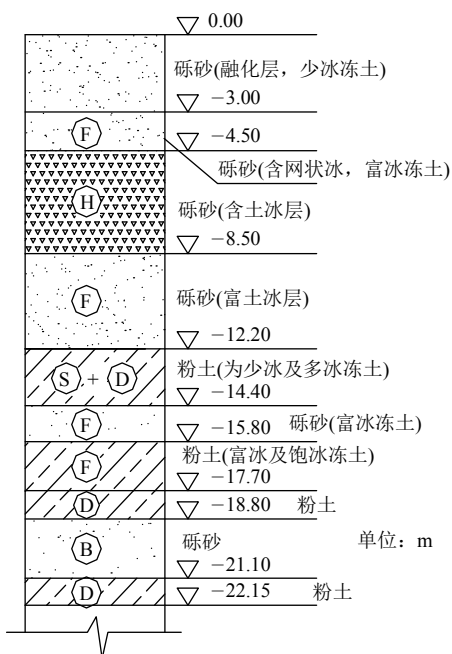


图 2 电力杆塔热棒桩基试验场地工程地质柱状图

Fig.2 Engineering geological histogram of the test site of power tower thermal pile foundation

土体不进行热量交换, 视为绝热边界, 蒸发段的吸热来源于热棒管壁与冻土之间的热传导, 其单位时间的传热量采用下面公式^[12]计算:

$$q = \frac{T_s - T_a}{R_f + R_s} \quad (T_s - T_a \geq 0.8)$$

$$q = 0 \quad (T_s - T_a < 0.8)$$
(1)

$$R_f = \frac{1}{A_s e h}$$
(2)

$$R_s = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi \lambda z}$$
(3)

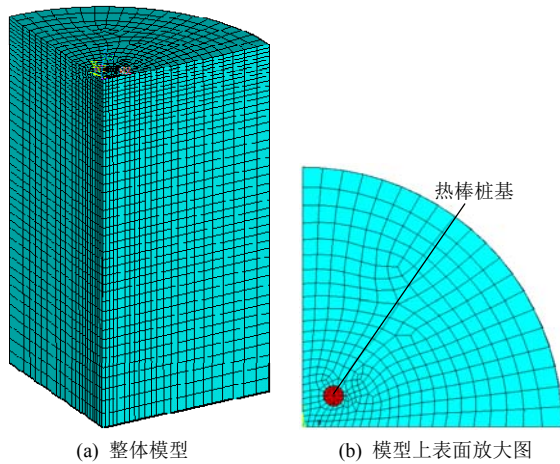
$$e h = 2.75 + 1.51 v^{0.2}$$
(4)

式中: R_f 为冷凝器表面的热阻($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$), R_s 为蒸发段周围土体热阻($^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$), T_s 为蒸发段土体温度($^{\circ}\text{C}$), T_a 为大气温度, A_s 为冷凝器表面的散热面积(m^2), $e h$ 为冷凝器表面有效放热系数, v 为大气平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), r_2 为冻结期蒸发段传热影响范围的平均半径(m), r_1 为蒸发段传热的外半径(m), λ 为蒸发段土

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

地层岩土分类	深度/m	含水量/%	干密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)		比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	
				融土	冻土	融土	冻土
砾砂含植根(少冰冻土)	0~3.0	11	1 200	0.51	1.39	1 597	1 405
砾砂(富冰冻土)	3.0~4.5	21	1 700	1.09	2.55	1 609	1 447
砾砂(含土冰层)	4.5~8.5	45	1 500	1.66	2.77	2 042	1 830
砾砂(富冰冻土)	8.5~12.2	20	1 500	1.53	2.61	1 630	1 412
粉土(少冰冻土)	12.2~14.4	12	1 400	0.57	0.59	1 255	1 171
粉土(富冰冻土)	14.4~15.8	22	1 400	1.13	1.58	1 882	1 486
砾砂(富冰冻土)	15.8~17.7	21	1 700	1.09	2.55	1 609	1 447
粉土	17.7~18.8	12	1 400	0.58	0.63	1 250	1 180
砾砂	18.8~20.0	11	1 700	1.06	2.50	1 600	1 439
混凝土			2 500	1.74	1.74	920	920
热棒				36.50	36.50	1 000	1 000



(a) 整体模型 (b) 模型上表面放大图

图3 有限元计算模型

Fig.3 Finite element calculation model

体的导热系数($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), z 为蒸发段的长(m)。热棒冷凝散热面积为 $3.0 m^2$, 平均风速 $4.5 m/s$, 传热影响半径为 $1.5 m$ 。可得 $R_f = 0.0696 ^\circ C/W$, $R_s = 0.0450 ^\circ C/W$ 。本文的电力塔热棒桩基试验场地年平均气温无详细实测数据, 但由于试验地离清水河较近, 故在数值模拟计算中, 大气温度采用清水河地区年平均气温变化模式^[13], 大气温度为

$$T_a = -3.4 + At + 12.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8640}t - \frac{\pi}{3}\right) \quad (5)$$

式中: $A = 1.65 \times 10^{-9} ^\circ C/W$, 对应未来 50 a 气温升高 $2.6 ^\circ C$ 。

计算中将 q 以线性热流的形式加载于蒸发段, 忽略蒸汽流动热阻和热管蒸发段与土体的接触热阻。蒸发段土体的温度 T_s 采用迭代的方式进行计算, 初次迭代 T_s 取无热棒时的温度场进行计算, 第二次迭代 T_s 取第一次的计算结果, 第三次 T_s 迭代取第二次的计算结果, 重复以上步骤, 在一个周期内反复迭代, 直至与上一次迭代计算结果偏差在 1% 以内, 认为整个温度场计算结果稳定。

热棒单位时间内的传热量即为热棒的功率, 则可得热棒的实际功率为

$$Q = \frac{T_s - T_a}{R_f + R_s} \quad (6)$$

由于 T_s 和 T_a 都是随着时间的变化而变化的, 所以热棒的功率也是随着时间的变化而变化的。

2.2 热传导控制微分方程

考虑土骨架和水的传导、冰水相变作用以及混凝土水化放热的影响, 由显热容法, 可得土体中温度 $T(x, y, z, t)$ 应满足的热传导微分方程^[14]为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v + \rho L \frac{df_s}{dt} \quad (7)$$

式中: ρ 为材料密度(kg/m^3), C 为材料比热容($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), T 为温度($^\circ C$), t 为时间(s), q_v 为混凝土热生成率(W/m^3), L 为土体相变潜热, f_s 为固相率。

由于随着冻土温度的变化, 其导热系数和比热容也随着变化, 并且相界的位置也不是恒定的, 所以该问题是一个强非线性的问题, 只能采用数值计算方法求解。运用离散伽辽金法可得到该问题的有限元解^[15]为

$$[K]\{T\} + [M]\left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (8)$$

式中: $[M]$ 为非稳态变温矩阵, $[K]$ 为温度刚度矩阵, $\{T\}$ 为未知温度值的列向量, $\{F\}$ 为与边界条件有关的温度荷载列向量。

2.3 混凝土水化热计算方程

混凝土桩水泥水化热采用朱伯芳等建议的指数式计算公式^[16]:

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-mt}) \quad (9)$$

式中: $Q(t)$ 为龄期在 t 时的累积水化热($kJ \cdot kg^{-1}$); Q_0 为 t 趋于无穷时的最终水化热($kJ \cdot kg^{-1}$); t 为龄期(d); m 为水化系数, 随水泥品种的不同而异。

在数值模型中, 水化热以热生成率的形式施加到混凝土桩体, 热生成率按下式进行计算:

$$q_v = \frac{\rho_0 dQ(t)}{dt} \quad (10)$$

式中: q_v 为热生成率($kJ \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$), ρ_0 为单位混凝土中所含水泥的质量($kg \cdot m^{-3}$)。

2.4 初始及边界条件

混凝土入模温度为 $10 ^\circ C$, 以 2004 年 2 月 3 日的实测地温为初始温度条件。基于附面层理论, 取普通桩基桩侧测温孔深 $0.5 m$ 处的实测地温作为模型的上边界条件, 满足下式:

$$T = -0.9 + At + 12.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8640}t - \frac{\pi}{3}\right) \quad (11)$$

侧边界($x = 0 m, y = 0 m, r = 10 m$)为绝热边界条件, 满足 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ 。下边界($z = -20 m$)施加一定的温度梯度, 满足 $\frac{\partial T}{\partial n} = 0.03 ^\circ C/m$ 。热棒蒸发段和冻

土交界面满足温度连续性和能量守恒条件^[14]，即

$$T = T_s, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (12)$$

式中： T_s ， λ_s 分别为冻土的温度及导热系数； T 为热棒蒸发段的温度。

3 与实测对比分析

根据前面所建的模型、设置的微分控制方程、边界条件、热棒的工作原理和采用的迭代计算方法，首先计算多年冻土区电力塔热棒桩基和普通桩基(无热棒桩基)分别运行 2 a 的温度场。选择 2 a 内暖寒季代表性时间 2004 年 7 月 26 日和 2005 年 2 月 4 日，绘制桩壁、桩侧地温随着深度的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可得，由于附面层效应，温度在上表面附近变化较为紊乱，但整体可以看出，无论是普通桩基还是热棒桩基，桩壁和桩侧 2 个测温孔的有限元计算值和现场实测值吻合程度较高，说明所建模型和采用的计算方法的合理性。

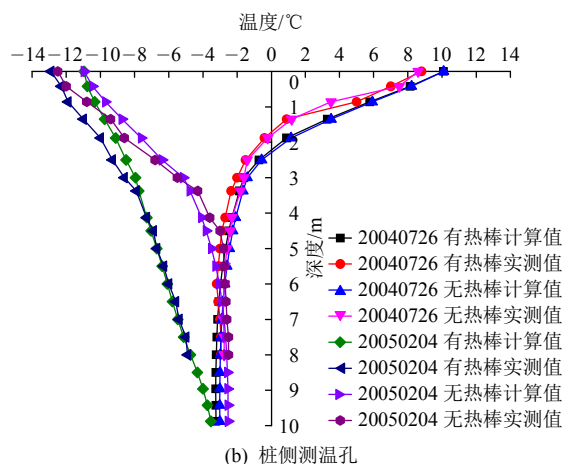
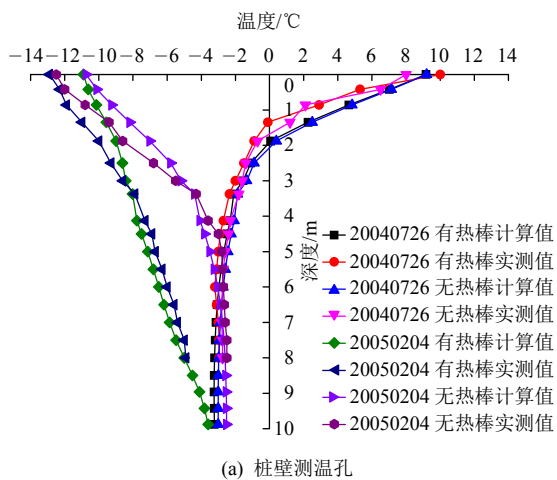


图 4 地温随深度变化曲线

Fig.4 Variation curves of ground temperature with depth

4 长期降温效果预测

4.1 热棒全寿命周期 30 a 内的降温效果

在前 2 a 计算结果的基础上，接着计算热棒桩基和普通桩基分别运行 30 a 的温度场，来分析热棒桩基的长期降温效果。深 5 m 处桩侧测温孔的地温变化曲线如图 5 所示。由图可得，热棒桩基在全寿命工作周期内能有效地降低地温。随着热棒的工作，桩基周围土体地温降低，第 5 年降到最低，之后又缓慢的升高。

在热棒的作用下，每年热棒对桩周土体的降温幅值不同，前 6 a 年最高降温值和年平均降温值都呈现出增大的趋势，之后随着随着时间的增大，年最高降温值和年平均降温值都降低，如图 6 所示。在 30 a 内，热棒最大降低桩侧深 5 m 处土体地温 3.3 °C~3.6 °C，年平均降温 1.2 °C~1.8 °C。

(1) 热棒的功率变化情况

由热棒实际功率的计算公式(式(3))可得，热棒功率与蒸发段土体温度和大气温度的温差成正比。

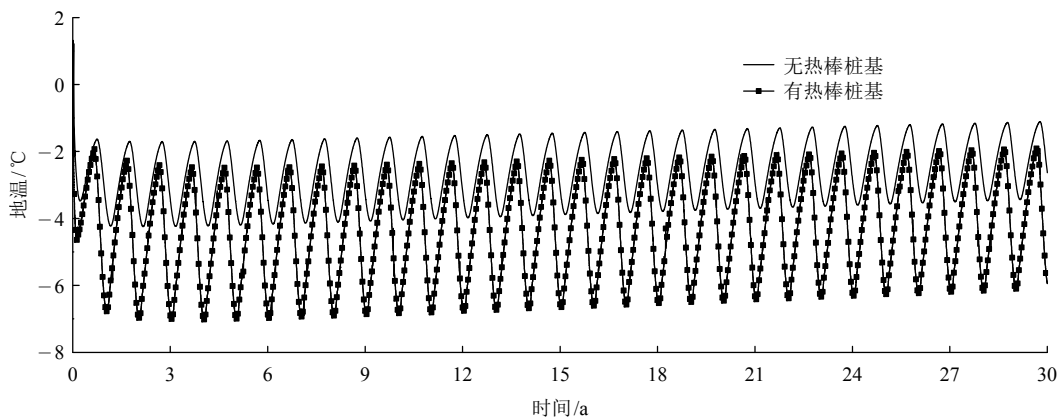


图 5 桩侧测温孔深 5 m 处地温随时间变化曲线(热棒工作时)

Fig.5 Variation curves of ground temperature with time at 5 m depth of thermometer hole on pile side(when the hot rod is working)

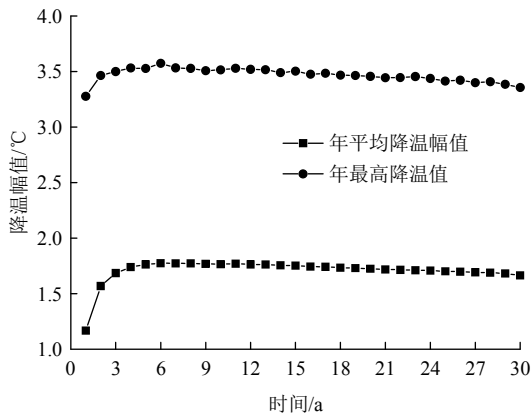


图6 桩侧测温孔深5 m处降温幅值

Fig.6 Amplitude of cooling at 5 m depth of thermometer hole on pile side

电力杆塔桩基刚浇筑完，由于受混凝土水化热的影响，热棒蒸发段周围土体温度在1 d左右升至最高，此时蒸发段土体温度和大气温度的温差达到最大，所以此时热棒的工作功率达到最大值 160.6 W。随着水化热影响作用的减弱，热棒蒸发段周围土体温度逐渐降低，蒸发段土体温度和大气温度的温差逐渐减小，从而热棒的工作功率也随之降低。经过约 49 d后，热棒的功率降为 7.8 W，之后热棒停止工作(热棒的启动温差所对应的功率为 7.0 W)。大约到 240 d，随着周围环境温度的降低，热棒又开始工作。如图 7 所示，在热棒的全寿命工作期内，其功率呈非连续波浪递减式变化。第 1，10，20，30 年内热

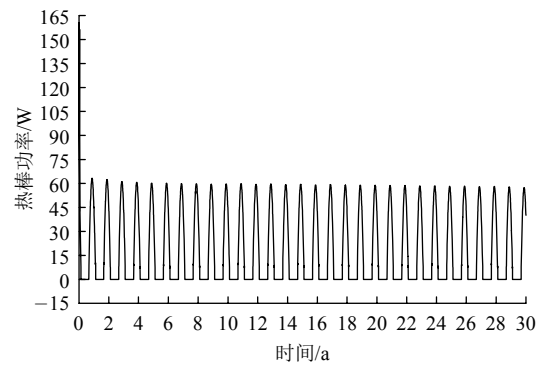


图7 热棒功率随时间变化曲线

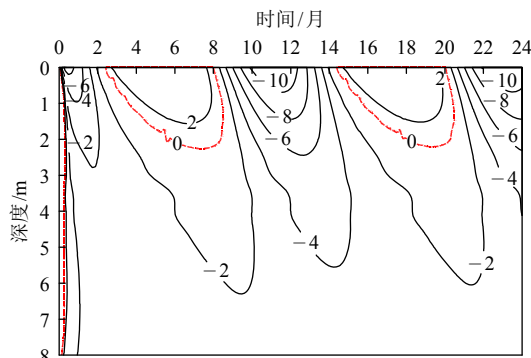
Fig.7 Variation curve of the working power with time

棒工作时段内的平均功率分别为 49.3，40.9，40.5，39.3 W，第 30 年平均功率比第 1 年低 10.0 W。

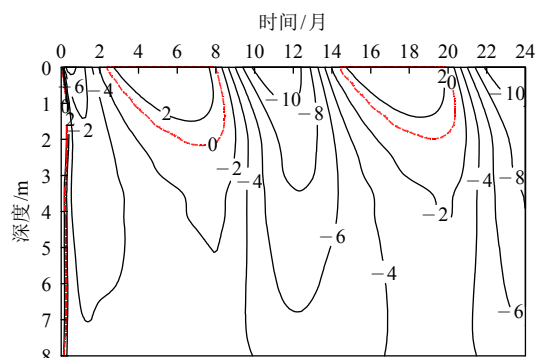
(2) 冻土上限变化

冻土上限指的是多年冻土层顶面距地表的深度，是多年冻土地区构筑物设计的重要数据。多年冻土上部是夏融冬冻的活动层，下部是终年不融的多年冻结层。在全球气候变暖的情况下，普通桩基和热棒桩基运行 30 a 的融化进程曲线如图 8(a)~(f) 所示。

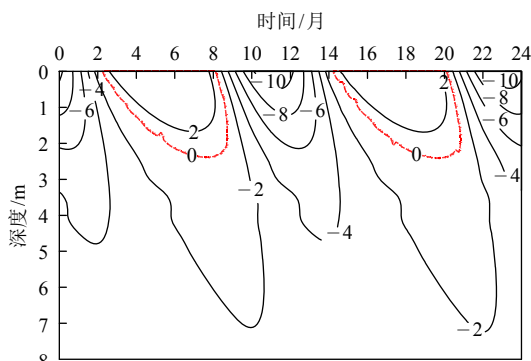
从图 8 融化进程曲线(图中虚线是零温线，初始时间为 2004 年 2 月 1 日)中反映出热棒桩基础的降温效果，通过比较热棒桩基和普通桩基的最大融化深度及地温可知，热棒桩基对地温的降低和冷储量的增加效果是显著的，比较图 8(a)和(b)可以看，出热棒桩基能提前整个桩身的回冻时间。普通桩基第



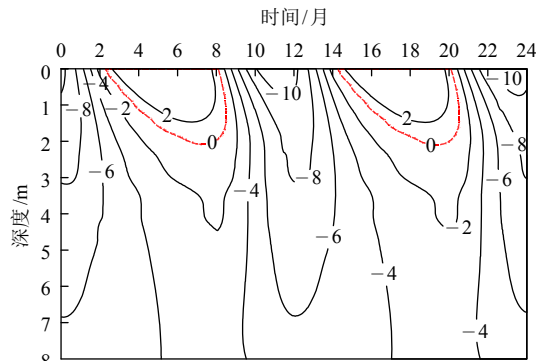
(a) 普通桩基第 1, 2 年



(b) 热棒桩基第 1, 2 年



(c) 普通桩基第 15, 16 年



(d) 热棒桩基第 15, 16 年

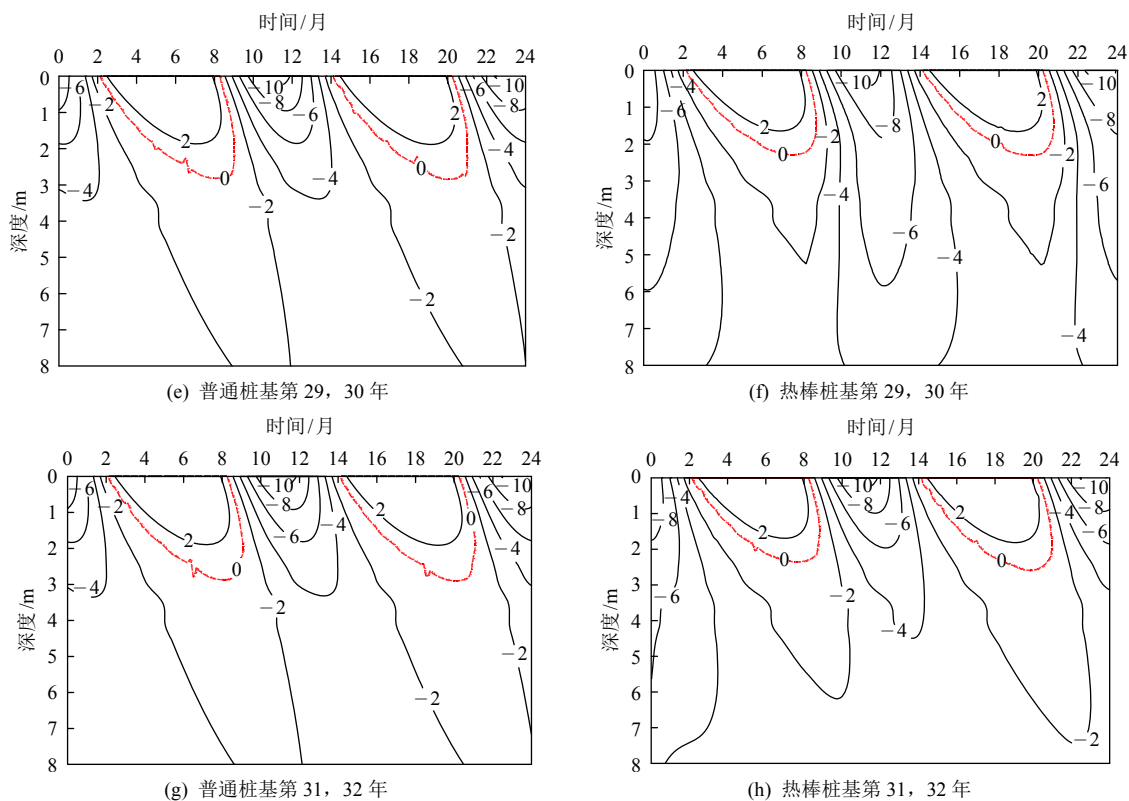


图 8 桩壁土体融化进程曲线
Fig.8 Melting process curves of pile wall soil

1, 15, 30 年的最大融深分别为 2.25, 2.43, 2.78 m, 热棒桩基第 1, 15, 30 年的最大融深分别为 2.20, 2.09, 2.30 m。随着气候变暖, 在 30 a 内普通桩基对应的冻土上限下移 0.53 m, 而热棒桩基对应的冻土上限下移 0.10 m。相比于普通桩基, 热棒桩基在第 1, 15, 30 年分别能抬高冻土上限 5, 34, 48 cm。冻土上限提高, 季节融化层在冬季冻结时对桩基产生的冻拔力减小, 有利于多年冻土地区输电杆塔基础的稳定。

4.2 热棒寿命结束后桩土体系的热稳定性

由于热棒的设计使用寿命为 30 a, 运行 30 a 后它停止工作, 在气候变暖的背景下, 随着时间的推移, 接下来桩基的温度场如何变化, 能否保持热稳定性。在前面的基础上, 再计算 20 a, 分析热棒寿命结束后 20 a 内桩基的热稳定性。

热棒停止工作后, 桩侧测温孔深 5 m 处地温随时间的变化曲线如图 9 所示。由图可得, 热棒停止工作后桩侧土体地温升高, 经过约 2 a 时间, 有热

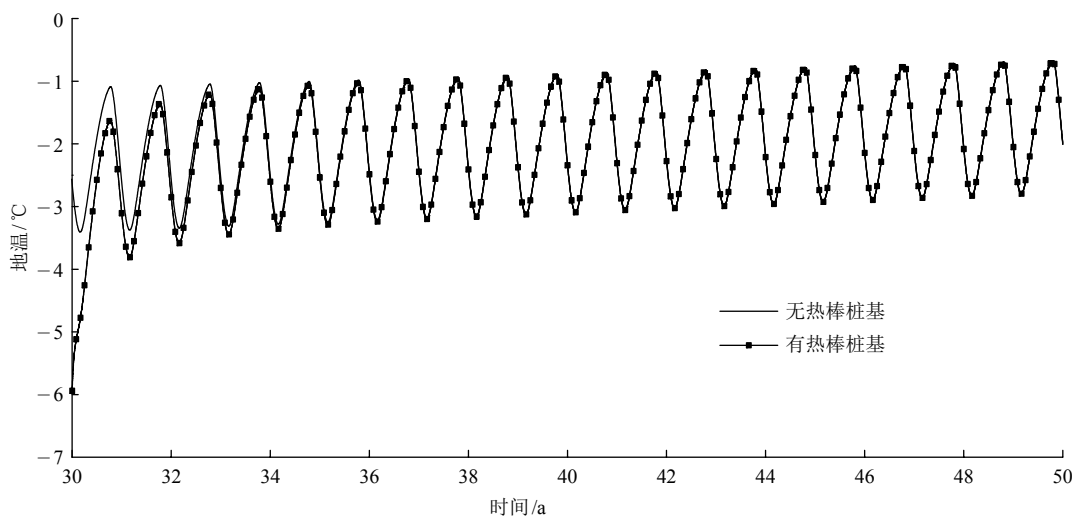


图 9 桩侧测温孔深 5 m 处地温随时间变化曲线(热棒停止工作后)

Fig.9 Variation curves of ground temperature with time at 5 m depth of thermometer hole on pile side(after the hot rod stops working)

棒桩侧测温孔深 5 m 处地温曲线和无热棒桩侧测温孔深 5 m 处地温曲线基本重合。

热棒桩基和普通桩基第 31, 32 年桩壁土体融化进程曲线如图 8(g), (h) 所示。从图 8(g), (h) 可以看出, 第 31 年热棒桩基的整个温度场比普通桩基的明显低, 第 32 年热棒桩基温度场和普通桩基温度场相差不是很大。为了保持多年冻土地区输电塔基础的热稳定, 建议在热棒寿命结束后的第 2 年更换新的热棒或进行其他工程处理措施。

5 结 论

(1) 考虑热棒功率是随大气温度、蒸发段土体温度变化的, 运用迭代的方法能准确的计算热棒功率及桩周土体温度。在热棒的全寿命工作期内, 其功率呈非连续波浪递减式变化, 第 30 年平均功率比第 1 年低 10.0 W。

(2) 热棒桩基能有效增加冷储量, 降低土体地温, 第 5 年桩周土体地温降至最低, 融化深度最小。在 30 a 内, 热棒最大降低桩侧深 5 m 处土体地温 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均降温 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 热棒桩基第 30 年可提高冻土上限 48 cm。冻土上限提高, 季节融化层在冬季冻结时对桩基产生的冻拔力减小, 有利于多年冻土地区输电杆塔基础的稳定。

(4) 为了保持多年冻土地区输电塔基础的热稳定性, 建议在热棒寿命结束后的第 2 年更换新的热棒或进行其他工程处理措施。

(5) 本文基于三维非线性有限元数值模拟, 获得了热棒桩基和普通桩基的长期地温变化规律, 可为多年冻土地区电力杆塔热棒桩基的实际应用提供参考。

参考文献(References):

[1] 俞祁浩, 刘厚建, 钱进, 等. 青藏直联网工程±500 kV 输电线路的工程问题分析[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 806 - 812.(YU Qihao, LIU Houjian, QIAN Jin, et al. Research on frozen engineering of problem analysis of Qinghai—Tibet 500 kV DC power transmission line[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(6): 806 - 812.(in Chinese))

[2] 刘厚健, 程东幸, 俞祁浩, 等. 高海拔输电线路的冻土工程问题及对策研究[J]. 工程勘察, 2009, (4): 32 - 36.(LIU Houjian, CHENG Dongxing, YU Qihao, et al. Study on frozen soil engineering problems and countermeasures of high altitude transmission lines[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2009, (4): 32 - 36.(in Chinese))

[3] 潘卫东, 连逢愈, 邓宏艳, 等. 寒区工程中热棒技术的应用原理和前景[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2 673 - 2 676.(PAN Weidong, LIAN Fengyu, DENG Hongyan, et al. Application principle and prospect of thermal-probe technique in cold region engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 673 - 2 676.(in Chinese))

[4] SMITH L B, GRAHAM J P, NIXON J F, et al. Thermal analysis of force air and thermosyphon cooling system for the inuvik airport expansion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28: 399 - 409.

[5] 李永强. 热棒在青藏高原风火山地区的实测效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2 669 - 2 672.(LI Yongqiang. Analysis of the actual measurement result of the thermal probes in Fenghuoshan area on Qinghai—Tibet plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2), 2 669 - 2 672.(in Chinese))

[6] 蒋代军, 王旭, 刘德仁, 等. 青藏铁路多年冻土地基输电塔热棒桩基稳定性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2): 4 258 - 4 263.(JIANG Daijun, WANG Xu, LIU Deren, et al. Experimental study on stability of thermal pile foundation of transmission tower in permafrost foundation of Qinghai—Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.2): 4 258 - 4 263.(in Chinese))

[7] 郭春香, 吴亚平, 董晟, 等. 热棒填土路基降温效果的三维非线性有限元分析[J]. 中南大学学报, 2014, 45(增 1): 202 - 207.(GUO Chunxiang, WU Yaping, DONG Sheng, et al. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of cooling effect of thermal pipe embankment[J]. Journal of Central South University, 2014, 45(Supp.1): 202 - 207.(in Chinese))

[8] 李永强. 青藏铁路多年冻土区热棒直径对降温效果和产冷量的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增 1): 510 - 515.(LI Yongqiang. Influences of diameter of thermal probes on effect of decreasing earth temperature and producing cold quantity along Qinghai—Tibet railway in permafrost area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Supp.1): 510 - 515.(in Chinese))

[9] 武俊杰, 马巍, 孙志忠, 等. 用估算热收支的方法评价热制冷效果[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 106 - 115.(WU Junjie, MA Wei,

- SUN Zhizhong, et al. Evaluating cooling effect of two-phase closed thermosyphon by estimated heat budget[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(1): 106 - 115.(in Chinese))
- [10] 汪双杰. 高原多年冻土区公路路基稳定及预测技术研究[博士学位论文][D]. 南京: 东南大学, 2005.(WANG Shuangjie. Research on highway subgrade stability and prediction technology in plateau permafrost regions[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Southeast University, 2005.(in Chinese))
- [11] 孙文, 吴亚平, 郭春香. 热棒对多年冻土路基稳定性的影响[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 15 - 19.(SUN Wen, WU Yaping, GUO Chunxiang. Influences of two-phase closed thermosyphon on permafrost roadbed stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 15 - 19.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 118—2011 冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ118—2011 The designing criterion of the foundations in permafrost regions[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.(in Chinese))
- [13] 郭春香, 吴亚平. 太阳辐射及气候变暖对冻土区单桩承载力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 3 306 - 3 311.(GUO Chunxiang, WU Yaping. Effects of solar radiation and global warming on bearing of single pile in permafrost region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 3 306 - 3 311.(in Chinese))
- [14] 郭春香, 杨凡杰, 吴亚平, 等. 混凝土水化热对寒区隧道围岩融化及回冻过程的影响[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 106 - 110.(GUO Chunxiang, YANG Fanjie, WU Yaping, et al. Influences of concrete hydration heat on the melting and refreezing processes of surrounding rock of tunnels in the permafrost region[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(11): 106 - 110.(in Chinese))
- [15] 吴亚平, 郭春香, 赵世运, 等. 青藏高原冻土区灌注桩入模温度对地温场的影响分析[J]. 铁道学报, 2004, 26(6): 81 - 85.(WU Yaping, GUO Chunxiang, ZHAO Shiyun, et al. Influence of casting temperature of single pile on temperature field of ground in permafrost of Qinghai—Tibet plateau[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(6): 81 - 85.(in Chinese))
- [16] 贾艳敏, 田海旗, 郭红雨. 水化热及入模温度对灌注桩回冻过程影响的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 44 - 47.(JIA Yanmin, TIAN Haiqi, GUO Hongyu. Study on the influence of hydration heat and initial casting temperature on the refreezing process of bored pile[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 44 - 47.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 实时高温真三轴试验系统的研制与应用;
- (2) 隧道围岩开挖及锚喷衬砌稳定可靠度计算;
- (3) 坡体几何参数与弹性模量对岩质斜坡地震动力响应的影响: IBEM 求解;
- (4) 基于隧道铣挖施工适应性的围岩质量分级方法;
- (5) 纹层方向对泥页岩纵、横波速度及弹性参数影响的试验研究;
- (6) 基于控制圆法和迭代反演的岩体多边形裂隙网络模拟方法;
- (7) 冲击荷载下层理对页岩内裂纹扩展行为影响规律的研究;
- (8) 一种煤层气藏相渗的获得方法及曲线形态讨论。

土工基础