

太阳能储热桩取热过程中桩内温度变化的研究

杨虎伟¹, 赵大军¹, 赵研¹, 李守圣², 刘玉民¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 洛阳 471002)

摘要:首先介绍了太阳能地下混凝土储热桩热量利用率不足的现状,通过在已有太阳能混凝土储热桩传热模型的基础上,对不同取热工况中影响储热桩温度场变化的各种因素进行了传热过程的模拟分析,得出了持续取热及间断取热2种不同运行工况及热流密度、导热系数和比热容、埋管间距对桩内温度场变化的影响,然后合理的选择最优参数,分析桩内温度场的变化,提高取热效率,使混凝土桩内热量充分利用。

关键词:地下混凝土储热桩;温度变化;取热工况

中图分类号:TK513 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2012)06-0054-04

Study on Temperature Change in the Solar Energy Storage Pile during Process of Heat Extraction/YANG Hu-wei¹, ZHAO Da-jun¹, ZHAO Yan¹, LI Shou-sheng², LIU Yu-min¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Luoyang Henan 471002, China)

Abstract: This paper first introduces the present situation of insufficient heat utilization ratio of solar energy in the underground concrete storage pile, and based on the existing equivalent model, stimulation analysis of heat transferring process is made on the factors affecting temperature field change under different heat extracting operation conditions. It is known that the temperature field change in heat storage pile is affected by different continuous & intermittent operation modes, heat flux, thermal conductivity, specific heat capacity and underground pipe space; and then optimal parameters are reasonable selected to reduce variation of soil temperature field and make full use of heat in concrete pile.

Key words: underground concrete heat storage pile; temperature change; heat extracting operation condition

太阳能储热桩是指在混凝土桩内部埋设换热管,在外部进行防水、保温和密封处理后,形成一个以混凝土桩为储热载体,将受季节、天气、昼夜变化的太阳能通过同步跟踪太阳能集热器有效的存储起来,并利用热泵技术进行取热^[1-3],实现夏天(白天)对太阳能进行取热,冬天(夜晚)对建筑物供暖。该技术为寒冷的北方地区提供了新的供暖方式。

太阳能混凝土桩联合蓄热取热模式因其能量利用率高、运行稳定等特点,近年来得到国内外的广泛重视^[1-3]。早在20世纪80年代,德国图宾根银行的主楼就是利用深度为18~22m的150个混凝土储热桩进行供暖和制冷,瑞士的PAGO公司利用570个地下混凝土桩为公司供暖和制冷。国内在太阳能地下储热方面也取得了一定的成果。天津商学院、青岛理工大学、哈尔滨工业大学、吉林大学先后对太阳能季节性存储供暖的模式进行了实验研究和理论分析。吉林大学建设工程学院“绿色能源开发研究与应用”实验室首次在太阳能与地源热泵技术联合供暖^[4,5]的基础上建立太阳能储热取热试验平

台并不断对其进行研究及改进。因此,为了节约能源,减小供热成本,降低环境污染,为北方地区供暖提供新的方式,深入研究合理高效的利用太阳能地下混凝土桩存取热技术将是加快新能源开发利用的新趋势。

考虑到太阳能混凝土储热桩取热过程中,热量提取过快、桩中心及桩边缘温度不能及时恢复、取热后温度恢复周期过长等诸多问题,本文运用有限元分析软件ANSYS对以下因素进行热分析^[6-9],如持续取热、间断取热2种工况、混凝土热物性参数、热流密度、埋管间距,模拟其对地下桩内温度场的影响,从而合理的选择最优参数,降低桩内温度场的变化,使混凝土桩内热量得到充分利用。

1 取热试验方案

整个取热试验的实质是利用水作为循环介质在混凝土桩和埋管换热器之间实现热交换。循环流程如图1。在试验过程中,记录取热工况下系统运行的时间、循环介质的流量、循环介质进出桩的温度及

收稿日期:2012-01-14; 修回日期:2012-03-18

基金项目:长春市科技计划项目(2007SF12);吉林大学“985”东北资源与环境科技创新平台联合资助项目

作者简介:杨虎伟(1987-),男(汉族),陕西榆林人,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事钻探工艺及机具的研究,吉林省长春市吉林大学前卫北区3舍409室,yanghuwei0608@163.com。

温差、混凝土桩中心的温度、混凝土桩与保温层(聚氨酯泡沫)之间的温度。

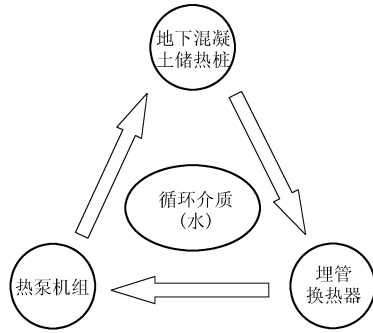


图 1 取热循环流程

在蓄热过程中采用白天加热,晚上恢复的模式,使桩中心温度达到 34 ℃ 左右。在蓄热基础上,预先设定进、出桩温差进行恒热流取热。首先对混凝土储热桩进行连续 36 h 的持续取热,然后再次对混凝土储热桩进行蓄热,在间断工况下,以恒定的热流密度进行取热,昼夜间歇工作,间隔时间为 12 h,如此循环运行。

2 混凝土储热桩取热的理论分析

在太阳能地下混凝土储能桩取热过程中,考虑到传热过程中埋管管材、周围混凝土的类型、热物性参数及埋管内流体流量等多种因素的影响,储热桩的温度沿着径向从桩中心依次向桩边缘、保温层、土壤层进行热传导。在求解计算模型时忽略温度沿孔深的轴向传导的影响,并且认为土壤及保温材料的热物性参数为常数。在对温度场进行模拟时,地表温度的变化不对地下温度产生影响,在求解区域内,地下埋管换热器、混凝土、保温层及土壤层的初始温度要保持均匀一致。

2.1 物理模型的建立

考虑到直接利用三维传热方程求解温度场比较复杂,因此建立埋管传热的二维模型^[10],根据假设条件,在整个求解过程中,求解区域的划分如图 2 所示。

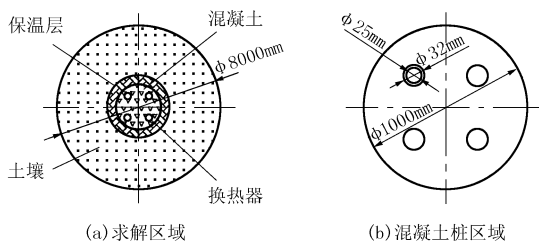


图 2 埋管换热器的物理模型

在图 2(a) 中,根据 Bose^[11] 1984 年提出的边界理论知:

$$R_{\infty} \geq 4 \sqrt{a_s t} \quad (1)$$

选取混凝土在 t 时刻之前的温度为初始温度。本文中远边界的半径选为 4 m。

2.2 数学模型的建立

建立混凝土地下埋管换热器的径向二维瞬态传热模型,其传热方程如下。

导热微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

式中: α ——热扩散系数。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

2.3 传热条件

2.3.1 初始条件

应用前述的假设条件,设定埋管换热器和土壤热传导之前的土壤初始温度,通过试验测得土壤的初始温度为 9 ℃^[12],这样即可确定循环介质的换热温度在达到稳态值后求解的初始边界条件:

$$T|_{t=0} = 9 \quad (5)$$

2.3.2 绝热的边界条件

忽略环境温度及地表温度的变化对地下温度场的影响,认为整个传热模型求解区域内热流变化是恒定的,内部的热流量不能传导至边界层,在上述的区域中选定土壤层的初始温度如下:

$$T|_{r=r_{\infty}} = T_{\infty} \quad (6)$$

3 取热试验影响因素的分析

3.1 蓄热阶段温度场变化

计算参数的选择:设定蓄热模拟条件,昼夜间隔运行 60 h,土壤的初始温度为 9 ℃,其它材料的热物性参数见表 1。蓄热的循环介质是水,以 100 W/h 恒定的热流密度进行间断蓄热(间隔为 12 h),得出混凝土桩中心、桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线(见图 3)。

从图 3 可以看出,随着热量的蓄积,桩中心的温度梯度大,温度增幅最大;随着热量不断扩散,桩中心的温度梯度逐渐减小。而在蓄热结束后,混凝土

表1 材料热物性参数

材料的热物性参数	导热系数 /[W·(m·k) ⁻¹]	比热/[J· (kg·°C) ⁻¹]	密度 /(kg·m ⁻³)
埋管换热器	47	477	7860
混凝土	1.6	1100	2200
聚氨酯泡沫	0.022	1000	45
土壤	1.13	1200	1400
循环介质(水)	0.6	4200	1000
初始温度/°C	9	土壤半径/m	4
埋管换热器直径(内径)/m	0.025		

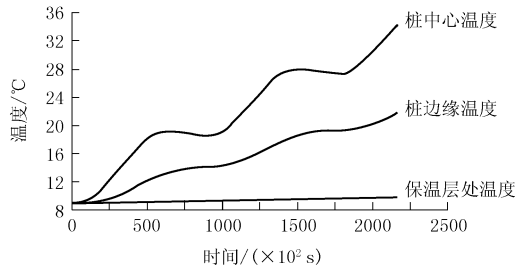


图3 混凝土桩温度模拟曲线

储热桩中心温度与桩边缘的温度梯度较大,所以在停止蓄热阶段,桩中心的温度会迅速下降,而桩边缘的温度会不断的上升。第一次蓄热的温度增幅较大,之后蓄热时,温度增幅将变小,混凝土桩中心的温度增幅比桩边缘的温度增幅大。在多次循环蓄热后,桩中心温度最终达到34°C,桩边缘温度为21.8°C,保温层温度为10°C。

3.2 取热阶段温度场变化

3.2.1 持续取热模式

蓄热结束时桩中心初始温度34°C,桩边缘及保温层温度初始温度分别为21.8°C和10°C。由于在蓄热结束后温度在达到稳定之前继续上升,桩中心温度达到36°C,桩边缘的温度为23.7°C,保温层处温度为10.3°C。以100 W/m恒定的热流密度进行持续取热,其余参数见表1。运行36 h后三点温度如图4所示。桩中心的温度扩散的范围最大,最终温度达到8.3°C,温差为25.7°C;桩边缘及保温层处温度最终分别达到11.8°C和10.4°C,温差分别为10和0.4°C。

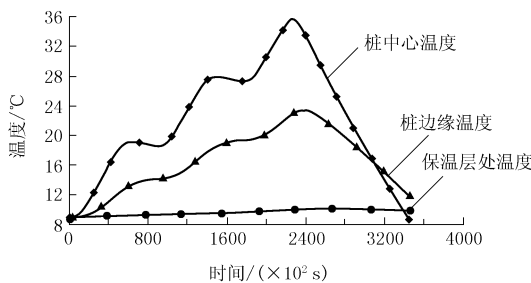


图4 混凝土桩中心和桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线

由于混凝土桩中心和桩边缘距埋管换热器较近,桩中心的温度降幅最快,桩边缘的温度较之下降相对缓慢,主要原因是在桩中心和桩边缘处距埋管换热器较近,温度梯度很大,所以降幅最快而桩中心距离最近,所以曲线的斜率最大;而保温层温度先缓慢上升,最后趋于平缓。

3.2.2 间断取热模式

设定计算参数:采用间断取热模式以100 W/m的热流密度运行60 h(间隔为12 h),图5为取热结束后各点温度的分布情况。

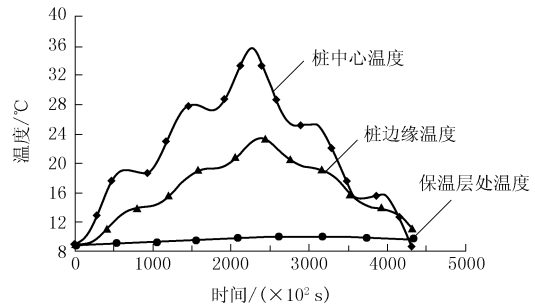


图5 混凝土桩中心和桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线

由于系统在间断运行时,埋管换热器周围的温度梯度呈阶梯式下降,其中桩中心温度从34°C最终降到8.1°C,桩边缘温度从23.7°C降到9.6°C;桩中心距埋管换热器最近,其温度梯度最大,降幅为25.9°C;而桩边缘降幅为14.1°C,保温层与土壤较远,热量的传递随着时间的延长而逐渐的衰减,温度变化范围在0.1~0.4°C,此时,桩中心温度比桩边缘的温度降幅大,而保温层与土壤之间的温度则是向上升到最大值后缓慢下降;在温度恢复期时,埋管换热器的周围各点都得到了新能量的迅速补充,为下一循环的取热提供了新的热源。

3.3 热流密度的影响

设定计算的条件:在连续取热的模式下,其余参数不变,系统采用以60 W/m和100 W/m不同的热流密度对混凝土桩进行36 h的取热,得出如图6所示的各点温度变化曲线。对比图4和图6发现,等到取热结束后,桩中心及桩边缘的温度分别降为19.1°C和16.8°C,温差为14.9°C;当以100 W/m和60 W/m的热流密度持续取热36 h,保温层的温度最终分别为9.2、10.0°C。而保温层处的温度梯度较小,热量传递的响应时间滞后,初始热流密度的大小对其影响不大。

通过对比发现,桩中心和桩边缘以不同的热流密度进行取热的过程中,初始热流密度越大,其温度的下降速率就越快,埋管换热器沿径向各点处温度

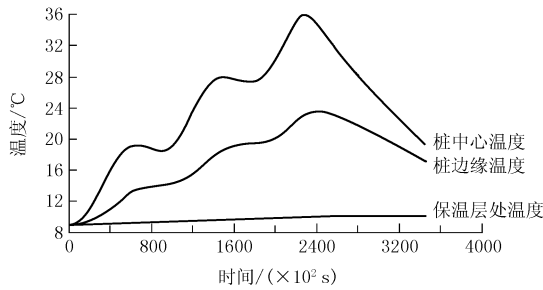


图6 混凝土桩中心和桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线

的变化与热流密度呈正比,而对保温层温度影响不明显。

3.4 导热系数的影响

设定模拟的条件:在持续取热的模式下,其余参数不变,导热系数取 1.6 W/(m·k)和 3.2 W/(m·k)。以恒定的 100 W/m 的热流密度进行 36 h 的取热,导热系数为 1.6 W/(m·k)时,桩中心、桩边缘及保温层的温度曲线如图 4 所示;导热系数为 3.2 W/(m·k)时,其温度曲线如图 7 所示,桩中心及桩边缘的温度分别降至 7.8 °C 和 9.8 °C,温差分别是 26.2 °C 和 12 °C,明显变化较大。保温层处温度变化不是很明显。

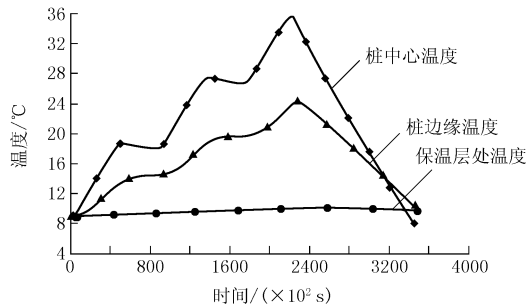


图7 混凝土桩中心和桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线

通过对比分析得出,当导热系数为 3.2 W/(m·k)时,桩中心温度产生很大的变化,对比发现蓄热阶段桩中心温度的变化率导热系数越大,各点温度的变化就越快,适当的增大导热系数将会增大中心温度的扩散范围,这样将有利于热量的提取。

3.5 混凝土比热容的影响

设定模拟的条件:在持续取热的模式下,混凝土的比热容分别取 1100 J/(kg·°C)和 2200 J/(kg·°C),用 100 W/m 的热流密度进行 36 h 的取热。当混凝土的比热容取 2200 J/(kg·°C)时,桩中心、桩边缘及保温层的温度曲线见图 8,与图 4 对比得出,当选取比热 2200 J/(kg·°C)时,桩中心及桩边缘的温度降幅分别是大于桩边缘,整个取热过程中,比热容越小,混凝土周围各点的温度变化就越快,埋

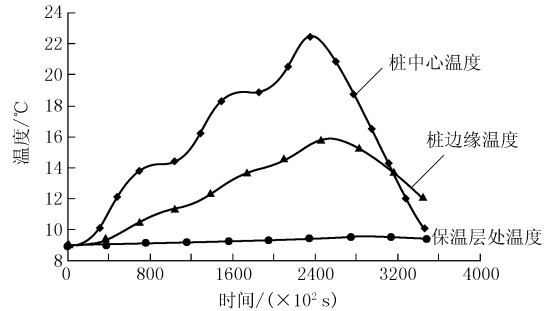


图8 混凝土桩中心和桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线

管换热器周围的温度梯度就越大。

3.6 埋管间距的影响

设定模拟的条件:在连续取热的模式下,以相同的热流密度 100 W/m 进行 36 h 的连续取热。埋管间距分别取 0.2 m 和 0.4 m,当间距为 0.2 m 时,各点的温度曲线见图 9。通过图 4 和图 9 的对比分析知,桩中心的温度下降速率最快,取热结束后温度将会一直下降,在取热时为防止其温度梯度过大造成取热间断或是较大波动的现象,埋管间距不能太小。

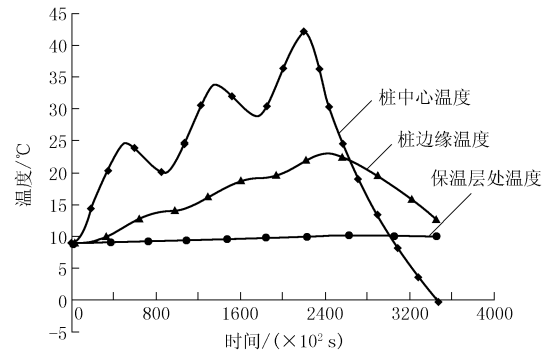


图9 混凝土桩中心和桩边缘及保温层处温度随时间的变化曲线

4 结论

(1) 经过间断蓄热后,分析混凝土桩内桩中心、桩边缘及保温层处 3 点温度,间断取热模式的效率要明显优于持续取热模式;在温度降低到一定程度后新热源能及时得到补充实现温度的交替补偿,这种方式利于热量的提取,保证整个取热过程平稳而有效的运行。

(2) 通过对比分析取热过程中热流密度、混凝土的导热系数、比热容及不同的埋管间距对地下温度场的影响,得出热流密度的大小与埋管换热器周围径向各点的温度变化呈正比,热流密度越大,桩中心和桩边缘的温度变化速率就越快;适当的增大导热系数及比热容,能更好的实现热量的提取;埋管间距越密,将会导致地下混凝土桩内各点之间的温度

(下转第 67 页)

在灌注混凝土前利用导管气举反循环二次清孔,二次清孔时利用VF7/7型空气压缩机,在导管内下入42 m长风管,通过风管送入压缩空气,使压缩空气与泥浆混合形成密度较小的气水混合物,在孔内泥浆液柱压力下通过导管携带钻渣排出孔外进行清孔。二次清孔时的泥浆指标应达到:粘度16~18 s,密度1.05~1.10 g/cm³,含砂率≤1%。孔底

经检测无沉渣,且孔深达到原钻进深度。

4 钻孔质量检测及控制

为确保桩基质量达到设计要求,加强钻孔前、钻孔过程及终孔后的检测与控制,具体控制项目见表2。对于检测中发现的不合格项,及时进行纠正及处理,直至检测合格后方可进入下道工序施工。

表2 钻孔质量检测及控制项目

施工阶段	控制项目	技术指标或允许偏差	检测及控制方法
钻孔前	桩位偏差	≤5 mm	测量定位后由第三方进行两级复核
	孔口护筒	垂直度 < 1/200,护筒中心与桩位偏差 < 20 mm	钻机就位前检查护筒埋设情况
	钻机平整度	底盘水平度偏差 < 5 mm	钻机就位后利用水准管检测
	钻头直径	< 1000 mm	开孔前利用钢尺检测
钻孔施工过程	钻杆垂直度	≤2 mm	孔深15、30和60 m时利用2 m靠尺检测
	泥浆指标	粘度17~20 s,密度1.07~1.15 g/cm ³	利用泥浆测试仪每班2次检测
	钻进参数	钻压10~15 kPa,转速>20 r/min	钻进至变层部位时进行控制
	孔内泥浆液面高度	不低于护筒顶面以下1 m	专人随时观测
	孔深	0~+300 mm	准确测量每根钻杆长度及终孔时钻杆余尺
终孔后	孔深	0~+300 mm	钢丝测绳检测
	孔底沉渣厚度	≤100 mm	沉渣测定仪检测
	钻孔直径	0~+50 mm	井径仪及超声波钻孔检测仪检测
	钻孔垂直度	< 1/200	超声波钻孔检测仪检测
	泥浆指标	一清后:粘度16~18 s,密度≤1.10 g/cm ³ ,含砂率≤3% 二清后:粘度16~18 s,密度1.05~1.10 g/cm ³ ,含砂率≤1%	利用泥浆测试仪孔口取样检测

5 结语

(1)天津117大厦超长钻孔灌注桩利用自走式反循环钻机成孔,成孔速度快,钻孔质量可靠。经统计,最短成孔周期仅为28 h,平均成孔周期为44 h,远远高于正循环钻机和气举反循环钻机。同时整机功率仅为75 kW,能耗小,施工成本较低。

(2)经对完成的271根桩利用超声波测孔仪进行检测,钻孔垂直度达到1‰~4.5‰,孔底沉渣厚度为21~50 mm,钻孔深度误差为0~150 mm,孔径为1000~1093 mm,远远高于设计要求。

(上接第57页)

梯度过大产生较大的波动,所以间距不可过密,但也不能太小,否则将影响热量的传递。

参考文献:

- [1] Metz PD. The use of ground-coupled tanks in solar-assisted heat pump system[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1982, 104(4): 366-372.
- [2] 江彦,高青,李明,等. 套管式地下换热器传热模型及特性分析[J]. 吉林大学学报, 2007, 37(5): 1035-1038.
- [3] 杨卫波,董华. 土壤源热泵系统国内外研究状况及其发展前景[J]. 建筑热能通风空调, 2003, (3): 52-55.
- [4] 孙友宏,胡克,等. 岩土钻掘工程应用的又一新领域——地源热泵技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002, (S1): 7-12.

参考文献:

- [1] JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] 廖光华. 泵吸反循环施工大口径灌注桩钻进深度的理论分析[J]. 探矿工程, 2000, (6): 15-16.
- [3] 许刘万,史言兵,王兴无,等. 大直径钻孔用刮刀钻头的设计与应用[J]. 探矿工程, 2001, (S1): 152-156.
- [4] 杨德才. 温州世贸中心大厦超深大直径钻孔灌注桩施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(1): 27-29.
- [5] 王辉,余地华,汪浩,等. 天津117大厦高承载力超大长径比试验桩施工技术[J]. 施工技术, 2011, 40(5): 23-25.
- [6] 张广亮,刘建涛,陈益敏. 娄江特大桥深孔泵吸反循环工艺的改进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(6): 47-50.
- [5] 庄迎春,孙友宏. 地源热泵地下直埋式换热器的施工[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002, (2): 10-11.
- [6] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 陕西西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 张朝晖. ANSYS8.0热分析教程与实例分析[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [9] 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用[M], 北京:科学出版社, 1998.
- [10] 李守圣,赵大军,赵研. 混凝土储热桩的储热试验研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(2): 99-101.
- [11] BOSE J E. Closed-loop ground-coupled heat pump design manual [C]. Engineering Technology Extension, Oklahoma State University, 1984.
- [12] 赵研. 太阳能地下混凝土存取热试验研究与数值模拟[D]. 吉林长春:吉林大学, 2010.