

# 土壤比热容对地埋管换热器周围土壤温度影响的模拟

尚少文,潘欣,徐颖,房子钰

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究不同的土壤比热容对土壤源热泵地埋管换热器周围土壤温度的变化规律. 方法 通过运用 Fluent 软件进行数值模拟,在软件中设置不同的土壤比热容参数,模拟土壤温度场变化. 结果 土壤比热容为  $1\,000\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$  时,土壤温度为  $15.5^{\circ}\text{C}$ ,热作用半径大约为  $2.13\text{ m}$ ;当土壤比热容增加到  $1\,600\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$  时,土壤温度为  $15.5^{\circ}\text{C}$ ,热作用半径减小,大约为  $2.08\text{ m}$ ;随着土壤比热容的增加,当土壤比热容达到  $2\,200\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$  时,土壤温度为  $15.5^{\circ}\text{C}$ ,热作用半径减小到  $2.0\text{ m}$  左右. 结论 埋管换热器周围土壤温度受土壤比热容的影响很显著,土壤的比热容越大,埋管周围土壤的温度下降的越小,热作用半径就越小.

**关键词** 土壤热容;垂直 U 型管;土壤温度场;数值模拟

中图分类号 TK124

文献标志码 A

## Simulation for Effect of Soil Specific Heat Capacity on Soil Temperature around Buried Pipe Heat Exchanger

SHANG Shaowen, PAN Xin, XU Ying, FANG Ziyu

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The change of soil temperature around buried pipe heat exchanger of soil-source heat pump with different soil specific heat capacity was studied. Fluent was used for numerical simulation. Different soil specific heat capacity parameters were set in the software to simulate the change of soil temperature field. The results show that when soil heat capacity is  $1\,000\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ , the soil temperature is  $15.5^{\circ}\text{C}$ , and the hot action radius is about  $2.13\text{ m}$ . When the soil heat capacity increased to  $1\,600\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ , the soil temperature is  $15.5^{\circ}\text{C}$ , the hot action radius, about  $2.08\text{ m}$ . With the increase of soil heat capacity, when soil heat capacity reaches  $2\,200\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ , the soil temperature is  $15.5^{\circ}\text{C}$ , the hot action radius is around  $2.0\text{ m}$ . The soil temperature around the buried pipe heat exchanger is significantly affected by the soil heat capacity. The larger the soil heat capacity is, the smaller the temperature drop around the buried pipe is, and the smaller the heat action radius is.

收稿日期:2016-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51408376);辽宁省住房和城乡建设厅项目(SZJT2015008)

作者简介:尚少文(1970—),男,副教授,主要从事建筑节能方面研究.

**Key words:**heat capacity of soil;vertical U-shaped embedded tube;temperature field of soil;numerical simulate

我国严寒地区采暖能耗在建筑总能耗中所占比例显著,因此节能技术的应用就显得越来越重要<sup>[1-2]</sup>.而地源热泵是利用高品位热能把热量从低位热能转向高位热能的一种节能装置,其中土壤源热泵是把土壤中的热量作为低位热源并将其转变成可直接被利用的高位热能供用户使用<sup>[3]</sup>,进而可以节约能源.但是,严寒地区土壤源热泵在冬季从土壤中取出的热量大于夏季向土壤排出的热量,如果长期运行会造成土壤的冷量堆积<sup>[4]</sup>,使周围土壤的温度逐渐降低,导致土壤中冷热量不平衡并影响热泵的性能系数<sup>[5]</sup>.埋管换热器与周围土壤之间的传热过程很复杂,土壤的种类对传热有着很大的影响.土壤是由碎散的固体颗粒、气体、液体组成的多孔介质,不同的土壤之间的比热相差较大<sup>[6]</sup>.其中水的比热容为  $4\,186\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,而石英砂的比热容仅为  $820\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,土壤的比热容不同,土壤与换热器间的传热效率也不同<sup>[7-8]</sup>.因此,土壤比热容对土壤温度场分布有很大的影响.目前许多学者对土壤源热泵的土壤导热系数、土壤孔隙率、土壤初始温度等都有研究<sup>[9]</sup>,但对土壤比热容尤其对土壤中土壤比热容的分层现象研究甚少.笔者通过 Fluent 软件,先用 Ansys15.0 中的 Workbench 建立几何模型,再将其导入 Mesh 中进行网格划分,最后通过设置不同的土壤比热容及相应的参数值对土壤的温度场进行模拟.发现埋管换热器周围土壤温度受土壤比热容的影响很显著,土壤的比热容越大,埋管周围土壤的温度下降得越小.

1 模型建立

1.1 模型的假设

地埋管与周围土壤间的传热过程是三维的非稳态的,所包含的几何条件和物理条件都很复杂,计算的时间也比较长.因此,笔者

建立模型时做如下假设:①假设地下土壤的温度不沿深度发生变化;②忽略土壤、回填土、管壁物性参数的变化,认为土壤、回填土、管壁的密度、导热系数不随深度发生变化<sup>[10]</sup>;③假设土壤与回填材料、回填材料与 U 型管外壁接触良好,不存在缝隙;④忽略 U 型管内流体在水平方向的传热,即认为管内流体水平方向的温度和速度分布不发生变化.

1.2 模型的建立

地源热泵的地下部分是由换热介质、地埋管、回填土及土壤组成<sup>[11]</sup>.管内介质及埋管管壁是与实际形状相同的 U 型管,U 型管内径为  $26\text{ mm}$ ,外径为  $32\text{ mm}$ ,回填土为直径为  $250\text{ mm}$ ,高度为  $30\text{ m}$  的圆柱体,土壤横截面长宽为  $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ,高度为  $30\text{ m}$  的长方体.几何模型如图 1 所示<sup>[12]</sup>.

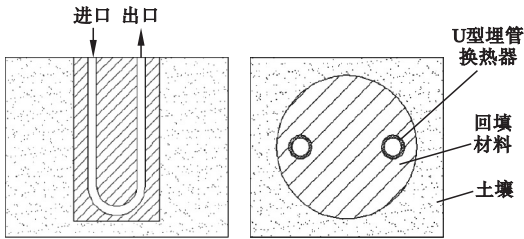


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

2 网格划分及边界条件设置

2.1 网格的划分

由于埋管换热器管径较小,U 型管的长度远大于管径,因此土壤温度沿横向变化较大,沿竖向变化较小.在进行网格划分时,横向的网格要较密,而竖向的网格相对稀疏<sup>[13]</sup>.管内的流体介质在靠近管壁处湍流强度较大,因此要进行加密处理.而回填土和土壤部分靠近 U 型管处的网格也要进行加密处理,两部分的网格都是从远端到中心逐渐变密.网格划分如图 2 所示.

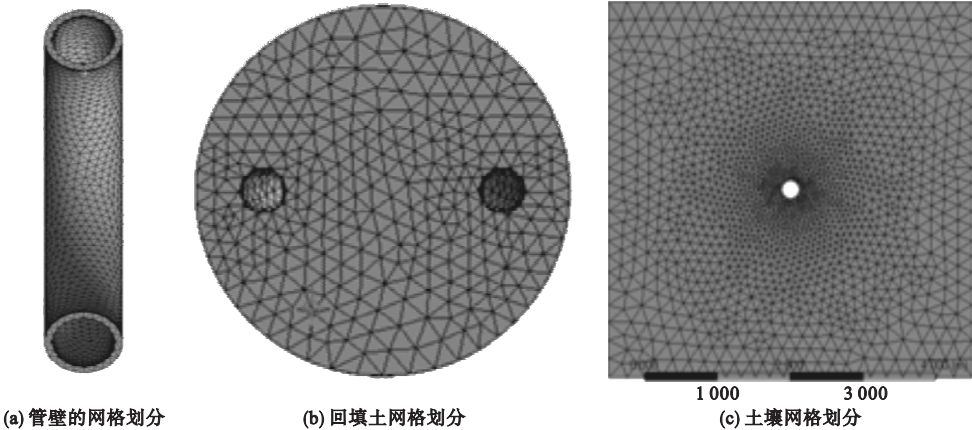


图2 网格划分

Fig. 2 The meshing of tube

2.2 边界条件的设定

用 Workbench 软件对埋管结构建立模型和网格划分后,要根据埋管的实际情况对模型进行边界条件的设定.在进行 FLU-ENT 计算时设定初始条件.①对 U 型埋管换热器的进口处定义为速度入口,在 FLUENT 中更方便的对管内流体和速度即温度进行设定.由于在出口处,流体已达到充分发展阶段,因此将埋管出口处的边界类型设定为自由出流.②由于地下埋管换热器从周围土壤不断的取热,因此将土壤区域的四周和土壤的底部定义边界条件类型为 WALL - 1,将回填土部分的底部定义为另一种边界条件 WALL - 2.③对各部分区域进行定义,即将 U 型管内的流体设置为流体,管壁、回填土及土壤部分都将设置为土壤.

2.3 求解类型的设定

将划分好的网格和设定好的边界条件直接导入 FLUENT15.0 中进行求解类型的设置.①求解方程的设置,由于地下土壤的传热过程相对比较复杂,因此在进行求解模型的设置时首先应该选择湍流模型及能量方程<sup>[14]</sup>.②材料及区域进行设置.③设置边界条件,将管道入口速度设定为 0.8 m/s,出口设置为自由出流,将土壤温度设为 15.85 ℃、埋管进口温度为 12.25 ℃,然后进行初始化,对时间进行设定.

3 模拟结果及分析

3.1 不同土壤热容对埋管换热器周围土壤温度的影响

土壤是由各种矿物质以及有机物组成的,而土壤的热物特性对埋管换热器的换热性能又有很大的影响,因此在研究换热器周围土壤温度时不能忽视<sup>[15]</sup>.土壤的热物性包括导热系数、密度、热扩散率及比热容,其中土壤的比热容对埋管换热器周围土壤温度有很大的影响<sup>[16]</sup>.

笔者分别对土壤比热容 1 000 J/(kg·℃)、1 600 J/(kg·℃)、2 200 J/(kg·℃) 3 种工况下埋管换热器周围土壤的温度场分布情况做分析<sup>[7]</sup>.其中设置埋管入口流速为 0.8 m/s,入口处温度为 12.25 ℃,土壤温度为 15.85 ℃,另外各个模型的热物性参数如表 1 所示.

表1 模型材料的热物性参数

Table 1 Thermal physical property parameters of model materials			
材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热系数/ W	比热容/ (J·kg <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )
土壤	1 530	1.6	1 000/1 600/2 200
回填材料	1 900	2.2	900
循环水	998.2	0.55	4 180
U 型管	950	0.42	2 300

模拟冬季连续运行3个月后不同土壤比热容条件下,地下埋管换热器周围地下15 m处土壤的温度分布情况(见图3).从图中可以看出,不同比热容下埋管周围土壤温度不同.通过比较3种工况下地下15 m处的土壤温度可以得知:土壤的比热容越大,埋管周围土壤的温度下降得越慢,作用半径也越小.由图3可以看出当土壤比热容为1 000 J/(kg·℃)时,土壤温度为15.5℃,热作用

半径大约为2.13 m,而当土壤比热容增加到1 600 J/(kg·℃)时,土壤温度为15.5℃的热作用半径减小,大约为2.08 m,随着土壤热容的增加,当土壤热容达到2 200 J/(kg·℃)时,土壤温度为15.5℃的热作用半径减小到2.0 m左右.由此可以看出,土壤热容越大,离埋管较远处的土壤温度下降得越慢,埋管周围温度为15.84℃处土壤温度区域较大.

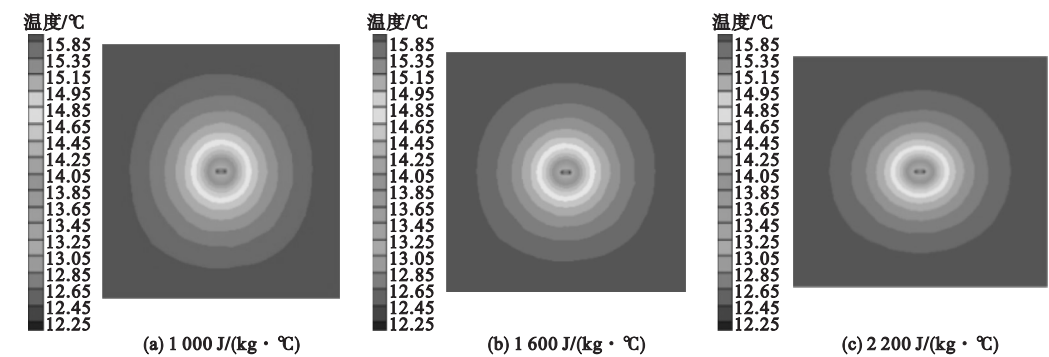


图3 不同土壤热容地下15 m处温度云图

Fig.3 Temperature cloud at 15 m underground of different soil heat capacity

为更清晰地看出埋管周围土壤温度的分布情况,图4为不同深度埋管周围土壤温度分布值.从图4中可以清晰地看出,随着埋管深度的增加,埋管周围土壤的温度逐渐增加,并且在0~15 m,土壤温度场变化比较明显,超过15 m后土壤温度变化比较缓慢<sup>[17]</sup>,而且还可以看出土壤比热容越大,埋管周围的土壤温度越高,越有利于土壤与埋管换热器的换热.

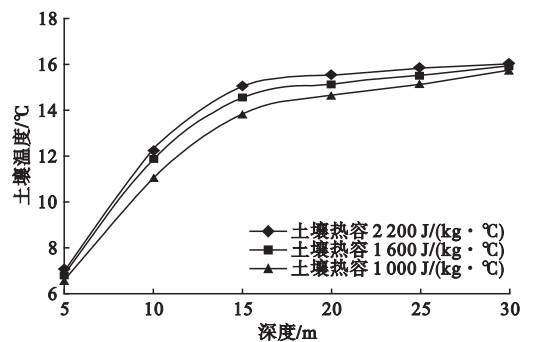


图4 不同深度埋管周围土壤温度分布值

Fig.4 Temperature distribution value of soil around buried pipe at different depth

3.2 土壤热容分层对埋管换热器周围土壤温度的影响

将土壤层分为3层:0~10 m为上层土壤,11~20 m为中间层土壤,21~30 m为下层土壤.方案一:上层土壤比热容为1 000 J/(kg·℃),中间层土壤比热容为1 600 J/(kg·℃),下层土壤比热容为2 200 J/(kg·℃);方案二:上层土壤为2 200 J/(kg·℃),中间层土壤为1 600 J/(kg·℃),下层土壤为1 000 J/(kg·℃).通过模拟冬季连续运行3个月后两种方案下地下15 m处埋管周围土壤的温度分布云图,分析地下土壤的温度分布情况.

图5为冬季运行3个月后方案一的土壤温度分布云图.从图5中可以看出,埋管周围的土壤温度出现明显下降,地下15 m处土壤比热容为1 600 J/(kg·℃)的热作用大约为2.05 m左右,通过比较图3(b)与图5地下15 m处土壤比热容为1 600 J/(kg·℃)的土壤温度为15.35℃处的热作用半径可知土壤



比热容分层即上层土壤比热容为 1 000 J/(kg·℃),中间层土壤比热容为 1 600 J/(kg·℃),下层土壤比热容为 2 200 J/(kg·℃)条件下的热作用半径比土壤比热容为 1 600 J/(kg·℃)的热作用半径小<sup>[18-19]</sup>,比热容高的土壤在下层埋管周围土壤的温度下降的更慢一些,更有利于埋管换热器的传热.

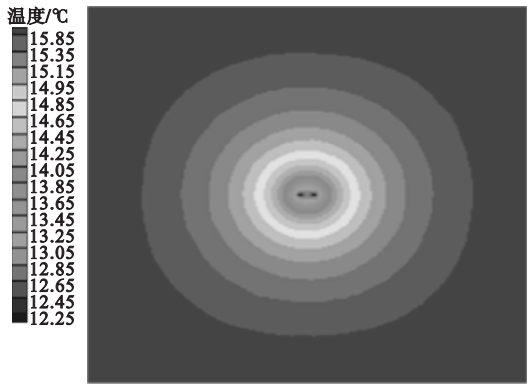


图5 冬季运行3个月方案一地下15m处温度云图

Fig.5 Three months running in winter;temperature contours at 15 m underground in program I

图6为冬季运行3个月方案二的土壤温度分布云图.从图6中可以看出温度为 15.35℃处的热作用半径大约为 2.06 m,通过与方案一对比可以看出:地下15 m处方案一的热作用半径比方案二的稍大一些,高比热容土壤在上层比高比热容土壤在下层的埋管换热器周围土壤温度下降的更慢一些,土壤的温度更高一些.与图3(b)中的温度云图

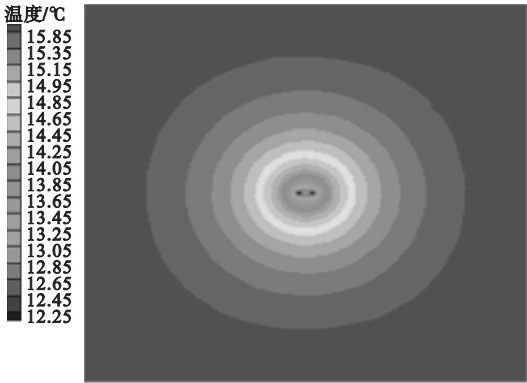


图6 冬季运行3个月方案二地下15 m处温度云图

Fig.6 Three months running in winter;temperature contours at 15 m underground in program II

相比,方案二中温度为 15.85℃处的土壤区域仍然比图3(b)中的大,即土壤温度下降幅度慢,温度为 15.35℃的热作用半径小.在图6中可以清晰地看出土壤比热容分层对埋管周围土壤的温度场影响较大,为了更清晰地比较出土壤的温度值大小.通过比较也可以看出高比热容的土壤在上层温度场变化较慢,温度为 15.85℃的区域大,更有利于土壤与换热器的换热.

4 结 论

(1)在冬季运行工况下,埋管周围土壤的温度逐渐降低,并且降低的幅度受土壤比热容的影响很大,随着土壤比热容的增加,埋管周围土壤的温度降低速率逐渐减慢,热作用半径也在逐渐减小.因此,为了防止土壤的温度降低的过快造成土壤的冷量堆积现象的发生,应尽量采用土壤比热容较高的土壤.

(2)在冬季运行的工况下,浅层土壤受温度影响比较大,深层土壤受温度影响的变化较小,甚至由于地心发热的影响,还会造成土壤温度的升高.

(3)在冬季运行工况下,土壤比热容分层与土壤比热容不分层情况相比,埋管周围土壤温度热作用半径更小,土壤温度降低的越慢,但是由于土壤结构复杂,会造成施工上的困难.因此,在条件允许的情况下,尽量将土壤进行分层设置,并且高比热容土壤在上层更有利于土壤与埋管的传热,且不易造成土壤冻结.

参考文献

[1] 江亿.我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J].暖通空调,2005,35(5):30-40.  
(JIANG Yi. Building energy consumption situation in our country and the effective energy saving way[J]. HV & AC, 2005, 35(5):30-40.)

[2] 胡连营.地源热泵技术讲座(一)地源热泵技术及其发展概况[J].可再生能源,2008,26(1):115-117.  
(HU Lianying. Ground source heat pump technology and its development situation[J]. Re-

- newable energy resources, 2008, 26(1): 115 - 117. )
- [3] ANDREW M. Finite difference model of a spiral ground heat exchanger for ground-source heat pumps[D]. Canada: Carleton University, 1998.
- [4] 张玉瑾. 土壤源热泵长期运行土壤温度场研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.  
(ZHANG Yujin. Study on soil temperature of ground source heat pump long-term operation [D]. Qingdao: Qingdao University of Science, 2010. )
- [5] 胡志高. 土壤源热泵垂直 U 型埋管温度场及热扰动分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
(HU Zhigao. Analysis in temperature field and thermal response around U-type vertical ground heat exchanger of ground source heat pump [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. )
- [6] 刘正华, 陈汝东, 李芃, 等. 土壤源热泵系统埋地换热器换热性能研究[J]. 流体机械, 2007, 35(3): 63 - 67.  
(LIU Zhenghua, CHEN Rudong, LI Peng, et al. Perform study of underground heat exchanger in soil source heat pump system [J]. Fluid machinery, 2007, 35(3): 63 - 67. )
- [7] CUI P, YANG H, FANG Z. Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes [J]. Energy and buildings, 2008, 40(32): 1060 - 1066.
- [8] SULLIVAN W, PHETTEPLACE G. Performance of a hybrid ground-coupled pump system [J]. ASHRAE transaction, 1998, 104: 763 - 770.
- [9] 夏磊. 重庆某土壤源热泵项目双 U 竖直埋管最佳埋管深度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
(XIA Lei. Study on the optimal buried depth of the vertical double U-tube ground heat exchanger for a ground-coupled heat pump system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. )
- [10] 闫晓娜. 土壤源热泵型 U 埋管换热器传热研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.  
(YAN Xiaona. Soil source heat pump buried U tube heat exchanger heat transfer research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science, 2006. )
- [11] 侯静. 土壤源热泵埋管群非稳态温度场的模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
(HOU Jing. Numerical simulation and research on unsteady state ground temperature field of multiple well of ground source heat pump [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. )
- [12] 张士花. 土壤源热泵换热器周围土壤温度变化研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
(ZHANG Shihua. Research on ground temperature around heat exchanger of ground-coupled source heat pump [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. )
- [13] 曾宪斌. 地源热泵垂直 U 型埋管换热器周围土壤温度场的数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.  
(ZENG Xianbin. Numerical simulation on soil temperature field around vertical U-tube heat exchange used in ground source heat pump [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. )
- [14] LADISLAUS R, MARTIN P, SAKIR S. Geothermal reconnaissance of the Marmara sea region (NW Turkey): surface heat flow density in an area of active continental extension [J]. Tectonophysics, 1998, 291(12): 77 - 89.
- [15] 李新国, 赵军, 周倩. U 型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 703 - 707.  
(LI Xinguo, HAO Jun, ZHOU Qian. U vertical buried tube heat exchanger nest of tubes surrounding soil temperature numerical simulation [J]. Acta energiae solaris sinica, 2004, 25(5): 703 - 707. )
- [16] 贺静静. 兰州地区土壤源热泵垂直 U 型管温度场数值模拟研究[D]. 甘肃: 兰州交通大学, 2013.  
(HE Jingjing. The study of numeric simulation of temperature field of U-vertical buried pipe of GSHP in Lanzhou area [D]. Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2013. )
- [17] Rottmayer. Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium [J]. ASHRAE transactions, 1997, 103(2): 651 - 659.
- [18] 康龙. 地源热泵 U 形埋管换热的数值模拟及优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
(KANG Long. Heating exchange numerical simulation and optimized of U-tube in ground-source heat pump system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. )
- [19] 赵国君. 土壤源热泵埋管换热器周围土壤温度场模拟与实验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.  
(ZHAO Guojun. Simulation and experiment research on ground temperature field around heat exchanger of ground source heat pump [D]. Beijing: Architecture University of Beijing, 2013. )