

基于土壤分层的双U型地埋管出口温度 及土壤温度场研究

王宏伟¹,于川淇¹,安瑞¹,张芸栗²,于磊鑫²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳城市建设学院市政与环境工程学院,
辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 探究在土壤分层和地下水渗流条件下地埋管的出口温度以及传热规律。方法 基于多孔介质理论建立分层岩土体瞬态三维模型,分析土壤的初始温度、地下水渗流、回填材料种类对地埋管出口温度及土壤温度场的影响。结果 土壤初始温度为 290.15 K 时,热泵运行 30 d 后地埋管的出口温度最高,达到 280.43 K;三种常用的回填材料中沙土的换热效果最好,黏土作为回填材料时,地埋管附近出现明显的冷量堆积;地下水渗流速度达到 200 m/a 时,地埋管出口温度为 280.85 K,相较于不存在地下水渗流时的出口温度增加了 0.51 K。结论 土壤初始温度、地下水渗流速度均与地埋管出口温度呈正相关;土壤温度场的变化在一定程度上取决于回填材料的种类及热物性;地下水渗流的存在能够消除土壤冷量的堆积,在地埋管敷设时应适当增加沿着渗流方向管间距离。

关键词 竖直双U型地埋管;出口温度;回填材料;地下水渗流;土壤温度

中图分类号 TU833⁺.3

文献标志码 A

引用格式:王宏伟,于川淇,安瑞,等.基于土壤分层的双U型地埋管出口温度及土壤温度场研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):338-344.(WANG Hongwei,YU Chuanqi,AN Rui,et al. Study on water temperature and soil temperature field for outlet of double-U buried pipe based on soil stratification[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(2):338-344.)

Study on Water Temperature and Soil Temperature Field for Outlet of Double-U Buried Pipe Based on Soil Stratification

WANG Hongwei¹,YU Chuanqi¹,AN Rui¹,ZHANG Yunli²,YU Leixin²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

收稿日期:2023-05-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0604001);辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20231575)

作者简介:王宏伟(1964—),女,教授,博士,主要从事可再生能源利用等方面研究。

Abstract: The outlet water temperature and the heat transfer of underground pipes under the conditions of soil stratification and groundwater seepage were studied. Based on the theory of porous media, a transient three-dimensional model of layered rock and soil mass was established. The effects of the initial temperature of the soil, the seepage of groundwater, and the type of backfill material on the water temperature and temperature field of soil at the outlet of the buried pipe were analyzed. The initial soil temperature and the groundwater seepage velocity are positively correlated with the outlet temperature of the buried pipe. The temperature field variation of the soil depends to some extent on the type of backfill material and the thermal physical properties. When the initial temperature of soil was 290.15 K, the outlet water temperature of the buried pipe reached 280.43 K after 30 days of heat pump operation. Among the three commonly backfill materials, sand's heat exchange effect is the best, and when clay is used as backfill material there is a obvious cold accumulation near the buried pipe. When the groundwater seepage velocity reaches 200 m/a, the outlet water temperature of the underground pipe is 280.85 K, which is 0.51 K higher than that when there is no groundwater seepage. So the existence of groundwater seepage can eliminate the cold energy of soil accumulation, and the distance between the buried pipes along the seepage direction should be appropriately increased when laying underground pipes.

Key words: vertical double U buried pipe; outlet temperature; backfill materials; groundwater seepage; soil temperature

在“双碳”背景下,中国目前的能源消费结构已确立需要向清洁绿色低碳转型^[1],环境保护以及可再生能源的利用也逐渐被重视。可再生能源中的浅层地热位于地表以下200 m范围内的岩土和地下水中,地源热泵系统就是通过地埋管将浅层地热能中的冷热量通过逆卡诺循环提供给建筑物^[2-8]。地源热泵系统具节能效果显著、不污染地下环境、运行费用低等优点,目前被广泛应用。瑞士人 Zolley 在一份专利中首先提出地源热泵概念^[9],之后人们逐步对其进行探索。S. P. Kavanaugh^[10]发现地下换热器的单位长度换热量误差会受到岩土导热系数偏差的影响,这表明换热器的换热效果会受到岩土体热物性的影响。张炳钟等^[11]利用 COMSOL 软件建立地埋管模型,并利用砂箱试验台获取试验数据,分析了U型管进水温度对土壤温度场的影响。张也等^[12]通过预测地源热泵系统运行期间地下温度场的变化趋势,确定了2种可以缓解热量堆积的热泵开发利用方案。尚少文等^[13-14]利用数值模拟方法得到土壤比热对土壤温度场的影响,分析了渗

流作用下土壤温度的加权平均值,为土壤源热泵的设计运行提供依据。董世豪等^[15]建立固-液-气三相预测模型,得到了水泥基回填材料的取值方法和取值组合。王瑜等^[16]建立地埋管换热器的三维模型,分析了地下水渗流温度等对土壤源热泵换热的影响,发现渗流存在可以更好地消除热量堆积现象。

通常情况下,地下岩土体的地质结构并非均匀一致,土壤会在垂直方向上产生分层,且各层土壤的热物性也不同。在进行地埋管换热问题的模拟研究中,多为简化传热模型,从而忽略岩土体分层对竖直地埋管的影响,这无疑会与实际情况产生偏差,导致研究结果不准确。因此,在前人研究的基础上,笔者基于土壤源热泵工程与实际土壤分层和地下水渗流两种情况,分析土壤初始温度、地下水渗流以及回填材料导热性能对竖直U型地埋管换热的影响,发现土壤初始温度对换热器换热效果影响较大,同时获得了回填材料以及地下水渗流情况对竖直双U型地埋管换热的影响特征。

1 竖直双 U 型地埋管模型建立

1.1 工程概况

研究对象为辽宁省某公共建筑,该建筑供热采用土壤源热泵系统,系统中铺设竖直双 U 型地埋管。根据当地水文地质资料可将岩土体分为 6 层,从地表依次向下为黏土层、泥岩层、砂岩层、泥岩层、砂岩层、泥岩层。岩土体物性参数如表 1 所示。土壤热物性等参数依据实际勘查结果和岩土热响应试验,现场热响应试验采用恒热流法,实时监测进出口温度、监测点的土壤温度。

表 1 岩土体物性参数

Table 1 Physical parameters of rock and soil mass

类型	深度/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热率/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
黏土层	0~6	2 025	1 142.5	1.465
泥岩层	6~17	2 610	868.5	1.996
砂岩层	17~43	2 594	1 069.0	2.974
泥岩层	43~73	2 579	841.4	1.834
砂岩层	73~90	2 540	1 069.0	2.654
泥岩层	90~141	2 585	852.0	1.924
回填土	0~141	1 700	1 200.0	1.970
U 型管	0~140	930	2 300.0	0.420

竖直双 U 型地埋管与分层岩土体之间换热过程极为复杂,为减少模拟过程中的时间成本,做出如下假设:①每层岩土体温度分布均匀,土壤设置为多孔介质且各向同性,土壤热物性与土壤温度变化无关^[17];②假设地下水渗流区域的渗流方向为水平方向;③地下水渗流温度保持为土壤的初始温度;④假设模型各区域之间接触良好,忽略接触热阻。

1.2 几何模型建立

利用 SpaceClaim 软件,按照工程原尺寸建模:双 U 型地埋管深度为 140 m,内径为 27 mm,管壁厚度为 5 mm,并行排列,两管间距离为 50 mm,回填区域直径 154 mm。模拟选取的计算区域为长方体,长×宽×高为 6 m×6 m×141 m。

采用 Workbench 中 mesh 模块进行网格划分,物理偏好选择 CFD,求解器偏好选择 Fluent。因模型比例的特殊性,在划分网格时双 U 型地埋管和管内流体均采用扫略方法。在热泵运行时,地埋管周围温度梯度变化较大,所以加密双 U 型地埋管以及回填区域的网格,为提高软件的计算速度,将土壤区域网格划分得较为稀疏。双 U 型管、管内流体域、回填土区域以及土壤区域网格划分模型如图 1 所示。

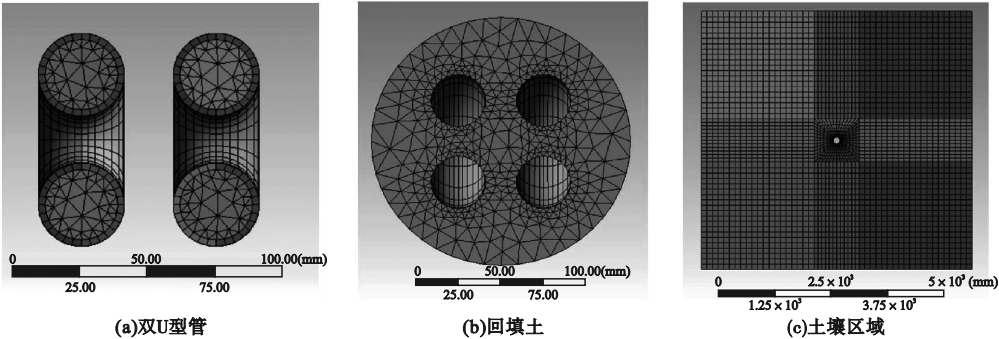


图 1 网格划分模型

Fig. 1 Meshing model

1.3 数值模拟条件设置

由于模型流体域沿埋深方向相对尺寸较大,且在考虑渗流的情况下流体域有多个部分,同时地埋管周围温度变化剧烈,因此采用

双精度求解器求解。黏性模型采用 k-epsilon ($k-\epsilon$),开启能量方程,将双 U 型管出入口的边界条件分别设置为 Pressure-outlet 和 Velocity-inlet;分层土壤设置为 fluid 多孔介

质,回填土设置为 Solid, 求解方案设置为 Simple。

1.4 可靠性验证

依据实测条件,模拟冬季换热条件下,埋管运行 30 d。将 30 d 出口温度的模拟值与实测值进行比照(见图 2)。

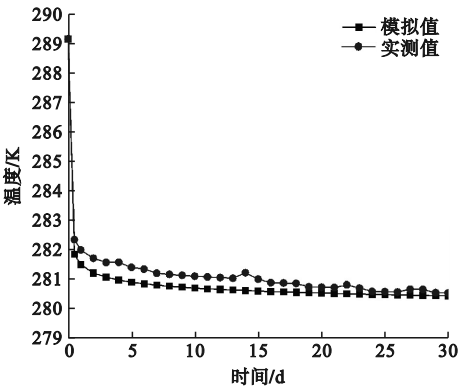


图2 埋管出口温度对比

Fig. 2 Outlet temperature of buried pipe

由图 2 可知,系统初步运行时模拟值与实测值出口温度曲线存在一定差异,这是因为对模型做了理想化的简化,且在实际中埋管之间会存在相互干扰。但在模拟到达 30 d 时,模拟出口温度值与实测出口温度值差异很小,在 30 d 内出口温度值的最大相对误差小于 5%,验证了所建立的分层土壤竖直双 U 型埋管模型的准确性。

2 模拟结果与分析

2.1 不同土壤初始温度的比较

双 U 型埋管的进口流速假定为 0.5 m/s,管内流体初始温度均设置为 289.15 K,模拟时间为 30 d,分别选取土壤初始温度为 284.15 K、287.15 K、290.15 K 进行模拟对比,出口温度变化如图 3 所示。从图 3 中可以看出,运行 30 d 后,土壤初始温度为 284.15 K 时,出口温度为 279.29 K,温差为 1.14 K;土壤初始温度为 287.15 K 时,出口温度为 279.86 K,温差为 1.71 K;土壤初始温度为 290.15 K 时,出口温度为 280.43 K,温差为 2.28 K,埋管的出口温

度与土壤的初始温度呈现正相关。由于冬季土壤的初始温度较低导致埋管与土壤之间换热效果差,较高的土壤初始温度能提高埋管与土壤之间的换热,从而埋管达到稳定后的出口温度也越高。因此,在敷设埋管的选址时,应当对建筑供热季的长短以及所需热负荷的大小进行全面考量,若需较高的埋管出口温度或较大的热负荷,要选择土壤初始温度高的区域。

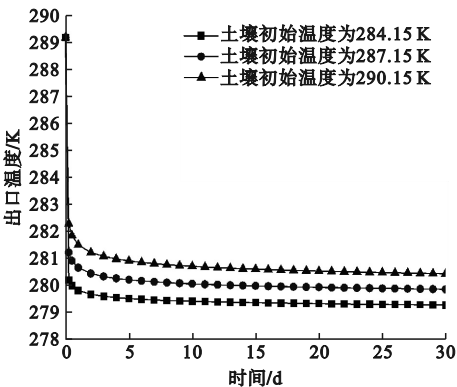


图3 不同土壤温度下出口温度对比

Fig. 3 Outlet water temperature of the buried pipe at different initial soil temperatures

2.2 回填材料种类的影响

选取黏土、沙土、砂岩三种常用的材料作为回填土,物性参数如表 2 所示。

表2 回填土材料物性参数

Table 2 Physical parameters of backfill soil material

种类	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	导热率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)
黏土	1 285	1 200	0.8
沙土	1 950	1 000	2.4
砂岩	2 400	930	1.5

2.2.1 回填材料对出口温度的影响

埋管进口流速假定为 0.5 m/s,热泵运行时间 30 d,不同回填材料的出口温度变化情况如图 4 所示。黏土对应的出口温度为 280.05 K,沙土对应的出口温度为 280.5 K,砂岩对应的出口温度为 280.3 K。回填材料为沙土时埋管出口温度最高,这是因为三种材料中沙土的导热系数最高,导热系数越

高,热量在回填材料中交换越快,地理管出口温度越高。

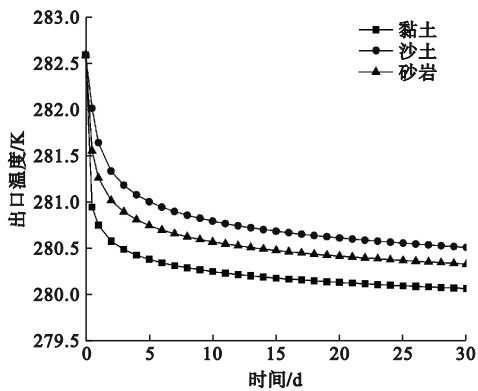


图4 不同回填材料的出口温度对比

Fig. 4 Outlet water temperature of the buried pipe with different backfill materials

2.2.2 回填材料对土壤温度场的影响

为探究常用的黏土、沙土、砂岩三种材料对土壤温度场的影响,选取距离地理管中心径向0.1 m,距离地面向下3 m处土壤中的一点进行监测。图5为不同回填材料对土壤温度的影响变化,图6为不同回填材料下土壤温度场。

由图5可知,相同初始条件下,稳定运行30 d后,沙土所对应的土壤温度为282.15 K,砂岩所对应的土壤温度为282.72 K,黏土所对应的土壤温度为283.55 K。热泵运行初期,沙

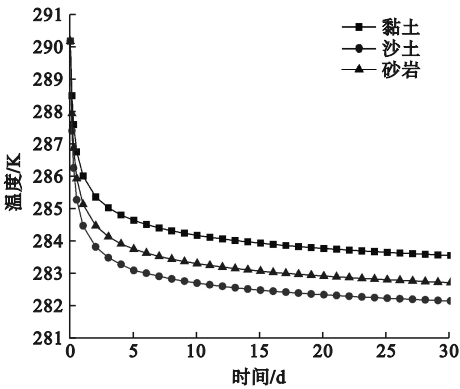


图5 不同回填材料对土壤温度的影响变化
Fig. 5 Effect of different backfill materials on soil temperature

土对应的土壤温度下降速率明显大于砂岩和黏土,温度变化剧烈,这是由于沙土的导热系数较高,有利于增强管内循环水与土壤之间的热传导。可见,三种回填材料中沙土的换热效果最佳。

从图6中可以看出,黏土相较于沙土和砂岩,在回填区域存在明显的冷量堆积,与土壤换热效果差。土壤温度场的变化在一定程度上取决于回填材料的种类及热物性,回填材料的导热率越高对土壤温度场影响越大。为提高换热效率,减小地理管附近的冷量堆积,在工程中要优先考虑导热系数较大的回填材料。

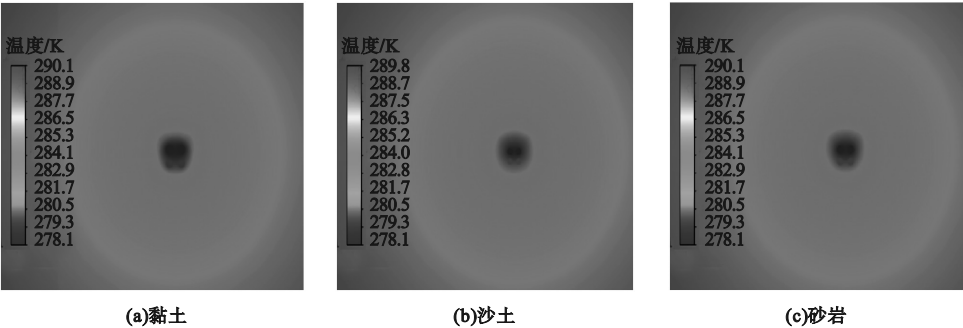


图6 不同回填材料下土壤温度场

Fig. 6 Soil temperature field under using different backfill materials

2.3 地下水渗流的影响

在地下水渗流的作用下,岩土体主要通过两种途径进行热量传递,一种是多孔介质土壤与孔隙中的地下水进行导热,另一种是通过水

分在多孔介质中的渗透作用来实现对流传热。黏土层、泥岩层、砂岩层土壤孔隙率分别为0.476、0.18、0.4。为了研究地下水渗流作用对竖直双U型地理管的影响,选取0、

100 m/a、200 m/a 三个渗流速度进行研究。

2.3.1 地下水渗流对出口温度的影响

地下水渗流对竖直双U型管出口温度的影响如图7所示。

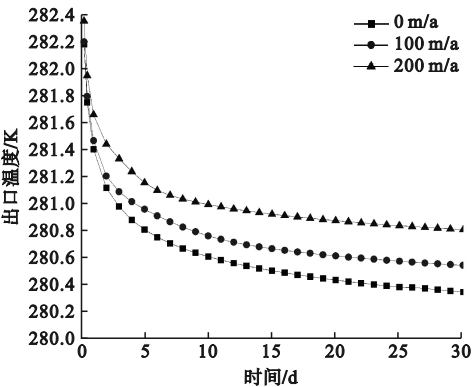


图7 不同地下水流速出口温度

Fig. 7 Outlet temperature of the buried pipe with different groundwater flow rates

由图7可知,地下水渗流速度对竖直双U型地埋管出口温度影响很大,设备运行30 d,渗流速度为0时,出口温度为280.34 K;渗流速度为100 m/a,出口温度为280.54 K;渗流速度为200 m/a时,出口温度为280.85 K。初始条件和运行相同时,渗流速度越大,地埋

管出口温度越高。这是因为渗流可以带走埋管周围的冷量,使得换热器与土壤之间一直存在着较大的温差,地埋管与土壤的换热能力会被增强。渗流速度的增大有利于减弱或消除地埋管因吸热不均匀引起的冷量堆积,且地埋管换热时间越长减弱效果越明显。

2.3.2 地下水渗流对土壤温度场的影响

在三个流速下,土壤源热泵运行30 d的土壤温度场分布如图8所示。由图8可知,没有渗流作用影响时,双U型地埋管周围土壤温度分布均匀,温度沿管中心向外逐渐升高,温度梯度由地埋管中心向外围土壤区域逐渐减小。随着地埋管与土壤换热时间的增加,埋管附近的土壤温度也随之降低,土壤开始出现冷量堆积,不利于地埋管换热。从图8(b)、(c)可以看出,热量等高线沿着渗流方向产生了拉伸,在地下水渗流方向的上游土壤温度明显高于无渗流时的土壤温度,这是因为上游区域的冷量会被渗流带走,造成沿着渗流方向的冷量发生明显迁移,此时土壤的换热是由导热和热对流共同作用来完成。

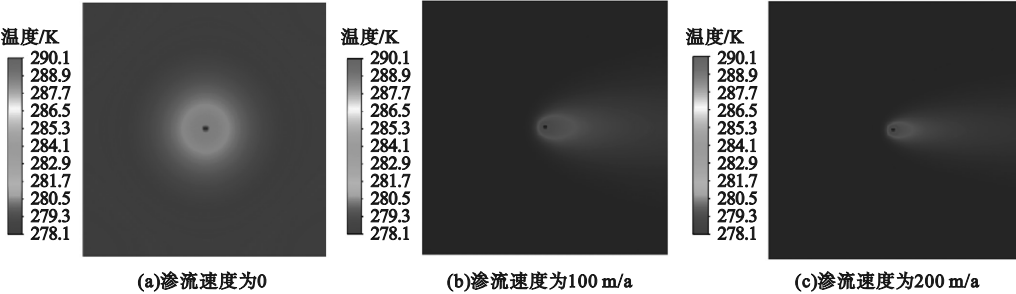


图8 不同地下水流速土壤温度分布图(垂直于z轴)

Fig. 8 Soil temperature distribution with different groundwater flow rates(perpendicular to the z-axis)

对比图8(b)、(c)可知,土壤的温度分布很大程度上会受到地下水渗流速度的影响。当地下水渗流存在时,土壤温度场会产生形变,整体呈现上下对称的椭圆形分布。当渗流速度增大时,温度场的等温线被拉伸程度也随之增大,渗流速度越大地埋管周围的冷量堆积的缩减效果越明显。由于在下游区域土壤依然存在较多的冷量,在布置地埋管管群时,应

在渗流方向上适当增加管间距。

3 结 论

(1) 土壤的初始温度越高,地埋管达到稳定后的出口温度也越高,换热效果越好;在冬季换热条件下,对于热负荷较大的建筑,埋管选址时应选择土壤初始温度较高的区域。

(2)黏土、沙土、砂岩三种回填材料中,沙土的埋管出口温度最高,达到 280.5 K,土壤温度场的变化在一定程度上取决于回填材料的种类及热物性。

(3)地下水渗流速度与埋管出口温度呈现正相关,地下水渗流速度达到 200 m/a 时,相较于无渗流时的出口温度增加了 0.51 K,地下水渗流可以消除周围土壤堆积的冷量,在渗流速度较大的土壤中布置管群时,应在渗流方向上适当增加管间距。

参考文献

- [1] 冯玉军. 国际能源大变局下的中国能源安全[J]. 国际经济评论, 2023, 30(1): 38-52.
(FENG Yujun. China's energy security under the drastic changes in international energy system [J]. International economic review, 2023, 30(1): 38-52.)
- [2] HAN C, YU X. Performance of a residential ground source heat pump system in sedimentary rock formation [J]. Applied energy, 2016, 164(2): 89-98.
- [3] HEIN P, KOLDITZ O, ENS GÖRKE U-J, et al. A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems [J]. Applied thermal engineering, 2016, 100(7): 421-433.
- [4] HUANG B, MAUERHOFER V. Life cycle sustainability assessment of ground source heat pump in Shanghai, China [J]. Journal of cleaner production, 2016, 119(4): 207-214.
- [5] LUO J, ROHN J, WEI X, et al. A review of ground investigations for ground source heat pump (GSHP) systems [J]. Energy and buildings, 2016, 117(3): 160-175.
- [6] MARMARAS J, BURBANK J. KOSANOVIC D B. Primary-secondary decoupled ground source heat pump systems coefficient of performance optimization through entering water temperature control [J]. Applied thermal engineering, 2016, 96(5): 107-116.
- [7] ZHANG S, JIANG Y, XU W, et al. Operating performance in cooling mode of a ground source heat pump of a nearly-zero energy building in the cold region of China [J]. Renewable energy, 2016, 87(5): 1045-1052.
- [8] ZHOU S, CUI W, TAO J, et al. Study on ground temperature response of multilayer stratus under operation of ground-source heat pump [J]. Applied thermal engineering, 2016, 101(2): 173-182.
- [9] 杨卫波. 太阳能-地源热泵系统的理论与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.

- (YANG Weibo. Theoretical and experimental research of solar-ground source heat pump system [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.)
- [10] KAVANAUGH S P. Simulation and experimental verification of vertical ground 2 coup led heat pump [D]. Oklahoma: Oklahoma State University, 1985.
- [11] 张炳钟, 晋华, 陈思青, 等. U 型管进水温度对土壤温度场的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 185-189.
(ZHANG Bingzhong, JIN Hua, CHEN Siqing, et al. Effect of U-shaped pipe inlet water temperature on soil temperature field [J]. Water resources and power, 2022, 40(9): 185-189.)
- [12] 张也, 骆祖江, 杜建国, 等. 基于热平衡原理的埋管地源热泵系统开发利用潜力评价[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 444-452.
(ZHANG Ye, LUO Zujiang, DU Jianguo, et al. Potential evaluation of development and utilization of ground source heat pump system based on heat balance principle [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(9): 444-452.)
- [13] 潘欣, 尚少文. 关于地源热泵技术的研究与应用现状[J]. 建筑与预算, 2018, 41(11): 26-29.
(PAN Xin, SHANG Shaowen. Research and application status of ground source heat pump technology [J]. Construction and budget, 2018, 41(11): 26-29.)
- [14] 尚少文, 潘欣, 徐颖, 等. 土壤比热容对埋管换热器周围土壤温度影响的模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2): 379-384.
(SHANG Shaowen, PAN Xin, XU Ying, et al. Simulation for effect of soil specific heat capacity on soil temperature around buried pipe heat exchanger [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2): 379-384.)
- [15] 董世豪, 胡自远, 周超辉, 等. 埋管地源热泵水泥基回填材料导热系数预测模型[J]. 流体机械, 2022, 50(5): 22-31.
(DONG Shihao, HU Ziyuan, ZHOU Chaohui, et al. Prediction model of thermal conductivity of cement-based grouts for ground source heat pump [J]. Fluid machinery, 2022, 50(5): 22-31.)
- [16] 王瑜, 刘志成. 地下水渗流对地源热泵竖直双 U 型埋管群传热特性的影响[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(9): 52-57.
(WANG Yu, LIU Zhicheng. Influence of groundwater seepage to the heat transfer characteristics of double U-type ground heat exchanger group in heat pump system [J]. Research and exploration in laboratory, 2019, 38(9): 52-57.)
- [17] 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. Research on heat transfer of soil source heat pump type U buried pipe heat exchanger [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2006.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)