

中深层地埋管换热器周围岩土热恢复特性

黄 帅^{1,2}, 孙苏雨婷³, 董建锴^{1,2}, 李 骥⁴, 姜益强^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 北京市建设工程造价管理处, 北京 101117; 4. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100101)

摘要: 为揭示中深层地埋管换热器周围岩土的热恢复特性, 建立数值传热模型, 基于有限差分法进行求解, 并利用项目实测数据进行验证, 在此基础上分析了中深层地埋管换热器周围岩土全年的温度场变化。主要得出以下结论: 特定工况下, 中深层地埋管换热器对其周围岩土的热影响范围有限, 其热影响半径为 9.3 m; 中深层地埋管换热器的取热区域主要集中在 1 200~2 000 m 的岩土; 岩土热恢复率随着恢复时间的增加而逐渐减小, 以恢复两个月的热恢复率为基准, 热恢复 4 个月、6 个月、8 个月热恢复率在前一基础上分别增加 2.1%、0.9% 和 0.5%; 经过 8 个月的热恢复期, 岩土能够基本恢复至初始温度, 当 $r=0.3$ m 时埋管深度为 1 200 m、1 600 m、1 800 m 和 2 000 m 的岩土所对应的热恢复率分别达 98.7%、97.9%、97.9%、98.2%。为中深层地源热泵系统的设计提供理论参考。

关键词: 中深层地热; 地埋管换热器; 数值模拟; 热恢复; 工程实测

中图分类号: TU831; TK529

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)06-0842-09

Heat recovery characteristics of rock and soil around medium-deep borehole heat exchanger

HUANG Shuai^{1,2}, SUNSU Yuting³, DONG Jiankai^{1,2}, LI Ji⁴, JIANG Yiqiang^{1,2}

(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China;

3. Beijing Engineering Cost Administration, Beijing 101117, China;

4. China Academy of Building Research, Beijing 100101, China)

Abstract: To reveal the heat recovery characteristics of the rock and soil around the deep borehole heat exchanger (DBHE), a numerical heat transfer model is established in this paper, which is solved based on the Finite Difference Method(FDM), and verified by the measured data of the project. On this basis, the annual temperature changes of the rock and soil around the DBHE are analyzed. The main conclusions are as follows: under specific working conditions, the heat influence range of the DBHE on the surrounding rock and soil is limited, and its heat-affected radius is 9.3 m; the heat extraction area of the DBHE is mainly concentrated in the rock and soil at a depth of 1 200~2 000 m; the thermal recovery rate of rock and soil gradually decreases with the increase of recovery time. Based on the thermal recovery rate of two months, the thermal recovery rates of four months, six months and eight months increase by 2.1%, 0.9% and 0.5% respectively, so the soil can basically recover to the initial temperature after 8 months of thermal recovery. When $r=0.3$ m, the corresponding thermal recovery rates of the buried pipe with depth of 1 200 m, 1 600 m, 1 800 m and 2 000 m are 98.7%, 97.9%, 97.9% and 98.2% respectively. This study can provide a theoretical reference for the design of DBHE.

Key words: medium deep geothermal energy; borehole heat exchanger; numerical simulation; heat recovery; engineering measurement

收稿日期: 2021-04-16

修改稿日期: 2021-11-07

基金项目: 中美政府间国际合作项目(2019YFE0100300); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2019E024)

第一作者: 黄 帅(1997—), 男, 硕士生, 主要从事中深层地源热泵研究. E-mail: sds_hs@163.com

通信作者: 董建锴(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热泵空调技术方面的研究工作. E-mail: djkehb@163.com

建筑领域是造成直接和间接碳排放的主要责任领域之一^[2], 为降低建筑能耗, 可再生能源在建筑供暖及供冷中得到了广泛的应用. 在可再生能源中, 中深层地热能资源丰富, 具有清洁环保、储量大、稳定可靠等特点^[3], 近年来引起了行业人员的广泛关注.

与目前应用广泛的浅层地源热泵系统相比, 中深层地源热泵系统具有换热器占地面积小、对全年冷热负荷平衡要求低等特点^[4], 并且, 前者需同时满足冬季供热夏季制冷的需求, 而后者仅用于冬季供热. 因此, 不同于浅层地源热泵系统需维持土壤全年热平衡, 中深层地源热泵系统更侧重取热后对土壤的热衰减^[5]. 前人对浅层地源热泵系统土壤热平衡做了相关研究^[6-9], 而中深层地埋管换热技术发展现状是工程实践先于理论研究^[10], 相关研究主要集中在完善数学模型^[11-13]、中深层地埋管换热器取热特性^[10, 14-16]等, 而对岩土热恢复特性研究较少, 贾林瑞等^[17]对单取热工况地下岩土温度热响应做了相关研究, 发现 1 400 ~ 1 800 m 处的岩土温度变化率最快; 杜甜甜等^[18]研究了中深层地埋管换热器取热对岩土的热影响, 得出当延米换热量为 100 W/m, 运行 20 a 的最佳钻孔间距为 133 m; 蔡皖龙等^[19]研究了 4 种不同间歇运行模式下中深层地埋管换热器取热稳定性, 发现当按不同运停比运行时的岩土温度恢复效果较好.

通过上述可知, 中深层地埋管供热系统作为地源热泵系统的新形式, 相关研究主要集中于中深层地埋管换热器的取热特性, 而对钻孔外岩土的热恢复特性等研究较少, 并且, 中深层地埋管换热器的埋管深度往往达数千米, 地下岩土环境具有不确定性, 应用实验方法研究岩土热恢复较为困难. 为此, 本文建立数值传热模型, 基于有限差分法将控制方程离散求解, 将求解的结果与实测数据进行比对, 分析了中深层地埋管换热器周围岩土温度场变化, 旨在揭示岩土温度在热恢复阶段的变化规律, 为工程实践提供理论指导和依据.

1 数值模型建立

1.1 物理模型

中深层同轴套管式地埋管换热器的取热原理如图 1 所示, 在循环水泵的驱动下, 循环水由套管外部环腔流入, 经中深层的高温岩土加热后通过内套管反向流动, 流出地面后进入热泵机组.

中深层地埋管换热器的取热过程主要包括内

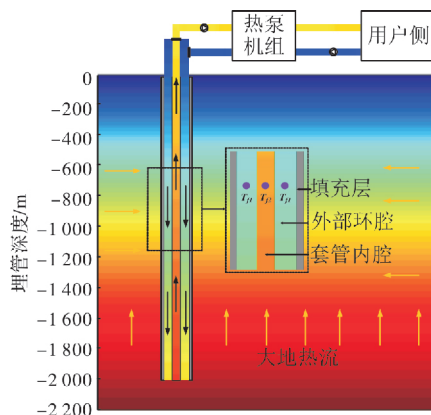


图 1 中深层套管式地埋管换热器的取热原理

Fig. 1 Heat extraction principle of medium deep borehole heat exchanger

套管流体与外部环腔流体的对流换热、环腔流体与外管壁的对流换热以及外套管与周围岩土的导热, 其换热过程较为复杂, 并且地下岩土环境具有不确定性, 因此做出以下假设:

- (1) 忽略地下渗流作用的影响, 将岩土中传热视为单纯的导热问题^[20];
- (2) 忽略地表温度波动的影响^[21];
- (3) 假定数值模拟区域的径向边界处的温度分布不受地埋管换热器的影响;
- (4) 假定同轴套管式换热器内循环体主要以对流传热, 忽略其轴向的热传导.

1.2 控制方程

基于以上假设, 每层岩土的导热方程可写为^[22]

$$\frac{1}{a_k} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial T_s}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: a_k 为不同岩土层的热扩散率, m^2/s ; T_s 为岩土层温度, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\tau$ 为时间步长, s ; r 和 z 为径向长度与竖直方向长度, m .

当地埋管换热器内的循环水按照图 1 所示的方式流动时, 外部环腔内流体的能量方程为

$$C_1 \frac{\partial T_{f1}}{\partial \tau} = \frac{T_{f2} - T_{f1}}{R_2} + \frac{T_b - T_{f1}}{R_1} - C \frac{\partial T_{f1}}{\partial z} \quad (2)$$

内管流体的能量方程为

$$C_2 \frac{\partial T_{f2}}{\partial \tau} = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{R_2} + C \frac{\partial T_{f2}}{\partial z} \quad (3)$$

式(2)和(3)描述的是在地埋管换热器正常取热工况下的能量方程, 当系统停运时, 外部环腔内流体及内管流体的流速为零, 此时地埋管周围岩土层处于热恢复状态. 与正常取热工况下的能量方程相比, 此时对流项前的系数 C 为零.

其中:

$$C_1 = \frac{\pi}{4} (d_{i1}^2 - d_{o1}^2) \rho c + \frac{\pi}{4} (d_{i2}^2 - d_{o2}^2) \rho_2 c_2 +$$

$$\frac{\pi}{4}(d_b^2 - d_{10}^2)\rho_g c_g \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\pi}{4}d_{2i}^2\rho_c + \frac{\pi}{4}(d_{20}^2 - d_{2i}^2)\rho_1 c_1 \quad (5)$$

式中: $C = MC_f$ 指的是循环液的热容流量, $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{K})$; d_b 代表钻孔半径, m ; d_i 和 d_o 代表套管的内径和外径, m ; ρ_c 、 $\rho_1 c_1$ 、 $\rho_2 c_2$ 、 $\rho_g c_g$ 分别代表循环水定容比热、外管定容比热、内管定容比热、回填材料定容比热, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. 此外, 外管内循环水和钻孔壁之间的热阻 R_1 以及内外管循环水之间的热阻 R_2 分别由下式求得:

$$R_1 = \frac{1}{\pi d_{11} h_1} + \frac{1}{2\pi k_{p1}} \ln\left(\frac{d_{10}}{d_{11}}\right) + \frac{1}{2\pi k_g} \ln\left(\frac{d_b}{d_{10}}\right) \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{1}{\pi d_{2i} h_2} + \frac{1}{2\pi k_{p2}} \ln\left(\frac{d_{20}}{d_{2i}}\right) + \frac{1}{\pi d_2 h_1} \quad (7)$$

式中: k_g 、 k_{p1} 和 k_{p2} 代表回填材料、外管和内管的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_1 和 h_2 代表套管外管和内管的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

1.3 初始及边界条件

岩土中的初始温度分布在径向是均匀的, 而在纵向存在地温梯度, 并且不同岩土层的地温梯度不同, 因此, 在大地热流一定的条件下, 在任一埋管深度处的初始岩土温度可以表达为下式^[23].

$$T_{(z)} = T_a + \frac{q_g}{h_a} + \sum_{j=1}^{m-1} \frac{q_g}{k_j} (H_j - H_{j-1}) + \frac{q_g}{k_m} (z - H_{m-1}) \quad (8)$$

在圆柱坐标的径向边界 r_{bnd} (距离地埋管换热器的中心足够远) 设第一类边界条件, 认为该处的温度分布不受地埋管换热器取热的影响, 同时, 在距离钻孔底部较远位置处 (钻孔底部以下 200 m 处) 也设第一类边界条件.

$$T_{r_{\text{bnd}}-\tau} = T_a + \frac{q_g}{h_a} + \sum_{j=1}^{m-1} \frac{q_g}{k_j} (H_j - H_{j-1}) + \frac{q_g}{k_m} (z - H_{m-1}) \quad (9)$$

式中: H_j 是第 j 层地层底部的坐标; q_g 是大地热流, $\text{W} \cdot \text{m}^2$; T_a 是地表温度, $^{\circ}\text{C}$; h_a 是空气与地表的对流换热系数, $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; k_m 为岩石的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})$.

在地表的边界设定第三类边界条件, 同时, 考虑到钻孔深度往往达数千米, 地表的参数的变化对地埋管换热器取热影响较小, 因此在本模型中求解过程中假定地表以上的空气温度 T_a 以及表面对流换热系数 h_a 保持不变^[24].

$$k \frac{\partial T_s}{\partial z} = h_a (T_s - T_a) \quad (10)$$

外部环腔流体与内管流体能量方程的边界条件为

$$T_{f1} = T_{f2} - \frac{Q}{C}, Z=0 \quad (11)$$

$$T_{f1} = T_{f2}, Z=H \quad (12)$$

式中: Q 为取热功率, kW ; $C = MC_f$ 指的是循环液的热容流量, $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{K})$; Z 是埋管深度, m .

2 数值模型求解及验证

2.1 模型求解

在非稳态数值传热模拟中, 时间步长 $\Delta\tau$ 、纵向步长 Δz 及径向步长对模拟计算速度及结果的精确度均有一定影响. 为了保证结果的准确性需要对其做无关性验证, 由图 2 时间步长无关性验证结果可知 $\Delta\tau$ 可取 900 s. 考虑径向较远处热流趋近于零, 钻孔附近的热流及温度梯度较大, 故以钻孔壁为界采用变步长, 即径向步长按照等比级数变化 (等比系数取 1.2), 距离钻孔第一个节点的距离为 0.168 m, 径向共取 40 个节点, 并且纵向步长 Δz 取 10 m. 由图 3 可知节点数量可取 7 700 个, 满足计算精度要求. 此外, 岩土热物性参数见表 1^[14, 25], 模拟所需的基础物理参数见表 2.

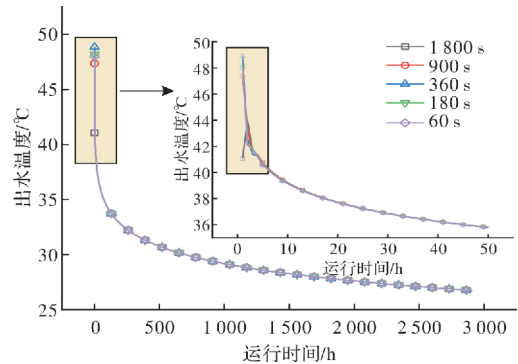


图 2 时间步长无关性验证

Fig. 2 Verification of time step independence

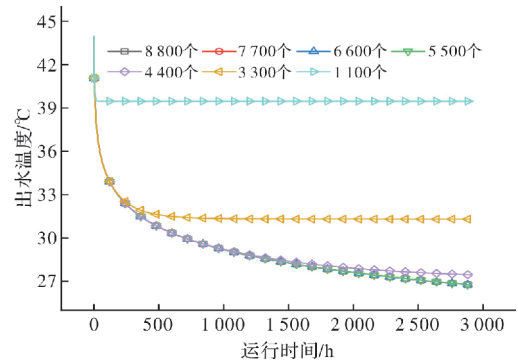


图 3 节点数量无关性验证

Fig. 3 Verification of node number independence

表 1 岩土层物理参数

Tab. 1 Physical parameters of rock and soil layer

岩土层	导热系数 /[W · (m · K) ⁻¹]	热扩散率 /(m ² · s ⁻¹)	单位体积热容 /[J · (m ³ · k) ⁻¹]
第一层	1.8	7.30 × 10 ⁻⁷	2.45 × 10 ⁶
第二层	2.6	8.80 × 10 ⁻⁷	2.94 × 10 ⁶
第三层	3.5	1.80 × 10 ⁻⁶	1.96 × 10 ⁶
第四层	5.3	2.30 × 10 ⁻⁶	2.28 × 10 ⁶

表 2 模拟所需的物理参数

Tab. 2 Physical parameters required for simulation

参数项	单位	数值
井孔深度	m	2 000
模拟区域深度	m	2 200
内管规格	mm	φ125 × 11.4
外管规格	mm	φ193.7 × 8.33
内管导热系数	W/(m · K)	0.4
外管导热系数	W/(m · K)	41
流量	m ³ /h	28
水的导热系数	W/(m · K)	0.618
水比热容	J/(kg · K)	4 174
回填材料导热系数	W/(m · K)	1.5
大地热流	W/m ²	0.075
地层上表面温度	℃	10
延米换热量	W/m	100

2.2 模型验证

为验证建立的数学模型及所编程序的准确性,我们对西安市某住宅工程进行了现场实测^[14, 26].在 2019 年到 2020 年供热期间,共监测了某地热井 1 100 h 的进出口温度,测试期间单孔地热井平均换热量为 270 kW,循环水平均流量为 25.5 m³/h,地埋管换热器进出水温差约为 9.2 ℃,机组的平均 COP 达 4.7.将该地热井运行参数导入所编制的程序,进而得出模拟地源侧进出口温度值,其中,地源侧进出水温度的模拟值与实测值对比如图 4 所示.

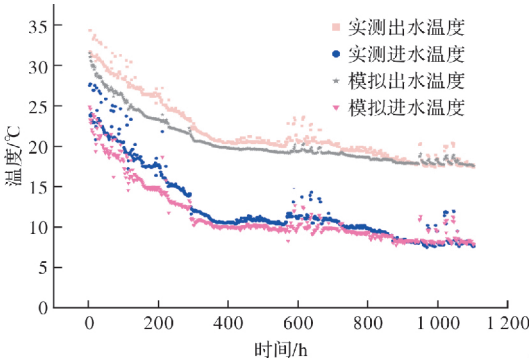


图 4 地源侧进出口温度实际值与模拟值对比^[14]

Fig. 4 Comparison of actual and simulated temperature at the inlet and outlet of the ground source side

从图 4 可以看出,650 h 后实测地埋管换热器出水温度与模拟出水温度的最大相对误差为 6.01%,满足工程要求,进而为下文相关分析奠定了基础.

3 结果与分析

3.1 岩土温度场

本文把寒冷地区住宅建筑作为模拟对象,其供暖周期一般为当年 11 月 15 至次年 3 月 15 日,约 120 d,中深层地埋管换热器在供暖期运行,其他时间停机,停机期间其周围岩土处于热恢复期.图 5 分别给出了中深层地埋管换热器连续取热 120 d 后以及经过为期 8 个月热恢复后的岩土温度场,此时的流量为 28 m³/h 时,其他参数如表 2 所示.

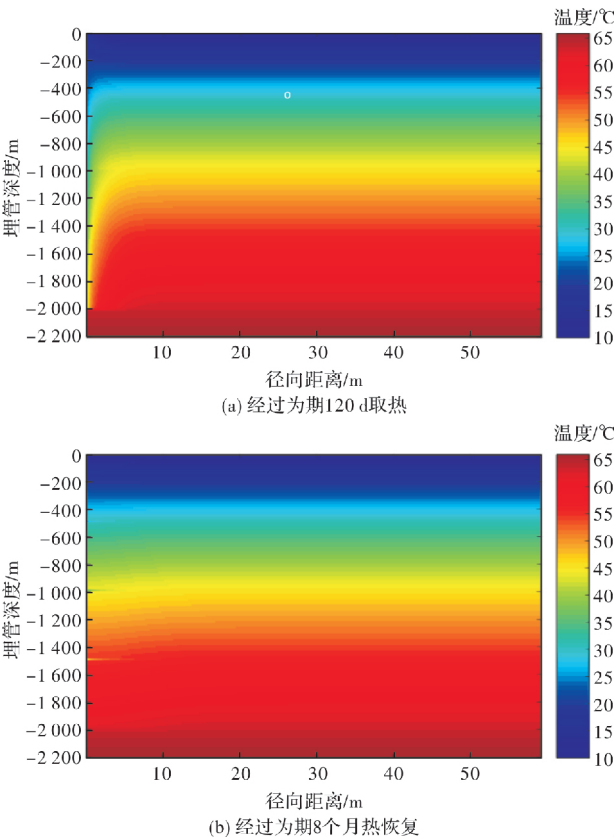


图 5 中深层地埋管换热器周围岩土温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of rock and soil around medium deep borehole heat exchanger

从图 5(a)可以看出,中深层地埋管换热器连续取热后,其周围 1 000 m 以下的岩土温降较为明显,但在埋管深度 200 m 以上的岩土温度有所升高.分析原因:地埋管换热器主要从温度较高的中深层岩土取热,而浅层岩土温度较低,内管流体经中深层岩土加热后,流体温度将高于浅层岩土,管内流体会向浅层岩土逆向传热.因此,为降低热损失在浅层岩土区域应采取相应的保温措

施。此外,从图 5(b)可以看出,岩土经过 8 个月的热恢复期,与初始岩土温度场相比,径向距离 10 m 以内的岩土恢复程度较高,下文将对岩土热恢复程度做详细分析。

为进一步分析中深层地埋管换热器连续取热对其周围岩土温度场的热影响,图 6 给出了中深层地埋管换热器运行 120 d 后不同埋管深度径向岩土温度分布。

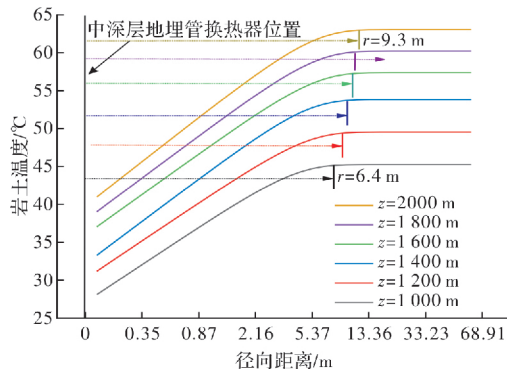


图 6 中深层地埋管换热器运行 120 d 后不同埋管深度径向岩土温度分布

Fig. 6 Radial geotechnical temperature distribution at different depths after 120 days operation of medium deep borehole heat exchanger

从图 6 可以看出,在中深层地埋管换热器连续运行 120 d 后,与不受影响的径向岩土温度相比,当 $r=0.2$ m, z 分别为 1 000 m、1 400 m、1 800 m 和 2 000 m 时,温降分别为 17.1 °C、20.5 °C、21.2 °C 和 22.1 °C,此外, $z=1$ 000 m 和 $z=2$ 000 m 时的岩土热影响半径分别为 6.4 m 和 9.3 m。因此,为研究中深层地埋管换热器周围岩土的热恢复性问题,将模拟监测点主要设置在岩土受热影响的区域,即 $r < 9.3$ m 范围。

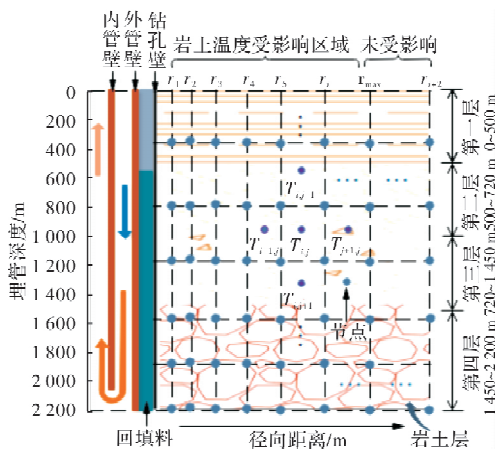


图 7 模拟监测点位置^[27]

Fig. 7 Location of monitoring points

模拟监测点的位置如图 7 所示,径向 r 分别取

0.3 m、0.4 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、4 m 和 6 m,径向 z 分别取 400 m、800 m、1 200 m、1 600 m、1 800 m 和 2 000 m,共设置 48 个模拟监测点。

3.2 岩土监测点全年温度分布

从图 8 可以看出,运行初期中深层地埋管换热器周围岩土($z=400$ m)的温度有所升高,主要原因是运行初期套管内流体温度较高,热量由套管内的流体传向周围岩土,经过一段时间运行后,套管内的流体温度逐渐降低,热量逐渐由周围岩土传向管内流体。下文图中出现的类似现象在这里进行说明,后期不再赘述。

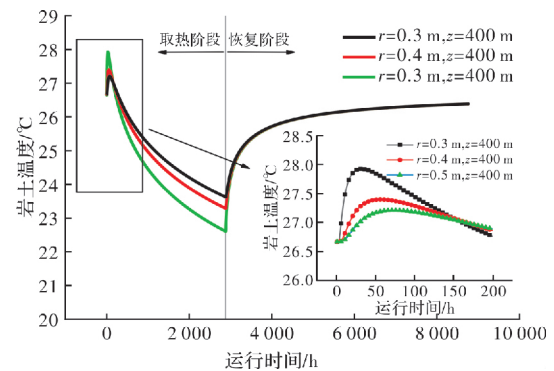
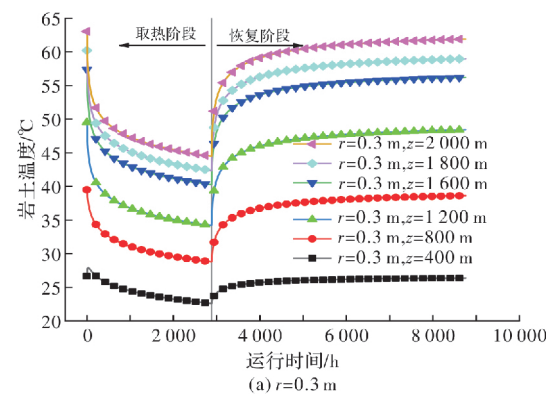


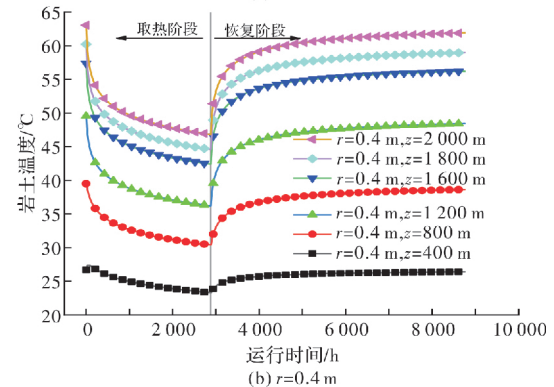
图 8 $z=400$ m 处不同径向距离岩土温度

Fig. 8 Temperature distribution of monitoring points with different radial distances at $z=400$ m

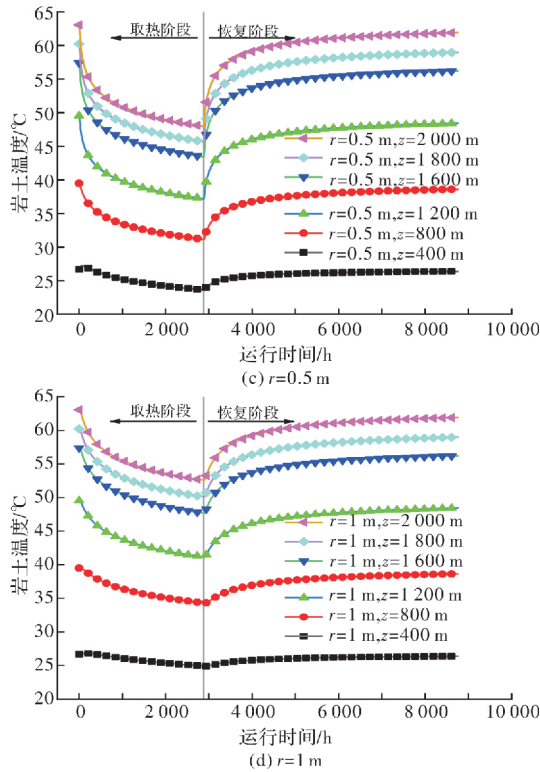
图 9 给出 $r \leq 1$ m 范围内 24 个监测点全年温度分布,此部分区域岩土距离地埋管换热器较近,属于中深层地埋管换热器取热的核心区域。



(a) $r=0.3$ m



(b) $r=0.4$ m

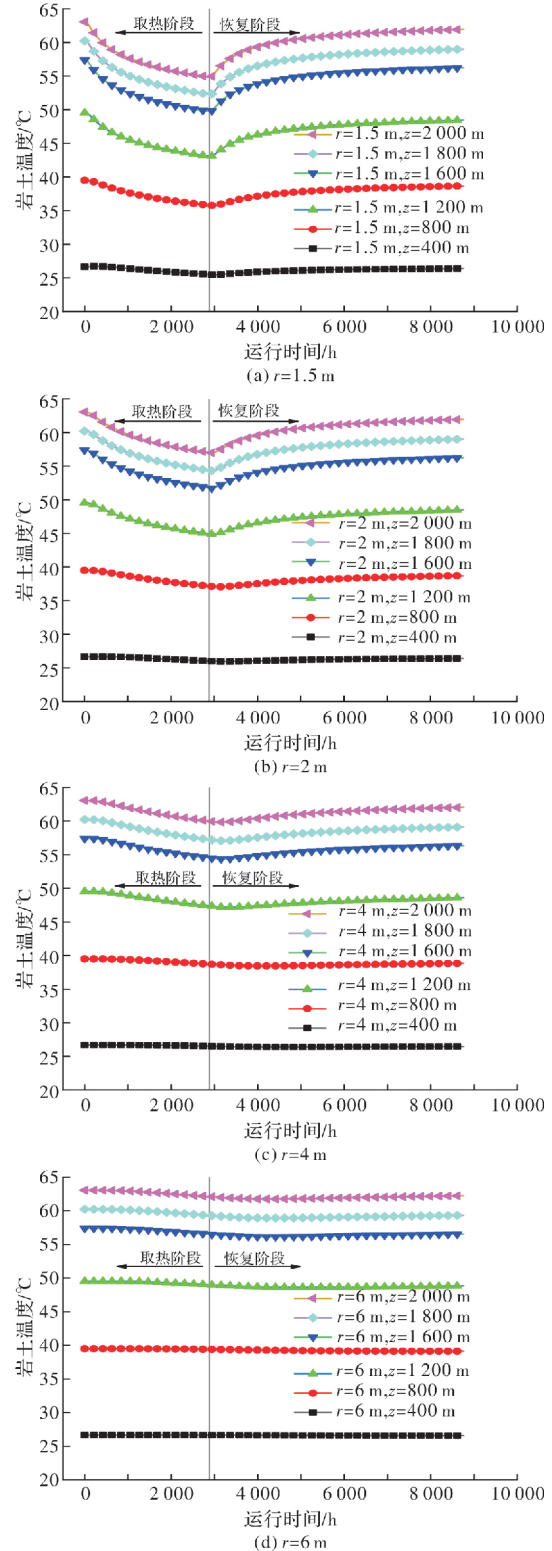
图9 $r \leq 1$ 范围内不同埋管深度处岩土温度Fig. 9 Rock and soil temperature at different depths in the range of $r \leq 1$ m

从图9可以看出,在埋管深度相同的取热阶段,越靠近中深层地埋管换热器的岩土温降越大.当 $z=2\,000$ m, r 分别取0.3 m、0.4 m、0.5 m及1 m时,温降分别为18.6 °C、16.2 °C、15.1 °C、10.5 °C.主要是在取热阶段,以中深层地埋管换热器为中心向周边岩土层取热,因此温降随着径向距离的增加而降低.此外,当 $r=0.3$ m, z 分别取400 m、800 m、1 200 m、1 600 m、1 800 m及2 000 m时,温降分别为4.1 °C、10.7 °C、15.3 °C、17.1 °C、17.8 °C和18.6 °C.由此可知,中深层地埋管换热器的取热区域主要集中在1 200~2 000 m的岩土,此外,在岩土热恢复阶段,可以看出前期斜率较高后期趋于平稳,即前期岩土的热恢复速率较快,下文将进行相关分析.

图10给出 $1\text{ m} < r \leq 6$ m范围内24个监测点全年温度分布,与 $r \leq 1$ m范围内24个监测点相比,此部分区域距离中深层地埋管换热器较远,但其变化规律与前文分析相同.

从图10可知,当半径 r 从1.5 m变化到6 m时,不同埋管深度的岩土温度变化幅度均逐步下降.当半径 r 增大到2 m时, $z=400$ m处岩土温度变化幅度较小;当半径 r 增大到4 m时, $z=800$ m及以上的区域岩土温度变化幅度较小;当半径 r 增大到6 m时,不同深度处的岩土温度变化幅度均

较小.当埋管深度相同,以 $z=2\,000$ m为例分析, r 分别为1.5 m、2 m、4 m和6 m时,在中深层地埋管换热器取热阶段时所对应的温降分别为8.2 °C、6.0 °C、3.1 °C和0.9 °C,表明中深层地埋管换热器对其周围岩土的热影响范围有限.

图10 $1\text{ m} < r \leq 6$ m范围内不同埋管深度处岩土温度Fig. 10 Rock and soil temperature at different depths in the range of $1\text{ m} < r \leq 6$ m

3.3 岩土监测点热恢复规律

为进一步分析岩土热恢复阶段的温度分布规律,图11给出了32个监测点随时间的温度分布。

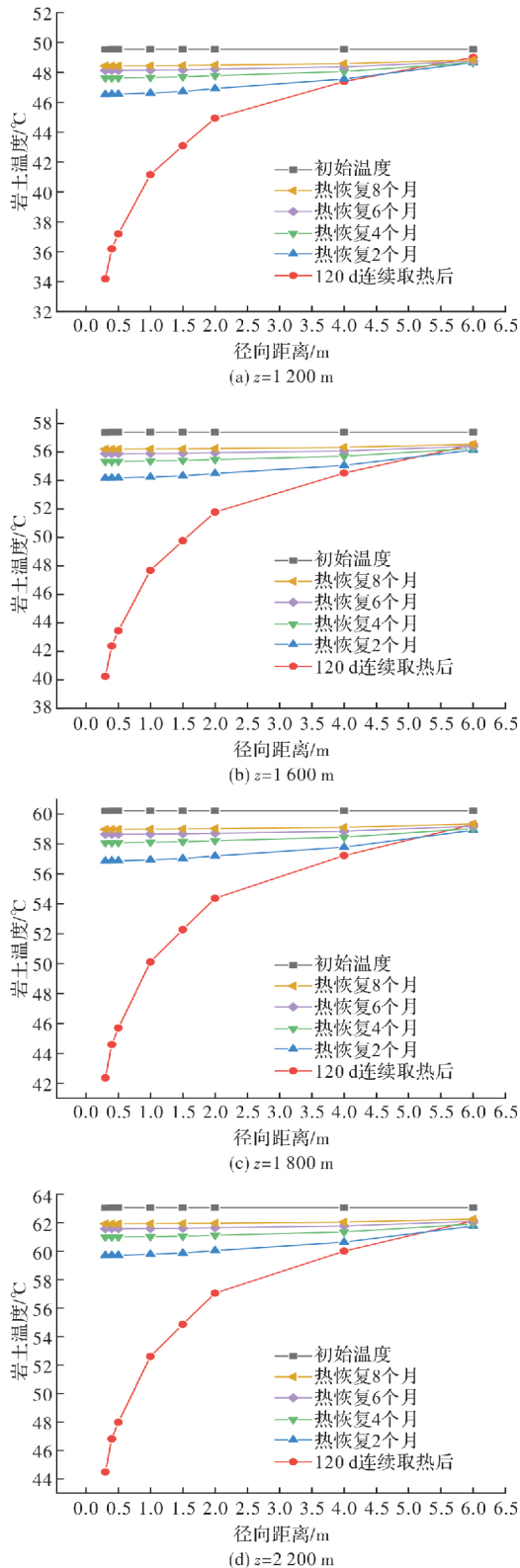


图11 中深层岩土在不同时间段的热恢复

Fig. 11 Thermal recovery of medium deep rock and soil at different time

由图11可以看出,前期岩土层热恢复速度较快,后期热恢复速度较为平缓。以 $z=2\,000\text{ m}$ 位

置不同径向距离的岩土为例, $z=2\,000\text{ m}$ 处不同径向距离的岩土初始温度为 $63.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,经过 120 d 的连续取热后 r 为 0.3 m 、 0.4 m 、 0.5 m 和 1 m 处的岩土温度分别是 $44.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $46.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $48.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $52.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,经过为期2个月的热恢复后的温度约为 $59.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,而经过为期4个月、6个月、8个月热恢复后的温度约为 $60.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $61.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $61.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分析原因:钻孔壁附近岩土经过为期4个月的连续取热后温度下降到最低,此时,与周围相同深度未受影响的岩土相比温差达到最大,在大温差的作用下,从周围未受影响的岩土向地埋管中心传递的热传导作用强,但后期随着岩土温度逐渐恢复,与临近岩土的温差进一步降低,热传导作用不明显,因此,当岩土温度恢复到一定数值后再进行恢复,热恢复速率会明显降低。但经过为期8个月的热恢复过程后,不同径向距离处的温度基本能够恢复到初始状态。

图12给出 $r=0.3\text{ m}$ 埋管深度分别为 $1\,200\text{ m}$ 、 $1\,600\text{ m}$ 、 $1\,800\text{ m}$ 和 $2\,000\text{ m}$ 的岩土在不同时间段的热恢复率,从图11中可以看出,在相同热恢复时间段内,埋管深度在 $1\,200\text{ m}$ 的岩土热恢复率最高,主要原因是中深层地埋管换热器对其热影响较小,并且不同时间段岩土的热恢复率均在 97.9% 以上。而当 $z=1\,600\text{ m}$ 时,恢复两个月及八个月的热恢复率分别为 94.4% 和 97.9% ;当 $z=1\,800\text{ m}$ 时,恢复两个月及八个月的热恢复率分别为 94.0% 和 98.0% ;当 $z=2\,000\text{ m}$ 时,恢复两个月及八个月的热恢复率分别为 94.7% 和 98.2% 。

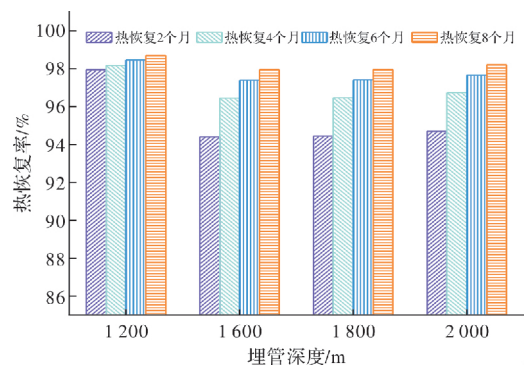


图12 $r=0.3\text{ m}$ 处不同埋管深度的岩土热恢复率

Fig. 12 Thermal recovery rate of rock and soil with different depths at $r=0.3\text{ m}$

此外,从图11中也可以看出,热恢复率随着恢复时间的增加而逐渐减小,以 $z=2\,000\text{ m}$ 为例进行分析,以恢复两个月的热恢复率为基准,热恢复4个月、6个月、8个月热恢复率在前一基础上分别增加 2.1% 、 0.9% 和 0.5% 。通过上述分析

可知, 经过为期 8 个月的热恢复期, 岩土能够基本恢复至初始温度。

4 结论

为揭示中深层地埋管换热器周围岩土的热恢复特性, 本文建立了数值传热模型, 基于有限差分法进行求解, 并将求解的结果与实测数据进行对比, 在此基础上分析了中深层地埋管换热器周围岩土全年的温度场变化。主要得出以下结论:

(1) 中深层地埋管换热器对其周围岩土的热影响范围有限。当埋管深度为 2 000 m 时, r 分别为 1.5 m、2 m、4 m 和 6 m 时, 在中深层地埋管换热器取热阶段时所对应的温降分别为 8.2 °C、6.0 °C、3.1 °C 和 0.9 °C, 其岩土热影响半径为 9.3 m;

(2) 中深层地埋管换热器的取热区域主要集中在 1 200~2 000 m 的岩土。当 $r=0.3$ m, z 分别取 400 m、800 m、1 200 m、1 600 m、1 800 m 及 2 000 m 时, 所对应的岩土温降分别为 4.1 °C、10.7 °C、15.3 °C、17.1 °C、17.8 °C 和 18.6 °C;

(3) 岩土热恢复率随着恢复时间的增加而逐渐减小, 前期热恢复的速率较快, 后期趋于平稳。当 $z=2$ 000 m 时, 以恢复两个月的热恢复率为基准, 热恢复 4 个月、6 个月、8 个月热恢复率在前一基础上分别增加 2.1%、0.9% 和 0.5%;

(4) 经过 8 个月的热恢复期, 岩土能够基本恢复至初始温度。当 $r=0.3$ m, 埋管深度为 1 200 m、1 600 m、1 800 m 和 2 000 m 的岩土所对应的热恢复率分别达 98.7%、97.9%、97.9% 和 98.2%。

参考文献 References

[1] 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.
ZHANG Yaxin, LUO Huilin, WANG can. Progress and trends of global carbon neutrality pledges[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 88-97.

[2] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
JIANG Yi, HU Shan. Paths to carbon neutrality in China's building sector[J]. HV & AC, 2021, 51(5): 1-13

[3] 满意, 姜国心, 杜甜甜, 等. 利用弃井开采中深层地热能名义取热量的模拟[J]. 山东建筑大学学报. 2019, 34(4): 20-24.
MAN Yi, JIANG Guoxin, DU Tiantian, et al. Modeling of deep and middle geothermal energy utilization

in abandoned oil wells[J]. Journal of Shandong Jianzhu University. 2019, 34(4): 20-24

[4] 王德敬, 胡松涛, 高志友, 等. 中深层套管式地埋管换热器性能的参数分析[J]. 区域供热. 2018(3): 1-7.
WANG Dejing, HU Songtao, GAO Zhiyou, et al. Parameter analysis of the performance of the deep borehole heat exchanger[J]. District Heating. 2018(3): 1-7

[5] 王泮浩, 蔡皖龙, 王铭, 等. 地热能供热技术研究现状及展望[J]. 制冷学报. 2021, 42(1): 14-22.
WANG Fenghao, CAI Wanlong, WANG Ming, et al. Status and outlook for research on geothermal heating technology[J]. Journal of Refrigeration. 2021, 42(1): 14-22

[6] 龚皓玥, 陈金华. 重庆地区竖直双 U 形地埋管换热器周围土壤温度恢复性能研究[J]. 暖通空调. 2016, 46(3): 89-93.
GONG Haoyue, CHEN Jinhua. Study on soil temperature restoration around vertical double U-type ground heat exchanger in Chongqing[J]. HV&AC. 2016, 46(3): 89-93

[7] 陆游, 王恩宇, 杨久顺, 等. 地源热泵系统土壤温度变化的影响因素分析[J]. 河北工业大学学报. 2015, 44(1): 66-72.
LU You, WANG Enyu, YANG Jiushun, et al. Analysis of the impacting factor on ground temperature field of ground source heat pump system[J]. Journal of Hebei University of Technology. 2015, 44(1): 66-72

[8] 罗仲, 张旭. 小型土壤源热泵冬季间歇运行的地温恢复特性实验研究[J]. 制冷技术. 2015, 35(4): 1-5.
LUO Zhong, ZHANG Xu. Experimental investigation on ground temperature restorative characteristics under intermittent operation condition in winter for a small ground source heat pump system[J]. Refrigeration technology. 2015, 35(4): 1-5

[9] 李绪泉, 于恒杰, 胡松涛, 等. 变热流工况土壤导热系数对热恢复特性的影响研究[J]. 青岛理工大学学报. 2014, 35(5): 98-102.
LI Xuquan, YU Hengjie, HU Songtao, et al. Effect of soil thermal conductivity to heat recovery characteristic in the case of variable heat conditions[J]. Journal of Qingdao University of technology. 2014, 35(5): 98-102

[10] 唐晓音, 程璐瑶, 许威, 等. 西安地区中深层套管式地埋管换热性能数值模拟[J]. 地质科学, 2021, 56(3): 985-999.
TANG Xiaoyin, CHENG Luyao, XU Wei, et al. Numerical study on factors that influence the heat trans-

- fer performance of mid-deep coaxial casing heat exchanger in the Xi'an area[J]. Geological Sciences. 2021, 56(3): 985-999.
- [11] BEIER R A. Thermal response tests on deep borehole heat exchangers with geothermal gradient[J]. Applied Thermal Engineering. 2020, 178: 115447.
- [12] PAN A, LU L, CUI P, et al. A new analytical heat transfer model for deep borehole heat exchangers with coaxial tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 141: 1056-1065.
- [13] LUO Y, GUO H, MEGGERS F, et al. Deep coaxial borehole heat exchanger: Analytical modeling and thermal analysis[J]. Energy. 2019, 185: 1298-1313.
- [14] LI J, XU W, LI J, et al. Heat extraction model and characteristics of coaxial deep borehole heat exchanger[J]. Renewable Energy. 2021, 169: 738-751.
- [15] LIU J, WANG F, CAI W, et al. Numerical investigation on the effects of geological parameters and layered subsurface on the thermal performance of medium-deep borehole heat exchanger[J]. Renewable Energy. 2020, 149: 384-399.
- [16] CAI W, WANG F, LIU J, et al. Experimental and numerical investigation of heat transfer performance and sustainability of deep borehole heat exchangers coupled with ground source heat pump systems[J]. Applied Thermal Engineering. 2019, 149: 975-986.
- [17] 贾林瑞,崔萍,方亮,等. 中深层地埋管换热器传热过程对周围岩土体的热影响[J]. 暖通空调. 2020, 51(1): 1-7.
- JIA Linrui, CUI Ping, FANG Liang, et al. Thermal effect of heat transfer process of deep borehole heat exchangers on surrounding rock and soil[J]. HV & AC. 2020, 51(1): 1-7.
- [18] 杜甜甜,满意,姜国心,等. 中深层地埋管换热器最佳钻孔间距的模拟研究[J]. 煤气与热力. 2019, 39(11): 21-24.
- DU Tiantian, YI Man, JIANG Guoxin, et al. Simulation study on optimal drilling spacing of medium and deep buried tube heat exchanger[J]. Gas & heat. 2019, 39(11): 21-24
- [19] 蔡皖龙,刘俊,王泮浩,等. 深层地埋管换热器换热性能模拟及稳定性研究[J]. 太阳能学报. 2020, 41(2): 158-164.
- CAI Wanlong, LIU Jun, WANG FengHao, et al. Research on heat performance and stability of deep borehole heat exchanger[J]. Acta solar energy Sinica. 2020, 41(2): 158-164
- [20] PIECHOWSKI M. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: Validation and sensitivity analysis[J]. International Journal of Energy Research. 1998, 22(11): 965-979.
- [21] 刘晓燕,赵军,石成,等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报. 2007, 28(5): 494-498.
- LIU Xiaoyan, ZHAO Jun, SHI Cheng, et al. Study on soli layer of constant temperature[J]. Acta energiae Solaris Sinica. 2007, 28(5): 494-498.
- [22] 贾力等,方肇洪. 高等传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- JIA Li, FANG Zhaohong. Advanced heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003
- [23] FANG L, DIAO N, SHAO Z, et al. A computationally efficient numerical model for heat transfer simulation of deep borehole heat exchangers[J]. Energy and Buildings. 2018, 167: 79-88.
- [24] 杜甜甜,满意,姜国心,等. 套管式中深层地埋管换热器传热建模及取热分析[J]. 可再生能源. 2020, 38(7): 887-892.
- DU Tiantian, MAN Yi, JIANG Guoxin, et al. Transfer modeling and heat extraction analysis of coaxial tubes deep borehole heat exchanger[J]. Renewable energy Resources. 2020, 38(7): 887-892
- [25] 汪集暘,等. 地热学及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2015.
- WANG Jiyang, et al. Geothermal science and its application [M]. Beijing: Science Press, 2015
- [26] 李骥,徐伟,李建峰,等. 中深层地埋管供热技术综述及工程实测分析[J]. 暖通空调. 2020, 50(8): 35-39.
- LI Ji, XU Wei, LI Jianfeng, et al. Heat supply technology review and engineering measurement analysis of medium and deep buried pipes [J]. HV&AC. 2020, 50(8): 35-39
- [27] 黄帅,董建锴,姜建中,等. 中深层同轴套管式地埋管换热器取热特性[J]. 东北电力大学学报. 2021, 41(4): 16-23.
- HUANG Shuai, DONG Jiankai, JIANG Jianzhong, et al. Heat extraction performance of medium and deep borehole heat exchanger[J]. Journal of Northeast Electric Power University. 2021, 41(4): 16-23.

(编辑 吴海西 沈 波)