

地埋管换热器热短路现象的试验与模拟

毛汉川¹, 李鹏², 毛官辉³, 李少华¹, 吕清³

1. 浙江省地质调查院, 杭州 311203

2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

3. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 宁波 315012

摘要 浅层地埋管换热器是地源热泵系统的核心部分, 其换热性能受众多因素的影响, 地埋管换热器2支管之间存在的热短路现象就是其中之一。在地埋管的施工过程中, 2支管之间的实际间距存在差异, 导致不同程度的热短路, 从而影响换热器的换热性能。基于实际地源热泵工程的热响应试验数据, 建立了3D数值模型, 研究了管间热短路对换热性能的影响。结果表明, 增大2支管间的距离能显著提升地埋管换热器的换热性能, 直径为32 mm的U型管换热器, 2支管的最大轴心距离113 mm相较于最小距离33 mm的换热效率提高了22.7%, 延米换热量与管轴心距之间呈线性关系式。

关键词 地埋管换热器; 热响应试验; 热短路

浅层地热能是一种可再生的清洁能源, 在工业化的快速发展、环境与经济增长之间的矛盾日益凸显之际, 浅层地热能的开发利用可以很好地解决当前能源短缺、大气污染、温室气体排放等问题^[1-3]。浅层地热能的开发利用常采用地源热泵系统, 该系统的核心是地埋管换热器, 地埋管换热器换热性能的好坏直接影响着整个地源热泵系统的性能^[4]。因此, 提高地埋管换热器的换热性能是研究者的关注点^[5-7]。

目前, 对于地埋管换热器的研究多集中在2个方面。一方面是不不断改进岩土热响应试验, 从而能

够获得更加精确的岩土热物性参数, 为地源热泵系统的设计提供依据^[8-11]。另一方面, 通过研究岩土热物性参数、孔深、孔径、回填材料、管材以及流体的流速、进口温度等对地埋管换热器的影响规律, 从而进行优化设计来提高地埋管换热性能^[12-15]。目前, 这2个方面的研究已经取得了一定的成果。

然而, 在地埋管换热器现场施工过程中, 仍存在一些问题, 需要进一步完善。由于地埋管在下入钻孔的过程一般比较困难, 因此, 大多数情况下, 地埋管下放前不做任何固定措施。这导致下入钻孔中的地埋管2支管间距未知, 2根支管可能贴到一

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2023-02-26

基金项目: 中国科学院学部咨询评议项目(2020-DX03-B-007)

作者简介: 毛汉川, 高级工程师, 研究方向为环境地质与浅层地热能勘探开发, 电子信箱: 365538457@qq.com

引用格式: 毛汉川, 李鹏, 毛官辉, 等. 地埋管换热器热短路现象的试验与模拟[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 94-100; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.010

起,也可能分开。不同的支管间距将导致不同程度的热短路,进而影响换热器的换热性能。李永强等^[16]研究了套管式埋管换热器热短路问题,结果显示,内管导热系数越大,热短路现象越显著。陈颖等^[17]研究了渗流条件下2支管之间的热短路问题,并通过在2支管中间设置隔热板进行对比研究,加装隔热板可有效抑制埋管换热器的热短路现象。徐玲玲等^[18]通过仿生树状埋管换热器来减轻热短路对换热效率的影响。罗朗^[19]研究了2种抑制热短路的方法,分别时在2支管间加隔热板或给出水管加保温层,结果表明,加保温层比加隔热板具有更好的抑制效果。范军等^[20]研究了并联和串联布置垂直双U型埋管地热换热器支管间的热短路问题,结果表明,并联连接的要比串联连接的热短路影响小。王瑾等^[21]研究了土壤、回填材料导热系数与地源热泵运行方式对热短路的影响,发现当回填材料导热系数小于或等于土壤导热系数时,间歇运行对热短路现象基本无影响,当回填材料导热系数大于土壤导热系数时,间歇运行可使热短路损失系数降低51.6%。上述研究多以解决热短路方法为主,而忽略了管间距与热短路程度之间的关系。为此,本研究以杭州市萧山区某现场热响应试验为基础,开展埋管换热器管间距与热短路程度及其影响因素的数值模拟研究。

1 现场热响应试验

1.1 热响应试验原理

采用线热源理论模型,由于其在数据处理上的便捷实用性,目前大多数热响应试验的结果处理都采用线热源理论。埋管换热器的长度远大于其直径,因此,该理论将埋管换热器看作是一个线热源向地层中传热,通过监测线热源温度随时间的变化关系即可求出土壤的导热系数,具体理论过程为

$$\theta_f - \theta_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda_s L} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + q \times R_b \quad (1)$$

式中, θ_f 是埋管内流体平均温度(°C); θ_0 是土壤初

始平均温度(°C); Q 是注入的热量(W); L 是钻孔深度(m); λ_s 是土壤导热系数(W/m·K); α 是热扩散系数(m²/s); t 是加热时间(s); γ 是欧拉常数,0.5772; R_b 是钻孔热阻(m·K/W); q 是单位长度钻孔的加热量(W/m); r_b 是钻孔半径(m)。

加热功率恒定时,(1)式可简写为

$$\theta_f = k \ln t + b \quad (2)$$

式中:

$$k = \frac{Q}{4\pi\lambda_s L} \quad (3)$$

$$b = \frac{q}{4\pi\lambda_s} \left[\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + q \times R_b + \theta_0 \quad (4)$$

$$\theta_f = \frac{\theta_m + \theta_{out}}{2} \quad (5)$$

式(2)表明,载热流体的平均温度与加热时间的自然对数成正比,故只需根据测试结果做出载热流体平均温度与时间对数的关系曲线,确定该曲线的斜率 k ,即可求出土壤的热传导系数

$$\lambda_s = \frac{q}{4\pi k} \quad (6)$$

1.2 现场热响应试验介绍

本研究的热响应试验为某个地源热泵工程实例,该试验区的地层主要以粘性土、粉土及粉砂组成,地层较为简单统一。为了研究埋管支管间距对换热的影响,开展单U埋管现场热响应试验,试验前对U型管的2支管进行了捆扎固定,如图1所示,使得2支管之间的距离最小。热响应试验原理如图2所示,试验孔及埋管参数见表1。

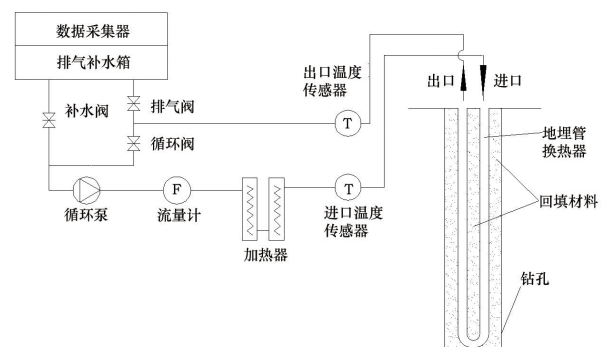


图1 热响应试验原理



图2 地埋管固定现场

表1 热响应试验相关参数

参数	B1
孔径/mm	150
孔深/mm	160
地埋管材料	HDPE
地埋管导热系数 / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.4
地埋管密度 / $10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$	950
地埋管比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2300
地埋管直径/mm	32
地埋管壁厚/mm	3
水的导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.618
水的密度/ $10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$	998
水的比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	4182
回填材料	原浆

1.3 热响应试验结果

采用2种方法测量土壤的初始平均温度,一是在试验孔中埋设了14个温度传感器,用温度传感器测量土壤初始温度;二是在热响应试验加热前只开循环泵,直至循环水的温度恒定,说明水的温度与土壤温度达到一致。2种方法的测量结果分别见图3和图4,其中用热响应试验测得的结果为15.44℃,温度传感器测得的平均值为15.34℃,两者结果误差小于1%。

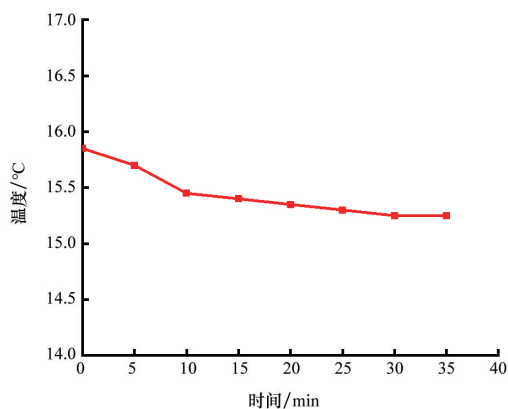


图3 热响应试验测得的初始平均温度

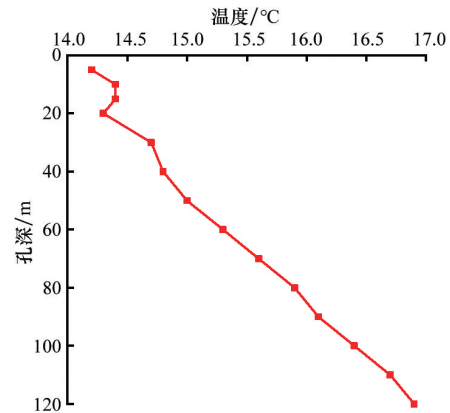


图4 温度传感器测得的初始平均温度

热响应试验过程中的流量、加热功率、进出口及流体平均温度随时间的变化如图5所示,其中流量为平均为1011 L/h,加热功率平均为6620 W。作载热流体的平均温度与加热时间的自然对数之间的关系曲线并进行线性拟合,结果如图6所示,决定系数 R^2 接近于1,表示拟合程度较高。将拟合结果代入式(6)求得土壤的平均导热系数为1.77 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

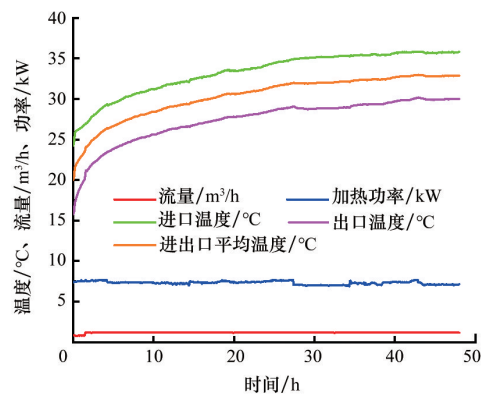


图5 热响应试验测试结果

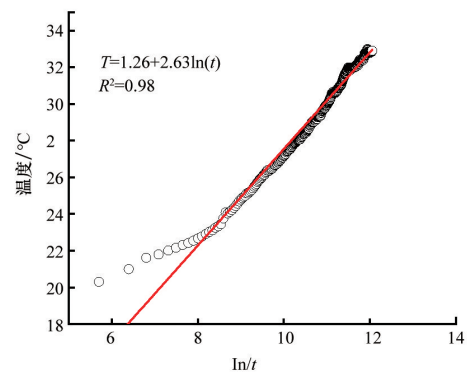


图6 流体平均温度与时间对数的关系

2 数值模拟研究

2.1 模型的建立

基于上述现场热响应试验,利用 Ansys workbench 建立地埋管换热器的三维数值模型,该模型假设地层为均质体,传热流体物性参数为常数。传热过程包括土壤、回填材料与地埋管之间的纯导热以及传热流体与地埋管之间的对流换热。图7为所建立的地埋管模型。

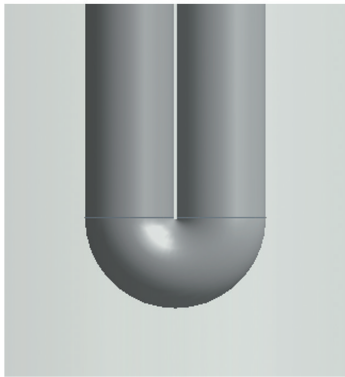


图7 三维地埋管换热器模型

2.2 网格离散化及初始边界条件

由于六面体网格在计算时具有较好的精确度与收敛性,因此,地埋管数值模型被离散成六面体网格。地埋管内流体、地埋管及回填材料是换热最为剧烈的地方,在这几个部分对网格进行了加密确保网格分布的合理性。图8为网格划分结果。

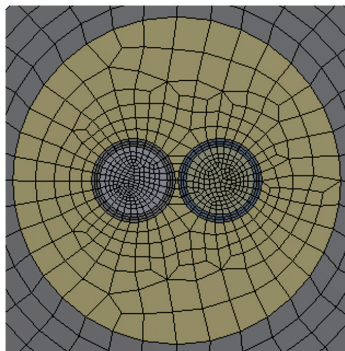


图8 模型网格划分结果

本模型中,由于模拟时间为热响应时间48 h,热影响范围较小,热响应试验孔埋管间距为4 m,

因此,地埋管周围土壤半径取2 m,土壤外边界设定为绝热边界。地埋管与流体接触面为对流换热耦合界面。土壤的初始平均温度设定为热响应试验测得的值15.44℃。以U型管的注入端为进口,流出端为出口。进口温度与热响应试验注入温度保持一致,热响应试验进口温度的拟合方程为式(7)。进口速度与热响应试验保持一致为0.6 m/s,出口设置为压力出口。

$$\theta_m = 13.48t^{0.08} \quad (7)$$

2.3 模型验证

模型中的流体、U型管和土壤的参数均与热响应试验及其结果保持一致。由于本地埋管换热孔的回填采用原浆回填,所以回填材料的热物性参数与周围土壤保持一致。基于热响应试验参数及所得结果,对所建立的数值模型进行计算,并监测了出口流体的温度变化。如图9所示,模拟的出口温度始终略高于试验的出口温度,这可能是因为热响应试验过程中电压波动对出口温度有一定的影响,造成导热系数的值偏大,但即使如此,可以看到两者之间表现出了较好的拟合性,在48 h的出口温度误差仅为3.3%,表明所建立的模型能够代表实际的埋管换热器来进行进一步的研究。

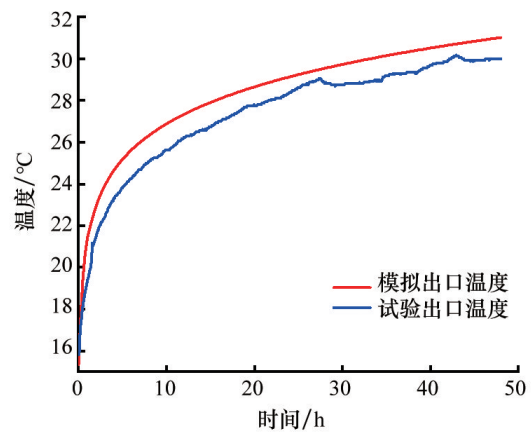


图9 试验与数值模拟出口温度验证图

2.4 地埋管热短路分析

地埋管换热器的主要功能是跟其周围土壤进行换热,以达到从土壤中取热或者向土壤中释热的目的。因此,希望地埋管最好只跟土壤换热而不受

其他因素的干扰。然而,实际上由于埋管换热器的2根支管之间距离太近,甚至在施工过程中导致2根管贴到一起,这导致2根管子之间也存在换热现象,即热短路。这种埋管自身内部的换热会对其换热特性带来不利影响。为了研究2支管之间间距对换热的影响,以150 mm的钻孔为例分析2支管轴心距为33、53、73、93和113 mm的换热情况。其中,模型的进口温度为30℃,土壤导热系数为 $2.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。其他参数与表1数据一致。

图10为埋管其他参数不变,只改变2支管轴心距的径向温度云图。可以看到,当2支管的轴心距为33 mm,即2支管管壁距离为1 mm时,2支管之间存在较为严重的热短路现象。随着2支管轴心距的不断增大,两者之间的热短路现象减轻,当2支管轴心距达93 mm时,减轻程度较为明显。

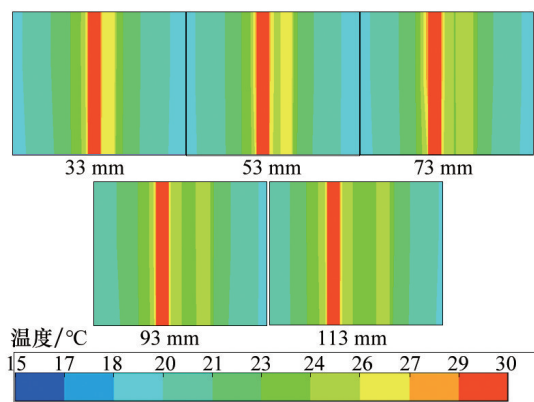


图10 不同支管轴心距的换热温度云图

为了定量表征热短路现象对换热特性的影响程度,研究了不同支管轴心距下埋管每延米换热量的变化。如图11所示,可以看出随着2支管的轴心距的增大,对应的换热量也逐步增大,当2支管的轴心距从33 mm增加到113 mm时,每延米换热量从63.05 W/m增大到了77.39 W/m,增大了22.7%,表明埋管每延米换热量随着支管间距的增大基本呈线性增长。对换热量进行拟合,得到如图11所示的线性关系式,在知道支管间距的情况下,通过该关系式可以预测每延米换热量。

埋管2支管之间是通过其周围的土壤来进行换热的,因此,其热短路的严重程度与其周围土

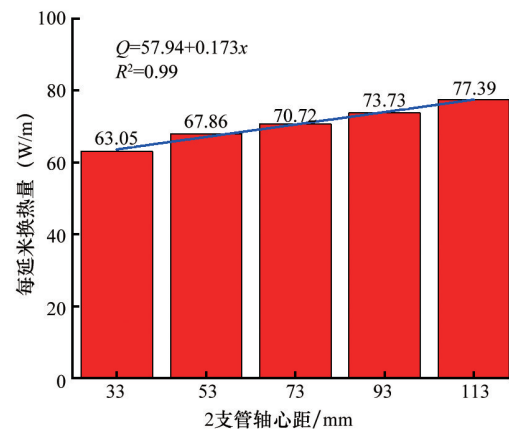


图11 不同支管轴心距下的进出口温差

壤的导热系数息息相关,为了进一步研究土壤导热系数对热短路程度的影响,对不同导热系数下最大轴心距与最小轴心距的温差进行了模拟计算,结果如图12所示。当导热系数为 $1.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 时,最大轴心距相对最小轴心距的延米换热量提高了13.1%,即热干扰程度为13.1%。当导热系数为2、2.3和 $2.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 时,最大轴心距相对最小轴心距的热干扰程度为15%左右,相较于土壤导热系数为 $1.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 时,热干扰程度虽有所提升,但是影响有限。这是因为随着土壤导热系数的增大,2支管之间的换热更加容易,更有利于热短路的发生,但是土壤导热系数的增大同时也有利于埋管与外围土壤的换热,即热量散发到土壤中去更为容易而不会在2支管之间造成热量堆积,因此,这在一定程度上会减轻热短路现象。

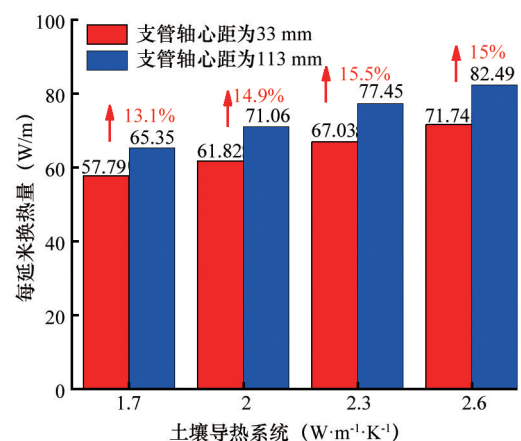


图12 不同土壤导热系数和轴心距下的进出口温差

3 结论

1) U型埋管换热器2支管之间存在较为严重的热短路现象,对于工程上常用的150 mm钻孔,管径32mm单U型埋管2支管轴心距从最小33 mm提高到最大113 mm时换热性能提高了22.7%。延米换热量随支管间距的变化为线性关系式。

2) 土壤的导热系数的变化对于埋管热短路现象有影响,但较微小,当导热系数从 $1.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 增大到 $2.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 时,对热短路影响程度从13.1%提高到15%,相差不到2%,因此,可以忽略土壤导热系数对热短路的影响。

3) 建议埋管轴心距设计时尽可能增大,且在埋管施工下放到钻孔中前应用管卡对2支管进行固定,以防下放过程中造成2支管贴在一起。

参考文献(References)

- [1] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
- [2] Cheng S W Y, Kurnia J C, Ghoreishi-Madiseh S A, et al. Optimization of geothermal energy extraction from abandoned oil well with a novel well bottom curvature design utilizing Taguchi method[J]. Energy, 2019, 188: 116098.
- [3] 吕灿. 研究地热开发利用过程中的环境效应及环境保护[J]. 环境与发展, 2020, 32(8): 241-242.
- [4] Tang F, Nowamooz H. Factors influencing the performance of shallow Borehole Heat Exchanger[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 571-583.
- [5] 王畅, 曹晓玲, 袁艳平, 等. 夏季间歇运行工况下相变温度对相变回填埋管换热器传热性能的影响[J]. 太阳能学报, 2020, 41(3): 234-241.
- [6] 宋英峰, 吴学红, 龚毅. 流速对垂直双U形埋管换热器热交换的影响[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2013, 28(1): 57-61.
- [7] 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(2): 975-986.
- [8] 高宽, 崔文智, 周世玉. 地温未恢复时热响应试验的线热源叠加法[J]. 暖通空调, 2016, 46(4): 111-114.
- [9] Hu P E, Meng Q F, Sun Q M, et al. A method and case study of thermal response test with unstable heat rate[J]. Energy and Buildings, 2012, 48: 199-205.
- [10] 黄珂, 卢垠, 张丽英, 等. 岩土热响应试验最短持续时间的确定[J]. 煤气与热, 2012, 32(12): 1-4.
- [11] 段新胜, 顾湘, 李鹏, 等. 加热过程间断的热响应试验数据处理方法研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2685-2690.
- [12] 齐子姝. 埋管换热器内循环工质流速影响分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2016, 33(2): 52-54.
- [13] Beier R A, Acuña J, Mogensen P, et al. Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers[J]. Applied Energy, 2013, 102: 665-675.
- [14] Sliwa T, Rosen M A. Efficiency analysis of borehole heat exchangers as grout varies via thermal response test simulations[J]. Geothermics, 2017, 69: 132-138.
- [15] 张山. 埋管换热器换热效率影响因素综述[C]//2019供热工程建设与高效运行研讨会论文集. 昆山: 中国市政工程华北设计研究院, 2019: 89-92.
- [16] 李永强, 徐拴海, 张卫东, 等. 套管式埋管换热器热短路及换热性能[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 183-188.
- [17] 陈颢, 阴继翔, 李涛, 等. 渗流条件下埋管换热器热短路现象的数值研究[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(3): 209-214.
- [18] 徐玲玲, 蒲亮. 基于热短路问题的仿生埋管换热器模拟[J]. 化工学报, 2021, 72(S1): 134-139.
- [19] 罗朗. 垂直单U型埋管换热器热短路现象研究与分析[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [20] 范军, 刘福胜, 胡玉秋. 并联和串联连接的垂直双U型埋管地热泵换热器热短路的分析[J]. 制冷与空调, 2014, 28(2): 219-222.
- [21] 王瑾, 李为, 郭威, 等. 垂直U形埋管换热器热短路现象及换热性能研究[J]. 暖通空调, 2014, 44(2): 89-94.

Field test and numerical simulation study on thermal short circuit of borehole heat exchanger

MAO Hanchuan¹, LI Peng², MAO Guanhui³, LI Shaohua¹, LV Qing³

1. Geological Survey Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 311203, China
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo 315012, China

Abstract Shallow geothermal energy is an important part of clean energy, and its development and utilization meet the needs of national and social development. The technology of ground source heat pump with borehole heat exchanger (BHE) is the main technology for developing shallow geothermal energy. BHE is the core part of ground source heat pump system (GSHP), and its heat transfer performance is affected by many factors. Because the distance between the two branches of the BHE is very small, there is a serious thermal short circuit phenomenon. In the construction process of BHE, the actual distance between two branches is unknown. And different spacing will lead to different degrees of thermal short circuit, which will affect the performance of BHE. Based on the thermal response test (TRT) of GSHP project, through the combination of field test and numerical simulation, a 3D numerical model is established to study the effect of thermal short circuit between two branches of BHE on its heat transfer performance. The results show that increasing the distance between the two branches can significantly improve the heat transfer performance of the BHE. The maximum distance of two branch pipes is 22.7% higher than that of the minimum distance. The linear relationship between heat exchange and branch distance in linear meter is presented. It is suggested that pipe clamps should be strictly used in the construction of buried pipes to ensure sufficient distance between the two branches.

Keywords borehole heat exchanger; thermal response test; thermal short circuit ●



(责任编辑 祝叶华)