

文章编号:0253 – 4339(2018) 02 – 0099 – 07
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2018. 02. 099

防护工程垂直 U 形地埋管换热性能的实验研究

廖 露 茅靳丰 陈尚沅 侯普民 刘立瑶

(陆军工程大学国防工程学院 南京 210007)

摘 要 为探讨防护工程垂直 U 形地埋管的换热性能,利用某地下工程地源热泵实验台,对比分析了两种工况进出口水和土壤温度的变化规律。结果表明:24 h 连续运行时,埋管单位孔深换热量逐渐降低;间歇 12 h 运行时,钻孔初始时局部单位孔深换热量与连续运行时相差较大,而总时间内钻孔平均单位孔深换热量要大于连续运行。建议防护工程在应对突袭时采用连续运行模式,并将热稳定时间和该时间内的单位孔深换热量作为工程地埋管系统应突处理能力的评价指标之一,但工程长期使用时应采用间歇运行模式。该工程本次实验测得的热稳定时间为 14 h,14 h 内换热量为 1 310.4 kJ/m。
关键词 热泵;U 形地埋管;防护工程;土壤温度;换热量
中图分类号:TQ051.5; TU96 + 2 **文献标识码**: A

Experimental Study on Heat Transfer Performance of Vertical U-type Buried Pipe in Protective Engineering

Liao Lu Mao Jinfeng Chen Shangyuan Hou Pumin Liu Liyao

(College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, 210007, China)

Abstract In order to discuss the heat transfer performance of a vertical U-tube in protective engineering, the changes in the inlet and outlet water and soil temperatures were analyzed under two different conditions based on a ground source heat pump experimental platform for underground engineering. The underground temperature was measured during the test, and the thermal diffusion ability of the soil was studied. The results showed that the heat exchange of each borehole gradually decreased under the condition of 24 h continuous operation. Under the condition of 12 h intermittent operation, the local heat exchange of each borehole at the beginning was significantly smaller than that of the continuous operation, but the average heat transfer capacity of each borehole was larger than that of the continuous operation. A continuous operation model should be used when protective engineering deals with raids, while the thermal stability time and heat exchange of each borehole at that time should be recommended as indexes to evaluate the ability of a buried pipe system when dealing with raids. The time and heat exchange in the time measured in this experiment were 14 h and 1 310.4 kJ/m. However, an intermittent operation model should be adopted when the engineering is used over a long period because it effectively slows down the heat accumulation.
Keywords heat pump;U-type buried pipe;protective engineering;soil temperature;heat exchange

地源热泵系统作为环保高效的节能技术在商业和居民建筑节能领域中均得到广泛的应用^[1-2]。其中,垂直 U 形地埋管占地面积小、适用性强、换热效率高,其换热性能成为暖通空调领域研究的热点^[3-4],在民用建筑中的研究与应用也日趋成熟。在理论模拟方面,刘永等^[5-8]建立了 U 形地埋管的三维数值传热模型,对地埋管的换热性能及影响因素进行了研究,为地埋管换热器传热特性的研究提供理论基础。董艳芳等^[9-11]利用软件模拟了不同运行模式下 U 形地埋管的传热特性,得到各运行模式下换热器的换热规律,结果表明:连续运行工况下,边缘位置的钻孔及较大的渗流速度能够增强换热;间歇运行模式下,土壤温度能在系统间歇期内得到一定程度的恢

复,有利于提高地热能利用效率。在实验方面,周志华等^[12-17]结合实际工程或实验对 U 形地埋管周围土壤温度场进行了检测,对比分析数据发现土壤温度场具有延迟性,且探讨了 U 形地埋管的换热性能与改善措施。蔡颖玲等^[18-20]测试了热泵机组在不同工况下运行时 U 形地埋管换热器的换热情况,认为采用间歇运行的方式,能显著提高埋管换热器换热性能,进而提高热泵机组的运行效率,利于系统的多年稳定运行。
地埋管换热器逐渐应用到防护工程中,研究者基于工程的负荷特点和时间特性及山区岩土体特性,研究了竖直埋管换热器在工程中的适用性及应用形式^[21-23],但是将地埋管技术成功融入到防护工程中

仍需进一步研究。在遭遇突袭时,防护工程内部作战系统立即运行,大量设备同时开启、大量人员进入产生大量余热。这与民用建筑中一年的冷热负荷分布情况不同,防护工程对地埋管系统的热处理能力要求更高。工程在长期运行时,内部余热量相对减小,需要考虑土壤的蓄热性能和地埋管系统的使用时间。因此,为探讨防护工程中 U 形地埋管的传热性能,本文利用南京某地下工程地源热泵实验台,对该处地下土壤原始温度进行了监测;采用恒热流水箱模拟工程

此时的余热,在连续与间歇运行两种模式下,对比了埋管的出水温度和钻孔内的土壤温度,分析两种运行模式下的换热量变化,提出地埋管在工程应对突袭时的运行建议。

1 实验台及实验方法

根据工程特点,实验台分为 3 个系统:室外地下埋管换热系统、流体循环系统和室内数据测量采集系统,如图 1 所示。

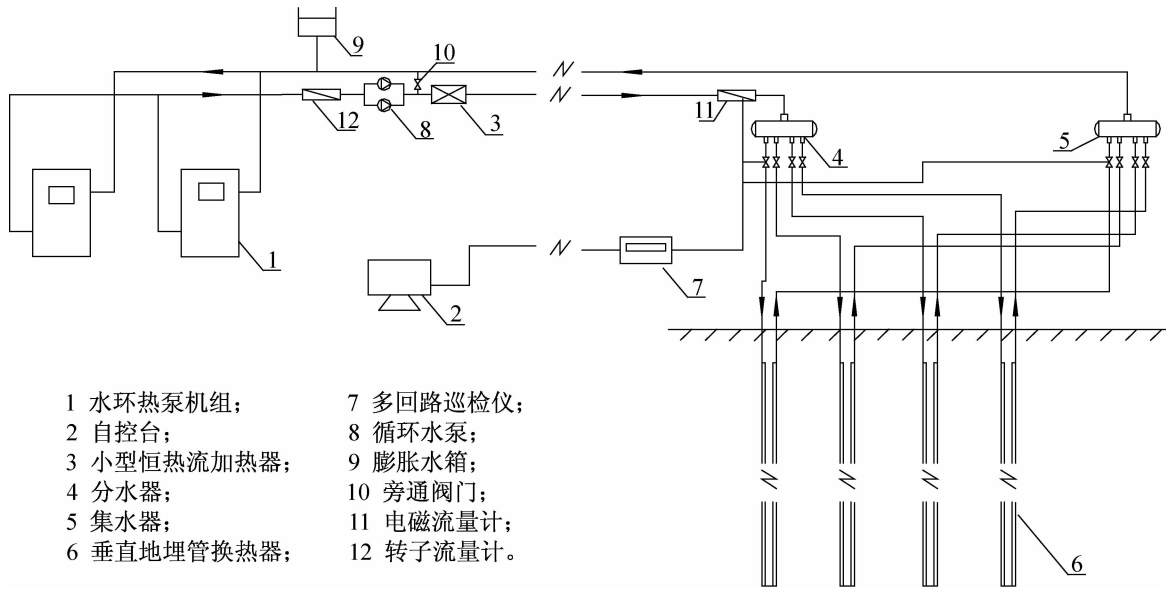


图 1 地源热泵实验系统
Fig. 1 The diagram of test system

针对防护工程使用阶段余热较大的情况,利用恒热流加热水箱中安装的 4 kW 电加热器,用于模拟工程内部余热;同时采用时间控制器调节加热器的启停、设置不同的日运行时间,用于地埋管系统在连续和间歇两种运行模式下的实验。选用 LD 系列电磁流量计测量循环流体的流量,流量值可现场读入,同时也可记录到自控台中存储。测量范围为 0.05 ~ 5 m³/h,精度为 0.5 级,额定工作压力 4.0 MPa。

实验采用 U 形垂直地埋管,管外径 32 mm,内径 26 mm;埋管埋于山区,周围土壤结构包括:地下 1 ~ 5 m 为干饱和土壤,5 ~ 20 m 为湿粉砂土,20 ~ 50 m 为饱和含水层,50 m 以下为含裂隙水的岩土层。在钻孔进、出水口处各布置 2 个温度测点,用来测量 U 形管进、出水口温度;为研究土壤不同埋深下的热恢复能力,沿钻孔的轴向方向布置 3 处测点,共 6 个温度测点,分布如图 2 所示。

对 U 形地埋管进行实验,分为 4 个部分:1) 10 月 16 日 00:00 ~ 10 月 20 日 00:00 进行原始地温测试;2) 10 月 20 日 12:00 ~ 10 月 21 日 12:00 连续运行 24

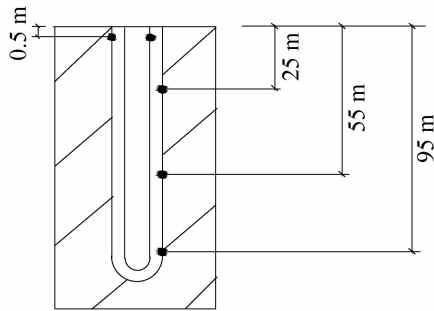


图 2 单个钻孔内温度测点分布
Fig. 2 The placement of the temperature sensors

h; 3) 10 月 21 日 12:00 ~ 10 月 23 日 12:00 期间停机,让地温自然恢复;4) 10 月 23 日 12:00 ~ 10 月 25 日 00:00 间歇运行实验。可由实验测试对象求得钻孔的瞬时换热量,具体数据处理如下:

$$Q = \rho c_p L (t_{in} - t_{out}) \tag{1}$$

式中: Q 为埋管换热器瞬时换热量, W; ρ 为循环水流体的密度, kg/m³; c_p 为循环水流体比热容, kJ/(kg·°C); L 为地埋管内流体流量, m³/h; t_{in} , t_{out} 分别为埋管进、出口流体平均温度, °C。

地埋管的单位孔深的换热量:

$$q_l = \frac{Q}{l} \quad (2)$$

式中: q_l 为单位孔深换热量, W/m ; l 为埋管深度, m 。

2 实验结果与分析

2.1 土壤原始温度测试

图 3 所示为地下初始温度在 10 月 16 日 00:00 ~ 10 月 20 日 00:00 随时间的变化。地面以下 0.5 m 处温度变化受当天气温的影响,可看作是周期性的温度波动,在每天 14:00 温度波达到峰值,在 6:00 降到谷值,温度变化范围为 17 ~ 19.5 $^{\circ}\text{C}$ 。由于地层的蓄热作用,温度波向地下深处传递时,波幅随深度衰减,深层地下土壤的原始温度波幅为 0,其温度值恒定,地下 25 m 处土壤温度为 16.7 $^{\circ}\text{C}$,55 m 深处为 17.5 $^{\circ}\text{C}$,95 m 深处为 18.4 $^{\circ}\text{C}$ 。

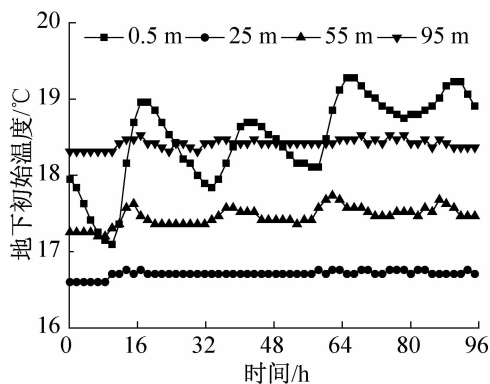


图 3 地下初始温度随时间的变化

Fig. 3 The initial temperature of underground changes with time

开启循环水泵,待埋管进、出口水温恒定且二者差值趋于 0 时得到的温度数据即为地温的平均值^[24]。如图 4 所示,埋管进、出口的水温逐渐上升,在 65 min 之后,进出口温差小于 0.3 $^{\circ}\text{C}$,且进、出口温度趋于稳定,可得到平均地温为 17.4 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 日运行 24 h 连续实验

10 月 20 日 12:00 ~ 10 月 21 日 12:00 为 24 h 连续运行工况,进、出口水温变化如图 5 所示。

由图 5 可知,在水箱的连续加热作用下,进口水温明显上升,最后逐渐趋于稳定,其值为 32.5 $^{\circ}\text{C}$;出口水温在 10 月 20 日 12:00 ~ 18:00 内明显上升,由初始的 18 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 24.8 $^{\circ}\text{C}$,随着时间的推移,上升幅度逐渐变得平缓,最后时刻出口水温度为 28.8 $^{\circ}\text{C}$;进、出口温差随运行时间的延长而逐渐减小。这是由于系统开始运行时埋管周围土壤温度为初始温度,U

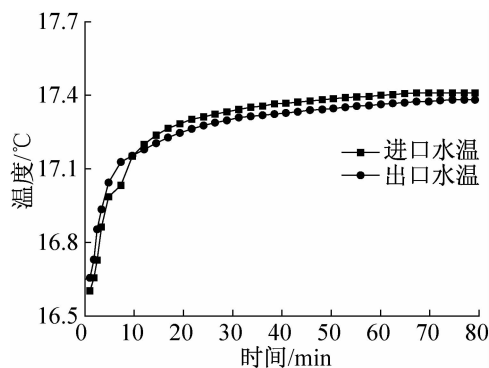


图 4 平均地温

Fig. 4 The mean underground temperature

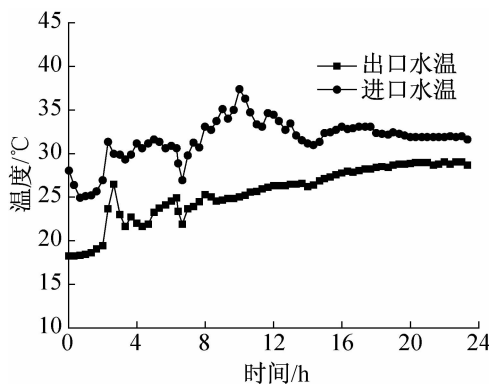


图 5 连续运行实验进出口水温随时间的变化

Fig. 5 The inlet and outlet temperatures change with time in continuous operation

形管内循环水与土壤的换热效果明显,出口水温较低,随着放热的进行,埋管周围土壤温度不断升高,埋管换热效果随之降低,出口水温随运行时间的推移而升高,并且由于 10 月 20 日 12:00 ~ 10 月 21 日 00:00 内埋管周围土壤热量来不及扩散,导致出口水温上升幅度较大。

2.3 日运行 12 h 间歇实验

间歇运行传热实验分为 3 个阶段:连续运行 12 h 后,停机 12 h 用作地温自然恢复,再运行 12 h。进、出口水温如图 6 所示。

图 6 中前 12 h (10 月 23 日 12:00 ~ 10 月 24 日 00:00) 为加热阶段,然后停机 12 h (10 月 24 日 00:00 ~ 10 月 24 日 12:00),后 12 h (10 月 24 日 12:00 ~ 10 月 25 日 00:00) 为第二次加热阶段。运行 3 h 后,进、出口水温趋于平稳,且两条曲线基本平行,进、出口水温差无明显变化;第一次加热阶段平均进口水温为 27.5 $^{\circ}\text{C}$,出口水温为 23 $^{\circ}\text{C}$,第二次加热阶段平均进口水温为 27.3 $^{\circ}\text{C}$,出口水温为 22.7 $^{\circ}\text{C}$,这是由于在运行期的 12 h 内埋管与土壤的换热能力保持在较高水平,出口水温没有明显升高,而机组停机 12 h 使前

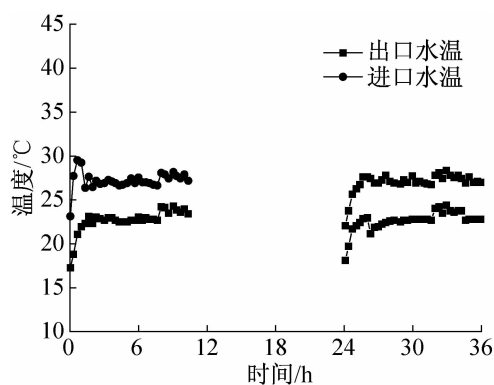


图6 间歇运行实验进出口水温随时间的变化

Fig. 6 The inlet and outlet temperatures change with the in intermittent operation

一阶段土壤中堆积的热量及时扩散,有利于地下土壤温度的恢复,因此在第二次加热期内,进、出口水温差仍保持在同一水平。

2.4 连续/间歇运行模式下单位孔深换热量

在连续、间歇运行两种模式下地埋管的单位孔深换热量 q_l 随时间的变化如图7所示。

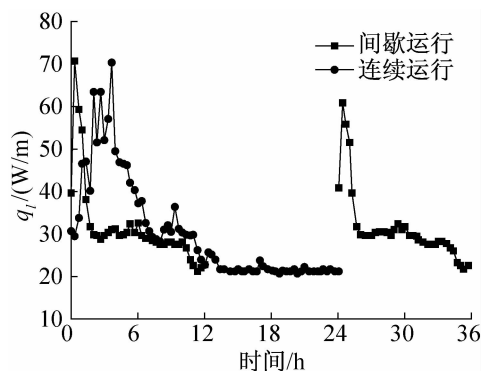


图7 不同运行模式下的单位孔深换热量对比

Fig. 7 The heat exchange of each borehole under different modes

观察连续运行工况下单位孔深换热量 q_l 随时间的变化,0~4 h内 q_l 快速上升,在4 h达到最大值75 W/m,这是由于系统运行初期,地下土壤处于初始温度,随着水箱的连续加热,埋管进口水温逐渐升高,循环流体与土壤间的换热强度持续升高;在4~9 h q_l 曲线快速下降,9 h时 q_l 为33 W/m,9~14 h下降幅度变缓,在14 h q_l 达到最小值21 W/m,这是因为随着放热的进行,埋管周围土壤热量不断堆积,换热效果开始降低,并且4~9 h内下降幅度较大,9~14 h换热趋向于平衡, q_l 下降幅度变缓;14~24 h内换热基本平衡,其值为21 W/m。最终,连续运行工况下 q_l 基本保持在21 W/m。

由间歇运行工况下 q_l 随时间的变化可知,在第

一个运行阶段0~12 h内, q_l 由最大值73 W/m下降为22 W/m,下降幅度由快变慢;第二个运行阶段在24 h时埋管 q_l 再次达到最大值73 W/m,随后 q_l 开始下降,最后时刻 q_l 为26 W/m。间歇工况两个运行阶段的 q_l 变化基本相同。最终,间歇运行工况下 q_l 为27.6 W/m。

对比两种运行方式,间歇工况在第一次运行的时间段内埋管 q_l 曲线变化趋势与连续运行工况基本一致,而第二次运行阶段中 q_l 曲线明显高于连续运行工况在12~24 h内的 q_l 曲线。分别求两种运行模式下24 h内 q_l 的平均值,得到连续运行模式平均 q_l 为22.3 W/m,间歇运行模式平均 q_l 为27.6 W/m,与连续运行模式相比提高了23.7%。

2.5 地下土壤温度变化

由温度测点得到10月19日00:00~10月25日12:00时间内钻孔内土壤温度变化如图8所示。

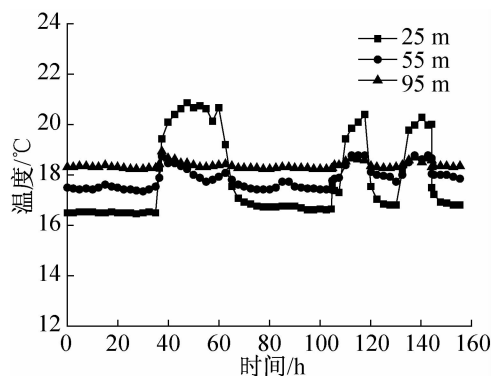


图8 实验期间地下土壤温度的变化

Fig. 8 The variation of underground temperature

在10月20日12:00~10月21日12:00连续加热运行期间,地下土壤温度明显上升,25 m深处温度由16.7 °C升高到20.9 °C,且随着时间的延长,上升速率逐渐变小;55 m深处温度由17.5 °C升高到19.2 °C;95 m深处土壤温度由18.4 °C升高到19 °C,埋管中流体温度顺着埋深方向逐渐降低,因此温度上升幅度随土壤深度的增加而减小。

10月21日12:00水箱停止加热,土壤进入恢复期,25 m深处土壤温度在21日12:00~22日00:00迅速下降,之后趋于平缓,22日21:00土壤温度为16.9 °C,比原始温度升高了1.19%;55 m深处土壤温度恢复为17.7 °C,比原始温度升高了1.14%;95 m深处土壤温度恢复为18.5 °C,比原始温度升高了0.54%。不同深度土壤的温度在自然恢复48 h后与初始值相比有小幅度的升高,95 m深处地温变化幅度最小,25 m、55 m深处与原始温度相差小于5%,可认为地温已恢复平衡。

在 10 月 23 日 12:00 ~ 10 月 25 日 00:00 间歇运行期间,两次加热运行阶段中 25 m 深处土壤温度在 12 h 内均上升到 20.6 °C,在 10 月 24 日 00:00 ~ 12:00 停机间歇期温度恢复到 17 °C,与原始温度相差 1.79%;55 m 深处土壤温度在加热运行阶段上升至 19 °C,在中间停机期恢复到 17.8 °C,与原始温度相差 1.71%;95 m 深处土壤温度在加热运行阶段上升至 18.9 °C,在中间停机期恢复到 18.55 °C,与原始温度相差 0.81%,可认为土壤温度经过 12 h 恢复到原始温度,为下一个阶段的运行提供了较好的换热条件。

对比两种工况的结果发现,间歇 12 h 运行时,钻孔初始时的局部换热量与 24 h 连续运行时相差较大,但总的相等时间内钻孔的平均换热量要大于连续运行。同时因为在 10 月 24 日 00:00 ~ 12:00 停机期内,埋管周围土壤温度得到有效恢复,热量堆积现象减缓,所以间歇运行工况温升幅度小于连续运行工况,说明间歇运行能有效减缓土壤温升。

防护工程在遭遇突袭时,要求地埋管系统能够迅速处理工程内部短期产生的大量余热,因此建议防护工程此时采用连续运行模式;但在进入使用期后,由于防护工程的余热相对降低,且工程根据使用级别的不同其运行时间也有差别,等级较高的工程甚至要求保障时间达到数月以上,故建议工程此时采用间歇运行模式,合理调控机组启停时间以延长地埋管系统的余热处理时间。

为了描述防护工程地埋管热泵系统在应对突袭时的保障水平,拟将连续运行模式下埋管与周围土壤换热过程趋于稳定时的时间称为热稳定时间,确定公式为:

$$(q_{j+1} - q_j)/q_j < f \quad (3)$$

式中: j 为地埋管系统运行时间, h ; f 为阈值,根据不同等级工程取值不同,文中工程取 5%。

热稳定时间反映了防护工程地埋管系统应对短期大量余热的有效处理能力,建议将热稳定时间及该时间内的埋管换热量作为工程地埋管系统应突处理能力的评价指标之一。如图 7 所示,第 14 h 和 15 h 时的埋管 q_l 变化与第 14 h 的 q_l 的比为 2.4%,开始小于 5%,认为该时刻埋管与土壤的换热达到稳定。经计算,该防护工程本次实验测得的热稳定时间为 14 h,14 h 内换热量为 1 310.4 kJ/m。

3 结论

基于南京某地下工程地源热泵实验台,对垂直 U 形地埋管的换热性能进行了实验研究,为地埋管换热

器在防护工程中的应用、在类似山地土壤结构中的运行提供借鉴,结论如下:

1) 连续运行工况会使地埋管与土壤间的换热效果减弱,使机组处于低效状态。间歇运行工况的停机时间使前一阶段循环水向土壤排放的热量及时扩散,弥补了土壤热扩散能力的不足。当日运行时间由连续运行 24 h 转变为运行 12 h、间歇停机 12 h 后,钻孔的平均 q_l 由 22.3 W/m 升高至 27.6 W/m,提高了 23.7%。

2) 分析测试期间地下恒温层土壤的温度变化,在换热期间土壤有明显的升温现象,间歇运行模式下该现象得到有效减缓,因此工程长期使用时应采用间歇运行模式,合理调控埋管换热器日运行时间,有利于避免热量聚集,可使换热能力保持在较高水平。

3) 由于间歇运行时钻孔初始时局部 q_l 与连续运行时相差较大,但总的相等时间内钻孔的平均 q_l 要大于连续运行。建议防护工程在应对突袭时采用连续运行模式,并将热稳定时间和该时间内的 q_l 作为工程地埋管系统应突处理能力的评价指标之一,该工程本次实验测得的热稳定时间为 14 h 及 14 h 内换热量为 1 310.4 kJ/m。

参考文献

- [1] SARBU I, SEBARCHIEVICI C. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings[J]. Energy & Buildings, 2014, 70(1): 441-454.
- [2] LIU Xiaobing, LU Shilei, HUGHES P, et al. A comparative study of the status of GSHP applications in the United States and China[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 48:558-570.
- [3] 王瑾,袁媛,柳建华,等. 垂直地埋管夏季非连续运行传热相干性数值模拟与研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(2):55-59. (WANG Jin, YUAN Yuan, LIU Jianhua, et al. Numerical simulation and research on coherent effects of vertical buried tube heat exchanger with summer discontinuous operation[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(2):55-59.)
- [4] GAO Yike, GAO Yan, YU Yong, et al. Numerical simulation and experimental validation of a vertical U-tube ground heat exchanger[J]. Advanced Materials Research, 2013, 860-863(4):709-714.
- [5] 刘永,柏祥华. U 型垂直地埋管换热器性能的影响因素分析[J]. 流体机械, 2014, 42(12):77-81. (LIU Yong, BAI Xianghua. Analysis on influence factor for the performance of vertical ground source U-tube heat exchanger[J].

- er[J]. Fluid Machinery, 2014, 42(12):77-81.)
- [6] ZHENG Zonghe, WANG Weixiao, JI Chao. A study on the thermal performance of vertical U-Tube ground heat exchangers[J]. Energy Procedia, 2011, 12:906-914.
- [7] 杨卫波, 陈振乾, 施明恒. 垂直U型埋管换热器准三维热渗耦合模型及其实验验证[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3):383-389. (YANG Weibo, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. A quasi-three dimensional model of vertical U-bend ground heat exchanger under coupled heat conduction and advection conditions and its experimental validation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(3):383-389.)
- [8] 王洪利, 田景瑞, 马一太, 等. 地源热泵U型垂直埋管传热特性的研究[J]. 流体机械, 2010, 38(8):66-72. (WANG Hongli, TIAN Jingrui, MA Yitai, et al. Study on heat-transfer character of geothermal heat pump vertical U-tube ground[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(8):66-72.)
- [9] 董艳芳, 王磊, 曾召田, 等. 连续与间歇运行工况下地埋管换热器的换热特性研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(11):1687-1693. (DONG Yanfang, WANG Lei, ZENG Zhaotian, et al. Research on heat transfer performance of ground heat exchangers in continuous and intermittent operation condition[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(11):1687-1693.)
- [10] 王瑾, 李为, 郭威, 等. 竖直U形地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. (WANG Jin, LI Wei, GUO Wei, et al. Thermal interference and heat transfer performance of vertical U-tube ground heat exchangers[J]. Journal of HV & AC, 2014, 44(2):89-94.)
- [11] 蒋绿林, 张亮, 侯亚祥, 等. 运行模式对土壤源太阳能热泵垂直埋管换热影响的研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(3):347-352. (JIANG Lulin, ZHANG Liang, HOU Yaxiang, et al. Study on the influence of operation model on the vertical buried tube underground heat exchanger of solar-soil source heat pump system[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(3):347-352.)
- [12] 周志华, 张丽英, 黄珂, 等. 垂直埋管式地源热泵土壤温度分布研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8):1480-1485. (ZHOU Zhihua, ZHANG Liying, HUANG Ke, et al. Study of soil temperature distribution in vertical bore-hole ground-source heat pump system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(8):1480-1485.)
- [13] 姜黎, 蒋绿林, 王宏, 等. 地源热泵系统双U型埋管换热器的测试实验[J]. 制冷学报, 2010, 31(1):50-53. (JIANG Li, JIANG Lulin, WANG Hong, et al. Experiment on underground double U-tube exchanger of ground-source heat pump system[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1):50-53.)
- [14] 刘业凤, 张峰, 杨标, 等. 稳定运行的土壤源热泵系统管群内外土壤温度场对比分析[J]. 制冷学报, 2013, 34(2):75-80. (LIU Yefeng, ZHANG Feng, YANG Biao, et al. Comparative analysis on soil temperature fields of inner and outside tube groups in stably operated GSHP system[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(2):75-80.)
- [15] KARA Y A. Experimental performance evaluation of a closed-loop vertical ground source heat pump in the heating mode using energy analysis method[J]. International Journal of Energy Research, 2007, 31(15):1504-1516.
- [16] CHOI J M, PARK Y, KANG S H. Heating performance verification of a ground source heat pump system with U-tube and double tube type GLHEs[J]. Renewable Energy, 2013, 54(6):32-39.
- [17] WOOD C J, LIU H, RIFFAT S B. Comparative performance of 'U-tube' and 'coaxial' loop designs for use with a ground source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 37(37):190-195.
- [18] 蔡颖玲, 张华, 朱朔祎, 等. 地源热泵U型管换热器夏季工况试验分析[J]. 流体机械, 2012, 40(3):56-59. (CAI Yingling, ZHANG Hua, ZHU Shuoyi, et al. Test and analysis for U-tube heat exchangers of ground-source heat pump in summer[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(3):56-59.)
- [19] 杜诗民, 刘业凤, 熊月忠, 等. 地源热泵U型竖直埋管换热器性能实验分析[J]. 建筑节能, 2015, 43(3):5-8. (DU Shimin, LIU Yefeng, XIONG Yuezhong, et al. Experimental analysis on the heat exchanger performance of ground-source heat pump with U-type vertical buried pipe[J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(3):5-8.)
- [20] 武佳琛, 张旭, 周翔, 等. 基于运行策略的某复合式地源热泵系统运行优化分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2):6-12. (WU Jiachen, ZHANG Xu, ZHOU Xiang, et al. An optimization of operation strategy on hybrid ground source heat pump system[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2):6-12.)
- [21] 茅靳丰, 李永, 张华, 等. 竖直埋管换热器在地下工程中的应用研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(9):25-30. (MAO Jinfeng, LI Yong, ZHANG Hua, et al. Application of vertical ground heat exchanger to underground works[J]. Journal of HV & AC, 2012, 42(9):25-30.)
- [22] 张华, 王婧, 茅靳丰, 等. 基于防护工程典型工况的地埋管传热模拟研究[J]. 防护工程, 2012(4):36-42. (ZHANG Hua, WANG Jing, MAO Jinfeng, et al. Simulation and study of U-vertical pipe transfer of GSHP system in protective engineering[J]. Protective Engineering, 2012(4):36-42.)
- [23] 茅靳丰, 陈尚沅, 李永, 等. 防护工程埋管周围土壤温度场热扩散研究[J]. 防护工程, 2013, 35(3):61-64.

(下转第112页)

- sity, 2012.
- [14] OZUDOGRU T Y, OLGUN C G, SENOL A. 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers[J]. *Geothermics*, 2014, 51: 312-324.
- [15] LI Zhongjian. A new constant heat flux model for vertical U-tube ground heat exchangers[J]. *Energy and Buildings*, 2012, 45: 311-316.
- [16] ZHANG Linfeng, ZHANG Quan, HUANG Gongsheng. A transient quasi-3D entire time scale line source model for the fluid and ground temperature prediction of vertical ground heat exchangers (GHEs) [J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 65-75.
- [17] MA Weiwu, LI Min, LI Ping, et al. New quasi-3D model for heat transfer in U-shaped GHEs (ground heat exchangers): Effective overall thermal resistance [J]. *Energy*, 2015, 90: 578-587.
- [18] WETTER M, HUBER A. Vertical borehole heat exchanger EWS Model[J]. *Trnsys Type*, 1997, 451.

- [19] GU Y, O'NEAL D L. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-tubes used in ground-coupled heat pumps [J]. *Ashrae Transactions*, 1998, 104 (2): 347-355.
- [20] BEIER R A, SMITH M D, SPITLER J D. Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis[J]. *Geothermics*, 2011, 40 (1): 79-85.

通信作者简介

李勇,男,副教授,上海交通大学机械与动力工程学院,(021) 34206056, E-mail: liyo@sjtu.edu.cn。研究方向:太阳能,地源热泵技术。

About the corresponding author

Li Yong, male, associate professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206056, E-mail: liyo@sjtu.edu.cn. Research fields: solar energy and ground source heat pump technology.

(上接第 104 页)

- (MAO Jinfeng, CHEN Shangyuan, LI Yong, et al. Research on thermal diffusion of soil temperature field around buried pipes in protective engineering[J]. *Protective Engineering*, 2013, 35(3): 61-64.)
- [24] 刘振. 地源热泵系统土壤初始温度的特征及确定方法研究[D]. 上海:东华大学, 2013. (LIU Zhen. Study on the characteristics and determination of soil initial temperature in ground source heat pump system [D]. Shanghai: Donghua University, 2013.)

通信作者简介

茅靳丰,男,教授,博士生导师,陆军工程大学国防工程学院,(025)80825498, E-mail: maojinfeng628@163.com。研究方向:地下工程热湿传递及除湿技术,国防工程内部设备防护及空气质量控制。

About the corresponding author

Mao Jinfeng, male, professor, doctoral supervisor, College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, +86 25-80825498, E-mail: maojinfeng_628@163.com. Research fields: heat and moisture transfer and dehumidification technology in underground engineering, inside facilities defense and air quality control in national defense engineering.