

文章编号:0254-0096(2019)06-1780-10

单/双工况运行下埋管周围土壤温度特性实验研究

吴 暄, 路子业, 刘 卫, 李松洋, 梁盼龙, 金 光

(内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

摘 要: 以实验研究为基础,分析埋管周围土壤温度、流体进出口温度及单位管长换热量随热泵运行时间的变化规律,探究雷诺数 Re 、流体进口温度和热泵运行模式等因素的影响;获得土壤温度及单位管长换热量的时变特性。研究发现:热泵单工况运行条件下,埋管周围土壤温度及单位管长换热量随热泵运行时间的延长而增加,并最终趋于稳定;适当的增加流体进口速度 (Re) 可提高单位管长换热量,流体流速的变化对径向距离 $r < 80$ mm 范围内的土壤温度影响较大;间歇运行模式下埋管附近土壤温升率较低,且单位管长换热量较热泵连续运行模式下有所提高。热泵双工况(连续和间歇运行模式)运行条件下,埋管周围土壤温度均表现为上下波动的规律,且均随径向距离的增加其波动幅度减小,但连续运行模式下的土壤热波动半径较间歇运行模式下有所增加。

关键词: 地源热泵; 实验研究; 土壤温度; 换热; 运行模式

中图分类号: TU83

文献标识码: A

0 引 言

地源热泵(GSHP)^[1-4]是以浅层土壤作为冷热源,通过埋管中流体与周围土壤进行间接换热,然后通过热力循环向建筑物提供冷量或热量来维持建筑内部冷热负荷,地源热泵系统 COP 较传统热泵系统大^[5]。地源热泵系统按埋管排列方式可分为水平和垂直 2 种,其中垂直 U 型埋管受环境气候影响较小,因此得到了广泛应用^[6]。地源热泵的运行效率及效能系数在很大程度上取决于埋管换热器与周围土壤之间的传热特性。因此,研究埋管换热器传热性能对热泵系统高效率运行至关重要^[7-9]。

国内外学者做了大量研究。杨昌智等^[10]研究流体进口速度和温度对埋管传热特性的影响,结果表明:单位管长换热量随流体进口温度和流速的增加而增加,且流体进口温度对其影响较大。杨卫波等^[11,12]研究热泵运行模式和相变材料对埋管周围土壤传热特性的影响,结果表明:热泵间歇运行模式下埋管附近土壤温度表现出波动变化,且随热泵开停比的减小而增加;相变材料可强化埋管与回填区域土壤间的换热,同时对于缓

解土壤热堆积具有明显效果。文献[13]采用数值模拟的方法分析了 Re 和埋管管径对埋管换热性能的影响,结果表明:适当增加埋管管径可提高埋管单位管长换热量; Re 数处于层流区和紊流区对埋管传热性能影响较大。文献[14]研究了热泵间歇运行模式对效能系数的影响,得出间歇运行模式下热泵系统的 COP 相比连续运行模式有很大提高。

以上研究都是基于有限元分析法、有限体积法和线热源模型等手段来开展的;从影响热泵传热特性等因素方面来讲,考虑的因素比较单一且均为热泵单工况(单一蓄热或放热)运行模式,特别对热泵双工况(蓄热和放热过程)下土壤传热特性实验方面的研究甚少;此外,针对包头地区地源热泵传热特性实验方面的研究更是甚少。为此,本文基于相似性准则搭建小型地源热泵实验台进行土壤蓄放热过程埋管传热特性研究,主要研究热泵单/双工况运行条件下,不同因素对埋管周围土壤温度场的影响。

1 实验系统

地源热泵实验台如图 1 所示,主要包括:能量

收稿日期: 2017-01-24

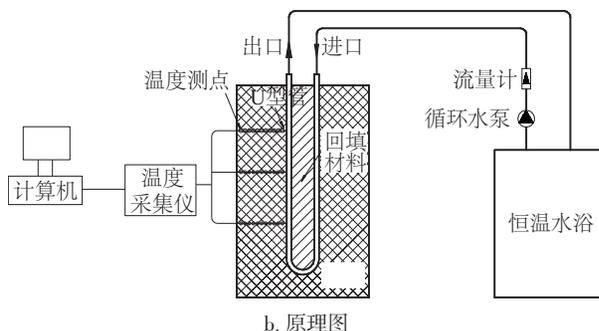
基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2018MS05043); 内蒙古自治区科技创新引导奖励资金(2017CXYP-1)

通信作者: 金 光(1970—), 女, 博士、教授, 主要从事可再生能源建筑应用技术及工业热过程方面的研究。wxgjf@163.com

供给系统(恒温水浴)、竖直 U 型埋地管、实验砂土箱、K 型热电偶、温度采集系统(Agilent 34970A)、转子流量计以及管路循环系统。其中,实验台采用 1.3 m×1.3 m×1.5 m 不锈钢箱体,内部填充内蒙古包头地区土壤。箱体底部和侧面均采用厚度为 300 mm 的橡塑棉进行保温,钻孔直径 150 mm,钻孔深度为 1500 mm;U 型埋地管材质为紫铜,内径和外径分别为 8 和 10 mm,管外间距为 60 mm,长度为 1400 mm。实验台共布置 52 个温度测点,其中 U 型埋地管外壁沿流体流动方向分别布置 15 个温度测点,每隔 200 mm 布置 1 个,编号为 D₁~D₁₅,D₁与 D₁₅分别为 U 型埋地管进口和出口温度测点。竖直埋地管沿深度方向布置上、中、下 3 层测点,其距离顶面分别为 350、700、1050 mm,其中每层各布置 12 个温度测点,均沿半径方向布置。例如,Z₁温度测点含义,Z 为中层的首字母(同理:下层为 X,上层为 S),下标 1 表示距离埋地管中心 40 mm 处第 1 个温度测点。其余的 2~12 共 11 个温度测点依次距离埋地管中心距离为 60、80、105、130、155、180、205、280、380、480 和 580 mm,详见表 1。温度探头采用 K 型热电偶其精度为 0.1 °C,恒温水浴可提供(-20~90 °C)其温度波动在-0.15~0.15 °C 范围内,满足实验精度要求。



a. 实物图



b. 原理图

图1 地源热泵实验台

Fig. 1 Laboratory bench of ground source heat pump

表1 温度测点编号

Table 1 Number of temperature measurement point						
距离/mm	40	60	80	105	...	580
上层	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	...	S ₁₂
中层	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	...	Z ₁₂
下层	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	...	X ₁₂

2 实验指标计算

埋地管换热量 Q :

$$Q = V \times r \times c_p \times (t_{in} - t_{out}) \quad (1)$$

式中, Q ——热泵运行稳定后的换热量,W; V ——流体的体积流量, m^3/s ; r ——水的密度, kg/m^3 ; c_p ——流体的定压比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; t_{in} ——流体进口温度, $^\circ C$; t_{out} ——流体出口温度, $^\circ C$ 。

体积流量 V :

$$V = 0.25\pi Re v \quad (2)$$

式中, d ——U型埋地管的定性尺寸,m; Re ——雷诺数; v ——流体的运动黏性系数, m^2/s 。

单位管长换热量 q :

$$q = Q/(H \times n) \quad (3)$$

式中, Q ——埋地管换热量,W; H ——埋地管纵向方向上的深度,m; n ——U型管数量,本文 $n=2$ 。

钻孔平均导热系数 K :

为评价钻孔的传热效果,定义钻孔平均导热系数,间接反映钻孔与周围土壤之间的传热特性^[15],计算公式为:

$$K = 2q/(t_m - t_0) \quad (4)$$

式中, q ——单位管长换热量,W/m; t_m ——埋地管进出口平均水温, $^\circ C$, $t_m = (t_{in} + t_{out})/2$; t_0 ——土壤初始温度值, $^\circ C$ 。

3 实验参数

实验基于内蒙古包头地区的土壤物性参数,研究土壤储热放热过程中的传热特性。实验相关参数见表 2。

4 研究结果及分析

4.1 热泵单工况运行

4.1.1 蓄热过程土壤温度变化规律

图 2 给出了热泵连续运行 72 h,离埋地管中心

距离为 40、80 和 180 mm 处 3 层土壤温度随运行时间的变化规律。3 层土壤温度均随热泵运行时间的延长而增加,其中中层土壤温度相对下层和上层土壤较高。在相同运行时间下,离地埋管中心距离越近土壤温度越高。热泵运行 72 h 后,分析中层土壤不同径向距离下温度值可知,径向距离为 40、80 和 180 mm 时土壤温度依次为 34.3、33.1 和 30.6 °C。

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

参数	数值
地埋管长度/mm	1400
地埋管外径/mm	10
地埋管内径/mm	8
地埋管管脚之间距离/mm	60
土壤容器长度/mm	1300
土壤容器宽度/mm	1300
土壤容器高度/mm	1500
土壤的比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	963
土壤孔隙率	0.35
地埋管导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	398
钻孔口径/mm	150
水密度/ $kg \cdot m^{-3}$	994.8
水定压比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	4174.8
水导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.64
水运动黏性系数/ $m^2 \cdot s^{-1}$	0.659×10^{-6}
土壤密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1600
土壤导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	2.45
数据提取时间/h	0.25

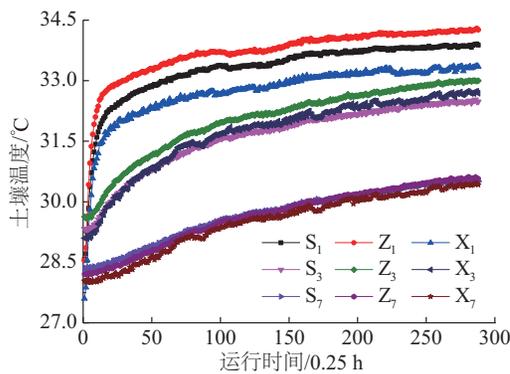


图 2 不同层土壤温度随时间的变化

Fig. 2 Variation of soil temperature of different layers with operation time

图 3 所示为中层土壤温度随径向距离的变化规律。土壤温度随径向距离的增加而减小,热泵运行 21 h 后,径向距离 40、105 和 180 mm 处的土壤温度分别为 33.8、31.3 和 29.8 °C。在径向距离相同的条件下,热泵运行时间越长土壤温度越高,如径向距离为 105 mm 时,热泵运行 1.5、21.0 和 42.0 h 后土壤温度依次为 29.2、31.3 和 32.2 °C。

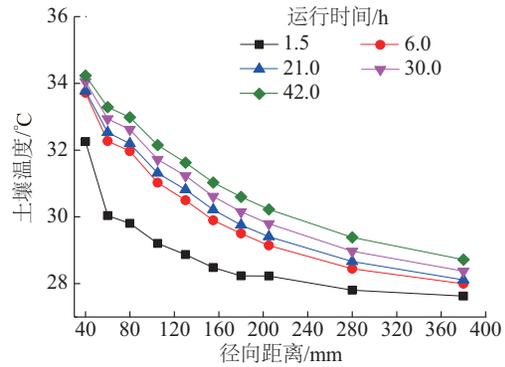


图 3 土壤温度

Fig. 3 Soil temperature

图 4 反映了单位管长换热量随热泵运行时间的变化规律。单位管长换热量随热泵运行时间的增加表现为先急剧上升之后缓慢下降,最终趋于平稳。分析可知,热泵在运行前 1.5 小时内,地埋管中流体温度与土壤间温度梯度较大,换热量较大;随着热泵运行时间的延长,地埋管进出口温度逐渐趋于稳定。

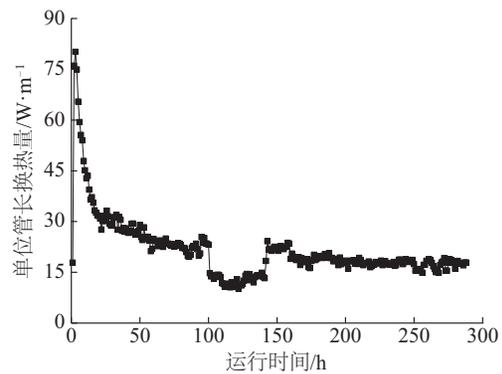


图 4 单位管长换热量随时间的变化

Fig. 4 Variation of heat transfer per unit length with operation time

4.1.2 流体进口速度(Re)的影响

图 5 给出了雷诺数 $Re=2500、3500、4500$ 时,距离钻孔中心 40 和 80 mm 处土壤温度随热泵运行时

间的变化规律。在不同雷诺数下,离地理管越近土壤温度变化越大,且随雷诺数的增加,土壤温度的增长幅度逐渐降低。热泵运行 48 h 后, $Re=2500$ 、3500、4500 时,径向距离为 40 mm 处土壤温度分别为 36.6、36.9 和 37 °C。究其原因,雷诺数越大流体流速越大,管内流体与地理管内壁之间的对流换热强度越大,地理管附近 ($r<80$ mm) 土壤温度上升越快。同时还发现,当雷诺数大于某值时,雷诺数的增加对地理管附近土壤温度场的影响可忽略不计。

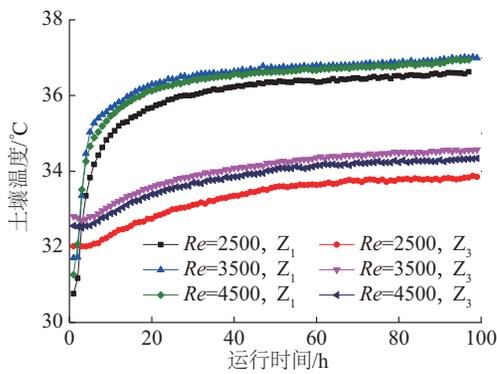


图5 不同 Re 下土壤温度随时间的变化

Fig. 5 Variation of soil temperature with operation time at different Re

分析图 6 可知,热泵运行 10 h 后,不同雷诺数下土壤温度曲线斜率随径向距离的增加逐渐减小。当热泵运行 24 h 后,土壤温度沿径向距离 ($r>80$ mm) 的变化曲线几乎重合。径向距离为 180 mm 时, $Re=2500$ 、3500、4500 对应的温度为 31.05、31.31、31.35 °C; 径向距离为 280 mm 时, $Re=2500$ 、3500、4500 对应的温度值为 29.63、29.64、29.66 °C。可看

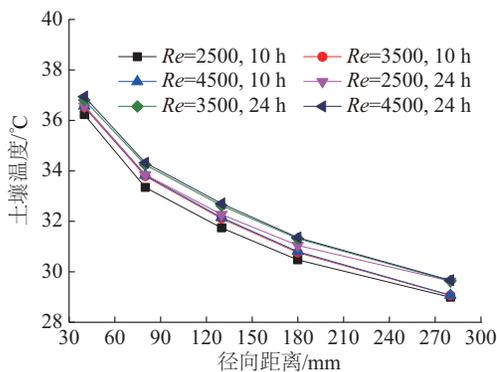


图6 不同 Re 和运行时间下土壤温度随径向距离的变化
Fig. 6 Variation of soil temperature with distance at different Re and operation time

出温度值相差很小,故流速的变化仅对地理管附近 $r<80$ mm 内土壤温度场产生影响。

图 7 给出了不同雷诺数下,单位管长换热量随热泵运行时间的变化规律。 Re 越大单位管长换热量越大。分析原因可知,单位管长换热量主要取决于流体速度和流体进、出口温差。流速越大,流体在地理管中停留时间短换热不充分,使得流体进、出口温差较小;而流速越小,流体在地理管中的停留时间越长,换热越充分,流体进、出口温差越大。分析图 7 可知,当流速和进出口温差同时影响时,流体流速占主导因素;当 Re 数大于一定数值时,再增加流体流速,单位管长换热量并未显著增加,而且流速增加会带来流动阻力增大,从而增加泵的能耗。所以,在实际工程中,流速的选择应同时考虑单位管长换热量及泵耗功量的影响。

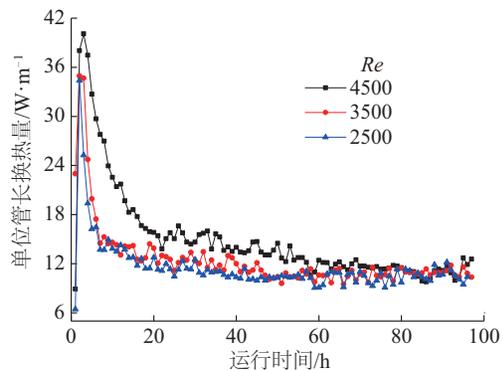


图7 不同 Re 下单位管长换热量随时间的变化
Fig. 7 Variation of heat transfer per unit length with operation time different Re

图 8 给出了不同雷诺数下,钻孔平均导热系数随运行时间的变化规律。在热泵运行初期(前 10 h),

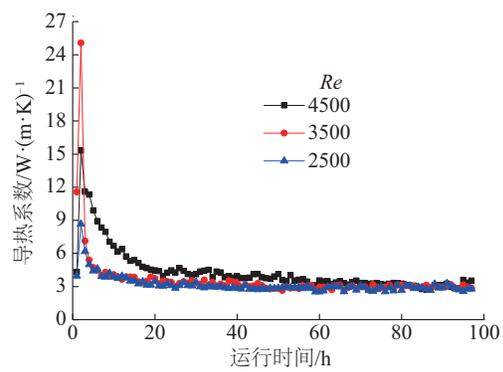


图8 钻孔平均导热系数随时间的变化
Fig. 8 Variation of average thermal conductivity of drilling with operation time

钻孔平均导热系数随 Re 数的增加而增加,当热泵运行时间大于 15 h 时, Re 数的变化对钻孔平均导热系数未产生影响。

4.1.3 流体进口温度的影响

图 9 给出了流体进口温度分别为 40 和 45 °C 时, 地埋管进出口温度随热泵运行时间的变化规律。二者进口温度均呈先上升后下降最后趋于平稳的变化规律。在热泵运行稳定后, 流体进口温度为 45 °C 时地埋管进出口温差比流体进口温度为 40 °C 时大。

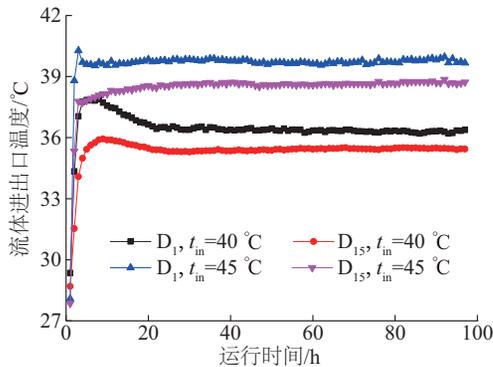


图9 流体进出口温度随时间的变化(进口温度不同)
Fig. 9 Variation of inlet and outlet temperature of fluid with operation time(Different inlet temperatures)

图 10 给出了不同流体进口温度和不同运行时间下, 土壤温度随径向距离的变化规律。在相同运行条件和同一径向距离下, 流体进口温度越大, 土壤温度越高且随径向距离的增加而减小。在径向距离为 80 mm 时, 流体进口温度分别为 40、45 °C 时, 热泵运行 24 h 后土壤温度依次为 31.9、33.8 °C; 径向距离为 280 mm 时, 热泵运行 24 h 后土壤温度分别为 28.4 和 29.0 °C。

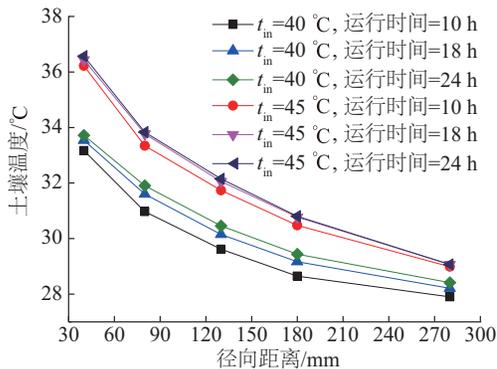


图10 不同进口温度下土壤温度随径向距离的变化
Fig. 10 Variation of soil temperature with distance at different inlet temperature

图 11 给出了不同流体进口温度下, 单位管长换热量随运行时间的变化规律。随着流体进口温度的升高, 单位管长换热量增加。分析可知, 流体进口温度越大热传递动力越大, 流体进出口温差越大, 从而单位管长换热量也随之增大。热泵运行 24 h 后, 流体进口温度为 40 和 45 °C 时, 对应的单位管长换热量为 12.7 和 14.1 W/m。

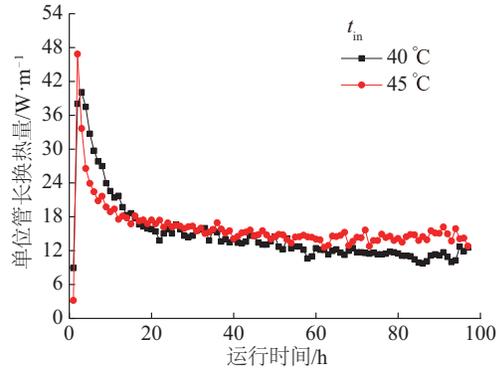


图11 单位管长换热量随时间的变化
Fig. 11 Variation of heat transfer per unit length with operation time

4.1.4 热泵运行模式的影响

热泵运行模式分连续运行和间歇运行 2 种。图 12 给出了不同运行模式下的流体进出口温度的变化规律。连续运行模式下, 流体进出口温度均表现为先上升后下降最后趋于稳定的规律; 而间歇运行模式下, 流体进出口温度均表现为先上升后保持平稳然后下降的变化规律。同时, 随着热泵开停比的减小, 温度下降幅度增大。分析可知连续运行模式下, 流体在管内的传热是连续的, 而间歇运行模式下, 热量的传递是间断的, 随着热泵开停比的减小, 间断时间增加。

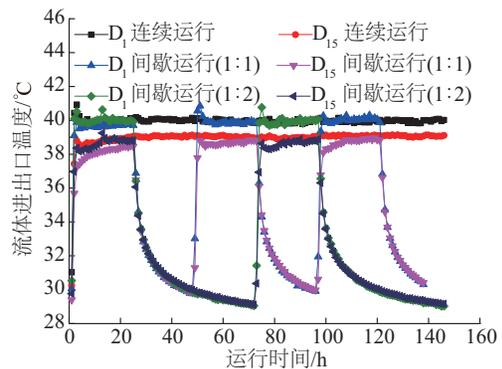


图12 流体进出口温度随时间的变化
Fig. 12 Variation of inlet and outlet temperature of fluid with operation time

图 13a 给出了热泵不同运行模式下, 径向距离为 60 mm 处, 土壤温度随运行时间的变化规律。连续运行模式下土壤温度呈逐渐递增的趋势, 且随热泵运行时间的延长土壤温升率增大; 而间歇运行模式下, 土壤温度呈先升高后下降的周期性变化规律, 同时随热泵开停比的减小土壤温升率降低。分析可知, 连续运行模式下埋管附近土壤温度较高, 与埋管管内流体的温差降低, 从而使得热传递动力下降, 效率降低; 而间歇运行模式增加了在热泵蓄热结束之后埋管附近土壤中的热量向远处土壤传递的时间, 从而使土壤温度降低, 且其随热泵开停比的减小而减小; 当热泵再次运行时, 埋管管内流体温度与埋管附近土壤温度差值比热泵连续运行模式下大。图 13b 给出了径向距离为 205 mm 处土壤温度的变化规律。连续运行模式下土壤温度随运行时间的延长而升高, 而间歇运行模式下土壤温度波动幅度逐渐下降且随开停比的减小而降低。分析图 13 可知, 当热泵运行时间为 19 h, 径向距离为 60 mm 时, 在 3 种不同热泵运行模式

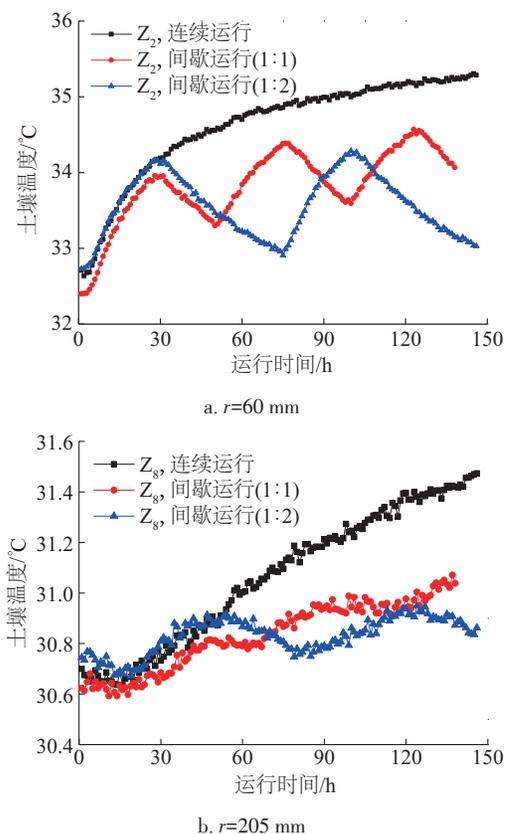


图 13 不同径向距离处土壤温度

Fig. 13 Soil temperature of different radial distances

下, 土壤温度依次为 34.9、34.4、33.0 °C; 当径向距离为 205 mm 时, 在 3 种不同热泵运行模式下, 土壤温度依次为 31.1、30.9、30.8 °C。

图 14 给出了单位管长换热量随热泵运行模式的变化规律。连续运行模式下单位管长换热量随热泵运行的稳定基本保持不变, 而间歇运行模式下单位管长换热量表现为周期性的波动式变化。分析可知, 间歇运行增加了埋管附近土壤中的热量向远处土壤传递的时间, 造成埋管附近土壤温升率较低, 从而增加了埋管中流体与周围土壤温度梯度, 使得流体进出口温差增加, 进而增加埋管单位管长换热量; 同时, 间歇运行模式下单位管长换热量随热泵开停比的减小而增加。综上所述, 在热泵运行过程中可适当降低热泵机组的开停时间比, 提高埋管单位管长换热量, 从而有利于提高浅层地热能利用率。

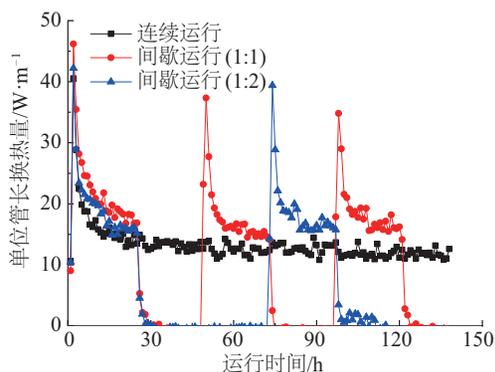


图 14 单位管长换热量随时间的变化

Fig. 14 Variation of heat transfer per unit length with operation time

4.2 热泵双工况运行

4.2.1 双工况连续运行

双工况连续运行, 即热泵(连续性冷热交替)。后文主要研究连续性冷热交替过程中土壤温度变化特性。图 15 给出了双工况(连续性冷热交替)连续模式下, 埋管进出口温度随热泵运行时间的变化规律。流体进、出口温度经历一个先上升稳定阶段, 然后急剧下降再缓慢上升的过程。分析可知, 热泵蓄热过程中恒温水浴设定温度为 40 °C, 而取热过程中恒温水浴设定温度为 7 °C; 蓄热结束后立即取热, 埋管进出口温度变化较剧烈。

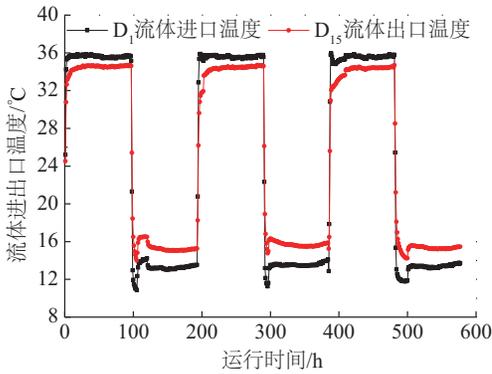


图 15 流体进出口温度随时间的变化(双工况连续运行)
 Fig. 15 Variation of inlet and Outlet temperature of fluid with operation time (Double continuous operating)

图 16 给出了离地埋管中心距离为 40、105、205 mm 处土壤温度随热泵运行时间的变化规律。双工况(连续性冷热交替)模式下地埋管附近($r=40$ mm)以内土壤温度变化曲线表现为先急剧上升之后再急剧下降这样周期性的变化。距离地埋管近,土壤温度波动幅度较大,随着径向距离的增加,土壤温度波动幅度逐渐下降。对图 16 分析可知,在径向距离为 40、105、205 mm 时,土壤温度波动范围分别为 13.2、3.9、1.3 °C。

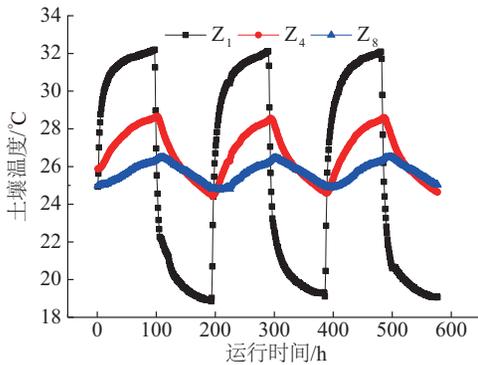


图 16 土壤温度随时间的变化(双工况连续运行)
 Fig. 16 Variation of soil temperature with operation time (Double continuous operation)

图 17 为不同运行时间下土壤温度随径向距离的变化规律。在径向距离一定的情况下,土壤温度随热泵运行时间的延长,表现为上升和下降的变化规律;当径向距离大于 380 mm 时,土壤温度波动仅为 0.15 °C。因此在本实验条件下,可认为双工况(连续性冷热交替)模式下土壤热波动半径为 380 mm。

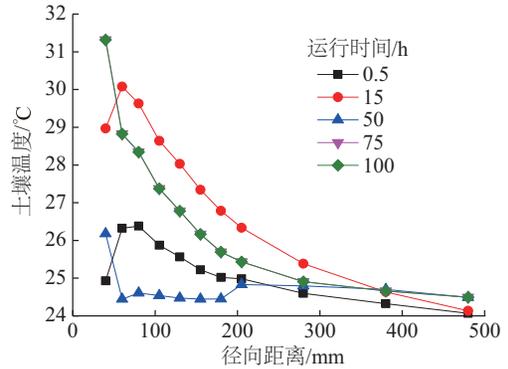


图 17 不同径向距离土壤温度(双工况连续运行)
 Fig. 17 Soil temperature of different distances radial distance (Double continuous operation)

图 18 给出了热泵双工况连续运行模式下,单位管长换热量随热泵运行时间的变化规律。单位管长换热量变化曲线呈先下降后趋于平稳再急剧上升,最后趋于平稳的周期性的变化。分析可知双工况连续运行模式下,热泵先进行蓄热,蓄热结束后地埋管附近土壤温度较高,这时改变恒温水浴温度进行 7 °C 取热,此时地埋管内流体温度与地埋管附近土壤温差较大,在温度梯度的作用下地埋管内流体温度迅速上升之后趋于平稳,如此反复变化。相比热泵单工况运行,单位管长换热量始终处于一个较高的范围。对图 18 中数据分析,双工况(连续性冷热交替)模式下,单位管长换热量处于 14.4~61.5 W/m 之间。

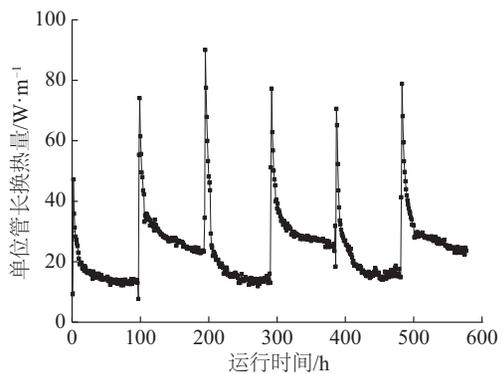


图 18 单位管长换热量随时间的变化(双工况连续运行)
 Fig. 18 Variation of heat transfer per unit length with operation time (Double continuous operation)

4.2.2 双工况间歇运行

所谓双工况间歇运行是指热泵蓄热结束后,土壤温度恢复一段时间后,再进行取热(间歇性冷热交替)。图 19 给出了双工况(间歇性冷热交替)间

歇模式下,地理管进、出口流体温度随热泵运行时间的变化规律。热泵间歇运行模式下,流体进出口温度先急剧上升,然后慢慢趋于稳定,当热泵停止运行后地理管进出口流体温度缓慢下降,最后温度变化曲线重合,随后热泵进行取热,流体进、出口温度又急剧下降这样周期性的变化。分析可知,相比双工况(连续性冷热交替)模式,间歇运行模式增加了地理管及地理管附近土壤中热量向远处土壤的传递时间。

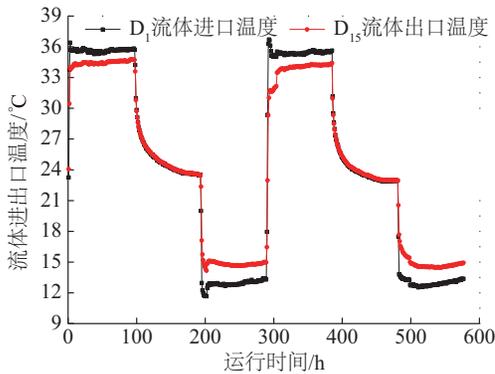


图 19 流体进出口温度随时间的变化(双工况间歇运行)
Fig. 19 Variation of inlet and outlet temperature of fluid with operation time (Double intermittent operating)

图 20 给出了地理管周围土壤温度随热泵运行时间的变化规律。间歇运行模式下,地理管周围土壤温度表现为先急剧上升后缓慢下降再急剧下降的变化规律,相比连续运行模式下,土壤温度变化曲线较为平缓且随径向距离的增加而增加。提取图 20 数据可知,径向距离为 40、105、205 mm 土壤温度波动范围依次为 5.40、1.20、0.14 °C。

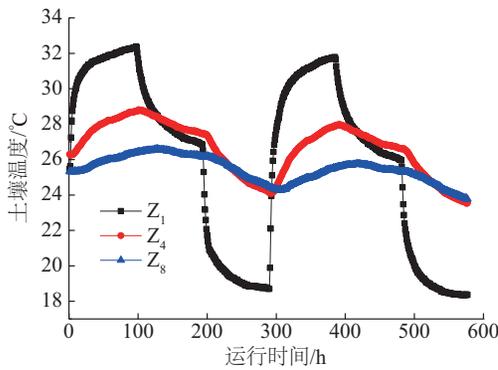


图 20 土壤温度随时间的变化(双工况间歇运行)
Fig. 20 Variation of soil temperature with operation time (Double intermittent operating)

通过图 21 可看出与连续运行模式相比,间歇

模式下地理管周围土壤温度波动幅度相对较小,均随径向距离的增加而减小。分析图 21 可知,径向距离为 180 mm 时土壤温度波动幅度为 0.14 °C,可认为在该实验条件下,间歇运行模式下土壤热波动半径为 180 mm。对比连续运行模式,可发现连续运行模式下土壤热波动半径较大,而间歇运行模式下土壤热波动半径较小。

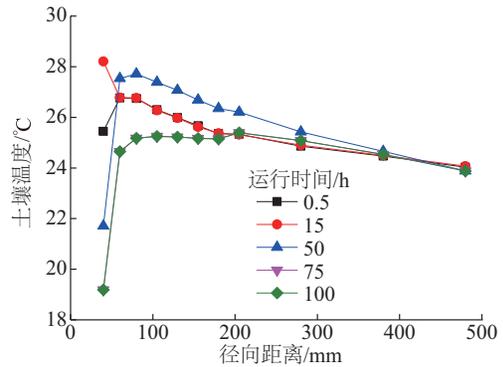


图 21 不同径向距离土壤温度(双工况间歇运行)
Fig. 21 Soil temperature of different distances radial (Double intermittent operation)

图 22 给出了双工况(间歇性冷热交替)模式下,单位管长换热量随运行时间的变化。双工况间歇运行模式,单位管长换热量随热泵运行时间的增加,有一段时间内单位管长换热量几乎为零,这是因为热泵刚处于停机状态,管内流体与地理管附近土壤温差,随着停机时间的延长而逐渐减小,最后趋于零。而双工况连续运行模式下未出现该现象。分析图 22 可知,在间歇运行模式下平均单位管长换热量在 0.1~38.9 W/m 之间,相比连续运行模式较低。

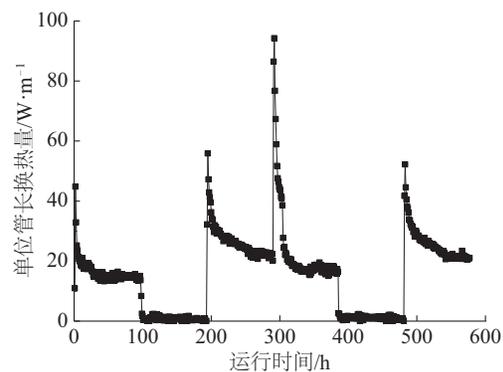


图 22 单位管长换热量随时间的变化(双工况间歇运行)
Fig. 22 Variation of the heat transfer per unit length with operation time (Double intermittent operating)

综上所述,相比热泵单一工况下的蓄热或取热,热泵双工况冷热交替运行模式可显著降低土壤温升率。对于内蒙古包头地区(严寒地区),宜采用太阳能-地源热泵系统(冷热交替运行模式)。白天利用太阳能集热器收集太阳能辐射热,把收集到得热量通过地埋管换热器储存到土壤中,晚上利用地源热泵提取热量,为建筑物供暖。

5 结 论

1) 热泵单工况运行条件下,流体进出口温度呈先升高后缓慢降低最后趋于稳定的变化规律。如热泵运行初期,流体进、出口温度分别为 29.6、28.7 °C;热泵运行 72 h,流体进、出口温度分别为 36.1、35.5 °C;土壤温度随径向距离的增加增幅逐渐降低,如热泵运行 21 h 时,径向距离分别为 40、105、180 mm 土壤温度依次为 33.8、31.3、29.8 °C;单位管长换热量随运行时间的增加基本稳定。

2) 增加流体进口速度(Re),可适当提高单位管长换热量;流体流速的变化对地埋管附近($r < 80$ mm)土壤温度影响较大;单位管长换热量随流速的增大而增加,但增幅较小。

3) 流体进口温度的升高对土壤温度和单位管长换热量的影响较大。如流体进口温度分别为 40、45 °C,热泵运行 24 h 时,径向距离为 80 mm 时土壤温度分别为 31.9、33.8 °C;径向距离为 280 mm 时,土壤温度分别为 28.4、29.0 °C,对应的单位管长换热量分别为 12.7、14.1 W/m。

4) 在热泵间歇运行模式下,土壤温度呈波动式变化,并随径向距离的增加而减小,随热泵开停比的减小而增大,如热泵运行时间为 19 h,径向距离为 60 mm 时,在 3 种不同热泵运行模式下,土壤温度依次为 34.9、34.4、33.0 °C,径向距离为 205 mm 时,3 种不同热泵运行模式下,土壤温度依次为 31.1、30.9、30.8 °C;单位管长换热量较热泵连续运行模式下有所提升。

5) 在双工况连续运行和间歇运行 2 种运行模式下,地埋管周围土壤温度均呈现上升和下降周期性变化,且波动幅度均随径向距离的增加而减小,同时连续运行模式下土壤温度波动幅度较大。在连续/间歇运行模式下单位管长换热量分别在 14.4~61.5 W/m 之间和 0.1~38.9 W/m 之间。

[参考文献]

- [1] Kang E C, Riederer P, Yoo S Y, et al. New approach to evaluate the seasonal performance of building integrated geothermal heat pump system[J]. *Renewable Energy*, 2013, 54(6): 51—54.
- [2] Kim Jiyoung, Jang Jea Chul, Kang Eun Chul, et al. Verification study of a GSHP system manufacturer data based modeling[J]. *Renewable Energy*, 2013, 54(6): 55—62.
- [3] Choi Jong Min, Park Yongjung, Kang Shin-Hyung. 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.
- [4] Cho Honghyun, Choi Jong Min. The quantitative evaluation of design parameter's effects on a ground source heat pump system[J]. *Renewable Energy*, 2014, 65(C): 2—6.
- [5] Zeng Heyi, Diao Nairen, Fang Zhaohong. Efficiency of vertical geothermal heat exchangers in the ground source heat pump system[J]. *Journal of Thermal Science*, 2003, 12(1): 77—81.
- [6] Fujii Hikari, Yamasaki Shohei, Maehara Takahiro, et al. Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers[J]. *Geothermics*, 2013, 47(7): 61—68.
- [7] Lee Chun Kwong, Lam H N. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(6): 1286—1296.
- [8] Nagano Katsunori, Katsura Takao, Takeda Sayaka. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14-15): 1578—1592.
- [9] Katsura Takao, Nagano Katsunori, Narita Shigeaki, et al. Calculation algorithm of the temperatures for pipe arrangement of multiple ground heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(5-6): 906—919.
- [10] 杨昌智, 黄 兵. U型管换热性能影响因素研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(12): 44—48.
- [10] Yang Changzhi, Huang Bing. Study on Influence factor of heat transfer performance of the U-tube[J]. *Journal of Hunan University: Natual Science*, 2009, 36(12): 44—48.

- [11] 杨卫波, 施明恒, 陈振乾. 非连续运行工况下垂直埋管换热器的换热特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(2): 328—333.
- [11] Yang Weibo, Shi Mingheng, Chen Zhenqian. Heat exchange characteristics of vertical U-tube ground heat exchanger with discontinuous operation condition[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(2): 328—333.
- [12] 杨卫波, 孙露露, 吴 暄. 相变材料回填埋管换热器蓄能传热特性[J]. 农业工程学报, 2014, (24): 193—199.
- [12] Yang Weibo, Sun Lulu, Wu Xuan. Energy storage and heat transfer characteristics of ground heat exchanger with phase change backfill materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, (24): 193—199.
- [13] Pu Liang, Qi Di, Li Kang, et al. Simulation study on the thermal performance of vertical U-tube heat exchangers for ground source heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, (79): 202—213.
- [14] Li Chaofeng, Mao Jinfeng, Xing Zheli, et al. Analysis of geo-temperature restoration performance under intermittent operation of borehole heat exchanger fields[J]. Sustainability, 2015, 8(1): 29—35.
- [15] 杨卫波, 施明恒, 陈振乾. 土壤源热泵夏季运行特性的实验研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(9): 1012—1016.
- [15] Yang Weibo, Shi Mingheng, Chen Zhenqian. Experimental study on the operative characteristics of a ground-coupled heat pump in cooling mode[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2007, 28(9): 1012—1016.

EXPERIMENTAL STUDY ON TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF SOIL AROUND BURIED PIPE UNDER SINGLE OR DOUBLE OPERATING CONDITIONS

Wu Xuan, Lu Ziyi, Liu Wei, Li Songyang, Liang Panlong, Jin Guang

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The variation of soil temperature around underground pipe heat exchanger, fluid inlet and outlet temperatures and heat exchange capacity of unit pipe length with the heat pump operation time is analyzed based on the experimental study. The effects of various factors such as Re , fluid inlet temperature and heat pump operation mode are explored, and the time variant characteristics of soil temperature and heat exchange capacity of unit pipe length is obtained. In the single operation condition of heat pump, the results show that the soil temperature and the heat exchange capacity of unit pipe length increase with the increase of heat pump operation time and go to steady in the end. The proper increase of fluid inlet velocity (Re) contributes to the improvement of heat exchange capacity of unit pipe length. The change of fluid velocity has a great influence on the soil temperature in the range of $r < 80$ mm. Under the intermittent operation mode, the rising rate of soil temperature rise is slower, while the heat exchange capacity of unit pipe length is increased comparing to that under continuous operation mode. Under double operation conditions of heat pump, the soil temperature around the buried pipe fluctuates up and down under both the continuous and intermittent operation modes, and the fluctuation range decreases with the increase of radial distance. The soil thermal influencing radius under continuous operation mode is larger than that under intermittent operation mode.

Keywords: ground source heat pump; experimental study; soil temperature; heat exchanger; operation mode