

文章编号: 0254-0096(2018)02-0453-08

地源热泵系统夏季制冷间歇运行特性实验研究

吕艺青, 傅允准

(上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201620)

摘 要: 对实际运行的地源热泵系统夏季制冷间歇运行特性进行实验研究, 分析比较不同间歇运行方案下得到的热泵机组性能和埋管换热性能。研究结果表明: 相比于负荷侧流量, 地源侧流量对机组性能和埋管换热性能的影响较大; 在流量设定的条件下, 采用开机运行 2 h 停机 2 h 运行方案机组的性能最好, 机组最大性能系数(COP)值可达到 4.17, 比运行 4 h 停机 2 h 机组的 COP 值高出 7.5%; 在停机 2 h 的情况下, 机组开机 2、3 或 4 h, 埋管的换热能力均可得到恢复, 停机前后埋管的平均换热量基本保持平衡。

关键词: 地源热泵; 间歇运行; 机组性能; 换热量; 实验研究

中图分类号: TU83

文献标识码: A

0 引 言

地源热泵作为一种高效、节能、环保的空调技术, 得到了越来越广泛的应用。但在冷热负荷不平衡地区长期运行后, 由于土壤热累积系统的性能会逐渐下降, 出现能耗大但又不能满足建筑需求的问题。学者们提出不同的地源热泵运行方式, 目的是通过解决土壤热累积问题来使地源热泵系统在长期运行中仍然保持高性能^[1-4]。如吴春玲等^[5]以天津市某办公楼的地源热泵系统为研究对象, 对其多年运行之后的土壤温度变化和系统能效变化进行模拟分析, 分析比较不同停机运行方案下得到的土壤温度和热泵机组能效的变化; 刘湘云等^[6]通过实验, 对比夏季和冬季不同条件对地源热泵运行系统的影响, 得出只有在热泵系统采用交替从地下取热和取冷时, 地下土壤才有保持其作为热源的能力; 林俊等^[7]对混和型地源热泵系统运行特性进行试验研究, 实验采用单因素实验方法, 研究热水温度、循环水泵功率、环境温度对不同混合型地源热泵系统制热能效比的影响; 余延顺等^[8]建立考虑地下水渗流的地下埋管换热系统的传热模型, 研究负荷分布对地源热泵系统长期运行特性的影响; Naili 等^[9]对地源热泵在突尼斯的现场运行性能进行试验; Fidorów 等^[10]基于实验数据研究土壤温度对地源热泵系统的影响。

以上学者的研究并未很明确得出流量和开机停机时间等因素对系统性能如何影响。

本文主要通过实验对地源热泵系统的制冷运行方式进行研究, 详细研究流量以及开机停机时间对机组性能和埋管换热性能的影响。研究结果可为冷却塔辅助地源热泵系统运行策略提供重要依据, 并对改善地源热泵系统的长期运行性能有一定的参考价值。其中间歇式运行主要是为了结合后续对冷却塔辅助地源热泵系统的研究。

1 工程概况

地源热泵综合实验系统如图 1 所示, 位于上海工程技术大学实训楼实验室, 主机为水-水式地源热泵机组, 制冷量为 12.6 kW, 制冷输入功率为 3.07 kW, 冷冻水泵流量与冷却水泵流量均为 3.2 m³/h。实验室房间末端采用风机盘管加新风系统。室内空调负荷设计参数为两间办公室人员共 6 人, 每人新风量 30 m³/h, 夏季室内设计温度 26 ℃, 最大相对湿度 65%。埋管换热器系统如图 2 所示, 本埋管系统设有 5 口竖直井, 分别是 4 根单 U 型埋管和 1 根双 U 型埋管, 管井埋深 60 m, U 型管采用 PE 管, 外径 32 mm, 内径 25 mm, 回填土采用原土回填。本实验系统数据采集对象主要包括地源侧埋管进出口温度及水流量、负荷侧循环水进出水口温度和水流量、不

收稿日期: 2016-01-05

基金项目: 校科技发展基金(2011XY13)

通信作者: 傅允准(1978—), 男, 博士、副教授, 主要从事热泵技术与建筑节能方面的研究。fuyunzhun@126.com

同深度不同距离土壤温度、热泵及水泵功率和耗能等。其中,温度信号采用热电阻传感器进行测量,精度等级为 0.5;流量信号采用 LWGY-25 型涡轮流量传感器进行测量,精度等级为 0.5%,整个数据采集过程均由计算机自动完成。

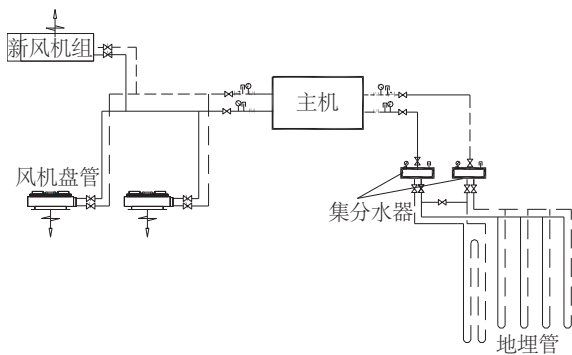


图1 地源热泵实验系统

Fig. 1 Experimental system of GSHP

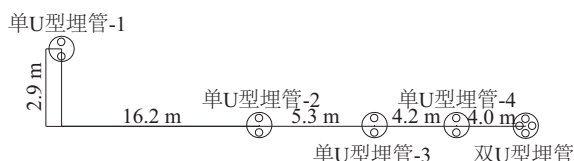


图2 地埋管平面图

Fig. 2 Plan of ground heat exchangers

2 实验结果与分析

本文以短期实验模拟夏季办公室地源热泵空调系统制冷工况。由于实验工况多,所以每个工况实验时间为 24 h,热泵机组白天运行 12 h,夜间停机 12 h。为研究负荷侧和地源侧水流量分别对机组性能的影响,本文做了以下 4 种工况的实验,如表 1 所示。

表1 变流量实验工况

Table 1 Variable flow experiment conditions

工况	地源侧流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	负荷侧流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
1	2.00	2.15
2	1.50	2.15
3	0.80	2.15
4	2.00	1.50

2.1 变地源侧流量对系统性能的影响

在此主要从压缩机功率、制冷量、机组性能系数

(COP)、地埋管换热量 4 个方面分析改变地源侧流量对整个系统性能的影响。其中对工况 1~工况 4 只分析白天运行 12 h 的实验结果,夜间 12 h 停机的内容不做分析。

2.1.1 变地源侧流量对机组性能的影响

工况 1:通过水泵变频,使得地源侧的水流量为 $2.00 \text{ m}^3/\text{h}$,负荷侧水流量为 $2.15 \text{ m}^3/\text{h}$,实验测得的制冷量、压缩机的功率、机组的 COP 变化情况如图 3 所示,机组的 COP 值取每小时的平均值。

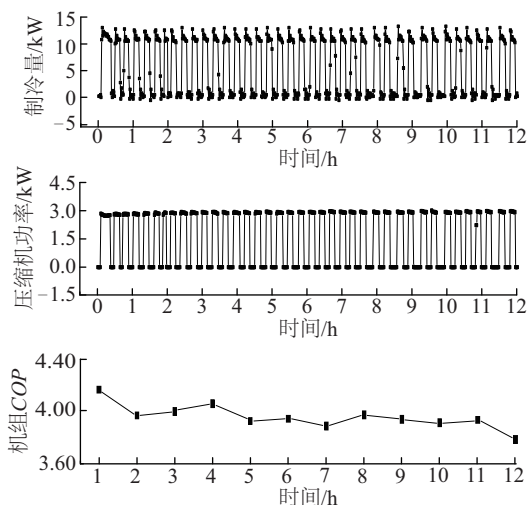


图3 工况1机组性能

Fig. 3 Unit performance on case 1

从图 3 可看出制冷量以及压缩机功率随着机组的启停呈规律性变化。而在连续运行 12 h 中,随着运行时间的增加,压缩机的功率逐渐增大,耗能增加,机组的 COP 值呈降低趋势,开始第 1 小时机组 COP 值最大,第 12 小时 COP 值最低。连续运行 12 h 机组 COP 平均值为 3.88,且最小 COP 与最大 COP 相差 13%。

工况 2:图 4 表明当负荷侧水流量不变,改变地埋管侧水流量为 $1.50 \text{ m}^3/\text{h}$,比工况 1 地埋管侧的水流量小 $0.50 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,压缩机工作的时间比工况 1 长,压缩机的总功率比工况 1 的高出 6.9%;机组的 COP 平均值是 3.79,比工况 1 机组的 COP 平均值低 2.3%。由于本实验负荷侧室内负荷相对较小,实验系统规模小,故地源侧流量的降低对整体性能的影响十分明显。

工况 3:负荷侧的水流量仍不变,再次降低地源侧的水流量,在地源侧的水流量为 $0.80 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,制

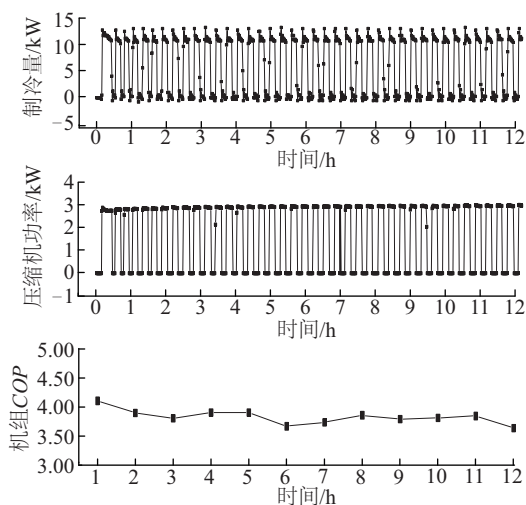


图4 工况2机组性能

Fig. 4 Unit performance on case 2

冷量、压缩机功率、机组 COP 的变化情况如图 5 所示。在工况 3 中,压缩机的最大输入功率为 3.34 kW,而在工况 1 和工况 2 中,压缩机的最大功率分别为 3.01 和 3.02 kW;机组的 COP 平均值为 3.18,相比于工况 1、工况 2,其 COP 值分别降低了 22.0% 和 18.9%。

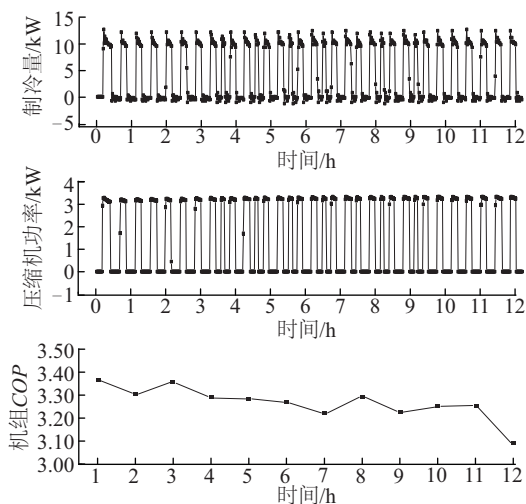


图5 工况3机组性能

Fig. 5 Unit performance on case 3

综合比较工况 1、工况 2、工况 3 机组 COP 值。随着运行时间的增加,各工况下机组的性能总体是下降的,第 12 个 1 h 的 COP 平均值与第 1 个 1 h 的 COP 平均值相比各工况分别下降 9.19%、13.04%、13.06%;随着地源侧水量的降低,机组的性能变差。从整体机组 COP 平均值来看,工况 3 的机组性能最

差。此外,对比图 3~图 5,从压缩机的运行状况可看出,地源侧水流量由大变小,压缩机运行时间增加,能耗也增大。显然,地源侧水量的变化对机组的性能有一定影响。

2.1.2 变地源侧流量对地埋管换热性能的影响

对地埋管的换热量进行分析,如图 6、图 7 所示。工况 1、工况 2、工况 3 最大换热量分别是 16.8、16.6、16.3 kW。流量为 2.00 m^3/h 时,埋管平均换热量为 14.19 kW,流量降低到 1.50 m^3/h 时,对换热器的影响不大,平均换热量仅降低 0.04%。当流量再次降低至 0.80 m^3/h 时,平均换热量降低 2%。

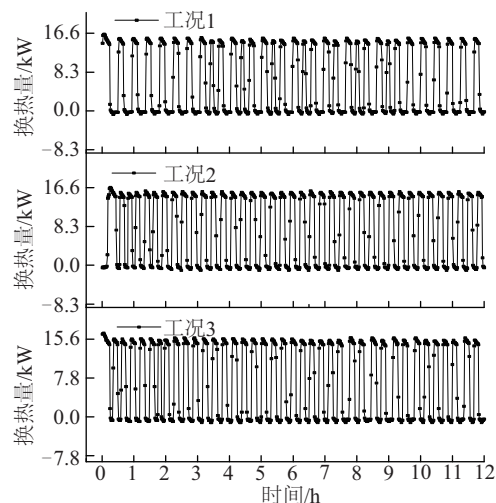


图6 不同流量对地埋管换热量的影响

Fig. 6 The influence of different flow on heat transfer of ground heat exchangers

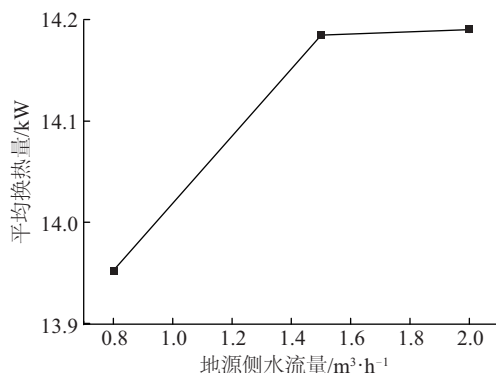


图7 地源侧流量对地埋管换热性能的影响

Fig. 7 The influence of ground source-side flow on heat transfer of heat exchangers

2.2 变负荷侧流量对系统性能的影响

为了较为详细地研究机组性能的影响因素,本

文还做了变负荷侧流量的实验,在此工况中,机组的运行时间和工况 1~工况 3 相同,实验结果与分析如下。

2.2.1 变负荷侧流量对机组性能的影响

如图 8 所示,此工况使地源侧的水流量为 $2.00 \text{ m}^3/\text{h}$,调节负荷侧的水量由 $2.15 \text{ m}^3/\text{h}$ 减小到 $1.50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。较之于图 3,随着负荷侧水流量减小,压缩机的工作时间缩短,停机时间增加,尽管压缩机的输入功率降低,但总的制冷量降低幅度大于压缩机功率的降低幅度,因此机组的性能也是降低的。且此工况下,机组 COP 的平均值为 3.66,工况 4 比工况 1 机组 COP 平均值低 6%。

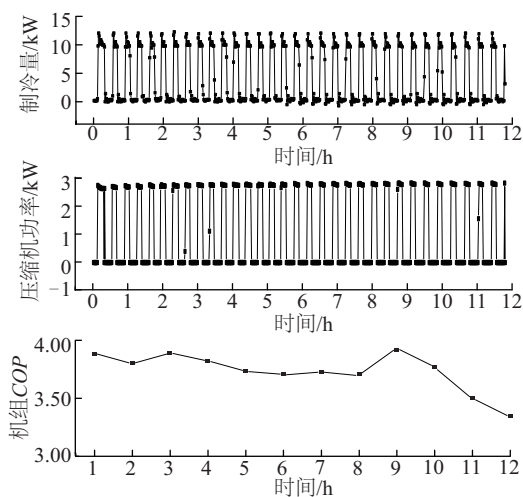


图8 工况4机组性能

Fig. 8 Unit performance on case 4

分析以上 4 种工况,可得出当调节地源侧水流量分别为 2.00 、 1.50 、 $0.80 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,运行时间均为 12 h,压缩机的功率逐渐增大,机组的 COP 值降低。而调节负荷侧流量,虽然机组的性能也降低了,但相比于调节地源侧流量,其降低幅度较小。因此,在夏季,对于该地源热泵机组来说,地源侧提供冷量的能力对机组的性能有较大影响,故对地埋管的性能应做进一步研究,从而增强系统的性能。

2.2.2 变负荷侧流量对地埋管换热性能的影响

在工况 4 中,地埋管的换热量情况如图 9 所示。埋管的平均换热量为 14.16 kW ,与工况 1 相比,埋管的换热量变化不大。可见负荷侧流量减小,虽然降低机组的性能,但对地埋管的性能影响并不明显。

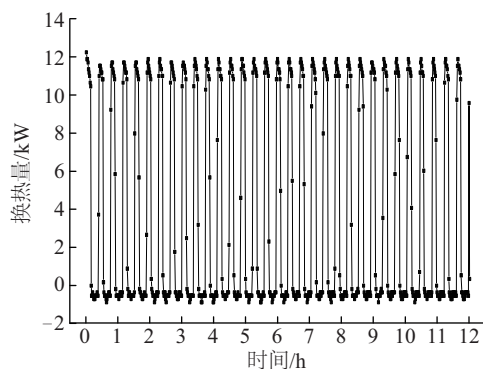


图9 工况4地埋管换热量

Fig. 9 The heat transfer of ground heat exchangers on case 4

2.3 变开机停机时间实验

由地源热泵系统连续运行 12 h 的实验分析可以看出,地源热泵机组在运行 12 h 后,机组整体的性能下降。土壤温度无法及时恢复是影响机组性能的主要因素。土壤温度升高,地源侧地埋管换热器性能受到影响,致使机组的性能也受到影响。为此,本文在前面实验的基础上通过改变机组开机和停机时间进行实验研究。

2.3.1 开机时间对系统性能的影响

在冷却水泵流量为 $2.00 \text{ m}^3/\text{h}$,冷冻水泵流量为 $2.15 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,分别进行如表 2 所示的 4 种不同开机停机时间的实验。

表2 开机停机时间实验工况

Table 2 Experiment conditions of boot and shutdown time

工况	运行状况
5	运行 2 h, 停机 2 h
6	运行 3 h, 停机 2 h
7	运行 4 h, 停机 2 h
8	运行 3 h, 停机 3 h

2.3.2 开机时间对机组性能的影响

工况 5: 运行模式是开机运行 2 h, 停机 2 h, 重复此模式, 共运行 12 h。

运行第 1 个 2 h 机组 COP 平均值值为 4.17, 停机 2 h 后继续运行, 第 2 个 2 h 机组 COP 值为 4.10, 再次停机 2 h, 第 3 个 2 h 机组 COP 值为 4.03。整体运行 COP 平均值为 4.10。在流量条件设置相同的情况下, 与连续运行机组相比 COP 平均值高出 5.6%。如图 10 所示, 压缩机的最大功率是 2.93 kW , 与图 3 相比, 压缩机的能耗大大降低, 机组的性能提高。

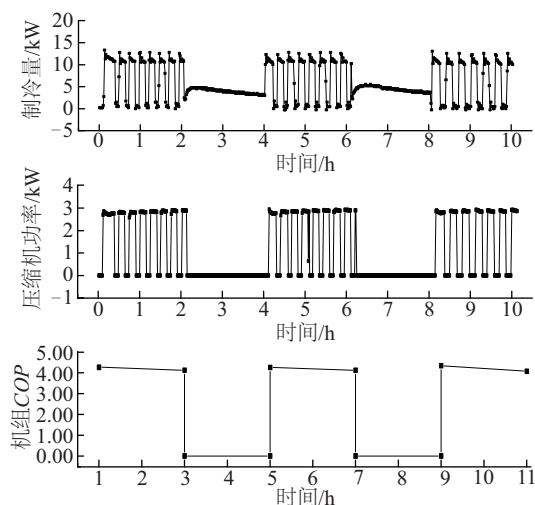


图10 工况5机组性能

Fig. 10 Unit performance on case 5

工况 6: 此工况的实验热泵机组每运行 3 h, 停机 2 h, 与工况 5 相比, 运行时间增加了 1 h。

由图 11 可看出, 在连续运行 3 h 后, 机组的 COP 值从 4.37 降低到 3.92, 但停机 2 h 后, 又升高到 3.99, 3 个 3 h 的运行均出现相同的变化趋势, 可见, 机组停机可使机组的性能得到一定程度恢复。整体机组 COP 平均值为 3.99, 与工况 5 实验相比, 机组的 COP 降低了 0.02。

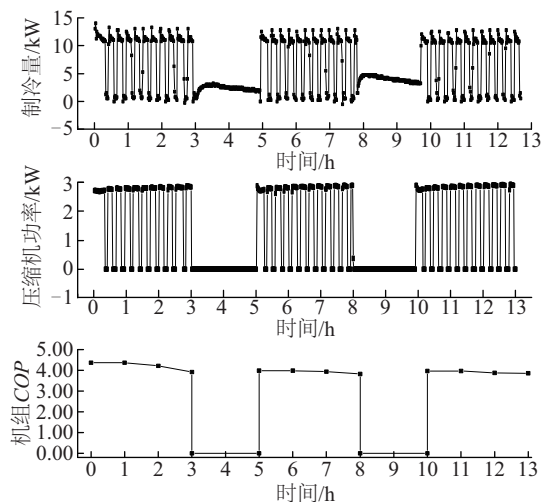


图11 工况6机组性能

Fig. 11 Unit performance on case 6

工况 7: 分析前面 2 种工况可知, 运行时间增加 1 h 对机组的性能影响并不明显, 于是本文进行开机运行 4 h, 停机 2 h 的实验。

从图 12 可清楚看出机组的性能呈下降趋势。

第 1 个 4 h 机组 COP 平均值为 3.98, 第 2 个 4 h 机组 COP 平均值为 3.79。整体 COP 平均值为 3.88, 相比于工况 5 机组 COP 值降低了 0.22。此工况压缩机的最大功率为 2.96 kW, 机组能耗增加, 性能受到影响。

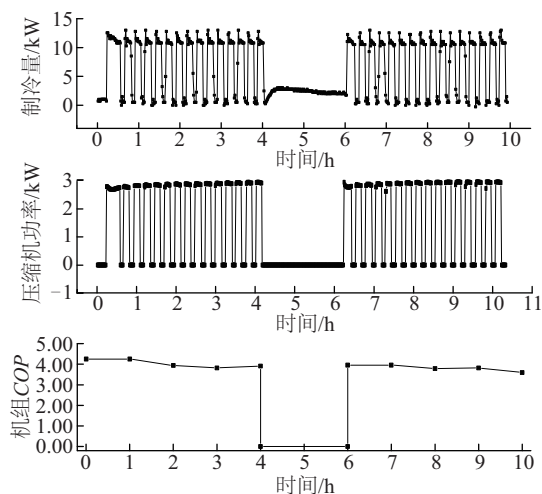


图12 工况7机组性能

Fig. 12 Unit performance on case 7

综合分析 3 种不同开机时间, 在开机 2 h 停机 2 h 的运行模式下, 机组的性能最好, 在系统运行起初, 3 种情况机组的 COP 平均值相差不大, 其值分别为 4.27、4.37、4.25。随着运行时间的增加, COP 值开始降低, 运行时间越长, 降低得越明显, 在最后 1 h, 其 COP 平均值分别为 4.08、3.86、3.60。在 3 种不同运行时间下, 最后 1 h 和第 1 个 1 h 的 COP 平均值下降率分别为 4.7%、13.2%、18.1%。可见运行在相同停机时间下, 运行时间越长机组性能越差。

2.3.3 开机时间对地埋管性能的影响

如图 13 所示: 1) 在工况 5 中, 第 1 个 2 h, 平均换热量为 13.35 kW, 停机 2 h, 第 2 个 2 h 的平均换热量为 12.46 kW, 再次停机 2 h, 第 3 个 2 h, 平均换热量为 12.16 kW; 2) 在工况 6 中, 第 1 个 3 h, 平均换热量为 13.69 kW, 停机 2 h, 第 2 个 3 h 的平均换热量为 13.54 kW, 再次停机 2 h, 第 3 个 3 h 平均换热量为 13.33 kW; 3) 在工况 7 中, 第 1 个 4 h 平均换热量为 13.72 kW, 停机 2 h, 第 2 个 4 h 的平均换热量为 13.55 kW。显然, 无论系统运行哪种工况, 在经过 2 h 的停机之后, 土壤温度均可得到恢复, 使埋管的换热性能保持平稳。

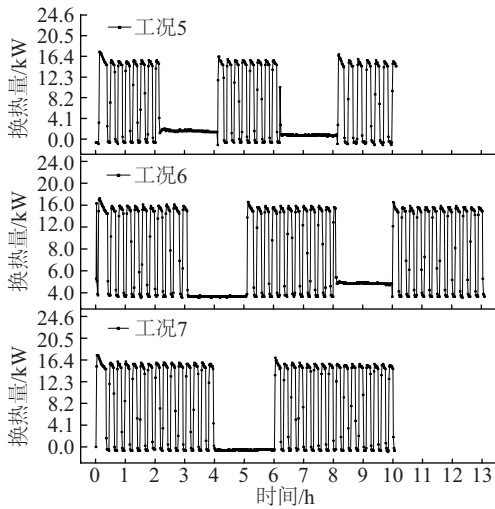


图13 不同开机时间对地埋管性能的影响

Fig. 13 The influence of different boot time on ground heat exchangers performance

2.4 停机时间对系统性能的影响

土壤温度的恢复需要一定的时间,在短时间运行后,合理的停机时间可使土壤温度得到很好的恢复,根据实际情况本文分别研究停机 2 h 和 3 h 的运行模式,实验结果和分析如下。

2.4.1 停机时间对机组性能的影响

工况 8: 运行 3 h, 停机 3 h 的实验,实验结果如图 14 所示。

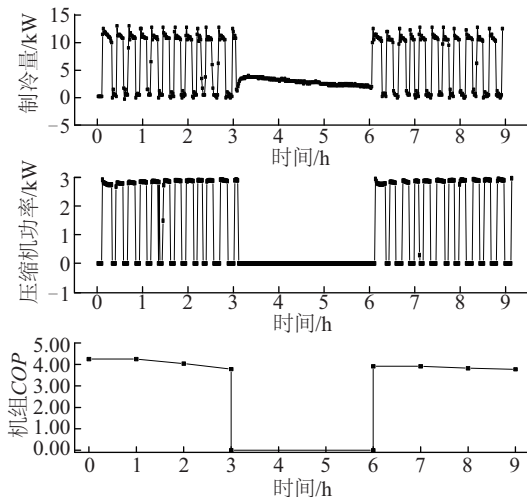


图14 工况8机组性能

Fig. 14 Unit performance on case8

分析图 14 可看出,机组 COP 变化趋势相同,都是在停机后机组的 COP 值有所回升,且回升的趋势较明显。在工况 6 中,停机前后机组 COP 值回升了

0.07, 工况 8 中停机前后机组 COP 值回升了 0.12。可看出,相同的开机时间,停机时间增加 1 h,土壤温度就会有更多的时间恢复,有利于提高机组的性能。

2.4.2 停机时间对地埋管性能的影响

在开机 3 h 停机 3 h 的运行模式下,地埋管的换热量如图 15 所示。在工况 8 的运行模式下,第 1 个 3 h 地埋管的平均换热量为 13.85 kW,在停机 3 h 后,第 2 个 3 h 换热量为 13.59,可见经过停机,土壤温度得到了一定的恢复,使地埋管的换热性能保持稳定。

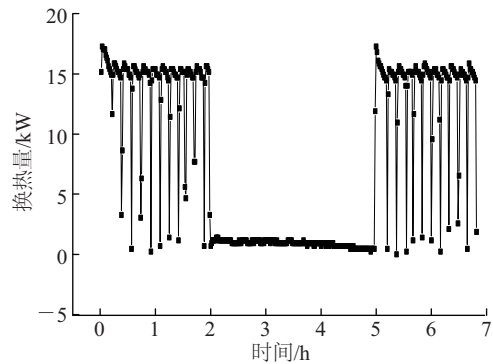


图15 工况8地埋管的换热量

Fig. 15 The heat transfer of ground heat exchangers on case 8

与工况 6 相比,增加停机时间至 3 h,停机前后埋管的平均换热量的变化量基本相同。如前文所述,本实验系统规模小,所需制冷量少,地埋管可充分地给机组提供冷却水,因此,土壤温度在短期内变化并不明显。显然,经过 2 h 的停机,土壤的温度也可得到恢复。就本实验系统而言,相比于工况 8,在冷却塔辅助地源热泵系统中,采用工况 6 更为合理。

3 结 论

本文通过对地源热泵系统夏季间歇运行方式的实验研究可得出以下结论:

1) 在短期内采用连续运行方式,改变地源侧和负荷侧的流量,机组的性能随着流量的减小而降低,且地源侧的流量对机组性能的影响更大。

2) 在地源侧流量为 2.00 m³/h, 负荷侧流量为 2.15 m³/h 时,运行 2 h 停机 2 h 的运行模式机组 COP 平均值比连续运行 12 h 高出 6.2%。

3) 在流量设定的条件下,机组的性能随着停机时间的增加而升高。并且在短时间内,机组的性能

可得到一定恢复。经过试验可得出,采用开机运行2 h 停机2 h 的运行策略,机组的性能最好,机组最大COP值可达到4.17,比相同情况下运行4 h 停机2 h 机组的COP值高出7.5%;

4)在停机2 h 的情况下,不管是哪种系统运行工况,地埋管的换热能力均可得到恢复,停机前后埋管的平均换热量基本保持平衡。

[参考文献]

- [1] 宋著坤,赵 军,李新国,等.地源热泵冬夏两季运行性能分析与实验研究[J].流体机械,2006,32(4): 55—59.
- [1] Song Zhukun, Zhao Jun, Li Xinguo, et al. Analysis and experimental study on heating and cooling operation of the ground source heat pump[J]. Fluid Machinery, 2006, 32(4): 55—59.
- [2] Kwon O, Bae K J, Park C. Cooling characteristics of ground source heat pump with heat exchange methods [J]. Renewable Energy, 2014, 71: 651—657.
- [3] Michopoulos A, Papakostas K T, Kyriakis N. Potential of autonomous ground-coupled heat pump system installations in Greece[J]. Applied Energy, 2011, 88 (6): 2122—2129.
- [4] 梁意艺,刘向龙.土壤源热泵地埋管传热与机组性能的实验研究[J].制冷与空调,2012,26(5): 500—503.
- [4] Liang Yiyi, Liu Xianglong. Experimental study of ground heat exchangers in ground source heat pump and its performance [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2012, 26(5): 500—503.
- [5] 吴春玲,惠超微,王雯翡,等.地源热泵停机运行方式对地温恢复和机组能效的影响研究[J].制冷与空调,2014,28(4): 410—414.
- [5] Wu Chunling, Hui Chaowei, Wang Wenfei, et al. Characteristics of ground temperature and system performance for the intermittent operation of GSHP system[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014, 28 (4): 410—414.
- [6] 刘湘云,陈 颖,杨 敏.季节条件对于地源热泵系统运行的影响[J].热能动力工程,2008,23(4): 434—437.
- [6] Liu Xiangyun, Chen Yin, Yang Min. Effect of seasonal conditions on the operation of a geothermal pump system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(4): 434—437.
- [7] 林 俊,胡映宁,李助军,等.混和型地源热泵系统运行特性试验研究[J].太阳能学报,2007,28(11): 1206—1212.
- [7] Lin Jun, Hu Yingning, Li Zhujun, et al. Study on compound ground source heat pump [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(11): 1206—1212.
- [8] 余延顺,马 娟.负荷分布对地源热泵系统长期运行特性的影响[J].南京理工大学学报,2011,35(2): 155—159.
- [8] Yu Yanshun, Ma Juan. Influence of load distribution on long-term operation characteristics of ground source heat pump system[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(2): 155—159.
- [9] Naili N, Attar I, Hazami M, et al. First in situ operation performance test of ground source heat pump in Tunisia [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 292—301.
- [10] Fidorów N, Szulgowska-Zgrzywa M. The influence of the ground coupled heat pump's labor on the ground temperature in the boreholes-Study based on experimental data[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 82: 237—245.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PERFORMANCE FOR REFRIGERATION INTERMITTENT OPERATION IN SUMMER OF GSHP SYSTEM

Lyu Yiqing, Fu Yunzhun

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Experimental study of performance for the refrigeration intermittent operation in summer of ground source heat pump (GSHP) system was carried out, the performance of heat pump units and heat exchange performance of buried pipe under different intermittent operation schemes were analyzed and compared. The results showed that relative to load side flow rate, the influence of ground source side flow rate on performance of units and heat exchange performance of buried pipe is larger. Under the condition of setting flow rate, the performance of units is the best when adopting the operation scheme with operating 2 hours and shutdown 2 hours, the maximum *COP* of unit can reach up to 4.17, which is 7.5% higher than the scheme of booting 4 hours operation and shutdown 2 hours. The performance of heat exchange of buried pipe can be restored for 2 hour, 3 hours or 4 hours operation in the case of shutdown 2 hours, and the average heat exchange quantity of buried pipe can keep balance basically before or after shutdown.

Keywords: ground source heat pump; intermittent operation; unit performance; heat transfer; experimental study