

某地下水源热泵系统制热工况测试分析与运行优化

王占伟¹, 王智伟¹, 闫增峰²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 对某住宅小区的地下水源热泵系统进行了连续三个冬季的运行监测。监测结果显示, 地下水源热泵系统有着较高的供暖能效, 但系统运行较长时间后能效会出现下降。通过对监测数据的分析, 获得了机组容量、相同机组容量下的两台压缩机的不同容量组合和负荷侧进机组的水温对机组能效的影响规律, 并提出了针对这三因素的优化运行策略。

关键词: 地下水源热泵; 制热工况; 测试; 能效; 运行优化

中图分类号: TUB831

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0125-06

Testing analysis and operation optimization of the heating mode of a ground water source heat pump system

WANG Zhanwei¹, WANG Zhiwei¹, YAN Zengfeng²

(1. School of Environment, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Arch., Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The operational conditions of a residential ground water source heat pump (GWHP) system operating in three successive winters in Hanzhong were tested. Results show that the GWHP system has high heating energy efficiency, but its energy efficiency will decrease after it has been in operation for a long time. According to the analysis of the testing data, the laws affecting the capacity of unit, the combinations of different capacities of double compressors in condition of the same capacity of unit and the inlet temperature of condenser affecting the energy efficiency of unit are obtained. Meanwhile, the strategies of optimizing operation about these three factors are proposed.

Key words: ground water source heat pump; heating condition; measurement; energy efficiency; optimizing operation

建筑能耗是终端能源消耗的重要组成部分。国际能源署指出, 建筑能耗占世界终端能耗总量的比例约为 35%^[1]; 而在中国, 这一比例也达到了 20%^[2], 其中应用在建筑中的供暖与空调能耗是总建筑运行能耗的主要部分。随着我国把可再生能源发展纳入国家能源发展的政策之中, 利用地下水和土壤等储存的低品位热能的热泵技术被广泛地应用, 地下水源热泵技术是可再生能源利用技术之一, 最早应用于 1948 年美国俄勒冈州波特兰市联邦大夏, 该系统从设计开始就得到广泛的关注。在其后的几十年中, 得到了更为广泛的研究与应用^[3-6]。国内近几年, 在山东、河南、湖北、辽宁、黑龙江、北京和河北等地已有 100 多个地下水源热泵项目, 供暖、空调面积达 100 余万 m²。由于目前已发表的论文和研究成果对长时间使用情况下的地下水源热泵系统的能效性能

监测和运行优化涉及较少^[7-10]。为此作者采集了某地下水源热泵机组在三个冬季的运行数据, 根据测试数据得到了实际现场的地下水源热泵系统的供暖能效, 同时对比了部分负荷率下两台压缩机在不同容量组合下的机组能效, 获得了机组能效随其容量和负荷侧进机组水温的变化规律, 为提高地下水源热泵机组的能效和优化运行提供参考。

1 测试对象、内容与方法

1.1 测试对象简介

惠泽小区位于陕西省汉中市, 该住宅小区共两栋建筑楼, 层高都是 3 m, 共 332 户, 总建筑面积近 4 万 m²。空调总设计冷负荷/热负荷是 2 315.1 kW/1 852.1 kW。冷热源采用两台欧威尔 AWW340HD-F 双机头水源热泵机组, 机组性能参数见表 1, 地下水源热泵系统图见图 1。

收稿日期: 2016-08-26

修改稿日期: 2016-12-29

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划基金资助项目(2011BAJ03B06)

作者简介: 王占伟(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究空调系统能效诊断理论与节能技术。E-mail: wzhanweisunshine@163.com

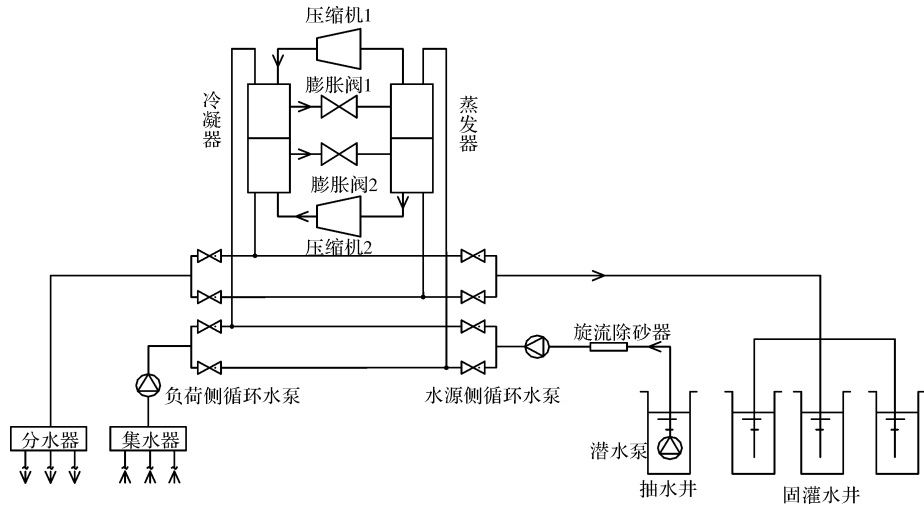


图 1 双机头地下水源热泵系统图

Fig. 1 System diagram of GWHP with double compressors

表 1 水源热泵机组性能参数

Tab. 1 The performance parameters of GWHP unit

	额定制热(冷)量/kW	额定耗功率/kW	额定 COP
冬季	1 362	282	4. 83
夏季	1 244	214	5. 81

注: 夏季设计工况下, 机组水源侧进/出口水温是 18/29 ℃, 流量是 113. 6 m³/h; 负荷侧进/出口水温是 12/7 ℃, 流量是 214 m³/h; 冬季设计工况下, 机组水源侧进/出口水温是 15/7 ℃, 流量是 116 m³/h; 负荷侧进/出口水温是 40/45 ℃, 流量是 234 m³/h.

表 2 水泵性能参数

Tab. 2 The performance parameters of water pumps

厂家	型号	台数	额定值		
			流量/m ³ · h ⁻¹	扬程/m	功率/kW
负荷侧循环水泵	TPG200-400A 管道离心泵	3	187	44	37
水源侧循环水泵	太平洋制泵公司 TPG125-160 管道离心泵	2	100	8	4
潜水泵	250QJ125-112/7	4	125	120	63

该工程的地下水取用/回灌系统介绍如下: 该小区位于汉中市城区南部, 地处汉江一级阶地, 南距汉江河边约 500 m, 浅层承压水总的流向是从西北流向东南, 径流速度约 60 m/d. 该工程的水源井平面布置见图 2. 由图 2, 本工程共 4 口井, 井的地层结构基本一致, 共有 9 个岩性层段, 其中主要含水层 4 个, 分别为中粗砂卵砾石、中细砂含泥、砂卵砾石和细砂砾石. 含水层结构较为松散, 以砂卵砾石为主, 富水性好. 井深 120 m 左右, 静水位约为 8 m. 根据抽回灌试验报告, 单井小时涌水量/回灌水量约为 120/42. 5 m³/h. 根据文献[11], 使用一口抽水井, 三口回灌井. 根据历史记录数据, 计算回灌率为 100%, 逐年取水量与逐

小区夏季供冷 90 d, 从 6 月 15 日到 9 月 15 日, 每天运行 14 h, 末端采用风机盘管的方式; 冬季供暖 120 d, 从 11 月 15 日到 3 月 15 日, 每天运行 16 h, 末端采用地面辐射供暖的方式. 供冷和供暖采用按每户空调水流量分摊收费的冷热计量方案. 该小区入住率约为 60%, 故常年只运行一台热泵主机. 水泵的性能参数见表 2, 负荷侧循环水泵 2 用 1 备, 运行时, 开启台数与主机运行台数一致; 水源侧循环水泵 2 台并联运行, 潜水泵一抽三灌.

年回灌量约为 16. 8 万 t.

2 数据采集的有效性分析与数据处理方法

2.1 现场采集数据的有效性分析

根据文献[12], 分别取出三次监测中一天的数据, 计算能量不平衡率(EIR), 结果见图 3. 由图 3, 绝大部分数据的 EIR 都小于 10%, 可认为该组合的仪器采集到的数据是有效的.

2.2 数据处理方法

(1)使用机组能效比(COP)和系统 COP 来表示地下水源热泵系统的能效水平. 冬季机组制热 COP 的计算见公式(1):

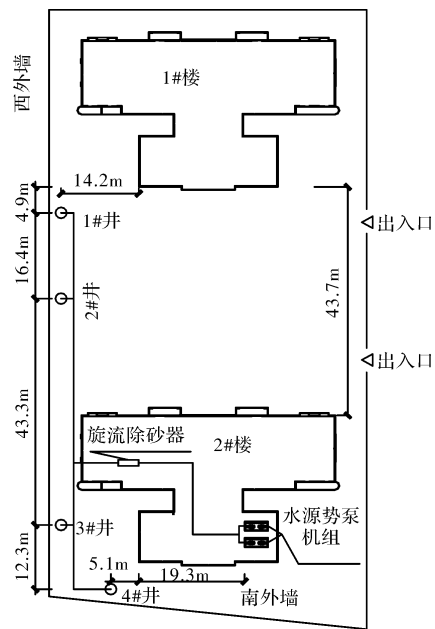


图 2 水源井布置图
Fig. 2 Locations of wells

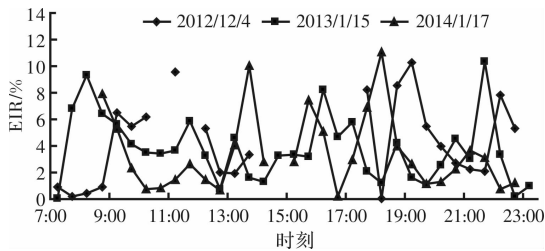


图 3 采集数据的能量不平衡率
Fig. 3 Energy imbalance rate of data collected

$$COP = Q_c / P_{in} \tag{1}$$

式中: $Q_c = m_e c_p (t_{co} - t_{ci})$, Q_c , P_{in} 分别为机组制热量和耗功率, kW; m_e 为负荷侧循环水的流量, kg/s; t_{ci} , t_{co} 分别为进出冷凝器的水温, °C; c_p 为水的定压比热容, kJ/(kg·K).

系统 COP 的计算见公式(2):

$$COP_{sys} = Q_c / (P_{in} + P_e + P_c + P_0) \tag{2}$$

式中: COP_{sys} 表示系统 COP; P_c , P_e , P_0 分别为负荷侧循环水泵、水源侧循环水泵和潜水泵的耗

功率, kW.

(2) 机组吸热量 Q_e 的计算见公式(3):

$$Q_e = m_e c_p (t_{ei} - t_{co}) \tag{3}$$

式中: m_e 为水源侧循环水的流量, kg/s; t_{ei} , t_{eo} 分别为进出蒸发器的水温, °C.

(3) 冷凝器/蒸发器传热系数的计算分别见公式(4)和公式(5):

$$K_c F_c = m_e c_p \ln((t_c - t_{ci}) / (t_c - t_{co})) \text{ (冷凝器)} \tag{4}$$

$$K_e F_e = m_e c_p \ln((t_{ei} - t_e) / (t_{eo} - t_e)) \text{ (蒸发器)} \tag{5}$$

式中: t_c , t_e 分别为冷凝温度和蒸发温度, °C. 使用 KF 表示冷凝器/蒸发器的传热性能, kW/K.

3 测试结果分析与运行优化

3.1 制热工况下的机组/系统 COP

三次监测过程中, 各水泵定流量运行, 测得负荷侧/水源侧循环水泵的流量分别是 290/120 m³/h, 且各水泵耗功率基本不变, 其总和约为 84.8 kW. 机组每天从早 6 点 30 分运行到晚 22 点 30 分. 三次测试期间的室外平均气温 t_a , 地下水抽水温度 t_g , 平均回灌温度 t_h , 负荷侧平均供/回水温度 t_{co}/t_{ci} , 负荷侧循环水泵和热泵机组的平均功耗 P_c 和 P_{in} 的监测结果和满容量运行下的平均机组/系统 COP 的计算结果见表 4. 在计算表 4 显示的满容量运行下的平均机组/系统 COP 时, 由于数据采集的时间间隔较短(5~10 min), 可认为某一时刻采集到的机组耗功率和计算得到的机组制热量的瞬时值在该采集时间间隔内保持不变. 因此, 一次测试期间的平均机组/系统 COP 可按照该次测试期间的每个采集时刻的制热量的瞬时值的累积和与耗功率的瞬时值的累积和之比, 这在原理上, 等同于一个测试期间的 COP 值是制热量对时间积分值除以耗功率对时间的积分值.

表 4 测试期间的 t_a , t_g , t_h , t_{co} , t_{ci} , P_c , P_{in} 和机组/系统 COP 值
Tab. 4 Value of t_a , t_g , t_h , t_{co} , t_{ci} , P_c , P_{in} and unit/system COP during the test

测试时间	t_a /°C	t_g /°C	t_h /°C	t_{co} /°C	t_{ci} /°C	P_c /°C	P_{in}	平均机组 COP	平均系统 COP
2012 年 12 月 1 日~7 日	4.5	15.3	7.8	40.5	36.7	40.5	247.5	5.1	3.9
2013 年 1 月 13 日~18 日	4.3	15.0	8.0	44.1	40.6	39.7	239.7	4.6	3.4
2014 年 1 月 16 日~22 日	3.3	15.0	8.2	40.5	36.9	41.5	258.9	4.5	3.3

由表 4, 三次测试期间的地下水入机组水温基本维持在 15°C 不变, 回灌水温也相差不大; 机组 COP 在 4.5 以上, 系统 COP 在 3.3 以上, 这表明地下水源热泵有着较高的能效比. 由表 4,

随着运行时间的增长, COP 不断下降, 到 2014 年 1 月份, 机组 COP 低于 2012 年 12 月份 11.8%. 由于这两个测试期间的 t_{co} 和 t_{ci} 基本相当, 各水泵流量也相当, 因此, 这表明机组能效

出现了劣化. 根据公式(4)和公式(5), 计算 2012 年 12 月份的机组的冷凝器/蒸发器的 KF 值是 301.2/408.1 kW/K, 2014 年 1 月份的机组的冷凝器/蒸发器的 KF 值是 185.2 /396.2 kW/K, 结果显示冷凝器的换热性能下降了 38.5%, 蒸发器的换热性能基本无下降. 根据文献[13]提出的压缩机性能诊断方法, 计算发现该热泵机组的压缩机性能未劣化. 因此, 机组能效下降的原因主要由冷凝器换热性能劣化引起, 建议对冷凝器进行清洗等维护工作.

3.2 各影响因素对机组能效的影响规律

(1) 机组容量对机组能效的影响规律

该地下水源热泵机组有两台采用四段容量调节方式的压缩机, 即 100%—75%—50%—25%, 其中 25% 为启动过程. 根据 2013 年 1 月份的监测数据计算不同机组容量下的机组/系统 COP 和机组制热量/耗功率, 结果见表 5. 表 5 表明机组/系统 COP 随机组容量减小而单调下降; 机组容量减小 12.5%, 制热量平均下降 12.5%, 耗功率平均下降 7.5%, 机组 COP 平均下降 5.3%. 制热量随机组容量减小而下降的速率大于耗功率, 这导致机组 COP 随机组容量减小而下降.

(2) 相同机组容量下的双压缩机的不同容量组合对机组能效的影响规律

根据表 5, 在相同的机组容量下, 两台压缩机在不同容量组合下的机组 COP 与耗功率不同. 当机组容量是 75% 时, 选择两台压缩机均 75% 容量运行要比一台满容量运行, 另一台 50% 容量运行节电约 1.6%; 当机组容量是 50% 时, 选择压缩机一台满容量运行, 另一台不运行要比两台均 50% 容量运行节电约 25%. 这是因为机组在部分负荷率下的能效是下降的, 且负荷率越低, 机组能效下降越严重.

表 5 不同机组容量下机组/系统 COP 和机组制热量/耗功率
Tab. 5 Unit/system COP , heating capacity and power consumption under different capacities of unit

机组容量	压缩机 1 容量	压缩机 2 容量	机组 COP	系统 COP	机组制热量/kW	机组耗功率/kW
100%	100%	100%	5.17	3.96	1 441	280
87.5%	100%	75%	4.72	3.58	1 268	269
75%	75%	75%	4.62	3.44	1 167	253
	100%	50%	4.55	3.47	1 170	257
62.5%	75%	50%	4.34	3.16	1 010	235
50%	50%	50%	3.91	2.84	875	224
	100%	0%	5.10	3.32	840	168

(3) 负荷侧进机组水温对机组能效的影响

根据 2014 年 1 月 17 日的监测数据来分析负荷

侧进机组的水温对机组能效的影响. 这一天的负荷侧进出机组的水温变化见图 4. 由图 4, 负荷侧进出机组的水温在开主机后的 5 h 内都是上升的, 这是因为主机设定在负荷侧出机组水温超过 42 °C 时卸载, 低于 40 °C 时加载. 所以在负荷侧出机组水温没达到 42 °C 时, 机组一直满容量运行; 当机组的制热量大于辐射末端散热量时, 负荷侧进出机组的水温将不断上升, 直到卸载温度, 之后负荷侧出机组水温维持在 40~42 °C 之间. 一天中机组吸热量、制热量和耗功率、机组 COP 、冷凝温度和蒸发温度的变化分别见图 5、图 6 和图 7. 由图 4 与图 5, 在主机开启 5 h 内, 随着负荷侧进机组水温不断上升, 制热量基本不变, 吸热量不断下降, 耗功率不断上升, 造成图 6 中显示的机组 COP 不断下降的结果. 这是因为机组固定在满容量运行时的制热量不变, 负荷侧进出机组的水温的上升导致图 7 示的机组的冷凝温度上升, 又蒸发温度基本不变, 故导致机组的耗功率上升, 又由于能量平衡, 所以蒸发器的吸热量必然下降. 当负荷侧进出机组水温相对稳定后, 机组制热量、吸热量和耗功率的波动都是由机组卸载与加载引起的. 根据计算, 负荷侧进机组水温每升高 1 °C, 机组耗功率升高 2%, 机组 COP 下降 1.3%. 由此来看, 设定机组加载与卸载的温度值对机组的能耗非常重要. 在满足房间负荷需求的情况下, 设定温度值越低, 机组能效越高. 测试这一天的房

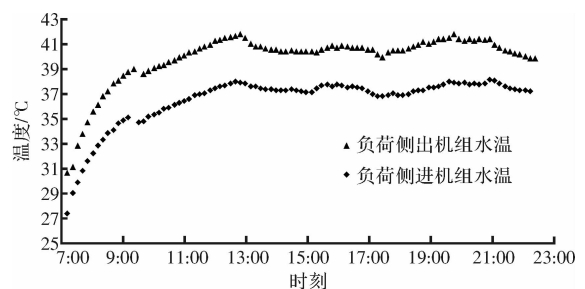


图 4 负荷侧进出机组的水温随时间的变化

Fig. 4 Variation of temperature of water entering unit

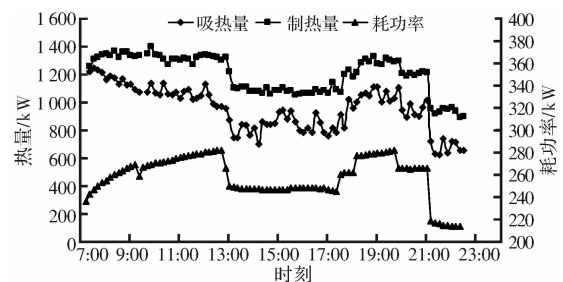


图 5 机组吸热量、制热量和耗功率随时间的变化

Fig. 5 Variation of absorbed heat, generated heat, power consumption of unit

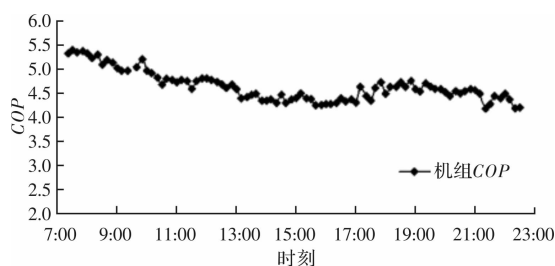


图6 机组 COP 随时间的变化

Fig. 6 Variation of unit COP

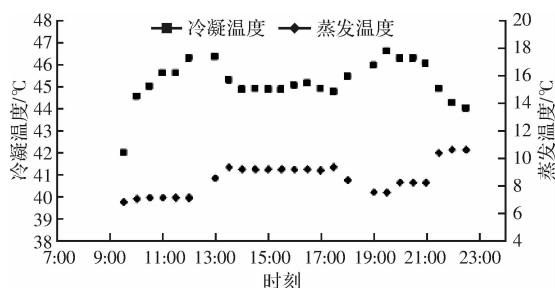


图7 冷凝温度和蒸发温度随时间的变化

Fig. 7 Variation of condensing and evaporating temperature

间温度为 17.9~22℃。而对于地面辐射供暖的住宅,室内设计温度是 16~18℃,所以此机组的加载与卸载温度值设定过高,负荷侧供水温度偏高。

3.3 优化运行策略

根据机组容量、在相同机组容量下的两台压缩机的不同容量组合和负荷侧进机组水温对机组能效的影响规律,可提出如下的优化运行策略:

(1)负荷侧进机组水温受机组加载与卸载的影响较大,应依据房间温度控制机组的加载与卸载。当房间温度高于(低于)设计范围的上限值(下限值)时,控制机组卸载(加载)。

(2)对于有着两台压缩机的机组 COP 随其容量单调变化的机组,设置两台压缩机卸载顺序为:100%+100%→100%+75%→75%+75%→75%+50%→100%+0%→75%+0%→50%+0%→关机;机组加载的顺序为卸载顺序的反方向。根据表 5 显示的测试结果,这样的卸载/加载顺序时的机组耗功率为 1 443.5 kW。而当机组卸载/加载顺序中将 75%+75% 替换成 100%+50% 和将 100%+0% 替换成 50%+50% 时,机组耗功率为 1 503.5 kW(由表 5 计算)。因此前者比后者节电约 4.2%。实际运行中,应选择机组能效高、耗功率低的压缩机容量组合方式。

4 结论

(1)实测结果显示,制热工况下的地下水源热泵机组 COP 在 4.5 以上,系统 COP 在 3.3 以上,

这表明地下水源热泵系统有着较高的供暖能效。但长时间的运行会降低系统的能效,到 2014 年 1 月份,机组 COP 低于 2012 年 12 月份 11.8%。分析显示这主要由冷凝器的换热性能劣化引起。

(2)机组容量、相同机组容量下的两台压缩机的不同容量组合对机组能效影响显著。制热量随机组容量减小而下降的速率大于耗功率,使机组 COP 随机组容量减小而下降。且在相同机组容量下的两台压缩机的不同的容量组合的机组 COP 和耗功率均不同。现场实际运行中,应选择机组能效高、耗功率低的压缩机容量组合方式。

(3)负荷侧进机组水温对机组 COP 有着显著影响。而负荷侧进机组水温主要由机组卸载/加载的温度设定值控制。实际运行中,应根据房间温度控制机组的卸载/加载。而对于该小区的热泵系统,房间温度超出了设计值,显然应降低机组加载/卸载的温度设定值,从而降低负荷侧供水温度。

参考文献 References

- [1] International energy agency. World Energy Outlook (2012) [M]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2012.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告(2015) [R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. Annual report on china building energy efficiency(2015) [R]. Beijing: China Building Industry Press, 2015.
- [3] ZHANG S, ZHANG L, WEI H, et al. Field testing and performance analyses of ground source heat pump systems for residential applications in Hot Summer and Cold Winter area in China[J]. Energy and Buildings, 2016, 133: 615-627.
- [4] ZHAI X Q, CHENG X W, WANG R Z. Heating and cooling performance of a minitype ground source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 1366-1370.
- [5] 龚光彩, 张翔翼, 陆凌, 等. 水源热泵系统设计冬季参考水温确定方法的探讨[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 128-133.
GONG Guangcai, ZHANG Xiangyi, LU Ling, et al. Discussion on method of designed reference water temperature in winter for water source heat pump system [J]. Building Science, 2016, 32(4): 128-133.
- [6] 陈阳, 王智伟, 刘炜, 等. 地下水源热泵热源井设计及施工关键问题研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 87-92.
CHEN Yang, WANG Zhiwei, LIU Wei, et al. Study of key problems of design and construction for heat source well of groundwater heat pump [J]. Building

- Science, 2016, 32(4): 87-92.
- [7] 舒海文, 祝明睿, 曾琦杰, 等. 大连某海水源热泵区域供热系统的实测分析[J]. 暖通空调, 2014, 44(11): 62-66.
SHU Haiwen, ZHU Mingrui, ZENG Qijie, et al. Field measurement and analysis of a seawater source heat pump district heating system in Dalian [J]. HV&AC, 2014, 44(11): 62-66.
- [8] 李峥嵘, 傅强, 钱必华, 等. 上海某办公楼土壤源热泵系统冬季运行特性实测分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 413-417.
LI Zhengrong, FU Qiang, QIAN Bihua, et al. Winter performance analysis for a ground-coupled heat pump system of an office building in Shanghai [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 413-417.
- [9] 雷飞, 胡平放, 黄素逸, 等. 地下水源热泵空调系统的实测以及能效火用分析[J]. 流体机械, 2012, 40(2): 57-62.
LEI Fei, HU Pingfang, HUANG Suyi, et al. Energy and exergy analysis of a ground water heat pump system [J]. Fluid Machinery, 2012, 40(2): 57-62.
- [10] 陈焰华, 於仲义, 胡平放, 等. 武汉地区地源热泵系统的运行测试与分析[J]. 暖通空调, 2009, 39(6): 12-17.
CHEN Yanhua, YU Zhongyi, HU Pingfang, et al. Operation Testing and Analysis of Ground-Source Heat Pump Systems in Wuhan Area [J]. HV&AC, 2009, 39(6): 12-17.
- [11] 中华人民共和国建设部. 地源热泵系统工程技术规范: GB/T50366-2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of the P. R. C. Technical code for ground-source heat pump system: GB/T50366-2009 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [12] WANG Zhanwei, WANG Zhiwei, YAN Zengfeng. The Method of Field Date Collection and Date Validity For Energy Efficiency Diagnosis in Heat Pump Operating. [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014(263): 593-601.
- [13] WANG Zhiwei, WANG Zhanwei, YAN Zengfeng. A Fault Diagnosis Model and its Application in Chiller Operating [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 294: 1851-1856.
- (编辑 桂智刚)

(上接第 117 页)

- [10] 任云英. 21 世纪关中农耕地区乡镇生态社区建设的意义及其展望[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2000, 32(2): 147-150.
REN Yunying. Significance and prospect in building up mid-Shaanxi rural ecological community [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2000, 32(2): 147-150.
- [11] 徐学选, 穆兴民, 王文龙. 黄土高原(陕西部分)雨水资源化潜力分析[J]. 资源科学, 2000(1): 31-34.
Preliminary analysis of rainwater resourcing in part of loess plateau (Shaanxi portion) [J]. J. Resources Science, 2000(1): 31-34.
- [12] STOKES Alexia. Soil bio-and eco-engineering in China: past experience and future priorities [J]. J. Ecological Engineering, 2010, 36(3): 247-257.
- [13] 车伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
CHE Wu, LI Junqi. Technology and Management of Urban Rainwater Utilization [M]. Beijing: Chinese Architecture Industry Press, 2006.
- [14] 张天曾. 黄土高原论纲 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 1993.
ZHANG Tianzeng. Contention of key issues in China's loess plateau [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1993.
- (编辑 吴海西)