

文章编号:1673-9469(2023)04-0082-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.012

中深层地热+多能互补供热系统在冀南某大学的应用研究

牛国庆^{1,2}, 许超³, 鲍玲玲^{1,2*}, 刘俊青³, 郭海明³, 刘伟⁴

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省暖通空调工程技术创新中心, 河北 邯郸 056038;
3. 中国煤炭地质总局水文地质局, 河北 邯郸 056004; 4. 河北省科学院能源研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 为解决传统单一供热形式能源利用效率较低, 环境与经济方面存在诸多不足等问题, 考虑将可再生能源的绿色可持续性与常规能源的稳定性进行有机结合, 以冀南地区某大学校区中深层地热+多能互补供热项目为例, 介绍了该项目概况、供能方案以及能源站建设, 并对系统运行与测试数据进行了整理分析。结果表明: 该系统运行效果良好, 年节省标准煤 20 860 t, 年减排二氧化碳 54 650 t, 减排硫化物 175 t, 减排氮氧化物 154 t, 减排废渣约 210 t, 经济环境效益显著。

关键词: 地热能; 多能互补; 能源站; 经济环境效益

中图分类号: TU83

文献标识码: A

Study on Application of Mid-deep Geothermal+Multi-energy Complementary Heating System in a University in Southern Hebei

NIU Guoqing^{1,2}, XU Chao³, BAO Lingling^{1,2*}, LIU Junqing³, GUO Haiming³, LIU Wei⁴

(1. School of Energy and Environment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;
2. Hebei HVAC Engineering Technology Innovation Center, Handan, Hebei 056038, China;
3. Bureau of Hydrogeology, General Administration of Coal Geology of China, Handan, Hebei 056004, China;
4. Energy Research Institute of Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

Abstract: In order to solve the problems of low energy utilization efficiency and many shortcomings in environmental and economic aspects of traditional single heating forms, it is considered to organically combine the green sustainability of renewable energy with the stability of conventional energy. Taking a deep geothermal energy+multi energy complementary heating project in a university campus in southern Hebei as an example, the project overview, energy supply plan, and energy station construction were introduced, and the system operation and testing data were organized and analyzed. The results show that the system operates well, saving 20 860 tons of standard coal annually, reducing 54 650 tons of carbon dioxide annually, reducing 175 tons of sulfides, 154 tons of nitrogen oxides, and approximately 210 tons of waste residue. The economic and environmental benefits are significant.

Key words: geothermal energy; multi-energy complementation; energy station; economic and environmental benefits

目前,我国以燃煤和燃气锅炉为主的供热形式,存在能源高质低用,季节峰谷问题突出,供能形式单一,碳排放量大等问题^[1]。寻求一种既能满足不断变化的能源供应结构和用户需求,又能促进能源系统资源高效利用、低碳、环保、经济的多能源互补分布式能源系统,已成为未来能源发

展的主要方向^[2]。因地制宜地利用当地的可再生能源,提高清洁能源占比的供能方式已成为缓解能源与环境问题的必由趋势^[3]。建筑作为终端能源消费的重要载体,其能耗是全社会能耗的重要组成部分^[4]。冬季供暖和生产热水是建筑能源需求中最重要的能源消耗^[5]。可再生能源的利用和

收稿日期:2023-04-07

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E202002052);河北省科学院重点研发计划(22702)

作者简介:牛国庆(1998-),男,山东临沂人,硕士研究生,从事中深层地热资源利用方面的研究。

* 通讯作者:鲍玲玲(1982-),女,河北藁城人,博士,教授,从事传热传质理论及应用研究、中深层地热资源利用等方面研究。

开发是建筑行业节能和减少碳排放的关键^[6]。然而,可再生能源具有间歇性和不稳定的性质。将可再生能源的绿色性与常规能源的稳定性相结合是解决这一问题的有效方法^[7]。煤炭、天然气等能源碳排放量较高、储量有限;太阳能、风能等可再生能源对环境友好,但受环境影响较大;地热能作为可再生能源具有储量丰富且不受天气影响的优势,采用地热能与其他能源联合供暖方式,利用多能互补的运行策略,改善能源供给侧与需求侧在时间空间不均问题,提高能源利用率^[8]。Ma等^[9]对多能源互补供暖系统的研究表明:与传统的集中供暖系统相比,其节能率约为30%。

在地热条件良好的地区,因地制宜采用地热能+多能互补的供暖模式,既可减少长距离输送过程中的能源损耗与输送设施投资,实现能源的就地生产与使用,又可减少煤炭等化石能源的消耗,减少碳排放。本文以冀南地区某大学中深层地热+多能互补联合供热工程为例,介绍其工程概况、总体规划与实施方案,并评估其经济环境效益,以期多能互补综合供暖系统研究提供参考。

1 项目概况

该项目为大学校区供热工程,建设有3个能源站,其中1号能源站采用燃气锅炉供热,3号能源站采用中深层U型地热井技术,配以燃气锅炉为补充,4号能源站利用浅层地热冬季供暖夏季制冷。生活热水系统供应洗浴用水量约410 t/d,采用太阳能+污水源+燃气锅炉供应,满足4个学生社区洗浴热水需求。总投资约1.2亿,2019年9月全部投入运行,项目计划运营20年。

2 供热方案

2.1 能源设计

该大学校区占地面积较大,建筑体分区集中,位于安阳—邯郸断裂东盘,本区地热田属于典型的沉积盆地型,第四系覆盖层下发育有中上元古界岩溶裂隙热储,古近系东营—沙河街裂隙热储,寒武—奥陶系岩溶裂隙热储,新近系明化镇—馆陶组热储等热储层^[10]。地热条件较好,中深层地热较浅层地热温度更高、单井取热量更大、占地面积更小,在负荷较大、面积有限的供暖区以采用中深层地热“取热不取水”的技术为主,其他能源作

为补充,是一种高效环保的供暖方式;学校图书馆周边面积较大,可大量埋设浅层埋管利用浅层地热对周边建筑进行清洁供暖;最后利用燃气锅炉对剩余建筑区进行供暖补充。此外,学校师生3万余人,洗浴用水量大,洗浴污水中存在大量低品位余热,利用污水源热泵进行余热回收利用,与太阳能互为补充,以燃气锅炉作为备用热源供应热水。具体供热负荷及能源方案如表1。

表1 供热负荷及能源方案
Tab.1 Heating load and energy program

	1号 能源站	3号 能源站	4号 能源站	4个 社区浴室
热负荷/kW	14 000	14 310	15 834	—
洗浴用水/t	—	—	—	410
供热形式	燃气	中深层地热 +燃气	浅层 地热	太阳能+污 水源+燃气

2.2 能源站建设

根据总体规划、分布式实施,按照资源高效利用、低碳、经济原则分区设计建造能源站,因地制宜利用地热能、太阳能等可再生能源,以天然气和洗浴污水余热为补充。如图1所示,各能源站分布式实施,互联互通,形成有机联动、互为补充、相互保障的合理布局。每个社区或学院均采用同程设计,保证水路水力平衡,防止供热死角。

2.2.1 1号能源站

该能源站供暖包括学生公寓、食堂、体育馆、学院楼等建筑,设计日峰值热负荷14 MW。该供暖区位于学校西北,建筑较为密集,采用5台2.8 MW真空燃气锅炉进行供暖,该锅炉采用全预混完全冷凝技术与羽翼式换热管,能明显提升换热管性能,比传统真空锅炉节能20%以上。

2.2.2 3号能源站

该能源站设计日峰值热负荷为14 310 kW,根据建筑使用性质分为三个环路:教学楼环路、学生公寓环路和学生食堂环路。以中深层地源热泵系统为主要热源、以燃气锅炉系统为辅助或备用热源,采用一对中深层地热U型封闭式地热井,该地热井较同轴套管式换热器单井热提取能力更强。钻井时埋入分布式光纤对地层温度进行监测,测得1-1井井下2 000 m处温度为67.8℃,2 125 m处温度超过70℃,2 450 m处温度可达78.3℃以上,地热条件良好。

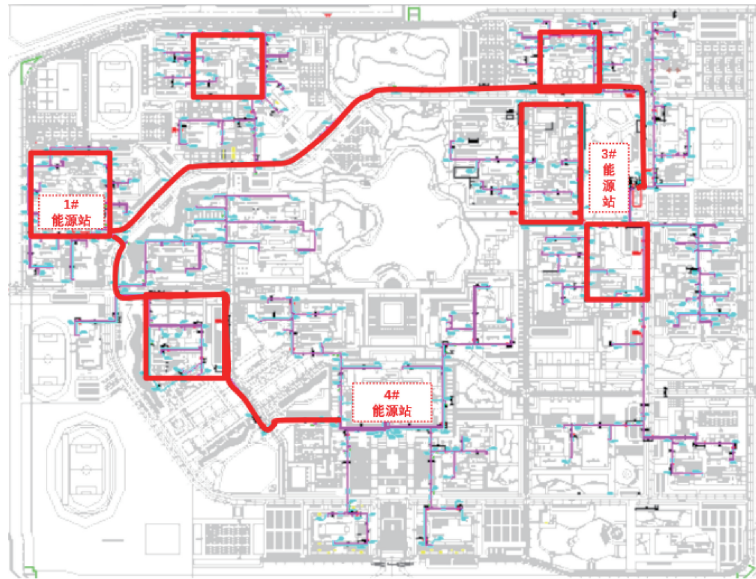


图1 能源站分布图

Fig. 1 Energy station distribution diagram

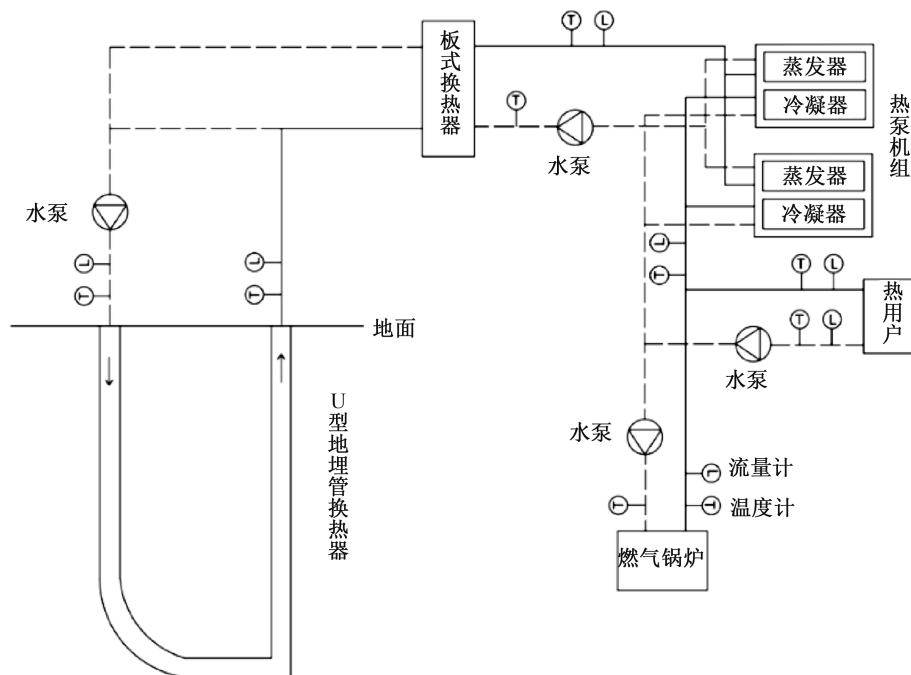


图2 换热系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of heat exchange system

本系统设计了两台高温热泵机组(制热量均6 MW),该系统在设计施工时,将蒸发器和冷凝器分别并联连接,以便在低温负荷下任一机组均可单独运行。另设计两台4.2 MW燃气锅炉(供热量8.4 MW)作为补充热源,预留两台4.2 MW燃气锅炉的位置。换热系统运行时,低温取热流体从注入井注入埋管换热器,在管内与地下热储层换热后变为高温流体从采出井流出,进入板式换热器进行第一次热交换,再

经过高温热泵机组二次换热使水温提升至设定温度后供给到采暖用户,若供热量或供水温度不能满足供暖需求时,利用燃气锅炉作为补充热源,保证供暖稳定。3号能源站换热系统原理见图2。

2.2.3 4号能源站

此能源站冬季日峰值热负荷为15 834 kW,夏季最高冷负荷达到19 979 kW。供暖建筑为行政楼、校图书馆、教学楼等。机房内配备有5台4 200 kW

离心式热泵机组,另配有 5 座冷却塔,夏季可用于承担部分冷负荷^[11],保证夏季制冷量,各热泵机组冷却塔互为备用。

根据《地源热泵系统工程技术规范》^[12]和文献^[13]推荐方法,制冷工况下,地埋管钻孔长度为

$$L_c = \frac{1000Q_c[R_f + R_{pe} + R_b + R_s \times F_c + R_{sp} \times (1 - F_c)] \left(\frac{EER + 1}{EER}\right)}{(t_{max} - t_\infty)} \quad (1)$$

$$F_c = \frac{\text{最热月份运行小时数}}{\text{最热月份天数} \times 24} \quad (2)$$

供热工况下,地埋管钻孔长度为

$$L_h = \frac{1000Q_h[R_f + R_{pe} + R_b + R_s \times F_h + R_{sp} \times (1 - F_h)] \left(\frac{COP - 1}{COP}\right)}{(t_\infty - t_{min})} \quad (3)$$

$$F_h = \frac{\text{最冷月份运行小时数}}{\text{最冷月份天数} \times 24} \quad (4)$$

式中:下标 c,h 分别表示制冷/供热工况; L —所需钻孔总长度,m; Q —热泵机组的额定负荷,kW; EER/COP —制冷/供热性能系数; t_{max}/t_{min} —制冷/制热工况下,地埋管换热器中流体的设计平均温度, $^{\circ}C$; t_∞ —岩土体初始温度, $^{\circ}C$; F —制冷/供热运行系数; $R_f, R_{pe}, R_b, R_s, R_{sp}$ —分别为管内对流换热热阻,管壁热阻,回填材料热阻,地层热阻,附加热阻, $m \cdot K/W$ 。

综合地质条件及经济性选用双 U 型 De25 管,深度 130 m,地埋侧换热孔数为 3 300 眼,另配备 2 套冷却塔,下入测温光纤,监测地温变化情况,为智慧节能控制系统提供基础参数。

2.3 热水供应系统

学校共有 4 个学生公寓社区,每个社区设有一

座浴室,洗浴热水热源为太阳能+污水源+燃气(备用),其中把浴室洗浴污水作为污水源热泵的热源进行余热利用,浴室淋浴设计温度为 40 $^{\circ}C$,热水箱设计水温为 42 $^{\circ}C$,日均用水约 410 t,开放时间为每天 15:00 至 22:00,可满足 3 万师生的洗浴热水需求。

下面以一社区浴室为例,太阳能集热板布置在楼顶,面积约为 514.6 m^2 ,太阳能集热水箱有效容积为 20 m^3 ,安置在 3 楼的热水箱间内;配套 2 座恒温水箱,有效容积为 40 m^3 ,同样集中设置于 3 楼。太阳能集热水箱设计终止温度为 40 $^{\circ}C$;采用强制循环系统,配备两台功率为 5.5 kW,流量为 40 m^3/h 的循环水泵用以定温循环;污水源热泵机组设计制热量为 320 kW,功率为 66.2 kW,配置 1 个污水池蓄存污水,有效容积为 60 m^3 ,污水池的平均温度为 26.3 $^{\circ}C$,排出污水的平均温度为 19.6 $^{\circ}C$;燃气锅炉额定热水产量为 60 m^3/h ,安置于一楼锅炉房内,采用变频设备供应热水^[14]。系统原理见图 3。

一方面,污水池中的洗浴污水经过过滤器过滤掉毛发等杂物后进入板式换热器,利用污水余热对自来水进行余热后进入污水源热泵蒸发器,经压缩机做功将污水余量传给预热后的自来水,使其升温到设定温度;另一方面,太阳能集热器利用太阳能加热自来水至设定温度,承担部分热水供应,当太阳能日辐照量不足以供给足够热水时,燃气锅炉作为热源补充,保证洗浴热水足量稳定供应。

2.4 能源管理系统

利用智慧能源管理系统,通过现场采集、云服

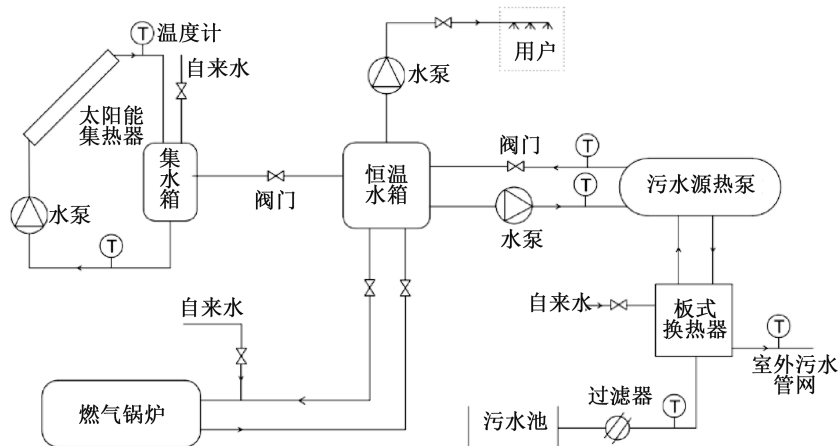


图 3 供热系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the heating system

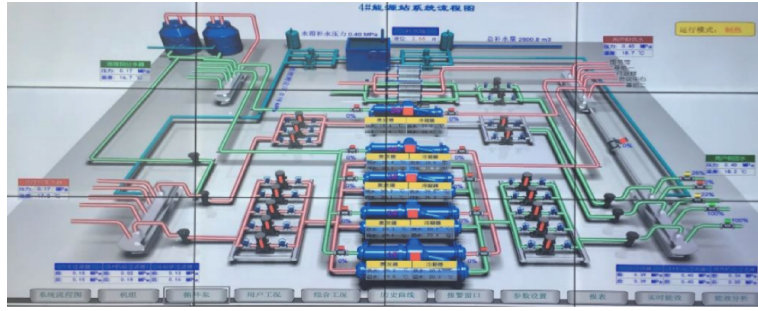


图4 系统监测平台

Fig. 4 System monitoring platform

务平台、监测平台(图4),实现自动化远程监控,手机 App 即可远程操纵,随时可了解系统运行状况及故障报警。以末端负荷、冷热源、输入功率的合理匹配,实现热泵系统的动态控制与管理,提高热泵系统的整体能效,达到系统节能的总体目标。

3 系统运行测试

3.1 中深层地热+燃气系统

本供暖系统接入智慧能源系统,对系统各环节运行进行实时监测,这里选取3号能源站2021年2月系统运行监测数据进行分析,选取供暖中期数据分析,此时系统较为稳定。图5为地热井进出水温度与进出水温差随时间变化图,可以看出系统运行期间,地热井进口水温稳定在 $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,出水温度维持在 $20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,地热井进出水温差最高 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低 $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温差 $8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水温度稳定但出水温度和进水温差随时间推移呈现下降趋势,这是因为经过近两个月的取热,井下温度不能及时恢复,会出现逐渐衰减的趋势,导致取热温差减小,出水温度降低,供暖期间依据用热负荷采取间歇运行策略可有效改善温度衰减状况,另外中深层地热相较于浅层地热热储温度更高,热恢复性更好,经过近8个月的非采暖期自然恢复,热储易恢复至较为理想状态。

图6为地热井换热量与系统COP随时间变化图,可以看出,随着供暖时间增加,地热井换热量呈现下降趋势,这是因为井下热储温度衰减,储层侧与埋管侧温差逐渐减小,致使取热量逐渐减小。此时间段内系统COP最低为3.2,最高达到4,虽有波动但平均值仍为3.5,性能良好。

3.2 浅层地热系统

4号能源站运行数据如图7所示,系统冬季运

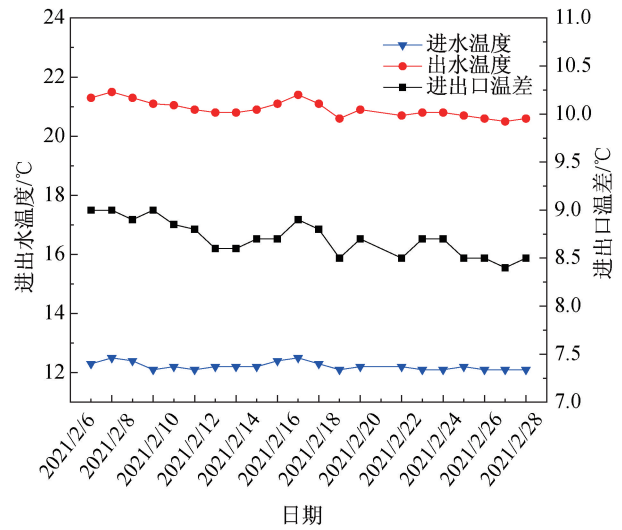


图5 进出口温度与进出口温差随时间变化图

Fig. 5 Time-dependent diagram of inlet and outlet temperature and temperature difference

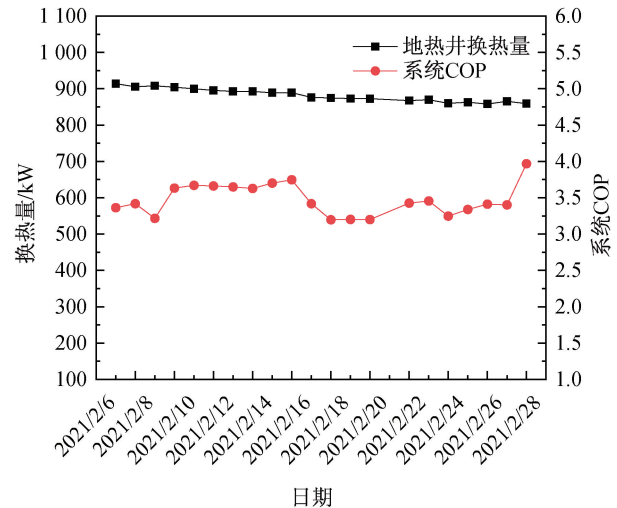


图6 地热井换热量与系统COP随时间变化图

Fig. 6 Time-dependent diagram of heat transfer in geothermal well and COP of the system

行时,此时间段内地源侧供水温度为 $10.7\sim 13.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温度为 $12.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,回水温度为 $8.3\sim 10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平

均温度为 9.1 ℃;用户侧供水温度为 41.1~42 ℃,平均稳定在 41.8 ℃,回水温度为 36.5~39.4 ℃,平均温度为 37.4 ℃。可以看出,地源侧供回水温差在 3 ℃左右,用户侧供回水温差基本稳定在 3.9 ℃。前期用户侧供回水温度呈现上升趋势,地源侧供回水温度有下降趋势,这是因为采暖季前期地上环境温度随季节加深逐渐降低,需提高地理管供水温度获取更多热量满足供暖要求,随着取热时间及取热量增加,地下热储层温度恢复能力有限,温度逐渐降低进而取热量减少,导致地理管出口温度降低。经数据统计分析,该系统经过夏季制冷冬季供暖运行后,冷热不平衡差 4.3%,基本平衡,效果良好。

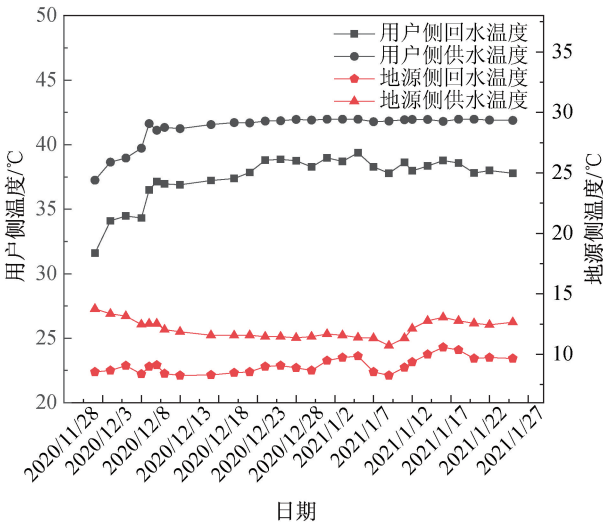


图 7 冬季运行供、回水温度

Fig. 7 Operating water supply and return water temperature in winter

3.3 太阳能+污水源+燃气系统

该系统于 2020 年至 2021 年对污水源热泵系统和太阳能集热系统进行现场测试,图 8 为 2020 年 10 月 2 日到 2020 年 10 月 27 日污水源热泵机组 COP 与系统 COP,测试与计算结果表明,系统 COP 平均在 3.6,污水源热泵机组 COP 平均在 4.8。当太阳能日辐照量 $\phi \geq 18 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,太阳能集热系统单独运行即可满足热水供应;当太阳能日辐照量 $8 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \leq \phi < 18 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,需开启污水源热泵配合太阳能集热系统进行供热;当太阳能日辐照量 $\phi \leq 8 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,需采用太阳能集热系统+污水源热泵再以燃气锅炉为补充才能供应足量的洗浴用水。

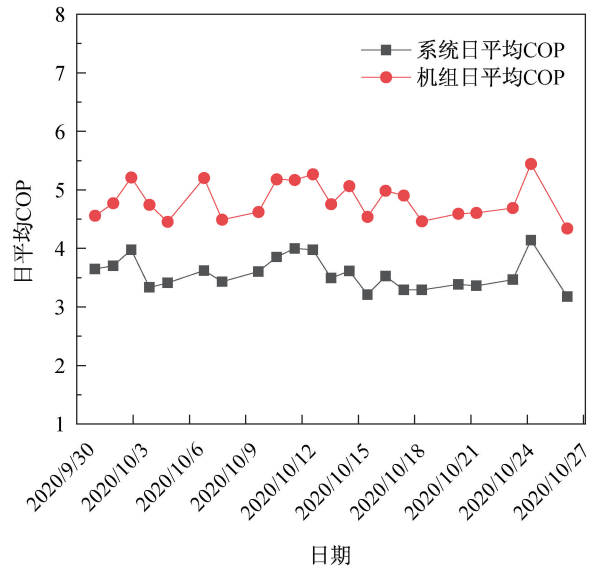


图 8 日平均 COP 变化图

Fig. 8 Daily average COP variation chart

4 经济环境效益

4.1 经济性分析

根据本系统实际供暖情况,计算统计一个供暖季的采暖费用,包括运行费用和平均运营成本,折合成每平方米费用如表 2,其中 4 号能源站为供暖制冷总费用,可以看出在不考虑初投资的情况下,3 号能源站采用的中深层地热+燃气锅炉供热的形式相较传统燃气锅炉供热每平方米费用节省约 20.95%,一个供暖季可节约 88.3 万元费用;采用浅层地热形式不仅可用于冬季供暖夏季也可用于制冷,供暖和制冷的总费用相较燃气锅炉每平方米供暖费用仍可节省 0.68%。

表 2 供暖经济性分析

Tab. 2 Economic analysis of heating

	1 号能源站	3 号能源站	4 号能源站
供暖形式	燃气	中深层地热+燃气	浅层地热
运行费用/元/m ²	8.8	7.2	9.5
平均运营成本/元/m ²	6	4.5	5.2
合计/元/m ²	14.8	11.7	14.7

四个浴室设备按日耗电量 1 200 kW · h 计算,电费取 0.5 元/kW · h,每学年系统运行费用约为 16.2 万元,如果采用燃气锅炉制备热水,锅炉热效率按 90% 计算,每学年需要天然气 111 104 Nm³,天然气价格取 3 元/Nm³,年运行费用约为 33.3 万元,采用太阳能+污水余热制备热水,理想状态下,每年可节省 17.1 万元费用。由此可见,采用多能互补的供热形式经济效益显著。

4.2 环境效益分析

相较传统燃煤或燃气锅炉供暖,采用中深层地热+多能互补形式供热,以可再生能源为主,一次能源为辅,并对污水余热进行回收利用,在负荷集中区就近建设能源站,节能减排的同时减少了长距离输送设施投资与热量损耗。

浴室原设计采用空气源热泵+燃气锅炉方式供热,每制备 1 t 热水需耗能折合标准煤 5.47 kg,利用太阳能+污水源热泵+燃气锅炉的方案,只需耗能折合标准煤 2.11 kg,每吨节约标准煤 3.36 kg。各能源站节能结果如表 3,可以得到本项目总年节省标准煤 20 860 t。进一步计算减排效益如表 4,可得年减排二氧化碳 54 650 t,减排硫化物 175 t,减排氮氧化物 154 t,减排废渣约 210 t,环境效益显著。

表 3 项目节省标准煤汇总表

	1号能源站	3号能源站	4号能源站	4个社区浴室
供热形式	燃气	中深层地热+燃气	浅层地热	太阳能+污水源+燃气
年节省标煤/t	5 720	7 260	7 100	780
合计节省标煤/t	20 860			

表 4 节能减排效益

年节省标煤/t	CO ₂ 减排量/t	SO ₂ 减排量/t	NO _x 减排量/t	废渣减排量/t
20 860	54 650	175	154	210

5 结论

1)中深层 U 型地热井进出水平均温差 8.7 °C,系统 COP 在 3.5 左右;4 号能源站冷热不平衡率仅为 4.3%,基本平衡;浴室污水源热泵机组 COP 平均在 4.8 左右,系统 COP 平均在 3.6 左右,各系统性能良好。

2)3 号能源站较传统燃气锅炉供热每平方米费用节省约 20.95%,一个供暖季可节约 88.3 万元费用;4 号能源站冬季供暖和夏季制冷的总费用相较燃气锅炉每平方米供暖费用仍可节省 0.68%;浴室热水系统较燃气锅炉供热每学年可节省运行费用 17.1 万元,此供热方案经济效益显著。

3)本项目年节省标准煤 20 860 t,年减排二氧化碳 54 650 t,减排硫化物 175 t,减排氮氧化物

154 t,减排废渣约 210 t,环境效益显著。

参考文献:

- [1] 金红光,何雅玲,杨勇平,等. 分布式能源中的基础科学问题[J]. 中国科学基金, 2020, 34(03): 266-271.
- [2] LIU C, WANG H, WANG Z Y, et al. Research on Life Cycle Low Carbon Optimization Method of Multi-energy Complementary Distributed Energy System: A Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 336: 130380.
- [3] 屈小云,吴鸣,李奇,等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 153-163.
- [4] 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 2021 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [5] ZHANG H, HAN Z, YANG L, et al. Analysis of Influence of the Length of Ground Heat Exchangers on the Operation Characteristics and Economy of Ground Source Heat Pumps[J]. Energy and Built Environment, 2020, 2(2).
- [6] REN F, WANG J, ZHU S, et al. Multi-objective Optimization of Combined Cooling, Heating and Power System Integrated with Solar and Geothermal Energies[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 197: 111866.
- [7] LIU Z, CUI Y, WANG J, et al. Multi-objective Optimization of Multi-energy Complementary Integrated Energy Systems Considering Load Prediction and Renewable Energy Production Uncertainties [J]. Energy, 2022, 254: 124399.
- [8] 张海静,杨雍琦,赵昕,等. 计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 141-150.
- [9] MA H, CONG L, LU W, et al. Experimental Study of a Multi-energy Complementary Heating System Based on a Solar-groundwater Heat Pump Unit[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109: 718-726.
- [10] 李振兴,李文静,翟丽娟,等. 中浅层同轴套管式换热器的传热能力分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(09): 152-161.
- [11] 杨永利,刘俊青,李鹏. 地源热泵系统在某高校中的应用研究[J]. 区域供热, 2022(04): 34-38.
- [12] 中华人民共和国建设部. 地源热泵系统工程技术规范: GB 50336—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 7.
- [13] 田慧峰,王鹏英,曹伟武. 垂直 U 形埋管换热器长度计算方法研究[J]. 制冷学报, 2008(05): 28-32.
- [14] 鲍玲玲,魏莹,刘俊青,等. 冀南某高校浴室用太阳能+污水源热泵系统运行性能分析[J]. 建筑科学, 2022, 38(10): 36-43.

(责任编辑 周雪梅)