

太阳能与中深层地岩热多能互补 供热技术的探索和研究

田斌守^{1,2*}, 邵继新¹, 杨海鸿¹, 司双龙¹, 蔺瑞山¹, 夏斌¹

(1. 甘肃省建材科研设计院有限责任公司, 兰州 730020; 2. 甘肃省绿色建筑技术重点实验室, 兰州 730020)

摘要: 太阳能和地热能储量巨大, 是具有极大开发应用潜力的低碳、清洁能源; 中深层地岩热供热技术取热不取水, 属于可开采应用的低品位地热能资源。将太阳能集热系统与中深层地岩热供热系统相结合, 利用兰州地区的太阳能资源, 设计建设了1套太阳能集热面积为202 m², 单口中深层地岩热换热井直径为200 mm、深度为2500 m的太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统, 在连续取热、地温梯度为30 ℃/km的条件下模拟了该换热井的供热情况及地岩温度恢复情况; 然后对该多能互补供热系统的控制系统进行了优化设计, 提出了6种运行模式; 最后对该多能互补供热系统在采暖季的实际运行情况进行了测试分析。研究结果显示: 1) 太阳能集热系统的理论全年得热量为133429 kWh, 其采暖季得热量占其全年得热量的31.6%; 2) 中深层地岩热换热井的热影响半径约为8 m, 采暖季结束后地岩温度的恢复周期约为120天, 可实现中深层地岩热持续供热; 3) 在采暖季, 该多能互补供热系统中的太阳能集热系统的平均日得热量为307 kWh, 可以为整个多能互补供热系统提供约11%的热量; 4) 多能互补供热系统具有6种运行模式, 可以根据用户端热负荷的变化情况和日照条件进行自动控制, 灵活配置能源, 充分发挥2种能源的优点, 以达到最低供热成本的目的。

关键词: 中深层地岩热; 太阳能; 多能互补; 太阳能集热系统; 可再生能源; 清洁供热

中图分类号: TK513.5/TK529

文献标志码: A

0 引言

在当今能源领域, 开发利用新能源, 逐步降低化石能源的消耗量是大势所趋。近年来, 中国对新能源的开发利用非常重视。据国家统计局公布的数据显示: 2018年, 中国能源生产总量为37.7亿吨标准煤当量, 其中, 煤炭的占比为69.3%, 石油的占比为7.2%, 天然气的占比为5.5%^[1]。据清华大学建筑节能研究中心对中国建筑领域用能及二氧化碳排放量的核算结果显示: 2018年, 建筑建造和建筑运行用能占全社会总能耗的36%, 其中, 建筑运行用能占全社会

总能耗的22%, 同时建筑运行用能的二氧化碳排放量在全社会总二氧化碳排放量中的占比达到了20%^[2]。另外, 根据姜洪殿等^[3]的研究结果, 2020年中国一次能源消费总量将达到3503.1百万吨油当量(约50亿吨标准煤当量), 新能源消费总量将达到690.5百万吨油当量。

中国能源形势很严峻, 新能源具有强劲发展势头, 必将成为能源生力军。在新能源应用中, 太阳能和地热能可在建筑用能领域具有极大的应用潜力。

太阳能热利用在建筑领域的应用历史较长,

收稿日期: 2021-02-25

基金项目: 中央引导地方科技发展计划——兰白试验区太阳能及地热能科技创新服务平台; 甘肃省建设科技攻关项目——非采暖季太阳能补充地岩热的应用示范研究(JK2018-30); 甘肃省建设科技项目——地热能开发利用对促进我省清洁能源产业发展的研究(JK2020-36)

通信作者: 田斌守(1968—), 男, 硕士、教授级高级工程师, 主要从事绿色建筑、建筑节能、新材料、可再生能源应用等方面的研究与推广应用工作。lztbs@126.com

在主动式技术、被动式技术方面都有一定的积累和较丰富的应用成果。太阳能具有普遍性,有阳光普照的地方,就可以利用太阳能;但同时太阳能也存在能量密度低的问题,太阳入射到地球大气层外表面的太阳辐照度为 1353 W/m^2 ,而地面上太阳辐照度小于 1000 W/m^2 。另外,太阳能还存在不稳定、不连续的问题,主要表现为:日夜更替的昼夜不平衡、四时变换的季节不平衡、阴晴雨雪的天气不确定性。而建筑等用热末端要求供热稳定、连续,因此为了解决稳定供热问题,在建筑等用热末端使用太阳能时必须增加储热环节,但这将会使整个供热系统变得复杂,导致投资增加,且运行费用提高。

根据地热能的赋存形式,通常将地热能分为水热型、岩热型、浅层地热型和深层地热型等。基于地温梯度原理,在地表以下 2500 m 深处的岩土层温度约为 $70 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$,此处岩土层所蓄积的热能即为中深层地岩热。而地岩热属于岩热型地热能中的一种,与水热型地热能有所区别,本文仅针对地岩热进行研究。地岩热普遍存在,几乎任何地方都有,资源量巨大;其温度比干热岩低,可以称为低品位地热能,可广泛应用于建筑供暖、设施农业、农产品加工、食品加工、工业干燥等领域。

近年来,科学合理地开发中深层地岩热技术受到了业界关注。中国科学院地质与地球物理研究所的孔彦龙等^[4]研究了深井换热技术的原理,并对其单井换热量进行了评估,研究结果显示:间歇换热可实现中深层地岩热 200 W/m 的稳定、连续开采,且地温梯度对换热量有较为显著的影响。清华大学的邓杰文等^[5]研究了中深层地岩热技术的利用对环境的影响及持续采热的效果,研究表明:中深层地岩热技术无需提取地下水,对地下水资源、地下环境无影响;热源侧取热于地下的中深层地岩热,其热量直接来自于地球内部熔融岩浆和放射性物质的衰变过程,有源源不断的热量补充到中深层地岩热中,能够从根本上

解决补热问题,因此热源侧换热器单位长度取热量可以达到常规地源热泵系统的 $2.0 \sim 3.6$ 倍。

目前,在建筑供暖领域已分别有地热能和太阳能的应用研究,但针对中深层地岩热和太阳能联合应用的系统性研究还未见报道。

在此背景下,为了充分利用兰州地区丰富的太阳能资源和地热资源,本文将太阳能集热系统与中深层地岩热供热系统相结合,开发了太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统。以兰州地区的太阳能资源为基础,在连续取热、地温梯度为 $30 \text{ }^\circ\text{C/km}$ 的条件下模拟了单口直径为 200 mm 、深度为 2500 m 的中深层地岩热换热井的供热情况及地岩温度恢复情况,并对太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的控制系统进行了优化设计,提出了 6 种运行模式,以结合太阳能和地热能的优势^[6],使投资效益和运行费用达到最优;最后实际测试分析了采暖季该多能互补供热系统的运行情况。

1 太阳能集热系统的设计开发

1.1 项目所在地的基础资料

太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的项目所在地为甘肃省兰州市,地理位置为 36.05°N 、 103.88°E ,海拔高度为 1517.2 m 。兰州市的年平均温度为 $9.8 \text{ }^\circ\text{C}$,采暖季室外计算温度为 $-9.0 \text{ }^\circ\text{C}$;冬季时,室外相对湿度为 54% ,室外平均风速为 0.5 m/s ,最大冻土深度为 98 cm ,室外大气压力为 85.15 kPa ;夏季时,室外大气压力为 84.32 kPa 。

1.2 当地太阳能资源

兰州市的太阳能资源情况如表 1 所示。表中: T_a 为月平均室外温度; H_t 为水平面上月平均日太阳总辐射量; H_d 为水平面上月平均日太阳散射辐射量; H_b 为水平面上月平均日太阳直射辐射量; H 为当地纬度倾斜面上月平均日太阳总辐射量; H_0 为大气层上界面的月平均日太阳总辐射量; S_m 为月日照小时数; K_t 为大气晴朗指数。

表 1 兰州市的太阳能资源情况

Table 1 Solar energy resources of Lanzhou City

月份	$T_a/^\circ\text{C}$	$H_t/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$H_d/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$H_b/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$H/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$H_\theta/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	S_m/h	K_t
1	-6.9	8.178	4.874	3.305	11.312	17.723	162.2	0.461
2	-2.3	11.655	6.496	5.158	14.789	22.583	185.5	0.516
3	5.2	14.831	8.780	6.051	16.152	29.258	202.0	0.506
4	11.8	18.563	10.458	8.105	18.128	35.670	232.0	0.520
5	16.6	21.208	11.072	10.136	19.216	39.952	253.8	0.531
6	20.3	22.389	10.303	12.086	19.553	41.609	242.3	0.538
7	22.2	20.406	8.811	11.595	18.016	40.629	252.8	0.502
8	21.0	18.994	7.704	11.290	18.151	37.067	248.9	0.515
9	15.8	14.378	7.064	7.314	15.376	31.271	197.7	0.460
10	9.4	12.282	5.916	6.365	15.207	24.447	192.6	0.502
11	1.7	9.214	5.040	4.174	12.600	18.759	180.8	0.491
12	-5.5	7.326	4.439	2.886	10.696	16.180	157.7	0.453

根据表 1 的数据，可以计算得出当地纬度倾斜面上年太阳总辐射量可达到 5754.7 MJ/m^2 ，水平面上年太阳总辐射量可达到 5457.5 MJ/m^2 。由此可知，兰州市的太阳能资源非常丰富，具有太阳能资源利用的巨大优势。

1.3 太阳能集热系统

在本太阳能与中深层地岩热多能互补供热系

统中，太阳能集热系统的初步设计为双盖板平板式太阳能集热器，根据工程条件，太阳能集热器阵列的总集热面积设计为 200 m^2 。根据《民用建筑太阳能热水系统工程技术手册》^[7]，计算整理得到太阳能集热系统的主要参数的取值，具体如表 2 所示；太阳能集热系统的得热量及其时间分布情况如表 3 所示。

表 2 太阳能集热系统的主要参数取值

Table 2 Values of main parameters of solar heat collection system

月份	各月日平均日照小时数/h	太阳能集热器的月均集热效率 η_{cd}	管路和储热水箱的热损失率 η_L	间接系统实际集热面积 $/\text{m}^2$	太阳能集热器数量/块	太阳能集热系统的得热量/kWh
1	5.23	0.50	0.2	202	90	7165
2	6.63	0.52	0.2	202	90	8757
3	6.52	0.55	0.2	202	90	11172
4	7.73	0.57	0.2	202	90	12693
5	8.19	0.59	0.2	202	90	14347
6	8.08	0.60	0.2	202	90	14465
7	8.15	0.61	0.2	202	90	13938
8	8.03	0.61	0.2	202	90	13937
9	6.59	0.59	0.2	202	90	11053
10	6.21	0.56	0.2	202	90	10826
11	6.03	0.53	0.2	202	90	8229
12	5.09	0.50	0.2	202	90	6847

表 3 太阳能集热系统的得热量及其时间分布情况
Table 3 Heat gain of solar heat collection system and its time distribution

参数	数值	占比 /%
理论全年得热量 /kWh	133429	100.0
采暖季得热量 /kWh	42170	31.6
非采暖季得热量 /kWh	91259	68.4

注: 兰州市的采暖季为 11 月 1 日~次年 3 月 31 日

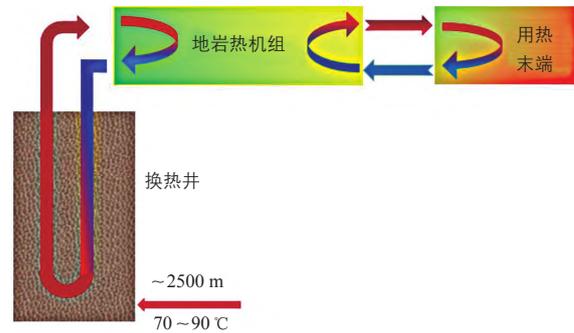
从表 3 可以看出: 太阳能集热系统的理论全年得热量为 133429 kWh, 相当于 16418 千克标准煤的发热量, 集热效果显著; 太阳能集热系统在非采暖季的得热量占其全年得热量的比例为 68.4%, 这部分热量若得不到充分利用, 对于能源和投资都是巨大的浪费。因此, 太阳能集热系统的季节不平衡性需要引起足够的重视。

综上所述, 在进行系统设计时就应考虑太阳能集热系统全年得热量的利用问题。通常, 为了保证太阳能集热系统提供的热量可以满足建筑的冬季采暖, 会使该系统的集热面积过大, 导致非采暖季其得热量得不到利用, 并且还会造成太阳能集热系统过热, 从而影响元器件的寿命。应在综合考虑投资效益、运行费用等因素的基础上, 设计储热单元来储存太阳能集热系统在非采暖季的得热量, 以便更加有效地利用太阳能资源和提高设备利用率。

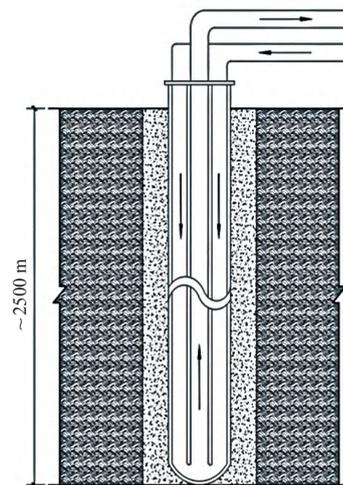
2 中深层地岩热供热系统的设计开发

目前, 开发利用中深层地岩热的技术路线是向地下一定深度处的岩土层钻孔, 并在孔中安装封闭循环的换热装置, 通过专用设备系统向建筑物供热^[8]。中深层地岩热供热系统主要是采用同轴套管换热技术^[4-5]或 U 型管换热技术, 其主要特点是“井下换热、取热不取水”, 这是《地热能开发利用“十三五”规划》^[9]加强研发的关键技术。中深层地岩热供热技术的工作原理示意图如图 1 所示。

由于中深层地岩热供热技术的换热过程中地



a. 中深层地岩热的供热过程原理示意图



b. 同轴套管的换热过程原理示意图

图 1 中深层地岩热供热技术的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of medium-depth strata geothermal heating technology

岩温度会发生变化^[10-11], 因此, 单口井取热的热影响半径的大小, 以及随着取热进程的持续, 地岩温度的恢复情况等成为该技术最受关注的问题。单口井取热的热影响半径的大小决定了井群的布置策略, 取热进程中地岩温度的恢复情况决定了中深层地岩热供热系统持续使用的可行性。综上所述, 需要研究中深层地岩热供热系统的地岩温度在时间和空间上的分布情况。本文所研究的中深层地岩热供热系统采用同轴套管换热技术。中深层地岩热换热井计算参数的设置如表 4、表 5 所示。

采用 CFD 模拟仿真软件进行中深层地岩热换热井的换热模拟计算, 计算条件设置为:

1) 忽略钻孔内部材料 (同轴套管管壁、回填材料等) 热容, 其相比于岩土层热容较小, 将钻孔内部视为稳态传热;

表4 中深层地岩热换热井的物理参数

Table 4 Physical parameters of heat transfer well using medium-depth strata geothermal

参数	数值
钻孔深度 /m	2500
钻孔直径 /m	0.200
同轴套管外管外径 /m	0.178
同轴套管外管内径 /m	0.160
同轴套管内管外径 /m	0.110
同轴套管内管内径 /m	0.090
土壤初始温度 /°C	10
岩石模拟直径 /m	20
地下热扩散率 /(m ² ·s ⁻¹)	1.3
水的循环流量 /(kg·s ⁻¹)	3
大地热流量 /(W·m ⁻²)	0.075
地温梯度 /(°C ·km ⁻¹)	30
入口水温 /°C	5 ~ 35

表5 中深层地岩热换热井的主要热物性参数

Table 5 Main thermophysical parameters of heat transfer well using medium-depth strata geothermal

项目	密度 / (kg·m ⁻³)	比热容 / (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
岩土层	2600	0.7	2.50
回填层	1600	1.5	1.50
保温材料	40	50.0	0.21(PP管)
同轴套管外管	7850	0.5	41.00
同轴套管内管	930	2.4	0.40

- 2) 同轴套管式地埋管换热器内外管的中心线重合, 忽略地下水渗流情况;
- 3) 假设岩土层的热物性均匀, 各地层的干度一致;
- 4) 换热过程连续 (不考虑系统间断运行);
- 5) 传热为准稳态过程, 沿径向一维传热, 忽略轴向传热。

在中深层地岩热换热井实际运行中, 地岩中

的热量源源不断地传递给换热器内的介质, 地岩周围温度受到影响后将会产生变化。本文将中深层地岩热换热井运行过程中, 钻孔径向未受到换热影响的岩土层与钻孔中心的距离定义为热影响半径, 即可通过研究地岩温度沿钻孔径向的分布来确定中深层地岩热换热井的热影响半径。通常将热影响半径之外的地岩温度定义为远场温度。在钻孔直径为 200 mm 的情况下, 中深层地岩热换热井对岩土层的热影响半径的 CFD 模拟结果如图 2 所示, 模拟计算时需要划分网格, 单元高度的岩土层及管内温度分布的模拟结果如图 3 所示。

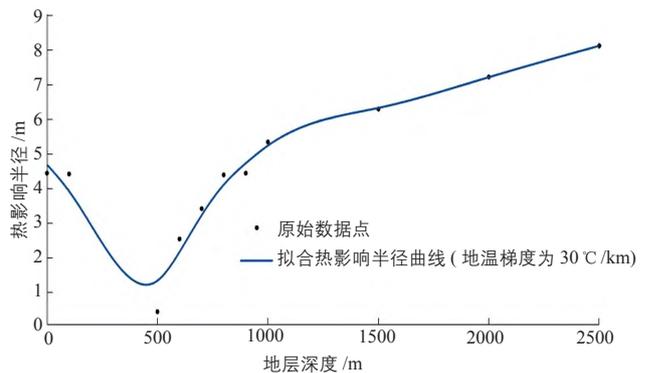


图2 中深层地岩热换热井对岩土层的热影响半径的 CFD 模拟结果

Fig. 2 CFD simulation results of thermal influence radius of heat transfer well using medium-depth strata geothermal on rock soil layer

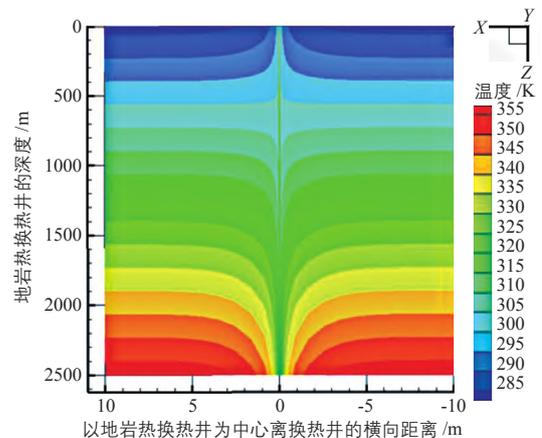


图3 单元高度的岩土层及管内温度分布

Fig. 3 Temperature distribution in rock soil layer and pipe at unit height

从图 2、图 3 可以看出: 中深层地岩热换热井对岩土层的热影响半径约为 8 m, 而且热影响半径会随着地层深度的变化而变化, 呈现出先

减后增的趋势；在地层深度约 500 m 时，热影响半径最小，这是因为中深层地岩热换热技术的充分换热段是在换热井深部，根据地岩温度分布状况，换热井井深 500 m 处刚进入地热增温段，因此该处的地岩温度还比较低。

在换热过程中，同轴套管式换热器中的内管向外流出热水，从外管与内管之间的环隙向下流入冷水。在换热井井深约 500 m 处，内管中的水温高于环隙中的水温，内、外管之间存在热量交换，环隙中的水从内管中获取热量，又向外管传递热量，这样使环隙中的水温与井深 500 m 处岩土层温度之间的温差最小。

在地岩热换热井入口处的流体流速为 1 m/s、流体温度为 24 °C 的条件下，对采暖季时地岩温度分布情况进行模拟，模拟结果如图 4 所示；对采暖季结束后地岩温度的恢复情况进行模拟，模拟结果如图 5 所示。

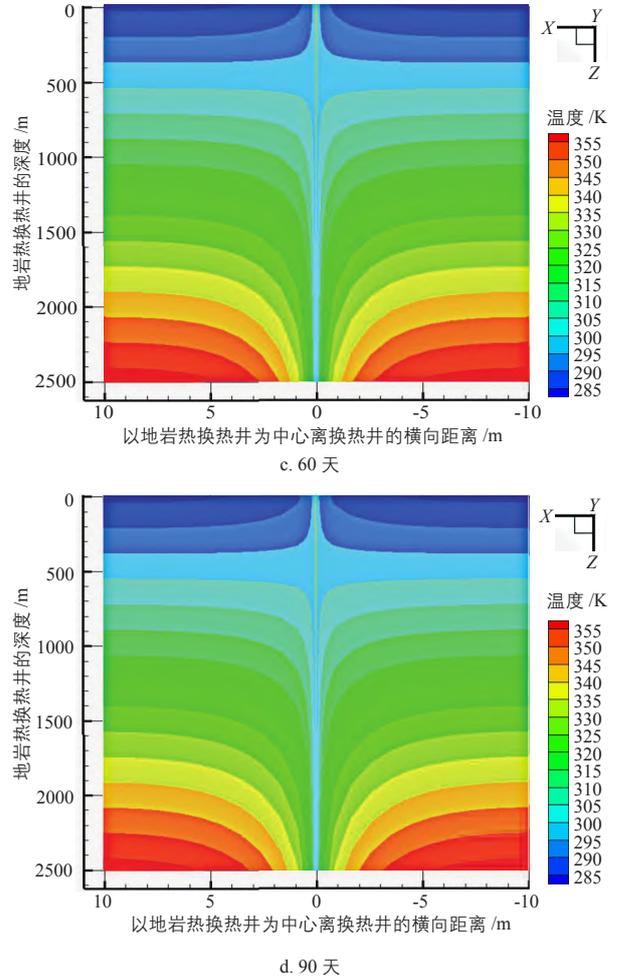
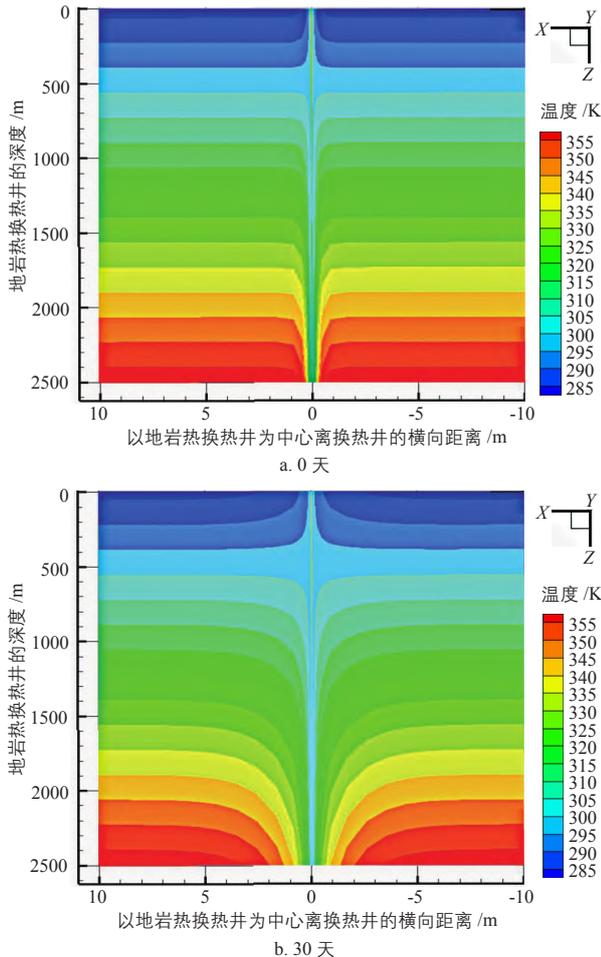
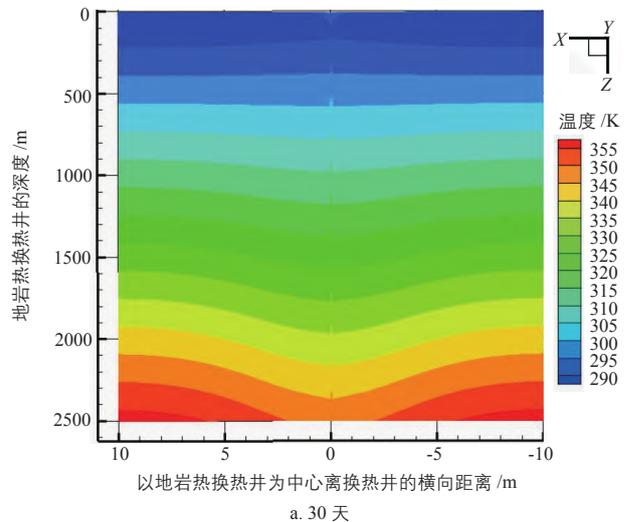


图 4 采暖季时地岩温度分布情况
Fig. 4 Distribution situation of ground rock temperature in heating season

从图 4 可以看出：在采暖季，中深层地岩热供热系统运行约 30 天后，地岩温度达到了较为稳定的状态。



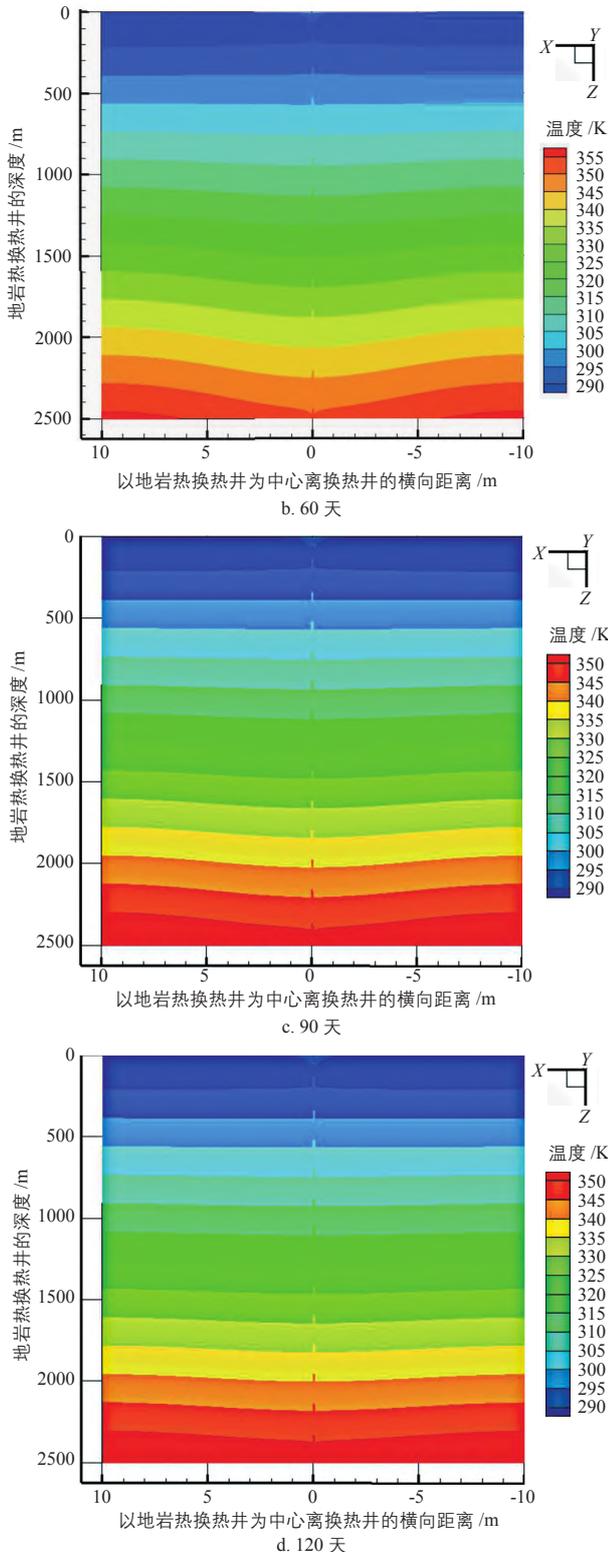


图5 采暖季结束后地岩温度的恢复情况

Fig. 5 Recovery situation of ground rock temperature after the end of heating season

从图5可以看出：采暖季结束后，地岩温度逐渐恢复；且采暖季结束后的第120天时，换热

井底部及沿程温度（即沿井深方向的温度分布）与远场温度相等。由于远场温度不受采暖季取热的影响，所以该温度也就是采暖季开始前的地岩温度。据此可以判定，换热井地岩温度恢复到采暖季取热开始前的水平需要120天，即地岩温度恢复周期为120天。

3 太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的工作模式

为了使太阳能集热系统和 中深层地岩热供热系统这 2 种能源系统耦合起来后可以达到最优的运行效果，设计了太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的控制逻辑和运行模式。该多能互补供热系统的控制逻辑示意图如图 6 所示。图中： $P_1 \sim P_4$ 均为循环泵； $F_1 \sim F_{12}$ 、 F_a 、 F_b 均为阀门；下文同。

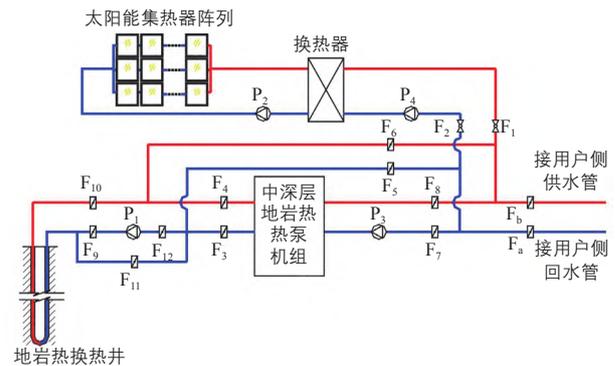


图6 太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的控制逻辑示意图

Fig. 6 Schematic diagram of control logic of solar energy and medium-depth strata geothermal multi energy complementary heating system

该多能互补供热系统可实现 6 种运行模式：

- 1) 运行模式 1 为太阳能集热系统单独向用户端供热；
- 2) 运行模式 2 为中深层地岩热供热系统直接供热；
- 3) 运行模式 3 为“太阳能集热系统 + 中深层地岩热供热系统”联合供热；
- 4) 运行模式 4 为通过中深层地岩热泵机组供热；
- 5) 运行模式 5 为“太阳能集热系统 + 中深层地岩热泵机组”联合供热^[11-12]；
- 6) 运行模式 6 为非采暖季太阳能跨季节储热。

从 6 种运行模式的运行成本来看, 运行模式 1 的运行成本最低, 运行模式 2 的运行成本次之, 运行模式 4 的运行成本最高。这是因为只要天气晴好, 太阳能集热系统可将太阳能直接转化为热能, 期间的运行成本仅为工质的循环泵耗电量(下文简称为“循环泵耗”)(热源侧循环泵的功率为 2.2 kW); 中深层地岩热供热系统直接供热的运行成本也是工质的循环泵耗(热源侧循环泵的功率为 11 kW, 大于太阳能集热系统的循环泵耗); 中深层地岩热泵机组供热的运行成本最高, 这是因为换热井中的热能温度达不到用户端需求, 需要通过热泵机组(功率为 130 kW)来提升热能温度, 因此该运行模式的功耗最大。

本多能互补供热系统设计的 6 种运行模式中, 除运行模式 6 之外, 其他 5 种运行模式需要依据日照条件、用户端需求(比如在采暖季初寒期、末寒期用户的需求最低, 而在中期用户的需求最大)、换热井底部温度等条件进行综合考虑, 再决定启动其中某种运行模式, 其目的是在满足用户端需求的前提下, 使系统的运行成本达到最低。

3.1 运行模式 1

该多能互补供热系统采用运行模式 1 时, 通过控制阀门, 实现太阳能集热系统单独向用户端供热, 此时中深层地岩热供热系统不启动。采用运行模式 1 时多能互补供热系统的运行原理如图 7 所示。

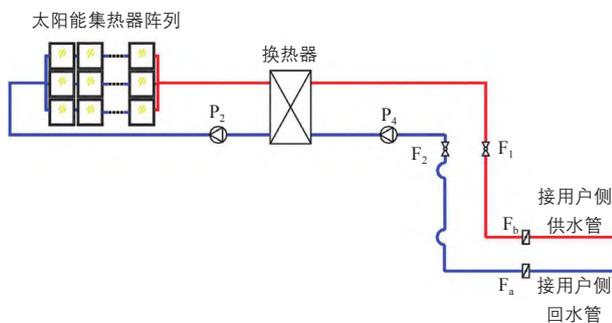


图 7 采用运行模式 1 时多能互补供热系统的运行原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of operation principle of multi energy complementary heating system in operation mode 1

3.2 运行模式 2

在采暖季的初寒期和末寒期, 用户端热负荷较小, 阴天、雨、雪等太阳辐照度不好的情况下可以采用运行模式 2, 即采用中深层地岩热供热系统直接供应用户端用热量, 此时多能互补供热系统耗能为循环泵耗, 可以达到低成本运行的目的。采用运行模式 2 时多能互补供热系统的运行原理示意图如图 8 所示。

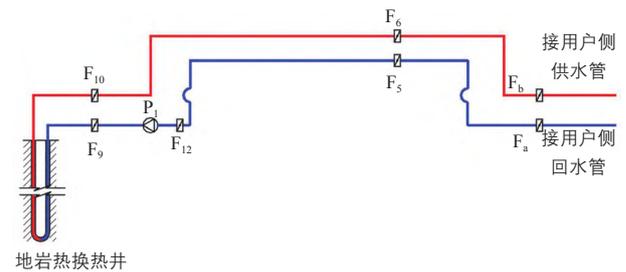


图 8 采用运行模式 2 时多能互补供热系统的运行原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of operation principle of multi energy complementary heating system in operation mode 2

3.3 运行模式 3

在多能互补供热系统采用运行模式 2 的基础上, 如果天气晴好, 可以通过设定温度阈值控制阀门开启, 实现“太阳能集热系统 + 中深层地岩热供热系统”联合向用户端供热, 即采用运行模式 3。采用运行模式 3 时多能互补供热系统的运行原理如图 9 所示。

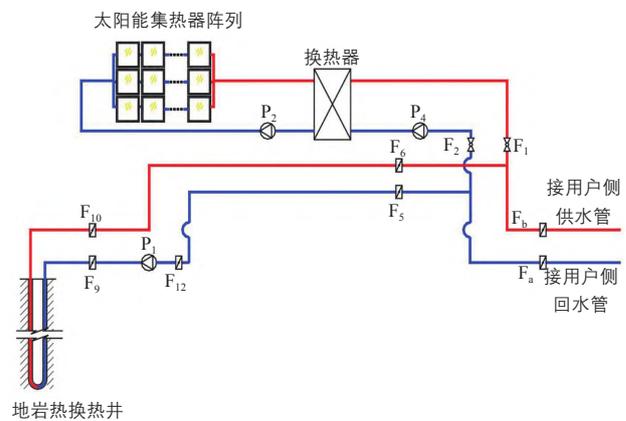


图 9 采用运行模式 3 时多能互补供热系统的运行原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of operation principle of multi energy complementary heating system in operation mode 3

3.4 运行模式 4

在用户端热负荷较大的情况下，多能互补供热系统通常采用运行模式 4，即通过中深层地岩热泵机组供热。该运行模式是将地岩热换热井内已经完成岩土层换热的水抽到地面机房，通过中深层地岩热泵机组与系统末端来的冷水完成换热，然后再回到换热井内与岩土层换热，系统末端来的冷水换热后变成热水供向系统末端；如此循环进行。采用运行模式 4 时多能互补供热系统的运行原理如图 10 所示。

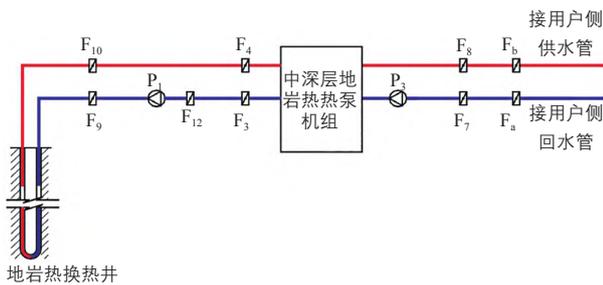


图 10 采用运行模式 4 时多能互补供热系统的运行原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of operation principle of multi energy complementary heating system in operation mode 4

3.5 运行模式 5

在多能互补供热系统采用运行模式 4 的基础上，如果天气晴好，可以将太阳能集热系统的得热量并入用户端供热管路，实现“太阳能集热系统 + 中深层地岩热泵机组”联合向用户端供热模式，即采用运行模式 5。采用运行模式 5 时多能互补供热系统的运行原理如图 11 所示。

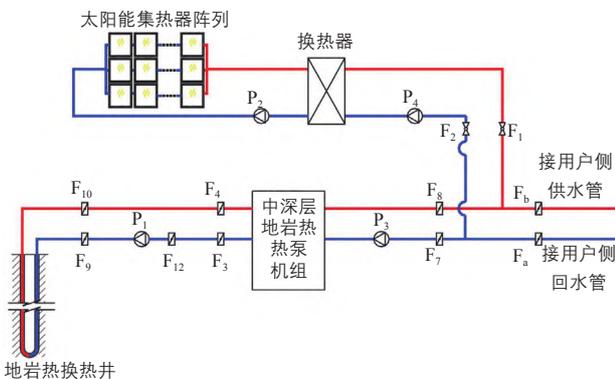


图 11 采用运行模式 5 时多能互补供热系统的运行原理示意图

Fig. 11 Schematic diagram of operation principle of multi energy complementary heating system in operation mode 5

3.6 运行模式 6

从表 2 可以看到：非采暖季时太阳能集热系统的得热量很大，是采暖季时的 2 倍多。若这些热量不能得到利用，会是巨大的浪费，同时太阳能集热系统过热也会影响其寿命。如果能将太阳能集热系统获得的热量利用中深层地岩热换热井来进行储热，实现太阳能跨季节储热，则有望很好地解决上述问题。该多能互补供热系统设计了太阳能集热系统向中深层地岩热换热井回补的管路，即运行模式 6，实现“太阳能 + 中深层地岩热换热井”储热，以便后续探索利用地岩热换热井实现太阳能跨季节储热的可行性。采用运行模式 6 时多能互补供热系统的运行原理如图 12 所示。

需要说明的是，本文对非采暖季时利用中深层地岩热换热井实现太阳能跨季节储热的相关分析不做赘述，将另文撰述。

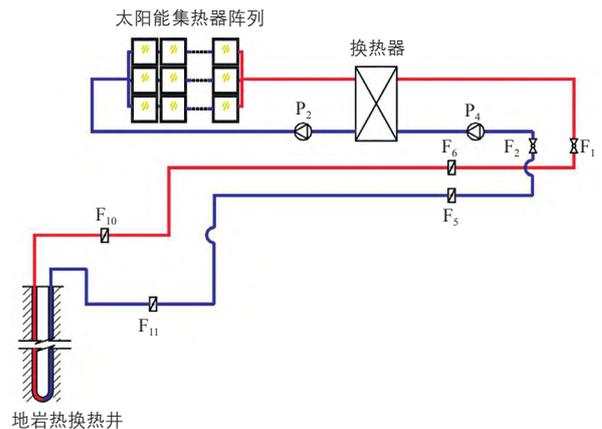


图 12 采用运行模式 6 时多能互补供热系统的运行原理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of operation principle of multi energy complementary heating system in operation mode 6

4 多能互补供热系统的运行测试与分析

根据上述研究结果，在兰州市建成太阳能与中深层地岩热互补供热实验项目。该实验项目的多能互补供热系统由 1 套中深层地岩热供热系统（含 1 口地岩热换热井）和 1 套太阳能集热系统组成，换热井的直径为 200 mm、深度为 2500 m；采用双盖板蓝膜平板式太阳能集热器，总集热面

积为 202 m²(为实现土地高效利用,采用停车场与太阳能集热器阵列一体化设计,形成了 12 个标准停车位)。在供热管路上安装 3 块热计量表,分别在线计量换热井出口处的得热量、太阳能集热系统的得热量和用户端总供热量。太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的项目实景及控制系统界面如图 13 所示。

该多能互补供热系统建成后,在采暖季进行了测试。以 2018 年 2 月 3—5 日的数据为例,采暖季时太阳能集热系统的得热量测试结果如表 6、图 14 所示。



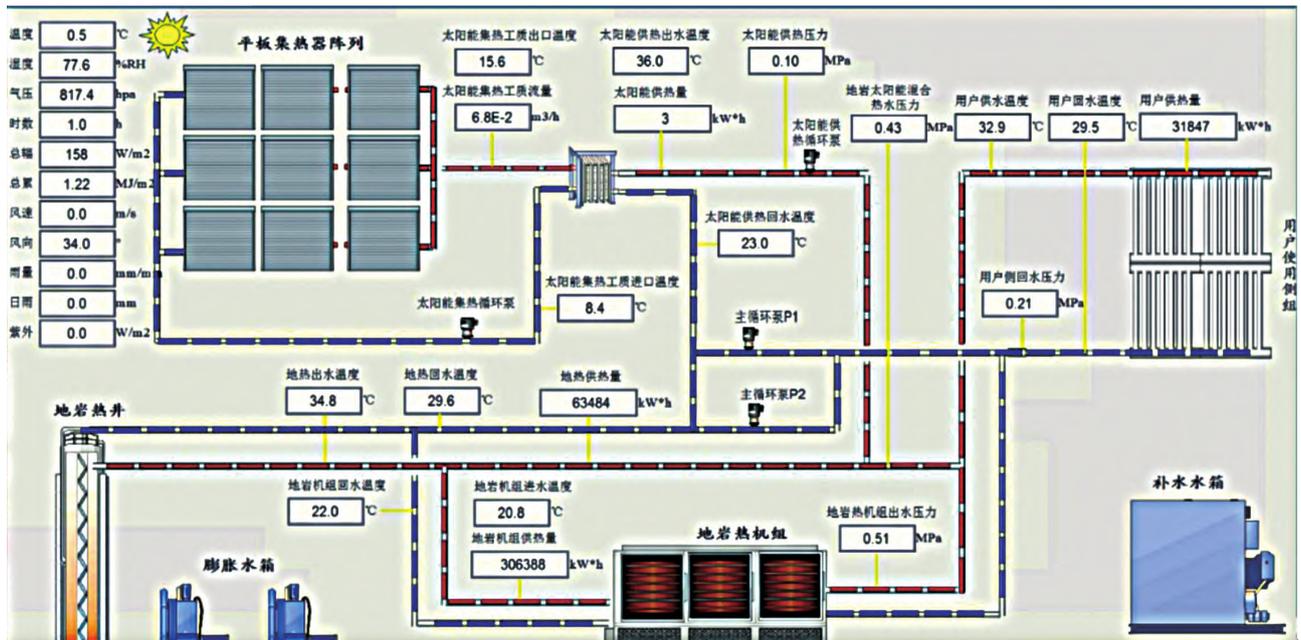
a. 太阳能集热器阵列



b. 板式换热器



c. 水箱



d. 控制系统界面

图 13 太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统的项目实景及控制系统界面

Fig. 13 Project photos and control system interface of solar energy and medium-depth strata geothermal multi energy complementary heating system

表 6 采暖季时太阳能集热系统的得热量测试结果

Table 6 Test results of heat gain of solar heat collection system in heating season

测试日期	起始时刻	起始时刻热计量表显示值 /kWh	终止时刻	终止时刻热计量表显示值 /kWh	当日累计得热量 /kWh	每小时最大得热量 /kWh	每分钟最大得热量 /kWh
2018-02-03	09:58	13691	16:58	13987	296	68	1.13
2018-02-04	10:58	13987	17:58	14293	306	67	1.12
2018-02-05	10:58	14293	17:58	14612	319	69	1.15
平均值	—	—	—	—	307	68	1.13

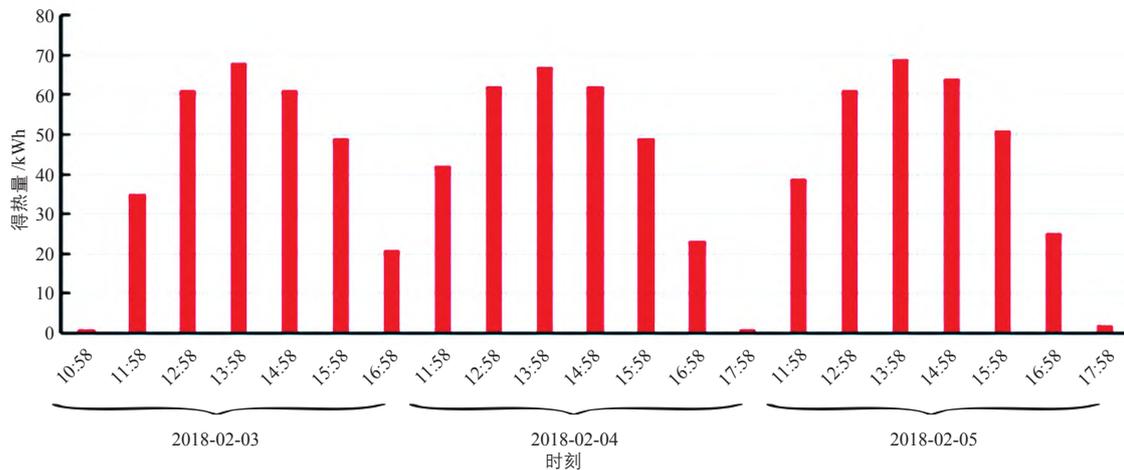


图 14 2018 年 2 月 3—5 日太阳能集热系统的逐时得热量

Fig. 14 Hourly heat gain of solar heat collection system from February 3 to February 5, 2018

从表 6 和图 14 可以看出：测试期间，太阳能集热系统的平均日累计得热量为 307 kWh，每分钟最大得热量为 1.15 kWh。对测试数据进行处理后可以得到：测试期间，太阳能集热系统的最高供水温度为 51.3 °C、最高回水温度为 38.0 °C，供回水温差为 13.3 °C；平均供水温度为 45.0 °C、平均回水温度为 35.1 °C，供回水平均温差为 9.9 °C。

项目建设地的采暖期为 150 天，从用户端的热计量表可以得到整个采暖期多能互补供热系统的总供热量为 418687 kWh。

由此，可计算得到多能互补供热系统的日均供热量 Q_d ，其计算式为：

$$Q_d = \frac{Q_z}{t} \quad (1)$$

式中： Q_z 为整个采暖期多能互补供热系统

的总供热量，kWh； t 为整个采暖期的时长，天，本文取 150。

将整个采暖期内多能互补供热系统的总供热量及整个采暖期的时长代入式 (1)，可以得到该多能互补供热系统的日均供热量为 2791.2 kWh。

太阳能集热系统的得热量在总供热量中的占比 n 的计算式为：

$$n = \frac{Q_s}{Q_d} \times 100\% \quad (2)$$

式中： Q_s 为太阳能集热系统的平均日得热量，kWh，本文取 307。

将相关数值代入式 (2)，可以得到在采暖季，该太阳能集热系统的得热量在总供热量中的占比为 11%，即太阳能集热系统可以为整个多能互补供热系统提供约 11% 的热量。

5 结论

为了充分利用兰州地区丰富的太阳能资源和地热资源, 本文开发了一种太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统, 对其控制系统进行了优化设计; 然后在兰州当地建设了 1 套太阳能集热系统集热面积为 202 m^2 , 单口中深层地岩热换热井直径为 200 mm 、深度为 2500 m 的太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统, 并对其在采暖季的运行情况进行了测试分析。研究结果表明:

1) 太阳能集热系统的理论全年得热量为 133429 kWh , 其在采暖季的得热量占其全年得热量的 31.6% 。

2) 在连续取热、地温梯度 $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 条件下, 中深层地岩热换热井的热影响半径约为 8 m , 采暖季结束后约在 120 天地岩温度可恢复, 可实现中深层地岩热持续供热。

3) 太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统有 6 种运行模式, 其可以根据用户端热负荷的变化情况和日照条件进行自动控制, 灵活配置能源。

4) 对于本多能互补供热系统, 在采暖季, 太阳能集热系统的平均日得热量为 307 kWh , 每分钟最大得热量为 1.15 kWh ; 太阳能集热系统的最高供水温度为 $51.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、最高回水温度为 $38.0 \text{ }^\circ\text{C}$, 供回水温差为 $13.3 \text{ }^\circ\text{C}$; 平均供水温度为 $45.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、平均回水温度为 $35.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 供回水平均温差为 $9.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在采暖季, 太阳能集热系统可以为整个多能互补供热系统提供约 11% 的热量。

5) 在非采暖季, 太阳能集热系统的理论得热量占其全年得热量的比例为 68.4% , 因此为充分利用太阳能资源和使投资效益最大化, 需设计储热单元以储存非采暖季时太阳能集热系统的得热量。本多能互补供热系统设计了非采暖季的储热回路, 以便利用中深层地岩热换热井实现太阳能跨季节储热。

综上所述, 太阳能与中深层地岩热多能互补供热系统利用中深层地岩热供热系统来解决因昼夜, 阴、晴天气等因素引起的太阳能集热系统不稳定、不连续的问题; 同时在日照条件良好的情况下, 该系统可以利用太阳能集热系统进行供热, 使中深层地岩热供热系统承担的负荷降低, 减轻连续取热状态下地岩热换热井的地岩温度降低程度, 有利于地岩温度在短期内恢复, 使该多能互补供热系统可以实现更加高效的为建筑供暖的目的。

【参考文献】

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [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 2020(农村住宅专题)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 3-9.
- [3] 姜洪殿, 董康银, 孙仁金, 等. 中国新能源消费预测及对策研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1196-1202.
- [4] 孔彦龙, 陈超凡, 邵玄冰, 等. 深井换热技术原理及其换热质量评估[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [5] 邓杰文, 魏庆芃, 张辉等. 深层地热源热泵供暖系统能耗和能效实测分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(8): 150-154.
- [6] 金光, 陈正浩, 郭少朋, 等. 严寒地区太阳能-地源热泵系统应用经济性分析研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1288-1293.
- [7] 郑瑞澄. 民用建筑太阳能热水系统工程技术手册[M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [8] 吕沛志. 无干扰地岩热能梯级利用系统的优化[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- [9] 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 国土资源部. 关于印发《地热能开发利用“十三五”规划》的通知: 发改能源[2017]158号[S/OL]. (2017-01-23). http://www.nea.gov.cn/2017-02/06/c_136035635.htm.
- [10] 方亮. 地源热泵系统中深层地埋管换热器的传热分析及其应用[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- [11] YAO J, LIU W J, ZHANG L, et al. Performance analysis of a residential heating system using borehole heat exchanger coupled with solar assisted PV/T heat pump[J]. Renewable energy, 2020, 160: 160-175.
- [12] 蔺瑞山, 田斌守, 邵继新, 等. 太阳能-热泵互补系统在绿色民居采暖中的应用研究[J]. 建筑节能, 2018, 46(6): 31-37.

EXPLORATION AND RESEARCH ON MULTI ENERGY COMPLEMENTARY HEATING TECHNOLOGY OF SOLAR ENERGY AND MEDIUM-DEPTH STRATA GEOTHERMAL

Tian Binshou^{1,2}, Shao Jixin¹, Yang Haihong¹, Si Shuanglong¹, Lin Ruishan¹, Xia Bin¹

(1. Gansu Building Materials Research & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730020, China;

2. Key Laboratory of Green Building Technology of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The reserves of solar energy and geothermal energy are huge, and they are low-carbon and clean energy with great development and application potential. The heating technology of medium-depth strata geothermal takes heat without water, which is a low-grade geothermal energy resource that can be exploited and applied. In this paper, by combining the solar heat collection system with the medium-depth strata geothermal heating system, and using the solar energy resources in Lanzhou, a set of multi energy complementary heating system using solar energy and medium-depth strata geothermal is designed and constructed with solar heat collection area is 202 m², a single heat transfer well of medium-depth strata geothermal with a diameter of 200 mm and a depth of 2500 m. Under the condition of continuous heat extraction and rock temperature gradient of 30 °C /km, the heat supply situation of the heat transfer well and the temperature recovery situation of the ground rock are simulated. Then, the control system of multi energy complementary heating system is optimized, and six operation modes are proposed. Finally, the actual operation of the multi energy complementary heating system in heating season is tested and analyzed. The results show that: 1) The theoretical annual heat gain of the solar heat collection system is 133429 kWh, and its heat gain in the heating season accounts for 31.6% of the annual heat gain; 2) The heat influence radius of the heat transfer well using the medium-depth strata geothermal is about 8 m, and the recovery period of the rock temperature after the heating season is about 120 days, which can realize the continuous heating of the medium-depth strata geothermal; 3) In the heating season, the average daily heat gain of the solar heat collection system in the multi energy complementary heating system is 307 kWh, which can provide about 11% of the heat for the entire multi energy complementary heating system; 4) The multi energy complementary heating system has six operation modes, which can be automatically controlled according to the change of client heat load and sunshine conditions, flexibly allocate energy, and give full play to the advantages of the two energy sources to achieve the purpose of the lowest heating cost.

Keywords: medium-depth strata geothermal; solar energy; multi energy complementation; solar heat collection system; renewable energy; clean heating