

浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统设计及可行性研究

李媚青, 李文欣, 陈振乾

(东南大学能源与环境学院, 南京 210096)

摘 要: 以夏热冬冷地区某大型公共建筑为研究对象, 基于TRNSYS软件搭建浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统仿真模型, 分析浅-中深层耦合供暖系统供暖季运行特性, 并分别与单一中深层地热梯级利用供暖系统和浅层地源热泵系统比较。结果表明, 耦合系统在末端换热量、地热回灌水温、热泵机组供热性能系数(COP)以及系统能量利用率等方面均优于单一的中深层或浅层地热供暖系统, 系统更加稳定、适应性强。系统能量利用率平均值达到0.95, 验证了耦合系统的运行可行性。

关键词: 中深层地热能; 梯级利用; 地热供暖; 地源热泵; TRNSYS模拟; 系统能效

中图分类号: TK529

文献标志码: A

0 引 言

近年来随着城市化进程的不断深入, 供暖能耗逐年增加。煤炭、石油等传统地下能源是中国燃煤锅炉采暖的主要热源, 持续增长的高能源需求导致集中热源供热能力和现有一次网输热能力不足, 给环境和生态带来巨大挑战。虽然中国在不断推进自身能源转型, 但能源消费中煤炭所占比重仍过大。在碳达峰和碳中和背景下, 达成减排目标的关键路径之一是在积极推进高效利用清洁能源的同时着力构建清洁、低碳、安全、高效的能源体系。作为可再生清洁能源之一的地热能, 其利用率高、安全稳定、运行成本相对较低, 具有优良的综合利用潜力。据有关资料统计, 中国地热蕴藏量约占全球的7.9%, 可采储量能够折合标准煤为 4.6265×10^{11} t, 具有可观的地热资源储量、广泛的分布范围以及巨大的开发潜力^[1]。

地热能按照储热深度的不同, 主要可分为浅层和中深层地热能利用两大类。其中, 温度维持在25℃之下并处于地表0~200 m深度范围内的低温地热资源为浅层地热能, 这类资源有极为广泛的分布区域, 开采难度较低, 可用于冬季供暖和夏日制冷。利用中深层水热型地热资源供热的过程一般是先抽取中深层的地热水, 运用一级板式换热器进行换热, 循环水从中吸取热量直接供暖; 然后, 进一步通过二级板式换热器利用地下尾水剩余热量, 通过热泵来加热循环水满足持续供热的需求。目前, 地热能供暖主要采用浅层地源热泵供暖技术, 节能环保和经济效益良好^[2]。文献[3]监测和评估了某住宅地源热泵系统在实际住宅环境中的性能, 记录了热

泵功耗、精准统计等不同操作模式下热泵的启停次数和各项操作的执行频次, 同时关注了钻孔内部的温度变动状况, 研究结果表明地源热泵系统在两年的运行中显示出较高的能效和显著的节能效益; 文献[4]对不同运行模式下地热换热器影响周边土壤温度场的情况开展分析, 结合实验与数值模拟得出, 系统长期运行会使地下局部区域出现热量聚积, 土壤热量收支失衡、温度难以快速回升, 系统运行性能随之下降。为改善这类问题, 不少研究开始聚焦不同层级地热资源的应用优势。文献[5]指出中深层地热相较于浅层地热, 温度、能量密度更高, 热量稳定性也更佳。

中深层地热能采暖技术在国外已有20多年的发展, 文献[6]提到自1995年由Rybach等率先开启针对利用中深层水热型地热能服务建筑供暖的探索研究后, 西方国家陆续都将深井换热广泛投用到建筑供暖的实际应用场景中; 文献[7]将一种深度达2302 m的中深套管式地埋管土壤源热泵系统作为某工厂采暖的系统, 经实践观测分析发现, 流速是地埋管换热量及出水温度的关键影响因素, 当流速从0.2 m/s增至0.8 m/s时, 地源热泵埋管系统的热交换率较基准工况实现了83%的提升; 清华大学魏庆芃团队^[8]针对中深层地热能热泵系统的性能设计参数进行了优化, 现场测试发现该系统的出水和进水水温分别达到33.0℃和23.7℃, 与传统浅层地源热泵相比热泵的供热性能系数(coefficient of performance, COP)值高出50%以上, 达到5.70; 李锦堂等^[9]提出一种中深层地埋管热泵系统供暖源侧参数设计方法, 对地质条件、地埋管长度、管径、间距以及流体流量等进行了详细分析, 并构建了相应的参数设计模型, 通过实例验证, 该设计方法能有

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 江苏省建设厅项目(7603009138; 7603009139)

通信作者: 陈振乾(1964—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事传热传质、制冷技术、建筑环境与节能等方面的研究。zqchen@seu.edu.cn

效提高中深层地埋管热泵系统的 COP,降低系统的初投资与运行成本,为工程实践提供切实可行的设计依据。但基于热泵的深层地热采暖系统因一次网回水温度较高,导致热泵性能偏低,难以高效开发深层地热能^[10]。此外,金海峰等^[11]通过对西安市地下热水多年动态的监测资料进行分析研究发现,地热井尤其是第三和第四热储层段的水头下降速度过快且年均下降超过 10 m 的主要原因是井距近、开采层段集中和单井开采量大,揭示了中深层地热开采的困难,特别是出水量有限的问题。

针对储量丰富且稳定的地热资源,2017 年住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会等部委提出地热能综合利用、梯次开发的建议^[12]。杜赛赛等^[13]展开分析了西北地区带辅助热源的中深层地源热泵供暖系统设计负荷配比,选取运行能耗、污染物排放和经济效果作为评价指标,全面评估了中深层地热能 and 燃气锅炉耦合供暖系统性能优劣,指出辅助热源的引入可显著提高系统的供暖能力,使系统在极端低温条件下的供暖负荷满足率提高了 15%;李建伟等^[14]提出太阳能光伏/光热一体化(PV/T)与中深层地源热泵耦合的供暖系统,通过 TRNSYS 软件模拟分析了该系统在不同工况下 20 a 的运行特性,旨在通过研究该耦合系统的运行特性为优化系统设计提供理论依据以提高系统的能源利用效率,实现太阳能与地热能的高效互补利用,进而降低供暖能耗与成本。

本文基于目前中浅层地热资源单一供热模式存在的不足,提出深浅联用、梯级利用的供暖模式,搭建浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统 TRNSYS 仿真模型,以期在减少中深层钻井数量的同时保证供热需求,提高系统能量利用效率及经济性,通过科学合理开发利用地热资源延长地热井使用寿命,促进地热资源的可持续利用。

1 地热能利用供暖系统设计与工作原理

图 1 为浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统运行流程。本文对浅、中深层地热展开梯级利用,综合规划中深层地热水、浅层地热 2 种地热清洁能源继而达成耦合供暖系统,包括中深层取水子系统、浅层地源热泵换热系统、板式换热器、热泵机组、水泵以及管路,构建梯级利用及浅中深层地热能互补的利用体系。出于简化考量,设置浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统末端温度设计值分别为 45/40 °C,中深层地热井出口水温为定值 75 °C。为避免地热水腐蚀、堵塞管网,通过取水泵抽取进 75 °C 中深层地热水通入一次管网,经除砂、软化、曝气处理防止对管网造成腐蚀、堵塞,再输送进一级板式换热器加热供暖回水,为建筑采暖提供 45 °C 的热水作为供暖热源。为进一步利用地热尾水热量,将温度降为 55 °C 的中深层地热尾水在二级板式换热器二次侧通过热泵机组为末端用户供热,完成二次换热后地热水由水泵施加压力,注入回灌井;高热负荷需求时启动浅层热泵机组,加热所提取 19 °C 浅层地下水至 45 °C 辅助供热。

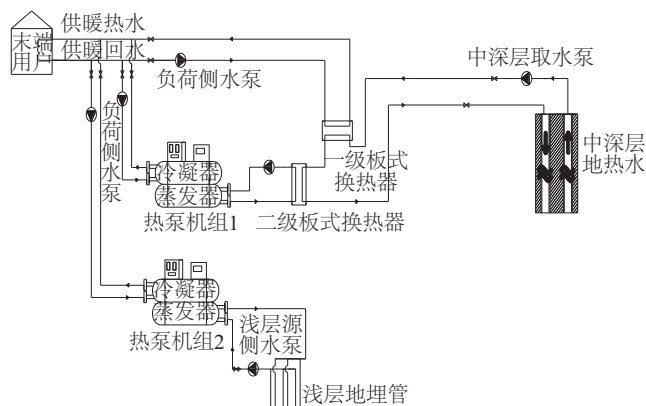


图 1 浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of shallow medium deep geothermal cascade utilization coupled heating system

为更准确地验证浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统的运行可行性,本文设计一组对照实验组,即单一中深层地热能梯级利用供暖系统和浅层地源热泵系统,如图 2 所示。这两个系统的供暖末端温度设计值与耦合系统一致,分别为 45/40 °C;与耦合供暖系统相比,单一中深层地热能梯级利用供暖系统只通过一级板式换热器与 1 台热泵机组为末端供热,浅层地源热泵系统由 3 台地源热泵机组承担末端供热。

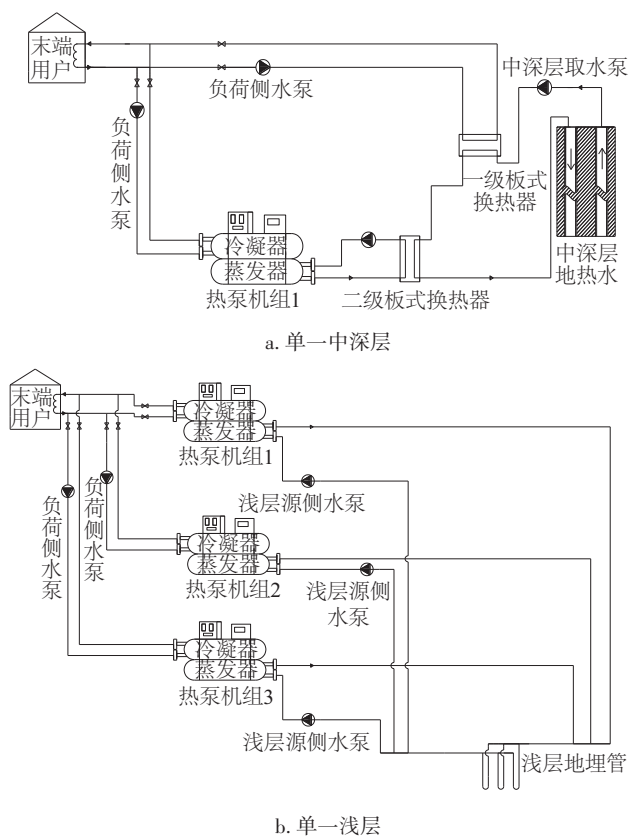


图 2 单一地热利用供暖系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of single geothermal heating system

2 地热利用供暖系统 TRNSYS 动态仿真模型

2.1 系统热量守恒数学模型

浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统主要由中深层地热梯级利用供暖子系统和浅层地源热泵供暖子系统组成。中深层地热梯级利用供暖子系统取热侧换热流程较为复杂: 一级板式换热器内所提取的中深层地热水与供暖回水换热、二级板式换热器内一级板式换热器热源侧出口地热尾水与热泵蒸发器出口工质换热; 末端用户供热侧换热流程: 一级板式换热器内供暖回水与所提取的中深层地热的井水换热、供暖回水被热泵机组的冷凝器加热, 实现升温; 浅层地源热泵供暖子系统取热侧换热流程: 在热泵蒸发器内所提取的浅层地热水与供暖回水换热; 供热侧换热流程: 供暖回水被热泵机组冷凝器加热。

一、二级板式换热器负荷侧换热量 Q_{he1} 、 Q_{he2} 计算公式分别为:

$$Q_{he1} = c_w M_{he1,l} (t_{he1,out} - t_{he1,in}) \quad (1)$$

$$Q_{he2} = c_w M_{he2,l} (t_{he2,out} - t_{he2,in}) \quad (2)$$

式中: $M_{he1,l}$ 、 $M_{he2,l}$ ——一、二级板式换热器负荷侧水流量, kg/s; $t_{he1,in}$ 、 $t_{he2,in}$ 、 $t_{he1,out}$ 、 $t_{he2,out}$ ——一、二级板式换热器负荷侧进出口水温, °C;

热泵机组能量平衡方程式分别为:

$$Q_{eva,q} + W_{whp,q} = Q_{con,q} \quad (3)$$

$$Q_{eva,z} + W_{whp,z} = Q_{con,z} \quad (4)$$

式中: Q_{eva} ——热泵机组蒸发器吸热功率, kW; W_{whp} ——热泵机组输入的电功率, kW; Q_{con} ——热泵冷凝器制热功率, kW; 下标 q——浅层地热供暖子系统; 下标 z——中深层地热梯级利用供暖子系统。

中深层地热梯级利用供暖子系统中二级板式换热器与热泵机组之间的能量平衡关系式为:

$$Q_{he2} = Q_{eva,z} \quad (5)$$

耦合供暖系统末端与一级板式换热器、系统热泵机组之间能量平衡关系式为:

$$Q_{he1} + Q_{con,z} + Q_{con,q} = Q_{load} \quad (6)$$

耦合供暖系统总体热量平衡方程为:

$$c_w M_{zw} (t_{zw,i} - t_{zw,o}) + c_w M_{qw} (t_{qw,i} - t_{qw,o}) + W_{ww} = Q_{load} \quad (7)$$

式中: c_w ——循环水的比热容, kJ/(kg·°C); M_{zw} 、 M_{qw} ——从中深层、浅层地热井抽取的热水流量, kg/s; $t_{zw,i}$ 、 $t_{zw,o}$ ——从中深层地热井抽取和回灌的水温, °C; $t_{qw,i}$ 、 $t_{qw,o}$ ——从浅层地热井抽取和回灌的水温, °C; W_{ww} ——耦合供暖系统所输入的电功率, kW; Q_{load} ——用户末端所需热负荷, kW。

2.2 建筑设计逐时热负荷及设备选型

南京市地处江苏省南部, 属于建筑热工设计分区的夏热冬冷地区, 全年干燥温度适中, 冬季气候偏冷, 有供暖需求。南京市建筑供暖季为 12 月 5 日—次年 3 月 5 日。以南京市某大型购物商场为研究对象, 该建筑共 8 层, 总面积约为 182294.49 m²。依据 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与

空气调节设计规范》^[15] 相关规定, 冬季室内供暖的设计温度应设定为 20 °C, 通过 TRNSYS 软件搭建如图 3 所示的典型公共建筑逐时热负荷仿真模型。

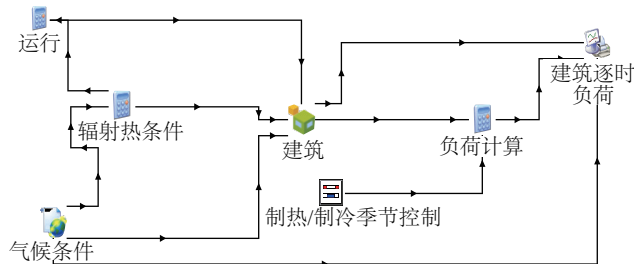


图3 TRNSYS建筑负荷仿真模型

Fig. 3 TRNSYS building load simulation model

选择南京全年逐时气象参数作为室外参数, 通过 Meteoromd 导出的基于实际的南京市历史天气文件导入天气模块 type15-2 中。在建筑模块 type56 中设置建筑内外墙及窗户的热工参数、人员及灯光等内热源参数; 通过对建筑负荷模型计算模拟分析, 得出如图 4 所示的供暖季建筑设计逐时热负荷状况, 其中某时刻的最大设计热负荷可达 5713 kW。为满足供暖需求以建筑供暖季最大热负荷作为选型设计热负荷, 选择合适的设备机组。各供暖系统主要设备参数如表 1~表 3 所示。

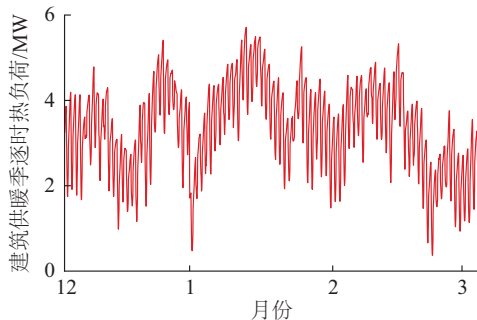


图4 供暖季建筑所需逐时设计热负荷变化

Fig. 4 Hourly design heat load variation for buildings during heating season

表1 浅层地源热泵供暖系统主要设备参数

Table 1 Main equipment parameters of shallow ground source heat pump heating system

设备	型号及技术参数
负荷侧循环水泵	流量: 262.22 m ³ /h 功率: 35.73 kW
源侧循环水泵	流量: 208.49 m ³ /h 功率: 28.40 kW
地埋管换热器	管内径: 26.00 mm; 外径: 32.00 mm 孔径: 150.00 mm; 孔深: 100.00 m 孔数量: 409.00
地源热泵机组	型号: YSFXFS55COE-HP 额定制热功率: 1938.00 kW

表2 单一中深层地热梯级利用供暖系统主要设备参数

Table 2 Main equipment parameters of single medium to deep geothermal cascade utilization heating system

设备	型号及技术参数
中深层取水泵	流量:65.00 m ³ /h
	功率:12.65 kW
板式换热器 1	设计热负荷:1513.00 kW
	源侧流量:65.00 m ³ /h
	负荷侧流量:260.00 m ³ /h
板式换热器 2	设计热负荷:2648.00 kW
	源侧流量:65.00 m ³ /h
	负荷侧流量:455.00 m ³ /h
地源热泵机组	型号:YSJ3J3D45CNCHA
	额定制热功率:3323.00 kW

表3 浅/中深层地热能梯级利用耦合供暖系统主要设备参数

Table 3 Main equipment parameters of shallow/medium deep geothermal energy cascade utilization coupled heating system

设备	型号及技术参数
中深层取水泵	流量:50.00 m ³ /h
	功率:9.73 kW
板式换热器 1	设计热负荷:1163.89 kW
	源侧流量:50.00 m ³ /h
	负荷侧流量:200.00 m ³ /h
板式换热器 2	设计热负荷:2036.81 kW
	源侧流量:50.00 m ³ /h
	负荷侧流量:350.00 m ³ /h
中深层子系统 热泵机组	型号:YSG3G3D35CKCHA
	额定制热功率:2463.00 kW
浅层子系统 地源机组	型号:YSJ2J2D45CLCHA
	额定制热功率:2899.00 kW
地埋管换热器	管内径:26.00 mm;外径:32.00 mm
	孔径:150.00 mm;孔深:100.00 m
	孔数量:348.00

2.3 浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统 TRNSYS 仿真模型

如图 5 所示,根据所提出浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖方案搭建 TRNSYS 系统仿真模型,选取合适设备模块

如:数据读取模块(Type9e)、数据输出模块(type65c)、天气模块(type15-6)、控制模块(Equa)、板式换热器(Type625)、热泵机组(Type225)和循环水泵(type114)并连接各设备模块构建完整的系统模型。在模拟过程中提出假设,对中深层取水子系统进行简化处理,根据实际情况设定中深层地热井出水温度为 75 ℃,流量约 65 m³/h。此外,模拟过程中系统控制灵敏不考虑水泵及热泵机组启停影响。

结合所研究区域的气候及建筑使用特性对于热舒适性的要求,系统的调节模式为一级板换直供,当建筑符合需求增大时启动热泵机组;当中深层系统无法满足建筑供暖需求时,增加浅层辅助供暖。将系统调节模式中阈值设置为 85%、90%、95%,通过建立相应的数学模型,模拟不同建筑工况下系统的运行情况并计算不同系统调节模式下的系统能量利用率,结果如表 4 所示。结果表明,当阈值调整为 95% 时,系统在大部分工况下能够保持较高的能源利用效率,地源热泵的启动频率相对降低,减少了设备的运行能耗,但在建筑热负荷接近峰值时,可能会出现供暖能力不足的情况;当调整为 85% 时,地源热泵和浅层地热辅助供暖的启动时间提前,系统的供暖稳定性增强,但能源消耗相对增加。

综上,系统调节模式中阈值 90% 在能耗经济性与设备利用率间取得了最优平衡,所以系统的调节模式为:当建筑热负荷小于板式换热器设计热负荷的 90% 时,仅一级板式换热器供暖,一级地热尾水经换热器换热后直接进入回灌系统;当建筑热负荷大于板式换热器设计热负荷的 90% 时,一级板式换热器+地源热泵供暖;当建筑热负荷大于板式换热器设计热负荷和地源热泵额定制热功率总和的 90% 时,增加浅层地热辅助供暖。

2.4 单一中深层、浅层地热利用供暖系统 TRNSYS 仿真模型

根据对照实验组——单一中深层地热梯级利用供暖系统和浅层地源热泵供暖系统原理图,分别搭建 TRNSYS 动态仿真模型如图 6 所示。与耦合供暖系统运行模式类似,单一中深层地热能梯级利用供暖系统运行遵循一级板式换热器优先直供的原则,当建筑所需热负荷未达到一级板式换热器设计热负荷 90% 时,供暖任务仅由一级板式换热器独立承担;当建筑所需热负荷超出一级板式换热器设计热负荷的 90% 时,开启热泵机组与一级板式换热器协同供暖。单一浅层地源热泵供暖系统当建筑所需热负荷处于较低水平,即小于 1 台热泵机组额定制热功率的 90% 时,仅开启 1 台机组;建筑所需热负荷超过 1 台机组额定制热功率的 90% 但未达到 2 台热泵机组额定制热功率总和的 90% 时同步开动 2 台机组;建筑所需热负荷大于 2 台机组额定制热功率总和的 90% 时,开启 3 台机组同时运作,保障供暖的稳定持续。

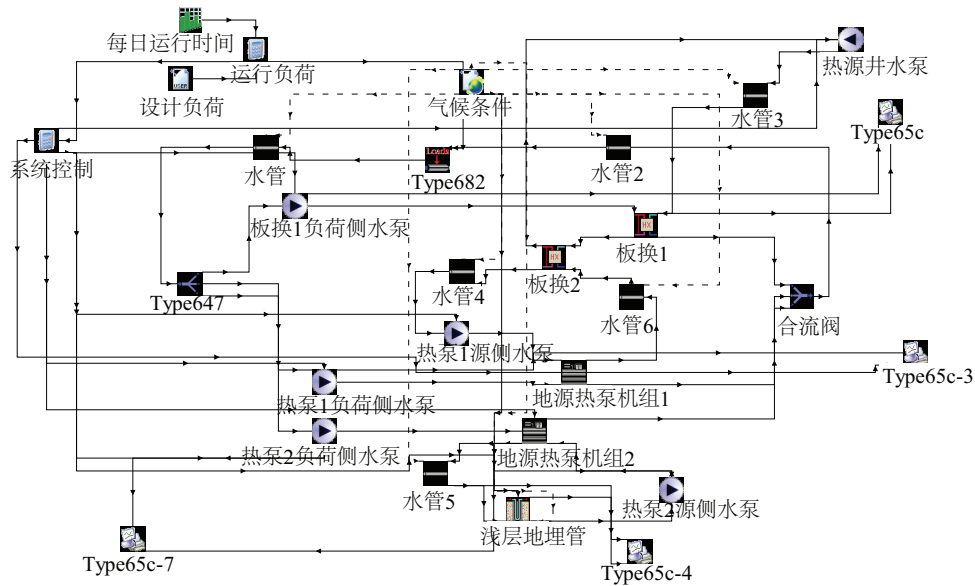


图5 浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统TRNSYS模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of TRNSYS model for shallow medium deep geothermal cascade utilization coupled heating system

表4 不同系统调节阀对比结果

Table 4 Comparison results of adjustment thresholds for different systems

系统调节模式阈值/%	85	90	95
系统能量利用率/%	94.18	94.88	94.55

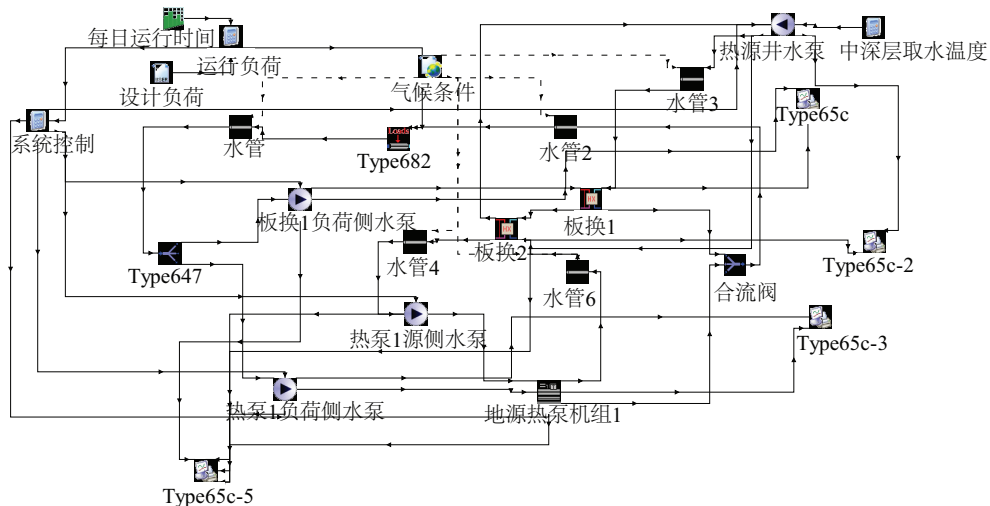
3 模拟结果与分析

本文基于 TRNSYS 软件模拟南京市某大型购物商场供暖季应用浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统制热。设置 12 月 5 日—次年 3 月 5 日,每天 07:00—22:00 为系统运行时间。同时模拟本文所设置对照组——中深层地热能梯级利用供暖、浅层地热供暖系统,从系统末端换热量、中深层及浅层地热尾水回灌温度、热泵机组 COP、系统能量利用率

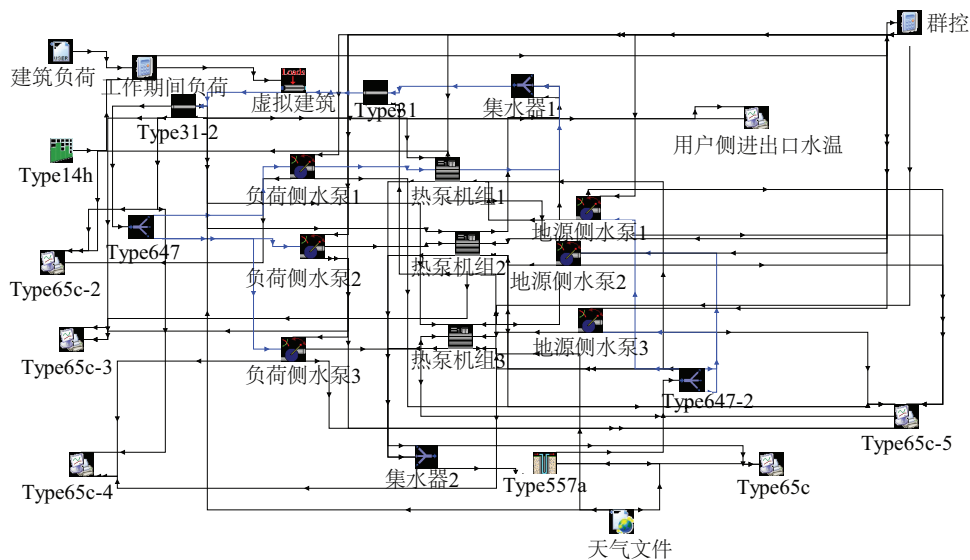
等全面评估 3 个系统性能,从而验证浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统运行可行性,为梯级供暖系统的优化设计、能效提升及区域适应性改进提供科学依据和理论支持。

3.1 系统末端换热量

如图 7 所示,在整个供暖季内浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统末端逐时换热功率曲线较平稳,从 12 月 5 日起随着气温的逐渐降低,换热功率逐渐上升并在一定范围内小幅波动,某时刻的换热功率稳定在 4~6 MW 内;单一中深层地热能梯级利用系统和浅层地源热泵供暖系统末端逐时换热功率曲线和耦合系统趋势类似,但系统总体换热量都低于耦合系统。这表明浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统运行相对稳定,能持续为末端用户提供较高且稳定的热量供应,充分发挥了耦合作用,实现了中深浅层地热优势互补。



a. 单一中深层



b. 单一浅层

图6 单一地热利用供暖系统TRNSYS模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of TRNSYS model for single geothermal utilization heating system

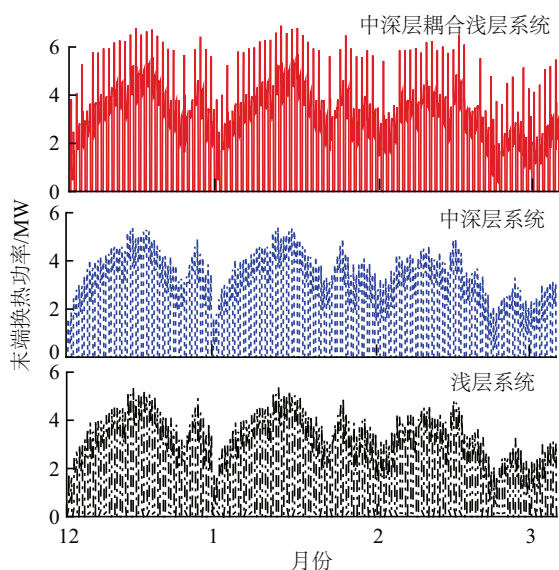


图7 系统末端供暖季逐时换热功率变化

Fig. 7 Heat exchange power changes at end of system during heating season

不到 30%; 浅-中深层地热耦合供暖系统回灌水温大多在 30~50 °C 区间内且波动较小, 30~40 °C 比例达 34.07%, 表明浅-中深层地热耦合供暖系统对于地热的利用效率更高, 在面对不同热负荷需求时, 可提供更稳定的热量。

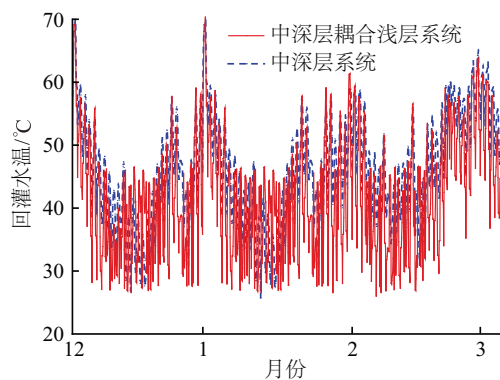


图8 中深层地热尾水回灌温度变化

Fig. 8 Temperature variation of middle and deep geothermal tailwater recharge

3.2 中深层、浅层取水及回灌水温

3.2.1 中深层地热回灌水温

单一中深层供暖系统和浅-中深层地热耦合供暖系统回灌水温变化趋势具有相似性: 供热初期热负荷需求较低, 部分设备未开启或小流量运行, 导致地热尾水回灌温度较高, 利用不太充分; 随着供暖的进行, 热负荷需求随室外温度的变化升高或降低, 地热尾水回灌温度在高温负荷需求时相对较低, 利用更加充分。图9显示单一中深层供暖系统回灌水温处于 40~50 °C 区间的占比为 41.32%, 低于 40 °C 的占比

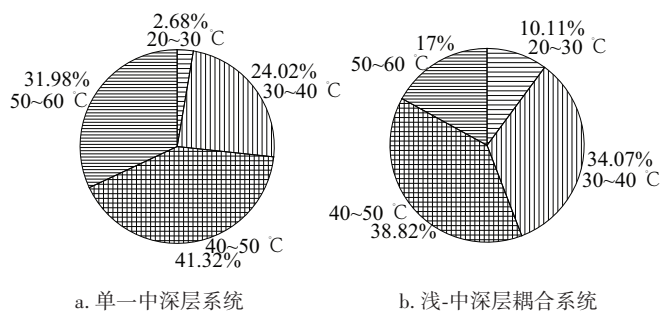


图9 系统中深层地热尾水回灌温度区间比例

Fig. 9 Proportion of temperature range for deep geothermal tailwater recharge in the system

3.2.2 浅层地热埋管进出口水温

图 10 显示在供暖季内浅层地源热泵供热系统和浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统的浅层地埋管进出口水温曲线波动起伏明显。浅层地源热泵供暖系统地面管进出口水温波动区间为 $-5\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 波动幅度较大, 说明该系统在利用浅层地热时热量输出不稳定; 浅-中深层地热耦合供暖系统的地埋管出口水温相较于浅层供暖系统波动较为平缓, 浅层供热水时出水温度范围为 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外, 耦合其他浅层地埋管进出口水温差异大, 在入口水温较低情况下可提供较高的出口水温, 表明耦合系统浅层地热利用效率高, 地热能的耦合使得系统热量供应更高温度, 提高了对环境温度变化的适应性, 系统更加稳定, 从而验证了中深层地热梯级利用耦合浅层地热供热系统的可行性。

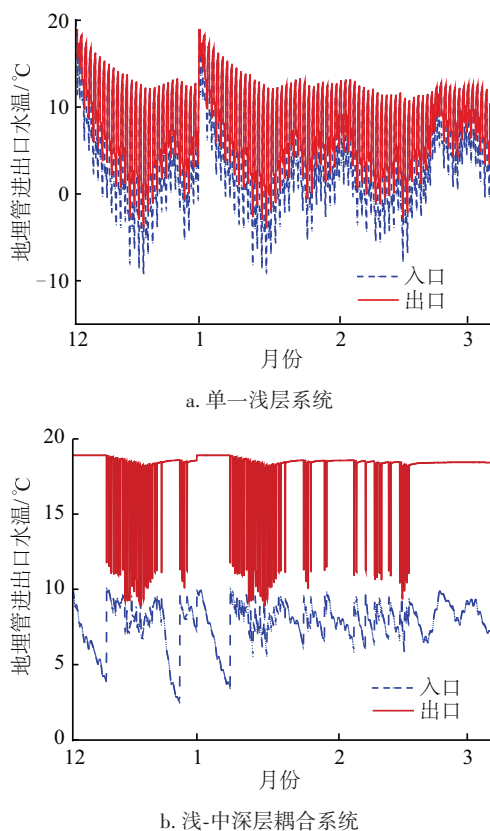


图 10 系统浅层地埋管进出口水温变化

Fig. 10 Water temperature changes at inlet and outlet of shallow buried pipes of system

3.3 系统热泵机组制热性能系数 (COP)

如图 11a 所示, 在供暖季运行期间, 浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统热泵机组 1、热泵机组 2 的 COP 平均值分别为 5.50、5.13, 两个机组 COP 值运行期间在一定范围内波动但变化趋势相对平缓, 整体较为稳定; 从图 11b、图 11c 可看出, 单一中深层地热能梯级利用供暖系统、浅层地源热泵供暖系统运行期间热泵机组 COP 值呈现出一定的稳定性,

波动较小。由此可看出, 这 3 个系统的机组运行都较为稳定, 能够保持良好的性能, 其中浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统机组 COP 平均值较高, 系统能源利用效率高, 具有较高的可行性。

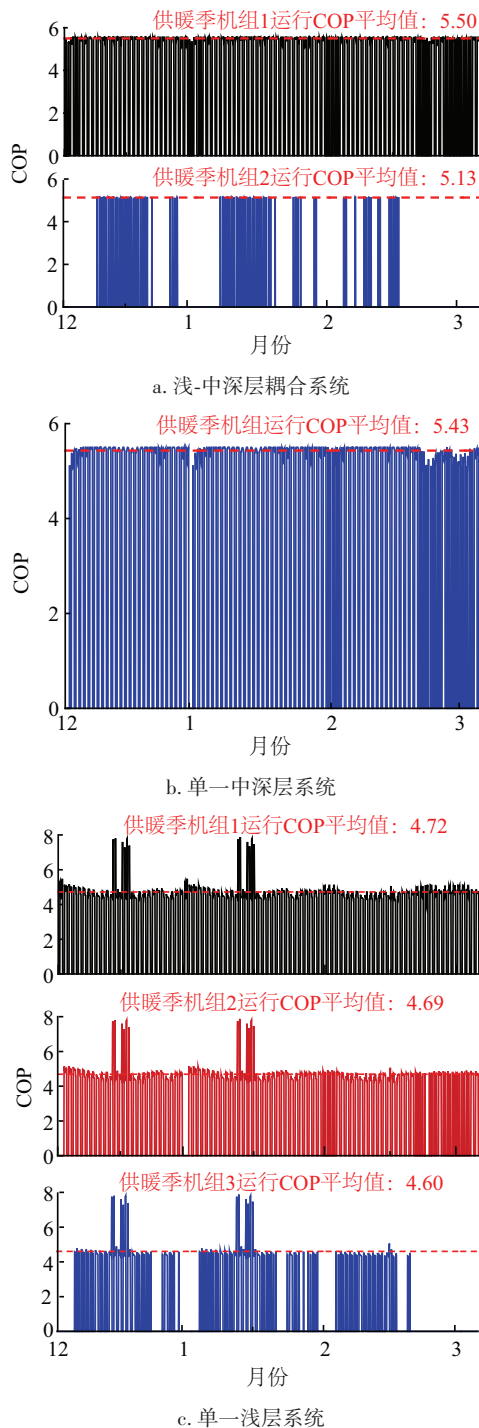


图 11 系统热泵机组 COP 变化

Fig. 11 COP variation of system heat pump unit

3.4 系统能量利用率

本文基于系统能源利用率评估耦合供暖系统的性能优

劣,验证了浅-中深层地热能梯级利用耦合供暖系统系统在技术上的可行性。依据 Zare^[16]提出的系统能量分析模型,定义系统能源利用率 η_E 为有用的系统输出能量与系统输入能量之比:

$$\eta_E = \frac{Q_{he1} + Q_{con,q} + Q_{con,z}}{Q_q + Q_z + W_{ww}} \quad (8)$$

$$Q_q = c_w M_{qw} (t_{qw,i} - t_{qw,o}) \quad (9)$$

$$Q_z = c_w M_{zw} (t_{zw,i} - t_{zw,o}) \quad (10)$$

式中: Q_q ——浅层地热利用系统制热功率, kW; Q_z ——中深层地热利用系统制热功率, kW。

如图 12 所示,浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统供暖季平均能量利用效率为 0.950,单一中深层地热梯级利用供暖系统供暖季平均能量利用效率为 0.943,浅层地源热泵供暖系统供暖季平均能量利用效率为 0.936。可看出,3 个系统在整个供暖季内均能在运行过程中较为稳定地将地热能转化为可用热能。相比之下,耦合系统能量利用效率最高,波动较为平稳,系统运行最为稳定,通过耦合中深层和浅层地热资源可实现更高效能量转换和利用。

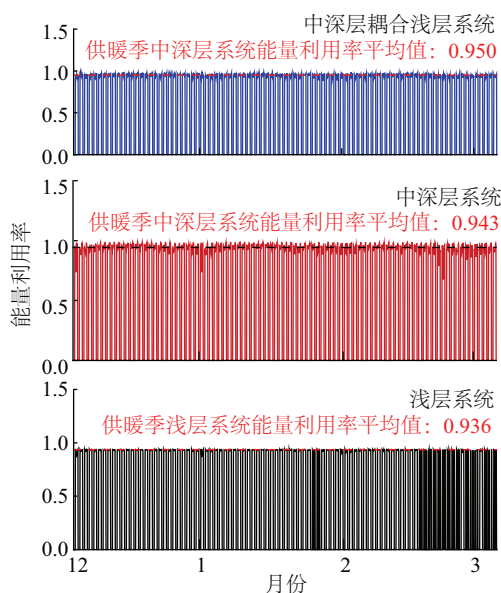


图 12 系统能量利用率变化

Fig. 12 Change chart of system energy utilization rate

4 结 论

本文针对中国城镇化进程供暖能耗递增与环境污染日益严重现状,同时针对目前建筑应用地热供暖存在浅层热地埋管占地面积大、冷热负荷不平衡以及中深层地热打井费用高,初投资多且施工困难等问题,提出浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统,通过 TRNSYS 平台建立仿真模型,模拟南京市某大型商场供暖季运行,对比单一中深层地热梯级利用供暖系统和浅层地源热泵供暖系统,验证耦合系统可行性,

得出以下主要结论:

1) 浅-中深层地热梯级利用耦合供暖系统在末端换热热量方面表现优异,某时刻的换热功率稳定在 4000-6000 kW 区间内处于较高水平,优于单一系统,实现了中深层与浅层地热的优势互补,能为高负荷需求地区持续提供稳定的热量供应且系统整体稳定性强,适应性佳。

2) 耦合系统中深层地热尾水回灌温度多在 30~50 °C 范围内且波动小,浅层地埋管进出口水温波动平缓;同时热泵机组 COP 平均值较高,热泵机组 1、热泵机组 2 的供暖季运行 COP 平均值为 5.50、5.13,运行稳定,表明该耦合系统地热利用效率高,运行稳定。

3) 耦合系统供暖季能量利用效率平均值达 0.950,高于单一系统,表明通过耦合中深层和浅层地热资源,实现了更高效能量转换和利用。

综上,浅/中深层地热梯级利用耦合供热系统性能优良,在能量利用率、稳定性以及对环境温度变化的适应性方面均优于单一的中深层或浅层地源热泵供暖系统,具有较高的可行性与稳定性。未来研究可聚焦于系统优化,如设备选型与参数匹配,提升效率;深入探究不同地质条件与气候区域适应性,以实现地热能科学合理开发和可持续利用。

[参考文献]

- [1] 尹玉龙. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 科技与创新, 2018(5): 57-58.
YIN Y L. Geothermal resources and their potential assessment in China [J]. Science and technology & innovation, 2018(5): 57-58.
- [2] 张晓灵, 李先庭, 石文星. 吸收式地源热泵在北方地区应用可行性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(S2): 69-72.
ZHANG X L, LI X T, SHI W G. The Application feasibility of absorption-type ground source heat pump in china north area [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2009, 36(S2): 69-72.
- [3] AIRA R, FERNÁNDEZ-SEARA J, DIZ R, et al. Experimental analysis of a ground source heat pump in a residential installation after two years in operation [J]. Renewable energy, 2017, 114: 1214-1223.
- [4] XI S P, WANG X. Analysis of temperature field and stress field around vertical u-tube exchange used in ground source heat pump [J]. Advanced materials research, 2014, 3383 (1008/1009): 1097-1100.
- [5] 李双, 朱林, 闫薇, 等. 中深层地源热泵系统研究进展 [J]. 节能, 2023, 42(7): 94-96.
LI S, ZHU L, YAN W, et al. Research progress of medium and deep ground source heat pump system [J].

- Energy conservation, 2023, 42(7): 94-96.
- [6] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4741-4752.
- KONG Y L, CHEN C F, SHAO H B, et al. Principle and capacity quantification of deep-borehole heat exchangers [J]. Chinese journal of geophysics, 2017, 60(12): 4741-4752.
- [7] KOHL T, BRENNI R, EUGSTER W. System performance of a deep borehole heat exchanger [J]. Geothermics, 2002, 31(6): 687-708.
- [8] DENG J W, HE S, WEI Q P, et al. Field test and optimization of heat pumps and water distribution systems in medium-depth geothermal heat pump systems [J]. Energy and buildings, 2020, 209: 109724.
- [9] 李锦堂, 李骥, 张广秋, 等. 中深层地埋管热泵系统供暖侧参数设计方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 1-13.
- LI J T, LI J, ZHANG G Q, et al. Design method for heating source side parameters of medium and deep buried pipe heat pump system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 1-13.
- [10] ALIYU M D, CHEN H P. Sensitivity analysis of deep geothermal reservoir: effect of reservoir parameters on production temperature[J]. Energy, 2017, 129: 101-113.
- [11] 金海峰, 张益谦. 西安地下热水开采现状与合理开发利用探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 40-43.
- JIN H F, ZHANG Y Q. Current state of geothermal water use in Xi'an and its reasonable exploitation[J]. Journal of earth sciences and environment, 2004, 26(3): 40-43.
- [12] 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 财政部, 等. 关于促进地热能开发利用的若干意见[EB/OL]. (2021-09-10)[2022-10-01]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/10/c_1310210548.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance, et al. Several opinions on promoting the development and utilization of geothermal energy [EB/OL]. (2021-09-10) [2022-10-01]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-09/10/c_1310210548.htm.
- [13] 杜赛赛, 张勇, 刘轩, 等. 西北地区带辅助热源的中深层地源热泵供暖系统设计负荷配比分析[J]. 西北水电, 2022(1): 95-98, 102.
- DU S S, ZHANG Y, LIU X, et al. Analysis of design load ratio of medium-depth geothermal heat pump systems with auxiliary heating in northwest China [J]. Northwest water power, 2022(1): 95-98, 102.
- [14] 李建伟, 鲍玲玲, 苗壮, 等. PV/T耦合中深层地源热泵供暖系统运行特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 219-227.
- LI J W, BAO L L, MIAO Z, et al. Research on the operating characteristics of PV/T coupled deep ground source heat pump heating system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 219-227.
- [15] GB 50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 附条文说明[另册][S].
- GB 50736—2012, Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings[S].
- [16] ZARE V. A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy [J]. Energy conversion and management, 2016, 118: 264-274.

DESIGN AND FEASIBILITY STUDY OF COUPLED HEATING SYSTEM FOR SHALLOW-MEDIUM DEEP GEOTHERMAL CASCADE UTILIZATION

Li Meiqing, Li Wenxin, Chen Zhenqian

(College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Taking a large public building in a hot summer and cold winter area as the research object, a simulation model of shallow medium deep geothermal cascade utilization coupled heating was built based on TRNSYS software. The operating characteristics of the shallow medium deep coupled heating system during the heating season were analyzed and compared with a single medium deep geothermal cascade utilization heating system and a shallow ground source heat pump system. The results show that the coupled system is superior to a single deep or shallow geothermal heating system in terms of end heat transfer, geothermal return water temperature, heat pump unit COP, and system energy utilization efficiency. The system is more stable and adaptable. The average energy utilization efficiency of the system reaches 0.95, verifying the feasibility of the coupled system operation.

Keywords: middle deep geothermal energy; cascade utilization; geothermal heating; ground source heat pump; TRNSYS simulation; system energy efficiency