

引用格式:张天安,王睿峰,王泮浩,等.中浅层地埋管换热器负荷不平衡率承载能力影响研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(6):886-893.

ZHANG Tian'an, WANG Ruifeng, WANG Fenghao, et al. Influence of sustainable load imbalance ratio of heat exchanger of medium-shallow borehole[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(6): 886-893.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.06.007

中浅层地埋管换热器负荷不平衡率承载能力影响研究

张天安¹,王睿峰²,王泮浩²,蔡皖龙²,周聪¹,刘博洋¹

(1.陕西中煤新能源有限公司,陕西 西安 710054;2.西安交通大学,陕西 西安 710049)

摘要:埋深较传统浅层地埋管更深的新型中浅层地埋管换热器可承载更大的冷热负荷不平衡率,拓宽了地热能的应用范围。为了探索不同设计参数影响下中浅层地埋管换热器的长期运行性能及负荷不平衡率承载能力大小,基于开源数值模拟平台 OpenGeoSys 建立了考虑管网特性的三维数值计算模型并开展了相关研究。研究结果表明,不同规模中浅层地埋管管群中换热器的负荷不平衡率承载能力有所不同,单根换热器的最大负荷不平衡率为 56%;而位于管群边缘位置的换热器的负荷不平衡率最大(60%),位于管群中心的换热器的负荷不平衡率最小(45%),这说明冷堆积现象对中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率承载能力具有较大影响。因此,在实际运行过程中可以通过关停部分管群中心位置的中浅层地埋管换热器来避免管群整体运行性能的降低。3种不同排布方式下,中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率介于 53%~58%,其中,交错排布下换热器的平均最大负荷不平衡率最高,因此,在实际应用中建议采用交错排布进行布置。研究表明,提出的新型中浅层地埋管换热器具有更大的负荷不平衡率承载能力,十分适用于建筑冷热负荷不平衡地区,相关结论还可为中浅层地埋管换热器的设计提供依据。

关键词:中浅层地埋管换热器;管网特性;负荷不平衡率;长期运行性能;设计参数;布置方式

中图分类号:TE965

文献标识码:A

Influence of sustainable load imbalance ratio of heat exchanger of medium-shallow borehole

ZHANG Tian'an¹, WANG Ruifeng², WANG Fenghao², CAI Wanlong², ZHOU Cong¹, LIU Boyang¹

(1. Shaanxi Zhongmei New Energy Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: The heat exchanger of medium-shallow borehole which have a deeper depth than the traditional ground source heat pump system and can sustain a notable load imbalance ratio and widen the application scope of geothermal energy. In order to investigate the long-term performance of medium-shallow borehole heat exchanger in the area with unbalanced cooling and heating load of buildings and the sustainable load imbalance ratio under different design parameters, a comprehensive numerical model is established based on the OpenGeoSys. The results show that the sustainable load imbalance ratio of medium-shallow borehole heat exchangers change with different scales. The load imbalance ratio of a single heat exchanger is 56%, while the load imbalance ratio of the heat exchanger located at the edge of the array is the largest of 60%, and the load imbalance ratio of the heat exchanger located in the center of the array is the smallest of 45%. This indicates that the cold accumulation phenomenon will reduce the load imbalance ratio of the medium-shallow borehole heat exchanger. Therefore, in the actual operation process, the overall operation performance of the array can be avoided by shutting down some medium-shallow borehole heat exchanger located in the center of the array. Under three different arrangements, the load imbalance ratio of the medium-shallow borehole heat exchangers also changes, ranging from 53% to 58%. The average load imbalance ratio of the medium-shallow borehole heat exchangers in staggered arrangement is the highest, so it is recommended to adopt staggered arrangement in practical application.

收稿日期:2022-06-29。

第一作者简介:张天安(1964—),男,高级工程师,从事地热能综合开发利用研究。地址:陕西省西安市碑林区建东街150号陕西省中煤新能源有限公司,邮政编码:710054。E-mail:515540553@qq.com

The results show that the newly proposed medium-shallow borehole heat exchanger can sustain a notable load imbalance ratio, and provide a basis for the design of medium-shallow borehole heat exchangers.

Keywords: heat exchanger of medium-shallow borehole; pipe network characteristic; load imbalance ratio; long-term performance; design parameter; arrangement

进入21世纪以来,全世界面临着能源消耗急剧增加,环境污染日益严重等问题^[1]。建筑行业目前消耗了全球主要能源使用量的36%,占全球CO₂排放量的40%^[2]。因此,利用可再生能源降低建筑能耗对缓解气候变化具有重要意义。地热能作为一种清洁能源,具有稳定、持续和高效等优点^[3],在供暖、洗浴、农业和工业领域的应用受到了世界各国的广泛关注^[4]。

中国拥有丰富的地热资源,市场发展潜力很大^[5]。近年来,浅层地热能在中国建筑供冷供热领域得到了广泛应用^[6],然而浅层地埋管地源热泵系统在实际应用中存在以下问题:①浅层地埋管地源热泵系统主要利用浅层土壤的蓄热效应。如果在长期运行过程中建筑端冷热负荷不平衡,系统性能将会明显下降^[7-8]。②浅层地埋管地源热泵系统占地面积较大^[9],在实际应用中容易受到场地的限制。浅层地埋管地源热泵系统目前出现的冷、热负荷不平衡现象通常通过增加辅助系统来缓解^[10],这必然会增加系统的初投资、运行成本和控制难度^[11]。因此,分析地源热泵系统在长期运行过程中的土壤热平衡至关重要。

许多学者目前利用负荷不平衡率来分析地源热泵系统的冷热负荷不平衡特征。YANG等^[7]指出,当地源热泵系统排到土壤中的热量远大于从土壤中吸收的热量时,地下热不平衡现象将变得更加严重。QIAN等^[8]发现间歇运行模式可以平衡地下冷、热负荷的堆积,进而提高系统性能。LUO等^[12]发现由于建筑的热负荷远远大于冷负荷,导致地源热泵系统的制冷能效逐渐提高,而供暖能效逐渐降低。这些研究表明,冷负荷和热负荷的不平衡会降低系统的性能。现有关负荷不平衡率的研究大多基于短期模拟^[7,13],并且地埋管换热器的深度基本在200 m以内^[14-15]。

常规浅层地埋管换热器在长期运行过程中需要保持冷热负荷平衡,然而建筑年荷载不平衡现象在许多地区普遍存在。相较于传统深度不超过200 m的浅层地埋管换热器,提出的一种新型中浅层地埋管换热器具有400~600 m埋深。当钻孔深度适当增

加时,中浅层地埋管换热器的供热能力将大于制冷能力^[16],整个系统可承载一定程度的负荷不平衡,因而特别适用于建筑全年冷热负荷不平衡区域。目前中国东北地区已有相关工程实践,但是中浅层地埋管换热器负荷不平衡率的影响因素尚未有学者进行分析。

利用开源数值模拟软件OpenGeoSys-TESPy构建了考虑管间水力交互影响的中浅层地埋管管群模型,并与BEIER的解析解模型进行验证。结果表明中浅层地埋管换热器能够在存在显著全年累计负荷不平衡的情况下长期运行。构建了不同管群规模以及不同排布方式下的中浅层地埋管管群模型,通过详细的数值模拟研究了管群数量以及管群排布方式对中浅层地埋管管群长期运行负荷不平衡率的影响,所得结论可以为中浅层地埋管换热器的设计提供依据。

1 方法

1.1 建立模型

OpenGeoSys软件采用双连续介质有限元法将地埋管换热器模型域划分为两部分:①将钻孔部分简化为一维线性有限元网格(包括中浅层地埋管换热器和周围回填材料);②采用离散的三维棱柱单元来代替土壤部分。钻孔部分和土壤部分之间的耦合采用热通量Robin型边界条件。在三维模型域中求解对流和传导热平衡方程来反映地下的传热过程^[17-18]。OpenGeoSys与解析解相比可以描绘复杂的边界条件和地质参数,与FLUENT、COMSOL等其他成熟的商业软件相比,可以大大减少计算网格数,因此,长期模拟运行时间保持在可接受的水平^[17]。

在实际工程应用中,为满足建筑物的负荷要求,地源热泵系统通常由几十根甚至上百根换热器组成。因此,需要考虑中浅层地埋管换热器地面管网连接产生的水力交互效应,准确计算中浅层地埋管换热器管群的供热和制冷能力。Python热力学计算工具TESPy^[19]通过Newton-Raphson迭代来求解质量和能量平衡控制方程,可用于计算中浅层地埋管换热

器管网中每个管网连接处的压力、质量流量和流体的焓值等参数。其中,中浅层地埋管换热器中循环流体的物性参数则通过Python CoolProp库动态更新^[20]。

在OpenGeoSys中,嵌入了Python接口pybind11,可实现OpenGeoSys和TESPy之间计算数据的相互传输。在每次迭代中,中浅层地埋管换热器的出口温度由OpenGeoSys模拟得到,然后通过pybind11传输到TESPy。TESPy将计算每根中浅层地埋管换热器的入口温度及其流量,以满足施加在管网上的热负荷,然后将这些计算数据传回OpenGeoSys以进行下一次迭代。当迭代结果的标准差小于设定残差时,实现收敛。

中浅层地埋管换热器系统模型示意图(图1)使用的计算模型依据西安地区的地质参数进行建立^[21]。在模型域顶部,采用西安地区的月平均气温作为第一类边界条件;模型域的侧面设置为无热通量边界条件;模型域的底部设置为西安地区标准地地热通量的第二类边界条件。土壤初始温度设定为17.5 °C,常温层的深度约为20 m^[22](在常温层范围内的土壤温度受季节气候变化影响),在常温层以下的所有土壤温度将随深度增加而升高。中浅层地埋管换热器的详细参数如下:换热器长度为500 m,钻井直径为0.15 m,外管外径为0.114 3 m,外管壁厚为0.006 88 m,外管导热系数为14.48 W/(m·K),内管外径为0.042 m,内管壁厚为0.01 m,内管导热系数为0.02 W/(m·K),回填材料密度为2 190 kg/m³,回填材料比热容为1 735.16 J/(kg·K),回填材料导热系数为0.73 W/(m·K),循环流体密度为998 kg/m³,循环流体比热容为4 190 J/(kg·K),循环流体导热系数为

0.6 W/(m·K),循环流体动力黏度为9.31×10⁻⁴ kg/(m·s),地温梯度为31.5 °C/km,岩土体密度为1 120 kg/m³,岩土体比热容为1 780 J/(kg·K),岩土体导热系数为2.4 W/(m·K)。

为避免中浅层地埋管换热器长期运行产生的热羽流对模型边界的干扰,模型域的尺寸设定为100 m×100 m×555 m。考虑到计算成本和精度,需要合理选择模型域的网格大小和时间步长。因此,进行了一系列轴向和垂直网格密度和时间步长无关性检验,检测结果见图2。结果表明,轴向和垂直尺寸的变化对出口温度有一定的影响,较大的网格密度会产生不准确的结果。因此,轴向网格密度设置为8 m,垂直网格密度设置为50 m。时间步长的变化对计算结果影响不大,因此在模拟过程中将时间步长设定为1 h,而后随运行时间逐渐增加到24 h。

1.2 验证模型

OpenGeoSys所使用的地埋管换热计算模型已经过多位学者通过解析解模型、数值解模型和实测数据进行了验证^[17,23-24]。使用BEIER提出的地埋管换热解析解模型进行验证^[25],该模型考虑了地温梯度,能够很好地刻画中浅层地埋管换热器的换热特性。从图3可以看出,OpenGeoSys计算的循环流体进出口温度与BEIER解析解模型的计算结果吻合较好。在模拟前期,系统尚未达到稳态,2个模型的出口温度相对误差达到最大值1.5%,之后2个模型之间的相对误差逐渐减小。验证结果表明,构建的中浅层地埋管换热器模型具有足够的准确性,可用于长期性能研究。

2 结果

2.1 负荷不平衡率

负荷不平衡率可以用来评估中浅层地埋管换热器的累计热负荷和冷负荷之间的差异水平,其定义如下:

$$I = \frac{Q_{\text{AHI}} - Q_{\text{ACS}}}{\max(Q_{\text{AHI}}, Q_{\text{ACS}})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I 为中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率,%; Q_{AHI} 为中浅层地埋管换热器在供暖季节提供的热量,J; Q_{ACS} 为中浅层地埋管换热器在夏季提供的冷量,J。

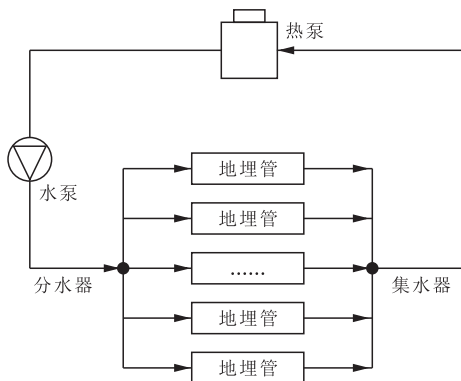


图1 中浅层地埋管换热器系统模型示意图

Fig. 1 Diagram of medium-shallow borehole heat exchanger system model

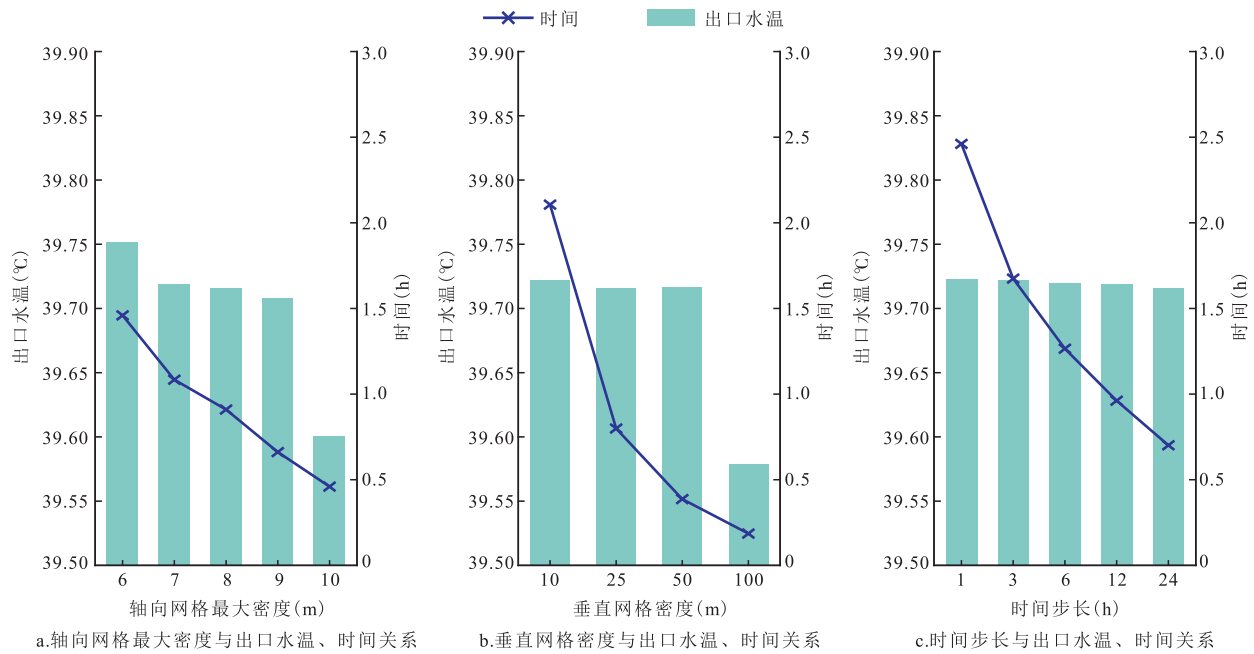


图2 OpenGeoSys在不同网格密度和时间步长下的出口水温和模拟所需时间

Fig. 2 Outlet temperature and simulation time of OpenGeoSys under different grid densities and time steps

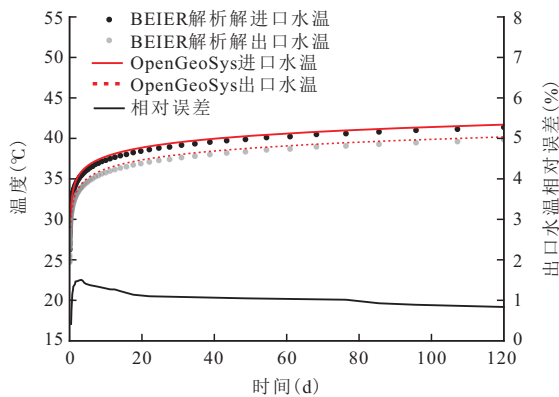


图3 BEIER解析解和OpenGeoSys构建的中浅层地埋管换热器模型进出口温度对比

Fig. 3 Comparison of inlet and outlet temperatures between medium-shallow borehole heat exchanger model constructed by BEIER's analytical solution and OpenGeoSys

2.2 管群规模

图4给出了3种不同数量中浅层地埋管管群的排布方式。模型I、II和III分别由1、4和9根换热器组成,相邻换热器的间距为4 m,符合国家标准《地源热泵系统工程技术规范:GB 50366—2009》中地埋管换热器间距应为3~6 m的要求^[26]。换热器分别使用

编号模型I中1号、模型II中1号、模型II中2号换热器等进行代替。

根据国家标准《地源热泵系统工程技术规范:GB 50366—2009》^[26],地埋管换热器在夏季的最高出口温度应低于33 °C,且不含防冻剂的地埋管换热器在供暖季运行时,最低出口温度应高于4 °C。为了满足中浅层地埋管换热器入口和出口温度的阈值, Q_{AHI} 和 Q_{ACS} 的值被限制在特定范围内。因此,通过改变夏季和冬季中浅层地埋管换热器的每延米负荷,然后进行多组数值模拟,可找到 Q_{AHI} 和 Q_{ACS} 的最大承载能力。根据该范围可以计算出中浅层地埋管换热器所能承受的最大负荷不平衡率。

为了找到图4中模型I所示单根中浅层地埋管换热器 Q_{AHI} 和 Q_{ACS} 的范围,设置了3种不同的工况(表1)。在工况1和工况2下,中浅层地埋管换热器提供热量相同,而在工况1和工况3下,施加在中浅层地埋管换热器上的冷负荷相同。

图5显示了上述3种不同工况下中浅层地埋管换热器出口水温15 a的变化情况。可以看出,由于中浅层地埋管换热器的制热能力更强,中浅层地埋管换热器的出口水温整体呈下降趋势,也就意味着中浅层地埋管换热器从土壤中吸收的热量远大于排

表1 中浅层地埋管换热器不同工况
Table 1 Different scenarios of medium-shallow borehole heat exchanger

序号	供暖季负荷		制冷季负荷	
	每延米负荷 (W)	累计负荷 (kW)	每延米负荷 (W)	累计负荷 (kW)
工况1	68	34.0	30	15.0
工况2	68	34.0	31	15.5
工况3	69	34.5	30	15.0

出的热量,导致土壤温度降低。工况1、2和3的最低出口水温分别为4.12,4.17,3.80 °C。工况1和工况2相比,由于夏季负荷的增加有利于土壤温度的恢复,因此,工况2中中浅层地埋管换热器的最低出口温度较高。工况1和工况3相比,在相同冷负荷下,热负荷的增加会降低中浅层地埋管换热器的最低出口温度。

综上所述,中浅层地埋管换热器的热负荷不应超过68 W/m,即 Q_{AHI} 不大于 5.29×10^{12} J。针对工况1、2和3,中浅层地埋管换热器的最高出口水温分别

为32.72,33.01,32.70 °C,其中工况2中的最高出口温度不符合要求。中浅层地埋管换热器的最高出口温度随着冷负荷的增加而增加,因此,为了满足33 °C的阈值要求,中浅层地埋管换热器在夏季的负荷不应大于30 W/m,这意味着中浅层地埋管换热器的 Q_{ACS} 最多为 2.33×10^{12} J。在获得 Q_{ACS} 和 Q_{AHI} 的范围后,可以计算出在满足中浅层地埋管换热器15 a长期稳定运行条件下的最大负荷不平衡率为56%。

对由4根和9根中浅层地埋管换热器组成的模型II和模型III设置了6种不同的工况。每种工况下,中浅层地埋管换热器的平均每延米冷负荷和热负荷分别为模型I中单根中浅层地埋管换热器最大冷负荷和热负荷的100%、90%、80%、70%、60%、50%,然后对这6种工况进行了15 a的长期模拟,找到满足中浅层地埋管换热器进出口水温阈值的工况,进而计算出典型位置中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率,最终结果见图6。从图6中可以看到,所选5根典型位置处的中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率在15 a的长期运行过程中基本没有变化。其中模型II

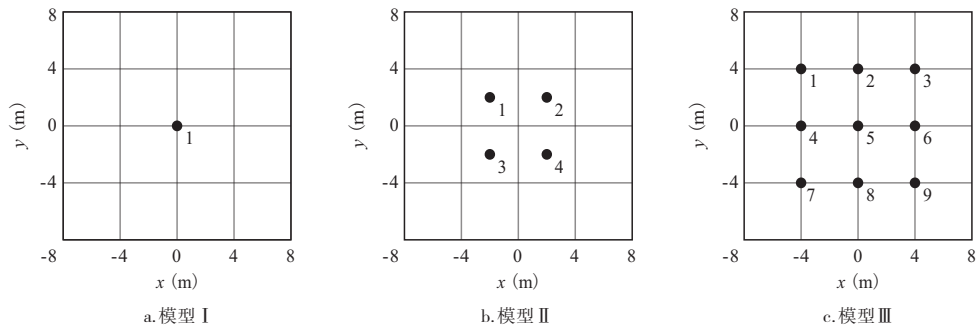


图4 3种不同数量下中浅层地埋管群模型示意图

Fig. 4 Diagram of three different numbers of medium-shallow borehole heat exchanger array models

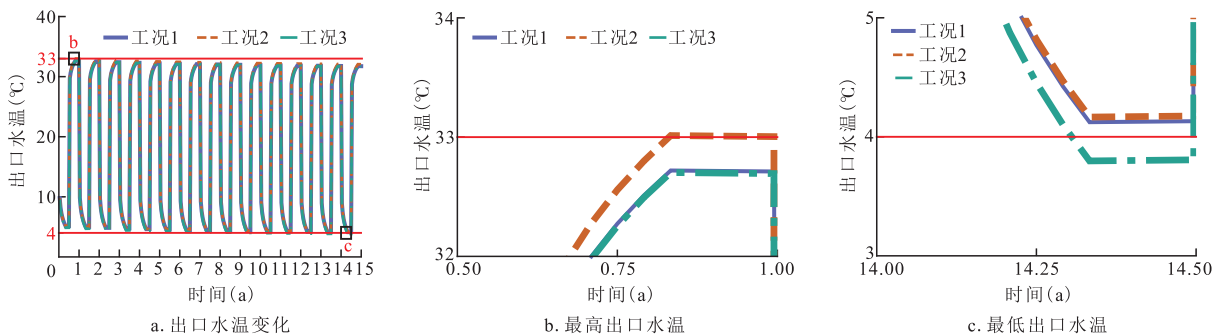


图5 3种不同工况下中浅层地埋管换热器出口水温对比

Fig. 5 Comparison of outlet temperature of medium-shallow borehole heat exchanger under three different scenarios.

的4根中浅层地埋管换热器的位置是对称的,因此,中浅层地埋管换热器模型Ⅱ中1号与模型Ⅰ中1号的负荷不平衡率基本一致。换热器模型Ⅲ中1号的负荷不平衡率是最高的,始终在60%左右,模型Ⅲ中2号的负荷不平衡率则在53.5%左右,模型Ⅲ中5号的负荷不平衡率则是最低的,在45%左右变化。仅有模型Ⅲ中位于管群边缘的换热器模型Ⅲ中1号的负荷不平衡率大于模型Ⅰ中单根中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率,这说明冷负荷的堆积会降低中浅层地埋管换热器的最大负荷不平衡率,因此,在实际运行过程中可以通过关停部分管群中心位置的中浅层地埋管换热器来避免管群整体运行性能降低。

2.3 管群排布方式

为了研究管群排布方式对中浅层地埋管换热器负荷不平衡率的影响,以上述模型Ⅱ为基础构建了

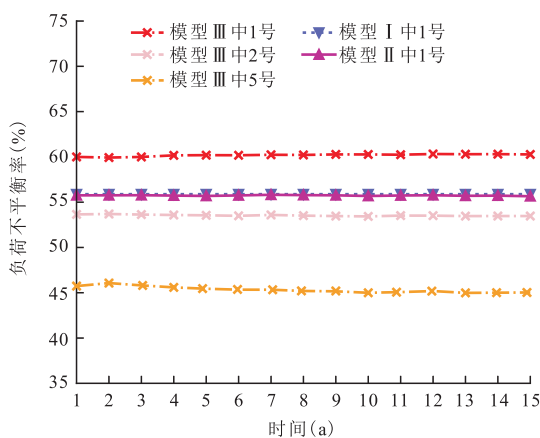


图6 不同数量下典型位置中浅层地埋管换热器负荷不平衡率

Fig. 6 Load imbalance ratio of medium-shallow borehole heat exchangers in typical location under different numbers

单排、正方形以及交错排布等3种不同排布方式,详细布置见图7。3种不同排布方式情况下,相邻中浅层地埋管换热器的间距均设置为4 m。

图8显示的是上述3种不同排布方式下典型位置中浅层地埋管换热器,也就是模型Ⅰ中1号、模型Ⅰ中2号、模型Ⅱ中1号、模型Ⅲ中1号、模型Ⅲ中2号负荷不平衡率随时间的变化。可以看到所选5根典型位置处的中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率在15 a的长期运行过程中基本没有变化。中浅层地埋管换热器模型Ⅰ中1号的负荷不平衡率是最高的,始终维持在58%左右,而模型Ⅰ中2号的负荷不平衡率是最低的,为53%左右,这与前面所述冷堆积会降低中浅层地埋管换热器的负荷不平衡率的结论相吻合。模型Ⅲ中1号的负荷不平衡率为57%左右,而模型Ⅲ中2号的负荷不平衡率为54.5%左右,这说明换热器模型Ⅲ中2号附近的冷堆积现象更为严重。3种不同排布下中浅层地埋管换热器的最大负荷不平衡率介于53%~58%,其中交错排布下4根换热器的平均最大负荷不平衡率最高,因此,在实际应用中建议采用交错排布进行布置。

3 结论

提出和建立了考虑管间水力交互的中浅层地埋管管群模型,并与BEIER解析解模型进行验证,表明所述中浅层地埋管换热器能够在存在显著全年累计负荷不平衡的情况下长期运行,适用于年建筑冷热负荷不平衡性较强的地区。接着研究了管群数量以及管群排布方式对中浅层地埋管管群长期运行负荷不平衡率的影响。主要研究结论如下:

1) 所建中浅层地埋管换热器模型与BEIER解

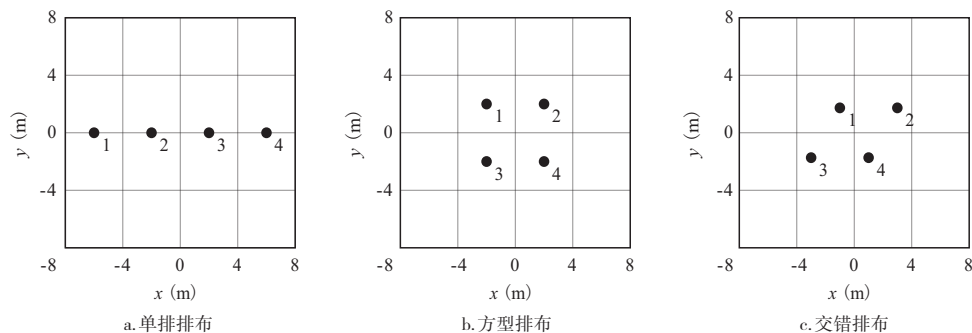


图7 3种不同排布方式下中浅层地埋管管群模型示意图

Fig. 7 Diagram of three different arrangement geometry of medium-shallow borehole heat exchanger array models

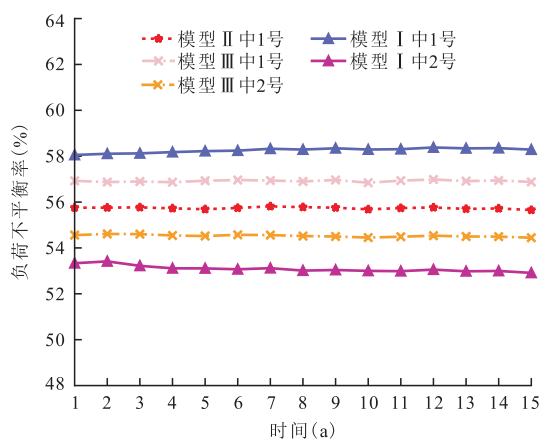


图8 不同排布形式下典型位置中浅层地埋管换热器负荷不平衡率

Fig. 8 Load imbalance ratio of medium-shallow borehole heat exchangers in typical location under different arrangement

析解模型的计算结果吻合较好,2个模型的出口温度相对误差最大为1.5%,表明构建的中浅层地埋管换热器模型具有足够的准确性,可用于长期性能研究。

2) 单根换热器的最大负荷不平衡率为56%,而位于管群边缘及中心位置的换热器的最大负荷不平衡率分别为60%、45%,说明管间交互影响产生的冷堆积现象会降低中浅层地埋管换热器的最大负荷不平衡率承载能力,因此,在实际运行过程中可以通过关停部分管群中心位置的中浅层地埋管换热器来避免管群整体运行性能的降低。

3) 中浅层地埋管管群的排布方式不同时,换热器的最大负荷不平衡率承载能力介于53%~58%,其中交错排布下换热器的平均最大负荷不平衡率最高,因此,在实际应用中建议采用交错排布进行布置以提高系统运行效率。

参考文献

- [1] VERMA P, KUMARI T, RAGHUBANSHI A S. Energy emissions, consumption and impact of urban households: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147: 111210.
- [2] ZHANG S C, FU Y J, YANG X Y, et al. Assessment of mid-to-long term energy saving impacts of nearly zero energy building incentive policies in cold region of China[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 241: 110938.
- [3] AUSTIN A, BEHNAZ R. Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future[J]. *Applied Energy*, 2019, 248: 18-34.
- [4] JOHN W L, ANIKO N T. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. *Geothermics*, 2021, 90: 101915.
- [5] 王洋浩,蔡皖龙,王铭,等.地热能供热技术研究现状及展望

[J]. *制冷学报*, 2021, 42(1): 14-22.

WANG Fenghao, CAI Wanlong, WANG Ming, et al. Status and outlook for research on geothermal heating technology[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(1): 14-22.

- [6] 中国地质调查局.中国地热能发展报告(2018)[R].北京:中国石化出版社,2018.
China Geological Survey. China geothermal energy development report (2018) [R]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.
- [7] YANG W B, CHEN Y P, SHI M H, et al. Numerical investigation on the underground thermal imbalance of ground-coupled heat pump operated in cooling-dominated district[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58: 626-637.
- [8] QIAN H, WANG Y G. Modeling the interactions between the performance of ground source heat pumps and soil temperature variations[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2014, 23: 115-121.
- [9] HOU G Y, HESSAM T, SONG Y, et al. A systematic review on optimal analysis of horizontal heat exchangers in ground source heat pump systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 154: 111830.
- [10] HU Z C, GENG S W, HUANG Y F, et al. Heat storage characteristics and application analysis of heat source tower in soil thermal balance of ground source heat pump[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 235: 110752.
- [11] DENIS G, RUCHI C, KENICHI S. Risk based lifetime costs assessment of a ground source heat pump (GSHP) system design: Methodology and case study[J]. *Building and Environment*, 2013, 60: 66-80.
- [12] LUO J, JOACHIM R, MANFRED B, et al. Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany[J]. *Geothermics*, 2015, 53: 57-66.
- [13] CHEN F, MAO J F, ZHU G D, et al. Numerical assessment on the thermal imbalance of multiple ground heat exchangers connected in parallel[J]. *Geothermics*, 2021, 96: 102191.
- [14] MASSIMO C, PARHAM E N. A simulation model for solar assisted shallow ground heat exchangers in series arrangement [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 157: 227-246.
- [15] YOU T, WANG B L, WU W, et al. A new solution for underground thermal imbalance of ground-coupled heat pump systems in cold regions: Heat compensation unit with thermosyphon[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64 (1): 283-292.
- [16] ZHAI X Q, CHENG X W, WANG R Z. Heating and cooling performance of a mini-type ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 1366-1370.
- [17] CHEN S, FRANCESCO W, OLAF K, et al. Shifted thermal extraction rates in large borehole heat exchanger array: A numerical experiment[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167: 114750.
- [18] PHILIPP H, OLAF K, UWE-JENS G, et al. A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 421-433.

- [19] FRANCESCO W, ILJA T. TESPpy: Thermal engineering systems in python[J]. Open Source Software, 2020, 5: 2178.
- [20] BELL I H, WRONSKI J, QUOILIN S, et al. Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53: 2498–2508.
- [21] CAI W L, WANG F H, CHEN S, et al. Analysis of heat extraction performance and long-term sustainability for multiple deep borehole heat exchanger array: A project-based study[J]. Applied Energy, 2021, 289: 116590.
- [22] 周阳, 穆根胥, 张卉, 等. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 1017–1026.
ZHOU Yang, MU Genxu, ZHANG Hui, et al. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 1017–1026.
- [23] CHEN S, CAI W L, FRANCESCO W, et al. Long-term thermal imbalance in large borehole heat exchangers array: A numerical study based on the Leicester project[J]. Energy and Buildings, 2021, 231: 110518.
- [24] JAKOB R, CHEN S, KATRIN L, et al. Modeling neighborhood scale shallow geothermal energy utilization: A case study in Berlin[J]. Geotherm Energy, 2022, 10: 1–26.
- [25] RICHARD A B. Thermal response tests on deep borehole heat exchangers with geothermal gradient[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115447.
- [26] 中华人民共和国建设部. 地源热泵系统工程技术规范: GB 50366—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical code for ground-source heat pump system: GB 50366—2009[S]. Beijing, China Architecture and Building Press, 2009.

(编辑 黄颖)

(上接第849页)

- [14] 周武. 鄂尔多斯地块东南缘与汾渭地堑接壤地带寻找深部岩溶地热水新突破[J]. 地下水, 2020, 42(4): 106–107.
ZHOU Wu. A new breakthrough was made in the search for deep karst geothermal water in the southeastern edge of the Ordos block and the border zone of Fenwei Graben[J]. Ground Water, 2020, 42(4): 106–107.
- [15] 王兴. 渭河盆地地温场特征与地热系统[J]. 陕西煤炭技术, 1997, 16(2): 43–50.
WANG Xing. Characteristics of geothermal field and geothermal system in Weihe Basin[J]. Shaanxi Coal Technology, 1997, 16(2): 43–50.
- [16] 李剑. 韩城区块水文地质条件对煤层气开发的影响[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
LING Jian. The influence of hydrogeological condition on coalbed methane development in the Hancheng Area[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2019.
- [17] 阎凤忠, 贺勇, 安卫平, 等. 韩城—侯马断陷区主要活动断裂的调查[J]. 山西地震, 1987, 15(3): 9–13.
YAN Fengzhong, HE Yong, AN Weiping, et al. Investigation of major active faults in Hancheng–Houma Fault Depression Zone [J]. Earthquake Research in Shanxi, 1987, 15(3): 9–13.
- [18] 代革联. 地质构造对韩城矿区水文地质特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 62–67.
DAI Gelian. The effect of geology structure on hydrogeology characteristics of Hancheng mining area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 62–67.
- [19] 周绍武. 恒温带取值与简易测温温度校正的统计分析法[J]. 中国煤田地质, 1989, 1(1): 30–34.
ZHOU Shaowu. The statistical analysis method of constant temperature zone value and simple temperature measurement and correction[J]. Coal Geology of China, 1989, 1(1): 30–34.
- [20] 李济琛, 陈明珠, 汤强, 等. 南京市浅层地温场研究——基于分布式光纤测温技术[J]. 中国地质, 2021, 48(3): 939–947.
LI Jichen, CHEN Mingzhu, TANG Qiang, et al. Study on shallow geothermal field in Nanjing: Based on distributed optical fiber temperature measurement system[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 939–947.
- [21] 能源行业地热能专业标准化技术委员. 地热能术语: 第2部分 术语和定义: NB/T 10097—2018[S]. 北京: 国家能源局, 2018.
Energy industry geothermal energy standardization technical committee. Terminology of geothermal energy, the 2nd part Terminology & Definition: NB/T 10097—2018[S]. Beijing: National energy administration, 2018.
- [22] 穆根胥, 李锋, 闫文中, 等. 关中盆地地热资源赋存规律及开发利用关键技术[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
MU Genxu, LI Feng, YAN Wenzhong, et al. Occurrence law and key technologies of development and utilization of geothermal resources for in Guanzhong Basin[M]. Beijing: Geology Press, 2016.
- [23] 王佳武, 罗安云, 唐力, 等. 陕西渭北东部岩溶热水分布特征及开发利用[J]. 陕西地质, 2015, 33(2): 84–89.
WANG Jiawu, LUO Anyun, TANG Li, et al. Exploitation and distribution of carst thermal water in the east of north Weihe River in Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 2015, 33(2): 84–89.
- [24] 李建宁, 马汉田, 王英, 等. 晋陕河津——韩城地区岩溶地下水勘查报告[R]. 北京: 国家能源局, 2004: 34.
LI Jianning, MA Hantian, WANG Ying, et al. Karst groundwater investigation report in Hejin–Hancheng region of Shanxi Province and Shaanxi Province[R]. Beijing: National Energy Administration, 2004: 34.

(编辑 郭群)