

引用格式:张育平,杨潇,刘俊,等.地源热泵系统能效提升途径[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):726-740.

ZAHNG Yuping, YANG Xiao, LIU Jun, et al. Overview of solutions to improve efficiency of ground source heat pump system[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 726-740.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.06.003

地源热泵系统能效提升途径

张育平¹,杨潇²,刘俊¹,刘博洋³,汤伏蛟²,谭忆秋²

(1.陕西省煤田地质集团有限公司,自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西 西安 710026;
2.哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150006;3.陕西中煤新能源有限公司,陕西 西安 710054)

摘要:浅层地热可被用于路面融雪除冰,建筑供热、制冷等。闭环垂直地埋管是浅层地热资源利用最常见形式,其在终端负荷作用下与岩土体进行热量交换。单根地埋管获取地热资源能力有限,多根埋管组合形式(地埋管群)被广泛应用于地源热泵系统。然而,地下温度场受管群与岩土换热性能影响,在设计、运行等不合理条件下可导致岩土体温度场不平衡,进而造成地源热泵系统能效降低,甚至失效。因此,管群设计、运行等方案优化是解决地温场不平衡问题的必要途径。基于国内外相关研究成果,梳理管群优化设计方法、储能和去能方法、辅助热源和冷源方法、运行控制策略。其中,管群优化设计方法主要聚焦管群间距设计、排布方式等;储能和去能方法主要介绍利用太阳能、工业废热等外部热源和冷源对地下岩土体进行加热和降温等的最新研究成果;辅助热源和冷源部分重点介绍太阳能、冷却塔等在地源热泵系统中的应用;运行控制策略主要分析地源热泵系统运行控制方案,包括峰点冷热负荷运行、间歇性运行、分区运行、系统控制策略等方案。总结了管群优化设计方法、运行控制策略等,剖析了各方案的优点与不足,可为管群岩土体温度场不平衡解决方案与地源热泵系统能效提升途径提供参考。

关键词:地热能;地埋管群;地温场;储能;辅助热源和冷源;运行策略

中图分类号:TE965

文献标识码:A

Overview of solutions to improve efficiency of ground source heat pump system

ZAHNG Yuping¹, YANG Xiao², LIU Jun¹, LIU Boyang³, TANG Fujiao², TAN Yiqiu²

(1. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710026, China; 2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150006, China; 3. Shaanxi Zhongmei New Energy Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Shallow geothermal energy, with applications ranging from road snow melting and deicing to building heating/cooling, primarily utilizes closed-loop vertical buried pipes for resource exploitation. These pipes function by exchanging heat with the subterranean zone under specific cooling or heating loads. Given the limited capacity of a single vertical ground heat exchanger to harness geothermal resources, arrays of these exchangers are more commonly employed to effectively tap into shallow geothermal resources. However, the underground temperature field can be significantly affected by the heat exchange process between the ground heat exchanger array and the surrounding soil. Improper design and operational conditions can lead to an imbalance in the underground temperature field, potentially resulting in energy deficiencies and the malfunctioning of Ground Source Heat Pump Systems (GSHPs). Therefore, optimizing the design and operation scheme of ground heat exchanger array is the key to solve the imbalance of underground temperature field. The review summarizes the domestic and foreign research results, outlining various

收稿日期:2023-03-13。

第一作者简介:张育平(1966—),男,博士,教授级高工,从事地热能开发与利用的研究。地址:陕西省西安市经开区文景路26号,邮政编码:710026。E-mail: xazyp@163.com

通信作者简介:汤伏蛟(1990—),男,博士,讲师,从事能源岩土与道路工程的研究。地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街92号哈尔滨工业大学,邮政编码:150006。E-mail: fujiao.tang@hit.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目“大气环境作用下沥青路面水蒸发与渗流耦合行为及湿度演化规律研究”(52208433);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目“陕西省地热能高效利用技术‘科学家+工程师’队伍”(2022KXY-039);中国博士后科学基金特别资助项目“浅层地源式寒区流体加热路面系统优化设计研究”(2021TQ0090)。

methods for energy storage and removal, incorporating auxiliary heating and cooling sources, and exploring relevant optimization techniques. The borehole array design optimization methods include primarily the distance between the pipe and the borehole layout. The energy storage/removal section mainly introduces the latest research results of borehole heat exchanger array by using external heat/cold sources such as solar energy and industrial waste heat. The auxiliary method mainly describes the latest researches on the application of resources like solar energy and heating towers. The operation control strategy mainly analyzes the operation control of the ground source heat pump system, including the peak cooling and heating load operation, intermittent operation, partition operation, system control strategy, etc. By thoroughly examining these optimization approaches and operational control strategies, the review provides a comprehensive analysis of the advantages and disadvantages of each scheme. This detailed evaluation serves as a valuable reference for improving the energy efficiency of GSHPS, ensuring sustainable and effective utilization of shallow geothermal resources.

Keywords: geothermal energy; ground heat exchanger array; underground temperature field; energy storage; auxiliary heating/cooling source; control strategy

中国为能源消耗大国,能源短缺与消耗的化石能源过高是限制中国实现可持续发展重要阻碍。据统计,2022年全国能源消费总量为 54.1×10^8 t标准煤,比2021年增长2.9%。其中,煤炭消费量增长4.3%,原油消费量下降3.1%,天然气消费量下降1.2%,电力消费量增长3.6%^[1]。2030年前CO₂排放达到峰值与2060年前实现碳中和的“双碳”目标给中国新能源和可再生能源的开发利用带来了机遇与挑战,例如地热能、太阳能、风能等可再生能源在近些年发展迅速。中国地热储量约为全球地热储量的1/6,以中低温资源为主^[2-3]。中国南方地区,浅层地温梯度平均值为0.025 K/m,北方地区平均值为0.03 K/m,年可开采浅层地热资源量折合约为 7×10^8 t标准煤^[2]。浅层地热能作为一种可再生资源,具有分布广泛、资源丰富、稳定可靠、开发利用相对简单等优点,逐渐被应用于交通业、建筑业、畜牧业、农业等领域。北京大兴机场流体加热系统等工程研究表明,地源热泵系统的合理运行可在满足终端道路除冰雪需求的基础上达到节能减排的效果,助力中国机场交通基础设施在保障飞机滑行安全的同时实现“双碳”战略目标^[4-5]。地源热泵系统(Ground Source Heat Pump System,简称GSHPS)以地热能作为冷源或热源,通过热泵机组将冷源或热源输送至用户端,达到节能目标^[6],比传统空气源热泵(Air Source Heat Pump System,简称ASHPS)可节省约40%的能耗^[7]。近年来,中国浅层地热能的开发利用增速较高,总装机容量在2020年底已达到 2.6×10^4 MW,连续20多年处于世界领先地位^[8-9]。地埋管是地源热泵系统的核心组成部分,合理提升地埋管换热效果对推广地源热泵系统具有重要意义^[10]。

地源热泵系统由于气候条件、使用场景、运行策略等差异而具有不同的冷热负荷。对于加热为主的埋管热泵系统,如中国北方流体加热型融冰除雪路面(图1),寒冷季节埋管取热量大于夏季释放到岩土中的热量,造成第二个采暖季开始时岩土体温度不能恢复到第一个采暖季开始时的温度,从而使岩土体温度下降,且可能出现岩土体温度逐年下降的现象。反之,对于制冷为主需求,大量热能将会在炎热季节释放到地下空间,导致热堆积,而采暖季节不能将岩土体温度降低到初始状态,进而出现岩土体温度上升现象。单一加热或制冷地源热泵系统常导致地温异常,削弱热泵系统能效,两者共同作用有利于岩土体温度恢复,然而冷热负荷不匹配仍可导致岩土体温度场失衡现象^[11]。地源热泵系统在长期制冷或供热负荷不平衡的运行工况下可造成岩土体温度无法恢复到起始温度,且这种不平衡现象一般会随地源热泵系统的使用年限而加剧,出现岩土体高温或低温导致的热源或冷源积聚现象,进一步引发地源热泵系统在运行期间的节能特性逐年降低,甚至在短期内造成地源热泵系统因节能特征不满足

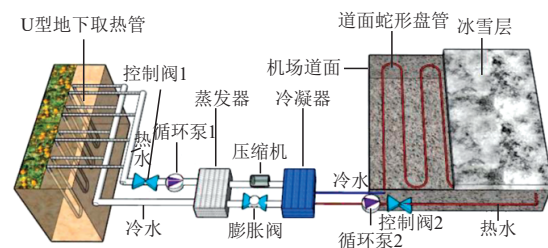


图1 路面除冰雪型地源热泵系统(据文献[4-5]修改)
Fig. 1 Ground source heat pump system in pavement heating

要求而被迫关闭^[12]。

地埋管群管设计不合理、不采用辅助冷源和热源、系统运行控制策略不佳是导致地源热泵系统性能下降的主要因素。针对冷热负荷提出相对应热源和冷源积聚区域,解决办法是解决岩土体温度场不平衡现象以及提高系统能效的关键。近年来,有诸多关于地埋管群地源热泵系统优化方案的研究,主要包括地埋管群优化设计方法、地下储能和去能方法、辅助热源和冷源方法与冷热负荷管理方法等。GULTEKIN等^[13]研究了埋管群排布方式对地埋管群综合换热能力的影响,结果表明,采用直线型埋管排布方法可有效减轻地下温度场不平衡现象,该研究结果证明地埋管群优化设计可以有助于维持地下岩土体的温度均衡。NARANJO-MENDOZA等^[14]研究了地源热泵系统储能效果,超过一年半的实验结果表明,跨季节将太阳能通过地埋管等方式存储于地下介质,有利于实现地下温度场平衡,从而提高系统能效,说明通过将热源或者冷源存储于地下空间对保持地下岩土体温度平衡有积极作用。SI等^[15]采用TRNSYS软件模拟了北京地区太阳能-地源热泵系统加热能效,研究结果表明,太阳能集热器-地埋管串联运行模式与太阳能集热板-地埋管昼夜储能分配模式较单地源热泵系统具有更优性能,且运行10 a后太阳能集热器-地埋管串联运行模式系统地温下降0.8 °C,表明在地源热泵系统之中采用辅助热源或冷源方法有利于提高地源热泵系统性能。LAZZARI等^[16]研究了无地下水渗流作用影响下地埋管群在50 a运行期间的能效表现,研究结果表明,单-冷热负荷工况是造成地源热泵系统性能逐年下降的重要原因,可见合理的终端冷热负荷是提升地源热泵系统节能水平有效的手段。

结合最新研究成果,综述提升地源热泵系统性能的关键因素,重点从管群设计、地下储能和去能、辅助热源和冷源、系统运行控制策略等方面对岩土体温度场与地源热泵系统能效的影响进行归纳总结。

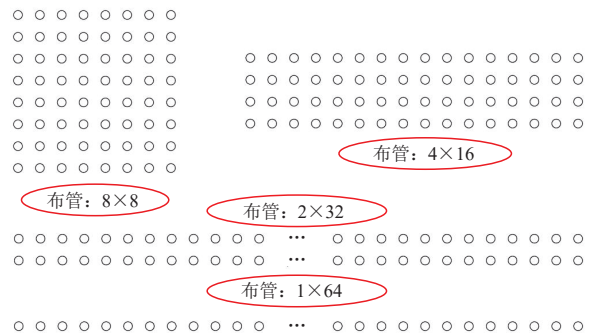
1 管群优化设计方法

地埋管系统设计因素主要包括地质条件、初始地温、地埋管间距、地埋管管型结构与排布方式、冷热负荷、埋管深度、钻孔回填料、管内载液及运行工况等,主要影响因素为埋管间距、排布方式、终端

冷热负荷。重点介绍地埋管群埋管间距与管群几何模型对地源热泵换热系统的影响及可优化途径。

地埋管内部载液主要通过热对流与周围岩土体进行热交换,传递到岩土体中的热量在无地下水作用下主要通过热传导向远端岩土体扩散。在同工程地质与设计参数相关的条件下,地埋管群管间距越大,管间温度场相互干扰越小。管间距推荐值与工程地质条件及管群负荷密切相关,在实际工程中应当采用热响应测试方法调查岩土体热物理参数与水文参数,并根据地源热泵系统季节性冷热负荷对管间距做出综合判定。由于工程地质调查与验算工作存在投资大、计算专业性强等特点,不同国家和地区对管间距推荐值做出国家或者行业内的规定,而这些规定采用的管间距标准存在差异。例如,瑞典规范规定管间距推荐值为20 m,德国为5~6 m,而中国为3~6 m^[17]。管群间距小可增加单位面积内埋管数量,然而同样造成管间热干扰增加,加剧岩土体温度场不平衡现象,最终造成地源热泵系统能效降低^[8-10]。

目前存在较多关于地埋管群排布方式的研究,主要集中于管群整体布设形状。研究结果表明,在同样数量地埋管的基础上,长宽比显著(图2)的布管模式利于减小管间热干扰,降低地下温度场失衡水平,进而提高地源热泵系统能效^[13]。例如,等埋管数量的地源热泵系统采用直线排布方式比长方形方式更利于维持岩土体温度平衡,长方形布管形状优于正方形布管模式,正方形排布形状的埋管群较圆形排布的埋管群换热效果更加优异^[18]。研



注:布管方式为行数×列数,单位根。

图2 不同的地埋管群布置方法
Fig. 2 Different underground borehole heat exchanger array layouts

究表明,埋管群采用直线排布时地源热泵能效(Coefficient of Performance,简称COP)5 a平均值较正方形排布模式在制冷模式下可提高12%,在加热模式下可提高16%^[19],定区域下埋管排布方式对地源热泵系统性能的影响可忽略不计^[20]。地下水渗流作用同样对管群布管形式有一定影响,在无地下水渗流作用影响的前提下,适当提升埋管群外侧埋管冷热负荷配比有利于通过边缘埋管将积聚热量传至远端,进而提升地源热泵系统能效;在有地下水渗流作用工程地质条件下,埋管群周围岩土体温度场受地下水流速及流动方向的影响,增加外侧及下游埋管负荷,有利于利用地下水渗流产生的热对流作用带走不平衡温度,利于岩土体温度场平衡,进而提升埋管群换热效率^[21]。根据埋管群热干扰特点,管群中心区域岩土体温度在无地下水作用下由于积聚的热量难以向周围岩土体扩散,受干扰严重。因此,埋管群中心区域布管数量相对稀疏,有利于提高地下岩土体温度平衡^[22]。

因此,增加埋管群管间距与直线排布方式可缓解岩土体温度不平衡现象,提升地源热泵系统能效。地下水渗流作用下可通过提高外侧埋管负荷缓解岩土体温度不平衡问题。实际工程中,埋管排布方式受到地域条件限制,在限定区域内研究更合理的管群排布方式对于提高地源热泵系统能效具有更强工程意义。研究表明,采用W型和双U型埋管也可以在一定程度上提升地源热泵系统能效^[19]。尽管通过增加埋管间距、埋管排布优化布置等管群设计方法有利于减小埋管之间的相互扰动造成的热泵系统能效降低问题,此类方法仅适用于岩土体温度场受扰动较小工程,对于冷热负荷不平衡较严重地源热泵系统而言,仅增大埋管设计间距与优化布置方法不足以解决岩土体温度场不平衡问题。

2 储能和去能方法

储能方法可通过埋管群等途径把传统化石燃料、太阳能、工业废热等热源存储于岩土体等介质。相反,去能方法可通过埋管群等方法将冷源存储于岩土体等介质。此类方法可减轻岩土体温度场不平衡现象,提升系统综合能效。

储能方法一般适用于埋管全年取热量大于全

年放热量场景。该方法可通过埋管群将太阳能、工业废热等外部能量存储于岩土体等介质。相变材料(Phase Change Material,简称PCM)具有在相变发生时可放出或吸收大量热的特性。因此,相变储能技术有应用于地源热泵系统的潜力,应对地下温度场热不平衡问题。

相反,对于年均热负荷低于冷负荷工程,系统长期运行可导致岩土体热负荷集聚,降低地源热泵系统制冷性能。因此,采用适宜的去能方法降低地下温度场或采用辅助手段减少埋管系统总散热量是提升制冷为主型热泵系统性能的重要途径。

2.1 储能方法

对于供热为主地区,通过将太阳能、工业废热等能源存储于岩土中可用于冬季采暖。早在20世纪80年代,瑞典与国际能源署(International Energy Agency,简称IEA)率先进行了大规模地下跨季节储能系统的研究。目前,美国、瑞典、德国、丹麦等国家均已建成基于跨季节储能技术的区域供热系统^[23]。管群储能介质为岩土体,通过埋管内部载液流动将太阳能、工业废热等能量存储于地下岩土体,世界各国部分关于埋管群储能技术的研究见表1。其中,位于中国内蒙古自治区赤峰市的储能示范工程是中国最大的埋管群储能工程(图3),该示范工程通过埋管群将低品位工业余热与太阳能存储于土壤中,并实现能源跨季节利用。研究表明,该工程热能跨季节利用可将岩土体平均温度提升超过25°C^[24]。

2.1.1 太阳能储能方法

近年来,太阳能已经被广泛应用于建筑供暖、供电,在日照充足地区,多余的太阳能可通过埋管换热器将能量存储于地下,提升岩土体温度,缓解由于冬季供暖期地源热泵采热作用导致的岩土体温度急剧降低的现象,提升地源热泵系统能效^[14,37]。太阳能光伏板不仅可以通过埋管群将能量存储于岩土体中实现跨季节利用,还能通过埋管群-光伏板系统载液冷却作用降低光伏板温度提高温差,进而提高太阳能发电效率,达到一举两得的效果(图4)^[38]。BERTRAM^[39]研究了太阳能(15 m²光伏板面积)与地源热泵(90 m埋管深度)耦合效应,研究表明,地源热泵系统可以通过载液作用提升光伏板温度差,

表1 地埋管储能技术研究汇总(据文献[24-35]修改)
Table 1 Summary of technical research on BHE thermal storage

国家	地点	开始年份	补充能量来源	埋管数量	埋管深度/m
瑞典	孔斯巴卡	1980	太阳能集热器(1 500 m ³) + 电热泵	612	35
瑞典	桑斯德	1981	太阳能集热器(162 m ³) + 电锅炉	42	23
瑞士	慈悲山	1981	太阳能集热器(320 m ³) + 气动热泵	400	6~8
芬兰	凯拉瓦	1983	太阳能集热器 + 电热泵 + 电锅炉	54	25
瑞典	吕勒奥	1983	工业余热 + 热泵	120	65
瑞典	哥德堡	1983	太阳能集热器+ 燃油锅炉 + 电热泵	286	12
瑞典	克罗斯弗	1985	太阳能集热器(7 000 m ³) + 电热泵	126	110
瑞典	克罗斯弗	1987	太阳能集热器 + 电热泵	382	18
瑞典	梅兰	1988	太阳能集热器 + 电热泵	258	15
德国	内卡苏尔姆	1999	太阳能集热器(5 670 m ³) + 电热泵 + 蒸汽锅炉	528	30
瑞典	安乃堡	2002	太阳能集热器(2 400 m ³) + 电锅炉	100	65
德国	阿滕基兴	2002	太阳能集热器(765 m ³) + 电热泵	90	30
德国	克莱尔斯海姆	2007	太阳能集热器(7 300 m ³) + 电热泵	80	55
加拿大	德雷克	2007	太阳能集热器(2 293 m ³) + 蒸汽锅炉	144	35
瑞典	阿玛布达	2010	工业余热 + 热泵	140	150
丹麦	布莱德斯普	2012	太阳能集热器(18 600 m ³) + 冷热电联产 + 电热泵 + 电锅炉	48	45
中国	赤峰	2020	太阳能集热器(6 078 m ³) + 工业余热	468	80

提高10%的光伏电产量。同时,太阳能光伏板产生的余热可被用于岩土体能量补充,缓解岩土体温度场由于供热季岩土体温度下降导致的地源热泵系统效率低下的问题。BAKKER等^[40]研究得出光伏板可提供岩土体温度场83%的恢复用能,并可以在地源热泵长期运行过程中保持岩土体温度平衡。对于冬季耗能高的地区,太阳能可通过季节性埋管换热作用提高寒冷地区岩土体温度,提升地源热泵系统冬季供热能效,朱大龙等^[41]通过TRNSYS模型分析得出太阳能季节性蓄热作用可有效解决寒冷地区地源热泵系统的冷热不平衡问题,使地源热泵系统能效提升8.6%。常见的太阳能-地热协同作用模式如图4所示。

2.1.2 空气热能储能方法

夏季较冬季有更高的空气温度,空气热能可以通过埋管群跨季节存储于岩土体,缓解地下温度场不平衡导致的地源热泵系统能效降低问题。YOU等^[42]提出了一种跨季节存储空气热能的方法,该方法将空气源热泵、空气源热虹吸管与地源热泵相连,研究表明,该方法可节省约15%的地源热泵系

统耗能。化石能源等方法也可用作地下储能,然而由于环境污染、能源消耗量高等不利因素需要进行充分考察。

综上所述,地下储能途径是高效解决岩土体温度场不平衡的方法,建议在工业产能充足的地区,将工业余热存储于岩土体;在气候条件良好,光照充足的地区可直接将太阳能作为地热能的补充;在夏热冬冷,供热需求高的地区,可将夏季空气热能用于地下储能。以上储能方式都是将岩土体作为储能介质,在有地下水流动的工程地质条件下应当慎重考虑其可行性。一般而言,地下水渗流由于地下水与埋管之间存在的对流作用,管群换热能力得以增强;但地下水流动同时可带走储存能量,造成事半功半的后果。因此,地下储能措施应因地制宜、科学论证。

2.1.3 相变材料储能技术

相变材料在相变过程中可吸收或者放出热量,储能方法可以通过相变材料的这种特征实现能量跨季节存储,进而平衡岩土体温度,提升地源热泵系统性能。相变材料是减少能源供需在时间、地点和强

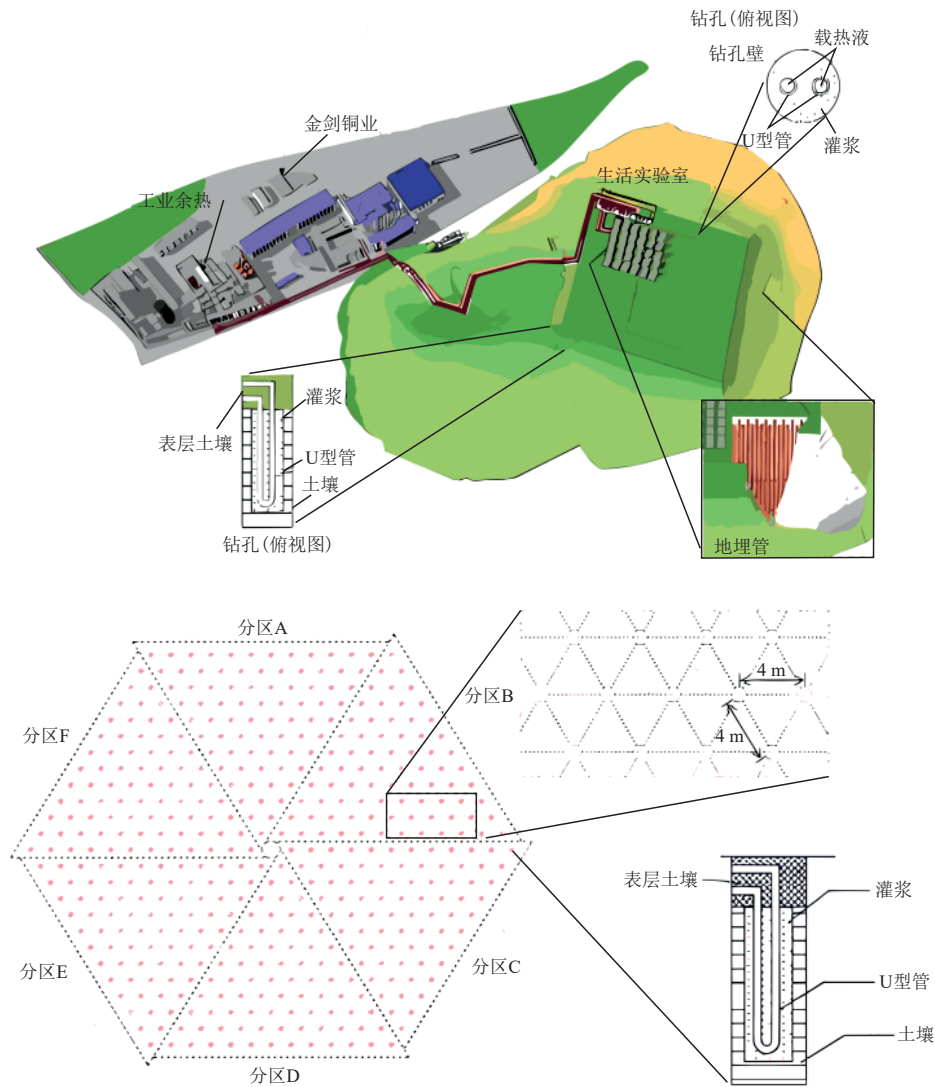
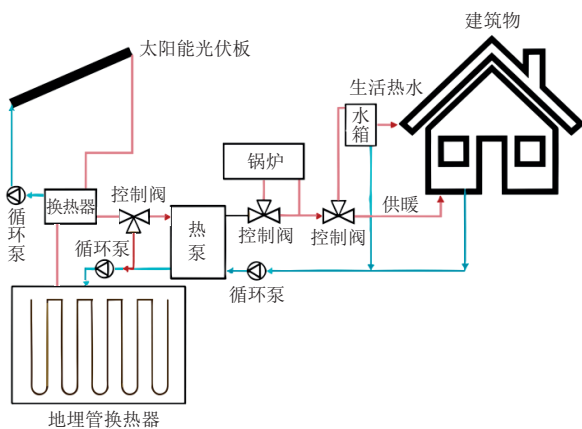


图3 赤峰地埋管储能工程简图(据文献[36]修改)

Fig. 3 Schematic diagram of Chifeng buried pipe thermal storage project



注:红管线为热水管路;蓝管线为冷水管路。

图4 光伏-地热能协同作用系统(据文献[38]修改)

Fig. 4 Photovoltaic-geothermal energy synergy system

度上不匹配的有效方法^[43],主要用于太阳能发电系统、余热回收等领域,具有温度恒定、储能密度高等优点,可为地源热泵系统提供更加稳定的工作条件^[44]。

在地埋管群中,相变材料一般用于钻孔回填材料(图5)。采用酸、增强酸和石蜡等相变材料对钻孔进行回填可在地源热泵系统运行期间通过减小地埋管热效应半径的途径提升地源热泵系统性能^[46]。除直接采用相变材料对地埋管钻孔进行回填外,微胶囊相变材料可通过与土混合的形式进行钻孔回填。DEHDEZI等^[47]采用实验方法研究得出,微胶囊相变改性土壤回填材料可提高17%的地源热泵系统能

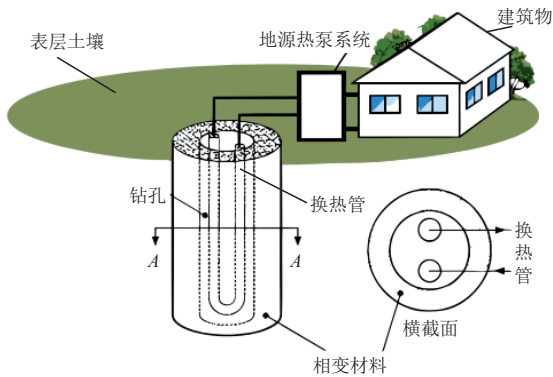
效。虽然相变回填材料灌浆与微胶囊相变回填材料都可以在一定范围内有效维持岩土体温度平衡,但是这2种应用相变材料的方法只能在有限范围内提升地源热泵系统能效,且存在污染环境与提升成本风险。

相比钻孔回填相变材料,相变材料储罐能优化地埋管管群设计,并显著缩减储罐占用空间,地源热泵可与相变材料储罐协同用于终端制冷与供热,该系统主要组件为热泵、相变材料储罐与地埋管,典型地源热泵与相变材料储罐构成如图6所示^[48]。ALKHWILDI等^[48]分析得出盐水混合物相变材料储罐可有效减小地埋管尺寸。BONAMENTE等^[49]的研究结果表明,相变材料可将正常储罐的尺寸缩小至原来的十分之一,并可提升地源热泵系统能效。

除以上相变材料储能方式外,相变材料地下热电池(Underground Thermal Battery,简称UTB)受到广泛关注(图7)。UTB可增加水箱水与周围土壤之间的热交换,该电池中部配备螺旋式换热器,由埋在地下的水箱组成,少量相变材料放置在热交换器和罐壁之间的环形空间中。UTB由于埋深浅的特点可以减少系统初期成本,且在系统的短期运行中可以提供较稳定释放和吸收热量的有效速率^[50]。

2.2 去能方法

对于年均热负荷低于冷负荷工程,系统长期运行可导致岩土体热负荷集聚,损害地源热泵系统制冷性能。因此,采用适宜的去能方法降低地下温度场是提升制冷为主型热泵系统性能的重要途径。



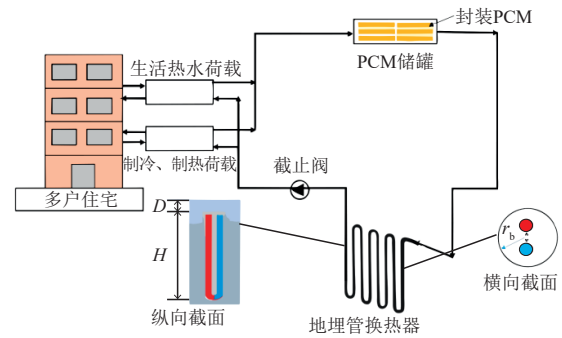
注:A为对应位置处的横截面。

图5 相变回填材料(据文献[45]修改)
Fig. 5 Phase change backfill material

同储能方法相似,去能方法可以通过地埋管群将季节性冷能(冬季)储存于岩土体、地下储罐等。同时也可以使用相变材料达到去能效果。然而采用去能方法冷却岩土体应当充分考虑地下水方向与流速,避免地下水带走储存于岩土体中冷能。

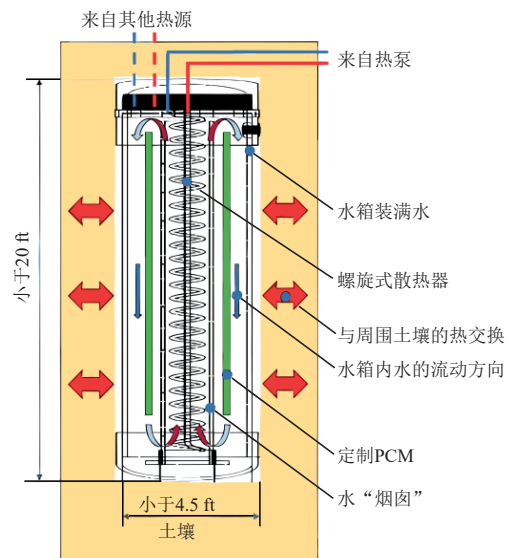
3 辅助热源或冷源

对于冷热负荷平衡的地源热泵系统,周期性地下温度场较均衡,在使用寿命周期范围内系统能效良好;而冷热负荷不平衡现象严重的系统则会出现



注:D为钻孔顶部到地表的距离;H为地埋管的有效长度; r_b 为单个钻孔的半径。

图6 相变材料储罐装置(据文献[48]修改)
Fig. 6 Phase change material storage tank device



注:1 ft=0.304 8 m。

图7 地下热电池(据文献[50]修改)
Fig. 7 Underground thermal battery

岩土体温度场异常。根据冷热负荷需要,可采用辅助热源或冷源装置平衡岩土体温度。辅助热源设备包括锅炉、太阳能集热器、工业废热回收等,辅助冷源设备可为冷却塔、储冰罐、流体冷却器等。辅助热、冷源地源热泵系统在运行阶段可以调节地源热泵单元加热、冷却负载,并在负荷需求高峰期提供热、冷源,满足终端需求,提高地源热泵系统长期性服务品质。

3.1 辅助热源

辅助热源主要应用于融冰除雪流体加热路面、建筑供暖等供热不足工况。由于冬季供热大于夏季制冷,浅层地热资源开发造成岩土体温度失衡,影响系统能效。因此,可采用辅助热源方法对终端能量进行补充。

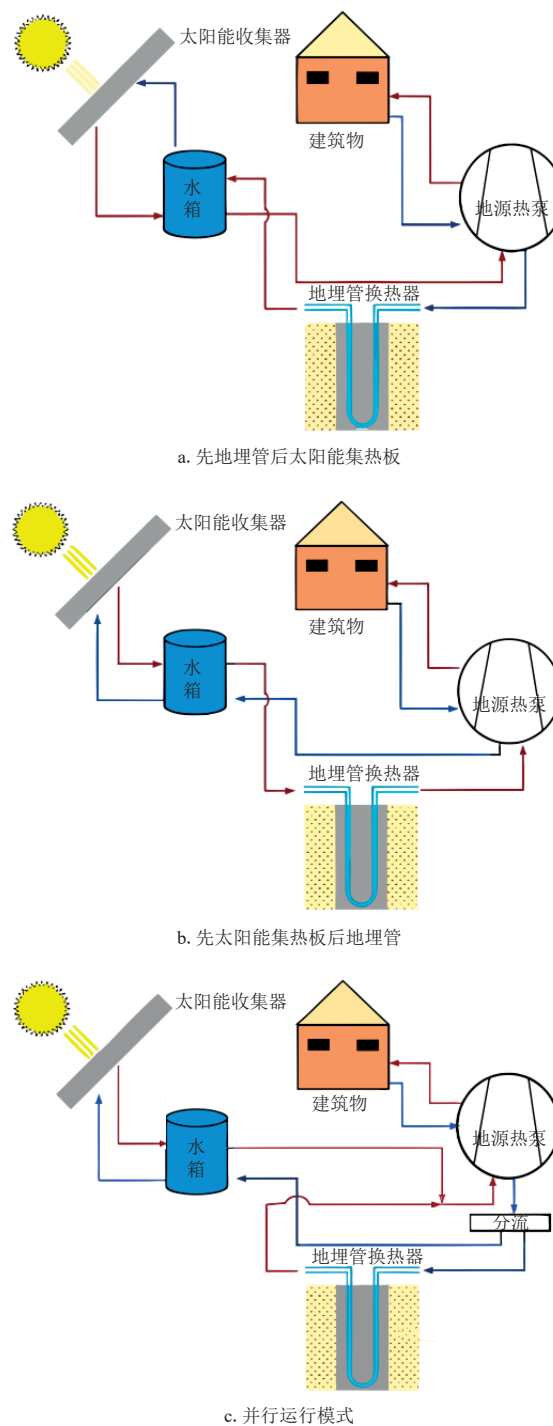
化石能源为传统辅助热源,对于以锅炉为主要供热源的终端系统或热不平衡程度较低的地区,锅炉-地源热泵系统具有可行性,且初期投资低,易于实现。通过研究燃气锅炉辅助式地源热泵系统,NI等^[51]分析得出,地源热泵与燃气锅炉分别承担60%与40%热负荷时此系统可实现最佳经济价值。以太阳能为主的绿色辅助热源可为中国“双碳”目标提供解决方法。应用太阳能集热器于地源热泵系统可解决太阳能集热器产热不稳定与岩土体温度场不平衡的问题。研究表明,太阳能辅助式地源热泵系统能效比传统地源热泵系统高出15%,利于岩土体温度平衡^[52]。

常见的太阳能-地热能混合式热泵系统按照工作模式可分为混合工作模式与并行工作模式(图8)^[44]。混合模式下地埋管与太阳能集热器串联,混合工作模式根据载液流经先后顺序不同分为2种运行模式,即先地埋管后太阳能集热板(图8a)与先太阳能集热板后地埋管(图8b)模式。

地铁、煤电厂、变电站、计算机服务站等特殊场所的运营可聚集大量余热,可作为辅助热源补充。对于高温隧道而言,采用地源热泵方法从隧道内部获取能源不仅可以达到废热利用效果,也可以降低隧道内部温度,提高隧道服役寿命。胡松涛等^[53]采用数值模拟方法研究了毛细管壁面换热器的降温效果,研究结果显示,隧道表面铺装毛细管换热器有利于改善地铁热环境,且地温在地源热泵系统工作10 a后与初始温度基本保持一致,表明地源热泵

系统可以有效减少热量积聚效应并保持隧道热平衡。

以上介绍了以化石能源、太阳能、工业余热为主的3种辅助热源形式,合理应用辅助热源可促进岩土



注:红管线为热水管路;蓝管线为冷水管路。

图8 太阳能集热器-地埋管工作模式(据文献[44]修改)
Fig. 8 Operation mode of solar collector and buried pipe

体温度场平衡,提升系统能效。在实际工程应用中,如果初期投资成本低,可选择易于实现的化石能源作为辅助热源,但要考虑化石燃料可对环境造成破坏;如果当地气候条件良好,光照充足,则建议将太阳能用作辅助热源,太阳能以其绿色、可持续特征已成为辅助热源的重要形式;如果当地有充足的工业产能支撑,建议直接将工业废热作为辅助热源。

3.2 辅助冷源

辅助冷源主要应用于制冷为主地区,其特征主要表现为夏季冷负荷需求高于冬季,地埋管在夏季向地下空间注入的热量比冬季从土壤中提取的热量多,导致地源热泵系统性能在长期运行过程中因为地下温度升高而降低。

冷却塔可有效缓解地埋管单独制冷导致的岩土体热堆积问题,结合冷却塔的地源热泵系统利于维

持岩土体周期性温度平衡,为最常用的地源热泵系统辅助冷源方法^[54-55]。地埋管与冷却塔主要通过2种方式(串联与并联)协同作用,第一种方式为并联模式(图9a),工作流体分别安装在冷却塔与地埋管回路中,不相互交接;第二种方式为串联模式(图9b),即工作流体先经过冷却塔预冷,然后流入地埋管进一步释放热量。朱立东等^[57]建立了冷却塔-地源热泵混合系统的非稳态数学模型,研究表明,并联冷却塔与地埋管比串联更有助于提升系统能效。

除冷却塔外,蓄冰槽也常被应用于混合式地源热泵冷却系统。HSIAO等^[58]通过实验方法研究了地源热泵-蓄冰槽混合系统性能,实验结果表明,地源热泵-蓄冰槽系统能效在放热模式下可提升约15%的地源热泵系统性能,然而蓄冰槽在水-冰相变过程中放热与吸热负荷难以稳定。相较于蓄冰槽方法,冷却塔方法更稳定,在两者投资成本与效果差距不大的工况中,可考虑将冷却塔方法作为首选的辅助冷源方法。

4 运行控制策略

地源热泵系统在运行阶段应当以可靠性、经济性和节能性3个方面指标为要求,这些指标与系统载液温度有密切关系。因此,为了达到3个方面指标要求,系统载液温度应控制在一定工作范围。工程中可以通过设定热泵机组的工作保护机制控制载液温度,埋管回流机组的载液温度在制冷工况下不宜高于40℃^[59],而地埋管出水温度在加热工况下不宜低于-1.5℃^[60]。地源热泵系统载液温度与其承担的负荷联系密切,过大负荷可能造成系统性能下降。终端负荷可用式(1)表示^[57]:

$$C_{wzi} \frac{dT_{wzi}}{dt} = u_{1d} u_{2y} [c_1 u_{4v} G_y (T_{wzo} - T_{wzi}) + Q_j] \quad (1)$$

式中: C_{wzi} 为负荷区热容,单位 $\text{kJ}/^\circ\text{C}$; T_{wzi} 为系统用户端入口温度,单位 $^\circ\text{C}$; t 为系统运行时间,单位 h ; u_{1d} 为每日控制信号; u_{2y} 为季节控制信号; c_1 为用户端水的比热,单位 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; u_{4v} 为用户端流量信号; G_y 为用户端最大流量,单位 m^3/h ; T_{wzo} 为系统用户端出口水温,单位 $^\circ\text{C}$; Q_j 为负荷,单位 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

地源热泵系统运行控制策略对保障岩土体温度季节性平衡有重要作用,合理的系统运行策略是防止地源热泵系统能效显著降低的关键措施。

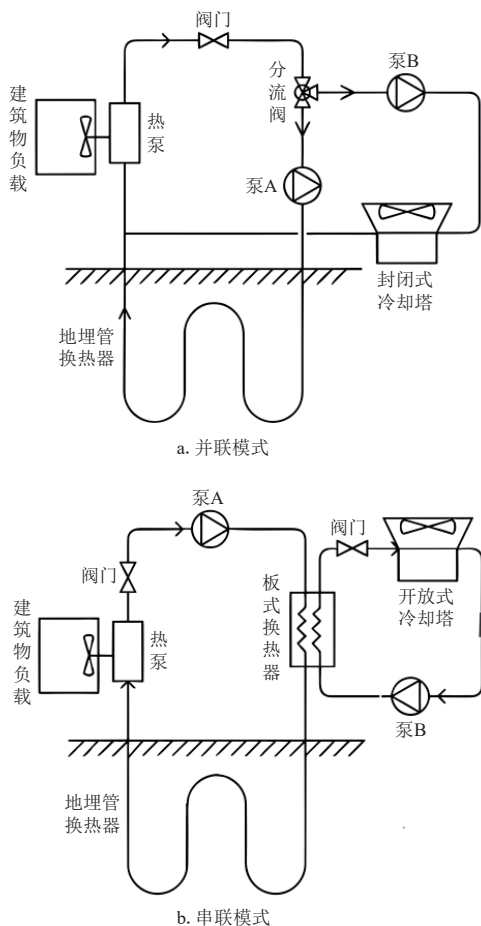


图9 冷却塔与地源热泵协同工作模式(据文献[56]修改)

Fig. 9 Cooperative working mode of cooling tower and ground source heat pump

4.1 峰点冷热负荷运行管理

峰值负荷对埋管地下温度场影响显著,降低峰值负荷可对缓解岩土体温度场不平衡起到积极作用。通过采用辅助热、冷源方法与提前预热方法可有效降低地源热泵系统峰值负荷。

通过数值分析与实验方法研究,MENSAH等^[61]发现当终端峰值负荷下降可显著减小埋管设计深度,当峰值负荷下降40%时,埋管深度在加热模式可缩短69.2%,在制冷模式可减少44.5%。因此,峰值负荷的下降对减小地源热泵系统初期投入有积极作用。由于峰值负荷对地源热泵系统性能影响显著,采用提前预热等技术性手段应对峰值负荷可以有效降低峰值负荷对系统性能的影响。CARVALHO等^[62]提出了一种结合峰值冷热负荷与时间的运行策略,该策略通过终端预热方法将地源热泵的部分运行周期排除在非高峰期,使电力成本降低34%。ALAICIA等^[63]提出了峰值负荷管理模式(图10),可减少15.0%碳排放量、58.5%峰值功耗、16.4%的运营成本。

4.2 间歇性运行方案

地源热泵系统连续运行可造成地下温度场恢复不及时,加剧地下温度场失衡现象。区别于连续运

行模式,间歇性运行模式指地源热泵系统不连续工作,岩土体温度在系统间歇期间恢复到一定程度,从而缓解地源热泵系统负荷造成的系统性能显著降低的现象,针对系统进行优化的间歇性运行模式可以使岩土体温度场不均衡问题得到有效缓解^[64-66]。

间歇时间越长,岩土温度恢复效果越好。袁艳平等^[67]研究了3种不同的间歇运行模式对U型管单位长度换热量的影响,研究表明U型管单位长度换热量在“14+10(运行14h,停机10h)、12+12(运行12h,停机12h)、10+14(运行10h,停机14h)”3种运行模式下分别比连续运行模式高45.57%、58.43%、88.05%。不同类型埋管在间歇运行条件下对换热性能的影响具有差异性。Jalaluddin等^[68]通过实验研究了单U型、双U型和多管型3类埋管换热器在制冷模式下连续运行和间歇运行的换热性能,并对2种间歇运行模式(采用单日运行6h和12h)的3种换热器换热能力进行了研究,结果表明,采用6h运行策略的单U管、双U管、多管热交换率分别提高了32.6%、39.8%、32.1%,采用12h运行策略的U型管、双管、多管热交换率分别提高了14.0%、15.1%、13.9%。

间歇运行方案要求地源热泵系统在某一时段停止运行,停止运行时间与地源热泵系统换热性能呈正相关联系。应根据工程实际需求合理设计地源热

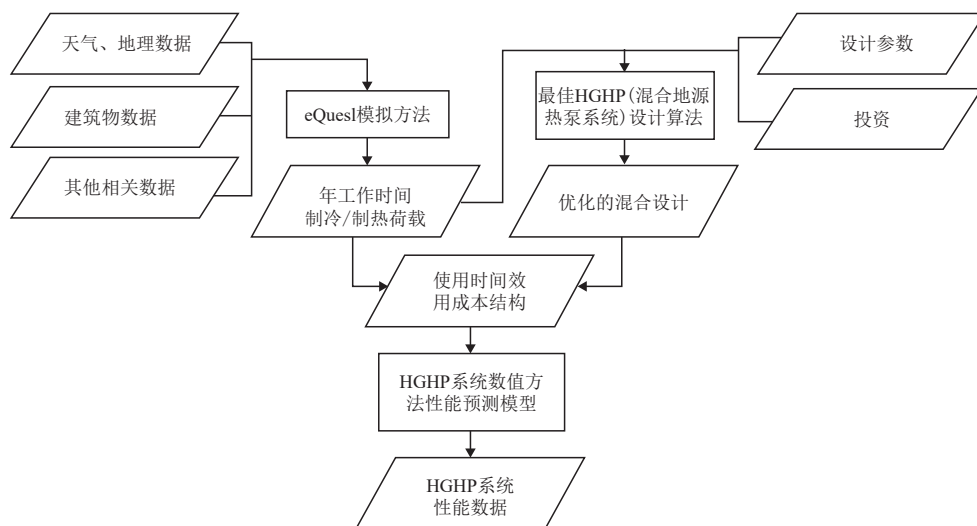


图10 基于运行时间与峰值负荷的地源热泵系统运行策略(据文献[63]修改)

Fig. 10 Workflow of GSHPs operation method based on operation time and peak load

泵系统停止运行时间,使得岩土体热不平衡问题得到有效缓解,同时避免因埋管群供冷不足引起的终端需求不满足的问题。

4.3 分区管理

埋管群在冬夏季常发生由于冷热不平衡导致的地下温度场异常现象,进而导致地源热泵系统效率降低。由于埋管群埋管众多,可根据终端冷热负荷对埋管群进行分区运行管理,达到降低地下温度场不平衡预期目标。

气象条件等因素变化决定地源热泵系统存在动态负荷运行工况,其季节性负荷特征由日负荷特征构成,负荷动态变化地源热泵系统可采用分区调节策略进行优化,对管群中间部分埋管进行负荷管理能明显提升管群能效^[69]。针对夏季冷负荷高于冬季热负荷地源热泵系统,夏季制冷工况可导致岩土体温度升高,达到岩土体夏季储能的效果。供冷期过后,岩土体温度逐渐恢复,而中心部分恢复较慢,在供热季开始之前仍具有较高温度。因此,有研究结果表明冬季仅运行埋管群中心部分埋管可有效缓解岩土体热不平衡现象,该分区方法对较小岩土体热导率工程地质情况更为有效^[18,70]。针对埋管群运行期间导致的温度场时空差异,采用管群分区运行方案可作为管理地下温度场的潜在途径,有研究结果显示采用埋管群分区优化运行策略可减轻地源热泵系统峰值负荷造成的岩土体温度场不平衡现象^[71]。YOU等^[72]针对北京地区建筑研究了不同分区操作策略对地源热泵系统性能的影响,研究结果表明向桩群中心集中注入热量或从桩群外层提取热量可以缓解地下温度场不平衡现象,且与传统策略相比,分区运行策略可以实现良好的系统能效。吴暄等^[73]提出了基于埋管群的全年蓄热取热同步运行模式,即管群中既有蓄热管,又有取热管,并采用有限体积法研究了全年埋管管群蓄热取热同步模式下的岩土体传热特性,研究结果表明,埋管群全年蓄热取热同步模式可使岩土体温度得到快速恢复,进而缓解岩土体热失衡问题,且取热埋管与蓄热埋管交叉排布时系统性能更优异。

4.4 系统控制运行策略

地源热泵系统控制方法根据温度设定打开或者关闭热泵,这种类型的控制为基于规则的控制,即根

据指令模拟专家决策过程,也称为专家规则系统,该方法可根据系统状态触发不同的动作。对于有辅助热源或冷源地源热泵系统而言,该控制系统可以决定某种状态下外部热源或冷源的应用。对传统控制策略而言可以通过5种方法对控制系统进行改进:优化温度设定值、进程优化、优化控制参数、采用更加复杂控制方法、埋管运行方式与系统架构相适应^[74]。

CORBERAN等^[75]将热泵加热、冷却能力及能效视为因变量,将循环泵速度、压缩机速度、接地回路返回温度、终端回路返回温度作为自变量,通过控制终端回水温度等变量,研究了不同控制优化策略对地源热泵系统性能的影响。MOKHTAR等^[76]提出了一种智能终端管理系统以改进地源热泵系统控制策略,研究结果表明,该智能管理系统能够通过分析、预测和协调其他能源来有效利用地源热泵系统,并保持地下温度场平衡。MADANI等^[77]通过使用动态模拟模型比较了恒定滞后、浮动滞后、温度差-时间方法3种控制策略下的地源热泵系统性能,模拟结果表明无论气候边界条件如何,采用温度差-时间法控制的系统向终端供水的平均温度接近所需温度,采用恒定滞后法的系统平均供应温度高于或低于所需温度。CHIASSON等^[78]研究了地源热泵系统的运行控制优化方法,并得出采用运行优化策略可以有效降低地源热泵系统成本。除以上控制方法外,基于人工神经网络、遗传算法等的机器学习方法也逐渐被应用于地源热泵系统。GANG等^[79]基于冷却塔与埋管出口温度,通过人工神经网络人工智能算法实现了冷却塔-地源热泵混合系统运行的优化控制。地源热泵控制策略要求对埋管群进口温度、埋管群出口温度、终端回路温度、压缩机速度、载液流速等参数有量化指标。因此,安装精度高的传感器与监测设备对各控制指标进行监测是系统优化控制运行策略的重要数据基础。

5 结论

介绍了埋管群地下温度场不平衡问题解决方法(埋管群设计、储能或去能方法、辅助冷热源、系统运行控制策略),得出结论如下:

- 1) 对于冷热负荷微弱不平衡导致的岩土体温度场不平衡现象,可通过优化埋管设计方法解决

此问题。优化方法简单概括为:增大埋管间距、调整埋管深度、采用优化布管方法(直线型、外密中疏型等)。然而埋管群受用地规划限制,通过优化埋管设计方法通常不能彻底解决地下温度场不平衡问题。

2) 由冷热负荷一般不均衡导致的地下温度场不平衡现象,可通过储能、去能方法对岩土体温度场进行管理,达到解决地下温度场不平衡的目标。工程中面临可安装太阳能板面积少、工业废热地域限制大、化石能源代价高等问题,通过地下储能、去能方式解决地下温度场不平衡问题时需要因地制宜,充分论证。

3) 辅助热、冷源可以利用化石能源、太阳能、工业废热、冷却塔等方法直接对终端冷热负荷进行补充,减少埋管能耗,缓解地下温度场不平衡问题。通过经济、环境保护等指标确定地源热泵所占终端冷热负荷比例是合理利用辅助冷热源方法的关键。

4) 对地源热泵系统负荷进行峰值管理、间歇性运行、分区域管理等可对平衡地下温度场起到积极作用。采用诸如机器学习等方法针对整个供热、制冷系统(压缩机、循环泵、接地回路、终端回路等)进行优化控制是进一步提升地源热泵系统性能的重要举措。

5) 根据实际负荷需求并采用针对性的埋管群设计优化方法,储能或去能方法,辅助冷热源方法与系统运行策略是有效提升地源热泵系统能效的重要途径。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会环资司. 2022年中国能源生产和消费相关数据[R/OL]. (2023-03-02)[2023-03-13]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202303/t20230302_1350587.html.
Environmental Resources Department of the National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Relevant data on China's energy production and consumption in 2022[R/OL]. (2023-03-02) [2023-03-13]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202303/t20230302_1350587.html.
- [2] 王贵玲, 陆川. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术发展[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 412-341.
WANG Guiling, LU Chuan. Progress in geothermal resource extraction and utilization technology driven by carbon neutrality goals[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 412-341.
- [3] 汪集旸. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WANG Jiyang. Geothermal science and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [4] TAN Y Q, ZHANG C, LYU H J, et al. Experimental and numerical analysis of the critical heating strategy for hydronic heated snow melting airfield runway[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 178: 115508.
- [5] ZHANG C, TAN Y Q, CHEN F C, et al. Long-term thermal analysis of an airfield-runway snow-melting system utilizing heat-pipe technology[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 473-486.
- [6] 穆天洋. 略论低碳市政技术对地缘政治与国际关系的影响[J]. 市政技术, 2022, 40(8): 271-275.
MU Tianyang. On the impact of low carbon municipal technology on geopolitics and international relations[J]. Municipal Technology, 2022, 40(8): 271-275.
- [7] ESEN H, INALLI M, ESEN M. A techno-economic comparison of ground-coupled and air-coupled heat pump system for space cooling[J]. Building and Environment, 2007, 42(5): 1955-1965.
- [8] 李嘉舒, 戴传山, 雷海燕, 等. 埋管换热器动态热负荷下地层温度场的解析解[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 198-206.
LI Jiashu, DAI Chuanshan, LEI Haiyan, et al. Analytical solution of formation temperature field under dynamic thermal load of buried pipe heat exchanger[J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2023, 50(2): 198-206.
- [9] LUND J W, TOTH A N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. Geothermics, 2021, 90: 101915.
- [10] 张杰, 马培发, 莫丽, 等. 竖进平出型埋管群设计及换热特性研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(10): 2734-2741.
ZHANG Jie, MA Peifa, MO Li, et al. Design and heat transfer characteristics study of vertical inlet and horizontal outlet buried pipe group[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(10): 2734-2741.
- [11] LIU Z J, XU W, QIAN C, et al. Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China[J]. Renewable Energy, 2015, 84: 89-96.
- [12] RYBACH L, EUGSTER W J. Sustainability aspects of geothermal heat pump operation, with experience from Switzerland[J]. Geothermics, 2010, 39(4): 365-369.
- [13] GULTEKIN A, AYDIN M, SISMAN A. Effects of arrangement geometry and number of boreholes on thermal interaction coefficient of multi-borehole heat exchangers[J]. Applied Energy, 2019, 237: 163-170.
- [14] NARANJO-MENDOZA C, OYINLOLA M A, WRIGHT A J, et al. Experimental study of a domestic solar-assisted ground source heat pump with seasonal underground thermal energy storage through shallow boreholes[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114218.
- [15] SI Q, OKUMIYA M, ZHANG X. Performance evaluation and optimization of a novel solar-ground source heat pump system[J]. Energy and Buildings, 2014, 70: 237-245.
- [16] LAZZARI S, PRIARONE A, ZANCHINI E. Long-term performance of BHE (borehole heat exchanger) fields with negligible groundwater movement[J]. Energy, 2010, 35(12):

- 4966-4974.
- [17] CHEN S, CAI W L, WITTE F, et al. Long-term thermal imbalance in large borehole heat exchangers array: A numerical study based on the Leicester project[J]. *Energy and Buildings*, 2020: 110518.
- [18] LI C F, MAO J F, ZHANG H, et al. Effects of load optimization and geometric arrangement on the thermal performance of borehole heat exchanger fields[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 35: 25-35.
- [19] GIORDANO N, RAYMOND J. Alternative and sustainable heat production for drinking water needs in a subarctic climate (Nunavik, Canada): Borehole thermal energy storage to reduce fossil fuel dependency in off-grid communities[J]. *Applied Energy*, 2019, 252: 113463.
- [20] ZHANG H Z, HAN Z W, JI M Z, et al. Analysis of influence of pipe group arrangement and heat exchanger type on operation performance of the ground source heat pump[J]. *Geothermics*, 2021, 97: 102237.
- [21] CIMMINO M, BERNIER M. Effects of unequal borehole spacing on the required borehole length[J]. *ASHRAE Transactions*, 2014, 120:158-173.
- [22] 郭敏, 刁乃仁, 朱科, 等. 冷热负荷不平衡地区地热换热器设计及其运行对策[J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(1): 88-94. GUO Min, DIAO Nairen, ZHU Ke, et al. Design and operation strategies of geothermal heat exchangers in areas with imbalanced cooling and heating loads[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, 45(1): 88-94.
- [23] 肖立业, 张京业, 聂子攀, 等. 地下储能工程[J]. *地下储能工程*, 2022, 41(2): 1-9. XIAO Liye, ZHANG Jingye, NIE Zipan, et al. Underground energy storage engineering[J]. *Underground Energy Storage Engineering*, 2022, 41(2): 1-9.
- [24] GUO F, ZHU X Y, ZHANG J Y, et al. Large-scale living laboratory of seasonal borehole thermal energy storage system for urban district heating[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114763.
- [25] OLSSON S. The sunclay and Kullavik projects - Heat storage in clay at low and high temperature[C]// First E.C. Conference on Solar Heating, Amsterdam, 1984.
- [26] PELTOLA S S, LUND P D, ROUTTI J T F. First year operating experience from Kerava solar village[J]. *International Journal of Ambient Energy*, 1985, 6: 117-122.
- [27] NORDELL B. Borehole heat store design optimization[D]. Umeå kommun, Sweden: Luleå Tekniska Universitet, 1994.
- [28] GEHLIN S. Borehole thermal energy storage[M]// REES S J. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Lund, Sweden: Woodhead Publishing, 2016: 295-327.
- [29] REUSS M. The use of borehole thermal energy storage (BTES) systems[J]. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 2015: 117-147.
- [30] DALENBACK J O, HELLSTROM G, LUNDIN S, et al. Borehole heat storage for the Anneberg solar heated residential district in Danderyd, Sweden[C]//Terrastock 2000. Proceedings of the 8th International Conference on Thermal Energy Storage, held in Stuttgart, Germany, August 28 until September 1, 2000.
- [31] REUSS M, BEUTH W, SCHMIDT M, et al. Solar district heating with seasonal storage in Attenkirchen[C]// OTTI-13 Symposium Thermische Solarenergie, held in Bad Staffelstein (Germany), 14-16 May, 2003.
- [32] BAUER D, MARX R, NUBBICKER-LUX J, et al. German central solar heating plants with seasonal heat storage[J]. *Solar Energy*, 2010, 84: 612-623.
- [33] SIBBITT B, MCCLENAHAN D, DJEBBAR R, et al. The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system: Five years of operation[J]. *Energy Procedia*, 2012, 30: 856-865.
- [34] NORDELL B, ANDERSSON O, RYDELL L, et al. Long-term performance of the HTBTES in Emmaboda, Sweden[C]// 13th International Energy Agency Energy Storage Greenstock Conference, held in Beijing, China, 2015.
- [35] TORDRUP K W, POULSEN S E, BJØRN H. An improved method for upscaling borehole thermal energy storage using inverse finite element modelling[J]. *Renewable Energy*, 2017, 105: 13-21.
- [36] GUO F, YANG X. Long-term performance simulation and sensitivity analysis of a large-scale seasonal borehole thermal energy storage system for industrial waste heat and solar energy [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 236: 110768.
- [37] SHAH S K, AYE L, RISMANCHI B. Multi-objective optimisation of a seasonal solar thermal energy storage system for space heating in cold climate[J]. *Applied Energy*, 2020, 268: 115047.
- [38] SOMMERFELDT N, MADANI H. In-depth techno-economic analysis of PV/Thermal plus ground source heat pump systems for multi-family houses in a heating dominated climate[J]. *Solar Energy*, 2019, 190: 44-62.
- [39] BERTRAM E. Unglazed PVT collectors as additional heat source in heat pump systems with borehole heat exchanger[J]. *Energy Procedia*, 2012: 10.
- [40] BAKKER M, ZONDAG H A, ELSWIJK M J, et al. Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump[J]. *Solar Energy*, 2005, 78(2): 331-339.
- [41] 朱大龙, 刁乃仁. 太阳能-地源热泵系统的运行模拟[J]. *建筑节能*, 2016, 44(5): 26-30. ZHU Dalong, DIAO Nairen. Simulation of the operation of a solar ground source heat pump system[J]. *Building Energy Efficiency*, 2016, 44(5): 26-30.
- [42] 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(1-2): 283-292.
- [43] XU X F, ZHANG X L, XIAO Y J. Research on influence of high and low temperature heat sources for heat transfer characteristics of pulsating heat pipe cold storage device[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2022, 58(2): 233-246.
- [44] XU L L, PU L, ZHANG S Q, et al. Hybrid ground source heat

- pump system for overcoming soil thermal imbalance: A review [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 44: 101098.
- [45] ESLAMI-NEJAD P, BERNIER M. A preliminary assessment on the use of phase change materials around geothermal Boreholes[J]. *ASHRAE Transactions*, 2013, 19: 11.
- [46] QI D, PU L, SUN F T, et al. Numerical investigation on thermal performance of ground heat exchangers using phase change materials as grout for ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 1023-1032.
- [47] DEHDEZI P K, HALL M R, DAWSON A R. Enhancement of soil thermo-physical properties using microencapsulated phase change materials for ground source heat pump applications[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 110-116: 1191-1198.
- [48] ALKHWILDI A, ELHASHMI R, CHIASSON A. Parametric modeling and simulation of low temperature energy storage for cold-climate multi-family residences using a geothermal heat pump system with integrated phase change material storage tank [J]. *Geothermics*, 2020, 86: 101864.
- [49] BONAMENTE E, AQUINO A, COTANA F. A PCM thermal storage for ground-source heat pumps: Simulating the system performance via CFD approach[J]. *Energy Procedia*, 2016, 101: 1079-1086.
- [50] ZHANG M K, LIU X B, BISWAS K, et al. A three-dimensional numerical investigation of a novel shallow bore ground heat exchanger integrated with phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114297.
- [51] NI L, SONG W, ZENG F C, et al. Energy saving and economic analyses of design heating load ratio of ground source heat pump with gas boiler as auxiliary heat source[C]// *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011, Lushan, China: 1197-1200.
- [52] YANG W B, SUN L L, CHEN Y P. Experimental investigations of the performance of a solar-ground source heat pump system operated in heating modes[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 89: 97-111.
- [53] 胡松涛,徐伟平,佟振,等.应用于地铁隧道的毛细管换热器降温效果模拟研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2019, 40(5): 78-84.
- HU Songtao, XU Weiping, TONG Zhen, et al. Simulation study on the cooling effect of capillary heat exchangers applied in subway tunnels[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2019, 40(5): 78-84.
- [54] 骆祖江,杜菁菁.基于热平衡分析的埋地管地源热泵换热方案模拟优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 246-255.
- LUO Zujiang, DU Jingjing. Simulation and optimization of heat transfer schemes for buried pipe ground source heat pumps based on heat balance analysis[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13): 246-255.
- [55] LIU Z J, LI Y W, XU W, et al. Performance and feasibility study of hybrid ground source heat pump system assisted with cooling tower for one office building based on one Shanghai case [J]. *Energy*, 2019, 173: 28-37.
- [56] CUI W Z, ZHOU S Y, LIU X Y. Optimization of design and operation parameters for hybrid ground-source heat pump assisted with cooling tower[J]. *Energy and Buildings*, 2015: 10.
- [57] 朱立东,赵蕾,王振宇.冷却塔辅助地源热泵系统的控制策略优化[J]. *建筑科学*, 2014, 30(10): 31-35.
- ZHU Lidong, ZHAO Lei, WANG Zhenyu. Optimization of control strategy for cooling tower assisted ground source heat pump system[J]. *Architecture Science*, 2014, 30(10): 31-35.
- [58] HSHIAO M J, KUO Y F, SHEN C C, et al. Performance enhancement of a heat pump system with ice storage subcooler[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(2): 251-258.
- [59] LI W X, LI X D, WANG Y, et al. An integrated predictive model of the long-term performance of ground source heat pump (GSHP) systems[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 159: 309-318.
- [60] MIGLANI S, OREHOUNIG K, CARMELIET J. A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 159: 462-473.
- [61] MENSAH K, JANG Y S, CHOI J M. Assessment of design strategies in a ground source heat pump system[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 138: 301-308.
- [62] CARVALHO A D, MOURA P, VAZ G C, et al. Ground source heat pumps as high efficient solutions for building space conditioning and for integration in smart grids[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103: 991-1007.
- [63] ALAICA A A, DWORKIN S B. Characterizing the effect of an off-peak ground pre-cool control strategy on hybrid ground source heat pump systems[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 137: 46-59.
- [64] CHOI J C, LEE S R, LEE D S. Numerical simulation of vertical ground heat exchangers: Intermittent operation in unsaturated soil conditions[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(8): 949-958.
- [65] 杨卫波,施明恒,陈振乾.非连续运行工况下垂直埋管换热器的换热特性[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(2): 328-333.
- YANG Weibo, SHI Mingheng, CHEN Zhenqian. Heat transfer characteristics of vertical buried tube heat exchangers under discontinuous operating conditions[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2013, 43(2): 328-333.
- [66] 张国柱,夏才初,孙猛,等.寒区隧道地源热泵供热系统及优化分析[J]. *同济大学学报*, 2012, 40(4): 610-615.
- ZHANG Guozhu, XIA Caichu, SUN Meng, et al. Ground source heat pump heating system and optimization analysis for tunnels in cold regions[J]. *Journal of Tongji University*, 2012, 40(4): 610-615.
- [67] 袁艳平,雷波,曹晓玲,等.间歇运行对U形埋管换热器换热特性的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2010, 45(3): 393-399.
- YUAN Yanping, LEI Bo, CAO Xiaoling, et al. The influence of intermittent operation on the heat transfer characteristics of U-shaped buried tube heat exchangers[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(3): 393-399.
- [68] Jalaluddin, MIYARA A. Thermal performance investigation of several types of vertical ground heat exchangers with different operation mode[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 33-34: 167-174.

- [69] 王勇. 动态负荷下地源热泵性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
WANG Yong. Research on the performance of ground source heat pump under dynamic load[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [70] YU M K, ZHANG K, CAO X Z, et al. Zoning operation of multiple borehole ground heat exchangers to alleviate the ground thermal accumulation caused by unbalanced seasonal loads[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 110: 345–352.
- [71] COEN T, FRANÇOIS B, GERARD P. Analytical solution for multi-borehole heat exchangers field including discontinuous and heterogeneous heat loads[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 253: 111520.
- [72] YOU T, ZENG W T. Zoning operation of energy piles to alleviate the soil thermal imbalance of ground source heat pump systems[J]. *Energy and Built Environment*, 2023, 4(1): 57–63.
- [73] 吴暄, 周雅慧, 路子业, 等. 地理管群全年蓄热取热同步模式下岩土传热特性[J]. *地下空间与工程学报*, 2020, 16(1): 274–287.
WU Xuan, ZHOU Yahui, LU Ziyue, et al. Heat transfer characteristics of rock and soil under the synchronous mode of annual heat storage and extraction of buried pipe groups[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2020, 16(1): 274–287.
- [74] NOYE S, MULERO MARTINEZ R, CARNIELETTO L, et al. A review of advanced ground source heat pump control: Artificial intelligence for autonomous and adaptive control[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111685.
- [75] CORBERAN J M, FINN D P, MONTAGUD C M, et al. A quasi-steady state mathematical model of an integrated ground source heat pump for building space control[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(1): 82–92.
- [76] MOKHTAR M, STABLES M, LIU X, et al. Intelligent multi-agent system for building heat distribution control with combined gas boilers and ground source heat pump[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 62: 615–626.
- [77] MADANI H, CLAESSEON J, LUNDQVIST P. A descriptive and comparative analysis of three common control techniques for an on/off controlled ground source heat pump (GSHP) system[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 65: 1–9.
- [78] CHIASSON A D, JOHNSON D W, YAVUZTURK C C, et al. Optimization of the ground thermal response in hybrid geothermal heat pump systems[J]. *ASHRAE Transactions*, 2010, 116: 212–524.
- [79] GANG W J, WANG J B, WANG S W. Performance analysis of hybrid ground source heat pump systems based on ANN predictive control[J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 1138–1144.

(编辑 黄颖)

(上接第725页)

- [29] 张承斌. 基于层次分析法-模糊综合评价模型的浅层地热能适宜性评价——以山东省昌乐县为例[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(2): 91–99.
ZHANG Chengbin. Suitability evaluation of shallow geothermal energy based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation: A case study of Changle County in Shandong Province[J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(2): 91–99.
- [30] 莫健文, 纪传伟, 李阳苹, 等. 基于层次分析法的地区节能潜力评价模型研究[J]. *东莞理工学院学报*, 2021, 28(5): 69–74.
MO Jianwen, JI Chuanwei, LI Yangping, et al. Research on evaluation model of regional energy saving potential based on analytic hierarchy process[J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2021, 28(5): 69–74.
- [31] 刘国勇, 赵忠新, 任路, 等. 沉积盆地中深层水热型地热资源评价体系研究与应用[J]. *油气与新能源*, 2022, 34(2): 38–47.
LIU Guoyong, ZHAO Zhongxin, REN Lu, et al. Study and application of the evaluation system concerning the hydrothermal type geothermal resource at the middle and deep layers of sedimentary basin[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(2): 38–47.
- [32] 李国永. 复杂断块油藏精细描述关键技术与应用[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(2): 152–162.
LI Guoyong. Key technology of fine description of complex fault block reservoir and its application[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(2): 152–162.
- [33] 程晓军. 缝洞型油藏注气提高采收率参数优化数值模拟研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2022, 12(6): 902–909.
CHENG Xiaojun. Enhanced oil recovery and parameter optimization of hydrocarbon injection in fractured-cavity reservoirs[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(6): 902–909.
- [34] 董月霞, 黄红祥, 任路, 等. 渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践——以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 666–676.
DONG Yuexia, HUANG Hongxiang, REN Lu, et al. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the Caofeidian geothermal heating project in Tangshan, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 666–676.

(编辑 黄颖)