

夏热冬冷地区暖通工程地埋管地源热泵系统的长期运行能效分析

侯进

130304*****0528

摘要: 地埋管地源热泵系统作为夏热冬冷地区暖通工程中极具潜力的可再生能源利用技术,其长期运行能效直接关系到系统的节能效益与可持续性。本文围绕夏热冬冷地区的气候特征,从地埋管地源热泵系统的运行特性出发,分析影响系统长期运行能效的关键因素,探讨提升系统长期运行能效的技术策略与优化路径,旨在为该地区暖通工程中地埋管地源热泵系统的设计、运行与维护提供理论参考,推动该技术在夏热冬冷地区的高效、稳定应用。

关键词: 地埋管地源热泵系统; 长期运行能效; 能效优化

DOI: 10.69979/3060-8767.25.10.054

引言

夏热冬冷地区位于我国东部,夏季高温高湿、冬季寒冷潮湿,季节温差大,对暖通系统制冷与制热需求强烈。传统暖通系统依赖化石能源,能耗高且污染大,与“双碳”目标不符。

地埋管地源热泵系统借助地下稳定温度场,通过地埋管换热器与地下换热,结合热泵机组实现能量转移,可同时满足冬夏需求,兼具节能、环保、运行稳定等优势,已成为该地区暖通工程重要技术选择。

但该系统长期运行能效易受多因素影响而衰减,降低节能效益。因此,结合该地区气候与地质条件,分析系统长期运行能效、明确影响机制并提出优化措施,对保障系统稳定高效运行、推动暖通工程绿色低碳发展意义重大。目前相关研究仍需完善,本文以此为切入点展开探讨。

1 夏热冬冷地区地埋管地源热泵系统的运行特性

1.1 与气候条件的适配性

夏热冬冷地区的气候特征对暖通系统的性能提出了特殊要求:夏季需高效制冷以应对高温高湿环境,冬季需稳定制热以抵御低温潮湿天气。地埋管地源热泵系统的核心优势在于其热源(地下岩土体)温度相对稳定,不受外界大气温度剧烈变化的影响。在夏季,地下岩土体温度低于室外环境温度,系统通过地埋管换热器吸收地下热量,再由热泵机组将热量转移至室外,实现建筑制冷;在冬季,地下岩土体温度高于室外环境温度,系统则从地下吸收热量,经热泵机组提升温度后为建筑供

暖。这种运行模式使得系统在夏热冬冷地区的冬夏两季均能保持较好的运行稳定性,避免了传统空气源热泵系统在极端高温或低温天气下能效大幅下降的问题。

但需注意的是,夏热冬冷地区部分区域存在季节性降水分布不均的特点,雨季可能导致地下水位上升,而旱季则可能出现地下水位下降,这会对地下岩土体的热传导性能产生影响,进而间接作用于系统的运行效率。此外,该地区夏季高温持续时间较长,冬季寒冷期虽不如北方地区漫长,但低温天气下建筑的热需求仍较为集中,这对系统的长期负荷匹配能力提出了挑战。

1.2 长期运行中的能量平衡特性

地埋管地源热泵系统的长期运行依赖于地下岩土体的热量平衡。在理想状态下,系统夏季向地下排放的热量与冬季从地下吸收的热量应保持基本平衡,以维持地下温度场的稳定,避免因热量累积或过度消耗导致地下温度异常变化,进而影响系统能效。然而,在夏热冬冷地区,由于建筑冬夏负荷存在差异,系统实际运行过程中往往难以实现完全的热量平衡。

一方面,部分夏热冬冷地区的建筑夏季制冷负荷大于冬季制热负荷,导致系统夏季向地下排放的热量远多于冬季从地下吸收的热量,长期运行后会造成地下岩土体温度逐年升高。地下温度升高会使得夏季系统制冷时的冷凝温度上升,热泵机组的COP(性能系数)下降,制冷能效降低;同时,冬季制热时的蒸发温度也会随之升高,虽短期内可能提升制热能效,但长期来看,地下温度场的失衡会破坏系统运行的稳定性,增加系统故障风险。另一方面,少数冬季寒冷期较长、建筑保温性能

较差的区域，可能出现冬季制热负荷大于夏季制冷负荷的情况，导致地下岩土体热量过度消耗，温度逐年降低，这会使得冬季系统制热时的蒸发温度下降，热泵机组COP降低，制热能效衰减，甚至可能出现机组无法正常启动的情况。

此外，地埋管换热器的传热性能也会随运行时间发生变化，影响系统与地下环境的热量交换效率，进一步加剧地下热量平衡的失衡问题，对系统长期运行能效产生不利影响。

2 影响夏热冬冷地区地埋管地源热泵系统长期运行能效的关键因素

2.1 地质与水文条件

作为基础性影响因素，夏热冬冷地区地域广阔，不同区域地质构造与水文条件差异显著，直接作用于地埋管换热器传热效率与地下温度场稳定性。地下岩土体的热物理性质（导热系数、比热容、密度等）是核心指标：导热系数越高，热量传递能力越强，系统能效越高；而黏土层等低导热系数岩土体，会显著阻碍传热。

该地区部分区域黏土层密集，其导热系数低且对含水量敏感：雨季含水量上升虽可能小幅提升导热系数，但透气性下降易致地埋管周围积水，破坏传热环境；旱季含水量减少则进一步降低导热系数，加剧传热效率衰减。部分岩石地层虽导热系数高，但钻孔难度大，地埋管安装易产生缝隙，若回填不密实形成空气层，会严重阻碍热量传递，降低系统能效。

水文条件方面，地下水位高低与流动状态影响岩土体热稳定性：水位高且流动活跃的区域，可通过地下水带走夏季多余热量、补充冬季消耗热量，维持地下温度场平衡，保障系统能效；水位低或流动缓慢的区域，热量易累积或过度消耗，导致地下温度异常波动，引发系统能效显著衰减。

2.2 系统设计参数

系统设计合理性直接决定能效，夏热冬冷地区特殊气候与负荷特点对设计参数要求更高，核心在于地埋管换热器设计与热泵机组选型。

地埋管换热器是热量交换核心，埋管方式、深度、管间距、管材均影响传热效率。该地区优先采用竖直埋管（占地面积小、传热效率高、受地表温度影响小），但埋管深度需精准匹配地质与负荷：过浅则地下温度受地表干扰大，冬季热量不足、夏季热量累积；过深则增加成本与施工难度，且超过临界深度后传热效率提升微

弱。管间距设计同样关键：过小易致相邻埋管热干扰，加剧地下温度场失衡；过大则增加用地面积与成本。

热泵机组选型需与建筑负荷特性匹配：额定容量过大易致机组频繁启停，增加能耗、缩短寿命；过小则无法满足负荷需求，影响热舒适性。因该地区建筑冬夏负荷差异大，单一容量机组难以兼顾两季高效运行，需优先采用变容量机组（适应负荷变化，维持部分负荷时段高COP），大型建筑或建筑群可采用多机组联合运行搭配群控系统。此外，机组制冷剂类型、压缩机效率等，也需在设计阶段综合考量。

2.3 运行与维护管理

系统长期能效不仅依赖设计，还与运行管理及后期维护密切相关。

运营管理的核心是负荷调节策略：该地区建筑负荷随室外温度、人员密度、设备状态动态变化，若系统采用固定模式，无法调整循环水流量、机组功率等参数，会造成能效浪费——夏季满负荷运行易过度排放热量，加剧地下温度升高；冬季运行参数过高则过度消耗热量，导致地下温度降低。同时，需合理规划系统启停，频繁启停会增加能耗、引发故障。

维护管理不到位会直接导致性能衰减：地埋管换热器长期运行易结垢，夏季高湿环境使循环水杂质沉积，冬季低温致钙镁离子析出，水垢增加管道热阻，降低传热效率；地埋管泄漏会导致循环水流失，影响系统运行且污染地下水。热泵机组若未定期清洗换热器、更换润滑油、检查电气系统，会导致性能下降、COP降低，拖累整体能效。

2.4 建筑负荷特性

建筑负荷特性是系统运行的基础前提，该地区建筑负荷受围护结构性能、朝向、使用功能影响，差异显著，直接决定系统工况与能效。

围护结构保温隔热性能核心影响负荷大小：性能优良的围护结构（高效保温材料、双层玻璃窗等），可减少建筑与外界热量交换，降低制冷制热负荷，进而减少系统向地下排放或吸收的热量，缓解地下温度场失衡，保障能效；性能差的围护结构（老旧实心砖墙、单层玻璃窗等），会增大建筑负荷，迫使系统高频次、高强度运行，加剧地下热量平衡破坏，导致能效衰减。

建筑朝向同样影响负荷：夏季太阳辐射强烈，南向建筑接收辐射多，增加制冷负荷；冬季南向辐射可降低制热负荷。朝向设计不合理会扩大冬夏负荷差异，增加

系统热量平衡难度，长期运行致地下温度失衡，降低能效。此外，建筑使用功能不同，负荷分布与变化规律不同（商业/办公建筑日间负荷高，住宅夜间负荷高），系统若未针对性设计与调节，会造成能源浪费，降低运行能效。

3 夏热冬冷地区地埋管地源热泵系统长期运行能效的提升策略

3.1 基于地质水文条件的系统优化设计

个性化设计是提升能效的基础，项目前期需开展详细地质勘察，明确岩土体热物理性质、地下水位及流动状态。针对黏土层广、导热系数低的区域，可增大埋管深度或减小管间距，搭配高导热回填材料减少热阻；岩石地层需优化钻孔工艺与回填材料，避免温度变化导致裂缝影响传热。地下水位高且活跃区域，可利用地下水特性采用增强型换热系统；水位低或流动慢的区域，增设辅助散热/取热装置，维持地下温度场稳定。

3.2 优化系统设计参数与设备选型

结合区域气候与建筑负荷特点优化设计：地埋管换热器采用动态负荷计算，冬夏负荷差异大的建筑用非对称布置方案，优先选竖直埋管并将深度控制在80~120米，平衡效率与成本。热泵机组优先选用变容量机型，适应负荷动态变化；大型建筑或建筑群采用多机组联合运行与群控调度，同时选择环保高效制冷剂及带变频压缩机、高效换热器的机组，提升设备性能。

3.3 加强运行管理与维护

科学管理与维护是能效保障：运行端采用智能控制系统，结合能耗数据与气象参数实现自适应调节，通过传感器实时监测地下温度、循环水参数及机组状态，动态调整运行参数与启停策略，减少能耗损失。维护端制定定期计划，检测循环水水质并清洗结垢，压力测试排查地埋管泄漏；定期维护热泵机组，清洗换热器、更换润滑油并检查电气系统，同时建立运行档案为后续优化提供依据。

3.4 结合建筑节能改造提升系统能效

从源头降低负荷是重要途径：开展围护结构节能改造，通过外墙、屋面保温及更换节能门窗减少冷热负荷，结合被动式设计优化建筑朝向、遮阳与通风，使负荷与系统特性更匹配。此外，按建筑功能优化室内温控，办

公建筑采用分区温控，住宅建筑采用分时温控，减少不必要的负荷消耗，进一步提升系统运行能效。

4 结论与展望

4.1 结论

本文分析夏热冬冷地区地埋管地源热泵系统，得出以下结论：该系统气候适配性较好，地下温度场稳定性可规避传统热泵极端天气能效衰减，但长期运行依赖地下热量平衡，而区域建筑冬夏负荷差异易打破此平衡，引发能效衰减，这是核心矛盾。系统长期运行能效受多维度关联因素影响：地质水文条件是基础，系统设计参数是关键，运行维护管理是保障，建筑负荷特性是前提，四者共同决定能效水平。针对区域特殊性，通过地质适配设计、参数设备优化、智能运维及建筑节能改造协同推进，可缓解地下热量失衡，降低能效衰减，为暖通工程绿色低碳发展提供路径。

4.2 展望

未来可从多方向深入研究：技术创新上，研发新型地埋管换热器与导热材料，构建地埋管热泵与太阳能、空气源热泵的耦合系统；应用推广上，完善区域技术标准，加强政策支持并建立能效监测评价体系；研究深化上，开展10年以上长期监测，加强多学科交叉研究；可持续发展上，开展系统全生命周期环境影响评价，提出绿色设计运行方案。综上，系统能效提升需多方面发力，未来应用前景广阔，助力区域“双碳”目标与绿色建筑发展。

参考文献

- [1] 庄运超. 复合地源热泵系统的长期经济运行策略研究[D]. 湖南工业大学, 2012.
- [2] 胡武文. 地源热泵空调系统的节能分析与管理[D]. 湖南大学, 2020.
- [3] 丰威仙. 夏热冬冷地区复合地源热泵系统性能分析与研究[D]. 江苏科技大学, 2015.
- [4] 邓欣, 王猛, 汪峰, 等. 某示范小区地源热泵系统长期运行特性监测与分析[J]. 能源研究与利用, 2024(5).
- [5] 韩丹丹. 重庆市地源热泵地埋管系统研究现状[C]//2022供热工程建设与高效运行研讨会. 中国土木工程学会; 中国市政工程华北设计研究总院; 《煤气与热力》杂志社; 中国建设科技集团, 2022.