

储热储冷多场景应用专刊



地埋管跨季节储热耦合热泵供暖系统性能与经济性分析

崔梦颖, 殷勇高, 赵栋霖, 黄钰希, 曹博文
(东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 跨季节地埋管储热供热系统可通过低品位热的跨季节转移与热泵提质利用, 实现高效、低成本的低碳供热, 但现有研究对不同规模井群长周期运行特性研究有限。通过TRNSYS建立了跨季节地埋管储热耦合热泵供热系统模型, 并开展了10年连续运行模拟。系统分析了不同热源温度(30~50℃)和不同钻孔数量(200~2000)对储热体储热容量、热损失、供热系统性能和经济性的影响。结果表明: 将钻孔数量从200个增加到2000个可显著降低单位体积热损失, 以第10年为例, 热源温度为50℃的系统储热效率由75.0%提升至85.0%, 热损失率由20.0%降至11.9%。另外, 增大钻孔数量会改变单位体积热损失在侧面、顶部与底部之间的占比, 储热体侧面热损失占比下降, 顶部和底部热损失占比增加。大规模储热体有必要采取地表保温措施减少顶部热损失。热源温度与规模共同决定储热效率与系统季节性能系数。降低热源温度可以提高储热效率, 但会增加热泵供热能耗, 在低电价地区和热源回收成本较高时更具经济优势。本研究可为低品位热源条件下跨季节地埋管储热系统规模选取和系统热损失优化提供参考。

关键词: 跨季节地埋管储热; 低品位热源; 建筑供热; 经济性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0107

中图分类号: TU 833

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-983-10

Performance and economic analysis of borehole thermal energy storage integrated heat pump heating system

CUI Mengying, YIN Yonggao, ZHAO Donglin, HUANG Yuxi, CAO Bowen
(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: Borehole thermal energy storage heating systems can deliver efficient, low-cost, low-carbon heating by seasonally storing low-grade heat and upgrading it via heat pumps. However, research on the long-term operating characteristics of borehole fields across different scales remains insufficient. In this study, a borehole thermal energy storage integrated heat pump system was developed in TRNSYS and simulated for 10 consecutive years. The effects of heat-source temperature (30—50℃) and borehole number (200—2000) on storage capacity, heat loss, heating system performance, and economics were evaluated. The results show that increasing the number of boreholes from 200 to 2000 significantly reduces volumetric heat loss. Taking Year 10 as an example, for the 50℃ heat-source case, the storage efficiency increases from 75.0% to 85.0%, while the heat-loss ratio decreases from 20.0% to 11.9%. In addition, as the borehole number increases, the distribution of heat

收稿日期: 2026-01-31; 修改稿日期: 2026-02-06。

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3810003)。

第一作者: 崔梦颖(1999—), 女, 博士研究生, 研究方向为跨季节地埋管储热技术, E-mail: myc759@163.com; 通信作者: 殷勇高, 教授, 主要从事储热储冷技术、高温热泵与低碳供暖等研究, E-mail: y.yin@seu.edu.cn。

引用本文: 崔梦颖, 殷勇高, 赵栋霖, 等. 地埋管跨季节储热耦合热泵供暖系统性能与经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 983-992.

Citation: CUI Mengying, YIN Yonggao, ZHAO Donglin, et al. Performance and economic analysis of borehole thermal energy storage integrated heat pump heating system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 983-992.

loss shifts among the sidewall, top, and bottom boundaries. The sidewall share decreases whereas the top and bottom shares increase, indicating that surface insulation becomes necessary for large-scale systems to mitigate top-boundary heat loss. Heat-source temperature and borehole field scale jointly determine storage efficiency and the system's seasonal performance factor. Reduction of the heat source temperature may improve heat storage efficiency, but it increases the power consumption of the heat pump. Therefore, low-temperature borehole thermal energy storage offers greater economic advantages when electricity prices are low and heat source recovery costs are high. The findings provide guidance for borehole field sizing and heat-loss mitigation for seasonal BTES systems driven by low-grade heat sources.

Keywords: seasonal borehole thermal energy storage; low-grade heat source; building heating; economic

2024 年我国民用建筑供暖能耗总量 1.7 亿 tce, 碳排放为 4.1 亿 tCO₂, 占我国民用建筑碳排放的 16.6%^[1]。由于建筑供暖具有季节性特征, 低品位热和供热需求存在时间、空间不匹配问题。若将非供暖季的可再生热与余热回收并跨季节储存, 于供暖季提取应用, 有望覆盖相当比例的建筑用热需求。建设跨季节储热设施并实现余热与可再生热源的灵活调配, 是提升供热系统灵活性与减排潜力的重要途径^[2]。

跨季节储热可将非供暖季的热量存储并在供暖季释放, 从而缓解可再生热源和余热热源的波动性并提升供热保障能力。其中, 跨季节地埋管储热 (BTES) 使用土壤作为储热介质, 技术成熟度高, 初投资少, 适用性与扩展性强, 在国内外开展了大量研究与工程示范^[3]。BTES 根据储热温度可以分为高温 BTES (60~80℃)、中温 BTES (40~60℃) 和低温 BTES (20~40℃)。早期项目验证了太阳能、工业余热等低品位热能可通过地下岩土实现跨季节储存, 并可直接接入热网替代部分化石燃料供暖。但当与传统高温热网直接连接时, 取热温度下限受热网供水温度约束, 使系统往往采用高温 BTES (如 60℃ 以上), 热源类型也以太阳能与工业余热为主^[4-5]。受到储热热源容量和成本的影响, 这些高温 BTES 系统可实现的规模通常较小。

区域供热技术向低温化、智能化与多能源协同方向演进^[6-7]。这降低了取热温度下限, 使 BTES 无需维持过高温度即可满足末端需求, 从而推动系统低温运行与热泵耦合应用^[8-9]。低品位热源的回收利用可与低温供热网络良好匹配。在相同规模下, 低

温 BTES 能减少储热体热损失, 并拓宽热源选择范围, 有望在保证供热同时降低成本^[10-11]。长期运行后, 低温 BTES 可实现稳定温升。连续运行 10 年后, 低温城市中水余热跨季节储热系统的储热体平均温度提高了 2.84℃, 整个系统能效比相比地源热泵可提升 2.80%~18.22%^[12]。该系统耦合的储热体由 48 根钻孔组成, 储热体规模较小。

BTES 运行性能受地表边界条件、岩土热物性、钻孔场几何参数与布置方式以及运行策略等多因素共同影响。已有研究表明, 钻孔储热的热损失速率随着土壤导热系数的增加而增加^[13], 不适合布置在具有高初始含水量或较高导热性的土层中。在钻孔总数一定时, 紧凑型布置储热体钻孔的储热效率高于分散型布置。充热温度和钻孔深度是影响注入热量的关键因素^[14]。提高入口温度可扩大热影响范围^[15], 增大系统热损失。在井群系统中, 侧向热损失通常占主导地位^[16]。BTES 具有显著的规模效应。在一定边界条件下, 储热体规模增大可降低比表面积, 从而降低单位储热量的边界热损失并提高回收效率。已有研究表明, 埋管总长度对储热体热性能会产生较大影响^[17], 但没有分析其对系统经济性的影响。

中低温热源来源广泛, 可实现大规模储热。湖/河水热源的低温大规模 BTES 系统的储热效率可以达到 90% 以上^[18]。当中低温 BTES 与热泵供热耦合时, 热损失不仅决定能量回收率, 还影响热泵的供热效率。因此, 大规模跨季节地埋管储热供热系统需要综合权衡系统能效、储热效率和经济性等指标, 这增加了系统设计的难度。然而, 现有研究多

从井间距、井深或土壤参数方面讨论能量回收率, 侧重单一工程对象且对经济性分析有限。另外, 热源温度影响与规模效应往往被分别讨论, 缺少在统一情景下综合考虑二者对系统季节能效比与经济性的系统量化分析。

因此, 以低品位热跨季节地埋管储热耦合热泵供热系统为研究对象, 通过 TRNSYS 建立系统动态模型, 开展长周期运行模拟, 揭示不同热源温度与井群规模对储热体温度、边界热损失的影响规律。然后, 量化供热系统稳定运行周期的季节能效比与经济性指标的影响, 评估系统在不同电价与热源回收费用下的适用性, 从而给出兼顾储热效率与系统能效的参数选取依据, 为中低温大规模 BTES 供热工程提供可复制的设计参考。

1 方法

1.1 跨季节地埋管储热供热系统组成

典型中低温跨季节地埋管储热耦合热泵供热系统如图1所示, 系统由热源侧、换热单元、地埋管储热体、热泵机组、储热水箱及用户侧供热回路构成。基于我国寒冷地区供热季节特征并避免系统频繁启停, 将系统年度运行周期划分为储热期(6月1日至10月31日)、取热期(11月1日至次年3月15日)与恢复期(3月16日至5月31日)。

在储热期, 热源侧通过换热器向 BTES 注入热量, 实现季节性蓄热; 在供热期, 从 BTES 提取热量并经热泵提质升温后向热用户供热, 储热水箱用于短期负荷调节; 在恢复期, 循环水泵关闭, 储热体内部热量以传导为主缓慢扩散, 温度梯度逐步减小, 促使储热体内部温度与能量分布趋于均匀。

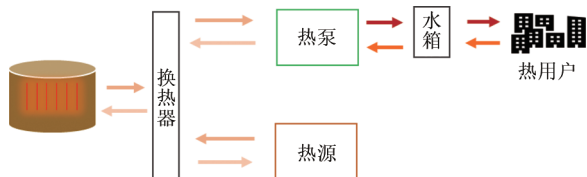


图1 典型跨季节地埋管储热耦合热泵供热系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a typical seasonal borehole thermal energy storage integrated heat pump system

1.2 跨季节地埋管储热供热系统模型建立

基于图1所示系统构型, 本研究在 TRNSYS 中建立跨季节储热供热系统动态模型, 如图2所示。

建筑逐时供热负荷由 TRNBuild 和 Type56 基于逐时气象数据计算得到。蓄热体模型采用 Type557 模块 (DST 模型^[19]), DST 模型假定钻孔在平面内规则布置, 并以等效圆柱体储热域表征井场尺度, 其将井场换热问题分解为全局温度响应、局部近井响应与稳态热通量响应等子问题, 并叠加得到地温与出入口温度的动态结果, 能够兼顾跨季节与多年尺度下的热积累与热损失演化。现有研究已经验证了 DST 模型模拟长周期 BTES 运行的准确性^[20]。BTES 的热量储存和提取通过换热器 (Type 5) 实现, 储热期采用恒定注热温度, 取热期取热温度根据热泵 (Type 925) 需求调节, 忽略地下水流动影响。

热泵、水泵和储热体的运行通过控制器调节, 将冬季用户侧供水温度维持在 45~50℃, 并切换储热期、供热期与恢复期的系统运行状态。模拟步长设定为 1 h, 模拟从 6 月 1 日开始连续运行 10 年。同时, 输出井场温度演化、注入/提取热量、热泵与循环泵耗电等关键参数。

通过改变钻孔数量和热源温度来构建工况矩阵。当钻孔数量增加时, 建筑供热需求、热泵装机容量、循环流量及换热器容量按比例放大, 以保持单位钻孔的设计负荷与运行策略在不同工况中的一致性。

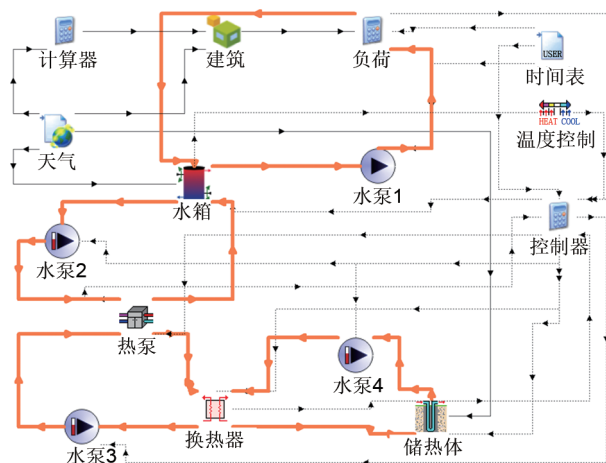


图2 跨季节地埋管储热耦合热泵系统 TRNSYS 模型
Fig. 2 TRNSYS model of seasonal borehole thermal energy storage integrated heat pump system

BTES 储热单元由传热流体、U 形管换热器、回填材料与土壤介质组成, 其 BTES 系统模型基本参数见表1。设置钻孔直径为 90 mm, U 形管外径与内径分别为 32 mm 和 26 mm, 钻孔间距为 3.5 m,

钻孔深度为 150 m, 并且计算了不同规模储热体的比表面积(储热体比表面积=储热体外边界面积总和/储热体体积)。

表 1 BTES 系统模型基本参数设置

Table 1 Main parameters of BTES system model

参数	数值	单位
U形管外径	32	mm
U形管内径	26	mm
管内流速	0.25~0.4	m/s
钻孔深度	150	m
钻孔直径	90	mm
井间距	3.5	m
土壤导热系数	1.31	W/(m·K)
土壤热容	2100	kJ/(m ³ ·K)
钻孔数量	200/400/800/1200/1600/2000	个
比表面积	0.0903/0.0678/0.0518/0.0448/0.0405/0.0377	m ² /m ³
热源温度	30/35/40/45/50	℃

1.3 评价指标

通常采用一个完整的准稳态运行周期作为评估 BTES 性能的分析周期。一个完整运行周期内从蓄热体提取的热量(Q_{st})和一个完整运行周期内输入储热体的热量(Q_{ex})可由式(1)、式(2)计算得到。

$$Q_{st} = \int_{st} \dot{m}_{st} c (T_{st, in, t} - T_{st, out, t}) dt \quad (1)$$

$$Q_{ex} = \int_{ex} \dot{m}_{ex} c (T_{ex, out, t} - T_{ex, in, t}) dt \quad (2)$$

式中, $\dot{m}_{ex}$ 为储热期 BTES 回路循环流体质量流量, kg/s; c 为循环流体定压比热容, J/(kg·K); $T_{st, in, t}$ 和 $T_{st, out, t}$ 分别为时刻 t 储热期 BTES 入口与出口温度, ℃; $T_{ex, in, t}$ 和 $T_{ex, out, t}$ 分别为时刻 t 取热期 BTES 入口与出口温度, ℃; t 为时间, h。

一个完整运行周期内储热体内部能量变化量(ΔQ), 可由式(3)计算。

$$\Delta Q = \iiint_{\Omega_{BTES}} C_v(x, y, z) \Delta T(x, y, z) dv \quad (3)$$

式中, Ω_{BTES} 为储热体的体积区域; $C_v(x, y, z)$ 为 (x, y, z) 处土壤的比热容, J/(kg·K); $\Delta T(x, y, z)$ 为 (x, y, z) 处土壤温度相对周期初始的变化量, K。

BTES 顶部会受到外界气候影响, 侧面和底部与土壤直接接触。在运行期间, 储热体内部热量通过边界向无限远处传递。将储热期间不能回收的耗散热量定义为 BTES 的热损失项, 即 Q_{loss} 。BTES 的完整运行周期的热平衡如式(4)所示。BTES 的最终可用能量受到热注入和热损失的影响。

$$\Delta Q = Q_{st} - Q_{ex} - \int_{st + ex + re} \dot{Q}_{loss} dt \quad (4)$$

跨季节储热系统评价指标包括能量和经济两方

面, 主要有储热效率、热损失率、系统季节能效比和费用年值。

(1) BTES 的储热效率(η_q)是评价其热性能广泛采用的指标。其被定义为对于一个完整运行周期, BTES 的能量提取与能量注入的比值, 计算公式如下:

$$\eta_q = \frac{Q_{ex}}{Q_{in}} \quad (5)$$

(2) BTES 热损失率(η_{loss})为系统完整运行周期内损失的热量占初始储存总热量的百分比。

$$\eta_{loss} = \frac{Q_{loss}}{Q_{in}} \quad (6)$$

(3) 系统季节能效比(SPF_{sys})定义为统计期内用户侧供热量与系统总耗电量之比, 其中系统耗电量包含热泵与循环泵耗电。

$$SPF_{sys} = \frac{Q_h}{E_{HP} + E_{pumps}} \quad (7)$$

式中, Q_h 为完整运行周期内向热用户侧累计供热量, kWh; E_{HP} 为完整运行周期内热泵耗电量, kWh; E_{pumps} 为完整运行周期内系统循环泵总耗电量, kWh。

综合考虑初投资和运行费用带来的经济影响, 使用费用年值(C_{AC})作为评价指标, 将初投资的资金按照时间价值等额分配到系统的使用年限中, 然后与年经营成本相加, 可由式(8)计算。

$$C_{AC} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot c + e \quad (8)$$

式中, i 为投资基准收益率, %; n 为系统运行时间, 年; c 为系统初期投资成本, 万元; e 为系统年运行成本, 万元。本研究中以 5% 的投资基准收益率, 计算运行 $n=10$ 年的费用年值。

其余成本依据实际项目成本进行计算。跨季节地埋管储热供热系统的初投资主要包括设备费、安装费、机房费、材料费、钻孔费等。设备费主要指各方案中热泵机组、水箱及水泵等的费用, 设备费和钻孔费按照实际设备价格计算, 其中孔深价格按 100 元/m 计算, 供热机房造价按照 10000 元/m² 计算^[18]。安装费采用因子法进行初步估算^[21], 按设备成本的 15% 计算^[22]。

2 结果分析与讨论

2.1 BTES 性能分析

2.1.1 储热体平均温度

图 3 展示了在热源温度为 50℃ 和 35℃ 时不同

钻孔数量下储热体的平均温度随运行时间的变化。不同热源温度的储热体平均温度变化趋势相似, 储热体在运行初期都经历了明显的波动, 随后逐渐进入稳定波动时期。热源温度越低, 储热体平均温度进入稳定波动周期的时间越短, 且不同钻孔数量之间的储热体平均温度差值越小。

对于同一种热源温度, 钻孔数量越大, 储热体平均温度越高。由图3(a)可以观察到, 第10年恢复期结束后, 200个钻孔工况的储热体平均温度为 28.42°C , 而2000个钻孔工况比200个钻孔储热体高 2.17°C , 储热体平均温度为 30.59°C 。这是由于增大储热体规模使储热核心和储热边界增大, 而单位体积对应的储热体表面积减少, 储热体积聚热量更多, 从而储热体的平均温度更高。值得注意的是, 当钻孔数量达到一定程度后, 进一步增加钻孔数量所带来的储热体比表面积下降幅度逐渐减缓。对于大规模储热体, 增加钻孔数量对平均温度的提升作用逐渐趋于饱和。当钻孔数由200个增加至400个时, 平均温度提高 0.96°C ; 而由1600个增加至2000个时, 平均温度仅提高 0.11°C 。

2.1.2 储热体出水温度

图4对比了热源温度为 50°C 的储热体在第3年与第10年时不同钻孔数量的出口温度变化。储热

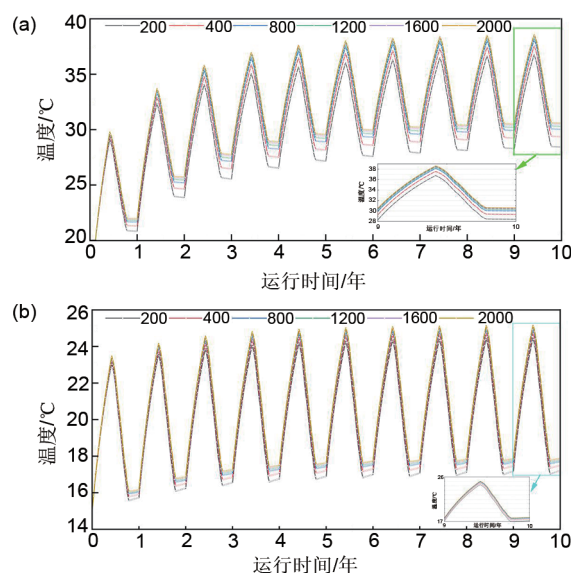


图3 不同规模储热体平均温度变化: (a) 热源温度 50°C ; (b) 热源温度 35°C

Fig. 3 Average temperature of storage volumes of different sizes: (a) Heat source temperature at 50°C ; (b) Heat source temperature at 35°C

期间, 储热体出口温度变化趋势与图3所示的储热体平均温度变化结果一致, 出口温度随着钻孔数量的减少而降低, 且不同规模工况间差值逐渐增大。小规模井场整体温度更低, 在相同热源温度与流量下, 流体与土壤间温差更大, 循环流体在储热期间

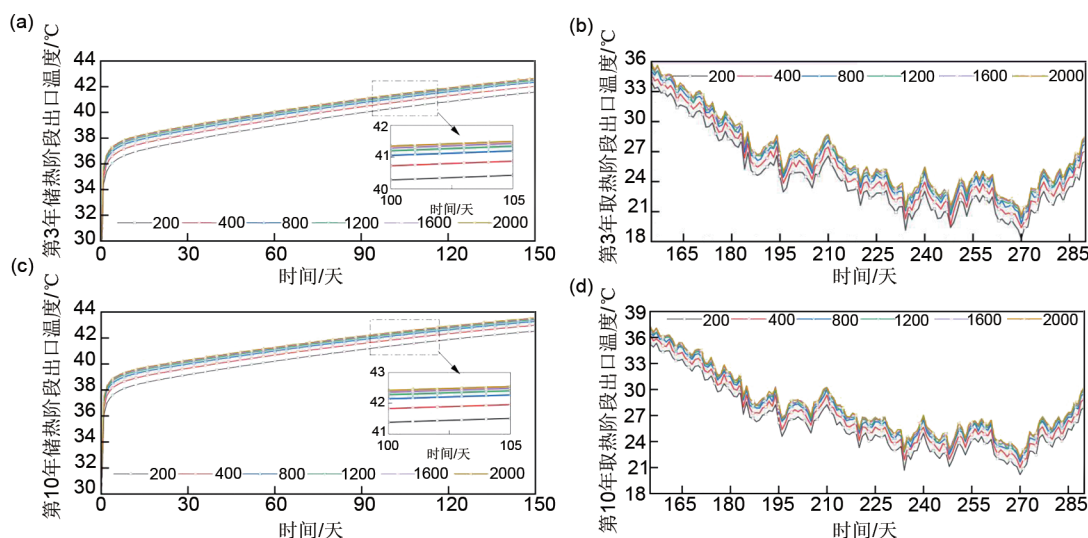


图4 热源温度为 50°C 的储热体出口水温变化: (a) 第3年储热阶段出口温度; (b) 第3年取热阶段出口温度; (c) 第10年储热阶段出口温度; (d) 第10年取热阶段出口温度

Fig. 4 Water outlet temperature of the storage volume at a heat source temperature of 50°C : (a) Water outlet temperature during charging in the 3rd year; (b) Water outlet temperature during discharging in the 3rd year; (c) Water outlet temperature during charging in the 10th year; (d) Water outlet temperature during discharging in the 10th year

向土壤传递的热量更大,从而导致储热期流体出口温度更低。随着储热时间的增加,储热体的出水温度逐渐升高。不同规模储热体的出水温度随储热时间变化的趋势一致。

如图4(b)和(d)所示,取热期间储热体出口温度不仅由储热体温度决定,还受到供热负荷波动的影响。当负荷短时升高或热泵侧需求提高时,小规模井场可能出现更大的瞬时温降幅度,从而导致不同规模工况的出口温度曲线可能出现交叉,但供暖季的整体出水温度主要受到储热体平均温度与热损失影响。因此,建议在取热期间预测供暖季平均出口温度和最低出口温度来对储热体进行调控,从而满足供热需求。

2.1.3 储热体热损失与储热效率

图5展示了不同规模储热体的单位体积热损失(完整运行周期内系统热损失总量/井场等效圆柱体体积)及其分布。以热源温度为50℃为例[图5(c)],单位体积的热损失变化随着钻孔数量的增加逐渐减小,2000个钻孔的储热体比200个钻孔的储热体热损失减小了48.6%。这是由于随着钻孔数量的增加,储热体的比表面积减少,从而减小了单位体积所对应的散热面积,进而降低了单位体积热损失。

另外,热损失在顶部、底部与侧面之间的分配比例也随规模发生变化。顶部与底部的热损失占比随规模增大逐步上升,而侧面热损失占比持续下降。这是由于随着钻孔数量增加,储热体的半径增大,侧面面积在总表面积中占比从85.2%降低至64.6%。对于热源温度为50℃的工况,侧面单位热损失占比也从74.8%降低至46.4%。相对于稳定的底部土层,地表边界温度受季节性气候影响,供暖季顶部与环境温差更大。因此相对于底部热损失,顶部热损失占比上升更为显著。对比不同热源温度工况可以发现,热源温度越低,储热体的顶部热损失占比越大。30℃热源温度工况下2000个钻孔的储热体顶部单位体积热损失占比可达59.2%。因此,对于大储热规模BTES不可忽略其顶部热损失,建议采取必要的保温措施。

如表2所示,BTES系统的能量利用率呈现显著的规模效应,储热效率(η_{loss})由75.0%提升到了85.0%,热损失率(η_q)由20.0%下降到了11.9%。大规模储热体通过降低比表面积来减小热损失,并提高热回收能力。

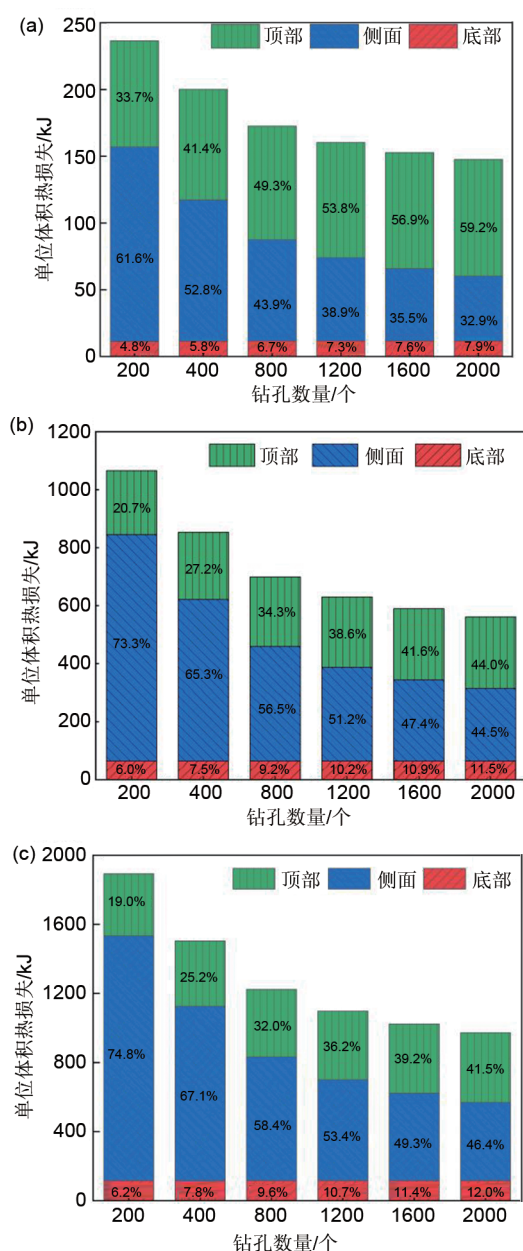


图5 第10年不同规模储热体单位体积热损失变化: (a) 热源温度30℃; (b) 热源温度40℃; (c) 热源温度50℃
Fig. 5 Variation in unit volume heat loss of different-sized thermal storage volumes in the 10th year: (a) Heat source temperature at 30℃; (b) Heat source temperature at 40℃; (c) Heat source temperature at 50℃

图6(a)进一步表明,当热源温度和流量不变时,随着储热体规模增大,向单位体积储热体注入的能量及其相应热损失均呈下降趋势,而单位体积取热量逐渐增加。大规模储热体在相同的运行策略下更有利于形成更高的储热密度。

另外,由于初期温度场尚未稳定,2000个钻

表2 热源温度为50℃的不同规模BTES在第10年的储热效率和热损失率

Table 2 Storage efficiency and heat-loss rate of different-sized BTES at a heat source temperature of 50℃ in the 10th Year

钻孔规模	储热效率	热损失率
200	75.0%	20.0%
400	79.0%	16.7%
800	82.1%	14.2%
1200	83.5%	13.1%
1600	84.3%	12.4%
2000	85.0%	11.9%

孔储热体的单位体积热损失在运行初期随储热体平均温度的提高而增大, 在第5年达到热损失峰值[图6(b)], 对应该运行周期内储热体表面与周围环境的温度梯度达到最大。随后由于外围土壤持续被加热, 储热体边界温度梯度减小, 单位体积热损失逐步下降并趋于稳定。随着运行年限增加, 系统每个周期的运行状态逐步稳定, 相邻年度的储热体内部能量变化(ΔQ)逐渐减小。

2.2 跨季节地理管储热供热系统经济分析

2.2.1 储热效率和系统季节能效比分析

图7给出了第10年不同热源温度与不同储热体规模条件下, 供热系统季节能效比与储热效率的联合分布。整体来看, 在同一储热规模下, 热源温度从30℃升高到50℃, 供热系统季节能效比提高, 但储热效率降低。在同一热源温度下, 钻孔数量从200个增加到2000个, 储热效率与系统季节能效比均呈上升趋势。以热源温度为30℃与50℃两组工况为例, 钻孔数量从200个增加到2000个时, 30℃工况下的储热效率由96.0%提高至97.3%, 50℃工况下由75.0%提高至85.0%。这是由于低温BTES的储热效率已经处于较好的水平, 扩大中温BTES的储热体规模对其效率的改善会相对显著。另外, 大规模储热体在储热结束后储热体平均温度比小规模储热体更高的热源, 取热期可以为热泵提供温度更高, 从而减小热泵能耗。

相比于中温BTES, 低温BTES储热体的平均温度较低, 使热泵加热所需耗电量增加, 从而降低供热系统季节能效比。如图7所示, 通过提高热源温度对供热系统季节能效比的提升比通过扩大系统规模更为显著。因此, 建议将储热温度控制在满足供热需求的最低水平, 并通过增大储热规模(降低

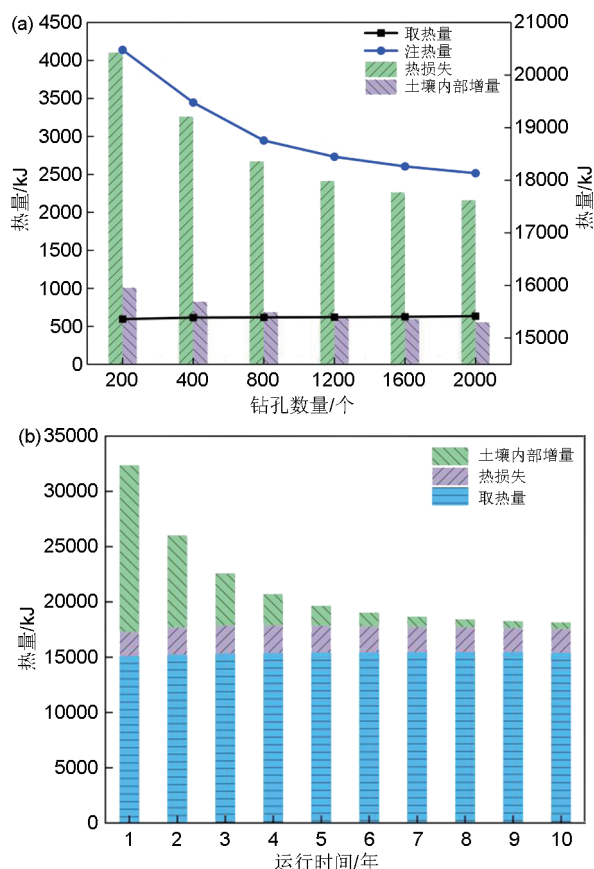


图6 热源温度为50℃的不同规模储热体单位体积储热能量变化: (a) 不同钻孔数量第10年; (b) 2000个钻孔储热体不同运行周期

Fig. 6 Change in specific heat storage capacity per unit volume for different-sized storage volumes at a heat source temperature of 50℃: (a) Tenth year for different numbers of boreholes; (b) 2000 boreholes storage volume under different operating cycles

比表面积)来减少单位储热体体积热损失, 从而提高低温工况下的储热体平均温度, 在保证较高回收效率的同时获得可接受的系统季节能效比。

2.2.2 费用年值

根据各方案的初投资及运行费用, 代入式(8)可得到各方案的费用年值。在基准电价与热源回收费设定下, 不同热源温度的费用年值差异相对有限。其中, 热源温度为30℃工况的跨季节地理管储热供热系统的费用年值如图8所示。由于系统仅进行冬季供热, 初投资在费用年值中占比略大于年运行费用。现有工况根据温度对跨季节地理管储热供热系统进行启停调控, 若通过动态调节流量和供水温度运行或考虑分时电价等优化系统运行策略, 可进一步降低费用年值。

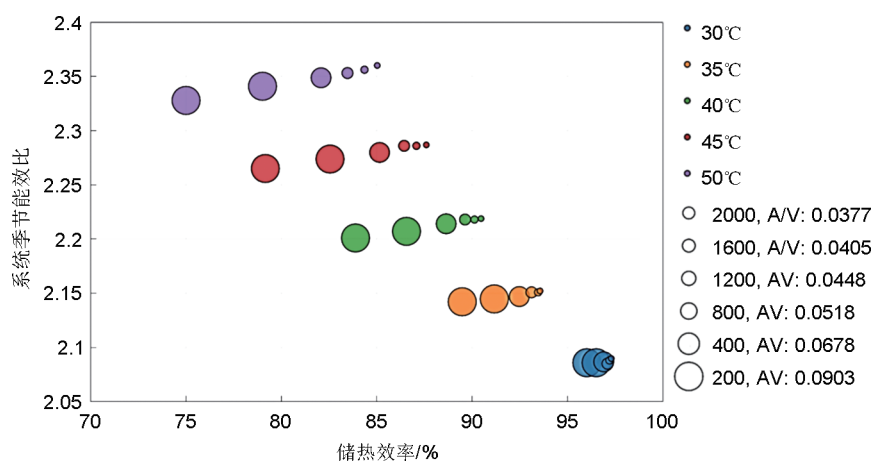


图7 跨季节地埋管储热耦合热泵供热系统储热效率和季节能效比

Fig. 7 Storage efficiency seasonal performance factor of seasonal borehole thermal energy storage integrated heat pump systems

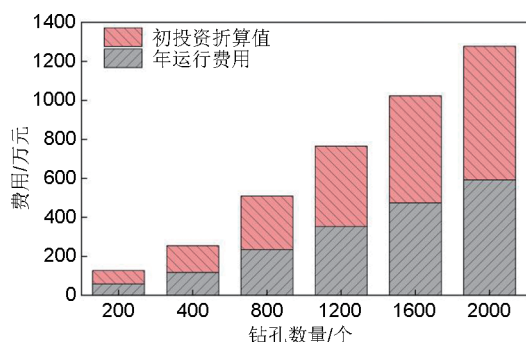


图8 热源温度30°C的不同规模跨季节地埋管储热供热系统的费用年值

Fig. 8 Annual expenses for seasonal borehole thermal energy storage integrated heat pump systems of different-sized storage volumes at a heat source temperature of 30°C

图9所示为平均电价从0.2元/kWh提高至1.0元/kWh时跨季节地埋管储热供热的费用年值变化。中低温跨季节地埋管储热供热系统依赖热泵提质升温，其电费是运行费用的重要组成部分。30°C方案对电价更敏感，在低电价区间，30°C方案费用年值更低，电价较高时50°C方案更经济。当热源温度为30°C时，储热体平均温度低导致供暖季的出口温度更低，此时热泵所需单位供热电耗更高，使运行费用中电费占比上升，从而放大电价变化对运行费用的影响。大规模储热体有效减少了热损失并提高了储热体平均温度和储热效率，可进一步减少中温跨季节地埋管储热供热系统的热泵运行能耗，从而降低运行费用。因此，相比于200个钻孔跨季节地埋管储热系统，大规模低温跨季节地埋管储热系统在不同电价下的经济性优势区间更小。

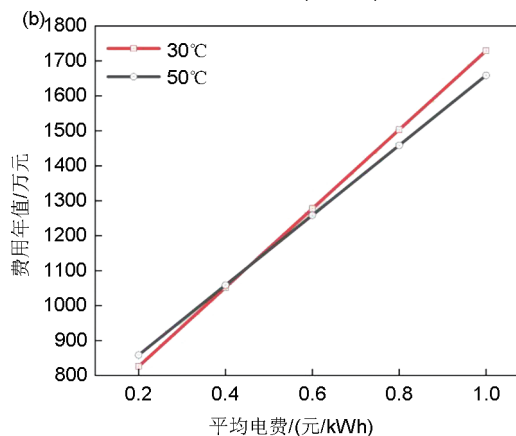
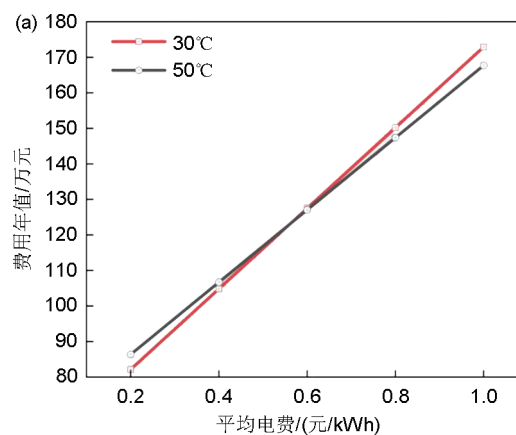


图9 平均电价对费用年值的影响：(a) 200个钻孔；(b) 2000个钻孔

Fig. 9 The influence of average electricity price on annual expenses: (a) 200 boreholes; (b) 2000 boreholes

图10展示了热源温度为30°C和50°C时随着热源回收费用变化的系统费用年值变化。通常50°C的热源需要付费回收，此处考虑通过工业余热回收

得到, 其中热源费用基准值取 10 元/GJ。而 30℃ 可近似视为低成本环境热源(例如湖水热能和河水热能), 假设其热源获取费用可忽略。当余热回收费用高于 10.8 元/GJ 时 30℃ 更占优势, 反之则 50℃ 更具经济性。随着储热体规模增大, 储热效率提高, 热泵的运行能耗会降低, 从而节省的电费可抵消部分热源回收费用, 该阈值也随之提高。增大储热体规模可提升中温跨季节地埋管储热供热系统对热源回收价格不确定性的承受能力。中温储热方案更适用于来源稳定且成本较低的大规模应用场景, 而在余热价格不确定或较高时, 应优先考虑低温储热方案。

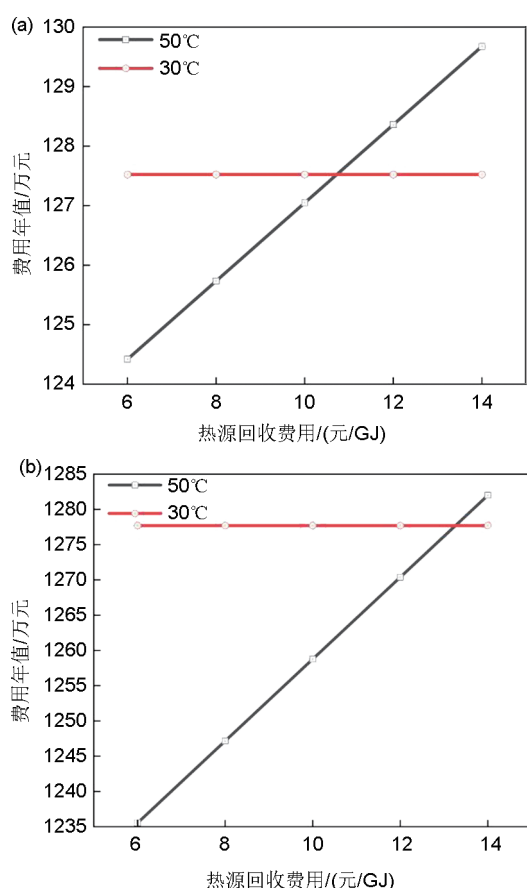


图 10 热源回收费用对费用年值的影响: (a) 200 个钻孔; (b) 2000 个钻孔

Fig. 10 The influence of heat source recovery costs on annual expenses: (a) 200 boreholes; (b) 2000 boreholes

3 结 论

基于 TRNSYS 平台建立了跨季节地埋管储热耦合热泵供热系统模型, 通过改变钻孔数量与热源

温度来开展长周期运行计算。从储热体热损失率、储热效率、系统季节能效比以及经济性等多维度进行分析, 定量揭示了系统性能与经济性随热源温度与规模变化的规律, 并综合费用年值指标给出了不同热源温度与规模方案的电费和热源回收费用场景适用性范围, 为中低温跨季节地埋管储热体规模设计提供依据。得到的主要结论如下:

(1) 扩大井场规模可显著降低单位体积热损失, 并改变储热体不同表面的热损失分布。热源温度为 50℃ 时, 2000 个钻孔储热体比 200 个钻孔储热体的单位体积热损失降低了 48.6%。扩大储热体规模会导致侧面热损失占比下降, 顶部热损失占比上升, 建议对大规模储热体强化顶层设计或设计地表保温以减少顶部热损失。

(2) 热源温度与储热体规模共同决定储热体有效温度水平, 从而形成储热效率与供热系统季节能效比的权衡关系。在同一规模下, 提高热源温度可提升供热系统季节能效比, 但会增大热损失从而降低储热效率。在同一热源温度下, 扩大储热体规模可同时提高储热效率与供热系统季节能效比。50℃ 热源跨季节地埋管储热的第 10 年储热效率随钻孔数量增加从 75.0% 提高到 85.0%。

(3) 跨季节地埋管储热供热系统的经济性受电价与余热回收费用影响。低温跨季节地埋管储热供热系统在低电价或高热源回收费用场景下更经济。中温跨季节地埋管储热需要考虑热源回收费用, 增大储热体规模可增强中温跨季节地埋管储热系统对热源价格波动的适应性。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑节能协会, 重庆大学. 中国城乡建设领域碳排放研究报告 (2025)[R]. 2025.
- [2] 江亿, 付林, 夏建军, 等. 构建新型零碳热力系统[J]. 中国工程科学, 2025, 27(5): 1-18. DOI:10.15302/J-SSCAE-2025.08.025.
JIANG Y, FU L, XIA J J, et al. Building a zero-carbon thermal system[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2025, 27(5): 1-18. DOI:10.15302/J-SSCAE-2025.08.025.
- [3] 冯国会, 田晓珂, 王茜如, 等. 地埋管跨季节储热技术与展望[J]. 太阳能学报, 2025, 46(8): 207-215. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0506.
FENG G H, TIAN X K, WANG X R, et al. Review and prospect of borehole thermal energy storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(8): 207-215. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0506.

- [4] SALOIX E, CANDANEDO J A. Control-oriented model of a solar community with seasonal thermal energy storage: Development, calibration and validation[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2019, 12(5): 523-545. DOI: 10.1080/19401493.2018.1523950.
- [5] HELLSTRÖM G. UTES experiences from Sweden[R]. Sweden, 2016.
- [6] YAO S, WU J Z, QADRDAN M. A state-of-the-art analysis and perspectives on the 4th/5th generation district heating and cooling systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 202: 114729. DOI:10.1016/j.rser.2024.114729.
- [7] FIGUEIRA J S, GARCÍA GIL A, VIEIRA A, et al. Shallow geothermal energy systems for district heating and cooling networks: Review and technological progression through case studies[J]. *Renewable Energy*, 2024, 236: 121436. DOI:10.1016/j.renene.2024.121436.
- [8] GUO F, YANG X D, XU L Y, et al. A central solar-industrial waste heat heating system with large scale borehole thermal storage[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1584-1591. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.274.
- [9] NILSSON E, ROHDIN P. Performance evaluation of an industrial borehole thermal energy storage (BTES) project-Experiences from the first seven years of operation[J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 1022-1034. DOI:10.1016/j.renene.2019.05.020.
- [10] MESQUITA L, MCCLENAHAN D, THORNTON J, et al. Drake landing solar community: 10 years of operation[C]//*Proceedings of SWC2017/SHC2017*. October 29-November 2, 2017. Abu Dhabi. International Solar Energy Society, 2017: 1-12. DOI: 10.18086/swc.2017.06.09.
- [11] ZHAO D L, CUI M Y, YANG S C, et al. Rapid temperature prediction model for large-scale seasonal borehole thermal energy storage unit[J]. *Energies*, 2025, 18(19): DOI: 10.3390/en18195326.
- [12] 贾鹏琦, 殷勇高, 张思雨, 等. 面向低碳供暖的城市中水余热跨季节储热系统性能分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(10): 4124-4134. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.10.030.
- JIA P Q, YIN Y G, ZHANG S Y, et al. Performance analysis of seasonal thermal energy storage system with urban reclaimed water waste heat for low-carbon heating[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(10): 4124-4134. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.10.030.
- [13] RAPANTOVA N, POSPISIL P, KOZIOREK J, et al. Optimisation of experimental operation of borehole thermal energy storage[J]. *Applied Energy*, 2016, 181: 464-476. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.08.091.
- [14] ZHU L, CHEN S, YANG Y, et al. Global sensitivity analysis on borehole thermal energy storage performances under intermittent operation mode in the first charging phase[J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 183-198. DOI:10.1016/j.renene.2019.05.010.
- [15] 冯国会, 卢伟东, 王茜如, 等. 运行参数及间歇启停策略对埋管蓄热性能的影响[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(10): 3785-3795. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0373.
- FENG G H, LU W D, WANG X R, et al. Influence of operational parameters and intermittent start-stop strategy on thermal storage performance of ground heat exchangers[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(10): 3785-3795. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0373.
- [16] 张思雨, 殷勇高, 贾鹏琦, 等. 双U型埋管群跨季节蓄热特性研究[J]. *化工学报*, 2023, 74(S1): 295-301. DOI: 10.11949/0438-1157.20221623.
- ZHANG S Y, YIN Y G, JIA P Q, et al. Study on seasonal thermal energy storage characteristics of double U-shaped buried pipe group[J]. *CIESC Journal*, 2023, 74(S1): 295-301. DOI: 10.11949/0438-1157.20221623.
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114763.
- [18] 杨曙川, 殷勇高, 李晓, 等. 基于湖/河水的跨季节/天混合储热技术实践与优化[J]. *制冷学报*, 2025, 46(3): 1-10, 31. DOI: 10.12465/j.issn.0253-4339.2025.03.001.
- YANG S C, YIN Y G, LI X, et al. Practice and optimization of seasonal/daily composite thermal energy storage technology based on lakes/rivers[J]. *Journal of Refrigeration*, 2025, 46(3): 1-10, 31. DOI: 10.12465/j.issn.0253-4339.2025.03.001.
- [19] HELLSTRÖM G. Duct ground heat storage model: manual for computer code[D]. Department of Mathematical Physics University of Lund, Lund, Sweden, 1989.
- [20] THORÉN Å. Practical evaluation of borehole heat exchanger models in TRNSYS[D]. Industrial Engineering and Management, KTH School, Stockholm, 2016.
- [21] AROMADA S A, ELDRUP N H, ERIK ØI L. Capital cost estimation of CO₂ capture plant using Enhanced Detailed Factor (EDF) method: Installation factors and plant construction characteristic factors[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2021, 110: 103394. DOI:10.1016/j.ijggc.2021.103394.
- [22] ZHOU W S, PEI P, MAO R Y, et al. Selection and techno-economic analysis of hybrid ground source heat pumps used in karst regions[J]. *Science Progress*, 2020, 103(2): 0036850420921682. DOI:10.1177/0036850420921682.