

【编者按】储能是实现“双碳”战略目标、推进能源低碳转型、建设新型电力系统的重要支撑技术。规模化长时储能可支撑日以上时间尺度的电力平衡调节,大幅提升新型电力系统的灵活性和稳定性。储冷储热作为用户侧典型的储能形式,是用户侧未来长时储能的中坚力量,将在零碳能源高比例消纳、用能柔性调节方面发挥重要作用。储冷储热技术已经开展了长期、广泛的研究与开发,但高密度、大规模、低成本、快蓄释速率的储冷储热技术还有待进一步研究与开发。“面向零碳能源消纳的储冷储热技术”专栏内容涉及新型高密度储冷储热方法研究与装备开发、长周期低成本储热技术应用、基于储冷储热的零碳能源消纳与柔性用能等,这些研究将推动用户侧热储存技术的开发应用、助力我国“双碳”目标的达成。

殷勇高  
东南大学

文章编号:0253-4339(2025)03-0001-11

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.03.001

面向零碳能源消纳的储冷储热技术

## 基于湖/河水的跨季节/天混合储热技术实践与优化

杨曙川<sup>1</sup> 殷勇高<sup>1</sup> 李晓<sup>2</sup> 赵栋霖<sup>1</sup> 崔梦颖<sup>1</sup>

(1 东南大学能源与环境学院 南京 210000;2 河北卓派新能源开发有限公司 石家庄 050000)

**摘要** 热泵技术因其电热转换的高效性已成为中低温供暖领域的主要路径。然而北方冬季缺少稳定热源,因此需要将城市范围内的热源进行跨季节存储,以保证热泵系统供暖的稳定性。基于馆陶地区河水跨季节/天储热工程,利用 TRNSYS 搭建仿真模型,在固定场地面积限制下对蓄热体各参数进行敏感性分析,并对跨天储热的配置与策略进行优化。结果表明:运行 10 a 后,蓄热体温升达到 3.2 °C,有效防止了土壤热失衡;埋管间距与深度对系统性能影响最大,当间距为 4 m、深度为 150 m 时,总管长可减小约 23%。此外跨天储热应匹配谷电储热量与释热负荷,避免谷电浪费,当制热功率大时,可增大水箱容积并考虑平电释热,以提高谷电利用率,优化后年运行费用减少 11.2%。

**关键词** 跨季节储热;河水;峰谷电价;TRNSYS

中图分类号:TK02;TK01<sup>+</sup>9

文献标识码:A

## Practice and Optimization of Seasonal/Daily Composite Thermal Energy Storage Technology Based on Lakes/Rivers

Yang Shuchuan<sup>1</sup> Yin Yonggao<sup>1</sup> Li Xiao<sup>2</sup> Zhao Donglin<sup>1</sup> Cui Mengying<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210000, China; 2. Hebei Zhuopai Renewable Energy Development Co., Ltd., Shijiazhuang, 050000)

**Abstract** Heat pump technology has become an essential solution in the field of medium- and low-temperature heating due to its superior efficiency in converting electrical energy into thermal energy. However, owing to the lack of stable heat sources during winter in northern China, it is necessary to store the heat sources within the urban area throughout the seasons to ensure the stability of the heat provided by the heat pump system. In this study, based on the project of seasonal/daily thermal storage of river water in Guantao, a simulation model was constructed using the Transient System Simulation Tool (TRNSYS). A sensitivity analysis of the thermal energy storage unit parameters was conducted under the constraint of the fixed site area. The configurations and strategies of the daily thermal energy storage were optimized. The results show that the temperature rise of the thermal energy storage unit reaches 3.2 °C after 10 years of operation, effectively preventing the soil heat imbalance. The distance between the buried pipes and the depth had the greatest influence on the performance of the system. The total length of the pipes could be reduced by approximately 23% with a spacing of 4 m and a depth of 150 m. The daily thermal energy storage system should be matched to the valley power storage heat and heat release load to avoid wasting the valley power. If the storage heat power is large, the volume of the storage tank can be increased, and the flat power heat release is considered. The optimized system improves the utilization rate of valley power and reduces annual operating costs by 11.2%.

收稿日期:2024-12-14;修回日期:2024-12-31;录用日期:2025-01-03

**Keywords** seasonal thermal energy storage; river water; peak-valley electricity price; TRNSYS

根据国家能源局统计,我国北方地区建筑供热面积总和超过 200 亿  $m^2$ ,其中空调和采暖依赖以煤炭为主的化石能源,燃煤占比 83%,约 2 亿 t 标煤为污染严重的散烧煤,烟尘产生量是工业用煤的 2.7 倍<sup>[1-2]</sup>,为北方环境污染防治带来巨大压力<sup>[3]</sup>。热泵技术因其电热转换的高效性,为替代化石能源提供了可靠方案,成为中低温供暖领域实现低/零碳的主要路径。由于北方冬季缺少稳定热源,热泵供暖的稳定性会受到较大影响,空气源热泵在使用中容易出现效率低、能耗高、难以运行等问题<sup>[4-5]</sup>。水源热泵具有高效节能、运行稳定的特点<sup>[6-7]</sup>,但需要稳定的水源。地源热泵在长期运行后会造土壤热失衡问题<sup>[8]</sup>。综上所述,稳定热源是保证热泵系统实现低/零碳供暖的关键,需要将区域/城市范围内的热源进行跨季节存储,从而在冬季保证热泵系统的高效稳定供暖,所以跨季节储热(seasonal thermal energy storage, STES)愈发受到关注<sup>[9-11]</sup>。图 1 所示为一个简单的跨季节储热系统。该系统包含机组端、用户端、蓄热体以及能源端。与传统地源热泵不同的是,跨季节储热系统利用非采暖季的可再生能源(太阳能、空气能等)对蓄热体进行热量回灌以补充供暖季提取的热量,从而实现蓄热体的热平衡并保证系统的长期稳定运行。

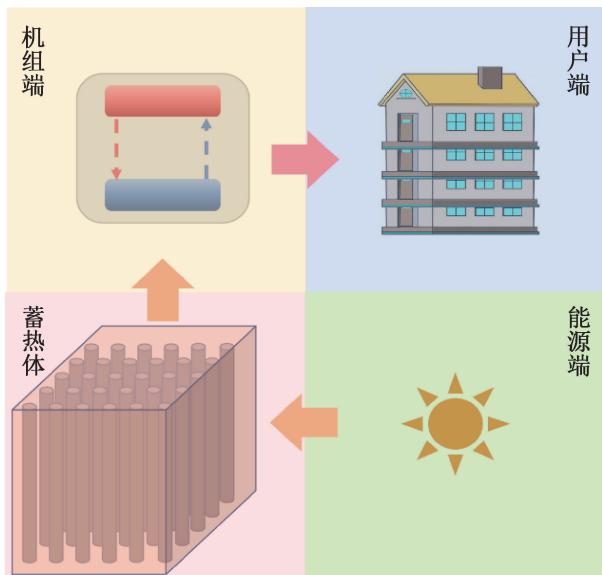


图 1 跨季节储热系统

Fig.1 Seasonal thermal energy storage system

在大规模集中供暖下,成本是限制跨季节系统应用的首要问题:1) 热源成本,目前储热热源主要为太阳能<sup>[12-14]</sup>、空气能<sup>[15-17]</sup>、工业余热<sup>[18-19]</sup>,表 1 所示为

各类热源的特点,其中低成本地表水不仅摆脱了工业生产的限制,且存在巨大的能量利用潜力<sup>[20]</sup>;2) 运营成本,峰谷电价差的合理利用应成为优化供暖系统经济性的重要策略,但目前跨季节储热中结合地表水热源与峰谷电价策略的研究尚有不足。

表 1 各类热源的特点

Tab.1 Characteristics of each heat source

热源形式	优点	缺点
太阳能	来源广泛、品位高	成本高
空气能	来源广泛、布置灵活	需额外增设热泵
工业余热	成本低、能量品位高	受地域与生产限制
地表水	来源广泛、成本低	品位低

蓄热体作为热量存储与转移的媒介,其热性能是影响系统运行效能的关键因素。T. Schmidt 等<sup>[21]</sup>研究发现降低储热体比表面积可以降低储热体热损失。N. Rapantova 等<sup>[22]</sup>发现在长期运行中,较大的导热效率、较长的钻孔深度会加大热损失。S. Lanini 等<sup>[23]</sup>结合实验与模拟发现,当钻孔深度由 100 m 增至 150 m 时,热损失将增大 15%。张辉等<sup>[24]</sup>研究了多变量对储热效率的影响,并指出相比于土壤热容与钻孔深度,土壤导热系数与钻孔间距更为重要。陈萨如拉等<sup>[25]</sup>通过全局敏感性分析法研究了单一因素与交互因素变化对注热量、蓄热率的影响,发现蓄热温度、钻孔深度、埋管间距、导热系数是影响蓄热体热性能的关键因素。Guo Fang 等<sup>[26]</sup>研究发现,蓄热体内部传热是导致焓损的主要因素,且钻孔总长度对蓄热体热性能影响最大。综上所述,现有研究主要集中在设计参数对蓄热体热性能的影响,忽略了对系统性能、经济性的评估以及工程中场地面积对蓄热体设计的限制。

本文基于实际工程,利用 TRNSYS 搭建了基于湖/河水的跨季节/天储热仿真系统,研究了系统在长期运行下的性能变化,在固定场地面积下分析了埋管间距、深度、流量等因素对蓄热体及系统性能的影响,并针对跨天系统对水箱容积与控制策略进行了优化。

## 1 工程概况

### 1.1 工程介绍

工程位于河北省邯郸馆陶,当地无大规模工业余热,但水域面积丰富,城内永济河流经 37.5 km,流域面积为 292  $km^2$ ,夏季河水温度达 30  $^{\circ}C$  以上,具备

跨季节储热的先天条件,因此选择在夏季利用河水对蓄热体进行热量回灌,工程初期设计供暖面积约为30万m<sup>2</sup>。

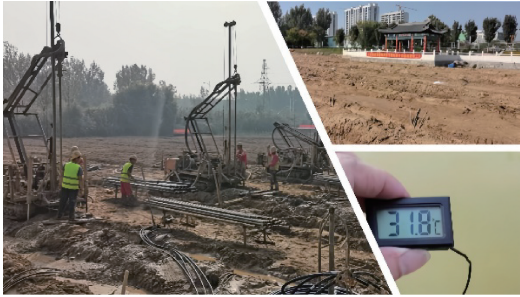


图2 馆陶跨季节储热工程

Fig.2 Seasonal thermal energy storage project in Guantao

### 1.2 负荷情况

利用 Meteororm 获取了邯郸馆陶的标准年室外气象参数数据并结合 TRNBuild 对冬季负荷进行计算,冬季负荷与气温如图3所示。该地区最低气温为-10.7℃,最大供暖热负荷为10.9MW,累计供暖量约为3.66万GJ。

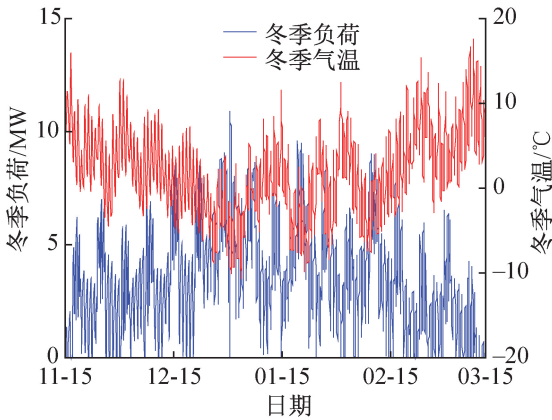


图3 冬季负荷与气温

Fig.3 Load and temperature in winter

### 1.3 峰谷电价

由于电价波动,将峰谷电价按2023年11月至2024年3月内的均值进行估算。图4所示为全年峰谷电价分时情况。从谷电到尖峰的价格分别为0.41、0.70、1.00、1.15元/(kW·h)。

## 2 模型建立与验证

### 2.1 水温模型

河水温度与当地气温等气象参数密切关联,可通过相关方程拟合得到<sup>[27-28]</sup>。白振营<sup>[29]</sup>建立了水温与室外温度、相对湿度、风速的关联方程,并针对河北陡河水库进行了验证,方程如下:

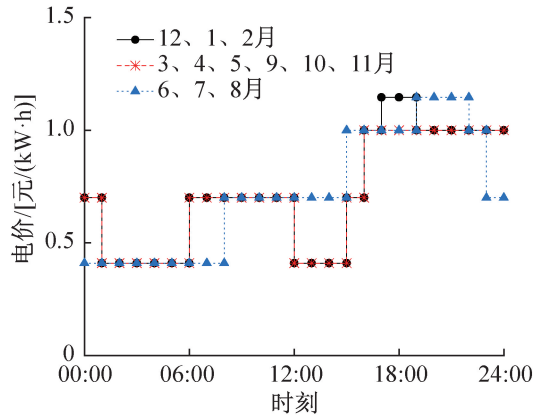


图4 峰谷电价

Fig.4 Annual peak valley electricity price

$$t_s = (2.82 + 0.82T_a) \frac{(1+r^2)^{0.435}}{(1+0.31\omega_{150}^2)^{0.056}} \quad (1)$$

式中: $t_s$ 为河水温度,℃; $T_a$ 为室外温度,℃; $r$ 为相对湿度; $\omega_{150}$ 为水面上方1.5m处风速,m/s。

工程在5—9月内对水面下方3.5m处的温度进行测量。将计算结果与实测值进行对比,如图5所示。最大相对误差为14.7%,证明了方程的可靠性。

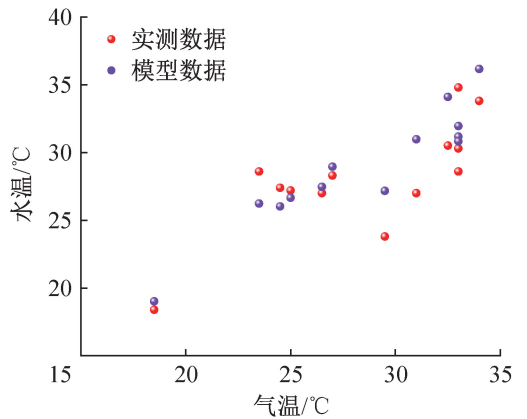


图5 河水温度模型验证

Fig.5 Verification of river water temperature model

### 2.2 系统模型

跨季节/天储热系统主要配置参数如表2所示,系统原理如图6所示。4种运行模式如下:1)谷电蓄热,在采暖季的谷电时段打开P3、P5、V5、V6、V11、V12,开启高温热泵机组给蓄热水箱蓄热,当水箱出口温度达到55℃时停止蓄热;2)峰电释热,在采暖季的峰电时段打开P2、P6、V1、V2、V3、V4,通过蓄热水箱给用户供暖,当水箱出口温度低于45℃时停止释热;3)正常供热模式,在采暖季打开P3、P4、V7、V8、V9、V10,启动4台机组正常向用户供热;4)埋管储热,在夏季当河水温度高于蓄热体中心温度5℃

表 2 跨季节/天储热系统主要参数

Tab.2 Main parameters of seasonal/daily composite thermal energy storage system

项目	数量	参数	值
蓄热体	1	埋管深度/m	150
		埋管数目/个	2 000
		埋管间距/m	3.5
		土壤导热系数/[ (W/(m·K)) ]	1.31
		土壤热容/[ kJ/(m <sup>3</sup> ·K) ]	2 100
高温热泵	2	额定制热功率/kW	2 303
		输入功率/kW	720
		制热温度/°C	60
热泵机组	4	额定制热功率/kW	2 723
		输入功率/kW	555
		制热温度/°C	45
河水泵	1	流量/(m <sup>3</sup> /h)	600
		额定功率/kW	45
循环水泵	2	流量/(m <sup>3</sup> /h)	300
		额定功率/kW	45

时,打开 P1、P3、V13、V14、V15、V16,利用河水对蓄热体储热,当温差小于 0 °C 时,停止储热。

在机组蒸发器进出口设置温度测点,并统一由数据采集仪上传至云端进行记录,在供暖季可代替蓄热体进出口温度进行验证。图 7 所示为蓄热体模型验证结果。由图 7 可知,实测出水温度与模型出水温度差异较小,最大温差为 1.5 °C,最大相对误差为 14%,模型可用于后续的分析中。

### 2.3 评价指标

跨季节储热系统评价指标包括蓄热体温度、储热效率、蓄热率、性能系数 (coefficient of performance, COP)、谷电占比等。储热效率可以直观反映系统的收获与投入之比,计算如下:

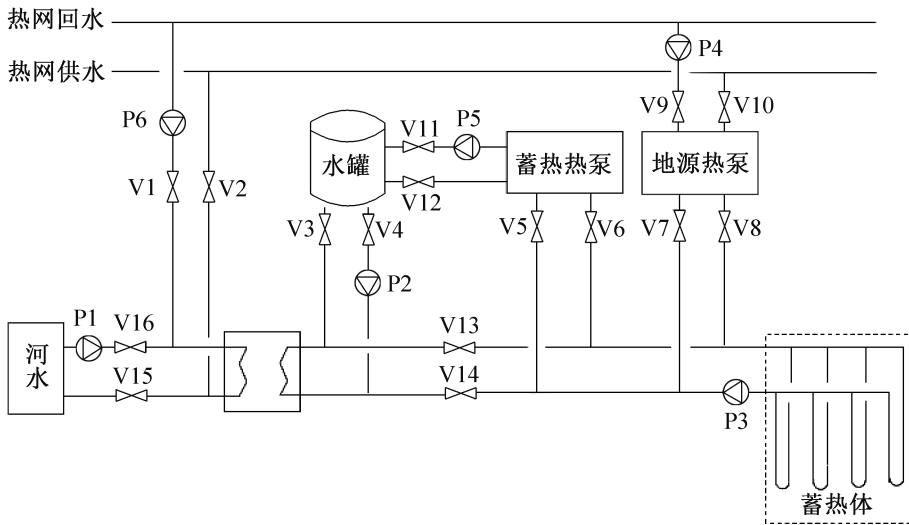
$$\eta_{\text{BTES}} = Q_{\text{ext}}/Q_{\text{inj}} \quad (2)$$

式中: $\eta_{\text{BTES}}$  为系统储热效率,%; $Q_{\text{ext}}$  为一个完整运行年内从蓄热体提取的热量,J; $Q_{\text{inj}}$  为一个完整运行年内输入蓄热体的热量,J。

蓄热率反映了蓄热体本身的热特性,即系统的存量与投入之比,计算如下:

$$\eta_{\text{ST}} = Q_{\text{stor}}/Q_{\text{inj}} \quad (3)$$

式中: $\eta_{\text{ST}}$  为系统蓄热率,%; $Q_{\text{stor}}$  为蓄热体内的蓄热量,J。



P 水泵;V 阀门。

图 6 跨季节/天储热系统原理

Fig.6 Principle of seasonal/daily thermal energy storage system

谷电占比为系统在全年谷电时段的用电量占全年总用电量的比例,计算如下:

$$\eta_{\text{gd}} = N_{\text{gd}}/N_{\text{xt}} \quad (4)$$

式中: $\eta_{\text{gd}}$  为谷电占比,%; $N_{\text{gd}}$  为全年谷电用电量,kW·h; $N_{\text{xt}}$  为全年系统耗电量,kW·h。

## 3 系统运行与优化

### 3.1 运行特性

由于能源端的波动性、地下传热过程的复杂性,系统一般要耗费数年才能达到平衡,因此需要对系统

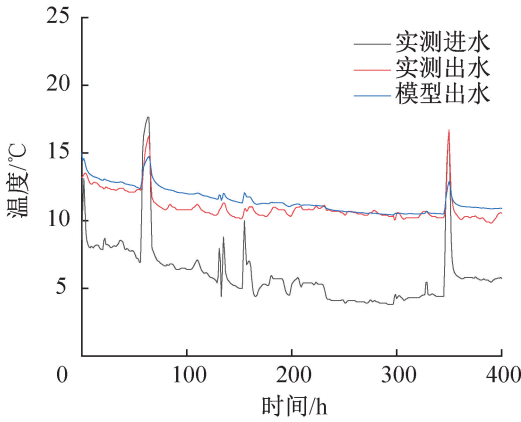


图7 蓄热体模型验证

Fig.7 Validation of thermal energy storage unit model

进行长期的运行模拟分析。

图8所示为跨季节/天储热系统的能量及效率变化。由图8可知,随着蓄热体温度升高,注热量由初始的3.89万GJ降至10a后的3万GJ并趋于平稳。取热量基本保持约2.9万GJ,储热效率随着运行时间逐步增加,由75%升至96%。蓄热率基本维持在96%~98%,较大的储热体减小了边界散热的影响,因此注热量可以更多蓄存在蓄热体内<sup>[30]</sup>。

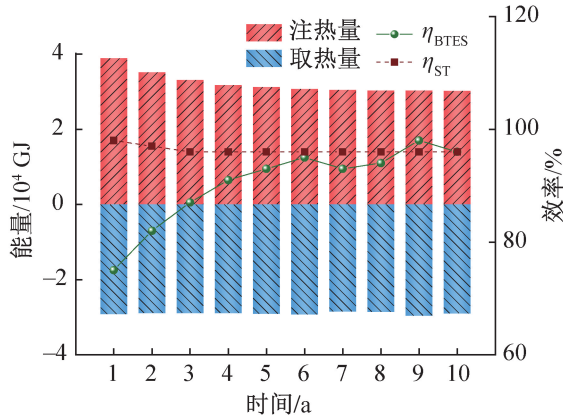


图8 系统能量及效率变化

Fig.8 Variation of system energy and efficiency

图9所示为不同系统蓄热体温度随时间的变化。由图9可知,传统地源热泵系统的蓄热体温度逐年下降,运行10a后降至6.6℃。跨季节/天储热系统的蓄热体温度呈波动上升趋势并趋于稳定,经过5a的运行后土壤温度基本保持稳定,10a后温度为18.2℃,相比初始温度升高了3.2℃,全年温度区间为15.5~20.0℃。跨季节储热系统相比跨季节/天储热系统的蓄热体温度约高0.3℃,但2种系统对蓄热体影响的差异较小,即跨天储热对跨季节储热系统影响较小。

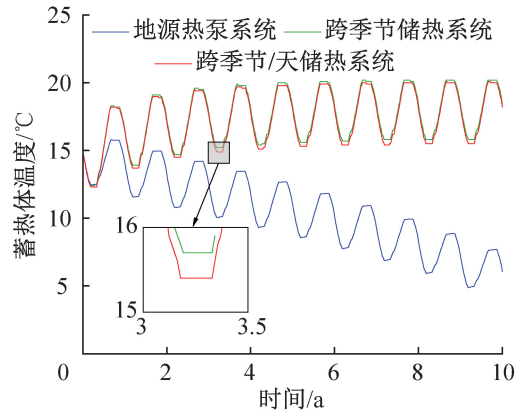


图9 不同系统的蓄热体温度

Fig.9 Temperature of thermal storage unit for different systems

图10所示为3种系统蓄热体出口温度随时间的变化。由图10可知,地源热泵系统出口水温逐年显著降低,跨季节/天储热系统与跨季节储热系统的出口水温较为稳定,两者夏季出水温度差异不显著,冬季跨季节系统的出口水温略高于跨季节/天储热系统,这是由于谷电蓄热模式使得蓄热体进口流量增加,因此出口水温较低。总体而言,跨季节/天储热系统出水温度受蓄热体温度上升影响而逐步升高,最低出水温度由第1年的4.0℃升至第5年的7.0℃并趋于稳定。

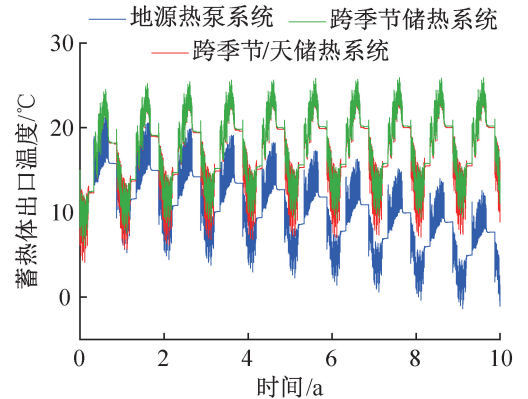


图10 不同系统的蓄热体出口温度

Fig.10 Outlet temperature of thermal storage unit for different systems

图11所示为系统的谷电利用状况。由图11可知,每年谷电蓄热、峰电释热时间分别约为597、863h,10a内谷电利用率稳定在52.8%。供暖季蓄热水箱的温度变化如图12所示。由图12可知,在供暖季初期,水箱温度由25℃逐步升至55℃后开始波动,在供暖季中期水箱最低温度为48.0℃。在整个供暖季,水箱温度维持在较高水平。

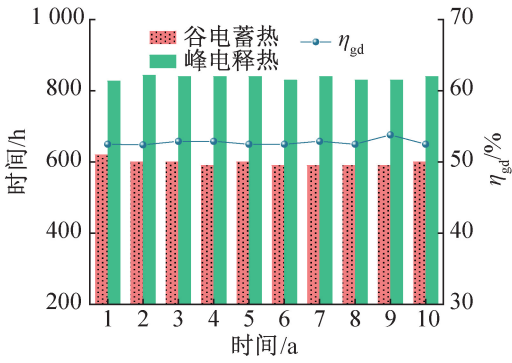


图 11 谷电利用状况

Fig.11 Utilization status of valley electricity

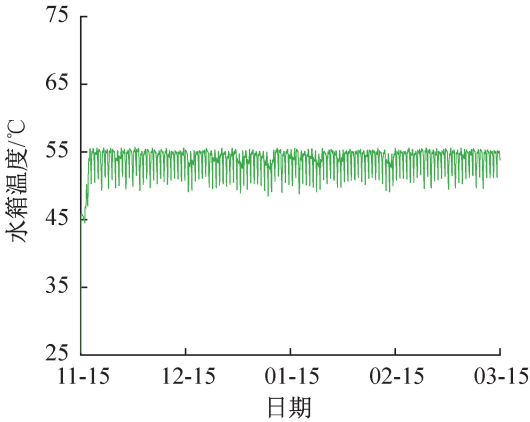


图 12 供暖季水箱温度

Fig.12 Water tank temperature during heating season

表 3 所示为跨季节/天系统与跨季节系统在 10 a 内指标的均值。由表 3 可知,采用跨季节/天系统电费较低,谷电占比较高,电费下降 19.7%,年运行电费节省约 59 万元,谷电占比提高 47.9%。

表 3 10 a 内指标均值

Tab.3 Average of indicators within 10 years

系统	谷电占比/%	运行年费/万元
跨季节/天系统	52.8	241
跨季节系统	35.7	300

### 3.2 分析与优化

由于跨季节储热的长周期性,系统性能需要较长时间才能达到稳定,因此选择 10 a 内的数据均值进行对比。

针对蓄热体设计,通过敏感性分析研究在固定场地面积下(场地面积为 21 300 m<sup>2</sup>,为实际蓄热体占地面积),埋管间距  $S_p$ 、埋管深度  $H$ 、河水流量  $Q_r$ 、循环流量  $Q_x$  对各指标的影响。各参数变化范围如表 4 所示。

考虑到总管长变化带来的经济影响,本文使用费

表 4 参数变化范围

Tab.4 Variation range of parameters

参数	$S_p/m$	$H/m$	$Q_r/(m^3/h)$	$Q_x/(m^3/h)$
最小值	2	50	300	300
最大值	8	250	900	900
步长	1.5	50	150	150
参考值	5	150	600	600

用年值作为经济性评价指标,计算如下:

$$C_{AC} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}c + e \quad (5)$$

式中: $C_{AC}$  为费用年值,元; $i$  为投资基准收益率,% ,取值为 3%; $n$  为系统运行时间,a,取值为 10; $c$  为系统初期投资成本,元; $e$  为系统年运行成本,元。涉及的其余成本如下:水泵 2.75 万元/台、热泵 75 万元/台、水箱 350 元/m<sup>3</sup>、钻孔 100 元/m。

为衡量蓄存能量与取热量之间的关系,将土壤年热平衡率  $\Delta$  作为供暖稳定性评价指标,计算如下:

$$\Delta = \frac{Q_{ext,max}}{Q_{ext}} = \frac{Q_{inj} - Q_{loss}}{Q_{ext}} \quad (6)$$

式中: $\Delta$  为土壤年热平衡率; $Q_{ext,max}$  为蓄热体可提供的最大取热量,J; $Q_{loss}$  为蓄热体散失的热量,J。

土壤年热平衡率  $\Delta$  相比于系统储热效率  $\eta_{BTES}$ ,考虑了热损失带来的影响,可以更直观地评估蓄热体状态。年热平衡率可作为评价跨季节储热系统适应性的指标,其值应尽量为 1.0~1.2<sup>[31]</sup>。

图 13 所示为不同参数下的指标变化。由图 13 (a)可知,随着埋管间距的增大,注热量、取热量、COP、 $\Delta$  均减小。这是因为在固定场地面积下,埋管间距的增大使埋管数目减小,总管长随之减小。但储热效率不断提高,这是由于取热量基本由用户端负荷决定,其变化较小,但注热量显著减少,因此虽然大间距蓄热体的储热效率更高但也面临注热量不足导致土壤热失衡的风险。费用年值随间距的增大而减小,同样是由总管长的变化决定。因此在固定场地下进行初期设计时,综合考虑经济性与蓄热体热性能对埋管间距进行优化是必要的。

由图 13(b)可知,随着深度的增加,注热量、取热量、COP、 $\Delta$  均增加,同样是由于总管长增加的原因。但由于钻孔径向温度梯度较大<sup>[32]</sup>,因此增加深度加大了热量损失,从而降低了储热效率。

由图 13(c)可知,当  $Q_r/Q_{r,ref} > 1$  后,各指标变化较小。因为河水流量是通过影响埋管进口水温产生影响,当河水流量过大,埋管进口水温将达到限值。

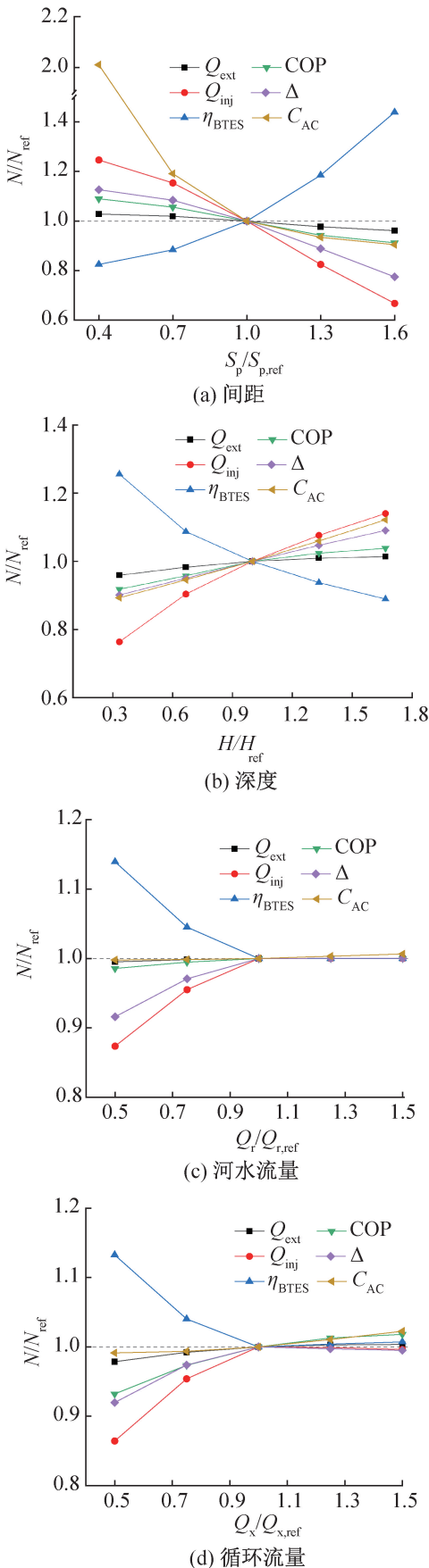


图 13 不同参数下的指标变化

Fig.13 Variation of indicators at different parameters

同时蓄热体与外界的传热温差也随着进口水温的增大而增大,因此储热效率呈现减小的趋势。对比图 13(c)与(d)可知,循环流量与河水流量对指标的影响效果相似,但循环流量对各指标的影响较大,这是由于循环水泵在储热、供暖季均保持运行,相比于河水泵,循环水泵工作时间更长,影响更大。

敏感度系数(sensitivity coefficient, SC)可以反映参数变化对结果的影响,计算如下:

$$\lambda_{SC} = \left| \frac{\lambda_{OP} - \lambda_{OP_B}}{\lambda_{OP_B}} \right| / \left| \frac{\lambda_{IP} - \lambda_{IP_B}}{\lambda_{IP_B}} \right| \quad (7)$$

式中: $\lambda_{OP}$  为输出参数; $\lambda_{OP_B}$  为参考输出参数; $\lambda_{IP}$  为输入参数; $\lambda_{IP_B}$  为参考输入参数。

各参数对指标的 SC 如图 14 所示,由图 14 可知,间距与深度对各指标的 SC 影响更大,说明蓄热体的设计因素相比于运行因素更重要,在设计时应着重考虑间距与深度的匹配优化。基于敏感性分析结果,研究了不同间距、深度下  $\Delta$ 、 $C_{AC}$ 、COP 的变化,如图 15 所示。

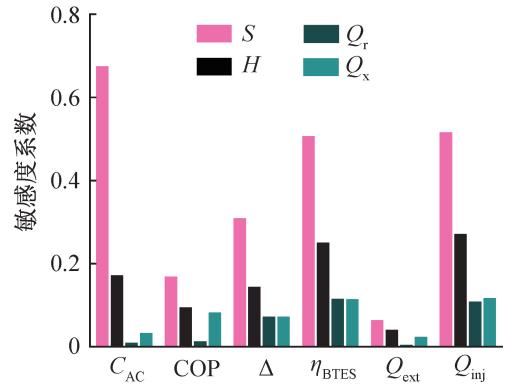


图 14 各参数的敏感度系数

Fig.14 Sensitivity coefficients of various parameters

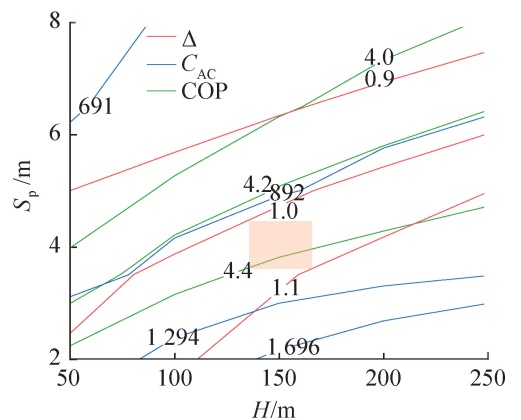


图 15 不同间距、深度下指标变化

Fig.15 Variation of indicators at different spacings and depths

综合考虑  $\Delta$ 、 $C_{AC}$ 、COP 的变化后发现,埋管间距为 3.5~4.5 m、埋管深度为 135~165 m 可作为设计取值的推荐区间。当埋管间距为 4 m、埋管深度为 150 m 时,埋管数减至 1 540 根,总管长为 23 万 m,相比于未优化前减少 23%。

针对跨天蓄热设计,本文从水箱容积变化入手,研究峰谷电价下,水箱容积与负荷的最佳匹配。图 16 所示为不同水箱容积在峰电释热策略下对水箱水温与谷电占比等参数的影响。由图 16(a)可知,随着水箱容积的增大,温度波动逐渐减小。当容积由 1 000 m<sup>3</sup> 增至 6 000 m<sup>3</sup> 时,供暖中期的温度波动由 15.0 °C 减至 1.3 °C,表明水箱在谷电的蓄热量未能在峰电时段得到充分释放。由图 16(b)可知,随着水箱体积的增大,谷电占比由 45.9% 升至 54.0%,但释热时间基本稳定在 840 h。这是因为当水箱体积逐渐增大,峰电释热基本满足了全部峰电时段的用能,但为了保证水箱温度,谷电蓄热的时间、能耗逐步增大,造成了谷电浪费。因此可考虑平电时段进行释热,尽管由于电价划分情况,平电时段负荷会优先峰电时段

负荷得到满足,这可能使得在部分峰电时段仍需开启机组。

图 17 所示为平电时段释热后的运行情况。对比图 16、图 17 可知,由于蓄热与释热时间的增加(蓄热时间由 283~783 h 增至 620~968 h,释热时间由 672~840 h 增至 1 200~1 690 h,谷电占比由 45.9%~54.0% 升至 60.0%~75.0%,提高约 38.4%。受益于机组制热功率较大,在大水箱容积下,平电与峰电负荷基本均可由水箱储热量满足,谷电得到了充分利用。

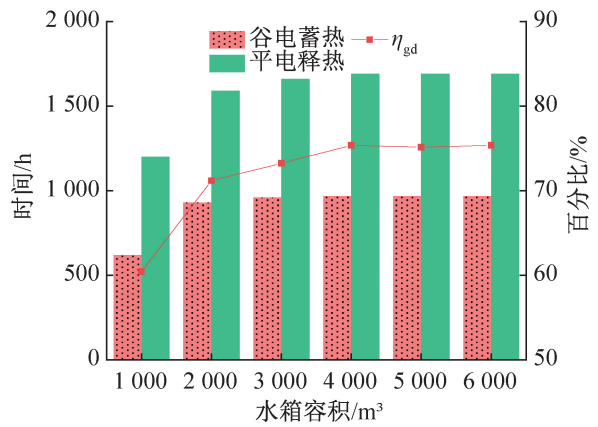


图 17 不同水箱容积下平电释热运行

Fig.17 Thermal release operation during flat electricity price periods under different tank volumes

图 18 所示为 2 种释热控制下的运行年费。由图 18 可知,随着水箱容积的增大,峰电释热的运行年费先减少后缓慢增加,当容积为 2 000 m<sup>3</sup> 时达到最小值 239 万元;而平电释热的运行年费逐步减小,当容积为 5 000 m<sup>3</sup> 时,运行年费基本达到最小值 214 万元,此时相比于跨季节系统,运行年费减少 28.7%,与优化前相比,运行年费减少 11.2%。

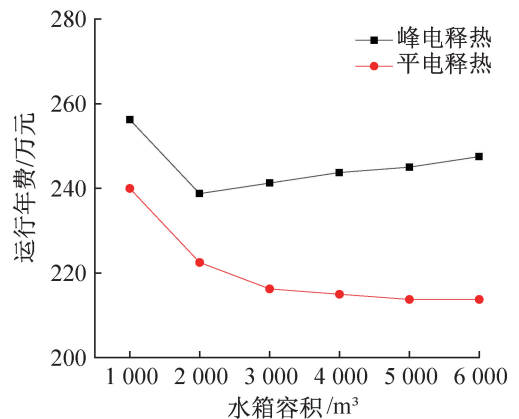
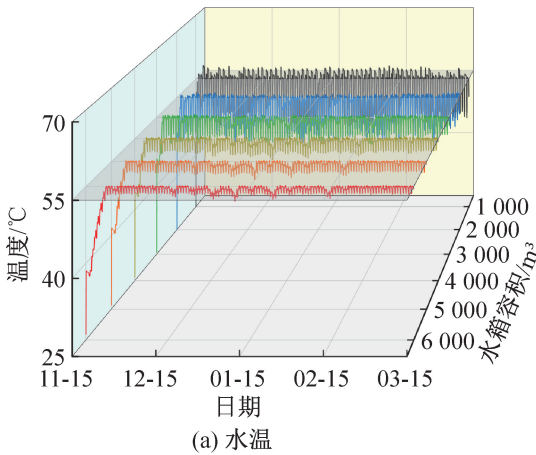
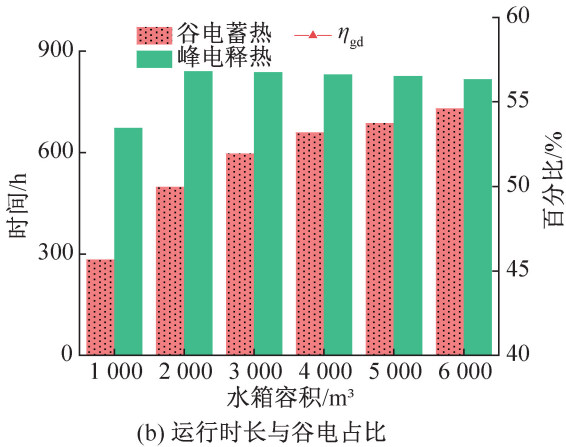


图 18 不同释热控制下的运行年费

Fig.18 Annual operating fees under different heat release controls



(a) 水温



(b) 运行时长与谷电占比

图 16 不同水箱容积下峰电释热运行

Fig.16 Thermal release operation during valley electricity price periods under different tank volumes

综上所述,跨天储热系统的设计优化与电价、负荷、设备性能有关。为避免谷电浪费,水箱储热量应与释热负荷相匹配,当设备储热功率大时,可增大水箱容积,并考虑平电时段释热以充分利用谷电。

## 4 结论

本文借助 TRNSYS 对跨季节/天储热工程进行了长周期模拟研究,在固定场地面积下研究了蓄热体参数对系统性能的影响,并对跨天储热进行了分析优化,得到结论如下:

1) 地表水跨季节储热可以防止土壤热失衡,10 a 后蓄热体温度升高 3.2 °C,储热效率提升至 98%。

2) 埋管间距、深度对蓄热体与整体的性能影响最大,因此工程要重视对间距、深度的优化。在固定场地面积下,蓄热体的间距与深度存在推荐区间范围,此时总管长可减少约 23%。

3) 跨天储热对跨季节系统影响较小,但可显著提高经济效益,通过改变水箱容积与控制策略,使谷电储热量应与释热负荷相匹配,可有效避免谷电浪费。此外当设备储热功率较高时,可增大水箱容积,并考虑平电释热以提高谷电利用率,优化后系统谷电占比提高 38.4%,年运行费用减少 11.2%。

4) 跨季节/天储热技术可在供暖季提供稳定的低品位热源,具有较高的应用价值。未来通过城市热网大范围整合不同品位、能量热源的情况下,蓄热体设计方法与系统运行策略还有待深入研究。

### 参考文献

[1] 凌浩恕,何京东,徐玉杰,等. 清洁供暖储热技术现状与趋势[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 861-868. (LING Haoshu, HE Jingdong, XU Yujie, et al. Status and prospect of thermal energy storage technology for clean heating [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 861-868.)

[2] 姚华,黄云,徐敬英,等. 我国北方地区清洁供暖技术现状与问题探讨[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(9): 1177-1188. (YAO Hua, HUANG Yun, XU Jingying, et al. Technology status and discussion on challenges of clean heating in northern China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(9): 1177-1188.)

[3] 聂海宁,黄小琳,曾智勇. 中国清洁能源供热现状及发展前景[J]. 能源与节能, 2018, 23(12): 87-89. (NIE Haining, HUANG Xiaolin, ZENG Zhiyong. Present situation and development prospect of clean energy heating in China [J]. Energy and Energy Conservation, 2018, 23(12): 87-89.)

[4] 王洋浩,王志华,郑煜鑫,等. 低温环境下空气源热泵

的研究现状及展望[J]. 制冷学报, 2013, 34(5): 47-54. (WANG Fenghao, WANG Zhihua, ZHENG Yuxin, et al. Research progress and prospect of air source heat pump in low temperature environment [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(5): 47-54.)

[5] GUO J J, WU J Y, WANG R Z, et al. Experimental research and operation optimization of an air-source heat pump water heater[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 4128-4138.

[6] JIANG Kewen, ZHANG Wei. The operation strategy of river water source heat pump cold source system in a chemical industrial park in a region with hot summers and cold winters [J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 319: 100483.

[7] JUNG Y, KIM J, KIM H, et al. Comprehensive feasibility investigation of river source heat pump systems in terms of life cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 188: 116655.

[8] 李舒宏,张小松,杨伟华,等. 多功能地源热泵埋管周围土壤的温度变化特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(5): 979-984. (LI Shuhong, ZHANG Xiaosong, YANG Weihua, et al. Temperature variation of soil around underground heat exchangers of multi-function ground source heat pump system[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(5): 979-984.)

[9] 杨卫波,陈振乾,施明恒. 跨季节蓄能型地源热泵地下蓄能与释能特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(5): 973-978. (YANG Weibo, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. Underground energy storage and release characteristics of ground source heat pump with seasonal energy storage[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(5): 973-978.)

[10] WANG Xiaozhe, ZHANG Hao, CUI Lin, et al. Borehole thermal energy storage for building heating application: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 203: 114772.

[11] ZHAO Xingwang, LI Yanwei, CHEN Xin, et al. Ten differences of seasonal borehole thermal energy storage system from ground-source heat pump system[J]. Energy and Buildings, 2024, 325: 114994.

[12] 冯国会,张磊,常莎莎,等. 严寒地区太阳能跨季节蓄热-地源热泵耦合系统性能研究[J]. 暖通空调, 2021, 51(增刊 1): 202-206. (FENG Guohui, ZHANG Lei, CHANG Shasha, et al. Research on the performance of solar energy seasonal thermal energy storage coupled with ground source heat pump systems in severe cold regions [J]. Journal of HV&AC, 2021, 51(Suppl. 1): 202-206.)

- [13] 窦子慧, 刘景霞, 李宝利. 严寒地区太阳能跨季节蓄热热泵系统研究[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(4): 52-58. (DOU Zihui, LIU Jingxia, LI Baoli. Study on the solar-assisted ground-source heat pump system with seasonal heat storage in cold regions [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(4): 52-58.)
- [14] 山强, 杨绪飞, 吴小华, 等. 太阳能跨季节蓄热增强土壤源热泵供暖系统建模与仿真研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(8): 1028-1037. (SHAN Qiang, YANG Xufei, WU Xiaohua, et al. Research on modeling and simulation of ground source heat pump heating system with seasonal solar thermal energy storage enhancement[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(8): 1028-1037.)
- [15] GROSSI I, DONGELLINI M, PIAZZI A, et al. Dynamic modelling and energy performance analysis of an innovative dual-source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 745-759.
- [16] JRADI M, VEJE C, JØRGENSEN B N. Performance analysis of a soil-based thermal energy storage system using solar-driven air-source heat pump for Danish buildings sector [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 360-373.
- [17] 张姝, 郑茂余, 王潇, 等. 严寒地区跨季节空气-U形埋管土壤蓄热特性模拟与实验验证[J]. 暖通空调, 2012, 42(3): 97-102. (ZHANG Shu, ZHENG Maoyu, WANG Xiao, et al. Simulation and experimental validation of soil seasonal thermal storage characteristics by air-U tube system in severe cold zone[J]. Journal of HV&AC, 2012, 42(3): 97-102.)
- [18] 方豪, 夏建军, 江亿. 北方采暖新模式: 低品位工业余热应用于城镇集中供热[J]. 建筑科学, 2012, 28(增刊2): 11-14. (FANG Hao, XIA Jianjun, JIANG Yi. New heating mode in North China: low-grade industrial waste heat applied to urban central heating [J]. Building Science, 2012, 28(Suppl. 2): 11-14.)
- [19] XU L, TORRENS J I, GUO F, et al. Application of large underground seasonal thermal energy storage in district heating system: a model-based energy performance assessment of a pilot system in Chifeng, China [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 319-328.
- [20] WANG Guiling, WANG Wanli, LUO Jin, et al. Assessment of three types of shallow geothermal resources and ground-source heat-pump applications in provincial capitals in the Yangtze River Basin, China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 111: 392-421.
- [21] SCHMIDT T, MANGOLD D, MÜLLER-STEINHAGEN H. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany[J]. Solar Energy, 2004, 76(1-3): 165-174.
- [22] RAPANTOVA N, POSPISIL P, KOZIOREK J, et al. Optimisation of experimental operation of borehole thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2016, 181: 464-476.
- [23] LANINI S, DELALEUX F, PY X, et al. Improvement of borehole thermal energy storage design based on experimental and modelling results [J]. Energy and Buildings, 2014, 77: 393-400.
- [24] 张辉, 侯宏娟, 汉京晓, 等. 跨季节埋管蓄热性能模拟及分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1148-1154. (ZHANG Hui, HOU Hongjuan, HAN Jingxiao, et al. Simulation and analysis of performance of seasonal borehole thermal energy storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(5): 1148-1154.)
- [25] 陈萨如拉, 常甜馨, 杨洋. 基于全局敏感性分析的跨季节埋管蓄热体热特性研究[J]. 流体机械, 2020, 48(11): 80-88. (CHEN Sarula, CHANG Tianxin, YANG Yang. Study on thermal characteristics of seasonal borehole thermal energy storage unit based on global sensitivity analysis[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(11): 80-88.)
- [26] GUO Fang, ZHU Xiaoyue, ZHANG Junyue, et al. Large-scale living laboratory of seasonal borehole thermal energy storage system for urban district heating [J]. Applied Energy, 2020, 264: 114763.
- [27] 李克锋, 郝红升, 庄春义, 等. 利用气象因子估算天然河道水温的新公式[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(1): 1-4. (LI Kefeng, HAO Hongsheng, ZHUANG Chunyi, et al. A new method for predicting water temperature of river by using meteorological factors [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(1): 1-4.)
- [28] SI Pengfei, LI Angui, RONG Xiangyang, et al. New optimized model for water temperature calculation of river-water source heat pump and its application in simulation of energy consumption [J]. Renewable Energy, 2015, 84: 65-73.
- [29] 白振营. 一个计算湖泊(水库)自然水温的新公式[J]. 水文, 1999, 19(3): 29-32. (BAI Zhenying. A new formula for calculating the natural water temperature of lakes (reservoirs) [J]. Hydrology, 1999, 19(3): 29-32.)
- [30] 王春林, 郭放, 朱永利, 等. 大规模太阳能跨季节土壤蓄热系统设计优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 320-327. (WANG Chunlin, GUO Fang, ZHU Yongli, et al. Design and optimization of large-scale seasonal borehole thermal energy storage system for solar energy [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(4): 320-327.)
- [31] 吕超, 郑茂余. 土壤源热泵系统土壤热平衡的评价方法研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(3): 42-47. (LYU Chao, ZHENG Maoyu. Research on evaluation method of

(下转第31页)

MMA approximations for structural optimization [J].  
Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 24  
(4): 263–276.

- [20] IMRE A R, BOGAERT J. The fractal dimension as a measure of the quality of habitats [J]. Acta Biotheoretica, 2004, 52(1): 41–56.
- [21] 张虎明, 赵明, 许一帆. 基于分形理论的相变储热拓扑优化结构的换热特性分析 [J]. 化学工程, 2024, 52(11): 44–48. (ZHANG Huming, ZHAO Ming, XU Yifan. Analysis of heat transfer characteristics in phase change thermal storage with optimized structure based on fractal theory [J]. Chemical Engineering (China), 2024,

52(11): 44–48.)

#### 通信作者简介

赵耀, 男, 副教授, 上海交通大学智慧能源创新学院, 021–64355111–6185, E-mail: zhaoyao@sjtu.edu.cn。研究方向: 高效储热、热机械储能、智慧能源。

#### About the corresponding author

Zhao Yao, male, associate professor, College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, 86–21–64355111–6185, E-mail: zhaoyao@sjtu.edu.cn. Research fields: thermal energy storage, thermo-mechanical energy storage, smart energy.

(上接第 10 页)

soil heat balance of ground-coupled heat pump system [J].  
Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 42–47.)

- [32] 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(增刊 1): 295–301. (ZHANG Siyu, YIN Yonggao, JIA Pengqi, et al. Study on seasonal thermal energy storage characteristics of double U-shaped buried pipe group [J]. CIESC Journal, 2023, 74(Suppl. 1): 295–301.)

E-mail: y.yin@seu.edu.cn。研究方向: 溶液除湿及低品位热利用、新型热泵与空调系统节能、面向建筑碳中和的储能技术研究。

#### About the corresponding author

Yin Yonggao, male, professor, School of Energy and Environment, Southeast University, 86–13611515279, E-mail: y.yin@seu.edu.cn. Research fields: solution dehumidification and low-grade heat utilization, energy-saving of new heat pumps and air conditioning systems, energy storage technology for building carbon neutrality.

#### 通信作者简介

殷勇高, 男, 教授, 东南大学能源与环境学院, 13611515279,

(上接第 23 页)

- [72] 游锦方, 高金彤, 闵恒, 等. 高储能密度三相吸收式储热系统的设计与测试 [J]. 制冷学报, 2024, 45(6): 33–40. (YOU Jinfang, GAO Jintong, MIN Heng, et al. Design and test of a three-phase absorption thermal storage system with high energy storage density [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(6): 33–40.)

- [73] 丁仲礼, 张涛. 碳中和: 逻辑体系与技术需求 [M]. 北京: 科学出版社, 2022. (DING Zhongli, ZHANG Tao. Carbon neutralization: logical system and technical requirements [M]. Beijing: Science Press, 2022.)

#### 通信作者简介

吴伟, 男, 副教授, 香港城市大学能源及环境学院, 852–34424436, E-mail: weiwu53@cityu.edu.hk。研究方向: 高效热泵、高密度储能、先进热管理、可再生能源利用、零能耗建筑等。

#### About the corresponding author

Wu Wei, male, associate professor, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, 86–852–34424436, E-mail: weiwu53@cityu.edu.hk. Research fields: advanced heat pumps, thermal energy storage, advanced thermal management, renewable energy utilization, net-zero energy buildings, etc.