文章编号：1671-6612（2026）05-724-06

太阳能跨季节储热水罐长周期温度响应模拟研究

施散波　胥文明

（贵州省中坤能源科技开发有限公司　铜仁　554300）

【摘　要】　在建筑低碳转型和可再生能源供热需求提高的背景下，太阳能供热系统存在非供暖季热量富余与供暖季热量不足的时间错配问题。跨季节水罐储热可将非供暖季太阳能热量储存至供暖季利用，但其运行效果受罐内温度分层和长周期温度衰减影响。以兰州理工大学太阳能跨季节储供热工程中的长时储热水罐为对象，基于工程监测数据分析水罐全年不同运行阶段的温度变化，并建立一维多节点模型，对储热阶段沿高度方向的温度响应进行模拟。结果表明：上半罐集热阶段主要提高罐体上部水温，4 月 8 日至 4 月 30 日顶部温度由约 42.7℃升至约 62.6℃，底部温度基本保持在 20℃左右；全罐循环集热阶段热量逐渐向中下部传递，10 月 26 日顶部和底部温度分别达到约 84.2℃和 78.7℃；供暖阶段水罐温度整体下降。模型能够反映储热阶段的主要温度变化特征，可为同类工程长周期运行分析提供参考。

【关键词】　太阳能；跨季节储热；水罐储热；一维模型

中图分类号　TK512.4　　文献标志码　A

Long-term Temperature Response Simulation of a Solar Seasonal Thermal Storage Water Tank

Shi Sanbo　Xu Wenming

(Guizhou Zhongkun Energy Technology Development Co., Ltd, Tongren, 554300)

【Abstract】　Against the background of low-carbon transformation in buildings and the increasing demand for renewable energy heating, solar heating systems face a temporal mismatch between surplus heat in the non-heating season and insufficient heat in the heating season. Seasonal thermal storage in water tanks can store solar heat collected during the non-heating season for later use in the heating season, but its performance is affected by temperature stratification inside the tank and long-term temperature attenuation. In this study, a long-term thermal storage water tank in the solar seasonal thermal storage and heating project of Lanzhou University of Technology was taken as the research object. Measured operating data were used to analyze the tank temperature variations during different annual operation stages, and a one-dimensional multi-node model was established to simulate the vertical temperature response during the charging period. From April 8 to April 30, the top temperature increased from approximately 42.7℃ to 62.6℃, while the bottom temperature remained around 20℃. During the whole-tank circulation heat collection stage, heat was gradually transferred to the middle and lower parts of the tank, and the top and bottom temperatures reached approximately 84.2℃ and 78.7 ℃, respectively, on October 26. During the heating stage, the tank temperature decreased as a whole. The model can reflect the main temperature variation characteristics during the charging period and provide a reference for the long-term operation analysis of similar projects.

【Keywords】　Solar energy; Seasonal thermal storage; Water tank thermal storage; One-dimensional model

0　引言

随着建筑领域低碳转型和可再生能源利用需求的提高，太阳能供热逐渐成为建筑供热系统清洁化的重要方式[1,2]。太阳能具有资源分布广、运行

作者（通讯作者）简介：施散波（1987.12-），男，本科，中级工程师，E-mail：673021036@qq.com
收稿日期：2026-07-07

过程中无直接排放等优点，适合应用于学校、园区及公共建筑供热系统。

太阳能供热系统在实际运行中存在明显的时间不匹配问题。非供暖季太阳辐照条件较好，系统容易产生富余热量；而供暖季建筑热负荷增加，太阳辐照强度和日照时间下降，单纯依靠即时集热难以满足连续供热需求[3]。季节性储热技术能够将非供暖季富余热量储存起来，并在供暖季释放，是缓解太阳能供需错配的重要方法。

跨季节储热方式主要包括水罐储热、水坑储热、地埋管储热和含水层储热等。水坑储热容量较大，但对场地和防渗结构要求较高；地埋管储热适合长期蓄热，但受岩土热物性和埋管布置影响较大；含水层储热规模较大，但对水文地质条件要求较高[4,5]。相比之下，水罐显热储热以水作为储热介质，结构边界清楚，运行调节方便，温度监测较为直观，适合中小型集中供热工程。

对于水罐储热系统而言，储热效果不仅取决于总储热量，还与罐内温度分布有关[6,7]。理想情况下，水罐内部形成“上热下冷”的温度分层，上部高温水可提高供热品位，下部低温水有利于降低太阳能集热回水温度。若冷热水掺混明显，罐内温差减小，可利用热量品位也会下降[8]。

目前，水罐储热模型主要包括零维模型、一维模型和三维模型；零维模型计算简单，但难以反映垂直方向温度分布；三维模型能够描述局部流动和掺混过程，但计算量较大，不适合全年运行模拟；一维多节点模型可在较低计算量下反映水罐高度方向温度变化，适合工程长周期分析[9]。Untrau等[10]的研究表明，一维节点模型适用于分层储热水箱动态模拟。

基于此，本文以兰州理工大学太阳能跨季节储供热工程中的长时储热水罐为对象，基于工程监测数据分析水罐全年不同运行阶段的温度变化，并建立一维多节点模型，对储热阶段沿高度方向的温度响应进行模拟。重点讨论不同运行阶段下水罐垂向温度变化及一维模型在长周期储热分析中的适用性，为同类工程运行分析和模型后续完善提供参考。

1　太阳能跨季节储热系统及实测运行特征

1.1　工程系统概况及储热水罐运行阶段

本文研究对象为兰州理工大学太阳能跨季节储供热工程中的长时水罐储热系统。该系统主要由太阳能集热系统、储热水罐、板式换热器、水源热泵、循环水泵、管路阀件及建筑供热末端组成。非供暖季，太阳能集热系统将收集到的热量输送至储热水罐，用于提高罐内水温；供暖季，储热水罐通过板式换热器向建筑侧释放热量。当水罐温度不能满足供热要求时，系统可与水源热泵等辅助热源联合运行，以保证供热稳定性。

根据全年运行目的、进出口位置和循环范围的不同，储热水罐运行过程可分为上半罐集热、全罐循环集热、板式换热器供暖、太阳能+热泵供暖、冬季集热和末期供暖等阶段，如表 1 所示。该分段方式能够反映水罐由局部储热到整体储热，再到供暖放热的运行过程。

表 1　储热水罐全年运行阶段划分

Table 1　Annual operation stages of thermal storage water tank

运行阶段	时间范围	主要运行特点
上半罐集热	2020.4.8–2020.4.30	上部进水、中部出水，热量主要集中于上半罐
全罐循环集热	2020.5.1–2020.10.26	上部进水、下部出水，水罐整体逐步升温
板换换热供暖	2020.10.27–2020.11.27	通过板式换热器释放储热量
太阳能+热泵供暖	2020.11.28–2021.1.4	太阳能储热与热泵联合供热
冬季集热	2021.1.5–2021.1.31	供暖期补充集热
末期供暖	2021.2.1–2021.3.31	储热末期持续供暖

上半罐集热阶段主要用于提高罐体上部水温，使水罐上部较快形成可利用的高温水区。全罐集热阶段扩大循环范围，使中部和底部水体逐渐参与储热，水罐整体储热量随之增加。进入供暖季后，水罐由储热状态转为放热状态，罐内热量通过换热设备和供热系统向建筑侧释放。当太阳能输入不足或水罐温度下降时，热泵承担部分补热任务。由此可见，储热水罐温度变化与运行阶段、循环方式和热

源组合密切相关。

1.2　储热水罐全年实测温度响应特征

储热水罐在液面以下沿高度方向等间距设置 21 个温度测点，由上至下依次编号为 T1~T21，用于记录水罐不同高度处的水温变化。各测点全年实测温度变化如图 1 所示[11]。

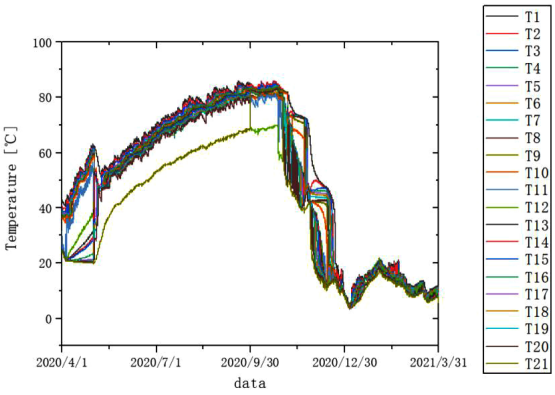


图 1　储热水罐测点全年温度变化

Fig.1　Annual temperature variation of measuring points in the thermal storage tank

由图 1 可知，储热水罐全年温度变化具有明显的阶段性。4 月上旬至 4 月底，上部测点温度升高较快，而中下部测点变化较小，说明上半罐集热阶段热量主要集中于罐体上部。5 月以后，系统进入全罐集热阶段，中部和底部测点温度开始逐渐升高，水罐整体温度水平不断提高。进入供暖阶段后，随着建筑侧持续取热，各测点温度整体下降，其中上部高温区降温更为明显。从不同高度测点的变化看，顶部测点对太阳能集热输入最敏感，温度变化幅度较大；中部测点升温存在一定滞后，反映出热量由上部逐渐向下部传递；底部测点在储热前期保持较低温度，有利于维持罐内上下温差。实测结果表明，储热水罐在长周期运行中并非完全混合，罐内沿高度方向存在明显温度差异。因此，有必要采用能够反映高度方向温度分布的一维模型进行分析。在后续一维模型计算中，入口温度采用集换蓄系统出口温度，回水温度采用集换蓄系统进口温度，循环流量根据流量计记录的实际有效循环流量确定，并将上述工程运行参数作为储热阶段模型计算的动态边界条件。

2　一维多节点模型及能量平衡方程

为描述储热水罐沿高度方向的长周期温度变化，模型做如下假设：水罐沿高度方向划分为若干水平节点，每个节点内部水体充分混合且温度均匀；相邻节点之间通过导热和等效混合作用传递热量；考虑罐壁与环境之间的热损失；入口温度、回水温度和循环流量由工程运行数据给定；模型主要描述水罐高度方向的温度变化，不直接求解节点内部的三维流动过程。

根据温度测点布置，将储热水罐划分为 21 个等温节点，由上至下依次编号为 1~21，每个节点厚度为 0.5m，计算时间步长为 1min。第 i 个节点的温度为 T_i，体积为 V_i。节点温度变化由进出口流动换热、相邻节点传热和罐壁热损失共同决定。第 i 个节点的能量守恒方程可写为：

$$\rho c_p V_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{in,i} - Q_{out,i} + Q_{cond,i} + Q_{mix,i} - Q_{loss,i} \quad (1)$$

式中：ρ为水密度，kg/m^3；c_p 为水的定压比热容，J/(kg·K)；$Q_{in,i}$ 和 $Q_{out,i}$ 分别为进入和离开节点的热量，kW；$Q_{cond,i}$ 为相邻节点之间导热量，kW；$Q_{mix,i}$ 为由于流动掺混导致的等效换热量，kW；$Q_{loss,i}$ 为节点向环境的热损失，kW。

当循环水进入第 i 个节点时，流动换热项可表示为：

$$Q_{flow,i} = mc_p\lambda\left(T_{in} - T_i\right) \quad (2)$$

式中：$Q_{flow,i}$ 为流动换热量；m 为循环水质量流量，kg/s；T_{in} 为入口水温，K；当节点不是入口所在节点时，流动换热项按节点间流动方向及相邻节点温差进行计算。对于出口节点，流出水带走的热量按照该节点温度确定。

相邻节点导热量可写为：

$$Q_{cond,i} = \lambda A\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta z} + \lambda A\frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta z} \quad (3)$$

式中：λ为等效导热系数，W/(m·K)；A_i 为节点水平截面积，m^2；Δz 为相邻节点中心距离，m。对于顶部和底部节点，只考虑其相邻一侧节点的传热作用。

$$Q_{loss,i} = U_i A_i\left(T_i - T_a\right) \quad (4)$$

式中：U_i 为节点对应罐壁传热系数，W/(m^2·K)；A_i 为第 i 节点对应的壁面面积，m^2；T_a 为环境温度，K。对长时储热过程而言，壁面热损失会随储存时间累积，是影响储热效率的重要因素。

根据式（1）-式（4）可建立各节点温度随时间变化的常微分方程组。计算时采用实际入口温

度、回水温度和循环流量作为动态边界，并通过时间步进获得储热阶段各节点的温度响应。

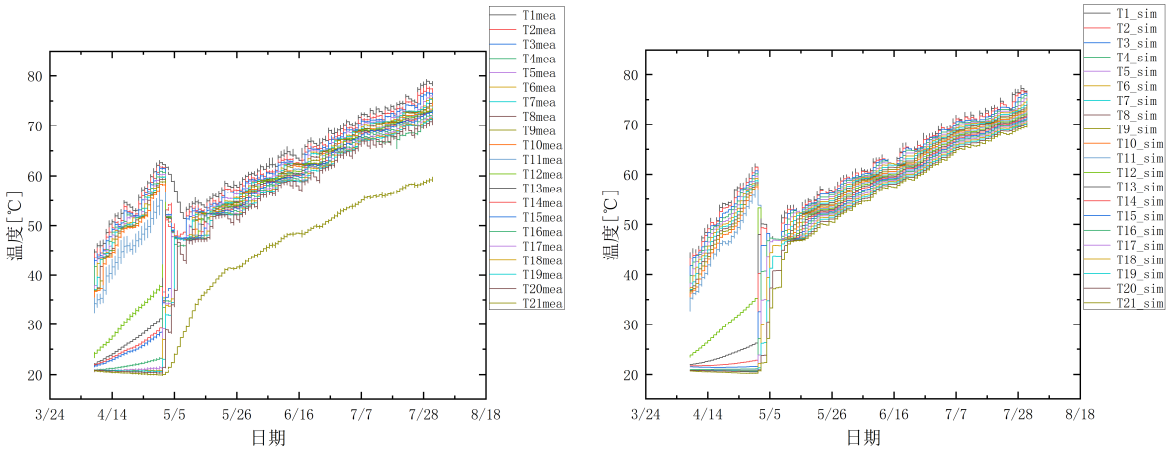
3　结果与讨论

3.1　储热阶段模型验证

为验证一维多节点模型对储热阶段长周期温度变化的描述能力，将模型计算结果与对应测点的实测温度进行对比，结果如图 2 所示。由图 2（a）可知，储热前期上部测点升温较快，中部和下部测点升温较慢，水罐内部保持较明显的上下温差。进入全罐循环集热阶段后，中下部测点温度逐渐升高，表明热量开始由上部向下部区域传递。

由图 2（b）可知，一维多节点模型能够反映储热阶段温度变化的总体趋势。模型计算结果表现为上部节点最早升温，中部节点温度响应存在一定滞后，下部节点在储热前期仍保持较低温度，与实测温度的总体变化规律基本一致。总体来看，该模型可用于分析储热阶段水罐沿高度方向的长周期温度变化。

由于模型将水罐简化为沿高度方向分布的若干均匀节点，对进出口附近局部扰动、短时回流和节点内部非均匀混合过程进行了简化，底部区域及运行状态转换时段仍可能存在一定偏差。现阶段模型主要用于长期温度变化趋势分析，后续将结合更多工程运行数据，对节点划分和传热参数进行进一步验证和改进。



（a）实测温度变化　　（b）模拟温度变化

图 2　储热水罐实测与模拟温度对比

Fig.2　Comparison between measured and simulated temperatures of the thermal storage tank

3.2　不同运行阶段水罐温度分布分析

为进一步分析储热水罐在不同运行阶段沿高度方向的温度变化，根据各高度测点的实测温度，选取前期储热及全罐循环初期、全罐循环储热中后期、供暖及冬季集热阶段的典型日期进行比较，如图 3 所示。

由图 3 可知，图 3（a）为前期储热阶段水罐温度分布。4 月 8 日，水罐顶部和底部温度分别约为 42.7℃和 20.7℃；到 4 月 30 日，顶部温度升至约 62.6℃，而底部温度仍约为 19.9℃，说明上半罐循环主要提高罐体上部水温，并能较好地维持下部冷水层。图 3（a）中同时给出了 5 月 31 日的温度分布，此时系统已进入全罐循环集热初期，顶部和底部温度分别约为 60.5℃和 54.2℃，上下温差明显减小，表明循环范围扩大后，中下部水体开始参与储热，热量逐渐由上部向中下部传递。

图 3（b）为全罐循环储热阶段水罐温度分布。随着集热过程持续进行，水罐整体温度水平不断提高。7 月 1 日顶部和底部温度分别约为 69.4℃和 64.1℃，7 月 31 日顶部和底部温度分别约为 78.3℃和 71.5℃。到 10 月 26 日，顶部和底部温度分别达到约 84.2℃和 78.7℃，说明经过较长时间的全罐循环集热后，水罐中下部水温明显升高，水罐整体已完成较充分的季节性储热。

图 3（c）为供暖及冬季集热阶段水罐温度分布。进入供暖期后，水罐向建筑侧释放热量，罐内温度整体下降。11 月 27 日顶部和底部温度分别降至约 61.8℃和 29.6℃，说明供暖取热使罐内储热量明显减少。1 月 4 日和 1 月 5 日水罐温度处于较低水平，随后冬季集热使 1 月 31 日水罐温度有所回

升，但到 3 月 31 日供暖阶段末期，水罐温度再次下降。综合来看，上半罐集热有利于形成上部高温水层，全罐循环集热有利于提高水罐整体储热量，供暖阶段则主要表现为储热量释放和温度衰减。需要说明的是，本文研究对象为兰州地区单一工程储热水罐，现有结果主要反映该水罐在相应结构和运行条件下的温度响应。受现阶段工程数据和研究范围限制，尚未对不同地区、不同容量及不同进出口布置形式的储热水罐进行对比。后续将结合更多工程监测数据，进一步验证一维模型在不同结构和运行条件下的适用性，并改进底部区域及运行状态转换阶段的计算方法。

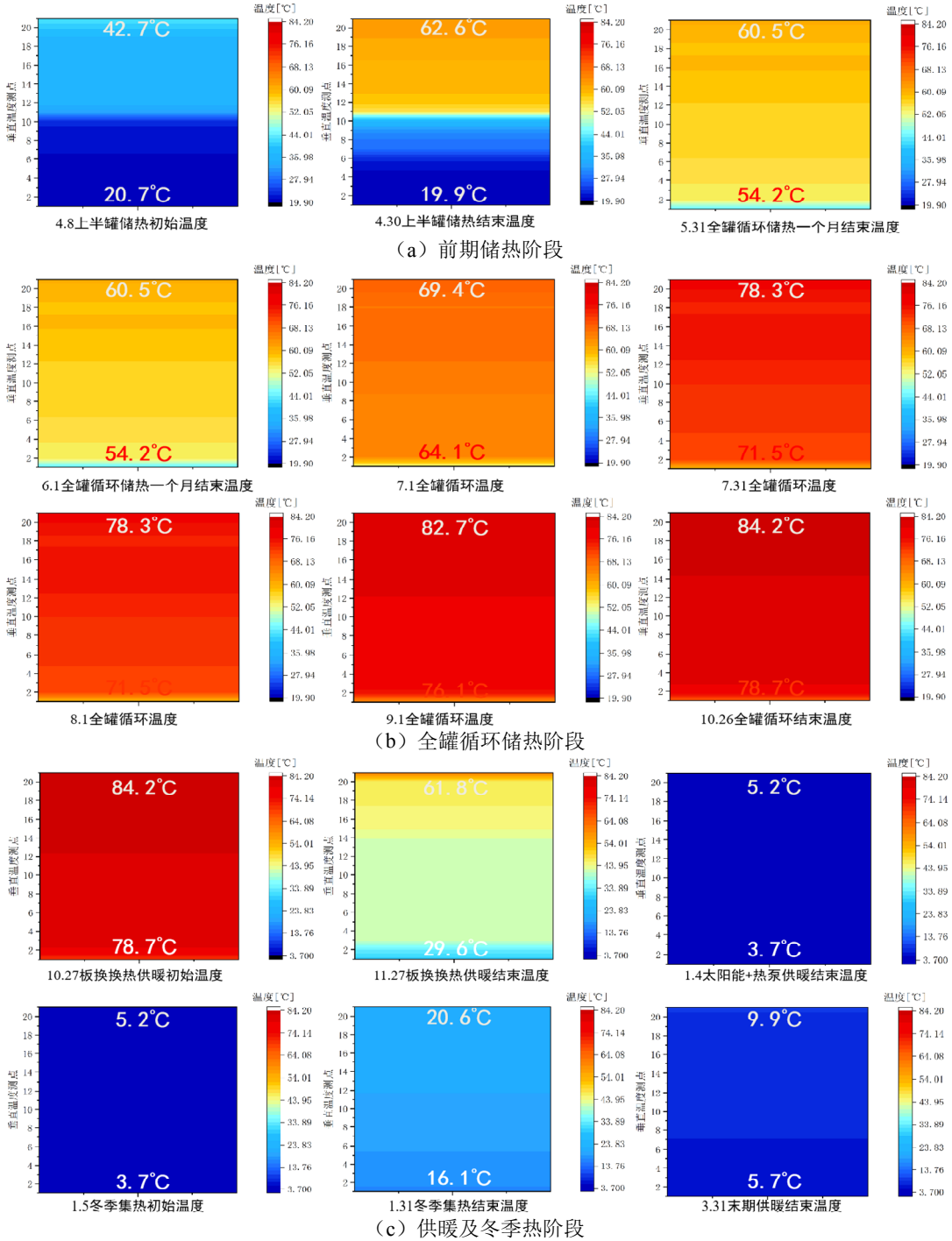


图 3　不同运行阶段水罐一维温度分布

Fig.3　One-dimensional temperature distribution of the water tank under different operation stages

4　结论

本文以兰州理工大学太阳能跨季节储供热工程中的长时储热水罐为对象，基于工程监测数据分析了水罐全年不同运行阶段的温度变化，并建立一维多节点模型对储热阶段的温度响应进行模拟，得到以下结论。

（1）储热水罐全年运行过程具有明显阶段性。上半罐集热阶段热量主要集中于罐体上部，4 月 8 日顶部和底部温度分别约为 42.7℃和 20.7℃；到 4 月 30 日顶部温度升至约 62.6℃，底部温度仍约为 19.9℃，说明上半罐循环能够提高上部水温并维持底部冷水层。

（2）全罐循环集热阶段热量逐渐向中下部传递，水罐整体温度水平明显提高。全罐循环初期，5 月 31 日顶部和底部温度分别约为 60.5℃和 54.2℃，上下温差较前期明显减小；到 10 月 26 日，顶部和底部温度分别约为 84.2℃和 78.7℃，表明系统完成了较充分的季节性储热。进入供暖阶段后，水罐向建筑侧释放热量，罐内温度整体下降。

（3）一维多节点模型能够反映储热阶段水罐沿高度方向的主要温度变化，可用于长周期温度变化趋势分析。但由于模型未直接描述进出口附近局部扰动、短时回流和节点内部非均匀混合过程，底部区域及运行状态转换时段仍可能存在一定偏差。后续将结合更多工程运行数据，对不同结构和运行条件下的模型参数及适用范围进行进一步验证和完善。

参考文献：

[1] 住房和城乡建设部.“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[R].北京:住房和城乡建设部,2022.

[2] 周莹,赵钘燃,黄泽皑,等.太阳能供热裂解天然气制氢和碳技术经济性[J].天然气工业,2026,46(3):214-225.

[3] 张杰,牛晨.跨季节储热技术研究进展及发展趋势[J].科技导报,2025,43(24):82-91.

[4] 黄永辉,庞忠和,程远志,等.深层含水层地下储热技术的发展现状与展望[J].地学前缘,2020,27(1):17-24.

[5] 贺明飞,王志峰,原郭丰,等.水体型太阳能跨季节储热技术简介[J].建筑节能(中英文),2021,49(10):66-70.

[6] Saloux E, Candanedo J A. Modelling stratified thermal energy storage tanks using an advanced flowrate distribution of the received flow[J]. Applied Energy, 2019,241:34-45.

[7] 梁婧.太阳能热水系统管道及储热水罐热损失分析[J].供热制冷,2013,(11):2.

[8] 黄震,王子龙,张华,等.储热水箱分层特性的研究[J].有色金属材料与工程,2017,38(5):273-279.

[9] 张怡,刘建帮,杨婷婷,等.储热罐一维连续动态建模及最优传感器布置[J].中国电机工程学报,2025,45(8):3120-3132.

[10] Untrau A, Sochard S, Marias F, et al. A fast and accurate 1-dimensional model for dynamic simulation and optimization of a stratified thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2023,333:120614.

[11] 李鹏超.大规模跨季节储热系统储热阶段热流传递与火积耗散分析[D].北京:清华大学,2021.