文章编号：1671-6612（2026）05-644-10

基于能量梯级利用的跨季节储热系统储热特性研究

陈洋泽佳　曹晓玲　袁艳平

（西南交通大学机械工程学院　成都　610031）

【摘　要】　跨季节蓄热供暖技术通过储存非采暖期富余热量供供暖期使用，解决夏冬热量供需矛盾，提升太阳能全年利用率。然而，传统地下储热方式存在储热形式单一、热损失显著等问题。为此，提出一种新型地下跨季节复合储热系统（简称复合储热系统），通过能量梯级利用显著提高太阳能利用效率并降低热损失。为探究系统性能，搭建了一套具备完善测控功能的地下储热实验平台，通过高精度传感器实时监测温度、流量等关键参数，并设计了“单一水箱”与“复合储热”两种模式的对比实验进行研究。结果表明：复合系统不仅显著加快了土壤的升温速率，还大幅提高了各特征点的最终温度，尤其在两环地埋管之间区域形成了更为集中的高温储热区。相较于单一水箱储热模式（最高温升仅 1.01℃），复合储热模式的最高温升大幅提升至 12.16℃，增幅达 11.15℃。在保温阶段，复合储热模式下水箱各层的温降均小于单一模式，整体热损失减少了 26122kJ，降幅约 27%，储热效率从 52.5%提升至 55.8%。这表明复合结构有效抑制了热量散失，提高了能量存储与利用效率。

【关键词】　地下储热；跨季节储热；复合储热；水箱储热；数值分析

中图分类号　TK116　　文献标志码　A

Study on the Heat Storage Characteristics of A Novel Seasonal Composite Thermal Energy Storage System Based on Energy Cascade Utilization

Chen Yangzejia　Cao Xiaoling　Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】　Seasonal thermal energy storage heating technology stores surplus heat from the non-heating season for use during the heating period, thereby resolving the seasonal mismatch between summer heat supply and winter demand, and improving the year-round utilization efficiency of solar energy. However, conventional underground thermal storage methods suffer from issues such as a single storage form and significant heat loss. To address these limitations, this paper proposes a novel underground seasonal hybrid thermal storage system (referred to as the hybrid storage system), which employs cascade energy utilization to substantially enhance solar energy efficiency and reduce heat loss. To investigate system performance, an underground thermal storage experimental platform with comprehensive measurement and control functions was constructed. Key parameters such as temperature and flow rate were monitored in real time using high-precision sensors, and comparative experiments were designed between two modes: "single water tank" and "hybrid thermal storage". The results show that the hybrid system not only significantly accelerates the soil temperature rise rate but also greatly increases the final temperatures at various characteristic

基金项目：国家重点研发计划（NO.2022YFC3802704）
作者简介：陈洋泽佳（2001.10-），女，在读硕士研究生，E-mail：15228376717@163.com
通讯作者：曹晓玲（1984.08-），女，博士，正高级工程师，E-mail：xlcao@swjtu.edu.cn
收稿日期：2026-04-23

points, forming a more concentrated high-temperature heat storage zone, particularly in the area between the two loops of buried pipes. Compared with the single water tank storage mode, in which the maximum temperature rise is only 1.01℃, the hybrid storage mode achieves a maximum temperature rise of 12.16℃, an increase of 11.15℃. During the heat preservation stage, the temperature drop at each depth of the hot water tank in the hybrid storage mode is smaller than that in the single water tank storage mode. Specifically, at the second layer of the tank, the temperature drop decreases from 9.71℃ (single mode) to 6.15℃ (hybrid mode), a reduction of 3.56℃; at the fifth layer, from 5.84℃ to 4.52℃, a reduction of 1.32℃; and at the eighth layer, from 2.56℃ to 2.12℃, a reduction of 0.44℃. These results indicate that the hybrid storage mode can significantly suppress heat loss during the heat preservation stage. Moreover, during the heat preservation stage, the heat loss in the hybrid storage mode is reduced by 26122kJ compared with the water tank storage mode, representing a decrease of approximately 27%. Correspondingly, its heat storage efficiency reaches 55.8%, which is 3.3 percentage points higher than that of the water tank storage mode (52.5%). This fully demonstrates that the hybrid structure effectively inhibits heat dissipation and improves energy storage and utilization efficiency.

【Keywords】 Underground thermal storage; Seasonal Thermal Energy Storage (STES); Composite thermal storage; Water tank thermal storage; Numerical analysis

0　引言

随着传统能源供暖带来的污染、环境和生态问题越来越严重，可再生能源供暖被世界各国高度关注，供暖清洁化转型凸显重要地位[1,2]。然而，可再生能源供暖受天气、地域、季节等因素限制，具有极强的间歇性、不稳定性和季节性特点[3]。跨季节储热将可再生能源在热源丰富、热需求少的季节储存起来，在热源贫乏、热需求大的季节释放出去，可有效解决可再生能源供热系统在时间上、空间上和强度上的不匹配特性[4,5]。我国的太阳能资源比较丰富，然而，太阳能资源在昼夜和季节上的波动性加之供需之间不同步的矛盾，阻碍了规模化实施太阳能供暖系统应用的进展。跨季节蓄热供暖技术针对“夏天热量过剩、冬季供能不足”的矛盾，储存非供暖期盈余的热量以备供暖期负荷集中时段使用，能够提高系统太阳能保证率，从而实现太阳能全年的综合利用。

地下跨季节储热技术因其技术成熟度高，应用广泛，成为当前研究与应用的主要方向。其中水箱储热和地埋管储热被认为是最具发展潜力的[6]。Givoni 等[7]对埋地水箱储热进行研究，分析了水箱周围的土壤没有参与到储热过程是水箱热损失较大的原因。Dalenback 等[8]研究表明，未埋地水箱高度需增加到 1.9 倍，或保温层厚度增加 2 倍才能达到与埋地水箱相同的性能。Panthalookaran 等[9]采用 TRNSYS 软件模拟研究了跨季节储热罐的高径比对储热的影响，结果表明储热罐的充放热性能随着高径比的增加而有所改善。刘铜等[10]发现散流器的合理设计可以通过减少紊乱的罐内流场，而使斜温层厚度减小。朱宁等[11]也利用 CFD 模拟出了促进水箱分层的方式有：通过提高热水的进口位置、降低热水的进口速度、设置特殊的热水通道。王登甲等[12]利用 CFD 软件模拟了不同进水管流速对蓄热水箱内温度分层情况的影响，得出蓄热水箱进水管流速越小温度分层越明显；流速越大，越不利于温度分层的结论。

Liang Zhang 等[13]对用于温室采暖的季节性太阳能储热系统进行了模拟研究，得到了埋地管埋深越深，热损失越小。Woloszyn 等[14,15]利用仿真软件研究了土壤导热系数、比热、密度及回填土热物性等参数对地埋管储热系统的敏感性分析。结果表明，土壤导热系数对地埋管储热效率存在极大影响。此外，又研究了埋管间距及埋管与地面夹角对储热效率的影响。结果表明，埋管与地面倾角为 0 即竖直埋管效果最好且最佳间距范围在 1.5～3m。刁乃仁等人[16]用模拟方法研究了流体入口水温、速度对 BTES 耦合热泵系统供热和制冷性能的影响。结果表明，提高流体入口水温可以提高储热量，但却没有大幅提高冬季取热量，且入口流速不宜过大。文中经过模拟得出的合适的流速范围为 0.4～0.6m/s。

Manfted Reuss[17]对地下蓄能进行研究，采用地下水箱和地下埋管换热器两种方式联合蓄存，水箱用于短期能量蓄存，减小了地下埋管的长度，可节约 52%的能源需求量，减少 60%的 CO_2 排放量。王子逸[18]提出一种地埋管储热和水箱储热并联耦

合的新型跨季节地下复合储热系统，通过实验和数值计算，发现复合储热模式储/释热能力优于传统地埋管储热模式和水箱储热模式。徐德厚[19]将 HWES 和 BTES 相结合，探索两种储热的复合利用效果。结果表明，随着运行年限的增加，地埋管储热、水箱储热和复合储热模式上边界的热量损失占比呈现逐年下降的趋势，而侧边界的热量损失占比却逐年增加，表明热量逐渐通过侧边界向外扩散。其中，复合储热模式的热量损失主要来自上边界，运行至第五年的热量损失占比达 42.2%，因此需要对复合储热模式上边界进行保温，有效降低热量损失，提高系统效率。

综上所述，在跨季节储热方面的研究目前主要针对单储热源系统，特别是水箱储热以及地埋管储热系统，形式较为单一，导致热损失较大，能量利用效率不高。水箱储热具有热容量大，选址灵活的优点，但单位投资成本高，热损失较大；地埋管储热可以就地取材，储热容量易扩大，但占地面积大，储热能力较低。目前国内外主要通过研究保温层与回填材料、水箱和地埋管结构、系统运行方式等来减少热量损失，提高储/释热效率。现有的系统尚未充分利用多级能量梯级利用的潜力，本文提出一种可再生能源利用形式：新型地下跨季节复合储热系统（简称复合储热系统）。该系统将水箱和地埋管串联耦合，这种设计不仅能够实现能量的梯级利用，还能使地埋管起到保温层的作用，减少热损失，提升系统的整体能效。为探究系统性能，本文搭建了一套具备完善测控功能的地下储热实验平台，通过高精度传感器实时监测温度、流量等关键参数，并设计了“单一水箱”与“复合储热”两种模式的对比实验，为揭示系统协同机制与增效原理奠定了基础。

1　跨季节储热系统实验研究

1.1　跨季节储热系统

本文提出将水箱储热与地埋管储热相结合，组成两种储热方式串联耦合的新型地下跨季节储热系统（见图 1），系统主要包括集热装置、埋地储热水箱、地埋管换热器、热交换器，以及阀门、管道等。热水储热的介质是水，具有热容量大、流动性能好的优点，但热损失较大，成本较高；地埋管储热方式的储热介质是土壤，其储热性能优秀，热扩散范围大，具有储热能力大、热损失较小和廉价的优点，但占地面积较大。

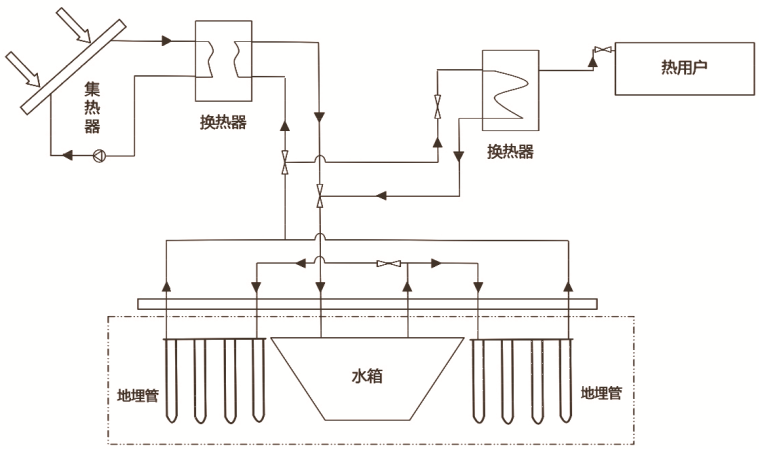


图 1　跨季节复合储热系统原理图

Fig.1　Schematic diagram of the seasonal hybrid thermal storage system

系统工作原理为：

夏季（储热阶段）：热量过剩，系统通过集热装置和管道，将多余的热量输入由储热水箱、地埋管及地下土壤组成的耦合储热体中。三部分相互耦合，共同完成热量的收集与储存。

过渡季（保温及恢复阶段）：整个系统静置，不进行主动的储热或释热。

冬季（释热阶段）：用热高峰，复合储热系统从储热水箱中取热，热量经由管道向末端用户供给，完成热量的释放与输出。

系统优势：

（1）水箱出水至地埋管，使能量得到梯级利

用，地埋管换热器起到“热屏”作用，抑制储热水箱热量扩散，使热量积聚在热源周围，同时地埋管加热了埋地水箱周围土壤，增强了土壤取热能力，从而提高系统效率。

（2）形成复合储热系统。多种储热方式互为补充、互为协调、互为备用，可以通过两者间不同的协调配置，达到促进储释热和抑制所储热量流失的双重目的，减少热量损失。

（3）储热水箱周围土壤相当于保温层，使得水箱不需要保温，大大降低系统成本，且可以避免由于保温层带来的漏水和腐蚀等影响储热效果和效率的难题。

（4）灵活多变。可根据实际地质条件、储热热源条件、用户侧实际条件等采用灵活多变的系统组合匹配和储释热运行模式。

1.2　实验台搭建

为深入研究复合储热系统储/释热特性和热量损失机理，搭建了复合储热系统实验台，开展了“单一水箱”与“复合储热”两种模式的对比实验研究。

复合储热实验系统主要由地面冷水箱、水泵、热泵、地下储热水箱、地埋管、阀门及测控系统组成（见图 2）。埋地水箱底面正方形边长 0.9m，顶面正方形边长 2.7m，高 0.9m，埋深 0.7m，容积 3.159m^3。地埋管设 2 层，层间距 0.3m，埋管深度 1.5m。系统设置了温度传感器，用于监测地下土壤温度、水箱和地埋管进出口温度。此外，利用浮子流量计测量系统进出口流量。跨季节复合储热实验台的具体设计参数如表 1 所示。

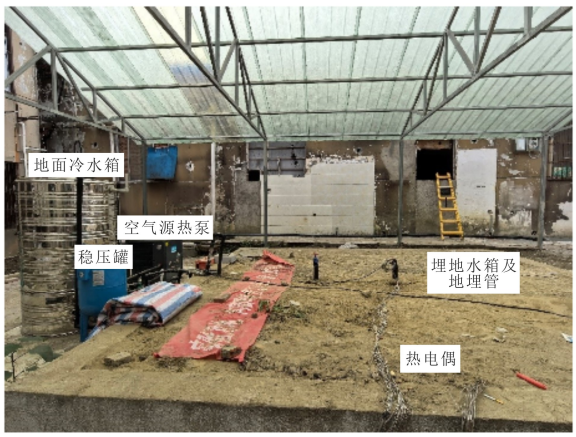


图 2　复合储热系统实验台

Fig.2　Experimental setup of the hybrid thermal storage system

表 1　跨季节复合储热系统设计参数

Table 1　Design parameters of the seasonal hybrid thermal storage system

设备	数量/规格	备注
埋地储热水箱容积/m^3	3.159	——
埋地储热水箱高度/m	0.9	——
埋管换热器总长度/m	336	——
埋管换热器管径/mm	DN16	——
埋管换热器埋深/m	1.5	管脚间距 0.15m
冷水箱容积/m^3	1	——
热泵/kW	10.7	名义产水量 150L/h
水泵/m	15	定频泵

实验台的主体为地下部分，如图 3 所示。埋地水箱位于系统中心，向外每隔 0.3m 设置一环地埋管，每环地埋管由 50 组 U 型管组成，共设置 2 环，并采用串联的连接方法。为全面监测系统运行状态并获取实验数据，平台布置了多个水温传感器与土壤温度传感器，并配合流量计对关键节点的温度与流量参数进行实时测量与记录，从而为系统热性能分析与优化提供可靠的数据基础。在土壤中设置 20 个土壤温度传感器（PHWS），全面测量土壤温度分布，设置 20 个水温传感器（PHSW-12V-W2），用于水箱和系统进出口水温测量，利用浮子流量计（DN25）测量系统进出口流量，如图 4 所示。复合储热系统内部温度取值点的分布，如图 5 所示。



（a）实验台地下部分照片



（b）水箱内部结构图

图 3　地下跨季节复合储热实验台地下部分

Fig.3　Underground part of the seasonal hybrid thermal storage experimental setup



（a）T 型热电偶



（b）玻璃转子流量计

图 4　地下跨季节复合储热实验台传感器

Fig.4　Sensors of the underground seasonal hybrid thermal storage experimental setup

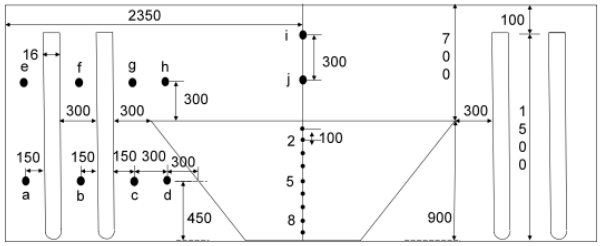


图 5　复合储热系统地下示意图

Fig.5　Underground schematic diagram of the hybrid thermal storage system

为深入探究复合储热系统内部的热量传递规律，实验在系统关键位置布置了共计 10 个温度测点，形成了一套完整的温度监测网络，具体分布如图 5 所示。监测点覆盖了储热水箱内部、周围土壤及地埋管区域，以全面捕捉储热过程中温度场的时空演变特征。

在水箱内部，沿其竖直中心线均匀设置了 9 个温度测点，相邻测点间距为 0.1m，用以监测水温的纵向分布与热分层动态。水箱外部土壤中的测点主要布置于两个高度：一是在水箱侧面高度中部位置，沿水平方向分别距离水箱外壁 0.30m、0.60m、0.92m 及 1.23m 处；二是在水箱顶部上方 0.3m 和 0.6m 处对应位置，同样沿径向布置系列测点。这些测点能够有效反映热量从水箱向周围土壤（含地埋管区域）的扩散过程与温度梯度变化。该测温系统为后续分析复合储热体的储热特性、评估其热分层行为及揭示土壤热响应规律提供了准确、连续的实验数据基础。通过 Keysight DAQ970 进行数据采集，数据采集间隔时间为 5min。

表 2　测试仪器参数表

Table 2　Test instrument parameters

测试仪器	型号	量程
T 型热电偶	WRT-T-191	-200~400℃
玻璃转子流量计	LZB-WS-15V/25V	16~160L/H； 30~300L/H
数据采集仪	DAQ970	——

本研究所搭建的实验测试平台主要用于跨季节复合储热系统的综合性能研究，其整体结构与关键组件布局如图 6 所示。该平台集成热泵机组、冷水箱、储热水箱、埋管换热器、流量计及循环水泵等核心部件，构成一个闭环式储热实验回路，能够模拟不同工况下系统的运行特性。其中，储热部分

采用复合式结构设计，以埋地式储热水箱为蓄热核心，并在其周围布置双圈 U 型地埋管，二者协同构成耦合蓄热体。该设计不仅提升了储热体的热容量与热响应能力，同时利用土壤与地埋管形成的热缓冲层，有效抑制水箱侧向热损失，增强系统整体的储热密度与运行稳定性。

在储热运行模式下，系统通过阀门的切换实现流程控制，具体设置为阀门 1、2、3、4 开启，阀门 5 和 6 关闭，从而形成完整的储热循环通路。启动后，冷水箱内的工质经循环水泵输送至热泵蒸发器侧，在蒸发器内与低温热源进行热交换，吸收热量后进入冷凝器侧，通过热泵循环的逆卡诺原理进一步提升至预设温度，最终形成的高温热水被输送至埋地复合储热体中进行热量储存。该过程不仅实现了热能由低温位向高温位的梯级提升与跨时段储存，也完整呈现了系统在非供暖期收集并存储热量的典型运行路径，为后续分析系统热响应特性及储热效率提供了可靠的实验依据。

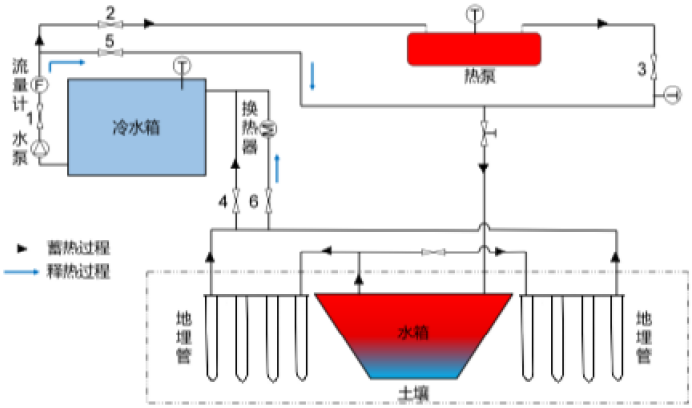


图 6　实验台运行示意图

Fig.6　Schematic diagram of the experimental setup in operation

为探究不同运行模式下跨季节储热系统内部的热量传递规律，实验统一采用储热 36 小时、保温 36 小时的周期性运行方式。在此基础上，设置两组对比运行策略：一是仅运行埋地水箱，二是水箱与地埋管协同运行，旨在揭示二者在储热过程中热量传递的相互影响机制。实验工况设定为入口温度 65℃、入口流量 0.150m³/h，具体实验工况参数详见表 3。通过上述控制变量设计，为后续分析系统热响应特性及能量传输机理提供数据支撑。

表 3　实验工况

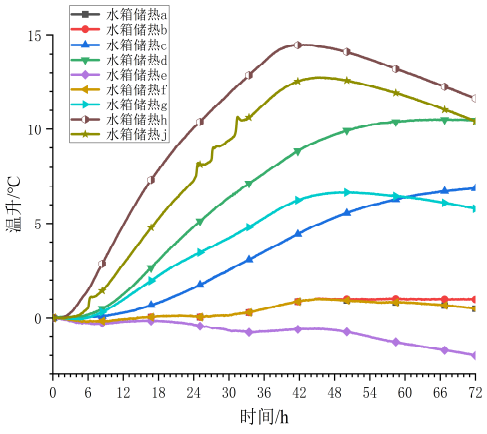
Table 3　Experimental conditions

入口温度/℃	运行方式	流量/(m³/h)	空气温度
65	只运行水箱	0.150	30
65	水箱和地埋管同时运行	0.150	27

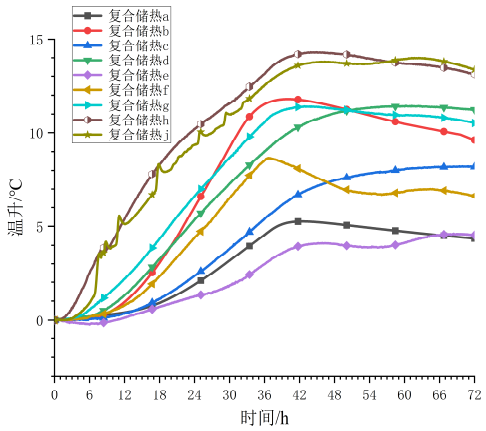
2　实验结果与讨论

2.1　特征点温度

选择埋深 1.15m 处的 a、b、c、d 四个特征点，埋深 0.4m 处的 e、f、g、h 四个特征点以及水箱中部上端 0.3m 处的 j 特征点进行分析。由于受到实验条件限制，两次储热实验之间需预留足够时间使土壤温度自然恢复至初始状态，该间隔周期较长，致使不同轮次实验的初始土壤温度分布存在一定差异。为消除初始条件不一致对结果分析的影响，本研究采用各特征监测点的瞬时温度与对应实验轮次初始温度的差值（即温升）来表征土壤在储热过程中的温度变化情况。该方法能够有效减少因初始温度场不同所带来的系统误差，从而更准确地反映储热系统运行期间土壤的热响应特性。水箱储热和复合储热模式下特征点温升变化曲线如图 7 所示。



（a）水箱储热



（b）复合储热

图 7　地下特征点温度变化曲线

Fig.7　Temperature variation curves of underground characteristic points

根据图 7 所示的实验结果，水箱储热与复合储热两种模式下，特征点 c、d、g、h 的温度变化规律总体一致，均呈现先上升后下降的趋势，且所有温度峰值均出现于保温阶段。然而在峰值过后，不同位置的特征点表现出差异：特征点 c 和 d 的温度在后期趋于稳定甚至缓慢上升，而特征点 g 和 h 则呈现缓慢下降的趋势。这主要是由于 c、d 两点更靠近水箱侧壁，受到水箱侧壁面散热的影响。此外，随着与水箱距离的增加，特征点达到温度峰值所需时间相应延长。这一现象可归因于土壤较低的导热系数，导致热量在其中传递缓慢，从而表现出明显的热延迟效应。

以特征点 c 和 g 为例进行深入分析可以发现，在复合储热模式下，两点温度上升速率均显著加快。具体数据表明：特征点 c 在水箱储热模式下的最高温升为 7.01℃，而在复合储热模式下最高温升达到 8.99℃，相对提高 1.98℃；特征点 g 在单纯水箱储热模式下的最高温升为 6.98℃，而在复合储热模式下则上升至 11.42℃，增幅达 4.44℃。上述温度变化趋势说明，随着土壤与储热中心距离的减小，土壤在储热过程中积累的热量显著增加，表明空间距离是影响储热效果的关键因素之一。同时，复合储热模式在相同位置能够实现更高的温升幅度，进一步证明该模式在增强储热能力、提升系统热输出潜力方面具有显著优势。

根据图 7 所示的实验结果，水箱储热与复合储热两种模式下特征点 a、b、e、f 的温度变化规律呈现明显区别。在水箱储热模式下，温度整体较为稳定，仅存在小幅波动，这是由于所选特征点距离水箱侧壁较远，在 72 小时实验周期内，热量尚未传递至该位置所致。相比之下，复合储热模式下的温度变化展现出更为复杂的阶段性特征：在储热阶段，系统温度持续上升，且两组地埋管之间的特征点在储热结束时达到峰值。该现象主要归因于地埋管温度的持续升高，促使邻近土壤不断吸热，从而使复合储热模式在温升速率和最终温度两方面均显著高于水箱储热模式。进入保温阶段后，温度开始下降，此时地埋管周边高温土壤持续向低温区域导热；而距离水箱和地埋管较远的特征点受热延迟效应影响，其温度在保温阶段仍继续上升。

以特征点 a 和 b 为例进一步分析可知，复合储热系统在储热过程中呈现出显著更高的温度响应。具体表现为：特征点 a 在单一水箱储热模式下的最高温升仅为 1.00℃，而在复合储热模式下则达到 5.23℃，较前者提高 4.23℃；特征点 b 在单一水箱储热模式下的最高温升为 1.01℃，而在复合储热模式下大幅提升至 12.16℃，增幅达 11.15℃。这一结果表明，复合储热模式不仅能够实现更快的温升速率和更强的储热能力，还能通过地埋管与水箱的协同作用，在管间区域形成更显著的热量集聚，从而有效增强局部储热密度，进一步提升系统的整体储热性能与热输出稳定性。

根据图 7 的实验结果可以看出，水箱上方特征点 j 的温度变化呈现出明显的阶段性规律：在储热阶段，特征点温度持续升高；进入保温阶段后，温度仍会继续上升一段时间，随后转为下降。该现象可解释为：在保温阶段，水箱顶部温度趋于稳定，导致其与相邻土壤区域之间的温差逐渐减小，从而使水箱向土壤传递的热流密度不断衰减。与此同时，土壤中的热量持续向更外侧土壤区域扩散。在这两种机制的共同作用下，保温阶段内特征点温度呈现出先上升而后缓慢下降的变化趋势。根据实验数据分析，两种运行模式下特征点 j 的温度峰值均出现在保温阶段。具体而言，在单一水箱储热模式下，特征点 j 的累计温升为 13.08℃；而在复合储热模式下，该点的累计温升至 14.32℃，较前者提高了 1.24℃。上述结果表明，复合储热模式能有效增强地下储热体的蓄热能力，使其在相同运行时间内积累更多热量，从而在后续的保温或释热阶段表

现出更好的热稳定性，有助于减缓系统在非加热阶段的温降速率。

2.2　水箱分层温度

为深入评估不同储热模式对水箱内部热动态的影响，本研究对水箱在单一储热模式与复合储热模式下的各层温度分布进行了系统的对比分析。通过比较两种模式下沿水箱竖向不同高度处的温度变化特征，旨在揭示复合储热方式对水箱内热分层结构、温度均匀性及储热稳定性的具体影响，从而为系统储热性能的综合评价提供依据。

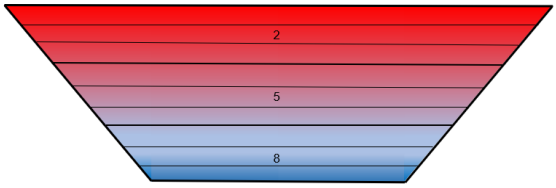
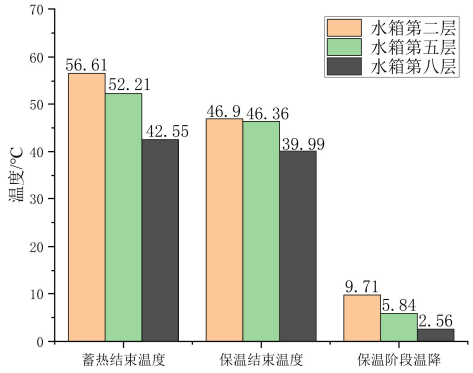


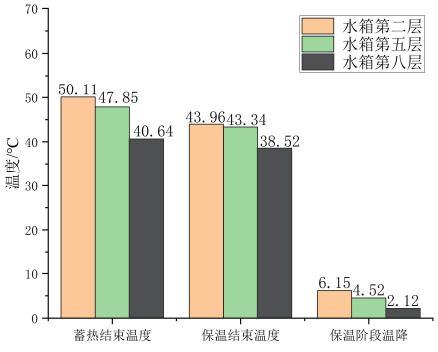
图 8　水箱分层图

Fig.8　Stratification diagram of the water tank

图 8 为水箱分层图。选择水箱储热和复合储热模式下水箱内部第 2 层、第 5 层和第 8 层的温度进行对比分析，水箱各层温度变化如图 9 所示。



（a）水箱储热



（b）复合储热

图 9　水箱各层温度变化

Fig.9　Temperature variation in each layer of the water tank

需要指出的是，由于两次对比实验的初始土壤温度存在差异（单一水箱储热模式实验前的土壤初始温度高于复合储热模式），导致图 9 中单一水箱模式的水箱水温整体偏高。因此，直接以水箱水温绝对值比较两种模式的储热效果并不完全公平。复合储热模式的优势在于将部分热量储存于土壤中，提升了土壤温度场，从而表现出更小的温降速率和更低的热损失。

如图 9 所示，在系统进入保温阶段后，复合储热模式下储热水箱内各深度的温度下降幅度均小于单一水箱储热模式。具体数据表明：在水箱第二层，水箱储热模式下的温降达 9.71℃，而复合储热模式下仅为 6.15℃，降幅减少 3.56℃；在第五层，两种模式对应的温降分别为 5.84℃与 4.52℃，复合模式下减少 1.32℃；在第八层，温降分别为 2.56℃和 2.12℃，差异为 0.44℃。上述结果说明，复合储热模式能够显著抑制保温阶段系统的热损失。

进一步分析可见，复合储热模式对水箱上部温降的抑制效果明显优于中下部。这一现象与系统的物理结构密切相关：水箱呈上窄下宽的倒金字塔形，竖直布置的地埋管环绕其侧壁，导致地埋管与水箱上部的间距较小、与下部的间距渐宽。因此，地埋管在水箱上部形成更为紧密的“热包围”效应，相当于构建了一个局部热屏障，从而更有效地减缓了该区域向周围土壤的散热。该结构特性使复合储热系统在空间上实现了非均匀的保温增强，尤其在上部区域表现出更优的热保持能力，进一步印证了其在整体热损失控制方面的结构优势与性能提升。

同时，实验数据进一步表明，水箱内部温度在竖直方向上呈现明显的梯度分布：高度越高，保温阶段的温降幅度越大。该现象主要源于系统的流动方式、结构特征与传热过程之间的耦合作用。具体而言：第一，系统采用上进下出的流动布置，蓄热结束后高温工质聚集于水箱上部，低温工质沉于下部，形成稳定的热分层结构；第二，水箱上部与周围土壤的温差显著大于下部，驱动了更强烈的热损失；第三，倒金字塔形结构使水箱上部的侧壁与土壤接触面积相对更大，进一步增加了该区域的热量散失强度。

综上，在保温阶段，复合储热系统表现出明显优于水箱储热系统的热保持能力。实验表明，该系

统不仅能够整体减缓水箱沿竖向各层的温度下降，更通过地埋管与水箱上部的紧密布局，在该区域形成显著的局部“热屏障”效应，从而针对性地抑制了主要热损失界面的散热。这一差异化保温效果源于系统在结构设计与运行方式上的协同：倒金字塔形水箱与环绕式地埋管的组合，使上部间距更小、热阻更低；而上进下出的流动方式与水箱形态共同强化了温度分层，使上部成为热损失的关键区域。复合储热模式通过结构性增强该区域的保温能力，实现了对系统热薄弱环节的重点改善。因此，该系统通过整合结构布局与传热机制，在空间上优化了热场分布，提升了整体的储热效率与热稳定性。

2.3　系统储热能力及热损失特性

蓄热量与热损失是衡量储热系统能量存储能力及保温性能的两个核心指标。在本文提出的地下跨季节复合储热系统中，埋地水箱既作为直接储热单元，又与周围土壤通过地埋管耦合协同工作。为了定量评估不同储热模式下埋地水箱的储热与保温特性，本节分别对水箱储热模式和复合储热模式下的充入热量、蓄热结束时的水箱蓄热量以及保温结束时的水箱蓄热量进行对比，并据此分析保温阶段的热损失特征。具体数据如图 10 所示。

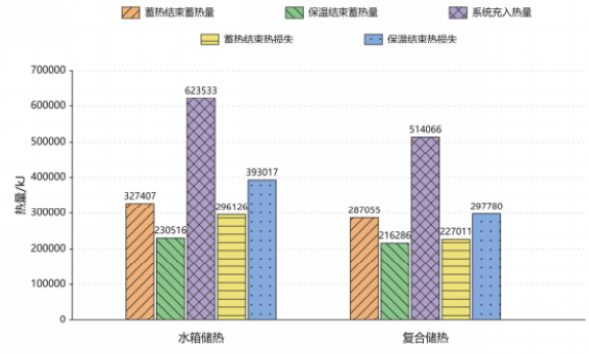


图 10　埋地水箱蓄热量及热损失

Fig.10　Heat storage and heat loss of buried water tank

根据图 10 所示实验数据，可以对两种储热系统在蓄热与保温阶段的蓄热量及热损失进行系统量化对比分析。在水箱储热模式下，系统充入热量为 623533kJ，蓄热结束时水箱蓄热量为 327407kJ，保温结束时降至 230516kJ。相应地在蓄热阶段的热损失为 296126kJ，至保温结束累计热损失达 393017kJ，其中保温阶段新增热损失 96891kJ。在复合储热模式下，充入热量为 514066kJ，蓄热结束与保温结束时的水箱蓄热量分别为 287055kJ 和 216286kJ。蓄热阶段热损失为 227011kJ，累计热损失为 297780kJ，保温阶段新增热损失 70769kJ。对比可见，复合储热模式虽然充入热量较少，但其蓄热阶段和保温阶段的热损失均显著低于水箱储热模式，表明与地埋管耦合有助于提升系统的热量保持能力。

从阶段对比来看，复合储热模式在蓄热阶段的热损失较水箱储热模式降低 69115kJ，降幅约 23.3%；在保温阶段热损失进一步减少 26122kJ，降幅约为 27%。结果表明，复合储热模式在每个阶段均表现出更低的热损失，说明其不仅在静态保温期间具有更好的热保持能力，在动态蓄热过程中也能更高效地将热量储存于系统内部，减少即时散失。

这一全面优势源于复合系统结构的协同效应：地埋管与水箱构成的复合储热体增强了整体的热容与热阻，同时地埋管区域在一定程度上形成了外部热屏障，抑制了热量向远场土壤的扩散。因此，复合储热系统在能量输入、储存与保持的全过程中均表现出更优的热力学性能，从而显著提升系统整体储热效率与运行稳定性。

储热效率是评价储热系统能量利用程度的核心指标，反映了系统在蓄热、储热和释热过程中的综合性能，其具体计算公式如式（1）–（3）所示。一般而言，更高的储热效率意味着系统在能量存储过程中的热损失更小，热量被有效利用的程度更高，从而对应更好的能源经济效益。

$$h_c = \frac{Q_{st}}{Q_{charge}} \tag{1}$$

$$Q_{st} = \sum_{i=1}^{n} \rho c_p V_i \left(T_f - T_i\right) \tag{2}$$

$$Q_{charge} = \int_0^{\tau} c_p m \left(T_{in,s} - T_{out,s}\right) d\tau \tag{3}$$

式中：Q_{st} 为跨季节储热水体内部能量变化，kJ，表示从充热开始（初始温度 T_i）到充热结束（终温 T_f）水体内能的变化量；Q_{charge} 为跨季节储热水体充入热量，kJ，表示在充热时间内，通过循环水带入储热水体的总能量。$T_{in,s}$ 为充热流入水体的温度，℃；$T_{out,s}$ 为充热流出水体的温度，℃；T_f 为充热阶段结束时水箱每层水温，℃；T_i 为充热阶段开始时水箱每层水温，℃。

通过公式（1）–（3）对系统能量收支进行计

算，得到两种储热模式在不同阶段的储热效率。结果表明，在蓄热阶段结束时，单一水箱储热系统的储热效率约为 52.5%，而复合储热系统在相同条件下达到 55.8%，效率提升 3.3 个百分点。至保温阶段结束时，水箱储热系统的储热效率进一步下降至 36.9%，复合储热系统则保持在 42.1%，较前者高出 5.2 个百分点。

上述效率变化说明，复合储热系统不仅在蓄热过程中具有更高的能量储存效率，在后续的保温阶段也表现出更好的能量保持能力。这进一步印证了复合储热结构在提升系统整体热力学性能方面的双重优势：一方面，地埋管与水箱的协同布局增强了热量向储热体的传递与蓄积，减少了蓄热阶段的即时热损失；另一方面，该结构也在静态保温期间形成了更为有效的热屏障，延缓了热量散失。

因此，复合储热系统为实现“夏热冬用”的跨季节储/供热目标提供了更可靠的技术路径。其在蓄热与保温阶段均表现出的效率优势，不仅有助于提升系统整体能效，也为增强可再生能源的持续利用能力、推动低碳供热工程应用奠定了技术基础。

3　结论

本文提出了一种将水箱储热与地埋管储热相串联耦合的新型地下跨季节复合储热系统。通过设计“仅水箱运行”与“水箱-地埋管同时运行”的对比实验，分析了两种储热模式的温度场演化、保温性能及储热效率，得出以下结论：

（1）在温度场演化方面，复合储热模式展现出显著优势。与单一水箱储热模式相比，复合系统不仅显著加快了土壤的温升速率，还大幅提升了各特征点的最终温度，特别是在两环地埋管之间的区域形成了更为集中的高温储热区。此外，系统表现出更强的热稳定性，有效减缓了保温阶段的温降速率。

（2）复合储热系统在保温阶段具有显著优于单一水箱储热模式的热保持能力。数据显示，该系统在各层均能有效抑制温度下降，且对水箱上部的保温效果尤为突出。因此，复合储热系统通过结构与传热的协同，实现了热场的空间优化，提升了储热稳定性与整体能效。

（3）在热损失与储热效率方面，复合系统的性能提升得到量化验证。实验数据显示，在保温阶段，复合储热模式的热损失较水箱储热模式减少了 26122kJ，降幅高达约 27%。相应地，其储热效率达到 55.8%，比水箱储热模式的 52.5% 提升了 3.3 个百分点。这充分证明复合结构有效抑制了热量散失，提高了能量的存储与利用效率。

后续可进一步研究全年周期、系统运行参数及运行策略对复合系统长期性能的影响；同时可结合数值模拟优化地埋管布置间距与储释热流量，探索系统的经济性与规模化应用可行性。

参考文献：

[1] 丁涛,孙瑜歌,贺元康,等.西北地区清洁供暖发展现状与典型案例分析（一）：政策现状与现存问题[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4881-4892.

[2] 丁涛,牟晨璐,贺元康,等.西北地区清洁供暖政策现状与典型案例分析（二）：典型案例与经济性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5126-5136.

[3] 赵璇,赵彦杰,王景刚,等.太阳能跨季节储热技术研究进展[J].新能源进展,2017,5(1):73-80.

[4] Pinel P, Cruickshank C A, et al. A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011,15(7):3341-3359.

[5] 崔杨,张家瑞,仲悟之,等.计及电热转换的含储热光热电站与风电系统优化调度[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6482-6494.

[6] Christoph B, Ingo D, Peter B. State of technology review of water-based closed seasonal thermal energy storage systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019,113:1-16.

[7] Givoni B. Underground longterm storage of solar energy-an overview[J]. Solar Energy, 1977,19(6):617-623.

[8] Dalenback J O. Solar heating with seasonal storage. Some aspects of the design and evaluation of systems with water storage[D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 1993.

[9] Panthalookaran V, Heidemann W, Muller-Steinhagen H. A new method of characterization for stratified thermal energy stores[J]. Solar Energy, 2007,81(8):1043.

（下转第 685 页）