



## 太阳能供暖二级水箱变容积蓄热系统能量及焓分析

娄晓歌<sup>1</sup>, 王 馨<sup>1</sup>, 司鹏飞<sup>2</sup>, 戎向阳<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>清华大学建筑技术科学系, 北京 100084; <sup>2</sup>中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610042)

**摘 要:** 太阳能供暖系统中的固定容积单水箱蓄热系统, 在太阳能波动供给和建筑热负荷波动需求之间存在不匹配及灵活性不足的问题。为更高效地利用太阳能, 本文对二级水箱温度分层变容积蓄热太阳能供暖系统建立了 MATLAB 数学模型, 包括集热循环、充热循环、取热循环和供热循环四部分及相应的控制策略, 并运用 Trnsys 进行了模型验证。提出了在某时间段内, 实际参与充热、取热或同时充热与取热的水箱体积为有效蓄热体积的概念。定义了集热比、有效蓄热体积平均温度、水箱热量取充比和热损比等参数对系统进行了分析与评价。研究表明: 与传统的太阳能供暖固定容积单水箱温度分层蓄热系统相比, 在整个供暖季, 二级水箱变容积蓄热系统的热损失减少了 17.2%, 取充比增加了 6.3%, 焓效率提高了 6.6%, 辅热能耗减少了 9.5%; 在供暖初期, 二级水箱变容积蓄热系统的水箱温度响应时间缩短了 54.9%, 可更灵活快速地用于供热。二级水箱变容积蓄热系统有利于调节供暖季不同时期的供需匹配, 具有良好的节能效果, 可进一步为太阳能供暖系统的设计与应用提供指导。

**关键词:** 二级水箱; 变容积; 焓; 温差控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0563

中图分类号: TK 513.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2022) 02-538-09

## Energy and energy analysis of two-stage water tanks variable-volume thermal heat storage system for solar heating

LOU Xiaoge<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, SI Pengfei<sup>2</sup>, RONG Xiangyang<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; <sup>2</sup>China Southwest Architecture Design and Research Institute Corp. Ltd., Chengdu 610042, Sichuan, China)

**Abstract:** The constant-volume water tank thermal heat storage system has the problem of insufficient flexibility and mismatch between the solar energy supply and heat load demand in the solar heating system. To make use of solar energy, a MATLAB numerical model, the two-stage variable-volume stratified-temperature water tanks thermal heat storage solar heating system, was established and verified by Trnsys, which was included four cycles, the heat collecting cycle, the heat charging cycle, the heat discharging cycle, the heating cycle, and the corresponding control strategies. The concept of effective volume of thermal heat storage is proposed, which is the volume of the water tank actually involved in heat charge, heat discharge or both in a period of time. To analyze the system, heat collected ratio, average temperature of the effective volume of thermal heat storage, heat discharge to charge ratio of the water tank, and heat loss ratio are also put forward. The results show that, compared with

收稿日期: 2021-10-26; 修改稿日期: 2021-11-17。

第一作者: 娄晓歌 (1989—), 女, 硕士, 研究方向为储能与可再生能源利用, E-mail: louxiaogebjut@163.com; 通讯作者: 王馨, 副研究员,

研究方向为储能与可再生能源利用, E-mail: wangxinlj@tsinghua.edu.cn。

the traditional constant-volume water tank thermal heat storage solar heating system, the heat loss of the two-stage variable-volume water tanks thermal heat storage solar heating system is reduced by 17.2%, heat discharge to charge ratio is increased by 6.3%, the exergy efficiency is increased by 6.6%, and the auxiliary heat is reduced by 9.5% in the whole heating season in Beijing. In the initial stage of heating, the temperature response time of the two-stage variable-volume water tanks thermal heat storage system is reduced by 54.9%, which can be used for heating more quickly. The two-stage variable-volume water tanks thermal heat storage system is beneficial to adjust the matching of supply and demand for heating in different periods, and has a good energy-saving effect, to further guide the design and operation of solar heating systems.

**Key words:** two-stage water tank; variable-volume; exergy; temperature difference control

我国建筑运行能耗约占总能耗的23%, 建筑运行过程中的二氧化碳排放占二氧化碳总排放量的22%<sup>[1]</sup>。太阳能供暖是一种清洁的可再生能源技术, 对缓解能源短缺、减少CO<sub>2</sub>排放, 实现2030年“碳达峰”、2060年“碳中和”目标具有重要意义。

蓄热水箱是太阳能供暖系统中常用的蓄热装置, 有助于解决太阳能利用在供需上存在的时间、空间和强度上不匹配问题。通常, 水箱的蓄热容积由总蓄热量除以蓄热温差确定, 即采用“总量满足需求”的设计原则与方法, 并对固定蓄热容积进行设计与优化<sup>[2-5]</sup>, 这样的做法存在一定不足。一方面, 在热负荷大、集热量小的工况下, 较大的蓄热水箱易造成蓄热水箱温度偏低, 热量不易取出, 增加了系统的辅热能耗; 另一方面, 在集热量大、热负荷小的工况下, 较小的蓄热水箱易造成蓄热水箱温度偏高, 同时集热器入口的水温偏高, 减少了系统集热量与蓄热量。因此, 固定容积蓄热难以匹配供暖季不同时期不同气象条件下充热、蓄热与取热的匹配要求, 其能源利用效率有待提高。

为提高固定容积蓄热水箱的热利用率, 对蓄热水箱温度分层的研究较多, 主要包括水箱进出口位置、流速、水箱高径比等研究<sup>[6]</sup>。为促进温度分层, 韩延民等<sup>[7]</sup>提出了带有内部隔板的分层水箱结构, 在总储能条件相同时, 供水温度较普通水箱高5℃。Cruickshank等<sup>[8]</sup>对多水箱(3个270 L)并联对温度分层的影响进行了研究。Dickinson等<sup>[9]</sup>在给定的周期性充热与取热条件下, 对3个270 L的水箱进行并联热性能研究, 得出多水箱并联的蓄放热性能更好。但是, 该研究模拟的集热量、负荷需求均为给定值, 未反映出气象以及真实的波动负荷对蓄

放热的影响, 且系统中3个水箱全时段并联用于充热与取热, 实际用于充热或取热的体积并没有变, 缺乏针对多水箱变容积蓄热的研究。

太阳能供暖的供需匹配除了考虑总量满足需求之外, 还需考虑逐时的供需匹配。为此, Li等<sup>[10-11]</sup>研究了分区储水箱太阳能吸收式空调系统的性能, 将水箱分为总体积的1/4和3/4两个区, 与单水箱系统相比, 通过适当热管理, 分区储水箱系统可以提前2 h实现供冷, 总制冷系数提高了约15%。Fan等<sup>[12]</sup>的研究也表明, 分区蓄热可以快速提升小部分蓄热体温度, 实现快速响应以满足供热需求。Wang等<sup>[13]</sup>通过切换蓄热水箱出口改变有效蓄热容积(水箱中变体积充热区域和固定体积取热区域之和), 使蓄热系统可以快速用于供热, 在案例典型周太阳能贡献率由25%提升到28%。然而, 上述方法均难以高效地减少水箱内部的冷热掺混。

利用多水箱变容积蓄热可有效阻断冷热掺混, 进一步提升太阳能供给和建筑负荷需求的匹配性。卜光峰等<sup>[14]</sup>提出了一种太阳能空调用多级水箱蓄热系统, 在蓄热过程中多级水箱蓄热系统采用单级水箱并联依次进行蓄热, 在蓄热量一定的情况下, 蓄热水温迅速上升, 水源热泵的COP也相应更高。戎向阳等<sup>[15]</sup>在专利中提出了一种通过切换多组蓄热水箱实现变容积蓄热的系统。多水箱变容积蓄热, 同时增加了水箱的表面积及逐时调控策略。蓄热数量多少与蓄热品位的高低共同决定着蓄热系统的优劣。目前对多水箱变容积蓄热系统的研究不足, 对其整个供暖季性能的评价研究也有欠缺。为此, 作为多级变容积蓄热的核心, 本文提出了一种二级水箱变容积蓄热太阳能供暖系统, 并建立了相应的太

太阳能供暖二级水箱变容积温度分层蓄热系统的数学模型, 对其进行能量和焓效率分析与评价, 为二级水箱变容积蓄热太阳能供暖系统的理论与应用研究提供指导。

## 1 模型与验证

### 1.1 系统组成与控制策略

二级水箱变容积蓄热太阳能供暖系统如图1所示。该系统共分4个循环, 分别是集热循环、充热循环、取热循环和供热循环, 其中每个循环中有1个循环泵。该系统由集热器、换热器、蓄热水箱、辅助热源、负荷末端、水泵及阀门等附件组成, 蓄热部分由2个蓄热水箱并联组成, 充热循环和取热循环通过阀门开合来控制切换。供暖末端设计供水温度  $T_{\text{sup}}$  为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 回水温度  $T_{\text{re}}$  为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为保证太阳能供热系统的稳定运行, 当末端供水温度达不到

要求时, 启动电辅热; 若达到则关闭电辅热。

为避免集热循环泵频繁启停, 泵1采用温差控制。当集热器出口  $T_{\text{co}2}$  与进口  $T_{\text{co}1}$  温差大于  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 开启集热泵1, 直至温差小于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 关闭泵1。充热与取热循环中, 泵2、泵3均采用  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  温差控制, 泵2由换热器1热侧进口温度  $T_{\text{ex}1,\text{h}1}$  与换热器1冷侧进口温度  $T_{\text{ex}1,\text{c}1}$  的温差控制, 泵3由换热器2热侧进口温度  $T_{\text{ex}2,\text{h}1}$  与换热器2冷侧进口温度  $T_{\text{ex}2,\text{c}1}$  的温差控制。取热泵3采用变流量运行, 当  $T_{\text{re}}$  大于  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 流量为设计标准流量的95%; 当  $T_{\text{re}}$  小于  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 流量为设计标准流量的110%。供热循环中, 供热循环泵4在整个供暖季持续运行。充热流体先对第一级蓄热水箱(水箱1)充热, 当水箱1的温度达到设定上限值( $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 充热流体切换至对二级蓄热水箱(水箱2)充热。当水箱1的温度低于设定下限值( $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时, 充热流体继续对水箱1充热。取热时, 取热流体始终从水箱温度较高的水箱取热。

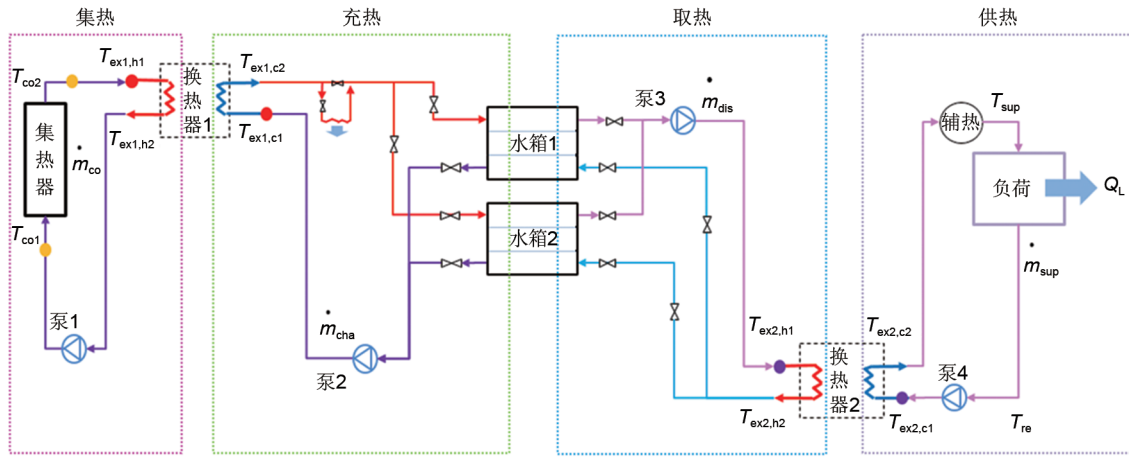


图1 二级水箱变容积蓄热太阳能供暖系统

Fig. 1 Solar heating system of two-stage water tanks variable-volume thermal heat storage

### 1.2 太阳能供暖系统各部件模型

#### 1.2.1 集热器模型

集热器单位面积上接收的太阳辐射照度采用Liu-Jordan<sup>[14]</sup>辐射模型。采用某高效平板集热器厂家所测试得的集热效率  $\eta_{\text{co}}$  曲线

$$\eta_{\text{co}} = 0.839 - 3.483(T_{\text{co}1} - T_{\text{a}})/I_{\text{T}} \quad (1)$$

单位时间的集热量  $Q_{\text{co}}$  为

$$Q_{\text{co}} = \eta_{\text{co}} A_{\text{co}} I_{\text{T}} \quad (2)$$

式中,  $T_{\text{co}1}$  为集热器进口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{a}}$  为环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $I_{\text{T}}$  为单位集热器面积上接收的太阳辐射照度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $A_{\text{co}}$  为集热器面积,  $\text{m}^2$ 。

#### 1.2.2 换热器模型

该系统均采用逆流换热器, 换热器效能  $\varepsilon$  的计算参见文献[16]。

#### 1.2.3 蓄热水箱温度分层模型

蓄热水箱温度分层采用多节点模型<sup>[17-18]</sup>, 将水箱沿竖直方向分为  $n$  层, 每1层即为1个节点, 每个节点满足质量与能量守恒, 可建立节点处温度变化的  $n$  个方程。充热流体进入水箱和取热流体回水箱的入口均采用浮动, 寻找最佳的温度层进入, 如图2所示。

定义函数  $F_m$  来描述水箱的哪一层接受热源

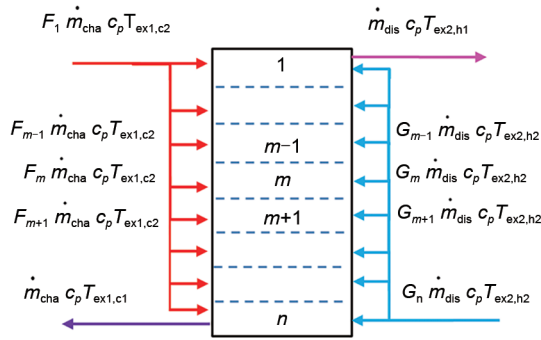


图2 多节点水箱模型

Fig. 2 Multi-node water tank model

出水

$$F_m = \begin{cases} 1, & \text{如果 } T_{m-1} \geq T_{co} \geq T_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

定义函数  $G_m$ , 来描述水箱的哪一层接受热汇回水

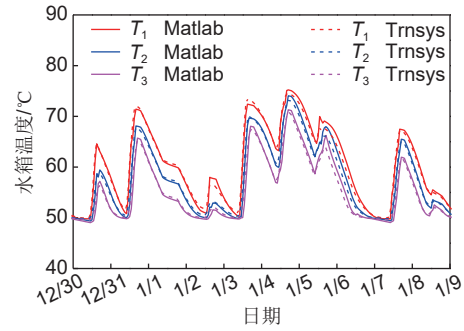
$$G_m = \begin{cases} 1, & \text{如果 } T_{m-1} \geq T_{Lo} \geq T_m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$m_m c_p \frac{dT_m}{dt} = F_m \dot{m}_{cha} c_p (T_{ex1,c2} - T_m) + \sum_{j=1}^{m-1} F_j \dot{m}_{cha} c_p (T_{ex1,c2} - T_m) + G_m \dot{m}_{dis} c_p (T_{ex2,h2} - T_m) - \sum_{i=m+1}^n G_i \dot{m}_{dis} c_p (T_{ex2,h2} - T_m) - U_{loss} A_m (T_m - T_a) \quad (3)$$

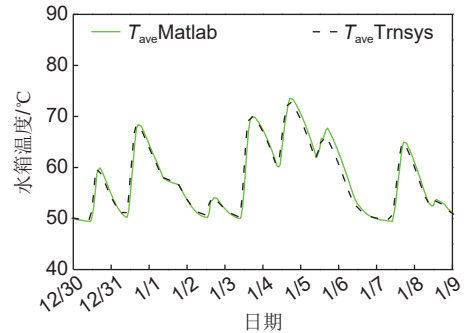
式中,  $m_m$  为水箱第  $m$  层的质量, kg;  $c_p$  为水箱工质的比热容, J/(kg K);  $T_m$  为水箱第  $m$  层的温度, °C;  $\tau$  为时间, s;  $\dot{m}_{cha}$  为水箱充热流体的质量流量, kg/s;  $\dot{m}_{dis}$  为水箱取热流体的质量流量, kg/s;  $T_{ex1,c2}$  为充热流体进水温度(换热器1冷侧出口温度), °C;  $T_{ex2,h2}$  为取热流体回水温度(换热器2热侧出口温度), °C;  $U_{loss}$  为水箱热损系数, 本文取 0.3 W/(m<sup>2</sup>·K);  $A_m$  为水箱第  $m$  层的表面积, m<sup>2</sup>;  $T_a$  为环境温度, °C。

### 1.3 数值模拟与验证

用 MATLAB 编程对上述太阳能供暖二级水箱变容积蓄热系统进行数值模拟研究。利用 Trnsys 固定容积三节点温度分层仿真模型对模型进行验证, 系统中包含平板集热器、蓄热水箱与末端建筑负荷及泵和阀门等附件。水箱内部温度的验证结果如图3所示, 两者在水箱各温度层温度  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  [图3(a)] 的差值及水箱平均温度 [图3(b)] 的差值均在 5.0% 以内, 系统辅热能耗偏差在 4.3% 以内(时间步长为 3 min), 验证结果表明模型准确可信。



(a) 各温度层温度



(b) 平均温度

图3 Matlab 模型水箱温度与 Trnsys 模型的对比

Fig. 3 Temperature validation between MATLAB and Trnsys models

## 2 蓄热水箱焓效率及系统热性能评价指标

### 2.1 焓效率

本文主要针对蓄热部件进行焓分析。蓄热水箱焓平衡采用温度分层水箱焓值计算方法, 其分析模型见图4<sup>[19-20]</sup>。

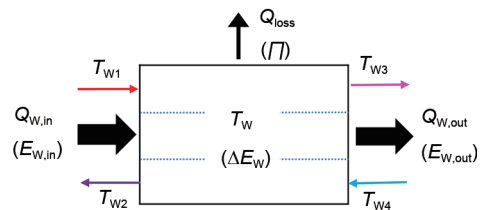


图4 温度分层水箱的焓模型

Fig. 4 Exergy model of stratified-temperature water tank

焓平衡方程与焓效率分别如下。

$$E_{W,in} - E_{W,out} = \Delta E_W + \Pi \quad (4)$$

$$\eta_{W,Ex} = \frac{E_{W,out} + \Delta E_W}{E_{W,in}} \quad (5)$$

其中



$$E_{W, in} = \left(1 - \frac{2T_a}{T_{W1} + T_{W2}}\right) Q_{W, in}$$

$$E_{W, out} = \left(1 - \frac{2T_a}{T_{W3} + T_{W4}}\right) Q_{W, out}$$

$$\Delta E_W = \sum_{m=1}^n \left[ m_m c_p (T_m - T_m^0) + m_m c_p T_a \ln \frac{T_m^0}{T_m} \right]$$

式中,  $E_{W, in}$ 为水箱的输入焓,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $E_{W, out}$ 为水箱的输出焓,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $\Delta E_W$ 为水箱的焓增量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $\Pi$ 为水箱焓损失,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $\eta_{W, Ex}$ 为水箱焓效率;  $Q_{W, in}$ 为水箱输入热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{W, out}$ 为水箱输出热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $c_p$ 为水箱工质的比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $T_{W1}$ 、 $T_{W2}$ 、 $T_{W4}$ 、 $T_{W3}$ 分别为水箱4个进出口水温,  $\text{K}$ ;  $T_a$ 为环境温度,  $\text{K}$ ;  $m_m$ 为水箱第 $m$ 层的质量,  $\text{kg}$ ;  $T_m$ 为当前时刻水箱 $m$ 层的温度,  $\text{K}$ ;  $T_m^0$ 为上一时刻水箱每个分层的温度,  $\text{K}$ 。

## 2.2 蓄热系统有效蓄热体积平均温度

二级水箱变容积蓄热系统设计原则: 优先使用第1级蓄热水箱。在第1级蓄热水箱第1次达到温度上限值后, 开始启用第2级蓄热水箱。为评价二级水箱变容积蓄热系统的性能, 定义在某时间段内实际参与充热、取热或同时充热与取热的水箱体积, 为蓄热系统的有效蓄热体积。二级水箱变容积蓄热系统的有效蓄热体积平均温度  $T_{ave, var}$  的定义见式(6)

$$T_{ave, var} = \begin{cases} T_{ave, 1}, & \text{二级蓄热启用前} \\ \frac{V_1}{V_1 + V_2} T_{ave, 1} + \frac{V_2}{V_1 + V_2} T_{ave, 2}, & \text{二级蓄热启用后} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $T_{ave, 1}$ 、 $T_{ave, 2}$ 分别为二级变容积系统第1级、第2级水箱的平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V_1$ 、 $V_2$ 分别为二级变容积系统的第1级、第2级水箱的体积。

## 2.3 集热比与热损比

为比较固定容积系统与二级变容积系统中水箱的集热与热损, 分别定义集热比  $R_{hc}$  (ratio of heat collected) 与热损比  $R_{hl}$  (ratio of heat loss)。

$$R_{hc} = Q_{co, var} / Q_{co, con} \quad (7)$$

$$R_{hl} = Q_{loss, var} / Q_{loss, con} \quad (8)$$

式中,  $Q_{co, con}$ 为固定容积蓄热系统的集热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{co, var}$ 为二级变容积蓄热系统的集热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{loss, con}$ 为固定容积蓄热系统中水箱的热损,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{coll, var}$ 为二级变容积蓄热系统中水箱的热损,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

## 2.4 蓄热系统响应时间和水箱热量取充比

蓄热系统响应时间指系统中水箱第1次充热到第1次取热的耗时。

为表征系统中蓄热水箱取热与充热性能, 定义蓄热系统中水箱的取充比  $R_{dis/cha}$  (discharge to charge ratio) 为从水箱取出热量与充入水箱热量之比, 简称取充比。

$$R_{dis/cha} = \frac{Q_{dis}}{Q_{cha}} = \frac{\int_0^T \dot{m}_g (T_{ex2, h1} - T_{ex2, h2}) dr}{\int_0^T \dot{m}_w (T_{ex1, c1} - T_{ex1, c2}) dr} \quad (9)$$

式中,  $Q_{dis}$ 为水箱取出的热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{cha}$ 为充入水箱的热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $\tau$ 为时间,  $\text{s}$ ;  $\dot{m}_{cha}$ 为充热流体的质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $\dot{m}_{dis}$ 为取热流体的质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $T_{ex2, h1}$ 、 $T_{ex2, h2}$ 分别为换热器2热侧进出口水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{ex2, c1}$ 、 $T_{ex2, c2}$ 分别为换热器1冷侧进出口水温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.5 系统辅助能耗比与太阳能贡献率

以系统辅助能耗比 (ratio of auxiliary heat,  $R_{auxi}$ ), 表示二级变容积蓄热系统相对于固定容积蓄热系统的能耗情况

$$R_{auxi} = Q_{auxi, var} / Q_{auxi, con} \quad (10)$$

式中,  $Q_{auxi, var}$ 为二级变容积蓄热系统辅热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{auxi, con}$ 为固定容积蓄热系统辅热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

太阳能贡献率 (solar contribution ratio, CRS) 可表征供暖系统所需热负荷由太阳辐射有效的热所提供的份额

$$CRS = Q_s / Q_L = (Q_L - Q_{auxi}) / Q_L \quad (11)$$

式中,  $Q_s$ 为由太阳能所提供的供热量,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_L$ 为建筑累计热负荷,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ;  $Q_{auxi}$ 为系统辅助能耗,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

## 3 结果与讨论

以北京供暖季(11月15日—3月15日)某居民区建筑为算例, 为充分利用太阳能, 太阳能保证率设计值取100%, 根据国标 GB 50495—2019<sup>[21]</sup>, 集热器面积设计值为6681  $\text{m}^2$ 。固定容积单水箱蓄热系统水箱体积按照水箱设定温度上限值(95  $^{\circ}\text{C}$ )动态模拟计算得到, 取不超上限值的最小体积 $V$ (水箱体积与集热面积之比  $V/A_{co}$ , 为0.38  $\text{m}^3/\text{m}^2$ )。太阳能集热器的单位面积流量取0.04  $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ , 集热循环、充热循环和供热循环的流量分别为289  $\text{m}^3/\text{h}$ 、267  $\text{m}^3/\text{h}$ 和30  $\text{m}^3/\text{h}$ 。取热循环的标准设计流量为

36 m<sup>3</sup>/h。本文二级水箱变容积系统总体积与单水箱固定容积系统的体积相等, 且二级水箱的各自体积相等(即  $V_1=V_2=0.5 V$ ), 水箱初始温度均设为 15 °C。下文对二级水箱变容积蓄热系统与固定容积蓄热系统的热性能进行研究, 两系统均不考虑水泵能耗。

### 3.1 气象条件与热负荷

图5(a)给出了以北京当地纬度为倾角的斜面逐时辐射功率, 及逐时热负荷, 建筑累计热负荷为  $1.37 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。图5(b)给出了北京供暖季月平均日有效斜面辐照量(有效斜面辐照量为斜面辐照量与集热器效率乘积, 集热器效率按本文模拟结果的近似值, 取0.4)与热负荷, 从11月到3月, 月平均日有效斜面辐照量分别为热负荷的1.08、0.67、0.74、1.00和1.67倍。

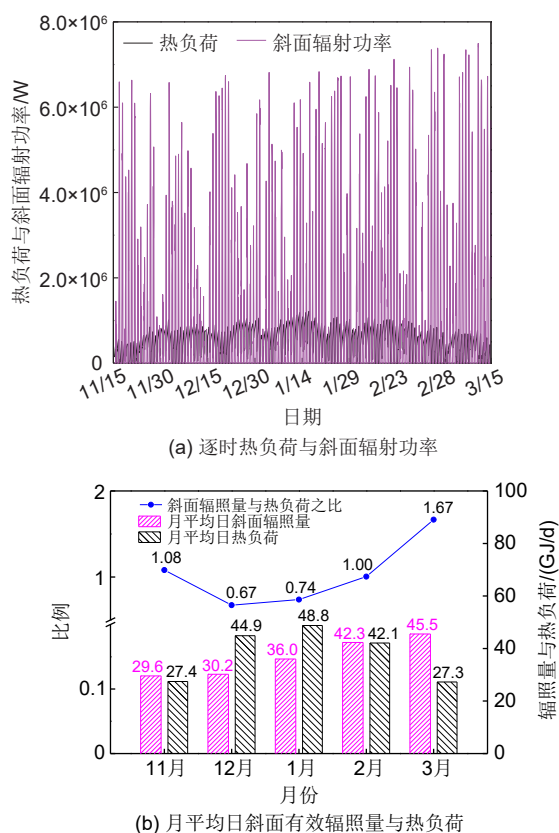


图5 北京地区气象条件与某算例热负荷

Fig. 5 Meteorological conditions and heat load of an example in Beijing

### 3.2 供暖季水箱温度与供热和辅热

图6给出了供暖季固定容积蓄热系统与二级变容积蓄热系统中, 各水箱平均温度与有效蓄热体积

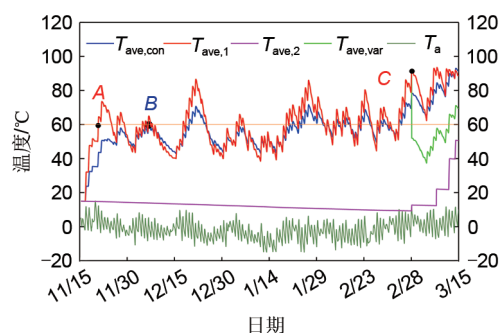


图6 两太阳能供暖系统的水箱平均温度与有效蓄热体积平均温度

Fig. 6 Average temperature and effective-volume average temperature of two solar heating systems

平均温度。在供暖初期(11月), 两系统均在第12小时第1次向水箱充热, 二级变容积系统的第1级蓄热水箱平均温度  $T_{\text{ave,1}}$  快速上升, 固定容积蓄热系统的平均温度  $T_{\text{ave,con}}$  (也即, 有效蓄热体积平均温度) 缓慢上升,  $T_{\text{ave,1}}$  明显高于  $T_{\text{ave,con}}$ 。  $T_{\text{ave,con}}$  在点B(第278小时)时可用于供热, 而二级变容积蓄热系统的有效蓄热体积平均温度  $T_{\text{ave,var}}$  (C点对应时间之前, 有效蓄热体积平均温度  $T_{\text{ave,var}}$  等于  $T_{\text{ave,1}}$ ) 在点A(第132小时)即可用于供热。二级变容积蓄热系统把响应时间缩短了54.9%。由于室外温度  $T_a$  较低, 第2级蓄热水箱产生热损, 整体上温度一直呈下降趋势, 直到2月28日  $T_{\text{ave,1}}$  高于95 °C时(点C), 第2级水箱启用, 第2级蓄热水箱平均温度  $T_{\text{ave,2}}$  才逐渐上升, C点之后先骤降然后逐渐增加。  $T_{\text{ave,con}}$  的波动较小温度上升较慢, 但是在供暖末期会接近水箱设定值, 为94.6 °C。直到供暖结束  $T_{\text{ave,2}}$  的最大值仅为56.0 °C, 因此, 如何优化设计实现二级(多级)变容积蓄热提升太阳能利用效率, 需要后续进一步研究。

图7给出了两系统在典型工况1月11日(0:00)—1月13日(24:00)的水箱温度, 辅热功率  $Q_{\text{auxi}}$  和取热功率  $Q_{\text{dis}}$  的对比, 图(a)为固定容积系统平均温度  $T_{\text{ave,con}}$  与二级变容积蓄热系统有效蓄热体积  $T_{\text{ave,var}}$  (此时  $T_{\text{ave,var}}=T_{\text{ave,1}}$ , 见图6), 图(b)、(c)分别为固定容积系统与二级变容积蓄热系统的辅热功率与取热功率。于1月11日—1月13日, 固定容积蓄热系统与变容积二级蓄热系统的辅热分别为27.6  $\text{MW} \cdot \text{h}$  和11.0  $\text{MW} \cdot \text{h}$ 。1月11日, 两系统水箱温度均比较低, 未能取热, 均需开启辅助热源。  $T_{\text{ave,var}}$  在室外气象条件较好时可快速升温(A—A'), 达到取热温度以减小辅热。  $T_{\text{ave,con}}$  升温较慢(B—B'), 未能达到

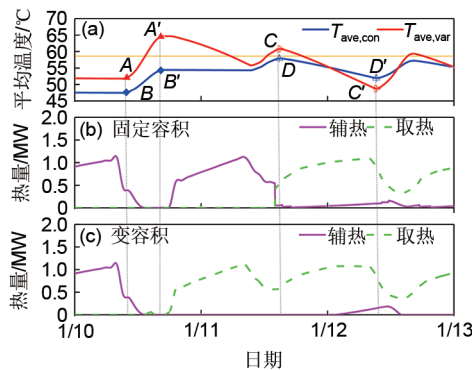


图7 两太阳能供暖系统典型工况取热与辅热

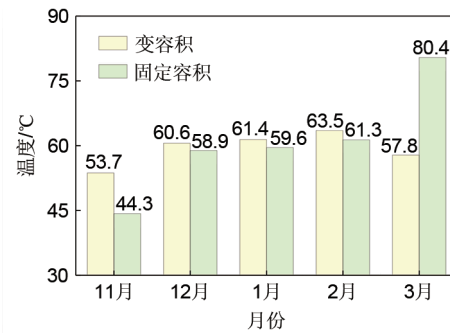
Fig. 7 Heat discharge and auxiliary heat of two solar heating systems during typical days

取热温度, 仍需开启辅助热源。固定容积蓄热系统温度波动较小( $D-D'$ ), 而二级变容积蓄热系统则温度波动较大( $C-C'$ )。

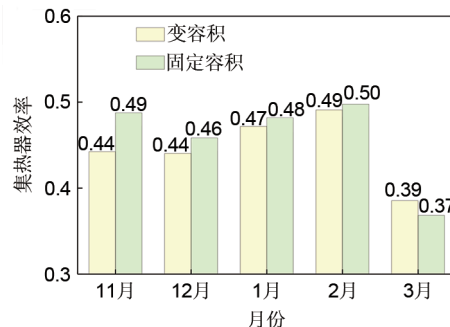
### 3.3 系统热性能分析

基于逐时数据对整个供暖季进行分析, 比较与评价二级变容积蓄热系统的优势。图8给出了两系统月平均有效蓄热体积平均温度、月平均集热器效率和月平均太阳能贡献率。

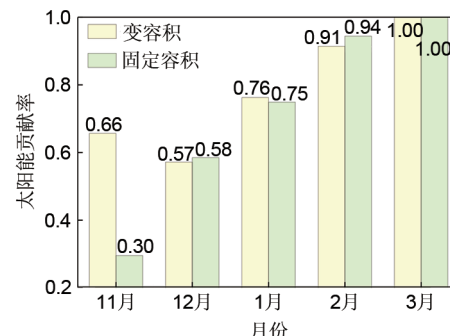
由图8(a)可看出, 两系统的有效蓄热体积平均温度  $T_{ave,var}$  与  $T_{ave,con}$  从11月到2月均逐渐增加。两系统11月的有效蓄热体积平均温度  $T_{ave,var}$  与  $T_{ave,con}$  分别为  $54.7^{\circ}\text{C}$  和  $45.2^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{ave,var}$  比  $T_{ave,con}$  高出  $9.5^{\circ}\text{C}$ , 这是由于二级变容积蓄热系统有效蓄热体积小升温快, 而固定容积蓄热系统由于体积大升温慢。12月、1月和2月, 两系统的有效蓄热体积平均温度的差异较小, 均在  $3^{\circ}\text{C}$  之内。3月由于第2级蓄热水箱的使用,  $T_{ave,var}$  比  $T_{ave,con}$  低  $22.6^{\circ}\text{C}$ 。由图8(b)可看出, 从整体来看二级变容积蓄热系统的集热效率低于固定容积蓄热系统, 11月份差异最大, 二级变容积蓄热系统的集热效率比固定容积蓄热系统减少了10.2%。这是由于固定容积蓄热系统水箱体积较大温度较低, 集热器进口温度较低的原因。随着时间的推移, 固定容积系统水箱温度逐渐增加, 两系统在12月、1月和2月的集热效率差异明显减小。3月份, 虽然  $T_{ave,1}$  较高, 但是  $T_{ave,2}$  与室外温度  $T_a$  相近, 所以  $T_{ave,var}$  远低于  $T_{ave,con}$ 。二级变容积蓄热系统的集热器进口温度较低, 因此其集热器效率反而高于固定容积系统, 收集更多太阳能。由图8(c)可看出, 两系统月平均太阳能贡献率在11月差异最大, 二级变容积蓄热系统与固定容积系统的月平均太阳能



(a) 月平均有效蓄热体积平均温度



(b) 月平均集热器效率



(c) 月平均太阳能贡献率

图8 两太阳能供暖系统月平均性能比较

Fig. 8 Monthly performance comparison of two solar heating systems

贡献率, 分别为66%和30%, 二级变容积蓄热系统是固定容积系统的2.2倍。其他月份的差异较小, 这是由于11月份,  $T_{ave,con}$  未能快速上升, 温度较低, 导致月平均太阳能贡献率较小。由于二级变容积蓄热系统在11月水箱温度可以快速上升, 且建筑负荷较小, 优势最为明显。在1月份由于温度较低, 建筑负荷较大, 二级变容积蓄热系统温度  $T_{ave,var}$  较高, 其月平均太阳能贡献率高于固定容积蓄热系统, 两系统分别为76%和75%。在3月, 两系统均实现了100%的太阳能贡献率。

图9为两系统供暖季整体性能对比。由图(a)可知, 两系统的集热比为0.978, 二级变容积蓄热系



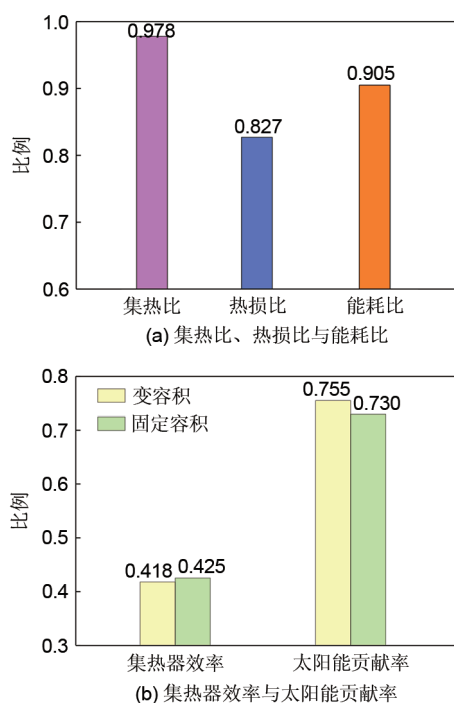


图9 两系统供暖季的整体热性能

Fig. 9 Whole performance of two solar heating systems during the heating season

统的集热量无明显减小。两系统的热损比为0.827，二级变容积蓄热系统的热损减小了17.2%。这是由于虽然二级变容积蓄热系统的水箱总表面积较大(水箱高径比均为4:1)，高于固定容积蓄热系统26%，并且 $T_{ave,1}$ 较高，但是在3月之前 $T_{ave,2}$ 一直较低，因此二级变容积蓄热系统的热损较小。二级变容积蓄热系统与固定容积蓄热系统的能耗比为0.905，也即，二级变容积蓄热系统实现了9.5%的节能率。由图(b)可知，二级变容积蓄热系统与固定容积蓄热系统的集热器效率分别为41.8%和42.5%。固定容积太阳能贡献率为73.0%，采用二级变容积蓄热系统比固定容积蓄热系统提高了供需匹配，太阳能贡献率可提高至75.5%。二级变容积蓄热系统能够更有效地利用收集到的太阳能，提高太阳能贡献率，减小辅助能耗。

### 3.4 蓄热系统焓效率与取充比

为确定二级变容积蓄热系统中能量的有效利用程度，对两系统的焓效率和取充比进行了对比分析(图10)。图10(a)为两系统水箱在供暖季的各月平均和整个供暖季蓄热水箱的焓效率对比，由图可以看出供暖季各月，二级变容积系统水箱的月平均焓效率均高于固定容积系统。在11月，二级变容积

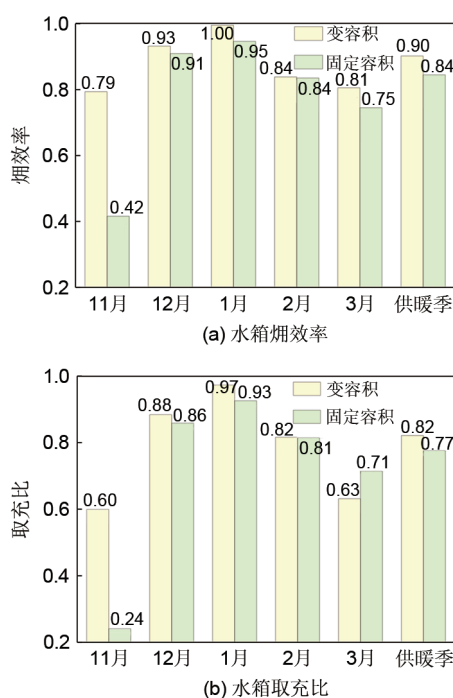


图10 两系统焓效率与取充比

Fig. 10 Exergy efficiency and heat discharge to charge ratio of two solar heating systems

系统与固定容积系统水箱的月平均焓效率分别为79%和42%，比固定容积系统的月平均焓效率高出了88%。虽然二级变容积系统在11月的月平均集热器效率要低于固定容积系统[图8(b)]，但是由于 $T_{ave,1}$ 能够快速上升，因此二级变容积系统的月平均焓效率更高，能够更好地满足供热需求。在整个供暖季，二级变容积蓄热系统与固定容积系统的焓效率分别为90%和84%，二级变容积蓄热系统比固定容积系统的焓效率提高了7.1%，可以提供更多的有用能量，二级变容积系统太阳能贡献率也更高，能耗更少。图10(b)为两系统水箱在供暖季的各月平均和整个供暖季水箱热量取充比对比。图10(b)与图10(a)的变化趋势基本一致，供暖季11月—2月，二级变容积蓄热系统的月平均取充比均高于固定容积系统。11月最为明显，二级变容积系统水箱的月平均取充比是固定容积系统的2.5倍。在3月，二级变容积系统水箱的月平均取充比低于固定容积系统。在整个供暖季，两系统水箱的取充比分别为82%与77%，前者比后者高出了6.5%。

## 4 结 论

对变容积蓄热太阳能供暖系统建立了二级变容



积温度分层蓄热太阳能供暖系统的 MATLAB 数学模型。模拟了北京地区二级变容积蓄热太阳能供暖系统的热性能,并与固定容积单水箱太阳能供暖系统进行了对比研究。主要结论如下。

(1) 二级变容积温度分层蓄热水箱太阳能供暖系统,可根据供需调控在某一时间段内实际参与充热、蓄热与取热的水箱体积。本文提出了参数指标,集热比、有效蓄热体积平均温度、水箱取充比和热损比,对二级变容积水箱蓄热系统进行评价与分析。

(2) 对于给定算例,与固定容积蓄热系统相比,二级变容积蓄热系统在整个供暖季,将太阳能贡献率由 73.0% 提升至 75.5%,实现了 9.5% 的节能率。

(3) 二级变容积蓄热系统在供暖初期 11 月,供暖响应时间缩短了 54.9%。系统灵活匹配,使整个供暖季系统的热损失减少了 17.2%,水箱热量取充比增加了 6.5%,烟效率提高了 7.1%。

## 参 考 文 献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.  
Building Energy Efficiency Research Center of Tsinghua University. 2021 Annual report on China building energy efficiency[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.
- [2] 刘艳峰, 王登甲. 太阳能地面采暖系统蓄热水箱容积分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1636-1639.  
LIU Y F, WANG D J. Volume of heat storage tank for solar floor heating[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(12): 1636-1639.
- [3] 刘艳峰, 曹彦宾, 王登甲, 等. 基于网格寻优算法的太阳能供暖系统匹配优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 286-292.  
LIU Y F, CAO Y B, WANG D J, et al. Matching optimization of solar heating system based on grid optimization algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(4): 286-292.
- [4] GUO F, ZHANG J Y, SHAN M, et al. Analysis on the optimum matching of collector and storage size of solar water heating systems in building space heating applications[J]. Building Simulation, 2018, 11(3): 549-560.
- [5] SHARIAH A M, LÖF G O G. The optimization of tank-volume-to-collector-area ratio for a thermosyphon solar water heater[J]. Renewable Energy, 1996, 7(3): 289-300.
- [6] HAN Y M, WANG R Z, DAI Y J. Thermal stratification within the water tank[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(5): 1014-1026.
- [7] 韩延民, 王如竹, 代彦军, 等. 卧式热分区太阳能水箱内的贮热性能分析及试验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(3): 277-282.  
HAN Y M, WANG R Z, DAI Y J, et al. Analysis and experimental studies on heat storage performance within a horizontal thermal partition solar water tank[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(3): 277-282.
- [8] CRUICKSHANK C A, HARRISON S J. Thermal response of a series- and parallel-connected solar energy storage to multi-day charge sequences[J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 180-187.
- [9] DICKINSON R M, CRUICKSHANK C A, HARRISON S J. Thermal behaviour of a modular storage system when subjected to variable charge and discharge sequences[J]. Solar Energy, 2014, 104: 29-41.
- [10] LI Z F, SUMATHY K. Experimental studies on a solar powered air conditioning system with partitioned hot water storage tank[J]. Solar Energy, 2001, 71(5): 285-297.
- [11] LI Z F, SUMATHY K. Performance study of a partitioned thermally stratified storage tank in a solar powered absorption air conditioning system[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(11): 1207-1216.
- [12] FAN Y, ZHAO X D, LI J, et al. Operational performance of a novel fast-responsive heat storage/exchanging unit (HSEU) for solar heating systems[J]. Renewable Energy, 2020, 151: 137-151.
- [13] LI J R, LI X D, WANG Y, et al. Long-term performance of a solar water heating system with a novel variable-volume tank[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 230-241.
- [14] 卜光峰, 金苏敏. 太阳能空调用多级水箱蓄热系统特性研究[J]. 流体机械, 2013, 41(11): 76-80.  
BU G F, JIN S M. Study on the characteristics of the system of multistage heat storage tanks applied to the solar air conditioning[J]. Fluid Machinery, 2013, 41(11): 76-80.
- [15] 戎向阳, 冯雅, 司鹏飞, 等. 一种多组蓄热水箱的直接式太阳能供暖系统及其控制方法: CN105240917B[P]. 2019-08-30.  
RONG X Y, FENG Y, SI P F, et al. A direct solar heating system with multiple groups of thermal heat storage tanks and its control method: CN105240917B[P]. 2019-08-30.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1998.  
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [17] 彭飞, 张国勋. 一个太阳能-热能系统的计算机分析模型[J]. 太阳能学报, 1988, 9(4): 383-390.  
PENG F, ZHANG G X. A computer analysis model for solar-thermal system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1988, 9(4): 383-390.
- [18] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2004.  
ZHANG H F. Solar thermal utilization principle and computer simulation[M]. 2nd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004.
- [19] 王宇波, 全贞花, 靖赫然, 等. 多能互补协同蓄能系统热力学分析与运行优化[J]. 化工学报, 2021, 72(5): 2474-2483, 2906.  
WANG Y B, QUAN Z H, JING H R, et al. Thermodynamic analysis and operation optimization of multi energy complementary energy storage system[J]. CIESC Journal, 2021, 72(5): 2474-2483, 2906.
- [20] ROSEN M A, TANG R, DINCER I. Effect of stratification on energy and exergy capacities in thermal storage systems[J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(2): 177-193.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 太阳能供热采暖工程技术标准: GB 50495—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for solar heating system: GB 50495—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.