



盒式布水器开孔形式对矩形储热水箱热分层性能影响研究

徐雪琦¹, 任玉成², 唐柏松³, 张鹏程¹, 肖益民¹

(¹重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; ²石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; ³中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 为减小水箱入口冷热水掺混对矩形储热水箱热分层的干扰, 提高储热水箱的蓄热效率, 本研究设计了一种区别于传统管式出流的矩形盒式布水器, 其通过内部矩形缓冲腔实现大面积低速散流。采用 Fluent 软件建立水箱三维数值模型, 针对盒式布水器的开孔位置与孔口形状进行数值仿真。选取斜温层厚度、理查森数 (Ri) 和热分层数 (Str) 作为水箱热分层性能的评价指标, 探究了盒式布水器结构参数对水箱热分层效果的影响机制。研究表明, 盒式布水器开孔位置对水箱热分层性能的影响最大, 顶部开孔时斜温层厚度较侧部开孔和底部开孔分别平均减少了 24.75% 和 58.02%, 底部开孔时水箱的热分层效果最差。盒式布水器孔口形状带来的热分层效果受布水器开孔位置的影响, 顶部和侧部开孔时条缝型热分层效果优于圆孔型, 底部开孔时圆孔型热分层效果优于条缝型。顶部条缝型盒式布水器的热分层综合效果最优, 相较水箱传统的 H 型布水结构, 该方案可使矩形储热水箱斜温层厚度平均降低 12.2%, Ri 数和 Str 数均有所提高, 可有效改善矩形储热水箱的热分层效果。本研究可为实际工程中矩形储热水箱布水器结构的设计与优化提供理论依据。

关键词: 储热水箱; 布水器; 斜温层; 计算流体力学; 热分层

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0700

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-11

Study on the effect of opening configuration of box-type water distributor on thermal stratification performance of rectangular hot water storage tank

XU Xueqi¹, REN Yucheng², TANG Baisong³, ZHANG Pengcheng¹, XIAO Yimin¹

(¹School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; ²College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China; ³Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: To reduce the interference of hot and cold water mixing at the inlet on thermal stratification in the rectangular hot water storage tank and improve its thermal storage efficiency, a rectangular box-type water distributor that differs from conventional tubular-outlet designs was proposed in this study. The distributor features an internal rectangular buffer cavity that enables large-area, low-velocity outflow. A three-dimensional numerical model of the tank was established using Fluent software. Numerical simulations were conducted to investigate the effects of opening position and orifice shape for the box-type distributor.

收稿日期: 2026-08-11; 修改稿日期: 2026-09-07。

第一作者: 徐雪琦 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为蓄热技术, E-mail: xuxueqi2030@163.com; 通信作者: 肖益民, 教授, 研究方向为蓄热技术, E-mail: xiaoyimin@cqu.edu.cn。

引用本文: 徐雪琦, 任玉成, 唐柏松, 等. 盒式布水器开孔形式对矩形储热水箱热分层性能影响研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-11.

Citation: XU Xueqi, REN Yucheng, TANG Baisong, et al. Study on the effect of opening configuration of box-type water distributor on thermal stratification performance of rectangular hot water storage tank[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-11.

Thermocline thickness, Richardson number (Ri), and stratification number (Str) were selected as evaluation indicators to explore the influence mechanism of distributor structural parameters on thermal stratification performance. The results show that the opening position has the most significant effect on thermal stratification performance. For the top-opening configuration, the thermocline thickness is reduced by 24.75% and 58.02% on average compared with the side-opening and bottom-opening cases, respectively. The bottom-opening configuration exhibits the poorest thermal stratification. The effect of orifice shape on thermal stratification depends on the opening position. Slot-type orifices outperform circular ones for top and side openings, while circular orifices yield better performance than slot-type ones for bottom openings. The top-opening slot-type box distributor exhibits the best comprehensive thermal stratification performance. Compared with the conventional H-type water distributor, this scheme reduces the average thermocline thickness of the rectangular tank by 12.2%, with simultaneous improvements in Ri and Str , which effectively enhance the thermal stratification performance of the rectangular hot water storage tank. This study provides a theoretical basis for the design and optimization of water distributor structures in rectangular hot water storage tanks for practical engineering applications.

Keywords: hot water storage tank; water distributor; thermocline; computational fluid dynamics; thermal stratification

当前能源需求日益增加，2024年全球能源结构仍以化石燃料为主^[1]，摆脱传统化石能源依赖，发展清洁能源已成为当下研究热点。在“双碳”战略目标与可持续发展要求下，太阳能这一清洁能源分布广泛、易于采集，搭配储热装置，可实现全天候稳定供热^[2-3]。矩形储热水箱结构规整，箱体之间便于模块化拼装，安装方便灵活、占用空间小，该装置可在日照充足时高效蓄积太阳能集热系统产出的热能，在用热高峰期按需释放储存的热量，持续稳定供给人们生活热水。受重力与浮升力的影响，储热水箱内部能够形成不同水平温度的分层结构，良好的分层可以提高水箱自身的热效率与能量利用率^[4-5]，然而水箱进水产生的射流扰动易引发冷热流体剧烈掺混、斜温层增厚等问题，会造成水箱有效储热量与可利用的热水量下降。

储热水箱的布水器作为影响水箱换热效率、稳定水箱温度分层及减少水流掺混的核心部件，其结构设计优化是储热水箱领域的研究重点。Gao^[6]等以大型水池储热装置 PTES 为研究对象，对顶、中、底三层布水器的竖向安装布局开展结构参数分析，最终确定最优布水结构，有效抑制水体掺混。Xu 等^[7]针对圆柱形水箱，对上下布水板无量纲宽度、隔热板厚度与导热系数进行多工况参数分析，

确定最优布水板尺寸与隔热参数，提升了水箱储热焓与放热稳定性。Wang 等^[8]以圆柱形储热水箱为研究对象，提出一种分流套筒的多孔布水结构，与原开槽进水结构对比，发现新型布水器可将出水均匀度提升 91%，有效减少上层热水提前掺混降温。Ren 等^[9]针对坑式储热系统传统布水器流场不均、冷热掺混问题，设计了一种新型的均匀流孔板布水结构，结合仿真试验与多目标优化确定最优参数，优化后装置整体储放热效率提升 38%，流速不均系数下降 65.1%。Zhao 等^[10]以太阳能跨季节储热水箱为对象，针对大型太阳能跨季节储热水箱三层圆盘式布水装置开展全年实测分析，发现不同充放热工况切换上中下布水口会改变进水射流强度，直接影响罐内流体掺混与斜温层厚度，进水扰动越大，整体储热焓效率下降。Liu 等^[11]以卧式矩形储热水箱为研究对象，将两种新型均流布水器与传统无导流布水器开展对照试验，得出两种均流式布水器均可削弱进水扰动，且侧部分流布水器适配低流速工况、均匀分流布水器适配高流速工况。

针对储热水箱热分层性能的研究，Zachár^[12]通过分析冷热层温差对水体掺混与斜温层稳定性的影响，发现同等工况下底部冷水射流造成的掺混程度远大于顶部热水射流，同时进出口温差越大，分层

稳定性越差。Ren等^[13]提出一种倒金字塔型储能装置，探究进出口流量和温差对储热分层效果的影响，发现冷水流量增大持续降低热分层效果，热水流量增大热分层效果先增后减，冷热温差扩大会削弱分层效果。Anacreonte等^[14]以圆柱形水箱为研究对象，模拟进水温度、流速波动对罐内热分层的破坏作用，结果表明进水温度波动会显著加剧冷热掺混、分层衰减程度随波动幅值增大而上升。Liu等^[15]以家用太阳能储热水箱为研究对象，分析水箱参数对分层与放热效率的影响，发现水箱高径比越大、进水雷诺数越低、罐内初始温度越高，分层效果与放热效率越好。

水箱的几何形状是影响热分层特性的重要因素。与圆柱形水箱相比，矩形水箱在热分层特性上表现存在差异。圆柱形水箱的轴对称结构有利于形成稳定的径向温度分布和规则的自然对流路径，矩形水箱则因平面壁面和直角拐角的限制，流动的对称性被削弱，浮力驱动路径也更为复杂。由此可见，针对矩形水箱的布水器设计不能简单移植圆柱

形水箱的成熟方案，而需充分考虑其截面形状对流动掺混和热分层稳定性的影响。

目前已有研究大多聚焦于圆柱形水箱，而矩形水箱在实际生活及工程中的应用并不少见，然而，现有研究多集中于圆柱形水箱的布水器优化，针对矩形水箱几何特征专门设计的布水器结构仍十分有限，尤其缺乏从布水器自身出流面布局出发的系统性对比研究。因此，本研究以矩形储热水箱为研究对象，针对水箱中的充热工况，探究水箱布水器结构对水箱热分层的影响规律。研究成果可为矩形储热水箱的布水结构和运行工况的优化提供理论参考。

1 模型建立

1.1 物理模型

图1为矩形储热水箱及布水器的几何物理模型，储热水箱尺寸为长600 mm×宽380 mm×高800 mm，水箱顶部与底部分别布设布水器，两处布水器采用对称布置形式。

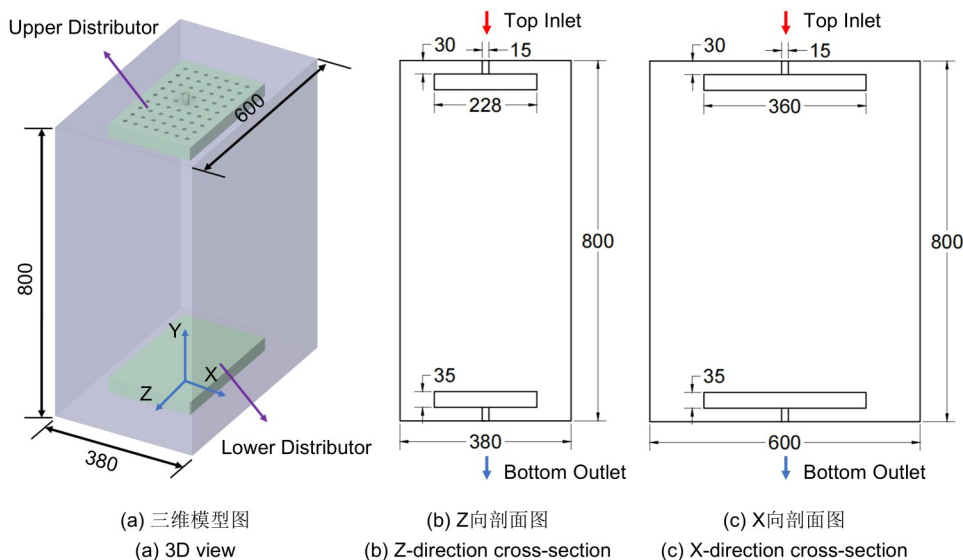


图1 储热水箱物理模型 (mm)

Fig. 1 Physical model of the thermal storage tank (mm)

合理优化布水器结构能够发挥良好的均流效果，降低进水口流体流速，依靠重力与浮力实现水平缓导流，避免扰动水箱内部斜温层结构。本研究选用盒式布水器作为矩形储热水箱的内部布水装置，其开孔形式对水箱内部的热分层特性影响显著，如图2所示，围绕开孔位置和孔口形状设置6

种盒式布水器结构 (Case 1-Case 6)。表1为六种工况下布水器结构参数。设置顶部、侧部和底部三种开孔位置，以考察不同出流方向及其与浮力作用关系对热分层的影响。采用圆孔型和条缝型两种孔口形式，以表征离散射流与连续分布式出流在扩散和卷吸特性上的差异。孔口尺寸综合考虑矩形水箱

与盒式布水器的几何匹配关系,并沿布水器长、宽方向均匀布置。在保持各工况总开孔面积一致的前提下,合理确定圆孔直径、条缝尺寸及开孔数量,使不同工况在相同流量下保持基本一致的平均出口速度,从而保证不同开孔形式之间的可比性。弗劳德(Fr)数的计算公式如式(1)所示,经计算布水器的Fr数为0.0635,满足设计规范Fr数小于2的要求^[16]。

$$Fr = \frac{G/L}{\sqrt{g \cdot h_i^3 \cdot \frac{\rho_i - \rho_n}{\rho_n}}} \quad (1)$$

式中, G 为通过布水器最大流量, $1.98 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; L 为布水器有效长度, 1.88 m ; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; h_i 为布水器距顶部距离, 0.03 m ; ρ_i 为箱内预存水的密度, 998.2 kg/m^3 ; ρ_n 为入口水流的密度, 988 kg/m^3 。

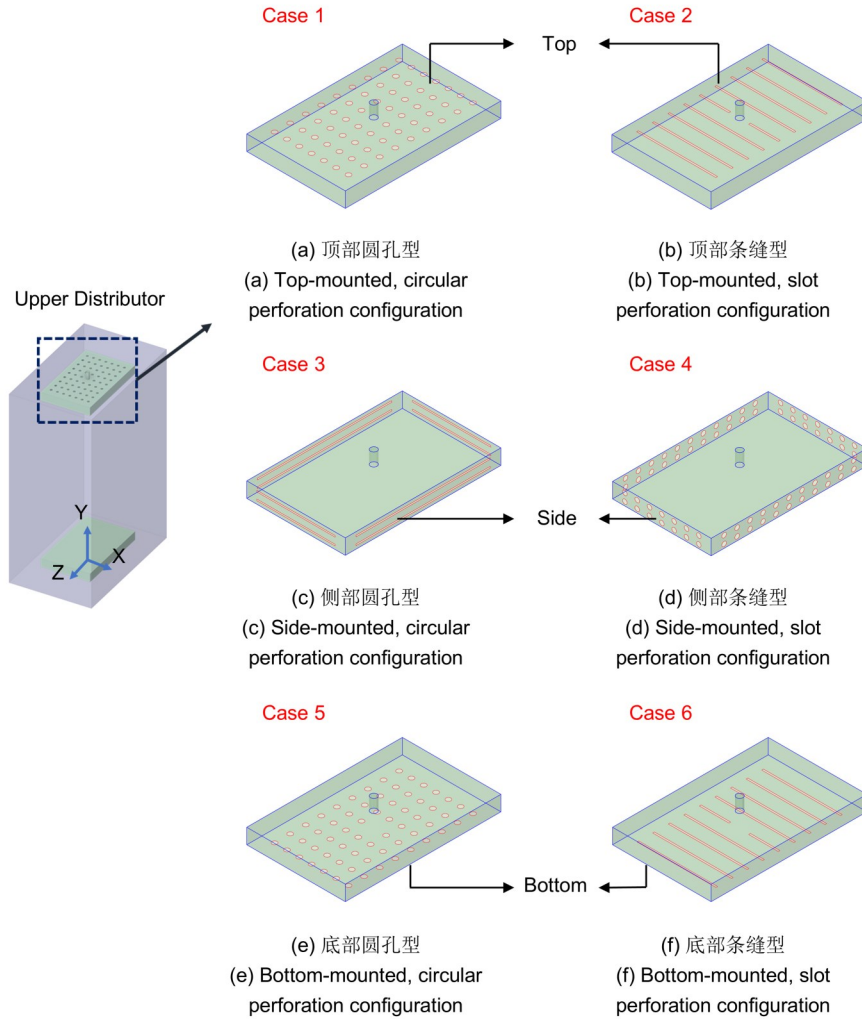


图2 盒式布水器开孔形式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of opening configurations of the box-type water distributor

1.2 数学模型

本研究的矩形储热水箱采用三维瞬态湍流模型,无内热源,为方便研究对模型做出一定简化:(1)水箱工作流体是牛顿流体;(2)流体的密度受温度变化的影响,其他物理性质视为恒定;(3)储热水箱外壁面视为绝热,不考虑与外界的换热;

(4)黏性耗散可忽略不计。

考虑上述假设,储热水箱的连续性控制方程、动量控制方程和能量控制方程为:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

动量方程

表1 六种工况下布水器结构参数

Table 1 Structural parameters of the water distributor for the six cases

工况编号	开孔位置	开孔形状	开孔率(%)	孔径(mm)	条缝尺寸(mm×mm)	开孔间距(mm)	布水器尺寸(mm×mm×mm)
Case 1	顶部	圆孔		11.25	—	X向: 28.5 Z向: 36	
Case 2	顶部	条缝		—	182×3.86	Z向: 36	
Case 3	侧部	圆孔	3.1	10.44	—	X向: 28.5 Y向: 17.5 Z向: 30	360×228×35
Case 4	侧部	条缝		—	X向: 182×3.13 Z向: 310×3.13	Y向: 17.5	
Case 5	底部	圆孔		11.25	—	X向: 28.5 Z向: 36	
Case 6	底部	条缝		—	182×3.86	Z向: 36	

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + ((\rho\vec{u}) \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) \right] + \rho g(3)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p \vec{u} T) = -\nabla \cdot q \quad (4)$$

$$q = -K \nabla T \quad (5)$$

在上述控制方程中， μ 为流体动力黏度，(N·s)/m²； $\vec{u}$ 为流体速度，m/s； ρ 为流体密度，kg/m³； p 为流体压强，Pa； $\rho\vec{g}$ 为体积力项； K 为流体导热系数，(W/(m·K))； C_p 为定压比热容，J/(kg·K)； T 为热力学温度，K。工作流体为水，水的密度随温度变化^[17]，拟合公式如式(6)所示。

$$\rho = 1.595 \times 10^{-5} T^3 - 5.880 \times 10^{-3} T^2 + 0.01775 T + 1000.3736 \quad (6)$$

1.3 边界条件和初始条件

布水器出流雷诺数 Re 确保在200-850之间^[16]，模拟过程中热水入口流量取0.196kg/s。根据民用建筑太阳能热水系统应用相关要求^[18]，入口温度设置为323.15K，水箱初始温度设为293.15K，流体以恒定流量和温度进入储热水箱。水箱壁面及布水器板面设为绝热、无滑移边界条件。

2 数值求解方法

2.1 计算方案

本研究借助Fluent数值仿真平台开展多工况数值模拟计算，获取不同运行条件下蓄热水箱内部温度场。通过有限体积法构建流动传热控制方程，计算采用压力基分离式求解框架，本研究采用Realizable k- ϵ 湍流模型，针对本文盒式布水器形成的射流、剪切及再循环流动特征，相比RNG k- ϵ 和SST k- ω 模型，该模型具有较突出的适应性，能

够较好描述不同开孔形式引起的流动与混合差异，同时具有较好的数值稳定性和计算效率，适用于本文多工况热分层研究。采用SIMPLE算法求解速度和压力耦合问题。动量、能量方程离散均采用二阶迎风格式。能量方程收敛迭代残差标准为 10^{-6} ，其他方程收敛迭代残差标准为 10^{-3} 。

2.2 网格与时间步长独立性验证

2.2.1 网格独立性验证

网格的数量与质量是确保模拟准确度的关键，过少的网格数量可能会导致模拟结果和实际出现较大偏差，过多的网格数量则会加重计算负担，因此必须通过网格独立性验证来确定合适的网格数量。本研究采用Fluent Meshing软件绘制非结构性网格，并确保网格整体质量在0.35以上。以Case 2为例，选取水箱0.5m高处中心点为监测点，绘制了3种不同的网格数量进行对比，分别为220664、491518、1159698。监测点温度随时间变化如图3所示。可以看出，网格数量达到491518时，继续增加网格数量不会对计算结果产生较大影响，综合考虑计算资源等因素，采用491518网格进行后续计算。本研究对其他工况采用相同的网格划分策略，分别进行了网格独立性验证，各工况均达到网格独立解，验证了该网格策略对不同开孔位置及开孔形状具有普遍适用性。

2.2.2 时间步长独立性验证

采用较小的时间步长可以提高瞬态模拟的精度，模拟时间成本也会相应增加。采用与网格独立性检验相同的条件，以Case 2为例，选取了0.5 s、1.0 s、2.0 s三种时间步长进行对比，测点温度如图4所示。可以看到0.5 s与1.0 s结果相差微小，

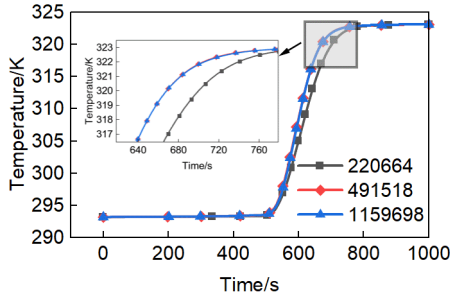


图3 网格独立性验证

Fig. 3 Mesh independence verification

将时间步长增至2.0 s时,误差较为明显,因此本研究采用时间步长1.0 s作为后续研究计算。

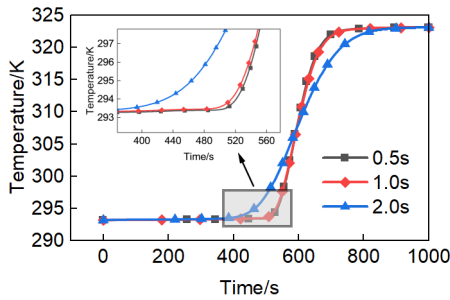


图4 时间步长独立性验证

Fig. 4 Time-step independence verification

2.3 模型验证

为了验证本研究数学模型的可靠性,与Gasque等人^[19]的实验数据进行对比验证,对比结果如图5所示,8个测点沿水箱高度均匀布置。为了评估模拟数据的准确程度,引入平均绝对百分比误差(MAPE)来反映数据误差大小,计算公式如式(7)所示,误差计算结果如表2所示。可以看出,8组数据MAPE值均小于1%,数值分析结果与实验结果吻合较好。因此,1.2节数学模型可以用于后续计算。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{T_k^s - T_k^e}{T_k^e} \right| \quad (7)$$

式中, n 为参与分析的数据样本总量, T_k^s 和 T_k^e 分别为第 k 个时间步长下的数值模拟温度与实测实验温度。

3 结果及分析

3.1 水箱蓄热性能评价参数

为增强不同工况下的可比性,对时间进行无量纲处理,如式(8)所示:

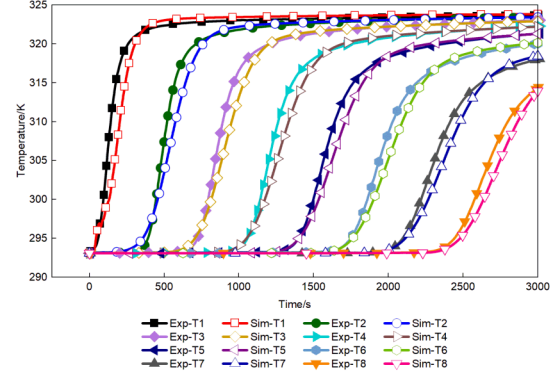


图5 实验与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated results

表2 实验与模拟结果的MAPE

Table 2 MAPE between experimental and simulated results

	MAPE
测点1	0.79%
测点2	0.45%
测点3	0.39%
测点4	0.38%
测点5	0.34%
测点6	0.30%
测点7	0.28%
测点8	0.29%

$$t^* = \frac{t}{t_0} \quad (8)$$

$$t_0 = \frac{V}{q} \quad (9)$$

式中, t^* 为无量纲时间, t_0 为蓄热总时间, s ; V 为水箱体积, L ; q 为水箱入口流量, L/s 。为量化水箱的热分层效果,本研究选取以下评价指标:

(1) 斜温层厚度

在蓄热水箱充放热过程中,冷、热水的掺混程度直接决定水箱温度分层性能。水的密度随温度升高而降低,高温水受浮升力作用向上聚集,低温水则下沉于水箱底部,冷热水区域交界处会形成温度梯度显著的过渡区域,该区域即为斜温层。工程上常用斜温层厚度量化水箱整体热分层效果,一般通过确定无量纲温度区间计算斜温层厚度。无量纲温度可以通过式(10)计算^[20]:

$$\Theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (10)$$

式中, T_c 为低温水温度, K ; T_h 为高温水温度, K 。本研究定义无量纲温度 $0.15 \leq \Theta \leq 0.85$ 所对应区

域厚度为斜温层厚度^[21]，该温度区间包含冷热流体之间主要温度变化区域，能够有效表征水箱内温度梯度较大的过渡区域，即式 (11)。

$$h_{tc} = h_{\Theta = 0.85} - h_{\Theta = 0.15} \quad (11)$$

(2) Ri 数

理查森数 (Ri) 是水箱浮力对流与强制对流惯性力的比值，可表示水箱的混合程度以及进口处冷热水的混乱程度，广泛用于评估储热水箱中的热分层效果。Ri 数定义如公式 (12) 所示^[22]：

$$Ri = \frac{g\beta_f H (T_{top} - T_{bottom})}{V^2} \quad (12)$$

式中， T_{top} 为水箱上部温度，K； T_{bottom} 为水箱下部温度，K； g 为重力加速度， m^2/s ； H 为水箱高度，m； β_f 为水的体膨胀系数， $1/K$ ； V 为斜温层区域内流体速度的体积加权平均值， m/s 。

(3) Str 数

在水箱蓄热工况中，分层数 (Str) 定义为：任意时刻温度梯度的平均值与充热过程中最大平均温度梯度的比值，如公式 (13) 所示^[23]：

$$Str = \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_t}{\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{max}} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_t = \frac{1}{J-1} \left[\sum_{i=1}^{J-1} \left(\frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta z} \right) \right] \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{max} = \frac{T_{in} - T_{ini}}{(J-1)\Delta z} \quad (15)$$

式中， J 为总节点数； $\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_t$ 为瞬时平均温度梯度； $\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{max}$ 为理论最大温度梯度； Δz 为相邻两节点间的间距； T_{in} 、 T_{ini} 依次分别为水箱进水温度与水箱初始水温。

3.2 布水器开孔形式对水箱热分层的影响

3.2.1 开孔形式对斜温层厚度的影响

六个工况的斜温层厚度变化如图6所示，从图中可以看到，顶部开孔型布水器 Case 1 和 Case 2 斜温层最薄，侧部开孔型 Case 3 和 Case 4 斜温层厚度次之，底部开孔型 Case 5 和 Case 6 斜温层最厚。顶部开孔型斜温层厚度相较侧部开孔型平均降低了 24.75%，相较底部平均降低了 58.02%，其中顶部条缝型 Case 2 较其他工况斜温层厚度最薄。顶部开孔及侧部开孔时，条缝型 Case 2 和 Case 4

所生成的斜温层更薄。底部开孔时，圆孔型 Case 5 所生成的斜温层更薄。顶部开孔时条缝型斜温层厚度相比圆孔型平均降低了 7.04%，侧部开孔时条缝型斜温层厚度相比圆孔型平均降低了 4.02%，底部开孔时圆孔型斜温层厚度相比条缝型平均降低了 10.85%。

在蓄热初期，受水箱入口来流扰动影响，水箱内部尚未构建起成型稳定的斜温层，斜温层整体厚度偏大。随着蓄热过程持续推进，入口流动扰动逐渐减弱，冷热水分层效果不断提升，斜温层厚度逐渐收缩减小，最终趋于稳定状态。其中，顶部和侧部开孔型在 $t^*=0.2$ 时开始稳定，而底部开孔型斜温层稳定时刻更晚，在 $t^*=0.5$ 时才开始稳定，之后随着蓄热过程进行，斜温层厚度逐渐增加，在蓄热末期高温区向下挤压斜温层，斜温层厚度开始下降。

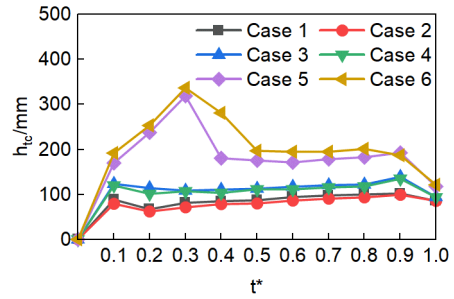


图6 斜温层厚度随无量纲时间的变化

Fig. 6 Variation of thermocline thickness with dimensionless time

3.2.2 开孔形式对 Ri 数的影响

六个工况的 Ri 数变化如图7所示。Ri 数可有效表征水箱浮力与混合力的比值，Ri 数越大，水箱热分层性能越好。由图可以看出，顶部开孔型 Case 1 和 Case 2 的 Ri 数最大，侧部开孔型 Case 3 和 Case 4 的 Ri 数次之，底部开孔型 Case 5 和 Case 6 的 Ri 数最小，其中顶部条缝型 Case 2 的 Ri 数较其他工况最大。顶部开孔及侧部开孔时，条缝型 Case 2 和 Case 4 的 Ri 数更大，底部开孔时，圆孔型 Case 5 的 Ri 数更大一些。

在蓄热过程初期，水箱顶部水温逐渐升温，顶部与底部温差变大，Ri 数逐渐增大，随着蓄热过程进行，水箱顶部温度与分层流速逐渐稳定，Ri 数也逐渐稳定。在水箱顶部和底部的温度稳定后，Ri 数主要受分层上流速的影响，流速越小，Ri 数越大。在蓄热末期，无量纲时间 $t^*=1$ 仅代表本次充热进水

过程结束,此时水箱底部仍存在少量斜温层,低温水体尚未被充分置换,竖直方向温度梯度依旧存在,故 Ri 数在 $t^*=1$ 时还未发生回落。

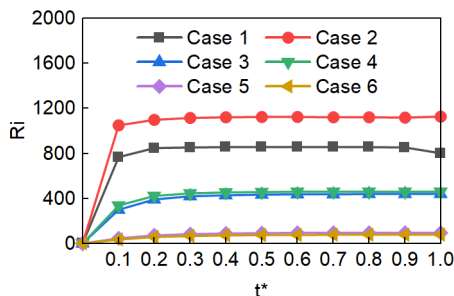


图7 Ri 数随无量纲时间的变化
Fig. 7 Variation of Ri number with dimensionless time

3.2.3 开孔形式对 Str 数的影响

六个工况的 Str 数变化如图8所示。 Str 越接近1,说明水箱分层效果越好。由图可以看出,顶部开孔型 Case 1 和 Case 2 的 Str 数最大,侧部开孔型 Case 3 和 Case 4 的 Str 数次之,底部开孔型 Case 5 和 Case 6 的 Str 数最小,其中顶部条缝型 Case 2 的 Str 数较其他工况最大。顶部开孔及侧部开孔时,条缝型 Case 2 和 Case 4 的 Str 数更大,底部开孔时,圆孔型 Case 5 的 Str 数更大一些。

在蓄热过程前期,水箱顶部进入热水,温度梯度平均值逐渐增大,随着蓄热过程进行,温度梯度平均值逐渐接近最大温度梯度值。在蓄热末期,无量纲时间 $t^*=1$ 代表本次充热进水过程结束,分层性能最优的布水工况 Case 1 和 Case 2 扰动微弱,斜温层能够平稳向下推进,在充热结束 ($t^*=1$) 时斜温层已先抵达水箱底部,轴向温度梯度相对其他工况衰减更快, Str 数随之下下降,而其余布水工况水流扰动更强,冷热掺混导致斜温层下移速率较慢,结束时刻水箱下部仍存在完整的温度分层结构,冷水尚未被充分置换,因此分层效率仍会保持稳定在接近1的较高数值更长一段时间。

3.2.4 开孔位置与孔口形状对热分层的协同影响

通过六种工况的斜温层厚度、 Ri 数和 Str 数的对比可以看到,盒式布水器开孔位置对水箱的热分层影响占主导因素。在盒式布水器顶部或侧部开孔时,条缝型孔口形状的热分层效果更好,开孔位置位于底部时,圆孔型孔口形状热分层效果更好。蓄热初期 $t^*=0.1$ 和蓄热末期 $t^*=0.9$ 时水箱温度云图及

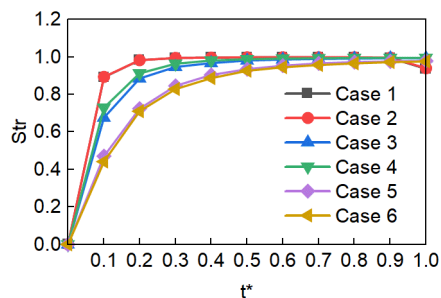


图8 Str 数随无量纲时间的变化
Fig. 8 Variation of Str number with dimensionless time

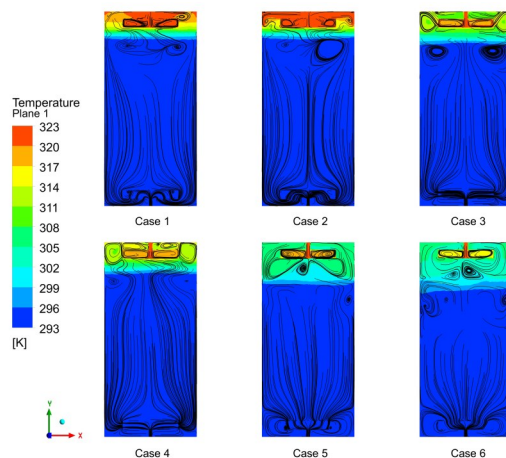


图9 水箱温度云图及流线分布 ($t^*=0.1$)
Fig. 9 Temperature contours and streamline distribution of the water tank at $t^*=0.1$

流线分布分别如图9和图10所示。

从温度云图及流线分布可以看出,顶部开孔型 Case 1 和 Case 2 的斜温层厚度最薄,热分层效果

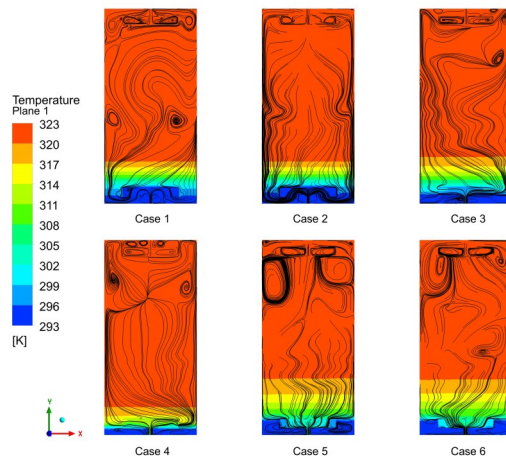


图10 水箱温度云图及流线分布 ($t^*=0.9$)
Fig. 10 Temperature contours and streamline distribution of the water tank at $t^*=0.9$

最好。蓄热初期 $t^*=0.1$ 时,流体由布水器顶部开孔流出后首先冲击水箱顶壁,并沿顶壁向两侧铺展,射流动量在转向和扩散过程中得到一定缓冲,局部回流主要集中在水箱顶部,未形成明显贯穿斜温层的流动路径,对斜温层的扰动较弱。侧部开孔型 **Case 3** 和 **Case 4** 热分层效果次之,侧向出流后流体沿水箱侧壁发生转向,并形成一定范围的回流与循环,使斜温层附近横向流动及局部卷吸作用增强。底部开孔型 **Case 5** 和 **Case 6** 热分层效果最差,底部出流更易向水箱主体区域发展并形成较大范围的循环流动,从而增强冷热流体之间的混合。随着蓄热过程的进行,蓄热末期 $t^*=0.9$ 时,斜温层逐渐向水箱下部移动,顶部和侧部开孔工况循环流动较为有序,对斜温层扰动较弱,而底部开孔工况存在更明显的流线弯折和大范围循环,使斜温层附近冷热流体交换增强,斜温层厚度也逐渐增加。

此外,条缝型和圆孔型的热分层效果受布水器开孔位置影响。从蓄热初期和末期的温度分布和流线图来看,顶部和侧部开孔时,流体在布水器腔体内转向和铺展过程中使射流动量得到降低,条缝型连续出流能够使流体沿较大的空间范围均匀展开,主体流线相对连续,圆孔型形成多个离散射流,局部回流及射流间相互作用更加明显,因此顶部和侧部开孔时条缝型热分层效果相对较好。底部开孔时缓冲作用较弱,射流保留的动量相对较大,圆孔型的多点分散出流能够将流动作用分散于多个局部区域,而条缝型连续出流更易形成较大范围的整体循环,对斜温层产生更明显的扰动,因此底部开孔时圆孔型热分层性能相对更优。

3.3 盒式布水器与传统H型布水器性能对比研究

当前工程常见水箱结构包含圆柱形与矩形两种,圆柱形水箱配套布水器以八角式、圆盘式为主,而针对矩形水箱H型布水器的应用最为广泛。因此本研究针对矩形水箱工程传统H型布水器结构,将盒式布水器对水箱热分层影响优劣与传统H型布水器对比,选取常见的对称H型布水器结构(**case 7**)^[24]应用于本矩形蓄热水箱中,结构如图11所示。在相同边界条件下与**Case 2**工况从斜温层厚度、 Ri 数和 Str 数三方面进行比较,图12~图14为斜温层厚度、 Ri 数和 Str 数对比结果。

由图可以看出,顶部条缝型盒式布水器结构**Case 2**相对传统H型结构**Case 7**,斜温层厚度平

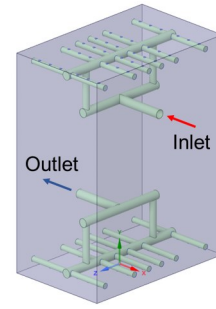


图11 用于矩形水箱的H型布水器结构 (**Case 7**)

Fig. 11 Configuration of the H-shaped water distributor for the rectangular tank (**Case 7**)

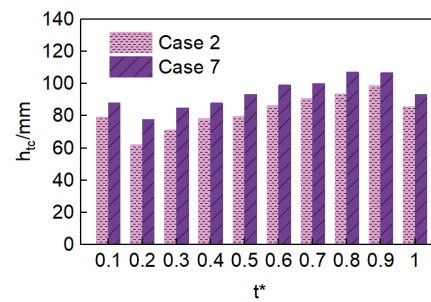


图12 **Case 2**和**Case 7**斜温层厚度对比

Fig. 12 Comparison of thermocline thickness between **Case 2** and **Case 7**

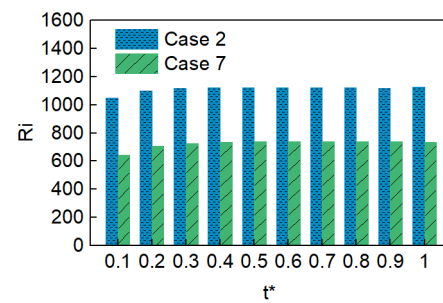


图13 **Case 2**和**Case 7** Ri 数对比

Fig. 13 Comparison of Ri number between **Case 2** and **Case 7**

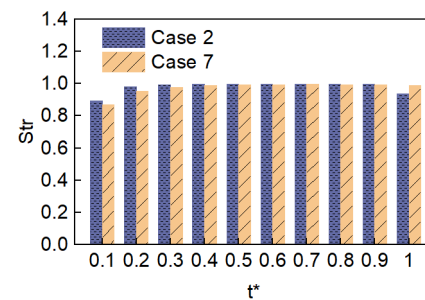


图14 **Case 2**和**Case 7** Str 数对比

Fig. 14 Comparison of Str number between **Case 2** and **Case 7**

均减少了12.2%， Ri 数更大，充热前中期Case 2的 Str 数更大，热分层效果更优。在充热结束($t^*=1$)时Case 2的 Str 数更小，表明斜温层更早到达水箱底部，相比Case 7的蓄热程度更完全，能够有效应用于矩形储热水箱中。从结构及出流机理来看，顶部条缝型盒式布水器能够先在腔体内对来流进行分配，流体由顶部条缝流出后沿顶壁向两侧均匀铺展。同时，条缝型连续分布式出流有利于扩大出流范围，减小局部射流作用，从而降低对水箱主体区域及斜温层的直接扰动。相比之下，传统H型布水器主要通过支管上的离散孔口出流，局部流动作用更为集中，易形成局部射流，增强冷热流体之间的混合。因此，顶部条缝型盒式布水器更有利于抑制垂向混合并维持稳定热分层。

4 结 论

本工作以矩形储热水箱为研究对象，提出了一种适用于水箱结构且能提高热分层性能的盒式布水器结构，研究了盒式布水器开孔位置及孔口形状对水箱内部热分层性能的影响，得出了以下结论：

(1) 水箱盒式布水器的开孔位置对水箱热分层性能影响最大，开孔位置通过改变射流的壁面缓冲程度及循环范围影响热分层，其中顶部开孔能够有效削弱射流动量并限制扰动范围，而底部开孔更易形成较大范围的循环流动，冲击水箱主体区域，增强冷热流体混合。顶部开孔的布水器热分层效果最好，侧部开孔效果次之，底部开孔效果最差。顶部开孔斜温层厚度相较侧部、底部开孔分别平均减小了24.75%、58.02%，且 Ri 数和 Str 数整体上更大。

(2) 盒式布水器孔口形状的热分层效果受开孔位置的影响。不同开孔位置改变了射流进入水箱主体时的动量水平及其扩散方式，顶部、侧部开孔工况下，条缝型斜温层厚度较圆孔型分别平均减小了7.04%、4.02%。底部开孔时，圆孔型斜温层厚度较条缝型平均减小了10.85%。顶部和侧部开孔时，射流经转向及壁面缓冲后动量衰减较多，条缝型连续分布式出流更有利于均匀铺展并减弱局部扰动。底部开孔时射流保留动量相对较大，圆孔型多点分散出流能够将流动作用分散至多个局部区域，从而减弱集中冲击。

(3) 顶部条缝型盒式布水器通过腔体均流及连续分布式出流削弱了射流动量和集中度，减小对斜

温层的直接扰动，更有利于维持水箱稳定的热分层结构。相较传统H型结构布水器，顶部条缝型盒式布水器结构的热分层效果更好，斜温层厚度平均减少了12.2%， Ri 数和 Str 数均有所提高，在无量纲时间 $t^*=1$ 时相比传统H型布水器蓄热程度更完全，可有效应用于矩形储热水箱中。

本研究为矩形储热水箱布水器结构与热分层性能优化提供了新的思路，同时进一步探究了布水器开孔结构与孔口形状的交互影响机制。后续将围绕盒式布水器在多分区储热水箱及变工况条件下的应用性能开展深入研究。

参 考 文 献

- [1] ZAAFOURI W, AMARA W B, BOUABIDI A, et al. Advancements and integration strategies of solar water heaters in buildings: A comprehensive review[J]. *Energy Nexus*, 2025, 20: 100535. DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100535.
- [2] 周洪, 罗伊默, 丁晓芹, 等. 全球储热技术科学知识图谱与前沿趋势分析[J]. *储能科学与技术*, 2026, 15(3): 1039-1053. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0096.
ZHOU H, LUO Y M, DING X Q, et al. Scientific knowledge mapping and emerging trend analysis of global thermal energy storage technologies[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2026, 15(3): 1039-1053. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0096.
- [3] IZGI B, ARSLAN M, İGCI A A, et al. A numerical investigation of the influence of an obstacle inside the vertical mantled hot water storage tank on the thermal stratification under discharging operation condition for domestic solar energy applications[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2026, 73: 104687. DOI:10.1016/j.tsep.2026.104687.
- [4] HADDOUCHE M R, VELASCO F J S, ILLÁN F, et al. Numerical approach and experimental investigation of a stratified hot water storage tank for domestic hot water production[J]. *Results in Engineering*, 2024, 24: 103221. DOI:10.1016/j.rineng.2024.103221.
- [5] 凡烈, 邢永杰, 刘芳, 等. 储热系统优化对延庆冬奥村供暖经济性的影响[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(6): 2057-2067. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0158.
FAN L, XING Y J, LIU F, et al. Thermal storage system optimization toward the economic viability of heating systems in Yanqing Winter Olympics Village[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(6): 2057-2067. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0158.
- [6] GAO M, SHAO S Y, XIANG Y T, et al. Semi-analytical model of a large-scale water pit heat storage for the long-term thermal applications[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 307: 113975. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.113975.
- [7] XU X Y, CHANG C, DONG J S, et al. Analysis and optimization of thermal storage performance of single tank thermocline layer with

- built-in insulation board[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 97: 112712. DOI:10.1016/j.est.2024.112712.
- [8] WANG C Y, ZHU Y C, XIONG Z W, et al. An inlet design for enhancing thermal stratification in heat storage tanks[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 161: 121932. DOI:10.1016/j.est.2026.121932.
- [9] REN Y C, REN Z L, WANG J X, et al. Response surface methodology-based multi-objective optimization of uniform flow orifice plate in stratified thermal water pit for improving energy storage efficiency[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 141: 119339. DOI:10.1016/j.est.2025.119339.
- [10] ZHAO J, ZHAI X L, ZHANG X M, et al. Experimental study on dynamic thermal performance of seasonal hot water storage tank in a solar heating system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 128424. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.128424.
- [11] LIU D X, ZHANG W, GU D, et al. Experimental study on a new type of water storage tank for geothermal heating[J]. *Geothermics*, 2024, 118: 102918. DOI: 10.1016/j.geothermics.2024.102918.
- [12] ZACHÁR A. Investigation of the interaction of negatively buoyant jets with stable thermal layers inside hot fluid storage tanks[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 98: 113133. DOI: 10.1016/j.est.2024.113133.
- [13] REN Y C, REN Z L, ZOU G, et al. Experimental investigation on the thermal performance of a novel inverted pyramid-shaped simultaneous cold and heat storage water tank[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2025, 219: 110234. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2025.110234.
- [14] ANACREONTE A V, VITOBBELLO R, MUSTO M. Impact of inlet fluctuations on the stratification of a sensible thermal energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2025, 252: 123484. DOI:10.1016/j.renene.2025.123484.
- [15] LIU B H, GAO W F, LI Q, et al. Quantification of thermal stratification and its impact on energy efficiency in solar hot water storage tanks[J]. *Energy*, 2025, 326: 136243. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136243.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 供冷供热用蓄能设备技术条件: JG/T 299-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specifications of thermal storage equipment for cooling and heating: JG/T 299-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [17] LI J R, DING L X, WANG Y, et al. Thermal performance of a solar water tank with variable inlet/outlet under various charging strategies[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 246: 122900. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.122900.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑太阳能热水系统应用技术标准: GB 50364-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for solar water heating system of civil buildings: GB 50364-2018[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018.
- [19] GASQUE M, GONZÁLEZ-ALTOZANO P, MAURER D, et al. Study of the influence of inner lining material on thermal stratification in a hot water storage tank[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 75: 344-356. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2014.10.040.
- [20] YANG Y F, QIN H F, CHEN X, et al. Optimization of continuous heat discharge from a thermal storage reservoir under extreme weather conditions using a cascaded water-intake strategy[J]. *Renewable Energy*, 2026, 270: 125900. DOI: 10.1016/j.renene.2026.125900.
- [21] LIU F, FANG S, FU L, et al. Thermal stratification study of thermal energy storage with small storage temperature difference[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 170: 122804. DOI: 10.1016/j.est.2026.122804.
- [22] XU X, LI Y H, ZHAO X D, et al. Parametric analysis and optimization of A novel indirect solar energy storage tank[J]. *Renewable Energy*, 2025, 252: 123507. DOI:10.1016/j.renene.2025.123507.
- [23] KHURANA H, TIWARI S, MAJUMDAR R, et al. Comparative Evaluation of Circular Truncated-Cone and Paraboloid Shapes for Thermal Energy Storage Tank based on Thermal Stratification Performance[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 34: 102191. DOI:10.1016/j.est.2020.102191.
- [24] 朱晓明. 卧式蓄能装置结构优化设计与传热性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- ZHU X M. Research on the Optimization Design and Heat Transfer Performance for Horizontal Energy Storage Device[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.