

移动挡板对熔盐蓄热特性的模拟研究

敖雪莲, 朱志伟, 周瑞睿

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为对单罐熔盐蓄热系统蓄热性能进行优化, 探究了在蓄热罐内设置移动挡板对蓄热过程的影响规律。采用数值模拟方法研究了移动挡板对罐体内熔盐流动换热的影响, 基于动网格及网格自适应技术模拟挡板的动态运动, 对比了设置挡板前后的蓄热过程, 分析了移动挡板对蓄热介质流动传热的影响, 在此基础上进一步探讨了移动挡板的移动速度及尺寸对系统蓄热性能的影响。结果表明: 相比于无挡板的情况, 移动挡板能够促进熔盐的流动换热, 提升罐体的蓄热能力; 挡板的尺寸对蓄热过程的影响较小, 而挡板的移动速度对其则有显著影响。在研究的参数范围内, 增加挡板后系统最多可减少 17.65% 的蓄热时间, 蓄热效率最高提升 11.65%。进一步的研究结果发现, 当移动挡板始终处于斜温层上方时能够促进熔盐的换热, 而处在斜温层下方时则会削弱换热效果。因此, 蓄热罐内设置移动挡板是提升熔盐蓄热系统性能的有效方式, 挡板的速度及与斜温层的位置关系是影响蓄热效率的关键因素。

关键词: 熔盐蓄热; 动网格; 移动挡板; 热性能

中图分类号: TK 513.5 文献标志码: A

Simulation study on heat storage characteristics of molten salt by moving baffle

AO Xuelian, ZHU Zhiwei, ZHOU Ruirui

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to optimize the heat storage performance of the single-tank molten salt heat storage system, the influence law of setting moving baffles in the storage tank on the heat storage process was discussed. The influence of the moving baffle on the heat transfer of molten salt flow in the tank was studied by numerical simulation method. The dynamic movement of the baffle was simulated based on

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206103); 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1430400)

第一作者: 敖雪莲(1998—), 女, 硕士研究生。研究方向: 强化传热。E-mail: aoxuelian1017@163.com

通信作者: 周瑞睿(1992—), 男, 副教授。研究方向: 热辐射算法、热对流机理、太阳能热利用。E-mail: zhouriurui@usst.edu.cn

引文格式: 敖雪莲, 朱志伟, 周瑞睿. 移动挡板对熔盐蓄热特性的模拟研究[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(3): 278-287.

Citation: AO Xuelian, ZHU Zhiwei, ZHOU Ruirui. Simulation study on heat storage characteristics of molten salt by moving baffle[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(3): 278-287.

the dynamic grid and grid adaptive technology. The heat storage processes before and after the setting of the baffle were compared, and the influence of the moving baffle on the heat transfer of the heat storage fluid flow was analyzed. On this basis, the influence of the moving speed and size of the moving baffle on the heat storage performance of the system was further discussed. The results show that the moving baffle can promote the flow heat transfer of molten salt and enhance the heat storage capacity of the tank compared with the case without baffle. The size of the baffle has a little effect on the heat storage process, while the moving speed of the baffle has a significant effect on it. Within the range of parameters studied, the thermal storage time of the system can be reduced by up to 17.65% with the addition of the baffle, and the thermal storage efficiency can be increased by up to 11.65%. Further results found that the heat transfer of molten salt can be promoted when the moving baffle is always above the thermocline, while it is weakened when it is below the thermocline. Therefore, setting up moving baffles in the storage tank is an effective way to improve the performance of the molten salt heat storage system. The speed of the baffles and their positional relationship with the thermocline are the key factors affecting the heat storage efficiency.

Keywords: *heat storage of molten salt; dynamic grid; moving baffles; thermal performance*

储能技术是解决可再生能源间歇性和不稳定性问题的关键技术之一,有助于实现能源供需平衡,提高能源利用效率^[1-5]。单罐熔盐蓄热系统是一种以熔盐作为蓄热工质,将高温和低温熔盐共同储存在一个罐体中的蓄热系统。由于工作温度范围广、占地面积小、成本低等优点,在电力调峰、余热回收、太阳能热利用等领域已有广泛的应用^[6-10]。在单罐蓄热系统中,冷热流体依靠密度差和重力形成了稳定的冷热流体分层,其中高温流体到低温流体的温度跃变区域称为斜温层。斜温层的稳定性会影响系统的有效蓄热量,从而影响系统的蓄热性能^[11-14]。因此,如何改善单罐蓄热系统的蓄热性能是研究的焦点。

蓄热罐蓄热性能的提高多数通过改善蓄热罐结构来调整内部流体的流动行为,从而得到理想的热分层和斜温层厚度,最终实现蓄热效率的提升。Ievers等^[15]通过数值分析方法研究了蓄热罐形状和运行条件对蓄热效果的影响,结果表明,增加罐体的纵横比并降低进出口流量能够减小斜温层厚度,提高蓄热罐的热分层水平和蓄热效率。为探究在罐内添加挡板对蓄热罐蓄热性能的影响,Erdemir等^[16]通过实验和数值分析方法,研究了蓄热罐内4种不同类型挡板的位置对蓄热性能的影响,经计算分析得到罐内有挡板且将挡板放置在距离罐底200~300 mm的位置能够取得最好的热分层效果,提高蓄热量,从而提升蓄热性

能。Paing等^[17]模拟研究了竖直挡板的长度和位置对蓄热罐内对流换热的影响。最终结果表明,挡板的参数对流动有显著影响,当其长度较长且位置靠近壁面时,可有效抑制罐体的热损失,从而显著提升蓄热罐的蓄热性能。为进一步探究挡板对蓄热罐蓄热性能的影响,以得出最优的蓄热罐配置,Gao等^[18]通过实验模拟研究了带孔水平挡板对蓄热罐热分层特性的影响,通过数值分析不同的挡板位置和孔径大小对理查森数、分层数和混合数3个评价指标的影响,最终得出挡板至蓄热罐底部的距离与蓄热罐高度的比值为0.79、孔径与挡板直径的比值为0.80,是蓄热罐的最优参数。Bouhal等^[19]研究了两种构型的蓄热罐内挡板数量、位置和方向对蓄热过程中的流动特性和热分层的影响,结果表明,当挡板位于蓄热罐的中间、顶部,或30°角倾斜位置时,两种蓄热罐得到最佳热分层和热效率,而挡板的数量对其影响不大。

罐体内设置固定挡板并优化其结构可以提高蓄热罐的热分层水平,实现蓄热量的提高,进而提高系统蓄热性能。蓄热过程中,固定挡板对不断向出口移动的斜温层产生的持续性影响较小,而移动挡板对罐体内流道的持续挤压和扰动促进了流体的流动,从而促进热量传递,持续影响移动的斜温层。Bouzaher等^[20]研究了球形蓄热罐内绕罐轴被动式移动的挡板对蓄热罐蓄热过程的影响,移动挡板将冷热流体隔离,因而冷热流体之

间没有直接混合换热, 结果表明, 移动挡板的存在能够使罐体有更好的热分层效果及较小的斜温层厚度。为了进一步促进冷热流体之间的流动换热, 本文在单罐熔盐蓄热罐内设置了将冷热熔盐不完全隔离的移动挡板。一方面, 移动挡板对冷热熔盐及斜温层区域产生扰动作用; 另一方面, 冷热熔盐会发生混合, 进一步强化换热, 从而提升罐体的蓄热性能。本文分析了移动挡板对系统蓄热特性的影响, 并进一步讨论了挡板移动速度、尺寸, 以及挡板与斜温层的位置关系对蓄热效率的影响。

1 研究方法

1.1 物理模型

以一个柱型熔盐蓄热罐为研究对象, 构建其二维罐体结构图, 如图 1(a) 所示。取蓄热罐直径 D 为 0.1 m, 高度 H 为 0.25 m, 进出口的管道直径为 0.01 m, 距离罐顶部 h 为 0.02 m 处加装一块可移动挡板用于增强扰动, 挡板直径 d 为 0.08 m。初始时刻, 罐内蓄满低温熔盐, 并以固定流量从罐体顶部进口向蓄热罐内填充高温熔盐, 同时排出罐内低温熔盐。与此同时, 罐内的移动挡板开始匀速向下运动, 直至高温熔盐全部充满罐体。

可以预见, 改变挡板的移动速度会直接影响冷热流体的流速, 进而影响冷热熔盐的流速; 而挡板对于流道的挤压作用, 亦会在挡板两侧缝隙起到加快冷热熔盐流动的作用。因此, 挡板的尺寸和速度都会影响熔盐的换热过程。

1.2 数学模型

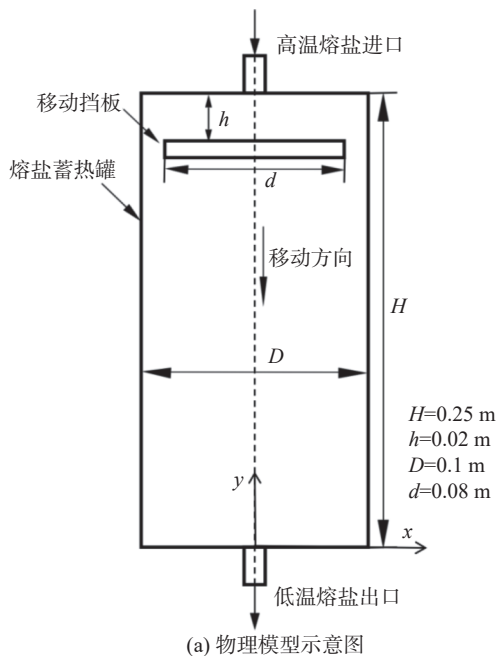
熔盐蓄热罐采用的是二维、瞬态湍流模型, 为简化计算, 本文作出以下假设:

- 蓄热罐入口采用均匀速度分布边界条件;
- 液态工质视为不可压缩流体;
- 忽略挡板的吸热作用;
- 忽略流体内部的黏性耗散效应。

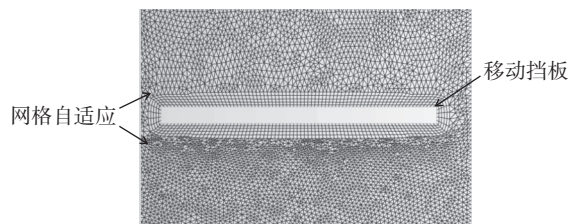
考虑上述假设, 蓄热罐的连续性控制方程、动量控制方程和能量控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} - \rho \beta (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{g} \quad (2)$$



(a) 物理模型示意图



(b) 动网格示意图

图 1 熔盐蓄热罐示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the molten salt heat storage tank

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) \quad (3)$$

式中: ∇ 为 Nabla 算子; $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为熔盐密度; t 为时间; p 为静压; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; β 为热膨胀系数; T 为热力学温度; T_{ref} 为参考热力学温度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; c_p 为比定压热容; λ 为热导率。

选择 Standard $k-\varepsilon$ 模型进行计算, 其湍流动能方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍流耗散率方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: k 为湍流动能; u_j 为速度分量; μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; Pr_k 为湍流动能的普朗特数; G_k 和 G_b 为由于浮力、速度梯度而产生的湍流动能; ε 为湍流动能的耗散率; Pr_ε 为湍流耗

散率的普朗特数; C_{1e} 、 C_{2e} 和 C_{3e} 为经验常数。

1.3 边界条件及计算方法

本文以太阳盐(质量比为 60% 的硝酸钠, 40% 的硝酸钾)为工质, 对蓄热系统的性能进行研究。太阳盐的物性随着温度而变化, 会影响斜温层厚度。因此, 需要考虑太阳盐的密度、比定压热容、动力黏度及热导率与温度之间的函数关系, 其具体关系式如表 1 所示^[21]。

表 1 熔盐热物性参数

Tab.1 Thermal property parameters of molten salt

热物性参数	参数计算公式
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho = 2\,263.723\,4 - 0.636T$
比定压热容 $c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_p = 1\,396.018\,2 + 0.172T$
动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\mu = 7.551 \times 10^{-2} - 2.776 \times 10^{-4}T + 3.5 \times 10^{-7}T^2 - 1.474 \times 10^{-10}T^3$
热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\lambda = 0.391\,1 + 1.9 \times 10^{-4}T$

罐内蓄满初始温度 T_{in} 为 603.15 K 的熔盐, 温度 T_{in} 为 693.15 K 的高温熔盐以流速 $v=0.01\text{ m/s}$ 的速度从进口流入罐体, 同时, 熔盐以相同速度从出口流出。罐体壁面设定为绝热无滑移壁面。

本文通过商业软件 Fluent 进行模拟计算, 采用双精度求解器和 PISO 算法, 对流项的离散应用二阶迎风格式, 重力方向为沿 y 轴的负方向。在模拟过程中, 压力和动量的松弛因子为 0.3, 能量的松弛因子为 0.5。模型计算的难点在于生成可有效持续计算的动网格。本研究依靠动网格及网格自适应技术实现网格的实时更新以及节点的重新分配, 并采用动态自适应法, 每 20 步对网格进行一次更新, 网格存储设置中, 存储数设置为 5, 挡板周围区域网格如图 1(b) 所示。

2 模型验证

Zachár 等^[22]通过实验, 研究了含有固定挡板的蓄热罐体内部的充热储能过程, 并采用添加染料的方法观察介质的热分层现象, 最终得到了介质内部的温度分布情况。为了验证本工作的可靠性, 首先模拟了 1/2 直径位置处介质温升随罐体深度的变化, 并将结果与文献 [20] 中的实验值进行了对比, 如图 2 所示。由图可以发现, 模拟结果与实验值吻合较好。

针对本文问题进行了网格数和时间步长的无

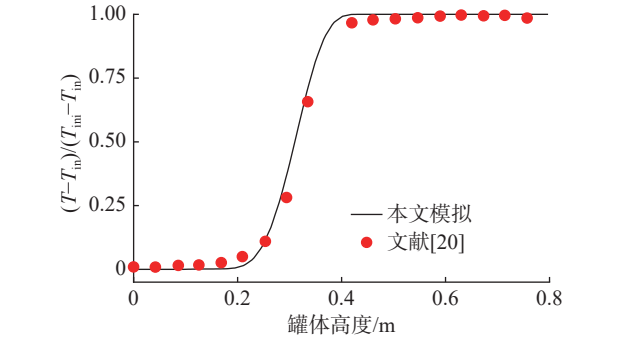


图 2 无量纲温度随蓄热罐高度的变化

Fig.2 Variation of dimensionless temperature with the height of the heat storage tank

关性验证, 考虑到计算效率及准确性, 最终取网格数为 38952、时间步长为 0.04 s 进行计算并得到结果。

3 结果与讨论

本文模拟了无挡板和有移动挡板的单罐熔盐蓄热系统的蓄热过程, 分析了移动挡板对蓄热系统性能的影响。在有挡板的情况下, 分别取挡板的移动速度为 0.000 5、0.000 8、0.001 0、0.001 3 m/s 时, 以及挡板直径为 0.07、0.08、0.09 m 时的工况进行对比研究, 具体计算方案如表 2 所示。

表 2 计算方案

Tab.2 Calculation schemes

工况	挡板直径/m	挡板移动速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	0.07	0.000 5
2	0.07	0.000 8
3	0.07	0.001 0
4	0.07	0.001 3
5	0.08	0.000 5
6	0.08	0.000 8
7	0.08	0.001 0
8	0.08	0.001 3
9	0.09	0.000 5
10	0.09	0.000 8
11	0.09	0.001 0
12	0.09	0.001 3

3.1 挡板对熔盐流动换热的影响

首先对无挡板和有移动挡板时单罐蓄热系统内熔盐的流动换热特性进行了模拟。图 3 为系统蓄热过程中无挡板和有移动挡板时罐内的流线

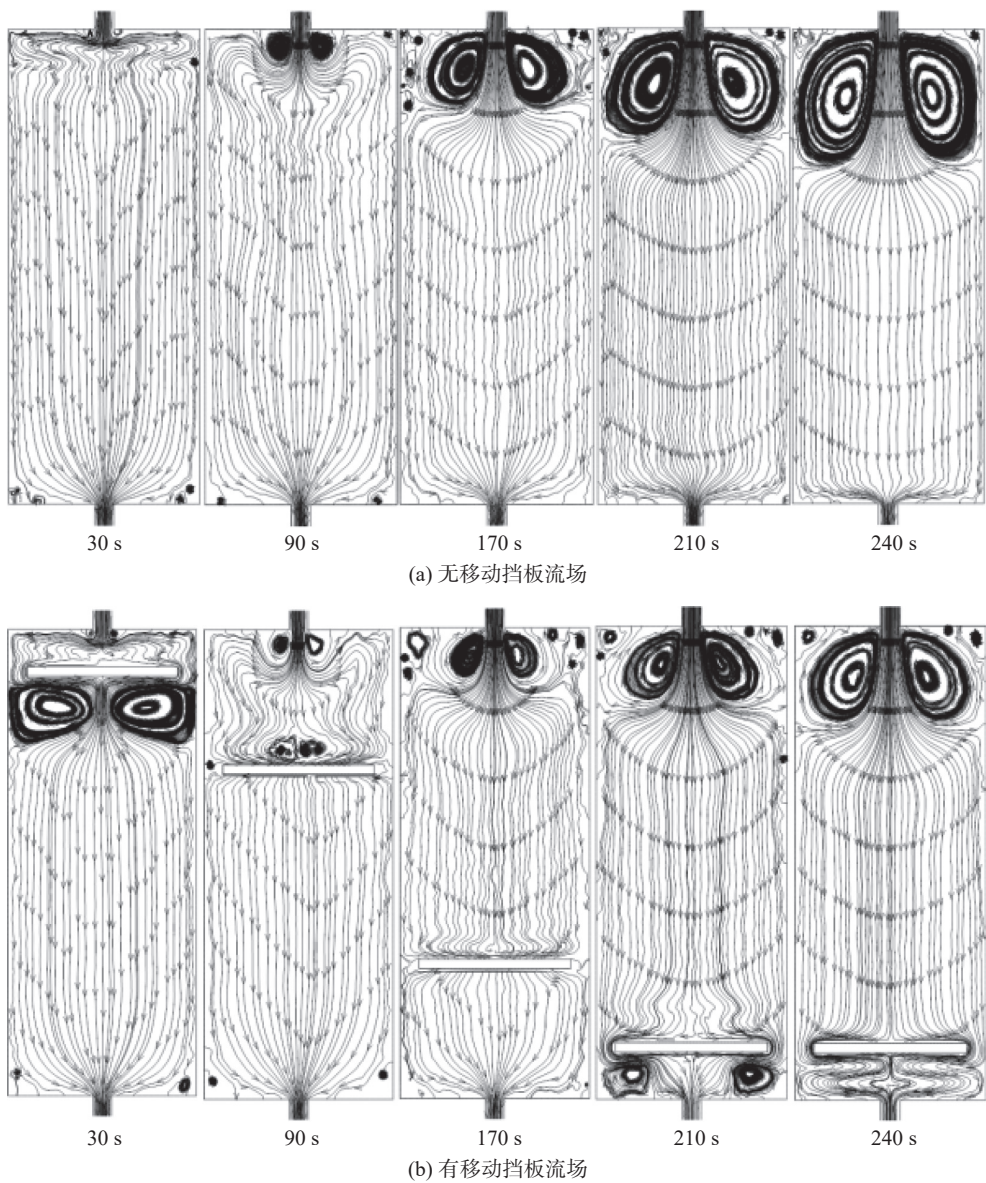


图3 蓄热罐的流线图

Fig.3 Flow diagram of the heat storage tank

图，通过流场分析移动挡板对熔盐流动特性的影响。由图可见，罐内加入移动的挡板后，挡板改变了流体的流动情况，对流体产生扰动，进而影响冷热流体交汇。蓄热初期，高温熔盐以一定速度流入罐体，在无挡板情况下，入口处的流速比较大，使得顶部区域流体剧烈混合。而有移动挡板的情况下，流入的高温熔盐流经移动挡板后由两边的环隙向下流动，同时挡板向下移动对挡板下方的熔盐形成扰动，并在挡板的挤压作用下形成涡流。随着蓄热过程的推进，挡板远离顶部区域，两种情况下入口区域产生的涡流逐渐变大，罐体内部的流场稳定发展。而随着挡板下方熔盐的流速逐渐提高，挡板的挤压作用逐渐变小，导

致涡流变小。添加挡板对于流道的影响主要是持续运动的挡板与静止流体之间存在速度差，使得挡板对于下方流体产生一定的挤压作用，进而导致了涡流产生。

在移动挡板的扰动和挤压作用下，熔盐流速有显著变化。图4为罐内有无挡板时熔盐平均流速随时间的变化。由图可见，随着蓄热过程的进行，熔盐的平均流速在逐渐增加，加入移动挡板后，其平均流速有明显提升。在蓄热后期，挡板停止运动，流速增幅有所减小，说明移动挡板能够促进内部熔盐的流动，进而提升熔盐的平均流速。

图5是系统蓄热过程中无移动挡板和有移动挡板时罐内的温度云图，通过温度场进一步分析

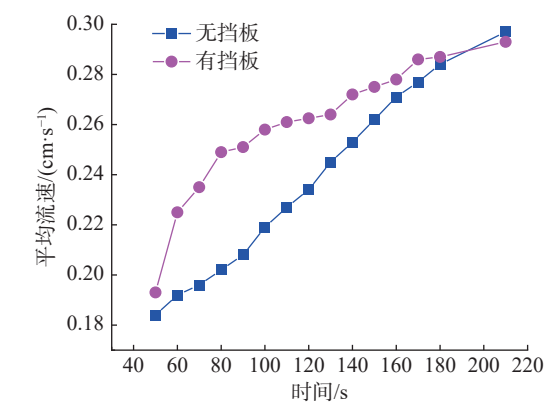


图 4 有无挡板时的平均流速变化

Fig.4 Variation of average flow rate with or without baffle

蓄热过程中熔盐的温度分布情况。在无挡板罐体内，在蓄热初期 30 s 时，高温熔盐流入罐体，高低温熔盐存在较大温差，产生大温度梯度，初步出现了温度分层现象，在 90 s 左右基本形成了稳定的斜温层。而在有移动挡板的罐体内，由于挡板移动带动了周边间隙的高低温熔盐的对流，引起的流体扰动使得热量传递更快，推进了高温熔盐在轴向方向的传热，所以挡板周围的斜温层更厚。随着时间的推移，两种情况下斜温层均逐步从蓄热罐的顶部向底部移动。有移动挡板的罐体在 170 s 和 210 s 时，挡板上层中间和底部两侧有

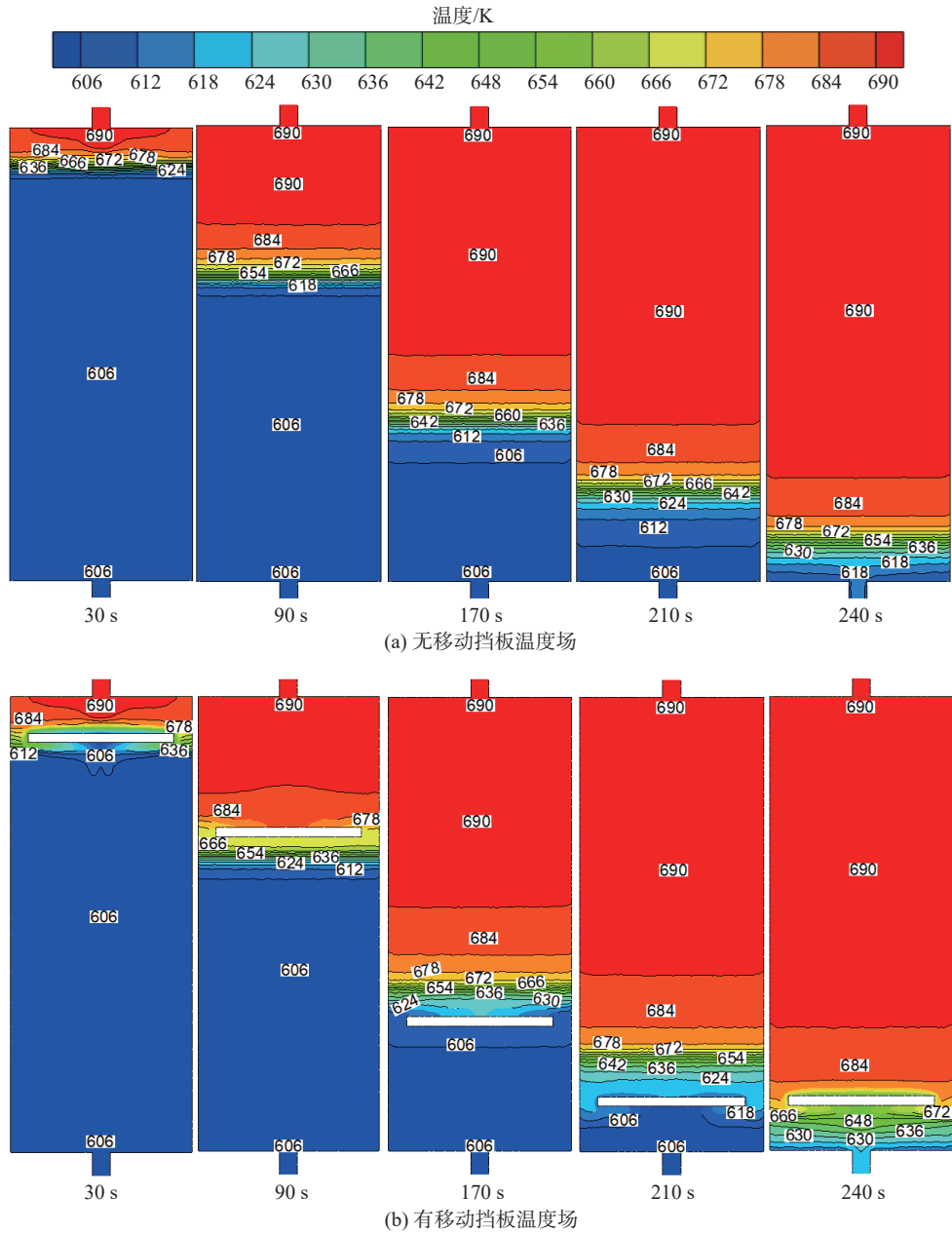


图 5 蓄热罐的温度分布图

Fig.5 Temperature profile of the heat storage tank

明显的吸附流作用。在 240 s 时蓄热过程即将结束，有移动挡板的蓄热罐的出口温度明显高于无挡板的熔盐罐的出口温度。最后，随着斜温层流出罐体，高温熔盐最终全部储存在罐内，出口温度与入口温度相同并保持稳定，蓄热过程结束。

挡板在斜温层区域的运动能够实现对该区域的扰动，促进温度层之间的热量传递。图 6 表示的是有无挡板时努塞尔数 Nu 随时间的变化， Nu 由式 (6) 可得^[23-25]：

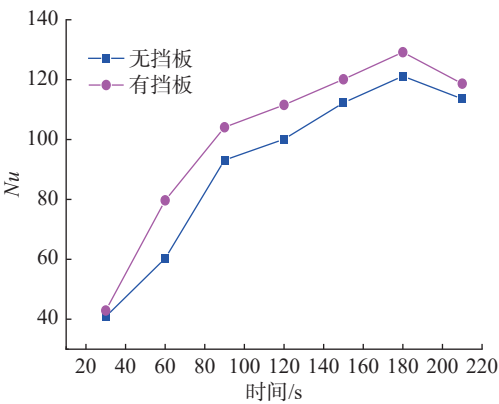


图 6 有无挡板时的努塞尔数变化
Fig.6 Variation of Nusselt number with or without baffle

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^m \tag{6}$$

$$Gr \cdot Pr = \frac{g \beta \Delta T l^3}{\nu^2} \frac{\nu}{a} = \frac{g \beta \Delta T l^3}{a \nu} \tag{7}$$

式中： C 和 m 为常数，根据流动状态 C 取 0.54， m 取 0.25； Gr 为格拉晓夫数； Pr 为普朗特数； ΔT 为流体温差； l 为特征长度； ν 为运动黏度； a 为热扩散系数。

由图 6 可以观察到， Nu 呈现出先缓慢增长后下降的趋势。在蓄热初期，高温熔盐进入罐内，由于挡板的存在，靠近板的熔盐会沿着挡板向两边流动，高温熔盐的热量既沿着竖直方向向下层层传递，同时也向两边传递。挡板的移动使得流体之间掺混的机会更多，不同温度梯度的熔盐之间接触面增加，因此，传热效果得到增强， Nu 逐步增长。大约在 180 s 时， Nu 开始有下降趋势，这是因为到后期流体温度分布逐渐变得均匀，罐内温差变小，对流效果逐渐减弱，低温熔盐流出罐体，高温熔盐逐步占据了整个罐体。由图 6 还可以发现，移动挡板的存在能够显著提升介质流动的 Nu ，实现对蓄热过程的强化传热。

3.2 挡板对罐体蓄热效率的影响

无挡板的蓄热罐完成蓄热所需要的时间为

408 s，表 3 记录了有挡板的蓄热罐在不同工况下的蓄热时间。结合表 2 可以看出，挡板移动速度为 0.0005 m/s，直径为 0.07 m 时，蓄热用时最少，节省了 17.65% 的蓄热时间，这说明移动挡板能够促进罐内熔盐的流动和传热。

表 3 不同工况蓄热时间
Tab.3 Heat storage time for different working conditions

工况	蓄热时间/s	节省时间比率/%
1	336	17.65
2	374	8.33
3	404	0.98
4	480	-17.65
5	348	14.71
6	372	8.82
7	392	3.92
8	478	-17.16
9	338	17.16
10	362	11.27
11	376	7.84
12	466	-14.22

蓄热罐的蓄热效率是评价其蓄热性能的重要参数，在单罐熔盐蓄热系统中，可以将蓄热能力定义为熔盐进出口温度差与进口温度和初始温度差的比^[26-27]，通过式 (8) 计算蓄热罐的蓄热效率，依据时间变化取其均值。

$$\eta_1(t) = \frac{T_{in} - T_{out}(t)}{T_{in} - T_{ini}} \tag{8}$$

式中： η_1 为蓄热罐的蓄热效率； T_{out} 为熔盐出口温度。

经计算，无挡板时蓄热效率为 61.78%，罐内设置移动挡板后，蓄热效率能够提升至 73.43%，且挡板的移动速度和尺寸会影响蓄热效率的大小。图 7 是直径为 0.07 m 的挡板以不同速度移动时，罐体的蓄热时间和蓄热效率随速度的变化情况。由图中可以看出，随着挡板移动速度的增大，完成蓄热所需要的时间在逐步增加，蓄热效率在逐步下降，挡板直径为 0.08 m 和 0.09 m 时的模拟结果表现出类似的趋势。相比于无挡板的情况，有移动挡板的系统蓄热效率最多能够提升 11.65%。同时，当 3 种不同直径的挡板在同一速度下移动时，其蓄热效率的最大差值为 2.67%。由此说明，相比于挡板的移动速度，挡板的直径对蓄热效率的影响较小。

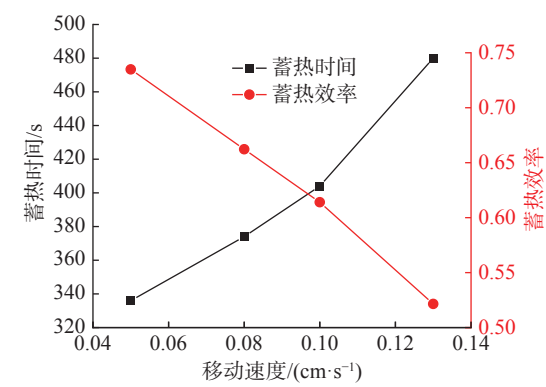


图7 不同移动速度挡板的蓄热时间和蓄热效率

Fig.7 Heat storage time and heat storage efficiency of baffle with different moving velocities

为进一步阐明挡板的移动速度对蓄热效率影响的原因，图8给出了不同移动速度下挡板与斜温层的关系。随着蓄热过程的进行，当移动速度为0.0005 m/s和0.001 m/s时，挡板始终保持在斜

温层的上方移动；当移动速度为0.0013 m/s时，挡板穿过斜温层并在后期保持在斜温层下方移动。因为熔盐在罐内的流动速度比较慢，当挡板能够保持在高温熔盐区域或者斜温层区域移动时，挡板能够推动附近的高温熔盐向下流动，促进挡板周边的高温熔盐与低温熔盐的对流换热，并推动底部出口附近的低温熔盐快速流向出口。当挡板移动速度过快，挡板穿过斜温层区域保持在低温熔盐区域移动，到达罐体底部后停止运动，而高温熔盐及斜温层还在缓慢向下移动，与低温熔盐进行换热。因此，挡板无法有效地影响斜温层，反而是挤压了流道，导致流动压力增加。最后，随着温差逐渐减小，换热效果减弱，蓄热时间延长。因此，挡板始终保持在斜温层上方能够促进熔盐的换热，在其下方则会削弱换热效果。

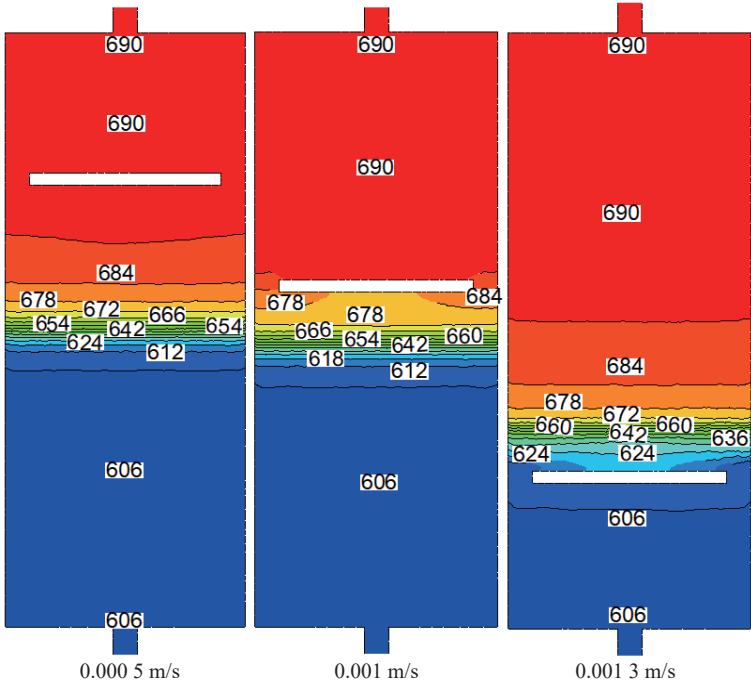


图8 不同移动速度下挡板与斜温层的位置关系

Fig.8 Position relationship between baffle and thermocline at different moving velocities

3.3 挡板对罐体蓄热有效性的影响

在单罐熔盐蓄热系统中，斜温层的存在会降低系统的有效蓄热量，斜温层厚度越大，罐体有效蓄热容积就越小，系统的蓄热效果也越差。因此，本文基于斜温层厚度定义蓄热有效性^[27-28]，计算公式如下：

$$\eta_2(t) = 1 - \frac{\delta(t)}{L} \tag{9}$$

式中： $\eta_2(t)$ 表示蓄热有效性； $\delta(t)$ 表示斜温层厚度； L 为蓄热罐的高度。式(9)表明斜温层厚度越小，有效体积蓄热容量越大，蓄热有效性越高。

图9是挡板以不同速度移动时，罐体蓄热有效性随时间的变化情况，由图可见，蓄热有效性整体呈现下降趋势。这是由于斜温层与高温熔盐区域换热使得斜温层逐渐向高温区域扩散，导致其内部温度梯度降低，传热效果减弱。因

此,斜温层厚度会逐渐增加,罐体有效蓄热容积减小,蓄热有效性降低。在有移动挡板的罐体中,随着挡板移动速度的增大,同一时刻的蓄热有效性呈现出先上升后下降的趋势,即斜温层的厚度随着挡板移动速度的增加先减小后增大。这是因为挡板移动速度较慢时,挡板始终保持在斜温层的上方运动,不会影响斜温层,斜温层仍会向高低温区域扩散而逐渐变厚。当挡板移动速度过快时,挡板快速穿过斜温层并保持在下方低温区域运动,斜温层中的低温区域向下扩散,导致斜温层变厚,蓄热有效性降低。而当挡板以接近于斜温层的移动速度运动时,能够促进斜温层内部的热量传递,从而减小斜温层厚度,提升其蓄热有效性。

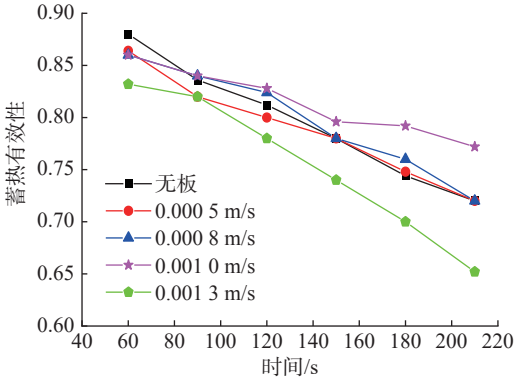


图 9 不同移动速度挡板的蓄热有效性

Fig.9 Heat storage effectiveness of baffle with different moving velocities

因此,对于不同的移动速度,斜温层厚度随着挡板的移动速度增加而先减小后增大,蓄热有效性则随着挡板的移动速度增加,呈现出先上升后下降的趋势。

本文进而探讨了挡板尺寸对蓄热有效性的影响,图 10 表示的是不同尺寸的挡板以一定速度运

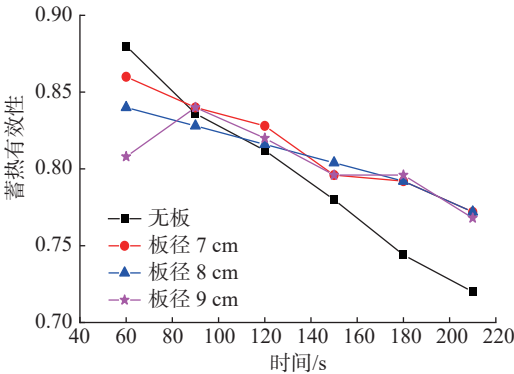


图 10 不同尺寸挡板的蓄热有效性

Fig.10 Heat storage effectiveness of baffles with different sizes

动时蓄热有效性随时间的变化。由图可见,无挡板时蓄热罐的蓄热有效性下降幅度明显大于有移动挡板时的蓄热罐。当有移动挡板时,在约 140 s 之前,板径为 0.07 m 的挡板蓄热有效性相对来说较大,在约 140 s 之后,区别不是很明显。

4 结 论

本文数值模拟了单罐熔盐蓄热系统的蓄热过程,结合动网格及网格自适应方法,探究了蓄热罐内设置移动挡板对熔盐流动换热的影响,探讨了移动挡板的不同速度及尺寸对系统蓄热性能的影响。主要结论如下:

a. 设置移动挡板能够提升罐体内部介质的平均流速与努塞尔数,实现强化流动换热。与无挡板相比,移动挡板带动板周边区域及间隙内熔盐的流动,增强了对蓄热罐内熔盐的扰动作用,从而促进了熔盐的流动换热。

b. 挡板的尺寸对系统蓄热性能的影响较小,而挡板的移动速度对其则有显著影响。在一定速度范围内,移动挡板能够减少罐体的蓄热时间,并提高蓄热效率。在本文研究的参数范围内,移动挡板能够使系统蓄热效率最高提高 11.65%,蓄热时间减少 17.65%。

c. 移动挡板处于斜温层上方可以促进熔盐的流动换热,而在斜温层下方时则会削弱换热效果。挡板保持在斜温层上方移动时,挡板持续影响高温熔盐及斜温层区域,并推动高温熔盐向下流动,促进冷热熔盐的流动换热。而挡板保持在斜温层下方移动时,仅影响下方的低温熔盐,未能持续扰动上方的高温熔盐及斜温层。

参考文献:

[1] LI L C, WANG B W, JIAO K, et al. Comparative techno-economic analysis of large-scale renewable energy storage technologies[J]. *Energy and AI*, 2023, 14: 100282.

[2] LIU L, SHAO S Q. Recent advances of low-temperature cascade phase change energy storage technology: a state-of-the-art review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 186: 113641.

[3] WANG D L, LIU N N, CHEN F, et al. Progress and prospects of energy storage technology research: based on multidimensional comparison[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 75: 109710.

- [4] FUNAYAMA S, KATO T, TAMANO S, et al. Thermal energy storage with flexible discharge performance based on molten-salt thermocline and thermochemical energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 121947.
- [5] 兰健, 郭雪岩. 柱状颗粒填充床的储能性能分析 [J]. *能源研究与信息*, 2023, 39(4): 242–249.
- [6] ROPER R, HARKEMA M, SABHARWALL P, et al. Molten salt for advanced energy applications: a review[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 169: 108924.
- [7] MA T S, LI Z K, LV K, et al. Design and performance analysis of deep peak shaving scheme for thermal power units based on high-temperature molten salt heat storage system[J]. *Energy*, 2024, 288: 129557.
- [8] ZHANG S, LI Z Y, WANG H, et al. Component-dependent thermal properties of molten salt eutectics for solar thermal energy storage: experiments, molecular simulation and applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 209: 118333.
- [9] YANG Z, GARIMELLA S V. Cyclic operation of molten-salt thermal energy storage in thermoclines for solar power plants[J]. *Applied Energy*, 2013, 103: 256–265.
- [10] ABDULLA A, REDDY K S. Effect of operating parameters on thermal performance of molten salt packed-bed thermocline thermal energy storage system for concentrating solar power plants[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 121: 30–44.
- [11] KHURANA H, MAJUMDAR R, SAHA S K. Experimental investigation of heat dispatch controllability through simultaneous charging-discharging and stand-alone discharging operations in vertical cylindrical sensible heat storage tank[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 54: 105268.
- [12] CHEN X T, LU Y W, KONG Q L, et al. Research on dimensionless structure size of coil heat exchanger in heat discharging process of molten salt single tank heat storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119367.
- [13] ZHANG C C, LU Y W, SHI S L, et al. Comparative research of heat discharging characteristic of single tank molten salt thermal energy storage system[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 161: 106704.
- [14] LI M J, QIU Y, LI M J. Cyclic thermal performance analysis of a traditional single-layered and of a novel multi-layered packed-bed molten salt thermocline tank[J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 565–578.
- [15] IEVERS S, LIN W X. Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(12): 2604–2614.
- [16] ERDEMIR D, ALTUNTOP N. Improved thermal stratification with obstacles placed inside the vertical mantled hot water tanks[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 20–29.
- [17] PAING S T, ANDERSON T N, NATES R J. Reducing heat loss from solar hot water storage tanks using passive baffles[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104807.
- [18] GAO L, LU H L, SUN B Z, et al. Numerical and experimental investigation on thermal stratification characteristics affected by the baffle plate in thermal storage tank[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102117.
- [19] BOUHAL T, FERTAHI S, AGROUAZ Y, et al. Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study[J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 441–455.
- [20] BOUZAHER M T, BOUCHAHM N, GUERIRA B, et al. On the thermal stratification inside a spherical water storage tank during dynamic mode[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 159: 113821.
- [21] ZAVOICO A B. Solar power tower design basis document, revision 0[R]. Albuquerque: Sandia National Lab., 2001: 786629.
- [22] ZACHÁR A, FARKAS I, SZLIVKA F. Numerical analyses of the impact of plates for thermal stratification inside a storage tank with upper and lower inlet flows[J]. *Solar Energy*, 2003, 74(4): 287–302.
- [23] INCROPERA F P, DEWITT D P. Fundamentals of heat and mass transfer [M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [24] HALTIWANGER J F, DAVIDSON J H. Discharge of a thermal storage tank using an immersed heat exchanger with an annular baffle[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(2): 193–201.
- [25] LI A G, CAO F F, ZHANG W Q, et al. Effects of different thermal storage tank structures on temperature stratification and thermal efficiency during charging[J]. *Solar Energy*, 2018, 173: 882–892.
- [26] HALLER M Y, CRUICKSHANK C A, STREICHER W, et al. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – review and theoretical comparison[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(10): 1847–1860.
- [27] 杨小平, 杨晓西, 丁静, 等. 高温熔融盐单罐蓄热模型与热性能研究 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2011, 39(8): 72–76.
- [28] 杨晓西, 丁静. 中高温蓄热技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.