

高温熔盐混温罐混温性能研究

张 兵^{1,2}, 高中稳^{1,2}, 冯森森^{1,2}, 白建军^{1,2}, 孙 钰^{1,2}

(1. 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 兰州 730070; 2. 上海蓝滨石化设备有限责任公司, 上海 201518)

摘 要: 采用 Ansys Fluent 软件研究高温熔盐混温罐混温过程的流动、传热及热力学特性, 并分析不同结构对混温性能的影响。通过研究得到混温罐充盐过程罐内空气被熔盐加热造成一定的热量损失, 使得实际的混温时间较理论计算时间长。在充盐过程, 挡板结构层阻止一部分热流体与空气的换热, 减少热量损失, 挡板不开孔更有利于缩短混温时间。进口弯管结构中冷热流体接触充分, 混温效果优于汇管结构。

关键词: 太阳能热发电; 熔盐; 热传导; 数值模拟; 混温罐; 充盐过程; 混温性能

中图分类号: TK172

文献标志码: A

0 引 言

随着开发能源技术的日益发展, 能源储存与热交换逐渐受到关注。熔盐储罐作为一种热交换容器被各领域的学者、专家广泛研究。熔盐储罐兼具混温、储热、放热、疏盐等多项功能。混温罐作为一种常见的热交换设备, 广泛应用于暖通空调、工业过程等领域, 其主要功能是实现不同温度流体的混合, 以达到所需的温度输出。然而, 混温罐的性能受到多种因素(如罐体结构、入口流体参数、搅拌方式等)影响。传统的实验研究方法往往受到时间、成本和测量精度的限制, 难以全面深入地揭示混温罐内部的复杂流动和热交换过程。

崔凯平等^[1]通过流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟计算分析了熔盐储罐出现热分层后, 经再循环扰动可破坏热分层的现象; 王源晶^[2]利用 Modelica 语言开发了二维离散模型, 分析了双罐熔盐温度分布和热损失; 曹瑞峰等^[3]以单罐储热系统为对象、三元熔盐为介质, 利用 Fluent 进行了罐内熔盐流动特性仿真; 时华等^[4]在熔盐储罐预热过程的实验和模拟研究中得出, 在预热过程中地基温度升高缓慢, 在罐体壁面温度达到热平衡时, 地基还仍未实现热平衡; 余抒阳^[5]采用 CFD 对储罐的储热性能和力学性能进行了研究; 王钰森^[6]通过数值模拟探究了保温材料组合、储热温度、罐体高径比、罐内液位、环境温度及风速对熔盐储热罐热损失的影响; 张夏^[7]使用 Fluent 对高温熔盐罐进行了不同运行模式下的建模仿真, 研究了一定周期内熔盐及储热罐壁面的散热情况; Abánades 等^[8]研制了一种新型混合熔盐, 在 150 ~

250 °C 区间内可用于储热, 能够提高区域供热和供冷装置的太阳能利用比例, 进而实现聚光太阳能技术的融合落地; 王钰森等^[9]利用熔盐储热实验平台研究了储热罐内熔盐的温降规律和影响温降的主要因素; 顾清之等^[10]建立了熔盐储罐冷却过程的模型, 通过 Fluent 模拟获得了熔盐储罐在不同情况下的散热量及熔盐温度下降规律; 文献^[11]研究了储罐的温度分布和热损失, 分析了保温钉对保温层传热性能的影响; 张晓明^[12]采用 API 650 标准规定的变点设计方法, 设计了储盐量为 $1.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型熔盐储罐, 利用 Fluent 计算流体动力学软件模拟了大型熔盐罐的温度分布; Prieto 等^[13]强调了严苛的熔盐储罐实际标准在储热技术中的重要性; 周浩等^[14-15]结合实验与数值方法围绕储罐基础及熔盐罐展开研究, 依托试验性太阳能热发电厂开展测试系统分析了不同尺度下罐体的温度分布规律与热损失特征; 岳松等^[16]基于 CFD 研究阶梯式预热过程中熔盐罐的温度分布和热应力分布。

以上研究集中于熔盐储罐的传热、散热、温度场变化规律, 在某些情况下需将不同温度熔盐混合, 例如某钢厂利用炼铁产生的高炉煤气建立熔盐发电系统, 将高炉煤气燃烧产生高温烟气加热熔盐, 再将高温熔盐加热水蒸气进行发电。由于烟气温度高, 发电后的低温熔盐不宜直接加热, 首先将加热后的部分高温熔盐与发电后的低温熔盐混合, 使低温熔盐升温至 515 °C 后, 再用锅炉加热至发电所需温度。不同温度熔盐混合过程既涉及热力学理论, 也包括流动、传热理论, 如何保证混温效果使混合后的熔盐达到预定温度是主要研究的内容。

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 兰州市科技计划项目(2022-2-6)

通信作者: 张 兵(1986—), 男, 学士、高级工程师, 主要从事光热储能、压缩空气储能、二氧化碳捕集等新能源行业工艺、设备科研和设计方面的研究。493499480@qq.com

1 混温罐模型建立

分别模拟混温罐充盐过程及正常工作过程的温度场分布和达到稳定的时间。两种工况分别采用多相流模型和单相流模型进行模拟。卧式混温罐,冷热介质分别从低温熔盐进口和高温熔盐进口进入混温罐,混合后从另一侧出口抽出。为使冷热介质混合均匀,设计 2 种混温方案(分别为冷热流体弯管对冲和冷热流体流入汇管),在汇管内混合后由汇管上均布的小孔流出,并通过挡板进一步防止尚未混合均匀的流体直接到达出口(挡板为多孔板)。通过对结构进行简化建立的模型如图 1 所示,其中混温罐直径 2500 mm,长度 6100 mm。本文采用 Fluent 软件通过数值模拟研究对比弯管对冲结构、汇管结构以及是否加装挡板的混温效果,确定混温罐的设计方案及混温时间。

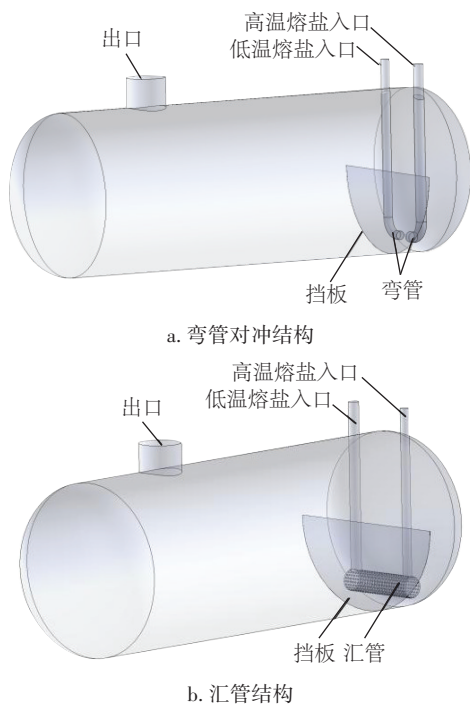


图1 充盐过程混温罐模型

Fig. 1 Model of mixing tank during filling stage

混温罐正常工作过程中,液位通常保持在 90%。同时,由于后续工况的需要,混温罐内熔盐介质需用泵进行抽取。因此,将混温罐出口位置设置在距混温罐底部 300 mm 处,建立的两种混合模式模型,如图 2 所示。

2 数值模拟方法

2.1 介质物性参数

根据处理量及初步的理论计算确定 3 种混温工况,(表 1)。混温罐所处理的熔盐是由 60% 的 NaNO_3 和 40% 的 KNO_3 组成的液态混合物。通过实验测得不同温度下混合熔

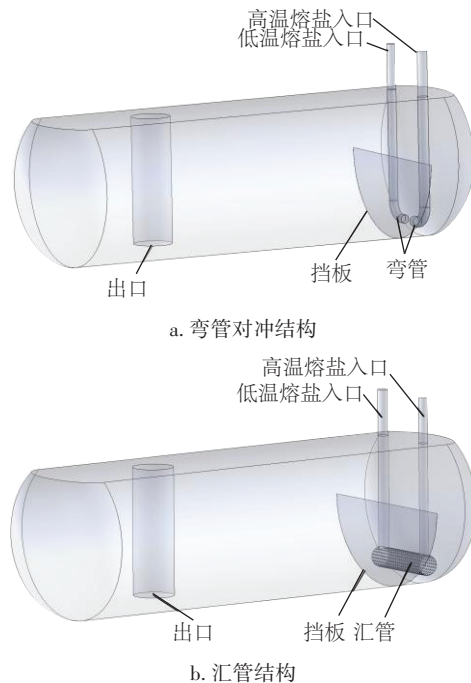


图2 正常工作过程混温罐模型

Fig. 2 Model of mixing tank during operation

盐的物性参数。根据不同温度下的试验结果,在 Fluent 软件中自定义熔盐物性,空气物性采用 NIST 数据库中不同温度的数据,在软件中自定义其参数。二者不同温度下的数据基本符合线性规律,因此即使间隔 70 °C 也不影响物性变化规律,两种物质的物性参数见表 2 和表 3。

表1 操作工况

Table 1 Operation conditions

工况	熔盐流量/(t/h)		熔盐温度/°C		混温温度/°C
	低温	高温	低温	高温	
1	100	302	364	565	515
2	140	253	500	565	542
3	140	258	423	565	515

表2 熔盐物性参数

Table 2 Physical properties of salt

温度/°C	密度/(kg/m ³)	比热容/[kJ/(kg·K)]	热导率/[W/(m·K)]	黏度/(mPa·s)
300	1892.84	1.50	0.50	3.30
360	1854.68	1.51	0.51	2.20
430	1810.16	1.52	0.53	1.60
500	1765.64	1.53	0.54	1.30
570	1721.12	1.54	0.55	1.10

表3 空气物性参数表

Table 3 Physical properties of air

温度/ ℃	密度/ (kg/m ³)	比热容/ [kJ/(kg·K)]	热导率/ [W/(m·K)]	黏度/ (μPa·s)
300	0.60	1.05	43.75	29.67
360	0.55	1.07	47.20	31.77
430	0.49	1.08	51.09	34.11
500	0.45	1.10	54.86	36.35
570	0.41	1.12	58.52	38.51

2.2 数值模拟模型

数值模拟过程所涉及的主要模型为质量守恒、动量守恒和能量守恒方程:

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

$$\frac{\partial(\rho v Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} v) = -\nabla \cdot \mathbf{p} + \nabla \cdot \left\{ \mu \left[(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} E) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T + \tau_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v}) \quad (3)$$

式中: ρ ——流体密度, kg/m³; t ——时间, s; $\mathbf{v}$ ——流速, m/s; p ——压力, Pa; μ ——动力黏度, Pa·s; E ——单位质量的总能量, J/kg; k_{eff} ——有效导热率, W/(m·K); T ——流体温度; $\mathbf{I}$ ——单位张量; τ_{eff} ——有效应力张量。

为初步判断熔盐流动状态, 根据熔盐流量及罐体尺寸计算其雷诺数, 即:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4m}{\pi D \mu} \quad (4)$$

式中: D ——管径, m; m ——质量流量, kg/s。

针对筒体, $m \approx 400 \text{ t/h} = 111 \text{ kg/s}$, $D = 2.5 \text{ m}$, 即使 μ 取熔盐不同温度下的最低黏度 (0.0058 Pa·s), 可得 $Re = 10479$; 针对管道, $m \approx 100 \text{ t/h}$, $D = 0.142 \text{ m}$, 可得 $Re = 46123$ 。因此, 流体无论在管道中还是在筒体内皆为湍流状态, 需采用湍流模型进行模拟。熔盐进口管道较长, 符合充分发展的湍流特征, 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 因其使用了壁面函数对壁面层流底层进行处理, 无需对壁面处采用边界层。

P1 模型是热辐射模拟中基于辐射传递方程简化的扩散模型, 其核心假设是辐射强度在空间各方向上分布均匀, 将复杂的辐射传递方程简化为类似热传导的扩散方程, 适用于光学厚度较大 (即介质对辐射的吸收和散射作用较强) 的场景。本文研究的熔盐属于低散射、弱吸收介质, 且混温罐内

熔盐空间分布较均匀, 光学厚度较大, P1 模型能够在保证计算精度的同时显著降低计算复杂度, 兼顾模拟效率与结果可靠性, 因此选用该模型进行热辐射模拟, 其辐射传递过程水可表示为:

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (5)$$

式中: q_r ——辐射通量, W/m²; a ——吸收系数; σ_s ——散射系数; C ——相函数系数; G ——入射辐射量, W/m²。

为模拟流体充满过程, 采用 Mixture 多相流模型, 主相为熔盐, 第二项为空气。采用多相流模型时, 式 (1)~式 (3) 中的密度和速度为平均密度和平均速度。

2.3 边界条件

将低温和高温熔盐进口设置为质量流量入口 (mass-flow-inlet), 设置其流量和温度边界条件, 具体数值见表 1, 出口设置为自由出流。壁面选用无滑移边界。储罐外侧用硅酸铝纤维毡进行保温, 厚度为 100 mm。以储罐内平均温度 400 °C 对保温后的热损失进行估算, 保温材料 400 °C 时的热导率为 0.09 W/(m·K), 则经过保温材料的热损失表示为:

$$Q_L = \frac{A\lambda(T - T_0)}{h} \quad (6)$$

式中: Q_L ——损失的热量, J; λ ——热导率, W/(m·K); A ——传热面积, m²; T_0 ——环境温度, °C; h ——保温棉厚度, m。

式 (6) 未完全忽略罐壁的导热过程, 而是基于工程简化假设对传热路径进行合理简化。罐壁材料 (如钢材) 的导热系数远大于保温层 (硅酸铝纤维毡, 0.09 W/(m·K)), 其热阻占总热阻的比例极小 (小于 5%), 热量传递的主要阻力来自保温层, 因此可近似忽略罐壁的导热热阻。式 (6) 中采用熔盐温度 T 作为计算值的原因是: 熔盐与罐壁之间的对流换热系数较大 (熔盐为湍流流动), 罐壁内侧温度与熔盐温度差异极小 (经估算温差小于 2 °C), 用熔盐温度近似替代罐壁内侧温度进行计算既能简化模型又能保证热损失计算的精度。储罐尺寸计算得到储罐体积为 38.12 m³, 表面积为 67.54 m²。根据检测结果, 熔盐 400 °C 时的焓值为 1080.6 kJ/kg, 综合几种工况, 进盐量约为 400 t/h, 因此单位时间 (s) 内该温度下熔盐的内能为 $1.2 \times 10^8 \text{ J}$; 根据式 (6) 计算单位时间内由表面散失的热量为 24314.4 J, 仅占总热量的 0.02%, 因此可忽略散热, 假设壁面为绝热。

2.4 网格无关性验证

混温罐网格划分如图 3 所示, 为验证网格划分精度是否满足计算要求, 对混温罐的弯管结构模型进行网格无关性验证, 如图 4 所示, 当网格数量为 321566 时, 混温温度达到 515 °C, 且随着网格数量的增加, 结果基本不变, 因此实际划分网格数量为 321566。



图3 混温罐网格划分

Fig. 3 Meshing of mixing tanks

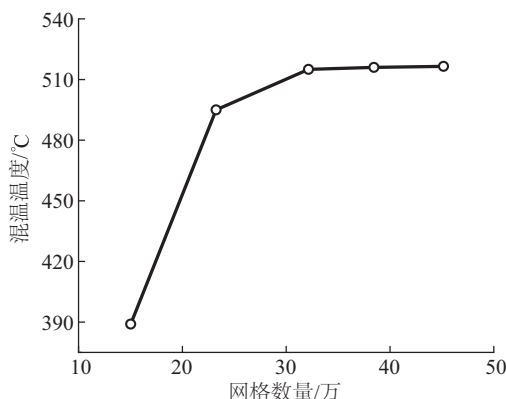


图4 网格数量与混温温度关系

Fig. 4 Relationship between grids and mixed temperature

2.5 模型验证

经过与现场分布式控制系统(distributed control system, DCS)数据(图5)对比,经余热锅炉加热后的低温熔盐和煤气炉加热的高温熔盐在混温罐内混合后温度为 515.9°C ,可见低温熔盐、高温熔盐及混温后的温度均与表1中工况1接近,提取混温罐出口0~8000 s内DCS系统温度监测瞬态数据与数值模拟结果对比见图6,可见模拟结果与实测数据较为接近,证明了数值模拟所用模型的可靠性。

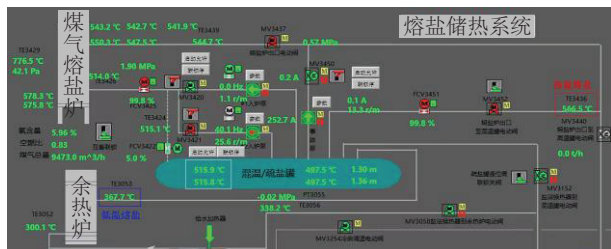


图5 工况1部分DCS界面

Fig. 5 Parts of DCS GUI in case 1



a. 0 s

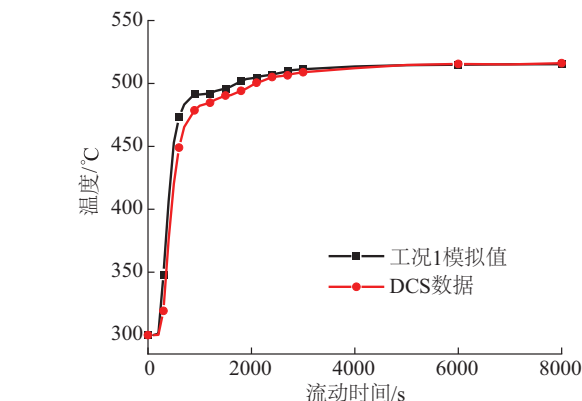


图6 模拟和现场DCS混温罐出口温度对比

Fig. 6 Outlet temperature comparison between simulation and DCS

3 结果分析与讨论

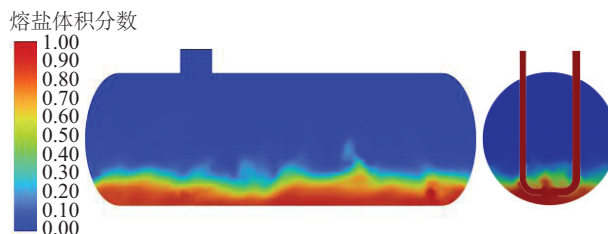
采用2节所述模型及边界条件研究不同工况下的混温效果。进盐之前罐内充满 300°C 的空气,高、低温熔盐需相互混合,所以首次使用达到稳定温度的时间较长,到达稳定状态后出口温度基本保持不变。采用Mixture多相流模型模拟熔盐充满过程,首先假定熔盐由上端出口自然流出,研究混温罐充满所需时间及其温度变化的过程,再考虑当液位高度为罐体高度90%时的混温特性。

3.1 混温罐内多相流动特性研究

采用瞬态方法模拟流体充满混温罐的过程,冷热流体自进口管道进入混温罐底部,图7为不同时间混温罐中间纵剖面 and 进口横截面熔盐的体积分数。混温罐内流体与空气存在较为分明的相界面,且由于存在湍流流动及气液相的传质,后期会有气液混合物流出,经过1800 s(0.5 h)混温罐可完全充满,但工程上罐体充液量最多只能到90%,因此1500 s时即可认为充满。

3.2 混温罐内温度场变化规律

混温罐充盐过程伴随着熔盐和空气的换热,由工况条件可知,即使低温熔盐温度也高于空气温度,熔盐将有一部分热量传给空气,使得空气温度升高,图8为不同时刻混温罐内熔盐的温度。空气迅速升至低温熔盐温度,且随进盐过程温度逐渐升高。



b. 300 s

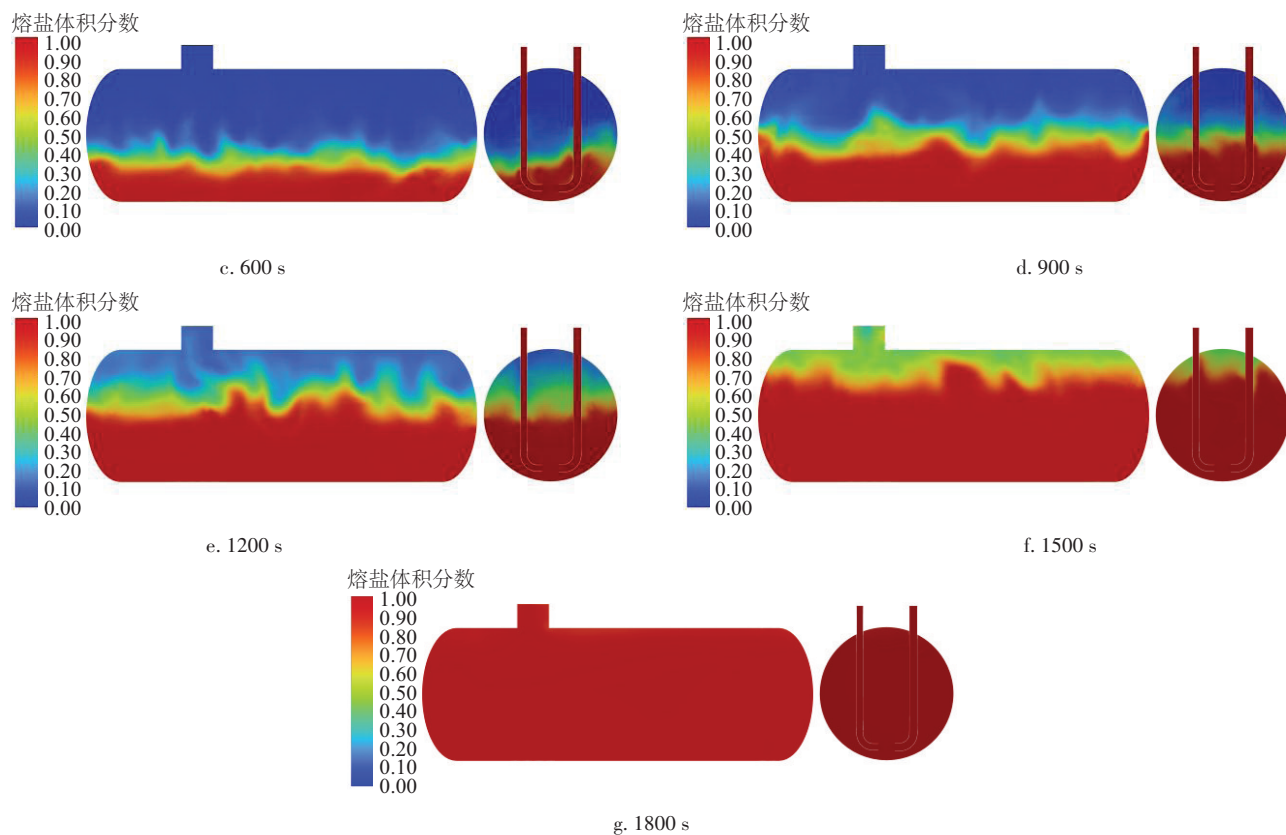
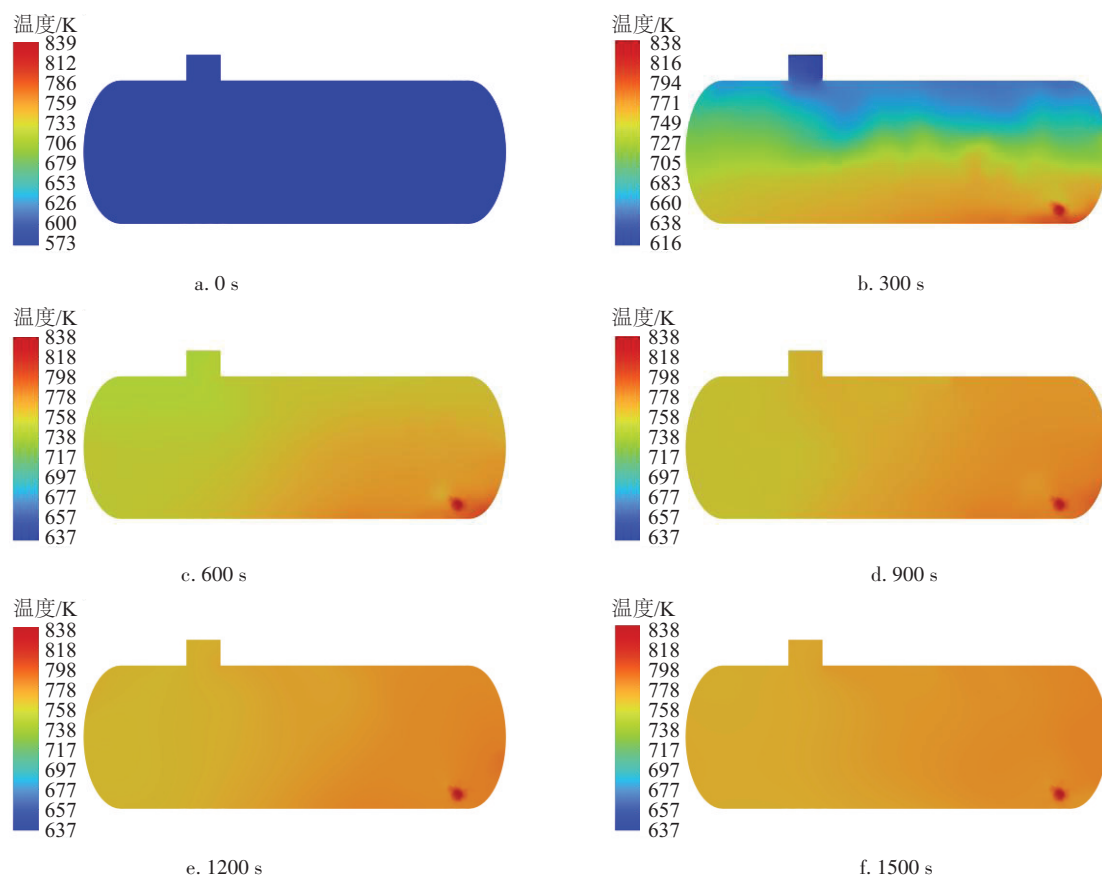


图7 混温罐充盐过程

Fig. 7 Salt filling process for mixing tanks



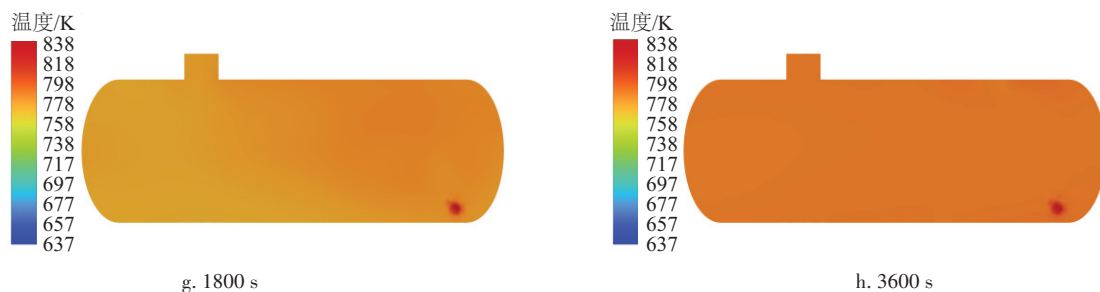


图8 混温罐不同时刻温度对比

Fig. 8 Comparison of temperatures at different moments in the mixing tank

由表3可知,空气密度为 0.6 kg/m^3 , 比热为 $1.05 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, 而罐体体积为 38.12 m^3 , 若空气由 300°C 升至 515°C , 需吸收热量 5163 kJ , 但由于空气量在升温过程中逐渐减少, 因此空气带走的热量小于该值。 515°C 下该体积熔盐的总热量 $8.43 \times 10^7 \text{ kJ}$, 损失的热量约为其 6.12×10^{-5} 倍。尽管损失非常小, 但这部分热损失仍导致冷热流体混合后的温度略低于 515°C , 需继续持续一段时间方可达到稳定状态, 经计算, 1 h 后, 混温罐出口温度升至 515°C , 达到稳定运行状态。

以工况1(低温熔盐 364°C 、高温熔盐 565°C , 目标混温 515°C)为例, 理论混温时间可通过能量守恒快速估算, 但实际模拟中, 熔盐需先将空气排出并加热直至 1800 s 才完全充满罐体, 此时出口温度仅约 490°C ; 持续混温至 6000 s 后, 出口温度稳定在 515.4°C , 较理论时间延长约3倍。

3.3 不同结构混温罐混温特性研究

3.3.1 弯管结构混温特性研究

针对图1a结构混温罐混温特性进行研究, 分别模拟加挡板和不加挡板结构出口平均温度随时间的变化过程, 得到3种工况出口温度变化曲线, 见图9。在混温初期, 罐内空气尚未完全排出, 此时出口温度保持稳定, 为空气温度, 即 300°C ; 200 s 时, 随着熔盐进入罐体, 空气被加热, 混温罐出口温度开始急速上升; 900 s 时, 罐中空气逐渐被气液混合物代替, 且出口上升趋势逐渐减弱; 1800 s 时, 熔盐充满, 但由于部分热量被空气带走, 仍未达到预定温度, 混温罐出口温度仍有小幅升高, 直至 6000 s 时, 混温罐出口温度达到 788.4 K , 即 515.4°C

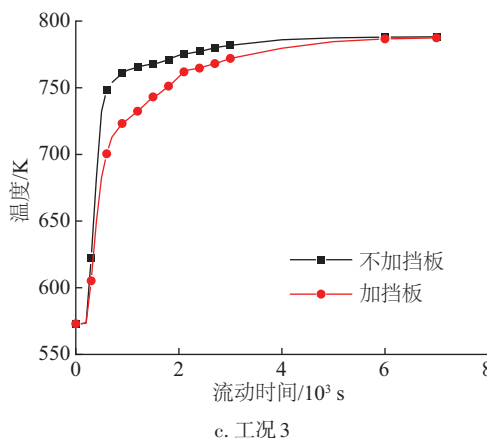
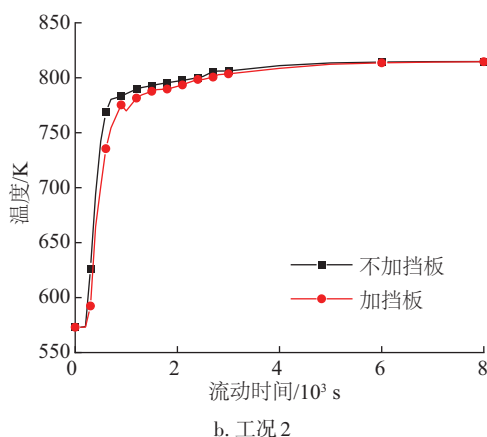
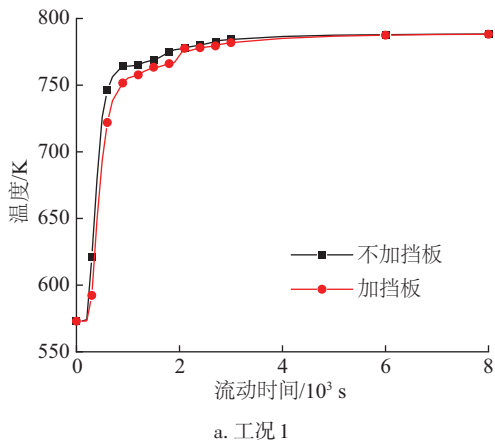


图9 弯管结构温度时间曲线

Fig. 9 Bend structure temperature time curve

(对工况2而言为 542°C), 已到达稳定状态。若混温罐内增设挡板, 挡板挡住了底部进入的高温熔盐, 延缓了高温流体与空气的接触及传热, 但达到稳定状态后加挡板与不加挡板工况出口温度一致。

3.3.2 真实液位高度混温罐性能研究

为安全起见, 真实工作情况下储罐液体不能充满, 应有一定的充装量, 通常为储罐高度的 90% , 而且液出口设置在距罐底 300 mm 处, 用泵将其抽出。根据罐内充盐过程模拟结果, 混温罐充满时间为 1800 s , 将图10所示 1800 s 时的温度场作为初始条件, 研究不同结构的混温温度及混温时间, 建立的模型如图2所示, 其网格如图3所示。

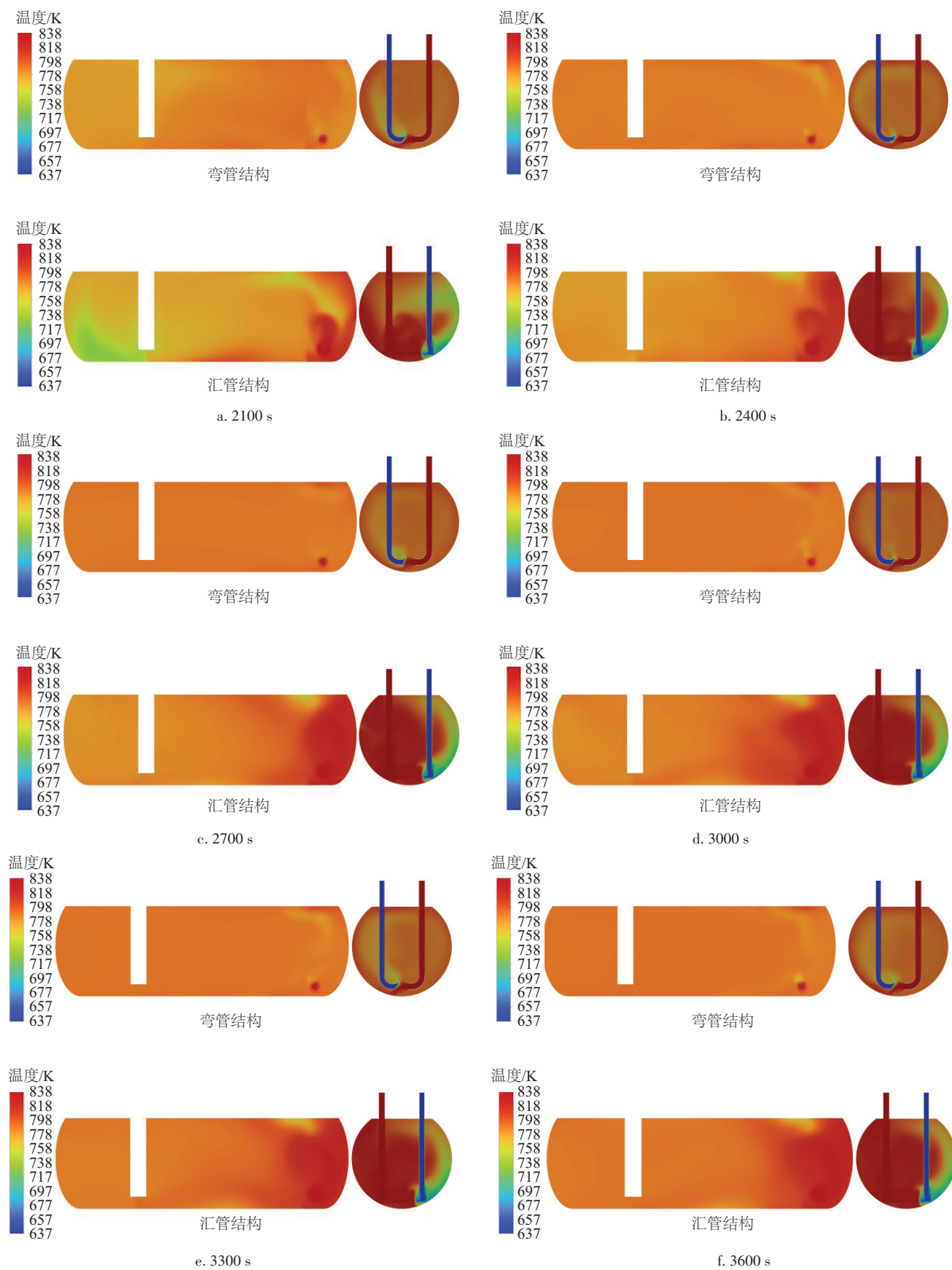


图 10 不同时刻混温罐内温度场分布

Fig. 10 Temperature field distribution in mixing tank at different moments

1) 进口弯管结构与汇管结构对比。自熔盐充至储罐90%高度(1800 s)时开始模拟,得到不同时刻两种结构混温罐纵剖面和进口横截面温度场分布如图10所示。可见,弯管结构的温度场较为均匀,达到预定混和温度的时间也更短,而汇管结构均匀性差,需更长时间才能达到所需温度。

定量分析表明,弯管结构在3600 s时出口温度稳定达标,而汇管式结构需4800 s,混温时间延长33%。

2) 挡板结构对混温性能影响研究。结合现有研究成果可知,挡板结构可阻止混温罐充盐过程的热量损失,但采用多孔板和采用盲板结构不仅影响流动过程也影响换热过程。针对弯管结构挡板开孔与不开孔工况进行研究,同时对比汇管结构的出口温度曲线,见图11。与云图体现的规律类似,图11中采用与弯管对冲式结构混温时间小于汇管结构,其中挡板不开孔更有利于缩短混温时间。对比挡板开孔与不开孔(盲板)结构发现,盲板完全阻断热流体向空气层的热量传递,使工况1混温时间从6000 s降至5400 s,缩短约10%。

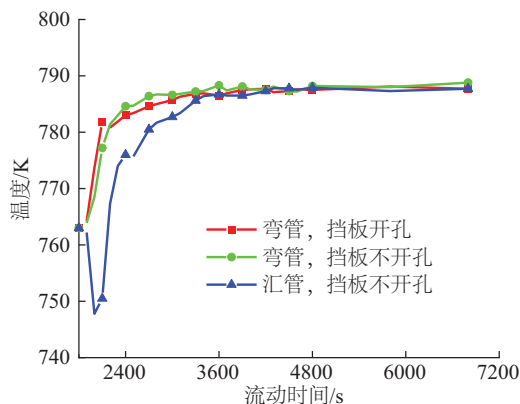


图11 工况1不同结构出口温度曲线

Fig. 11 Outlet temperature curve of different structures for case 1

3) 3种工况对比。不同工况的混温时间对比见图12,熔盐的混温时间与熔盐温度有关,工况1和工况3最终的混温温度相同,但工况1低温熔盐温度较低,需更多的高温熔盐提升其温度,尽管两种工况交换的热量相同,但用于换热的流体

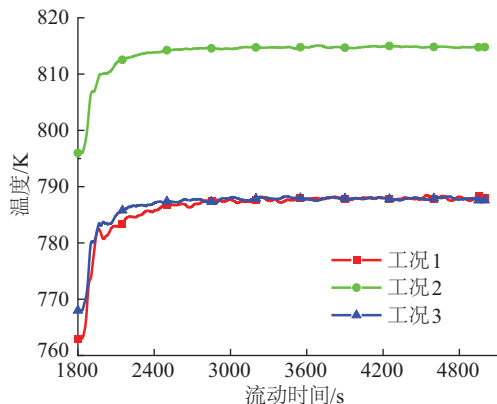


图12 3种工况出口温度曲线对比

Fig. 11 Comparison of outlet temperature curves for three operating conditions

质量不同,工况1所需流体更多,影响了其换热时间,使其升温速率略有区别。其中工况1(低温364℃)与工况3(低温423℃)目标混温均为515℃,但因工况1需要更多的高温熔盐(302 t/h vs. 258 t/h),其稳定时间比工况3延长约500 s;工况2(低温500℃)因初始温差较小,混温时间较工况1缩短25%。

4 结 论

采用Ansys Fluent软件对高温熔盐混温罐的混温过程进行数值模拟,通过分析不同结构对混温性能的影响,得出以下主要结论:

1) 混温罐充盐过程中,罐内空气与熔盐的换热导致显著热量损失,实际混温时间较理论计算延长约3倍。瞬态模拟可准确捕捉热损失对混温效率的影响。

2) 增设挡板结构可有效减少熔盐与空气的热交换,其中挡板不开孔(盲板)工况使混温时间缩短10%,验证挡板结构对缩短混温时间的积极作用。

3) 弯管对冲式进口结构通过促进冷热流体的直接接触,混温效率显著优于汇管式结构,其达到目标温度的时间较汇管式缩短33%。

4) 混温时间受熔盐初始温度及流量影响显著:低温熔盐初始温度越高混温效率越高;流量增加虽提升换热量,但可能因混合路径延长而略微降低升温速率。

[参考文献]

- [1] 崔凯平, 韩伟, 倪煜, 等. 熔盐储罐热分层混温过程研究[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 8-13.
CUI K P, HAN W, NI Y, et al. Research on thermal stratification and control process in molten salt storage tanks[J]. Huadian technology, 2020, 42(5): 8-13.
- [2] WANG Y J, LIU J N, MA X, et al. Numerical investigation on the thermal performance of a molten salt tank under different electric heating method [J]. Solar energy materials and solar cells, 2024, 278: 113183.
- [3] 曹瑞峰, 赵浩, 高建. 单罐储热系统的动态特性数值研究[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(4): 61-68.
CAO R F, ZHAO H, GAO J. Numerical study on dynamic characteristics of single tank thermal energy storage system [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(4): 61-68.
- [4] 时华, 方文峰, 朱义凡, 等. 熔盐储罐预热过程的实验和模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5972-5978.
SHI H, FANG W F, ZHU Y F, et al. Experimental and numerical investigation on preheating process of molten salt storage tank [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5972-5978.
- [5] 余抒阳. 太阳能单罐熔盐储热特性数值模拟研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2020.
YU S Y. Numerical simulation and study on thermal energy

- storage characteristics of solar energy molten-salt-based single-tank[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2020.
- [6] 王钰森. 熔盐储热罐的设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2019.
- WANG Y S. Research on design of molten salt heat storage tank[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2019.
- [7] 张夏. 中低温熔盐储热系统的容量配置与热力性能分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- ZHANG X. Capacity configuration and thermal performance analysis of medium and low temperature molten salt heat storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [8] ABÁNADES A, RODRÍGUEZ-MARTÍN J, RONCAL J J, et al. Proposal of a thermocline molten salt storage tank for district heating and cooling [J]. *Applied thermal engineering*, 2023, 218: 119309.
- [9] 王钰森, 初泰青, 王智, 等. 熔盐储热罐散热试验研究[J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2019, 15(1): 54-58.
- WANG Y S, CHU T Q, WANG Z, et al. Experimental study on heat dissipation of molten salt heat storage tank [J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (natural science)*, 2019, 15(1): 54-58.
- [10] 顾清之, 张艳梅, 关弘扬, 等. 熔盐储罐冷却过程的瞬态分析[J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(4): 782-788.
- GU Q Z, ZHANG Y M, GUAN H Y, et al. Transient analyses of a molten salt heat storage tanks [J]. *Energy storage science and technology*, 2017, 6(4): 782-788.
- [11] YUE S, LIU X Q. Study of heat transfer performance of insulating layer of molten salt storage tank [J]. *IOP conference series: earth and environmental science*, 2020, 512(1): 012019.
- [12] ZHANG X M, WU Y T, ZHANG C C. Temperature distribution and strength analysis of large-scale molten salt thermal storage tank [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(9): 1064-1073.
- [13] PRIETO C, BLINDU A, CABEZA L F, et al. Molten salts tanks thermal energy storage: aspects to consider during design[J]. *Energies*, 2024, 17(1): 22.
- [14] ZHOU H, SHI H, ZHANG J K, et al. Experimental and numerical investigation of temperature distribution and heat loss of molten salt tank foundation at different scales [J]. *Heat and mass transfer*, 2020, 56(10): 2859-2869.
- [15] ZHOU H, SHI H, ZHU Y F, et al. An experimental investigation of temperature distribution and heat loss in molten salt tanks in concentrating solar power plants [J]. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2020, 12: 014101.
- [16] 岳松, 陈宇轩, 肖虎, 等. 熔盐储罐预热过程优化研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 113-118.
- YUE S, CHEN Y X, XIAO H, et al. Study on optimization of preheating process of molten salt storage tank [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2022, 43(10): 113-118.

MIXING PERFORMANCE OF HIGH TEMPERATURE MOLTEN SALT MIXING TANK

Zhang Bing^{1,2}, Gao Zhongwen^{1,2}, Feng Sensen^{1,2}, BaiJianjun^{1,2}, Sun Yu^{1,2}

(1. LANPEC Technologies Limited, Lanzhou 730070, China

2. LANPEC Technologies Limited(Shanghai), Shanghai 201518, China)

Abstract: With the development of concentrated solar power generation technology and the need for heat recovery from industrial exhaust gases and high-temperature flue gases, high-temperature molten salt power generation technology plays an increasingly important role. In some cases, due to the process needs, it is necessary to mix the low-temperature molten salt with the high-temperature molten salt to reach the desired temperature. In this paper, Ansys Fluent software was used to study the flow, heat transfer and thermodynamic characteristics of the mixing process in the high temperature molten salt mixing tank, and the influence of different structures on the mixing performance was also analyzed. According to the results, it is obtained that the air inside the tank is heated by the molten salt during the salt charging process of the mixing tank, resulting in a certain amount of heat loss, which makes the actual mixing time longer than the theoretical calculation time. In the salt charging process, the baffle structure prevents part of the heat exchange between the molten salt and the air, which reduces the heat loss, and the baffle is more conducive to shorten the mixing time without opening holes. Besides, for elbow counter-current inlet type, the cold and hot molten salt fully contact when they were out from the inlet, which show better mixing result than the manifold inlet structure.

Keywords: solar thermal power generation; molten salt; heat conduction; numerical simulation; mixing tank; salt charging process; temperature mixing performance