

管内加电伴热装置熔盐熔化过程数值模拟研究

马 瑞¹, 任志恩¹, 郭嘉敏¹, 朱 锐¹, 王 峰¹, 杨晓艳²

(1. 内蒙古自治区风能太阳能利用机理及优化重点实验室, 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古自治区计量测试研究院, 呼和浩特 010060)

摘 要: 建立内置电伴热装置水平管道二维模型, 模拟混合熔盐纳米流体在熔化过程中固-液交界面的位置、形状和温度场的分布, 分析不同斯蒂数(Ste)和电伴热装置的尺寸对整个熔盐熔化过程的影响。结果表明, 随着加热时长的增加, 电伴热装置与相界面之间的距离增加, 温度向固相区熔盐传递随热阻的增大而逐渐变缓。加热时间持续至 3082 s 时, 熔盐纳米流体完全熔化。当 Ste 由 0.392 分别增至 0.706 和 1.021 时, 熔盐纳米流体完全熔化时间分别减少 66% 和 81%; 与 5 mm 直径的电伴热装置相比较, 直径为 10 mm 和 20 mm 的电伴热装置熔盐熔化效率分别提高 68% 和 82%, 熔盐完全熔化的时间分别为 1100 s 和 623 s。

关键词: 太阳能热发电; 传热; 相变; 熔化; 纳米流体; 熔融盐; 电加热元件

中图分类号: TK124

文献标志码: A

0 引 言

聚光太阳能发电系统中常用熔盐的凝固点为 120~220 °C^[1], 远超常规环境温度, 因此在光照匮乏或系统故障停机 etc 情况下, 过度热耗散容易引发熔盐管路内局部甚至完全冻堵^[2]。管内熔盐发生凝固后, 其解冻过程中若操作不当或熔盐体积膨胀可能致使管道发生不可逆结构形变^[3]。为避免熔盐管道冻堵, 通常采用的保温方案是在熔盐管道内部加装电伴热装置, 同时对熔盐管道采用绝热材料进行包裹^[4]。文献[5]构建了电伴热熔盐管道二维模型, 通过模拟计算探讨电伴热根数、敷设面积和加热功率对水平管道内二元熔盐解冻过程的影响; 文献[6]研究了电伴热在光热发电熔盐系统中的应用, 认为光热发电中, 熔盐具有高凝固点温度, 为防止其凝固, 要求电伴热系统介入以保障系统稳定运行; 文献[7]进一步分析了不同电伴热装置布置方式、几何尺寸和功率条件下熔盐熔化过程的均匀性和效率; 文献[8]针对太阳能光热电站高温熔融盐管道系统开展了防凝设计, 包括管道布置方法及注意事项、管道附件典型电伴热及保温结构等。

熔盐管内凝固与其热物性和流动特性相关, 混合熔盐热物性优选^[9-10]有利于预测熔盐防堵所需功率值。流动特性研究同样重要, 文献[11]利用自行搭建的熔融盐强制对流实验系统, 开展了导热油与低熔点熔融盐($\text{KNO}_3\text{-Ca}(\text{NO}_3)_2$)的管内强制对流实验研究, 并通过最小二乘法和 Wilson 分离

法得到了管内低熔点熔融盐侧的对流换热系数及其准则关联式; 文献[12]进行了 24 种条件下熔盐管内流动实验, 对 Gnielinski 经验公式进行了修正, 为熔盐热性能分析提供了理论与实验依据; 文献[13]总结了熔盐相变储能材料在聚光太阳能发电中的应用, 指出其中熔盐泄漏和凝固是主要问题, 需对熔盐管道开展更多的模拟研究; 文献[14]进行了多维数值模拟, 分析了倾斜管道中遇到的熔盐凝固问题, 结果表明在熔融过程中, 随着倾斜角的减小熔盐中的自然对流增强, 固体盐的熔化加快; 文献[15]对 Hitec 盐在倾斜冷却管内的湍流混合对流换热特性进行了数值研究, 并分别提出以倾角 φ 为自变量的上半壁、下半壁和整个管壁的浮力效应关联式; 文献[16]建立了套管式换热器内熔盐强制对流模型, 对比数值结果与实验数据, 提出对流换热关联式并讨论了流速对热流密度及对流换热系数的影响; 文献[17]数值模拟研究了熔盐在 3 种热流边界条件下的管内流动换热特性, 分析了熔盐换热性能和壁面温度分布规律, 热边界条件显著影响管壁温度梯度和管内温度场变化; 文献[18]模拟了非均匀余弦热流作用下 Hitec 熔盐管内湍流换热特性, 结果表明加热面热流密度与熔盐速度呈正相关, 而绝热面为负相关, 管内和管壁温度场分布极不均匀, 模拟所得换热系数相较 Sieder-Tate 关联式更高。

熔盐基纳米流体的理论研究可为熔盐管道的解冻操作提供指导, 但现有研究仍较少。文献[19]通过实验研究纳米

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 内蒙古自治区科技计划(2021GG0253); 内蒙古自治区自然科学基金(2024MS05044); 内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持项目”(NJYT24012); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(JY20220110)

通信作者: 马 瑞(1988—), 女, 博士、副教授, 主要从事储热技术、先进制冷及热泵技术、微重力多相流方面的研究。mr12593@126.com

颗粒对熔盐热物性影响,结果表明 0.2% nano-CuO/PCM 具有较好的稳定性,熔化潜热和凝固潜热相较于复合 PCM 分别降低了 5.91% 和 5.44%,导热系数提高了 30.0%;文献[20]研究了熔盐纳米流体在螺旋管中的流动与传热特性,采用 Wilson 分离法对实验数据进行处理,通过实验得到了熔盐纳米流体的传热关联式;文献[21]采用相同尺寸、不同种类的短多壁碳纳米管(S-MWCNTS)、MWCNTS 和羧基化碳纳米管(COOH-MWCNTS)作为添加剂制备熔盐纳米流体,实验测量和分析了比热容(c_p)、导热系数和其他参数,结果表明纳米流体比热和导热系数与 Solar 盐相比增加了 13.79% 和 78.18%,与 Hitec 盐相比增加了 21.13% 和 130.69%。文献[22]采用欧拉-拉格朗日离散模型对圆管内层流状态的 Al_2O_3 -Hitec 纳米流体进行了数值模拟,结果证实纳米流体的努塞尔数和换热系数均高于纯熔盐。

综上,目前研究更多关注熔盐和纳米流体热物性和流动换热特性,对熔盐纳米流体在管内相变融化的数值模拟研究相对较少,而管内加电伴热装置熔盐熔化过程的研究对于熔盐管道的解冻操作具有重要的指导意义。因此,本文利用 ANSYS 软件建立内置电伴热装置水平管道的二维模型,利用焓法研究熔盐纳米流体在水平管道的熔化过程,分析熔盐纳米流体熔化过程中固-液相分布,探究水平管道内电伴热装置直径以及 Ste 数对熔盐纳米流体熔化特性的影响。

1 管内熔盐纳米流体熔化模型

1.1 物理模型

将模型简化为内置电伴热装置的水平管道二维模型,如图 1 所示。蓄热单元水平结构的外径为 50 mm,内径为 5 mm,忽略壁厚,外壁面为绝热壁面,无热量损失,内壁面为电伴热装置壁面。

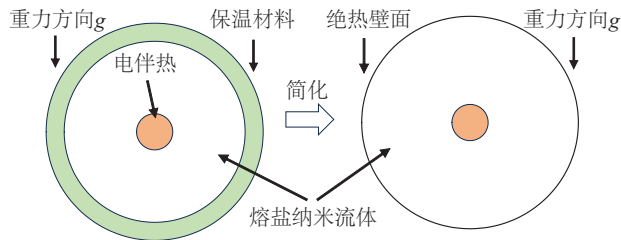


图 1 带有电伴热装置的管道二维模型

Fig. 1 Two-dimensional model of a pipe with electric heat tracing device

1.2 控制方程

为使整个熔化过程计算方便,将模型简化为二维并假设:

1) 熔盐纳米材料具有各向同性;

2) 忽略接触热阻和壁厚;

3) 整个相变过程中熔化发生在一个温度区间内;

4) 液相熔盐纳米为不可压缩牛顿流体,熔化过程中浮力影响采用 Boussinesq 假设。

由于浮升力主要受温度梯度变化的影响,在计算时采用 Boussinesq 假设,模拟中温度场的分布采用焓法计算,整体控制方程如下。

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

2) 动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)(u) = -\frac{1}{\rho} \nabla(P) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} S \quad (2)$$

其中针对混相区的源相:

$$S_u = -A_{\text{mush}} \frac{(1-f)^2}{f^3 + \omega} u \quad (3)$$

$$S_v = -A_{\text{mush}} \frac{(1-f)^2}{f^3 + \omega} v + \rho_{\text{ref}} g \beta (T - T_{\text{ref}}) \quad (4)$$

$$f = \begin{cases} 1, & T \geq T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s > T > T_l \\ 0, & T \leq T_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: A_{mush} ——糊相区常数,一般取值 10^5 ; f ——混相区中熔融盐的液态体积分数; ω ——避免分母为 0 引入常数,一般取值 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 之间; u ——液相 PCM 流动速度, m/s; ρ_{ref} ——相对密度, kg/m^3 ; β ——PCM 液相率; T_{ref} ——相对温度, K; T_l ——PCM 相变温度, K; T_s ——PCM 凝固温度, K。

3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho u H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (6)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho \Delta H \frac{\partial f}{\partial t} \quad (7)$$

式中: H ——焓值, J; c_p ——比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ΔH ——潜热焓, J。

加热管壁的能量方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

1.3 边界条件

内壁面为电伴热装置壁面,设置为指定热流密度加热面;外壁面为填充保温材料壁面,设置为绝热壁面;管内熔盐纳米材料为实验配置的 2H-1% SiO_2 混合熔盐纳米流体(表示在编号为 2H 的熔盐中加入 1% SiO_2 颗粒制备的纳米流体),其导热系数、比热容、熔化潜热、熔点等热物性参数及计算用到的相关热物性参数见表 1。初始时刻管内各处温度一致,初始温度设置为 435 K。

表1 相关热物性参数

Table 1 Relevant thermophysical parameters

材料	状态	熔点/℃	密度/(kg/m ³)	比热容/[J/(g·K)]	热导率/[W/(m·K)]	黏性系数/Pa·s
2H-1%SiO ₂	固态	166	2010	1775	0.58	0.0032
石蜡	固态	51	760	2100	0.25	0.0032
不锈钢	固态		8030	502	16.30	4.0000

采用 2D 非稳态、隐式求解器,对动量方程和能量方程采用 Second Order Upwind 格式进行离散,压力和速度耦合项采用 SIMPLE 算法,流动方式设置为层流并启动 Solidification&melting 计算模块。为了保证计算结果的精确性与收敛性,时间步长设为 0.05 s,迭代步数设为 60 步,部分松弛因子下调为 0.8。

1.4 模型验证

网格无关性验证可保证计算的精确性和可靠性,本研究利用 ICEM 软件对水平二维模型的内外壁进行 4 组网格的划分,设置不同的节点数量,网格数量分别为 8268、16048、38808、76728(图 2)。模拟计算步长为 100 s,验证在相同边界条件和时间下熔盐纳米流体液相率变化,如图 3 所示。由图 3 可知,在相同时间内,熔盐纳米流体熔化至 100 s 时,4 组网格数量对应的液相率分别为 0.612、0.680、0.681、0.683,当网格单元数量为 8268 时,液相率变化存在较大偏差,其余网格数量下液相率变化曲线吻合度较好。因此,选用网格数量为 38808 的模型进行后续数值计算。

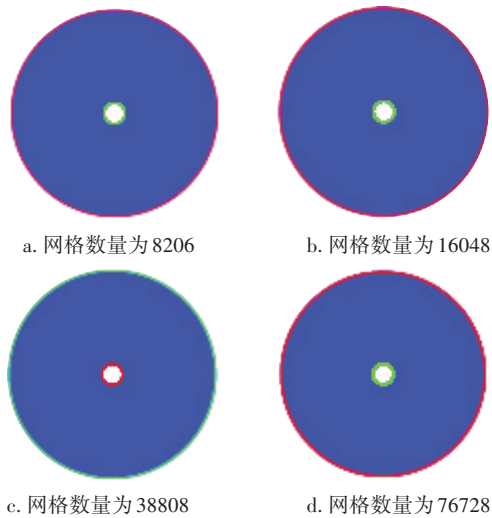


图2 不同节点的网格划分

Fig. 2 Meshing of different nodes

为验证模型的准确性与可靠性,本文以文献[23]的数值计算结果为依据,采用相同的二维模型几何参数,模型外径为 70 mm,内径为 14 mm,电伴热装置位于模型正中心,采用恒温热源。不同时刻下的石蜡熔化液相率数据与文献对比如图 4 所示。

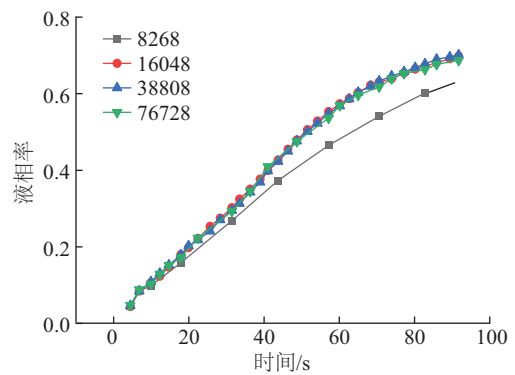
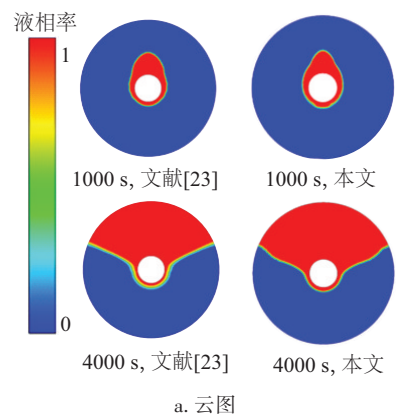
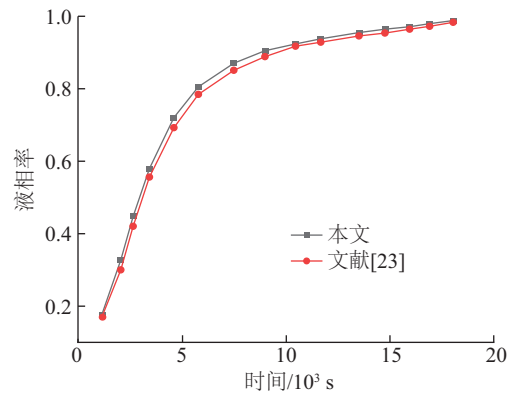


图3 不同网格数量下熔盐纳米流体液相率变化曲线

Fig. 3 Molten salt liquid phase rate change curve under different mesh numbers



a. 云图



b. 液相率曲线

图4 不同时刻下石蜡熔化数据与文献[23]对比图

Fig. 4 Comparison of paraffin melting data at different moments with literature [23]

针对石蜡相变熔化过程不同时间下液相率云图对比如图 4a 所示,在相同时刻下,本模型中石蜡的相变熔化云图与文献[23]中石蜡相变熔化云图变化趋势一致。图 4b 中相同条件下石蜡吸热熔化后液相率曲线吻合度良好,本文模拟计算值与文献[23]的计算值误差在 3%~5% 之间。

2 计算结果及分析

2.1 管内熔盐纳米流体熔化过程中液相率及温度分布

如图 5,定义液相率 β 为 1 时为图中色阶上部区域表示熔盐纳米流体熔化部分;下部区域表示熔盐纳米流体熔融未熔化的固态部分,即 $\beta=0$;而当 $0<\beta<1$ 时,代表熔盐纳米流体在水平装置中处于固-液混相的模糊区域。由图 5 可知,在 0~1000 s 的加热时间内,熔盐熔化速率逐渐加快;1000 s 后熔盐液相率的速度逐渐变缓,整个熔化速度呈先增大后减小的趋势;在 0~2000 s 的加热温度段内,熔盐熔化 80% 的体积;在 2000 s 之后的加热时间段内,熔盐熔化速度整体出现下降趋势。这是因为熔盐纳米流体熔化过程中存在自然对流,使得熔盐在整个熔化过程中熔化速率呈先增强后减弱的趋势。位于水平管道正中心的电加热棒恒温加热时,熔盐在熔化过程中由于浮升力的作用,熔化的液相熔盐逐渐向电伴热装置上方移动。在加热过程中,处于液相区的熔盐密度发生变化,由于自然对流中浮升力的产生,靠近电伴热装置的熔盐温度逐渐升高并开始吸热熔化,使密度较小的固态熔盐在浮升力的作用下逐渐向上流动,与相邻液相区的熔盐进行换热,从而导致熔盐的熔化区域从上半部分开始,温度场与熔盐的固-液混合相交界面形成上下不对称的现象。当加热时间持续到 3082 s 时,熔盐纳米流体完全熔化。

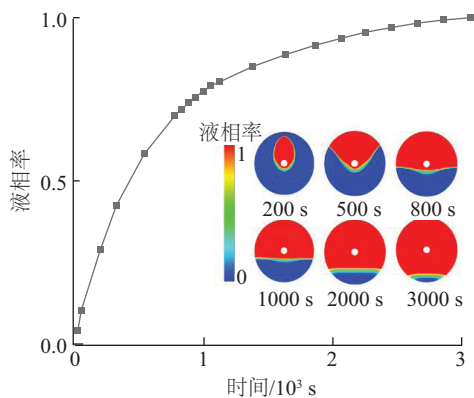


图 5 管内熔盐纳米流体熔化液相率变化

Fig. 5 Variation of melting liquid phase rate of molten salt nanofluid inside tube

图 6 为管内纳米熔盐熔化过程中固液交界面的平均温度变化情况。由图 6 可知,在 0~1000 s 的加热时间内,熔盐纳米流体的热传递速率升高;在 1000 s 时,熔盐纳米流体在熔化时固-液交界面最高温度为 461 K。

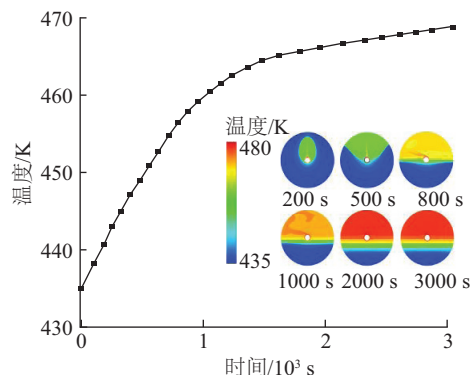


图 6 固液交界面混合熔盐平均温度变化

Fig. 6 Variation of average temperature of mixed molten salt at solid-liquid interface

2.2 电伴热装置尺寸对熔化过程的影响

为探究电伴热装置尺寸对管内熔盐纳米流体熔化效率的影响,改变电伴热装置的直径 D 分别为 5、10 和 20 mm,保持熔盐整个区域面积不变,对应管内径分别为 50.00、50.74、53.62 mm,保持融化条件不变,对应热流密度为 26000、13000 和 6500 W/m²。图 7 为不同电伴热装置直径 D 下熔盐熔化液相率分布云图及曲线。

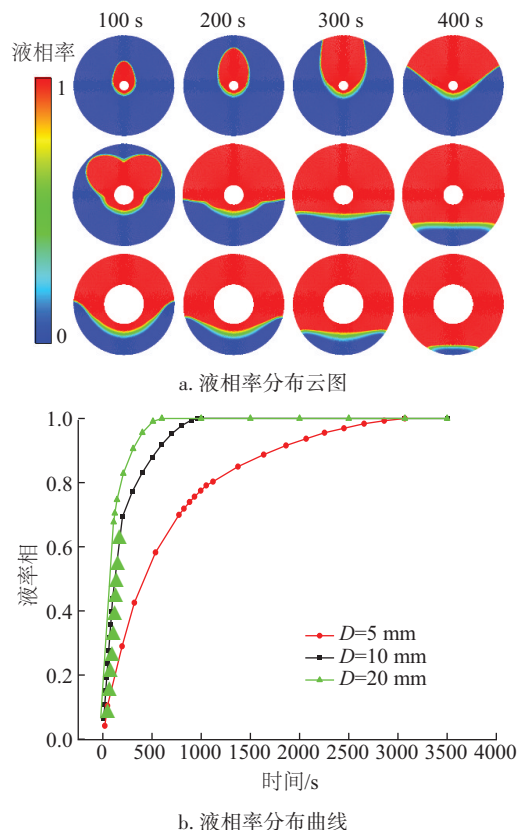


图 7 不同电伴热装置直径下熔盐熔化液相率分布云图及曲线

Fig. 7 Cloud diagram and curve of distribution of liquid phase rate of molten salt melting under different diameters of electric heat tracing device

由图 7 可知,电伴热装置直径直接影响熔盐的熔化速率, D 越大熔盐纳米流体的液相率变化梯度越大。由于熔盐纳米流体在熔化过程中受到自然对流的影响,位于管道上方的熔盐纳米熔化速率始终明显高于管道下方的熔盐纳米,且电伴热装置下方的熔盐熔化速率普遍呈减慢趋势。与 5 mm 直径的电伴热装置相比,直径为 10 mm 和 20 mm 的电伴热装置对熔盐的熔化效率分别提高 68% 和 82%,熔盐完全熔化时间分别为 1100 s 和 623 s。图 8 为不同电伴热装置直径 D 下熔盐熔化温度分布云图及曲线。由图 8 可知,对于同一熔盐, D 越大管内熔盐传热效率越快,其温度梯度也越大。由于受到管内自然对流的影响,位于电伴热装置下方的熔盐温度的传递仍受到热阻的影响,其传递效率逐渐降低。因此,在对熔盐管道内部加装电伴热装置防止熔盐冻堵现象的发生时,在保证管内熔盐的质量流量和流速满足要求的前提下,应尽可能增加电伴热装置的直径,增强电伴热装置对熔盐的热传递效率,保障熔盐熔化速率。

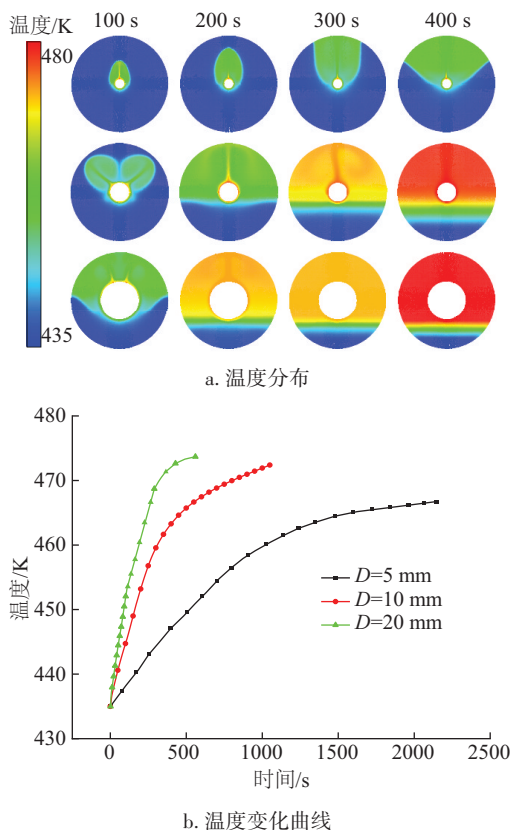


图 8 不同电伴热装置直径下熔盐熔化温度分布云图及变化曲线

Fig. 8 Molten salt melting temperature distribution cloud and change curve under different diameters of electric heat tracing devices

2.3 Ste 对熔化过程的影响

在模拟计算熔盐熔化过程中,斯蒂芬数(Ste)表征了熔盐

纳米流体的显热与潜热之比^[23]。为了更好地描述相变过程,引入无量纲参数 Ste :

$$Ste = c_{p,solid} \frac{T_{in} - T_m}{L} \quad (9)$$

式中: $c_{p,solid}$ ——固体比热容, $J/(kg \cdot K)$; T_{in} ——加热温度, K ; T_m ——相变平均温度, K ; L ——相变潜热, kJ/kg 。

通过调整熔盐纳米流体填充区域温度与电伴热装置的温度差值来改变 Ste 数的大小。设置边界条件的温度差值分别为 $25^\circ C$ ($Ste=0.392$)、 $45^\circ C$ ($Ste=0.706$)、 $65^\circ C$ ($Ste=1.021$) 时,分析不同 Ste 对熔盐熔化过程的影响。当 Ste 为 0.392、0.706、1.021 时,400 s 时刻下纳米流体固-液界面熔化过程如图 9 所示。由图 9 可知,在相同时刻下,熔盐纳米流体的熔化速率随 Ste 的增大而增大;当温差由 $25^\circ C$ 增至 $45^\circ C$ 和 $65^\circ C$ 时,由于加热壁面与熔盐界面更大的温度差值产生了较大的温度梯度,导致熔盐纳米流体的热传递效率增强,熔化速率也随之增加。

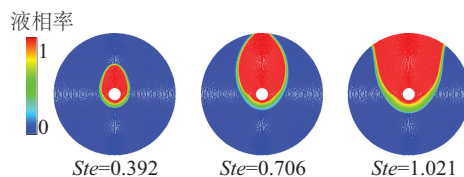


图 9 400 s 时不同 Ste 的纳米流体固-液界面液相率云图
Fig. 9 Liquid phase rate cloud at solid-liquid interface of nanofluids with different Ste at 400 s

图 10 为不同 Ste 下熔盐纳米熔化过程液相率曲线对比图。当 Ste 由 0.392 分别增至 0.706 和 1.021 时,熔盐纳米完全熔化时间分别减少 66% 和 81%。由于传热温差对熔盐纳米的蓄放热效率的增加有限,当 Ste 由 0.706 增至 1.021 时,熔盐纳米的熔化速率提升变缓,明显低于 Ste 由 0.392 增至 0.706 时的熔化提升速率。

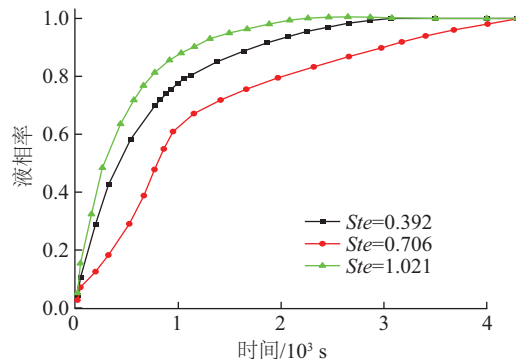


图 10 不同 Ste 下的熔盐纳米熔化过程液相率曲线对比
Fig. 10 Comparison of liquid phase rate curves for nanomelting process of molten salt at different Ste

3 结 论

本文利用 ANSYS 软件建立了内置电伴热装置水平管道

的二维模型,模拟了熔盐纳米流体在管道中的熔化过程,探究了电伴热装置直径及 Ste 对熔盐自然对流传热特性的影响,分析了熔化过程中液相率和温度分布,得出如下主要结论:

1)位于水平管道中心的电伴热装置加热时,随着加热时间的持续增长,熔盐在重力与管道内自然对流产生的浮升力作用下,液相的熔盐增多,导致自然对流逐渐增强,并且水平管道内出现上面先熔化、下面后熔化的不对称现象。

2)在探究电伴热装置尺寸对管内熔盐纳米流体熔化效率的影响时,电伴热装置直径的不同直接影响熔盐的熔化速率,与 5 mm 直径的电伴热装置相比较,直径为 10 mm 和 20 mm 的电伴热装置对熔盐的熔化效率分别提高 68% 和 82%,熔盐完全熔化的时间分别为 1100 s 和 623 s。

3)当 Ste 由 0.392 分别增至 0.706 和 1.021 时,熔盐纳米流体完全熔化时间分别减少 66% 和 81%。

[参考文献]

- [1] 牛东圣,周治,肖斌,等.槽式光热电站熔盐管道系统防凝研究进展[J].热力发电,2020,49(3):1-7.
NIU D S, ZHOU Z, XIAO B, et al. Advances in freeze protection of molten salt piping system in parabolic trough CSP plants[J]. Thermal power generation, 2020, 49(3): 1-7.
- [2] LI Z, ZHANG Q Q, WANG Z F, et al. Numerical and experimental study of solidification dangers in a molten salt receiver for cloudy conditions [J]. Solar energy, 2019, 193: 118-131.
- [3] CALVET N, SLOCUM A H, GIL A, et al. Dispatchable solar power using molten salt directly irradiated from above [J]. Solar energy, 2021, 220: 217-229.
- [4] 温士彪,张瑜,王永生,等.浅谈熔盐防冻堵技术的研究[J].区域供热,2021(5):1-7.
WEN S B, ZHANG Y, WANG Y S, et al. Study on antifreeze blocking technology of molten salt [J]. District heating, 2021(5): 1-7.
- [5] 王佳明,黄静,曾柱楷,等.电伴热布置方式对管内熔盐解冻过程的影响研究[J].节能技术,2022,40(1):36-42,51.
WANG J M, HUANG J, ZENG Z K, et al. Study on the effect of electric tracing heater arrangement on the thawing process of molten salt in pipeline [J]. Energy conservation technology, 2022, 40(1): 36-42, 51.
- [6] 申晓蕾,陈海涛.电伴热在光热发电熔盐系统中的应用浅析[J].电力设备管理,2024(15):131-133.
SHEN X L, CHEN H T. Analysis on the application of electric heat tracing in molten salt system of solar thermal power generation [J]. Electric power equipment management, 2024(15): 131-133.
- [7] 吴旺松,匡敬柱,毛正江,等.管内加装电伴热装置时熔盐熔化过程研究[J].热力发电,2022,51(3):79-87.
WU W S, KUANG J Z, MAO Z J, et al. Study on melting process of molten salt in pipe equipped with a built-in electric tracing heater [J]. Thermal power generation, 2022, 51(3): 79-87.
- [8] 臧平伟.太阳能光热电站熔盐管道及其防凝设计[J].东方电气评论,2019,33(2):67-70.
ZANG P W. Molten salt pipeline and anti-solidification design for solar thermal power plant [J]. Dongfang electric review, 2019, 33(2): 67-70.
- [9] 王元媛,鹿院卫,樊占胜,等. KNO_3 - $NaNO_2$ - KNO_2 三元系相图筛选及物性测试[J].太阳能学报,2024,45(9):662-667.
WANG Y Y, LU Y W, FAN Z S, et al. Phase diagram screening and physical property testing of KNO_3 - $NaNO_2$ - KNO_2 ternary system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 662-667.
- [10] 杨薛明,陶嘉伟,孟凡星,等. $Li_2CO_3/Na_2CO_3/K_2CO_3$ 及其混合熔融盐储热材料热物性分子动力学研究[J].太阳能学报,2023,44(5):48-58.
YANG X M, TAO J W, MENG F X, et al. Molecular dynamics study on thermophysical properties of $Li_2CO_3/Na_2CO_3/K_2CO_3$ and their mixed molten salt for heat storage [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(5): 48-58.
- [11] 陈虎,吴玉庭,郭航,等.低熔点熔融盐管内强迫对流换热的实验研究[J].太阳能学报,2021,42(2):25-30.
CHEN H, WU Y T, GUO H, et al. Experimental study on forced convection heat transfer with low melting point molten salt in smooth tube [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(2): 25-30.
- [12] XU X, ZHANG L, WANG Q, et al. Thermal performance analysis of molten salt based on a novel experimental rig [J]. Applied thermal engineering, 2024, 236: 121731.
- [13] ONG T C, SARVGHAD M, BELL S, et al. Review on the challenges of salt phase change materials for energy storage in concentrated solar power facilities [J]. Applied thermal engineering, 2024, 238: 122034.
- [14] ILHAM M, KUNCORO AJI I, OKAWA T. Numerical study on the effects of tube inclination angle and heat conductive cover plate on freeze plug performance in molten salt reactors [J]. Nuclear engineering and design, 2024, 428: 113528.
- [15] TIAN W S, PENG T J, TANG Y Z, et al. Numerical analysis of turbulent mixed convection heat transfer of molten salt in an inclined cooling tube [J]. Annals of nuclear energy, 2024, 207: 110676.
- [16] 孟强,陈梦东,胡晓,等.管内熔融盐强制对流传热的数值模拟[J].储能科学与技术,2019,8(3):544-550.
MENG Q, CHEN M D, HU X, et al. Numerical

- simulation of forced convective heat transfer of molten salt in tubes [J]. *Energy storage science and technology*, 2019, 8(3): 544-550.
- [17] 孔祥夷. 太阳能集热管内熔盐流动传热特性数值模拟[J]. *节能技术*, 2017, 35(2): 167-171.
- KONG X Y. Numerical simulation study on the heat transfer of molten salt in solar receiver tube [J]. *Energy conservation technology*, 2017, 35(2): 167-171.
- [18] YANG X P, YANG X X, DING J, et al. Numerical simulation study on the heat transfer characteristics of the tube receiver of the solar thermal power tower[J]. *Applied energy*, 2012, 90(1): 142-147.
- [19] 谭倩莉, 刘慧芳, 张铭驿, 等. 月桂酸/硬脂酸/纳米复合相变材料制备及性能研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(4): 532-539.
- TAN Q L, LIU H F, ZHANG M Y, et al. Preparation and properties of lauric acid/stearic acid/nanocomposite phase change materials [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(4): 532-539.
- [20] DONG X M, WU Y T, ZHANG C C, et al. Experimental and numerical study on heat transfer and flow characteristics of molten salt nanofluids in spiral-wound tube heat exchanger [J]. *International journal of thermal sciences*, 2023, 191: 108343.
- [21] CHEN X, QU L M, ZHANG M X, et al. Experimental study on thermal properties and microstructure of carbon nanotube molten salt nanofluids for solar thermal utilization [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2024, 278: 113201.
- [22] HE B S, YING Z P. Numerical investigation of molten salt-based nanofluid laminar heat transfer in a circular tube using Eulerian-Lagrangian method [J]. *Thermal science*, 2021, 25(5 Part A): 3427-3439.
- [23] 张嘉辉. 三元氯化盐相变蓄热特性及强化换热研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- ZHANG J H. Thermal storage characteristics and heat transfer enhancement of ternary chloride molten salt [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

NUMERICAL SIMULATION STUDY ON MELTING PROCESS OF MOLTEN SALT IN PIPE WITH ELECTRIC HEAT TRACING DEVICE

Ma Rui¹, Ren Zhien¹, Guo Jiamin¹, Zhu Rui¹, Wang Feng¹, Yang Xiaoyan²

(1. *Key Laboratory of Wind and Solar Energy Utilization Mechanism, College of Energy and Power Engineering,*

Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Measurement and Testing Institute, Hohhot 010060, China)

Abstract: In this paper, a two-dimensional model of horizontal pipeline with built-in electric heat tracing device is established to simulate the position, shape and temperature field distribution of solid-liquid interface of mixed molten salt nanofluid during the melting process, and to analyze the influence of different Ste and the size of the electric heat tracing device on the whole molten salt melting process. The results indicate that, as the heating duration increases, the distance between the electric heating system and the phase interface increases, and the transfer of heat to the molten salt in the solid phase gradually slows down due to the increase in thermal resistance. and the molten salt nanofluid is completely melted when the heating time lasts for 3082 s. The temperature of the solid-liquid interface is reduced by the influence of the thermal resistance of the electric trace heating device. When Ste increases from 0.392 to 0.706 and 1.021, the complete melting time of the molten salt nanofluid is reduced by 66% and 81%, respectively; compared with the 5 mm diameter electric trace heating device, the melting efficiency of the molten salt of the electric trace heating device with diameters of 10 mm and 20 mm is increased by 68% and 82%, and the time of complete melting of the molten salt is 1100 s and 623 s, respectively.

Keywords: solar thermal power generation; heat transfer; phase change; melt; nanofluids; molten salt; electric heating element