

糊状区常数对熔盐液固相变行为特性的影响研究

于鸿翔^{1,2} 周 翀^{1,2} 袁晓凤¹ 陈玉爽^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 熔盐堆凭借其熔盐冷却剂在常压、高温环境下的卓越物理与化学性能,展现出较高的固有安全性和经济潜力。然而,熔融无机盐的凝固点较高,管内流动过程中若遇到冷点,可能导致管道冻结堵塞的风险。本研究采用商用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)程序 ANSYS Fluent 对熔盐填充冷管过程进行数值模拟,利用焓-孔隙率模型处理凝固相变问题,其中,糊状区常数(A_{mush})是重要影响参数之一。研究首先聚焦于熔盐冷管流动过程中的基本相界面结构、凝固与熔化现象等特性;随后,针对管道冻堵问题,分析了不同糊状区常数取值($5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$)下的瞬态过程,计算得到一组堵塞穿透距离模拟值,并对其敏感性进行了探讨;最终,基于已有堵塞穿透距离实验值反推发现 $A_{mush} = 5 \times 10^4$ 适用于 HTS 盐的糊状区效应估计。研究结果表明,糊状区常数对凝固相变特性具有显著影响,在使用焓-孔隙率模型时,正确选择糊状区常数对于准确预测介质固液相变行为及其冻堵特性至关重要。

关键词 熔盐, 凝固与熔化, 糊状区常数, 堵塞穿透距离, 计算流体力学

中图分类号 TL334

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240306

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240306

Influence of mushy zone constant on solid-liquid phase change behaviors and characteristics of molten salt in filling process

YU Hongxiang^{1,2} ZHOU Chong^{1,2} YUAN Xiaofeng¹ CHEN Yushuang^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] Molten salt reactor is a promising type of reactor with excellent safety and economy, benefiting from the stable properties of its molten salt coolant at high temperatures. However, the freezing point of molten inorganic salt is usually high enough to pose a risk of coolant freezing, which could plug the pipelines when flowing through a relatively cold place. [Purpose] This study aims to present the process of the molten salt filling cold pipe with solidification-melting behaviors and estimate the mushy zone effect of molten salt with temperature

中国科学院上海应用物理研究所堆芯模块化理论与比选研究(No.SINAP-QYJS-202202)、甘肃省科技重大专项钍基熔盐堆关键装备与技术开发(No.23ZDGH001)资助

第一作者: 于鸿翔, 男, 2000 年出生, 2022 年毕业于成都理工大学, 现为博士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 周翀, E-mail: zhouchong@sinap.ac.cn

收稿日期: 2024-07-26, 修回日期: 2024-10-17

Supported by Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, "Research on Core Modularization Theory and Comparison" (No. SINAP-QYJS-202202), Gansu Major Scientific and Technological Special Project (No.23ZDGH001)

First author: YU Hongxiang, male, born in 2000, graduated from Chengdu University of Technology in 2022, doctoral student, focusing on thermal hydraulic analysis of nuclear reactor

Corresponding author: ZHOU Chong, E-mail: zhouchong@sinap.ac.cn

Received date: 2024-07-26, revised date: 2024-10-17

near the freezing point. **[Methods]** The commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) code ANSYS Fluent was used to numerically simulate the process, and the solidification-melting behaviors were solved by the enthalpy-porosity model, in which the mushy zone constant (A_{mush}) was an important influencing parameter. By monitoring the velocity change of the characteristic interface, a set of penetration distances was simulated at different A_{mush} values ($5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$), and an existing experiment was used to deduce the mushy zone constant for molten salt. **[Results]** Simulation results show that penetration distance is sensitive to variations in the mushy zone constant. Based on the existing experimental value of penetration distance, $A_{\text{mush}} = 5 \times 10^4$ is suitable to mushy zone influence estimation for molten salt. **[Conclusions]** Based on the method proposed in this study for determining the mushy zone constant, proper selection of mushy zone constant is very much necessary to accurately solidification-melting process prediction when using the enthalpy-porosity model whilst the freezing point of molten inorganic salt is usually high enough presenting a risk of coolant freezing which could plug pipelines when flowing through relative cold place.

Key words Molten salt, Solidification-melting, Mushy zone constant, Penetration distance, Computational fluid dynamics (CFD)

熔盐在高温下具有稳定的化学性质和良好的热物性^[1],是公认的优良高温传热介质,其不仅可作为液态熔盐堆溶解核燃料的溶剂(基盐)和固态熔盐堆堆芯冷却剂,同时也是熔盐热量传输系统的传热介质^[2-5]。但熔融无机盐普遍具有较高的凝固点^[6],远超室温,在熔盐系统启动或运行阶段,容易发生凝固现象。这种凝固可能导致系统压力急剧上升,进而引发管道堵塞或材料断裂等严重的安全事故^[7]。

为设计熔盐防冻堵策略,进一步保证熔盐系统的安全性,首先需要准确理解熔盐在管道系统中的凝固相变机制。Bergan^[8]首先对外部熔盐太阳能中央接收器(Molten Salt Electric Experiment, MSEE)进行了测试,观察了管道出口处熔盐的流动情况,发现熔盐在低于凝固点温度的接收器上填充时存在冻结堵塞情况;随后,Pacheco等^[9]使熔盐流过冷板,测量了其局部瞬态热响应,并利用Cheung^[10]的结论对熔盐冻堵的穿透距离进行了预测。在熔盐填充冷管过程中,熔盐遇冷发生凝固相变,由于实验测量手段的限制,难以获得其瞬态的局部动力及热参数,而数值方法在这方面具有明显优势。特别是逐渐兴起的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对研究瞬态、三维流动问题十分有优势,能够方便分析参数变化以便理解流动过程。例如,Lu等^[11]用CFD商用软件ANSYS Fluent描述了熔盐冷填充过程,通过熔盐流动前沿界面温度达到凝固点来判断熔盐是否冻堵,并提出了堵塞穿透距离相关式。但对于理论上共晶的多元熔盐体系,其实际凝固点不是固定值^[12],而是在一定温度范围内存在固液共存现象,此温度范围也被称作糊状区,由于其半固态和多孔性^[13-14],该区域在熔融和凝固过程中的影响至今仍难以预测。

由凝固引起的相之间的移动边界问题,通常被

称为Stefan问题。针对这一问题,Voller等^[15]首先提出的焓-孔隙率方法是一种广泛使用的单域数值模拟方法,该方法利用固定的网格来计算流体中的液相和固相分数,通过对糊状区流体施加不同比例的阻尼和相变潜热,来模拟凝固相变过程中的流动和传热特性。其中,糊状区常数备受关注,选取合适的糊状区常数有助于正确预测糊状区域内的流动与传热行为。在众多研究^[16-17]中,针对不同介质提出了各种糊状区常数的取值建议,取值范围为 $10^3 \sim 10^8$ 。针对相变储热,可通过比较不同时刻静态介质的相变形状确定合适的糊状区常数,当涉及流动问题,糊状区带来的额外阻尼不可忽略,其关键参数取值方法的尝试也必不可少。

本研究的目的是评估熔盐冷管流动中的糊状效应,首先给定 $A_{\text{mush}} = 10^5$,介绍了基本的流动前沿形状和凝固层厚度变化,并分析了熔盐冷管填充过程中的凝固与熔化行为及其速度、温度场变化。为了考虑填充过程中的冻结堵塞现象,由糊状区自带压损特点,根据其特征界面速度的衰减规律,计算堵塞穿透距离;接着,扩大 A_{mush} 取值范围($5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$),进一步分析填充过程中的凝固与熔化行为,以堵塞穿透距离作为评估的定量手段,分析其对 A_{mush} 的敏感性;最后,利用已有的凝固实验数据,反推出适合熔盐的糊状区常数取值。

1 分析方法

1.1 控制方程

熔盐排空管内空气首先是一个多相过程,采用流体体积法(Volume of Fluid, VOF)进行模拟,其通过求解不同相的体积分数,来追踪相间界面,不同相的体积分数约束如下:

$$\alpha_m + \alpha_a = 1 \quad (1)$$

式中： α_m 、 α_a 分别是熔盐和空气的体积分数。不同相之间共用一套动量与能量方程，故方程中的材料物性也根据不同相的体积分数占比决定。

$$x = \alpha_m x_m + \alpha_a x_a \quad (2)$$

其中： x 可以是密度(ρ)、定压比热(c)、热导率(λ)和动力黏度(μ)。

熔盐填充过程发生凝固/熔化相变现象，将采用焓-孔隙率方法进行处理，这种方法不显示追踪相界面，而是通过焓平衡计算得到液相分数来表达。

流体的焓为显焓 h 和潜热 ΔH 之和：

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$

式中：

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (4)$$

式中： h_{ref} 是参考焓； T_{ref} 是参考温度； c_p 是定压比热容。

液相分数 f_l 定义为：

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

式中： T_s 、 T_l 分别是流体的固、液相温度；液相分数 f_l 在0~1之间的区域称作糊状区，是一种半固体区域。

潜热量 ΔH 可写成是液相分数 f_l 与液相潜热值

Q 的乘积：

$$\Delta H = f_l Q \quad (6)$$

综上，其能量方程可写为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (7)$$

其中， S 为源项，且动量方程可写为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} + A \quad (8)$$

其中， g 是重力加速时， F 是表面张力源项；因流体凝固而导致的动量下降，由阻力源项 A 表示：

$$A = \frac{(1 - f_l)^2}{(f_l^2 + \varepsilon)} A_{\text{mush}} \vec{v} \quad (9)$$

式中： ε 为一个防止分母为零的极小值(0.001)；在糊状区内，随着流体的凝固， f_l 从1降至0，其速度也随之降为零。 A_{mush} 为糊状区常数，其通过调整凝固阻力源项的大小，从而控制流体凝固时速度变化量，该值越大，凝固时速度降低越快。

1.2 几何与初始条件

如图1所示，基于笛卡尔坐标系，建立三维熔盐填充冷管的几何模型。钢制管道内径 $R_1=0.005$ m，外径 $R_2=0.006$ m，管长 $L=1$ m。充填过程开始前，管内充满空气，整个管道初始温度为301.5 K，且管道外壁面 $T_w=301.5$ K，保持恒温；充填过程开始，于 $z=0$ 处，熔盐入口温度、压差分别为 T_0 、 ΔP_0 。

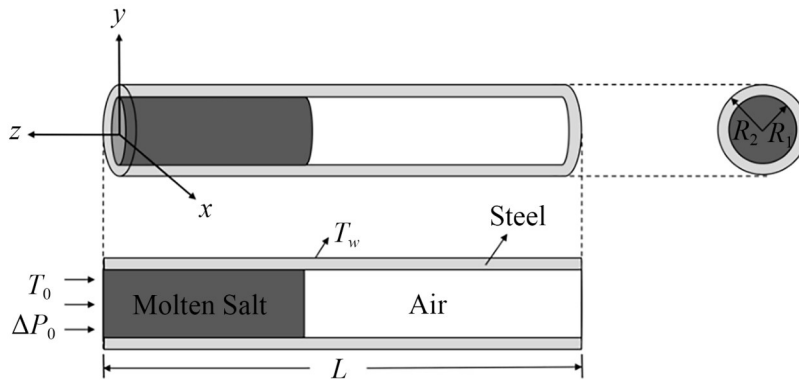


图1 几何模型结构示意图

Fig.1 Structural diagram of geometric model for molten salt filling pipeline with the initial boundary conditions

熔盐堆常用氟盐作为基盐，其在高温下有很强的腐蚀性和化学毒性，考虑到实验用盐的可能性，且在一定的温度范围内，硝酸盐的物性和变化与氟盐类似。故熔盐选用三元硝酸盐， KNO_3 - NaNO_2 - NaNO_3 (53-40-7 wt%)的硝酸盐，又称HTS盐，其热物性^[18]列于表1。

考虑到熔盐流动前沿相界面的连续结构变化，在 y 轴负方向添加重力加速度 $g=9.81$ m·s⁻¹，熔盐表

面张力^[19] $\sigma=0.149-0.000\ 055\ 6T$ N·m⁻¹，熔盐-空气-钢制圆管的多相接触角为20°，此外，熔盐固相温度 $T_s=406.5$ K，液相温度 $T_l=418.2$ K，潜热 $Q=80$ kJ·kg⁻¹，糊状区常数为 A_{mush} 。

1.3 程序设置及网格无关性分析

ANSYS Fluent^[20]使用有限体积法，将计算域离散成有限体积单元，并将变量存储在网格单元的中

表1 HTS盐热物性
Table 1 Thermal properties of molten salt in present simulation

热物理性质 Thermal properties	计算公式 Calculation formula
密度 $\rho_m / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$2\,293 - 0.749\,7T$
定压比热容 $c_m / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$5\,806 - 10.833\,7T + 7.241\,3 \times 10^{-3}T^2$
导热系数 $\lambda_m / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$0.78 - 1.25 \times 10^{-3}T + 1.6 \times 10^{-6}T^2$
动力粘度 $\mu_m / \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.473\,7 - 2.297 \times 10^{-3}T + 3.371 \times 10^{-6}T^2 - 2.019 \times 10^{-9}T^3$

心。开启凝固-熔化模型,添加糊状区常数 (A_{mush}),并在熔盐介质设置中添加糊状温度范围 (T_s, T_l)以及相变潜热值 (Q),其中 A_{mush}, Q 在糊状温度范围内线性变化。填充过程中,当熔盐温度达到液相温度 (T_l),相变潜热作用下,其温度降低放缓,并随着温度降低,熔盐将凝固产生额外阻力影响流动,通过比较流动距离随时间的变化来测试不同网

格方案。网格划分总体采用六面体结构化网格,流向上,每层网格厚度为 1.5 mm,熔盐将于冷管内壁生长出凝固薄层^[21],重点关注径向与周向网格分布,如图2所示,网格独立性共测试4种方案。从图3可以看出,较高的网格密度使得流动距离 (L_x) 随时间没有显著变化,兼顾计算效率,最终选取尺寸3网格方案,总网格数为 830 415。

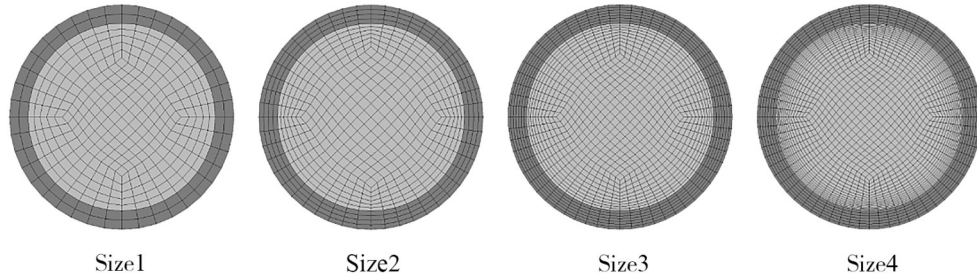


图2 网格尺寸示意图
Fig.2 Schematic diagram of the grid size

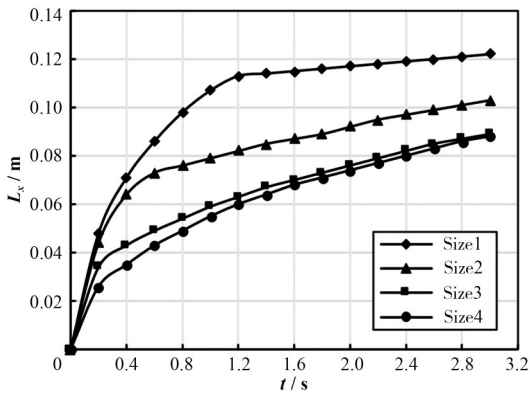


图3 不同网格尺寸下的流动距离随时间变化
Fig.3 Variation of flow distance with time for different grid sizes

本文涉及的典型入口条件是恒定压差入口 $\Delta P_0 = 22 \text{ Pa}$, 零时刻,其全部转化为流体动压,入口速度 (v_0) 约为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $Re = 160$,故流体流动使用层流模型。对于模拟密度差较大的熔盐与空气相,其压力-速度耦合求解使用 PISO (Pressure-Implicit with Splitting Operators) 算法,并采用二阶精度的迎风格式对动量和能量方程进行离散。为了得到良好瞬态计算结果,时间步长的选取参考 Courant,如

式(10)。

$$\text{Courant} = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (10)$$

式中: u 是流速; Δx 是网格尺寸; Δt 是时间步长。若 $\text{Courant} < 1$, 时间步长较小,计算时间虽长但数值稳定性好,考虑到计算的易发散性,故牺牲部分计算效率,从而追求计算稳定性, Δt 最终取值 0.001 s 。

2 结果与讨论

2.1 凝固与熔化行为及其特性

本节以 $\Delta P_0 = 22 \text{ Pa}$ 、 $T_0 = 415.4 \text{ K}$ 、 $A_{\text{mush}} = 10^5$ 为例,研究糊状熔盐填充水平冷管过程中的液固相变行为及其特点。图4从水平、垂直方向3D展示了短时刻的熔盐填充情况,能够说明其基本的相界面结构和初始凝固行为,其中黑色区域为 $f_l < 0.5$ 的熔盐固相部分,蓝色区域为式(1)提到的体积分数小于 0.5 的空气部分。从不同截面可以看到,从管道入口 ($z=0$) 开始,由管壁附近均匀生长出一层很薄的凝固层,受重力与界面张力影响,相界面沿流向被拉长,形成光滑长条弧形状的流动前沿。且流动前沿 ($z=0.02 \sim 0.05 \text{ m}$) 在管壁附近的界面因接触角而急剧

弯曲,当液面高度大于管道内径 R_1 时,高于中间区域,反之,低于中间区域。

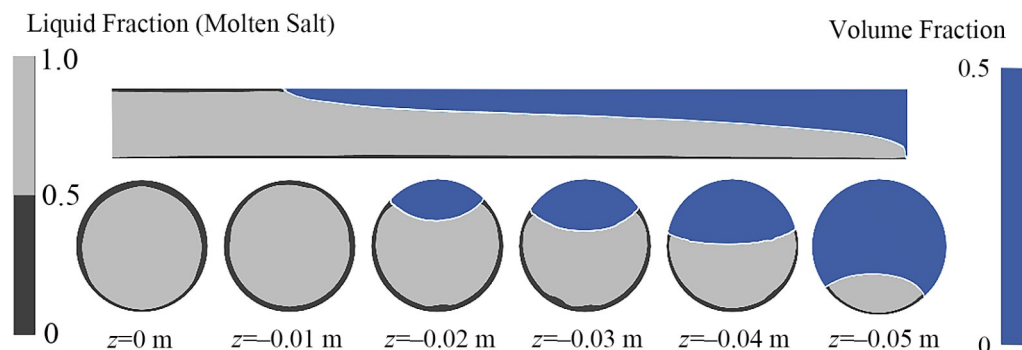


图4 基本相界面结构与凝固行为($t = 0.4$ s)示意图(彩图见网络版)

Fig.4 Diagram of the basic phase interface structure and initial solidification behavior ($t = 0.4$ s) (color online)

图5展示了 $x=0$ 截面,熔盐填充过程中的凝固情况,可以看到,表现为凝固层厚度的变化,其主要取决于冷管壁和高温流体。在0.4 s时,熔盐凝固时间较短,在冷壁面附近生长出极薄的凝固层,其最大厚度约为0.5 mm,在0.8 s时,最大厚度为0.8 mm。在1.2 s时,可以看到上下壁面附近的凝固层厚度有了明显的区别,因流动受重力影响,高温流体率先向管道下方聚集,不断融化下管壁附近凝固,使得下壁附

近的凝固层较薄,最终上层凝固厚度要大于下层,此时,上层凝固最大厚度约为1.8 mm,下层凝固最大厚度约为1.0 mm,在2.0 s时,上层凝固最大厚度约为1.9 mm,下层凝固最大厚度约为1.3 mm。在4.0 s时,经历了较长的凝固时间后,流速变缓,传热方式由热对流向热传导过渡,下层凝固受流动影响变小,其上下层凝固厚度逐渐靠近,此时,上层凝固最大厚度约为2.2 mm,下层凝固最大厚度约为1.8 mm。

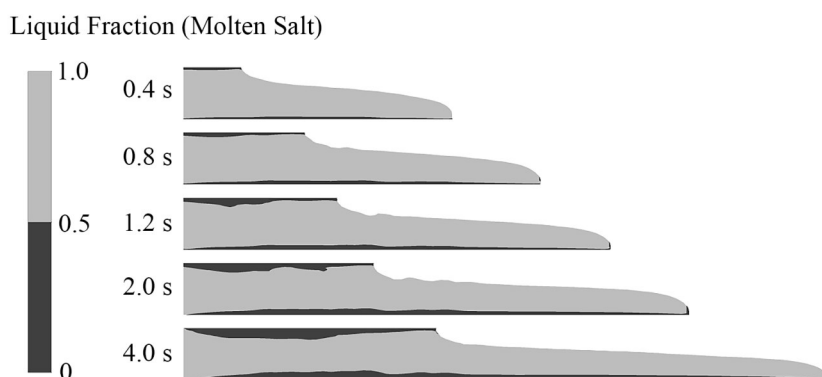


图5 熔盐流动过程中的凝固与熔化行为($x = 0$)示意图

Fig.5 Diagram of solidification and melting behaviors in horizontal sections during filling process ($x=0$)

此外,为了更加清晰定量凝固与熔化现象,图6(a)~(c)用 f_l 详细描述了凝固开始生长处,即入口截面($z=0$)的相变行为。图6(a)展示了 $z=0$ 截面不同时刻的液相分数云图,在0.4~1.2 s,受冷壁影响,管道上层及两侧凝固厚度逐渐变大,是典型的凝固过程;由于重力作用,管道下层的流动较为剧烈,导致壁面附近的凝固层较薄。在2.0~4.0 s,受高温来流影响,上、下层凝固厚度开始减小,直至消失,是典型的熔化过程。

图6(b)是典型凝固过程中径向的液相分数变化,不同时刻,下层凝固厚度很小且近似相等,约为0.15 mm;0.4~1.2 s,上层凝固厚度变化为0.4~

0.6 mm,逐渐变厚。图6(c)是典型熔化过程中径向的液相分数变化,可以看到,从2.0 s开始,下层凝固就被完全熔化,上层凝固厚度由2.0 s时的0.6 mm到4.0 s被完全熔化。

图7是填充过程中 $x=0$ 平面的速度分布。管道进出口保持恒定总压差,零时刻,熔盐以 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度进入管道; $t=0.4$ s,随着充填过程中沿程、凝固阻力出现,管内压损逐渐增大,由于重力,于入口附近管段下方产生回流,流速沿流向开始衰减,以保证进出口压差的守恒。 $t=4.0$ s,速度从管壁到管道中心也有明显的分层,且流动前沿在上壁附近有小的回流涡旋。图8(a)~(b)是几个横截面上不同时

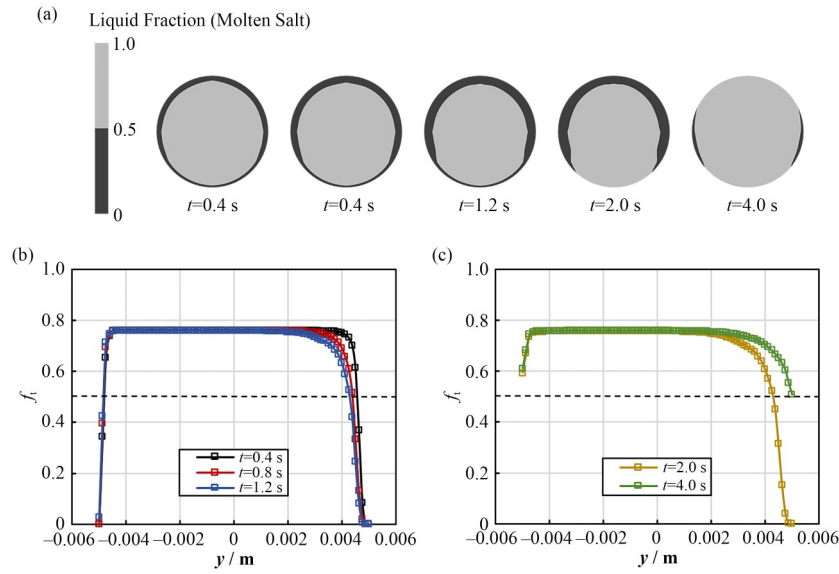


图6 冷管入口截面处的凝固与熔化行为 (a) 液相分数云图($z=0$), (b) $t=0.4\sim 1.2$ s 的液相分数, (c) $t=2.0\sim 4.0$ s 的液相分数

Fig.6 Solidification and melting behaviors in $z=0$ section during filling process

(a) Liquid fraction contours ($z=0$), (b) Liquid fraction at $t=0.4\sim 1.2$ s, (c) Liquid fraction at $t=2.0\sim 4.0$ s

刻的温度分布。当 $t=0.4$ s, 熔盐流经 $z=-0.01$ m, 壁面附近有凝固产生, 流通面积被压缩, 中心流速增大; 此时, $z=-0.03$ m 与 $z=-0.08$ m 处远离主流熔盐, 其速度分布近似为管内初始状态。当 $t=0.4$ s, 历经了较长的凝固时间后, 流速已经大幅度衰减, 由于凝

固层的稳定生长, 于 $z=-0.03$ m 与 $z=-0.08$ m 可见, 壁面附近产生零速度层, 此时, 熔盐已流至 $z=-0.08$ m, 其处于流动前沿部分, 只有下侧存在零速度层, 截面上半部分充满气体。

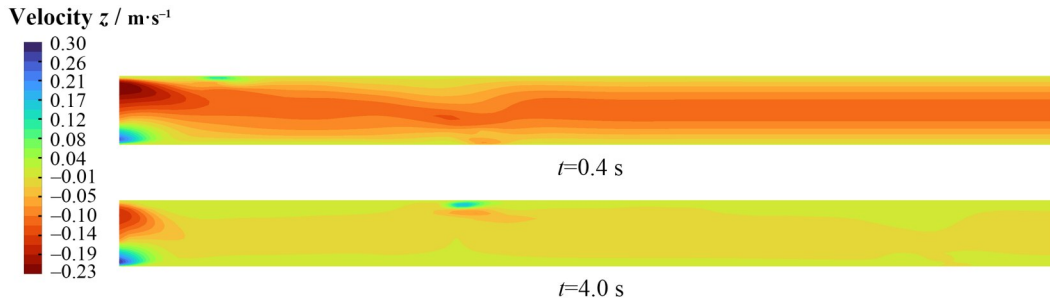


图7 不同时刻的流体区速度场云图($x=0$) (彩图见网络版)

Fig.7 Velocity field contours of the fluid zone at different time moments during filling process ($x=0$) (color online)

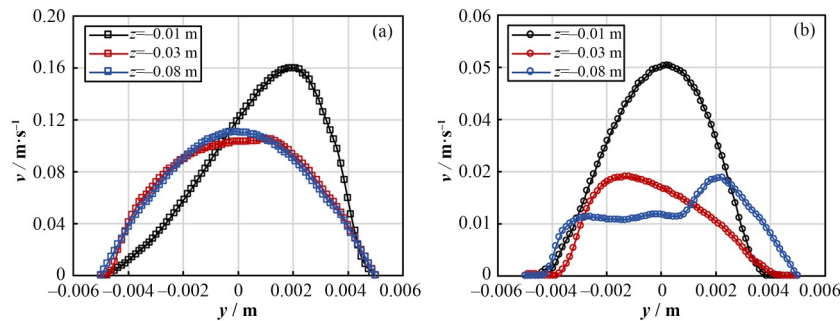


图8 管道横截面不同时刻的速度分布 (彩图见网络版) (a) $t=0.4$ s, (b) $t=4.0$ s

Fig.8 Velocity distribution across the pipe cross-section at different time moments (color online) (a) $t=0.4$ s, (b) $t=4.0$ s

图9是填充过程中 $x=0$ 平面的温度分布。 $t=0.4$ s,流向上,流动前沿与空气接触界面上的温度比主流温度低;径向上,由于凝固时间较短,凝固层很薄,其壁面附近温度分层不明显; $t=4.0$ s,凝固层生长开始稳定,冷壁附近温度逐渐分层。图10(a~b)是几个横截面上不同时刻的温度分布。当 $t=0.4$ s, $z=-0.01$ m反应主流熔盐的温度分布,凝固层生

长,冷壁附近温度梯度较大,形成低温层; $z=-0.03$ m处于流动前沿部分,其上方充满气体,只有下方出现低温层; $z=-0.08$ m截面的温度分布为冷管初始温度。当 $t=4.0$ s,较长时间的高温来流使得 $z=-0.01$ m与 $z=-0.03$ m截面冷壁附近温度梯度缩小,低温层随着凝固层厚度增加而加厚,此时,熔盐已流至 $z=-0.08$ m。

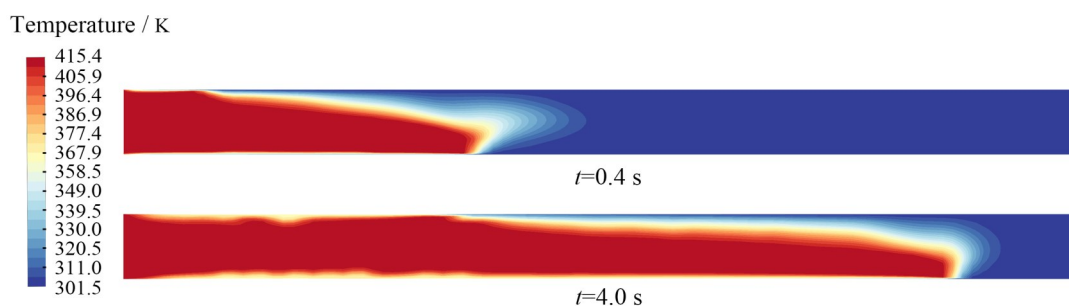


图9 不同时刻的温度场云图($x=0$) (彩图见网络版)

Fig.9 Temperature field contours of the fluid zone at different time moments during filling process ($x=0$) (color online)

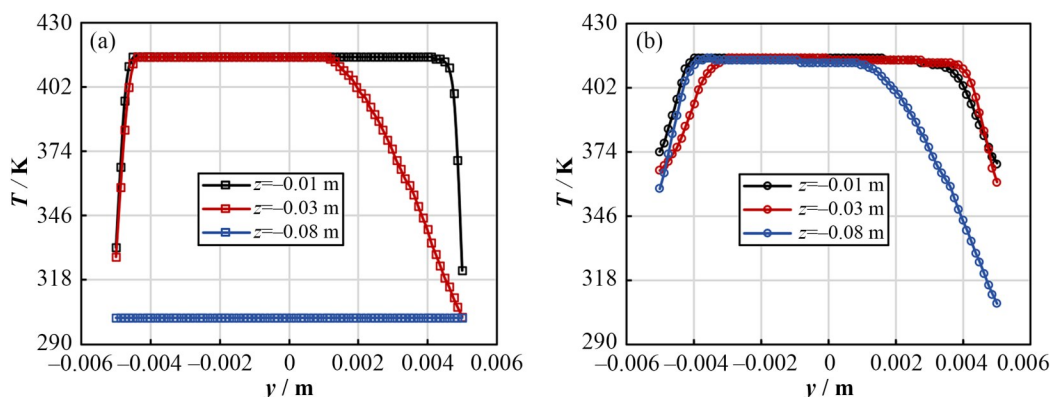


图10 管道横截面不同时刻的温度分布 (彩图见网络版) (a) $t=0.4$ s, (b) $t=4.0$ s

Fig.10 Temperature distribution across the pipe cross-section at different time moments (color online) (a) $t=0.4$ s, (b) $t=4.0$ s

2.2 糊状区常数敏感性分析及管道冻堵风险分析

糊状区常数取值大小决定凝固阻力源项变化幅度,是十分重要的参数。在§2.1的基础上,扩大糊状区常数的取值范围($5 \times 10^3 \leq A_{\text{mush}} \leq 5 \times 10^5$),进一步研究其对凝固与熔化行为及其特性的影响。

如图11(a)~(b)所示,熔盐填充冷管过程中,冷管作为热阱,吸收热量,温度升高。 A_{mush} 取值越大,流阻越高,流入管道的熔盐体积越小,即熔盐与冷壁接触面积减小,换热量减小,则管道温升降低。

熔盐热量损失主要通过相变潜热,表现为凝固层的生长。图12(a)~(f)展示了不同 A_{mush} 取值下熔盐充填过程中 $x=0$ 截面处的液相分数云图。当 $A_{\text{mush}}=5 \times 10^5$, A_{mush} 取值过大,短时间流动后,流阻产生远超进口压力,出现流动近乎停止的现象,此时冷

壁附近凝固生长可认为只与时间相关,凝固层最大厚度从0.4 s的0.5 mm增加到4.0 s的1.9 mm。当 $A_{\text{mush}}=10^4 \sim 10^5$,其流阻较大,凝固层生长主要受冷壁影响,在 $t=0.4$ s,短时间内,冷壁附近生长凝固薄层,厚度约0.5 mm;在 $t=1.2$ s, A_{mush} 越小,流阻越小,主流区冷壁换热面积增大,故最大凝固层厚度从 $A_{\text{mush}}=10^5$ 时的1.8 mm增大到 $A_{\text{mush}}=10^4$ 时的2.3 mm;在 $t=4.0$ s,较长的凝固时间后,主流区最大凝固层厚度进一步增大到2.8 mm,流动前沿与空气接触部分开始有凝固生长,阻挡了来流,导致熔盐回流,熔化了主流区的凝固层,同样也影响了前沿的凝固生长,最终凝固生长现象展现出紊乱过渡局面。当 $A_{\text{mush}}=5 \times 10^3$,其流阻较小,流速较快,在 $t=0.4 \sim 4.0$ s,主流区冷壁附近受高温来流影响,凝固层较薄,且最大凝固层

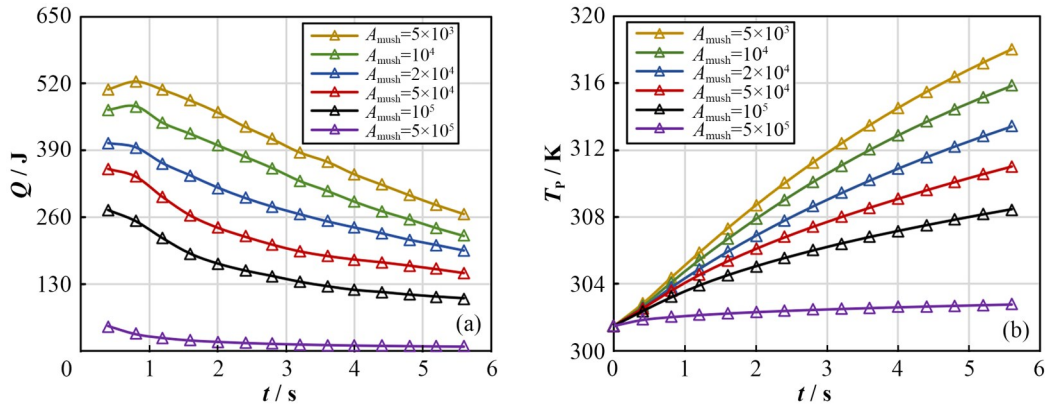


图11 熔盐向冷管传递总热量(a)及管道平均温度(b)随时间变化(彩图见网络版)

Fig.11 Variations of total heat transfer from molten salt to cold pipe (a) and the average temperature in the cold pipe (b) with time (color online)

厚度增量较小,从 $t=0.4$ s的0.5 mm到 $t=4.0$ s的1.2 mm;流速较快,熔盐与冷壁换热增强,当 $t=4.0$ s,较长凝固时间后,流动前沿率先产生冻结。

流动过程中,熔盐凝固导致流阻增大,其速度逐渐衰减。以熔盐流动前沿与空气交界面作为特征截面,并取特征截面的平均温度、速度作为特征值(T_c 、 v_c),描述熔盐温度与流速变化。图13(a)是特征温度随时间变化曲线,可见,流向熔盐冷点温度随时间不断下降至糊状区温度以下,且 A_{mush} 越大,流阻越大,熔盐与冷管道接触面积减小,散热越慢。图13(b)~(c)是特征速度和流动距离随时间的变化曲线,随着熔盐进入管内,由于其糊状凝固现象,阻力骤增。 $t=0$ 开始,随着流动距离不断增长,特征速度开始大幅度衰减, A_{mush} 越大,衰减速度越快,在经历了较长时间步后, v_c 均降低至小值,流动逐渐停止。

充填过程中,熔盐因冻结而堵塞管道是一个不可忽略的问题。实验研究通常测量堵塞穿透距离(L_c)^[7-8,22],即流体在管内因冻结而最终走过的距离,作为冻堵特性的主要定量手段。对于数值模拟填充冷管的瞬态过程,综合计算量与理论假设考虑,判断其冻堵的收敛条件至关重要。为进一步评估堵塞穿透距离对糊状区常数的敏感性,定义特征无量纲速度(v_d),如式(11), v_0 为初始入口速度,当 $v_d = 15\%$,认为此时流动停止,以此作为堵塞穿透距离的计算假设。

$$v_d = \frac{v_c}{v_0} \times 100\% \quad (11)$$

图14展示了不同糊状区常数取值所对应的堵塞穿透距离。在所评估的 A_{mush} 取值范围内,由于 $A_{mush}=5 \times 10^5$ 取值过大,其堵塞穿透距离无参考价值。当 $10^4 \leq A_{mush} \leq 10^5$,糊状区常数取值较大,凝固现象占主导且较稳定,此时堵塞穿透距离与糊状区常数呈

线性相关;当 $5 \times 10^3 \leq A_{mush} \leq 10^4$,糊状区常数取值较小,其产生凝固阻力较小,流动特性展现,堵塞穿透距离随糊状区常数减小增长速度变快。

2.3 熔盐糊状区常数验证

由§2.2可知,对于低温工况,熔盐入口温度靠近其糊状区,填充管道后,糊状熔盐使得流阻增加,速度大幅衰减,快速冻结管道。糊状区常数通过控制熔盐流阻变化幅度,从而影响熔盐填充冷管的堵塞穿透距离,因此,合适的熔盐糊状区常数取值有助于正确地模拟熔盐充填过程中发生的凝固相变现象。

糊状区常数作为焓-孔隙率模型中的介质经验参数,针对各类介质都有不同的糊状区常数取值建议,取值范围为 $10^3 \sim 10^8$ 。如图15所示,可通过不同 A_{mush} 取值下的熔盐堵塞穿透距离模拟值与实验值的比较,最终对比得到适合熔盐的 A_{mush} 取值,HTS盐糊状区常数建议取值为 5×10^4 ,其中实验值参考张伟豪^[23]的低温熔盐凝固实验工况。

3 结语

本文采用流体体积模型与焓-孔隙率模型对熔盐填充水平冷管过程及其凝固和熔化行为进行了数值研究。首先,熔盐管内流动前沿沿界面结构为长条弧形状;其次,其凝固相变行为主要表现为凝固层的变化,受冷壁影响,从入口处管壁附近开始生长凝固薄层,凝固层厚度随时间增大,当流阻增大直至超过入口恒压,速度开始衰减,在经历较长的凝固时间后,流动趋于停止,凝固层生长逐渐稳定,在冷壁附近形成了类似的零速度层与低温层,由于入口处恒定的高温来流,其附近凝固层首先开始熔化。进一步关注熔盐冻堵特性,通过分析流动前沿界面的特征温度、速度变化规律,确定熔盐冻结标准,从而得

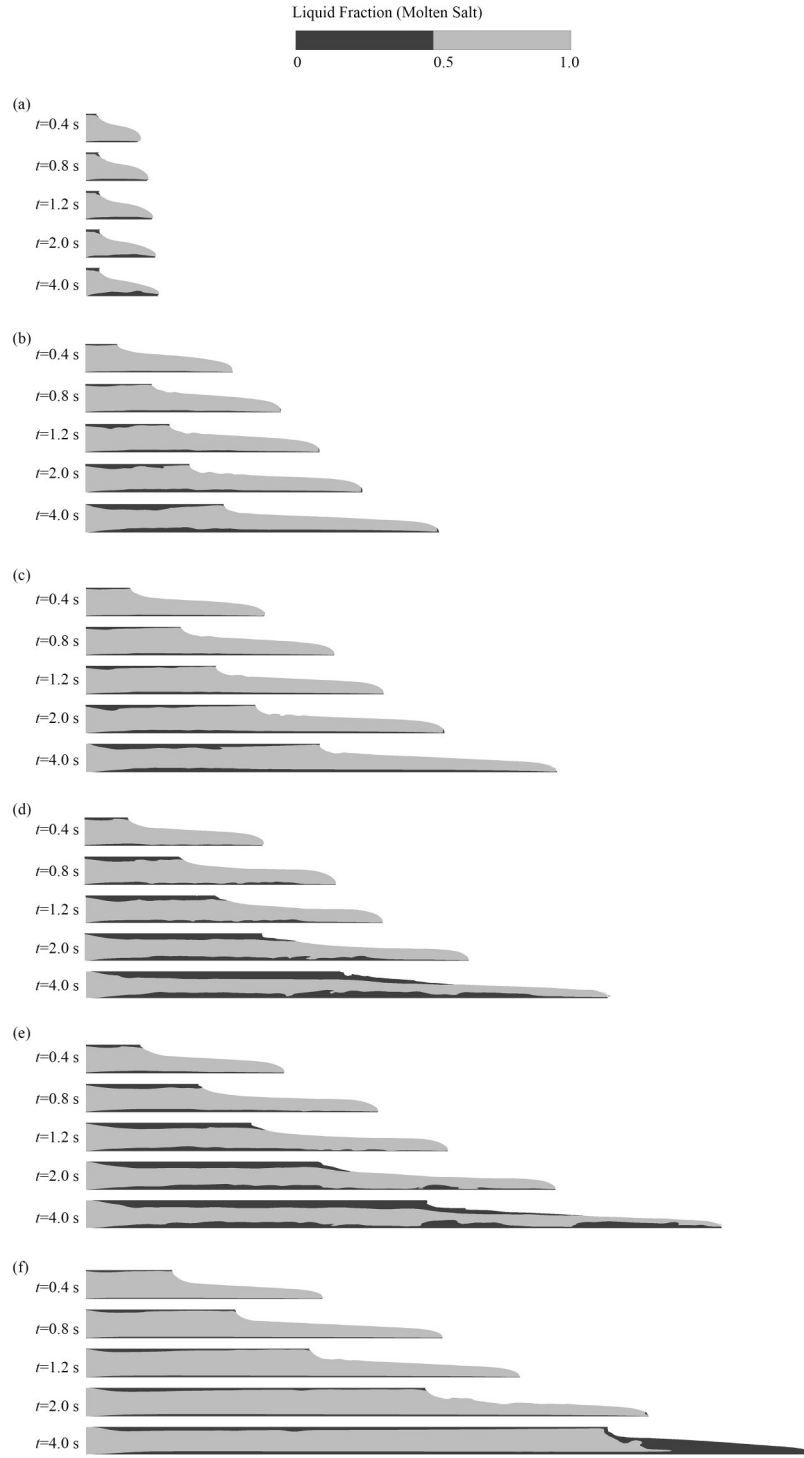


图12 不同 A_{mush} 取值下,熔盐流动过程中不同时刻的液相分数分布云图
(a) 5×10^5 , (b) 10^5 , (c) 5×10^4 , (d) 2×10^4 , (e) 10^4 , (f) 5×10^3
Fig.12 Liquid fraction contours at different time moments during filling process for various A_{mush}
(a) 5×10^5 , (b) 10^5 , (c) 5×10^4 , (d) 2×10^4 , (e) 10^4 , (f) 5×10^3

到堵塞穿透距离作为定量手段。

对不同糊状区常数取值($5 \times 10^3 \leq A_{\text{mush}} \leq 5 \times 10^5$)的填充瞬态过程进行分析, A_{mush} 作为糊状阻力源项的关键参数,当 A_{mush} 取值过大,糊状区流动性质被抑制; A_{mush} 越小,糊状区流阻越小,同时间与冷壁接触

面积增大,受冷壁影响为主,凝固层厚度增大; A_{mush} 继续减小,高温来流影响占据主导,凝固层厚度骤降,且流动前沿率先产生冻结。同时,发现堵塞穿透距离对糊状区常数较敏感,其影响不可忽略。并利用已有凝固实验数据,反推得到适合 HTS 盐的糊状

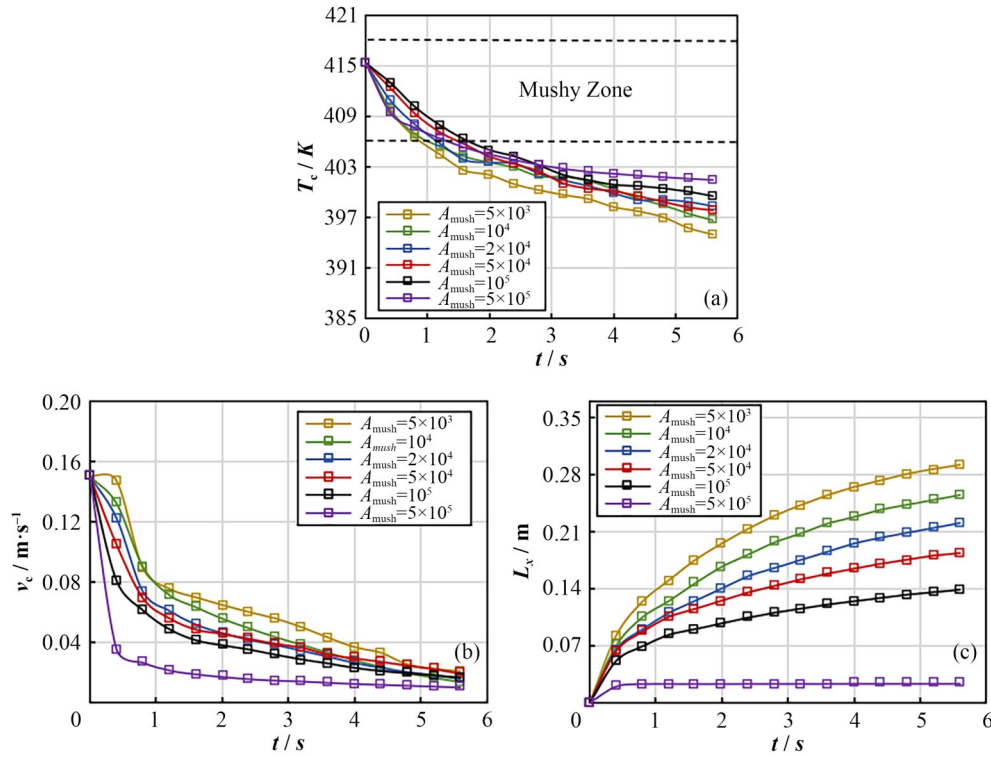


图13 熔盐特征温度(a)、特征速度(b)和流动距离(c)随时间变化(彩图见网络版)

Fig.13 Variations of the temperature (a), velocity (b) and flow distance (c) with time at the characteristic interface (color online)

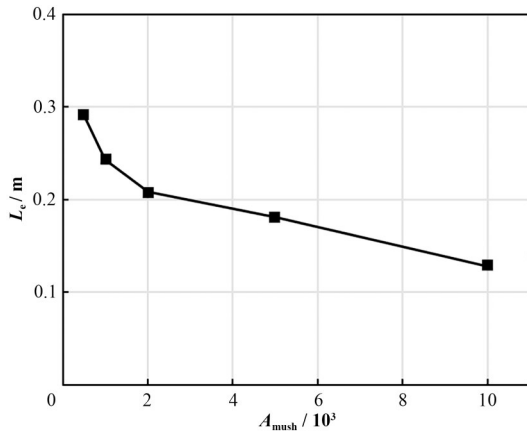


图14 不同 A_{mush} 取值下的堵塞穿透距离
Fig.14 Variation of penetration distance with A_{mush} values

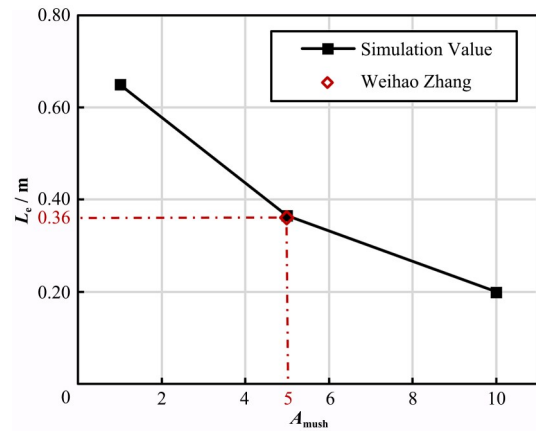


图15 熔盐堵塞穿透距离模拟值与实验值^[23]对比
Fig.15 Comparison of the penetration distances between the simulation results and the experimental data^[23]

区常数取值($A_{mush}=5\times 10^4$),这有助于准确地模拟熔盐填充过程中的凝固相变行为,更好地理解其冻堵特性。

作者贡献声明 于鸿翔负责数值技术支持,数据管理与分析,算例设计验证与核实,论文初稿;周翀负责立题,研究指导与监督,研究经费支持,论文审阅与修改;袁晓凤负责数值模型校验,论文修改;陈玉爽负责数值方法支持,研究经费支持。

参考文献

- 1 Janz G J. Molten salts handbook[M]. New York: Academic Press, 1967.
- 2 徐洪杰,戴志敏,蔡翔舟,等. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现代物理知识, 2018, 30(4): 25 - 34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.
XU Hongjie, DAI Zhimin, CAI Xiangzhou, et al. Thorium-based molten salt reactor and comprehensive utilization of nuclear energy[J]. Modern Physics, 2018, 30

- (4): 25 – 34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.
- 3 Wang S W, Zhou C, Wang N X, *et al.* Numerical analysis and validation on heat transfer characteristics and correlation of molten salt in pebble bed channel[J]. Nuclear Engineering and Design, 2024, **418**: 112920. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.112920.
- 4 胡思勤, 周翀, 朱贵凤, 等. 双面冷却熔盐堆组件热工分析程序开发与验证[J]. 核技术, 2024, **47**(9): 090602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090602.
HU Siqin, ZHOU Chong, ZHU Guifeng, *et al.* Development and validation of a thermal-hydraulic analysis code for dual cooled assemblies in molten salt reactors[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(9): 090602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090602.
- 5 薛帅钰, 周翀, 邹杨, 等. 液态燃料熔盐堆停堆后主回路自然循环特性研究[J]. 核技术, 2024, **47**(7): 070604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.070604.
XUE Shuaiyu, ZHOU Chong, ZOU Yang, *et al.* Natural circulation characteristics of main loop after shutdown of liquid-fuel molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(7): 070604. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.070604.
- 6 王允, 田健, 周翀, 等. 熔盐堆氟盐的泄漏凝固特性研究[J]. 核技术, 2021, **44**(10): 100603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.100603.
WANG Yun, TIAN Jian, ZHOU Chong, *et al.* Investigation on leakage and solidification characteristics of fluorides in molten salt reactor[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(10): 100603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.100603.
- 7 Wang Y, Tian J, Wang S W, *et al.* Experimental study on the penetration characteristics of leaking molten salt in the thermal insulation layer of aluminum silicate fiber[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(9): 92. DOI: 10.1007/s41365-021-00935-6.
- 8 Bergan N E. External molten salt solar central receiver test[J]. Solar Engineering, 1987, **1**: 474 – 478.
- 9 Pacheco J E, Ralph M E, Chavez J M. Investigation of cold filling receiver panels and piping in molten-nitrate-salt central-receiver solar power plants[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1995, **117**(4): 282 – 289. DOI: 10.1115/1.2847839.
- 10 Cheung F B, Baker L. Transient freezing of liquids in tube flow[J]. Nuclear Science and Engineering, 1976, **60** (1): 1 – 9. DOI: 10.13182/nse76-a26851.
- 11 Lu J F, Ding J. Dynamical and thermal performance of molten salt pipe during filling process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, **52**(15 – 16): 3576 – 3584. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.005.
- 12 Jiang D L, Liao Z R, Li P D, *et al.* The evolution of the mushy zone during the melting process of a binary nitrate salt[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **142**: 118456. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118456.
- 13 Pal D, Joshi Y K. Melting in a side heated tall enclosure by a uniformly dissipating heat source[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, **44**(2): 375 – 387. DOI: 10.1016/S0017-9310(00)00116-2.
- 14 Brent A D, Voller V R, Reid K J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal[J]. Numerical Heat Transfer Part B - Fundamentals, 1988, **13** (3): 297 – 318. DOI: 10.1080/10407798808551388.
- 15 Voller V R, Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, **30**(8): 1709 – 1719. DOI: 10.1016/0017-9310(87)90317-6.
- 16 Fadl M, Eames P C. Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter A_{mush} on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, **151**: 90 – 99. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.102.
- 17 Hong Y X, Ye W B, Du J, *et al.* Solid-liquid phase-change thermal storage and release behaviors in a rectangular cavity under the impacts of mushy region and low gravity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **130**: 1120 – 1132. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.024.
- 18 Boerema N, Morrison G, Taylor R, *et al.* Liquid sodium versus Hitec as a heat transfer fluid in solar thermal central receiver systems[J]. Solar Energy, 2012, **86**(9): 2293 – 2305. DOI: 10.1016/j.solener.2012.05.001.
- 19 Janz G J, Tomkins R P. T. Physical properties data compilations relevant to energy storage, IV, Molten salts: data on additional single and multicomponent salt systems [R]. United States: NSRDS-NBS-61-PT-4, Order No. PB81-244121, pp. 786 – 795, 1981.
- 20 FLUENT 6.1 documentation[ED/OL]. <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/>.

-
- 21 Lu J F, Ding J, Yang J P. Solidification and melting behaviors and characteristics of molten salt in cold filling pipe[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, **53**(9 - 10): 1628 - 1635. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.01.033.
- 22 Zeng C, Liu M L, Zhang W H, *et al.* Development and validation of a one-dimensional solidification model: Part II: model validation for molten lead-bismuth[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, **193**: 110058. DOI: 10.1016/j.anucene.2023.110058.
- 23 张伟豪, 刘茂龙, 曾陈, 等. 熔盐堆冷却剂凝固行为的实验及数值模拟研究[J]. 核技术, 2025, **48**(4): 040603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.230405. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.230405.
- ZHANG Weihao, LIU Maolong, ZENG Chen, *et al.* Experimental and numerical simulation study on the solidification behavior of molten salt reactor coolants[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(4): 040603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.230405. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.230405.