

机械工程

钠冷堆蛇形管蒸发器传热及流动特性 CFD 模拟分析

李彦峰¹ 孔泽学² 曲闪亮¹ 孟维岩¹

1.国核电力规划设计研究院有限公司; 2.杭州中科长基机械工程有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8753

[摘要] 在全球低碳发展及“双碳”目标的背景下,核能蒸汽系统的创新研发至关重要,而蒸汽发生器作为该系统的核心设备,其可靠性、效率等性能备受关注。本文通过采用“SolidWorks 模型构建、ICEM 网格划分、FLUENT 三维模拟方法,对蛇形管蒸汽发生器的流动和传热性能进行了模拟,得到了蛇形管蒸发器的流场和温度场,进出口参数,达到了工程要求,验证了蛇形管结构的大容量特征,具有本质上各方面均优于U形管的亮点,具有广泛推广价值。

[关键词] 蛇形管蒸汽发生器; 数值模拟; 对流换热; 大容量特性

CFD Simulation Analysis of Heat Transfer and Flow Characteristics in Sodium-cooled Reactor Serpentine Tube Evaporators

Li Yanfeng¹ Kong Zexue² Qu Shanliang¹ Meng Weiyan¹

1 State Nuclear Power Planning and Design Institute Co., Ltd.;

2 Hangzhou Zhongke Changji Mechanical Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of global low-carbon development and the "dual carbon" goals, innovative R&D of nuclear steam systems is crucial. As the core equipment of such systems, steam generators' reliability and efficiency have drawn significant attention. This study employs SolidWorks modeling, ICEM meshing, and FLUENT 3D simulation to analyze the flow and heat transfer performance of serpentine tube steam generators. The results demonstrate the serpentine tube evaporator's flow field, temperature field, and inlet/outlet parameters, meeting engineering requirements. The simulation validates the high-capacity characteristics of the serpentine tube structure, which outperforms U-tubes in all aspects and holds broad application potential.

[Key words] serpentine tube steam generator; numerical simulation; convective heat transfer; large-capacity characteristics

1 前言

根据钠冷堆蛇形管蒸发器结构图和运行工况,我们进行了蒸发器流动和传热特性的 CFD 数值模拟,得到了蒸发器的流场和温度场:

- 模拟蒸发器中钠溶液在壳程的温度分布及流体的流动情况;
- 计算壳程内钠溶液对管程内的水加热情况。

2 计算模型

2.1 几何模型及简化

模拟的固体区域包含蒸发器的圆柱壳、换热管、包壳等,

流体区域包含管程和壳程流体等。详见图 1 所示。

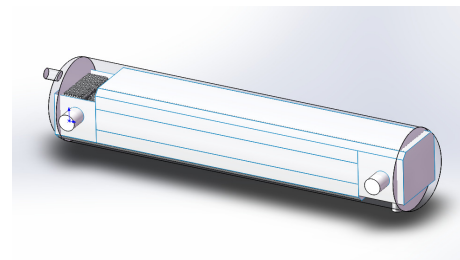


图 1 蒸发器几何图

蒸发器的换热主要发生在换热管及附近区域,其中换热管总共 80 列,总管束 1808 根。采用多孔介质方法模拟蒸发器的换热过程,提取蒸发器包壳、壳体等进行建模仿真,所提取的

简化模型见图2所示。

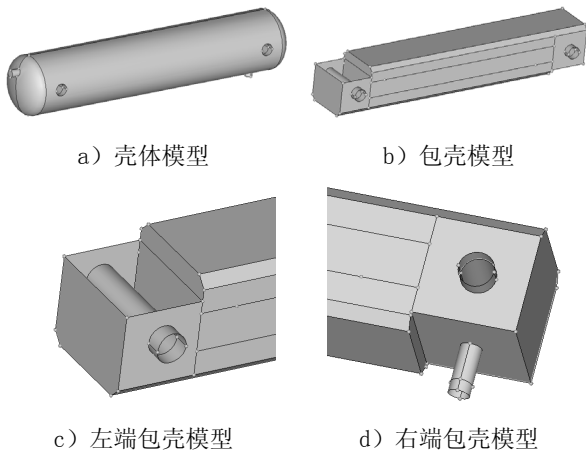


图2 蒸发器壳体、包壳等几何图

2.2 进/出口边界条件

1) 给水进口介质为水, 温度为 463.15K, 质量流量为 308.7kg/s;

2) 钠溶液进口介质为蒸汽, 温度为 769.45K, 质量流量为 3177kg/s;

3) 钠溶液出口为压力出口边界条件。

2.3 蒸发器壁面边界条件

- 1) 蒸发器壳体部分为绝热边界条件;
- 2) 包壳厚度为 20mm, 采用耦合壁面边界条件;
- 3) 换热管厚度为 3mm, 采用耦合壁面边界条件;
- 4) 蒸汽进/出口管厚度为 50mm, 采用耦合壁面边界条件;
- 5) 钠溶液进/出口管厚度为 20mm, 采用耦合壁面边界条件;

2.4 物性参数

计算所涉及的蒸发器材料密度、热传导系数和热容等物性分别见[参考文献][1]的 Table TCD, 计算所用的水、蒸汽等物性参数根据 IAPWS-IF97 标准[2]查得, 详见标准[2]的 Table 1 Saturation state。钠溶液的物性采用文献[3]的 III.1 节计算公式计算。

3 蒸发器传热特性数值模拟

本报告采用“SolidWorks 模型构建、ICEM 网格划分、FLUENT 三维模拟”协同作业的技术路线, 把 SolidWorks 灵活的建模能力、ICEM 优秀的网格划分功能以及 FLUENT 强大计算分析功能有机的结合起来, 并利用高性能并行计算技术, 顺利地完成了蒸发器传热特性计算的研究工作。

3.1 网格划分

好的网格划分是计算分析效率和精度的保证。在建立合理模型的基础上, 建立了优质的网格, 采用非结构化网格, 并对分析的关键部位进行网格加密和细化, 细化网格尺寸不大于局部实际最小尺寸的 1/3, 兼顾效率和精度, 为后续分析创造条件。依照本项目图2的几何模型进行网格生成, 其中整体网格如图3所示。

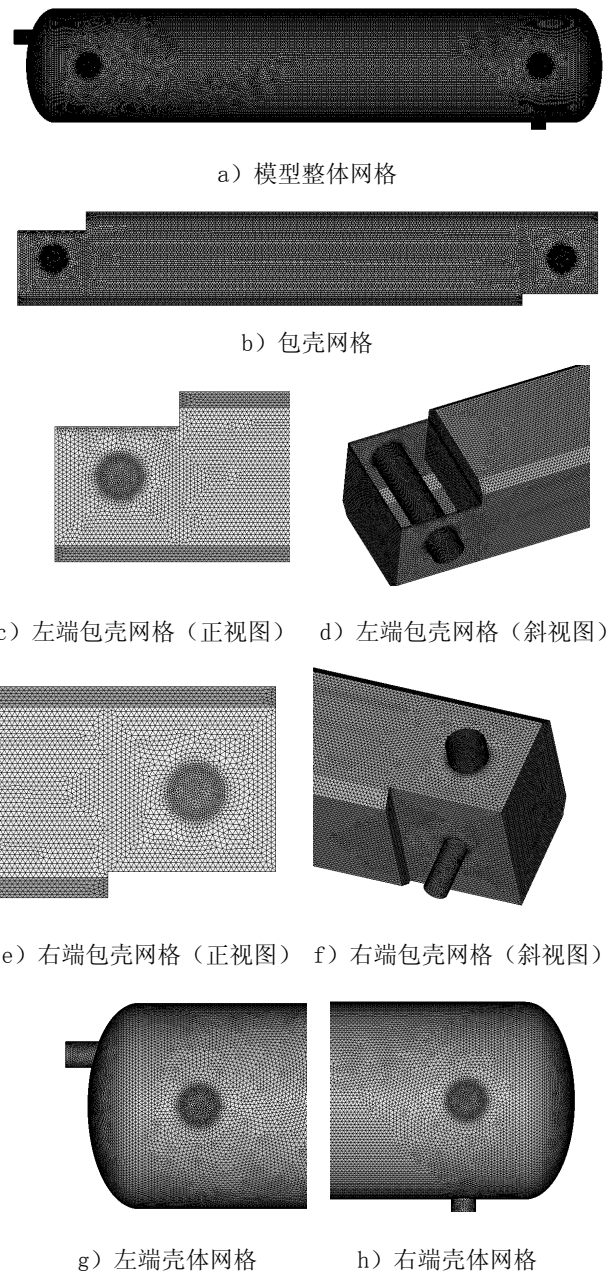
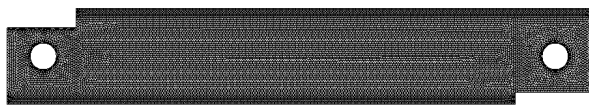
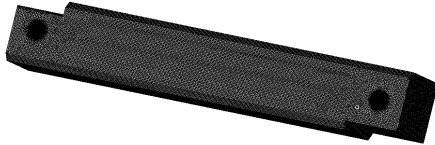


图3 蒸发器总体网格图

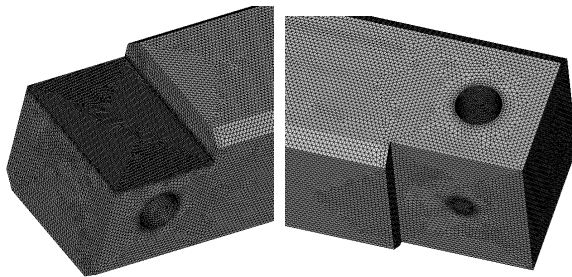
为了方便采用多孔介质模型模拟换热管的换热过程, 将钠溶液区域的网格分为多孔介质区域网格和壳体区域网格, 如下图所示。



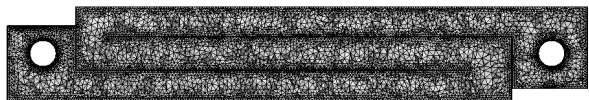
a) 多孔介质区网格



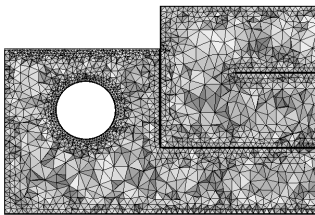
b) 多孔介质区网格斜视图



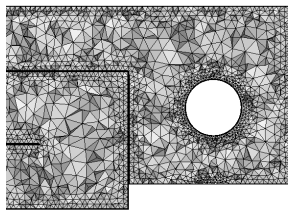
c) 多孔介质区左端网格图 d) 多孔介质区右端网格图



e) 多孔介质区网格 (剖视图)



f) 多孔介质区左端网格图 (剖视图)



g) 多孔介质区右端网格图 (剖视图)

图4 蒸发器多孔介质区域网格图

壳层网格为包壳、壳体、冷水出入口和钠出入口所围成。

其网格如图5所示。

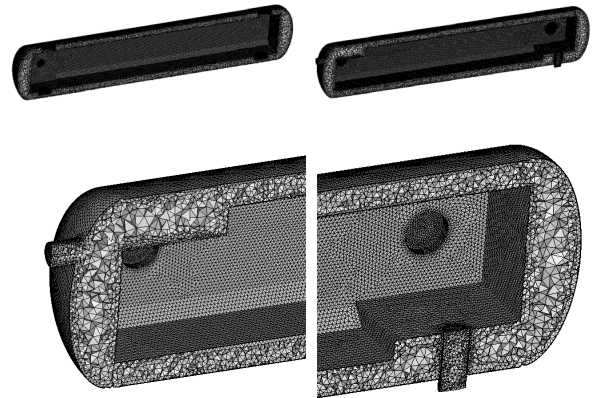


图5 蒸发器壳体区域网格图

3.2 数值计算方法

对给定工况条件进行了数值模拟，研究蒸发器的对流换热、钠溶液的对流换热、温度分布及流体流动情况。

N-S 及传热特性控制方程

本文求解的流场控制方程为守恒形式的可压缩 Navier-Stokes 方程 (RANS)。定义 Ω 为流场内任一控制体， $\partial\Omega$ 是控制体 Ω 的边界， dS 是边界 $\partial\Omega$ 上的任一面元，而 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 是面元 dS 的单位法向量。可压缩 N-S 方程积分形式的控制方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} W d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (F_c - F_v) dS = 0 \quad (4.1)$$

上式中 W 是守恒项， F_c 、 F_v 分别为对流量项和粘性通量项。本项目选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

固体区域的导热方程为：

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (4.2)$$

上式中 C_v 为比定容热容， λ 为导热系数， t 为时间， T 为温度。

传质模型

多相流传热模型中，水蒸气传质的控制方程为蒸汽的运输方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{l \rightarrow v} - \dot{m}_{v \rightarrow l} \quad (4.3)$$

上式中，下标 l 、 v 分别表示水和蒸汽， α 为蒸汽体积分数， ρ 为密度， \vec{v} 为速度， $\dot{m}_{l \rightarrow v}$ 为质量转变速率。

基于饱和温度 T_{sat} ，当蒸汽温度低于饱和温度时产生冷凝

水，即：

$$m_{v \rightarrow l} = coef \cdot \alpha_v \rho_v \frac{(T_v - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (4.4)$$

上式中，coef 为蒸发系数，T 为温度。本项目中 T_{sat} 为蒸汽饱和温度。

传热模型

在连续化的工业生产中，换热器内进行的大都是定态传热过程。针对定态逆流操作的换热管换热器，以换热管外径作为计算的传热面积，采用公式 (4.5) 计算换热管壁面的传热系数：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \times \frac{d_2}{d_1} + \frac{\delta d_2}{\lambda d_m} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \times \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4.5)$$

式中 d_1 、 d_2 表示圆管的内、外直径；

t_w 、 T_w 分别为冷、热流体侧的壁温，单位 K；

α_1 、 α_2 分别为冷、热流体侧的给热系数，单位 W / (m^2K)；

λ 为管壁材料的热导率，单位 W / (mK)；

δ 为管壁厚度，单位 m。

公式 (4.4) 中的给热系数与流动状态密切相关，本项目计算中假设管内为充分湍流流动。管程采用的给热系数计算公式为：

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \left(\frac{\rho du}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda} \right)^{0.4} \quad (4.6)$$

由于换热管的作用，壳程内流体在雷诺数很小时即可达到湍流状态。因而壳程采用的给热系数计算公式为：

$$Nu = c \varepsilon R_e^n Pr^{0.4} \quad (4.7)$$

公式 (4.6) 中 μ 为流体在主体温度下的粘度， c_p 为热容。

公式 (4.6) 的 R_e 和 Pr 分别为雷诺数和普朗特数。 c 、 ε 和 n 为管程和壳程有关的系数，本次计算中分别取为 0.65、0.157 和 1.3。

3.3 CFD 计算结果

采用稳态求解算法进行蒸发器的传热及流场数值模拟。在计算收敛后的钠溶液出口温度达到 582.5K，即 309.35℃。

分别提取了蒸发器在计算稳定后 $x=0m$ 、 $2m$ 、 $4m$ 、 $6m$ 、 $8m$ 、 $10m$ 、 $12m$ 、 $12.7m$ 以及 $z=-2.5$ 、 $z=-2.0$ 、 $z=-1.815$ 、 $z=-1.5$ 、 $z=-1.0$ 截面的速度分布和温度分布等云图。其中温度分布见 3.4.1 节，速度分布见 3.4.2 节所示。

3.4.1 温度计算结果

从图 6 可以看出在 z 截面上，温度在包壳内迅速降温。钠溶液在入口处温度较高，在包壳出口处温度相对较低。随着低温给水从左端入口流入，左端包壳内温度较低，低温区域主要集中在蒸发器的左半部分且靠近下端。

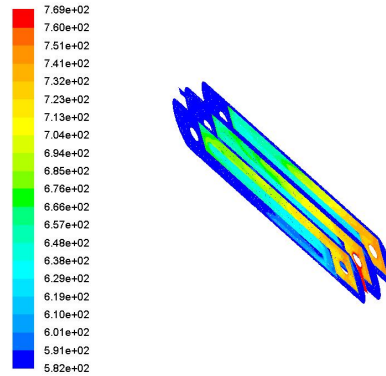
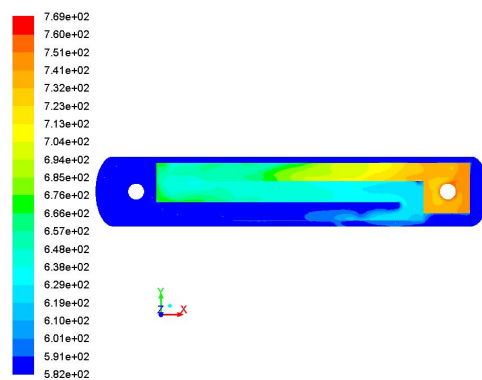
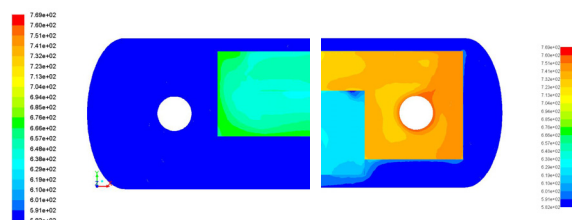


图 6 z 截面温度分布总图 (单位: K)

图 7-图 11 分别给出了 $z=-2.5$ 、 -2.0 、 -1.815 、 -1.5 和 -1.0 截面的钠溶液温度分布。可以看出在 z 截面中，温度在包壳内迅速降温。钠溶液在包壳入口的温度较高，在包壳出口底端温度相对较低。高温区域主要集中在蒸发器的右半部分。随着低温给水从左端入口流入，左端包壳内温度较低，低温区域主要集中在蒸发器的左半部分。

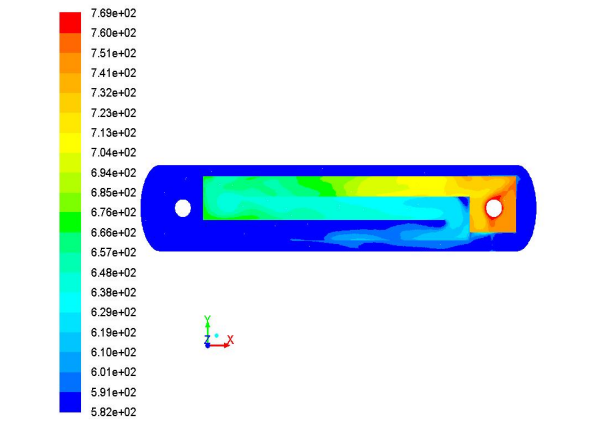


a) 正视图

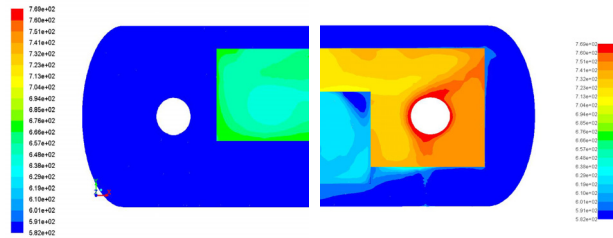


b) 钠出口局部视图 c) 钠入口局部视图

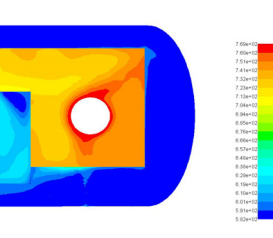
图 7 z=-2.5m 面温度分布 (单位: K)



a) 正视图

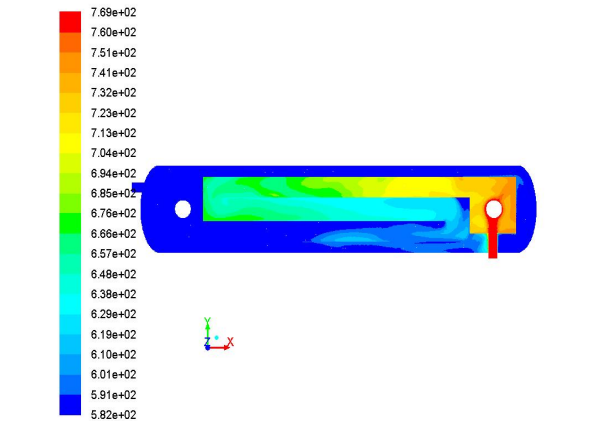


b) 钠出口局部视图

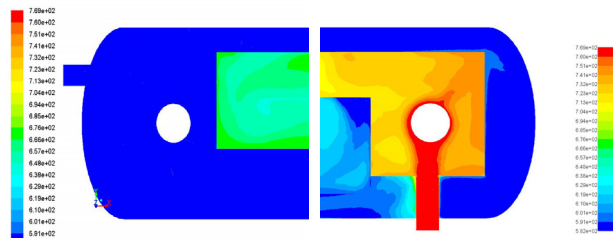


c) 钠入口局部视图

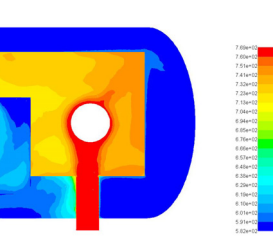
图 8 z=-2.0m 面温度分布 (单位: K)



a) 正视图

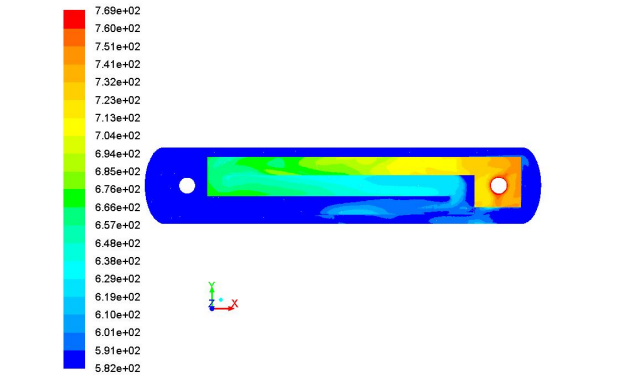


b) 钠出口局部视图

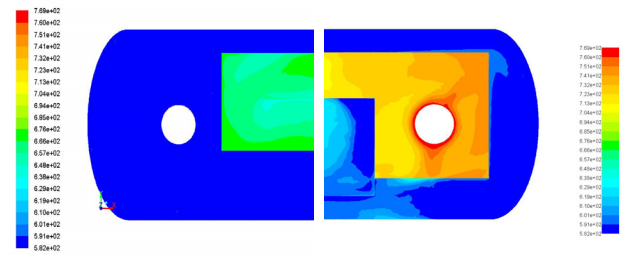


c) 钠入口局部视图

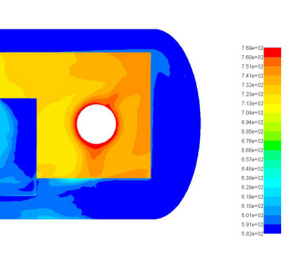
图 9 z=-1.815m 面温度分布 (单位: K)



a) 正视图

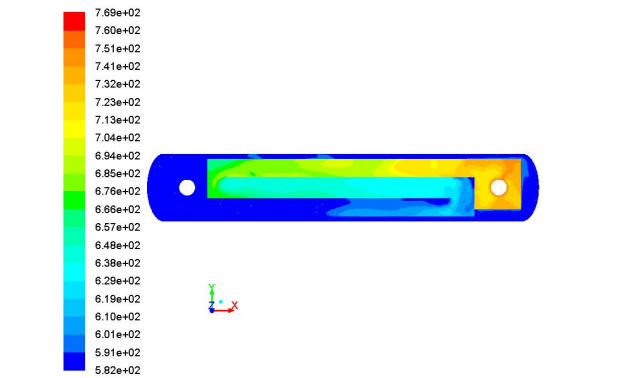


b) 钠出口局部视图

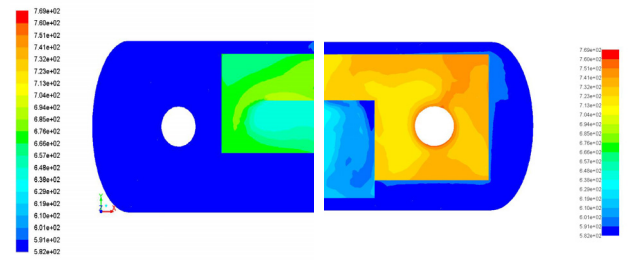


c) 钠入口局部视图

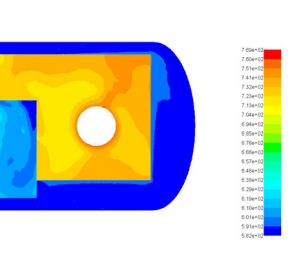
图 10 z=-1.5m 面温度分布 (单位: K)



a) 正视图



b) 钠出口局部视图



c) 钠入口局部视图

图 11 z=-1.0m 面温度分布 (单位: K)

图 12 分别给出了 x 为 0m、2m、4m、6m、8m、10m、12m 和 12.7m 截面处的温度分布总体图,图 13 给出了各个截面的温度

分布正视图。从图中可以看出，发生热量交换的主要发生在包壳内。随着 x 的逐渐增加，靠近底部的换热管及其周围流体温度逐渐增加。图 14 则给出了包壳的温度分布，可以看出包壳沿着壳程温度逐渐降低。

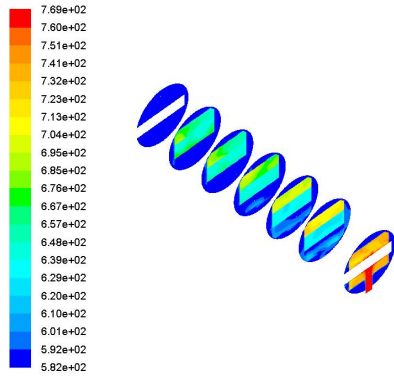


图 12 x 截面处的温度分布总图 (单位: K)

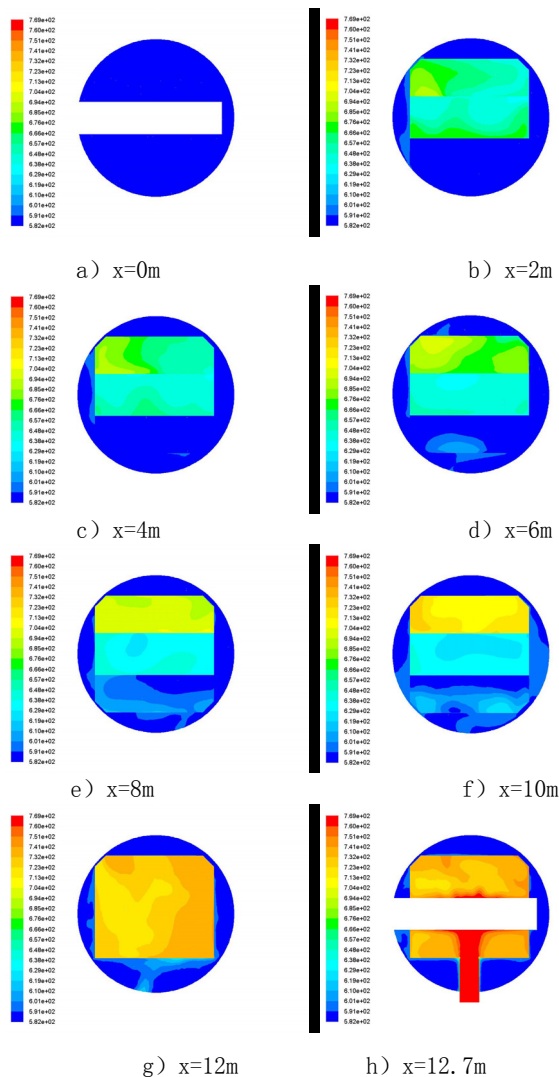


图 13 x 为 0m~12.7m 截面处的温度分布 (单位: K)

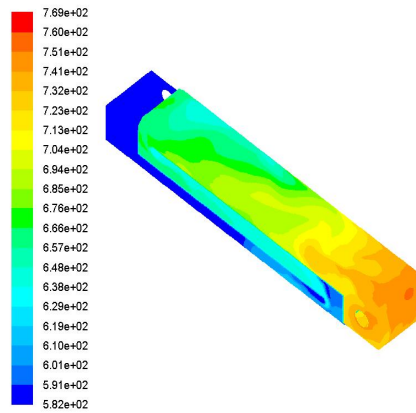


图 14 包壳温度分布 (单位: K)

3.4.2 速度计算结果

图 15 给出了各 z 截面的速度分布图，钠溶液速度最大区域主要发生在右端包壳内，且在蒸汽出口管处形成一定的涡流。

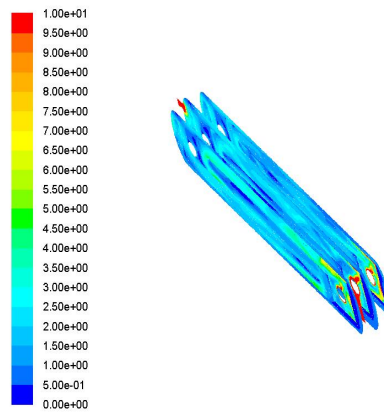
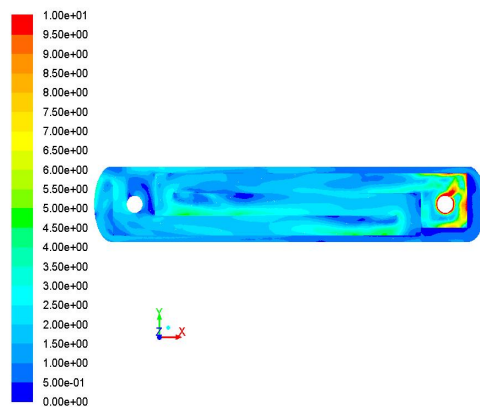
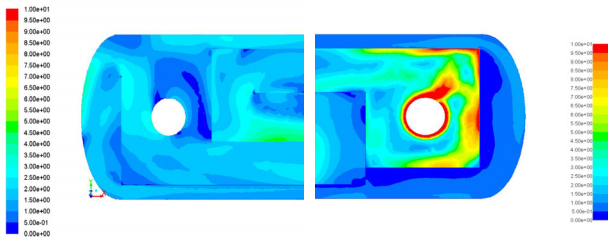


图 15 周期边界速度分布 (单位: m/s)

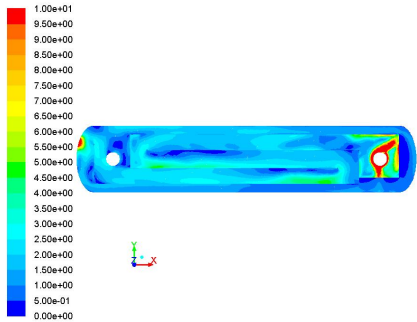
从图 16-图 20 分别给出了 $z=-2.5$ 、 -2.0 、 -1.815 、 -1.5 和 -1.0 截面的钠溶液的速度分布。可以看出钠速度最大区域主要发生在右端包壳内，且在右端包壳处形成一定的涡流。



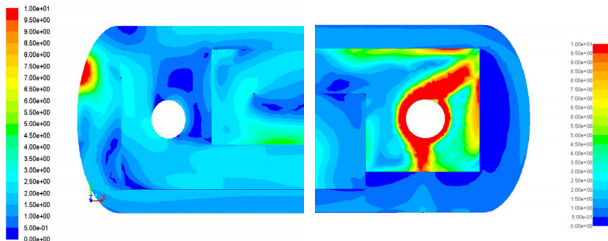
a) 正视图



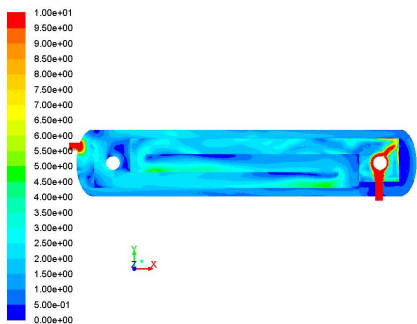
b) 钠出口局部视图 c) 钠入口局部视图
图 16 $z=-2.5\text{m}$ 速度分布 (单位: m/s)



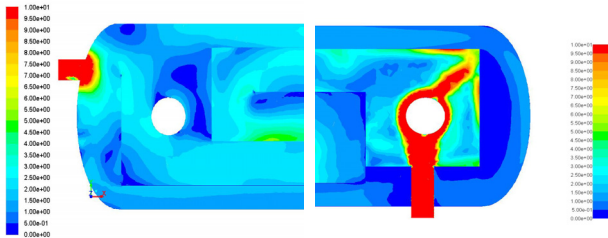
a) 正视图



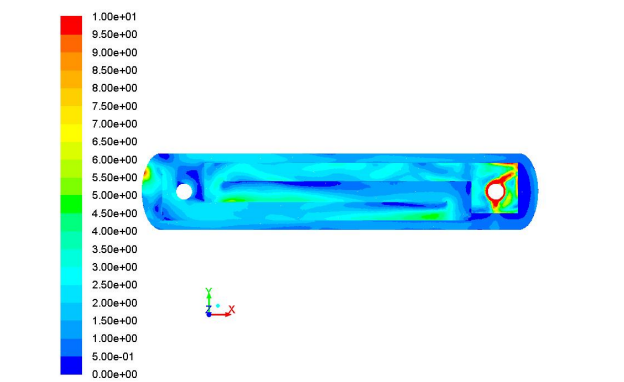
b) 钠出口局部视图 c) 钠入口局部视图
图 17 $z=-2.0\text{m}$ 速度分布 (单位: m/s)



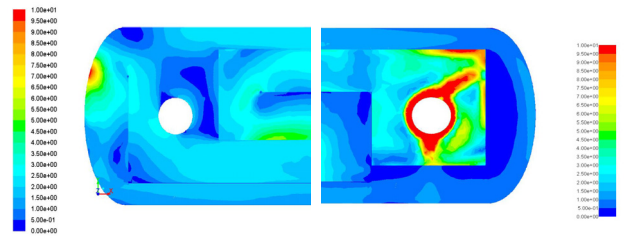
a) 正视图



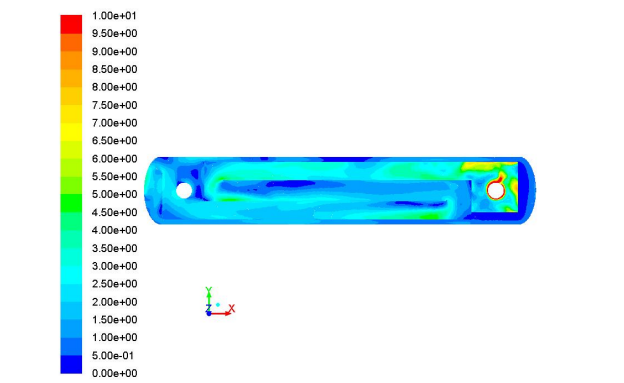
b) 钠出口局部视图 c) 钠入口局部视图
图 18 $z=-1.79\text{m}$ 速度分布 (单位: m/s)



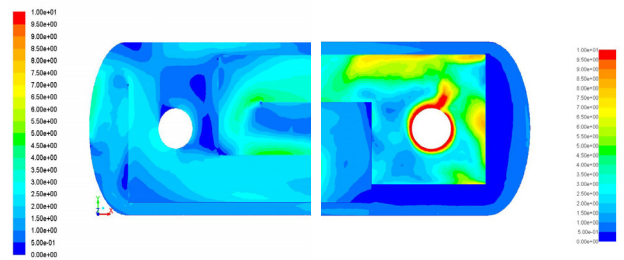
a) 正视图



b) 钠出口局部视图 c) 钠入口局部视图
图 19 $z=-1.5\text{m}$ 速度分布 (单位: m/s)



a) 正视图



b) 钠出口局部视图 c) 钠入口局部视图
图 20 $z=-1.0\text{m}$ 速度分布 (单位: m/s)

图 21 给出了 x 分别为 0m、2m、4m、6m、8m、10m、12m 和 12.7m 截面处的速度分布, 从图中可以看出钠液速度主要集中在壳内, 而壳程内速度较小。

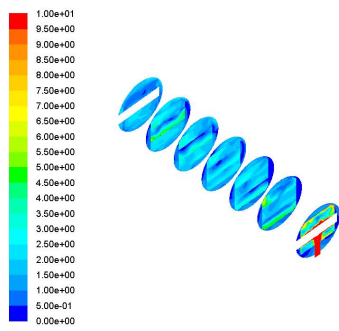


图 21 x 为 0m~12.7m 截面速度分布总图 (单位: K)

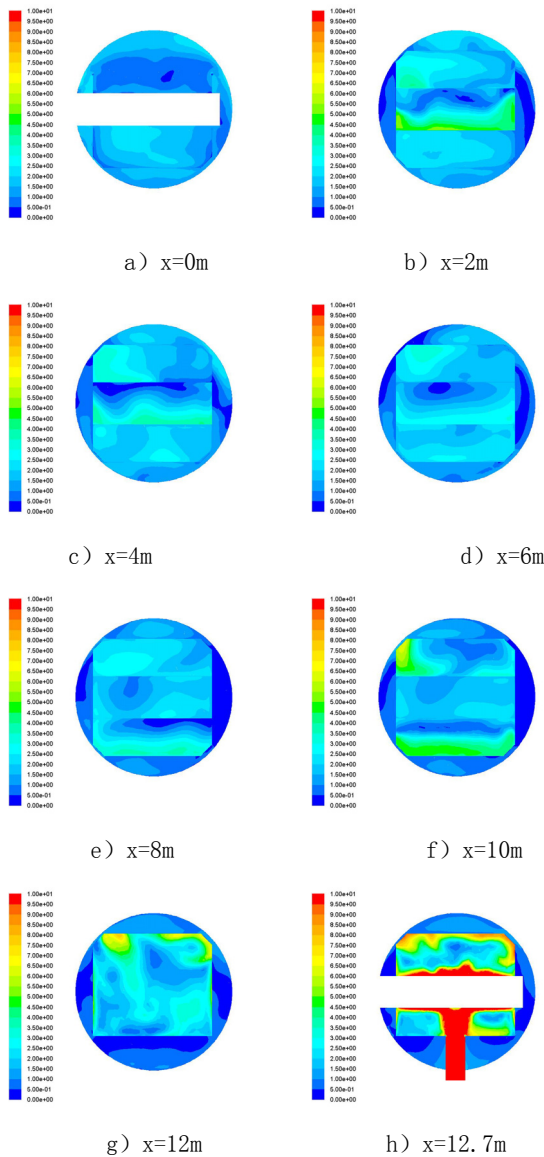


图 22 x 为 0m~12.7m 处的速度分布 (单位: K)

3.4 换热量衡算

结合 CFD 模拟结果,采用热量衡算方法计算蒸汽出口温度。

其中,钠溶液入口压力为 0.4MPa,入口温度为 496.3° C,质

量流量为 3177kg/s;钠出口压力为 0.3MPa,出口温度为 309.35° C。查物性表[3]得,入口钠焓值为 1009.6KJ/kg,出口钠焓值为 771KJ/kg。每秒换热量为 758048KJ。

过冷水入口压力为 14MPa,入口温度为 190° C,入口焓值为 813.6 kJ/kg,质量流量为 308.7kg/s。采用换热量除以过冷水流量,得到过冷水焓值增加量为 2455.6KJ/kg,反算过冷水经加热后的焓值为 3269.2 KJ/kg。查物性表得到过冷水加热后的过热蒸汽温度为 480.9° C。

4 结论

本项目采用 CFD 方法结合多孔介质模型模拟了蒸发器的对流换热和流体流动情况。模拟结果表明:经过换热过程,钠溶液可达到 582.5K,即 309.35° C。采用热量衡算方法,反算了过冷水加热后的过热蒸汽温度为 480.9° C,达到了工程要求,验证了蛇形管结构的大容量特征,具有本质上各方面均优于 U 形管的亮点,具有广泛推广价值。

[参考文献]

[1]The American Society of Mechanical Engineers. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, II Materials, Part D Properties (Metric). Printed in the United States of America, Library of Congress Catalog Card Number: 56-3934, 2013.

[2]WolfgangWagner, Hans-Joachim Kretzschmar. Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97. Springer, second edition, Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

[3]居怀明. 载热质热物性计算程序及数据手册. 原子能出版社, 1990.

作者简介:第一作者,李彦峰,198004,男,陕西,汉族,大学本科,高级工程师,研究方向:核电设计;

第二作者,孔泽学,1966.09.28,男,四川成都,汉,大学本科,总经理高级工程师,研究方向:传热与传质的基础发展;

第三作者,曲闪亮,198805,男,河南偃师,汉族,硕士研究生,高级工程师,研究方向:核电设计;

第四作者,孟维岩,199301,女,河北保定,汉族,硕士研究生,工程师,研究方向:核电设计。