螺旋管式换热器管侧熔盐传热与流动阻力特性模拟研究

王 宇[1,2,3] 李启明[1,2,3] 陈玉爽[1,2] 邹 杨[1,2,3]

1（中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800）

2（中国科学院上海应用物理研究所 钍基核裂变能全国重点实验室 上海 201800）

3（中国科学院大学 北京 100049）

摘要 螺旋管式换热器（Helically Coiled Heat Exchanger，HCHX）具有换热效率高、结构紧凑、耐高压等优点，能够很好地满足模块化熔盐堆对换热器的要求，其传热性能与流动阻力直接影响反应堆的热效率，因此研究其传热与流动阻力特性具有重要意义。本文通过数值模拟，研究了高温FNaBe盐在HCHX管侧的传热和流动阻力特性，重点分析了螺旋管结构参数（螺旋角、管直径、螺旋直径）、熔盐入口温度和入口速度对努塞尔数（*Nu*）和摩擦因子（*f*）的影响规律。研究结果表明：FNaBe盐在螺旋管内的传热强化效果和压降均随螺旋直径的减小而增大，随管直径的增大而增大；而螺旋角的影响在本研究参数范围内可忽略。将模拟结果与基于传统工质提出的经验关联式进行对比，发现现有传热关联式不适用于预测FNaBe盐的传热特性，*Nu*计算值的最大偏差高达65%。此外，由于离心力作用引发的二次流现象，FNaBe盐在螺旋管内的*Nu*和*f*均高于直管关联式的预测结果。最后，基于模拟数据拟合得到了适用于FNaBe盐在HCHX管侧的*Nu*和*f*经验关联式，其计算结果与模拟值的偏差分别为−8%～5%和−5%～5%。该关联式可为熔盐堆紧凑型换热器的设计提供理论基础。

关键词 螺旋管式换热器，熔盐，阻力特性，传热特性，数值模拟

中图分类号 TL33

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250349

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250349

Numerical investigation on heat transfer and flow resistance of fluoride salt in tube side of helically coiled heat exchangers

WANG Yu[1,2,3] LI Qiming[1,2,3] CHEN Yushang[1,2] ZOU Yang[1,2,3]

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

2(*National Key Laboratory of Thorium Energy*, *Shanghai Institute of Applied Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai 201800*, *China*)

3(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing 100049*, *China*)

Abstract **[Background]** The Helically Coiled Heat Exchanger (HCHX) offers advantages including high heat transfer efficiency, compactness, high-pressure resistance, and reduced fouling tendency, making it well-suited to meet the requirements of modular Molten Salt Reactors (MSRs) for heat exchangers. Its heat transfer performance

钍基熔盐堆核能系统产业基金项目(No.SINAP-CYJJ-202401)资助

第一作者：王宇，男，2001年出生，2023年毕业于武汉理工大学，现为博士研究生，研究领域为反应堆热工水力

通信作者：邹杨，E-mail：zouyang@sinap.ac.cn；李启明，E-mail：liqiming@sinap.ac.cn

收稿日期：2025-09-10，修回日期：2025-12-29

Supported by Thorium-Based Molten Salt Reactor Nuclear Energy System Industrial Fund Project (Basic Research Project) (No. SINAP-CYJJ-202401)

First author: WANG Yu, male, born in 2001, graduated from Wuhan University of Technology in 2023, doctoral student, focusing on thermal hydraulic analysis of nuclear reactor

Corresponding author: ZOU Yang, E-mail: zouyang@sinap.ac.cn; LI Qiming, E-mail: liqiming@sinap.ac.cn

Received date: 2025-09-10, revised date: 2025-12-29

and pressure drop directly impact the reactor's thermal efficiency and safety, rendering research on its heat transfer and flow resistance characteristics highly significant. **[Purpose]** This study aims to investigate the heat transfer and flow resistance characteristics of FNaBe salt on the tube side of an HCHX, and develop empirical correlations for molten salt flow in helical tubes. **[Methods]** Firstly, a computational model of HCHX including a single helical tube with shell-side and tube-side fluids was established. Then, Computational Fluid Dynamics (CFD) with SST k-ω turbulence model was employed to simulate the heat transfer and flow resistance characteristics of FNaBe salt within the tube side, focusing particularly on the effects of structural parameters (tube diameter, helical diameter, helical angle), molten salt inlet temperatures, and velocities on the Nusselt number (Nu) and friction factor (f). Finally, the numerical simulation results were comparatively evaluated with predictions from existing empirical correlations for both helical and straight tubes. Based on the numerical simulation data, empirical correlations for Nu and f of FNaBe salt on the HCHX tube side, which incorporate the helical curvature ratio, were developed using multiple nonlinear regression. **[Results]** The numerical simulation results are in good agreement with existing experimental data from the literature, validating the accuracy of the CFD numerical simulation. Both the Nu and f increase with decreasing helical diameter and increasing tube diameter. Reducing the helical diameter from 572 mm to 176 mm intensifies centrifugal effects in molten salt, thereby enhancing secondary flows and increasing Nu by 7%~14% and f by 13%~19%. In contrast, the helical angle has a negligible influence on the heat transfer and flow resistance characteristics within the studied parameters range. Comparison of the numerical simulation results with existing correlations reveals that correlations developed for traditional fluids are inadequate for predicting the heat transfer and flow resistance characteristics of FNaBe salt, yielding maximum deviations of 65% for Nu and 15% for f. Furthermore, the secondary flow generated by centrifugal forces in helical tubes enhances heat transfer and flow resistance, resulting in higher Nu and f compared to straight-tube correlations. **[Conclusions]** The new developed empirical correlations in this study exhibit deviations of −8%~5% for Nu and −5%~5% for f from the numerical simulation results, providing a theoretical foundation for the design of compact heat exchangers in molten salt reactors.

Key words Helically coiled heat exchanger, Molten salt, Flow resistance, Heat transfer, Numerical simulation

熔盐堆(Molten Salt Reactor,MSR)作为第四代核能系统中唯一的液态燃料堆型,具有安全性好、热效率高、一回路低压运行等优点[1]。换热器作为MSR的重要设备之一,主要承担热量运输与放射性物质隔离等关键任务,对系统的稳定运行至关重要[2-3]。目前,反应堆中广泛采用的直管式和U形管式管壳式换热器(Shell and Tube Heat Exchanger,STHX)[4-9],存在传热效率低、体积大等缺点,难以满足MSR小型化、模块化的发展需求。为了提升MSR的经济可行性,亟需研究一种高效紧凑式换热器。螺旋管式换热器(Helically Coiled Heat Exchanger,HCHX)因其传热效率高、耐高压、不易结垢[10]等特性,已被广泛应用于先进反应堆的设计当中[11-12]。相较于STHX,HCHX独特的螺旋缠绕结构使得在同等体积下有更大的传热面积[13],且管内的二次流现象增强了流体的传热性能[14]。此外,HCHX对高温环境下热应力的自适应性好[15],能够很好地满足MSR对熔盐换热器的要求。然而,螺旋管在强化传热的同时会增大管内流体的压损。常规工况下,熔盐在HCHX管侧的传热和阻力特性会影响堆芯的热效率以及回路设备(如熔盐泵)负荷;而在事故工况下,其直接影响堆芯通过自然循环排出余热的能力,对防止内部组件温度超限至关重要[8,16]。因此,深入研究熔盐在HCHX管侧的传热与流动阻力特性,对提升HCHX整体性能,实现MSR热量高效传输具有重要意义。

流体在HCHX管侧传热和阻力特性的影响因素有螺旋管的结构参数以及流体的热工参数等。近年来,国内外学者基于不同流体,围绕HCHX开展了大量的实验和模拟研究。Jian等[17]以水为工质搭建了一个5层螺旋管束的HCHX,实验研究了结构参数对流动传热特性的影响。结果表明,管内传热系数和摩擦因子(f)随着螺旋角而减小,最后根据Schmidt关联式总结出了水在螺旋管内流动的努塞尔数(Nu)和f关联式。Zhao等[18]采用水和空气作为流体介质,测量了不同管曲率下螺旋管内层流和湍流区域的f。结果表明,层流区域推荐使用Ito[19]关联式,湍流区推荐使用Mori[19]关联式。Zhai等[20]实验研究了纳米流体在螺旋管内的流动传热特性,并分别对螺距、螺旋管放置角度、纳米颗粒质量分数开展了敏感性分析。Zhu等[21]采用乙二醇和煤油为流动工质,实验研究了管曲率、流体黏度以及螺距对螺

旋管管内压降和传热特性的研究，结果表明，管内压降和*Nu*随着管曲率和流体黏度而增大。Liu等[22]模拟研究了不同迪恩数（Dean number，*Dn*）、节距和缠绕直径下，液态锂金属在螺旋管内的流动传热特性，结果表明，管内的*Nu*和*f*与*Dn*呈线性关系，且流体在管内的速度和温度分布呈现出“眼剖式”形状。刘彦等[23]对三元硝酸盐在螺旋管内的传热特性开展了实验研究，并将实验数据和Salimpour[24]关联式的计算结果进行了对比。结果表明，水等其他工质在螺旋管内的传热关联式不适用于熔盐。然而，该研究仅针对单一结构螺旋管（管曲率为0.08），未深入讨论结构参数对传热特性的影响，导致开发的经验关联式适用范围有限，且文中未涉及熔盐在螺旋管内的阻力特性研究。

综上所述，现有研究表明流体在螺旋管内的流动结构复杂，且螺旋管结构参数对管内的传热和阻力特性影响较大。然而，文献中螺旋管内*Nu*和*f*经验关联式大多基于常用流动工质，如水、空气和碳氢化合物等提出，涉及高温、高普朗特数（*Pr*）熔盐的研究较少。此外，已有研究也证明了熔盐的流动传热特性不同于传统介质[23,25]。因此，急需开发新的适用于熔盐的螺旋管内传热和阻力关联式。

目前，FNaBe盐（$NaF\text{-}BeF_2$）作为MSR的一种基体盐，具有化学性和腐蚀性，且在高温（≥973.15 K）下运行，实验研究面临安全和材料方面的挑战。计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）作为一种高效，低成本的重要工具，已被广泛用于熔盐换热器的模拟计算[26-27]。因此，本文采用数值模拟方法，研究了FNaBe盐在螺旋管内的传热与流动阻力特性。由于FNaBe盐黏度大且管内流速较低，研究的雷诺数（*Re*）范围低于12 000。同时，为了准确描述熔盐在HCHX管侧的流动传热状态，考虑了壳侧和管侧流体对流换热以及壁面导热的耦合效应。首先，重点分析了螺旋管结构参数（螺旋角、管直径、螺旋直径），熔盐入口温度和入口速度对传热和流动阻力特性的影响规律，并将模拟结果和已有螺旋管及直管关联式的计算结果进行对比。最后，基于模拟数据拟合得出包含结构参数的FNaBe盐在HCHX管侧的经验关联式，为MSR螺旋管式熔盐换热器的设计提供理论参考。

1 几何模型和结构参数

HCHX主要由外壳体，内筒体以及交替缠绕的螺旋管束组成[28]。在实际换热器中，HCHX通常含有多层螺旋管束。本研究主要关注FNaBe盐在HCHX管侧的传热和流动阻力特性。鉴于螺旋管内流动与传热的复杂性受螺旋角、螺旋直径和管直径等多个参数的影响，对单根螺旋管开展模拟有助于精确控制变量，探究各参数的影响机理。此外，熔盐在螺旋管束中各管内的流动具有相似性。因此，为在接近实际换热器工况的同时节省计算资源，建立的计算模型包含一根螺旋管及内外壳体，冷热流体采用逆流布置，如图1（a）所示。

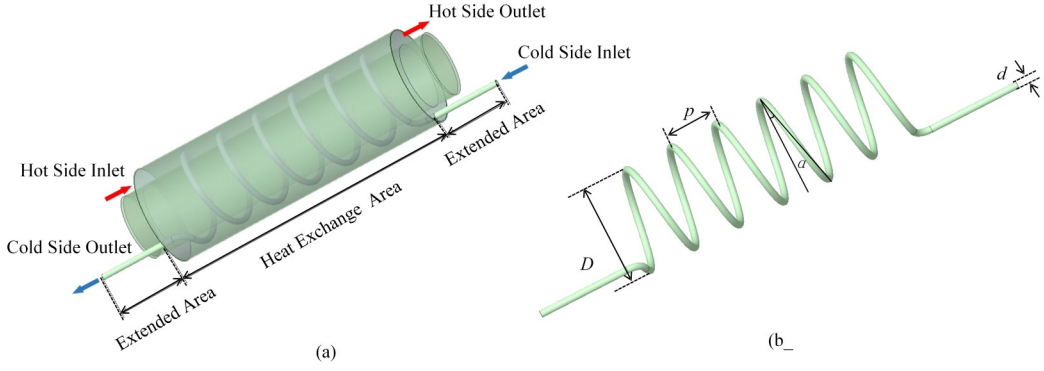


图1 螺旋管式换热器(a)和单根螺旋管(b)示意图
Fig.1 Diagrams of helically coiled heat exchanger (a) and single helical tube (b)

螺旋管换热区高度为528 mm，螺旋管长度为3 360 mm，为了避免入口效应和出口回流，在实际进出口位置各延伸了200 mm的充分发展段，螺旋管的几何模型如图1（b）所示。为了研究螺旋管结构参数对管侧熔盐传热和流动阻力特性的影响，分别选取了螺旋直径（*D*）、螺旋角（*α*）和管直径（*d*）三个因素，具体的结构参数如表1所示。

2 计算模型及验证

2.1 控制方程和边界条件

本文采用ANSYS Fluent求解控制方程，为简化模型，提出以下合理假设：1）流动为稳态不可压缩流动。2）流体无内热源，且忽略重力影响；3）忽略壳侧流体与环境间的热交换；4）熔盐为单相流动，不涉及

表1　结构参数
Table 1　Structural parameters

水平 Level	管直径 Tube diameter / mm	螺旋直径 Helical diameter / mm	螺旋角 Helical angle / (°)
1	8	176	6.05
2	10	308	7.55
3	13	440	9.04
4	15.4	572	10.52
5	17	704	11.98

相变。基于以上假设，控制方程如下：

连续方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right)=0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i u_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\mu_t\right)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i T\right)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] \tag{3}$$

式中：u_i和u_j是i、j方向上的速度分量；p是压力；ρ是流体密度；T为温度；c_p是定压比热容；μ是动力黏度。

文中采用的湍流模型为SST k-ω（Shear-Stress Transport k-ω）模型。该模型结合了标准k-ω模型在近壁区域及标准k-ε模型在远场区域的优势。熔盐具有高黏度、高Pr特性，其流动与传热特性不同于传统介质，Luzzi等[29]对比了熔盐在不同湍流模型下（k-ε、k-ω）的传热和阻力特性，结果表明，在低雷诺数（Re<10 000）情况下采用k-ω模型的计算结果更加准确。因此，本文选取SST k-ω模型开展FNaBe盐在螺旋管内的流动与传热特性计算，其湍流动能k和比耗散率ω的输运方程为[30]：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho k\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho k u_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+Y_k+S_k \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\omega\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\omega u_i\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+G_\omega+Y_\omega+S_\omega \tag{5}$$

式中：G_k、G_ω分别表示平均速度梯度产生的k和ω；Y_k、Y_ω分别表示湍流产生的k和ω；S_k、S_ω为自定义源项。

计算模型的边界条件设置如下：冷热侧流体的入口为速度入口，管侧入口流速为0.3~5.5 m·s^{-1}，对应的Re范围为888~12 374，入口温度为723.15~953.15 K。为保证壳侧热阻不变，所有工况下，壳侧入口流速和入口温度均为0.182 5 m·s^{-1}、973.15 K。管侧和壳侧的出口均设置为压力出口，流体域和固体域的接触面设置为耦合传热且无滑移边界，其他面为绝热边界。采用基于压力的双精度求解器，使用压力耦合方程组的半隐式方法（Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent，SIMPLEC）对速度与压力的耦合关系进行计算。当控制方程残差下降到10^{-6}且监测的冷热侧入口压力和出口温度不再发生变化时认为计算收敛。

HCHX采用的流体介质为熔盐，壳侧是燃料盐NaF-BeF_2-ZrF_4-UF_4-ThF_4，管侧是冷却盐FNaBe。由于FNaBe盐的高温腐蚀特性，选用Hastelloy N为换热器壳体材料，熔盐和合金的物性参数[31-32]如表2所示。

表2　熔盐和Hastelloy N合金的热物性参数
Table 2　The thermophysical properties of molten salt and Hastelloy N alloy

物性 Thermal property	NaF-BeF_2-ZrF_4-UF_4-ThF_4	FNaBe	Hastelloy N
密度 Density / kg·m^{-3}	2 231	2 484.58−0.527 4(T−273.15)	8 860
比热容 Specific heat / J·(kg·K)$^{-1}$	1 566	1 663.67+0.571 4(T−273.15)	523
黏度 Viscosity / Pa·s	0.004 22	0.034 6exp(5 165/T)/1 000	—
热导率 Thermal conductivity / W·(m·K)$^{-1}$	0.76	0.87	19

2.2　参数定义

为了分析FNaBe盐在HCHX管侧的传热和流动阻力特性，定义以下参数。

螺旋管曲率：

$$\delta=\frac{d}{D} \tag{6}$$

螺旋角：

$$\alpha=\arcsin\left(\frac{H}{L}\right) \tag{7}$$

式中：H和L分别表示螺旋管垂直高度和长度。

雷诺数：

$$Re=\frac{\rho v d}{\mu} \tag{8}$$

式中：v表示管内流速。

区别于直管内的流动，流体在螺旋管内会受到离心效应，可用迪恩数表示：

$$Dn=Re\sqrt{\delta} \tag{9}$$

普朗特数：

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \tag{10}$$

式中：λ表示导热系数。

总传热量：

$$Q = c_p m (T_{out} - T_{in}) \tag{11}$$

式中：m表示管内质量流量；T_{out}和T_{in}分别表示管内流体出口和入口温度。

平均传热系数：

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_f)} \tag{12}$$

式中：A表示螺旋管内表面积；T_w和T_f分别表示管内壁平均温度以及管内流体出入口的平均温度。

平均努塞尔数：

$$Nu = \frac{hd}{\lambda} \tag{13}$$

摩擦因子：

$$f = \frac{2d\Delta P}{\rho L v^2} \tag{14}$$

式中：ΔP表示管侧进出口的压力差。

2.3 网格独立性分析

为确保计算结果的可靠性，本文对D=176 mm、d=10 mm、α=9.04°的HCHX开展了网格无关性验证分析。采用ANSYS meshing对模型进行网格划分，鉴于HCHX模型复杂，为了减少网格数量，节省计算资源，对管内流体以及螺旋管采用六面体网格，壳侧流体采用四面体网格，流体与固体的交界面进行了网格加密，以确保近壁面y^+在1左右。如表3所示，共采用了5套网格划分方法，当网格数大于594万个时，f和Nu的变化均在1%以内，表明此时网格的疏密程度对计算结果影响可以忽略，因此，后续所有计算均选取第4套网格划分方法进行分析。

表3 网格无关性验证
Table 3 Grid independence validation

	网格数Mesh number / 10^4				
	288	342	492	594	731
f	0.075 02	0.075 03	0.074 66	0.074 27	0.074 26
Nu	74.17	74.45	71.46	67.07	67.20

2.4 湍流模型验证

流体在螺旋管内的流动结构复杂，不同湍流模型的预测结果可能存在显著偏差，且现有关于FNaBe盐在螺旋管内传热和流动阻力特性的实验数据有限。因此，本文采用两步法对湍流模型的有效性进行验证。由于FNaBe盐具有较高的Pr，其传热和流动阻力特性不同于传统介质。本文首先采用不同湍流模型（RNG k-ε、Realizable k-ε和SST k-ω）对FNaBe盐在直管内的传热和流动阻力特性开展模拟计算。Zhang等[33]和陈玉爽等[34]全面总结了熔盐在直管内传热特性的实验数据，并将实验结果和现有关联式进行对比，指出Gnielinski关联式计算结果和实验结果吻合较好。因此，本文将FNaBe盐在直管内Nu、f模拟结果分别与Gnielinski和Blasius关联式进行对比，结果如图2所示。Realizable k-ε、SST k-ω模拟结果和关联式计算结果的误差均随着Re的增大而逐渐减小；其中，SST k-ω模型在较宽Re范围内能更好预测FNaBe盐的传热和流动阻力特性。

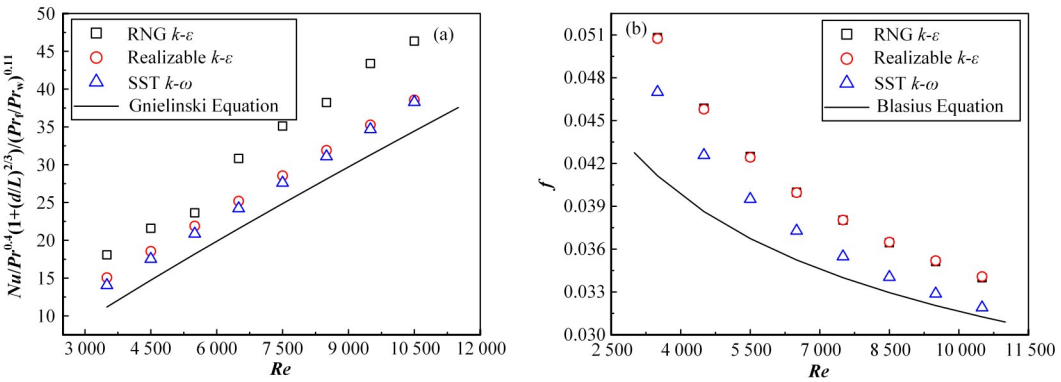


图2 直管内不同湍流模型模拟结果的对比 (a) Nu, (b) f

Fig.2 Comparison of simulation results from different turbulence models in straight tube (a) Nu, (b) f

随后，采用预测结果最优的SST k-ω模型对Hardik等[35]的水在螺旋管内的实验数据开展进一步验证。实验段的具体结构参数为：d=7.5 mm，D=98.21 mm，α=9.2°和L=1 875 mm。计算结果如图3所示。Nu、f的模拟结果和实验结果的最大偏差分别为8%和15%，造成这种偏差的原因可能是模拟计算时采用的流体物性参数不随温度变化，这与实际情况不符。此外，模拟计算边界条件的简化以及求解的离散误差等也是误差产生的重要因素。总体来讲，Nu和f模拟结果和实验结果吻合较好，两者的最大偏差均在15%以内。因此本文采用SST k-ω模型开展FNaBe盐在HCHX管侧的数值模拟计算。

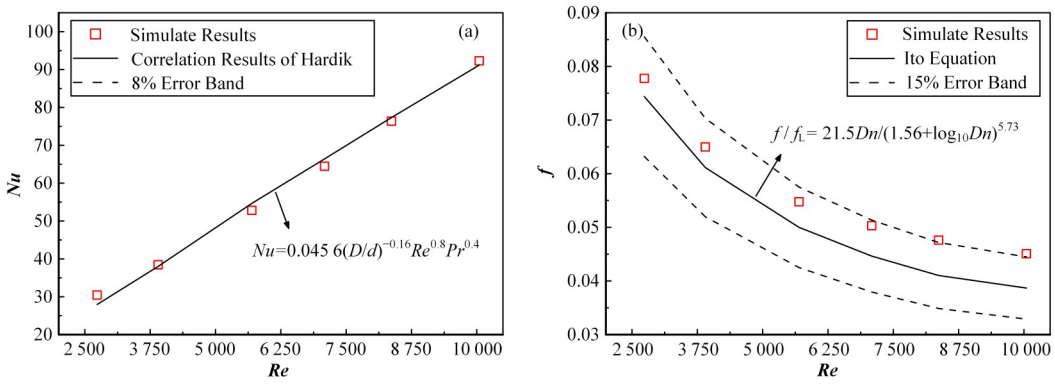


图3 螺旋管内模拟结果和实验及关联式结果的对比 (a) Nu, (b) f

Fig.3 Comparison of simulation results with experimental and correlation results in spiral tubes (a) Nu, (b) f

3 结果和讨论

3.1 热工参数对传热和阻力特性的影响

通过改变管侧入口温度边界条件，研究了FNaBe盐在不同入口温度下HCHX管侧的传热和流动阻力特性，计算结果如图4所示。相同入口温度下，Nu随流速的增加而增大，f随流速的增大而减小。这是因为流速增大加剧了熔盐的湍流强度，流体对边界层的扰动作用增强，从而降低壁面传热热阻，强化了FNaBe盐在螺旋管内的传热特性；在相同流速下，随着入口温度的增大，Nu逐渐增大，而f逐渐减小。其原因为：熔盐温度变化导致其动力黏度和密度改变，当温度由723.15 K增大到953.15 K时，FNaBe盐的密度和动力黏度分别减小5.4%和82.2%，动力黏度随温度变化更加剧烈。两者的综合作用下使得管侧Re增大，因此，增强了FNaBe盐的换热能力，而黏度的减小导致流体内摩擦阻力减小，最终使得f减小。

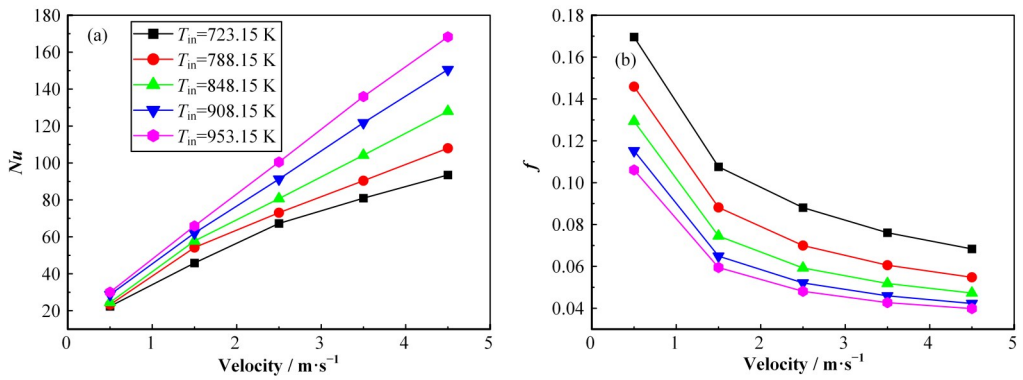


图4 入口温度对Nu (a)、f (b)的影响（彩图见网络版）

Fig.4 Effect of inlet temperatures on Nu (a) and f (b) (color online)

3.2 结构参数对传热和阻力特性的影响

3.2.1 螺旋角的影响

为探究螺旋角对FNaBe盐流动与传热特性的影响，分别取螺旋角为6.05°、7.55°、9.04°、10.52°、11.98°的螺旋管开展数值模拟研究，结果如图5所示。当螺旋角由6.05°增大到11.98°时，Nu和f分别增大了2%和3%左右。产生这种现象的原因是：螺旋角增大虽然削弱了熔盐在螺旋管内的离心效应，但同时也增强了管内的扭转效应[16]，综合作用下导致管内流场随螺旋角的增大而逐渐失稳，最终增大了熔盐的传热和压降。为了进一步揭示螺旋角对熔盐在HCHX管侧传热和流动阻力特性的影响机理，采用二次流强度（Secondary Flow Intensity，SFI）[36]来量化熔盐在管内的湍流混合效应，如式（15）所示：

$$I_{\mathrm{SF,ave}}=\frac{\int\sqrt{u_x^2+u_y^2}\,\mathrm{d}A}{\int u_z\mathrm{d}A} \tag{15}$$

图6为螺旋角0°~11.98°，熔盐在螺旋管管内的二次流强度云图。结果表明，随着螺旋角增大，二次流强度不断增大，进而改善了螺旋管内的湍流混合效应，有利于FNaBe盐的流动传热特性；管内二次流现象整体呈现出“双旋涡”型式（蓝色区域为旋涡），但随着螺旋角的增大，旋涡大小以及涡心连线与竖直方向的夹角都发生了变化。当螺旋角等于

0°，管内二次流为对称的双旋涡结构，且涡心连线与竖直方向的夹角为0°。随着螺旋角增大，离心效应的减弱使得旋涡逐渐减小，而扭转效应导致涡心连线与竖直方向出现明显的夹角，且上下涡发生畸变，不再对称，整体表现为“斜向非对称旋涡”状态。

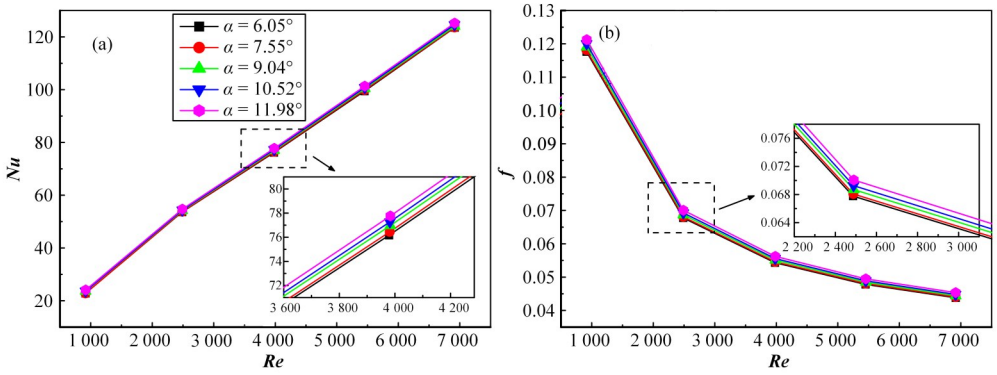


图5 螺旋角对*Nu* (a)、*f* (b)的影响（彩图见网络版）
Fig.5 Effect of helix angle on *Nu* (a) and *f* (b) (color online)

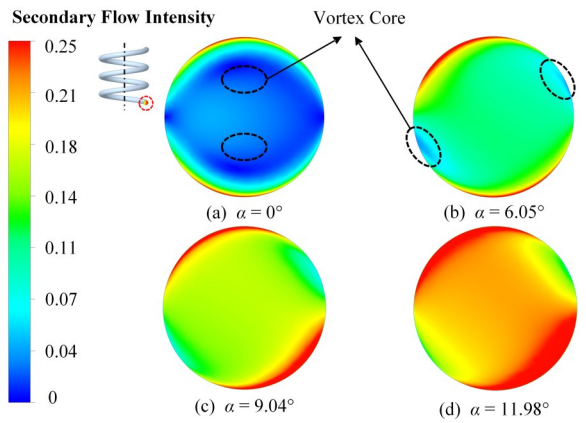


图6 不同螺旋角管内二次流强度云图（彩图见网络版）
Fig.6 Secondary flow intensity contour in tubes with different helix angles (color online)

3.2.2 管直径的影响

为探究螺旋管直径对FNaBe盐流动与传热特性的影响，分别取管直径为8 mm、10 mm、13 mm、15.4 mm、17 mm的螺旋管开展数值模拟研究。图7为螺旋管直径对*Nu*和*f*的影响。结果表明，在相同*Re*下，随着管直径的增大，*Nu*和*f*均增大；当管直径由8 mm增大到17 mm时，*Nu*和*f*分别增大了20%和17%。这是因为管直径的增大导致管曲率增大，从而强化了管内熔盐的离心效应，进而提高了传热速率和压降。为了进一步说明管直径对FNaBe盐在管内流动传热特性的影响，图8为不同管直径，螺旋管管内的二次流强度云图。当管直径由8 mm增至17 mm，管内的旋涡（蓝色区域）会逐渐增大，管截面的二次流强度面平均值由0.165 3增大至0.167 0，即二次流现象增强，因此增大了熔盐在螺旋管管内的传热和压降。此外，涡心连线和竖直方向夹角不随管直径的改变而变化。

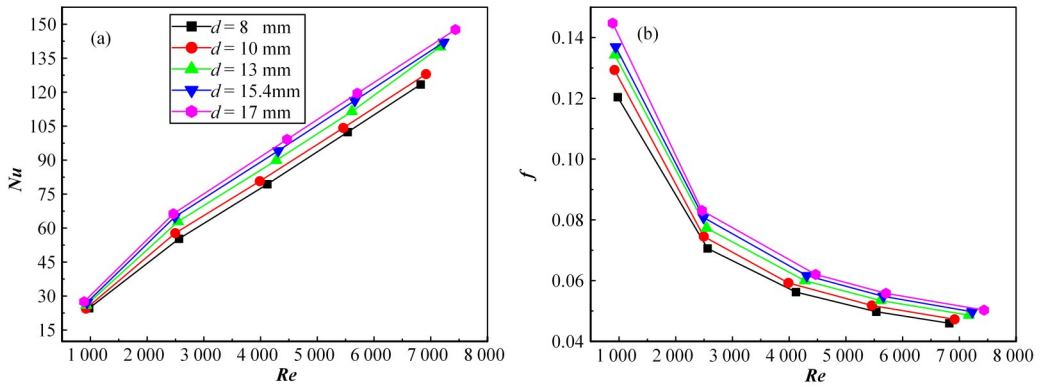


图7 管直径对*Nu* (a)、*f* (b)的影响（彩图见网络版）
Fig.7 Effect of tube diameter on *Nu* (a) and *f* (b) (color online)

3.2.3 螺旋直径的影响

为探究螺旋直径对FNaBe盐传热与流动阻力特性的影响，分别取螺旋直径为176 mm、308 mm、440 mm、572 mm、704 mm的螺旋管开展数值模拟研究，结果如图9所示。在相同*Re*下，*Nu*和*f*均随着螺旋直径的增大而减小，且减小趋势逐渐降低。当螺

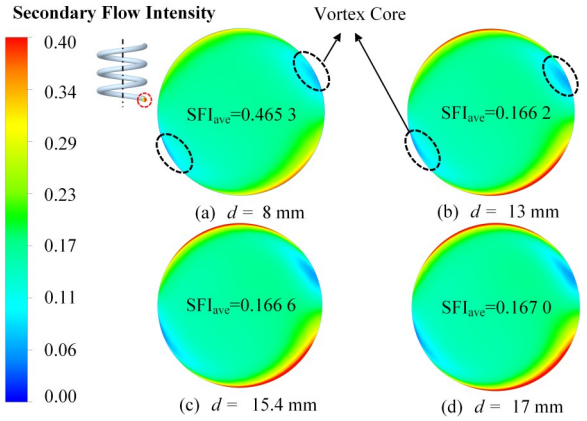


图8 不同管直径管内二次流强度云图(彩图见网络版)
Fig.8 Secondary flow intensity contour in tubes with different tube diameter (color online)

旋直径由176 mm增大到572 mm时,*Nu*和*f*分别减小了7%~14%和13%~19%,进一步增大到704 mm时,*Nu*和*f*基本不变。图10为螺旋直径176~704 mm,螺旋管管内的二次流强度云图。结果表明,随着螺旋直径的增大,管内旋涡的大小发生变化,而涡心连线与竖直方向的夹角不变。当螺旋直径为176 mm时,在管内壁面附近存在较小的涡流,而随着螺旋直径的不断增大,旋涡逐渐减小,直至在管壁附近消失。这是因为管内流体所受离心力大小与螺旋直径成反比。当螺旋直径由176 mm增大至704 mm,管截面的二次流强度面平均值由0.117 7减小至0.106 3,表明管内二次流现象减弱,最终导致传热速率和阻力下降。

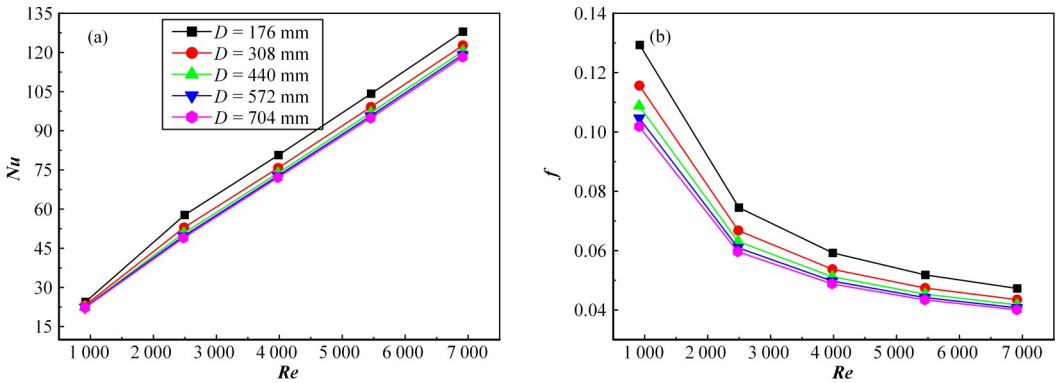


图9 螺旋直径对*Nu* (a)、*f* (b)的影响(彩图见网络版)
Fig.9 Effect of helical diameter on *Nu* (a) and *f* (b) (color online)

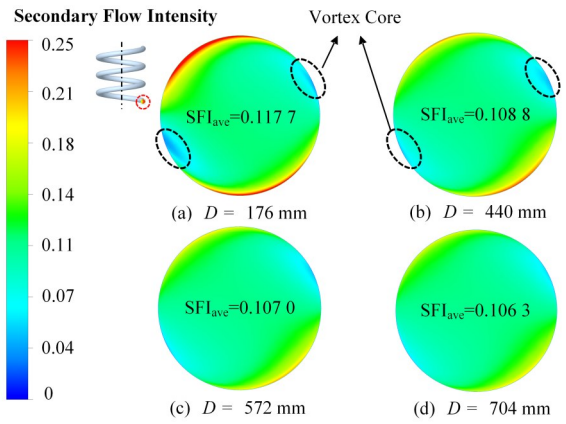


图10 不同螺旋直径管内二次流强度云图(彩图见网络版)
Fig.10 Secondary flow intensity contour in tubes with different helical diameter (color online)

3.3 不同经验关联式对比

3.3.1 传热关联式对比

将模拟结果与表4中现有螺旋管以及直管内的传热关联式进行对比,如图11所示。结果表明,FNaBe盐在螺旋管内的*Nu*模拟结果和现有螺旋管内关联式计算结果误差在65%以内。其中,模拟结果和Hardik等[35]关联式吻合最好,平均偏差为4.37%。造成这种偏差的原因是本文采用的流动工质为高温FNaBe盐,其*Pr*高,动力黏度大,且*Pr*对熔盐传热特性影响较大(关联式*Pr*指数通常为0.4)[34]。然而,现有关联式大多基于低*Pr*工质(如水、空气等)提出,部分关联式(如Dravid、Xin、Zhao)中*Pr*对流体的传热特性影响较小(关联式*Pr*指数小于0.2),导致无法准确预测FNaBe盐的传热特性,其计算结果甚至低于直管Dittus-Boelter公式。此外,区别于以往研究采用的恒定热通量或恒定温度边界条件,本文在模拟中为了准确描述FNaBe盐在HCHX管侧的受热状态,还考虑了壳侧与管侧流体对流换热以及管壁导热的耦合效应,这也是产生偏差的重要因素。值得注意的是,大部分关联式和模拟结果的偏差都在50%以内,但Dravid和Pimenta关联式的误差达到了65%。这是因为Dravid和Pimenta关联式都是基于固定管曲率的螺旋管提出,未充分考虑管曲率对管内传热特性的影响,而本文模拟研究的管曲率范围较大(0.014~0.097),因此进一步扩大了偏差。最后,模拟结果和直管经验关联

式的对比表明，FNaBe盐在螺旋管内的传热特性优于直管，这是因为熔盐流经螺旋管时会受到离心力作用产生二次流现象，加剧了管内的径向混合，从而强化了流体的传热。

表4 螺旋管及直管内的*Nu*经验关联式

Table 4 Empirical correlations for *Nu* in spiral as well as straight tubes

作者 Author	流动工质 Medium	关联式 Correlations	备注 Remark
Dravid[37]	水、乙二醇 Water, glycol	$Nu=(0.76+0.65Dn^{0.5})Pr^{0.175}$ $50<Dn<2\,000$, $5<Pr<175$, $\delta=0.05$	实验，恒定壁面热通量 Experiment and constant heat flux
Xin[38]	空气、水、乙二醇 Air, water, glycol	$Nu=(2.153+0.318Dn^{0.643})Pr^{0.177}$ $20<Dn<2\,000$, $0.7<Pr<175$, $0.026\,7<\delta<0.088\,4$	实验，恒定壁面热通量 Experiment and constant heat flux
Manlapaz[39]	—	$Nu=\left[\left(\frac{48}{11}+\frac{51}{11}\left(1+\frac{1\,342}{PrDn^2}\right)^{-2}\right)^3+1.816\left(\frac{Dn}{1+1.15/Pr}\right)^{\frac{3}{2}}\right]^{1/3}$	理论方程 Theoretical equation
Pawar[40]	水 Water	$Nu=0.021\,98Re^{0.931\,4}Pr^{0.4}\delta^{0.391}$ $3\,166<Re<9\,658$, $3.8<Pr<4.8$, $0.055<\delta<0.075\,7$	实验，恒定壁面温度 Experiment and constant wall temperature
Pimenta[41]	甘油水溶液 Glycerol aqueous solution	$Nu=(0.5Dn^{0.481}-0.465)Pr^{0.367}$ $15<Dn<1\,020$, $10<Pr<353$, $\delta=0.026\,3$	实验，恒定壁面温度 Experiment and constant wall temperature
Hardik[35]	水 Water	$Nu=0.045\,6Re^{0.8}Pr^{0.4}\delta^{0.16}$ $1\,700<Re<14\,000$, $3<Pr<6$, $0.015<\delta<0.076$	实验，恒定壁面热通量 Experiment and constant heat flux
Zhao[18]	空气，水 Air, water	$Nu=0.025\,4fRe^{1.197}Pr^{0.159}$ $200<Re<8\,000$, $3<Pr<175$, $0.015<\delta<0.077$	实验 Experiment
Dittus-Boelter[42]	—	$Nu=0.023aRe^{0.8}Pr^{0.4}$ $2\,300<Re<10\,000$	直管 Straight tube

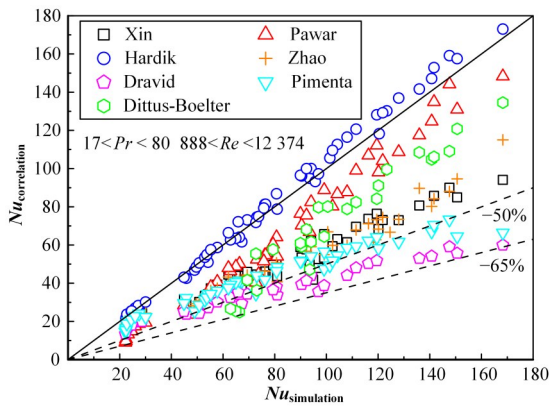


图11 *Nu*模拟结果和不同经验关联式的对比（彩图见网络版）

Fig.11 Comparison of *Nu* simulation results and different empirical correlations (color online)

3.3.2 阻力关联式对比

图12对比了模拟结果与表5中螺旋管及直管阻力关联式的计算结果。结果表明，*f*模拟结果和螺旋管内关联式计算结果吻合较好，最大偏差在15%以内。其中，Mori等[19]关联式的预测结果最好，平均偏差为6.93%左右。产生这种偏差的原因可能是：本文在模拟计算时考虑了FNaBe盐的变物性效应，其动力黏度在723.15~953.15 K范围的变化超过82%。这种大幅度的黏度变化会显著改变流场的速度剖面和壁面剪切效应，从而影响摩擦阻力系数。此外，熔盐的高*Pr*数表明其热边界层和速度边界层不同于常规流体。这种差异会使得壁面附近由温度场驱动的物性变化与由离心力驱动的二次流场之间产生相互作用，导致熔盐和常规流体在螺旋管内的流场结构并不完全相似，最终使得*f*出现偏差。所有螺旋管内关联式的计算结果以及模拟结果均大于直管关联式，且*f*越大（*Re*越小），差距越明显。这是因为随着*Re*的增大，管内流体的流动状态会逐渐由层流过渡到湍流，管内二次流的影响效果会不断减小[35]，因此当*f*大于0.08，模拟结果和直管关联式的偏差更大，对于管内的传热特性（*Nu*<100），也有同样的趋势。

3.4 螺旋管式换热器管侧经验关联式拟合

根据以上讨论，现有螺旋管关联式均基于传统工质提出，不适用于FNaBe盐的流动与传热特性。因此，针对FNaBe盐总结新的螺旋管内经验关联式具有重要意义。区别于直管内的流动，流体在螺旋管内主要受到离心效应和扭转效应的影响。离心效应会使得流体在管截面产生二次流现象，从而强化管内的径向混合，其主要取决于*Re*和几何参数。扭转效应则会随着螺旋角（螺距）而增大，导致对称的二次流发生畸变，进而破坏流场的稳定性。由于本文选取的螺旋角范围较小，在拟合经验关联式时不考虑螺旋角的影响。此外，FNaBe盐的物性参数随

表5 螺旋管及直管内的f经验关联式
Table 5 Empirical correlations for f in spiral as well as straight tubes

作者 Author	流动工质 Medium	关联式 Correlations
White[43]	水、油 Water, oil	$f/f_L=[1-[1-(11.6/Dn)^{0.45}]^{1/0.45}]^{-1}$, $11.6<Dn<2\,000$, $\delta<0.066$
Prandtl[44]	—	$f/f_L=0.29Dn^{0.36}$, $40<Dn<2\,000$
Hasson[44]	—	$\frac{f}{f_L}=0.556+0.096\,9Dn^{0.5}$, $22<Dn<2\,000$, $\delta<0.066$
Ito[19]	—	$f/f_L=21.5Dn(1.56+\log_{10}Dn)^{-5.73}$, $13.5<Dn<2\,000$
Barua[45]	—	$\frac{f}{f_L}=0.509+0.0918Dn^{0.5}$
Mori[19]	—	$f/f_L=\frac{0.108Dn^{0.5}}{1-3.252\,7Dn^{-0.5}}$
Mishra[46]	水 Water	$f/f_L=1+0.033(\log_{10}Dn)^4$, $1<Dn<3\,000$
Manlapaz[39]	—	$f/f_L=\left[\left(1-0.18\left[1+(35/Dn)^2\right]^{-1/2}\right)^n+(1+\delta/3)^2Dn/88.33\right]^{1/2}$
Pimenta[41]	甘油水溶液 Glycerol aqueous solution	$f/f_L=1+\frac{0.028Dn^{1.68}}{70+Dn}$, $40<Re<6\,300$, $\delta=0.026\,3$
Blasius[42]	—	$f=64/Re$, $Re<2\,000$ $f=0.316\,4/Re^{0.25}$, $3\,000<Re<100\,000$

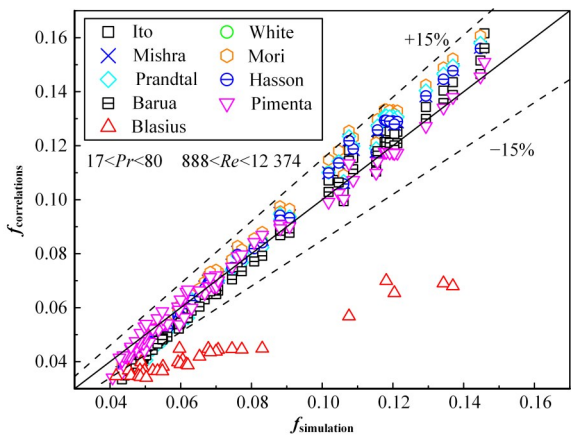


图12 f模拟结果和不同经验关联式的对比(彩图见网络版)
Fig.12 Comparison of f simulation results and different empirical correlations (color online)

温度变化显著,且流体与管壁之间存在较大温差,因此拟合过程中还须考虑变物性效应的修正。最后,基于直管经验关联式形式拟合得出了FNaBe盐在螺旋管内的Nu和f经验关联式,如式(16)和(17)所示。其中,无量纲参数管曲率为管直径和螺旋直径的比值,表明螺旋管结构参数对传热和阻力特性的影响。图13为Nu和f关联式计算结果和模拟结果的对比。结果表明,关联式的计算结果和模拟结果吻合较好,Nu和f的偏差分别为−8%~5%和−5%~5%。因此认为该经验关联式满足要求,可为螺旋管式熔盐换热器的设计提供理论参考。

$$Nu=0.023Re^{(0.8-4.96\delta^{2.33})}Pr^{0.4}(1+13.97\delta^{1.43})\left(\frac{\mu_w}{\mu_f}\right)^{-0.11} \tag{16}$$

$$f=\frac{0.316\,4}{Re^{0.25}}\left(1+\frac{261.5}{Re^{0.61}}\delta^{0.37}\right)\left(\frac{\mu_w}{\mu_f}\right)^{0.21} \tag{17}$$

式中:$888<Re<12\,374$,$18<Pr<80$,$0.014<\delta<0.097$,$3\ \mathrm{K}<T_w-T_f<110\ \mathrm{K}$,$\mu_w$和$\mu_f$分别表示管内壁平均温度及流体出入口平均温度下的动力黏度。

4 结语

本文通过数值模拟方法,建立了HCHX模型,研究了FNaBe盐在管侧的传热与流动阻力特性,得到了以下结论:

1)熔盐入口温度通过改变物性参数影响流动与传热。温度从723.15 K升高到953.15 K时,FNaBe盐的密度和动力黏度分别降低5.4%和82.2%,动力黏度的急剧下降导致Re增大,最终使得Nu增大,f减小。

2)螺旋管的结构参数中,螺旋直径与管直径是影响传热和阻力特性的主要几何因素,而螺旋角在本文研究范围内影响甚微。Nu和f均随管直径而增大,随螺旋直径的增大而减小,当螺旋直径由176 mm增大到572 mm时,Nu和f分别减小7%~14%和13%~19%,进一步增大到704 mm,Nu和f变化不显著。

3)模拟结果和现有基于传统工质提出的经验关

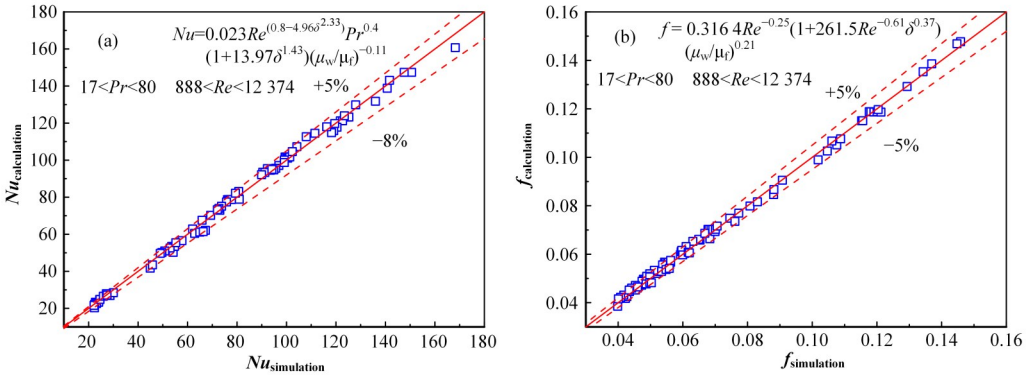


图13 模拟结果和拟合关联式计算结果对比（彩图见网络版） (a) *Nu*，(b) *f*

Fig.13 Comparison of simulation results and fitted correlation formula calculations (color online) (a) *Nu*, (b) *f*

联式存在较大偏差，*Nu* 和 *f* 的最大偏差分别达到65%和15%。表明这些关联式不适用于预测FNaBe盐在螺旋管内的流动与传热特性。螺旋管中离心力驱动的二次流效应使得其 *Nu* 和 *f* 均高于直管关联式的预测值。

4）基于模拟结果，采用多元非线性回归法拟合得到了FNaBe盐在HCHX管侧的 *Nu* 和 *f* 关联式：

$$Nu = 0.023Re^{(0.8-4.96\delta^{2.33})}Pr^{0.4}(1+13.97\delta^{1.43})\left(\frac{\mu_w}{\mu_f}\right)^{-0.11},$$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}\left(1+\frac{261.5}{Re^{0.61}}\delta^{0.37}\right)\left(\frac{\mu_w}{\mu_f}\right)^{0.21},$$

适用范围：888<*Re*<12 374，18<*Pr*<80，0.014<*δ*<0.096，3 K<T_w-T_f<110 K。新关联式与模拟结果吻合良好，*Nu* 和 *f* 的偏差分别为−8%～5%和−5%～5%，可为熔盐紧凑型换热器的设计提供理论参考。

作者贡献声明 王宇负责制定论文框架和研究思路、完善仿真模型、进行仿真、编制论文稿件；李启明负责制定论文框架、指导研究工作方法、完善研究方案、审阅修订稿件；陈玉爽负责完善研究方案、审阅修订稿件；邹杨负责指导研究工作方法、完善研究思路。

参考文献

1 蔡翔舟, 戴志敏, 徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(9): 578－590. DOI: 10.7693/wl20160904.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, **45**(9): 578－590. DOI: 10.7693/wl20160904.

2 缪洪康. 熔盐—熔盐板(翅)式换热器数值模拟研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2018.
MIAO Hongkang. Numerical simulation of molten salt-molten salt plate heat exchanger and plate fin heat exchanger[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.

3 李哲, 陈玉爽, 杨晓虹. 高温熔盐微通道换热器的热工水力特性研究[J]. 核技术, 2025, **48**(10): 100605. DOI: 10.3724/j. 0253-3219.2025. hjs. 48.240406. CSTR: 32193. 14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240406.
LI Zhe, CHEN Yushuang, YANG Xiaohong. Thermo-hydraulic characteristics of high-temperature molten salt microchannel heat exchangers[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(10): 100605. DOI: 10.3724/j. 0253-3219.2025. hjs.48.240406. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025. 48.240406.

4 刘晨, 李启明, 邹杨, 等. 翼型翅片PCHE的结构参数优化与流动传热的数值模拟[J]. 核技术, 2021, **44**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110602.
LIU Chen, LI Qiming, ZOU Yang, *et al*. Optimization of structural parameters and thermal-hydraulic numerical simulation of printed circuit heat exchanger with airfoil fins[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(11): 110602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.110602.

5 王中原, 傅瑶, 邹杨, 等. 管壳式熔盐换热器折流板开孔数值分析[J]. 工程热物理学报, 2022, **43**(10): 2790－2797.
WANG Zhongyuan, FU Yao, ZOU Yang, *et al*. Numerical analysis of baffle opening on shell and tube molten salt heat exchanger[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, **43**(10): 2790－2797.

6 Chen Y S, Tian J, Fu Y, *et al*. Experimental study of heat transfer enhancement for molten salt with transversely grooved tube heat exchanger in laminar-transition-turbulent regimes[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **132**: 95 － 101. DOI: 10.1016/j. applthermaleng. 2017. 12.054.

7 Chen Y S, Tian J, Zhu H H, *et al*. Thermal sizing design and experimental evaluation of molten salt-to-air heat exchanger[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, **132**: 504－511. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.06.033.

8 Li Q M, Tian J, Fu Y, *et al*. Experimental study on heat transfer and flow resistance performance of an air-cooled fluoride salt heat exchanger[J]. Applied Thermal

Engineering, 2025, **269**: 126124. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126124.

9 Li Q M, Fu Y, Tian J, *et al*. Experimental heat transfer performance of a drainage-integrated fluoride salt-to-salt heat exchanger[J]. Results in Engineering, 2025, **28**: 107206. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107206.

10 Khairulmaini M, Michael Z, Hamid M F A, *et al*. Analyzing the influence of diameter and winding on heat transfer efficiency in spiral tube heat exchangers: a CAD-integrated CFD study using solidworks flow simulation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, **2688**(1): 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2688/1/012002.

11 Ju H M, Zhang Y J, Huang Z Y, *et al*. Experimental and operational verification of the HTR-10 once-through steam generator (SG): heat-transfer and hydrodynamic features of the once-through steam generator[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, **41**(7): 765 – 770. DOI: 10.1080/18811248.2004.9715544.

12 Chung Y J, Kim H J, Chung B D, *et al*. Thermo-hydraulic characteristics of the helically coiled tube and the condensate heat exchanger for SMART[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013, **55**: 49 – 54. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.11.026.

13 Oh C H, Kim E S, Patterson M. Design option of heat exchanger for the next generation nuclear plant[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, **132**(3): 032903. DOI: 10.1115/1.3126780.

14 Inyang U E, Uwa I J. Heat transfer in helical coil heat exchanger[J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2022, **12**(1): 26 – 39. DOI: 10.4236/aces.2022.121003.

15 张贤安, 陈永东, 王健良. 缠绕管式换热器的工程应用[J]. 大氮肥, 2004, **27**(1): 9 – 11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5782.2004.01.004.
ZHANG Xian′an, CHEN Yongdong, WANG Jianliang. Engineering application of wrap-round tubular heat exchanger[J]. Large Scale Nitrogenous Fertilizer Industry, 2004, **27**(1): 9 – 11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5782.2004.01.004.

16 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.

17 Jian G P, Wang S M, Wen J. Experimental study on the tube-side thermal-hydraulic performance of spiral wound heat exchangers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, **159**: 106618. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106618.

18 Zhao H J, Li X W, Wu Y J, *et al*. Friction factor and Nusselt number correlations for forced convection in helical tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **155**: 119759. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119759.

19 Mori Y S, Nakayama W. Study on forced convective heat transfer in curved pipes: 1st report, laminar region[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1964, **30**(216): 977 – 988. DOI: 10.1299/kikai1938.30.977.

20 Zhai X F, Qi C, Pan Y H, *et al*. Effects of screw pitches and rotation angles on flow and heat transfer characteristics of nanofluids in spiral tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **130**: 989 – 1003. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.131.

21 Zhu H, Wang H Q, Kou G X. Experimental study on the heat transfer enhancement by Dean vortices in spiral tubes [J]. International Journal of Energy and Environment, 2014, **5**(3): 317−326.

22 Liu Y F, He Y, Tan P. Numerical investigation of the heat transfer characteristics of liquid lithium metal in spiral tubes[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2023, **15**(12): 121012. DOI: 10.1115/1.4063570.

23 刘彦, 孔巧玲, 黄伟光, 等. 螺旋管式熔盐-氦气换热器对流传热试验研究[J]. 太阳能学报, 2019, **40**(8): 2266 – 2271. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2019.08.023.
LIU Yan, KONG Qiaoling, HUANG Weiguang, *et al*. Experimental study for a spiral tube molten salt to helium gas heat exchanger[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, **40**(8): 2266 – 2271. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2019.08.023.

24 Salimpour M R. Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, **33**(2): 203 – 207. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2008.07.015.

25 Qian J, Kong Q L, Zhang H W, *et al*. Experimental study for shell-and-tube molten salt heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, **124**: 616 – 623. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.005.

26 Chen Y S, Tian J, Zhu H H, *et al*. Experimental and numerical study on thermal performance of a fluoride salt-to-air heat exchanger[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, **168**: 108876. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108876.

27 Du B C, He Y L, Wang K, *et al*. Convective heat transfer of molten salt in the shell-and-tube heat exchanger with segmental baffles[J]. International Journal of Heat and

Mass Transfer, 2017, **113**: 456 – 465. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.075.

28 肖娟, 简冠平, 王家瑞, 等. 缠绕管式换热器性能及应用研究进展[J]. 化工机械, 2016, **43**(4): 423 – 428. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6094.2016.04.001.
XIAO Juan, JIAN Guanping, WANG Jiarui, *et al*. Progress in performance and application study for wound-tube heat exchanger[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, **43**(4): 423 – 428. DOI: 10.3969/j. issn. 0254-6094.2016.04.001.

29 Luzzi L, Cammi A, Di Marcello V, *et al*. An approach for the modelling and the analysis of the MSR thermo-hydrodynamic behaviour[J]. Chemical Engineering Science, 2010, **65**(16): 4873 – 4883. DOI: 10.1016/j.ces.2010.05.040.

30 Yakhot V, Orszag S A. Renormalization-group analysis of turbulence[J]. Physical Review Letters, 1986, **57**(14): 1722 – 1724. DOI: 10.1103/physrevlett.57.1722.

31 Li Q M, Tian J, Zhou C, *et al*. A new method to evaluate the sealing reliability of the flanged connections for Molten Salt Reactors[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, **287**: 90 – 94. DOI: 10.1016/j. nucengdes. 2015. 03.003.

32 熔盐化学部. FNaBe熔盐物性参数[R]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2025.
Molten Salt Chemistry Department. Thermal-physical properties of FNaBe salt[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2025.

33 Zhang S, Sun X D, Dominguez-Ontiveros E E. Numerical study on convective heat transfer and friction characteristics of molten salts in circular tubes[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, **142**: 107375. DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107375.

34 陈玉爽, 田健, 朱海华, 等. 熔盐圆管内湍流对流换热实验研究[J]. 核技术, 2019, **42**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.040601.
CHEN Yushuang, TIAN Jian, ZHU Haihua, *et al*. Experimental study on turbulent convective heat transfer of molten salts in circular tubes[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(4): 040601. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2019.hjs.42.040601.

35 Hardik B K, Baburajan P K, Prabhu S V. Local heat transfer coefficient in helical coils with single phase flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, **89**: 522 – 538. DOI: 10.1016/j. ijheatmasstransfer.2015.05.069.

36 Yildiz M A, Yuan H M, Merzari E, *et al*. Numerical simulation of isothermal flow across slant five-tube bundle with spectral element method code Nek5000[J]. Nuclear Technology, 2020, **206**(2): 296 – 306. DOI: 10.1080/00295450.2019.1626176.

37 Dravid A N, Smith K A, Merrill E W, *et al*. Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes[J]. AIChE Journal, 1971, **17**(5): 1114 – 1122. DOI: 10.1002/aic.690170517.

38 Xin R C, Ebadian M A. The effects of Prandtl numbers on local and average convective heat transfer characteristics in helical pipes[J]. Journal of Heat Transfer, 1997, **119**(3): 467 – 473. DOI: 10.1115/1.2824120.

39 Manlapaz R L, Churchill S W. Fully developed laminar convection from a helical coil[J]. Chemical Engineering Communications, 1981, **9**(1 – 6): 185 – 200. DOI: 10.1080/00986448108911023.

40 Pawar S S, Sunnapwar V K. Studies on convective heat transfer through helical coils[J]. Heat and Mass Transfer, 2013, **49**(12): 1741 – 1754. DOI: 10.1007/s00231-013-1210-3.

41 Pimenta T A, Campos J B L M. Friction losses of Newtonian and non-Newtonian fluids flowing in laminar regime in a helical coil[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, **36**: 194 – 204. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.09.013.

42 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 59 – 76.
QIAN Songwen. Heat exchanger design manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 59 – 76.

43 White C M. Streamline flow through curved pipes[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 1929, **123**(792): 645 – 663. DOI: 10.1098/rspa.1929.0089.

44 Di G Sigalotti L, Alvarado-Rodríguez C E, Rendón O. Fluid flow in helically coiled pipes[J]. Fluids, 2023, **8**(12): 308. DOI: 10.3390/fluids8120308.

45 Barua S N. On secondary flow in stationary curved pipes [J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1963, **16**(1): 61 – 77. DOI: 10.1093/qjmam/16.1.61.

46 Mishra P, Gupta S N. Momentum transfer in curved pipes. 1. Newtonian fluids[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1979, **18**(1): 130 – 137.