

失重和重力条件液态金属绕流管束对流传热特性对比

肖辉¹, 郭靓¹, 兰治科¹, 马元², 王苏豪¹, 王盛¹

(1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213;

2. 西安航天动力研究所 航天液体动力全国重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘要: 液态金属绕流管束对流换热能力强, 其应用有助于换热设备小型化, 是空间动力反应堆主换热器设计的较好选择。失重是空间环境的典型特征, 失重和重力条件下液态金属绕流管束流动传热特性的异同尚不清楚, 阻碍了液态金属用于空间反应堆的发展进程。为此, 通过雷诺时均数值模拟方法, 对比研究了失重和重力条件下液态金属绕流管束湍流传热特性, 获得了局部温度与速度分布, 得到了流动传热性能变化规律。结果表明: 竖直向下流动时, 液态金属对流传热性能在失重和重力条件下表现不同; 重力条件下浮力影响了流场和温度场, 相比失重条件, 阻力和换热性能最大偏差约 10%。

关键词: 对流传热; 横掠管束; 液态金属; 失重; 重力

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)04-0103-07

Comparison of convective heat transfer characteristics of liquid metals flowing across tube bundles between gravity and zero-gravity conditions

XIAO Hui¹, GUO Liang¹, LAN Zhike¹, MA Yuan², WANG Suhao¹, WANG Sheng¹

(1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China; 2. National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Liquid metal flowing across tube bundles accompanies with strong convective heat transfer ability. Its application is conducive to the miniaturization of heat exchanger equipment and is a good choice for the main heat exchanger design of space reactor. Weightlessness is a typical characteristic of space environment. However, it is not clear in the similarities and differences of the flow and heat transfer characteristics between gravity and zero-gravity conditions in the process of liquid metal flowing across tube bundles, which hinders the development process of liquid metal used in space reactors. Therefore, the turbulent heat transfer characteristics of liquid metal flowing across tube bundles between gravity and zero-gravity conditions are investigated by employing the Reynolds averaged numerical method. The temperature and the velocity distribution are displayed in the local area, and the convective heat transfer characteristics are obtained. It is shown that the convective heat transfer performance is different under gravity and zero-gravity conditions with liquid metal flowing vertically downward. Under

收稿日期: 2023-04-29 修回日期: 2023-09-24

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1967203); 四川省自然科学基金(2024NSFC1361)

作者简介: 肖辉(1993—), 男, 博士, 助理研究员, 研究领域为自然循环强化及多场协同调控。

引用格式: 肖辉, 郭靓, 兰治科, 等. 失重和重力条件液态金属绕流管束对流传热特性对比[J]. 火箭推进, 2024, 50(4): 103-109.

XIAO H, GUO L, LAN Z K, et al. Comparison of convective heat transfer characteristics of liquid metals flowing across tube bundles between gravity and zero-gravity conditions[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(4): 103-109.

the gravity condition, the buoyancy affects the flow and temperature fields, thereby causing a maximum deviation of 10% for friction factor and heat transfer ability compared with the zero-gravity condition.

Keywords: convective heat transfer; flowing across tube bundles; liquid metal; weightlessness; gravity

0 引言

在空间推进领域,低质量核能系统可提供高可靠性、可持续性和大功率动力源,因此成为太阳系边界探测、载人深空探测等空间更远区域探索任务的较好动力源方案^[1-2]。此外,低质量核能系统还可实现核热推进与核电推进,具有实现高比冲、长寿命、多模式微小推力和宽功率范围等多种推进方案的潜力^[3]。

液态金属具有优良的导热性能^[4],将特殊液态重金属作为冷却工质的先进核能系统具有安全性能高、小型可移动、功率范围宽(千瓦-百兆瓦)的显著特点,加上一次装料可运行 30 年的长效优势,使其成为空间环境动力源的较优选择^[5-6]。液态金属横掠管束对流传热能力强,相关换热器结构紧凑,便于火箭运载,是较好的主换热器形式^[7-8]。空间环境异于地面环境,其显著特点是失重,对比研究失重和重力条件液态金属横掠管束流动传热特性可提升空间反应堆换热器设计能力。

液态金属的普朗特数 Pr 约为水、空气等常见工质的 1%,量级为 0.01,故对对流传热过程导热贡献较大,常规普朗特数流体对流传热公式不适用于液态金属^[9-10]。文献[11-12]研究了钠、铅铋合金在绕丝棒束内的流动传热特性,表明了绕丝引起的二次流对流动传热影响较大。Richard 等^[13]研究了液态汞绕流管束的对流换热性能,得到了努塞尔数 Nu 为贝克莱数 Pe 的函数。Dwyer^[14]根据实验结果拟合得到了液态金属对流换热关系式,公式可适用于 $Pe = 50 \sim 7\,000$ 范围。近年来,赵后剑等^[15-16]数值研究了液态铅铋绕流顺排管束流动传热性能,表明截距对传热性能影响较小。Yang 等^[17-18]数值研究了液态铅铋横掠螺旋管束流动传热性能,得到了最优结构参数 $P_t/D = 0.167$ 和 $P_a/D = 0.137$ 。沈聪等^[19]数值模拟研究了铅铋螺旋管壳侧流动传热性能,表明阻力和换热均随着流速和螺旋升角增大而增强。总体而言,可查阅的液态金属横掠管束对流传热相关研究较缺乏^[20]。此外,重力和失重条件下

的液态金属横掠管束特性对比尚不清楚,现有地面实验也无法获得绝对失重条件下的流动传热特性。近年来,数值模拟技术为理论分析和工程实践提供了较好结果^[21-22],成为了研究流动传热问题的可靠方法。为此,本文将开展数值模拟研究失重和重力条件下液态重金属横掠管束流动传热特性。

1 物理模型

考虑到研究重点为重力和失重条件对流动传热性能的影响,采用了较常见的管间距和壁面结构。物理模型为实际换热器的简化结构,如图 1 所示。模型内部管径为 D ,相邻管轴心截距 P_t ,截距比 P_t/D 为 1.5。模型分为进口区域、测试区域和出口区域 3 个部分,长度分别为 $6D$ 、 $21D$ 和 $9D$,高度 P_t 为 $1.5D$,垂直纸面的横向宽度 w 为 $10D$ 。模型竖直放置,高温液态金属从上往下横掠管束,管内为冷却工质,管壁厚 2 mm,管外径 14 mm,此时重力方向竖直向下。

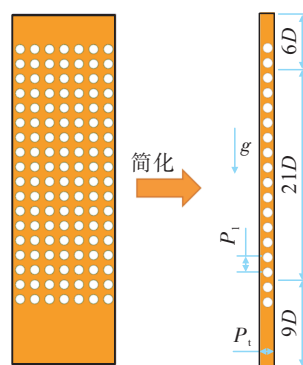


图 1 横掠管束对流换热物理模型

Fig. 1 Physical model of convective heat transfer in flowing across tube bundles

2 研究方法

2.1 数学模型

为开展数值研究,采用如下假设:数学模型为三维模型且处于稳态条件;流体质量连续且不受其

他体积力;忽略黏性耗散产热和辐射传热的影响;采用 k - ε Reliazable 雷诺时均模型处理湍流脉动。相关控制方程如下。

连续性方程为

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

式中: ρ 为密度; \mathbf{v} 为速度; t 为时间。

动量方程为

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

式中: p 为压力; μ 为动力黏度; \mathbf{g} 为重力加速度。

能量方程为

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

式中: k_{eff} 为有效热导系数; c_p 为比热容; T 为温度。

湍动能 k 和湍流耗散率 ε 满足

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (5)$$

其中

$$C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta + 5)]$$

$$\eta = S k / \varepsilon$$

$$S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$$

式中: C_2 和 $C_{1\varepsilon}$ 均为给定的经验常数;湍动能增量 G_k 由速度梯度引起;湍动能增量 G_b 由浮力引起; Y_m 为脉动膨胀引起的湍流耗散率增量; σ_k 为 k 的湍流普朗特数; σ_ε 为 ε 的湍流普朗特数。

液态金属普朗特数较低,对流传热过程热扩散贡献较大,湍流传热过程给定 $Pr_t \approx 1$ 不适用^[23]。对于液态金属,其湍流普朗特数 Pr_t 选择 Cheng 等^[24]提出的模型,即

$$Pr_t = \begin{cases} \frac{0.01Pe}{[0.018Pe^{0.8} - (7-A')]^{1.25}} & 1\,000 < Pe \leq 6\,000 \\ 4.12 & Pe \leq 1\,000 \end{cases} \quad (6)$$

式中: Pe 为佩克莱数; A' 为常数。

2.2 边界条件

液态金属入口为均匀速度和温度入口,壁面为无滑移边界,出口为压力出口。换热管壁面给定第三类边界,管内换热系数为 $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,管内温度为 553.15 K ,管壁厚度为 2 mm ,其余壁面为绝热边界。考虑失重条件时,在动量方程中给定重力加速度为 0 。

2.3 参数定义

主要无量纲参数有雷诺数 Re 、换热系数 h 、努塞尔数 Nu 和单排阻力系数 f ,相关定义如下

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{\rho u_{\text{in}} P_t D}{\mu(P_t - D)} \quad (7)$$

$$h = q/[A(T_w - T_f)] \quad (8)$$

$$f = \frac{\Delta p}{0.5 \rho u^2 N} \quad (9)$$

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (10)$$

式中: q 为平均热流密度; A 为换热面积; N 为管排数; Δp 为流体摩擦压降; T_w 为测试段管壁面积平均温度; T_f 为流体测试段流体体积平均温度; f 为测试段平均单排摩擦阻力系数。

对于液态金属物性,其物性参数为^[9]

$$\begin{cases} \rho = 11\,065 - 1.293T \\ c_p = 164.8 - 3.94 \times 10^{-2}T + 1.25 \times 10^{-5}T^2 - 4.65 \times 10^5 T^{-2} \\ \mu = 4.94 \times 10^{-4} e^{754.1/T} \\ \lambda = 3.284 + 1.617 \times 10^{-2}T - 2.305 \times 10^{-6}T^2 \end{cases} \quad (11)$$

2.4 数值方法

网格系统主体采用多面体网格,壁面附近附加边界层进行网格加密,壁面 $y^+ \approx 1$,如图 2 所示。采用商业软件 Fluent 2021 开展数值模拟研究。湍流模型采用增强壁面处理。采用控制容积法对流体域进行离散,压力采用二阶格式,动量方程采用 Quick 格式,温度与湍流模型采用二阶迎风格式。利用 Couple 算法解决速度和压力耦合问题。对于物性参数和湍流普朗特数,采用 UDF 函数植入 Fluent,操作温度为 773.15 K 。当残差低于 10^{-6} 或各变量迭代 $1\,000$ 步变化小于 1% 时,可认为计算收敛。

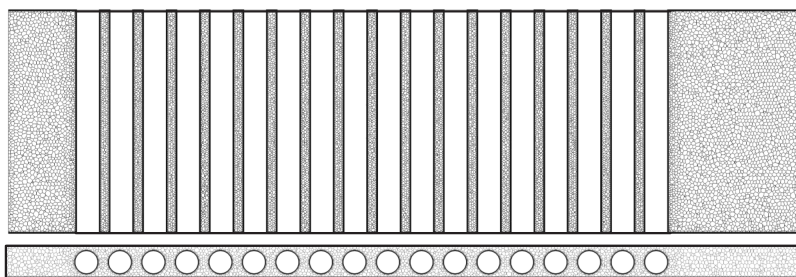


图 2 网格系统划分

Fig. 2 Meshing system

3 模型验证

3.1 网格敏感性验证

为选择合适的网格,对比分析了利用 4 套不同网格尺寸的网格系统计算得到的换热和阻力性能,如图 3 所示。采用单位体积网格数量描述不同网格系统的网格数量,4 套网格的控制单元数量分别为:模型 1 为 8.79×10^8 个/ m^3 ,模型 2 为 3.48×10^8 个/ m^3 ,模型 3 为 2.02×10^8 个/ m^3 ,模型 4 为 8.20×10^7 个/ m^3 。当网格系统从模型 2 变为模型 1 时,网格数量增加一倍,但流动换热性能基本不变,变化量小于 3%。可以认为,模型 2 对应的网格系统已足够细密,对于阻力系数和换热系数,网格系统已经独立。

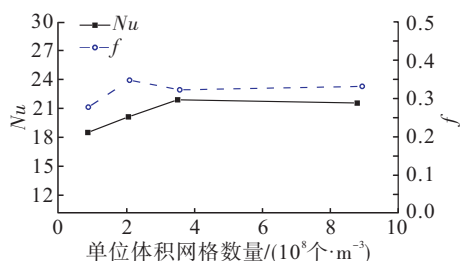


图 3 换热和阻力随网格数量增加的变化规律

Fig. 3 Variations of heat transfer and flow resistance with the increase of grid number

3.2 经验公式对比

在换热方面,缺乏壳侧液态金属外掠顺排管束的实验数据,因此,本文选择液态金属钠的换热经验公式,通过对比相应横掠错排管束的 Kalish-Dwyer 公式^[14]和数值模拟结果开展结果验证。在阻力方面,采用传热学推荐的错排管束经验公式^[25]。相关公式表示为

$$Nu = 5.36 + 0.197 4Pe^{0.682} \quad (12)$$

$$f = 4 \left\{ 0.25 + \frac{0.118}{[(P_1 - D)/D]^{1.08}} \right\} Re^{-0.16} \quad (13)$$

对比结果如图 4 所示,经验公式结果和模拟结果之间偏差较小,两者吻合较好。换热性能最大偏差为 16%,阻力系数最大偏差为 19%。这表明当前湍流模型、湍流普朗特数模型以及数值模拟方法可靠且足够准确。

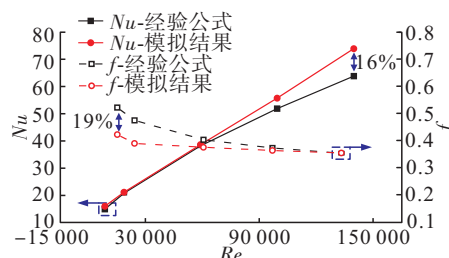


图 4 换热和阻力经验公式与模拟结果对比

Fig. 4 Comparisons of heat transfer and friction factor between correlations and simulations

4 结果与讨论

4.1 流动传热特性

选取了 $Re = 20\,000$ 的数值模拟结果,关注入口后管束区域的第 3 排和第 4 排传热管附近区域,对比了重力和失重条件相同截面位置温度场和速度场的分布,结果如图 5 所示。温度分布结果表明,受到传热管内冷却流体的冷却作用,传热管附近温度明显降低,管壁附近流体最高温度和最低温度差可达 80 K,最低温度出现在传热管背风面。重力和失重条件下温度分布差别较小,这是因为液态金属导热性能较强,导热在对流换热过程中贡献较多,而且绕流传热管混流强烈,尽管浮力会引起一些流场改变,但对流换热性能不会有较大改变。

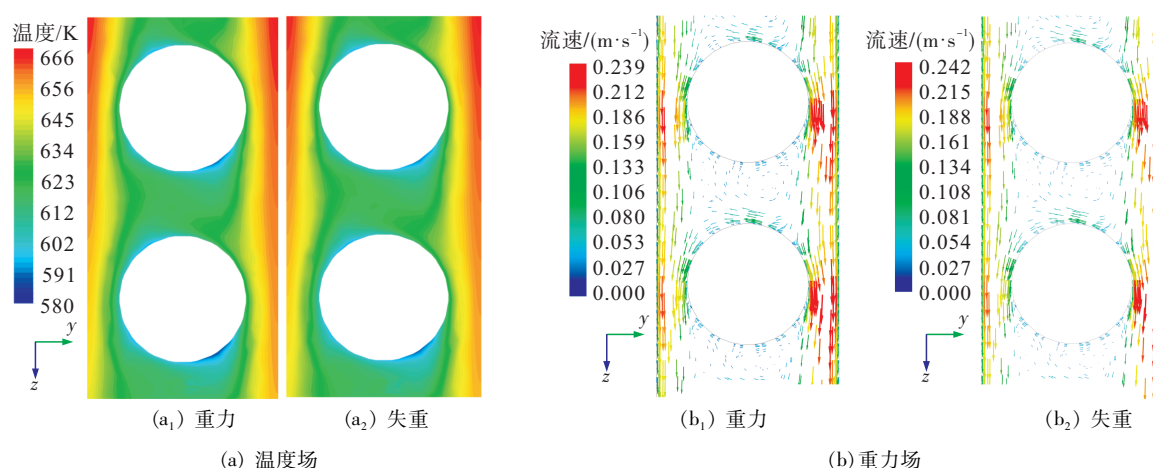


图 5 重力和失重条件下温度场和速度场对比

Fig. 5 Comparisons of temperature field and velocity field between gravity and zero-gravity conditions

速度分布结果表明,流体绕流传热管时,传热管背风面会产生回流涡,回流涡搅浑了流体,可强化对流换热。传热管侧面流道变窄,该区域流速较大。对比失重和重力条件速度分布可知,重力条件下最大流速较小,这是由于传热温差引起的浮力对原本流场产生了影响,促使最大流速变化,进而导致阻力特性变化。

4.2 流动传热规律

随着 Re 的增大,换热性能和阻力系数的变化规律如图 6 所示。随着雷诺数的增加, Nu 逐渐增加,失重和重力条件下的变化规律一致。在失重条件时, Nu 稍大且 Re 较小时,偏差量越大,当前研究范围内失重条件比重力条件换热性能偏差量最大约 10%。重力条件下换热性能偏小的原因是浮力作用对主流流动产生了抵抗,降低了其对流换热能力,但液态金属导热系数较大,对流换热能力降低不明显。

失重和重力条件下阻力系数变化规律基本一致。在失重条件下,随着 Re 增加,阻力系数逐渐减小;在重力条件下,随着 Re 增加,阻力系数也逐渐减小,但减小幅度的略大。当 $Re > 10\,000$ 时,重力条件下阻力系数总是小于失重条件下的阻力系数,且随着 Re 增大,两者差距变小。这表明,对于液态金属竖直向下流动降温过程,密度增大引起流速降低,将降低绕流管束的流动阻力。然而, Re 较低时(约小于 10 000),浮力引起的二次流对主流流动的影响较大,会增大流动耗散,从而增大摩擦阻力。在本研究范围内,重力条件下和失重条件下的阻力系数

最大偏差约为 10%。

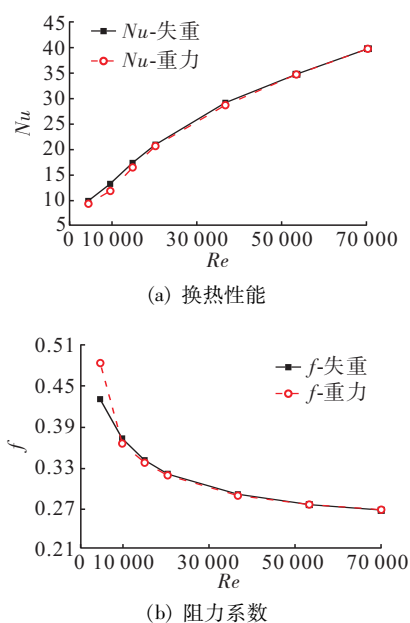
图 6 换热性能和阻力系数随 Re 增加的变化规律

Fig. 6 Variations of heat transfer and friction factor with the increase of Reynolds number

针对当前研究范围,给定第三类热边界条件,拟合了流动换热过程的阻力和换热关系式,其中失重条件下关系式为

$$Nu = -0.2923 + 0.8084Pe^{0.5507} \quad (14)$$

$$f = 0.1663 + 5.724Re^{-0.3619} \quad (15)$$

Nu 和模拟结果的最大偏差为 5.6%, f 和模拟结果的最大偏差为 0.8%。

重力条件下,对于给定的第三类热边界条件,流动换热关系式为

$$Nu = -0.6535 + 0.6958Pe^{0.5733} \quad (16)$$

$$f = 0.2494 + 397.5Re^{-0.8767} \quad (17)$$

Nu 和数值模拟结果的最大偏差为 10.9%, f 和模拟结果的最大偏差为 1.9%。

5 结 论

本文针对重力和失重条件下液态金属绕流传热问题开展了数值模拟研究,获得了流动传热过程的温度和速度分布,得到了流动传热特性随雷诺数的变化规律,拟合得到了流动传热关系式,在本研究范围内,得到如下结论。

1) 基于雷诺时均的 $k-\varepsilon$ Realizable 湍流模型结合 Cheng 等^[24] 提出的湍流普朗特数模型可用于获得可靠的液态金属绕流传热数值模拟结果, Nu 与实验经验关系式偏差分别小于 16% 和 19%。

2) 绕流传热管附近温度分布不均,当前热边界下最大温差可达到 80 K,绕流传热管背风面会产生回流涡,从而强化对流传热。

3) 流动换热过程温度差会引起密度差,产生的主流流速改变和二次流引起流动传热性能发生变化,浮力对阻力和换热性能影响均小于 10%。

4) 拟合得到了重力和失重条件下流动换热阻力关系式,与数值模拟的偏差不超过 10.9%。

参 考 文 献

- [1] 廖宏图. 核推进的空间应用浅析[J]. 火箭推进, 2016, 42(3): 6-14.
LIAO H T. Preliminary application analysis of nuclear propulsions in space [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(3): 6-14.
- [2] 张泽, 薛翔, 王园丁, 等. 空间核动力推进技术研究展望[J]. 火箭推进, 2021, 47(5): 1-13.
ZHANG Z, XUE X, WANG Y D, et al. Prospect of space nuclear power propulsion technology [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(5): 1-13.
- [3] 田立成, 王小永, 张天平. 空间电推进应用及发展趋势[J]. 火箭推进, 2015, 41(3): 7-14.
TIAN L C, WANG X Y, ZHANG T P. Application and development trend of space electric propulsion technology[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(3): 7-14.
- [4] BENOIT H, SPREAFICO L, GAUTHIER D, et al. Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: properties and heat transfer coefficients [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 298-315.
- [5] PACIO J, VAN TICHELEN K, ECKERT S, et al. Advanced thermal-hydraulic experiments and instrumentation for heavy liquid metal reactors [J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 399: 112010.
- [6] 吴宜灿. 铅基反应堆研究进展与应用前景[J]. 现代物理知识, 2018, 30(4): 35-39.
WU Y C. Research progress and applications prospect of lead-based reactor [J]. Modern Physics, 2018, 30(4): 35-39.
- [7] SHEN C, LIU L M, XU Z Y, et al. Influence of helix angle on flow and heat transfer characteristics of lead-bismuth flow in helical-coiled tube bundles [J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 180: 109483.
- [8] MANGRULKAR C K, DHOBLE A S, DESHMUKH A R, et al. Numerical investigation of heat transfer and friction factor characteristics from in-line cam shaped tube bank in crossflow [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 521-538.
- [9] NUCLEAR-ENERGY-AGENCY. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermalhydraulics and technologies [M]. Paris: OECD Publishing, 2015.
- [10] 吕科锋. 液态铅铋合金在带统丝棒束组件内热工水力行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
LYU K F. Study on the thermal-hydraulic behaviors of a wire-wrapped rod bundle cooled with lead bismuth eutectic [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [11] ZHANG D, ZHANG H C, LI Z E, et al. Investigation on entropy generation and flow characteristics of 7-pin sodium cooled wrapped-wire fuel bundle [Z]. 2022.
- [12] 张冬, 张昊春, 王琦, 等. 基于熵产分析的铅-铋冷却带绕丝燃料棒束热工水力特性研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(S2): 125-130.
- [13] RICKARD C L, DWYER O E, DROPKIN D. Heat-transfer rates to cross-flowing mercury in a staggered tube bank (II) [J]. Journal of Fluids Engineering, 1958, 80(3): 646-652.
- [14] DWYER O. Recent developments in liquid-metal heat

- transfer [Z]. 1966.
- [15] 赵后剑, 谢箫阳, 高伟凯, 等. 液态铅铋合金横掠管束对流换热数值计算[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(7): 1837-1843.
- ZHAO H J, XIE X Y, GAO W K, et al. Numerical simulation of liquid lead-bismuth eutectic cross flow heat transfer over tube bundles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(7): 1837-1843.
- [16] XIE X Y, ZHAO H J, LI X W, et al. Numerical investigation on heat transfer characteristics of liquid metal cross flow over tube bundles [J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 180: 109465.
- [17] YANG Y P, LI Y, WANG C L, et al. Parametric sensitivity analysis of liquid metal helical coil once-through tube steam generator [J]. Nuclear Engineering and Design, 2021, 383: 111427.
- [18] 杨宇鹏, 王成龙, 张大林, 等. 液态金属螺旋管式直流蒸汽发生器数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(7): 1288-1295.
- YANG Y P, WANG C L, ZHANG D L, et al. Numerical study of liquid metal helical coil once-through tube steam generator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(7): 1288-1295.
- [19] 沈聪, 刘茂龙, 刘利民, 等. 铅铋螺旋管壳侧流动传热数值模拟研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(S2): 13-18.
- [20] ROELOFS F. Thermal hydraulics aspects of liquid metal cooled nuclear reactors [M]. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2019.
- [21] 刘伟, 肖辉. 基于增强协同与减少耗散的对流传热强化理论研究[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(10): 1166-1177.
- LIU W, XIAO H. Theoretical study on enhancing convective heat transfer based on strengthening synergy and reducing dissipation [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(10): 1166-1177.
- [22] XIAO H, DONG Z M, LIU Z C, et al. Heat transfer performance and flow characteristics of solar air heaters with inclined trapezoidal vortex generators [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115484.
- [23] SHAMS A, DE SANTIS A, KOLOSZAR L, et al. Status and perspectives of turbulent heat transfer modelling in low-Prandtl number fluids [J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 353(C): 110220.
- [24] CHENG X, TAK N I. Investigation on turbulent heat transfer to lead-bismuth eutectic flows in circular tubes for nuclear applications [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(4): 385-393.
- [25] HOLMAN J. Heat transfer [M]. 10th ed. [S. l.]: [s. n.], 2010.