

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.04.009

摇摆条件下棒束通道内超临界水流动传热特性

李鑫, 谢公南

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 针对核动力舰艇航行时可能发生的摇摆运动情况, 本文采用数值模拟方法探究海洋摇摆运动条件下超临界水冷堆(Supercritical-water-cooled reactor, SCWR)堆芯冷却通道内超临界水湍流流动与传热特性, 揭示海洋摇摆运动对通道内瞬时及时均换热性能的影响。研究表明: 在摇摆条件下通道内超临界水横流强度大幅增强, 流体质量流量、压降损失、瞬时换热系数、燃料棒外壁面最高温度等均出现周期性波动现象, 在流体温度接近拟临界温度时摇摆运动对通道内对流传热过程的影响最显著。并且, 上述参数波动幅度与摇摆幅度和摇摆周期之比正相关。随通道摇摆幅度增大或摇摆周期减小, 瞬时换热系数与瞬时压降波动幅度增大。总体而言, 与竖直静止情形相比, 在摇摆条件下通道内时均压降损失与时均换热系数均有一定程度增大, 但增长幅度有限。

关键词: 核动力舰船; 超临界水冷堆; 堆芯冷却; 摇摆运动; 湍流流动传热

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)04-0623-12

Flow and Heat Transfer Characteristics of Supercritical Water Flowing in Rod Bundle Channel Under Rolling Conditions

LI Xin, XIE Gongnan

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering the rolling motion of nuclear-powered ships, the turbulence flow and heat transfer characteristics of supercritical water in the cooling channel in the core of supercritical-water-cooled reactor (SCWR) under rolling conditions are numerically investigated, in order to reveal the impact of rolling motion on transient and time-averaged heat transfer performance. The results show that the crossflow intensity of the supercritical water is strengthened under rolling conditions. The mass flow rate of the fluid, the pressure drop, the transient heat transfer coefficient and the maximum wall temperature on the outer surface of fuel rod are observed to fluctuate periodically. The impact of rolling motion on convective heat transfer characteristics will be more significant as the fluid temperature gets closer to pseudocritical temperature, and there is positive correlation between the fluctuation amplitude of transient parameters and the ratio of rolling amplitude to rolling period. As the rolling amplitude increases or rolling period decreases, the fluctuation amplitude of transient heat transfer coefficient and transient pressure drop rises. In general, both the time-averaged heat transfer coefficient and pressure drop increase under rolling condition, when compared with the vertical static situation, but the increment is limited.

Key words: nuclear-powered ships; supercritical-water-cooled reactor (SCWR); core cooling; rolling motion; turbulence flow and heat transfer

核动力装置作为核动力舰艇的核心, 是使舰艇安全、高速、持久、稳定续航的动力源泉^[1-2]。现阶段

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(B18041); 深圳市科创委基础研究项目(NJCYJ20170306155153048)。

收稿日期: 2022-01-14; **修订日期:** 2022-03-21

通信作者: 谢公南, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: xgn@nwpu.edu.cn。

引用格式: 李鑫, 谢公南. 摇摆条件下棒束通道内超临界水流动传热特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(4): 623-634. LI Xin, XIE Gongnan. Flow and heat transfer characteristics of supercritical water flowing in rod bundle channel under rolling conditions[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(4): 623-634.

段,舰船核动力装置多以压水堆为主。作为基于现有压水堆技术自然演进而来的第四代超临界水冷堆(Supercritical-water-cooled reactor, SCWR),因其高效、安全、结构紧凑等优点^[3],在舰艇上具有极大应用潜力^[4-5]。而堆芯冷却技术作为反应堆安全可靠运行的重要保障,具有重要学术研究价值。

目前,国内外学者已针对堆芯冷却通道内超临界水的流动传热特性开展了大量基础性研究。Gu等^[6]及Wang等^[7]对质量流量、热流密度、压强等工况参数的影响进行实验研究表明:随着壁面热流密度减小或流体质量流量增大换热表面换热性能提升,而工作压强对换热性能的影响则相对较小;并且,由于超临界水在拟临界温度附近热物性剧烈变化,导致其流动换热过程中存在复杂的传热强化、传热恶化现象^[8]。胡振泉等^[9]观察到在燃料棒周向存在明显壁温分布不均匀现象;Gou等^[10]采用数值模拟方法对通道内湍流流动换热过程进行分析表明:燃料棒外壁面周向温差主要是由棒束通道特殊几何结构引起流体质量流量分布不均匀所致。Cheng等^[11]研究发现燃料组件内燃料棒排布方式对上述壁温分布不均匀性有较大影响,在方形排布通道内壁温不均匀性明显高于三角形排布通道,且当流体温度接近拟临界温度时壁面周向温差较小。Shang等^[12]对方形、六边形与圆心排布通道内燃料棒外壁面温度分布进行比较发现:高温区域主要出现在燃料棒与通道壁面的窄缝区域,且采用六边形排布方式能够有效降低周向壁温差异。Yang等^[13]分析指出:增大相邻燃料棒间栅径比能够有效改善通道内冷却剂质量流量分布均匀性,从而显著降低燃料棒外壁面周向温度梯度,但受反应堆系统实际尺寸限制,栅径比不能无限增大。Liu等^[14]及Wang等^[15]研究表明:当燃料棒外径为8 mm、栅径比为1.20左右时能够获得最佳的换热效果。此外,为有效改善通道内燃料棒冷却效果,还有研究人员对定位格架^[16]及螺旋绕丝^[17]两种典型支撑结构的强化传热性能进行了讨论分析。

然而,上述研究均仅针对陆基条件。在舰艇航行过程中受海洋风浪影响,船身会发生倾斜、摇摆等非常规运动情形,导致冷却通道内流动换热过程发生显著变化^[18]。田春平^[19]通过实验研究发现:摇摆运动引起的附加惯性力会使冷却通道内流体质量流量发生周期性波动,导致换热系数发生变化。Zhang等^[20]在实验过程中观察到通道内摩擦阻力系数变化受摇摆运动幅度、运动周期、流体物性参数、流速等多个因素影响。Tan等^[21-22]对实验数据进行分析表明:摇摆运动条件下由于发生流动震荡现象,导致通道内摩擦阻力系数增大,换热系

数也得到强化;且随摇摆运动幅度增大或摇摆运动周期减小,换热系数提升幅度也相应增大。Wang等^[23]通过数值模拟也得到了相似的结论,并指出摇摆运动主要通过强化流体间的相互掺混及流体与换热壁面间的相互作用实现强化传热效果。

但是,上述研究仍仅限于亚临界条件下单相水或气液两相流体的流动换热问题,关于摇摆条件下超临界流体对流换热特性的研究主要针对圆管、套管等简单通道,鲜有关于海洋摇摆条件下堆芯棒束通道内超临界水流动换热过程的报导^[4]。Zhao等^[24]对圆管内超临界CO₂的对流换热过程进行数值模拟研究表明:摇摆运动对超临界CO₂流动换热性能的影响比对传统单相流的影响更显著。Ma等^[25]研究发现,随工作压力由亚临界增大至超临界状态,摇摆运动对PCHE换热器内天然气对流换热性能的影响减弱。

Wang等^[18]分析指出由于棒束通道独特的几何结构造成在简单通道中适用的研究结论不能很好拓展至棒束通道。基于此,本文采用数值模拟方法对海洋摇摆条件下2×2棒束通道内超临界水瞬态流动换热过程进行研究,旨在探究发生摇摆运动时通道内超临界水湍流流动与传热的变化,并对不同摇摆运动周期与运动幅度对综合换热性能的影响进行评价,分析摇摆条件对通道内超临界水对流换热的影响规律,从而为船用超临界水冷堆的工程设计提供有利参考。同时,由于超临界流体在拟临界温度区域内具有相似的物性变化规律,其流动换热性能具有一定相似性^[26-28],故该研究也能够对摇摆条件下以其他超临界流体为工质的换热设备设计产生一定借鉴意义。

1 物理模型与网格划分

1.1 物理模型

依据Cheng等^[29]提出的超临界压水堆概念设计方案及Wang等^[7]实验过程中所采用的通道结构,建立简化的2×2棒束通道物理模型如图1(a)所示。通道由4根金属圆管(燃料棒#01~#04)按方形排列构成。并且,由于计算资源限制,本文研究的通道总长为800 mm,横截面尺寸为20.32 mm×20.32 mm。圆管外径 $D_{out}=8$ mm,内径 $D_{in}=6$ mm,燃料棒间栅径比为 $P/D_{out}=1.18$,且燃料棒与壁面间隙大小为1.44 mm。燃料棒含600 mm测试段及两端各100 mm延伸段。

同时,考虑舰艇实际航行时运动状态及其复杂,将运动过程简化为以空间某点为中心的摇摆运动,如图1(b)所示。假设通道仅在 yoz 平面内绕平

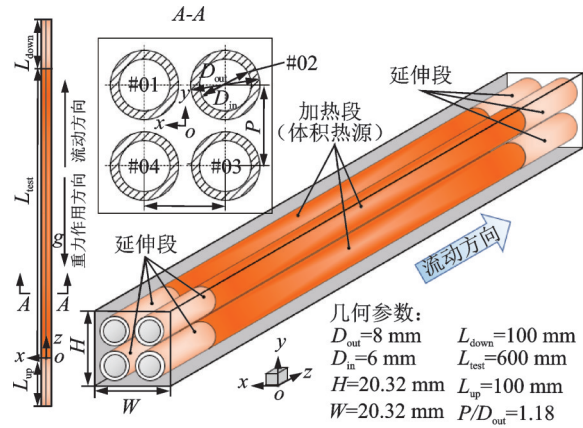
行于 x 轴的方向做正弦运动,且将旋转中心设置在 y 轴负向且距通道 0.6 m 处,其运动规律定义为

$$\theta(t) = \theta_{\max} \cdot \sin \frac{2\pi}{t_c} t \quad (1)$$

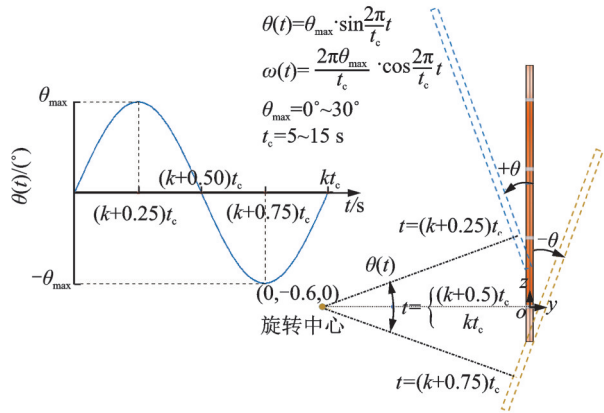
$$\omega(t) = \frac{2\pi\theta_{\max}}{t_c} \cdot \cos \frac{2\pi}{t_c} t \quad (2)$$

式中: $\theta(t)$ 表示 t 时刻通道的角位移; θ_{\max} 为最大摇

摆角度; t_c 为摇摆运动周期; $\omega(t)$ 为运动角速度,并将通道位于竖直位置时定义为 $t=0\text{ s}$ 时刻。为使工况尽可能贴近舰艇在海洋航行时实际摇摆运动情形,参考《舰船环境条件要求机械环境》标准^[30]相关规定,摇摆运动幅度及周期等运动参数取值范围为: $\theta_{\max}=0^\circ\sim 30^\circ$, $t_c=5\sim 15\text{ s}$ 。



(a) Channel geometry



(b) Ocean rolling condition

图 1 计算模型与海洋摇摆运动

Fig.1 Computational model and rolling condition

1.2 边界条件

参考 Cheng 等^[29]提出的设计方案,将图 1(a)中燃料棒测试段视为体热源施加热边界条件,且由设计平均线热流密度 19 kW/m 计算得到体热源热流密度 $q = 863.98\text{ MW/m}^3$ 。冷却通道内工作压力为 25 MPa ,通道入口处超临界水平均质量流速 $G = 1\ 000\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。同时,为探究不同流体焓值范围内超临界水的流动传热特征,通道入口处超临界水温度取 $T_{\text{inlet}} = 603.15, 653.15$ 和 703.15 K ,分别表示流体焓值低于拟临界值、临近拟临界值 ($T_{\text{pc}} = 658.05\text{ K}$)以及高于拟临界值 3 种不同特征区域内的状态进行研究。此外,研究过程中对竖直静止及倾斜条件下棒束通道内流动换热过程进行仿真计算。详细工况参数设置见表 1。

表 1 工况参数设置

Table 1 Setting of operating conditions

边界/运动条件	工况参数
压强 p / MPa	25
体积热源热流密度 $q / (\text{MW}\cdot\text{m}^{-3})$	863.98
超临界水平均质量流速 $G / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	1 000
入口温度 $T_{\text{inlet}} / \text{K}$	603.15, 653.15, 703.15
摇摆幅度 $\theta_{\max} / (^\circ)$	10, 20, 30
摇摆周期 t_c / s	5, 10, 15
倾斜角度 $\theta_0 / (^\circ)$	30

2 数值计算方法

2.1 控制方程

超临界水瞬态流动传热过程遵循质量守恒方

程、动量守恒方程和能量守恒方程,如式(3~5)所示^[31-32]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\mu} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho g_i + \rho f_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho e u_i)}{\partial x_i} = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\mu} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

考虑流体在棒束通道内流动时存在明显的湍流各向异性^[11,33],在本文研究过程中选取 $v2f$ 湍流模型^[34]对湍流特征进行计算,其湍流方程如式(6~9)所示,式中各参数详细定义可参考湍流模型手册及文献[34]。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{C_{\epsilon 1} P - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon}{T} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + S_\epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}^2) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{v}^2 u_i) = \rho k f - 6\rho \bar{v}^2 \frac{\epsilon}{k} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial x_j} \right] + S_{\bar{v}^2} \quad (8)$$

$$f - L^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} = (C_1 - 1) \frac{2/3 - \bar{v}^2/k}{T} +$$

$$C_2 \frac{P}{\rho k} + \frac{5\bar{v}^2/k}{T} + S_f \quad (9)$$

2.2 物性参数

在温度及压力发生变化时超临界流体密度、比热、导热系数和动力黏度等物性参数均会发生剧烈变化。因此,在计算时通过直接调用 NIST Standard Reference Database 物性数据库^[35-36]获取超临界水物性数据,并考虑温度 T 及压强 p 对热物性的影响,生成流体热物性随温度及压强变化数据表,导入计算软件中进行求解。燃料棒由 Inconel 718 合金钢制成,其导热系数 λ_s 为^[35]

$$\lambda_s = 6.667 + 0.016T \quad (10)$$

2.3 湍流模型验证

为验证本文所采用的数值计算方法可靠性,选取 Wang 等^[7]测量稳态下,棒束通道内燃料棒壁温分布的实验数据与本文数值计算所得结果进行对比,如图 2 所示。图中: $T_{w,in}$ 为内壁面温度, $T_{w,ave}$ 为平均壁温, q_{in} 及 q_{out} 分别为内、外壁面热流密度。结果表明:当流体温度 T_f 远离拟临界温度时数值计算结果与实验数据吻合度较高,而当流体温度接近拟临界温度时数值计算所得壁温比实验数据高 10 K 左右。但总体来说,采用 $v2f$ 模型能够很好地捕获超临界压力下棒束通道内燃料棒壁面周向温度分布特征及壁温随流体焓值变化规律。考虑拟临界点附近流体剧烈物性变化以及实际实验条件与数值仿真参数设置之间的差异,上述误差可视为在可接受范围内。因此,可采用本章中提出的数值模拟方法对通道内超临界水的流动传热特性进行研究。

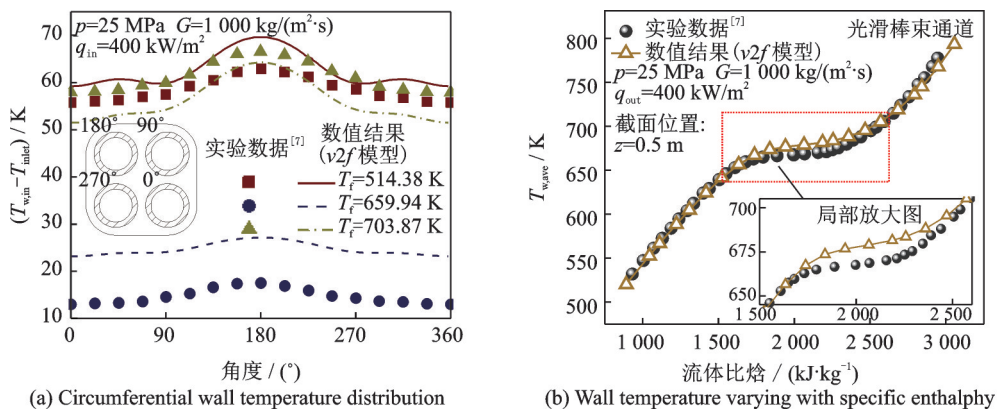


图2 棒束通道内燃料棒壁温分布实验数据与数值计算结果对比

Fig.2 Comparison between wall temperature distributions of fuel rod in rod bundle channel obtained from experiments and simulations

2.4 摇摆运动模型验证

由于缺乏海洋摇摆运动条件下棒束通道内超临界水流动换热过程的实验研究数据,选取

Tan 等^[21]在圆管内单相水对流换热实验数据对摇摆运动模型进行验证,如图 3 所示。图中 q_w 为体平均热流密度, T_w 为壁面温度。从图中可看

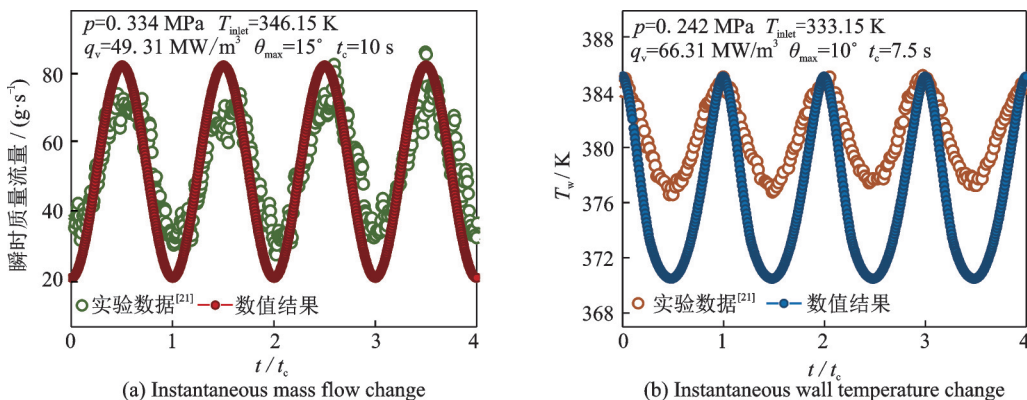


图3 摇摆运动模型验证

Fig.3 Validation of rolling motion model

出,采用本文的摇摆运动模型能够准确预测摇摆条件下通道内流体质量流量、壁温等的波动现象。但因文献[21]中并未给出详细摇摆运动旋转中心坐标及壁温监测点等关键信息,导致计算所得壁温数据与实验测量结果存在一定差异,其瞬时最大误差在 14% 左右,仍在可接受范围内。故后文仍采用本文建立的摇摆运动模型进行研究。

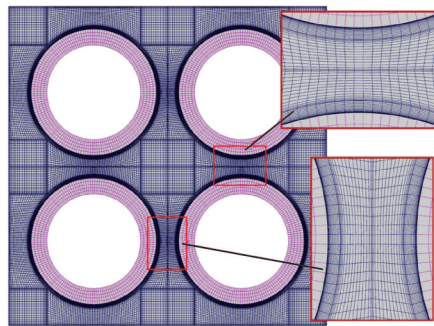
2.5 网格无关性及时间步长独立性

根据棒束通道结构特点,采用 ICEM 软件对计算域进行结构化网格划分如图 4(a)所示。为精准捕获边界层内的流动与传热现象,对大曲率、小间隙区域及换热壁面处网格进行加密,使得换热表面

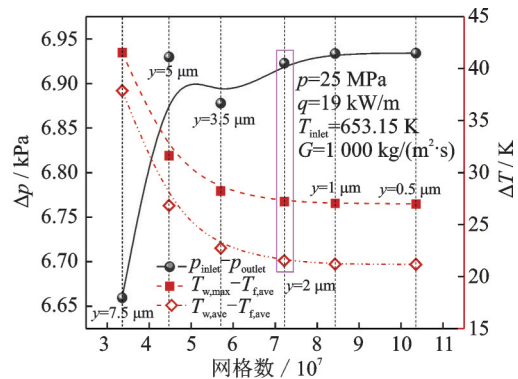
$y^+ \approx 1$ 。同时,为验证计算结果的网格无关性,采用相同网格划分策略生成多套不同疏密程度的网格,并对不同网格系统下的计算结果进行比较,如图 4(b)所示。图中 $T_{w,max}$ 为最高壁温, $T_{i,ave}$ 为流体平均温度, ΔT 为壁温与室温的差值, Δp 表示通道入口与出口面平均压强之差

$$\Delta p = p_{inlet} - p_{outlet} \quad (11)$$

结果显示:随网格量增大,通道内压降以及燃料棒换热表面温差均逐渐趋近于某一特定值。当第一层网格高度减小至 $2 \mu m$,继续加密网格计算所得数据间最大差异小于 3%。综合考虑计算精度及经济性,本文选取网格量为 7×10^6 个左右的网格系统开展数值模拟研究。



(a) Grid partition at entrance



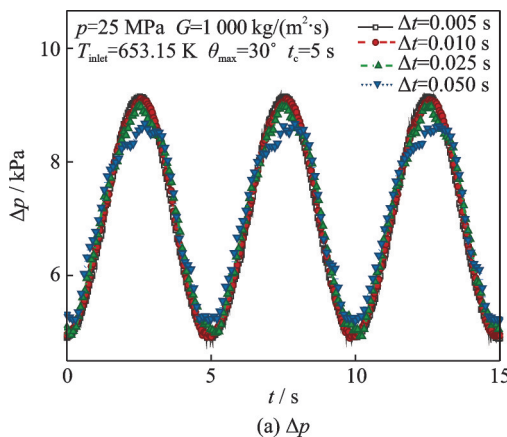
(b) Grid independence test

图 4 结构化网格划分及网格无关性

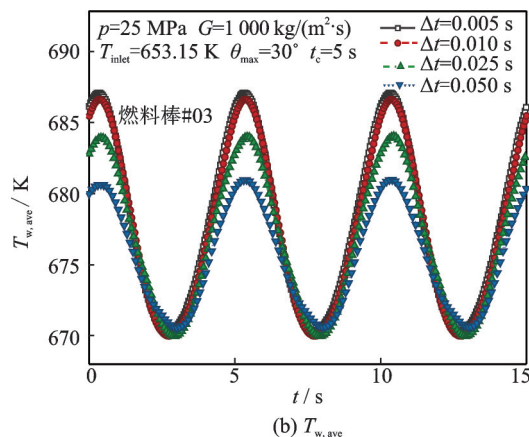
Fig. 4 Structured grids partition and mesh independence

此外,对瞬态流动换热过程进行仿真计算时,时间步长的设置对计算结果准确性具有极大影响。因此,选取流体热物性变化最大且摇摆运动最剧烈的工况对时间步长无关性进行验证,如图 5 所示。计算过程中时间步长 Δt 分别设置为 0.050、0.025、0.010 和 0.005 s。计算结果显示:随时间步长减小,通道内压降损失 Δp 及燃料棒外

壁面平均温度 $T_{w,ave}$ 随时间变化波动幅度增大。但当 Δt 由 0.010 s 减小至 0.005 s 时,上述参数的变化曲线基本重合。这表明:当时间步长达到 0.010 s 继续减小该值所造成的通道内压降及换热性能变化基本可忽略,但计算时长显著增大。故在后续研究过程中,将时间步长 Δt 设为 0.010 s。



(a) Δp



(b) $T_{w,ave}$

图 5 时间步长无关性

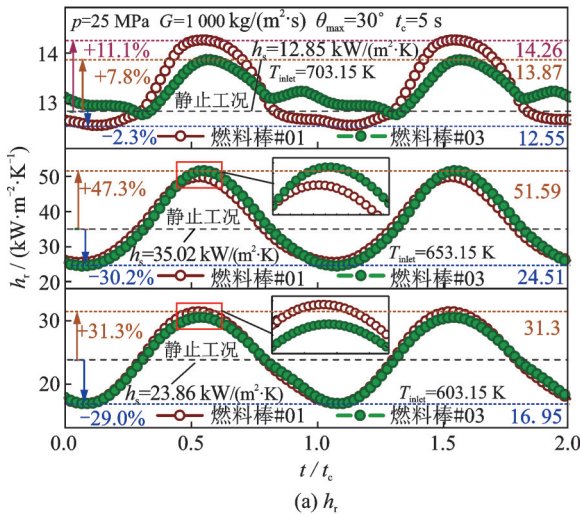
Fig.5 Time step independence

3 结果与分析

3.1 燃料棒外壁面换热性能变化

为更好分析通道内换热性能变化,定义面平均换热系数 h 为

$$h = \frac{q_{\text{out}}}{T_{\text{w,ave}} - T_{\text{f}}} \quad (12)$$



式中: q_{out} 为燃料棒外壁面平均热流密度; $T_{\text{w,ave}}$ 为壁面平均温度; T_{f} 为流体平均温度,取通道入口与出口流体温度的算术平均值。

摇摆运动情形下燃料棒外壁面瞬时面平均换热系数 (h_r) 及最高壁面温度 ($T_{\text{max,r}}$) 随时间变化规律如图 6 所示。图中,下角标“r”表示海洋摇摆条件,下角标“s”表示竖直静止情形。

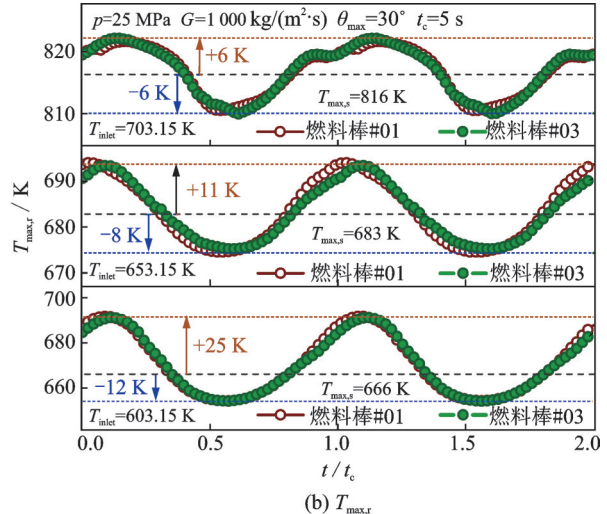


图 6 摇摆条件下燃料棒外壁面瞬时面平均换热系数及壁面最高温度变化

Fig.6 Transient variations of average heat transfer coefficient and maximum wall temperature on the outer surface of fuel rods under rolling condition

图示结果显示:在摇摆运动条件下燃料棒外壁面平均换热系数与最高壁温均呈现周期性波动现象,且其波动周期与摇摆运动周期保持一致。当流体温度接近拟临界温度时换热系数波动幅度最大,瞬时 h_r 峰值可达 $51.59 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,比竖直静止情形下稳态值 (h_s) 高 47.3% ,瞬时 h_r 谷值比 h_s 低 30.2% ,相应燃料棒外壁面最高温度变化 $-8 \sim +11 \text{ K}$ 。而高流体入口温度条件下瞬时换热性能变化幅度最小,其瞬时峰值比稳态值高 11.1% ,瞬时谷值比稳态值低 2.3% ,相应燃料棒外壁面最高温度变化 $-6 \sim +6 \text{ K}$ 。这主要是由于超临界流体在拟临界点附近流体密度、比热等热物性发生剧烈变化,导致流体温度接近拟临界温度时摇摆条件对燃料棒外壁面换热性能的影响较大;而当流体温度较高且远离拟临界温度时,流体热物性随温度变化幅度小,换热性能受摇摆运动影响也相对较小。

此外,对比分析燃料棒#01与燃料棒#03外壁面上上述参数变化曲线发现:在光滑棒束通道内不同位置处燃料棒外壁面瞬时 h_r 与 $T_{\text{max,r}}$ 变化曲线均存在一定差异,但其差异相对较小(小于 4%),且曲线变化趋势基本一致。这一现象表明:在摇摆运动情形下棒束通道内不同位置处燃料棒冷却效果虽略有不同,但其瞬时换热性能变化规律相同。故在后文分析通道内燃料棒外壁面局部换热性能时,可仅针对单一燃料棒进行讨论,以简化分析过程。

对 $p=25 \text{ MPa}$ 、 $G=1\ 000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{inlet}} =$

653.15 K 工况下,燃料棒#01外壁面温度分布随时间的变化进行分析如图 7 所示。依据图 6 中面平均换热系数及最高壁温变化特点,选取 $t/t_c = 0.0$ 、 0.25 、 0.50 及 0.75 等具有代表性的特征时刻进行分析。从图中可看出:在静止情形下,由于不同子通道处横截面面积大小不一致,流过子通道的冷却剂质量流量存在一定差异,导致在燃料棒周向上存在较大温度梯度。间隙子通道处超临界水流量小,热负荷大,造成该区域内燃料棒外表面壁温高。而在摇摆运动情形下燃料棒外壁面温度不再呈现对称分布特征,其局部高温区域出现的位置随摇摆运动而发生周期性变化。与静止情形相比,在 $t/t_c = 0$ 或 0.25 时刻燃料棒外壁面温度显著升高;而在 $t/t_c = 0.75$ 或 1.00 时刻,燃料棒外壁面温度明显降低。这一现象表明:摇摆运动主要造成燃料棒外壁面温度整体升高或降低,从而使换热性能发生大幅度周期性变化。在本文研究的工况参数范围内,摇摆运动不会导致燃料棒外壁面出现局部传热恶化现象。

为深入探究摇摆运动对通道内时均换热性能的影响,对静止与摇摆条件下燃料棒外壁面时均换热系数 (\bar{h}) 进行比较,如图 8 所示。与竖直静止情形相比,摇摆运动使燃料棒外壁面时均换热系数有一定提升,且在不同流体温度范围内摇摆运动引起的时均换热系数变化幅度存在差异。当流体入口温度接近拟临界温度时,摇摆运动对时均换热性能的影响最大,时均换热系数增大 $1.39 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,

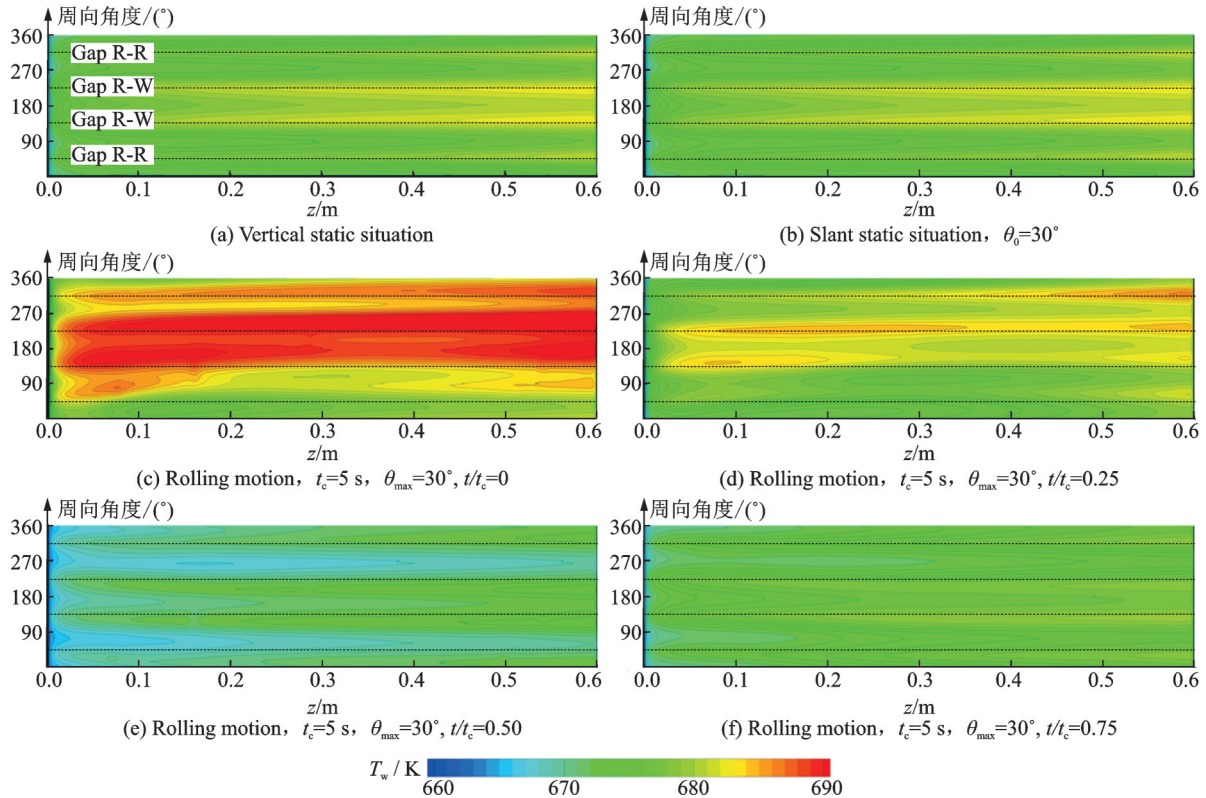


图 7 摇摆条件下不同时刻燃料棒#01外壁面温度分布

Fig.7 Wall temperature distributions of outer surface of fuel rod #01 at different moments under rolling condition

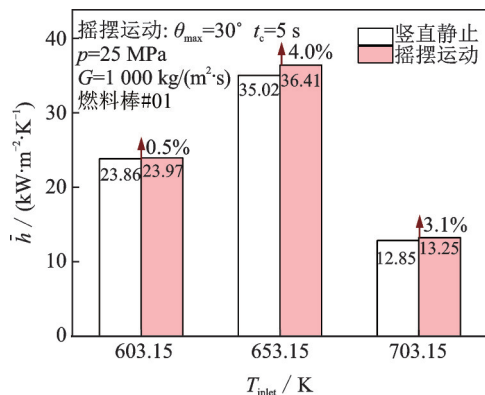


图 8 摇摆条件下不同入口温度工况对应换热系数时均值
Fig.8 Variations of time-averaged heat transfer coefficient in the cases with different inlet temperature under rolling conditions

相比竖直静止情形提升 4.0%;而在流体入口温度较低的工况下摇摆运动对时均换热性能的作用效果最弱,时均换热系数仅升高 0.11 kW/(m²·K),提升 0.5%。并且,与图 6(a)中瞬时换热系数波动幅度相比,时均换热系数提升幅度较小。这一现象说明:摇摆运动主要造成棒束通道内瞬时换热性能发生较大幅度波动,而对燃料棒外壁面时均换热性能的影响有限。

3.2 通道内湍流流动特征分析

为明晰造成上述局部换热特性变化的原因,对超临界水湍流流动特征进行讨论,如图 9 所示。研究发现:摇摆条件下通道内横流流线与通道发生倾

斜时相似,在通道横截面上均形成绕燃料棒的旋流。但摇摆情形下由离心力和科里奥利力引起的横流强度远高于倾斜通道内由重力分量及压强梯度造成的横流。摇摆通道内局部最大相对横流强度为竖直静止情形下的 30~100 倍,为倾斜条件下的 10~30 倍。

此外,研究表明:随通道摇摆运动方向变化,通道内超临界水旋流方向也发生改变。在 $t/t_c = 0$ 和 0.25 时刻,摇摆角速度方向为正,聚集在通道中心的流体沿 y 轴正向流动,流体冲击通道壁面后从通道两侧间隙子通道沿 y 轴负向回流;而在 $t/t_c = 0.50$ 和 0.75 时刻横流方向则正好相反。

为进一步探明产生上述横流特征的原因,对通道内局部质量流速 G 分布及通道后段 $z = 0.5$ m 横截面上流体温度分布随时间的变化进行分析,如图 10 所示。在 $t/t_c = 0 \sim 0.25$ 时,通道在运动过程中向 y 轴负方向摆动。但流体在惯性影响下,仍有维持原运动状态的趋势,导致通道内流场的变化略滞后于通道本身运动姿态变化,使流体相对通道存在沿摆动反方向的运动,故原本大量聚集于通道中心的流体向 y 轴正向迁移,形成图 9 所示旋流。而在 $t/t_c = 0.25 \sim 0.75$ 时,同样在惯性作用下流体相对通道向 y 轴负向运动,导致流体聚集于 y 轴负方向侧的边子通道,使棒束通道内超临界水质量流量分布不均匀现象加剧。

然而,分析图 9 中横流流场发现:上述向边子通道聚集的流体在输运过程中均流经燃料棒之间

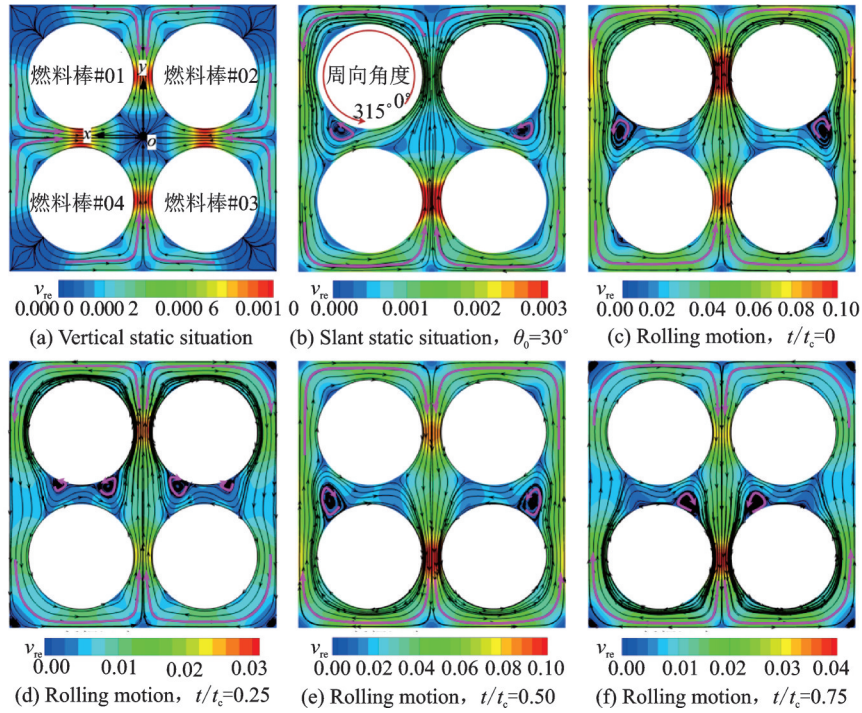


图9 不同时刻 $z = 0.3$ m 横截面上相对横流强度 v_{re} 及横流流线变化

Fig.9 Variations of relative crossflow intensity v_{re} and crossflow streamline on the cross sections with $z = 0.3$ m at different moments

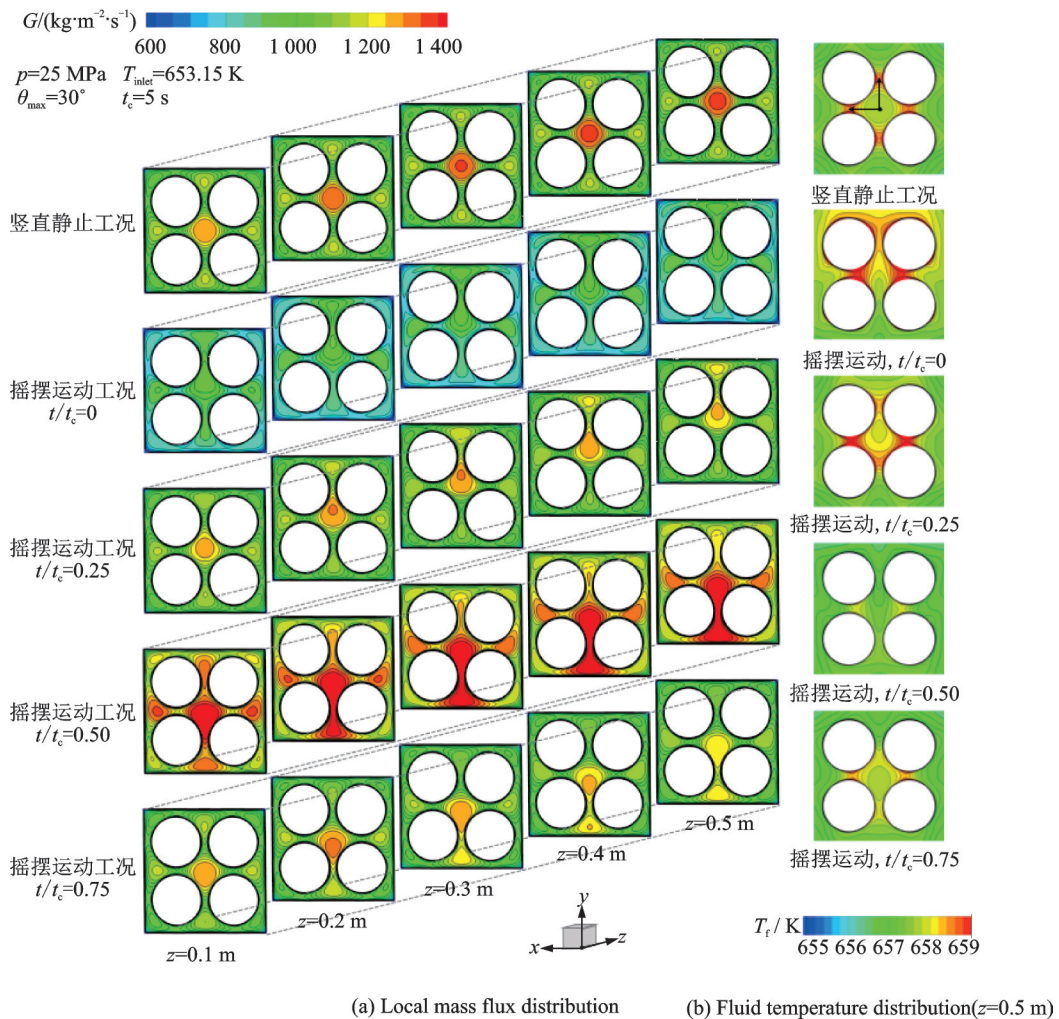


图10 摇摆条件下通道横截面上局部质量流速分布及流体温度分布

Fig.10 Distributions of local mass flux and fluid temperature on cross sections under rolling motion

的间隙区域。因相邻燃料棒之间热负荷高,导致聚集于边子通道内的流体温度较高,如图 10 中对应时刻横截面上流体温度分布所示。因此,位于通道该侧的燃料棒虽然能够被大量超临界水冷却,但因参与冷却的流体温度较高,实际冷却效果并无太大改善;而在通道另一侧虽然超临界水质量流量小,但流体温度相对较低,故燃料棒外壁面实际冷却效果并未过分削弱。故,同一时刻位于不同位置处的燃料棒外壁面平均换热系数间的差异较小。

并且,在图 10 中观察到通道内超临界水质量流速随时间发生显著变化。 $t/t_c=0$ 时超临界水质量流速低; $t/t_c=0.50$ 时质量流速高;而在 $t/t_c=0.25$ 或 0.75 时刻流体质量流速与静止情形相当。这一现象表明:在摇摆运动工况下,通道内超临界水质量流量也随摇摆运动而发生变化,从而对冷却性能产生较大影响。

3.3 流体质量流量及压降损失波动

根据前文分析,对通道内超临界水瞬时质量流

量变化现象进行详细讨论,如图 11(a) 所示。从图中可看出:通道发生摇摆运动时超临界水质量流量 ($\dot{m}_r - \dot{m}_s$) 也呈周期性波动。这一现象主要是由摇摆运动引起的切向力、离心力等附加惯性力作用,使通道入口与出口间压降 ($\Delta p_r - \Delta p_s$) 发生图 11(b) 所示波动所致^[37-39]。

综合分析图中质量流量波动与压降变化发现:摇摆条件下通道内压降与质量流量同步变化,且其波动周期与摇摆运动周期一致。与静止情形相比,在 $\theta_{\max}=30^\circ$ 、 $t_c=5$ s 摇摆运动条件下,摇摆运动导致的压降波动幅度可达 $-1.99 \sim 2.17$ kPa。但由于超临界水入口温度升高导致流体密度减小、流速增大、压降时均值增大。而图 11(b) 所示压降波动幅值几乎不随流体温度发生变化,使压降波动幅值与时均值之比降低,由压强波动引起的驱动力变化减小,进而导致流体质量流量波动幅度减小。如图 11(a) 所示, $T_{\text{inlet}}=603.15$ K 工况下瞬时质量流量波动幅度可达 $\pm 26.9\%$;而当 $T_{\text{inlet}}=703.15$ K 时质量流量波动幅度降低至 $\pm 4.9\%$ 。

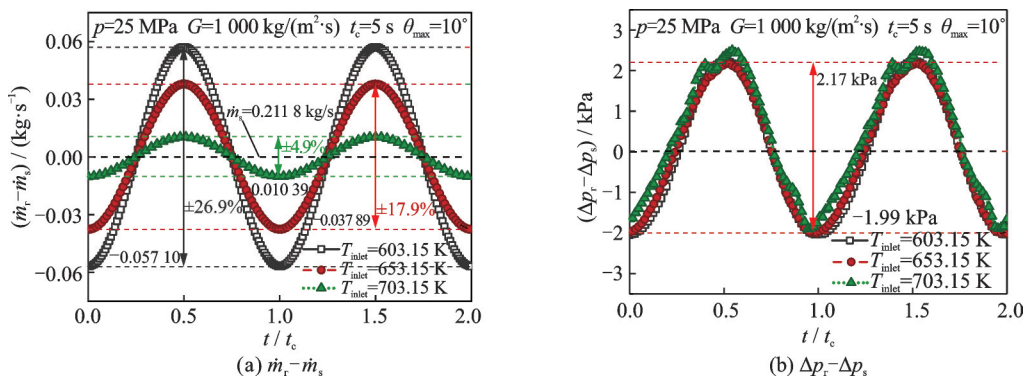


图 11 摇摆条件下通道内超临界水质量流量及压降波动

Fig. 11 Fluctuations of mass flow rate of supercritical water and pressure drop under rolling condition

同时,对比分析图 6(a) 中燃料棒外壁面平均换热系数与图 11(a) 中超临界水质量流量变化曲线发现:虽然换热系数波动略滞后于质量流量波动,但两者变化趋势基本保持一致。在 $t/t_c=0$ 时刻,通道内瞬时质量流量最小,换热系数也达到谷值,此时燃料棒外壁面冷却效果最差;而在 $t/t_c=0.50$ 时刻,通道内瞬时质量流量最大,换热系数达到峰值,冷却效果最佳。这一现象说明:由摇摆运动引起的超临界水瞬时质量流量的周期性增减变化是导致燃料棒外壁面平均换热性能与最高壁温发生周期性波动的主要原因。

为进一步探究摇摆运动对棒束通道内综合对流换热性能的影响,对竖直静止与摇摆运动情形下压降时均值 ($\overline{\Delta p}$) 进行比较,如图 12 所示。研究发现:在图示工况范围内,由摇摆运动引起的时均压降变化幅度仅为 $0.05 \sim 0.40$ kPa,相比同工况下竖

直静止通道升高 $1.15\% \sim 1.20\%$ 。这表明:摇摆运动仅对通道内瞬时压降损失产生较大影响,而对时均压降的影响较小。

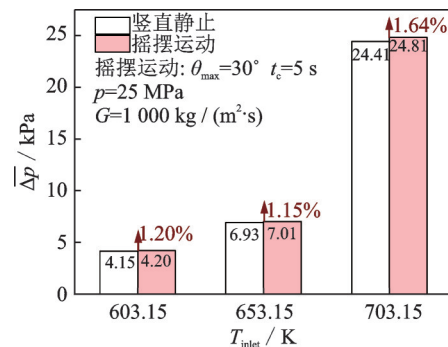


图 12 摇摆条件下不同入口温度工况对应通道内压降时均值变化

Fig.12 Variations of time-averaged pressure drop in cases with different inlet temperature under rolling condition

3.4 摇摆运动参数对综合换热性能的影响

考虑舰船实际航行过程中摇摆运动参数存在不确定性,对不同摇摆参数下通道内超临界水对流换热特性变化进行讨论。图13(a~b)展示了 $T_{inlet}=653.15\text{ K}$ 条件下燃料棒#03外壁面瞬时面平均换热系数(h_t/h_s)及通道压降($\Delta p_t/\Delta p_s$)随摇摆运动参数变化情况。研究表明:随摇摆运动幅度增大或摇摆周期减小,瞬时换热系数及压降波动幅度增大。

对上述瞬时值的变化规律进行深入分析发现:在 $t_c=5\text{ s}, \theta_{max}=10^\circ$ 工况, $t_c=10\text{ s}, \theta_{max}=20^\circ$ 工况以及 $t_c=15\text{ s}, \theta_{max}=30^\circ$ 工况下对应波动曲线基本重合。并且, $t_c=5\text{ s}, \theta_{max}=30^\circ$ 时燃料棒#03外壁面瞬时换热系数波动幅度可高达 $-30.14\% \sim +47.30\%$,

而瞬时压降的波动幅度可达 $-28.87\% \sim +31.39\%$,为 $t_c=5\text{ s}, \theta_{max}=10^\circ$ 工况下对应波动幅度的3倍左右。这一现象进一步证明:通道内瞬时换热系数和压降的波动幅度与摇摆运动最大角度和运动周期的比值(θ_{max}/t_c)正相关。这主要是因摇摆运动产生的切向力、离心力、科里奥利力等附加力与摇摆角速度、角加速度等运动参数成正比所致。

在此基础上,对不同摇摆运动参数下时均换热系数及时均压降的变化进行分析,如图13(c~d)所示。在本文研究的大部分工况下,时均换热系数及压降均随摇摆幅度的增大或摇摆周期的减小而增大。但与瞬时参数的波动幅度相比,时均值受运动参数的影响较小。

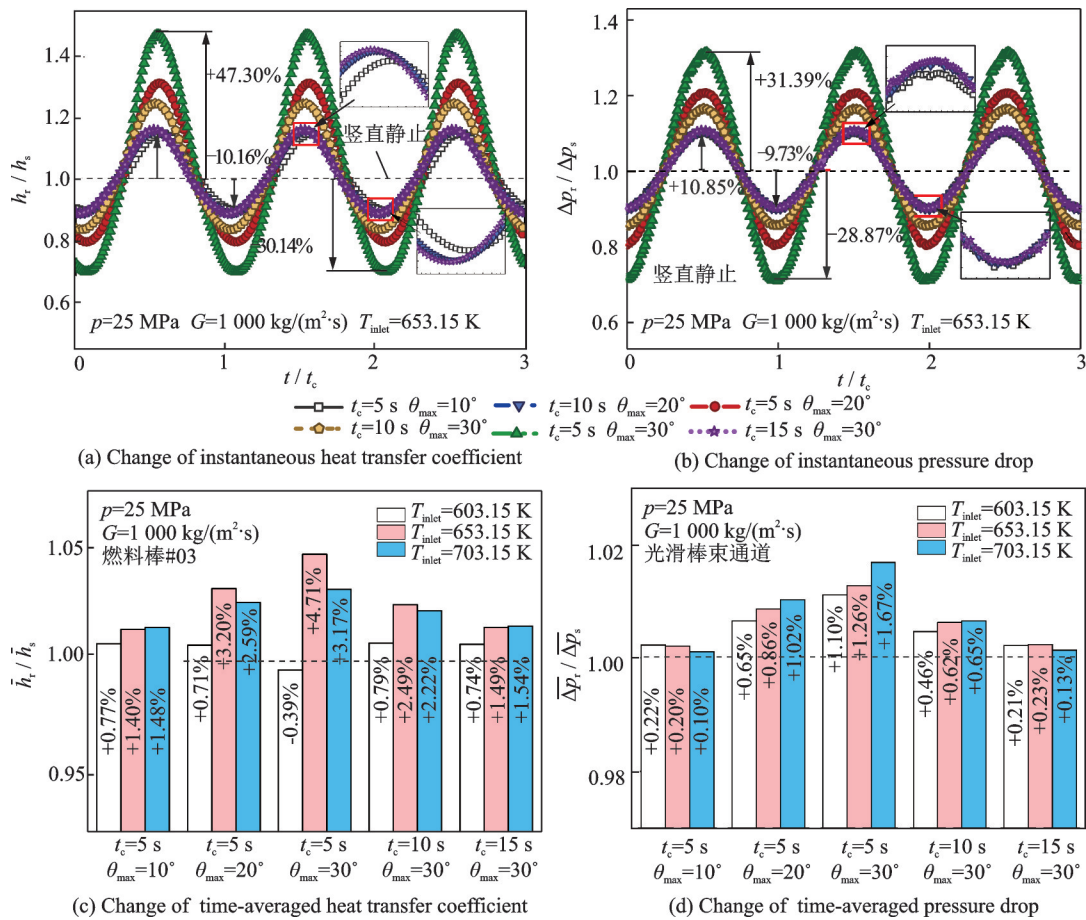


图13 不同摇摆运动参数下瞬时与时均换热系数及压降变化

Fig.13 Variations of transient and time-averaged heat transfer coefficient and pressure drop under different rolling conditions

4 结 论

本文针对舰船航行时可能发生摇摆这一实际问题,以超临界水冷堆为研究对象,对摇摆运动条件下棒束通道内超临界水瞬态流动传热过程进行数值模拟,研究摇摆运动条件下冷却通道内瞬时及时均对流换热特性变化,分析摇摆运动对通道内超临界水湍流流动与换热过程的影响,且讨论了摇摆周期及摇摆幅度等运动参数对通道内综合换热性

能的影响。获得主要结论如下:

(1)由于摇摆运动产生附加惯性力作用,通道内压降、超临界水质量流量等发生周期性波动,导致燃料棒外壁面平均换热系数及最高壁温也呈周期性变化。并且,摇摆运动导致通道内横流强度显著增强,从而能够在一定程度上提高换热性能。

(2)瞬时换热系数及瞬时压降的波动幅度与最大摇摆角度和摇摆周期之比(θ_{max}/t_c)成正相关。随摇摆幅度增大或摇摆周期减小,摇摆运动对通道

内超临界水流动传热过程的影响增强,瞬时换热系数及瞬时压降波动幅度增大,时均换热系数与时均压降的变化量也相应增大。

(3)当流体温度接近拟临界温度时摇摆运动对通道内流动与传热过程的影响最大,而当流体温度远离拟临界温度时摇摆运动的影响减小。

参考文献:

- [1] 谭美,郭建,陈刚.核动力船舶与浮动堆发展现状[J].船舶工业,2019,41(11):11-12.
- [2] 伍赛特.核动力舰船发展前景展望[J].节能,2019,38(3):117-120.
- [3] ZOHURI B. Generation IV nuclear reactors[J]. Nuclear Reactor Technology Development and Utilization, 2020.DOI:10.1016/B978-0-12-818483-7.0006-8.
- [4] RAHMAN M M, JI Dongxu, JAHAN N, et al. Design concepts of supercritical water-cooled reactor (SCWR) and nuclear marine vessel: A review[J]. Progress in Nuclear Energy, 2020, 124: 103320.
- [5] MARIAN P. The analysis of turbine propulsion systems in nuclear submarines[J]. Key Engineering Materials, 2013, 597: 99-105.
- [6] GU H Y, HU Z X, LIU D, et al. Experimental studies on heat transfer to supercritical water in 2×2 rod bundle with two channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 291: 212-223.
- [7] WANG Han, BI Qincheng, WANG Linchuan, et al. Experimental investigation of heat transfer from a 2×2 rod bundle to supercritical pressure water[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 275: 205-218.
- [8] WANG Han, LEUNG L K H, WANG Weishu, et al. A review on recent heat transfer studies to supercritical pressure water in channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 573-596.
- [9] 胡振泉,李虹波,杨伟国,等.两流程 2×2 棒束超临界水传热实验研究[J].原子能科学技术,2016,50(7):1166-1172.
HU Zhenxiao, LI Hongbo, YANG Weiguo, et al. Experimental study on heat transfer of supercritical water in 2×2 rod bundles with two paths[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(7): 1166-1172.
- [10] GOU Junli, SHANG Zhi, ISHIWARARI Y, et al. CFD analysis of heat transfer in subchannels of a super fast reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(7): 1819-1829.
- [11] CHENG X, KUANG B, YANG Y H. Numerical analysis of heat transfer in supercritical water cooled flow channels[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(3): 240-252.
- [12] SHANG Zhi. CFD investigation of vertical rod bundles of supercritical water-cooled nuclear reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(11): 2562-2572.
- [13] YANG Jue, OKA Y, ISHIWATARI Y, et al. Numerical investigation of heat transfer in upward flows of supercritical water in circular tubes and tight fuel rod bundles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(4): 420-430.
- [14] LIU X J, CHENG X. Thermal-hydraulic and neutron-physical characteristics of a new SCWR fuel assembly[J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36(1): 28-36.
- [15] WANG Han, BI Qincheng, WANG Linchuan. Heat transfer characteristics of supercritical water in a 2×2 rod bundle-numerical simulation and experimental validation[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 730-743.
- [16] 徐维晖,闫友志,王为术,等. SCWR类三角形通道超临界流动传热定位格架结构影响研究[J].核科学与工程,2019,39(6):872-877.
XU Weihui, YAN Youzhi, WANG Weishu, et al. Study on influence of supercritical flow and heat transfer grid spacer inner structural of supercritical water cooled reactor triangular channel[J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, 39(6): 872-877.
- [17] WANG Han, BI Qincheng, LEUNG L K H. Heat transfer from a 2×2 wire-wrapped rod bundle to supercritical pressure water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 486-501.
- [18] WANG Sipeng, YANG Baowen, ZHOU Zhaobo, et al. Review on thermal-hydraulic characteristics of nuclear reactors under ocean conditions[J]. Nuclear Science and Engineering, 2019, 193(1/2): 14-32.
- [19] 田春平.摇摆对棒束通道内传热特性的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
TIAN Chunping. Study on effect of rolling motion on heat transfer characteristics in rod bundle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [20] ZHANG Yinxing, GAO Puzhen, KINNISON W W, et al. Analysis of natural circulation frictional resistance characteristics in a rod bundle channel under rolling motion conditions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 103: 295-303.
- [21] TAN Sichao, SU G H, GAO Puzhen. Experimental and theoretical study on single-phase natural circulation flow and heat transfer under rolling motion condition[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14/15): 3160-3168.
- [22] TAN Sichao, SU G H, GAO Puzhen. Heat transfer model of single-phase natural circulation flow under a rolling motion condition[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(10): 2212-2216.

- [23] WANG Sipeng, ZHOU Zhaobo, YANG Baowen, et al. CFD analysis on flow and heat transfer characteristic in natural circulation system with subchannels under rolling conditions[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 150: 107862.
- [24] ZHAO Zhenxing, LIN Yuansheng, YAO Shiwei, et al. Numerical investigation on heat transfer to supercritical CO₂ in rolling motion[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, 106: 97-110.
- [25] MA Ting, ZHANG Pan, DENG Tianrui, et al. Thermal-hydraulic characteristics of printed circuit heat exchanger used for floating natural gas liquefaction[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110606.
- [26] YU Guojun, JIANG Chaofei, WANG Liu, et al. A new method on fluid-to-fluid scaling for heat transfer in tubes at supercritical pressures[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 809-822.
- [27] TIAN Ran, FEUERSTEIN F, DAI Xiaoye, et al. Fluid-to-fluid scaling of heat transfer to mixed convection flow of supercritical pressure fluids[J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 42(10): 3361-3377.
- [28] XIE Gongnan, XU Xiaoxiao, LEI Xianliang, et al. Heat transfer behaviors of some supercritical fluids: A review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(1): 290-306.
- [29] CHENG Xu, LIU Xiaojing, YANG Yanhua. A mixed core for supercritical water-cooled reactors[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2008, 40(2): 117-126.
- [30] 国防科学技术工业委员会. 舰船环境条件要求机械环境: GJB 1060.1—91[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1991.
National Defense Science and Technology Commission. general requirement for environment conditions of naval ships mechanical environments: GJB 1060.1—91[S]. Beijing: China Commission of Science Technology and Industry for National Defense, 1991.
- [31] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
TAO Wenquan, Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [32] 安德森·J D. 计算流体力学基础及其应用[M]. 吴颂平, 刘赵森, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 26-51.
ANDERSON J D. Computational fluid dynamics [M]. WU Songping, LIU Zhaomiao, translation. Beijing: China Machine Press, 2007: 26-51.
- [33] PODILA K, RAO Yanfei. CFD modelling of supercritical water flow and heat transfer in a 2×2 fuel rod bundle[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 301: 279-289.
- [34] DURBIN P A. Separated flow computations with the $k-\epsilon-v2$ model[J]. *AIAA Journal*, 1995, 33(4): 659-664.
- [35] XIONG Jinbiao, CHENG Xu, YANG Yanhua. Numerical analysis on supercritical water heat transfer in a 2×2 rod bundle[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, 80: 123-134.
- [36] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. NIST standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP 9.1[S]. [S. l.]: National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [37] 季鹏. 棒束内自然循环流动换热特性受摇摆影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
JI Peng. The effect of rolling on flow and heat transfer of natural circulation in rod bundle channel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [38] WANG Chang, GAO Puzhen, WANG Shaowu, et al. Experimental study of single-phase forced circulation heat transfer in circular pipe under rolling motion [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 265: 348-355.
- [39] TAN Sichao, WANG Zhanwei, WANG Chang, et al. Flow fluctuations and flow friction characteristics of vertical narrow rectangular channel under rolling motion conditions [J]. *Experimental and Fluid Science*, 2013, 50: 69-78.

(编辑: 孙静)