

液态金属脉动横掠管束的非稳态流动与 多参数传热耦合机制研究

蒋瀚涛, 陈慧, 刘迎文

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统顺排管束布置中二次流有限而导致的传热受限问题, 将液态金属横掠管束和脉动流两种方法相结合, 针对传热性能展开数值模拟研究。首先, 建立液态金属横掠管束模型, 并基于该物理模型验证湍流模型和湍流普朗特数的可靠性; 接着, 建立具有流动分离和逆压梯度特征的凹槽模型, 验证湍流模型对脉动流的适用性; 然后, 对施加脉动流后的非稳态流场进行了分析; 最后, 采用 Box-Behnken 实验设计方法, 以管束流向间距比、横向间距比、贝克来数、脉动振幅和脉动频率为设计变量, 努塞尔数为目标函数, 对液态金属脉动横掠管束进行数值模拟。结果表明: 脉动流的引入导致涡结构的演变增强了再循环区的湍流程度, 与稳态流动相比湍动能增强 3~4 倍, 传热性能提升 1.05~1.70 倍; 努塞尔数与贝克来数、脉动振幅呈现正相关, 与横向间距和流向间距呈负相关, 而不同参数条件下则存在最佳脉动频率, 范围在 7.5~12.5 Hz; 所提传热关联式预测误差不超过 8%。研究对推进换热器设计、提高热效率、工程应用具有参考意义。

关键词: 液态金属; 顺排管束; 脉动流; 湍流; 传热关联式

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202603013 **文章编号:** 0253-987X(2026)03-0132-12

Research on Unsteady Flow and Multi-Parameter Heat Transfer Coupling Mechanism for Liquid Metal Pulsating Crossflow Over Tube Bundles

JIANG Hantao, CHEN Hui, LIU Yingwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the heat transfer limitation resulting from limited secondary flow in traditional in-line tube bundle arrangements, the liquid metal cross-flow over tube bundles is combined with pulsating flow to investigate heat transfer performance through numerical simulations. Firstly, a model of liquid metal cross-flow over tube bundles is established, and the reliability of the turbulence model and turbulent Prandtl number is validated based on this physical model. Subsequently, a grooved model with characteristics of flow separation and adverse pressure gradients is constructed to verify the applicability of the turbulence model for pulsating flows. Next, the unsteady flow field induced by the application of pulsating flow is analyzed. Finally, using the Box-Behnken experimental design method, numerical simulations of liquid metal pulsating crossflow over tube bundles are conducted with streamwise pitch ratio, transverse pitch ratio, Péclet number, pulsation amplitude, and pulsation frequency as design variables, and the

Nusselt number as the objective function. The results show that the introduction of pulsating flow leads to the evolution of vortex structures, which enhances turbulence in the recirculation zones. Compared to steady-state flow, the turbulent kinetic energy increases by 3—4 times, while heat transfer performance improves by 1.05—1.70 times. The Nusselt number exhibits a positive correlation with the Peclet number and pulsation amplitude, but a negative correlation with transverse and streamwise pitch ratios. Meanwhile, under different parameter conditions, an optimal pulsation frequency within the range of 7.5—12.5 Hz is identified. The proposed heat transfer correlation achieves a prediction error of no more than 8%. It provides valuable insights for advancing heat exchanger design, improving thermal efficiency, and supporting engineering applications.

Keywords: liquid metal; in-line tube bundle; pulsating flow; turbulent; heat transfer correlation

在石油、化工、能源以及航空航天等能源领域,常常要求在有限空间中提供较高的传热能力^[1-3]。管束式换热器因具有紧凑、高效以及经济等优点而被广泛应用^[4-5]。20世纪以来,随着空间探索计划的推进,为了解决普通工质在高温条件下的散热要求,液态金属逐渐得到人们的重视。NaK合金具有高沸点(1 030 K)以及低熔点(250 K),其宽广的液相区、低蒸气压和优异的传热性,已经被证明其作为冷却剂适用于中子反应堆冷却系统以及航天核动力系统^[6-7]。此外,在第四代核反应堆的开发中,液态金属快冷堆被视为未来经济型核能系统中最具前景的反应堆之一^[8-12]。

液态金属具有高导热性和低黏度,可在紧凑结构换热器中实现高效散热,已经有大量学者对液态金属横掠管束系统进行了研究。Borishanskii等^[13]对液钠在交错管束布置下的流体流动和传热进行了实验研究,发现努塞尔数(Nu)和贝克莱数(Pe)存在0.5次幂的关系。Hoe等^[14]对雷诺数(Re)在15 000~80 000的汞外掠管束的研究表明,润湿性是影响液态金属传热的主要因素。此外,Cess等^[15]提出了理论分析的解析解,与Hoe等的研究结果吻合。值得注意的是,他们所提出的关联式在较小的 Re 范围内换热性能变化较小,表明在该雷诺数区间内,流动扰动和二次流作用不足,难以显著强化对流换热。然而,由于难以解决液态金属的易爆炸、腐蚀性、毒性以及存储问题,实验研究一度中断,随着计算机技术的发展,数值仿真成为实验研究的有效替代。Abramov等^[16]研究了 Re 在26 200~52 400的不同管排数对全局 Nu 结果的影响,发现管排数大于3时的结果是可以接受的。Xie等^[17]对比了不同工质的传热性能,发现背风侧的传热性能较弱。综上,现有研究缺乏对液态金属横掠管束流场瞬态变

化的分析,无法有效揭示管束内湍流特征的变化过程。

尽管液态金属的引入已经使传热有了一定的提升,但紧凑型顺排管束的排布特征造成的流动死区以及有限二次流特征仍然限制着传热性能^[18-19]。为了改变这一特征,有学者引入脉动流,这种间歇性特征会改善二次流从而强化传热。Wantha^[20]实验研究了脉动技术对翅片管换热器换热性能的影响,发现高脉动频率下的流动不稳定性要弱于低脉动频率下的流动不稳定性。Wu等^[21]实验研究了海水中交错管束的换热特性,结果表明振幅的增加比频率的增加更显著地增强了换热。Farouk等^[22]对具有圆柱肋的空气加热器在湍流脉动下的运行进行了数值模拟研究,发现锯齿速度分布对热液性能参数的增强效果最好。Haibullina等^[23]研究了 $Re=500$ 条件下非对称脉动流动条件下直列管束内的传热,发现传热增强体现在柱体的前后两侧, Nu 最大增加106%。现有研究表明,脉动流技术能够在一定程度上改善顺排管束内的传热特性。然而,对于普通工质而言,其有限的导热系数使得在紧凑型顺排管束中传热增强的潜力受到制约,难以充分发挥脉动流所带来的强化效果。

液态金属的引入增加了工质的导热能力,这类不需要额外功耗的技术称为被动强化技术。而引入脉动流则需要消耗外部能量,属于主动强化技术。目前,主动与被动技术协同应用的研究尚不充分,其潜在机理和强化效果仍有待系统探索,特别是二次流有限的顺排管束,该结构类型的传热强化研究有着重要的工程意义。基于此,本文构建顺排管束三维模型,基于文献中已存在实验数据对模型进行验证。分析流场脉动引入对流场非稳态特征的影响,然后采用Box-Behnken实验设计方法,以 Pe 、横向

节径比 S_t 、流向节径比 S_l 、无量纲脉动振幅 A 以及脉动频率 f 为变量,将无量纲 Nu 作为评价指标,对液态金属脉动横掠管束进行数值模拟研究,揭示不同参数耦合对传热性能的影响机制。

1 数值模拟方法及模型验证

1.1 几何模型及边界条件

图 1 为本文使用的二维和三维物理模型示意图。图 1(a)中, a 、 b 为监测点,管径 D 为 12.7 mm,展向距离为 πD 。流体区域分为 3 部分,除主流域,设入口和流出延伸段分别为 $7D$ 和 $20D$ 。图 1(b) 给出了边界条件设置,入口为速度入口且符合 $u_{in} = U[1 + A\sin(2\pi ft)]$,式中 U 是时间平均速度, t 为时间,通过 Fluent 软件中的用户自定义函数(UDF)功能施加在速度入口,温度为 660 K;管壁为无滑移恒热流密度边界,热流密度设置为 500 kW/m^2 ;上下边界和两侧边界均设置为周期边界;出口为压力出口。

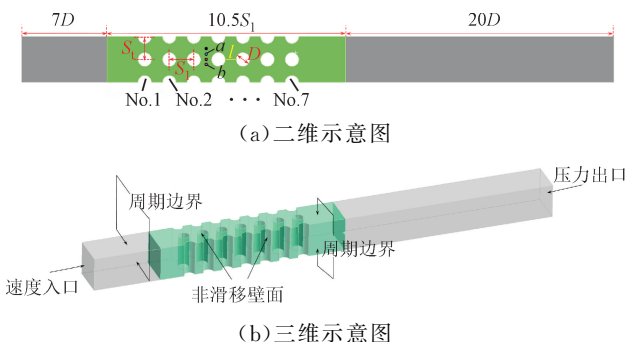


图 1 顺排管束结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of in-line tube bundle structure

1.2 模型及计算设置

三维不可压缩非稳态控制方程如下。

连续性方程、动量方程、能量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2(v + v_{tu})S] \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_{tu}}{Pr_{tu}} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

式中: v_{tu} 为湍流黏度; Pr_{tu} 为湍流普朗特数; p 为压力; ρ 为液体密度; λ 为导热系数; u_i 为速度分量; v 为流体黏度; T 为流体温度; $\partial(\cdot)/\partial x_i$ 表示变量沿不同方向的变化率,下标 i, j 为张量指标,分别表示直角坐标系的方向。本研究采用 $k-k_1-\omega$ 三方程模型封闭上述方程组,该模型通过引入预转捩区的间歇性脉动动能更精确捕捉近壁区的流动及可能发生的分离

特征。输运方程为

$$\frac{D(\rho k_{tu})}{Dt} = \rho(P_{k_{tu}} + R_{BP} + R_{NAT} - \omega k_{tu} - B_{tu}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\rho \alpha_{tu}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_{tu}}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{D(\rho k_1)}{Dt} = \rho(P_{k_1} - R_{BP} - R_{NAT} - B_1) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k_1}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \omega)}{Dt} = & \rho \left[C_{\omega 1} \frac{\omega}{k_{tu}} P_{k_{tu}} + \left(\frac{C_{\omega R}}{f_W} - 1 \right) \frac{\omega}{k_{tu}} (R_{BP} + \right. \\ & \left. R_{NAT}) - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} f_{\omega} \alpha_{tu} f_W^2 \frac{\sqrt{k_{tu}}}{d^3} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\rho \alpha_{tu}}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_{tu} 为湍流动能; k_1 为层流脉动动能; ω 为比耗散率; μ 为流体动力黏度; d 为计算点到壁面的最近距离; $P_{k_{tu}}$ 、 P_{k_1} 分别为湍流动能、层流动能的生成项; R_{BP} 和 R_{NAT} 分别为与旁路转捩和自然转捩的相关源项; B_{tu} 和 B_1 分别为湍流动能和层流动能的近壁耗散项; α_{tu} 为湍流扩散项; f_W 和 f_ω 为模型阻尼函数,下角 W 为流动参数; σ_k 、 σ_ω 、 $C_{\omega 1}$ 、 $C_{\omega 2}$ 、 $C_{\omega 3}$ 和 $C_{\omega R}$ 均为模型常数。该模型在具有逆压梯度和流动分离的顺排管束模拟中被证实具有更准确的预测精度^[24-25]。通过 Ansys Fluent 软件对控制方程进行求解。对流项采用二阶迎风格式离散化求解。采用 SIMPLE 算法对速度和压力进行耦合。

1.3 参数设置

液态金属的 $Pr \ll 1$,传统介质湍流 Pr 假定为 $0.85 \sim 1.00$,对于液态金属已不适用,因此本文采用 Kays 湍流 Pr 模型^[26]计算湍流热扩散系数,以量化湍流与分子导热的竞争机制,并基于局部湍流参数动态修正湍流普朗特数,从而有效降低传热误差。公式为

$$\begin{cases} Pr_{tu} = 0.85 + \frac{0.7}{Pe_{tu}} \\ Pe_{tu} = \frac{v_{tu}}{v} Pr \end{cases} \quad (7)$$

本文使用 NaK 合金液态金属,其热物理性质随温度变化较大。工质物性随温度的变化^[27]为

$$\rho = 929.01 - 2 \times 10^{-5} T^2 - 1.63 T \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \lambda = & 15.0006 + 30.2877 \times 10^{-3} T - \\ & 20.8095 \times 10^{-6} T^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} c_p = & 5 \times 10^{-4} T^2 - 7.306 \times 10^{-1} T + 1325.2 \\ & \quad \quad \quad (10) \end{aligned}$$

$$\mu = 1.327 \times 10^{-2} - 1.232 \times 10^{-2} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{87.52968}\right)\right) - 8.22853 \times 10^{-4} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{349.1661}\right)\right) \quad (11)$$

式中: c_p 为比定压热容。

其他参数定义如下

$$Re = DU\rho/\mu \quad (12)$$

$$Nu = hD/\lambda \quad (13)$$

$$h = q/(T_{\text{tube}} - T_{\text{Average}}) \quad (14)$$

$$Pe = UD\rho c_p/\lambda \quad (15)$$

式中: U 为速度; q 为热流密度; T_{average} 为流体平均温度; h 为对流传热系数; T_{tube} 为管壁温度。

1.4 网格及时间无关性验证

网格示意图如图2所示,在每个无滑移管壁处生成边界层,以确保整个计算过程中无量纲壁面距离 y^+ 的最大值小于1。

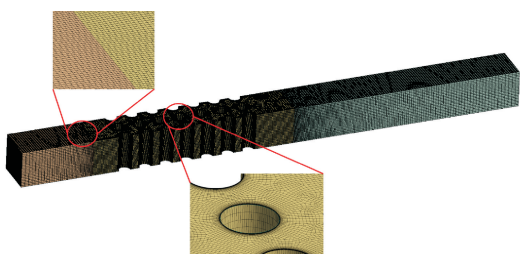


图2 网格划分

Fig. 2 Schematic of grid distribution

全局 Nu 用于验证网格独立性。如图3所示,进行网格独立性验证的网格数为47万、74万、108万、140万、181万。当网格数超过108万时, Nu 的变化误差不超过1%,因此选择该网格进行后续时间无关验证。

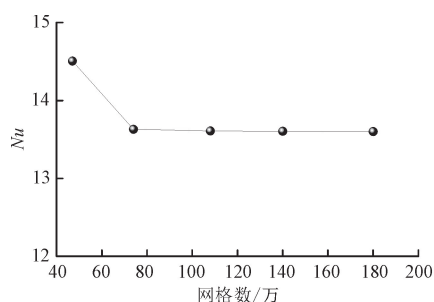


图3 Nu 随网格数的变化

Fig. 3 Nu varies with the number of grid

选取4个时间步长进行时间步长独立性验证。图1中 l 的局部速度分布对比如图4所示。当时间步长 Δt 小于0.0005 s时,速度分布的变化较小,为了提高计算效率,选择0.0002 s作为仿真时间步长。

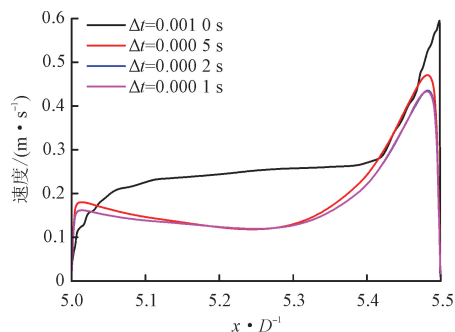


图4 时间无关性验证

Fig. 4 Time-independent verification

1.5 模型验证

1.5.1 液态金属横掠管束验证

本文所使用的流体与 Kalish 等^[28]实验相同,因此采用其传热数据来验证液态金属横掠管束的模型适用性。物理模型及边界条件如图5所示。

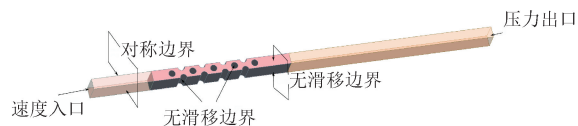


图5 计算域示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the computational domain

模拟与实验结果的误差随雷诺数的变化如图6所示。 Nu 偏差不超过10%,验证了本模型的可靠性。

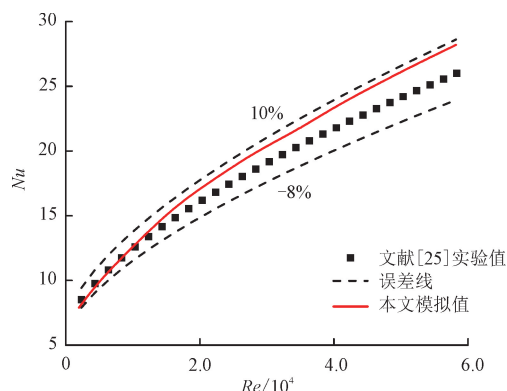


图6 Nu 随 Re 的变化

Fig. 6 Variation of Nu with Re

1.5.2 脉动流模型验证

矩形凹槽实验具有逆压梯度和流动分离特征,可以验证再循环区域的流动特性。利用 Zontul 等^[29]对矩形槽内脉动流动的实验结果,验证湍流模

型对脉动流动的适用性,模型如图 7 所示。

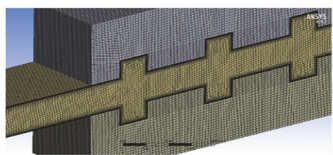


图 7 多凹槽通道物理模型及网格

Fig. 7 Physical model and mesh of multi-groove channel

图 8 对比了加速期流速分布。由图可见,无量纲壁面距离大于 0.2 时一致性较好;0.1 附近的误差归因于实验测量限制及模型低估耗散。

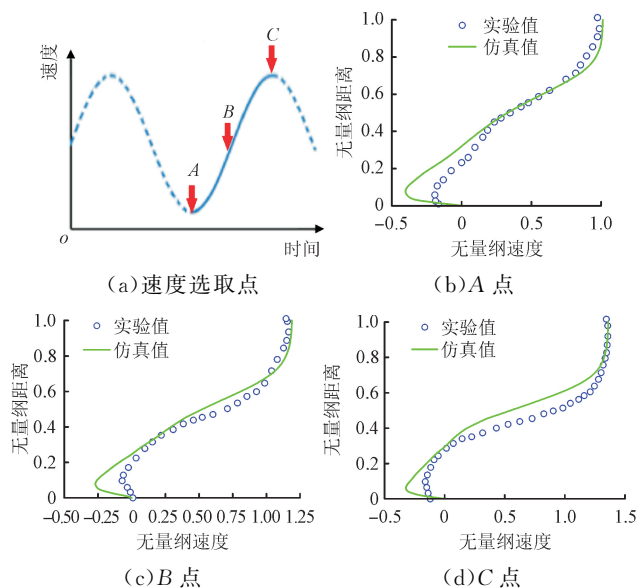


图 8 不同脉动速度下槽内速度分量分布

Fig. 8 Distribution of velocity components in the groove at different pulsation velocities

总的来说,本文构建的模型在液态金属横掠管束的全局努塞尔数、脉动流中的速度分布都与实验有较好的一致性,后续将采用该模型开展相关液态金属脉动横掠管束的传热分析。

2 结果与讨论

2.1 流场特征

工质流过顺排管束时,管束周围的流场主要包含 3 部分,管横向之间的主流区、管后侧的再循环区以及两者之间的剪切层区,再循环区的存在限制了传热性能的提升^[30]。图 9 展示了 1 个周期内不同速度下的涡量等值面。入口速度位于 A 时,除首尾列外,其余管列附近出现强度较弱的单涡并发生横向偏移。速度增至 B 点即最大值时,涡被拉长并附着于后侧管,入口流速增加促进了黏性底层发展,且此时从第

2 列起出现小尺度涡;后 3 列强烈的横向混合表明存在时滞。速度降至 C 点,惯性减弱,再循环区小尺度涡迅速发展为中尺度涡。降至最低点 D 时,演变为大尺度涡并附着于后列管。在稳态流中,除首列外呈现单侧涡脱落,与脉动流下的对称涡对比鲜明;且涡结构呈明显二维特征,表明缺乏轴向混合。整体上,脉动流引起的周期性加减速改变了涡脱落特征,促进尾迹区涡量集中与扩散,进而影响二次流与传热。

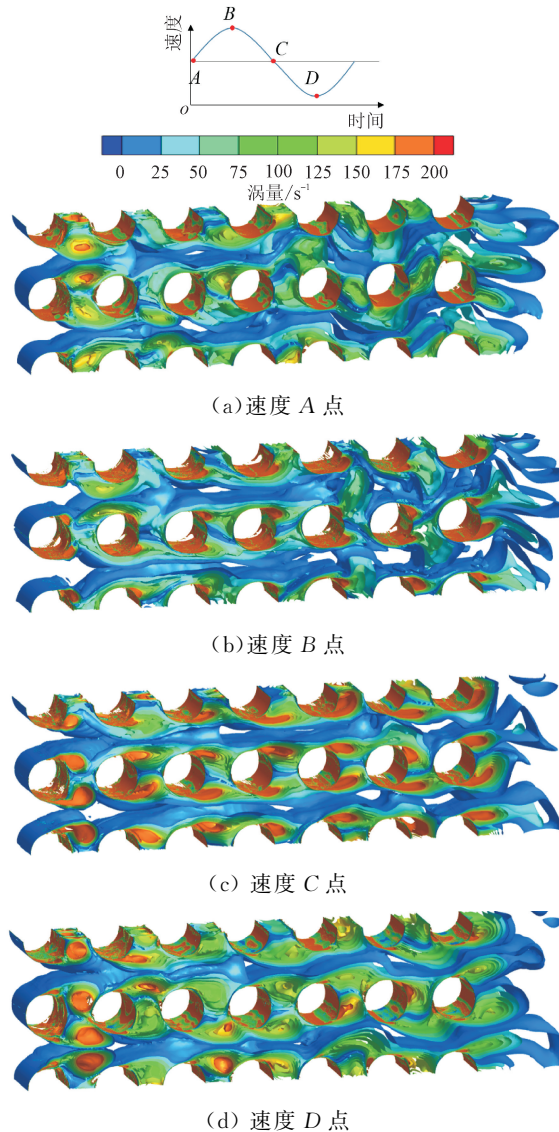


图 9 不同入口速度涡量分布

Fig. 9 Distribution of vortices at different inlet velocities

图 10 给出了未施加脉动流的涡量分布图,可以看到第一列管后侧形成的对称剪切层,从第二列开始,管后侧依次出现单侧涡脱落的特征,这与施加脉动流后形成的对称涡形成鲜明对比。值得注意的是,稳态流工况中涡结构具有明显的二维特征,表明沿管轴向缺乏明显的流体混合。整体而言,脉动流

诱导的周期性加速与减速交替,不仅改变了涡脱落的特征,还促进了尾迹区涡量的周期性集中与扩散,从而对二次流结构与传热性能产生影响。

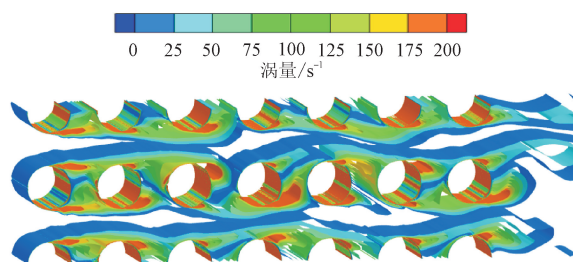
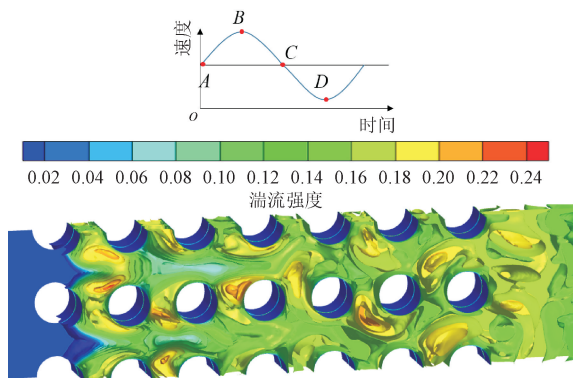


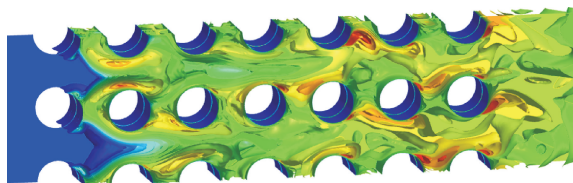
图10 稳态流动涡量分布

Fig. 10 Distribution of vortices in steady flow

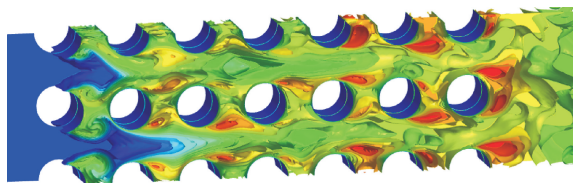
图11展示了图9对应相位的湍流强度变化。A点为入口速度,加速流体增强了惯性促进涡破碎,使局部湍流较高。当速度增加至B点,受耗散影响前排湍流先行下降,证实了时滞现象。而速度到达C点时,速度进一步的下降削弱了流体惯性,促进中尺度涡生成,剧烈的速度梯度引发 Kelvin-Helmholtz 不稳定性从而强化湍流。而在速度从C降至D点的过程中,大尺度涡与耗散生成的小尺度涡相互作用,通过强烈的能量级联效应进一步维持了高湍流水平。此外,脉动引起的涡偏移改变了分离点及逆压梯度,这种非稳态特性使得整体湍流强度显著高于图12的稳态工况。



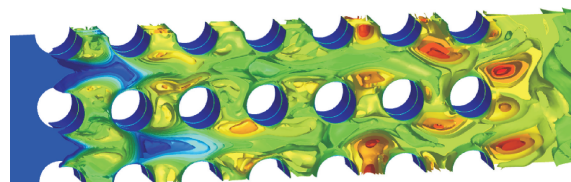
(a)速度 A 点



(b)速度 B 点



(c)速度 C 点



(d)速度 D 点

图11 不同入口速度湍流强度分布

Fig. 11 Distribution of turbulent intensity at different inlet velocities

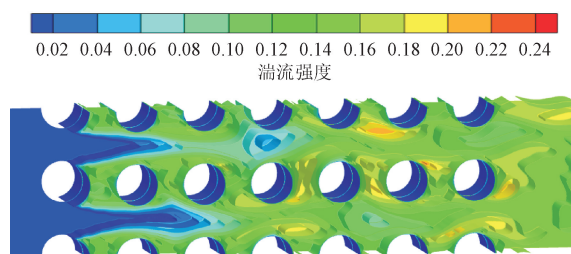


图12 稳态流动湍流强度分布

Fig. 12 Distribution of turbulent intensity in steady flow

图13给出了脉动流和稳态流管后侧不同点的湍动能变化。在不同位置的对比中,主流区监测点湍动能始终维持在较低水平,波动幅度较小。而偏离中心的半径方向监测点a与b(图1),湍动能波动显著增强,峰值可达0.2 m/s左右,远高于其他区域。这归因于管束尾流区周期性涡脱落与速度剪切效应的叠加,导致局部湍流强度显著提高。管后中心点的湍动能变化幅度介于主流区与偏半径区域之间,表明中心位置仍受尾流扰动影响。稳态流动的湍动能强度明显小于脉动流,最大值约为脉动流的1/4~1/3。

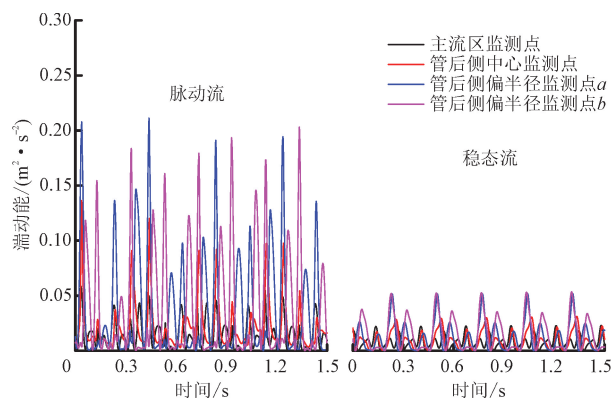


图13 湍动能随时间变化

Fig. 13 Variation of turbulent kinetic energy with time

总之,脉动流激发下的横掠管束后方湍流结构

表现出显著的非稳态与空间不均匀性,局部湍动能的周期性增强有助于边界层的扰动破坏和传热强化。

2.2 时均湍动能分析

图 14 为响应面法中 BBD 试验部分工况的结果。可以看出,随着 Pe 和振幅增加,管内湍动能显著提升。不同在于, Pe 增加更有利于入口区湍动能增强,而振幅增加主要影响主流区。与常规流动需至第 5 列才充分发展相比,脉动流有效强化了前 3 排的流体混合。较高振幅既为减速区大尺度涡的形成提供了条件,又通过提升最大速度增加了剪切率,加速了湍动能生成,从而显著增强传热。

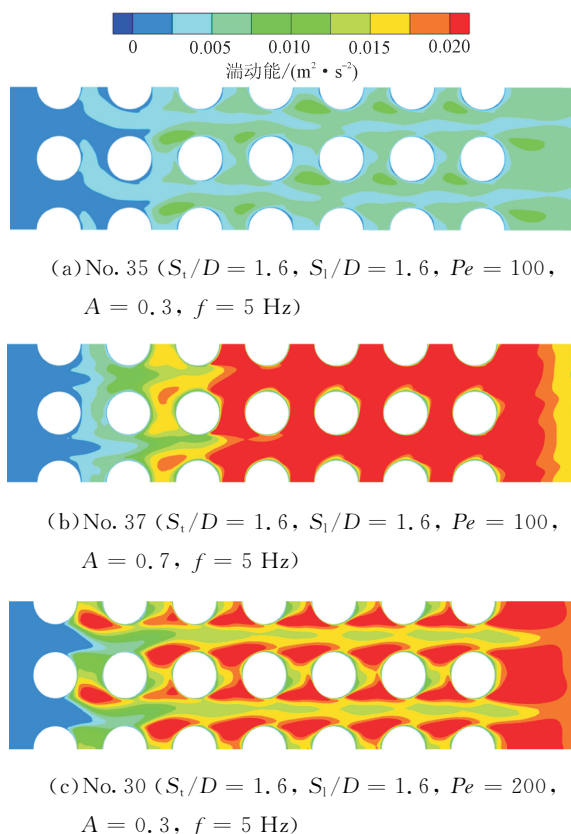


图 14 Pe 及振幅对湍动能的影响

Fig. 14 Effect of Pe and amplitude on turbulent kinetic energy

图 15 展示了横向间距和流向间距对湍动能的影响。No. 17 和 No. 8 为不同横向间距工况对比。可见,较小的横向间距排布具有更大的湍动能,特别是在流动死区即管后侧区域,这是由于较小的横向间距促使再循环区内的流体和剪切层区的流体混合更强烈,绕流流体在管间的流通截面积减小,横向挤压效应增强,导致来流加速与剪切增强,使边界层更易受到扰动而提前转捩,从而增强了湍流。而较小的流向间距具有更大的湍动能,且产生明显的流动

偏移现象,湍动能在某一侧观察到较大的值,这与常规流动中小流向间距存在的非对称涡有关。

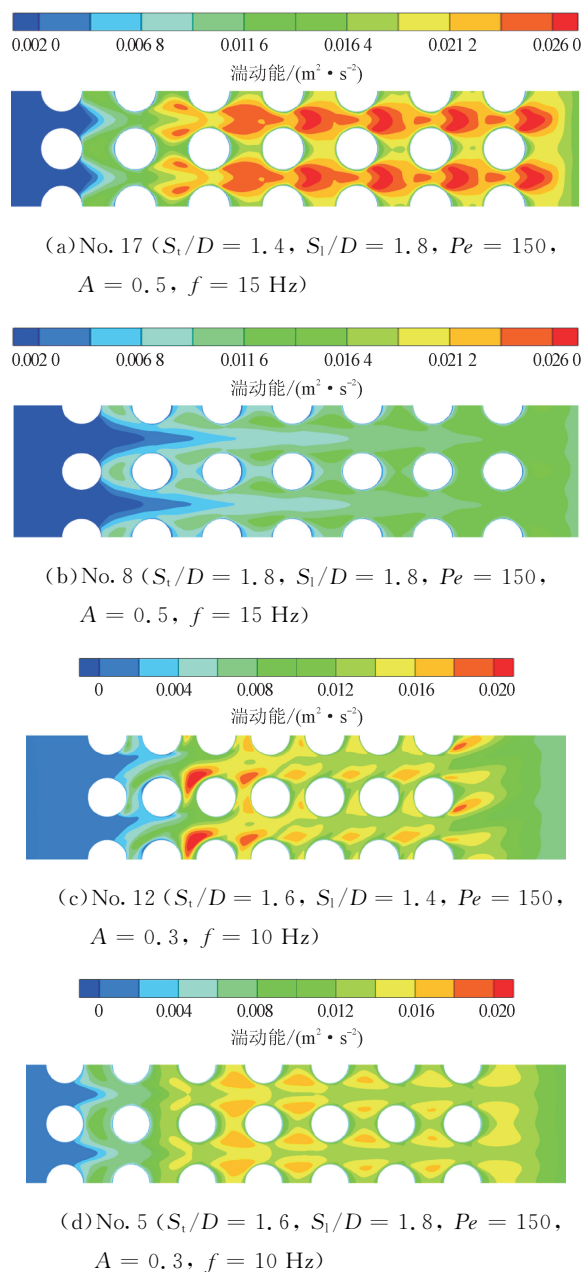


图 15 管间距对湍动能的影响

Fig. 15 Effect of tube spacing on turbulent kinetic energy

图 16 展示了不同脉动频率对应的湍动能分布。可以观察到, No. 36 工况对应了最大的湍动能, No. 15 次之, No. 4 最弱, 这表明过高的频率不利于流场内部的流动, 再循环区内的大尺度涡是在减速区后半程形成的, 且在加速区前半程涡会发生偏移运动。当频率增加、入口速度处于减速区时, 形成的大尺度涡无法及时产生偏移, 且流速增加使主流区域惯性增强限制了涡与主流区的有效混合。

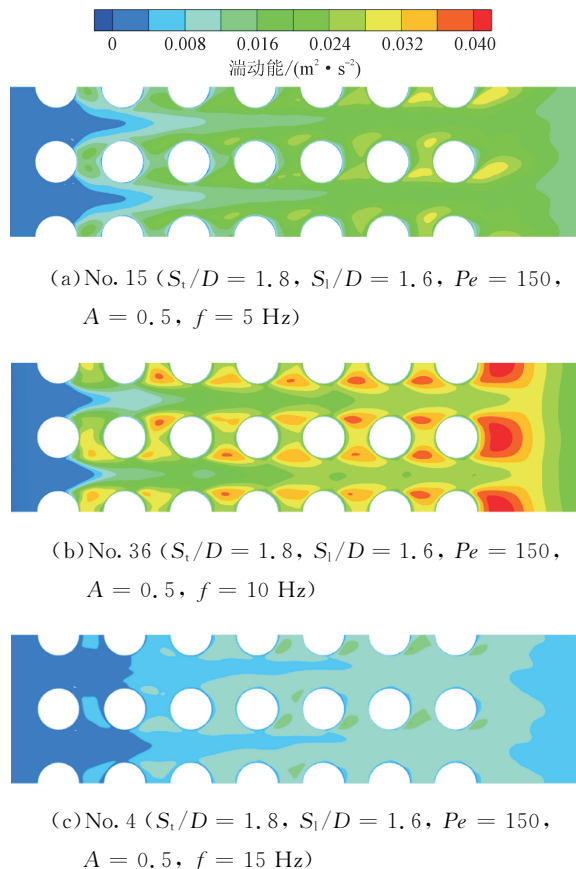


图16 脉动频率对湍动能的影响

Fig. 16 Effect of pulsating frequency on turbulent kinetic energy

2.3 响应面法及变量设计

响应面法(RSM)^[31]是综合数学和统计技术方法,建立自变量和因变量之间的数学模型。RSM的第一步是找到接近真实关系的合适近似值,常见的形式是低阶多项式(一阶或二阶)。当一阶模型由于变量和曲面曲率的相互作用导致拟合不足时,二阶模型可以显著改善优化过程。一般二阶模型定义为

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i m_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} m_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} m_i m_j \quad (16)$$

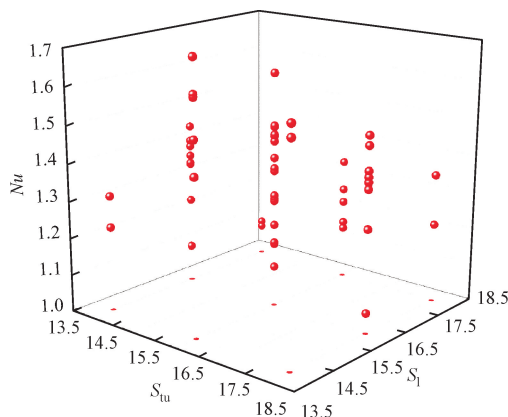
式中: m_i 和 m_j 是设计变量; a 是调优参数; a_0 是模型截距; n 是参数的个数,在本例中是5。Box-Wilson中心复合设计,通常也称为“中心复合设计”或BBD,是RSM中帮助用户定义因子水平的选项之一^[32]。表1给出了BBD试验设计方法计算得到的代表性结果。

对脉动流工况对应的稳态流动进行仿真,并计算了 Nu ,以量化传热强化程度。由图17可见,所有工况均有不同程度的传热性能提升,范围为1.05~1.70,证明脉动流的引入有效强化了传热。

表1 试验方案

Table 1 Schemes of the experiments

方案	$S_t \cdot D^{-1}$	$S_l \cdot D^{-1}$	Pe	A	f/Hz	Nu
1	1.8	1.8	150	0.5	5	10.377
2	1.4	1.6	150	0.5	5	12.811
3	1.8	1.6	100	0.3	10	6.788
4	1.8	1.6	150	0.5	15	9.479
5	1.6	1.8	150	0.3	10	10.146
6	1.4	1.4	150	0.5	15	13.697
7	1.8	1.6	100	0.7	10	9.247
8	1.8	1.8	150	0.5	15	9.332
9	1.6	1.4	150	0.7	10	12.321
10	1.6	1.6	150	0.5	10	12.072
11	1.4	1.6	100	0.3	10	9.286
12	1.6	1.4	150	0.3	10	13.958
13	1.6	1.8	150	0.7	10	11.847
14	1.4	1.6	150	0.5	15	11.399
15	1.8	1.6	150	0.5	5	10.277
16	1.8	1.4	150	0.5	5	10.854
17	1.4	1.8	150	0.5	15	11.122
18	1.4	1.8	150	0.5	5	11.273
19	1.4	1.4	150	0.5	5	12.819
20	1.8	1.4	150	0.5	15	11.085

图17 Nu 分布Fig. 17 Distribution of dimensionless Nu number

2.4 响应面分析

基于BBD结果,考虑到经典传热计算关联式表达形式,自变量传递函数表示为 $Y(x) = e^x$,因此自变量表示为 $Y(x) = \ln x$ 转换形式,引入 $10^{-3} v_s$ (v_s 为声速)将频率无量纲化以保证关联式无量纲统一性,使用RSM方法拟合得到的关联式为

$$\ln Nu = -0.320752 + 0.647868 Pe_T - 0.777915 \left(\frac{S_t}{D} \right)_T - 1.93402 \left(\frac{S_l}{D} \right)_T +$$

$$0.427447A_T - 1.92164f_T - 0.222507Pe_TA_T + \\ 0.279308Pe_Tf_T + 1.80122\left(\frac{S_l}{D}\right)_T A_T + \\ 2.72712\left(\frac{S_l}{D}\right)_T^2 - 0.226283f_T^2 \quad (17)$$

式中:下标 T 表示各参数的转换形式。

对等式两边进行反对数变换,变换过程中 $f_T = \ln\left(\frac{fD}{10^{-3}v_s}\right)$, 传递函数将由自然对数形式转换为标准形式

$$Nu = e^{-0.320752Pe^{0.647868-0.222507\ln A+0.279308\ln[fD/(10^{-3}v_s)]} \cdot \\ \left(\frac{S_l}{D}\right)^{-0.777915} \left(\frac{S_l}{D}\right)_T^{-1.93402+1.80122\ln A+2.72712\ln(S_l/D)} A^{0.427447} \cdot \\ \left(\frac{fD}{10^{-3}v_s}\right)^{-1.92164-0.226283\ln[fD/(10^{-3}v_s)]} \quad (18)$$

图 18 为回归模型中得到的预测值与仿真值对比,可以看出所有数据点的预测误差不超过 8%。

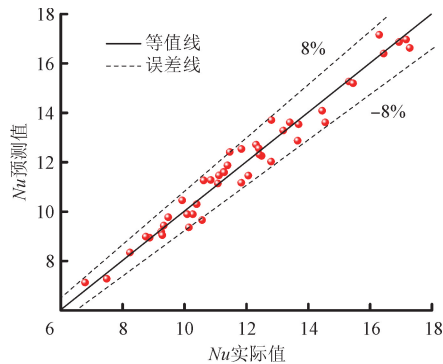


图 18 响应面回归模型中实际值和预测值的比较

Fig. 18 Comparison of actual and predicted values in response surface regression models

表 2 给出了基于实验数据得到的响应面模型的分方差分析结果。

表 2 方差分析

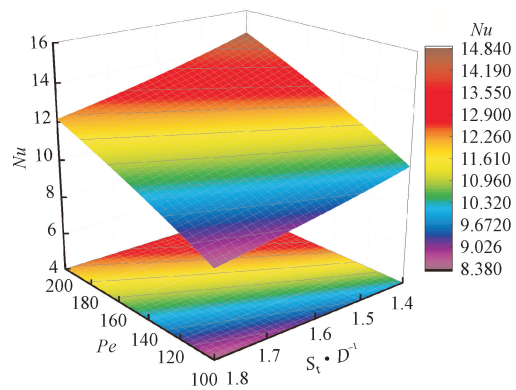
Table 2 Variance analysis

方差来源	平方和	均方	F	P
模型	2.290 0	0.229 2	88.37	<0.000 1
Pe_T	0.018 0	0.018 0	6.94	0.011 4
$(S_l D^{-1})_T$	0.234 2	0.234 2	90.27	<0.000 1
$(S_l D^{-1})_T$	0.015 8	0.015 8	6.07	0.017 4
A_T	0.060 8	0.060 8	23.46	<0.000 1
f_T	0.045 9	0.045 9	17.69	0.000 1
Pe_TA_T	0.018 9	0.018 9	7.29	0.009 6
Pe_Tf_T	0.028 2	0.028 2	10.86	0.001 9
$(S_l D^{-1})_T A_T$	0.058 9	0.058 9	22.69	<0.000 1
$(S_l D^{-1})_T^2$	0.022 9	0.022 9	8.84	0.004 6
f_T^2	0.047 3	0.047 3	18.22	<0.000 1

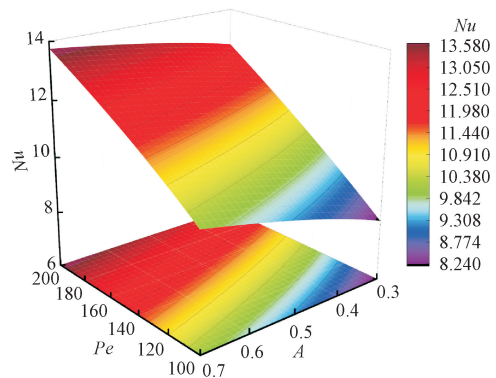
可以看出,5 个影响因素均为显著项,存在 3 个交互项和 2 个二次项。主效应中横向间距的影响最显著,流向间距的影响较小但仍然有着显著意义。而交互项和二次项的显著性则提示变量间存在着非线性和耦合效应。

2.5 参数交互作用分析

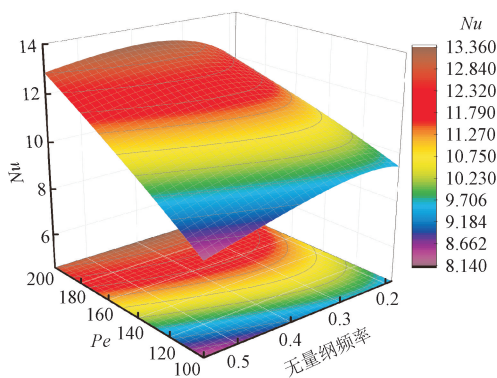
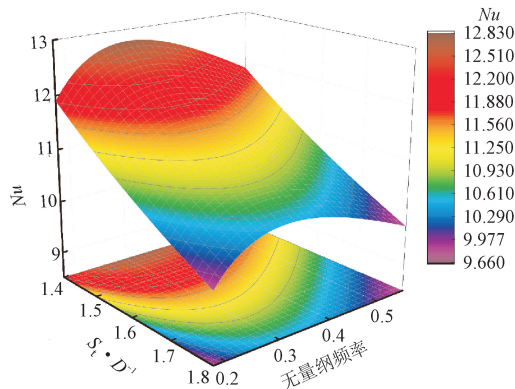
响应面分析过程中除目标交互分析参数外的其他参数均固定为中间值,以消除其变化对 Nu 的影响。图 19 为 Pe 与其余关键参数之间的响应面交互作用对 Nu 的影响。流向间距与横向间距变化类似,因此只给出了横向间距与 Pe 的交互作用。 Pe 在各参数组合中均表现为正相关主导因素,其值的增大可以显著提升传热性能。横向节径比和脉动振幅的影响相对平缓,响应面展现出线性特征;而频率显示出明显的非线性特征和,表明其对传热具有较强调节作用,且存在明显的最优区间。可以发现,横向节径比减小 Nu 线性增加,脉动振幅的增加也强化了传热。此外,随着 Pe 的增大,最佳频率逐渐增大,低频和高频出现的传热下降是由于低频率时湍流提升有限和高频率遏制了二次流。



(a) Pe 与横向节径比



(b) Pe 与脉动振幅

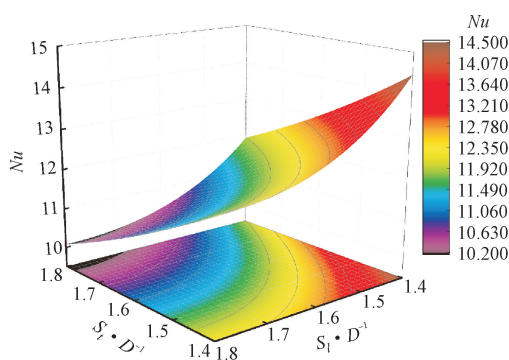
(c) Pe 与脉动频率图 19 Pe 与其余参数交互作用响应面Fig. 19 Response surface of Pe number interacting with different parameters

(c) 横向节径比与脉动频率

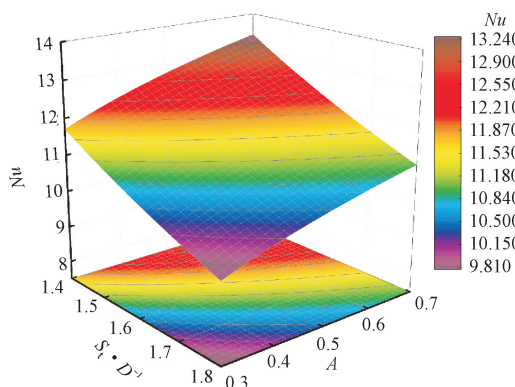
图 20 横向节径比与不同参数交互作用响应面

Fig. 20 Response surface for the interaction between transverse pitch ratio and different parameters

图 20 为管束间距与不同参数的交互作用对 Nu 的影响。图 21(a)中,横向节径比减小时 Nu 增加,且变化斜率增加,表明管间距较小时不同温度的液态金属混合更为强烈,有效地增强了金属内部的对流传热。图 20(b)中较小的脉动振幅和较大的间距产生较低的 Nu 。图 20(c)中最大 Nu 对应于 10 Hz 左右的脉动频率。总体来看,液态金属高热导特性使得边界层极易受到扰动增强,合理匹配管间距与脉动参数是实现传热优化的关键。



(a) 横向节径比与流向节径比



(b) 横向节径比与脉动振幅

2.6 关联式预测性能对比

图 21 给出与强迫对流相关的关联式对本文数据的预测结果。Grimison^[33]考虑了强迫对流,Wu等^[21]是根据流体脉动流过管束的实验结果得到的拟合公式,预测结果误差较大,表明普通工质脉动流关联式无法合理预测液态金属工况。赵后剑等^[34]和 Dwyer^[35]分别根据仿真和实验得到了液态金属横掠管束的关联式,发现两者预测结果均为单值,这是由于他们只考虑了 Pe 范围而没有考虑脉动增加的传热增加导致。约 50% 的数据集在本文关联式预测 25% 的误差范围以内,说明本文关联式在一定程度上能够实现液态金属实验结果的预测。总的来说,本文提出的关联式可以保证 Nu 预测值与计算值误差在 8% 以内。

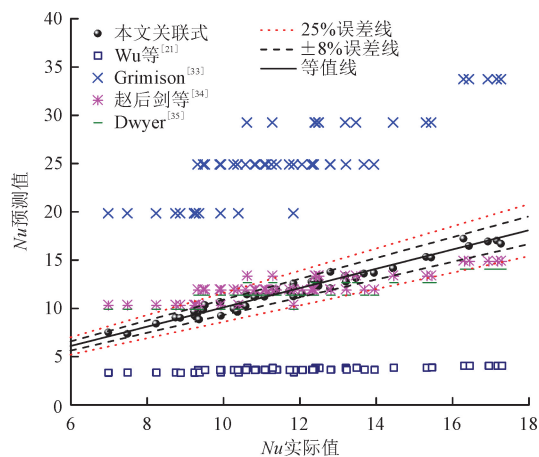


图 21 不同关联式预测结果对比

Fig. 21 Comparison of different correlation prediction results

3 结 论

(1) 耦合 $k-k_1-\omega$ 与 Kays 湍流普朗特数模型模拟液态金属脉动横掠管束, Nu 偏差低于 10%; 矩形槽脉动流实验验证进一步表明, 该模型适用于表征存在流动分离与逆压梯度的流动。

(2) 施加脉动后, 管束传热性能 Nu 与 Pe 和脉动振幅呈正相关, 而与横向间距和流向间距呈负相关, 而当频率超过 12.5 Hz 或低于 7.5 Hz 均不利于传热, 这一现象源于涡演变与脉动速度的耦合作用。

(3) 脉动流的引入改变了管束间涡的变化, 进而影响了流场湍流强度, 横向间距和脉动振幅具有较大显著性, 这与湍流强度的变化相吻合, 提出的 Nu 响应面预测关联式预测误差不得超过 8%。

研究揭示了被动和主动技术耦合带来的传热强化, 为换热器传热强化提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] 白凯杰, 江志铭, 李运泉. 管壳式换热器优化设计以及工质研究进展 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(1): 60-62.
BAI Kaijie, JIANG Zhiming, LI Yunquan. Shell and tube heat exchanger design optimization and work quality research progress [J]. Petro & Chemical Equipment, 2025, 28(1): 60-62.
- [2] 杨佳琪, 曹元福, 姜涛, 等. 车载紧凑型换热器高效轻质的性能优化研究 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(1): 138-145.
YANG Jiaqi, CAO Yuanfu, JIANG Tao, et al. Study on optimization of high efficiency and light weight performance for vehicle-mounted compact heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(1): 138-145.
- [3] 陈伟雄, 梁铁波, 姜超, 等. 空间堆氦氙布雷顿循环研究进展 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(11): 46-57.
CHEN Weixiong, LIANG Tiebo, JIANG Chao, et al. Advances in the study of He-Xe Brayton cycle in space reactors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(11): 46-57.
- [4] ZHAO Chuangyao, QI Di, JI Wentao, et al. A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 202: 117869.
- [5] MOHARANA S, BHATTACHARYA A, DAS M K. A critical review of parameters governing the boiling characteristics of tube bundle on shell side of two-phase shell and tube heat exchangers [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 29: 101220.
- [6] FOUST O J. Sodium-NaK engineering handbook [M]. New York: Gordon and Breach, 1972.
- [7] KLINKRAD H. Space debris: models and risk analysis [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] AOTO K, DUFOUR P, YANG Hongyi, et al. A summary of sodium-cooled fast reactor development [J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, 77: 247-265.
- [9] CHELLAPANDI P, VELUSAMY K. Thermal hydraulic issues and challenges for current and new generation FBRs [J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, 294: 202-225.
- [10] MIKITYUK K. Heat transfer to liquid metal: review of data and correlations for tube bundles [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(4): 680-687.
- [11] 孙琦琦, 张昊春, 孙梓健, 等. 液态金属钠在空间堆芯单通道中流动传热特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2024, 45(5): 1484-1489.
SUN Qiqi, ZHANG Haochun, SUN Zijian, et al. Study of the flow and heat transfer characteristics of liquid sodium metal in a single channel for space core [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(5): 1484-1489.
- [12] LU Qi, LIU Yu, DENG Jian, et al. Review of interdisciplinary heat transfer enhancement technology for nuclear reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 159: 108302.
- [13] BORISHANSKII V M, GOTOVSKII M A, FIRSOVA É V. Heat transfer to liquid metals in longitudinally wetted bundles of rods [J]. Soviet Atomic Energy, 1969, 27(6): 1347-1350.
- [14] HOE R J, DROPKIN D, DWYER O E. Heat-transfer rates to crossflowing mercury in a staggered tube bank; I [J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1957, 79(4): 899-905.
- [15] CESS R D, GROSH R J. Heat transmission to fluids with low Prandtl numbers for flow through tube banks [J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1958, 80(3): 677-681.
- [16] ABRAMOV A G, LEVCHENYA A M, SMIRNOV E M, et al. Numerical simulation of liquid metal turbulent heat transfer from an inline tube bundle in cross-flow [J]. St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2015, 1(4): 356-363.

- [17] XIE Xiaoyang, ZHAO Houjian, LI Xiaowei, et al. Numerical investigation on heat transfer characteristics of liquid metal cross flow over tube bundles [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 180: 109465.
- [18] 鲜成卓, 赵剑刚, 李海阳, 等. 新型高效紧凑式换热器仿真及热力分析 [J]. *热能动力工程*, 2024, 39(3): 142-149.
- XIAN Chengzhuo, ZHAO Jiangang, LI Haiyang, et al. Simulation and thermal analysis of a new efficient compact heat exchanger [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2024, 39(3): 142-149.
- [19] YAN B H. The thermal hydraulic phenomenon in tight lattice bundles: a review [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, 126: 330-349.
- [20] WANTHA C. Effect and heat transfer correlations of finned tube heat exchanger under unsteady pulsating flows [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 99: 141-148.
- [21] WU Zhenjing, YOU Shijun, ZHANG Huan, et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148: 119125.
- [22] FAROUK N, ABED A M, SINGH P K, et al. Thermal performance analysis of artificially roughened solar air heater under turbulent pulsating flow with various wave shapes [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 41: 102664.
- [23] HAIBULLINA A, KHAIRULLIN A, BALZAMOV D, et al. Local heat transfer dynamics in the in-line tube bundle under asymmetrical pulsating flow [J]. *Energies*, 2022, 15(15): 5571.
- [24] HU Qingxiang, WANG Jie, GAO Yue, et al. Numerical study of thermal-hydraulic and dust-deposition of tube bundles in an intermediate heat exchanger [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(63): 27187-27198.
- [25] MOOSAVI A, LJUNG A L, LUNDSTRÖM T S. A comparative study on thermo-fluid characteristics of free and wall-bounded cross-flow heat exchangers [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 40: 101746.
- [26] KAYS W M. Turbulent Prandtl number: where are we? [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(2): 284-295.
- [27] JAEGER W. Heat transfer to liquid metals with empirical models for turbulent forced convection in various geometries [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 319: 12-27.
- [28] KALISH S, DWYER O E. Heat transfer to NaK flowing through unbaffled rod bundles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1967, 10(11): 1533-1558.
- [29] ZONTUL H, ŞAHİN B. Experimental investigation of convective heat transfer performance and hydrodynamics of pulsating flow through the rectangular grooved channel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 141: 110796.
- [30] JIANG Hantao, NIU Yafeng, YANG Peng, et al. Effect of pulsation parameters on the spatial and temporal variation of flow and heat transfer characteristics in liquid metal cross flow the in-line tube bundle [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 219: 124871.
- [31] 王伟云, 王阔, 李学振, 等. 流动水溶液体系中Na-LSX型分子筛锂离子交换度的响应面优化 [J]. *能源化工*, 2024, 45(2): 27-32.
- WANG Weiyun, WANG Kuo, LI Xuezhen, et al. Response surface optimization of lithium ion exchange degree of Na-LSX molecular sieves in flowing aqueous solution system [J]. *Energy Chemical Industry*, 2024, 45(2): 27-32.
- [32] CHEN W H, CHANG Cheming, MUTUKU J K, et al. Analysis of microparticle deposition in the human lung by Taguchi method and response surface methodology [J]. *Environmental Research*, 2021, 197: 110975.
- [33] GRIMISON E D. Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1937, 59(7): 583-594.
- [34] 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 Houjian, XIE Xiaoyang, GAO Weikai, 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.
- [35] DWYER O. Recent developments in liquid-metal heat transfer [EB/OL]. (1965-12-08) [2025-07-18]. <https://www.osti.gov/servlets/purl/4541057>.

(编辑 元列梅)