

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.07.006

引用格式:杨国耀,孙悦,单智超,等.振荡流下旋转圆柱涡致振动与传热特性研究[J].重庆大学学报,2025,48(7): 62-74.



振荡流下旋转圆柱涡致振动与传热特性研究

杨国耀¹,孙悦¹,单智超^{1,2},李祥^{1,2},丁林¹

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院,四川 绵阳 610500)

摘要:基于海洋深层流的特点,数值模拟了振荡来流条件下不同折减速度 U^* 和旋转速率 α 对圆柱振动响应与传热特性的影响。结果表明,圆柱的 $x(A_{\text{peaks},x}^*)$ 和 y 方向($A_{\text{peaks},y}^*$)的振幅比存在多个极值点,且随着 α 增加, $A_{\text{peaks},x}^*$ 的最大值增大,其对应的 U^* 减小。位移和升阻力系数随着 α 和 U^* 变化表现出显著差异, x 方向的时间平均位移随 U^* 的增加而增大, y 方向平均位移和升阻力系数均随 α 的增大而增大。圆柱的运动轨迹在 $0 \leq \alpha \leq 1.0$ 时,无明显规律;在 $\alpha=1.5$ 时,为圆环状。随着 U^* 增加,圆柱平均努塞尔数增大,局部努塞尔数分布逐渐成圆形。随着 α 增大,涡旋脱落模式由2S转变为单排排列,尾迹逐渐拉伸并趋于U型模式。温度场结果表明,前驻点热交换较弱,后驻点热交换和局部传热效率显著提升。

关键词:涡致振动;振荡流;换热特性;旋转圆柱;努塞尔数

中图分类号:TB126;TK124

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)07-062-13

Study on vortex-induced vibration and heat transfer characteristics of rotating cylinders under oscillatory flow

YANG Guoyao¹, SUN Yue¹, SHAN Zhichao^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, DING Lin¹

(1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan, 610500, P. R. China.)

Abstract: Considering the characteristics of deep ocean currents, this study numerically investigates the effects of reduced velocity (U^*) and rotational speed (α) on the vortex-induced vibration (VIV) response and heat transfer performance of a circular cylinder subjected to oscillatory inflow. The results reveal multiple extrema in the peak amplitude ratios in both the streamwise ($A_{\text{peaks},x}^*$) and transverse ($A_{\text{peaks},y}^*$) directions. As α increases, the maximum $A_{\text{peaks},x}^*$ increases, while the corresponding U^* decreases. Significant variations are observed in cylinder displacement and lift/drag coefficients with changes in α and U^* . The time-averaged displacement in the x -

收稿日期:2025-01-16

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2024NSCQ-MSX0463);中国航发四川燃气涡轮研究院国家财政稳定支持项目。

Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2024NSCQ-MSX0463), and National Financially Stable Support Project of Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China.

作者简介:杨国耀(1999—),女,硕士研究生,主要从事流致振动控制及利用研究,(E-mail)2813132569@qq.com。

通信作者:丁林,男,博士,教授,(E-mail)linding@cqu.edu.cn。

direction increases with U^* , whereas the average displacement in the y -direction and the lift coefficient both increase with α . The motion trajectory of the cylinder lacks a distinct pattern within the range of $0 \leq \alpha \leq 1.0$, but becomes circular at $\alpha = 1.5$. With increasing U^* , the average Nusselt number increases, and the distribution of local Nusselt numbers gradually forms a circular pattern. As α increases, the vortex shedding transitions from a 2S pattern to a single-row configuration, with the wake stretching into a U-shaped structure. Temperature field analysis reveals weaker heat exchange at the front stagnation point, while heat transfer and local thermal efficiency at the rear stagnation point are significantly enhanced.

Keywords: vortex-induced vibration; oscillatory flow; heat transfer characteristics; rotating cylinder; Nusselt number

钝体结构包括圆柱体、椭圆和矩形,在工程流体力学中,“涡致振动(vortex-induced vibration, VIV)”是钝体结构与外部流体的周期性不规则运动相互作用而引起的结构运动。VIV产生的主要原因是边界层在结构曲率变化处分离,产生旋涡流改变表面压力分布。非对称的旋涡流导致钝体两侧升力不同,引发横向运动,进而改变旋涡流的性质^[1]。尾涡流由1个交替的涡道组成,是剪切层、基压、扩散和旋涡耗散以及远尾流之间相互作用的结果^[2]。引起涡致振动的钝体结构在工程中常见,如热交换器、管道、海上钻井平台等^[3-6]。圆柱是研究VIV工作中最典型的结构。已有文献分析了圆柱在低速度、阻尼比和雷诺数范围内的涡致振动,以研究圆柱的位移振幅、尾迹模式和传热^[7]。Yang等^[8]对双自由度等温圆柱VIV强迫对流换热特性数值模拟,发现对于VIV中的圆柱体,位移和圆柱的 Nu_A 随时间周期性变化。由于圆柱的振动,最大 Nu_t 对应的位置偏离了前驻点。与固定圆柱体和单自由度VIV圆柱体相比, Nu_A 分别增加了5.73%和2.46%。Ding等^[9]研究了上游固定圆柱对下游圆柱涡致振动及换热特性的影响。结果表明,下游振动圆柱在 U^* 较小时,传热减弱。随着 U^* 增加,VIV将逐渐增强热传递。Ali等^[10]通过数值研究探讨了圆柱体在另一圆柱体尾流中的传热特性以及尾流引起的振动。观察到2S和C涡旋脱落模式,在少数情况下出现稳定流动和混沌模式。随着 S/D 的增加,上下游圆柱的平均 Nu 都会随着圆柱对另一个圆柱影响的减小而变化。Khan等^[11]研究了3个串列圆柱直径差对VIV和换热的影响,发现下游圆柱周围的流动和热传递在很大程度上取决于直径减小比,且随着直径减小比的增加,流动和热传递的强度增强。

旋转作为一种典型的非对称手段,对揭示流体动力学与结构相互作用具有深远影响。圆柱可以经历主动和被动旋转。主动旋转受稳定/非稳定旋转速度的控制,被动旋转是由周围流动引起,也称为流致旋转(flow-induced rotation, FIR)。Bao等^[12]通过数值模拟研究了旋转圆柱引起的尾流模式变化,观察到圆柱轨迹从狭窄的椭圆形变化为圆形,随后变为扁平的椭圆形。Li等^[13]分析了双自由度旋转圆柱在近壁处的涡致振动,随着间隙比的增加,壁面效应减弱。在不同的旋转速率和降低的流速下,识别出了5种尾流模式。Chen等^[14]对低雷诺数下的粗糙旋转圆柱体展开了研究,发现引入表面粗糙度和旋转运动可以有效减少VIV响应。此外,粗糙度增大时,时间平均位移也变大。Liu等^[15]研究了轴向比和质量比变化的自由旋转椭圆形圆柱体的横向振动,发现增加轴向比或减少质量比会导致更宽的同步区域和显著的不稳定旋转。在该区域之外,仅在初始位置附近发生小幅度旋转,横向振动类似于非旋转椭圆形圆柱体。Farouk等^[16]通过数值模拟和实验研究了旋转等温圆柱体周围的混合对流。观察旋转圆柱体产生的热传递特性和流动模式的定性和定量差异,指出了旋转参数 σ (Grashof数/旋转雷诺数的平方)对流动和换热的影响。结果表明,传热特性与固定圆柱存在明显差异。Ma等^[17-18]在大直径水平旋转圆柱体上进行了实验,观察到随着转速的增加,尾涡向旋转方向偏转。随着雷诺数的增加,传热模式从纯自然对流变为混合对流,随后变为强制对流,在较高的速度下,传热可以被视为纯粹的旋转强制对流。

已有的研究主要集中在均匀来流下旋转柱体的VIV^[19-22]。实际海洋工程中,结构常暴露在非均匀来流条件下,研究非均匀振荡来流对旋转圆柱涡致振动的影响具有重要意义。Rehman等^[23]研究了振荡流中,不同旋转速率下圆柱的旋转对VIV的影响,结果表明,旋转对 y 方向振动的影响比对 x 方向振动的影响更为显著,旋转圆柱的折减速度锁定范围比非旋转圆柱更广。Sahu等^[24]使用线性稳定性分析和直接时间积分方法研究

了在层流中具有双自由度的旋转圆柱体的流致振动(flow-induced vibration, FIV)。结果发现,随着脱落的涡旋数量的增加,圆柱体的振动幅度增大,并且增加 Re 数会导致更多的涡旋脱落模式。

综上所述,实际应用中振荡来流条件较为常见,但针对旋转圆柱在振荡来流下的涡致振动影响的相关研究较少。因此,文中在振荡流动条件下,研究了旋转圆柱在 x 和 y 方向上的涡致振动与换热特性,分析了旋转圆柱的流体动力学特性以及尾涡温度场分布随 U^* 和 α 的变化规律。

1 物理模型

文中所采用的模型如图1所示。其中,圆柱直径 $D=0.03\text{ m}$,质量比 $m^*=6$,在振荡流中流体力作用下,可在 x 和 y 方向上自由振动。为简化计算,振动系统采用双自由度 M-C-K 模型,弹簧刚度为 K ,系统阻尼为 C ,在 x 和 y 方向上分别为 K_1 和 K_2 , C_1 和 C_2 ; 其中, $K_1/K_2=52$, $C_1/C_2=0.1$ 。圆柱以固定角速度 Ω 逆时针旋转, Ω 取决于圆柱的 α ($\alpha=D|\Omega|/(2U)$),无量纲折减速度 U^* 定义为 $U^*=U/(D \times f_n)$ 。

为了模拟实际海洋中的流体状态,采用振荡流作为来流条件。振荡流描述为

$$U(t) = U[1 + A \cos(2\pi f_g t + \varphi)], \quad (1)$$

式中: U 为均匀来流的流速; f_g 为振荡频率, $f_g = \lambda U/D$, 文中设定振荡幅值 $A=0.2$, 振荡因子 $\lambda=0.1$ 。

2 数值计算方法

2.1 控制方程

2.1.1 流体力学控制方程

文中采用 N-S 方程组来描述不可压缩黏性流体的流场特性。因此,对于不可压缩流体的非定常流动,其控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\bar{u}'_i \bar{u}'_j), \quad (3)$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = -p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为对应方向的直角坐标分量; u 为 x 方向的速度; c_v, ρ, p 分别代表定容比热容、流体密度和压力。 $C_\mu=0.09$, 湍流动能 $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ 。

2.1.2 动力学方程

圆柱体的 VIV 采用 M-C-K 振子模型建模,忽略系统结构阻尼的影响,简化后的运动方程为

$$m_{\text{system}} \ddot{x} + K_1 x = F_{\text{fluid}, x}, \quad (5)$$

$$m_{\text{system}} \ddot{y} + K_2 y = F_{\text{fluid}, y}, \quad (6)$$

式中: \ddot{x} 和 \ddot{y} , \dot{x} 和 \dot{y} , x 和 y 分别表示 x 和 y 方向上的无量纲加速度、速度和无量纲位移; $F_{\text{fluid}, x}$ 和 $F_{\text{fluid}, y}$ 分别为 x 和 y 方向上的周期性流体力。

$$Nu_L = \frac{hD}{\lambda}, \quad (7)$$

$$Nu_s = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Nu_L d\theta, \quad (8)$$

$$Nu_A = \frac{1}{\tau_c} \int_0^{\tau_c} Nu_s d\tau, \quad (9)$$

式中: Nu_L , Nu_s 和 Nu_A 分别代表恒温圆柱上的局部、面平均和平均努塞尔数; h 为对流换热系数; λ 为导热系数; τ_c 代表稳定振动周期。

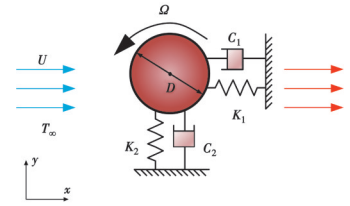


图1 物理模型

Fig. 1 Physical model

2.2 计算区域

图2为文中所使用的计算域,横向上圆柱位于计算区域中心,可在 x 和 y 方向自由振动。入口边界到圆柱中心的距离为 $8D$, $L=20D$,以保证尾流不受出口边界的影响,左右分别为速度入口和压力出口,顶部及底部为无流动边界,圆柱表面满足无滑移条件。

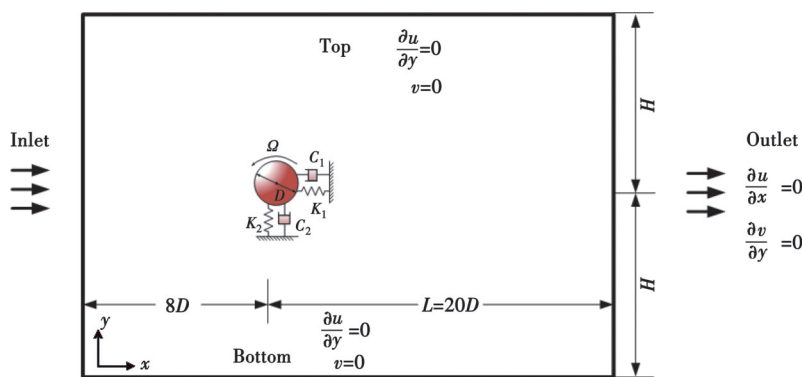


图2 计算区域

Fig. 2 Schematic diagram of the computational region

2.3 网格划分和无关性验证

图3为计算区域,整体采用二维结构化网格,同时使用嵌套网格技术,以避免由网格变形导致负体积问题。为了获得最优的网格设置,以保障计算结果的精度并使计算时间保持在合理范围内,对网格密度和计算域大小进行了验证。在 $U^*=5$, $Re \approx 3\ 000$,圆柱无旋转时完成。网格密度由最小网格尺寸(Δh)表示。由于2套网格的密度一致,可以同时进行验证。计算域被固定为 $(8D+20D) \times 30D$ 。采用 $D/100$ 、 $D/50$ 和 $D/25$ 3种网格尺寸对区域进行离散。计算结果如表1所示。对比关键参数($A_{x,rms}/D$ 、 $A_{y,rms}/D$ 、 $C_{l,rms}$ 、 $C_{d,mean}$)发现, $D/50$ 与更精细网格 $D/100$ 之间的误差最大不超过1.2%,综合考虑,选取最优 Δh 为 $D/50$ 作为计算网格。计算域尺寸与课题前期工作相同^[25]。

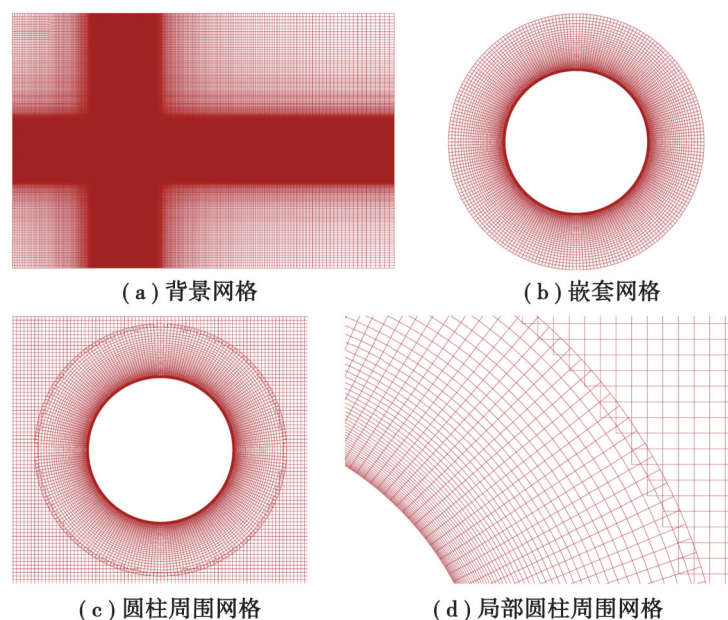


图3 计算网格

Fig. 3 Computational mesh

表 1 网格无关性验证

Table 1 Mesh independence study

最小网格尺寸(Δh)	前景网格+背景网格	$A_{x,rms}/D$	$A_{y,rms}/D$	$C_{l,rms}$	$C_{d,mean}$
$D/100$	161 412+53 677	0.008 6	0.426 6	0.253 3	1.700 1
$D/50$	12 735+38 652	0.008 7	0.431 4	0.242 4	1.699 8
$D/25$	24 580+6 638	0.008 9	0.432 1	0.258 3	1.701 0

2.4 模型验证

如图 4 所示,数值模拟了质量比 $m^*=2$,雷诺数 $Re=150$,普朗特数 $Pr=7$ 的单自由度非旋转圆柱的 Nu_A 随 U^* 变化的关系,并与 Izadpanah 等^[26] 的数值模拟结果进行了对比。结果表明, Nu_A 随着 U^* 的增加呈现先增大后减小的趋势,文中的数值模拟结果与文献[26]一致,在折减速度 $U^*=4$ 时,达到了 Nu_A 的最大值。这一结果验证了模型的准确性和可靠性。

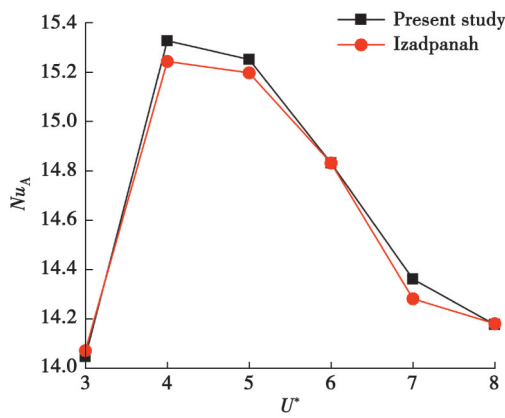


图 4 不同 U^* 下振动圆柱的 Nu_A

Fig. 4 Nu_A of a vibrating cylinder under different U^*

3 结果与讨论

3.1 振幅响应

图 5 为不同 α 下圆柱的振幅比 $A^*_{peaks,x}$,由图可知, $A^*_{peaks,x}$ 总体呈先上升后下降的趋势,且 α 越大,圆柱的 $A^*_{peaks,x}$ 峰值越大,最大值为 $\alpha=1.5$ 时, $A^*_{peaks,x}$ 值达到 0.9。对于非旋转圆柱, $A^*_{peaks,x}$ 总体缓慢上升,在 $U^*=9$ 时,达到极值点,之后持续减小。而旋转圆柱在 $U^*=5$ 后,均出现快速增长的趋势,并在达到第 2 个极值点后迅速降低。多个极值点存在的主要原因是振荡来流的周期性变化及复杂的来流形式,使得圆柱的受力情况不断波动,导致振幅响应出现多个局部极值。此外,旋转速率(α)的不同影响流动分离、涡旋脱落模式及流体力分

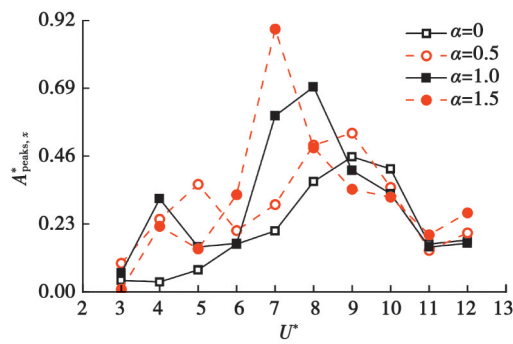


图 5 不同 α 下圆柱的 $A^*_{peaks,x}$

Fig. 5 $A^*_{peaks,x}$ of the cylinder under different α

布,使得圆柱在不同 U^* 下的 $A_{\text{peaks},x}^*$ 呈现复杂的变化趋势。特别是较高的旋转速率会增强圆柱的升力效应,使振动响应更加非线性,进一步导致多个极值点的出现。在高折减速度下,无论是旋转圆柱还是非旋转圆柱,圆柱的 $A_{\text{peaks},x}^*$ 相差不大,且逐渐趋于平稳。

振荡来流条件下旋转圆柱 $A_{\text{peaks},y}^*$ 的变化如图 6 所示。由图可知,与 x 方向不同,不同 α 的圆柱 $A_{\text{peaks},y}^*$ 均存在多个极值。 U^* 较低时,圆柱的 $A_{\text{peaks},y}^*$ 随 U^* 的增加而升高。在此情况下,极值点的数值随 α 的增加逐渐降低。高 α 的圆柱 ($\alpha=1.0$ 、 $\alpha=1.5$) 均在 $U^*=7$ 时,达到第 2 个极值点,且达到峰值;而低 α 的圆柱相继在 $U^*=10$ ($\alpha=0$)、 $U^*=9$ ($\alpha=0.5$) 达到第 2 个极值点。

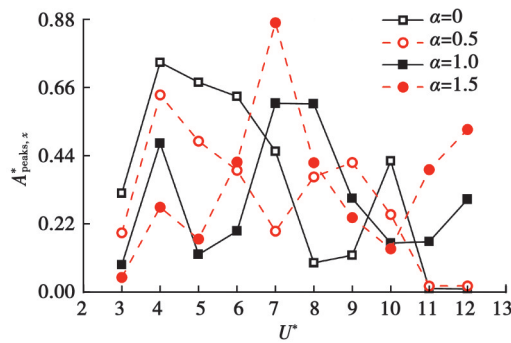


图 6 不同 α 下圆柱的 $A_{\text{peaks},y}^*$
Fig. 6 $A_{\text{peaks},y}^*$ of the cylinder under different α

3.2 时间平均位移

图 7 为不同 α 条件下的 x 方向时间平均位移 (X_{mean}/D)。可以观察到,圆柱 X_{mean}/D 不为 0,这是由于在流体力和马格努斯效应的影响下,圆柱的平衡位置会偏离初始位置。圆柱在流体力的作用下,会沿流动方向向下游移动。随着 U^* 的增加,圆柱的 X_{mean}/D 呈现出增长的趋势。在 $U^*=6$ 前,非旋转圆柱 ($\alpha=0$) 的 X_{mean}/D 变化趋势与旋转圆柱类似,低 α 的旋转圆柱的 X_{mean}/D 大于高 α ;但随着折减速度的增长,高 α 的 X_{mean}/D 会逐渐高于低 α 的圆柱,且 α 越大, X_{mean}/D 的增长速率越快,说明旋转速率的增加会增强圆柱顺流方向的位移。图 8 为圆柱沿 y 方向的时间平均位移 (Y_{mean}/D) 随 α 和 U^* 的变化。当 $\alpha=0$ 时, Y_{mean}/D 稳定在 0,表明非旋转圆柱在 y 方向的平衡位置基本不变。旋转圆柱在 y 方向的平衡位置向负 y 轴方向偏移,升力则随 α 的增加而增大 (如图 10 所示)^[27],而升力增大会导致圆柱 Y_{mean}/D 的绝对值增大。不同的 α 下,对应的 Y_{mean}/D 分别为 0.2 ($\alpha=0$)、0.6 ($\alpha=0.5$)、0.8 ($\alpha=1.0$)、0.9 ($\alpha=1.5$)。

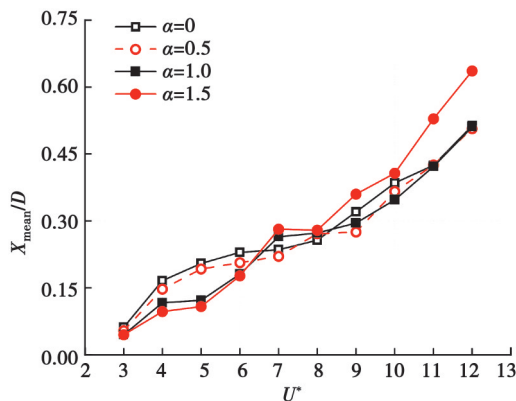


图 7 不同 α 下振荡流中圆柱的 X_{mean}/D
Fig. 7 X_{mean}/D of a cylinder in oscillating flow with different α

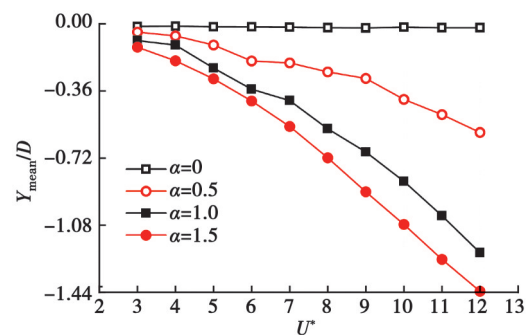


图 8 不同 α 下振荡流中圆柱的 Y_{mean}/D
Fig. 8 Y_{mean}/D of a cylinder in oscillating flow with different α

3.3 升阻力系数

图9(a)展示了不同 α 下圆柱 σ_{Cl} 随 U^* 变化的趋势。在振荡来流条件下,对于旋转圆柱,随着 U^* 的增加, σ_{Cl} 在 $3 \leq U^* \leq 4$ 的范围内急剧增大,随后在 $4 \leq U^* \leq 6$ 范围内减小,并在 $U^*=7$ 时达到第二次峰值,随后 σ_{Cl} 再次减少并逐渐趋于稳定。非旋转圆柱($\alpha=0$)则与此不同,在 U^* 增大时, σ_{Cl} 逐渐减小,且在 $3 \leq U^* \leq 5$ 时急剧下降,之后趋于平稳。需要注意的是, $\alpha=0$ 时的 σ_{Cl} 明显小于 $\alpha \neq 0$ 时。进一步分析表明,圆柱体的高振幅响应部分与 σ_c 密切相关。

如图9(b)所示,旋转圆柱体的 C_{l_mean} 绝对值明显大于 $\alpha=0$ 时的圆柱。由图可知,同一 U^* 下, C_{l_mean} 绝对值随 α 增加而增大。 $0 \leq \alpha \leq 1.0$ 时, C_{l_mean} 在 $U^*=4$ 时取得最小值,并且在 $U^* > 17$ 时, C_{l_mean} 均处于平稳。

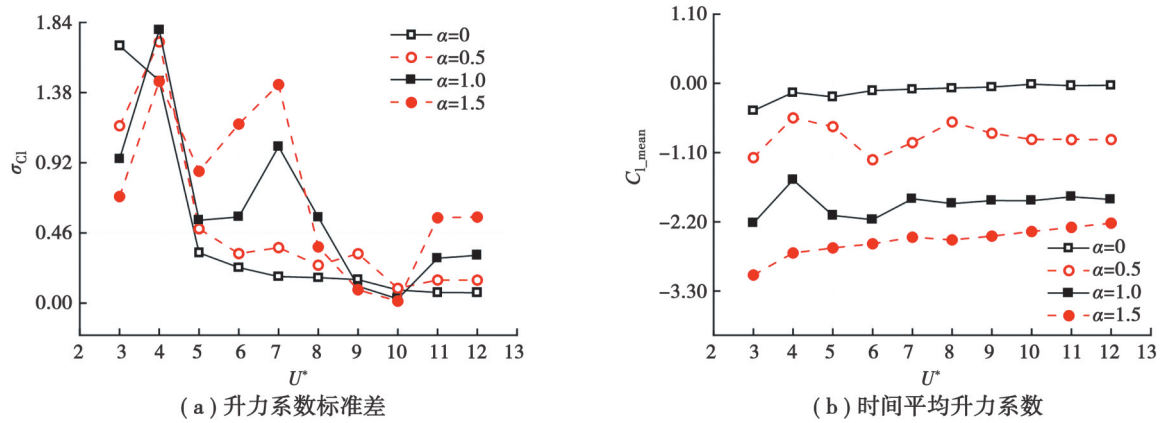


图9 不同 U^* 时升力系数

Fig. 9 Evolution of lift coefficient with reduced velocity

由图10可知,不同 α 时 C_{d_mean} 有明显的差异,但 C_{d_mean} 的峰值均出现在 $U^*=4$ 时,随着 α 的增大, C_{d_mean} 峰值逐渐减小。随着 U^* 的增大, C_{d_mean} 逐渐减小。其中,对于较高旋转速率的圆柱,会在 $U^*=5$ 后 C_{d_mean} 再次升高,而低 α 的则持续减小。表明圆柱周围流体的运动状态受 α 的显著影响, α 的变化对圆柱的 C_{d_mean} 具有显著调节作用。

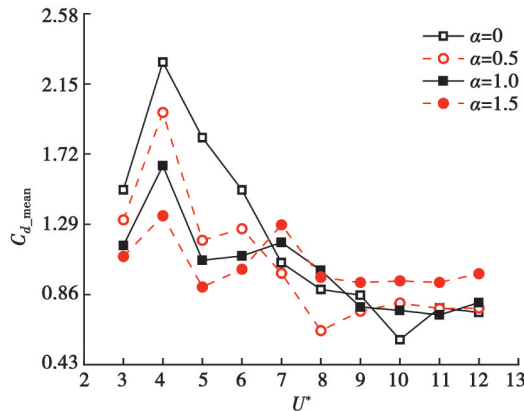


图10 不同 α 下圆柱的 C_{d_mean}

Fig. 10 C_{d_mean} of cylinder with different α

3.4 运动轨迹分析

如图11所示,不同 U^* 和 α 下,圆柱的运动轨迹有较大差异。当 $\alpha=0$ 、 $U^*=5$ 时,轨迹为“8”字形,表明 x 方向的振动频率是 y 方向的2倍,这一现象在以往的FIV研究中已被观察到^[28]。随着 U^* 的增大,轨迹发生明显变化,由 $U^*=7,9$ 时 x 方向上分布呈现镜像特征转变为 x 和 y 方向对角的对称分布。相同的 U^* 下,随着 α 的增

加,圆柱的轨迹变得更有规律,体现为 $\alpha=1.0$ 时,轨迹多呈环状,值得注意的是,在 $U^*=11$ 时,圆柱轨迹呈现水滴状,表明在低旋转速率下,圆柱的运动振荡来流影响更加显著,导致轨迹呈现更复杂的形态。

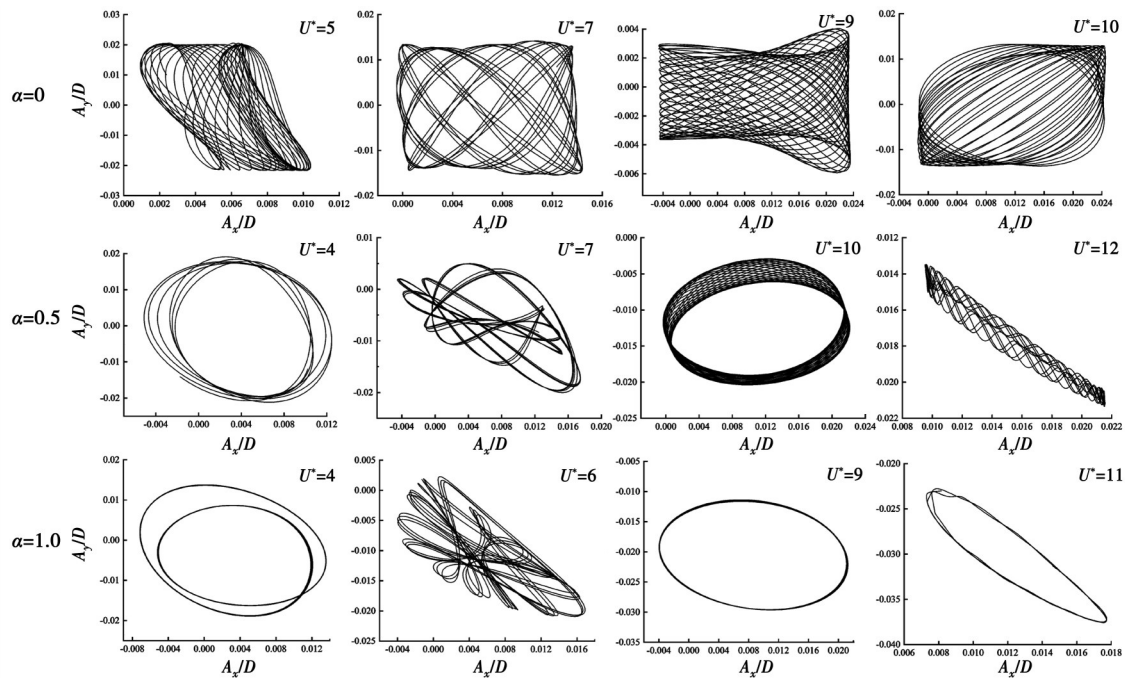


图 11 运动轨迹图 ($\alpha=0, 0.5, 1.0$)

Fig. 11 Motion trajectory ($\alpha=0, 0.5, 1.0$)

由图 12 可知,当 $\alpha=1.5$ 时,旋转圆柱的运动轨迹呈现单一闭环圆形。当 $U^*\leq 7$ 时,轨迹的圆形随着 U^* 的增大逐渐增大,最大值在 $U^*=7$ 时获得,这与振幅响应的变化趋势相一致,此时, $A_{peaks,x}^*$ 、 $A_{peaks,y}^*$ 均达到最大值。当 $U^*>7$ 时,圆柱的振幅减小,圆柱运动轨迹逐渐聚集并趋向更为紧凑的形状。

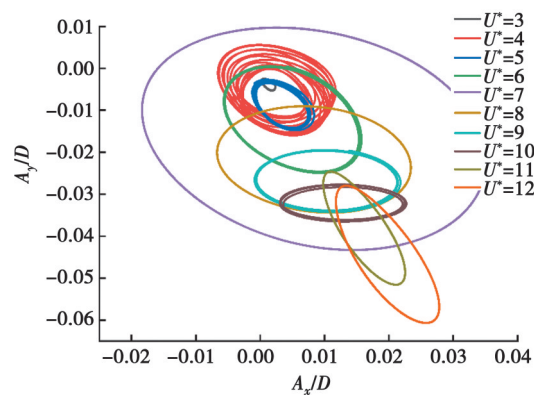


图 12 $\alpha=1.5$ 时运动轨迹图

Fig. 12 Motion trajectory for $\alpha=1.5$

3.5 换热特性分析

3.5.1 平均努塞尔数

图 13 为不同 α 下,壁面 Nu_A 随 U^* 变化的情况。由图可知,在 $3\leq U^*\leq 7$ 范围内,低 α 圆柱的 Nu_A 明显高于高 α 圆柱,然而,当 U^* 增大至 $7<U^*\leq 12$ 时,旋转速率较高的圆柱表现出更大的 Nu_A 值,表明 α 的增加能显著增强圆柱壁面的换热性能。对于相同 α 圆柱, U^* 越大,壁面 Nu_A 越大,表明通过增加 U^* 可以增强圆柱的换热强度。

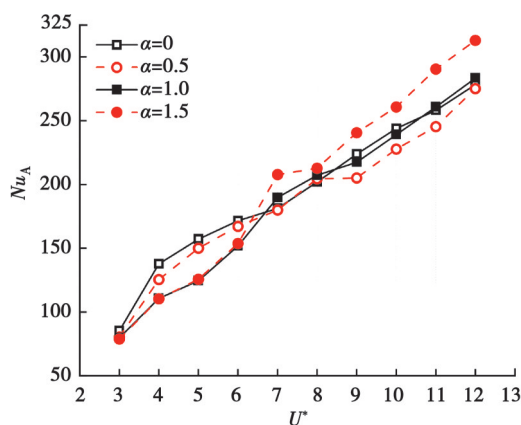
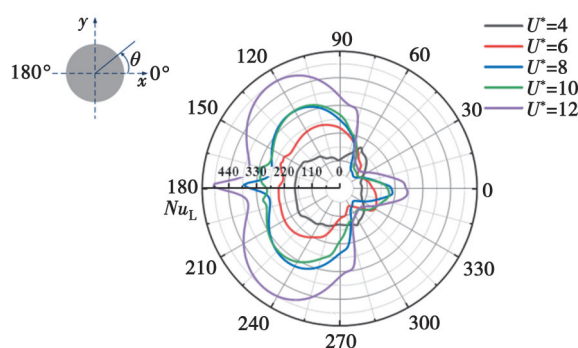
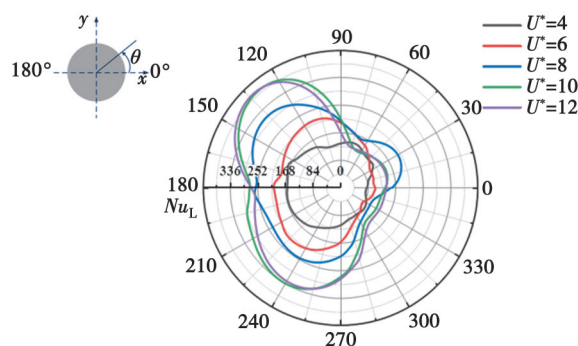


图13 平均努塞尔数

Fig. 13 The average Nusselt number

3.5.2 局部努塞尔数

图14~图17为 $U^*=4, 6, 8, 10, 12$ 时,不同 α 下的 Nu_L 分布。可以发现,后驻点周围的流动特性是决定换热效率的重要参数。具体来说,尾涡的形成和分布对流体的流动结构产生了显著影响,从而影响了热量的传递过程。图15为非旋转圆柱在不同 U^* 下的 Nu_L 分布。随着 U^* 的增大,后驻点($\theta=0^\circ$)的 Nu_L 逐渐增大,且当 $U^*=8, 12$ 时,后驻点的 Nu_L 在 $\theta=0^\circ, \theta=180^\circ$ 处呈对称分布。对比分析前后驻点的 Nu_L 变化,可以发现, Nu_L 的最大值出现在前驻点 $\theta=180^\circ$ 处。

图14 $\alpha=0$ 时局部努塞尔数Fig. 14 Local Nusselt Number for $\alpha=0$ 图15 $\alpha=0.5$ 时局部努塞尔数Fig. 15 Local Nusselt Number for $\alpha=0.5$

旋转圆柱的 Nu_L 分布如图15~图17所示,不同 α 下圆柱 Nu_L 的分布特征各异。对于 $\alpha=0.5$ 时,在 $U^*\leq 8$ 范围内,圆柱的 Nu_L 分布较为不规则,表现为 U^* 越高, Nu_L 分布越复杂。表明在低 α 时,流体的换热过程具有较大的不稳定性。 U^* 较大时, Nu_L 的变化与低 U^* 有显著差异,表现为 U^* 越高, Nu_L 分布越一致,当旋转速率提高至 $\alpha=1.0$ 时, U^* 越大,后驻点的 Nu_L 越大。逆时针旋转导致圆柱上表面($\theta=135^\circ$)振动加剧,进而形成局部 Nu_L 峰

值。此外,旋涡脱落现象在 $\theta=0^\circ$ 处引发了 Nu_L 的显著波动。提高旋转速率至 $\alpha=1.5$ 时, Nu_L 的分布发生了显著变化,呈现出近似椭圆形的对称分布,这与低旋转速率下的分布截然不同,显示出更为有序的换热效果。在较高折减速度下($U^*=10、12$),圆柱 Nu_L 的最大值始终出现在 $\theta=170^\circ$ 附近。因此,旋转速率对 Nu_L 的分布和局部换热强度产生了显著的影响,尤其是在高 U^* 和高 α 条件下,圆柱表面的换热表现出更为有序且集中的特性。

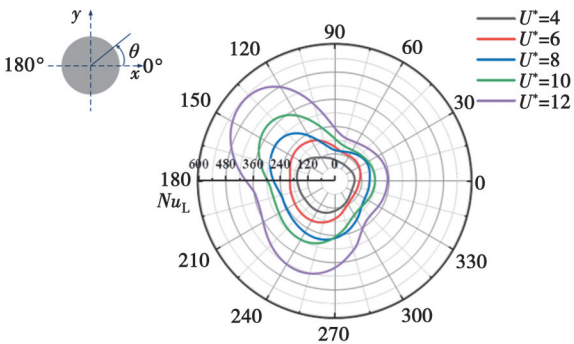


图 16 $\alpha=1.0$ 时局部努塞尔数
Fig. 16 Local Nusselt Number for $\alpha=1.0$

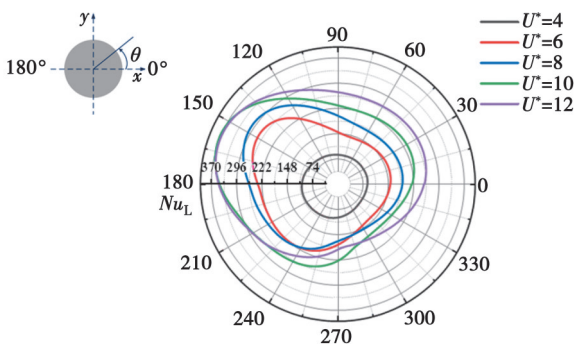


图 17 $\alpha=1.5$ 时局部努塞尔数
Fig. 17 Local Nusselt Number for $\alpha=1.5$

3.6 尾涡结构和温度场分布

图 18~图 19 为不同 α 和 U^* 条件下,旋转圆柱的尾涡结构和温度场分布。由于各工况下的涡流特性具有一定相似性,文中针对性讨论折减速度 U^* 为 2、4、6、8、10 时的尾涡结构及温度分布。如图 18 所示, $U^*=4$ 时,

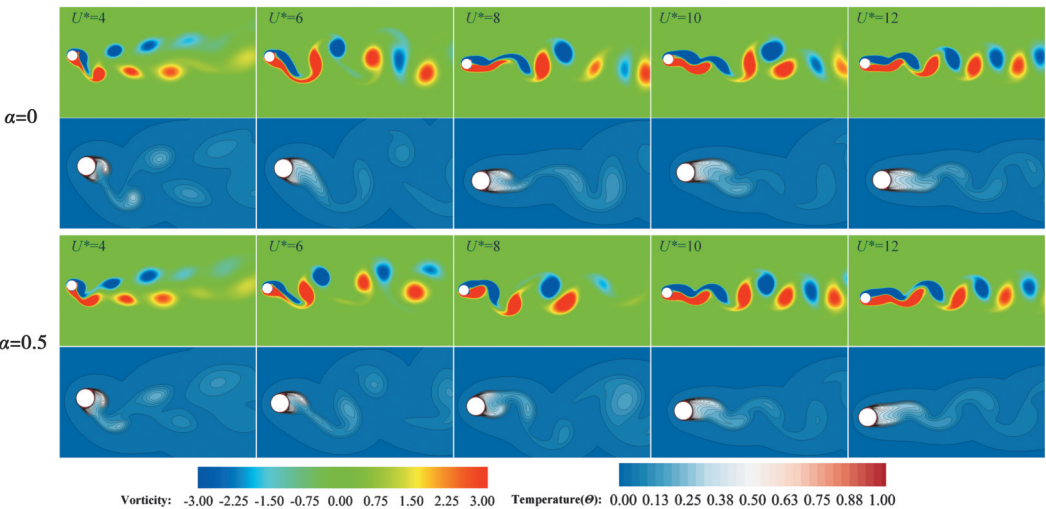


图 18 低 α 下的流场和温度场分布
Fig. 18 Distribution of flow field and temperature field at low α

低旋转速率($\alpha=0, 0.5$), 旋转圆柱表面在1个振荡周期内会发生2次涡旋分离。呈现典型的“2S”脱落模式, 此时, 涡旋的脱落排列为上下分布, 且 α 越大, 上下排列的间隔逐渐减小。随着 U^* 的增大, 边界层脱离后拉伸, 拉伸后在远场形成涡街。温度场分析表明, 旋转圆柱的换热主要发生在后驻点区域, 由于旋转圆柱的VIV, 后驻点发生涡脱分离, 边界层由于剪切作用变得薄弱, 导致换热的增强。

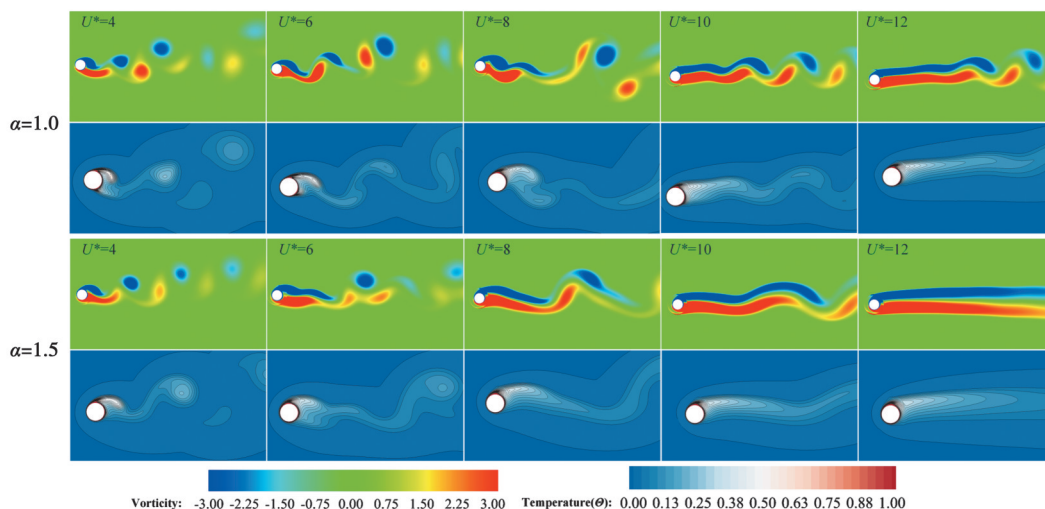


图19 高 α 下的流场和温度场分布

Fig. 19 Distribution of flow field and temperature field at high α

由图19可知, 当 $\alpha=1.0, 1.5$, $U^*=4$ 时, 涡旋脱落模式与低旋转速率一致, 均为2S模式。 $U^*=6$ 时, 旋转圆柱的尾迹结构略微向上偏移。 $U^*=8$ 时, 为过渡状态, 由单旋涡过渡为双旋涡。随着 U^* 的增大, 旋涡脱落变得困难, 尾迹拉伸, 在远端才开始脱落。当 $\alpha=1.5$, $U^*=4$ 时, 形成单列卡门涡街, 并向上倾斜。到 $U^*=6$ 时, 转换为2列平行涡街, 随后逐渐向“U”型过渡; 当 $U^*>8$ 时, 仅观察到剪切层分离, 圆柱尾迹狭窄而且无旋涡从表面脱落, 尾流呈U型模式。在温度分布方面, 与低旋转速率的情况不同, 圆柱在前驻点和后驻点的换热均较为强烈。在流体绕流圆柱时, 边界层呈现先增大后减小的趋势, 导致绕流过程中的换热较弱。而在后驻点处, 由于涡流脱落与旋转效应的综合作用, 热阻减小, 增强了换热效果。

4 结 论

在振荡来流条件下, 综合分析了不同 α 和 U^* 旋转圆柱在 x 和 y 方向的流体动力学特性及热交换特性, 得到以下结论。

1) 振荡来流下, 旋转圆柱 $A^*_{\text{packs},x}$ 随着 U^* 变化表现出多个极大值点, 增加旋转速率最大值逐渐减小, $\alpha=1.5$ 时达到0.89。旋转效应增强了圆柱的横向振动, $A^*_{\text{packs},y}$ 也呈现多个极值, 随着 U^* 增大, $U^*=7$ 时, 较高 α 的圆柱达到最大值, 而低 α 圆柱则分别在 $U^*=10$ ($\alpha=0$) 和 $U^*=9$ ($\alpha=0.5$) 时才达到极值。

2) 旋转圆柱的位移和气动系数随 α 和 U^* 的变化表现出显著差异。 X_{mean}/D 随着 U^* 增大而增加, 而 Y_{mean}/D 则受马格努斯效应影响, 随 α 增大而增大。此外, σ_{cl} 与 U^* 密切相关, 而 $C_{l,\text{mean}}$ 和 $C_{d,\text{mean}}$ 随旋转速率的增加而增大, 旋转速率对气动阻力有显著调节作用。

3) 圆柱的运动轨迹在不同 α 和 U^* 下, 差异显著。低旋转速率时轨迹较复杂, 呈“8”字形或闭环圆形。随着 U^* 增大, 轨迹逐渐变大并趋于紧凑, 特别是当 $\alpha=1.5$ 时, 运动轨迹为单一圆环状, 且随 U^* 变化与振幅响应趋势一致。

4) 高 α 和 U^* 能够显著提升换热性能。旋转圆柱的 Nu_l 分布在不同 α 下差异明显, 随着 U^* 增大, 旋转速率提高导致 Nu_l 分布趋于有序且集中, 换热效果在高 U^* 和 α 下表现更优。

5)在低旋转速率($\alpha=0.0.5$), $U^*=4$ 时,涡旋脱落呈“2S”模式,随着旋转速率增大,涡旋排列间隔减小,且涡旋脱落由两排过渡为单排。温度场分析显示,后驻点区域的热交换增强,剪切层分离提高局部传热效率。随着 U^* 增大,尾迹逐渐拉伸,并趋向“U”型,热传递效果进一步增强。

参考文献

- [1] Sahoo P, Domala V, Sharma R. Vortex induced vibrations and motions-review, issues and challenges [J]. Ocean Systems Engineering, 2022, 12(3): 301-33.
- [2] Ma L X, Resvanis T L, Vandiver J K. The influence of mode dominance and traveling waves on flexible cylinder flow-induced vibration[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 111750.
- [3] Wang J L, Geng L F, Ding L, et al. The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations[J]. Applied Energy, 2020, 267: 114902.
- [4] Zou Q F, Ding L, Wang H B, et al. Two-degree-of-freedom flow-induced vibration of a rotating circular cylinder[J]. Ocean Engineering, 2019, 191: 106505.
- [5] Wang J L, Tang L H, Zhao L Y, et al. Efficiency investigation on energy harvesting from airflows in HVAC system based on galloping of isosceles triangle sectioned bluff bodies[J]. Energy, 2019, 172: 1066-1078.
- [6] Hu G, Wang J L, Su Z, et al. Performance evaluation of twin piezoelectric wind energy harvesters under mutual interference[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(7): 073901.
- [7] Williamson C H K, Govardhan R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6/7): 713-735.
- [8] Yang Z M, Ding L, Zhang L, et al. Two degrees of freedom flow-induced vibration and heat transfer of an isothermal cylinder [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119766.
- [9] Ding L, Han Y X, Yang Z M, et al. Influence of upstream cylinder on flow-induced vibration and heat transfer of downstream cylinder[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 176: 107519.
- [10] Ali U, Islam M, Janajreh I. Heat transfer and wake-induced vibrations of heated tandem cylinders with two degrees of freedom: Effect of spacing ratio [J]. Phys Fluids, 2022, 34(11): 113612.
- [11] Khan H H, Islam M, Fatt Y Y, et al. Effect of three tandem cylinder diameter difference on flow-induced vibrations and heat transfer[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 236: 107764.
- [12] Bao Y X, Lin Y S, Chen W, et al. Numerical investigation of wake and flow-induced vibrations of a rotating cylinder in flow[J]. Ocean Engineering, 2022, 262: 112207.
- [13] Li R, Gong J, Chen W, et al. Numerical investigation of vortex-induced vibrations of a rotating cylinder near a plane wall[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(6): 1202.
- [14] Chen W, Du A Y, Lin Y S, et al. Investigation of vortex-induced vibrations of rotating cylinders with different surface roughnesses[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(4): 043614.
- [15] Liu X W, Hu C J, Liu D P, et al. Vibration characteristic of free-to-rotate elliptical cylinder at low Reynolds number[J]. Ocean Engineering, 2024, 293: 116576.
- [16] Farouk B, Ball K S. Convective flows around a rotating isothermal cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1985, 28(10): 1921-1935.
- [17] Ma H T, Xia W J, Zhou W Y, et al. Experimental investigation on the steady, external laminar mixed convection heat transfer characteristics around a large diameter horizontal rotating cylinder[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 57: 239-246.
- [18] Ma H T, Lu W Q, Zhou W Y, et al. Effects of rotation on the trailing vortex and heat transfer from a horizontal rotating cylinder at higher Grashof number[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 68: 20-26.
- [19] Borazjani I, Sotiropoulos F. Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement in the proximity-wake interference region[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, 621: 321-364.
- [20] Papaioannou G V, Yue D K P, Triantafyllou M S, et al. On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(6): 833-854.
- [21] Zhao M, Cheng L. Numerical simulation of vortex-induced vibration of four circular cylinders in a square configuration[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 31: 125-140.

- [22] Lai W C, Zhou Y, So R M C, et al. Interference between stationary and vibrating cylinder wakes[J]. *Physics of Fluids*, 2003, 15(6): 1687-1695.
- [23] Rehman U U, Munir A, Khan N B, et al. Numerical investigation of vortex-induced vibrations (VIV) of a rotating cylinder in in-line and cross-flow directions subjected to oscillatory flow[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 304: 117917.
- [24] Sahu T R, Navrose, Mittal S. Multiple regimes of lock-in and hysteresis in free vibration of a rotating cylinder[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(12): 123606.
- [25] 孙悦. 旋转恒温圆柱涡致振动响应及其换热特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
Sun Y. Study on vortex-induced vibration response and heat transfer characteristics of rotating constant temperature cylinder [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023. (in Chinese)
- [26] Izadpanah E, Amini Y, Ashouri A. A comprehensive investigation of vortex induced vibration effects on the heat transfer from a circular cylinder[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 125: 405-418.
- [27] Seifert J. A review of the Magnus effect in aeronautics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, 55: 17-45.
- [28] Munir A, Zhao M, Wu H, et al. Three-dimensional numerical investigation of vortex-induced vibration of a rotating circular cylinder in uniform flow[J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(5): 053602.

(编辑 陈移峰)