

摇摆状态下窄通道内单相阻力特性实验研究

谢清清¹, 阎昌琪¹, 曹夏昕¹, 黄彦平², 马建², 王广飞¹

(1. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国核动力研究设计院 空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:在3种不同摇摆周期(8、12、16 s)和3种不同摇摆角度(10°、15°、30°)下,对内壁光滑的窄矩形通道内的单相阻力特性进行了实验研究。经实验研究发现,摩擦阻力系数随时间变化有明显的周期性。雷诺数越大,摩擦阻力系数的波动幅值越小,平均值也越小。在任意时刻,摩擦阻力系数的波动幅值随摇摆角加速度的增大而增大。

关键词:摇摆;阻力特性;摩擦阻力系数

中图分类号:TL314

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)03-0294-05

Single-phase Flow Characteristics in Narrow Channel Under Rolling Motion

XIE Qing-qing¹, YAN Chang-qi¹, CAO Xia-xin¹, HUANG Yan-ping², MA Jian², WANG Guang-fei¹

(1. *National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*; 2. *National Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China*)

Abstract: Experimental studies of single-phase pressure drop in narrow rectangular channel under rolling motion were carried out. The rolling periods were 8, 12, 16 s, and the rolling angles were 10°, 15°, 30°. Experimental results show that the frictional factors periodically fluctuate with time. The amplitude and average value of frictional factors decrease with the increasing of Reynolds numbers. At any moment, the transient frictional factors increase with the increasing of rolling angular acceleration.

Key words: rolling; pressure drop characteristics; frictional factor

窄隙通道内流动和传热特性的研究是近年来传热学领域的一个研究热点。它在超大规模集成电路的冷却、微电子机械系统、生物医药、化学分析以及航空航天等领域均有十分广阔的应用前景^[1-2]。近年来,对于稳定状态下窄隙通道内单相流动特性的研究非常多^[3-6],但对于海洋船舶、航空航天等非稳定条件下窄隙通道内

的流动特性研究则较少,尚未见文献报道,因此有必要开展这方面的研究。

本文主要研究摇摆状态下窄矩形通道内单相水的阻力特性,并分析雷诺数、摇摆角加速度对摇摆条件下瞬时摩擦阻力系数 f 的影响,旨在下一步给出摇摆状态下 f 的计算经验公式奠定基础。

收稿日期:2010-11-03;修回日期:2010-12-13

基金项目:哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(HEUFT07066)

作者简介:谢清清(1986—),女,重庆人,硕士研究生,核能科学与工程专业

1 实验装置及方法

实验在摇摆台(图 1)上进行, 摇摆台以 x 轴为中心轴做往复简谐运动, 其平衡位置是摇摆台的水平位置。实验装置示于图 2, 由试验段、水循环回路和测量系统组成。水由离心泵从水箱抽出, 经质量流量计后流入试验段, 而后回到水箱, 完成循环。测量系统由计算机、NI 数据采集板、差压传感器和质量流量计组成。流体流过试验段的压差和流量信号通过 NI 数据采集板输入计算机, 采样率为 20 Hz。

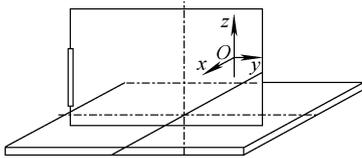


图 1 摇摆台示意图

Fig. 1 Scheme of rolling facility

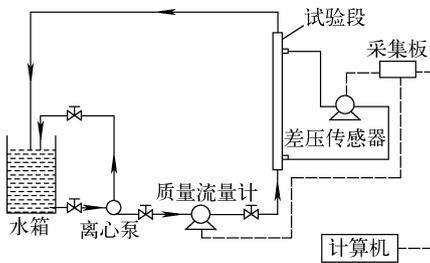


图 2 实验回路简图

Fig. 2 Simple diagram of experimental loop

试验段为内壁光滑的有机玻璃窄矩形通道, 通道总长 2 m, 其中测压段长 1.6 m。本实验在常温常压下进行, 流动雷诺数变化范围为 551~46 995。实验中, 对试验段在 3 种不同摇摆周期(8、12、16 s)和 3 种不同摇摆角度(10° 、 15° 、 30°)下进行组合, 在每一组合工况下, 从小到大调节水的流量, 测量并记录相关数据, 从而完成整个实验过程。

2 摇摆台运动规律

摇摆台采用双液压缸同步驱动, 其运动规律^[7]如下:

$$\theta = \theta_m \sin \frac{2\pi}{T}t \quad (1)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \theta_m \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T}t \quad (2)$$

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = -\theta_m \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \sin \frac{2\pi}{T}t \quad (3)$$

式中: θ 、 ω 、 β 分别为 t 时刻的摇摆角位移(rad)、角速度(rad/s)、角加速度(rad/s²); θ_m 为最大摇摆角位移, rad。

3 摇摆状态下阻力特性分析

3.1 摇摆状态下 f 的计算

图 3 为摇摆状态下试验段内压差测量示意图, 试验段上 A、B 两测压孔与差压传感器的两测压端 H、L 之间采用引压管相连, 引压管内充满不流动的单相水。通过对实验数据的分析发现, 在强迫循环下, 流体流量基本不因摇摆运动产生波动, 这与文献[7]的结论一致。因此, 根据动量方程, 单相水流过试验段 A、B 两点之间的总压差为:

$$\Delta p_{AB} = \Delta p_g + \Delta p_f + \Delta p_{附} \quad (4)$$

式中: Δp_f 为摩擦压降; Δp_g 为重位压降; $\Delta p_{附}$ 为附加压降, 它是由摇摆产生的法向惯性力和切向惯性力^[7]引起的。由于实验是在非加热状态下进行, 无相变产生, 因此不考虑加速压降。

在任意摇摆时刻, 对两测压孔与差压传感器两测压端子间的压力传递采用单相流体静力学方程, 则 Δp_{AB} 为:

$$\Delta p_{AB} = p_A - p_B = p_H - p_L + \Delta p'_g + \Delta p'_f \quad (5)$$

$$p_H - p_L = \Delta p_M, \Delta p'_g = \Delta p_g = \rho g h_{eff} \quad (6)$$

式中: p_A 、 p_B 、 p_H 、 p_L 分别为 A、B、H、L 处的静压, kPa; Δp_M 为压差传感器测量值, kPa; Δp_g 、 $\Delta p'_g$ 分别为试验段测压段和引压管内单相水产

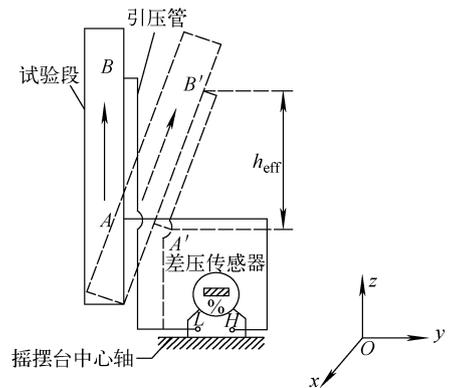


图 3 试验段内压差测量示意图

Fig. 3 Scheme of differential pressure measurement of test section

生的重力压降, kPa; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; h_{eff} 为测压段 A、B 之间的有效高度, m。

联合式(4)~(6)可得:

$$\Delta p_t = \Delta p_M - (\Delta p_{\text{附}} - \Delta p'_{\text{附}}) \quad (7)$$

令:

$$\Delta p_{\text{附}} - \Delta p'_{\text{附}} = \delta \quad (8)$$

式中: δ 为摇摆引起的试验段与引压管内单相水产生的总附加压降, kPa。

因此, 摇摆状态下试验段测压段之间的摩擦阻力压降等于差压传感器测得的压差减去对应时刻摇摆引起的总附加压降。根据达西-魏斯巴赫(D-W)公式^[8], 摇摆状态下瞬时 f 为:

$$f = \frac{2\Delta p_t D_e}{\rho v^2 h} = \frac{2(\Delta p_M - \delta)\rho D_e^3}{Re^2 h \mu^2} \quad (9)$$

式中: D_e 为试验段的当量直径, m; h 为测压段 A、B 之间的实际长度, m; v 为水的平均流速, m/s; μ 为水的动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

3.2 附加压降对流动特性的影响

为了分析摇摆条件下附加压降对流动特性的影响, 给出了摇摆条件下窄矩形通道内流体的受力分析图, 如图 4 所示。规定摇摆台顺时针方向运动时为正, O 点为摇摆台轴心位置, P_1 点为摇摆台平衡位置, P_2 、 P_3 点分别表示摇摆台处于正方向最大摇摆角和负方向最大摇摆角位置。设通道内流动方向为正方向, A、B 为试验段上两测压孔, A、B 距 P_1 点高度分别为 z_1 、 z_2 。取试验段测压段内一段流体微元 dz 为研究对象, 微元与摇摆台水平面夹角为 α , 微元距 P_1 点高度为 z , 距摇摆台中心轴 O 点的距

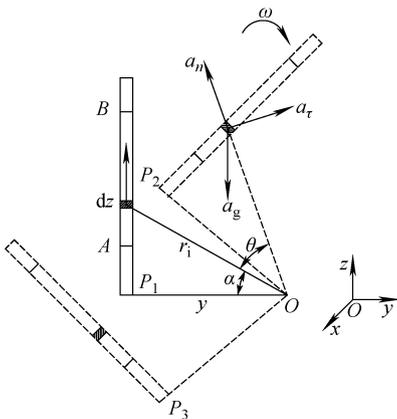


图 4 摇摆条件下受力分析图

Fig. 4 Force analysis under rolling motion

离为 r_i , OP_1 长度为 y , θ 为任意时刻摇摆台角位移。在摇摆条件下, 试验段内单位质量的微元流体除了受到重力外, 还受到摇摆产生各种惯性力: 切向惯性力、法向惯性力和科式惯性力。科式惯性力的方向垂直于流动方向, 对流动无影响。将切向惯性力和法向惯性力沿垂直于流动的方向和平行于流动的方向分解, 垂直于流动方向的分力对流动无影响, 平行于流动方向的分力会对流动起到驱动或阻碍的作用^[7]。

切向加速度 a_t 沿流动方向分量为:

$$a_{\text{切向}} = a_t \cos \alpha = \beta r_i \cos \alpha \quad (10)$$

对上式沿流动方向积分得到切向惯性力, 为:

$$\Delta p_{\text{切向}} = \rho \int_{z_1}^{z_2} a_{\text{切向}} dz = \rho \beta y (z_2 - z_1) \quad (11)$$

法向加速度 a_n 沿流动方向分量为:

$$a_{\text{法向}} = a_n \sin \alpha = \omega^2 r_i \sin \alpha = \omega^2 z \quad (12)$$

对上式沿流动方向积分得到法向惯性力, 为:

$$\Delta p_{\text{法向}} = \rho \int_{z_1}^{z_2} a_{\text{法向}} dz = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (z_2^2 - z_1^2) \quad (13)$$

式(11)加式(13)即得到法向惯性力和切向惯性力的合力所引起的附加压降, 为:

$$\Delta p_{\text{附}} = \Delta p_{\text{切向}} + \Delta p_{\text{法向}} \quad (14)$$

以摇摆工况 10° 、16 s 为例, 绘出理论推导出的法向惯性力和切向惯性力随时间周期性变化曲线(图 5)。从图中可看出, 相对于切向惯性力, 法向惯性力的值很小, 且法向惯性力的方向总为正, 对管内流动起驱动力的作用。而切向惯性力时正时负, 方向与角加速度 β 的方向一致。

图 6 示出摇摆产生的惯性力的合力所引起附加压降和角加速度随时间周期性变化曲线。

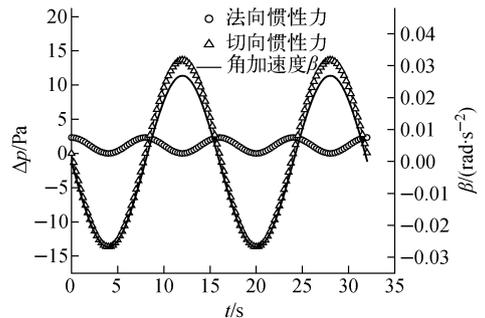


图 5 法向惯性力和切向惯性力随时间周期性变化的波动曲线

Fig. 5 Periodic change curves of centrifugal and tangential inertia force with time

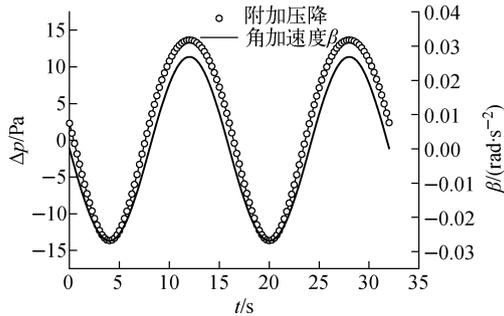
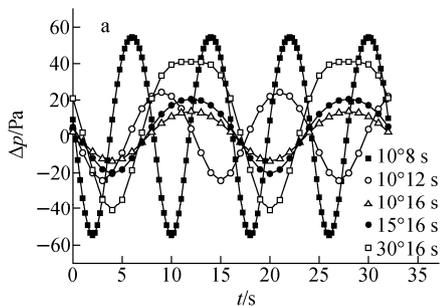


图6 附加压降和角加速度随时间周期性变化曲线
Fig. 6 Periodic change curves of additional pressure drop and angular acceleration with time

可看出,附加压降的大小与角加速度的幅值成正比,方向与角加速度的方向相同。当角加速度的值为负时,附加压降的方向与流动方向相反,对流动起到阻力的作用,流体速度减小,摩擦阻力损失减小,相应的摩阻系数也减小。当角加速度的值为正时,附加压降的方向与流动方向相同,对流动起到驱动力的作用,流体速度增大,摩擦阻力损失和摩阻系数也增大。由于在摇摆运动中,角加速度的方向不断变化,幅值随时间周期性的波动,使得附加压降的方向和幅值随之变化,进而导致摩擦阻力损失和摩阻系数也相应随时间周期性波动。

图7为不同的摇摆工况下,摇摆引起的附加压降的计算值和实验值随时间周期性变化的曲线。可看出,附加压降的计算值和实验值随时间变化的规律相同,即当摇摆周期一定时,摇摆角度越大,附加压降波动幅值越大。当摇摆角度一定时,摇摆周期越短,附加压降波动幅值越大。这两种影响因素可归纳为角加速度的影响,由角加速度的表达式(式(3))知角加速度随着摇摆角



度的增大而增大,随着摇摆周期的减小而增大,所以角加速度越大,附加压降的波动幅值越大。

4 实验结果与分析

4.1 雷诺数对摇摆瞬时 f 的影响

由式(9)知,在摇摆状态下影响单相水瞬时 f 的一个主要因素是雷诺数,图8示出在摇摆周期为8 s、摇摆角度为10°条件下, f 在不同的雷诺数下随时间周期性波动的曲线。

从图8可看出,在摇摆角度和摇摆周期相同的条件下,雷诺数越大,瞬时 f 的波动幅值越小,其时均值也越小。雷诺数体现了流动惯性力和粘滞力的相互作用大小,当雷诺数增大时,流动惯性力的作用相对增大,粘滞力对流动的作用减小,所以流层间流体微团的相对滑移减弱,摩擦阻力损失减小,相应的摩阻系数也减小。由3.2节的分析可知,对于特定的摇摆工况而言,摇摆产生的附加压降是一定的,而随着雷诺数的增大,流动惯性力增大,附加压降对流动的影响必然减弱。因此,雷诺数的增大使 f 由于受摇摆作用而波动的幅值减小。

4.2 摇摆角加速度对瞬时 f 的影响

通过对实验数据的分析,发现摇摆周期和摇摆角度对瞬时 f 也有明显影响。图9示出雷诺数均为1718,摇摆角度均为10°,摇摆周期分别为8、12、16 s条件下,瞬时 f 随时间周期性变化情况。图10示出雷诺数均为1315,摇摆周期均为16 s,摇摆角度分别为10°、15°、30°条件下,瞬时 f 随时间周期性波动变化情况。从图中可看出,当雷诺数和摇摆角度相同时,瞬时 f 的波动幅值随摇摆周期的缩短而增加,其波动平均值变化不大。在相同的雷诺数和摇摆周期条

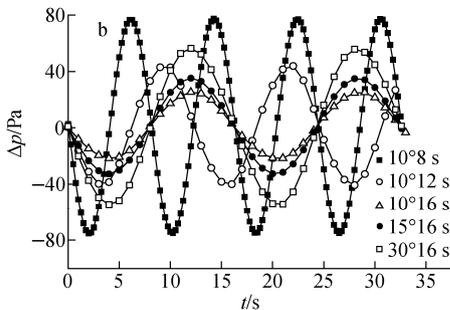


图7 附加压降计算值(a)和实验值(b)随时间周期性变化曲线

Fig. 7 Periodic change curves of calculated (a) and experimental (b) additional pressure drops with time

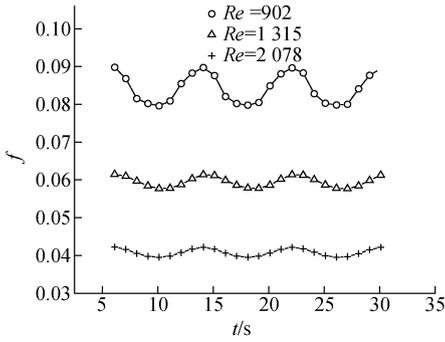
图8 雷诺数对 f 周期性波动的影响

Fig. 8 Effect of Reynolds number on fluctuation of frictional coefficient

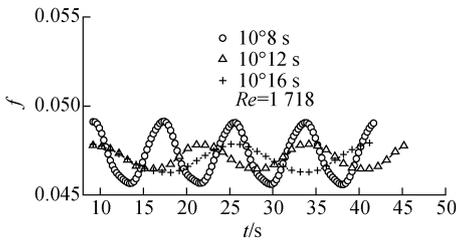
图9 摇摆周期对 f 周期性波动的影响

Fig. 9 Effect of rolling periods on fluctuation of frictional coefficient

件下,摇摆角度越大,瞬时 f 的波动幅值越大,其波动平均值同样变化不大。由 3.2 节的分析可知,摇摆周期和角度的变化本质是摇摆角加速度的变化,周期缩短或角度增大,均会导致角加速度的增大,而角加速度越大,摇摆产生的附加压降越大,对流动起到驱动或阻碍的作用越大,从而导致摩擦阻力损失变化的幅度也越大。而在一定的摇摆周期内,附加压降的时均值近似为零,对流动驱动和阻碍的作用基本抵消,所以在相同雷诺数下,对不同的摇摆工况而言,在一定的摇摆周期内摩擦阻力损失的平均值基本相同。

5 结论

1) 摇摆产生的附加压降对通道内的流动产生周期性的驱动或阻碍的作用,使流体速度发生周期性的变化,从而导致摩擦系数随时间出现周期性的波动。

2) 在摇摆状态一定的情况下,雷诺数越大,流动惯性力越大,附加压降对流动的影响作用越弱,相应的摩擦系数所受的影响越小,波动幅度越小,平均值越小。

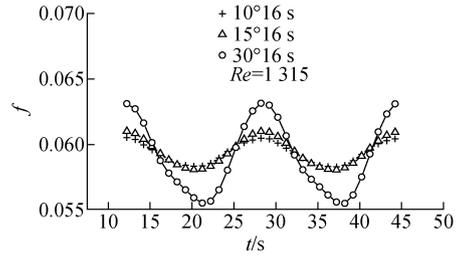
图10 摇摆角度对 f 周期性波动的影响

Fig. 10 Effect of rolling angles on fluctuation of frictional coefficient

3) 当雷诺数一定时,周期缩短或角度增大,均会导致角加速度的增大,从而使摇摆产生的附加压降越大,对流动起到驱动或阻碍的作用也越大, f 变化的幅度也越大。

参考文献:

- [1] MEI Tao, WU Xiaoping. MEMS system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 196.
- [2] KANDLIKAR S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(12): 389-407.
- [3] MORINI G L. Single-phase convective heat transfer in microchannels: A review of experimental results[J]. International Journal of Thermal Science, 2004, 43(7): 631-651.
- [4] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Dev Lett (EDL), 1981, 2(1): 126-129.
- [5] LI Z X, DU D X, GUO Z Y. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes[J]. Microscale Thermophysics Engineering, 2003, 7(3): 253-265.
- [6] WU H W, CHENG P. An experimental study of convective heat transfer in silicon microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(11): 2 547-2 556.
- [7] 庞凤阁,高璞珍,王兆祥,等. 海洋条件对自然循环影响的理论研究[J]. 核动力工程, 1995, 16(4): 330-335.
PANG Fengge, GAO Puzhen, WANG Zhaoxiang, et al. Theoretical research for effect of ocean conditions on natural circulation[J]. Nucl Power Eng, 1995, 16(4): 330-335(in Chinese).
- [8] 孔珑. 工程流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 106-107.