

# 不稳定条件下水平管 单相水流动阻力特性实验研究

贾 辉, 谭思超, 高璞珍, 阎昌琪

(哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对不稳定流动(脉动流)条件下的实时阻力特性进行了实验研究。研究表明: 脉动流造成了摩擦压降特性的改变, 摩擦压降随流动波动而波动, 且二者存在相位差。分析可知, 加速度对摩擦压降产生较大影响, 相同大小的流速和加速度下, 加速度方向不同时, 摩擦压降也不同, 加速度为正时, 摩擦压降较大, 加速度为负时, 摩擦压降较小, 加速度为 0 时, 摩擦压降为唯一值。在理论分析的基础上, 拟合了适用于脉动流条件下的实时摩擦压降计算关系式, 拟合结果和实验结果符合良好。

**关键词:** 脉动流; 流动阻力; 单相水

中图分类号: TL33

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)02-0168-06

## Experimental Study on Horizontal Single Phase Water Flow Resistance Characteristics Under Unsteady Flow Condition

JIA Hui, TAN Si-chao, GAO Pu-zhen, YAN Chang-qi

(College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Experimental studies on single-phase real time flow resistance characteristics under unsteady flow condition were carried out. The experimental phenomena show fluctuation changes friction pressure drop characteristics. The friction pressure drop fluctuates with fluctuation flow and there is phase difference between two fluctuation signals. Based on analysis, such conclusions can be achieved that the acceleration may strongly influenced friction pressure drop, and with the same flow rate, the friction pressure drop is different with different directions of acceleration. When the direction of acceleration is same as that of flow rate, the friction pressure drop is large, when the acceleration is opposite with flow rate, the friction pressure drop is small. Based on theoretical analysis, an empirical correlation was obtained to calculate real time friction pressure drop of fluctuation conditions and calculated results fit well with experimental data.

**Key words:** fluctuation flow; flow resistance; single-phase water

脉动流是工程上经常遇到的流动状态,当流体处于周期性外力作用下时,如海洋条件<sup>[1-3]</sup>、泵阀的周期性启闭<sup>[4]</sup>、血管动脉系统<sup>[5]</sup>以及热工水力脉动<sup>[6-7]</sup>时,均会出现周期性流动波动,特别是当流动不稳定性发生时,会出现自持流量振荡,影响反应堆安全运行。

当流动发生波动时,必然导致其他热工水力特性,如流动和传热特性的改变,文献<sup>[8-9]</sup>在研究海洋条件对冷却剂热工水力特性影响时,发现流量的波动造成了传热和阻力特性的改变,这种改变并非由摇摆运动直接引起,而是摇摆引起的流动波动造成的,文献<sup>[10]</sup>的研究也证明了这一点,文献<sup>[9-10]</sup>均提出了相关条件下的流动阻力的修正系数,但均针对平均阻力的修正,并非针对实时流动阻力。另外,早期的相关研究对象为血液中的脉动,雷诺数较低,而动力系统上更多的是以水作为工质,且雷诺数较高,二者之间的适用性较差。

不稳定流动条件下的阻力计算是文献<sup>[11]</sup>提出的脉动流研究的关键问题之一,对于反应堆安全分析也非常重要,现有的分析模型在处理类似问题时,多采用稳态条件下的阻力计算关系式,不考虑流量脉动的影响,影响分析结果的准确性。对于脉动流动阻力这样的问题,理论分析能给出定性的结果,但实用性较强的定量分析仍依赖于实验研究,因此,本工作针对脉动流条件下的单相水实时流动阻力特性进行实验研究。

## 1 实验装置及实验现象

实验回路如图 1 所示,整个实验回路主要由水箱、离心泵、变频器、止回阀、调节阀、电磁流量计、温度表、差压变送器及实验段组成,实验段水平布置,实验工质为水,整个实验过程是在常温、常压下进行的,其中流量、压差转换为电信号输入到控制台,由数据采集系统进行自动采集。

本实验中采用的实验段为镀锌管,实验段有效长度为 4.70 m,管外径为 21 mm,内径为 16.1 mm,实验段前后预留直管段分别为 80 cm 和 50 cm 作为入口段、出口段,满足实验要求。

采用变频器与离心泵电机相连,通过调节频率可改变电机(或泵)的转速来调节流量,实

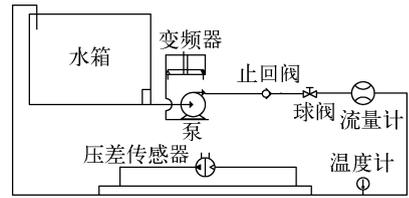


图 1 实验回路简图

Fig. 1 Scheme of experimental loop

现管路中流体流量的波动。本实验中自行编制了正弦波信号生成程序,通过 D/A 转换将程序中生成的正弦波数字信号转换成模拟信号输入变频器,从而通过变频器控制水泵的转速,实现泵转速的周期性变化,使流量产生周期性波动。

对于脉动流,影响其特性的主要有 3 个参数:平均值、振幅和频率。因此,本工作主要针对上述对脉动流阻力特性的影响展开研究,实验中保持 2 个参数不变,改变另外 1 个以分析其对流动阻力的影响。

实验参数测量范围:实验段前后压差范围,5.0~40.0 kPa;流动速度,1.1~3.8 m/s;流体温度,18~20 °C;脉动周期,10~20 s。

首先进行了稳态条件下的实验研究,根据镀锌管粗糙度可知,本次实验流动处于紊流粗糙管过渡区,采用洛巴耶夫公式( $\lambda = 1.42[\lg(Red/\epsilon)]^{-2}$ )计算,计算结果和实验结果符合良好(图 2),说明本实验系统运行良好。不同脉动周期下的实验结果示于图 3,流量和压降均发生了周期性波动,二者之间存在相位差,这主要是由于粘性和惯性作用,流体速度对压力变化的响应存在滞后造成的,这种滞后还

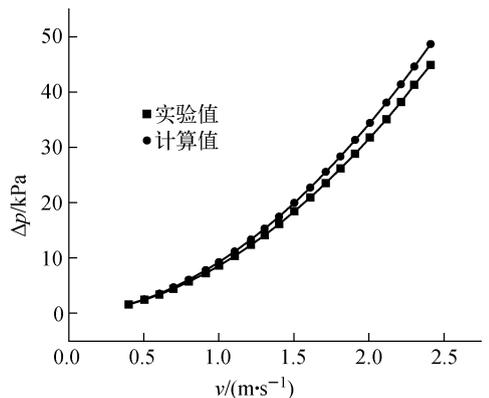


图 2 稳态实验结果

Fig. 2 Results of steady flow experiment

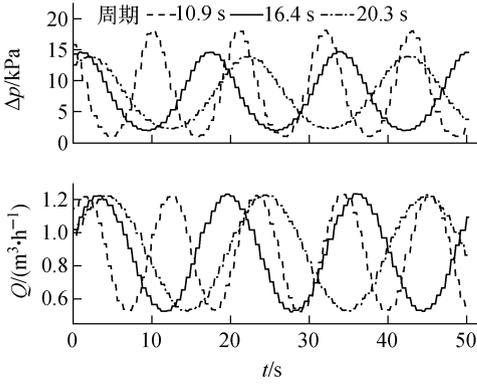


图3 脉动流实验结果

Fig. 3 Results of oscillation flow experiment

会造成截面速度分布的变化<sup>[12]</sup>。实验结果表明:平均流量越大,流量振幅越大,流量波动周期越小,压降曲线平均值和振幅越大。各种实验还表明,流量曲线比对应压降曲线滞后约2.2 s。在不同的波动参数和平均流量下,重复实验,结论相同。

## 2 脉动流压降特性分析

脉动流条件下,测得的压降包括摩擦压降和加速压降,图4示出了单周期内流动速度和压降的对应关系。按稳态条件下研究的结果,流动速度和摩擦压降一一对应,造成了总压降变化的只是加速压降,图中摩擦压降应是一条线,而不是一个环,但从图中可看出,即使从总压降中减去加速压降,这个压降环仍很明显,且加速压降造成的改变与摩擦压降自身的变化相比,影响并不大。

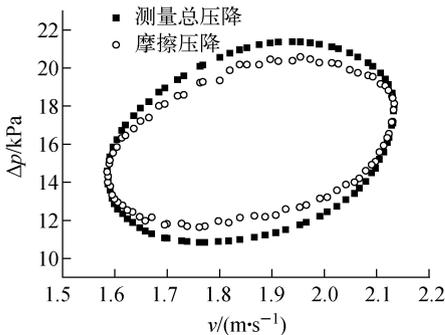


图4 测量总压降和摩擦压降随流速的变化  
Fig. 4 Measured total pressure drop and frictional pressure drop vs. velocity

图4中每一流速对应两个压降,每一流速下加速度大小相同,只是方向不同,因此两个压降差别主要源于加速度,当加速度为0时,即流动速度最高和最低点,存在单一摩擦压降值,对每一流速下的两个压降取平均值,结果表明,平均压降与流速之间呈线性关系(图5)。将实时摩擦压降减去平均压降,其与加速度也呈线性关系(图6)。因此可得,流动速度主要影响平均摩擦压降,而加速度造成了摩擦压降的变化。当加速度为正时,边界层对流体施加一向后的曳力,从而造成阻力增加,反之亦然。

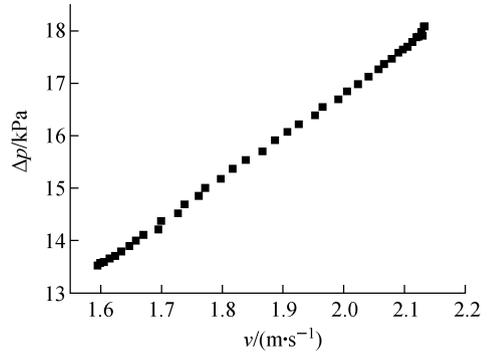


图5 平均摩擦压降

Fig. 5 Average frictional pressure drop

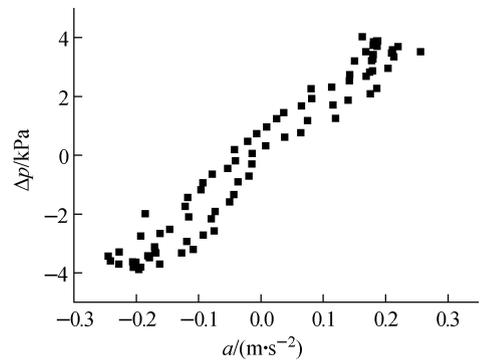


图6 加速度与压降差的关系

Fig. 6 Acceleration vs. difference between average and frictional pressure drop

## 3 脉动流实时摩擦压降计算关系式

根据实验结果,可得出流动速度和压降均呈正(余)弦变化状态,文献[13]中也证实了脉动流条件下流速和压降均呈正(余)弦变化,因此,可用正弦函数来模拟流速和压降的变化,即流速 $v$ 和压降 $\Delta p$ 均可用下式表达:

$$v = C_1 \sin(2\pi t/t_0) + C_2 \quad (1)$$

$$\Delta p = C_3 \sin(2\pi(t + \Delta t)/t_0) + C_4 \quad (2)$$

其中:  $v$  为流动速度;  $t$  为时间;  $t_0$  为周期;  $\Delta p$  为压降;  $C_2$  和  $C_4$  分别为平均流速和平均压降;  $C_1$  和  $C_3$  分别为流速和压降的振幅。

加速度  $a$  为:

$$a = C_1 (2\pi/t_0) \cos(2\pi t/t_0) \quad (3)$$

摩擦压降  $\Delta p_f$  为  $\Delta p$  减去加速压降  $\Delta p_a$ :

$$\Delta p_f = \Delta p - \Delta p_a = C_3 \sin \frac{2\pi(t + \Delta t)}{t_0} + C_4 - C_1 \frac{2\pi}{t_0} \cos \frac{2\pi t}{t_0} \rho l \quad (4)$$

式中:  $l$  为流道长度。

单周期内另一相同流速点的压降为:

$$\Delta p'_f = C_3 \sin \frac{2\pi(t - \Delta t)}{t_0} + C_4 + C_1 \frac{2\pi}{t_0} \cos \frac{2\pi t}{t_0} \rho l \quad (5)$$

对式(4)和式(5)取平均值,得:

$$\Delta \bar{p}_f = 0.5(\Delta p'_f + \Delta p_f) = C_3 \sin \frac{2\pi t}{t_0} \cos \frac{2\pi \Delta t}{t_0} + C_4 \quad (6)$$

从式(6)可看出,其与流动速度呈线性关系,即:

$$\Delta \bar{p}_f = Av + B \quad (7)$$

其中,

$$A = C_3 \cos(2\pi \Delta t/t_0)/C_1 \quad (8)$$

$$B = C_4 - C_2 C_3 \cos(2\pi \Delta t/t_0)/C_1 \quad (9)$$

理论推导的结果和实验结果(图4)一致,实时压降与平均压降的差值为:

$$\Delta p_f - \Delta \bar{p}_f = (C_3 \sin \frac{2\pi \Delta t}{t_0} - C_1 \frac{2\pi}{t_0} \rho l) \cos \frac{2\pi t}{t_0} = (\frac{C_3 t_0}{2\pi C_1} \sin \frac{2\pi \Delta t}{t_0} - \rho l) a = C_A a \quad (10)$$

可见,摩擦压降与平均压降的差值与加速度呈线性关系,与实验研究的结果(图6)一致。

根据上述分析结果,脉动流条件下的摩擦压降或摩擦系数可分为两部分:1)由加速度产生;2)由流动速度产生。即:

$$\lambda = \bar{\lambda} + \lambda_a \quad (11)$$

其中,

$$\lambda_a = \frac{C_A a}{\frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \bar{v}^2}{2}} = \frac{C_A}{\frac{l \rho}{2}} \cdot \frac{ad}{\bar{v}^2} = C'_A a^* \quad (12)$$

式中:  $\bar{v}$  为平均流速;  $a^*$  为无量纲加速度,即:

$$a^* = \frac{ad}{\bar{v}^2} \quad (13)$$

根据式(7),得:

$$\bar{\lambda} = \frac{\Delta \bar{p}_f}{\frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \bar{v}^2}{2}} = A' Re + B' \quad (14)$$

其中,

$$A' = \frac{C_3 \cos \frac{2\pi \Delta t}{t_0}}{C_1} \cdot \frac{2d}{C_2^2 \rho} \cdot \frac{v}{d} \quad (15)$$

$$B' = C_4 \frac{2d}{C_2^2 \rho} - \frac{C_2 C_3 \cos \frac{2\pi \Delta t}{t_0}}{C_1} \cdot \frac{2d}{C_2^2 \rho} = B_1 - A' Re \quad (16)$$

对流动而言,  $C'_A$ 、 $A'$  和  $B_1$  均受到脉动流的平均流速、振幅和频率的影响,将脉动振幅和频率无量纲化,平均流速用  $Re$  表达,得:

$$f^* = \frac{l}{\bar{v} t_0} \quad (17)$$

$$V^* = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \quad (18)$$

结合实验数据拟合  $C'_A$ , 拟合结果如式(19), 误差小于  $\pm 7\%$ , 如图7所示。

$$C'_A = 3.175 \times 10^{-5} f^{*0.34} Re^{1.34} \quad (19)$$

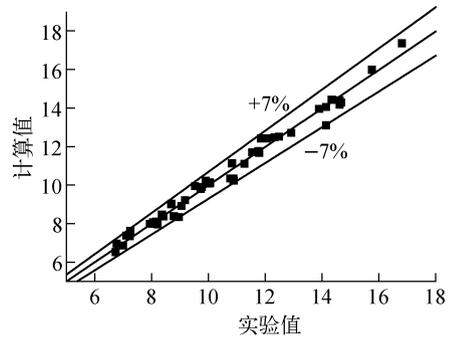


图7 系数  $C'_A$  实验值与计算值的比较

Fig.7 Comparison between experimental and calculated coefficient  $C'_A$

结合式(17)、(19)可得:

$$C'_A = 3.175 \times 10^{-5} (\frac{l}{t_0})^{0.34} (\frac{d}{v})^{1.34} \bar{v}^{-1.00} \quad (20)$$

可看出,加速度系数与流动速度近似成正比关系,说明加速度引起的摩擦压降是以流动速度引起的摩擦压降为基础的,流动速度越大,压降基数越大,加速度引起的摩擦压降变化也

就越大。当加速度为 0 时,即流动速度保持不变,则:

$$\Delta \bar{p}_f = B = C_4 \quad (21)$$

该式仍符合稳态流动的达西公式。结合式(12)、(20)可得:

$$\lambda_a = 3.175 \times 10^{-5} (l/t_0)^{0.34} d^{2.34} v^{-1.34} \bar{v}^{-1.00} a \quad (22)$$

可知,相同加速度条件下,加速度的摩擦系数与平均速度成反比,平均速度越大,加速度造成的相对波动幅度越小,对阻力的影响越小。

系数  $A'$  的拟合结果为:

$$A' = 612.55 f^{*-0.99} v^{*0.02} Re^{-2.12} \quad (23)$$

考虑波动振幅指数较小,可忽略波动振幅影响,得到式(24),误差小于  $\pm 10\%$  (图 8)。

$$A' = 720.16 f^{*-0.99} Re^{-2.14} \quad (24)$$

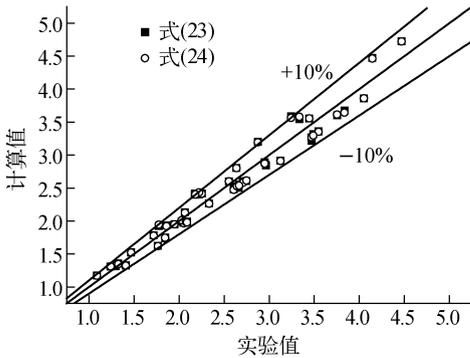


图 8 系数  $A'$  实验值与计算值的比较

Fig. 8 Comparison between experimental and calculated coefficient  $A'$

系数  $B_1$  拟合结果为式(25),误差小于  $\pm 8\%$ ,如图 9 所示。

$$B_1 = 0.058 4 f^{*0.170} V^{*0.161} \quad (25)$$

根据式(11)、(22)、(24)和(25),只要获得脉动流平均流量、脉动振幅和频率,就可计算出脉动流实时摩擦压降,计算结果与实验结果的比较示于图 10,波谷点误差较大,这是因为波谷点数值较小,很小的变化就会造成较大的误差,除波谷点外,其余大多数工况误差在  $\pm 20\%$  以内。

## 4 结论

1) 脉动流条件下,摩擦压降也随之波动,且和流动速度波动曲线存在相位差。

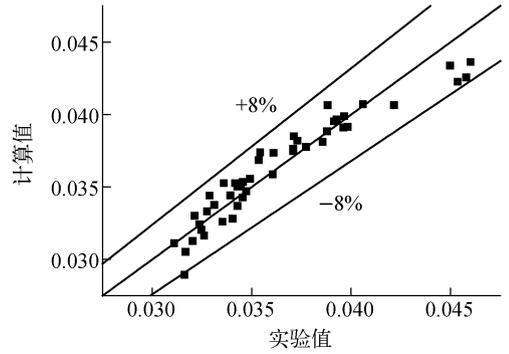


图 9 系数  $B_1$  实验值与计算值的比较

Fig. 9 Comparison between experimental and calculated coefficient  $B_1$

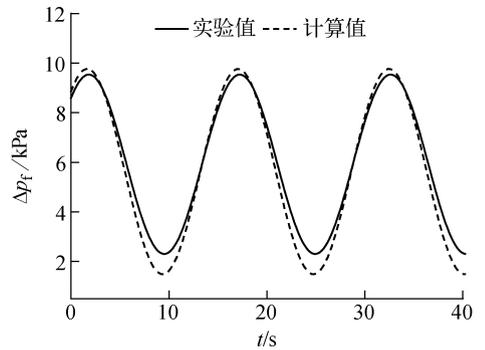


图 10 压降实验值与计算值的比较

Fig. 10 Comparison between experimental and calculated pressure drop

2) 脉动流条件下,加速度对摩擦压降存在较大影响,加速度为正时,摩擦压降较大;加速度为负时,摩擦压降较小;加速度为 0 时,摩擦压降存在单一值。

3) 结合实验数据和理论分析,拟合了脉动流条件下实时摩擦压降计算关系式,计算关系式和实验结果符合较好。

## 参考文献:

- [1] TAN S C, SU G H, GAO P Z. Experimental and theoretical study on single-phase natural circulation flow and heat transfer under rolling motion condition[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 3 160-3 168.
  - [2] 谭思超,张红岩,庞凤阁,等. 摇摆运动下单相自然循环流动特点[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 554-558.
- TAN Sichao, ZHANG Hongyan, PANG Fengge,

- et al. Characteristics of single-phase natural circulation flow under rolling motion[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(6): 554-558 (in Chinese).
- [3] MURATA H, SAWADA K, KOBAYASHI M. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 215: 69-85.
- [4] 侯波, 栾振辉. 摆动活齿泵流量脉动的试验研究[J]. 液压与气动, 2007(3): 60-61.  
HOU Bo, LUAN Zhenhui. Experimental study on the sliding-tooth pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2007(3): 60-61 (in Chinese).
- [5] 董建明. 近生理脉动流实验仿真与测控系统的设计[D]. 成都: 四川大学, 2007.
- [6] BOURE J A, BERGLES A E, TONG L S. Review of two-phase flow instability[J]. Nuclear Engineering and Design, 1973(25): 165-192.
- [7] DURGAPRASAD G V, PANDEY M, KALRA M S. Review of research on flow instabilities in natural circulation boiling systems[J]. Progress in Nuclear Energy, 2007, 49(6): 429-451.
- [8] TAN S C, SU G H, GAO P Z. Heat transfer model of single-phase natural circulation flow under rolling motion condition [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239: 2 212-2 216.
- [9] 谭思超, 高璞珍, 苏光辉. 摇摆运动条件下自然循环流动的理论和实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(11): 1 213-1 217.  
TAN Sichao, GAO Puzhen, SU Guanghui. Experimental and theoretical study on natural circulation flow under rolling motion condition [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(11): 1 213-1 217 (in Chinese).
- [10] PENDYALA R, JAYANTI S, BALAKRISHNAN A R. Flow and pressure drop fluctuations in a vertical tube subject to low frequency oscillations [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238: 178-187.
- [11] CARPINLIOGLU O M, GUNDOGDU M Y. A critical review on pulsatile pipe flow studies directing towards future research topics[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(3): 163-174.
- [12] WOMERSLEY J R. Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known[J]. Journal of Physiology, 1955, 127(3): 553-563.
- [13] 王致清. 粘性流体动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.