

文章编号: 0258-0926(2017)02-0028-04; doi:10.13832/j.jnpe.2017.02.0028

摇摆条件下圆管通道内气-液两相压降特性研究

周慧辉¹, 谢添舟¹, 徐建军¹, 陈炳德¹, 张彬²

1. 中国核动力研究设计院中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 成都, 610041; 2. 华能山东石岛湾核电有限公司, 山东荣成, 264312

摘要:开展了摇摆条件下圆管通道内气-液两相压降特性实验研究, 获得了摇摆条件下实验段内瞬时及时均压降。构建了摇摆条件下两相压降计算模型, 与实验结果对比符合很好。根据实验数据和模型计算结果分析摇摆条件对两相压降特性的影响规律, 发现摇摆条件下通道内瞬时总压降呈现周期性波动, 但其时均值和静止时相比偏差不大。进一步分析发现, 摇摆条件下摩擦压降基本不变, 摇摆运动引入的附加压降可忽略不计, 而摇摆条件下重力压降的周期性波动是总压降出现周期性波动的原因。

关键词: 两相流; 压降; 摇摆运动

中图分类号: TL33; TL352 **文献标志码:** A

Two-Phase Pressure Drop Characteristics in Circular Tube under Rolling Motion

Zhou Huihui¹, Xie Tianzhou¹, Xu Jianjun¹, Chen Bingde¹, Zhang bin²

1. CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermo-Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China;
2. Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Co. Ltd., Rongcheng, Shandong, 264312, China

Abstract: An experimental study on the pressure drop in the circular tube was carried out under rolling condition, and the transient and time averaged data were obtained. The pressure drop calculation model under rolling condition was established and agreed well with the experimental data. The effect of rolling motion on the pressure drop characteristics was researched by analyzing the experimental and calculation results. It found that the cyclical fluctuation occurs in the transient total pressure drop, while the deviation of average total pressure drop is very small compared with static condition. By analyzing the transient total pressure drop and its composition, it is found that the friction pressure drop is almost constant under rolling condition; the additional pressure drop caused by rolling motion can be ignore; and the fluctuation of gravity pressure drop is the reason of total pressure drop fluctuation.

Key words: Two-phase flow, Pressure drop, Rolling motion

0 引言

气-液两相流广泛存在于油田、化工及动力工程中, 两相流体的压降特性对于系统设计和运行特性有重要意义。目前, 静止条件下压降特性研究已获得了丰富的研究成果^[1]。而船舶处于海洋中时, 受风浪影响会处于摇摆状态, 摇摆条件下两相界面形态及相分布特性发生改变^[2-3], 进而可

能影响两相压降特性。因此, 深入分析摇摆条件下两相压降特性, 对于船舶热工水力特性计算具有重要意义。

开展了摇摆条件下圆管通道内气-液两相压降特性实验研究, 构建了摇摆条件下两相压降计算模型。结合实验数据和模型计算结果, 获得了摇摆条件对两相瞬时及时均压降特性的影响规律。

收稿日期: 2016-08-21; 修回日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(11475161, 51106142)

作者简介: 周慧辉(1985—), 男, 助理研究员, 现主要从事核反应堆热工水力研究

1 实验装置及数据处理方法

实验装置主要由运动平台、往复泵、空气泵、混合腔、实验段及相应测量系统组成，其中实验段固定在运动平台上（图 1）。实验段为圆管，内径 24 mm，长 0.8 m，下端有 1.8 m 长的稳定段，保证气-水两相混合充分。本次实验水温 20℃，压力为 0.2 MPa，液相表观速度范围为 0.05~4.1 m/s，气相表观速度范围为 0.02~18 m/s。运动平台最大摇摆角度 30°，最大摇摆角加速度 0.55 rad/s²。

流量测量采用 2 台配有 ST3000 智能式差压变送器的文丘里流量计，量程分别为 40~2500 kg/h 和 1~20 t/h，精度为 0.5%。本次实验中，流量测量不确定度为 1.27%；气相流量测量采用 2 台量程分别为 0.3~300 L/min 和 150~1600 L/min

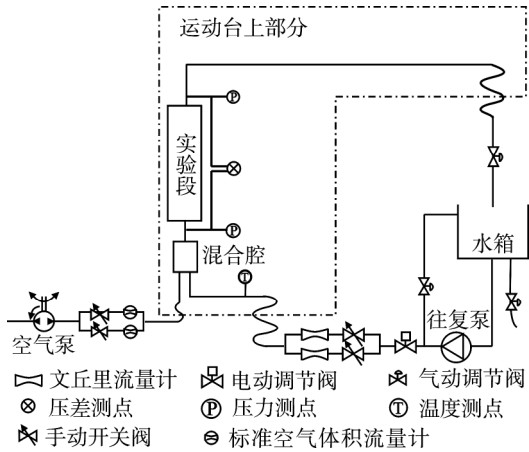


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Experiment Apparatus

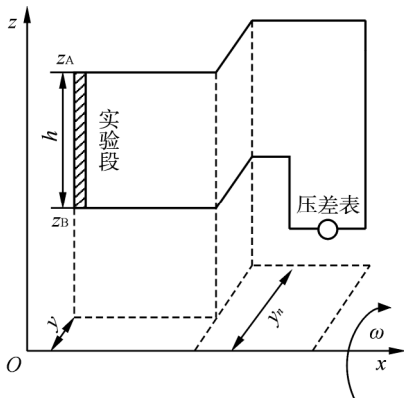


图 2 实验段及差压变送器布置图

Fig. 2 Placement of Test Section and Pressure Differential Gauge

h —实验段高度； ω —摇摆角速度； z_A 、 z_B —进、出口取压点与运动平台的高差； y —实验段距摇摆轴的水平距离； y_n —第 n 段竖直引压管距摇摆轴的水平距离

的标准空气体积流量计，精度为 2%，本次实验中测量不确定度为 3.18%。

实验中去离子水由水箱经往复泵送入混合腔；空气由空气泵加压后经空气流量计送入混合腔；去离子水和空气流量分别由相应阀门控制，二者在混合腔充分搅混，经稳定段后流入实验段并最终流入水箱。实验段两端通过测压孔测量管内两相流体压力及压降，两测压孔间距为 0.774 m。

摇摆条件下，由于与差压变送器相连的引压管内充满流体，加速度会在引压管流体上产生相应的压降，并作用到差压变送器上，使得差压变送器的测量值变为一个与运动相关的信号。因此，为了准确获得摇摆条件下实验段内两相压降，需对采集的压降信号进行处理。实验段及差压变送器在运动平台上的布置位置如图 2 所示。

摇摆条件下，测量得到的压降为整个测压环路的总压降 Δp_m ，因此有：

$$\Delta p_m = \Delta p_{\text{exp}} - \Delta p_{h,s} - \Delta p_{\text{ad},s} \quad (1)$$

式中， Δp_{exp} 为实验段总压降； $\Delta p_{h,s}$ 为引压管段重力压降； $\Delta p_{\text{ad},s}$ 为引压管在摇摆条件下产生的附加压降。

引压管段重力压降 $\Delta p_{h,s}$ 表达式为：

$$\Delta p_{h,s} = \rho_L g h \cos \theta(t) \quad (2)$$

式中， $\theta(t)$ 为摇摆角位移； ρ_L 为液相密度； g 为重力加速度。

摇摆条件下，对于平行于摇摆轴布置的引压管，摇摆引起的附加惯性力垂直作用于管壁，不会对测量系统引入附加压降，则引压管引入的附加压降 $\Delta p_{\text{ad},s}$ 如下：

$$\Delta p_{\text{ad},s} = \rho_L \frac{\omega(t)^2}{2} \sum_1^n (z_{n,A} + z_{n,B}) h_n - \rho_L \varepsilon(t) \sum_1^n y_n h_n \quad (3)$$

式中， $\omega(t)$ 为摇摆角速度； $\varepsilon(t)$ 为摇摆角加速度，具体表达式见文献[4]； $z_{n,A}$ 和 $z_{n,B}$ 分别为第 n 段竖直引压管上、下端与运动平台的位差； h_n 为第 n 段竖直引压管的高度。

则实验段测量总压降 Δp_{exp} 为：

$$\Delta p_{\text{exp}} = \Delta p_m + \rho_L g h \cos \theta(t) +$$

$$\rho_L \frac{\omega(t)^2}{2} \sum_1^n (z_{n,A} + z_{n,B}) h_n - \rho_L \varepsilon(t) \sum_1^n y_n h_n \quad (4)$$

2 摇摆条件下两相压降计算模型构建

对于摇摆条件下实验段,总压降 Δp_{pre} 由摩擦压降 Δp_f 、重力压降 Δp_h 、加速压降 Δp_a 以及运动条件引入的附加压降 Δp_{ad} 组成。由于本次实验在绝热条件下开展,则加速压降为 0,则实验段总压降 Δp_{pre} 为:

$$\Delta p_{pre} = \Delta p_f + \Delta p_h + \Delta p_{ad} \quad (5)$$

2.1 摩擦压降

根据 L-M 关系式^[5],有:

$$-\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_{TP} = -\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_L \Phi_{L0}^2 \quad (6)$$

$$-\left(\frac{dp_f}{dz}\right)_L = \frac{2f_L \rho_L J_L^2}{D} \quad (7)$$

$$\Phi_{L0}^2 = 1 + C/X + 1/X^2 \quad (8)$$

$$X^2 = \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.2} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{1.8} \quad (9)$$

$$x = \frac{\rho_G J_G}{\rho_L J_L + \rho_G J_G} \quad (10)$$

上述各式中, $(dp_f/dz)_{TP}$ 为两相摩擦压降梯度; $(dp_f/dz)_L$ 为只有液相时的摩擦压降梯度; Φ_{L0} 为全液相摩擦乘子; J_L 为液相表观速度; J_G 为气相表观速度; X 为表征参数; f_L 为只有液相时的摩擦系数; ρ_G 为气相密度; x 为质量含气率; μ_L 和 μ_G 分别为液相和气相粘度; C 是由实验数据确定的拟合系数,通常情况下 C 值取决于流态,但摇摆运动会影响气相扰动加剧,进而影响气液两相流态,因此本文考虑气液两相密度的影响,对实验系数 C 按如下形式进行拟合^[6]:

$$C = [C_1 + (C_2 - C_1)(1 - \rho_G/\rho_L)^{0.5}] \times [(\rho_G/\rho_L)^{0.5} + (\rho_L/\rho_G)^{0.5}] \quad (11)$$

式中, C_1 和 C_2 为拟合的待定参数。根据本次摇摆条件下压降测量实验结果,拟合得到: $C_1 = -171.11$, $C_2 = 10.627$ 。

2.2 重力压降

摇摆条件下,重力压降 Δp_h 计算关系式如下:

$$\Delta p_h = \rho_m g h \cos \theta(t) \quad (12)$$

两相混合密度 ρ_m 采用下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{1-x}{\rho_L} + \frac{x}{\rho_G} \quad (13)$$

2.3 附加压降

实验段在摇摆条件下产生的附加压降 Δp_{ad} 如下:

$$\Delta p_{ad} = \rho_m \frac{\omega(t)^2}{2} \sum_1^n (z_{n,A} + z_{n,B}) h_n - \rho_m \varepsilon(t) y h \quad (14)$$

3 结果与分析

3.1 摇摆条件下两相压降计算模型构建

采用上述提出的摇摆条件下两相压降计算关系式,计算不同摇摆工况下通道内总压降时均值,并与实验测量值进行了对比,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,摇摆条件下所有数据偏差都在 $\pm 30\%$ 以内,符合较好。

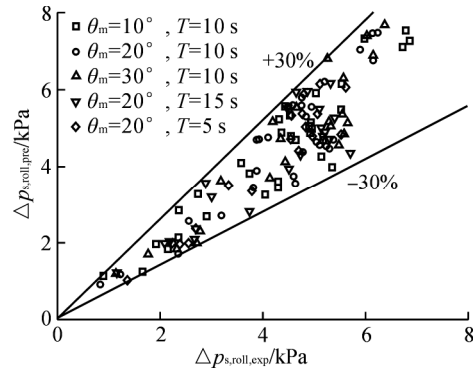


图 3 摇摆条件下总压降时均计算值与实验值对比

Fig. 3 Comparison between Predicted and Measured Total Pressure Drop under Rolling Motion

$\Delta p_{s,roll,pre}$ —摇摆条件下总压降时均计算值; $\Delta p_{s,roll,exp}$ —摇摆条件下总压降时均实验值

3.2 摇摆运动对两相压降瞬时特性的影响

以气液相表观速度分别为 0.19 m/s 和 2.48 m/s 的工况为例,获得了摇摆振幅 20°、周期 10 s 时瞬时测量总压降 p_{exp} ,将其与静止时该工况下时均总压降 p_{stic} 的比值示于图 4a;图 4a 中同样示出了该工况下计算总压降 p_{pre} 与 p_{stic} 的比值。以同样方式给出了气液相表观速度分别为 0.13 m/s 和 0.96 m/s 的工况在摇摆振幅 30°、周期 10 s 时结果(图 4b)。从图 4b 中可以看出,摇摆条件下测量总压降总体呈周期性波动,且波动振幅随热工及运动参数变化而变化,但波动周期是运动周期的 1/2。对于图 4a,此时液相表观速度高,气相表观速度低,则气相被夹带在液相中运动,摇摆作用影响较小,测量值和预测值符合较好;而对于图 4b,此时液相表观速度较低,

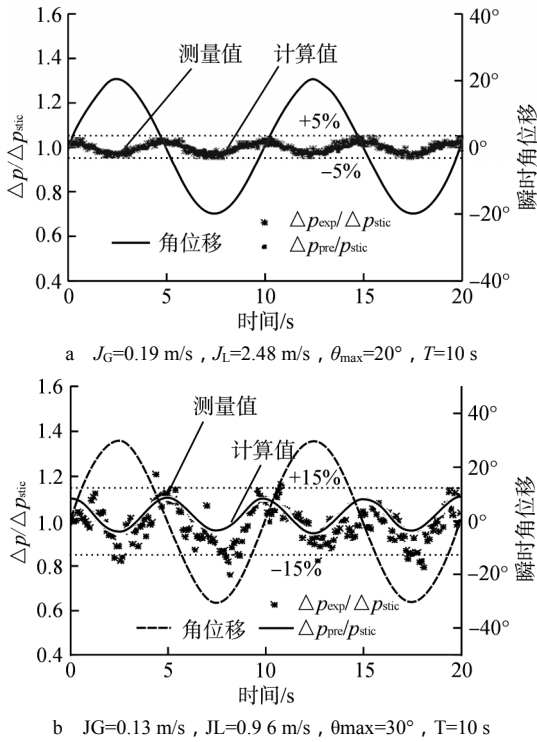


图4 摇摆条件下两相总压降瞬时变化
Fig. 4 Transient Change of Two-Phase Total Pressure Drop under Rolling Motion

受摇摆作用影响，气相会向壁面聚集，随机发生聚合、破碎等一系列复杂的演化过程，导致压降数据会围绕预测值出现随机的扰动。对现有摇摆工况下总压降时均值进行统计分析，发现其与静止时偏差均在±5%以内，表明摇摆运动对两相压降时均值影响很小。

为进一步分析摇摆运动时瞬时总压降发生波动的原因，对图4a工况下各压降分量进行计算，结果示于图5。从图中可以看出：摇摆条件下，摩擦压降在摇摆过程中基本不变；重力压降周期性波动，且当摇摆角位移最大或最小时，重力压降最小，这是因为摇摆时实验段进、出口位差会随着角位移的变化而变化，而角位移最大或最小时，实验段进、出口位差最小；摇摆运动引入的附加压降的绝对值很小，在现有工况范围内可以忽略。在现有摇摆工况下，实验段内重力压降的周期性波动是总压降出现同相周期性波动的原因。

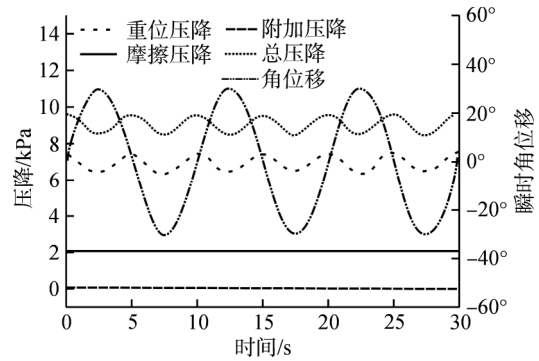


图5 摇摆条件下两相压降分量瞬时变化
Fig. 5 Transient Change of Two-Phase Pressure Drop Component under Rolling Motion

4 结论

(1) 建立了摇摆条件下压降计算模型，并与实验数据进行了比较，结果显示所有数据偏差都在±30%以内，符合较好。

(2) 摇摆条件下通道内瞬时总压降呈现周期性波动，但其时均值和静止时相比偏差不大。

(3) 计算分析发现摇摆条件下摩擦压降基本不变，摇摆运动引入的附加压降可忽略不计，而摇摆条件下重力压降的周期性波动是总压降出现周期性波动的原因。

参考文献：

- [1] 徐济望. 沸腾传热和气液两相流[M]. 第二版. 北京：原子能出版社, 2001.
- [2] 于凯秋, 曹夏昕, 阎昌琪, 等. 摇摆状态下两相流空泡份额变化规律分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(11): 1250-1254.
- [3] 栾锋, 阎昌琪, 曹夏昕, 等. 摇摆对垂直上升管内气液两相流截面含气率影响的研究[J]. 核科学与工程, 2006, 26(3): 215-219.
- [4] 谢添舟, 陈炳德, 闫晓, 等. 摇摆条件下矩形窄缝通道内汽泡脱离直径模型构建及分析[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(5): 801-805.
- [5] Lockhart R W, Martinelli R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes[J]. Chem. Eng. Prog, 1949, 45(1): 39-48.
- [6] Chisholm D. Paper presented at symposium on fluid mechanics and measurements in two-phase flow systems[R]. 1969, Leeds: University of Leeds. No. 63.

(责任编辑：马 蓉)