

垂直上升管内气水两相流动截面含气率的测量

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室) 蔡继勇 陈昕宽 叶强

[摘要] 用水平—上升管组合法测量垂直上升管内气水两相流动在泡状流和弹状流情况下截面含气率的值,应用理论模型对实验结果进行了预测,预测值与实验结果吻合良好。证实了此方法在工程应用中是一种简单、准确、可行的测量方法。

关键词 气水两相流动 截面含气率 组合法
垂直上升管 测量

中图分类号 TK31

1 前言

在动力及核能工业中,会经常遇到气液两相在垂直上升管内共同流动的情况。截面含气率是气液两相流动中的最重要的特性参数之一,其对于管内流动压降和传热特性的计算占有十分重要的地位。特别是在泡状流和弹状流流动时,垂直上升管内的重位压降可占总压降的90%以上^[1,2],而要准确地计算重位压降,就必须建立起截面含气率准确的计算式。

近几十年来,对于截面含气率的测量,已为广大研究者所尝试,测量方法有光纤—电导探针组合法、快速关闭阀门法, γ —射线等。但这些方法在实际应用过程中非常麻烦,并且其要求的测量条件比较高,而无法在工程中加以应用推广。为此,作者采用垂直上升管与水平管组合的方法来测量截面含气率。此方法的核心就是以水平段的摩擦阻力替代垂直上升管的摩擦阻力,在泡状及弹状流流动时,由于加速压降相对于总压力降来说比较小,一般可以忽略,从而可根据总压力降求得垂直上升管内的重位压降,从重位压降即可导出管内的平均截面含气率。同时采用理论模型来预测了垂直上升管内泡状及弹状流时的截面含气率。

2 实验系统

实验是在油气水实验台上进行的,其结构简图

可参见图1。工质选用空气和自来水,空气由空压机压出,经过气路流量测量孔板,进入混合器,在混合器中与由水泵泵出经过水路流量测量孔板而来的水相混合,然后进入水平实验段,绕过弯头进入垂直上升实验管段。垂直上升及水平实验段长1.5 m,其内径为44 mm的无缝碳钢管,在垂直上升管段上开有观察窗,以便于流型的观察。在实验段的入口有2.5 m长同内径的稳定段,这样可消除由于流动不稳定而对流型观察及流量测量的影响。实验段的压降采用1151—电容式差压变动器测量,水平、垂直上升实验段入口及出口的压力测量采用压力变送器,温度测量选用镍铬镍硅热电偶,数据采集系统选用IMP3595数据采集板。实验参数范围:压力: $P=0.1\sim 0.5(\text{MPa})$;温度: $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$;水的折算速度: $V_{1S}=0\sim 1.2(\text{m/s})$;空气的折算速度: $V_{GS}=0\sim 15(\text{m/s})$; $\alpha=0.0\sim 1.0$

3 截面含气率的计算

在垂直上升管内,实验段总的压力降 ΔP 可表示为重位压力降 ΔP_{ug} 、摩擦阻力降 ΔP_{uf} 、加速压力降 ΔP_{ua} 之和。在泡沫流、弹状流流动区域,由于加速压力降通常远小于总的压力降,因此可忽略不计,那么垂直上升管内总的压力降可写成下面的表达式:

$$\Delta P = \Delta P_{ug} + \Delta P_{uf} \quad (1)$$

根据前面的论述,用水平管内的摩擦阻力 ΔP_{Hf} 替代垂直上升管内的摩擦阻力 ΔP_{uf} ,式(1)则可改写为如下的形式:

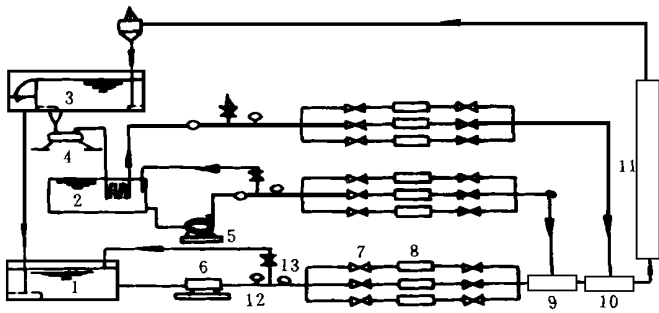
$$\Delta P = \Delta P_{ug} + \Delta P_{Hf} \quad (2)$$

由于式(2)中 ΔP 和 ΔP_{Hf} 可通过实验测量出来,那么垂直上升管内的重位压力降就可应用式(2)求出:

$$\Delta P_{ug} = \Delta P - \Delta P_{Hf} \quad (3)$$

$$\text{而: } \Delta P_{ug} = \rho_L g h \quad (4)$$

$$\text{式(4)中: } \rho_L = \rho_W (1 - \alpha_g) + \rho_g \alpha_g \quad (5)$$



1—油箱 2—水箱 3—分离箱 4—空压机 5—水泵
6—油泵 7—阀门 8—测量孔板 9—油水混合器
10—油气水混合器 11—实验段 12—热电偶 13—压力表

图 1 实验台结构简图

联立式(3)、(4)、(5)则可求出垂直上升管内的平均截面含气率:

$$\alpha_g = \frac{\Delta P - \Delta P_{Hf} - \rho g h}{gh(\rho_g - \rho_W)} \quad (6)$$

4 实验结果及模型预测

4.1 泡状流

在垂直及倾斜向上管道中的气液两相流动, 气相的在线速度 V_G 可表示为气泡末端上升速度 V_∞ 和管道中心的混合物速度 $C_0 V_m$ (Zuber & Findlay^[3], Aziz et al^[4]) 之和:

$$V_G = C_0 V_m + V_\infty \quad (7)$$

而 $V_G = V_{GS} / \alpha_g$, 则式(7)又可重写为:

$$\alpha_g = V_{GS} / (C_0 V_m + V_\infty) \quad (8)$$

对于垂直向上流动, Harmathy^[5]认为气泡末端的上升速度 V_∞ 可用下式来计算:

$$V_\infty + 1.53 [g\sigma(\rho_W - \rho_g) / \rho_L^2]^{1/4} \quad (9)$$

式(8)中 C_0 反映了管道中由于气相的作用而使其混合物的平均速度提高的程度. 对于湍流流动, 管道中心最大的速度值与通道内混合物的平均速度的比值 C_0 可达到 1.2. 尽管并不是所有的气泡都集中在管道中心流动, 但是很少有气泡贴壁向上运动, Hasan & Kabir^[1]认为 $C_0 = 1.2$ 和他们的实验数据以及其他一些研究者的数据吻合良好.

图 2 给出了作者的实验结果与式(8)预测结果的比较. 从图中可发现, 当系统的工作压力高于 0.3 MPa 时, 作者的实验结果和式(8)的计算值吻合良好, 均方根误差为 3.25%, 而当系统的工作压力

低于 0.3 MPa 时, 采用式(8)计算出的值较实验值偏低, 均方根误差为 5.6%.

4.2 弹状流

弹状流的主要特征是由一个几乎占据了整个管截面的 Taylor 气泡和一个紧随其后的内部含有许多小气泡的液弹组成, 图 3 给出了垂直上升管内一个弹单元的结构图. 假定液弹中气泡的漂移通量值等于 Taylor 气泡的漂移通量值, 那么我们可以得到一个弹状流的截面含气率的理想表达式:

$$\alpha_g = V_{GS} / (C_1 V_m + V_{\infty T}) \quad (10)$$

Hasan—Kabir^[1]曾采用了一个弹单元的方法分析了弹状流时的截面含气率: 长度为 L_T 的 Taylor 气泡段的截面含气率用 α_T 表示, 而长度为 L_s 的液弹的截面含气率用 α_s 表示, 那么我们可以得到如下的一个弹单元的截面含气率的表达式:

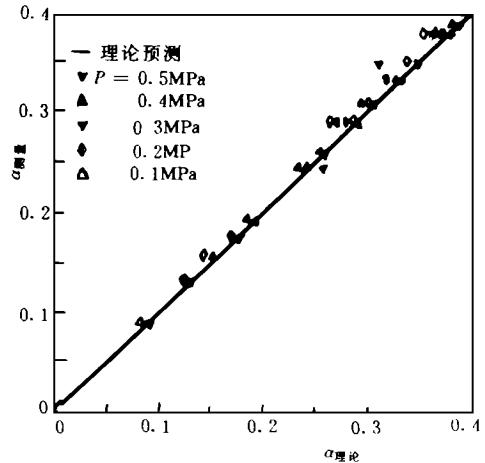


图 2 泡状流时实验与预测结果比较

$$\alpha_g = \frac{L_T}{L} \alpha_T + \frac{L_s}{L} \alpha_s \quad (11)$$

可对于 Taylor 气泡段的截面含气率可以近似地采用式(10)计算, 而液弹中 α_s 的值, Akagawa 和 Sakaguchi^[5]认为当空气的折算速度 V_{GS} 大于 0.4 (m/s) 时, $\alpha_s = 0.1$, 而当气相的折算速度小于 0.4 (m/s) 时, $\alpha_s = 0.25 V_{GS}$, 那么式(11)可改写为:

$$\alpha_g = \frac{L_T}{L} \alpha_T + 0.1 \quad V_{GS} > 0.4(\text{m/s})$$

$$\alpha_g = \frac{L_T}{L} \alpha_T + 0.25 V_{GS} \quad V_{GS} < 0.4(\text{m/s}) \quad (12)$$

当气相的折算速度大于 0.4(m/s) 时, Hasan & Kabir^[1]应用式(8)得出了液弹中截面含气率的表达

式为:

$$\frac{L_s}{L} \alpha_s = \frac{(L_s/L) V_{GS}}{c_0 V_m + V} = 0.1$$

进一步推导可得:

$$\frac{L_s}{L} = 0.1 \left[\frac{c_0 V_m + V_\infty}{V_{GS}} \right] \quad (13)$$

同样当气相的折算速度小于 0.4(m/s)时,可以

得到:

$$\frac{L_s}{L} = 0.25$$

$$(c_0 V_m + V_\infty) \quad (14)$$

应用类似于泡状流的分析方法, Bendiksen^[6], Hasan & Kabir^[1] 认为其流动参数 C_1 为 1.2, 本文也采用此值来比较实验结果, 而对于式(8)中 Taylor 气泡的上升速度 $V_{\infty T}$, Nicklin^[7]

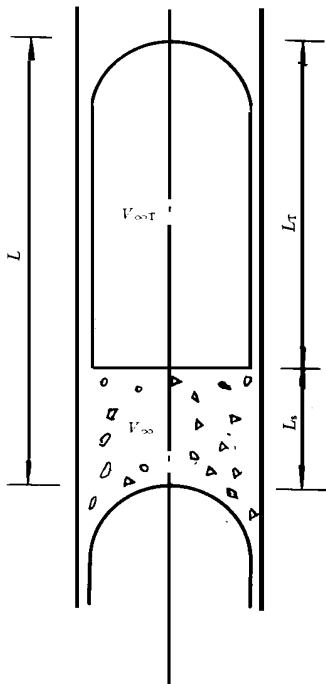


图3 垂直上升管内一个单元结构图

认为对于垂直向上流动时可采用

如下的计算式比较合适:

$$V_{\infty T} = 0.345 \sqrt{gd \left(\frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_L} \right)} \quad (15)$$

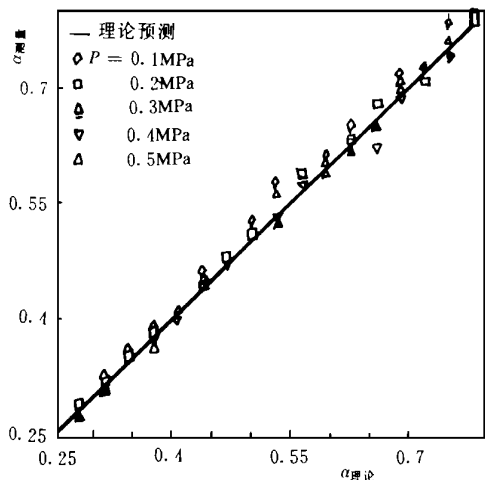


图4 弹状流时实验与预测结果比较

上弹状流时的截面含气率值。图4给出了作者的实验结果和预测值之间的比较, 从图中可发现, 当工作压力大于 0.3MPa 时, 实验结果和预测值吻合良好, 均方根误差为 2.72%, 而当压力小于 0.3MPa 时, 预测值低于实验结果, 特别是在较小的液体折算速度时, 其均方根误差为 4.54%。

5 讨论

从上述分析发现, 作者采用的水平—垂直上升管组合法来测量截面含气率在低工作压力情况下误差偏大的原因在于: 由于沿程阻力的损失, 垂直上升段的工作压力要低于水平段的工作压力, 因此垂直上升管内的空气由于压力的降低而发生膨胀。随着工作压力的增大, 水平管的沿程阻力损失相对于工作压力越来越小, 相应地垂直上升管内气体的膨胀程度就越小。随着气体的膨胀, 在相同的质量流量情况下, 水平段的摩擦阻力值小于垂直上升管内的摩擦阻力值, 在用式(1)计算截面含气率时, 就会出现实验结果比预测值偏高的现象, 而随着工作压力的提高, 气体膨胀的程度就会相对变小, 水平段的摩擦阻力和垂直上升段的摩擦阻力值逐渐相等, 实验结果就和预测值更为接近。

6 结论

(1)水平—垂直上升管组合法测量垂直上升管内气水两相泡状和弹状流时的截面含气率, 用理论模型对实验结果进行预测, 实验值和预测值吻合良好。

(2)通过实验结果分析发现, 本测量方法在系统工作压力高的情况下的测量精度高于系统工作压力较低时的值, 因此, 这种测量方法更适用于高压下的工作系统。

(3)由于需要测量的参数较少, 要求的测量设备、现场条件并不高, 因此此测量方法是一种简单、方便、准确的测量手段, 在工程应用中值得推广。

符号表

- P_L, P_g, P_w : 混合物, 空气, 水的密度, (kg/m³)
- V_{LS}, V_{GS} : 水, 空气的折算速度, (m/s)
- $V_m, V_\infty, V_{\infty T}$: 混合物的平均速度, 气泡末端上

联立式(10)、(12)、(13)、(15)即可求得垂直向

(下转 36 页)

动提供驱动力,使固体颗粒能顺利、稳定地进入物料输送室,并避免固定颗粒在孔口处沉积。运行过程中,由于立管内物料有较高阻力和固体颗粒的向下

分别示于图 10 和图 12,相对应的松动风门开度与循环物料量之间的关系分别示于图 9 和图 11。从图中可以看出,不但通过调节松动风风量的大小可以很好地调节和控制固体颗粒通过返粒器的流量,而且可有效地传输固体颗粒进行循环。实际运行时为防止固体颗粒沉积和结渣,松动风量应不小于固体颗粒的最小流化风量,一般为最小流化风量的 1.2~1.5 倍。

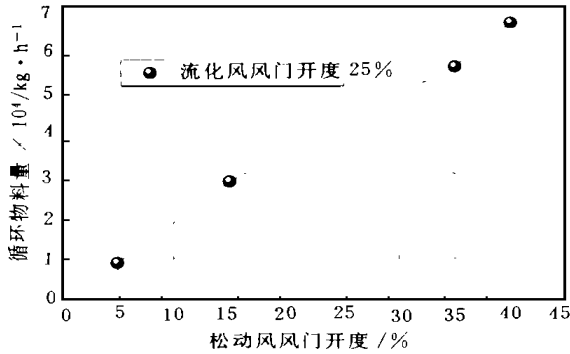


图 11 松动风风门开度和循环物料量之间的关系

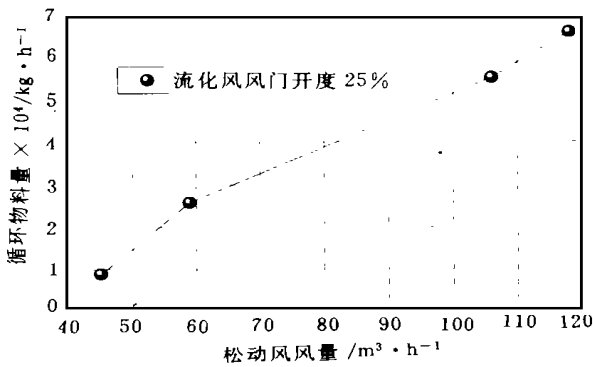


图 12 松动风风量和循环物料量之间的关系

流动,这部分充气只有一小部分能进入立管,而大部分充气将携带固体颗粒通过孔口进入物料输送室。进入输送室的那部分充气与流化风一起输送固体颗粒进入燃烧室,所以说这部分充气对于 U 型返料器调节和控制固体颗粒返料量来说是非常重要的。设置流化风为一定值,通过调节松动风进而调节循环物料量而获得的松动风量与循环物料量之间的关系

4 结论

(1)固定流化风量,调节松动风量的大小来调节控制物料循环量。这种组合调节方式其返料量随松动风量的变化呈线性变化。且流化风量的大小对其线性返料关系影响不大,可满足锅炉稳定运行的要求,具有良好的调节品质。循环流化床锅炉运行中应采用此种组合调节方式。此外,为防止固体颗粒在物料输送室和送入室沉积与结渣,流化风与松动风的最小极限风量分别为固体颗粒最小流化风量的 2~3 和 1.2~1.5 倍。

(2)固定松动风量,调节流化风量的大小来调节控制物料循环量。这种组合调节方式其返料量在松动风量较大时,极易引起返料量的非线性变化,尤其在流化风量较小时,其风量的微小变化,将导致返料量的剧烈变化,使锅炉无法运行。这种组合调节方式调节品质差,不宜采用。

(3)采用固定流化风量调节松动风量的组合调节方式可使 U 型返料器获得良好的调节品质。为循环流化床锅炉的稳定高效的运行提供可靠保证。

(辉 编)

(上接 32 页)

升速度, Taylor 气泡的速度, (m/s)

$\alpha_g, \alpha_T, \alpha_s$: 截面含气率, Taylor 气泡的含气率, 液弹中的含气率

$\Delta P, \Delta P_{ug}$: 测量段的总压降, 上升段的重位压降, (kPa)

$\Delta P_{uf}, \Delta P_{hf}$: 上升段的摩擦压降, 水平段的摩擦压降, (kPa)

h, d : 实验段的长度, 实验段的内径 (m)

σ : 表面张力 (N/m^2)

参考文献

- Hasan A R and Kabir C S. Prediction multiphase flow behavior in a deviated well. SPE, 15449, 1986.
- Kabir C S & Hasan A R. A study of multiphase flow behavior in vertical oil wells; Part 2—Field application. SPE, 15139, 1986.
- Zuber N and Findlay J. Average volumetric concentration in two-phase flow system. Trans. ASME. Heat Transfer; 1965—87; 453
- Aziz K et al. The flow of complex mixture in pipes. Van Nostrand CO. New York city, NY, USA 1972.
- Akagawa K and Sakaguchi T. Fluctuation of void ratio in two-phase flow. Bull. JSME. 1996. (9); 104.
- Bendixsen K H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. INT. J. Multiphase Flow 1984, 10; 467 ~ 483.
- Nicklin D J, Wilkes J O and Davidson J F Two-phase flow in vertical tubes. Trans. Inst. Chem. Engrs. 1962, 40; 61 ~ 68.

discussion is conducted of the cylindrical fins when the entropy generation attained a minimum value under forced convection conditions. **Key words:** fin, entropy generation, irreversibility

催化裂化再生烟气能量回收系统的经济优化 = **Exergoeconomic Optimization of a Catalytic Cracking Regeneration Flue-gas Energy Recovery System** [刊, 中] / Chen Qinglin, Hua Ben (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 20 ~ 23

By the use of the binary sub-system method of an energy system an exergoeconomic analysis and optimization is conducted of a flue-gas energy recovery system. Under the condition that the regeneration flue-gas physical parameters are constant the maximum economic benefits of recovery as a result of the optimum distribution of energy recovery quantity and heat recovery rate within the system are designated as the system optimization target. In addition, on the basis of a given economic model an optimization is performed of a representative flue-gas energy recovery system. Thereupon, obtained are the optimum design operation parameters when the system enjoys the maximum economic benefits. The optimization results can serve as a useful guide during the optimization design and operation of flue-gas energy recovery systems. **Key words:** fluid catalytic cracking, exergoeconomics, system optimization

舰船用冷凝器冷却管腐蚀寿命的可靠性探讨 = **A Reliability Study of the Cooling Tube Corrosion Life of a Naval Condenser** [刊, 中] / Cha Changsong, Hu Deming, Xu Yigui (Resident Military Representative Office of No. 425 Works) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 24 ~ 26

Local corrosion constitutes a major failure mode of naval condenser cooling tubes. The reliability life calculation of such tubes pertains to a maximal value problem. Based on accumulated corrosion data and the analytical report on naval condenser cooling tubes the authors have set up a reliability mathematical model for Bfe 30-1-1 cooling tube corrosion life assessment. The reliable service life of the main condenser cooling tubes has also been predicted. **Key words:** reliability, condenser, cooling tube, corrosion life, local corrosion

柴—燃交替使用动力装置(CODOG)的实验研究 = **Experimental Study of a Combined Diesel or Gas Turbine (CODOG) Power Plant** [刊, 中] / Zhang Biao, Wang Chuanpu, (Harbin Engineering University) et al // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 27 ~ 29

On the basis of research and development of a combined diesel or gas turbine (CODOG) power plant test rig an experimental study is conducted of the effect of such a variety of factors as load, diesel engine throttle speed and S.S.S clutch damping on the diesel and gas turbine switch-over process. As a result, some meaningful conclusions have been obtained. **Key words:** CODOG power plant, S.S.S clutch, dynamic process, experimental study

垂直上升管内气水两相流动截面含气率的测量 = **The Measurement of Void Fraction of a Two-phase Flow in Vertical Riser Tubes** [刊, 中] / Cai Jiyong, Chen Tingkuan, Ye Qiang (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(1). — 29 ~ 33

The void fraction of gas-water two-phase flow in a vertical riser tube under bubble and slug flow conditions is measured by the use of a combination horizontal-riser tube method. The experimental test results are forecast using a theoretical model. The forecast values agree well with those of experimental results. This proves that the above-mentioned measurement method is a simple, accurate and feasible one. **Key words:** gas-water two-phase flow, void fraction, combination method, vertical riser tube, measurement

油页岩循环流化床锅炉返料系统调节特性试验研究 = **An Experimental Investigation of the Material Return System Regulating Characteristics of a Oil Shale Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 中] / Jiang Xiumin