

# 气液两相流多喷嘴分流取样计量研究

梁法春, 杨桂云, 王金龙, 于皓, 曹学文

(中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**提出一种具有4个分流喷嘴的新型取样器结构,根据分流比和取样流体气、液流量确定主管路气液相流量。为保证取样流体的代表性,采用“流型调整”与“阻力控制”两种方法抑制相分离的发生。建立气液两相流数值模型,模拟气液两相流在取样器中的流动特性。在气液两相流试验环道上开展试验测试,流型包括波浪流、段塞流及环状流。结果表明:在试验范围内气、液相分流系数接近理论值0.25,其主要取决于分流喷嘴的数目,不受流型、气液流速等参数波动的影响,流量测量误差小于 $\pm 6.0\%$ 。该取样计量装置具有体积小、精度高、维护费用低的优点,可代替传统计量分离器,实现气液流量的实时测量。

**关键词:**两相流; 流量测量; 取样; 试验

**中图分类号:**O 362      **文献标志码:**A

**引用格式:**梁法春,杨桂云,王金龙,等.气液两相流多喷嘴分流取样计量研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):143-147.

LIANG Fachun, YANG Guiyun, WANG Jinlong, et al. Gas-liquid two-phase flow metering using multi-nozzle sampler[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 143-147.

## Gas-liquid two-phase flow metering using multi-nozzle sampler

LIANG Fachun, YANG Guiyun, WANG Jinlong, YU Hao, CAO Xuewen

(College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** A novel sampler with four nozzles was proposed to extract a small fraction of gas liquid mixture from the main stream. The total gas and liquid flow rate was determined according to the flow rate of the sampled fluid and the extraction ratio. A gas-liquid two-phase flow numerical model was developed to simulate flow characteristics of gas-liquid two-phase flow in the sampler. Experiments were carried out in an air-water two-phase flow loop. The flow patterns observed during the tests includes wavy flow, annular flow and slug flow. The experimental results show that the gas and liquid flow is close to the theoretical value of 0.25 and is independent of inlet quality, flow pattern, gas and liquid velocity. The measurement error of flow rates is less than  $\pm 6.0\%$ . The metering device proposed has the merits of small size, low cost and high accuracy and can replace conventional metering separator for online measurement of gas-liquid two-phase flow.

**Key words:** two-phase flow; flow rate measurement; sampling; experiment

由于多相流动的随机性和复杂性,其流量计量一直是难题。取样式多相计量方法融合了传统分离式计量方法和不分离在线计量方法的优点,近年来引起广泛关注<sup>[14]</sup>。取样式计量成功的关键在于保证取样流体与被测主流体具有高度一致的相分率和稳定的流量比例,即要进行等比例取样。然而取样流体气液相比例与上游主管路通常会出现差异,这

就是所谓的相分离现象<sup>[5-8]</sup>。实现比例取样的关键在于取样器,因此探索新型取样结构,提高取样流体的代表性,一直是研究者追求的目标。王栋等<sup>[9-10]</sup>采用三通管作为取样器进行了流量测量试验,无法实现气、液相流量的同时测量。Stoisits等<sup>[11]</sup>采用混合器将气、液两相混合均匀,然后再进行取样。其缺点是压力损失大,且当气液相流量较小时,混合效果

收稿日期:2014-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51006123);中央高校基本科研业务费专项基金项目(14CX05028A)

作者简介:梁法春(1977-),男,副教授,博士,主要从事多相流体分离与计量研究。E-mail:Liangfch@upc.edu.cn。

差,影响取样的代表性。梁法春等<sup>[12-13]</sup>基于分时原理的转轮型分配器提高了取样精度,但转轮为运动部件,在气相流量较大的工况下工作容易发生卡堵。有研究表明两相流取样特性不但取决于上游入口参数还受取样回路和主流回路下游压力波动的影响<sup>[14]</sup>。笔者提出一种具有多个喷嘴的新型取样结构,通过流型调整和喷嘴阻力调节来控制相分离,实现气液两相流流量的准确测量。

## 1 气液两相流多喷嘴分流器结构和工作原理

### 1.1 分流取样计量原理

图1为取样计量原理图。气液两相流体流经取样器时被成分流体和主流体两部分,分流体经计量分离器分离计量后,重新与主流体汇合。被测两相流体的气相和液相流量计算为

$$M_{1G} = M_{3G} / K_G, \quad (1)$$

$$M_{1L} = M_{3L} / K_L. \quad (2)$$

式中, $M_{1G}$ 、 $M_{1L}$ 分别为被测主管真实气、液相流量; $K_G$ 、 $K_L$ 分别为气、液相分流系数; $M_{3G}$ 、 $M_{3L}$ 分别为分流体的气、液相流量。

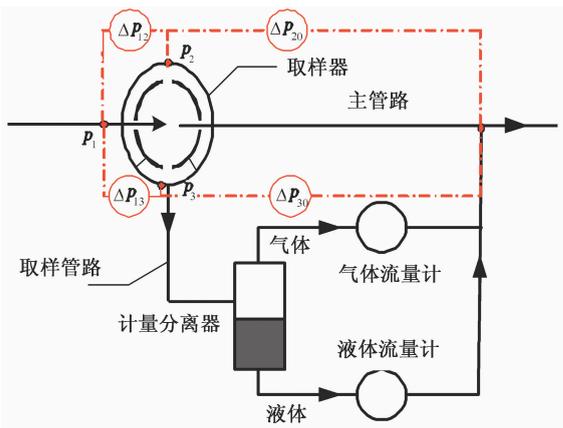


图1 气、液两相流分流取样计量原理

Fig. 1 Gas-liquid flow rate metering principle of sampling method

### 1.2 多喷嘴分流取样器结构

图2为分流取样器结构示意图,主要由旋流叶片、整流器、分流喷嘴、流体收集室等组成。上游气、液两相流首先通过旋流叶片和整流装置进行流型调整,将分层流、波浪流、半环状流等不对称流型调整为液膜沿管周均匀分布的环状流型。因下游通道由盲板密封,上游流体完全进入4个分流喷嘴并在流体收集室汇集。流体收集室由隔板分离成主流体室和取样流体室。4个分流喷嘴中1个与取样流体室相通,其余3个与主流体室相通。取样流体室

与取样流体计量回路相连,通过分离方式计量气、液相流量后,重新混合返回主管路。

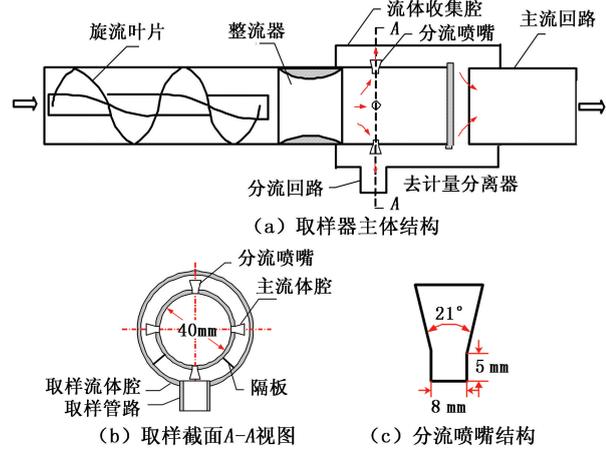


图2 分流取样器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampler structure

### 1.3 取样过程相分离控制

消除相分离,保证进入4个取样喷嘴的气、液相流量一致,是实现精确计量的前提。进入分流喷嘴的气、液相流量取决于喷嘴入口处气液相分布及喷嘴前后差压。为此,提出了“流型调整”和“喷嘴阻力调节”的相分离控制方案。

流型调整:通过在取样喷嘴上游安装旋流叶片和整流器(图2(a)),将上游不对称流型调整为均匀环状流,从而保证了各个分流喷嘴接触气、液相的几率相等。

喷嘴阻力调节:因各个分流喷嘴入口在同一截面上,同时取样流体经计量后又重新返回主流体回路(图1),故取样管路和主流路构成并联管路。根据并联管路特性,其起、终点压降相等,即  $\Delta p_{13} + \Delta p_{30} = \Delta p_{12} + \Delta p_{20}$ 。  $\Delta p_{13}$ 、 $\Delta p_{12}$ 分别为取样喷嘴和非取样喷嘴两侧差压,  $\Delta p_{30}$ 、 $\Delta p_{20}$ 分别为取样回路与主流路喷嘴下游压降。气、液两相流通过分流喷嘴时由于流通面积急剧减少,流速很高,产生的阻力损失远大于喷嘴下游管件的,即  $\Delta p_{13} \gg \Delta p_{30}$ ,  $\Delta p_{12} \gg \Delta p_{20}$ 。因此取样回路和主流路压降主要取决于喷嘴两侧压差,而两回路压降相等,从而各分流喷嘴前后压差也基本相同。

通过流型调整和喷嘴阻力调节,各个分流喷嘴流动特性基本一致。取样流体占被测流体的比例只取决于分流喷嘴的数目,而不受上游流型等参数变化的影响。理论上取样喷嘴的气、液流量分别为主管路气、液流量的  $1/N$  ( $N$ 为分流喷嘴数目)。本分配器周向均匀分布4个喷嘴,气、液相的理论分流系数均为0.25。

## 2 气、液两相流多喷嘴分流特性数值模拟

### 2.1 多相流模型

采用 FLUENT 软件进行取样过程数值模拟。气、液两相混合物经过旋流叶片后在离心力作用下发生气、液分离,液相将以液膜形式贴着管壁流动,在通过管壁分流喷嘴处气、液发生分流,流场将发生突变。为准确捕捉每一相的速度、相含率等参数,选取 Euler 多相流模型。湍流模型采用雷诺应力模型以提高流线弯曲、漩涡、旋转预测精确性。

### 2.2 边界条件确定

(1) 入口边界:速度入口 (velocity-inlet) 边界条件。

(2) 出口边界:出口采用压力出口 (pressure-outlet) 边界条件。

(3) 壁面条件:管道壁面、叶片表面、整流元件及密封盲板表面均采用无滑移壁面 (wall) 边界条件。

气、液两相流分流模型见图 3。

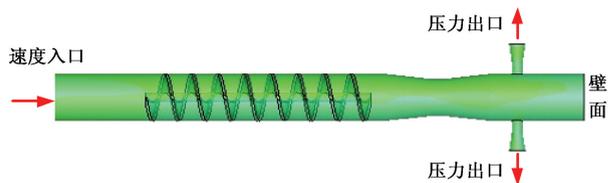


图3 气、液两相流分流模型

Fig.3 Gas-liquid splitting model

### 2.3 模拟结果

图4为气液两相流通过管壁4个分流喷嘴的气相分率分布特性(气相折算速度  $U_{SG}=20.0$  m/s,液相折算速度  $U_{SL}=0.1$  m/s, $x$ 表示 $x$ 轴向上距离原点的长度,mm)。由图4可见,气液两相流通过旋流叶片后,液相在离心力作用下被甩向壁面,通过多级旋流后最终形成均匀环状流型。到达分流截面时,在内外差压作用下气、液相加速流入分流喷嘴。图5为气、液相速度分布矢量图。由图5可以看出,各个分流喷嘴流动特性基本一致。

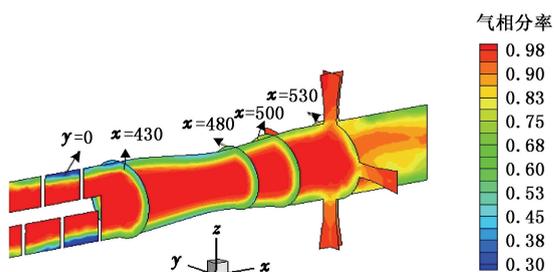


图4 取样器内气液相分布

Fig.4 Gas and liquid distribution in sampler

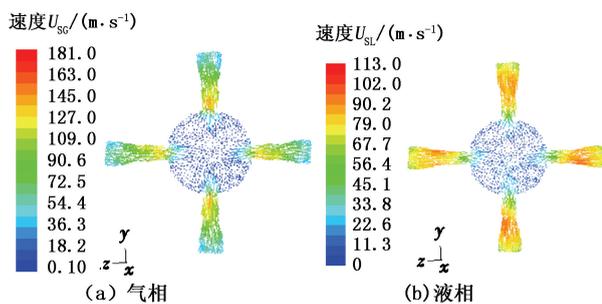


图5 取样截面气、液相速度矢量分布

Fig.5 Velocity vector distribution in splitting section of sampler

## 3 试验系统

试验在中国石油大学(华东)多相流试验环道上进行,气、液介质采用空气和水。测试段管道内径为40 mm,试验取样器水平布置。取样器上游安装了由透明机玻璃管制成的流型观察段。气相折算速度范围:5.0~25.0 m/s,液相折算速度范围:0.012~0.23 m/s,出现的流型包括波浪流、段塞流以及环状流。

气液两相流体经过试验取样器时通过分流喷嘴后来流被分成两部分,其中大部分直接流入下游的主回路,另一小部分混合物进入取样计量回路,计量分离器将这部分两相流体分离成单相气体和单相液体后分别计量各自流量。分流液体相流量  $M_{3L}$  采用高准质量流量计测量,分流体气相体积流量采用 YOKOGAWA 气体旋涡流量计测量,为获得质量流量  $M_{3C}$  还同时测量了当地温度、压力。

为了获得气、液相分流系数,试验中还测量了主管气相质量流量  $M_{1C}$  和液相质量流量  $M_{1L}$ ,其详细试验过程可参考文献[14]。

## 4 试验结果

### 4.1 流型对气、液相分流系数的影响

图6显示了流型对气、液相分流系数的影响。从图6中可以看出段塞流、环状流流量下气相分流系数基本维持0.25不变。而对于波浪流,当液相折算速度较小时,  $K_C$  随着液相折算速度的增大而减小,且当液相折算速度大于0.04 m/s时,气相分流系数接近理论值。主要原因是在波浪流型下,气液相流速较小,没有足够的动量形成均匀环状流,各个取样喷嘴接触气液相的几率不同,从而气相分流系数与理论值出现偏差。液相分流系数基本稳定在0.25左右,不受流型的影响。液相折算速度小于0.04 m/s时,稍微偏离理论值。优化旋流叶片结构,将有助于在低气、液流速条件下形成环状流,从

而提高分流系数的稳定范围。

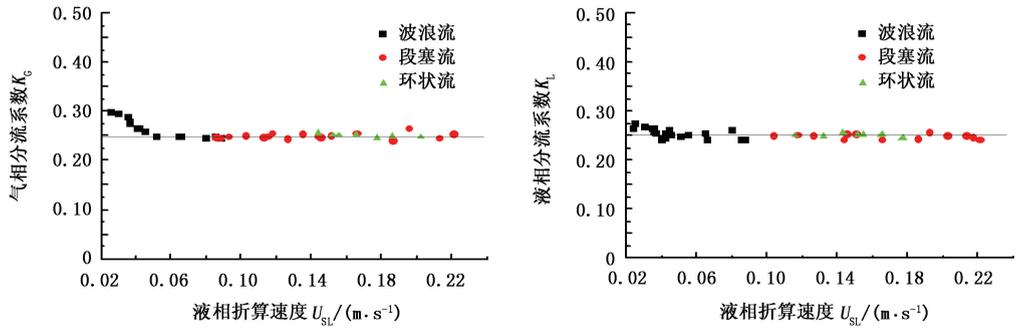


图6 流型对分流系数的影响

Fig.6 Effect of flow patterns on extraction ratio

### 4.2 气、液流量测量结果

图7为气、液相流量计量误差随质量含气率关系。计算公式为

$$E_G = \frac{M_{1GM} - M_{1G}}{M_{1G}} \quad (3)$$

$$E_L = \frac{M_{1LM} - M_{1L}}{M_{1L}} \quad (4)$$

式中,  $E_G$ 和  $E_L$ 分别为气、液相质量流量测量误差;

$M_{1GM}$ 、 $M_{1LM}$ 分别为测量的主管气、液相流量。

从图7中可以看出,在入口质量含气率0.1~0.6内气、液相流量计量误差基本在±6.0%以内,取得了良好的计量效果。需要指出的是本文中采用4个分流喷嘴进行取样计量,体积约为传统的完全分离计量方法分离器体积的1/4。若增加分流取样喷嘴的数目,将进一步缩小计量装置体积。

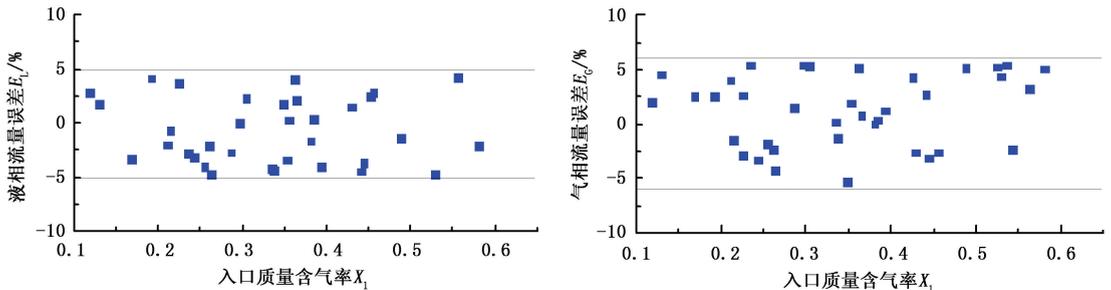


图7 气、液相流量误差测量结果

Fig.7 Measurement error of gas and liquid flow rate

## 5 结论

(1)当出口压力一致时新型取样分流结构的各个分流喷嘴具有相同的流动特性。

(2)基于“流型调整+喷嘴阻力控制”的取样相分离控制方法保证了各分流喷嘴具有相同的阻力特性,分流比只取决于分流喷嘴的数目,不受上下游参数波动的影响,实现了比例取样。

(3)通过取样分流,克服了两相流波动对计量的影响。所提出的取样计量装置无运动部件、体积小、结构紧凑,既可水平布置又可垂直布置,具有良好的环境适应性,可代替传统计量分离器,实现气液两相流流量的实时测量。

### 参考文献:

[1] WANG Dong, LIN Zonghu. Gas-liquid two-phase flow

measurement using ESM[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26, 827-832.

[2] 王栋, 林宗虎. 气液两相流体流量的分流分相测量法[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 441-444.

WANG Dong, LIN Zonghu. Extracting and separating method for gas-liquid two-phase flow measurement[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(5): 441-444.

[3] LIANG Fachun, WANG Dong, LIN Zonghu. A method for liquid sampling and measurement of gas-liquid two-phase fluid flow rate or mass quality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2008, 23(3): 256-258.

[4] 王栋, 林益, 林宗虎. 取样管型分流分相式气液两相流体流量计[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(2): 235-237.

WANG Dong, LIN Yi, LIN Zonghu. A ESM type gas-liq-

- uid two-phase flow meter with sampler tubes as distributor [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(2):235-237.
- [5] AZZOPARDI B J. Phase separation at T junctions[J]. *Multiphase Science and Technology*, 1999,11:223-329.
- [6] SHOHAM J P, BRILL Y T. Two-phase flow splitting in a Tee junction — experiment and modeling[J]. *Chemical Engineering Science*, 1987,42:2667-2676.
- [7] HWANG S T, SOLIMAN H M, LAHEY R T Jr. Phase separation in impacting wyes and tees [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1989,15:965-975.
- [8] ROBERTS P A, AZZOPARDI B J, HIBBERD S. Split of horizontal annular flow at a T-junction[J]. *Chemical Engineering Science*,1997,52:3441-3453.
- [9] 王栋,林益,林宗虎. 利用T型三通测量气液两相流体的流量和干度[J]. *热能动力工程*, 2002,17(4):336-338, 348.  
WANG Dong, LIN Yi, LIN Zonghu. Measurement of flow rate and dryness of a vapor-liquid two-phase fluid by using a T-junction[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2002,17(4):336-338,348.
- [10] 王栋,林宗虎. 一种新的气液两相流体流量计——三通管型分流分相式两相流体流量计[J]. *工程热物理学报*, 2001,22(4):488-491.  
WANG Dong, LIN Zonghu. A new type of gas-liquid two-phase flow meter—T-junction ESM two phase flow meter [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2001,22(4):488-491.
- [11] STOISITS R F, PINTO M T. Improved static mixer design for achieving equal phase splitting at pipe junctions [R]. SPE 54111, 1999:221-228.
- [12] 梁法春,陈婧,王栋,等. 基于分时原理的气液两相流量测量[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2008, 32(4):95-98.  
LIANG Fachun, CHEN Jing, WANG Dong, et al. Gas-liquid two-phase flow metering by time-sharing method [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008,32(4):95-98.
- [13] WANG Dong, LIANG Fachun, PENG Zhiqian, et al. Gas-liquid two-phase flow measurements by full stream batch sampling[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012,40,113-125.
- [14] LIANG Fachun, WANG Dong, CHEN Jing, et al. Gas-liquid two-phase flow sampling measurement using a swirl sampler [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013,33:145-152.

(编辑 沈玉英)