

V 锥流量计湿气流量测量新模型

贺登辉¹, 柳海², 张锋², 李星¹, 周日峰¹, 白博峰¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国石油新疆油田分公司采气一厂, 834000, 新疆克拉玛依)

摘要: 针对 V 锥流量计在测量湿气时产生的虚高问题, 提出用 V 锥流量计的两相流量系数来进行修正。采用节流比为 0.75 的 V 锥, 在压力为 0.10~0.22 MPa、气相流量为 100~300 m³·h⁻¹、液相流量为 0~0.08 m³·h⁻¹ 的实验条件下, 研究了 Lockhart-Martinelli (L-M) 参数、压力及气体密度弗鲁德数对 V 锥两相流量系数的影响。结果表明, 两相流量系数与 L-M 参数呈良好的线性关系, 线性斜率受气体密度弗鲁德数和压力的影响。获得了两相流量系数与 L-M 参数、气体密度弗鲁德数和压力的拟合关联式, 并建立了基于两相流量系数的湿气测量模型。在 95% 的置信水平下, 新模型的气相流量测量相对误差小于 ±5%。

关键词: 湿气; V 锥; 两相流量系数; 流量测量

中图分类号: TK313; TH71 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0032-05

A New Model for Wet Gas Flow Measurement with V-Cone Meter

HE Denghui¹, LIU Hai², ZHANG Feng², LI Xing¹, ZHOU Rifeng¹, BAI Bofeng¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. First Gas Production Factory, PetroChina Xinjiang Oilfield Branch Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: The two-phase flow coefficient of a V-cone meter was proposed to correct the “over-reading” produced by measuring the wet gas using the V-cone meter. The experiment was conducted with the V-cone meter with a diameter ratio of 0.75 for air and water. The test pressure ranged from 0.10 MPa to 0.22 MPa, and the gas and liquid mass flow rates were from 100 m³·h⁻¹ to 300 m³·h⁻¹ and from 0 to 0.08 m³·h⁻¹, respectively. The effects of the Lockhart-Martinelli parameter, the operating pressure and the gas densimetric Froude number on the two-phase flow coefficient were investigated. The results show that the two-phase flow coefficient increased linearly with the Lockhart-Martinelli parameter, and the slope of the two-phase flow coefficient vs. the Lockhart-Martinelli parameter was affected by the gas densimetric Froude number and the pressure. The correlation between the two-phase flow coefficient and the Lockhart-Martinelli parameter, the gas densimetric Froude number and the pressure was obtained. On the basis of the two-phase flow coefficient, the wet gas model was developed. The relative error of the gas mass flow rate predicted by the model is within ±5.0% at the 95% confidence level.

Keywords: wet gas; V-cone; two-phase flow coefficient; flow measurement

当气相中含有少量液相时, 则称该气液混合物 为湿气。美国石油学会将 Lockhart-Martinelli (L-

M)参数 $X_{LM} \leq 0.3$ 的气液两相流定义为湿气^[1],其广泛存在于石化、核能、冶金等工业过程中。近年来,湿气流量测量已成为国内外研究的热点问题之一。目前,虽然有很多测量湿气的方法,但是绝大多数湿气流量计都采用了差压测量技术^[1-4]。从1962年 Murdock 发表了第一个针对孔板流量计的湿气测量模型^[5]开始,经过 Chisholm 等的不断发展,出现了很多差压元件的湿气流量测量模型^[6-10]。但是,这些研究大多是针对孔板、文丘里管等标准节流装置进行的,对于V锥流量计的研究则相对较少。由于湿气流型多为光滑分层流、分层波浪流和环雾状流,其流型特点表现为液相集中在管壁附近,气相分布在水平管的上半部分与管道中心^[11]。与孔板和文丘里管相比,V锥流量计独特的锥形节流结构可以大大降低对湿气流型的破坏作用,减小差压测量的波动,使得测量更加平稳、准确。因此,V锥流量计在湿气测量领域具有广阔的应用前景。

研究表明,与其他差压式流量计类似,V锥流量计测量湿气时得到的流量比单独测量气相时偏高,即产生了虚高现象^[12]。已有的湿气测量模型均建立在经虚高修正的经验或半经验关联式上。Stewart 等对节流比为0.55和0.75的V锥流量计进行了湿气测量研究,拟合出了虚高修正关联式,结果表明,在相同的湿气条件下,V锥流量计的测量精度要优于文丘里流量计^[13];胡俊等采用V锥流量计,基于流型修正的林宗虎关系式实现了气水两相流测量,验证了采用V锥流量计测量气液两相流的可行性^[14]。此外,徐英等采用V锥与文丘里管串联的方法测量湿气流量,经过室内实验和现场实验的验证,均获得了较高的测量精度^[15];Zhang 等将两个节流比不同的V锥串联起来进行气液两相流流量的测量也取得了较好的测量效果^[16]。但是,已有的V锥湿气测量模型除了对虚高进行修正外,还需获得流量计的流出系数 C_d 和气体可膨胀系数 ϵ ,一般 C_d 和 ϵ 由单相介质进行标定得到,而目前V锥仍然为非标准节流元件,其 C_d 和 ϵ 没有统一的标准可供参考,不同研究者也会得出相异的 C_d 和 ϵ 的表达式。同时,在单相介质和气液混合介质中,V锥的 C_d 和 ϵ 也不相同,这都为测量工作带来了困难。

本文采用V锥流量计,提出了差压流量计的两相流量系数 K ,即两相混合物的总质量流量与表观质量流量的比值,实验研究了液相含率、压力和气相流量对 K 的影响,并以 K 为基础,导出了湿气流量的测量模型。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

本文的实验系统如图1所示。实验介质采用的是压缩空气和自来水。实验流程为:空气压缩机提供的压缩空气进入储气罐后,由调压阀和旁通调节阀获得一定压力和流量的气体,再经由气相流量计进行计量;储水罐中的自来水由水泵泵送至液相流量计进行计量,水路也设有调节阀和旁通阀来调节水的流量和压力。流量计计量后的气和水进入气液混合器以实现气液的混合,混合器出口至实验段留有足够长的直管段以保证气液的充分混合和流型的充分发展。实验段出口的气液混合物由气液分离器进行气水分离后,空气直接排入大气中,水回收至储水罐进行循环利用。实验中参考气相流量由一台精度为1.0%的横河涡街流量计计量,对应0.2 MPa的测量范围为 $19.5 \sim 444 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;液相参考流量由一台横河电磁流量计测量,其精度为0.1%,测量范围为 $0.0076 \sim 0.76 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

实验段管道内径 $D=50 \text{ mm}$,V锥流量计的节流比 $\beta=0.75$,一次差压元件V锥的前锥角 $\alpha=45^\circ$,后锥角 $\gamma=135^\circ$ 。V锥结构示意图如图2所示。

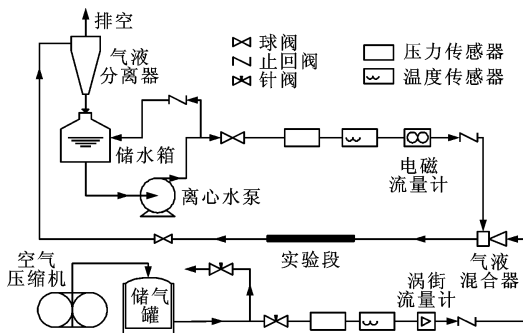


图1 实验系统图

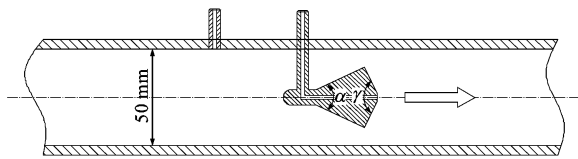


图2 V锥实验段结构图

1.2 实验方法

本实验主要研究液相流量、气相流量和压力对测量的影响,实验安排如下:通过气路调节阀使得实验管段的压力保持稳定,然后稳定气相流量大小,改变液相流量大小。对每组实验,实验段进口压力设

定在 0.1~0.25 MPa,在每一种压力条件下又可调节几种不同的气相流量,在每一个气相流量下,改变液相流量的大小,从而获得不同的实验数据。本研究的湿气含水量很小,实验中 X_{LM} 大部分在 0~0.035 之间;每个工况点数据采集时间为 40 s,并进行了平均处理。具体的实验方案设计见表 1。

X_{LM} 一般定义为如下的形式

$$X_{LM} = \frac{m_l}{m_g} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2}$$

(1)

式中: ρ_g 、 ρ_l 分别为气、液相密度, m_g 、 m_l 分别为气、液相质量流量。

ρ_r 为气液密度比,并且 $\rho_r = \rho_g / \rho_l$ 。气体弗鲁德数 Fr_g 是气体惯性力与液体重力比值的均方根,如下式所示

$$Fr_g = \frac{U_{sg}}{(gD)^{1/2}} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{1/2}$$

(2)

式中: g 为重力加速度; U_{sg} 为表观气体速度,且有

$$U_{sg} = 4m_g / (\pi D^2 \rho_g)$$

(3)

测试数据在曼德汉流型图^[17]上的分布如图 3 所示,其中 U_{sl} 为表观液体速度。由图可知,实验数据流型主要为分层流、波状分层流和环状流。

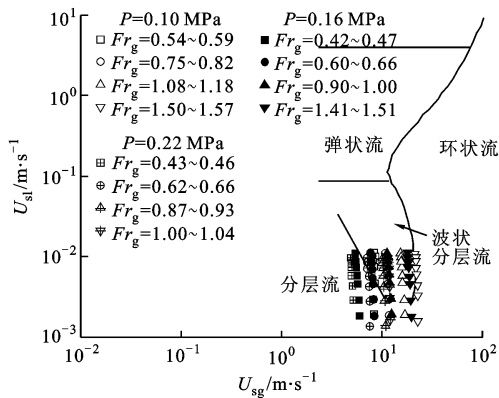


图 3 实验数据在曼德汉流型图上的分布

2 实验结果及分析

2.1 测量模型

差压流量计的两相流量系数可表示为

$$K = m_t / m_a$$

(4)

式中: m_t 为气液两相总质量流量, $m_t = m_g + m_l$, m_l 为液相质量流量; m_a 为气液混合物表观质量流量,可由下式得出

$$m_a = A_t (2\rho_g \Delta P_{tp})^{1/2} (1 - \beta^4)^{-1/2}$$

(5)

其中, A_t 为差压流量计的最小流通面积, ΔP_{tp} 为气液两相总差压。

联立式(4)和(5)可得

$$m_g + m_l = K A_t (2\rho_g \Delta P_{tp})^{1/2} (1 - \beta^4)^{-1/2}$$

(6)

式(6)即为基于两相流量系数 K 的湿气流量测量关联式, K 通过实验标定来确定。

2.2 实验数据与分析

分别考察液相流量、气相流量和压力的无量纲参数 X_{LM} 、 Fr_g 和 ρ_r 对 K 的影响,具体参数取值详见表 1。图 4 为在不同压力和 Fr_g 下 K 随 X_{LM} 的变化关系,可知对于已知节流比的 V 锥流量计, K 受 X_{LM} 、压力及 Fr_g 等参数的影响,并且 K 随 X_{LM} 的增大而增大。图 5 为不同压力下 Fr_g 对 K 的影响。由图可知:当 $Fr_g < 1.0$ 时, K 受 Fr_g 的影响较小;当 $Fr_g > 1.0$ 时, K 发生了较大变化。这是由于当 $Fr_g < 1.0$ 时,流型处于分层流和波状分层流(见图 3),流动状态变化较小,因此 K 受 Fr_g 的影响也不大。当 Fr_g 在 1.5 左右时,湿气流型处于波状分层流与环状流的过渡区(见图 3),此时流动非常不稳定,因此图 5a 中 $Fr_g = 1.50 \sim 1.57$ 和图 5b 中 $Fr_g = 1.41 \sim 1.51$ 时,与其他几组实验数据相比 K 突然增大,发生了较大变化。

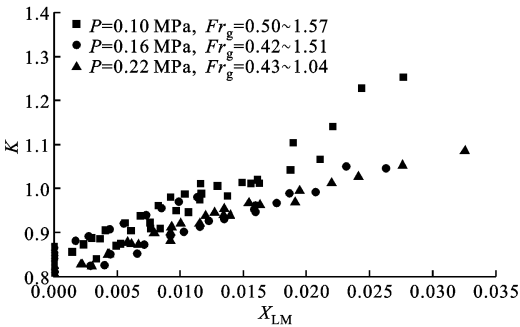
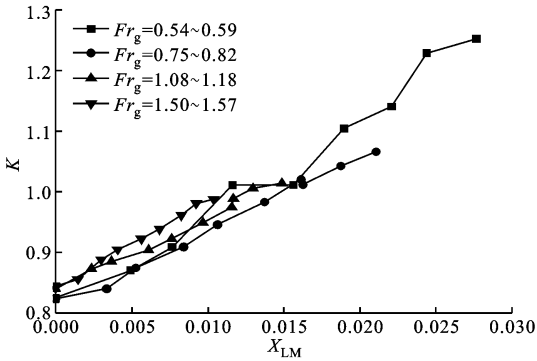


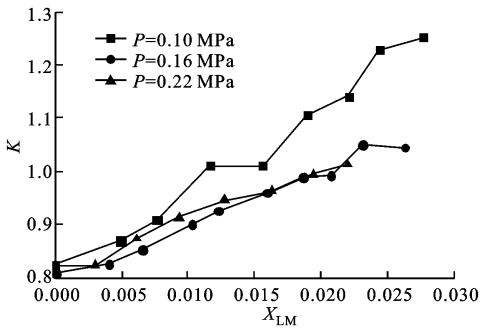
图 4 不同压力和 Fr_g 下 K 随 X_{LM} 的变化

表 1 实验方案

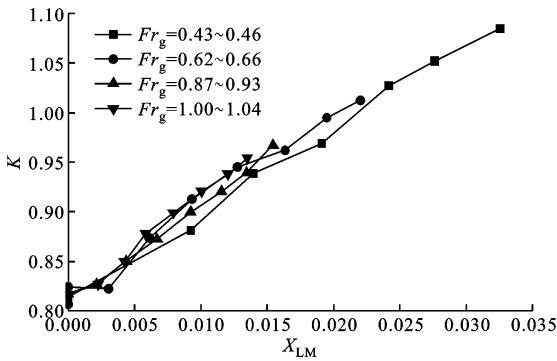
β	压力/MPa	气相流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	液相流量/ $m^3 \cdot h^{-1}$	X_{LM}	Fr_g	ρ_r
0.75	0.10	100,150, 200,300	0~0.08	0~0.035	0.54~1.57	0.002 32
	0.16				0.42~1.51	0.003 01
	0.22				0.46~1.04	0.003 71



(a) $P=0.10\text{ MPa}$



(b) $P=0.16\text{ MPa}$



(c) $P=0.22\text{ MPa}$

图 5 不同压力下 Fr_g 对 K 的影响

由图 6 可知,当 Fr_g 基本不变时,压力的变化也会对 K 产生影响。考虑到含液率、压力和气相流量 3 者对 K 的影响,本文将这 3 个参数进行无量纲化后,采用多元线性拟合的方法对 K 进行拟合,其表达式如下

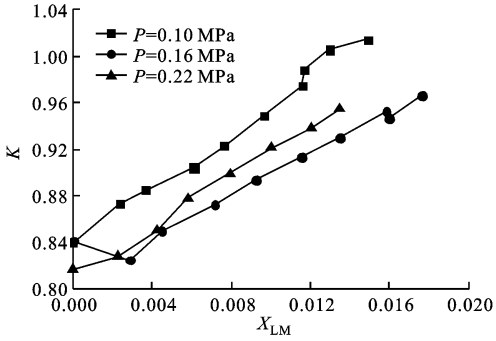
$$K = 0.973\,34 - 3.709\,86 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2} + 10.756\,96 X_{LM} + 0.051\,72 Fr_g \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),即可得到湿气测量关联式。

2.3 测量误差分析

相对误差可按下式计算

(a) $Fr_g=0.6$



(b) $Fr_g=1.0$

图 6 压力对 K 的影响

$$\delta = \frac{m_p - m_r}{m_r} \times 100\% \quad (8)$$

式中: m_p 为采用湿气测量模型获得的湿气质量流量; m_r 为参考质量流量。

图 7 为由湿气测量模型得到的气相质量流量与参考质量流量的相对偏差,可知在 95% 的置信水平下,其相对误差在 $\pm 5\%$ 之内。

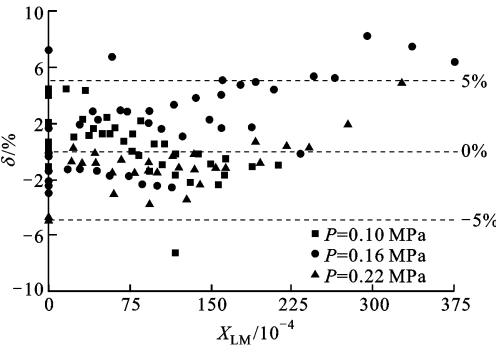


图 7 气相质量流量相对误差随 X_{LM} 的变化

3 结 论

本文提出了 V 锥流量计两相流量系数 K ,实验研究了 X_{LM} 、管道压力和 Fr_g 对 V 锥两相流量系数

的影响,结果表明 K 受 X_{LM} 的影响较大,并与含液率呈线性关系变化;当压力波动较小时, K 受 Fr_g 变化影响较小。此外,在相同的 Fr_g 下,压力对 K 也有一定的影响。根据 K 与 X_{LM} 、 Fr_g 及压力的关系,通过拟合得到了 K 的关联式,并据此建立了 V 锥流量计的湿气测量模型。经过验证,该模型在 95% 的置信水平下,气相流量相对误差在 $\pm 5\%$ 之内。

与其他模型相似,本文提出的湿气流量测量模型同样需要在已知液相流量的前提下得到气相流量,因此可以采用其他的途径,如串联一个与之测量特性差异较大的差压式节流元件,或者与其他的相含率测量设备进行组合测量等方法来实现湿气气液两相流量的分别测量。此外,该湿气流量测量模型无需事先获得差压测量元件的流出系数和气体可膨胀系数,对于采用 V 锥这类非标准的差压元件进行两相流流量测量是一个有益的探索。

参考文献:

- [1] ASME. Wet gas flowmetering guideline, MFC-19G-2008 [R]. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2008: 1-74.
- [2] LAWRENCE P A. Wet gas measurement [C]//Proceedings of the 84th International School of Hydrocarbon Measurement. Colorado, USA: CEESI, 2009: 165-179.
- [3] XU L J, ZHOU W L, LI X M. Wet gas flow modeling for a vertically mounted Venturi meter [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23 (4): 045301.
- [4] GYSLING D L, LOOSE D H, VOLZ R. Wet gas metering using combination of differential pressure and SONAR flow meters [C]//Proceedings of the 24th International North Sea Flow Measurement Workshop. Glasgow, UK: TUV NEL, 2006: 410-417.
- [5] MURDOCK J. Two-phase flow measurement with orifices [J]. ASME Journal of Basic Engineering, 1962, 84: 419-433.
- [6] CHISHOLM D. Research note: two-phase flow through sharp-edged orifices [J]. Journal Mechanical Engineering Science, 1977, 19(3): 128-130.
- [7] SMITH R V, LEANG J T. Evaluations of correlations for two-phase, flowmeters three current-one new [J]. ASME Journal of Engineering Power, 1975, 97 (4): 589-593.

- [8] LIN Z H. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(6): 683-693.
- [9] DE LEEUW R. Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow [C]//Proceedings of the 1997 North Sea Flow Measurement Workshop. London, UK: Energy Institute, 1998: 153-161.
- [10] STEVEN R N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 12(5): 361-372.
- [11] 耿艳峰, 冯叔初, 郑金吾, 等. 凝析天然气计量技术 [J]. 自动化仪表, 2005, 26 (8): 1-3.
GENG Yanfeng, FENG Shuchu, ZHENG Jinwu, et al. Metering technology for condensate natural gas [J]. Process Automation Instrumentation, 2005, 26 (8): 1-3.
- [12] STEVEN R, LAWRENCE P A. Research developments in wet gas metering with V-Cone meters [C]//Proceedings of the 21st North Sea Flow Measurement Workshop. London, UK: Energy Institute, 2008: 174-193.
- [13] STEWART D G, STEVEN R, PETERS R J W. Wet gas metering with V-Cone meters [C]//Proceedings of the 20th North Sea Flow Measurement Workshop. Glasgow, UK: TUV NEL, 2002: 194-212.
- [14] 胡俊, 董峰. 基于 V 型内锥流量计测量气水两相流的研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(S1): 205-208.
HU Jun, DONG Feng. Research on measurement of air/water two-phase flow based on V-Cone flowmeter [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28 (S1): 205-208.
- [15] 徐英, 张强, 于磊, 等. 凝析天然气两相流不分离测量技术 [J]. 加工利用, 2011, 31(4): 1-5.
XU Ying, ZHANG Qiang, YU Lei, et al. Measurement technology of the condensate natural gas two-phase flow by non-separation [J]. Processing and Utilization, 2011, 31(4): 1-5.
- [16] ZHANG F, DONG F, TAN C. High GVF and low pressure gas-liquid two-phase flow measurement based on dual-cone flowmeter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3): 410-417.
- [17] MANDHANE J, GREGORY G, AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1974, 1(4): 537-553.

(编辑 荆树蓉)