

用锐边孔板对气(汽)液两相流进行测量的发展与研究

刘尧奇 陈听宽 陈学俊

(西安交通大学)

〔摘要〕 综述国内外有关用锐边孔板测量气(汽)液两相流方面所做的研究工作,并介绍本文作者等用锐边孔板对高压汽-水两相流进行测量的试验及理论研究工作。

关键词 两相流 流量 干度 锐边孔板

1 引 言

气(汽)液两相流广泛应用于热 能动力,核反应堆、石油化工、地热发电及制冷等许多工程技术领域。在这些设备的试验、研究、设计、运行和调节过程中,尽可能准确地测定两相流的流量及干度等基本参数常常是必不可少的。因此气(汽)液两相流测量既有学术意义又有重要的工程应用价值,是该领域中一个很重要的研究方向。由于两相流动中气(汽)液两相相对速度的存在及相分布的不断变化,使得流型多变,流动过程相当复杂,这就给两相流测量带来极大的困难。关于两相流流量及干度的测量,至今已尝试过多种方法,如分离法、电测法、放射性同位素法、节流法及其他流量计(速度式、容积式等)法等。但这些方法有的适用范围很小,只局限于实验室应用;有的设备

庞大,使用不便;有的成本高,制造困难,有的存在噪音或振动问题;有的则精度很低。而节流法以其结构简单、工作可靠、性能稳定、造价低廉,且适用范围较宽,有一定精度,便于在一般工业生产中应用等优点,受到了广泛重视。其中应用最多的节流件即为锐边孔板。其测量原理很简单,就是利用孔板压降、流量及干度三者之间的关系。但是迄今为止,尽管在这方面已做了比较多的试验及理论研究工作,但作为一种测量方法在理论上和实践上还不够成熟和完善,尚未形成统一的标准。

2 试验研究

2.1 已有工作一览

为简洁明了,将前人所做的试验研究工作,以完成时间先后为序,列于表1。

表1 用锐边孔板测量气(汽)液两相流试验研究一览表

研究者及时间	工 质	压力 P (MPa)	干 度 x	孔板孔径 d (mm)	取压方式
				管道内径 D (mm)	
Bottomley (1937)	汽—水	0.33~0.48	0.0165~0.0325	$\frac{2.22}{76.2}$	
Monroe (1956)	汽—水	0.22~1.33	0~0.0359	$\frac{6.35\sim15.9}{38.1\sim67.8}$	
Hoopes (1957)	汽—水	0.47		$\frac{9.53}{50.8}$	
Пагулин (1958)	汽—水	2.73~12.06	0~1	$\frac{15.8}{19}$	
Silberment (1960)	空气—水			$\frac{12.7\sim16}{25.4}$	
Murdock (1962)	汽—水 空气—水 天然气—水	0.1~6.44	0.11~0.98	$\frac{25.4\sim31.8}{46.4\sim98}$	径向取压 法兰取压 管接取压
Fizsmwons (1964)	汽—水	0.084~0.126	0.1~0.233	$\frac{39.4}{48.8}$	
James (1965)	汽—水	0.427~2.06	0.061~0.669	$\frac{142\sim168}{201}$	
Bizon (1965)	汽—水	8.5	0.0847~0.5	$\frac{11.4\sim17.8}{25.4}$	
Thom (1966)	汽—水	0.85~2.15	0.0133~0.171	$\frac{25.9}{38.6}$	
Watson (1967)	汽—水	0.17~1.38	0~0.1	$\frac{9.53\sim25.4}{50.8\sim101.6}$	
陈之航等 (1967~1968) (1980~1986)	空气—水	0.105~0.11	0.0148~0.965	$\frac{13.5\sim17.05}{25.4}$	环室取压
Collins (1971)	汽—水	6.9	0.05~0.9	$\frac{40.7\sim52.6}{58.1\sim72.7}$	
Медведев (1972)	汽—水		0~0.98	$\frac{d}{D} = 0.316\sim0.707$	
Кремлевский (1972)	汽—水	0.1~0.4	0.7~1	$\frac{d}{D} = 0.316\sim0.633$	
Daries (1973)	R~12	0.604	0.00017~0.18	$\frac{0.762\sim1.422}{9.525}$	孔板前后各3.3D
Rooney (1973)	汽—水	1.02~7.14	0~0.15	$\frac{13\sim22}{21\sim44}$	
林宗虎等 (1975~1978)	R~113	2~2.92	0~1	$\frac{10\sim20}{32}$	环室取压
哈尔滨锅炉厂 (1979)	汽—水	17~18.83	0.27~0.93	$\frac{35.9}{60}$	
世古口育彦 (1978)	空气—水			开口面积 管道面积 = 0.4~0.6	圆缺孔板 法兰取压

续表 1

研究者及时间	工 质	压力P(MPa)	干 度 x	孔板孔径d(mm)	取压方式
				管道内径D(mm)	
郑亦朋, 林宗虎 (1984)	空气-水	常压	0.035~0.56	$\frac{12.58 \sim 25.16}{25 \sim 50}$	角接取压
王 栋, 林宗虎 (1985)	空气-水 汽-水	常压 6~10	0.1~1 0.176~1	$\frac{12.5 \sim 20}{25 \sim 32}$	角接取压
仲朔平 (1987)	汽-水		0~1		
本文作者等 (1986~1989)	汽-水	3~22	0~1	$\frac{10 \sim 15}{21}$	角接取压

2.2 已有研究的不足

由表 1 可见, 有关的试验研究工作已做了不少, 但仍存在着明显的不足之处。

- (1) 缺乏系统的研究;
- (2) 涉及工质种类少, 主要是以低压水-蒸汽和水-空气为试验工质;
- (3) 参数范围狭窄, 每一项试验研究的压力、干度及孔板尺寸等参数的范围不够宽广;
- (4) 试验参数范围比较分散;
- (5) 不同研究者所得结果不尽一致;
- (6) 对工程上应用很多的高压汽-水两相流的测

量研究还很少。

3 理论研究

3.1 计算公式一览

这里只介绍一些比较典型的公式。不论公式形式如何, 其核心都是孔板压降与流量及干度的关系, 只不过人们常常把两相压降与单项压降相关联而已。这些公式中, 有理论模型, 也有经验的和半经验的关系式。

表 2 用锐边孔板测量气(汽)液两相流计算公式一览表

研究者	模型类型	公 式	适用范围
	均相模型	$\phi_{10}^2 = 1 + x(\rho_l/\rho_g - 1)$	单组份两相流部分情况(高压)
James (1965)	修正均相模型	$\phi_{10}^2 = 1 + x^{1.5}(\rho_l/\rho_g - 1)$	单组份两相流部分情况
Кремлевский (1972)	(同上)	$M = K\alpha\epsilon A_d \sqrt{2\rho_k \Delta p_{tp}}$ 其中 $K = 1.56 - 0.56x$	低压湿蒸汽
Lorenzi (1977)	分相能量模型	$\phi_{10}^2 = \left[\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^2 \frac{x^3}{\phi^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-\phi)^2} \right] / \left[\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) x + (1-x) \right]$ 其中: 含气率 ϕ 用经验公式确定	
Hoopes (1957)	分相动量模型	$\phi_{10}^2 = \frac{(1-x)^2}{1-\phi} + \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{x^2}{\phi}$ 其中 ϕ 用经验公式确定	
Murdock (1962)	修正动量模型	$\phi_g = 1 + 1.26X$	双组份两相流 $x \geq 0.1$
Chisholm (1967)	(同上)	$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2$ 其中 $C = \begin{cases} \left(\frac{\rho_k}{\rho_g} \right)^{1/2} Z^2 + \left(\frac{\rho_g}{\rho_k} \right)^{1/2} & \text{当 } X > 1 \\ \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} Z^4 + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/4} & \text{当 } X \leq 1 \end{cases}$	较广

续表 2

研究者	模型类型	公 式	适用范围
Bizon (1965)	修正动量模型	$\left(\frac{\Delta p_{1p}}{\Delta p_g}\right)^{1/2} = a + b \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_g}\right)^{1/2}$ 其中a、b为试验常数	
Collins (1971)	(同上)	$\left(\frac{\Delta p_{1p}}{\Delta p_g}\right)^{1/2} = B_1 + B_2 \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_g}\right)^{1/2} + B_3 \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_g}\right)^{1/4}$ 其中B ₁ 、B ₂ 、B ₃ 为试验常数	
林宗虎 (1979)	(同上)	$\left(\frac{\Delta p_{1p}}{\Delta p_g}\right)^{1/2} = 1 + \theta \left(\frac{\Delta p_1}{\Delta p_g}\right)^{1/2}$ 其中 $\theta = f\left(\frac{\rho_1}{\rho_g}\right)$	较广
陈之航 (1967)	(同上)	$\Delta p_{1p}^{1/2} / M = A + (-B)x$ (对于低干度区) $M_g / M_l = (\Delta p_{1p}^{1/2} / M_l - A) / (A + K - B)$ (高干度区) 其中K=f(p) A、B为试验常数	空气-水
Matter (1979)		$Q_{1p} / Q_g = 1 + b(Q_1 / Q_g)$ b为试验常数 其中Q _{1p} 为能产生Δp _{1p} 的单相气体体积流	油-气
Smith (1975)		$M = \alpha_g \epsilon_g A_d (BF) (2\rho_g \Delta p_{1p})^{1/2} / x$ 其中, 阻塞系数(BF) = 0.637 + 0.421 1x - 0.001 83/x ²	
刘尧奇等 (1987)	动力学模型	$\Delta p_{1p} = KM^2 f(m) [1 + x(\rho_1 / \rho_g - 1)] / (2\rho_1 A_d^2)$ 其中, $f(m) = [0.639(1 - m)^{1/2} + 1]^2 - m^2$ 修正系数K = a + b(p/p _{cr}), b、a为试验常数	3~22MPa 汽水两相流

表中符号: A_d—孔板开孔面积 (m²); M—流量 (kg/s); m—孔板开孔面积与管道截面积之比; p—压力 (MPa); Δp—压降 (Pa); Q—体积流量 (m³/s); X—Martinelli参数; x—干度; φ—两相压降倍率; φ—截面含气率; ρ—密度 (kg/m³); α—流量系数; ε—膨胀系数。下标: cr—临界; g—气相; h—均相; l—液相; lo—全液相; 1p—两相。

3.2 讨论

综合作者及前人做过的工作分析比较结果, 我们可以得出如下结论: 对于一定参数范围的汽水两相流, James公式比较适用; 对于双组份两相流, Murdock公式较好。Chisholm公式和林宗虎公式可用于多种工质及比较宽的参数范围。本文作者等提出的公式可较好地应用于3~22MPa宽广压力范围汽水两相流的测量。

但是, 以上这些公式都有各自的不足之处, 如: 有的公式不能适用于低干度区 (x接近于0) 或高干度区 (x接近于1); 有的公式只能在一定范围内保证精度等。因此, 继续寻求适用范围广且精度高的计算式仍是这一课题的重要任务, 它依赖于理论认识的提高和系统可靠的试验数据。目前在应用中, 则一定要注意考查计算公式的适用范

围, 尽量选择适当的计算式, 以免造成过大的误差。

4 用锐边孔板测量 高压汽水两相流

为了弥补在用锐边孔板进行高压汽水两相流测量方面缺乏系统的试验数据和深入的理论分析的不足, 作者等在3~22MPa的宽广压力范围内进行了比较深入的研究, 简要介绍如下。

4.1 计算公式的得出

对于单相流, 孔板压降与流量、几何尺寸及流体物性之间存在如下理论关系式:

$$\Delta p = M^2 / (2\rho\alpha^2\epsilon^2 m^2 A^2) \quad (1)$$

即: $\Delta p = f(M, m, A, \text{流体物性})$

$$(2)$$

与单相流不同，对两相流则不存在这样的精确的理论关系式。对于汽-水两相流，蒸汽干度 α 是重要特性参数之一，而热力学平衡的汽水混合物的物性则取决于压力及干度，因此，对汽水两相流流孔板，各参数间应存在如下关系：

$$\Delta p_{tp} = f(M, m, A, \alpha, p) \quad (3)$$

显然，就应用锐边孔板测量汽水两相流进行理论研究的任务就是确定上述关系式。

基于对两相流体流孔板的流动结构及动力学特性的理论分析，作者等建立了一个计算关系式。详细的分析和推导参见文献[1]，这里只提及几个要点：

(1) 认为两相流体流孔板的结构象一个Laval喷管的形状，如图1所示。

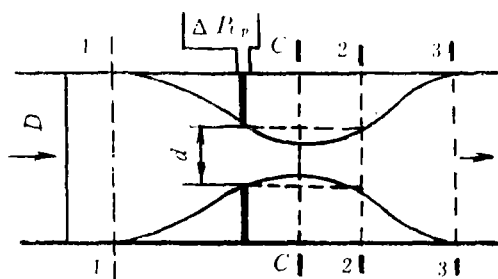


图 1

(2) 根据流体力学理论，假定两相流体流孔板时角接取压的压差 Δp_{tp} 近似等于流体收缩流段（截面1-1到截面c-c）的动能差。

表 3

高压汽水两相流测量试验参数范围

管道内径 (m)	孔板孔径 (m)	压力 (MPa)	干度	流量 (kg/s)	流向
0.021	0.01, 0.015 0.0135, 0.0136	3~22	0~1	0.0848~0.4991	水平
0.032	0.016	5.9~9.8	0.176~1	0.0872~0.5517	水平
0.012	0.004, 0.005 0.006	3~9.8	0~0.6	0.0678~0.1243	垂直向上

(3) 用均相模型来计算动能，并忽略孔板附近流体热力学不平衡及物性的微小变化。用Chisholm公式计算流体收缩比[2]。

(4) 引入一个修正系数 K 来考虑流体可压缩性的影响。因为压力是影响汽水混合物可压缩性的最主要参数，所以 K 取为无量纲压力 p/p_{cr} 的函数。

这样，就可以推导得出如下公式：

$$\Delta p_{tp} = KM^2 f(m) [1 + \alpha(\rho_l/\rho_g - 1)] / (2\rho_l A_d^2) \quad (4)$$

其中，几何尺寸项为：

$$f(m) = [0.639(1-m)^{1/2} + 1]^2 - m^2 \quad (5)$$

可压缩性修正项：

$$K = f(p/p_{cr}) \quad (6)$$

通过试验确定。

式(4)是用锐边孔板测量汽水两相流的基本公式。显然，当 Δp_{tp} 、 M 和 α 三个主要参数中已知两个，则可用式(4)方便地确定出另一个。

若将两相压降与单项压降相关联，转变为全液相两相压降倍率的形式，则式(4)变为：

$$\varphi^2_{10} = K \alpha^2 f(m) [1 + \alpha(\rho_l/\rho_g - 1)] \quad (7)$$

4.2 试验结果

在电加热高压汽水两相流试验回路上已经进行过试验的参数范围如表3所列。结果表明，在此试验范围内，可压缩性修正系数 K 与无量纲压力 p/p_{cr} 分三段呈近似线性关

系, 即:

$$K = a + b(p/p_{cr}) \quad (8)$$

并由试验数据确定出试验常数 a 和 b , 如表4所列。

表4 试验常数 a 和 b 的值

压力 p (MPa)	a	b
3~15	0.468 94	0.883 42
15~18.5	1.827 85	-1.120 52
18.5~22	-0.366 13	1.502 76

作者等提出的计算公式能在上述广泛的试验参数范围内与试验结果良好吻合。部分结果示于图2。

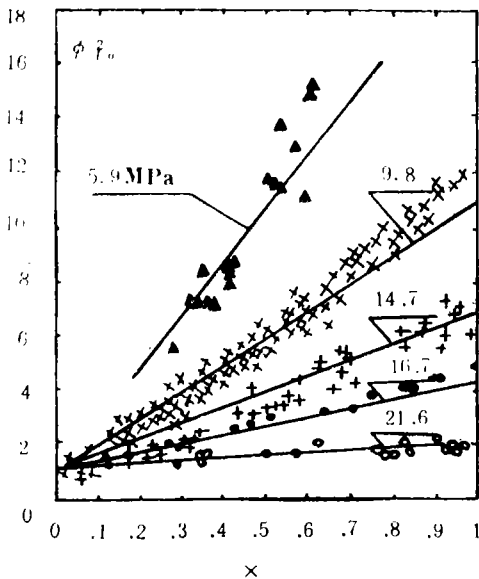


图2 部分试验结果及其与计算值比较

- ▲ 5.9 MPa($\beta = 0.25$), X 9.3-10.6 MPa($\beta = 0.2268, 0.25, 0.5102$);
- + 14.4-15.5 MPa($\beta = 0.2268, 0.5102$);
- 16.7 MPa($\beta = 0.5102$)
- 21-22 MPa($\beta = 0.5102$)
- 作者等提出的计算公式

5 结 论

用锐边孔板对气(汽)液两相流的流量

及干度进行测量, 是一种结构简单、性能可靠、适用性强的方法, 但目前尚不够成熟和完善。

1. 试验研究方面: 已有的试验研究参数比较分散, 结果不尽一致。今后的研究方向应该是: 进行宽广参数范围(不同工质、运行条件及尺寸条件等)的系统试验, 取得全面、准确的试验数据, 为理论分析及工程应用提供可靠的依据, 逐步向标准化发展。作者等在3~22MPa的宽广压力范围内, 以汽水两相为工质进行了比较系统的试验研究。

2. 理论分析及计算公式: 对于汽水两相流, 作者等提出的动力学模型及计算公式可较好地应用于3~22 MPa范围, James公式也具有一定的适用性; 对于双组份两相流, Murdock公式比较适用。Chisholm公式和林宗虎公式可用于单组份和双组份两相流比较宽的参数范围。但以上这些公式或在精度上或在适用范围上, 存在着不足之处, 所以在应用时必须注意公式的适用范围。今后的理论研究方向应该是: 以系统可靠的试验数据为依据, 结合对两相流体流过孔板的流型及其转变特性以及机理进行深入的研究, 得出适用范围广、且精度高的计算公式。

参 考 文 献

- 1 Liu Yaoqi et al. Using orifices to measure mass flows or steam qualities of high pressure steam-water mixtures, in experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. ed. by Shah R K. et al, New York: Elsevier Publishing Co., 1988: 1150-1155
- 2 Chisholm D. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers. New York: Pitman press, 1983
- 3 Liu Yaoqi et al. Steam-water two-phase flow-measurements with sharp-edged orifices, in multiphase flow and heat transfer. ed. by Chen Xuejun et al, New York:

- Hemisphere, 1990, 1347-1355
- 4 陈之航等. 气液和汽液双相流体流量测量的研究和发展. 上海机械学院学报, 1979, 1(1): 1-29
- 5 Lin Z H. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices. Int. J. Multiphase flow, 1982, 8(6): 683-693
- 6 James R. Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices. Proc. Inst. Mech. Eng., 1965, 180, pt I(23): 549-566
- 7 Murdock J W. Two-phase flow measurement with orifices. ASEM, Ser. D, 1962, 84(4): 419-432
- 8 Smith R V, Leang J T. Evaluations of correlations for two-phase flow meters three current-one new. ASME, Ser. A, 1975, 97(4): 589-593

A Study on Gas(Vapour)--Liquid Two-Phase Flow Measurement by Use of Sharp-edged Orifices and Their Recent Developments

Liu Yaoqi, Chen Tingkuan, Chen Xiejun

(Xian Jiaotong University)

Abstract

An overview is given of the study both at home and abroad of gas (vapour)-liquid two-phase flow measurements by use of sharp-edged orifices. Briefly presented is also the experimental and theoretical study conducted by the author and others on high pressure steam-water two-phase flow measurements with the help of sharp-edged orifices.

Key words: *two-phase flow, flow rate, dryness, sharp-edged orifice*

新产品新技术信息

R9103 ZPE系列电动伺服放大器 是一种广泛用于计算机控制系统及各种电动执行机构的机电仪一体化产品。

该产品具有上下限幅及正反作用分程调节、电气刹车等特点, 还可同时接受微机或模拟仪表输出的两路标准信号。该产品经首钢、马钢、石家庄啤酒厂等十几家冶金矿山, 化工建材, 水电交通部门使用, 认为具有技术先进、性能可靠等优点, 是新一代理想的自控仪器。

该产品已获国家专利(专利号: 902071831), 并通过省级新产品投产鉴定。

(如需要以上产品或技术请与编辑部联系)