

用多孔探针测量高压汽水混合物的流量与干度

王 栋 林宗虎

(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘要 报告了用多孔探针测量高压汽水混合物的流量与干度的实验结果。实验压力为5、8、10MPa; 干度为5%~70%; 流量为0.08~0.5kg/s。在修正的均相模型基础上, 提出了一个简单的流量干度计算式, 该式在实验范围内的误差小于5%。作为多孔探针的一个重要应用, 还探讨了应用多孔探针与孔板组合法实现汽液两相流体流量干度双参数测量。

关键词: 两相流 多孔探针 流量干度测量

1 引 言

多孔探针又名笛形管、阿组巴管, 在单相流体的流速、流量测量中已得到广泛应用。在工作原理上, 多孔探针与皮特管是相似的。皮特管测量的往往是管内某一点的流速, 通过移动皮特管的位置, 可以测得较为准确的管内平均流速, 从而测出流量大小。多孔探针可以看作是一列沿管道直径分布的皮特管(见图1), 因此它可以直接测得管内的平均流速。

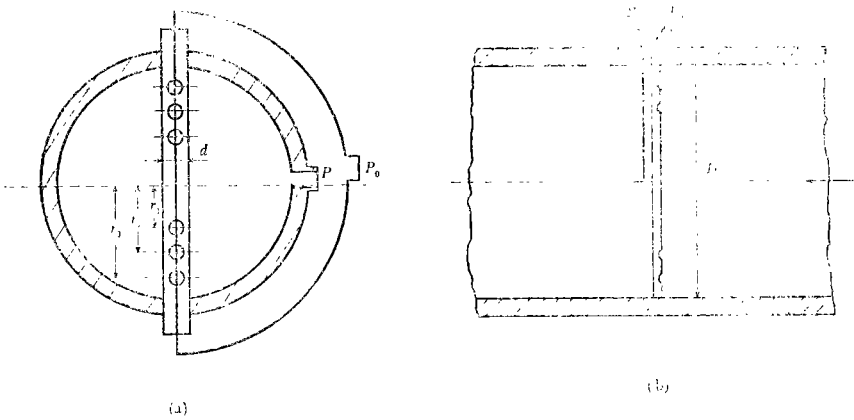


图1 多孔探针结构简图

一般地说, 皮特管在实际工程中应用得较少, 主要是由于它的振动问题、强度问题以及为测得平均流速而需移动等^[1]。

皮特管与多孔探针都可以用来测量汽液两相流体的流量与干度。与皮特管相比, 多孔探针更适合于两相流测量。

到目前为止，有关皮特管测量两相流的研究已很多^[2,3]，但关于多孔探针在汽液两相流测量中的研究还很少。

本文报告用多孔探针测量高压（ $p=6、8、10\text{MPa}$ ）汽水混合物流量干度的实验结果。在均相模型基础上，通过引入修正系数 ε_2 ，得到了一个简单的流量和干度计算式。在此基础上，本文还研究了应用多孔探针与孔板组合法实现汽液两相流体流量干度双参数测量。

2 理论推导

图1是多孔探针的结构简图。探针上的小孔迎着来流方向，用以测量流体的平均全压。静压孔的布置有两种方式，一种是布置在管壁上[图1(a)]，另一种则布置在探针背后[图1(b)]。

探针直径 d 与管道内径 D 之比 $d/D=0.04\sim0.13$ 。探针上的小孔直径等于 $0.04\sim0.3d$ ，小孔位置按等面积环原则分布，各孔中心至管道轴线的距离由下式确定：

$$r_i=\sqrt{R^2(i-1/2)/n}$$

(1)

式中： r_i 为第 i 个孔中心到管道轴线的距离， i 为孔的序号， $i=1, 2, 3\cdots n$ ； R 为管道半径； n 为探针上的孔所划分的等面积环数目，见表1。

表1 等面积环数 n 与管道内径 D 的关系

D/mm	<300	300	400
n	2	3	4

由伯努利方程可以求得多孔探针测量单相流体的流量计算式：

$$W_{sp}=\Phi A\sqrt{2\rho_{sp}(P_0-P)}$$

(2)

式中， W_{sp} 为单相流体的流量， kg/s ； A 为管道流通截面积， m^2 ； ρ_{sp} 为单相流体的密度， kg/m^3 ； P_0 为流体的全压， Pa ； P 为流体的静压， Pa ； Φ 为多孔探针流量系数。

式(2)也可写成下面的形式：

$$\Delta P_{A,sp}=P_0-P=(W_{sp}^2/2\Phi^2A^2)V_{sp}$$

(3)

式中， V_{sp} 为单相流体的比容， m^3/kg 。

应用多孔探针测量汽液两相流体的流量干度时，假定汽相和液相以均相方式流过多孔探针，汽相为不可压缩流体，流动过程中不发生汽化。那么这种均相流动的汽水混合物比容为：

$$V_{TP}=XV_G+(1-X)V_L$$

式中： $V_G、V_L$ 分别为汽相和液相的比容； X 为蒸汽干度。上式是在纯均相模型的假定下得到的，与实际流动有差别，引入系数 ε_2 对上式修正如下：

$$V_{TP}=XV_G+\varepsilon_2(1-X)V_L=\varepsilon_2V_L+(V_G-\varepsilon_2V_L)X$$

(4)

ε_2 是对汽水混合物偏离均相流动的修正。在一定的流速范围内， ε_2 主要取决于两相流体的密度比或汽水混合物的压力。分别用 $\Delta P_{ATP}、W_{TP}、V_{TP}$ 代替式(3)中的 $\Delta P_{A,sp}、W_{sp}$ 和 V_{sp} ，就可以得到多孔探针测量流量干度的计算式：

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{ATP}} &= \frac{W_{\text{TP}}^2}{2(\Phi \varepsilon_1 A)^2} [\varepsilon_2 V_L + (V_G - \varepsilon_2 V_L) X] \\ &= \frac{1}{2\rho_L (\Phi \varepsilon_1 A)^2} [\varepsilon_2 + (\rho_L/\rho_G - \varepsilon_2) X]\end{aligned}\quad (5)$$

式中: ε_1 为流量系数修正系数; ρ_G 和 ρ_L 分别是汽相和液相的密度, kg/m^3 。

式(5)也可变成下面的形式:

$$X = \frac{\Delta P_{\text{ATP}}}{W_{\text{TP}}^2} \left[\frac{2(\Phi \varepsilon_1 A)^2}{V_G - \varepsilon_2 V_L} \right] - \left[\frac{\varepsilon_2 V_L}{V_G - \varepsilon_2 V_L} \right] \quad (6)$$

或

$$W_{\text{TP}} = \Phi \varepsilon_1 A \sqrt{\frac{2\rho_L \Delta P_{\text{ATP}}}{\varepsilon_2 + (\rho_L/\rho_G - \varepsilon_2) X}} \quad (7)$$

式(6)和式(7)就是应用多孔探针测量干度和流量的公式。 ε_1 和 ε_2 由实验确定。使用式(6)或式(7)时, 流量 W_{TP} 或干度 X 两个参数中的一个量是事先已知的或采用其它方法已测得的, 即当 X 已知时通过测量 ΔP_{ATP} 可以由式(7)计算出 W_{TP} , 或 W_{TP} 已知时由式(6)计算出 X 。例如在直流锅炉中, 总流量 W_{TP} 可以在锅炉的进口处测得, 这样可以由式(6)计算出各段的出口干度; 在一般蒸汽回路中, 通过电导法或化学方法测出干度 X 后, 可以由式(7)计算出管路中的流量。

式(6)还表明, 在给定压力下, X 与 $\Delta P_{\text{ATP}}/W_{\text{TP}}^2$ 成线性关系。

3 实验装置与数据处理

实验在西安交通大学高压蒸汽水回路上进行, 基本回路如图2所示。

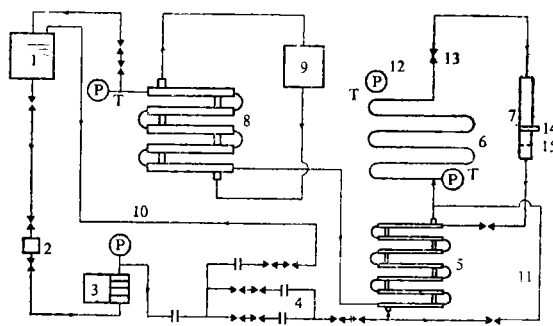


图2 高压蒸汽水回路简图

1——水箱; 2——过滤器; 3——柱塞泵; 4——水量孔板; 5——换热器; 6——加热器; 7——实验段; 8——冷凝器; 9——冷却塔; 10——旁路; 11——调温旁路; 12——压力温度测点; 13——阀门; 14——多孔探针; 15——孔板

实验段7水平安装在电加热段6的下游。管道内径31.7mm; 多孔探针直径 $d=4\text{mm}$; 开孔直径1mm; 静压孔布置在管壁上如图1(a)所示, 多孔探针上游直管段长度为3.2m; 孔板安装在多孔探针的下游0.96m处, 孔板内径与管道内径之比 $\beta=0.5$ 。多孔探针与孔板作为一个整体在实验前用单相水进行了标定, 流量系数分别为0.8538和0.7036。

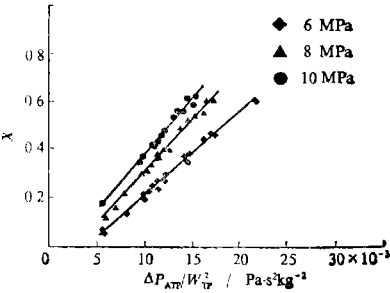


图3 X 与 $\Delta P_{ATP}/W_{TP}^2$ 的关系

进入实验段的流量用孔板流量计检测，两相流体的差压 ΔP_{TP} 采用1151 差压 变送器 检测，温度由热电偶测量。干度的大小根据电加 热功率进行计算，计算中考虑了散热损失。

实验结果 以 $X=f(\Delta P_{ATP}/W_{TP}^2)$ 的形式示 于图3。

在式（6）中令：

$a=\varepsilon_2V_L/(V_G-\varepsilon_2V_L)$ (8)

$b=2(\Phi\varepsilon_1A)^2/(V_G-\varepsilon_2V_L)$ (9)

a 、 b 值可以从图3中得到。在给定的压力 下， V_G 和 V_L 都是常数，因此根据 式（8）

表2 不同压力下的 a 、 b 、 ε_1 和 ε_2

P/MPa	a	b	ε_1	ε_2
6	0.151	3.62×10^{-5}	1.058	3.282
8	0.121	4.31×10^{-5}	0.998	1.831
10	0.111	4.81×10^{-5}	0.927	1.241

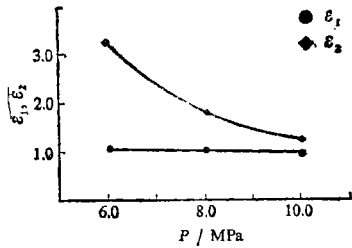


图4 ε_1 和 ε_2 与压力 P 的关系

和式（9）可以分别计算出不同压力下的 ε_1 和 ε_2 。结果见表2。

图4给出了 ε_1 和 ε_2 与压力的关系曲 线。通过图4可以求得 $P=6\sim10\text{MPa}$ 范围内的 ε_1 和 ε_2 。然后应用式（6）或式（7）就可以 根据 ΔP_{ATP} 测量出干度 X 或 流量 W_{TP} 。实 验结果表明，式（6）、式（7）的误差小于 5 %。

4 应用多孔探针与孔板组合法进行双参数测量

单独使用多孔探针，只能解决 X 和 W_{TP} 中一个参数是已知时的测量问题，即 流量干 度单参数测量。工程中大量的问题还是双参数测量，流量和干度两个参数都是未知的。要进 行双参数测量，一般必须同时采用两个测量元件。

在众多测量元件中，孔板的两相流特性研究得最为充分，应用也最广。因此将多孔探针 与孔板进行组合，就可以成为一种简单的双参数测量方法^[4]。

根据文献[5]，孔板流量干度计算式为：

$W_{TP}=amA\psi\sqrt{2\rho_L\Delta P_{OTP}}/[\theta+(\sqrt{\rho_L/\rho_G}-\theta)X]$ (10)

或

$\Delta P_{OTP}=\frac{1}{2\rho_L}\frac{W_{TP}^2}{(amA\psi)^2}[\theta+(\sqrt{\rho_L/\rho_G}-\theta)X]^2$ (11)

式中： ΔP_{OTP} 为两相流体流过孔板时的压力降，Pa； α 为孔板流量系数； m 为孔板流通截面积与管道流通截面积之比； Ψ 为孔板热膨胀系数； θ 为与两相流体密度比有关的修正系数，联立求解式（5）与式（11），便可同时求得干度 X 和流量 W_{TP} 。

将式（11）与式（5）相比得：

$$\frac{\Delta P_{\text{OTP}}}{\Delta P_{\text{ATP}}} = \left(\frac{\varepsilon_1 \Phi}{m \alpha \Psi} \right)^2 \frac{[\theta + (\sqrt{\rho_L / \rho_G} - \theta) X]^2}{[\varepsilon_2 + (\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2) X]}$$

(12)

由式（12）可以求得干度 X ，但式（12）是非线性的，应用不便，应进行线性化处理。令 $R(X) = [\theta + (\sqrt{\rho_L / \rho_G} - \theta) X]^2 / [\varepsilon_2 + (\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2) X]$ ，对上式右边进一步分解得：

$$R(X) = [CX + D] + E / [\varepsilon_2 + (\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2) X] = L(X) + N(X)$$

(13)

式中： $L(X)$ 表示线性部分， $N(X)$ 表示非线性部分。其中：

$$C = (\sqrt{\rho_L / \rho_G} - \theta)^2 / (\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2)$$

(13 a)

$$D = [2\theta(\sqrt{\rho_L / \rho_G} - \theta)(\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2) - \varepsilon_2(\sqrt{\rho_L / \rho_G} - \theta)^2] / (\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2)^2$$

(13 b)

$$E = [\theta - \varepsilon_2(\sqrt{\rho_L / \rho_G} - \theta) / (\rho_L / \rho_G - \varepsilon_2)]^2$$

(13 c)

实际计算表明， $N(x)$ 所占份额小于 1%，可以忽略不计。故式（13）可简化为：

$$R(X) = CX + D$$

(14)

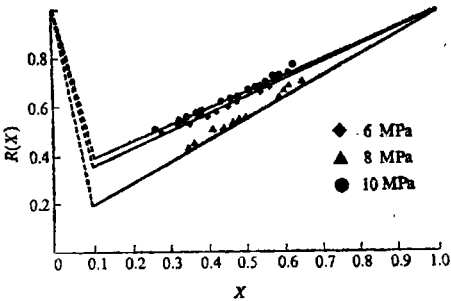


图 5 式（16）与实验结果对比

表 3 不同压力下的 C 、 D 、 G 、 H 值

P/MPa	C	D	G	H
6	0.7093	0.2816	29.26	5.66
8	0.8910	0.1090	33.05	1.47
10	0.6771	0.3053	19.81	5.05

将式（14）代入式（12）得：

$$\frac{\Delta P_{\text{OTP}}}{\Delta P_{\text{ATP}}} = \left(\frac{\varepsilon_1 \Phi}{am \Psi} \right)^2 R(X) = \left(\frac{\varepsilon_1 \Phi}{am \Psi} \right)^2 [CX + D] = GX + H$$

(15)

或

$$R(X) = \left(\frac{\Delta P_{\text{OTP}}}{\Delta P_{\text{ATP}}} \right) / \left(\frac{\varepsilon_1 \Phi}{am \Psi} \right)^2 = CX + D$$

(16)

图 5 给出了式（16）与实验的对比情况，结果表明，式（16）、（15）的误差小于 7%。系数 C 、 D 、 G 、 H 的值见表 3。

由式 (16) 或式 (15) 计算出 X 后, 就可以应用式 (7) 或式 (10) 确定出流量 W_{TP} , 实现了两相流体流量干度双参数测量。实验表明, 由这种方法测量流量的误差小于 4.7%。

从式 (13) 可以看出, 系数 C 、 D 值与多孔探针和孔板的结构参数无关, 在一定的流速范围内主要取决于两相流体的密度比或汽水混合物的压力。因此式 (16) 是通用计算式, 而式 (15) 则与多孔探针和孔板的结构参数有关。

5 结论

(1) 使用多孔探针可以较为准确地测量高压汽水混合物的流量和干度。当一个参数为已知时, 应用多孔探针可以测得另一个参数; 同时使用多孔探针和孔板就可以测得两个未知参数。

(2) 式 (6) 和式 (7) 是应用多孔探针进行汽液两相流体流量干度单参数测量的基本公式。适用范围为: $X > 0.1$, $P = 6 \sim 10 \text{ MPa}$; 多孔探针的结构型式如图 1(a)。

(3) 式 (15)、式 (16) 是应用多孔探针与孔板组合法进行双参数测量的基本公式。适用条件为 $X > 0.1$, $P = 6 \sim 10 \text{ MPa}$ 。

(4) 有关多孔探针在其它范围内的两相流特性还有待于进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 Miller R W. Flow Measurement Engineering Handbook, New York: McGraw-Hill, 1983; 11—26~39.
- 2 Reimann J, et al. Two-phase Mass Flow Measurements with Pitot Tubes and Density Measurements In: Delhaye J M, Cognet G ed., Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-phase Flow, Nancy, France, 1983; Berlin: Springer-Verlag, 1984: 625~650.
- 3 林宗虎. 气液固多相流测量. 北京: 中国计量出版社, 1988: 194~196.
- 4 林宗虎, 王栋, 申国强. 节流元件-多孔动压探针组合式双相流量干度计. 实用新型专利公报. 86203508, 1988: 4-12-118.
- 5 Lin Z H. Two-phase Flow Measurements with Sharp-edged Orifices. *Int J Multiphase Flow*, 1982 8(6): 683~693.

High Pressure Steam-Water Flow and Dryness Measurements with Multihole Probes

Wang Dong, Lin Zonghu

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract—This paper contains the experimental results of high pressure steam-water flow and dryness measurements obtained by using a multihole probe. The tested pressures are 6, 8 and 10 MPa, respectively. The test dryness range is 5%~70% while the test mass flow range is 0.08~0.5 kg/s. On the basis of a modified homogeneous flow model, a simple relationship is developed for the two-phase flow and dryness. Comparisons with the experimental data show that within the experimental range the root-mean-square error of this method is about 5%. As a major application of multihole probe, this paper also studies the method for simultaneous measurements of two-phase flow and dryness by using the combination of a multihole probe and an orifice plate.

Ke words: Two-phase flow; Multihole probe; Measurements of flow and dryness