

计算不可压缩流体流经孔板流量计 永久压强降的半理论公式

李 微 陈逢星
(化工系)

提 要 本文从流体流动理论出发, 导出计算孔板流量计永久压强降的半理论公式, 并与实验数据及若干经验式进行计算结果比较, 表明该公式准确可靠, 可供设计部门使用.

关键词 孔板流量计; 永久压强降; 半理论公式

孔板流量计具有价廉, 结构简单, 易于安装等优点, 但其最大的缺陷是大部分压强降无法恢复⁽⁴⁾, 造成永久压强降较大. 比如孔径和管径比值为 0.5 时, 其永久压强降占总压降的 73%⁽⁵⁾. 准确计算永久压强降乃是管路计算中的重要一环, 目前尚无成熟的模型, 多采用各种经验式^(1,3,6) 来估算. 本文从流体流动理论出发, 导出计算永久压强降的半理论公式, 并与实验数据⁽⁵⁾ 及若干经验式进行计算结果比较. 结果表明该公式与实验数据吻合较好.

1 压降分布图的分析

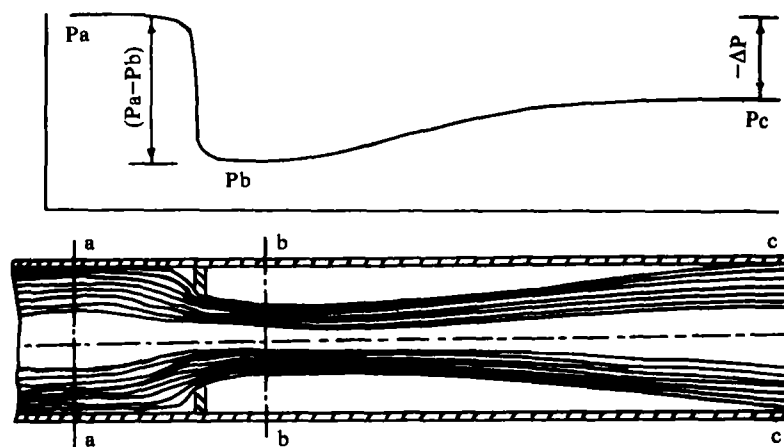


图 1 压降分布图

图 1 为上、下游距孔板分别为 1 倍管径和 1/2 倍管径处, 以径接法所测得的压降分布图. $(p_a - p_b)$ 为孔板前后的总压降, b 为截面为流体缩脉处, c 截面为流体恢复截面, 则永久压强降 $(-\Delta p)$ 应由以下两部分组成: 一是流经 a、b 截面的突然缩小的压强损失. 二是流经 b、c 截面的突然扩大的压强损失. 前者由于流道缩小, 速度在孔口处增加, 压强能转变为

动能, 其能量损耗不明显⁽⁴⁾, 可忽略不计. 而后者缩脉处以后高速流动的流体与 c 截面上流动得比较慢的流体相混合时, 其速度被大大的减弱, 引起此区间的高度湍流并发生涡流运动, 因此可认为全部压强损失即永久压强降产生于此.

2 公式的推导

由 Bernoulli 方程可得
$$\frac{p_a}{\rho} + \frac{u_a^2}{2} = \frac{p_b}{\rho} + \frac{u_b^2}{2}$$

根据不可压缩流体的连续性方程
$$S_a u_a = S_b u_b$$

代入上式并整理得:

$$\frac{p_a - p_b}{\rho} = \frac{u_b^2}{2} \left[1 - \left(\frac{S_b}{S_a} \right)^2 \right] \tag{1}$$

由动量衡算式及机械能衡算式知 b、c 两截面间的能量损耗^[2, 3]:

$$h_f = \frac{u_b^2}{2} [1 - (S_b / S_c)]^2 \tag{2}$$

(1) 式和 (2) 式合并, 并将 $S_a = S_c$ 代入整理得:

$$\frac{P_a - P_b}{\rho} = \frac{h_f}{[1 - (S_b / S_a)]^2} \left[1 - \left(\frac{S_b}{S_a} \right)^2 \right]$$

则永久压强降为

$$-\Delta p = h_f \rho = \frac{1 - (S_b / S_a)}{1 + (S_b / S_a)} (P_a - P_b)$$

设 $S_b = C_c S_0$, 代入上式得

$$-\Delta p = \frac{1 - C_c (S_0 / S_a)}{1 + C_c (S_0 / S_a)} (P_a - P_b) \tag{3}$$

孔口处的流速为^[2]:

$$u_0 = C_c \sqrt{\frac{1}{1 - (C_c S_0 / S_a)^2}} \sqrt{\frac{2(P_a - P_b)}{\rho}}$$

或

$$u_0 = C_D \sqrt{\frac{1}{1 - (S_0 / S_a)^2}} \sqrt{\frac{2(P_a - P_b)}{\rho}}$$

则

$$C_c \sqrt{\frac{1}{1 - (C_c S_0 / S_a)^2}} = C_D \sqrt{\frac{1}{1 - (S_0 / S_a)^2}}$$

将上式两边平方, 整理后得

$$C_c = \frac{C_D}{\sqrt{1 - (1 - C_D^2)(S_0 / S_a)^2}}$$

对于圆形管道: $\frac{S_0}{S_a} = \left(\frac{D_0}{D_a}\right)^2$, 令孔径与管径比值 $\frac{D_0}{D_a}$ 为 β , 则

$$C_c = \frac{C_D}{\sqrt{1 - (1 - C_D^2)\beta^4}}$$

由实验知, 当管道内雷诺数 $Re_a = \frac{D_a u_a \rho}{\mu}$ 或孔口处雷诺数 $Re_0 = \frac{D_0 u_0 \rho}{\mu}$ 大于 3×10^4 时, C_D 则恒值为 0.61, 与 β 测压方式无关^[1,2,4,5]. 所以:

$$C_c = \frac{0.61}{\sqrt{1 - 0.628\beta^4}} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式, 整理得:

$$-\Delta P = \frac{\sqrt{1 - 0.628\beta^4} - 0.61\beta^2}{\sqrt{1 - 0.628\beta^4} + 0.61\beta^2} (P_a - P_b) \quad (5)$$

(5)式即为计算永久压强降的半理论公式. 由式中可知, 永久压强降等于总压降乘以某个系数, 即总压降打一折扣. 该系数 K_c 只是 β 的函数, 且随 β 值的减小而增大. 即:

$$K_c = \frac{-\Delta P}{P_a - P_b} = \frac{\sqrt{1 - 0.628\beta^4} - 0.61\beta^2}{\sqrt{1 - 0.628\beta^4} + 0.61\beta^2} \quad (6)$$

3 计算结果比较

文献[1]、[3]、[6]提出的经验式分别为:

$$K_c = \frac{-\Delta P}{P_a - P_b} = 1 - \beta^2$$

$$K_c = \frac{-\Delta P}{P_a - P_b} = \frac{0.298}{1 - \beta^4}$$

$$K_c = \frac{-\Delta P}{P_a - P_b} = 1 - 1.1\beta^2$$

文献[5]提供了图1实验曲线及表1实验数据. 现将各公式 K_c 计算结果列于表1, 并加以比较.

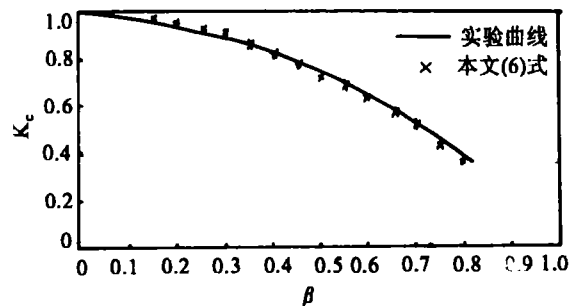


图2 K_c 与 β 的关系

由图1和表1均可看出: 在 $\beta < 0.25$ 的范围内, 本文(6)式更接近实验数据, 平均相对误差为 2.01%. 在 $\beta > 0.3$ 的范围内, 本文(6)式与实验数据几乎吻合(见图2), 平均相对误差仅 0.44%, 比文献[1]和文献[6]的经验公式都更为准确, 而文献[3]公式明显有误.

孔板流量计的 β 实用范围一般应大于 0.25^[5], 所以本文(6)式更具有准确实用的优点.

表1 各公式计算结果比较

β 值	K_C 计算结果				
	实验数据	本文(6)式	文献[1]公式	文献[3]公式	文献[6]公式
0.0	1.00000	1.00000	1.00000	0.29800	1.00000
0.05	0.98500	0.99695	0.99750	0.29800	0.99725
0.10	0.97500	0.98787	0.99000	0.29803	0.98900
0.15	0.95000	0.97292	0.97750	0.29815	0.97525
0.20	0.93100	0.95234	0.96000	0.29848	0.95600
0.25	0.91000	0.92646	0.93750	0.29917	0.93125
0.30	0.88500	0.89566	0.91000	0.30043	0.90100
0.35	0.85500	0.86033	0.87750	0.30254	0.86525
0.40	0.82000	0.82084	0.84000	0.30583	0.82400
0.45	0.78000	0.77755	0.79750	0.31074	0.77725
0.50	0.74000	0.73073	0.75000	0.31787	0.72500
0.55	0.68500	0.68058	0.69750	0.32802	0.66725
0.60	0.63000	0.62718	0.64000	0.34237	0.60400
0.65	0.57200	0.57046	0.57750	0.36275	0.53525
0.70	0.51000	0.51017	0.51000	0.39216	0.46100
0.75	0.45000	0.44580	0.43750	0.43593	0.38125
0.80	0.38000	0.37648	0.36000	0.50474	0.29600
$\beta < 0.25$ 时平均相对误差 / %		2.01	2.37	59.3	2.07
$\beta > 0.3$ 时平均相对误差 / %		0.44	2.17	48.4	6.00

主要符号

- P_a, P_b, P_c —a、b、c 截面处压强, (Pa)
- u_a, u_b, u_c, u_0 —a、b、c 截面及孔口处流速, (m/s)
- ρ —流体密度, (kg/m^3)
- S_a, S_b, S_c, S_0 —a、b、c 截面及孔口截面的截面积, (m^2)
- hfe —每公斤流体的摩擦能量损失, (J/kg)
- $-\Delta P$ —永久压强降, (Pa)
- C_c —孔板收缩系数
- C_D —孔板排出系数或流量系数
- D_a, D_0 —管道内径及孔口直径, (m)
- β —孔口直径与管道内径比值
- Re_a, Re_0 —管道内及孔口处雷诺数
- μ —流体粘度, ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- K_C —压降系数

参考文献

- 1 Holland F A. Fluid flow for chemical engineers. Edward Arnold. 1973. 141~144
- 2 谭天恩等. 化工原理(上册). 北京: 化学工业出版社, 1986. 54~55; 74~76
- 3 陈敏恒等. 化工原理(上册). 北京: 化学工业出版社, 1985. 62~64
- 4 丁绪淮等译. 化学工程(卷1): 流体流动, 传热与传质. 北京: 化学工业出版社, 1983. 137~142
- 5 McCabe Warren L. Unit operations of chemical engineering. New York: McGraw-Hill Book Company, 1985. 195~198
- 6 天津大学化工原理教研室编. 化工原理(上册). 天津: 天津科学技术出版社, 1990. 73~77

Calculation of Incompressible Fluids through Orifice Meter in Half Theory Expression of Permanent Head Losses

Li Wei Cheng Fengxing

(Department of Chemical Engineering)

Abstract Based on the theory of fluid flow, the half theory expression for calculation orifice meter permanent head loss had been derived. By comparing the calculation results with the experimental data and some empirical formulas, it shows that the expression is accurate and reliable.

Keywords orifice meter; permanent head losses; half expression