

水煤浆管内流动流量测量的研究

孟令杰 秦显燕 (山东工业大学动力工程系)

章名耀 (东南大学热能工程研究所)

【摘要】 本文从水煤浆流变模型的研究入手,利用理论分析同实验研究相结合的方法,对文丘里节流装置测定水煤浆流量的规律进行了研究。通过对文丘里测试管段内水煤浆流动规律的分析,用量纲分析法导出了文丘里流量修正系数的准则方程,并根据实验确定了文丘里测定水煤浆流量的经验公式。结果表明,在实验范围内该公式的精度令人满意。

关键词 水煤浆 文丘里管 流变模型 流量测量

分类号 TH814

1 引言

高浓度水煤浆是70年代初发展起来的一种新型以煤代油的液态燃料,其管内流动流量的测量是水煤浆应用技术中的一个重要问题。目前,水煤浆的流量测量大都采用电磁流量计,用节流方法测量其流量的研究还不多。本文拟从水煤浆流变模型的确定入手,利用理论分析和实验研究相结合的方法,对文丘里节流装置测量水煤浆流量的规律进行探索,从而为工程上测量水煤浆的流量提供一种方法。

2 水煤浆的流变模型

水煤浆由一定粒度分布的煤粉、水和少量添加剂均匀混合而成,具有明显的非牛顿流体特性。水煤浆流变模型用管流法确定,其壁面剪切应力 τ_w 和应变率 $\dot{\gamma}_w$ 为:

$$\tau_w = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{4Q_c}{\pi R^3} \left[\frac{3n' + 1}{4n'} \right] \quad (2)$$

其中 $n' = \frac{d \log(\Delta P)}{d \log(Q_c)}$, R 为圆管半径, Q_c 为管内无滑移流量, ΔP 为长 L 的水平圆管上相应的压力降。

用两种管径 ($D = 27.45\text{mm}, 53.14\text{mm}$) 对三种重量浓度 ($C_w = 61.2\%, 58\%, 56\%$)

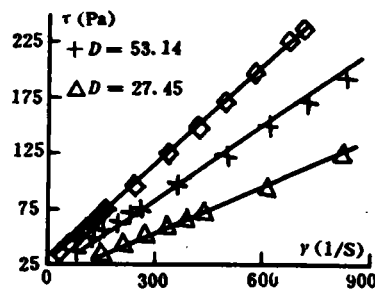


图1 $\tau-\dot{\gamma}$ 曲线

的水煤浆所做的流变试验结果表明:它们都具有宾汉流体的性质,但对同一浓度的水煤

收稿日期 1994-06-21

本文联系人 孟令杰 男 32 讲师 250014 山东济南

浆在两种管径管道内测得的流变模型不一样,其原因是由管道内壁面附近存在滑移层所致^[3]。图 1 显示了 61.2% 浓度水煤浆的测算结果。

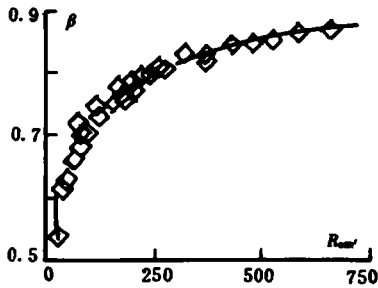


图 2 $\beta-R_w$ 曲线

为求得水煤浆真实的流变模型,我们采用 Jastrzebski 模型^[1]对滑移进行修正。

设管内滑移层外边界速度为 U_s ,则管内实际流量 Q 应为无滑移流量 Q_c 与滑移附加流量 Q_s 之和,即

$$Q = Q_c + Q_s = Q_c + \pi R^2 U_s \quad (3)$$

据文献^[1,2]假设

$$U_s = \beta_c \tau_w / R \quad (4)$$

$$\text{故 } Q_c = Q - \beta_c \pi R \tau_w \quad (3a)$$

其中 β_c 为滑移修正系数,它仅是壁面剪切应力 τ_w 的函数,而与管径无关。由此可知,对给定的水煤浆在不同管径管道内流动时,只要选取共同的壁面剪切应力 τ_w 的范围,则它们的滑移修正系数 $\beta_c(\tau_w)$ 是相同的。可以证明^[3]:对两种管径管道内水煤浆流动的滑移修正系数可由下式确定:

$$\beta_c = \left[\frac{Q_1}{\pi R_1^3 \tau_w} - \frac{Q_2}{\pi R_2^3 \tau_w} \right] / \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right] \quad (5)$$

通过实验确定了 β_c 后,可由式(3a)求得无滑移流量 Q_c ,再由式(1)、(2)便可得到水煤浆真实的特性关系。根据对滑移进行修正和对修正后的实验数据进行拟合的方法得到的上述浓度水煤浆真实的特性关系为:

$$C_{w1} = 61.2\% \quad \tau = 26.37 + 0.26\dot{\gamma}$$

$$C_{w2} = 58\% \quad \tau = 8.48 + 0.17\dot{\gamma}$$

$$C_{w3} = 56\% \quad \tau = 5.29 + 0.12\dot{\gamma}$$

在实验范围内,上述关系计算值与滑移修正后的实验值之间的相对误差在 3% 以内,图 1 给出了 61.2% 浓度水煤浆的真实流变曲线。

3 文丘里管测量水煤浆流量的原理

3.1 流量公式

文丘里管安装在水平圆管道中,其入口截面 1、喉部截面 2 的内径分别为 d_1, d_2 ,则文丘里管测量一般牛顿流体的体积流量:

$$Q = \mu A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

其中 $\Delta P = P_1 - P_2, A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}, A_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$ 分别为文丘里管截面 1、2 间的压差和有效截面积, ρ 为被测量流体的密度, μ 为文丘里管的流量系数。

对于均匀的、处于稳定状态的水煤浆在文丘里管内的定常流动,其截面 1、2 间的能量方程和连续方程分别为:

$$P_1 + \alpha_1 \frac{\rho_m V_1^2}{2} = P_2 + \alpha_2 \frac{\rho_m V_2^2}{2} + \Delta P_i \quad (7)$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (8)$$

其中 $V_1, V_2, \alpha_1, \alpha_2$ 分别为文丘里管截面 1、2 面上的平均流速和动能修正系数, $\Delta P_i = \xi \frac{\rho_m V_1^2}{2}$ 为截面 1、2 间的能量损失, ξ 为相应的能量损失系数, ρ_m 为水煤浆的密度。

联解式(7)、(8),可得水煤浆经文丘里管的流量

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 (\xi - \alpha_1) + \alpha_2}} A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m}} \\ &= \beta A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (9) \end{aligned}$$

对比式(6)、式(9)可知,文丘里管测量水煤浆流量的流量系数:

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - (\frac{A_2}{A_1})^2}{(\frac{A_2}{A_1})^2(\xi - a_1) + a_2}} \quad (10)$$

3.2 流动分析

由式(9)、(10)的分析可知,用文丘里管测量水煤浆流量,关键在于流量系数 β 变化规律的确定。

流体在圆管内流动时任意有效截面上的动能修正系数定义为:

$$\alpha = \frac{2}{R^2} \int_0^R \left[\frac{u}{V} \right]^3 r dr \quad (11)$$

其中 $u(r)$ 、 V 分别为截面上任意点的速度和平均速度,对广义宾汉流体(高浓度的水煤浆具此属性)

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (12)$$

其中 τ_y 为屈服应力, k 、 n 分别为流体的稠度系

$$E_2 = (C_1 C_2)^2 \frac{(R^2 - r_b^2)}{2} - 2C_1^2 C_2 \left[\frac{C_2^{(N+2)/N}}{C_3^2(N+2)} + \frac{\tau_b C_2^{(N+1)/N}}{C_3(N+1)} \right] + C_1^2 \left[\frac{C_2^{(2N+2)/N}}{C_3^2(N+2)} + \frac{\tau_b C_2^{(2N+1)/N}}{C_3(2N+1)} \right] \quad (14b)$$

$$L_3 = (C_1 C_2)^3 \frac{(R^2 - r_b^2)}{2} - 3C_1^3 C_2^2 \left[\frac{C_2^{(N+2)/N}}{C_3^2(N+2)} + \frac{\tau_b C_2^{(N+1)/N}}{C_3(N+1)} \right] + 3C_1^3 C_2 \left[\frac{C_2^{(2N+2)/N}}{C_3^2(2N+2)} + \frac{\tau_b C_2^{(2N+1)/N}}{C_3(2N+1)} \right] - C_1^3 \left[\frac{C_2^{(3N+2)/N}}{C_3^2(3N+2)} + \frac{\tau_b C_2^{(3N+1)/N}}{C_3(3N+1)} \right] \quad (14c)$$

由式(14)的分析可以看出,只要水煤浆的流变参数 n 、 k 、 τ_y 的值一定,且由实验确定了它在圆管内流动的滑移修正系数 $\beta_c(\tau_w)(U_c = \beta_c \tau_w / R)$ 后,便可求得水煤浆在圆管内作定常层流流动时任意有效截面上的动能修正系数。

3.3 准则方程

依据上面的分析可知,流量系数 β 可如下式确定

$$\beta = f(n, k, \tau_y, \rho_m, d_1, d_2, V_1, \theta) \quad (15)$$

数和流动指数。它在水平圆管内作定常层流流动时,任意有效截面上的实际速度分布^[3]为

$$u(r) = \frac{kR}{\tau_w} \left[\frac{n}{n+1} \right] \left\{ \left[\frac{\tau_w}{k} - \frac{\tau_y}{k} \right]^{\frac{n+1}{n}} - \left[\frac{\tau_w}{kR} r - \frac{\tau_y}{k} \right]^{\frac{n+1}{n}} \right\} + U_c, \quad r \geq r_b \quad (13a)$$

$$u(r) = \frac{kR}{\tau_w} \left[\frac{n}{n+1} \right] \left[\frac{\tau_w}{k} - \frac{\tau_y}{k} \right]^{\frac{n+1}{n}} + U_c, \quad r < r_b \quad (13b)$$

其中 $r_b = \frac{\tau_y}{\tau_w} R$ 为“柱塞区”半径。

将式(13a)、(13b)代入式(11),完成积分并令: $C_1 = \frac{kR}{\tau_w} \left[\frac{n}{n+1} \right]$, $C_2 = \left[\frac{\tau_w}{k} - \frac{\tau_y}{k} \right]^{\frac{n+1}{n}}$,

$$C_3 = \frac{\tau_w}{kR}, C_4 = \frac{\tau_y}{k}, r_b = \frac{C_4}{C_3}, N = \frac{n+1}{n}, \text{得}$$

$$\alpha = \frac{2}{R^2} \left[\frac{r_b^2}{2} \left[\frac{C_1 C_2 + U_c}{V} \right]^3 + \frac{1}{V^3} \left[\frac{(R^2 - r_b^2)}{2} U_c^3 + 3U_c^2 E_1 + 3U_c E_2 + E_3 \right] \right] \quad (14)$$

$$\text{其中 } E_1 = \frac{1}{2} [(V - U_c)R^2 - C_1 C_2 r_b^2] \quad (14a)$$

其中 θ 为文丘里管收缩段的锥顶角。由量纲分析的 Π 定理可导出与式(15)相对应的准则方程

$$\beta = F_1(Re, He, n, \theta, \frac{d_1}{d_2}) \quad (16)$$

其中 $Re = \frac{\rho_m V_1 d_1}{[k(\frac{8V_1}{d_1})^{n-1}]}$ 称 Reynolds 数

$$He = \frac{\rho_m \tau_y d_1^2}{[k(\frac{8V_1}{d_1})^{n-1}]^2}$$
 称 Hedstrom 数

对于给定几何形状的文丘里管,流量系

数 β 随表征水煤浆性质及其流动状态的相似准数 Re 、 He 和流动指数 n 而变,即

$$\beta = F_2(R_e, H_e, n) \quad (17)$$

4 经验公式

本实验文丘里管内的几何形状是给定的,试验水煤浆皆属宾汉体,即 $n = 1, \tau = \tau_0, k = \eta_0$,故式(17)简化为

$$\beta = F_3(Re, He) \quad (18)$$

其中 $Re = \frac{\rho_m V_1 d_1}{\eta_0}$ 称宾汉雷诺数,

$$He = \frac{\rho_m \tau_0 d_1^2}{\eta_0} \text{ 称宾汉赫氏数。}$$

由于宾汉赫氏数不随流动状态变化,为了便于看清 β 的变化规律和数据处理方便,可将两相似准数 Re 、 He 重新组合成一个新的相似准数 Re'_m 则式(18)可进行一步简化为:

$$\beta = F_4(Re'_m) \quad (19)$$

其中 $Re'_m = Re / (1 + \frac{He}{6Re})$ 称宾汉体综合雷诺数。

依据上面的分析,我们用给定的文丘里管对上述各浓度的水煤浆进行了流量测量试验(试验中的标准流量 Q 用电磁流量计测量,压差 ΔP 用自制隔膜差压计测量)。流量系数随综合雷诺数 Re'_m 变化的实验数据见图 2。在整理实验数据的基础上,采用回归拟合的方法可得经验公式:

$$\beta = A - BRe'_m \quad (20)$$

其中 A, B, C 为由试验确定的常数。本试验的综合雷诺数范围为 $Re'_m = 30 - 656$,对应的 $A = 1 \quad B = 1.6622 \quad C = -0.3834$ 将式(20)代入式(9),得

$$Q = [1 - \frac{1.6622}{Re'_m 0.3834}] A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m [1 - (\frac{A_2}{A_1})^2]}} \quad (9a)$$

式(9a)的计算值与实验值之间的相对误差

一般在 1% 左右,最大误差不超过 5%。

由式(20)可知,流量系数 β 随综合雷诺数 Re'_m 的增加(宾汉雷诺数 Re 的增加或宾汉赫氏数 He 的减小)而增加。值得指出的是式(20)是在本实验条件下得出的,实验范围以外的应用精度有待于进一步的试验验证。

5 结论

1 水煤浆经过较长时间的剪切其结构的破坏与恢复处于平衡状态后,可作为一种均匀的、处于稳定状态的纯粘性流体处理^[4]。

2 用文丘里管测量水煤浆管内定常流动的流量是可行的。研究表明:文丘里管测试段压差 ΔP 与其测量的水煤浆流量 Q 之间的关系为

$$Q = \beta A_2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_m [1 - (\frac{A_2}{A_1})^2]}}$$

3 对给定几何形状的文丘里管,测量水煤浆流量的流量系数 β 一般可整理成如下准则方程

$$\beta = F_2(Re, He, n)$$

当测量的水煤浆具有宾汉体性质时,其流量系数 β 可由宾汉体综合雷诺数 Re'_m 唯一确定,即

$$\beta = F_4(Re'_m) = A - BRe'_m$$

本文得出的经验公式具有较高的精度。

参 考 文 献

- 1 Z. D. Jastrzebski. I. E. Fund., 1967, 6(3), p. 445-454
- 2 G. Antonini, O. Francois, P. Gislais, A. Touret, P. Giltand, 6th. Int. Symp. On Coal Slurry Comb. and tech. Orlando, 1984. p. 266-281
- 3 贾庆贤,张中民,孔 珑. 第二届华东地区流体力学学术会议论文集,杭州,1990年11月,pp. 80-82
- 4 茆丽华,王世均. 水煤浆技术论文集. 全国第一次水煤浆技术研讨会论文集,1987年10月,pp. 13

The authors hold that the high-quality running-in of a naval propulsion plant can be conducive to fully tapping its potential in respect of performance, economics and service life. Currently, a classified running-in is generally adopted in all running-in trial-run programs. Is this beneficial to the realization of a rapid and high-quality running-in? In this regard, the authors with the main transmission gear taken as an object of investigation have conducted separately simulation tests of the soft and hard tooth flanks. This paper presents the test method and other details along with the conclusion that the use of the classified running-in operating mode has its limitations. Key words; gear, running-in, simulation test

用单片机实现水蒸气性质图表的电子化=Electronic Data Processing of Steam Tables Through the Use of a Single Chip Processor[刊,中]/Hu Niansu et al(Wuhan University of Electric Power & Water Resources)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -175-178

By the use of a single chip processor an electronic device for making available steam property data has been developed, which features ease of use and high precision and can fully replace conventional steam property diagrams. The paper also describes its specific features, functions, hardware and software design, etc. Key words; single chip processor, steam properties, diagram, electronic computerization

水煤浆管内流动流量测量的研究=A Study on the Flow Rate Measurement of Coal Water, Mixture Flowing in Circular Pipes[刊,中]/Meng Lingjie, Qin Xiameyan, Zhang Mingyao(Shandong Polytechnical University, Southeastern University)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -179-182

Proceeding from the investigation of a rheological model of coal water mixture(CWM), the authors have studied the Venturi tube-based CWM flow rate measuring technique through the use of a method combining theoretical analyses with experimental investigation. On the basis of the analysis of CWM flow characteristics in the Venturi test tube a criteria equation for the Venturi tube flow rate correction factor has been derived by using the method of dimensional analysis. Through experiments an empiric formula for measuring CWM flow rate by the Venturi tube is also obtained. It has been shown that the accuracy of the formula is satisfactory in the experimental range. Key words; coal water mixture, rheological model, Venturi tube, flow rate measurement

圆柱型磁电式转速传感器的压力特性及试制=On the Voltage Characteristics of a Cylindrical Electromagnetic Type Speed Sensor[刊,中]/Chen Yanfen(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -183-185

Key words; sensor, electromotive force, amplitude characteristics, fabrication, commissioning test

Edited and Published by Harbin Marine
Boiler & Turbine Research
Institute and Editorial Staff
of this Journal

Printer: Printing House of Harbin Institute
of Technology

Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin China

Post Code Number 150036

Periodical Registration: ISSN1001-2060
CN23-1176/TK

Distributed by China International

Book Trading Corporation,

P. O. Box 399, Beijing, China