

高浓度水煤浆流动的滑移现象 及其管内流动特性的影响

孟令杰 (山东工业大学)

章名耀 (东南大学)

[摘要]本文采用理论分析与实验研究相结合的方法,讨论了高浓度水煤浆在圆管内流动的滑移现象。分析了“滑移层”的存在对水煤浆管内流动特性的影响,并提出了一种用管流法确定水煤浆的真实本构关系的滑移修正方法。

关键词 水煤浆 滑移现象 流动特性

分类号 TQ531

1 引言

高浓度水煤浆(质量浓度大于 60%)作为一种悬浮液,具有非牛顿流体的特性。研究表明^[1,2,3]:其管内流动存在一种特殊的现象,即管内壁面处存在一层浓度很低、粘度显著下降的“滑移层”。这种滑移现象的存在不仅给水煤浆管内流动规律的研究带来了麻烦,而且也致使用管流法去确定其流变特性更加复杂。本文采用理论分析与实验研究相结合的方法。分析了水煤浆管内流动滑移现象存在条件下的流动规律,并进一步讨论了滑移现象对水煤浆管内流动特性的影响。

2 滑移现象

2.1 滑移层的形成

在含有固体颗粒的悬浮液中,当存在有剪切应变速率梯度时,颗粒会由剪切应变速率大的区域向剪切应变速率小的区域移

动^[2,3,4]。作为由一定粒度分布的煤粉组成的高浓度水煤浆,当其在管内流动时,浆水的煤粉颗粒会从管内壁面处高剪切应变速率区向管内的低剪切应变速率区迁移,致使管内壁面处形成了一层浓度很低、粘度显著下降而剪切应变速率很大的薄层,称为“滑移层”。

2.2 滑移影响分析

2.2.1 速度分布

对具有广义宾汉体性质的高浓度水煤浆,其流变模型为

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

其中 τ 为剪切应力, τ_y 为屈服应力, k, n 分别为流体的稠度系数和流动指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切应变速率。

当水煤浆在圆管内作无滑移稳定层流流动时,可推知其速度分布^[5]。

当水煤浆在圆管内的流动存在滑移时,管内壁面处这一浓度很低、粘度显著下降的薄层(滑移层)构成了管内主流区(滑移层之

收稿日期 1995-07-28

本文联系人 孟令杰 男 32 岁 博士生 250014 济南

外的区域)的流体整体向前移动的条件,使水煤浆管内实际流动成为其无滑移流动和“滑移层”引起的附加流动的叠加。根据文献^[6]，“滑移层”内这一薄层流体的流动可视为沿管内壁面作层流流动的“牛顿流体”的流动,且可认为在该薄层内任意处的剪切应力 $\tau = \tau_w$,即滑移层内的速度分布为线性分布。

滑移引起了附加流动的速度分布曲线变化,于是,水煤浆在圆管内的实际速度分布应为无滑移速度分布 V_c 与滑移引起的附加流动的速度 V_s 的叠加,即

$$V(r) = V_c(r) + V_s(r) \quad (2)$$

2.2.2 流量的影响

通过上述对水煤浆管内流动速度分布的分析,滑移现象的存在使得水煤浆管内流动的流量较无滑移存在时增加,即水煤浆管内流动的实际流量 Q 应为无滑移动的流量 Q_c 与滑移存在引起的附加流动的流量 Q_s 之和,即

$$Q = Q_c + Q_s \quad (3)$$

$$Q_s = \pi U_s R^2 - \pi U_s R \delta + \pi U_s \delta^2 / 3 \quad (4)$$

由于滑移层的厚度很薄,即 $\delta \rightarrow 0$,则由式(4)可得

$$Q_s = \pi U_s R^2 \quad (5)$$

$$Q_s = \pi R B_c \tau_w \quad (5a)$$

则由式(3)得管内的无滑移流量

$$Q_c = Q - \pi R B_c \tau_w \quad (6)$$

式(6)中的 Q 、 Q_c 分别为水煤浆在管内的实际流量和无滑移流量。

分析可知,只要通过一组不同管径的管流实验,在它们共同的壁面剪切应力 τ_w 的范围内确定出它们的滑移修正系数 $\beta_c(\tau_w)$ 的关系,由式(5a)可确定管内相应的滑移流量 Q_s ,再由式(6)可得水煤浆管内的无滑移流量 Q_c 。

2.3 流变特性

水煤浆流变特性的研究是水煤浆各项

流动规律研究的前提,用管流法来确定水煤浆的流变模型是工程上常用的基本方法之一。它的基本原理是通过测量流体在管内流过的体积流量 Q 及其在一段管长 L 上相应的压力降 ΔP ,然后通过一定的变换间接地得出流体的剪切应力和剪切应变速率间的关系。管流法原理的基本公式^[7]为

$$\tau_w = R \Delta P / 2L \quad (7)$$

$$\gamma_w = \frac{4Q_c}{\pi R^3} \left(\frac{3'n + 1}{4n'} \right) \quad (8)$$

其中 $n' = \frac{d \log(\Delta P)}{d \log(Q_c)}$

由式(7)、(8)的分析可以看出,只要通过管流实验得到一组 Q 、 ΔP 的测量数据,就可通过一定的数学处理方法得到流体的剪切应力 τ 和剪切应变速率 γ 的关系,即确定了流体的流变模型。

通过上述分析,水煤浆作为一种均质悬浮液,在管内流动存在滑移现象。由式(5a)可以看出,在同样大小的壁面剪切应力 τ_w 的条件下,同一浓度的水煤浆在不同管径的管道内流动时,滑移现象所引起的滑移附加流量 Q_s 是不同的。如不考虑这一滑移因素的影响,用管流法去确定水煤浆的流变模型时,必然会导致对同一浓度的水煤浆用不同管径的管道所测得的流变模型的结果不一致。为了求得水煤浆真实的流变模型,必须依据上述原理对滑移的影响进行修正,即先通过实验由式(6)求得水煤浆管内的无滑移流量 Q_c ,再通过式(7)、式(8)得到水煤浆真实的流变模型。

3 实验分析

管流实验在自制的水煤浆实验台上进行,实验中采用了山东八一制浆厂的三种不同浓度的水煤浆,其浓度分别为 66.1%, 64.2%, 62.3%。对每一浓度的水煤浆分别在三

种不同管径(管半径为 $R = 19.94, 26.57, 41.38$ mm) 管道内进行了管流实验。实验中的管内流量 Q 的测量由电磁流量计测定,相应水平管段上的沿程压降 ΔP 的测量由自制隔膜差压计测量。依据上述关于对水煤浆滑移现象分析的原理去整理测量的数据,数据的处理由计算机自动完成。结果表明:三种不同浓度的水煤浆在管内流动时,其无因次的管内滑移附加流量 Q_s^* ($Q_s^* = Q_s/Q$) 随其无因次的壁面剪切应力 τ_w^* ($\tau_w^* = \tau_w/\rho V^2$) 的变化具有相似的非线性的变化规律,但随着管径不同的变化表现出显著的差异,即同一浓度的水煤浆在不同管径的管道内流动时,其管内滑移附加流量 Q_s 占其管内流动的实际流量 Q 的份额随着管径的减少而增大,见图 1、2、3 所示。在不考虑滑移因素影响的条件下,每一浓度的水煤浆在不同管径的管道内所测的流变模型具有不同的结果,图 4 给出了浓度为 66.2% 的水煤浆在三种不同管径管道内所测得的流变实验点,其中的实线为拟合流变模型的计算曲线。浓度为 66.2% 的水煤浆的流变模型分别为

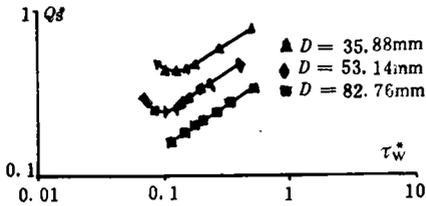


图 1 $Q_s^* - \tau_w^*$ 曲线

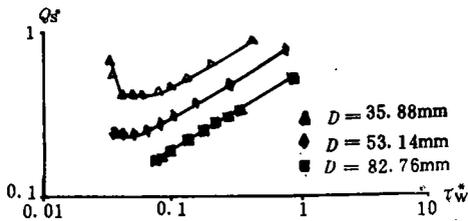


图 2 $Q_s^* - \tau_w^*$ 曲线

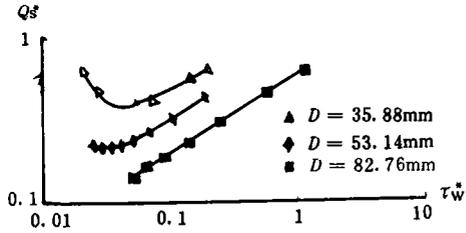


图 3 $Q_s^* - \tau_w^*$ 曲线

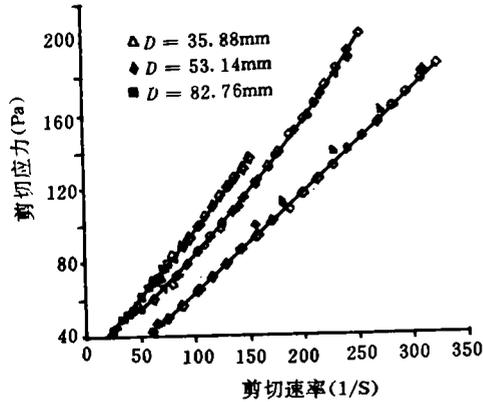


图 4 水煤浆流变模型曲线

$$D = 35.88 \text{ mm} \quad \tau = 14.21 + 0.356\gamma^{1.07}$$

拟合最大相对误差为 2.7% (9a)

$$D = 53.14 \text{ mm} \quad \tau = 35.53 + 0.101\gamma^{1.34}$$

拟合最大相对误差为 1.2% (9b)

$$D = 82.76 \text{ mm} \quad \tau = 27.99 + 0.479\gamma^{1.08}$$

拟合最大相对误差为 1.9%。(9c)

从上述结果可以看出,同一浓度的水煤浆在三种不同的管径管道内测得的流变模型虽都具有非牛顿广义宾汉体的性质,但模型结果相差甚远。同时,分析图 4 中的数据也可以看出,这种同一浓度水煤浆的流变模型的不一致性不是测量数据的分散造成的,正是由于水煤浆在不同管径的管道内流动时,其滑移所引起的附加流动的程度不同造成。因此,为求得水煤浆真实的流变模型,必须对滑移因素的影响予以修正。图 5 给出了浓度为 66.2% 的水煤浆,在三种不同管径管道内流动时滑移修正以后的流变数据点,其中的实线为修正后三种管径的流变数据一块拟合,

所得真实流变模型的计算曲线。真实流变模型为

$$C_w = 66.2\% \quad \tau = 47.32 + 0.0376\gamma^{1.582} \quad (10)$$

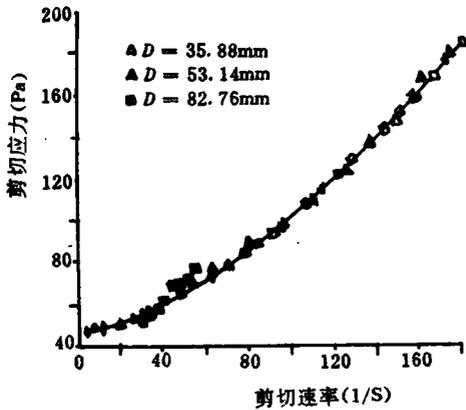


图 5 水煤浆真实流变模型曲线

方程(10)的计算值与修正后的相应流变数据之间的相对误差一般在 2% 左右,误差最大值不超过 10%。

4 结 论

通过上面的分析,得出以下结论:

1. 滑移现象的存在对水煤浆管内流动规律有着重要的影响。
2. 同一浓度的水煤浆在不同管径管道内流动时,其滑移影响的程度不同。
3. 用管流法确定水煤浆的真实流变模型时,需对滑移因素的影响予以修正。本文提出了一种可行的滑移修正方法。

参 考 文 献

- 1 孟令杰. 水煤浆在圆管内流动动能修正系数的确定方法. 中国工程热物理学报, 1993, 14(2)
- 2 Jastrzebski Z D. I. E. C. Fund, 1967, 6(3): 445-454
- 3 Antonini G, Francois O, Gislais P, Touret A, Girand P. 6th. Int. Symp. On Coal Slurry Comb. and Tech., 1984. Orlando, P, 266-281
- 4 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟. 清华大学出版社, 1991, 123-128
- 5 孟令杰. 水煤浆管内流动流量测量的研究. 热能动力工程, 1995, 10(3)
- 6 孟令杰. 水煤浆管内流动的相似准数及阻力特性. 化工学报, 1995, 46(3)
- 7 沈崇棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用. 高教出版社, 1989, 150-157

船用柴油机变型设计系统填补国内空白

目前,由上海沪东造船厂推出的船用柴油机变型设计系统,属于最新开发的项目,填补了国内在此方面的空白。

为了促进船用柴油机设计效率的提高,降低柴油机设计和制造的难度,节约人力、物力和财力,取得良好的经济效益。该厂开发研制的这种目前国内首创的应用系统,投入实际运用后,效果很好。不仅图像清晰,布局合理,而且出图迅速,费用低廉,设计效率明显改观。同时,该系统还能提供计算模型和计算报告,加快运算速度,对柴油机各项性能的计算和调试,均能获得满意的答案,经有关专家评审后,一致对该系统的开发成功给予了充分肯定。

(邵天骏 供稿)

(CWM) of High Concentration and Its Effect on Flow Characteristics in Pipes [刊,中]/Meng LingJie (Shandong Polytechnical University), Zhang Mingyao (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):85~88

By combining theoretical analysis with experimental research discussed is the slip phenomenon of coal water mixture (CWM) of high concentration flowing in pipes. An analysis is given of the effect of "slip layer" on the flow characteristics of the CWM in pipes. The authors have also come up with a new method for correcting the wall slip of CWM. flowing in pipes and obtaining a true rheological model of the CWM. **Key words:** coal water mixture, slip phenomenon, flow properties

流化床煤燃烧中氮氧化物的生成机理=A study on the Generation Mechanism of Nitrogen-Oxygen Compound During the Process of Fluidized Bed Coal Combustion [刊,中]/Feng Bo, Lin Zhijie, Yuan Jianwei, Cai Xuejun, Liu Dechang (Middle China University of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):89~94

The generation mechanism of N_2O and NO_x during the process of fluidized bed coal combustion is studied in a fluidized bed reactor and a fixed bed reactor. N_2O and NO_x in the fluidized bed coal combustion are found to come mainly from the nitrogen in the coal, i. e. volatilization nitrogen and coke nitrogen, and NO_x is partly from the N_2 in the air. The volatilization nitrogen is mainly in the form of HCN and NH_3 to generate N_2O and NO_x by means of equal phase reaction, and the resultant of N_2O and NO_x from the coke nitrogen is by multi-phase reaction. The removing mechanism of N_2O is different from that of NO_x . The removal of N_2O is by means of the reduction reaction between the hydrogen atom and the oxygen atom, the catalysis-reduction of the solid state substance in the bed layer and self thermal decomposition, and the removal of NO_x is by means of the reaction with CO_2 , H_2 , NH_3 and coke under the catalysis of solid state substance. **Key words:** Fluidized Bed Reactor, Fluidized Bed Combustion, Nitrogen-Oxygen Compound

内循环流化床锅炉技术及发展前景=Internal Cycle Fluidized Bed Boiler Technology and Its Development Prospects [刊,中]/Wang Huaibin, Zhang Zidong, Dong Yong (Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):95~100

A definition is given of the internal cycle fluidized bed boiler along with an overview of the major contributions made by experts at home and abroad involved in the development of the said boiler. The authors hold that the above mentioned boiler will eventually be listed as a predominant product among industrial boilers. **Key words:** boiler, internal cycle, fluidized bed, overview

燃机应用于商船的现状和展望=The Present Status and Future Prospects of the Application of Gas Turbines for Merchant Ships [刊,中]/Zhang Hui(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):101~104

A general review is given of the developments and present status of marine gas turbines employed on board merchant ships. In this connection the merits of the gas turbines as against diesels are described. The prospects of the use of gas turbines for merchant vessels have also been briefly dealt with. **Key words:** gas turbine, power plant, merchant ship application

锅炉装置计算机监测优化控制系统=A Computer-based Monitoring and Optimized Control System for a Boiler Unit

[刊,中]/Zhang Mingbo(Applied Mathematics Institute of Heilongjiang University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):105~107

This paper deals with a computer-based system for the on-line monitoring and optimized control of a boiler unit. **Key words:** computer-based monitoring, optimized control

BHW35 钢电渣焊后亚温淬火 = Sub-temperature Quench of BHW35 Steel after Electroslag welding [刊,中]/Liu Ying, Xiao Yueling, Chang Fanghua, You Mo (Harbin Boiler Ltd Company), Cui Yuexian (Harbin Institute of Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):108~111

The treatment of normalizing, sub-temperature quenching and tempering to BHW35 steel after electroslag welding can improve the impact toughness of the welding contacts and the mother steel, with the high strength being maintained. The problem of low impact toughness of electroslag welding seam of BHW steel has been therefor resolved. **Key words:** BHW35 Steel. Welding, Impact Toughness, Quench

用锰砂除地下深井水中铁、锰离子的工艺设计及运行控制 = The Technological Design & Operation Control of the Clearance of Iron & manganese Ion from Deep-Well Water by Manganese Sand [刊,中]/Shao Yanqiu, Liu Yangfang, Gao shujun, Liu Li(Harbin Labour Bureau Boiler Compressure Vessel Inspection Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):112~116

Key words: underground water, manganese sand, Iron and Manganese Ion, Technology Design, Control.

HG-CFB35-3 • 82/450-1 型循环流化床锅炉的启动调试研究及改进分析 = A Study on the Start-up Commissioning Test of a HG-CFB 35-3 • 82/450-1 Circulating Fluidized Bed Boiler Followed by an Analysis of Improvement Measures [刊,中]/Dang Lijun, Zhang Wenjing, Wang Jubao//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):117~121

SHL10-13 锅炉提高产量的改造设计 = The Modification Design of SHL10-13 Boiler for Uprating its Capacity [刊,中]/Zhang Lianping (Hangzhou Southeastern Chemical Engineering Co. Ltd.)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):122~123

提高凝汽器真空度的现场措施 = On-site Measures for Enhancing Condenser Vacuum [刊,中]/Wang Jinming (Huaibei Textile & Dyeing Power Plant Co. Ltd.)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):124~125

Edited and Published by Harbin 703 Research Institute and Editorial Staff of this Journal	Post Code Number 150036
Printer; Printing House of Harbin Institute of Technology	ISSN1001-2060
Address; P. O. Box 77, Harbin China	Periodical Registration: CN23-1176/TK
Cable: 6511, Harbin China	Distributed by China International Book Trading Corporation, P. O. Box 399, Beijing, China