

# 压力下水煤浆流变特性的测量

王秋粉, 任 远, 陈良勇, 段钰锋

(东南大学 洁净煤发电和燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**[摘要]** 水煤浆是一种高浓度、高粘性、不透明的固液分散悬浮体系, 表现出非牛顿流体的特性, 其流变特性十分复杂, 迄今为止难以给出理论上的流变模型表达式。水煤浆流变特性是研究水煤浆的稳定性、输送的可泵性、流动的阻力特性和雾化特性的前提和基础。详细介绍了确定压力下水煤浆流变特性的两种试验方法: 管流法和旋转粘度计法。并对水煤浆输送中产生的滑移现象进行了较深入的分析和讨论, 讨论了滑移产生的原因及修正方法。

**[关键词]** 水煤浆, 流变特性, 压力, 测量, 滑移

**[中图分类号]** TQ53 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)02-0063-05

## Measurement for the Rheological Behavior of Coal Water Slurry at Elevated Pressure

WANG Qiufen, REN Yuan, CHEN Liangyong, DUAN Yufeng

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Coal water slurry (CWS) is solid-liquid suspended system with dense concentration, high viscosity and opacity, which features property of Non-Newtonian fluids. So far it is difficult to gain the rheological model in theory because of the complexity in its flows. The characterization study of rheological behavior in CWS is important for slurry stability, pumpability, flow resistance and atomization. Two experimental methods known as pipe-flow and rotational viscometer to determine the rheological behaviors of CWS are proposed. The slip phenomenon of CWS in pipe flows is discussed deeply.

**Key words:** coal water slurry, rheological behavior, pressure, measure, slippage

## 0 引言

当前石油供给的安全性使人们越来越多地关注煤转化技术, 其中包括对水煤浆技术的研究。水煤浆是由煤粉、水和少量添加剂混合而成的固液两相悬浮流体, 高浓度水煤浆的安全、稳定和经济地管道输送是保证水煤浆高效应用的前提。水煤浆的大规模商业应用取决于很多因素, 包括浆的稳定性、可泵性和雾化、燃烧特性, 而这些因素又反过来影响水煤浆的流变特性。特别地, 水煤浆的稳定性由其低剪切速率下的流变性决定, 可泵性取决于中等剪切速率下浆的粘度, 雾化和燃烧特性则取决于高剪切速率下浆的粘度<sup>[1]</sup>。可见, 流变特性的研究是确定水煤浆管内其它流动规律(如速度分布、阻力损失计算等)的前提和基础。

非牛顿流体的流变特性是研究剪切应力与剪切应变速率之间关系的规律, 其分析表达式称为流变模型或称为本构关系。由于水煤浆是一种宽筛分、高含固量的复杂多级分散悬浮体系, 影响其流变特性的因素十分复杂, 往往同煤的化学性质特别是灰分和煤化程度、煤颗粒的粒度分布及形状、煤粒之间的相互作用、温度和浓度等因素有关<sup>[2,3]</sup>。另外, 真实流变模型还受入口效应和滑移作用的影响。从水煤浆管内输送

收稿日期: 2005-11-22。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217701)。

作者简介: 王秋粉(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事煤的洁净燃烧与气化等方面的学习和研究。E-mail: qfwang1982@163.com

通讯联系人: 段钰锋(1963-), 教授, 博士生导师, 主要从事煤的洁净燃烧及污染物的控制等方面的教学与研究。

E-mail: yfduan@seu.edu.cn

的研究进展来看,世界各国都将水煤浆流变模型的确定作为研究的主要内容之一。

一般文献都普遍认为水煤浆是不可压缩的,因而都未考虑压力对水煤浆流变特性的影响。GARRAT G W<sup>[4]</sup>等和 ATSUSHI TSUTSUMI<sup>[5]</sup>等虽分别研究了高温高压下旋转粘度计法和管流法的流变特性,但都没有具体地分析压力对水煤浆流变特性的影响。为了发展大规模高效气流床煤气化技术,有必要确定高压下水煤浆的真实流变模型,为气流床煤气化的规模化和放大化应用提供设计依据。为此,本文研究内容成为国家重点基础研究发展计划(973计划)的子课题“高浓度浆态非牛顿流体的流动特性和均配规律研究”的一部分,对高浓度水煤浆在压力下的流变特性进行了综合分析和讨论。

## 1 流变模型

流变特性的研究通常有两种方法:一是从微观角度出发,即从悬浮液各部分的性质以及它们之间的相互作用,通过理论分析来建立关联式;二是着眼于悬浮液的宏观流动行为,即通过实验来观察悬浮液的流变特性,提出包含几个参数的流变模型,然后利用流变学的知识,通过实验的方法来确定这些参数。由于液固两相高浓度水煤浆组成的复杂性,目前还无法从机理上探讨流变特性的本构方程。许多研究者对水煤浆流变特性的研究,通常是采用第二种方法,借助实验数据由剪切应力的变化或某些与剪切速率相对应的“表观粘度”的变化曲线得出流变模型。

大量实验表明,水煤浆几乎包括了非牛顿流体的各种类型,且存在明显的结构化特征,即存在屈服应力。在较低剪切速率和较高的剪切速率下水煤浆呈现出牛顿流体特性,而在中等剪切速率下呈现假塑性体特性,只有极少的水煤浆呈现出胀流性流体特性,此外,有的还具有较大的触变性和粘弹性<sup>[6]</sup>。

目前,常采用的流变模型有以下几种<sup>[7]</sup>:

牛顿体: $\tau = \mu\dot{\gamma}$ ;幂率体: $\tau = k\dot{\gamma}^n$ ;  $n < 1$ , 伪塑性体;  $n > 1$  膨胀体;宾汉体: $\tau = \tau_b + \eta_b\dot{\gamma}$ ;屈服幂率体: $\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n$ ;  $n < 1$ , 有屈服应力的伪塑性体;  $n > 1$ , 有屈服应力的膨胀体;式中 $\mu$ 是粘度; $k$ 是流动相容系数(又叫稠度系数)。

以上模型简单,直观,可以直接反映剪切应力和剪切应变之间的关系,为进一步的研究提供了一定的基础,但它的主要缺陷在于没有考虑固相颗粒分布以及固相颗粒间的相互作用对悬浮体流变性的影响。

## 2 测量方法

利用流体力学的原理进行流变参数的测量,一般地说,是在一定的条件下,通过对试样施加切应力(或变形)跟踪受力后的响应(或应力)与时间的函数关系而得到。测定的方法可以大体分为两种类型:

(1) 利用圆柱、圆锥或圆盘的旋转效应测量流体的剪切应力和速度梯度的关系,这就是旋转粘度计法。主要测量参数是粘度计转子的旋转角速度 $\Omega$ 和转子所受阻力矩 $M$ 。但是,旋转粘度计价格昂贵,容易损坏,且剪切速率变化范围小。

(2) 根据流体在直管段内流量和压力降的关系求出其粘度和剪切应力与速度梯度的关系,这属于间接的测量方法,也称管流法。如常用的管道流动阻力法,毛细管粘度计等。对水煤浆来说,过细管道中的测量将是十分困难的,因此工程上常用较粗的工程管道流阻测量来推算,主要测量参数是测量段上的压力降 $\Delta P$ 和水煤浆的流量 $Q$ 。

### 2.1 旋转粘度计法

以往很多实验室的流变特性测量都是采用旋转粘度计法,如在国外大多使用 Brookfield 旋转粘度计和 haake 旋转粘度计确定流变模型,而国内基本上使用的是国产的 NDJ-1 型和 NXS-11 型旋转粘度计,这几种粘度计的工作原理基本相同,均为双圆筒结构。

测量时的假设条件如下<sup>[8]</sup>:

(1) 外筒固定,内筒以等角速度 $\Omega$ 旋转;(2) 两筒无限长;(3) 圆筒表面无滑移;(4) 在垂直于转轴的平面上,流动的流线是圆,即速度仅是半径的函数,径向和周向的速度为零;(5) 运动为稳态的,即连续性方程和运动方程的时间导数均为零;(6) 系统恒温。

用旋转粘度计法计算流变模型的公式为:

$$\eta_B = \frac{(r_1^2 - r_2^2)M}{4\pi h \Omega r_1^2 r_2^2}, \quad \tau = \frac{M}{2\pi r_2^2 h}, \quad \gamma = \frac{2r_1^2}{r_1^2 - r_2^2} \Omega.$$

式中,  $r_2$  和  $r_1$  分别为粘度计内外筒半径;  $h$  为工作高度;  $M$  为转矩;  $\Omega$  为旋转角速度. 测定  $M$  和  $\Omega$  后, 就可以根据上式进一步回归出本构方程.

旋转粘度计操作简单, 测量结果可直接读出, 使用的样品少, 但是其剪切速率变化范围较小, 如 Brookfield 旋转粘度计的范围为  $0 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ , NXS-11 型旋转粘度计的范围是  $1.23 \sim 996 \text{ s}^{-1}$ , 而且旋转粘度计在小剪切速率下还易出现“柱塞流”和滑移现象.

常用的粘度测量系统是在常压、非密封条件下进行粘度测试的. 为了测量高压条件下水煤浆的流变特性, 需要用高压流变仪或者对一般的旋转粘度计进行改造, 即在一般的同轴圆筒旋转粘度计的外围加装一个压力腔, 实现高粘稠物料的封闭加压条件, 从而完成物料加压流变特性的测量<sup>[5,9]</sup>.

## 2.2 管流法

管流法测量压力下流体的流变特性需要在加压试验台上进行, 其高压条件是通过提高输送泵的压力来实现的. 流体在管道内做恒定剪切流动, 可实测其压降和流量, 并推算剪切应力和剪应变速率的关系, 确定流变特性.

流体在管道内的流动通常作如下假设<sup>[10]</sup>:

(1) 粘性层流; (2) 稳定流动; (3) 均匀流动; (4) 沿管壁无滑移.

利用管流法确定流变模型的计算公式为:

$$\tau_w = \frac{\Delta P D}{4L}, \quad \tau_r = \frac{r}{R} \tau_w, \quad n' = \frac{d \ln \left( \frac{8W}{D} \right)}{d \ln \left( \frac{D \Delta P}{4L} \right)},$$

$$\gamma_w = f(\tau_w) = - \left( \frac{du}{dr} \right)_w = \frac{8W}{D} \left( \frac{1 + 3n'}{4n'} \right) = \frac{4Q}{\pi R^3} \left( \frac{1 + 3n'}{4n'} \right).$$

式中,  $\tau_w$  为壁面处剪切应力;  $\gamma_w$  为壁面处剪切速率;  $L$  为测试段长度,  $D$  为管道直径. 测定  $Q$  和  $\Delta P$  后根据上式即可绘出  $\tau - \gamma$  曲线, 回归拟合即可得到流变模型.

管流法的特点是装置结构较简单, 可在较高压力下操作, 剪切速率可在较大范围内变化, 因此更接近于实际流动过程, 测量结果比旋转粘度计法更适于工程应用.

另外还有学者提出了用毛细管粘度计确定流变模型. 毛细管粘度计是测量牛顿流体粘度的通用仪器, 使用简单, 测量准确. 但应用于非牛顿流体时, 由于入口效应和滑移的影响, 给实际测量带来了很多不便. 清华大学和唐山管道研究所都曾作过毛细管粘度计的实验研究, 均没取得理想结果<sup>[11]</sup>. 刘宝林和孔珑<sup>[12]</sup>设计了水煤浆用改型的毛细管粘度计, 解决了水煤浆的稳定状态问题、测压装置问题、准确地测量水煤浆流变模型问题. ATSUSHI TSUTSUMI 和 KUNIO YOSHIDA<sup>[5]</sup>也成功的用毛细管粘度计进行了高温高压下水煤浆流变特性的研究.

## 3 滑移现象

滑移现象是煤水混合物类液固两相流体在管内流动时产生的一种特殊流动现象. 自从 1931 年 MOONEY<sup>[13]</sup>提出关于滑移的问题以来, 许多学者相继对滑移进行了研究. GARNET 和 NISSAN、MALONE、MELZNER 对高分子溶液、乳胶液和固体悬浮液在应力不均匀流场中的行为进行理论研究表明, 在筒壁或管壁处出现异常流动行为<sup>[14]</sup>. 目前对壁面“滑移”的解释说法不一. 一种说法认为, 由于近壁处粒子的排列在几何上不可能与其主体中排列的方式相同, 因而产生了滑移现象; 另一种说法是, 粒子从高剪切速率区域至低剪切速率区域的迁移所引起; 还有一种说法是粒子的流体动力学再分布.

普遍认为壁面滑移产生的机理是当介质受到不均匀剪切时, 颗粒趋向于由高剪切区域向低剪切区域迁移, 在径向产生组分浓度梯度<sup>[15]</sup>. 文献[16]研究了颗粒—流体两相流中颗粒团聚存在的临界条件, 提出了颗粒—流体两相流中主要存在着流体和颗粒及颗粒和颗粒间的两种相互作用, 当这两种力平衡时, 不会产生团聚, 颗粒浓度处处均匀, 不产生滑移现象; 当流体—颗粒的作用远远大于颗粒—颗粒间的相互作用时, 如果颗粒浓度较大, 则可能在近壁面处出现颗粒浓度很低的薄层, 从而导致滑移现象的出现. 表现为流体

在流动过程中,与它所接触的固体壁面处形成一层溶剂层,流体与壁面发生相对滑动,在壁面处出现速度的跳跃.在壁面附近流体的速度可视为不连续,即流体在壁面处出现一个“滑移速度”.

滑移层是控制管内压降损失的主要因素,而滑移层的性质随管径尺寸和管材的变化而变化.同样的水煤浆在不同管径的管道内所测得的流变模型不一致,这种不一致性正是由于水煤浆的滑移所引起的附加流量的程度不同所造成的.所以滑移现象的存在无疑会对非牛顿流体流变模型的确定及其管内流动规律的研究带来一定的影响,因此,为确定水煤浆的真实流变模型,探索水煤浆管内流动规律,有必要进一步深入研究水煤浆管内流动产生滑移流动现象的机理及如何修正滑移现象对水煤浆管内流动特性的影响等一系列问题.

为了得到正确的流变模型,需要消除滑移的影响.滑移的消除一般从两个方面进行,一是通过改进实验仪器,例如用旋转粘度计测高粘度浆体的流变特性时,用十字形叶头代替传统旋转粘度计的圆柱形测量元件<sup>[17]</sup>,或在旋转粘度计的内筒上开凹槽,来解决测定过程中圆柱形测量元件易“打滑”等问题;二是通过理论分析对实验数据进行修正.

由于滑移的存在,水煤浆管内流动的实际流量  $Q$  应是无滑移流动时的流量  $Q_c$  与存在滑移引起的附加流量  $Q_s$  之和.即  $Q = Q_c + Q_s$ .

$$\text{在管道流动中有: } Q_c = \frac{\pi R^3}{3} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \tau^2 d\tau.$$

由于滑移层的厚度很薄,可认为  $\delta \rightarrow 0$ , 所以:  $Q_s = \pi R^2 U_s$ .

据文献<sup>[18,19]</sup>,滑移速度不仅与壁面剪切应力有关,而且还是管径的函数,即:  $U_s = \beta_c \tau_w / R$ . 其中  $\beta_c$  为滑移系数,且  $\beta_c$  仅是  $\tau_w$  的函数,与半径  $R$  无关. 综上可得:  $\frac{Q}{\pi R^3 \tau_w} = \frac{\beta_c}{R^2} + \frac{1}{\tau_w^4} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau$ .

因此,在给定的  $\tau_w$  下,让  $\frac{Q}{\pi R^3 \tau_w}$  对  $\frac{1}{R^2}$  作图,所得直线的斜率就是  $\beta_c$ ,进而就可计算出滑移引起的附加流量和无滑移流量  $Q_c$ ,根据无滑移流量  $Q_c$  即可求得真实的剪切速率.

## 4 结论

本文根据非牛顿流体流动理论,介绍了两种测量压力下水煤浆流变特性的方法:旋转粘度计法和管流法,这两种方法各有优缺点,可以将两种方法结合应用,得到压力下水煤浆的流变特性参数.

对水煤浆的流变特性虽然已进行了大量的研究工作,取得了很多有意义的成果,也推动了水煤浆技术的应用和发展,但是由于水煤浆本身的性质比较复杂,目前很多理论还不够成熟.另外由于这些基础研究基本上都是在常压下进行的,对水煤浆高压条件下的很多特性还没做过深入的研究和验证,为了发展大规模高效气流床煤气化技术,就有必要从理论上进一步深入研究.

由于水煤浆两相悬浮液流动的复杂性,目前对其滑移产生的机理还没有统一的定论.因此有必要深入研究滑移产生的机理及如何修正滑移对水煤浆流动产生的影响等问题,最终确定有滑移修正的水煤浆流变模型,用于工程放大化设计和计算.

## [参考文献] (References)

- [1] SHIRLEY C TSAI, EVERETT W KNELL. Viscometry and rheology of coal water slurry [J]. Fuel, 1986, 66(4): 566-571.
- [2] RHO NAM-SUN, SHIN DAEHYUN, KIM DONGCHAN. Rheological behaviour of coal water mixtures [J]. Fuel, 1995, 74(8): 1220-1225.
- [3] TURIAN R M, HSU FENGLUNG, AVRAMIDIS KOSTAS S, et al. Settling and rheology of suspension of narrow-sized coal particles [J]. Aiche Journal, 1992, 38(7): 969-987.
- [4] GARRATT G W, RAND B, WHITEHOUSE S. An apparatus for studying the rheological behaviour of carbonaceous materials at elevated temperature and pressure [J]. Fuel, 1988, 67(2): 238-241.
- [5] ATSUSHI TSUTSUMI, KUNIO YOSHIDA. Rheological behaviour of coal-solvent slurries [J]. Fuel, 1986, 65(7): 906-909.

- [6] 王卫平, 顾培韵. 悬浮液的流变[J]. 高分子材料科学与工程, 1989, 5(1): 1-10.  
WANG Weiping, GU Peiyun. Rheology of suspension[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1989, 5(1): 1-10. (in Chinese)
- [7] 张庆, 赵晓琳. 水煤浆的流变学属性[J]. 化学工程, 1994, 22(1): 53-59.  
ZHANG Qing, ZHAO Xiaolin. Rheology of coal-water slurry[J]. Chemical Engineering, 1994, 22(1): 53-59. (in Chinese)
- [8] 岑可法, 姚强, 曹欣玉, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 146-149.  
CEN Kefa, YAO Qiang, CAO Xinyu, et al. Theory and Application of Combustion, Flow, Heat Transfer, Gasification of Coal Slurry[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997: 146-149. (in Chinese)
- [9] 杨晓璞, 曹建文, 吴淼. JYX 高浓度黏稠物料加压旋转流变仪的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2005(4): 8-10.  
YANG Xiaopu, CAO Jianwen, WU Miao. Design and manufacture of high pressure JYX rotational rheometer for viscous and dense material of high concentration[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005(4): 8-10. (in Chinese)
- [10] 孟令杰. 增压流化床煤水混合物输送特性研究[D]. 南京: 东南大学, 1996: 28-29.  
MENG Lingjie. An investigation on transportation properties of coal-water paste in a pressurized fluidized bed[D]. Nanjing: Southeast University, 1996: 28-29. (in Chinese)
- [11] 刘宝林, 孔珑. 水煤浆流动特性及其流变模型确定方法综述[J]. 煤化工, 1995, 73(4): 49-53.  
LIU Baolin, KONG Long. A summary of flowing properties of coal-water slurry and determination of rheologic model thereof[J]. Coal Chemical Industry, 1995, 73(4): 49-53. (in Chinese)
- [12] 刘宝林, 孔珑. 水煤浆用改型的细管式粘度计[J]. 发电设备, 1996(9): 7-10.  
LIU Baolin, KONG Long. A new type of slim-tube viscosimeter for coal slurry[J]. Power Equipment, 1996(9): 7-10. (in Chinese)
- [13] MOONEY M. Explicit formulas for slip and fluidity[J]. Journal of Rheology, 1931, 2(2): 210-222.
- [14] 杨小生, 张荣曾, 陈基, 等. 宾汉流管壁滑移速度预测模型[J]. 矿冶工程, 1993, 13(4): 24-27.  
YANG Xiaosheng, ZHANG Rongzeng, CHEN Ji, et al. Prediction model for the wall slip velocity of a bingham flow pipe[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1993, 13(4): 24-27. (in Chinese)
- [15] 孟令杰, 章明耀. 高浓度水煤浆流动的滑移现象及其对管内流动特性的影响[J]. 热能动力工程, 1996, 11(2): 85-88.  
MENG Lingjie, ZHANG Mingyao. The slip phenomenon of coal water mixture of high concentration and its effect on flow characteristics in pipes[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy, 1996, 11(2): 85-88. (in Chinese)
- [16] 吴文渊, 杨励丹. 颗粒-流体两相流中颗粒团聚物存在的临界条件[J]. 工程热物理学报, 1992, 13(3): 324-328.  
WU Wenyuan, YANG Lidian. Critical condition for the existence of particle aggregation in particle-fluid two-phase flow[J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 1992, 13(3): 324-328. (in Chinese)
- [17] 段鸿杰, 孙恒虎. 高浓度浆体流变参数测定的新方法[J]. 中国矿业大学学报: 自然科学版, 2001, 30(4): 371-374.  
DUAN Hongjie, SUN Henghu. New method of measuring rheologic parameters of high-density slurry[J]. Journal of China University of Mining and Technology: Natural Science Edition, 2001, 30(4): 371-374. (in Chinese)
- [18] KALGANETAL D M. Rheological behavior of a concentrated suspensions; a solid rocket fuel simulant[J]. Rheology, 1993, 37(1): 35-53.
- [19] JASTRZEBSKI Z D. Entrance effects and wall effects in an extrusion rheometer during the flow of concentrated suspensions[J]. I E C Fund, 1967, 6(3): 445-450.

[责任编辑: 刘 健]