

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

研究颗粒在钻井、压裂液中 沉降的新方法

金 亮

(Stim-Lab, Inc., U. S. A.)

1994 年 9 月 北京

研究颗粒在钻井、压裂液中沉降的新方法

摘 要

本文介绍一种测量摩阻的方法。这种方法可以用来在透明和不透明的液体中研究颗粒沉降。通过无量纲化的方法处理数据后,此方法可覆盖很宽的雷诺数范围。本文还介绍了预测颗粒沉降速度的计算方法。利用摩阻测量方法得到的数据,可用来预测颗粒沉降。预测的数据与实测的沉降速度十分接近。由于此方法可覆盖很宽的雷诺数范围,因而可大大简化实验过程。

问题的提出

在石油工业中,颗粒在钻井及压裂液中的沉降一直是令人十分关切的问题。在钻井及完成大角度及水平井时,这个问题十分突出。而在压裂过程中,良好的携带能力可以使压裂砂均匀地分布到整个裂缝中。

此研究中的一个重要任务是考虑流体的流变性。我们在这里推出一种新的实验方法。它可用于研究透明和非透明流体,因为通常的钻井液和压裂液都是不透明的。以往发表的研究方法都是测量颗粒的沉降速度。对于不透明液体,由重力导致的沉降速度是用电磁法(Tran-Son-Tay, et al, 1988)、超声波法(Sample and Bourgoyne, 1978),或者放射性法(Qassin and Souza, 1988)来测量颗粒通过一段距离的平均速度。而这里介绍的方法则不借助于重力,而是在已知速度下测量阻力。

颗粒沉降问题可简化成单个球体在无边界的流体中下沉的问题。球体在牛顿流体中沉降的问题可用 Stokes 定律来进行描述,适于蠕变流动区、过渡区及紊流区的摩阻系数与雷诺数间的关系,早已建立起来并得到广泛的使用(Derry, 1984)。我们感兴趣的是流体的非牛顿性对沉降速度的影响。因为大多数石油工业中使用的流体都是非牛顿流体。

摩阻测量装置的设计及评定

1. 设计原理

这里我们所要介绍的方法可称作“摩阻直接测量法”。它是直接测量球体(或任何其它形状)在

运动中的阻力。而通常方法则要通过沉降速度的测量来确定摩阻。这种方法是建立在非常简单的原理上的。如图 1 所示,如果球体在任一速度下通过流体时所承受的阻力可以测出的话,则这一球体在流体中的阻力—速度关系可以建立起来(图 1 中的曲线)。由球体及流体的物理性质可以计算出作用于球体的重力 F_g 。在图上划一条代表这个重力的直线(水平线 F_g)并使之与阻力曲线相交。交点的横坐标就代表该球体在这个流体中的最终沉降速度。这里所引用的只是牛顿力学第一定律。

很显然,这个方法的优点是一旦对某一尺寸的球体建立了这样的阻力—速度曲线,任何比重的球体的沉降速度均可预测,而且不管流体是否透明。这个方法的缺点是对于任何尺寸的球体,要想研究其沉降规律,必须建立相应的阻力—速度曲线。这意味着要做大量的实验。

2. 实验装置简介

图 2 是摩阻测量装置示意图。该装置用来测量恒速运动中颗粒所受的流体阻力。由计算机控制速度的马达牵引着颗粒在被测流体柱中恒速运动。颗粒受的力由重力传感器测出。这里我们使用的是数字天平,它可以每秒十次的速度输出所测的力。颗粒的速度由角位移传感器测出。角位移传感器的精度为每 360° 输出 3600 个脉冲。所有这些信号均送到数据采集计算机,并与计算机产生的时标一起被记录下来以便进行数据处理。

由图 2 可见,由于使用了滑轮,滑轮的阻力会影响到所测的力的准确性。经多次努力,我们选择了适合的轴承—滑轮组合,使得滑轮的阻力影响减小到小于天平的精密度。

尽管使用了很细的线来拖引球体,它的表面在运动中仍会产生阻力。但是在颗粒即将到达流

体表面的瞬间,这个阻力的影响会减至最小。由阻力对位移的曲线上可以清楚地找到引线阻力最小时的摩擦阻值。图3中的实线就是一条实测的曲线。当球体开始离开液面时,由于要冲破表面张力及失去浮力,测到的力会急剧增加。

3. 实验曲线分析

图3中实线是一条典型的在牛顿流体中测到的实验曲线。液体是65%的甘油水溶液。现在我们通过理论分析证明它之所以具有这种形状是由于各种力及马达的运动特性造成的。

(1) 理论分析

在实验过程中,天平测到的是各个力的综合作用。它们包括作用于球体的力, F_s ; 引线上的阻力, F_w ; 加速度产生的力, F_a ; 以及一个“附加的液体质量”力, F_t 。这个力也是由于对球体施加了加速度所引起的(Chow, 1979)。在实验中已将重力减除了,所以在这里不再讨论重力项。滑轮阻力项也已减除。因此,天平所测到的总力可表述为

$$F_t = F_s + F_w + F_a + F_t \quad (1)$$

加速度力 F_a 可写成

$$F_a = m_s \frac{dv_{s1}}{dt} \quad (2)$$

这里: m_s 是球体的质量; v_{s1} 是球体的运动速度。这一项是由马达的运动特性所决定的。

附加液体质量力 F_t 可表达成

$$F_t = \frac{1}{2} m_t \frac{dv_{s1}}{dt} \quad (3)$$

这里 m_t 是与球体同体积的液体的质量。

作用于球体上的阻力可由下式表述

$$F_s = f \frac{\pi D^2 \rho_l v_{s1}^2}{8} \quad (4)$$

这里: D 是球的直径; ρ_l 是液体的密度; f 是摩擦系数。由于图3中的曲线是在雷诺数 0.1~100 之间测得的,而且是在牛顿液体中,故摩擦系数可表达为(Bird, et al, 1960)

$$f = \frac{18.5}{Re^{0.6}} \quad (5)$$

这样,公式(4)就可写成

$$F_s = \frac{18.5\pi}{8} \rho_l^{2/5} \mu^{3/5} D^{7/5} v_{s1}^{7/5} \quad (6)$$

在牛顿流体中,作用于引线的阻力可写成

$$\begin{aligned} F_w &= \tau_w \pi D_w L \\ &= \mu \left(\frac{dv}{dr} \right)_{r=r_w} \pi D_w L \end{aligned} \quad (7)$$

而

$$\begin{aligned} \left(\frac{dv}{dr} \right)_{r=r_w} &= v_{s1} \times \\ &\times \left[\frac{-\frac{2r_w}{R^2} + \frac{4K^2}{1-K^2} \ln \frac{1}{K} \left(\frac{r_w}{R^2} \right) - (1-K^2) \frac{1}{r_w}}{1-K^2 - (1+K^2) \ln \frac{1}{K}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

这里: r_w 是引线半径; R 是液柱半径; K 是这两个半径之比。公式(8)是由环空流动速度分布公式推出,这里没有使用 Bird 等人关于薄夹层的假设。 L 是引线的长度,它是时间与速度的函数

$$L = L_0 - \int_0^t v_{s1} dt \quad (9)$$

而 L_0 是开始实验时浸入液体的引线长度, t 是时间。因此公式(7)可被写成

$$F_w = \mu \left(\frac{dv}{dr} \right)_{r=r_w} \pi D_w (L_0 - \int_0^t v_{s1} dt) \quad (10)$$

在加速阶段,公式(1)中各项均不为零。当马达到达恒定转速时, F_s 成为固定值, F_s 与 F_t 为零,而 F_w 随时间线性下降。

(2) 计算实例

基于以上的分析,我们可通过分析图3上所示实验的原始数据进行数值模拟。原始数据如下

$$\begin{aligned} \mu &= 20 \text{ mPa} \cdot \text{s} & D &= 12.7 \text{ mm} \\ \rho_l &= 1188 \text{ kg/m}^3 & R &= 43.5 \text{ mm} \\ D_w &= 0.14 \text{ mm} & r_w &= 0.07 \text{ mm} \\ L_0 &= 1.2 \text{ m} & m_s &= 0.00961 \text{ kg} \end{aligned}$$

加速度数据是由对实测速度曲线进行对时间的微分来获得。图3中的点是计算的数值。它们与实测曲线十分接近。这说明这一实验过程可进行理论分析并可以数值模拟。

数据处理方法

我们曾在前面提到,直接测量摩擦阻力的方法有其局限性。其中之一是天平有其精度影响,而且系统的摩擦力也对直接预测沉降速度有影响;其二是要预测不同尺寸的颗粒沉降速度,相应的摩擦阻—速度曲线必须测出。这不仅意味着要做大量的实验,而且对于小颗粒尺寸的颗粒而言,系统误差与实测数据几乎在同一数量级甚至更大。很明显,要想得到有意义的数据,我们必须得到尽可能大的摩擦阻值,这只能通过大尺寸球体才能获得。为了实现用单一大尺寸颗粒测得的数据来预测不同尺寸、不同比重的颗粒沉降速度,有必要引用无量纲

数据分析方法。运用这种方法可以得到最好的精度,同时大大减少实验工作量。通常是将颗粒沉降数据处理成摩阻系数与雷诺数之间的关系(Bird, et al, 1960; Chhabra, et al, 1980)。由于我们是对待非牛顿流体,所以通常定义雷诺数的方法需要修正,使之能包括流体的粘度随剪切速率变化的特性,图4是这一处理方法的流程框图。以下分步解释这一处理方法。

①流变性测量

我们使用了 Rheometrics RFS8400 流变仪来测量流体的稳定剪切流变曲线。测量的剪切速率范围是 $0.01 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$ 。

②测量摩阻或颗粒沉降速度

这里,我们对每一实验流体都进行了摩阻实验以得到摩阻—速度(F_d-v_{sl})曲线。

③确定实测摩阻系数 f_m

摩阻系数的一般定义为

$$f = \frac{F_d}{AE_k} \quad (11)$$

式中: F_d 是摩阻力, f 是摩阻系数(无量纲), A 是物体投影到与其运动方向垂直的平面上的面积, E_k 是动能。对于球体沉降运动,实测的摩阻系数 f_m 可表达为

$$f_m = \frac{2F_d}{\rho_l v_{sl}^2 \pi R^2} \quad (12)$$

这里的 F_d 由步骤②得到。

④确定表现剪切速率 $\dot{\gamma}_a$

围绕球体的剪切速率是变化的。对于牛顿流体,其平均值可表示为

$$\dot{\gamma}_a = \frac{v_{sl}}{R} \quad (13)$$

我们用这个公式来定义表现剪切速率 $\dot{\gamma}_a$ 。

⑤计算表现粘度 μ_a

对于各个速度值 v_{sl} ,由步骤④定出 $\dot{\gamma}_a$ 后,从步骤①中得到的流变曲线中找到相应于 $\dot{\gamma}_a$ 的剪切应力值,用下式确定表现粘度

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_a} \quad (14)$$

⑥算出雷诺数

$$Re = \frac{\rho_l v_{sl} D}{\mu_a} \quad (15)$$

遵循上述步骤就可以建立起实测的摩阻系数与雷诺数间的关系曲线。对于每一流体,使用一个尺寸的球就可以建立起这样的曲线。将无量纲处

理方法与直接测量摩阻的实验方法结合,我们可得到几点好处。

(1)由于我们可以控制运动速度,从而简化了测颗粒沉降的实验。这是因为在落球实验中,驱动力是重力,要想覆盖宽广的雷诺数范围,必须选不同尺寸及不同比重的球体。

(2)测量摩阻是在已知速度下进行的。我们不必担心通常在落球实验中所要考虑的最终速度或平均速度的问题。

(3)流体是否透明不成问题。

(4)如果能精心地设计好一套实验,我们可以对每一实验流体建立一条摩阻系数对雷诺数的曲线。这个关系曲线可用来预测任何尺寸及比重的球体或其它颗粒在被测流体中的沉降速度。

预测沉降速度的方法

预测沉降速度的方法正好是与前面所论述的建立 f_m-Re 关系相反的过程。它可以通过简单的计算机程序来实现。图5是这一预测方法的流程图。输入程序的数据包括:流变曲线、 f_m-Re 关系曲线、流体及颗粒的物理特性(尺寸、比重等)。通过计算及插值等步骤,输出预测的沉降速度。

实验及结果

按以上所述步骤及装置对不同的流体进行了测试。它们包括牛顿流体(甘油溶液及蜂蜜)与非牛顿流体(PHPA, HEC 以及生物聚合物 Xanvis)。为了与实测的沉降速度比较,落球实验也同时进行。落球实验是用照相法完成的。图6是在得克萨斯蜂蜜中实验的结果。由流变测量可知,它是牛顿流体,因而斯托克斯(Stokes)定律应该适用。在图中实线代表斯托克斯定律,实方块代表摩阻测量值,空心菱形代表落球实验值。由图可见有非常好的符合程度。

图7是在 4.275×10^{-6} PHPA 水溶液中测量的结果。该水溶液的塑性粘度是 $10.75 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 屈服值是 10.53 Pa 。可以明显地看出,符合程度很好。要指出的是摩阻实验都是用一个直径为 22.86 mm 的球测量的,而落球实验所用的球的尺寸在 $3.175 \sim 12.7 \text{ mm}$ 范围内。这证明这里介绍的无量纲处理方法对摩阻数据和落球数据的无量纲处理均适用。从其它流体实验中也得到了同样

的结果。

图 8 是在一水基钻井泥浆中测到的 f_m-Re 曲线。该泥浆的塑性粘度为 $23.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 屈服值为 2.87 Pa 。它表明这个方法也可以在泥浆中使用。

用实验测得的数据, 经过无量纲处理后, 我们进行了预测颗粒沉降速度的计算。图 9 是预测沉降速度与实测沉降速度的比较。数据包括在 2850×10^{-6} 、 4275×10^{-6} Xanuis 溶液及 1853×10^{-6} 、 4275×10^{-6} PHPA 水溶液中所作的实验。横坐标代表实测的沉降速度, 纵坐标代表预测的速度。所有点的平均误差小于 7%, 这应算是不错了。

结 论

(1) 一种可在透明及非透明流体中测量摩阻的方法建立起来了。

(2) 本文提出的无量纲处理数据的方法经摩阻实验及落球实验验证, 可用于牛顿及无牛顿流体。

(3) 利用无量纲处理方法, 摩阻测量实验可为被测流体建立起覆盖宽广雷诺数范围 ($10^{-3} \sim 10^3$) 的摩阻曲线, 这大大简化了实验过程, 扩展了实验范围。

(4) 利用摩阻实验的数据, 通过本文所介绍的预测方法, 可得到与实测数据很接近的预测沉降速度。无论在牛顿流体还是非牛顿流体, 均得到良好的结果。

(5) 本文所介绍的直接测量摩阻方法、无量纲

方法及预测沉降方法可用于研究颗粒在钻井液、完井液、压裂液及其它携带颗粒的非牛顿流体。

参 考 文 献

- 1 Bird R B, Stewart W E and Lightfoot E N. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, 1960:193~196
- 2 Bird R B, Armstrong R C and Hassager O. *Dynamics of Polymeric Liquids*, John Wiley & Sons, New York, 1987,1:44~45
- 3 Chhabra R P, Tiu C, and Uhlherr P H T. "Shear Thinning Effects in Creeping Flow About a Sphere", *Proceedings of 8th International Conference of Rheology*, Napels, Italy, 1980,2:9~13
- 4 Chow C Y. *An Introduction to Computational Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 1979:6~7
- 5 Perry. *Perry's Chemical Engineering Handbook*, Sixth Edition, 1984:5~63
- 6 Qassim R Y, and Souza R DE. "Falling Radioactive Sphere Viscometry", *Proceedings of 10th International Congress on Rheology*, Uhlherr, editor, Sydney, Australia, 1988
- 7 Sample K J, and Bourgoyne A T. "Development of Improved Laboratory and Field Procedures for Determining the Carrying Capacity of Drilling Fluids", SPE 7497, Presented at the 53rd Annual Fall Technical Conference and Exhibition of SPE of AIME, Houston, Texas, 1978
- 8 Tran-SOn-Tay R, Beaty B B, Coffey B E, and Hochmuth R. "A Ball Rheometer for Viscoelastic Studies of Small Quantities of Opaque Fluid Samples", *Proceedings of 10th International congress on Rheology*, Uhlherr, editor, Sydney, Australia, 1988

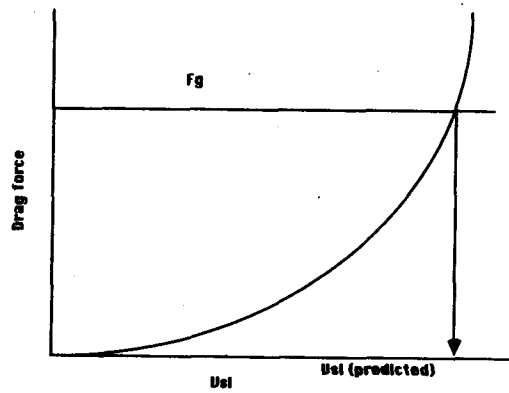


图 1 摩阻测量方法原理示意图

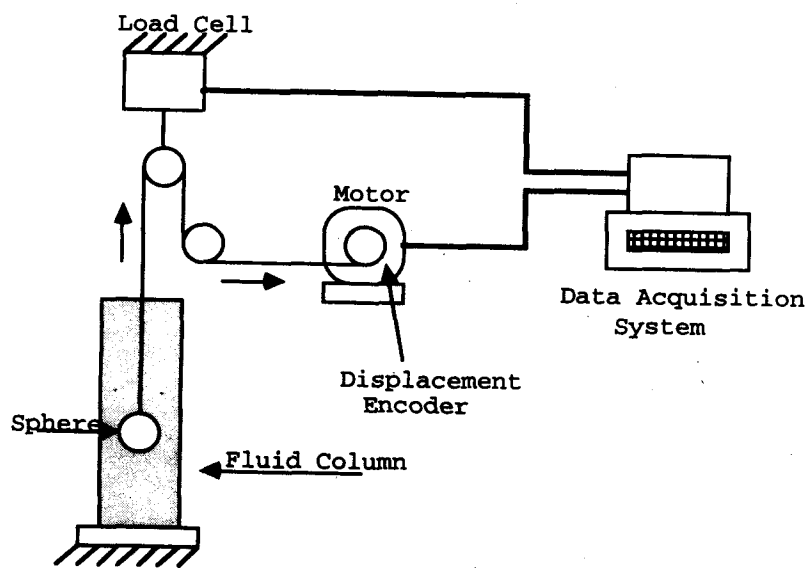


图 2 实验装置示意图

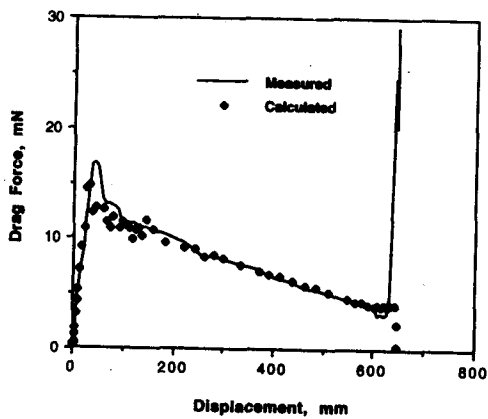


图 3 实验测量曲线与计算数据的对比

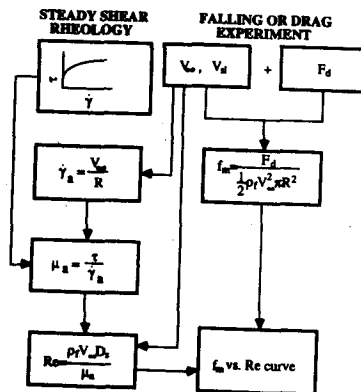


图 4 无量纲数据处理方法图示

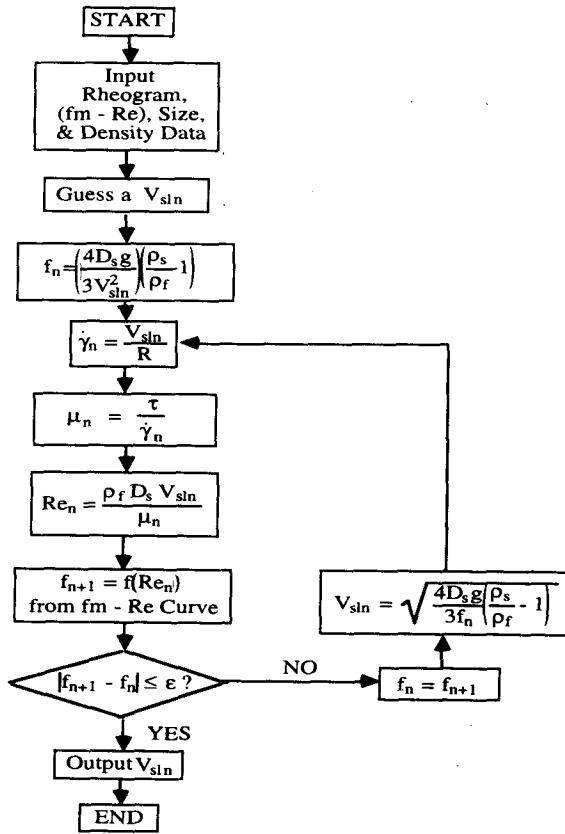


图 5 预测颗粒沉降的流程图

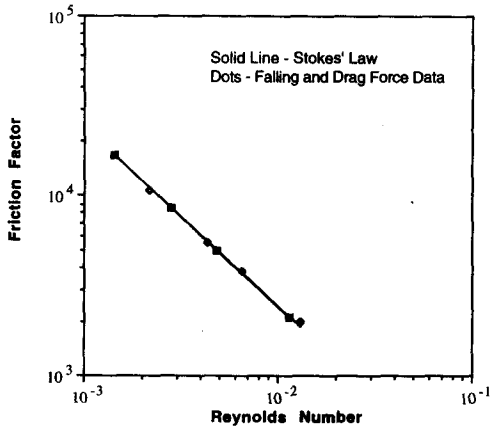


图 6 实测的和用斯托克斯定律算出的摩擦系数
实验液体: 得克萨斯蜂蜜

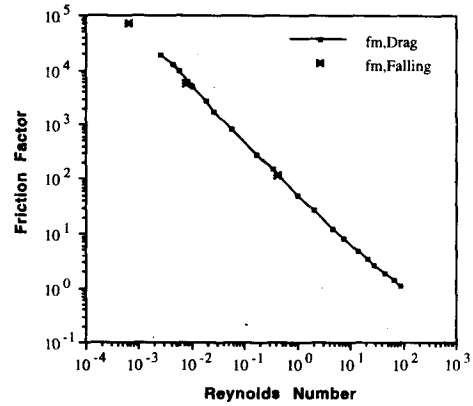


图 7 通过摩擦测量及落球实验得到的摩擦系数
实验液体: 4275×10^{-6} PHPA 水溶液

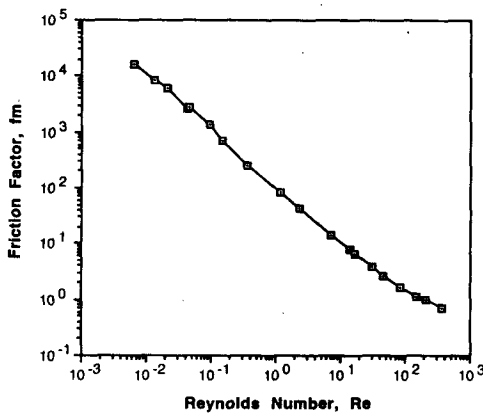


图 8 水基泥浆的摩擦系数

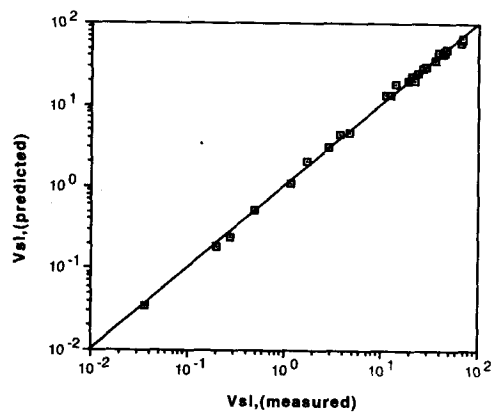


图 9 预测的和实测的沉降速度对比

石油物探局制图印刷厂
照排印刷