

钻井液旋转粘度测试中双圆筒力矩分析

李月¹, 江欣^{1,2}

(1. 西安交通大学航天航空学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 流体的粘度能够直接反映不同流体的特性, 其测量对于鉴定流体质量及确定其使用方向具有十分重要的意义。在钻探工作中钻井液粘度的变化会影响润滑油功能的实现, 以粘度作为钻井液选用的依据, 对钻井液粘度的测量就显得尤为重要。然而对于传统的旋转式粘度计, 由于内筒下表面所产生的附加力矩也同时作用在弹簧上, 因此计算出液体作用在整个内筒上的摩擦力矩偏大, 且底部平面上各点的速度梯度及剪切应力均不相同, 问题较为复杂。本文在传统的旋转式圆筒粘度计结构的基础上, 对计算原理进行了改进补充, 并通过采用有限元软件分析双圆柱绕流的流动特性, 仿真结果与理论分析相一致, 验证了推导公式的合理性。应用于钻井液在完整地层中的流动特性, 可为进一步研究钻井液在破碎地层中的剪切应力提供基础, 为预防孔内事故提供支撑。

关键词: 钻井液; 旋转粘度计; 粘度测量; 有限元; 数值分析

中图分类号: P634.3⁺6; TE927 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0096-08

Analysis of drilling fluid rotational viscosity tests subjected to double cylinder moments

LI Yue¹, JIANG Xin^{1,2}

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The viscosity of fluids can directly reflect the characteristics of different fluids, and its measurement is of great significance in identifying the quality of fluids and determining their direction of use. For example, the change of drilling fluid viscosity will affect the realization of lubricating oil function, and the viscosity parameter as a basis for the selection of the drilling fluid is particularly critical for the measurement of the viscosity of the drilling fluid. However, in the traditional rotary viscometer, the friction moment of the liquid acting on the whole inner cylinder is calculated to be large because the additional moment generated in the lower plane of the inner cylinder also acts on the spring at the same time, and the velocity gradient and shear stress at each point on the bottom flat surface are different, which makes the problem more complicated. In this paper, based on the traditional rotating cylinder viscometer structure, the calculation principle is improved and supplemented, and by using finite element software to analyze the flow characteristics of the double cylindrical winding flow, the simulation results are consistent with the theoretical analysis, which verifies the reasonableness of the derived formula. Applied to the flow characteristics of drilling fluid in intact formation, it can provide a basis for further research on the shear stress of drilling fluid in fractured formation, and provide support for the prevention of in-hole accidents.

Key words: drilling fluid; rotational viscometer; viscosity measurement; finite element; numerical analysis

0 引言

钻井液按分散介质(连续相)可分为水基钻井

液、油基钻井液、气体型钻井流体等^[1]。主要由液相、固相和化学处理剂组成。液相可以是水(淡水、

收稿日期:2024-07-31; 修回日期:2024-08-06 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.014

作者简介:李月,女,汉族,1996年生,硕士研究生,机械专业,参与实验力学方面的研究工作,陕西省西安市碑林区咸宁西路28号,1247105342@qq.com。

引用格式:李月,江欣. 钻井液旋转粘度测试中双圆筒力矩分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1):96-103.

LI Yue, JIANG Xin. Analysis of drilling fluid rotational viscosity tests subjected to double cylinder moments[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1):96-103.

盐水)、油(原油、柴油)或乳状液(混油乳化液和反相乳化液)。固相包括有用固相(膨润土、加重材料)和无用固相(岩石)^[2]。钻井循环对钻井液的要求是泵压低(粘度低),携砂能力强(动切力高),启动泵压低(静切力低),润滑性能好,摩擦力低,磨损小(固体颗粒少)^[3-10]。钻井液在钻井工作过程中,粘度的大小对其携带岩屑能力有很大的影响,一般来说,钻井液粘度大,携带岩屑能力强。但在钻井过程中,钻井液粘度要适当,否则将会引起不良后果。若钻井液粘度过低,不利于携带岩屑,井内沉砂快,冲刷井壁,易造成井壁剥落,坍塌,井漏等;钻井液粘度过高,则可能造成多种危害^[11]。因此应根据具体情况,选择恰当的钻井液。

Taylor^[12]从理论和实验上研究了双圆柱旋转时的角向 Couette 流的稳定性。对于足够小的雷诺数,同心旋转圆柱体之间的粘性不可压缩流体的唯一稳定流动是库埃特流动^[13]。在两个同心独立旋转圆柱之间的不可压缩流体中存在几种流型。对于与时间无关的轴对称流动,最常观察到库埃特和泰勒涡流。大多数数值研究仅限于轴对称流的情况^[14-15]。Snyder^[16]发现,当雷诺数为 0.2、0.5、0.8 和 0.959 时,在反向和同向旋转的圆柱体中,会出现各种波形。Couette-Taylor 系统中的轴对称假设是一种近似方法,以简化分析。Kirchgässner 等^[17]提供了严格的分析证明,证明临界泰勒数是与时间无关的方程的一个分叉点,存在两种类型的定常解:库埃特流和泰勒涡流。Lizuka 等^[18]将关口-太田模型发展到有限变形理论中,结合该模型可以考虑应力诱使各向异性的特点,得出由应力诱使的共轴项对产生变形局部化失稳影响不大,且屈服顶点效应引起的非同轴性则倾向于通过定位变形来引发不稳定。张启辉等^[19]采用关口-太田模型,得到主轴旋转对激发变形局部化失稳的影响不大。

目前大多数关于泰勒实验的标准理论对理解这些流动统一假设圆柱体无限长,但实际上圆柱形双筒旋转粘度仪工作时内筒浸没在被测液体中,内筒底面仍受到力矩,本文的目的是在通过假设暂态剪切流态在有限长度的圆柱底部,估算出底面扰动产生力矩的影响。

1 粘度测试原理

如图 1 所示,内筒和外筒浸入测试样品中,由顶

部驱动装置带动弹性元件旋转,并带动内筒与内筒相连的刻度盘一起旋转。同时外筒固定,旋转的样品通过粘度的作用给内筒一个反向的扭力,当两个方向的力达到平衡时,内筒就转过一定角度,样品的粘度越大,转过的角度也越大^[20-23]。

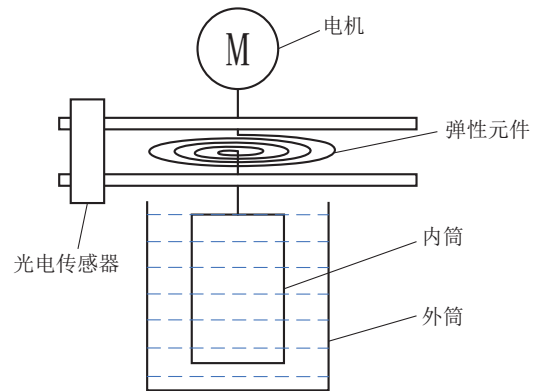


图1 旋转粘度仪结构

按照相关测试规范,通过测试样品在不同转速下(如 600、300、200、100、6、3 r/min)的剪切应力值,就可计算出不同模式下流变特性参数^[24],得到样品的不同流变特性。

2 基本方程

描述流体运动的非线性 $N-S$ 方程是流体力学中的基本方程,由 Navier 于 1821 年首先提出,Stokes 于 1845 年进一步完善。理想流体流动的欧拉方程,即:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + f \quad (1)$$

式中: u ——流体速度; t ——时间; p ——压强; ρ ——密度; f ——单位质量力,而单位质量流体所受的粘性力为 $f_s/\rho = (\mu/\rho) \nabla^2 u = \nu \nabla^2 u$ 。

给欧拉方程右侧添加单位质量流体的粘性力,即得到粘度 μ 为常数时的不可压缩粘性流动的运动方程,即:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + f + \nu \nabla^2 u \quad (2)$$

式中: $\nu = \mu/\rho$ ——运动粘度。

如果方程中 ρ 、 p 和 f 已知,则未知数为矢量 u 的 3 个分量和流体动力粘度 μ , 4 个标量方程包含 4 个未知量,方程是不封闭的,还需要与不可压缩流体的连续方程联立求解,连续方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

对于不可压缩流体, 流体质点的密度为常数 $\partial \rho / \partial t = 0$, 式(3)可以化简为:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4)$$

本次推算限于不可压缩流动, 当温度变化不大时流体动力粘度 μ 可近似取为常数。这样的流动不受温度影响, 流体动力学问题与热力学问题可分开求解, 基本控制方程为连续方程和动量方程(N-S方程)。

现在讨论双圆柱模型, 使用圆柱极坐标 (r, θ, z) , 式(2)中在 r, θ, z 方向的分量方程分别为:

$$\rho \left(\frac{Du_r}{Dt} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) + \rho f_r \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{Du_\theta}{Dt} + \frac{u_r u_\theta}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) + \rho f_\theta \quad (6)$$

$$\rho \frac{Du_z}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z + \rho f_z \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)中随体导数和拉普拉斯算符的定义式分别为:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (8)$$

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (9)$$

连续方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (u_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \quad (10)$$

联立求解式(5)、(6)、(7)、(10)可获得旋转同心圆管间的粘性层流速度场。

2.1 N-S方程简化

本次推算仅包含周向速度, 与 r 坐标有关, 速度表述如下:

$$\begin{cases} u_r = u_z = 0 \\ u_\theta = u_\theta(r) \end{cases} \quad (11)$$

其中忽略质量力:

$$f_r = f_\theta = f_z = 0 \quad (12)$$

流动沿周向不变:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} = 0 \quad (13)$$

定常流动:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (14)$$

于是有 $u_\theta = u_\theta(r, t), p = p(r, t)$, 将上式带入式(5)、(6)、(7), 可简化N-S方程:

$$-\frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} \quad (15)$$

$$0 = \mu \left(\nabla^2 u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} \right) \quad (16)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (17)$$

将式(16)展开:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2} &= \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \right) = \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial (r u_\theta)}{r \partial r} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

对式(15)两次积分:

$$u_\theta(r) = A \frac{r}{2} + B \frac{1}{r} \quad (19)$$

式中: A, B ——积分常数, 需要通过流动的边界条件确定。

2.2 边界条件(固壁边界)

本次推算流体为绕固体边界流动, 流动边界示意图如图2所示。

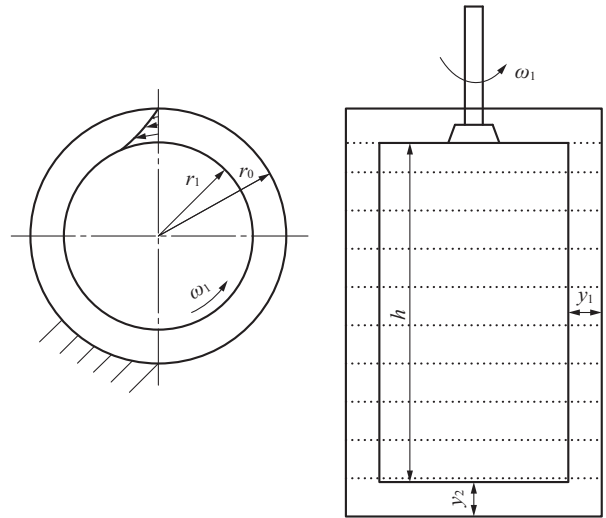


图2 双圆柱流动示意

在轴向平面内, 边界层沿着内外圆柱壁发展, 与固壁相邻的流体质点将粘附在固壁上, 于是得到:

$$u = u_w \quad (20)$$

式中: u ——流体速度; u_w ——固壁速度。

当固壁静止时 $u = 0$, 内含两个条件: 一是流体沿固壁表面的法向速度 u_n 为零, 称为不可穿透条件; 一是流体沿固壁的切向速度 u_t 为零, 称为粘附条件或无滑移条件, 以数学的形式可表示为:

$$u_n = u_t = 0 \quad (21)$$

在流体实验中可以直接观察到固壁附近的有色液体确实与壁面保持相对静止, 无滑移假设下求出的基本方程的解与实测结果相吻合。在极小尺度的微流动条件下, 液固界面间会发生滑移, 本文不予讨论, 因此假设边界无滑移, 于是边界条件可写为:

$$\begin{cases} r = r_0, u_0 = 0 \\ r = r_1, u_1 = r_1 \omega_1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: r_1 ——内圆柱半径; r_0 ——外圆柱半径; $u_1 = r_1 \omega_1$ ——内圆柱面的圆周速度。

解得:

$$\begin{cases} A = -\frac{2\omega_1 r_1^2}{r_0^2 - r_1^2} \\ B = \frac{\omega_1 r_1^2 r_0^2}{r_0^2 - r_1^2} \end{cases} \quad (23)$$

双圆筒间隙速度分布为:

$$u_\theta = \frac{\omega_1 r_1^2}{r_0^2 - r_1^2} \left(\frac{r_0^2}{r} - r \right) \quad (24)$$

将式(24)代入(15)可得压力分布:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho \omega_1^2 r_1^4}{(r_0^2 - r_1^2)^2 r} \left(\frac{r_0^2}{r} - r \right)^2 \quad (25)$$

2.3 内圆筒侧面受力矩

1687年牛顿首先做了最简单的剪切流动实验, 实验如图3所示, 在平行平板之间充满粘性流体, 平板间距为 Δy , 下板静止不动, 上板以速度 u 在自己平面内等速平移。

由于板上流体随平板一起运动, 因此附在上板的流体速度为 $u = u(y)$, 附在下板的流体速度为零。实验指出对于简单剪切流场 $u = u(y), v = 0, \omega = 0$ 有:

$$\sigma_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (26)$$

式中: σ_{xy} ——切应力; du/dy ——剪切变形速率; μ ——比例系数, 是一个与流体有关的物性常数, 称

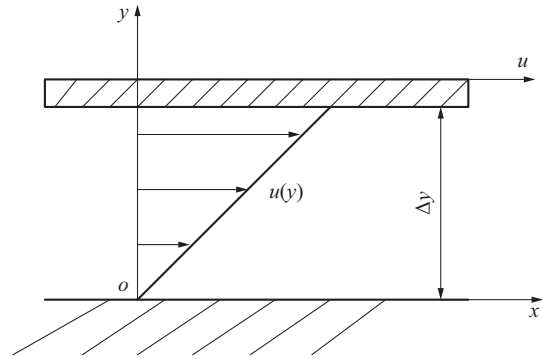


图3 两平板间的平行剪切流动示意

为动力粘度。

当内圆柱面非常靠近外圆柱面时, 式(24)可近似为平面库埃特流动的线性速度分布。

引入变量 $y = r_0 - r$, 令 $y_1 = r_0 - r_1$, 式(24)可以写成:

$$u_\theta = \frac{\omega_1 r_1^2 (r_0 - r)(r_0 + r)}{(r_0 - r_1)(r_0 + r_1)r} = \frac{\omega_1 r_1^2 y}{(r_0 + r_1)\delta} \frac{(2r_0 - y)}{(r_0 - y)} \quad (27)$$

当两圆柱面靠近时 $r_0 \approx r_1 \approx r, y \ll r$, 则有:

$$\begin{cases} r_0 + r_1 = 2r \\ \frac{2r_0 - y}{r_0 - y} \approx 2 \end{cases}$$

于是速度分布可简化为:

$$u_\theta \approx 2 \frac{\omega_1 r_1^2 y}{2r_1 y_1} = r_1 \omega_1 \frac{y}{y_1} = u_1 \frac{y}{y_1} \quad (28)$$

因为平面库埃特的流动速度分布是线性的, 将式(28)代入式(26)得剪切力为:

$$\tau_1 = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u_1}{y_1} \quad (29)$$

内圆柱侧面所受力矩为:

$$M_1 = \tau A r_1 = 2\pi h r_1^2 \mu \frac{u_1}{y_1} \quad (30)$$

3 底部扰动推导

将边界条件改写为:

$$\begin{cases} r = r_0, & u_0 = r_0 \omega_0 \\ r = r_1, & u_0 = r_0 \omega_0 \end{cases} \quad (31)$$

式中: r_1 ——内圆柱半径; r_0 ——外圆柱半径; $u_1 = r_1 \omega_1$ ——内圆柱面的圆周速度; $u_0 = r_0 \omega_0$ ——外圆柱面的圆周速度。

解得速度分布为:

$$u_\theta = \frac{1}{r_0^2 - r_1^2} \left[(r_0^2 \omega_0 - r_1^2 \omega_1) r - (\omega_0 - \omega_1) \frac{r_0^2 r_1^2}{r} \right] \quad (32)$$

如令 $r_1 \rightarrow 0$, 则式(32)简化为:

$$u_\theta = r\omega_0 \quad (33)$$

这相当于一个圆柱形容器内的流体同容器像刚体一样旋转, 流体相对于容器处于静止状态, 现将这种刚体状态假设在内筒圆柱底部, 即速度 \mathbf{u} 不依赖 r 方向。如图1所示, 内外圆柱间的距离 y_2 与旋转圆周的线性尺度相比很小, 可认为平板无限长, 等效于两平板间的库埃特流动, 如图4所示。本次推算依旧为不可压缩流体, 流体质点的密度为常数 $\partial\rho/\partial t = 0$, 定常流动 $\partial/\partial t = 0$, 不计质量力 $f_x = f_y = f_z = 0$, 仅由上板拖动则 $u_y = u_z = 0$ 。

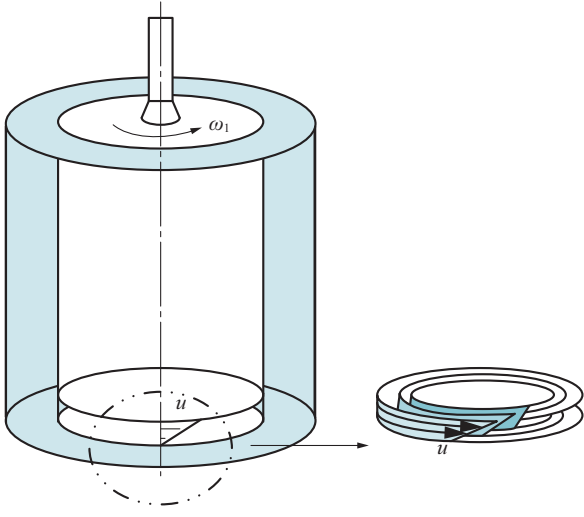


图4 双圆柱底部流动示意

采用直角坐标系, 对式(2)、(3)进行简化:

$$v_x \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (34)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (35)$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (36)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (37)$$

由式(35)、(36)知压力 $p = p(x)$, 由式(34)知 $u_x = u_x(y)$, 故式(36)可进一步转化为:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad (38)$$

因为上式右项为 x 的函数, 左项为 y 的函数, 则 $\partial p/\partial x = C$, 其中 C 为常数。于是对式(38)两次积分得通解为:

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + Dy + E \quad (39)$$

式中的 D 和 E 为积分常数, 需要通过流动的边界条件确定。

平面库埃特流的边界条件可写为:

$$\begin{cases} y=0, u_x=0 \\ y=y_2, u_x=u_i \end{cases} \quad (40)$$

其中 $u_i = r_i \omega_i$ 为内圆柱底面的任意点圆速度, 解得:

$$\begin{cases} D = \frac{u_i}{y_2} - \frac{y_2}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ E = 0 \end{cases} \quad (41)$$

速度分布为:

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (y - y_2) y + \frac{u_i}{y_2} y \quad (42)$$

若流动速度仅由上板拖动引起, 而沿流动方向压力梯度 $\partial p/\partial x = 0$, 于是简化式(39)为:

$$u_x = \frac{u_i}{y_2} y \quad (43)$$

同理因为平面库埃特的流动速度分布是线性的, 将式(43)代入式(26)得内圆柱底面任意点剪应力为:

$$\tau_i = \mu_i \frac{du}{dy} = \mu \frac{u_i}{y_2} \quad (44)$$

内圆柱底面任意微元环面所受力矩为:

$$M_i = \tau_i \cdot \pi (R_i^2 - r_i^2) \cdot r_i \quad (45)$$

式中: $R_i - r_i$ 在内圆柱底面上的增量半径。

因为微元线性尺度小 $R_i \approx r_i$, 式(45)可化为:

$$dM_i = \tau_i \cdot 2\pi r_i dr_i \cdot r_i \quad (46)$$

内圆柱底面所受力矩为:

$$M_2 = \mu \frac{\pi \omega r_1^4}{2y_2} \quad (47)$$

内圆柱所受合力矩为:

$$M = M_1 + M_2 = \mu \pi \omega r_1^3 \left(\frac{2h}{y_1} + \frac{r_1}{2y_2} \right) \quad (48)$$

传统旋转粘度仪计算力矩在实时测量后仅使用内圆筒侧壁面力矩[式(30)]计算液体粘度, 但实际测量时底部壁面间的粘滞效应将导致液体测量时计算值偏大, 不能忽略。

4 双圆筒流动数值分析

粘性流体围绕轴对称体(如圆柱体、球体和椭圆体)的流动一直是流体力学研究的一个热点。Coutanceau^[25]对充满粘性液体的管中轴对称体周围的约束蠕动流进行了实验,强调了由于约束管壁的存在而导致的形状效应的增加。Volobuev等^[26]应用置换假说分析了粘性流体中物体的缓慢流动,包括球体、圆柱体、椭圆体和平板。Kotsev等^[27]使用有限元模型研究了不同排列方式的球形颗粒周围的粘性流动,观察到球体排成直线时的轴对称流动,以及球体并排时的三维问题。总之,这些研究有助于理解轴对称体周围粘性流体的行为。

粘性流体流动的行为由 Navier-Stokes 方程描述,Navier-Stokes 方程是牛顿运动定律的特定形式,并由描述质量守恒的方程补充,服从主要的边界条件。除了非常简单的条件外,这些方程都需要借助于计算机进行数值求解。

本文建立了一个数值模型,分析有底双圆柱模型的几何构型,以获得内部流场速度分布,对上文推导进行验证。在本节中所有参数见图2,所考虑的几何参数见表1。

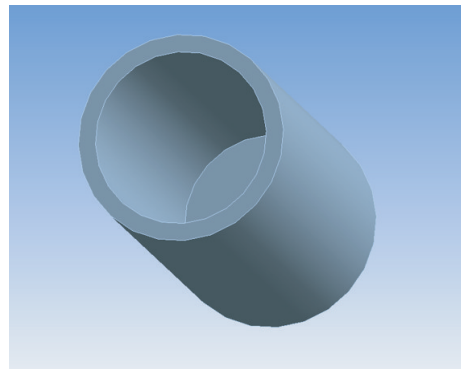
表1 有底双圆柱数值模型的结构参数

参数项	值/mm
内圆筒半径 r_1	25
外圆筒半径 r_0	30
内圆筒高 h	120
侧壁面间隙厚度 y_1	5
底壁面间隙厚度 y_2	5

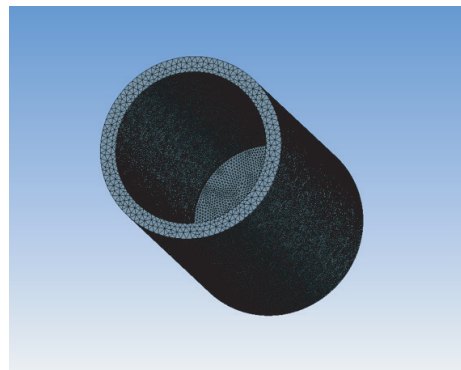
圆柱模型如图5(a)所示,图5(b)所示为在ICEM-CFD[®]2024软件支持下构建的代表研究域的网格。一个网格是每一个流场数值变化的流域。这些非结构化网格是在各种细化之后获得的,并且具有大约1530614个节点,1062406个四面体单元。

模拟中采用常见的水基钻井液,其流体参数如表2所示(温度为20℃)。

图6为圆柱中心速度剖视云图,双圆柱内端点对流场速度有轻微影响,因此分别取中段(line.1: $z=60$ mm; line.2: $x=10$ mm; line.3: $x=20$ mm)数值结果与文中推导计算结果进行比较。底部间隙结果如图7所示,层流下容器内的流体同容器像刚



(a)模型图



(b)网格图

图5 有底双圆柱模型

表2 水基钻井液流体性质

流体	$\rho/(kg\cdot m^{-3})$	$\mu/(mPa\cdot s)$
水	998.2	1.003

体一样旋转,流体相对于容器处于静止状态,速度云图与文中推导结果一致。如图8、图9所示,两者之间的平均误差line.1为0.132%,line.2为1.381%,line.3为1.602%,速度结果之间的低偏差验证了文中推导方法的正确性,表明它很好地描述了所研究的现象。

5 结论

本文通过分析传统的粘度仪转子结构,对粘度测量中平衡力矩检测原理进行进一步推导完善,然后采用有限元软件分析双圆柱绕流的流动特性,验证了推导公式的合理性。将其应用在钻井液粘度测量中可进一步为研究钻井液在破碎地层中的剪切应力提供基础,为预防井下事故提供支撑。本文得到的主要结论如下:

(1)钻井液粘度的高低应根据具体情况而定,从提高钻速的角度出发,对钻井液的粘度提出新的

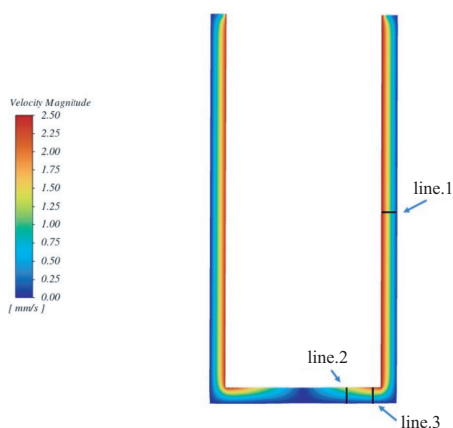


图6 圆柱中心剖视图速度云图

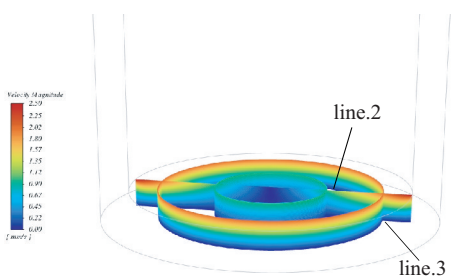
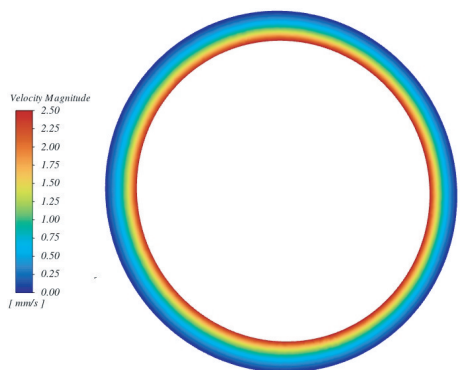
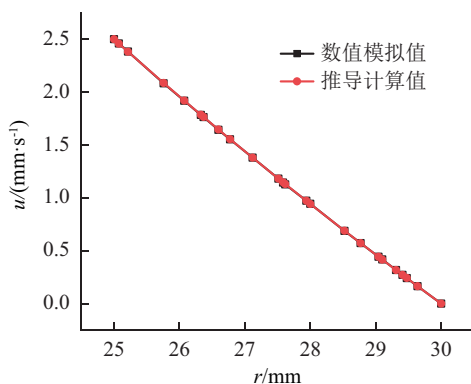


图7 圆柱底部壁面速度云图

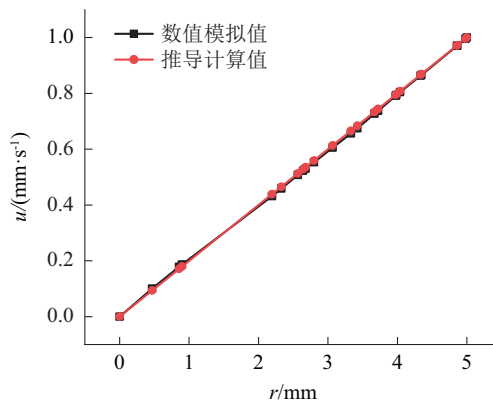


(a) 速度云图

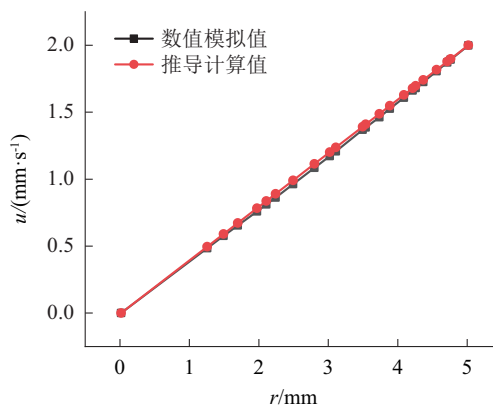


(b) line.1数据对比

图8 圆柱侧面速度云图与曲线



(a) line.2数据对比



(b) line.3数据对比

图9 特征线速度对比

要求,钻井液的粘度要随流速梯度上升而下降,这就是剪切降粘的特性。钻井液从钻头水眼喷出时有较低的粘度,有利于钻头破碎岩屑。清洗井底时,在环形空间上返时又具有较高粘度,有利于携带岩屑,这个特性对提高钻速有利。改进后的旋转粘度仪在新算法的补充后能更准确地检验不同钻井液的粘度,更好地适用于实际的工作情况。

(2) 钻井液采用旋转粘度测量并应用于不同场合是可行和有效的。

(3) 通过分析双筒中力矩变化应用于钻井液在完整地层中的流动特性,可为进一步研究钻井液在破碎地层中的剪切应力提供基础,为预防井内事故提供支撑。

参考文献:

[1] 孙金声,蒋官澄. 钻井工程“血液”——钻完井液技术的发展现状与趋势[J]. 前瞻科技, 2023, 2(2): 62-74.
 [2] 李中. 中国海油油气井工程数字化和智能化新进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 1-8.
 [3] 刘日淦. 钻井液常见污染问题及处理策略探究[J]. 石化技术,

- 2024,31(7):332-334.
- [4] 庞少聪,安玉秀,马京缘.近十年国内钻井液降粘剂研究进展[J].钻探工程,2022,49(1):96-103.
- [5] 韩银府,王正良,徐鹏.一种钻井液润滑剂的制备及其性能评价[J].化学工程师,2024,38(7):9-12.
- [6] 马旭.膨润土粒径及浓度对钻井液流变性能的影响研究[J].西部探矿工程,2023,35(7):110-112,119.
- [7] 刘晓栋,刘涛.钻井液高温流变性能测试仪器与测试方法[J].钻井液与完井液,2021,38(3):280-284.
- [8] 卢齐,庞东晓,聂秋露.提高钻井液粘度在线测量精度的标准化措施探索[J].标准科学,2023(S2):198-205.
- [9] 赵建刚,王雪竹,石凯,等.高温高压钻井液流变仪应用[J].钻探工程,2023,50(S1):449-455.
- [10] 赵建刚,王雪竹,石凯,等.高温高压钻井液性能测试仪器简介[J].地质装备,2022,23(5):8-12.
- [11] 王志祥,李之军,韩庆,等.卡森模式流变参数的合理表达及公式推导分析[J].四川地质学报,2022,42(S1):13-17.
- [12] Taylor G. I. Stability of a Viscous Liquid Contained between Two Rotating Cylinders[J]. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1923,102(718):541-542.
- [13] Meyer-Spasche R, Keller H B. Computations of the axisymmetric flow between rotating cylinders[J]. Journal of Computational Physics, 1980,35(1):100-109.
- [14] Cliffe, K, A. Numerical calculations of two-cell and single-cell Taylor flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983,135(-1):219-229.
- [15] Fasel H, Booz O. Numerical investigation of supercritical Taylor-Vortex Flow for a wide gap[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984,138(-1):21-52.
- [16] Snyder H A. Waveforms in rotating Couette flow[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1970,5(4):659-685.
- [17] Kirchgässner K, Sorger P. Branching analysis for the Taylor problem[J]. Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics, 1970,28(2):2-6.
- [18] Lizuka A, Yatomi C, Yashima A, et al. The effect of stress induced anisotropy on shear band formation[J]. Archive of Applied Mechanics, 1992,62(2):104-114.
- [19] 张启辉,赵锡宏.主应力轴旋转对剪切带形成的影响分析[J].岩土力学,2000,20(1):32-35.
- [20] 潘华,陈国兴.动态围压下空心圆柱扭剪仪模拟主应力轴旋转应力路径能力分析[J].岩土力学,2011,32(6):1701-1706,1712.
- [21] 张斌龙,王大雁,马巍,等.主应力轴旋转条件下冻结黏土累积塑性应变与临界动应力特性研究[J].岩土工程学报,2023,45(3):551-560.
- [22] 董志华,高彦斌.主应力轴旋转情况下土的各向异性研究进展[J].西北地震学报,2011,33(S1):10-14,20.
- [23] 董志华,张静.主应力轴旋转情况下土的各向异性理论研究进展[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2011,21(2):29-31,67.
- [24] 张因,厚美瑛.“简单”复杂流体中发现暂态剪切带[J].物理,2010,39(7):489.
- [25] Coutanceau M. Confined creeping flow around an axisymmetric body: increase of the shape effect by a tube wall[J]. Fluid Dynamics Research, 1987,2(3):153-174.
- [26] Volobuev A N, Petrov E S. Application of Hypothesis of Replacement at the Analysis of a Slow Flow of a Body by a Viscous Fluid[J]. ENGINEERING, 2011,3(6):632-638.
- [27] Kotsev T, Vassilev V M, Nikolov S G, et al. Viscous flow around spherical particles in different arrangements[C]//Fluid Dynamics Research, 2018:03008.

(编辑 荐华)