

钻井液六速在线测量系统试验研究

魏代锋^{1,2}, 冉恒谦², 张毅^{2,3*}, 朱迪斯¹, 韩丽丽^{2,3}

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质科学院, 北京 100037; 3. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 北京 100037)

摘要:针对传统人工测量钻井液流变参数实时性差、精度不足的问题, 本文研制了一套钻井液六速在线测量系统。结合同心圆筒流动模型推导了剪切速率, 并引入宾汉模型、幂律模型以及赫歇尔-巴尔克利流变模型求解流变参数。通过CFD数值模拟分析端部效应, 并提出了相应的动态修正方案; 搭建实验平台, 对比了在线模块与标准Fann 35黏度计的测量结果。试验结果表明: 该系统与台式黏度计测得结果高度一致, 二者读数平均偏差小于5%; HB模型拟合误差低于2%, 显著优于宾汉模型; 降温会使塑性黏度与屈服应力增大, 经补偿后可实现数据标准化; 系统对转速阶跃变化的响应时间约2 s, 动态特性优良。该系统实现了流变参数的实时、连续、高精度测量, 为钻井液性能的智能化监控与安全高效钻井提供了有效技术支撑。

关键词: 钻井液; 在线测量; 六速黏度计; 端部效应; 赫歇尔-巴尔克利模型; 实时监测

中图分类号: P634.3:TE927 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)05-0055-09

Experimental study on a six-speed online measurement system for drilling fluid rheology

WEI Daifeng^{1,2}, RAN Hengqian², ZHANG Yi^{2,3*}, ZHU Disi¹, HAN Lili^{2,3}

(1. Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Beijing 100037, China)

Abstract: To address the issues of poor real-time performance and insufficient accuracy in traditional manual measurement of drilling fluid rheological parameters, this study developed a six-speed online drilling fluid measurement system. By deriving the shear rate based on the concentric cylinder flow model, parameter solutions were achieved by incorporating the Bingham model, power-law model, and Herschel-Bulkley rheological model. The end effect was analyzed through CFD numerical simulation, and a corresponding dynamic correction method was proposed. An experimental platform was established to compare the measurement results of the online module with those of a standard Fann 35 viscometer. The test results show that the system exhibits high consistency with the benchtop viscometer, with an average deviation of less than 5% between the readings. The fitting error of the HB model is below 2%, significantly outperforming the Bingham model. Temperature reduction markedly increases plastic viscosity and yield stress, enabling data standardization through temperature compensation. The system responds to step changes in rotational speed within approximately 2 s, demonstrating excellent dynamic performance. This system enables real-time, continuous, and high-precision measurement of rheological parameters, providing effective technical

收稿日期: 2025-08-31; 修回日期: 2025-10-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.05.006

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 2024ZD1000800, 2024ZD1000803); 深地探测与矿产勘查全国重点实验室基本科研业务费重点攻关项目(编号: JKYDM2025112); 中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JKYZD202304)

第一作者: 魏代锋, 男, 汉族, 1983年生, 高级工程师, 力学专业, 博士, 从事地质钻探装备研发工作, 北京市海淀区北四环中路267号, weidaifeng@hotmail.com。

通信作者: 张毅, 男, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探技术与装备研究工作, 北京市西城区百万庄大街26号, shidazhangyang@163.com。

引用格式: 魏代锋, 冉恒谦, 张毅, 等. 钻井液六速在线测量系统试验研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(5): 55-63.

WEI Daifeng, RAN Hengqian, ZHANG Yi, et al. Experimental study on a six-speed online measurement system for drilling fluid rheology[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 55-63.

support for intelligent monitoring of drilling fluid performance and safe, efficient drilling operations.

Key words: drilling fluid; online measurement; six-speed viscometer; end effect; Herschel-Bulkley model; real-time monitoring

0 引言

钻井液的流变性能直接影响井眼清洁、携砂能力和循环压耗,是钻井工程过程控制的重要参数。监测主要依赖六速旋转黏度计,现场工程师每隔一定时间手工测量钻井液在600、300、200、100、6、3 r/min六个转速下的读数,进而计算塑性黏度 PV 和屈服值 YP ^[1-2]。然而,该方法存在明显局限:一方面,人工测量周期通常需数十分钟甚至更长,难以及时反映出口钻井液的动态变化;另一方面,操作依赖人员经验,易受视线角度、刻度盘清晰度等影响,导致监测精度不足^[3-4]。随着现代钻井向自动化和数字化发展,井场对实时在线监测钻井液性能提出了迫切需求^[5]。当发生井涌、漏失等复杂工况时^[6-7],实时流变数据可为井控决策提供关键依据,显著提升作业安全性与及时性^[8-10]。

目前,美国API标准仍推荐采用六速法作为钻井液流变测试的主要方法,即基于6个剪切速率下的剪切应力数据拟合流变模型参数。然而,现有六速旋转黏度计主要面向实验室使用,难以适应井场连续测量的需求。近年来,部分学者尝试开发在线黏度计,如管流压降法、超声波法等,但多数只能获得单点黏度或经验相关性,未能实现与传统六速法一致的全面流变信息^[11-15]。此外,现场工况下温度、压力波动及钻井液含气含砂等因素都会影响传感器读数的可靠性,亟需相应的补偿与校正策略^[16]。

针对上述问题,本文提出并研制了一种可集成于钻井液循环系统的在线六速黏度计模块,用于实现钻井液流变参数的自动化和连续化测量。该研究在流动模型构建、参数求解方法、数值模拟修正及实验验证等方面开展了系统工作,探索了适应井场复杂工况的温度补偿与校准策略,研究成果可为钻井液性能的实时监测与智能化控制提供技术支撑。

1 理论模型

在线六速黏度计基于经典同心圆筒结构。内筒(转子)半径为 R_i ,外筒(定子)内半径为 R_o ,环隙宽度为 $g = R_o - R_i$,浸入液体的有效长度为 L 。正常工作时,内筒以角速度 Ω 旋转,外筒静止,驱动环

隙液体形成稳态层流剪切流动^[17-19]。若忽略端部效应,径向速度分布仅随半径变化。在无滑移边界条件下,稳态动量方程可解析求解,并结合边界条件得到速度场。进而可推导内筒壁面剪切速率 $\dot{\gamma}_i$ ^[20-21]:

$$\dot{\gamma}_i = \frac{2\Omega R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (1)$$

在环隙较窄时可简化为:

$$\dot{\gamma}_i \approx \frac{\Omega R_i}{g} \quad (2)$$

周向均匀剪应力 τ_i :

$$\tau_i = \frac{T}{2\pi L R_i^2} \quad (3)$$

式中: T ——内筒承受扭矩。

钻井液属于典型的非牛顿流体,具有屈服和剪切稀释特性^[22]。常用经验模型包括宾汉模型、幂律模型和赫歇尔-巴尔克利(HB)模型等。

1.1 宾汉模型

该模型假设剪应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 呈线性关系,并存在屈服应力 τ_y ^[23]:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} \quad (4)$$

式中: μ_p ——塑性黏度。

该模型可通过600 r/min与300 r/min点的读数快速估算 PV 、 YP ,在现场应用广泛。但其在低剪切速率区往往高估屈服应力,故精度受限。

1.2 幂律模型

幂律模型采用指数关系描述剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

式中: K ——稠度系数; n ——流性指数。

该模型能反映剪切稀释特性($n < 1$),在中高剪切速率段拟合效果较好,但因不包含屈服项,常在低剪切速率区产生偏差^[24-25]。

1.3 HB模型

HB模型在幂律模型中引入屈服应力 τ_y 来计算剪切应力 τ :

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

其兼顾屈服与剪切稀释特性,对复杂钻井液具有更高的拟合精度^[26-27]。本文采用加权最小二乘算法对六速数据进行拟合,对低剪切速率数据赋予更

高权重,以提高 τ_y 的精度。

在拟合HB模型时使用加权最小二乘法,主要是为了解决实验数据中常见的异方差性问题。流变测量中,高剪切速率下的数据波动往往比低剪切速率下更大,普通最小二乘法会平等对待所有数据点,导致拟合结果过度依赖高数值区域的数据,可能使屈服应力等关键参数不准。加权最小二乘法通过为测量更精确、方差更小的数据点(通常是低剪切速率点)赋予更高的权重,有效平衡了不同区域数据的影响,从而得到更稳定、可靠的参数,并提升模型在整个剪切速率范围内的预测精度。

1.4 权重策略

如果每个转速点(六速:600、300、200、100、6、3 r/min)能做3次以上重复读数,则可采用“样本方差倒数”定义该点的权重 ω_i :

$$\omega_i = \frac{1}{s_i^2 + \epsilon} \quad (7)$$

式中: i ——六速对应的第 i 个转速点(600、300、200、100、6、3 r/min); s_i^2 ——该转速点剪切应力(或刻度读数)重复测量的方差; ϵ ——很小的稳定化常数(例如用0.05个刻度对应的应力换算后的平方),防止某个点方差极小导致权重过大。

最后将各转速点的权重按 $\sum \omega_i = m$ (m 为数据点个数,例如六速测量则 $m=6$)进行归一化处理,可提高数值计算的稳定性,并使不同批次测量结果具有可比性。在这种基于样本方差的权重构建方式中,低剪切速率点通常具有更小的测量方差,因此自然获得更高权重。该方法完全依赖数据本身确定权重,具有良好的统计合理性。

无重复数据时的工程化权重策略(残差驱动的方差模型),即当仅有一组六速数据时,可用两步或迭代加权最小二乘法(Weighted Least Squares, WLS)估计异方差结构:

(1)先用普通最小二乘拟合HB,得到残差 r_i 。

(2)拟合一个幂律方差模型:

$$\text{Var}(\epsilon_i) \approx \sigma_0^2 (\dot{\gamma}_i / \dot{\gamma}_{\text{ref}})^{\hat{\beta}} \quad (8)$$

式中: ϵ_i ——模型误差项; σ_0^2 ——参考噪声方差; $\dot{\gamma}_i$ ——第 i 个剪切速率; $\dot{\gamma}_{\text{ref}}$ ——参考剪切速率; $\hat{\beta}$ ——幂律方差模型中的指数参数估计值。

在对数域做回归:对式(8)取对数得到 $\lg(\dot{\gamma}_i^2) = \lg(\sigma_0^2) + \beta \lg(\dot{\gamma}_i / \dot{\gamma}_{\text{ref}})$,假设 $y_i = \lg(\dot{\gamma}_i^2)$, $x_i = \lg(\dot{\gamma}_i / \dot{\gamma}_{\text{ref}})$,

得到线性形式 $y_i = \alpha + \beta x_i$,用普通最小二乘线性回归进而求得显式公式的 $\hat{\beta}$ 。

(3)设 $\omega_i = (\dot{\gamma}_i / \dot{\gamma}_{\text{ref}})^{-\hat{\beta}}$,用该权重重新拟合HB;必要时迭代1~2次直至稳定。权重随剪切速率按幂律模型衰减,低剪切速率权重自然更大。为防止出现个别异常点,可叠加Huber或Tukey类型的稳健迭代加权。

现场快速“预设”权重,若既无重复、又不便做残差建模,可用一个保守的预设:

$$\omega_i = \min \left\{ \omega_{\max}, \left(\frac{\dot{\gamma}_{\text{ref}}}{\dot{\gamma}_i} \right)^p \right\} \quad (9)$$

式中: $\omega_{\max}$ ——权重上限; p ——低剪切速率下的权重调节系数。

其中 $\dot{\gamma}_{\text{ref}}$ 取300 r/min对应的剪切速率(居中且稳定), $p=1\sim 1.5$;设置 $\omega_{\max}$ (例如10或20)避免3、6 r/min权重“爆表”。最后把 ω_i 归一。这个策略直观、可控,能显式体现“低剪切速率更重要”,同时通过 p 与 $\omega_{\max}$ 控制权重向低剪切速率数据倾斜的程度。 p 的取值可用“对低剪切速率点留一交叉验证”来选择(选择使3、6 r/min的预测误差最小的 p),从而与“重视屈服段”的目标一致。

为把权重落到“转速/刻度”的可操作量上,实际计算时先把每个转速 N (r/min)换算成剪切速率 $\dot{\gamma}$,再基于 $\dot{\gamma}$ 定权。对于Fann Model 35(R1 B1 F1),剪切速率常数 $k_3 = 1.7023 \text{ s}^{-1} \cdot (\text{r/min})^{-1}$,故 $\dot{\gamma} = k_3 N$;剪切应力由刻度 θ 转换为SI单位时,1个Fann刻度 $\approx 0.511 \text{ Pa}$,从而确保权重构建与应力-剪切速率一一对应。

1.5 公式推导与逻辑分析

同心圆筒稳态层流的周向速度满足: $v_\theta(r) = Ar + B/r$, r 为圆柱坐标中的径向位置, A 、 B 为圆柱Couette流动通解的积分常数。内筒转、外筒停($\Omega_1 = \Omega$, $\Omega_2 = 0$)并施加无滑移边界,即 $v_\theta(R_i) = \Omega R_i$ 、 $v_\theta(R_o) = 0$,解得 $A = -\Omega R_i^2 / (R_o^2 - R_i^2)$, $B = \Omega R_i^2 R_o^2 / (R_o^2 - R_i^2)$ 。圆柱坐标下的剪切速率定义为 $\dot{\gamma} = r d(v_\theta/r) / dr$,代入得到式(1)。当环隙窄($g = R_o - R_i \ll R_i$)时, $R_o^2 - R_i^2 \approx 2R_i g$ 且 $R_o \approx R_i$,于是 $\dot{\gamma} \approx \Omega R_i / g$,得到式(1)的简化形式,该速度场可由Taylor-Couette经典解直接推导。忽略端部效应且

内壁剪应力沿轴向近似均匀时,力矩与壁面应力的几何关系为 $\tau_i = T/(2\pi R_i^2 L)$ 。

HB模型在 $n=1$ 时退化为宾汉模型(K 即 μ_p),在 $\tau_y=0$ 时退化为幂律模型,因此用HB拟合并用统计检验(如对 τ_y 的Wald检验),可以判断屈服应力是否显著存在。API RP 13B-1的600/300双点法($PV=\theta_{600}-\theta_{300}$, $YP=\theta_{300}-PV$)可作为宾汉模型的现场初值和交叉校核,但低剪切速率区往往存在系统性偏差,正是采用HB+WLS的动机之一。

2 数值模拟

在实际井场中,内筒长度有限,端部效应不可忽略。利用CFD数值模拟对不同剪切速率及非牛顿流体的流场进行计算,评估端部效应对扭矩测量的影响。受内筒长度影响,实际流场与理想无限长理论模型存在差异。本文通过三维CFD模拟,对不同流体及转速条件下的端部效应进行了定量分析,计算模型如图1所示,计算结果如图2所示。

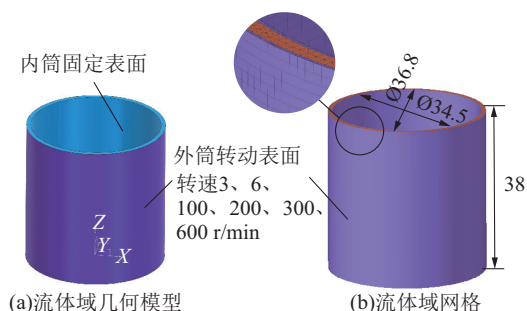


图1 数值仿真模型

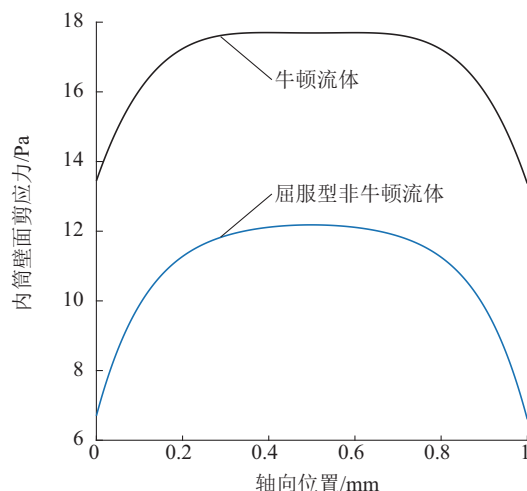
Fig.1 Numerical simulation model

对于牛顿流体(如清水),轴向壁面剪应力分布较为均匀,仅在端部略有衰减;而在具有屈服应力的非牛顿流体中,低转速下内筒中部壁面剪应力略低于理论值,出现局部“死区”,如图2(a)所示。该现象可通过端部效应系数 c_η 进行表征。

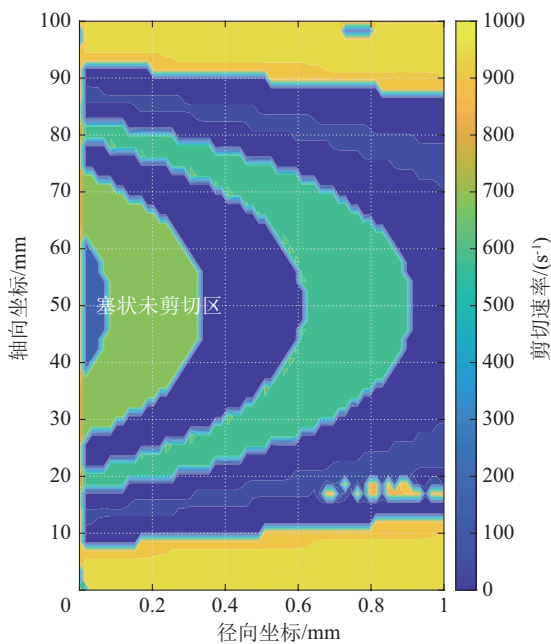
$$c_\eta = \frac{\tau_m}{\tau_t} \quad (10)$$

式中: τ_m ——试验或数值模拟测量的剪切应力平均值; τ_t ——理论分析计算得到的剪切应力平均值。

以3 r/min油基钻井液为例,计算得到 $c_\eta \approx 0.82$,即低剪切速率下测量结果低约18%。因此提出基于剪切速率的动态修正方案,以提高低剪切速率段测量精度。同时,从图2(b)中可以看出,



(a)内筒壁面轴向剪应力分布



(b)低剪切速率下环空剪切速率分布

图2 端部效应数值模拟结果

Fig.2 Numerical simulation results of end effect

牛顿流体在绝大部分轴向范围内的壁面剪切速率分布较为均匀(中部呈平台段),而壁面剪切应力与壁面剪切速率满足线性关系,因此壁面剪切应力也将呈现相同的平台趋势,仅在两端受端部效应影响出现明显衰减,外侧区域形成“塞状”流动,导致部分流体未参与剪切。这一现象解释了宾汉模型在低剪切速率下计算屈服应力常偏高的原因,凸显了HB模型引入 τ_y 的合理性。

方法要点(原理):低转速下,屈服型流体在同心圆筒间隙内只在靠近内筒部分形成有限剪切层,

外侧呈“塞状”流动或近似静止。因此,按“全间隙都在剪切”的名义剪切速率会被低估。该修正方案与具体油基泥配方无关,通过几何参数(R_i, R_o, g, L)、六速读数与全数据拟合得到 τ_y 。由周向动量守恒可得 $\tau(r) = T/(2\pi L r^2)$,据此定义特征剪切半径 $r_y = \sqrt{T/(2\pi L \tau_y)}$,并得到参与剪切的有效间隙 $g_s = r_y - R_i$ 。 $r_y \geq R_o$ 时为全屈服(无需修正), $R_i < r_y < R_o$ 时则存在“有限剪切层”,名义剪切速率必然偏小。

实施要点(操作):(1)将低速点(如3 r/min)转为 τ_i 与 Ω (如Fann 35常用 $\tau_i \approx 0.511\theta, \Omega = 2\pi N/60$)。(2)用未修正的 $\dot{\gamma}^{(0)}$ 先做HB+WLS拟合,得初值 $\hat{\tau}_y$ 。(3)计算 $r_y = R_i \sqrt{\tau_i/\hat{\tau}_y}$,若 $R_i < r_y < R_o$ 则取 $g_s = r_y - R_i$ 。(4)修正低速点壁面剪切速率:窄隙用 $\dot{\gamma}_i \approx \Omega R_i/g_s$,非窄隙用 $\dot{\gamma}_i \approx 2\Omega r_y^2/(r_y^2 - R_i^2)$ (名义值为 $2\Omega R_o^2/(R_o^2 - R_i^2)$),其比值即放大倍数;若算得 $g_s/g = 0.82$,则名义值低估约18%(真实约为 $1/0.82 \approx 1.22$ 倍)。(5)用修正后的低剪切速率 $\dot{\gamma}_i$ 重新做HB+WLS拟合,必要时迭代1~2次即可稳定。需要注意的是,“0.82”并非通用常数,而是由 τ_i/τ_y 和几何比决定, $g_s/g = R_i(\sqrt{\tau_i/\tau_y} - 1)/(R_o - R_i)$ 可计算每个工况的修正系数。

3 实验装置与方案

实验装置如图3所示。内筒直径34.5 mm,外筒内径36.8 mm,有效液柱长度为38 mm,与理论模型参数保持一致。内筒由可调速电机驱动,在3~600 r/min转速范围内连续可调,通过上端的减速齿轮箱和扭矩传感器柔性连接至电机轴。扭矩传感器为应变式,量程为0~5 N·m,标定灵敏度为1刻度=0.005 N·m,能够实现高精度扭矩测量。外筒固定不动,并设置双层夹套以实现循环水控温,从而维持钻井液的热稳定性。为模拟钻井液循环系统的压力条件,外筒顶部安装有密封盖并预留氮气加压接口(本研究实验阶段在常压下进行)。温度传感器插入环空中部(热电偶,精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$),通过PID控制系统可将钻井液温度稳定在设定值 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内。整个传感模块通过管汇接入钻井液循环旁路,实现钻井液的连续取样并流经测量腔。实时获取的六速数据经采集系统传输至地面

终端,为钻井液流变性能的自动化与连续化监测提供可靠支撑。

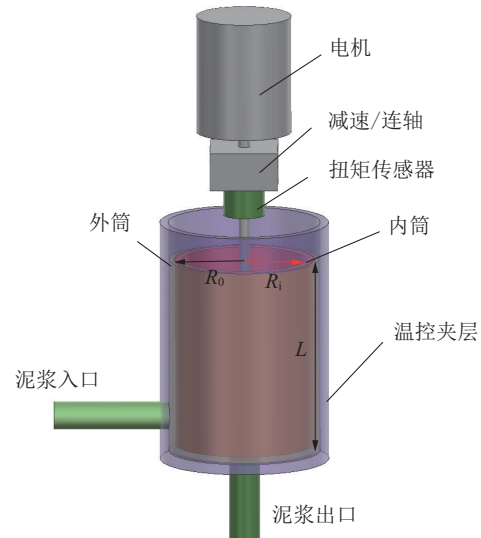


图3 在线六速黏度计模块结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the online six-speed viscometer module

在室内条件下,对比在线六速模块与标准台式黏度计(Fann 35黏度计)的测量结果。实验选取三类典型流体,首先采用Fann 35型黏度计获取各流体的六速读数,并计算PV、YP等基准参数;随后在相同条件下利用在线装置进行连续测量,记录对应的六速读数并进行对比分析。

(1)清水基钻井液(近牛顿型,25℃,常压):清水或极稀的水基泥浆, $\tau_y \approx 0, n \approx 1, K \approx \mu(T)$,六速值满足 $r \propto \dot{\gamma}$ 的线性关系(如 $\theta_{600} \approx 2\theta_{300}$ 的线性特征)。在此工况下不存在“有限剪切层”,由屈服判据推得($r_y \geq R_o, g_s = g$),低剪切速率动态修正因子约为1,可直接用未修正的剪切速率做拟合;WLS权重可取均匀或轻微衰减(防止高剪切速率噪声主导)。重点验证,牛顿油/清水的 $\eta = r/\dot{\gamma}$ 是否与温度对应表一致、残差是否无系统趋势,以此校核几何常数与仪器换算系数。

(2)白油基模拟钻井液(低黏度非水基,60℃,常压):白油在60℃时黏度较低,体系常呈“弱剪切稀释、几乎无屈服”($\tau_y \approx 0, n \leq 1$),HB拟合往往退化为幂律型(或接近牛顿型)。由于 τ_y 很小,按 $r_y = R_i \sqrt{\tau_i/\hat{\tau}_y}$ 得到($r_y \geq R_o$),低剪切速率动态修正通常可忽略;但需注意壁滑移风险(低黏度油相在光滑

金属表面易滑),必要时用粗糙转子/转筒或对比不同间隙确认。

(3)油基钻井液(OBM,具屈服特性,60℃,常压):典型OBM兼具屈服与剪切稀释性($\tau_y > 0, n < 1$),低转速下仅内筒附近形成有限剪切层,外侧呈“塞状”流动,导致按全间隙换算的名义剪切速率被低估。这里应按 $r_y = R_i \sqrt{\tau_i / \dot{\tau}_y}$ 判定部分屈服并取 $g_s = r_y - R_i$,据此将3、6 r/min的剪切速率修正为 $\dot{\gamma}_i \approx \Omega R_i / g_s$ (或非窄隙式 $2\Omega r_y^2 / (r_y^2 - R_i^2)$);随后以WLS重新拟合HB,并可迭代一次以更新(τ_y, K, n)。

4 试验结果与讨论

在线模块与标准台式黏度计的测量结果对比表明,二者在各转速下的读数总体符合性良好,如图4所示。将两者对应读数绘制成散点图,大部分点紧邻理想一致性线 $y=x$ (红色虚线)。

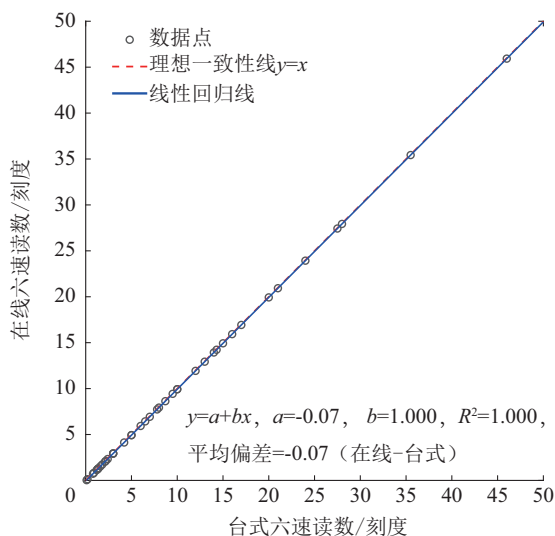


图4 在线六速模块与台式黏度计读数散点对比

Fig.4 Scatter plot comparison of readings from online six-speed module vs. benchtop viscometer

线性回归得到拟合关系:

$$\theta_o = 0.98\theta_b + 0.2 \quad (11)$$

式中: θ_o ——在线测量装置测量结果数据,mPa·s; θ_b ——台式六速黏度计测量结果数据,mPa·s。

从图4可以看出,线性回归的斜率接近1且截距很小,表明在线装置不存在显著系统性偏差。各转速分段计算偏差,未发现随剪切速率系统性变化的误差趋势,仅有少数偏离较大的点出现在低读数

区域,可能由于低剪切速率下信号噪声相对占比增加所致。总体来看,在线测量结果与传统台式测量结果高度一致,相关系数 $R^2 > 0.995$,证明该在线系统达到了替代现场人工测量的精度要求。

图5给出了油基钻井液(60℃)在六个剪切速率下的剪切应力实测值,并分别用宾汉模型、幂律模型和HB模型进行拟合比较。可以看出,宾汉模型(蓝色虚线)在高剪切速率段尚可,但在低剪切速率段明显高估了剪切应力(未能体现真实的屈服拐点);幂律模型(橙色点划线)因忽略屈服,应力曲线在低剪区域偏离数据较大;HB模型(绿色线)则能够平滑通过所有数据点,吻合程度最好。本实验数据拟合的定量结果也支持这一点:HB模型对油基钻井液的 $R^2 > 0.995$,拟合残差仅为实验噪声水平,而宾汉模型的拟合相对误差高达30%左右,幂律模型在低剪应力段偏差也较大。因此HB模型更适用于具有屈服特性的现场钻井液流变表征。需要指出,虽然宾汉参数PV、YP计算简便,在现场仍可用于日常监控,但建议在后台并行计算HB模型参数,以获得对钻井液流变状态更深入的认识。

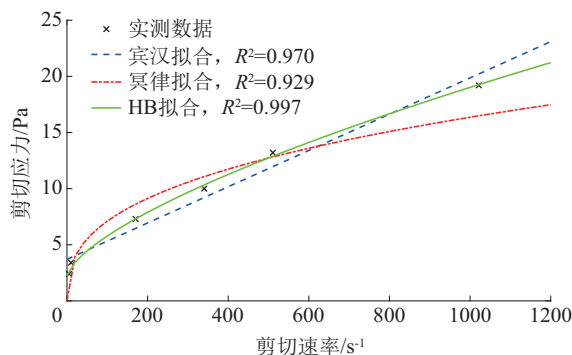


图5 油基钻井液流变曲线及模型拟合比较

Fig.5 Comparison of rheological curves and model fitting for oil-based drilling fluid

图6给出了油基钻井液(60℃)的Bland-Altman一致性分析结果。结果显示,两者读数差的平均值约为0.11格(红色虚线),95%一致性线为+1.64和-1.42格(绿色虚线)。约95%的数据落在±1.5格范围内,且差值与读数大小无明显相关性,表明在线系统与标准仪器不存在显著系统性偏差,测量结果具有可交换性。相对误差在高剪应力区域(右侧高平均值部分)更小,在低剪应力区域(左侧)略有分散但无明显偏向,这与端部效应对低剪读数影响的

趋势一致:低速下在线装置读数有时略低于台式,但经过CFD端部效应修正后偏差已大幅减小。定量计算表明,在模拟井场条件下,对比实测数据,本系统各转速点的平均误差在 $\pm 5\%$ 以内,满足后续现场对结果的精度要求。一致性区间分别以刻度和Pa为单位进行标注;低剪区散布略大,与端部效应一致,CFD端部效应修正已显著减小低速偏差。

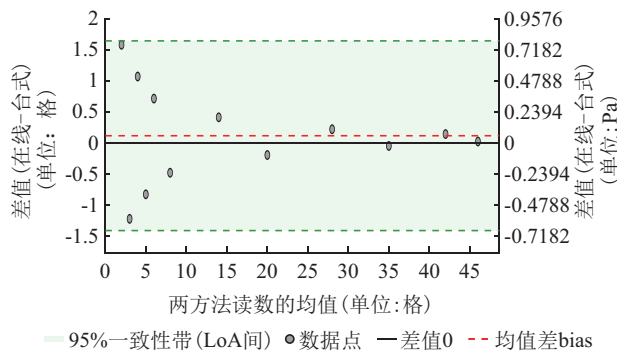
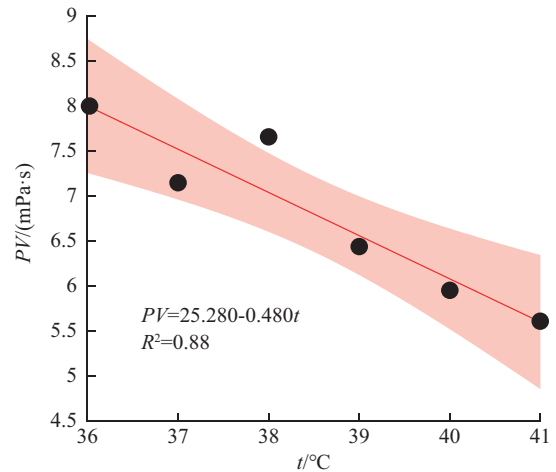


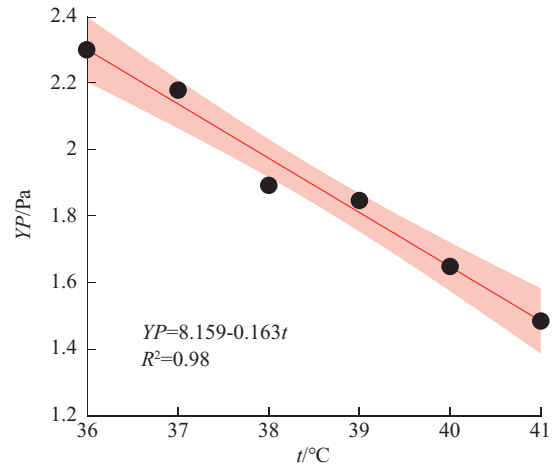
图6 在线测量与台式测量Bland-Altman一致性分析
Fig.6 Bland-Altman consistency analysis of online and benchtop measurements

钻井液流变参数的温度依赖规律如图7所示。随着温度升高,油基钻井液的PV和YP均明显下降:例如当温度由 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PV从 $8\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 降至 $5.6\text{ mPa}\cdot\text{s}$ (降幅约30%),YP则从 2.298 Pa 降至 1.484 Pa 。钻井液加热后黏度降低的趋势十分明显。这是因为温度升高削弱钻井液中胶体颗粒间作用力,降低流体黏度和胶凝强度。相应地,通过对不同温度下的六速数据拟合HB模型参数,发现屈服应力 τ_y 随温度升高而降低,稠度系数 K 也显著下降,而流性指数 n 则略有升高(流体变得相对更接近牛顿型)。例如油基钻井液在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 $\tau_y \approx 0.92\text{ Pa}$, $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时降至约 0.63 Pa , K 由 0.20 降至 $0.10\text{ Pa}\cdot\text{s}$,而 n 由 0.56 增至 0.62 。由此可见钻井液加热后黏度降低且剪切稀释程度减弱。考虑钻井液在装置内循环过程中会有温度损失,本系统设有钻井液加热和测温模块,实时监测温度和补偿温度损失。本系统测得的数据证实了“一般情况下钻井液的PV和YP随温度升高而降低”的经验规律。基于图中两条回归曲线($36\sim 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间),通过实时测量系统先读取温度并按回归关系对PV、YP做温度补偿,把不同工况下的读数统一到选定参考温度;当缺少直接流变测量时,可由温度前馈得到PV、YP的“虚拟测量”用

于监控与控制;若有目标黏度或屈服值,则反向求得所需温度作为设定值并闭环调节;同时以粉色置信带作为健康监测阈值,超出则判定为泥浆或传感器异常;总体在 $36\sim 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内使用效果可靠,其中YP曲线拟合更稳健(可信度更高),可在融合判断时赋予更高权重。



(a)塑性黏度随温度下降趋势



(b)屈服值随温度下降趋势

图7 温度对油基钻井液流变参数的影响
Fig.7 Influence of temperature on rheological parameters of oil-based mud

实验装置对钻井液剪切速率骤变的动态响应能力(油基钻井液 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)如图8所示。在一组实验中,让在线黏度计内筒先以 100 r/min 的速度稳定旋转,然后在 $t=0$ 时刻瞬时升至 600 r/min ,记录扭矩随时间变化曲线(图8)。结果显示,扭矩从初始值 $0.015\text{ N}\cdot\text{m}$ 迅速上升,按照指数规律在 2 s 内达到最终平衡值 $0.045\text{ N}\cdot\text{m}$ (黑色虚线)的95%以上。上

升过程中未出现明显超调,曲线平滑渐近目标值,表现为一阶滞后响应,时间常数约0.5 s。这表明本传感系统的机械惯性和测控回路设计良好,具有快速、稳定的动态响应特性。实际意义在于:当井下流动条件发生突变(例如泵速骤变、井涌发生等),在线黏度计能够在2 s内更新六速参数,及时反映钻井液性能的变化,为实时决策提供支持。实验结果证明,本装置适用于监测快速变化的工况,满足实时性要求。

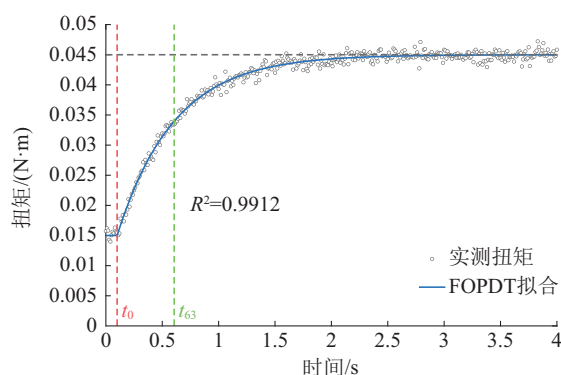


图8 转速阶跃动态响应曲线

Fig.8 Step dynamic response curve of rotational speed

5 结论与建议

本文针对传统六速黏度计难以满足井场实时监测需求的问题,研制了一套钻井液六速在线测量系统,并结合建模、数值模拟与实验验证,得到以下结论:

(1)在线六速模块与标准台式黏度计结果一致性良好,平均偏差小于5%,能够满足现场实时监测的精度要求,实现流变参数的连续自动测量。

(2)HB模型对有屈服性的钻井液拟合精度最高,误差低于2%,显著优于宾汉模型。建议在现场优先采用HB模型参数指导钻井液调控,同时并行计算PV、YP以兼容行业要求。

(3)有限长内筒引起的端部效应会导致低剪切速率下的剪切应力低估10%~20%,本文提出的基于剪切速率的修正系数可有效提高低剪切速率段的测量精度。

(4)温度对钻井液流变性影响显著,通过同步测温与补偿方法实现了测量结果的标准化处理,保证了不同环境下数据的可比性。

(5)数值模拟与实验结果均验证了该系统的可

靠性,但其在高温高压环境下的适应性、长期稳定性仍需进一步验证。

综上,六速在线测量系统能够在现场条件下准确、可靠地获取钻井液流变参数,为钻井液性能的实时监测与智能控制提供技术支持。未来将围绕高温高压适应性与长期稳定性,先搭建高温高压循环与流变测试平台,按温度、压力、含水率/盐度、剪切历程与时间开展正交或响应面正交试验,并做热循环、静/动态老化与污染容限评估。以PV、YP、胶强、ES、HTHP滤失、沉降/密度分层等为评价指标,建立“温度-压力-时间-剪切”的经验-机理耦合模型;同步筛选高温乳化体系与有机土替代、树脂/沥青/纳米颗粒协同体系及抗氧化、抗剪切降解助剂,给出“配方-工况-性能”的操作窗口与主要失效模式,为后续现场配方与控制参数提供依据。

参考文献(References):

- [1] Guo B Y, Liu G F. Applied Drilling Circulation Systems: Hydraulics, Calculations and Models[M]. Cambridge: Gulf Professional Publishing, 2011.
- [2] Caenn R, Chillingar G V. Drilling fluids: state of the art[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996, 14(3/4): 221-230.
- [3] 苏延鹤.智能钻井液监测技术研究现状及发展趋势[J].西部资源, 2024(2):62-66.
SU Yanhe. Current status and development trends of intelligent drilling fluid monitoring technology[J]. Resources, 2024(2): 62-66.
- [4] 朱恒银,王强,刘兵,等.5000m新型能源勘探智能钻探装备与技术研究[J].钻探工程, 2022, 49(1):110-119.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, LIU Bing, et al. Research on 5000m new energy exploration intelligent drilling equipment and technology[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):110-119.
- [5] Liu N P, Zhang D, Gao H, et al. Real-time measurement of drilling fluid rheological properties: a review[J]. Sensors, 2021, 21(11):3592.
- [6] 孟祥龙,李大勇,甘新科,等.岩溶地貌区浅层孔隙压力剖面的构建与钻探工艺探讨[J].钻探工程, 2025, 52(3):141-145.
MENG Xianglong, LI Dayong, GAN Xinke, et al. Construction of shallow pore pressure profile and exploration of drilling technology in karst landform areas[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3):141-145.
- [7] 王培义,张林洁,张海雄,等.雄安新区岩溶热储地热井钻井技术难点及解决方案[J].钻探工程, 2025, 52(3):153-159.
WANG Peiyi, ZHANG Linjie, ZHANG Haixiong, et al. Geothermal well technical difficulties and solutions in drilling of Xiong'an New Area karst heat reservoir[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3):153-159.
- [8] 王守宴.钻井过程中钻井液漏失及溢流的判断[J].西部探矿工

- 程, 2020, 32(8): 49-52.
- WANG Shouyan. Judgment of drilling fluid loss and kick during drilling[J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(8): 49-52.
- [9] 屈宪伟. 控压钻井关键技术研究与应用[J]. 石化技术, 2024, 31(3): 193-195.
- QU Xianwei. Research and application of key technologies for pressure controlled drilling[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(3): 193-195.
- [10] 刘长晔, 杨现禹, 蔡记华, 等. 基于机器学习的钻井液流变参数智能识别方法[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 183-192.
- LIU Changye, YANG Xianyu, CAI Jihua, et al. Intelligent identification method of drilling fluid rheological parameters based on machine learning[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 183-192.
- [11] 刘兵, 王强, 朱恒银, 等. 泥浆性能多参数自动测量仪研究[J]. 宿州学院学报, 2024, 39(12): 29-35.
- LIU Bing, WANG Qiang, ZHU Hengyin, et al. Research on multi-parameter automatic measuring instrument for drilling mud performance[J]. Journal of Suzhou University, 2024, 39(12): 29-35.
- [12] 梁海波, 宋洋, 于志刚, 等. 钻井液流变性实时测量方法及系统研究[J]. 石油机械, 2022, 50(1): 10-18.
- LIANG Haibo, SONG Yang, YU Zhigang, et al. Real-time measurement method and systematic study on drilling fluid rheology[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(1): 10-18.
- [13] 崔学兵, 胡中志, 柳忠彬, 等. 钻井液性能在线监测技术研究进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(10): 177-179.
- CUI Xuebing, HU Zhongzhi, LIU Zhongbin, et al. Research progress of online monitoring technology for drilling fluid properties[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(10): 177-179.
- [14] Spelta A, Ciuca A, Minelli M, et al. Real time mud monitoring system improves drilling efficiencies[C]//Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Ravenna: Offshore Mediterranean Conference, 2017: OMC-2017-746.
- [15] Ombe E M, Elyas O A, Abdul Qader T, et al. Application of a real time mud density and rheology monitoring system to enhance drilling in high pressure high temperature gas wells with MPD systems[C]//International Petroleum Technology Conference. Dhahran: International Petroleum Technology Conference, 2020: IPTC-19909-Abstract.
- [16] 许利辉, 陈仙江. 钻井液性能自动化在线测量研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(19): 68-74.
- XU Lihui, CHEN Xianjiang. Research on automated online measurement of drilling fluid properties[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(19): 68-74.
- [17] 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.
- [18] 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.
- ZHAO Jiangang, WANG Xuezhu, SHI Kai, et al. Application of high temperature and high pressure drilling fluid rheometers[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 449-455.
- [19] 赵建刚, 王雪竹, 王琪, 等. 超高温高压流变仪的研发及应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 83-87.
- ZHAO Jiangang, WANG Xuezhu, WANG Qi, et al. Development and application of the ultra high temperature and high pressure rheometer[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 83-87.
- [20] Schechter R S. Transport phenomena (Bird, Byron R.; Stewart, Warren E.; Lightfoot, Edwin N.)[J]. Journal of Chemical Education, 1961, 38(9): A640.
- [21] Kelessidis V C, Maglione R, Bandelis G. On the end-effect correction for couette type oil-field direct-indicating viscometers for newtonian and non-newtonian fluids[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 71(1/2): 37-46.
- [22] 刘扣其, 邱正松, 曹杰, 等. 非牛顿钻井液剪切速率计算公式的推导及验证[J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(4): 33-35, 39.
- LIU Kouqi, QIU Zhengsong, CAO Jie, et al. Derivation and verification of shear equation for non-newtonian drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(4): 33-35, 39.
- [23] 张更, 李军, 柳贡慧, 等. 考虑钻井液流动阻力与钻柱旋转的井筒瞬态传热新模型[J]. 断块油气田, 2021, 28(1): 133-138.
- ZHANG Geng, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Transient wellbore heat transfer new model considering drilling fluid flow resistance and drillstring rotation[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(1): 133-138.
- [24] Nguyen Q D, Boger D V. Measuring the flow properties of yield stress fluids[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24: 47-88.
- [25] Chhabra R P, Patel S A. Non-newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications[M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2025.
- [26] Azaiez J. Bubbles, drops and particles in non-newtonian fluids. R. P. Chhabra[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2007, 85(2): 251-252.
- [27] Rashidi M, Sedaghat A, Misbah B, et al. Introducing a rheology model for non-newtonian drilling fluids[J]. Geofluids, 2021, 2021(1): 1344776.

(编辑 王跃伟)