

磁力耦合式高压流变仪测试系统测试参数修正

刘 刚¹, 周 莹¹, 苗 青², 张永祥³, 李秉繁¹

(1. 中国石油大学(华东)山东省油气储运安全省级重点实验室, 山东青岛 266580;

2. 中国石油油气储运重点实验室, 河北廊坊 065000; 3. 中国石油管道局工程有限公司, 河北廊坊 065000)

摘要:磁力耦合式旋转流变仪因内、外磁环磁力耦合而导致内外磁环转动不同步,存在延迟启动问题,造成流变仪测试数据出现较大偏差。为解决这一问题,根据流变仪内、外磁环扭矩平衡以及内外磁力耦合特性,建立磁力耦合式旋转流变仪传动过程物理模型,并以 HAAKE-MARS 60 高压流变仪为例,对牛顿流体恒剪切率加载条件下测量参数进行修正。结果表明:测试物料黏度越大,剪切速率越小,内转子转速波动幅度越大,内转子表面真实剪切应力小于外磁环剪切应力;因区分了流变仪马达扭矩和作用于流体的负载扭矩,以及考虑了测试过程中内、外磁环转速的差别,黏度修正值较接近于真实黏度,且黏度越大,剪切速率越高,黏度修正效果越好;很好地解决了高压流变仪测试系统下流变测试结果“失真”问题。

关键词:磁力耦合; 扭矩传递; 黏度修正; 响应滞后

中图分类号:TE 832; TH 836 **文献标志码:**A

引用格式:刘刚,周莹,苗青,等. 磁力耦合式高压流变仪测试系统测试参数修正[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019,43(4):127-136.

LIU Gang, ZHOU Ying, MIAO Qing, et al. Correction of test parameters for magnetic coupling high pressure rheometer testing system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019,43(4):127-136.

Correction of test parameters for magnetic coupling high pressure rheometer testing system

LIU Gang¹, ZHOU Ying¹, MIAO Qing², ZHANG Yongxiang³, LI Bingfan¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Oil & Gas Storage & Transportation Safety in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation, Langfang 065000, China;

3. PetroChina Pipeline Engineering Company Limited, Langfang 065000, China)

Abstract: Due to the magnetic coupling between the internal and external magnetic rings, the rotation of the two rings is not synchronous, therefore the problem of delayed start-up occurs, which results in large deviation of the rheometer test data. In order to solve this problem, according to the torque balance of the internal and external magnetic rings and the coupling characteristics of the internal and external magnetic forces, a physical model of the transmission process of the magnetic coupling rotary rheometer was established. The high pressure rheometer, HAAKE-MARS 60 was used to correct the measurement parameters of the Newtonian fluid under the condition of constant shearing rate. The results show that the true shear stress on the surface of the internal magnetic ring becomes much bigger than that of the external ring, with the increase of the viscosity of the tested material, the decrease of the shear rate, and the increase of the fluctuation amplitude of the internal rotor speed. It is found that the viscosity correction value is close to the true viscosity, as the difference between the motor torque of the rheometer and the load torque acting on the fluid is considered, as well as the difference between the rotational speed of the internal and external magnetic rings during the test. The higher the viscosity, the higher the shear rate, and the better the vis-

cosity correction effect is. Altogether, the problem of "distortion" of rheological test results under the high-pressure rheometer test system has been solved successfully.

Keywords: magnetic coupling; torque transfer; viscosity correction; lags in response

随着对石油需求的不断增加,油气勘探开发逐步向深层次挖掘。对于高温高压深井、超深井,钻井液流变性受温度和压力的影响较大,所以实验室采用高压流变仪研究温度和压力对钻井液流变性带来的影响对高温高压井作业成败起着至关重要的作用^[14]。而且近年来国内大力开展了气体驱油技术^[5-8],矿场集输当中也常溶解一定的轻组分以降低原油的黏度来提高集输效率,降低能耗。管路内的原油通常为溶有一定气体的饱和溶气原油,然而目前中国常根据脱气原油凝点和黏度等流变参数来指导矿场集输系统的设计和运行,因此一些学者开始关注气体对原油的流变性的影响^[9-13]。实验室中主要利用高压流变仪来研究气体驱油效果及驱替过程中原油流变性的影响规律。可见高压流变仪是研究高压溶气物料流变性^[14-16]的重要手段,但由于磁力耦合作用,导致内磁环启动存在滞后问题^[17-19],进一步加剧非稳态剪切测试结果的“失真”^[20-25]。目前,尚未有学者对于磁力耦合式流变测试系统延迟启动问题进行研究。综上所述,磁力耦合式流变仪因磁力耦合存在延迟启动问题,从而造成高压流变仪启动瞬时测试数据出现较大偏差,导致研究测试物料的流变性时也存在较大偏差,这使得在进行矿场集输系统设计时产生更大的误差,会影响实际站场运行,存在安全隐患及增加能耗。对于非稳态剪切流动过程中流变测试结果“失真”问题,流变仪厂家并未给出修正,其他学者也未深入研究。恒剪切率加载是最为常用的流变条件。为此,笔者根据恒剪切率加载条件下流变仪传动过程的扭矩平衡建立磁力耦合式旋转流变仪启动过程的物理传动模型,并以 HAAKE-MARS60 高压流变仪为例,对牛顿流体恒剪切率加载条件下测量参数进行分析,并利用所建立的模型进行修正。

1 磁力耦合式旋转流变仪测试系统磁力耦合传动过程物理模型建立

图1为磁力耦合式旋转流变仪测试系统。其中包括外磁环、内磁环、压力单元腔体以及转子、宝石轴承等^[26-28]。流变仪启动过程中的扭矩并非都用于剪切流体,部分扭矩用于加速内外磁环、马达和转子旋转以及摩擦损失。

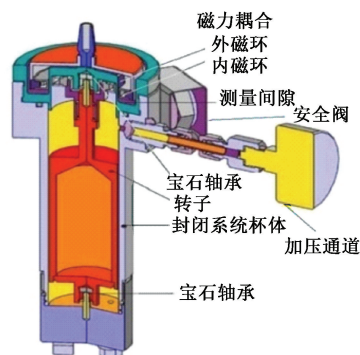


图1 磁力耦合式流变仪测试系统

Fig.1 Magnetic coupling rheometer test system

1.1 物理模型建立

图2为磁力耦合式旋转流变仪测试系统的磁力耦合传动过程。在流变仪启动瞬间,马达扭矩达到设定值,但在向下传递的过程中,由于流变仪外磁环作非匀速转动,将损失一部分扭矩,并且在传动过程中会损失部分传动力矩 ΔM ,传递给内磁环的力矩 M_0 ,但由于 ΔM 很小可忽略不计^[29-30],内磁环的扭矩一部分用于内磁环的加速和摩擦造成的损失,剩下的才是真正作用于负载的扭矩,在此假设下建立模型如下。



图2 磁力耦合式旋转流变仪测试系统的磁力耦合传动过程

Fig.2 Magnetic coupling driving process of magnetic coupling rotary rheometer testing system

考虑马达和外磁环惯量,建立外磁环扭矩平衡关系式为

$$M = M_0 + (J_1 + J_{\text{monitor}}) \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} \quad (1)$$

式中, M 为流变仪马达启动扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; M_0 为磁力耦合扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; θ_1 为外磁环角位移, rad ; J_1 为外磁环转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; J_{monitor} 为马达及夹具惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

考虑内磁环及测量转子惯量和宝石轴承摩擦损耗,建立内磁环扭矩平衡关系式为

$$M_0 = M_F + J_2 \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} + M_f \quad (2)$$

式中, M_F 为负载扭矩, $N \cdot m$; M_f 为宝石轴承摩擦扭矩, $N \cdot m$; θ_2 为内磁环角位移, rad ; J_2 为内磁环及测量转子转动惯量, $kg \cdot m^2$ 。

根据流变仪自身机械特性, 内外磁环磁力耦合关系式为

$$M_0 = M_{\max} \sin [m(\theta_1 - \theta_2)] \quad (3)$$

式中, $M_{\max}$ 为最大静磁力矩, $N \cdot m$; m 为磁极个数。

初始条件为

$$\begin{cases} \theta_1 \Big|_{t=0} = \theta_2 \Big|_{t=0}, \\ \frac{d\theta_1}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{d\theta_2}{dt} \Big|_{t=0}. \end{cases}$$

1.2 物理模型中各参量特性

1.2.1 负载扭矩

HAAKE-MARS60 高压流变仪测试流体流变性时, 处于测量环形间隙内的流体随测量转子做同心状旋转流动, 测量转子会受到流体的黏滞阻力 τ , 因此产生负载力矩 M_F , 其力矩大小取决于流体黏稠程度。对于黏度为 μ 的牛顿流体, 有 $\tau = C_{ss} M_F = \mu \gamma$ 。

1.2.2 宝石轴承摩擦扭矩

控制流变仪空转, 采用剪切速率阶跃增加的方法, 待转速恒定后, 测试不同转速条件下宝石轴承的摩擦扭矩 M_f , 如图 3 所示。宝石轴承摩擦扭矩随着内磁环转速 N_2 的增加而增大, 且呈现较好的线性关系。拟合可得

$$M_f = aN_2 + b = 0.06149 + 0.001791N_2.$$

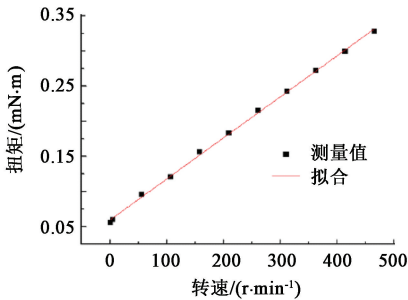


图 3 摩擦扭矩随转速变化关系

Fig.3 Variation of friction torque with rotational speed

1.2.3 马达及夹具惯量计算

流变测试过程中旋转件的转动惯量应包括外磁环、内磁环、转子、马达及夹具的转动惯量。但是由于流变仪厂商没有提供马达及夹具的传动惯量。稳定转动时, 施加扭矩、转子角速度以及总转动惯量之间的关系式为 $M = I_{\text{total}} \frac{d\omega}{dt}$, 即 $\frac{\tau}{C_{ss}} = I_{\text{total}} \frac{60}{2\pi} \frac{dn}{dt}$, 故测试系统总的转动惯量为

$$I_{\text{total}} = \frac{60\pi/C_{ss}}{2\pi\Delta N_1/\Delta t} \quad (4)$$

式中, I_{total} 为总的转动惯量, $kg \cdot m^2$; C_{ss} 为应力-扭矩转换系数, 数值为 $5511 \text{ Pa}/(N \cdot m)$; N_1 为外磁环转速, r/min 。

为了探究马达和夹具的总转动惯量, 采用空载测试的方法获得不同恒定应力下的转速-时间曲线, 如图 4 所示。通过计算不同应力条件下系统转动惯量的真实值进而确定马达和夹具的总转动惯量, 可得 $I_{\text{total}} = 456.0811 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot m^2$, 扣除相应的内、外磁环及测量转子质量惯量, 可得马达及夹具惯量约为 $234.5811 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot m^2$ 。

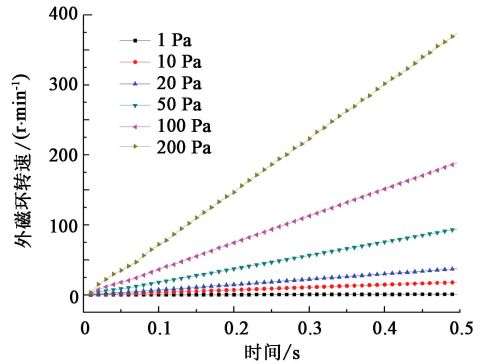


图 4 不同恒应力启动条件下空载转速随时间变化关系

Fig.4 Variation of rotational speed with time under different constant stress during initial testing stage with no load

1.3 模型求解

将式(3)分别代入式(1)及式(2)中, 整理可得

$$\begin{cases} \frac{d^2\theta_1}{dt^2} = \frac{M - M_{\max} \sin [m(\theta_1 - \theta_2)]}{J_1 + J_{\text{monitor}}}, \\ \frac{d^2\theta_2}{dt^2} = \frac{M_{\max} \sin [m(\theta_1 - \theta_2)] - M_F - M_f}{J_2}. \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可看出: 流变仪磁力耦合传动过程物理模型为二阶非线性偏微分方程组。由流变仪测得外磁环扭矩测试值 M_{test} 和外磁环转速测试值 N_1 , 采用追赶法编程求解式(5), 可得内磁环的相关物理参数, 进而计算得到测试流体的流变参数。

通过对外磁环转速积分可得外磁环角度为

$$\theta_1 = \int N_1 \frac{\pi}{30} dt \quad (6)$$

根据外磁环的扭矩平衡公式(1)和磁力耦合特性公式(3)可以算出内磁环转动角度为

$$\theta_2 = \int \omega_1 dt - \frac{1}{m} \arcsin \left(\frac{M_{\text{test}} - (J_1 + J_{\text{monitor}}) \frac{d\omega_1}{dt}}{M_{\max}} \right) \quad (7)$$

式中, w_1 为外磁环角速度, rad/s 。

对内磁环转动角度求导可得到内磁环转速 N_2 为

$$N_2 = \frac{30 d\theta_2}{\pi dt} \tag{8}$$

根据内外磁环扭矩平衡公式(1)和(2)可得到负载扭矩 M_F 为

$$M_F = M - (J_1 + J_{\text{monitor}}) \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} - J_2 \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} - M_f \tag{9}$$

根据运动参数进行流变参数的换算,可得到剪切应力 τ 为

$$\tau = \frac{M - (J_1 + J_{\text{monitor}}) \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} - J_2 \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} - M_f}{2\pi R_1^2 H} \tag{10}$$

式中, R_1 为转子半径, mm ; H 为转子高度, mm 。

表 1 常压条件下 20 ℃ 时标准黏度液基本物性参数

Table 1 Basic physical parameters of standard viscosity liquid at ambient pressure under 20 ℃

标物编号	标称黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	运动黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	特征时间/ ms	
					$d=0.712 \text{ mm}$	$d=1.346 \text{ mm}$
GBW 13608	500	972.10	544.14	559.77	0.906	2.305
GBW 13609	1000	937.69	912.37	937.69	0.541	1.376
GBW 13610	2000	974.20	2325.90	2387.50	0.212	0.541
GBW 13611	5000	973.70	4963.30	5097.40	0.099	0.253

2.1 磁力耦合式流变测试系统内磁环真实流变信息求解

2.1.1 内磁环转速

根据恒剪切速率加载条件下测得不同标准黏度液外磁环加载扭矩 M 和外磁环转速 N_1 , 利用磁力耦合传动物理模型计算得到内磁环转速 N_2 。

图 5 为不同标准黏度液在 20 s^{-1} (对应转速为 9.3 r/min)。恒剪切速率加载条件下启动时内磁环转速、外磁环转速随时间变化曲线。由图 5 可以看出,启动初始时刻内磁环启动滞后于外磁环;且随着时间增加,内磁环转速震荡上升,最终内外磁环达到同一转速。

同样比较 40 s^{-1} 剪切速率加载条件下启动时内磁环转速、外磁环转速随时间的变化关系,结果如图 6 所示。比较图 5 和图 6 可以看出, 20 s^{-1} 加载条件下内磁环的转速震荡比 40 s^{-1} 的明显。

表 2 为不同标准液在不同剪速加载条件下启动时内磁环转速波动幅度。由表 2 可以看出,黏度相同情况下, 1 s^{-1} 恒剪速加载条件下内磁环转速的波动幅度最大。随着剪切速率增大,内磁环转速波动幅度逐渐减小。剪切速率加载条件相同情况下,黏度为 $4963.3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的黏度液内磁环

根据牛顿内摩擦定律,故表观黏度 μ_{ap} 为

$$\mu_{\text{ap}} = \frac{M - (J_1 + J_{\text{monitor}}) \frac{d^2 \theta_1}{dt^2} - J_2 \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} - M_f}{2\pi R_1^2 H (N_2 / C_{\text{SR}})} \tag{11}$$

式中, C_{SR} 为剪切速率-转速转换系数,数值为 $2.1478 \text{ s}^{-1}/\text{min}^{-1}$ 。

2 结果及其讨论

实验所用的 4 种牛顿流体为国家计量科学院提供的标准黏度液,标物编号分别为 GBW13608、GBW13609、GBW13610 和 GBW13611,其基本物性参数如表 1 (d 为内、外转筒间隙)所示。标准黏度液是在常压条件下, 20°C 时标定的标准流体,可用于流变仪测试系统的测量标定。

转速波动幅度最大,随着黏度降低,内磁环转速波动逐渐减小。

表 2 不同标准液恒剪速启动时内磁环转速波动幅度

Table 2 Fluctuation of internal rotor speed at constant shear rate startup of different standard fluids

剪切速率/ s^{-1}	r/min			
	GBW13608	GBW13609	GBW13610	GBW13611
1	0.022 1	0.029 9	0.231 7	0.280 0
5	0.013 4	0.015 1	0.227 8	0.262 3
10	0.006 0	0.010 5	0.201 2	0.258 9
20	0.005 3	0.008 7	0.199 5	0.236 3
40	0.004 3	0.006 8	0.175 7	0.203 0
50	0.003 6	0.004 9	0.166 0	0.192 4
80	0.001 2	0.002 5	0.156 2	0.184 6

由此可以得出:标准液黏度越大,剪切速率越小,内磁环转速波动幅度越大。这是由于内、外磁环的转动受磁力偶合扭矩以及负载扭矩的影响,而流变仪磁力耦合扭矩是以内、外磁环转角差为自变量的正弦周期函数。因此在流变仪初始启动阶段,内磁环转速震荡上升,当流变仪稳态剪切时,其内、外磁环转角差为恒定常数,内、外磁环达到同一转速。由于加载边界反馈控制时调节频繁,剪速会呈现明显波动,且在试样黏度较大时更为明显。

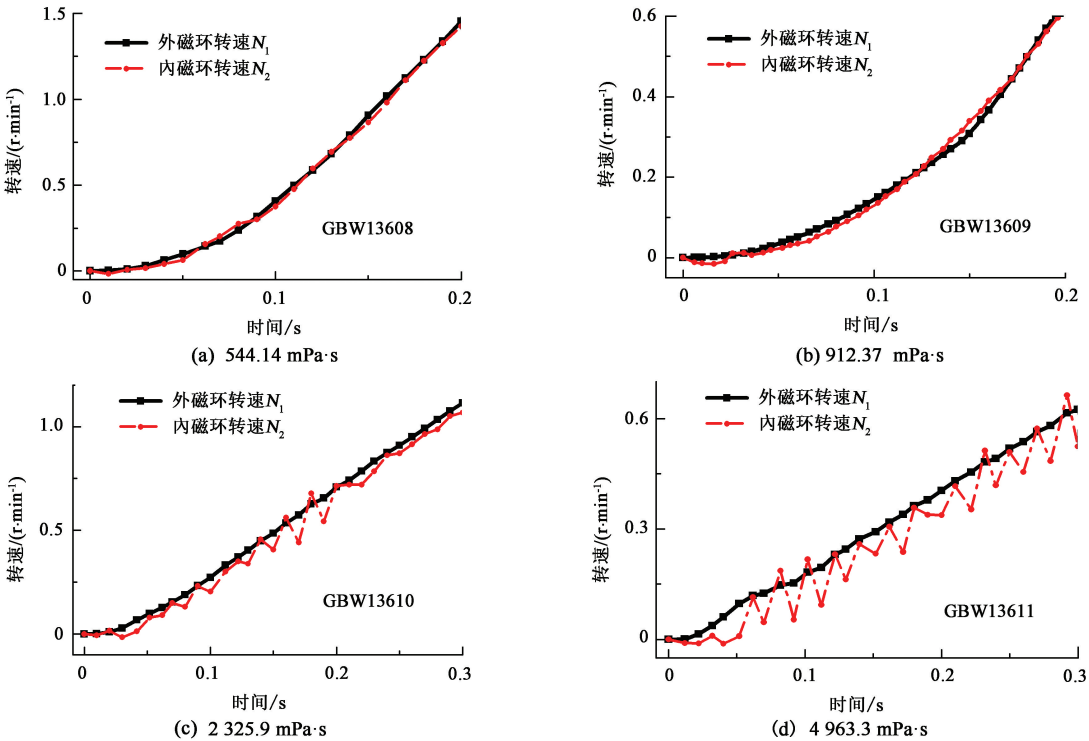


图 5 不同标准液恒剪速启动时内、外磁环转速随时间变化曲线(20 s⁻¹)

Fig. 5 Variation of internal and external rotation speeds with time at constant shear speed of different standard liquids (20 s⁻¹)

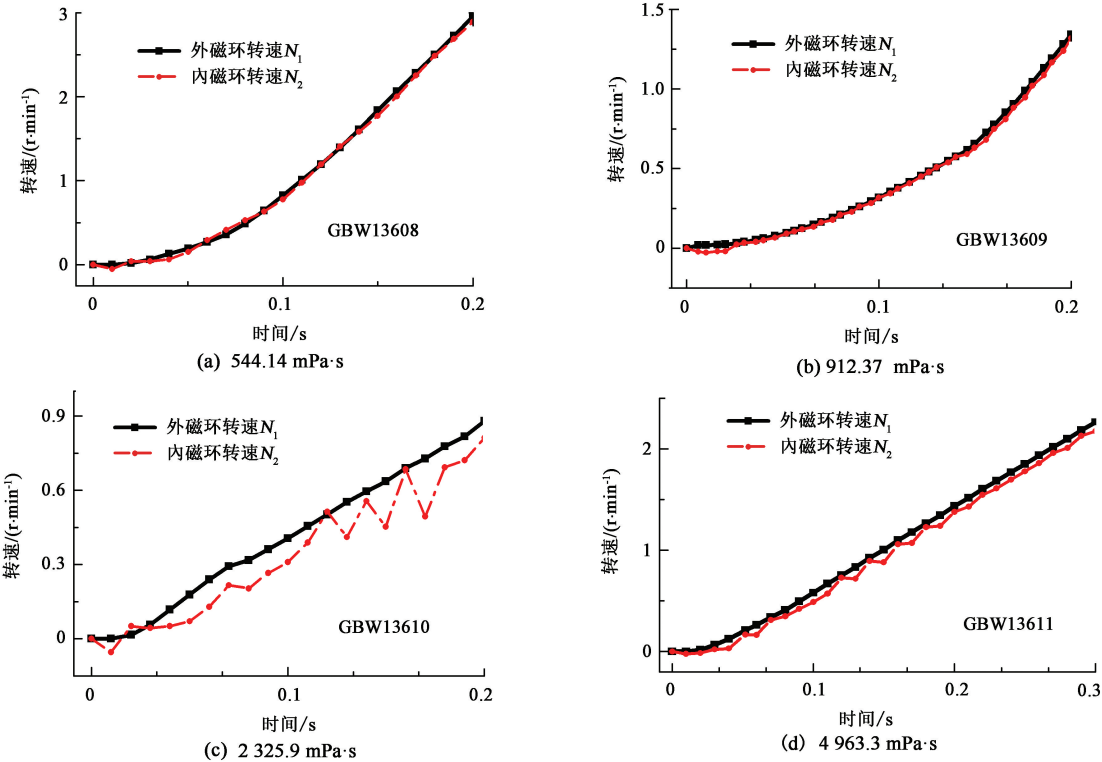


图 6 不同标准液恒剪速启动时内、外磁环转速随时间变化曲线(40 s⁻¹)

Fig. 6 Variation of internal and external rotation speeds with time at constant shear speed of different standard liquids (40 s⁻¹)

2.1.2 内磁环剪切应力

根据恒剪切速率加载条件下测得不同标准液外磁环加载扭矩和外磁环转速,利用公式(10)求解得到内磁环的剪切应力。并与外磁环测得的剪切应力进行比较,得到内、外磁环的剪切应力随时间变化曲

线(图7、8)。20 s⁻¹恒剪速加载条件下的结果如图7所示。流变仪初始启动阶段,内磁环转子表面的剪切应力存在从零增加至预设值的过程,并且内磁环转子表面的剪切应力要低于外磁环的剪切应力。

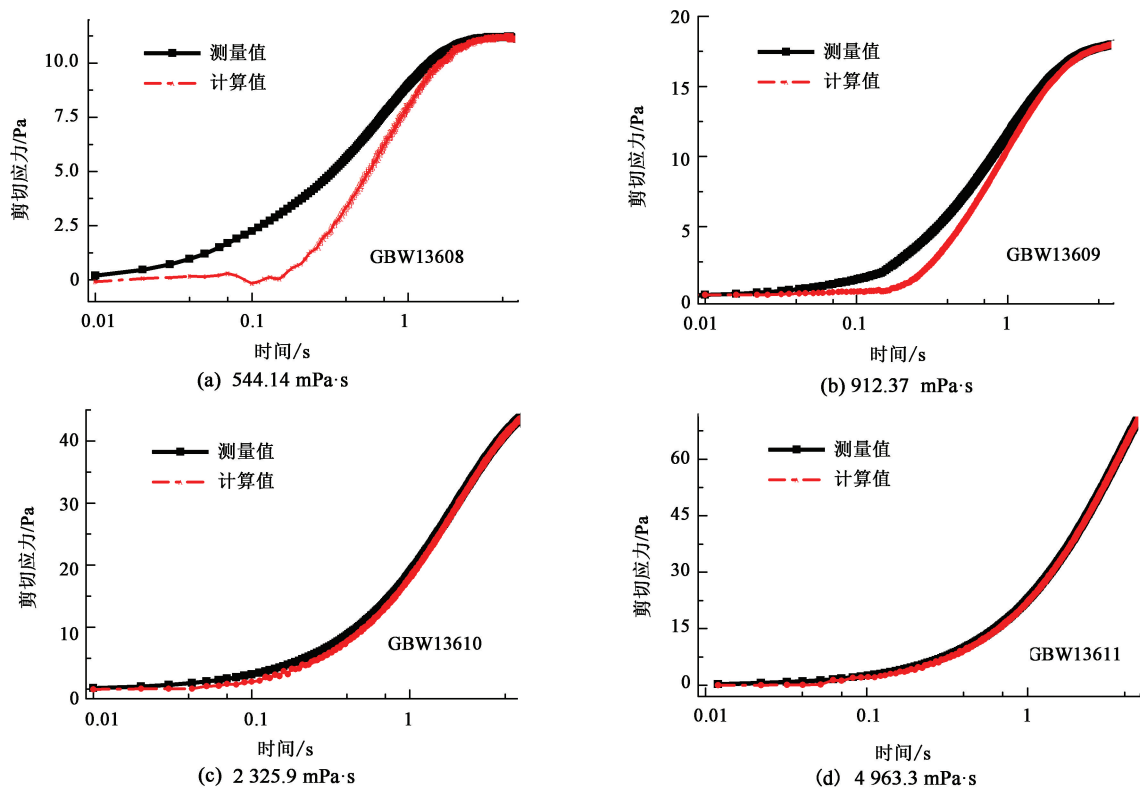


图7 不同标准液恒剪速启动时内、外磁环剪切应力随时间变化曲线(20 s⁻¹)
Fig.7 Variation of internal and external magnetic ring stress with time when starting with constant shear speed of different standard liquids (20 s⁻¹)

同样对 40 s⁻¹恒剪切速率加载条件下的内外磁环剪切应力进行比较,可以看出同 20 s⁻¹恒剪切速率加载条件下的内磁环剪切应力变化规律一致。比较图7、8可以看出,内磁环剪切应力明显低于外磁环测得的剪切应力,并且黏度越小,剪切速率越大,内、外磁环表面的剪切应力差异越明显。这是由于剪切速率越大,黏度越小,则用于加速旋转系统的扭矩损失和摩擦损失越大,真正用于剪切流体的剪切力越小,因此内、外磁环对应的剪切应力差异越大。

2.1.3 牛顿流体黏度修正

根据恒剪切速率加载条件下测得不同标准黏度液外磁环加载扭矩 M 和外磁环转速 N_1 ,利用公式(11)求解得到标准液的真实黏度。并与实测黏度进行比较,得到不同标准液恒剪速条件下黏度测量值和修正值。

图9为20 s⁻¹恒剪速加载条件下黏度测量值和修

正值。由图9可看出实测黏度曲线随时间先增大后减小直到达到稳态,这是由于实测黏度的计算并未区分瞬态测试过程中总扭矩和真正用于剪切流体的扭矩,以及瞬态测试过程中外磁环转速和内磁环转速。因此,流变仪数据处理系统瞬态过程的黏度是存在偏差的。而利用流变仪磁力耦合传动过程物理模型求解得到的黏度相比实测黏度明显越接近牛顿流体的真实黏度。但求解得到的黏度仍然存在一定的波动情况,主要原因有:①求解过程中需用到内外磁环角位移的二阶导数,而流变仪测试数据取点不够密,导致黏度修正值存在一定的波动;②在较低剪切速率加载条件下,宝石轴承的摩擦扭矩 M_f 可能并非严格与转速成线性关系;③加载边界的反馈控制调节频繁,所采集的应力或剪速会呈现轻微波动,黏度作为应力与剪速的计算值也不可避免地出现数据波动;④模型假设测量转子表面的转动参数等于测量物料的转动参数,忽略了测试物料的惯性。

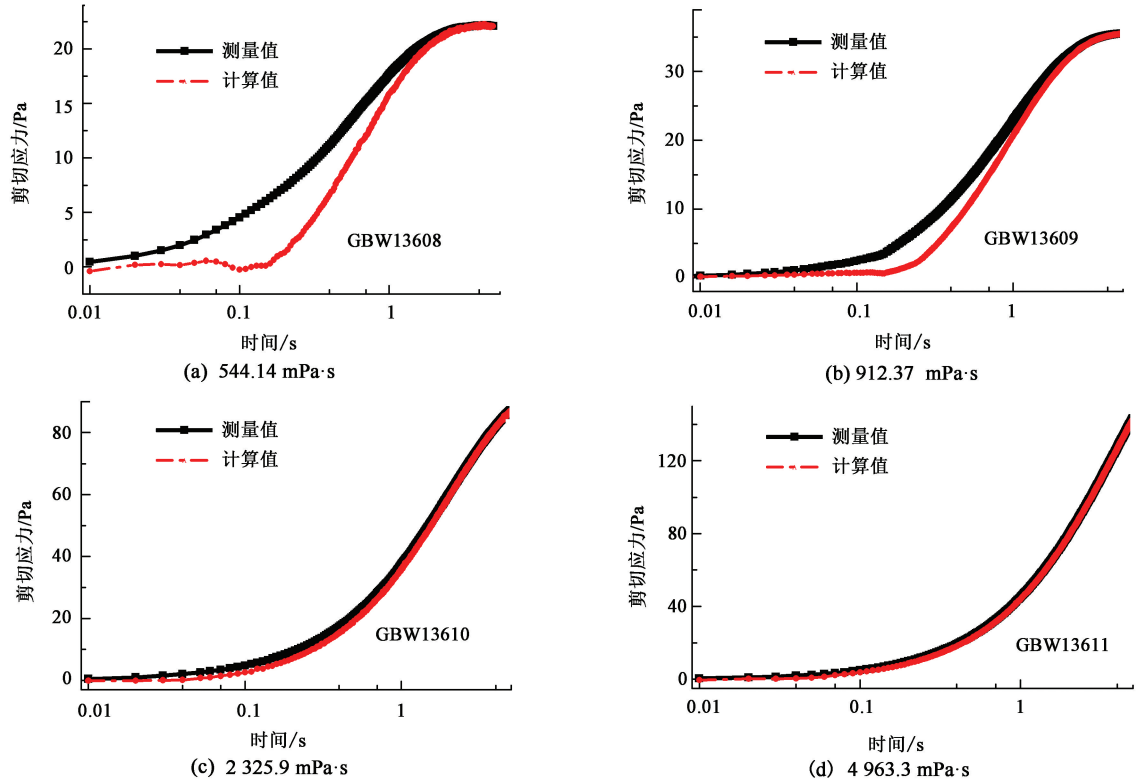


图 8 不同标准液恒剪速启动时内、外磁环剪切应力随时间变化曲线 (40 s^{-1})

Fig.8 Variation of internal and external magnetic ring stress with time when starting with constant shear speed of different standard liquids (40 s^{-1})

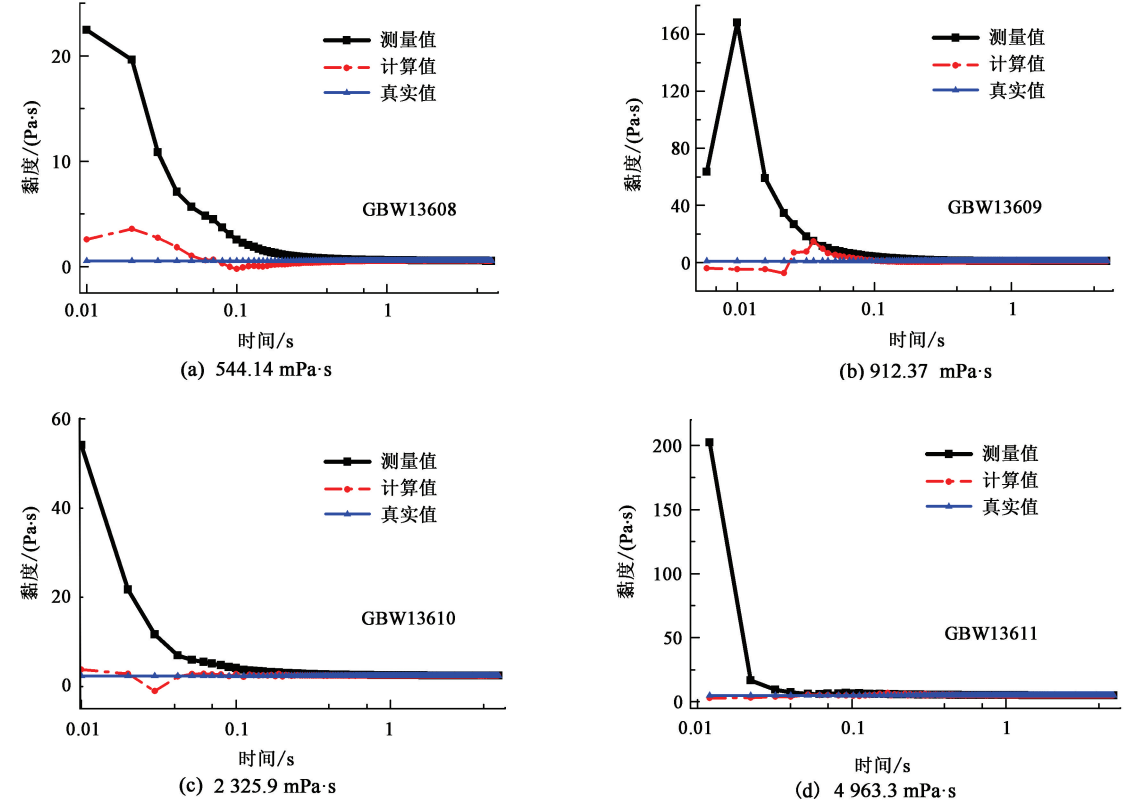


图 9 不同标准液恒剪速条件下黏度实测曲线和修正曲线 (20 s^{-1})

Fig.9 Variation between viscosity test and correction under constant shear rate of different standard liquid (20 s^{-1})

图10为 40 s^{-1} 恒剪切速率加载条件下的表观黏度测量值和修正值。比较图9和图10,可以看出黏度越大,剪切速率越大,计算得到的黏度越接近真实值。

由于黏度和剪切速率越大,外磁环剪切速率线性增加,不会出现大幅度波动。因此内外磁环角位移的二阶导数比较连续,黏度修正值越接近真实值。

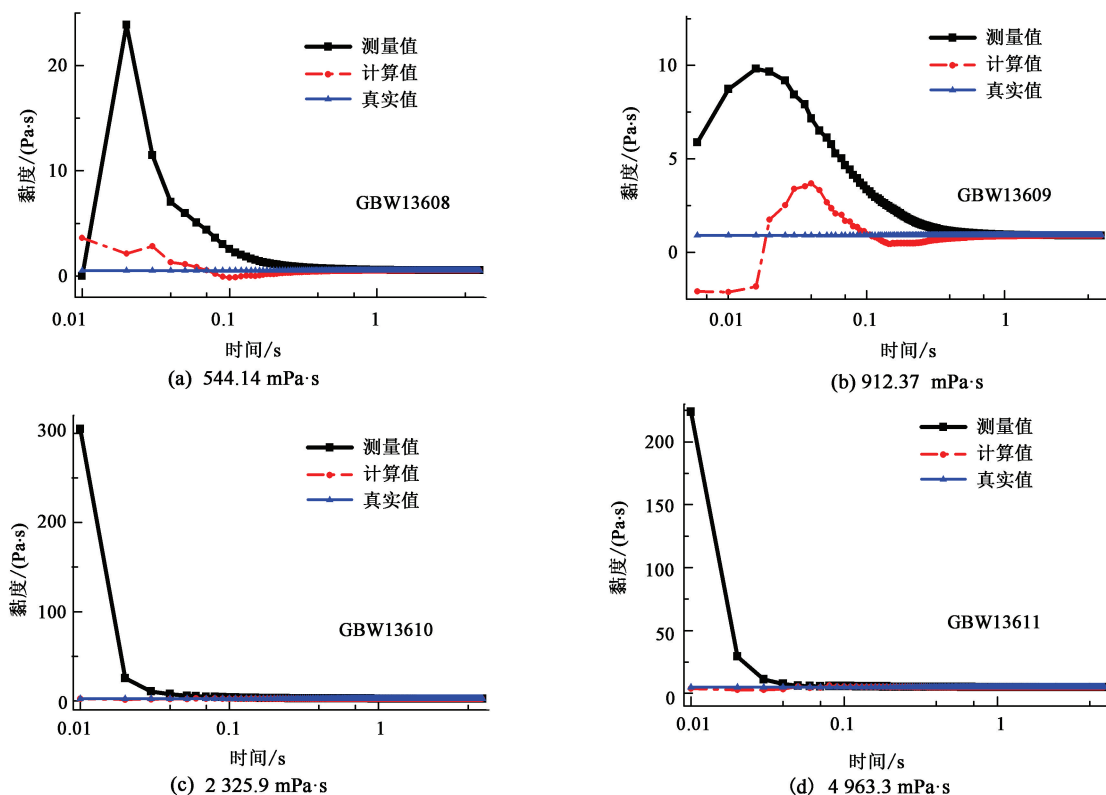


图10 不同标准液恒剪速条件下黏度实测曲线和修正曲线(40 s^{-1})

Fig. 10 Variation between viscosity test and correction under constant shear rate of different standard liquid (40 s^{-1})

3 结 论

(1)启动初始时刻内磁环启动滞后于外磁环,随着时间增加,内磁环转速震荡上升,最终内外磁环达到同一转速。并且标准液黏度越大,剪切速率越小,内转子波动幅度越大。

(2)流变仪初始启动阶段,内、外磁环真实剪切应力存在从零增加至预设值的过程,并且内磁环的剪切应力要低于外磁环的剪切应力。当黏度越小,剪切速率越大时,内、外转子表面剪切应力差异越大。

(3)牛顿流体黏度修正曲线相比实测黏度曲线结果更趋近于牛顿流体的真实黏度。黏度越大,剪切速率越高,黏度修正效果越好,应尽量选择高剪切速率研究高压条件下物料的流变性。

参考文献:

[1] 赵胜英,鄢捷年,舒勇,等. 油基钻井液高温高压流变参数预测模型[J]. 石油学报, 2009,30(4):603-606.

ZHAO Shengyin, YAN Jienian, SHU Yong, et al. Prediction model for rheological parameters of oil-based drilling fluids at high temperature and high pressure[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(4):603-606.

[2] 管志川. 温度和压力对深水钻井油基钻井液液柱压力的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4):48-52,57.

GUAN Zhichuan. Effect of temperature and pressure on fluid column pressure of wellbore drilling fluid in deep-water drilling with oil-based drilling fluid[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(4):48-52,57.

[3] 丁彤伟,鄢捷年,冯杰. 抗高温高密度水基钻井液体系的室内实验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007,31(2):73-78.

DING Tongwei, YAN Jienian, FENG Jie. Laboratory experimental study on high temperature and high density water-based drilling fluid system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(2):73-78.

[4] 孙宝江,孙小辉,王志远,等. 超临界 CO_2 钻井井筒内

- 流动参数变化规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3): 88-95.
- SUN Baojiang, SUN Xiaohui, WANG Zhiyuan, et al. Variation of flow parameters in supercritical CO₂ drilling wellbore[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3): 88-95.
- [5] 李向良. 温度和注入压力对 CO₂ 驱油效果的影响规律实验[J]. 油气地质与采率, 2015, 22(1): 84-87.
- LI Xiangliang. Experimental study on the effect of temperature and injection pressure on CO₂ flooding[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 84-87.
- [6] 崔茂蕾, 王锐, 吕成远, 等. 特高含水油藏 CO₂ 微观驱油机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 119-125.
- CUI Maolei, WANG Rui, LÜ Chengyuan, et al. Research on microcosmic oil displacement mechanism of CO₂ flooding in extra-high water cut reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(1): 119-125.
- [7] 李传宪, 阎孔尧, 杨爽, 等. CO₂ 溶胀和 CH₄ 协同作用下长庆原油流动性的改善[J]. 石油化工高等学校学报, 2017, 30(5): 86-92.
- LI Chuanxian, YAN Kongyao, YANG Shuang, et al. CO₂ swelling and synergistic effect of CH₄ on rheological improvement of Changqing crude oil[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2017, 30(5): 86-92.
- [8] 王雅春, 赵振铎. 压力对二氧化碳驱油效果影响的实验研究[J]. 特种油气藏, 2017, 24(4): 132-135.
- WANG Yachun, ZHAO Zhenduo. Experimental research on the effect of pressure on CO₂ oil displacement efficiency[J]. Special Oil and Gas Research, 2017, 24(4): 132-135.
- [9] 郭平, 彭鹏商. 不同种类气体注入对原油物性的影响研究[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(3): 57-60.
- GUO Ping, PENG Pengshang. Influences of injection gas on physical behavior of crude oil[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(3): 57-60.
- [10] 于涛. 溶气原油流变性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- YU Tao. Studies on the rheological property of live crude oil[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [11] 夏炳焕. 天然气在原油中的溶解性及溶气原油流变性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- XIA Binghuan. Research on natural gas solubility in crude oil and rheological property of live crude oil[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [12] 鲁彦伯. 溶气原油流变性研究及模型的建立[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- LU Yanbo. Research on rheological property of live crude oil and foundation of model[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [13] 李保平. 溶气原油溶气规律及流变规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
- LI Baopin. Research on resolve law and rheological law of live crude oil[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [14] PARKH E, DEALY J M. Effects of pressure and supercritical fluids on the viscosity of polyethylene[J]. Macromolecules, 2006, 39(16): 5438-5452.
- [15] WINGERT M J, SHUKL A S, KOELLING K W, et al. Shear viscosity of CO₂-plasticized polystyrene under high static pressures[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(11): 5460-5471.
- [16] RUIEN H. The rheology of crude oil and carbon dioxide mixtures[D]. London: Imperial College, 2016.
- [17] LAYAD A. Determination of magnetic coupling from torque curve[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 1999, 192(2): 353-362.
- [18] MOHAMMADI S, MIRSALI M M. Double-sided permanent-magnet radial-flux eddy current couplers: three-dimensional analytical modelling, static and transient study, and sensitivity analysis[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(9): 665-679.
- [19] 张忠田. 同轴圆筒式磁力耦合器数字化设计及工作特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2007.
- ZHANG Zhongtian. Digital design and characteristics research of coaxial cylinder style magnetic coupler[D]. Shenyang: Northeastern University, 2007.
- [20] LAUGER J, STETTIN H. Differences between stress and strain control in the non-linear behavior of complex fluids[J]. Rheol Acta, 2010, 49(9): 909-930.
- [21] 肖文涛, 张国忠, 刘坤, 等. 同轴圆筒旋转黏度计测量误差的分析与修正[J]. 现代科学仪器, 2012, 2: 114-118.
- XIAO Wentao, ZHANG Guozhong, LIU Kun, et al. Analysis and correction of measurement errors of coaxial cylinder rotary viscometer [J]. Modern Scientific Instruments, 2012, 2: 114-118.
- [22] VARSAKELI S C, PAPAEXANDRIS M V. Stability analysis of Couette flows of spatially inhomogeneous complex fluids[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering, 2015, 471(2182): 20150529.

- [23] JI-SEOK L, YONG-SEOK K, KI-WON S. Transient rheological behavior of natural polysaccharide xanthan gum solutions in start-up shear flow fields: an experimental study using a strain-controlled rheometer [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2015, 27(3): 227-239.
- [24] 徐睿好, 刘刚, 陈雷, 等. 同轴圆筒流变仪初始瞬态黏度的解析与数值研究[J]. 化工学报, 2016, 67(5): 1784-1790.
- XU Ruiyu, LIU Gang, CHEN Lei, et al. Analytical and numerical studies on apparent viscosity in coaxial cylinder rotational rheometer during initial unsteady stage [J]. CIESC Journal, 2016, 67(5): 1784-1790.
- [25] CHEN Lei, LIU Gang, ZHANG Guozhong, et al. Transient stage comparison of Couette flow under step shear stress and step velocity boundary conditions[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 75: 232-239.
- [26] LUBIN T, MEZANI S, REZZOUG A. Simple analytical expressions for the force and torque of axial magnetic couplings[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 536-546.
- [27] DAI X, LIANG Q, REN C, et al. Analytical solution of magnetic field in permanent-magnet eddy-current couplings by considering the effects of slots and iron-core protrusions[J]. Journal of Magnetism, 2015, 20(3): 273-283.
- [28] KIM J M, CHOI Y, KOO M M, et al. Characteristic analysis of tubular-type permanent-magnet linear magnetic coupling based on analytical magnetic field calculations [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [29] SHIN H J, CHOI J Y, JANG S M, et al. Design and analysis of axial permanent magnet couplings based on 3D FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2013, 49(7): 3985-3988.
- [30] ZHANG B, WAN Y, LI Y, et al. Optimized design research on adjustable-speed permanent magnet coupling [J]. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2013, 113(8): 380-385.

(编辑 沈玉英)