

Fann 50SL 流变仪测试高粘流体爬杆问题的机理研究及解决方法

邓都都, 赵建刚, 陈延滨, 石凯, 王琪, 李进, 许云博, 王雪竹
(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: Fann 50SL 高温高压流变仪作为经典的钻井液流变性能测试仪器, 为高温钻井液体系的研发发挥了巨大的作用。但采用原装的 Fann 50SL 流变仪做高粘流体的流变性能测试时, 发现流体容易出现爬杆的现象, 这个问题会导致测试数据不准确, 实验的重复性较差, 甚至会由于上爬的样品污染外转筒轴承, 导致轴承锈死和驱动电机烧毁的严重问题。通过分析这类流体的流动特性和 Fann 50SL 的测量原理, 找出了影响高粘流体测试数据准确性的原因, 并据此设计了 2 款防爬杆结构, 实际安装在 Fann 50SL 流变仪上使用后, 有效地解决了高粘流体的爬杆问题。

关键词: 流变性能; 高粘流体; 爬杆效应; 高温高压流变仪

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)10-0079-05

Mechanism Research on Upward Climbing in High Viscosity Fluid Testing by Fann 50SL and the Solution/DENG Du-du, ZHAO Jian-gang, CHEN Yan-bin, SHI Kai, WANG Qi, LI Jin, XU Yun-bo, WANG Xue-zhu (Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: As classic drilling fluid rheological properties test instrument, Fann 50SL HTHP (high temperature and high pressure) rheometer has played a great role in the research and development of high temperature drilling fluid system. But the fluid is prone to climb upward when the original Fann 50SL HTHP rheometer is used to test rheological properties of high viscosity fluid, which will result in inaccurate test data and poor reproducibility of experiment, and even polluted bearing lead to serious problems of bearing rust and driving motor burning. Through the analysis on the flow characteristics of the high viscosity fluid and the measuring principle of Fann 50SL, the reasons influencing the accuracy of test data are found out, on this basis, 2 kinds of prevent-climbing structures are designed and installed on Fann 50SL HTHP rheometer, the climbing upward is effectively solved.

Key words: rheological properties; high viscosity fluid; climbing upward effect; HTHP rheometer

0 引言

随着现代钻探技术的日益发展, 钻井越来越深, 对于钻井液在高温高压条件下的流变性能要求更为苛刻, 如何准确地检测钻井液在高温高压条件下的流变性能至关重要。Fann 50SL 流变仪作为一款经典的高温高压流变仪在检测各类流体高温高压流变性能方面应用广泛, 为高温高压钻井液体系的研发发挥了巨大的作用。大量的实验表明, Fann 50SL 高温高压流变仪具有测试精度高、操作使用方便等优点^[1-4]。

但在使用 Fann 50SL 测试诸如高分子聚合物溶液、压裂液、冻胶等高粘流体样品时容易出现流体爬杆的问题。样品爬杆会直接影响测量数据的稳定性

和重复性, 而且测试结束后在轴的上方容易残留大量的实验液体, 长期积累会导致液体进入测试粘度的轴承和驱动外转筒的轴承, 这不仅会腐蚀轴承影响设备的正常运转, 严重情况会导致轴承锈死而烧毁电机, 影响设备的使用。

1 高粘流体爬杆现象的分析

为了观察高粘流体的爬杆现象, 选取 2 种流体来进行实验, 一种为水, 另一种为聚丙烯酰胺 (PAM) 的水溶液。在常规低速搅拌机的带动下搅动, 可以明显地观察到水由于受离心力的作用, 中央液面呈凹形, 液体沿着杯壁上爬, 实验现象见图 1; 而 PAM 水溶液则正好相反, 中间的液体沿着杆往上

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 国家科技部重大科学设备开发专项“超高温高压钻井液流变仪的研发及产业化”(编号: 2012YQ050242)

作者简介: 邓都都, 男, 汉族, 1989 年生, 硕士, 地质工程专业, 从事钻井液仪器研发与钻井液性能测试等研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号探工楼 102 室, duducugh@163.com。

爬,离心力越大,爬杆越高,实验现象见图2。



图1 水搅动产生离心的现象



图2 PAM溶液搅动产生的爬杆现象

上述在聚丙烯酰胺溶液中出现的爬杆现象也称 Weissenberg 效应^[5],早在1944年 Weissenberg 在英国伦敦帝国学院就公开了类似的实验。对于高粘流体,在旋转过程中会做向心运动并沿低速搅拌机的旋转杆向上爬动,实验中可以明显地观察到流体液面变成凸形,这种现象即使在较低的转速时也能够发生。现在普遍认为该现象的产生是由于这类流体流动不稳定性导致的。

对于粘弹性流体的流动不稳定性,国内外的学者进行了大量的实验研究^[6-9],最为经典的装置为 T-C (Taylor - Couette) 流动装置,测试原理见图3。该装置是将测试液体放在2个独立旋转同心圆筒中间,然后观察各类流体在圆筒旋转过程中的流态变化。该实验装置以其结构简单、存在封闭流动系统并且能产生丰富的不稳定流态等优点,一直作为流体不稳定性研究的经典装置。Couette^[10]首次设计出了该装置,并利用该装置进行了流体粘度的测量,Fann 50SL 实际上就是一款 Couette 式粘度计。

聚合物溶液作为一种高分子溶液,分子量一般都在上百万以上,是一种典型的高粘流体。研究表明,聚合物的长分子链由于流动而受到拉伸作用,

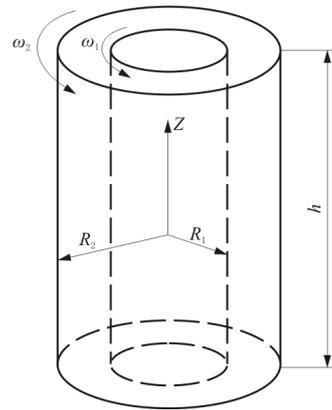


图3 T-C流动装置

但是流动变化引起聚合物分子的变形需要一定的松弛时间才能恢复,弹性势能因此储存在了受到拉伸作用的聚合物分子链中,并最终在流动的旋涡结构中释放,这种势能的释放就会诱发聚物流体的流动不稳定^[11]。

高粘的聚合物溶液流动时出现的 Weissenberg 效应,可以说是一种典型的流体弹性诱发的不稳定现象。当采用 Fann 50SL 进行测试时,由于外筒的高速旋转带动聚物流体产生了强烈的剪切流动,其周围的聚合物分子在周向曲线流动方向受到剧烈的拉伸作用,把这些受到强烈拉伸作用的分子与向外扩张的橡皮筋类比,其必然会产生一个反向的环向应力,该应力的存在使得流体向圆柱轴心方向流动,碰到圆柱表面便沿着表面上爬^[12],其上爬原理如图4所示。一旦开始上爬,由于高粘流体的分子间的作用力相互拉扯,就会逐步上移,速度越快,时间越久,爬杆问题越明显。

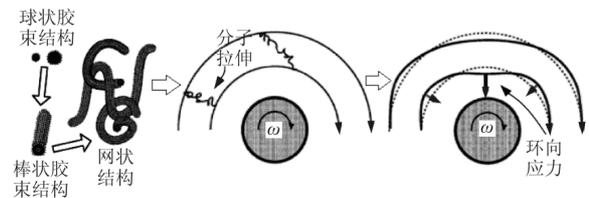


图4 聚物流体 Weissenberg 效应的产生

2 Fann 50SL 高温高压流变仪测试原理分析

Fann 50SL 高温高压流变仪是一款经典的测量各类流体粘度的设备,其主要用于测量各类流体在高温高压状态下的流变性能。该设备测试温度最高 260 °C,测试压力最高 1000 psi (6.90 MPa),配合专用的测试软件,能够自动进行实验过程,具有简单方便、性能可靠的特点。

Fann 50SL 的粘度测试原理与 Fann 35 直读式旋转粘度计相同,具体原理见图 5。整个结构由弹簧、传感器、轴和内外筒组成,外筒由高精度的驱动电机带动,可以控制其在固定的转速下旋转,内筒固定在轴上,轴上端连接着扭力弹簧。测试时在电机驱动下,外筒以固定转速带动流体旋转;流体旋转过程中会产生剪切应力,作用在内筒上,使得内筒带动轴产生一定的偏角,通过传感器测量偏角就能够计算出在该剪切速率下的剪切应力的大小,根据流体力学给出的计算公式,流体的粘度即为剪切应力与剪切速率的比值。

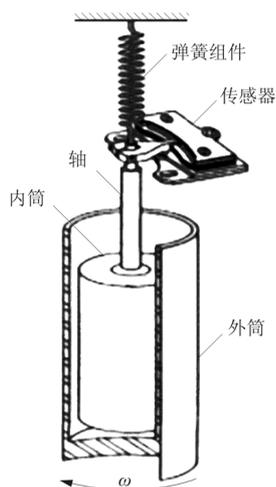


图 5 Fann 50SL 粘度测试原理示意图

根据测试原理可得流体粘度 η :

$$\eta = \tau/\gamma = K\Theta(R_0^2 - R_1^2)/(4\pi\omega LR_0^2 R_1^2)$$

式中: K ——弹簧的劲度系数, $\text{dyne} \cdot \text{cm}/(\circ)$; Θ ——扭力弹簧的角度, (\circ) ; R_0 ——样品杯的半径, m ; R_1 ——内筒的半径, m ; ω ——杯体旋转的角速度, s^{-1} ; L ——内筒的长度, m 。

上式中 R_0 为 1.8415 cm,一般为定值。表 1 中给出了常用的几种弹簧的 K 值和内筒的尺寸 (L 、 R_1),通过改变上述参数能够得到不同的流体粘度测量范围。

采用 Fann 50SL 进行流体粘度测试时,测试前整个杯体内部结构如图 6 所示,当外筒以一定的角速度 ω 旋转时,由于高粘的聚物流体的 Weissenberg 效应,导致流体通过内筒爬到了杯体的上部,并沿着轴逐步往上蹿,见图 7。该问题的出现会导致测试数据出现一定的偏差:首先高粘的聚物流体爬到了内筒的上部,导致实际流体与内筒的接触面积变小,根据 Fann 50SL 的测量计算公式,这会对

表 1 Fann 50SL 常用弹簧及内外筒尺寸组合

配件编号	劲度系数 $K/$ [$\text{dyne} \cdot \text{cm} \cdot (\circ)^{-1}$]	内筒尺寸/cm	
		R_1	L
弹簧	#420	2×10^4	
	#430	4.1×10^4	
	#440	8.2×10^4	
内筒	B1	1.7245	7.62
	B2	1.2276	7.62
	B3	0.8622	7.62
	B4	0.8622	3.81
	B5	1.5987	7.62

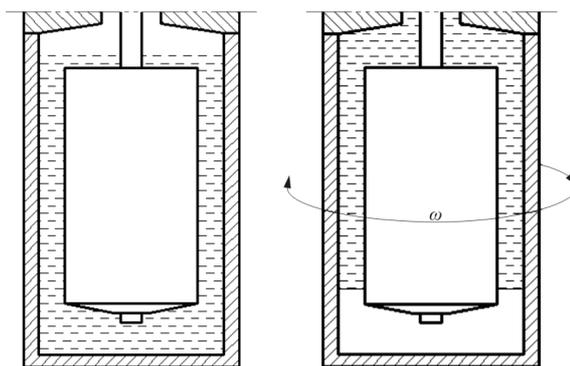


图 6 测试前杯体内部状态 图 7 旋转过程中杯体内部状态

粘度的测试结果产生影响;聚合物分子爬到轴后会缠绕在轴上面,这部分残留的聚合物也会对轴的扭转产生一定的阻力,导致上部的弹簧的扭力测试值不准。最终这些影响因素会导致用户在使用 Fann 50SL 测试高粘流体时出现测试数据不够准确,实验重复性较差的问题。

而且上蹿的聚合物液体极易进入轴部的大小轴承中,导致轴承腐蚀严重,轴承摩擦力变大,会在出现测试软件上初始扭矩不归零的问题,也会导致测试过程中扭力弹簧的测量值出现较大偏差。长期测试高粘流体会腐蚀轴承导致轴承坏死,降低设备的使用寿命,严重的情况下会烧毁电机,实际测试过程中出现的问题见图 8~10。

3 爬杆问题的解决办法探讨

通过对高粘流体的流动特性分析,可以看出爬杆效应是这类流体的固有特性,在高剪切速率条件下,这类聚物流体不可避免地会沿着内筒上蹿。采用 Fann 50SL 进行测试时候,如何尽可能地减少流体上蹿是解决这一问题的关键。

设计了一种防爬杆的卡套,原理图与实物图见图 11 和图 12。卡套直接固定在轴上,与外轴间有一定的余量,不会对轴的扭动产生影响。当液体沿杆



图8 高粘聚合物流体上蹿



图9 小轴承被腐蚀



图10 大轴承锈死

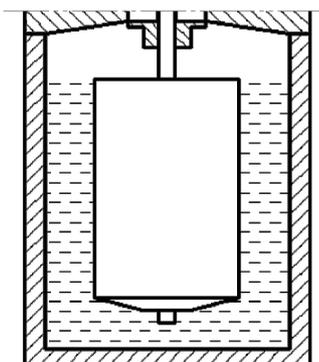


图11 防爬杆卡套原理图

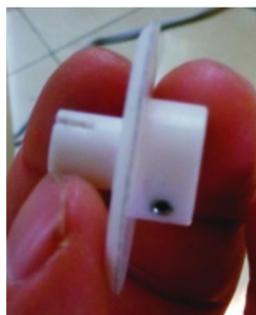


图12 防爬杆卡套实物图

爬到卡套位置时就会被挡住,从而阻止了聚合物的上蹿。卡套采用聚四氟乙烯材料,具有良好的耐温耐腐蚀性能,适合测试各类流体高温高压下的流变

性能。该结构具有简单实用,方便安装与拆卸,能够阻止大部分的流体上蹿的优点;不足之处是测试时间比较长时,会有少量的流体通过间隙爬到上部。

为此,设计了另外一种螺旋防爬杆结构,原理图与实物图见图13和图14。该结构采用反扣螺纹,旋转时,聚合物流体通过反扣螺纹时候,螺纹在旋转时产生较大的向下的作用力自动带着液体向下走,从而达到阻止流体上爬的作用。该结构对于低粘与中粘流体在转速较低时能够发挥良好的效果,上蹿流体极少,但对于高粘流体在较高速度长时间旋转时,还是会有少量样品上蹿。

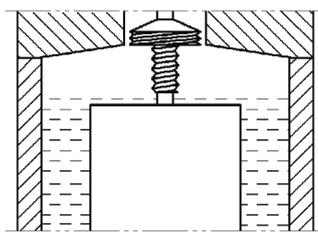


图13 螺旋防爬杆结构原理示意图



图14 螺旋防爬杆结构实物

采用上述的卡套结构,选择一种高粘流体进行Fann 50SL高温高压流体性能测试,选择测试温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试压力 600 psi (4.14 MPa),测试时间为 1 h ,测试结果见图15。由图15可以看出,该流体粘度高达 $1000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上,属于典型的高粘流体。实验结束后,取出卡套,发现轴上方的流体较少,防爬杆效果较好。

实际测试数据有一定波动,可能与杯体中的粘弹性较强的高粘流体流态不稳定有关系,但整体来看粘度的变化趋势明显,而且实验结束后发现测试流体基本都在杯体内部,上蹿的流体较少,实验数据具有较好的可信度。

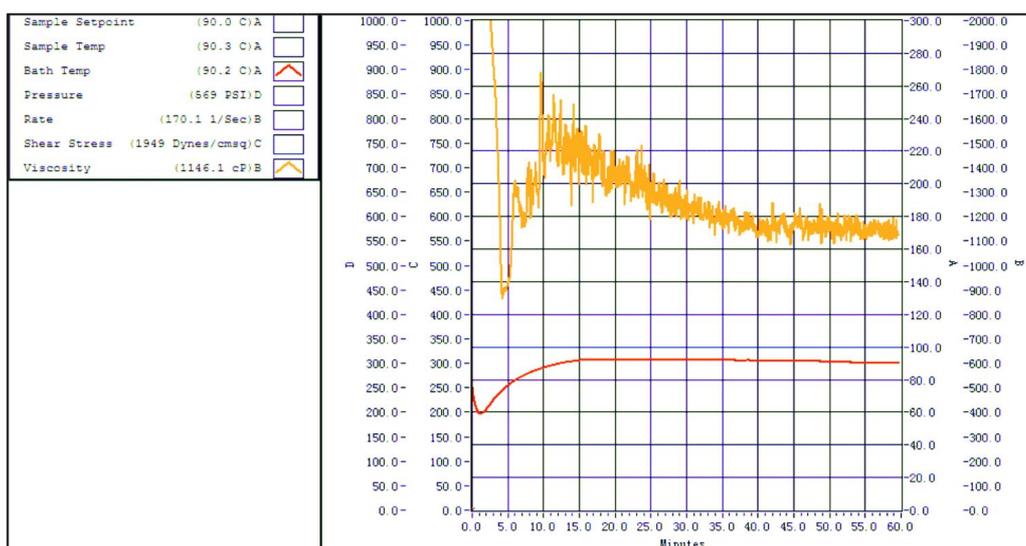


图 15 加上卡套后测试高粘流体实验结果

4 结论与展望

(1) 通过设计卡套与螺旋防爬杆结构, 能够有效地防止或减轻高粘流体的上蹿, 提高实验的准确性和重复性。

(2) 使用 Fann 50SL 测试高粘流体样品, 一定要注意控制样品的加量, 过量的液体易导致上蹿; 实验结束后一定要及时把上蹿的流体清理干净, 定期检查并更换相关配件, 这样才能提高设备的使用寿命。

(3) Fann 50SL 采用气体加压方式, 为了防止高粘流体样品的上蹿, 需要加装防样品爬杆装置。也可选择使用 Fann iX77 高温高压流变仪, 该设备采用液压油加压, 密闭效果好, 能够有效地防止样品爬杆。

参考文献:

- [1] 赵建刚, 韩天夫, 许云博. 高温高压泥浆流变性测试方法及其测试设备[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, (S1): 233 - 236.
- [2] 卜海, 孙金声, 王成彪, 等. 超高温钻井液的高温流变性研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, (4): 122 - 126.
- [3] 沈丽, 陈二丁, 张海青. 一种水基抗温钻井液的高温流变性研究[J]. 石油与天然气化工, 2014, (4): 428 - 432.
- [4] 赵胜英, 鄢捷年, 丁彤伟, 等. 抗高温高密度水基钻井液流变性研究[J]. 天然气工业, 2007, (5): 78 - 80, 154.
- [5] 王海林, 张青雷, 朱均. 同心旋转圆柱间黏弹性流的非线性动力学模型[J]. 摩擦学学报, 2000, (4): 296 - 299.
- [6] 阳倦成, 张红娜, 李小斌, 等. 黏弹性流体纯弹性不稳定现象研究综述[J]. 力学进展, 2010, (05): 495 - 516.

(上接第 87 页)

通过对动力头的设计和改进, 我们认为在满足工艺要求的前提下, 动力头的结构应力求简单、可靠、维修方便, 便于在海洋上工作, 减轻操作人员的劳动强度。

参考文献:

- [1] 武汉地质学院, 等. 岩心钻探设备及设计原理(第一版)[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [2] 肖燕波, 谭国平, 等. 立轴式岩心钻机设计开发的新思路[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(9): 32 - 34.
- [3] 鄢泰宁, 等. 岩土钻掘工程学[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2001.
- [4] 邓代强, 黄筱军, 钟路, 等. 深海地质取样的高科技——浅地层岩心钻机的简介[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(6): 43 - 44.
- [5] 万步炎, 黄筱军, 朱伟亚, 等. 深海浅地层岩心取样钻机的研制[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(S1): 49 - 51.
- [6] 丁六怀, 高宇清, 等. 深海采矿集矿机的研究与开发[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(S1): 49 - 51.
- [7] 彭芸, 夏建新, 任华堂. 国外深海底岩心取样钻机的设计参数及其应用效果[J]. 金属矿山, 2015, 45(3): 156 - 160.
- [8] 于彦江, 胡波, 姚永坚, 等. 深海浅钻在海洋区域地质调查中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(11): 44 - 48.