

# 高温高压钻井液流变仪应用

赵建刚, 王雪竹, 石凯, 许云博, 李慧想

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**在深部钻探过程中,井下的高温高压环境对钻井液性能提出了更高的要求。流变性是钻井液的重要性能,保证高温高压状态下钻井液流变性能的稳定是深井安全钻进的必要前提,高温高压钻井液流变仪是测定钻井液高温高压流变性能的重要仪器。本文简要地介绍了当前在深部钻探中需要用到 3 款高温高压钻井液流变仪,包括其功能特点、主要技术参数和应用情况,旨在为钻探工作者正确选用相关测试仪器、提高钻探安全性和效率提供参考依据。

**关键词:**深部钻探;钻井液;流变性测试;高温高压流变仪;便携式

**中图分类号:**P634.6;TE927+.3 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0449-07

## Application of high temperature and high pressure drilling fluid rheometers

ZHAO Jiangang, WANG Xuezhu, SHI Kai, XU Yunbo, LI Huixiang

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In deep drilling, the high temperature and high pressure environment underground places higher requirements on the performance of drilling fluids. Rheology is an important property of drilling fluid, and ensuring the stability of drilling fluid rheological properties under high temperature and high pressure conditions is a necessary prerequisite for safe drilling in deep wells. High temperature and high pressure drilling fluid rheometers are important to measure the high temperature and high pressure rheological properties of drilling fluid. This article briefly introduces three high temperature and high pressure drilling fluid rheometers that are currently needed in deep drilling, including their functional characteristics, main technical parameters, and applications. The aim is to provide reference for drilling workers to correctly select relevant testing instruments, improve drilling safety and efficiency.

**Key words:** deep drilling; drilling fluid; rheology; high temperature and high pressure rheometer; portable

### 0 引言

钻井液被钻探界视为钻井工程的“血液”,足见其对于钻探工程的重要性。钻井液等样品的流变性是指钻井液在外力作用下变形或流动的特性,是其最为重要的特性之一,主要用不同剪切速率下的粘度来反映。

井下的高温高压会对钻井液的流变性产生较大影响,主要包括高温降解和解吸作用、高温分散

和絮凝作用等。钻井液的高温高压流变性影响钻速、排量、泵压、悬浮及携带岩屑、井壁稳定、井眼清洁和固井质量等,下井前对其进行高温高压流变性测试非常必要。

据估算,全球超过 6000 m 的深部资源占比为 1/4 左右,中国则是 1/3 左右。塔里木盆地是我国拥有最丰富深层油气的盆地之一,“深地一号”顺北油气田基地位于塔里木盆地中西部,储层平均埋藏深度

收稿日期:2023-08-18;修回日期:2023-08-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.072

基金项目:国家科技部重大仪器设备开发专项“超高温高压钻井液流变仪的研发及产业化”(编号:2012YQ050240)

第一作者:赵建刚,男,汉族,1969年生,北京探矿工程研究所钻探仪器研发中心主任,教授级高级工程师,博士,从事钻井液和固井水泥测试仪器方面的研发工作,北京市海淀区学院路29号探工楼602室,2446526534@qq.com。

引用格式: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.

超过7300 m,目前垂直深度超过8000 m的油气井已达41口<sup>[1]</sup>。其中,顺北56X井是目前亚洲陆上最深水平井,井深达到9300 m<sup>[2]</sup>。2023年,我国首口万米科学探井“深地塔科1井”已开钻,设计井深11100 m,目前正稳步钻进<sup>[3-4]</sup>。

未来,深部钻探将越来越多地进入我们的视野,最大井深将不断被刷新,这将对钻探理论、技术、设备提出更高的要求。

在深部钻探过程中,井深增加,井下温度和压力随之增高,深井、超深井的井下温度可达240~270℃,压力可达15000 psi(约103 MPa)。在高温高压条件下,钻井液流变性受影响较大。钻井液流变性对井眼清洁、提高机械钻速、井眼规则稳定、悬浮岩屑和重晶石的效果起着十分重要的作用,井下钻井液高温高压流变性能好坏直接关系到井眼的安全和钻井的成败<sup>[5-11]</sup>。用高温高压流变仪对入井流体进行高温高压流变性测试,以便随着井下温度、压力的升高和地层条件的变化,即时调整、改进和优化钻井液配方,确保钻井液在井下高温高压环境下仍具有良好的流变特性,从而确保钻井高效安全。

目前针对高温高压钻井液性能的测试方法主要为2种:高温滚子炉热滚法和高温高压流变仪测试法。前者由于热滚前后各项性能参数测试都是在常温常压下进行,并不能真实地模拟井下真实的高温高压环境,测试结果指标往往虚高,容易过高地估计样品的性能,造成误判,影响钻井安全;后者由于需要使用欧美国家垄断的昂贵价格进口高温高压流变仪,且使用和维护成本高,严重影响了钻井液高温高压助剂和体系的研发及钻探现场高温高压流变性的适时调整。研发和推广我国具有自主知识产权的高温高压流变仪成为必须。

## 1 高温高压钻井液流变仪的重要作用及原理

### 1.1 高温高压钻井液流变仪的重要作用

传统的高温滚子炉热滚法测试钻井液流变性存在一定的局限性,无法真正实时模拟井下高温高压环境,其测试过程为:首先测定样品在常温常压下的各项参数,然后将样品加入到高温老化罐中,加压后放在高温滚子炉中进行热滚(如200℃,滚动16 h)后,将老化罐取出并冷却至室温,从罐中取出样品,在常温常压下测定各项参数。通过对比样品加热滚动前后各项参数的变化来评价样品的耐温耐压

特性。

通过高温高压流变仪对样品在真实的高温高压环境下的流变性测试研究表明,样品在高温高压下的各项性能多数会变差,但在温度和压力恢复为常温常压后,其变差的性能有很大一部分可以恢复过来。所以应用高温滚子炉热滚法,由于前后两次测试都是在常温常压条件下进行的,测试结果不可避免地会与真实的高温高压条件下测试结果有较大偏差,测试结果往往比真实情况偏好,即测试结果指标虚高。

相较于传统的滚子炉热滚法,高温高压流变仪可以真实实时模拟井下的高温高压环境,对样品的测试评价更加真实可靠,不会发生对样品性能的误判,从而避免井下事故的发生,提高钻井的效率和安全性。

### 1.2 粘度测试原理

如图1所示,内筒和外筒浸入测试样品中,由外部的驱动装置带动外筒旋转,外筒驱使具有一定粘度的样品随着旋转,旋转的样品通过粘度的作用,带动内筒转动,并带动与内筒相连的刻度盘一起旋转。同时,与内筒相连的扭簧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。

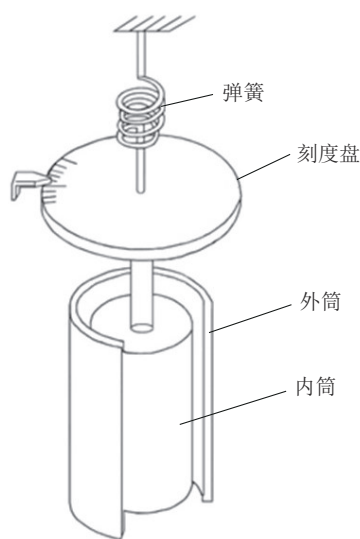


图1 直读式粘度测量原理

转过的角度可以通过人眼直接读取刻度盘上的读数获取,从而获得样品的剪切应力,结合测试时转速对应的剪率,可以计算出样品在此转速下的粘度

值。剪应力值也可以通过与内筒转动轴相连的各种传感器将转动角度转换成电信号传递给自动检测电路实现自动检测,如图2所示。

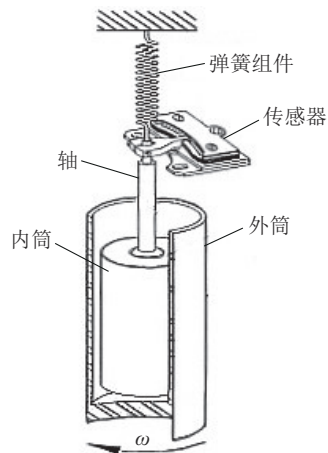


图2 利用传感器实现粘度自动测试

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(如卡森、宾汉、幂律、赫巴等模式)下流变特性参数,得到样品的不同流变特性。

### 1.3 高温高压流变性测试原理

如果需要对样品进行高温高压流变性测试,为了防止样品在高温下沸腾,需要对样品施加一定的压力,这就需要将内筒、外筒和样品密闭起来并进行加温加压,并要实现对外筒的驱动和对内筒转过的角度进行测量,如图3所示。

为了确保高温高压条件下加压控温腔内的压

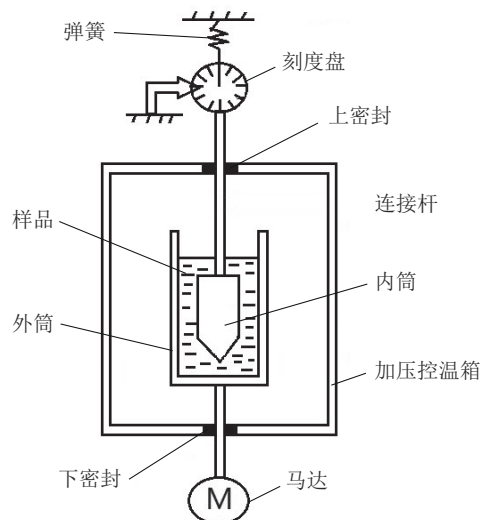


图3 高温高压流变性测试原理

力,要求上下密封与上下连接杆之间有足够的压力和良好的润滑,但是由于常规的各种密封圈(如可耐高温的氟橡胶密封圈)在高温和高压条件下,随马达驱动轴一转动起来,很快就会由于高温高压和动态旋转而磨损损坏,加压控制腔内的压力就会泄露,导致实验失败。

为了延长高温高压动态下密封使用寿命,多重密封技术(在加温控压腔与连接杆之间加装了多层耐高温密封装置)、自膨胀密封技术(如图4所示带自膨胀功能的密封圈)和对密封系统进行强制水冷等各种技术应用而生,在一定程度上延缓了密封系统更换间隔周期,但并没有从根本上解决高温高压动态密封寿命短、需要频繁更换的难题,制约了高温高压流变仪的使用。



图4 带自膨胀功能的密封圈

为此,需要采取颠覆性的转速驱动和粘度测量技术,研发新一代高温高压流变仪,满足高温高压勘探流变性测试需要。

## 2 三款高温高压钻井液流变仪性能及应用情况介绍

目前,国外用于钻井液等钻探样品测试的高温高压流变仪生产商主要包括美国的Fann、OFITE、Grace和德国的Haake、奥地利的Anton Paar公司。其中Fann iX77高温高压流变仪是当前国外最为先进的高温高压流变仪,由钻井液测试仪器研发的鼻祖美国Fann仪器公司设计、生产,在国际上应用广泛,目前占据约80%的市场份额。

下面主要介绍3款有代表性的高温高压流变仪,包括美国Fann公司生产的Fann iX77型高温高压流变仪、北京探矿工程研究所自主研发的Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪和

HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪。

## 2.1 Fann iX77型高温高压流变仪

### 2.1.1 功能介绍

Fann iX77型高温高压流变仪(见图5)是一款同轴圆筒型旋转流变仪<sup>[12]</sup>,用于测量高温高压条件下液体样品的流变性。由于内置先进计算机系统和安全设计的机电结构,该仪器具有很高的安全性和可靠性。



图5 Fann iX77高温高压流变仪

Fann iX77型高温高压流变仪使用计算机控制,仪器操作、数据采集、输出报告和报警功能可自动进行,最大限度地扩展了其应用范围。专用计算机软件使仪器操作自动化,并允许实验人员根据实验条件编制专用的测试程序。该仪器使用一个精密的磁敏角度传感器来检测内嵌宝石轴承的弹簧组合转过的角度,样品粘度越大,转过的角度越大。粘度传感器系统可以校准到 $\pm 0.01^\circ$ 。实验压力由气动增压泵产生,该泵由一个精密的后置压力控制器、高压阀和压力传感器来控制。加压液体充满测试体的上部,与样品小面积接触,以减少液体间的混合。

### 2.1.2 主要技术参数

该仪器的最高工作温度:316 $^\circ\text{C}$ ;最低工作温度:-10 $^\circ\text{C}$ ;最大工作压力:30000 psi(约206 MPa);压力控制精度10 psi;剪应力精度:0.5% F.S;粘度测试范围:300000 mPa·s;转筒速度:0~600 r/min;样品体积:175 cm<sup>3</sup>。

### 2.1.3 主要应用情况

Fann iX77型高温高压流变仪以其优越的性能和安全可靠性,在国内外得到了广泛地应用,在中海

油服的应用包括油化研究院(燕郊)、湛江基地、塘沽基地、印尼分公司、伊拉克分公司,在中石化的应用包括中石化钻井院(北京)、胜利油田钻井院(东营)等,在中石油的应用包括中石油工程院(北京)、川庆钻探工程院(成都)、吐哈油田工程院、渤海钻探研究所(天津)等,在高校的应用包括中国石油大学(北京)等。

如图6所示是使用Fann iX77型高温高压流变仪对某高温油基钻井液样品(无荧光白油+1%~3% EnvaMul 1699主乳化剂+2%~4% EnvaMul 1767辅乳化剂+20%~30% CaCl<sub>2</sub>+3%~6% PF-MOALK碱度调节剂+2%~4% PF-MOGEL有机土提切剂+3.5% TP-L3降滤失剂+重晶石,密度为2.3 g/cm<sup>3</sup>,油水比=80:20)在50 MPa压力下,分别测试该样品在80、100、120、150、180、200 $^\circ\text{C}$ 时的流变曲线。从中可以看出,在相同的剪切速率下,样品的剪切应力随温度的升高而减小;在相同的温度下,样品的剪切应力随剪切速率的升高而增大。

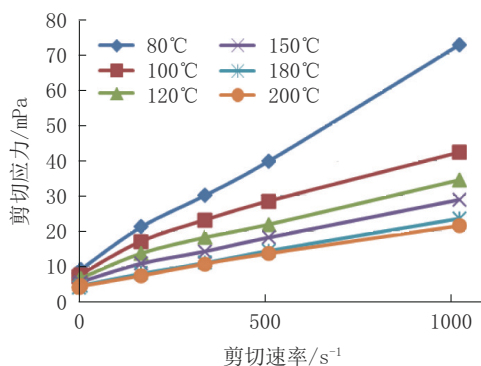


图6 高温油基钻井液不同温度下的流变曲线

## 2.2 Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪

### 2.2.1 仪器简介

为了解决钻井液等样品的高温高压流变性测试难题,由北京探矿工程研究所牵头,联合中国石油大学(北京)、青岛海通达专用仪器有限公司等4家单位,申报了国家重大科学仪器设备开发专项项目“超高温高压钻井液流变仪的研发及产业化”,历时5年,研发了Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪(见图7),属于国内首台自主研发的高温高压流变仪,主要性能指标达到国际先进水平,打破了欧美产品和技术垄断,填补了国内空白。



图7 Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪

该仪器可用于测试钻井液、完井液、压裂液等样品在高温高压及低温高压条件下的流变性,满足深地科学钻探、深部地热资源钻探的高温高压钻井液测试需求,也能应用于极地、深水和陆域天然气水合物等新型清洁能源钻探用低温钻井液的流变性测试评价。

Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪主要由工控机、粘度测量系统、温度控制系统、压力控制系统4个部分组成<sup>[13-14]</sup>,采用国际先进的外环隔离磁耦合驱动技术及非接触式扭矩传递测量技术,从根本上攻克了传统动态密封系统在高温、高压、动态3重条件下寿命短的难题,用户不用再为频繁更换动密封系统而操心,并为以后设计更高温度更高压力的流变仪提供了良好的基础。Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪实现了高温320℃、低温-20℃和高压220 MPa条件下的高精度粘度测量。

如图8所示,进行实验测试时,将测试样品和同轴内筒、外筒等部件置于封闭的高温高压测试腔中,外筒上的耐高温永磁体与测试腔外部的磁驱动外环通过磁耦合相连接,伺服电机驱动外环,带动外筒以相同转速同步旋转。内筒通过刚性连接杆与上部的角度磁铁相连,测试腔外与角度磁铁距离很近的高精度磁场检测电路通过测量角度磁铁X-Y两个磁场方向转过的角度即可得到内筒转过的角度。利用磁耦合技术,将高温高压动态密封转化为高温高压静态密封,从根本上破解了传统密封系统在高温高

压动态3重条件下寿命短的难题,实验人员不用频繁更换动密封系统,极大地提高了实验效率。

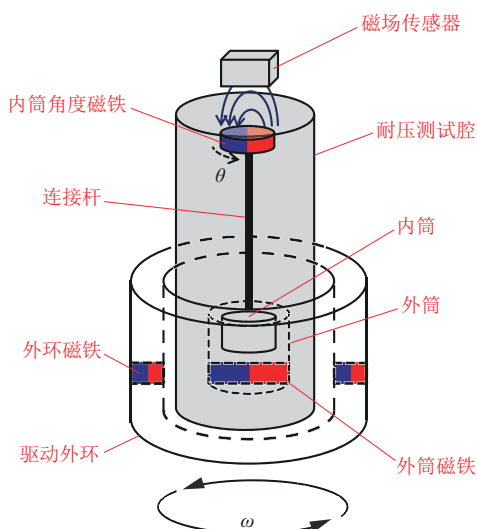


图8 非接触式高温高压转速驱动和粘度测量原理

Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪配备了具有完全自主知识产权的测控软件系统,可实时设置转速、温度、压力、时长等参数,可实时显示和保存测试结果,有手动和自动两种工作模式,中文和英文操作界面可在线实时切换,实现了安全简便的智能控制。

### 2.2.2 主要技术参数

该仪器的最高工作温度:320℃;最低工作温度:-20℃;最大工作压力:220 MPa;转筒速度:0~1000 r/min;粘度测试范围:0~300000 mPa·s。

### 2.2.3 主要应用情况

近几年,该仪器先后为中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、沙克(天津)石油技术服务有限公司等10余家单位提供了高温高压钻井液流变性测试技术服务,取得了良好的社会和经济效益。目前,该仪器已实现了科技成果转化,产品销往中海油能源发展工程公司湛江分公司、中石化胜利油田钻井院等单位,展示了良好的市场推广前景,未来有望逐步实现替代国外进口产品。

图9为使用Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪对中国石油大学(北京)研制的有土相白油基钻井液进行测试得到的粘温曲线,从中可以直观看到该钻井液从室温到180℃过程中粘度的变化情况。

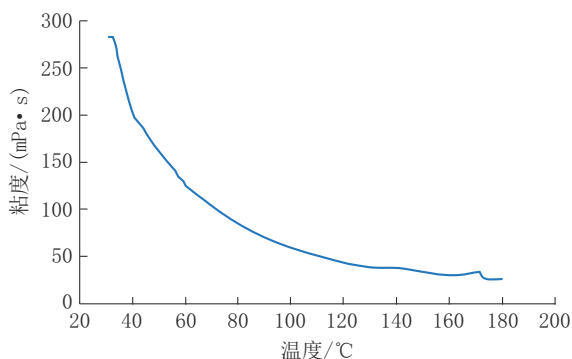


图9 有土相白油基钻井液粘温曲线

图10所示为使用Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪在某清洁能源钻探现场,对项目中使用的压裂液样品在42 MPa条件下温度和剪率对粘度的影响进行的测试研究,研究人员据此可以优化压裂过程中相关参数的设置。

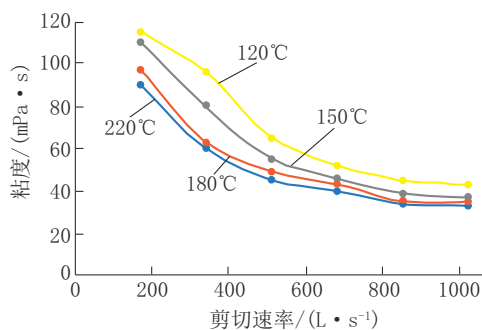


图10 测试温度和剪率对压裂液粘度的影响

## 2.3 HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪

### 2.3.1 仪器简介

北京探矿工程研究所在Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪研发成功后,根据钻探现场用户反馈的需求,利用项目前期积累的技术和节余经费,成功研发了HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪(见图11),形成了系列化产品,满足不同用户的需求。

HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪主要针对钻探现场使用要求设计而成,具有体积小、质量轻、性价比高的特点,配备了移动防震拉杆箱,便于携带和井场间搬迁,满足钻探现场高温高压流变性测试需求。

HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪剪切应力测量系统采用非接触式光栅传



图11 HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪

感器,搭配不同弹性系数的扭矩弹簧,可以满足不同粘度等级的样品测量需求。测试部分选用哈氏合金材质,具有耐强酸强碱腐蚀的特性。设计有防爬杆机构,满足压裂液等易爬杆胶体样品的测试需求。采用多层高压动密封,最高工作压力可达到7 MPa,既可用氮气瓶加压的方式在实验室使用,也可用二氧化碳气弹加压的方式应用于钻探现场。

### 2.3.2 主要技术参数

该仪器的最高工作温度:260 °C;最大工作压力:7 MPa;转筒速度:0~1000 r/min;粘度测试范围:0~300000 mPa·s;体积:28 cm×35 cm×49 cm;质量:17.6 kg。

### 2.3.3 主要应用情况

该便携式高温高压流变仪2022年一经推出,就吸引了众多潜在客户的注意,先后为山东得顺源石油科技有限公司、中国石油大学(北京)等多家单位提供测试技术服务,产品先后被中石油工程院(北京)、中石化工程院(德阳)、中国地质大学(北京)、西安康派斯质量检测有限公司等单位选购,取得了良好的社会和经济效益,展示了良好的市场推广前景。

应用自主研发的HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪对国内某钻探公司的钻井液样品在200 °C、30 MPa条件下进行了现场测试,表观粘度随温度变化曲线如图12所示。

从图12可以看到,随着温度的升高,被测钻井液样品的表观粘度在逐步下降,到200 °C时,表观粘度达到最小值。但当温度降低时,被测钻井液样品的表观粘度有所上升,有所恢复。被测样品经过高温老化后,温度恢复到常温后其表观粘度有所升高,说明高温对被测钻井液样品中的高分子和粘土结构

有所破坏,流动性有所下降。

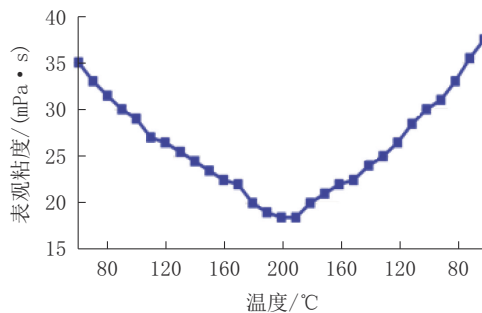


图12 表观粘度随温度变化曲线

### 3 结论

深井、超深井的不断出现对钻井液高温高压流变性提出了更高要求,应用高温高压钻井液流变仪可以更加真实地模拟井下不同温度和压力条件,实时测试钻井液的高温高压流变性,为调整、改进和优化钻井液配方提供了重要依据,可以避免传统滚子炉热滚法测试结果指标虚高的问题,对于保证高效安全钻井具有重要意义。

本文介绍的3款高温高压钻井液流变仪涵盖了进口Fann iX77型高温高压流变仪和北京探矿工程研究所自研的两款高温高压流变仪,其中Super HTHP Rheometer 2018型超高温高压流变仪的各项性能指标可以比肩当前最为先进的Fann iX77型高温高压流变仪,HTHP Rheometer-Mini2022-1型便携式高温高压流变仪以其质量轻、体积小、便于携带的特点深受钻探现场工程师青睐,三款高温高压流变仪基本上都可以满足当前钻井液高温高压流变性测试需求,深部地质钻探工作者可以根据需要进行选择。

### 参考文献:

- [1] 徐徐,戴安妮,王福全.“深地工程”启动:我国油气领域“深地一号”项目横空出世——中国石化“深地工程”顺北油气田落实4个亿吨级油气区,标志着全球埋藏最深的油气田成功勘探开发[J].中国石化,2022(9):10-11.
- [2] 白彬珍,曾义金,葛洪魁.顺北56X特深水平井钻井关键技术[J].石油钻探技术,2022,50(6):49-55.
- [3] 杨寒.我国首口万米科探井鸣笛开钻标志着我国深地探测系列技术跨入世界前列[J].天然气与石油,2023,41(3):13.
- [4] 马香,江艳,李亚辉等.挑战深地极限——全球首台12000米特深井自动化钻机诞生记[J].国企管理,2023(7):98-100.
- [5] 徐同台,陈乐亮,罗平亚.深井泥浆[M].北京:石油工业出版社,1994.
- [6] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].东营:中国石油大学出版社,2006:89-105.
- [7] 刘晓栋,刘涛.钻井液高温流变性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] 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),2012,34(4):122-126.
- [9] 黄汉仁,杨坤鹏,罗平亚.泥浆工艺原理[M].北京:石油工业出版社,1981:130-132.
- [10] 王旭,王中华,周乐群,等.240°C超高温饱和盐水钻井液室内研究[J].钻井液与完井液,2011,28(4):19-21.
- [11] 赵怀珍,薛玉志,李公让,等.抗高温水基钻井液超高温高压流变性研究[J].石油钻探技术,2009,37(1):5-9.
- [12] 王楠,李怀科,田荣剑,等.用于评价深水条件下钻井液流变特性的Fann iX77全自动流变仪[J].石油仪器,2011,25(1):49-50,53,103.
- [13] 赵建刚,赵锴,韩天夫,等.超高温高压流变仪的研制与应用[J].钻井液与完井液,2019,36(3):333-337.
- [14] 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.

(编辑 荐华)