

超高温高压流变仪的研发及应用

赵建刚, 王雪竹*, 王琪, 石凯, 韩天夫, 杨锐

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:随着我国能源勘探及地球深部探测等向深部发展,深井越来越多,地层温度、压力越来越高。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,测定钻井液高温高压流变性是评价和优选钻井液体系最基础的工作。依托国家科技部重大仪器设备开发专项,通过对压力控制系统、温度控制系统、剪率控制系统、粘度检测系统等方面技术难题的攻关,研制成功了国内首台超高温高压流变仪。该仪器可在高温高压及低温高压条件下对钻井液、完井液、压裂液等样品的流变性进行高精度测量。

关键词:超高温高压;低温高压;钻井液;流变仪;深井钻探

中图分类号: P634.3⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)05-0083-05

Development and application of the ultra high temperature and high pressure rheometer

ZHAO Jiangang, WANG Xuezhū*, WANG Qi, SHI Kai, HAN Tianfu, YANG Rui

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

Abstract: With the development of energy exploration and deep exploration in China, there are more and more deep wells, and the formation temperature and pressure are higher and higher. To ensure the stability of rheological properties of drilling fluid under high temperature and high pressure is a prerequisite for safe drilling in deep wells. The determination of rheological properties of drilling fluid under high temperature and high pressure is the most basic work for evaluation and optimization of the drilling fluid system. With the support of the national major equipment and instrument development project of the Ministry of Science and Technology of China, the first ultra high temperature and high pressure rheometer in China has been successfully developed by tackling the technical problems with the pressure control system, temperature control system, shear rate control system, viscosity detection system, etc. The instrument can measure the rheological properties of drilling fluid, completion fluid and fracturing fluid with high precision under high temperature and high pressure, as well as low temperature and high pressure.

Key words: ultra high temperature and high pressure; low temperature and high pressure; drilling fluid; rheometer; deep well drilling

0 引言

在当前大部分地质表层或浅层的资源已经勘探开发殆尽的背景下,国内外钻探深井的深度逐年增加。深海域是中国未来海上油气勘探开发的重

点^[1],全球深水油田在经过近40余年的勘探,水深界限不断提高,目前普遍将400~1500 m水深定为深水,超过1500 m为超深水^[2-5]。中国南海海域石油储量巨大,属于世界四大海洋油气富集区之一,

收稿日期:2020-11-04; 修回日期:2021-01-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.012

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

作者简介:赵建刚,男,汉族,1969年生,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, zhaojg@cugb.edu.cn。

通信作者:王雪竹,女,汉族,1991年生,助理工程师,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, 1529861210@qq.com。

引用格式: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 Xuezhū, WANG Qi, et al. Development and application of the ultra high temperature and high pressure rheometer[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 83-87.

其中70%储藏于深水区^[6]。与浅水作业相比,深水钻井时低温对钻井液的流变性影响很大,特别是动切力和低剪切率下的粘度难以控制,使得井控难度加大等一系列问题已成为深水钻井技术所面临的巨大挑战^[7]。而中国大陆科学钻探面临着万米深井的挑战,超深井井底温度和压力很高,如此高温高压必然会对钻井液体系产生严重的影响^[8]。另一方面,应用前景广阔的天然气水合物近年来受到了世界各国的高度关注。天然气水合物是低温高压条件下由气体与水形成的固态类冰状物质,主要产于海底沉积物和陆上永久冻土带^[9],勘探开发涉及深水钻探和冻土区钻探。深水钻井随着水深增加,温度将会越来越低,海底泥线附近的油基钻井液由于海水的冷却作用,温度会降到4℃甚至更低^[10],在中国南海水域1800 m水深处水温甚至达到2.9℃^[11],而冻土区钻井的井下温度则会低于0℃^[12]。国内外钻井实践表明,钻井液的流变性对提高机械钻速、井眼净化、井眼稳定和地面清除固相的效果都有十分重要的作用^[13-14]。为了满足上述对钻井液在极端条件下的流变性测试需求,需要一种能够模拟超高温高压及低温高压环境的高性能流变仪。高端超高温高压钻井液流变仪长期由美国垄断,价格昂贵,通过自主创新研制国产超高温高压流变仪,满足国内钻探需求,对总体提升我国高端钻井液测试仪器的研究和制造水平、降低钻探成本、提升我国钻探能力和话语权具有重要意义。

1 超高温高压钻井液流变仪的研发

2013年4月,国家重大科学仪器设备开发专项“超高温高压钻井液流变仪的研发及产业化”获得正式批复,由我所牵头承担,目标是研制开发一种超高温高压钻井液流变仪,进行工程化和产业化,最终开发出能够用于测定高温(320℃)高压(220 MPa)和低温(-10℃)高压条件下钻井液的流变性,满足我国深部油气、深部矿产、高温地热、天然气水合物及大陆科学钻探等深部钻探工程的需要。通过自主创新,获得相应的自主知识产权,实现替代进口,打破技术垄断,降低我国对国外高端钻井液测试仪器的依赖,提升我国高端钻井液测试仪器的研究和制造水平,使我国跻身于该领域的国际先进行列。

1.1 超高温高压流变仪的技术突破与创新

高精度粘度测量、测试腔耐高温高压性能、耐高

压密封问题是研制超高温高压钻井液流变仪的技术难题,项目采用外环式强力磁耦合旋转驱动装置、高精度控制技术、非接触式流变性测试技术、三体结构耐高温高压测试腔设计,解决了制约国内研发超高温高压系列测试仪器的“卡脖子”难题,使得本项目研发的超高温高压流变仪可以投入实际长期使用。

1.1.1 高精度粘度测量技术

仪器采用外环式强力磁耦合旋转驱动装置及高精度控制技术和非接触式流变性测试技术,保证粘度高精度测量。设计了合理的粘度测量、粘度信号采集处理模块,优选粘度传感器,进行粘度信号的数字转换。通过采用高精度的24位 Σ - Δ AD转换器,实现了信号模数转换。仪器粘度测量原理见图1。

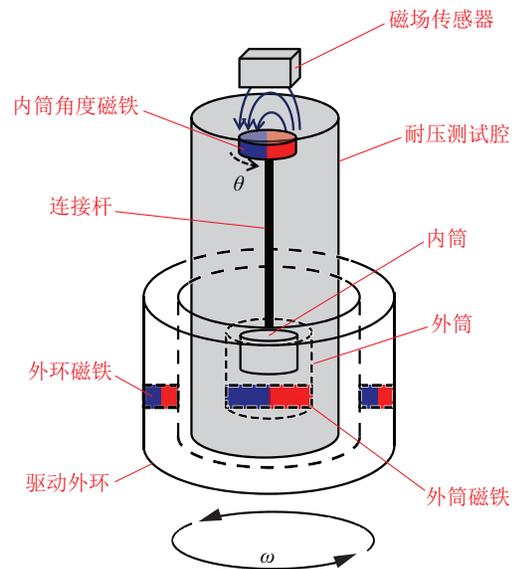


图1 粘度测量原理示意

Fig.1 The viscosity measurement principle

1.1.2 耐高温高压测试腔的设计

耐高温高压测试腔是仪器的关键核心部分,选择单层厚壁容器的设计方法,耐高温高压测试腔为三体结构,采用锻件加工成形。通过分析计算完成了耐高温高压测试腔尺寸的合理化,并通过爆破安全准则验证,保证了耐高温高压测试腔整体安全性。图2为耐高温高压测试腔结构设计图。

1.1.3 外环式强力磁耦合旋转驱动系统研究

研制出外环式强力磁耦合旋转驱动系统,解决了耐高压密封和对样品进行精密的剪率驱动控制这一关键问题。外环式强力磁耦合旋转驱动系统的结构主要包括空心轴旋转外筒、保温层、耐高温强力磁

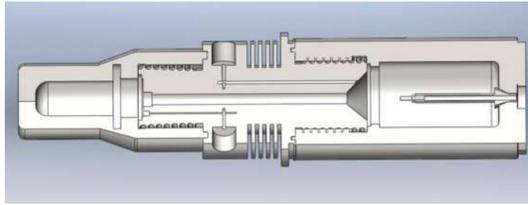


图2 耐高温高压测试腔结构设计示意

Fig.2 Structural design of the high temperature and high pressure resistance test chamber

铁等。

经过5年研发,项目组攻克了多项技术难题,成功生产出国内首台超高温高压流变仪——Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪,实现了高温320℃、低温-10℃和高压220 MPa下的高精度粘度测量,可广泛应用于高温干热岩钻探、天然气水合物钻采、深部油气矿产勘探开发等工程。超高温高压流变仪产品实物见图3。



图3 超高温高压流变仪实物

Fig.3 Appearance of the ultra high temperature and high pressure rheometer

1.2 超高温高压流变仪的特点

Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪测控系统由工控机、温度控制系统、压力控制系统、剪率控制系统、粘度测量系统和高温高压测试腔6大部分组成,见图4。

工控机是仪器的上位控制计算机,控制软件运行,操作者使用键盘、鼠标和触摸屏在软件交互界面上修改各项参数,从而对样品展开流变性测试。工

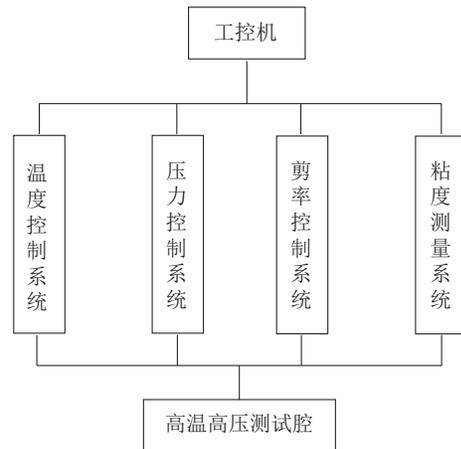


图4 超高温高压流变仪系统结构

Fig.4 System structure of the ultra high temperature and high pressure rheometer

控机通过串口、USB口等端口与下位机通讯,下发指令实现对温度、压力、剪率、粘度4个子系统的控制,各个子系统将采集到的数据上传给工控机后在软件界面上显示和绘图。

超高温高压流变仪是一款同轴圆筒式粘度测试仪^[15],使用仪器进行流变性测试时,测试样品在高温高压测试腔中被加温、加压和搅拌,被以一定速率搅拌的样品对内筒产生剪切力从而使内筒转过一个角度,通过测量这个角度,即可计算出样品在当前剪切速率下的粘度。

仪器的4个子系统围绕高温高压测试腔实现对温度、压力、剪率3个参数的控制,并对粘度进行测量,温度控制系统对测试腔进行加热或冷却以控制样品温度,压力控制系统对测试腔内施加或卸除压力以控制样品压力,剪率控制系统控制外筒的转速从而控制样品的剪切速率,粘度测量系统测量内筒转过的角度从而计算出剪切应力以及样品粘度。

Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪颠覆性地彻底解决了制约国内研发高温高压系列测试仪器的“卡脖子”问题,是国内首款超高温高压流变仪,真正可以长时间投入使用。目前,研究成果已实现科技成果转化。

2 超高温高压流变仪性能测试

图5为温度120、150、180和220℃、42 MPa压力条件下,钻井液样品粘度随剪切速率变化的曲线,显示了样品流变性的变化趋势。对于同种测试样

品,应用超高温高压流变仪测试的数据与国外同类仪器测试数据对比情况如图6所示,通过控制温度从60℃上升至200℃,再下降至60℃,测试钻井液样品升温再降温过程中的表观粘度及塑性粘度变化趋势,从图6中可以看出,两种仪器测得的表观粘度和塑性粘度随温度变化曲线具有很好的一致性。

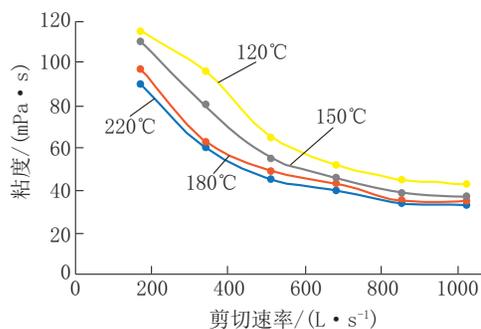


图5 相同压力、不同温度条件下超高温高压钻井液流变仪测试结果

Fig.5 Test results of the ultra high temperature and high pressure drilling fluid rheometer at the same pressure and different temperatures

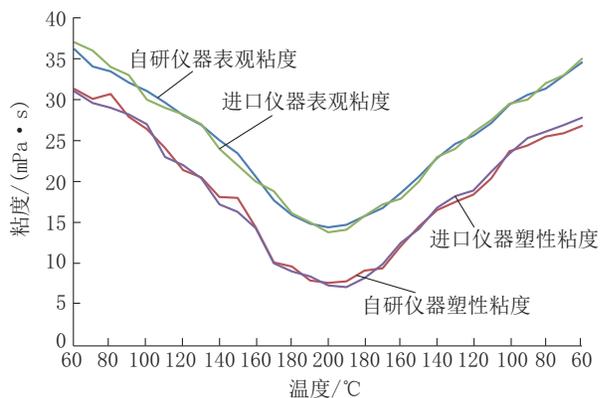


图6 自研超高温高压钻井液流变仪与国外同类仪器测试数据对比

Fig.6 Comparison of test data between the UHTHP drilling fluid rheometer and the similar foreign instruments

3 超高温高压流变仪的应用

作为国内首台超高温高压流变仪, Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪通过了异地测试和连续无故障工作时间超1000 h的可靠性测试,具有良好的准确性和稳定性,具备工程化和产业化条件,并成功实现科技成果转化应用,展示了良好的市场应用前景。

在已产出的5台产业化样机中,目前已有3台实现科技成果转化,分别销往中海油湛江西部公司研究院、山东得顺源科技有限公司(德州民企)、中石油西部钻探钻井液公司,另有1台样机于2020年被运至深部高温清洁能源钻探现场对下井样品进行测试,确保下入井内的钻井液具有良好的耐温耐压特性,为保证深部高温清洁能源钻井安全和高效提供了技术支撑。此外,超高温高压流变仪还为中国石油大学(北京)、中国地质大学(北京)、中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院、沙克(天津)石油技术服务有限公司等多家单位提供了高温高压条件下钻井液样品的流变性测试技术服务。图7为中国石油大学(北京)研究人员使用 Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪进行测试得到的堵漏用凝胶样品。图8为中国石油大学(北京)研制的有土相白油基钻井液在超高温高压流变仪上进行测试得到的粘度随温度变化曲线。



图7 堵漏用凝胶样品

Fig.7 Samples of the plugging gel

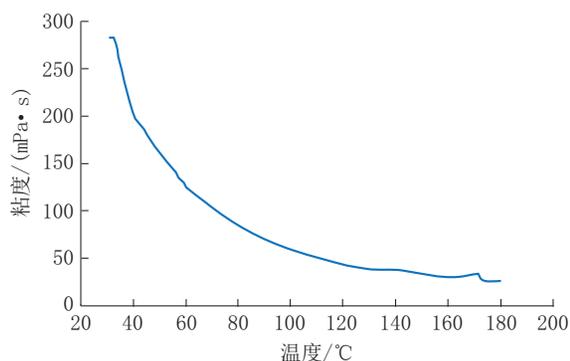


图8 有土相白油基钻井液粘度随温度变化曲线

Fig.8 Viscosity versus temperature curve of white oil based drilling fluid with soil phase

4 结语

钻井液流变性能数据可有效支撑高温超深井安全高效钻探和海域天然气水合物勘查等深水钻探作业, Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪可真实模拟钻探井下情况, 是国内唯一一款可长时间投入实际应用的高温高压钻井液流变仪, 灵敏性强、测量精度高, 主要技术指标达到国际先进水平, 打破了欧美国家对高端钻井液流变仪的技术垄断。该仪器大规模进入市场后, 可改变以往高端流变仪完全依赖进口的局面, 降低钻探成本, 提升我国钻探能力和话语权, 为高温干热岩钻探、天然气水合物钻采、大陆科学钻探、深部油气矿产勘探开发等重大工程提供高温高压钻井液流变性的测试评价手段, 提升我国“入地”和“下海”的能力, 满足科技创新战略需要, 有效解决向地球深部进军战略科技问题。

参考文献(References):

- [1] 邓金根, 郑勋, 闫新江, 等. 深水气田防砂方案优选试验研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(3): 382-385.
DENG Jinggen, ZHENG Xun, YAN Xinjiang, et al. Experimental study on optimization of sand control scheme in deep-water gas field[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2012, 19(3): 382-385.
- [2] 张功成, 屈红军, 赵冲, 等. 全球深水油田勘探40年大发现及未来勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(10): 1447-1476.
ZHANG Gongcheng, QU Hongjun, ZHAO Chong, et al. Giant discoveries of oil and gas exploration in global deepwaters in 40 years and the prospect of exploration [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(10): 1447-1476.
- [3] 张异彪, 黄涛, 李斌, 等. 深水钻井环境因素调查评价方法和流程研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(10): 154-161.
ZHANG Yibiao, HUANG Tao, LI Bin, et al. Procedure and methods of deep water drilling site environmental hazards surveying and evaluation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(10): 154-161.
- [4] 杨海长, 陈莹, 纪沫, 等. 珠江口盆地深水区构造演化差异性油气勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 59-68.
YANG Haizhang, CHEN Ying, JI Mo, et al. Structural evolution difference and the significance for oil and gas exploration in the deep water area of the Pearl River Mouth Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 59-68.
- [5] 邢作昌, 林畅松, 张忠涛, 等. 白云深水区珠海组陆架边缘三角洲沉积演化[J]. 特种油气藏, 2017, 24(5): 15-20.
XING Zuochang, LIN Changsong, ZHANG Zhongtao, et al. Deposit evolution of continental margin delta in the Zhuhai Formation in deep water area of Baiyun sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(5): 15-20.
- [6] 李炎军, 吴志明, 徐一龙, 等. 抗220℃深水高密度钻井液体系构建及性能评价[J]. 化学与生物工程, 2020, 37(7): 42-46.
LI Yanjun, WU Zhiming, XU Yilong, et al. Construction and performance evaluation of deepwater high density drilling fluid system resistant to 220℃ [J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(7): 42-46.
- [7] 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FannIX77全自动流变仪[J]. 石油仪器, 2011, 25(1): 49-50, 53.
WANG Nan, LI Huaik, TIAN Rongjian, et al. The FannIX77 fully automatic rheometer for deepwater drilling fluids evaluation[J]. Petroleum Instruments, 2011, 25(1): 49-50, 53.
- [8] 许洁, 乌效鸣, V. F. 契霍金, 等. 超深井240℃高温钻井液室内研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(4): 134-137.
XU Jie, WU Xiaoming, Chikhotkin V. F., et al. Laboratory study on drilling fluids resisting 240℃ temperature for ultra-high well[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(4): 134-137.
- [9] 祝有海, 张永勤, 方慧, 等. 中国大陆域天然气水合物调查研究主要进展[J]. 中国地质调查, 2020, 7(4): 1-9.
ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, FANG Hui, et al. Main progress of natural gas hydrate survey in China[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(4): 1-9.
- [10] 刘扣其, 邱正松, 曹杰, 等. 深水低温条件下油基钻井液流变性能实验研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(3): 378-381.
LIU Kouqi, QIU Zhengsong, CAO Jie, et al. Experimental study on rheological property of oil-based drilling fluid under deep water and low temperature conditions[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(3): 378-381.
- [11] 田荣剑, 王楠, 李松, 等. 深水作业中钻井液在低温高压条件下的流变性[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(5): 5-7, 87.
TIAN Rongjian, WANG Nan, LI Song, et al. Research on drilling fluid rheology with low temperature and high pressure in deep water operation [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(5): 5-7, 87.
- [12] 张川, 王胜, 陈礼仪, 等. 用于冻土区天然气水合物钻探的聚合物钻井液低温流变响应[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 92-97.
ZHANG Chuan, WANG Sheng, CHEN Liyi, et al. Low-temperature rheological response characteristics of the polymer drilling fluid developed for permafrost gas hydrate exploration [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(2): 92-97.
- [13] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 57-87.
YAN Jienian. Drilling fluid technology [M]. Dongying: Petroleum University Press, 2001: 57-87.
- [14] 徐同台, 陈乐亮, 罗平亚. 深井泥浆[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 9-19.
XU Tongtai, CHEN Leliang, LUO Pingya. Deep well mud [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 9-19.
- [15] 杨晓璇, 崔玉江. 同轴圆筒旋转黏度计测量原理详析[J]. 大学物理, 2005, 24(4): 42-44.
YANG Xiaoxuan, CUI Yujang. A detailed analysis on the principle of coaxial cylinder rotational viscometer [J]. College Physics, 2005, 24(4): 42-44.

(编辑 荐华)