

# 超高温高压流变仪的研发及应用

赵建刚, 王雪竹, 石凯, 许云博, 李慧想, 杨锐, 魏瑞, 李进, 贺云超  
(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**由北京探矿工程研究所牵头的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”历时5年,成功研发了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条件下的高精度粘度测量,主要技术指标达到国际先进水平,打破了国外高端钻井液流变仪的技术垄断,填补了国内空白。该产品可以模拟真实的高温高压环境,实时测定钻井液、压裂液、凝胶堵漏剂、黄原胶等不同样品的粘度随温度、压力和剪切速率的变化规律,可以真实地测定样品在高温高压环境下的流变性,可以克服传统滚子炉热滚法测试样品导致测试的性能指标虚高的弊端,避免井下事故的发生。在国内某新型清洁能源钻探等项目进行了应用,为多家单位的油基、水基钻井液和高温堵漏凝胶等不同样品提供了精确的测试技术服务。

**关键词:**超高温高压流变仪;钻井液流变性;滚子炉;钻井安全

**中图分类号:**P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0349-07

## Development and application of the ultra high temperature high pressure (HTHP) rheometer

ZHAO Jiangang, WANG Xuezhuzhu, SHI Kai, XU Yunbo, LI Huixiang,  
YANG Rui, WEI Rui, LI Jin, HE Yunchao  
(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The national major scientific instrument and equipment development project “Development and industrialization of ultra high temperature and high pressure drilling fluid rheometer” led by Beijing Institute of exploration engineering has lasted for five years, successfully developed super HTHP rheometer 2018 ultra-high temperature and high pressure rheometer, and achieved high precision viscosity measurement under the conditions of high temperature 320°C, low temperature -10°C and high pressure 220MPa, The main technical indexes have reached the international advanced level, breaking the technical monopoly of foreign high-end drilling fluid rheometer and filling the domestic blank. The product can simulate the real high temperature and high pressure environment. The viscosity of different samples such as drilling fluid, fracturing fluid, gel plugging agent, xanthan gum and so on can be measured in real time according to the changing rules of temperature, pressure and shear rate. It can truly measure the rheological properties of samples under high temperature and high pressure environment, and overcome the disadvantages of the traditional roller furnace hot rolling test sample which leads to the high performance index of the test. Avoid the occurrence of underground accidents.

**Key words:** ultra high temperature and high pressure rheometer; rheology of drilling fluid; roller furnace; drilling safety

## 0 引言

钻井液被业界称为钻井工程的“血液”,可见钻

井液对于钻井工程的重要性。钻井液流变性是指钻井液在外力作用下变形或流动的特性,是钻井液

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.058

作者简介:赵建刚,男,汉族,1969年生,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研发工作,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)院内探工楼602室,2446526534@qq.com。

引用格式:赵建刚,王雪竹,石凯,等.超高温高压流变仪的研发及应用[J].钻探工程,2021,48(S1):349-355.

ZHAO Jiangang, WANG Xuezhuzhu, SHI Kai, et al. Development and application of the ultra high temperature high pressure (HTHP) rheometer[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):349-355.

具有的一系列特性中最为重要的特性之一,主要由粘度来反映<sup>[1-2]</sup>。

高温高压会对钻井液流变性产生较大影响,主要包括高温分散和絮凝作用、高温降解和解吸作用、高温交联作用等。高温所引起的钻井液性能变化可归纳为不可逆变化和可逆变化两个方面,前者可以用滚子炉对钻井液进行滚动老化,然后冷却到室温,评价其经高温之后的性能变化;后者则需要使用专门的高温高压流变仪进行测试和评价。钻井液高温高压流变性直接影响钻速、泵压、排量、悬浮及携带岩屑、井眼清洁、井壁稳定、压力波动及固井质量等,下井前对其进行测试非常必要<sup>[3-4]</sup>。

在浅层矿产和资源逐步开发殆尽的背景下,国内外钻井深度逐年增加,深达7~8 km的深井已司空见惯,井下温度可以达到240~260 °C甚至更高,井下压力可以达到40~60 MPa,这种高温高压环境对钻井液的耐高温高压性能提出了更高的要求<sup>[3]</sup>。

近年来,海域中丰富的天然气水合物和油气资源引起了世界各国的高度关注。在钻开水下海床的过程中,存在着天然气水合物分解和再结晶的可逆过程。在低温高压条件下,天然气水合物在钻井液循环管路中再结晶会导致钻井液循环通道被堵塞,引起井下事故。为避免这种情况的发生,需要在钻井液体系中加入防止天然气水合物在钻井液管路中特定的温度和压力条件下再结晶的助剂<sup>[5-6]</sup>。

在高原冻土区和南北极低温区进行钻探,钻井液必然面临低温环境的考验<sup>[7-8]</sup>。

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和低温高压环境的高性能流变仪。高端高温高压钻井液流变仪长期由美国等西方国家垄断,价格昂贵,维护成本高。通过自主创新研制国产超高温高压流变仪,满足国内深井高温高压钻探需求,对于从总体上提升我国高端钻井液测试仪器的研究能力和制造水平,降低钻探成本,提高我国深井和超深井钻探能力和话语权具有重要的现实意义。

## 1 超高温高压流变仪的研发

鉴于潜在的巨大市场需要,由北京探矿工程研究所牵头,联合中国石油大学(北京)、沈阳工业大学、大连钰霖电机有限公司和青岛海通达专用仪器有限公司向科技部申报了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”,并于2013年4月正式获批。项目组经过5年的潜心研发,先后攻克了超高温高压及低温高压测控、超高温高压耐酸碱盐腐蚀测试腔加工、低温快速冷却、非接触式转速驱动、非接触式高精度粘度测量等技术难题,设计了中英文在线自由切换测控软件系统,成功研发生产出5台“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”,实现了高温320 °C、低温-10 °C和高压220 MPa下的高精度粘度测量。项目先后通过了科技部组织的技术验收和综合验收,成果就绪度达到了8级(最高9级)。

### 1.1 传统高温高压动态密封存在的问题

#### 1.1.1 常温常压条件下粘度测试原理

如图1所示,内筒(又称:悬锤)和外筒(又称:转子)浸入被测试的样品之中,由外部的电机带动外筒旋转,外筒驱使样品随着旋转,由于样品有一定的粘度,旋转的样品会驱使内筒转动,并带动与其相连的刻度盘(又称:读数盘)一起旋转。与内筒相连的弹簧(又称:扭簧)会给转动的内筒一个反向的扭力,当两个方向的扭力达到平衡时,内筒就转过一定角度,样品的粘度越大,转过的角度也越大<sup>[9-10]</sup>。

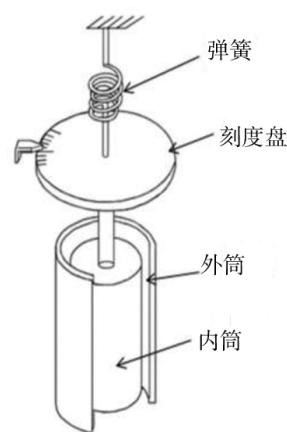


图1 直读式粘度测量原理

这个转过的角度可以通过人眼读取刻度盘上读数获取。也可以通过与内筒转动轴相连的传感器将转动角度变换成电信号传递给自动检测电路进行自动检测,如图2所示。

按照相关样品的测试规范,通过测量样品在不同转速下(如600、300、200、100、6、3 r/min)的剪切

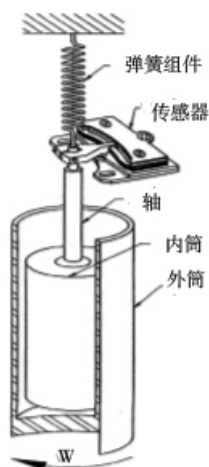


图2 带传感器的粘度测试原理

应力值,就可计算出不同模式(如卡森、宾汉、幂律等模式)下流变特性参数,从而评价样品的不同流变特性<sup>[11]</sup>。

### 1.1.2 高温高压条件下粘度测试原理及存在的问题

如果要进行高温高压测试,则必须要将内筒、外筒和样品密闭起来,并且要实现外筒的转动和对内筒转过的角度进行测量,如图3所示。

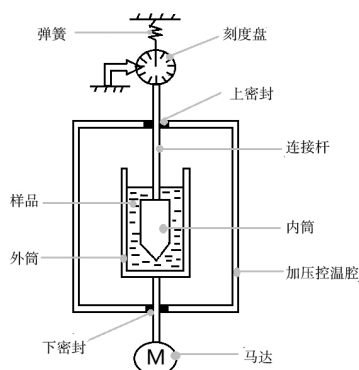


图3 传统高温高压粘度测试原理

由于在高温(低温)及高压条件下,要想保持加压控温腔内的压力,就要求上下密封与连接杆之间要有足够的压力和良好的润滑,但是由于常规的各种密封圈(包括可耐高温的氟橡胶密封圈和聚四氟乙烯密封圈)在高温和高压条件下,一转动起来,很快就会由于磨损而损坏,难以克服高温(低温)、高压和动态旋转三重因素之间的矛盾,导致密封圈的寿命极短,转不了多长时间,密封圈就会被损坏而无法继续保持压力,导致仪器无法继续进行高温高压测试。

为了提高高温高压动态密封圈的使用寿命,有

些仪器采用了多重密封技术,即在加温控压腔与连接杆之间加装了多套耐高温性能优良的密封装置,在一定程度上延长了更换密封装置的间隔周期,但并没有从根本上解决动密封圈寿命短、需要经常更换的问题。

为了进一步提高高温高压动态密封装置的使用寿命和使用的温度、压力范围,国外有的公司设计使用了如图4所示的带有自膨胀功能的高温高压动态密封圈,并设计了对动态密封圈进行水冷的配套装置。如图5所示,通过特殊的结构设计,这种高温高压动态密封圈会由于内部的压力和密封圈内部具有良好弹性的金属片的弹力双重作用,使得密封圈的内圈和外圈分别与连接杆和加温控压腔紧紧靠在一起,达到高温高压密封的目的。虽然这种密封圈采用了能耐高温且耐磨的特殊材料,并且辅之以水冷却系统来降低密封圈周边的温度,但由于在转速较高时,如600 r/min的转速,在驱动外筒的转动轴与密封圈之间不可避免地会产生局部的高温,从而加快密封圈的磨损,导致密封圈很快损坏而失压,试验只能中途停止。



图4 带自膨胀功能的动态密封圈

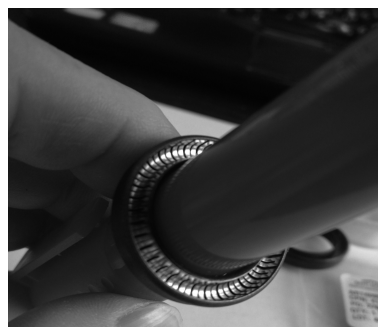


图5 带自膨胀功能的动态密封圈工作原理

总之,由于高温高压动态旋转三重作用,传统的动态密封圈的接触面快速磨损,做不了多少个实验就需要更换动态密封圈,费时费力费钱。

### 1.1.3 高温高压动态密封圈寿命短问题的解决

如何才能从根本上彻底解决高温高压动态密封寿命短的问题?答案只有一个,将动态密封变为静密封。

如图6所示,测试样品和同轴圆筒被封闭在高温高压测试腔中,外筒上的能耐高温的永磁体与测试腔外部的驱动外环通过磁耦合相连接,驱动外环由伺服电机驱动,带动外筒以相同转速同步旋转。内筒通过刚性直杆与上部的角度磁铁相连,高温高压测试腔外部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。

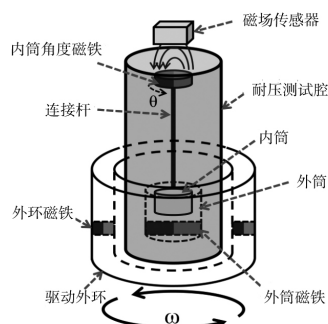


图6 高温高压非接触式转速驱动和非接触式粘度测量原理

利用磁耦合技术,项目组创新研发了外环强力磁耦合旋转驱动装置和非接触式精密粘度测量装置,并将两者组合成一套完整的高精度粘度测量系统,从根本上消除了以往传统设计中采用的动态密封寿命短和精密控制难等问题,样品可以测试的最高温度和压力得到了极大提升。

### 1.2 耐酸碱盐腐蚀的高温高压测试腔的设计和加工

由于钻井液体系中含有各种具有腐蚀性的材料,在高温高压条件下,其腐蚀性更会成倍增长。所以,本项目研发了能耐酸碱盐腐蚀的超高温高压测试腔。

由于哈氏合金不但具有优良的耐腐蚀特性,而且在高温高压条件下变形小,承压能力强,所以选用哈氏合金加工超高温高压测试腔。

高温高压测试腔主体由泥浆杯、中间体、上端帽3部分组成,3部分之间采用梯形螺纹副联结。

耐高温高压测试腔的螺纹在测试时需要承受巨大的载荷,测试后又需要快速方便地开启。普通的

粗牙螺纹自锁性能与抗剪切性能较好,但其抗拉强度和耐磨性不够,难以满足本项目超高温高压测度腔的使用需求。

本项目选用了改进形的梯形螺纹,如图7所示。常规梯形螺纹具有工艺性能好、牙根强度高、螺纹副对中性能好的特点。改进后的梯形螺纹对牙底做大圆弧处理,可以在结构允许的条件下尽可能地增大牙底的圆角半径,牙顶做倒角处理,充分保证螺纹的圆滑过渡,也能更好地保证螺纹副快速的安装与拆卸。这样的设计能够有效地减少螺纹根部的应力集中,提高螺纹的抗疲劳强度<sup>[12]</sup>。

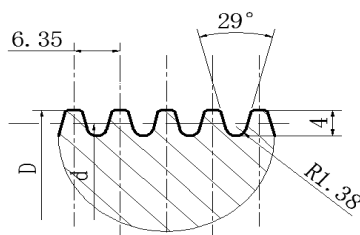


图7 改进后的梯形螺纹牙形

## 2 超高温高压流变仪的应用

项目成功研发生产的5台“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”产业化样机,通过了可靠性测试,无故障工作累计时长超1000 h,具有良好的准确性和稳定性,并进行了2次异地测试,包括中海油服油田化学研究院(河北省三河市燕郊镇)和荆州嘉华科技有限公司(湖北省荆州市),成功实现在高温高压(320℃、220 MPa)及低温高压(-10℃、220 MPa)条件下的流变性能测试。

目前,项目研究成果已实现了科技成果转化。使用项目研发的“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”,先后为中国地质大学(北京)、中国石油大学(北京)、长江大学化学与环境工程学院、南开大学、沙克(天津)石油技术服务有限公司、荆州长大石油科技有限公司、北京石大博诚科技有限公司、北京佛瑞克油田化学技术有限公司、国锐环境工程技术有限公司等国内10多家单位的油基、水基钻井液和凝胶堵漏样品提供了测试技术服务,2020年在国内某新型清洁能源钻探现场对入井钻井液随时进行检测,确保钻井安全高效。同时,先后有3台Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪被中海油能源发展工程技术公司湛江分公司、



中石油西部钻探公司和一家民企订购。超高温高压流变仪产品实物如图8所示。



图8 Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪实物

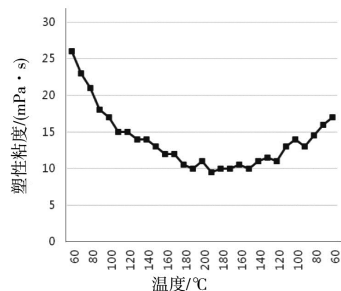
## 2.1 超高温高压流变仪在国内某新型清洁能源钻探现场的应用

2020年,应用项目自主研发的“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”对200℃、50MPa模拟环境下多个钻井液样品的超高温高压流变性进行了现场测试。

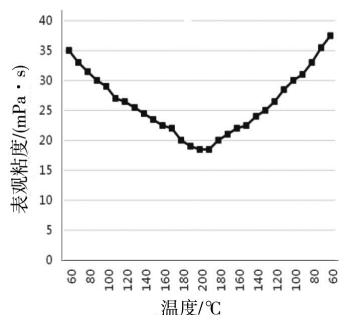
从图9可以看到一个现象,随着温度的升高,被测钻井液体系的塑性粘度和表观粘度都在下降,到200℃时,2种粘度达到最小值。但当温度降低时,被测钻井液体系的塑性粘度和表观粘度都在上升,都在恢复,虽然没有完全恢复到当初的值。被测样品经过高温老化后,温度恢复到常温后其塑性粘度比老化前要低,而表观粘度经老化后则稍有所升高,证明高温对被测钻井液体系的高分子和粘土结构有所破坏,流动性稍微有所下降。

从图9的测试曲线可以看到,使用高温高压流变仪测试样品的流变性随温度的变化规律时,可以模拟实际的高温高压环境,观察到被测样品在真正的高温高压环境下流变性的变化情况。

使用传统的滚子炉热滚法来评价被测样品的耐温特性的测试过程大致为:首先在常温常压下测定样品的特性(如流变性、滤失性、润滑性等),然后将样品加入高温老化罐中,加压后放在高温滚子炉里进行多个小时的热滚(如150℃,滚动16h)。热滚后,将老化罐放凉到室温后,将老化罐拧开,将样品取出,测定样品热滚后的特性。通过将样品热滚前



(a)塑性粘度随温度的变化曲线



(b)表观粘度随温度的变化曲线

图9 国内某新型清洁能源钻探现场钻井液塑性粘度和表观粘度测试结果

和热滚后测定的结果进行比对,来判断样品耐温的特性。

这种热滚法测定样品的耐温特性有一定的局限性,因为两次测试都是在常温常压条件下测试的,用的是一种外推法。从图9用超高温高压流变仪测试样品的塑性粘度和表观粘度随温度的变化曲线来看,当样品从高温降温到常温时,其变差的特性有很大一部分可以恢复过来,也就是说热滚后在常温测得的结果并不能完全代表样品在真实的高温高压环境下的情况,其测得的结果往往偏好,导致测试的性能指标虚高。这也正说明了之前不止一次发生的一种怪现象,即用滚子炉法测定的样品耐温特性很好,比如可以耐温240℃,而样品下到井里(比如井下温度可能只有200℃)却不断发生事故<sup>[13]</sup>。

所以,对于深井和超深井,由于井下存在着高温高压环境,样品或钻井液在下井之前,使用高温高压流变仪对其进行测试和评价就很有必要,避免井下事故的发生,提高钻井的效率和安全性<sup>[14-15]</sup>。

## 2.2 超高温高压流变仪在中国石油大学(北京)的

## 应用

### 2.2.1 有土相白油基钻井液粘温曲线测定

应用自主研发的“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”,在中国石油大学(北京)对其研制的有土相白油基钻井液进行了高温高压流变性测试,测试得到的粘温曲线如图10所示,从图中可以直观地看到该体系从室温加热到180℃过程中粘度的变化情况。

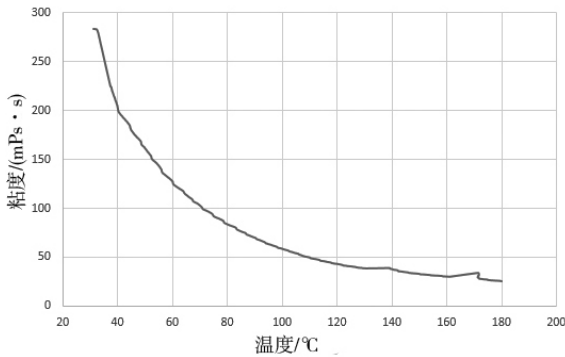


图10 有土相白油基钻井液粘温曲线

### 2.2.2 凝胶起凝点的测定

之前,高温凝胶随温度的变化过程及起凝点的测定一直没有一种直观、精确的测定方法。在“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”研发成功后,中国石油大学(北京)用此流变仪对其研制的一种高温凝胶进行了粘度随温度变化规律和起凝点进行了精确测定,如图11所示。

### 2.3 在中国地质调查局新型清洁能源项目中的应用

如图12所示,使用“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”对中国地质调查局负责的一项新型清洁能源科技攻坚项目中使用的压裂液样品在42 MPa条件下不同温度和不同剪切率对粘度的影响进行的测试,研究人员获得了满意的测试结果,可以据此优化压裂过程中相关参数的设置。

### 2.4 在高温地热井井温测试中的应用

此外,“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”还可应用于对超高温地热井井温的测量和校正研究中。研究人员应用超高温高压流变仪对井下温度与压力进行了真实模拟,对水银留点温度计在不同温度、压力条件下的温度漂移进行了测试研究,摸清了留点温度计温度漂移随深度(环境压

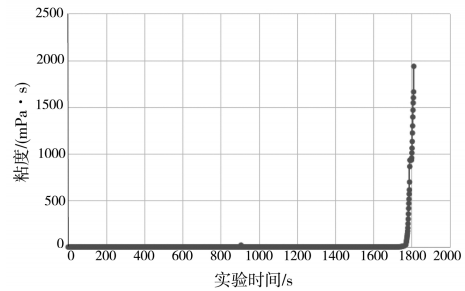


图11 在一定温度下形成的堵漏用凝胶样品

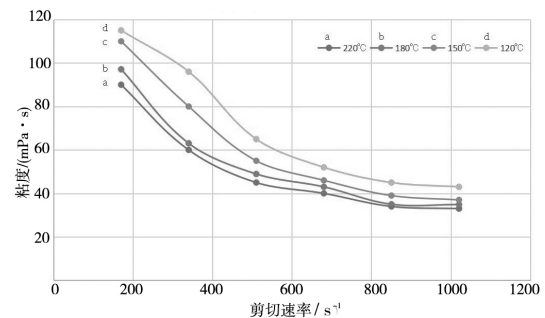


图12 应用超高温高压流变仪测试温度和剪切率参数对粘度的影响

力)变化的相关规律。

如图13所示,由于制作工艺的原因,水银留点温度计的水银泡大小和形状会有所不同,即水银泡的表面积不一致,根据公式 $F=PS$ (式中: $F$ ——水银泡表面所受的压力,N; $P$ ——压强,Pa; $S$ ——水银泡表面积, $m^2$ ),即在相同压力下,由于水银泡表面积不同,水银泡受力会有所区别。在压力变化不大的情况下,这种制作工艺上的差异所造成的温度差异可能比较小,可以忽略不计。但当压力的变化比较大时,这种差异就会比较大,如表1所示。

图14是根据表1所做的水银留点温度计读值

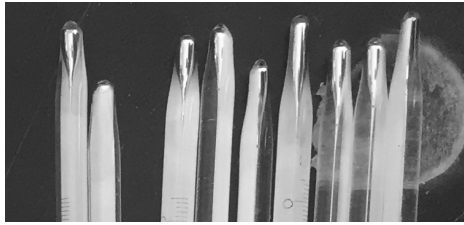


图13 水银留点温度计

表1 水银留点温度计读值受压力影响试验

序号	压力/N	压强/MPa	实际温度/°C	读数/°C	温差/°C
1	14.6	0.101	22	22	0
2	1600	11.024	22	30	8
3	2840	19.5676	22	36	14
4	4013	27.64957	22	42	20
5	6408	44.15112	22	54	32
6	6973	48.04397	197	232	35

差值与外部压力的关系曲线,从图中可以看出,水银留点温度计读值差值与外部压力成正比关系。

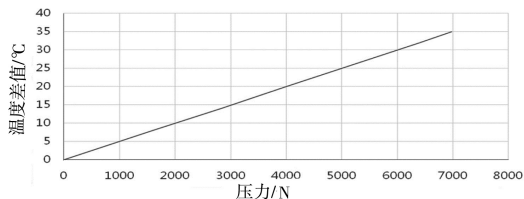


图14 水银留点温度计读值差值与压力的线性关系

### 3 结语

长期以来我国高端流变仪主要依赖进口,这些进口仪器价格昂贵,售后维修周期长、费用高,在一定程度上制约了我国超深钻探的发展。由北京探矿工程研究所牵头研发成功的“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”可以实现真实地模拟高温高压环境,实现了对样品实时高温高压和低温高压测试,各项性能指标达到了国际先进水平,打破了国外高端钻井液流变仪的技术和产品垄断,可以提升我国超深钻探的能力和水平。

使用“Super HTHP Rheometer 2018超高温高

压流变仪”实时测试样品的流变性,可以从根本上克服传统滚子炉热滚法测试样品可能导致测试的性能指标虚高的缺陷,从而可以避免井下事故的发生。

“Super HTHP Rheometer 2018超高温高压流变仪”研发成功后,为国内10多家单位的油基、水基钻井液和高温堵漏凝胶等不同样品提供了精确的测试技术服务,科技成果实现了良好的转化,为评价和优选深井、超深井高温高压钻井液体系,确保安全、高效钻探提供了可靠的测试手段。

### 参考文献:

- [1] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营:石油大学出版社,2001:57-87.
- [2] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 东营:石油大学出版社,2000:219-225.
- [3] 许洁,乌效鸣,契霍金 V. F,等. 超深井 240°C 高温钻井液室内研究[J]. 中国矿业,2015,24(4):134-137.
- [4] 卜海,徐同台,孙金声,等. 高温对钻井液中黏土的作用及作用原理[J]. 钻井液与完井液,2010,27(2):23-25.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 祝有海,张永勤,方慧,等. 中国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.
- [9] 杨晓璞,崔玉江. 同轴圆筒旋转黏度计测量原理详析[J]. 大学物理,2005(4):42-44.
- [10] 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.
- [11] 张孝华,罗兴树. 现代泥浆实验技术[M]. 东营:石油大学出版社,1999:24-34.
- [12] 邓都都,李进,韩天夫,等. 超高温高压流变仪耐压测试腔螺旋设计与强度校核研究[J]. 地质装备,2018,19(1):36-38.
- [13] 吴奇,孙宁,郑新权,等. 复杂深井钻井技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2009:204-213.
- [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.
- [15] 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.