

有限圈闭复杂沥青质稠油层钻井难点与对策

鲍洪志, 肖超, 赵向阳, 何青水, 杨顺辉, 王朝明

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 101100)

摘要:中东 YD 油田为海相碳酸盐岩地层, Kazh 地层分布着活跃的非均质沥青质稠油, 高压并含有酸性气体, 为非目的层, 需要钻穿并封隔该层后对下部产层进行开发。由于沥青质稠油层分布不均, 孔隙压力不确定, 对钻井工程造成了极大的挑战。在第一期施工中, 3 口井由于沥青质稠油的侵入被迫工程弃井, 未能实现工程目的。针对此世界性难点问题, 开展了沥青质稠油侵入机理实验研究、固化剂研制、控压钻井技术应用等一系列配套工艺技术研究, 提出了复杂沥青质稠油层安全钻井技术对策, 现场应用取得较好的效果。

关键词:有限圈闭; 沥青质稠油; 溢漏同存; 固化剂; 控压钻井

中图分类号:TE242; P634.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)12-0018-05

Difficulties and Solutions for Drilling in Finite Geological Structure Trap Asphaltene Heavy Oil Layer/BAO Hong-zhi, XIAO Chao, ZHAO Xiang-yang, HE Qing-shui, YANG Shun-hui, WANG Chao-ming (Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 101100, China)

Abstract: Oilfield YD is one of marine strata carbonate reservoir in Middle East, active heterogeneous asphaltene heavy oil are distributed in Kazh formation with high pressure and acidic gas; being non-target layer, Kazh formation should be drilled through and isolated, then the lower payzone can be developed. Uneven distribution of asphaltene heavy oil and uncertain pore pressure bring severe challenges to drilling construction. Because of asphaltene heavy oil intrusion, 3 wells had to be abandoned in the first phase construction. In view of this world difficult problem, the technical study was made with some results. This paper discusses the experimental study on the intrusion mechanism of asphaltene heavy oil, the development of hardening agent, the application of managed pressure drilling technique and a series of associated technology research, proposes the safe drilling measures for asphaltene heavy oil layer and presents the field application effects.

Key words: finite geological structure trap; asphaltene heavy oil; coexistence of loss circulation and well kick; hardening agent; managed pressure drilling

1 区域地质特征

中东 YD 油田是中国石化海外首个自主设计、施工与开发的大型整装油田, 该油田地质条件复杂, 高温、高压及高含硫, 钻井工程中面临多压力体系、井漏、井塌、盐膏层、酸性气体溢出、复杂沥青质稠油溢出等一系列复杂情况。地层以灰岩为主, 主力储层为 Sarv 和 Fahli 两套储层, 地层分层及岩性描述见表 1。

2 复杂沥青质稠油层钻井难点

Kazh 地层富含沥青质稠油, 为非目的层。埋藏深度 3500 m 左右, 岩性以沥青页岩、灰岩和泥质灰岩为主, 微裂隙与孔隙发育。地层温度约为 110 ℃。钻井工程难点主要表现在以下几点。

(1) 难以确定地层孔隙压力。实测资料表明,

该地层未发生严重沥青质稠油侵入的井实测孔隙压力当量钻井液密度为 1.19 ~ 1.29 g/cm³, 在钻遇到活跃沥青质稠油层的 3 口井, 由于无法进行实测, 现场采用关井求压方式求得的地层压力当量钻井液密度为 1.58 ~ 1.65 g/cm³。

(2) 现场钻井液性能控制困难。沥青质稠油的侵入严重影响钻井液性能, 使钻井液密度、粘度与切力等恶化, 现场不得不倾倒与排放钻井液, 严重影响钻井施工并增加成本。其中一口井由于钻井液污染, 共排放 2000 m³, 漏失 900 m³, 重晶石消耗 3000 t。

(3) 钻井复杂时间长, 固井困难。由于沥青质稠油大量侵入井筒破坏钻井液性能, 增大了流体循环阻力, 固井下尾管中途顶泵时造成悬挂器提前坐挂, 以及固井前开泵困难而难以建立循环, 造成施工

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2016-11-11

基金项目: 国家十三五重大专项“海上油气田关键工程技术”(编号: 2016ZX05033-004) 及中石化科技部项目“伊朗雅达油田活跃沥青侵害防控钻井技术研究”(编号: P16104) 联合资助

作者简介: 鲍洪志, 男, 汉族, 1966 年生, 教授级高级工程师, 从事石油钻井工艺技术研究及海外技术支持工作, 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 502 室, baohz.sripe@sinopec.com。

表 1 地层分层及岩性描述

系	地层	顶深/ m	层厚/ m	岩性描述
第三系	Agha	20	1090	砂岩, 泥岩, 泥灰岩, 薄层石灰岩, 石膏及无水石膏
	Gach	1110	440	无水石膏, 泥岩和泥灰岩
	Asma	1550	240	砂岩, 泥岩夹石灰岩和页岩
	Pab	1790	480	泥灰质, 浅棕色, 浅灰色石灰岩
	Gur	2270	390	灰色泥质石灰岩, 泥灰岩
	Ila	2660	100	棕色石灰岩, 棕色/白色石灰岩
	Laf	2760	10	泥岩, 灰绿色页岩
	Sarv	2770	670	浅棕色、深棕色石灰岩, 灰色石灰岩, 含 H_2S 、 CO_2
	Kazh	3440	150	深色沥青页岩, 灰色石灰岩, 含 H_2S 、 CO_2
	Burg	3590	40	深灰与灰色泥岩
白垩系	Dari	3630	170	白色/棕色石灰岩, 沥青灰岩, 灰色石灰岩, 泥灰岩
	Gadv	3800	330	泥岩, 灰色泥灰岩, 棕色石灰岩, 灰色页岩, 灰色砂岩
	Fahli	4130	320	石灰岩, 含 H_2S 、 CO_2
	Garu	4500	/	石灰岩

时间延长。

(4)酸性气体逸出,溢漏同存,严重威胁人身及设备安全。钻遇到活跃沥青质稠油层,溢出与漏失同时发生,伴有高浓度 H_2S 逸出,严重威胁人员和设备安全。如 F13 井在处理复杂沥青质稠油侵入过程中,检测到 10000 ppm (15000 mg/m³) 的 H_2S 。

(5)沥青质稠油侵入导致多井工程弃井。F13 井钻进至 3847 m (Kazh 层上部),溢流 1.2 m³,关井套压由 800 psi (1 psi = 6.9 kPa,下同)迅速降低至 350 psi,同时发生漏失。实施 13 次压井堵漏作业,无钻井液返出,井口溢出物为沥青质稠油和含硫化氢气体。由于多次压井与堵漏没有成功,共消耗 4500 m³ 钻井液。被迫打水泥塞弃井,共打水泥塞 12 次才完成弃井。APP2 井与 F21 井也发生了与 F13 井相似的情况,最终打水泥塞弃井。

(6)常规井控工艺技术难以控制。揭开沥青质稠油层后发生涌漏同存,钻井液密度窗口很小甚至无窗口。在堵漏失败情况下,常规的井控压井作业,包括司钻法及工程师法都无法建立循环,难以实现压力平衡而无法实现有效控制。

3 有限圈闭沥青质稠油层侵害机理及对策研究

3.1 有限圈闭工程特征分析

国内外资料表明,由于碳酸盐岩储层具有非均质性,存在有限圈闭定容构造。规模较小的油气储

集体(定容体),占据空间有限,受外力影响明显。围压大,体积变小,反之体积膨胀,所占据空间变大。连通性差的较大油气藏,一定条件下,相当于被分隔的定容体的组合,其压力变化类似于定容体。在钻井工程中表现为井涌、井漏频繁,地层压力不确定,常规压井愈压愈强,漏失的钻井液置换出大量地层流体,井口压力不断升高^[11]。

YD 油田多口沥青侵入的井都表现出此工程特点,如 F21 井钻遇沥青质稠油层无法控制工程弃井后,侧钻距沥青质稠油层水平位移 400 m,未钻遇沥青质稠油层,表明该地层为非均质有限圈闭特点。F19 井处理沥青侵入时,提高钻井液密度来平衡地层压力并不能有效控制沥青向井筒内的侵入,钻井液密度由 1.38 g/cm³ 提高至 1.60 g/cm³,沥青侵入井筒的速度及数量并未减少。F13 井大量出沥青时,使用重浆压井,累计打入各种高密度重浆 4500 m³,结果是重浆进入井底后没返出,但井口返出沥青约 4500 m³。

另外,还有一种现象是在钻进时出口钻井液密度降低,但钻井液液面无变化。如 F02 井在中期完井期间静止 82 h,井下返出了沥青-钻井液混合物 43 m³,F23 井在中期完井期间静止了 76 h,井下返出了沥青-钻井液混合物 39 m³,但坐岗观察液面均正常,未发现溢流显示。

分析工程现象表明,地层压力与钻井液柱压力差不是沥青质稠油的侵入井筒的主要因素,沥青质稠油与钻井液的密度差产生的重力转换现象是产生沥青质稠油大量溢出的主要原因,即在沥青质稠油层钻进时存在置换性漏失。

3.2 室内实验及仿真模拟

针对沥青质稠油与钻井液溢漏同存问题,研制了一套可视化井筒地层裂缝连通装置,采用实验手段模拟沥青稠油-钻井液之间的动态置换规律,考虑钻井液密度、沥青在高温高压状态下的流变性的影响,实验装置可以调节裂缝宽度。通过可视化井筒地层裂缝置换实验数据,验证沥青质稠油-钻井液之间的动态置换规律模型。

3.2.1 实验装置设计

采用两个有机玻璃圆筒模拟井筒与地层,两圆筒中间的平板模拟地层裂缝,如图 1 所示。在裂缝面板上粘砂,形成裂缝面内微凸体,模拟不规则裂缝。平板的四角分别装有压力传感器。整个模拟装置均是开放系统,地层边界条件为压力边界,无限大

地层。井筒边界条件为压力边界,整个井筒内钻井液能够循环,视为开放边界。可以通过加大缝宽、减小板宽、降低粘度来改变喷漏同存现象明显程度。

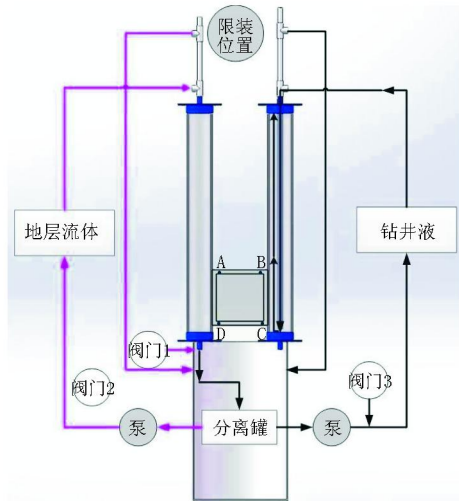


图1 实验装置示意图

3.2.2 实验方案设计

将模拟地层的容器设定为一个封闭定容空间,钻井液有多少进入地层就有多少地层稠油进入井筒。模拟正常钻进过程中地层-井筒置换的情况:钻井液从钻杆上部注入,由环空返出,观察环空中钻井液与地层稠油的置换现象。模拟关井情况下环空钻井液与地层稠油置换的情况:将钻井液充满钻井井筒与环空之后关泵,使得井筒形成密闭空间。在此情况下观察环空钻井液与地层稠油的置换现象。实验参数见表2。

表2 实验基本参数设计

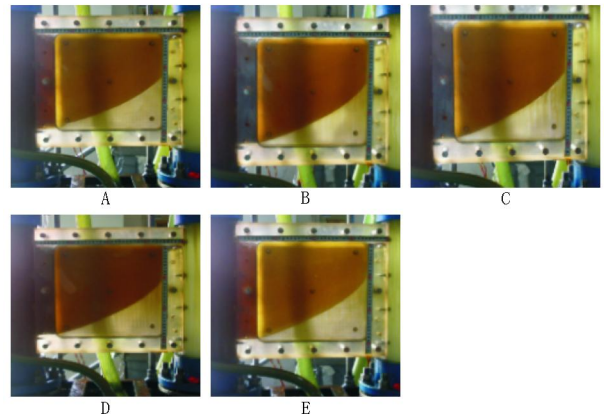
实验材料	基本参数
模拟沥青质稠油粘度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	224、3742、5024
模拟沥青质稠油密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.84
模拟钻井液粘度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	15、82
模拟裂缝宽度/mm	0.5、1、1.5、2.5
模拟钻井液密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.0~1.5

3.2.3 定容实验现象

模拟实验中观察到了两相分界面现象,是重力置换式溢漏同存的重要特征,为了分析不同缝宽的两相分界面特征,记录了两相分界面图像,如图2。

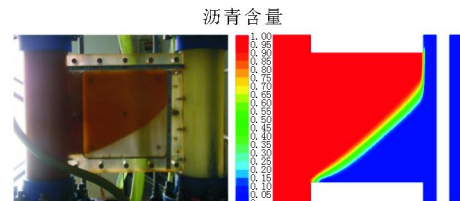
3.2.4 仿真模拟

应用CFD软件模拟缝宽和沥青质稠油粘度分别为0.5 mm和224 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 时,沥青质稠油和钻井液两相分布形态见图3。在裂缝下部被钻井液替换,裂缝上部区域模拟沥青质稠油进入钻井液井筒,

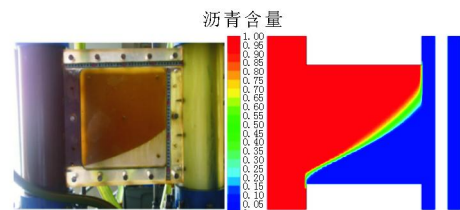


(注:图A—E中,两相分界面实验中缝宽2.5 mm,沥青粘度5024 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,钻井液密度依次是1.03、1.13、1.23、1.27、1.40 g/cm^3)

图2 模拟实验可视化两相界面图



(a) 0.5mm缝宽实验与数模两相云图



(b) 1mm缝宽实验与数模两相云图

图3 模拟仿真两相界面云图

呈现裂缝上部沥青喷而裂缝下部钻井液漏失同时存在现象。这种现象与实验结果规律相同,证明了高粘沥青介质与钻井液存在重力置换。

分别模拟裂缝宽度1、1.5和2.5 mm情形的沥青质稠油与钻井液置换状态,与实验结果分布规律基本一致。对比不同缝宽两相云图,缝宽越大,沥青和钻井液交界面越陡峭,井筒中因置换侵入的沥青质稠油的量越大。

3.2.5 实验与仿真研究认识

(1)当沥青的粘度和裂缝宽度保持恒定时,随着钻井液密度的增加,在循环与不循环的定容实验中,裂缝中的置换量逐渐增大,增大的趋势均符合对数关系。

(2)通过调节裂缝宽度,随着裂缝宽度的增加,定容循环与不循环实验中,置换量呈线性趋势增大。

(3)当裂缝宽度和钻井液密度保持恒定时,随着沥青粘度的增加,定容循环与不循环实验中,置换量呈对数关系减小。

(4)孔隙型裂缝相比较裂缝地层来说置换现象不明显,置换量很小。

(5)定容实验中,钻井液粘度与漏失量呈现反比关系,说明随着钻井液粘度的增加,会有效抑制钻井液的漏失及稠油上返情况。

(6)钻井液密度和地层稠油密度相等的情况下,不会发生置换现象或者置换现象不明显,在等压过程中,置换现象同样不明显。

(7)对定容循环与不循环实验各个参数的增量进行比较,虽然置换量的增量都随着密度、缝宽及压力的增量增加而增加,缝宽对置换量的影响比密度对其的影响要大的多,即缝宽在置换量的影响因素中占主要地位。

通过该项实验,建立了钻井液与沥青的转换规律模型,为制定科学合理的沥青质稠油层安全钻井的技术对策提供了依据。

3.3 沥青质稠油固化剂研制

基于沥青质稠油侵入的试验研究以及取得的结论,裂缝因素是影响转换性漏失的重要因素,因此开展了以固化与封堵地层通道为目的的控制方案研究。开发和优选性能优良的固化剂,采用沥青固化技术固化稠油,封堵沥青流动孔道,阻止沥青涌入井筒,切断钻井液污染源,保障钻井及后续固井作业顺利进行。

3.3.1 氧化固化剂

氧化固化的基本原理是氧化剂与沥青中成分发生反应,破坏了沥青中原有的组分和结构,使沥青性质发生改变。在一定温度下,烷基侧链易于断裂形成自由基而引发氧化反应以及沥青中活性基团与氧化剂中氧发生反应,氧化反应符合自由基链反应历程,氧化反应的主要产物为羰基与亚砷官能团,深度氧化可能进一步生成羧酸与酸酐官能团。分子间因极性官能团的缔合与缩聚作用,使得老化后沥青的平均分子量增加,分子量分布发生明显变化。从组成和性质上分析,老化后沥青中胶质减少,沥青质增加,软化点升高,粘度增大,针入度下将,沥青变硬。

沥青质稠油轻质成分向重质成分转化可表示为: $A(\text{芳香分}) \rightarrow R(\text{胶质}) \rightarrow As(\text{沥青质})$ 。在温度的作用下沥青分子中活性基团裂解产生自由基,活性自由

基与氧化剂反应进一步转化成氢过氧化物中间体($R-O-O-H$)。氢过氧化物中间体不稳定分解转化成含羰基官能团的组分,同时沥青分子中的双键在氢过氧化物的作用下可以转化成含羰基的官能团。

在沥青质稠油分子研究的基础上,优化了多种固化剂并进行了室内实验,用现场取得的沥青质稠油进行了评价实验。研制了 YHJ-6 氧化固化剂,主要性能:120 ℃、4 h、5 MPa 下,固结体的抗压强度 1.89 MPa。

该固化剂适用于沥青质稠油侵入量小,通过在钻井液中添加一定比例的固化剂,实现沥青质稠油聚集并固结,通过钻井液循环系统(振动筛)清除。

3.3.2 自交联固化剂

当沥青质稠油侵入严重,氧化固化剂难以控制时,采用以固化并封堵地层通道、切断污染源的思路。研发了自交联有机堵漏固化剂(GUJ-5)。GUJ-5 是 4 种有机单体按一定比例组成的混合液体,4 种单体分别为植物油脂类、有机酯类、多元醇类及多元胺类。与常规化学堵漏剂不同的是,GUJ-5 密度只有 $0.9 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$,接近沥青质稠油的密度,可最大限度减小重力置换程度。该固化剂在常压室温下,10 h 内能保持良好流动性;在一定温度(70~160 ℃)、压力(5~60 MPa)下,3~5 h 形成具有一定强度(抗压强度 $\geq 10 \text{ MPa}$)的固体堵漏剂。现场应用时,将自交联有机堵漏固化剂(GUJ-5)注入含沥青质稠油地层,在井下温度压力下迅速固化封堵稠油流通通道,控制沥青质稠油的溢出。

3.4 沥青质稠油层控压钻井技术

当发生严重沥青质稠油侵入,并伴有酸性气体溢出,采用固化剂及其它工艺技术难以控制时,为保障地面人身与设备安全,首先要控制井口。依照此思路,提出了基于控压钻井(MPD)技术的控制方案。

基于室内置换实验的基础上,通过对地层压力的估算,采用 MPD 钻井方式进行井口控制。该技术虽然不能解决由于置换引起的沥青质稠油溢出,但可以控制井下压差,减轻置换程度。主要工艺包括恒定井底压力控制方法和加压泥浆帽控制方法。

3.4.1 井底恒压压力控制(CBHP)方案

通过井身结构优化,技术套管封隔上部易漏层,通过 MPD 设备控制井底压力略大于地层压力。保持井内压力近似恒定,减小压力波动,避免漏、涌发生。由于沥青质稠油层(Kazh 地层)的孔隙压力具

有非均质不确定性,通过多井测试资料进行估算。例如 APP2、F21、F3、F13 井在该地层钻进时钻井液密度分别为 1.37、1.38、1.45、1.52 g/cm³,均出现了溢流。因此,初始时按照漏失压力进行钻井液密度设计。按设计的钻井液密度进行控压钻进,溢流后不建议关井,而是通过循环节流逐步调高套压的方法控制溢流、并验证漏失压力。如果地层没有压稳并发生了漏失情况,则推荐第二套方案——强钻方案。如果地层已经压稳,没有发生漏失,则进行钻井液密度的调整,使井底压力高于地层压力 100 psi。在起下钻与接单根时,控制泥浆泵、压井管汇、钻井四通、节流管汇进行回压施加,考虑环空压耗损失,保持井底恒压压力。

3.4.2 加压泥浆帽控压钻井(PMCD)方案

如果沥青溢出量较大,或有高浓度 H₂S 溢出,或者发生失返性漏失,推荐加压泥浆帽控压钻井方案。即套管鞋上部环空中注入一段高粘度与高密度的钻井液(比平衡地层压力所需的钻井液密度要偏低),关闭井口环空,按照井口套压的大小对井底压力进行分析与确定。强行钻进过程中,从钻杆注入的钻井液不返出,连同地层岩屑直接压入地层裂缝或孔洞中。为了防止 H₂S 等酸性气体上移至井口,套管鞋上部的“泥浆帽”通常为一段高粘与高密度钻井液,并定期补充与监控。

3.5 现场应用方案与效果

针对 YD 油田含硫化氢活跃沥青质稠油层安全钻井难题,从沥青侵入机理、沥青处理剂研发、现场施工工艺等方面进行了研究,形成了一套沥青质稠油层安全钻井配套方案。

(1)在沥青侵入速度 < 5 m³/h,能维持正常钻进的轻度沥青污染情况下,采用随钻堵漏和沥青乳化技术阻止和预防沥青侵入井筒。

(2)在沥青质稠油侵入速度 5 ~ 20 m³/h 钻进困难的中度沥青污染情况下,采用化学固结和沥青固化技术堵塞置换通道。

(3)在沥青质稠油侵入速度 > 20 m³/h,并伴随 H₂S 溢出(> 20 ppm< 30 mg/m³)无法正常钻井的情况下,采用 MPD 技术实现沥青质稠油层强钻方案。

氧化固化技术在 F17 井进行了现场试验,沥青质稠油层埋深 3370 ~ 3509 m,钻进中振动筛处沥青量占岩屑返出量的 40% ~ 60%。钻至井深 3428 m

时,泵入 6 m³ 固化剂,顶替到位,起钻至套管鞋处,大排量洗井 2 h,利用压差将部分沥青硬化封堵浆挤入地层。使用沥青固化封堵技术后,活跃沥青侵入量明显降低,单位时间内沥青污染量降低了 81%。

S3 井在钻至井深 3494 m 时钻时加快(由 24.45 min/m 加快至 12.47 min/m),并发现沥青质稠油返出。按制定的方案实施 MPD 强钻。初始钻井液密度 1.60 g/cm³,根据施工中井口压力情况进行分析与调整,包括井口加回压、提高钻井液密度、随钻堵漏、控压堵漏、随钻加入脱硫剂等措施。按照强钻方案,该井成功钻穿沥青质稠油层,并完成了后续的下套管及固井等作业。

4 结语

(1)该技术在 YD 油田多口钻遇沥青质稠油层的井应用,成功完成前期因沥青质稠油层问题被迫工程弃井的 3 口井,为含 H₂S 活跃沥青质稠油层安全钻井难题进行了有益的探索。

(2)针对有限圈闭复杂沥青质稠油层,采用常规的井控工艺技术具有一定的局限性,需要根据实际情况,制定安全、合理与有效的钻井方案。

(3)采用综合工艺技术,如优化井身结构,采用专打专封井身结构等,是解决活跃沥青质稠油层安全钻井问题的重要配套技术。

参考文献:

- [1] 何青水,宋明全,肖超,等.非均质超厚活跃沥青层安全钻井技术探讨[J].石油钻探技术,2013,41(1).
- [2] 杨顺辉.可视化重力置换室内模拟装置的研制与应用[J].石油机械,2015,43(3).
- [3] 赵向阳,豆宁辉,黄在福,等.活跃沥青层控压钻井技术研究与应用[J].钻采工艺,2015,(11).
- [4] 陈天成.定容性构造泄压法压井技术[J].钻采工艺,2009,32(1).
- [5] 景彦平.沥青结构及高聚物改性沥青机理研究[D].陕西西安:长安大学,2006.
- [6] 李季.塔河超稠油胶质、沥青质形貌分析[J].石油与天然气化工,2010,39(5).
- [7] 王果,樊洪海,刘刚,等.控制压力钻井技术应用研究[J].石油钻探技术,2009,37(1).
- [8] 周英操,崔猛,查永进.控压钻井技术探讨与展望[J].石油钻探技术,2008,36(4).
- [9] 郭京华,夏柏如,黄桂洪,等.稠油沥青污染钻井液的处理技术[J].钻采工艺,2012,35(4).
- [10] 郭京华,夏柏如,赵增新,等.F19 井沥青侵及相关井下复杂情况的处理[J].特种油气藏,2012,19(4).
- [11] 赵向阳,孟英峰,李皋,等.充气控压钻井气液两相流型研究[J].石油钻采工艺,2010,(2).
- [12] 陈林,范红康,胡恩涛,等.控压钻井技术在涪陵页岩气田的实践与认识[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7).