

海上高产高含蜡油气井测试工艺优化

冯大龙¹, 黄伟¹, 谭振兴², 张勇雪³, 于虎基³, 苏璇³

1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司工程技术作业中心 上海 200335

2. 中海艾普油气测试(天津)有限公司 天津 300457

3. 中国石油集团渤海钻探工程公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者:Email:fengdl@cnooc.com.cn

项目支持:中海石油(中国)东海西湖石油天然气作业公司生产性科研项目“西湖高产高含蜡油气层 DST 测试工艺优化研究”(CCL2019XHPS003DMT)

引用:冯大龙, 黄伟, 谭振兴, 等. 海上高产高含蜡油气井测试工艺优化[J]. 油气井测试, 2021, 30(2): 13-18.

Cite: FENG Dalong, HUANG Wei, TAN Zhenxing, et al. Optimization of testing technology for offshore oil and gas wells with high yield and high wax content [J]. Well Testing, 2021, 30(2): 13-18.

摘要 东海油田西湖某高产高含蜡油气井测试作业期间,地面流程结蜡,井内返出碎屑堵塞油咀管汇、原油燃烧不充分。从固控、加热保温及原油燃烧工艺等方面细化研究,采用空心电加热杆、高强度气凝胶隔热管和地面蒸汽加热同心管,实现井下到计量罐全流程加热保温,确保原油温度始终保持在析蜡点以上,提高含蜡原油流动性;采用井下割缝管和井口捕屑器组合工艺,预防井内返出碎屑堵塞流程;优选原油燃烧器及优化燃烧配气参数,为高产原油燃烧提供保障。现场实践证明,该技术解决了高产高含蜡油气井测试难题,为东海西湖某区块的后期评价积累了配套技术。

关键词 高产油气井;高含蜡原油;油气井测试;电加热杆;隔热管;捕屑器;割缝管;地面计量

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.02.003

Optimization of testing technology for offshore oil and gas wells with high yield and high wax content

FENG Dalong¹, HUANG Wei¹, TAN Zhenxing², ZHANG Yongxue³, YU Huji³, SU Xuan³

1. Engineering Technology Operation Center, Shanghai Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shanghai 200335, China

2. CNOOC Cosl-Expro Testing Services (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300457, China

3. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: During the test operation of a high yield and high wax content oil and gas well in Xihu, Donghai Oilfield, wax easily deposits on the surface flow, oil nozzle manifold is easily blocked by debris returned from the well and crude oil insufficiently combusts. In this paper, solid control, heating and insulation, and crude oil combustion technology are studied. The hollow electric heating rods, high-strength aerogel insulation pipes and surface steam heating concentric pipes are used to realize the heating and heat preservation in the whole process from downhole to the metering tank, to ensure that the crude oil temperature is always maintained above the wax precipitation point, and to improve the fluidity of waxy crude oil; in addition, the combined technology of downhole slotting pipe and wellhead chip collector is adopted. The optimized crude oil burner and combustion gas distribution parameters provide guarantee for high-yield crude oil combustion. The field practice shows that this technology solves the testing problem of high yield and high wax content oil and gas wells, and accumulates supporting technology for the later evaluation of a block in Xihu, East China Sea.

Keywords: high yield oil and gas well; high waxy crude oil; oil and gas well testing; electric heating rod; insulation pipe; chip catcher; slotted pipe; surface measurement

以往,东海油田地层测试工艺主要针对气井,解决不同天然气产量条件下的井下及地面流动保障问题,井下测试工艺采取成熟可靠的射孔及测试联作测试,通过测试阀实现井下开关井和压力恢

复,地面采用高压井口控制流程和低压油气水分离和计量流程。整套测试工艺成熟可靠,对资料的录取全面准确,作业安全得到了很好的保障,有力地支持了东海西湖低孔低渗油气藏的勘探评价。但

是,自启动东海油田西湖区块部分孔渗条件较好的油气层测试时,由于成藏条件差异,油气井呈现高产原油及原油中蜡含量较高的特点。

据统计,我国所产含蜡量高于10%的原油约占全国原油总产量的90%,其与普通原油相比具有不同的流变性^[1-2]。石蜡对温度变化十分敏感,在温度较低时溶解度下降。当温度降至析蜡点以下时^[3],就会破坏蜡在原油中的溶解平衡,使蜡结晶析出,并沉积在管柱、地面流程中。原油结蜡会增加原油黏度,减小油流动面积,增加流动阻力,并在高产时携带井筒内大量杂质返出堵塞流程,致使在测试中无法获得地层流体的真实产能。现有的海上测试工艺无法达到高产高含蜡油气井安全高效测试要求。通过工艺优化,可保障高产高含蜡油气井的安全高效测试。为解决高含蜡原油测试难题,陆洪涛等^[4]对稠油、高凝油资源的分布及特点进行阐述,并对测试技术,如螺杆泵抽汲、注蒸汽吞吐等工艺进行分析探索。余东合等^[5]提出在非自喷高凝油井采用电加热螺杆泵与地层测试器联作测试工艺,解决了各类高凝、高黏稠油井试油难的问题。白建华等^[6]建立海上高含蜡油田井筒温度场传热模型,通过数值模拟方法对隔热油管防蜡工艺进行优化设计,说明隔热油管防蜡工艺的可行性。陈广超^[7]提出在江苏油田使用伴热电缆对测试管柱进行加热,改善高凝油流动性,保障高凝稠油井抽汲求产。王爱利等^[8]对包括射流泵增温排液、同心管闭式增温喷射排液、油管变频电加热排液和双空心抽油杆内循环电磁加热螺杆泵排液等高凝油藏试油排液工艺进行探索,提出排液举升工艺的选择应综合考虑油藏类型、流体特性、产液能力、井身结构和井口压力等条件,以实现工艺的针对性和可操作性。卢中原等^[9]将中低频智能双频组合变频加热装置与全井筒保温技术等配套,形成了稠油井测试泵抽加热工艺组合,节能高效,加热设备运行安全可靠。李楠^[10]在大庆油田采用水力泵排液工艺,利用Wellflo软件模拟分析水力喷射泵排液施工参数,并进行优选,对高凝油井进行快速排液求产,顺利求取了目的层产能等数据,对指导高凝油井测试具有重要实际意义。以上研究探讨分析了现有的高含蜡油气井测试工艺,从中看出工艺优化主要方向是提高温度和举升方式优选两方面。

东海油田西湖某构造的原油除了含蜡量高、凝固点高等特点造成易结蜡、流动性差等问题之外,

还具有自喷能力强、测试产能高等特点,同时造成井筒杂质易返出、高产含蜡原油燃烧等难题。这些问题将严重影响后续作业安全及测试资料录取。因此,现场急需通过优化整个测试工艺,并针对性地进行专题攻关,提出高效的解决方案。

1 问题描述及分析

东海西湖油田某构造测试过程中出现了以下三个典型问题:

(1)在地面流程温降较大的部位,蜡质组分极易析出并凝结,从而造成地面流程的堵塞风险,且堵塞的蜡质会随着流动对地面油气处理设备形成冲击,安全隐患大;

(2)随着产量及井下管流流速的加大,高产原油将井底射孔弹的金属外皮及不明橡胶件携至井口,可能造成无征兆的临时关井,对井下资料的录取影响大;

(3)高含蜡原油和空气混合的雾化效果差造成燃烧不充分。

1.1 原油在地面流程中结蜡

众所周知,含蜡原油的黏度(决定流体流动性的关键因素)与温度有关。当含蜡原油的温度高于析蜡点,黏度和温度的关系可以用 Arrhenius 方程描述,即

$$\eta = A e^{\frac{E_a}{RT}}$$

式中: η 为表观黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; A 为指前因子, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; E_a 为黏流活化能, J/mol ; T 为绝对温度, K ; R 为气体常数(值为 8.314), $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

含蜡原油密度 0.857 ,含蜡量 13% ,析蜡点 $30.6\text{ }^\circ\text{C}$,凝固点 $19\text{ }^\circ\text{C}$ 。在地面流程温降较大的部位,蜡质组分极易析出并凝结,从而造成地面流程的堵塞风险,且堵塞的蜡质会随着流动对地面油气处理设备形成冲击,安全隐患极大。

当含蜡原油的温度低于蜡的析出温度时,譬如大庆油田原油的溶蜡点比其析蜡点高出 $11\sim 18\text{ }^\circ\text{C}$,说明直接影响含蜡原油流变性的关键因素是已结晶析出的蜡量,而不仅是油中的蜡含量。在析蜡点温度以上,原油中的蜡以分子形式溶解于液态油中,此时其黏度主要取决于其中轻质油的含量和胶质沥青质的含量。Abdel-Waly 的研究结果表明,在析蜡点温度以上,含蜡量的高低对油样的黏度几乎无影响。蜡晶开始析出,原油呈现出明显的非牛顿流体特性,黏度急剧增加。若温

度继续降低,析出蜡晶数量增加,结晶形成网状物^[11-12]。当温度低于凝固点将发生沉积,在管道内部凝结聚集,过流通道直径缩减,阻碍流体通过,甚至堵塞通道。若井口压力小于堵塞物最大承受压力,就会形成地面关井;若井口压力大于堵塞物最大承受压力,管线上游压力急剧增大。当压力增大到堵塞物最大承受压力时,堵塞物会瞬间崩开,以较快速度碰撞流程下游有缩径或流动方向改变(如弯头)的设备,对设备造成冲击伤害,甚至发生安全事故,安全隐患极大,同时难以保证录取资料的准确性。

1.2 大量碎屑由井筒返出堵塞井口

随着井口油嘴的加大,高产原油将井底的射孔弹金属外皮及不明橡胶件携至井口,出现堵塞油嘴的现象,其中碎屑最大可达2 cm,从而造成无征兆的临时关井,对井下资料的录取有较大影响。环状碎屑是枪体盲孔穿孔处周围合金钢材料塑型变形所产生的,粒状碎屑包括射孔弹金属碎屑、套管碎屑等,如图1所示。



图1 井筒返出碎屑实物

Fig.1 Debris returned from wellbore

在流动过程中,高含蜡原油随着温度的降低和原油中气体的析出,黏度增大,其携带固相能力增大。因此,固相颗粒,尤其是大直径颗粒,其在生产管柱中的沉降速度将显著低于高产情况下的流体上返速度,从而造成高产原油将井底的射孔弹金属外皮及不明橡胶件携至井口,出现堵塞油嘴的现象。

1.3 高产含蜡原油不充分燃烧

由于高含蜡原油在温度低于析蜡点时原油呈现出明显的非牛顿流体特性,黏度急剧增加,原油内部结蜡结晶将形成网状物,因此在同等燃烧头的雾化条件下,高含蜡原油通过压缩空气雾化的颗粒直径偏大,从而造成燃烧不充分。

2 工艺优化设计

针对上述问题,对井下及地面流动保障而言,需要从井下适度防固相颗粒上返,井下保温,井口防固相堵塞,地面流程加温保温,提高原油燃烧雾化效果等方面形成具有特色的一整套综合井下管柱及地面测试流程的高产高含蜡井测试工艺。

2.1 测试管柱流动保障技术

为了提高测试管柱内原油流动性,降低原油热损,同时减少井筒内杂质的返出,采用保温油管 and 电加热防蜡、井下割缝管过滤等技术实现了测试管柱的流动保障。

2.1.1 保温油管和电加热防蜡技术

在测试流动期间,地层流体在井筒中流速大,热损相对小,从而在井筒内保持较高的温度,蜡不易析出。地层流体气油比相对较高,对管壁的冲刷能力强,蜡不易沉积在管壁上。然而在测试中途关井期间,地层流体在井筒中处于静止状态,热损增大,原油中的石蜡易析出并沉积,针对该现象特点,采用保温油管和电加热防蜡技术。

在测试管柱中,用保温油管取代原有的钻杆^[13-14],可以隔断或减少测试管柱内部流体与外部流体之间的热量交换。依据原油析蜡点,保温管的下入深度设计优化及电加热的下入深度优化,通过 Pipesim 等专业模拟软件的计算,确保真空保温管的下入深度位置的地层温度高于高含蜡原油的溶蜡点温度10~20℃以上。在高含蜡油气井中,下入保温油管后,井口产液温度得到提高,且随着保温油管下入深度的增加,井口产液温度不断上升。当保温油管下入的深度使井口产液温度高于原油析蜡温度时,可以达到有效防止井筒结蜡的目的。保温效果比较理想且运用比较普遍的两种类型的保温管应用性能对比如下:

(1)气凝胶隔热管^[15]的隔热寿命为20年,是高真空隔热管(10年)的2倍;

(2)气凝胶隔热管的视导热系数明显小于高真空隔热管。

针对低温油气井,在保温油管防蜡的基础上,采用电加热防蜡技术,实现保温油管外部保温,电加热杆内部加热升温双重作用提高油气井井口产液温度。将380 V/50 Hz的三相交流电经整流后变成直流,经逆变电路,变成500~2 000 Hz的单

相电,再经中频变压器隔离后输送到加热电缆。通过加热电缆输送到井内的交直流电流,经抽油杆末端回路器,由抽油杆本体构成回路,回到加热设备^[16-17]。

保温油管+电加热防蜡工艺在南海西部陆丰某高产井中采用螺杆泵空心加热杆加热,抽油杆下至980 m,采用真空保温油管,油管下至857 m,井口数据头温度达到54.5℃,远高于原油凝点,工艺取得成功。其相关数据为:井口压力9.5 MPa,井口温度54.5℃,原油产量600 m³/d,含蜡量20%,原油凝固点39℃。

2.1.2 井下割缝管技术

考虑到射孔弹屑的尺寸,在管柱中设计使用能够对大颗粒杂质进行过滤的割缝管,减少对地面高压井口的堵塞。同时,防止大直径颗粒进入管柱,避免关井测压力恢复期间在测试阀上造成大直径颗粒沉积,以确保后续作业安全。在封隔器下部常用的73 mm油管的内径是62 mm,其过流面积为30.2 cm²,所采用的割缝管应考虑部分割缝堵塞的情况下,其有效过流面积大于30.2 cm²。考虑到射孔时的冲击力,应对割缝管的管壁进行加厚,避免射孔后出现变形。

2.2 地面流程流动保障技术

在地面流程中采用加热器和同心管加热相结合的方式,以实现全流程加热保温,使原油不会在地面流程中结蜡。在井口采用管路捕屑器组合技术,增加井口高压流程的固控手段。

2.2.1 全流程加热保温

由测试树至加热器至计量罐,采用同心加热管^[18]、加热器和具备保温加热能力的计量罐,实现全流程加热保温。在开井流动时降低原油黏度,提高流动性;在关井时保持原油温度,避免原油中石蜡析出并在流程沉积。

2.2.2 管路捕屑器组合技术

针对井筒内返出的大尺寸固相杂质,在井口油嘴管汇上游设置捕屑器^[19]对射孔弹屑、不明橡胶件等进行过滤,避免造成油嘴流动通道堵塞,保障测试求产数据真实、可靠。有别于除砂器对细小砂砾的过滤,捕屑器专门针对于大尺寸固相颗粒的捕捉。井口小型捕屑器和下游流程捕屑器的组合方式,通过下游流程捕屑器可以有效地避免大颗粒固相堵塞燃烧器,如图2所示。

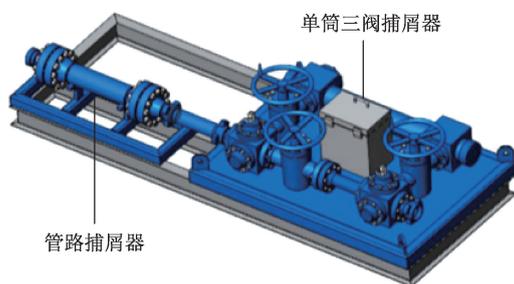


图2 捕屑器组合模块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of combined module of chip catcher

2.3 高产高含蜡原油燃烧保障技术

为使高产高含蜡原油完全燃烧,必须对原油进行充分雾化。对于原油燃烧器^[20-21]的混合雾化方式主要包括:压力雾化喷嘴、旋流雾化喷嘴、气动雾化喷嘴和气泡雾化喷嘴。其中Vulcan燃烧装置采用的气泡雾化喷嘴是在特殊结构的通道中注入压缩空气,使其在原油中形成数量巨大的气泡,气泡经运动、变形、加速等一系列过程后至喷嘴处破裂,从而形成液滴非常小、尺寸均匀、与压缩空气混合充分而又均匀的液雾。该雾化方式对于流体黏度不敏感,燃烧效率高。

测试燃烧采用适合蜡质原油燃烧的Vulcan燃烧装置,并提前在计量罐或储油罐对含蜡原油进行保温加热,充足的压缩空气供应及合理配比,降低原油黏度以达到更好的雾化效果,实现清洁燃烧。

3 现场应用

结合海上测试特点,通过对高产高含蜡油气井地质特征、技术难点的剖析,优化形成的系列高含蜡测试工艺技术在海上与陆地油田含蜡井测试中得到了成功应用。

3.1 东海某高产高含蜡油层测试

该井为东海油田的一口预探井,所处区块的构造呈现岩性复合油气藏特点。结合前期已评价探井及本井实钻显示,目的层储层垂向较发育,油气显示活跃,储层渗透性相对较好,但呈现含蜡量高、原油凝固点高的特点。

本井为三开井身结构,测试层位处在3700~4100 m井段,分别在244.5 mm、177.8 mm套管内各测试一层,均采用TCP+APR射孔测试联作测试工艺。其中第二层测试为高产高含蜡油层测试,其主要测试施工工序为:钻具试压→刮管洗井→替射孔保护液→组下TCP+APR射孔测试联作管柱→校

深射孔→开关井→求产。测试曲线如图3所示。

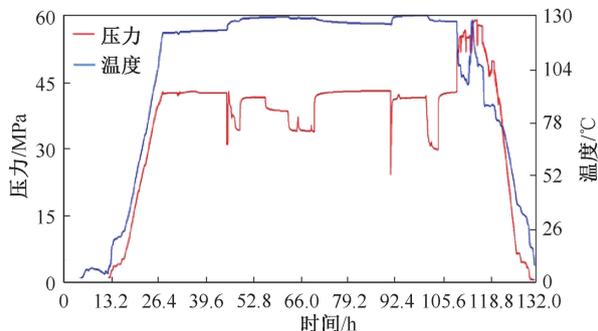


图3 实测压力温度曲线图

Fig. 3 Diagram of measured pressure temperature curve

对以往该区已测试产出原油分析,该层位具备高含蜡原油的特点。因此,本井采用空心抽油杆、气凝胶保温管和同心加热管的保温加热技术,井下割缝管和流程捕屑器组合的固控工艺,气泡雾化方式的Vulcan燃烧器及合理的压缩空气配比的燃烧保障技术组成的高产高含蜡油气井测试系列技术成功实施测试作业,取全、取准了测试地质资料,并取得了良好的测试产能。本井采用三开三关测试工作制度,原油产量为日产近700 m³,原油密度0.86,原油含蜡达21%,凝固点19℃。

3.2 其他海域及陆地含蜡油气井测试

井下割缝管技术、全流程热保温技术、管路捕屑器组合技术、燃烧器及参数优化配比技术等系列技术,在渤海、南海西部稠油测试,以及辽河油田高含蜡油气井测试中均有部分或组合应用。应用表明,该系列技术对解决含蜡油气井测试面临的结蜡、堵塞、燃烧不充分等问题有着显著的应用效果,具备较高的推广应用价值。

4 结论

(1)气凝胶保温油管+空心抽油杆加热组合防蜡工艺使测试管柱内原油温度高于原油中蜡质析出温度,有效保证井筒流动通畅。

(2)井下割缝管的加入有效从源头避免大颗粒碎屑进入管柱,为测试的顺利进行提供保障。

(3)捕屑器成为拦截井筒碎屑的最后一道屏障,多层防护可以有效避免流体携带碎屑对流程的影响。

致谢:感谢中海石油(中国)东海西湖石油天然气作业公司生产性科研项目“西湖高产高含蜡油气层DST测试工艺优化研究”项目组、中海艾普油气测试(天津)有限公司相关技术人员的大力支持。

参考文献

- [1] 刘翔鹏. 高凝油油藏开发模式[M]. 北京:石油工业出版社,1997:67-69
- [2] 宁雯宇. 高含蜡水体系流变特性研究[J]. 石油化工高等学校学报,2015,28(2):87-90.
NING Wenyu. The search of rheological properties of the high waxy oil water system [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2015, 28(2):87-90.
- [3] 何伟,施雯,李树松,等. 含蜡原油析蜡点测试方法综述[J]. 当代化工,2018,47(7):1441-1444.
HE Wei, SHI Wen, LI Shusong et al. Survey of test methods of wax appearance temperature in crude oil [J]. Contemporary Chemical Industry, 2018,47(7):1441-1444.
- [4] 陆洪涛,高银宝. 稠油、高凝油试油方法简述[J]. 油气井测试,1991(2):80-84.
LU Hongtao, GAO Yingbao. Brief introduction of well testing methods for heavy oil and high pour-point oil [J]. Well Testing, 1991(2):80-84.
- [5] 余东合,夏克文,韩琴,等. 稠油高凝油井电加热螺杆泵与地层测试器联作试油工艺[J]. 石油钻采工艺,1999,21(3):105-106,108.
YU Donghe, XIA Kewen, HAN Qin, et al. Production test in heavy oil well by joint work of electric heat screw pump and formation tester [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999,21(3):105-106,108.
- [6] 白健华,刘义刚,吴华晓,等. 海上高含蜡油田隔热油管防蜡优化设计[J]. 长江大学学报(自然科学版),2015,12(35):71-74.
BAI Jianhua, LIU Yigang, WU Huaxiao, et al. Optimized design of vacuum insulated tubing for wax control in offshore oilfield with high wax content [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(35):71-74.
- [7] 陈广超. 高凝油井试油电加热技术的研究和应用[J]. 油气井测试,2010,19(1):72-74.
CHEN Guangchao. Research and application of electrical heating technology for well testing in high pour-point oil wells [J]. Well Testing, 2010,19(1):72-74.
- [8] 王爱利,赵江援,史文奇,等. 冀东油田高凝油藏试油排液工艺的探索[J]. 油气井测试,2014,23(6):36-39.
WANG Aili, ZHAO Jiangyuan, SHI Wenqi, et al. Probe of oil test and unflowing technology to condensate oil reservoir in Jidong Oilfield [J]. Well Testing, 2014, 23(6):36-39.
- [9] 卢中原,谭忠健,许峰,等. 渤海油田稠油测试井智能双频加热降黏技术[J]. 油气井测试,2018,27(6):27-32.
LU Zhongyuan, TAN Zhongjian, XU Feng, et al. Intelligent dual-frequency heating and viscosity reduction technology for heavy oil test wells in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2018,27(6):27-32.
- [10] 李楠. 高凝油井水力泵排液参数分析及优化[J]. 油

- 气井测试,2019,28(1):14-19.
- LI Nan. Analysis and optimization of discharge parameters of hydraulic pump in high pour-point oil well [J]. Well Testing, 2019,28(1):14-19.
- [11] 张建国,于世军,雷光伦,等. 声波在高含蜡油生产中防蜡作用的实验研究[J]. 应用声学,2000,20(4):31-34,20.
- ZHANG Jianguo, YU Shijun, LEI Guanglun, et al. Experimental study of wax control with sonic wave in production of high-wax-content oil [J]. Journal of Applied Acoustics, 2000,20(4):31-34,20.
- [12] 魏盼龙,姜许健,马金龙,等. 精细清蜡配套技术在高含蜡油气井的推广应用[J]. 化学工程与装备,2016(7):121-124.
- WEI Panlong, JIANG Xujian, MA Jinlong, et al. Promotion and application of fine paraffin removal technology in gas Wells with high wax content [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2016(7):121-124.
- [13] 宋立双. 交变磁场油井防蜡技术研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2010.
- SONG Lishuang. Study on the technique of crude oil anti-wax using alternating magnetic field [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2010.
- [14] 付亚荣,李仰民,杨中峰,等. 隔热保温防磨油管在高含蜡油井的应用[J]. 石油石化节能,2019,9(1):44-46.
- FU Yarong, LI Yangmin, YANG Zhongfeng, et al. Application of heat insulation and anti-wear tubing in high wax oil wells [J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2019,9(1):44-46.
- [15] 杜明俊,史东波,邵艳波,等. 基于气凝胶绝热材料的隔热油管传热特性研究[J]. 当代化工,2020,49(1):134-137.
- DU Mingjun, SHI Dongbo, SHAO Yanbo, et al. Numerical study on heat transfer characteristics of downhole insulated tubing with aerogel insulation material [J]. Contemporary Chemical Industry, 2020,49(1):134-137.
- [16] 张召莲,苏娅,吴祖景. 电加热工艺在稠油试油中的应用及效果评价[J]. 科技信息(科学教研),2007(16):49.
- ZHANG Shaolian, SU Ya, WU Zujing. Application and effect evaluation of electric heating technology in heavy oil test [J]. Science & Technology Information (Scientific Teaching and Research), 2007(16):49.
- [17] 薛敬利,刘铮,蒋登高,等. 螺杆泵热试油(采)探边一体化工艺技术[J]. 油气井测试,1999,8(3):41-45.
- XUE Jingli, LIU Zheng, JIANG Denggao, et al. Integrated technology of screw pump, thermal drillstem test (early production test) and limit test [J]. Well Testing, 1999,8(3):41-45.
- [18] 周宝锁,谭忠健,卢中原,张兴华,刘境玄,魏青涛. 渤海油田稠油精准测试技术[J]. 油气井测试,2019,28(4):14-19.
- ZHOU Baosuo, TAN Zhongjian, LU Zhongyuan, et al. Precision testing technology of heavy oil in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2019,28(4):14-19.
- [19] 赵益秋,杨川琴,刘飞. 105 MPa 捕屑器在龙王庙气藏开发井中的应用[J]. 油气井测试,2016,25(6):38-40.
- ZHAO Yiqiu, YANG Chuanqing, LIU Fei. Application of 105 MPa plug catcher in Sichuan Longwangmiao gas reservoir [J]. Well Testing, 2016,25(6):38-40.
- [20] 彭贤强,曾爱民,刘从军,等. 原油测试燃烧器的现场应用[J]. 油气井测试,2015,24(6):38-40.
- PENG Xianqiang, ZENG Aimin, LIU Congjun, et al. Field application of crude oil test burner [J]. Well Testing, 2015,24(6):38-40.
- [21] 张箭. 海洋钻井平台用燃烧器雾化及燃烧的数值研究[D]. 大连:大连海事大学,2016.
- ZHANG Jian. Numerical study on atomization and combustion of burner used in offshore drilling platform [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.

编辑 刘振庆

第一作者简介:冯大龙,男,1984年出生,工程师,2007年毕业于中国石油大学(华东)资源勘查工程专业,现主要从事海上油田测试作业施工管理及质量控制工作。电话:022-22830420,18116221475;Email:fengdl@cnooc.com.cn。通信地址:上海市长宁区通协路388号中海石油大厦A753室工程技术作业中心探井项目组,邮政编码:200335。