

渤海油田普通稠油冷采测试工艺

高科超¹, 高飞², 杨子³, 杨歧年⁴, 刘宝坤⁵

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探部 天津 300459
2. 中海艾普油气测试(天津)有限公司 天津 300459
3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300459
4. 中海石油(中国)有限公司天津分公司工程技术作业中心 天津 300459
5. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: gaokch@cnooc.com.cn

项目支持: 中海石油(中国)有限公司生产性科研项目“海上稠油举升井筒降黏工艺技术研究”(CCL2014TJXZSS0845)

引用: 高科超, 高飞, 杨子, 等. 渤海油田普通稠油冷采测试工艺[J], 油气井测试, 2019, 28(1): 38-45.

Cite: GAO Kechao, GAO Fei, YANG Zi, et al. Cold production testing technology for heavy oil well in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 38-45.

摘要 针对渤海油田稠油井测试过程中存在的出砂、垂直管流黏阻大流动困难、PVT 取样成功率低、计量误差大等难题, 从射孔、防砂、控温、取样及计量工艺优化等方面细化研究, 形成了由稳岩控砂射孔诱喷技术、井下测试管柱控温技术、稠油 PVT 取样技术和稠油测试配套计量技术组成的普通稠油井冷采测试工艺。该工艺采用大孔径、深穿透、高密度射孔技术配合合适的诱喷压差提高油层渗流能力, 联合井筒保温和加热技术降低原油在井筒中的流动阻力, 优化取样器放置位置和取样时机, 采用具有压力补偿功能的单相取样器保证取样准确性, 配备可加热式的 25 m³ 计量罐实现精确计量。渤海油田蓬莱 31-X1 井现场应用表明, 取样压差仅为 0.925 MPa, 取样合格; 采用螺杆泵排液求产, 80 r/min 时日产油 52.84 m³, 130 r/min 时日产油 89.28 m³; 四次开关井均取得了合格的压力数据资料。该工艺为类似稠油油田产能释放及有效动用提供了技术支撑。

关键词 渤海油田; 普通稠油; 试采; 射孔; 控温; 取样; 计量; 排液

中图分类号: TE27 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.01.007

Cold production testing technology for heavy oil well in Bohai Oilfield

GAO Kechao¹, GAO Fei², YANG Zi³, YANG Qinian⁴, LIU Baokun⁵

1. Exploration Department of Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China
2. COSL-EXPRO Testing Services (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300459, China
3. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Company, Tianjin 300459, China
4. EnerTech Center of Tianjin Branch of CNOOC (China) Limited, Tianjin 300459, China
5. Well Testing Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: In view of some problems such as sand production, difficult vertical pipe flow due to high viscosity, low success rate of PVT sampling, and big metering error in heavy oil well tests in the Bohai Oilfield, the cold production testing technology for heavy oil well was developed through the detailed study in respect of perforation, sand control, temperature control, sampling and metering process optimization, which is composed of perforating and induced flow while stabilizing rock and controlling sand, temperature control of downhole testing string, heavy oil PVT sampling, and metering for to heavy oil testing. This technology uses large-diameter, deep-penetrating and high-density perforation technique to improve the reservoir seepage capacity at suitable induced flow pressure difference. It also combines wellbore insulation and heating technique to reduce the flow resistance of crude oil in wellbore. The single-phase sampler with pressure compensation function is used to acquire samples accurately at proper positions and time. Moreover, a 25 m³ heated metering tank is equipped to ensure accurate metering. Field application of this technology in Well PL31-X1 in the Bohai Oilfield demonstrates the qualified sampling with pressure difference of only 0.925 MPa, the daily oil production of 52.84 m³ at the pump rate of 80 r/min and 89.28 m³ at the pump rate of 130 r/min when the screw pump is used for production, and satisfactory pressure data obtained from four times of well entry and shut-in. This proposed technology provides the support for release and effective utilization of productivity in similar heavy oil oilfields.

Keywords: Bohai Oilfield; heavy oil; production test; perforation; temperature control; sampling; metering; discharge

测试产能是评价稠油储量的重要资料^[1-2]。渤海油田稠油储量资源丰富,截止 2014 年底,探明稠油石油地质储量 $18.09\times10^8\text{t}$,占渤海油田总探明储量的 58.0%。如何求取稠油储层的经济性能是评价的重点^[3]。地层测试工作是评价和发现油气资源的重要手段^[4]。陆上油田稠油储量通常采用防砂加热采的工艺进行测试,如卢中原等^[5]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,在曹妃甸 6-X、渤中 36-X、蓬莱 20-X 等多个构造现场应用成功,节能效率高,加热设备运行安全可靠。但对于海上平台作业,勘探阶段的成本控制及开发阶段的经济性都是制约稠油勘探开发的难题^[6]。因此,对稠油冷采工艺进行了针对性研究,分析了稠油冷采的技术难题,并制定了针对性的解决措施。张国强等^[7-10]总结了稠油在资料录取及测试产能方面面临几个难题,主要包括:

(1)稠油溶解油气比低,地层渗流阻力大,且储层岩石骨架疏松易出砂。如何平稳控砂,实现冷采“蚯蚓洞网络”是稠油测试难题^[11]。

(2)井下垂直管流阶段原油流动磨阻较大,并随着原油上行过程中温度散失,其磨阻更大。如何在垂直管流阶段保温、增温,保持原油流动性是稠油测试难题。

(3)PVT 样品是测试必取的重要样品资料,稠油测试由于其含砂、含水、高流动压差等因素,PVT 取样难以成功。

(4)稠油储层的溶解气量小且稠油脱气速度慢,易形成泡沫油,影响原油产量计量精度,并且采用常规的计量方式,无法实现稠油气产量计量。

(5)陆地油田对于稠油测试或开发通常采用掺稀降黏的方式提升井筒流动性^[12],采用砾石压裂充填防砂方式以避免地层出砂^[13]。海上油田勘探开发作业成本极高,通常为陆地油田单井作业费用的十倍以上,稠油掺稀、防砂等作业在海上平台限制空间作业难度较大,而且对井下测试管柱设计有较大影响,不利于勘探阶段的测试资料录取。

针对以上问题,本次研究以“稠油测试常规化”为指导,综合多专业,针对以上稠油测试过程中的难题,综合考虑多种方法和手段,取得了以下四项测试创新技术,形成“控温”冷采测试系列技术。

1 冷采测试工艺

针对海上稠油测试井所面临的难题,形成了稳岩控砂射孔诱喷技术、井下测试管柱控温技术、稠油高压物性取样技术和稠油测试配套计量技术。

1.1 稳岩控砂射孔诱喷技术

随着渤海油田勘探开发进程的加快,区域勘探开发程度日益提高,测试作业难度不断加大^[14]。稠油的成因非常复杂,与普通原油最大的区别在于生物降解程度,降解程度越高越容易形成稠油^[15]。随着油气勘探开发的深入,在渤海、南海东部逐渐发现了较大规模的稠油油藏。稠油油藏油层浅,储层胶结不好,地层疏松,测试过程中极易出砂,测试结果不理想^[16]。而稠油出砂冷采的重要开采机理之一是油层大量出砂形成高渗透的“蚯蚓洞网络”,这要求排砂冷采过程中通过调节压差使地层达到出砂,同时又保持地层骨架不被破坏,从而形成“蚯蚓洞”大幅度改善地层的渗透率,达到提高产量的过程。与此相适应,稠油出砂冷采井必须采用大孔径、深穿透、高密度射孔技术,同时取消渤海油田 2009–2013 年期间经常采用的射孔联作应用复合火药的射孔模式。由于普通射孔作业时,聚能射孔弹射孔后在产生射孔孔道的同时也会形成射孔压实带,对近井地带造成污染,严重影响油井产能^[17-18]。现有的复合射孔技术利用高压气体实现近井地带造缝^[19],然而复合火药能量的集中释放易导致近井地带储层的岩石骨架结构发生不可逆损害,导致近井地带严重出砂,形成砂桥,从而影响冷采效果(表 1)。

表 1 部分稠油井复合射孔情况统计
Table 1 Composite perforation in some heavy oil wells

井名	射孔方式	产量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	备注
垦利 9-X1	复合射孔 孔密:40 孔/m 孔径:10.92 mm 穿深:1 125 mm	33.00 (瞬时产量)	开井放喷 7 h,含砂由 0 升至 10%,螺杆泵电流异常,结束测试。
	复合射孔 孔密:40 孔/m 孔径:10.92 mm 穿深:881 mm	29.64 (求产 4 h)	开井 8 h,含砂由 0 升至 40%,螺杆泵工作电流异常,结束测试。

采用大孔径射孔的目的是防止孔眼被地层砂形成的砂桥堵塞,利于“蚯蚓洞”的形成和延伸。室内实验表明,当孔眼直径小于储层颗粒粒径的 4 倍时,砂粒容易在孔眼外形成稳定的砂桥,不利于砂

产出和“蚯蚓洞”的形成;当孔径大于储层颗粒粒径的6倍时,难以形成稳定的砂桥(图1)。因此,储层中砾石含量较高时,大孔径射孔是必不可少的。

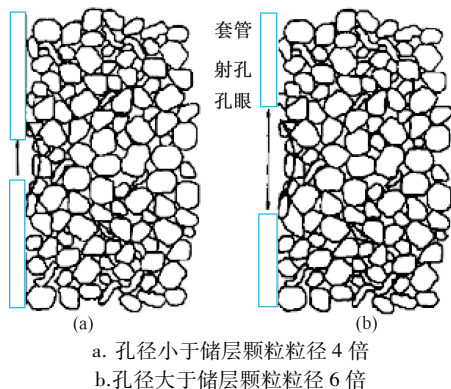


图1 射孔孔眼大小对出砂的影响

Fig.1 Effect of perforation size on sand production

采用大孔径深穿透射孔的目的,一是提高孔道末端压力梯度,为激励初始出砂创造条件。同时,射孔孔道延伸越长,近井地带岩石骨架越稳定,对套管的保护越好;二是克服水泥环及钻井液侵入造成的不良影响,发挥油层本身的渗流能力,并扩大油层初始供液能力。

采用高密度射孔的目的是尽量增加“蚯蚓洞”的数量,提高油井供液能力。射孔时用柴油液垫灌满管柱,通过地层压力与柴油液柱压力的差值作为诱喷压差。一般低于油层压力1~3 MPa的负压射孔方式。这可根据原油黏度和油层情况而定,即原油黏度越高,溶解气含量越低,要求负压越大。

地质力学理论研究结果表明,在井眼周围,“蚯蚓洞”将沿射孔孔道方向形成和发展。射孔后,井眼周围压力梯度和应力状况发生改变,分散的砂粒连同原油从射孔孔道流入井筒,使孔道逐渐向外扩展形成“蚯蚓洞”;“蚯蚓洞”继续延伸时,将朝胶结程度最弱的区域扩展,形成“蚯蚓洞网络”。可见,只有采取大孔径、深穿透、高密度射孔技术,配合合适的诱喷压差,才能形成数量众多的大直径、长距离“蚯蚓洞”。

1.2 井下测试管柱控温技术

稠油的流动温度对其流动性影响非常大。如何保持稠油的流动温度,降低稠油的流动黏度是测试成功的关键^[20]。解决井筒中的热能散失和不足的问题实际上有两个途径:一是补充热能;二是“保能”,保持并减少热能的散失。测试作业中,“保能”及“补能”等控温措施的应用,对稠油测试成功有着重要意义。

1.2.1 保温技术

“保能”通过井筒保温管工艺来实现。保温管

也称隔热管,大致由连接扣、惰性腔室和外管组成。它利用不同介质导热系数不同而制成,是用于隔绝或阻滞热交换的工具。保温管的结构类似于保温瓶,即在油管等载流管材的外部再增加一层,使得内外层间形成一个环空,再将环空或抽成真空或加注惰性气体,以降低环空的导热能力,使内管在相对高温的流体流过时与外部低温体的接触式热交换速率受到很大限制,保证流体流过管径段后不发生温度的快速下降。

1.2.2 井筒加热技术

“补能”通过螺杆泵加热工艺来实现。螺杆泵兼有柱塞泵和离心泵的优点,在不同的压力条件下流量改变很小,而且流量非常均匀;对气的适应性也比较好,不会产生“气锁”现象和“气蚀”现象;对砂、蜡的适应性好,并且配合抽油杆内电缆加热技术,以及热循环水加热技术,能够满足对稠油储层测试井筒加温的需求,能够在高黏原油、高含砂、高含蜡储层作业中以较高的效率工作。

渤海油田通常采用的加热技术为电缆加热技术,该技术采用“中低频组合的变频控制”方法,通过电缆,利用抽油杆作为电热体,对井筒进行加热,从而保持或提高原油举升过程中的温度,减低流动阻力^[5]。

1.3 稠油高压物性取样技术

高压物性分析数据是油田开发勘探中最重要的数据,是评价储油层性质、计算储量、开发设计、管理油井、预测油田动态及三次采油不可缺少的资料。地层原油在高温高压条件下溶解大量的烃类气,随油藏开采的进程,由于油藏温度、压力的变化,油气相态及油、气组成也随之改变。为了合理开发油藏,要及时掌握随温度、压力的改变油藏油、气性质的变化。取得合格的PVT样品进行分析化验非常有必要性。以往测试工艺中,稠油PVT取样存在以下几点难题^[21]:

(1)稠油黏度高、比重大,无法采用钢丝作业下入取样器,而且稠油测试通常采用螺杆泵泵抽的方式进行生产,同样也无法实现钢丝作业,通常采用RD取样器随管柱下入井下的方式取PVT样。

(2)原油流动难度大,流动的启动压差大,容易在流入井筒时已经脱气导致取到样品不合格。

(3)以往测试程序,泵抽求产后进行关井,关井期间起出螺杆泵抽油杆,向管柱内灌满柴油,之后再开井,控制井口流动,取PVT样。该做法由于地层原油无法通过地层能量进行流动,从而无法到达

管柱的取样位置,而使作业成功率低。

(4)螺杆泵泵抽产量较低,其测试口袋的水可能无法排净。因此,井下 RD 取样阀取样存在取到水样的风险。

(5)稠油地层压力一般较低,取样流压也比较低。取样器从井下取出至地面过程中,随着温度下降,取样室中的原油压力下降,部分溶解气将从原油中析出,出现油、气两相共存的现象。油样从取样器转至样瓶之前,尽管可以通过增压泵对原油进行补压,游离气体重新溶解至原油中,但是仍有一些析出的成分将无法重新溶解到原油中。因此,稠油样品取样结束后的保压也是稠油 PVT 取样的一大难点。

针对稠油 PVT 取样过程中的难点,在稠油探井测试作业中,做了针对性的工艺优化,形成了稠油 PVT 取样的标准流程,在蓬莱 31-X 构造以及渤中 36-X 构造稠油探井测试中成功应用,取得了合格的稠油 PVT 样品。

1.3.1 管柱设计优化措施

鉴于稠油测试产能较低,测试沉砂口袋中测试液可能存在无法完全排出的情况,优化取样器放置位置。以往测试管柱中,取样器常置于存储压力计托筒下部、封隔器上部(图 2)。优化后,分别将两支取样器托筒置于存储压力计下部及钻铤下部(或中部),可根据井况具体优化,如图 3 所示。这种取样器位置放置方式减小了取样位置含水导致的样品不合格情况,大幅增加了取样样品合格率。

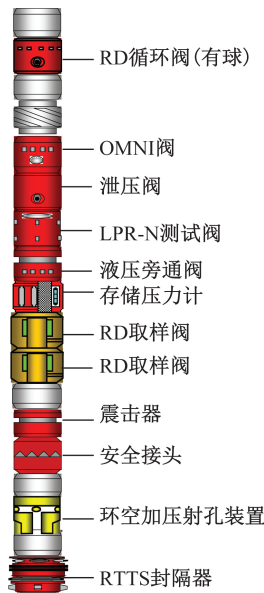


图 2 常规取样测试管柱示意图

Fig.2 Schematic diagram of conventional sampling and testing string

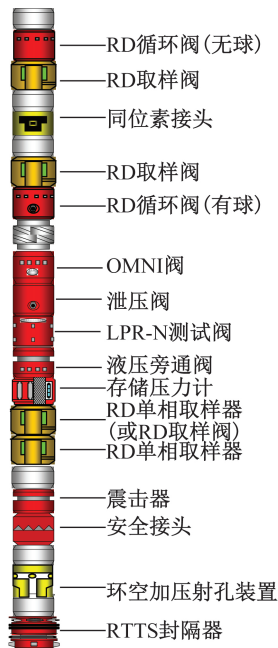


图 3 优化后的取样测试管柱示意图

Fig.3 Schematic diagram of optimized sampling and testing string

1.3.2 取样时机优化选取

以往稠油测试作业中,通常在泵抽求产结束,关井恢复后,用柴油灌满测试管柱,用柴油与地层压力差值作为诱喷压差进行诱喷后,关闭井下取样器进行取样。但该种方式通常由于诱喷压力过小且随着流动的持续,其流动阻力逐渐增大,因此无法使地层原油流至取样深度;并且这种方式是在通过冷采生产后,其储层承受一定程度的冲蚀,无法保证取样的含砂量。

1.3.3 单相式取样工具应用

采用具有压力补偿功能的单相取样器 (Single Phase Sampler) 替代没有压力补偿功能的置换式取样器 (Positive Displacement Sampler) 进行井下高压物性 (PVT) 地层流体取样^[22],避免了常规取样器随温度变化导致的压力降低,同时避免了压力降低导致的部分轻烃类析出,保证了样品的准确性。

1.4 稠油测试配套计量技术

稠油冷采过程中起泡性较强,主要是因为稠油中含有大量的胶质和沥青质。胶质沥青质是由一些分子量很宽、基本结构相似、环数不等的缩合芳香环(或含杂原子)构成的,芳香环上还联接着长度和数量不等的烷基侧链或环烷侧链,有些侧链上还带有羧基或钠羧基,具有较高的表面活性及很高的表面黏度,使稠油具有较强的起泡性。以往测试工艺中,稠油的计量通常采用计量罐进行体积计量。渤海油田油藏由

于埋藏浅和地层压力低等因素,导致地层产出的原油到达地面时,压力降低,气体以微小的气泡形式从原油中脱出来,导致原油起泡、产生泡沫。泡沫影响分离器流量计的测量精度,也影响油气分离的效果,造成一定的误差^[23]。因此,优化稠油计量方式是稠油测试中取准产能资料的关键。

计量方式优化:渤海油田现有的体积计量装置分为三种:14 m³ 计量罐、30 m³ 计量罐和 25 m³ 计量罐。它们的计量方式都是通过液位看窗进行阶段读数从而实现计量。但以往测试过程中流程通过阻流管汇、加热器之后直接进计量罐计量,再由计量罐通过离心泵输入到 30 m³ 计量罐进行存储,但测试过程中计量罐每 30 min 计量一次,由于生产过程中泡沫的影响,其计量值一直偏大,为消除此影响,引进了 25 m³ 计量罐。

25 m³ 计量罐是可加热式罐,其罐体及罐底均布有蒸汽加热盘管,加热介质为热蒸汽。测试过程中放喷清井、取样等非求产时间的液体计量由计量罐进行计量,之后转存至 30 m³ 计量罐;进入求产阶段后,原油仍进计量罐进行阶段性读数初步计量(渤海油田一般要求计量频率为每 30 min 一次),之后将求产期间所有原油均转存至 25 m³ 计量罐。求产结束后,对 25 m³ 计量罐进行持续性加热(一般不低于 24 h),并加入适量消泡剂,待原油泡沫消除后,再行计量产量,对初次计量产量数据进行校正。此种求产计量方式可满足日产 100 m³ 的稠油产量计量。

2 工艺应用

蓬莱 31-X1 井是渤海油田的一口预探井。该井明下段的测试井段岩性为细砂岩,录井见 D 级荧光显示,全烃最高含量为 11.9%,电阻率最大为 25.2 Ω·m,射孔段为 1 241.5~1 243.5 m、1 245.0~1 247.0 m、1 249.0~1 251.5 m、1 254.0~1 256.5 m、1 257.5~1 259.0 m。通过该区已钻井产出原油分析,该层原油属于普通稠油,最终测试采用“控温”冷采配套系列技术进行测试,取全、取准了测试地质资料,并取得了良好的测试产能。

本井采用四开四关测试方式实现两个转速条件下求产,以及四次关井恢复压力资料。通过四次关井恢复曲线,判断储层通过“控温”冷采工艺测试后渗流条件的变化情况。

本井一开井 35 min,累计排出柴油液垫 0.59 m³;一关井 115 min,取得了合格的原始地层压力数据。

二开井 7 h,累计排出柴油液垫 4.23 m³,原油 1.47 m³,沉沙口袋海水测试液 0.34 m³;二关井 8.5 h,测取地层压力恢复数据,同时下抽油杆,组装螺杆泵井口驱动,进行泵抽作业前的其它准备工作。

三开井采用螺杆泵泵抽方式进行排液。首先进行 PVT 取样工作。调整转速 20 r/min 至 50 r/min,清井放喷,共排出原油 3.88 m³,沉沙口袋海水 1.04 m³,井口含水从 84%降至 0。至此,判断口袋海水基本全部排出。调整泵转速至 20 r/min,泵抽排出原油 1.64 m³。由此判断地层原油重新达到取样位置,此时操作环空压力关闭单相取样器以及 RD 取样器,完成井下 PVT 取样作业。起出测试管柱后,回放压力计数据,取样流压为 10.778 MPa,取样压差仅 0.925 MPa。通过释放 SPS 大单相取样器其中一支的液体,流体均为油和气,含砂量和含水率均为 0,各项指标均达到了合格的 PVT 高压物性样品要求,本次稠油 PVT 取样合格。高压物性样品取样结束后,进入调整转速冷采放喷、求产阶段。均匀调整转速 20 r/min 至 80 r/min,期间平均泵效为 100%,反应地层供液充足,流动压力损耗仅消耗在流体流动阻力上,螺杆泵工作状况良好,井口原油含砂微量。12:30-18:30,采用 80 r/min 转速稳定排液,求产数据见表 2。由表 2 可知,求取第一个工作制度下原油日产量为 52.84 m³,平均含砂微量,含水 0,井口平均温度 53.8 ℃。

80 r/min 转速求产结束后,通过环空压力操作井下 LPR-N 阀关井,求取地层压力恢复数据,之后进入四开井。四开井均匀调整转速 20 r/min 至 130 r/min。泵转速调整过程中,泵效均匀,平均泵效由 100%下降至 92%;电机电流变化平稳,由 19 A 至 40 A。12:00-18:00,采用螺杆泵转速 130 r/min 进行第二个工作制度求产,求产数据见表 3。由表 3 可知,求取平均日产原油 89.28 m³,平均含砂微量,含水 0,平均井口温度 54.3 ℃。

该稠油井本次地层测试采取了四次开井、四次关井的工作制度,均取得了合格的压力数据资料。选用蓬莱 31-X1 井第四次关井恢复资料做不稳定试井分析,物性基础参数为:井筒半径 0.112 m,有效厚度 10.5 m,孔隙度 28.84%,体积系数 1.119,黏度 12.277 mPa·s,地层压缩系数 2.397×10^{-3} MPa⁻¹。试井解释模型为“垂直井+裂缝+均质油藏”模型,解释结果见表 4。

表 2 蓬莱 31-X1 井 80 r/min 转速下泵抽求产表
Table 2 Production of Well PL31-x1 at pump rate of 80 r/min

时间	泵转速/ (r·min ⁻¹)	电机电流/ A	加热电流/ A	温度/ ℃	井底流压/ MPa	井口温度/ ℃	日产油/ (m ³ ·d ⁻¹)	含砂量	相对密度 (20℃)
12:30	80	28	50	56.0	9.067	53.3	—	微量	0.9618
13:00	80	29	45	56.0	8.945	53.4	55.68	微量	0.9618
13:30	80	30	45	55.0	8.956	53.5	50.40	微量	0.9618
14:00	80	30	45	53.0	8.863	53.6	50.40	微量	0.9618
14:30	80	31	50	51.0	8.785	53.6	50.40	微量	0.9618
15:00	80	31	50	51.0	8.754	53.7	50.40	微量	0.9618
15:30	80	31	50	51.0	8.715	53.7	50.40	微量	0.9618
16:00	80	29	55	51.0	8.699	53.8	48.00	微量	0.9618
16:30	80	30	55	51.0	8.850	53.8	50.40	微量	0.9618
17:00	80	30	55	51.0	8.883	53.8	58.08	微量	0.9618
17:30	80	30	55	51.0	8.915	53.8	55.68	微量	0.9618
18:00	80	30	55	51.0	8.920	53.8	55.68	微量	0.9618
18:30	80	30	55	51.0	8.920	53.8	58.56	微量	0.9618

表 3 蓬莱 31-X1 井 130 r/min 转速下泵抽求产表
Table 3 Production of Well PL31-x1 at pump rate of 130 r/min

时间	泵转速/ (r·min ⁻¹)	电机电流/ A	加热电流/ A	温度/ ℃	井底流压/ MPa	井口温度/ ℃	油产量/ (m ³ ·d ⁻¹)	含砂量	相对密度 (20℃)
12:00	130	40	45	53.0	8.074	54.2	—	微量	0.9618
13:00	130	40	45	53.0	8.003	54.2	89.28	微量	0.9618
14:00	130	41	45	53.0	7.952	54.3	85.92	微量	0.9618
15:00	130	42	45	54.0	7.933	54.3	88.32	微量	0.9618
16:00	130	43	45	54.0	7.908	54.3	93.84	微量	0.9618
17:00	130	45	45	54.0	7.869	54.3	84.96	微量	0.9618
18:00	130	47	45	54.0	7.858	54.3	93.84	微量	0.9618

表 4 蓬莱 31-X1 井 DST No.2 四关井试井解释结果表
Table 4 Interpretation results of Well Penglai31-X1 DST No.2 shut-in well test

解释方法	分析段	渗透率/ mD	地层系数/ (mD·m)	表皮 系数	井筒储集系数/ (m ³ ·MPa ⁻¹)	裂缝 半长/m
现代试井	四关井	165	1 740	-3.75	0.057	9.76
半对数分析	四关井	167	1 750	-3.72		

利用试井解释结果模拟的压力历史与实测的压力历史曲线拟合较好,双对数分析与半对数分析具有一致性,双对数、单对数及压力历史曲线如图 4~6 所示。

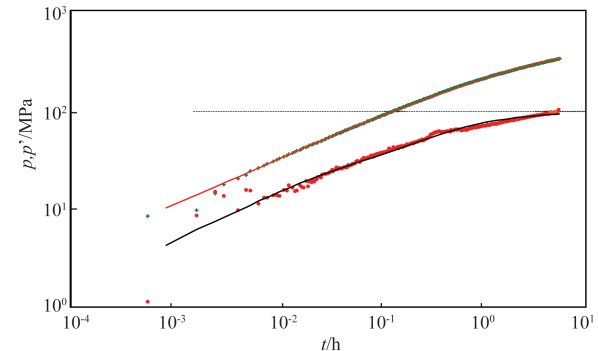


图 4 DST No.2 四关井双对数曲线
Fig.4 Four shut-in double logarithmic curve

试井解释结果为:有效渗透率 100~200 mD;表皮系数为-3.7;导数曲线具有裂缝形态,近井地带可能

发育微裂缝;四关井恢复压力比三关井有所下降,地层外推压力 11.67 MPa;测试结论为油层。

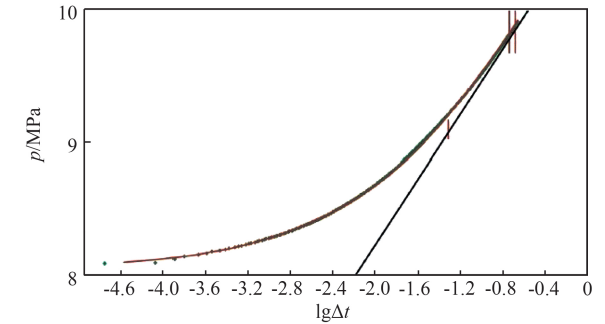


图 5 DST No.2 四关井双对数曲线
Fig.5 Four shut-in single logarithmic curve

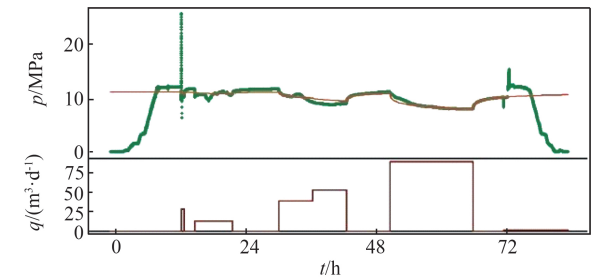


图 6 蓬莱 31-X1 井 DST No.2 压力历史曲线
Fig.6 Pressure history curve of DST No.2 in Well Penglai 31-X1

3 结论

针对渤海油田普通稠油测试工艺现状及特点,通过技术的针对性改进与优化,形成了渤海油田特有的普通稠油“控温冷采”测试系列技术。该技术集成了稠油射孔优化技术、“控温”型井下测试管柱优化技术、稠油高压物性取样优化技术,以及稠油测试配套计量技术。四项技术的创新组合应用,实现了普通稠油“控温冷采”工艺,克服了以往测试工艺中防砂管堵塞、砂埋、高压物性取样成功率低等稠油测试难题,提高了资料录取的完整程度和作业效率,节省大量作业成本。同时,开辟了一条新思路,为类似稠油油田产能释放及有效动用探索了一套新工艺,已在渤海稠油油藏测试中得到应用,也可以供其它海域油田借鉴参考,具有较高的推广价值。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司天津分公司同意本文公开发表;感谢外审专家及本单位同事对本文修改提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] 张凤久,姜伟,孙福街,等.海上稠油聚合物驱关键技术研究及矿场试验[J].中国工程科学,2011,13(5):28-33.
ZHANG Fengjiu, JIANG Wei, SUN Fujie, et al. Key technology research and field test of offshore viscous polymer flooding [J]. Engineering Sciences, 2011,13(5):28-33.
- [2] 张凤久.海上稠油油藏早期注聚最佳时机的确定[J].中国海上油气,2018,30(3):89-94.
ZHANG Fengjiu. The optimum early polymer injection time for offshore heavy oil reservoir [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018,30(3):89-94.
- [3] 郭太现,苏彦春.渤海油田稠油油藏开发现状和技术发展方向[J].中国海上油气,2013,25(4):26-30,35.
GUO Taixian, SU Yanchun. Current status and technical development direction in heavy oil reservoir development in Bohai Oilfields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013,25(4):26-30,35.
- [4] 高科超,冯卫华,吴轩,等.海上油田复杂气井深井测试管柱的应用与研究[J].油气井测试,2016,25(1):54-57.
GAO Kechao, FENG Weihua, WU Xuan, et al. Application and research of deep well test strings in complex gas wells in offshore oilfields [J]. Well Testing, 2016,25(1):54-57.
- [5] 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.
- [6] 张兴华,周新宇,杨子,等. APR 测试工艺在压裂测试井中的技术创新[J]. 油气井测试, 2018,27(5):13-18.
ZHANG Xinghua, ZHOU Xinyu, YANG Zi, et al. Technical innovation of APR testing technology in fracturing test wells [J]. Well Testing, 2018,27(5):13-18.
- [7] 张国强,许兵,潘福熙,等.电缆地层测试聚焦探针在渤海地区的应用[J]. 中国海上油气,2011,23(5):309-312.
ZHANG Guoqiang, XU Bing, PAN Fuxi, et al. An application of focused probe for wireline formation test in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011,23(5):309-312.
- [8] 唐海雄,王跃曾,张俊斌,等.浮式钻井装置电潜泵测试关键技术及其应用[J]. 中国海上油气,2009,21(4):257-259.
TANG Haixiong, WANG Yuezheng, ZHANG Junbin, et al. Key techniques and their application for well testing with electric submersible pump on floating drilling vessel [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009,21(4):257-259.
- [9] 张兴华.稠油油藏地层测试保温管技术[J]. 中国海上油气,2007,19(4):269-271.
ZHANG Xinghua. Insulation pipe technology for formation test of viscous oil reservoir [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007,19(4):269-271.
- [10] 徐锦绣,吕洪志,崔云江.渤海地区电缆地层测试应用效果分析[J].中国海上油气,2008,20(2):106-110.
XU Jinxiu, LYU Hongzhi, CUI Yunjiang. An application analysis of wireline formation test in Bohai region [J]. China Offshore Oil and Gas, 2008,20(2):106-110.
- [11] 曾祥林,孙福街,王星,等.渤海疏松砂岩常规稠油提高单井产能对策研究[J]. 钻采工艺,2005,28(6):47-50.
ZENG Xianglin, SUN Fujie, WANG Xing, et al. Well production research on conventional heavy oil in unconsolidated research in Bohai Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2005,28(6):47-50.
- [12] 柯文奇,赵仁保,石在虹,等.稠油掺稀降黏评价新方法及模拟分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(6):1990-1994.
KE Wenqi, ZHAO Renbao, SHI Zaihong, et al. A new viscosity evaluation method of heavy oil production assisted with light oil blending and simulation analysis [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016,47(6):1990-1994.

- [13] 黄文强. 高压砾石充填防砂技术在曙三区的应用[J]. 特种油气藏, 2010, 17(4): 111-113.
- HUANG Wenqiang. Application of high-rate gravel packing sand control in Shu 3 Area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17(4): 111-113.
- [14] 高科超, 尚锁贵, 杨子, 等. 海上油田复杂气井测试地面工艺的研究与创新应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 37-40.
- GAO Kechao, SHANG Suogui, YANG Zi, et al. Research and innovative application of ground technology for complex gas well testing in offshore oilfields [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 37-40.
- [15] 曾玉强, 刘蜀知, 王琴, 等. 稠油蒸汽吞吐开采技术研究概述[J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 5-9.
- ZENG Yuqiang, LIU Shuzhi, WANG Qin, et al. Overview of heavy oil cyclic steam stimulation recovery technology [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(6): 5-9.
- [16] 张自印, 熊友明, 张俊斌, 等. 南海东部稠油油藏测试射孔参数优化研究[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(5): 47-50.
- ZHANG Ziyin, XIONG Youming, ZHANG Junbin, et al. Optimization of perforation parameters for testing heavy oil reservoirs in the eastern south China Sea [J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(5): 47-50.
- [17] 王守君, 谭忠健, 胡小江, 等. 海上复合射孔与地层测试联作工艺技术研究及应用[J]. 中国海上油气, 2013, 25(3): 8-12.
- WANG Shoujun, TAN Zhongjian, HU Xiaojian, et al. An offshore combination technology of composite perforation and formation testing and its application [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(3): 8-12.
- [18] 李东传, 唐国海, 孙新波, 等. 射孔压实带研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 112-114.
- LI Dongchuan, TANG Guohai, SUN Xinbo, et al. A study on perforation crushed-zone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(5): 112-114.
- [19] PUCKNELL J K, BEHRMANN L A. An investigation of the damaged zone created by perforating [C]. SPE 22811, 1991.
- [20] 马英文, 付团辉, 吴泽林, 等. 渤中 34-2/4 油田外置式复合射孔技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 31-36.
- MA Yingwen, FU Tuanhui, WU Zelin, et al. External composite perforation technology in the Bozhong Oilfield [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 31-36.
- [21] 戴卢军, 杨子, 高科超, 等. 渤海油田探井测试井下 PVT 取样技术进展研究与改进[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 62-65.
- DAI Lujun, YANG Zi, GAO Kechao, et al. Research and improvement on down-hole PVT sampling technique progress in exploratory well testing in Bohai Oilfield [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 62-65.
- [22] 张兴华, 杨子, 冯卫华, 等. 单相和置换式 PVT 取样技术在探井测试中的研究[J]. 石油工业技术监督, 2014, 30(2): 27-29.
- ZHANG Xinghua, YANG Zi, FNEG Weihua, et al. Study on application of single phase sampling and positive displacement sampling in testing of exploratory wells [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2014, 30(2): 27-29.
- [23] 陈金先, 杨歧年, 高科超, 等. 稠油计量新技术在渤海油田探井测试中的应用与分析[J]. 石油和化工设备, 2018, 21(5): 40-45.
- CHEN Jinxian, YANG Qinian, GAO Kechao, et al. Analysis and application of heavy oil metering new technology in Bohai Oilfield at exploratory well testing [J]. Petro & Chemical Equipment, 2018, 21(5): 40-45.

编辑 刘述忍

第一作者简介: 高科超, 男, 1983 年出生, 高级工程师, 2007 年毕业于西南石油大学资源勘查工程专业, 现从事海上测试作业管理及工艺研究工作。电话: 022-66500297; Email: gaokch@cnooc.com.cn。通信地址: 天津市滨海新区海川路 2121 号渤海石油管理局 A 座, 邮政编码: 300459。