

沙特高温高压低渗凝析气井全过程欠平衡设计与应用

张广垠¹, 杨顺辉², 豆宁辉², 赵向阳², 夏柏如¹

1. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100038
2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

摘要 沙特B区块属于高温高压低渗凝析气田, 储层为致密砂岩地层, 在前期的勘探作业中, 钻井中显示良好而测试时产量不高, 室内实验表明油锁和水锁是引起储层伤害的主要原因。本文采用一种新型全过程欠平衡设计方法, 在设计时充分考虑了井控安全、油锁、水锁、井壁稳定对井底负压值的影响、在水力参数计算过程中高温高压对钻井液密度和黏度的影响; 在施工过程中考虑了钻进、接立柱、取心、起下钻等整个作业过程中保持井底负压所需要的设备和工艺。通过现场M-0001井试验表明, 该方法能有效释放油气井产能, 避免储层伤害, 测试后显示该井表皮系数为-3.44, 钻井过程中储层没有污染。

关键词 高温高压; 低渗; 凝析气井; 全过程欠平衡; 储层伤害

中图分类号 TE372 **文献标识码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.34.007

Total Underbalance Drilling Design and Application for HTHP Low Permeability Gas-condensate Well in Sandi Arabia

ZHANG Guangyin¹, YANG Shunhui², DOU Ninghui², ZHAO Xiangyang², XIA Bairu¹

1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract The B block in Saudi Arabia is a High Temperature and High Pressure (HTHP) low permeability condensate gas reservoir. The early exploration wells show good behavior, but with not very high production rate. Indoor experiments show that the oil lock and the water lock are the main cause of the reservoir damage. In order to deal with this problem during the drilling operation, the underbalance drilling is adopted. In the design of the negative pressure value in the process, the well control safety, the borehole stability, the oil lock damage, the water lock damage and other factors are taken a full account with respect to their influences on the bottom negative pressure value selection under 2-10MPa while drilling. In the calculation of the hydraulic parameters, the influence of the temperature and the pressure on the drilling fluid density and viscosity is considered, the industry approved Drillbench software is used to calculate the sensitivity of the drilling fluid density, and finally to determine the drilling fluid density, which is in the range of 1.69-1.76g/cm³. The main equipment includes the rotating blowout preventer, the DDV, the automatic choke manifold, the four-phase separator, the data transmission and processing equipment, the ignition line, and the automatic ignition system. With the setting up of DDV, it is not necessary to shut down the well in the process. In the M-0001 well Sarah group, the real drilling process shows that the fluid density is in the range of 1.69-1.71g/cm³, the bottom hole negative pressure value in the range of 2.08-3.12MPa. According to the M-0001 well test data, the main reservoir skin factor $S=3.44$, indicating that M-0001 well drilling fluid has a good effect on the gas reservoirs, and the drilling process will not cause the formation pollution.

Keywords HTHP; low permeability; gas-condensate well; total underbalance drilling; reservoir damage

收稿日期: 2012-09-06; 修回日期: 2012-09-28

作者简介: 张广垠, 高级工程师, 研究方向为海外欠平衡钻井、控制压力钻井等, 电子信箱: gyzhang@sipc.cn

0 引言

沙特 B 区块是中国石化国际勘探公司在海外的一个重要探区,该区块位于沙特鲁卜哈利盆地,自然条件恶劣,地质条件复杂,主要目的层为奥陶系 Sarah 组天然气储层,该区块具有多套地层压力系统、井身结构复杂、最多有 8 层套管程序,上部地层存在严重漏失、垮塌掉块,下部为高温高压凝析气藏,地层最高温度 176℃,压力系数 1.88,井深在 5217—5672m。

在早期的勘探作业中由于目的层采用常规的钻井方式,在钻井过程中显示良好,如 F-0001 井钻进时全烃值最高达 80%以上,点火火焰高 2—3m,持续时间 1—2h,A-0002 井钻进时火焰高 3—5m,持续 3—4h,但在测试时产量较低,认为可能在钻井过程中存在储层污染,为了释放储层产能,决定在后期钻井过程中采用欠平衡作业,防止储层污染。

1 储层伤害因素评价

奥陶系 Sarah 组储层岩性特征为褐灰色中至细粒岩屑石英砂岩,夹粗粒岩屑石英砂岩,局部夹页岩、泥岩。室内岩心分析表明,储层孔隙度集中在 3%—12%之间,平均值约 7.6%。渗透率范围主要分布在 $(0.011—3.32) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均渗透率为 $0.465 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型的低孔低渗砂岩储层。

黏土矿物在原始的地层条件下处于一定矿化度的环境中,当低矿化度水进入地层时,某些黏土矿物就会膨胀、分散、运移,减小或堵塞地层孔隙和喉道,并最终使岩石渗透率下降,即发生水敏。黏土矿物在原始的地层条件下处于一定

矿化度的环境中,当低矿化度水进入地层时,某些黏土矿物就会膨胀、分散、运移,减小或堵塞地层孔隙和喉道,并最终使岩石渗透率下降,即发生水敏。通过岩心扫描电镜分析可知 Sarah 组泥质含量在 8%—12%之间,砂岩以石英为主,含量为 88%—92%;黏土矿物以伊利石、绿泥石为主。伊利石形态以丝缕状、毛发状和片状为主(图 1(a)),绿泥石多生长于颗粒表面,其产出状态以包壳状(图 1(b))生长在颗粒表面,结构较为稳定。室内岩心敏感性评价结果表明,水敏指数在 21.6%—45.2%,属水敏程度中等偏弱。

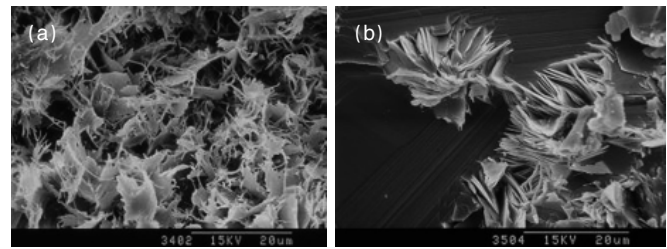


图 1 Sarah 组岩心扫描电镜照片

Fig. 1 The scanning electron microscopy picture for Sarah zone core

凝析气井在一定温度、压力条件下凝析油会从地层中析出,析出的凝析油会堵塞孔道导致渗透率下降,通过室内凝析油对岩心的驱替试验表明,渗透率恢复率仅为 15%—20%(表 1),存在明显的油锁伤害,因此在施工过程中应尽量避免凝析油在地层中析出导致的储层伤害。

表 1 凝析油对储层渗透率的影响

Table 1 Influence of condensate oil vs permeability of reservoirs

岩心编号	深度/m	原始气体渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	凝析油饱和后渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	凝析油渗透率损害率/%
F-0001 C-1	4722.32	3.620	0.712	80.3
F-0001 C-2	5093.48	0.286	0.046	83.9
F-0001 C-3	5094.36	0.375	0.055	85.3

2 高压低渗凝析气井欠平衡设计

(1) 欠平衡钻井的分类

为了描述欠平衡钻井应用,IADC 依据风险等级(0—5)、应用类别(A、B 或 C)及流体系统(1—5)进行分类,这也是目前国际上最新的分类标准。由于该储层属于高压,压力系数 1.88,按地层中部深度 5400m 计算,最大关井压力为 99.5MPa,远大于目前旋转防喷器的额定静压 35MPa,属于风险等级中的最高级——5 级(最大预计关井压力 MASP 大于欠平衡作业/控制压力钻井设备的额定工作压力,小于防喷器组的额定压力,如果发生设备失效可能会立即导致严重后果。例如,任何 MASP 大于欠平衡作业/控制压力钻井设备额定压力的油气井);因为该井采用欠平衡作业方式,应用类别为 B 类(欠平衡钻井(UBD)),流体返至地面,保持环空内流体

密度小于裸眼井段孔隙压力当量密度);对于这样的高压井只能选择液相作为钻井液,流体类型为 5(流体中仅含有单相液体,即采用液相钻井液的欠平衡作业),因此该作业的国际分类标准号为 5-B-5^[1]。

(2) 井底负压值的计算

井底负压值的设计是欠平衡设计的主要参数,合理的负压值既能保证井壁稳定,又能防止储层伤害,同时保证井控安全,因此必须综合考虑储层的压力、井壁的稳定性和储层的伤害因素、井控设备的性能。

通过对该地区已钻井的井壁稳定性分析表明,该地区井壁稳定性较好,在井底承受 15MPa 以内的负压差情况下不会发生井壁垮塌现象。为了防止钻井过程中产生油锁,必须避免凝析油在地层中析出,即在钻井施工过程中,尤其是欠平

衡钻井施工时,必须控制井底压力大于露点压力,通过邻井已取样的高温高压 PVT 相图试验可知,该地层在地层温度下露点压力为 22.68MPa,由于该井使用水基钻井液的钻井施工中液柱压力都在 50MPa 以上,一般不会产生油锁现象。但在测试过程需控制上部井段掏空的长度,防止出现凝析油堵塞储层孔隙现象的发生。在钻井过程中,即使钻井液井底循环压力等于地层孔隙压力,由于毛细管吸入压力的影响井筒中的液体也会进入地层,形成一定的损害,因此,在欠平衡钻井过程中应尽可能保持井底的负压值大于毛细管的吸入压力,实际岩心实验数据测得 Sarah 组的毛细管吸入压力为:水气界面毛吸压力 0.737—1.48MPa,油气界面毛吸压力 0.48—0.96MPa。因此在欠平衡压差取值时负压值应保持在 1.5MPa 以上。

通过上述约束条件的综合分析,井底负压值的范围是 1.5—15MPa,考虑到井控安全,初步确定钻进时井底负压值的选取在 2—10MPa,具体根据现场实钻情况进行调整。

(3) 钻井液密度和波动压力的计算

在一定条件下钻井液体积随温度的增加而膨胀,随压力的增加而压缩,因而钻井液的密度也会从井口到井底随温度与压力的变化而变化,而且温度和压力对钻井液的黏度变化也有巨大的影响,因此对于高温高压深井而言,必须在水力参数计算过程中考虑温度和压力的影响^[2]。本文利用得到业界认可的 Drillbench 软件对钻井液密度进行了敏感性计算,最后确定钻井液密度 1.69—1.76g/cm³,钻进时井底负压值 5.13—2.03MPa。

如果密度取 1.69/cm³,起下钻速度按 10m/min(钻具带单流阀),则在井底激动压力为 3.33MPa。抽吸压力差值为 1.77MPa。

3 主要设备优选和工艺优化

针对本区块高温高压凝析气井全过程欠平衡主要设备包括旋转防喷器、井下套管阀、自动节流管汇、四相分离器、数据传输和处理设备以及钻具止回阀、点火管线、自动点火系统等。由于该地区压力高、风险大,因此选用威德福公司的产品:旋转防喷器选择威廉母斯 7100 系列,静密封 35MPa,动密封 17.5MPa;井下套管阀安装在 $\varphi 244.5\text{mm}$ 技术套管上,可承受 35MPa 压差;自动节流管汇压力级别 35MPa;四相分离器气体处理能力 $1.1327 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$,油处理能力 $6.36 \times 10^3 \text{m}^3/\text{d}$ 。

由于安装了井下套管阀,在起下钻过程中不需要压井,起钻时利用井口旋转防喷器带压起钻到套管阀上面,通过地面控制管线关闭套管阀,然后正常起钻;下钻时先正常下钻到套管阀上部,通过地面控制管线打开套管阀,然后利用旋转防喷器带压下钻到底进行正常钻进,这样就可以实现在钻进、起钻、下钻过程中的全过程欠平衡钻井^[3-10]。

对于高温高压凝析气井需要注意在套管阀关闭期间,由于储层气体的带压滑脱上升会导致气体在套管阀下部堆积,使得套管阀下部气体的压力加液柱的压力大于地层压力,从

而使地层处于过平衡状态,因此,套管阀长时间关闭时必须定期打开泄压。

4 现场施工情况分析

(1) 施工过程分析

在 M-0001 井 Sarah 组实钻过程中钻井液密度在 1.69—1.71g/cm³,正常钻井过程井底均保持了 2.08MPa 以上的负压值;取心作业井底负压值为 2.80—3.12MPa;起钻过程中井底负压值在 2.80MPa 以上;下钻过程中由于激动压力的存在和回压值稍大,短时间负压值较小,为 0.78MPa;接立柱过程,井底压力有一定的波动,总体都保持了 2.80MPa 左右的井底负压值;整个施工过程中共溢流 40.3m³,进一步说明整个钻井过程中未造成地层过压。

(2) 测试结果分析

依据 M-0001 井测试的数据,对该井压力数据随等效时间变化进行拟合(图 2),主要储层表皮系数为 -3.44,说明 M-0001 井钻井液取得了良好的保护油气层效果,施工过程中钻井液未对地层造成污染。

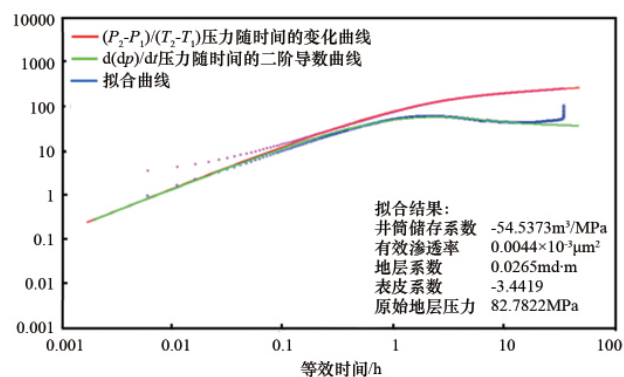


图 2 M-0001 井 DST#1 测试二关双对数曲线

Fig. 2 Well M-0001 DST#1 test log-log curve

5 结论

(1) 通过对沙特高压低渗凝析气藏岩心的室内评价,凝析油析出导致的油锁和钻井过程中钻井液中的水相渗入地层导致的水锁是引起储层渗透率降低的主要原因,在钻井过程中应尽量避免油锁和水锁伤害。

(2) 针对高压低渗凝析气井,采用一种新型全过程欠平衡设计方法,设计时充分考虑油藏工程和钻井工程的结合,能最大限度防止储层伤害,解放气井产能,提高油气发现率。

(3) 实际现场应用表明,该设计方法能有效防止储层污染并保证井控安全,钻井过程中有溢流发生,但在可控范围之内,测试后表皮系数为 -3.44,说明储层没有受到污染。

参考文献 (References)

- [1] 杨顺辉. UBD/MPD 技术标准现状分析[J]. 石油工业技术监督, 2011(7): 38-40.

- Yang Shunhui. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2011(7): 38-40.
- [2] 苏勤, 侯绪田. 窄安全密度窗口条件下钻井设计技术探讨 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 62-65.
Su Qin, Hou Xutian. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3): 62-65.
- [3] 陈永明. 全过程欠平衡钻井中的不压井作业 [J]. 石油钻探技术, 2006, 34(2): 22-25.
Chen Yongming. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 34(2): 22-25.
- [4] 赵向阳, 孟英峰, 李皋, 等. 充气控压钻井气液两相流流型研究 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 6-10.
Zhao Xiangyang, Meng Yingfeng, Li Gao, et al. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010, 32(2): 6-10.
- [5] Nyoman D, Toralde J. Combining MPD with downhole valve enables high rate gas wells[J]. *World Oil*, 2008, 229(3): 10-12.
- [6] Hodgson R. Snubbing units: A viable alternative to conventional drilling rig and coiled tubing technology [C]. Offshore Europe, Aberdeen, United Kingdom, September 5-8, 1995.
- [7] Sehmigel K, Macpherson L. Snubbing provides options for broader application of underbalanced drilling lessons [C]. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Port-of-Spain, Trinidad and Tobago, April 27-30, 2003.
- [8] Cavender T W, Restarick H L. Well-completion techniques and methodologies for maintaining underbalanced conditions throughout initial and subsequences interventions [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, September 26-29, 2004.
- [9] Timms A, Muir K, Wuest C. Downhole deployment valve: Case histories [C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 5-7, 2005.
- [10] 安本清, 赵向阳, 侯绪田, 等. 全过程欠平衡随钻测试替代钻柱测试探讨[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(8): 124-128.
An Benqing, Zhao Xiangyang, Hou Xutian, et al. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(8): 124-128. (责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“第四届全国岩土与工程学术大会”征文

中国岩石力学与工程学会、中国建筑学会工程勘察分会、中国土木工程学会土力学及岩土工程分会和中国地质学会工程地质专业委员会将于2013年11月1日于杭州召开“第四届全国岩土与工程学术大会”。

征稿范围:岩土的基本性质与本构关系;岩土工程数值分析与仿真;边坡、基坑与地下工程典型案例;岩土力学实验研究方法;软土地基处理的新概念、新技术、新工艺;复杂地质条件下施工安全和工程稳定问题;岩土工程的加固与防护新理念、新方法、新技术;重大地质灾害形成机理预警与防治;环境友好的岩土工程技术;岩土文物的勘察与保护技术;岩土与工程技术应用的新领域;岩土工程风险评价与管理;其他。

全文截稿日期:2013年4月30日。

联系电话:0571-56738228。

通信地址:杭州市潮王路22号中国水电顾问集团华东勘测设计研究院科技信息部,310014。

电子邮箱:chen_p@ecidi.com。

大会网站:http://www.csrme.com/CN/News/2012-09/EnableSite_ReadNews36812321347897600.html。