

全过程欠平衡钻井储层保护机制

张广垠¹, 赵向阳², 杨顺辉², 豆宁辉², 夏柏如¹

1. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100083

2. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

摘要 系统总结了国内外全过程欠平衡钻井的研究现状;分析了常规欠平衡钻井过程中,因起下钻、测井、完井等存在的压井作业,使井底储层处于间断过平衡状态,在固相侵入、水相圈闭和水敏等作用下,造成严重的储层损害;论述了全过程欠平衡钻井技术,从钻开储层到交井投产的全过程欠平衡保护储层的机制,并以邛西3井、4井为例说明了全过程欠平衡钻井在储层保护、减少井漏等井下复杂事故、提高产量,以及快速、真实、准确地发现储层、评价储层方面的优势。

关键词 全过程欠平衡;间断过平衡;储层保护;损害机制

中图分类号 TE24

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.08.004

The Reservoir Protection Mechanism of Underbalanced Drilling Operation

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

1. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract The current research status on the underbalanced drilling operation at home and abroad is systematically summered. The reservoir damage mechanism and during the normal process of underbalanced drilling operation, the reason making well bottom reservoir run into intermittent overbalanced drilling operation status caused by drilling operations, such as tripping, logging, and well completion, are analyzed. Intermittent overbalanced drilling operation causes the seriously reservoir damage due to the intrusion of the solid phase, water trapping, and water sensitivity. The technology and the reservoir protection mechanism of underbalanced drilling operation from open reservoir to reservoir production are discussed. Finally, the advantages of underbalanced drilling operation, involving reservoir protection, the reduction of lost circulation and other drilling accident, production increase, quick, real, and exact discovery of reservoir, and evaluation of reservoir, are illustrated by taking wells QX3 and QX4 as the example.

Keywords underbalanced drilling operation; intermittent overbalanced drilling operation; reservoir protection; damage mechanism

0 引言

欠平衡钻井技术可以大幅度提高钻井速度,缩短建井周期,减轻或消除钻井液对油气层的损害,降低井漏风险,有利于油气层发现,提高油气勘探成功率,及时对地层进行动态评价,提高油气井产量。然而,钻井施工过程中间断过平衡钻井和相关的压井作业可能对储层造成严重的固相侵入、水相圈闭和水敏损害,影响欠平衡钻井应用的效果。全过程欠平衡钻井技术可以克服间断过平衡造成的储层损害^[1-6]。针对全过程欠平衡钻井技术,目前发明了不压井起下钻装置和井下套管阀、连续循环系统 CCS、连续循环阀系统 CCV。目前针对全过程欠平衡保护储层的机制研究较少,本文系统总结了国内外全过程欠平衡钻井的研究现状;分析了常规欠平衡钻井过程中,因起下钻、测井、完井等存在的压井作业使井底储层

处于间断过平衡状态,造成严重的储层损害;论述了全过程欠平衡钻井技术,从钻开储层到交井投产的全过程欠平衡保护储层的机制,为更好地评价和预测全过程欠平衡的效果,科学选井选层提供理论依据。

1 全过程欠平衡技术研究现状

全过程欠平衡钻井是指包括欠平衡钻进 (underbalanced drilling) 和欠平衡完井 (underbalanced completion) 的全过程欠平衡压力控制技术,其核心是不压井作业。通过采用不压井起下钻和井下套管阀装置,不但实现欠平衡钻进,而且能同时实现欠平衡起下钻、欠平衡测井、欠平衡完井等整个钻完井施工作业。

国内由四川石油管理局、西南油气分公司和西南石油大

收稿日期: 2012-11-07;修回日期: 2012-12-31

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、油气层保护等钻井技术,电子信箱: gyzhang.sipc@sinopec.com

学联合研发的不压井起下钻全过程欠平衡钻井技术,于2002年6月—2004年在四川盆地邛西构造上投入使用,使该构造的单井产量由每天不足万方提高到每天几十万方,取得了突破性的技术进步;新疆石油管理局独立开发了国产化井下套管阀的全过程欠平衡钻井技术,在新疆等地区的应用中也获得了显著的经济效益。全过程欠平衡钻井技术使单井增产能力由最初的不到1倍,发展到后来的增产6~7倍。

国外 Halliburton、Weatherford 等公司通过应用井下压力随钻测量系统(PWD),实现对井底压力的调节和控制,基本解决了钻进过程中的实时监测、模型预测和自动控制等问题,但其未能解决全过程欠平衡钻井中井内循环停止后的井筒压力控制问题,仍然是非全过程类型的欠平衡钻井。

美国 SWACO 公司发明了连续循环系统 CCS,挪威 Statoil 公司发明了连续循环阀系统 CCV,从另一途径实现了接单根过程中的连续循环,维持井筒压力平衡。但该系统的不足之处在于:一旦井内钻柱的循环不可用(如起钻、下钻、或钻具断掉刺堵等)或井内没有钻柱(如测井、完井、停工等待等起出钻柱的场合),则该系统也无法维持井筒内连续循环,仍然是非全过程类型的欠平衡钻井。

为克服循环与静止之间的井底压力变化对窄窗口、零窗口、负窗口地层钻进所造成的困难,人们也想到了利用“连续循环”技术克服循环-静止之间的井筒压力变化。西南石油大学孟英峰^[7]提出了“注气稳压”的方法,即在循环开始时同时由地面向环空注气,使环空含气造成的井底压力降低到恰好等于环空循环造成的井底压力增加,这样循环时的井底压力可以保持与静止时的井底压力一致。

2 非全过程欠平衡产生的原因

不连续的欠平衡条件一方面来自欠平衡钻进过程,另一方面来自非欠平衡钻进过程。在欠平衡钻进过程中,由于接单根、更换钻头起下钻、常规 MWD 信号的传输、摩擦流动效应、静液柱效应、不同压力的多个地层、相同地层的不同压力、对原始油气藏压力缺乏了解、操作或供应问题等因素,会干扰欠平衡条件的连续性,导致间断的过平衡压力波动。非欠平衡钻井导致的不连续条件是在欠平衡钻井过程中的各种可能导致过平衡的中途测试及在欠平衡钻进后采用的各种过平衡作业,如压井、固井、测井、下油管等作业^[8,9]。

2.1 欠平衡钻井井底的压力波动

欠平衡钻井循环系统是一个多相流体流动的非稳定压力系统,它受注入液体气液比、储层流体进入、地面回压等因素控制。欠平衡钻井中的环空气、液、固多相流动是一复杂、多变的流动过程,同时也是影响欠平衡钻井安全、高效的重要因素。欠平衡钻井在不同工作方式(钻进、接单根、起下钻等)的多相流态、相态特征,不同井深、温度、压力和产出物条件下环空流态变化,岩屑的运移、不同岩性物性地层产出流体流动规律都与井筒压力密切相关。同时,不合理的设计和压力控制都可能造成井底有效压力大于地层压力,如图1、图2所示,

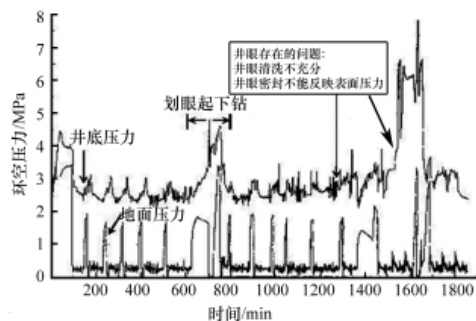


图1 接单根的正压脉冲与起下钻的持续正压差实测数据
Fig. 1 Actually measured data of positive pressure pulse of single pipe connection and continual positive differential pressure of trip

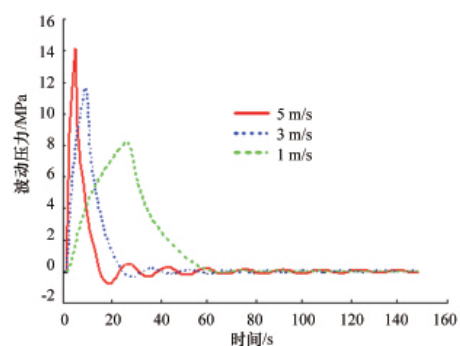


图2 某井不同速度下钻过程中压力波动曲线
Fig. 2 Fluctuation curves of the pressure with different velocities tripping in certain well

然而这些只要进行合理的工艺设计,都是可以避免的^[10]。

2.2 毛管力自吸效应的影响

毛管力自吸效应对低渗致密砂岩气藏的水基欠平衡钻井有着非常重要的影响。Guo等^[11]提出由于毛管压力的作用,在水基欠平衡钻井过程中要考虑毛管压力的影响。如果欠压值小于毛管压力值,由于毛管自吸效应,使水进入储层,引起液相侵入损害,失去欠平衡钻井的意义。西南石油大学李皋等^[12]通过室内实验和理论分析得出了欠平衡逆流自吸规律,即低渗致密砂岩气藏在欠平衡条件下仍然存在水基工作液的自吸效应。随着时间延长,自吸造成气相渗透率下降的幅度增加,在接触润湿相的初始阶段气相渗透率下降速率最大。欠压值越小,自吸作用越强,过低的欠压值不能起到欠平衡的作用;围压增加和黏土矿物膨胀、自吸造成气相渗透率下降程度增加。

2.3 中途测试和起下钻、测井以及完井过程进行压井作业

最初的欠平衡钻井,只能在钻进过程中实现欠平衡,而在起下钻、测井、完井等过程中则需压井转换为过平衡,这个压井过程使储层由欠平衡状态转变为过平衡状态。

3 间断过平衡造成的储层损害机制分析

在欠平衡钻井时,地层液体流向井筒,井壁表面不会形成滤饼。在实际作业中,受多种因素的影响,欠平衡钻井过程中

的一些时间段或一些层位实际处于正压差状态,如起下钻、测井、完井等过程中则需压井转换为过平衡,使储层由欠平衡状态转变为过平衡状态,对地层造成严重的固相侵入和水相圈闭、水敏损害,从而会丧失欠平衡钻井的许多优点,并且可能给作业者带来更大的损失^[13]。

应用中经常会出现在欠平衡钻进过程中油气产出显示高产,而在完井投产之后油气产能很低。因此,早期的欠平衡钻井的业绩主要是在钻开产层的钻进过程中,有利于勘探中发现储层和评价真实产能。在随后的完井、投产作业中,由于过平衡压井、注水泥固井等的多次正压差损害,使得单井产能一次次大幅度降低,以致完井后自然产能非常低,甚至酸化解堵、压裂改造的效果也不显著,这充分说明储层被欠平衡钻开之后,如果再遭受过平衡压差作用,则会造成不可恢复和致命的储层损害。

4 全过程欠平衡钻井保护储层机制分析

全过程欠平衡钻井真正实现了从钻开储层到交井投产的欠平衡储层保护,消除了由于正压差引起的液相、固相侵入造成的损害。减少了处理井漏、卡钻的复杂事故带来的损害。储层全过程的良好保护为开发井提供了获得单井高产的基础;储层全过程的良好保护,以及直接、连续的油气产出定性显示和定量计量,也给勘探井提供了快速、真实、准确发现储层、评价储层的基础。

4.1 消除正压差造成的损害

压差是造成油气层损害的主要因素,对水相在油气层中的侵入量、侵入深度、侵入速率及反排速率和效率起着十分重要的作用。通常钻井液的滤失随着压差的增大而增大,因为钻井液进入油气层的深度和损害程度均随着正压差的增大而增大,当钻井液的有效液柱压力超过地层破裂压力或裂缝的流动阻力时,钻井液有可能漏入油气层,加剧油气层的损害。

对于低渗油藏,过平衡压差下打开储层,井内工作液在正压差作用下迅速侵入孔隙或微裂隙,形成一个侵入储层深度相当大的“裂缝冲洗带”。工作液中的固相颗粒、胶质、杂质等直接堵塞了裂缝流道,造成了裂缝供流能力的损害。

对于裂缝溶洞储层,普遍存在许多毫米级以上的大裂缝,甚至溶洞。该类储层用常规水基工作液打开,常出现严重井漏。这种漏失随着过平衡压差增大而增大,在平衡压力甚至轻微的欠平衡压力条件下仍有明显漏失。漏失的工作液不但造成了严重的储层损害,严重井漏,甚至使钻开储层的施工失败,导致井眼报废。西南石油大学完井技术中心(CWCT)的实验和理论研究证明:这种大的裂缝、溶洞型储层在水基工作液打开的过程中,工作液进入储层与储层进入井筒的规律已经完全不符合达西渗流定律,而是由裂缝几何形状、尺寸与压差、流体密度差、流体界面张力与黏度等因素综合控制的一个复杂规律,称之为“重力置换性漏失规律”。进一步研究证明:欠平衡压差适当的欠平衡钻井,可以有效地克服严重裂缝型储层的这种“重力置换性漏失规律”^[14,15]。

对于低压储层,其孔隙压力低于静水压力,当采用常规水基钻井液过平衡钻井时,过大的正压差常造成极其严重的工作液侵入损害,甚至导致井漏,且损害侵入深、地层恢复能力差,而采用全过程欠平衡钻井技术可以避免低压储层损害。

4.2 减少或消除液相侵入造成的损害

在过平衡条件下,进入油气层岩石的钻井液滤液由于与油气层岩石和流体不配伍,可能诱发水敏、盐敏、碱敏、润湿反转、表面吸附、水相圈闭等损害,而采用全过程欠平衡钻井减少或消除了钻井液滤液侵入油气层岩石,从而减少或消除了液相侵入造成的损害。

(1) 水相圈闭损害。对于低渗透储层,在过平衡压差和孔隙性基块吸水势能的共同作用下,工作液的滤液通过裂隙表面向孔隙性基块内侵入。由于正压差作业所形成的侵入带内完全被工作液的滤液所饱和,在孔隙性基块自然吸水势能所形成的侵入带内,含水饱和度由初始增加为束缚水饱和度。

(2) 水敏性损害。伴随着沿裂隙向基块内的渗流和渗吸过程,在孔隙性基块的压差冲洗带还有各种固相颗粒堵塞、胶质及聚合物吸附堵塞等损害。由于低渗储层的特殊孔喉结构,使得堵塞损害更加容易发生,其后果更加严重。如果储层内黏土矿物丰富,则在水相圈闭带黏土矿物的水化膨胀和分散会更明显。

(3) 页岩水化导致的裂缝闭合。低渗储层相邻的泥页岩盖层、夹层开始由井眼内的工作液缓慢吸水,经过一定时间后达到一个侵入深度。在这个侵入范围内,水相滤液使泥页岩吸水膨胀,产生水化应力。这个水化应力直接作用在储层上,再加上储层微裂隙的高度应力敏感性,从而使近井壁带的裂缝趋于闭合,造成损害。由此可见,低渗透储层损害的主要来源是正压差和水相,而且损害程度随着正压差、水相作用的时间增加而加剧。

4.3 减少或消除固相侵入造成的损害

在常规钻井完井液中含有一定量不同粒径的固相粒子,在正压差作用下,这些固相粒子可能侵入储层形成堵塞,造成气体渗透率降低。对于低渗致密砂岩固相堵塞主要有两种形式:在砂岩基块孔隙中的堵塞和沿裂缝面的侵入堵塞。由于低渗致密砂岩孔喉相对中高渗透率砂岩小得多,只有钻井完井液中粒径最小的一部分颗粒可以进入孔喉,因此,在低渗致密砂岩基块中固相侵入的量和深度很小。对于宏观裂缝不发育的气层,对渗透率贡献最大的一部分较大孔喉可由于固相堵塞而导致气体渗透率大幅降低。

仅采用水基工作液的欠平衡钻井,虽然可以消除正压差造成的损害,但仍无法避免储层的自然渗吸造成的水相圈闭和水敏损害,也无法避免泥页岩长期吸水的水化应力造成的应力敏感性损害。而采用气体类工作液的欠平衡钻井,则可以完全消除因水相造成的损害^[16-18]。

5 现场应用实例

川西邛西构造须二气藏属于典型的低渗致密砂岩气藏,

气藏的黏土矿物以非膨胀性的伊利石和绿泥石为主;储层宏观裂缝发育,平均 20 条/m 左右。在钻井、完井过程中,液相沿裂缝侵入,在缝面形成水相圈闭损害,一直是制约该构造气藏经济有效开发的瓶颈。2002 年起在该气藏试验全过程欠平衡钻井技术,成功地保护了气藏,有效预防了水相圈闭损害。

邛西 3 井^①是川西邛西潜伏构造上的一口预探井,目的层是须家河须二段,其 177.8mm 油层套管下至须二顶部固井后,于 2002 年 6 月 1 日 21:30,从井深 3487.00m 开始用 $\Phi 152\text{mm}$ 钻头实施欠平衡钻进,于 2002 年 6 月 18 日 10:00 钻至完钻井深 3572.00m。在本次钻井施工中,为了最大限度地发现和保护油气层,成功地进行了欠平衡钻进、不压井带压起下钻具、不压井带压取心、不压井带压测井和不压井带压油管完井等全过程欠平衡钻井配套试验,在国内首次实现了从钻进到完井全过程的欠平衡施工作业。在欠平衡钻进过程中,通过放喷管线直观点火并结合综合录井资料,及时直观地发现 3 个含气层段:3487.00~3488.80m;3494.00~3496.71m 和 3526.00~3528.00m。完井后用 31.8mm 孔板测试,井口油压为 20.63MPa、井口套压为 26.07MPa、上游压力为 2.69MPa、上游温度 22℃,获得日产气量为 $43.13 \times 10^4 \text{m}^3$ 的高产气流,取得了川西地区邛西构造油气勘探的重大突破。邛西 4 井是邛西潜伏构造上的另一口评价井,目的层须家河须二段。该井也成功地实施了全过程欠平衡钻井配套技术,完井测试获得日产气量 $84.47 \times 10^4 \text{m}^3$ 的高产气流,是继邛西 3 井后在川西地区邛西构造油气勘探上取得的又一次重大突破。而采用常规钻井方式在该构造钻成的邛西 1 井和邛西 2 井获得日产气量分别为 $0.07 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $0.52 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

6 结论

(1) 欠平衡钻井中起下钻、开泵和测井、完井等过程中的压井作业可能造成井底处于过平衡状态,这种间断过平衡仍会造成储层损害。

(2) 间断过平衡和相关的压井作业是通过储层造成固相侵入、水相圈闭和水敏损害,从而造成对储层的严重损害,丧失欠平衡钻井的优点,并且可能给作业者带来更大损失。

(3) 全过程欠平衡钻井真正实现了从钻开储层到交井投产的欠平衡储层保护,消除了由于正压差引起的液相、固相侵入造成的损害;减少了处理井漏、卡钻等复杂事故所带来的损害;提高了单井产量;提供了快速、真实、准确发现储层、评价储层的基础。

参考文献 (References)

- [1] 孟英峰, 罗平亚, 杨龙. 国外低压钻井技术调研分析[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996.
Meng Yingfeng, Luo Pingya, Yang Long. Foreign low-pressure drilling technology research and analysis [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 1996.
- [2] Bennion D B, Thomas F B. Underbalanced drilling of horizontal wells: Does it really eliminate formation damage [C]. SPE Formation Damage Control Symposium, Lafayette, Louisiana, February 7-10, 1994.

- [3] Bennion D B, Thomas F B, Imer D. Low permeability gas reservoirs and formation damage -tricks and traps [C]. SPE/CERI Gas Technology Symposium, Calgary, Alberta, Canada, April 3-5, 2000.
- [4] Magsood A R. Underbalanced drilling: "remedy for formation damage, lost circulation, and other related conventional drilling problems"[J]. SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting, Bakersfield, California, March 29-April 2, 2008.
- [5] Bennion D B. Remediation of water and hydrocarbon phase trapping problems in low permeability gas reservoirs [C]. 47th ATM of the Petroleum Society, Calgary, AB, June 10-12, 1996.
- [6] Khansari A N. Evaluation of well productivity loss due to formation damage caused by spontaneous imbibition in underbalanced drilling[C]. IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition, San Antonio, Texas, February 12-13, 2009.
- [7] 孟英峰, 李永杰, 陈一健. 注气稳压钻井方法: 中国, CN101139911[P]. 2008-03-12.
Meng Yingfeng, Li Yongjie, Chen Yijian. Method of stabilize pressure drilling by gas injection: China, CN101139911[P]. 2008-03-12.
- [8] 侯绪田, 莫跃龙. 塔河油田深井碳酸盐岩储层欠平衡钻井技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 77-79.
Hou Xutian, Mo Yuelong. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 77-79.
- [9] 李皋. 低渗砂岩气藏水锁损害机理、预防和解除技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2005.
Li Gao. Water lock damage mechanism, prevention and resolving technical research in low permeability sandstone gas reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [10] 侯绪田. 多相流井筒压力分布规律探讨 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32(4): 32-34.
Hou Xutian. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(4): 32-34.
- [11] Guo B, Ghalambor A. Guideline to optimizing pressure differential in underbalanced drilling for reducing formation damage [C]. International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, February 15-17, 2006.
- [12] 李皋, 孟英峰, 唐洪明, 等. 砂岩气藏水基欠平衡钻井逆流自吸效应实验研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(1): 75-77.
Li Gao, Meng Yingfeng, Tang Haoming, et al. Natural Gas Industry, 2007, 27(1): 75-77.
- [13] 樊世忠, 石景玲. 欠平衡钻井完井液技术(I)概念及损害机理[J]. 钻井液与完井液, 2000(16): 27-29.
Fan Shizhong, Shi Jingling. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2000(16): 27-29.
- [14] 张绍槐, 罗平亚. 保护储集层技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
Zhang Shaohuai, Luo Pingya. Reservoir protection techniques [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [15] 孙宁. 我国气象钻研技术研究与实践[R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2006.
Sun Ning. Gas drilling technology reasearch and practice in our country [R]. Beijing: Economic Research Institute of China Petroleum, 2006.
- [16] Guo B Y. Balance between formation damage and wellbore damage: what is the controlling factor in UBD operations? [C]. International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, February 20-21, 2002.
- [17] Berkat A, Mazouzi A, Kartobi K, et al. Applying a new systematic and dynamic UBD procedure prevented formation damage, wellbore collapse and improved oil production in Hassi massoud field[C]. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Muscat, Oman, October 24-26, 2011.
- [18] 兰林, 夏海英, 牛静, 等. 关于液体欠平衡钻井的储层损害评价[J]. 钻井液与完井液, 2008, 25(2): 12-13.
Lan Lan, Xia Haiying, Niu Jing, et al. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2008, 25(2): 12-13.

(责任编辑 刘志远)