

大牛地气田欠平衡水平井钻井技术

卢周芳

(中国石化集团华北石油局三普石油工程公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要:针对鄂尔多斯北部地区低压低渗地层,常规钻井工艺技术一直是制约钻井效率和及时发现有效保护油气层、影响油气产能的重要因素。为此,近几年在鄂北工区大牛地气田进行了欠平衡钻井工艺和水平井钻井技术的推广应用与研究。介绍了欠平衡钻井工艺技术概况、优点及在大牛地气田水平井中的应用。业已显示,欠平衡钻井技术具有及时发现和有效保护油气层、提高机械钻速、及时评价低压低渗油气层的特点,同时提出了应用中存在的问题和技术难点。

关键词:欠平衡钻井;水平井;机械钻速;储层保护;大牛地气田

中图分类号:TE249 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)09-0010-05

Drilling Technology of Underbalanced Horizontal Well in Daniudi Gas Field/LU Zhoufang (Sanpu Drilling Company of SINOPEC North China, Xianyang Shaanxi 712000, China)

Abstract: Conventional drilling technology restricts drilling efficiency and is unfavorable to protect oil and gas formation in low pressure and low permeability reservoir. Underbalanced drilling and horizontal drilling were analyzed and applied in Daniudi gas field. The paper introduced the underbalanced drilling technology about the process overview, advantages and the application in horizontal well of Daniudi gas field. It was showed that underbalanced drilling technology can provide timely discovery and effective protection of oil and gas formation, improvement of drilling efficiency and evaluation on oil and field formation with low pressure and low permeability. The problems and technical difficulties in application were also put forward.

Key words: underbalanced drilling; horizontal well; penetration rate; reservoir protection; Daniudi gas field

0 引言

欠平衡钻井技术是指在钻井过程中使钻井流体压力低于地层压力,允许地层流体有控制的进入井筒并将其循环到地面的一种钻井技术。有时也称负压钻井。

针对鄂尔多斯北部地区低压低渗地层,常规钻井工艺技术一直是制约钻井效率和有效保护油气层、影响油气产能的重要因素,为了有效保护储层,提高油气产能和机械效率,近几年在鄂北工区大牛地气田进行了欠平衡钻井工艺和水平井钻井技术的推广应用与研究。欠平衡钻井能更有效减少钻井介质对地层的污染,及时发现产层和提高产能;能减少和避免井漏和压差卡钻等井下复杂事故,提高钻井机械钻速,减少钻井费用等。

欠平衡钻井技术在鄂北工区的应用研究,目前国内钻井界尚处在应用试验到推广阶段。实践发现,针对不同复杂地层有很多问题亟待研究和探讨。

1 区域地质特征

鄂北大牛地气田天然气储层属典型的低压、低

渗、低产“三低”砂岩气藏,地质构造断层不发育,总体为东北高、西南低的平缓单斜,平均坡降6~9 m/km,倾角0.3°~0.6°,局部发育鼻状隆起,未形成较大的构造圈闭,属上古生界石炭系~二叠系海陆交互相含煤碎屑岩含油气体系。

大牛地气田储层为低压~正常压力系统,低渗透致密气藏,多数产层渗透率小,具有低孔隙度(平均孔隙度为6%~8%)、低含气饱和度(平均含气饱和度为50%~60%)、低产的特征,气藏平均压力系数0.92。具非均质性、砂体平面展布变化大。

大牛地气田上古生界自下而上发育的太₁、太₂、山₁、山₂、盒₁、盒₂和盒₃七套气层,其埋深2500~2900 m。气层纵向上交错叠合发育,平面上分片展布,储层非均质性较强,气藏内部差别较大。七套气层纵向跨度大,气层组合关系复杂。各套气层均为低渗~致密气层,有效渗透率 $<0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,气藏温度79~91.6℃,基本属同一压力系统,气层有效应力和基块毛管压力高,储层保护难度比较大,易产生水锁伤害。

收稿日期:2010-07-28

作者简介:卢周芳(1957-),男(汉族),山东德州人,中国石化集团华北石油局三普石油工程公司生产技术科科长,石油钻井专业,从事石油钻井技术工作,陕西省咸阳市毕塬东路10号,sp.lzf@163.com。

2 实现欠平衡钻井作业相关技术与配套设备

2.1 充气钻井技术

充气钻井液基液采用无土相钻井完井液体系,循环均匀后开始欠平衡钻进,充氮气 $30 \sim 50 \text{ Nm}^3/\text{min}$,注液量 $25 \sim 30 \text{ L/s}$ 。钻井循环时,井口采用双液气分离器,同时控制钻井液粘度,提高了液气分离效果。

2.2 不压井起下钻技术

起钻前用充气钻井液充分循环洗井。先停止注气,继续泵入钻井液,直到整个钻柱内充满基液,停泵,关井,通过旋转控制头胶芯起出立柱。起至套管阀之上后,按套管阀作业程序关闭套管阀,当套管阀完全关闭后,起出旋转控制头轴承总成,进行常规起钻。下钻时,在套管阀以上,按常规方法下钻。下到靠近套管时,装好旋转控制头,打开套管阀。通过旋转控制头胶芯下入钻杆柱。

2.3 接单根技术

接单根时先停泵,继续注入气体,直到充气钻井液顶至第一个回压阀以下。采用泥浆顶充气液,先停气后停泵,接单根时间可大为减少,减缓了环空段塞分离,减少了节流处理时间。

2.4 双液气分离技术

充气钻井原则上不节流控制井口压力,而是调节气液比控制井底压力。DP4 井在充气量最大至 $50 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 情况下,为了保证正常循环,泥浆不外溢,保证入口泥浆不受气侵和合理的泥浆密度,采用了双液分离器双节流控制工艺,控制井底压力,保证了施工的正常进行。

2.5 套管阀应用

套管阀的下入深度必须大于发生钻柱失重的深度,即当管柱起至套管阀位置时,其浮重必须大于上顶力。在确定套管阀的下深时,一个关键的因素是要确定在起下钻过程中可能发生的最高套压。不压井起下钻过程中实际套压很难预测,现场经综合考虑套压确定为 11 MPa ,以此为依据确定套管阀的下入深度。套管阀长度一般在 4.5 m 左右。过胶芯起钻到套管阀以下 2 个立柱,缓慢通过套管阀,注意观察悬重变化,到套管阀以上两个立柱,关闭套管阀,卸掉套管阀以上井内的压力,起出旋转控制头,正常起钻。正常起钻到套管阀以上两个立柱,座上旋转控制头,平衡套管阀上下压力开套管阀,之后过胶芯继续下钻。

2.6 井眼轨迹测量

在钻进水平段由于注气量较大,而常规泥浆脉

冲无线随钻测量设备的上传信号在此类钻井液中会有不同程度的衰减,严重情况下地面译码设备将无法获取足够强度的信号。因此华北分公司采用了斯伦贝谢的电磁波测量工具 E-PULSE + MCR 测量仪器,可以测量自然伽玛、工具面、(连续)井斜、方位(自动测斜)、电阻率等参数。实际施工中,信号传输比较稳定,清晰,对地质导向提供了指导意义,水平段井眼轨迹控制达到了设计要求。解决了常规地质导向在充气钻井液中信号无法传输的问题。

2.7 充气欠平衡钻井设备

为了保证充气欠平衡作业的安全实施,配备了 $9\frac{5}{8} \text{ in}(\text{Ø}244.5 \text{ mm})$ 套管阀、旋转控制头,为了解决非连续液相条件下地质导向,配备了电磁测量工具 E-PLUS、MCR。并配备制氮充氮设备及地面流程。充气欠平衡钻井循环流程如图 1 所示。

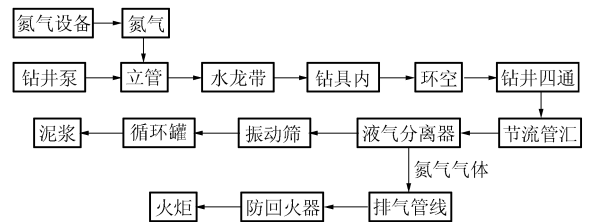


图 1 充气欠平衡钻井循环流程

3 大牛地气田欠平衡水平井钻井技术工艺概况

3.1 钻井工艺实施过程

前期 DP1、DP35-1、DF1 这 3 口水平井采用三级井身结构,水平段采用 $6 \text{ in}(\text{Ø}152.4 \text{ mm})$ 井眼。其中 DP1 井主要目的层山₁ 气层,水平段采用钾基聚醚多元醇+屏蔽暂堵技术,钻井液密度为 1.13 g/cm^3 。该井实钻水平段长 612 m ,裸眼段砂岩钻遇率 88.3% ,气层和差气层钻遇率 48.89% 。

DP35-1 井主要目的层太₂ 气层,借鉴邻近区块长北气田水平井开发经验,水平段采用强抑制全酸溶 ASS-1,钻井液密度为 1.05 g/cm^3 。该井完钻后裸眼测试气产量 $170 \text{ m}^3/\text{d}$,酸化解堵后气产量稍降,自然产能低。

DP1 井、DP35-1 井证实了气层存在一定的自然产能,但整个水平井试验未取得预期成果。

为了彻底解放气层,了解自然产能,2006 年在山₁ 气层部署实施了分支井 DF1 井,该井按预案实施了负压钻进,循环介质为氮气泡沫,实测井底负压 $1100 \sim 1400 \text{ PSI}(7.58 \sim 9.65 \text{ MPa})$ 。水平段采用电磁测量工具 EMWD。因氮气泡沫不能有效防止煤层坍塌,DF1 井最终未能安全成井。实施过程中在

3120~3720 m 井段产气量达 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 欠平衡技术在山₁₋₁气层取得了初步成效,充分体现了欠平衡保护储层的优越性,对下一步水平(分支)井钻井具有指导和借鉴意义。

3.2 DF2、DP3 井方案优化及实施

DF2 井实施层位山₁气层, DP3 井实施层位盒₃气层。在 DF2、DP3 实施前根据前期水平井(分支井)存在问题,对 DF2、DP3 井从井身结构、A 点靶前距、储层保护等方面进行了优化,并针对 DF2 井提出了钻遇煤层技术措施。

DF2、DP3 井二开下 $9\frac{5}{8} \text{ in}$ ($\varnothing 244.5 \text{ mm}$) 技术套管到 A 点,水平段采用 $8\frac{1}{2} \text{ in}$ ($\varnothing 215.9 \text{ mm}$) 井眼,做好两手准备,如果自然产能达到配产要求则裸眼完井,如果自然产能达不到配产要求,再实施后期改造,避免小井眼中实施压裂改造在工具上的局限。为了有效保护储层,两口井采用水基欠平衡钻井液体系,其中 DF2 井优选了胜利钻井研究院的无土相漂珠钻井完井液体系, DP3 井优选了无粘土相漂珠钻井完井液体系,试验利用空心玻璃微珠降低钻井液密度,实际施井中 DF2 井实现近平衡钻进、DP3 井部分井段实现了欠平衡钻进,有效保护储层;因为是连续液相,采用常规地质导向进行数据传输。

因为这两口井设计水平段较长,DF2 井水平位移 1962.80 m, DP3 井水平位移 1695.00 m,为了确保钻井作业安全实施,配套顶部驱动装置。DP3 井按预期要实施水基欠平衡作业,为了确保全程欠平衡作业安全有效,配套了旋转防喷器、井下套管阀等欠平衡设备设施。DF2 井水平段曾两次钻遇煤线调整轨迹,均未发生塌垮事故,水基钻井液在近平衡条件下可以有效平衡煤层垮塌应力。

无粘土相漂珠钻井完井液体系特点:利用空心玻璃微珠实现钻井液的低密度($0.8 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$),减少油气层的伤害,提高机械钻速,消除压差卡钻。井底压力低,钻井液侵入低,能降低水相圈闭的伤害。具有较强的抑制性,可以减轻粘土矿物的水化膨胀,减少水敏损害。不含粘土相,消除了固相污染。可以降低钻具在井下的摩擦力。保持全井筒液柱密度的一致性和良好的流动性,满足携岩洗井的要求。能够满足地质导向和随钻测量工具信号传输的要求。不使用充气设备,降低了钻井的综合成本。

3.3 DF2、DP3 井存在问题

(1) DF2、DP3 井虽然取得了初步成效,但钻井液所用减轻剂空心玻璃微珠承压能力有限,易碎,而且成本比较高,不适合气田的规模开发。DP3 井无

粘土相钻井完井液体系所用空心玻璃微珠承压能力有限,易碎,造成钻井液密度上升,致使 DP3 井未能全面达到欠平衡钻井,水平井钻井完井液体系有待进一步筛选和优化。

(2) 石炭二叠系泥页岩地层易水化膨胀、剥落,造成阻卡。

这个问题在 DP3 井比较突出,在造斜段钻遇上石盒子泥岩 2670~2774.37 m 井段多次遇阻遇卡(井斜 62° 左右),当时钻井液失水过大,加剧了泥页岩的水化膨胀、剥落,将钻井液密度从 1.10 g/cm^3 提高到 1.19 g/cm^3 ,不能有效缓解阻卡,被迫填井侧钻,报废进尺 140.88 m。水泥塞面 2608.80 m,从 2633.49 m 开始控时侧钻,侧钻时在该井段时依然遇阻、遇卡比较严重,井内有掉块,侧钻井段钻井液密度由 1.20 g/cm^3 提高到 1.23 g/cm^3 ,下套管前调整到 1.24 g/cm^3 。在今后水平井的施工中可适当提高造斜段曲率,减少造斜段长度,提高钻井液的抑制性,控制失水。

(3) 从顶驱的现场使用来看,顶驱类型的选择较小,DP3 井选用顶驱的额定载荷为 36 kN,而现场钻井至 3919 m 加载达到 33 kN 时,顶驱打滑无法加载。如果按设计井深或继续追踪砂岩时,顶驱无法加载。

3.4 DP4、DP5 井方案优化及实施

DP4、DP5 井在方案优化时吸取前期水平井教训、借鉴成功经验,以欠平衡钻井为主体思路,最大限度地降低储层污染、争取裸眼建产。

(1) 方案在 DF2 井的基础上将钻井完井液配方进行了优化(与 DF2 井相比去掉了空心玻璃微珠,增加润滑剂,充氮气)并进行了伤害实验评价。设计 DP4 井水平段充气量 $50 \text{ m}^3/\text{min}$, DP5 井水平段充气量 $30 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

在实际施工中 DP4 井出浆口钻井液密度在 $1.02 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$,计算钻井液当量密度在 0.82 g/cm^3 左右。DP5 井出浆口钻井液密度在 $1.01 \sim 1.03 \text{ g/cm}^3$,计算钻井液当量密度在 $0.86 \sim 0.89 \text{ g/cm}^3$ 左右。

(2) 为了防止造斜可能钻遇的大段泥岩的垮塌,优化了造斜段钻井液性能,进入造斜段前钻井液密度提高到 1.20 g/cm^3 ,严格控制钻井液失水量 $\leq 5 \text{ mL}$ 。

(3) DP4 井采用 E-Plus(伽玛)、MCR(电阻率)地质导向测量工具,解决了常规地质导向在充气钻井液中信号无法传输的问题。

DP4井在盒₁层实施水平井欠平衡钻井工艺技术,施工水平段过程中后效明显,7次点火,其中一次持续140 min,火焰高达3~9 m。DP4井优化欠平衡介质(充氮钻井液),实现了全过程负压,实际施工中充气量 $50\text{ m}^3/\text{min}$,计算循环当量密度 $0.82\sim 0.86\text{ g}/\text{cm}^3$,盒₁段压力系数0.93,实现了欠平衡钻井,欠压值 $1.24\sim 2.74\text{ MPa}$,水平段出口钻井液密度控制在 $1.02\sim 1.05\text{ g}/\text{cm}^3$ 。钻井效率提高,且在非连续液相施工中稳定实施定向和地质导向,创造了国内陆地滑动定向工艺最长裸眼水平段记录1625.06 m,实钻水平段垂深最大落差26.30 m,实钻井眼轨迹与设计井眼轨迹符合率较高,钻遇靶点靶半高仅 $\pm 0.20\text{ m}$ 。该井在后期完井过程中,因钻杆传输测井需要,转为近平衡。

DP5井因钻遇大段泥岩被迫将欠平衡改变为近平衡,后因连续钻遇泥岩填井侧钻后又钻遇大段泥岩提前完钻,实钻水平段长462.60 m。

4 大牛地气田欠平衡水平井应用成果

(1)欠平衡水平井钻井技术在大牛地气田的开发中取得了较好的效果,在山₁气层、盒₃气层获经济可采自然产能,结束了大牛地气田靠后期改造才能建产的历史。

2008年元月DF2井和DP3井分别以 $4\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 和 $3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 配产。

(2)初步形成了大牛地气田欠平衡水平井钻完井工艺技术,为开发方案提供了依据,提交了山₁、盒₃气层水平井开发方案并进行了实施。

2008年在山₁₋₂气层部署开发水平井6口,水平段全部使用无固相钻井液体系配合生物酶完井液进行解堵、解水锁,其中DP6、DP11已完成施工,DP6井日试获气产量 $4.27\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,DP11井试获 $1.5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。其他井正在实施中。

2009年重点在盒₃比较稳定不易塌的目的层实施充气(氮气)欠平衡水平井钻井工艺技术(DP14、DP22等5口井)。

(3)欠平衡钻井取得的主要技术经济指标。

鄂北大牛地气田储层非均质性较强,为了满足地质要求在水平井实施中常因储层变化导致井眼轨迹控制频繁调整,井眼轨迹控制满足调整后地质设计要求,符合率较高,显示了较好的井身轨迹控制技术,保证了水平井准确中靶。如:DF2、DP3水平井的井深、井斜角、水平位移、闭合方位、纵距、横距等各项指标均达到了设计规定的要求,尤其是A、B靶

点的中靶指标堪称优秀,DP3井A靶点最大纵距仅0.14 m,最大横距仅0.09 m。DP4井整个水平段靶半宽控制在 $\pm 0.20\text{ m}$ 左右。

充氮负压钻进结合其它配套钻井工艺技术,有效地提高了钻井速度,2007年完井的欠平衡水平试验井DP3井,该井A点后水平段位移1220.79 m,总位移1570.14 m,创造了工区内目前水平井水平位移最大纪录,被列入2007年中国石化石油工程水平定向井新记录。DP3井通过自然产能测试产量为 $2\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$,该井的试验成功为华北分公司下一步气田开发部署具有十分重要的指导意义。2008年DP4井为华北分公司一口重点水平井,设计水平段最长(1600 m),三开水平段采用全过程充气欠平衡钻进的特殊工艺,全过程充气欠平衡钻进,冲气量 $50\text{ m}^3/\text{min}$ 。总位移1970.73 m,水平段位移1624.00 m。再次创2008年中国石化石油工程(水平井)新记录。

2009年7月完成DP16井,该井是在工区大尺寸井身结构下第一口目的层为太₂的水平井,并在该井首次试验了弱凝胶钻井液体系,通过该井的试验为2009年下半年石化重点水平井DP20井的试验积累了经验。

2009年12月完成的DP22井,该井是集团公司的一口重点实验井,水平位1500 m,三开采用全过程氮气泡沫欠平衡钻井技术,该井造斜段500 m靶前距的试验非常成功,为该井以后水平井靶前距的设计提供了重要参考价值。

5 总结

5.1 欠平衡钻井技术优点

5.1.1 有利于保护和发现油气层,提高单井产量

在欠平衡钻井过程中,井内循环系统中流体的液柱压力低于储层孔隙压力,有效地避免了钻井液和完井液中的固相颗粒及水敏性物质侵入储层,从而避免地层污染,明显的提高了油气井产能。这一优势在水平井中表现得最为突出,水平段钻井、完井及测试所需时间长,相应储层与钻井液、完井液接触时间长,地层损害的可能性高,损害程度也严重很多,从而降低了水平井的产能,使水平井的优势不能充分体现。在水平井中合理运用欠平衡钻井工艺技术,不但可以避免地层伤害,还可以避免难度大、成本高的增产作业。

5.1.2 避免复杂事故发生,提高钻井速度,降低钻井成本

欠平衡钻井过程中由于钻头端面上液柱压力减小,被钻的岩石更容易破碎,低密度的循环液体有助于减少静压持效应,使钻头继续切削新岩石,避免了重复破碎岩屑,有效提高机械钻速,延长钻头的使用寿命,并可以避免复杂事故的发生,如井漏、压差卡钻等事故,从而提高钻井效率,降低钻井成本。

5.1.3 有利于及时评价低压低渗油气层

在欠平衡钻井条件下,钻井过程中地层流体可以进入井眼,在井口监测返出液就可以适时提供良好的产层信息,可以及时对产层进行较为准确的评价。

5.2 问题与建议

5.2.1 准确掌握地层压力问题

欠平衡钻井必须首先准确掌握所钻地层的3个压力系数(破裂、孔隙、坍塌),只有准确地掌握地层压力系数,特别是地层孔隙压力,才能有效地确定钻井液密度、欠压值、所采用的井口装置及钻井施工措施。工区内用欠平衡钻井工艺施工的这几口水平井中地层压力只是一个设计理论值,钻井过程中,地层压力的实际值没有检测,所以在钻井过程中,是否能真正达到欠平衡的效果,欠平衡压差理论值和实际值有多大误差,无法判断。建议尽快建立起该工区的地层压力剖面。

5.2.2 欠平衡钻井过程中地层损害的问题

在欠平衡钻井过程中,地层压力高于循环钻井液井底压力时,在岩石表面不能形成泥饼,一旦在钻井和完井期间不能保持连续的欠平衡状态,无泥饼的井壁无法阻止液相和固相对地层的侵入,造成的地层损害将比普通的过平衡钻井更大。DP3、DP4井在后期的钻井、完井作业期间,都无法保持连续的欠平衡状态,对地层损害会很大,不容忽视。

5.2.3 氮气泡沫的润滑性问题

欠平衡氮气泡沫钻井工艺,在提高钻速和保护地层等方面有明显的优势,但是氮气泡沫与常规钻井液相比,润滑性能要差很多,随着水平段的增加,钻具上提下放的摩阻越来越大,托压现象较严重。另水平段采用优选钻具组合和优化钻井参数,减少了滑动进尺,可提高机械钻速。进入造斜段、水平段后坚持定期进行起下钻作业,可及时有效清除岩屑床。

5.2.4 储层的非均质性问题

由于储层非均质性强,储层预测存在误差,导致部分井钻遇煤层、泥岩提前完钻。要加强现场地质与工程的信息沟通与密切配合,加强地质导向预测的准确率;就现阶段的钻井实践表明,在山西太原储气层沉积的不均质性和钻遇煤层易发生坍塌的复杂性,不宜实施钻井介质为非连续相的气体钻井工艺。在地层岩性比较稳定的盒。实施气体欠平衡钻井比较理想。

5.2.5 钻具的磨损、腐蚀问题

大牛地气田的地层研磨性非常强,对钻具的磨损非常严重。在欠平衡钻井过程中,井口装置中有旋转防喷器无法加入减磨接头,DP3、DP4井钻具接头部分外径磨损非常厉害(图2)。DP4井充氮气欠平衡钻进,采用薄膜渗析法生产氮气,由于用薄膜渗析法不能完全去除氧,因此有氧进入循环系统,由于液相为水基流体,进入系统的自由氧腐蚀循环系统管道设备及钻具、套管等,DP4井钻具氧腐蚀情况非常严重(图3)。



图2 DP3井钻具磨损情况

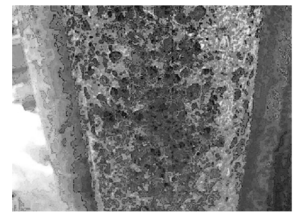


图3 DP4井钻具腐蚀情况

参考文献:

- [1] 李飞,徐恩信,赵培兰,等.实用欠平衡钻井技术[M].北京:中国石化出版社,2000.
- [2] 徐同台,等.油气田地层特点与钻井液技术[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [3] 陈庭根,等.钻井工程理论与技术[M].山东东营:中国石油大学出版社,2001.
- [4] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].山东东营:中国石油大学出版社,2001.
- [5] 张绍槐,罗平亚,等.保护储集层技术[M].北京:石油工业出版社,1993.
- [6] 樊世忠,等.钻井液完井液及保护油气层技术[M].山东东营:中国石油大学出版社,1996.
- [7] 编委会.现代石油复杂钻井关键技术实用手册[Z].2006.
- [8] [美]P.L.穆尔,等.钻井工艺技术[M].刘希圣,等译.北京:石油工业出版社,1982.
- [9] 卢周芳.充气欠平衡钻井液技术在DP4井水平段的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(2):17-19.
- [10] 俞宪生.DF1井氮气泡沫欠平衡钻井实践与认识[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(1):14-17.