

欠平衡钻井技术在松辽盆地腰深 1 井中的应用

于铁军¹ 燕修良¹ 曹强¹ 臧艳彬² 杨俊锋¹

1. 中石化胜利石油管理局钻井工艺研究院欠平衡所 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院

于铁军等. 欠平衡钻井技术在松辽盆地腰深 1 井中的应用. 天然气工业, 2010, 30(12): 67-71.

摘 要 腰深 1 井是部署在松辽盆地长岭断陷达尔罕断凸带腰西构造高点上的一口直探井。该井储集层具有典型的低孔隙度、低渗透率特征, 常规钻井容易引起储层伤害, 造成气层产能下降, 甚至不能发现气层。为此, 在区域地质构造与岩性特征分析的基础上, 论证了对该井实施欠平衡钻井的必要性和可行性, 结合腰深 1 井的地质特征与井身结构参数, 对欠平衡钻井实现方式、欠平衡压差、钻井液体系与性能以及欠平衡钻井参数等进行了设计。施工结果表明: 欠平衡钻井技术保护了储集层, 提高了钻井速度, 延长了钻头寿命, 钻进过程中发现了 3 套主力气层, 达到了预期目标。该井欠平衡钻井技术的成功应用, 验证和完善了欠平衡钻井设计和施工理论与方法, 有助于欠平衡钻井技术的进一步应用和推广。

关键词 松辽盆地 腰深 1 井 欠平衡钻井 可行性 充气钻井 欠平衡钻井设计 压差控制 钻井液体系

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.12.017

腰深 1 井是中石化部署在松辽盆地长岭断陷达尔罕断凸带腰西构造高点上的一口直探井。该地区储集层埋深大、地层温度高, 成岩作用强, 物性较差且非均质性强, 具有典型的低孔、低渗特征。在腰英台地区采用常规钻井技术, 钻井液容易进入地层, 造成地层伤害, 引起气层产能下降, 甚至不能发现气层^[1]。欠平衡钻井过程中钻井液液柱压力小于地层压力, 允许地层流体进入井眼, 从而减轻或避免地层伤害, 已成为经济、有效地开发低渗透油气藏的重要手段^[2-6]。因此, 欠平衡钻井技术可用于解决腰深 1 井钻井过程中出现的储层伤害问题。为此, 笔者对腰深 1 井欠平衡钻井的可行性进行了论证, 并对欠平衡钻井压差、欠平衡钻井液密度以及性能、欠平衡钻进参数以及欠平衡压差控制方法进行了设计, 对腰深 1 井欠平衡钻井施工过程以及施工效果进行了总结分析。

1 地层特征及欠平衡钻井可行性

1.1 地层特征

腰深 1 井所处的腰英台深层构造是在基底隆起背景上发育的背斜构造, 和南部的达尔罕构造位于一个构造带内, 位于长发屯断陷槽边部, 达尔罕断凸带的最

前缘。储集体岩性多以砂砾岩、含砂中—粗砂岩、细—中砂岩为主, 含部分火成岩, 发育火山岩气藏。其地层主要有以下特点: ①孔隙度低, 目的层为营城组火山岩, 以流纹岩为主, 含少部分熔结凝灰岩。邻井测井资料和岩心分析结果表明, 储集层孔隙主要为孤立气孔或溶蚀气孔, 有效性较好, 部分发育裂缝且主要发育低孔隙度层段, 岩心物性分析结果表明, 孔隙度介于 4.7%~8.6%, 平均为 7.47%, 属于低孔隙度储层; ②渗透率低, 测井解释结果与取心分析统计表明, 储集层渗透率介于 0.02~0.13 mD, 平均渗透率为 0.10 mD, 属于特低渗透率储层; ③局部存在异常低压, 井深超过 3 568 m 的地层可能存在异常低地层压力, 依据地质设计 3 568 m 以深地层压力系数为 1.10, 但不排除低地层压力的可能。

1.2 欠平衡钻井的必要性和可行性

根据地震资料和邻井地层压力分析, 腰深 1 井地层压力预测结果如表 1 所示。可以得出以下认识:

1) 必要性: 腰深 1 井目的层营城组属于典型的低孔、低渗气藏, 利用常规钻井方式容易引起储层伤害, 不能够及时发现油气层。不论是出于保护油气层、较为准确地获取储层地质参数及相关的油、气、水资料,

基金项目: 中石化胜利石油管理局重点新技术推广项目“欠平衡钻井配套技术推广应用”(编号: TG32003013)。

作者简介: 于铁军, 1979 年生, 工程师; 2001 本科毕业于山东大学; 主要从事欠平衡钻井设计与施工工作。地址: (266555) 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号中国石油大学石油工程学院工科楼 B 座 313。电话: 13646392665。E-mail: qphytj@sina.com

表 1 腰深 1 井及其邻井地层压力预测表

井号	层位	井深/ m	孔隙压力/ MPa	压力 系数
DB11 井	K _{1yc}	3 976.5~3 981.0	37.0	0.96
长深 1 井	K _{1yc}	3 577~3 900	—	1.15
本井	—	3 568 m 以浅	—	1.00
	—	3 568 m 以深	—	1.10

还是客观评价腰英台深层构造天然气资源及储量计算等多方面考虑,该井采用欠平衡钻井技术都非常必要。

2)可行性:由表 1 和邻井资料可知,首先,腰深 1 井储层压力系数为 1.10,属于正常压力系统,能够保证欠平衡钻井井控安全;其次,储层岩性主要为火成岩,稳定性好,井壁不易坍塌^[7-8],可以满足欠平衡钻井的井壁安全需要。

2 欠平衡钻井设计

依据腰深 1 井的气井特点、井身结构以及地质要求,为保证安全、有效钻达目的层,设计了两种欠平衡实现方式:液相欠平衡和充气欠平衡,两种欠平衡方式选择的依据是:①如果实际地层压力系数为 1.10,则

可用该密度直接进行液相欠平衡钻井;②如果实际地层压力系数低,采用液相欠平衡技术达不到欠平衡条件,则采用充气钻井。

2.1 欠平衡压差设计

欠平衡压差就是地层孔隙压力与井眼压力之差,也叫欠平衡压力,也称为负压差^[3-5],欠平衡压差设计的合理与否直接关系到欠平衡钻井技术的成败^[5-6]。地层压力系数是欠平衡压差设计的主要依据,根据表 1 中的地层压力系数,优先采用低黏土相钻井液体系进行液相欠平衡钻井,充气设备作为备用。

2.1.1 液相欠平衡压差及钻井液密度设计

对于液相欠平衡钻井只要在循环钻进过程中达到欠平衡就能满足欠平衡钻井要求,欠平衡压差稍大于零就能满足需要。对于高气油比油井或气井,动欠平衡压差(指没有油气侵的情况下)可取为零,因为产出的气会使环空静液柱压力急剧减小,控制产气量可降低对井口压力的控制,同时可以防止地面处理设备过载,液相欠平衡钻井欠平衡压差一般取 0.7~1.4 MPa。根据腰深 1 井地质设计,地层压力系数按 1.10 设计,采用液相欠平衡钻井,欠平衡压差设计为 1.10 MPa,液相欠平衡压差设计结果见表 2。

表 2 欠平衡压差及钻井液密度设计结果表

欠平衡 方式	欠平衡压差/ MPa	钻井液密度/ g·cm ⁻³	钻井液排量/ L·s ⁻¹	等效钻井液密度/ g·cm ⁻³	地层压力 系数	充气量/ m ³ ·min ⁻¹
液相	1.10	1.03~1.05	25~28	1.07	1.10	—
气相	1.70	1.03~1.05	25~28	0.91~0.93	0.96	20

2.1.2 充气欠平衡压差及钻井液密度设计

由于气液两相流的不稳定性,井底压力波动较大,国外资料显示,钻杆注气压力波动可达 2.1~3.5 MPa。因此充气钻井的欠平衡压差一般取 1.70~3.5 MPa。据表 1 的结果,地层压力系数按 0.96 设计采用充气欠平衡钻井,利用美国 Maurer 工程公司欠平衡多相水力计算软件,欠平衡压差设计为 1.7 MPa,设计结果见表 2。

2.2 欠平衡压差实时调控

2.2.1 实际地层压力低于预计压力

如果地层压力低于预计压力,在地质预测为气层、而实际没有显示时,调整施工参数降低钻井液当量密度,每次降密度不得超过 0.02 g/cm³,每次降低后循环 1~2 周而没有显示,可继续降低,降低密度循环时要注意观察,确保井壁稳定,钻井液当量密度最终不得

低于地层坍塌压力。

2.2.2 实际地层压力高于预计压力

如果地层压力高于预计压力,钻进时发现溢流显示应立即关井求压,确定实际地层压力。鉴于欠平衡压力太高会造成全烃值过高,干扰新储层的气测显示,且增加井控风险,探井欠平衡压力设计不宜太高,以 1 MPa 为宜。因此,如果欠平衡压力小于 3 MPa,通过增加回压继续实施欠平衡钻进,否则应按欠平衡压力 1 MPa 调整钻井液密度后再进行欠平衡钻进。

2.2.3 欠平衡钻井压差的控制

对于液相欠平衡通过井口回压控制压差,充气欠平衡通过改变气液比控制压差。依据不同情况其控制措施有:①按井底常压法,平稳操作节流阀控制井口回压,确保欠平衡压力满足设计要求,回压宜控制在 3 MPa 之内;②通过现场分析,火焰明显增大,钻井液体

积增量值有上升趋势,应适当增大回压值;③当回压超过 7 MPa 时或井内出气严重,液气分离器压力超过其额定压力的 50% 时必须调整钻井参数,当井口回压降至安全压力时再继续钻进;④在欠平衡钻井井口有回压的情况下,须有专人负责巡回检查地层流体在地面流经路线是否存在泄漏现象,一经发现立即组织整改。

2.3 欠平衡钻井液性能设计

从腰深 1 井邻井 DB2 井和 DB11 井情况来看:①DB2 井在钻进至嫩江组、姚家组地层时,出现垮塌掉块现象;②DB11 井钻进至 4 002.07 m 时出现井内垮塌现象,经调整钻井液性能后返出大量岩屑,井下才恢复正常。从腰深 1 井地层岩性预测结果可知,欠平衡钻井井段存在泥岩层,易吸水膨胀而产生剥落掉块、垮塌。从邻井分析和腰深 1 井岩性预测均表明,在欠平衡井段应选用防塌性能好的钻井液体系,为此决定采用聚合醇抑制型防塌钻井液体系。

2.3.1 钻井液体系配方

淡水+2%~4% 膨润土+2%~4% 聚合醇抑制剂+0.4%~0.6% KPAM+1%~2% SD201+1%~2% PAC+2%~3% SMP+1%~2% SR-1+其他辅助处理剂。

处理添加剂:加重剂、封堵防塌剂、油层保护剂、NaOH、纯碱、钻具防腐抗氧化剂、超细碳酸钙等。

2.3.2 钻井液体系性能设计及测定

腰深 1 井欠平衡井段岩性以流纹岩为主,中间夹泥岩、砂岩,为防止泥岩吸水膨胀,要求钻井液黏度保持在 55 s 左右。针对腰深 1 井地层对钻井液性能特殊要求,结合欠平衡压差设计结果,选用聚合醇钻井液体系,对欠平衡钻井液性能进行了设计。根据行业操作标准,对腰深 1 井钻井液配方进行调整和性能测定。调整后的钻井液性能见表 3。

表 3 腰深 1 井钻井液性能测定结果表

密度/ g·cm ⁻³	漏斗黏度/ s	API 失水/ mL	pH 值	静切力/Pa 初切力/终切力
1.02~1.05	35~65	≤5	8~10	1~3/5~15
含砂量 ≤0.3%	固相含量 ≤12%	泥饼摩阻系数 <0.15	动切力/Pa 4~12	塑性黏度/mPa·s 8~20

2.4 腰深 1 井钻井参数设计

2.4.1 钻头选型

欠平衡钻井井段 3 576~4 200 m,上部岩性主要为流纹岩、英安岩夹流纹质凝灰岩,顶部为砂、泥岩;中、下部为玄武岩、安山岩、辉绿岩、英安岩、玻屑、晶屑、流纹质、安山质凝灰岩,局部泥岩和细砂岩夹层;底部为灰色含粉砂质泥岩。地层硬度较大且含有泥岩、砂岩夹层,不易采用 PDC 钻头,

推荐使用牙轮钻头。从邻井来看,DB11 井从 3 381.3 m 钻至井深 4 300 m 过程中共使用钻头 15 只,其中 HA537 钻头 4 只,HA637 钻头 10 只,PDC 钻头 1 只。其中在 3 885.70 m 下入 PDC 钻头,由于地层交错,造成 PDC 钻头落井,无进尺。根据腰深 1 井岩性和邻井钻头使用情况分析,推荐牙轮钻头,型号为 HJ637G。

2.4.2 参数确定

由腰深 1 井岩性分析可知,欠平衡井段岩性以中硬和硬地层为主,岩石的压入硬度较大、研磨性较高。因此需要较大钻压使切削齿压入地层,为避免切削齿较快磨损,钻进时不能过分增大转速,结合该井段钻头类型为牙轮钻头,故采用高钻压、低转速,钻压范围是 160~180 kN,转速 50~70 r/min。根据长深 1 井的实钻情况,腰深 1 井欠平衡井段 3 576~4 200 m,钻井液携岩要求的环空返速为 1.20 m/s。利用钻井水力计算公式,可以求得腰深 1 井泵压范围是 15~18 MPa,排量为 25~28 L/s。

腰深 1 井钻井参数设计结果如表 4 所示。

3 欠平衡钻井现场施工与调控

腰深 1 井于 2006 年 6 月 12 日 23:00 开始第三次开钻欠平衡钻进施工,液相欠平衡钻井液密度 1.03~1.07 g/cm³,施工井段为 3 569.20~3 750.00 m,进尺 180.80 m,纯钻进 86.67 h,平均机械钻速 2.09 m/h,使用 Ø216 mm 牙轮钻头一只,目的层气体显示较好,历时 7 d 欠平衡钻进井段长度 183 m。

3.1 施工过程与施工参数

实际第三次开钻欠平衡钻进中,采用液相欠平衡技术达到了欠平衡条件,充气设备一直待命未用。其

表 4 腰深 1 井钻井参数设计结果表

井段/ m	井径/ mm	钻压/ kN	转速/ r·min ⁻¹	排量/ L·s ⁻¹	泵压/ MPa	环空返速/ m·s ⁻¹
3 576~3 800	215.9	160~180	50~70	25~28	15~18	1.20
3 800~4 200	215.9	160~180	50~70	25~28	15~18	1.20

施工过程可以分为两个阶段。

1)井段 3 569.20~3 680.00 m 钻井液密度 1.04~1.05 g/cm³。6 月 13 日 6:22 钻进至井深 3 585 m 立压开始下降,地层气开始进入井筒。钻进至井深 3 594.00 m 自动点火,此后一直边喷边钻。燃烧火焰呈明亮橘黄色,火焰高度介于 2~11 m。由于气体流量较大,决定节流加压,控制地层气体进入量,实现安全钻井。9:27 开始节流控制,套压稳定在 2 MPa 左右,立压稳定在 8~10 MPa 的范围内,气体流量维持在 1 000~1 200 m³/h,火炬持续燃烧;气体流量最高达 1 601 m³/h,平均机械钻速近 5 m/h。钻进至井深 3 662 m 钻遇新的储层,大量气体侵入井筒,气体流量 1 200~1 500 m³/h。控制节流压力提高至 3~5 MPa,处理接单根油气后效最高套压 14.28 MPa,钻井液喷溅严重,燃烧管线气流携带有大量的钻井液,火焰高度 3~8 m,14 日 17:30 决定提高钻井液密度至 1.07 g/cm³,以保证安全欠平衡钻进。

2)井段 3 680.00~3 750.00 m 钻井液密度 1.07 g/cm³。6 月 14 日 21:45 开始用 1.27 g/cm³ 重浆 15 m³,钻井液密度提高至 1.07 g/cm³。由于密度提高,钻井泵排量增大,循环摩阻增大,钻井液液柱压力增加,降低了井口回压,节流套压控制在 1~3 MPa 的范

围内,立压稳定在 9~12 MPa 之间,气体流量 900~1 200 m³/h,火焰高度 3~8 m。6 月 16 日 8:30 钻进至井深 3 723.0 m,由于钻速较慢,尝试开大节流阀,降低立压钻进,减小井底岩屑压持效应,提高机械钻速。6 月 17 日 0:00 顺利钻进至井深 3 750.00 m,充分循环后,采用 1.30 g/cm³ 的重泥浆全井压井起钻。

3.2 欠平衡钻井压差的实时调控

在腰深 1 井施工过程中进行了一次钻井液密度调整,腰深 1 井实际欠平衡压差如表 5 所示。

1)本井自第三次开钻井深 3 570 m 开始节流钻进,套压控制在 2~3 MPa,钻进至井深 3 665.25 m 后,地层气体进入量增大,泥浆槽出口钻井液喷涌严重,节流套压增至 3~5 MPa。

2)根据设计,节流回压控制在 3 MPa 以内,因此决定自井深 3 680 m 将钻井液密度由 1.04 g/cm³ 调整至 1.07 g/cm³ 钻进,此后节流加压 1~3 MPa。鉴于欠平衡压差太高增加井控风险,气井欠压差设计不宜太高,以 1 MPa 为宜。

3)如果欠压差超过 1 MPa,通过增加回压继续进行欠平衡钻进;节流回压超过 3 MPa 应调整钻井液当量密度后再进行欠平衡钻进。

表 5 液相欠平衡钻井参数表

井段/ m	钻井液密度/ g·cm ⁻³	排量/ L·s ⁻¹	产气量/ m ³ ·h ⁻¹	套压/ MPa	等效钻井液密度/ g·cm ⁻³	欠压差/ MPa	最低环空返速/ m·s ⁻¹
3 569~3 585	1.04	25	0	0	1.072	0.98	1.1
3 585~3 680	1.04~1.05	25	900~1 500	2~3	1.018~1.063	1.30~2.80	1.1
3 680~3 750	1.07	28	750~1 250	1~2	1.031~1.070	1.10~2.40	1.1

4 欠平衡钻井施工效果

4.1 油气显示情况

通过随钻综合分析,腰深 1 井欠平衡段共钻遇 3 段主力气显示层,其具体情况如下:

1)3 585~3 603 m 井段,厚度为 18.00 m,岩性为凝灰岩。在井深 3 594 m 燃烧管线尾部火炬自动点火成功,火焰呈明亮橘红色,焰高 2~8 m,之后持续边喷边钻。

2)3 611~3 621.50 m 井段,厚度为 10.50 m,岩性为凝灰岩。焰高 2~8 m,由于井口钻井液喷溅严重,人为控制井口套压在 3 MPa 以下,才保持井口钻井液液面稳定,但接单根后效显示仍然很高,显示上窜至井口,钻井液有喷涌现象,排气管线气流量最大可达

1 601 m³/h。

3)3 652.50~3 680.50 m 井段,厚度为 28 m,岩性为流纹岩。焰高 2~9 m,1 m 以内有明显气流声。井口钻井液喷溅严重排气管线气流量最大可达 2 105 m³/h,处理后套压最大达到 13.5 MPa。

上述 3 段主力气层累计厚度为 56.50 m,欠平衡钻井为储层实时评价提供了有力的技术支撑。2006 年 6 月 20 日中途测试求产、放喷点火,获得高产工业性气流。

4.2 欠平衡施工效果评价

欠平衡钻井技术在腰深 1 井应用实践表明,欠平衡钻井为优质、快速、安全钻井提供了有力支持和保障,安全圆满地完成了钻探任务。欠平衡钻井的优势:

1)减少油气层污染,提高油气产能。本井自井深

3 585 m 开始实施欠平衡钻进,由储层进入井筒的瞬间气体流量为 $414 \sim 2\,010 \text{ m}^3/\text{h}$,燃烧火焰高度 $2 \sim 11 \text{ m}$,节流回压一般控制在 $0 \sim 5 \text{ MPa}$ 。井底处于欠平衡状态,从而极大地减轻了钻进过程中钻井液侵入地层对储层的污染,保护了油气储层。

2)提高了机械钻速,延长钻头寿命。欠平衡钻进过程中,钻井液循环压力低于地层压力,消除了正压差对岩屑的压持效应,避免了岩石的重复研磨,提高了机械钻速,延长了钻头寿命。欠平衡井段 $3\,569.2 \sim 3\,750.0 \text{ m}$,进尺 180.80 m ,纯钻进 86.67 h ,平均机械钻速 2.09 m/h ,使用 $\varnothing 216 \text{ mm}$ 牙轮钻头一只,钻时超过 6 m/h 的段长就有 31 m 。

3)连续、实时的地层评价,及时发现油气层。由于井底处于欠平衡状态,地层油气持续进入井筒,钻遇新气层时,进入井筒的气量随之增加,从而为及时发现油气层、储层实时评价提供了有力的技术支撑。第三次开钻欠平衡段发现有 3 段主力气层,累计厚度达 56.50 m 。

4)欠平衡装置保障井口安全。腰深 1 井欠平衡钻井过程中,一直使用旋转控制头轴承总成密封井口进行钻进、接单根、循环、起下钻等作业。处理接单根气体时,旋转控制头承受套压高达 14.28 MPa ,在设备方面为该井优质、快速、安全钻井提供了有力支撑和保障。

5 结论

1)腰深 1 井低孔隙度、低渗透特性使得实施欠平衡钻井技术成为必要手段;储集层岩性主要为火成岩、地层稳定性好、不易坍塌为欠平衡提供了基础。

2)结合现场经验,推荐液相欠平衡钻井欠平衡压差一般取 $0.7 \sim 1.4 \text{ MPa}$;充气钻井欠平衡压差一般取 $1.70 \sim 3.5 \text{ MPa}$ 。

3)欠平衡钻井技术保护了储集层,提高了钻井速度,延长了钻头寿命,钻进过程中发现了 3 套主力气层,为连续、实时地层评价,及时发现气藏起到了很好的技术支撑。

4)腰深 1 井欠平衡钻井技术的成功应用,验证了欠平衡钻井技术在低孔、低渗油气藏中的独特优势,从而为特殊岩性油气藏、致密气藏及其他难动用的边际油气藏合理实施欠平衡钻井提供了借鉴与参考。

参 考 文 献

- [1] 周英操,高德利,翟洪军,等.欠平衡钻井技术在大庆油田探井中的应用[J].石油钻采工艺,2004,26(4):1-4.
- [2] 赵金洲,孙荣华,燕修良.欠平衡钻井技术在低渗透油藏开发中的应用[J].石油钻探技术,2002,30(1):21-22.
- [3] CUNHA J C, FABIO S N. Underbalance drilling technique improves drilling performance - A field case history [C]// paper 47802-MS presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, 7-9 September 1998, Jakarta, Indonesia. Jakarta: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, 1998.
- [4] 韩玉安,韩海生,李伟胜,等.欠平衡钻井的发展状况及专用设备的发展方向[J].西部探矿工程,2005,17(1):78-79.
- [5] 李春吉.欠平衡钻井技术在辽河油田马古 1 井的应用[J].钻采工艺,2004,27(6):4-7.
- [6] 李维轩.欠平衡钻井压差的确定技术及在石南 4 井区的应用[J].西部探矿工程,2003,15(3):72-73.
- [7] 杨虎,鄢捷年.欠平衡钻井井壁失稳和储层伤害的最大负压差确定研究[J].天然气工业,2005,25(5):53-55.
- [8] 何世明,安文华,王书婁,等.欠平衡钻进坍塌压力计算模型[J].天然气工业,2008,28(4):72-73.

(修改回稿日期 2010-10-05 编辑 居维清)