

# 可循环空气泡沫钻井技术在元坝10井的应用

曹品鲁<sup>1,2</sup>, 马文英<sup>2</sup>, 张兆国<sup>3</sup>, 刘光成<sup>2</sup>, 刘学良<sup>4</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林长春 130026; 2. 中国石化中原石油勘探局钻井工程技术研究院, 河南濮阳 457001; 3. 中国石化中原石油勘探局西南钻井公司, 河南濮阳 457001; 4. 中国石化中原石油勘探局钻井管具工程处, 河南濮阳 457001)

**摘要:** 针对川东北地区上部陆相地层砂岩、泥岩、页岩互层频繁, 硬度大, 研磨性强, 常规钻井液钻井机械钻速低, 而气体钻井由于地层出水无法顺利进行的技术难点, 研发了适合该地区上部地层钻进的空气泡沫流体配方, 研制了 HX-350 型环隙式机械消泡器, 形成了可循环空气泡沫钻井技术。元坝 10 井  $\phi 660.4$  mm 导眼段应用了可循环空气泡沫钻井技术, 该井段的平均机械钻速为 4.88 m/h, 与邻井常规钻井液钻井井段相比, 平均机械钻速提高了 3 倍; 消泡器消泡效果显著, 累计回收泡沫基液 2 230 m<sup>3</sup>, 节约清水 2 230 m<sup>3</sup>, 污水处理量减少 2 230 m<sup>3</sup>, 并大大减少了发泡剂的消耗。应用结果表明, 可循环空气泡沫钻井技术能有效解决大尺寸井眼的携岩问题, 实现泡沫基液的循环利用, 大幅度降低泡沫钻井成本, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 泡沫钻井液 泡沫钻井 消泡 发泡剂 机械钻速 元坝 10 井

中图分类号: TE242.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2011)05-0049-04

## Application of Recycling Air-Foam Drilling Technology in Well Yuanba-10

Cao Pinlu<sup>1,2</sup>, Ma Wenyi<sup>2</sup>, Zhang Zhaoguo<sup>3</sup>, Liu Guangcheng<sup>2</sup>, Liu Xueliang<sup>4</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin, 130026, China; 2. Drilling Technology Research Institute of Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China; 3. Southwest Drilling Company of Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China; 4. Drilling Services of Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China)

**Abstract:** The upper formation of Northeastern Sichuan Basin is characterized by sandstone interbedded with shale and clay with high rock hardness and abrasiveness. The rate of penetration (ROP) of conventional drilling is very small, and gas drilling can not be used due to the formation water influx. In order to solve this, the air-foam drilling fluid and HX-350 annular mechanical foam breaker were developed which resulted in the recycling air-foam drilling technology. The application results in Well Yuanba-10 in  $\phi 660.4$  mm section show that the ROP was 4.88 m/h, which is 4 times faster than conventional drilling. The defoam results of the HX-350 foam breaker was obvious. Total 2 230 m<sup>3</sup> foam was reused, 2 230 m<sup>3</sup> of water was saved and reduced processing volume of 2 230 m<sup>3</sup>. The difficulty of cuttings transport in large diameter well section was solved with this technology and the foam based fluid can be reused, which significantly reduce the air-foam drilling cost.

**Key words:** foam drilling fluid; foam drilling; defoam; foamer; penetration rate; Well Yuanba-10

## 1 概述

川东北元坝区块是中国石化天然气增储上产的重点探区, 地质条件复杂, 上部陆相地层砂岩、泥岩、页岩互层频繁, 硬度大, 研磨性强, 常规钻井液钻井机械钻速低, 而气体钻井往往由于地层出水无法顺利进行, 钻井难度大。新一轮井井身结构调整后(井身结构由四开调整为三开),  $\phi 660.4$  mm 井段较长, 采用常规钻井液钻井时, 受排量限制环空钻

井液返速低, 易产生井眼清洁效果不好、扭矩增大、岩屑重复破碎等问题; 机械钻速低, 如元坝 103H 井  $\phi 660.4$  mm 井段平均机械钻速仅为 1.18 m/h; 如果

收稿日期: 2010-03-24; 改回日期: 2011-08-08。

作者简介: 曹品鲁(1979—), 男, 山东曹县人, 2002 年毕业于吉林大学地质工程专业, 2007 年获该校地质工程专业博士学位, 讲师, 主要从事钻井工程方面的研究工作。

联系方式: 13844982787, jlucpl@163.com。

基金项目: 中原油田重点科技攻关项目“空气泡沫钻井技术研究”(编号: 20083022) 资助。

采用气体钻进,根据理论计算气体排量应大于300 m<sup>3</sup>/min,耗气量较大,尤其是地层出水转为雾化钻井后,气体排量远不能满足携岩要求,往往被迫提前转为钻井液钻进。元坝6井因地层出水转为雾化钻进后钻至井深118.57 m时,排砂口出现间断性返砂现象,判断为环空返速低,不能满足携岩要求,于是转为钻井液钻进,转换后机械钻速大幅度降低。因此,Φ660.4 mm井段是元坝区块钻井提速的关键井段之一。

空气泡沫钻井流体携岩、携水能力强,所需环空返速低,耗气量少,在大尺寸井眼钻进中优势较为突出<sup>[1-3]</sup>。因此,为加快元坝区块勘探开发步伐,中原石油勘探局钻井工程技术研究院研发了空气泡沫钻井流体,研制了HX-350型环隙式机械消泡器,形成了可循环空气泡沫钻井技术,并在元坝10井进行了试验应用,取得了很好的效果,为元坝地区上部导眼钻井提速提供了技术支撑<sup>[4]</sup>。

## 2 可循环空气泡沫钻井工艺流程

与普通空气泡沫钻井技术相比,可循环空气泡沫钻井配备了消泡器,其工艺流程如图1所示:增压机将压缩空气增至所需工作压力并输送至立管内,与雾化泵泵入的泡沫基液混合,通过钻头水眼后形成稳定的泡沫流体,由环空返出后经排砂管线进入机械消泡器消泡,然后进入钻井液池自然沉淀除去岩屑,最后对泡沫基液循环利用。

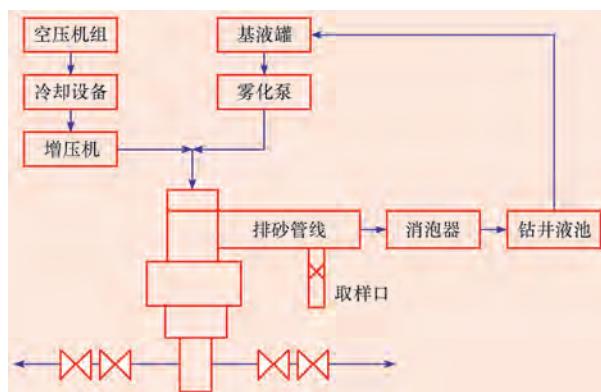


图1 可循环空气泡沫钻井工艺流程

Fig. 1 Recycling process of air-foam drilling technology

## 3 可循环空气泡沫钻井技术难点

**井壁易失稳** 元坝区块上部陆相地层砂岩、泥岩、页岩互层频繁,泥页岩水敏性强。进行空气泡沫

钻井时由于泡沫流体形成的液柱压力不能平衡地层压力,而泡沫流体又不能在井壁形成泥饼,地层出水后如果不采取措施,泥页岩极易吸水膨胀、水化分散,导致井壁失稳<sup>[5]</sup>。因此,泡沫流体应具有较好的抑制性,并具有良好的携水能力,一旦地层出水,泡沫流体能够及时将地层水转换为泡沫带出,减少地层水对地层的浸泡时间。

**携岩困难** 元坝区块导眼尺寸大、井段长,携岩较为困难。可循环空气泡沫钻进时钻速较快,泡沫流体能否将大量的岩屑携带彻底,保证井底干净较为关键。在优化钻井参数的基础上,应根据返砂情况及时调整泡沫流体配方,以满足大尺寸井眼的携岩要求。

**消泡困难** 泡沫完成携岩任务返到钻井液池后,由于稳定性较好,泡沫大量堆积在钻井液池里,长时间不破裂。元坝区块导眼尺寸大,要满足携岩、携水需求,要求泡沫流体不但具有较高的黏度和稳定性,而且泡沫量要大。由于消泡困难,泡沫基液只能一次性使用,配制工作量大,表面活性剂消耗多,空气泡沫钻井成本高<sup>[6-7]</sup>。加入化学消泡剂虽然能够快速消泡,但易对发泡剂造成污染,影响其再次发泡能力,不能实现泡沫基液的循环利用。机械消泡虽然对发泡剂没有污染,但目前机械消泡效率较低,尚不能满足现场消泡需求。因此,研制具有较高消泡效率的机械消泡器,实现泡沫流体快速消泡,是可循环空气泡沫钻井技术的关键所在。

## 4 可循环空气泡沫钻井技术研究

### 4.1 可循环空气泡沫流体

根据川东北地区上部陆相地层资料及地层出水情况,研发了可循环空气泡沫流体,其配方为:0.50%发泡剂TP-1+0.15%稳定剂HXC+0.50%抑制剂GXG+0.03%井壁稳定剂YIM+0.30%井壁稳定剂WJ-3。

#### 4.1.1 抑制防塌性能

使用NP-02页岩膨胀测试仪测定页岩膨胀量,考察可循环空气泡沫流体抑制页岩水化膨胀的能力,结果如图2所示。从图2可以看出,页岩在清水中24 h线性膨胀量为5.59 mm,而页岩在泡沫流体中24 h线性膨胀量仅有1.84 mm,说明泡沫流体具有较好的抑制页岩膨胀的能力。

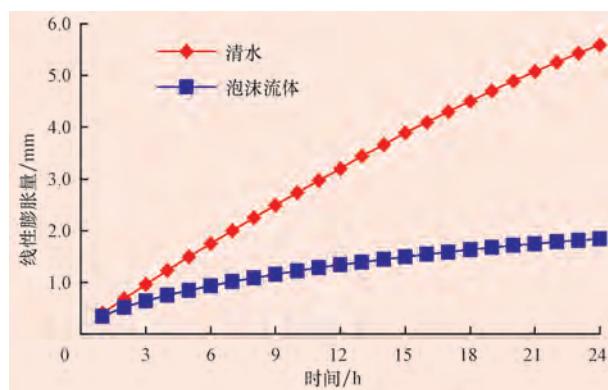


图2 清水和泡沫流体的岩心膨胀量对比

Fig. 2 Comparison of the linear expansion between water and foam drilling fluid

为了评价泡沫流体抑制页岩水化分散的能力,进行了页岩滚动回收试验(试验采用现场取回的岩屑),结果为:马12井岩屑在清水中的回收率仅为7.2%,在泡沫流体中达到97.4%;P104井岩屑在泡沫流体中回收率达98.7%。可见该泡沫流体具有良好的抑制泥页岩水化分散的能力。

为进一步考察泡沫流体的井壁稳定能力,将现场取回的岩屑压制成岩心柱,在常温常压下分别浸泡在清水和泡沫流体中,观察岩心的变化情况。观察发现:岩心放入清水中立即吸水膨胀,浸泡15 min后完全坍塌;而在泡沫流体中岩心浸泡13 d无明显变化,取出岩心后可以看到其表面有一层比较明显的吸附膜(这是井壁稳定剂WJ-3在岩心表面吸附的结果),该吸附膜在井壁形成一层稳定的疏水屏障,限制了自由水的流动,降低了自由水向地层的渗透,利于井壁稳定。

#### 4.1.2 携水性能

预先将泡沫流体模拟试验装置的模拟井筒环空内充满清水(清水体积为7.5 L),通入泡沫流体循环30 s,考察泡沫流体的携水能力。通过试验发现,泡沫流体流速达到0.2 m/s时即可将7.5 L清水全部携带出。因此研发的泡沫流体具有良好的携水能力,有利于解决地层出水问题。

#### 4.2 环隙式机械消泡器

平直流动的流体在遇到具有一定曲率的曲面时,由于流体与曲面之间存在表面摩擦作用,流体由外向内存在速度差,产生压力梯度促使流体产生附壁作用而沿曲面流动,在高速流体的卷吸作用下,曲面附近产生负压区,泡沫流经该区域时膨胀破裂<sup>[8-9]</sup>。据此原理设计了多喷嘴环隙式机械消泡器,并进行了消

泡试验。结果表明:消泡器工作前泡沫均匀、致密,泡沫量丰富,泡沫较干,泡沫流动性差,泡沫大量堆积在地面上;消泡器工作时,泡沫呈雾状从消泡器喷出,在扩散管出口底部有大量水柱状流体流出,气、液分离现象明显,消泡后的流体体积小,在地面上流动性较好,消泡效果显著。

表1为不同气液比条件下泡沫流体的消泡情况。从表1可看出,随泡沫气液比的降低,消泡器消泡效率增大,当泡沫气液比降至100后,消泡效率达到80%以上。因此,在满足安全钻井的前提下,应尽量降低泡沫气液比,以提高消泡效率。

表1 消泡器消泡效率统计数据

Table 1 Experiment foam-breaking results

泵量/ L·min <sup>-1</sup>	泡沫 气液比	泡沫体积/L		消泡效率, %
		消泡前	消泡后	
0.2	300	19.6	4.75	75.76
0.4	150	36.0	8.16	77.33
0.5	100	46.7	6.20	86.72
0.8	75	52.3	6.67	87.25
1.0	50	56.1	7.53	86.58

## 5 在元坝10井的应用

### 5.1 基本概况

元坝10井设计井深7 150.00 m,导眼首先采用φ900.1 mm钻头以常规钻井方式钻至井深30 m,下入φ720.7 mm套管封隔表层,建立井口;然后采用φ660.4 mm钻头以泡沫钻井方式钻至井深700.00 m中完,钻遇地层以紫红色泥岩、青灰色砂岩为主。

元坝10井配备空气压缩机(每台空气排量35 m<sup>3</sup>/min)9台,总理论供气量为315 m<sup>3</sup>/min,由于该井井口海拔512 m,实际供气量略低于理论值;增压机2台,其中1台排量为160 m<sup>3</sup>/min,另1台排量为80 m<sup>3</sup>/min;雾化泵1台,排量为0~360 L/min;HX-350型消泡器1台。

### 5.2 施工过程

元坝10井气举钻井液、干燥井眼,准备气体钻进时,由于井眼尺寸大,钻井液不易举出。向井内注入20 m<sup>3</sup>清水清洗井眼,并稀释井底残留钻井液,然后继续气举、干燥。排砂口长时间不见钻井液返出,返出气体比较潮湿,于是直接采用空气泡沫进行举液。以空气排量105 m<sup>3</sup>/min,基液排量180 L/min,向井内注入泡沫液,排砂口返出大量泥糊状钻井液和泡沫的混合物。至排砂口返出连续、致密泡沫,井底清洗干净,调整钻井参数进行泡沫钻进。施工过程中,根据

取样口泡沫质量及排砂口岩屑返出情况,通过适时调整泡沫基液黏度、优化空气排量和基液排量、补充发泡剂量,有效保证了泡沫流体的携岩能力和井眼的稳定,顺利钻至井深 702.63 m,导眼中完。元坝 10 井泡沫钻井井段 30.39~702.63 m,钻压 40~200 kN,转速 40~60 r/min,空气排量 105~175 m<sup>3</sup>/min,泡沫钻井总进尺 672.24 m,纯钻时间为 137.75 h,平均机械钻速达 4.88 m/h。

### 5.3 应用效果

1) 有效解决了大尺寸井眼的岩屑携带问题,提高了机械钻速。通过调整泡沫配方和优化钻井参数,空气排量仅需 105~175 m<sup>3</sup>/min 即可满足携岩要求,排砂管内岩屑撞击声连续,取样口获取的岩屑大小混杂,棱角分明,岩屑直径最大达 15 mm,表明泡沫流体具有良好的携岩能力,较好地满足了大井眼岩屑携带要求及地质资料的录取要求。起下钻畅通,无阻卡现象,测斜顺利;接单跟时,井底无沉砂,岩屑无重复破碎现象。元坝 10 井采用泡沫钻井顺利钻至导眼设计深度 700.00 m,其平均机械钻速较其他钻井方式钻进的邻井(元坝 103H 井、元坝 6 井)导眼平均机械钻速均为 1.18 m/h)提高了 3 倍,大大缩短了导眼钻井周期。

2) 有效保证了大尺寸井眼的井壁稳定。元坝 10 井  $\phi 660.4$  mm 导眼尺寸大,岩性以红色泥岩和灰色砂岩互层为主,泥质含量高,存在一定程度的水化不稳定因素,而且邻井资料显示 240.00~270.00 m 井段为不稳定地层,易坍塌掉块。钻进该井段时,及时对泡沫配方进行了调整,提高了井壁稳定剂和防塌剂的有效浓度,钻进过程中井壁稳定,起下钻顺利,未出现划眼等井下故障。

3) 消泡效果显著,实现了泡沫基液的循环利用。HX-350 型消泡器在元坝 10 井泡沫钻井施工中,发挥了重要作用。泡沫经过消泡器后呈分散的流态喷出,泡沫体积大幅度减少。虽然井眼尺寸较大,泡沫排量高,但良好的消泡效果保证了泡沫基液的循环利用,钻井过程中使用清水配制泡沫基液 400 m<sup>3</sup>,其余全部使用消泡后回收的泡沫基液,节约清水 2 230 m<sup>3</sup>,同时减少了污水处理量。从泡沫剂消耗来看,由于使用了回收的泡沫基液,只需适当补充井壁、岩屑造成的吸附损失量即可,因此泡沫剂用量节约近 2/3,成本大幅度降低。另一方面,在元坝 10 井施工中,只使用了一个钻井液池,减轻了钻井液池的容积负担和环保压力。

## 6 结 论

1) 可循环空气泡沫钻井技术需要的空气排量小,携岩能力强,机械钻速高,有效解决了大尺寸井眼的岩屑携带问题,与同条件下常规钻井液钻井相比机械钻速提高了 3 倍多,具有突出的技术优势。

2) 可循环空气泡沫钻井技术实现了泡沫基液的循环利用,不但大幅度降低了泡沫剂和清水的消耗,减少了泡沫基液配制工作量及后续的污水处理量,而且减轻了钻井液池的容积负担和环保压力,避免了泡沫钻井因钻井液池容量有限而被迫提前终止,并大幅度降低了泡沫钻井成本。

## 参 考 文 献

- [1] 杨景利,薛玉志,张斌,等. 分 1 井大井眼空气可循环泡沫钻井液技术[J]. 钻井液与完井液,2007,24(增刊 1):86~88.  
Yang Jingli, Xue Yuzhi, Zhang Bin, et al. Recycling air foam mud technology in large hole Well Fen-1[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007,24(Supplement 1):86~88.
- [2] 申威. 空气/泡沫钻井技术在伊朗 19+2 项目中的应用[J]. 钻采工艺,2005,28(4):31~34.  
Shen Wei. Application of air/foam drilling technique in 19+2 Project of Iran[J]. Drilling & Production Technology, 2005,28(4):31~34.
- [3] 李晓亮,李勇,王童,等. 空气泡沫钻井技术在河坝 101 井的应用[J]. 天然气技术,2008,2(3):33~34.  
Li Xiaoliang, Li Yong, Wang Tong, et al. Apply air foam drilling to Well Heba-101[J]. Natural Gas Technology, 2008,2(3):33~34.
- [4] 黄强,马文英,曹品鲁,等. 空气泡沫流体井壁稳定性研究[J]. 石油钻探技术,2011,39(1):52~55.  
Huang Qiang, Ma Wenying, Cao Pinlu, et al. Well stability study of using air-foam drilling fluid[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(1):52~55.
- [5] 赖晓晴,申瑞臣,李克华,等. 稳定泡沫钻井流体抑制性研究[J]. 长江大学学报:自然科学版,2006,3(1):25~28.  
Lai Xiaoqing, Shen Ruichen, Li Kehua, et al. Shale inhibition of foam fluids for stabilized foam drilling[J]. Journal of Yangtze University:Natural Science Edition, 2006,3(1):25~28.
- [6] 刘德胜,李昭辉,刘绪礼. 空气泡沫钻井液回收再利用技术[J]. 钻井液与完井液,2006,23(1):11~14.  
Liu Desheng, Li Zhaohui, Liu Xuli. Recovery and reuse of air-foam drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(1):11~14.
- [7] 宋金仕,欧绍祥,单正名,等. 循环泡沫钻井工艺技术的应用[J]. 钻采工艺,1998,20(6):24~28.  
Song Jinshi, Ou Shaoxiang, Shan Zhengming, et al. Application of circulation foam drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 1998,20(6):24~28.
- [8] 曹品鲁,黄进云,王瑞和,等. 空气泡沫钻井模拟试验装置[J]. 石油机械,2009,37(6):74~77.  
Cao Pinlu, Huang Jinyun, Wang Ruihe, et al. Research on an experimental device to simulate air-foam drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2009,37(6):74~77.
- [9] 徐良,孙友宏. 基于泡沫钻进中消泡装置的试验研究[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,2008,35(6):5~7.  
Xu Liang, Sun Youhong. Test study on foam bursting device for foam-drilling[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2008,35(6):5~7.