

# 空气泡沫钻井流体井壁稳定性研究

黄 强<sup>1</sup> 马文英<sup>2</sup> 曹品鲁<sup>3</sup> 郭建华<sup>2</sup> 苏雪霞<sup>2</sup>

(1. 中国石化中原油田分公司 科技部,河南 濮阳 457001;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. 吉林大学 建设工程学院,吉林 长春 130026)

**摘 要:**针对空气钻井中遇到地层大量出水时无法钻进、需转化为空气泡沫钻井的情况,优选出了有利于空气泡沫流体钻井时井壁稳定的处理剂 GXG、AP-1 和 WJ-3,形成了一套具有良好井壁稳定性能的空气泡沫钻井流体配方,对该泡沫流体的抑制性、井壁稳定性等性能进行了评价。结果表明,所研究的空气泡沫钻井流体具有强抑制性,页岩回收率达 97.4%,页岩膨胀量较清水降低 67.1%。该空气泡沫钻井流体能使泡沫在井壁上形成保护膜,阻止水进入地层,有效防止井壁坍塌,井壁稳定效果良好。

**关键词:**气体钻井;泡沫钻井液;井眼稳定;地层水;抑制剂;保护膜  
**中图分类号:**TE254<sup>+</sup>.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)01-0052-04

## Well Stability Study of Using Air-Foam Drilling Fluid

Huang Qiang<sup>1</sup> Ma Wenying<sup>2</sup> Cao Pinlu<sup>3</sup> Guo Jianhua<sup>2</sup> Su Xuexia<sup>2</sup>

(1. Department of Science and Technology, Zhongyuan Oilfeild Company, Sinopec, Puyang, Henan, 457001, China; 2. Drilling Engineering Technique Research Institute, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang, Henan, 457001, China; 3. College of Construction, Jilin University, Changchun, Jilin, 130026, China)

**Abstract:** Air drilling is stopped and has to change into air foam drilling when abundant formation water is produced. In order to solve this problem, an air foam drilling fluid system were formulated by optimizing additives GXG, AP-1 and WJ-3. The inhibitive ability and wellbore stability of this system was evaluated. Results showed that this fluid system has good inhibitive ability with shale recovery of 97.4% and the amount of shale expansion reduced by 67.1% compared with water. This fluid system has good wellbore stability by forming a protective film to prevent water from entering formation and prevent wellbore collapse.

**Key words:** gas drilling; foam drilling fluid; hole stabilization; formation water; inhibitor; protective film

空气钻井因具有较高钻井速度、可提高钻井综合效益等优点<sup>[1]</sup>,在国内得到大范围应用。但在钻遇地层水时,井眼极易发生井壁失稳而造成井下事故,为此,开展了空气泡沫钻井流体的研究。

由于空气泡沫流体钻井属于欠平衡钻井,在钻开的井眼中无法提供液柱支撑,地层的原有应力平衡遭到破坏<sup>[2]</sup>,导致井壁不稳定;当遇到地层出水时<sup>[3-5]</sup>,水沿泥页岩的微裂缝侵入,并由于毛管力作用产生渗析作用,使泥页岩吸水膨胀,造成地层的孔隙压力增大,致使井眼周围岩石的应力分布改变,从

而降低了泥页岩的岩石强度,导致坍塌应力上升。因此,进行空气泡沫钻井流体的抑制性和井壁稳定

收稿日期:2009-10-13;改回日期:2010-12-01  
基金项目:中国石化先导试验项目“雾化及可循环空气泡沫钻井技术先导试验”(编号:SG10032)、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  
作者简介:黄强(1962—),男,云南姚安人,1983年毕业于西南石油学院油田化学专业,高级工程师,主要从事钻井液技术方面的研究工作。  
联系方式:(0393)4732993,huangq62@163.com

性研究,提高泡沫钻井的井壁稳定性,延长泡沫钻井时间,具有一定的现实意义。

## 1 抑制剂和井壁稳定剂优选

空气泡沫流体不能形成正压差而在井壁产生泥饼,所以必须通过在空气泡沫流体中加入泥页岩抑制剂<sup>[6]</sup>来提高其抑制性以减少泥页岩的水化作用,增强泥页岩强度,同时使用有效的处理剂对裸露的井壁进行处理,减少自由水进入新打开的地层,维持泥页岩地层中的井壁稳定性。在泡沫流体基础配方(配方为 0.10%~0.15% HXC+0.01%~0.03% YIM+0.30%~0.50% TP-1)的基础上,开展了抑制剂和井壁稳定剂的研究工作。笔者采用 Waring Blender 法评价了泡沫性能<sup>[7]</sup>。

### 1.1 抑制剂对泡沫性能的影响

进行空气泡沫钻井时,泡沫的稳定性至关重要,在泡沫流体基础配方的基础上添加抑制剂和井壁稳定剂等处理剂时,首先需考虑处理剂对泡沫稳定性的影响。因此,先考察了抑制剂 KCl、GXG、水解聚丙烯腈铵(以下简称铵盐)、聚丙烯酸钾和 NH<sub>4</sub>Cl 对泡沫稳定性的影响,试验结果见表 1。

表 1 抑制剂对泡沫性能的影响试验结果			
Table 1 The effect of inhibitor on foam performance			
序号	配方	发泡量/ mL	半衰期/ min
1	基液	650	37.5
	基液+2.00%KCl	460	39.5
	基液+3.00%KCl	320	38.2
2	基液+4.00%KCl	320	36.8
	基液+0.20%GXG	690	29.3
	基液+0.40%GXG	680	28.2
3	基液+0.60%GXG	680	27.2
	基液+0.20%铵盐	670	39.2
4	基液+0.40%铵盐	630	36.1
	基液+0.60%铵盐	600	36.0
5	基液+0.20%聚丙烯酸钾	490	52.2
	基液+0.40%聚丙烯酸钾	540	65.7
	基液+0.60%聚丙烯酸钾	480	81.3
6	基液+0.20%NH <sub>4</sub> Cl	680	31.3
	基液+0.40%NH <sub>4</sub> Cl	660	26.0
	基液+0.60%NH <sub>4</sub> Cl	700	25.3

注:基液配方为 0.10% HXC+0.03% YIM+0.30% TP-1。

从表 1 可以看出,添加 KCl 可降低发泡量,聚丙烯酸钾可延长泡沫的半衰期,而 GXG、铵盐和 NH<sub>4</sub>Cl 对泡沫的稳定性影响不大。

### 1.2 泡沫流体的抑制性评价

在上述研究基础上,进行了页岩回收率评价试验,以考察添加不同抑制剂的泡沫流体的抑制性能。钻屑取自中原油田马 12 井,试验结果见表 2。

表 2 抑制剂页岩回收率评价结果				
Table 2 Evaluation of shale recovery by inhibitor				
序号	配方	一次回收 率, %	二次回收 率, %	相对回收 率, %
1	清水	7.20		
2	基液+3.00%KCl	9.62	8.82	91.70
3	基液+0.40%GXG	9.56	9.50	99.40
4	基液+0.40%铵盐	5.42	5.03	92.80
5	基液+0.40%聚丙烯酸钾	9.42	9.16	97.20
6	基液+0.40%NH <sub>4</sub> Cl	8.54	6.44	75.40

注:基液同表 1;试验条件 160 ℃/90 ℃;相对回收率为二次回收率与一次回收率之比。

由表 2 可知,铵盐的回收率较低,而 KCl、GXG、聚丙烯酸钾和 NH<sub>4</sub>Cl 的一次回收率较高,但 NH<sub>4</sub>Cl 的相对回收率较低。因此铵盐和 NH<sub>4</sub>Cl 不适于在空气泡沫流体中作为抑制剂使用。

为了保证在循环过程中泡沫流体处于稳定状态,需保证其发泡倍数达到 4.5 倍以上,否则就会因存在过多的液体而使泡沫转化为增能液体,因此 KCl 不适于作为空气泡沫流体的抑制剂,而聚丙烯酸钾会使泡沫的半衰期严重延长亦不适用。在不影响泡沫稳定性的同时抑制剂须有良好的抑制效果,综合考虑各种抑制剂的抑制性能及对泡沫稳定性的影响,选择 GXG 作为空气泡沫流体的抑制剂,推荐加量为 0.30%~0.50%。

### 1.3 井壁稳定剂

泥页岩抑制剂可以通过抑制泥页岩的水化分散来提高井壁稳定性,但组成泥页岩的黏土矿物和非黏土矿物表面的特征及所表现的化学活性,构成了泥页岩接触自由水后短时间内迅速发生各种复杂物理化学反应的基础,也是实施各种防塌技术的关键。在自由水对泥页岩起破坏反应之前,有效利用新鲜表面所具有的化学活性和反应驱动力,快速封闭这些活性点,在泥页岩上形成牢固的保护膜,也是防塌的新途径<sup>[8]</sup>,因此选择具有成膜或封堵作用的井壁

稳定剂与抑制剂进行复配使用。

在优选抑制剂的基础上,考察了井壁稳定剂 AP-1 和 WJ-3,并评价了其对空气泡沫流体性能的影响,试验结果见表 3 和表 4。从表 3、表 4 可以看出,空气泡沫钻井流体的发泡量随着 AP-1、WJ-3 加量的增大而下降,而半衰期则延长,综合考虑,选择 AP-1 的加量为 0.20%~0.60%,WJ-3 的加量为 0.10%~0.40%。

表 3 AP-1 对泡沫性能的影响

Table 3 The effect of AP-1 on foam performance

配方	发泡量/mL	半衰期/min
1 <sup>#</sup>	600	44.8
1 <sup>#</sup> +0.20%AP-1	560	47.1
1 <sup>#</sup> +0.40%AP-1	550	47.3
1 <sup>#</sup> +0.50%AP-1	510	51.7
1 <sup>#</sup> +0.60%AP-1	490	50.7
1 <sup>#</sup> +0.80%AP-1	430	54.1
1 <sup>#</sup> +1.00%AP-1	440	54.5
1 <sup>#</sup> +1.20%AP-1	410	68.7
1 <sup>#</sup> +1.40%AP-1	400	69.5

注:配方 1<sup>#</sup> 为 0.10% HXC+0.03% YIM+0.30% TP-1+0.30% GXG。

表 4 WJ-3 对泡沫性能的影响

Table 4 The effect of WJ-3 on foam performance

配方	发泡量/mL	半衰期/min
1 <sup>#</sup>	510	51.7
1 <sup>#</sup> +0.10%WJ-3	510	60.0
1 <sup>#</sup> +0.20%WJ-3	480	55.8
1 <sup>#</sup> +0.40%WJ-3	460	61.5
1 <sup>#</sup> +0.60%WJ-3	460	67.7
1 <sup>#</sup> +0.80%WJ-3	430	80.0

注:配方 1<sup>#</sup> 为 0.10% HXC+0.03% YIM+0.30% TP-1+0.30% GXG+0.50% AP-1。

通过以上试验,确定有利于提高井壁稳定性的空气泡沫流体配方为:0.10%~0.15% HXC+0.01%~0.03% YIM+0.30%~0.70% TP-1+0.30%~0.50% GXG+0.10%~0.40% WJ-3+0.20%~0.60% AP-1。

## 2 性能评价

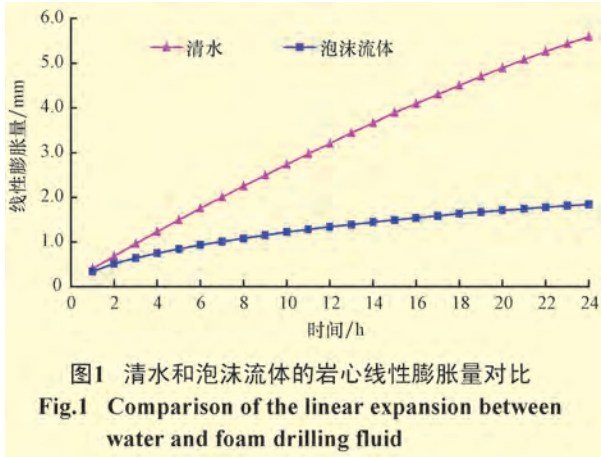
### 2.1 页岩滚动回收试验

为了考察泡沫流体的抑制性能,采用中原油田马 12 井岩心,进行了页岩滚动回收率试验。泡沫流体配方为 0.10% HXC+0.03% YIM+0.30% TP-1

+0.30% GXG+0.20% WT-3+0.50% AP-1,试验结果为:其页岩回收率达到 97.4%,表明其具有良好的抑制页岩水化分散的能力。

### 2.2 岩心膨胀试验

为考察泡沫流体的抑制性能,使用 NP-02 型页岩膨胀测试仪进行了岩心线性膨胀试验,试验结果见图 1。从图 1 可以看出,清水的岩心线性膨胀量为 5.59 mm,而空气泡沫基液的膨胀量仅有 1.84 mm,页岩膨胀降低率达 67.1%,说明空气泡沫流体具有很强的抑制页岩膨胀能力,并可在短时间内在页岩表面形成保护层,有效阻止外界流体的侵入。



### 2.3 岩心浸泡试验

空气泡沫钻井的井壁失稳问题不同于常规的钻井液钻井,在地层出水条件下,干燥的地层瞬间吸水,孔隙压力、围岩压力瞬间发生变化,易发生膨胀坍塌。为进一步考察所确定的泡沫流体对现场的适用情况,进行了空气泡沫流体浸泡岩心的模拟试验。

将现场空气钻井岩屑粉碎,压制成岩心柱,分别放入未加井壁稳定剂和加入了井壁稳定剂的泡沫流体中浸泡,观察浸泡后的岩心情况,浸泡试验条件为常温常压泡沫状态。试验配方 1<sup>#</sup> 为 0.10% HXC+0.03% YIM+0.30% (TWJ+OP-10)+0.50% GXG; 配方 2<sup>#</sup> 为 0.10% HXC+0.03% YIM+0.30% (TWJ+OP-10)+0.30% GXG+0.20% WJ-3+0.30% AP-1。试验结果为:岩心放入清水中即开始吸水膨胀,浸泡 15 min 后完全坍塌;岩心在未加入井壁稳定剂的泡沫中浸泡发生膨胀;岩心在加入井壁稳定剂 AP-1 和 WJ-3 的泡沫流体中浸泡后,岩心表面有一层薄膜,浸泡后无膨胀。

### 3 抑制剂及井壁稳定剂作用机理

页岩抑制剂 GXG 是低分子无机聚合物,其分子中含有阳离子基团和极性非离子酰胺基团,可以抑制黏土水化分散、絮凝钻屑、控制地层造浆,防止钻头泥包。AP-1 所含胺基官能团具有独特的分子结构,使其能很好地镶嵌在黏土层间,并使黏土层紧密结合在一起,通过压缩双电层,减小黏土层间距,抑制黏土吸水膨胀;其抑制膨胀的机理不同于普通的聚醚多元醇,是通过胺基特有的吸附,在裸露的井壁上形成一层保护膜,阻止自由水进入地层从而抑制黏土吸水膨胀,而不完全是通过驱除页岩层空间内的水或浊点行为起作用。另外,AP-1 一方面通过抑制黏土的水化,控制黏土的塑性变形以降低钻头泥包的可能性;另一方面又可通过吸附,在钻具的表面形成一层疏水油膜,有效控制钻头泥包。WJ-3 是一种低分子的改性纤维素产品,含有非离子基团、阳离子基团,其中非离子基团与地层岩石表面形成较强的氢键吸附作用,阳离子基团能与带负电的岩石表面产生较强的静电吸附作用,提高同地层的胶结能力,增强井壁的稳定性,同时在地层毛细管力的作用下微细纤维颗粒可进入地层孔隙封堵孔喉,阻止水分进入地层。

GXG、AP-1 和 WJ-3 在井壁表面协同作用,形成吸附膜,阻止自由水进入地层的同时,泡沫自身存在向井壁吸附、聚集的趋势,气泡在井壁的粘着吸附分为四个阶段,即接触发生、水层减薄、水层破裂、最终形成三相润湿周边,在井壁表面产生具有疏水性、黏弹性的泡沫吸附壁,也大大减弱了自由水向井壁的渗透,从而抑制井壁的表面水化<sup>[9]</sup>;且泡沫具有一定的尺寸,在井壁可堵塞部分孔隙,使水分子不易进入泥页岩晶层之间,水化膨胀和分散也就受到了抑制,从而增强了井壁的稳定性。

### 4 结 论

1) 通过考察多种抑制剂的抑制性能及对空气泡沫稳定性的影响,优选 GXG 作为空气泡沫流体的抑制剂,推荐加量为 0.30%~0.50%。

2) 空气泡沫流体中加入井壁稳定剂 AP-1 和 WJ-3,可在井壁形成保护膜,阻止水进入地层,有效防止井壁坍塌。泡沫流体 24 h 页岩膨胀量仅为 1.84 mm,较清水降低 67.1%,有利于泡沫钻井的

井壁稳定。

3) 目前对空气泡沫钻井井壁失稳机理的研究较少,建议深入开展此项研究,建立泡沫流体井壁稳定模型,延长泡沫钻井时间,扩大泡沫钻井的应用范围。

### 参 考 文 献

- [1] 李玉飞,孟英峰,聂政远,等. 空气钻井提高钻速机理研究[J]. 石油钻探技术,2006,34(4):9-11.  
Li Yufei, Meng Yingfeng, Nie Zhengyuan, et al. The mechanisms of increasing ROP during air drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(4): 9-11.
- [2] 李荣,孟英峰,汪绪刚,等. 气体钻井中泥页岩地层遇水时的井壁稳定性研究[J]. 钻采工艺,2008,31(3):5-8,15.  
Li Rong, Meng Yingfeng, Wang Xugang, et al. Evaluation for shale hydration and stability in gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(3): 5-8, 15.
- [3] 张杰,徐安建,李翠楠,等. 泥页岩水化对气体钻井井壁稳定性影响规律研究[J]. 石油钻采工艺,2008,30(2):46-49.  
Zhang Jie, Xu Anjian, Li Cuinan, et al. Effect of shale hydration on wellbore stability in gas drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 46-49.
- [4] 邱正松,徐加放,吕开河,等. “多元协同”稳定井壁新理论[J]. 石油学报,2007,28(2):117-119.  
Qiu Zhengsong, Xu Jiafang, Lü Kaihe, et al. A multivariate co-operation principle for well-bore stabilization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 117-119.
- [5] 金衍,陈勉. 水敏性泥页岩地层临界坍塌时间的确定方法[J]. 石油钻探技术,2004,32(2):12-14.  
Jin Yan, Chen Mian. A method for determining the critical time of wellbore instability at water-sensitive shale formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 12-14.
- [6] 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.
- [7] 万里平,孟英峰,梁发书,等. 欠平衡钻井中新型防腐稳定泡沫的研制[J]. 新疆石油学院学报,2004,16(1):34-38.  
Wan Liping, Meng Yingfeng, Liang Fashu, et al. Synthesis of a new anti-corrosive and stable foam in under-balance drilling[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2004, 16(1): 34-38.
- [8] 杨振杰. 泥页岩构成及泥页岩井壁表面和岩屑表面特征对井壁稳定性的影响:文献综述[J]. 油田化学,2000,17(1):73-77.  
Yang Zhenjie. Effects of shale composition and surface properties on borehole stability: a review[J]. Oilfield Chemistry, 2000, 17(1): 73-77.
- [9] 吴飞,朱宗培. 泡沫在井壁的物理化学作用[J]. 钻井液与完井液,1995,12(1):31-34.  
Wu Fei, Zhu Zongpei. The physical chemistry action of foam on borehole wall[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1995, 12(1): 31-34.