

# 叶舞凹陷 ZKX 井深部盐层钻井液技术研究

彭朝洪, 肖长波, 徐 飞

(四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610072)

**摘要:**叶舞凹陷 ZKX 井位于叶县盐田范围内,该钻探的目的是河南叶舞凹陷盐矿的普查,该井设计井深 2630 m,在 2000 ~ 2400 m 连续取心,主要钻遇以泥页岩、砂岩、含盐膏层及盐岩为主的沉积岩地层,钻进过程中存在防塌、护心、井壁稳定等方面的问题和难点。针对 ZKX 井的钻井液难点,在钻井液体系优化的基础上,根据不同地层分别采用了防塌钻井液体系、欠饱和盐水钻井液体系和饱和盐水钻井液体系,解决了水敏性泥页岩钻进的防塌及盐岩地层连续取心的钻井液技术难点,探索出了一套适用于盐膏层取心钻进的低成本钻井液技术思路。

**关键词:**深部盐层;防塌钻井液;盐水钻井液;叶舞凹陷 ZKX 井

中图分类号:P634.6 文献标识码:A 文章编号:1672 - 7428(2015)02 - 0028 - 05

**Drilling Fluid Technology for Well ZKX of Deep Salt Bed in Yexian-Wuyang Depression/PENG Chao-hong, XIAO Chang-bo, XU Fei** (Sichuan Institute Geological Engineering Investigation, Chengdu Sichuan 610072, China)

**Abstract:** Well ZKX is located in the salt bed of Yexian with the purpose of the salt mine survey in Yexian-Wuyang depression of Henan. The planned depth of the wellbore was 2630 m, and the continuous coring was operated from 2000 to 2400m. Mainly the sedimentary strata of mud shale, sandstone, and the salt rocks were drilled; there were difficulties in anti-sloughing, core protection and wellbore stability in drilling construction. On the basis of the optimization of the drilling fluid system and according to the different strata, the anti sloughing drilling fluid system, unsaturated salt water drilling fluid system and saturated salt water drilling fluid system were used respectively, which solves the technical difficulties of anti-sloughing in water sensitive shale and problems of drilling fluid for continuous coring in halite stratum. A set of technical ideas has been explored for low cost drilling fluid which is suitable to core drilling in salt bed.

**Key words:** deep salt bed; anti-sloughing drilling fluid; salt water drilling fluid; Well ZKX Yexian-Wuyang depression

叶舞凹陷盐田位于河南省中部叶县和舞阳县境内,是我国东部 31 个盐盆中发现的大型优质盐矿床之一,ZKX 井位于叶县盐田范围内,该钻探的目的是河南叶舞凹陷盐矿的普查,在 2000 ~ 2400 m 连续取心,为石盐矿床查证提供支持。

该孔设计井深 2630 m,为三开井身结构,其中一开(0 ~ 491.2 m)、二开(491.2 ~ 2000 m)井段采用全面钻进,三开(2000 ~ 2630 m)连续取心;该井实际完井深度 2400 m,0 ~ 491.2 m 井段采用  $\varnothing 311.1$  mm 钻头扩眼后下入  $\varnothing 244.5$  mm 套管固井,491.2 ~ 2000 m 井段采用  $\varnothing 215.9$  mm 钻头钻进后下入  $\varnothing 177.8$  mm 套管并固井,2000 ~ 2630 m 井段  $\varnothing 120.6$  mm 裸眼钻进。

盐层是指以盐或石膏为主要成分的地层<sup>[1]</sup>,盐层蠕变特性除了和岩石理化性质有关还与氯离子含量、钻井液性能紧密相关<sup>[2]</sup>,所以本文主要研究盐水钻井液的配制及防护。

## 1 岩石性质及对钻井液的要求

对盐岩层我们采用的研究方法很多,比如 X 衍射分析、电镜扫描分析等<sup>[3]</sup>。同时测定可溶性盐的类型( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 等)及含量<sup>[4]</sup>。

一开(0 ~ 492 m)地层,深度浅,地层简单,钻井液体系采用常用材料配制普通钻井液。

二开以浅(491.2 ~ 1650 m)地层的普遍情况是泥页岩的复合体,其中页岩具有比较高的膨胀性,其阳离子交换容量 CEC 为 5 mmol/100 g 土。所以在钻井液设计时应当注意考虑钻井液对页岩的抑制作用,同时要考虑二开以深(1650 ~ 2000 m)含盐膏层的抗盐能力。

三开地层中含有大量的石盐矿物,含有极少的蒙脱石,说明该地层的膨胀量不高,含有大量的伊利石、石英和方解石等,属于中等分散;但是因为三开中含有大量的盐岩,所以回收率将会降低;阳离子交换容量比二开地层的数值更低, < 3 mmol/100 g 土。

本研究区域的可溶盐类型分析结果是石盐矿石主要组分为NaCl,其含量一般为75%~90%,最高为95.17%,最低为68%,平均为80%以上。其次为CaSO<sub>4</sub>,含量一般为3.5%~6%。所以在钻井液设计时应当注意考虑钻井液的抗盐能力、抑制盐岩溶解及提高取心率。

## 2 钻井液体系优化

### 2.1 二开以浅防塌钻井液体系

二开(491.2~1650 m)钻遇水敏性泥页岩地层,应重点考虑水化膨胀使钻孔发生井眼蠕变缩径、井壁掉块、井壁坍塌、上下钻杆遇阻等问题。选用泥页岩强抑制剂腐植酸钾、XY-27和HV-CMC进行复配。其配方及性能见表1。

表1 防塌钻井液主要性能统计

配方号	性能参数		配 方							
	AV/ (mPa·s)	FL/[mL· (30 min) <sup>-1</sup> ]	淡水/ mL	膨润土/ %	LV-CMC/ %	HV-CMC/ %	水解聚丙烯腈 钠盐/%	腐植酸钾/ %	聚丙烯酰胺 钾盐/%	XY-27/ %
1	18.0	15.0	400	3	0.30			0.04	0.20	
2	18.5	14.5	400	4		0.10		0.20	0.30	0.01
3	18.5	14.0	400	4		0.20		0.10	0.30	0.05
4	16.5	15.5	400	4		0.15		0.05	0.15	0.05
5	18.5	13.5	400	5		0.20		0.05	0.25	0.08
6	16.5	13.5	400	5	0.25			0.05	0.25	0.05

优选的钻井液配方为6号配方,其性能参数为:密度1.0 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度34 s,表观粘度16.5 mPa·s,塑性粘度13 mPa·s,动切力3.5 Pa,滤失量13.5 mL/30 min,静切力3.5/10 Pa/Pa。

### 2.2 二开以深欠饱和盐水钻井液体系

二开(1650~2000 m)钻遇含盐膏岩地层,根据ZKX井现场的条件计算出欠饱和盐水钻井液中的Cl<sup>-</sup>含量为0.1009 g/mL左右,同时考虑到抑制盐岩层过度溶解及钻井液对盐的容纳能力,所以选择欠

饱和盐水钻井液中的Cl<sup>-</sup>含量为0.1 g/mL。

基浆为5%预水化膨润土+10%NaCl。采用LV-CMC、腐植酸钾、水解聚丙烯腈钠盐、HV-CMC降失水,HV-CMC、水解聚丙烯腈钠盐、LV-CMC抗温性能好;同时HV-CMC、LV-CMC和水解聚丙烯腈钠盐还具有一定程度的抗盐性能。实验结果优化使用正交实验,采用四因素三水平正交实验法,实验结果如表2所示。

表2 欠饱和盐水钻井液主要性能

配方号	配 方				性 能 参 数				
	HV-CMC/ %	LV-CMC/ %	腐植酸钾/ %	水解聚丙烯腈 钠盐/%	AV/ (mPa·s)	FL/[mL· (30 min) <sup>-1</sup> ]	泥皮厚度/ mm	pH 值	
1	0.20	0.6	0.30	0.8	18.0	9.5	1.0	9	
2	0.20	0.8	0.25	0.9	22.5	9.0	1.5	9	
3	0.20	1.0	0.20	1.0	25.0	8.8	1.5	9	
4	0.15	0.6	0.25	1.0	16.0	9.8	1.5	9	
5	0.15	0.8	0.20	0.8	18.0	9.0	1.5	9	
6	0.15	1.0	0.30	0.9	22.5	8.9	1.5	9	
7	0.10	0.6	0.20	0.9	14.5	11.0	2.0	9	
8	0.10	0.8	0.30	1.0	18.5	9.2	2.0	9	
9	0.10	1.0	0.25	0.8	19.0	9.0	1.5	9	

优选的钻井液配方为5号配方:淡水+5%膨润土+10%NaCl+0.15%HV-CMC+0.2%腐植酸钾+0.8%水解聚丙烯腈+0.8%LV-CMC。其性能为:密度1.20 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度30 s,表观粘度18 mPa·s,塑性粘度17 mPa·s,动切力1 Pa,滤失量9 mL/30 min,静切力3.5/6 Pa/Pa。

### 2.3 三开饱和盐水钻井液体系

三开是2000 m以深的盐岩地层,该段采用取心钻进,钻孔深,取心工艺要求高,故设计使用饱和盐水钻井液体系,实验方法和欠饱和盐水钻井液类似。

基浆为3%钠膨润土+2%凹凸棒抗盐粘土+31.5%NaCl+0.01%聚丙烯酰胺钾盐。饱和盐水钻

井液选用抗盐抗高温处理剂为凹凸棒抗盐粘土和FKJ-2材料;增粘剂主要采用钠基膨润土和聚丙烯酸钾处理剂;降失水采用腐植酸钾、水解聚丙烯腈钠

盐、LV-CMC、FKJ-2材料;润滑剂采用聚丙烯酸钾处理剂。实验配方及性能参数如表3所示。

表3 饱和盐水钻井液主要性能

配方号	配 方				性 能 参 数			
	腐植酸钾/ %	LV-CMC/ %	FKJ-2/ %	水解聚丙烯腈 钠盐/%	AV/ (mPa·s)	FL/[mL· (30 min) <sup>-1</sup> ]	泥皮厚度/ mm	pH 值
1	0.3	0.80	0.80	0.5	20.0	7.6	2	9
2	0.3	0.85	0.85	0.6	21.5	7.0	2	9
3	0.3	0.90	0.90	0.7	23.5	6.5	2	9
4	0.4	0.80	0.85	0.7	25.0	6.0	2	9
5	0.4	0.85	0.90	0.5	22.0	7.0	2	9
6	0.4	0.90	0.80	0.6	22.5	6.7	2	9
7	0.5	0.80	0.90	0.6	23.0	6.5	2	9
8	0.5	0.85	0.80	0.7	26.5	5.8	2	9
9	0.5	0.90	0.85	0.5	23.5	6.7	2	9

优选的钻井液配方为配方3:淡水+3%钠膨润土+2%凹凸棒抗盐粘土+31.5%NaCl+0.01%聚丙烯酰胺钾盐+0.3%腐植酸钾+0.7%水解聚丙烯腈钠盐+0.90%LV-CMC+0.90%FKJ-2+1.5%NaOH(以土的质量计)。其性能为:密度1.25 g/cm<sup>3</sup>,漏斗粘度38 s,表观粘度23.5 mPa·s,塑性粘度21 mPa·s,动切力2.5 Pa,滤失量6.5 mL/30 min,静切力4/8.5 Pa/Pa。

图2所示,淡水防塌钻井液、欠饱和盐水钻井液、饱和盐水钻井液在常温失水量分别为:13.5、9、6.5 mL/30 min,失水量逐步减小。从颗粒级配的优越性、泥饼致密性、泥饼折线率的角度观察发现,泥饼质量最优的是饱和盐水钻井液,所以其滤失性能最优。

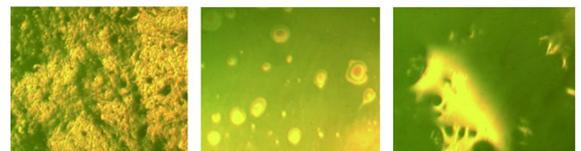


图2 三种钻井液泥饼微观图

图2 三种钻井液泥饼微观图

通过摩阻测卡实验,测得淡水防塌钻井液、欠饱和盐水钻井液、饱和盐水钻井液泥饼的摩阻值分别为0.031、0.027、0.018,3种钻井液摩阻系数依次减小,摩阻系数与泥饼的粘附力呈正比,所以发生卡钻的可能性最小的是饱和盐水钻井液。

### 3.1.2 钻井液抗温性评价

盐水钻井液受温度的影响,随着温度的升高,表观粘度下降。2000 m孔深的井口循环温度为33℃,井底循环温度为45℃,2400 m孔深的井口循环温度为45℃,井底循环温度为59℃。盐水钻井液粘度随温度的变化如图3所示。到达井底时,欠饱和盐水钻井液粘度达到16 mPa·s;饱和盐水钻井液达到18.5 mPa·s,粘度均在可用和控制范围内,温度升高除了影响膨润土水化分散作用和影响处理剂材料使粘度降低外,还使盐的溶解度增加,所以在现场经过钻孔循环和地层的相互作用,温度对钻井

## 3 钻井液性能与抑制效果评价

### 3.1 钻井液性能评价

#### 3.1.1 泥饼质量评价

泥饼质量主要通过泥饼照片、显微镜照片、泥饼厚度和泥饼摩阻系数的测定进行评价。泥饼照片如图1所示,能够清楚地辨别出非盐水钻井液、欠饱和盐水钻井液和饱和盐水钻井液,石盐在各种钻井液形成的泥饼上表现差异性较大。



图1 三套钻井液体系泥饼对照图

将图1的3个泥饼用显微镜放大50倍观察,如

液性能的影响将减小。

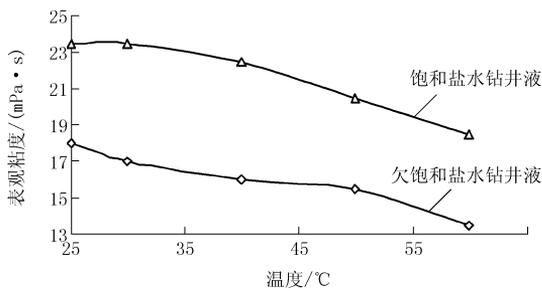


图3 盐水钻井液表观粘度与温度关系曲线

### 3.1.3 钻井液润滑性评价

钻井液润滑性评价实验主要分析钻井液的润滑性,尽量减少其对钻具的磨损和破坏,在深孔特别是深部取心过程中起到润滑减阻的作用。使用 EP 型润滑仪测试结果如表 4 所示。

表 4 钻井液润滑性

钻井液体系	钻井液润滑系数	备注
清水	0.32	—
淡水防塌钻井液	0.32	润滑性不强
欠饱和盐水钻井液	0.22	CMC 有润滑作用
饱和盐水钻井液	0.20	K-PAM 润滑效果好

测试结果显示,饱和盐水钻井液体系的润滑效果最好,能润滑钻具降低摩阻,利于深部钻探和取心钻进。

## 3.2 抑制性效果评价

### 3.2.1 膨胀性测试

现场采集 3 种岩样,其中一号岩样与淡水防塌钻井液接触,二号岩样与欠饱和盐水钻井液接触,三号岩样与饱和盐水钻井液接触。称取过 100 目筛的岩样(在 105 °C 烘干 4 h)6.5 g 在 4 MPa 压制 5 min,测试膨胀量。

由图 4 可知,从岩样的膨胀性角度而言,3 种岩样中膨胀性最强的是二号样,由于该岩样主要是取自于泥页岩、砂岩及盐膏层;其次是一号岩样,主要是泥页岩;膨胀性最弱的是三号岩样,取自于盐膏层复合地层。从钻井液的抑制性效果而言,3 种钻井液均具有较强的抑制岩样吸水膨胀的能力。

### 3.2.2 岩样滚动回收测试

称取 50 g 10~20 目的岩样,与 350 mL 钻井液混合加入到老化罐中,在 80 °C 滚动 16 h,用 40 目筛回收,回收岩样在 105 °C 下烘干,冷却 24 h,称重并计算回收率。

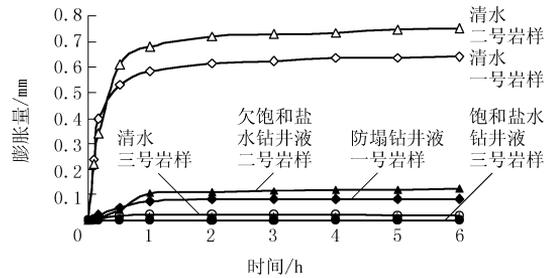


图 4 三种岩样的膨胀性曲线

由图 5 发现,2 套盐水钻井液体系均有较强的抑制水敏性岩样的水化分散能力,ZKX 井实际钻遇盐岩地层时,井底循环温度较实验温度低,取心率更高。

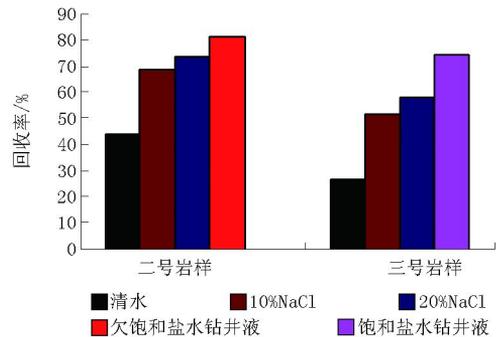


图 5 回收率实验结果

## 4 现场应用

钻井液技术人员在现场负责监控钻井液性能,负责设计钻井液配方,每 2 h 测 1 次 pH 值、密度、粘度,每班(按 8 h 计)测一次钻井液全性能(pH 值、密度、粘度、滤失量、含砂量),使用饱和盐水钻井液时应加密测量频次;根据地质资料及邻井钻探施工资料,控制好钻井液的密度,以平衡地层压力;严格控制钻井液滤失量,二开后钻井液滤失水量应控制在 15 mL/30 min 以内,深度超过 2000 m 应控制在 10 mL/30 min 以内。

用好“振动筛+除砂器”的固控组合,有条件时配备离心机,严格控制无用固相的含量,含砂量应低于 0.5%;进入盐岩层前 50 m 时,将普通钻井液转化为饱和盐水钻井液。防塌钻井液、欠饱和盐水钻井液及饱和盐水钻井液体系有效地提高了钻进工作的安全性。ZKX 井各典型地层监测参数如表 5 所示。

ZKX 井钻井液体系现场运用中,主要针对地层为:

表5 典型地层钻井液性能参数

深度 $h$ / m	密度 $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$FV$ / s	$AV$ / ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	$PV$ / ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	$FL$ / mL	含砂 量/%
738.00	1.13	23.0	12.5	11	16.0	3
860.06	1.14	31.0	15.0	8	14.0	2
960.61	1.14	25.0	12.5	9	15.0	2
1100.00	1.15	29.0	14.0	10	15.0	3
1250.00	1.14	29.0	15.0	10	14.5	3
1340.81	1.15	33.0	17.0	12	14.0	3
1550.00	1.12	46.0	22.5	15	12.5	4
1650.43	1.15	33.0	17.0	12	14.0	3
1750.49	1.17	40.0	19.0	14	10.0	3
1823.52	1.16	35.0	16.5	14	12.5	3
2131.71	1.30	35.0	25.5	21	6.5	1
2132.41	1.30	35.0	25.0	18	7.0	1
2149.65	1.29	37.0	27.5	26	8.0	1
2156.01	1.30	37.0	26.5	24	8.2	1
2159.37	1.30	40.0	29.0	26	7.0	1
2162.87	1.30	40.0	27.5	24	7.2	1

- (1) 含有少量石盐矿物的泥页岩复合体地层;  
(2) 盐岩地层。

在(1)类地层中,由于复合地层的膨胀、收缩、钙盐浸和高温等特性,岩土胀缩导致钻孔孔径发生变化易缩径卡钻;盐浸导致普通钻井液体系发生破坏,丧失钻井液功能;高温导致普通钻井液颗粒物质发生性能突变失效等问题。在(2)类地层中,除高温问题以外,存在由于大量的石盐矿物进入钻井液,导致钻井液中盐岩矿物过量,钻井液性能发生改变问题。

使用普通钻井液进行泥页岩地层钻进初遇石盐矿物时,现场钻井液由于钙盐浸性能失效,发生卡钻事故,通过换用欠饱和钻井液体系使钻井液在含有NaCl和 $\text{Ca}^{2+}$ 污染的情况下,钻井液粘度、失水量、切力等各种性能均达到合格要求,成功分离钻杆与地层挤压接触,解决卡钻事故并保证改地层钻进顺利完成。

盐岩地层钻进易出现漏失、卡钻、钙盐侵、埋钻等事故,应结合钻井井身结构、钻具工艺和钻井液等技术,相互配合,共同发挥功效,保证钻进安全顺利。

ZKX井钻进过程使用钻井液技术很好地处理

了钻井中出现的漏失、卡钻、钙盐侵、埋钻事故。

## 5 结论与认识

(1) 本文研究的防塌钻井液、欠饱和盐水钻井液及饱和盐水钻井液体系分别满足了ZKX井不同井段的井壁稳定、保护岩心和润滑减阻等要求,对将在同区域的盐膏层钻进钻井液体系设计和实施有重要的参考价值;

(2) 在能有效地解决盐岩层产生蠕变前提下,尽可能取钻井液中的 $\text{Cl}^-$ 含量的最小值,所以欠饱和和盐水钻井液在钻遇ZKX井二开以深的地层效果较优;

(3) 饱和盐水钻井液体系能有效的抑制盐岩层吸水膨胀和水化分散,保证了井壁稳定及较高的取心率。

## 参考文献:

- [1] 王铁超. 厚盐青层钻井技术优化研究[D]. 四川南充: 西南石油大学, 2010.
- [2] 何亭. 亚苏尔哲别油田盐膏层安全钻井技术[J]. 矿业论坛, 2010, (31).
- [3] 张奎林. 滨里海地区巨厚盐膏层蠕变规律研究[D]. 山东东营: 中国石油大学, 2009.
- [4] 唐继平. 盐膏层钻井理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [5] Cai Jihua, Wu Xiaoming, Gu Sui. Research on Environmentally Safe Temporarily Plugging Drilling Fluid in Water Well Drilling [C]//Asia Pacific Health, Safety, Security and Environment Conference. Indonesia, 2009, 77-82.
- [6] 刘翠娜, 纪卫军, 李晓玮, 等. 盐水钻井液配制方法对其性能的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(1): 33-36.
- [7] 刘政, 黄平, 刘静, 等. 川渝地区盐膏层钻井液技术对策[J]. 天然气勘探与开发, 2014, (3): 75-77, 10.
- [8] 赵岩, 仲玉芳, 王卫民, 等. S/D-2井欠饱和和盐水钻井液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(3): 41-43.
- [9] 钱殿存, 孙明波, 杜素珍, 等. 深层盐膏层钻井液技术研究与应用[J]. 钻采工艺, 2001, 06: 74-78, 8.
- [10] 靳红军. 深部岩盐取心钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(10): 10-12.
- [11] 张蔚, 刘亚峰, 周天辉, 等. S115井承压堵漏及盐膏层钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2005, (3): 44-46, 84.