

# 钾铵聚合物钻井液在地热钻井中的应用研究

黄聿铭<sup>1,2</sup>, 张金昌<sup>1</sup>, 杨钦明<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 贵州地热井钻遇地层以灰岩和白云岩为主, 夹杂泥岩、砂岩及煤层等不稳定地层, 为满足井壁稳定及配合螺杆钻进工艺的需求, 确定采用强抑制聚合物钻井液体系。通过正交试验确定了室内配方, 并对配方的综合性能进行了室内测评。FT-1 与 QS-2 协同作用可有效改善泥皮质量, 白油润滑剂在 1% 加量时即可将润滑系数降低至 0.2 以下。其综合性能测试结果表明: 该钻井液体系具有良好的流变性, 抑制性强且润滑性良好。相比于无固相聚合物钻井液, 井眼清洁能力明显增强, 机械钻速提高了 129%, 漏失风险有所下降, 取得了良好的实钻效果。

**关键词:** 地热井; 聚合物钻井液体系; 强抑制; 井壁稳定

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2016)10-0265-04

**Research and Application of Potassium-Ammonium Polymer Drilling Fluid Suitable for Geothermal Well/HUANG Yu-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-chang<sup>1</sup>, YANG Qin-ming<sup>1</sup>** (1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The rock formations encountered in geothermal well drilling in Guizhou are mainly limestone, dolomite and some unstable formations such as sandstone, mudstone and coal seam. To meet the demands of keeping borehole stability and matching with screw motor drilling tool, potassium-ammonium polymer drilling fluid was optimized. The drilling fluid formulation was obtained through orthogonal tests, and a series of performance tests were conducted in laboratory. Test results show that FT-1 and QS-2 have a synergistic effect on effectively improving mud cake quality, and the friction coefficient of the mud system can be reduced to less than 0.2 by adding 1% of white oil into the system. The new drilling fluid system has good rheological properties with strong inhibition ability and good lubricating property. Compared with solid-free polymer drilling fluid, the new novel drilling fluid has stronger borehole cleaning ability and lower risk in loss of circulation, the ROP can be increased by 129%.

**Key words:** geothermal well; polymer drilling fluid system; strong inhibition; borehole stability

## 0 引言

螺杆钻具对钻井液的性能要求较高<sup>[1]</sup>。首先, 钻井液含砂量需控制在 0.5% 以下, 否则会对螺杆钻具造成严重损害, 这就要求现场必须配备高效的固控系统。其次, 泥浆泵必须有足够的流量和泵压来保证螺杆钻具正常高效的工作。

以贵州地区地热井为例, 其地热资源<sup>[2]</sup>埋深一般位于地下 1000~2000 m 处, 主要储集层是厚度大、裂隙及孔隙率高的石灰岩、白云岩; 保温层则以粘土岩(页岩、泥岩)为主<sup>[3-4]</sup>。其深部地热钻井研究起始于 2006 年<sup>[5-8]</sup>, 主要钻进方法为硬质合金、牙轮钻头正循环钻进工艺和螺杆马达孔底动力钻进。综合考虑地层特点及钻进工艺的要求与限制, 所用钻井液既需有合适的粘度, 较低的滤失量, 又需一定的抑制性

以防止水敏地层造浆和缩径等复杂情况, 为降低粘附卡钻的可能性, 钻井液需要有良好的润滑性能<sup>[9-12]</sup>。因此, 研制出适于螺杆马达孔底动力钻进工艺的钻井液对贵州地热井的顺利实施意义重大。

## 1 地热井螺杆钻进工艺钻井液技术难点

贵州地区地热井主要钻遇地层以白云岩及灰岩, 伴有泥岩、砂岩及煤层, 针对螺杆孔底动力钻进工艺, 钻井液面临的技术难点有以下几点。

(1) 螺杆钻进过程要求有效携带岩屑, 若粘切过低导致孔内岩屑不能被完全带至地面, 形成二次破碎, 既磨损钻具又降低钻速。因此需要适量提高钻井液粘度, 以保持快速安全钻进<sup>[13]</sup>。

(2) 钻遇地层的粘土岩(页岩、泥岩)为水敏地

收稿日期: 2016-06-21; 修回日期: 2016-09-07

作者简介: 黄聿铭, 女, 汉族, 1992 年生, 中国地质大学(北京)在读硕士研究生, 主要从事地质钻探相关工作研究, 北京市海淀区学院路 29 号, huangyuming718@126.com。

通讯作者: 张金昌, 男, 汉族, 1959 年生, 所长, 党委书记, 教授级高级工程师(二级), 中国地质科学院研究生院硕士生导师, 中国地质大学(北京)特聘教授, 国土资源部科技领军人才, 探矿工程专业, 从事钻探技术研究、钻探装备设计和科技管理工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, zjinchang@mail.cgs.gov.cn。

层,起下钻以及整个钻进过程中,钻井液对井壁的浸泡、冲刷,都会使自由水进入井壁,引起井壁不稳。因此需要严格控制其抑制粘土水化分散能力。

(3) 钻遇煤岩必须考虑其易缩径引发井下事故,在提粘、维持抑制性的同时必须控制滤失量,使钻井液能够在井壁形成一层致密泥皮,控制自由水的进入对井壁稳定性产生影响。

(4) 螺杆钻进过程要求钻井液低含砂量,防止对钻杆以及井底动力钻具产生冲刷、磨损,从而影响其使用效果及寿命<sup>[13]</sup>。钻遇地层中含有石英砂岩等研磨性强的地层,因此必须增强钻井液润滑性,将润滑系数控制在0.15左右,并防止粘附卡钻。

(5) 下部地层情况不明,钻井液钻遇各种复杂地层(盐膏层)的可能性较大,钻井液须有较强的抗污染能力。

## 2 室内实验

### 2.1 配方设计思路

根据上述钻井液技术难点,确定钻井液配方设计思路<sup>[14]</sup>:(1)通过正交试验分析主要处理剂对粘度、滤失量的影响情况,并确定钻井液配方;(2)优选润滑剂以及封堵剂进一步优化钻井液配方;(3)在聚合物钻井液配方的基础上引入无机盐以转化为聚合物氯化钾钻井液,作为钻遇污染地层时的钻井液预案。

### 2.2 钻井液配方正交试验

初步确定用聚丙烯酸钾(KPAM)、低粘羧甲基纤维素(LV-CMC)、铵盐(NH<sub>4</sub>-HPAM)来作为该钻井液的主要添加剂,并通过正交实验<sup>[15]</sup>确定各试剂性能及相对合理加量。正交实验结果见表1。

表1 正交实验数据分析表

序号	KPAM/%	NH <sub>4</sub> -HPAM/%	LV-CMC/%	AV/(MPa·s)	PV/(MPa·s)	YP/(MPa·s)	Gel	FL/mL
①	0.10	0.20	0.10	8	7	1	0/0	22
②	0.10	0.40	0.30	9	7	2	0/0	4.5
③	0.10	0.60	0.50	12.5	11	1.5	0/0	3.5
④	0.20	0.20	0.30	15.5	11	4.5	0.5/2.0	7
⑤	0.20	0.40	0.50	19	14	5	0.5/0.5	7
⑥	0.20	0.60	0.10	12.5	9	3.5	0/0.25	8
⑦	0.30	0.20	0.50	33	24	9	1.5/2.5	4.5
⑧	0.30	0.40	0.10	18.5	12	6.5	1.0/2.5	7.5
⑨	0.30	0.60	0.30	23.5	17	6.7	1.0/2.0	6.5
I	9.8333	18.8333	13					
II	15.6667	15.5	16					
III	25	16.1667	21.5					
R	15.1667	3.3333	8.5					
I	8.3333	14	9.3333					
II	11.3333	11	11.6667					
III	17.6667	12.3333	16.3333					
R	9.3333	3	7					
I	10	11.1667	12.5					
II	7.3333	6.3333	6					
III	6.1667	6	5					
R	3.8333	5.1667	7.5					
I	1.5330	4.9397	3.7473					
II	4.4287	4.5990	4.4287					
III	7.4947	3.9177	5.2803					
R	5.9616	1.0220	1.5330					

注:基浆为4%的膨润土基浆。

由各极差大小得出各因素在选定范围内对于粘度、滤失量及动切力的影响关系次序如下:

(1) AV: KPAM > LV - CMC > NH<sub>4</sub> - HPAM;

(2) PV: KPAM > LV - CMC > NH<sub>4</sub> - HPAM;

(3) YP: KPAM > LV - CMC > NH<sub>4</sub> - HPAM;

(4) FL: LV - CMC > NH<sub>4</sub> - HPAM > KPAM。

通过对数据分析可知:KPAM对粘度影响最为突出;LV - CMC在增粘的同时有一定降滤失作用;

$\text{NH}_4 - \text{HPAM}$  既可以降粘,也可以降滤失。

对比9组实验数据可知:KPAM加量达到3%时粘度值适中, $\text{NH}_4 - \text{HPAM}$ 加量控制在0.2%~0.6%之间,LV-CMC加量控制在0.3%~0.5%之间即可保持粘度与滤失量的调控平衡。

综上,初选配方1号:4%膨润土+0.3%KPAM+0.2%~0.6% $\text{NH}_4 - \text{HPAM}$ +0.3%~0.5%LV-CMC。

### 2.3 FT-1与QS-2对钻井液性能的影响

该地区钻遇大部分地层(砂岩、煤层)均有漏失风险,并且,目前初选配方1号针对该类地层的堵漏滤失并未完全可控,故而降滤失剂降低钻井液滤失量的同时,通过封堵剂的加入进行封堵。通过在1号配方基础上添加磺化沥青(FT-1)与超细碳酸钙(QS-2)以改善钻井液的固相分布,增强封堵造壁性能<sup>[16]</sup>。实验结果见表2。

表2 FT-1及QS-2对钻井液性能的影响

配方	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa	FL/mL
1号	24	17	7	6.5
1号+2%FT-1	25	19	6	5.2
1号+2%QS-2	24	17	7	5.8
1号+2%FT-1+2%QS-2	25	18	7	4.8

注:初选配方1号+降滤失剂。

通过对数据分析可知:FT-1和QS-2对钻井液流变性能影响不大,且都有一定的降滤失效果,这是因为FT-1本身为柔性颗粒,在失水造壁过程中具有一定的变形能力,起到改善泥皮质量的作用;QS-2作为刚性颗粒,在失水造壁过程中可起到骨架作用。二者相配合可进一步改善泥皮质量,并降低滤失量。由此,优化配方2号:4%膨润土+0.3%KPAM+0.4% $\text{NH}_4 - \text{HPAM}$ +0.5%LV-CMC+2%FT-1+2%QS-2。

### 2.4 润滑剂优选

长裸眼钻进施工过程中,随着井深增加,钻具回转产生的阻力较大,通过在钻井液中补充润滑剂,可起到良好的润滑减阻效果。此外,钻井液润滑性的提高,也在一定程度上可以降低粘卡的风险。为此,选择并对比了几种常见润滑剂的润滑效果,通过对多种润滑剂进行横向对比,优选出性能较好的润滑剂,实验数据见表3。

由表3可知,上述几种润滑剂对于钻井液润滑性能的改进都有一定效果,对比之下白油效果更加

突出。优化配方3号:4%膨润土+0.3%KPAM+0.4% $\text{NH}_4 - \text{HPAM}$ +0.5%LV-CMC+2%FT-1+2%QS-2+1%白油。

表3 润滑剂优选及评价结果

序号	试剂	润滑系数	序号	试剂	润滑系数
1	2号配方	0.35	4	1%皂化油	0.30
2	1%白油	0.21	5	1%极压润滑油	0.24
3	1%石墨	0.25			

注:4%的膨润土浆+1%润滑剂。

## 3 钻井液综合性能测试

通过以上实验基本确定了聚合物钻井液体系配方,为保证该配方钻井液在螺杆钻井过程中维持良好性能,有助于井底动力钻具发挥其效能,对其进行抗岩屑及抑制性评价。

### 3.1 钻井液的抗岩屑能力评价

钻进过程中,钻头切削下来的钻屑尺寸由于液流冲击及水化分散作用不断变小,大量钻屑颗粒混入钻井液影响钻井液本身性能,导致螺杆钻进过程受到影响。为表征钻井液抗钻屑污染的能力,通过加入不同加量岩屑对钻井液性能影响进行测试评价,研究1号配方钻井液的抗岩屑能力的强弱。

将岩屑(过100目筛)分别以0%、2%、5%、10%的加量加入1号配方钻井液中,测试其各项性能参数,试验结果见表4。

表4 钻井液的抗岩屑污染试验数据

岩屑加量/%	AV/(mPa·s)	PV/(mPa·s)	YP/Pa	FL/mL
0	28	25	3	4.4
2	29	25	4	4.7
5	31	27	4	4.0
10	33	28	5	3.0

结果表明,随着岩屑粉的加量增大,钻井液粘度呈现上涨趋势,滤失量总体呈下降趋势。这是因为,岩屑粉的引入导致钻井液中的自由水含量下降,且部分岩屑粉参与了造浆,导致粘切上涨;但是因为钻井液本身具有一定的抑制性且岩屑本身水化能力有限,所以粘切上涨的幅度有限。在最高加量为10%的范围内,滤失量随着岩屑粉增加总体呈降低趋势,主要原因为岩屑粉水化后改善了钻井液中的固相级配,泥皮充填更密实。

### 3.2 抑制剂对钻井液性能的影响

聚合物钻井液剪切稀释性良好,维护简单,固相

含量低,为快速钻进创造了有利条件。如钻遇强水敏地层,由于聚合物的快速消耗可能导致抑制性不足而使得性能难以控制。为进一步提高抑制性,考虑引入抑制剂。表5对比了不同种类的抑制剂对钻井液性能的影响情况。

表5 各类抑制剂的抑制性及其与钻井液配伍性

钻井液配方	AV/ (mPa·s)	PV/ (mPa·s)	YP/ Pa	FL/ mL	回收率/ %
3号	31	22.5	8.5	4.4	91.6
3号+7%氯化钠	22	16.5	5.5	4.7	92.5
3号+7%氯化钾	17.5	13	4.5	4.7	94.6
3号+7%甲酸钠	27.5	22	5.5	4.6	93.8
3号+7%甲酸钾	20	15	5	4.9	93.0
3号+1%聚胺	27	20	7	4.0	93.2

由表5可知,不同类型的抑制剂加入后粘切均有一定程度降低,尤其是动切力降低更明显。除聚胺外,4种盐类抑制剂加入后失水均增大,钻井液本身也会受到一定破坏。这是因为,钻井液中加入盐后,粘土胶粒扩散双电层受压缩,水化膜减薄,电动电位下降,胶体发生聚结<sup>[17]</sup>。总体而言,各类抑制剂加入后,泥页岩滚动回收率均有一定幅度增大,主要是因为聚合物钻井液本身具有较强的抑制性。充分考虑成本与现场安全,建议在一般水敏地层情况下使用3号聚合物钻井液配方,若钻遇强水敏地层,可根据井浆实际情况补充一定加量的强抑制剂以增强抑制性。

#### 4 现场应用

相比于前期使用的无固相钻井液体系,钾铵低固相聚合物钻井液在该地区钻进施工中取得了良好的使用效果。

(1)携岩能力突出。ZK-1井在钻至溶洞下方30m左右时即出现返渣不畅的现象,井底沉积岩屑累积厚度>7m,导致下钻不到底;转换为钾铵聚合物钻井液后凭借其良好的剪切稀释性,钻具下放顺利,钻屑返出正常,井眼清洁情况得到显著改善。

(2)良好的失水造壁性。FT-1与QS-2的配合使用显著改善了泥浆的失水造壁能力,泥皮质量坚韧、光滑,且具有良好的充填效果,增强了松散地层的胶结能力,降低了掉块、划眼的几率,钻进过程中未观察到明显的漏失现象。

(3)钻速得到一定程度的提升。采用无固相聚合物钻井液钻进时,泥浆性能维护难度大,班进尺不足10m;转换为钾铵聚合物钻井液后,泥浆性能稳

定,施工进度明显加快,班进尺可达18m以上,钻进效率得到明显提升。

#### 5 结语

(1)钾铵聚合物钻井液体系配方简单,具有良好的絮凝包被钻屑的能力;低固相含量条件下剪切稀释性良好而有助于钻速发挥,与无固相钻井液相比钻速提高最大可达129%以上。

(2)通过少量膨润土粉、沥青粉、超细碳酸钙等固相颗粒显著改善钻井液颗粒分布级配,进而起到良好的封堵造壁效果,可有效防止砂岩段、裂隙发育带、破碎带等不稳定地层的井壁失稳现象的发生。

(3)白油润滑剂在1%加量时即可显著降低极压润滑系数,提高泥皮的润滑能力,降低粘附卡钻等事故的发生概率,同时也减轻了钻具的磨损,降低了功耗。

#### 参考文献:

- [1] 张文庆. 孙家庄铁矿初级定向钻进及防斜措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(12): 22-24.
- [2] 贺仁钧, 乌效鸣, 田恒星. 易斜地层钻孔倾斜规律研究[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(4): 111-114.
- [3] 王虎, 陈怡, 段德培, 等. 贵州省深部地热钻井现状与发展建议[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(2): 45-47, 52.
- [4] 孔令珍, 张新福, 王荣生, 等. 地热井京城技术研[J]. 地下水, 2010, 33(2): 106-107.
- [5] 毛健全. 大力开发清洁、可持续利用的贵州地热资源[C] // 贵州省科学技术学会. 建设资源节约型, 环境友好型社会——节能、环保、可持续发展研讨会论文集. 贵州贵阳: 2006: 12-17.
- [6] John K. Prentice. Introduction and Geothermal Overview[R]. Houston, Texas. 2009.
- [7] K. W. Seal, The Geothermal Potential Of Indonesia[R]. California. 1972.
- [8] Joel Robinson. Environmental Constraints on Geothermal Development[R]. California. 1975
- [9] 王洪伟. 浅谈我国地热井钻探工艺及方法[J]. 西部探矿工程, 2015, (2): 39-40.
- [10] 鄢捷年. 2011. 钻井液工艺学[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 219-224.
- [11] 卢予北. 地热井常见问题分析与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(2): 43-47.
- [12] 沈炎, 刘俊, 程晓年, 等. 泡沫流体钻井液在肯尼亚OW904超高温地热井的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2009, 11(4): 16-19.
- [13] 刘广志, 汤凤林. 特种钻探工艺学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 23-24.
- [14] 陈燕黎. 伯努利方程的原理及运用浅析[J]. 漯河职业技术学院学报, 2012, 11(2): 86-88.
- [15] SY/T 5241—91, 水基钻井液用降滤失剂评价程序[S].
- [16] 胡金鹏, 雷恒永, 赵善波, 等. 关于钻井液用磺化沥青FT-1产品技术指标的探讨[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(6): 87-88.
- [17] 乌效明, 胡郁乐, 童红梅, 等. 钻井液与岩土工程泥浆实验原理与方法[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2010: 7-11.