

硅酸盐防塌泥浆研究及其在碳质泥岩钻探中的应用

刘选朋¹, 郑秀华¹, 王志民¹, 王 军², 解卫权²

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 陕西省地矿局西安地勘院, 西安 710100)

[摘 要] 硅酸盐钻井液体系是一种以无机盐为主要处理剂的防塌抑制性钻井液, 具有物理封堵和化学加固井壁双重防塌作用, 能有效的降低井壁的渗透率、阻止压力传递, 且具有较好的流变特性、无毒、无荧光、成本低, 被认为是具有发展前景的水基钻井液之一。在碳质泥岩钻探中经常遇到的问题有: 漏失、坍塌、掉块、涌水等, 给安全钻井带来很大麻烦。同时, 为了满足工程/水文地质资料获取与评价要求, 铁路勘察对复杂地层的处理有相对严格的要求, 如避免使用水泥封孔等, 本文研究的硅酸盐钻井液可以有效的解决碳质泥岩钻探中的上述问题, 并能提高岩心采取率和机械钻速。

[关键词] 抑制性 漏失 坍塌 碳质泥岩

[中图分类号] TE254.3 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2010)05-0967-05

Liu Xuan-peng, Zheng Xiu-hua, Wang Zhi-min, Wang Jun, Xie Wei-quan. Study of the silicate fluid for prevention of borehole-wall collapse and its application to drilling in carbonaceous mudstone [J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(5): 0967-0971.

0 前言

岩心钻探通常技术要求高, 既要保证岩心、岩样的采取率, 又要满足孔内各项试验要求(郑秀华等, 2008; 要二仓等, 2008), 而且经常遇到地层漏失和坍塌的问题, 尤其在铁路勘察中问题较为突出。同时, 为了满足工程/水文地质资料获取与评价要求, 铁路勘察对复杂地层的处理有相对严格的要求, 如避免使用水泥封孔等, 这就对钻井液的性能提出了更高的要求, 硅酸盐在钻井液中的应用始于 20 世纪 20 至 30 年代(Lakatos I *et al.*, 1999)。研究表明硅酸盐钻井液具有很强的降低泥页岩渗透率、改善膜系数、稳定井壁的能力, “封固”能力随作用时间的延长而加强。Alford S, Dzialowski A, Jiang P 等人认为, 该体系不仅提供有效的井壁稳定性, 也用于岩性改进和地质解释(Alford S *et al.*, 2001)。

1 硅酸盐防塌钻井液的研究

目前国内外大量研究表明, 泥页岩/钻井液之间物化-力学作用是影响泥页岩稳定性的关键因素。它们之间的相互作用主要变为: 第一, 滤液向泥页

岩中渗流引发地层孔压增加以及水化效应, 其中水化效应主要包括泥页岩水化膨胀、分散或产生水化应力等; 第二, 泥浆液柱压力对井壁的力学支撑作用。为了稳定泥页岩地层, 通常要求泥浆液柱压力过平衡以提供有效径向应力支撑。但是, 泥浆液柱的过平衡又会导致钻井液滤液的达西侵入。侵入地层的滤液有可能引起泥页岩水化, 产生水化膨胀压同时降低页岩强度; 另一方面, 滤液侵入使近井眼处孔隙压力提高, 从而减弱泥浆液柱的有效应力支撑, 只要井眼周围应力超过岩石强度, 就会导致页岩的塑性变形和失稳(梁大川等, 2005; 梁大川, 1998)。这一机理可由 Van Oort E. 等人做的压力传递实验证明(Van Oort E, *et al.*), 硅滤液侵入量可用下式表示:

$$V = \frac{k(p_m - p_s - \sigma \Delta \pi)}{\eta}$$

(1)

式中: K —页岩渗透率; η —滤液粘度; p_m —泥浆液柱压力; p_s —地层压力; σ —页岩—流体膜效率; $\Delta \pi$ —渗透压力。其中

$$\Delta \pi = \frac{RT}{v_w} \ln \left(\frac{a_w^{sh}}{a_w^{dh}} \right)$$

(2)

[收稿日期] 2010-06-17; [修订日期] 2010-08-10; [责任编辑] 郝情情。
[第一作者简介] 刘选朋(1986 年-), 2008 年毕业于华北水利水电学院, 获工学学士学位, 中国地质大学(北京)在读硕士, 从事钻井液方向研究, E-mail: liuxuanpeng001@163.com。

式中: T —温度; R —气体常数; V_w —水的偏摩尔体积; a_w^{sh} 和 a_w^{dh} —分别为页岩和钻井液的水相活度。

当 $a_w^{sh}<a_w^{dh}$ 时, $\Delta\pi$ 为负,增加滤液侵入,当 $a_w^{sh}=a_w^{dh}$ 时,页岩和钻井液间不会因水相活度差产生流体流动。泥页岩地层水与钻井液间由于水活度差所造成的化学驱动力是影响泥页岩渗透方向及大小的一个主要因素。

根据以上分析可知,通过增加滤液粘度,降低页岩的渗透率,用有效渗透压力产生的反向流动抵消因压差产生的滤液侵入等途径均可以减少滤液侵入,从而有利于井壁稳定。硅酸盐钻井液主要是通过这些途径而稳定井壁的。

硅酸盐本身具有良好的抑制性,能很好的抑制泥页岩的水化膨胀和分散,国内外学者研究一致认为:“含硅酸盐溶液抑制页岩分散能力最强,具有独特的封固作用”(Bailey L *et al.*, 1998;邱正松等, 1999;Grattoni C A *et al.*, 2001;Schlemmer R *et al.*, 2002)。硅酸盐与地层矿物反应生成沉淀封堵地层微小裂缝和孔隙,改善和提高了泥页岩的半透膜效率,抑制粘土水化膨胀和分散降低地层孔隙中压力传递速度与地层中粘土矿物发生反应。再加上配合

使用的氯化钠或氯化钾协同硅酸盐钻井液提高了抑制能力。硅酸盐在进入地层时,会变成硅酸盐凝胶堵塞裂缝和孔隙,而进入地层的硅酸根粒子(SiO_3^{2-})与地层中的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 反应,生成沉淀,起到堵漏的效果。

配方及其性能:影响硅酸盐钻井液性能的主要因素有:硅酸盐的浓度、水玻璃的模数、粘土的含量、pH 值、无机盐的类型和浓度、zeta 电位等(蓝强, 2007)。硅酸盐的模数在 2.8~3.2 之间时,水玻璃粒度分布范围最窄,粒度最均匀,浓度为 5% 时的水玻璃粒度分布范围最窄(魏新勇, 2002;徐加放, 2007)。针对兰渝铁路勘察钻探易坍塌漏失的情况,基于以上机理,利用正交实验,最终得出优选配方为:4% 土+0.3% Na-CMC+5% Na_2SiO_3 +3% KCl。其性能如下:密度 1.01g/cm^3 , pH 值为 13,失水 12.5 mL/30min,表观粘度 21mPa·s,塑性粘度 11mPa·s,动切力 10.22Pa,动塑比 0.93,六转读数 13,三转读数 10,页岩回收率为 93.2%,膨胀率为 0.1%。该体系具有良好的流变特性和页岩抑制性。基本性能指标见表 1, pH 值对硅酸盐钻井液性能影响研究见表 2。

表 1 硅酸盐钻井液性能参数

Table 1 Basic performance parameters of silicate drilling fluids									
$\rho(\text{g/cm}^3)$	FL/ml	pH	AV/cp	PV/cp	YP/Pa	动塑比	初切/Pa	终切/Pa	泥皮/mm
1.01	12.5	13	21	11	10.22	0.93	5.11	10.7	0.1

注:P—密度;FL—滤失量;AV—表观粘度;PV—塑性粘度;YP—动切力。

表 2 不同 pH 值硅酸盐钻井液性能基本数据

Table 2 Basic performance parameters of silicate drilling fluids with varied pH values								
PH 值	$\rho(\text{g/cm}^3)$	FL(ml)	AV(cp)	PV(cp)	YP(Pa)	动塑比	初切(Pa)	终切(Pa)
14	1.04	13.2	30	10	20.44	2.04	9.198	14.308
13	1.01	12.5	21	11	10.22	0.93	5.11	10.73
12	1.04	12	20.5	12	8.687	0.72	3.066	12.264
11	1.04	18.5	33	11	22.484	2.04	4.599	6.132
10	1.04	23.2	37.5	21	16.863	0.80	12.775	11.753
9	1.03	27	70	35	35.77	1.02	20.44	26.572
8	1.04	35	86.5	40	47.523	1.19	34.748	27.083

通过表 2 可知,在 pH 值为 13 的时候泥浆性能最好,随着 pH 值的降低,滤失量和粘度逐渐增大,流变性能变坏。因为水玻璃属于强碱弱酸盐,它的性能在碱性环境中才能发挥的最好,当体系的 pH 值>11.0 时,钻井液中的硅酸盐以硅酸根离子形式存在或者聚合硅醇离子形式存在,这些离子具有较

强的分散性,能够保持很好的流变性和防塌性能,随着 pH 值的降低水玻璃逐渐丧失其抑制封堵的作用,(丁锐等,1998;丁锐,1998;Nakajima *et al.*, 2002)现场应用时应及时补充消耗掉的硅酸盐,保持 pH 值>11 从而保证硅酸盐体系发挥优良的性能。一般要求钻井液的 pH 值在 9 以上,以使钻井液防塌性能和流变

性能达到和谐统一(蓝强,2007)。

硅酸盐抑制性实验研究结果见表3:

表3 页岩膨胀实验结果

Table 3 Results of dilation experiments on shale

序号	岩柱/mm	D1/mm	D2/mm	伸长/mm	膨胀率
1	7.95	0.10	0.60	0.50	6.3%
2	6.52	2.29	2.32	0.03	0.5%
3	6.83	2.35	2.38	0.03	0.44%
4	6.94	2.43	2.45	0.02	0.3%
5	7.56	3.87	3.88	0.01	0.1%

注:1:自来水(室温);2:4%土+0.3%Na-CMC;3:4%土+0.3%Na-CMC+3%KCl;4:4%土+0.3%Na-CMC+5%Na₂SiO₃;5:4%土+0.3%Na-CMC+3%KCl+5%Na₂SiO₃。

通过表3可知此水玻璃加上氯化钾的协同作用,抑制页岩膨胀的能力比较理想,膨胀率较低。硅酸盐中加入一定浓度的氯化钠和氯化钾,它们本身具有一定的抑制性,从而协同硅酸盐提高了体系的抑制性或水相活度,改善了此体系的抑制性能。

2 兰渝新建铁路的坍塌机理

钻进过程中的井壁不稳定问题原因很复杂,其主要原因可归结为力学因素、物理化学因素和工程技术措施等三个方面,但后两个因素最终均因影响井壁应力分布和井壁岩石的力学性能而造成井壁不稳定(鄢捷年,2006)。

钻井过程中保持井壁处于力学稳定的必要条件是钻井液液柱压力必须大于地层坍塌压力,且钻井液的实际当量密度低于与地层破裂压力对应的当量钻井液密度(图1)。安全钻进的钻井液密度由密度窗口确定。

安全钻进钻井液密度由公式: $P_p < P_b (P_H + P_s) < P_f$ 确定。

式中, P_p -地层孔隙压力; P_b -钻井液井底压力; P_H -钻井液静液柱压力; P_s -安全压力,考虑环空压力、激动压力等; P_f -地层破裂压力。

钻进过程中当量密度压力如果大于地层破裂压力,地层将被压裂,钻井液会大量漏失,发生井漏现象,如果小于地层坍塌压力,井壁发生坍塌,产生卡钻、埋钻事故,均会给安全钻井带来严重的影响。

物理和工程技术措施因素最终也是通过影响井壁的应力分布和井壁岩石的力学性能导致井壁失

稳,由于地层中所含的粘土矿物吸水发生水化膨胀,产生水化应力,改变了井筒周围地层的孔隙压力与应力分布,从而引起井壁岩石强度降低,地层坍塌压力发生变化。当井壁岩石所受到的周向应力超过岩石的屈服强度时,就会产生井壁失稳。而一些不当的工程措施如:起下钻速度过快、钻井液静切力过大、开泵过猛、钻头泥包等原因,均可能发生强的抽吸作用,产生过高的抽吸压力,从而降低钻井液作用于井壁的压力,造成井塌。

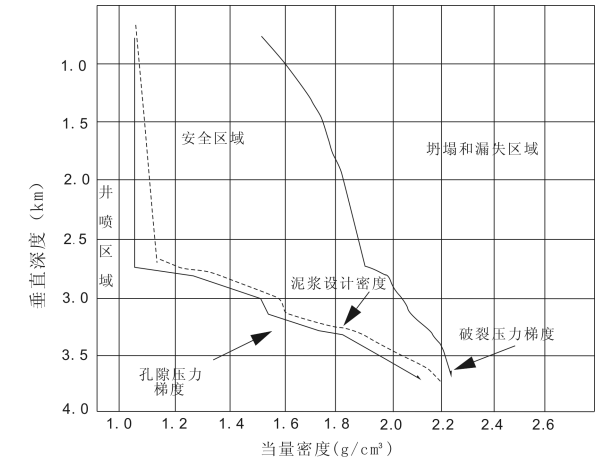


图1 由地层压力和地层破裂压力决定钻井液密度图示

Fig. 1 Determination of drilling fluid density according to formation pressure and fracture pressure

SZ-2 钻孔位于彰县殳虎桥铁沟村,钻遇地层:(1)第四系残积物、坡积物,岩性为灰绿色粘土、块石堆积物,块石成分以灰岩为主;(2)风化基岩,炭质泥岩;(3)炭质泥岩、断层破碎带。该钻孔孔深350m,地层岩性:0~70m,捣石碓;70~350m:炭质泥岩。地层倾角>85°。

SZ-2 孔的突出钻井问题为:漏失、坍塌、掉快、缩径、进尺慢,地下涌水。具体原因如下:1) 地层破裂压力比较小,而坍塌和地层压力偏高,泥浆密度窗口较窄,密度过大地层就被压裂,将发生漏失现象,过小井壁便会坍塌。如果小于地层孔隙压力,地下水将会涌入钻孔。2) 该段钻孔地层岩性为碳质泥岩,泥页岩水化会导致井壁不稳定,而水泥封孔不能解决地层倾角近乎直立的破碎的碳质泥岩钻井问题。这也为新型的防塌钻井液技术提出了更高的要求,研究新型的防塌堵漏钻井液技术迫在眉睫。

3 硅酸盐钻井液在 SZ-2 钻孔中的应用

该钻孔于 2008 年 6 月开工, 钻探情况: 上部地层漏失严重, 疏松坍塌, 采用投掷黄土球, 捣实, 钻进; 重复。70 ~ 350m, 进尺慢, 每天只钻进 1 ~ 2m, 有坍塌掉块现象, 岩心破碎。钻进过程中, 有地下水涌入, 表现在泥浆有被稀释现象; 同时, 伴有泥浆消耗, 表明产生泥浆漏失现象, 特别是未能及时调整泥浆性能时压裂地层, 发生漏失。说明地层破裂压力比较小, 而坍塌和地层压力偏高, 泥浆密度窗口小。在 324m 处, 坍塌比较严重, 下钻不能到底。

采用硅酸盐防塌抑制性钻井液后, 解决了坍塌和漏失问题, 在孔深 310 ~ 320m 处, 有地下水涌入, 采用重晶石加重以解决此问题, 每方泥浆中加入 0.36kg 的重晶石, 加重后的密度为 $1.26\text{g}/\text{cm}^3$, 解决了钻孔涌水的问题。使用此钻井液前钻进效率很低, 应用后钻进效率明显提高, 每天钻进 6~9m。

4 结论及建议

造成钻孔坍塌, 漏失的主要原因有:

(1) 该钻孔的地层破裂压力比较小, 而地层压力和坍塌压力比较大, 密度窗口较窄, 所以对密度的要求比较苛刻。可通过加重剂和稀释剂及时进行调整。

(2) 碳质泥岩的水化膨胀, 本文研究的硅酸盐钻井液具有良好的泥页岩抑制性, 再加上氯化钾的协同作用, 抑制效果明显。另外硅酸盐体系的 pH 值需保持在 11 以上, 才能更好的发挥该体系的封固和抑制分散能力, 总体起到了很好的防塌抑制目的。

建议进一步从硅酸盐的微观结构入手研究其防塌机理, 不同速度的剪切作用下、不同的组成成分、不同的温度和压力下硅酸盐的微观结构、粒径分布以及防塌效果, 以便更好的应用到构造破碎, 问题严重的泥页岩地层中。

[References]

- Alford S, Dzialowski A, Jiang P. 2001. Research into lubricity formation damage promises to expand applications for silicate drilling fluids [R]. SPE 67737; 352-364
- Bailey L, Craster B, Sawdon C. 1998. New insight into the mechanisms of shale inhibition using water based silicate drilling fluids [R]. SPE 39401
- Ding Rui, Ding Zhu. 1998. Status and development of silicate drilling fluid [J]. Petroleum Drilling Techniques, 26(3): 16-18 (in Chinese with English abstract)
- Ding Rui. 1998. Lab study on anti-collapse of silicate drilling fluids [J]. Oilfield Chemistry, 15(1): 1-5 (in Chinese with English abstract)

- Grattoni C A, Jing X D, Zimmerman R W. 2001. Disproportionate permeability reduction when a silicate gel is formed in-situ to control water production [R]. SPE 69534
- Lakatos I, Lakatos-Szabó J, Tiszai G. 1999. Application of silicate-based well treatment techniques at the Hungarian Oil Fields [A]. SPE 56739
- Lan Qiang, Qiu Zheng-song, Wang Yi, Zhang Yan. 2007. The effect of pH on silicate drilling fluid properties [J]. Oil Drilling & Production Technology, 29(3): 80-82 (in Chinese with English abstract)
- Lan Qiang, Qiu Zheng-song, Wang Yi. 2007. Study on anti-collapse mechanism of silicate drilling fluid [J]. Acta Petrolei Sinica, 28(5): 133-135 (in Chinese with English abstract)
- Liang Da-chuan, Pu Xiao-lin. 2005. Inhibition and borehole stability mechanism of silicate [J]. Drilling & Production Technology, 28(6): 105-107 (in Chinese with English abstract)
- Liang Da-chuan. 1998. The analysis of silicate drilling fluids' s borehole stability mechanism [J]. Journal of Southwest petroleum institute, 20(2): 53-60 (in Chinese with English abstract)
- Nakajima M, Bot N V. 2002. Silicate/enhanced low shear rate viscosity (LSRV) drilling fluid system and new drilling approach in Rangdong Field [R]. SPE 78148
- Qiu Zheng-song. 1999. Lab study on shale hydration inhibition of different anionic potassium muds [J]. Petroleum Drilling Techniques, 27(2): 25-27 (in Chinese with English abstract)
- Schlemmer R, Friedheim J E, Growcock F B. 2002. Membrane efficiency in shale—an empirical evaluation of drilling fluid chemistries and implication for fluid design [R]. SPE 74557
- Van Oort E. 1996. Silicate-Based drilling fluids; competent, cost-effective and benign solution to well bore stability problems [R]. IADC/SPE 35509
- Wei Xin-yong, Xiao Chao, Han Li-sheng. 2002. Study on integrated mechanism of silicate drilling fluids [J]. Petroleum Drilling Techniques, 30(2): 51-53 (in Chinese with English abstract)
- Xu Ji-fang, Qiu Zheng-song, Lv Kai-he, Yu Lian-xiang. 2007. Anti-sloughing mechanism and application of silicate drilling [J]. Petroleum Exploration and Development, 34: 622-625 (in Chinese with English abstract)
- Yan Jie-nian. 2006. Drilling fluids Technology [M]. Beijing: China Petroleum University Press; 313-314 (in Chinese)
- Yao Er-cang, Zheng Xiu-hua, Yang Ai-jun, Zhang Fu-lan, Chen Li-min. 2008. Application of recyclable foam mud in leaching in-situ sandstone type uranium deposits [J]. Geology and Prospecting, 44(5): 87-89 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Xiu-hua, Wang Jun, Zhan Mei-ping, Shen Qing-min, Cai Fu-min. 2009. The multiple efficiency of micro-bubble drilling fluid in core drilling [J]. Geology and Prospecting, 5(3): 321-324 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 丁锐, 丁铸. 1998 硅酸盐钻井液技术现状和发展趋势 [J] 石油钻

探技术,26(3):16-18

丁 锐. 1998. 硅酸盐钻井液防塌性能的室内研究[J]. 油田化学,15(1):1-5

蓝 强,邱正松,王 毅,张 妍. 2007. pH 值对硅酸盐钻井液性能的影响[J]. 石油钻采工艺,29(3):80-82

蓝 强,邱正松,王 毅. 2007. 硅酸盐钻井液防塌机理研究[J]. 石油学报,28(5):133-135

梁大川,蒲晓林. 2005. 硅酸盐抑制性及稳定井壁机理探讨[J]. 钻井工艺,28(6):105-107

梁大川. 1998. 硅酸盐钻井液稳定井壁机理分析[J]. 西南石油学院学报,20(2):53-60

邱正松. 1999. 不同阴离子钾盐抑制页岩水化作用的实验研究[J]. 石油钻探技术,27(2):25-27

魏新勇,肖 超,韩立胜. 2002. 硅酸盐钻井液综合机理研究[J]. 石油钻探技术,30(2):51-53

徐加放,邱正松,吕开河,于连香. 2007. 硅酸盐钻井液防塌机理与应用研究[J]. 石油勘探与开发,34:622-625

鄢捷年. 2006. 钻井液工艺学[M]. 北京:中国石油大学出版社:313-314

要二仓,郑秀华,杨爱军,张富兰,陈立敏. 2008. 可循环微泡沫泥浆在地浸砂岩铀矿中的应用[J]. 地质与勘探,44(5):90-93

郑秀华,王 军,詹美萍,申庆民,蔡福民. 2009. 微泡钻井液在岩心钻探中的多重功效[J]. 地质与勘探,45(3):321-324

Study of the Silicate Fluid for Prevention of Borehole-Wall Collapse and Its Application to Drilling in Carbonaceous Mudstone

LIU Xuan-peng¹, ZHENG Xiu-hua¹, WANG Zhi-min¹, WANG Jun², XIE Wei-quan²
(1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;
2. Geological Exploration Institute of Shanxi Province, Xi'an 710100)

Abstract:The silicate drilling fluid system is an agent suppression fluid dominated by inorganic salt which is used to prevent collapse of borehole wall. It has the physical and chemical sealing, a double role of wall reinforce. It can effectively reduce the penetration of wall, and impede pressure transmission. And it has good rheological properties, is non-toxic, non-fluorescent, low cost, considered with the development prospects of one of the water-based drilling fluids. In the Carbonaceous mudstone areas, drilling frequently encounters some problems, such as loss, collapse, block falling down, and water inflow, bringing about a great trouble to the safety of drilling. Meanwhile, in order to meet requirements of the engineering/hydrological data acquisition and evaluation, there are relatively strict requirements of the handling complex formation in railway survey, such as avoiding using of cement sealing. The silicate solution, which is studied in this paper, can be effectively solve the abovementioned problems and enhance the rate of taking core and the ROP.

Key words:suppression fluid, loss, collapse, carbonaceous mudstone