

探采结合水井无固相环保冲洗液的研究与应用

张统得¹, 蒋炳², 樊腊生¹, 房勇¹

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.成都理工大学环境与土木工程学院,四川成都 610059)

摘要:探采结合水井需要实现精确获取水文地质参数和解决百姓饮水难题的双重目的,因此要求钻进施工中采用的冲洗液既要具备基本的护壁防塌等功能,还需最大程度地降低对地层渗透性的影响,同时还应具有优良的环保性能。针对这一特殊要求,研发了新型的 PA-1 型无固相环保冲洗液,采用渗透性实验、电镜扫描、砂球浸泡实验等多种测试手段对冲洗液进行了室内评价与分析,结果表明 PA-1 型无固相环保冲洗液对地层渗透性影响较小,防塌护壁能力强,综合性能优于常规冲洗液体系;采用中华米虾对其进行急性毒性实验也表明其安全无毒。大量室内实验及现场应用表明,PA-1 型无固相环保冲洗液各项性能优良,可为今后在探采结合水井施工中冲洗液的合理选用提供参考。

关键词:探采结合水井;无固相冲洗液;渗透性;防塌护壁性;毒性评价

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)06-0001-07

Research and application of solid-free environment-friendly drilling fluid for exploration and production well drilling

ZHANG Tongde¹, JIANG Bing², FAN Lasheng¹, FANG Yong¹

(1.*Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;*

2.*College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China*)

Abstract: Exploration and production wells need to achieve the dual purposes of accurately obtaining hydrogeological parameters and providing drinking water for the people. Therefore, the drilling fluid is required not only to have basic wall protection and anti-collapse functions, but also to minimize the impact on formation permeability; and to have good environmental protection as well. In light of this special requirement, a new PA-1 type solid-free drilling fluid was developed. Permeability test, SEM and sand ball immersion test were conducted to evaluate and analyze the drilling fluid in the laboratory, and the results showed that PA-1 solid-free drilling fluid has little influence on formation permeability and strong ability to prevent collapse with comprehensive performance superior to the conventional drilling fluid system. In addition, the acute toxicity test on Chinese rice shrimp showed that it is safe and non-toxic. Laboratory experiments and field applications have proven that PA-1 solid-free flushing fluid has excellent performance, which can be an alternative for selection of drilling fluid in exploration and production well construction in the future.

Key words: exploration and production well; solid-free drilling fluid; permeability; anti-collapse performance; toxicity evaluation

0 引言

近年来,针对全面建成小康社会、脱贫攻坚、生态文明建设的国家目标和要求,以解决岩溶区干旱

缺水、群众饮水困难、促进地下水合理开发利用、服务生态环境保护为核心,中国地质调查局在我国多个地区部署了水文地质环境地质综合调查工作。按

收稿日期:2019-11-28; **修回日期:**2020-06-02 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.06.001

基金项目:国家重点研发计划课题“绿色环保冲洗液体系与废浆处理技术”(编号:2018YFC0603406);中国地质调查局地质调查项目“雄安新区地热清洁能源调查评价”(编号:DD20189626)

作者简介:张统得,男,汉族,1987年生,工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事钻探技术方面的研究工作,四川省成都市郫县成都现代工业港北区港华路 139 号,ztd8795@126.com。

引用格式:张统得,蒋炳,樊腊生,等.探采结合水井无固相环保冲洗液的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):1-7.

ZHANG Tongde, JIANG Bing, FAN Lasheng, et al. Research and application of solid-free environment-friendly drilling fluid for exploration and production well drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(6):1-7.

照工作要求,需要在一些集中连片贫困缺水地区实施探采结合水井工程,该项工程将传统的水文地质钻探与水井施工相结合,以实现精确获取水文地质参数和解决百姓饮水难题的双重目的^[1]。

目前,探采结合水井的实施主要采用两种工艺,分别为回转取心钻进和空气潜孔锤钻进,其中又以回转取心钻进技术较为常见,其最大优点是能准确获取地层的岩心实物资料,且成本相对较低、对施工场地要求较低,但由于回转钻进工艺是采用泥浆或清水作为循环介质,极易对地层渗透性产生影响,尤其在破碎地层为了保证安全钻进所采用的高固相、高粘度、高切力泥浆在井壁上形成较厚泥饼,严重影响地层出水量,且环保性较差;而若采用清水钻进则难以保证井壁稳定^[1-2]。因此,在施工探采结合水井过程中采用适宜的冲洗液至关重要。

通常探采结合水井含水层位于第四系卵砾石、砂砾石层、基岩风化带或断层破碎带处,裂隙较为发育^[3]。采用清水钻进该类地层往往难以钻达设计井

深,需要借助冲洗液护壁,但因探采结合水井钻进的特殊性质要求冲洗液不仅应具有防塌护壁、冷却钻头、润滑钻具、携带岩粉等常规功能,还应尽量减轻对含水地层性质的不利影响,具体表现为:(1)尽量采用无固相或低固相体系,以降低冲洗液对近井壁裂隙的堵塞;(2)具有无毒、环保特性,以满足后期生产生活对水质的要求^[4-6]。因此,针对上述特殊要求,研发了新型无固相环保型冲洗液体系。

1 冲洗液体系室内实验研究

1.1 基本体系与性能

基于前述探采结合水井钻探施工对冲洗液的基本要求,结合施工具体地层条件,研发了以PA-1为主剂的新型无固相环保冲洗液体系。为了充分评价该体系的各项性能,将其与常用的植物胶无固相冲洗液、PHP无固相冲洗液以及不分散低固相冲洗液体系进行了室内实验对比。各体系具体配方及性能指标如表1所示。

表1 不同冲洗液体系性能指标
Table 1 Performance index of different drilling fluid systems

冲洗液体系	冲洗液配方	性能指标						pH值
		$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	FV/ s	AV/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	PV/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	YP/ Pa	Gel(10 s/ 10 min)/Pa	
PA-1 无固相冲洗液	清水+2%PA-1+0.2%交联剂	1.01	22	5.0	3	2.0	0.0/0.5	7.5
植物胶无固相冲洗液	清水+0.02%PHP+0.3%植物胶+0.02%NaOH	1.01	28	6.0	4	2.0	0.25/0.5	10.0
PHP 无固相冲洗液	清水+0.4%PHP	1.01	26	6.5	5	1.5	0.0/0.5	7.5
不分散低固相冲洗液	清水+5%膨润土+0.2%Na ₂ CO ₃ +0.5%LV -CMC+0.03%PHP	1.04	30	21.0	17	4.0	1.0/1.5	9.0

注: ρ —冲洗液密度;FV—冲洗液的苏式漏斗粘度;AV、PV和YP—分别为冲洗液的表现粘度、塑性粘度和动切力;Gel(10 s/10 min)—冲洗液的静切力。

1.2 渗透性实验

1.2.1 实验仪器及原理

本次渗透性影响实验主要利用FA-1无渗透仪进行常水头法模拟测试。其基本工作原理:在无渗透仪顶端的高压进气口连接压缩空气,以提供恒定的高压气体进入盛有模拟岩样和冲洗液(或清水)的可视玻璃管内,形成压差,驱动冲洗液(或清水)流经模拟岩样后进入量杯,并在一定时间内测量其渗流量,进而评价冲洗液对岩样的渗透性影响^[7],实验装置及示意图如图1所示。

根据渗透系数的定义,它表示在各向同性介质中,单位水力梯度下的单位流量,表示流体通过孔隙骨架的难易程度。岩石的渗透系数越大,透水性越强,反之越弱。其计算公式为:

$$K = QL / (\Delta h \cdot At) \quad (1)$$

式中: K ——地层的渗透系数,cm/s; Q ——渗透流量,mL; L ——模拟岩样的长度,cm,本次实验为定值20 cm; Δh ——水头差,cm,本次实验模拟为定值7000 cm; A ——模拟岩样断面积,cm²,本次实验为定值18.09 cm²; t ——冲洗液渗流模拟地层的时间,s。

1.2.2 实验方法及结果

根据以往工作经验,探采结合水井含水层通常在50~100 m,为了尽可能模拟实际钻探过程中不同冲洗液对地层渗透性的影响,采用0.7 MPa(约为70 m的水头势差)的恒定压缩空气模拟水头差,分别选用20~40、40~60目的不同粒径砂粒模拟不同孔隙大小的地层,进行不同冲洗液侵入前后的渗透

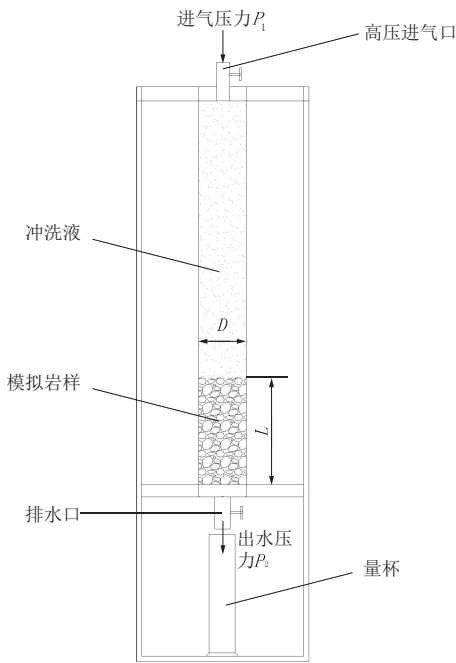


图 1 渗透性模拟实验仪器及原理

Fig.1 Schematic diagram of the permeability test device and test principle

性模拟实验,计算相应结果,进而评价不同冲洗液对地层的渗透性影响。具体实验结果见表 2。

表 2 不同冲洗液对模拟岩样的渗透性影响实验结果

Table 2 Effects of different drilling fluids on permeability of experimental rock samples

冲洗液体系	模拟岩样粒径/目	冲洗液侵入前渗透系数/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	冲洗液侵入后渗透系数/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	冲洗液侵入后渗透系数降低率/%
PA-1 无固相冲洗液	40~60	0.0058	0.00395	32.14
	20~40	0.0123	0.00921	25.00
植物胶无固相冲洗液	40~60	0.0058	0.00006	98.94
	20~40	0.0123	0.00191	84.48
PHP 无固相冲洗液	40~60	0.0058	0.00357	38.71
	20~40	0.0123	0.00790	35.71
不分散低固相冲洗液	40~60	0.0058	0.00013	97.74
	20~40	0.0123	0.00230	81.25

1.2.3 结果分析与渗透性影响机理讨论

根据以上实验结果可以得知:不同冲洗液侵入岩样后对其渗透性的影响有较大区别,其中 PA-1 及 PHP 无固相冲洗液对岩样进行模拟侵入后渗透系数降低率较小,而植物胶无固相冲洗液及不分散低固相冲洗液侵入模拟岩样后渗透系数大幅降低;此外,同种冲洗液对模拟不同孔隙的岩样渗透性影响也有较大区别,对孔隙较小的岩样渗透系数降低率较大,而对孔隙较大的模拟地层渗透系数降低率

较小。如采用 40~60 目砂粒制成的岩样经过植物胶无固相冲洗液及不分散低固相冲洗液侵入之后近乎完全封堵,渗透系数降低率达到 98.94% 及 97.74%,而 20~40 目砂粒制成的岩样渗透系数降低率分别为 84.48% 及 81.25%。

为了进一步了解不同冲洗液对渗透性的影响机理,对模拟冲洗液侵入后的岩样表面取样进行扫描电镜(SEM)观察,从微观角度揭示其空间结构和形态特征,发现在经过 PA-1 及 PHP 无固相冲洗液侵入后,岩样表面基本保持原有孔隙形态(图 2a),无固相颗粒填充,仅因其中高分子聚合物吸附胶结于岩样颗粒之间,使得流体的流动阻力增大,造成岩样的渗透性降低,对岩样的渗透性影响相对较小;而经过植物胶冲洗液及低固相冲洗液侵入后的岩样表面均附着了一层较厚泥皮,进一步研究发现经植物胶冲洗液侵入后的岩样表面主要被一些大小不一、形态各异的颗粒性材料所堵塞(图 2b),在压差作用下形成屏蔽封堵,导致岩样渗透系数大大降低;不分散低固相冲洗液则是在压差作用下冲洗液中的片状粘土颗粒在砂样表面渗透沉积(图 2c),形成一道坚实的封隔屏障,降低了岩样的渗透系数。

1.3 护壁防塌性能评价

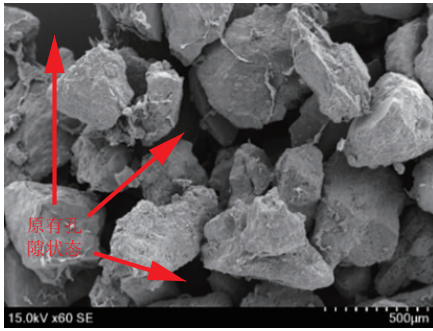
冲洗液的护壁防塌性能评价方法主要有岩屑滚动回收实验、CST 值法、膨胀量测定法、失水量评价法等^[8-9],上述方法主要用于含膨润土水敏性地层的防塌实验评价,但探采结合水井钻遇地层通常包含松散弱胶结的覆盖层或断层破碎带,冲洗液的胶结防塌能力应为关注重点,因此,本文采用砂球浸泡实验评价冲洗液的护壁防塌性。

1.3.1 实验方法及结果

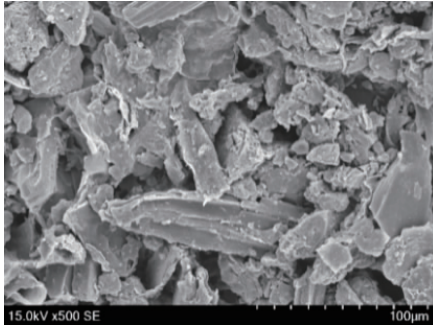
采用 40 目以细的洁净河砂掺入适量清水制成 25 mm 大小均匀砂球,再进行烘干待用;正式浸泡前先将砂球完全浸入配制好的各类冲洗液中 1 min,再迅速将砂球移至清水中浸泡,观察砂球的形态特征,浸泡时间越长且不发生垮塌或变形的冲洗液防塌性能越好。实验结果见表 3,浸泡至 24 h 后砂球形态见图 3。

1.3.2 评价结果与防塌机理分析

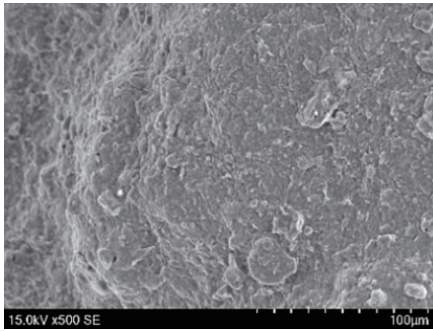
制作砂球经过 PA-1 无固相冲洗液浸泡之后再清水中浸泡能长时间的保持原状,表明 PA-1 冲洗液对砂球具有良好的胶结防塌作用,而植物胶无固相冲洗液、PHP 无固相冲洗液、不分散低固相



(a) 经PA-1冲洗液侵入岩样表面(放大倍数60)



(b) 经植物胶冲洗液侵入岩样表面(放大倍数500)



(c) 经不分散低固相冲洗液侵入岩样表面(放大倍数500)

图2 不同冲洗液侵入后岩样表面扫描电镜图

Fig.2 SEM images of rock sample surface after invasion by different drilling fluids



清水

PA-1无固相冲洗液

植物胶无固相冲洗液

PHP无固相冲洗液

不分散低固相冲洗液

图3 不同冲洗液浸泡砂球24 h后形态

Fig.3 Shape of sand balls soaked in different drilling fluids for 24 hours

表3 不同冲洗液体系对砂球浸泡实验情况

Table 3 Immersion test of sand balls with different drilling fluids

冲洗液体系	砂球浸泡情况
清水	遇水立即垮塌
PA-1 无固相冲洗液	24 h 基本保持原样,无明显开裂、变形特征
植物胶无固相冲洗液	10 min 后出现小裂缝,随后开裂现象加重,至 30 min 后完全坍塌
PHP 无固相冲洗液	4 min 后变形严重,20 min 后完全垮塌
不分散低固相冲洗液	1 min 即发生开裂并逐步垮塌

冲洗液的胶结防塌能力依次降低。

防塌机理分析:PA-1 为线型高分子聚合物,主体构型对称性好且侧链小,其中含有大量羟基(-OH),以平卧吸附的方式有效地吸附在砂粒表面并形成一道高分子膜^[10-11],而在交联剂的作用下加快了成膜速度并提高了膜的致密性,起着较好的保护作用,同时固相颗粒之间也通过这种吸附胶结在一起(见图4),进一步提高了整体的防塌能力;虽然植物胶和 PHP 也具有大量的羟基、酰胺基(-CONH₂)等吸附基团,对砂粒也具有一定的吸附胶结能力,但其吸附方式为多点环吸附,且分子主链构型复杂(如植物胶主链上分布有环状结构链节),导致柔顺性较差,形成的吸附膜较为松弛,对砂粒的吸附效果相对较差,此外受钻进工艺对冲洗液粘度要求,聚合物浓度不能太高,导致冲洗液整体胶结防塌能力也较弱^[12-13];不分散低固相冲洗液的胶结防塌则主要依靠在一定压差作用下形成的泥皮对松散砂粒形成包裹胶结,而砂球在浸泡时因不能形成致密泥皮,导致在实验中表现出的胶结防塌能力较差。

2 冲洗液急性毒性评价

为了评价 PA-1 冲洗液体系的生物毒性,鉴于

当前无陆上钻井液生物毒性检测标准的现状,参照中华人民共和国国家标准《海洋石油勘探开发污染生物毒性》(GB/T 18420.2-2009)及美国环保局

(EPA)批准的糠虾生物实验法^[14-15],结合实际情况改进后进行急性毒性测试实验,用 96 h 半数致死浓度 LC₅₀ 值划分毒性水平。根据相关标准,需要

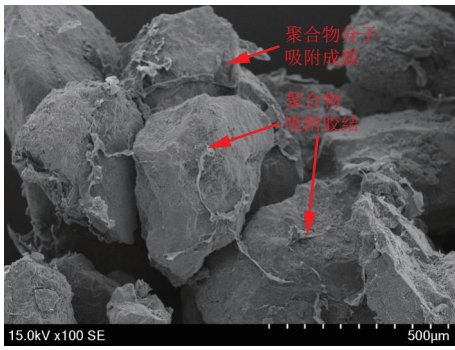


图 4 高分子聚合物在岩样表面吸附扫描电镜图

Fig.4 SEM image of polymer adsorption on rock sample surface

采用黑褐新糠虾来进行实验,黑褐新糠虾属于盐水型虾,本次实验选取淡水型中华米虾替代黑褐新糠虾进行急性毒性实验。中华米虾属于匙指虾科的一种小型虾种,成体体长介于 2~3 cm,体色多变,常生活在水草茂密的水域,以藻类和动植物尸体为食^[16]。

2.1 实验方法及过程

中华米虾的实验室培养:采集中华米虾之后,于实验室中进行长期驯化培养,实验室中所用水均无污染,定时投喂藻类,定期更换饲养用水,长期通气。饲养 7 d 后,选取成年健康中华米虾进行实验。

实验样品制备:将 PA-1 冲洗液制备好后摇匀,按体积比取 1 份冲洗液加入 9 份稀释水,用电动搅拌机搅拌 15 min 以上,然后加水稀释至设定最高浓度,继续搅拌 5 min,静置 2 h,取中上层清液备用。

实验过程:对冲洗液的毒性范围进行预实验,设定正式实验浓度。实验分为 7 组(含对照组),每组平行 2 个 2000 mL 烧杯,加入中华米虾个体,每杯 20 尾。每隔 24 h 观察记录个体死亡情况,清除死虾个体,至 96 h 后结束实验。

2.2 实验结果与分析

实验结束后,采用概率单位-对数图解法进行 96 h 时 LC₅₀ 值的计算,其结果见表 4。

表 4 中华米虾不同时间段死亡个数

Table 4 Number of dead denticulata sinensis at different times

剂量/ (mg · L ⁻¹)	不同时间死亡个体数量/个			
	24 h	48 h	72 h	96 h
0	0	0	0	0
10000	0	0	0	0
20000	0	0	0	2
30000	0	0	3	4
40000	0	4	6	7
50000	2	4	8	11
60000	3	5	13	20

对实验结果进行整理,得出剂量对数及概率单位数据,详见表 5。

表 5 剂量对数及概率单位结果

Table 5 Results of dosage logarithms and probability units

剂量/(mg · L ⁻¹)	剂量对数	死亡概率/%	概率单位
0		0	3.04
10000	4.000	0	3.04
20000	4.301	10	3.72
30000	4.477	20	4.16
40000	4.602	35	4.61
50000	4.699	55	5.13
60000	4.778	100	7.24

根据剂量对数和概率单位画出散点图(图 5)。按照各点分布趋势,以最接近各个点的方式画直线(图中虚线),通过此直线,得出概率单位为 5.00 时的剂量对数。再取其剂量对数的反对数即可得出冲洗液的 LC₅₀ 值。

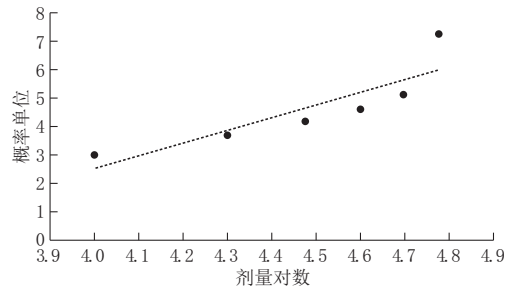


图 5 急性毒性实验散点图

Fig.5 Scattered dot diagram of acute toxicity experiment

采用上述计算方法本次实验所得出的 LC₅₀ 值 = 35481.34 mg/L。根据《海洋石油勘探开发污染生物毒性》(GB/T 18420.2-2009)相关标准(见表 6),其海区等级为一级的水基钻井液生物毒性容许值为 30000 mg/L;根据美国环保局(USEPA)提出的急性毒性等级划分标准 LC₅₀ > 10000 mg/L 即为无毒等级(见表 7)。因此,本次无固相冲洗液室内评价 LC₅₀ 值为 35481.34 mg/L,均超过了上述两个标准的生物毒性容许值及无毒等级指标要求,表明该冲洗液无毒且完全符合排放标准。

表 6 钻井液生物毒性容许值

Table 6 Allowable biotoxicity values for drilling fluids

钻井液类型	海区等级	生物毒性容许值/(mg · L ⁻¹)
水基钻井液	一级	30000
	二级	20000
非水基钻井液	一级	15000
	二级	10000

表7 美国钻井液毒性等级分类

Table 7 Toxicity classification of drilling fluids in United States

毒性等级	LC50/(mg·L ⁻¹)
剧毒	<1
重毒	1~100
中毒	101~1000
微毒	1001~10000
无毒	>10000

3 现场应用情况

2017年9月,在湖南省宜章县天塘镇肖家村实施一口探采结合水井(ZK-15),设计井深130 m。为了保证地层出水量及准确获取地层参数要求尽量采用清水钻进,但该井处于一近东西向的断层带上,地层主要为白云岩及灰岩等,受构造影响局部井段地层极其破碎,节理裂隙发育。开始采用清水钻进,但在上部松散强风化地层井段即发生下钻不到底、憋钻等复杂情况,为了保证该井的顺利施工,后采用PA-1型无固相冲洗液,顺利通过8~30 m、93~95 m、120~128 m等多个断层破碎带(图6),并钻进至133.67 m满足设计井深后完钻。



图6 ZK-15探采结合水井破碎岩心

Fig.6 Broken cores from ZK-15 exploration and production well

后期经过充分洗井和抽水试验,实抽最大涌水量达到611 m³/d,未对含水层渗透性造成明显影响;对水样进行化验分析,地下水化学组分含量中等,感官性状及一般化学指标、毒理学指标满足相关

要求,按照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)进行分类评级为Ⅲ级,主要适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水^[17]。

2017年采用PA-1型无固相冲洗液在湖南、广西、广东等严重缺水区顺利实施探采结合水井15口,总进尺1862.21 m,成井8口,实抽最大涌水量为2702.27 m³/d,既节约了钻井施工成本,也有利于准确获取水文地质参数,更重要的是很好地解决了当地缺水群众的生产生活用水难题,为超过1.6万人提供了安全用水保障,具有重大的民生意义。

4 结论

(1)室内实验表明不同冲洗液对探采结合水井施工中所钻遇的松散弱胶结及微裂隙发育地层渗透性有较大影响,其中PA-1型无固相冲洗液、PHP无固相冲洗液侵入后对地层渗透性影响小于植物胶无固相冲洗液及不分散低固相冲洗液;且同种类型的冲洗液对地层渗透系数的降低率与地层孔隙尺寸有较大的关系,其中对孔隙较小地层的渗透系数降低率要高于孔隙较大地层。

(2)通过渗透性模拟实验及扫描电镜对模拟岩样表面进行观察分析,PA-1型及PHP无固相冲洗液对地层渗透性的影响主要来自于冲洗液侵入导致流体的流动阻力增大进而引发渗透系数降低;而植物胶无固相冲洗液及不分散低固相冲洗液则主要是由于其自身所含有的大量的不规则微小植物纤维颗粒或片状粘土颗粒在压差作用下封堵地层微裂隙,导致渗透系数降低。

(3)通过室内实验及现场应用实践表明,PA-1型无固相冲洗液对松散软弱破碎地层的井壁具有较强的胶结防塌能力,同时通过急性毒性实验评价,其LC50值=35481.34 mg/L,按照毒性等级分类属于“无毒”等级,环保性较好,满足探采结合水井施工对水质的要求。

参考文献(References):

- [1] 张统得,严君凤,房勇,等.空气潜孔锤钻进技术在乌蒙山地下水探采结合工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):238-241.
- ZHANG Tongde, YAN Junfeng, FANG Yong, et al. Application of pneumatic DTH drilling technology in Wumeng Mountain groundwater exploration and production project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):238-241.

- [2] 王康年.传统钻井工艺与空气潜孔锤钻进综合技术在西南缺水地区水井钻探中的应用[J].贵州地质,2012,29(2):135-139. WANG Kangnian. Application of traditional drilling and DTH hammer drilling technology in water drilling in Southwest Area[J]. Guizhou Geology, 2012,29(2):135-139.
- [3] 赵铭琪.水文水井冲洗液渗透恢复率的试验研究[J].水文地质工程地质,1988(1):49-51. ZHAO Mingqi. Experimental study on permeability recovery rate of drilling fluids for hydrological well drilling[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1988(1):49-51.
- [4] 郑继天,李小杰,关晓琳.水文地质钻探冲洗液的选用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):242-244. ZHENG Jitian, LI Xiaojie, GUAN Xiaolin. Selection of drilling fluid for hydro-geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):242-244.
- [5] 中国地质调查局.水文地质手册[M].北京:地质出版社,2012. China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [6] 吴跃钢,徐菁.无固相弱凝胶钻井液在水井施工中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):261-264. WU Yuegang, XU Jing. Application of solid-free weak gel drilling fluid in water well construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):261-264.
- [7] 阮文军,黄有魁.钻井冲洗液对水井出水量影响规律的模拟试验研究及其应用[J].地质与勘探,2001,37(6):76-79. RUAN Wenjun, HUANG Youkui. Research on regularity of water well Yield influenced by drilling fluids through simulated test and its application[J]. Geology and Exploration, 2001,37(6):76-79.
- [8] 韦猛,曾一芳,朱金勇,等.含煤地层封堵抑制型钻井液添加剂的研究[J].煤田地质与勘探,2018,46(6):212-216. WEI Meng, ZENG Yifang, ZHU Jinyong, et al. Study on inhibited plugging additives of drilling fluid for coal-bearing strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2018,46(6):212-216.
- [9] 李恒,何世明,汤明,等.塔里木盆地深部煤层失稳机理及防塌钻井液技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(4):212-218. LI Heng, HE Shiming, TANG Ming, et al. Instability mechanism and anti-sloughing drilling fluid technique for deep coal seam of Tarim Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2019,46(4):212-216.
- [10] 王文臣.钻孔冲洗与注浆[M].北京:冶金工业出版社,1996:102-111. WANG Wenchen. Drilling flushing and grouting[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996:102-111.
- [11] 代国忠,张亚兴,赖文辉,等.PVM 聚合物型无固相钻井液研究与应用[J].地质与勘探,2010,46(6):1127-1132. DAI Guozhong, ZHANG Yaxing, LAI Wenhui, et al. Study on solid-free drilling fluid of PVM polymer and its application[J]. Geology and Exploration, 2010,46(6):1127-1132.
- [12] 占祥烈,徐力生,李月良,等.植物胶冲洗液特殊功能及其作用机理的分析与探讨[J].勘察科学技术,2009(2):34-36. ZHAN Yanglie, XU Lisheng, LI Yueliang, et al. Analysis and discussion on the special function and its mechanism of vegetable gum drilling fluid[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009(2):34-36.
- [13] 王胜,陈礼仪,黄猛,等.新型 KL 植物胶无固相环保钻井液体系[J].煤田地质与勘探,2010,38(3):76-80. WANG Sheng, CHEN Liyi, HUANG Meng, et al. New type KL plant glue solid free drilling fluid system for environmental protection[J]. Coal Geology & Exploration, 2010,38(3):76-80.
- [14] GB/T 18420-2009,海洋石油勘探开发污染物生物毒性[S]. GB/T 18420-2009, Biological toxicity for pollutants from marine petroleum exploration and exploitation[S].
- [15] 王东,冯定,张兆康.海上油田废弃钻井液的毒性评价及无害化处理技术研究进展[J].环境科学与管理,2011,36(6):78-83. WANG Dong, FENG Ding, ZHANG Zhaokang. Technical progress on toxicity assessment and innocuous treatment of wasted drilling fluid from offshore oilfield[J]. Environmental Science and Management, 2011,36(6):78-83.
- [16] 张保森,李守春,冯志国,等.大庆油田钻井液对中华米虾的毒性研究[J].黑龙江环境通报,1999,23(1):18-20. ZHANG Baosen, LI Shouchun, FENG Zhiguo, et al. The research of the toxicity for denticulata siensia with drilling fluid in Daqing Oil Field [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 1999,23(1):18-20.
- [17] GB/T 14848-2017,地下水质量标准[S]. GB/T 14848-2017, Standard for groundwater quality[S].

(编辑 韩丽丽)