柴达木盆地石圈滩地区铀矿钻探冲洗液研究与应用

龚美鑫，汪成勇，陈　擎*，荣　骁
（核工业二〇三研究所，陕西 西安 712000）

摘要：柴达木盆地石圈滩地区铀矿资源调查评价钻探中钻遇地层高压异常，0～600 m地层压力系数为1.25～1.4；地层易溶，含盐量最高达1.025%，钻孔资料较少，在钻探过程中经常出现卡钻、塌孔等严重孔内事故。通过对该区地层进行岩性特征分析，根据地层特点进行冲洗液造浆粘土与处理剂优选，提出了一套适用于该区地层的抗盐防塌冲洗液体系，该体系具有良好的抗盐防塌性能，主要表现为：表观粘度38 mPa•s、动切力16.4 Pa、API滤失量4～5 mL、泥皮厚度0.3～0.4 mm，薄且致密，护壁效果良好。有效解决了该地区施工盐膏层缩径、塌孔及高压异常条件下冲洗液失稳等难题，平均台月效率从729.76 m提升至1378.78 m，孔径扩大率从130%下降至19.4%，泥浆材料和用水成本从57.91元/m降至38.92元/m，在现场实际应用中取得了良好的经济效益，具有推广应用价值。

关键词：铀矿钻探；高压异常；抗盐防塌冲洗液；盐膏层；柴达木盆地
中图分类号：P634.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2023)04-0057-07

Research and application of flushing fluid for uranium deposits drilling in Shiquantan area, Qaidam Basin

GONG Meixin, WANG Chengyong, CHEN Qing*, RONG Xiao
(*No.*203 *Research Institute of Nuclear Industry, Xi'an Shaanxi* 712000, *China*)

Abstract: During the investigation and evaluation of Uranium deposits in Shiquantan area of Qaidam Basin, the formation pressure anomaly was encountered. The formation pressure coefficient of 0～600m is 1.25～1.4. The formation is easily soluble with a high salt content of up to 1.025%. Accidents such as stuck and collapse usually happened during the drlling process as drilling information about this area is less. In this paper, a set of anti-salt and anti-collapse flushing fluid system suitable for the strata in this area is proposed by analyzing the lithological characteristics of the strata in this area, and preferentially selecting the corresponding slurry-making clay and treatment agent for the flushing fluid. As a result, this systerm has good anti-salt and anti-collapse performance, mainly showing as follows: the apparent viscosity 38MPa•s, the dynamic shear force is 16.4Pa, the API filter vector is 4～5mL, the mud skin is thin and dense with the thickness of 0.3～0.4mm which has good wall protection effect. It effectively solved the problems such as shrinkage in salt-gypsum layers, hole collapse and destabilization of flushing fluid under abnormal conditions of high pressure in this area. As a result, the average monthly efficiency is increased from 729.76m to 1378.78m, the hole expansion rate is reduced from 130% to 19.4%, and the cost of mud material and water is reduced from 57.91RMB/m to 38.92RMB/m. Good economic benefits have been achieved in practical application in the field which make it has the value of popularization and application.

Key words: uranium deposit drilling; abnormal high pressure; anti-salt and anti-collapse flushing fluid; salt-gypsum bed; Qaidam Basin

收稿日期：2022-11-12；**修回日期**：2023-03-25　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2023.04.008
基金项目：中国核工业地质局项目"地浸砂岩型铀矿高效取心工艺研究"(编号：202110-5)

第一作者：龚美鑫，男，汉族，1997年生，助理工程师，勘查技术与工程(钻探工程)专业，主要从事钻井液技术、钻探工艺研究工作，陕西省西咸新区沣东新城科源三路869号，hgygmx@163.com。
通信作者：陈擎，男，汉族，1987年生，高级工程师，资源勘查工程专业，主要从事铀矿勘查及科研工作，陕西省西咸新区沣东新城科源三路869号，quanjiawna88@126.com。

引用格式：龚美鑫，汪成勇，陈擎，等.柴达木盆地石圈滩地区铀矿钻探冲洗液研究与应用[J].钻探工程，2023，50(4)：57-63.
GONG Meixin, WANG Chengyong, CHEN Qing, et al. Research and application of flushing fluid for uranium deposits drilling in Shiquantan area, Qaidam Basin[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 57-63.

0 引言

我国盐膏层广泛分布于华北、新疆、青海、重庆、江汉和长庆等地区[1-2]。柴达木盆地盐膏层埋藏较深、厚度较大,在地质钻探过程中,由于盐岩层的塑性蠕动易造成卡钻[3-9]、孔内坍塌等工程事故,形成不规则井眼,影响井身质量,给钻探作业带来较高技术难度及安全风险。钻遇岩盐地层时,冲洗液容易受到污染,导致其丧失粘度、切力,无法维持正常作业性能需求。因此,在柴达木盆地石圈滩地区施工钻孔中岩盐地层的安全顺利施工是该地区的最大难题,维持冲洗液体系性能稳定是岩盐地层施工钻孔的关键技术之一[10]。

2021年我单位在柴达木盆地石圈滩地区施工铀矿资源调查评价钻孔4个,采用正循环回转钻进,钻探工作量共计2437.87 m。其中上半年施工钻孔ZKLH12-1和ZKLH19-1因相关地质资料欠缺,施工经验不足,均发生不同程度孔内事故。ZKLH19-1在钻进到472 m时钻遇浅层气发生小规模井喷,孔内正常后继续施工到510 m发生卡钻事故,最终因孔内气压较高、施工风险太高停止施工。ZKLH12-1孔在施工到597 m时发生钻杆折断事故,打捞3天无果挪孔后重新施工,新孔位施工至695 m时再次发生钻杆折断事故,该孔累计施工51天,报废工作量597 m。测井数据表明,两个钻孔孔径均不同程度扩大,其中ZKLH12-1钻孔孔径扩大率达到145.34%。两孔接连发生孔内事故,给单位带来严重经济损失,影响地质找矿进展。因此,特对该区岩石的理化性能进行分析,开展针对性冲洗液室内研究与现场试验,提高钻进效率。

1 地质概况

石圈滩工区位于柴达木盆地柴北缘隆起区赛昆断陷亚区冷湖构造带西北端,其西面是阿尔金山,北面为祁连山,南面为昆特依凹陷,东面是赛什腾凹陷。地表条件较复杂,主要为丘陵、戈壁、碱滩、沼泽、盐湖和风蚀残丘,局部出露下第三系或中生界。区内断裂构造较发育,多为燕山期逆冲断层,断层产状较陡,走向为NWW、WE,地层具有西高东低、南深北浅的特征。

钻遇地层主要为古近系路乐河组和侏罗系小煤沟组。路乐河组以粗碎屑岩为主,颜色多呈棕红色、浅棕红色,局部受油气还原或高岭土化影响呈灰白色。沉积物粒度较粗,多为中、粗砂岩,砾岩,岩石分选差,泥质杂基含量较高,为一套冲积扇相沉积,地层中较大粒径的砾石坚硬,可钻性及研磨性较强,但地层松散,岩心采取率低,易造成塌孔。小煤沟组浅灰色、灰色泥岩,粉砂质泥岩,炭质泥岩与浅黄色、灰白色、灰色砂岩,砾状砂岩,砾岩互层,为一套扇三角洲前缘相沉积。小煤沟组具有较好的“泥-砂-泥”结构,是施工区主要的找矿目的层。由于揭露侏罗系小煤沟组找矿目的层,需揭穿上伏古近系路乐河组地层,而路乐河组地层整体含盐度较高,给钻探查证造成了较大的技术难度。

2 岩心理化性能分析

为探究石圈滩工区地层岩性,取古近系路乐河组岩样及侏罗系小煤沟组岩样进行岩性与孔隙结构等理化性能分析。分别采用正交偏光显微镜、X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、Auto-pore IV 9520高压压汞仪、JHGP气体渗透率测定仪、JC2000DM接触角测量仪对岩样进行定性和定量测试与分析。

2.1 岩性分析

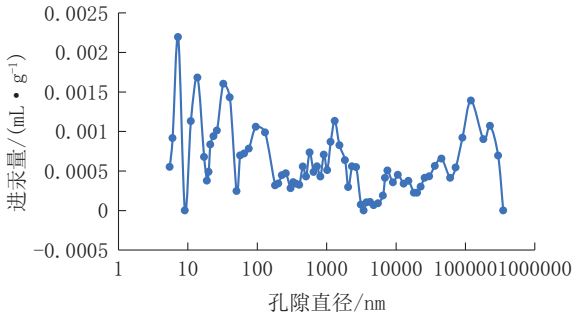
首先,采用偏光显微镜对岩心磨片观察,综合XRD分析结果确定岩样矿物成分及相对含量。薄片分析结果显示,两组岩样属于石英质岩屑砂岩,主要由石英、长石和石膏等构成。矿物粒径大都在50~300 μm之间,部分粒径可达500 μm,颗粒分选中等,多呈多边形状或椭圆状,碎屑结构分布较多。

XRD分析结果显示,该地层岩心成分复杂,含有12种矿物,地层中所含盐份成分以NaCl和KCl为主,该地层易溶含盐量最高达到1.025%,远高于盐渍土定义中0.3%的含盐量标准。

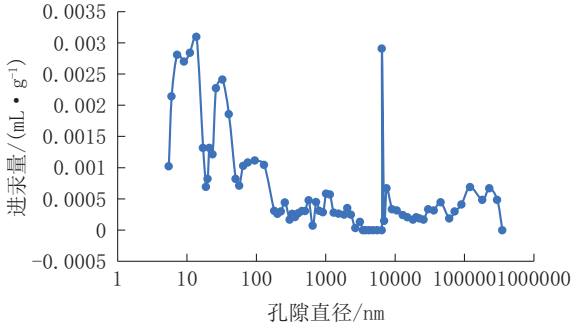
2.2 孔隙及润湿性分析

依据《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第1部分:压汞法》(GB/T 21650.1—2008)测定岩样孔径分布情况,结合SEM测试、气体渗透率实验、润湿性实验对岩样孔隙情况进行定量分析。实验结果见图1~3。

实验结果表明,古近系路乐河组岩心的孔隙主要分布在孔隙直径为10、40、60 nm以及100、300 μm处,孔隙度为10%(图1a)。由SEM图像(图2a)可知岩样裂隙发育,裂隙宽度3~10 μm,长度可达100~400 μm,片状结构分布于岩样裂隙周围,鳞片



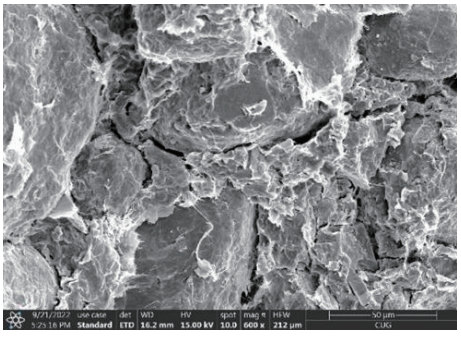
(a)古近系路乐河组



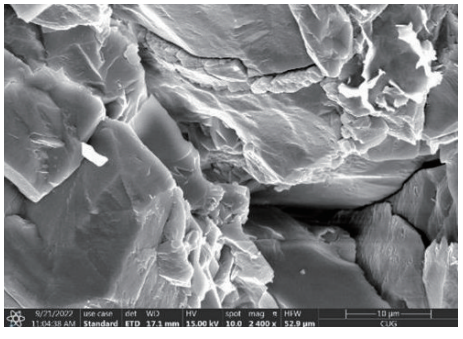
(b)侏罗系小煤沟组

图1　岩心压汞试验曲线

Fig.1　The mercury injection test curve of the core



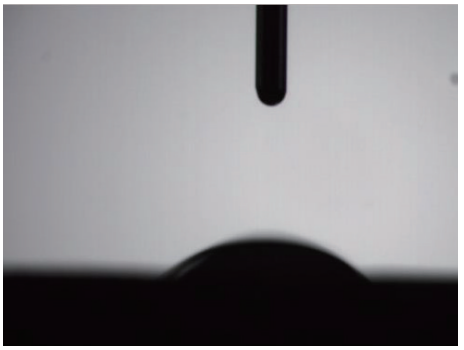
(a)古近系路乐河组



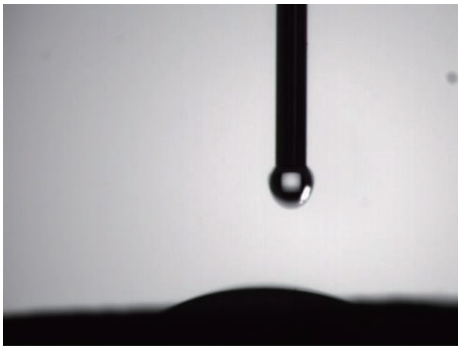
(b)侏罗系小煤沟组

图2　岩样SEM图像

Fig.2　SEM images of the rock samples



(a)古近系路乐河组



(b)侏罗系小煤沟组

图3　岩样接触角图像

Fig.3　Contact angle image of the rock sample

状裂隙中含有一定量的孔隙,并且片状结构的孔隙以及裂隙之间分布有大量起连接作用的线状结构。另测得样品的气测渗透率在8.5 mD左右,接触角实验结果(图3a)显示岩水接触角为53.5°,表现出较好的亲水性。

侏罗系小煤沟组岩心的孔隙主要分布在孔隙直径为9～13 nm、26～32 nm处,孔隙度为11%(图1b)。由SEM图像(图2b)可知岩样呈片状结构,裂隙分布较广,裂隙宽度大约在3 μm。另测得样品的气测渗透率在23 mD左右,接触角实验结果(图3b)显示岩水接触角为31°,同样表现为较好的亲水性。

通过对石圈滩地区古近系路乐河组岩样及侏罗系小煤沟组岩样进行岩性与孔隙结构等理化性能分析,得到两点结论:

(1)石圈滩地区钻遇地层路乐河组整体含盐度较高,最高达到1.025%,以水溶性盐份NaCl和KCl为主。

(2)石圈滩地区钻遇地层孔隙度普遍较高,且表现出良好的亲水性。

根据岩样分析结果,施工该类易溶盐膏地层的

关键是解决冲洗液护壁问题，结合前期施工经验，为保证钻孔施工安全与岩心采取率，设计及应用的冲洗液体系需具备以下几点要求：(1)具有良好的造壁、护壁性能；(2)具有良好的流变性能；(3)具有良好的润滑性能；(4)具有良好的悬浮性能；(5)具有较强的抗盐侵能力；(6)具有足够的密度，能够平衡浅层气压，避免因为浅层气外溢、孔内井壁被破坏，上部不稳定地层发生掉块而引发卡钻事故。

3 冲洗液配方优选

3.1 冲洗液设计

在ZKLH12-1与ZKLH19-1孔前期施工中，选择具有“双护”[11-12]作用的广谱(GSP)泥浆作为冲洗液，但在现场施工中应用效果较差，主要问题如下：

(1)钻遇岩盐地层后冲洗液中粘土的电动电位会下降、水化膜减薄，导致粘土颗粒不易形成端-端或端-面连接的网架结构，产生面-面聚结，形成大颗粒而沉降[13-14]。

(2)冲洗液性能材料受盐侵后在粘土表面吸附量上升，导致粘土粒子表面电动电位上升、水化膜增厚。

(3)冲洗液滤失量升高后冲洗液体系内水分子更容易渗入地层，岩盐地层遇水后盐份溶解进入冲洗液体系造成冲洗液粘度、切力下降，引起孔径扩大后发生塌孔事故[15-16]。

通过调研国内类似地层冲洗液技术，针对柴达木盆地石圈滩地区地层岩性及施工难点优选处理剂，确定该冲洗液主要由造浆材料钠膨润土、具有抗盐能力的增粘剂抗盐共聚物GTQ、冲洗液用降滤失剂羧羟基烷烯共聚物Redu 1、冲洗液用防塌封堵剂聚醇硬脂酸共聚物BZ-YFT组成，各冲洗液材料的加量范围及作用见表1。

参考国内相关冲洗液研究方法[17-20]，设计不同比例配方进行四因素三水平正交实验。配方设计见表2。

测定9组冲洗液配方API滤矢量与六速旋转粘度计读值数据，计算每组冲洗液配比的表观粘度、塑性粘度、动切力，具体数据见表3。

根据动切力越大越好，表观粘度、塑性粘度和滤失量较小的原则，结合冲洗液配方选用材料经济性，最终优选出抗盐防塌冲洗液配比为2号：1 m^3水+20 kg膨润土+2 kg片碱NaOH+5 kg GTQ+6 kg Redu 1+10 kg BZ-YFT，另外还需要根据现场情况加入适量的润滑剂和重晶石配合使用。

表1 冲洗液材料的加量范围及作用

Table 1 Addition range and function of mud material

材料名称	代 号	加量范围/%	作 用
膨润土	钠基膨润土	2～4	增加粘度和切力，形成致密泥皮
降滤失剂	Redu 1	0.4～0.8	降滤失、抗盐
防塌封堵剂	BZ-YFT	0.8～1.2	具有封堵降低渗透率和软化粘结的防塌作用
增粘剂	GTQ	0.3～0.7	具有提高粘度和切力、抗盐、抑制粘土水化

表2 抗盐防塌冲洗液配方设计

Table 2 Formulation design for anti-salt and anti-collapse flushing fluid

配方	钠膨润土/%	GTQ/%	Redu 1/%	BZ-YFT/%
1	2	0.3	0.4	0.8
2	2	0.5	0.6	1.0
3	2	0.7	0.8	1.2
4	3	0.3	0.6	1.2
5	3	0.5	0.8	0.8
6	3	0.7	0.4	1.0
7	4	0.3	0.8	1.0
8	4	0.5	0.4	1.2
9	4	0.7	0.6	0.8

表3 抗盐防塌冲洗液性能参数

Table 3 Parameter performance of anti-salt and anti-collapse flushing fluid

配方	*AV*/(mPa•s)	*PV*/(mPa•s)	*YP*/Pa	*YP*/*PV*/[Pa/(mPa•s)]	*FL*/mL
1	28	16	12.3	0.5	11.6
2	38	22	16.4	0.7	4.5
3	40	25	15.3	0.6	4.8
4	30	19	11.2	0.6	7.4
5	42	30	12.3	0.4	5.2
6	40	27	13.3	0.5	8.4
7	30	18	12.3	0.7	7.8
8	36	23	13.3	0.6	9.6
9	40	26	14.3	0.6	7.2

3.2　冲洗液抗盐性能评价

针对石圈滩地区钻遇地层含盐度较高的问题,对优选的冲洗液配方进行抗盐性能评价,向优选冲洗液中加入不同比例盐水溶液(5%KCl+5%NaCl),盐水溶液比例分别取15%、20%、25%,实验结果见表4。

表4　不同盐含量对冲洗液性能影响统计

Table 4　Statistics of the effect of different salt content on the performance of flushing fluid

序号	加入盐水比例/%	含盐量/%	*AV*/(mPa•s)	*PV*/(mPa•s)	*YP*/Pa	(*YP*/*PV*)/[Pa/(mPa•s)]	*FL*/mL
1	0	0	38	22	16.4	0.7	4.5
2	15	0.75	38	23	15.3	0.7	4.6
3	20	1	35	20	15.3	0.8	4.8
4	25	1.25	31	18	13.3	0.7	5.0

上述实验结果表明,在优选的冲洗液配方中加入3种比例盐水溶液,粘切略微下降,有轻微盐侵影响,但基本稳定,具备良好的悬浮性能,能够满足该地区施工需求。

4　现场应用

4.1　使用设备及工艺概况

项目使用HXY-2000C型拖车式钻机,NBB-390～52/11-8型变量泥浆泵。采用正循环回转钻进方式,以Ø113 mm口径开孔一径到底裸眼钻进,提钻取心。

4.2　冲洗液配制

(1)向搅拌罐中加入1 m^3淡水,在淡水中加入3%～5%优质钠膨润土,再加入膨润土质量5%～6%(即1～3 kg)的片碱,搅拌20 min。

(2)在配制好的膨润土基浆中,根据设计配方依次添加GTQ、Redu 1、BZ-YFT,搅拌15～25 min后加入适量润滑剂HX-B。

(3)按现场施工需要加入重晶石粉充分搅拌均匀后即可放入泥浆池。

4.3　应用效果

2021年8月至2022年8月,在石圈滩地区8个钻孔的钻探施工中对该冲洗液进行现场应用,总体上适用性较强,能够满足施工要求,且冲洗液性能较稳定。2021年4月份施工的ZKLH12-1孔设计孔深700 m,钻遇古近系路乐河组棕红色砂岩与侏罗系炭质泥岩接触段时有油气侵入,严重破坏了冲洗液性能(见图4a),钻进中发生钻杆折断事故,钻孔报废;2021年8月份重新进场施工ZKLH8-1孔,两孔相距1.6 km,钻遇古近系路乐河组棕红色砂岩时发生小规模浅层油气涌出,孔深178～182 m,测算该段地层压力系数为1.4。在现场配制抗盐防塌冲洗液(见图4b),同时加入重晶石粉,调整冲洗液密度为1.35 g/cm^3,使用抗盐防塌冲洗液后该孔顺利施工至终孔。

(a)被污染的冲洗液　　(b)抗盐防塌冲洗液

图4　现场应用的冲洗液对比

Fig.4　Comparison of flushing fluids used on site

ZKLH12-1孔施工使用低固相“双护”泥浆作冲洗液,因冲洗液滤失量过高,路乐河组钻取岩心(见图5)遇水变脆弱、破碎,测井数据显示孔径达到了244 mm;ZKLH8-1孔使用抗盐防塌冲洗液,钻取岩心完整(见图6),最大孔径为135 mm。

对比前期使用的普通低固相“双护”泥浆,抗盐防塌冲洗液配方的研究与应用取得了理想效果,具体表现在以下几个方面:

(1)工区钻探施工效率稳定增长。石圈滩工区外单位施工钻孔4个,台月效率相对较低,平均为469 m;我单位在石圈滩地区2021年施工4个钻孔,其中前期施工两个钻孔平均台月效率为729.76 m,

图5 ZKLH12-1孔钻取的岩心

Fig.5 Core drilled from Hole ZKLH12-1

图6 ZKLH8-1孔钻取的岩心

Fig.6 Core drilled from Hole ZKLH8-1

自2021年8月应用抗盐防塌冲洗液配方施工钻孔共8个，累计4625.33 m，平均台月效率达到了1378.78 m。

(2)该冲洗液体系具有良好的护壁性能。前期施工钻孔孔径过大，井径扩大率为126.59%～145.34%，更换冲洗液后平均孔径扩大率仅为19.4%。

(3)该冲洗液体系具有较好的抗盐侵能力，钻遇含盐地层时冲洗液悬浮能力相对稳定，孔内顺畅，测井作业均一次性成功。

(4)钻探施工取得了良好的经济效益，降低了钻探成本。2021年前期在该地区施工泥浆材料与用水成本为57.91元/m，2022年试验钻孔成本为38.92元/m，试验钻孔平均孔深565 m，单孔可节省泥浆材料与用水成本32.79%，经济效益较显著。

5 结论

(1)针对石圈滩地区施工存在的难点，提出了一套适用于该区地层的抗盐防塌冲洗液，配比为：1 m^3水＋20 kg膨润土＋2 kg片碱NaOH＋5 kg抗盐共聚物GTQ＋6 kg降滤失剂Redu 1＋10 kg防塌封堵剂BZ-YFT，另外需要根据施工钻孔地层压力情况加入适量重晶石配合使用。

(2)该冲洗液能够抑制降粘切，其密度可调、失水量低，应用效果好，成功克服了石圈滩地区钻探施工中含盐地层蠕变引起的孔内事故多发、钻探效率低等难题。

(3)通过近2年在石圈滩地区的现场应用效果表明，该冲洗液适用性较强，在施工类似地层时可参考使用。

参考文献(References)：

[1] 孔北远.聚磺黄泥浆在岩盐钻井中的应用[J].中国井矿盐，2014，45(5)：17-19.
KONG Beiyuan. Application of polysulfonate mud in the drilling of rock salt well[J]. China Well and Rock Salt, 2014, 45(5): 17-19.

[2] 曾义金.深部盐膏层蠕变关系研究[J].石油钻探技术，2004(3)：5-7.
ZENG Yijin. Study on salt creep in deep formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004(3): 5-7.

[3] 曾义金，王文立，石秉忠.深层盐膏岩蠕变特性研究及其在钻井中的应用[J].石油钻探技术，2005(5)：51-54.
ZENG Yijin, WANG Wenli, SHI Bingzhong. Study on creep features of deep salt and gypsum beds and its applications in drilling operations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005(5): 51-54.

[4] 虞海法，左凤江，耿东士，等.盐膏层有机盐钻井液技术研究与应用[J].钻井液与完井液，2004，21(5)：8-11.
YU Haifa, ZUO Fengjiang, GENG Dongshi, et al. Organic salt drilling fluid for salt gypsum formation drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(5): 8-11.

[5] 周建东，李在均，邹盛礼，等.有机盐钻井液在塔里木东河油田DH1-8-6井的应用[J].钻井液与完井液，2002，19(4)：21-23.
ZHOU Jiandong, LI Zaijun, ZOU Shengli, et al. Application of organic salt drilling fluid in Well DH-8-6 of Donghe Oilfield in Tarim[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2002, 19(4): 21-23.

[6] 郑力会，王志军，张民立.盐膏层用高密度有机盐钻井液的研究与应用[J].钻井液与完井液，2004，21(4)：37-39.

ZHENG Lihui, WANG Zhijun, ZHANG Minli. Study and application of high density organic salt drilling fluid for gypsum/salt bed[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004,21(4):37-39.

[7] 邓诚,曾胡勇.伊拉克M油田A-25井盐膏层侧钻技术[J].石化技术,2022,29(4):147-148.
DENG Cheng, ZENG Huyong. Salt Layer Sidetrack technology of Well A-25 in M Oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022,29(4):147-148.

[8] 杨晓冰,蔺志鹏,陈鑫,等.土库曼斯坦南约洛坦气田复杂盐膏层钻井液技术[J].天然气工业,2011,31(7):55-58.
YANG Xiaobing, LIN Zhipeng, CHEN Xin, et al. Drilling fluid technology used in the complicated gypsum beds in the South Yoloten Gas Field, Turkmenistan[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(7):55-58.

[9] 刘晓阳."双护"泥浆在地浸砂岩铀矿钻进中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程), 2004,31(9):55-56.
LIU Xiaoyang. Application of 'Double Protections' mud in sandstone uranium mine drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004,31(9):55-56.

[10] 乌效鸣,蔡记华,胡郁乐.钻井液与岩土工程浆材[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
WU Xiaoming, CAI Jihua, HU Yule. Drilling Fluid and Geotechnical Engineering Slurry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.

[11] 徐培远,袁志坚.青海盐溶地层钻探卤水泥浆配方研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):41-44.
XU Peiyuan, YUAN Zhijian. Development and application of brine mud formula in salt soluble formation in Qinghai[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(6):41-44.

[12] 纪卫军,张明德,赵长亮,等.青海省冷湖镇钾矿资源调查评价项目冲洗液技术研究及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):54-57.
JI Weijun, ZHANG Mingde, ZHAO Changliang, et al. Research and application of flushing fluid technology for potassium ore resource investigation project of Lenghu town in Qinghai [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(1):54 -57.

[13] 程建祥,张德权,张家峰.漳县盐矿钻探施工与成井工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(6):54-56.
CHENG Jianxiang, ZHANG Dequan, ZHANG Jiafeng. Well drilling and completion techniques in Zhangxian county salt mine [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005,32(6):54-56.

[14] 张庆海,姚桂山,吴宁魁.盐矿钻探技术与工艺[M].北京:地质出版社,1992.
ZHANG Qinghai, YAO Guishan, WU Ningkui. Salt Mine Drilling Technology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.

[15] 郑文龙,乌效鸣,吴笛,等.深部盐岩层绳索取心钻井液技术研究与应用[J].地质与勘探,2015,51(5):977-983.
ZHENG Wenlong, WU Xiaoming, WU Di, et al. Drilling fluid technology suitable for core drilling in deep salt beds[J]. Geology and Exploration, 2015,51(5):977-983.

[16] 祝学飞,孙俊,舒义勇,等.ZQ2井盐膏层高密度欠饱和盐水聚磺钻井液技术[J].钻井液与完井液,2019,36(6):716-720.
ZHU Xuefei, SUN Jun, SHU Yiyong, et al. A high density under saturated saltwater drilling fluid for salt and gypsum drilling in Well ZQ2[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(6):716-720.

[17] 李田周,陶士先,熊正强.磷石膏地层用钙基成膜环保冲洗液研究与应用[J].钻探工程,2023,50(1):49-54.
LI Tianzhou, TAO Shixian, XIONG Zhengqiang. Development and application of calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid for phosphogypsum formation [J]. Drilling Engineering, 2023,50(1):49-54.

[18] 王方博.川西海相破碎地层防塌钻井液技术研究及应用[J].钻探工程,2021,48(9):55-64.
WANG Fangbo. Application of anti-collapse drilling fluid technology in marine broken formation in western Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2021,48(9):55-64.

[19] 刘学鹏.温敏堵漏水泥浆体系研究与应用[J].钻探工程,2022,49(2):110-116.
LIU Xuepeng. Research and application of the temperature sensitive plugging cement slurry system[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):110-116.

[20] 苏力才,谢健全,李永卫,等.PVA1788无固相冲洗液体系的研究与应用[J].钻探工程,2022,49(4):68-73.
SU Licai, XIE Jianquan, LI Yongwei, et al. Research and application of PVA1788 solid-free drilling fluid system[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):68-73.

(编辑　荐华)