

金川矿区复杂地层钻探冲洗液配方研究与应用

雒焕桢¹, 张席芝¹, 张永昇¹, 葛正斌¹, 程悦瀚^{2*}, 张统得²

(1. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737102; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:针对金川矿区强水敏性、强破碎、强涌水及高地应力复杂地层钻探所遇缩径、掉块造成的卡钻和埋钻等孔内事故,对冲洗液提出了低失水量、强抑制性、强封堵性、合适的密度以及优良流变性能等要求。首先优选合适的冲洗液处理剂,包括降失水抑制剂FLI-1、封堵防塌剂FDC-1、抑制剂LHK和封堵剂FG-1;然后通过正交试验,研制了适用于金川矿区复杂地层的冲洗液配方,并针对冲洗液配方开展了常规性能、抑制性、封堵性和润滑性评价。现场应用试验结果表明,该冲洗液配方具有优良的流变性能,还兼具较好的抑制性、封堵性及润滑性,能够有效预防矿区钻探遇复杂地层引发钻孔事故,提高钻探效率,支撑矿区钻探施工。

关键词:复杂地层;冲洗液配方;抑制性;封堵性;金川矿区

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)01-0125-09

Research and application on the flushing fluid formula for drilling in the complex strata of Jinchuan mining area

LUO Huanzhen¹, ZHANG Xizhi¹, ZHANG Yongsheng¹, GE Zhengbin¹, CHENG Yuehan^{2*}, ZHANG Tongde²

(1. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang Gansu 737102, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: In response to the hole-inside accidents such as drill jamming and burying caused by hole shrinkage and chipping encountered during drilling in the complex strata of Jinchuan mining area, which are characterized by strong water sensitivity, intense fragmentation, severe water inrush, and high ground stress, requirements for the flushing fluid have been set, including low water loss, strong inhibition, strong sealing, appropriate density, and excellent rheological properties. Firstly, suitable flushing fluid treatment agents were selected, including the water loss reducing inhibitor FLI-1, the sealing and anti-collapse agent FDC-1, the inhibitor LHK, and the sealing agent FG-1. Then, through orthogonal experiments, a flushing fluid formula suitable for the complex strata of Jinchuan mining area was developed, and the conventional performance, inhibition, sealing, and lubricity of the formulated flushing fluid were evaluated. The results of field application tests showed that this flushing fluid formula possesses excellent rheological properties, along with good inhibition, sealing, and lubricity. It can effectively prevent drilling accidents caused by complex strata encountered in the mining area drilling, improve drilling efficiency, and support drilling construction in the mining area.

Key words: complex strata; flushing fluid formula; inhibition; sealing; Jinchuan mining area

0 引言

金川矿区自1958年发现以来,历经数十年开采,其开采深度目前已超过1000 m^[1]。为探明深部

矿体地质条件与资源储量,矿区曾布设大量深孔钻探工程。然而,该区工程地质条件极其复杂,主要表现为岩层软弱破碎、水敏性强、地应力高且地层涌水

收稿日期:2025-08-06; 修回日期:2025-10-19 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.01.019

基金项目:金川集团工程建设有限公司科技项目“金川矿区复杂地层超深孔钻进工艺研究”(编号:KSGCFGSKY202401);新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目“中深孔绿色适用钻探技术装备升级与应用”(编号:ZKKJ202423)

第一作者:雒焕桢,男,汉族,1970年生,高级工程师,采矿工程专业,从事地质岩心钻探等相关工作,甘肃省金昌市金川区金川西路矿山工程分公司。

通信作者:程悦瀚,男,汉族,1995年生,工程师,石油与天然气工程专业,硕士,从事深部钻探技术工作,四川省成都市郫都区港华路139号, cyuehan@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:雒焕桢,张席芝,张永昇,等.金川矿区复杂地层钻探冲洗液配方研究与应用[J].钻探工程,2026,53(1):125-133.

LUO Huanzhen, ZHANG Xizhi, ZHANG Yongsheng, et al. Research and application on the flushing fluid formula for drilling in the complex strata of Jinchuan mining area[J]. Drilling Engineering, 2026,53(1):125-133.

强烈,导致钻探施工难度极大,冲洗液护壁困难,时常发生缩径、掉块、卡钻等孔内复杂情况,常规处理手段效果有限,事故频发,钻孔报废率居高不下。

近年来,针对金川矿区复杂地层钻探的孔壁稳定难题,金川集团联合中南大学、中国地质大学等国内高校及科研院所,在冲洗液技术领域开展了大量研究并取得了一定成效。其中研发的低固相聚合物冲洗液体系,以羧甲基纤维素(CMC)、水解聚丙烯腈(HPAN)、接枝淀粉等作为降失水剂,聚丙烯酰胺(PHP)、腐殖酸钾、SM植物胶等作为抑制剂,兼具低失水与强抑制特性,在现场应用中取得了良好效果^[2-8]。然而,在深部某些极端复杂地质条件下,冲洗液的护壁效果仍面临挑战。

为此,本文在前人研究基础上,紧密结合金川矿区实际地质条件,从冲洗液体系与配方优化入手,通过优选关键处理剂,并采用正交试验方法,研制出适用于该矿区复杂地层的冲洗液配方。该配方经现场应用验证效果良好,最终形成了一套高效且针对性强的金川矿区复杂地层钻探冲洗液技术方案,可为矿区深部复杂地层钻探技术提供支撑。

1 孔壁稳定性分析与冲洗液技术对策

1.1 孔壁稳定性分析

孔壁失稳是一个极其复杂的问题,在金川矿区尤为突出,其影响因素众多。前期研究表明,矿区孔壁失稳的主要影响因素有如下几个方面:

(1)岩性组分:金川矿区地层岩心普遍含有高比例的黏土矿物,且以强膨胀性的蒙脱石和绿泥石为主。这类矿物水敏性强,钻进过程中遇水极易发生水化分散,引发缩径甚至孔壁垮塌^[9-10]。

(2)地质构造:受地质构造影响,矿区地层极度破碎,微裂隙与微孔隙高度发育,且裂隙宽度分布范围广,在钻进过程中随着机械扰动、抽吸压力、地应力等因素的影响,极易产生孔壁失稳,出现掉块、缩径、垮塌等复杂情况。

(3)地下水:矿区地下水活动强烈、涌水现象突出,而矿区岩体节理裂隙发育且破碎,渗透性强,致使深部岩体长期处于高含水乃至饱和状态,加剧了孔壁失稳风险;同时,在井下巷道施工中地下水多属高水头承压水,钻进过程中极易侵入孔内稀释冲洗液,致使其性能急剧恶化,难以有效维持孔壁稳定。

(4)高地应力:金川矿区普遍存在高地应力地

层,尤其是具有最大水平主应力与最小水平主应力差值较大的特征,钻孔易发生剪切破坏而产生失稳;同时岩石受构造蚀变等影响强度较低,更容易发生孔壁垮塌或钻孔缩径等失稳现象。

1.2 冲洗液技术对策

通过分析孔壁失稳原因,主要考虑从冲洗液方面入手,降低水化作用影响,强化孔壁,提高钻孔稳定性。

(1)针对矿区岩性组分中黏土矿物含量较高,一方面降低冲洗液失水量,避免黏土矿物吸水膨胀;另一方面提高冲洗液抑制性能,稳定黏土结构,抑制黏土矿物水化缩径。同时考虑添加高分子聚合物,通过吸附在黏土颗粒表面,形成包被层,阻止水分侵入,并且发挥絮凝作用,使分散的黏土颗粒聚集^[11-12]。

(2)针对矿区地质构造复杂,裂隙发育问题,考虑向冲洗液中添加不同粒径的封堵性材料,在孔壁表面快速形成致密封堵层,降低孔壁的渗透率,以阻止大量自由水进入地层;加入具有较强黏结性的材料,强化颗粒或碎块之间的胶结,提高孔壁岩体的机械强度^[13-15]。

(3)针对矿区强涌水和高地应力问题,考虑适当提高冲洗液密度,一方面能够平衡地层压力,减轻地下水对钻进的影响;同时也能在高地应力地层实现冲洗液液柱压力对孔壁的正向支撑,减轻因地应力作用导致的钻孔缩径或垮塌^[16-20]。

2 冲洗液体系及配方研究

首先采用单因素法对冲洗液处理剂进行优选,然后采用正交试验法开展冲洗液体系配方优化研究。对正交试验结果中的主要因素,如表观黏度、API滤失量等进行极差分析,找出每个因素的最优水平组合,最终确定出满足要求的冲洗液配方^[21-23]。对研制的冲洗液进行常规性能、润滑性、页岩抑制性能及封堵性能评价。

2.1 处理剂优选

进行处理剂优选前,配置好基浆备用。通过分析现场常用的冲洗液配方,以及满足钻进工艺和经济成本的要求,选择基浆配方为:清水+4%膨润土+0.2%纯碱。配置完成后高速搅拌20 min,室温下陈化24 h。实测基浆性能如表1所示。

2.1.1 降失水抑制剂

优选具有降失水效果好、兼具一定抑制性、对

表 1 基浆性能测试结果

Table 1 Test results of the base mud performance

性能参数	参数值
漏斗黏度/s	18
密度/(g·cm ⁻³)	1.03
表观黏度/(mPa·s)	8.5
塑性黏度/(mPa·s)	6
动塑比/[Pa/(mPa·s)]	0.42
滤失量/(mL·30 min ⁻¹)	25
泥饼厚度/mm	0.5

冲洗液黏度影响较小的降失水剂,优选了聚丙烯腈铵盐(NH₄-HPAN)、树脂类共聚物(S-1)、多功能降失水抑制剂(FLI-1)以及硅钾基防塌降失水剂(SAK-1),分别按1%~3%加量加入1000 mL基浆中,降失水和增黏效果见图1和图2。

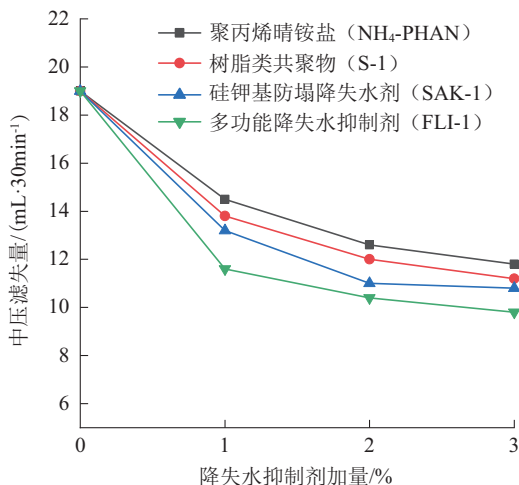


图 1 不同降失水剂的降失水效果

Fig.1 Water loss reduction effect of the different water loss agents

从图1可以看出,随着降失水剂的加入,冲洗液滤失量明显降低,随着加量的增加,滤失量进一步降低,其中多功能降失水抑制剂(FLI-1)的降失水效果更佳。结合图2来看,随着降失水剂的加入,表观黏度逐步升高,只有硅钾基防塌降失水剂(SAK-1)对冲洗液黏度的影响呈现出先升高再降低的情况,其中多功能降失水抑制剂(FLI-1)的提黏效果更好,故选用该处理剂作为降失水抑制剂。

2.1.2 封堵防塌剂优选

封堵防塌剂的主要作用是在一定低滤失量的基础上,优化泥皮质量,进一步提高防塌效果,同时

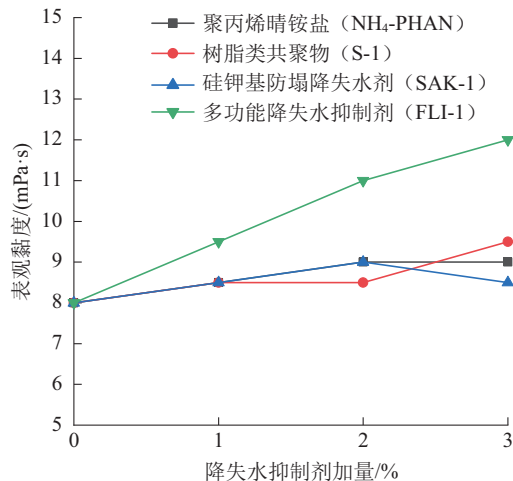


图 2 不同降失水剂对黏度的影响

Fig.2 Effects of the different water loss agents on viscosity

随着封堵防塌剂的加入也会进一步降低冲洗液体系的滤失量,因此,在优选材料中尽量考虑对滤失量的影响及润滑性等其它方面的因素。为此优选了改性沥青(FT-342)、广谱护壁剂(GSP)以及复合防塌封堵剂(FDC-1)3种材料,分别按照1%~3%加量加入1000 mL基浆,并在基浆中加入20 g FLI-1以维持一定低的滤失量。降失水以及对润滑性影响见图3和图4。

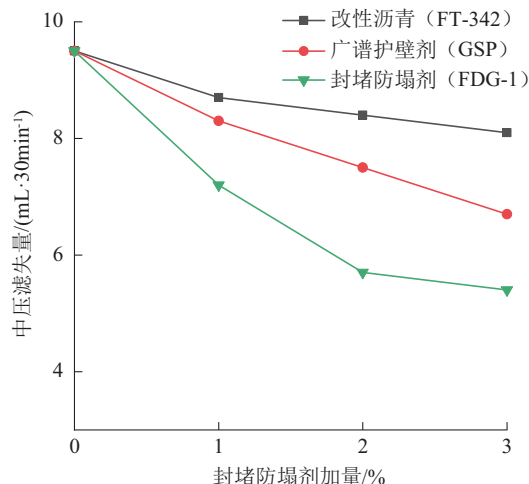


图 3 不同封堵防塌剂对失水量影响

Fig.3 Effects of the different blocking and anti-collapse agents on water loss

从图3可以看出,随着不同封堵剂的加入,冲洗液的滤失量进一步降低,其中FDC-1的降失水效果更佳。图4展现了各封堵防塌剂加入后对冲洗液润滑性能的影响,其中GSP和FDC-1呈现很明显的

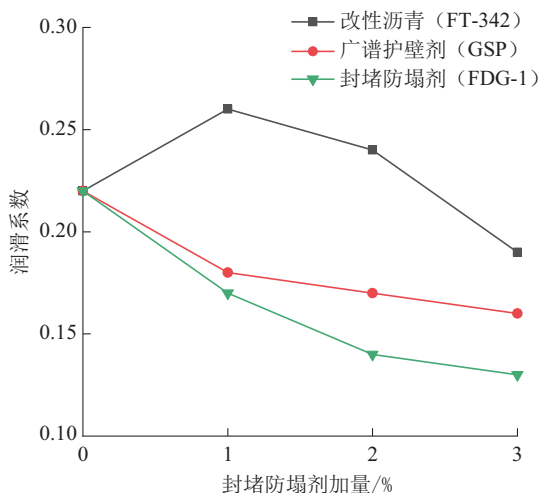


图4 不同封堵防塌剂对润滑性影响

Fig.4 Effects of the different blocking and anti-collapse agents on lubricity

随加量提高而润滑系数降低的趋势,而FT-342则出现先升高再降低,因此,综合2组性能评价情况来看,优选FDC-1作为封堵防塌剂。

2.1.3 抑制剂优选

由于金川矿区地层水敏性极强,对专用抑制剂进行优选以提高冲洗液抑制性能。优选了非离子抑制剂(PA-1)、聚胺页岩抑制剂(JA-1)、腐殖酸钾(KHm)、无机抑制剂(LHK)和氯化钾(KCl)。分别按照1%、2%、3%、5%的加量加入1000 mL基浆中,再选用矿区蚀变黏土片岩进行滚动回收率测试,通过滚动回收试验评价各处理剂的抑制性,具体试验结果如图5所示。

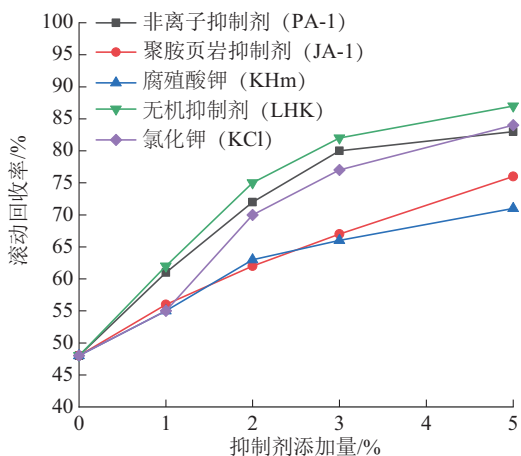


图5 不同抑制剂对黏土片岩的滚动回收率影响

Fig.5 Influence of the different inhibitors on rolling recovery rate of clay schist

从图5可以看出,各抑制剂对矿区黏土片岩均具有一定的抑制性,且随着抑制剂加量的提高,滚动回收率也逐步提高,表明冲洗液的抑制性逐渐增强,其中无机抑制剂(LHK)在各种加量条件下回收率最高,因此,选用LHK处理剂作为抑制剂。

2.1.4 封堵剂优选

为了进一步提高特破碎地层的封堵性能,需要开展适合于矿区地层裂隙的封堵剂优选以实现对不同微裂隙的有效封堵。优选了微纳米封堵材料,包括非渗透封堵剂(FST-1)、纳米乳液(NPR-1)及封固剂(FG-1)3种材料,分别按照1%、2%、3%的加量加入1000 mL基浆中,然后采用FA无渗透仪测试冲洗液的封堵性能,试验结果见表2。

表2 不同封堵剂的封堵性实验结果

Table 2 Experimental results of sealing properties of the different sealing agents

封堵剂加量/%	非渗透封堵剂 (FST-1)		纳米乳液 (NPR-1)		封固剂 (FG-1)	
	滤失量/mL	侵入深度/cm	滤失量/mL	侵入深度/cm	滤失量/mL	侵入深度/cm
1	74	18.7	16	18.7	8	18.7
2	12	18.7	5	18.7	0	5.8
3	0	14.5	0	6.5	0	2.4

从表2可以看出,3种封堵剂均有一定的封堵效果,其中封固剂(FG-1)的封堵效果最佳,纳米乳液(NPR-1)效果次之,因此,选用FG-1作为封堵剂。

2.2 冲洗液配方试验

基于上述处理剂优选结果,确定冲洗液体系中的组分为膨润土、降失水抑制剂FLI-1、封堵防塌剂FDC-1、抑制剂LHK、封堵剂FG-1。采用正交试验法进一步探索各因素以及水平变化对试验效果的影响,具体见表3、表4,试验结果见表5。

对表5每组正交试验结果中的主要因素,如漏

表3 冲洗液配方研究正交试验设计

Table 3 Orthogonal experimental design for the research of flushing liquid formulas

水平	膨润土/%	FLI-1/%	FDC-1/%	LHK/%	FG-1/%
1	3	1	1	1	1
2	4	2	2	3	2
3	5	3	3	5	3

表 4 5 因素 3 水平正交试验表					
Table 4 The orthogonal experiment table with 5 factors and 3 levels					
编号	膨润土/ %	FLI-1/ %	FDC-1/ %	LHK/ %	FG-1/ %
1	3	1	1	1	1
2	4	2	2	1	2
3	5	3	3	1	3
4	3	2	2	3	1
5	4	3	3	3	2
6	5	1	1	3	3
7	4	3	1	5	1
8	5	1	2	5	2
9	3	2	3	5	3
10	5	2	3	1	1
11	3	3	1	1	2
12	4	1	2	1	3
13	4	1	3	3	1
14	5	2	1	3	2
15	3	3	2	3	3
16	5	2	2	5	1
17	3	3	3	5	2
18	4	1	1	5	3

斗黏度、表观黏度、塑性黏度及中压滤失量进行极差分析,找出每个因素的最优水平组合。通过正交试验的极差分析法得到了各项指标所对应的水平的影响大小和优化水平取值。综合考虑各指标的影响因素的主次并结合体系目标性能确定最终配方。

由于金川矿区水敏性强,漏斗黏度和中压滤失量是首要考虑的指标,选取正交实验中的第 4 组为参考,并在此基础上进行改进优化,针对金川矿区复杂地层冲洗液配方优化为:水+4% 膨润土+0.2% 纯碱+2% 降失水抑制剂 FLI-1+2% 封堵防塌剂 FDC-1+3% 无机抑制剂 LHK+2% 封堵剂 FG-1。

2.3 冲洗液性能评价

对确定的配方进行性能评价,包括常规性能评价、抑制性评价、封堵防塌性评价、润滑性能评价。

2.3.1 常规性能评价

主要包括密度、黏度、流变性能、滤失量等指标,具体见表 6。

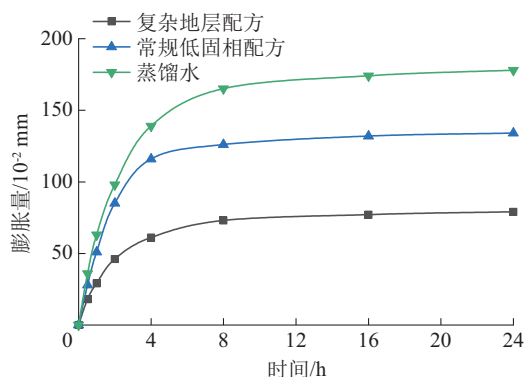
2.3.2 抑制性评价

冲洗液抑制性能主要是测试矿区典型水敏性

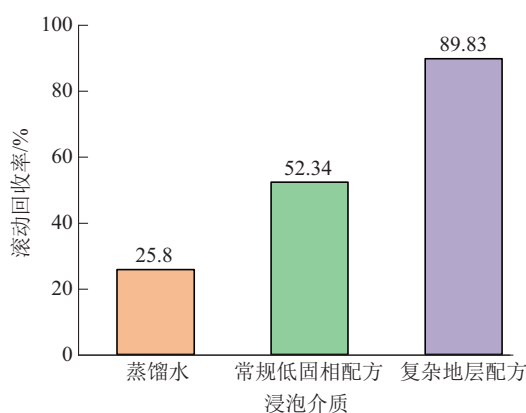
表 5 冲洗液配方研究正交试验结果					
Table 5 Orthogonal experiment results for the research of flushing liquid formulas					
编号	漏斗 黏度/ s	表观黏 度/(mPa· s)	塑性黏 度/(mPa· s)	动塑比/ [Pa/(mPa· s)]	中压滤 失量/ mL
1	21	12	11	0.09	7.5
2	24	13.5	13	0.04	5.6
3	37	22.5	18	0.25	4.8
4	26	15.5	14	0.11	6.2
5	38	24.5	20	0.23	5.5
6	25	14	10	0.40	7.2
7	31	20	17	0.18	6.5
8	25	14.5	12	0.21	6.6
9	22	13	12	0.08	6.0
10	30	19	15	0.27	5.0
11	25	13.5	13	0.04	5.4
12	25	14	13	0.08	6.2
13	26	15	13	0.15	5.8
14	29	17.5	13	0.35	6.6
15	26	14.5	13	0.12	5.8
16	33	21	17	0.24	5.6
17	32	20.5	17	0.21	5.3
18	27	15.5	14	0.11	6.0

表 6 冲洗液配方常规性能结果	
Table 6 Conventional performance results of the flushing liquid formula	
性能参数	参数值
漏斗黏度/s	31
密度/(g/cm ³)	1.08
表观黏度/(mPa·s)	19
塑性黏度/(mPa·s)	15
动切力/Pa	4
动塑比/[Pa/(mPa·s)]	0.27
滤失量/mL	5.4
泥饼厚度/mm	0.5
pH 值	9

黏土片岩的相对膨胀降低率和滚动回收率。为了对比评价冲洗液的抑制性能,选用蒸馏水及矿区钻探使用的常规低固相冲洗液配方(蒸馏水+5% 膨润土+0.5% 低黏羧甲基纤维素钠 LV-CMC+2% 广谱护壁剂+1.5% 磺化沥青)作为对比,实验结果见图 6。



(a)不同冲洗液对黏土片岩的膨胀量曲线



(b)黏土片岩热滚动回收率实验结果

图6 抑制性评价试验结果

Fig.6 The inhibition evaluation test results

从图6(a)可以看出,研制的针对金川矿区复杂地层冲洗液配方具有优良的线膨胀抑制性,8 h线膨胀系数降低率达55.32%。从图6(b)可以看出,黏土片岩在不同的浸泡介质条件下回收率有较大不同,其中蒸馏水的滚动回收率仅有25.8%,但在研制的冲洗液中浸泡下滚动回收率达到了89.93%,充分展现了该配方体系优良的抑制分散性能力。

2.3.3 封堵防塌性评价

2.3.3.1 封堵性评价

主要采用FA无渗透仪测试不同冲洗液的砂床滤失量,进而间接评价冲洗液的封堵性能,选用20~40目的石英砂。具体试验结果见表7。

表7 不同冲洗液的砂床滤失实验结果

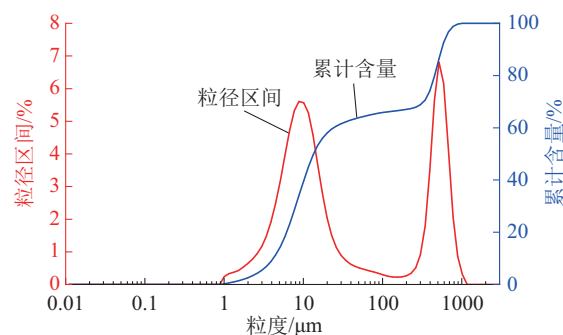
Table 7 Experimental results of sand bed filtration with the different flushing liquids

冲洗液配方	滤失量/mL	侵入深度/cm
复杂地层配方	0	12.4
常规低固相配方	16	18.7

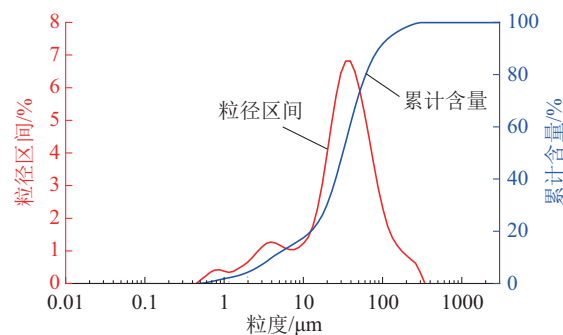
从表7可以看出,研制的冲洗液配方具有较好的封堵性,砂床滤失量为0,且砂床侵入深度较浅,表明该体系在压差下能够快速的在砂床表面形成封堵层,避免滤液的渗入。

2.3.3.2 冲洗液配方粒度分析

提高冲洗液封堵能力的关键是要有与地层微裂隙相匹配的固相颗粒,因此,为了进一步了解冲洗液中固相颗粒粒径大小,采用激光粒度分析仪对不同冲洗液进行了粒度分析,分析结果如图7所示。



(a)常规低固相配方冲洗液



(b)复杂地层配方冲洗液

图7 不同冲洗液配方粒度分析曲线

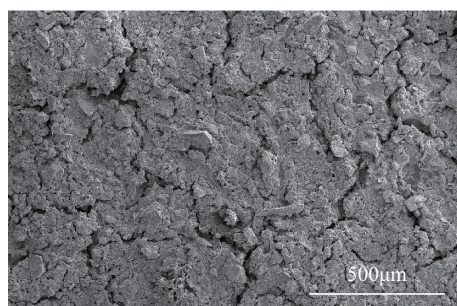
Fig.7 Particle size analysis curves of the different flushing liquid formulas

从图7可以看出,常规低固相冲洗液配方粒度分布范围在1~1000 μm之间,其中主要为4~11 μm和400~800 μm之间,主要是因为一些处理剂材料,如磺化沥青本身为抗高温处理剂,在常温条件下很难溶解软化,导致粒度较大,与地层的裂隙宽度不适应。而复杂地层冲洗液配方粒度分布范围总体较为合理,主要为10~50 μm之间,符合研究人员对矿区典型岩样SEM试验得出的微裂隙宽度范围(主要集中在10~30 μm)。

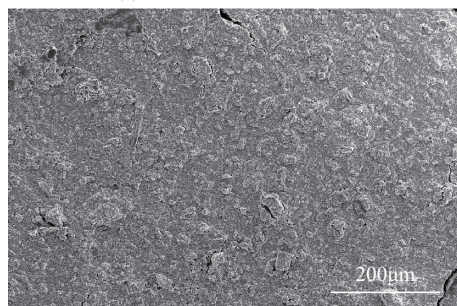
2.3.3.3 泥皮质量分析

主要对3种不同配方做中压滤失试验后的泥皮

进行扫描电镜微观分析,以评价泥皮质量,见图8。



(a)常规低固相配方冲洗液



(b)复杂地层冲洗液

图8 不同冲洗液配方泥皮(200×)

Fig.8 Mud skin with the different flushing liquid formulas (200×)

从图8可以看出,常规低固相配方冲洗液泥皮在微观下孔隙发育,难以对地层形成封堵,自由水易沿着这些微孔隙进入到地层,进而导致孔壁失稳;而复杂地层配方冲洗液泥皮虽然表面形态不一,但总体较为致密,可以在岩石表面形成一道封堵层,阻止自由水的渗透,起到良好的护壁防塌作用。

2.3.4 润滑性评价

主要通过润滑仪和泥饼黏滞系数测量仪分别测试冲洗液的润滑性以及泥饼的黏滞系数,评价冲洗液的润滑性能,具体试验结果见表8。

表8 不同冲洗液的润滑性能测试结果

Table 8 Lubrication performance test results of the different flushing liquid formulas

冲洗液配方	润滑系数	泥饼黏滞系数
常规低固相配方	0.23	0.2493
复杂地层配方	0.12	0.1405

从表8可以看出,复杂地层冲洗液体系相比常规低固相冲洗液体系具有较低的润滑系数及泥饼黏滞系数,展现出良好的润滑性能。

3 现场应用

3.1 试验钻孔情况

现场应用选在二矿区 ZK II 700-14-1 钻孔,设计孔深 750 m,设计倾角 88°、方位角 38.38°。钻孔位于井下巷道内,距地表高程约 1100 m,地应力高。在上部地层钻进过程中采用常规低固相冲洗液配方,由于钻遇大量强水敏性黏土矿物(图9),冲洗液滤失量大导致黏土矿物水化膨胀严重造成卡钻事故。同时由于高地应力,钻孔强烈涌水,冲洗液遭受地下水的稀释而性能恶化,性能控制困难,上部地层平均日进尺不足 6 m。



图9 上部强水敏性黏土矿物

Fig.9 Strong water-sensitive clay minerals from the upper section

3.2 冲洗液配方及性能

现场应用冲洗液配方为:4% 膨润土+0.2% 纯碱+2% 降失水抑制剂 FLI-1+2% 封堵防塌剂 FDC-1+3% 无机抑制剂 LHK+2% 封堵剂 FG-1。现场冲洗液性能控制范围见表9。

3.3 现场应用效果

(1)实现了复杂地层超长裸眼安全钻进。该钻

表9 现场冲洗液性能参数控制范围

Table 9 Control range of performance parameters of on site flushing fluid

性能参数	参数值
密度/(g·cm ⁻³)	1.05~1.15
漏斗黏度/s	25~35
塑性黏度/(mPa·s)	13~25
动切力/Pa	8~12
(初/终切力)/Pa	0.5~1/2~5
失水量/mL	5~10
pH值	8~9
泥饼黏滞系数	0.12~0.15

孔通过优化冲洗液体系及配方,改善冲洗液性能,进一步提高了冲洗液的各项性能指标,实现了从11.40~626 m的超长裸眼安全钻进,裸眼段长达614.60 m,展现出良好的护壁防塌性能。

(2)在试验中钻遇多层蚀变带和破碎带,尤其是在下部495~505、532~545、560~575、595~631、658~679、699~718、733~742 m等多个层段钻遇强蚀变及破碎地层,依靠冲洗液良好的抑制性和防塌护壁性,有效抑制黏土矿物水化缩径和稳定孔壁,均未出现明显孔内复杂情况,部分地层岩心情况见图10所示。



(a)强蚀变地层



(b)强破碎地层

图10 钻孔复杂地层岩心情况

Fig.10 Core situation of drilling complex strata

(3)该孔在上部地层钻进过程中有涌水现象发生,通过改变冲洗液配方提高了冲洗液密度,平衡地层压力,有效减轻涌水对钻进的影响;虽然该钻孔为小角度斜孔,但在后期起下大钻中通畅,无明显遇阻现象,体现出冲洗液良好的封堵性和润滑性。

(4)通过在该钻孔的试验,显著提高了施工效率,总工期仅为70天,创造了该矿区井下巷道750 m钻孔最短完钻时间记录,有效降低了生产成本,全孔未发生严重孔内事故。同时保障了岩心采取质量,平均岩心采取率达到了95.71%。

4 结论

(1)本研究分析了金川矿区孔壁失稳频发的主要原因,包括高地应力、强水敏性黏土矿物、高度破

碎的地质构造以及强烈的涌水活动。针对性地提出了提高孔壁稳定性的冲洗液技术对策。

(2)通过系统的处理剂优选实验,确定了适用于金川矿区复杂地层钻探的核心处理剂,包括降失水抑制剂 FLI-1、防塌封堵剂 FDC-1、抑制剂 LHK 和封堵剂 FG-1;基于正交试验方法,成功研制出适用于金川矿区复杂地层的冲洗液配方,对配方进行的全面性能评价表明,该冲洗液体系具备优良的流变性、抑制性、封堵性和润滑性。

(3)现场应用表明,该冲洗液配方能够满足金川矿区复杂地层钻探需求,基本解决了矿区孔壁失稳难题,大幅降低了事故率,提高了钻探效率,为矿区深部资源勘探开发提供了可靠的技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 郭捷,张功海,宋焯炜,等.联合 Sentinel-1A 升降轨的 DS-InSAR 金川矿区形变提取[J].测绘通报,2025(3):1-7.
GUO Jie, ZHANG Gonghai, SONG Yewei, et al. Deformation extraction of Jinchuan mining area using DS-InSAR with Sentinel-1A ascending and descending orbit[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(3):1-7.
- [2] 宋厚园.缓角度绳索取芯钻孔井壁稳定性分析及钻井液研究[D].长沙:中南大学,2012.
SONG Houyuan. Delay angle wire-line core drilling hole wall stability analysis and research on drilling fluid [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [3] 胡郁乐,杨涛,董海燕.金川科学深钻预导孔钻井液技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S1):13-15.
HU Yule, YANG Tao, DONG Haiyan. The research of fluid in Jinchuan deep scientific drilling pilot hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(S1): 13-15.
- [4] 郑文龙,乌效鸣,许洁,等.中国深部岩心钻探钻井液技术应用现状及研究方向探讨[J].地质与勘探,2019,55(3):826-832.
ZHENG Wenlong, WU Xiaoming, XU Jie, et al. Application situation and focused research of drilling fluid technology in deep core drilling projects of China [J]. Geology and Exploration, 2019, 55(3):826-832.
- [5] 夏健.金川某矿区深孔钻井液的研制及现场应用[J].中国高新技术企业,2013(14):90-91.
XIA Jian. Development and on-site application of deep hole drilling fluid in a mining area of Jinchuan [J]. China High-Tech Enterprises, 2013(14):90-91.
- [6] 张席芝,杨亚平,寇永渊,等.金川矿区复杂地层钻探孔壁失稳机理与对策研究[J].钻探工程,2023,50(6):69-76.
ZHANG Xizhi, YANG Yaping, KOU Yongyuan, et al. Research on mechanism and countermeasure of borehole wall destabilization in complex formation of Jinchuan mining area [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):69-76.
- [7] 刘俊辉,李晓东.广西苗儿山大厚度水敏性地层冲洗液技术研

- 究及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 154-162.
- LIU Junhui, LI Xiaodong. Research and application of drilling fluid technology for thick water-sensitive formations in the Miaoshan area of Guangxi[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 154-162.
- [8] 李晓东, 熊正强, 付帆, 等. 环保型弱凝胶护壁护心钻井液研究与应用[J]. 地质与勘探, 2024, 60(3): 581-591.
- LI Xiaodong, XIONG Zhengqiang, FU Fan, et al. Research and application of environment-friendly weak-gel drilling fluid for wall and core protection[J]. Geology and Exploration, 2024, 60(3): 581-591.
- [9] 韩毅, 张绍和, 王文彬, 等. 湘西北复杂构造区雪峰山先导孔钻进技术[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 20-25.
- HAN Yi, ZHANG Shaohe, WANG Wenbin, et al. Drilling technology for Xuefengshan pilot hole for shale gas geological survey in northwest Hunan[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 20-25.
- [10] 史铭, 杨亚平, 张席芝, 等. 无固相冲洗液防塌护壁性能强化改进试验研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 191-195.
- SHI Ming, YANG Yaping, ZHANG Xizhi, et al. Experimental study on strengthening and improving the anti-collapse and wall protection performance of solid-free flushing fluid[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 191-195.
- [11] 闫和平, 李文平, 段中会, 等. 黄陇煤田典型特厚煤层综放开采涌水机理与导水裂隙带发育规律[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(5): 129-138.
- YAN Heping, LI Wenping, DUAN Zhonghui, et al. Water inrush mechanism and water-conducting fractured zone development patterns of a typical ultra-thick coal seam in the Huanlong coalfield during fully mechanized mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(5): 129-138.
- [12] 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.
- [13] Maliardi A, Molaschi C, De Grandis G, et al. High performance water base fluid improves rate of penetration and lowers torque successful application and results achieved by drilling a horizontal section through the reservoir[C]//Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Ravenna: Offshore Mediterranean Conference, 2015: OMC-2015-343.
- [14] Ponmani S, Nagarajan R, Sangwai J S. Effect of nanofluids of CuO and ZnO in polyethylene glycol and polyvinylpyrrolidone on the thermal, electrical, and filtration-loss properties of water-based drilling fluids[J]. SPE, 2016, 21(2): 405-415.
- [15] 刘凤双, 王皓, 尹飞, 等. 承德宽城坳陷重点地区页岩油气资源调查井冲洗液技术研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 51-58.
- LIU Fengshuang, WANG Hao, YIN Fei, et al. Research on flushing fluid technology for shale oil and gas resources survey well in key areas of Kuancheng Depression in Chengde[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 51-58.
- [16] 赵德康, 韩冰, 曾一凡, 等. 渗流-应力耦合下断层带裂隙岩体渗透演化规律[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(7): 154-165.
- ZHAO Dekang, HAN Bing, ZENG Yifan, et al. Permeability evolutionary patterns of fractured rock masses in fault zones under seepage-stress coupling[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(7): 154-165.
- [17] 于富安, 刘维平, 孙健越. 双聚防塌冲洗液在覆盖层钻探中的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 59-64.
- YU Fuan, LIU Weiping, SUN Jianyue. The application of dual-polymer anti-sloughing flushing fluid for drilling in covering layers[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 59-64.
- [18] 高书阳, 薄克浩, 张亚云, 等. 川东北陆相页岩储层井壁失稳机理研究[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(2): 217-224.
- GAO Shuyang, BO Kehao, ZHANG Yayun, et al. Study on wellbore instability mechanism of continental shale reservoir in northeastern Sichuan Basin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2025, 42(2): 217-224.
- [19] 王鹏飞, 郭曜欣, 翟育峰, 等. 小秦岭金矿田 3500m 特深孔冲洗液技术[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 115-121.
- WANG Pengfei, GUO Yaoxin, ZHAI Yufeng, et al. The drilling fluid technology of 3500m extra-deep hole in Xiaoling Gold Field[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 115-121.
- [20] 吴春林, 文明, 邱正松. 井壁强化承压防漏技术模拟实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2025, 42(3): 318-323.
- WU Chunlin, WEN Ming, QIU Zhengsong. Simulation experiment study on lost circulation control by borehole wall strengthening[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2025, 42(3): 318-323.
- [21] 张统得, 程悦瀚, 赵瞻, 等. 四川盆地西南缘页岩气地质调查川马页 1 井钻井关键技术[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 10-19.
- ZHANG Tongde, CHENG Yuehan, ZHAO Zhan, et al. Key drilling technologies for Well Chuanmaye 1: geological survey of shale gas in the southwest margin of Sichuan Basin[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 10-19.
- [22] 何希鹏, 肖翠, 高玉巧, 等. 鄂尔多斯盆地延川南煤层气田地质特征及勘探开发关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 54-71.
- HE Xipeng, XIAO Cui, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and key technologies for exploration and development of the Yanchuannan coalbed methane field, Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 54-71.
- [23] 程悦瀚, 张统得, 赵瞻, 等. 裸眼侧钻技术在川马页 1 井的应用实践[J]. 钻探工程, 2024, 51(5): 122-129.
- CHENG Yuehan, ZHANG Tongde, ZHAO Zhan, et al. Application of open hole sidetracking technology in Well Chuanmaye 1[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 122-129.

(编辑 王文)