

双聚防塌钻井液在北京某地热井中的应用研究

孙振添^{1,2}, 邹志飞^{3,4}, 何铁柱^{1,2}, 李晓东^{3,4*}, 张文洋^{1,2}, 陈家玺^{1,2}, 孔繁玉^{1,2}, 王煜曦^{1,2}

(1. 自然资源部浅层地热能重点实验室, 北京 100012; 2. 北京市地热调查研究所, 北京 102218; 3. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 4. 中国地质调查局绿色钻探技术创新中心, 北京 100083)

摘要:北京市某地热井在钻探施工中遇到泥岩造浆严重、钻井液性能恶化、井壁坍塌、卡钻埋钻事故频发等诸多技术难题。针对该井存在的问题, 本文系统阐述了原钻井液体系的改进方案及双聚防塌钻井液的工程应用情况。通过室内实验, 对原钻井液的流变性、滤失量、抑制性等性能指标进行优化改进, 并在钻探现场应用, 实现原钻井液向双聚防塌钻井液体系的逐步转化。实践证明, 改进后的钻井液在护壁效果、流变特性、润滑性能及钻进效率等方面均获得显著提升。研究同时指出当前钻井工艺中固控设备效能不足等局限性, 并提出针对性技术建议, 为同类地热井工程的钻井液设计与施工提供重要参考。

关键词: 地热井; 双聚防塌钻井液; 井壁坍塌; 泥岩造浆; 固控设备

中图分类号: TE254; P634.6 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0121-08

Application research of bi-polymer anti-collapse drilling fluid in a geothermal well in Beijing

SUN Zhentian^{1,2}, ZOU Zhifei^{3,4}, HE Tiezhu^{1,2}, LI Xiaodong^{3,4*}, ZHANG Wenyang^{1,2},
CHEN Jiayi^{1,2}, KONG Fanyu^{1,2}, WANG Yuxi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Shallow Geothermal Energy, Ministry of Natural Resources, Beijing 100012, China; 2. Beijing Geothermal Research Institute, Beijing 102218, China; 3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 4. Technology Innovation Center of Green Drilling, China Geological Survey, Beijing 100083, China)

Abstract: During the drilling construction of a geothermal well in Beijing, numerous technical challenges were encountered, including severe mud-making in mudstone, deterioration of drilling fluid performance, hole-wall collapse, and frequent occurrences of pipe sticking and burying accidents. Aiming at the above problems, this paper systematically expounds the improvement scheme of the original drilling fluid system and the engineering application of the bi-polymer anti-collapse drilling fluid. Through laboratory experiments, the performance indexes of the original drilling fluid such as rheological properties, filtration loss, and inhibition were optimized and improved, and the bi-polymer anti-collapse drilling fluid system was gradually transformed from the original drilling fluid and applied on field drilling. The practice has proved that the improved drilling fluid has achieved significant improvements in hole protection effect, rheological characteristics, lubrication performance, and drilling efficiency. The study also points out the limitation such as insufficient efficiency of solid control equipment in the current drilling technology and puts forward targeted technical suggestions, providing an important reference for the drilling fluid design and construction of the similar geothermal well projects.

Key words: geothermal well; bi-polymer anti-collapse drilling fluid; hole-wall collapse; mud-making in mudstone; solid control equipment

收稿日期: 2025-05-25; 修回日期: 2025-06-10 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.016

第一作者: 孙振添, 男, 汉族, 1988年生, 高级工程师, 固体地球物理学专业, 硕士, 主要从事地热勘查开发利用评价、地热钻探及地球物理勘查等研究工作, 北京市朝阳区立水桥甲2号, sz06106116@126.com。

通信作者: 李晓东, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 应用化学专业, 硕士, 从事钻井液技术研究与应用工作, 北京市海淀区学院路29号, 286822486@qq.com。

引用格式: 孙振添, 邹志飞, 何铁柱, 等. 双聚防塌钻井液在北京某地热井中的应用研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 121-128.

SUN Zhentian, ZOU Zhifei, HE Tiezhu, et al. Application research of bi-polymer anti-collapse drilling fluid in a geothermal well in Beijing[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 121-128.

0 引言

地热资源作为一种储量丰富、稳定可靠的清洁能源,其开发利用对于优化能源结构、实现“双碳”目标具有战略意义。在建筑供暖领域,地热能可提供高效稳定的供热解决方案,显著降低化石能源消耗;在温泉保健产业中,地热流体的特殊矿物成分使其成为医疗康养的重要资源载体。北京市丰台区作为城市核心功能拓展区,能源结构转型需求迫切,通过地热资源勘查项目实施地热井钻探,获取勘查区地层结构、热储岩性、地热流体温度等,为地热资源进一步勘查提供依据,并对该区域内地热资源开发利用提出建议。

该地热井在钻探施工过程中遇到水敏性泥岩造浆严重、钻井液流变性恶化、井壁坍塌及卡钻埋钻等诸多难题,导致该井历经多次侧钻仍难以推进,工程周期延长近3年,经济损失巨大。此类问题不仅制约单井开发效率,更暴露了传统钻井液体系在水敏性复杂地层中的技术短板,凸显了开展钻井液体系创新研究的必要性^[1-2]。

本文以该地热井工程为研究对象,结合地层情况与钻井液性能分析测试,系统开展原钻井液体系缺陷诊断、双聚防塌钻井液配方优化及现场应用工艺研究。通过室内流变性调控实验、泥岩抑制性评价及滤失性能测试,构建了以高分子聚合物包被-沥青类材料抑制封堵为核心的双聚防塌钻井液体系,并通过现场第4次侧钻工程应用,展现了该体系在抑制泥岩造浆、增强井壁稳定性及提升钻进效率中的显著效果。研究成果不仅为该井的顺利完钻提供了技术支撑,更有望为华北地区类似水敏性地层的地热井钻井工程提供可复制的解决方案,推动地热资源开发向更深层、更复杂地质条件拓展。

1 工程概况

1.1 项目概况

北京市丰台区某地热资源勘查项目在西三环丰益桥南侧实施了地热勘探1号井,设计深度3600 m,目的层为蓟县系白云岩地层。项目旨在通过钻井工程初步查明勘查区地层结构、热储岩性、埋深、厚度、地热增温率、地热流体温度、压力和化学组分等,为地热资源进一步勘查提供依据,并对该区域内地热资源开发利用提出建议。

1.2 地质概况

1.2.1 区域地质

勘查区位于华北断坳(Ⅱ₂)北京迭断陷(Ⅲ₆)内的坨里-丰台迭凹陷(Ⅳ₁₄)中部。该凹陷呈北东向长条状展布,基岩由中上元古界及中生界下白垩统组成,区域上断裂构造发育,主要为北东向张性断裂。

1.2.2 地层情况

勘查区地表被第四系覆盖,自上而下依次为第四系(Q)、新近系(N)+古近系(E)、白垩系(K)、侏罗系(J)、青白口系(Qn)和蓟县系(Jx),热储目的层为蓟县系。

各地层岩性和厚度在不同钻孔中有一定差异。第四系岩性主要为河流相砂砾石、细砂及黏土;新近系和古近系岩性为泥岩、砂岩,并夹有薄层玄武岩;白垩系岩性主要为泥岩、页岩,以及粉砂质泥岩、火山碎屑岩、砾岩和安山岩等;侏罗系岩性主要为安山岩、凝灰岩及安山质火山角砾岩等;青白口系主要为一套碎屑岩-碳酸盐岩沉积地层,岩性主要为泥灰岩、砂岩、页岩;蓟县系岩性以海相沉积的灰、青灰色中厚层燧石或硅质条带白云岩为主,包括铁岭组(Jxt)、洪水庄组(Jxh)、雾迷山组(Jxw)和杨庄组(Jxy)。其中铁岭组(Jxt)和雾迷山组(Jxw)岩性主要为碳酸盐岩,为北京地区地热资源开发的主要热储层^[3]。

2 施工设备及技术工艺

2.1 仪器设备

现场配备RG30型钻机、QZ3NB-500型与SL3NB-1300型泥浆泵,以及振动筛、除砂器、离心机等固控设备,并配备马氏漏斗黏度计、密度计、中压滤失仪等钻井液测试仪器。

2.2 钻井液循环系统

现场钻井液循环系统由3个20 m³泥浆罐组成,1号罐配备振动筛和除砂器,2号罐配备离心机,实现钻井液的分级处理。

2.3 井身结构

该井采用四开井身结构(见图1)。

一开井深0~350 m,井径 $\Phi 444.5$ mm,下入 $\Phi 339.7$ mm $\times$ 9.65 mm石油套管,深度350 m,水泥固井,水泥浆返至地表。

二开井深350~1800 m,井径 $\Phi 311$ mm,下入 Φ

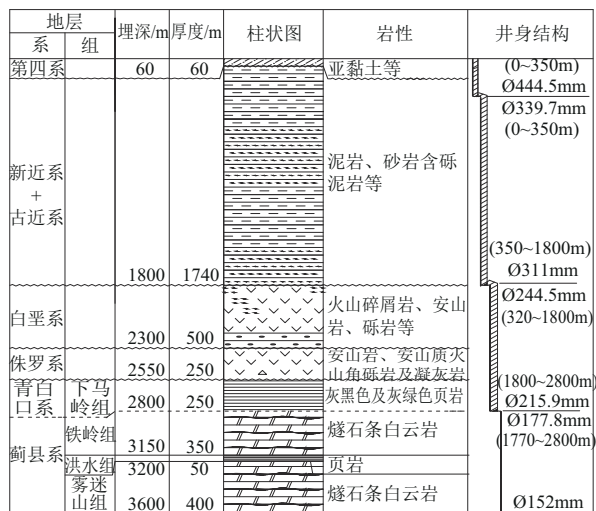


图 1 井身结构设计示意

Fig.1 Schematic diagram of well configuration design

244.5 mm×10.03 mm 石油套管,深度 270~1800 m,与表层套管重叠≥30 m,环空用“全环空”方式水泥固井。

三开井深 1800~2800 m,井径 Ø215.9 mm,下入 Ø177.8 mm×9.19 mm 石油套管,深度 1770~2800 m,与上部技术套管重叠≥30 m,环空用“全环空”方式水泥固井。

四开井深 2800~3600 m,井径 Ø152.4 mm,根据地层破碎情况决定是否下管。

2.4 钻具组合

各开次钻具组合根据井段和井径要求采用相应的钻具组合,详见表 1。

表 1 各开次钻具组合

Table 1 Bottom hole assembly for each section

开次	钻具组合
一开	Ø444.5 mm 三牙轮钻头 + Ø203 mm 钻铤 (2~3 柱) + Ø178 mm 钻铤 (2~3 柱) + Ø127 mm 钻杆
二开	Ø311 mm 三牙轮钻头 + Ø203 mm 钻铤 (2~3 柱) + Ø178 mm 钻铤 (2~3 柱) + Ø127 mm 钻杆
三开	Ø215.9 mm 三牙轮钻头 + Ø159 mm 钻铤 (4~6 柱) + Ø121 mm 钻铤 (2 柱) + Ø89 mm 钻杆
四开	Ø152.4 mm 三牙轮钻头 + Ø121 mm 钻铤 (6 柱) + Ø73 mm 钻杆 (N 柱)

3 现场施工存在的问题

3.1 工程难点

钻探施工难点地层主要为下马岭组 (2600~

2800 m) 以及铁岭组底部 (3100~3200 m) 的泥页岩地层,此 2 段地层普遍存在地层造浆严重、井壁稳定性差、易发生坍塌掉块事故。

该井于 2018 年开钻,在三开钻进至 3200 m 左右的铁岭组页岩地层时发生井壁坍塌,导致埋钻事故,处理无果后在 2600 m 处侧钻;2019 年侧钻至 3250 m 时再次发生坍塌埋钻事故,在 2860 m 处再次侧钻,至 2020 年 8 月钻至 3210 m 又出现坍塌埋钻事故,反复处理仍未能解决,暂时放弃施工;2021 年重新组织施工,在 2380 m 处进行第 3 次侧钻,在钻进至该地层时依然遇到相同问题,再次从 1550 m 开窗进行第 4 次侧钻,钻至 2600 m 时,遇到定向钻进扭矩和提下钻阻力大、坍塌掉块现象明显、地层造浆严重导致钻井液排放频繁、进尺效率低等问题,决定更换优质钻井液进行钻进。

3.2 原钻井液使用情况

原钻井液主要使用的材料包括膨润土、腐植酸钾、磺化沥青、水解聚丙烯腈铵盐、无荧光防塌润滑剂、高黏羧甲基纤维素。使用过程中存在的主要问题如下:

(1)防塌抑制性能不足。钻井液无法抑制泥岩地层水化造浆,导致钻井液黏度剧增;同时泥岩地层井壁水化膨胀或分散剥落,钻井液防塌抑制效果差,无法起到有效的防塌护壁作用,易发生坍塌、掉块问题,严重时造成埋钻事故。

(2)流变性能恶化。由于现场固控设备效能不足,尤其是离心机无法正常使用,钻井液中的泥岩颗粒无法清除,在钻井液中形成恶性循环,钻井液黏度持续升高,导致现场频繁排浆并配制新浆以维持钻井液性能,钻井液材料消耗大,且无法保持稳定的流变性能。

(3)滤失量大。钻井液中无用固相多,钻井液材料降滤失效果差,滤失量过大,在井内液柱压力下钻井液中的大量水分渗入地层,砂岩地层井壁易形成虚厚泥皮,增加了黏附卡钻的风险,泥岩地层易吸水膨胀缩径或分散剥落出现坍塌掉块问题。

4 钻井液改进方案研究

4.1 钻井液体系优化设计

根据该井所遇到的问题及钻井液存在的不足,在原钻井液基础上进行改进,设计钻井液优化方案:

(1)原钻井液由于地层造浆后黏度过高,首先通过加入清水和稀释剂对原钻井液进行处理,降低钻井液黏度^[4-6];

(2)加入抑制性能良好的改性沥青和包被剂,其中,改性沥青为沥青衍生物,可通过填充泥页岩微裂隙,形成弹性封堵膜,阻止滤液侵入泥页岩地层;包被剂为聚丙烯酰胺类高分子聚合物,可通过长链高分子的包被吸附作用将黏土颗粒聚集成团,避免黏土颗粒水化分散。两者通过物理封堵阻隔滤液侵入与化学吸附抑制黏土颗粒分散的协同机制,实现对泥页岩水化分散的双重抑制,从而降低泥岩造浆的影响,提高钻井液的防塌护壁性能^[7-8];

(3)加入降滤失效果良好的降失水剂,降低钻井液滤失量,改善泥皮质量,避免形成厚泥皮,同时减小钻井液中的水相对地层的浸泡破坏作用^[9-10];

(4)加入随钻封堵类的材料,填充封堵破碎地

层或裂隙发育地层中的缝隙,支撑强化井壁,减少钻井液渗漏^[11-13];

(5)加入具有良好的极压润滑效果的无荧光润滑剂,降低定向钻进摩擦阻力,同时可减小钻具磨损^[14-15]。

通过以上分析,针对钻井液的流变性、防塌抑制性、滤失造壁性、封堵性及润滑性等性能进行改进,将原钻井液逐步转化为双聚防塌钻井液,该钻井液体系在多个钻探施工现场进行过应用,展现了良好的防塌护壁效果^[16-21]。

4.2 钻井液室内实验

4.2.1 原钻井液性能测试

针对现场采取的原钻井液样品,按照方案设计进行钻井液室内评价实验。原钻井液性能测试结果见表2。

表2 原钻井液性能测试结果

Table 2 Performance test results of original drilling fluid

配 方	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	动塑比/[Pa/ (mPa·s)]	静切力/ (Pa/Pa)	API滤失 量/mL	泥皮/ mm	润滑 系数	固相含 量/%
原浆(手动搅拌)	69	33	36.8	1.09	15/113	9.0	2.0	0.28	36
原浆(8000 r/min 高速搅拌)	26.5	17	9.7	0.56	2/110	10.0	2.0	0.27	36

结果表明:原钻井液经过高速剪切稀释后黏度明显下降,反映了现场钻井液循环过程中泵排量低、钻井液流速慢,剪切稀释不足,导致钻井液流变性差^[22-23]。原钻井液静切力过大,证明钻井液中因地层造浆导致固相含量过高,固控设备无法彻底清

除有害固相^[24]。

4.2.2 原钻井液稀释实验

将原钻井液与清水按不同比例进行混合后测试性能,结果见表3。

表3 原钻井液中加入不同比例清水后的性能测试结果

Table 3 Performance test results after adding different proportions of water into original drilling fluid

原浆与清水 比例	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	动塑比/ [Pa/(mPa·s)]	静切力/ (Pa/Pa)	API滤失量/ mL	泥皮/ mm
4:1	10.5	7	3.6	0.5	0.5/42	10	0.8
3:1	9	7	2	0.29	0.5/24	12	0.8
2:1	7	6	1	0.17	0.1/0.5	13	0.8
1:1	5	5	0.5	0.11	0.1/0.2	15	1
1:2	2.5	2	0.5	0.25	0.1/0.5	22	0.8
1:3	1.5	1	0.5	0.5	0.1/0.5	29	1

随清水加量的增加,钻井液的黏度和切力逐渐降低,滤失量逐渐增加,但动塑比先降低后又逐渐升高,表明钻井液中黏土相含量高,流变性能不稳定。

4.2.3 稀释剂优选

在原钻井液中加入不同稀释剂后测试性能,结果见表4。

表 4 原钻井液中加入不同稀释剂后的性能测试结果

Table 4 Performance test results after adding different diluents into original drilling fluid

配 方	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切力/ Pa	动塑比/ [Pa/(mPa·s)]	静切力/ (Pa/Pa)	API 滤失量/ mL	泥皮/ mm
原浆+1% 稀释剂 A	12	11	1.0	0.09	0.8/1.5	7.0	0.5
原浆+1% 稀释剂 B	34.5	15	19.9	1.30	49/115	8.0	0.8
原浆+1% 稀释剂 C	10.5	7	3.6	0.50	0.1/0.5	9.0	0.5

通过对 3 种稀释剂的实验,发现稀释剂 C 的稀释效果最佳,黏度与切力降低幅度较大,同时保持了最佳的动塑比,因此选择稀释剂 C,代号为 GJN。

4.2.4 钻井液配方改进

以原钻井液和清水比例 1:3 混合液为基浆,加

入不同比例的降失水剂(GPNH)、改性沥青防塌剂(GLA)、包被剂(GBBJ)、增黏剂(GTQ)、膨润土、无荧光润滑剂(GLUB)等钻井液材料,对原钻井液进行性能改进,测试改进后的钻井液性能,表 5 列举了具有代表性的几组配方测试结果。

表 5 改进后的钻井液性能测试结果

Table 5 Performance test results of improved drilling fluid

配 方	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	动切 力/Pa	动塑比/[Pa/ (mPa·s)]	静切力/ (Pa/Pa)	API 滤失 量/mL	泥皮/ mm	润滑 系数
基浆+1% GPNH+1% GLA+0.2% GBBJ	13.5	10	3.6	0.35	1.5/18	10.0	0.2	0.15
基浆+1% GPNH+1% GLA+0.2% GBBJ+ 3% 膨润土	20.5	12	8.7	0.71	3.5/40	9.0	0.2	0.16
基浆+1% GPNH+1% GLA+0.2% GBBJ+ 0.5% GTQ	25.5	13	12.8	0.96	6/24	9.0	0.2	0.16
基浆+1% GPNH+1% GLA+0.2% GBBJ+ 3% 膨润土+0.5% GLUB	21	13	8.2	0.62	4/38	8.8	0.2	0.08

优化改进后的钻井液具有良好的流变性,黏度和切力适中;加入优质膨润土及降失水剂 GPNH 后形成紧密堆积结构,从而降低钻井液滤失量,使泥皮厚度降至 0.2 mm,形成的泥皮薄而韧,结合改性沥青和包被剂的协同抑制作用,显著提高了钻井液防塌护壁性能,且润滑性能良好。根据现场实际需要,若携带能力不足时,可加入膨润土或增黏剂提高黏度和切力,同时进一步降低滤失量;若地层造浆导致钻井液黏切增加,可加入稀释剂 GJN 来降低黏切,保证钻井液具备良好的流动性。

通过室内优选实验,采用原钻井液和清水比例 1:3 混合,再按照配方“1% GPNH+1% GLA+0.2% GBBJ+3% 膨润土+0.5% GLUB”加入混合液中,可有效改善钻井液性能。

5 双聚防塌钻井液现场应用情况

5.1 钻井液组成及配方

双聚防塌钻井液为低固相聚合物钻井液体系,

其主要材料及加量详见表 6。

表 6 配制 1 m³双聚防塌钻井液所需要的材料及加量

Table 6 Materials and dosage required for preparing 1m³ of bi-polymer anti-collapse drilling fluid

材料名称	代号	作 用	加量/kg
膨润土		造浆材料	30~50
降失水剂	GPNH	降低滤失量,形成薄韧泥皮	10~15
改性沥青	GLA	提高抑制性,防塌护壁	10~15
稀释剂	GJN	降低黏度,减轻造浆影响	0~10
包被剂	GBBJ	包被絮凝岩屑,促进固相清除	2~3
随钻堵漏剂	GPC	封堵地层裂隙,强化井壁	10~20
封堵剂	GFD-1	封堵地层微裂隙,强化井壁	10~30
无荧光润滑剂	GLUB	润滑钻具,降低扭矩	5~10

现场钻井液加入清水稀释后按照配方“1% GPNH+1% GLA+0.2% GBBJ+3% 膨润土+0.5% GLUB”加入钻井液中,将原钻井液逐步转

化为双聚防塌钻井液体系。转化完成后,按照双聚防塌钻井液最优配方“清水+4%膨润土+1%GPNH+1%GLA+1%GPC+2%GFD-1+0.2%GBBJ+0.5%GJN+0.5%GLUB”配制新的钻井液。

5.2 钻井液现场配制

首先排掉部分原钻井液,在泥浆罐中注入适量清水,通过加料漏斗加入所需材料,与原钻井液混合,加完材料后开泵与井内钻井液建立循环,待钻井液循环均匀后即可正常扫孔钻进。钻进过程中使用配浆罐配制新的双聚防塌钻井液,保证循环钻井液总量保持在合理范围内。

5.3 钻井液性能

原钻井液黏度较高,通过加入双聚防塌钻井液配方材料,逐步调整改善性能,钻井液转化前后的漏斗黏度变化曲线如图2所示,原钻井液漏斗黏度超过300 s,通过逐步转化,在第4 d漏斗黏度降至69 s。稳定后的钻井液漏斗黏度维持在50~80 s,密度 $1.18\sim 1.34\text{ g/cm}^3$,API滤失量6~8 mL,泥皮厚度0.2 mm,pH值8~9。转换后的钻井液流变性能稳定,滤失量低,防塌护壁效果显著。

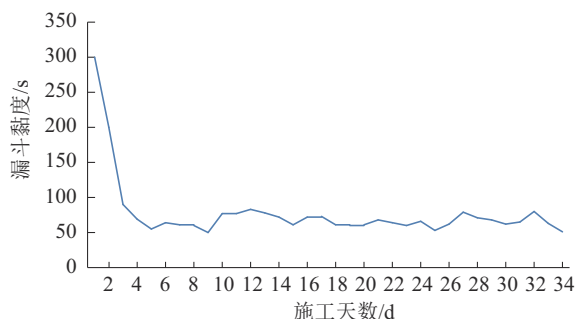


图2 现场钻井液漏斗黏度逐日变化

Fig.2 Daily change of funnel viscosity of on-site drilling fluid

5.4 现场维护方法

现场钻井液使用和维护应注意以下几方面:

(1)严格按配方配制钻井液,钻井液循环中,需根据钻井液性能变化及时调整维护钻井液性能。

(2)由于钻遇泥岩地层易造浆,加密测试钻井液黏度,根据黏度变化情况,适量补充稀释剂,保证钻井液流变性。

(3)关注泥浆罐液面变化,一旦发现钻井液消耗过大,及时增加随钻堵漏剂和封堵剂的加量,降

低钻井液漏失量;若漏失量较大,则应根据漏失情况,停止钻进,商讨并执行堵漏措施。

(4)关注振动筛返出岩屑情况,判断井内是否掉块,根据掉块情况调整钻井液黏度及防塌护壁性能。

(5)包被剂是高分子聚合物,消耗较快,可提前配制包被剂水溶液,定期加入泥浆罐中。

5.5 钻井液现场应用效果

2022年3月13日,自井深2649.21 m开始转换为双聚防塌钻井液体系,顺利扫孔到井底并钻进至完钻,完钻井深3626.56 m。双聚防塌钻井液现场应用取得效果如下:

(1)护壁效果明显提升。转化后的钻井液防塌护壁性能优良,在长裸眼以及井壁坍塌脆弱的不利条件下,扫孔及钻进过程中,上部已坍塌地层掉块现象明显减少,井壁稳定性有明显提升。

(2)流变性明显变好。出口的钻井液流动状态明显变好(见图3),振动筛可返出足量岩屑(见图4),地层造浆情况明显缓解,调整后的钻井液始终保持稳定的流变性。



图3 出口钻井液流动状态

Fig.3 Flow state of drilling fluid at outlet



图4 振动筛返出的岩屑

Fig.4 Cuttings returned from vibrating screen

(3) 润滑性能良好。钻井液本身润滑性能良好,加入无荧光润滑剂后进一步提升了钻井液润滑性,定向钻进托压现象从原来的平均托压 22 kN 降至 8 kN,托压现象明显缓解。

(4) 钻进速度和效率明显提高。以 2676 m 左右的地层为例,之前施工时每 8 h 进尺不到 1 m,转换钻井液后每 8 h 进尺提高至 2.4 m,同时由于井壁稳定,减少了大量扫孔等辅助时间,施工效率明显提高。

6 结论及建议

通过对北京某地热井钻探工程中钻井液体系的系统性研究与工程实践,形成以下结论:

(1) 通过引入改性沥青类防塌剂 (GLA) 与高分子包被剂 (GBBJ) 的“双聚协同机制”,构建了低固相、强抑制性钻井液体系。室内实验表明,改进后钻井液 API 滤失量从原浆的 9~10 mL 降至 6~8 mL,泥皮厚度由 2.0 mm 减至 0.2 mm,动塑比优化至 0.35~0.96,显著提升了泥岩地层的抑制能力和井壁稳定性。

(2) 通过添加无荧光润滑剂 (GLUB),定向钻进托压现象显著减少,在 2676 m 左右典型井段机械钻速从原工艺的 0.12 m/h 提升至 0.3 m/h,钻进效率提升了 150%,体现了该体系在复杂地层中的高效破岩与减阻特性。

(3) 建立了“稀释-抑制-封堵-润滑”四步转化工艺,通过清水稀释 (原浆:清水=1:3) 降低初始黏度,分阶段添加稀释剂、改性沥青、包被剂、降失水剂 GPNH 等处理剂,实现体系平稳过渡,使改进后的钻井液在防塌护壁、流变性能、润滑性和钻进效率等方面均取得了显著成效,为地热井的顺利钻进提供了有力保障。

(4) 建议现场完善固控设备配置,确保离心机、除泥器、除砂器等设备正常运行,建议采用处理量 $\geq 30 \text{ m}^3/\text{h}$ 的立式离心机,构建振动筛-除砂器-除泥器-离心机四级固控体系,有效控制钻井液无用固相含量。

参考文献 (References):

- [1] 张宏涛,李虎辰,吴江博.地热井施工钻井液使用管理[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(18):50-52.
ZHANG Hongtao, LI Huchen, WU Jiangbo. Use and management of drilling fluid in geothermal well construction[J]. China

- Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(18): 50-52.
- [2] 杨涛.地热井施工钻井液的使用管理方式探讨[J].云南化工, 2019, 46(6):99-100.
YANG Tao. Research and discussion on management methods of drilling fluid in geothermal well construction [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(6):99-100.
- [3] 刘凯,王珊珊,孙颖,等.北京地区地热资源特征与区划研究[J].中国地质,2017,44(6):1128-1139.
LIU Kai, WANG Shanshan, SUN Ying, et al. Characteristics and regionalization of geothermal resources in Beijing[J]. Geology in China, 2017, 44(6):1128-1139.
- [4] 庞少聪,安玉秀,马京缘.近十年国内钻井液降粘剂研究进展[J].钻探工程,2022,49(1):96-103.
PANG Shaocong, AN Yuxiu, MA Jingyuan. Research progress of domestic drilling fluid viscosity reducer in recent ten years[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):96-103.
- [5] 徐生婧.水基钻井液用降粘剂的研究进展[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(15):99-101.
XU Shengjing. Research progress on viscosity reducers for water-based drilling fluids [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(15):99-101.
- [6] 李萌.钻井液用降粘剂评价基浆的确定[J].内蒙古石油化工, 2023, 49(3):105-108.
LI Meng. Determination of evaluation base slurry for drilling fluid using viscosity reducers[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2023, 49(3):105-108.
- [7] 李冰乐,王胜,袁长金,等.复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究[J].钻探工程,2023,50(6):85-91.
LI Bingle, WANG Sheng, YUAN Changjin, et al. Research on polymer alcohol anti-collapse flushing fluid for directional drilling of horizontal wire-line coring in complex mountain areas [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):85-91.
- [8] 田天.一种煤层防塌剂的制备及其性能研究[D].成都:西南石油大学,2016.
TIAN Tian. Preparation and performance study of a coal seam Anti collapse agent [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [9] 毛淋.钻井液用降滤失剂的研究进展[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(23):97-98.
MAO Lin. Research progress on fluid loss reducers for drilling [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(23):97-98.
- [10] 王梦园,薛曼,梁梦佳,等.改性柚子皮降滤失剂的合成与评价研究[J].钻探工程,2024,51(3):84-93.
WANG Mengyuan, XUE Man, LIANG Mengjia, et al. Synthesis and evaluation of modified pomelo peel fluid loss additives[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3):84-93.
- [11] 张斌,黄进军,李家学.随钻防漏堵漏技术的研究与应用[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2010,12(5):70-71,75.
ZHANG Bin, HUANG Jinjun, LI Jiaxue. Research and application of mud losses prevention and control technology while drilling [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 12(5):70-71,75.

- [12] 熊正强,陶士先,蒋睿,等.抗高温随钻封堵材料研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(12):33-36.
XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, JIANG Rui, et al. Research progress of high temperature resistant loss circulation material while drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(12):33-36.
- [13] 韩立国.新型随钻防漏堵漏钻井液技术研究[J].钻采工艺,2015,38(3):37-39,42.
HAN Ligu. Study on new type of lost circulation additive ask-1 while drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2015,38(3):37-39,42.
- [14] 刘胜,吴宇,由福昌.钻井液润滑性能评价方法研究进展[J].实验技术与管理,2023,40(6):18-29.
LIU Sheng, WU Yu, YOU Fuchang. Research progress of lubrication performance evaluation methods for drilling fluid[J]. Experimental Technology and Management, 2023,40(6):18-29.
- [15] 匡小东,陶际明,梁千山,等.润滑防卡钻井液技术研究与应用[J].清洗世界,2021,37(5):101-102.
KUANG Xiaodong, TAO Jiming, LIANG Qianshan, et al. Research and application of lubricating anti jamming drilling fluid technology[J]. Cleaning World, 2021,37(5):101-102.
- [16] 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.
- [17] 李艳宁,祝强,蒋睿,等.双聚-成膜冲洗液体系在山西怀仁鹅毛口页岩气——煤层气预查孔施工中的应用[J].地质装备,2017,18(1):32-34.
LI Yanning, ZHU Qiang, JIANG Rui, et al. Application of the dual polymer film-forming flushing fluid system in shale gas coalbed methane pre drilling construction in Emaokou, Huairan, Shanxi Province[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2017,18(1):32-34.
- [18] 王鲁朝,李晓东,翟育峰.汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-4S孔冲洗液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):27-31.
WANG Luzhao, LI Xiaodong, ZHAI Yufeng. Research on drilling fluids technology for WFSD-4S hole of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(2):27-31.
- [19] 吴召明,李晓东,陶士先.双聚防塌冲洗液在安徽何家圩子铁矿区钻探中的应用[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集.哈尔滨,2015:507-511.
WU Zhaoming, LI Xiaodong, TAO Shixian. Application of double polymer anti collapse flushing fluid in drilling of Hejiaweizi Iron mine area in Anhui Province[C]//Proceedings of the 18th National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Technical Academic Exchange Conference. Harbin, 2015:507-511.
- [20] 李攀义,单文军,储伟,等.双聚防塌冲洗液体系在GHW2井中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):12-15.
LI Panyi, SHAN Wenjun, CHU Wei, et al. Application of bi-polymer anti-caving drilling fluid system in GHW2[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(5):12-15.
- [21] 王景章,纪卫军,陶士先,等.双聚防塌冲洗液体系在辽阳红阳三矿煤田深部补勘项目中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):216-218.
WANG Jingzhang, JI Weijun, TAO Shixian, et al. Application of the dual polymer anti collapse flushing fluid system in the deep exploration project of the Hongyang Third Coalfield in Liaoyang[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(S1):216-218.
- [22] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].东营:中国石油大学出版社,2001.
YAN Jienian. Drilling Fluid Technology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001.
- [23] 郭金爱,赵静,杨国涛,等.钻井液剪切稀释性及其相关性研究[J].精细石油化工进展,2015,16(5):12-15.
GUO Jinai, ZHAO Jing, YANG Guotao, et al. Research on shear thinning and correlation of drilling fluid[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2015,16(5):12-15.
- [24] 邓建民,唐洪发,李登前.钻井液静切力与静置时间关系的触变方程[J].钻井液与完井液,2010,27(4):32-34.
DENG Jianmin, TANG Hongfa, LI Dengqian. Drilling fluid thixotropy equation for relationship of gel strength and stable time[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010,27(4):32-34.

(编辑 王文)