

水敏性地层钻探泥浆性能优化及配制

代万庆, 薛艳, 颜巧云

(河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 河南 郑州 450001)

摘要:依据河南许昌地热井水敏性地层钻探工程,在分析水敏性地层的成分、水化机理及钻进泥浆性能需求的基础上,确定水敏性地层钻进需要滤失量小、密度低、流变性好、抑制性强的泥浆。依据文献资料及生产实践经验,初步选出配制泥浆的材料和浓度,采用室内试验测定泥浆性能和正交试验极差分析法优选泥浆材料浓度,优化出泥浆最终的配比,经生产实践验证调整,最终确定了适应项目生产需求的泥浆配方。经实际生产检验,满足水敏性地层钻探需求,效果良好。

关键词:水敏性地层;地热井;孔壁稳定;泥浆处理剂;泥浆配制;正交试验极差分析

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2021)11-0022-07

Performance optimization and preparation of drilling mud for water sensitive formation

DAI Wanqing, XUE Yan, YAN Qiaoyun

(The First Geological Exploration Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: In reference to geothermal wells in water-sensitive strata in Xuchang city, Henan province, and based on the analysis of the composition, hydration mechanism and drilling mud performance requirements of water-sensitive strata, drilling mud with small filtration, low density, good rheological property and strong inhibition was specified for the water sensitive formation. Based on the literature and field experience, the components and their concentration for mud preparation were preliminarily selected, mud performance was determined by laboratory test, and component concentration was optimized by orthogonal test range analysis with the final mud make-up optimized. With field verification and adjustment, the mud formula suitable for field use was finally determined. field test has proven that it met the drilling requirements of water sensitive strata with good effect.

Key words: water sensitive formation; geothermal well; borehole wall stability; mud treatment agent; mud preparation; orthogonal test range analysis

0 引言

由各种粘土或粘土经后生作用形成的泥岩、页岩等组成的岩层称为水敏性地层,较为典型的水敏性地层有粘土层、泥岩层、软页岩层、粘土胶结硬页岩层等^[1-3]。

水敏性地层钻探常出现泥浆增稠、钻速急速下降、钻头泥包不进尺和偏磨损坏、孔壁缩径及掉块

剥落、钻孔埋钻、钻具折断等不利情况,这些情况与泥浆性能紧密相关。

解决水敏性地层钻探泥浆性能问题,对提高钻探质量和效率意义重大。

收稿日期:2021-08-07; 修回日期:2021-09-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.11.004

作者简介:代万庆,男,汉族,1971年生,高级工程师,探矿工程专业,长期从事钻探工程技术管理工作,河南省郑州市高新区莲花街56号地矿创新大厦3002室,503403128@qq.com。

引用格式:代万庆,薛艳,颜巧云.水敏性地层钻探泥浆性能优化及配制[J].钻探工程,2021,48(11):22-28.

DAI Wanqing, XUE Yan, YAN Qiaoyun. Performance optimization and preparation of drilling mud for water sensitive formation[J]. Drilling Engineering, 2021,48(11):22-28.

1 工程概况

1.1 工程简介

“河南省通许凸起许昌—鄢陵岩溶热储地热资源调查评价地热钻探井”为河南省自然资源厅2019年度省财政地质勘查类招投标项目。地热井位于许昌市五女店镇苗店村西村边,于2020年4月30日开钻,10月4日终孔。

钻孔从上至下揭露地层情况见表1。

表1 地热井地层情况

Table 1 Stratum of the geothermal well

层位	主要岩性	厚度/ m	井深/m
Q	粘土夹细砂	286.6	0~286.6
N ₁	粘土、细中砂夹粉砂	714.7	286.6~1001.3
N ₂	细砂岩、泥岩夹砂质泥岩, 底部为中砂岩	675.45	1001.3~1676.75
E	白云质灰岩	246.95	1676.75~1923.7
	构造角砾岩	46.3	1923.7~1970
P	泥岩、细砂岩夹粉砂岩,分 别在2106.40~2108.85 m、2119.15~2123.05 m 见煤层	169.6	1970~2139.6
C	石灰岩夹泥岩和细粒砂岩	64.38	2139.6~2203.98

1.2 施工中遇到的问题

前期泥浆配方为(1 m³泥浆):山东高阳粘土70 kg, Na₂CO₃(碳酸氢钠)2.80 kg, PAN(水解聚丙烯腈)0.1%~0.2%, CMC(钠羧甲基纤维素)0.1%~0.2%, NaOH(氢氧化钠)0.1%。

泥浆性能指标见表2。

表2 泥浆性能指标

Table 2 Mud performance index

密度/ (g·cm ⁻³)	粘度/s	滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	泥皮厚度/ mm
1.09	45	24	1.6

在施工过程中,井深300 m以浅,钻进施工进展顺利,井深超过300 m后,施工出现了一系列问题。钻探施工异常情况见表3。

由表3可知,泥浆性能不适用于水敏性地层钻探需求是导致钻探异常的主要原因。

表3 钻探问题原因分析

Table 3 Cause analysis of the drilling problems

出现的问题	原因
漏失量过大	泥浆密度大;泥浆滤失量偏大;泥浆护壁堵漏性能不佳
钻速较低	泥浆粘度大;泥浆固体含量大;泥浆携屑能力低,钻进岩屑不能及时排出
缩径、孔壁坍塌	泥浆滤失量偏大;泥浆护壁堵漏性能不佳,泥皮性能不佳
牙轮钻头偏磨、泥包	泥浆粘度过大;泥浆粘土含量过高;泥浆循环量偏低

2 水敏性地层对钻探泥浆性能的需求

由表1可知,地热井地层大部分为粘土、泥岩或者粘土和泥岩互层等水敏性地层。

取该井岩样进行岩矿鉴定,鉴定结果见表4。

由表4可知,该井水敏性地层主要成分为高岭石、伊利石,局部以蒙脱石为主。

富含高岭石、伊利石的地层,吸水后粘土颗粒进入泥浆,加大泥浆表观粘度和滤失量,作为有害颗粒,较易沉淀于井底,导致钻速急剧降低。井壁吸水后不稳定,易剥落掉块。

富含蒙脱石的地层吸水后粘土水化分散进入泥浆体系,加大泥浆稠度和粘度,增大了钻头糊钻、偏磨、泥包及钻具“粘钻”风险;井壁易出现缩径和流散。

基于水敏性地层成分的特点,其对钻进泥浆性能需求如下^[4-13]:(1)低滤失量,减少井壁的吸水量,减缓井壁的水敏性趋势;(2)低密度。泥浆密度过大,泥浆液柱的压强高,泥浆的滤失量就高,易引起井壁粘土的水化分散;(3)良好的流动性,低的泥浆粘度,降低循环液泵压,减少滤失量;合适的“动塑比”,泥浆携、排岩屑能力、钻进效率就高;(4)强抑制性,能增强泥皮的强度、降低泥浆滤失量;抑制粘土坍塌掉块、水化分散的趋势。

水敏性地层钻进需要滤失量小、密度低、流变性好、抑制性强的泥浆。

3 泥浆配制的设计思路

由水敏性地层的成分、水化机理及钻进泥浆性能需求^[14-20],选择蒙脱石含量高的膨润土,用烧碱或食碱改性和陈化,制成优质基浆;选取合适、经济的

表4 水敏性地层成分含量岩矿鉴定

取样深度/m	层位	岩性	样品的岩矿鉴定描述
175	Q	粘土夹细粉砂	褐红色、黄褐色,可塑—硬塑,干强度中等,主要成分为高岭石,约占65%,伊利石约占30%;样品局部夹细砂、粉砂,砂砾含量约5%
365		粘土夹中、细粉砂	淡绿色、灰白色,具膨胀性,有滑腻感。主要成分为蒙脱石,占75%左右,高岭石占20%左右,少许石英和砂粒
408	N ₁	粘土夹中砂	灰色至浅黄色,呈鳞片状、纤维状,主要成分为高岭石,约占75%,伊利石约占20%,其余为砂粒等
459 811		粘土	浅绿或黄褐色,鳞片状、片状较多,具棱角,主要成分为伊利石,约占55%,高岭石约占45%
1263 1507	N ₂	泥岩夹砂质泥岩	灰色,泥质结构,层状构造。主要成分为高岭石,约占65%,伊利石约占30%,局部夹细砂
1996	P	泥岩、细砂岩夹粉砂岩	深灰色,泥质结构,块状构造,主要成分为伊利石
2170	C	石灰岩夹泥岩	灰白色,碎屑结构,块状构造,主要成分为碳酸钙,约占75%;局部夹泥岩,泥岩为深灰色,泥质结构,薄层状构造,主要成分为伊利石。泥岩约占20%

高分子处理剂及阴、阳离子种类和浓度,增强粘土的分散稳定性,降低泥浆的滤失量,抑制地层水化分散趋势,提高泥皮致密性和强度,加强孔壁的稳固性,调节泥浆的动塑比,提升泥浆携排能力。

采用室内试验与正交实验极差选择法相结合进行优化,确定最适宜本项目水敏性地层钻探施工的泥浆配方。

3.1 基浆的确定

山东高阳膨润土性能优良稳定,故选其作为基浆材料。资料及实践证明,粘土含量4%的泥浆,其表观粘度低而动塑比高。

3.2 泥浆处理剂的选择确定

无机处理剂:常用的有烧碱(NaOH)和纯碱(Na₂CO₃)。Na₂CO₃提高pH值的能力较弱,清除钙、镁离子的效果比NaOH强;生产安全性相对较高。故无机处理剂选用Na₂CO₃。

有机处理剂:常用的泥浆降失水剂有钠羧甲基纤维素(Na-CMC)、腐殖酸钾(KHm)、聚丙烯腈胺盐(NH₄HPAN)等。

KHm是良好的降失水剂、稀释剂和防塌剂。K⁺能增强粘土中伊利石的聚结稳定性,KHm与粘土颗粒吸附性较强,有加强泥皮强度、降低泥浆滤失量的作用^[5-7]。

Na-CMC与粘土颗粒吸附在一起,能使粘土颗

粒的水化膜厚度增厚,提高泥浆的切力,增高泥浆的粘度。低粘CMC和中粘CMC一般降失水性能明显,做降失水剂,而高粘CMC增粘效果显著,做增粘剂^[5-7]。选择了聚合度为200~600之间、取代度为80%~85%的中粘CMC作为降失水剂。

NH₄HPAN中的NH₄⁺能抑制粘土颗粒的水化分散,能加厚粘土的水化膜,降低粘土水化及坍塌趋势,减少泥浆滤失量,是良好的防塌剂和降滤失剂。聚合度为235~376、取代度为60%~70%之间的NH₄HPAN较为适用^[5-7]。

泥浆中岩屑等固体颗粒危害较大,水解聚丙烯酰胺(HPAM/PHP)吸附基团可将岩屑等有害固体颗粒吸附絮凝沉淀,控制泥浆固体含量。其长分子链吸附于孔壁上,也起到降低地层吸水水化膨胀、稳定孔壁防塌作用^[5-7]。分子量为300万~500万、水解度在30%左右、浓度为100 mg/L左右、泥浆pH值在7~9之间时,絮凝作用最好。

3.3 泥浆初步配方的正交试验极差分析

基浆配方为(1 m³基浆):山东高阳膨润土40 kg,Na₂CO₃2 kg。

基浆中按质量比例分别加入KHm、Na-CMC(中粘)、NH₄HPAN(分子量235万~376万、水解度60%~70%)、PHP(分子量300万~500万、水解度30%),在室内试验测定泥浆性能的基础上,用正交

实验极差选择法对泥浆组方进行优化。

正交试验设计采用4因素3水平正交表。依据文献资料及生产实践经验,列出4种泥浆处理剂的水平值。泥浆处理剂正交试验因素及水平值设定详见表5。

泥浆正交试验测定的粘度、滤失量、泥皮厚度数据见表6。

表5 泥浆处理剂因素及水平值设定

Table 5 Factors and level setting of the mud treatment agent

序号	KHm/% (A)	Na-CMC/% (B)	NH ₄ HPAN/ %(C)	PHP/(mg· L ⁻¹)(D)
1	1	0.2	0.5	50
2	2	0.3	1.0	100
3	3	0.4	1.5	200

表6 泥浆正交试验测试结果及极差分析

Table 6 Orthogonal test results and range analysis of the mud

序号	A	B	C	D	漏斗粘度/s	滤失量/[mL·(30min) ⁻¹]	泥皮厚度/mm
1	1	1	1	1	21	12	1.00
2	1	2	2	2	25	10	0.80
3	1	3	3	3	29	8	0.60
4	2	1	2	3	20	13	1.10
5	2	2	3	1	23	9	0.70
6	2	3	1	2	27	9	0.80
7	3	1	3	2	19	8	0.90
8	3	2	1	3	24	8	0.80
9	3	3	2	1	26	7	0.60
K1	75	60	70	70	Σ214	粘度因素最优组合:B1A3D1C1	
K2	70	72	71	71			
K3	69	71	71	73			
$\bar{K}1$	25.00	20.00	23.33	23.33	A3/A1	(69-75)/75=-0.08	
$\bar{K}2$	23.33	24.00	23.67	23.67	B3/B1	(71-60)/60=18.33	
$\bar{K}3$	23.00	23.67	23.67	24.33	D2/D1	(71-70)/70=0.01	
因素优水平	A3	B1	C1	D1			
R	2	4	0.4	1			
K1	30	33	29	28	Σ84	滤失量因素最优组合:B3A3C3D2	
K2	31	27	30	27			
K3	23	24	25	29			
$\bar{K}1$	10.00	11.00	9.67	9.33	A3/A1	(23-30)/30=-23.33	
$\bar{K}2$	10.33	9.00	10.00	9.00	B3/B1	(24-33)/33=-0.27	
$\bar{K}3$	7.67	8.00	8.33	9.67	D2/D1	(27-28)/27=-0.04	
因素优水平	A3	B3	C3	D2			
R	2.5	3	1.7	0.7			
K1	2.40	3.00	2.60	2.30	Σ7.3	泥皮厚度因素最优组合:B3C3A3D1	
K2	2.60	2.30	2.50	2.50			
K3	2.30	2.00	2.20	2.50			
$\bar{K}1$	0.80	1.00	0.87	0.77	A3/A1	(2.3-2.4)/2.4=-0.04	
$\bar{K}2$	0.87	0.77	0.83	0.83	B3/B1	(2-3)/3=-0.33	
$\bar{K}3$	0.77	0.67	0.73	0.83	D2/D1	(2.5-2.3)/2.3=0.09	
因素优水平	A3	B3	C3	D1			
R	0.1	0.23	0.14	0.04			

根据表6极差分析情况,排列出各指标下每个因素的试验指标为:漏斗粘度(%):BADC;滤失量(%):BACD;泥皮厚度(mm):BCAD。

依据各指标下试验结果,确定各因素的最优水平组合为:漏斗粘度(%):B1A3D1C1;滤失量(%):B3A1C3D2;泥皮厚度(mm):B3C3A3D1。

由于漏斗粘度、滤失量、泥皮厚度3个指标确认的最优水平组合结果并不一致,我们再根据KHm、Na-CMC、NH₄HPAN、PHP 4个因素影响的3个指标的主次顺序,结合水敏性地层对泥浆性能具体需求,确定出最优结果。

B(Na-CMC)是主要因素指标,对滤失量、泥皮厚度的影响大小排第一位,取B3;对漏斗粘度的影响也排第一位,取B1。取值B3与取值B1相比,漏斗粘度升高了18.33%,对泥浆性能不利;滤失量减少了27%,泥皮厚度减少了33%,对泥浆性能有利。水敏性地层的泥浆设计,滤失量是关键,故我们取B3。

A(KHm)也是主要因素,对漏斗粘度、滤失量的影响排第二位,对泥皮厚度的影响排第三位。优先考虑第二位的影响。考虑漏斗粘度的影响取A3,滤失量的影响取A1,对比A3与A1的试验值,漏斗粘度减少8%,滤失量减少23.33%,泥皮厚度减少4%。综合考虑,A3更优。

C(NH₄HPAN)对漏斗粘度的影响排在第四位,是次要因素,对滤失量的影响排在第三位,为C3,对泥皮厚度的影响排在第二位,也是C3。所以我们取C3。

D(PHP)对漏斗粘度的影响排在第三位,为D1,对滤失量的影响排第四位,为D2,次要因素;对泥皮厚度的影响排第四位,为D1,也为次要因素。经过统计表6试验值,D2比D1在漏斗粘度升高1%,滤失量降低4%,泥皮厚度升高9%。针对水敏性地层,滤失量是关键因素,D2提升漏斗粘度的幅度也较小,综合考虑,取D2较为合适。

最佳护壁堵漏材料组合为A3B3C3D2。还原各组添加量为:KHm 3%,Na-CMC(聚合度200~600、取代度80%~85%的中粘)0.4%,NH₄HPAN(聚合度235~376、取代度60~70%)1.5%,PHP(分子量300万~500万时,水解度30%左右)100 mg/L。

最终确定泥浆配方为(1 m³泥浆):山东高阳膨

润土 40 kg, Na₂CO₃ 2 kg, KHm 3%, Na-CMC 0.4%, NH₄HPAN 1.5%, PHP 100 mg/L。

该配方不在正交试验组合配方之内。按该比例配制泥浆,室内测试该新配方泥浆性能指标见表7。

表7 新配方泥浆性能指标

Table 7 Performance index of the new formula mud

密度/ (g·cm ⁻³)	粘度/ s	滤失量/ [mL·(30 min) ⁻¹]	泥皮厚度/ mm	pH值
1.04	24	8	0.8	9

4 生产实践效果

地热井从500 m井深起始,采用新配方泥浆钻进。比对500 m井深前后泥浆的性能、井内状况、钻探效率等情况如下:

(1)新配方泥浆的密度降低了4.6%,漏斗粘度降低了46.7%,降低了循环液液柱的静压强和泵压压强;新配方泥浆增加了泥皮的致密性,大幅降低了泥浆内有害固体含量,泥浆滤失量大大降低。

(2)使用新配方泥浆后,钻进顺利,纯钻进时间增多,井内事故未再发生,钻进辅助时间大幅降低,钻速提升明显。

(3)井孔状况得到极大改善,未再出现缩径、粘钻、卡钻等险情。

(4)牙轮钻头未再出现偏磨、泥包等不正常状况。

新泥浆使用前后的钻探情况、生产效率、泥浆漏失量情况对比见表8。

实践证明,我们选取的泥浆材料是合适的,正交试验极差分析法确定的配方比例是准确的,新配方泥浆完全适应本项目水敏性地层钻探施工需求,效果良好。

5 结语

(1)水敏性地层钻探,对泥浆性能有特殊需求。泥浆性能不适宜时,循环液会出现粘度增高、滤失量增大、有害固体含量过多,钻孔缩径、孔壁坍塌,钻速低下、钻头偏磨及泥包、钻杆“粘钻”等不正常情况。

(2)本项目水敏性地层的主要成分以高岭石、伊利石、蒙脱石为主,厚度较大,地层吸水后坍塌掉块、水化流散情况较为严重。配制泥浆从降低泥浆

表8 新配方泥浆使用前后进钻施工情况及浆液漏失量对比

Table 8 Comparison of drilling results and mud leakage before and after using the new formula mud

泥浆配方	井段/m	生产时间	小时效率/m	纯钻时间/%	辅助时间/%	停钻时间/%	处理事故时间/%	累计补充溶液体积/m ³	进尺增加容积/m ³	实际漏失泥浆体积/m ³
原始配方	300~500	2020.06.02—2020.06.18	1.33	39.5	47	11	2.5	13.65	7.53	6.12
新配方	500~700	2020.06.18—2020.06.23	3.41	57	35	8	0	7.59	7.53	0.058

滤失量、抑制粘土水化分散剥落掉块趋势、加强孔壁稳固性等需求出发,配制滤失量小、密度低、抑制性强、流变性好的泥浆。

(3)钻探施工效果不理想时,应及时调整泥浆配方。针对本项目地层条件,推荐泥浆配方为(1 m³泥浆):山东高阳膨润土 40 kg; Na₂CO₃ 2 kg; KHm 3%; Na-CMC(聚合度 200~600、取代度 80%~85%的中粘)0.4%; NH₄HPAN(聚合度 235~376、取代度 60%~70%) 1.5%; PHP(分子量 300 万~500 万时,水解度 30%左右) 100 mg/L。

(4)正交试验极差分析法应用于泥浆处理剂浓度的确定,具有室内配制试验次数减少、确定浓度准确的优势,是一种简便、经济、科学、快速和准确的方法。

参考文献(References):

- 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京:清华大学出版社,1998:10-89.
CHEN Xizhe. Soil Mechanics and Foundation Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998:10-89.
- 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2001:177-184.
YAN Taining. Rock and Soil Drilling and Tunneling Engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001:177-184.
- 曾克峰,刘超,程璜鑫. 地貌学及第四纪地质学教程[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2014:224-297.
ZENG Kefeng, LIU Chao, CHENG Huangxin. Geography and Quaternary Geology Course[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004:224-297.
- 杨坤光,袁晏明. 地质学基础[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2009:207-249.
YANG Kunguang, YUAN Yanming. Geology Foundation[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009:207-249.
- 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新,等. 钻井液与岩土工程浆液[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002:9-38.
WU Xiaoming, HU Yule, HE Bingxin, et al. Drilling Fluid and Geotechnical Slurry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002:9-38.
- 范正青,邵启昌. 钻孔冲洗液与护壁堵漏工艺[Z]. 兰州:甘肃省地质矿产局,1986:28-44.
FAN Zhengqing, SHAO Qichang. Drilling Flushing Fluid and Wall Protection Plugging Technology[Z]. Lanzhou: Geological and Mineral Bureau of Gansu Province, 1986:28-44.
- 汤凤林, A.Γ.加里宁,段隆臣. 岩心钻探学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997:336-480.
TANG Fenglin, A.G.Kalinin, DUAN Longchen. Core Drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:336-480.
- 蔡澄宇. 低固相双钾泥浆的研究与试用[J]. 地质与勘探,1989(9):15-18.
CAI Chengyu. Study and application of low solid double potassium mud[J]. Geology and Prospecting, 1989(9):15-18.
- 兰凯,黄振国. 优质膨润土泥浆在大直径深桩基工程中的应用[J]. 地质与勘探,2006,42(5):94-97.
LAN Kai, HUANG Zhengu. Application of high-performance bentonite slurry in large diameter and deep bored pile engineering[J]. Geology and Exploration, 2006,42(5):94-97.
- 胡国安,张天乐,蒋伯昌,等. 中国河南粘土-铝土矿床和江西高岭土、瓷石矿床及应用研究[M]. 北京:地质出版社,1983:1-45.
HU Guoan, ZHANG Tianle, JIANG Bochang, et al. Application Research of Clay-Bauxite Deposits in Henan Province and Kaolin And Pottery Stone Deposits in Jiangxi Province, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983:1-45.
- 张健松,刘永升,李之军,等. 地质钻探复杂地层固壁堵漏新工艺[J]. 地质与勘探,2020,56(4):819-825.
ZHANG Jiansong, LIU Yongsheng, LI Zhijun, et al. New technology of geological drilling for borehole-wall reinforcement and leaking stoppage in complex formation[J]. Geology and Exploration, 2020,56(4):819-825.
- 代万庆,何雪梅,韩明耀,等. “橡皮土”地层施工作业面施工处理技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):86-90.
DAI Wanqing, HE Xuemei, HAN Mingyao, et al. Treatment of “rubber soil” construction ground[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(12):86-90.
- 蔡晓文,纪卫军,阮海龙,等. 不分散低固相钻井液体系在张掖平山湖矿区中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37

- (8):27-28,31.
- CAI Xiaowen, JI Weijun, RUAN Hailong, et al. Application of non-dispersed low solid-phase drilling fluid system in Zhangye Pingshanhu Mining Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(8):27-28,31.
- [14] 李宏. 福建煤田复杂钻孔漏失治理的实践与探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012,39(11):17-21,25.
- LI Hong. Practice and discussion of leakage control of complicated drilling in Fujian coalfield [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11): 17-21,25.
- [15] 陈尔志,陈礼仪,向昆明,等. 高密度低失水泥浆体系在煤田绳索取心钻探中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011,38(2):15-18.
- CHEN Erzhi, CHEN Liyi, XIANG Kunming, et al. Application of high density and low filtration drilling fluid system in wire-line coring drilling of coalfield exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(2):15-18.
- [16] 李志康. 浅谈非开挖工程施工中钻孔泥浆的几个问题[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012,39(9):62-65.
- LI Zhikang. Discussion on some problems of drilling mud in trenchless engineering construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(9):62-65.
- [17] 胡继良,陶士先. 深部地质钻探钻井液体系设计因素及其分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011,38(4):17-21.
- HU Jiliang, TAO Shixian. Design factors of drilling fluid system for deep geological drilling and the analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(4):17-21.
- [18] 吴德军,朱小锋,刘树华,等. 松辽盆地松南油页岩地质调查井绳索取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020,47(3):44-48.
- WU Dejun, ZHU Xiaofeng, LIU Shuhua, et al. Wire-line core drilling for Songnan oil shale survey in the Songliao Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(3):44-48.
- [19] 黄建宁,刘文革. 渭北煤田澄合矿区复杂地层钻孔施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011,38(6):22-25.
- HUANG Jianning, LIU Wenge. Construction technology of borehole in complex formation in Chenghe Mining Area of Wei-bei [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(6):22-25.
- [20] 袁进科,陈礼仪,王军伟,等. 青藏高原复杂地层地质钻探低固相冲洗液试验研究[J]. 钻探工程, 2021,48(4):79-84.
- YUAN Jinke, CHEN Liyi, WANG Junwei, et al. Experimental study on low solid flushing fluid for geological drilling in complex metamorphic of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):79-84.

(编辑 荐华)