

# 青海五龙沟矿区泥岩地层冲洗液研究

肖冬顺<sup>1</sup>, 符文<sup>2</sup>, 吴琼<sup>3</sup>, 孙荣<sup>4</sup>, 黄帆<sup>1</sup>, 谭松娥<sup>5</sup>, 张莹<sup>1</sup>, 方小红<sup>6</sup>

(1.长江岩土工程总公司(武汉),湖北武汉 430014; 2.中煤科工集团武汉设计研究院有限公司,湖北武汉 430074;  
3.西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院,西藏拉萨 850000;  
4.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西西安 710000;  
5.中南建筑设计院股份有限公司,湖北武汉 430071; 6.中国地质大学(武汉),湖北武汉 430074)

**摘要:**青海五龙沟矿区内存在大量泥岩地层,其特点为粘土总含量高,易吸水膨胀,地层微裂隙多,导致钻探过程中易出现钻孔缩径、坍塌以及岩心采取率不足等问题,严重影响了矿体规模及经济价值的评价,研究适用于该区的冲洗液意义重大。本文通过正交试验研发了一套适用于该区泥岩地层钻探的水基冲洗液,该冲洗液配方为:5%膨润土+2%纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )+0.05%高粘聚阴离子纤维素(HV-PAC)+0.4%低粘钠羧甲基纤维素(LV-CMC)+2%磺甲基酚醛树脂(SMP-1)+2.5%无荧光防塌润滑剂(FT-342)+0.4%正电胶(MMH)+1%白油。该冲洗液失水量为4 mL,泥岩在清水中的膨胀率为20.26%,而在冲洗液中降到了3.02%,将泥岩制样放到冲洗液中浸泡24 h,泥岩结构保持完整。该冲洗液滤失量低、抑制性强、配制工艺简单,能很好地适用于五龙沟地区泥岩地层的钻探工作。

**关键词:**地质钻探;泥岩;水敏性地层;冲洗液;五龙沟矿区

中图分类号:P634.6 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2019)09-0045-06

## Drilling fluid for mudstone in Wulonggou Mine of Qinghai Province

XIAO Dongshun<sup>1</sup>, FU Wen<sup>2</sup>, WU Qiong<sup>3</sup>, SUN Rong<sup>4</sup>,

HUANG Fan<sup>1</sup>, TAN Songe<sup>5</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, FANG Xiaohong<sup>6</sup>

(1.Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan Hubei 430014, China;  
2.Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd of China Coal Technology & Engineering Group,  
Wuhan Hubei 430074, China;  
3.Tibet Water Resources and Hydropower Planning Survey and Design Institute, Lasa Tibet 850000, China;  
4.Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an Shaanxi 710000, China;  
5.Central South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan Hubei 430071, China;  
6.China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** There are a large number of mudstone strata in the Wulonggou mining area of Qinghai Province, which are characterized by high total clay content, ease to expand after absorbing water, and many micro-cracks in the strata. In the process of drilling, problems such as hole shrinkage, collapse and insufficient core recovery are easy to occur, which seriously affects the evaluation of the scale and economic value of the ore body. Therefore, it is of great significance to study the drilling fluid suitable for this area. A water-based drilling fluid suitable for mudstone formation has been developed through the orthogonal experiment. The drilling fluid formula was: 5% bentonite + 2% soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) + 0.05% highly viscous polyanionic cellulose (HV-PAC) + 0.4% low viscous sodium carboxymethyl cellulose (LV-CMC) + 2% sulfomethyl phenolic resin (SMP-1) + 2.5% non-fluorescence anti-sloughing lubricant (FT-342) + 0.4% MMH (MMH) + 1% white oil. The drilling fluid had water loss of 4mL, and the expansion rate of mudstone was reduced to 3.02% in the drilling fluid, whereas it is 20.26% in clean water. The mudstone structure remained intact after soaking in the drilling fluid for 24h. The drilling fluid has the advantages of low filtration, strong inhibition and simple preparation process, which can be well applied to drilling of mudstone strata in the Wulonggou area.

**Key words:** geological drilling; mudstone; water sensitive formation; drilling fluid; Wulonggou Mining area

收稿日期:2019-06-20; 修回日期:2019-07-30 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.09.004

作者简介:肖冬顺,男,汉族,1966年生,公司副经理,高级工程师,探矿工程专业,主要从事水利水电工程勘探技术研究和科研管理工作,湖北省武汉市江岸区解放大道1863号,171546354@qq.com。

引用格式:肖冬顺,符文,吴琼,等.青海五龙沟矿区泥岩地层冲洗液研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):45-50.

XIAO Dongshun, FU Wen, WU Qiong, et al. Drilling fluid for mudstone in Wulonggou Mine of Qinghai Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):45-50.

## 0 引言

水敏性地层以泥岩、页岩为主,遇水时易吸水膨胀、分散,导致井壁缩径、垮塌等事故<sup>[1-5]</sup>。同时粘性泥岩钻屑对钻头表面具有很强的粘附性能,一定程度上增强了钻屑与钻头表面的粘合力,造成钻头泥包、增加扭矩和压持效应、降低钻头的切削深度和破岩效率<sup>[6-8]</sup>。

许多学者对泥岩水敏性地层进行了研究,主要是研究井壁失稳的机理以及针对特定水敏性地层研发有效配方。刘晓栋等<sup>[9]</sup>以聚胺抑制剂和防泥包快钻剂为主要处理剂,研制出一套解决活性泥页岩钻井中缩径、井壁坍塌的快速冲洗液体系。卢运虎等<sup>[10]</sup>通过室内试验分析了深部泥岩在冲洗液浸泡下强度弱化规律。许春田等<sup>[11]</sup>分析了裂隙发育脆性泥岩井壁失稳机理,并通过醋酸钾、聚胺、大分子聚丙烯酰胺作为抑制剂解决了井壁失稳问题。

青海五龙沟矿区是重要的成矿带,赵莹、陆露、袁万明、张延林等<sup>[13-16]</sup>对五龙沟区的金矿进行了研究,五龙沟矿区含有丰富的矿产。五龙沟矿区钻探过程中经常遇到规模较大的泥岩地层,使得该区钻探取心困难以及易发生缩径坍塌造成埋钻事故,这是近年困扰该区正常钻井和完成找矿目标的主要因素。本文针对五龙沟矿区水敏地层的特点,研发解决水敏性地层钻探问题的冲洗液,对该区找矿具有重要的意义。

## 1 泥岩地层分析

五龙沟矿区内地层中存在水敏性地层,其组成为炭质泥岩,导致钻探施工中产生取心困难、缩径、坍塌等问题。为了能够有针对性地研发冲洗液配方,对该矿区水敏性地层岩样进行了微观分析和矿物成分分析。

### 1.1 形貌仪分析

利用三维非接触式表面形貌仪,对五龙沟矿区泥岩地层岩心样品进行拍照,并对结果进行分析。拍摄的微观结构特征如图1、图2所示。

从图1、图2中可以看出,泥岩地层微裂隙较发育,冲洗液滤液在压差作用下首先沿着微裂隙进入地层内部,为泥岩提供水化空间,使粘土矿物颗粒之间的粘结力减小,泥岩强度降低。

### 1.2 XRD分析

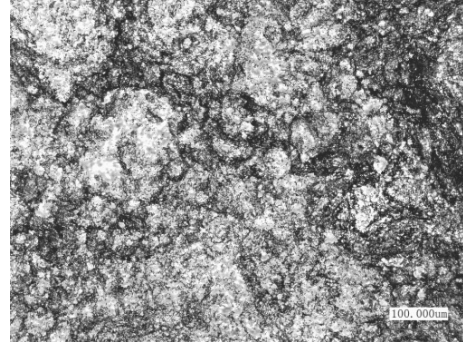


图1 泥岩放大100倍图

Fig.1 Microscopic image of mudstone at 100 times amplification

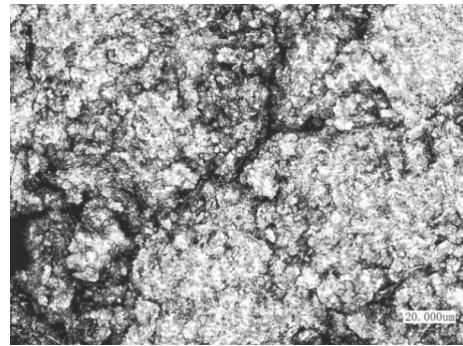


图2 泥岩放大500倍图

Fig.2 Microscopic image of mudstone at 500 times amplification

X射线衍射是粘土矿物分析的有效手段之一,能够定性、半定量、定量研究各种粘土矿物,而且分析迅速、简便,并能给出大量反映粘土矿物各方面特征的信息,五龙沟泥岩地层XRD分析结果如表1所示。

表1 岩样定量分析结果

样品编号	石英	伊利石	高岭石	方解石	黄铁矿	钾长石	钠长石	%
QH-1	48.08	15.22	23.06	8.46	3.55	1.63	0	
QH-2	30.08	46.61	1.80	16.04	3.67	1.14	0.66	
QH-3	34.35	34.96	22.15	5.41	1.10	2.03	0	

由表1可知,五龙沟矿区泥岩粘土总含量为38%~57%,其中伊利石的含量为15%~46%,因此易在冲洗液作用下水化膨胀,影响泥岩地层强度,造成地层不稳定,也影响岩心采取率。

### 1.3 小结

五龙沟矿区钻探过程中发生缩径、孔壁坍塌、岩心采取率不足等问题的根本原因是该区泥岩地层粘土含量高,易吸水膨胀,且微裂隙多。冲洗液设计与性能优化主要是加强封堵、降低失水量和抑制粘土水化膨胀。

通过岩样分析结果,结合现场施工经验得到五龙沟地区进行钻探所需冲洗液性能要求有:应具有好的流变性,漏斗粘度控制在 30~35 s;API 失水量控制在 5 mL 内;能有效抑制泥岩地层膨胀和分散。

## 2 冲洗液配方设计

水敏性地层冲洗液设计主要考虑两方面:一方面是尽量减少冲洗液对地层的渗水,也就是降低失水量;另一方面是即便冲洗液渗入井壁,也对泥质不产生或很少产生水敏或抑制水敏。

本试验采用高粘聚阴离子纤维素(HV-PAC)来提高冲洗液的粘度,低粘钠羧甲基纤维素(LV-CMC)、磺甲基酚醛树脂(SMP-1)、无荧光防塌润滑剂(FT-342)来控制冲洗液的失水量,正电胶(MMH)作为抑制剂来抑制粘土膨胀分散,含量为 1% 的白油作为润滑剂以降低钻具与孔壁之间的摩擦。

正交试验法是一种科学的多因素试验设计方

法,利用正交试验表设计试验方案,在多种因素变化范围内均衡抽样,能够大幅度减少试验次数并有效找到各因素最优水平组合,得出最优配方和工艺。下面采用正交试验研究适用于五龙沟矿区的冲洗液配方。

### 2.1 降失水剂

由于 FT-342 对失水量有较大影响而对粘度影响不大,为了便于研究,配制基浆添加 LV-CMC、HV-PAC 和 SMP-1 三种添加剂的冲洗液进行正交试验研究。

冲洗液配方为:5% 膨润土 + 2%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 0.3%~0.5% LV-CMC + 0.05%~0.1% HV-PAC + 1% + 1.5% SMP-1。

本正交试验设计 3 个因素,3 个水平,共配制 9 组不同加量的冲洗液,分别测试其性能,将统计的数据进行计算处理,数据见表 2。为了评价不同材料对表观粘度和失水量的影响,对所得数据进行极差分析。

表 2 正交试验数据统计

Table 2 Summary of orthogonal test data

编号	LV-CMC/ %	HV-PAC/ %	SMP-1/ %	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	pH 值	$\varphi_{600}$	$\varphi_{300}$	API 滤失 量/mL	粘度/ s	表观粘度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	塑性粘度/ ( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	动切 力/Pa	动塑 比
1	0.3	0.050	1.00	1.03	8.2	36	22	9.4	32	18.0	14	4.1	0.29
2	0.3	0.075	1.25	1.03	8.2	43	27	8.4	41	21.5	16	5.6	0.35
3	0.3	0.100	1.50	1.03	8.2	49	32	8.0	44	24.5	17	7.7	0.45
4	0.4	0.050	1.25	1.03	8.2	42	26	8.4	37	21.0	16	5.1	0.32
5	0.4	0.075	1.50	1.03	8.2	52	32	7.2	45	26.0	20	6.1	0.31
6	0.4	0.100	1.00	1.03	8.2	49	30	8.0	42	24.5	19	5.6	0.30
7	0.5	0.050	1.50	1.03	8.2	50	31	7.2	43	25.0	19	6.1	0.32
8	0.5	0.075	1.00	1.03	8.2	52	32	7.6	41	26.0	20	6.1	0.31
9	0.5	0.100	1.25	1.03	8.2	55	35	6.4	50	27.5	20	7.7	0.38
K1	21.33	21.33	22.83										
K2	23.83	24.50	23.33										
K3	26.17	25.50	25.17										
R1	4.84	4.17	2.34										
K1	8.60	8.33	7.67										
K2	7.87	7.73	7.87										
K3	7.07	7.47	8.00										
R	1.53	0.86	0.33										

表观粘度极差分析

失水量极差分析

从表 2 中极差 R 的大小可以看出,影响表观粘度的各因素从主到次的顺序为:LV-CMC>HV-PAC>SMP-1。影响失水量的因素从主到次的顺序为:LV-CMC>HV-PAC>SMP-1, LV-CMC 对失水量影响最大。由表 2 可知,4 号配方流

变性更适宜于五龙沟矿区。

为了更准确地评价每种添加剂对表观粘度和失水量影响的显著性,对试验结果进行了方差分析,得出的结果见表 3。

表3 方差分析结果

Table 3 Results of variance analysis

因素	表观粘度方差分析		失水量方差分析	
	Sig	显著水平	Sig	显著水平
LV-CMC	0.002	**	0.046	*
HV-PAC	0.002	**	0.125	0
SMP-1	0.006	**	0.125	0

注:\*\*表示因素水平的改变对试验指标有高度显著影响;\*表示因素水平的改变对试验指标有显著影响;0表示因素水平的改变对试验指标无显著影响。

通过方差分析可知, LV-CMC、HV-PAC以及SMP-1对表观粘度均有高度显著的影响。LV-CMC对失水量有显著影响, HV-PAC与SMP-1对失水量的影响不明显。根据分析可适当提高LV-CMC与SMP-1的含量来优化4号配方。

2.2 抑制剂

正电胶的主要成分是混合金属层状氢氧化物(MMH), 它本身带正电荷。水基冲洗液通常是由粘土分散在水中形成, 所用处理剂也是带负电的, 强负电性导致钻屑分散和井壁不稳定, 带正电荷的MMH胶粒加入冲洗液体系后, 会降低体系的负电性, 甚至会转化为正电性, 这对抑制钻屑分散和稳定井壁非常有益; MMH能提高冲洗液体系的稳定性, 提高体系的结构强度, 同时MMH正电胶冲洗液具有极强的剪切稀释性。基于上述优点, 选择MMH作为冲洗液抑制剂来抑制粘土的水化分散。

为了评价MMH对五龙沟矿区泥岩地层的抑制性, 采集五龙沟矿区泥岩制作成岩样, 配制不同含量的MMH冲洗液, 泥岩岩样在其中的膨胀量与时间的关系如表4所示, 为了便于比较将泥岩的膨胀率随时间变化规律绘制成图3。

表4 泥岩膨胀高度随时间变化数据

Table 4 Mudstone expansion height vs time

MMH加量/%	高度/mm	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h
0(清水)	11.60	1.41	2.02	2.19	2.26	2.30	2.33	2.34	2.35
0.2	12.00	0.42	0.66	0.75	0.78	0.80	0.81	0.82	0.82
0.3	11.60	0.40	0.64	0.72	0.74	0.76	0.77	0.78	0.78
0.4	11.68	0.38	0.60	0.67	0.69	0.70	0.70	0.71	0.71
0.5	11.66	0.52	0.76	0.83	0.86	0.87	0.88	0.88	0.89
0.6	11.62	0.65	0.89	0.98	1.02	1.03	1.03	1.04	1.04

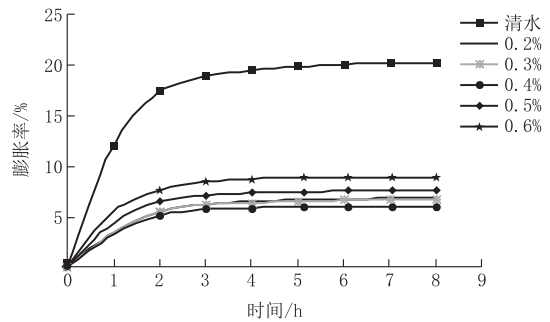


图3 泥岩膨胀率随时间变化规律

Fig.3 Mudstone expansion rate vs time

由图3可知, 当MMH含量<0.4%时, 增加MMH含量, 泥岩膨胀率减小, 冲洗液抑制性变强, 当MMH含量>0.4%, 增加MMH含量, 泥岩膨胀率增大, 冲洗液抑制性减弱, 由此可知, MMH的最优加量是0.4%。

通过上述分析结果来优化基础配方, 优化后的配方为: 5%膨润土+2%纯碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)+0.05%高粘聚阴离子纤维素(HV-PAC)+0.4%低粘钠羧甲基纤维素(LV-CMC)+2%磺甲基酚醛树脂(SMP-1)+2.5%无荧光防塌润滑剂(FT-342)+0.4%正电胶(MMH)+1%白油。测试配方性能见表5。

表5 配方性能

Table 5 Formula properties

性能参数	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH值	不同转速下粘度计读数						API滤失量/mL	粘度/s	表观粘度/(mPa·s)	塑性粘度/(mPa·s)	动切力/Pa	动塑比
			φ <sub>600</sub>	φ <sub>300</sub>	φ <sub>200</sub>	φ <sub>100</sub>	φ <sub>6</sub>	φ <sub>3</sub>						
测试结果	1.04	8.2	45	26	19	11	3	2	4	33	22.5	18	4.6	0.256

2.3 膨胀量试验

利用ZNP型膨胀量测定仪测试了五龙沟矿区泥岩地层岩样在冲洗液中的膨胀量, 岩样的直径为25 mm, 高度为11.62 mm, 膨胀量随时间变化见表6。

岩样在清水中最终的膨胀率为:

表6 泥岩膨胀量

Table 6 Mudstone expansion values

时间/h	膨胀量/mm	时间/h	膨胀量/mm
1	0.20	5	0.34
2	0.28	6	0.34
3	0.31	7	0.35
4	0.33	8	0.35

$$\text{膨胀率} = \frac{\text{膨胀高度}}{\text{岩样高度}} = \frac{2.35}{11.60} = 20.26\%$$

岩样在冲洗液中最终的膨胀率为:

$$\text{膨胀率} = \frac{\text{膨胀高度}}{\text{岩样高度}} = \frac{0.35}{11.60} = 3.02\%$$

由图 4 可以明显观察到泥岩膨胀率的变化,泥岩在清水中的膨胀率为 20.26%,在冲洗液中降到了 3.02%,表明冲洗液对泥岩有很强的抑制性。

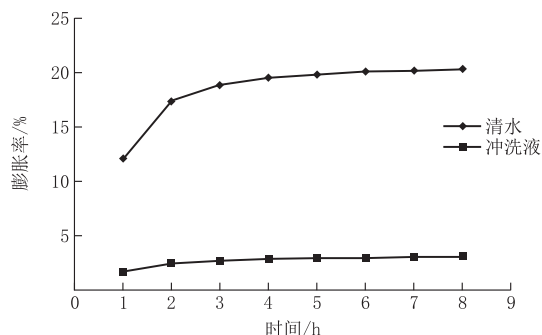


图 4 膨胀率对比图

Fig.4 Comparison of the expansion rates

## 2.4 浸泡试验

将五龙沟矿区泥岩研磨成粉,过 200 目的筛,压制直径为 25 mm、高度约为 28 mm 的岩样进行浸泡试验,使用清水作对比。泥岩压制后如图 5 所示,将两岩样分别放入清水和冲洗液中浸泡 24 h,24 h 后两岩样的状态如图 6 所示。

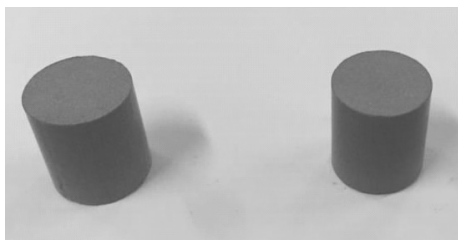


图 5 压制成的岩样

Fig.5 Pressed rock samples

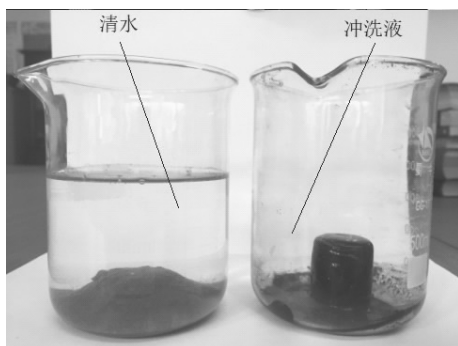


图 6 浸泡 24 h 后的泥岩岩样

Fig.6 Mudstone samples after soaking for 24 hours

由图 6 可以看出浸泡 24 h 后,在清水中的泥岩岩样完全坍塌,而在冲洗液中的泥岩岩样形状保持良好。

冲洗液漏斗粘度为 33 s,失水量为 4 mL,能很好地满足五龙沟矿区钻探工作对于冲洗液流变特性和失水特性方面的要求。通过膨胀量试验以及浸泡试验可以看出,优化后的配方对五龙沟矿区泥岩地层抑制性强,能很好地适用于该区泥岩地层钻进。与一般的泥岩地层配方相比,添加剂种类少,故其配置工艺简单,成本低,性价比高,能很好满足地质钻探的要求。

## 3 结论

(1)五龙沟矿区钻探施工中经常发生缩径、孔壁坍塌、岩心采取率不足等问题的根本原因是该区泥岩粘土含量高,易吸水膨胀,且微裂隙多。冲洗液设计与性能优化主要是加强封堵、降低失水量和抑制粘土水化膨胀。

(2)通过正交试验研制的水基冲洗液配方为:5%膨润土+2%纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )+0.05%高粘聚阴离子纤维素(HV-PAC)+0.4%低粘钠羧甲基纤维素(LV-CMC)+2%磺甲基酚醛树脂(SMP-1)+2.5%无荧光防塌润滑剂(FT-342)+0.4%正电胶(MMH)+1%白油,该配方流变性好,符合五龙沟矿区钻探对冲洗液的要求。

(3)通过膨胀量试验与浸泡试验对优化后的配方进行评价,发现该配方抑制性好,失水量低,适用于五龙沟矿区泥岩地层的钻探,配制工艺简单。

## 参考文献(References):

- [1] 刘加才. 泥页岩地层中钻井冲洗液的应用研究[J]. 西部探矿工程, 2015(1): 22-24.  
LIU Jiakai. Research on the application of drilling fluid in mud and shale formation[J]. West-China Exploration Engineering, 2015(1): 22-24.
- [2] 李尧, 杨国兴, 樊志刚, 等. 聚胺抑制防塌钻井液的研究及其在川西地区的推广应用[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(12): 137-142, 9.  
LI Yao, YANG Guoxing, FAN Zhigang, et al. Study on polyamine anti-collapse drilling fluid and its application in west of Sichuan[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(12): 137-142.
- [3] 胡郁乐, 乌效鸣, 蔡记华. 钻井液与岩土工程浆液[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014.  
HU Yule, WU Xiaoming, CAI Jihua. Drilling fluid and geotechnical grout[M]. Wuhan: China University of Geosci-

- ences Press, 2014.
- [4] Huang Yang, Lu Y. Research & application of the drilling fluid for water sensitive stratum[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 73:299-304.
- [5] 刘厚平, 韩博, 张凌, 等. 基于正交试验法的天然气水合物地层钻井液配方设计[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(6):202-206.  
LIU Houping, HAN Bo, ZHANG Ling, et al. Optimum design of drilling fluids in the natural gas hydrate formation by orthogona test method[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(6):202-206.
- [6] 张定宇, 邓金根, 李大华, 等. 页岩储层水敏性及井壁失稳规律分析[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(34):10268-10271.  
ZHANG Dingyu, DENG Jingen, LI Dahua, et al. The law of wellbore instability in non-water sensitive gas shales[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(34):10268-10271.
- [7] West G C, Grebe E L, Carbajal D. Inhibitive water-based drilling fluid system and method for drilling sands and other water-sensitive formations[Z]. 2008.
- [8] Arvind D P, Stamatakis E, Young S, et al. Advances in inhibitive water-based drilling fluid-can they replace oil-based muds[J]. *SPE*, 2007, 106476:1-8.
- [9] 刘晓栋, 王宇宾, 宋有胜, 等. 活性泥页岩快速钻井钻井液技术[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(2):56-61.  
LIU Xiaodong, WANG Yubin, SONG Yousheng, et al. Study on drilling fluid technology for improving activated shale drilling rate[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(2):56-61.
- [10] 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等. 钻井液浸泡下深部泥岩强度特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(7):1399-1405.  
LU Yunhu, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study of strength properties of deep mudstone under drilling fluid soaking[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(7):1399-1405.
- [11] 许春田, 刘建全, 汤燕丹, 等. 裂隙发育硬脆性泥岩井壁失稳机理及其解决措施[J]. *钻井液与完井液*, 2013, 30(3):13-16, 91-92.  
XU Chuntian, LIU Jianquan, TANG Yandan, et al. Research on mechanism and treating methods of wellbore instability in fractured and hard brittle mud[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2013, 30(3):13-16.
- [12] 赵莹. 青海省五龙沟金矿床的矿床特征及成因浅析[J]. *科技资讯*, 2014, 12(11):115-119.  
ZHAO Ying. The geological characters and genesis of the Wulonggou deposit in Qinghai Province[J]. *Science & Technology Information*, 2014, 12(11):115-119.
- [13] 陆露, 张延林, 吴珍汉, 等. 青海省都兰县五龙沟金矿主断裂带断层泥 K-Ar 定年[J]. *地质力学学报*, 2013, 19(4):385-391, 446.  
LU Lu, ZHANG Yanlin, WU Zhenhan, et al. K-Ar dating of fault gouge from the main fault of Wulonggou gold deposit in Dulan, Qinghai Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(4):385-391.
- [14] 袁万明, 王世成, 王兰芬. 东昆仑五龙沟金矿床成矿热历史的裂变径迹热年代学证据[J]. *地球学报*, 2000(4):389-395.  
YUAN Wanming, WANG Shicheng, WANG Lanfen, et al. Metallogenic thermal history of the Wulonggou gold deposits in east Kunlun Mountains in the light of fission track thermochronology[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2000(4):389-395.
- [15] 张延林, 韩玉, 张培青, 等. 东昆仑五龙沟金矿床 XI 号金矿化带特征及找矿前景[J]. *黄金*, 2011, 32(9):9-15.  
ZHANG Yanlin, HAN Yu, ZHANG Peiqing, et al. Characteristics and prospecting potential of gold mineralized zone XI in Wulonggou gold deposit, Eastern Kunlun[J]. *Gold*, 2011, 32(9):9-15.

(编辑 韩丽丽)