

# 磷石膏地层用钙基成膜环保冲洗液研究与应用

李田周<sup>1</sup>, 陶士先<sup>\*2</sup>, 熊正强<sup>2</sup>

(1. 商洛西北有色七一三总队有限公司, 陕西 商洛 726000; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:** 针对磷石膏地层水平孔钻探工程存在松散磷石膏层孔壁坍塌、磷石膏遇水分散影响取心质量、冲洗液受钙侵导致其性能恶化以及钻孔轨迹控制困难等技术难题, 同时满足绳索取心钻进工艺要求, 室内针对性地开展了冲洗液技术研究, 分析了磷石膏地层水平孔钻进对冲洗液性能的要求, 并在室内处理剂优选、配方优化的基础上, 研发了钙基成膜环保冲洗液体系, 并成功应用于贵州某磷石膏矿尾矿库中的水平孔钻探工程。室内试验及现场应用结果表明, 该体系具有良好的抗钙侵能力, 滤失量低, 流变性能相对稳定; 能够在岩心表面形成相对坚固的保护膜, 强化磷石膏孔壁, 有效预防孔壁坍塌; 保护岩心免受冲洗液侵蚀, 提高了取心质量。此外, 该体系由无毒和易降解的环保材料组成, 具有良好的环保性能。

**关键词:** 钙基成膜环保冲洗液; 磷石膏地层; 水平孔钻进; 绳索取心; 取心质量

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2023)01-0049-06

## Development and application of calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid for phosphogypsum formation

LI Tianzhou<sup>1</sup>, TAO Shixian<sup>\*2</sup>, XIONG Zhengqiang<sup>2</sup>

(1.No. 713 Team Limited Company of Northwest Geological Exploration and Group Company for Nonferrous Metals, Shangluo Shaanxi 726000, China;

2.Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Regarding to the technical problems of loose phosphogypsum hole wall collapse, dispersion of phosphogypsum encountering water, calcium contamination of drilling fluid and difficulty in drilling trajectory control during horizontal hole drilling in phosphogypsum formation, the research on drilling fluid technology was carried out indoors with analysis of the requirements of horizontal hole drilling in phosphogypsum formation for the performance of drilling fluid. The calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid was developed and successfully applied to horizontal hole drilling at a depository of phosphogypsum tailings in Guizhou. Laboratory test and field application results indicate that the system has good resistance to calcium intrusion, low filtration loss, and relatively stable rheological properties. A relatively strong protective film can be formed on the core surface, which can effectively prevent the hole wall collapse and protect core. In addition, the system consisting of non-toxic and biodegradable materials has good environment protection performance.

**Key words:** calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid; phosphogypsum; horizontal hole drilling; wire-line coring; coring quality

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-06-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.01.008

基金项目: 国家重点研发计划课题“绿色环保冲洗液体系与废浆处理技术”(编号: 2018YFC0603406)

第一作者: 李田周, 男, 汉族, 1970年生, 高级工程师, 矿产勘查与勘探专业, 从事岩心钻探施工及管理工作, 陕西省商洛商州区东关街11号, 527024235@qq.com。

通信作者: 陶士先, 女, 汉族, 1964年生, 正高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻井液技术研究工作, 北京市海淀区学院路29号, 13641250082@139.com。

引用格式: 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.

磷石膏是磷矿通过湿法生产磷酸或磷肥类产品过程中产生的固体废渣,其主要成分是二水硫酸钙,以及少量未完全分解的磷矿、残留的磷酸以及氟化物等。商洛西北有色七一三总队有限公司承担了贵州某磷矿尾矿库(磷石膏库)水平孔勘察项目,要求全孔取心,施工中将面临石膏污染冲洗液、孔壁坍塌、孔壁冲蚀扩径等诸多技术难题<sup>[1-2]</sup>。为此,针对磷石膏污染及水平孔钻进要求,开展了钙基成膜环保冲洗液研究与应用。

## 1 施工中存在的主要问题与分析

### 1.1 硫酸钙侵入对冲洗液性能的影响

磷石膏的主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。钻进过程中, $\text{CaSO}_4$ 会不断侵入到冲洗液中。虽然 $\text{CaSO}_4$ 的溶解度不高,但能提供一定数量的 $\text{Ca}^{2+}$ ,足以影响冲洗液的胶体稳定性。这是由于 $\text{Ca}^{2+}$ 易与钠蒙脱石中的 $\text{Na}^+$ 发生离子交换,使其转化为钙蒙脱石,而 $\text{Ca}^{2+}$ 的水化能力要比 $\text{Na}^+$ 弱得多,因此 $\text{Ca}^{2+}$ 的进入使蒙脱石的絮凝程度增加<sup>[3-4]</sup>;同时 $\text{Ca}^{2+}$ 的进入,使粘土颗粒聚结,减少了处理剂在粘土颗粒上的吸附,也使处理剂的水化能力减弱,护胶能力下降。 $\text{Ca}^{2+}$ 污染后,由于聚合物处理剂抗钙能力差,导致其水化能力减弱,影响其作用效果。因此, $\text{CaSO}_4$ 的侵入通常会造成以下不利影响:

(1)使无固相(不含粘土相)冲洗液的粘度显著降低,导致冲洗液的悬浮与携带能力大幅度降低,对松软地层孔壁的冲蚀作用显著增大,易引起沉砂卡钻或断钻杆等孔内事故。

(2)使含粘土相的冲洗液粘度、切力快速提高,冲洗液流动性变差,使得钻孔清洁度变差,易引起粘附卡钻;绳钻钻杆内壁结垢严重,影响岩心管打捞<sup>[5]</sup>;还需要频繁排浆,影响环境,也显著增加施工成本。

(3)使冲洗液的滤失量显著增大,大量的水进入地层,严重影响孔壁稳定。

### 1.2 孔壁易失稳

尾矿库中的磷石膏是经过堆积、碾压在一起的,因此该磷石膏层具有结构松散、强度低、渗透性强的特点,遇水极易分散成碎末或碎块(见图1),施工时孔壁易失稳。

1.3 在松散的磷石膏地层实施水平孔钻探难度大  
在松散的磷石膏地层中,采用绳索取心钻进工



(a) 水浸泡前

(b) 水浸泡后

图1 磷石膏岩心经水浸泡前后的状态

Fig.1 State of phosphogypsum core before and after immersion in water

艺施工水平孔,易产生以下问题<sup>[6-10]</sup>:

(1)水平孔钻进,冲洗液中岩屑的重力下沉方向与冲洗液流动方向不在一条直线上,其合速度方向指向下部孔壁,再加上岩屑沉降距离短,易在下部孔壁形成岩屑沉积床。若冲洗液悬浮与携岩能力差,极易在孔壁形成岩屑床,造成旋转扭矩和提拉阻力增大;冲洗液粘度升高,又会引起泵压急剧升高和钻杆内壁结垢。

(2)无垂深水平孔的孔壁更易坍塌。其主要原因:磷石膏层本身结构松散、强度低,上孔壁的磷石膏在重力作用下很容易下落;磷石膏层渗透性强,冲洗液侵入石膏后,滤失量的大幅度提高使得冲洗液中的水大量进入石膏层,导致孔壁强度进一步降低;无垂深的水平孔,当冲洗液停止循环时,其上孔壁的液柱支撑力几乎为零,孔壁处于力学不平衡状态。

### 1.4 钻孔轨迹控制困难

由于磷石膏层本身结构松散及冲洗液中水的进入,使得下孔壁在钻杆重力、钻杆回转扰动以及冲洗液的冲蚀作用下很容易向下延伸,会导致钻孔向下漂移严重。

## 2 磷石膏地层水平孔钻进对冲洗液性能的要求

磷石膏层水平孔钻进所使用的冲洗液必须保证井眼清洁和解决孔壁失稳问题,同时还应考虑绳索取心钻进钻杆内壁结垢以及环保等问题,因此要求冲洗液具有:

(1)良好的抗钙侵能力,当硫酸钙侵入后冲洗液仍能维持性能稳定。

(2)良好的井眼净化能力。具有合理的静切力和动切力,并使冲洗液在低剪切速率下具有适当的

粘度,以维持冲洗液良好的悬浮、携带能力。

(3)较强的封堵性,能有效地强化孔壁,并避免大量自由水进入到地层,以防止孔壁坍塌。

(4)合理的冲洗液粘度,既要避免冲洗液过度冲蚀孔壁,又要有利于环空压力控制和预防钻杆内壁结泥皮。

(5)良好的减摩降阻性能。

(6)良好的环保性能,避免污染环境。

### 3 钙基成膜环保冲洗液体系研究

针对磷石膏地层存在的问题,为满足磷石膏层水平孔钻探对冲洗液的性能要求,提高冲洗液体系

抗污染能力,在现有适用于松散地层和强水敏性地层的成膜冲洗液研究基础上<sup>[11-14]</sup>,开展钙基成膜环保冲洗液研究,以期该冲洗液在继承以往成膜冲洗液优良的护壁性能外,还具有良好的抗钙侵能力。

#### 3.1 处理剂优选

为了达到体系性能要求,需选择合适的增粘剂、防塌剂、降滤失剂及封堵剂等<sup>[15]</sup>。另外,在选择这些处理剂时,主要考虑两个方面的因素,一是材料本身在冲洗液中的性能,二是尽可能选用无毒或生物降解性好的材料。

通过大量的室内试验,最终优选出6种材料,其名称、常用加量范围及作用等见表1。

表1 钙基成膜环保冲洗液体系主要处理剂及其作用、环保特性

Table 1 Main agents of calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid and their functions

名称	代号	常用加量/%	主要成分与作用	环保性
抗盐共聚物	GTQ	0.3~1.0	天然高分子聚合物改性产品,提高冲洗液粘度和切力,抗盐、钙等污染能力强	无毒,易降解
成膜B剂	GCM-B	1.0~5.0	低分子量成膜树脂,提高胶结性,强化孔壁	较易降解
降滤失剂	GLCM	0.1~0.5	纤维素衍生物,降低冲洗液滤失量	无毒,易降解
植物胶	GZWJ	0.5~2.0	植物胶,降低冲洗液滤失量,并提高冲洗液的封堵性能	无毒,易降解
包被剂	GBBJ	0.1~0.3	聚丙烯酰胺类,包被、絮凝岩粉,调节冲洗液流型	易降解
封堵剂	GFD-1	1.0~3.0	无机矿物,提高冲洗液的封堵性能	无毒

#### 3.2 成膜B剂加量优选

成膜B剂是孔壁稳定的关键处理剂,不同加量情况下对磷石膏岩心的浸泡效果不同。室内通过在冲洗液中加入不同加量的成膜B剂,观察所对应冲洗液对磷石膏岩心的浸泡效果,以此确定成膜B剂的加量,试验结果见表2。

从表2可看出,随着成膜B剂加量增加,浸泡2h后的磷石膏岩心完整,而且强度逐渐提高。因此,为了更好地抑制磷石膏岩心分散,确定成膜B剂的加量为2.0%~3.0%。




#### 3.3 冲洗液体系配方优化

为了控制冲洗液各项性能指标在合理范围内,室内采用正交试验法开展冲洗液体系配方优化,确定了钙基成膜环保冲洗液的配方,具体为:

淡水+0.4%~0.8%抗盐共聚物(GTQ)+0.2%~0.5%降滤失剂(GLCM)+0.5%~1.5%植物胶(GZWJ)+0.1%~0.3%包被剂(GBBJ)+2.0%硫酸钙+2.0%~3.0%成膜B剂+1.0%~3.0%封堵剂(GFD-1)。

表2 不同成膜B剂加量的成膜冲洗液浸泡磷石膏岩心效果对比

Table 2 Comparison of immersion effect on phosphogypsum cores between film-forming environment-friendly drilling fluid with different dosage of GCM-B

成膜B剂加量/%	浸泡前后岩心状态		浸泡后变化情况
	浸泡前	浸泡2h后	
1			岩心块变小、变薄,杯底有粉末
2			岩心块大小未变,但明显变软
3			岩心块大小不变,表面致密,手感明显感觉变硬

### 3.4 冲洗液体系性能评价

以配方“水+0.4% GTQ+0.3% GLCM+1.0% GZWJ+0.2% GBBJ+2% CaSO<sub>4</sub>+3.0% 成膜B剂+1.0% GFD-1”配制的钙基成膜环保冲洗液为例,评价其常规性能、抗钙侵性能及对磷石膏岩心块的浸泡效果。

以不加成膜B剂的普通钙基冲洗液作为参比冲洗液,按配方“水+0.4% GTQ+0.3% GLCM+1.0% GZWJ+0.2% GBBJ+2.0% CaSO<sub>4</sub>+1.0% GFD-1”配制。

#### 3.4.1 常规性能

采用六速旋转粘度计和中压滤失仪测试冲洗液的性能,试验结果见表3。

从表3可看出,钙基成膜冲洗液具有较低的静切力、合适的动塑比和较低的滤失量。

#### 3.4.2 抗钙侵性能

为了评价冲洗液的抗钙侵性能,向钙基成膜环保冲洗液中加入不同质量的硫酸钙,采用六速旋转粘度计和中压滤失仪测试冲洗液的性能,试验结果见表4。

表3 不同钙基环保冲洗液的常规性能

Table 3 Conventional properties of different calcium-based environment-friendly drilling fluid

冲洗液名称	表观粘度/ (mPa·s)	动塑比/[Pa/ (mPa·s)]	静切力/Pa		API滤失量/ mL	泥皮厚度/ /mm	pH值
			10 s	10 min			
钙基成膜冲洗液	18.5	0.43	2.0	3.0	9.5	0.1	10
普通钙基冲洗液	15.5	0.73	2.0	2.5	10	0.1	10

表4 不同硫酸钙加量对钙基成膜环保冲洗液常规性能的影响

Table 4 Effect of different calcium sulfate adding amount on the conventional properties of calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid

CaSO <sub>4</sub> 加量/%	表观粘度/ (mPa·s)	动塑比/[Pa/ (mPa·s)]	静切力/Pa		API滤失量/ mL	泥皮厚度/ mm	pH值
			10 s	10 min			
0	18.5	0.43	2.0	3.0	9.5	0.1	10
2	18.5	0.44	2.0	2.5	9	0.1	10
4	17.5	0.46	2.0	2.5	8	0.1	10

从表4可看出,随着硫酸钙加量增加,冲洗液的表观粘度、动塑比和静切力基本保持不变,而滤失量逐渐降低。这说明钙基成膜环保冲洗液具有良好的抗硫酸钙污染能力。

#### 3.4.3 磷石膏岩心浸泡

将磷石膏岩心分别在两种冲洗液中浸泡16 h,然后取出并观察岩心状态,试验结果见图2。

从图2可明显看出,磷石膏岩心经钙基成膜环保冲洗液浸泡16 h后,岩心块完整;而磷石膏岩心经普通钙基环保冲洗液浸泡16 h后,岩心块分散、变小。这充分说明研制的钙基成膜环保冲洗液能很好地抑制磷石膏岩心分散。

## 4 钙基成膜环保冲洗液在磷石膏库水平孔钻进中的应用

试验钻孔位于贵州某磷矿区,设计深度530 m,

实际完钻深度530.1 m,全孔采用绳索取心钻进工艺施工。

### 4.1 孔身结构

该孔二开孔身结构完钻。采用 $\varnothing 122$  mm开孔至孔深4.5 m,下入 $\varnothing 114$  mm套管;一开采用 $\varnothing 95$  mm绳索取心钻进至180 m,下入 $\varnothing 91$  mm套管;二开采用 $\varnothing 75$  mm绳索取心钻进至530.1 m终孔。

### 4.2 现场钙基成膜环保冲洗液的配制与维护

现场首先按照配方“水+0.4%GTQ+0.3%GLCM+1.0%GZWJ+0.2%GBBJ+1.0%GFD-1”配制普通钙基冲洗液,并采用该冲洗液进行钻进。但是发现取出的岩心比较松软,甚至岩心表面出现严重脱落(见图3,脱落的厚度为5~6 mm),然后在该冲洗液的基础上添加3%成膜B剂,将其转化为钙基成膜环保冲洗液。

钙基成膜环保冲洗液使用过程中,由于磷石膏





(a) 岩心经普通钙基冲洗液浸泡前后状态



(b) 岩心经钙基成膜环保冲洗液浸泡前后状态

图2 磷石膏岩心经冲洗液浸泡16h前后的状态

Fig.2 State of phosphogypsum core before and after immersion in different drilling fluid for 16h



(a) 80m处取出的岩心



(b) 320m处取出的岩心

图3 使用普通钙基冲洗液取出的岩心及岩心表面脱落情况

Fig.3 Core taken with calcium-based environment-friendly flushing fluid and its surface shedding

粉的不断侵入,冲洗液粘度会有所提高,通过补充新浆或配制胶液稀释原有冲洗液,使冲洗液的漏斗粘度(苏式漏斗)维持在30~40s,滤失量 $\leq 10$  mL/30 min;当发现岩心变化时,进行岩心浸泡试验,若发现岩心浸泡后的效果变差,通过现场小样试验确定成膜B剂的加量,并及时向冲洗液中补加所需的成膜B剂数量。施工过程中,成膜B剂的加量维持在

3%~5%。

#### 4.3 应用效果

采用钙基成膜环保冲洗液体系顺利完成了—个孔深530.1m的磷石膏层水平孔,现场应用表明:

(1)冲洗液具有良好的护壁性能。施工过程中没有出现孔壁坍塌现象,并且取出的岩心表面坚硬、光滑(见图4)。



图4 钙基成膜环保冲洗液在390m处取出的岩心

Fig.4 Core taken with calcium-based film-forming environment-friendly drilling fluid

(2)与普通钙基冲洗液取出的岩心(见图3)相比,钙基成膜环保冲洗液的取心质量显著提高(图4)。

(3)冲洗液具有良好的流变性能,满足水平孔钻进岩粉携带需求。

(4)冲洗液抗钙侵能力强,使用过程中冲洗液性能较稳定。

(5)与采用普通钙基冲洗液相比,钙基成膜环保冲洗液能在孔壁表面形成保护膜,改善了孔壁强度,有助于钻孔轨迹控制。

#### 5 结论

(1)针对磷石膏地层水平孔钻进面临的冲洗液关键技术难题,研发了钙基成膜环保冲洗液,该冲洗液的配方为:淡水+0.4%~0.8%增粘剂(GTQ)+0.2%~0.5%降滤失剂(GLCM)+0.5%~1.5%植物胶(GZWJ)+0.1%~0.3%包被剂(GBBJ)+2.0%硫酸钙+3.0%~5.0%成膜B剂+1.0%~3.0%封堵剂(GFD-1)。

(2)室内评价与现场应用表明钙基成膜环保冲洗液对松散磷石膏层具有显著的护壁和护心效果,其较强的抗石膏污染及悬浮携带能力,较好地满足了磷石膏地层水平孔施工对冲洗液的性能要求。

#### 参考文献(References):

- [1] 唐军,聂福贵,卢虎,等.抑制性抗钙盐岩盐与石膏侵污钻井液工艺技术试验研究[J].钻采工艺,2014,37(1):95-98.

- TANG Jun, NIE Fugui, LU Hu, et al. Experimental study on inhibitory anti-calcium salt rock salt and gypsum drilling fluid technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2014, 37(1):95-98.
- [2] 董明建, 丁海峰, 崔顺利. 抗盐、抗石膏钻井液在河坝1井的应用[J]. *南方油气*, 2004, 17(3):37-39.  
DONG Mingjian, DING Haifeng, CUI Shunli. Application of salt-resisting, gypsum-resisting drilling fluid in No.1 well of Heba[J]. *Southern China Oil & Gas*, 2004, 17(3):37-39.
- [3] 鄢捷年. 钻井液工艺学(修订版)[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2014:122.  
YAN Jienian. *Drilling Fluid Technology (Revised Edition)*[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2014:122.
- [4] 黄汉仁. 钻井流体工艺原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016: 348-350.  
HUANG Hanren. *Drilling Fluid Technology Principle*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016:348-350.
- [5] 陶士先, 汤松然, 彭步涛. 绳索取心钻杆内壁结垢机理与防治[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2007, 34(S1):155-159.  
TAO Shixian, TANG Songran, PENG Butao. Mechanism and prevention of scaling on inner wall of wire-line coring drill pipe[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2007, 34(S1):155-159.
- [6] 常江华, 凡东, 刘庆修, 等. 水平孔绳索取心钻进技术在金矿坑道勘探中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2012, 39(1):40-43.  
CHANG Jianghua, FAN Dong, LIU Qingxiu, et al. Application of wire-line coring technology in horizontal borehole for exploration in gold mine tunnel[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2012, 39(1):40-43.
- [7] 赵文辉. 川藏铁路复杂地层水平孔钻探护壁堵漏研究与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(11):19-24.  
ZHAO Wenhui. Wellbore protection and sealing for directional drilling in complicated formation at the Sichuan-Tibet Railway[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(11):19-24.
- [8] 吴纪修, 尹浩, 张恒春, 等. 水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J]. *钻探工程*, 2021, 48(5):1-8.  
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5):1-8.
- [9] 肖华, 刘建国, 徐正宣, 等. 川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J]. *钻探工程*, 2021, 48(5):18-26.  
XIAO Hua, LIU Jianguo, XU Zhengxuan, et al. Wire-line core drilling technology of ultra-long horizontal investigation boreholes for the Sichuan-Tibet Railway[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5):18-26.
- [10] 侯锦, 杜宇本, 蒋良文, 等. 隧道超前地质预报水平冲击钻探取心技术[J]. *钻探工程*, 2021, 48(5):27-31.  
HOU Jin, DU Yuben, JIANG Liangwen, et al. Coring technology of horizontal percussion drilling for advance geological prediction in tunneling[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5):27-31.
- [11] 陶士先, 李晓东, 吴召明, 等. 强成膜性护壁冲洗液体系的研究与应用[J]. *地质与勘探*, 2014, 50(6):1147-1154.  
TAO Shixian, LI Xiaodong, WU Zhaoming, et al. Research and application of the strong-film-forming wall-protecting flushing fluid system for drilling[J]. *Geology and Exploration*, 2014, 50(6):1147-1154.
- [12] 李攀义, 单文军, 徐兆刚, 等. 成膜防塌无固相钻井液体系在金鹰矿区 ZK1146 井中的应用研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2015, 42(10):26-30.  
LI Panyi, SHAN Wenjun, XU Zhaogang, et al. Research and application of solid free film-forming and anti-sloughing drilling fluid system in Well ZK1146 of Jinying mining area[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(10):26-30.
- [13] 何玉云, 王发民, 熊正强, 等. 甘肃李坝金矿区强水敏分散剥落地层冲洗液的选型与使用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(4):59-62.  
HE Yuyun, WANG Famin, XIONG Zhengqiang, et al. Selection and application of flushing fluid for strong water sensitive stratum in Liba gold mine of Gansu[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(4):59-62.
- [14] 熊正强, 陶士先, 李艳宁, 等. 国内外冲洗液技术研究与进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(5):6-12.  
XIONG Zhengqiang, TAO Shixian, LI Yanning, et al. Progress in research and application of flushing fluid technology both in China and abroad[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(5):6-12.
- [15] 付帆, 陶士先, 李晓东. 绿色勘查高温环保冲洗液研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(4):129-133.  
FU Fan, TAO Shixian, LI Xiaodong. Research on environment-friendly high-temperature drilling fluid for green exploration[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(4):129-133.

(编辑 荐华)