

# MBM - GTQ 盐水冲洗液体系的研究与应用

贾宏福<sup>1</sup>, 罗刚<sup>1</sup>, 付兆友<sup>1</sup>, 盖志鹏<sup>1</sup>, 李晓东<sup>2</sup>

(1. 新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队, 新疆哈密 839000; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:** 盐水条件下配制出性能稳定且能维护孔壁稳定的冲洗液一直是困扰着新疆戈壁区域钻探施工的一个难题。通过冲洗液材料选型和在不同工区的试验研究, 最终确定了 MBM - GTQ 盐水冲洗液体系配制与使用维护方案, 并在新疆若羌县坡北铜镍矿强蚀变地层深孔施工和事故处理中取得了良好的应用效果。实践证明, MBM - GTQ 盐水冲洗液体系是适合新疆若羌县坡北铜镍矿破碎蚀变地层的有效方案。

**关键词:** MBM; GTQ; 盐水冲洗液; 坡北铜镍矿; 蚀变地层

**中图分类号:** P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2015)12 - 0023 - 05

**Study on MBM - GTQ Saltwater Drilling Fluid System and the Application** / JIA Hong-fu<sup>1</sup>, LUO Gang<sup>1</sup>, FU Zhao-you<sup>1</sup>, GE Zhi-peng<sup>1</sup>, LI Xiao-dong<sup>2</sup> (1. No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hami Xinjiang 839000, China; 2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** It has been a difficult problem to make up drilling fluid with stable performance under saltwater condition to keep borehole wall stability in the drilling construction in Gobi of Xinjiang. By the selection of drilling fluid materials and the test studies in different work areas, MBM - GTQ saltwater drilling fluid system was determined for use with good application effects for deep hole construction and accident treatment in intensely altered strata in Pobei Cu-Ni mine of Ruoqiang County. The practice proves that MBM - GTQ saltwater drilling fluid system is an effective scheme for the broken altered strata there.

**Key words:** MBM; GTQ; saltwater drilling fluid; Pobei Cu-Ni mine; altered strata

## 0 引言

冲洗液技术是钻探工程的重要组成部分, 随着钻孔深度、难度的增大, 它在确保安全、优质、快速钻探施工中起着越来越重要的作用。目前, 水基冲洗液在实际应用中占据主导地位。通常, 大部分冲洗液处理剂在淡水中才能高效地发挥作用。而在新疆戈壁区域施工时, 当地所取水中一般都含有一定量的盐分, 使得常用冲洗液处理剂不能有效发挥作用。这既浪费了材料又危及孔内安全。因此, 寻求一种能够在盐水中有效发挥作用的处理剂, 配制出性能稳定、优良的冲洗液, 维护钻孔施工过程中孔壁稳定势在必行。新疆若羌县坡北铜镍矿是一个使用卤水进行钻探施工的典型工区。本文以该工区为主介绍笔者近年来在盐水冲洗液技术方面的探索与实践。

## 1 工区概况及对冲洗液性能的要求

### 1.1 工区概况

坡北工区 2012 年被列为全国找矿突破战略行

动整装勘查区。钻遇岩石主要有辉长岩、辉石岩、橄榄岩以及它们之间的过渡岩石, 如辉石辉长岩、辉长苏长岩、辉橄岩、辉长闪长岩等。上部孔段(700 m 以浅), 岩性一般均匀、较完整, 研磨性中等, 可钻性 6~9 级。700 m 以深, 岩石蚀变现象很普遍, 部分地层强烈蚀变后的岩石松软、疏松, 吸水易膨胀剥落。蚀变地层岩性分析见表 1。

表 1 岩性分析结果

岩样孔号	岩性分析结果							%
	蒙脱石	绿泥石	伊利石	闪石	镁橄榄石	蛇纹石	长石	
ZK38-4 孔	15	5	5	25	20		25	
ZK2-6 孔	15	5	5	30	30	10	5	

ZK2-6 孔与 ZK38-4 孔岩样矿物组分基本相同, 值得注意的是粘土矿物成分较多, 达到 25%。其中蒙脱石含量达到 15%, 极易发生水化膨胀。绿泥石和伊利石含量 10%, 易水化分散和剥落。

该工区钻探施工遇到的最大问题是中深部、深部孔段存在强烈蚀变破碎地层, 钻遇该层则施工进

度缓慢,甚至发生事故。钻探用水均取自工区周边干涸盐湖浅层地下水或矿井排出的废水,水的矿化度较高,达到卤水级别,密度达到 $1.05\text{ g/cm}^3$ 。水中离子成分较为复杂,对配制冲洗液都具有很大的影响。水质分析结果: $\text{Ca}^{2+} 821.90\text{ mg/L}$ ,  $\text{Mg}^{2+} 311.80\text{ mg/L}$ ,  $\text{Na}^+ 19900.00\text{ mg/L}$ ,  $\text{K}^+ 157.70\text{ mg/L}$ ,  $\text{HCO}_3^- 143.50\text{ mg/L}$ ,  $\text{CO}_3^{2-} 0\text{ mg/L}$ ,  $\text{SO}_4^{2-} 11300.00\text{ mg/L}$ ,  $\text{Cl}^- 23900.00\text{ mg/L}$ 。

## 1.2 典型钻孔

近年来,随着深孔数量增加,个别钻孔钻遇多层、厚层蚀变破碎带,软硬互层现象明显(见图1),钻孔施工难度很大,个别钻孔因事故多次施工无果。其中最为典型的案例即ZK2-6孔和ZK38-4孔。



图1 蚀变破碎带与软硬互层地层岩心

ZK2-6孔设计孔深1600 m,倾角 $90^\circ$ 。自2011年起由新疆地矿局第六地质大队和国内其它两家单位机台历经3次施工,均在800~1100 m孔段蚀变破碎地层发生复杂事故,处理无效而报废钻孔。2013年我队重新制定施工方案后,由XY-6B型钻机重新施工该钻孔。上部孔段以PQ、HQ口径为主,施工至952 m,接近钻机施工最大能力,下入套管。

ZK38-4孔设计倾角 $89^\circ$ ,设计孔深2200 m。该孔自1100 m后遇到多层破碎蚀变地层,频繁发生事故,施工历时610 d,施工进展缓慢(未钻遇蚀变破碎地层的钻孔钻月效率可高达900 m)。该孔上部孔段以HQ口径为主,施工至1318 m后下入套管。

上述2个钻孔用HQ套管护壁的方法已经达到钻机施工最大能力,下部孔段施工则需要冲洗液充分发挥保护孔壁的作用。

## 1.3 冲洗液性能要求

根据以往施工经验,在蚀变破碎地层钻进时冲洗液应该具有以下特点。

(1)较小的滤失量与良好的造壁性。冲洗液的滤失与造壁性能对蚀变破碎地层或遇水失稳地层的孔壁稳定有重要影响。滤失量过大会引起蚀变地层孔壁岩石膨胀、剥落,导致钻头寿命锐减、钻孔超径,引起埋钻、断钻杆事故,不利于快速穿过复杂地层。故滤失量应较小,滤失形成的泥饼要薄而韧。

(2)适宜的流变性。相对于坚硬完整岩层,蚀变破碎地层钻进时冲洗液粘度、悬浮岩屑的能力应增大,触变性要好,以利于携带和排除岩屑,保证孔内清洁和孔壁稳定。

(3)合适的密度、pH值和固相含量。冲洗液密度应稍高,以避免孔壁坍塌。pH值应控制在8~11之间,以利于处理剂发挥作用。固相含量要偏低,以利于快速钻进,避免事故。

## 2 常用冲洗液体系应用效果及失效机理

### 2.1 常用材料使用效果

2008年以前采用的冲洗液材料主要有膨润土、纯碱、CMC、植物胶、聚丙烯酸钾、聚丙烯酰胺和KP共聚物等常用材料。使用卤水配制冲洗液存在的问题主要是各类冲洗液材料在卤水中溶解性、分散性差,利用率不高,导致冲洗液性能不稳定,胶体率很低,其中的固相材料易沉淀分层,不能有效悬浮携带和清除岩粉,冲洗液变质快,浪费大。但由于之前大部分孔都属于浅孔或中深孔,蚀变破碎层少,用上述冲洗液材料配制的冲洗液或无固相冲洗液基本可以满足施工要求。

2008年我们引进了抗盐一号处理剂,冲洗液性能得到了改善,但仍然没能解决冲洗液性能不稳定,分层较快的问题。抗盐一号冲洗液虽然提高了冲洗液粘度和对岩粉的携带能力,但其悬浮能力和护壁效果还是不能满足深孔或复杂地层的施工要求。

2012年施工中又尝试使用淡水配制冲洗液,淡水冲洗液虽然性能较好,但容易受卤水侵蚀而变质。同时由于拉淡水运距远、运量小、成本高等原因,放弃使用淡水配制冲洗液。

### 2.2 常用材料失效机理

一般,常用冲洗液材料配制的溶液的流变性大多会受到盐离子的影响。阳离子较阴离子影响大,高价阳离子较低价阳离子影响大。

#### 2.2.1 盐对膨润土-水分散体系的影响

膨润土-水分散体系中粘土颗粒之间由于颗粒

表面都带有负电荷而产生排斥力,粘土颗粒表面存在双电层和水化膜。具有同种电荷(负电荷)的粘土颗粒因静电斥力不能靠近而保持分散状态。同时粘土颗粒四周的水化膜,也阻碍了土颗粒彼此接近或聚结。因此,粘土分散,冲洗液性能稳定。当水中含有大量高价阳离子时,双电层厚度下降,粘土胶粒间的吸引力大于排斥力,从而产生颗粒聚结沉淀现象。宏观表现为冲洗液固液分层,滤失量增大,泥皮增厚,性能不稳定。

### 2.2.2 盐对纤维素类溶液的影响

钠羧甲基纤维素分子中羧钠基(-COONa)上的 $\text{Na}^+$ 在水溶液中易电离,将其加入无机盐溶液后不仅 $\text{Na}^+$ 会阻止-COONa上 $\text{Na}^+$ 的解离,电荷屏蔽作用也促使CMC分子链发生卷曲,同时在盐溶液中水化基团受到一定限制,分子链的水化膜斥力会有所削弱,所以NaCl浓度的增加会使CMC溶液粘度下降。同样, $\text{Ca}^{2+}$ 及 $\text{Mg}^{2+}$ 等二价离子对CMC的作用明显强于单价离子 $\text{Na}^+$ 或 $\text{K}^+$ 。总之,不同种类的盐溶液对CMC溶液的流变特性都有着不同的影响与作用。大量 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 等阳离子对聚阴离子纤维素(PAC)溶液也有类似的作用,导致其粘度下降。

### 2.2.3 盐对聚丙烯酰胺溶液的影响

试验表明,阴离子对聚丙烯酰胺溶液粘度没有影响。阳离子会与HPAM链上的羧酸根阴离子之间的静电引力使分子链节中原有静电斥力减弱,舒展程度降低,分子表面的溶剂化层在金属阳离子作用下变薄,释放出大量“束缚水”,使溶液粘度明显降低。

### 2.2.4 盐对植物胶类的影响

冲洗液常用植物胶有黄原胶、瓜尔胶等。有关研究表明,外加盐浓度在一定范围内会使黄原胶溶液浓度下降。盐浓度达到一定值时,黄原胶溶液迅速转变成一种絮凝状的不溶性沉淀。这种沉淀可能是由于黄原胶分子侧链的羧酸根与高价金属离子形成难溶性的盐而致,也可能是高价阳离子在不同分子间通过离子链产生架桥作用,使分子成束状凝聚所致。而对瓜尔胶而言,由于其结构上不含易解离基团,分子与阴阳离子通过较强的化学键相互作用的可能性较小,也不存在静电屏蔽效应,因而它对大多数阴阳离子表现出很强的耐受性<sup>[11]</sup>。

### 2.2.5 盐对腐植酸盐类的影响

腐植酸盐除靠它的水化作用强的官能团起降失

水作用外,它本身又是聚电解质,在泥浆分散系中,聚阴离子吸附在粘土颗粒表面时,提高粘土粒的电动电位,增大土粒聚结阻力和静电斥力,提高了土粒的稳定性,使泥浆中易于保持和增加细土粒的含量,形成细而致密的泥皮,从而使泥浆失水量减少。当泥浆中的钙离子含量一定范围内时,泥浆的粘度和失水量保持较好水平,超过此范围后,因生成微溶性的腐植酸钙沉淀,泥浆的失水及粘度增加<sup>[12]</sup>。

## 3 MBM-GTQ 盐水冲洗液体系研究

### 3.1 MBM、GTQ 及其作用机理

多功能复合剂MBM是以钠膨润土为基材,通过一定的工艺条件将自制的降失水剂和其它处理剂以晶面接枝共聚、层间插入、离子互换、物理吸附等方式复合制备而成的冲洗液多功能复合材料。MBM具有较强的抑制性能,适合于在水敏地层和破碎地层中使用,钻进过程中可以保证孔壁的稳定性,避免掉块、卡钻等情况出现,钻进平稳。其不论在淡水还是盐水中都具有良好的悬浮能力,可以将钻屑、泥沙带出,保持孔底清洁,钻杆内无结垢。配制、使用简单方便。

MBM作用机理:粘土造浆主要取决于粘土的水化作用,粘土水化时晶层间距增加,形成扩散双电层,而卤水中大量的阳离子进入扩散双电层会破坏粘土水化。MBM是通过将粘土晶体的层片剥离和对晶粒破碎细化,与有机改性剂发生作用,形成的双电层不受阳离子的影响,因此能够在卤水中形成稳定的结构。

抗盐共聚物GTQ中有多种官能团,具有增粘、提切、降失水,抗污染等功能,且不受电解质污染影响。

GTQ作用机理:GTQ分子链上有大量的-COO-Na基团和 $-\text{SO}_3\text{Na}$ 存在,这两种基团为强水化基团,使黏土颗粒表面的溶剂化水膜增厚,电动电位提高,从而显著提高黏土颗粒的聚结稳定性。当遇到大量的钠离子、钙离子或镁离子等时,不易产生去水化作用和盐析现象。

### 3.2 MBM 卤水冲洗液体系室内试验

#### 3.2.1 配方确定试验

根据性能要求,通过调整加量、多次试验,确定出基本配方:1000 mL水+2 g纯碱+40 g多功能复合剂MBM+2.5 g抗盐共聚物GTQ。

经检测,该冲洗液体系滤失量  $< 10 \text{ mL}/30 \text{ min}$ ,漏斗粘度  $30 \text{ s}$ ,密度  $1.07 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,胶体率  $98\%$ ,性能随时间延长基本保持稳定。

### 3.2.2 岩样膨胀与分散试验

为验证 MBM - GTQ 盐水冲洗液体系的抑制性,取蚀变地层岩样压制小岩心,分别在清水与 MBM - GTQ 冲洗液中进行了膨胀量测试,结果见表 2。

表 2 岩样膨胀与分散试验结果

项 目	岩心膨胀量/mm				相对膨胀 降低率/%
	1 h	2 h	3 h	4 h	
清水	0.57	0.60	0.62	0.62	
MBM - GTQ 盐水冲洗液	0.14	0.15	0.16	0.16	74

由表 2 可以看出,MBM - GTQ 盐水冲洗液具有较好的抑制性能。

### 3.2.3 对比试验

为了研究不同材料配制出的冲洗液的性能,选取了 2 家生产商提供的 2 种材料,即抗盐一号和抗盐土做了对比试验。试验配方见表 3,试验结果见表 4。

表 3 试验后的冲洗液配方

编号	淡水/ mL	卤水/ mL	纯碱/ g	膨润 土/g	MBM/ g	抗盐一 号/g	抗盐 土/g	CMC/ g	GTQ/ g
1	1000		2	40				2.5	
2		1000	2	40				2.5	
3		1000	2		40			2.5	
4		1000	2	40				2.5	2.5
5		1000	2		40			2.5	2.5
6		1000	2	40		20		2.5	
7		1000	2				40	2.5	
8	1000		2		40			2.5	

表 4 试验的冲洗液性能

编号	滤失量/ [mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	漏斗 粘度/ s	密度/ (g· cm <sup>-3</sup> )	动切 力/ Pa	塑性 粘度/ (mPa·s)	动 塑 比	胶体 率/ %
1	11	48	1.032	4.599	8	0.575	100
2	19	18	1.066	1.533	2	0.383	12
3	12	21	1.075	1.022	6	0.170	90
4	13	18	1.072	1.533	4	0.383	15
5	10	30	1.079	4.088	7	0.583	98
6	13	20	1.050	1.022	4	0.255	25
7	17	19	1.071	1.022	4	0.256	15
8	9	42	1.028	5.110	9	0.568	100

试验结果表明:淡水条件下冲洗液胶体率很高。使用卤水时,唯有 MBM - GTQ 冲洗液胶体率较高。冲洗液滤失后形成的泥皮质量优劣次序为:8 号,1

号,5 号,3 号,4 号,6 号,2 号,7 号。

1、2 号对比可知:其他条件相同时,淡水与卤水配制的冲洗液,滤失量、漏斗粘度和胶体率等性能均有较大差别。

2、3 号对比可知:使用卤水时,用 MBM 配制的冲洗液较用膨润土配制的冲洗液性能好。

2、4 号对比可知:使用卤水时,GTQ 与膨润土配合使用未能有效改变冲洗液性能。

4、5 号对比可知:使用卤水时,用 MBM + GTQ 配制的冲洗液性能较用膨润土 + GTQ 配制的冲洗液性能好。(注:实际施工中 5 号未加 CMC)。

2、6 号对比可知:使用抗盐一号后冲洗液的性能有所改善,但不够理想。

2、7 号对比可知:使用卤水时,用抗盐土与膨润土配制的冲洗液性能接近。

1、8 号对比可知:使用淡水时,用膨润土与 MBM 配制的冲洗液性能相近。MBM - GTQ 冲洗液的滤失量和密度较低。

### 3.2.4 现场试验

为了确保冲洗液性能稳定并满足施工需要,坡北工区建立了容积为  $10 \text{ m}^3$  的搅拌站,以 XY - 4 型钻机为搅拌机,配专人搅制并监控冲洗液性能。

现场测试表明随着搅拌时间的增加,冲洗液漏斗粘度逐渐提高到一定程度。由于钻机只能开动较低的转速,搅拌所需时间较长。一般需要搅拌 3 ~ 5 h,然后静置 1 ~ 2 h 浸泡(浸泡时间长则冲洗液粘度提高大),再搅拌 1 ~ 2 h 即可。冲洗液漏斗粘度可达 27 ~ 35 s(随静置时间延长,漏斗粘度可达 60 s),胶体率可达 95% 以上,滤失量  $10 \text{ mL}/30 \text{ min}$ ,泥皮薄而韧。

现场试验和实际使用表明,该冲洗液性能稳定,胶体率高(静置数天亦无分层现象)、粘度高、滤失量低、悬浮能力强,可以满足施工要求。可循环使用的时间为 10 ~ 15 d,随孔深或时间的延长会出现颜色发灰,固液分层,各种性能持续下降的现象,分析其原因为冲洗液内部组分降解或地下卤水侵蚀污染所造成。

## 4 应用成果与推广情况

### 4.1 MBM - GTQ 冲洗液体系的应用成果

MBM - GTQ 冲洗液体系的应用,确保了坡北工区 ZK38 - 4 孔及 ZK2 - 6 孔的成功施工。这既体现

在保障正常施工的过程中,也体现在事故处理期间维持孔壁稳定的有效性上,得到了机台员工的高度认可。

ZK38-4 孔终孔孔深 2472.66 m,刷新了新疆小口径金刚石绳索取心钻探新记录。ZK2-6 孔终孔孔深 1620.06 m,突破了在破碎蚀变地层施工中的技术难题。

#### 4.2 MBM-GTQ 冲洗液的推广应用

在新疆,尤其在东疆众多工区施工时通常只有盐水可作为冲洗液用水。常用材料配制的冲洗液在浅孔、地层完整的工区可维持正常钻进,但不能有效满足深孔、复杂地层施工。因此我队在多个工区推广应用 MBM-GTQ 冲洗液体系,并均取得了良好的效果。

##### 4.2.1 在哈密沙东钨矿钻探中的应用

该矿区多个钻孔钻遇较厚第四系覆盖层,最厚达 175 m。钻进时,孔壁坍塌严重,每次提钻后,均无法下到位,要进行扫孔和冲孔。采用当地盐水配制的冲洗液性能不稳定,在循环过程中固液分层,不能有效护壁和防塌。改用 MBM 后顺利钻穿覆盖层并下入套管,配方如下:

$1 \text{ m}^3 \text{ 水} + 0.3\% \sim 0.5\% \text{ Na}_2\text{CO}_3 + 2\% \sim 4\% \text{ MBM} + 0.3\% \sim 0.5\% \text{ 植物胶} + 0.2\% \sim 0.3\% \text{ CMC} + 0.1\% \sim 0.2\% \text{ PAC141}$ 。

经测定,漏斗粘度达到 40 s,且性能稳定,优于常用冲洗液体系。

##### 4.2.2 在新疆若羌县某金矿钻探中的应用

该工区以浅孔为主,钻孔倾角  $60^\circ \sim 70^\circ$ ,下部地层具有破碎,且冲洗液普遍漏失的特点。施工中常有卡钻现象,断钻杆事故频发。工区使用卤水配制冲洗液,经常因供水不足而停工。使用 MBM、GTQ,并用交联堵漏法堵漏后,事故次数减少,可基本维持正常钻进,施工效率提高。

## 5 结论

现场实际应用成果表明,MBM-GTQ 冲洗液体系是用盐水或卤水配浆时,顺利钻进复杂地层和处理事故期间维护孔壁稳定的有效解决方案。

(1) MBM-GTQ 盐水冲洗液体系具有良好的流变特性,解决了常规盐水冲洗液处理剂使用量大、性

能极不稳定、不利于蚀变破碎地层钻进的难题。同时,使用当地卤水也极大地降低了运水成本和等待时间,利于施工。

(2) MBM-GTQ 冲洗液集多种功能于一体,搅拌方便,现场容易操作,维护简单。值得在类似工区推广应用。

## 参考文献:

- [1] 付帆,胡继良,王新萍,等.地质钻探新型多功能复合剂研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):153-156.
- [2] 黄卫东,付帆,胡继良,等.多功能复合剂在伊塘湖矿区 ZK11-1 孔的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):1-3.
- [3] 鄢捷年.钻井液工艺学(修订版)[M].山东东营:中国石油大学出版社,2012.
- [4] 秦明明,吉静,王峰.无机盐对膨润土/水分散体系的影响[J].新型建筑材料,2009,36(11):32-34.
- [5] 李俊华,李俊莉,杨乃旺.羧甲基纤维素钠水溶胶液粘度影响实验研究[J].应用化工,2011,40(3):479-482.
- [6] 吴伟都,朱慧,姜胡兵,等.阳离子对 CMC 溶液流变特性的影响研究[J].中国食品添加剂,2012,(6):165-169.
- [7] 牟伯中,罗平亚,郭拥军,等.聚电解质溶液中粘土颗粒的  $\zeta$  电位[J].环境工程,2000,18(5):55-56.
- [8] 王霞,王文俊,邵自强,等.  $\text{CaCl}_2$  浓度对聚阴离子纤维素粘度性能的影响[J].应用化工,2007,36(7):707-709.
- [9] 李美蓉,柳智,宋新旺,等.金属阳离子对聚丙烯酰胺溶液黏度的影响及其降黏机理研究[J].燃料化学学报,2012,40(1):43-47.
- [10] 康万利,孟令伟,牛井岗,等.矿化度影响 HPAM 溶液黏度机理[J].高分子材料科学与工程,2006,22(5):175-177,181.
- [11] 卢晓黎,雷鸣,陈正钢,等.常用低浓度食品胶溶液粘度的影响因素研究(2)[J].四川大学学报(工程科学版),2001,33(1):78-81,109.
- [12] 刘萍,彭振斌,陈志超.几种腐植酸盐处理剂对泥浆性能的作用分析[J].江西腐植酸,1986,(2):1-7.
- [13] 陶士先,陈礼仪,单文军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目 WFSD-2 孔钻井液工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):45-48.
- [14] 李之军,陈礼仪,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)断层泥孔段泥浆体系的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):13-15,19.
- [15] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].湖南长沙:中南大学出版社,2014.
- [16] 沈钟,赵振国,康万利.胶体与表面化学[M].北京:化学工业出版社,2012.

致谢:本文得到了北京探矿工程研究所陶士先高工和成都理工大学李之军博士的指导,在此表示感谢。