

# 若尔盖铀矿田复杂地层泥浆技术研究与应

宋 军<sup>1,2</sup>, 陈礼仪<sup>2</sup>, 张统得<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:**若尔盖铀矿田地层极其复杂,主要表现为强水敏性、强破碎、漏失严重,钻探施工难度极大。本文结合地层特点及孔壁稳定性分析,研究出了适合于该矿区复杂地层钻探施工的泥浆体系,并在现场取得了良好的应用效果,同时也总结出了一套泥浆现场维护与管理技术措施,对类似复杂地层钻探施工中的泥浆技术具有较好的借鉴作用。

**关键词:**复杂地层;孔壁稳定性;泥浆体系;泥浆维护与管理;若尔盖铀矿田

中图分类号:P634.6 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2016)12-0001-05

**Research and Application of Mud Technology in Complex Formation of Ruergai Uranium Mining Field/SONG Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Li-yi<sup>2</sup>, ZHANG Tong-de<sup>1</sup>** (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** The formation of Ruergai uranium mining field is extremely complex, mainly manifesting with high water sensitivity, strong broken and severe leakage, which result in high difficulty of drilling operation. In this article, combining the analysis on formation characteristics and the hole wall stability, the mud system suitable for the complex formation drilling in mining area is obtained, and good application results achieved in site. And a set of technical measures of mud maintenance and management are summarized in the application, which can be good reference for mud technology in similar complex formation drilling construction.

**Key words:** complex formation; holewall stability; mud system; mud maintenance and management; Ruergai uranium mining field

## 0 引言

若尔盖碳硅泥岩型铀矿田位于四川省北部若尔盖县境内,处于川西北高原高寒地区,该矿田成矿条件优越,矿量集中,品位较富,是难得的铀矿资源基地。但矿区受白龙江深大断裂带构造活动影响,断裂构造十分发育,次断裂交错切割,因此,矿区地层条件极其复杂。

从 1959 年开始,我国的地质人员已开始在该矿区进行相关地质勘查工作,并施工了大量钻孔,但勘探工程质量始终不高,钻孔不合格率都在 50% 以上,其中的重要原因即是地层复杂、岩石松散破碎、漏失严重,导致钻孔事故多发,成孔率较低。

2013 年,由中国地质科学院探矿工艺研究所和四川省核工业地质局联合实施了“高原生态环境脆弱区综合钻探技术应用示范”的地质调查项目,该项目的-一个主要目的即是利用国内现有的先进钻探技术,解决在若尔盖矿区钻探工作中所面临的施工

难题,提高矿区的勘探效率。复杂地层钻进泥浆技术的研究与应用便是其中的一个重要课题。

## 1 矿区地层特点及孔壁稳定性分析

矿区地层岩性主要为炭质、硅质、粉砂质板岩,以及砂岩、灰岩等,受地质构造影响,地层极其破碎,换层频繁,孔壁稳定性极差,主要表现在以下几个方面。

(1) 通常在钻孔上部存在较厚的炭质板岩层(如图 1),该类地层强度较低,松软破碎,水敏性强,粘土矿物含量较高,遇水即散,在钻进时,一旦钻探泥浆质量较差,泥浆滤液便会沿着地层岩石层表面或裂隙侵入其中,易与粘土矿物表面结合并产生一定的水化应力,进而大大降低了地层岩石之间的结合强度以及层里面的结合力,同时伴随钻柱的回转扰动或起下钻时的压力“激动”,极易导致地层岩石发生剥落、垮塌,最终引发卡钻、埋钻等严重孔内事

收稿日期:2016-11-03

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“高原生态环境脆弱区综合钻探技术应用示范”(编号:12120113017200)

作者简介:宋军,男,汉族,1963 年生,教授级高级工程师,成都理工大学在读博士,长期从事地质钻探技术研究和科研管理工作,四川省成都市郫县成都现代工业港港华路 139 号, songjun801@163.com。

故。



图1 强水敏性炭质板岩地层

(2)深部地层以硅质灰岩或灰岩为主,溶蚀孔洞发育,破碎严重,属于典型的硬、脆、碎地层,同时伴随强漏失。由于该类地层为非水敏性岩石,裂隙发育,胶结性差,泥浆滤液进入裂隙后,导致孔壁周围的孔隙压力增大,泥浆液柱压力对孔壁的有效支撑力减小,最终使得孔壁发生坍塌、掉块。

(3)由于在灰岩地层溶蚀孔洞、裂隙极其发育(如图2),钻孔漏失严重,并通常表现为长段纵向性漏失,采用常规堵漏材料及工艺难以根本性解决漏失难题。恶性漏失给钻探孔内安全也带来极大隐患,主要表现在一旦发生全漏失,即失去了泥浆液柱压力对孔壁稳定的物理支撑,此外,在破碎孔壁也难以形成高质量的泥饼,容易使得炭质板岩层、破碎灰岩层等发生掉块、坍塌,造成孔内事故。



图2 地层溶蚀孔洞、纵向裂隙极其发育

## 2 泥浆技术思路与对策

根据以上对矿区主要地层特点以及孔壁稳定性分析,从泥浆技术思路与对策方面对孔壁稳定应从以下几点进行考虑。

(1)针对矿区上部强水敏性炭质板岩地层,泥浆应具有优良的滤失性能,同时提高泥浆滤液的矿

化度,降低自由水活度,减小泥浆滤液中自由水分子与粘土矿物的结合力,进而降低因泥浆滤液侵入导致的孔壁岩石剥落坍塌。

(2)对于破碎灰岩或硅质灰岩地层,在泥浆技术对策上应以加强封堵防塌和胶结防塌为主。通过加强封堵,从根本上降低或延缓泥浆滤液的侵入,避免孔壁周围的孔隙压力增大;通过提高泥浆体系的胶结性,防止破碎地层的坍塌掉块。

(3)保证合适的泥浆密度,在具有较强封堵能力的前提下确保泥浆液柱压力能有效地对破碎孔壁起着物理支撑;同时由于灰岩地层裂隙孔洞发育,孔内静止水位较低,泥浆液柱压力要能平衡地层压力,过大的液柱压力必然会在压差作用下发生钻孔漏失现象。

(4)由于矿区地层通常同时存在水敏性强、地层破碎、漏失严重等多种复杂情况,因此泥浆体系在具有防塌抑制能力的前提下还应有一定的防漏堵漏作用,避免因钻孔漏失导致泥浆难以发挥其防塌护壁的能力。

除此之外,在泥浆技术设计思路上还应具有优良的流变特性、润滑性,同时,泥浆的各项性能易于调整和维护,以满足矿区实施的多种特殊钻进工艺,包括螺杆马达—有缆随钻定向钻进、套管钻进、绳索取心液动锤钻进等。

## 3 泥浆体系的设计与应用

矿区在勘探历史上曾先后使用清水、植物胶体系、低固相泥浆等多种泥浆体系钻进,但始终未能有效解决复杂地层的护壁防塌难题。因此,根据以往的泥浆技术经验教训以及前述泥浆技术思路与对策,结合“高原生态环境脆弱区综合钻探技术应用示范”项目中的复杂地层泥浆技术研究专题,形成了2套主要泥浆体系方案——钾石灰—聚磺泥浆技术体系和低密度随钻防塌防漏泥浆技术体系。

### 3.1 钾石灰—聚磺泥浆技术体系

钾石灰—聚磺泥浆技术体系是将聚合物泥浆体系及石灰泥浆体系的优点结合为一体,具有更强的防塌护壁性能,尤其是针对松散、破碎、水敏性强的地层具有较好的防塌效果。该体系在石油天然气钻探中较为常用,具有抑制性好、防塌能力强,综合成本较低等特点。但在矿区实施的岩心钻探不同于石油钻探,主要表现在钻孔口径小、设备能力较低、全

孔取心等,要求泥浆具有较低的粘切力,同时配方也要尽量简化,以便现场人员进行维护和调整。

### 3.1.1 基本配方

经过大量室内试验优化,确定该体系基本配方为:3%~5%膨润土+0.3%~0.6%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+2%~3%LV-CMC+0.2%~0.5%K-PAM+0.5%~2%SMC+1%~2%SMP-1+1%~2%NRH+1%~2%KCL+0.2%~0.5%CaO。

### 3.1.2 基本性能参数

钾石灰-聚磺泥浆体系基本性能参数如下:ρ为1.04~1.08g/cm<sup>3</sup>,FV为25~35s,PV为12~16mpa·s,YP为4~10Pa,Gel(10'/10")为0.5~1/2~4Pa,FL为4~8mL,泥饼厚度为0.3~0.8mm,pH值9~11。

### 3.1.3 基本性能评价

#### 3.1.3.1 抑制性评价

采用ZNP-1型膨胀量测定仪进行测试。试验岩样选用若尔盖矿区典型炭质板岩,磨细过100目筛网后,取15g置于压模机内制成。试验条件为常温常压。对该体系基本配方组成的钻孔冲洗液以及地质钻探常用的不分散低固相泥浆(具体配方为:清水+5%优质膨润土+0.3%纯碱+0.5%LV-CMC+200ppmPHP)进行对比试验,了解岩样在不同介质情况下的膨胀情况,试验结果见图3。

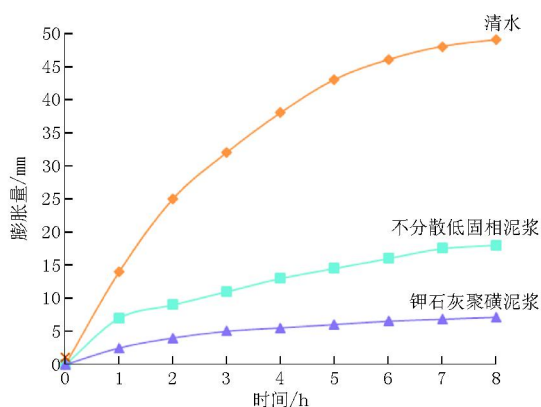


图3 炭质板岩岩样在不同介质中随时间膨胀情况

#### 3.1.3.2 封堵性评价

主要采用FA型无渗透测试仪进行评价。该试验是采用20~40目(相当于0.90~0.45mm)石英砂作为模拟地层微孔隙,模拟渗透压力为0.69MPa。观察30min内冲洗液的渗透量。试验结果见表1。

表1 FA型无渗透仪封堵性能评价

配方	砂床滤失量/mL	渗滤深度/mm
清水	全漏失	全浸湿
不分散低固相泥浆	全漏失	全浸湿
钾石灰-聚磺泥浆	0	94

#### 3.1.3.3 小结

通过以上抑制性和封堵性试验评价表明,钾石灰-聚磺泥浆体系相对于清水或常规不分散低固相泥浆体系具有较强的抑制、封堵性能,其主要原因在于该体系中引入了K<sup>+</sup>和Ca<sup>2+</sup>等无机离子,提高了泥浆滤液的矿化度;其中K<sup>+</sup>半径与蒙脱石中的硅氧四面体氧原子六角环网格直径相当,能镶嵌其中,并且其水化半径较小,水化能较低,水分子不易进入,能很好地抑制蒙脱石含量较高地层的水化膨胀;另外引入Ca<sup>2+</sup>使得体系中的粘土颗粒处于适度絮凝的粗分散状态,具有较强的抑制、抗可溶盐污染能力;此外,在体系中含有大量低软化点沥青类处理剂,加强对破碎、松散地层的封堵胶结,并有助于形成更为薄而致密的泥饼,进一步提高了体系的防塌性能。

### 3.2 低密度随钻防塌防漏泥浆技术体系

低密度随钻防塌防漏泥浆体系是根据矿区垮塌与漏失并存的复杂地层条件下研制的新型泥浆体系。该体系主要是在钾石灰-聚磺泥浆体系的基础上加入了流型调节剂、桥堵剂和发泡剂,同时进一步提高其封堵、抑制能力,形成低密度随钻防漏泥浆体系。

#### 3.2.1 基本配方

基本配方为:钾石灰-聚磺泥浆体系基础配方+0.5%流行调节剂+2%~8%桥堵剂+0.1%~0.3%发泡剂;其中桥堵剂主要为DTR、SRFL-101、QP-1和GDJ-IV按质量比1:3:2:3组成,发泡剂为ADF-3,流行调节剂主要用于改善泥浆流变性质和沉降稳定性。其中根据调整ADF-3的加量以及发泡强度控制泥浆密度,以平衡地层压力。

#### 3.2.2 基本性能参数

低密度随钻防塌防漏泥浆体系基本性能参数如下:ρ为0.7~0.9g/cm<sup>3</sup>,FV为30~45s,PV为15~25mpa·s,YP为9~12Pa,Gel(10'/10")为1~3/3~8Pa,FL为3~6mL,泥饼厚度0.4~0.6mm,pH值9~11。

#### 3.2.3 防漏堵漏能力评价



采用中国地质科学院探矿工艺研究所研制的DS-2型堵漏测试仪进行评价。采用 $\varnothing 2$  mm的钢珠和宽为1 mm的缝板分别模拟地层孔隙和裂隙,初始模拟渗透压力均为1 MPa,并逐渐提高压力,评

价其承压能力。分别选用钾石灰-聚磺泥浆、密度为 $0.75\text{ g/cm}^3$ 和 $0.86\text{ g/cm}^3$ 的低密度随钻防塌防漏泥浆3种泥浆进行测试评价,结果见表2。

表2 各种性能防漏堵漏能力评价结果

配 方	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$\varnothing 2$ mm 钢珠		1 mm 缝板	
		1 MPa 压力下堵漏情况	承压能力/MPa	1 MPa 压力下堵漏情况	承压能力/MPa
钾石灰-聚磺泥浆	1.07	全漏失		全漏失	
低密度随钻防塌防漏泥浆	0.86	漏失 132 mL 后堵漏成功	$\geq 2.0$	漏失 209 mL 后堵漏成功	1.5
	0.75	漏失 86 mL 后堵漏成功	$\geq 2.0$	漏失 175 mL 后堵漏成功	1.3

根据以上室内模拟防漏堵漏试验表明,该体系相对于常规钾石灰-聚磺泥浆体系进一步提高了其防漏、堵漏方面的能力。通过加入了多种细小惰性桥堵材料,利用其架桥、拉筋、填塞作用,能有效封堵一般微小裂隙,同时也不影响正常钻进施工,实现随钻防漏堵漏;同时通过发泡降低密度,即降低了泥浆液柱压力,防止钻孔压差漏失。

该泥浆体系的制备方法主要是向常规钾石灰-聚磺泥浆体系中加入流型调节剂、桥堵剂和发泡剂,再通过特制发泡器和压缩空气进行混合发泡。在现场具体制备流程如图4所示。

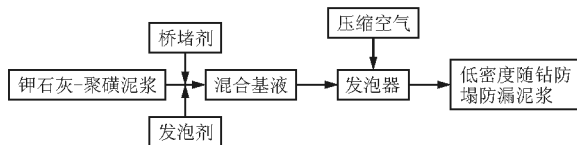


图4 随钻防塌防漏泥浆制备工艺流程图

### 3.3 现场应用及使用效果

采用上述2种体系于2013—2015年在若尔盖铀矿区进行了现场试验,并取得了较好的应用效果。其中ZK3-1钻孔于2011年8月开钻,采用常规低固相泥浆体系,经过2年艰难钻进最深孔深至691.60 m,因钻遇长段破碎带时发生严重孔内事故,处理无效钻孔报废。2013年8月在距原孔位约2 m处重新开孔,采用更具有防塌性能的钾石灰-聚磺泥浆体系钻进,钻穿了多层松散炭质板岩、破碎硅质灰岩层(见图5),并满足于套管钻进、螺杆马达定向钻进等多项特殊施工工艺,经过约200日的施工顺利终孔,期间未发生任何严重孔内事故,终孔深度达834.35 m,成为该矿区近5年来最深钻孔。

同时,也利用了随钻防塌防漏泥浆体系在ZK4-1、ZK3-5等钻孔进行了现场试验,均表现出了良好的防塌防漏效果。尤其针对矿区的小漏失具有



图5 ZK3-1钻孔取出的松散破碎岩心

一定的防漏能力,也大大提高了破碎地层的防塌护壁效果。

上述2种体系在2013—2015年在矿区实施钻孔8个,共计试验进尺7054.44 m,孔壁稳定性得到了极大提高,裸孔最大钻进深度、平均台月效率、钻孔事故率相比试验前都有明显改善。配合其它先进钻探技术,近年来在若尔盖的勘探效率和勘探质量得到大幅提高,表3为试验前后综合指标对比情况(其中2011—2012年为试验前)。

表 3 试验前后钻探综合指标对比情况

工作年度	完成工作量/m	平均台月效率/m	平均机械钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	钻孔合格率/%	优质孔率/%
2011—2012	864.22	92.44	0.81	50	
2013	1089.47	125.95	1.08	100	75
2014	1913.26	131.79	0.97	100	76
2015	4051.71	231.92	1.45	100	78
对比情况	+172%	+76.6%	+44%	100%	76%

#### 4 泥浆维护与管理

泥浆体系的合理选择是实现安全钻进的前提条件,而良好的现场泥浆维护与管理则是保证泥浆体系正确应用的决定性因素。因此,2 种新型泥浆体系能在矿区极端复杂地层条件下得以成功应用,也与现场的泥浆维护与管理密不可分。

严格控制无用固相含量,一旦泥浆中无用固相较高,会导致泥浆性能难以控制,流变性变差,同时也会导致岩粉重复破碎,影响钻进效率;此外,也会对在项目中采用的螺杆马达定向钻进或套管钻进造成不良影响。由于采用钾石灰-聚磺泥浆体系和低密度随钻防塌防漏泥浆技术体系相对于常规地质岩心钻探中所用的无固相或低固相泥浆体系配方复杂,固相含量高,且在应用中粘切较高,因此在应用中必须严格控制无用固相,采用常规岩粉自然沉淀较为困难,因此,现场采用 CS-150 型除砂机(60 目筛网)除去较大颗粒,再利用化学絮凝或自然沉淀清除较小无用固相颗粒,保证泥浆含砂量 <0.5%。

要根据地层情况、钻进工艺、孔内实钻情况等灵活调整泥浆各项性能参数,要与当前钻进情况相适应。如在钻进强水敏性炭质板岩层时应着重加强体系的滤失性能和抑制性能,保证较低的失水量及强抑制性,改善泥浆的流变性能,避免对松散破碎地层造成严重冲蚀。而当现场采用液动锤钻进或螺杆马达定向钻进等特殊工艺时,应在满足孔壁稳定的前提下尽量降低泥浆粘度和切力,进而降低循环压耗。同时,泥浆性能参数也要结合孔内实钻情况,如当钻进中发生漏失现象时,应立即加大桥堵剂材料的用量,同时加强发泡,降低泥浆密度,减轻漏失程度;而当钻孔沉渣较多,排粉困难时,应适当提高粘切,提高动塑比。此外,泥浆的良好应用还应与钻探施工工艺相配合,才能充分地发挥其护壁防塌等作用。

在泥浆现场应用中,必须要有专职或兼职泥浆技术员随时根据现场施工情况对泥浆进行维护与调

整,并至少每回次进行泥浆性能监测,特殊情况时还应加密测试,做到心中有数。加强泥浆报表、小样试验记录等资料的收集与整理,以提高矿区复杂地层条件泥浆技术的研究与应用水平。

#### 5 结论与认识

通过对若尔盖铀矿田的矿区地层特点及孔壁稳定性进行分析,提出了针对该类复杂地层泥浆技术思路与对策,并结合“高原生态环境脆弱区综合钻探技术应用示范”地质调查项目,研制了适合于地质岩心钻探的新型钾石灰-聚磺泥浆技术体系,基本解决了矿区松散破碎地层孔壁失稳的难题;同时,根据矿区钻孔漏失与垮塌并存的恶劣地层条件下,在钾石灰-聚磺泥浆体系的基础上引入桥堵剂及发泡剂,进一步衍化为随钻防塌防漏泥浆体系,该体系针对低压漏失层和破碎地层具有较好的应用效果。试验实施过程中还总结出的一套地质钻探中的现场泥浆管理与维护经验。

经过 3 年的野外试验,该泥浆体系在现场取得了较大成功,对矿区的地质找矿提供了坚实的技术基础。

#### 参考文献:

- [1] 刘卫东,黎波.若尔盖铀矿区岩心钻探技术发展、现状及对策[C]//第十四届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2007.
- [2] 孙丹,黎波,刘卫东,等.若尔盖碳硅泥岩型铀矿钻探工作回顾与技术对策[J].西部探矿工程,2014,(6).
- [3] 杨振杰.井壁失稳机理和几种新型防塌泥浆的防塌机理-文献综述[J].油田化学,1999,16(2).
- [4] 孙丹.若尔盖铀矿强水敏性地层泥浆体系研究[D].四川成都:成都理工大学,2014.
- [5] 郑力会,鄢捷年,陈勉,等.钻井液用仿磺化沥青防塌剂的性能与作用机理[J].油田化学,2005,22(2).
- [6] 张统得,吴金生,李前贵,等.软弱破碎地层孔壁失稳机理及钻井液技术对策研究[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.北京:地质出版社,2015.
- [7] 张统得,陈礼仪,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目钻井液技术与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9).
- [8] 胡继良,陶士先.深部地质钻探冲洗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).
- [9] 吴金生,李子章,李政昭,等.绿色勘查中减少探矿工程对环境影响的技术方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10).
- [10] 吴金生,张统得,刘卫东,等.高原生态脆弱区钻探技术体系综合研究与示范[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10).