

金川矿区复杂地层钻探孔壁失稳机理 与对策研究

张席芝^{1,2}, 杨亚平², 寇永渊^{1,2}, 巢世霞², 张统得^{*3}, 蒋炳³

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737102;

3. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 金川矿区目前资源开采逐渐向深部转移, 采用的主要探矿方式为在采矿巷道中布设中深钻孔, 由于矿区地质条件复杂, 常出现钻孔垮孔、造浆、地层涌水、破碎等情况, 影响了勘察效率。为了解矿区复杂地层影响钻孔孔壁稳定性的原因, 对从矿区采取的岩样进行理化分析、微观分析和力学性质分析, 结果表明金川矿区钻孔孔壁失稳主要是因为钻探过程中遇强水敏性、强破碎、强涌水和高地应力地层。通过对矿区钻孔孔壁进行稳定性评价, 从冲洗液技术和工程技术等方面制定了钻探技术对策, 为矿区钻探施工提供了技术支撑。

关键词: 复杂地层; 强水敏性; 强破碎; 强涌水; 高地应力; 孔壁失稳; 冲洗液技术; 金川矿区

中图分类号: P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)06-0069-08

Research on mechanism and countermeasure of borehole wall destabilization in complex formation of Jinchuan mining area

ZHANG Xizhi^{1,2}, YANG Yaping², KOU Yongyuan^{1,2}, CHAO Shixia², ZHANG Tongde^{*3}, JIANG Bing³

(1. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang Gansu 737102, China;

3. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: At present, the resource exploitation in Jinchuan mining area is gradually going to the deep part, and laying medium-deep boreholes in the mining roadways is the main exploration method. Complex geological conditions such as borehole collapse, slurry making, water inrush and strata breaking often occur, which greatly affect the exploration efficiency. In order to find the reasons why the complex strata in the mining area affect the stability of borehole walls, physical and chemical analysis, micro and mechanical analysis of the rock samples taken from the mining area are made. The results show that the strata encountered with strong water-sensitive, highly fractured, strong water inrush and high geostress during drilling is the main reason which affect the borehole wall destabilization in Jinchuan mining area. Through the stability evaluation of borehole wall in the mine area, drilling countermeasures for complex strata were made from the perspectives of flushing fluid technology and engineering technology, which provides technical support for drilling work of the mine area.

Key words: complex strata; strong water sensitivity; highly breaking; strong water inrush; high geostress; destabilization of hole wall; flushing fluid technology; Jinchuan mining area

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-06-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.06.009

基金项目: 金川集团工程建设有限公司科技项目“金川矿区深部复杂地层深孔快速钻进工艺匹配化研究”(编号: 矿科2021-02号)

第一作者: 张席芝, 男, 汉族, 1984年生, 工程师, 矿业工程专业, 主要从事矿山掘进与探矿工程技术研究工作, 甘肃省金昌市金川区银川路58号, zhangxizhi@Jnmc.com。

通信作者: 张统得, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 主要从事深孔复杂地层钻探技术研究工作, 四川省成都市郫都区红光镇港华路139号, ztd8795@126.com。

引用格式: 张席芝, 杨亚平, 寇永渊, 等. 金川矿区复杂地层钻探孔壁失稳机理与对策研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 69-76.

ZHANG Xizhi, YANG Yaping, KOU Yongyuan, et al. Research on mechanism and countermeasure of borehole wall destabilization in complex formation of Jinchuan mining area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 69-76.

0 引言

金川是世界第三大在采岩浆铜镍硫化物矿床,也是我国三大矿产综合利用基地之一,拥有国内最大储量的镍矿。矿床集中分布在龙首山下长6.5 km、宽500 m的范围内。已探明矿石储量5.2亿 t,镍金属储量550万 t,铜金属储量343万 t。经过多年开采,形成了龙首矿、二矿、三矿等主力矿山^[1-2]。

经过几十年的大规模开采,金川矿区浅部资源已近枯竭,资源开采逐渐向深部转移。为进一步探明下部矿床,目前大多采用在已建采矿巷道内布设中深钻孔的方式,以降低勘探成本,提高勘探效率^[3]。然而金川矿区工程地质条件复杂,岩层软弱破碎,地应力高^[4],钻探施工难度极大,主要表现为孔壁稳定性较差,冲洗液护壁困难,时常发生塌孔、掉块、卡钻等复杂情况,导致施工进度缓慢,矿区井下钻探平均日进尺不足6 m,钻孔报废率居高不下,而钻探施工周期的延长直接影响矿山建设和正常生产。解决复杂地层钻进难题,首先需要深入了解矿区的地质特点及孔壁失稳机理,从而针对性地开展器具、材料、工艺等工程方面的技术研究

1 矿区典型复杂情况

金川矿区地层主要为前震旦纪中深度变质岩系,含矿超基性岩侵入大理岩、混合岩、片麻岩中。矿区经历了自吕梁运动以来的多次构造运动作用、变质作用和多期岩浆的侵入作用,给矿区留下以断裂为主的构造形迹,形成矿区复杂的岩石组合,导致矿区地质条件十分复杂^[5-7]。因此,在深部钻探过程中,常遇破碎、弱胶结性、强水敏性和强涌水岩层等^[8](见图1),频繁导致钻孔坍塌、掉块,进而造成卡钻、埋钻、断钻具等事故(见表1),给矿区钻探工作

带来极大困难,增加了钻探成本^[9]。



图1 矿区钻孔破碎岩心

Fig.1 Broken core in the mining area

2 金川矿区复杂地层孔壁稳定性研究

影响孔壁稳定的原因十分复杂,但总体可归结为3个方面:(1)地层本身的物质组成和结构特性;(2)孔壁岩石所受的构造应力;(3)钻进工艺措施。因此,研究孔壁失稳的原因及技术对策必须了解不稳定地层的组构特性、理化性能以及所处的力学环境。

为此选取了龙首矿、二矿区和三矿区等多个钻孔的复杂地层典型岩样,通过薄片鉴定、X射线衍射、电镜扫描了解岩石的物质组成与结构特征;采用分散性测试、膨胀性测试、岩心浸泡实验等手段探究岩样的理化性能,结合矿区地应力特征开展孔壁稳定性力学分析。

2.1 岩石物质组成分析

2.1.1 岩样薄片鉴定

通过对选取的典型岩样进行薄片鉴定,其主要定名为绿泥片岩、蚀变阳起石片岩、蚀变粘土片岩、阳起绿泥片岩四种,均属于强蚀变性软弱岩层。如其中绿泥片岩,呈鳞片状结构,镜下岩石发生强的风化蚀变,组成矿物以粘土矿物为主,其中又以绿泥石居多,包括部分蒙脱石及伊利石等,整体呈微晶片状、丝缕状集合体,少量石英,呈粒状,且部分发育裂

表1 金川矿区典型复杂情况

Table 1 Overview of complex conditions in Jinchuan Mining Area

钻孔编号	设计孔深/m	典型复杂情况
二矿区 ZK II 700-10-1	750	常发生坍塌卡钻、缩径、涌水等复杂情况,钻进至460 m时发生严重卡钻事故,事故处理中钻杆再次断裂,最终被迫钻孔报废
龙首矿 850水 平 II-K1-5	400	深厚软弱蚀变地层坍塌、缩径,在180 m左右缩径极为严重,套管跟进至183 m,出套管后钻进不到3 m,钻具三次断裂,处理后仍不能正常钻进而报废。二次重新开孔也未能穿过这层,至196 m被迫终止
龙首矿 1100水 平 CKI26-3	620	地层坍塌缩径、涌水;软弱蚀变层厚度超过80 m,采用防塌冲洗液处理历时110 d,最终由于坍塌卡钻、缩径导致钻具多次断裂无法处理,钻进至孔深550 m报废

纹,见少量残留的长石,多具有粘土化现象,少量方解石充填在岩石裂隙中,裂隙宽在 0.02~0.2 mm 之间;而蚀变阳起石片岩呈鳞片状、柱状结构,主要由阳起石矿物组成,呈长柱状、针柱状,矿物普遍沿解理、裂隙发生强的风化蚀变作用(粘土化),整体呈黄褐色,含少量辉石,其次为粘土矿物,主要是绿泥石、蒙脱石及伊利石等。

从薄片鉴定的结果来看,岩样中普遍含有粘土矿物,且裂隙发育,岩石强度低,易水化导致钻进中孔壁失稳。

2.1.2 全岩矿物和粘土矿物组分分析

为了进一步了解岩石中各类矿物组成及含量,选取了部分岩样开展了全岩矿物和粘土矿物组分分析(XRD),具体结果分别见图 2 和图 3。

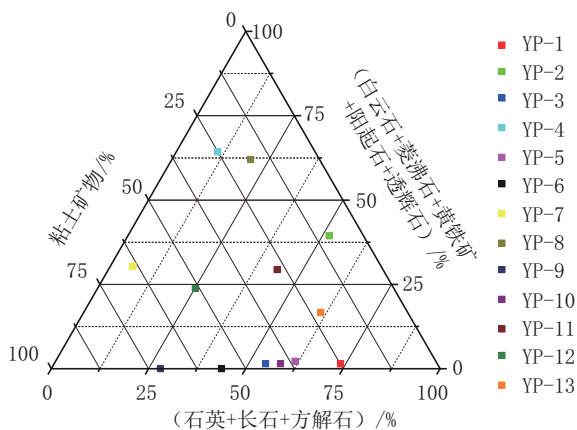


图 2 全岩矿物 X 射线衍射法检测结果
Fig.2 Results of X-ray diffraction for whole rock minerals

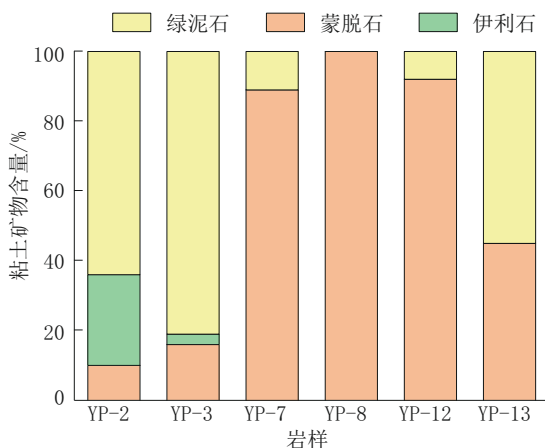


图 3 粘土矿物 X 射线衍射法检测结果
Fig.3 Results of X-ray diffraction for clay minerals

从图 2 可以看出,岩样的主要矿物组分为石英、斜长石、方解石和粘土矿物,部分岩样粘土矿物含量较高,甚至超过 50% 以上,表明粘土-水体系水化效应对岩样力学特性及孔壁稳定有较大影响。从图 3 中进一步对粘土矿物的种类和组分分析来看,选取的 6 个样品中粘土矿物主要以蒙脱石和绿泥石为主;而蒙脱石由于其自身的晶体构造特点,分子间连接力较弱,水分子易进入晶层之间,引起晶格膨胀,同时由于晶格取代作用,阳离子交换容量较高,进一步加剧了水化膨胀作用,因此,蒙脱石属于典型的膨胀型粘土矿物;此外,虽然绿泥石不属于膨胀性粘土矿物,但在其蚀变过程中,降解的绿泥石其中的一部分水镁石被除去也会发生一定程度的晶层间水化和晶格膨胀。从全岩矿物和粘土矿物组分分析来看,岩样中含有大量粘土矿物,且粘土矿物以膨胀性蒙脱石和绿泥石为主,具有较强的水敏特性^[10-12]。

2.2 微观结构分析

为了进一步了解地层的结构微观特性,对不同岩样开展了扫描电镜分析(SEM),从微观结构形态去揭示水作用机理。从实验结果来看,总体呈现如下 3 个特点:

(1)部分蚀变强烈地层的岩样孔隙发育,且孔隙直径较大、胶结性差,图 4 为岩样在放大 110 倍条件下扫描照片,从图中可以明显看出岩样孔隙、裂隙发育,孔隙宽度在 20~130 μm 之间,一旦该类地层被钻开后,自由水很容易沿着孔隙进入地层,造成原本较为松散的岩石发生垮塌,同时随着自由水的深入也会引发深部地层的水化反应,进一步加剧孔壁失稳^[13]。

(2)部分岩样层状结构明显,裂隙发育,自由水可以从水平及垂直两个方向进入地层,如图 5 所示,

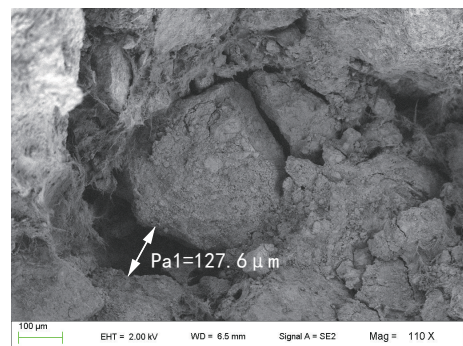


图 4 弱胶结岩样微观扫描照片
Fig.4 Microscopic scanning photos of weakly cemented rock samples

具有如此结构特点在水作用下更容易发生孔壁失稳,且发生迅速。

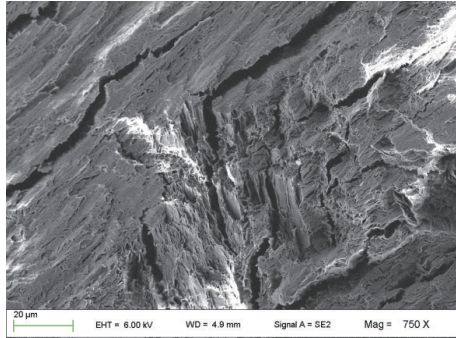


图5 岩样水平及垂直方向裂隙发育

Fig.5 Horizontal and vertical fracture developed in rock samples

(3)从不同倍数实验条件下获得的微观照片来看,裂隙宽度范围较大,但主要集中在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间,少部分微裂隙为纳米级,见图6。

总体上,矿区地层的微观孔隙裂隙发育,结构形态多样,在钻探过程中冲洗液很容易沿着微裂隙进入地层,而地层中的粘土矿物与水接触后引起地层

水化膨胀,造成孔壁失稳;同时冲洗液滤液进入地层后也会引起地层中含水量的升高,从而导致地层的力学性质发生一系列变化,如弹性模量降低、泊松比增加、地层强度降低等,加剧了孔壁失稳的程度^[14]。

2.3 理化分析

2.3.1 岩石分散性测试

滚动回收实验主要是测定岩样在液体介质条件下的分散特性,回收率越低,表明其分散性越强。本次选取典型岩样进行热滚实验,分别取6~10目的不同岩样20 g在蒸馏水中进行热滚16 h后(根据矿区实钻孔底温度设定为 $40\ ^\circ\text{C}$),取出岩样过40目分样筛,烘干称取剩余重量,计算滚动回收率,其结果见图7。

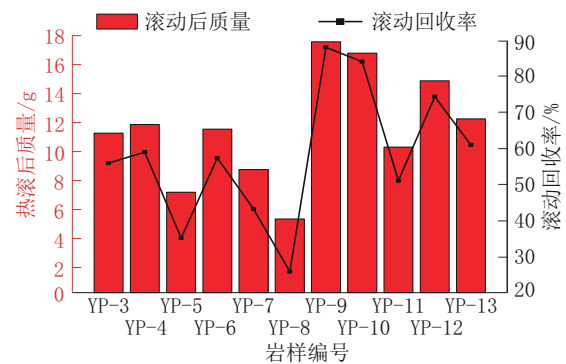


图7 滚动回收实验结果

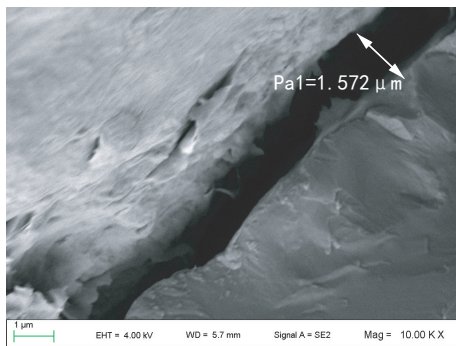
Fig.7 Rolling recovery test results

从图7可以看出,选取的岩样在经过热滚后均出现了不同程度的质量损失,大部分岩样的回收率为60%以下,个别岩样滚动回收率甚至小于30%,表明矿区典型地层均存在较强分散的特性,容易发生分散剥落垮塌,更为重要的是矿区主要采用金刚石绳索取心钻进工艺,产生的岩粉粒度较小,在钻进过程中一旦冲洗液的抑制性较差,岩粉更容易水化分散,造成冲洗液性能严重变坏,如粘度、切力、密度、滤失量及固相含量等指标升高,泥皮质量变差,难以满足钻进要求;同时由于滤失量的升高还会加剧不稳定地层的水化反应程度,进一步产生膨胀缩径等情况引发孔壁失稳。

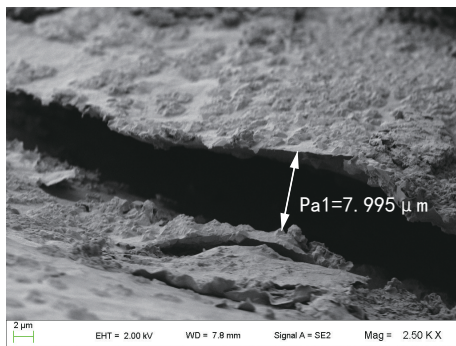
2.3.2 岩样膨胀性测试

地层膨胀是地层中所含的粘土矿物水化的结果。膨胀性实验主要用于检测岩样在常温常压条件下的膨胀变化情况,实验选取部分岩样开展常温常压条件下膨胀量测试,各岩样的线膨胀曲线见图8。

通过图8可以看出,所选取的岩样总体上都具



(a) 10000×



(b) 2500×

图6 不同放大倍数下的岩样裂缝形态

Fig.6 Fracture morphology of rock samples under different magnification

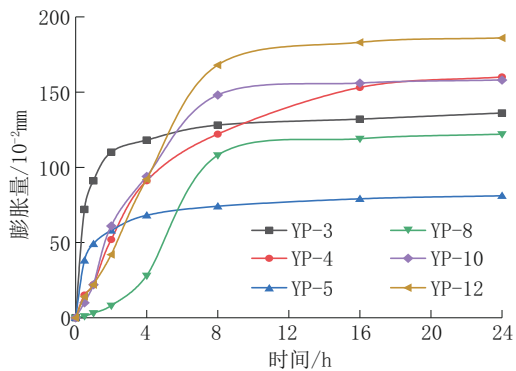


图8 各样品膨胀量随时间变化曲线

Fig.8 Expansion curve of each sample with time

有较强的膨胀特性,其中16 h膨胀率最高达到19.06%。岩样的膨胀均呈现出前期发展较快,8h后基本上趋于稳定;因岩石性质的不同,大部分岩样的2 h膨胀率较高,并很快趋于稳定,表明自由水易进入岩石内部并很快参与水化反应,而也有部分岩样水化时间较长,呈现出初期膨胀量较低,但后期膨胀量较高。其膨胀机理主要是在浸泡过程中岩样内部的粘土类矿物如蒙脱石、绿泥石、伊利石等与水相互

作用,造成晶格膨胀隆起,产生了一定的膨胀变形和膨胀压力,且在短时间内较为剧烈,但随着时间的延长,其膨胀变形和膨胀压力增加速率变小并趋于稳定^[15-17]。在钻探施工中,岩石吸水水化膨胀极易造成钻孔缩径,引发憋泵、钻机回转阻力大、下钻扫孔,甚至卡钻等复杂情况。

2.3.3 岩心浸泡试验

实验选取不同钻孔、不同岩性特征的岩样人工制备成试验岩心进行蒸馏水浸泡实验。从实验结果来看,各岩样的浸泡稳定性总体较差,大部分岩样在放入蒸馏水中立即发生剥落垮塌,其余岩样也是在24 h内发生完全垮塌。从实验现象来看,随着蒸馏水的侵入,各岩样均不同程度的出现先小块剥落再大面积垮塌现象,其原因主要是如同矿区不稳定地层一样,在制备的岩心中同样存在大量微裂隙和孔隙,而在浸泡过程中随着蒸馏水的侵入一方面导致岩样内部的粘聚力和内摩擦力减小,力学强度降低而发生垮塌,另一方面岩样内部粘土水化效应产生水化应力,进一步降低了岩样内部的胶结力,造成岩样的垮塌,如图9所示。

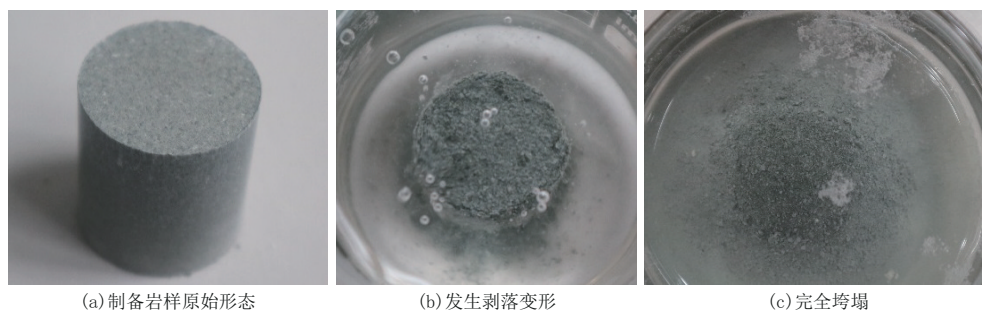


图9 岩样浸泡实验

Fig.9 Immersion test of rock samples

2.4 力学分析

从岩石力学分析孔壁失稳主要是由于岩石本身强度小于孔壁周围应力时发生破坏。在钻进之前,地层受到上覆岩层压力、水平地应力以及孔隙压力,处于力学的相对平衡状态,而一旦地层被钻开之后,冲洗液液柱压力代替了原有的岩土层对孔壁的支撑,孔壁周围应力发生重新分布。为了达到孔壁的稳定状态,必须保证冲洗液的液柱压力能平衡孔壁周围的应力,当冲洗液液柱压力小于孔壁围岩地层坍塌压力时,围岩极易发生剪切破坏而坍塌,在强塑性地层中则会发生缩径;而当冲洗液液柱压力大于

孔壁围岩地层破裂压力时,这个压力差超过岩石的抗拉强度时即会发生漏失。根据目前对金川矿区地层孔壁失稳的形态来看,其主要表现为地层钻开后引起的应力重分布超过岩体强度或过度变形所致,这两方面的因素均与岩体天然应力场的特征密切相关,因此,要了解金川矿区孔壁失稳的力学因素必须深入分析矿区的地应力特征。

金川地应力测量和研究工作从20世纪70年代开始一直持续至今,已取得了诸多成果,有许多机构学者都进行了实测研究,针对金川矿区的地应力开展了测量及资料收集整理^[18-21],结合线性回归分析

方法,得出了矿区最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力随深度变化的规律和回归方程;在相关学者的研究成果基础上^[22-23],绘制了地应力与深度的变化曲线,如图10所示。

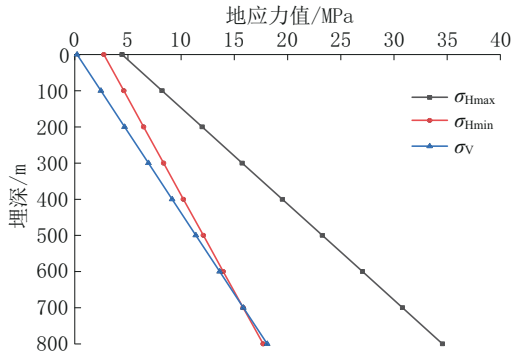


图10 地应力与埋深的变化曲线

Fig.10 Variation curve of geostress and burial depth

从图10可以看出,虽然从各个研究学者得出的地应力随埋深的变化规律有一定差别,但总体趋势是一致的,且呈现如下几个特点。

(1)根据高地应力判别标准,矿区基本上属于中高应力-超高地应力范围;且最大水平主应力(σ_{Hmax})、最小水平主应力(σ_{Hmin})和垂直主应力(σ_V)与埋深具有很强的线性关系,都随埋深的增加而增加;(2)最大水平主应力始终处于主导地位,说明金川矿区以水平的构造应力为主;(3)随着埋深的增加, σ_{Hmax} 与 σ_{Hmin} 的差值越大,而根据地层坍塌当量密度的确定公式可知,当 σ_{Hmax} 和 σ_{Hmin} 的差值越大,地层坍塌压力和破裂压力差值就越小,可调当量密度范围也就越低,同时两个水平应力相差越大,岩石所受的剪切应力亦越大,钻孔也容易沿着弱结构面发生剪切破坏,不利于孔壁的稳定性,增加了钻探施工的难度;(4)矿区地应力场具有明显的不均匀性,即使在同一高程不同位置,测点的应力大小、方向和倾角都存在较大差异,反映了本区域地质构造和岩体特征的复杂和特殊性,这样在不同区域孔壁稳定性会呈现较大区别,不利于钻探工作的开展。

3 复杂地层钻探技术对策

3.1 冲洗液技术对策

3.1.1 强化冲洗液的失水抑制性

对金川矿区典型复杂地层的物质组分及理化分析得出,岩石中粘土矿物含量较高,且以蒙脱石、

绿泥石等膨胀性粘土矿物为主,具有强水敏性,因此要求冲洗液具有优良的降失水性和抑制性。降低滤失量的目的是减少冲洗液滤液与地层的水化反应量,强抑制性则主要是通过提高滤液粘度、滤液矿化度等手段降低滤液与水敏性地层的反应程度,可充分利用钾离子防塌、高分子聚合物吸附-包被作用以及化学反渗透防塌等机理提高冲洗液的抑制性^[24]。

3.1.2 强化冲洗液的封堵胶结性

由于地层具有胶结性差、强度低、微裂隙发育的典型特征,需采用物理封堵方法阻止或减缓滤液向地层的渗透。针对不同的裂缝宽度选用合适尺寸的刚性或柔性粒子对微裂隙实现有效封堵,在孔壁周围形成一道致密的薄膜,避免冲洗液在液柱压力作用下沿着微裂隙侵入地层而造成粘土水化或孔隙压力升高,同时也可向冲洗液中加入适量的聚合物以提高冲洗液的滤液粘度,或向冲洗液中加入具有较强吸附粘接性的处理剂,在地层内部岩石颗粒间形成具有较强粘附性和内聚力的胶结层,从而强化岩石强度,提高地层的坍塌压力^[25-26]。

3.1.3 选用合适的冲洗液密度

根据矿区普遍存在高地应力情况,尤其是最大水平主应力始终处于主导地位,说明金川矿区以水平的构造应力为主,且随着深度增加,最大水平主应力与最小水平主应力的差值越大,越容易发生剪切破坏,因此在冲洗液应在良好抑制性和封堵性的前提下必须具有合适的密度,以提高冲洗液液柱压力对孔壁的正向支撑力,减轻因地应力作用导致的钻孔缩径或垮塌;同时,应针对涌水地层适当提高冲洗液密度,平衡地层压力快速通过涌水层。钻进中加强冲洗液的性能监测与维护。

3.2 工程技术对策

3.2.1 进行合理的钻探工程设计

对地质设计相关资料进行仔细分析,做好钻探工程设计,尤其是做好钻孔结构设计。在复杂地层钻进时尽可能的采用“超前裸眼”钻进思路,即在钻进中尽可能完成甚至超过本开次的设计孔深任务,一旦钻遇复杂情况再下入套管,这样能为下部孔段提供安全储备口径,减小深部复杂地层钻进的安全风险,确保满足终孔深度及终孔口径要求。极端复杂地层可以考虑采用提钻取心或其它钻进工艺^[27-28]。

3.2.2 合理选择钻探设备,优选钻进参数

尽可能选用大一级钻探设备,为处理复杂情况提供动力储备;泵量的选择也至关重要,如泵量选择较低,对孔壁的冲蚀作用较小,但冲洗液上返流速较低,岩粉排出困难;而泵量过高,排粉容易,但在环空的上返流速过高,形成紊流,对孔壁形成过度冲蚀,易引起孔壁的坍塌掉快。此外在复杂地层钻进时可适当增加钻头外径,增大外环间隙,降低缩径和卡钻风险,也降低了循环压耗。

3.2.3 细化操作,降低影响

在起钻过程中要坚持回灌冲洗液,避免冲洗液柱压力降低和波动而造成孔壁失稳;严格控制起钻速度,避免由于绳索取心满眼钻进产生很大的抽汲压力并形成负压差,严重时抽塌下部地层;还要做到早开泵、缓开泵,避免产生压力激动而造成孔壁不稳定;要力求快速通过复杂地层,避免长时间裸眼浸泡,因此需做好物资储备、设备维护和日常交接班等工作,尽量避免因长时间停待引发孔内复杂情况。

4 结论

(1)金川矿区钻探事故频发,地层复杂,主要表现为孔壁垮塌、缩径、掉块、涌水等。通过室内实验与测试分析表明矿区不稳定地层粘土矿物含量较高,且以蒙脱石和绿泥石为主,具有较强的水敏特性,在理化实验中也表现出较强的水化分散和水化膨胀特征;此外,地层破碎,微裂隙发育,裂隙宽度范围较广,自由水极易沿着微裂隙进入岩石内部引发孔壁失稳;同时,根据对矿区地应力资料分析,普遍存在高地应力地层,尤其是具有最大水平主应力与最小水平主应力差值较大的特征,孔壁易发生剪切破坏而失稳;因此,矿区不稳定地层总体呈现出强水敏、强破碎和高地应力,同时伴随大量钻孔涌水,进一步加剧了孔壁失稳的程度。

(2)孔壁稳定性研究工作为后续开展冲洗液、器具工艺等研究提供了理论依据。针对金川矿区地层特点和孔壁稳定性分析,在该类复杂地层钻探时,需要从冲洗液技术与工程措施两个方面同时入手。一是强化冲洗液的失水抑制性和封堵性,选择合适的冲洗液密度,提高冲洗液的防塌护壁能力;另一方面是进一步优化钻探工程设计,选择合理的钻孔结构设计、钻探设备、钻进参数、管理措施等,也可以有效避免孔内事故,提高复杂地层钻探效率。

参考文献(References):

- [1] 张宇,冯晖,恩和得力海,等.金川矿区及周边地球物理特征和背景噪声成像的应用[J].世界地质,2021,40(2):419-427.
ZHANG Yu, FENG Xuan, Enhedelilai, et al. Geophysical characteristics and application of ambient noise tomography in Jinchuan mining area and surroundings [J]. World Geology, 2021,40(2):419-427.
- [2] 张重远,吴满路,廖椿庭.金川三矿地应力测量及应力状态特征研究[J].岩土力学,2013,34(11):3254-3260.
ZHANG Chongyuan, WU Manlu, LIAO Chunting. In-situ stress measurement and study of stress state characteristics of Jinchuan No.3 Mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(11):3254-3260.
- [3] 曹平,张科,万琳辉,等.金川矿山深部采掘条件下岩石力学研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1334-1341.
CAO Ping, ZHANG Ke, WAN Linhui, et al. Study and practice of rock mechanics in jinchuan mine under deep exploitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7):1334-1341.
- [4] 马崇武,慕青松,苗天德,等.金川矿区原岩应力场与软弱层带构造的关系[J].金属矿山,2007(11):83-86,105.
MA Chongwu, MU Qingsong, MIAO Tiande, et al. Relationship between in-situ rock stress field and weak intercalation in Jinchuan Mine [J]. Metal Mine, 2007(11):83-86,105.
- [5] 周青,杨新安,高艳灵,等.金川不良岩体分类及其巷道支护研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2002(2):140-142.
ZHOU Qing, YANG Xin'an, GAO Yanling, et al. Study on the classification and support of weak rock mass roadway in the Jinchuan Nickel Mine [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2002(2):140-142.
- [6] 杨亚平,杨有林,穆玉生,等.金川矿区深部高应力破碎岩体巷道支护技术研究及应用[J].中国矿业,2018,27(11):99-103.
YANG Yaping, YANG Youlin, MU Yusheng, et al. Research and application of supporting technology of fractured rock roadway with high stress of deep ground in Jinchuan mining area [J]. China Mining Magazine, 2018,27(11):99-103.
- [7] 王志远.金川高应力碎裂围岩巷道环境强化技术[J].中国矿山工程,2021,50(6):35-38.
WANG Zhiyuan. Reinforcement technologies of the roadways surrounded by high stress fractured rocks in Jinchuan mining area [J]. China Mine Engineering, 2021,50(6):35-38.
- [8] 米文满,王俊超,张永龙,等.甘肃金川铜镍矿区F₁断层地质特征及其影响[J].现代矿业,2018,34(3):107-110,114.
MI Wenman, WANG Junchao, ZHANG Yonglong, et al. Geological characteristics and its influence of F₁ fault in Jinchuan Cu-Ni mining area in Gansu Province [J]. Modern Mining, 2018,34(3):107-110,114.
- [9] 宋厚园.缓角度绳索取芯钻孔井壁稳定性分析及钻井液研究[D].长沙:中南大学,2012.
SONG Houyuan. Delay angle wireline core drilling hole wall stability analysis and research on drilling fluid [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [10] 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):139-142,145.

- ZHANG Tongde, CHEN Liyi, JIA Jun, et al. The drilling fluid technology and application of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):139-142,145.
- [11] 张统得. 汶川地震断裂带科学钻探泥浆体系的研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- ZHANG Tongde. Research and application of mud system for wenchuan earthquake fault scientific drilling project[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [12] 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.
- LI Zhijun, CHEN Liyi, JIA Jun, et al. Research and application of drilling fluid system for fault gouge section of the hole WFSD-1 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(12):13-15, 19.
- [13] 刘厚彬, 勐睿, 孟英峰, 等. 辉绿岩地层井壁垮塌机理及主控因素实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(8):121-127.
- LIU Houbin, MENG Rui, MENG Yingfeng, et al. Experimental studies on the wellbore collapse mechanism and main controlling factors of diabase formations[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(8):121-127.
- [14] 王跃鹏, 孙正财, 刘向君, 等. 煤层割理结构及其对井壁稳定的影响研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4):45-52.
- WANG Yuepeng, SUN Zhengcai, LIU Xiangjun, et al. Study on cleat structure and its influence on wellbore stability in coal seams[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4):45-52.
- [15] 张雯, 曹平, 张向阳, 等. 金川矿区岩石的膨胀和软化特性试验及分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5):1913-1917.
- ZHANG Wen, CAO Ping, ZHANG Xiangyang, et al. Analysis and research on swelling and strain softening of rock in Jinchuan mining district[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(5):1913-1917.
- [16] 邓仕奎, 李华坤, 陈鑫, 等. 土库曼斯坦白垩系不稳定地层钻井液技术[J]. 钻采工艺, 2020, 43(5):91-94, 10-11.
- DENG Shikui, LI Huakun, CHEN Xin, et al. Drilling fluid technology in cretaceous unstable claystone formation of Turkmenistan[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(5):91-94, 10-11.
- [17] 刘敬平, 孙金声. 钻井液活度对川滇页岩气地层水化膨胀与分散的影响[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(2):31-35.
- LIU Jingping, SUN Jinsheng. Effects of drilling fluid activity on hydration and dispersion of formation rocks in shale gas drilling in Chuandian area[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(2):31-35.
- [18] 蔡美峰, 乔兰, 于波, 等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(4):46-50.
- CAI Meifeng, QIAO Lan, YU Bo, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement at deep position of No.2 mining area of Jinchuan Nickel Mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999(4):46-50.
- [19] 刘高, 韩文峰, 聂德新. 金川矿区地应力场特征[J]. 天津城市建设学院学报, 2002(2):81-85.
- LIU Gao, HAN Wenfeng, NIE Dexin. Characteristics of earth stress field of Jinchuan mine area[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 1999(4):46-50.
- [20] 刘卫东, 李金鑫, 孙伟, 等. 金川三矿区东部贫矿场地应力测量及应力分析[J]. 矿冶, 2020, 29(5):15-20, 56.
- LIU Weidong, LI Jinxin, SUN Wei, et al. In-situ stress measurement and stress analysis of the east lean ore in the No.3 mining area of Jinchuan[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(5):15-20, 56.
- [21] 张光存, 杨志强, 高谦, 等. 金川矿区地应力分布规律的回归分析研究[J]. 黄金, 2014, 35(12):29-33.
- ZHANG Guangcun, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Regression analysis of geostress distribution pattern in Jinchuan underground mining area[J]. Gold, 2014, 35(12):29-33.
- [22] 和秋姣, 赖健清, 毛先成, 等. 甘肃金川矿区构造应力场与构造演化研究[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(2):265-273.
- HE Qiujiao, LAI Jianqing, MAO Xiancheng, et al. Tectonic stress field and tectonic evolution in Jinchuan mining district, Gansu Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(2):265-273.
- [23] 瞿亮, 王永定, 杨晓炳, 等. 金川III矿区地应力现场测量与分布规律研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(7):65-68.
- QU Liang, WANG Yongding, YANG Xiaobing, et al. Research on field measurement and distribution of geostress in Jinchuan III mining area[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 47(7):65-68.
- [24] 胡郁乐, 杨涛, 董海燕. 金川科学深钻预导孔钻井液技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39:13-15.
- HU Yule, YANG Tao, DONG Haiyan. The research of fluid in Jinchuan deep scientific drilling pilot hole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39:13-15.
- [25] 王力, 孟尚志, 陈万钢, 等. 提高煤层强度的钻井液防塌堵剂的研制[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(5):46-49.
- WANG Li, MENG Shangzhi, CHEN Wangang, et al. Development of and study on an anti-sloughing plugging agent used in drilling fluids to strengthen coal beds[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(5):46-49.
- [26] 张勤. 长庆气田储气库井大井眼钻井液技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(2):72-79.
- ZHANG Qin. Large borehole drilling fluid technology for gas storage wells in Changqing Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):72-79.
- [27] 张统得, 李正前, 蒋炳, 等. 塔里木盆地油气地质调查新乌地1井钻探工艺技术[J]. 中国地质调查, 2019, 6(4):58-63.
- ZHANG Tongde, LI Zhengqian, JIANG Bing, et al. Drilling technology of well Xinwudi-1 in oil and gas geological survey of Tarim Basin[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(4):58-63.
- [28] 刘兵. 四川尔呷地吉铅锌矿区复杂地层钻探施工技术[J]. 钻探工程, 2022, 49(4):87-92.
- LIU Bing. Drilling technology for complex formation in the Ergadiji lead-zinc mine area in Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4):87-92.

(编辑 王文)