

青海省锡铁山矿区坑道钻探技术研究

徐国辉^{1,2}, 刘海声^{*1,2}, 穆元红^{1,2}, 陈龙¹, 杨海云¹

(1. 青海省第二地质勘查院, 青海 西宁 810001; 2. 青海省岩心钻探工程技术研究中心, 青海 西宁 810001)

摘要: 近几年, 锡铁山主矿带逐步进入深部找矿, 在矿井下主要借助坑道钻探查明深部矿床分布与储量, 在实施坑道钻探过程中面临机场硐室支护、破碎地层钻进、水敏地层护壁取心、涌水地层处理等挑战, 如果处理不当会造成机场硐室掉块、坍塌, 钻孔出现卡钻、埋钻、坍塌等事故, 严重时造成钻孔报废, 制约了找矿进程。针对上述复杂地层钻进技术难点, 开展加强硐室支护、选择合理钻进参数、优化钻孔结构、制定复杂地层冲洗液配方以及使用速凝水泥封堵等技术措施研究, 保障了坑道机场的施工安全, 有效解决了该区多种复杂地层的钻进难题, 降低了孔内事故发生率和钻孔报废率, 提高了钻探效率和钻探质量, 为后续相似地层钻探施工提供了参考。

关键词: 坑道钻探; 破碎地层; 水敏地层; 涌水地层; 钻进参数; 冲洗液; 锡铁山矿区

中图分类号: P634.5 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)03-0150-07

Research on tunnel drilling technology in Xitieshan mining area, Qinghai Province

XU Guohui^{1,2}, LIU Haisheng^{*1,2}, MU Yuanhong^{1,2}, CHEN Long¹, YANG Haiyun¹

(1. Qinghai Second Geological Exploration Institute, Xining Qinghai 810028, China;

2. Qinghai Core Drilling Engineering Technology Research Center, Xining Qinghai 810028, China)

Abstract: In recent years, the main ore belt of Xitieshan has gradually entered deep exploration, mainly relying on tunnel drilling to determine the distribution and reserves of deep mineral deposits in the mine. During the implementation of tunnel drilling, challenges such as airport chamber support, drilling of fractured strata, core extraction of water sensitive strata wall protection, and treatment of water inrush strata are faced. If not handled properly, it can cause airport chambers to fall and collapse, and drilling accidents such as jamming, burying, and collapse may occur. In severe cases, drilling may be scrapped, which restricts the exploration process. In response to the technical difficulties in drilling complex formations mentioned above, research has been carried out on strengthening tunnel support, selecting reasonable drilling parameters, optimizing drilling structures, formulating complex formation flushing fluid formulas, and using rapid setting cement for sealing. This has ensured the construction safety of the tunnel airport, effectively solved the drilling difficulties in various complex formations in the area, reduced the incidence of accidents and drilling scrap rates, improved drilling efficiency and quality, and provided reference for subsequent drilling construction in similar formations.

Key words: tunnel drilling; ravelly ground; water sensitive strata; water inrush strata; drilling parameters; flushing liquid; Xitieshan mining area

收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2024-04-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.020

基金项目: 中共青海省委人才工作领导小组2022年度青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目(青人才字[2023]1号); 青海省地质矿产勘查开发局2023年度局地质勘查项目(第一批)“青藏高原地质钻探绿色施工技术研究与示范”(青地矿科[2023]33号)

第一作者: 徐国辉, 男, 汉族, 1979年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 工程硕士, 主要从事小口径岩心钻探技术与管理, 青海省西宁市城西区胜利路24号, 17977049@qq.com。

通信作者: 刘海声, 男, 汉族, 1990年生, 高级工程师, 地质工程专业, 博士研究生, 长期从事钻井工程, 青海省西宁市城西区胜利路24号, 249897642@qq.com。

引用格式: 徐国辉, 刘海声, 穆元红, 等. 青海省锡铁山矿区坑道钻探技术研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 150-156.

XU Guohui, LIU Haisheng, MU Yuanhong, et al. Research on tunnel drilling technology in Xitieshan mining area, Qinghai Province [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 150-156.

0 引言

锡铁山矿区位于青藏高原腹地,柴达木盆地北缘中段^[1],该区干旱、少雨、蒸发强烈、日照充足,昼夜温差大,植被稀疏,具有典型的高原沙漠性气候。区内锡铁山铅锌矿是西部矿业股份有限公司下属的重要大型矿床,是我国规模最大的铅锌矿之一^[2]。目前主矿区浅部矿产已经开采殆尽,为满足矿山后续生产的资源需求,逐步转入深层采矿,而深部矿产资源尚未完全调查清楚,故近几年西部矿业加大对锡铁山主矿区深部找矿力度,借助坑道钻探手段及早探明深部矿床分布以及储量,为后续矿床开采提供科学依据。

坑道钻探受作业空间、巷道通风等影响,存在的安全隐患多,施工条件差^[3-5],所以从事坑道钻探的施工队伍较少,专业技术水平参差不齐。从锡铁山历年实施的坑道钻探情况来看,施工队伍主要使用无固相和低固相冲洗液,遇到水敏地层不及时调整钻进参数与冲洗液性能,遇到涌水地层不处理或处理不及时、不得当,导致发生各种孔内事故,找矿效果不理想。由于该区坑道内地质条件复杂^[6],尤其在实施中深孔过程中往往多种复杂地层并存,施工难度大,钻孔报废率高,先后有多家施工单位在此施工,因无法突破技术“瓶颈”而遗憾离场,找矿进度一度停滞不前。本文结合矿区地层实际情况,着重解决水敏地层尤其是大厚度水敏地层、涌水地层以及涌水地层与水敏地层并存的复杂地层的钻进问题,减少孔内事故发生率,提高钻孔质量和成孔率,提高钻进效率。

1 概况

1.1 项目概况

当前锡铁山深部找矿已进入详查阶段,设计钻探工作量在20000 m以上,目前矿山底层已开采至2462(高程2462 m)中段,而硐口高程3100 m,矿井最底部为2222中段,垂直高差878 m,距离地表较深,因此在矿井下实施坑道钻探更为经济合理。坑道钻孔主要布置在2402~2222中段,设计孔深300~1000 m,最深钻孔达990 m,前期钻探资料显示该矿区地层较为复杂,尤其孔深在600 m以深时钻探施工难度较大,有时出现钻孔报废现象,施工进度缓慢,无法保障按时完成任务。

1.2 地质概况

锡铁山铅锌矿床位于柴达木盆地北缘。该地区出露地层由老至新为^[1,7]:

(1)下元古界达肯大板群(Pt_1dk):主要分布于北部,岩性为斜长片麻岩、白云石英片岩、二云片岩及混合岩化斜长角闪岩等深变质岩系。

(2)上奥陶统滩洞山群(O_3tn):是本区分布最广,发育较好的区域变质岩系。主要为一套浅海相中基性-酸性火山喷发熔岩,火山碎屑岩夹沉积岩及少量碳酸盐岩的绿片岩系。锡铁山铅锌矿床的赋矿层位主要为其下部的正常沉积岩系,其次为中基性火山碎屑岩组。

(3)上泥盆统阿木尼克组(D_3a):沿锡铁山沟至断层沟一带断续分布,岩性为紫红色复成份砂岩、细砾岩夹砂岩透镜体。

(4)下石炭统城墙沟组(C_1c):为红色、黄色粉砂岩、细砂岩夹泥质灰岩。

(5)本区南侧为柴达木盆地北缘,断续分布有第三系(N)砖红色、黄褐色砂岩、含砾砂岩及砾岩,其次为大片第四系覆盖层。

从已钻取的岩心看,勘查区地层大部分为片岩,岩石平均可钻性为7级,硬度大都在中硬以下,中等研磨性。

2 施工中存在的技术挑战

(1)机场支护难度大:坑道机场大小主要有5 m×5 m×6 m(宽×长×高)和6 m×8 m×10 m两种规格,孔深越深需要修筑的机场空间越大,机场规格越大越不利于周边岩石稳定,容易出现掉块、冒顶片帮等安全隐患,相应支护难度也越大。

(2)地层破碎难钻进:区内断裂构造发育,分布有大范围超高压变质带,矿区一带发育有北西向挤压走向断裂、近东西向、北北东向及近南北向横向斜滑断裂^[8]。在构造破碎带中钻进受地应力等影响,岩心易碎,回次进尺少,取心难度大,钻进过程中易发生掉块、卡钻事故。

(3)水敏地层占比高:从以往钻孔资料显示,该区大部分钻孔含有水敏性地层,厚度从几十厘米至十几米不等,甚至一个钻孔内出现多层。该地层遇水缩径、坍塌、扭矩高,容易抱钻;糊钻、堵塞钻头水口,送水困难,泵压高,易引发烧钻事故^[9-10];岩心浸水后易被冲蚀,岩心采取率低下;操作不当易造成

较大偏斜,影响钻孔质量;处理不当极易引发各种孔内事故,严重时造成钻孔报废。据统计,以往坑道钻探施工钻遇水敏地层(厚5 m以上)时孔内事故发生率在40%以上,钻孔报废率可达14%。因此水敏地层是钻进过程中面临的主要难题,水敏地层如图1所示。



图1 锡铁山水敏地层

Fig.1 Xitieshan water-sensitive strata

(4) 涌水现象频发:在坑道内实施的钻孔离地表较深,地下水比较丰富,大多钻孔伴有涌水现象。涌水使钻井液变稀释,不利于孔壁稳定,当孔内同时存在水敏地层和涌水层时,水敏层孔壁在水流的冲刷稀释下,钻孔易发生坍塌埋钻事故,加大了钻探施工难度。涌水钻孔如图2所示。



图2 锡铁山涌水钻孔

Fig.2 Xitieshan water gushing bore

3 采取的钻进工艺

针对前期施工中存在的问题,从钻进工艺方面进行了研究改进。

3.1 钻进方法

主要采用 $\varnothing 76$ mm 金刚石绳索取心钻进,根据矿区的地质特点,选择相应的钻头、扩孔器。由于

地层普遍呈中等研磨性,为提高钻头使用寿命,尽量减少提下钻次数(坑道内由于场地等条件限制提下钻不方便,用时较长,劳动强度高),主要选择耐磨性能好、胎体硬度高(HRC40左右)、金刚石浓度高($\geq 80\%$)、粒度细(40~60目)、底唇面平底的孕镶金刚石绳索取心钻头^[11]。水敏性地层可选用大水口和底喷钻头,深孔可选用高胎体钻头。

3.2 钻进参数

通过总结前期的钻探施工经验,结合坑道钻探的特点,充分考虑提高钻头的使用寿命,减少提下钻次数,兼顾钻探效率,通过现场大量的试验对比(以 $\varnothing 76$ mm 钻头为统计对象,见表1),最终确定了适合该矿区大部分地层的钻进参数(见表2)。钻进过程中,当遇到较硬地层时,转速与钻压可适当提高;遇到较软地层、水敏地层时钻压、转速适当降低,泵量适当加大;遇到破碎地层时,钻压适当降低^[12]。总之,钻进参数要根据地层的复杂程度适当选取,这样才能有效提高钻进效率。

表1 不同钻进参数下 $\varnothing 76$ mm 钻头使用情况

Table 1 Use of drill bits under different drilling parameters

钻头数 量/个	钻压 /kN	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	泵量/ ($L \cdot \min^{-1}$)	平均时 效/m	钻头平均 寿命/m
4	10~12	600~800	30~40	2.42	82
5	10~12	600~800	40~50	2.58	103
6	10~12	600~800	50~60	2.85	135
8	10~12	600~800	60~70	3.01	154
5	10~12	600~800	70~80	3.05	152
4	10~12	300~400	60~70	2.25	173
5	10~12	400~500	60~70	2.43	165
8	10~12	500~600	60~70	2.81	160
6	10~12	600~700	60~70	2.97	153
5	10~12	700~800	60~70	3.10	135
4	7~9	600~800	60~70	2.65	158
6	9~10	600~800	60~70	2.86	155
10	10~11	600~800	60~70	2.94	142
9	11~12	600~800	60~70	3.03	126
6	12~13	600~800	60~70	3.12	117

3.3 钻孔结构

该矿区要求终孔口径 ≤ 75 mm,在满足终孔口径的前提下尽量简化钻孔结构,防止钻孔过大偏斜^[13]。在坑道内施工,开孔即为基岩,由于受到爆

表2 钻进参数

Table 2 drilling parameters

钻进参数	钻头规格		
	Ø76 mm	Ø96 mm	Ø122 mm
钻压/kN	9~11	11~14	14~16
转速/(r·min ⁻¹)	550~700	300~600	250~500
泵量/(L·min ⁻¹)	60~80	80~100	100~120

破、地应力等影响,表面基岩比较破碎,有时深达几十米,遂采用三级成孔(如图3所示)。

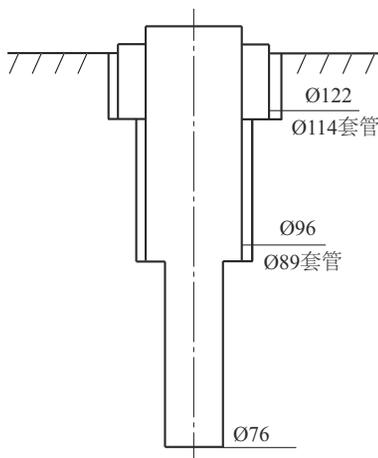


图3 钻孔结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of borehole structure

一开采用Ø122 mm钻头穿过表面破碎层,下入Ø114 mm套管6~9 m(具体视地层情况确定)。

二开采用Ø96 mm金刚石绳索取心钻进至稳定基岩,下入Ø89 mm套管60~120 m(套管深度视地层情况确定)。

三开采用Ø76 mm金刚石绳索取心钻进至终孔。

在设计孔深比较浅(300 m以浅)、岩石完整的情况下钻孔结构可简化为二级。

4 难点分析与采取的措施

4.1 机场洞室支护

钻探施工所需机场洞室空间大、开挖断面大,离地表较深,受地应力、爆破、钻机震动、地下水等影响,易发生掉块、冒顶片帮等安全隐患,因此需要加强机场支护。根据洞室围岩(围岩等级Ⅲ级)的稳定程度选择挂网锚喷支护^[14-15],施工顺序为:平整洞室围岩,钻孔,锚杆制作、安装,锚固灌浆,第一次

喷射混凝土,养护,钢筋网制作、挂网,第二次喷射混凝土,养护。锚杆选用Ø22 mm×2400 mm的左旋高强无纵筋锚杆,密度1.2根/m²,喷射混凝土配比为水泥体积:沙子体积:石子体积=1:2:2。初始喷射混凝土厚度30~50 mm,最终喷射混凝土厚度<250 mm,现场洞室锚喷支护如图4所示。



图4 锚喷支护洞室

Fig.4 Bolting and shotcreting supporting chamber

4.2 破碎地层钻进方法

受断裂构造、地应力等影响,地层岩石有一部分较为破碎,该层容易堵塞内管,回次进尺少,有时只能取心20~30 cm,岩心采取率低,钻进效率低,容易发生掉块、卡钻事故。破碎地层取心钻进效率低下一直以来尚未得到有效解决^[16],对现场破碎地层的反复试验研究发现,钻压过大,岩石易碎,产生的碎屑容易堵塞内管和水路,造成憋泵、回次进尺少、岩心对磨等现象。泵量过大会加大对岩心和孔壁的冲蚀,加大掉块几率,降低岩心采取率。通过不断的调整钻进参数,提高冲洗液的润滑性能和防塌性能,合理调整卡簧座与钻头内台阶距离收到了良好的效果。

(1)钻进参数(Ø76 mm绳索取心钻进):钻压5~8 kN,转速400~600 r/min,泵量30~50 L/min。

(2)冲洗液配比:1 m³水+2%钠基膨润土+0.5%高粘羧甲基纤维素钠(HV-CMC)+1%磺化沥青+0.04%PAC-141+0.1%烧碱+0.05%皂化油润滑剂。

(3)破碎地层适当调小金刚石绳索取心钻头内台阶与卡簧座(选用底部不带水口卡簧座)底端的间隙,一般为2 mm左右,可提高回次进尺。钻进过

程中在不憋泵也不进尺的情况下应立即打捞岩心,防止岩心对磨,降低岩心采取率。

破碎地层钻进工艺改变前后效果对比见表3。

表3 Ø76 mm 绳索取心钻进破碎地层工艺改变前后对比

Table 3 Comparison of Ø76mm rope core drilling technology before and after changes in fractured formations

钻进工艺	钻进参数			回次进尺/m	岩心采取率/%	小时效率/m	掉块、卡钻情况
	钻压/kN	泵量/(L·min ⁻¹)	转速/(r·min ⁻¹)				
工艺改变前	10~12	40~70	500~800	0.2~0.8	75	0.6	时有
工艺改变后	5~8	30~50	300~600	1.2~1.8	90	1.5	基本没有

4.3 水敏地层处理方法

水敏地层钻进是本矿区施工过程中面临的主要技术难题^[17-18]。通过总结以往的施工经验,结合室内试验与现场应用,经过长时间的探索改进,主要从冲洗液、操作方法、钻进参数等方面着手解决。

(1)钻进参数:在正常钻进过程中,若遇到泵压突然升高,扭矩突然增大,进尺缓慢的情况,可大致判断钻遇了水敏地层,要及时调整钻进参数和冲洗液性能。钻遇水敏地层后,容易发生抱钻、烧钻事故,钻压、转速、泵压应适当降低,采取的钻进参数见表4。

钻头使用胎体硬度大(HRC≥40)、水口大且深的金刚绳索取心钻头(可在已有钻头基础上扩大水口面积和高度),防止憋泵、糊钻现象。

(2)冲洗液配制:对于水敏地层应尽量减少钻井液对地层的渗水,增强孔壁岩土的抗水敏性^[19-20],

表4 Ø76 mm 绳索取心钻进水敏地层钻进参数

Table 4 Drilling parameters for Ø76mm rope core drilling in water sensitive formations

钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)
2~5	200~400	30~50

因此钻遇水敏地层要及时调整冲洗液性能,调整后的冲洗液应具有抑制性好、滤失量小、防塌效果好等性能,还要满足固相含量低、防止钻杆结垢的特点。针对该矿区水敏地层,经过试验应用,确定了粗分散低固相钾基冲洗液,能成功钻穿水敏层。

冲洗液配方:1 m³水+3%钠基膨润土+1.5%KCl+0.5%K21防塌剂+1%磺化沥青+0.5%高粘羧甲基纤维素钠(HV-CMC)+0.03%PAC-141+0.1%烧碱。冲洗液性能指标见表5。

表5 冲洗液性能

Table 5 Performance of flushing liquid

漏斗粘度/s	表观粘度/(mPa·s)	塑性粘度/(mPa·s)	胶体率/%	失水量/[mL·(30min) ⁻¹]	密度/(g·cm ⁻³)	pH值
35	18.2	15.1	98	8.5	1.05	9.5

(3)钻进注意事项:在操作过程中需时刻注意泵压表变化,泵压过高要及时上顶钻具,穿过水敏地层后,若泵压依然较高,则需要将该孔段来回多扫几次,保持泵压正常后再继续钻进。

钻穿水敏地层至稳定基岩2~3 m,视孔深、埋深、孔内地层复杂程度决定是否下入套管。

当水敏等不稳定地层埋深在300 m以内,且小于设计孔深的2/3,孔内地层情况十分复杂时,则首先考虑通过扩孔下入技术套管。反之,若复杂地层较深或离设计孔深较近,下入套管不经济实用时,可加强泥浆维护继续钻进或通过水泥封堵的方法

进行处理。

4.4 涌水地层和水敏地层并存的钻进方法

该矿区坑道内地下水丰富,钻孔涌水现象严重,涌水量可达9 L/min,涌水使冲洗液变稀释,性能下降,不利于孔壁稳定^[21],给钻探施工造成很大麻烦^[22]。当钻孔岩石相对完整,涌水层对钻进影响不大,只需在已有冲洗液基础上加入重晶石粉提高密度,使地层涌水量变小甚至不涌水。当遇到孔内同时存在涌水层和水敏地层时,钻进十分困难。当涌水层和水敏地层埋深较浅,则首先考虑下入技术套管隔离,若埋深较深则用水泥封堵,具体处理方

法如下:

(1)加大冲洗液密度。在水敏地层冲洗液的基础上加入重晶石粉,使冲洗液密度保持在1.2 kg/L左右,冲洗液配方:1 m³水+3%钠基膨润土+1.5%KCl+0.5%K21防塌剂+1%磺化沥青+0.5%高粘羧甲基纤维素钠(HV-CMC)+0.03%PAC-141+0.1%烧碱+2%~5%重晶石粉。

(2)钻穿水敏地层。按水敏地层的钻进参数及操作方法进行钻进,要及时测定冲洗液性能指标,被稀释后及时补充,钻穿水敏地层进入完整地层2~3 m进行水泥封堵。

(3)水泥封堵。由于水敏地层冲洗液在涌水层的不断稀释下,维护十分困难,长时间钻进容易引发孔内事故,为彻底消除孔内事故隐患,用水泥封堵该孔段最为有效。为提高钻进效率,缩短水泥凝固时间并防止涌水层将水泥冲出孔外,通过反复试验,选用标号425以上水泥,加入速凝剂(水玻璃)4%、重晶石粉5%,配成0.5:1水泥浆进行灌注,灌注完成24 h后即可扫孔钻进。

5 施工效果

通过对锡铁山坑道钻探存在的难题进行深入分析研究,反复试验,制定了相应的技术措施,克服了许多难题,孔内事故发生率控制在10%以下,钻孔报废率大为降低,从14%降低到5%左右,钻进效率整体提高了30%以上,超额完成年度工作量,加快了找矿进程,年完成钻探工作量6000 m以上,为锡铁山深部找矿做出了巨大贡献。

(1)通过科学的硐室支护方法,坑道钻探生产更为安全,消除了机场内存在的落石、冒顶片帮等安全隐患,在后续钻探工作中未发生因支护不当而造成的安全生产事故。

(2)针对不同地层选用不同的钻进参数、相应的冲洗液配方及规范操作方法,减少了孔内事故的发生,提高了复杂地层岩心采取率15%左右,降低了钻孔偏斜率,提高了钻进效率。

(3)解决了水敏地层钻进困难的现状,制定了粗分散低固相钾基冲洗液方案,有效抑制了水敏地层的缩径、坍塌,提高了钻孔质量与成孔率。

(4)通过加大冲洗液密度处理涌水地层,解决了冲洗液被快速稀释的问题,可使冲洗液保持长时

间的性能稳定。当孔内同时存在涌水地层和水敏等复杂地层时,用速凝水泥封堵的方法,消除了诸多事故隐患,使后续钻探生产变得更加顺利。

参考文献(References):

- [1] 李鹏,李义邦,王海丰,等.柴北缘锡铁山铅锌矿床构造变形特征及其地质意义[J].地质科技情报,2019,38(4):108-123.
LI Peng, LI Yibang, WANG Haifeng, et al. Structural characteristics and ore-controlling law of Xitieshan lead-zinc mine in North Qaidam Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(4):108-123.
- [2] 魏俊浩,李鹏,李义邦,等.青海省锡铁山铅锌矿成矿元素物质场结构及深部找矿潜力[J].地质科技情报,2021,40(2):1-12.
WEI Junhao, LI Peng, LI Yibang, et al. Mineral field structure and deep prospecting potential of the Xitieshan lead zinc deposit in Qinghai Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2021, 40(2):1-12.
- [3] 徐国辉,万道含,杨树强,等.青海省都兰县五龙沟矿区坑道钻探工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):34-37,45.
XU Guohui, WAN Daohan, YANG Shuqiang, et al. Research on tunnel drilling technology in Wulonggou Mining Area, Dulan County, Qinghai Province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(11):34-37,45.
- [4] 梁俊,高元宏,陈宗涛,等.坑道钻探施工技术规程探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(9):89-92.
LIANG Jian, GAO Yuanhong, CHEN Zongtao, et al. Discussion on technical regulations for tunnel drilling construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(9):89-92.
- [5] 胡海峰,熊文祥,郑明辉.ZLY2500L型煤矿用履带式坑道钻机的研制[J].钻探工程,2022,49(2):129-134.
HU Haifeng, XIONG Wenxiang, ZHENG Minghui. Development of ZLY2500L crawler tunnel drill for coal mines[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):129-134.
- [6] 冯志兴,陈正乐,李正明,等.柴北缘锡铁山铅锌矿床控矿构造特征及找矿预测[J].地质力学学报,2020,26(3):329-344.
FENG Zhixing, CHEN Zhengle, LI Zhengming, et al. Characteristics of ore-controlling structures and prospecting prediction of the Xitieshan lead-zinc deposit in the northern margin of Chai[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(3):329-344.
- [7] 潘彤.青海矿床成矿系列探讨[J].地球科学与环境学报,2019,41(3):297-315.
PAN Tong. Exploration of the metallogenic series of Qinghai deposit[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2019, 41(3):297-315.
- [8] 祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山铅锌矿床的找矿潜力与找矿方向[J].地质与勘探,2006,42(3):18-23.
ZHU Xinyou, DENG Jiniu, WANG Jingbin, et al. Prospecting potential and direction of the Xitieshan lead-zinc deposit[J]. Geology and Exploration, 2006, 42(3):18-23.
- [9] 莫玉贵.青海大柴旦细晶沟金矿复杂地层钻探施工技术[J].地质装备,2021,22(5):33-37.

- MO Yugui. Drilling construction technology for complex strata of Xijinggou Gold Mine in Dachaidan, Qinghai[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021,22(5): 33-37.
- [10] 王盛,潘振泉,秦正运.小口径绳索取心钻进在矽山地区深厚泥岩地层中的施工技术[J].钻探工程,2022,49(2):85-90.
WANG Sheng, PAN Zhenquan, QIN Zhengyun. Construction technology of small diameter rope core drilling in deep mudstone formations in Dangshan area [J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):85-90.
- [11] 邓鹏,黄明勇,方青,等.贵州省旦坪铝土矿钻探施工工艺[J].钻探工程,2021,48(3):78-85.
DENG Peng, HUANG Mingyong, FANG Qing, et al. Drilling construction technology for Danping bauxite mine in Guizhou Province[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):78-85.
- [12] 李光宏,李红梅.多种钻探工艺技术在白洞铁矿区的应用实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):49-52.
LI Guanghong, LI Hongmei. Application practice of multiple drilling techniques in Baijian iron mine area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(9):49-52.
- [13] 张彪,康玉国,黄勇,等.矿山救援地面生命保障孔高效成孔关键技术[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):14-23.
ZHANG Biao, KANG Yuguo, HUANG Yong, et al. Key technologies for efficient drilling of ground life support holes in mine rescue[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11):14-23.
- [14] 张忠伟,刘成勇.浅谈锚喷支护技术在大断面洞室中的应用[J].陕西煤炭,2014,33(2):86-88.
ZHANG Zhongwei, LIU Chengyong. Application of anchor spray support technology in large cross-section tunnels [J]. Shaanxi Coal, 2014,33(2):86-88.
- [15] 黄金坤,姚韦靖,庞建勇.深井大断面洞室锚注网喷联合支护技术[J].煤炭技术,2017,36(4):54-56.
HUANG Jinkun, YAO Weijing, PANG Jianyong. Combined support technology of deep well large cross-section chamber with anchor injection, mesh spraying [J]. Coal Technology, 2017,36(4):54-56.
- [16] 谭春亮,岳永东,渠洪杰,等.多工艺钻探技术在浅覆盖区矿产勘查中的应用研究[J].矿产勘查,2023,14(4):631-638.
TAN Chunliang, YUE Yongdong, QU Hongjie, et al. Research on the application of multi process drilling technology in mineral exploration of shallow cover areas[J]. Mineral Exploration, 2023,14(4):631-638.
- [17] 颜志华,王剑武,石得权.复合泥浆解决失稳地层钻进难题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):57-59,64.
YAN Zhihua, WANG Jianwu, SHI Dequan. Composite mud solves the problem of drilling in unstable formations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(2):57-59,64.
- [18] 刘祥,兰沁,许飞,等.西藏罗布莎铬铁矿高海拔巨厚覆盖层钻探技术[J].钻探工程,2021,48(6):49-56.
LIU Xiang, LAN Qin, XU Fei, et al. Drilling technology for massive overburden at high altitude in Luobusa Chromite Mine, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):49-56.
- [19] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新,等.钻井液与岩土工程浆液[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.
WU Xiaoming, HU Yule, HE Bingxin, et al. Drilling Fluid and Geotechnical Engineering Slurry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [20] 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. Study on mudstone formation flushing fluid in Wulonggou Mining Area, Qinghai [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):45-50.
- [21] 刘跳民,李峰,刘杰,等.钻孔灌注水泥护壁堵漏方法[J].矿产勘查,2016,7(3):505-510.
LIU Tiaomin, LI Feng, LIU Jie, et al. Drilling and grouting cement wall sealing method [J]. Mineral Exploration, 2016,7(3):505-510.
- [22] 宋继伟.特大涌水孔绳索取心钻探施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(12):17-21.
SONG Jiwei. Construction technology of large water inflow hole rope core drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(12):17-21.

(编辑 荐华)