

辽宁丹东 3000 m 科学深钻施工技术

田志超^{1,2}, 翟育峰^{*1,2}, 刘振新^{1,2}, 马云超^{1,2}, 袁长金³, 王勇军⁴

(1. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东烟台 264004; 2. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004;
3. 四川省第一地质大队, 四川成都 610032; 4. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东, 德州 253072)

摘要: 辽宁丹东 3000 m 科学深钻项目是国家重点研发计划“辽东/胶东矿集区深部矿产勘查与增储示范”项目下设立子课题的核心任务工程。本文介绍了辽宁丹东 3000 m 科学深钻的施工概况及其应用的多项关键技术。通过采用 HXY-8VB 改进型变频立轴钻机、加长钻具配套防堵内管及快速打捞矛等新机具, 开展高效金刚石取心钻头研究及应用, 进行深部地质钻探钻进过程流式大数据分析与动态预处理系统的应用, 优质高效的完成了全部钻探施工任务, 创造了辽东地区非煤固体矿产勘查第一深孔纪录。为验证该地区成矿条件, 评价区域 3000 m 以浅金资源潜力提供了有力支撑, 同时, 也为特深孔钻探施工提供了技术借鉴。

关键词: 科学钻探; 特深孔钻探; 复杂地层; 变频立轴钻机; 高效金刚石取心钻头; 流式大数据分析与动态预处理系统; 辽宁丹东

中图分类号: P634 文献标识码: B 文章编号: 2096-9686(2023)S1-0233-07

Drilling technology of 3000m scientific deep drilling in Dandong, Liaoning Province

TIAN Zhichao^{1,2}, ZHAI Yufeng^{*1,2}, LIU Zhenxin^{1,2}, MA Yunchao^{1,2}, YUAN Changjin³, WANG Yongjun⁴

(1. Shandong No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China;

2. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Provincial Bureau of
Geology & Mineral Resources, Yantai Shandong 264004, China;

3. No.1 Geological Team of Sichuan Province, Chengdu Sichuan 610032, China;

4. Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy
Exploration and Reinjection, Dezhou Shandong 253072, China)

Abstract: The Dandong 3000m scientific deep drilling project in Liaoning Province is the core task of the sub-project of the national key research and development plan “Demonstration of Deep Mineral Exploration and Storage in Liaodong/Jiaodong Ore Concentration Area”. This paper introduces the general situation of 3000m scientific deep drilling in Dandong, Liaoning Province and several key technologies. By adopting new tools such as HXY-8VB modified frequency conversion vertical shaft drill, lengthening drilling tool supporting anti-blocking inner pipe and quick fishing spear, the research and application of efficient diamond core bit were carried out, and the application of flow big data analysis and dynamic pretreatment system in deep geological drilling process was carried out. All drilling construction tasks were completed with high quality and high efficiency. It sets the record of the first deep hole in the exploration of non-coal solid minerals in eastern Liaoning. It provides a strong support for rerifing the metallogenic conditions,

收稿日期: 2023-05-24; 修回日期: 2023-08-02 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.035

基金项目: 山东省地矿局科技攻关项目“3000m 超深科学钻探关键技术研发应用”(编号: KY202102)、“深孔地质岩心钻孔轨迹控制技术研发及应用”(编号: KY202205)

第一作者: 田志超, 男, 汉族, 1990 年生, 工程师, 勘查技术与工程(岩土钻掘)专业, 从事岩心钻探技术应用与生产工作, 山东省烟台市芝罘区机场路 271 号, sdsdtzc@163.com。

通信作者: 翟育峰, 男, 汉族, 1984 年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 硕士, 从事钻探技术研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路 271 号, 282163880@qq.com。

引用格式: 田志超, 翟育峰, 刘振新, 等. 辽宁丹东 3000 m 科学深钻施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 233-239.

TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIU Zhenxin, et al. Drilling technology of 3000m scientific deep drilling in Dandong, Liaoning Province [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 233-239.

evaluating gold resource potential below 3000m in this area and also provides technical references for extra-deep hole drilling construction.

Key words: scientific drilling; ultra-deep drilling; complex formation; modified frequency conversion vertical shaft drill; efficient diamond core bit; flow big data analysis and dynamic pretreatment system; Dandong, Liaoning Province

0 引言

辽宁丹东 3000 m 科学深钻(LDZK001 钻孔)为国家重点研发计划“辽东/胶东矿集区深部矿产勘查与增储示范”项目下设子课题的核心任务工程。项目设计孔深 3000 m,设计顶角 1°,终孔孔深 3003.99 m,终孔孔径 76 mm,钻进 1207 个回次,平均机械钻速 1.38 m/h,累计采取岩矿心 2996.67 m,累计岩矿心采取率 99.76%,项目于 2021 年 4 月 28 日正式开钻,2022 年 6 月 6 日顺利终孔,累计施工 405 d。项目应用了 HXY-8VB 型变频立轴钻机等新机具,开展了高效金刚石取心钻头的研究及应用,进行了提高绳索取心效率的新型取心机具的研究应用工作,克服了施工难度大、条件复杂等难题,顺利完成钻探任务,创造了辽东地区非煤固体矿产勘查第一深孔纪录,为特深孔钻探施工积累了经验。

1 工作区及地质概况

1.1 工作区交通位置

项目位于辽宁省丹东市五龙金矿区内,行政管辖归属辽宁省丹东市振安区金矿街道,距丹东市中心 30 km,矿区内道路交通较为便利。

1.2 地质概况

1.2.1 地层岩性

工作区零星出露古元古界辽河群层状变质岩系,自下而上主要有于家堡子组、浪子山组、大石桥组和盖县组,主要由各类大理岩、片岩、变粒岩组成;震旦纪沉积岩系呈零星残块出露,分布于工作区东南部,岩石组成为石英岩、石英砂岩、泥灰岩、页岩等;局部地段出现晚侏罗纪火山喷发沉积,主要分布在工作区东南部,鸭绿江深大断裂两侧,其主要岩性为紫色砂岩、页岩、泥灰岩;新生代地层主要为第四系的河流相、冲积相的砂砾石及砂质粘^[1-2]。

工作区区域岩浆活动频繁,形成了一系列花岗质岩石,最早的为五龙岩体,岩性主要为中细粒片麻状黑云母二长花岗岩,其后为燕山期的花岗闪长岩-花岗岩系。中细粒片麻状黑云母二长花岗岩出露面

积大,是五龙矿区的主要成矿围岩。矿物成分主要为斜长石、钾长石、石英和黑云母^[2-4]。

1.2.2 构造

工作区区域构造发育,以断裂构造为主,褶皱构造次之。断裂构造主要为北东向和北西向压性断裂,断裂间距分别为 2~4 km 和 4~6 km,延伸均在 10 km 以上;局部,特别是五龙金矿区,近南北向和北西向断裂发育。褶皱构造仅在区域东南部发育,褶皱轴向总体呈北东向,由下元古界辽河群和震旦系地层组成,延长 10 km 左右,属营口-草河口-宽甸复向斜中的次级褶皱部分^[2-4]。

1.2.3 岩石可钻性

工作区钻遇地层以片麻状中细粒黑云二长花岗岩为主,岩石硬度大、研磨性强,可钻性等级为 8~10 级,详见表 1。采用金刚石绳索取心钻进,平均机械钻速 1.38 m/h,局部石英脉地层机械钻速低于 0.8 m/h,且地层存在局部破碎,造成金刚石钻头寿命短,平均寿命 39.91 m。综合钻进效率较低,钻遇地层可钻性等级较高是主要原因^[5-7]。

表 1 钻遇岩石可钻性等级

序号	岩石名称	可钻性等级	统计效率/(m·h ⁻¹)
1	黑云母花岗岩	8	1.50~2.10
2	闪长岩	8	1.50~2.10
3	黑云二长花岗岩	9	1.10~1.70
4	斑状花岗闪长岩	9	1.10~1.70
5	石英岩	10	0.80~1.20

2 钻孔施工难点

(1) 钻孔设计深度 3000 m,在该区域施工的深部钻孔较少,深部地层资料缺失,对钻探设备选型、钻孔结构设计及钻探管材强度提出更高要求^[8]。

(2) 上部地层存在老旧废弃采矿巷道,位置不明,极易钻入废旧矿区巷道,对施工要求较高^[9]。

(3) 地层岩石硬度大、研磨性强,可钻性等级高,如何提高钻进效率是施工的重点^[10]。

(4) 局部地层较破碎,存在较多孔隙和裂缝,渗

透性强,易发生漏失,地层条件十分复杂^[9-10]。

3 钻孔施工概况

3.1 钻孔结构

LDZK001钻孔采用了四开的钻孔结构,主要是根据项目总体要求,结合终孔孔深和口径以及地层情况等因素综合确定。实际钻孔结构见图1。

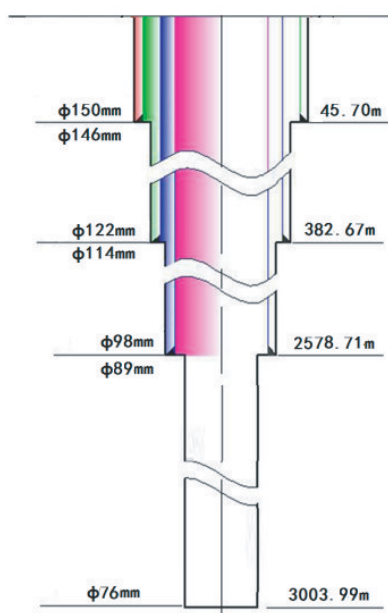


图1 LDZK001钻孔结构

根据四开次钻孔结构的应用情况分析,实际应用效果不佳。开孔直径小,导致了三开钻穿上部1170.40~1203.60 m孔段复杂地层后,为保证留有更多余地以应对更深部地层可能出现的复杂情况,未下入套管有效封隔复杂孔段,引发了后续严重孔内事故。因此,特深孔施工应尽量采用大直径开孔,浅部复杂地层处理要比深部容易,在无法预知深部地层的情况下预留2~3级套管结构^[11-12]。

3.2 主要机械设备

LDZK001钻孔施工中使用的主要机械设备见表2。

3.3 施工工艺

一开(0~45.70 m),为风化层,地层松散破碎,采用低固相冲洗液,Φ150 mm金刚石单管提钻取心钻进工艺钻进至45.70 m,下入Φ146 mm套管,孔口加固,严格控制钻进参数,以小钻压钻进,控制孔身

表2 主要机械设备

设备名称	型号	主要技术参数
钻机	HXY-8VB型	钻进深度4000 m;转速正转95、175、250、363、264、487、695、1011 r/min;转速反转77、215 r/min;单绳最大提升力125 kN;功率90 kW(变频)
泥浆泵	BW350	流量300、235、155、95、52 L/min;最大额定压力16 Mpa;功率30 kw
钻塔	A29-90t	塔高29 m;负荷900 kN;立根18 m
取心绞车	S4000	绳容量(Φ8 mm)4000 m;功率11 kw
液压钳	SQ114/8	额定扭矩8 kN·m;应用范围Φ57~116.5 mm

轨迹为本孔段施工重点^[13]。

二开(45.70~382.67 m),主要岩性为黑云二长花岗岩、闪长岩等,地层局部破碎,采用无固相冲洗液,S122 mm金刚石绳索取心钻进工艺钻进至382.67 m,下R-PCS绳索取心钻杆做为套管。在233.20~235.30 m孔段钻遇废弃矿井巷道,漏失严重,冲洗液失返,多次堵漏失败,采用钻杆涂抹油脂顶漏钻进,下R-PCS绳索取心钻杆做为套管封隔,套管下部采用水泥固井^[14-19]。

三开(382.67~2578.71 m),主要岩性为黑云二长花岗岩、蚀变闪长岩等,为施工重点地层,采用S98 mm金刚石绳索取心钻进工艺,岩石硬度大、研磨性强,可钻性等级为8~10级,地层局部破碎。钻进至1170.40~1203.60 m孔段,地层破碎,坍塌严重,掉块较多,时常卡钻,用水泥封孔护壁。钻进至2561.44 m处,更换钻头下钻至1190 m处遇阻,在1190~1202 m孔段处多次处理孔壁坍塌掉块事故,钻进至2578.71 m。原计划采用S98 mm金刚石绳索取心钻进工艺钻进至终孔,由于上部地层坍塌掉块严重,为保障孔内安全下R-HCS绳索取心钻杆做为套管封隔事故孔段。

四开(2578.71~3003.99 m),采用S76 mm绳索取心钻进工艺,钻进至终孔。本孔段地层较完整,加强管理,预防孔内事故,合理选配钻头钻具,提高钻进效率是本孔段的重点^[9-16]。

3.4 事故的处理与预防

LDZK001钻孔前期施工较为顺利,未发生较大孔内事故,但钻遇局部地层较为破碎,坍塌掉块严重,仅采用了多次水泥封孔护壁,透孔过程中取出了

水泥固结的破碎地层岩心,取得了一定短期效果。

3.4.1 钻孔掉块坍塌事故

1170.40~1203.60 m孔段地层破碎,垂直节理较为发育,掉块坍塌严重,地层岩心见图2。仅采用水泥封孔护壁,未下入套管封隔有效解决,导致后续事故频发,是影响施工效率的主要原因。



图2 破碎地层岩心

钻进至 2561.44 m,多次提下钻过程中均在 1190~1202 m孔段遇阻,前期采用水泥封固的破碎地层孔壁再次失稳,坍塌非常严重。反复通孔扫孔处理,取出了完整掉块岩心,取出的岩心带有明显的钻孔孔身痕迹(见图3),判断钻孔已经偏离原孔位,决定下入套管护壁。



图3 扫孔取出的岩心

坍塌孔段需采用窜扫的方式通过,决定采用 $\varnothing 89$ mm钻杆配导正钻具(见图4),扫孔穿过坍塌掉块孔段后,直接用 $\varnothing 89$ mm钻杆做套管,上部连接 $\varnothing 91$ mm地质套管下入孔内,封隔坍塌孔段。

3.4.2 钻杆断裂事故

采用 $\varnothing 89$ mm钻杆做套管,下钻至 1190 m处遇阻,反复扫孔通孔至 1210 m处,通过坍塌孔段,继续下入 $\varnothing 89$ mm钻杆做套管扫孔至 1224 m,上部连接 $\varnothing 91$ mm钻杆继续通孔,扫孔至 2515 m处,发生断钻杆事故,事故头位于 1204 m处。若直接提出上部 $\varnothing 91$ mm钻杆,1190~1202 m掉块坍塌孔段无法封隔,掉块沉渣可能会掩埋下方事故头,导致下部事故钻杆无法打捞。因此,决定采用60系列石油钻杆配合可退式打捞矛,通过上部钻杆内孔下入,直接打捞



图4 导正钻具

下部事故钻杆,确保提出事故头后下部钻杆继续封隔坍塌孔段,一次打捞成功,见图5。孔口整理事故头,上部接 $\varnothing 91$ mm地质套管,下套管至 2539 m处遇阻,套管孔口固定。打捞 $\varnothing 89$ mm钻具内管总成,下S76绳索取心钻具,磨铰 $\varnothing 98$ mm钻头内台阶,扫孔到底,采用 $\varnothing 76$ mm孔径钻进,钻杆断裂事故处理完毕^[18]。



图5 可退式打捞矛及打捞出来的钻杆

3.4.3 钻具遇卡事故

采用S76 mm金刚石绳索取心工艺钻进至 2578.71 m,提钻更换钻头,于 2539 m处遇卡,上扫过程中下部套管倒扣,套坐在遇卡钻具上方。下放遇卡钻具,试图利用 $\varnothing 98$ mm孔径与 $\varnothing 76$ mm孔径变径位置处(2561.44 m),将倒扣套管与遇卡钻具分离。下放遇卡钻具至接近孔底 2578.71 m处,钩载保持不变,倒扣套管与遇卡钻具未分离。分析认为,前期采用S76 mm绳索取心钻具磨铰套管底部 $\varnothing 98$ mm钻头内台阶时,底部钻头或钻具倒扣,与S76 mm绳索取心钻具卡在一起,导致钻进 2561.44~2578.71 m孔段时处于“边打边扩”的异常状态。活

动套管,下放套管至接近孔底2578 m处。反开遇卡钻具,提出 $\varnothing 71$ mm钻杆2407 m,孔内剩余 $\varnothing 71$ mm钻杆171 m及钻具4.07 m。采用反丝钻杆反孔内事故钻具15次,反出孔内全部事故钻杆及弹卡室,剩余部分S76 mm事故钻具。采用S76 mm金刚石绳索取心钻具铣磨,铣磨完毕后钻进1.75 m,提钻取心,事故处理完毕。

通过梳理整个事故处理过程,认为深孔、特深孔钻探施工,要坚持预防为主,稳中求进,发现问题要及时有效解决,避免问题进一步恶化。

4 LDZK001孔采用的关键技术

4.1 HXY-8VB型变频立轴钻机的应用

针对特深孔施工设备要求,采用了山东省第三地质矿产勘查院联合生产厂家升级改造的HXY-8VB型钻机^[9],由立轴钻机主机、变频控制中心、司钻房、液压站等组成,见图6。

该钻机是在HXY-8型传统立轴钻机的基础上,将普通电机驱动系统升级改造成变频电机驱动系统,动力大幅提升,更加节能环保;主卷扬由抱

闸式滚筒升级成变频电机驱动、液压盘刹式滚筒,卷扬升降速度由变频器控制;液压油缸给进升级成液压油缸给进与变频电机驱动主卷扬自动送钻,即浅孔时用油缸实现加压钻进,深孔时用变频送钻电机驱动主绞车实现自动送钻;回转、送钻、起下钻等操作由司钻房数字控制调节,实现了自动化、精细化操作;配套各种传感器和可编程逻辑控制器(PLC),将钻压、转速、立轴扭矩、泵压等参数数据呈现在司钻房控制屏幕上,实时反应钻进状态,可视化程度高。

通过升级改造,提升了钻机的施工能力,改善了工作环境,降低了劳动强度,减少了事故的发生,提高了工作效率,钻进参数控制由经验值向量化值转变,真正实现了优质高效科学施工。

4.2 高效金刚石取心钻头研究及应用

针对工作区硬岩地层,且局部地层严重破碎,导致钻进效率低、钻头寿命低等问题^[9],山东省第三地质矿产勘查院联合相关单位,通过对胎体结构及唇面形式的优化设计,研制应用了2种高效金刚石取心钻头,取得了良好的应用效果。

为实现硬岩地层的高效钻进,采用偏心齿结构设计,可将金刚石取心钻头工作唇面的面积减少35%~45%,从而增大钻进过程中单齿工作压力,在偏心齿结构后部增加了扭面过渡后支撑结构,保证偏心齿结构的扭转强度和耐冲击性能,见图7(a)。

为进一步提高破碎硬岩地层钻头寿命,采用扇形切削齿高胎块结构,唇面为同心圆尖齿形式,切削齿间增加支撑柱结构,增加钻头的强度,以实现钻头的高效长寿命钻进,见图7(b)。

两种钻头的工作层高度设计为22~25 mm,水口数量分为12、10、9个三种形式。

试验应用了2只偏心齿金刚石取心钻头和2只高胎块金刚石取心钻头,详见表3。

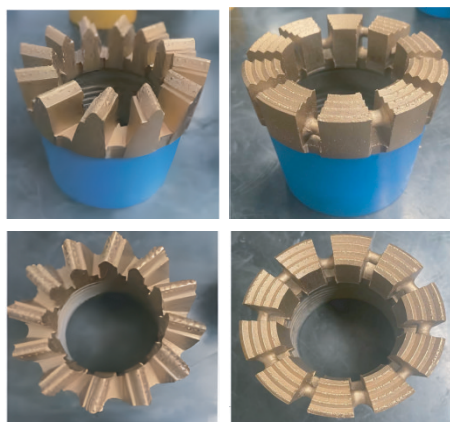
偏心齿金刚石取心钻头的平均机械钻速平均值为2.25 m/h,远超普通钻头的平均机械钻速1.00 m/h,钻头寿命平均值为18.76 m,主要是由于严重破碎



图6 HXY-8VB型变频立轴式钻机

表3 金刚石取心钻头应用试验结果

序号	结构形式	水口数量/个	钻进孔段/m	钻头寿命/m	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)
p-1	偏心齿结构	12	568.44~583.64	15.20	2.30
P-2	偏心齿结构	10	604.17~626.95	22.31	2.20
g-1	高胎体结构	10	930.94~1060.84	129.90	1.00
g-2	高胎体结构	9	1213.05~1345.25	132.20	1.40



(a) 偏心齿结构 (b) 高胎块结构

图7 高效金刚石取心钻头

的地层导致钻头工作层快速消耗,不适用于该地层。9齿高胎块金刚石取心钻头的平均机械钻速为1.4 m/h,明显高于普通钻头的钻速,钻头平均寿命为132.2 m,远超普通钻头平均寿命^[20]。

经过现场试验验证,9齿高胎块金刚石取心钻头可有效提高该矿区的机械钻速和寿命,表现出优良的钻进性能,较高的施工效率和良好的经济技术效果,可在该类硬岩地层推广应用。

4.3 提高绳索取心效率的新型取心机具的应用

在绳索取心钻进中,随着孔深增加,取心等辅助时间也不断增加,取心时间占辅助时间的绝大部分,如何缩短取心时间也成为了提高钻进效率的有力武器。

在正常情况下,保障每回次进尺长度最大化,可有效减少取心频次,缩短取心时间,有效提升钻进效率。在复杂地层取心钻进时极易出现堵心,造成岩

心过度研磨、内管钻具无法打捞等问题,避免堵心等不正常回次进尺的发生也可以有效提高钻进效率。

基于以上原因,通过对取心机具进行分析研究,将常规绳索取心钻具及内管长度由3 m增加至4.5 m,尽可能增加回次进尺长度;采用内壁镀有耐磨涂层的加强型防堵内管有效避免了堵心等不正常进尺的发生,提高取心钻进效率^[15-17]。

采用新型快速打捞矛(见图8),相较传统打捞矛,捞钩架由圆形改为方形,下放提拉阻力小,下放速度快,结构更加简单轻便,有效缩短取心时间,减少辅助时间,减轻工人劳动强度,降低成本^[21]。



图8 新型快速打捞矛与传统打捞矛

4.4 深部地质钻探钻进过程流式大数据分析与动态预处理系统的应用

深部地质钻探钻进过程流式大数据分析与动态预处理系统,成功应用于辽宁丹东3000 m科学钻探工程。通过采集项目的钻进过程数据,运用限幅滤波结合过程数据分布特征、施工人员人工操作经验去除过程数据中的离群值,去除深部地质钻探钻进过程数据的噪声,提升了过程数据质量,实现了钻压、钩载、钻速、转速、扭矩等钻进过程原始数据的在线处理与观测,具有较好的工程适用性,试验应用效果良好,工程试验应用情况见图9。

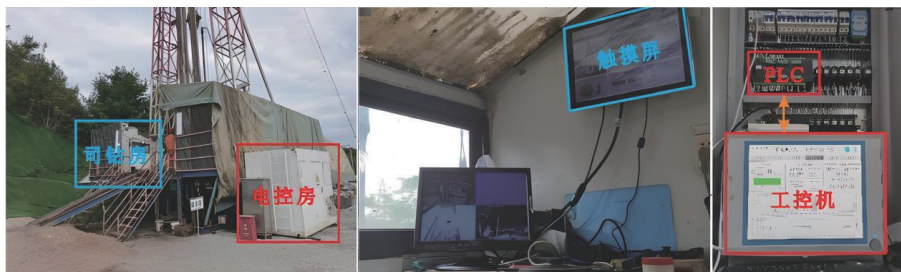


图9 试验应用现场情况

钻速是表征钻进过程效率的关键指标,工程应用孔段具体表现为在0~4 cm/min之间跳变;扭矩是主要反映钻进过程的安全性的核心参数,在工程应用孔段表现为在500~2000 N·m之间变化。通过

本系统的优化,有效地去除了钻速数据中受到地层条件、钻进工艺等不同因素影响而产生的数据尖峰与毛刺,同时很好地抑制扭矩数据的异常突变,有利于高精度预测钻速进而实现钻速优化。试验应用发

现,该系统在对相对变化幅度较大的钻速和扭矩的处理方面,表现更为出色^[22]。

5 结论和建议

(1)特深孔施工在满足施工总体要求的前提下,要充分发挥工艺方法、钻探机具等施工能力,采用大直径开孔,各开次尽可能向深部施工,为应对更深部地层可能出现的复杂情况留有更多余地。

(2)深部复杂地层钻进,要以保证孔内安全为主,发现问题隐患,及时有效解决,坚持预防为主,稳中求进。

(3)HXY-8VB型钻机,可视化程度高,数字控制调节,实现了钻进参数控制由经验值向量化值转变,真正实现了优质高效科学施工,适合特深孔钻探施工。利用传统式机械立轴钻机进行改造升级,可大幅度提升钻机整体施工能力,满足更高施工要求,实现了落后设备资源的进一步整合,提高了闲置设备周转利用率,节约了生产成本。

(4)通过采用加长钻具、防堵内管及新型快速打捞矛,提高了回次进尺长度,有效降低了辅助时间,提高了取心钻进效率,应用效果良好,可进一步推广应用。

(5)深部地质钻探钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理系统的试验应用,为促进钻探工程融合大数据与人工智能技术提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 俞炳,曾庆栋,夏凡,等.辽宁五龙金矿构造叠加晕研究[J].地质与勘探,2020,56(5):898-914.
- [2] 李兆龙,许文斗,秦敏琪,等.辽宁五龙金矿地质特征及矿床成因[J].地质找矿论丛,1987,2(3):31-39.
- [3] 刘桂芝,张维松.辽宁五龙金矿含金石英脉中石英标型特征及其找矿意义[J].贵金属地质,1992(4):214-222.
- [4] 王冬丽,申俊峰,邱海成,等.辽宁五龙金矿黄铁矿标型特征研究及深部找矿预测[J].南京大学学报(自然科学),2019,55(6):898-915.
- [5] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.
- [6] 栾国栋.山东莱州吴一村ZK01科学钻孔钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):36-39.
- [7] 李志国,杨春和.深部地层岩石可钻性与岩石力学特性实验[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(S1):424-427.
- [8] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):1-3,9.
- [9] 田志超,翟育峰,林彬等.西藏甲玛3000米科学深钻施工技术[J].钻探工程,2022,49(3):100-108.
- [10] 陈师逊,宋世杰.中国东部海区科学钻探施工技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(12):1-5.
- [11] 杨芳,陈师逊.深部地质钻探钻孔结构与施工分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):21-26.
- [12] 朱恒银,等.深部岩石钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
- [13] 宋世杰,李晓东,陈师逊.南黄海大陆架科钻CSDP-2井第四系、新近系地层海水冲洗液研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):10-13.
- [14] 田志超,翟育峰,林彬,等.耐高温环保型冲洗液体系在西藏甲玛3000m科学深钻中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(11):15-22.
- [15] 翟育峰,仲崇龙,刘峰.羌塘盆地羌资-14井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):92-95.
- [16] 翟育峰.西藏甲玛3000m科学深钻施工方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):8-12,53.
- [17] 刘振新,翟育峰,宋世杰,等.川西甲基卡锂矿3000m科学深钻关键技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):29-32.
- [18] 董海燕,王鲁朝,杨芳,等.国产CNH(T)绳索取心钻杆在中国岩金勘查第一深钻工程中的应用分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(1):49-53.
- [19] 陈师逊.深部钻探复合钻杆的研究与应用[J].地质与勘探,2014,50(4):772-776.
- [20] 王鲁朝,吴海霞.辽宁五龙金矿区金刚石取芯钻头研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(5):518-522.
- [21] 刘振新,翟育峰,赵辉,等.川西甲基卡锂矿3000m科学深钻施工技术[J].钻探工程,2023,50(4):41-48.
- [22] 甘超,曹卫华,王鲁朝,吴敏.深部地质钻探钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理——以辽宁丹东3000m科学钻探工程为例[J].钻探工程,2022,49(4):1-7.

(编辑 王文)