

# 川西甲基卡锂矿 3000 m 科学深钻高效钻进措施分析

杨芳<sup>1,2</sup>, 曹凡<sup>1,2\*</sup>, 刘振新<sup>1,2</sup>, 翟育峰<sup>1,2</sup>, 田志超<sup>1,2</sup>, 王鲁朝<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:** 位于海拔 4500 m 青藏高原中北部的川西甲基卡锂矿 3000 m 科学深钻 (JSD 孔) 终孔孔深 3211.21 m、施工期仅为 232 d, 创造了青藏高原小口径固体矿产勘查孔深纪录及同类型钻孔全国效率纪录。本文从钻探设备及机具选型、钻探技术优化和施工组织管理等方面, 系统分析了 JSD 孔的钻探效率提升措施。具体措施总结为, 合理选择钻探设备与机具是基础, 采用绳索取心液动锤钻进技术、环保冲洗液技术、孔内事故预防等特定钻探技术及方法应用是关键, 标准化组织管理是保障。JSD 孔高效钻进措施可为提高青藏高原深孔、特深孔施工钻探效率提供借鉴参考。

**关键词:** 深部钻探; 高原钻探; 科学钻探; 钻探效率; 绳索取心液动锤; 环保冲洗液

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0047-07

## Analysis of efficient drilling measures for 3000m scientific deep drilling in Jiajika Lithium Mine, western Sichuan

YANG Fang<sup>1,2</sup>, CAO Fan<sup>1,2\*</sup>, LIU Zhenxin<sup>1,2</sup>, ZHAI Yufeng<sup>1,2</sup>, TIAN Zhichao<sup>1,2</sup>, WANG Luzhao<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** The 3000m scientific deep drilling project (JSD hole) of the west Sichuan Jiajika Lithium Mine is located in the central and northern part of the Qinghai-Tibet Plateau, with a final drilling depth of 3211.21m and the construction period of only 232d, creating a record in the field of small-bore solid mineral exploration on the Qinghai-Tibet Plateau and a national efficiency record of the same type of drilling. This article systematically analyzes the measures to improve the drilling efficiency of JSD hole from the aspects of drilling equipment and tools, drilling technology and methods, construction organization and management. The specific measures are summarized as follows: reasonable selection of drilling equipment and tools is the foundation, specific drilling techniques and methods are the key such as wire-line coring hydraulic hammer drilling technology, environment-friendly flushing fluid technology, hole accident prevention and so on, moreover, the standardized organization and management is the guarantee. The efficient drilling measures of JSD hole can provide reference for improving the drilling efficiency of deep and extra-deep hole construction in the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words:** deep drilling; plateau drilling; scientific drilling; drilling efficiency; wire-line coring hydraulic hammer; environment-friendly flushing fluid

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-11-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.007

基金项目: 南京大学卓越研究计划项目“川西伟晶岩型锂矿科学钻探”; 山东省地矿局科技攻关项目“3000 m 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: 杨芳, 女, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 长期从事深部地质岩心钻探及浅海地质钻探技术、装备研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路 271 号, fangxin0911@126.com。

通信作者: 曹凡, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 土木工程专业, 主要从事地质钻探、地质灾害治理及岩土工程研究工作, 山东省烟台市芝罘区机场路 271 号, 122295247@qq.com。

引用格式: 杨芳, 曹凡, 刘振新, 等. 川西甲基卡锂矿 3000 m 科学深钻高效钻进措施分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 47-53.

YANG Fang, CAO Fan, LIU Zhenxin, et al. Analysis of efficient drilling measures for 3000m scientific deep drilling in Jiajika Lithium Mine, western Sichuan[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 47-53.

## 0 引言

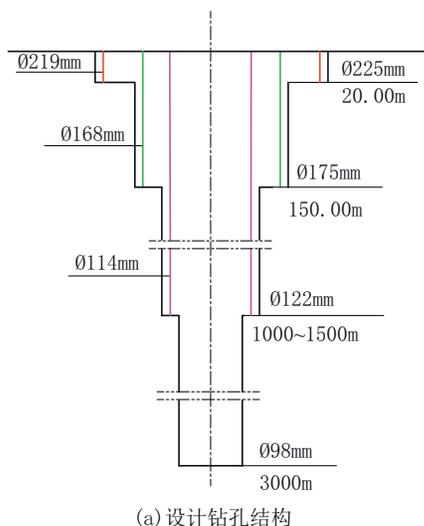
“川西甲基卡锂矿 3000 m 科学钻探”项目来源于南京大学地球科学与工程学院承担的南京大学卓越计划“川西伟晶岩型锂矿科学钻探”项目,山东省第三地质矿产勘查院负责钻探施工。项目要求在甲基卡矿区指定位置,完成设计孔深 3000 m 的科学钻探孔 JSD 孔,详细揭示甲基卡矿区 3000 m 以浅的地质信息。项目于 2020 年 6 月 3 日开钻,2021 年 1 月 21 日终孔,终孔孔深 3211.21 m,终孔孔径 98 mm,累计采取岩心 3202.25 m,岩心采取率 99.72%,创青藏高原小口径固体矿产勘查孔深纪录<sup>[1]</sup>。项目的实施为探索川西伟晶岩型锂矿成矿机理、建立伟晶岩型锂矿创新理论、实现锂矿找矿突破提供有力数据支撑<sup>[2-3]</sup>。

项目位于甘孜藏族自治州雅江县,地处川藏高原东南缘,横断山脉中段,海拔 4500 m,属丘状高原地貌。与内陆相比,高原地理环境与地质条件独特,高寒缺氧、气压低、紫外线强烈,施工环境条件差,橡胶管件、密封件老化快,设备故障率高。同时,施工区地处川西鲜水河断裂西南的甲基卡锂矿矿集区,是中国乃至世界上锂矿资源最集中的地区之一,是我国重要的伟晶岩型稀有金属成矿地区,靠近鲜水河、龙门山断裂带,地层破碎、可能发生地震<sup>[1,3]</sup>。此外,施工区域位于藏民牧区范围内,生态环境脆弱,环保要求高。由于无相关深孔经验可供参考,复杂地层和复杂环境因素对设备、工艺均提出了较高的要求,3000 m 特深孔施工难度较大。钻孔经施工单位精心设计,采用多种钻探关键技术,全孔未发生孔内事故,用时 232 d,创造了同类型钻孔全国效率纪录<sup>[1,4]</sup>。

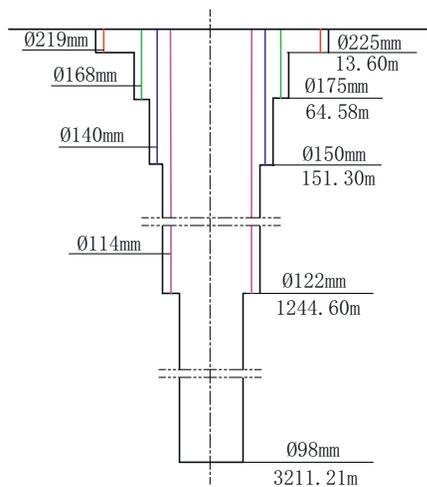
本文从钻孔设计、钻探设备配置、钻探工艺、孔内事故预防与处理、施工组织管理等方面,对 JSD 孔高效钻进措施进行统计分析,为提高青藏高原深孔、特深孔施工钻探效率提供参考。

## 1 钻孔施工概况

JSD 孔初步设计为孔深 3000 m 直孔,终孔直径  $\leq 95$  mm,岩心采取率  $\leq 85\%$ ,含矿段岩心采取率  $\leq 90\%$ ,终孔顶角  $\geq 15^\circ$ <sup>[5]</sup>。钻孔设计为三开结构,根据实际钻遇地层、生产进度情况及地质相关要求,实际增加了一级 150 mm 口径,目的是为深部施工留有余地,终孔孔深 3211.21 m。钻孔结构见图 1。



(a) 设计钻孔结构



(b) 终孔实际钻孔结构

图 1 JSD 钻孔结构示意图

Fig.1 Borehole structure of JSD hole

除孔口管外,钻孔实际为四开结构,各开次质量指标完成情况良好。

孔口管:采用  $\varnothing 175$  mm 单动双管提钻取心钻进至 13.60 m 后,采用  $\varnothing 225$  mm 金刚石钻头扩孔,下  $\varnothing 219$  mm 套管至 13.60 m。用时 2 d。

一开:采用  $\varnothing 175$  mm 单动双管提钻取心钻进至 64.58 m,下  $\varnothing 168$  mm 套管。用时 4 d。

二开:采用  $\varnothing 150/122$  mm“钻扩一体”绳索取心钻进工艺钻进至 151.30 m,下入  $\varnothing 140$  mm 套管。用时 12 d。

三开:采用  $\varnothing 122$  mm 绳索取心钻进工艺钻进至 1244.60 m,下入  $\varnothing 114$  mm 套管。用时 68 d。

四开:采用  $\varnothing 98$  mm 绳索取心钻进工艺钻进至 1310.75 m 后,采用  $\varnothing 98$  mm 绳索取心液动锤钻进至

3211.21 m。用时 146 d。

## 2 钻进时间及钻探效率统计

### 2.1 钻进时间

JSD 孔钻进时间如图 2 所示,计入台月时间为 5568 h(232 d,7.7 台月),台月效率为 415.24 m,全孔平均机械钻速 1.46 m/h。事故及停待时间中,主要为机械事故(470.67 h,占比 8.45%)。JSD 孔全孔未发生孔内事故,故而全孔台月效率整体较高。

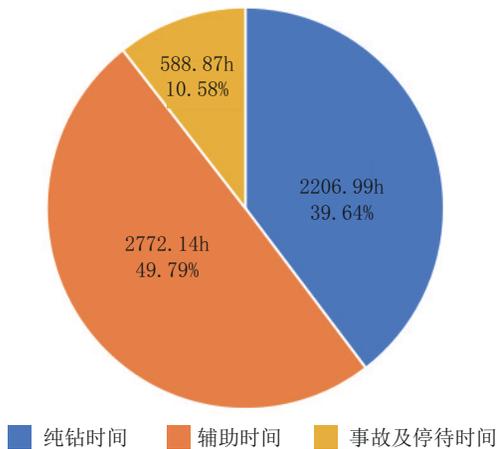


图 2 JSD 孔钻进时间统计

Fig.2 Statistics of drilling time of JSD hole

### 2.2 钻探效率

不同孔段的台月效率和机械钻速如表 1 所示。

JSD 孔全孔机械钻速为 1.46 m/h,台月效率 415.24 m/台月。从表 1 可以看出,JSD 孔全孔机械钻速均较高,其中,三开地层较为完整,采用  $\varnothing 122$

表 1 JSD 孔钻探效率

Table 1 Drilling efficiency of JSD hole

开次	孔段/m	机械钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	台月效率/(m·台月 <sup>-1</sup> )	备注
开孔	0~13.60	1.24	204.00	提钻取心
一开	13.60~64.58	1.50	382.35	提钻取心
二开	64.58~151.30	1.24	216.80	钻扩一体绳索取心
三开	151.30~1244.60	1.42	482.34	绳索取心
四开	1244.60~3211.21	1.49	404.90	绳索取心、液动锤
平均		1.46	415.24	

mm 绳索取心钻进,台月效率最高,为 482.34 m/台月;一开机械钻速最高,为 1.50 m/h,由于工作量小,对整体施工效率影响不大。二开采用钻扩一体绳索取心钻进,边钻边扩,虽然台月效率较低,随着孔深增加,相比同口径提钻取心,仍然具有一定优势。四开在 1244.60~1310.75 m 孔段采用绳索取心钻进,台月效率仅为 180.41 m/台月,且出现了钻头打滑现象,回次进尺较低。为提高钻进效率,经综合考虑,使用了绳索取心液动锤钻进,同时配合加长型内涂层内管,台月效率提高至 422.32 m/台月。四开综合机械钻速、台月效率均处于较高水平,分别为 1.49 m/h、404.90 m/台月。由此可见,根据钻孔实际情况,选择合理的钻探技术方法对提高钻进效率至关重要。

## 3 JSD 孔高效钻进措施分析

### 3.1 钻探设备及机具

#### 3.1.1 钻机及配套设备

特深孔施工钻机选择要在考虑钻机具备设计孔深钻深能力,并有足够余量,能够满足孔内事故处理等要求基础上,综合施工区地形地貌、道路、水源、电力供应、气候等环境条件。本次施工地处高原,根据“大马拉小车”原则,考虑钻机维修、保养和修理方便,选择了 HXY-9 型钻机<sup>[6-8]</sup>。该钻机为国产立轴式钻机,虽然在钻进至 2500 m 以后多次出现故障,但维修方便,能够很好的适应高原环境(见图 3)。

钻塔的使用要考虑其有足够的承载力,原则上钻塔承载负荷应大于钻孔设计孔深及孔径所用钻



图 3 HXY-9 型钻机

Fig.3 HXY-9 drill

具总重力的2倍,在实施3000 m科学钻探工程时,一般采用钻塔高度 $\leq 20$  m的四角式或A式钻塔<sup>[9]</sup>。本项目采用K27-90型钻塔,该钻塔自带两个水箱,兼做冲洗液循环池,实现“泥浆不落地”。

小口径施工时,多采用活塞式往复泵(单缸、双缸、三缸、四缸),现场常用双缸和三缸活塞式往复泵,它们均可输送高粘度、高密度的液体,具有输出特性波动小等特点。为节约能源,深孔钻进时采用BW300、BW320型等大排量泥浆泵作为生产用泵。JSD孔配套BW300/16型泥浆泵,可满足生产需要。

此外,JSD孔前期施工使用柴油发电机发电。有资料显示,与平原地区相比,海拔高度每升高1000 m,内燃机功率和扭矩性能指标下降8%~12%。当海拔 $>4500$  m,发动机功率损失超过50%<sup>[7,10]</sup>。因此,选用采用柴油机时,必须考虑功率损耗问题。因此,本项目在充分考虑高海拔对柴油动力功率损耗较大的前提下,加大了柴油动力机功率,选用了350 kW柴油机。

高原施工时,要充分考虑环境对钻探设备技术性能的影响,适当加大设备能力。实践证明,JSD孔的设备配置很好地满足了高海拔地区深孔钻探施工要求。

### 3.1.2 加长型内涂层内管

提高回次进尺是有效提高钻进效率的方法之一。前期研究表明,提高回次进尺长度,能够减少取心时间,明显提升台月效率<sup>[6]</sup>。此外,由于绳索取心钻进取心内管与岩心间隙小,钻遇破碎地层时,易发生岩心堵塞。JSD孔四开钻进时,采用了加长型内涂层内管<sup>[5]</sup>。与传统取心内管相比,该内管长度4.60 m,内壁经特殊涂层处理,具有很高的光滑度,岩心进入内管时有一定减阻作用,能够降低岩心堵塞内管的概率。JSD孔回次进尺统计见表2。

从表2中可看出,钻孔四开采用加长型内管后,

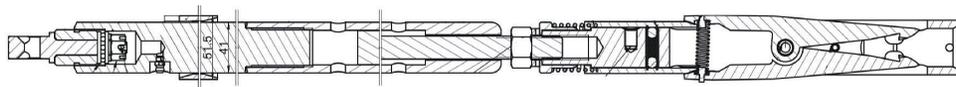


图4 改进型打捞器

Fig.4 Improved overshot device

### 3.1.4 优选钻头

深孔作业在不提钻换钻头技术还未能普及的情况下,若频繁提钻换钻头,随着孔深增加,必然降

表2 JSD孔回次进尺统计

Table 2 Statistics of round trip meterage of JSD hole

开次	孔段/m	回次数	总进尺/m	平均回次进尺/m	备注
开孔	0~13.60	6	13.60	2.27	提钻取心
一开	13.60~64.58	20	50.98	2.55	提钻取心
二开	64.58~151.30	32	86.72	2.71	绳索取心
三开	151.30~1244.60	401	1093.30	2.73	绳索取心
四开	1244.60~3211.21	509	1966.61	3.86	绳索取心
合计		968	3211.21	3.32	

平均回次进尺长度明显提升,结合表1钻探效率情况,随着孔深增加,四开机械钻速、台月效率仍然处于较高水平。加长型内涂层内管的使用,有效提高了回次进尺,降低了辅助时间,同时降低了岩心堵塞,对提高钻探效率起到了重要作用。

### 3.1.3 改进型打捞器

传统绳索取心内管打捞器打捞内管时,易发生内管脱落导致取心失败。随着孔深增加,绳索取心辅助时间随之增长。项目使用的改进型打捞器(见图4),一方面通过减小打捞器横截面面积,降低了打捞器下放时遇液阻力,减少了打捞器下放时间;另一方面通过增加锁止机构,使打捞器在取心时能够牢固锁住内管总成的捞矛头,减少取心失败概率,同时在使用跟管器撞击内管总成以确保内管到位或撞击脱落钻具内的岩心时,能够使跟管器与捞矛头牢固锁住,防止脱落,从而减少钻进辅助时间。据统计,钻进孔深至3200 m进行取心作业时,打捞器下放至孔底时间仅为27 min<sup>[5]</sup>。同时,JSD孔钻进过程中,全孔打捞作业未发生内管总成、岩心撞击器、跟管器与打捞器脱离的情况,从而有效减少了辅助时间,达到提高钻进效率的目的。

低台月效率。因此,选择高效、长寿命的钻头是影响工程进度的重要因素之一<sup>[11]</sup>。JSD孔全孔主要采用金刚石钻头。浅孔段(孔口、一开、二开)各开次

使用金刚石钻头各1个,由于钻探深度小,对项目整体效率影响不大。三开、四开孔段采用绳索取心金刚石钻头。根据钻遇地层预测情况,开展了深孔金刚石钻头优选。根据JSD孔钻头实际使用情况,在相同钻头胎体硬度、水口数量情况下,增加工作层高度可以一定程度上增加钻头寿命,底唇面形状阶梯形较平底形寿命长<sup>[1]</sup>。同时,在钻头参数相同情况下,因制作工艺等原因,不同厂家相同规格钻头寿命也具有一定差异。在实际生产应用过程中,要综合地层、设备和工艺等因素选择。据统计,JSD孔全孔钻头最高寿命153.70 m,四开孔段钻头最高寿命108.69 m。

## 3.2 钻探技术方法

### 3.2.1 钻孔结构

合理的钻孔结构设计,是成功实施深部钻探的重要基础,同时也是选择钻探工艺、孔内护壁措施以及预测钻孔技术经济指标的重要依据之一。对深孔、特深孔施工来说,要综合考虑地质要求、地层情况、前期施工经验、设备和钻具能力、钻头(钻杆)

直径与套管内外直径的配合、孔内是否下放试验测试仪器、钻探技术方法和措施。根据前期特深孔施工经验,采用大口径开孔,对上部地层熟悉条件下,按常规钻孔结构设计。在不能预测下部地层复杂情况前提下,可以增加一级套管结构,即增大一级终孔口径,为钻孔下部施工留有充分余地<sup>[12-13]</sup>。JSD孔施工时,为给深部施工留有余地,特增加了一级口径,以应对深部可能出现破碎严重、冲洗液护壁困难、高应力坍塌掉块等问题。

### 3.2.2 绳索取心液动锤钻进

深孔、特深孔施工时,常采用绳索取心钻进技术,该技术能够有效减少提下钻次数,对提高钻进效率具有重要作用。JSD孔采用该技术钻进四开1244.60~1310.75 m孔段时,出现钻头打滑现象,回次进尺较低,机械钻速明显减小。为解决该问题,采用了绳索取心液动锤钻进技术完成了JSD孔1310.75~3211.21 m孔段施工(如表3所示),该技术在坚硬、“打滑”地层对提高钻进效率具有显著优势。

表3 绳索取心液动锤钻进情况统计<sup>[1]</sup>

Table 3 Drilling situation of wireline coring hydraulic hammer

孔段/m	钻进方法	累计进尺/m	回次数	平均回次进尺/m	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	台月效率/(m·台月 <sup>-1</sup> )
1244.60~1310.75	绳索取心钻进	66.15	24	2.76	1.26	180.41
1310.75~3211.21	绳索取心液动锤钻进	1900.46	484	3.93	1.49	422.32

从表3可以看出,采用绳索取心液动锤钻进技术,是JSD孔能够高效完成的主要因素之一,该技术不仅在坚硬、“打滑”地层能够提高机械效率,还能有效防止岩心堵塞,对提高回次进尺十分有利。JSD孔四开孔段地层可钻性7~10级,部分地层易打滑。与采用绳索取心钻进技术相比,采用绳索取心液动锤钻进技术,其平均回次进尺、机械钻速均有显著提升,台月效率由180.41 m/台月提高至422.32 m/台月,大大提高了钻进效率<sup>[10,14]</sup>。

### 3.2.3 环保冲洗液技术

冲洗液是钻探技术的重要组成部分,被誉为钻探的“血液”。优质的冲洗液要具有良好的润滑性、流变性、抗温性、护壁性,悬浮、携带岩粉强且地表净化程度高。绳索取心钻进因其环状间隙小,对冲洗液的要求较高。JSD孔全孔大部分孔段地层完整,部分孔段裂隙较发育。上部第四系采用了固相

冲洗液,下部主要采用以水解聚丙烯酰胺(PHP)为主要处理剂的无固相聚合物冲洗液。

除选择合适冲洗液配方外,根据孔内情况对冲洗液性能进行及时调整和维护是冲洗液能发挥其性能的重要影响因素之一。在钻进过程中,随时监测冲洗液性能参数,根据孔内情况,对冲洗液配方进行及时调整,以满足特深孔对冲洗液的要求,如:在部分裂隙发育孔段,每回次添加一定量聚乙烯醇;在四开2000 m以深孔段,孔内阻力增加时,每回次添加乳化油,以减少孔内阻力<sup>[15-17]</sup>。

随着绿色勘查理念的普及,冲洗液作为钻探过程中绿色环保重要环节之一,其环保性能及环保处理对钻探工程具有重要意义。JSD孔实施过程中,全孔除尽量减少处理剂种类及用量外,冲洗液循环池、沉淀池、循环槽均采用特制箱体、PVC管等代替,冲洗液循环系统做到“泥浆不落地”。

### 3.2.4 孔内事故预防

特深孔地质岩心钻探施工具有很强的探索性,风险性大,存在大量模糊性、复杂性及不确定性,极易发生孔内事故。浅孔段施工时,孔内事故处理方法、事故处理机具可选择范围广,事故处理方便。深孔尤其是特深孔钻探时,口径小,环空间隙有限,一旦发生孔内事故,处理时间长,且容易发生二次事故。因此,针对孔内事故要以预防为主<sup>[18-19]</sup>。JSD孔实施过程中,从钻孔结构设计、钻具选择、钻进操作等多方面采取了多种措施,如根据钻遇地层情况增加一级口径;遇破碎裂隙地层及时调整冲洗液;采用改进型打捞器配合绳索取心液动锤钻进;钻进时,下入孔内的钻具提前进行检查核实;采取新钻头下钻至孔底前,尽量轻压慢扫,以减少卡钻概率等方。JSD孔实施过程中,全孔无孔内事故发生,这也是该孔高效完成进尺的重要原因之一。

### 3.3 施工组织管理

JSD孔施工组织管理利用了施工单位已成型的项目标准化管理,实行安全基础管理、生产现场工作生活、安全警示、作业现场布置、劳动防护、设备设施、生产作业、技术资料管理等标准化,采用直线型管理模式,实行项目负责制、岗位责任制,施工过程规范、有序<sup>[20]</sup>。此外,高海拔施工具有很多不确定因素,对内陆施工队伍来说,高海拔环境对人体机能会产生不利影响<sup>[21]</sup>。为降低高海拔缺氧、气候恶劣多变对施工人员的影响,施工前进行合理规划,保障医疗、物资等后勤供应,同时选拔身体素质好、具有高原施工经验的施工人员;施工过程中采用“慢节奏”,特别是提下钻等重体力工作时,给施工人员充分的机体调整时间。项目实施过程中,施工人员身体、心理状态稳定,为项目高效完成打下基础。

## 4 结论

(1)特深孔地质钻探时,不确定因素多,深部地层往往无资料参考且与预测存在较大差异,这就要求前期钻探设计要充分考虑各种复杂情况,保证钻探设备能力,钻进技术方法转换方便,储备应对突发复杂情况能力等。

(2)除外在环境条件、地层条件等客观因素不易更改外,深孔、特深孔施工效率主要受设备能力、钻孔结构设计、钻进技术方法、施工组织管理等多

种主观因素影响。实际生产时,可根据实际情况,综合协调各项主观因素,达到提高效率的目的。

(3)经充分实践经验表明,在设备、地层条件允许前提下,尽量使用大口径向深部钻进为下部施工留有充分余地的施工方法对特深孔施工十分有利。同时,降低孔内事故率是提高钻探项目效率的重要方法之一,施工过程中要注意各项操作细节,尽量减少人为因素导致的孔内事故。

(4)在条件允许时,采用新技术、新方法、新机具是提高深部钻进效率的途径之一。根据孔内实际情况,如何选择适用的技术、方法、机具等,需要综合各项因素进行充分研究。如:在坚硬、“打滑”打滑地层,采用绳索取心液动锤钻进技术,配合加长岩心内管,能够有效提高回次进尺,提高台月效率从而提高钻进效率。

### 参考文献(References):

- [1] 刘振新,翟育峰,赵辉,等.川西甲基卡锂矿3000 m科学深钻施工技术[J].钻探工程,2023,50(4):41-48.  
LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, ZHAO Hui, et al. 3000m scientific deep drilling construction technology for Jiajika Lithium mine in western Sichuan [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (4) : 41-48.
- [2] 许志琴,李广伟,张泽明,等.再探青藏高原十大关键地质科学问题——《地质学报》百年华诞纪念[J].地质学报,2022,96(1):65-94.  
XU Zhiqin, LI Guangwei, ZHANG Zeming, et al. Review ten key geological issues of the Tibetan Plateau: Commemoration of the centennial anniversary of Acta Geologica Sinica [J]. Acta Geologica Sinica, 2022,96(1):65-94.
- [3] 许志琴,王汝成,朱文斌,等.川西花岗-伟晶岩型锂矿科学钻探:科学问题和科学意义[J].地质学报,2020,94(8):2177-2189.  
XU Zhiqin, WANG Rucheng, ZHU Wenbin, et al. Scientific drilling project of granite-pegmatite-type Lithium deposit in western Sichuan: Scientific problems and significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(8):2177-2189.
- [4] 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.  
TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin, et al. Drilling technology for 3000m deep scientific drilling in Jiama, Tibet [J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):100-108.
- [5] 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.  
LIU Zhenxin, ZHAI Yufeng, SONG Shijie, et al. Discussion on key technology for the 3000m deep scientific drilling project of Jiajika Lithium Mine in West Sichuan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47 (10) :

- 29-32.
- [6] 杨芳,翟育峰,田志超,等.西藏甲玛3000m科学深钻经济技术指标统计与分析[J].钻探工程,2024,51(1):113-119.  
YANG Fang, ZHAI Yufeng, TIAN Zhichao, et al. Statistics and analysis of economic and technical indexes for 3000m scientific drilling in Jiama, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1):113-119.
- [7] 张进.高原地区钻探工程装备及工艺技术适应性分析[J].地质装备,2005,6(2):7-11.  
ZHANG Jin. Adaptability analysis of drilling equipment and technology in tableland[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2005, 6(2):7-11.
- [8] 张正,朱恒银.深部钻探关键设备选择原则及配置优化[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(9):17-20.  
ZHANG Zheng, ZHU Hengyin. Selection principles and configuration optimization of the key equipments in deep drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(9):17-20.
- [9] 朱恒银.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.  
ZHU Hengyin. Technology and management of deep core drilling[M]. Beijing: Geological Publishing, 2014.
- [10] 徐小兵.提高高海拔地区钻探效率的几点体会[J].地质与勘探,2006,42(3):103-106.  
XU Xiaobing. Experiences on improving drilling efficiency in the high elevation area[J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(3):103-106.
- [11] 王达,何远信.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.  
WANG Da, HE Yuanxin. Geological Drilling Handbook[M]. Changsha: Central-South University Press, 2014.
- [12] 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.  
YANG Fang, CHEN Shixun. Analysis of design and construction of deep geo-drilling boreholes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(11):21-26.
- [13] 孙丙伦.深部找矿钻探技术与实践[M].北京:地质出版社,2013.  
SUN Binglun. Study and Practice on Drilling Technology of Deep Mine Prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [14] 刘秀美,李小洋,孙建华.地质钻探液动冲击回转钻进技术再(新)认识[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):31-35.  
LIU Xiumei, LI Xiaoyang, SUN Jianhua. New understanding of hydraulic percussive-rotary drilling technology in geological drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4):31-35.
- [15] 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):15-21.  
TIAN Zhichao, ZHAI Yufeng, LIN Bin, et al. Application research of high temperature resistant and environment-friendly drilling fluid system in 3000m scientific deep drilling in Jiama, Tibet[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11):15-21.
- [16] 鄢泰宁.岩土钻掘工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.  
YAN Taining. Rock and Soil Drilling and Excavation Engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001.
- [17] 陶士先,纪卫军.地质钻探复杂地层冲洗液对策及应用案例[M].北京:地质出版社,2016.  
TAO Shixian, JI Weijun. Countermeasures and Application Cases of Washing Fluid in Complex Strata in Geological Drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [18] 刘佳丹,张真,李阳.探讨影响岩心钻探钻进效率的因素[J].河南科技,2014(8):33-34.  
LIU Jiadan, ZHANG Zhen, LI Yang. Discussing on the influencing factors of core drilling efficiency[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2014(8):33-34.
- [19] 孙建华,刘秀美,王志刚,等.地质钻探孔内复杂情况和孔内事故种类梳理分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):4-9.  
SUN Jianhua, LIU Xiumei, WANG Zhigang, et al. Classification and analysis on complex cases and accidents in geological drilling holes[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(1):4-9.
- [20] 刘治,赵辉,万鹏,等.4M1E分析法在地质钻探安全管理中的运用[J].钻探工程,2023,50(6):77-84.  
LIU Zhi, ZHAO Hui, WAN Peng, et al. Application of 4M1E in geological drilling safety management[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6):77-84.
- [21] 李振学.高原地区钻探施工组织与技术管理措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):82-84.  
LI Zhenxue. Drilling construction organization and technical management measures for drilling in plateau area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(10):82-84.

(编辑 王文)