

# 空气反循环钻探技术在超高海拔地区的应用

王立新, 聂洪岩

(天津华北地质勘查局核工业二四七大队, 天津 301800)

**摘要:**空气反循环钻探与传统的钻探工艺相比,具有成本低、钻速快、场地要求低、样品可靠无污染等优点。因其以压缩空气为主要循环介质,遇水、冰容易造成淤堵,应用于超高海拔地区空气稀薄、永冻层较厚、地下水丰富等复杂环境一直以来都是难题。为验证空气反循环钻探工艺应用于超高海拔复杂环境的可行性,本文依托西藏巨龙铜矿空气反循环钻探项目,通过选取高功率设备、防水工艺改进以及防冻材料应用等多项举措,成功研究出克服复杂环境因素的整套施工工艺,使其综合效率与平原地区相近,证明了空气反循环钻探技术可以应用于超高海拔地区。

**关键词:**空气反循环钻探;超高海拔;空气稀薄;地下水;永冻层

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2023)04-0064-06

## Application of air reverse circulation drilling technology in ultra-high altitude area

WANG Lixin, NIE Hongyan

(The Nuclear Industry Brigade 247 of Tianjin North China Geological Exploration Bureau, Tianjin 301800, China)

**Abstract:** Compared with the traditional drilling technology, air reverse circulation drilling has the advantages of low cost, fast drilling speed, low site requirements, reliable and non-pollution samples. Because it takes compressed air as the main circulating medium, it is easy to cause blockage when meets water and ice. Therefore, it has been a difficult problem to be applied in the ultra-high altitude area with complex environment such as thin air, thick permafrost and abundant groundwater. In order to verify the feasibility of air reverse circulation drilling technology applied in the complex environment, based on the air reverse circulation drilling project of Julong copper mine in the Tibet autonomous region, this paper has successfully developed a complete set of construction technology to overcome complex environmental factors through the selection of high-power equipment, the improvement of waterproof technology and the application of anti-freezing materials. As a result, its comprehensive efficiency is similar to that of the plain area, and the air reverse circulation drilling technology can be applied to the ultra-high altitude area is proved.

**Key words:** air reverse circulation drilling; ultra-high altitude; thin air; ground water; permafrost

### 0 引言

空气反循环钻探是当今世界范围内最有发展前景的钻探技术之一,主要以快速获取矿物成分和矿体品位为目的,核心是把压缩空气作为钻孔冲洗介质或兼作孔底碎岩动力<sup>[1]</sup>。20世纪60年代,各部门已经陆续开展了空气钻进实验。发展至今,空气反循环应用于地质找矿领域的关键技术已趋于成

熟。与普通岩心钻探相比,空气反循环钻探技术具有如下优点:(1)压缩空气作为动力源驱动,有利于提高硬岩钻进效率;(2)配套设备少,有利于狭小场地施工;(3)空气作为循环介质,对样品污染小;(4)造价低,有利于节约成本<sup>[2]</sup>。

空气反循环钻探作为一种高效的勘探手段,虽有诸多优势,但仍然存在粉尘污染较大、缩分技术

收稿日期:2022-11-03; 修回日期:2023-03-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.009

第一作者:王立新,男,汉族,1974年生,党委书记,高级工程师,工程管理硕士,从事地质勘探管理与技术工作,天津市宝坻区钰华街地质路36号二四七大院, Wlxchina871@sohu.com。

引用格式:王立新,聂洪岩.空气反循环钻探技术在超高海拔地区的应用[J].钻探工程,2023,50(4):64-69.

WANG Lixin, NIE Hongyan. Application of air reverse circulation drilling technology in ultra-high altitude area[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):64-69.

不佳、复杂条件下施工效率低等不足之处。根据流体力学理论,钻进过程中,循环介质携带岩粉的能力与循环介质的密度和上返速度的大小成正比<sup>[3]</sup>。只有当空气上返速度很大时,才能拥有与液体同样的携岩能力。5000 m海拔以上,气压与空气密度仅为平原的59%左右,客观条件增大了空气携岩难度,制约了空气反循环钻探技术的应用。截至本项目施工前,国内暂未发现海拔5000 m以上进行空气反循环钻探施工的先例。

受西藏巨龙铜矿委托,我单位本着产学研用相结合的理念,以该铜矿勘探项目作为空气反循环钻探技术在超高海拔地区应用的依托,验证空气反循环钻探工艺在超高海拔地区实施的可行性,发现并解决施工中的难点问题,为高原地区提供更加高效的钻探手段。项目地点位于西藏冈底斯山脉东余脉郭喀拉日居北麓,最低海拔5290 m,最高海拔5400 m,采用100 m×100 m网度布设反循环钻孔,设计孔深36~220 m。

## 1 地质情况

### 1.1 地层

矿区地处西藏冈底斯多金属成矿带东段,主要出露中侏罗世叶巴组( $J_2y^1$ )。叶巴组广泛分布于矿区,呈近东西向分布,总体呈向北倾的单斜构造。地层倾角 $65^\circ\sim 75^\circ$ ,少数地段大于 $80^\circ$ ,由4个岩段组成,矿区仅见第一岩性段( $J_2y^1$ )。主要钻遇岩性有黑云母花岗闪长岩、流纹质岩屑凝灰熔岩、流纹岩、安山质晶屑凝灰岩、英安质凝灰岩等。

### 1.2 构造

矿区勘探深度范围内褶皱构造较简单,在矿区范围内地层总体表现为向北倾的单斜构造;在矿区南部矿权范围以外,有叶巴组二段( $J_2y^2$ )重复出露,构成向北倒转的背斜构造,倾向 $5^\circ\sim 20^\circ$ 、倾角 $65^\circ\sim 80^\circ$ 。

由于受附近区域性大断裂以及多期次岩浆活动的影响,次级断裂构造较复杂,部分地段形成宽5~20 m不等、长达1000 m左右的断裂破碎带。

区内裂隙主要发育有北东向、近东西向、北西向3组,多分布在近东西向断裂的下盘或两侧,其中北西向和近东西向裂隙为区内主要容矿裂隙。

### 1.3 水文地质条件

矿区附近无人工或大的自然地表水体,地形有

利于自然排水。地下水类型主要有第四系松散层孔隙水、基岩风化带裂隙水、构造裂隙脉状水和碳酸盐岩裂隙溶洞水。松散孔隙水含水层厚度变化大,且分布不连续;碳酸盐岩裂隙溶洞水分布厚度小,且仅部分矿段与碳酸盐岩裂隙溶洞水直接接触;基岩裂隙水是矿区内的主要地下水类型,也是矿床充水的主要来源。

## 2 施工设备选择

### 2.1 钻机选择

海拔越高,空气越稀薄,绝对压力越低,压缩比越高,动力设备的功率损耗越大。因此,选择钻机时除需考虑满足设计生产能力外,还要充分考虑高海拔地区设备功率损耗问题。本项目采用SL600S型钻机,对反循环液压动力头进行改装。钻机名义钻进深度600 m( $\varnothing 89$  mm钻具),钻孔直径105~400 mm,工作风压1.6~6 MPa,风量16~75 m<sup>3</sup>/min,提升力380 kN,最大回转扭矩6500 N·m,最大回转转速105 r/min。

### 2.2 空压机选择

根据施工区域内其他项目经验,空压机在高海拔施工中存在的主要问题为:空气稀薄,空压机的实际供风量低于额定风量,功率损耗大。因此,所选择的空压机要具备更高压缩功率,方能适应复杂的环境条件。经多方对比,选用LUY310-25G III型空压机加装预热装置。该空压机额定风量31 m<sup>3</sup>/min,最大工作压力2.5 MPa,满足高海拔施工要求。

### 2.3 钻具及其他配套设备选择

钻具选择过程中除了需要满足设计孔身结构与反循环回路要求,还应尽可能选用直径大、环状间隙大的双壁钻具,以降低永冻层内钻具与环状间隙热交换速度,降低结冰概率。经综合考虑,采用 $\varnothing 114$  mm双壁反循环钻杆、RE542 $\varnothing 133$  mm边齿复合片钎头进行主体钻孔施工。开孔钻头、正反接头、岩粉收集器等设备均按需配备。

## 3 施工工艺

### 3.1 孔身结构

本次施工钻孔深度 $\geq 220$  m,多数钻孔布置在采矿区域,上部多为破碎的覆盖层。覆盖层开孔后会形成漏斗形孔口,并随着钻进的持续孔口会越来越大,孔口岩渣极易落入孔内,造成卡埋钻<sup>[4]</sup>。因

此, 钻孔上部选择  $\text{O}153$  mm 钻头开孔钻进 3~6 m, 下入  $\text{O}146$  mm 套管保护孔口, 防止地表碎石造成卡钻事故。下部采用  $\text{O}133$  mm 钻头钻进至终孔, 孔身结构示意图见图 1。

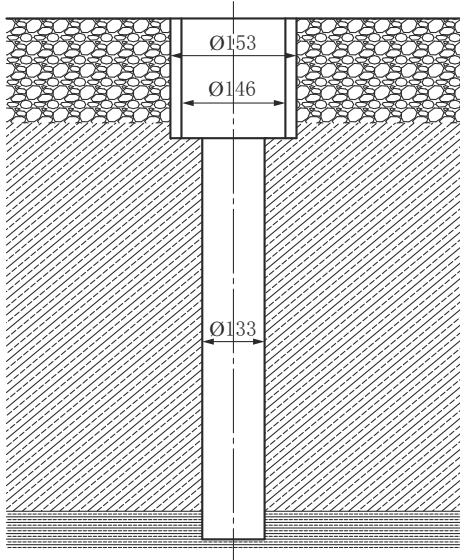


图1 孔身结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of borehole structure

### 3.2 施工参数

转速与钻压主要取决于潜孔锤的冲击频率与地层岩性<sup>[5]</sup>, 施工区地层可钻性等级在 7~9 之间, 适宜转速为 25~35 r/min, 钻压约 12 MPa。空压机风量不低于 16 m<sup>3</sup>/min, 风压 2.0~2.4 MPa。钻进过程中要牢记各深度正常钻进的空气压力。根据空气压力值的大小和出样情况, 及时预见和判断反循环通道是否堵塞及堵塞的严重程度<sup>[6]</sup>。

### 3.3 岩粉采集

(1) 钻机工作时检查孔口装置密封性, 漏风严重时重新安装密封装置。同时检查旋流收集器装置, 使其具有良好的岩粉收集能力, 确保岩粉收集后能够正常钻进。

(2) 矿层取样每米 1 个, 非矿层取样每 2 米 1 个, 取样时将钻头提高孔底 30~50 cm, 上下往复串动将内壁管的岩粉吹出, 待孔口不返岩屑时停机、关气, 待压力下降后将集粉袋从旋流除尘器上解下称量, 记录样品重量、单独装袋、详细编号、专人看护、保管。做到不混样, 不过界采样, 保证岩粉采取率不小于理论采取率的 80%<sup>[7]</sup>。

(3) 将样品倒入搅拌器中, 搅拌 5~8 min, 待混

合均匀后倒出到垫板上, 将岩粉摊平呈正方形, 等分成九宫格状, 在每个格内用取样铲均匀铲取 0.5 kg 左右的岩粉后倒入样品袋, 称重并记录样品重量<sup>[8]</sup>。

(4) 含水的潮湿样岩粉, 单独存放, 晴天后将样品摊开晒干后方按照“搅拌—取样”流程进行处理。

(5) 每个样品采集后, 用高压气流吹净搅拌机内的岩粉, 确保搅拌机内无大颗粒岩矿石和粉尘残留, 避免造成样品污染。

## 4 超高海拔地区施工难点及解决方案

### 4.1 地下水丰富造成钻进困难

富水地层钻进一直是空气反循环钻探的难点, 极易造成卡钻、冲击器淤堵等危害<sup>[9]</sup>。主要原因为: (1) 地下水冲刷, 造成孔壁不稳, 容易出现坍塌、掉块等现象, 造成卡钻事故; (2) 孔内岩粉与水混合顺反循环气流方向进入冲击器, 在活塞间隙较小处拥堵冲击器。

矿区内, 地下水类型主要是基岩裂隙水, 地层渗透系数大, 出水量大。水位在 0~30 余米均有发现, 实测最高水量可达 25 L/min。为避免因地下水量大造成的各类钻探事故, 施工中采取如下措施: (1) 延长空吹时间, 将孔内地下水吹至上部, 减少地下水冲刷孔壁而造成的孔壁失稳风险, 同时也能将原本将要淤堵于冲击器内的岩粉与水混合物冲至地表<sup>[10]</sup>; (2) 减少取样时间, 润滑内管管壁和动力头弯管, 降低地下水与岩粉融合概率, 防止潮湿泥砂堵塞上返通道<sup>[11]</sup>。

根据以上措施, 现场选取 3 组 (6 个) 水文、地质情况相近的钻孔进行对比试验, 将施工过程中的卡钻、淤堵事故及钻进时间等数据详细记录并加以统计, 具体见表 1。

根据表 1 对比数据可发现: 3 个钻孔延长空吹时间、减少取样时间后, 卡钻事故与淤堵情况均未发生, 辅助时间明显降低, 综合钻速明显提高, 基本能够达到正常钻进状态。

### 4.2 永冻层低温造成孔内结冰

永冻层温度和厚度与海拔高度直接相关, 海拔越高、温度越低, 永冻层越厚<sup>[12]</sup>。施工区域平均海拔 5300 m 以上, 永冻层厚度 10~30 m 不等, 在孔深 10~95 m 均钻遇过永冻层。永冻层对空气反循环钻探主要危害有: (1) 钻进至永冻层部位时, 钻孔温度迅速降低, 钻具内水分结冰, 淤堵钻杆环状间隙

表1 采取措施前后钻进情况对比

Table 1 Comparison of drilling conditions before and after taking action

钻孔编号	改进情况	施工孔深/m	钻孔水量/(L·min <sup>-1</sup> )	卡钻次数	处理时间/h	淤堵次数	处理时间/h	纯钻时间/h	取样时间/h	辅助时间/h	施工总时长/h	综合钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
FZK1901	改进前	101	15	1	0.5	1	4.5	8	3.3	1.2	17.5	5.77
FZK1902	改进后	102	16	0	0	0	0	6.5	2.4	0.5	9.4	10.85
FZK1127	改进前	70	18	0	0	1	1.5	5	1.9	1	9.4	7.45
FZK1125	改进后	69	18	0	0	0	0	4.5	1.5	0.7	6.7	10.30
FZK0107	改进前	150	23	1	1.2	2	10	13.5	4.5	1.5	30.7	4.89
FZK0109	改进后	152	24	0	0	0	0	11	3.4	1.0	15.4	9.87

(见图2);(2)潮湿岩粉在冲击器部位遇冷凝结,淤堵冲击器<sup>[13]</sup>(见图3);(3)地层上部地下水流至永冻层段结冰,钻孔内径变小,造成卡钻事故<sup>[14]</sup>。

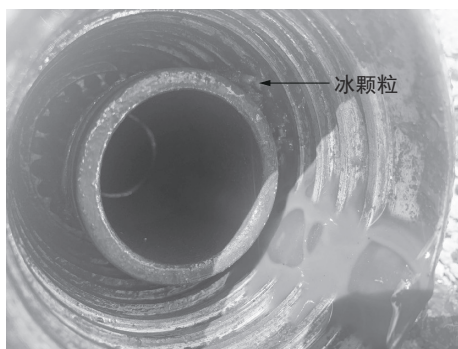


图2 钻杆接头处结冰

Fig.2 Ice in the drill pipe joint

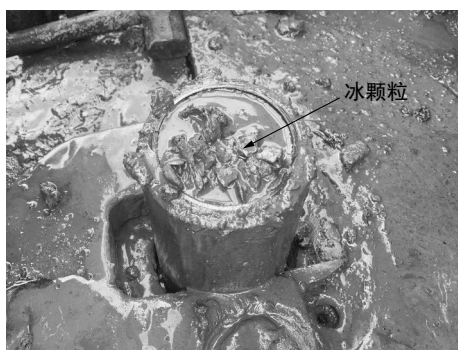


图3 冲击器内结冰

Fig.3 Ice in the impactor

解决永冻层问题主要思路:(1)沿用空吹方式的同时,改进转速、钻压、空压机风量、风压等参数,加快钻进速度,降低地下水结冰造成的缩径风险;(2)减小冲击器活塞尺寸以增大送风通道间隙,减缓冰冻;(3)向孔内加注柴油等材料,润滑冲击器,将冲击器内冻结岩粉快速吹出;(4)随风注入防冻、解冻材料,

降低孔壁与钻具整体环境的冰点<sup>[15]</sup>。经现场实践,前3种方式对解决钻具、冲击器结冰与缩径现象均无明显效果,故将研究重点放在解冻材料应用方向。

据调研,目前市场主要解冻材料有:氯化钠,酒精,乙二醇溶液(各种防冻产品主要成分)等材料。氯化钠溶液解冻效果好,但对钻具腐蚀严重,不可持续;酒精溶液燃点低,易造成气路自燃现象。

乙二醇冰点随着其在水溶液中的浓度变化而变化,浓度在60%以下时,水溶液中乙二醇浓度升高冰点降低;浓度在60%时,其冰点最低为-48.3℃;浓度超过60%后,随着乙二醇浓度的升高,其冰点呈上升趋势。虽然乙二醇溶液解冻效果较好,但在理论上,其有可能与铜离子反应,生成乙二醇合铜络合物,进而影响铜矿品味鉴定。

为确定乙二醇溶液对铜矿品味鉴定的影响,现场选取10份样品,通过实验判断乙二醇对样品质量是否造成污染。根据控制变量原则,每份样品分为两组,其中一组正常存放,另一组加入适量的乙二醇溶液潮湿样岩粉进行处理。晾干后,将两组样品一同送至化验室检测,最终结果见表2。

由表2可看出,10个加入乙二醇溶液的样品与正常样品铜矿品味检测结果完全相同,加入乙二醇对铜矿品味分析并无影响。因此,乙二醇溶液应用于空气反循环钻探解决永冻层问题可行。

根据乙二醇浓度与冰点的关系,选取浓度为20%、40%、50%、60%的乙二醇溶液进行试验。主要过程为:(1)在进风管前段加装雾化器,以满足乙二醇溶液均匀送入孔内需求;(2)选取地质构造类似、矿区剥离程度相近、预估永冻层位相差较小的钻孔;(3)正常钻进,将乙二醇溶液通过雾化器送入孔内,时刻观察冲击器工作情况并记录。具体见表3。

表2 正常取样与乙二醇溶液混合样品检测结果统计

Table 2 Statistical results of normal sample compared with the sample mixed with ethylene glycol solution

样品编号	取样深度/m	是否含有乙二醇	铜矿品味/%
30-1	30	否	1.12
30-2	30	是	1.12
31-1	31	否	1.13
31-2	31	是	1.13
32-1	32	否	1.13
32-2	32	是	1.13
33-1	33	否	1.13
33-2	33	是	1.13
34-1	34	否	1.13
34-2	34	是	1.13
35-1	35	否	1.07
35-2	35	是	1.07
36-1	36	否	1.07
36-2	36	是	1.07
37-1	37	否	1.07
37-2	37	是	1.07
38-1	38	否	1.08
38-2	38	是	1.08
39-1	39	否	1.08
39-2	39	是	1.08

通过以上数据:20%浓度的乙二醇溶液施工的2个钻孔冻结5次,卡钻3次;40%浓度的乙二醇溶液施工的2个钻孔冻结3次,卡钻1次;50%与60%浓度的乙二醇溶液施工的4个钻孔均未产生冻结与卡钻现象。

考虑到乙二醇溶液进入孔内后,会与钻孔内的冰、水混合从而降低溶液浓度。故最终选择雾化器随风注入50%浓度的乙二醇溶液作为防冻剂,进行施工。后续钻孔均采用此配比,无结冰、卡钻现象发生,顺利完成钻孔86个,有效进尺7361.5 m。

## 5 结论

(1)空气反循环钻探技术是一种高效且节约资金的品味控制手段,技术改进后,能够提高该技术在超高海拔地区的施工效率,拓宽其在复杂环境下的应用领域。

(2)科学组织、减少辅助时间、适当延长空吹时间有利于空气反循环钻探技术应用于水量较大地区。

(3)将乙二醇溶液作为防冻剂应用于超高海拔地区空气反循环钻探过程中,能够有效解决钻进过程中的结冰与卡钻事故。但在应用于不同矿产品类勘探过程中,要考虑其对样品污染的可能,并做相应的试验后方可应用。

表3 各浓度乙二醇溶液钻进冻结情况对比

Table 3 Comparison of freezing conditions with different concentration of ethylene glycol solution in drilling

乙二醇溶液浓度/%	钻孔编号	施工孔深/m	乙二醇溶液总用量/L	冻结深度/m	卡钻事故次数	冻结次数
20	FZK5-702	72.00	15	21/45	1	2
	FZK5-703	103.00	21	30/52/71	2	3
40	FZK5-704	92.00	18	37/69	1	2
	FZK5-705	77.00	15	51	/	1
50	FZK5-706	74.10	15	/	/	0
	FZK5-707	75.00	15	/	/	0
60	FZK5-708	106.20	21	/	/	0
	FZK5-709	110.20	22	/	/	0

## 参考文献(References):

- [1] 陆生林,邓梦春,李正前.空气反循环取样钻探与岩心钻探的地质找矿效果对比研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(11):8-11.  
LU Shenglin, DENG Mengchun, LI Zhengqian. Air reverse circulation drilling and core sampling drilling in geological prospecting effects[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(11): 8-11.
- [2] 耿瑞伦,陈星庆,耿燕婷,等.推广应用多工艺空气钻进技术成效显著[J].探矿工程,1998(3):3-6.  
GENG Ruilun, CHEN Xingqing, GENG Yanting, et al. Popularizing and applying multi-process air drilling technology has achieved remarkable results[J]. Exploration Engineering, 1998(3): 3-6.
- [3] 邓梦春,黄晟辉,殷琨,等.空气反循环取样钻探的岩样收集和缩分技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(7):73-76.

- DENG Mengchun, HUANG Shenghui, YIN Kun, et al. Rock sample collection and division technologies for air reverse circulation sampling drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(7):73-76,80.
- [4] 贾庆军. 空气反循环中心取样钻探技术在第四系地层的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008,35(4):23-25.  
JIA Qingjun. Application of air reverse circulation central sampling drilling in Quaternary strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008,35(4):23-25.
- [5] 李锋. 空气反循环连续取样钻探技术在新疆乌什磷矿矿区的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013,40(5):23-25.  
LI Feng. Application of air reverse circulation continuous sampling drilling technology in a mine Xinjiang[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(5):23-25.
- [6] 王跃进, 周裕树, 赵立新. 空气钻进推广及技术配套试验研究[J]. 探矿工程, 1996(4):59-61.  
WANG Yuejin, ZHOU Yushu, ZHAO Lixin. The application of air drilling and the experimental research on technical combination[J]. Exploration Engineering, 1996(4):59-61.
- [7] 黄晟辉, 陆生林, 殷琨, 等. 地质勘探空气反循环钻进技术找矿效果示范应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013,40(3):1-6.  
HUANG Shenghui, LU Shenglin, YIN Kun, et al. Application research on demonstration of air reverse circulation drilling for prospecting in geological exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(3):1-6.
- [8] 邓梦春, 陆生林, 黄晟辉. 空气反循环取样钻探岩心采取率的计算方法探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013,40(9):6-8,13.  
DENG Mengchun, LU Shenglin, HUANG Shenghui. Discussion of calculation method for core recovery percent of air reverse circulation sampling drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(9):6-8,13.
- [9] 郝文奎, 宋宏兵, 康亢, 等. 多工艺空气钻进技术在深水井施工中的应用实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(12):11-14.  
HAO Wenkui, SONG Hongbing, KANG Kang, et al. Application practice of multi-process air drilling technology in deep well construction[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(12):11-14.
- [10] 石荆京, 苏园园, 郑秀华. 空气潜孔锤钻进技术在沉积岩地热深井中的应用[J]. 钻探工程, 2021,48(S1):160-163.  
SHI Jingjing, SU Yuanyuan, ZHENG Xiuhua. Application of air DTH hammer drilling technology in sedimentary rock deep geothermal wells[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):160-163.
- [11] 殷国乐, 王艳丽, 陈浩文, 等. 气举反循环连续取心工艺探索[J]. 钻探工程, 2022,49(2):22-29.  
YIN Guoyue, WANG Yanli, CHEN Haowen, et al. Air lift reverse circulation continuous coring technology[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):22-29.
- [12] 翟育峰. 西藏甲玛3000 m科学深钻施工技术方案[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020,47(6):8-12,53.  
ZHAI Yufeng. Technical proposal for the 3000m deep scientific drilling borehole in Jiama, Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(6):8-12,53.
- [13] 董硕, 贺文博, 曹金娥, 等. 冰层空气反循环快速钻进方法及冰屑运移研究[J]. 钻探工程, 2021,48(1):49-56.  
DONG Shuo, HE Wenbo, CAO Jine, et al. Study on transportation of ice chips in ice drilling with air reverse circulation[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):49-56.
- [14] 李雪峰, 白玉鹏. 空气反循环连续取样施工中卡钻事故的预防与处理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014,41(8):40-45.  
LI Xuefeng, BAI Yupeng. Prevention and treatment of string sticking accidents in air reverse circulation continuous sampling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(8):40-45.
- [15] 丁付利, 段晓, 皮建伟. 东乘公麻冻土地层低温冲洗液研究与应用[J]. 钻探工程, 2022,49(1):104-109.  
DING Fuli, DUAN Xiao, PI Jianwei. Research and application of low-temperature drilling fluid for permafrost strata in the Dongchenggongma area[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):104-109.

(编辑 荐华)