

空气反循环跟管连续取样技术在排土场低品位矿产勘探中的应用

胥虹¹, 朱金乐¹, 雷洁力¹, 于得龙¹, 曹煜²

(1. 天津华北地质勘查局核工业二四七大队, 天津 301800; 2. 紫金矿业集团西北地质勘查有限公司, 新疆 乌恰 845450)

摘要: 本文系统探讨了空气反循环跟管连续取样技术在排土场低品位矿产勘探中的应用价值与技术路径。该技术融合空气潜孔锤破岩、套管跟进护壁与反循环取样等工艺, 适用于复杂松散地层, 具备高效、精准、环保等优势。结合新疆金宝排土场低品位磁铁矿勘探项目, 从设备选型、钻进参数、工艺措施等方面展开分析。结果表明, 该技术显著提升了钻进效率与取样代表性, 平均机械钻速达 24.28 m/h, 岩粉采取率整体高于 60%, 为排土场资源勘查提供了可靠的技术支撑, 具有推广价值。

关键词: 空气反循环; 潜孔锤; 跟管连续取样; 套管护壁; 排土场; 低品位矿产; 绿色勘查

中图分类号: P634 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0279-06

Application of air reverse circulation casing-following continuous sampling technology in low-grade mineral exploration of waste dumps

XU Hong¹, ZHU Jinle¹, LEI Jieli¹, YU Delong¹, CAO Yu²

(1. Nuclear Industry 247 Brigade, Tianjin North China Geological Survey, Tianjin 301800, China; 2. Zijin Mining Group Northwest Geological Exploration Co., Ltd., Wuqia Xinjiang 845450, China)

Abstract: This paper systematically discusses the application value and technical route of air reverse circulation casing-following continuous sampling technology in low-grade mineral exploration of waste dumps. This technology integrated the techniques of air down-the-hole (DTH) hammer rock breaking, casing-following for wall protection, and reverse circulation sampling, and is suitable for complex unconsolidated strata with the advantages of high efficiency, precision, and environmental sustainability. Through the low-grade magnetite exploration project in the Xinjiang Jinbao waste dumps, the equipment selection, drilling parameters, and operational measures are analyzed in this research. The results indicated that this technology significantly enhances drilling efficiency and sampling representativeness, achieving an average mechanical efficiency of 24.28 m/h and an overall rock powder recovery rate of over 60%, which provides reliable technical support for resource exploration at waste dumps and holds significant potential for broader application.

Key words: air reverse circulation; DTH hammer; casing-following continuous sampling; casing wall protection; waste dump; low-grade mineral; green exploration

0 引言

我国多数老矿山历经长期开采, 主体资源趋于枯竭, 而历史堆存于排土场的低品位矿石、表外矿等存量“搁置资源”具备二次开发潜力^[1-2]。随着选

冶技术进步与资源需求上升, 排土场资源的综合勘查与利用既是摆脱老矿山资源枯竭困境、延长矿山服务年限、盘活存量资产的现实需求, 也是响应国家资源战略、践行绿色矿业发展理念的重要举措。

收稿日期: 2026-01-29; 修回日期: 2026-04-16 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.035

第一作者: 胥虹, 男, 汉族, 1987年生, 高级工程师, 岩土钻掘工程专业, 主要从事钻探相关工作, 天津市宝坻区地质路36号, 314934542@qq.com。

引用格式: 胥虹, 朱金乐, 雷洁力, 等. 空气反循环跟管连续取样技术在排土场低品位矿产勘探中的应用[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 279-284.

XU Hong, ZHU Jinle, LEI Jieli, et al. Application of air reverse circulation casing-following continuous sampling technology in low-grade mineral exploration of waste dumps[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 279-284.

排土场是矿山开采中集中堆放剥离岩土的场所。排弃物由大小悬殊的岩块、碎石、黏土、尾矿等混合堆积而成,颗粒级配差异大,孔隙率与渗透系数空间变异极强^[3];堆体呈无序分层堆积,存在软弱夹层、空洞、渗流通道等隐患,无连续稳定的地层结构。传统钻探方法(回转钻探、冲击钻探等)是岩土工程勘察的常规手段,但受钻进工艺限制,在硬岩块、空洞、软弱夹层易造成钻具卡钻、掉钻、孔壁坍塌事故。其钻进时效低、取样代表性差,难以适配排土场复杂地层勘探需求^[4-5]。

空气反循环跟管连续取样技术以高效、地层适应性强、取样准确、绿色环保等特点,为排土场低品位资源勘探提供了新型技术方案^[6-9]。

1 空气反循环跟管连续取样技术原理及核心优势

1.1 技术原理

空气反循环跟管连续取样技术是集成空气潜孔锤破岩、空气反循环连续取样、套管同步跟进等技术的复合钻探工艺。其工作原理如图1所示:空压机压缩的高压空气,经气盒子、双壁钻杆环空、封隔转换接头输送至潜孔锤,驱动跟管钻头破碎岩层;高压空气一路冷却钻头并携带岩屑,另一路经文丘里管射流至套管靴,依托文丘里效应形成局部负压抽吸,孔底岩粉在两重气流作用下,进入封隔转换接头,经排渣孔进入双壁钻杆内管返至地表,最后通过高压软管进入取样缩分装置完成气固分离和岩样收集。套管随钻跟进,有效护壁,保障孔壁安全。

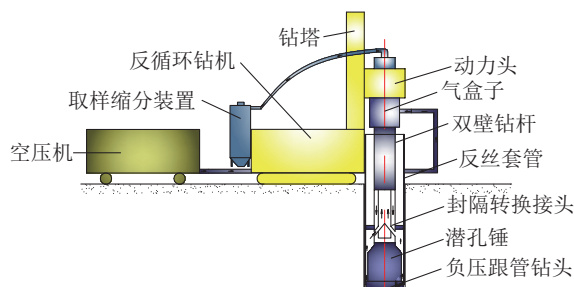


图1 空气反循环跟管连续取样技术原理示意

1.2 核心技术优势

(1)空气潜孔锤破岩,高效环保。高压空气经双壁钻杆的环空输送至转换接头,进入潜孔锤驱动活塞高频往复运动,冲击功经钻头传递至地层实现

冲击破碎;同时钻头在一定钻压下回转扩大破碎范围,形成标准孔壁。破岩效率高,仅以空气作为工作介质,无泥浆污染,绿色环保。

(2)套管同步跟进护壁,取样精准。动力头带动钻具回转,套管同步跟进,套管前端焊接耐磨管靴,套管之间采用反丝连接;套管有效隔离孔壁松散岩土体,防止掉块、坍塌干扰取样,保障样品纯度与深度准确性。

(3)空气反循环取样,高效经济。携屑气流在高压驱动下,经双壁钻杆内管返至地表,形成反循环流场;岩屑随气流进入旋流器实现气固分离,经取样缩分器完成样品的收集。反循环排渣不破坏孔壁,高压气流可冷却润滑潜孔锤与钻头,降低钻具磨损,延长钻具寿命,降低施工成本。

(4)钻具匹配协同,保障深孔钻进。工艺核心为钻具系统尺寸精准适配:①各级潜孔锤外径与套管内径预留 ≥ 8 mm安全间隙,保障活塞运动顺畅;②套管内径与钻头外径预留3~5 mm轴向排渣间隙,满足气流携渣需求;③双壁钻杆内、外管尺寸分别匹配潜孔锤尾部接头与套管内径,保障环空进气通道畅通,实现“破碎-护壁-排渣”同步连续作业。通过多级钻具合理配置,满足复杂地层钻进级次需求。

(5)负压跟管钻头,提高岩屑采取率。工艺创新采用负压跟管钻头,其工作原理为:高压气流分为两路,一路经钻头底部冷却钻头、携带岩粉,另一路经文丘里管射流至钻头与套管间隙,在喷嘴处形成局部负压,强制携粉气固混合物快速进入排渣通道,减少岩粉向地层漏失,显著提升岩屑采取率。

2 工程应用与效果分析

2.1 项目概况

施工区位于金宝铁矿排土场,地层以变粒岩岩屑、岩块混合堆积层为主。主要任务为新疆金宝矿区排土场低品位磁铁矿勘探。设计总工作量3150 m/48孔,全程采用空气反循环跟管连续取样工艺,取样间距1 m,设计岩样采取率 $\geq 60\%$ 。

2.2 施工设备、工具选择

2.2.1 钻机选择

根据工艺需求,选用JLRC500型反循环勘探钻机(图2),为履带底盘装载、全液压驱动、动力头式钻机,其最大起拔力300 kN,最大给进力110 kN,行

程 5000 mm,输出转速(正/反)0~160 r/min,孔口板通孔直径 400 mm,柴油机功率 132 kW。同时为了提高拔管能力,增加了两个直径 130 mm、长度 5 m 的辅助油缸,改进后钻机最大起拔力达 1500 kN。

2.2.2 空压机

空压机作为空气反循环跟管连续取样技术的



图 2 升级版 JLRC500 型反循环钻机

核心设备,需适配不同孔径、漏风、富水等工况风压风量需求。选用 Y1300 型移动螺杆空压机,该机具备风量、气压自动调节功能,保障潜孔锤与反循环系统稳定运行。

主要技术参数:工作压力 1.5~3.5 MPa(可调),工作流量 32.3~36.5 m³/min(可控),额定功率 410 kW。

2.2.3 三级钻具级配

为保障跟管深度达到设计孔深,采用三级钻具级配方案,各级均采用正循环潜孔锤、DZ50 级套管,套管反丝连接,单级设计跟管深度 50 m;第一级采用偏心钻头,后两级采用同心跟管钻头,见表 1。

表 1 三级钻具级配

设计跟管深度/m	钻杆型号(外径/内径×长度)/mm	跟管型号(外径×壁厚×长度)/mm	套管靴型号(外径/内径)/mm	潜孔锤型号(外径)/mm	跟管钻头型号(内径/外径)/mm
0~50	双壁钻杆 89/43×3000	168×4.5×3000	168/155	DHD350R(140)	偏心跟管钻头(140/168)
50~100	双壁钻杆 89/43×3000	146×4.5×3000	146/133	DHD340A(115)	同心跟管钻头(115/146)
100~150	双壁钻杆 89/43×3000	108×4.5×3000	108/99	DHD3.5(90)	同心跟管钻头(89/110)

2.2.4 封隔转换接头

封隔转换接头是连接双壁钻杆与潜孔锤的连接接头,其核心功能:(1)将双壁钻杆间隙内的高压空气输送给潜孔锤做功;(2)引导高压空气携岩屑进入双壁钻杆的内管。各级钻具配置专用封隔转换接头,结构见图 3。

2.2.5 负压跟管钻头

排土场堆积层孔隙率高,常规钻头易出现风量

漏失、岩粉采取率偏低问题。在常规跟管钻头基础上优化设计负压跟管钻头(图 4、图 5)。图 4 为负压同心跟管钻头的工作原理示意图。高压气体经内钻头分为两路,一路冷却钻头、携粉;另一路经斜向文丘里管射流至套管与钻头间隙,形成局部负压,强制岩粉快速进入排渣通道,减少漏失、提高采取率。

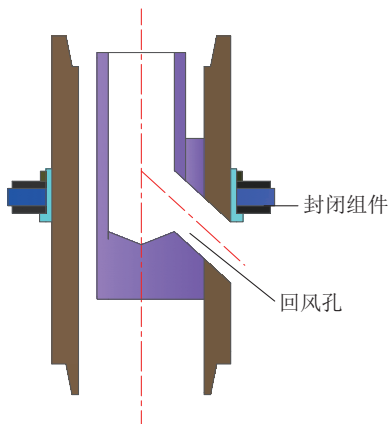


图 3 封隔转换接头示意

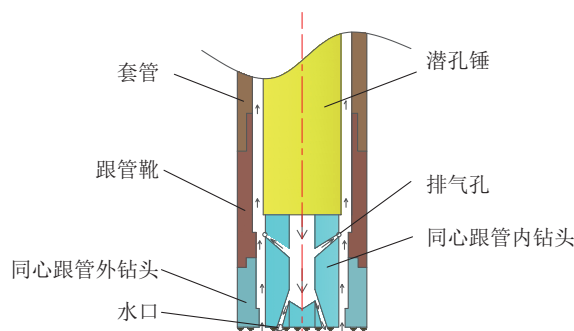


图 4 负压同心跟管钻头工作原理

2.2.6 多功能岩样收集和缩分装置

多功能岩样收集和缩分装置由旋流收集器、储存器、锥形缩分器组成,与钻机一体化安装(参见图



图5 负压同心跟管钻头实物

2),旋流收集器完成气固分离,储存器暂存岩样,锥形缩分器对岩样进行缩分,三个装置之间设置气动阀门,可实现不停钻连续精准取样。图6为现场取样作业照片。



图6 现场取样作业照片

2.3 施工工艺

2.3.1 钻孔结构

施工地层为堆积层,孔壁稳定性差,为确保成孔安全,全程采用三级套管护壁技术。钻孔结构为三开:一开采用 $\text{Ø}168\text{ mm}$ 跟管钻头开孔,钻进至 50 m , $\text{Ø}168\text{ mm}$ 套管随钻跟进;二开采用 $\text{Ø}146\text{ mm}$ 跟管钻头钻进至 100 m , $\text{Ø}146\text{ mm}$ 套管随钻跟进;三开采用 $\text{Ø}110\text{ mm}$ 跟管钻头钻进至终孔, $\text{Ø}108\text{ mm}$ 套管随钻跟进;钻孔验收后,起拔全部套管。钻孔如图7所示。

2.3.2 钻进参数

结合潜孔锤额定参数与地层特性,确定核心技术参数:转速为 $20\sim 25\text{ r/min}$,钻压 $7\sim 15\text{ kN}$,风量 $\geq 20\text{ m}^3/\text{min}$ (自动调节),风压 $2.4\sim 3.4\text{ MPa}$ 。

参数控制:钻进压力按地层松散程度调整,松散层 $5\sim 10\text{ kN}$,块石层 $15\sim 20\text{ kN}$;风压与排量根据需求匹配,避免携粉不足或孔壁扰动。

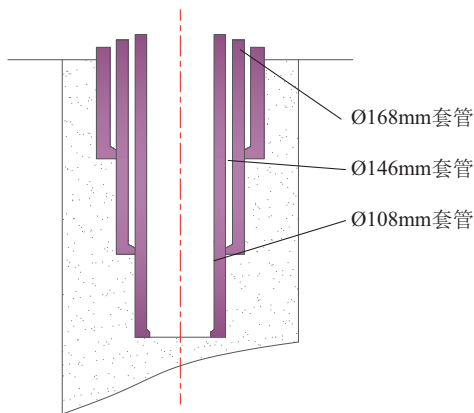


图7 钻孔结构示意图

2.3.3 关键技术措施

为确保该技术高质高效应用,在施工中执行以下关键技术措施。

(1)钻具尺寸与取样深度精准控制。取样间距为 1 m ,套管与钻杆长度均为 3 m ,潜孔锤+转换接头总长度控制在 1.7 m ,首根套管(含管靴)长度为 1.6 m ,作业前将套管3等分标记,钻机机高调至 0.6 m ,通过套管跟进深度,精准掌握取样深度。

(2)防斜打直措施。①在动力头下端短接处安装扶正器,辅助控制钻进过程孔斜情况。②第一根套管安装完毕,开钻前用水平尺检查套管垂直状态,确保垂直开孔。③首根套管仅冲击钻进不回转,当套管靴完全入地后,复测垂直度,合格后再进行冲击回转钻进。

(3)同心跟管钻头提升套管起拔安全性。套管能否全部起拔是该技术应用经济性的关键,同心跟管钻头承载强度高于偏心钻头,可与钻杆同步起拔,依托钻杆高抗拉强度避免套管单独起拔断裂,保障套管回收率。

(4)降低套管跟进阻力措施。为防止漏风,跟管钻进所用的套管与孔壁几乎没有间隙,套管跟进过程容易被大量松散砂粒裹挟卡钻,导致跟进阻力增大,跟进困难或跟断套管情况。要求每根套管跟完后提钻划眼、吹扫孔底沉渣,反复操作至套管跟进顺畅、沉渣排净,再恢复正常钻进。

(5)标准化取样流程。本次取样设备为采选一体设备,将岩粉袋、验样袋固定于对应出粉口,钻进时开启储存阀,关闭取样阀;单回次结束后,关闭储存阀,打开取样阀,岩粉进入样袋中,取下样袋,称重,记录总质量,计算采取率,标记深度,整齐摆放,

待钻孔结束后统一送检。

(6)职业健康防护。噪声和粉尘是该工艺作业最大职业病危险源。为确保作业人员身体健康,全程配备耳塞、防尘口罩、护目镜、工作服、劳保鞋、安全帽等防护用品。

2.4 经济技术指标分析

施工效率是衡量工艺技术经济性的重要指标。本次钻探作业采用的是白班作业制,用时 2 个月共

完成 55 个钻孔,有效工作量 2801 m,其中最深孔 147 m,平均台月效率达到 1400 m/台月。随机抽取的 5 个较深钻孔数据(表 2)统计,平均机械钻速为 24.28 m/h,为常规岩心钻探效率的 10 倍。时间利用率显示(图 8),纯钻时间仅为 15%,85%的时间在进行辅助作业。因此,优化作业流程可进一步提升施工效率。

表 2 施工效率统计

孔号	施工日期	终孔深度/m	钻探作业时间/h					机械钻速/(m·h ⁻¹)
			搬迁安装	纯钻取样	加杆辅助	起下钻更换钻具	起拔、拆卸套管	
ZKE0404	2025-10-04	115.00	2.5	4.5	4.5	9.5	10.2	25.56
ZKW1606	2025-10-09	85.00	3.0	3.5	3.3	5.3	8.5	24.29
ZKW1602	2025-10-11	81.00	2.5	3.5	3.2	5.8	9.6	23.14
ZKW1604	2025-10-19	101.00	3.0	4.0	4.0	9.5	11.5	25.25
ZKE0816	2025-10-22	140.00	3.0	6.0	5.5	9.2	12.2	23.33
平均值		104.40	2.8	4.3	4.1	7.86	10.4	24.28

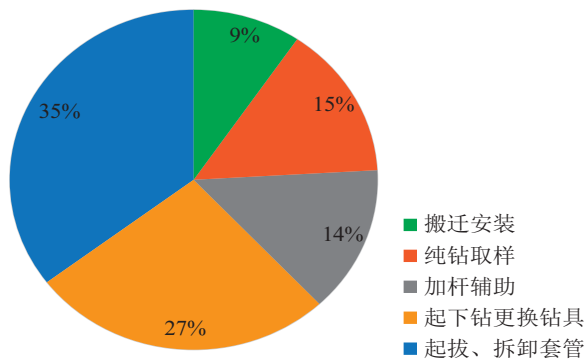


图 8 时间利用率分布

套管折损率是衡量该工艺经济性的核心指标(套管折损率=损失套管长度/施工总进尺)。本次共 3 孔套管未全部拔出,套管损失 126 m,套管折损率为 4.5%,套管大部分起拔回收,有效控制了施工成本,工艺经济性良好。

2.5 取样质量评价

岩样采取率是取样质量的重要指标。本次岩样采取率计算采用质量比计算法,理论比重由地表土试验确定。同一高程的 3 个相邻的浅钻孔(孔距 100 m)的统计数据显示(表 3),岩样平均采取率均>60%,满足设计要求。但深部(>16 m)采取率下降,部分回次不达标。主要原因:(1)排土场深部岩块粒径大、孔隙率高,漏风严重,携渣能力下降;(2)

负压钻头仍未完全解决高压空气与岩粉地层漏失问题,后续可通过钻头结构优化、智能控制系统研发进一步改进^[10]。

本次勘查核心为查明 mFe 品位。将上述 3 个钻孔化验数据整理在表格中进行对比,可知,相邻钻孔同深度 mFe 含量虽呈现波动,但将品位≥3%的位置进行简易区域统计与品位圈定,仍可识别矿化趋势,支撑资源评价^[11-12];同时采用算术平均法可计算区域平均品位,为储量估算提供数据支撑^[13]。有专家认为深部采取率过低,mFe 含量检测数据存在不准确性,不能作为计算矿产储量的依据。但笔者认为:排土场本就是一个矿产资源分布不均匀的无序堆积体,准确勘查本身存在着技术难度。该勘查手段虽存在不足之处,但是该工艺仍是现阶段查明排土场低品位资源最经济高效的勘探手段。

3 结论

(1)空气反循环跟管连续取样技术集成多项钻探工艺优势,在排土场松散地层中表现出良好的适应性,其高效性与取样准确性为低品位资源评价提供了可靠数据基础,是目前该类资源勘查中经济可行的技术手段^[14-15]。当前仍存在深部取样率下降、辅助作业时间长等问题,未来可通过优化钻头结构、开发智能化控制系统等措施进一步改进工艺

表3 岩样采取率及mFe含量化验结果

孔深/ m	ZKW0602		ZKW0604		ZKW0606	
	采取 率/%	mFe/ %	采取 率/%	mFe/ %	采取 率/%	mFe %
1	82.30	3.40	76.70	2.11	72.10	3.02
2	90.90	1.92	87.30	2.28	98.50	1.45
3	68.30	1.40	76.20	3.78	62.00	0.34
4	77.50	2.00	86.60	4.02	57.00	1.01
5	84.30	1.58	72.10	2.45	86.80	1.10
6	68.20	0.85	78.50	1.28	86.00	4.12
7	76.60	1.29	79.30	5.62	63.00	1.78
8	112.20	1.60	89.50	3.50	78.00	0.75
9	102.10	3.51	68.50	3.81	102.20	4.53
10	65.20	11.30	57.60	3.28	93.00	4.80
11	72.00	9.50	84.50	3.19	86.10	4.25
12	68.80	3.30	96.60	3.17	109.00	3.08
13	90.50	8.81	100.20	3.60	102.30	2.30
14	60.20	4.98	86.50	4.28	96.70	1.28
15	53.60	6.39	76.40	1.96	105.00	2.68
16	72.50	3.40	65.30	4.97	75.60	3.90
17	62.10	5.08	52.60	2.08	65.80	1.40
18	53.60	5.19	62.50	5.26	58.90	0.89
19	53.20	2.30	52.40	4.12	65.40	3.00
20	42.10	5.21	34.60	1.13	54.20	3.71
21	32.20	2.56	53.20	5.32	68.50	1.70
22	60.40	1.20	61.10	4.15	21.00	3.50
23	67.50	4.12	35.80	2.12	58.80	0.13
24	64.40	2.14	72.50	3.02	68.40	4.01
25	38.90	1.12	16.35	1.25	35.50	2.45
26	12.14	2.56	53.20	2.02	23.50	0.36
27	37.60	1.14	45.20	2.58	10.24	1.54
平均	65.00	3.62	67.00	3.20	71.00	2.33

方法。

(2)通过设备合理选型、钻进参数优化、操作工艺标准化,可显著提高勘探效率与取样代表性,支撑排土场低品位资源的动态评价与开发规划。

(3)空气反循环跟管连续取样技术可拓展应用于成孔困难的松散覆盖、卵砾石、基岩破碎、漏失严重等地层,突破传统反循环连续取样技术局限,应用场景广阔。

(4)随着装备智能化与工艺复合化发展,该技术有望在大口径、更深孔段及超复杂地层中进一步拓展应用。

参考文献:

[1] 蔡咏欣.我国低品位、难选冶矿产资源勘查和综合利用现状述评[J].科学技术创新,2019,36(2):156-157.

[2] 文涵睿,杨晓军,何剑,等.攀西钒钛磁铁矿采选工艺与二次资源利用现状[J].矿产综合利用,2014(6):10-14.

[3] 曹江涛.第四系土层对钻探的影响及其解决方法[J].西部探矿工程,2015,27(5):45-46,50.

[4] 关振斌.黑毛湾超低品位磁铁矿资源的勘查与开发[J].西部资源,2012(1):107-108.

[5] 计胜利,郭威,张晓光,等.卵砾石地层潜孔锤同心跟管钻具的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(7):52-55.

[6] 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.

[7] 周作明.空气跟管钻进在南苏丹供水井流沙层中的应用实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):36-38.

[8] 王艳丽,许刘万,殷国乐,等.空气反循环钻进技术[J].钻探工程,2025,52(5):156-157.

[9] 石永泉.复杂地层气动潜孔锤跟管钻进最大深度的确定方法[J].地质与勘探,2009,45(4):484-487.

[10] 苏敬达.空气反循环钻探技术在矿山勘查中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):38-42.

[11] 陈勇,陆生林,黄晟辉.空气反循环取样钻探技术应用于金矿勘查的地质效果对比研究[J].钻探工程,2021,48(9):81-87.

[12] 吴松涛,薛宇,于新磊.低品位铁矿资源开发利用保护综合评价:以内蒙古乌拉特前旗低品位铁矿为例[J].地质科学,2024,59(3):841-851.

[13] 俱养社.空气反循环连续取样钻探技术浅析[J].陕西煤炭,2021,40(6):154-157,183.

[14] 张晓昂,郝登峰,刘国卫,等.大直径潜孔锤跟管钻进直排井施工技术研究与应用[J].钻探工程,2022,49(6):130-137.

[15] 胡德玥,博坤,范黎明.贯通式环喷潜孔锤钻头反循环结构参数研究[J].钻探工程,2025,52(S1):136-144.

(编辑 王文)