千米级反循环钻探取样测试一体化技术与装备研发

吴金生[1,2]，刘术杰[1,2*]，贾文彬[3]，博　坤[4]，钱　锋[1,2]，黄晟辉[1,2]
（1.中国地质科学院探矿工艺研究所，四川 成都 611734；2.中国地质调查局智能钻探技术创新中心，四川 成都 611734；3.国家地质实验测试中心，北京 100037；4.吉林大学，吉林 长春 130026）

摘要：空气反循环取样钻探（RC钻探）是以压缩空气作为冲洗介质，以连续高效低成本获取高品质岩屑样为目的的一种高效取样钻探方法，主要适用于干旱缺水、裂隙发育、易漏失等复杂地层钻进。因含水地层岩样缩分难、样品层位界定及代表性差等问题，虽经过多年示范应用，我国空气反循环钻探推广难度仍然很大。针对深孔含水、复杂地层钻进效率低、矿物层位界定准确性低、现场快速测试分析手段少等难题，主要开展了千米级智能化反循环多工艺钻探装备、高强双壁钻杆与反循环钻探工艺、干湿一体化岩样缩分装置及现场快速测试分析系统等方面的研究，已完成了样机加工和室内测试，基本形成千米级反循环多工艺钻探技术与装备体系。期望通过本文的介绍，推动深孔复杂地层RC钻探技术进步。

关键词：千米级；空气反循环取样钻探；反循环多工艺钻机；干湿一体化缩分装置；现场测试分析系统；复杂地层；快速钻探
中图分类号：P634　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0018-08

Development of integrated technology and equipment for kilometer-scale reverse circulation drilling, sampling, and testing

WU Jinsheng[1,2], LIU Shujie[1,2*], JIA Wenbin[3], BO Kun[4], QIAN Feng[1,2], HUANG Shenghui[1,2]
(1. *Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan* 611734, *China*; 2. *Technology Innovation Center for Intelligent Drilling, CGS, Chengdu Sichuan* 611734, *China*; 3. *National Research Center for Geoanalysis, Beijing* 100037, *China*; 4. *Jilin University, Changchun Jilin* 130026, *China*)

Abstract: Air reverse circulation sampling drilling (RC drilling) is an efficient sampling drilling method that uses compressed air as the flushing medium, aiming to continuously obtain high-quality cutting samples with high efficiency and low cost. It is mainly suitable for drilling in complex formations characterized by arid and water-short conditions, well developed fractures, and severe circulation loss. After years of demonstration and application in China, air reverse circulation drilling has faced difficulties in promotion due to problems such as the difficulty of sample splitting in water-bearing formations, and the poor definition and representativeness of sample horizons. In response to the challenges of low drilling efficiency in deep-hole water-bearing complex formations, low accuracy in defining mineral horizons, and shortage of on-site rapid testing and analysis methods, this study focuses on the development of kilometer-scale intelligent reverse circulation multi-process drilling equipment, high-strength double-wall drill pipes and reverse circulation drilling technology, dry-wet integrated rock sample splitting device, and on-site rapid testing and analysis system. Prototype fabrication and laboratory testing are completed, and a kilometer-scale reverse circulation

收稿日期：2026-09-14；**修回日期**：2026-09-29　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.002
基金项目：深地国家科技重大专项课题“反循环钻探取样测试一体化技术与装备研发”（编号：2024ZD1003101）；中国地质调查局地质调查项目“西部地区复杂地层绿色钻探技术支撑”（编号：DD202402054）
第一作者：吴金生，男，汉族，1971年生，正高级工程师，地质工程专业，博士，主要从事深孔复杂地层钻探技术及科学钻探研究与开发工作，四川省成都市郫都区港华路139号，542768373@qq.com。
通信作者：刘术杰，男，汉族，1998年生，助理工程师，地质工程专业，硕士，主要从事地质钻探技术研究工作，四川省成都市郫都区港华路139号，1228869021@qq.com。
引用格式：吴金生，刘术杰，贾文彬，等.千米级反循环钻探取样测试一体化技术与装备研发[J].钻探工程，2026，53(6)：18-25.
WU Jinsheng, LIU Shujie, JIA Wenbin, et al. Development of integrated technology and equipment for kilometer-scale reverse circulation drilling, sampling, and testing[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 18-25.

multi-process drilling technology and equipment system has basically been established. Through the introduction in this paper, it is hoped that the progress of RC drilling technology in deep-hole complex formations can be jointly discussed and promoted.

Key words: kilometer-scale; air reverse circulation sampling drilling; reverse circulation multi-process drill; dry-wet integrated splitting device; on-site testing and analysis system; complex formations; rapid drilling

0　引言

近年来，国内经济对矿产资源的需求旺盛，部分战略性矿产对外依存度居高不下，资源安全形势严峻。随着新一轮找矿突破战略行动的深入推进，我国矿产资源勘查正迎来关键技术装备升级的关键时期。在此背景下，既具备高效钻进能力又能降低综合成本、减少环境扰动的空气反循环取样钻探（简称RC钻探）技术，具有天然的优势，主要适用于干旱、缺水、裂隙发育、硬、脆、碎、坍塌、漏失等地层钻进[1]，尤其在西北缺水地区及生态敏感区域，无需用水作业的空气反循环技术可有效兼顾找矿效率与绿色勘查要求。

空气反循环取样钻探是以压缩空气作为循环介质，以连续高效低成本获取高品质岩屑样为目的的一种钻探方法[2-3]，其核心原理是通过双壁钻杆的环形间隙将高压空气输送至孔底驱动潜孔锤碎岩，岩屑随中心通道高速气流上返至地表旋流取样器，实现钻进与取样的同步连续作业[4]，可用于水井钻探[5]、地质勘探，获取更真实的矿体品位[1]、层数和厚度等数据。与常规岩心钻探相比，钻进效率可提高3～10倍，勘探成本降低60%以上[6]。

国外空气反循环钻探技术的应用是寻求取心钻探与取样钻探在找矿勘探应用中的一种平衡，浅部勘探主要采用取样钻探，深孔勘探采用取样钻探与金刚石岩心钻探相结合。不同国家对岩心与岩样在找矿勘查中接受的程度不同，取样钻探工程量在世界各国矿产勘探中的占比差距很大，澳大利亚、美国等国家RC钻探工程量占比较大。其中澳大利亚早在2000年代RC钻探最大孔深已超过700 m[6]。

国内反循环钻探技术研究始于20世纪80年代，主要集中于反循环钻机及钻具[7-11]、反循环岩心采取率[12]、岩屑运移[13]、反循环钻探工艺[14]等研究。历经数十年发展，自主研发的贯通式潜孔锤反循环连续取样钻探技术集高效碎岩、全孔反循环、不停钻连续获取岩矿心于一体，国产多工艺自动化钻机的研制取得了积极进展。岳永东等[10]研制了TGQ-200RC型多工艺自动化钻机，该钻机以空气正/反循环取样、水力反循环取心、金刚石回转钻进等多工艺集成为核心，在内蒙古阿鲁科尔沁旗完成了孔深201 m的实钻试验，RC钻进机械钻速12～18 m/h，岩样采取率≥90%，为国内浅层钻探装备的自动化升级提供了有益借鉴。胡德玥等[11]通过系统的数值模拟与试验研究，对贯通式环喷潜孔锤钻头反循环结构的11项关键参数进行了系统分析。然而，我国空气反循环钻探因含水地层岩样缩分难、样品层位界定及代表性差等问题，以及受限于地质对岩心与岩样接受程度的差异，RC钻探国内接受程度仍然较低，最大钻深未超过500 m，与国外相比存在较大差距。

针对矿区千米级含水、硬岩、多变等复杂地层排屑困难，含水地层矿物层位界定和岩样缩分难，钻探效率低等问题，开展了千米级智能化反循环多工艺钻探装备、高强钻具系统与反循环钻探工艺、岩样缩分及快速测试分析系统等方面研究与应用示范，形成千米级反循环多工艺钻探技术与装备体系，解决复杂工况反循环深孔快速钻探取样测试一体化问题，实现高效钻进取样和现场快速测试分析。

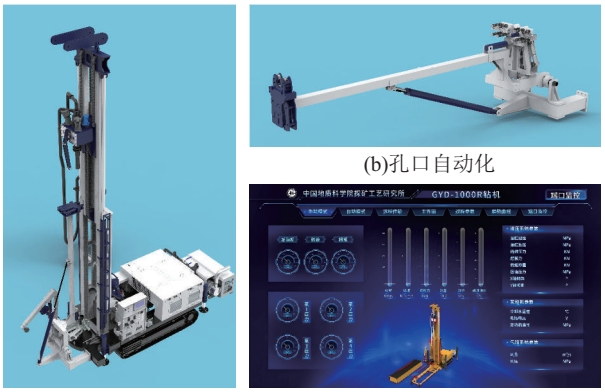
本文重点介绍千米级反循环钻探取样测试一体化技术与装备研发情况，以便共同探讨与推动深孔复杂地层RC钻探技术进步。

1　千米级反循环钻探装备

开展GYD-1000R型智能化反循环多工艺钻机、钻进参数监控系统（数字孪生系统）和孔口自动化作业装置的研制，基本形成一套千米级反循环多工艺取样钻探装备，如图1所示。

1.1　智能化反循环钻机研制

千米级反循环多工艺钻机整体设计如图1(a)所示，主要包括多功能动力头、给进系统、液压系统、履带平台总成、发动机系统、反循环孔口装置

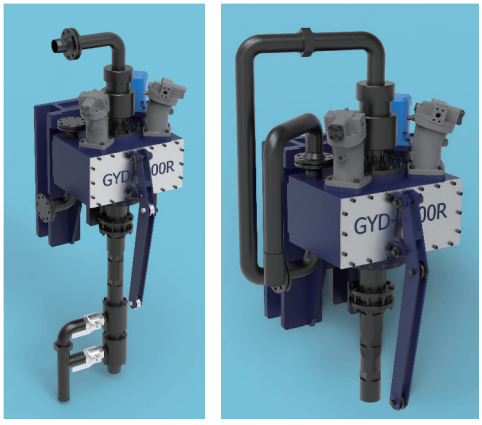


(a)反循环钻机 (b)孔口自动化 (c)钻进参数

图1 千米级反循环多工艺钻探装备

Fig.1 Kilometer-scale reverse circulation multi-process drilling equipment

(图2a)、绳索取心孔口装置(图2b)等七大模块。千米级反循环多工艺钻机同时满足空气反循环钻探、气举反循环钻探和绳索取心钻进三种工艺要求。



(a)反循环孔口装置 (b)绳索取心孔口装置

图2 反循环多工艺钻进孔口装置

Fig.2 Reverse circulation multi-process drilling rig-floor unit

空气反循环取样钻探需低转速大扭矩,绳索取心钻进需高转速小扭矩,根据不同钻进工艺需求,钻机动力头应具备不同的钻进功能。千米级反循环多工艺钻机主要性能参数如表1所示。

1.2 孔口自动化装置研制

为降低工人劳动强度,提高作业效率,开展孔口作业自动化装备研究。孔口自动化作业系统主要包括钻杆库、提吊、自动加杆、夹持、拧卸和下放机构等部分,替代传统人工操作,降低劳动强度、提高效率和安全性。运动控制系统可实现6 m单根加

表1 千米级多工艺钻机主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of the kilometer-scale multi-process drill

钻进工艺	性能参数		指标值
反循环钻进(气举反循环)	最大钻孔深度/m		1000
	钻孔直径/mm		Ø112～Ø610
	给进系统	提升力/kN	500
		加压力/kN	80
	动力头	回转速度/(r·min^{-1})	无级调速
		最大扭矩/(N·m)	22000
		行程/mm	6800
绳索取心钻进	最大钻孔深度/m		1500
	钻孔直径/mm		Ø76～Ø172
	最高转速/(r·min^{-1})		650(无级调速)
	绳索绞车	提升力/kN	30
		容绳量/m	1500(Ø6 mm)

接、孔口拧卸及钻杆摆放等工序的自动化操作,研制的与反循环动力头钻机相适应的自动化移摆管系统如图3所示,外形尺寸(长×宽×高):5500 mm×1600 mm×1400 mm。

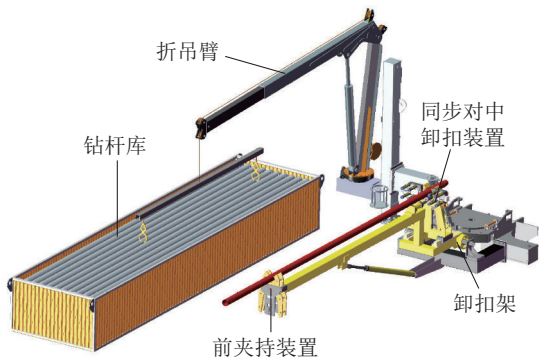


图3 孔口自动化作业设备

Fig.3 Automated rig-floor equipment

孔口自动化作业系统具有一键控制、自动移摆管、加减钻杆、快速拧卸、钻具称重、自动记忆、浮动压力与速度控制、回转速度与扭矩调节等功能。

1.3 钻进参数监控系统研究

为监控钻机运行和孔内钻进安全,开展钻进参数、钻机运行参数实时采集、保存和远程传输等数字孪生系统研发。钻进多参数可视化系统由硬件、软件两部分组成。利用精准外部信号采集装备和PLC自动化控制技术,对钻机工作状态、运行参数进行实时监控,并通过系统中的人机界面进行显

示,方便操作人员随时掌握设备运行参数,并能根据采集到的数据通过软件程序逻辑运算与比较,适时进行辅助控制或者根据设置进行自动控制,对钻机的工作状态、动作效果进行调整。

以工业电脑为核心,通过监控屏的以太网接口与中央处理器通过Modbus-TCP协议读取采集的压力、温度、倾角、速度等参数,发动机数据通过J1939转Modbus-RTU网关连接触摸屏,读取相关的发动机参数,位移通过编码器的RS485接口连接触摸屏直接读取,显示界面参见图1(c)。

2　反循环钻探工艺

目前,国内外均未实现千米级空气反循环取样钻探,本文开展了双壁钻杆材质强度分析研究,提高其服役的安全性和可靠性;根据千米级反循环多工艺钻探情况基本确定为两种钻孔结构设计,钻进工艺采用空气反循环、气举反循环和绳索取心钻进,形成三种钻孔结构设计及钻探工艺组合,优化钻具组合和钻进工艺参数,优选空压机、增压机等设备,形成一套千米级反循环多工艺高效绿色钻探工艺。

2.1　反循环钻探工艺研究

经过研究,千米级反循环多工艺钻探钻孔结构设计及钻探工艺初步确定为三种方案。

方案一:一开采用Ø175 mm反循环钻头或正循环钻头开孔,空气潜孔锤反循环钻进或正循环跟管钻进穿过覆盖层,下入Ø168 mm套管,封隔上部覆盖层;二开考虑钻头外径磨损,依次采用Ø156、Ø152、Ø146、Ø140、Ø137 mm反循环钻头向下钻进,如图4(a)所示,每个钻头计划钻进200 m,反循环钻至1000 m完钻。

方案二:一开采用Ø175 mm反循环钻头或正循环钻头开孔,空气潜孔锤反循环钻进或正循环跟管钻进穿过覆盖层,下入Ø168 mm套管,封隔上部覆盖层;二开采用Ø156、Ø152、Ø146 mm反循环钻头依次向下钻进,每个钻头计划钻进200 m,根据地层情况实时调整钻孔深度,若钻遇含水、复杂地层无法钻进时,下入Ø127 mm套管,下入深度根据地层情况确定;三开再采用Ø115、Ø112 mm反循环钻头钻进至1000 m,如图4(b)所示。

方案三:采用绳索取心钻进。钻遇深孔富水复杂地层时,无法采用空气反循环钻进,或难以达到地质目标要求时,在方案一或方案二钻孔结构中,下入Ø114 mm或Ø91 mm技术套管后,采用绳索取心工艺钻进至设计深度。绳索取心主要采用Ø96 mm或Ø76 mm口径钻进目标层或下部地层。

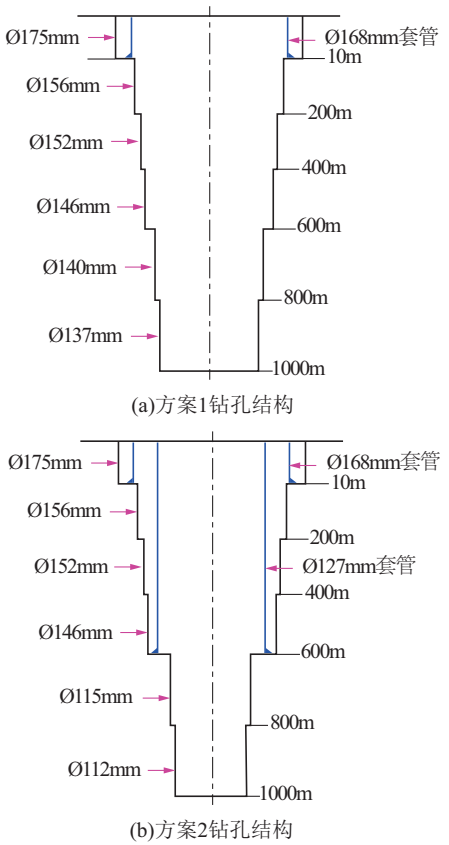


图4　反循环钻孔结构设计

Fig.4　Reverse circulation drilling structure design

千米级反循环多工艺钻进中,不同工艺的应用场景不同,空气反循环钻探主要应用于干孔、含水地层不影响钻进效率场景;气举反循环钻进主要应用于富水地层且冲击器工作效率低的场景;绳索取心钻进主要应用于目标层钻进,或RC钻探难以达到地质设计时的场景。

钻具组合:RC钻探采用两种钻具组合,反循环钻头+Ø130 mm贯通式潜孔锤+Ø114 mm双壁钻杆组合,无法钻进时,下入Ø127 mm套管,钻具组合采用反循环钻头+Ø108 mm贯通式潜孔锤+Ø102 mm双壁钻杆,根据孔斜情况可以添加加重钻杆与扶正器进行防斜。气举反循环钻进采用牙轮钻头+Ø102 mm单壁钻杆+气水混合器+Ø114 mm双壁钻杆;绳索取心钻进主要采用Ø96 mm钻头+Ø96.5 mm扩孔器+外管总成+Ø91 mm钻杆。

钻进规程参数[15]：RC钻探钻压可按钻头直径0.5～0.8 kN/cm计算；转速为20～50 r/min；每10 m水柱需增加0.1 MPa供给风压，以平衡水柱压力；双壁钻杆内部上返速度＞15.24 m/s。气举反循环钻进钻压可按钻头直径8～10 kN/in计算(1 in=25.4 mm)，转速为20～80 r/min。绳索取心钻进钻压8～15 kN，转速250～400 r/min。

2.2 钻杆及器具研究

针对高强双壁钻杆，主要开展钻杆材质的研究。通过改善双壁钻杆材质、管材表面处理等技术，提升钻杆柱强度、安全性和可靠性。空气反循环钻杆主要采用Ø114 mm双壁钻杆，钻杆钢级由原来的R780改为S135，钻杆长度为6 m，取样管通孔直径为Ø50 mm，钻杆采用专业厂家定制。

反循环潜孔锤选择能量消耗低、冲击功大、能量传递效率高、钻进效率高、排屑能力强的潜孔锤，主要优选RC56和1080RC两种规格。反循环钻头从大到小依次选用Ø156、Ø152、Ø146、Ø140、Ø137 mm等，钻头底唇面采用凹陷结构，有利于反循环岩样上返；辅助设备器具主要包括钻杆车、拔管器、拆卸台、反循环清孔装置和钻杆提引器等。

2.3 配套设备的选择

空气反循环钻探设备除钻机外，还包括空压机、增压机、泥浆泵和辅助器具。

采用国Ⅲ高原型双级压缩柴油移动式空压机，排气量＞30 m^3/min，排气压力＞2.4 MPa，考虑千米级深孔，水柱压力过大，空气被严重压缩，上返流速低，岩样上返困难，计划配备两台空压机。增压机组采用国内橇装的方式，定制一台2VF-2.5/24-100型、微油润滑、风冷、往复式活塞增压机，进气量＞60 m^3/min，最大增压能力达10 MPa，具有耗能少、噪声低、振动小、可靠性高、操作简便等特点。泥浆泵选择地质泥浆泵，可满足绳索取心或处理孔内事故需求。

2.4 复杂工况处理措施

钻遇深部含水、复杂地层时应采取以下对策与措施：

(1)增大风量和风压。钻遇深部含水层时，岩样混合物上返的中心管内液柱压力大，空气被压缩，中心管岩样混合物上返流速降低，携岩能力差，钻进效率低，增加一台相同规格的空压机并联。若空压机的压力难以平衡管内液柱压力，岩样无法上返，还需增加一台10 MPa的增压机；通过增加风量和风压，可提高钻进效率和携岩能力，同时可使部分地下水通过钻杆外环空排出地表。

(2)强力吹孔。出风口风量变小、钻机回转阻力上升、压力表高于正常值时，应上提钻具进行强力吹(清)孔，仍无法畅通时，应加接反吹接头，增大风量和压力，采用正循环清孔，适当添加水或泡沫，直到堵塞解除，方可继续钻进。

3 岩样缩分及快速测试分析系统

国内空气反循环钻进以压缩空气作为钻孔冲洗介质，实现了“无水钻探”。深孔含水地层取样代表性差，快速缩分与现场测试难以兼顾，制约了空气反循环钻探技术的推广应用[3]。开展干湿一体化岩样旋转缩分装置研究、小型化矿物元素瞬发伽马中子活化分析仪(PGNAA)物理设计和高计数率电子学读出系统设计，构建野外一体化实验室，形成实时开展分析测试的野外移动实验室。

3.1 干湿一体化岩样缩分装置

针对国内空气反循环钻探含水地层岩样缩分存在的问题，设计了一种体积紧凑，集固液分离、干湿兼容、比例可调、现场快速分析于一体的岩样缩分装置，可满足空气反循环钻探在干旱缺水与含水交替地层下的连续取样需求，并能保障缩分精度、层位界定和样品代表性。

干湿一体化旋转缩分装置集成旋流分离、沉降、混样、旋转缩分等多级模块，分离路径自上而下单向流动，降低前一段样品残留混入后一段样品的可能，由此分别给出两种工况下干式和湿式岩样运动缩分的工作原理。干式地层工作初始状态为静置存样室上部阀门开启，下部阀门关闭；旋转缩分时下部阀门开启，上部阀门关闭。湿式地层工作初始状态为静置存样室上部阀门和下部阀门同时开启，为避免水量过大无法缩分，旋转缩分装置保持回转，实现均匀缩分。

缩分装置整体设计分为旋流分离、静置沉降和旋转缩分三个部分，由旋流室、静置存样筒和旋转缩分器等组件锁扣密封连接组成，便于拆卸维修。旋流室内含1/4圈陶瓷衬套；静置存样筒由电磁阀、压杆、联轴块、连接板组成，通过空压机联动控制；旋转缩分器由旋转波轮、旋转收集盒、驱动电机和回转轴承组成，可实现无级调速。分别通过干式缩

分和湿式缩分两种控制方式，完成多种工况下的缩分采集，如图 5 所示。

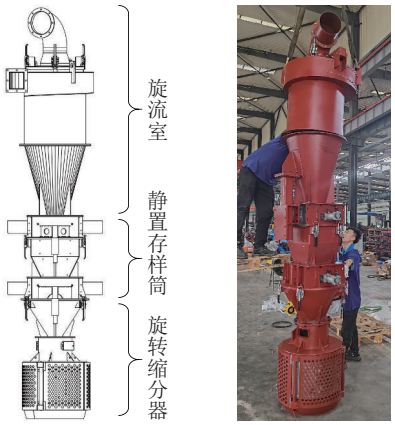


图 5　缩分装置示意及实物

Fig.5　Schematic and physical diagram of the sample dividing device

干湿一体化岩样缩分装置关键参数根据钻进速度 10 m/h、钻孔直径 150 mm、体积膨胀系数＞5 来设计。总高度 3300 mm；进气管 Ø321 mm×Ø 151 mm，排气管直径 219 mm；旋流室筒体直径 570 mm，筒体高度 673 mm，锥体高度 668 mm；静置存样筒体直径 450 mm，高度 360 mm；旋转缩分器旋转速度 0～95 r/min，无级调速，设三个采样盒。

3.2　现场快速测试分析系统

为满足野外矿产资源快速、原位、无损分析的需求，开发了一款基于瞬发伽马中子活化分析（PGNAA）技术的小型化、低功耗、高可靠性的元素分析仪器系统，在野外勘查现场，可实现对 15 种以上元素（Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Pb、Zn、Cd、Co、Ag、S、U、Hf）及矿物含量的实时快速测试分析，测量精度均优于 0.1%。突破了传统 PGNAA 设备庞大、笨重、仅适用于实验室环境的局限。

仪器物理设计采用模块化理念，系统分为中子源项模块、反射模块、样品模块、慢化模块、屏蔽模块，各模块之间的物理布局关系和实物如图 6 所示。以 D-T 中子发生器、BGO 探测器为核心部件，针对镍矿样品，对慢化体、反射倍增体及探测器屏蔽体等参数进行模拟优化设计。

目前，PGNAA 测量样机已具备开展后续测试的条件，用于无人化作业的输送与伸缩机械臂等自动化接口部件已完成方案设计，处于待加工与联调阶段。

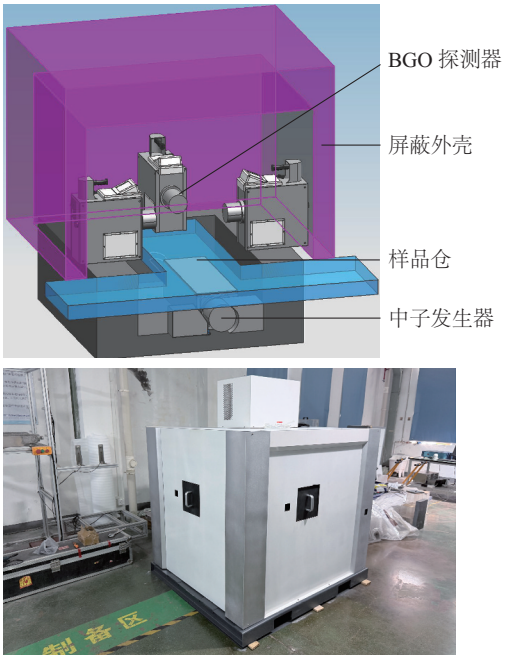


图 6　元素分析仪器总体结构及实物

Fig.6　Overall structure and physical diagram of the elemental analyzer

3.3　野外一体化实验室设计

实验室以可移动的集装箱为主体，配置瞬发中子活化多元素分析仪，实现岩石、土壤等样品的现场直接、多元素快速测试；配套布设台式 X 荧光光谱仪，用于样品的精细化定量分析与结果校核；通过传送带系统实现钻探岩心与岩样在各功能单元之间的连续、高效传输，减少人工干预；同时引入电子光学显微镜，满足岩石学、矿物学快速鉴定与蚀变特征识别需求。上述仪器装备在空间布局、流程衔接和安全防护等方面已完成系统化设计，移动实验室的外廓尺寸为 6.3 m×3.0 m×3.0 m，如图 7 所示。

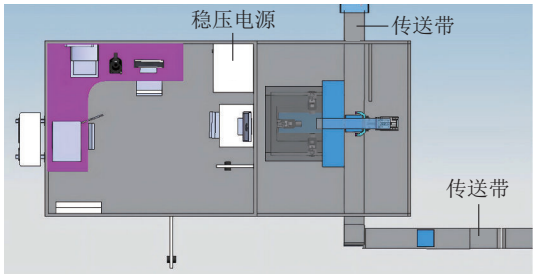


图 7　野外实验室平面设计

Fig.7　Floor plan of the field laboratory

4 技术装备整体研究及下一步工作计划

目前，完成了GYD-1000R型千米级智能化反循环多工艺钻探装备设计与样机试制；开展反循环钻杆的材质研究，钻杆钢级由原来的R780改为S135，完成了高强双壁钻杆定制和反循环钻探工艺设计；完成了干湿一体化岩样旋转缩分装置和小型化PGNAA矿物元素分析仪器设计与样机试制；形成了一套千米级反循环多工艺钻探取样测试一体化技术装备，如图8所示。



图8 反循环钻探取样测试一体化装备

Fig.8 Overall diagram of the integrated reverse circulation drilling, sampling, and testing system

通过图8可以看出，反循环钻探时，两台空压机并联产生气体进入一台增压机，气体增压后进入钻机输入端，通过钻机管路进入回转动力头及气盒子，再进入双壁钻杆进行空气反循环取样钻探；孔内上返出来的岩屑样连接进入缩分装置，岩屑样经缩分后通过输送带进入现场快速测试分析系统进行分析。绳索取心钻进时，泥浆泵循环泥浆进入钻机输入端，通过钻机管路进入回转动力头，再进入绳索取心钻杆进行取心钻进。

反循环钻探取样测试分析一体化技术与装备体系解决了复杂工况反循环深孔快速钻探取样测试一体化的问题，可实现高效钻进和现场快速测试分析。

下一步计划在云南会泽铅锌矿区、云南毛坪铅锌矿区、贵州硝洞铅锌矿区、云南永昌铅锌矿区、云南兰坪铅锌矿区等五个矿区开展岩心钻探和反循环钻探应用示范，收集岩心钻探施工效率、岩矿心采取率、施工周期、施工成本等技术经济指标，进行数据对比分析研究；收集空气反循环钻探技术经济指标和工艺技术流程，对技术经济指标进行对比分析研究，编制《固体矿产空气反循环钻探规程》，便于更好地推广应用。

5 结论

（1）开展GYD-1000R型千米级反循环多工艺钻机、钻进参数监控系统和孔口自动化作业装置的研发、样机试制与室内测试，形成一套千米级反循环多工艺取样钻探装备。

（2）开展高强双壁钻杆材质优化和定制，完成了空气反循环钻探工艺和绳索取心工艺优化设计，可实现千米级反循环多工艺钻进。

（3）开展干湿一体化岩样旋转缩分装置研发、小型化PGNAA矿物元素分析仪器物理设计和高计数率电子学读出系统设计与样机试制，解决干湿一体化岩样缩分难题，实现“采—测—判”快速联动的目标，形成现场快速测试分析的野外移动实验室。

（4）基本形成了一套千米级反循环多工艺钻探取样测试一体化技术装备，有待开展现场示范工程。

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)：5-8.
GENG Ruilun, CHEN Xingqing, GENG Yanting, et al. Remarkable results achieved in the promotion and application of multi-process air drilling technology[J]. Exploration Engineering, 1998(3):5-8.

[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)：73-76，80.
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] 张鑫鑫，高睿嘉，刘飚，等.空气反循环连续取心钻探技术研究、应用与进展[J].中国有色金属学报，2026，36(8)：3333-3356.
ZHANG Xinxin, GAO Ruijia, LIU Biao, et al. Research, application and progress of air reverse circulation continuous sampling drilling technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2026,36(8):3333-3356.

[5] 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.

[6] 张永勤.反循环钻探技术的推广应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):46-47.
ZHANG Yongqin. Popularization and application of reverse circulation drilling technique[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(9):46-47.

[7] Zhao Z Q, Li L J, Bo K, et al. Numerical investigation based on orthogonal design of structural parameters on large-diameter DTH hammer bit[J]. Advanced Materials Research, 2013,774/776:1442-1445.

[8] Cao P L, Cao H Y, Cao J E, et al. Performance of large-diameter pneumatic down-the-hole (DTH) hammers: A focus on influences of the hammer structure[J]. Petroleum Science, 2023,20(4):2399-2412.

[9] 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.
JI Shengli, GUO Wei, ZHANG Xiaoguang, et al. Research on DTH hammer concentric simultaneous casing drilling tool in gravel strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006,33(7):52-55.

[10] 岳永东,谭春亮,冉灵杰,等.TGQ-200RC型多工艺自动化钻机的研制与应用[J].钻探工程,2024,51(5):101-107.
YUE Yongdong, TAN Chunliang, RAN Lingjie, et al. Development and application of TGQ-200RC multi-technique automatic drill[J]. Drilling Engineering, 2024,51(5):101-107.

[11] 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):135-143.
HU Deyue, BO Kun, FAN Liming. Study on reverse circulation structural parameters of through-type ring jet DTH bit[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):135-143.

[12] 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.

[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 Jin′e, et al. Study on transportation of ice chips in ice drilling with air reverse circulation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):49-56.

[14] 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.

[15] 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.

(编辑　王文)