“绿色高效精准智能化钻探技术与装备专题”编者按:推动钻探工程绿色高效精准智能化发展,是服务新一轮找矿突破战略行动、助力“双碳”目标落地、支撑矿业转型与生态文明建设的重要路径。近年来,我国钻探技术装备向绿色、高效、精准、自动化、智能化方向加速演进,取得了一系列具有自主知识产权的创新成果。及时梳理、集中展示相关研究成果,对促进行业交流、推动技术革新具有重要意义。为此,编辑部策划组织了“绿色高效精准智能化钻探技术与装备专题”,特邀胡远彪教授担任客座主编。经严格审稿,择优刊发10篇论文,聚焦钻探技术与装备发展现状、自动化智能化钻探装备、钻探智能监测与决策、钻头工具优化设计、绿色环保冲洗液及废浆无害化处理、新型钻探装备研发等方向,集中展示我国在该领域的新认识、新技术、新装备与新实践,力求体现学术前沿与工程实践的深度融合。希望本专题能为钻探工程绿色化、高效化、精准化、智能化发展提供有益借鉴。

绿色高效精准智能化钻探技术与装备发展现状及展望

胡远彪[1,2],王 璐[1,2],祖雨彤[1,2],吴金生[3],臧臣坤[4],赵 妍[5],沈立娜[6],李 宽[7]
(1.中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室,北京 100083;2.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;3.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川 成都 611734;4.中国地质装备集团有限公司,北京 100015;5.吉林大学建设工程学院,吉林 长春 130026;6.北京探矿工程研究所,北京 100083;7.山东省第六地质矿产勘查院,山东 威海 264209)

摘要:地质岩心钻探是矿产资源勘查的重要技术手段,其技术水平直接影响勘查效率和取心质量。针对新一轮找矿突破战略行动中装备自动化智能化水平不足、小口径测控与取心适配困难、绿色钻探装备现场适应性与成套应用能力有待提高等问题,采用文献调研与国内外对比分析方法,从空气反循环钻探取样与现场测试一体化、自动化智能化岩心钻探、导向钻进连续取心与随钻测量、高效破岩与环保冲洗液四个方面,梳理国内外技术装备发展现状。结果表明,国外已形成系列化、成套化、商品化装备及配套服务;我国全液压岩心钻机、部分反循环钻机、长寿命金刚石钻头及废浆处理装备已实现现场应用,但小口径孔内测控、导向连续取心与系统集成仍处于样机研制、试验或示范阶段,存在样机较多、工程化不足、成套化偏弱等共性问题。未来应围绕绿色勘查、高效钻探、精准钻探和转型升级方向,重点发展模块化智能化钻探装备、快速取样与精准导向连续取心、长寿命钻头与高性能环保冲洗液、废浆无害化处理,并推进多源数据融合与工程示范,加强装备、钻具、工艺与现场应用协同,推动地质岩心钻探向绿色、高效、精准、智能化转型,为新一轮找矿突破提供技术支撑与装备保障。

关键词:地质岩心钻探;绿色勘查;空气反循环钻探;自动化智能化钻探;导向钻进连续取心;环保冲洗液;长寿命金刚石钻头;废浆无害化处理
中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)06-0001-17

Development status and prospects of green, efficient, precise, and intelligent drilling technologies and equipment

HU Yuanbiao[1,2], WANG Lu[1,2], ZU Yutong[1,2], WU Jinsheng[3], ZANG Chenkun[4], ZHAO Yan[5], SHEN Lina[6], LI Kuan[7]
(1. *State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 2. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 3. *Institute*

收稿日期:2026-10-13; **修回日期:**2026-10-23 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2026.06.001
基金项目:国家科技重大专项(编号:2024ZD1003100)
第一作者:胡远彪,男,汉族,1977年生,教授,地质工程专业,博士,研究方向为自动化岩心钻探、导向钻进技术和随钻测量技术,北京市海淀区学院路29号,hyb@cugb.edu.cn。
引用格式:胡远彪,王璐,祖雨彤,等.绿色高效精准智能化钻探技术与装备发展现状及展望[J].钻探工程,2026,53(6):1-17.
HU Yuanbiao, WANG Lu, ZU Yutong, et al. Development status and prospects of green, efficient, precise, and intelligent drilling technologies and equipment[J]. Drilling Engineering, 2026,53(6):1-17.

of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, *China*; 4. *China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing* 100015, *China*; 5. *College of Construction Engineering, Jilin University , Changchun Jilin* 130026, *China*; 6. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*; 7. *No.* 6 *Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Weihai Shandong* 264209, *China*)

Abstract: Geological core drilling is an important technical means for mineral resource exploration, and its technical level directly affects exploration efficiency and core recovery quality. To address the problems in the New Round of Mineral Exploration Breakthrough Strategic Action, such as insufficient automation and intelligence of drilling equipment, difficulties in adapting slim-hole measurement and control to coring, and the need to improve the field adaptability and complete-set application capability of green drilling equipment, this paper reviews the development status of drilling technologies and equipment at home and abroad by literature research and comparative analysis, focusing on four aspects: the integration of air reverse circulation drilling sampling and on-site testing, automated and intelligent core drilling, directional drilling continuous coring and measurement while drilling (MWD), and high-efficiency rock breaking and environmentally friendly drilling fluid. The results show that serialized, packaged and commercialized equipment and supporting services have been formed abroad. In China, full-hydraulic core drilling rigs, some reverse circulation drilling rigs, long-life diamond bits and waste-slurry treatment equipment have been applied in the field. However, slim-hole downhole measurement and control, directional continuous coring and system integration are still at the stages of prototype development, testing or demonstration, with common problems such as numerous prototypes, insufficient engineering application and weak packaging capability. In the future, efforts should be focused on the directions of green exploration, efficient drilling, precise drilling and transformation and upgrading, giving priority to the development of key technologies and equipment including modular and intelligent drilling equipment, rapid sampling and precise directional continuous coring, long-life diamond bits and high-performance environmentally friendly drilling fluids, and harmless treatment of waste slurry. Meanwhile, multi-source data fusion and engineering demonstration should be promoted, and the synergy among equipment, drilling tools, drilling processes and field applications should be strengthened, so as to advance the transformation of geological core drilling toward green, efficient, precise and intelligent development, and to provide technical support and equipment guarantee for the New Round of Mineral Exploration Breakthrough Strategic Action.

Key words: geological core drilling; green exploration; air reverse circulation drilling; automated and intelligent drilling; directional drilling continuous coring; environmentally friendly drilling fluid; long-life diamond bit; harmless treatment of waste slurry

0 引言

岩心(样)作为地层最直接、最准确的第一手地质研究资料,是了解地层岩性和储层特性最可靠的手段[1]。而钻探取心(样)是获取岩心(样)的最直接手段,是获取准确地层信息的主要方法,是矿产资源勘查的重要支撑。矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,是提升战略性矿产资源勘查能力和保障国家资源安全的重要支撑[2]。随着矿产资源勘查向深部、复杂地层和交通不便地区拓展,钻探施工面临装备运输与布设困难、地质信息获取成本较高、生态环境保护要求严格等挑战[3-4]。我国地质勘查作业广泛分布于山地、林区、草原及其他生态敏感区域,露天与坑道等不同施工场景又对装备配置和作业方式提出差异化要求。因此,矿产资源勘查钻探既需要提高地层信息获取效率与质量,也需要统筹施工安全、经济性和生态环境保护,推动技术与装备向绿色、高效、精准和智能化方向发展[5-6]。

绿色勘查是协调矿产资源勘查与生态环境保护的重要途径。近年来,随着绿色勘查相关政策与技术规范逐步完善,环境保护要求已贯穿装备进场、井场与驻地建设、钻探作业、完钻封孔及生态恢复等全过程[7]。绿色钻探装备从提升单台钻机的性能,进一步向运输与安装方式、井场占用、能源利用、冲洗液循环、废浆处理及施工结束后的环境恢复等转型升级[8]。面向不同地形、地层和施工条件,装备轻量化与模块化、环保冲洗液及废浆无害化处理,是形成生态保护与技术经济适用性的成套技术体系的重点攻关方向[9-11]。

面向量大面广的千米级矿产勘查需求,部分传统岩心钻探装备存在辅助作业时间较长、劳动强度

较大、施工过程依赖人员经验,以及自动化和信息化水平不足等问题[12]。提高钻探效率,不仅要提升机械钻速,还要减少装备搬迁、钻杆装卸和起下钻等环节的耗时,延长钻头使用寿命,降低卡钻、埋钻等孔内事故发生的概率[13-14]。因此,需要改进破岩技术和钻具,优化辅助作业流程,并加强孔内事故预防,缩短整体施工周期。反循环钻探能够连续获取岩屑样品,配合样品缩分和现场快速测试,可更快了解钻遇地层的情况,为勘查部署和施工调整提供支持[15]。但在复杂工况下,仍需解决样品输送不畅、样品混杂、样品与钻进深度对应不准等问题,同时保证样品具有代表性,测试结果真实可靠。

精准钻探有助于钻孔准确钻遇目标矿体,查明矿体的位置、形态和分布,并获取可靠的岩心资料。随着勘查深度增加、地层条件变复杂,钻孔容易偏离设计方向,难以钻遇目标矿体,取出的岩心也可能破碎或缺失[16]。这些问题会影响矿体边界判断和资源评价,还可能需要补孔或重新施工,延长勘查周期、增加施工成本。因此,精准钻探需兼顾钻孔轨迹控制与取心质量保障,通过随钻测量和导向控制提高目标矿体命中率与有效穿越程度,通过取心钻具和工艺优化提高岩心采取率、完整性及深度对应的准确性[17],减少因轨迹偏差或资料质量不足造成的重复钻探,提高单孔勘查效能。

智能化钻探有助于提高施工安全性,使钻进过程更加稳定。传统钻探主要依靠操作人员的经验判断地层和设备状态、调整钻进参数及处理异常情况,部分装备仍需要较多人工操作,劳动强度较大[18]。随着计算机监测、控制和数据分析技术的发展,钻探装备不仅能够自动完成部分操作,还能实时监测钻进情况、调整钻压和转速等参数、提前发现异常,并为操作人员提供判断和处理参考。因此,需在钻杆处理、取心等作业自动化的基础上,加强多源信息融合与钻进过程协同控制,提高装备对地层变化和异常工况的响应能力[19]。

综上,矿产勘查钻探既要减少对环境的影响、提高施工效率,也要准确钻遇目标矿体、保证取心质量,并通过自动化和智能化技术提高施工安全性与稳定性。为此,本文围绕空气反循环钻探取样与测试一体化、自动化智能化岩心钻探、导向钻进连续取心与随钻测量,以及高效破岩与环保冲洗液四个方向,梳理国内外研究进展,分析目前存在的主要问题,为相关技术与装备的改进和配套应用提供参考。

1　空气反循环钻探取样现场测试一体化技术

空气反循环钻探(air reverse circulation drilling,RC)取样与现场测试一体化需要钻机、双壁钻杆、供气系统、岩样收集缩分装置和现场测试设备协同运行。作业过程中,钻机驱动孔底工具破岩,高压空气经双壁钻杆建立循环,将岩屑输送至地面;岩样经旋流分离、收集与缩分后,完成编录、制样和快速测试,并通过统一的孔深与样品编号关联钻进参数和测试结果。现场测试信息可用于辅助识别矿化变化、调整取样间隔及优化后续钻探部署,形成钻进、取样与地质信息获取相衔接的作业流程,具有取样效率较高、作业成本较低等特点,适用于矿产勘查中的快速取样。与绳索取心相比,RC钻探在部分应用场景下可获得更高的进尺效率[20]。目前,RC技术已在发达国家地质勘探中得到了广泛应用,是一种常见的探矿方法,钻探效率比绳索取心高3倍左右,成本仅为其1/3~1/2。RC占比方面,澳大利亚和美国约80%,东南亚约60%,非洲约30%(图1)。

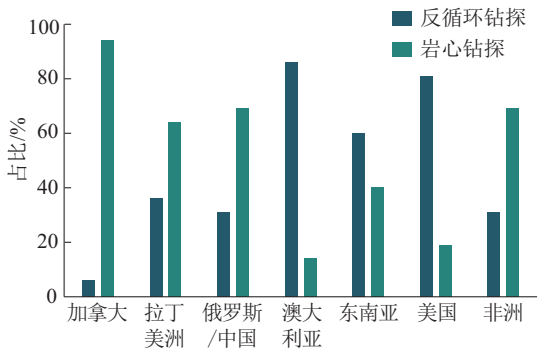


图1　不同地区反循环钻探与岩心钻探应用占比对比

Fig.1　Comparison of air reverse circulation drilling and core drilling applications across regions

我国于1980年首次应用RC钻探,勘探技术研究所、探矿工程研究所、吉林大学、中国地质装备集团等单位开展了RC钻探工艺的研究,最大孔深可达300 m[21]。2011年,中国地质调查局开展RC钻探的新一轮研究和推广。探矿工艺研究所开展RC找矿效果示范应用研究,分别在四川拉拉铜矿、云南北衙金矿、老寨湾金矿等矿区开展示范应用,平均

台月效率2469 m/台月，取得了较好的效果。

国内RC装备已形成多种产品，部分型号能够提供商品化设备及配套服务。选取国内RC-300L与国外Explorac 235两款代表性钻机，对其钻深能力、回转扭矩、提升或起拔力、动力头给进力及双壁钻杆规格进行比较，如表1所示。两款代表性钻机的给进力接近，而Explorac 235的回转扭矩和起拔力较大，可为较深孔作业提供装备条件。但额定钻深还受钻杆规格、供气配置和地层条件影响。目前，国外已形成成熟的成套装备。国内已具备商品化钻机与矿区应用基础，但钻孔深度超过300 m后，容易出现孔内事故增多、钻进速度下降、样品返出和收集困难、输送通道堵塞等问题，样品自动缩分和取样质量控制也需要改进。因此，后续不仅要提高钻机性能，还要让装备适应不同钻进工艺，完善样品自动处理和钻进数据记录功能，采用模块化设计以便运输与组装，并统一双壁钻杆、钻具和钻头的规格，形成满足不同施工需求的系列产品。

表1 国内外代表性RC钻机技术指标对比

Table 1 Comparison of technical specifications of representative RC drilling rigs in China and abroad

指 标	RC-300L	Explorac 235
钻深能力/m	300	450
最大回转扭矩/(N·m)	8000(低速扭矩)	14000(并联模式)
最大提升或起拔力/kN	140	220
动力头给进力/kN	70	75(受限给进力)
反循环双壁钻杆直径/mm	101.6	114.3
应用情况	具有商品化产品与配套服务	具有商品化产品与配套服务

1.1 自动化反循环钻机

反循环钻机是空气反循环取样的作业平台，除提供回转、给进和起拔力外，还需适配双壁钻杆装卸、高压供气及地面样品收集等作业。其发展方向逐步由单一钻进能力提升，转向多工艺适配、辅助作业自动化及钻进过程数字化控制[22]。

国外反循环钻机主要有专用钻机和多工艺钻机两类。专用钻机将钻进、供气和取样设备配套使用，多工艺钻机则可根据施工需要配置相应设备，完成空气反循环钻探、金刚石取心等作业。以Epiroc公司的Explorac 235型钻机为例(图2a)，其钻深能力为450 m，最大回转扭矩为14000 N·m，起拔力为220 kN，配有RCS钻机控制系统，支持无线遥控，还可配套岩样缩分设备，方便钻进与地面样品处理衔接。国内反循环钻机经历了引进消化、关键部件国产化和整机自主研发的发展过程。XT-6R型钻机兼顾绳索取心与空气反循环作业[23-24]；XD-12R型钻机进一步发展了多循环介质适配和自动化控制功能[25-26]；TGQ-200RC型钻机集成空气反循环与金刚石钻进工艺，并配置夹持拧卸、移摆管及钻杆储存等辅助机构，已开展现场应用(图2b)[27]；YGL-220RC型钻机已在高海拔环境施工中应用[28]。这些装备为减少人工辅助操作、提高工艺切换效率提供了基础。目前，国内研究已进一步拓展到多工艺钻机、自动钻杆处理及数字控制，钻进深度向千米级发展(图3)。



(a) Explorac 235型钻机 (b) TGQ-200RC型钻机

图2 反循环钻机

Fig.2 Reverse circulation drilling rigs

1.2 高强轻量化钻具与反循环钻探工艺优化

反循环钻具主要包括双壁钻杆、贯通式潜孔锤和专用钻头，用于传递钻压和扭矩、冲击破碎岩石，并将岩样输送到地面。双壁钻杆的内外管之间用于供气，内管用于返样，其强度、密封性和耐冲蚀能力直接影响钻进效率与取样质量(图4)[29]。钻孔越深、地层越复杂，钻杆柱越重，接头越容易疲劳损坏，岩样返出也越困难。因此，需要在保证强度的前提下减小钻具质量，并配合调整钻进和供气参数，提高深孔钻进与岩样输送的稳定性。

国外较早形成了双壁钻杆与反循环工具的配套体系。W-N Apache公司的相关技术通过分离供气与返样路径，为连续取样提供了结构基础[30]。在耐久性方面，Schulz等[31]比较了激光熔覆和超音速火焰喷涂涂层的颗粒冲蚀性能，为关键部件表面强化提供了依据。国内研究则主要围绕钻杆应用、钻



图3　反循环钻机钻进过程参数监控系统

Fig.3　Drilling parameter monitoring system for reverse circulation drilling

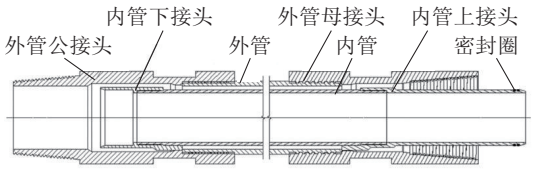
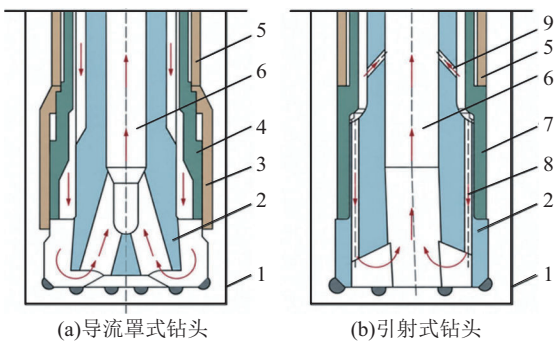


图4　双壁钻杆结构示意

Fig.4　Schematic of a double-wall drill pipe

头流道和潜孔锤性能展开。Zhang等[32]通过数值计算与现场试验,分析供气流量及喷嘴结构对反循环钻头抽吸能力的影响;通过动态网格方法研究供气压力、活塞质量等因素对潜孔锤冲击性能的作用,为结构与参数优化提供了基础。反循环钻头主要通过导流罩约束气流或喷嘴引射建立返样流路,两类结构如图5所示。



1—孔壁;2—钻头;3—导流罩;4—驱动接头;5—潜孔锤外管;6—中心通道;7—花键套;8—冲洗喷嘴;9—内吸喷嘴

图5　两类反循环钻头结构及流路示意

Fig.5　Structures and flow paths of two types of reverse circulation drill bits

工艺优化既要让钻头破岩快,也要保证产生的岩屑能顺利返出。供气压力和流量影响潜孔锤的冲击效果与岩样输送,钻压、转速和给进速度则影响破岩速度及岩屑产生量。提高供气压力可以增强冲击效果,但也会增加能耗,因此不能只追求钻速,还应改进钻具材料、接头结构和耐磨性能,选择合适的供气参数,并通过台架和现场试验,评价钻具寿命、每米有效进尺耗能、样品质量可靠性,在减小钻具质量的同时提高钻进效率、保证取样质量。

1.3　岩样缩分装置

反循环钻探取得的岩屑,需要经过缩分,才能用于判断地层和矿化情况。岩屑经旋流分离器收集后,要从中分出一部分有代表性的样品用于分析。岩屑颗粒大小、含水量及矿物分布是否均匀,都会影响缩分结果。因此,从样品收集、缩分到制样,各环节都要做好质量控制,防止细颗粒流失和不同样品相互混杂,保证测试样品能够反映所钻地层的实际情况。

国外已形成旋流分离与自动缩分相配套的设备体系,相关研究重点在于缩分比例控制、不同粒级的均衡回收及干湿工况适配。国内研究则围绕岩样收集装置和缩分工艺开展改进。刘杰等[33]研究了双出口旋流取样器在RC钻探中的应用;邓梦春等[34]讨论了空气反循环取样钻探的岩样收集与缩分技术,为地面样品处理和质量控制提供了参考。

1.4　反循环钻探现场测试分析一体化技术装备

反循环钻探现场测试分析一体化装备通过衔接钻进、返样、缩分、制样与现场检测,缩短样品转运和分析等待时间,使地质信息能够及时服务勘查决策。

在现场快速测试方面,X射线荧光可用于分析元素组成,短波红外光谱可用于识别部分矿物,帮助判断矿化异常和蚀变情况。将这些方法与反循环取样配套使用时,要协调岩样返出、缩分、制样和检测的速度,避免样品积压,并记录每个测试结果

对应的样品编号、孔深区间和质量检查情况。后续还需完善干、湿样品的连续处理，结合不同测试方法进行分析，并用标准样、重复样和实验室检测结果核查现场测试结果，提高地质判断的可靠性。

国外已尝试把钻场取样和快速分析结合起来。CSIRO开发的Lab-at-Rig系统集成了岩屑回收、干燥制样、X射线荧光和X射线衍射分析，可通过数据平台向现场人员提供元素和矿物信息，帮助调整勘查部署（图6）。



图6 CSIRO公司的Lab-at-Rig系统

Fig.6 CSIRO Lab-at-Rig system

国内相关研发也正从单台机具和样品处理装置向成套装备发展。可将反循环钻机、适应不同样品条件的缩分装置和快速分析设备配套使用，在移动实验室内完成样品处理和检测。要保证现场应用可靠，还需让每个检测结果准确对应样品编号和孔深区间，并用标准样检查检测准确性、用重复样检查结果稳定性，再与实验室检测结果对比，形成完整的质量控制流程。

2 自动化智能化岩心钻探技术与装备

岩心钻探装备的自动化与智能化，主要用于调整钻进参数、辅助钻杆装卸，以及监测钻进情况和设备状态。北美、欧洲和澳大利亚等地区较多使用全液压动力头钻机，Boart Longyear、Epiroc和Sandvik等公司已推出多种型号，部分钻机能够自动送钻、装卸钻杆、监测参数并传输数据。国内钻机的钻深能力已接近国际先进水平，但仍有部分施工使用机械立轴钻机，自动化操作、反循环钻探装备和数字化控制还需根据现场需求进一步改进。表2从钻进工艺、钻机结构、传动方式和装载方式等方面，对国内外装备情况进行了比较。

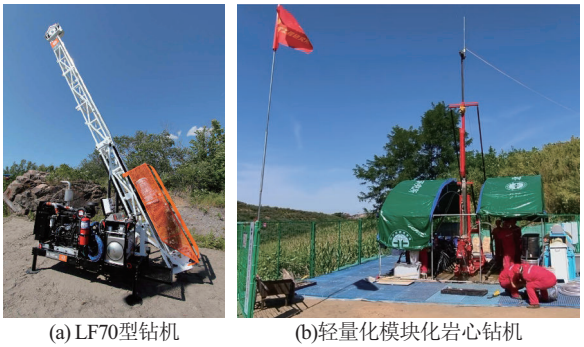
表2 国内外自动化智能化岩心钻探技术对比

Table 2 Comparison of automated and intelligent core drilling technologies in China and abroad

维度	主要型式	国外现状	国内现状
工艺	金刚石取心、反循环取样、全面钻进取屑	绳索取心与RC并行	反循环机具和熟练队伍较少
结构	立轴式、动力头式、顶驱式、转盘式	全液压动力头式	XY系列机械立轴钻机仍占较高比例
传动	机械、液压、电气传动	液压与电液控制	机械与液压装备并存
装载	撬装、散装、车载、履带	多型式快速就位	复杂地形搬迁和快速部署能力仍需提升

2.1 轻量化模块化岩心钻机

轻量化模块化岩心钻机通过将动力、回转、给进及钻架等单元分体设计，降低单模块质量，便于在交通不便和生态敏感区域运输与布设。国外以Boart Longyear LF70型等为代表（图7），采用可拆分模块及吊运结构，适应偏远地区的设备搬迁需求。国内已形成TGQ、XD、EP等便携式岩心钻机系列，通常配套薄壁绳索取心钻具和高转速钻进工艺。工程实践表明，模块化钻机能够减少井场整平和运输便道修筑造成的地表扰动[35]。目前，国内研发正进一步结合轻质材料、结构优化及电液测控技术，在便携性基础上提高参数监测和远程操控能力，同时协调模块质量、结构刚度与钻深能力，并提高快速连接及野外安装的可靠性。



(a) LF70型钻机 (b)轻量化模块化岩心钻机

图7 国内外轻量化模块化岩心钻机

Fig.7 Lightweight modular core drilling rigs, domestic and international

2.2　电传动立轴式岩心钻机

电传动立轴式岩心钻机是在传统立轴钻机基础上,采用交流变频调速和电液控制技术实现的升级装备。相较于国外代表性产品以液压动力头结构为主的发展路线,国内电传动立轴钻机主要为既有装备的技术改造,在保留结构紧凑及立轴加压特点的同时,提高调速性能和集中控制水平。

国内XY系列电传动立轴钻机已应用于深孔岩心钻探,通过变频电机、减速机构和液压系统协同驱动,实现回转无级调速及钻进参数显示[36]。当前研发进一步向电液比例给进、远程换挡、绞车精准控制和自动化管柱作业拓展。其技术重点是回转、给进与提升系统的协调控制,以及立轴有限给进行程与长立根辅助作业之间的衔接(图8),从而减少人工干预并提高操作安全性。



(a) XY-8DB型立轴钻机　　(b)电传动立轴式钻机

图8　国内立轴钻机

Fig.8　Spindle-type drilling rigs in China

2.3　全液压岩心钻机

全液压岩心钻机通过液压系统完成回转、给进及辅助操作,调速范围较宽,各机构布置灵活,也方便协调多个机构的动作。国外部分钻机已将自动钻进、作业数据记录和安全联锁功能集成到控制系统中。例如,Epiroc Christensen 160 Smart采用液压回转动力头和数字控制系统,能够记录钻孔作业数据,帮助操作人员调整钻进参数。

国内已形成YDX、HYDX、XD等全液压岩心钻机系列,并采用履带式、车载式或撬装式结构,满足不同现场的运输和安装需求。目前,研发不仅关注钻机性能,还着重改进液压系统,使其按实际负载供油、更加准确地控制动作,并通过机械手完成钻杆夹持、移动和接头拧卸等操作(图9)。后续还需结合钻压、转速和扭矩等监测数据,及时识别异常情况,并协调钻进与钻杆装卸等作业,提高自动化和智能化水平。



(a)实物　　(b)3D模型

图9　自动化管柱作业装置的全液压岩心钻机

Fig.9　Fully hydraulic core drilling rig with automated drill-pipe handling equipment

2.4　坑道岩心钻机

坑道岩心钻机主要用于地下矿体勘查和坑道内取心。由于坑道空间有限、钻孔方向多样,钻机既要便于布置,也要能够调整钻进角度并可靠固定。国外Epiroc Diamec Smart系列钻机采用紧凑结构,配合钻架定位机构和数字控制系统,可进行多角度钻进;Boart Longyear LM90型钻机采用模块化结构和按负载调节供油的液压系统,还可配备半自动钻杆处理装置,减少人员接触运动部件的机会。国内坑道及水平取心装备也在减小体积、采用履带底盘,并用机械装置辅助人工操作。1000 m智能化坑道岩心钻机(图10)配有动力头、定心夹持器和多种辅助机械手,可进行水平及俯仰角±30°范围内的钻进。在狭小空间内连续施工,需要保证钻杆输送顺畅、接头准确对中、夹持牢固,还要解决上仰孔、水平孔和下倾孔中取心器的送入与回收问题,减少作业中断,提高施工安全性。

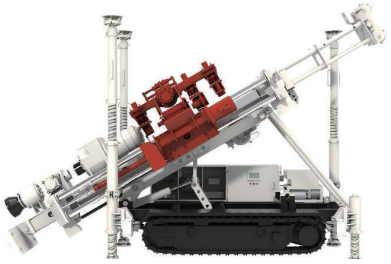


图10　1000 m智能化坑道岩心钻机

Fig.10　1000 m intelligent underground core drilling rig

目前国外代表性商品化钻机已将自动送钻、钻杆处理与作业联锁集成于统一控制系统,国内也已形成全液压、模块化等系列机型,并开展钻杆辅助

操作和数字控制功能研发。国内进一步提升的重点集中于多机构动作协调、复杂工况识别及连续运行可靠性。

3 精准导向连续取心与随钻测量技术

精准导向连续取心通过调整钻孔方向，使钻孔准确钻遇并穿过目标地层，同时获取岩心和孔内测量数据。这一过程需要随钻测量掌握钻孔位置和方向，将数据传到地面，再据此调整钻进轨迹，并配合绳索取心工艺获取岩心（图11）。国外已有配套的定向取心工具和测量服务，国内水平定向取心及综合测试技术也已在工程中应用。但在小口径钻孔内，如何让测量、数据传输和连续取心顺畅配合，仍需进一步研究。

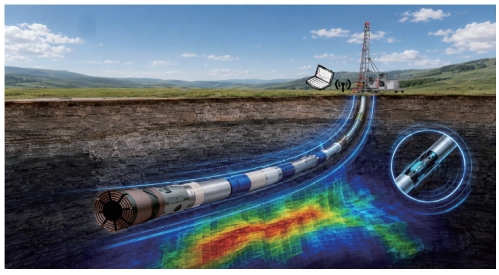


图11 精准导向连续取心与随钻测量技术示意

Fig.11 Schematic of precision directional coring and measurement while drilling

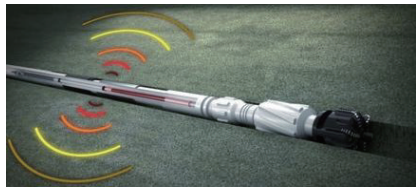
3.1 随钻测量技术

随钻测量（measurement while drilling，MWD）主要获取井斜、方位和工具面等轨迹参数，以及钻压、扭矩和振动等工程参数；随钻测井（logging while drilling，LWD）则利用伽马、电阻率和声波等响应评价地层。二者共同为轨迹调整提供支持。油气领域近钻头测量和地质导向技术已形成工程服务体系，但其工具外径、通流截面、供电方式及工作排量多按全面钻进配置，不能直接应用于小口径地质岩心钻探。

国内已开展小口径定向仪器与水平绳索取心钻具集成，解决仪器泵送、固定和打捞问题，并用于水平孔纠斜。与油气技术相比，小口径工具外壁与取心内管之间空间有限，传感器、供电及通信单元须避让内管和打捞器；低排量条件下可供发电及信号调制的水力功率受限；硬岩钻进的高转速、振动及磁性矿体干扰又会降低姿态测量稳定性。面向矿产勘查，研究重点是缩小测量与供电单元尺寸，降低振动和磁性地层干扰，在保留取心通道的条件下提高近钻头测量的可靠性。

3.2 高速数据传输技术

地表-孔底通信决定随钻信息能否及时参与导向决策。泥浆脉冲传输受排量、工具尺寸及传输速率限制，小排量下适应性较差；电磁波传输通过钻柱、泥浆与地层构成的电流回路传递信号，但传输距离和稳定性受信号衰减及地层干扰影响。国外代表性产品包括Baker Hughes XEM MWD，以及融合泥浆正脉冲与电磁波双通道传输的xBolt G2 MWD（图12）；国内已研制Speedlink-EMWave、CQ-EMWD和SEMWD-2000等系统（图13）。面向小口径岩心钻探，仍需提升通信工具的小型化、低排量适应性及其与取心通道的兼容性。



(a) XEM MWD



(b) xBolt G2 MWD

图12 Baker Hughes电磁随钻测量系统

Fig.12 Baker Hughes electromagnetic measurement-while-drilling system

有线传输通过电缆或集成于钻杆的传输结构实现井下与地面之间的数据交换，具有较高的数据传输能力。电缆放置于有线传输钻杆中空通道，阻塞了取心内管的运移通道，因此需要在传输通道与取心通道之间进行结构协调。国外NOV IntelliServ智能钻杆采用嵌入式传输结构，其标称速率可达57.6 kbit/s（图14）。

小口径岩心钻探的高速数据传输应重点解决接头耦合、信号衰减及低排量适应性等问题，以有效传输速率、误码率和系统连续运行能力综合评价通信性能[37]。

3.3 导向钻进连续取心技术

导向钻进利用造斜钻具和钻进参数调整改变钻孔延伸方向，可实施纠斜、中靶及一孔多分支勘

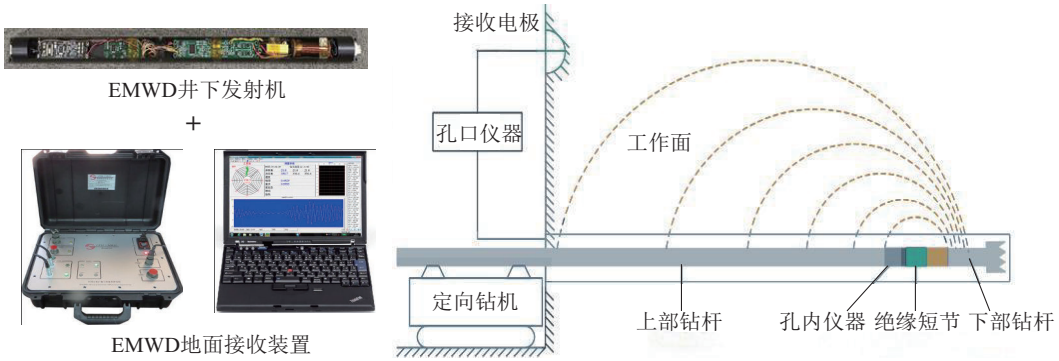


图 13　随钻电磁传输系统组成及工作原理

Fig.13　Components and operating principle of an electromagnetic MWD system



图 14　嵌入式有线传输系统

Fig.14　Embedded wired transmission system

查。其优势在于复用母孔,减少重复穿越非目标地层的进尺(图 15)。在硬岩和破碎地层中进行导向钻进,既要能调整钻孔方向,也要保证钻头有效破岩,避免孔壁坍塌。后续需研究短结构孔底动力工具、耐磨导向钻头与其他钻具如何配套使用,并根据岩性变化和钻具在孔内受到的摩擦阻力,及时调整钻压、转速和冲洗液排量。

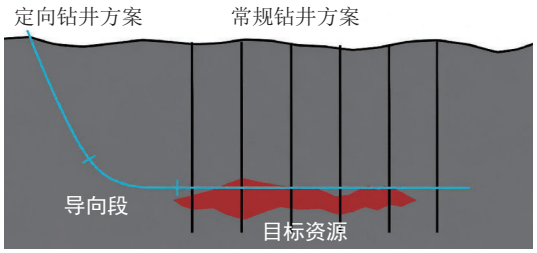


图 15　定向钻孔与常规钻孔布置对比

Fig.15　Comparison of directional and conventional borehole layouts

绳索取心利用钢丝绳将装有岩心的内管提出孔外,无需每次取心都起下整套钻柱,可节省取心时间、提高钻探效率。导向取心在此基础上进行钻孔方向控制,使钻孔沿设计路径钻遇目标地层,并连续取得岩心。结合钻孔轨迹测量,可确定岩心在地下的具体位置,为圈定矿体、对比地层和评价资源储量提供依据。

国外受控定向钻进技术发展较早,在大口径钻井中,自动垂直钻井和旋转导向系统已实现工程应用,形成了集钻进、测量、信号传输与轨迹控制于一体的技术体系。但这些技术主要面向油气钻井,其工具尺寸、作业方式和取心要求与地质岩心钻探不同,相关高端装备和技术也受到出口限制。

相比之下,小口径取心钻进中的造斜段连续取心与轨迹控制,仍是定向钻进领域需要重点突破的方向。国外现有产品和技术主要由 Devico、Aziwell 和 Epiroc 等公司提供,常用造斜曲率约为(6°~9°)/30 m(图 16)。其中 Aziwell 的 AZIDRILL 将孔内导向与岩心获取结合,并提供 N、H 口径工具,可用于纠斜和多分支钻孔。国内已集成小直径定向仪器、无磁钻杆、螺杆马达与定向钻头,形成水平绳索取心随钻定向方法,并在工程中得到了应用。



图 16　Devico 导向取心工具

Fig.16　Devico directional coring tool

国内定向钻进技术已在石油和煤矿等领域应用,但这些作业通常不以连续获取岩心为主要目的。铁路、公路和水利隧道等工程勘察中的定向取

心应用仍较少，连续取心长度和钻孔轨迹控制能力还难以满足矿产勘查需求[38]。针对这些问题，勘探技术研究所研制了中空螺杆马达井底动力绳索取心原理样机，并在陆地花岗岩中完成取心试验，验证了动力传递与取心通道配套布置的可行性（图17）[39]，进一步形成中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具（图18）[40]。吉林大学开展了定向钻进连续取心钻具的研究（图19）[41]，取得了阶段性进展。



图17 中空螺杆马达井底动力绳索取心原理样机

Fig.17 Prototype of a wireline coring tool powered by a hollow screw motor

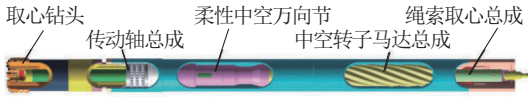
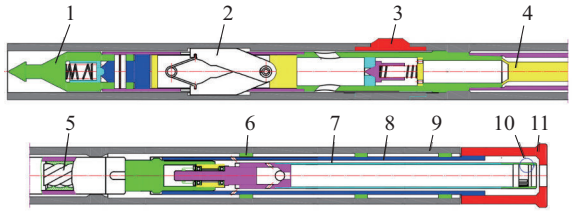


图18 中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具

Fig.18 Wireline coring tool powered by a hollow screw motor

表3给出了代表性机构的研究内容、主要成果和应用情况。

小口径导向钻进连续取心需要在有限的孔内空间里装下测量、通信和动力工具，还要留出取心通道，因此对工具设计和配套使用要求较高。目前主要存在几方面问题：工具尺寸小，测量和通信装置难以集成，孔内信号容易受干扰，数据传输量也有限；测量不够准确、导向调整不够及时，难以根据实时数据控制钻孔方向和获取地质参数；部分造斜工具较长，调整方向及保持方向所需的孔段也可能更长，减少了有效取心进尺；地表钻机与孔底定向工具之间的控制配合还需改进。因此，如何在有限孔径内实现稳定测量、有效造斜、连续取心与轨迹控制，是我国矿产勘查定向取心亟需解决的关键问题。



1—绳索打捞机构；2—弹卡定位机构；3—推靠导向机构；4—随钻测量存储探管；5—可提捞式小口径大扭矩螺杆马达；6—偏心轴承组件；7—轻质高强取心内管；8—传扭机构；9—高强铝合金外管；10—岩心定向机构；11—长寿命取心钻头

图19 定向钻进连续取心钻具

Fig.19 Continuous coring tool for directional drilling

后续应将小直径孔内动力工具、测量与通信装置、造斜机构、取心工具和地面控制系统配套设计，重点解决调整钻孔方向时难以连续取心、轨迹控制不够准确，以及复杂地层中工具运行不稳定等问题。同时，应通过现场试验，检查钻孔偏离设计轨迹的程度、有效取心长度、岩心质量和工具运行情况，逐步完善成套装备，使导向取心技术从样机试验走向实际工程应用。

表3 国内外导向取心钻探技术对比

Table 3 Comparison of directional coring technologies in China and abroad

机构/公司名称	相关研究内容	相关研究成果	成果应用情况
Devico	定向钻进取心器具及工艺	N、H规格绳索打捞式定向取心器及钻进工艺	
Aziwell	定向钻进取心器具及井下测量仪器	系列化的绳索打捞式定向取心器及成套设备	商业化推广应用
Epiroc	定向钻进取心器具及钻机等设备	Aquaguard定向取心器	
勘探技术研究所	定向取心器具及工艺	多篇研究论文和相关专利	现场钻进试验
探矿工艺研究所	水平孔取心器具及工艺	系列规格的水平孔取心器具	在川藏铁路施工中进行取样应用
中煤科工集团西安研究院有限公司	水平孔钻井器具及工艺	坑道水平孔钻井器具及钻机等设备	推广应用
中国地质大学（北京）、安徽省地质矿产勘查局	岩心定向仪及取心工具	电动岩心定向取心器	野外取样试验

3.4　导向控制技术

导向控制用于解决轨迹精准度的问题,逐渐从几何导向发展到地质导向、从滑动导向发展到旋转导向。旋转导向工具是当前研究的热点,有推靠式和指向式两种形式,主要聚焦于结构简化、成本降低及精度提升方面。国外油气旋转导向系统已集成近钻头测量与轨迹控制,Schlumberger的PowerDrive vorteX Max旋转导向系统结合了高扭矩高转速能力及先进的模型以优化动力部分,转速提高近60%,钻井周期缩短17%[42]。Halliburton的GeoPilot指向式旋转导向平台上增加了GeoPilot Duro新应用,用于提高其抗振性和机械钻速(图20)。对于高振动工况,转速增加了33%~100%。PowerDrive Archer采用复合导向机构,并配置近钻头井斜、方位和伽马测量[43]。

国内小口径岩心钻探已能通过随钻测量和调整钻具组合纠正钻孔偏斜,目前正逐步从分次测量、人工调整,向实时测量和自动纠偏发展。仍需解决孔内工具尺寸受限、硬岩中钻孔方向不易调整,以及导向工具不能妨碍取心等问题[44]。后续应将测量钻孔位置和方向、判断轨迹偏差、执行纠偏及检查纠偏效果衔接起来,并根据目标矿体位置和钻孔允许的弯曲程度设计合理路径。

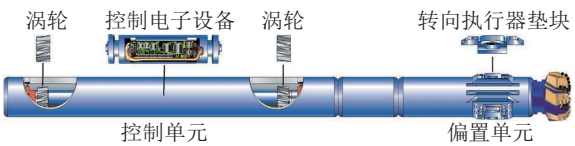


图20　Halliburton的GeoPilot指向式旋转导向系统

Fig.20　Halliburton GeoPilot point-the-bit rotary steerable system

总体上,精准导向连续取心的发展方向是将实物岩心、随钻地层响应和轨迹信息关联,实现测量、取心与导向协同。油气领域的成熟测控技术可提供借鉴,但面向地质岩心钻探仍需经过小口径、低排量及硬岩工况的适应性验证。

4　高效破岩技术与环保冲洗液体系

钻头和冲洗液是实现地质岩心钻探绿色高效的关键技术。钻头性能影响破岩效率、钻头消耗和起下钻时间;冲洗液用于将岩屑带出钻孔、润滑钻具和保护孔壁,其性能及循环处理方式还会影响废浆量。表4汇总了国内外代表性机构和公司在钻头、环保冲洗液及废浆处理方面的研究成果。总体来看,国外相关公司已有配套产品和处理方案,国内科研院所、高校及企业也取得了一些进展,部分成果已在现场应用。

表4　国内外绿色钻探关键技术研发及应用概况

Table 4　Overview of green drilling technology development and applications in China and abroad

机构名称	相　关　研　究	相关研究成果	成果应用情况
Boart Longyear	金刚石钻头、钻具	Stage系列水道结构钻头、UMX系列钻头	商业化推广应用
Baker Hughes	环保冲洗液特色处理剂	高性能水基钻井液体系,用于复杂地层钻进	
Schlumberger	聚合物冲洗液体系	Envirotherm NT新型超高温无铬环境友好型聚合物冲洗液体系	
M-I SWACO	高性能环保冲洗液处理剂、冲洗液固相控制与废弃物管理	面向非常规页岩地层的环保型钻井液体系、固相控制及钻井废弃物管理技术	
北京探矿工程研究所	绿色钻探体系技术,如高胎体钻头、环保冲洗液、废浆处理工艺等	多层金刚石取心钻头、环保型弱凝胶护壁护心冲洗液及废浆处理工艺	完成国内多个钻探孔现场应用
成都理工大学	改性聚合醇冲洗液无固相成膜冲洗液及微生物冲洗液制备及使用	微生物无固相冲洗液及其制备方法	现场试验效果良好
中国地质大学(武汉)	环保型冲洗液体系	纳米二氧化硅增强盐水基冲洗液,用于页岩气水平钻井	现场冲洗液性能试验
中海油田服务股份有限公司	合成基冲洗液体系	BIODRILL S合成基冲洗液	在渤海、南海、东南亚等环境要求严苛区域成功应用
胜利油田钻井院	钻井油基钻屑随钻处理工艺技术	油基钻屑随钻处理工艺、专用处理剂及处理设备	完成国内多个大口径油气勘探现场应用

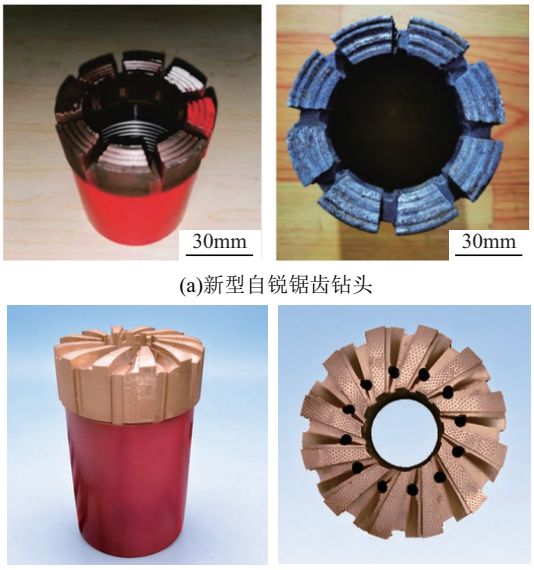
4.1 长寿命金刚石钻头

国外地质岩心钻探装备和钻头产品以Boart Longyear、Atlas等企业为代表，国内则有北京探矿工程研究所、中国地质大学（武汉）、吉林大学等单位开展相关研究。已有工作主要从胎体配方、金刚石特性和切削结构入手，改善钻头耐磨性与自锐能力[45-46]。

胎体材料的改进，主要是调整硬质颗粒、弱化颗粒和造孔剂的种类与用量，使胎体以合适的速度磨损，让金刚石及时出露并参与切削（图21）[47-48]。钻头结构也会影响破岩效果，自锐锯齿唇面可在磨损后继续保持有利于切削的齿形；加入CVD金刚石条可增强切削能力；齿轮状结构则可将钻压集中到较小的接触面积上，使切削齿更容易切入岩石[49-51]。这些设计要根据岩石性质、研磨性和钻进参数选择。胎体太硬，金刚石不易出露，钻头可能打滑；胎体磨损太快，钻头又不耐用。改进切削结构时，还要保证切削齿得到可靠支撑，并留出足够的排屑空间。钻头使用寿命，取决于地层条件、钻头规格和施工参数。已有现场研究表明，自锐锯齿钻头在部分岩层中比常规钻头更耐用，也有单只钻头累计进尺超过200 m的案例[52]；超高胎体偏心齿钻头试验在坚硬破碎地层中取得了194.65 m的单只进尺[53]。这些实例表明，通过胎体与结构协同设计，有望延长钻头寿命并维持较高钻速。因此，长寿命金刚石钻头研发应由单项材料改进转向配方、齿形、支撑、保径和钻进参数的匹配。评价钻头寿命时，除钻头进尺外，还应记录机械钻速、磨损形态、保径状态、取心质量及更换钻头所耗辅助时间，以综合判断其对全孔施工效率的影响。

4.2 绿色环保冲洗液体系

在冲洗液研究方面，国内外大多针对油气开发的大井眼钻探。地质岩心钻探因孔径小、间隙窄等特点，对冲洗液的流变性能、润滑性能及防塌性能等均提出了更为特殊的要求。国外以Baker Hughes公司的PERFLEX™体系、M-I SWACO公司的UltraDril Plus™体系和Exxon Mobil公司为代表[54-55]。国内已开展高性能水基冲洗液、有机盐冲洗液、改性聚合醇冲洗液、微生物冲洗液、植物胶冲洗液及高温环保冲洗液等研究（图22），但配方需要同时满足施工性能、环境评价和成本要求。北京探矿工程研究所研制的高温环保冲洗液经150 ℃高温处理后，仍保持较好的流变性、降滤失性和页岩抑制性能，其BOD_5/CODCr为21.5%。该结果说明，通过处理剂配伍和体系设计，可以兼顾一定的耐温性与环境性能。



(a)新型自锐锯齿钻头

(b)超高胎体偏心齿钻头

图21 长寿命金刚石钻头

Fig.21 Long-life diamond drill bit

冲洗液的环保性能还与循环使用时能否及时清除岩粉有关。岩心钻探过程中，细颗粒岩粉不断进入冲洗液，积累过多会影响其流动、携带岩屑和保护孔壁的效果。配套使用振动筛、清洁器和离心机等设备，可去除多余岩粉，使冲洗液保持良好性能、继续循环使用，减少材料消耗[56-58]。北京探矿工程研究所研发了小型一体化冲洗液不落地系统，可集中完成冲洗液的收集、净化和循环处理（图23）。绿色冲洗液体系应覆盖配方设计、循环净化和现场维护，而不能只依据初始配方的环保指标评价。

4.3 废浆无害化处理技术

国外油气钻井较早开展钻井废弃物的封闭式收集和现场处理，以SWACO公司、Brandt NOV公司和PAU国际石油设备公司等为典型代表，研发了闭路式处理系统，可在钻井现场对岩屑进行封闭式处理，降低岩屑逸散和现场污染风险。油气钻井废弃物与地质岩心钻探废浆的组成和作业条件存在差异，相关设备与工艺需针对小口径钻孔、低排量及分散施工点进行适应性调整[59]。

国内大庆油田、胜利油田等单位重点开展了油基钻井液岩屑处理技术攻关；地质钻探废弃冲洗液

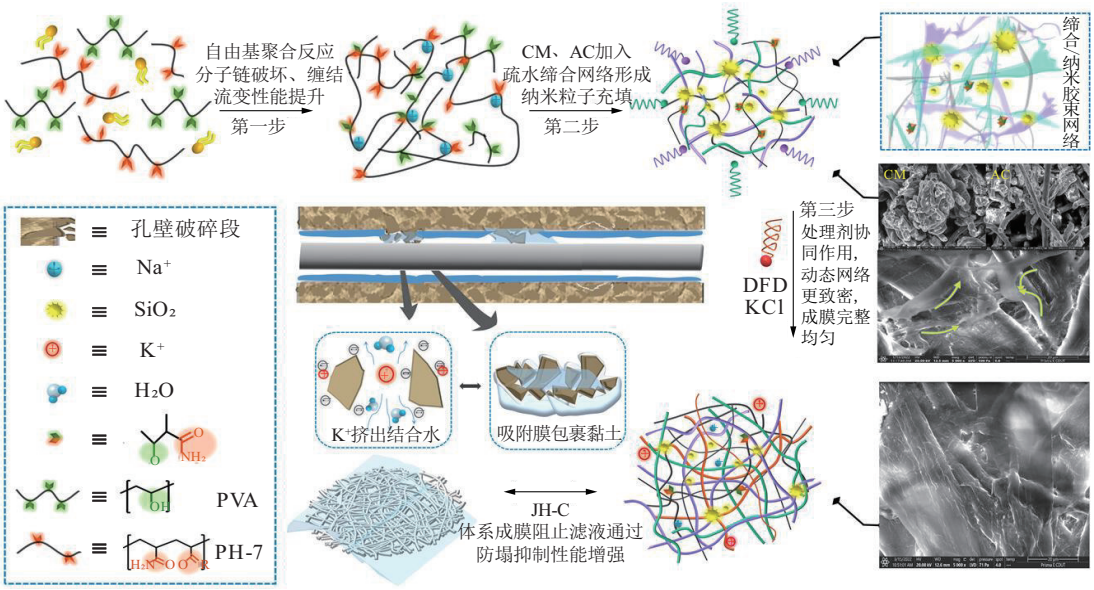


图 22　改性聚合醇冲洗液

Fig.22　Modified polyalkylene glycol drilling fluid



(a)过渡罐　　(b)净化/循环罐　　(c)自动化控制系统

图 23　冲洗液固控循环系统

Fig.23　Drilling fluid solids-control and circulation system

处理则主要围绕破胶、絮凝、脱色等药剂筛选,以及离心、压滤等固液分离工艺展开。目前国内已研制出 FJS-1A 型废浆处理设备和新型隔膜压滤装置,并开展现场应用(图 24)。隔膜压滤通过化学调理与机械压榨相结合降低滤饼含水率,处理后的滤液经检测或进一步处理后,可依据水质和施工要求回收或处置。

针对地质钻探废浆固相颗粒细、胶体稳定性较



(a)FJS-1A 型废浆处理设备　　(b)新型隔膜压滤装置

图 24　地质钻探废浆处理设备

Fig.24　Waste-slurry treatment equipments for geological drilling

强等特点,探矿工艺研究所开展了物化电融合处理技术与装备研究,形成由化学处理、物理处理和深度净化等模块组成的一体化工艺流程(图 25)。该流程通过不同处理单元的衔接,实现废浆调理、固液分离及后续净化,体现了废浆处理由单一设备或单项药剂处理向多环节协同处理发展的方向。

国内地质钻探废浆处理已从单纯的药剂处理,逐步发展到用药剂调节废浆性质、分离固体和液体,并配套现场处理设备。但废浆成分和所钻地层不同,处理效果还不够稳定。后续应先检测废浆性质,再选择合适的处理方法,并检查处理后的液体和固体是否满足回用或处置要求。同时,应开发体积小、便于拆装运输、可自动运行的设备,适应钻探施工点分散、场地狭小和废浆处理量变化的实际情况。

5　结论与展望

为支撑我国战略性矿产资源高效绿色勘查,提升钻探技术水平与经济效益,目前地质钻探装备的国内外发展趋势是自动化、智能化、标准化、模块化,钻探工艺的发展趋势是快速高效取样、精准连续取心,孔内钻具的发展趋势是高效率、长寿命,钻孔冲洗液的发展趋势是满足绿色环保要求。目前,我国相关技术装备已取得进展,但仍存在样机较多、工程化不足、成套化偏弱等共性问题,需加强装备、钻具、工艺与现场应用的协同。后续研究应围

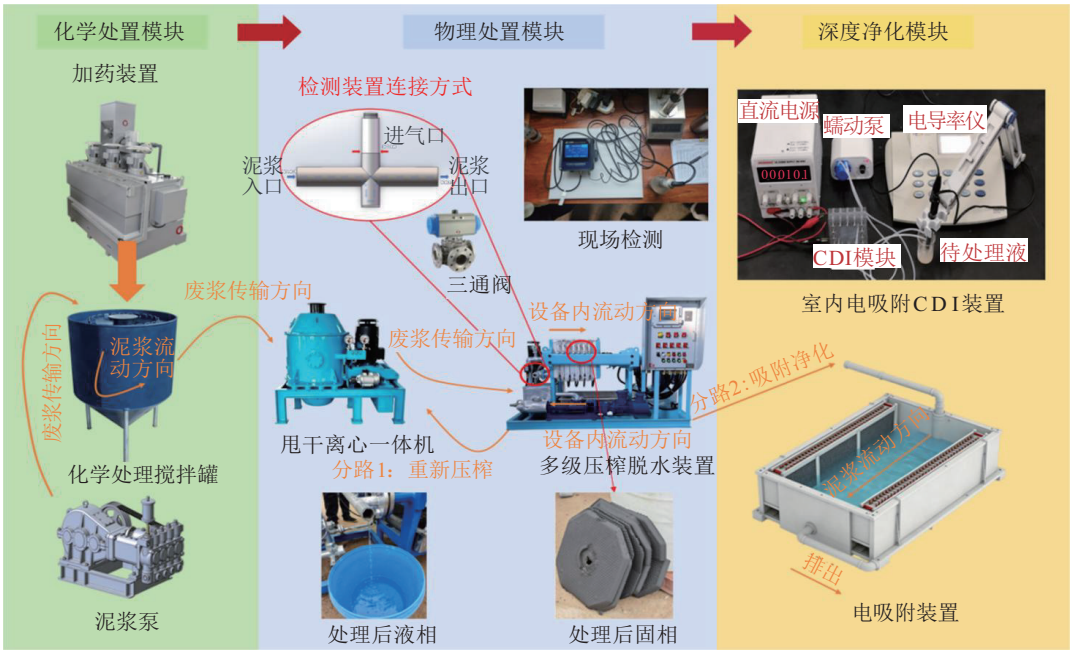


图25　多模块物化电融合一体化废浆处理系统示意

Fig.25　Schematic of an integrated, multimodule physicochemical-electrochemical wastes lurry treatment system

绕“绿色勘查、高效钻探、精准钻探、转型升级”协同攻关。

(1)发展模块化、自动化、智能化钻探装备。面向不同勘查任务和施工条件,提升钻机模块化配置与快速部署能力;推进钻杆操作、孔口作业和钻进参数控制自动化,完善数据采集、远程传输、状态监测与辅助决策功能,逐步形成系列化智能岩心钻探装备。

(2)提升快速取样与高效破岩能力。协同发展反循环取样、连续管取心和绳索取心技术,优化钻具结构与取心工艺;围绕长寿命金刚石钻头及复杂结构钻头,加强胎体材料、切削结构与地层条件的匹配,兼顾钻进效率、钻头寿命和岩心质量。

(3)强化精准取心与孔内测控。面向小口径、复杂地层和定向勘查需求,推进导向钻进连续取心、随钻探测、孔底动力和数据传输协同设计,打通测量、轨迹判断、导向执行与效果校核环节,提高钻孔轨迹控制和目标地层取心能力。

(4)构建绿色冲洗液与废浆处理技术体系。根据地层和钻进工况优化环保冲洗液配方及循环净化工艺,推进废浆减量、固液分离、滤液回用或合规处置相衔接,提升处理装备的模块化与现场适应性,并综合评价环境性能、处理效果和运行成本。

(5)推进多源数据融合与系统集成示范。融合地质、钻进工况与钻具姿态等数据,支撑地层识别、轨迹判断和钻进参数调整。针对数据标准不统一、现场传感器可靠性不足及野外网络通信受限等主要瓶颈,推进数据格式、时空基准与接口标准化,提高传感器环境适应性和长期稳定性,完善本地处理、数据存储与断网续传功能。将钻机、钻具、钻头、冲洗液、孔内测量及信息管理系统配套应用,开展多矿区、长周期成套示范,综合评价钻进效率、取样质量、轨迹精度、设备可靠性、能耗及废弃物处置效果,推动研发样机向工程化、成套化应用转化,明确技术装备的适用范围与应用条件。

参考文献(References):

[1] 朱永宜,王稳石,张恒春,等.我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J].地质学报,2018,92(10):1971-1984.
ZHU Yongyi, WANG Wenshi, ZHANG Hengchun, et al. Implementation overview of Chinese continental scientific drilling (CCSD) project and technical systems of core boring[J]. Acta Geologica Sinica, 2018,92(10):1971-1984.

[2] 自然资源部,国家林草局.自然资源部 国家林草局关于在新一轮找矿突破战略行动中全面实施绿色勘查的通知:自然资发[2024]122号[EB/OL].(2024-07-03)[2026-10-11].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6961702.htm.
Ministry of Natural Resources, National Forestry and Grassland Administration. Notice on the comprehensive implementation of green exploration in the new round of mineral prospecting break-

through strategic actions: Natural resources development [2024] No. 122[EB/OL]. (2024-07-03) [2026-10-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202407/content_6961702.htm.

[3] 刘蓓,杨可,张雄.国内绿色勘查地质岩心钻探装备进展与发展建议[J].地质与勘探,2026,62(4):687-702.
LIU Bei, YANG Ke, ZHANG Xiong. Progress and development suggestions of geological core drilling equipment for green exploration in China[J]. Geology and Exploration, 2026,62(4):687-702.

[4] 肖克炎,邢树文,丁建华,等.全国重要固体矿产重点成矿区带划分与资源潜力特征[J].地质学报,2016,90(7):1269-1280.
XIAO Keyan, XING Shuwen, DING Jianhua, et al. Division of major mineralization belts of China's key solid mineral resources and their mineral resource potential[J]. Acta Geologica Sinica, 2016,90(7):1269-1280.

[5] 自然资源部网站.自然资源部加强新一轮找矿突破战略行动装备建设[EB/OL].(2024-04-28)[2026-10-11].https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202404/content_6948015.htm.
The website of the Ministry of Natural Resources. The ministry of natural resources strengthens the equipment construction for the new round of breakthrough strategic actions in mineral exploration [EB/OL]. (2024-04-28) [2026-10-11]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202404/content_6948015.htm.

[6] 杜轶伦,李雪峰,张帮禄,等.全国绿色勘查实施进展与成效研究[J].中国矿业,2024,33(10):240-245.
DU Yilun, LI Xuefeng, ZHANG Banglu, et al. Research on the progress and effectiveness of national green exploration[J]. China Mining Magazine, 2024,33(10):240-245.

[7] 郑杰,张福良,靳松,等.绿色勘查项目示范进展与成效研究[J].中国矿业,2021,30(11):37-41.
ZHENG Jie, ZHANG Fuliang, JIN Song, et al. Demonstration progress and effectiveness of green exploration project[J]. China Mining Magazine, 2021,30(11):37-41.

[8] Mahmoud A, Gajbhiye R, Elkatatny S. Advances in drilling fluid technology: Recent innovations, performance enhancements, and future trends in high-performance and eco-friendly formulations[J]. Journal of Molecular Liquids, 2025,434:128004.

[9] 刘福强.中国海洋石油模块钻机自动化技术发展[J].石化技术,2026,33(7):369-371.
LIU Fuqiang. Development of automation technology for offshore drilling rigs in China's offshore oil industry[J]. Petrochemical Industry Technology, 2026,33(7):369-371.

[10] 冉灵杰,宋殿兰,卢猛.TGQ背包式取样钻机的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):49-51,55.
RAN Lingjie, SONG Dianlan, LU Meng. Development of TGQ knapsack sampling drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(6):49-51,55.

[11] 卢倩,谭春亮,岳永东.轻便新能源电动钻机及数字监控系统研制[J].地质装备,2024,25(S1):155-160.
LU Qian, TAN Chunliang, YUE Yongdong. Development of portable new energy electric drilling machine and digital monitoring system [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024,25(S1):155-160.

[12] 罗鑫,崔猛,张彦龙,等.自动驾驶钻井技术现状与展望[J].钻采工艺,2026,49(1):115-123.
LUO Xin, CUI Meng, ZHANG Yanlong, et al. Current status and prospects of autonomous drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2026,49(1):115-123.

[13] 尹浩,梁健,李宽,等.万米科学钻探关键机具优化措施研究[J].钻探工程,2023,50(4):16-24.
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):16-24.

[14] 温得全,王贵,邵盛元,等.铀矿绿色勘查泥浆随钻处理装备研究[J].钻探工程,2021,48(10):88-94.
WEN Dequan, WANG Gui, SHAO Shengyuan, et al. Development of equipment for mud treatment while drilling in uranium green exploration[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):88-94.

[15] 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.

[16] 冉飞,田鹏辉,宋继伟,等.小直径分支孔技术在贵州省富矿精开中的应用探索[J].钻探工程,2026,53(3):122-129.
RAN Fei, TIAN Penghui, SONG Jiwei, et al. Exploration of the application of small-diameter branch hole technology in the fine mining of rich ores in Guizhou Province[J]. Drilling Engineering, 2026,53(3):122-129.

[17] 殷邈,王雷浩,石逊,等.水平孔长距离取心技术在华北某矿水害治理效果验证中的应用[J].钻探工程,2026,53(3):147-154.
YIN Miao, WANG Leihao, SHI Xun, et al. Application of long-distance coring technology in horizontal holes for water hazard control effect verification in a mine in North China[J]. Drilling Engineering, 2026,53(3):147-154.

[18] 陆承达,甘超,陈略峰,等.地质钻进过程智能控制研究进展与发展前景[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):31-43.
LU Chengda, GAN Chao, CHEN Lüefeng, et al. Development and prospect of intelligent control of geological drilling process[J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(9):31-43.

[19] 赵甜,张毅,徐绍涛,等.地质岩心钻探钻机与取心技术的研究进展及智能化发展趋势[J].中国地质调查,2026,13(2):152-165.
ZHAO Tian, ZHANG Yi, XU Shaotao, et al. Research progress and intelligent development trends of geological core drilling rigs and core sampling techniques[J]. Geological Survey of China, 2026,13(2):152-165.

[20] 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):82-88.
CHEN Yong, LU Shenglin, HUANG Shenghui. Comparative study on geological effect of air reverse circulation sampling drilling technology in gold exploration[J]. Drilling Engineering, 2021,48(9):82-88.

[21] 姚建平,底衡波.空气反循环连续取样技术在地质矿产勘查中的实际应用[J].矿产勘查,2021,12(7):1635-1640.
YAO Jianping, DI Hengbo. Practical application of air reverse circulation continuous sampling technology in geological and mineral exploration (non-ferrous system)[J]. Mineral Exploration, 2021,12(7):1635-1640.

[22] 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 sam-

pling drilling technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2026,36(8):3333-3356.

[23] 何磊,刘跃进,沈怀浦,等.XT-6R型多工艺钻机的研制[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集.哈尔滨:中国地质学会探矿工程专业委员会,2015:48-54.
HE Lei, LIU Yuejin, SHEN Huaipu, et al. Development of the XT-6R multi-process drilling rig[C]//Proceedings of the 18th National Academic Conference on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling). Harbin: Professional Committee of Exportation Engineering, China Geological Society, 2015:48-54.

[24] 佚名.XT-6R型全液压多工艺钻机重庆探矿机械厂[J].地质装备,2016,17(4):46.
Anon. XT-6R fully hydraulic multi process drilling rig Chongqing exploration machinery factory[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2016,17(4):46.

[25] 周政,何磊,朱江龙,等.XD-12R型多工艺自动化钻机的研制与应用[J].地质装备,2020,21(3):11-16.
ZHOU Zheng, HE Lei, ZHU Jianglong, et al. The development and demonstration application of XD-12R multi-process automatic drilling rig[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020,21(3):11-16.

[26] 宋志亮,孙卫娜,何磊,等.XD-12R型多工艺自动化钻机电液控制系统的设计[J].地质装备,2020,21(3):17-21.
SONG Zhiliang, SUN Weina, HE Lei, et al. Design of electro-hydraulic control system for XD-12R multi-process automatic drilling rig[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020,21(3):17-21.

[27] 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.

[28] 崔金龙,关彪,张克永.YGL-220RC型空气反循环取样钻机的研制及应用[J].钻探工程,2023,50(S1):424-430.
CUI Jinlong, GUAN Biao, ZHANG Keyong. Development and application of YGL-220RC air reverse circulation sampling drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):424-430.

[29] 刘建林.双壁钻杆在空气潜孔锤反循环钻进中的应用研究[J].能源与环保,2017,39(1):39-42.
LIU Jianlin. Application study of dual-wall drill pipe on DTH reverse circulation drilling[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017,39(1):39-42.

[30] 陈赤武,张运钧.美国W-N Apache公司的反循环钻进技术[J].国外探矿工程情报,1992(1):45-49.
CHEN Chiwu, ZHANG Yunjun. Reverse circulation drilling technology of W-N Apache company in the United States[J]. World Drilling, 1992(1):45-49.

[31] Schulz C, Schläfer T, Charrault E, et al. Erosive wear testing of laser clad and HVOF coatings for drilling in mining[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2020,29(3):520-529.

[32] Zhang X X, Luo Y J, Gan X, et al. Design and numerical analysis of a large-diameter air reverse circulation drill bit for reverse circulation down-the-hole air hammer drilling[J]. Energy Science & Engineering, 2019,7(3):921-929.

[33] 刘杰,刘跳民,杨胜兴,等.双出口旋流取样器在RC钻探试验中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):64-67.
LIU Jie, LIU Tiaomin, YANG Shengxing, et al. Application of double-outlet cyclone sampler in RC drilling test[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(1):64-67.

[34] 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.

[35] 林广利,谭春亮,岳永东,等.TGQ-50型轻便钻机在浅覆盖区地质填图中的应用[J].西部探矿工程,2017,29(9):31-33.
LIN Guangli, TAN Chunliang, YUE Yongdong, et al. Application of TGQ-50 portable drilling rig in geological mapping of shallow coverage areas[J]. West-China Exploration Engineering, 2017,29(9):31-33.

[36] 欧阳志强,陈刚,雷统平,等.XD系列电传动顶驱岩心钻机的研制[J].地质装备,2017,18(4):11-14.
OUYANG Zhiqiang, CHEN Gang, LEI Tongping, et al. Development of XD series electric top drive core drilling rig[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2017,18(4):11-14.

[37] Zheng Z, Geng Y F. Research on data transmission system of acoustic wave while drilling based on OFDM[J]. IET Communications, 2023,17(4):428-447.

[38] 李奉霖,王汉昌,辛宗成,等.长距离水平孔绳索取心钻进关键技术研究及应用[J].钻探工程,2025,52(6):77-85.
LI Fenglin, WANG Hanchang, XIN Zongcheng, et al. Research and application of key technologies for long-distance wire-line core drilling in horizontal boreholes[J]. Drilling Engineering, 2025,52(6):77-85.

[39] 陈晓君,宋刚,王诗竣,等.中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的研制与试验[J].钻探工程,2024,51(5):36-44.
CHEN Xiaojun, SONG Gang, WANG Shijun, et al. Development and test of hollow screw motor bottom hole power wire-line core drill[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 36-44.

[40] 韩泽龙,李小洋,施山山,等.定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析[J].钻探工程,2025,52(1):39-46.
HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling[J]. Drilling Engineering, 2025,52(1):39-46.

[41] 林婷婷,刘泽楷,马银龙,等.定向钻进连续取心钻具姿态监测系统设计[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):138-146.
LIN Tingting, LIU Zekai, MA Yinlong, et al. Design of attitude monitoring system for directional drilling continuous coring tools[J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(9):138-146.

[42] 朱丽华.斯伦贝谢PowerDrive vorteX Max高动力RSS系统[J].钻采工艺,2017,40(6):116.
ZHU Lihua. Schlumberger PowerDrive vorteX Max high power RSS system[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(6):116.

[43] 王潇.Powerdrive Archer型旋转导向系统在海上深井小井眼中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(8):133-134.
WANG Xiao. Application of Powerdrive Archer rotary guidance system in small wells of deep wells at sea[J]. China Petro-

leum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(8): 133-134.

[44] 宋继伟,冉飞,方青,等.贵州省贞丰县金矿勘查小口径定向分支钻进技术[J].地质与勘探,2024,60(6):1217-1227.
SONG Jiwei, RAN Fei, FANG Qing, et al. The small-bore directional branch drilling technology in gold exploration of Zhenfeng County, Guizhou Province[J]. Geology and Exploration, 2024,60(6):1217-1227.

[45] 蔡家品,贾美玲,沈立娜,等.难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):67-73,91.
CAI Jiapin, JIA Meiling, SHEN Lina, et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(2):67-73,91.

[46] 王佳亮,张绍和.硬质磨粒对孕镶金刚石钻头胎体磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(9):1872-1878.
WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Effects of hard abrasive particles on matrix wear resistance of diamond impregnated bit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(9):1872-1878.

[47] 郭庆清,王佳亮,张绍和.胎体弱化颗粒材质对WC基孕镶金刚石钻头胎体磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(9):2531-2536.
GUO Qingqing, WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Effects of matrix weaken particle material on matrix wear resistance of diamond bit based on WC[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015,25(9):2531-2536.

[48] 庞丰,段隆臣,童牧,等.钻进打滑地层时造孔剂对镶金刚石钻头性能的影响[J].粉末冶金材料科学与工程,2014(5):790-796.
PANG Feng, DUAN Longchen, TONG Mu, et al. Effect of pore-forming agent on drilling performance of impregnated diamond bits for slipping formation[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014(5):790-796.

[49] 沈立娜,阮海龙,李春,等.坚硬致密"打滑"地层新型自锐金刚石钻头的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):57-59.
SHEN Lina, RUAN Hailong, LI Chun, et al. Study on a new type self-sharpening diamond bit for drilling in hard-compact-slipping formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(11):57-59.

[50] 王秋雯,孙友宏,刘宝昌,等.CVD金刚石强化孕镶金刚石钻头的冲击回转钻进试验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2011,31(1):6-10.
WANG Qiuwen, SUN Youhong, LIU Baochang, et al. Experimental study of diamond impregnated drilling bit enhanced with CVD diamond pins[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011,31(1):6-10.

[51] 赵涛.孕镶金刚石齿轮钻头在蒙库铁矿地区的应用[J].西部探矿工程,2018,30(10):77-79,81.
ZHAO Tao. Application of impregnated diamond gear drill bits in the Mengku iron mine area[J]. West-China Exploration Engineering, 2018,30(10):77-79,81.

[52] 骆建诗,凌振武,吴闻涛,等.坚硬致密地层自锐锯齿金刚石钻头的研制及应用[J].东华理工大学学报(自然科学版),2023,46(3):269-276.
LUO Jianshi, LING Zhenwu, WU Wentao, et al. Development and application of new self-sharpening serrated diamond bit in hard compact formation[J]. Journal of East China Institute of Technology(Natural Science Edition), 2023,46(3):269-276.

[53] 阮海龙,沈立娜,胡远彪,等.硬岩超高胎体偏心齿钻头的研制及应用[J].钻探工程,2021,48(3):56-60.
RUAN Hailong, SHEN Lina, HU Yuanbiao, et al. Development and application of ultrahigh matrix eccentric-cutter bits for deep hard rock[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):56-60.

[54] 代秋实,潘一,杨双春.国内外环保型钻井液研究进展[J].油田化学,2015,32(3):435-439.
DAI Qiushi, PAN Yi, YANG Shuangchun. Research progress of environmentally friendly drilling fluid at home and abroad [J]. Oilfield Chemistry, 2015,32(3):435-439.

[55] 宋波凯,阮彪,谢建安,等.新疆油田环保钻井液体系的研究与评价[J].化学工程师,2018,32(11):43-46.
SONG Bokai, RUAN Biao, XIE Jian'an, et al. Research and evaluation of environmentally friendly drilling fluid system in Xinjiang Oilfield[J]. Chemical Engineer, 2018,32(11):43-46.

[56] 冯美贵,王健策,高元宏,等.地质岩芯钻探钻井液固相控制技术现场应用[J].西部探矿工程,2022,34(2):100-104.
FENG Meigui, WANG Jiance, GAO Yuanhong, et al. On site application of solid phase control technology for drilling fluid in geological core drilling[J]. West-China Exploration Engineering, 2022,34(2):100-104.

[57] 王琳,孙祺斌,赵延亮,等.铀矿地质钻探移动式泥浆净化设备设计[J].现代矿业,2024,40(4):162-165.
WANG Lin, SUN Qibin, ZHAO Yanliang, et al. Design of mobile mud purification equipment for uranium geological drilling[J]. Modern Mining, 2024,40(4):162-165.

[58] 梁健,李小洋,周红军,等."十四五"我国地质岩心钻探技术装备发展现状及趋势分析[J].钻探工程,2025,52(6):1-14.
LIANG Jian, LI Xiaoyang, ZHOU Hongjun, et al. Analysis of the development status and trends of geological core drilling equipment in China during the 14th five-year plan period[J]. Drilling Engineering, 2025,52(6):1-14.

[59] 蒋炳,张统得,吴金生,等.地质钻探废浆处理设备及技术研究进展[J].西部探矿工程,2023,35(12):81-83,87.
JIANG Bing, ZHANG Tongde, WU Jinsheng, et al. Research progress on equipment and technology for treating geological drilling waste slurry[J]. West-China Exploration Engineering, 2023,35(12):81-83,87.

(编辑　王跃伟)