

我国大直径钻井技术装备发展的挑战与思考

刘志强^{1,2}, 陈湘生^{2,3}, 蔡美峰⁴, 纪洪广⁴, 宋朝阳^{1,2}

(1. 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013; 2. 矿山深井建设技术国家工程研究中心, 北京 100013; 3. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518061; 4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: “向地下要资源、要空间”是解决人类面临的能源、资源和生存空间基本问题的有效途径。井筒是从地面进入地层中的咽喉工程, 其安全、高效、绿色、智能化建设是保障地下矿产资源开采和地下空间开发利用的必由之路。本文分析了发展大直径钻井技术装备的需求和必要性, 对比分析了国内外相关装备的发展现状; 从基础科学问题研究、应用技术研发、高端装备制造、工程示范等角度, 剖析了我国钻井技术装备发展面临的挑战, 提出了井筒建设技术与装备的发展方向。研究建议: 确立智能钻井发展理念, 明确智能钻井发展路径与任务, 建立和完善大直径钻井相关标准规范, 推动智能钻井平台与示范工程建设, 以期对矿山、水电、交通、城市建设等领域井筒建设技术发展提供支撑。

关键词: 地下工程; 井筒建设; 矿产开采; 地下空间利用; 钻井技术装备

中图分类号: TD262; TV554; TU94 **文献标识码:** A

Challenges and Thoughts on the Development of Large-Diameter Drilling Technology and Equipment

Liu Zhiqiang^{1,2}, Chen Xiangsheng^{2,3}, Cai Meifeng⁴, Ji Hongguang⁴, Song Zhaoyang^{1,2}

(1. Beijing China Coal Mine Engineering Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. National Engineering Research Center of Deep Shaft Construction, Beijing 100013, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, Guangdong, China; 4. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Underground space and resources are crucial for solving energy, resource, and living space problems faced by mankind. Shafts are throats that extend from the ground into the strata and thus require safe, efficient, green, and intelligent construction. In this paper, we analyze the need and necessity for developing large-diameter drilling technology and equipment, examine the development status in China and abroad, and analyze the challenges faced by China from the perspectives of basic research, applied technology development, high-end equipment manufacturing, and project demonstration. Moreover, we pinpoint the development directions of shaft construction technology and equipment and propose that China should establish the development concept of intelligent drilling, clarify the development path and tasks of intelligent drilling, establish relevant standards and specifications of large-diameter drilling, and promote the construction of intelligent drilling platforms and demonstration projects, thereby providing support for shaft construction in fields such as mining, hydropower, transportation, and urban construction.

收稿日期: 2022-02-21; **修回日期:** 2022-03-10

通讯作者: 刘志强, 北京中煤矿山工程有限公司研究员, 研究方向为井筒建设与机械破岩钻井技术装备; E-mail: liuzhiqiang@vip.sohu.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“深部矿产和地热资源共采战略研究”(2019-XZ-16); 国家自然科学基金资助项目(52004125)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Keywords: underground engineering; shaft construction; mineral exploitation; underground space development and utilization; drilling technology and equipment

一、前言

随着人类社会进步与国民经济发展,“向地下要资源、要空间”成为改善人类生存环境、支撑人类可持续发展的有效途径。世界各国相继制定了地下能源资源与地下空间开发利用领域的工业化、数字化、智能化发展战略 [1,2]。我国在能源、矿业领域以及水电、铁路、城市建设等行业快速发展,工程建设规模不断扩大,工程技术创新进入高度活跃期。我国是矿产资源开采和地下空间开发利用的大国,已由解决供需矛盾为主转变为提升质量为主的发展阶段,“十四五”及中长期内将致力于向安全、低碳、智能转型与变革 [3~5]。

井筒作为地下工程建设与开发的核心构筑物,担负着矿物、人员、材料、设备等运输,地下通风、供电、排水等功能;从服务于传统的井工矿产资源开采,拓展应用到铁路/公路隧道、城市地下空间、水力发电站、海上风电、大科学实验和国防等领域的功能井筒建设。大直径井筒是地下工程建设与开发的关键工程,也是首要工程,被视为能源资源安全、地下空间开发利用、深地探索等国家重大战略任务的重要支撑。

大直径井筒钻井技术与装备研究不仅是地下工程建设领域的重点研究方向,也是国家高端装备制造战略新兴产业发展的迫切任务 [6]。对照国家能源战略对洁净、绿色、低碳能源需求的不断调整,国家能源局、应急管理部、发展和改革委员会等部委对矿业和其他地下工程安全、高效、绿色、智能建设的总体要求,可以发现普通钻孔爆破破岩凿井技术存在安全风险高、作业不连续、环境污染、职业伤害严重等问题,与建井智能化发展趋势不匹配、不协调。也要注意,我国在机械破岩钻井技术与装备方面仍处于起步阶段,尽管在大型竖井钻机、反井钻机、竖井掘进机、斜井硬岩掘进机等研究方面取得一定的进展,但钻机装备和技术工艺基础薄弱,与国外发达国家仍存在一定差距,部分钻井装备的关键构件、传感器、专用材料以及沉井式竖井掘进机整机都依

赖进口;亟需通过地质、设计、岩土、力学、机械、材料、安全、控制、信息等多学科的交叉融合,科学谋划并统筹推进,重点发展新型大体积破岩与克服重力排渣、围岩与结构稳定控制、整机装备智能制造、环境感知与反馈、钻井风险防控等智能钻井技术装备的创新与应用 [6,7],力争全面提升大直径井筒钻井技术与装备的创新能力和国际竞争力。

本文在分析大直径机械破岩钻井技术装备发展需求、对比国内外发展现状的基础上,从基础科学问题研究、应用技术研发、高端装备制造、工程示范等角度剖析我国钻井技术装备发展面临的挑战,提出井筒建设技术与装备的重点任务和发展建议,以期为推动我国地下工程建设与资源开发领域研究提供基础参考。

二、大直径钻井技术装备的需求分析

(一) 推动井筒建设技术变革

地下固体矿产资源开采和地下空间工程建设是在深部岩土体内利用破岩技术与装备建设稳定的空间工程结构,进得去、取得出、待得住是地下工程建设的基本任务和要求。在大直径井筒建设技术的发展进程中,钻眼爆破技术代替人工凿岩是第一次技术突破,而机械破岩钻井是建井技术的第二次重大技术变革,将不连续且难以控制的爆破破碎岩石转变为利用全断面刀盘或钻头进行连续可控破岩 [8]。机械破岩钻井技术解决了钻孔爆破凿井存在的井筒狭小空间内作业人员多、职业伤害严重、环境污染重、作业不连续、易发生安全事故、施工效率低等突出问题,攻克了地层预探识、不良地层预改性、大体积破岩、连续排渣、协同掘支、感知与调控、风险防控等科学技术问题,将开创机械化、无人化、智能化井筒建设的新阶段。因此,全面提升大直径井筒钻井技术装备水平,是推动我国地下工程建设的重大需求,也是解决我国深地资源开发重大工程技术问题的关键举措。

(二) 支撑国家矿产资源开发

伴随着我国浅部矿产资源的持续开发,千米以深矿产资源开发成为支撑我国矿业发展的必然趋势。据不完全统计,我国煤炭行业已建成40余条深度超过1000 m的井筒;金属矿井建成近20条深度超过1000 m的井筒,其中7条井筒深度超过1500 m,正在设计和施工的井筒深度超过2000 m [9,10]。2019年第21届中国科学技术协会年会发布了20个对科学发展具有导向作用、对技术和产业创新具有关键作用的前沿重大科学问题和工程技术难题,其中第19项为“千米级深竖井全断面掘进技术” [11]。因此,深化机械破岩大直径钻井技术装备研究,致力解决深部高地温、高地压、高水压等复杂地质条件下普通钻爆法凿井存在的安全和职业伤害等问题,将为我国千米级深井建设与资源保障供给提供重要支撑。

(三) 服务国家重大地下工程建设

1. 城市地下空间开发利用

从城市地下空间发展的历程来看,起初我国城市地下空间建设以人防地下工程建设为主体,而目前城市地铁隧道始发井、地下疏排水与排污系统立井、地下竖井式停车场、地下废料储藏/垃圾处理等城市深大竖井建设工程日益增加;主要采用小型挖掘设备进行开挖,场地占用面积大,挖掘效率低;城市地下60~200 m空间的全要素开发还停留在研发与设计层面。发展大直径井筒钻井技术与装备,将助力解决“城市综合征”,是服务“韧性城市”“海绵城市”建设的重要技术支撑。

2. 水力发电站建设

水电行业的水力发电站和抽水蓄能电站建设多采用地下厂房式结构,需要建设大量的压力管道、出线竖井、通风竖井等井筒工程。目前的井筒深度在400 m左右,正在规划的压力管道井筒深度达到800 m,将明显减少辅助工程量并优化电站建设系统。发展大直径井筒钻井技术与装备,可应用于国家大型水电站建设、抽水蓄能电站建设以及其他重大水利工程建设的井筒工程项目,服务国家清洁能源发展,保障“碳达峰、碳中和”国家战略实施。

3. 深埋铁路、公路隧道建设

深埋铁路、公路隧道建设需要隧道施工措施井和通风井:前者用于开拓和增加作业面、加快

主洞建设速度,后者保证隧道安全运行。目前国内最深的铁路竖井为高黎贡山隧道1号竖井(主井深762.59 m、副井深764.74 m),依然采用普通钻爆法施工。因此,发展大直径井筒钻井技术与装备,可应用于川藏铁路、新疆天山隧道等重大工程的深大通风井建设项目,服务国家交通强国战略、保障交通重点工程。

4. 其他地下工程建设

在国家大型科学试验方面,目前设计规划的试验竖井工程深度近800 m。国防、引水调水工程隧道、海上风电、地下油-气-化学物质储存、地下核废物和CO₂封存等地下工程建设领域的井筒工程数量和井筒直径及深度也在逐年增加。这些地下工程建设对大直径井筒钻井技术与装备提出了重大需求。

三、国内外钻井技术装备发展现状

20世纪60年代,国内外开始机械破岩凿井装备研究,大直径井筒机械破岩钻井装备主要有竖井钻机、竖井掘进机、反井钻机、斜井硬岩掘进机等类型。鉴于钻井装备性能和制造能力是钻井技术发展的关键,本文主要围绕适用不同地质条件和工程条件的钻井装备及其工程实践展开论述。

(一) 竖井钻机钻井

20世纪中期,美国休斯公司的CSD300型、德国维尔特集团公司的L40型竖井钻机代表了当时的先进水平,但材料、装备加工制造水平和经济成本制约了机械破岩凿井技术的发展。到20世纪末,由于采矿工业变化,多数国家此项技术的研发处于暂时停滞状态或转行到隧道掘进机等领域。

为解决我国东部富水深厚冲积层建井难题,由北京中煤矿山工程有限公司联合国内企业和高校,在国家“七五”“十五”科技攻关项目与“十一五”科技支撑项目的资助下相继开展了钻井法凿井技术研究。在国外钻机基础上,升级改造了L40/1000型钻机,后续又研制了具有自主知识产权的AS-12/800型、AD130/1000型等大型竖井钻机装备 [12],形成了钻井直径小于7.7 m井筒“一钻成井”、直径10.8 m井筒“一扩成井”快速钻井工艺,最大钻井深度为660 m,标志着我国竖井钻机钻井技术

发展达到了新高度,处于国际领先水平。钻井法具有机械化程度高、钻进自动控制、井下无人的优势,逐步拓展应用于海上风电桩基钻井工程。中国平煤神马能源化工集团有限责任公司研制的 ZDZD-100 型全液压竖井钻机,在钻进能力、钻井直径方面处于国际先进水平,正在陕西省可可盖煤矿全岩地层进行直径 8.5 m、深度 538 m 的“一钻成井”试验。

(二) 反井钻机钻井

德国海瑞克股份公司、加拿大 Redpath 公司、澳大利亚特瑞泰克国际投资有限公司一直致力于反井钻机和反井钻井技术研发,研制的 RBR900 型、G330SP 型是目前最大型的反井钻机,设计钻井深度达 2000 m,扩孔刀盘的直径范围为 1~8 m。20 世纪 80 年代开始,北京中煤矿山工程有限公司研制了适用于稳定地层条件不同地下工程领域井筒施工的 LM 系列、BMC100~BMC600 系列反井钻机,最大钻井直径为 6 m,钻井最大深度为 592 m [13]。北京中煤矿山工程有限公司组织研制的智能控制 BMC1000 型反井钻机,设计钻井直径为 7 m,钻井深度可达 1000 m,拥有完全自主知识产权的核心设备性能和稳定的技术状态;采用模块化设计,设备外形紧凑,满足狭窄场地情况下灵活运行的要求,适用于地下工程的反井钻井。这标志着我国大直径井筒反井钻井技术和装备制造取得重大进展。

(三) 竖井掘进机钻井

20 世纪 60 年代开始,美国和德国主导研究全断面和部分断面竖井掘进机。德国维尔特公司研制了部分断面竖井掘进机和 SB-VI-580/750 型上排渣竖井掘进机,海瑞克股份公司制造了悬臂截割破岩上排渣竖井掘进机并提出了大滚轮破岩上排渣竖井掘进机概念 [14~16]。美国罗宾斯公司研制了“ ω ”形钻头结构的 241SB-184 型竖井掘进机,基尼公司研制了球形钻头结构的 VDS400/2430 型竖井掘进机 [17]。截至目前,国外竖井掘进机凿井直径约为 8 m、深度在 700 m 左右,但掘进速度低、相对成本高。

“十二五”时期由北京中煤矿山工程有限公司承担国家“863”计划项目的“矿山竖井掘进机研制”课题,研制出了国内首台(套)MSJ5.8/1000/1.6D 型竖井掘进机,该机采用锥形全断面钻头破岩和导

井式下排渣方式。2020 年,采用首台(套)下排渣竖井掘进机开展了云南省以礼河水电站钻井工业性试验,完成钻井深度为 282.5 m、导孔直径为 1.4 m、掘进直径为 5.8 m 的出线竖井工程 [18]。中铁工程装备集团有限公司研制的 SBM/1000 型全断面硬岩竖井掘进机,采用全断面刀盘破岩和机械排渣方式,2021 年年底完成了浙江省宁海抽水蓄能电站竖井工程工业性试验,钻井深度为 198 m、钻井直径为 7.83 m。中交天和机械设备制造有限公司研制的“首创号”超大直径硬岩竖井掘进机,采用全断面刀盘破岩和半淹井流体排渣方式,2021 年年底在新疆维吾尔自治区天山胜利隧道 2 号竖井始发,设计钻井直径为 11.4 m。相关产品的研制和应用,标志着我国基本掌握了竖井掘进机技术体系。与此同时,2021 年科学技术部组织并立项了“千米竖井硬岩全断面掘进机关键技术与装备”重点专项。国内城市用下沉式竖井掘进机(VSM)装备处于设计研发阶段,依靠进口 VSM 设备和技术服务导致成本居高不下。2020 年,我国引进的德国海瑞克股份公司 VSM12000 型沉井式竖井掘进机,采用了部分断面截割破岩和潜入式泵吸反循环排渣,完成了南京市建邺区沉井地下车库项目,最大开挖深度为 68 m,钻井直径为 12.8 m。

(四) 斜井掘进机钻井

全断面硬岩隧道掘进机(TBM)已逐渐成为城市地铁、铁路隧道、引水隧洞等基础设施建设的重要设备,不仅解决了普通钻爆法危险性高、劳动强度大等问题,而且一定程度上解决了综掘机破岩能力不足、硬岩掘进效率低的问题。根据统计结果,采用 TBM 的掘进速度可达到钻爆法的 3~10 倍,为综掘法的 2~8 倍,体现了减人提效、安全可靠、经济环保的优势。我国 TBM 施工技术主要是用于平巷或隧洞开挖,而国外较多开展了 TBM 斜井工程实践,TBM 斜井钻井直径通常为 3~10 m,上坡角度大于 37°,下坡角度小于 30°,最大钻井长度为 1010 m。据不完全统计,全球有 85 个斜井项目采用了 TBM 施工,其中 60 余个为抽水蓄能电站的斜井项目 [19]。

我国在大坡度、长距离、深埋深等复杂条件下 TBM 斜井建设领域的应用处于起步阶段。国家“十一五”科技支撑计划示范工程“盾构施工煤矿

长距离斜井关键技术研究及示范”，采用中国铁建重工集团研制的单护盾 TBM 掘进机掘进神东补连塔煤矿 2 号副井，5.5° 连续下坡，TBM 掘进长度为 2718.2 m，开挖直径为 7.62 m，平均月进尺为 546 m。2021 年，陕西延长石油（集团）有限责任公司可可盖煤矿主副斜井采用中国铁建重工集团股份有限公司研发的 ZTT7130 型敞开式全断面 TBM 掘进机进行施工，主斜井设计倾角为 5.6°，TBM 掘进 5040.9 m，掘进直径 7.13 m；副斜井设计倾角为 6°，TBM 掘进 5041.3 m。这是目前国内煤系地层 TBM 掘进的最长距离 [20]。

四、我国钻井技术装备发展面临的挑战

（一）工程场景与市场环境的接受程度较低

钻孔爆破破岩和小型机械挖掘在矿山井巷与地下工程建设中长时间占据主流位置，施工企业从经济性、效率性、可靠性等方面考虑，对新型大直径井筒钻井技术装备认知程度和接受程度较低，机械破岩钻井技术装备替代难度依然较大。大直径井筒穿越地层的复杂性和不确定性对大直径钻井提出了极高的安全性要求，钻井过程中的多系统集中控制和协同作业难度较高。目前钻井工程应用案例基数少，市场反馈支撑不足，不仅导致钻井技术装备开发的科研院所和企业参与度较低，同时阻碍了钻机技术装备功能和性能的优化提升，不利于技术与装备革新适应地下工程建设发展需求。

（二）大直径钻井技术装备产业链不完善

中国煤炭科工集团有限公司、中煤矿山建设集团有限责任公司、洛阳中信重工机械股份有限公司是我国最早从事机械钻井技术装备研究的单位。中国铁建重工集团股份有限公司、中铁工程装备集团有限公司、中交天和机械设备制造有限公司等企业在大直径钻井装备制造方面起步较晚，主要从研制隧道或巷道掘进机方面转型到研制井筒钻机装备，核心技术自主创新能力薄弱，较多集中在对国外已有装备的改造和升级。钻井装备整机的主轴承、液压件、电气控制组件等关键部件以及总体集成设计技术已经实现国产化，核心部件对外依赖度不断降低，但新材料、加工技术和工艺的产业链少、产业链短等因素导致相比国外企业依然存在差距。装备

制造企业对凿井工艺及装备的工程适应性认知不足，钻井基础理论、技术、工艺以及装备的设计与研发更多停留在科研院所和高校层面，钻井技术装备产业链不完善成为推动钻井技术发展和制造装备性能提高的障碍。

（三）智能钻井技术装备处于初级阶段

智能化钻井是机械化和信息化建井到智慧化建井的过渡阶段。目前智能钻井相关基础理论薄弱，核心关键技术、智能装备制造能力等瓶颈尚未取得重大突破，现有机械破岩钻井技术装备更多还是对爆破破岩技术的替代以及对作业工人体力的延伸或替代。地层条件的复杂性、特殊性、多变性以及装备运行重复出现率较低的自主学习机会，极大制约了智能钻井装备深度学习、分析、决策系统的研发与运行可靠度，使得地层感知、钻井装备运行、井筒结构稳定等方面实现自主决策与智能防控困难重重。现有的钻井智能监控分析系统存在“重监测、轻控制”“管理强、技术弱”等问题，“环境装备-仿真模拟-判识反馈”三元体系的智能分析决策成为现阶段智能化建井需要首先解决的难题。由于智能钻井处于发展的初级阶段，关键技术、核心装备、研发平台、学科专业、标准规范、人才梯队、示范工程等顶层设计与发展路径不完善，甚至有缺失。

五、井筒建设技术与装备重点发展方向

推动我国从地下工程建设大国迈向强国行列，提升我国钻井技术与国产高端装备核心竞争力，应遵循“基础理论-应用技术-整机装备-钻井工艺-工程示范”研究思路，突破钻井地层控制、高效钻进和结构稳定、灾害防控等关键科学技术问题，研发高效、可靠、智能钻井装备及配套系统，满足地下工程领域井筒“安全、快速、智能、绿色”建设的迫切需求。

（一）钻井工程地质保障

岩土工程特别是千米级深井建设问题的复杂性，在很大程度上取决于井筒穿越的地质条件。复杂地质环境和工况下高可靠、高效率、智能化的机械破岩装备要实现安全、高效、绿色钻井，必须率

先攻克面临的地质透明化难题，为钻井装备“干井掘进”提供“透明地质、靶域改性、主动控灾”的地质安全保障。重点开展基于多重探测手段的地层岩体原位精细化探测、岩性识别与围岩分级方法研究，攻克随钻远距离动态探测与岩体参数感知、风险判识、地层综合预改性等关键技术，完善大直径钻井地质风险评价与防控机制。

（二）钻井技术工艺突破

竖井钻机、竖井掘进机、反井钻机、斜井掘进机等钻井装备形成了各自相适应的钻井技术与工艺。然而无论以哪种机械破岩钻机进行钻井施工，均要遵循“破得掉”“排得出”“控得住”“支得牢”四大原则，即实现“高效破岩”“连续排渣”“精准钻进”“围岩稳定”4项关键技术与工艺[7]。针对井筒多场耦合条件下钻机装备大直径钻井工艺适应性难题，开展机械破岩钻井井内空间布置设计理论和方法、钻进-排渣-支护与地层改性平行作业工艺、钻井风险控制技术等研究。针对坚硬岩石难破碎、重复破碎和围岩扰动失稳问题，攻克多刀协同与新型破岩方式联合的坚硬岩石大体积破碎、克服重力的机械或流体连续排渣、随钻支护与掘-支协同永久支护等科学技术难题。

（三）装备设计与制造能力提升

为适应钻井井筒穿越地层复杂性、多变性、不确定性的特点，装备研制采用“材料-结构-性能”一体化与“设计-制造-运行”全过程协同的设计理念，研发智能感知、集中控制、强自适应的大直径钻井钻机。重点开展钻机装备多源动载激励下钻井钻机的动力学建模、系统耦合动力学分析与优化、整机总成及其空间优化布置等研究，研发破岩钻进岩-机作用感知反馈、不良地质超前探测、旋转-推进-支撑协调、高精度装备姿态调控等核心功能系统，形成轻量化、高性能、低能耗、高效率、高可靠的智能高端钻井装备及配套系统。

（四）钻井系统运维与预警

在地下大直径钻井过程中，需要对钻井装备运行状态、围岩与支护结构的稳定性开展实时监控并制定防灾减灾技术对策。重点开展智能钻井装备探

测、掘进、排渣、支护、推进、支撑、导向、降温、排水、通风等系统运行状态可靠性与稳定性的智能诊断与预警，钻井围岩及其支护结构的监测与风险防控研究，建立钻井过程中井下多维数据融合共网传输体系与智慧终端平台；突破适应井内极端恶劣环境的钻井装备快速脱困技术，快速应对风险，避免并降低潜在的经济损失。

六、对策建议

（一）确立智能钻井发展理念

我国地下工程大直径钻井技术与装备的发展应秉持安全、高效、绿色、智能等理念，协同政府、行业、企业、科研院所，面向国家重点项目或工程，发挥校企联合主体地位、政府和行业主管部门服务、市场需求引领的作用，合理加大专项资金投入，制定配套支持政策，完善技术产业链。研制大功率智能钻机及配套装备，突破复杂地质条件下大直径钻井全系统协同控制技术，基于信息融合、数字逻辑模型、智能控制等技术构建大直径井筒信息化、无人化、智能化钻井体系。针对智能钻井组织架构、管控模式、管理方法、经营模式、岗位权责等，制定全面覆盖、重点突出、持久力强的保障措施。积极整合现有资源和潜在资源，推动我国智能钻井基础研究、关键技术突破和智能装备制造，满足提质增效、高质量发展的需要。

（二）明确智能钻井发展路径与任务

制定智能钻井顶层规划，梳理钻井技术装备发展的关键科学问题和“卡脖子”技术，明确智能钻井技术装备发展路径和重点任务。针对地下工程井筒建设从浅部走向深部、从小直径钻井向大直径钻井的发展趋势，大直径井筒钻井钻机产品未来为了适应地层条件和工程条件必然朝着多样化和系列化方向发展，应分类型、分阶段、分层次建设可迭代大直径钻井技术装备体系和发展架构。针对地下工程建设智能钻井整体系统，基于目标钻井深度和直径，开展钻机钻井可行性分析和工艺研究，建立钻井整体装备选型与井内空间布置理论方法；攻克地层精细探查与地层预改性技术、大体积破岩与连续排渣技术、围岩稳定与掘-支协同控制技术等；发展钻井装备环境感知、决策与姿态调控技术，研制

轻量化、高性能、低能耗、高效率、高可靠的智能钻井装备；突破钻井装备和围岩支护结构实时监测和预警技术，构建智能钻井防灾减灾和全过程风险管控体系，实现大直径钻井智能感知、精准钻井、风险控制。

（三）建立和完善大直径钻井相关标准规范

建立健全体系性、继承性、前瞻性的标准规范，引领和推动行业的高质量发展。我国大直径钻井技术装备应用涉及煤矿、金属矿山、铁路交通、城市地下空间、水力发电、海上风电等行业，因工程功能属性和地层条件的差异必然导致对大直径钻井技术装备的要求有所不同，因此各行业均有各自适用的标准或规范。以煤炭行业为例，针对反井钻机钻井法和立井钻井法均出台了相关的标准规范，而竖井掘进机钻井法和斜井掘进机钻井法的相关标准规范仍属空白。部分行业缺乏对大直径钻井法的相关标准规范，导致施工企业对大直径钻井法排斥或接受度不高。行业缺失智能钻井相关的标准和规范，很大程度上阻碍或限制了大直径钻井技术装备的发展。需要制定技术术语、工艺、装备、检验监测、质量验收等标准规范，同时制定相关通用技术国家标准，推进智能钻井从初级阶段向中、高级阶段迈进。

（四）推动智能钻井平台与示范工程建设

我国大直径钻井装备制造企业基数较少，且智能钻井技术的技术装备研发很难由单一企业独立完成，做不强也做不精。我国在井筒建设领域仅有国家发展和改革委员会办公厅批复的“矿山深井建设技术国家工程研究中心”1个国家级研发平台（由1家科研院所、1个安标国家中心、3所高等院校、3家生产施工单位共建）。亟需加强相关装备制造企业、设备应用企业、承担技术攻关任务的科研院所及高校之间的合作，强化基础研发投入、工程创新决策、科研组织和成果应用的主体作用，以创新为动力、协调为路径、绿色为使命，形成开放合作格局共享发展成果。针对大直径钻井产业链短、技术研发和装备制造资源分散、学科交叉融合度较低等问题，建议在国家层面进行统筹和规划，形成地下工程领域智能钻井发展指导意见，整合优势资源，建立智能钻井基础理论、共性技术、装备研制、工

程示范的综合技术创新平台；支持各类企业建立创新中心、技术中心、工业设计中心等研发平台，必要时加强国际交流合作；高校分层建设钻井技术学科，培养专有技术人才，形成集研发、设计、建造为一体的人才队伍，为大直径智能钻井技术装备发展提供坚实的智力支撑。

参考文献

- [1] 孙钧. 国内外城市地下空间资源开发利用的发展和问题 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 699-709.
Sun J. Development and some issues on exploitation and utilization of urban underground space in China and abroad [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 699-709.
- [2] 王国法, 刘峰. 中国煤矿智能化发展报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Wang G F, Liu F. China smart coal mine development report [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] Cai M F, Li P, Tan W H, et al. Key engineering technologies to achieve green, intelligent, and sustainable development of deep metal mines in China [J]. Engineering, 2021, 7(11): 1513-1517.
- [4] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.
Liu F, Guo L F, Zhao L Z. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [5] 钱七虎. 能源地下结构与工程——助力“双碳”目标, 赋能绿色城市 [J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(1): 1-2.
Qian Q H. Energy geostructure engineering: Promote carbon peak and neutrality, empower green cities [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(1): 1-2.
- [6] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 千米级竖井全断面科学钻进装备与关键技术分析 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3645-3656.
Liu Z Q, Song Z Y, Cheng S Y, et al. Equipment and key technologies for full-section scientifically drilling of kilometer-level vertical shafts [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3645-3656.
- [7] 刘志强, 宋朝阳, 纪洪广, 等. 深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 826-845.
Liu Z Q, Song Z Y, Ji H G, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 826-845.
- [8] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 我国反井钻机钻井技术与装备发展历程及现状 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 32-65.
Liu Z Q, Song Z Y, Cheng S Y, et al. Development and prospects of raise boring technologies in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 32-65.
- [9] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417-426.
Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.
- [10] 谭杰, 刘志强, 宋朝阳, 等. 我国矿山竖井凿井技术现状与发展

- 趋势 [J]. 金属矿山, 2021, 50(5): 13–24.
- Tan J, Liu Z Q, Song Z Y, et al. Status and development trend of mine shaft sinking technique in China [J]. *Metal Mine*, 2021, 50(5): 13–24.
- [11] 人民网. 中国科协发布2019重大科学问题和工程技术难题 [EB/OL]. (2019-07-01)[2022-02-10]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2019/0701/c1007-31205367.html>.
- People's Daily Online. Major scientific issues and engineering technical problems issued by the China Association for Science and Technology in 2019 [EB/OL]. (2019-07-01)[2022-02-10]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2019/0701/c1007-31205367.html>.
- [12] 洪伯潜, 刘志强, 姜浩亮. 钻井法凿井井筒支护结构研究与实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.
- Hong B Q, Liu Z Q, Jiang H L. Research and practice of shaft support structure of blind drilling method [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2015.
- [13] 刘志强. 反井钻机 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Liu Z Q. Raise boring machine [M]. Beijing: Science press, 2017.
- [14] 刘志强. 竖井掘进机 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
- Liu Z Q. Shaft boring machine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2019.
- [15] Maidl B, Schmid L, Ritz W, et al. Hardrock tunnel boring machines [M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- [16] Herrenknecht. Shaft boring machine(SBM) [EB/OL]. (2015-06-14)[2022-02-10]. <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/shaft-boring-machine-sbm/>.
- [17] Hutchinson D. Zeni vertical drilling system shaft drill model VDS-400/2430 [R]. West Virginia: Zeni Drilling Company, 1989.
- [18] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 86–94.
- Liu Z Q, Song Z Y, Cheng S Y, et al. Classification grading evaluation index system and evaluation method of surrounding rock for full section shaft boring machine [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 86–94.
- [19] 张学清, 王炳豹, 殷康, 等. 洛宁抽水蓄能电站引水斜井TBM施工关键技术研究 [J]. 水力发电, 2022, 48(2): 81–87.
- Zhang X Q, Wang B B, Yin K, et al. Study on key technology of TBM construction for diversion inclined shaft of Luoning pumped-storage power station [J]. *Water Power*, 2022, 48(2): 81–87.
- [20] 范京道, 封华, 宋朝阳, 等. 可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备 [J]. 煤炭学报, 2022, 47 (1): 499–514.
- Fan J D, Feng H, Song Z Y, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 499–514.