

我国深部高温地层井巷建设发展路径与关键技术分析

刘志强^{1,2)}, 陈湘生^{2,3)}, 宋朝阳^{1,2)}✉, 程守业^{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, 深圳 518061

✉通信作者, E-mail: szhaoyang123@126.com

摘 要 深部矿产与地热资源共采战略为实现“矿-热”经济有效开发和实现双赢提供了有效途径, 深部高温地层井巷建设技术是“矿-热共采”战略安全高效实施的重要支撑和保障。分析了深部“矿-热共采”战略对井巷建设技术需求的必要性和迫切性, 梳理了矿山井巷建设技术现状和存在的不足, 阐述了矿山井巷智能化建设方面的研究进展与发展路径; 剖析了深部高温地层井巷建设面临的难题与挑战, 提出了深部高温地层井巷工程建造技术发展的三大优先发展任务: 1) 深部高温地层井巷建设地质保障系统; 2) 深部高温地层井巷建设模式与规划; 3) 深部高温地层井巷建设成套技术与装备。结合三大优先发展任务, 凝练出 8 项基础理论与关键技术的发展方向: 地层原位探识与透明化重构、高温地层井巷建设工艺适宜性、高温地层非爆破破岩、深井连续提升、深部不良地层改性与围岩长期稳定性控制、深井热害治理、井巷装备智能感知、井巷掘进装备智能控制。基于以上内容, 初步构建了深部高温地层井巷建设基础理论与技术研究体系, 以期对深部资源开采清洁化和地热清洁能源规模化发展提供参考。

关键词 深部环境; 矿-热开采; 地热资源; 矿井建设; 高温岩层

分类号 TU45

Development path and key technology analysis of shaft and tunnel construction in deep stratum with high temperature

LIU Zhi-qiang^{1,2)}, CHEN Xiang-sheng^{2,3)}, SONG Zhao-yang^{1,2)}✉, CHENG Shou-ye^{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, China

✉ Corresponding author, E-mail: szhaoyang123@126.com

ABSTRACT The joint exploitation of deep mineral and geothermal resources strategy provides an effective way to realize the economic exploitation of “resources-thermal” and achieve a win-win situation. The technology for deep high-temperature stratum shaft and roadway construction is an important support and guarantee for the safe and efficient implementation of the “ore-thermal co-mining” strategy. The necessity and urgency of this deep “ore-thermal co-mining” strategy to the technical requirements of shaft and roadway construction are analyzed. Combined with the analysis of the status quo of mine construction technology, it is clear that the non-blasting rock breaking technology represented by mechanical rock breaking is an important direction in the development of deep shaft and roadway construction technology at present. Mechanical rock breaking technology is a technical approach to solve the existing problems in the process of drilling and blasting excavation, such as too many underground workers, complex working procedures, serious occupational injury, and environmental pollution. In the hard rock stratum, partial section roadheader equipment has low boring

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004125); 中国工程院咨询研究资助项目(2019-XZ-16); 天地科技股份有限公司创新创业资金重点资助项目(2021-2-TD-ZD006)

efficiency, large tool consumption, and high economic cost, whereas full-section boring machines used for shaft or roadway have advantages in detection, rock breaking, slag discharge, surrounding rock supporting, and other aspects. Therefore, the development direction of intelligent shaft and roadway construction is proposed. It analyzes the difficulties and challenges faced by shaft and roadway construction in the deep high-temperature stratum, such as precise formation exploration, formation reinforcement and water plugging, high ground temperature prevention and control, high ground stress prevention and control, deep shaft lifting, and manufacturing of shaft and roadway boring machines. Three priority development tasks are proposed: 1) a geological guarantee system for deep high-temperature strata shaft and roadway construction; 2) a construction mode and planning of shaft and roadway in deep high-temperature strata; 3) a complete set of technology and equipment for deep high-temperature stratum shaft and roadway construction. Eight basic theories and key technologies are summarized based on the three priority development tasks: *in situ* exploration and transparent reconstruction of stratum, suitability of shaft and roadway construction methods in the high-temperature stratum; non-blasting rock breaking in the high-temperature stratum; continuous lifting of deep shaft; modification of deep bad stratum and long-term stability control of surrounding rock; thermal damage treatment of deep shaft; intelligent perception of shaft and roadway equipment; intelligent control of shaft and roadway boring equipment. Based on the above content, the basic theory and technology research system of shaft and roadway construction in a deep high-temperature stratum is preliminarily constructed to provide a reference for deep resource clean mining and the large-scale geothermal clean energy development.

KEY WORDS deep environment; mineral and geothermal comining; geothermal energy; mine construction; high-temperature strata

“深地、深海、深空、深蓝”作为国家“决战深部”的重大战略任务,其中“深地”战略关乎国家重要战略资源和能源的开发利用,然而面临深部坚硬岩石、高地温、高地压和高水压等极端地层环境条件,导致对深部地层的认知相较于深空和深海的认知程度较低^[1]。因此,向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题,以满足国家对战略科技支撑的需求。

资源和能源是国民经济和社会发展的重要基础和支柱,矿业与能源工程科技是现代化世界强国建设战略的重大需求。目前,深地勘查或深部开采石油的钻井深度已接近 15000 m,世界上已钻成超 9000 m 深井 9 口,超万米特超深井 3 口,其中,最深钻井为俄罗斯 Sakhalin 钻井,达 14600 m 深,俄罗斯 Odoptu OP-11 油井深度为 12345 m,美国在卡塔尔钻成的阿肖辛油井深度为 12289 m。随着我国石油钻井技术装备的不断发展,我国西北油田顺北 55X 井完钻井深达到 8725 m(亚洲陆上最深钻井),顺北鹰 1 井完钻井深 8588 m,顺北 5-5H 井深 8520 m,顺北蓬 1 井深 8450 m,顺北评 2H 井深 8433 m;此外,我国深部找矿钻探在 2000 ~ 3000 m 深度已完成钻孔 170 个,3000 m 以上金属探查孔 2 个,分别为胶东地区焦家断裂带钻孔深 3266.06 m 和三山岛断裂带钻孔深 4006.17 m,其中焦家断裂带钻孔在 2800 m 以深探获多层金矿体,是我国目前最深的见矿钻孔^[2]。从国际资源开发现状来看,石油、天然气等油气资源钻探深度已超过万米,主要因油气资源属于流态化开发,采用钻机钻井直径小,人员不下井,而以井工开采的固体矿物资源

开发深度远不及油气资源开发深度。按照固体矿产资源赋存深度与环境条件以及资源的需求现状,国内外矿产资源开发已全面转入深部开发阶段,千米级深部资源开采已成常态。据统计,国外矿产资源勘查开采深度超 1000 m 的矿山有 80 余座,其中矿产开采深度在 1000 ~ 2000 m 的有 60 余座,2000 ~ 3000 m 深的有 12 座,3000 ~ 4000 m 深的有 5 座,开采深度超过 4000 m 的有 1 座;我国煤矿最大开采深度超 1500 m,有色金属矿山开采深度逼近 2000 m^[3]。以现有的技术储备来看,对于 2000 ~ 5000 m 深部固体矿物的大规模开采,依然需要依靠井工开采方式。因此,矿井建设能力和技术水平在很大程度上制约了进入深地空间进行资源开发的步伐,亟需开展深部井巷工程建设新理论、新技术、新材料、新工艺等方面的攻关,以满足装备进入地下进行采、掘、运等生产活动的需求;对于 5000 m 以深的固体矿物资源的开发现有的技术储备将完全失效,必须颠覆现有的矿物开采理论与技术,如借鉴油气资源流态化开采模式或流态化提运模式。因此,面对现阶段 2000 m 以深国家资源能源战略迫切需求,探索深地基础前沿大科学问题,构建深部矿井开拓模式与工艺,突破深部井巷建设关键技术,研发适应深地复杂环境中井巷掘进重大装备,既是保障国家深地资源和能源的安全开发与经济发展的重要支撑,也是实现向地球深部“要资源,要空间”必须解决的科学技术问题。

随着探明资源赋存深度的不断增加,高温热害成为深部资源开发面临的突出难题之一。深地资源开发过程中地层温度以平均 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 梯度

增加,在地幔与地壳交界处平均厚度 17 km,温度达到 500 ℃。目前,国外开采深度最深的南非兰德金矿开采深度为 4530 m,工作面温度达 65 ℃;我国矿产资源开采深度已突破 1500 m 埋深,工作面最高温度达 53 ℃^[4-5]。因此,随着深部开采深度继续向下延伸,在达到一定临界深度时,高地温将导致现有的井巷建设技术工艺和装备等将难以高效、安全、可靠和稳定的工作;同时,随着我国生态环境保护呈现高压态势,资源开采的生态环境约束将越来越严苛,致力于向绿色低碳转型。因此,从深部资源开发的安全、经济、绿色、智能等方面考虑,井工开采作为 2000 ~ 5000 m 深部固体矿产资源开发的主要方式,矿井建设模式正酝酿深刻变革,高温地层井巷建设基础理论、关键技术、核心装备、新材料和新工艺亟待发展或变革。

为推动资源与能源发展向绿色低碳转型,解决深部高地温环境下资源安全开发难题,蔡美峰院士提出了“深部矿产和地热资源共采战略”^[6],核心理念是将深部采矿与深部地热开发相结合,充分利用矿产开采建设的井巷工程,在深部建设多水平巷道、360°分布的水平巷道,这与增强型地热系统(Enhanced geothermal systems, EGS)的小口径钻孔和通过水压致裂形成的热储相比,可有效地大规模地提高热储建造的能力、成百上千倍地增加热交换面积和地热输送的量级,不仅大幅度消减采矿降温成本,同时增加矿产开采效益和地热资源开发利用效益,为解决深部采矿的经济性和可行性问题开辟了有效途径。

深部高温地层井巷工程是深地矿产资源和深部地热共采战略实施的重要组成部分,即采用井巷建设技术与装备从地表进入深部高温坚硬地层中,为资源与地热共采创造条件的工程,是保障深地资源安全、高效开发整个产业链的首要 and 关键工程。本文在中国工程院《深部矿产和地热资源共采战略研究》重点咨询项目的资助下,笔者基于高温坚硬岩层井巷建设技术与装备对深部矿产与地热资源共采战略支撑的关键需求,总结发展现状、剖析面临难题、分析关键技术群、研判重点攻关方向,以期为深部资源开采清洁化和地热清洁能源规模化发展提供参考。

1 矿山井巷建设技术发展历程与现状

1.1 钻爆法井巷建设技术

钻眼爆破法凿井是我国矿山井巷掘进的主要施工方法。钻爆法凿井方面,以深孔控制爆破破岩

技术为核心,完善了短段掘砌凿井工艺,研制了新型凿井井架、大直径提升绞车、大吨位悬吊稳车、大直径液压伞钻、大容量吊桶、迈步式整体模板和多层吊盘等凿井装备,实现了一次段高超 5 m 正规循环掘砌作业,具有提升高度 1547.5 m、运行速度 15.7 m·s⁻¹、单次有效提升荷载 53 t 的能力^[4];钻爆法凿井辅以冻结法、注浆法等围岩改性方法,解决了建井过程中地层涌水和围岩失稳控制等难题,创新“冻结-注浆-凿井”时空协同作业技术与工艺,满足了直径 8 ~ 12 m、1500 m 以深竖井建设需求。据不完全统计,我国近 40 余年来,矿山领域建成 1000 m 以深竖井 150 余条,其中,1300 ~ 1500 m 深竖井 15 条,1500 m 以深竖井 7 条;尽管受到矿产资源储量和生产能力等因素的影响,井筒直径建设并不是一味地追求大直径,但千米级竖井成井直径从最初 6 m 的已发展到 10.5 m,月成井速度曾一度超过 200 m^[4]。我国竖井建设深度与成井直径发展历程图,如图 1 所示。

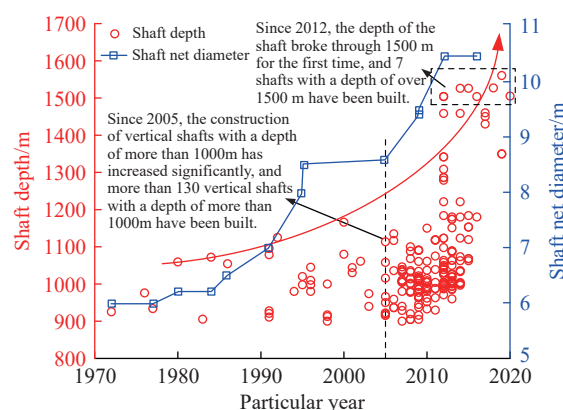


图 1 我国竖井建设深度与直径发展历程图^[4]

Fig.1 Development of shaft depth and diameter in China^[4]

矿山巷道工程特别是岩巷,同样以钻爆法施工为主,现已全面采用机械化钻孔取代人工钻孔,以凿岩台车钻孔爆破,装岩机排渣及辅助运输,形成“钻爆支排”的整套机械化作业线;研发了多种气动和全液压型凿岩机具,攻克了凿岩台车控制终端集中管控、巷道轮廓扫描、爆后轮廓重建、位姿控制、自动定位和自主行走等技术^[7],提高了凿岩台车自动化钻爆施工巷道能力和效率。

不可否认钻孔爆破井巷掘进技术为我国矿产资源开发与经济社会发展提供了重要支撑,但是也不可回避采用钻爆法井巷掘进存在的问题。首先,钻爆凿井施工存在难度大和风险高等问题,如下井作业人员多、作业环境差、职业伤害严重,安全事故时有发生;其次,钻爆法凿井工序复杂、施

工效率低,井筒建设工程量只占井巷工程总量的 5%~7%,但受制于建井技术的不足,工期占到了井巷施工总工期的 40%~50%;最后,钻爆法施工炸药爆破破岩产生大量的有害气体,造成环境污染,以钻爆施工深度 1200 m、直径 8 m 的井筒为例,需要消耗炸药约 200 t,排放到大气中的 CO、NO、NO₂、N₂O 等有害气体超过 20000 m³. 综上,尽管基于钻爆法井巷掘进施工,部分企业研发了一些所谓的智能凿岩、智能装药、智能排渣、智能支护和智能输送等设备,但由于炸药爆炸对设备、人员、围岩及环境等的不良影响,国家对炸药使用严格限制,现阶段普通钻爆法井巷建设技术显然与矿山行业机械化、少人化、绿色化、智能化发展的总体趋势不匹配、不协调,亟待进行非爆破破岩技术装备的研发与攻关.

1.2 非爆破机械破岩井巷掘进技术

机械高效破岩技术代替钻眼爆破岩石技术,实现了连续、精准、可控破岩钻进,机械破岩对井巷围岩扰动较小、次生裂隙率降低,有效降低了透水、涌水等水害风险;机械破岩掘进形成的断面规矩,可避免超挖和欠挖现象,提高了井巷围岩自稳性能;机械破岩凿井工艺相比于普通钻爆法凿井井下作业人减少约 70%,降低了作业人员劳动强度和职业伤害.

1.2.1 竖井机械破岩钻进技术与装备

针对地层条件和工程建设条件,机械破岩大直径井筒钻井方面,研发了以竖井钻机、竖井掘进机和反井钻机为主的机械破岩钻井装备体系,攻克了钻井地层预改性、富水软岩地层钻井围岩稳定控制、坚硬岩石大体积破碎、克服重力连续排渣、掘-支协同作业等关键技术与工艺,形成了机械破岩钻井技术与装备体系.

(1)竖井钻机钻井方面.

竖井钻机钻井方面我国处于国际领先水平,研制了 L40/1000 型、AD130/1000 型和 ZDZD-100 型等竖井钻机及配套装备,钻井直径可达 13 m、深度可达 1000 m,形成了适用于深厚冲积地层和富水软岩地层的“一扩成井”和“一钻成井”快速钻井技术工艺^[8],已完成最大钻井直径 10.8 m,最深钻井深度 660 m 的井筒.

(2)反井钻机钻井方面.

德国海瑞克研制的 RBR900 型反井钻机和维尔特研制的 G330SP 型反井钻机,设计钻井深度可达 2000 m,但尚无工程应用案例^[9]. 国内北京中煤矿山工程有限公司研制的 BMC100~BMC600 型反

井钻机,完成了最大钻井深度 562 m 和最大钻井直径 6 m 的井筒^[10-11],研发的 BMC1000 型反井钻机,设计钻井直径 7 m,钻井深度 1000 m.

(3)竖井掘进机钻井方面.

国外竖井掘进机研发起步较早,研制了部分断面和全断面的导井式下排渣竖井掘进机、部分断面和全断面的上排渣竖井掘进机等装备,典型代表有德国海瑞克研制的双支撑截割滚筒式、全断面式下排渣竖井掘进机以及截割式上排渣竖井掘进机,美国罗宾斯和齐尼公司分别研制了 241SB-184 型、VDS400/2430 型全断面上排渣竖井掘进机. 截止目前,国外竖井掘进机凿井直径约 8 m、深度 1000 m 左右^[12-13]. 北京中煤矿山工程有限公司研制了国内首台套 MSJ5.8/1000/1.6D 型竖井掘进机(金沙江 1 号),在云南以礼河水电站出线竖井工程应用并完成国内首个竖井掘进机钻井工业试验,掘进直径 5.8 m,深度 282.5 m,单日最高进尺 10.3 m;中铁工程装备集团有限公司研制了 SBM/1000 型全断面硬岩竖井掘进机,在浙江宁海抽水蓄能电站完成了深度约 198 m、直径 7.83 m 钻井工程.

我国现有竖井机械破岩钻井装备钻井深度及适用范围,如图 2 所示. 目前,竖井机械破岩钻井已形成了适用富水软弱地层的竖井钻机钻井,反井钻机和下排渣竖井掘进机钻井适用具有下部排渣通道的钻井工程,竖井掘进机钻井受地层条件、破岩能力、钻进技术和工艺的限制,与其他机械破岩钻井均未突破千米深度,而目前采用普通法凿井已经突破 1500 m. 我国的机械破岩钻井技术与装备依然处于研发起步阶段,现阶段亟需研发 1000~2000 m 深钻井技术与装备并完成工业性试验,深竖井机械化掘进基础理论、技术与装备的研发和创新任重道远.

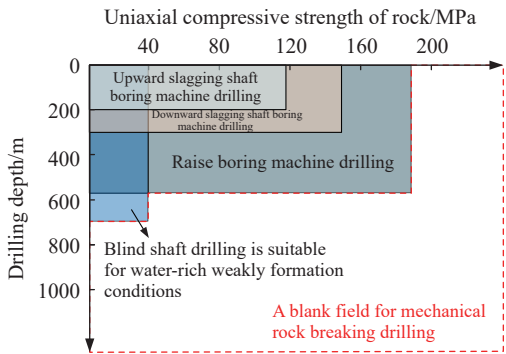


图 2 我国现有竖井机械破岩钻井装备适用范围
Fig.2 The scope of application of mechanical rock boring

1.2.2 斜井与巷道机械破岩掘进技术与装备

(1) 斜井与巷道部分断面掘进方面

以井工建设模式为主的矿山资源开采,遵循“采掘并重,掘进先行”的原则,巷道快速高效掘进,对矿山企业高效生产具有重要意义。掘锚机组是在悬臂掘进机和连续采煤机的基础上研发而成的掘锚一体化设备,可实现地层截割破岩、钻锚临时和永久支护的掘-支协同作业^[14]。国外具有代表性的掘锚机组有瑞典山特维克的 MB670LH、MB670 和 MB670-1 系列,美国久益公司的 12BM18、12ED30 和 EJM2x170 系列,德国波拉特的 E230,英国安德森的 KB II 和 BJD 的 2048HP/MD,奥地利阿尔卑尼的 AM30 等。我国从 20 世纪 90 年代开始在掘锚一体化快速成巷装备领域进行了研究试验,经几十年的研发和科技攻关,国内研制的具有代表性的掘锚机组有三一重工的 EBZ160-JM 系列化掘锚机、兖煤黑豹的 EBZ160MH 锚护分离式掘护锚一体机、中煤科工集团太原院的 EJM340/4-2H 掘锚机、天巨重工的 EJM270/4-2 型掘锚机、铁建重工的 ZJM4200 护盾式掘锚机及徐工基础的 EBZ260M-4H 型掘锚机。目前,适用巷道快速掘进的掘锚机组将掘、装、运、锚、支等功能高度集于一体,结构紧凑、稳定性好,实现了超前钻探、远程控制截割、可视化及高效除尘、截割轨迹在线监测及掘锚护一体化等技术,并逐步向大功率、自动化和智能化方向发展。然而现有的各种悬臂式部分断面掘进机主要应用于岩石强度较低的井巷掘进,且掘进断面一般小于 35 m²,在硬岩地层中掘进依然存在刀具耐磨性差、消耗量大、掘进效率低等问题。

(2) 斜井与巷道全断面掘进方面

全断面隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)掘进技术与装备在隧道工程应用成熟后,近年来随着 TBM 掘进技术的不断提升和能源开发等领域需求的增长,TBM 逐渐转向矿山井巷工程施工,主要应用于矿山软岩地层斜井和井下岩巷掘进。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 2718.2 m,开挖直径 7.62 m,平均月进尺 546 m。2021 年陕西延长石油可可盖煤矿主副斜井采用的中国铁建重工集团研发的 ZTT7130 型敞开式全断面 TBM 掘进机开始掘进,主副斜井设计倾角分别为 5.6°和 6°,单井 TBM 掘进长度超 5000 m,是目前国内煤系地层 TBM 正在掘进的最长斜井。

我国煤矿平硐和井下近水平巷道建设采用 TBM 掘进的情况,如神华新疆涝坝湾煤矿副平硐采用中国铁建重工集团研制的 ZTE6460 复合式 TBM 掘进,掘进长度 6200 m,掘进直径 6.46 m;山东新巨龙煤矿采用初北方重工集团研制的 QJYC063M 全断面掘进机掘进,掘进巷道总长度约为 10 km,掘进直径 6.3 m,环境作业温度高达 40 ℃。综合分析,我国已经拥有大直径矿山井巷全断面掘进机掘进技术装备与施工经验,初步形成了矿山井巷 TBM 掘进地层超前探测、高效破岩掘进、连续排渣、姿态控制、围岩快速支护、装备运行状态监控等成套技术体系,全断面掘进机虽然能够满足硬岩地层破岩掘进需求,但是其掘进技术工艺与装备需要克服地层涌水、地层破碎、断层发育等复杂地质条件,满足巷道多变坡度、小半径转弯、超长距离等工程条件,实现“探-破-支-运”一体化快速掘进,从而为深部高温地层井巷智能化掘进提供支撑。

1.3 智能化井巷建设技术

深部资源与能源共采战略的实施过程中必然要秉持安全、高效、绿色、智能的理念。目前,我国矿山井巷建设正经历钻爆法掘进、机械化掘进、智能化掘进的发展路径。然而,智能化井巷掘进处于发展的初期阶段,现有竖井钻机、竖井掘进机、反井钻机钻井技术与装备,以及掘锚一体机、全断面掘进机等巷道掘进技术与装备,尽管已经在一定程度上实现了掘进前方地层探测、破岩与排渣、掘进导向与装备姿态调控、运行状态监控、围岩与支护结构监控、井下人员与施工进度监视等技术^[15]。但我们必须清醒的认识到仍存在的问题,如目前的智能化井巷掘进装备水平不高、智能化技术体系不完整,智能化井巷建设不能被自动化、机械化建设能力混淆或被掩盖。

首先,现有所谓的井巷智能建设系统存在“重监测、轻控制”和“管理强、技术弱”等突出问题。现阶段的自动化机械破岩井巷建设技术在一定程度上更多的还是爆破破岩技术的替代以及作业工人体力的延伸或替代,在复杂的矿井地质条件下,特别是穿越富水地层或高应力破碎地层时,必须随时进行人工干预或者实施辅助技术或工艺才能完成安全掘进。

其次,深部井巷工程穿越地层条件具有多变性、复杂性和不确定性等特征,对掘进装备和配套装备的深度学习、分析与决策系统的研发及运行可靠度困难重重,自动化、机械化的井巷掘进装备

系统尚无法满足智能感知、自主决策与智能调控的需求^[5];此外,井巷围岩支护技术、设备、材料、工艺与智能化建设要求尚有很大差距。

其三,现有的智能化监控技术存在“重建设、轻运维”的问题。加快矿井智能化发展不应仅体现在井巷智能化建设过程中,井巷工程服役期运维监控技术的智能化也必然要列入矿山井巷智能化的蓝图中。

2 深部高温地层井巷建设面临的难题与挑战

深部“矿-热”共采战略将深部高地温导致的热害转变为可利用地热能源,实现“变害为利”,但深部资源能源开发不仅仅要面临高地温难题,同时要面临地质情况难确定、应力环境更复杂、涌水温度高和水量大等挑战,复杂恶劣地质环境将导致深部不良地质治理难度加大、装备性能受损、深井矿物提运效率降低、围岩支护结构劣化或失效、井巷施工成本增加、灾害和风险率提高等一系列的井巷工程建设难题与挑战。

2.1 深部地层原位精准探识与透明化难题

深部地层原位探识与透明化重构是开展深地矿物开采、地热开发、深地空间利用和深地实验室等活动的首要任务。可以说地层钻探深度有多深,对深部地层的认知程度才能有多深,资源和能源的开发利用才有可能达到多深。深部高温地层原位精准探识技术是深部地层结构探查与研究高温岩体力学的根本保证,是研究深部高温地层与浅部地层的产异性、变异性和不确定性的基础手段,是实现深部地层透明化和深部高温地层井巷工程规划设计融合的先决条件,能够为实现资源有效利用和能源开发提供安全可行的技术保障。

针对基于普通钻探获得的岩芯存在丢失大量原位信息的不足,谢和平院士提出了保压、保温、保质、保湿、保光的“五保”取芯构想^[16],经科研攻关初步实现了取芯保压能力超过 100 MPa,温度调节范围 $-8.8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而基于钻孔式的钻孔窥视、光-电联合、震-电联合、重-磁联合等探测方法,受制于探测深度与范围、数据传输方式、反演算法等,深部远距离地层构造与多场多相分布探测维度和精度不足,大部分已有矿区三维地质模型,在一定程度上是基于钻探资料和三维地震勘探数据进行简单叠加或进行数值计算反演后叠加,在探测精度和分辨率上并没有真正的提高^[17],特别是对于新建矿区不具备井下探测条件时,距离真正意义上的地质透明还有很大的差距。

2.2 深部不良地层改性难题

随着资源开采深度的不断增加,深部高温井巷建设将面对断层构造、岩体破碎、高温高压水、高岩溶水、有害气体等不良地质条件,对于深部地层井巷掘进构成严重威胁。基于地层精准探测与透明化重构技术,突破深部不良地层预改性技术,封堵地层高温涌水和有害气体,加固破碎围岩体并提高工程围岩稳定性,是实现深部高温地层井巷建设防灾减灾的重要保障技术。

目前,矿山建设工程形成了以破碎地层注浆技术与富水地层冻结技术为主的地层堵水与加固的预改性技术,然而深部高温地层特点导致低温冻结技术难以有效实施,所以深井预注浆改性必然成为深部不良地层加固堵水的重要手段。现有的地面预注浆深度已达到垂深 1100 m,造斜段水平段加固距离超过 200 m,但是更深部地层的预改性治理,将使得钻孔深度不断增加。然而深部钻进坚硬岩石时跳钻和钻具磨损严重,常规螺杆等工具中橡胶件可耐高温的数值通常仅 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,随钻测量(MWD)等仪器的电子元件耐高温极限为 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$,常规钻井液中蒙脱石在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上温度后会形成一种低标号的水泥,这些对钻孔轨迹测量、控制及钻进速率提高造成困难;此外,高地层压力导致浆液扩散范围受限,超深预注浆钻孔分支轨迹控制技术困难重重。因此,靶域精准定向钻孔、高温地层钻孔钻具、深井高压注浆装备、绿色高性能注浆材料等成为深井不良地层预改性面临的挑战。

2.3 深部高地温防治难题

随着深部地层井巷建设深度的不断增加,高温热害愈加严重。进入地下 1000 m 以深普遍温度大于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,南非 Mponeng 金矿深度 4359 m,地层温度 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,印度某金矿开采深度近 3000 m 时,地层温度高达 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$;更有甚者,在我国云南会泽、山东巨野、胶东半岛、河南秦岭等地区的部分矿山 500 m 深地层温度就超 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6]。据不完全统计,我国部分竖井凿井工作面温度统计,如图 3 所示。

深部高温湿热环境将导致人员难以下井工作,钻爆法施工采用的炸药在高温及热水浸泡环境下易产生膨胀、融化现象,导致炸药失效,并产生有毒物质;井巷掘进采用的液压、气压或者电控装备,其密封系统适用工作温度一般不超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,高温环境将导致装备性能降低或无法正常工作;分布式光纤、智能转速监测仪、设备振动监测仪、井下视频监控系统、防爆交换机等为代表的监控

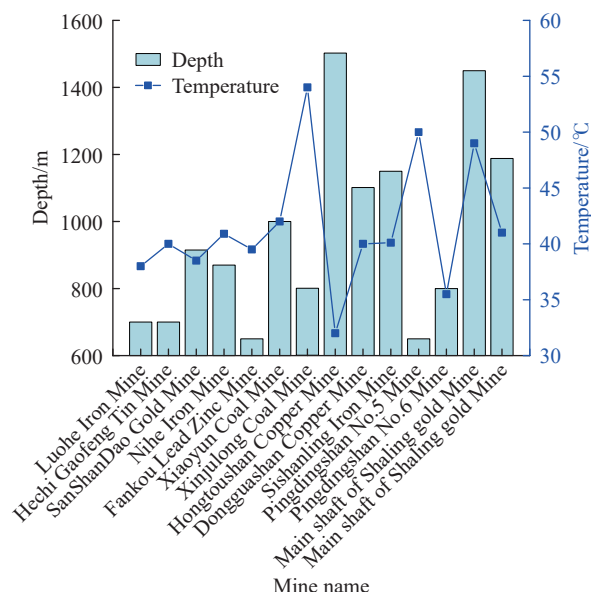

 图3 凿井深度与工作面温度统计^[4]

 Fig.3 Shaft depth and working surface temperature^[4]

设备,其正常工作耐高温度一般为 40~50℃,高温将导致监测元器件失效;同时,井巷围岩衬砌支护结构高温湿热环境下易腐蚀劣化。然而,随着井巷开采深度增加,井下长距离输送冷量损失较大,单纯依靠机械制冷降温成本较高,深部井巷建设与运维全生命周期的“降温-隔温-保温”系列高温防治技术亟待突破^[5]。根据地热能资源利用分类,可分为水热型地热能(低温<90℃,中温 90~150℃,高温>150℃)和干热岩地热能(温度>200℃),然而现阶段我国中低温地热发电效率低等问题突出,这对“矿-热共采”和“先采热后采矿”技术方案都提出了更严苛的要求。因此,深部地层高温防治依然是井巷安全高效建设面临的挑战。

2.4 深部高地应力防治难题

随着矿产资源开采深度的不断增加,井巷穿越地层的原岩应力和构造应力不断升高且更加复杂,深部地质结构变化引起的应力场、渗流场、能量场及变形场等多场耦合规律依然沿用浅部矿井建设理论分析显然不科学;深部井巷建设过程中岩体的高度非线性、岩石脆延性转换、强压缩、高蓄能状态下发生能量聚集、应力释放、围岩变形和强烈瞬时动态破坏等各种力学行为与现象^[18-20],将对深部井巷建设与运维带来诸多困难;同时,传统基于线弹性地应力测量理论和方法的可靠性和准确性都值得商榷和深入研究。目前,我国矿山千米级开采深度发生较强岩爆的频率、破坏程度明显增加,严重威胁了井巷建设装备和人员的安全。此外,深部高地应力环境下地热开采过程中,水压

致裂产生的裂隙易闭合,导致裂隙间不连通或形成短路,无法建成并保持足够体积的热储,导致深部地热能开采效率降低。因此,深部井巷建设过程中断面形状优化、超前卸压、恒阻大变形支护、非等厚井壁支护等高应力诱导、能量调控和围岩控制理论与技术是深部井巷建设必须解决的难题,从而提高岩爆灾害预测预报的准确性。

2.5 深井快速提升难题

深井物料与岩渣的快速提升技术与工艺,无论是钻爆法掘进还是上排渣竖井掘进机凿井、部分断面或全断面掘进机掘进工艺,都是矿山井巷建设过程中核心环节。现阶段矿井建设过程中普遍采用摩擦轮多绳提升机,可满足 2000 m 以浅的提升高度。然而,随着矿山井巷不断向深部延伸,提升高度同步增加,现有的悬吊提升技术存在钢丝绳自重占悬吊荷载比例大、提升钢丝绳大摆动、提升容器大振荡等难题;深井提升时稳绳需要更大的张紧力以保证提升容器运行平稳,提升机需要更大的静张力和静张力差,同时这也增加了提升钢丝绳的断丝风险,导致钢丝绳寿命急剧下降,严重影响提升系统高速高效安全运行,甚至难以运行。

为了克服摩擦轮多绳提升产生大摆动、大惯量、大振动等难题,何满潮院士提出了以“顶部智能驱动与制动、中部刚柔耦合轻量化容器、底部自适应尾绳导向”系统控制为核心的深井自适应预应力(Self-adapting pre-stressed, SAP)提升新模式^[21];英国的布雷尔研发出多绳缠绕式提升机,消除了深井提升机的提升尾绳。但是这两种提升方式仍然采用提升机钢丝绳提升容器的提升方式,依然没有实现提升方式的变革。面对未来规划 2000~3000 m 深度,甚至 5000 m 的深度依然存在提升困难的问题。鉴于此,刘志强等^[5]提出了竖井式斜坡螺旋分级提运技术构想,采用资源多相流态化提升方式(图 4),在一定程度上解决深部资源提升难题具有可行性。然而,采用竖井式斜坡螺旋分级提运,从理论上讲必然存在一个极限提升高度,必须解决一次向上流态化提升高度。因此,如何实现高效连续提升矿物和高效利用地热资源,成为深部矿井建设模式面临的挑战。

2.6 高性能掘进装备制造难题

高性能井巷掘进装备是深部井巷建设的利器,推动井巷掘进装备制造技术向材料-结构-功能一体化的高性能设计制造,符合我国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领《中国制造 2025》

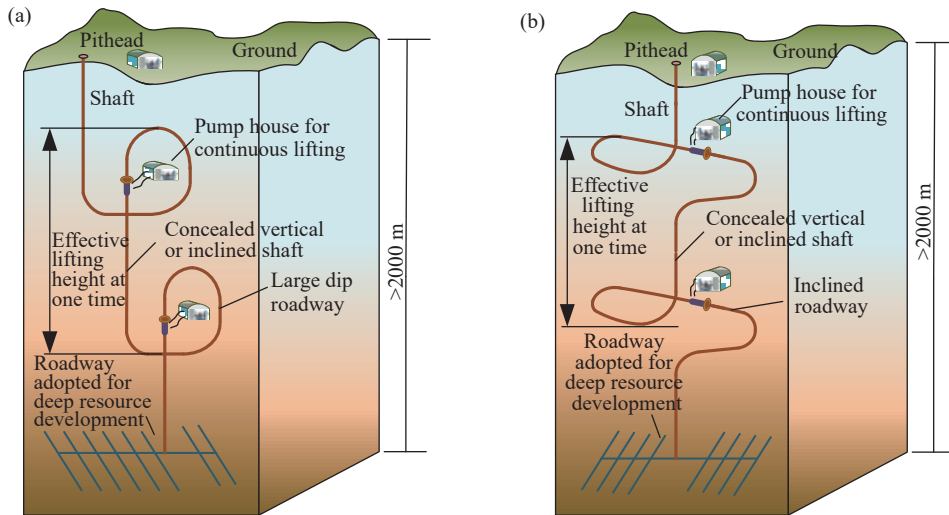


图 4 竖井式斜坡螺旋分级提运技术构想^[5]. (a) 竖向螺旋模式; (b) 横向螺旋模式

Fig.4 Spiral graded lifting mode for deep vertical shaft slope^[5]. (a) vertical spiral mode; (b) horizontal spiral mode

的要求。深竖井掘进装备研制集地质、机械、材料、力学、控制等科学于一体,需要解决地层探测与预报、坚硬岩石破碎、克服重力排渣、姿态与导向调控、掘进机支撑与推进、集中控制与运行监控、随掘支护、降温、除尘、排水等一系列关键技术,研制轻量化、高性能、低能耗、高效率的掘进装备,并借鉴电磁学、声学、光学、信息工程等高新技术,不断推进适用深井极端环境下智能掘进装备研制是未来很长一段时间内深部井巷建设面临重大挑战。

目前,我国开展机械破岩竖井掘进装备研制的单位主要有中国煤炭科工集团、中煤矿山建设集团和中信重工集团,以及从研制隧道或巷道掘进机方面转型到研制竖井掘进机装备的中国铁建重工集团、中铁工程装备集团、中交天和机械设备有限公司等企业。整体而言,我国在竖井掘进装备研制起步较晚,基础研究短板依旧突出,原始创新能力仍显薄弱,产业链、创新链协同不足,更多的是对国外已有装备的改造和升级。因此,深部高温地层中井巷安全、高效、绿色、智能化建设,首要任务是研制高精度、高可靠、高效率、绿色化、智能化的高性能掘进装备。

3 深部高温地层井巷建设重点发展方向

3.1 深部井巷工程建造优先发展任务

以我国 2000 m 以深地层“矿-热共采”战略开发为背景,针对深部高温坚硬岩石地层井巷建设面临的高岩石硬度、高应力、高地温、高水压、超井深等导致的重大难题,结合我国目前深部井巷建设地质探查、井巷开拓方式、掘进技术装备和

工艺等方面的现有能力和综合水平,提出了我国深部高温坚硬岩层井巷建设技术发展战略(图 5),为实现深部复杂地质环境下安全、高效、绿色、智能化建设深地工程结构的发展目标,确定以下 3 个优先发展任务:深部高温地层井巷建设地质保障系统,深部高温地层井巷建设模式与规划,深部高温地层井巷建设成套技术与装备。

3.1.1 深部高温地层井巷建设地质保障系统

深部高温地层井巷建设地质保障系统需要以提升深部矿体资源和地热能获取能力为导向,构建“探-识-防-治”地质保障技术体系。发展深部高温地层地质和地应力环境探测新理论、新方法和新技术等,探识技术由钻探向物探化转^[17],利用高分辨三维地震勘探、随钻探测等技术,精准探测地层构造、有害气体、突水灾害等分布与状态,确定隐患灾害靶域;研究灾源灾变演化规律以及深部地质风险判识理论;构建多尺度多维地层透明化重构的理论体系;基于地质精准探识成果和透明化地质模型,提出不良地层改性技术与方法,构建深部动力灾害防治新技术体系,从而为深部高温地层井巷建设提供地质保障。

3.1.2 深部高温地层井巷建设模式与规划

在深部高温地层探识与透明化重构研究成果的基础上,遵循安全性、可行性、适应性、经济性的原则,开展深部高温井巷工程整体规划、建设模式及工艺适宜性研究,不仅要突破超深井立井悬吊提升的技术瓶颈,同时也要实现矿产资源与地热能资源的充分开采和利用。根据深部矿产资源与地热能资源的分布规律和赋存状态,充分发挥规划与设计的引领作用,分类型、分层次、分阶段规划

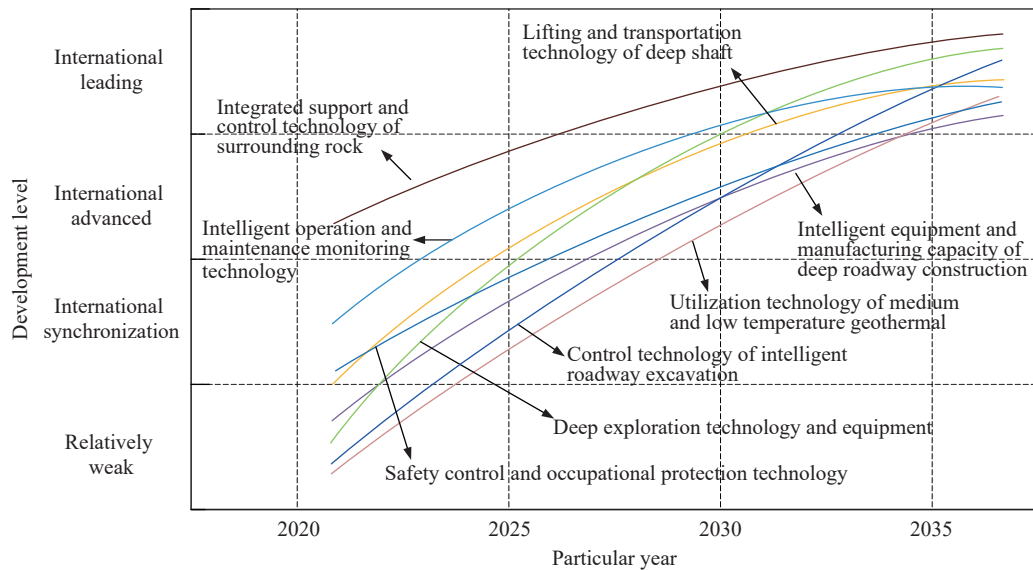


图5 深部高温坚硬岩层井巷建设技术发展策略示意

Fig.5 Technical development strategy of shaft and roadway construction in deep high-temperature rock strata

深部井巷建设模式, 整体规划、协调推进、分步实施“矿-热共采”战略。现阶段发展可按照以下路径逐步开展, 对于 1000 ~ 2000 m 深度以井工方式进行矿产资源开采为主; 对于 2000 ~ 4000 m 深度先采用钻孔方式采热, 后以井工方式采矿为主; 对于 4000 m 以深主要以钻孔式地热开采为主。针对深部矿井开拓模式而言, 仅采用斜井开拓具有建设工程量大、技术难度高、经济性差等缺点, 可开展“上竖井+下斜井”、“上斜井+下竖井”以及“竖井式斜坡螺旋”等多种井巷建设模式研究, 提出多水平、多角度、分级建设深部高温地层井巷开拓与延伸方案, 构建井巷开拓与地热钻孔高效换热的协调理论模型, 实现“矿-热共采”战略下井巷工程共建、共用、共存, 保障深部高温地层井巷建设过程中岩渣和物料连续高效运输, 以及运营期矿产资源和地热资源的高效提升。

3.1.3 深部高温地层井巷建设成套技术与装备

针对深部井巷建设穿越地层的复杂性、多变性和不确定性等难题, 重点研究深部高温坚硬岩石机械破碎为主、新型破岩方式为辅的联合破岩方法, 研制耐磨、耐高温的大体积破岩刀具, 研发基于掘进工作面岩渣分布规律的高效排渣方法与装置, 研发高强刀盘结构、智能换刀装置与技术; 研发长期湿热、高压条件下深部高温地层工程围岩控制理论、支护方法与新型材料; 突破随掘随探、地层改性、高效破岩、连续排渣、精准钻进、围岩控制、稳定支护、降温除尘、堵水排水、环境感知、风险防控等关键技术, 提出井巷复杂掘进装备机构系统建模、性能评价、位姿调控、智能反

馈、集中控制等一体化设计理论与方法, 研制适应深部极端环境的井巷硬岩掘进机及配套装备, 或小转弯半径的井巷掘进一体机, 形成井巷建设过程中“掘-排-支-控-运-监”的成套技术与装备体系, 提高深部高温地层井巷建设技术与装备能力以及工程结构耐久性和稳定性, 保障安全、高效、稳定和持续地进行矿产开采与地热能开发。

3.2 深部高温井巷建设基础理论与关键技术体系

随着地球科学的发展和矿井工程的深延, 深部高温环境下井巷建设基础理论研究已涉及越来越多的学科领域并越来越受到重视, 成为解决深部高温岩层中工程建造技术问题、工程问题的基础支撑和重要途径, 也是一个新挑战。深部高温环境下井巷建设基础研究, 包括为了认识深部高温地层和热能利用而进行的岩石物理力学、热物理特性和破碎机理等基础科学规律研究, 以及为保障深部高温环境中井巷建设过程中高效安全的掘进、降温-隔温-保温、围岩控制等技术难题进行的应用基础研究。围绕深部高温地层井巷建造优先发展的 3 大任务, 凝练出深部高温环境下井巷建设涉及的 8 项基础理论与技术的重点研究方向。优先发展任务与研究方向的逻辑关系, 以及深部高温地层井巷建设基础理论与技术研究体系, 如图 6 所示。

3.2.1 深部地层原位探识与透明化重构

基于深部地层探识技术, 认知深部地层演化科学规律, 构建矿井地质透明化, 是深部工程建设的先决条件。重点开展探识深部岩体原位力学行为, 探究深部岩体非稳定变形、临界破坏状态、触

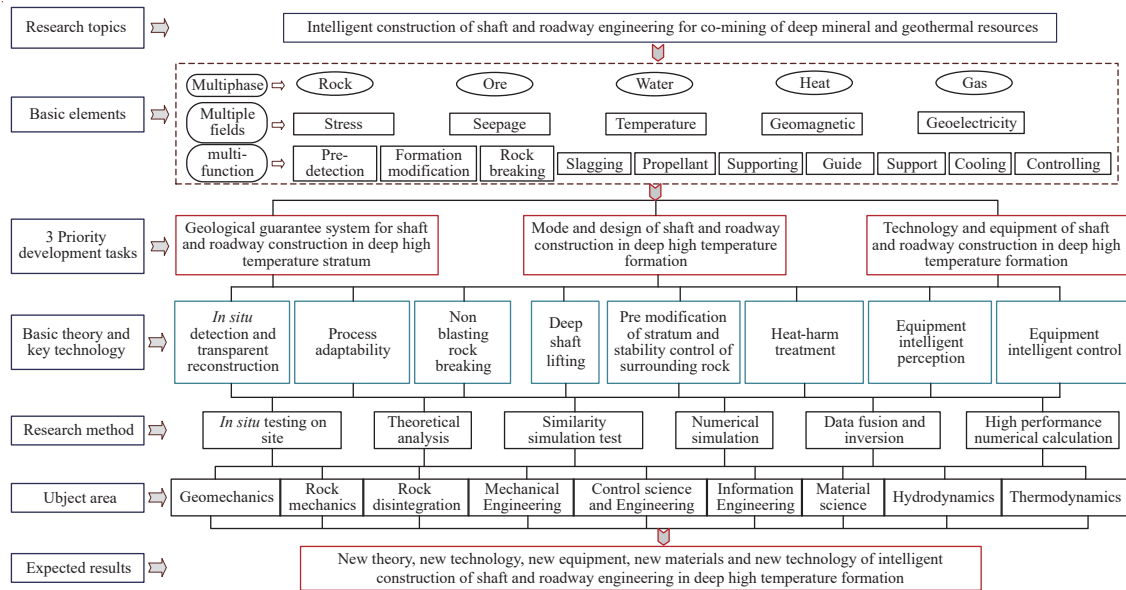


图 6 深部高温地层井巷建设基础理论与技术研究体系

Fig.6 Basic theory and technology of shaft and roadway construction in deep high temperature stratum

发条件和能量演化规律;研究岩体力学及多场多相渗流理论,揭示岩体力学及多场多相耦合作用的力-能、力-构演化规律;建立多维地质信息数据库,提出反演重构地质模型的理论和方法,提高“矿-热”共采地质透明化水平。

3.2.2 深部高温地层井巷建设工艺适应性

基于深部地层精准探识与透明化重构技术,研究深部高温地层井巷工程开拓模式与工艺适应性,即能够独立开展研究又能够与其他井巷建设技术协同开展。重点研究基于井巷掘进机掘进功能的井巷工程空间布置设计理论和方法;研究深部高温复杂地层井巷掘进机掘-支与地层改性平行作业时空关系,形成探、破、装、运、支和地层处理等工序平行作业工艺;提出井巷建设与地面设备适应性选型与配套方法。

3.2.3 深部高温岩体非爆破破岩

针对深部高温岩石硬度大、研磨性强、可钻性差等高效破碎难题,研究高温和温变条件下岩石宏细观物理力学特性^[22],以及温度对岩石破坏模式的影响机制,研究高温岩石可钻性,基于“岩-机”互馈作用构建围岩分类和分级评价方法^[23];研究齿形滚刀机械破岩机理,以及机械与高压水射流联合破岩机制,研发激光破岩、热-机碎岩、贯通锥形断裂破岩、等离子体破岩、微波破岩、粒子冲击破岩等新型破岩技术并向工程应用转化。

3.2.4 深部井巷建设连续提升

针对深部矿井建设和开采过程中固体资源与岩渣采用非连续箕斗提升机方式,制约提升能力

和高运营成本的难题,在悬吊提升机和带式输送机输送机的基础上,研发诸如磁悬浮箱式提升、多相流体管道提升等提升技术装备与工艺,重点研发适用流态化输送的固体矿物井下分选方法与技术,研究多相流动理论,确定并优化多相流管道直径、提升高度、多相比、多相流速等参数,建立低能耗高效连续提升模式,为超深部原位流态化开采的颠覆性技术进行技术与装备的探索奠定基础。

3.2.5 深部地层预改性与围岩长期稳定控制

针对超深井复杂地质条件下地层涌水、岩体破碎和高应力下岩体变形破坏、结构失稳等问题,研发超深井地面定向钻孔与曲线钻孔技术,研究深部不良地层劈裂注浆和高压喷射注浆等注浆理论,研发具有耐高温、低固相、低导热性的绿色注浆材料;研发与破岩掘进相适应的不良地层近工作面快速模块化支护技术与工艺;研究多相多场耦合条件围岩体力-能演化规律与变形破坏特征,研发耐高温、耐腐蚀、高强度、高韧性复合井壁结构与材料,建立深井工程“地层改性-断面优化-应力调控-围岩支护”的围岩稳定协同控制技术体系,提高围岩的自承载和自稳定能力,满足深部井巷工程支护体系达到高强抗压和防渗堵水的需求。

3.2.6 深部高温地层井巷建设热害治理

深部高温地层可分为水热型和干热型,根据矿体成因特点,“矿-热共采”地热源主要为水热型。应重点研究能够阻断工作面与周围岩体热交换通道的新技术、新材料和新工艺,阐明新型相变储能材料隔热的热交换机制,研发耐高温、耐腐蚀

的隔热材料;研究深井围岩改性、相变储能支护结构、隔热支护材料和人工制冷协同的井下降温技术等,形成“降温-保温-隔温”联合的深井围岩注浆、支护结构和人工降温三位协同的热害治理技术体系,实现低能耗降温技术与工艺。

3.2.7 深部高温地层井巷装备感知融合技术

针对深部复杂多变的地质条件对井巷掘进装备的掘进效率和安全造成的影响,重点开展“岩-机”相互作用下装备掘进状态与地质环境信息感知技术研究^[24],包括研究装备随掘工作面前方探测、刀具磨损、装备姿态、掘进方向、装备性能等掘进装备与运行状态感知;同步开展研究井巷掘进过程中工作面涌水、有害气体、工作温度等环境条件感知,以及基于围岩与支护结构相互作用的耦合机理,研究工程围岩体与支护结构的应力与变形特征信息感知;构建井巷装备掘进全过程信息的采集系统^[25],形成装备、围岩、结构、环境等综合感知技术体系,实现掘进进度、风险、质量等关联性分析与自主决策,保障装备掘进过程中风险可预、可识、可防、可控。

3.2.8 深部高温地层井巷掘进装备智能控制技术

深部高温地层井巷掘进集超前探测、破岩、排渣、支护、导向等功能于一体并协调运行与控制的技术体系,是未来井巷智能化掘进装备发展的重大需求^[26-27]。重点研究井巷全断面掘进机支撑、推进与驱动协同模块化设计方法;研究掘进机姿态精准调控机制和算法,基于以激光导向为主,结合掘进机姿态感知数据,研发激光+传感器组合导航系统,并通过控制撑靴位置和调向油缸实现掘进过程方向控制;突破感知数据无线传输与远程控制技术,研发井巷掘进装备智能控制系统平台。

4 结论

深部高温地层井巷工程为深部矿产资源开采与地热能开发利用提供了经济可行的技术途径,是保障深地资源安全、高效开发整个产业链的首要 and 关键工程。开展深部井巷工程建设跨学科交叉融合的基础科学与技术问题研究,创新深部井巷建设模式,协同攻关核心装备研制,将为深部“矿-热共采”战略安全经济实施提供重要支撑。

(1) 深部地质条件与浅部相比更加错综复杂,灾源探识不明,致灾机理不清,对矿井建设设计施工中的风险辨识和灾害防控带来很大挑战。应首先开展深部地层应力场、渗流场、温度场等多场原位探测及多场耦合机理研究,提高对深部地层

风险和隐秘灾源的判识能力,突破基于多维地层信息融合的地质透明化重构技术,构建“探-识-防治”地质保障技术体系。

(2) 深部极端复杂的地质环境与超深井难以高效提升的难题,亟需创新深井建设模式。开展分类型、分层次、分阶段规划深部井巷建设模式研究,探索“上竖井+下斜井”、“上斜井+下竖井”以及“竖井式斜坡螺旋”等井巷建设模式,提出多水平、多角度、分级建设深部高温地层井巷开拓与延伸方案,整体规划、协调推进、分步实施“矿-热共采”战略。

(3) 深部高温地层井巷安全、高效、绿色、智能化建设,是未来深地资源开发的必然趋势。基于深部地层透明化重构技术,攻克深部不良地层综合改性的干井掘进技术,研究机械与新型破岩方法联合的破岩技术,突破机械-流体协同排渣和流态化提运技术;研究深井工程“地层改性-断面优化-应力调控-围岩支护”的围岩稳定协同控制技术,研发耐高温、耐腐蚀支护结构与材料,提高工程结构耐久性和稳定性;突破“降温-保温-隔温”联合的深井围岩注浆、支护结构和人工降温三位协同的热害防治技术。

(4) 研究装备、围岩、结构、环境等综合感知技术,提高装备掘进过程中风险可判识、可预警、可防控能力;研究集超前探测、破岩、排渣、支护、导向等功能于一体并协调运行与控制的技术群;研究井巷全断面掘进机支撑、推进与驱动协同模块化设计方法;研制适应深部极端环境下的井巷硬岩掘进机及配套装备,提高深部高温地层井巷建设技术与装备能力,保障安全、高效、稳定和持续地进行矿产开采与地热能开发。

致谢

感谢中国工程院重点咨询项目“深部矿产与地热资源共采战略研究”(项目编号:2019-XZ-16)对本研究的支持。感谢北京大学蔡美峰院士、西藏自治区地质矿产勘察开发局多吉院士、中国地质科学院矿产资源研究所毛景文院士、北京大学纪洪广教授、大连理工大学唐春安教授等专家对本研究的指导和建议;感谢本研究团队中深圳大学崔宏志教授、包小华教授,以及北京中煤矿山工程有限公司谭杰研究员、荆国业研究员等所有参研人员的参与和大力支持。

参考文献

- [1] Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth. *Adv Eng Sci*, 2017,

- 49(1): 1
(谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1)
- [2] Yu X F, Yang D P, Li D P, et al. Mineralization characteristics and geological significance in 3000 m depth of Jiaojia gold metallogenic belt, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrol Sin*, 2019, 35(9): 2893
(于学峰, 杨德平, 李大鹏, 等. 胶东焦家金矿带3000m深部成矿特征及其地质意义. 岩石学报, 2019, 35(9): 2893)
- [3] Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 417
(蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417)
- [4] Tan J, Liu Z Q, Song Z Y, et al. Status and development trend of mine shaft sinking technique in China. *Met Mine*, 2021(5): 13
(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. 金属矿山, 2021(5): 13)
- [5] 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 China Coal Soc*, 2021, 46(3): 826
(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. 煤炭学报, 2021, 46(3): 826)
- [6] Cai M F, Duo J, Chen X S, et al. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources. *Strateg Study CAE*, 2021, 23(6): 43
(蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究. 中国工程科学, 2021, 23(6): 43)
- [7] Wu H J, Ji H G, Gong M, et al. Present application status of rock drilling equipment in underground mine and the development direction for intelligent rock drilling in China. *Met Mine*, 2021(1): 185
(吴昊骏, 纪洪广, 龚敏, 等. 我国地下矿山凿岩装备应用现状与凿岩智能化发展方向. 金属矿山, 2021(1): 185)
- [8] Liu Z Q, Hong B Q, Long Z Y. 60 years science and research achievements of mine construction. *Mine Constr Technol*, 2017, 38(5): 1
(刘志强, 洪伯潜, 龙志阳. 矿井建设科研成就60年. 建井技术, 2017, 38(5): 1)
- [9] Herrenknecht AG. Shaft boring machine (SBM) [EB/OL]. *Herrenknecht AG* (2015-06-14)[2022-04-08]. <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/shaft-boring-machine-sbm/>
- [10] Liu Z Q. *Raise Boring Machine*. Beijing: Science press, 2017
(刘志强. 反井钻机. 北京: 科学出版社, 2017)
- [11] Liu Z Q, Song Z Y, Cheng S Y, et al. Development history and status quo of raise boring technologies and equipment in China. *Coal Sci Technol*, 2021, 49(1): 32
(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. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 32)
- [12] Maidl B, Schmid L, Ritz W, et al. *Hardrock Tunnel Boring Machines*. Berlin: John Wiley and Sons, 2008
- [13] Liu Z Q. *Shaft Boring Machine*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2019
(刘志强. 竖井掘进机. 北京: 煤炭工业出版社, 2019)
- [14] 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 China Coal Soc*, 2022, 47(1): 499
(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. 煤炭学报, 2022, 47(1): 499)
- [15] 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 China Coal Soc*, 2020, 45(11): 3645
(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. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3645)
- [16] Xie H P, Gao M Z, Zhang R, et al. Study on concept and progress of *in situ* fidelity coring of deep rocks. *Chin J Rock Mech Eng*, 2020, 39(5): 865
(谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 深部岩石原位“五保”取芯构想与研究进展. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 865)
- [17] Peng S P. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining. *J China Coal Soc*, 2020, 45(7): 2331
(彭苏萍. 我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331)
- [18] Simser B P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *J Rock Mech Geotech Eng*, 2019, 11(5): 1036
- [19] Cai M F, Ji D, Guo Q F. Study of rockburst prediction based on *in-situ* stress measurement and theory of energy accumulation caused by mining disturbance. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(10): 1973
(蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1973)
- [20] Song Z Y, Ji H G, Zhang Y Z, et al. Acoustic emission signal sources and critical failure precursors of weakly consolidated sandstone with different grain sizes. *J China Coal Soc*, 2020, 45(12): 4028
(宋朝阳, 纪洪广, 张月征, 等. 不同粒度弱胶结砂岩声发射信号源与其临界破坏前兆信息判识. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4028)
- [21] He M C. Research on deep shaft hoisting dynamics. *Adv Mech*, 2021, 51(3): 702
(何满潮. 深井提升动力学研究. 力学进展, 2021, 51(3): 702)
- [22] Song Z Y, Ji H G, Liu Z Q, et al. Study on the critical stress threshold of weakly cemented sandstone damage based on the renormalization group method. *Int J Coal Sci Technol*, 2020, 7(4): 693
- [23] 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. *Coal Sci Technol*, 2022, 50(1): 86
(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. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 86)

- [24] Li C, Li T, Jing G Y, et al. Study on the ultimate bearing capacity of surrounding soil underlying gripper of shaft boring machine. *Rock Soil Mech*, 2020, 41(Suppl 1): 227
(李超, 李涛, 荆国业, 等. 竖井掘进机撑靴井壁土体极限承载力研究. 岩土力学, 2020, 41(增刊1): 227)
- [25] Liu Z Q, Song Z Y. The latest development of mechanical rock breaking drilling technology and equipment for large diameter shaft in China. *Mine Constr Technol*, 2022, 43(1): 1
(刘志强, 宋朝阳. 我国大直径井筒机械破岩钻井技术与装备新进展. 建井技术, 2022, 43(1): 1)
- [26] Meng J H, Xia W Q, Peng Z B, et al. Risk analysis and control measures of SBM construction-based on shaft engineering of Ninghai pumped-storage hydroplant as example. *Mine Constr Technol*, 2021, 42(6): 1
(孟继慧, 夏万求, 彭泽豹, 等. SBM施工风险分析及管控措施——以宁海抽水蓄能电站竖井工程为例. 建井技术, 2021, 42(6): 1)
- [27] Liu Z Q, Chen X S, Cai M F, et al. Challenges and thoughts on the development of large-diameter drilling technology and equipment. *Strateg Study CAE*, 2022, 24(2): 132
(刘志强, 陈湘生, 蔡美峰, 等. 我国大直径钻井技术装备发展的挑战与思考. 中国工程科学, 2022, 24(2): 132)