

交叉·前沿

深地科学与深地工程技术探索与思考

谢和平^{1,2,3,4,5,6,7}, 张 茹^{5,6}, 张泽天^{5,6}, 高明忠^{1,2,3,4,5,6}, 李存宝^{1,2,3,4,5,6}, 何志强^{5,6},
李 聪^{5,6}, 刘 涛^{5,6,7}

(1. 深圳大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 4. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 5. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 6. 四川大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 四川 成都 610065; 7. 四川大学 新能源与低碳技术研究院, 四川 成都 610065)

摘 要: 21 世纪的深地科学进入了新的发展阶段, 深地科学规律尚未探明, 深部工程活动普遍存在着一定程度的盲目性、低效性和不确定性, 地球深部内源动力、结构演变规律、致灾机理等仍待进一步认知。因此首先从地球科学的视角定义了深地科学: 以地球浅层以深的深层和超深层为研究对象, 旨在探索地球不同层圈和不同赋存深度(深层和超深层)科学奥秘; 理清了深地科学与地球科学的区别与联系: 即深地科学是在已知地球科学知识体系上的延伸, 是拓展科学视野、深化地球认知的国家战略科技方向, 包含于地球科学; 定义了深部与深地工程科学的本质: 即针对现有浅部工程的科学规律与技术无法适用于深部工程的难点, 探索深部工程相关科学规律, 突破深部工程关键基础科学问题, 匹配人类在深部工程活动中的地灾防控需求, 进而指导深部资源安全高效绿色开发、深部工程空间有效利用。提出深地工程技术定义, 即指人类为利用地球、开发地球所需要的工程实施技术与装备, 为探索深地科学规律、开发深地工程必需的理论与技术手段。最后, 进一步明确了深地科学的研究内容与规划, 以及深地工程技术内涵与攻关方向(即深地工程岩土力学与灾变机理、超深井智能建造与能源资源高效开采、深地隧道与巨型洞室群智能建造、深地工程灾害智能防控与健康运维), 以期促进深地科学领域的发展。

关键词: 深地科学; 深部工程科学; 深地工程技术; 地球科学

中图分类号: TD313; TD803 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2023)11-3959-20

Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology

XIE Heping^{1,2,3,4,5,6,7}, ZHANG Ru^{5,6}, ZHANG Zetian^{5,6}, GAO Mingzhong^{1,2,3,4,5,6},
LI Cunbao^{1,2,3,4,5,6}, HE Zhiqiang^{5,6}, LI Cong^{5,6}, LIU Tao^{5,6,7}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 5. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 6. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 7. Institute of New Energy and Low Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

收稿日期: 2023-08-13 修回日期: 2023-10-07 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0989

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51827901, 52125402, 52174084)

作者简介: 谢和平(1956—), 男, 湖南双峰人, 中国工程院院士。E-mail: xiehp@scu.edu.cn

通讯作者: 张 茹(1976—), 女, 山东德州人, 教授, 博士。E-mail: zhangru@scu.edu.cn

引用格式: 谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959-3978.

XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959-3978.



移动阅读

Abstract: Deep earth science in the 21st century has entered a new stage of development. The laws of deep earth science have not yet been explored. Deep engineering activities generally have a certain degree of blindness, inefficiency and uncertainty, and the endogenous dynamics of the Earth's deep part, structural evolutionary laws, and disaster-causing mechanisms need to be further cognised. Therefore, this paper firstly defines deep earth science from the perspective of geoscience: the deep and ultra-deep layers of the earth are the research objects from the shallow earth to the deep, aiming at exploring the scientific mysteries of the earth's different layers and different depths of the earth (deep and ultra-deep); clarifies the difference and connection between the deep earth science and the earth science: that is to say, the deep earth science is an extension of the known knowledge system of the earth science, and it is the national strategic science and technology direction to expand the scientific horizons, and to deepen the earth's cognition. It is a national strategic scientific and technological direction to expand scientific vision and deepen earth knowledge, which is included in earth science; it defines the essence of deep and deep earth engineering science: that is, for the difficulties that the existing scientific laws and technologies of shallow engineering cannot be applied to deep engineering, it is necessary to explore the relevant scientific laws of deep engineering, break through the key basic scientific problems of deep engineering, and meet the demand for geo-disaster prevention and control of human beings in the activities of deep engineering, and then guide the safe, efficient, and green development of deep resources and effective utilization of the space of deep engineering; at the same time, it further clarifies the difference and connection between deep earth science and earth science. This article proposes the definition of deep earth engineering technology, which refers to the engineering implementation technology and equipment required by humans to utilize and develop the Earth, as well as the necessary theoretical and technical means to explore the laws of deep earth science and develop deep earth engineering. Finally, to promote the development of deep earth science, the research content and strategic planning of deep earth science, and the connotation of deep earth engineering technology, have been further clarified (geomechanics and disaster mechanism of deep-earth engineering, intelligent construction and efficient mining, intelligent construction of deep-earth tunnels and giant cavern groups, intelligent disaster prevention and control as well as healthy operation and maintenance of deep-earth engineering).

Key words: deep earth science; deep engineering science; deep earth engineering technology; earth science

中国中长期科技发展规划曾提出“上天、入地、下海、登极”的科研八字方针,不仅对全世界大科学问题发展进程进行了全面概括,也为中国重大科技发展指明了方向,然而目前人类对于地球深部的认知是相当匮乏的,世界最深的库页岛 Odoptu OP-11 油井仅 12 345 m^[1],中国最深的蓬深 6 井深度仅 9 026 m^[2],中国最深孙村煤矿仅 1 510 m^[3],世界最深的中国锦屏地下实验室垂直岩石覆盖达 2 525 m^[4],世界第 1 埋深公路隧道为中国大峡谷隧道,最大埋深为 1 944 m^[5]。总体上,人类工程涉及的深度相对于地球而言仅仅触及了一点表皮,面向地球深处的探测技术亟待发展^[6]。

同时,随着浅部资源的开采殆尽,千米级深部资源开采工程已成为常态,煤炭开采深度已达 1 500 m,地热开采深度超过 5 000 m,金属矿开采深度超过 4 350 m,油气资源开采深度达 8 800 m^[3]。而深部岩体工程活动大大超前于基础理论研究,但深部岩体力学理论尚未建立,深地科学规律尚未探明,深部工程活动普遍存在着一定程度的盲目性、低效性和不确定性^[7],地球深部内源动力、结构演变规律、致灾机理等处于“黑箱”或“灰箱”状态。迫切需要发展适用于深部实

际环境和不同工程活动方式的深部岩石力学新原理、新理论^[8],探索深地科学规律新奥秘及深地工程技术新认识,为认知地球演变规律与深地资源开发奠定理论基础^[9]。

此外,地表自然灾害频发、全球变暖、环境恶化、城市综合症等问题也日益突出,深地空间资源开发与利用已成为人类活动的未来趋势,也是人类可持续发展的主要途径。因此亟需探索科学利用地下空间、地热、地下水资源与生态资源,构建深地自循环生态系统的深地科学理论与技术体系,建设全新的地下空间开发利用体系。

可见,深地科学规律的探测与揭示以及深地资源的开发利用的深地工程技术攻关成为深地科学领域探索的重要方向。然而,学术界尚未对深地科学这一领域形成统一认识,包括在不同学科领域、不同专业行业对地球“深部”及“深地”的表述、理解及认识各有不同;对深地科学与深地工程科学及技术也有不同的表述和认识,并对其未来发展方向还未有明确规划,因此本文将从地球科学的视角定义深地科学的学术内涵,理清深地科学与地球科学的区别与联系,探讨深

地科学、深地工程技术与深地工程的相关关系,并进一步明确深地科学的研究内容与规划,以及深地工程技术内涵与攻关方向,以期促进深地科学领域的发展。

1 深地科学与地球科学的区别与联系

地球科学是研究地球系统及其组成部分变化过程及相互作用的科学,以地球各圈层相互作用及其资源与环境效应为研究对象,从数学、物理学、化学、地质学、地理学、气象学、生物学角度研究地球的科学,具有显著的学科交叉特征^[10-12]。它和人类的生活息息相关,比如矿产资源、海洋资源、气候变化、天体运行等,因此,地球科学是一门很基础、很重要的学科。按照中国国家自然科学基金委员会的定义,地球科学是理解和认识地球的形成演化历史、资源环境效应、人地关系基本规律、其他天体对地球影响的科学。它以地球系统及其组成部分为研究对象,探究发生在其中的各种现象、过程及过程之间的相互作用,以提高对地球的认识水平,并利用获取的知识为解决人类生存与可持续发展中的资源供给、环境保护、减轻灾害等重大问题提供科学依据与技术支撑。因此,地球科学的范围很广,涵盖地质学、海洋学、气象学和天文学等众多科学领域。

深地科学是研究地球本体及地表到地心更深层面已知和未知的科学,是地球科学延伸和尚未建立的知识体系,更是拓展科学视野、深化地球认知的国家战略科技方向,进而实现透明地球、向地球深部进军的整体目标,其中主要有 3 个层次的研究需要攻关:① 结构透明是手段。以科学钻探为主,在物理层面实现深地岩石圈可视化;② 行为规律透明是基础。探索不同深度的行为特征规律差异、不同深度的岩石力学特征差异、不同深度的微生物变异,揭示深部与浅部的本质特征差异,为透明开采奠定基础;③ 透明地球是目标。实现地下环境与空间资源有效利用、深地能源开发的可视化。因此,深地科学包括深地探测、深地科学、深地资源、深地地下空间、深层地下工程、深地碳中和等分领域,包含地学、物理、化学、力学、材料科学、信息科学、工程科学、能源资源等多个学科,涉及基础科学、资源安全、能源安全、国防安全、防灾减灾等国家重大需求。

2 深地科学的内涵

2.1 深地科学的定义与本质

习近平总书记在 2016 年两院院士大会和全国科技大会上指出:“从理论上讲,地球内部可利用的成矿空间分布在从地表到地下 1 万 m,目前世界先进水平

勘探开采深度已达 2 500 m 至 4 000 m,而我国大多小于 500 m,向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题^[6]”。

因此,从定义上来说,深地科学则是以地球为本体的,研究从地表岩石圈到地幔、地核的围绕地球自身活动的科学,相对于地球浅层而言,是人类现有科学理论和认知水平不能准确描述与分析解译的地球浅层以深的区域。是揭示地球内部运行规律,探索人类活动和生存发展需求以及拓展人类生存空间、支撑可持续发展的战略科技领域。

从学术内涵角度来看,深地科学以地球浅层以深的深层和超深层为研究对象,旨在探索地球不同层圈和不同赋存深度(深层和超深层)的科学奥秘和基本规律、分析内在机理,从而揭示人类现有科学理论和认知水平尚未涉及、无法解译的地球浅层以深的深层物理力学差异性行为,以及超深层的深地内部结构、物质行为、内外动力响应等定性定量基本规律,直接服务于人类生存发展所必需的战略资源能源、空间利用与工程安全等重大科学与技术问题。

同时,深地科学的研究方法和理论认识可延伸拓展并应用于类地行星等地球外天体的深空物质颗粒基本作用、星壤星岩物理力学行为、深空资源能源与空间开发利用等重大科学问题的探索。

2.2 深部/深地工程科学的定义与本质

深部工程科学在地球科学与深地科学的研究基础上,为开发利用地球资源和地下空间而进行工程实施所需要探索的原理、理论与技术方法的科学。其中,深部不是物理尺度的绝对深度,而是一个力学状态概念,应综合反映应力水平、应力状态和围岩属性,它与复杂的地质条件和力学状态等因素相关,并区别于浅部工程定义和范畴^[13]。

统计概念而言,不同工程领域对于深部的界定也有所不同,土木工程、矿业工程等深部工程领域往往在 1 000 m 以深,某些特殊环境下 50 m 或 80 m 已是深部^[14],而油气工程达到 4 500 m 进入深层领域,6 000 m 则属于超深层范畴。国内还有按钻井深度划分的,垂直深度 4 500~6 000 m 为深井,垂直深度超过 6 000 m 为超深井,超过 9 000 m 为特深井^[15]。从整体上看,对于矿业工程、土木工程及地下工程等领域涉及到 2 000~3 000 m 以深的深度范围,人类正处于探索阶段,难度更高、情况更复杂,人类要超前思考和探索对目前浅部和深部的层位更深的能源资源及空间利用的开发获取能力和技术的科学,则称为深地工程科学。

因此,深地工程科学是针对现有浅部与深部工程的科学规律与技术无法适用于深地工程的难点、技术

瓶颈,探索深地工程相关科学规律,突破深地工程关键基础科学问题,匹配人类在深地工程活动中的地灾防控需求,进而指导深地资源安全高效绿色开发、深地工程空间有效利用的科学。

2.3 深地科学与深部工程科学的区别与联系

基于上述深地科学与深部工程科学的定义,深地科学是旨在探测、探索现有科学理论与规律不能解译的,还处于“黑箱”或者“灰箱”状态的深部科学规律,解决地球深部重大科学问题,揭示地球内部运行的科学奥秘,是更普适、更广泛的科学。而深部工程科学则是旨在服务于深部资源、空间的开发与利用,为更好利用深部地下能源资源提供科学理论与技术,从而支撑人类活动向地球深部进军,是更聚焦、更工程化的科学。因此,深地科学是包含深部工程科学的,深部工程科学是深地科学的重要组成部分。

同时,针对深地科学与深部工程科学的现有探索

与研究手段和方式,应改变人们现有的实验和理论研究的方式和思维定势,充分考虑不同深度原位赋存环境(压力、温度、孔隙压力、含水率、物质组分、构造等)对岩石本征物理力学行为及深部工程稳定与灾变规律的影响,来实现理论研究考虑深部特征、室内实验还原深部特征、工程技术适应深部特征,进而探索和建立真正适用于深地科学规律研究、深部资源开发的理论与技术体系^[8]。

3 深地科学研究内容与思考

地球浅部资源已趋于枯竭,深部资源开发成为常态。向深部要能源资源已是我国当前最紧迫的现实问题,也是我国重大战略科技问题,更是我国重大的能源安全问题。向地球深部进军,需要从深地探测、深地工程科学规律、深地资源开发利用 3 个层次深入开展研究(图 1)。

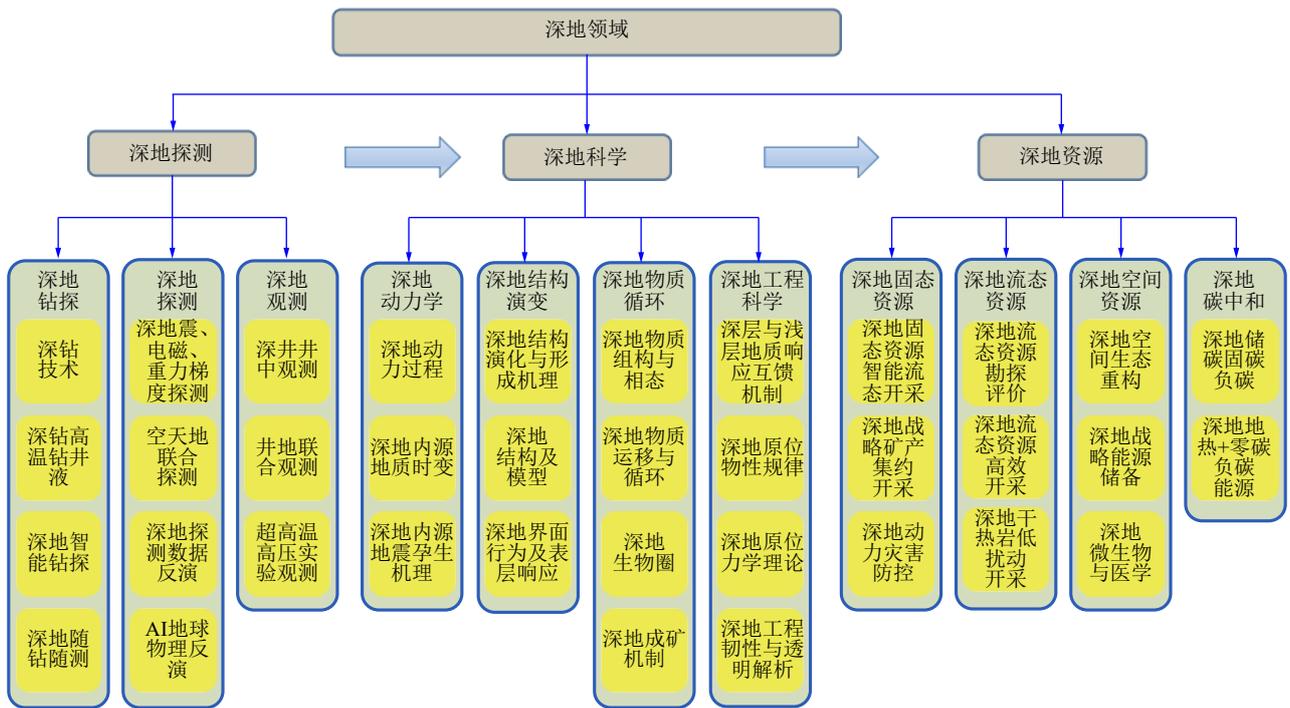


图 1 深地科学研究内容与思考

Fig.1 Deep earth science research content and strategic reflections

3.1 深地探测技术领域研究现状与思考

深地探测包含 3 方面思考:深地钻探、深地探测和深地观测。

3.1.1 深地钻探

深地钻探包含 4 方面思考:深钻技术、深钻高温钻井液、深地智能钻探、深地随钻随测。深钻技术是指钻进深度超过 1 000 m 的钻探技术与装备。国外深钻领域发展比较成熟,如钻井结构设计及高效破岩技术装备、科学钻探、油气钻井等。超深钻探原理技术

与装备是我国未来重点研究方向^[16]。其次,深钻高温钻井液研究方面,据国际高温高压井合作促进协会,钻井过程中深部钻井液温度达到 149 ℃ 及以上属于高温钻井液(超高温为 205~260 ℃、极高温为 260 ℃ 以上)范畴。深钻高温钻井液重点攻关近万米及以深(300 ℃ 左右及以上)的高温钻井液原理与技术(图 2)^[17]。

再次,深地智能钻探是基于大数据、人工智能、信息工程等理论与技术发展起来的一项变革性深地钻

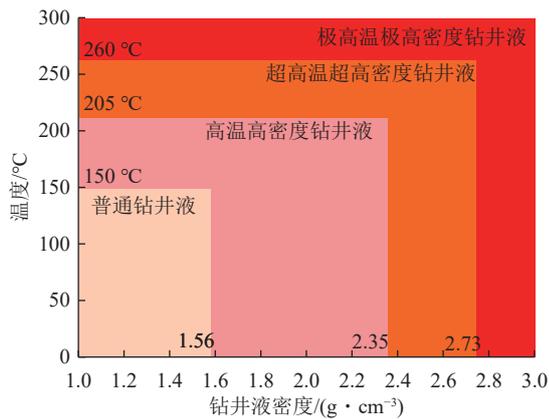


图 2 钻井液体系适应的温度与密度范围的界定^[17]

Fig.2 Definition of the temperature and density range to which the drilling fluid system is adapted^[17]

井技术。国外深地智能钻探技术相对较为成熟,但国内智能化水平相对较低,缺乏智能化钻井的总体规划设计理论与技术。未来仍需重点布局深地智能钻探一体化技术、深地智慧(大数据)自适应钻探技术和装备等方向^[18]。

最后,深地随钻随测是指深地钻井过程中实时测量并记录地层物性参数的原理、技术与装备,测量参数通常包括地层压力、温度、成分、钻井轨迹等^[19]。实时数据高效传输、耐高温高压传感器、深地随钻随测技术及实时高效采集是未来重点研究方向。

3.1.2 深地探测

深地物理探测包含深地震-电磁-重力梯度探测、空天地联合探测、深地探测数据反演、AI 地球物理反演。其中,深地震-电磁-重力梯度探测是指通过监测天然或人工激发的场源(地震场、电磁场、重力场等)在不同深部岩层中的传播规律,来探测地质体构造形态、岩层物性特征以及地球内部物质密度分布等。探测手段包括深地震探测、深地电磁探测以及深地重力梯度探测^[20]。未来应重点研究深地震四维探测及信息精细化采集技术与装备(如百万道地震数据采集技术与装备)、超深电磁探测技术与数据解译、量子重力梯度探测技术与装备等方向。

空天地联合探测指集成航天系统、航空系统和地面系统,通过工业大数据、云计算、5G 通信等形成动态空天地一体化网络,实现数据交互与整合,服务于深地结构、深地资源探测等的技术。空天地联合探测属于集成协同创新技术体系,国外相关报道甚少。近几年,我国在此方面研究较多并逐渐形成规模,如空天地一体化立体地球物理探测体系,数字地球空天地一体化灾害探测系统,空天地一体化能源资源立体勘查技术等。但总体来说,该技术领域在世界范围内还

处于起步阶段。未来应重点研究空天地联合探测深地结构及资源原理与技术等方向。

深地探测数据反演是为深地大数据提供常规处理、特殊处理以及数值模拟分析和反演成像等方面的工具包,是推测地球深部重要信息,获得地球深部物体模型参数的重要方法与技术,主要理论包括深地震反演、深地电磁反演和深地重力梯度反演^[21]。目前研究热点集中于数据反演理论与非线性算法。未来应重点探索深地地震反演理论及算法、深地电磁反演理论及算法、深地重力梯度反演理论及算法等方向。

AI 地球物理反演是指基于 AI 深度学习的地球物性识别理论和技术,对深地物理信息深度挖掘和综合分析的反演方法^[22]。AI 地球反演技术正在从自动化向智能化过渡,如三维磁化率分类反演的算法框架/物理方程驱动的人工神经网络法、差分进化算法、多智能体遗传算法等。未来应重点研究深地多源数据 AI 物理识别、反演及挖掘理论与技术等方向。

3.1.3 深地观测

深地观测包含深井井中观测、井地联合观测与超高温高压实验观测 3 方面内容。首先,深井井中观测是指在超深钻井或深部矿井、深部隧道、地穴等深地空间原位实时监测重力、温度、压力、震动、放射性、微生物信号等,实现对地球深部多物理场长时、连续、大深度、原位的实时观测与分析^[23]。国外技术较为成熟,如井中综合观测技术、EquiPoise 系统、PEM 系列深井瞬变电磁技术等^[24]。我国近年也取得长足进步,如深井地球物理综合观测系统、多维高精度成像测井装备 CPLog、井下多参数在线连续测量技术、深井瞬变电磁技术等^[25]。此外,在深井观测项目方面,国外有日本屏风山深井长期综合观测台网、美国圣安德列斯断层深部观测 SAFOD 项目(4 000 m)等^[25];国内有江苏东海县 5 000 m 的深井观测站、黑龙江井深 7 018 m 的松科二井、四川汶川科探深井、锦屏 2 400 m 深隧^[26]等。未来应重点研究极端深地环境原位数据采集原理与技术、深井原位观测瞬变电磁技术及装备等方向。

其次,井地联合观测是指通过构建不同深度超深钻井及深地空间(深部矿井、深部隧道、地穴等)多参数观测(地震、地磁、地电、重力等)与地面综合观测协同互补一体化体系,形成井下地面联合观测以提高观测精度的系统^[27]。国外技术较为成熟,如地震观测技术、原位应力探测技术等,井地联合中的地震、地磁、地电、重力等观测仪器可普遍商用。我国在井地联合观测领域发展慢、不均衡,如微地震井地联合监测技术^[28]、uDAS 分布式深井光线传感监测系统^[29]、超深

井地球物理综合观测系统等。未来应重点研究深井—地面联合观测技术及微弱信号分析方法等。

最后,超高温高压实验观测是指基于模拟的地球深部超高温高压环境,开展岩石、矿物等样品的超高温高压地学实验,探索超高压地学和地球内部奥秘,检验深地科学新理论、新观点、新概念。国外在超高温高压实验观测方面具有领先地位,如美国华盛顿的卡内基研究所实验装置(Piston Cylinder Presses, 3 GPa、1 700 °C)^[30],美国 Depths of the earth 公司高温高压合成装置(4 GPa、1 800 °C)^[31],德国拜罗伊特大学超高压高温大腔体压机(40 GPa),广泛应用于超高温高压实验研究领域;我国的相关研究包括地震动力学国家重点实验室研发的固体介质三轴实验系统(3 GPa、1 200 °C)、中科院地球物理研究所研发的固体围压三轴流变仪(3 GPa、1 500 °C)^[32]、中国地质调查局研发的 Super HTHP Rheometer 2018 超高温高压流变仪(220 MPa、320 °C)^[33]等。未来重点应研究超高温高压实验及动力学构造机制等。

3.2 深地科学规律领域研究现状与思考

深地科学基本规律研究主要包含深地动力学、深地结构演变、深地物质循环、深地工程科学 4 方面内容。

3.2.1 深地动力学

深地动力学包含深地动力过程、深地内源地质时变与深地内源地震孕生机理等内容。深地动力过程是指由地球内动力所引起的深地物质大尺度运动行为及动力机制、物质与能量交换、大陆变形与内源动力等。国外在深地动力学理论、板块运动、地球演化、比较行星学、地球数值模型等方面均有深入研究。我国在计算地球动力学、大地构造学、大陆动力学与地幔动力学及成矿作用动力过程等方面研究有良好基础和影响力^[34-39]。国内外在深地力源及动力机制,大陆构造变形、变位与深部动力机制等方面均处于攻关阶段。未来应重点研究深地力源驱动机制与过程分析、深地内源动力反演与驱动灾变机理。

深地内源地质时变是指在地球内外地质作用下,区域构造运动产生的应力累积,使得不同尺度的地质体(大到地壳板块,小到岩体岩石)在不同时间—空间尺度上发生稳态/非稳态的演变响应过程^[9]。当前在全球深地地质信息归集解译、深地地质环境探测、深地多重地质灾害与复原等方面国外研究机构具有理论和技术装备优势。我国正积极拓展基于深地原位实验空间的深地内源地质时变微弱信号探测和解译,率先开展深地内源地质时变前沿探索。但在深地内源地质时变高精度探测原理与方法、技术与装备研发

方面有待进一步研究。未来应重点研究深地内源地质时变规律与关键弱信号解译。

深地内源地震孕生机理主要研究在地球内动力作用下深地区域地质体发生能量快速释放并引起振动破坏的现象及规律,揭示地震孕育、发生和发展过程的物理机制,解析地震灾害效应。国外在深地内源地震监测、预测领域处于世界领先水平^[40-44]。我国地震科技在地震预警、电磁监测试验卫星探测、地震孕育发生规律等研究领域处于国际先进水平^[45-46]。然而,我国地震科技在基础研究领域前沿原创少,对地震发生和成灾机理的认识有待深化;在应用研究领域涉及地震监测预测预警、风险防范和应急处置的一些关键技术尚待突破,观测技术装备产业化水平较低^[47]。未来应重点研究深地内源地震孕生机理与模型、深地内源地震灾害识别方法与技术等。

3.2.2 深地结构演变

深地结构演变包含深地结构演化与形成机理、深地结构及模型、深地界面行为及表层响应 3 方面内容。

深地结构演化与形成机理主要研究地球浅部以深(深层、超深层)的不同尺度地球深地结构的时间属性及其在内动力作用下时空演化规律和形成机理。国外在深地结构探测深度、精度方面均具有明显优势,通过开展深地结构重大探测计划,刷新了对地球结构的认知。我国成功研发了地壳与地幔深部探测系列技术方法,达到国际先进水平^[48-51]。但存在地壳结构及地球内部精细结构探测精度不足、深地结构的时间属性和形成机理及结构演变规律研究尚不深入等问题。下一步应重点研究深地结构相互作用机理及演变规律、深地结构时间属性与形成机理等。

深地结构及模型主要研究基于各类地质观测数据的深地结构反演分析计算方法,构建描述深地内部结构、性质和特征的物理及数值模型,形成深地结构透明推演理论与技术,实现深地结构的三维可视化。国外研究机构在区域精细结构反演理论与方法、非线性地球物理反演理论与非确定性反演算法^[52]等方面具有明显优势。国内研究机构在深地结构地球物理反演理论与方法、深地结构信息大数据挖掘及智能精细化反演理论与方法等^[53]方面取得了一系列进展,但核心反演算法和系统软件与世界先进水平尚有差距,仍需进一步攻关。未来仍需继续攻关深地结构反演理论与算法、深地结构空间拓扑建模及透明推演理论等。

深地界面行为及表层响应主要研究地球不同层圈分界面的形态、运动和影响,揭示深部地幔动力和

岩石圈构造动力塑造地表地形演变、驱动地表过程的机理及表层响应。近年,美国国家科学院提出“地形演变的成因和结果”是地球科学研究领域的前沿和重要挑战^[54],国外在深地界面运动行为、运动轨迹及动力学机理^[55]、界面运动的物理-力学-化学过程、深地物质的受力作用后造成深地界面的变异行为、地表过程与深部地幔动力^[56]、岩石圈变形相互作用^[57]方面处于领先水平。我国在深部地幔动力与地形耦合、古地形演变及其环境气候效应方面达到国际先进水平。深地界面动力行为及深地过程的表层响应等方面仍需进一步攻关。

3.2.3 深地物质循环

深地物质循环包含深地物质组构与相态、深地物质运移与循环、深地生物圈、深地成矿机制 4 个方面内容。

深地物质组构与相态主要研究地球内部物质组构及赋存状态,加深对深地物质的物理化学及矿物、岩石组构与相态等方面的理解,推动深地超临界态物质赋存规律等科学问题的解决。我国在地球内部物质组成与相态研究领域取得了较多重要进展与科学成果,在深地物质组构、相态演变及临界行为的特征与规律等方面仍需进一步攻关。

深地物质运移与循环旨在系统研究深地内动力作用下的深地物质循环、运移、交互及富集过程,以及研究地球内部碳库与通量,加深对深地碳及其他物质的赋存状态、运动方式、与地表碳循环的耦合关系等方面的理解,为正确理解全球碳循环、实现国家双碳计划提供理论依据。欧美发达国家及中国陆续开展了十余项地球深部研究计划,系统探索了大陆各层圈的物质组成、结构变异、运动行为、动态演化和驱动力系、深地碳循环的理论及实验技术(以美国华盛顿卡耐基研究所为首)等深地物质循环与运移交互规律等诸多领域^[50]。国内相关研究受到高精度探测核心技术装备限制,极端条件下深地物质运移和循环的实验与通量计算研究大多在国外实验室完成。通过与国际深碳观察计划的合作,我国在深地物质循环研究领域取得了较多重要进展,加深了人们对地球深部物质的赋存形式、运移规律、通量以及在地表的表现形式等的了解,但对深部物质循环仍缺乏系统性的认识^[51]。未来应重点研究深地物质运移富集原理及循环运移规律等。

深地生物圈是指不以阳光为能量来源的深部地下生物圈,主要由微生物组成,深地生物圈代表着地球早期极端环境下的生命,对于生命起源及火星等外星体的生命探索有重大意义。其旨在探索深地微生物

物的特点与分布规律,探究深地微生物差异性演化对深地物质循环的影响,揭示深地微生物活性及对地质过程(物质循环)的作用,包含深地微生物多样性构成、群落结构与功能以及与地表生物关系等研究^[58-61]。深地微生物研究主要依托深地实验室、陆地深钻等深地原位空间环境,开展了深地微生物的分布、生存边界条件及其对深部物质循环的影响等研究。依托中国大陆科学深钻项目(CCSZ)及锦屏地下实验室,我国学者开展了深地微生物分布、群落结构与多样性及其深地原位生存环境的初步研究,然而深地微生物活性的地质效应及变异和能量溯源^[62-65]、深地微生物多样性演化与生态圈构建相关研究尚处于起步阶段,亟待深入探索攻关^[66-67]。

深地成矿机制主要研究特定壳-幔结构空间驱动含矿热液流体运移、富集,并在地壳介质的适宜部位(特别是在深部空间)形成大型、超大型矿床或矿集区的作用机理,探索战略性矿产成矿系统与关键矿产资源成矿机制^[68]。国外矿业大国在成矿机制和找矿预测理论等方面研究较为成熟,促进了深地矿产资源勘查。目前世界先进水平勘探开采深度已达 2 500~4 000 m,而我国大多小于 500 m^[69]。我国战略性矿产的需求仍将持续维持在高态势,约 2/3 的战略性矿产还需要进口,其中,石油、铁矿石、铬铁矿,以及铜、铝、镍、钴、锆等,对外依存度已经超过 70%^[70]。我国矿产资源约束趋紧的态势没有改变,资源保障正在经受资源家底薄弱、全球市场控制力不足、话语权不强、中美贸易摩擦等挑战,加之在本次疫情中暴露出供应链安全和运输安全等问题,使得我国矿产资源形势更为严峻^[71]。我国诞生了多个原创性矿床学和找矿预测理论方法,但目前对深地成矿规律和机制、战略性矿产及关键矿产的深地成矿潜力等关键问题的研究有待深入^[72]。

3.2.4 深地工程科学

深地工程科学包含深部工程科学范畴,重点旨在为开发利用地球资源和地下空间过程中,人类处于探索阶段尚无系统原理、理论与技术方法解决的难度更高、情况更复杂的工程领域。包含深层与浅层地质响应互馈机制、深地原位物性规律、深地原位力学理论、深地工程韧性与透明解析 4 个方面内容。

深层与浅层地质响应关联互馈主要探索长期内外动力地质相互作用过程与地灾形成机理,揭示深层-浅层地质灾害的内在联系,构建深层-浅层重大地质灾害孕灾机制研究体系。国外较早认识到地球深层环境正在发生深刻变化并对浅层行为产生重要影响。美国斯坦福大学 MARK D Zoback 院士等^[73]较早

运用深层-浅层测量数据,分析深层结构临界状态及其浅层影响。相关研究在地球内外动力作用下的深地行为规律、地表形貌、地质灾害孕生及预警、灾害数据智能识别等领域取得长足进步,在海量地质灾害数据多维度-多层次分析、极端地质灾害监测预警等领域尚有不足。我国陈宗基院士^[74]早在 20 世纪 80 年代就指出深层运动决定地应力场,影响浅层工程岩体时效响应。然而,深层内源时变与浅层地质响应关联模型;深层-浅层重大地质灾害孕育机制与预警防控仍需进一步研究。

深地原位物性规律主要探索攻关深地物质原位物性、成份信息及本真行为性质的获取(利用深地赋存环境原位保真取心原理技术等),来系统研究深地原位赋存环境的物性参数差异性特征规律,为深地资源能源的探测评估与开采以及深地空间开发利用提供理论研究基础。国内外在深地原位物质获取及物性规律研究方面全部依托传统理论和技术手段,难以获取考虑深地原位环境影响的本真行为性质,必须发展获取深地原位环境本真物性参数的技术手段,获取新数据,建立新模型,形成新技术。国外组织和机构探索了深地物质“密闭型保真”获取原理与技术。我国借鉴国外技术也发展了“密闭型保真”获取方法,但两者均无法准确反映原位赋存环境的深地物质本真属性^[75]。亟待进一步攻关真正考虑深地原位赋存环境的物质保真获取理论、方法与技术,以系统探索研究深地物质原位物性参数和本真行为性质的差异性规律。但总体上,深地原位赋存环境下物性本真行为特征及差异性规律,深地原位物质保真获取原理技术与装备仍需进一步研究。

深地原位力学理论^[3,6,8]主要研究深地原位赋存环境与深地工程扰动下的原位力学行为及稳定性规律,重点研究深部原位真实赋存环境下岩石力学、环境力学、灾害力学等原位力学理论,为深地资源能源开发、深地空间利用及深地科学规律探索提供新的先导性基础科学理论。国外较早关注并重视深部原位环境对深部工程科学与技术的影响,开展原位环境现场测试的技术与方法及物理实验模拟研究,但是到目前为止,仍停留在传统测试手段和经典理论上,所获得的参数、模型、理论等与深地赋存深度无关,与深地原位环境无关,与深地工程扰动无关,亟待发展考虑深地真实赋存环境影响的原位力学理论。我国在国际上首次提出“深部原位岩石力学”创新构想与学术内涵^[8],旨在考虑深地赋存环境的原位力学行为及稳定性规律,为探索深地工程科学规律、提升深部资源能源获取能力提供理论支撑。但深地原位力学行为

及稳定性规律、深地极端环境原位力学理论与技术仍需继续攻关探索。

深地工程韧性与透明解析是指在深地资源能源开发与空间利用施工运营中的安全稳定以及抗灾害和快速应对恢复的能力,需系统研究深地工程韧性的理论、技术以及深地工程的可视化、透明解析方法和技术。自 20 世纪中叶,美国、日本等发达国家开始致力于重大工程灾害风险防控等减灾理论和技术的研究;21 世纪初,倡导地区可持续发展国际理事会(ICLEI)在联合国可持续发展全球峰会上提出“韧性”概念^[76]。国际科研机构(澳大利亚联邦科学与工业研究院、美国国家标准与技术研究院等)综合运用地球物理探测、计算机模拟等技术实现了千米量级的地层及其地质控制过程“透明化”,进一步发展了深地工程韧性的理论与技术。我国倡导全息感知智能工程韧性体系,率先提出了基于分形重构模型的深地工程透明解析可视化方法^[77]。国内外在深地工程尺度增韧原理与方法、相场耦合作用下透明解析等方面仍需进一步攻关。

3.3 深地资源利用领域研究现状与思考

深地资源利用领域包含深地固态资源、深地流态资源、深地空间资源、深地碳中和 4 方面内容。

3.3.1 深地固态资源

深地固态资源包含深地固态资源智能流态开采、深地战略矿产资源集约开采、深地动力灾害防控 3 个方面。深地固态资源智能流态开采主要通过深地开采环境智能感知、开采过程智能作业、开采系统智能管控,将深地固体矿产资源原位转化为气态、液态或气液混态物质,构建深地固态资源原位采选充、热电气等流态化智能开采技术体系^[78]。国内外在煤炭地下气化,以及盐矿、铀矿、油页岩流态开采等领域已有较多研究^[79-80],当前处于技术攻关期。国外固态资源智能开采设备、技术已较为成熟,并应用多年。我国已初步开展了现场智能化开采应用,技术还较为薄弱,处于攻关和推广应用阶段。煤炭智能原位流态开采为中国原创的理论和技术的^[76],国内高校、企业进行了初步探索,还处于起步阶段。深地固体资源原位流态化智能开采原理和技术、深地固态资源原位采选充与电热气一体化智能流态开采原理和技术仍需继续研究。

深地战略矿产资源集约开采指对深地固态资源中维系国民经济正常运行的战略性、关键性矿种、支撑高新技术和战略性新兴产业发展的小矿种,在开采中利用控制手段,优化系统资源组合,形成开采过程中的产量集中、工序集中、服务系统集中的集约化开

采。我国多数战略性稀有矿产为伴生矿床, 品位低, 开采难度大, 开采贫化率、选矿回收率低; 如铀、锂、钴、镍等储量低。但中国的石墨、萤石、锑、钒、锆、镓等储量丰富。总体上深地战略矿产资源精准集约开采技术仍需进一步研究。

深地动力灾害防控主要研究在深地固态资源开发中发生的岩爆、矿震、冲击地压、煤与瓦斯突出、冒顶、突水、边坡等动力灾害发生机理、超前预警和防控理论与技术。目前国内外根据各自的地质条件和开采方式形成了相应的灾害发生机理及预警理论。加拿大、南非、澳大利亚等国的灾害监测技术装备等发展较早, 被世界各国广泛采用。国内相关科研单位在矿山灾害监测装备和技术等方面已打破国外垄断。然而, 我国固态资源赋存地质条件更复杂, 现有的灾害理论和防控技术往往难以满足深地固态资源开采的灾害防控需求。深地动力灾害孕育机制和防控理论与技术仍需攻关探索。

3.3.2 深地流态资源

深地流态资源包含深地流态资源勘探评价、深地流态资源高效开采、深地干热岩低扰动开采技术 3 个方面。

深地流态资源勘探评价指精准勘探和计算分析深地某一特定区域(小到圈闭, 大及全球)的流态资源(石油、天然气、非常规油气、地热、煤层气等)富集和资源储量的技术和方法, 以及评估深地该区域流态资源禀赋特征和开采策略。国内在常规油气资源的评价理论上与国外同步, 美国地调局、加拿大地调局、中国地调局等政府机构以及美孚、壳牌、中石化等大型油气公司均形成各自的评价理论^[81]。然而我国核心装备落后较大, 导致勘探评价技术和数据解读方面还落后于国外, 特别是我国在非常规、深地、超深地等关键领域的深地流态资源勘探开发技术上还大幅度落后于发达国家。总体上, 深地(深地/超深地)储层流态资源勘探评价理论和方法仍需进一步研究。

深地流态资源高效开采主要研究将埋藏在深地(深地/超深地)储层中流态资源(石油、天然气、非常规油气、地热、煤层气等)及其伴生物高效开采的理论、技术与装备。国外钻完井技术、储层压裂改造技术成熟, 在不同深度、不同地质条件下的流态资源储层中均已应用成功。我国亟需自主研发新型的深地及超深地钻采技术和装备。深地流态资源储层改造理论和方法、深地流态资源高效开采技术装备仍需继续攻关探索^[82]。

深地干热岩低扰动开采技术主要破解目前干热岩开采诱发地震的技术瓶颈, 发展和探索深层低扰动

(不诱发矿震、地震)干热岩开采新原理、新方法和新技术。欧美发达国家对干热岩开采已进行了将近 50 a 的研究^[83], 在美国 Fenton Hill^[84], 法国 Forge^[85]等进行了数十处干热岩现场开采测试。德国、韩国为了减轻干热岩开采诱发地震的重大社会问题^[86], 探索了区别于水力压裂的新型开采技术方法, 进行了干热岩储层疲劳压裂改造, 获得大量宝贵的数据和经验。我国干热岩开采基础薄弱, 目前仅在青海共和等进行实验性研究, 理论和实践均远落后于国外研究^[87-94]。然而, 国内外干热岩开采都受到诱发地震等强烈扰动的困扰, 引起了一系列社会问题, 导致多处干热岩工程停工。目前全球尚无成熟的低扰动干热岩地热资源开发实例。深地干热岩储层改造理论和方法、深地干热岩低扰动开采原理和技术仍需继续研究^[95-98]。

3.3.3 深地空间资源

深地空间资源的开发利用的重点在深地空间生态重构, 旨在开发探索在深地空间人类生存所需要的生态环境(阳光、空气、水、湿地、植被等)的重构原理和技术, 以满足人类开发深地资源能源以及生存发展的需要和保障^[99]。目前世界范围内尚未有以深地生态重构为目的科学研究, 但是国外较早发展的地下农业可为未来研究提供路径。有代表性的为日本的 Pasona O2, 法国巴黎地下花园, 美国纽约曼哈顿的 Lowline Lab 实现了地下 100 余种植被为期 2 a 的实验^[100-102]; 加拿大利用矿道建设了位于地下 500 m 的地下花园, 美国亚利桑那大学、美国航空航天局建设了以小尺寸密封舱, 系统研究了密闭空间内碳、水循环以及生物量产出与能源输入关系^[103-104]。我国在地下农业方面具有一定基础, 其中具有代表性的中科三安, 已形成了相当的企业规模^[105-106]。但我国目前尚未有以地下空间生态重构为目标的研究。深地空间生态环境重构理论和技术仍待进一步研究。

深地战略能源储备指利用深地空间进行石油、天然气等能源战略储备, 以及对高压风、氢气、化学品、热能等新型能源进行存储。世界主要的发达国家均利用人造深地空间、废弃油气田、地下含水层或盐岩井等进行大量石油、天然气等战略能源储备, 并进行了利用深地空间进行储氢、核废料、高压风储存的前沿探索^[107-109]。我国能源地下储库主要集中在利用盐岩等特殊地层建设天然气地下储库^[110-111]; 石油地下储库发展相对较慢, 我国国家石油储备二期工程中有 4 处采用地下水封洞形式建设。但是我国石油、天然气的储备规模与国际能源署建议的 90 d 安全战略储备量差距较大, 并且我国在新型能源的地下储备方面研究几乎处于空白^[112]。深地能源储库长期稳定性理

论和技术、深地新型能源储备理论和技术仍待进一步研究。

深地微生物与医学指深地环境对微生物生命活动的影响规律,以及地下空间环境对生命体生理和病理,以及对人体心理的影响及机制^[113-114]。国外系统展开了深地微生物学研究,着重研究地下微生物的生存方式以及非人体细胞受深地低辐射、高温等地质环境的影响^[115-116]。我国深地微生物研究主要来源于钻探取得的深部微生物进行了细菌群落分析、菌株原位含量分析、菌株分离与鉴定。在深地医学领域,四川大学在中国夹皮沟金矿、锦屏地下实验室等建立了世界首个深地医学实验室^[113-114],系统研究深地环境对人体健康及心理状态影响以及对生命体生理和病理的作用机制,目前还处于起步阶段。深地微生物学、深地生物与医学有待继续研究。

3.3.4 深地碳中和

深地碳中和指深地储碳固碳负碳、深地“地热+”零碳负碳能源 2 个方面。

深地储碳固碳负碳指利用深地特殊地质环境(咸水层、油气田、煤层等)和深地生物圈等将 CO₂ 封存到地下或转化为方解石、石膏等矿物,实现其与大气的长期隔绝或永久性储存。国外已形成了 CO₂ 地下封存较为完善的研究和工业应用体系,特别是在 CO₂ 强化油气开采技术在深地储碳的同时产生一定的经济效益^[117-119]。美国能源部、欧洲、日本已进行了多处的现场工程测试,积累了丰富的深地储碳工程经验^[120-121]。同时,日本、冰岛、美国等对深地微生物的碳汇作用及其与地表碳汇的相互联系有较深入的研究。由中国国家能源集团、中海油、中石化、中石油等在 CO₂ 地下封存和驱替油气方面开展了工程示范;目前,中石油、中石化和华能集团等都发布了深地 CCUS 规划^[122-126]。我国对深地微生物,特别“深古菌”的代谢机制及其对碳汇的地球化学功能进行了研究。四川大学、深圳大学等在 CO₂ 矿化发电、CO₂ 能源化资源化利用、空气中直接捕集 CO₂ 等方面进行了前沿性探索^[127]。在深地固碳负碳方面,我国的研究与国际同步,均处于起步阶段。深地储碳固碳负碳原理和技术仍待进一步研究。

深地“地热+”零碳负碳能源指以深部开采“中、高、低”地热发电后的常温地热和 CO₂ 培养生物、深古菌等,创新集成地热发电+微藻固碳的生物质负碳能源技术,建成与地面风光电多能互补的“地热+”零碳负碳能源技术体系^[128]。国际上地热开发主要分为直接利用和地热发电,美国、印尼、菲律宾、土耳其和新西兰地热发电装机量位于世界前列(均超过 1 GW),

但受限于常规地热发电技术,各国地热发电总量占比很小^[129-132];同时,美国、欧洲、日本等主要针对太阳能与其他能源结合的多能互补系统开展了大量研究^[133],比如太阳能与热泵相结合,但尚未出现以地热为基础能源的多能互补智慧能源系统。近年来,受限于中低温地热发电效率低的技术难题,我国地热能发电规模和体量与世界地热大国相距甚远、进展缓慢;“双碳”背景下,我国深部地热开发与多能互补绿色园区建设正处于试验探索阶段,仍需攻关“地热+”零碳负碳能源技术^[134-137]。深地“中、高、低”地热发电变革性原理与技术、深地地热+微藻固碳与多能互补零碳负碳技术仍待进一步研究。

4 深地工程技术的内涵与思考

我国深地开发重大战略目标的实现亟待提高深部地下工程建设运维能力,但是深地具有更强的“高应力、高渗压、高地温”极复杂地质条件和极强构造活动区等极端条件,地下工程建设能力不足、服役寿命不长、智能化水平不高、环境感知与调控不精细等重大问题成为制约深地工程建造运维的瓶颈,亟待重点攻关深地工程技术。深地工程技术是指人类为利用地球、开发地球所需要的工程实施技术与装备,为探索深地科学规律、开发深地工程必需的理论和技术手段,进而实现深地工程的安全建造与健康运维,主要包含 4 个方面内容:深地工程岩土力学与灾变机理、超深井智能建造与能源资源高效开采、深埋隧道与巨型洞室群智能建造、深地工程灾害智能防控与健康运维。

4.1 深地工程岩土力学与灾变机理

建立深地岩土体基本力学理论,特别是其深地工程响应及灾变规律,是开展深地工程建设的科学基础。面对国家深地工程向 1 000 m 深厚土层、3 000 m 岩层以深挺进的重大需求,深地工程建设中高地应力、高地温和高渗透压等愈发严重,构造活动及工程扰动愈发剧烈,深地工程不可或缺的超深井、巨型洞室群和深埋隧道群等建造将面临着难以预见的复杂严苛的地质环境与工程条件^[138-143]。

为达到深地工程安全、低损和高效建设的要求,必须系统深入地开展深地工程岩体力学、深地工程土/冻土力学理论及深地工程重大灾害灾变机理方面的研究,掌握与建立极复杂地质环境中深部岩土体非线性力学行为和多场多相耦合效应、灾变演化机理等方面的基础理论。围绕深地工程原位岩石力学理论,研究深地原位环境保真取心与测试原理技术^[144]、深地工程扰动岩石力学响应规律^[145-149]、深地原位环境

岩石本构理论, 建立深地工程原位岩石力学全新理论体系, 为深地工程建设与运维以及深地灾害预警防控提供理论支撑^[150-154]; 围绕极复杂地质环境深地工程灾变机理, 研究深地工程高烈度岩爆灾变机理、深地工程高压突水灾变机理、深地工程大变形灾变机理, 为深地工程灾害预警提供理论依据^[143, 155-158]。

4.2 超深井智能建造与能源资源高效开采

井筒是沟通地表与深部地下空间的咽喉要道, 须下穿待建地下空间之上的各种土层与岩层, 其重要性位居各种深地工程之首。在深厚含水不稳定土层、微孔(裂)隙高压富水岩层、高应力破碎岩层、强烈构造活动区岩层等极复杂地质与水文地质条件下建造井筒, 是极具挑战性的世界难题^[159-162]。因冻结法适用性广, 迄今为止在深厚不稳定土层和深厚富水复杂岩层中, 90% 以上的井筒须采用冻结法建造, 我国已具备用冻结法在 750 m 深厚土层和 1 000 m 深厚富水岩层中建造立井井筒的能力, 居世界领先水平^[163]。需针对深部极复杂工程地质与水文地质条件, 建立超深井建造理论技术, 同时建立并完善深部能源资源安全高效开发理论技术, 提升深部能源资源获取能力。

围绕深厚不稳定土层冻结法建井, 研究超深土层冻结井设计理论、超深土层智能冻结技术、超千米冻结深井智能掘砌技术, 突破超千米土层冻结法建井重大技术瓶颈; 围绕复杂岩层超深井智能建造, 研究超深井封水井壁设计理论、超深井智能掘砌技术、超深井智能探测堵水技术, 攻关突破 3 000 m 超深井智能高效建造重大技术瓶颈^[164-168]; 开展深地固态资源智能流态开采、深地战略矿产集约开采、深地动力灾害防控、深地流态资源高效开采、深地战略能源储备、深地储碳固碳负碳等理论技术攻关, 研究建立深地资源(深地固态资源、深地流态资源、深地空间资源及深地碳中和等)安全高效开发理论技术体系。

4.3 深地隧道与巨型洞室群智能建造

隧道、巷道和巨型洞室群是深地工程的主体, 肩负着国土空间扩容、疆域纵深拓展的重任。随着固体矿产资源开采、交通水利国防基础建设重大地下工程向 3 000 m 以深极端复杂环境, 以及埋深大于 35 m 巨型洞室群极大规模发展, 深部地下工程面临着高地应力硬岩掘进效率低、开挖后围岩时效大变形稳定控制难, 以及大跨巨型洞室群高效安全建造方案控制因素多等严峻挑战, 亟需研发变革性新技术和新材料, 在重大工程中进行集成创新^[169-171]。

围绕深埋隧道智能高效掘进, 研究深地复杂围岩智能辨识技术、深地智能掘进高效破岩技术、深埋隧道掘进智能监控技术, 形成深埋隧道智能高效掘进全

新技术体系^[172-173]; 围绕深地巨型洞室群智能建造, 研究巨型洞室群围岩稳定控制理论、巨型洞室群全域协同智能建造技术、巨型洞室群灾害智能感知与防控技术, 实现深地巨型洞室群机械化、智能化建造的技术集成创新^[174-175]; 围绕深地围岩大变形稳定控制, 研究深地围岩大变形理论与控制方法、深地围岩大变形自适应支护新技术、深地围岩原位改性新技术, 形成深地围岩大变形控制理论与技术体系。

4.4 深地工程灾害智能防控与健康运维

极复杂地质环境和极强烈构造活动区的超深井、巨型洞室群、深埋隧道群等深地工程, 建造过程中必然面临着岩爆、突水等重大工程灾害难题, 同时面临着动力灾害演化机制与动力响应规律不清、深地工程动力灾害防控基础薄弱等科学难题^[176-178]。深地工程运维过程面临着大量的安全难题, 包括通风-空调、灾变控风、突发灾害应急救援等难题, 以及开裂、渗水、大变形或坍塌防控等重大安全风险。本方向将重点研究超深井、巨型洞室群、深埋洞室群等特殊场景可能出现的岩体破裂、灾情探测、智能预警、安全管控等, 研究深地工程建造与运维动力响应理论与技术, 发展灾害探测与智能预警新理论, 研发深地工程动力灾害智能预警防控、降振减振、安全管控、健康运维、应急联动等新技术和新装备。

围绕深地工程动态响应理论与技术, 研究深地工程动力学响应测试技术与方法、深地工程建造与运维期动态响应规律、深地工程扰动动力学理论, 建立深地工程建造与运维期的岩石动力学新理论与新技术; 围绕深地工程灾害智能预警与防控, 研究深地工程灾害源智能探测技术、深地工程灾害智能辨识预警技术、深地工程灾害精准防控技术, 建立深地工程灾害智能预警与防控全新技术体系; 围绕服役期安全智能感控与健康运维, 研究深地工程安全智能感知理论与技术、深地工程多灾种精准防控技术、深地工程生命线与应急技术, 构建深地工程健康运维智能技术体系, 保障深地工程安全与健康服役。

以期形成大深度隧道、矿井及大跨度巨型洞室群等地下工程智能建造与健康运维理论技术体系, 建立健全深地工程技术理论与装备框架, 提升我国深地资源开发和深地空间利用能力, 引领国际深地工程技术发展。

5 结 语

21 世纪的深地科学进入了新的发展阶段, 深地科学规律尚未探明, 深部工程活动普遍存在着一定程度的盲目性、低效性和不确定性, 地球深部内源动力、结

构演变规律、致灾机理等仍待进一步认知。

(1) 笔者提出深地科学的定义与本质,即以地球浅层以深的深层和超深层为研究对象,旨在探索地球不同层圈和不同赋存深度(深层和超深层)的科学奥秘和基本规律、分析内在机理,从而揭示人类现有科学理论和认知水平尚未涉及、无法解译的地球浅层以深的深层物理力学差异性行为,以及超深层的深地内部结构、物质行为、内外动力响应等定性定量基本规律,直接服务于人类生存发展所必需的战略资源能源、空间利用与工程安全等重大科学与技术问题。

(2) 定义了深地工程科学的内涵,即人类要超前思考和探索对目前浅部和深部的层位更深的能源资源及空间利用的开发获取能力和技术的科学。深地工程科学从深层与浅层地质响应互馈机制、深地原位物性规律、深地原位力学理论、深地工程韧性与透明解析 4 个方面进行重点攻关,旨在构建深层-浅层重大地质灾害孕灾机制研究体系,获取深地物质原位物性、成份信息及本真行为性质,发展考虑深地真实赋存环境影响的原位力学理论,提高深地资源能源开发与空间利用施工运营中的安全稳定性以及抗灾害和快速应对恢复的能力,为探索深地工程科学规律、提升深部资源能源获取能力提供理论支撑。

(3) 定义了深地工程技术的内涵,即深地工程技术是指人类为利用地球、开发地球所需要的工程实施技术与装备,为探索深地科学规律、开发深地工程必需的理论与技术手段。深地工程面临更强的高应力、高地温、高渗压、强扰动复杂环境和岩爆、大变形等动力灾害严峻挑战,深地工程技术从深地工程岩土力学与灾变机理、超深井智能建造与能源资源高效开采、深埋隧道与巨型洞室群智能建造、深地工程灾害智能防控与健康运维 4 个方面进行重点攻关,旨在解决深地工程原位环境与物性保真测试、深埋隧洞围岩稳定控制、复杂岩土层超深立井建造、深地工程灾害智能预警防控与健康运维关键科技问题。

致谢 本文形成过程中,很多学者如中国地质大学(北京)王成善院士、南京大学董树文教授等参与讨论并提出建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] WALKER M. Pushing the extended-reach envelope at sakhalin: An Operator experience drilling a record reach well [C]// IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. San Diego, California, 2012.
- [2] 王明华,贺立勤,卓云,等.川渝地区 9 000 m 级超深超高温超高压地层安全钻井技术实践与认识[J].天然气勘探与开发,2023,46(2): 44-50.
- WANG Minghua, HE Liqin, ZHUO Yun, et al. Practices and understandings on safe drilling technologies for 9 000-m-level super deep and ultra high temperature and pressure strata, Sichuan-Chongqing area[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(2): 44-50.
- [3] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1-16.
- XIE Heping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Science, 2017, 49(2): 1-16.
- [4] 张鹏,曾新华,李现臣,等.锦屏二级水电站引水隧洞工程强岩爆综合防治措施研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 61-65.
- ZHANG Peng, ZENG Xinhua, LI Xianchen, et al. Study on comprehensive measures for control of heavy rockburst during construction of diversion tunnel for Jinping Hydropower Station II[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 61-65.
- [5] 叶少波.套孔应力解除法在大峡谷隧道出口端的应用[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(2): 119-123.
- YE Shaobo. Application of stress relief by overcoring at the exit end of grand canyon tunnel[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2022, 18(2): 119-123.
- [6] 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[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Science, 2017, 49(1): 1-8.
- [7] XIE Heping, LI Cong, HE Zhiqiang, et al. Experimental study on rock mechanical behavior retaining the in situ geological conditions at different depths[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104548.
- [8] 谢和平,李存宝,高明忠,等.深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 217-232.
- XIE Heping, LI Cunbao, GAO Mingzhong, et al. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 217-232.
- [9] 谢和平,张茹,邓建辉,等.基于“深地-地表”联动的深地科学与地灾防控技术体系初探[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 1-12.
- XIE Heping, ZHANG Ru, DENG Jianhui, et al. A preliminary study on the technical system of deep earth science and geo disaster prevention-control based on the “deep earth-surface” linkage strategy[J]. Advanced Engineering Science, 2021, 53(4): 1-12.
- [10] 周立华,王鑫,周城雄,等.我国地球科学发展的若干思考与建议[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 297-307.
- ZHOU Lihua, WANG Xin, ZHOU Chengxiong, et al. Thoughts and suggestions on development of earth sciences in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 297-307.
- [11] 侯贺晟,王成善,张交东,等.松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 2018, 45(4): 641-657.
- HOU Hesheng, WANG Chengshan, ZHANG Jiaodong, et al. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in earth science research[J]. Geology in China, 2018, 45(4): 641-657.

- [12] 彭诚, 邹长春, 王成善. 嫩江组一二段天文旋回测井替代指标优选: 以松辽盆地科学钻探井为例[C]//2020 年中国地球科学联合学术年会. 重庆, 2020: 3623–3624.
- [13] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 1–10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 1–10.
- [14] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1283–1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1283–1305.
- [15] 王大锐. 叩击地球深部的门[J]. *石油知识*, 2022, 38(3): 6–7.
WANG Darui. Knocking on the door of the deep Earth[J]. *Petroleum Knowledge*, 2022, 38(3): 6–7.
- [16] 邹长春, 王成善, 彭诚, 等. 中国大陆科学深钻发展的若干思考与建议[J]. *现代地质*, 2023, 37(1): 1–14.
ZOU Changchun, WANG Chengshan, PENG Cheng, et al. Development of the Chinese continental scientific deep drilling: Perspectives and suggestions[J]. *Geoscience*, 2023, 37(1): 1–14.
- [17] 毛惠. 超高温超高密度水基钻井液技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
MAO Hui. Research on the technology of ultra-high temperature and ultra-high density water based drilling fluid [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [18] 李根生, 宋先知, 田守增. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 1–8.
LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouzeng. Intelligent drilling technology research status and development trend[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 1–8.
- [19] 韩双彪, 杜欣, 白松涛, 等. 松辽盆地深层陆相页岩储层测井评价: 以国际大陆科学钻探为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(9): 3271–3286.
HAN Shuangbiao, DU Xin, BAI Songtao, et al. Logging evaluation of deep lacustrine shale reservoir in Songliao Basin: A case study of international continental scientific drilling[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3271–3286.
- [20] 张双全. 二维大地电磁各向异性理论与反演[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHANG Shuangquan. Theoretical and inversion research of magnetotelluric fields in twodimensional anisotropic media [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [21] 王明超, 刘宝鸿, 张斌, 等. 利用高分辨率波阻抗反演技术预测薄储层——以辽河坳陷牛居地区为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S1): 196–200.
WANG Mingchao, LIU Baohong, ZHANG Bin, et al. Prediction of thin reservoirs using high-resolution wave impedance inversion technique—A case study of niuju area in Liaohe Depression[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 196–200.
- [22] 王华, 张雨顺. 测井资料人工智能处理解释的现状与展望[J]. *测井技术*, 2021, 45(4): 345–356.
WANG Hua, ZHANG Yushun. Research status and prospect of artificial intelligence in logging data processing and interpretation[J]. *Well Logging Technology*, 2021, 45(4): 345–356.
- [23] MAXWELL S. Microseismic: Growth born from success[J]. *Geophysics*, 2010, 29(3).
- [24] THORNTON M Duncan. Microseismic imaging with combined surface and downhole arrays[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2012: 1–5.
- [25] 徐纪人, 高锦曦, 赵志新, 等. 中国大陆科学钻探 500 m 深井地球物理长期观测最新进展[C]//中国地球物理 2013——第十分会场论文集. 2013.
- [26] 苏俊, 张昊, 李志宏, 等. 锦屏深地核天体物理实验 (JUNA) 的首个结果: $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反应 92 keV 共振的精确测量[J]. *科学通报*, 2022, 67(2): 9.
SU Jun, ZHANG Hao, LI Zhihong, et al. First result from the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment JUNA: Precise measurement of the 92 keV $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ resonance[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(2): 9.
- [27] HUANG Junge, RUAN Baiyao, WANG Jialin, et al. A study on anomaly of borehole-to-ground joint resistivity surveying system[J]. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 2009, 52: 1348–1362.
- [28] LIU Y, LIAO R, ZHANG Y, et al. Application of surface-downhole combined microseismic monitoring technology in the Fuling shale gas field and its enlightenment[J]. *Natural Gas Industry B*, 2016, 36: 56–62.
- [29] 冉曾令, 饶云江, 王熙明, 等. uDAS(R) 分布式光纤传感地震仪及其应用[J]. *石油物探*, 2022, 61(1): 41–49.
RAN Zengling, RAO Yunjiang, WANG Ximing, et al. Ultra-sensitive distributed acoustic sensor seismograph and its application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(1): 41–49.
- [30] ERIKA Kohler, CHAO He, SARAH E Moran, et al. The importance of prioritizing exoplanet experimental facilities- a white paper for the planetary science and astrobiology decadal survey 2023–2032 [R]. Carnegie Institution for Science, 2020: 1–8.
- [31] RAHAMAN A, IMRAN M. Epoxy-carbon nanotubes as matrix in glass fiber reinforced laminated composites[J]. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2017, 25(10): 559–562.
- [32] 孙天泽. 固体传压三轴流变仪的研制[C]//第一届高温高压岩石力学学术讨论会. 北京, 1986.
- [33] 赵建刚, 王雪竹, 王琪, 等. 超高温高压流变仪的研发及应用[J]. *钻探工程*, 2021, 48(5): 83–87.
ZHAO Jiangang, WANG Xuezhu, WANG Qi, et al. Development and application of the ultra high temperature and high pressure rheometer[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(5): 83–87.
- [34] 卢占武, 高锐, 李秋生, 等. 中国青藏高原深部地球物理探测与地球动力学研究 (1958—2004)[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(3): 753–770.
LU Zhanwu, GAO Rui, LI Qiusheng, et al. Deep geophysical probe and geodynamic study on the Qinghai-Tibet Plateau (1958–2004)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(3): 753–770.
- [35] 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 等. 大陆动力学的过去、现在和未来

- 来——理论与应用[J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1433–1444.
- XU Zhiqin, LI Tingdong, YANG Jingsui, et al. Advances and perspectives of continental dynamics: Theory and application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7): 1433–1444.
- [36] 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 1–42.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, HOU Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 1–42.
- [37] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 2011, 85(1): 1–33.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. On the Tectonics of the India-Asia Collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(1): 1–33.
- [38] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553–1582.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, WANG Yuejun, et al. Continental tectonics and problems in South China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2013, 43(10): 1553–1582.
- [39] LI Z, LIU M, GERYA T. Lithosphere delamination in continental collisional orogens: A systematic numerical study: Dynamics of lithosphere delamination[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121: 5186–5211.
- [40] DE Luca G, DEL Pezzo E, DI Luccio F, et al. Site response study in Abruzzo (Central Italy): Underground array versus surface stations[J]. *Journal of Seismology*, 1998, 2(3): 223–236.
- [41] SACCOROTTI G, LIETO B D, TRONCA F, et al. Performances of the Underground SEISmic array for the analysis of seismicity in Central Italy[J]. *Annals of Geophysics*, 2009, 49(4): 1041–1057.
- [42] BEVERINI N, BASTI A, BOSI F, et al. Ring laser gyroscopes in the underground Gran Sasso Laboratories[J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(2): 195–198.
- [43] AKITO A, AKITERU T, WATARU M, et al. Analyses of far-field coseismic crustal deformation observed by a new laser distance measurement system[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181: 127–140.
- [44] ARAYA A, TAKAMORI A, MORII W, et al. Design and operation of a 1500-m laser strainmeter installed at an underground site in Kamioka, Japan[J]. *Earth, Planets and Space*, 2017, 69(1): 1–7.
- [45] ACERNESE F, ROSA R D, BARONE F, et al. Long term seismic noise acquisition and analysis in the Homestake mine with tunable monolithic sensors[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 228: 012036.
- [46] 操玉文, 曾祥方, 李正斌, 等. 云南漾濞 M_s6.4 地震信号的旋转和平动分量面波记录分析研究[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(2): 663–672.
- CAO Yuwen, ZENG Xiangfang, LI Zhengbin, et al. Rotational and translational motions induced by the Ms6.4 Yunnan Yangbearthquake recorded by co-located FOGs and seismometer[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 663–672.
- [47] 张晁军, 陈会忠, 李卫东, 等. 大数据时代对地震监测预报问题的思考[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(4): 1561–1568.
- ZHANG Chaojun, CHEN Huizhong, LI Weidong, et al. Thinking of earthquake monitoring and prediction at the age of big data[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1561–1568.
- [48] 董树文, 李廷栋. SinoProbe——中国深部探测实验[J]. *地质学报*, 2009, 83(7): 895–909.
- DONG Shuwen, LI Tingdong. SinoProbe: The exploration of the deep interior beneath the Chinese continent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(7): 895–909.
- [49] 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 深部探测揭示中国地壳结构、深部过程与成矿作用背景[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3): 201–225.
- DONG Shuwen, LI Tingdong, CHEN Xuanhua, et al. SinoProbe revealed crustal structures, deep processes, and metallogenic background within China continent[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3): 201–225.
- [50] 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 我国深部探测技术与实验研究进展综述[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(12): 3884–3901.
- DONG Shuwen, LI Tingdong, CHEN Xuanhua, et al. Progress of deep exploration in mainland China: A review[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(12): 3884–3901.
- [51] 董树文, 李廷栋, 高锐, 等. 地球深部探测国际发展与我国现状综述[J]. *地质学报*, 2010, 84(6): 743–770.
- DONG Shuwen, LI Tingdong, GAO Rui, et al. International progress in probing the earth's lithosphere and deep interior: A review[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(6): 743–770.
- [52] MALINVERNO A. Parsimonious Bayesian Markov chain Monte Carlo inversion in a nonlinear geophysical problem[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2002, 151(3): 675–688.
- [53] 邵陆森, 刘振东, 吕庆田, 等. 安徽贵池矿集区深部精细结构——来自综合地球物理探测结果的认识[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(12): 4490–4504.
- SHAO Lusen, LIU Zhendong, LÜ Qingtian, et al. Deep fine structure of Guichi Ore concentrated area: The understanding of the integrated geophysical detection results[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(12): 4490–4504.
- [54] 美国科学院国家科学研究理事会. 地球科学新的研究机遇[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [55] THORNE LAY, QUENTIN WILLIAMS, EDWARD J. The core-mantle boundary layer and deep Earth dynamics[J]. *Nature*, 1998, 392(6675): 461–468.
- [56] KIRALY A, FACCENNA C, FUNICIELLO F, et al. Coupling surface and mantle dynamics: A novel experimental approach[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 3863–3869.
- [57] 陈建业, 杨晓松, 石耀霖. 热-流-固耦合方法模拟岩石圈与软流圈相互作用[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(4): 939–949.
- CHEN Jianye, YANG Xiaosong, SHI Yaolin. A coupled thermal-fluid-solid approach for modeling the lithosphere-asthenosphere interactions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(4): 939–949.
- [58] BORGONIE G, LINAGE-ALVAREZ B, OJO A O, et al. Eukaryotic opportunists dominate the deep-subsurface biosphere in South Africa[J]. *Nature communications*, 2015, 6(1): 8952.
- [59] HINAKO T, MARIKO K, YOHEY S. The deep rocky biosphere: new geomicrobiological insights and prospects[J]. *Frontiers*

- in Microbiology, 2021, 12: 785743.
- [60] KRUEGER J, FOERSTER V, TRAUTH M H, et al. Exploring the past biosphere of Chew Bahir/southern Ethiopia: Cross-species hybridization capture of ancient sedimentary DNA from a deep drill core[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 683010.
- [61] MAYER A. Life in the deep biosphere[J]. *BioScience*, 2012, 62(5): 453–457.
- [62] 王纬琦, 程晓钰, 向兴, 等. 四川锦屏隧道细菌群落特征及其组装过程[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(4): 1216–1228.
WANG Weiqi, CHENG Xiaoyu, XIANG Xing, et al. Bacterial community and their assembly process in Jinpingian Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(4): 1216–1228.
- [63] NUPPUNEN-PUPUTTI M, KIETÄVÄINEN R, PURKAMO L, et al. Rock surface fungi in deep continental biosphere-exploration of microbial community formation with subsurface in situ biofilm trap[J]. *Microorganisms*, 2020, 9(1): 64.
- [64] WANG F P, LU S L, ORCUTT B N, et al. Discovering the roles of subsurface microorganisms: Progress and future of deep biosphere investigation[J]. *Chinese Science Bulletin: English version*, 2013(4): 12.
- [65] DAI X, WANG Y, LUO L, et al. Detection of the deep biosphere in metamorphic rocks from the Chinese continental scientific drilling[J]. *Geobiology*, 2021, 19(3): 278–291.
- [66] 董海良. 深地生物圈的最新研究进展以及发展趋势[J]. *科学通报*, 2018, 63(36): 3885–3901.
DONG Hailiang. Recent developments and future directions of deep biosphere research[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(36): 3885–3901.
- [67] 殷鸿福. 中国深部地下生物圈亟待研究[J]. *科学通报*, 2018, 63(36): 3883–3884.
YIN Hongfu. China's deep underground biosphere needs urgent study[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(36): 3883–3884.
- [68] 吕庆田, 董树文, 史大年, 等. 长江中下游成矿带岩石圈结构与成矿动力学模型——深部探测 (SinoProbe) 综述[J]. *岩石学报*, 2014, 30(4): 889–906.
LÜ Qingtian, DONG Shuwen, SHI Danian, et al. Lithosphere architecture and geodynamic model of Middle and Lower Reaches of Yangtze Metallogenic Belt: A review from SinoProbe[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(4): 889–906.
- [69] 习近平. 为建设世界科技强国而奋斗——在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话[J]. *科协论坛*, 2016(6): 4–9.
XI Jinping. Striving for building a world power in science and technology - speech at the national conference on science and technology innovation, the congress of academicians of the two academies, and the ninth national congress of the chinese association for science and technology[J]. *Science & Technology Association Forum*, 2016(6): 4–9.
- [70] 余良晖, 闻少博, 陈甲斌. 全球矿产资源安全格局与地缘政治博弈分析[J]. *中国国土资源经济*, 2023, 36(9): 24–30, 55.
YU Lianghui, WEN Shaobo, CHEN Jiabin. Analysis of global mineral resources security pattern and geopolitical game[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2023, 36(9): 24–30, 55.
- [71] 翟步金, 祝诗蓓, 王贤卫. 我国建立重要金属矿产资源储备的对策研究[J]. *中国工程咨询*, 2023, 276(5): 36–39.
ZHAI Bujin, ZHU Shibei, WANG Xianwei. Countermeasures research on establishing important metal mineral resources reserves in China[J]. *China Engineering Consultants*, 2023, 276(5): 36–39.
- [72] 薛迎喜, 贾儒雅, 庞振山, 等. 我国开展深部找矿的对策与建议 [EB/OL]. (2018–11–06)[2023–10–02]. https://www.cgs.gov.cn/ddztt/jqthd/ddy/jyxc/201811/t20181106_470794.html
XUE Yingxi, JIA Ruya, PANG Zhenshan, et al. Countermeasures Research on Establishing Important Metal Mineral Resources Reserves in China [EB/OL]. (2018–11–06)[2023–10–02]. https://www.cgs.gov.cn/ddztt/jqthd/ddy/jyxc/201811/t20181106_470794.html
- [73] 刘澜波, MARHK D Zoback. 新马德里地震带的岩石圈强度与板内形变[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(S1): 1–14.
LIU Lanbo, MARHK D ZOBACK. Lithospheric strength and intraplate deformation in the new madrid seismic zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1998, 41(S1): 1–14.
- [74] 陈宗基, 吴海青. 我国在复杂岩层中的巷道掘进——兼论构造应力与时间效应的重要性[J]. *岩石力学与工程学报*, 1988, 7(1): 1–14.
CHEN Zongji, WU Haiqing. Chinese roadway excavation in complex rock formations—and the importance of tectonic stress and time effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1988, 7(1): 1–14.
- [75] XIE Heping, LIU Tao, GAO Mingzhong, et al. Research on in-situ condition preserved coring and testing systems[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(6): 1840–1859.
- [76] 薄景山, 王玉婷, 薄涛, 等. 城市和建筑抗震韧性研究的进展与展望[J]. *地震工程与工程振动*, 2022, 42(2): 13–21.
BO Jingshan WANG Yuting, BO Tao, et al. Progress and prospect of research on seismic resilience of cities and buildings[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2022, 42(2): 13–21.
- [77] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 1–7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 1–7.
- [78] XIE H, JU Y, GAO F, et al. Groundbreaking theoretical and technical conceptualization of fluidized mining of deep underground solid mineral resources[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 67: 68–70.
- [79] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 547–556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 547–556.
- [80] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1187–1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1187–1197.
- [81] MA W, VAN RHEE C, SCHOTT D L. Technological and profitable analysis of airlifting in deep sea mining systems[J]. *Minerals*, 2017, 7(8): 143–143.

- [82] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(5): 1210–1219.
XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1210–1219.
- [83] JIA Jun, ZHANG Delong, WENG Wei, et al. Key technology and development of hot dry rock drilling[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 40–44.
- [84] TESTER J W, ANDERSON B J, BATCHELOR A S, et al. Impact of enhanced geothermal systems on US energy supply in the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 365(1853): 1057–1094.
- [85] 张森琦, 文冬光, 许天, 等. 美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型 EGS 场地勘查现状对比[J]. *地学前缘*, 2019, 26(2): 321–334.
ZHANG Senqi, WEN Dongguang, XU Tian, et al. The U. S. Frontier observatory for research in geothermal energy project and comparison of typical EGS site exploration status in China and U. S.[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(2): 321–334.
- [86] MOCK J E, TESTER J W, WRIGHT P M. Geothermal energy from the earth: Its potential impact as an environmentally sustainable resource[J]. *Annual Review of Energy the Environment*, 1997, 22(1): 305–356.
- [87] ZHANG L, CHEN S, ZHANG C. Geothermal power generation in China: Status and prospects[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(5): 1428–1450
- [88] GAO X, LI T, ZHANG Y, et al. A review of simulation models of heat extraction for a geothermal reservoir in an enhanced geothermal system[J]. *Energies*, 2022, 15(19): 7148.
- [89] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地球学报*, 2012, 33(5): 807–811.
LING Wenjing, LIU Zhiming, MA Feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2012, 33(5): 807–811.
- [90] 汪集咏, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 25–31.
WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 25–31.
- [91] 李德威, 王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. *地球科学*, 2015, 40(11): 1858–1869.
LI Dewei, WANG Yanxin. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy[J]. *Earth Science*, 2015, 40(11): 1858–1869.
- [92] 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(4): 1139–1152.
XU Tianfu, YUAN Yilong, JIANG Zhenjiao, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2016, 46(4): 1139–1152.
- [93] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 2017, 38(4): 448–459.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38(4): 448–459.
- [94] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 1–9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1–9.
- [95] LIU Shumin, LI Xuelong, WANG Dengke, et al. Mechanical and acoustic emission characteristics of coal at temperature impact[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(3): 1755–1772.
- [96] CHENG Y, ZHANG Y, YU Z, et al. Experimental and numerical studies on hydraulic fracturing characteristics with different injection flow rates in granite geothermal reservoir[J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(1): 142–168.
- [97] YIN X X, JIANG C S, ZHAI H Y, et al. Review of induced seismicity and disaster risk control in dry hot rock resource development worldwide[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(11): 3817–3836.
- [98] ZHU Z, YANG S, RANJITH P G, et al. A comprehensive review on mechanical responses of granite in enhanced geothermal systems (EGSs)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022: 135378.
- [99] 谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 地下生态城市与深地生态圈战略构想及其关键技术展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1301–1313.
XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. The subversive idea and its key technical prospect on underground ecological city and ecosystem[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1301–1313.
- [100] 邵继中, 罗丹, 谭嫣然, 等. 城市地下农场发展前景及实践路径初探[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(5): 1413–1423.
SHAO Jizhong, LUO Dan, TAN Yanran, et al. Preliminary study on the development prospect and practice path of urban underground farm[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(5): 1413–1423.
- [101] 西农. 英国“地下生长”蔬菜将上市[J]. *蔬菜*, 2015(8): 81.
XI Nong. Vegetables “grown underground” to hit the market in the UK[J]. *Vegetables*, 2015(8): 81.
- [102] 苗苗. 英国将地下防空洞变为农场[J]. *科学大观园*, 2015(23): 9.
MIAO Miao. UK turns underground air raid shelters into farms[J]. *Grand Garden of Science*, 2015(23): 9.
- [103] 潘丽珍, 李传斌, 祝文君. 青岛市城市地下空间开发利用规划研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(S1): 1093–1099.
PAN Lizhen, LI Chuanbin, ZHU Wenjun. Underground space exploitation planning of Qingdao City[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(S1): 1093–1099.
- [104] 智庆玺, 张可宗, 栾勇鹏, 等. 新空间格局下青岛城市地下空间开发战略研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(S1): 1518–1525.
ZHI Qingxi, ZHANG Kezong, LUAN Yongpeng, et al. Research on urban underground space development strategy of Qingdao City

- under new spatial pattern[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(S1): 1518–1525.
- [105] 马健. 植物照明 LED 光源光度系统与光量子系统转化系数的计算和应用[J]. *照明工程学报*, 2022, 33(5): 110–114.
MA Jian. Calculation and application of conversion coefficient between photometric system and light quantity subsystem of LED light source for plant lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2022, 33(5): 110–114.
- [106] 李阳. 中科生物植物工厂关键技术科技创新和产业化[J]. *中国农村科技*, 2023(2): 6–10.
LI Yang. Science and technology innovation and industrialisation of key technologies of Zhongke Bio-plant factory[J]. *China Rural Science & Technology*, 2023(2): 6–10.
- [107] 陆佳敏, 徐俊辉, 王卫东, 等. 大规模地下储氢技术研究展望[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(11): 3699–3707.
LU Jiamin, XU Junhui, WANG Weidong, et al. Development of large-scale underground hydrogen storage technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(11): 3699–3707.
- [108] 张博, 吕柏霖, 吴宇航, 等. 国内外盐穴储气库发展概况及趋势[J]. *中国井矿盐*, 2021, 52(1): 21–24.
ZHANG Bo, LÜ Bolin, WU Yuhang, et al. Development and trend of salt-cavern gas storage in domestic and abroad[J]. *China Well and Rock Salt*, 2021, 52(1): 21–24.
- [109] 付盼, 罗森, 夏焱, 等. 氢气地下存储技术现状及难点研究[J]. *中国井矿盐*, 2020, 51(6): 19–23.
FU Pan, LUO Miao, XIA Yan, et al. Research on status and difficulties of hydrogen underground storage technology[J]. *China Well and Rock Salt*, 2020, 51(6): 19–23.
- [110] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1729–1759.
YANG Chunhe, WANG Tongtao. Advance in deep underground energy storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1729–1759.
- [111] 杨春和, 贺涛, 王同涛. 层状盐岩地层油气储库建造技术研发进展[J]. *油气储运*, 2022, 41(6): 614–624.
YANG Chunhe, HE Tao, WANG Tongtao. Research and development progress of oil and gas storage construction technology in bedded salt rock formation[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 614–624.
- [112] 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 等. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(4): 8–14.
YUAN Guangjie, XIA Yan, JIN Gentai, et al. Present state of underground storage and development trends in engineering technologies at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(4): 8–14.
- [113] 谢和平, 刘吉峰, 高明忠, 等. 深地医学研究进展及构想[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2018, 49(2): 163–168.
XIE Heping, LIU Jifeng, GAO Mingzhong, et al. The research advancement and conception of the deep-underground medicine[J]. *Journal of Sichuan University (Medical Sciences)*, 2018, 49(2): 163–168.
- [114] 谢和平, 刘吉峰, 高明忠, 等. 深地医学研究新进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2140–2149.
XIE Heping, LIU Jifeng, GAO Mingzhong, et al. Research progress of deep-underground medicine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2140–2149.
- [115] XIE H, ZHANG Y, CHEN Y, et al. A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 107: 103651.
- [116] ANTONELLI F, BELLI M, SAPORA O, et al. Radiation biophysics at the Gran Sasso laboratory: Influence of a low background radiation environment on the adaptive response of living cells[J]. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 2000, 87(1): 508–509.
- [117] DENNEY D. Industry experience with CO₂-enhanced-oil-recovery technology[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2015, 62: 39–41.
- [118] 任文婧. CO₂ 提高采收率技术在美国的应用研究[J]. *化工设计通讯*, 2019, 45(11): 139,146.
REN Wenjin. The study of applications of CO₂ enhanced oil recovery in the United States[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2019, 45(11): 139,146.
- [119] 周蒂, 李鹏春, 张翠梅. 离岸二氧化碳驱油的国际进展及我国近海潜力初步分析[J]. *南方能源建设*, 2015, 2(3): 1–9.
ZHOU Di, LI Pengchun, ZHANG Cuimei. Offshore CO₂-EOR: worldwide progress and a preliminary analysis on its potential in offshore sedimentary basins off China[J]. *Southern Energy Construction*, 2015, 2(3): 1–9.
- [120] 陈秋燕. 国内外大型碳捕集与封存 (CCS) 项目建设综述[J]. *技术与市场*, 2013, 20(7): 222–224.
CHEN Qiuyan. Overview of construction of large-scale CO₂ capture and storage projects at home and abroad[J]. *Technology and Market*, 2013, 20(7): 222–224.
- [121] 程一步, 王北星. 美国 CMTC2017 碳管理和技术大会综述[J]. *石油石化绿色低碳*, 2017, 2(6): 1–5,23.
CHENG Yibu, WANG Beixing. Summary of CMTC2017 conference on carbon management and technology[J]. *Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry*, 2017, 2(6): 1–5,23.
- [122] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1128–1138.
ZHAO Zhenyu, YAO Shun, YANG Shuopeng, et al. Under goals of carbon peaking and carbon neutrality: Status, problems, and suggestions of CCUS in China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1128–1138.
- [123] 胡其会, 李玉星, 张建, 等. “双碳”战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议[J]. *油气储运*, 2022, 41(4): 361–371.
HU Qihui, LI Yuxing, ZHANG Jian, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the “Double Carbon” strategy[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(4): 361–371.
- [124] 许毛, 张贤, 樊静丽, 等. 我国煤制氢与 CCUS 技术集成应用的现状、机遇与挑战[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(6): 659–666.
XU Mao, ZHANG Xian, FAN Jingli, et al. Status quo, opportunities and challenges of integrated application of coal-to-hydrogen and CCUS technology in China[J]. *Journal of Mining Science and*

- Technology, 2021, 6(6): 659–666.
- [125] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70–80.
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 70–80.
- [126] 秦积舜, 李永亮, 吴德斌, 等. CCUS 全球进展与中国对策建议[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(1): 20–28.
QIN Jishun, LI Yongliang, WU Debin, et al. CCUS global progress and China's policy suggestions[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(1): 20–28.
- [127] 谢和平, 刘涛, 吴一凡, 等. CO₂ 的能源化利用技术进展与展望[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 145–156.
XIE Heping, LIU Tao, WU Yifan, et al. Progress and prospect of CO₂ energy utilization technology[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 145–156.
- [128] 王钰泽, 何萍, 王洋, 等. 一种风光电热耦合的分布式供热系统及方法: CN202210704757.3[P]. 2022–08–30.
- [129] BREEDE K, DZEBISASHVILI K, LIU X, et al. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future[J]. *Geothermal Energy*, 2013, 1: 1–27.
- [130] POLLACK A, HORNE R N, MUKERJI T. What are the challenges in developing Enhanced Geothermal Systems (EGS)? [C]//Observations from 64 EGS Sites. 2020.
- [131] OLASOLO P, JUÁREZ M C, MORALES M P, et al. Enhanced geothermal systems (EGS): A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56: 133–144.
- [132] HUENGES E. 25 - Enhanced geothermal systems: Review and status of research and development[C]//Geothermal Power Generation. Woodhead Publishing, 2016: 743–761.
- [133] 祖文超, 李琼. 太阳能热泵国内外发展现状及应用分析[C]//中国建筑学会建筑热能动力分会学术交流大会暨理事会年会. 2011.
- [134] 张波, 薛攀源, 刘浪, 等. 深部充填矿井的矿床–地热协同开采方法探索[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(9): 2824–2837.
ZHANG Bo, XUE Panyuan, LIU Lang, et al. Exploration on the method of ore deposit-geothermal energy synergetic mining in deep backfill mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 2824–2837.
- [135] 蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 43–51.
CAI Meifeng, DUO Ji, CHEN Xiangsheng, et al. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 43–51.
- [136] 宋健, 唐春安, 亢方超. 深部矿产与地热资源协同开采模式[J]. *金属矿山*, 2020(5): 124–131.
SONG Jian, TANG Chunan, KANG Fangchao. Synergetic mining mode of deep mineral and geothermal resources[J]. *Metal Mine*, 2020(5): 124–131.
- [137] 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. *地质论评*, 2019, 65(6): 1462–1472.
MAO Xiang, GUO Dianbin, LUO Lu, et al. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1462–1472.
- [138] 何满潮, 郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(12): 2377–2393.
HE Manchao, GUO Pingye. Deep rock mass thermodynamic effect and temperature control measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(12): 2377–2393.
- [139] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(5): 865–876.
HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007(5): 865–876.
- [140] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(12): 2006–2013.
LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1000 m and the key rock mechanics problems[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(12): 2006–2013.
- [141] 钱七虎, 李树忱. 深部岩体工程围岩分区破裂化现象研究综述[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1278–1284.
QIAN Qihu, LI Shuchen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1278–1284.
- [142] 王大勋, 刘洪, 韩松, 等. 深部岩石力学与深井钻井技术研究[J]. *钻采工艺*, 2006(3): 6–10, 121.
WANG Daxun, LIU Hong, HAN Song, et al. Deep rock mechanics and deep or ultra-deep well drilling technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2006(3): 6–10, 121.
- [143] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 448–455.
WANG Mingyang, ZHOU Zeping, QIAN Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 448–455.
- [144] 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(5): 865–876.
XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. Study on concept and progress of in situ fidelity coring of deep rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(5): 865–876.
- [145] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2691–2703.
GAO Mingzhong, WANG Mingyao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2691–2703.
- [146] 彭瑞东, 薛东杰, 孙华飞, 等. 深部开采中的强扰动特性探讨[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1359–1368.
PENG Ruidong, XUE Dongjie, SUN Huafei, et al. Characteristics of strong disturbance to rock mass in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1359–1368.
- [147] 魏明尧, 刘春, 刘应科, 等. 深部矿井频繁微扰动下煤巷损伤累积演化规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2689–2701.
WEI Mingyao, LIU Chun, LIU Yingke, et al. Evolution of accu-

- culated damage in deep coal roadway with repeated dynamic disturbance[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(8): 2689–2701.
- [148] 张茹, 张安林, 谢和平, 等. 不同赋存深度岩石力学行为差异及本构模型研究[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(6): 1008–1015.
ZHANG Ru, ZHANG Anlin, XIE Heping, et al. Mechanical behavior differences and constitutive model of rock at different depths[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(6): 1008–1015.
- [149] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(9): 3396–3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [150] 蔡瑛. 深土冻融特性试验及工程应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2007.
CAI Ying. Experiments on freezing and thawing characteristics of deep soil and research on engineering application[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2007.
- [151] 马巍, 王大雁. 深土冻土力学的研究现状与思考[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(6): 1123–1130.
MA Wei, WANG Dayan. Status quo and reflections of the deep frozen soil mechanics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(6): 1123–1130.
- [152] 田怀植, 王大雁, 马巍, 等. 高压作用下深部粘土冻结后卸载应力路径的力学性质研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 351–357.
TIAN Huaizhi, WANG Dayan, MA Wei, et al. Study of the mechanical properties of frozen deep-buried clay under high pressures in unloaded state[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 351–357.
- [153] 王建省, 宁建国. 冻土力学研究的重要领域及问题[J]. *北方工业大学学报*, 2003, 15(1): 77–88.
WANG Jiansheng, NING Jianguo. Important domain and problems on frozen soil mechanics research[J]. *Journal of North China University of Technology*, 2003, 15(1): 77–88.
- [154] 张照太. 深土冻土力学性能试验研究及工程应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006.
ZHANG Zhaotai. Experimental study on mechanical properties of deep freezing soil and engineering application[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2006.
- [155] 康红普, 牛多龙, 张镇, 等. 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(10): 1977–1987.
KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 1977–1987.
- [156] 康红普, 王金华, 林健. 高预应力强力支护系统及其在深部巷道中的应用[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(12): 1233–1238.
KANG Hongpu, WANG Jinhua, LIN Jian. High pretensioned stress and intensive bolting system and its application in deep roadways[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(12): 1233–1238.
- [157] 刘树才. 煤矿底板突水机理及破坏裂隙带演化动态探测技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
LIU Shucai. Dynamic detection of water surge mechanism and destructive fissure zone evolution in coal mine floors [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [158] 张红梅, 翟晓荣, 吴基文, 等. 深部煤层采动流固耦合效应下陷落柱突水机理研究[J]. *煤矿开采*, 2017, 22(5): 102–105.
ZHANG Hongmei, ZHAI Xiaorong, WU Jiwen, et al. Study of collapse column water inrush under fluid-solid coupling effect of coal seam mining in deep[J]. *Coal Mining Technology*, 2017, 22(5): 102–105.
- [159] 陈湘生. 对深冻结井几个关键问题的探讨[J]. *煤炭科学技术*, 1999(1): 40–42.
CHEN Xiangsheng. Discussion on several key issue of deep freezing shaft[J]. *Coal Science and Technology*, 1999(1): 40–42.
- [160] 盛天宝. 深厚冻结井壁壁间前注浆机理与应用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(7): 912–916.
SHENG Tianbao. Early grouting mechanism and application between thick freezing shaft walls[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(7): 912–916.
- [161] 苏立凡, 娄根达, 赵光荣. 冻结井井壁破坏及其原因分析[J]. *建井技术*, 1991(1): 33–37, 47.
SU Lifan, LOU Genda, ZHAO Guangrong. Analysis of wall damage and its causes in frozen wells[J]. *Mine Construction Technology*, 1991(1): 33–37, 47.
- [162] 王衍森, 黄家会, 杨维好. 特厚冲积层中冻结井外壁温度实测研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(4): 468–472.
WANG Yansen, HUANG Jiahui, YANG Weihao. Measured temperature of the outer wall of a frozen well in a very thick alluvial layer[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(4): 468–472.
- [163] 张驰. 富水岩层中新型单层冻结井壁关键施工技术与工艺研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
ZHANG Chi. Research on key construction technology and process of new single-layer frozen well wall in water-rich rock formation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [164] 蔡振, 张建鑫, 郭少璞. 油田超深井钻井关键技术研究与分析[J]. *石化技术*, 2023, 30(4): 101–103.
CAI Zhen, ZHANG Jianxin, GUO Shaopu. Research and analysis on key technologies of ultra deep well drilling in oilfield[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(4): 101–103.
- [165] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 527–542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for on-shore deep and ultra deep wells in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 527–542.
- [166] 唐宇, 叶春丽. 中国科学院智能导钻系统在塔里木盆地 6 000 m 超深井成功完成多项实钻试验[J]. *测井技术*, 2023, 47(1): 6.
TANG Yu, YE Chunli. Chinese academy of sciences intelligent guided drilling system successfully completes multiple live drilling tests in 6000 m ultra-deep wells in tarim basin[J]. *Well Logging*

- Technology, 2023, 47(1): 6.
- [167] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
- WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [168] 许益民, 刘占鹏, 高猛, 等. 9 000 m 智能钻机关键技术[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 57-62.
- XU Yimin, LIU Zhanpeng, GAO Meng, et al. Key technology of 9 000 m intelligent drilling rig[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(9): 57-62.
- [169] 蔡武强. 岩体三维精细本构理论与深埋隧道应力控制设计分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2376.
- CAI Wuqiang. Three-dimensional refined constitutive theory of rock mass and its integration in stress control-based design and analysis of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(11): 2376.
- [170] 陈卫忠, 肖正龙, 田洪铭. 深埋高地应力 TBM 隧道挤压大变形及其控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2215-2226.
- CHEN Weizhong, XIAO Zhenglong, TIAN Hongxin. Research on squeezing large displacement and its disposing method of weak rock tunnel under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2215-2226.
- [171] 洪开荣. 超长深埋高地应力 TBM 隧道修建关键技术[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 1-23.
- HONG Kairong. Key technology for construction of ultra-long and deep-buried TBM tunnels with high geostress[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 1-23.
- [172] 申艳军, 吕游, 李曙光, 等. 隧道围岩分级方法研究进展及“人工智能+”应用动态[J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43(4): 563-582.
- SHEN Yanjun, LÜ You, LI Shuguang, et al. Research progress of tunnel surrounding rock classification method and application trend of “Artificial Intelligence+” [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 563-582.
- [173] CHEN G Q, SU G S, LI T B. New method of reliability analysis for deep tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 1156: 50-51.
- [174] ZHAO Y M, HAN Y, KOU Y Y, et al. Three-dimensional, real-time, and intelligent data acquisition of large deformation in deep tunnels[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-11.
- [175] TAN C H, NG M, SHAFUL D S B, et al. A smart unmanned aerial vehicle (UAV) based imaging system for inspection of deep hazardous tunnels[J]. Water Practice & Technology, 2018, 13(4): 991-1000.
- [176] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
- YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [177] 何满潮. 煤矿软岩工程与深部灾害控制研究进展[J]. 煤炭科技, 2012, 131(3): 1-5.
- HE Manchao. Progress of research on soft rock engineering and deep hazard control in Coal Mines[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2012, 131(3): 1-5.
- [178] 郑学召, 童鑫, 郭军, 等. 煤矿智能监测与预警技术研究现状与发展趋势[J]. 工矿自动化, 2020, 46(6): 35-40.
- ZHENG Xuezhao, TONG Xin, GUO Jun, et al. Research status and development trend of intelligent monitoring and early warning technology in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(6): 35-40.