

交叉·前沿

深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术

袁 亮^{1,2,3}, 张 通^{1,2,3}, 王玥晗^{1,2}, 王新中^{1,2}, 王雅亭^{1,2}, 郝宪杰⁴

(1. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学 煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 安徽 淮南 232001; 4. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083)

摘 要:在百年未有之大变局加速演变国际大背景下,我国能源行业面临“双碳”战略目标实现与能源资源稳定供给的双重挑战,向地球深部进军成为我国能源资源开发的必由之路。系统梳理了地质勘测、智能开采、灾害预警、生态修复等领域的技术发展现状,分析了现有技术针对深部资源开发的适用性。基于现有技术现状及深部矿产资源原位贮存及采动特性,提炼出了深部矿井建设运营全过程面临的关键理论及技术问题,进一步指出了实现深部煤炭资源安全高效开采未来的技术攻关方向。通过分析数字孪生、人工智能、大算力模型等新兴技术的发展趋势,明确了地质透明化、智能开采工艺、灾害预警体系、生态环境修复等重要领域的技术突破路径,构建了深部资源安全-高效-智能-绿色开采的可行技术发展战略。未来,通过逐步在跨尺度地质体演化动态表征、非线性煤岩多相多场耦合致灾机理研究、耐高温高压多功能材料与新型勘探开采装备研发、泛适应性无人开采工艺构建、地质生态高效绿色精准修复、矿区建设-生产-修复区域智能决策大模型孕训等方向形成突破,奠定深部矿产资源稳定、高效、智能、绿色开采的基础技术保障,深部资源开采必将实现少人/无人开采及全网络分布式智能调控开采,为国家能源安全战略保障提供核心支撑。

关键词:深部煤炭资源;安全、高效、智能、精准、绿色开采;关键技术;多相多场响应;人工智能;泛工艺
中图分类号:TD82 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)01-0001-12

Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources

YUAN Liang^{1,2,3}, ZHANG Tong^{1,2,3}, WANG Yuehan^{1,2}, WANG Xinzhong^{1,2}, WANG Yating^{1,2}, HAO Xianjie⁴

(1. State Key Laboratory of Deep Coal Mining and Environment Protection, Huainan 232000, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 3. State Key Laboratory of Digital and Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 4. Beijing Key Laboratory of Precise Mining of Associated Energy, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Under the international background of the unprecedented great change and accelerated evolution in a century, China's energy industry is facing the dual challenges of the realization of the “double carbon” strategic goal and the stable supply of energy resources. Marching into the deep part of the earth has become the only way for China's energy resources development. This paper systematically reviews the technical development status of geological survey, intelligent mining, disaster warning, ecological restoration and other fields, and analyzes the applicability of existing technologies for

收稿日期: 2025-01-04 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YG25.0016

基金项目: 中国工程院工程科技学术研讨资助项目 (2024-XS-15); 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制资助项目 (52227901); 国家自然科学基金面上资助项目 (42477201)

作者简介: 袁 亮 (1960—), 男, 安徽金寨人, 中国工程院院士。E-mail: Yuanl_1960@sina.com

引用格式: 袁亮, 张通, 王玥晗, 等. 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 1-12.

YUAN Liang, ZHANG Tong, WANG Yuehan, et al. Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 1-12.



移动阅读

the development of deep mineral resources. Based on the existing technology status and the in-situ storage and mining characteristics of deep mineral resources, this paper extracts the key theoretical and technical problems faced by the whole process of construction and operation of kilometer deep mine, and further points out the future technical research direction to realize the safe and efficient mining of deep coal resources. By analyzing the development trend of emerging technologies such as digital twin, artificial intelligence, and large computing power model, the technology breakthrough paths in important fields such as geological transparency, intelligent mining technology, disaster early warning system, and ecological environment restoration were identified, and a feasible technological development strategy for safe, efficient, intelligent, and green mining of deep mineral resources was constructed. In the future, by gradually making breakthroughs in the dynamic characterization of cross-scale geological body evolution, research on nonlinear coal-rock multiphase and multi-field coupling disaster mechanism, research and development of multi-functional materials resistant to high temperature and high pressure and new exploration and mining equipment, construction of pan-adaptive unmanned mining craft, efficient green and accurate restoration of geological ecology, and intelligent decision-making model of mining area construction-production-restoration, the basic technical support for stable, efficient, intelligent and green mining of kilometer deep well resources will be established. The mining of kilometer deep well resources will surely realize less/unmanned mining and full network distributed intelligent control mining, providing core support for the national energy security strategy.

Key words: deep coal resources; safe, efficient, intelligent, accurate and green mining; key technologies; multiphase and multifield response; artificial intelligence; general-purpose process

0 引 言

我国“缺气、少油、相对富煤”，2023 年，煤炭在一次能源消费中占比 55.3%，原油、天然气对外依存度分别达 73%、42%。据中国工程院预测，到 2050 年煤炭占比仍将维持在 50% 左右，未来几十年以煤炭为主导的能源格局难以改变^[1]。当下，我国浅部能源资源枯竭态势加剧，深部资源开发加剧演化，其中，煤矿矿井最大开采深度已达 1 500 m，且正以每年 10~25 m 的速度向深部拓展，预计 2030 年前后，多数矿井将进入千米深井开采阶段^[2]。我国已探明深部煤炭资源量超 5.9 万亿 t，千米以深资源量占 50% 以上。与浅部开采相比，深部煤岩体处于高地应力、高瓦斯、高温、高渗透压及时间效应叠加的复杂环境，煤与瓦斯突出、冲击地压等动力灾害频发且更严重，多重灾害耦合趋势明显^[1, 3-4]。加快推进深部煤炭资源开采理论、技术、装备及工艺创新，实现深部资源绿色、安全、高效开发，对保障国家能源安全、支撑经济社会高质量发展至关重要。

千米级及更深矿井开采将成为常态，深部煤炭资源将是今后以煤为主能源结构的资源保障。当前，中东部地区的河北、山西、江苏、安徽、山东、河南等重要产煤省，埋藏较浅的煤炭资源日渐减少，而埋深 1 000 m 以深的资源占这些省预测总量的 65.0%~92.4%^[5]。同时，我国煤矿采掘活动每年产生的瓦斯量约 300 亿 m³，除去每年抽采利用瓦斯 50 亿 m³ 左右，其余约 250 亿 m³ 的瓦斯全部排到大气中，相当于

3.75 亿 t 的 CO₂ 温室气体当量，为“双碳”目标实现带来巨大压力^[6]。由浅部走向深部，深井高瓦斯煤层群低损害开采与灾害治理面临非线性行为、大范围高能级灾害、多物理场耦合演化等难题。当前深部多场耦合致灾机理不明晰，深部煤与瓦斯共采理论不完善，深部开采瓦斯动力灾害防治技术保障不足，深部煤炭绿色低损害开采技术不成熟。因此，亟需强化深部资源开发理论探究，升级先进工艺装备，融入智能通讯、智能网联技术，稳步推动深部资源开采走向数字化、智能化、无人化，实现深部煤炭资源安全、高效、绿色开发^[7-8]。

笔者系统梳理了近年来深部煤炭资源开采技术在理论探索、实践应用等方面取得的重要研究进展，并深入探讨了进入深部煤炭开采时代面临的主要挑战与关键科学问题。旨在为深部煤炭资源安全高效开采关键技术创新研发提供战略指引，为深部煤炭资源开发提供理论支撑与技术参考，推动产业沿着科学、高效、安全的轨道稳健前行。

1 深地资源开发技术

1.1 深部地质勘探技术

以地质体的精细探测和透明化重建，为地下矿产资源开采方案的科学规划、以及突水、冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害的预测防治提供可靠技术保障，是地质体透明化技术的首要任务^[9-12]。近年来，受地下资源贮存禀赋的影响，我国学者在深部地质勘探技术研发领域开展了大量工作并逐渐走到了世界前沿，形

成了三维地震勘探主导,采前采中多手段配合,井上下联合的立体式综合勘探技术体系并得到广泛应用,同时多源勘测信息融合、精细化三维透明地质模型构建和地质动态变动超前预测等技术也逐步得到发展^[13-18]。尽管如此,该领域仍处于持续探索阶段,随着深部资源开采向千米及以下深度挺进,高温、高压、高地质贮存深度、高构造复杂度的极端环境下,地质体透明化技术面临技术装备适用性不足、测量精度有限、测量数据可靠性不足等问题,亟待进一步解决^[19-20]。

1.2 煤矿智能开采技术

煤矿智能开采技术自20世纪90年代起在全球范围内迅速发展。德国采用电液控制高阻液压支架结合传感器实现采煤机自动控制;美国开发出适用于浅埋深低采高综采工作面的智能化开采技术及IM-SC智能服务中心;澳大利亚推出LASC技术实现全自动化割煤^[9, 21-24]。中国煤矿技术历经炮采、普采后,已迈向机械化、自动化,正逐步迈向智能化、无人化。“十五”规划以来,中国在全煤层综合采掘及智能开采技术与装备领域取得突破,同时打破进口盾构机限制,国产化盾构机占全球市场份额2/3。2013年,黄陵一号煤矿完成首个无人开采工作面试验,标志智能化开采技术进入工程应用阶段^[1, 25-26]。当前,中国煤矿智能化建设快速发展,2024年全国累计建成智能化采煤工作面1922个、智能化掘进工作面2154个,但仍面临发展不平衡、运行水平低、技术装备弱、人才匮乏等问题。随着资源开发向深部进军,提升深井资源智能开采技术成为迫切需求。

1.3 深部灾害预警技术

与浅部资源开采相比,进入深部开采后煤岩体材料的非线性行为更加凸显,赋存环境更加复杂,表现出高地应力、高地温、高岩溶水压和低渗透性的典型“三高一低”赋存环境特征^[3, 27-28],深部大规模的资源开采还会产生强烈工程扰动的附加属性,引起岩层、地下含水层及隔水层变形、破断和运动,进而产生大量裂隙及地表沉降,改变其应力场、裂隙场、渗流场、温度场、浓度场等原场赋存条件,多场多相耦合效应更加显著^[4, 29]。在深部复杂的地质赋存环境及强烈工程扰动的综合影响下,深部资源开采过程中高能级矿震及冲击地压、大体量煤与瓦斯突出、巷道围岩大变形、矿井水害与热害、顶板大面积来压与冒落等工程灾害凸显^[30]。深部资源开采灾害前兆信息精准判识与准确预警是实现深部资源安全高效开采关键。国外最早由美国从20世纪60年代起将声发射设备运用地下工程微震信息监测,随后德国在20世纪70年代末发明了光纤检测技术,并将其运用到围岩变形监

测中,加拿大从20世纪90年代初开始研究遥控采矿技术^[31]。我国起步较晚,从20世纪80年代才开始将安全监测系统运用矿山工程中,主要采用声、光、电、磁等监测预警技术。受深部多场多相复杂赋存环境与强工程扰动影响,深部岩体力学响应特征不清楚、致灾机理不清晰^[4],导致传统基于浅部开采提出的灾变判识理论模型、风险判识技术、灾变预警方法与防控技术也可能在深部资源开采过程失效,深部资源开采灾害精准预测与控制面临严峻挑战,严重制约深部煤炭资源安全高效开采。

1.4 矿井生态修复技术

20世纪后期起,矿井生态修复技术备受关注。诸多发达国家在矿山生态修复理论与技术研究方面率先钻研,构建起相对完备的修复理论体系,配套技术也趋于成熟。德国力推近自然修复,以还原生态原貌为导向;加拿大遵循因地制宜策略,保留矿坑独特地形,打造特色生态景观;美国推行“师法自然生态修复法”,成功构建出景观和谐、物种丰富的矿山生态环境^[32-35]。我国在该领域的研究起步较晚,中国矿井生态修复历经探索,从早期简单覆土绿化,逐步发展为多学科融合的综合修复模式。“十二五”规划以来,在土壤修复、植被恢复、水污染治理等关键技术领域成果显著。例如在一些采煤地表沉陷区,通过创新的填充与生态再造技术,成功复垦出大片耕地与湿地^[35-42]。当下,中国矿井生态修复项目广泛开展,但依然存在挑战,如地区差异导致技术适配性问题、现代技术推广困难、长期监测体系不完善、资金投入不均衡等。随着生态保护理念深入人心,进一步优化矿井生态修复技术、提升修复效果成为当务之急。

2 深部煤炭资源安全高效开采面临挑战

2.1 超高压超临界跨介质多相场耦合理论

深部煤炭资源开采过程中受到应力场、裂隙场、渗流场、温度场、化学场等多场耦合环境影响,甲烷的临界温度是191 K,临界压力是4.6 MPa,当埋深超过470 m,煤储层中的甲烷即属于超临界流体^[43-44],因此,深部煤炭资源开采过程还会发生固、液、气多相,非临界、临界、超临界多态重新分布与运移交互作用。探究深部煤岩体在多场多相耦合下的相互作用机理及其理论模型是深部煤炭资源开采基础理论的重要研究内容。深地资源开发应力场、渗流场、温度场、化学场等两场或者两场以上耦合作用下温度、轴压、渗透压、孔隙压力、水化学性质等对煤岩体力学响应、水岩化学反应和渗流行为是灾害孕育及演化关键指标^[45-50]。深部煤炭资源开挖扰动效应会引起原位应

力场改变,诱发能量场和震动场,导致裂纹裂隙孕育、延伸及交叉拓展,影响渗流场分布特征,引发煤岩体结构转变和破坏灾变失稳。然而,当前深部煤岩体开采扰动下多场多相耦合响应规律及灾变失稳机理尚未探明,深部煤炭资源开采缺乏有效基础理论指导,工程实践一定程度上存在低效性和风险不确定性。在高温高压环境下,流体物质(如甲烷、二氧化碳或水)达到超临界状态时,其物理特性显著变化,深刻影响其流动和传质行为,进一步加剧了煤岩体的复杂响应。因此,亟需开展深部煤炭资源超高压超临界跨介质多相场耦合理论研究,揭示深部煤岩体多场多相耦合行为及致灾耦合机理,为深部煤炭资源安全高效开采提供重要理论支撑。

2.2 固态流法开采煤岩体响应特征

埋深超千米煤炭等固体资源储量占比超过固体资源总量的 70%,向地球深部进军是当前保障国家能源需求、实现资源充分利用的必然之路^[1]。随开采深度增加,原位应力、复杂地质构造、高温、高渗透压对煤巷工作面现场作业的不利影响愈发凸显,传统井巷开采方式的技术适应性面临挑战。目前,通过将深部固体矿产资源原位转化为易回收利用流化物质的流态化开采方法,成为突破了传统开采模式的局限,提高深地资源开发利用能力,实现无人化、低碳化、智能化开采等战略构想的关键技术发展^[51]。固态流法开采体系下,地下岩体在智能化无人设备的作用下发生破碎、物相转换及输运,在此过程中煤岩体动态扰动及响应特征有别与常规开采方式^[12]。因此,传统的岩体力学及采动岩体力学理论或许难以适用于表征固态流法开采下煤岩体的响应特征,急需突破现有的采动岩体力学框架,基于多场多相耦合理论构建固态流法开采方式下的原位煤岩体力学响应理论体系。

2.3 井工-地面井协同开采工艺布局

深部煤炭资源井工-地面井协同开采面临诸多棘手问题,高地应力、高温、高瓦斯与复杂地质相互叠加,极大增加了开采难度^[1, 2, 4]。需依靠高精度地质勘探及地质结构透明化模型^[20],精准规划井下开采巷道与地面井组成的立体井网布局,垂直或倾斜地面井与井下不同水平巷道相互贯通,形成瓦斯抽采、煤层注水、通风等功能于一体的多元通道体系。井下开采和地面井作业紧密联动,既能管控瓦斯涌出、降低事故风险,又能改良煤层特性,化解冲击地压等隐患,还为井下通风营造良好条件,缓解深部热害。与此同时,深部煤炭资源采-掘-机-运-通-排系统的精准采掘与智能调控离不开全方位感知网络^[22-24, 52]。在井下及地

面井周边广布传感器,对地质动态、采掘进程、瓦斯体积分数、地应力等关键参数进行实时、连续监测。借助大数据与人工智能技术对数据进行深度剖析,依据多源海量数据监测分析结果,智能调控中心依据开采条件变化灵活调整采掘路径,提前预警各类灾害并精准判识风险区域,为深部煤炭资源安全高效开采保驾护航。因此,亟需完善深部煤炭资源井工-地面井协同开采相关的理论知识体系与前沿技术体系,深度优化其在复杂恶劣环境下的智能调控策略以及多系统联动协同机制,助力深部煤炭资源开采智能化发展。

2.4 深部煤炭资源开发生态环境修复

矿山生态环境保护问题不容忽视。开采活动引发的地层塌陷、地下水污染、矸石堆存、植被破坏等环境问题交织在一起,使得生态修复工作艰难复杂。当前中国矿山生态修复研究主要聚焦于地貌、土壤、植被、景观和生物多样性等生态要素修复技术、修复成效评估与监测技术等方面^[34, 53-56],提出了煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复的生态修复理念^[57],通过近年来的生态修复实践,我国的矿山生态修复取得显著成效。然而,受政策法规不完善、管理和技术等因素的影响,矿山生态修复的缺口仍然很大,传统基于浅部开采条件提出矿山生态环境技术与方案,也难免会在深部煤炭资源开发应用中出现“水土不服”现象。为了践行国家“两山”生态文明理念以及落实绿色矿山建设的重要战略目标,亟需发展适用深部煤炭资源开发全生命周期的生态环境修复技术体系,探究多因素交互影响下的矿山生态环境保护及修复策略,最终实现深部煤炭资源开发与生态平衡共赢。

3 深部煤炭资源智能精准绿色开采

深部煤炭资源开发在未来相当长的一段时间内为国家能源稳定供给提供保障,然而,深部能源资源处于高地应力、高水压、高气压、高地温复杂环境,高载荷扰动深部资源开采存在非线性行为、大范围高能级灾害、多物理场耦合演化等超现实难题,在地质结构超前精准探测、地面-井下探采工艺装备部署、先进固态-流态资源开发工艺、探采智能感知与精准决策方面应超前部署长期攻坚任务。聚焦深部煤炭资源智能精准绿色开采,围绕深部透明地质、深部资源智能开采、开采灾害精准判识、矿山生态环境保护,开展地质结构超距离、超精度感知研究,深部煤炭地面-深井信息超速度、超精准传输研究,多源复合灾害超远距离、超大范围、超前距离判识研究,煤岩采动多场多相耦合响应超尺度、超高分辨率表征研究,矿区大

模型超强算力、超异构信息融合、超域调控、超高灵敏高适性并行多指令决策研究, 深井探采装备超高环境适应性、超高稳定性、超高分布式工艺部署研究, 地质生态超高稳定自主修复及资源勘探-矿区建设-运行-修复全链条全周期超高自主决策研究。牟定深部煤炭资源智能精准开采, 发挥国家相关部委职能、国家级实验平台优势、新兴产业及智能制造企业前沿科技, 调动科研院所、高校及相关研究单位力量, 形成政-产-学-研-用-金持续攻关格局, 遵循深地攻关顶层设计部署, 执行落实攻关方向, 加快推进深地科研成果产出, 保障深地资源开发基础理论与工程科技难题的率先突破, 为深地资源安全、高效、绿色开采提供坚实技术保障, 助力能源强国建设, 为国家应对国际能源格局变化提供重要支撑。

深部煤炭资源安全高效开采将经历全井工开采、井工-地面结合开采、全地面开采 3 个发展阶段,相应的探采技术装备与通讯手段将经历外部整合、整合-自主研发相结合、自主研发,最终形成资源战略规划、

智能开发、自主按需调控的矿区智能化智慧化无人化工厂作业模式,进一步形成以新能源为矿区新质生产力推进深地化石能源资源稳定高效开发的生动实践。围绕我国深部资源安全、高效、低损、绿色开采的重大战略需求,针对深部煤炭资源安全高效开发面临的关键挑战,以为深部透明地质表征-深井资源智能开采-开采灾害精准判识-矿山生态环境保护为主线,深入探索多尺度地质结构精准表征及重构,多源采动信息智能感知及实时响应,多场多相耦合致灾机理及防控理论,多因素交互影响矿山生态环境保护及修复等关键科学问题;在突破关键科学理论基础上,研发深部地质结构多尺度表征重构与透明可视化技术,深部煤炭资源智能开采与远程操控技术,深部煤炭灾害精准判识与智能预警防控技术,矿山生态环境保护与资源协调开采主动智能调控技术,最终形成通用的深部煤炭资源安全高效开发关键技术体系,保障深部煤炭资源高效、绿色、安全开采,总体研究技术路线框架如图1所示。

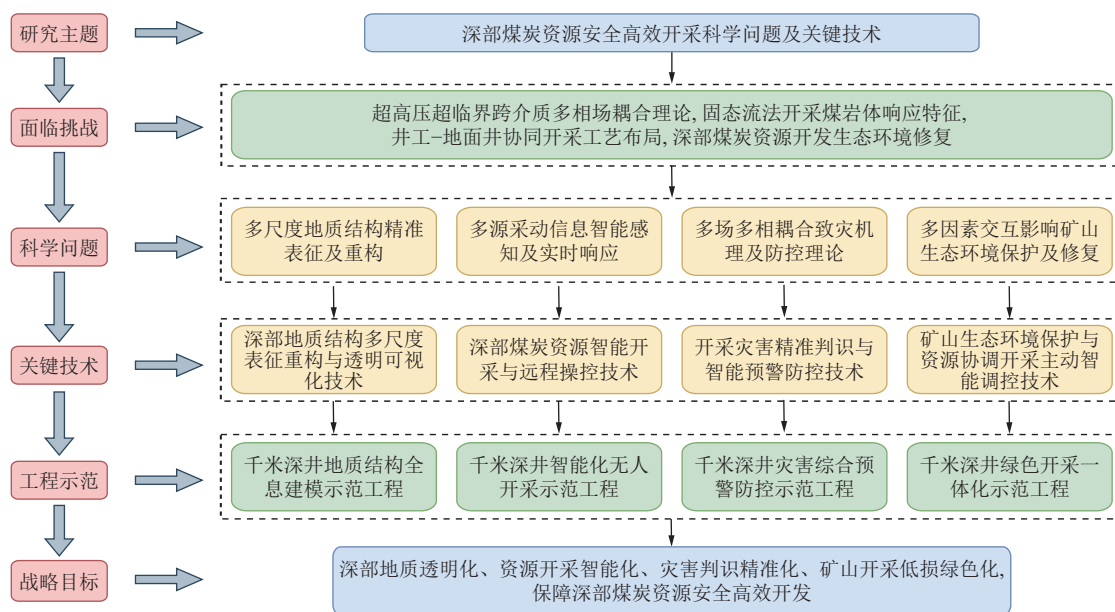


图1 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术-总技术路线

Fig.1 Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources-general technical route

4 深部煤炭资源安全高效开采技术攻关

4.1 深部透明地质表征

4.1.1 深部地质结构多元协同勘测技术

单一类型勘探技术受限于自身原理、适用范围与获取信息的片面性,在应对现今复杂的深部地质勘探任务时难以全面反映真实地质构造。整合地质学、地球物理学、地球化学、岩石力学等多学科精髓,联合各类型井上及井下勘测技术,发展深部地质结构多元协同勘测技术体系成为揭示深部地质体全貌的有效技

术方案。考虑我国矿产资源开发逐步走向深部,针对深部煤炭资源开采的特点,未来深部地质结构多元协同勘测技术的开发应重点关注:针对跨尺度的地质构造及关联参数类型开发具有针对性的探测技术装备;进一步实现大数据、人工智能等新兴技术与传统地质勘测的深度融合,构建智能化的多元数据共享平台,实现多元数据的实时交互及智能判识。

4.1.2 跨尺度地质结构一体化表征与重构技术

深部煤炭所处地质环境复杂多变,仅依靠工程尺

度地质勘察,虽能了解区域地层构造、褶皱断层分布等大致情况,却无法精准知晓岩石物理力学特性、岩体内部细微结构、岩体矿物组分等对工程结构稳定性的影响。反之,单纯依靠实验室尺度的岩样分析,难以将工程结构局部岩体的物理力学特性、局部微细观结构与矿井周边大尺度地质体构造相联系,无法从整体上把握施工风险。因此,统筹考虑宏观大尺度构造与局部小尺度岩体的力学特性、内部微细观结构特征的关联机理,实现跨尺度地质结构一体化表征与重构势在必行。从现有技术的发展现状来看,构建大尺度工程构造时空分布特征与局部小尺度岩样微细观参数的关联模型,是实现跨尺度地质结构一体化表征与重构的关键。其次,通过开发跨尺度模拟算法,实现数字化地质模型动态演化的精准预测,有助于推进工程结构突变的科学精准预测、动力灾害防治等研究进一步发展。上述方案中,随着地质勘探、数据融合及 AI 技术的不断进步,跨尺度地质结构一体化表征与重构有望在短期内实现,跨尺度模拟算法的开发,需在经典岩石力学理论上做出进一步突破。

4.1.3 深部煤炭地质结构动态变动的透明可视化

深部煤炭建设过程中,板块运动、岩浆涌动、地下水径流变迁以及采动岩体应力应变的实时调整等诸多因素相互交织,致使地质结构在宏微观各个尺度上不断演化。基于传统静态地质建模方法,构建的三维地质模型无法实时反映地质结构变动特征。要满足深部地质动态可视化的实时性诉求,需融合光电声等多类前沿动态传感技术,实现宏观构造、区域岩体变形、应力、温度、流体成分等多元参数的实时采集。通过连续性动态数据,构建全方位、高频率的深部地质动态监测网络。另外,需研发基于人工智能的深度学习算法,挖掘数据中的隐藏模式,构建地质结构动态演化模型,基于实时数据处理与分析实现模型的动态更新。打造适配动态可视化的专业软件平台,实现工程策略与地质动态演化数据的交互,为研究方案或施工计划的实时调整提供技术保障。目前,针对不同类型连续性动态数据采集的装备研发开展较为顺利,取得了较好的成果。然而,动态监测网络及适配可视化平台的构建尚处于初期发展阶段,仍需在数据处理、参数交互更新算法等方面做出进一步突破。

4.2 深部资源智能开采

4.2.1 深部煤炭信息智能感知与安全监控技术

深部煤炭信息智能感知与安全监控技术是实现深井智能开采与安全保障的前提基础。针对井下多源采动信息监测中存在的精度不足、参数单一、动态响应滞后等关键问题,亟需依托光纤光栅传感器、

MEMS 传感器等前沿感知技术,精准采集地应力变化、岩层位移、瓦斯体积分数波动、设备振动特征等关键信息,开发适用于复杂井下环境的高灵敏多功能传感装置。设计集成防尘、防抖、光照自适应调节功能的智能视觉设备和井下巡检机器人,通过优化续航能力与自主决策算法,提升机器人在复杂环境中的动态巡检能力,可根据实时信息调整巡检路径与监测重点,保障关键区域高清图像与多维数据的获取,并通过群体智能算法协同完成大型采场复杂信息采集任务。鉴于智能综采工作面获取的多源信息复杂性与广泛性,需研发高效数据处理与分析技术,对采矿全生命周期内的锚杆载荷、顶板离层、围岩应力、巷道温度、液压支架状态及采煤设备运行参数等信息进行多维度深度剖析与整合,提炼关键性安全数据,全面支撑深井高效安全生产。针对深部煤炭井下作业需求,依托新一代有线、无线通信技术确保井下信息稳定传输,凭借 5G/6G 技术的高带宽、低时延特性实现高速传输,同时探索卫星通信在偏远矿区及应急通信场景的应用可行性,关注量子通信为井下超安全通信创造的未来发展潜能,达成井下信息近乎实时且安全可靠的传输效果。融合数字孪生与 AI 技术,构建深部煤炭智能感知与安全监控数智平台,为深井开采提供数据化、智能化支撑,推动产业智能化发展。

4.2.2 深部煤炭资源精准采掘与智能控制技术

深部煤炭资源精准采掘与智能控制技术是驱动深部复杂环境下采-掘-机-运-通-排系统革新的核心动力。精准采掘层面,依托前沿地质探测与透明可视化技术,其搭载的传感器能够穿透岩层干扰,精确勾勒煤层形态及地质结构细节,为采掘设备提供高精度导航,确保开采路径最优,减少无效进尺与资源浪费。以 TBM 掘进机与掘锚一体机为例,智能控制系统实时解析地质数据,依地质变化精细调整掘进参数,精准捕捉巷道轮廓变化,显著提升作业效率和精度。在智能控制领域,智能采煤机运用高灵敏煤岩界面识别及实时反馈技术,即便在深部高温高压环境下,也能精准判别煤岩界面,动态优化截割参数,保障开采效率与煤质稳定。超前巷道支护配备智能安全监控系统,传感器实时监测围岩应力、位移,遇风险自动触发支护。智能放煤依靠光谱与图像识别技术,精准判断煤质与垮落状态,实现煤量回收最大化。运输系统方面,煤流输送机结合物联网与边缘计算,构建智能联动系统,依据采掘现场实时信息,快速优化运输参数,提升运行效率。通风与排水系统依托智能感知与调控技术,在深部恶劣环境下精准监测瓦斯、涌水量,通过内置算法动态调节,确保风量分配合理、水泵启停

精准。结合绿色环保技术,如纳米材料吸附粉尘与新型制冷介质降温,进一步应对粉尘与高地温难题。这些技术革新为深部资源的安全、高效、绿色开发提供了强大支撑,开创深井开采全新模式。

4.2.3 深部煤炭开采智能决策与远程调控技术

深部煤炭开采智能决策与远程调控技术是智慧矿山建设的关键支撑。依托多源感知数据融合技术,特制传感器即便在深部煤炭高温、高压、强电磁干扰环境下,仍能精准采集地质、设备、环境等多维度信息,构建精准动态数据模型,为智能决策提供有力依据。借助大数据与 AGI 算法,利用分布式架构克服深部数据传输延迟,实现复杂采掘场景下数据清洗、降维与特征提取,快速识别关键影响因素,即时优化开采参数与策略。远程调控层面,融合 5G/6G、物联网及卫星通信技术的深度应用,可实现远程实时控制与多场景协同作业。采煤机、掘进机等核心设备通过智能化改造,搭载抗干扰通信模块与智能控制系统,支持远程精准设置参数、智能规划路径、故障预警,通信中断时依本地策略维持基本作业,提升作业效率与安全性。结合 VR、AR 技术打造适配深部环境的远程操作平台,使井上操作人员能够实时查看设备故障与开采细节,一键下达指令实现采煤机的精准启停、刮板输送机的调速等操作。此外,融合数字孪生技术构建虚拟矿山全景模型,对千米井下复杂环境进行数值仿真模拟与生产成效预估,辅助制定最优生产计划与应急预案。深部煤炭开采智能决策与远程调控技术的应用,将全面提升矿山管理精细化水平,推动深井开采从经验驱动向数据驱动的转型,为智慧矿山建设奠定坚实基础。

4.3 开采灾害精准判识

4.3.1 灾害前兆信息智能感知与采集传输技术

灾害信息实时精准感知与分析是实现深部煤炭开采灾害前兆预警判识与灾害控制的关键前提,针对当前灾害信息感知与收集传输中存在的信息不全面、灵敏度低、通信可靠性差等重大技术问题,亟需开展深部煤炭开采灾害前兆信息智能感知与采集传输技术的研究。基于新兴的信息智能感知技术,如光纤传感器、MEMS 传感器、石墨烯传感器等,开发能主动获取采动应力、微震信息、巷道围岩收敛变形、气体浓度、瓦斯涌出量、温度湿度、冲击能量、地音、巷道渗漏等深部煤炭开采灾害关键信息新型智能感知传感仪器与技术。研发配备除尘、稳像、光照适应等功能的计算机视觉设备,以保障深部煤炭开采灾害高清图像信息的采集。融合深度学习、人工智能、大数据和云计算等提出更为高效精准的信息数据的降维、清

洗、修正和去噪机器学习算法,实现深部煤炭开采灾害信息高效精准获取。基于物联网新兴的无线 NB-IoT 通信技术,发展覆盖广、功耗低、成本少、容量大、可靠性高的深部煤炭开采灾害信息传输技术。上述新兴的信息智能感知技术、深度学习、人工智能大模型算法和无线 NB-IoT 通信技术,较于传统手段,其具有更为精准、可信、稳定的工作性能,其在深部煤炭开采过程应用,能够自动、精准、便捷的获取与开采灾害相关的关键采动响应信息,并可深入挖掘各信息要素间隐藏的内在关联,有望实现深部煤炭灾害前兆信息感知智能化和传输快速可靠化。

4.3.2 灾害风险区域智能判识与监控预警技术

风险区域智能判识与超前预警是实现深部煤炭开采灾害远程精准防控与智能应急决策关键基础。揭示深部多场多相耦合下煤岩体力学响应微观机制与宏观灾害孕育发生机理的内在联系,构建深部复杂赋存环境与强工程扰动效应共同作用下煤岩体灾变失稳模型,提出深部煤炭开采灾害风险的应力、能量、变形、声波、气体浓度和流体速度等判识指标,建立深部煤炭开采灾害风险判识预警理论与模型,对各灾害风险判识指标进行无量纲处理,采用 R 值法、概率法、敏感指数法、距离权重法等,综合确定各指标权重,根据指标权重及指标值,计算综合预警指标值,比对风险等级判别标准,综合判定深部煤炭开采灾害风险等级。利用基于大数据和云技术的数据融合的灾害多元信息挖掘分析新技术、新方法,研发形成基于大数据的多参量灾害判识算法与模型,构建灾害预警技术指标体系,建立可实现深部灾害风险多源海量动态信息远程在线传输、存储和多源信息挖掘的系统平台,该平台能够满足深部灾害数据多源、海量、动态及实时特点,并可对灾害前兆信息自动分类识别与实时远程监控预警,有望实现深部灾害风险区域判识与监控预警智能化和信息化。

4.3.3 灾害远程精准防控与智能应急决策技术

灾害远程精准防控与智能应急决策实现深部煤炭资源安全高效开采关键保障。深部煤炭资源开采灾害精准防控与智能应急决策技术包括采前和采中,在新工作面开采,需要综合原始地应力、瓦斯含量、地质水文条件,构造特征和煤岩体基础物理力学性质等,采用分区分级早期智能判识法等对深部灾害风险进行初判,根据风险等级选择相应的资源开采与围岩支护方法,并采取必要灾害防护措施,比如保护层开采、煤层注水和优化开拓方案等方法。开采过程中时刻关注灾害风险区域智能判识与监控预警等级,分区分级采取针对性精准防控手段,比如煤炭资源常用的典

型动力灾害危险局部解危措施有:煤层大直径钻卸压、顶板深孔断裂爆破、顶板水压致裂和顶板定向水压致裂等措施。并进一步根据风险区域智能判识与监控预警风险等级进行应急决策优化。将智能感知装备、大数据、无线通信、物联网、云计算、人工智能、灾害巡检机器人等数智信息化技术相融合,建成集多源感知-高效传输-准确预警-精准防控-智能决策为一体的深部灾害智能防控系统,该系统能够适用于深部煤炭资源开采“三高一扰动”复杂地质环境,并可实现“灾害监测-智慧反馈-及时调整”一体化操作流程,有望实现对深部煤炭资源开采灾害联防联控。

4.4 矿山生态环境保护

4.4.1 矿山生态环境原位实时监测与精准诊断技术

矿井生态环境原位实时监测与精准诊断是实现深部煤炭资源开采低损绿色化的重要前提。集成 GPS 或 GNSS 等卫星定位技术、雷达技术、无人机红外遥感技术、地球物理探测技术、地面钻井和井下钻孔技术,开发深部煤炭开采“空-天-地-井-孔”全方位立体化生态环境原位实时监测平台,获取深部煤炭资源开采全过程(采前-采中-采后-稳定期)覆岩结构、矿井水和地表生态环境(植被生长发育、地面沉降、建筑物、地表水等)原位实时数据。采用物联网、大数据、无线通信、云计算等技术,构建深部煤炭资源开采全过程的多态、多维、多源生态环境数据库,发展矿山生态环境脆弱区精准诊断技术,实现对覆岩结构、矿井水和地表生态环境演化特征定量表征,并对生态环境潜在脆弱区精准诊断定位,同时可对深部煤炭资源开采全生命周期的资源条件、地下水和地热等其他资源等资源量及其空间分布进行准确掌控,为深部煤炭资源高效绿色化开发提供技术支撑。

4.4.2 矿山生态修复工材创新与植被群落构建技术

由于矿山建设运营过程中,不可避免会使地表植被、地下水位、地热分布、微生物群落分布、地层有机质构成等产生动态变动^[58-59]。这些生态环境变动的不利影响无法预估,在深井建设运营过程中采取必要的生态修复手段有效控制生态环境变动的范围与程度,是防止矿山建设过程中伴生重大生态问题的必要手段。然而,受深部开采高温、高压、高湿度以及复杂的地质化学条件影响,传统材料通常难以满足生态修复需求。因此,开发具备耐高温、耐高压、耐腐蚀性能,并能够在极端环境下保持结构稳定的新型工程材料变得尤为重要。同时,针对井下的透水、透气问题,新型深井材料还应具备优异的密封性能,阻止地下水无序渗漏,避免对周围地层生态造成 2 次破坏。据统计,全国 30 个省(市、自治区)共圈定矿山开发面积

220.42 万 hm^2 , 约占全国陆域面积的 0.23%^[60]。其中,采煤矿区占地 83.62 万 hm^2 , 因煤矿开采导致的塌陷区占地 57.08 万 hm^2 , 而受损地表环境修复治理面积仅为 8.69 万 hm^2 , 加大矿区受损地表环境修复工作势在必行。植被群落构建是推进矿区地表生态恢复的重要技术手段^[61]。针对矿区土地贫瘠、重金属含量高等特点,应分期有序开展土壤改良及适应性植被种类筛选。综合考虑植被生态习性及其矿区季节变化特点,构建多层次生态体系,维持生态景观的连续性、稳定性。同时,引入经济型动植物群落,合理安排种植密度,适时收割与养护,实现生态保护与经济协同共进。

4.4.3 矿山生态修复与资源开采协同优化决策与智能管控技术

矿山生态修复与资源开采协同优化决策与智能管控技术是实现深井低损绿色开采的关键支撑。针对深井开采引发的生态环境损害与资源浪费问题,需通过多源信息融合与数字孪生技术构建生态-资源耦合模型,在保障开采安全与资源高效利用过程中,动态评估开采过程地质结构变化对地表生态环境的影响,为协同优化决策提供科学依据。引入智能化注浆系统和可控回填材料,根据采空区特征实现差异化治理,提升地层稳定性,防止地表沉降与水资源破坏。结合植被恢复、微生物修复等手段,加快矿区生态系统恢复。同时,基于人工智能与大数据分析,开发开采与修复协同优化算法,动态平衡资源开发与生态保护之间的矛盾。利用物联网与远程监控技术,实时掌握修复进展,精确评估修复效果,动态调整修复方案。通过构建生态修复与资源开采协同管理平台,将开采、治理、监测全过程数智化,在保障资源安全高效开采的同时,还将实现矿区生态环境的整体改善,为产业的可持续发展奠定坚实基础。

5 结 论

1) 深部地质勘探技术的进展为深部煤炭资源开发提供了精准的地质信息支持,但仍需克服高温、高压环境下的装备适用性、测量精度和数据可靠性等难题。煤矿智能开采技术正逐步迈向智能化和无人化,但在深井环境下,技术适应性和专业人才短缺亟待解决。深部灾害预警技术的创新是确保安全开采的关键,必须加强对多场耦合效应的研究,以提升灾害预警的精准性和及时性。矿井生态修复技术从简单的覆土绿化发展到多学科融合模式,虽然取得显著成果,但在地区差异和技术推广方面仍面临挑战。

2) 深部煤炭资源的安全高效开发面临多重挑战:

超高压、超临界跨介质多相场耦合理论亟待突破,以揭示深部煤岩体在复杂环境下的响应机理;固态流法开采技术的发展需要构建新的力学响应理论体系,适应深部资源无人化、低碳化、智能化开采需求;井工-地面井协同开采工艺布局需解决高地应力、高温、高瓦斯等难题,通过精准规划和智能调控实现安全高效开采;生态环境修复方面,需完善适用于矿山生态修复技术体系,确保资源开发与生态保护双赢。

3) 智能精准绿色开采是保障国家能源稳定供给的关键。面对高地应力、高水压、高气压和高地温等复杂环境,需攻克非线性行为、多物理场耦合演化及大范围高能级灾害等难题。聚焦深部透明地质、智能开采、灾害精准判识及生态环境保护,开展超前精准探测、智能感知与决策、灾害预警防控及生态修复研究。通过政-产-学-研-用-金联合攻关,发挥国家级平台优势,推动矿区智能化和无人化发展,形成从资源勘探到矿区建设、运行及修复的全链条自主决策体系,最终构建通用的深部煤炭资源安全高效开发技术体系。

4) 关键技术领域包括深部透明地质表征、智能开采、灾害精准判识及生态环境保护。通过多元协同勘测、跨尺度一体化表征与重构、动态可视化技术,实现深部地质结构的精准透明化;依托智能感知、精准采掘与远程调控,提升作业效率与安全性;利用智能感知与采集传输、风险区域判识预警、远程精准防控等技术,确保灾害防控的及时性和有效性;通过原位实时监测、工材创新与植被群落构建、协同优化决策,保障矿区生态修复与资源开采的和谐共进。政产学研用金联合攻关,融合新兴信息技术,构建智能化、绿色化的深部煤炭资源开发体系,为国家能源安全和生态文明建设提供坚实支撑。

6 展 望

深部煤炭资源安全高效开发是响应国家向深地进军重大战略部署的重要实践,挑战超常规地层开采条件、解决复合多场多相致灾问题、实现真正的无人智能开采需要久久为功,围绕深井矿山地质环境、深地探采关键问题、尖端耐高温高压材料、智能化技术装备、跨介质多源异构信号传输、矿山智慧学习指挥决策模型方向,持续稳步破解多尺度地质结构精准表征及重构、多源采动信息智能感知及实时响应、多场多相耦合致灾机理及防控理论及多因素交互影响矿山生态环境保护及修复难题,形成深部非线性多相多场响应前沿理论完备、智能网络建设完善、材料装备与多元开采工艺齐全、全周期智能自主决策精准可控

全面支持深地资源安全开采的生动实践,力争2030年形成初步井上-地面开采技术体系,2035年形成初步智能化大算力大模型指挥矿区技术生态系统,2050年全面实现深部煤炭资源安全高效智能无人开采,践行科技能源强国战略部署,助力“双碳”战略目标尽早实现,推进国际能源新格局建设。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(6): 1-6.
YUAN Liang. Study on the development strategy of coal mine safety in China[J]. China Coal, 2021, 47(6): 1-6.
- [2] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [3] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557-1566.
YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557-1566.
- [4] 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.
- [5] 袁亮. 兜底能源安全需加大深部煤炭安全开采, 促进矿区接续发展[N]. 澎湃新闻.
- [6] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [7] 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.
- [8] 袁亮. 煤及伴生资源精准开采科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [9] 葛世荣, 郝尚清, 张世洪, 等. 我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, et al. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28-46.
- [10] 鞠杨, 任张瑜, 郑江韬, 等. 岩石灾变非连续结构与多物理场效应的透明解析与透明推演[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 210-232.
JU Yang, REN Zhangyu, ZHENG Jiangtao, et al. Transparentized

- solutions and interpretation for the effects of discontinuous structures and multiphysics on rock failure[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 210–232.
- [11] 王国法, 任怀伟, 庞义辉, 等. 煤矿智能化 (初级阶段) 技术体系研究与工程进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 1–27.
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1–27.
- [12] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论及技术体系[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.
- [13] 贾庆仁. 煤矿三维地质与巷道建模方法研究及应用[J]. 测绘学报, 2021, 50(9): 1275.
JIA Qingren. Research and applications on methodologies for three-dimensional geological and roadway modeling in coal mine[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(9): 1275.
- [14] 雷晓荣. “孔-井-地”一体化智能钻进系统及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 274–281.
LEI Xiaorong. “Hole-well-ground” integrated intelligent drilling system and key technologies[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 274–281.
- [15] 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[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2331–2345.
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331–2345.
- [16] 覃思, 程建远. 煤矿井下随采地震反射波勘探试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 116–119.
QIN Si, CHENG Jianyuan. Experimental study on seismic while mining for underground coal mine reflection survey[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 116–119.
- [17] 王保利, 程建远, 崔伟雄, 等. 采煤工作面随采地震探测技术研究进展: 以贵州岩脚矿 12701 工作面为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 406–413.
WANG Baoli, CHENG Jianyuan, CUI Weixiong, et al. Research progress of seismic-while-mining detection technology in coal face: An case study in 12701 working face in Guizhou Yanjiao Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 406–413.
- [18] 王保利, 程建远, 金丹, 等. 煤矿井下随掘地震震源特征及探测性能研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 10–19.
WANG Baoli, CHENG Jianyuan, JIN Dan, et al. Characteristics and detection performance of the source of seismic while excavating in underground coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 10–19.
- [19] 程久龙, 李飞, 彭苏萍, 等. 矿井巷道地球物理方法超前探测研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1742–1750.
CHENG Jiulong, LI Fei, PENG Suping, et al. Research progress and development direction on advanced detection in mine roadway working face using geophysical methods[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1742–1750.
- [20] 袁亮, 张平松. 煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 1–14.
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1–14.
- [21] WANG J H, HUANG Z H. The recent technological development of intelligent mining in China[J]. Engineering, 2017, 3(4): 439–444.
- [22] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789–1800.
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789–1800.
- [23] 王国法, 杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 1–10.
WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1–10.
- [24] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181–202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 181–202.
- [25] 范京道, 闫振国, 李川. 基于 5G 技术的煤矿智能化开采关键技术探索[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 92–97.
FAN Jingdao, YAN Zhenguo, LI Chuan. Exploration of intelligent coal mining key technology based on 5G technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 92–97.
- [26] 李首滨. 智能化开采研究进展与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 102–110.
LI Shoubin. Progress and development trend of intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 102–110.
- [27] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161–2178.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161–2178.
- [28] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判别及监控预警技术“十三五”研究进展[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(1): 1–8.
YUAN Liang. Risk identification, monitoring and early warning of typical coal mine dynamic disasters during the 13th Five-Year Plan period[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(1): 1–8.
- [29] 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 Sciences, 2017, 49(2): 1–16.
- [30] 袁亮, 马衍坤, 黄勤豪, 等. 煤矿动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 827–856.
YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qin hao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone

- strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(5): 827–856.
- [31] 张水平, 陈刚. 国内外金属矿山安全监测现状与发展趋势[J]. *世界有色金属*, 2009, 34(6): 28–29.
- ZHANG Shuiping, CHEN Gang. Present situation and development trend of metal mine safety monitoring at home and abroad[J]. *World Nonferrous Metals*, 2009, 34(6): 28–29.
- [32] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 449–459.
- BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong. Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 449–459.
- [33] 贾梦旋, 王金满, 李禹凝, 等. 基于自然解决方案的矿山生态修复研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 209–221.
- JIA Mengxuan, WANG Jinman, LI Yuning, et al. Ecological restoration of mines based on nature-based solution: A review[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 209–221.
- [34] 雷少刚, 卞正富, 杨永均. 论引导型矿山生态修复[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 915–921.
- LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, YANG Yongjun. Discussion on the guided restoration for mine ecosystem[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 915–921.
- [35] 张进德, 郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7921–7930.
- ZHANG Jinde, XI Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7921–7930.
- [36] 侯金武, 余洋. 试论科学推进矿山生态修复[J]. *矿业安全与环保*, 2023, 50(6): 1–6, 15.
- HOU Jinwu, YU Yang. Discourse on scientific advancements in mining ecological restoration[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2023, 50(6): 1–6, 15.
- [37] 胡振琪, 赵艳玲. 矿山生态修复面临的主要问题及解决策略[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(9): 2–7.
- HU Zhenqi, ZHAO Yanling. Main problems in ecological restoration of mines and their solutions[J]. *China Coal*, 2021, 47(9): 2–7.
- [38] 刘举庆, 李军, 王兴娟, 等. 矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 346–358.
- LIU Juqing, LI Jun, WANG Xingjuan, et al. Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 346–358.
- [39] 王国法, 张建中, 刘再斌, 等. 煤炭绿色开发复杂巨系统数智化技术进展[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(11): 1–16.
- WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, LIU Zaibin, et al. Progress in digital and intelligent technologies for complex giant systems in green coal development[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(11): 1–16.
- [40] 闫石, 孟祥芳, 马妍, 等. 矿山生态修复成效评估[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(S2): 593–599.
- YAN Shi, MENG Xiangfang, MA Yan, et al. Evaluation of mine ecological restoration effectiveness[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(S2): 593–599.
- [41] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(5): 103–110.
- YUAN Liang. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 103–110.
- [42] 袁亮, 徐良骥. 高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 65–74.
- YUAN Liang, XU Liangji. Conception and practice of resource utilization, energization and functionalization of coal mining subsidence areas with high groundwater level[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 65–74.
- [43] 宋昱, 姜波, 李明, 等. 低中煤级构造煤超临界甲烷吸附特性及吸附模型适用性[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(8): 2063–2073.
- SONG Yu, JIANG Bo, LI Ming, et al. Super critical CH₄ adsorption characteristics and applicability of adsorption models for low, middle-rank tectonically deformed coals[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(8): 2063–2073.
- [44] 杨兆彪, 秦勇, 高弟, 等. 超临界条件下煤层甲烷视吸附量、真实吸附量的差异及其地质意义[J]. *天然气工业*, 2011, 31(4): 13–16, 122.
- YANG Zhaobiao, QIN Yong, GAO Di, et al. Differences between apparent and true adsorption quantity of coalbed methane under supercritical conditions and their geological significance[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(4): 13–16, 122.
- [45] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力–水流–化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1465–1473.
- FENG Xiating, DING Wuxiu. Meso-mechanical experiment of microfracturing process of rock under coupled mechanical-hydrological-chemical environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1465–1473.
- [46] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(2): 305–320.
- LIU Quansheng, LIU Xuewei. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 305–320.
- [47] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流装置的研制及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 907–914.
- XU Jiang, PENG Shoujian, YIN Guangzhi, et al. Development and application of triaxial servo-controlled seepage equipment for thermo-fluid-solid coupling of coal containing methane[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 907–914.
- [48] 尹光志, 蒋长宝, 李晓泉, 等. 突出煤和非突出煤全应力–应变瓦斯渗流试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(6): 1613–1619.
- YIN Guangzhi, JIANG Changbao, LI Xiaoquan, et al. An experimental study of gas permeabilities of outburst and nonoutburst coals under complete stress-strain process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1613–1619.
- [49] 尹光志, 李文璞, 许江, 等. 多场多相耦合下多孔介质压裂–渗流试验系统的研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S1): 2853–2861.
- YIN Guangzhi, LI Wenpu, XU Jiang, et al. Development and application of fracturing and seepage experimental system for multi-

- physical field and multiphase coupling of porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2853–2861.
- [50] 朱万成, 魏晨慧, 田军, 等. 岩石损伤过程中的热-流-力耦合模型及其应用初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3851–3857.
ZHU Wancheng, WEI Chenhui, TIAN Jun, et al. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model during rock damage and its preliminary application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3851–3857.
- [51] 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.
- [52] 张茹, 吕游, 张泽天, 等. 深地工程多维信息感知与智能建造的发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1259–1290.
ZHANG Ru, LÜ You, ZHANG Zetian, et al. Development and prospect of multidimensional information perception and intelligent construction in deep earth engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3): 1259–1290.
- [53] 李树志, 李学良, 尹大伟. 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 286–292.
LI Shuzhi, LI Xueliang, YIN Dawei. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 286–292.
- [54] 王金满, 冯宇, 叶甜甜, 等. 基于 NbS 的全生命周期矿山生态修复理论框架及技术路径[J/OL]. 煤炭科学技术, 2024: 1–15. [2024–09–04]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ20240826001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
WANG Jinman, FENG Yu, YE Tiantian, et al. Theoretical framework and technical path of mine ecological restoration in the whole life cycle based on NbS[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1–15. [2024–09–04]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ20240826001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [55] 肖武, 陈文琦, 何厅厅, 等. 高潜水位煤矿区开采扰动的长时序过程遥感监测与影响评价[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 922–933.
XIAO Wu, CHEN Wenqi, HE Tingting, et al. Remote sensing monitoring and impact assessment of mining disturbance in mining area with high groundwater level[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 922–933.
- [56] 张建民, 李全生, 胡振琪, 等. 西部风积沙区超大综采工作面开采生态修复研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 173–177.
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, HU Zhenqi, et al. Study on ecological restoration mode of ultra wide fully-mechanized coal mining in West China aeolian sand area[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 173–177.
- [57] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1751–1757.
HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751–1757.
- [58] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239–246.
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239–246.
- [59] 汪云甲. 矿区生态扰动监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1705–1716.
WANG Yunjia. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1705–1716.
- [60] 戴华阳, 罗景程, 郭俊廷, 等. 上湾矿高强度开采地表裂缝发育规律实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 124–129.
DAI Huayang, LUO Jingcheng, GUO Juntong, et al. In-site surveying and study on development laws of surface cracks by high-intensity mining in Shangwan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 124–129.
- [61] 杨金中, 聂洪峰, 荆青青. 初论全国矿山地质环境现状与存在问题[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 1–7.
YANG Jinzhong, NIE Hongfeng, JING Qingqing. Preliminary analysis of mine geo-environment status and existing problems in China[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017, 29(2): 1–7.