



移动阅读

袁亮. 煤及共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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.5048

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.5048

煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策

袁 亮^{1,2}

(1. 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学(北京) 共生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 面临新一轮以大数据、云计算、人工智能、物联网、区块链、互联网为代表的信息技术革命, 及煤、铀、油气相继走向智能化无人开采的发展趋势, 深度融合现代信息技术、资源开采理论技术助推煤及共伴生资源无人(少人)开采, 保障国家能源及战略需求, 成为新时代能源资源开发模式变革的导向, 基于此率先提出煤及共伴生资源精准开采的科学构想。煤及共伴生资源精准开采是以创新地球空间物理科学、多相多场耦合理论及智能管控系统为核心保障, 互联网+现场监测、物理/数值模拟、基础实验的“三位一体”科研手段为支撑, 实现煤及共伴生资源禀赋、原生/扰动地质灾害、开采装备工况全息实时展现, 资源开发规划、矿井运行管理及退役矿井生态修复方案的智能弹性决策, 潜在致灾因素的智能深度感知、精准圈定及高效解危, 突发灾害的损伤体自主修复、管控系统韧性恢复、装备自适应调整的能源资源科学开发模式。煤及共伴生资源精准开采可有效破解资源开发面临的勘探监测、协同开发、灾害防控及环境负外部性等重大难题, 为未来煤及共伴生资源开发提供了新思路。本文凝练了煤及共伴生资源精准开发的5个关键科学问题和7个主要研究方向, 为实现新时代资源安全高效绿色开发提出了阶段性规划。

关键词: 煤及共伴生资源; 精准开采; 三位一体; 互联网+; 物联网; 人工智能

中图分类号: TD821 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2019)01-0001-09

Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources

YUAN Liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Beijing Key Laboratory for Precision Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To boost the exploitation of energy resources in no manpower (little manpower) and to guarantee the demand of national energy and strategies, a complete integration of information technology and the theories of mineral resource exploitation is the direction for the revolution of energy resources development in the new era. A new round of information technology revolution occurs in the areas, such as big data, cloud computing, artificial intelligence, internet of things, regional chain and internet, and intelligent unmanned exploitation in coal, uranium, and oil and gas. In considering the integration of information technology, the scientific conception of precise mining of coal and its associated resources was innovatively developed in this paper. The innovative geospatial physical science, multi-phase and multi-

收稿日期: 2018-11-22 修回日期: 2018-12-20 责任编辑: 常 琛

基金项目: 中国工程院重大咨询研究资助项目(2017-ZD-03)

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

field coupling theory and intelligent control system are proposed as a core guarantee system, supported by the “trinity” scientific research means including internet+on-site monitoring, physical/numerical simulation and basic experiments. The holographic real-time display of coal and associated resource endowment, original/disturbed geological disaster and the working condition of mining equipment is required. Also, the intelligent and flexible decision on mine planning, operation management and the ecological restoration of closed mines, the intelligent depth perception, accurate delineation and efficient resolution of the crisis for potential disaster, the self-repair of the damage space, the resilience recovery of control system, the adaptive adjustment of the equipment are all need to be achieved. Precise mining of coal and associated resources can effectively solve all these major problems subjected to exploration and monitoring, collaborative development, disaster prevention and control, and negative environmental externalities, to provide new ideas for the future development of coal and associated resources. In this paper, five key scientific issues and seven main research directions for the precision mining of coal and associated resources are summarized, and a phased plan is proposed for the safe, efficient and green mining of resources in the new era.

Key words: coal and associated resources; precision mining; trinity means; internet+; internet of things; artificial intelligence

2017年我国化石能源消费占比高达86.5%,其中煤、石油、天然气消费分别占60.4%,19.5%和6.6%,同时石油、天然气对外依存度分别高达67.4%和39%,创造历史新高^[1]。以煤、石油、天然气为主的传统化石能源保障了国家经济发展,“富煤贫油少气”的能源结构也决定了我国能源发展方向。国家《能源中长期发展规划纲要(2004—2020年)》中确定,中国将“坚持以煤炭为主体、电力为中心、油气和新能源全面发展的能源战略”,同时《“十三五”国家科技创新规划》也提出了重点开展煤炭安全绿色开采和煤系伴生资源协同开发理论与技术攻关目标^[2]。以鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地为代表的煤、铀、煤层气、油气伴生资源开采面临诸多问题,破解煤及伴生资源精准协调开发科学问题势在必行。

煤及伴生资源精准开采涉及多相多场耦合作用与动态复杂灾害约束。煤炭开采中瓦斯突出、冲击地压等典型动力灾害频现,开采扰动区矿井水突出、瓦斯涌出等渗流灾害凸显^[3-6],同时水、火、瓦斯、顶底板等多场灾害形成伴生铀、煤层气、油气资源勘探及开发难题。铀矿地浸含铀溶浸液、氡及其子体、重金属元素对地层水及伴生资源构成严重威胁^[7];油气开采面临井喷、气窜威胁,钻完井,携砂致裂储层,CO₂/水驱油,CO₂及核废料埋存等过程中多相多场耦合致灾难题,同时油气井网布设、钻完井及开采影响到煤、铀及煤层气等伴生资源安全经济开发^[10-12]。

国外同样面临煤、铀、油气伴生资源同盆地赋存情况,以美国、澳大利亚、中亚、俄罗斯等国及地区为代表的盆地31处^[13],然而国外以备用资源、战略

性资源保护为主,依据需求在基本不扰动伴生资源的条件下,有选择性的开采单一矿种。我国能源结构及消费占比,决定煤及伴生资源精准开采的现实需求,煤及伴生资源精准开采在相当长的一段时间内将成为我国资源开发的主导方向。

创新互联网+物联网+科学开采技术,将大数据、云计算、人工智能、VR/AR技术等^[14-17],推向煤及伴生资源勘探开发、多相多场耦合致灾机理研究、开采工艺技术创新、生产管理优化、开采设备升级,集成创新监控预警平台与智能决策系统,指导模式化的煤及伴生资源防灾减灾、安全高效开采,将成为破解煤及伴生资源精准开采的必由之路。

1 煤及伴生资源开采面临的挑战

(1)煤及伴生资源综合勘探水平亟待提高。

稳定的盆地构造演化及优良的沉积环境为煤及伴生资源同盆富集创造了优良环境。基于时空的煤、铀、油气分布规律呈油气、煤与煤层气、铀矿的垂直深浅赋存,平面叠置、部分叠置、非叠置分布^[2]。

砂岩型铀矿赋存于含矿含水层中对水体具有强依赖性,煤层赋岩中断层、陷落柱等隐蔽致灾因素繁多,油气资源蕴藏于密闭圈层中对地层封闭环境具有强依赖性。鄂尔多斯盆地为代表的伴生资源勘探开发问题,凸显出现有基于力、声、光、热、电、磁与核变理论的地质雷达勘探方法、高密度电法、地震勘探法及地球物理测井法等单一矿种勘探技术在多资源综合勘探协调度、精度方面的不足^[3-6]。大力提升空、天、地一体化综合勘探手段,透视化资源赋存环境,揭示隐蔽灾害因素,方可资源科学开采规划提供大力支撑。

(2)煤及共伴生资源协调开采技术方法亟待建立。

煤层开采工艺以走向长壁全部垮落法开采、条带开采、房柱式开采为主,开采过程伴随强烈地层响应。砂岩型铀矿以地浸开采为主,依据赋存环境选择性的进行酸式或碱式地浸开采,对低品位高复杂性砂岩型铀矿形成高效开采^[18-20]。油气采用垂直主井配合分支水平井开采工艺,进行自喷采油、注入液(气)驱油及聚合物驱油开采。煤、铀、油气共伴生资源协调开发工序错乱将导致系列开发难题及严重经济损失,其中煤铀失调开采导致了伊犁盆地南缘煤层上部铀矿的无效地浸开采,煤油气的失调开采引发了鄂尔多斯盆地旬邑-宜君煤层下部油气管井布设难题。基于现有共伴生资源单一矿种开采工艺系统,破解基于时空的煤、铀、油气协调开采工序,降低资源、地下水、岩层、地表生态的负外部性,保障经济及战略价值,成为制约煤及共伴生资源精准开采的关键。

(3)煤及共伴生资源开采动态叠加多相多场耦合致灾机理仍需深入研究。

基于煤、铀、油气单一矿种多相多场耦合演化及灾害孕育,煤及共伴生资源精准开采涉及应力场—裂隙场—渗流场—温度场—能量场耦合作用及动态叠加多相多场耦合复合灾害孕育演化,煤铀协调开采中煤层开采“三带”效应对铀矿床构成威胁,甚至活化铀矿床,破坏铀矿地浸开采地层水环境,同时含铀溶解液、氡气及其子体、重金属在扩散、对流、及弥散作用下对地层水及深埋煤层构成污染威胁^[2,7];煤油气协调中煤层开发扰动油气圈闭层稳定性,影响油气动态分布,油气管井与煤层覆岩力热耦合效应诱发管道泄漏、爆燃,扰动煤层采动围岩应力场—裂隙场—渗流场动态耦合过程,诱发采场围岩异常响应,矿井水、瓦斯、粉尘等异常扩散。

强化煤及共伴生资源精准开采多相多场耦合机理研究,揭示资源开采动态叠加多相多场耦合灾害孕育演化规律^[21],实现耦合灾害的超前感知、精准定位、高效预警预解,为煤及共伴生资源精准开采提供保障。

(4)煤及共伴生资源精准开采理论及技术体系有待建立。

煤及共伴生资源精准开采亟待解决可视化资源赋存勘探、开采工艺适配、多相多场耦合致灾机理揭示、致灾因素智能判识深度分析、灾害超前预测预报、灾害综合防治问题^[22]。相比单一矿种决胜勘探、开采、灾害防控难题,面临更大挑战。现场监测、物理/数值模拟、基础实验数据信息共享、互联性差,实验指

导理论滞后现场开采,灾害预测、圈定速度低,精度差。基于物联网的自主学习、自适应调整、采动与决策信息互馈的实验设备及开采装备,致灾因素深度感知、智能判识技术,大数据多网融合传输技术,及大数据云计算数据深度挖掘分析技术、人机互动或人工智能分析、决策系统,是实现“感知、传送、决策、执行”一体化精准开采的保障,统一规划调控煤、铀、油气开采,实现时空上多资源开采工艺、技术合理配置,动态复合灾害提前预判、预知,开采工艺参数智能调控决策,一线开采设备智能强力执行决策。

构建煤及共伴生资源精准开采理论及技术体系,为煤、铀、油气共伴生资源有序开采提供保障,规避经济、社会、环境及战略资源储备的巨大损失。

(5)煤及共伴生资源退役矿井统一开发修复技术有待研发。

煤及共伴生资源退役矿井具有“灾源”和“资源”双重属性,煤、铀、油气共伴生资源开采引发地层应力场、温度场、化学场扰动对地下水生态、上覆及深埋资源、地质岩层结构、地表生态造成不同程度的损害,环境负外部性凸显。同时,废弃矿井水服务废弃铀矿水体环境修复,废弃矿井空间可用于油气储藏、垃圾填埋、核废料处理及抽水蓄能等工程,退役油气井为CO₂封存提供稳定密闭空间,退役矿井“资源”属性凸显。

加强煤及共伴生资源退役矿井统一开发修复技术研发^[21],为降低煤及共伴生资源开发引发的环境负外部性,提高退役矿井资源利用率提供保障,同时是保障煤及共伴生资源可持续开发的基础。

(6)煤及共伴生资源协调精准开发、生产、修复标准有待制定。

开发标准、生产标准及退役后环境修复标准的制定是实现煤及共伴生资源开采统筹工程开发的保障,煤及共伴生资源智能矿山构建的关键。煤、铀、油气资源赋存环境复杂,蕴藏层位深浅不一,共伴生资源单一开采、协调共采的地质评价标准、安全开采标准、采后可修复标准等均处于空白状态,具体开采模式的选取尚无理论依据,无法对现场工程实践形成具体指导,理论滞后于工程实践。共伴生资源协调精准开发、生产、修复标准亟待制定。

2 煤及共伴生资源精准开采科学内涵

煤及共伴生资源精准开采是借力大数据、云计算、区块链、人工智能、5G 通讯、超级计算、物联网等现代互联网、通讯网高新信息技术,融合地质勘探保障技术、协同开采机制、多相多场耦合理论及灾害防

控预警模型,创新开采扰动多维全息地质信息实时共享互馈的互联网+现场监控、物理/数值模拟、基础实验“三位一体”科学研究方法,深度透视化资源储藏环境、动静态地质扰动灾害孕育演化,集成基于虚拟现实技术(VR)、全息人机虚拟互动技术(AR)的原生/扰动地质信息实时展示、智能决策及预警解危平台,超前决策协调开采方式,灾害应急救援方案,最终实现少人(无人)煤及共伴生资源精准绿色安全开采,集成满足新时代环境保护、资源需求、安全开采要求的现代化煤及共伴生资源开发模式。

煤层无人开采方面涉及矿层动态信息智能感知、多场耦合演化信息实时可视、自动巡航切割等关键技术^[3];油气、铀开发方面涉及智能钻完井装备、智能连续管钻井、智能水平分支井完井、局域/广域物联网系统构建、井上下一体化智能闭环监控与决策系统等关键技术^[8],安全保障方面涉及地球物理数据库、灾害风险判识、灾害智能防控、风险监控预警等技术理论。

煤及共伴生资源精准开采发展将经历三大战略阶段。第1阶段以定性、探索性的协调开采规划,机械化、信息化、数字化的开采管控,进行煤及共伴生资源精准开采探索;第2阶段定量挖掘分析开采扰动地层损坏量、环境污染量、综合经济效益、灾害类型/源头,推进机械学习,优化协调开发模式、开采方案,基于煤、铀、油气开采工艺(地浸采铀、直接垮落法/充填法采煤、压差采油)结合数字化、信息化、智能化技术构建智能管控平台,科学、高效决策开发方案,实现提质增效、降本减灾开采;第3阶段互联网+物联网+科学开采理论、技术及装备高度成熟,智能实验设备、生产装备不断涌现,多相多场耦合机理及复合灾害模型弹性构建,开发管理水平极大提高,深入融合智能算法、MGIS、机器智能学习、VR/AR技术,透视化资源赋存及灾害区域,依据环境扰动容量、绿色资源需求量及资源开采安全保障,智能自主决策开采方案,智能机器人连续管钻井、智能无人盾构机开拓、自适应综合优化管道、自适应自主巡航采煤,勘探、规划、建设、开采及灾害防控一体化智能综合煤及共伴生资源精准开采体系形成。

3 关键科学问题

3.1 煤铀资源精准协调开发流固耦合基础理论

(1)研究应力、渗流、化学反应作用下多孔介质、裂隙介质损伤演化及渗透特性变化规律。

精准掌握复杂水文地质条件、岩体结构特征、流体介质属性及化学反应作用下岩体损伤-渗流规律,

可为透视化含铀溶浸液、氦及其子体时空扩散状态,煤层采场“三带”发育状况提供保障。煤铀资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括基于地应力、孔隙压力、温度及化学反应的煤铀赋岩裂隙、孔隙结构演化特征及渗透特性演变规律,多相多场耦合理论模型,基于复杂介质结构演化的铀矿地浸开采溶质化学反应-输运耦合机理等。

(2)研究煤铀精准开采扰动岩层应力场-裂隙场-渗流场-溶质化学反应场-输运场时空动态耦合演化机理。

煤铀资源叠置分布,开采为应力-裂隙-渗流场及溶质化学反应-输运动态耦合过程,地层形成化学、物理破坏,极易引发动态复合多相多场耦合灾害。煤铀资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括“三位一体”科研创新,精准开采试验设备研发,数值仿真软件开发,基于煤铀不同开采情景(煤铀共采、先铀后煤及先煤后铀)的流、固、气介子应力场、裂隙场、渗流场及溶浸液化学反应-溶质输运场耦合演化特征,预识、预判地质渗流灾害及动力灾害,精准开采方案及配套工艺参数优化,精准开采安全等级评价标准等。

3.2 煤与油气精准协调开发多场耦合基础理论

(1)研究基于多相渗流介质、复杂水力环境、非均质各项异性岩体结构变动的煤、油、气赋存地层响应。

油气钻井作业、管道布设、致裂增透、负压抽采行为,扰动煤油气储层、盖层稳定性,促进孔隙裂隙网络发育、引发渗流扩散时空演化。

煤及共伴生资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括岩石三轴多相多场耦合实验系统研发,煤油气固-液-气扰动环境反演,透视化试验技术,岩体非线性破坏失稳准则,岩体峰后裂隙场油气运移规律,开采扰动固、液、气介质多相多场耦合机制,渗流介质、应力环境、水力环境及开采复合扰动下油气开采孔隙裂隙网络演化及渗流运移扩散规律等。

(2)研究煤与油气精准协调开采扰动岩层应力场-损伤场-渗流场-溶质输运场耦合机理及时空动态演化特征。

基于透视化地质保障体系,加强煤与油气精准协调开采扰动岩层应力场-损伤场-渗流场-溶质输运场耦合机理及时空动态演化特征研究,为煤油气共伴生资源精准开采提供基础保障。煤油气精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括天然/扰动裂缝分布规律及分布类型、3D透明打印及精细化模型构建技术,多源、海量、动态多相多场信息高速、云存储及实

时双向传导技术,基于时空的扰动岩体与流体应力场、岩体损伤场、流体渗流场及油气输运场动态演化精准展示,开采扰动岩层应力场-损伤场-渗流场-溶质输运场耦合机理及灾害孕育演化特征等。

3.3 煤及共伴生资源精准协调开发协同机制与方法

(1)研究考虑技术、经济、社会、环境、战略地位因素的煤及共伴生资源精准开发综合效益评价模型。

煤及共伴生资源精准协调开发综合效益给出客观性评价,是保障能源资源安全开采,满足国家能源及战略需求的前提。煤及共伴生资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括综合效益指标衡量法、考虑技术、经济、社会、环境、战略地位因素的综合效益评价模型,共伴生能源资源开采规划、开拓布局、工艺选调,开发技术经济评价机制,精准开发协同机制配套方法等。

(2)研究煤及共伴生资源精准开发协同机制,创新精准协调开采工艺工序。

产学研高度结合,推动煤、铀、油气协同开发机制研究,构建煤及共伴生资源协同开发的建设、运行、管理体系,创新以综合走廊、油气走廊、铀矿走廊及隔离走廊为代表的协调开采工艺工序,精准智能决策不同叠置资源(煤、铀、油气)开发模式,实时生成最优开采方案,智能调控协调开采工艺及配套参数,实现煤、铀、油气煤及共伴生资源精准协调开发。煤及共伴生资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括煤、油气开采走廊工艺技术,开采顺序,井网布设,煤铀开采走廊、隔离走廊工艺技术,扰动铀矿层活化理论,含铀溶浸液、氦及其子体在裂隙场中扩散规律,铀矿原位地浸开采垂直及水平井布设等。

3.4 煤及共伴生资源安全高效开发关键技术与装备

(1)开发基于煤及共伴生资源精准开发的煤铀高效开采、铀矿退役矿井生态修复、油气储层增透及盖层防护技术体系。

深入开展煤、铀、油气提质增效,降本增产协调开采技术研究,是实现煤及共伴生资源精准开采的关键。煤及共伴生资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括地表含铀溶浸液离子解析技术,注抽井、离子交换池中溶浸剂、水、含铀溶浸液循环周期智能管控技术,煤层开采扰动岩层减沉技术,扰动“三带”地层及水资源修复技术,污染源扩散控制及排除技术,多场演化井上井下接触/非接触式智能感知技术、区块链自适应管控技术,扰动地质条件下自适应甜点精准钻遇技术,智能管道管控技术,智能水平井网铺设技术。

(2)开展铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸开采设备、液态 CO_2

压裂密闭混砂设备、水力及 CO_2 驱油气设备研发。

智能装备驱动多资源精准协调开发,加强研发智能感知、多源海量信息高速双向传输及智能自适应执行装备,是实现煤及共伴生资源协调开发的强力保障。地浸采铀及油气开采方面主要涉及智能连续管钻井、智能钻小眼等设备。油气储层致裂增透水平管眼网、铀矿水平井、矿井自适应及导航巡航采煤机、智能检修机器人、液态 CO_2 压裂密闭混砂设备、智能管控管道及智能决策专家平台建设。

加大钻孔成井、完井技术中套管选择、井底结构、涉及智能开关器、压力计、封隔器、地面系统及电缆等关键部件研发力度;助推千米地浸钻孔施工技术,水平井地浸开采技术研究。

3.5 煤及共伴生资源开发灾害防控与智能预警平台

(1)研发油气管道损伤智能检测、油气泄露预警、油气管道穿层透水、含铀溶浸液及氦运移扩散控制技术。

煤、铀、油气共伴生资源精准开采过程以管道、巷道为“动脉”,进行铀矿溶浸液、驱油 CO_2 /水气液、煤层回采材料下行输送,及含铀溶浸液、油水气、煤炭上行提升,气液对管道的腐蚀损伤作用,将引发油气泄露,含铀溶浸液及氦扩散,同时油气管道穿层透水作用损伤巷道稳定性。煤及共伴生资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括致灾因素精准筛选归类与数值化参量表征,多源海量信息智能感知,实时动态多网融合传输技术,连续管智能闭环控制,分支井智能完井动态调控等。

(2)建立大数据云计算多参量深度挖掘与智能预警防控平台。

煤及共伴生资源精准开采过程中应力孔隙压力场变动,引发围岩非线性损伤破坏,孔隙裂隙介质内部结构调整,渗透特性变动等岩体力学属性、结构特征、物性参数变动,同时围岩属性的变动引发应力、孔隙压力及能量集中,诱发渗流灾害(矿井涌水、气窜、污染物扩散转移)、动力灾害(冲击地压、煤与瓦斯突出),产生多源、海量、动态灾害表征数据。大数据云计算多参量深度挖掘与智能预警平台构建,是煤及共伴生资源精准开采的安全保障。

煤及共伴生资源精准开采在该方面涉及的关键科学问题包括甜点区域模态钻遇,分散铀矿的集中开采管控,多源海量动态信息聚合,数据挖掘模型构建与更新,实时动态预警服务知识体系构建,具有推理能力、语义一致性的灾害知识库构建,基于云技术和深度机器学习的灾害风险智能判识及灾害智能预警机制,伴生灾害预知、预判、预解的井上井下一体化综

合云技术的智能数据分析挖掘、预警防控及智能决策平台。

4 主要研究方向

4.1 创新煤及共伴生资源透视化地质保障

创新“空、天、地”一体化多方位综合探测手段,研制磁、核、声、光、电等物理参数综合成像探测仪器,研发多维可视化重构等数据融合处理、多源海量全息地质全息透明显示技术等是实现煤及共伴生资源精准开采的基础支撑。该方向将地理空间服务技术、互联网技术、CT扫描技术、VR/AR技术、物联网技术、5G通讯技术、区域链技术等积极推向煤及共伴生资源透视化勘探开发,构建煤及共伴生资源多源多相多场的多维全息知识数据库,打造具有资源赋存透明化,灾害信息可视化的透明矿山,实现煤、铀、油气共伴生资源基于时空的赋存、勘探开发、扰动多相多场耦合演化动态精准掌控。

该方向主要包括以下研究内容:

(1)构建空天地一体化煤及共伴生资源赋存地质结构精准勘探,1:1精细化地质模型。

(2)研发智能勘探、物联网耦合技术,实时感知、采集、传输原生/扰动多源多相多场参量数据,深度融合遗传算法、智能算法、免疫神经网络、遗传规划、遗传算法等推演理论,实时原生/扰动能量场、损伤场、渗流场极限逼真反演。

(3)集成基于时空的地质构造(断层、褶皱、陷落柱、油气圈层)与活化流体(瓦斯、矿井水、粉尘、CO₂、油气、地浸液、含铀溶浸液、氦及其子体)动态运移,及对应力场、裂隙场、渗流场、温度场、能量场及化学场变动贡献率的感知监控技术,灾害孕育、发生、扩展衍生前兆信息智能感知、实时监测地学传感网系统。

(4)构建透视化原生/扰动煤、铀、油气共伴生资源开采多相多场全息信息库,形成云技术下多源异构、多尺度、大规模历史及实时动态参量的分布式存储管理数据库,建立四维多层次拓扑模型。

4.2 多相多场耦合演化机理与灾害孕育演化规律

多相多场耦合演化机理与灾害孕育演化规律研究可为煤及共伴生资源精准开发提供理论支撑。该方向借力互联网+、物联网、移动互联技术,消除煤及共伴生资源现场监测(历史实践经验数据、实时多源海量数据)、模拟试验(可视化数值仿真模拟数据、多尺度物理相似模拟试验数据)与基础研究试验(微-细-宏观地质岩层样本内部结构、力学属性、物性的力热耦合扰动响应表征参量数据)信息中存在的信息孤岛、系统封闭、异构融合、标准滞后现象,实现

“三位一体”研究下多维多源数据的全息实时动态多向传输、共享、互馈,揭示煤铀协调开采过程中应力场-裂隙场-渗流场-溶质化学反应输运场多相多场耦合演化机理,获取伴生灾害孕育演化规律,创新灾害前兆感知、预警、预解技术,创建智能决策模式。

该方向主要包括以下研究内容:

(1)创建基于大数据、云计算、人工智能、超级计算、互联网+、物联网、区域链等现代信息技术,及智能终端、5G通讯等移动互联通讯技术的现场监控、相似模拟、基础试验动态信息的统一语义、多向传输、实时共享互馈机制,具体创新相似模拟、基础试验设备,优化试验系统,研发透视化实验系统,集成创新“三位一体”煤及共伴生资源研究系统,深入研发的采集、传输、融合技术及配套装备。

(2)发挥“三位一体”研究手段优势,深度融合透视化地质保障信息,反演煤、铀、油气赋存条件,结合煤及共伴生资源开发工艺,开展多方案多情景下煤及共伴生资源协调开发,揭示煤铀协调开采扰动流固介质应力场-裂隙场-渗流场-溶质化学反应输运场多相多场耦合机理,构建多相多场耦合模型,揭示资源破坏性灾害、环境污染型灾害孕育机理及演化规律;揭示煤油气协调开采扰动气固液介质温度场-应力场-化学场-裂隙场-渗流场-溶质输运场多相多场耦合演化机理,构建温度场、应力场、化学场耦合作用下孔隙介质、裂隙介质的裂隙、渗流、溶质输运模型,揭示典型动力灾害、渗流灾害孕育发生机理及扩展演化规律。

(3)基于云技术的大数据深度学习煤、铀、油气不同地质赋存条件耦合不同开采工艺及开采情景的多相多场耦合演化机理与灾害孕育演化规律,提出面向灾变区域预测模型的全息全局学习方法,构建多相多场耦合信息、致灾因素、灾害前兆的多元信息数据库和四维时空地理信息系统,形成具有推理能力、统一语义的灾害信息库。

(4)积极推进现场监测、相似模拟、智能仿真模拟、基础实验数据实时同步汇集、处理、分析,基于VR/AR技术创新集成煤及共伴生资源多相多场耦合机理及灾害演化规律的四维虚拟仿真反演,为灾源前兆信息感知,危险区域的隐患、风险、危险程度的智能评价和定级,及预警和解警信息的实时生成和发布提供保障。

4.3 精准协同开发方式与创新工艺工序

精准协同开发方式与创新工艺工序是保障煤及共伴生资源精准开采的关键。形成考虑煤及共伴生资源赋存环境、多相多场耦合机理与灾害孕育演化规

律、开拓开采工艺的煤及共伴生资源精准协调开发、生产管理、采后修复全生命周期标准指标及技术体系,指导煤、铀、油气共伴生资源协同开发科学规划,深度融合互联网、通讯网技术,满足共伴生资源需求及环境负外部性容量。

该方向主要包括以下研究内容:

(1)煤及共伴生资源精准协调开发、生产管理、采后修复全生命周期标准指标及技术体系,具体研究精准协调开发方式判定标准,煤及共伴生资源生产管理模式确定指标,煤及共伴生资源退役矿井统一修复技术及标准。

(2)创新优化煤及共伴生资源开采工艺,煤、铀、油气开采布局方式,搭建钻完井、巷道开拓布设方式智能决策系统。

(3)构建油气藏产能甜点预测模型,储层油气富集区域动态产能权重分析模型,智能优化井型、井眼轨迹。

(4)研发以开采走廊为代表的共伴生协调开采手段,研究连续管智能钻井理论与闭环控制方法,及分支井智能完井理论与动态调控方法。

4.4 多源海量动态参量智能监测与多网融合传输方法与技术装备

多源海量动态参量智能监测与多网融合传输方法与技术装备为煤及共伴生资源精准开采提供了安全保障。深度融合采矿科技进步并基于数字化、信息化、自动化,分析数字矿山与自动采矿、遥控采矿、矿山物联网、感知矿山、智能采矿、智能矿山之间的联系,加强多样泛在传感器的“矿山数字神经系统”搭建,矿山体征感知与监测系统研发,推进多网融合传输方法与技术装备研制,实现煤及共伴生资源开发全息获取,及复合灾害动态前兆信息感知、危险区域圈定。

该方向主要包括以下研究内容:

(1)煤及共伴生资源采场及采动扰动影响区及灾害前兆信息等信息采集高灵敏度传感技术。

(2)煤及共伴生资源采场及采动扰动区监测数据组网布控关键技术及装备。

(3)人机环参数全面采集、共网传输新方法,非接触供电及多制式数据抗干扰高保真稳定传输技术。

(4)煤及共伴生资源灾害前兆信息采集、解析及协同控制技术装备。

4.5 云计算海量数据深度挖掘与智能管控技术与装备

云计算海量数据深度挖掘与智能管控技术与装备为煤及共伴生资源精准开采提供智能决策和控制

保障。突破多源异构数据融合与知识挖掘难题,创建面向煤矿开采及灾害预警监测数据的共用快速分析模型与算法,助力实现对不同类型灾害的多源、海量、动态信息的实时管控,为创新煤及共伴生资源安全开采及灾害预警模式提供保障。

该方向主要包括以下研究内容:

(1)多源海量动态信息聚合、数据挖掘模型构建与更新。

(2)探索具有推理能力及语义一致性的多场耦合复合灾害知识库构建理论与方法,建立适用于区域性煤、铀、油气开采条件下灾害前兆信息特征标量判定与提取。

(3)机器、管控系统深度学习煤、铀、油气灾害煤及共伴生资源协调开采风险判识理论与方法,融合灾害知识库、管理经验模型,进行灾害自适应训练。

(4)远程可控的无人精准开采技术与装备,采煤机自动调高、巡航及自动切割自主定位、煤岩界面与地质构造自动识别;智能钻完井技术、智能连续管、闭环监控与管理技术;钻完井、掘进事故预防诊断处理的人工智能系统。

4.6 互联网+物联网煤及共伴生资源协调开发灾害预警与智能精准决策平台

互联网+物联网煤及共伴生资源协调开发灾害预警与智能精准决策平台是实现煤及共伴生资源精准开采的刚性手段。该方向基于大数据深度挖掘学习理论,及面向灾变区域预测模型的全息全局学习方法,掌握煤及共伴生资源协调开发复合灾害致灾因素的时空耦合特性及灾变机理与灾害事故的内在规律。构建灾害多元信息数据仓库和四维时空地理信息系统,对煤及共伴生资源灾害可能涉及的危险区域进行快速辨识和动态圈定,利用多元数据融合理论,对圈定危险区域的隐患、风险、危险程度进行智能评价和定级。实现互联网+物联网煤及共伴生资源协调开发灾害预警与智能精准决策平台构建,保障煤及共伴生资源精准协调开发。

该方向主要包括以下研究内容:

(1)煤及共伴生资源典型动力灾害、渗流灾害等多相多场耦合灾害的综合、分项动态辨识技术及有效的现场/远程监控预警系统平台,开拓设计、运营管理、安全管理闭环控制技术及开发方案与应急方案/预案智能决策平台。

(2)开发基于云计算深度机器学习的区域性煤及共伴生资源复合灾害风险智能判识技术,研究满足煤及共伴生资源复合灾害数据多源、海量、动态及实时特点且适用于区域煤及共伴生资源复合灾害实

时现场/远程监控预警的云平台架构技术。

(3)多相多场复合灾害“灾源”自动定位与识别技术、震动波场前兆信息自动识别技术、应力场实时反演及专家诊断系统高效运行与处理系统。

(4)基于闭环式循环往复持续优化技术,博纳复合条件下开发方案、应急预案、决策模型及多专业部门协同工作经验的智能精准决策平台实时生成并发布预警和解警决策。

4.7 基于云技术的煤及共伴生资源智能矿山建设

基于云技术的煤及共伴生资源智能矿山建设是煤及共伴生资源精准协调开发的目标。充分发挥采矿、油气、安全、机电、信息、计算机、互联网、物联网、现代通信等学科优势,借力云计算、大数据、人工智能、超级计算、互联网+、新材料、物联网、区域链、5G通讯等先进科学的互联网、通讯网技术,支撑基于煤及共伴生资源透视化地质保障的精准开发方案选取、井型/巷道优化、钻完井/掘进、灾害监控预警、科学决策的智能化,助力将煤及共伴生资源协调开发变成智能车间,实现未来煤及共伴生资源智能化少人(无人)安全开采。

5 展 望

煤及共伴生资源精准开采以创新具有透视功能的地球物理科学为支撑,“三位一体”科学研究方法为手段,深入研究煤及共伴生资源精准协调开发多相多场耦合机理及灾害孕育演化规律,构建煤及共伴生资源精准开发的多相多场耦合理论模型,开发具有深度感知、执行、管控功能智能技术与装备,实现煤及共伴生资源智能矿山构建,具体以精细地球物理勘探与透明矿山、大数据远程可控的无人精准开采技术与装备、基于云技术的智能矿山建设为技术导向进行具体实施,以能够实现资源开发的效率最大化,实现资源开发的可持续性,实现科学技术功能的最大释放,能够实现人的劳动价值最高取向为目标,促进煤、铀、油气资源高效合理开采,满足国家经济发展对能源资源的持续性需求,为我国经济发展社会建设做出贡献。

随着科技的发展,我国煤及共伴生资源精准开采技术水平将不断提高。由于煤及共伴生资源精准开采研究现阶段仍处于起步阶段,能源资源工作者任重而道远。煤及共伴生资源应聚焦精准协调开采与灾害风险预警,进一步加大煤及共伴生资源科技创新力度,为实现科技强国梦做出贡献。2025年,煤及共伴生资源精准开采取得阶段性突破,2035年,煤及共伴生资源精准开采取得重大进展,2050年,全面实现煤及共伴生资源精准开采,助推中国能源科技强国梦!

参考文献 (References):

- [1] BP. BP 世界能源统计年鉴 [EB/OL]. https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2018-.html, 2018-09-20.
- [2] 袁亮,张通,赵毅鑫,等.煤与共伴生资源精准协调开采——以鄂尔多斯盆地煤与伴生特种稀有金属精准协调开采为例[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):449-459.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHAO Yixin, et al. Precise coordinated mining of coal and associated resources: A case of environmental coordinated mining of coal and associated rare metal in Ordos basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 449-459.
- [3] 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.
- [4] 袁亮.开展基于人工智能的煤炭精准开采研究,为深地开发提供科技支撑[J].科技导报,2017,(14):3.
YUAN Liang. Research on precise coal mining based on artificial intelligence to provide technological support for deep mining[J]. Science & Technology Review, 2017, (14): 3.
- [5] 袁亮,姜耀东,何学秋,等.煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J].煤炭学报,2018,43(2):306-318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [6] 袁亮.面向煤炭精准开采的物联网架构及关键技术[J].工矿自动化,2017,43(10):1-7.
YUAN Liang. Framework and key technologies of Internet of things for precision coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(10): 1-7.
- [7] 辛至秀.捷克地浸采铀的污染问题及其思考[J].世界核地质科学,2005,22(3):183-186.
XIN Zhixiu. Problems and consideration of pollution related to Stráz uranium mine in Czech Republic [J]. World Nuclear Geoscience, 2005, 22(3): 183-186.
- [8] 杨金华,邱茂鑫,郝宏娜,等.智能化——油气工业发展大趋势[J].石油科技论坛,2016,(6):36-42.
YANG Jinhua, QIU Maoxin, HAO Hongna, et al. Intelligence-oil and gas industrial development trend [J]. Oil Forum, 2016(6): 36-42.
- [9] 姚军,黄朝琴,刘文政,等.深层油气藏开发中的关键力学问题[J].中国科学:物理学力学天文学,2018,48(4):5-31.
YAO Jun, HUANG Chaoqin, LIU Wenzheng, et al. Key mechanical problems in the development of deep oil and gas reservoirs [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(4): 5-31.
- [10] 陈勉,葛洪魁,赵金洲,等.页岩油气高效开发的关键基础理论与挑战[J].石油钻探技术,2015,43(5):7-14.
CHEN Mian, GE Hongkui, ZHAO Jinzhou, et al. The key fundamentals for the efficient exploitation of shale oil and gas and its re-

- lated challenges[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 7-14.
- [11] 张文昭. 美国威明顿油田地面下沉与防治[J]. *世界石油工业*, 1999, 9(4): 56-60.
ZHANG Wenzhao. Ground subsidence and prevention in wilmington oilfield, USA[J]. *World Petroleum Industry*, 1999, 9(4): 56-60.
- [12] 官兵, 李士斌, 张立刚, 等. 基于多场耦合效应的水平井压裂应力场分析[J]. *非常规油气*, 2017, 4(3): 103-109.
GUAN Bing, LI Shibin, ZHANG Ligang, et al. Analysis of stress field of horizontal well fracturing based on multi-field coupling effect[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2017, 4(3): 103-109.
- [13] 秦鹏, 孟志强, 李彦恒, 等. 国外多种能源矿产同盆共存富集规律初探[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2005, 22(3): 76-78.
QIN Peng, MENG Zhiqiang, LI Yanheng, et al. Relationship of energy ore deposits in a same basin[J]. *Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 22(3): 76-78.
- [14] 陈天瑜, 欧阳卫华, 夏光耀. 三位一体打造智能环保网——物联网技术在环境管理体系中的应用[J]. *科技创新导报*, 2011(23): 28-29.
CHEN Tianyu, OU YANG Weihua, XIA Guangyao. Trinity to create an intelligent environmental protection network-application of Internet of things technology in environmental management system[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2011(23): 28-29.
- [15] 张昕婧, 王海龙. 新一代信息技术助力制造业转型升级[J]. *祖国*, 2018(5): 38-40.
ZHANG Xinqiang, WANG Hailong. New generation of information technologies are helping the transformation and upgrading of manufacturing industry[J]. *Motherland*, 2018(5): 38-40.
- [16] 林梓焕. 人工智能大数据和云计算的融合发展[J]. *居舍*, 2018(10): 166.
LIN Zhihuan. Fusion development of artificial intelligence big data and cloud computing[J]. *Ju She*, 2018(10): 166.
- [17] 文兴. 基律纳铁矿智能采矿技术考察报告[J]. *采矿技术*, 2014, 14(1): 4-6.
WEN Xing. Investigation report of intelligent mining technology of Kiruna iron ore[J]. *Mining Technology*, 2014, 14(1): 4-6.
- [18] 谭亚辉, 廖文胜, 肖碧泉. 超深砂岩型铀矿地浸开采技术问题的探讨[J]. *铀矿冶*, 2015, 34(3): 135-138.
TAN Yahui, LIAO Wensheng, XIAO Biquan. Discussion on the problem of in-situ leaching mining ultra-deep sandstone-type uranium ore deposit[J]. *Uranium Mining & Metallurgy*, 2015, 34(3): 135-138.
- [19] 付勇, 魏帅超, 金若时, 等. 我国砂岩型铀矿分带特征研究现状及存在问题[J]. *地质学报*, 2016, 90(12): 3519-3544.
FU Yong, WEI Shuaichao, JIN Ruoshi, et al. Current status and existing problems of China's sandstone-type uranium deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3519-3544.
- [20] 曾晟, 谭凯旋, 桑潇, 等. 原地浸出采铀多场多过程耦合动力学数值模拟[J]. *原子能科学技术*, 2011, 45(4): 500-505.
ZENG Sheng, TAN Kaixuan, SANG Xiao, et al. Numerical simulation on multi-field and multi-process coupling dynamics of in-situ leaching of uranium[J]. *Atomic Energy Science & Technology*, 2011, 45(4): 500-505.
- [21] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 14-20.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, et al. Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 14-20.
- [22] 黄炳香, 赵兴龙, 张权. 煤与煤系伴生资源共采的理论与技术框架[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(4): 653-662.
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, ZHANG Quan. Framework of the theory and technology for simultaneous mining of coal and its associated resources[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(4): 653-662.