

特色专题

面向能源转型的煤铀协同开采发展战略研究

张通^{1,2,3}, 宋帅兵², 袁亮^{1,2,3*}, 苏学斌⁴, 张村⁵

摘要 煤铀规模化协同开采是支撑中国能源转型期“煤炭有序退出、核能规模发展”结构性调整的战略举措。系统解析了煤铀协同开采的战略内涵、关键技术体系与发展路径。首先从资源安全、区域转型、资源利用效率3个维度阐释其战略价值,论证其作为能源体系平稳过渡关键路径的必要性。进而构建了以精准探测与协同评价、协同设计与优化、安全与环境扰动控制、智能化赋能为核心的技术体系框架,重点剖析“上煤下铀”“上铀下煤”2类典型煤铀共生结构的差异化开发策略与核心技术挑战。在此基础上,提出“示范探索—规模化推广—深度融合”3阶段发展路径,并从顶层设计、科技创新、政策标准3方面提出保障措施。研究表明,煤铀协同开采是实现能源资源高质量发展、保障国家煤铀资源安全的战略性选择,亟需国家层面统筹规划与系统推进。

关键词 能源转型;煤铀协同开采;发展路径;技术体系;资源安全保障

推动能源结构向清洁、低碳、安全、高效转型,是中国应对全球气候变化、实现碳达峰、碳中和战略目标的系统性革命,亦是保障国家能源安全、迈向高质量发展的必然路径^[1-2]。当前,中国能源体系正面临深刻且复杂的结构性挑战^[3]:一方面,煤炭作为国家能源安全的“压舱石”,其消费量在一次能源中占比虽稳步下降,但在未来相当长时期内仍需要担任电力供应“兜底保障”与电网调峰的关键角色,其自身面临着向“清洁、高效、集约”生产方式转型的问题^[4];另一方

面,核能作为唯一可大规模替代化石能源的稳定、可靠、低碳基荷电源,对于构建新型电力系统、提升非化石能源占比具有不可替代的战略作用^[5]。根据行业预测,到2035年,中国核电在运装机容量将实现大幅增长^[6]。然而,与之形成尖锐矛盾的是,支撑核电规模化发展的“粮食”——天然铀资源,其对外依存度长期维持在高位,供应链地缘政治风险突出,现已成为制约中国核能事业稳健发展的“阿喀琉斯之踵”^[7-11]。

从国际视野来看,煤铀共生资源的协同开发并非中国独有的战略需求,但各国的资源禀赋与开发路径存在显著差异。美国粉河盆地拥有全球最大的煤炭资源储量,其深部亦赋存大量砂岩型铀矿,但由于铀资源对外依存度较低,美国并未将煤铀协同开采纳入国家战略层面,而是采取“优先采煤、铀矿暂不开发”的策略。澳大利亚的情况则截然不同,作为全球第3大铀资源国,其奥林匹克坝铜-铀-金共生矿床采用“以铜为主、铀为副产”的协同开发模式,通过井下开

1. 安徽理工大学安全科学与工程学院, 淮南 232001

2. 安徽理工大学煤炭无人化开采数智技术全国重点实验室, 淮南 232001

3. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 淮南 232001

4. 中国铀业股份有限公司, 北京 100013

5. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083

收稿日期: 2026-02-03; 修回日期: 2026-05-16

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD1700201); 中国工程院重大咨询资助项目(2025-28-18); 国家自然科学基金面上资助项目(42477201)

作者简介: 张通, 教授, 研究方向为共生资源开发, 电子信箱: 1099731996@qq.com; 袁亮(通信作者), 中国工程院院士, 教授, 研究方向为煤炭地下开采, 电子信箱: Yuanl_1960@sina.com

引用格式: 张通, 宋帅兵, 袁亮, 等. 面向能源转型的煤铀协同开采发展战略研究[J]. 科技导报, 2026, 44(12): 114-122; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.02.00012

采与地表堆浸相结合的方式,实现了多金属资源的综合回收。相比之下,中国煤铀共生盆地的特殊性在于:铀资源对外依存度极高,供应链安全压力巨大;煤铀垂向叠置关系复杂,传统“单一开发”模式导致大量铀资源因煤炭开采扰动而永久丧失开采价值;鄂尔多斯、二连、伊犁等大型盆地的铀矿以砂岩型为主,具备采用CO₂+O₂地浸采铀绿色工艺的先天条件。这一独特的资源格局,决定了中国必须走出一条具有中国特色的煤铀协同开采之路。

更为关键的是,中国的资源赋存条件本身为破解这一难题提供了独特的契机。勘察与研究证实,在中

国鄂尔多斯、二连、伊犁等大型中新生代沉积盆地中,煤炭与砂岩型铀矿在垂向层序上紧密共生,形成了“同盆共存、垂向叠置”的宝贵资源格局^[11-13]。然而,传统的“单一开发、各自为战”的矿业开发模式,不仅造成了巨大的资源浪费,如先行的煤炭开采活动会通过排水疏干、岩层移动等方式,彻底破坏上覆或下伏铀矿层的地下水动力系统和原始地质环境,导致数十万吨计的铀资源因技术条件被破坏而永久丧失开采价值,成为“呆矿”,更可能因开采扰动诱发放射性核素迁移等新的环境安全问题(表1)^[12-17]。

表 1 煤铀协同开采已有研究分类及代表性成果

研究方向	代表性工作	主要研究内容
协同勘查理论与技术	韩效忠等 ^[13] 吴兆剑等 ^[12]	系统总结了我国北方中新生代盆地煤铀共生赋存规律
协同开采战略规划	袁亮等 ^[17]	系统规划提出了煤铀协同开采面临的挑战,并提出共生资源协同开采研究内容与发展规划
多场耦合演化机制	张通等 ^[15]	建立了岩层移动—地下水—化学等耦合数值模型,揭示了协同开采过程中的多场演化特征
地下水保护与安全保障	杨鑫等 ^[14]	开展了塔然高勒矿区溶浸液扩散运移规律研究,研发了地浸流场再造与核素迁移控制技术

在此背景下,煤铀协同开采作为一种旨在打破传统矿业开发壁垒、实现“一区双采、资源共享、环境共治”的战略性资源开发新范式,应运而生^[15-17]。它绝非2种资源开采活动的简单叠加,而是通过系统性思维、科学顶层规划与关键技术突破,在时间和空间上优化配置煤炭与铀矿的开采活动,以期达到“1+1>2”的综合效益。近年来,特别是以“CO₂+O₂地浸采铀”为代表的第三代绿色铀矿开采技术的成熟与产业化应用,为协同开采提供了关键的技术支点^[11,18]。该技术通过在地下矿层中进行化学溶浸和液体回收,实现了“无矿渣、零排放、无地下水污染”的绿色开采,使得在不破坏上部煤层结构的前提下先行采铀成为可能。

本文的核心工作与创新性体现在以下3个方面:战略内涵的系统揭示,首次系统阐释煤铀协同开采的战略价值,明确其作为能源转型“稳定器”与“桥梁”的核心定位;技术体系的完整构建,提出“精准探测—协同设计—安全控制—智能赋能”4大模块协同的技术框架;发展路径与政策举措的务实设计,提出“示范探索—规模化推广—深度融合”3阶段发展路径。

综上,本文将煤铀协同开采置于国家能源转型与资源安全保障的战略高度进行系统性审视,旨在为国家的能源资源战略决策、相关产业的协同发展及科技创新方向的布局提供坚实的理论支撑与实践参考。

1 煤铀协同开采的战略内涵

煤铀协同开采是能源资源领域践行总体国家安全观与高质量发展要求的具体体现,是当下能源转型的“稳定器”与“桥梁”,其战略内涵超越了传统资源开发的范畴,深刻体现了系统性、协同性和前瞻性。它并非煤炭与铀矿2种资源开发的简单叠加,而是在能源系统深刻变革的背景下,通过系统性思维对资源、区域与发展模式进行重构,其战略内涵如图1所示,主要体现为以下3个核心维度。

1.1 资源安全保障内涵

能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题,其核心在于供给安全与自主可控^[19]。煤铀协同开采通过“一区双采”模式,在时间和空间上优化

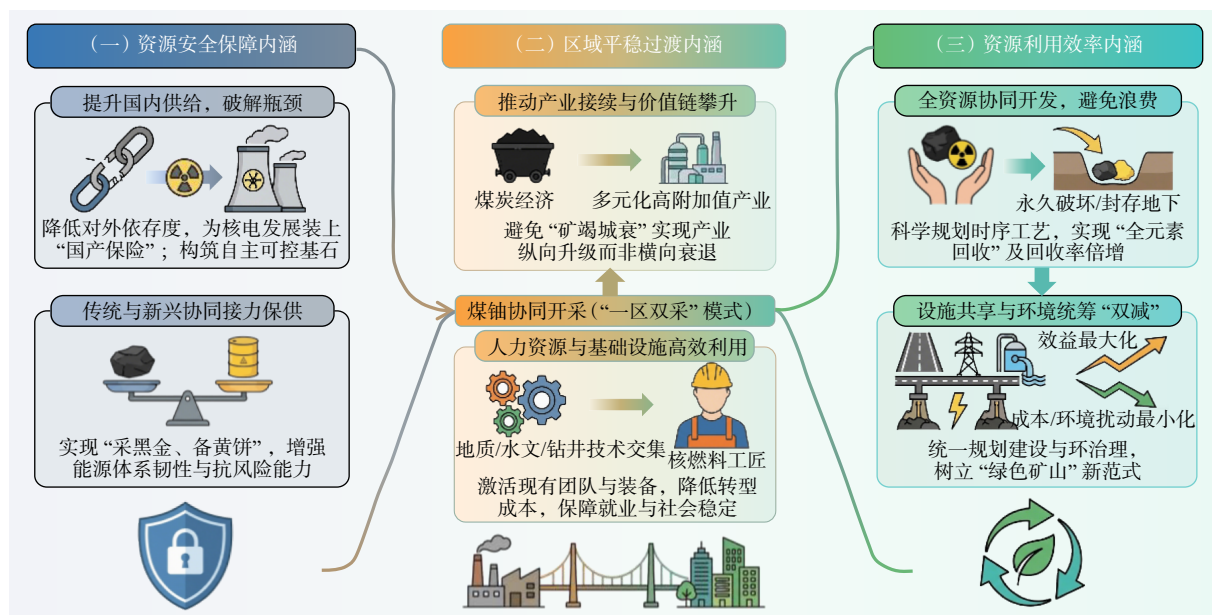


图1 煤铀协同开采战略内涵示意

了国家战略资源的配置与供给,从“开源”和“协同”2个层面,为能源转型期提供了独特的双重安全保障,构筑了“自主可控”的现代能源体系基石。

首先,它直接提升了国内铀资源的供给能力,是破解核电发展资源瓶颈的“关键棋”。中国核电发展规划宏远,但铀资源对外依存度长期超过70%,构成了显著的供应链风险^[10]。协同开采能够盘活鄂尔多斯盆地等大型煤炭基地下方以往未被统计或难以单独开采的铀资源,相当于在“能源粮仓”之下发现了新的“核燃料粮仓”。据预测,仅鄂尔多斯盆地部分区域的煤铀协同开采,就有望提升中国国内铀产能数十个百分点,显著降低对外依存度,为核电的规模化发展装上“国产保险”。

其次,它在能源转型的过渡期内实现了“传统”与“新兴”能源资源的协同接力保供。在未来相当长时期内,煤炭仍将承担能源“压舱石”角色。协同开采并非否定煤炭,而是追求在保障煤炭稳定供应的同时,为国家战略性新兴产业——核能,同步准备其“口粮”。这种“采黑金、备黄饼”的模式,使得同一片矿区能够在不同历史时期、为能源结构的不同组成部分持续作出贡献,实现了从“单一供给”到“综合保障”的升级,极大地增强了国家能源体系的韧性、抗风险能力和自主可控水平。

1.2 区域平稳过渡内涵

能源转型不仅是技术革命,更是深刻的社会经济

重构。对于内蒙古、新疆等长期依赖煤炭经济的资源型地区而言,转型阵痛尤为剧烈。煤铀协同开采为这些地区提供了一条“在发展中转型、在继承中新生”的平滑路径,是推动区域协调发展的有效工具,从而赋能传统能源基地的“绿色重生”与可持续发展。

传统的煤炭城市在资源枯竭或产能压缩后,常陷入“矿竭城衰”的困境。协同开采则将铀矿资源培育为战略性的接替产业,引导区域经济从单一的、价值链低端的“煤炭经济”,转向“煤炭开采+核燃料前端加工”的多元化、高附加值产业结构,推动产业接续与价值链攀升,实现了产业的纵向升级而非横向衰退。这不仅延长了矿区的服务寿命,更将其深度嵌入了国家核能产业链的战略环节,实现了从“燃料供应商”到“核能基础材料保障基地”的角色转变,是资源型地区实现高质量发展的典范。

铀矿的地浸开采、水文地质监测、钻井工程等,与煤炭开采在地质勘探、岩土力学、水害防治等领域存在大量的知识与技能交集。推行协同开采,可最大限度激活和利用矿区现有的专业技术团队、大型工程装备、土地资源和交通网络,避免新兴产业的重复建设和原有资产的闲置沉没,显著降低了区域产业转型的社会经济成本,实现人力资源与基础设施的高效利用。这使得原有的矿业技术工人和工程师能平稳转型为“核燃料工匠”,有效保障了就业、社会稳定与知识传承,为区域的平稳过渡与社会融合奠定了坚实基础。

1.3 资源利用效率内涵

推动资源利用方式的根本性转变,是高质量可持续发展与生态文明建设的核心要求。煤铀协同开采践行“循环经济”与“绿水青山”的国家理念,从源头上颠覆了“资源单打一、挑肥拣瘦”的粗放开发模式,是“节约集约”和“循环经济”理念在矿产资源领域的生动实践。

协同开采通过科学规划开采时序与工艺,从技术上根本性避免了因开发冲突导致的万吨级铀资源被永久破坏、封存于地下的巨大浪费,确保了2种资源均能被安全、高效地采出,实现了资源的“全元素回收”及回收率的倍增。这种对共生资源的“全资源协同开发”模式,将整装矿藏的价值最大化地贡献于国家发展,是对“绿水青山就是金山银山”理念在矿业领域的生动诠释。

此外,它通过设施共享与环境统筹,实现了开发成本与环境成本的“双减”。协同开采可以从矿区总体规划层面,统一规划建设道路、电网、供水、通信等基础设施,共享办公、生活及环保设施。在环境治理

上,可以对矿区的水文地质进行一体化保护、监测与修复,对固体废弃物与矿井水进行集中处理和综合利用。这种系统性的开发与管理,相较于2个独立、割裂的开发项目,能够显著降低单位资源的开发成本与环境扰动,以最小的环境代价获取最大的资源效益,为建设“绿色矿山”“和谐矿区”,推动矿业可持续发展建立了全新的范式。

2 煤铀协同开采的关键技术体系构建

煤铀协同开采的实现,绝非2种采矿技术的简单拼凑,而是一项需要攻克系列技术瓶颈的复杂系统工程。其成功依赖于一套贯穿勘探、设计、开采、闭坑全生命周期,以精准化、协同化、绿色化、智能化为典型特征,且能够克服传统单一开采模式技术瓶颈的综合性技术体系。该体系旨在解决煤铀资源共生条件下的精准勘探、协同设计、安全控制与高效生产等核心问题,其技术体系总体框架如图2所示,主要包含以下4个相互关联、层层递进的关键技术群。

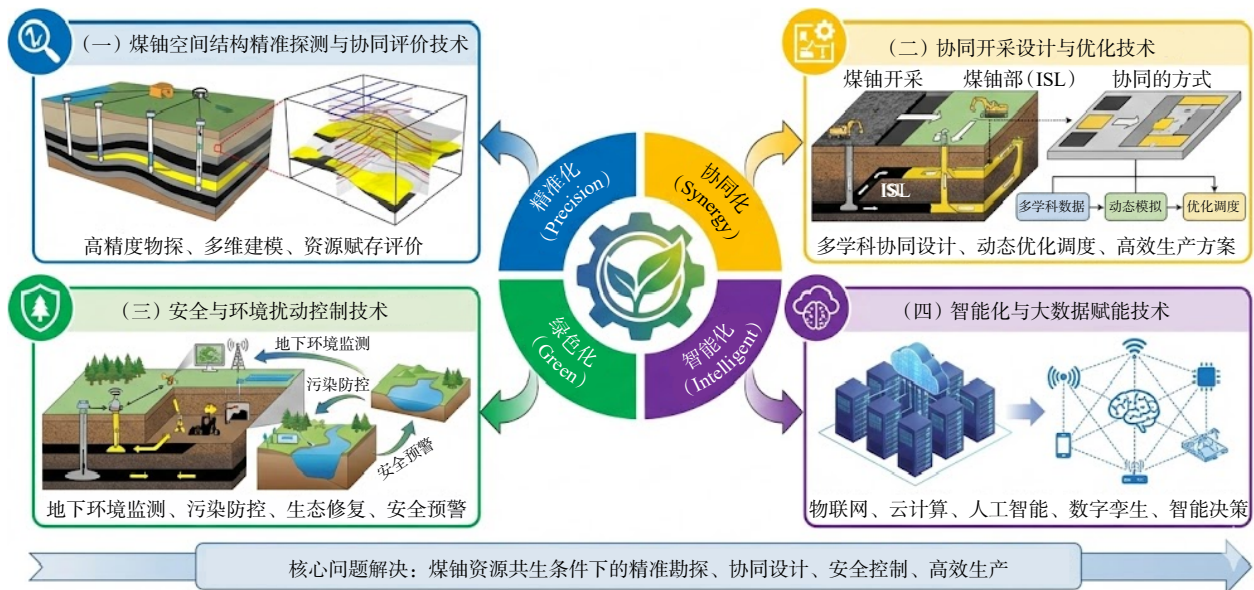


图2 煤铀协同开采关键技术体系框架

2.1 煤铀空间结构精准探测与协同评价技术

精准探明煤铀2种资源的空间赋存关系及其相互作用机制,是实现一切协同决策的地质前提与“数字底盘”,该技术群旨在构建“煤-铀一体化”的地质保障系统。中国煤铀共生盆地主要呈现2种典型的空

“上煤下铀”结构,也即煤层位于铀矿层之上。此结构下,开采活动的相互制约性极强。若先采煤,将引发覆岩垮落,形成贯通至铀矿含水层的“导水裂隙带”,这不仅使后续地浸采铀所需的封闭、稳定的水文地质系统遭到毁灭性破坏,导致溶浸液无法控制、回收率骤降,更可能成为放射性核素向上迁移的快速通

道,环境风险极高。因此,必须严格遵循“先铀后煤”的开采时序。勘探阶段需运用三维地震勘探与高频电磁法结合,精细刻画煤层底板与铀矿层顶板的间距,并精确探测可能沟通上下含水层的断裂构造。

“上铀下煤”结构,也即铀矿层位于煤层之上。此结构下,开采制约的关键在于下部煤层大规模、长壁开采引起的“上三带”(冒落带、裂隙带、弯曲下沉带)发育高度是否会直接破坏上部铀矿层,或改变其含水层的补径排条件。技术核心在于精准预测导水裂隙带的最大高度,并确保其与铀矿层底板之间有足够厚度的、完整的隔水关键层。勘探评价需要重点关注隔水关键层的岩性、厚度与力学性质。

针对上述结构,需要综合利用协同勘探与三维地质建模技术和资源协同评价与开发条件评估技术,集成地质、地球物理、水文地质与地球化学数据,构建“煤-铀-水-岩”一体化的非均质三维动态地质模型,直观揭示煤铀资源的共生关系与相互影响机制,并在此基础上对煤铀资源的协同开发价值与技术可行性进行综合评价,量化评估2种资源开采的相互影响度,为选择最优的开采时序与工艺参数提供科学依据。

2.2 协同开采设计与优化技术

将地质认知转化为可执行工程方案的核心决策环节目标是在时空四维尺度上,安全、高效地配置煤炭与铀矿的开采活动。

1) 开采时序优化与动态模拟技术:基于煤铀空间结构特征,建立科学的开采时序决策模型,核心原则是优先保障铀矿地浸开采所必需的、未受扰动的原始水文地质环境。对于“上煤下铀”结构,必须优先采铀;对于“上铀下煤”结构,也强烈推荐优先采铀。此外,还需要利用数值模拟技术,动态模拟不同开采时序下,岩层移动、地下水渗流场演变及应力重分布的全过程,从而优选出最佳的时序方案,确保2种开采活动在时间和空间上安全“错车”。

2) 井巷工程协同布置与多功能钻孔技术:针对需要同步或交替进行的开采活动,需要对煤矿的巷道、工作面布局与铀矿的地浸井场(注液井、抽液井)进行一体化、模块化设计。例如,创新性地设计“一孔多用”钻孔,同一个钻孔可在地下不同层位实现不同功能:在铀矿层段作为地浸液的注采通道,在煤层顶板

段则可作为离层注浆充填的通道,实现工程设施的共享与功能集成。此外,煤矿巷道的开拓方向应主动规避铀矿地浸采区的核心区域和地下水主要流向,选择从其侧翼或下游方向布置,而铀矿地浸井网的布置也需要考虑未来煤矿开采的扰动范围,实现空间上的主动避让与协同。

2.3 安全与环境扰动控制技术

该技术群是确保协同开采环境可接受、安全可控的生命线,重点解决地下水保护与辐射防护2大难题。

多屏障地下水保护与流场精准控制技术作为决定协同开采成败的关键技术瓶颈,其核心技术主要包括:人工水力帷幕(抗渗帷幕)技术和关键层保护与离层注浆充填技术。前者在铀矿地浸采区的外围边界,通过高压旋喷、垂直铺塑或深层搅拌注浆等方式,建造一道或数道地下连续、低渗透性的墙体,形成一个“地下水屏障系统(或称‘吊篮’)",将地浸采铀的溶浸液牢牢“封锁”在目标回收区域内,有效防止其流向周围,特别是向下部潜在采动裂隙区扩散。后者则在下方煤层开采时,通过精准识别并对上覆铀矿含水层起决定性支撑作用的主关键层,在其下部的离层发育区,注入高性能充填材料,形成注浆充填体以有效支撑关键层,将导水裂隙带的发育高度抑制在安全范围内,从而在铀矿含水层与煤矿采空区之间构筑一道可靠的“人工隔水盾牌”。以鄂尔多斯盆地纳岭沟-塔然高勒矿区为例,针对“上铀下煤”的共生结构,研究提出了“先铀后煤、协同开采”的开发原则,并设计了高压旋喷帷幕和离层注浆充填等关键技术的工程试验。现场示踪试验表明,帷幕对溶浸液的侧向阻隔效果显著,离层注浆充填也有效抑制了导水裂隙带的发育高度,有效保障了下部煤层后续开采的安全条件。

此外,利用全过程辐射防护与核素迁移原位阻断技术,建立从地浸采铀到煤矿开采全过程的“天-地-井”一体化放射性监测与智能防控体系。在地浸阶段,研发核素地球化学行为模拟与精准阻断技术,实时反演地下水中铀、镭、氡等核素的迁移路径,一旦监测到浓度异常或存在越界风险,可立即启动应急预案,智能调控注采井的压力和流量,或注入特定的化学钝化剂,改变核素的赋存状态,从过程上实现原位吸附、沉淀与固定,阻断其迁移通路。在煤矿开采阶段,在巷道中布置放射性核素与氡气监测传感器,实

现超前预警。

在铀矿地浸开采结束后,采用采区地下水原位再生与废物最小化技术,对采区地下水进行主动的、强化的原位再生,而并非被动等待自然恢复。研发应用地下水微生物原位修复与植物修复耦合技术,并采用多级反渗透与高效蒸发结晶等先进集成工艺,对地浸产生的少量废水进行深度处理和资源化回用,最终实现废水“近零排放”、固废资源化与采区生态的快速、主动恢复。

2.4 智能化与大数据赋能技术

现代信息技术的深度融合是提升协同开采效率、可靠性与透明度的倍增器,是实现矿业现代化的核心驱动力。

1) “数字建井”与智能精准钻进技术:基于前述高精度三维地质模型和流场表征技术,在铀矿地浸钻井施工前进行全数字化的井场布局、井身结构与钻井轨迹模拟优化(数字建井),使地浸井网的建设精度由传统的米级提升至分米级,甚至厘米级。同时,结合随钻测量与高压水力喷射定向钻进等智能精准工程技术,可实现溶浸剂在地下流场的精确导向与控制,显著提高资源回收率与开采效率。

2) 地浸采铀智能化分析控制系统:作为实现“千里之外、一键采铀、一屏掌控”现代化铀矿山的核心,

该系统通过布设于地浸井场的各类传感器,实时采集注液压力、流量、铀浓度等关键参数,并通过云端智能分析系统自动调节注采策略,实现流场优化与高效回收,使铀矿山生产进入自动化、智能化的新格局。

3) 协同开采数字孪生平台:基于一体化三维地质模型及物联网实时数据,构建一个考虑煤铀协同开采“勘探-设计-生产-闭坑-恢复”全生命周期的数字孪生系统。通过高效融合物联网实时数据、地质模型与多场耦合(渗流-应力-化学)数值模拟,该平台能够对不同的协同开采方案进行超前模拟推演与迭代优化,对安全与环境风险进行预测预警,并为生产开采过程中的异常工况(如压力异常、浓度波动)提供智能诊断与决策支持,最终实现整个协同开采系统从“黑箱”到“透视箱”的转变,达到“透明矿山”与“自适应优化”的高阶形态。

3 煤铀协同开采的发展路径与政策建议

将煤铀协同开采的战略愿景与技术蓝图转化为现实生产力,需要一个立足国情、尊重科学、循序渐进的推进策略。基于“问题导向、系统布局、示范引领、政策护航”的原则,本文提出分3阶段推进的产业化路径与相应的保障措施,具体如图3所示。

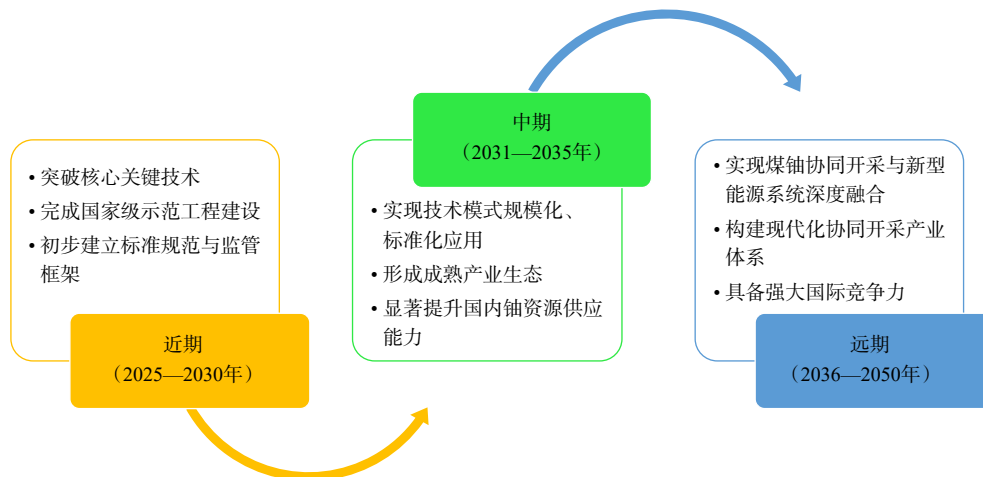


图3 煤铀协同开采发展路径规划

3.1 发展路径规划

1) 近期(2025—2030年):示范突破与体系构建阶段。此阶段的战略目标是突破关键核心技术,完成国家级示范工程建设,验证技术经济可行性与环境安

全性,初步建立标准规范与监管框架。重点任务包括:在国家科技计划中设立重大专项,集中力量攻克多屏障地下水保护、协同设计优化软件平台、核素原位阻断等核心技术;优先在鄂尔多斯盆地、伊犁盆

地、吐哈盆地和柴达木盆地等地质条件清楚、协同需求迫切的区域,选址建设 1~2 个国家级煤铀协同开采综合示范工程,形成可复制、可推广的技术模式、工程管理模式和环境评估模式;同时,启动矿产资源法、核安全法等相关法律法规的修订研究,明确协同开采的法律地位、监管职责划分、矿业权设置与重叠处置规则。由自然资源部牵头,联合国家原子能机构、国家能源局等部门,制定并试行《煤铀协同开采地质勘查规范》《煤铀协同开采安全技术指南》等核心标准规范。

2) 中期(2031—2035 年):规模化推广与产业培育阶段。此阶段的战略目标是在主要共生盆地实现技术模式的规模化、标准化应用,形成成熟的产业生态,国内铀资源供应能力显著提升。重点任务在于将经示范工程验证的成功模式,向二连盆地、伊犁盆地等其他主要煤铀共生盆地区进行适应性推广和规模化应用,目标是使煤铀协同开采成为该类资源区的首选和标配开发模式,力争在此阶段末,使协同开采贡献的铀年产量占国内总产量的显著份额,成为国内铀供应的支柱之一;同时,鼓励组建形成专业化的煤铀协同开采工程技术服务公司与装备制造产业,大力发展绿色金融、转型金融,对符合标准的协同开采项目提供优惠信贷、绿色债券等金融支持,建立“国家-省-企”联动的跨部门协同监管信息平台,实现数据共享与高效审批,提升监管效能与透明度。

3) 远期(2036—2050 年):深度融合与智慧化阶段。此阶段的战略目标是实现煤铀协同开采与新型能源系统的深度融合,建成智慧、高效、“近零排放”的现代化协同开采产业体系,并具备强大的国际竞争力。重点任务包括:与新型电力系统及二氧化碳捕集、利用与封存(carbon capture utilization and storage, CCUS)技术深度融合,在协同开采矿区,大规模配套建设风电、光伏、储能等分布式能源设施,实现矿区的清洁能源自给与“绿电”制氢,并探索“绿氢”“绿氧”用于地浸采铀的低碳、高效新工艺;在条件适宜的煤矿,研究将 CCUS 技术与协同开采相结合,将捕集的 CO₂ 用于增强地浸采铀效率,构建“煤-铀-CCUS-可再生能源”联动的近零碳矿区综合系统;广泛应用数字孪生、人工智能决策等先进技术,实现所有协同开采矿山的全要素智能化运行与管理,使其成为所有

矿山的标准配置;将中国成功的煤铀协同开采技术、标准、装备与商业模式,系统性地推向国际市场,为全球类似资源条件的国家提供“中国方案”,提升中国在全球矿业治理中的话语权与影响力。

3.2 政策与机制保障建议

为确保上述路径顺利实施,亟需国家层面加强顶层设计,破除制度壁垒,提供强有力的政策与机制保障。

(1) 构建统筹协调机制:由国家有关部委建立煤铀协同开发联席会议制度,明确各部门职责分工。在鄂尔多斯盆地等典型矿区,鼓励煤炭与核能企业签订协同开发协议,明确矿业权边界与开采时序。参照自然资源部现有联合审批机制,对协同开采项目推行“一窗受理、并联审批”。(2) 完善法规与审批规则:依据 2025 年施行的新《矿产资源法》第九条(综合勘查、合理开采和综合利用)及《原子能法》第二十二条(合理确定铀矿与共生矿产开发秩序),研究制定《煤铀共生资源矿业权协同登记管理办法》,明确纵向叠置空间矿业权的设置方式、优先开发时序及权益协调原则。(3) 加大科技创新与财税支持力度:持续投入国家科研经费,长期稳定支持协同开采的基础理论研究 with 前沿技术装备研发。对协同开采项目给予企业所得税“三免三减半”、资源税减征、进口关键装备关税减免等强有力的税收激励,并将其整体纳入绿色产业指导目录,享受绿色信贷、绿色债券等全方位金融政策支持。(4) 建立协同监管与标准体系:构建由国家有关部委共同参与的“一部主导、多部门联动、信息共享、联合执法”的协同监管机制。加速建立覆盖“勘探-可研-设计-建设-生产-闭坑-后处理”全生命周期的技术标准体系、安全环保规范、环境影响评价导则和项目后评估制度,确保产业发展规范有序。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本文在国家能源转型与资源安全保障的战略框架下,对煤铀协同开采的战略内涵、关键技术体系与发展路径进行了系统性研究,得出以下核心结论。

1) 煤铀协同开采是具有重大国家战略价值的矿业开发范式创新。它精准地回应了能源转型期煤铀

资源规模化增储上产问题,通过“一区双采、时序协同”的模式,在保障煤炭短期稳定供应的同时,为核能这一清洁基荷能源的长远发展夯实了铀资源基础,兼具能源安全“稳定器”、区域转型“桥梁”和资源效率“提升器”的三重功能。对于提升国家能源自主可控能力、促进资源型区域绿色转型以及践行资源节约集约理念具有不可替代的战略价值,是破解当前能源转型结构性矛盾的战略性举措。

2) 煤铀协同开采的工程实现依赖于一套完整且复杂的技术体系。该体系以“精准勘探(认知)、协同设计(规划)、安全控制(保障)、智能赋能(提升)”为逻辑主线,其技术核心与难点在于针对“上煤下铀”和“上铀下煤”等典型空间结构,通过时序优化、多屏障地下水与关键层保护、全过程核素防控等关键技术,解决煤铀资源共生条件下的安全与环保瓶颈问题,从而实现从“单一开发”到“系统协同”的范式变革。

3) 煤铀协同开采的推进需要遵循科学的分阶段路径与强有力的政策保障。本文提出的“示范探索(验证)、规模化推广(产业培育)、深度融合(引领)”3阶段路径,以及与之配套的顶层设计、科技创新、财税金融、标准监管四位一体的保障机制,为该战略从理论构想迈向大规模产业化提供了清晰、务实、可行的行动蓝图,有助于统筹技术研发、工程实践与政策制定,确保其行稳致远。

4.2 未来展望

展望未来,煤铀协同开采的发展将与国家现代化进程同频共振,呈现3大趋势。

1) 技术融合化。未来,煤铀协同开采系统将与CCUS技术及矿区风光发电等可再生能源深度融合,共同构建起“采铀、采煤、固碳、发电”一体化的综合能源系统。这不仅将极大提升资源综合利用效率,而且能推动传统矿区从“能源原料基地”向“近零碳能源化工综合体”演进,成为国家能源系统深度脱碳的重要底层支撑。

2) 矿山智能化。基于数字孪生、大数据与人工智能的“智慧矿山3.0”将成为标配,智能化与透明化将重塑矿业形态,未来的协同开采将实现全生命周期的“可视化、可控化、可优化”管理,矿山将从劳动密集型生产场所,演进为高度自动化的智慧工厂,最终实现安全、效率与环保绩效的跨越式提升。

3) 模式全球化。中国在煤铀协同开采领域先行先试所积累的技术、标准、管理和政策经验,将形成一套完整的中国资源协同开发模式,为全球众多面临类似铀煤共生资源与发展挑战的国家提供全新的资源开发范式与技术解决方案。推动这一“中国方案”的国际化,不仅有助于全球能源转型,而且将显著提升中国在全球能源资源治理中的话语权与影响力。

综上所述,推动煤铀协同开采,绝非权宜之计,而是立足国情、洞察趋势、面向未来的战略抉择。需要以系统思维打破能源矿种与行业管理的壁垒,通过科技创新与制度创新的双轮驱动,最终为实现高水平的能源安全与高质量的绿色低碳转型贡献不可或缺的关键力量。

参考文献(References)

- [1] 孙福全,王超,许晔. 依靠科技创新推动能源结构转型研究[J]. 科学发展, 2022(12): 80-87.
- [2] 谢克昌. 新型能源体系发展思考与建议[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 1-8.
- [3] 景春梅,何七香. 新型能源体系的内涵、挑战及建设重点[J]. 全球化, 2024(2): 52-59,135.
- [4] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
- [5] 王鑫,吴继承,朴磊. “双碳”目标下核能发展形势思考[J]. 核科学与工程, 2022, 42(2): 241-245.
- [6] 刘博杰,陈思宇,钟诚,等. 将核电纳入我国低碳转型市场化政策工具体系研究: II. 经验与路径[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2025, 61(2): 198-206.
- [7] 周荣洲,梅军,曹涛涛,等. 我国煤系铀矿形成条件及成矿模式研究[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(11): 65-70,151.
- [8] 任忠宝,陈甲斌,邢万里. 基于复杂网络视角的全球铀矿产品贸易特征分析[J]. 中国矿业, 2020, 29(9): 9-15.
- [9] 周思聪. 核能发展新形势下我国铀资源保障有关问题的探讨[J]. 中国核工业, 2024(7): 42-45.
- [10] 杨月平,王萍. 核电事业发展中我国铀资源对外依存度探讨[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2024, 25(2): 1-6.
- [11] 苏学斌,田野,任宇,等. 先进地浸采铀技术与“国铀一号”工程[J]. 核科学与工程, 2025, 45(5): 819-831.
- [12] 吴兆剑,韩效忠,林中湘,等. 中国北方主要中新生代盆地构造沉积气候演化及其成煤、铀意义[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 710-724.
- [13] 韩效忠,林中湘,吴兆剑,等. 中—新生代盆地煤铀协同勘查及对策建议[J]. 地质论评, 2022, 68(3): 945-954.

- [14] 杨鑫. 塔然高勒矿区煤铀协调开采溶浸液扩散运移规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [15] 张通. 鄂尔多斯盆地煤铀协调开采扰动岩层多场耦合特征研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [16] 曾晟, 叶文浩, 徐华清. 煤型铀矿床煤铀协同开采理论模型[J]. 金属矿山, 2020(5): 117–123.
- [17] 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.
- [18] 苏学斌, 原渊, 贾秀敏, 等. 我国铀水冶技术现状与展望[J]. 核化学与放射化学, 2025, 47(4): 313–326.
- [19] 王国法, 刘合, 王丹丹, 等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 23–37.

Strategy for co-mining of coal and uranium oriented towards energy transition

ZHANG Tong^{1,2,3}, SONG Shuaibing², YUAN Liang^{1,2,3*}, SU Xuebin⁴, ZHANG Cun⁵

1. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
2. State Key Laboratory of Digital Intelligent Technology for Unmanned Coal Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
3. National Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Huainan 232001, China
4. China National Uranium Corporation Limited, Beijing 100013, China
5. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract Coal–uranium co-mining is a strategic measure to resolve the structural contradiction between "orderly coal phase-down and large-scale nuclear energy development" during China's energy transition. This paper systematically analyzes the strategic connotation, key technology system, and development path of coal–uranium co-mining. The study first elucidates the strategic value of coal–uranium co-mining from three dimensions—resource security, regional transformation, and resource utilization efficiency—demonstrating its necessity as a key pathway for a smooth transition of the energy system. Subsequently, a framework of key technology systems is constructed, centered on four core modules: precise exploration and collaborative evaluation, collaborative design and optimization, safety and environmental disturbance control, and intelligent empowerment. The paper focuses on the differentiated development strategies and core technical challenges for two typical symbiotic structures: "coal-over-uranium" and "uranium-over-coal". On this basis, a three-phase development path is proposed: "demonstration and exploration–large-scale promotion–deep integration". Corresponding safeguard measures are put forward from three aspects: top-level design, technological innovation, and policies and standards. The research indicates that coal–uranium co-mining is a strategic choice for achieving high-quality development of energy resources and ensuring national uranium resource security, requiring national-level overall planning and systematic promotion.

Keywords energy transition; coal–uranium co-mining; development path; technology system; resource security assurance ●



(责任编辑 王微)