

# 煤与共伴生战略性金属矿产协调开采理论与技术构想

黄炳香<sup>1</sup>,赵兴龙<sup>1</sup>,余 斌<sup>2</sup>,贺桂成<sup>3</sup>,岳中文<sup>4</sup>,杨成祥<sup>5</sup>,王长申<sup>6</sup>,孟庆彬<sup>7</sup>,杨玉贵<sup>7</sup>,  
刘江峰<sup>7</sup>,冯秀娟<sup>1</sup>,陈大勇<sup>1</sup>,邢岳堃<sup>1</sup>,朱卫兵<sup>1</sup>,段晓恒<sup>8</sup>,鞠金峰<sup>9</sup>

(1.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116;2.矿冶科技集团有限公司 矿山工程研究设计所,北京 100160;3.南  
华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;4.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;5.东北大学 深部金属矿山  
安全开采教育部重点实验室,辽宁 沈阳 110819;6.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;7.中国矿业大学 深部岩土力学与地  
下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116;8.中核第四研究设计工程有限公司 铀矿冶研究设计所,河北 石家庄 050021;9.中国矿业大学  
联网研究中心,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**煤与煤系共伴生矿产协调开采是国家重大战略需求。我国煤系共伴生有铝、铀、铁、镓等22种战略性金属矿产,种类多、储量丰富、与煤层叠置,赋存状态与开采方法差异大,各矿产开采的岩层活动、流体迁移等影响彼此正常开采。传统煤矿仅开采煤炭,对煤系共伴生矿产考虑较少或没有考虑,导致资源浪费;近些年国内开始出现煤与共伴生矿产开采的矛盾,煤与共伴生矿产协调开采迫在眉睫。面向煤系全部共伴生战略性金属矿产,聚焦典型代表性的煤系铝土矿和铀矿,保障研究成果的通用性。煤与共伴生矿产协调开采亟需解决的核心共性重大科学问题是:协调开采的固液气应力场、渗流场、化学场、微生物场、采动裂隙场耦合机制及岩层活动叠加影响规律。亟需攻克的关键技术包括:煤与共伴生矿产协调、协同及共采的分区错时协调开采技术、减振高效爆破开挖技术、水位主动调控技术、污染物的微生物原位还原-矿化治理技术。针对协调开采的重大科学问题和关键技术,研究揭示协调开采多相多场耦合机制与岩层活动叠加影响规律,提出协调开采成套方法,研发协调开采关键技术与装备,构建全资源、全生命周期协调开采规划理论,制定协调开采技术标准,形成通用性的协调开采理论与技术体系,保障各矿产开采活动不影响彼此正常开采。实现煤与共伴生矿产可持续绿色协调性开采,释放矿产储量,保障资源集约开发,经济社会效益显著。  
**关键词:**协调开采;战略性金属;煤系;共伴生矿产;多相多场耦合;岩层活动叠加;全生命周期采矿  
**中图分类号:**P618.11;TD82 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)07-2516-18

## Research framework of theory and technology for coordinated mining of coal and its co-existed and associated strategic metal minerals

HUANG Bingxiang<sup>1</sup>, ZHAO Xinglong<sup>1</sup>, YU Bin<sup>2</sup>, HE Guicheng<sup>3</sup>, YUE Zhongwen<sup>4</sup>, YANG Chengxiang<sup>5</sup>, WANG Changshen<sup>6</sup>,  
MENG Qingbin<sup>7</sup>, YANG Yugui<sup>7</sup>, LIU Jiangfeng<sup>7</sup>, FENG Xiujuan<sup>1</sup>, CHEN Dayang<sup>1</sup>, XING Yuekun<sup>1</sup>,  
ZHU Weibing<sup>1</sup>, DUAN Xiaoheng<sup>8</sup>, JU Jinfeng<sup>9</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Mine Engineering and Research Institute, BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China; 3. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 5.Key Laboratory of Education Ministry on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 6.School of Resources

收稿日期:2022-04-07 修回日期:2022-06-26 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0453

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902100)

作者简介:黄炳香(1978—),男,湖北通城人,教授,博士生导师,博士。E-mail:huangbingxiang@cumt.edu.cn

引用格式:黄炳香,赵兴龙,余斌,等.煤与共伴生战略性金属矿产协调开采理论与技术构想[J].煤炭学报,2022,47(7):2516-2533.

HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, YU Bin, et al. Research framework of theory and technology for coordinated mining of coal and its co-existed and associated strategic metal minerals[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2516-2533.



移动阅读

and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 7. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 8. Research and Design Institute of Uranium Mining and Metallurgy, The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang 050021, China; 9. CUMT-IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The coordinated mining of coal and its co-existed and associated minerals is a major national strategy. China's coal measures are associated with 22 kinds of strategic metal minerals such as aluminum, uranium, iron, and gallium. They have many kinds and large resources, overlap with coal seams, and have great differences in occurrences and mining methods. The rock stratum activities and fluid migration of each mineral affect each other's normal mining operations. Traditional coal mines only focus on coal mining, with little or no consideration on the extraction of the co-existed and associated minerals of coal measures, resulting in the waste of mineral resources. In recent years, the contradiction between coal and its co-existed and associated mineral mining has begun to draw attention in China, and the coordinated mining of coal and its co-existed and associated minerals is imminent. Aiming at all the co-existed and associated strategic metal minerals of coal measures, this study focuses on the typical and representative coal measures with bauxite and uranium to ensure the versatility of research results. The core common scientific issues that need to be solved urgently in the coordinated mining of coal and its co-existed and associated minerals are the coupling mechanism of three-phase including solid-liquid-gas and five-field including stress field, seepage field, chemical field, microbial field, and mining fracture field, and the superimposed influence law of rock formation activities. The key technologies that need to be overcome urgently in the coordinated mining of coal and its co-existed and associated minerals include the zoning and staggered mining technology of coordinated, collaborative and co-mining, the high-efficiency blasting and excavation technology with vibration reduction, the water level active control technology, and the in-situ reduction and mineralization treatment technology with microbial for pollutants. Aiming at the key scientific issues and key technologies of coordinated mining, the coupling mechanism of multi-phase and multi-field, and the superimposed influence law of rock formation activities in coordinated mining of coal and its co-existed and associated resources will be analyzed. A complete set of coordinated mining methods will be proposed. The key technologies and equipment for coordinated mining will be developed. Through the construction of all resources and whole life cycle coordinated mine planning theory of coal and its co-existed and associated minerals, the formulation of the coordinate mining technical standards, and the formation of a universal coordinated mining theory and technological system, it can ensure that the mining activities of each resource do not affect the normal mining operation of each other. This study will realize the sustainable and green coordinated mining of coal and its co-existed and associated minerals, release mineral resources, guarantee an intensive development of resources, and achieve some economic and social benefits.

**Key words:** coordinated mining; strategic metal minerals; coal measures; co-existed and associated minerals; multiphase and multifield coupling; superposition of rock formation activities; full life cycle mining planning

共生矿产是指同一矿床或矿区内,存在 2 种或 2 种以上有用组分(矿石、矿物、元素,下同),分别达到工业品位,或虽未达到工业品位,但已达到边界品位以上,经论证后可以制定综合工业指标的一组矿产。共生矿产分为同体共生矿产和异体共生矿产。伴生矿产是指在主矿产矿体中赋存的未达到工业品位但已达到综合评价参考指标,或虽未达到综合评价参考指标,但可在加工选冶过程中单独出产品或可在主矿产的精矿及某一产品中富集且达到计价标准,通过开采主矿产可综合回收利用的其他有用组分矿产<sup>[1]</sup>。

资源安全是习近平总书记“总体国家安全观”国

家战略的具体要求。我国煤系已探明共伴生战略性金属矿产 22 种,占 25 种战略性金属矿产的 88%<sup>[2-6]</sup>,种类多、储量丰富(图 1)<sup>[7-12]</sup>、且部分矿产价值远高于煤本身<sup>[13-18]</sup>。

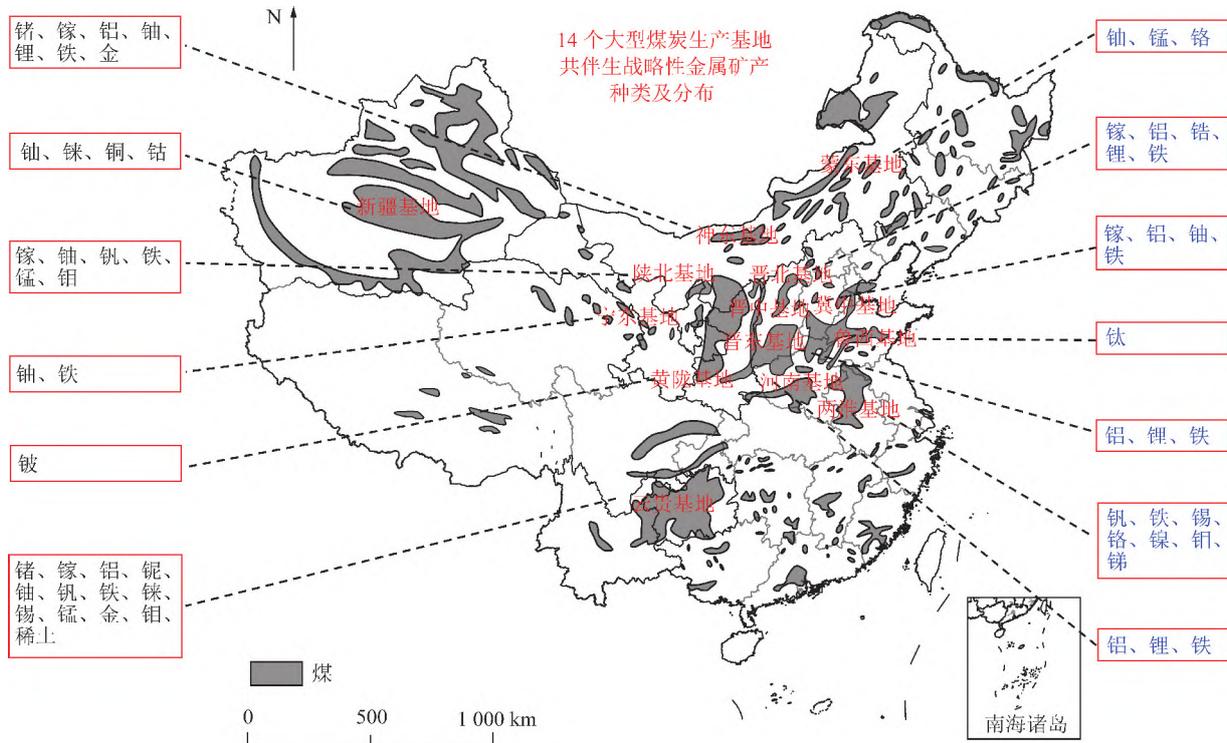
煤-铝和煤-铀是典型的煤系共伴生战略性金属矿产(表 1),煤、铝、铀分别采用长壁、房柱和钻井等典型开采方法,其典型矿区分别位于鄂尔多斯盆地和伊犁盆地。铝土矿主要为沉积型,在煤系自上而下呈现“煤-铝-铁”赋存结构。2019 年我国煤系共伴生铝土矿累计查明资源储量约 29.4 亿 t,占全国铝土矿总储量的 50%以上<sup>[2-4]</sup>,主要集中分布在山西、河南、

贵州。鄂尔多斯盆地吕梁地区的铝土矿 70%左右为煤铝共生资源(图 2),是我国典型的煤-铝-铁-镓共生矿区<sup>[2-4]</sup>;铝土矿中含有铁、镓等战略性金属,随铝土矿一起采出。铀矿是关乎国防安全和国家能源安全的稀有战略资源。新疆伊犁盆地铀矿区为我国典型的煤-铀共生矿区,发现了中国第 1 个万吨级可地浸砂岩型铀矿床,铀矿层上下均赋存有煤层(图 3),且煤中共伴生铀。

煤系共生矿产与煤层叠置,赋存状态与开采方法差异大,各矿产开采的岩层活动、流体迁移等影响彼此正常开采(图 4)。目前,传统煤矿仅开采煤炭,

对煤系共伴生的其他矿产考虑较少或没有考虑,导致资源浪费;另一方面,近些年国内开始出现煤与煤系共生矿产开采的矛盾,如新疆伊犁盆地煤矿与铀矿开采的矛盾,山西吕梁煤矿与铝土矿开采的矛盾,协调开采迫在眉睫。

针对煤系同体共生矿产的开采,如煤中锆、稀土、铈等,同体共生矿产随主矿产一起采出,主矿产与同体共生矿产基本不涉及协调开采的问题,只需考虑后续的矿物分离。而煤与异体共生矿产则需考虑协调开采的问题,因此,本文重点研究煤与异体共生矿产协调开采的理论与技术。



(a) 14 个大型煤炭生产基地共生战略性金属矿产种类及分布

矿产	铝土矿	铀矿	锆	镓	钒
储量/t	约 $29.4 \times 10^8$	约 $19.1 \times 10^4$	约 7 519	约 $23.34 \times 10^4$	$118 \times 10^6$
占比/%	>50	>60	>80	>60	87

(b) 典型煤系共生矿产储量及占全国总储量比例

图 1 我国煤系共生战略性金属矿产种类、分布及储量(数据统计于文献[5])

Fig.1 Types, distribution and reserves of strategic metal minerals co-existed and associated with coal measures in China(Data statistics from References [5])

表 1 典型煤系共生战略性金属矿产

Table 1 Typical strategic metal minerals co-existed and associated with coal measures

矿种	用途	占全国总储量比例	成矿特征	叠置结构	典型开采方法	典型盆地
铝土矿	广泛用于航空、轻工业等领域,拥有“万能金属”之誉	50%以上	主要为沉积型	煤-铝-铁叠置	房柱式	鄂尔多斯盆地
铀矿	国防和能源安全的稀有战略资源	60%以上	主要为砂岩型	煤-铀-煤、铀-煤叠置	钻井地浸	伊犁盆地

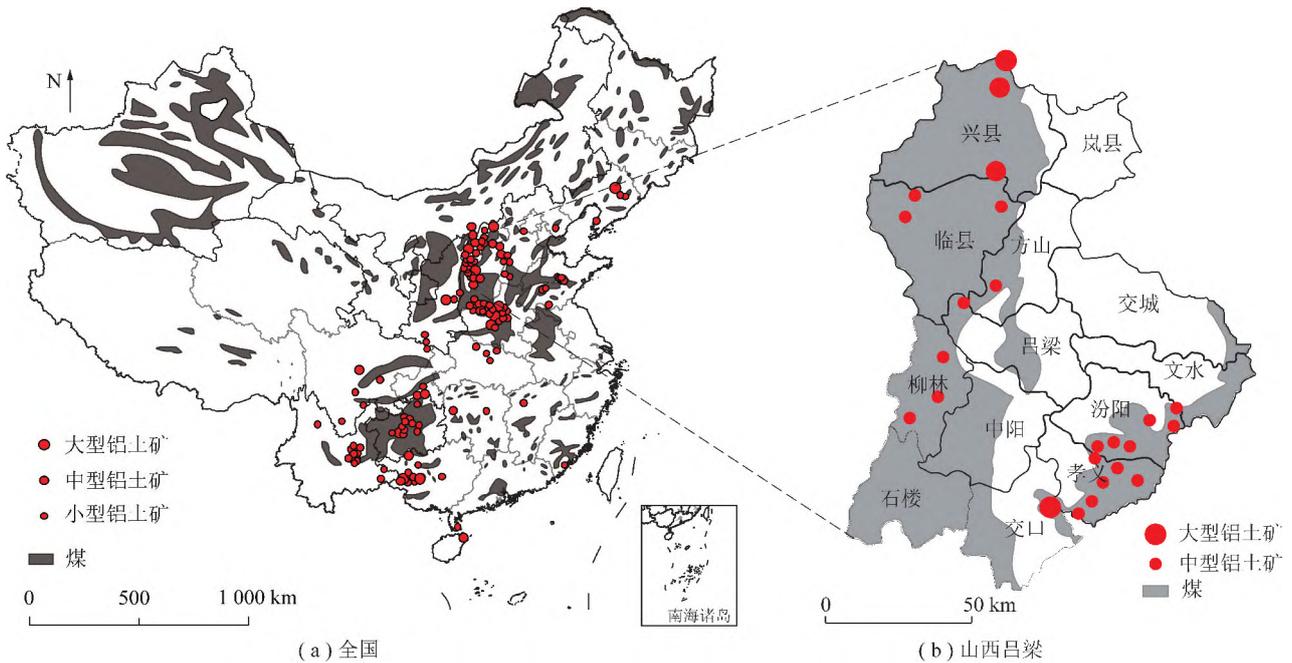


图2 煤铝矿产分布

Fig.2 Distribution of coal and aluminum

## 1 煤与共伴生矿产开采研究现状

国家高度重视煤与煤系共伴生矿产综合开发问题,山西省成为国家惟一同意开展煤铝共采试验的省份<sup>[19]</sup>。

### 1.1 采动岩层多相多场耦合作用与运动规律

目前的多场耦合理论主要集中在应力、渗流、温度、化学场之间的耦合机制方面<sup>[20-22]</sup>,较少考虑宏微观跨尺度孔隙结构对不同场耦合机制的影响。从经典的岩石孔隙渗流到考虑岩层扰动岩体破裂演化的裂隙渗流<sup>[23-26]</sup>,关于单一矿种开采岩层应力场、渗流场、变形场、裂隙场耦合机制的研究尚不完善。尚未涉及协调开采过程中不同矿种开采局部区域相态及耦合场的动态转化,以及协调开采岩石-裂隙岩体-散体演变过程中流体达西非达西流态转化的精确描述,且不能准确描述煤系多矿种协调开采隔水层破断前后区分时多场耦合机制。基于固体力学建立的砌体梁、关键层等矿压理论为岩层运动和采场矿压控制提供了科学依据<sup>[27-28]</sup>,协调开采面临的多相多场耦合下的岩层运动叠加影响规律研究较少涉及。

### 1.2 煤系共伴生矿产协调开采方法

国内部分矿区已尝试探索煤与煤系共伴生矿产协调开发,如在鄂尔多斯盆地探索了煤下铝的保护性开采<sup>[29]</sup>,新疆伊犁盆地等开展了煤铀叠置区开采相互影响的现场监测与评价<sup>[30]</sup>。中国矿业大学率先提出了煤与煤系共伴生矿产共采理论与技术框架<sup>[31]</sup>,

初步探讨了煤系共伴生矿产共采的技术经济评价方法与资源共采规划、协调开采方法及工艺等理论与技术问题,但仍需系统建立与矿产资源赋存特征相匹配的煤系共伴生矿产协调开采理论、方法及安全保障技术<sup>[32-33]</sup>。

### 1.3 协调开采开拓延伸及其围岩稳定控制

开拓延伸设计原则由减少施工量与集中生产向完善生产系统及适应新工艺技术发展,目前的开拓延伸方法针对单一矿种开采,未考虑多矿种差异性生产系统间的相互衔接及匹配。从传统的手持风钻打孔、人工拌和炮泥封堵炮孔向机械化钻孔、装药发展,从考虑爆炸应力波与爆生气体联合作用发展到建立动态本构模型与揭示爆生裂纹演化的阶段<sup>[34-35]</sup>。从经典的弹塑性理论发展到采动巷道围岩结构失稳大变形理论<sup>[36-38]</sup>,从传统的U型钢可缩性拱形支架和普遍采用的锚杆支护,发展到采动巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术<sup>[39-44]</sup>。但目前尚未涉及异体共生多矿种协调开采叠加扰动影响下的开拓延伸、爆破施工及巷道支护问题。

### 1.4 协调开采水位调控与污染物迁移及控制

协调开采多次扰动导致隔水层突发局部高渗流突变,目前常采用采空区充填、限制采高、注浆加固等方式控制隔水层稳定,传统方法难以保障安全高效协调开采。煤炭开采不可避免引起地浸采场含矿含水层水位下降而影响甚至破坏铀资源开采。已初步探讨含水层注浆阻水、构筑水力帷幕等水位控制技术方

界	系	统	组	符号	层厚/m	埋深/m	柱状	岩性特征
古生界	石炭系	上统	太原组	C <sub>3</sub> t <sub>2</sub>	0.85	311.50		粗砂岩: 灰黄、灰白色、灰色, 具楔形交错层理, 主要成分石英、长石, 局部含有较稀少的砂砾
				C <sub>3</sub> t <sub>1</sub>	45.15	373.17		煤: 煤层结构较简单-较复杂, 一般含2~4层夹矸, 是层位稳定的全区主要可采煤层
					3.82	315.32		泥岩
					12.70	328.02		泥岩
								中砂岩
								泥岩
								煤: 厚度较稳定, 局部可采煤层
							泥岩	
							中砂岩	
							泥岩	
							煤: 厚度较稳定, 局部可采煤层	
							泥岩, 粗砂岩	
			砂质泥岩					
			煤: 不开采煤层					
			含砾粗砂岩: 主要成分石英、长石, 钙质胶结					
			泥岩, 中砂岩					
			泥岩					
			煤					
			泥岩, 石灰岩					
			黏土岩: 灰黄或灰褐色, 局部为硬质耐火黏土矿					
			铝土矿: 灰白色、褐红色、浅黄色, 块状构造					
			铁质黏土层: 灰色、黄色、褐红色铁质黏土岩					
			白云质灰岩: 灰色, 致密状结构, 厚层状结构					
			泥质白云岩: 灰白色, 致密状结构, 厚层状构造					

(a) 煤-铝

界	系	统	群	组	符号	层厚/m	埋深/m	柱状	岩性特征
中生界	侏罗系	中统	水西沟群	西山窑组	J <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	140.0	煤中含铀 236~283		中砂岩、粗砂岩为主, 下部砂体较上部发育, 主砂体间夹有稳定的泥质隔水层
					J <sub>2</sub> x <sub>2</sub>	283~317	283~317		顶部10号煤层可作为区域标志层, 下部岩性主要为厚层状的泥岩、粉砂岩夹透镜状细砂岩和中砂岩
					J <sub>2</sub> x <sub>1</sub>	317~376	煤 317~376 铀		顶部8号煤层可作为区域标志层, 岩性主要为含砾粗粒砂岩、粗砂岩, 其次为中-细粒砂岩和砂砾岩。砂体之间夹有发育不稳定的泥岩、粉砂岩或煤层透镜体
					J <sub>1</sub> s <sub>2</sub>	31.9	391		岩性为细-粗粒砂岩、含砾粗粒砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩夹少量碳质泥岩和薄煤层, 局部的薄层菱铁矿层。砂体发育较差, 区域上成透镜状产出
					J <sub>1</sub> s <sub>1</sub>	408	煤 408		

(b) 煤-铀

图3 山西吕梁煤-铝和新疆伊犁煤-铀典型地层柱状

Fig.3 Typical stratigraphic histogram of aluminum in coal measures-in Lüliang Shanxi and uranium in coal measures in Yili Xinjiang

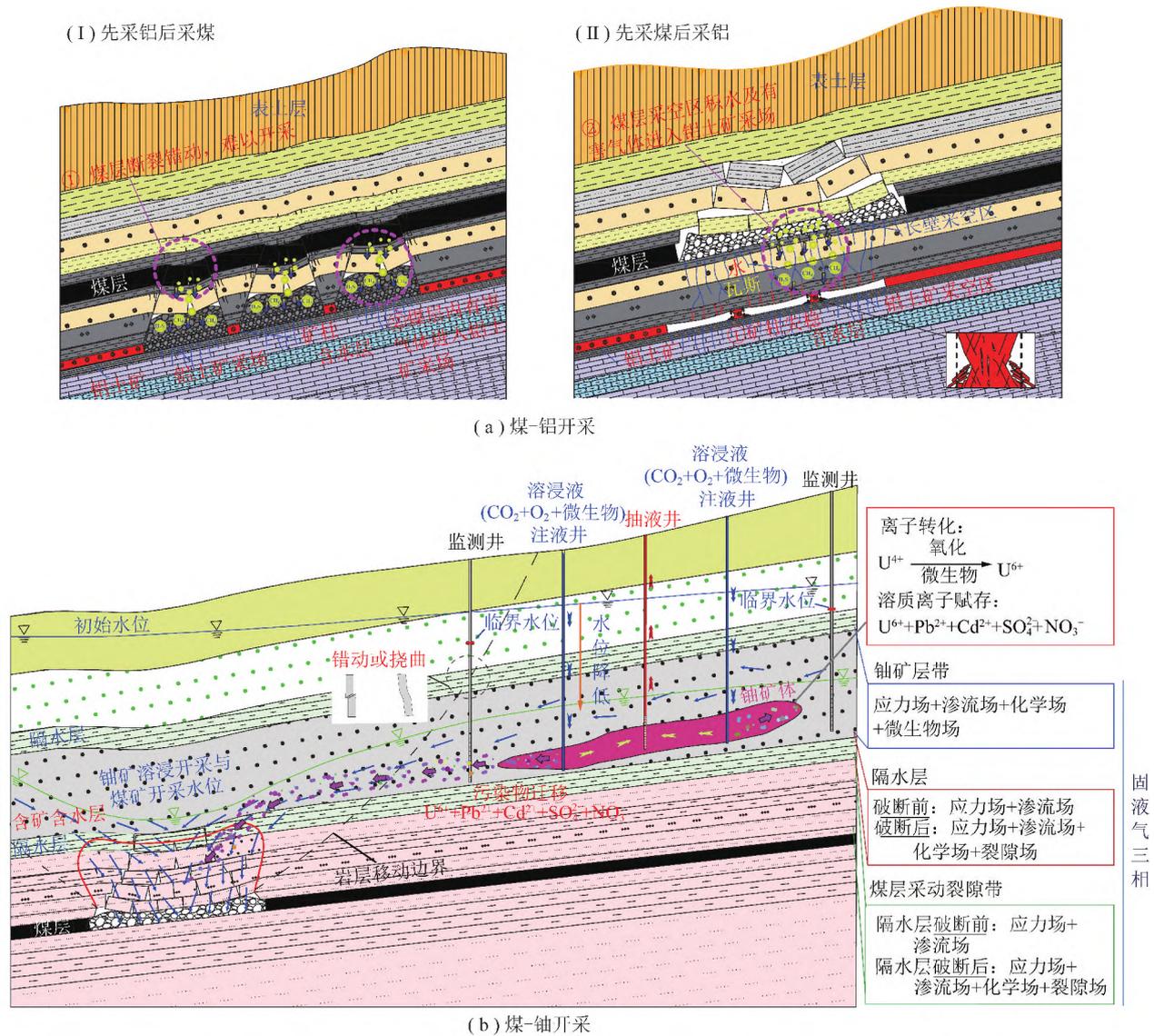


图 4 典型煤系共生矿产开采的共性问题

Fig.4 Common problems in the mining of typical co-existed and associated minerals in coal-measure

案,但因技术风险和工程难度大,鲜有工程实践报道。局部或单一水位调控措施难以解决煤铀协调开采涉及区域水位调控问题。目前地浸采铀地下水中污染物治理是技术难题<sup>[45-46]</sup>,而煤铀协调开采时采煤疏放水引起的含矿含水层中污染物的迁移机制与规律更复杂。铝土矿开采 Fe<sup>3+</sup>等重金属污染物治理的纳米零价铁功能材料取得突破<sup>[47]</sup>,但零价铁容易发生团聚,在地下不能长久维持还原环境;原位微生物还原及矿化修复技术取得了进展<sup>[48]</sup>,但还原及矿化产物不稳定。

### 1.5 存在的科学技术难题

煤与共伴生矿产协调开采处于起步探索阶段,面临的主要科技问题有:

① 煤系共生矿产协调开采中隔水层破断导致不同矿种开采间的多相多场耦合转化机制;② 煤系

叠置矿产开采的岩层活动叠加影响规律,协调开采方法和技术体系;③ 协调开采的开拓延伸方法及其围岩稳定控制技术;④ 协调开采过程水位主动调控技术及污染物迁移规律与控制技术;⑤ 煤与共伴生矿产协调开采的规划方法,协调开发模式与标准。

因此,亟需开展协调开采理论与技术研究,解决我国煤系共生矿产安全高效开采难题。

## 2 煤与共伴生矿产协调开采理论与技术框架

围绕煤系共生矿产开采的重大战略需求,面向煤系全部共生战略性金属矿产,聚焦典型代表性的煤系铝土矿和铀矿,保障研究成果的通用性。针对煤与共伴生矿产协调开采面临的科技难题,聚焦协调开采多相多场耦合与岩层活动叠加影响的核心共性科学问题,深入研究:① 协调开采以隔水层为界的三相

多场耦合作用机制;② 协调开采引起的岩层骨架应力、孔隙压力和变形断裂等叠加规律;③ 采动叠加孔隙-裂隙-散体结构岩体的固-流-微生物-化学耦合模型。在突破关键科学问题基础上,瞄准共伴生矿产赋存状态与开采方法的差异,研究突破煤与伴生矿产分区错时协调开采技术、近距离异体共生矿产采动巷道减振高效爆破开挖技术、协调开采含矿含水层水位主动智能调控技术、地下水中污染物的微生物原位还原-矿化治理技术等关键技术。构建煤与伴生矿产的全生命周期协调开采规划理论,形成可推广的协调开采模式与标准,并初步建立涵盖全国煤系矿产

的基础数据库。最终形成通用性的协调开采理论与技术体系,保障各矿产开采活动不影响彼此正常开采。针对协调开采特点,以“多相多场耦合及岩层活动叠加—协调开采方法—开拓延伸—隔水层稳定性及污染物迁移控制—工程示范”为主线,按照空间划开、时序错开、急需先上、综合利用、合理避让的原则,统筹资源的开采布局、时序、规模和结构,融通关键技术创新与现场应用示范,实现“基础理论—方法—关键技术—材料—装备—工程示范—标准”的全创新链研究。总体研究理论与技术框架如图5所示。

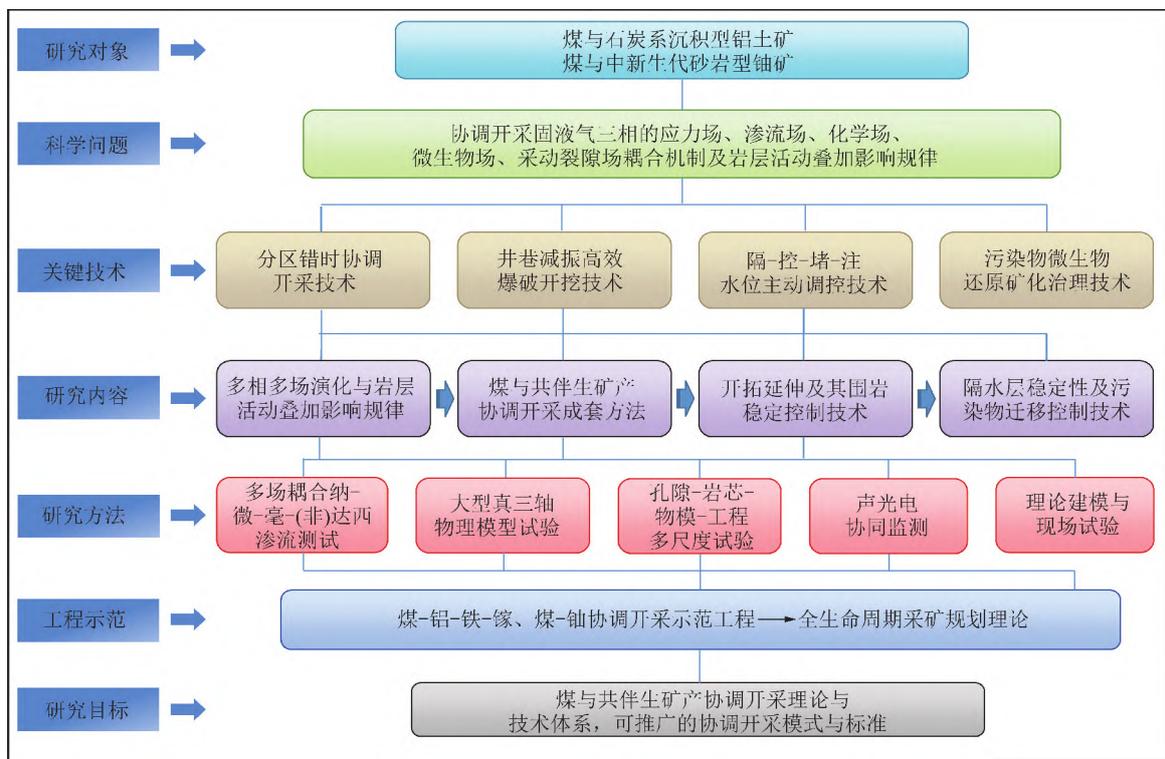


图5 煤与伴生矿产协调开采理论与技术研究框架

Fig.5 Framework of theory and technology for coordinated mining of coal and its co-existed and associated minerals

### 3 煤与伴生矿产协调开采关键科学问题

煤与伴生矿产垂直叠置,协调开采的固液气应力、渗流、化学、采动裂隙场等耦合作用机制不明,岩层活动叠加影响规律不清。现有理论不能准确描述煤系多矿种协调开采隔水层破断前后分区分时多场耦合机制,如何精确表征协调开采采动岩体三相五场耦合演化过程是学术界与工程界普遍关注的重大基础性科学难题。针对协调开采多相多场耦合及岩层活动叠加特点,从以下3个方面开展研究:

(1)协调开采的固液气应力场、渗流场、化学场、微生物场、采动裂隙场耦合演化机制。不同矿种开采局部区域相态及耦合场种类不同,隔水层破断导致煤

系不同矿种开采间的多相多场耦合转化。针对不同开采方式,研究溶浸钻采应力场-渗流场-化学场-微生物场耦合演化机制,及井工开采过程应力场-渗流场-采动裂隙场耦合演化机制。研究隔水层破断后的全区域相态及耦合场转化机制,定量表征协调开采过程中岩层固液气多场耦合演化过程,建立协调开采孔隙-裂隙-散体结构岩体的三相五场耦合模型。根据“分区、分时段”原则,考虑不同矿种协调开采局部区域相态转化、孔裂隙结构多尺度表征及耦合场类自由组合,实现孔-裂隙-散体演变过程达西非达西流态转化精确描述(图6)。

(2)协调开采跨尺度多相多场耦合与岩层活动叠加建模。煤-钛协调开采各矿种采动影响区域交

又重叠,岩层结构破断、移动与流体迁移多相多场演化过程相互影响,相互制约。传统实验系统功能设计主要针对单一矿种开采及单一开采方法,难适用于协调开采研究。研发大型真三轴围岩活动叠加多相多场工程模拟实验系统(图 7),具备 4 项主要功能:采用阵列式模型复杂边界应力加载,模拟岩层活动叠加;采用多相流体加载模块,模拟多相多场耦合;采用

钻进开挖与机器人长壁开采模块,实现矿产开采及开拓延伸等;采用变形及模型内部流体多参量监测,充足数据保障建模。攻克协调开采叠加影响区多相态、多场类耦合转化难题。研究长壁采煤与共伴生矿产协调钻采岩层活动叠加与流体迁移规律,建立煤铀协调开采岩层活动叠加与流体迁移影响评价方法。

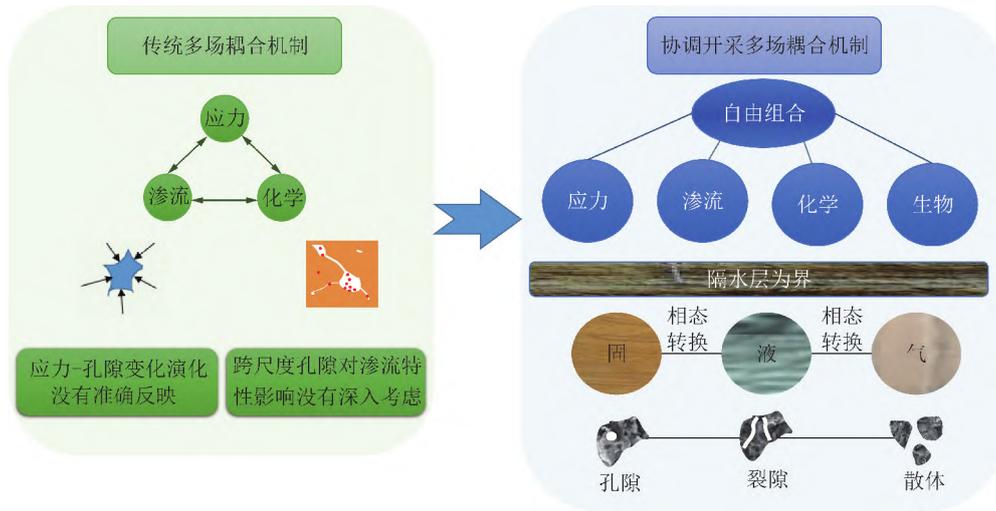


图 6 协调开采多相多场耦合机制

Fig.6 Multiphase and multifield coupling mechanism for coordinated mining

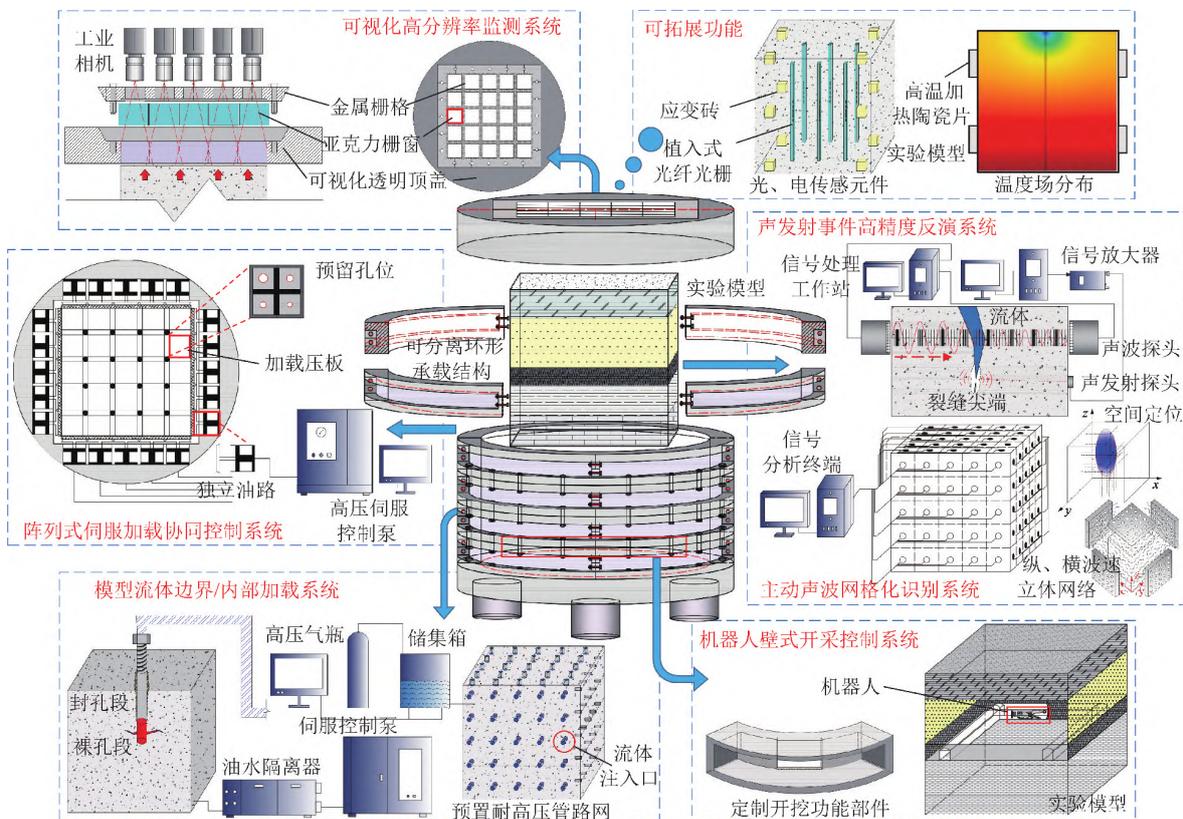
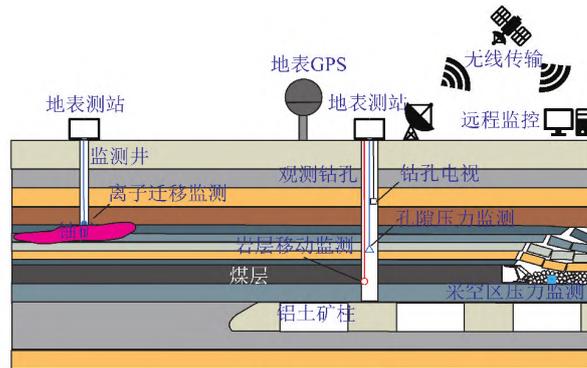


图 7 大型真三轴模型实验系统主要结构及主要功能模块的初步设计

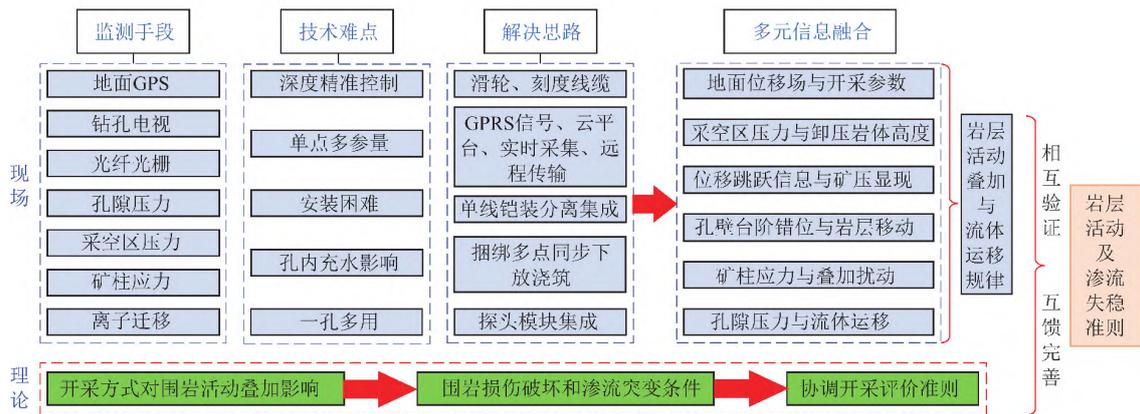
Fig.7 Preliminary design of main structure and main function modules of large scale true triaxial model experiment system

(3) 全时全域多元信息动态融合表征与岩层活动及渗流失稳准则。煤铝矿产上行和下行开采时因矿种开采方式不同,岩层活动叠加影响易导致采空区遗留矿(煤)柱失稳破坏,引发多相多场突变和采场强矿压显现。研究煤铝协调开采矿体应力—覆岩位移—孔隙压力—采动裂隙—水气运移时空演化规律,研发覆岩内部岩移、孔隙压力与采动裂隙的地面钻孔全地层原位监测成套装备与技术,一孔测岩层运动、

裂隙、孔隙压力等多参量,构建“地表、覆岩内部岩移、采空区应力”井上下全地层三位一体监测系统(图8(a)),多元信息融合表征协调开采岩层活动及渗流失稳条件(图8(b))。解决岩层活动立体多参量监测、理论与实践结合的难题。揭示煤铝协调开采岩层移动叠加影响规律,建立煤铝协调开采岩层活动叠加影响评价方法。



(a) 井上下全地层三位一体监测系统示意



(b) 多元信息融合表征协调开采岩层活动及渗流失稳准则

图8 全时全域多元信息监测与岩层活动及渗流失稳准则

Fig.8 All-time and all-area multi-information monitoring and rock formation activity and seepage destabilize criteria

#### 4 煤与共伴生矿产协调开采关键技术

广义的协调开采包括协调、协同和共采,其中,协调开采是避开不利因素,协同开采是利用岩层活动叠加作用,共采是共用生产系统。

##### 4.1 煤与共伴生矿产协调、协同及共采的分区错时协调开采技术

煤与共伴生矿产地质赋存多变、开采条件复杂、对生态环境影响突出,亟需研究与矿床地质赋存条件相适应、与采场围岩控制相协同的开采方法,构建与共伴生矿产赋存环境相协调的充填采矿方法和岩层控制技术,形成煤与共伴生战略性金属矿产协调开采成套方法。

基于岩层活动叠加影响规律,提出协调、协同及共用生产系统的分区错时协调开采原理与方法(图

9),根据各矿产的分布区域、开采布局、规模及开采影响等对矿产的开采范围进行空间分区,合理避让;根据矿产的战略需求属性、赋存特征、经济价值等对矿产的开采顺序进行时序错开,实现各矿产开采活动不影响彼此正常开采。

开采方法和关键工艺是实现煤与共伴生矿产协调开采的核心,研究煤—铝共生矿产上行协调开采方法及下行协调开采方法,研发沉积硬岩型铝土矿短壁高效开采技术与装备,研究煤—铀共伴生矿产协调开采方法。均匀沉降控制、保护性开采等为协调开采精细化、高采出率提供保障。煤与共伴生矿产开发方式是连接协调开采方法与现场工程示范的纽带。岩层活动叠加影响下采场的围岩协同控制和通风等是安全高效协调开采的保障。针对煤系矿产赋存状态与

开采方法差异大的特点,研发井工-井工及井工-钻采协调开采、井工共采及露天共采开发方式(图 10),保障技术通用性,提高共生矿产资源采出率。研究

协调开采采场围岩协同控制机理与技术,研发煤与共生矿产协调开采的通风与安全技术,保障煤与共生矿产的安全高效开采。

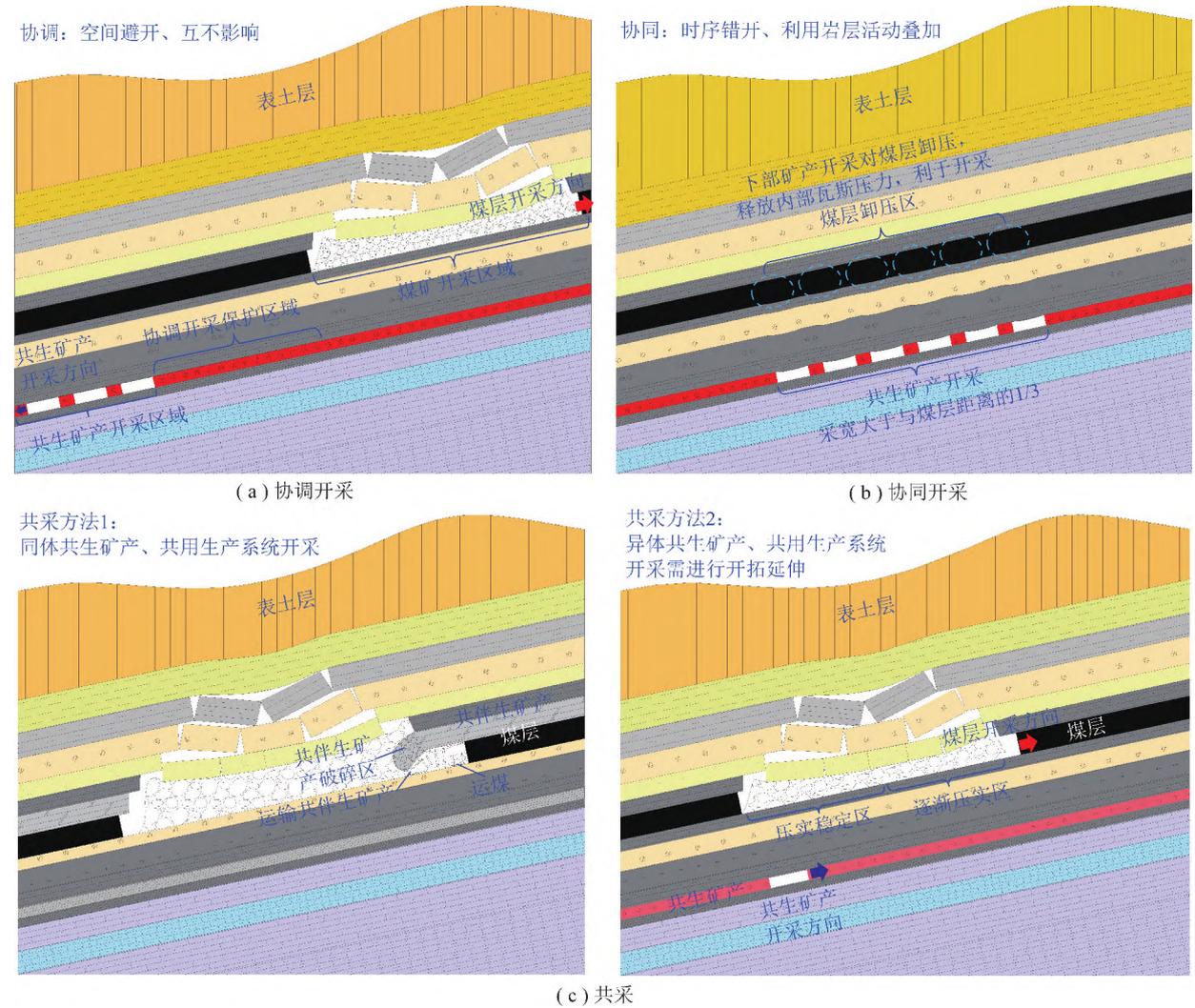


图 9 煤与共生矿产协调、协同与共采原理示意

Fig.9 Principles of coordinated, collaborative, and co-mining of coal and its co-existed and associated minerals

### 4.2 近距离异体共生矿产采动巷道减振高效爆破开挖技术

煤与共生矿产资源的采矿工艺及开拓延伸方式差异性较大,当由一种矿产资源开采进入其他矿产资源共采时,需进行井巷开拓系统的延伸和原有井巷工程的保护利用。目前的开拓延伸仅考虑单矿种的生产能力、地质条件等设计原则,不涉及多矿种差异性生产系统间的相互衔接及匹配。针对异体共生矿产赋存特征及开采方法的差异性,以采动影响与生产系统协同匹配为设计原则,构建异体共生矿产开拓延伸及协同管理系统(图 11),提升方法通用性。

煤近距离共生矿产开拓延伸巷道的采动影响强。近距离异体共生矿产厚度变化大,赋存不稳定,巷道平直性差,盾构机掘进不适应。需攻克开拓巷道低损

减振高效爆破开挖的技术难题,降低爆破振动对巷道的影响,缩短动压对巷道的影响时间。研发周边预裂—微差爆破—分阶分段深孔掏槽爆破技术(图 12),攻克减振与高效难兼顾的瓶颈。

目前的随钻测量与爆破施工难协同,难实时调整爆破工艺;钻孔装药自动化水平低,降低了开挖效率。以岩性智能识别为特色,通过“随钻随测—自动装药—自动封堵”的一体化设计(图 13),提升自动化程度,支撑快速开挖,降低岩层活动叠加影响开拓井巷围岩的时间。

协调开采多次叠加扰动诱发岩层错动、滑移,严重影响井筒、巷道及钻采井稳定性,危及井巷使用安全。研究协调开采井巷及钻采井变形破坏规律及失稳模式,开采诱导岩层反对称沉降叠加平衡与锚网索

注梯级支护协同控制围岩稳定(图14),保障协调开

采采动影响开拓井巷安全服役。

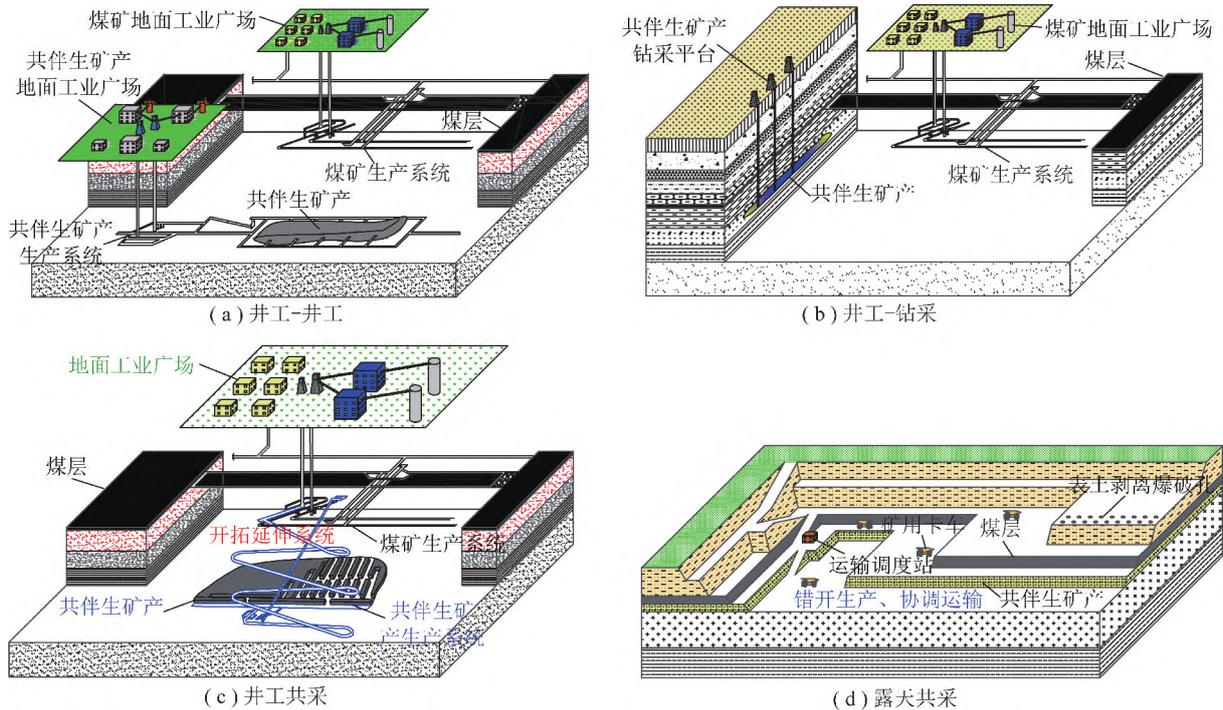


图10 煤与共伴生矿产协调开发方式示意

Fig.10 Schematic illustration of coordinated development of coal and its co-existed and associated minerals

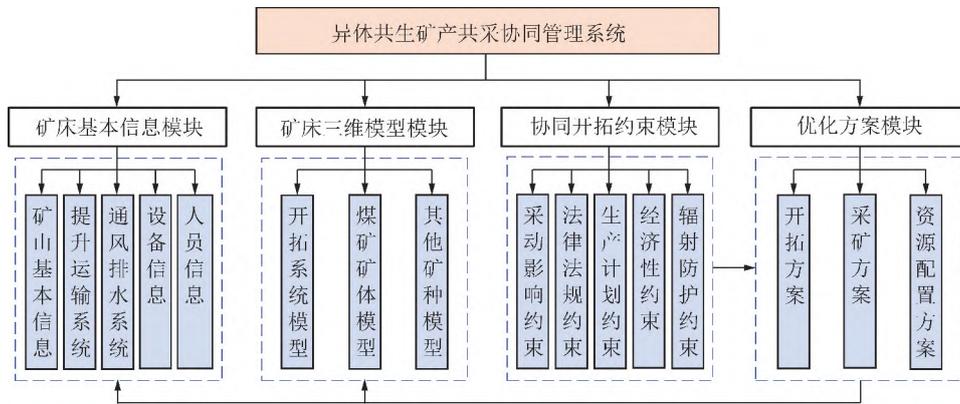


图11 异体共生矿产开拓延伸协同管理系统初步构想

Fig.11 Preliminary conception of the collaborative management system for the development and extension of allogeneic co-existed minerals

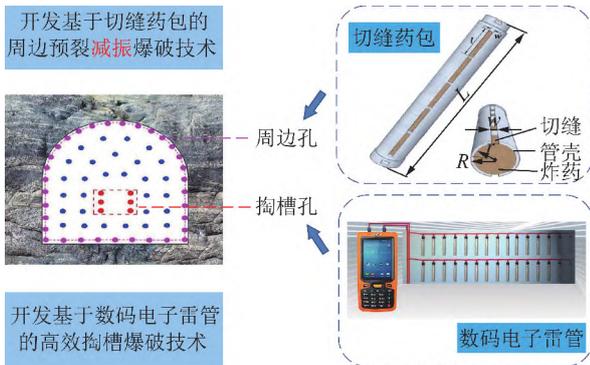


图12 开拓延伸巷道减振高效爆破开挖技术思路

Fig.12 Technical ideas of high-efficiency blasting and excavation for vibration reduction of the development extended roadway

### 4.3 协调开采含矿含水层水位主动智能调控技术

铀矿地浸开采要求含矿含水层维持一定水位,因此,需保证隔水层稳定不破断,否则含矿含水层将持续下降进而导致铀矿无法开采。协调开采强采动与高水压耦合作用于隔水层致其强度劣化而失水和失压,表征隔水层采动裂隙的修复机制是协调开采的保障条件。聚焦隔水层采动裂隙发育与水岩作用下自修复的对冲机制,构建调节地下水理条件诱导隔水层降渗与裂隙自修复理论与技术(图15),应对协调开采强采动。

采煤疏放水导致含矿含水层水位降低而影响地浸采铀技术,水位调控技术是解决煤铀协调开采、实

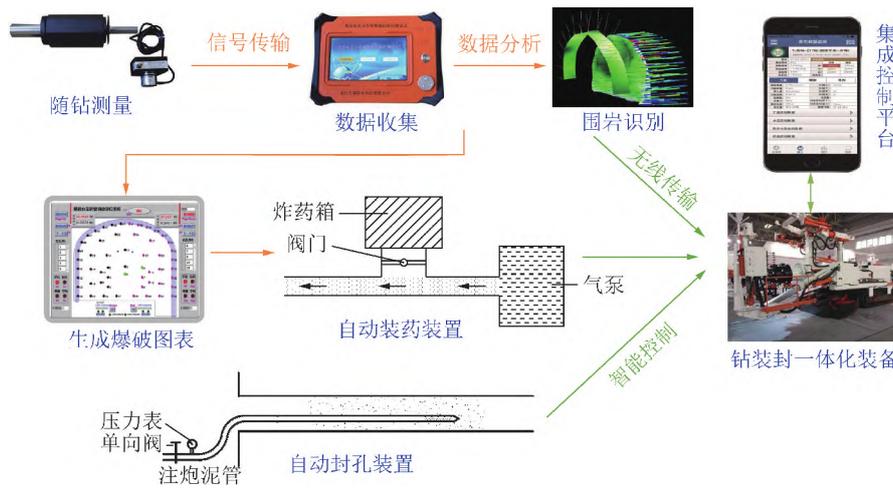


图 13 “岩性随钻随测-自动装药-炮孔自动封堵”一体化装备设计思路

Fig.13 Design idea of integrated equipment of “lithology test while drilling-automatic loading explosives-automatic plugging of blast holes”

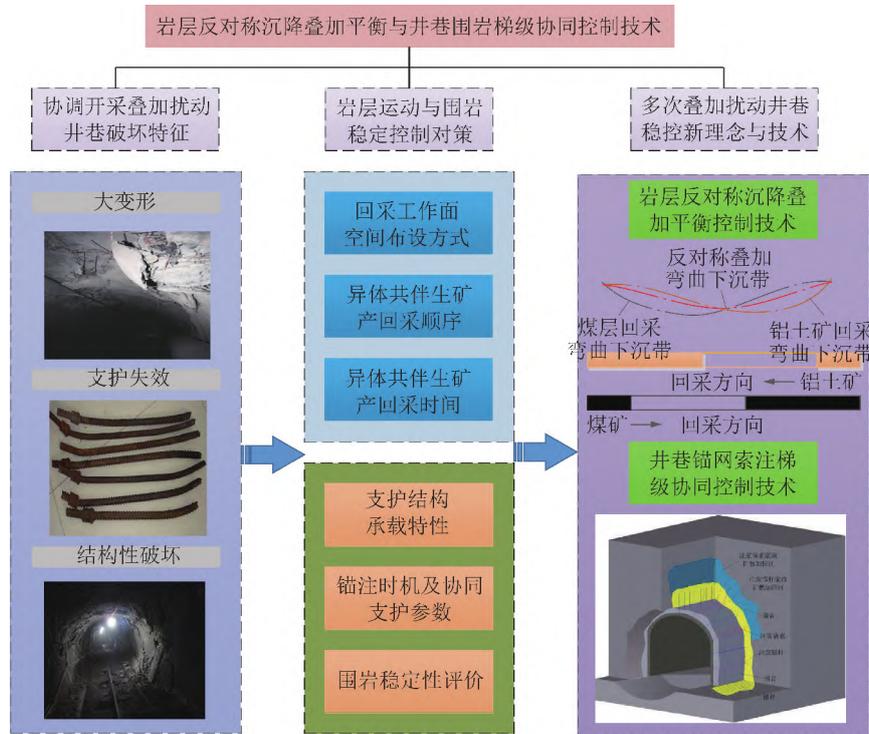


图 14 岩层反对称沉降叠加平衡控制井巷稳定

Fig.14 Antisymmetric settlement of rock formation superimposed balance to control shaft and roadway stability

现源头阻隔污染物、保护地下水环境的关键技术。以“区域调控-局部管理”的理念制定“开采空间划区避让-控煤矿涌水-含水层注浆围堵-矿井水回注构建人工分水岭”四重手段(图 16),主动调控水位,抑制污染物迁移,防矿井突水,降低生态脆弱区环境损伤。建立协调开采地下水智能调控系统(图 17),分区动态调节矿井抽水与含水层回注速率,提升水位控制能力与精度。

#### 4.4 地下水中污染物的微生物原位还原-矿化治理技术

环境污染防治是煤与共伴生矿产全生命周期协

调开采中重要的一个环节。煤-铀协调开采过程中采煤疏放水引起地浸采铀采区污染物迁移而破坏地下水环境,煤-铝协调开采引起铝土矿中重金属离子发生地球化学反应随地下水迁移转化而污染周边环境。目前,协调开采污染物迁移机制及控制方法不清。现有理论不能准确描述多相多场多组分污染物耦合迁移机制,如何精确表征污染物迁移机制、有效防治污染物是学术界和工程界普遍关注的重大技术难题。化学、微生物原位修复技术是实现污染物源头控制的有效途径。

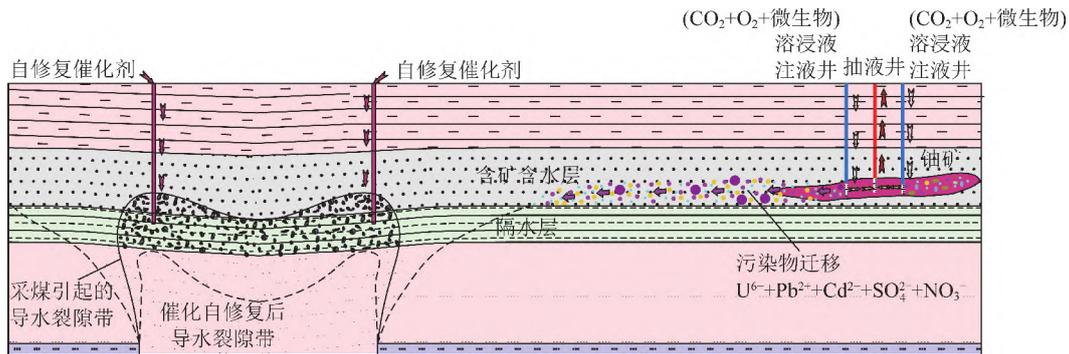


图 15 人工诱导隔水层自修复

Fig.15 Artificially induced self-repair of aquifer

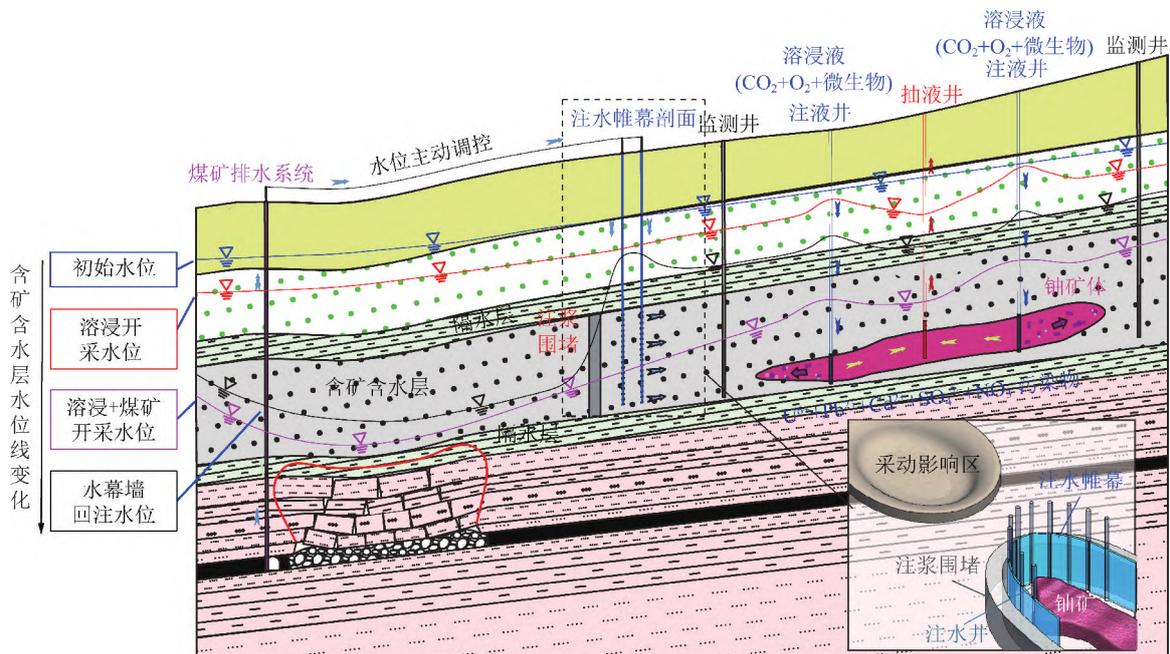


图 16 “开采空间划区避让-控煤矿涌水-含水层注浆围堵-矿井水回注构建人工分水岭”水位主动调控方法示意

Fig.16 Schematic illustration of the water level active control method of “mining space zoning to avoid each other-control coal mine water inflow-aquifer grouting containment-mine water reinjection to construct artificial watershed

提出“注浆围堵+还原矿化”的全生命周期污染物控制及修复技术,首先通过注浆围堵源头阻断污染物的迁移路径(图 18),采区退役后采用微生物及多功能缓释纳米材料原位还原/矿化地下水污染物,使污染物长期稳定固化在含矿含水层。

研发强化微生物原位还原/矿化污染物稳定性的多功能缓释纳米材料(图 19),具有调节地下水 pH,并缓慢释放电子供体的功能,能长期维持地下水溶液 pH 稳定和还原环境,能确保地下土著功能微生物的正常新陈代谢,从而使地下水污染物高效还原/矿化,并维持长期稳定。

协调开采引起铝土矿中重金属离子发生地球化学反应随地下水迁移转化而污染周边环境,微生物原位固化技术是实现了对开采场地污染风险管控的有效

方法。筛选  $Fe^{3+}$  存在下的高效还原菌,联合生物刺激剂与铁协同强化微生物提高原位固化效率(图 20),并集成智能化修复装备提高布料均质率。

### 5 煤与共伴生矿产全生命周期采矿规划理论

全生命周期采矿规划是煤系各矿种开采互不影响的保障,也是技术推广的需要。以“分区错峰”为核心理念,考虑资源、安全、环境等因素,协调开采规划包含采前综合规划、采中协调开采、采后环境治理的全生命周期。给出全生命周期协调采矿规划理论的定义与内涵,构建全生命周期协调采矿规划的评价模型及准则,初步建立涵盖全国煤系共伴生矿产的数据库,形成全生命周期采矿规划理论及协调开发模式与标准(图 21)。

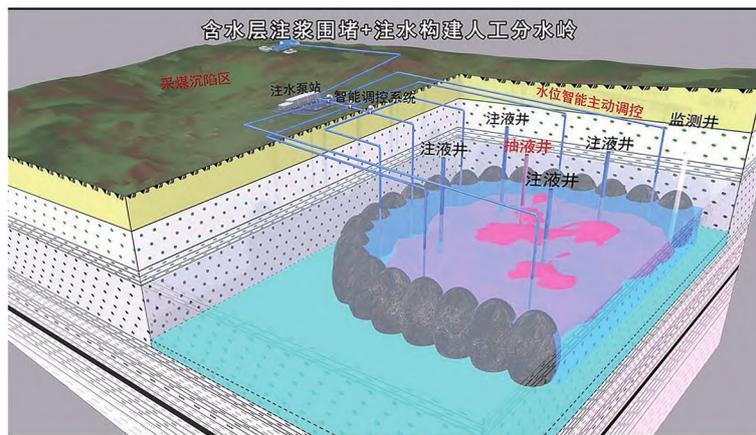
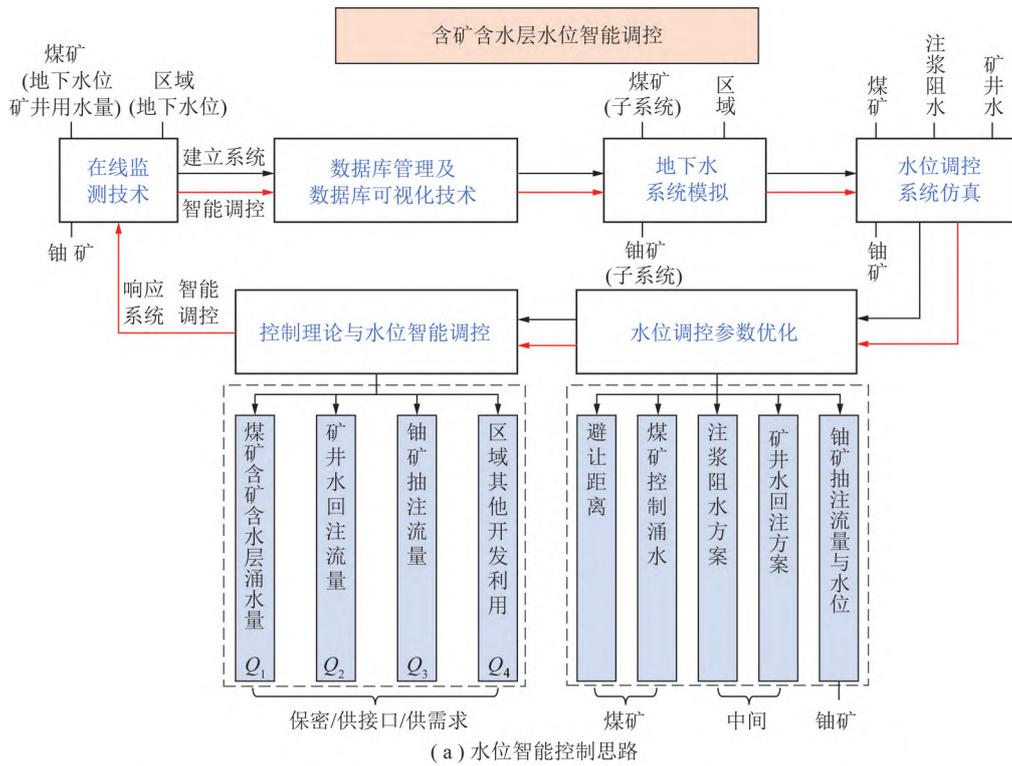


图 17 煤铀协调开采含矿含水层水位智能控制系统

Fig.17 Intelligent control system for the water level of the mineral-bearing aquifer during coal and uranium coordinated mining

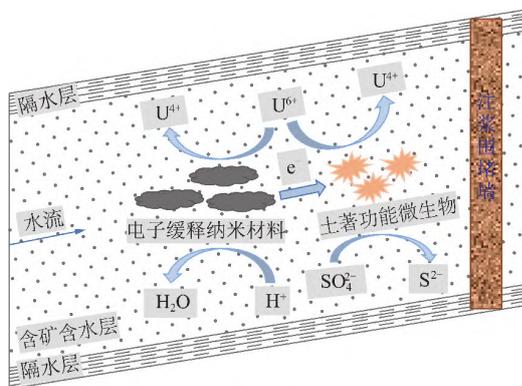


图 18 “注浆围堵+还原矿化”的污染物控制及修复思路

Fig.18 Pollutant control and restoration ideas of "grouting containment+reduction mineralization"

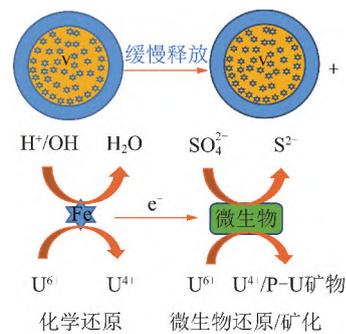


Fig.19 Principle of multifunctional sustained-release nanomaterials

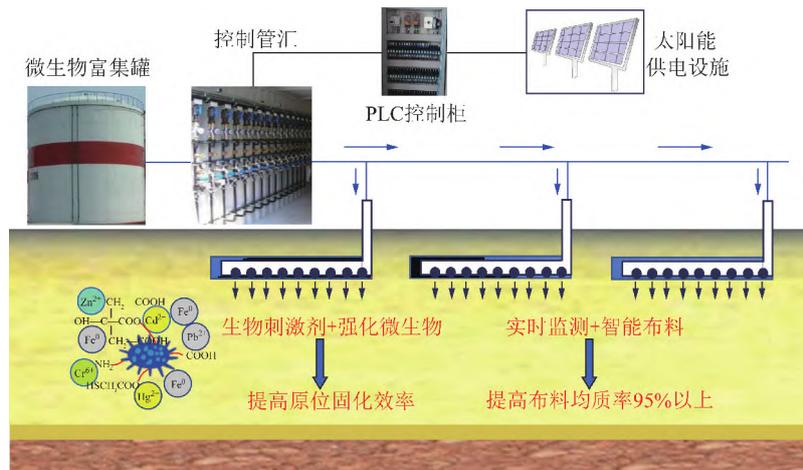


图 20 生物刺激剂与铁协同强化微生物原位固化重金属与硫技术路线

Fig.20 Technical route of biostimulants and iron synergistically enhance microbial in situ immobilization of heavy metals and sulfur

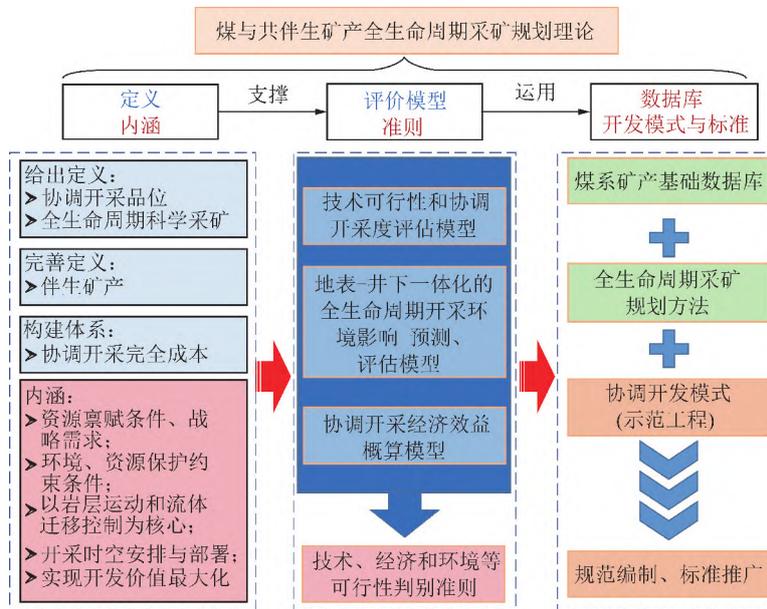


图 21 协调开采全生命周期规划理论框架

Fig.21 Theoretical Framework of whole life cycle coordinated mining planning

### 6 结论与展望

(1) 传统煤矿仅开采煤炭,对煤系共伴生矿产考虑较少或没有考虑,导致资源浪费;近些年国内开始出现煤与共伴生矿产开采的矛盾,煤与共伴生矿产协调开采迫在眉睫。面向煤系全部共伴生战略性金属矿产,聚焦典型代表性的煤系铝土矿和铀矿,提出了煤与共伴生矿产协调开采的重大科学问题与关键技术,保障研究成果的通用性。

(2) 聚焦协调开采过程中多相多场耦合作用机制及岩层活动叠加效应,构建煤与共伴生矿产协调开采的孔隙-裂隙-散体结构岩体的固-流-微生物-化学耦合模型,揭示煤与共伴生矿产协调开采的多相多物理场时空演化与岩层活动叠加影响规律,为协调开

采提供理论支撑。

(3) 针对煤与共伴生矿产赋存状态与开采方法差异大的特点,研究突破煤与共伴生矿产协调、协同及共采的分区错时协调开采技术、开拓延伸及其围岩稳定控制技术、隔水层稳定性控制与含矿含水层水位调控技术、地下水及场地污染物迁移控制技术,为协调开采提供技术保障。

(4) 研究采前综合规划、采中协调开采、采后环境治理的煤与共伴生矿产全生命周期协调采矿规划理论,形成可推广的协调开采模式与标准,保障各矿产开采活动不影响彼此正常开采。

(5) 协调开采理论与技术等可实现煤与共伴生矿产可持续绿色协调性开采,释放矿产储量,保障资源集约开发,经济社会效益显著。

**致谢** 本项目参加单位 10 个,人员 100 余名,对本文的形成均作出不同程度的贡献,在此一并表示感谢!

### 参考文献 (References):

- [1] GB/T 25283—2010, 矿产资源综合勘查评价规范[S].
- [2] 代世峰,赵蕾,魏强,等. 中国煤系中关键金属资源:富集类型与分布[J]. 科学通报,2020,65(33):3715-3729.  
DAI Shifeng, ZHAO Lei, WEI Qiang, et al. Resources of critical metals in coal-bearing sequences in China: Enrichment types and distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3715-3729.
- [3] 高兰,王登红,熊晓云,等. 中国铝矿成矿规律概要[J]. 地质学报,2014,88(12):2284-2295.  
GAO Lan, WANG Denghong, XIONG Xiaoyun, et al. Summary on aluminum ore deposits minerogenetic regulation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2284-2295.
- [4] 国家统计局. 铝土矿矿石查明资源储量[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2020[R]. 2020.
- [6] 代世峰,任德胎,周义平,等. 煤型稀有金属矿床:成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1707-1715.  
DAI Shifeng, REN Deyi, ZHOU Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits: Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707-1715.
- [7] 王婷灏,黄文辉,闫德宇,等. 中国大型煤-锆矿床成矿模式研究进展:以云南临沧和内蒙古乌兰图嘎煤-锆矿床为例[J]. 地学前缘,2016,23(3):113-123.  
WANG Tingying, HUANG Wenhui, YAN Deyu, et al. Progress of research on mineralization mode of large coal-Ge deposits in China: Coal-Ge deposit in Wulantuga of Inner Mongolia and Lincang of Yunnan [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 113-123.
- [8] 温汉捷,朱传威,杜胜江,等. 中国镓锗铊镉资源[J]. 科学通报,2020,65(33):3688-3699.  
WEN Hanjie, ZHU Chuanwei, DU Shengjiang, et al. Gallium (Ga), germanium (Ge), thallium (Tl) and cadmium (Cd) resources in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3688-3699.
- [9] 宁树正,黄少青,朱士飞,等. 中国煤中金属元素成矿区带[J]. 科学通报,2019,64(24):2501-2513.  
NING Shunzheng, HUANG Shaoqing, ZHU Shifei, et al. Mineralization zoning of coal-metal deposits in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(24): 2501-2513.
- [10] 宁树正,邓小利,李聪聪,等. 中国煤中金属元素矿产资源研究现状与展望[J]. 煤炭学报,2017,42(9):2214-2225.  
NING Shuzheng, DENG Xiaoli, LI Congcong, et al. Research status and prospect of metal element mineral resources in China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2214-2225.
- [11] 李建康,刘喜方,王登红. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报,2014,88(12):2269-2283.  
LI Jiankang, LIU Xifang, WANG Denghong. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2269-2283.
- [12] 赵月圆,曾凡桂,梁虎珍,等. 云南干河特高有机硫煤中铼的地球化学特征及富集成因探讨[J]. 煤炭学报,2017,42(10):2679-2687.  
ZHAO Yueyuan, ZENG Fangui, LIANG Huzhen, et al. Geochemistry and enrichment origin of the Rhenium in a super-high-organicsulfur coal from Ganhe coalmine, Yanshan Coalfield, Yunnan, China [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2679-2687.
- [13] 瞿沁媛,刘桂建,孙梅,等. 中国煤中微量元素锡(Sn)的研究进展[J]. 地学前缘,2016,23(3):68-73.  
QU Qinyuan, LIU Guijian, SUN Mei, et al. A review of the geochemistry of tin (Sn) in Chinese coals: Measurement, concentration, distribution and modes of occurrence [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 68-73.
- [14] 乔军伟,李聪聪,范琪,等. 青藏高原北部成煤地质背景及煤系矿产资源特征[J]. 煤炭学报,2016,41(2):294-302.  
QIAO Junwei, LI Congcong, FAN Qi, et al. Characteristics of coal resources and their geological background at Northern Qinghai Tibet Plateau [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 294-302.
- [15] 方维萱,王磊,贾润幸. 塔西地区中—新生代盆-山-原镶嵌构造区:砂砾岩型铜铅锌-天青石-铀-煤成矿系统[J]. 地质科学与环境学报,2018,40(6):663-705.  
FANG Weixuan, WANG Lei, JIA Runxing. Mosaic tectonics of mesozoic to cenozoic basin-mountain-plateau in the western tarim basin, China: Glutenite-type Cu-Pb-Zn-celesite-U-coal metallogenic system [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(6): 663-705.
- [16] 王文峰,秦勇,桑树勋. 煤中金的地球化学研究进展[J]. 煤炭学报,2010,35(2):236-240.  
WANG Wenfeng, QIN Yong, SANG Shuxun. Advances in geochemical research on gold in coal [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 236-240.
- [17] 李宝庆,庄新国,赵仕华. 新疆煤中钴的分布、赋存特征及成因分析[J]. 岩石矿物学杂志,2014,33(3):574-580.  
LI Baoqing, ZHUANG Xinguo, ZHAO Shihua. The distribution, modes of occurrence and genesis of cobalt in coals of Xinjiang [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(3): 574-580.
- [18] 欧金萍,郑刘根,魏祥平,等. 岩浆侵入煤层中铼的赋存特征——以淮北卧龙湖矿为例[J]. 煤田地质与勘探,2019,47(4):63-68.  
OU Jinping, ZHENG Liugen, WEI Xiangping, et al. Occurrence of antimony in magmatic intrusive coal seam: A case study from the Wolonghu coal mine, Huabei coalfield, China [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 63-68.
- [19] 人民网. 山西成为全国唯一同意开展煤铝共采的省份[EB/OL]. <http://sx.people.com.cn/n2/2021/0805/c189150-34854350.html>. 2021-08-05.
- [20] 赵阳升,杨栋,冯增朝,等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(7):1321-1328.

- ZHAO Yangsheng, YANG Dong, FENG Zengehao, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1321-1328.
- [21] RUTQVIST J. An overview of TOUGH-based geomechanics models [J]. Computers & Geosciences, 2017, 108: 56-63.
- [22] ZHANG D M, SKOCZYLAS F, AGOSTINI F, et al. Experimental investigation of gas transfer properties and stress coupling effects of salt rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(9): 4015-4029.
- [23] 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.
- [24] 刘江峰, 倪宏阳, 浦海, 等. 多孔介质气体渗透率测试理论、方法、装置及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 137-146.
- LIU Jiangfeng, NI Hongyang, PU Hai, et al. Test theory, method and device of gas permeability of porous media and the application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 137-146.
- [25] 谢和平, 张泽天, 高峰, 等. 不同开采方式下煤岩应力场-裂隙场-渗流场行为研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2405-2417.
- XIE Heping, ZHANG Zetian, GAO Feng, et al. Stress-fracture-seepage field behavior of coal under different mining layouts [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2405-2417.
- [26] 杨金保, 冯夏庭, 潘鹏志. 考虑应力历史的岩石单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1629-1635.
- YANG Jinbao, FENG Xiating, PAN Pengzhi, et al. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1629-1635.
- [27] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225-230.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jianlin. Theoretical study of key stratum in ground control [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3): 225-230.
- [28] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场砌体梁结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 19(6): 557-563.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(6): 557-563.
- [29] 黄丹, 陈何, 王昌, 等. 煤系地层覆盖下铝土矿采矿方法研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2019, 71(1): 1-4.
- HUANG Dan, CHEN He, WANG Chang, et al. Study on mining method of the bauxite resources under coal seams [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(1): 1-4.
- [30] 周勇. 基于上轴下煤压覆关系的煤轴协调开采技术方案优选研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(6): 199-203.
- ZHOU Yong. Optimization research on coordinated mining technology scheme of coal and uranium based on overburden relationship of upper uranium and lower coal [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(6): 199-203.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 袁亮, 张通, 赵毅鑫, 等. 煤与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.
- [34] 杨仁树, 许鹏, 陈程. 爆炸应力波与裂纹作用实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 30-40.
- YANG Renshu, XU Peng, CHEN Cheng. Interaction between blast stress waves and cracks [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(8): 30-40.
- [35] KLIP M E, GRADY D E. Numerical studies of rock fragmentation, SAND-79-1582, 1980.
- [36] 靖洪文, 尹乾, 朱栋, 等. 深部巷道围岩锚固结构失稳破坏全过程试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 889-901.
- JING Hongwen, YIN Qian, ZHU Dong, et al. Experimental study on the whole process of instability and failure of anchorage structure in surrounding rock of deep-buried roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 889-901.
- [37] 刘泉声, 卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3273-3279.
- LIU Quansheng, LU Xingli. Research on nonlinear large deformation and support measures for broken surrounding rocks of deep coal mine roadway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3273-3279.
- [38] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911-926.
- HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.
- [39] 李术才, 王新, 王琦, 等. 深部巷道U型约束混凝土拱架力学性能及破坏特征研究[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 178-187.
- LI Shucan, WANG Xin, WANG Qi, et al. Mechanical property research and failure characteristics of U-type confined concrete arch in deep roadway [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 178-187.
- [40] HE M C, GONG W L, WANG J, et al. Development of a novel energy-absorbing bolt with extraordinarily large elongation and constant

- resistance[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67(4): 29-42.
- [41] RAJU G D, MITRI H, THIBODEAU D, et al. Numerical modelling and in situ monitoring of drift support performance with respect to mining sequence [J]. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 2013, 29(2): 1-13.
- [42] MILISAVLJEVIĆ V, TOŠIĆ D, ČOKORILO V, et al. Modelling of at rockbolts parameters for “soko” underground coal mine[J]. *Tehnicki Vjesnik Technical Gazette*, 2016, 23(3): 661-666.
- [43] LI C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 396-404.
- [44] 康红普, 姜鹏飞, 黄炳香, 等. 煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 845-864.  
KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 845-864.
- [45] 张国奇, 胡鄂明, 丁德馨, 等. DNB 和 SRB 治理地浸采铀矿山污染地下水的研究现状及展望[J]. *中国矿业*, 2009, 18(11): 56-59.
- ZHANG Guoqi, HU Eming, DING Dexin, et al. The current state and prospect of polluted groundwater treatment of in in-situ leaching uranium mine using DNB and SRB [J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(11): 56-59.
- [46] 王清良, 胡南, 丁德馨, 等. 反硝化细菌生物反应器去除地浸采铀矿山退役采区地下水中  $\text{NO}_3^-$ -N 的试验研究[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(8): 1300-1306.  
WANG Qingliang, HU Nan, DING Dexin, et al. Removal of  $\text{NO}_3^-$ -N from polluted groundwater in decommissioned mining area in an in-situ leach uranium mine by denitrifying bacteria Bioreactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(8): 1300-1306.
- [47] GUO H C, CHEN J B, ZHOU X F. Study on mechanism of Nano-Zero-Valent iron removal of pollutants[J]. *Advances in Environmental Protection*, 2019, 9(2): 220-224.
- [48] 吴唯民, JACK Carley, DAVID Watson, 等. 地下水铀污染的原位微生物还原与固定; 在美国能源部田纳西橡树岭放射物污染现场的试验[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 449-459.  
WU Weimin, CARLEY J, WATSON D, et al. Bioreduction and immobilization of uranium in situ: A case study at a USA Department of Energy radioactive waste site, Oak Ridge, Tennessee [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(3): 449-459.