

王双明, 申艳军, 孙强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(4): 043531.

WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Scientific issues of coal detraction mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of Western China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(4): 043531.

## 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望

王双明<sup>1,2,3</sup>, 申艳军<sup>1,2,3</sup>, 孙强<sup>1,2,3</sup>, 侯恩科<sup>1,2,3</sup>

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 我国能源禀赋特点决定了煤炭主体能源地位短期难以改变, 其中, 西部煤炭资源担负着我国基础能源自主供给的核心角色。但西部煤炭多处于干旱-半干旱带沙漠-黄土覆盖生态脆弱区, 易因开采扰动引起地下水及生态环境产生显著影响。因此, 减损开采成为西部生态脆弱区煤炭资源安全高效开发与环境保护协调发展的必然选择。立足西部煤炭资源开发现实情况, 提出了西部生态脆弱区煤炭减损开采面临的四大关键科学问题, 即: ① 煤-水空间发育组合特征; ② 采动过程地质条件变化规律; ③ 保水开采分区及地质判据; ④ 西部煤炭减损开采技术体系构建思路。同时, 详细阐述了煤炭减损开采技术发展状况及存在的现实难题。在此基础上, 尝试构建西部生态脆弱区煤炭减损开采技术体系, 并展望了西部煤炭减损开采技术未来发展方向。相关研究以期西部生态脆弱区煤炭绿色减损开采提供借鉴。

**关键词:** 西部生态脆弱区; 减损开采; 科学问题

中图分类号: TD82

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2020)04-3531-15

### Scientific issues of coal detraction mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of Western China

WANG Shuangming<sup>1,2,3</sup>, SHEN Yanjun<sup>1,2,3</sup>, SUN Qiang<sup>1,2,3</sup>, HOU Enke<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The endowment characteristics of China's energy source determine that the status of coal as the main energy source is difficult to change in the short term. To be sure, coal resources in Western China are playing the core role of independent supply of basic energy. However, the western coal is mostly located in the desert-loess covered ecologically fragile area which is arid and semi-arid area. The area is susceptible to the disturbance of mining which causes the destruction of groundwater and ecological environment. Therefore, achieving the coordinated development of safe and efficient coal mining and ecological environment protection has become an

收稿日期: 2020-07-20

修回日期: 2020-08-11

责任编辑: 许书阁

基金项目: 陕西省自然科学基金陕煤联合基金重点资助项目(2019JL-01)

作者简介: 王双明(1955—), 男, 陕西岐山人, 中国工程院院士。E-mail: sxmwtm@163.com

inevitable choice for the exploitation of coal resources in the ecologically fragile areas of Western China. Based on the actual situation of coal resources development in Western China, four scientific issues were proposed to realize coal green mining in ecologically fragile mining areas of Western China: ① clarifying the characteristics of coal-water spatial growth combination is; ② mastering the change rule of geological conditions during mining process; ③ realizing the zoning of water conservation mining and the discrimination of geological basis; ④ building technology system of coal detraction mining in Western China, and elaborating its development status and key problems. The development concept of coal green-detraction mining in ecologically fragile areas of Western China was put forward. The challenges of the future development of mining technology were sorted out. Relevant research is expected to provide a certain reference value for coal green mining in ecologically fragile areas of Western China.

**Key words:** ecologically fragile mining area of Western China; detraction mining; key scientific issues

我国能源禀赋特点决定了煤炭主体能源地位短期难以改变。西部煤炭占全国资源总量70%以上,担负着我国基础能源供给核心角色,开发西部煤炭资源已成为保障国家能源安全的重大现实需求<sup>[1]</sup>。西部煤炭具有储量大、煤质好、地质条件总体简单的特点,具备开展大规模开发的优势,如:神东、陕北、黄陇、新疆4个亿吨级煤炭生产基地及宁东能源化工基地正陆续投产。但西部煤炭资源多处于干旱-半干旱带沙漠-黄土覆盖的生态脆弱区,水资源匮乏,地表植被稀少,煤层上覆基岩整体偏薄,易受到采动诱发的生态环境损坏,严重制约了西部煤炭资源的安全高效开发。因此,确保西部煤炭资源安全高效开采的同时,最大限度降低对地下水及生态环境损坏,成为西部煤炭开采的关键技术难题。因此,开展西部生态脆弱区煤炭减损开采研究势在必行。

目前,针对西部生态脆弱区煤矿减损开采技术研究已取得一些代表性成果,如:钱鸣高<sup>[2]</sup>等论述了开展西部煤炭资源高效开采的必要性和现实意义,并对资源与环境协调开采内涵进行了详细阐述;顾大钊<sup>[3]</sup>等系统分析了西部煤炭开采水资源保护利用的技术进展及工程应用特点,结合神华集团近20 a的探索和工程实践,构建了煤矿地下水库技术体系,为西部煤炭开采过程中水资源保护利用开辟了新途径;范立民<sup>[4]</sup>等回顾了陕北煤炭开发过程中出现的土地荒漠化、水资源供需矛盾等突出环境问题;张东升<sup>[5]</sup>等围绕西北煤炭开采水资源保护过程中的关键科学问题,构建了西北矿区不同生态地质环境类型下生态-水-煤系地层空间赋存结构模型,提出了西北地区复采煤层保水开采技术适用性分类方法体系;郭俊廷<sup>[6]</sup>等归纳了我国现阶段减损开

采技术的发展状况,指出:防治方式应从源头控制,重视过程中的协调和变形控制,考虑通过优化改进开采技术实现煤矿绿色减损。笔者<sup>[7-13]</sup>针对西部生态脆弱区煤层、隔水层、含水层和地表生态系统的空间多元组合特征,发现采动诱发隔水性损害是西部矿区生态环境损害的根源,认识到:确保隔水岩组性能不受损害是该区域煤炭开采过程中生态环境保护的关键问题。因此,立足于西部煤炭开采可持续发展需求,创新性开展绿色减损开采技术体系研究是必由之路。基于西部生态脆弱区煤炭开采与生态环境保护协调发展思路,需要对其减损开采关键科学问题予以全面梳理,同时结合煤炭开采减损技术现状,构建适宜于西部生态脆弱区的高效、安全、创新减损开采技术体系。

据此,本文以陕北榆神府矿区为代表,梳理了西部生态脆弱区煤炭减损开采的四大关键科学问题(①煤-水空间发育组合特征;②采动过程地质条件变化规律;③保水开采分区及地质判据;④西部煤炭减损开采技术体系构建思路),并详细阐述了其发展状况及存在的关键难题;在此基础上,尝试构建西部生态脆弱区煤炭减损开采技术体系,并梳理了西部煤炭减损开采技术未来发展的新挑战,以期西部生态脆弱区煤炭减损开采发展提供借鉴。本文研究内容及逻辑关系如图1所示。

## 1 西部生态脆弱区煤-水空间发育组合特征

西部生态脆弱区地表生态系统对地下水位具有很强的依赖性,实现煤层之上浅表层生态水位保护是确保区域生态环境安全的核心要求。而该区域煤层的埋深浅、厚度大的赋存特点,使煤层开采极易引起浅表层水溃涌及漏失现象。同时,地层作

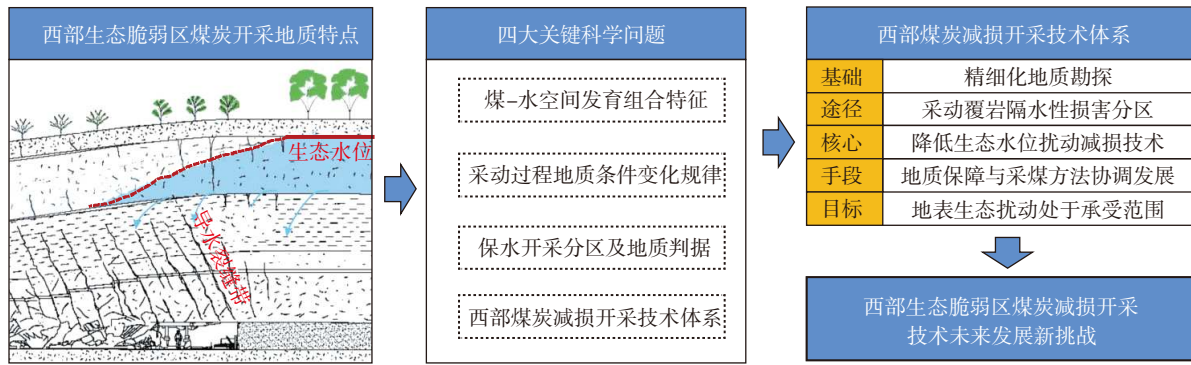


图1 西部生态脆弱区煤炭减损开采关键科学问题逻辑关系

Fig. 1 Relationship of key problems of green coal mining and loss reduction technology in the fragile ecological area of Western China

为地下水的赋存空间,其地质结构特征与岩土体性质改变会显著影响浅表层水资源分布与运移,此外,浅表层水在循环运移过程中又会引起地层岩土体物理力学、水理性质变异<sup>[14]</sup>。因此,厘清西部生态脆弱区煤-水空间发育组合特征,是西部生态脆弱区煤炭开采的关键科学问题之一<sup>[15]</sup>。具体包括:① 煤层分布规律及赋存地质特征;② 地下水赋存特点及生态水位埋深;③ 煤水空间发育组合特征等3个方面。

### 1.1 煤层分布规律及赋存地质特征

陕北榆神府矿区作为西部生态脆弱区煤炭开采的典型代表,可较好地反映西部生态脆弱区煤炭开采赋存地质环境状况。因此,本文以陕北榆神府矿区为研究对象,详细阐述该区域煤层分布规律及赋存特征。榆神府矿区位于鄂尔多斯盆地北部,东西宽约84 km,南北长约85 km,面积8 369.1 km<sup>2</sup>,包括榆神和神府(包括:神北和新民矿区)两大矿区(图2)<sup>[16]</sup>。矿区处于陕北黄土高原与毛乌素沙漠南缘接壤地带,西部及中部处在以波状起伏、风蚀为主的毛乌素沙漠边缘,东部为黄土丘陵,由风沙地貌及黄土丘陵地貌组成。矿区内年降雨量小于500 mm,属荒漠-半荒漠生态系统。

矿区地层自上而下的赋存状况一般为:地表为风积沙(Q<sub>eol</sub>)、马兰组(Q<sub>m</sub>)及萨拉乌苏组(Q<sub>s</sub>)松散沙层含水层;其下为分布不均的离石黄土(Q<sub>l</sub>)、三门组(Q<sub>s</sub>)及新近系保德组(N<sub>b</sub>)红土隔水层;再下为基岩风化层和基岩组,包括下白垩统洛河组(K<sub>l</sub>)、侏罗系中统安定组(J<sub>a</sub>)、直罗组(J<sub>z</sub>)岩、延安组(J<sub>y</sub>)、侏罗系下统富县组(J<sub>f</sub>)及三叠系上统永坪组(T<sub>y</sub>)(图3)。侏罗系中统延安组为本矿区的主要含煤地层,总厚度250~310 m,含煤层多达18层,一般5~12层,其

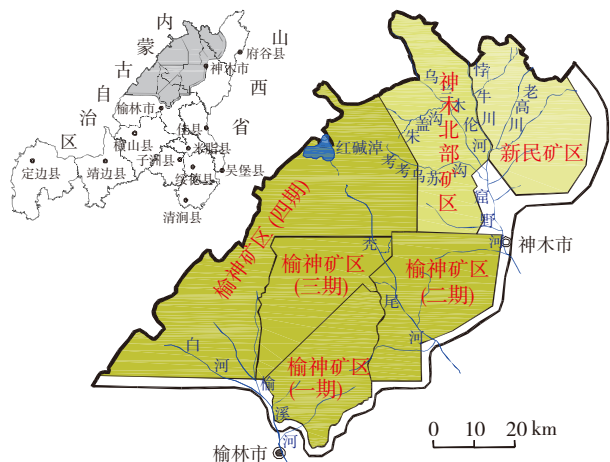


图2 陕北榆神府矿区自然地理状况

Fig. 2 Geography of Yushenfu mining area in Northern Shaanxi

中,可采煤层3~7层,可采厚度总计27 m,最大单层厚度12.8 m,2<sup>-2</sup>煤层为主采煤层。

主采2<sup>-2</sup>煤层赋存特征为:地层总体西倾,自东向西,埋深逐渐增大。其中,最浅<40 m,位于神北矿区,最深>580 m,位于榆神府矿区西南部。神府矿区的煤层埋藏深度多<100 m,榆神矿区埋深普遍>200 m。从其埋深变化规律来看,神府矿区的规律性普遍较差,其中,神府矿区与榆神矿区的交界处系煤层埋深变化较剧烈区;而榆神矿区煤层埋深变化规律较明显,沿“中鸡镇—尔林兔镇—大保当镇”一线,埋深变化由东向西逐渐增大,而沿“金鸡滩镇—孟家湾”一线则呈向NW方向逐渐增大的趋势。

因此,关注西部生态脆弱区煤层分布规律及赋存地质特征,需要重点考虑:① 矿区煤层赋存的地质环境及地表生态环境特征;② 地层发育特征及典型物理力学性质;③ 煤系地层空间展布规律及发育











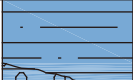
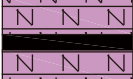
地 层				柱状图	厚 度/m	岩性特征	分布范围
界	系	统	组				
新 生 界	第 四 系	全新统			0~60	以现代风积沙为主, 主要为中细砂及亚砂土, 在河谷滩地和一些地势低洼地带还有冲积层、洪积层和湖积层	分布于榆林、神木大部分地区
		上更新统	马兰组 Q <sub>3m</sub>		0~30	灰黄—灰褐色亚砂土及粉砂, 均质, 疏松, 大孔隙度	分布于鱼河堡以东地区
			萨拉乌苏组 Q <sub>3s</sub>		0~160	灰黄—褐黑色粉细砂, 亚砂土、均质黏土, 底部有砾石, 属富水性强的含水层段	榆林、神木西北部及鱼河堡地区
		中更新统	离石组 Q <sub>2l</sub>		20~165	浅棕黄色—黄褐色粉质黏土、亚砂土, 夹粉土质沙层、古土壤层、钙质结核层, 底部有砾石层	榆林、神木东大部分地区
		下更新统	三门组 Q <sub>1s</sub>		0~50	上部褐红色亚黏土, 均质、致密, 夹钙质结核, 下部灰褐色砂砾岩, 半胶结, 砾石成分以砂岩与泥岩为主, 含少量石英岩及燧石	分布于大柳塔地区
中 生 界	新近系	上新统	保德组 N <sub>2b</sub>		0~110	棕红色—紫红色黏土或砂质黏土, 夹钙质结核层, 含脊椎动物化石, 为区内主要隔水层	出露于大河谷中上游分水岭一带
		白垩系	下统	洛河组 K <sub>1l</sub>		0~350	紫红色—橘红色巨厚层状中粗粒膳食砂岩, 胶结疏松, 底部为砾石层, 为富水含水层
	侏 罗 系	中 统	安定组 J <sub>2a</sub>		0~184	上部为紫红—暗紫色泥岩、砂质泥岩为主, 下部以紫红色中粗粒长石砂岩为主, 属弱富水含水层	神木窝兔采当、榆林刀兔
			直罗组 J <sub>2z</sub>		0~203	紫色泥岩、砂质泥岩、砂岩, 底部有时含砂砾岩, 属富水性弱的含水层段	瑶镇、红石峡一带
		延安组 J <sub>2y</sub>		2 <sup>-2</sup> 59~307	浅灰—深灰色砂岩及泥岩、砂质泥岩, 是盆地的主要含煤地层, 最多含可采煤层13层, 可采总厚度最大27 m, 单层最大厚度12 m	府谷沙川沟、神木安崖、榆林房家沟以西	
	下统	富县组 J <sub>1f</sub>		0~142	紫红、灰紫、灰绿色砂质泥岩为主, 夹黑色泥岩、薄煤层、油页岩、石英砂岩, 底部为细—巨砾石, 为富水性弱的裂隙承压含水层	孤山川、神木高家堡最厚、其余断续分布	
三 叠 系	上统	永坪组 T <sub>3y</sub>		80~200	以灰白—灰绿色巨厚层状细中粒长石石英砂岩为主, 夹灰黑—蓝灰色泥岩、砂质泥岩, 含薄煤层, 是含油地层, 为富水性弱的裂隙承压含水层	窟野河、秃尾河、勃牛川、孤山川一带	

图3 陕北榆神府矿区代表性综合地质柱状图<sup>[15]</sup>

Fig. 3 Representative comprehensive geological histogram in Yushenfu mining area, Northern Shaanxi<sup>[15]</sup>

特征。

### 1.2 地下水赋存特点及生态水位埋深

陕北榆神府矿区以萨拉乌苏组、侏罗系煤层上覆基岩经风化和烧变形成的风化基岩及烧变岩为三大主要含水层。其中,地表萨拉乌苏组含水层水位埋藏较浅,一般为潜水含水层,埋深在0.9~9.3 m之间,且受沉积前古地貌特征及沉积影响,萨拉乌苏组地层在垂向和平面上呈现出明显的非均一性,在平面上连续性较差。而不同地区富水性差异较大,富水性强弱与厚度分布呈明显的相关关系,整体呈西南强,东北弱的特点。烧变岩含水层作为榆神府矿区重要的生态水源之一,其分布规律受煤层埋藏条件和地形地貌影响明显,一般而言,原岩烧

变程度越强,岩层中的孔裂隙就越发育,储水能力越强。此外,早白垩世—上新世期间形成的侏罗系风化基岩也是矿区内重要含水层,厚度一般在20 m左右,岩性主要以粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩为主。按照风化程度可分为强风化、中等风化和弱风化等3类,风化基岩含水层储水空间主要以风化裂隙和孔隙为主,具有良好的渗透性和储水条件。

考虑浅表层萨拉乌苏组含水层与地表生态环境的强关联性,陕北榆神府矿区地表生态系统主要依赖于该层地下水位的稳定。若地下水位过高,会引起水过量蒸发导致可溶盐地表聚集,出现土壤盐渍化。据杨泽元<sup>[13-14]</sup>等研究发现:地下水位埋深<1.5 m,易引起地表盐渍化;水位过低时无法保障地

表植被正常生长,当地下水位埋深达到5~8 m时,进入警戒地下水埋深,8~15 m为乔木衰败地下水埋深,>15 m为乔木枯梢地下水埋深。张茂省<sup>[16]</sup>等以陕北能源基地为对象,确定该区域植被生态水位阈值:0.2 m为水生植物的临界水位埋深,1.2 m为土壤盐渍化的极限水位埋深,1.2~3.8 m为当地优势植物适生水位埋深,3.8~7.0 m为中生植物能够生存但长势较差的水位埋深,而>7.0 m系旱生植物和靠灌溉才能生存植物的极限生态水位埋深。王威<sup>[17]</sup>等以鄂尔多斯乌兰淖水源地为对象,确定乌兰淖地区适宜生态水位为1~5 m,认为1~3 m埋深较为适宜喜水和中生植被生长,而3~5 m适宜耐旱植物生长,超过5 m后整体生长性较差。笔者<sup>[9]</sup>等经过大量调研认为:陕北地区应将采煤后地下水埋深1.5~5.0 m,作为矿区保水采煤的水位约束阈值。基于前期研究成果,共同支持该区域适宜生态水位在1.5~5.0 m。

因此,明确西部生态脆弱区地下水赋存特点及生态水位埋深,主要需明确所在矿区典型含水层发育特征,特别是关注与地表生态环境存在强关联性的浅表含水层水位变化状况。对榆神府矿区而言,采取有效、合理的采煤减损技术,确保采中、采后萨拉乌苏组地下水始终处于生态水位范围内,是该矿区煤炭开采必须考虑的关键科学问题之一。

### 1.3 煤-水空间发育组合特征

立足于陕北地区煤层及含水层空间分布,进一步明确煤-水空间组合发育特征,是后期实现针对性减损技术发展的基础性研究工作。对陕北地区煤-水空间组合发育特征研究,主要呈现2个特点:①煤水共生,水在上、煤在下,空间组合韵律特征显著;②煤水间隔水岩组厚度变化大,煤层顶板基岩厚度与含水层厚度呈负相关关系。笔者结合含水层、隔水层厚度及平面分布特点,将该区域煤-水空间组合特征分为4种类型<sup>[8]</sup>(图4)。

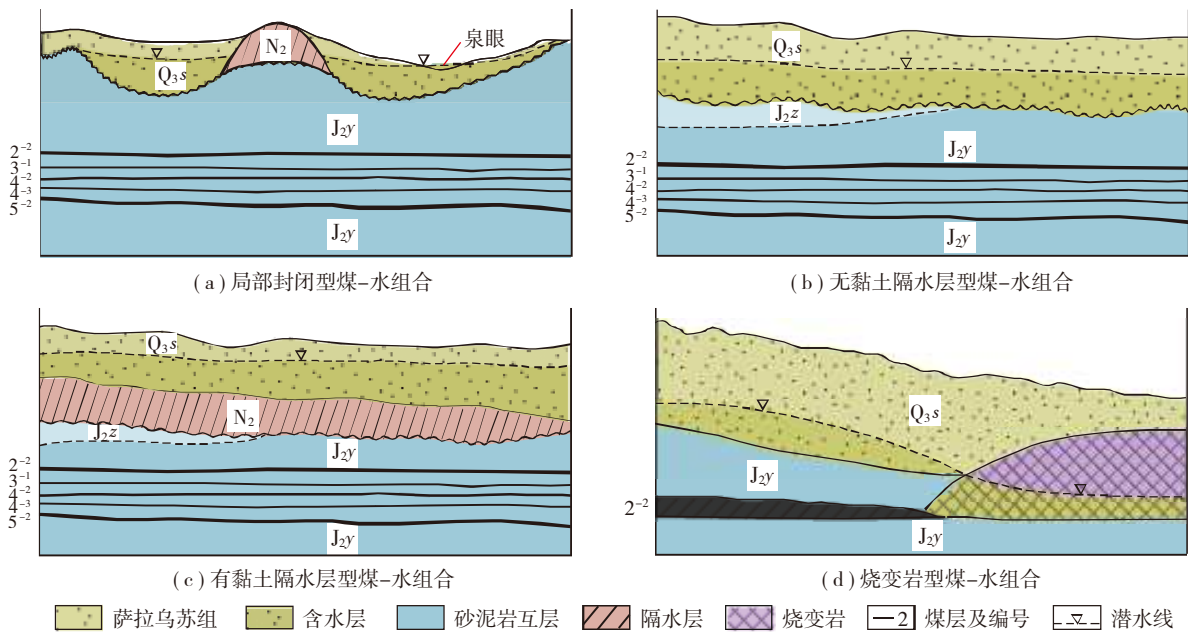


图4 陕北榆神府矿区煤水空间典型组合特征

Fig. 4 Typical characteristics of coal water spatial combination in Yushenfu mining area, Northern Shaanxi

(1) 局部封闭型煤-水组合: 该类含水层多为相对封闭分布的小型含水盆地,盆地底界面距煤层一般<50 m,属于局部富水区域。其中,当潜水面高于侵蚀基准面时,多以泉水形式排泄。

(2) 无黏土隔水层型煤-水组合: 该类含水层大面积分布,煤层与含水层之间无土层隔水层,煤层上覆复合隔水岩组厚度一般为30~120 m。

(3) 有黏土隔水层型煤-水组合: 该类含水层、

黏土隔水层均大面积分布,厚度变化均较大,隔水层厚度20~170 m,一般20~40 m,煤层上覆复合隔水岩组厚度一般为120~480 m。

(4) 烧变岩型煤-水组合: 该类组合以萨拉乌苏组与烧变岩共同构成复合含水层,其中,烧变岩含水层上与萨拉乌苏组、侧向或下部与煤层直接接触,其一般分布在沟谷沿岸区域。

总体而言,因矿区地层发育的差异性,煤水空

间组合关系复杂,对应煤层开采对含水层的影响也存在较大差异。如:①局部封闭型含水盆地一旦破坏,则整个盆地在短期内迅速疏干;大面积含水区,在无黏土隔水层的情况下采煤将导致地下水位的区域性下降,进而影响河川径流量,导致流域生态变异和恶化;②含水层、土层隔水层均大面积存在时,采煤过程则不会导致地下水位明显下降,但会引起地表变形;③烧变岩含水层附近采煤,会造成烧变岩和补给区水位下降,须予以考虑留设一定宽度的防水煤柱。

可见,准确掌握煤-水空间组合特征是西部生态脆弱区煤炭开采与环境保护协调发展的基础性工作,而科学合理确定煤-水空间组合类型、预测掌握采动对含水层影响状况,是开展煤-水空间组合特征研究的关键工作。

## 2 西部生态脆弱区采动过程地质条件变化规律

煤系覆岩沉积形成的层状结构是煤炭赋存的典型地质特征<sup>[18]</sup>,因西部生态脆弱区浅埋煤层具有“沙层-黏土隔水层-基岩风化带-基岩”地质结构特征,导致高强度采动过程诱发覆岩破断与传统基岩内部覆岩破坏规律存在显著差异<sup>[19]</sup>。以陕北榆神府矿区为例,其赋存特点为:埋深浅(大部分在100 m左右)、基岩薄(最小仅1.4 m)、厚松沙(基岩之上为10~50 m厚的风积沙)、富潜水(在松散层中有水柱高达10 m的地下潜水)。以上特点导致地下煤炭开采易引起覆岩应力重新分布,造成覆岩结构地质条件变化,并产生原生裂隙扩展和次生裂隙发育,进而影响整体隔水效果。同时,过大的变形还会造成岩层破断、岩体移动,使隔水效果完全丧失<sup>[20]</sup>。因该区域浅埋厚煤层禀赋地质状况导致采动覆岩多场耦合演化特征显著,引发的导水裂隙带发育存在变幅大、范围广、易突变的特点,因此,准确揭示西部生态脆弱区采动过程中的地质条件变化规律,是后期开展减损地质工程防控的基础性工作,也是西部生态脆弱区煤炭减损开采必须关注的关键科学问题之二。其具体包括:①采动过程覆岩破断规律及多场耦合特征;②采动过程中导水裂隙带演化规律2个方面。

### 2.1 采动过程覆岩破断规律及多场耦合特征

目前,“砌体梁”结构模型<sup>[21]</sup>及“传递岩梁”

理论<sup>[22]</sup>多用于表征采场覆岩破断演化特征分析,王家臣<sup>[23]</sup>认为:西部薄基岩浅埋厚煤层受工作面覆岩的非均质性影响,加之覆岩存在大量原生裂隙及采动裂隙,采动过程中覆岩破断呈现分区破断及动态迁移特征,传统砌体梁模型及传递岩梁刚度模型已经无法准确反映该新特点。据此,黄庆亨<sup>[24]</sup>等提出了西部浅埋煤层岩层运移破断模型,认为:西部浅埋煤层顶板多体现为单一关键层的台阶岩梁结构,覆岩垮落具有典型“两带(冒落带和裂隙带)”特征,且“两带”直接与含水层沟通,引起地下水渗漏;任艳芳<sup>[25]</sup>等根据神东矿区浅埋煤层赋存特点及现场实测成果,提出了一套浅埋煤层覆岩承压拱结构模型,并指出该承压拱结构稳定性与浅埋工作面矿压、采高及工作面长度相关;李正杰<sup>[26]</sup>发现浅埋综采工作面顶板具有等距来压特征,在此基础上提出了切落体模型,并对其滞后、垂直、超前3种切落体模型受载特征进行分析,指出顶板覆岩垂直滑动切落是浅埋煤层破断演化的典型特点。笔者<sup>[18]</sup>以榆神府地区小保当井田覆岩结构为例,采用“砂层系数”表征煤系覆岩中各类砂层数之和与基岩岩层总层数之比,并通过数值模拟手段分析覆岩破断诱发下沉与砂层系数的关系,研究表明:下沉变化随砂层系数增加而增大,且存在迅速增大、缓慢增大和趋于稳定的3段式变化过程;当砂层系数>70%时,砂岩层数逐步失去对开采沉陷的影响作用;但当砂层系数>90%时,不同砂泥比所对应下沉系数有明显的收敛、趋同特征。可见,西部浅埋煤层采动诱发覆岩破断下沉与岩层地质结构存在密切联系。

此外,西部薄基岩浅埋厚煤层开采诱发的顶板破断演化,伴随上覆含水层运动及流失,呈现典型的多场耦合特征。具体包括:外部采动覆岩-水循环响应和内部应力场-裂隙场-渗流场相互作用<sup>[19]</sup>。因此,采动诱发的“应力场-裂隙场-渗流场”多场耦合及动态演化问题,是西部生态脆弱区浅埋煤层实现有效阻隔水必须考虑的又一关键问题。许家林<sup>[27]</sup>等基于关键层理论系统阐述了关键层对其上覆岩层应力场、裂隙场演化控制作用,指出:主关键层的破断将导致上覆岩层的同步破断与地表快速下沉,并推荐采用关键层破断后下沉曲线特征来预测地表下沉量,为系统探究采动诱发覆岩应力场与裂隙场耦合关系指明方向;张东升<sup>[5]</sup>等通

过构建西北矿区不同生态地质环境类型生态-水-煤系地层空间赋存结构模型,总结了浅表层水因覆岩移动引起水循环运移响应规律,并提出了覆岩应力场-裂隙场-渗流场重构表征方法,构建了上位隔水层-中位阻隔层-下位基本顶结构协同(渐序)变化模型,从多场耦合角度为构建基于水资源保护的西北煤炭科学开采方法体系提供了基础参考。

但需要指出的是,西部生态脆弱区浅埋煤层采动过程多场耦合研究尚不够系统与全面,对于采动诱发覆岩应力场-裂隙场-渗流场耦合演化关系认知有待深入。因此,从西部煤层禀赋地质结构出发,通过多元化分析手段准确揭示采动地质条件变化规律,是未来开展西部浅埋煤层采动过程多场耦合分析的基础途径之一。

## 2.2 采动过程中导水裂隙带演化规律

导水裂隙带高度准确判别是实现煤矿水下安全采煤及保水采煤的前提条件<sup>[28-29]</sup>。目前,关于导水裂隙带高度预测,主要参考《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》<sup>[30]</sup>推荐的统计经验公式,其基于大量实测数据统计得到的导水裂隙带高度经验值,在一定程度上满足了我国煤矿水下采煤设计的要求。但针对西部生态脆弱区的保水采煤情况而言,因受到煤层埋深及覆岩岩体结构等因素影响,会导致覆岩导水裂隙带预测高度与实际偏差较大的情况。据此,笔者以陕北榆神府矿区为例,根据基岩组厚度与采高比不同,将该区域煤层分为浅埋煤层、近浅埋煤层2类,并进一步归纳其导水裂隙带典型的地质发育特征。其中,浅埋煤层顶板多为单一关键层结构,覆岩垮落将形成鲜明的垮落带和裂隙带,且垮落带多可直达地表,形成明显的台阶下沉。其采动裂隙贯通隔水岩组与地表萨拉乌苏组含水层,导致萨拉乌苏组地下水位发生剧烈下降,并危及该区域安全生态水位,引发一系列表生生态环境问题。对应的地质勘探核心研究课题为:精确掌握裂隙带是否导通单一关键隔水层;而近浅埋煤层基岩厚度多>60 m,其存在2组及更多关键层结构,采动过程中覆岩垮落可形成弯曲下沉带、垮落带和裂隙带显著的“三带”。其主要研究课题则为:精确掌握导水裂隙带发育高度与上位隔水层的安全距离。即防止上位隔水岩组破坏为该区域采煤减损技术研究的核心目标。可见,深入把握导水裂隙带发育高度,必须

从煤层禀赋地质条件出发,结合采动诱发覆岩运移规律及多场耦合特征,综合判别适应其地质状况的方法。

此外,采动诱发隔水层导水裂隙带发育包括:上行裂隙带和下行裂隙带2类,其中,隔水层的稳定性则取决于上行裂隙带和下行裂隙带的导通性(图5)。基于榆神府浅埋煤层覆岩“三带”高度的大量统计结果,笔者建议上行裂隙带发育高度按照18~28倍采高选取。同样,张东升<sup>[5]</sup>等基于榆神府浅埋煤层6个钻孔现场实测(榆阳煤矿、红柳林井田及崔木煤矿各2个),并结合22个临近区域侏罗系煤层开采导高实测数据,建立了该区域浅埋煤层开采导水裂隙带发育高度 $H_i$ 与采高 $M$ 、采深 $s$ 、工作面斜长 $b$ (单位:m)的经验公式,即

$$H_i = 4.82M + 60.13 \ln \frac{s}{100} + 3.43M \ln \frac{b}{100} + 16.17 \quad (1)$$

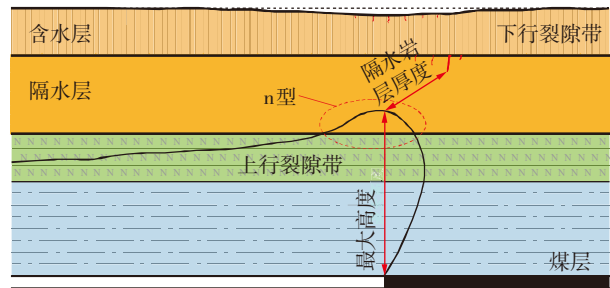


图5 西部浅埋煤层采动过程导水裂隙带发育特征及形态  
Fig. 5 Characteristics of water-conducting fracture zone in mining process of shallow coal seam in Western China

根据该关系式计算结果,导水裂隙带发育高度受采高影响最为显著,同时受到采深及煤层倾斜程度的影响。但立足于该区域浅埋煤层5<sup>2</sup>埋深及发育状况,估算为采高的15~22倍,基本与笔者推荐的范围近似。此外,范立民<sup>[4]</sup>等整理了陕西煤业化工技术研究院与一八五队共同实施的榆神矿区部分导高探测钻孔数据,并收集了部分公开发表的文献数据,发现榆神府矿区、神东矿区综采工作面的导高裂采比为21~30倍,平均约26倍,具体统计结果见表1。与笔者推荐的上行裂隙带发育高度值较为接近。但需要指出的是,关于上行裂隙带发育高度判别与所在矿区赋存的地质条件密切相关,如何采用科学合理的地质勘探方法及理论分析手段,准确确定上行裂隙带发育高度,是导水裂隙带高度分析未来面临的重要科学难题。

表1 西部生态脆弱区综采工作面导水裂隙带高度探测结果统计一览<sup>[4]</sup>Table 1 Statistics on results of height detection of water conducted zone in fully-mechanized mining coal face<sup>[4]</sup>

孔号	探测煤矿	工作面编号	覆岩结构类型	煤层埋深/m	开采煤层编号	采高/m	垮落带高度/m	导水裂隙带高度/m	冒采比	裂采比
S19	补连塔	31401	沙基型	247.00	1 <sup>-2</sup>	4.40	17.08	153.95	3.88	34.98
S21	补连塔	31401	沙基型	247.00	1 <sup>-2</sup>	4.40	19.72	140.50	3.48	31.93
G1	韩家湾	2305	沙土基型	160.00	2 <sup>-2</sup>	4.43	—	110.11	—	24.86
MD1	大柳塔	1203	沙基型	54.58	1 <sup>-2</sup>	3.79	8.10	发育至地表	2.14	—
MD2	大柳塔	20601	沙基型	89.17	1 <sup>-2</sup>	3.95	13.49	至地表	3.42	>22.60
孔1	柠条塔	N1209	土基型	150.91	2 <sup>-2</sup>	4.80	33.46	130.60	6.97	27.21
孔3	柠条塔	N1209	土基型	171.00	2 <sup>-2</sup>	5.80	35.25	153.46	6.10	26.46
孔4	柠条塔	N1112	土基型	186.10	1 <sup>-2</sup>	5.46	14.20	149.28	2.60	27.30
孔6	柠条塔	N1114	土基型	188.91	1 <sup>-2</sup>	5.46	34.45	145.23	6.31	26.60
ZK13	张家峁	15204	沙土基型	93.00	5 <sup>-2</sup>	6.00	32.06	≥65.10	5.34	—
ZK15	张家峁	15204	沙土基型	89.70	5 <sup>-2</sup>	6.00	27.70	≥69.17	4.62	—
孔7	张家峁	N15203	土基型	157.88	5 <sup>-2</sup>	5.60	34.78	157.88	6.21	28.19
孔8	张家峁	N15203	土基型	165.11	5 <sup>-2</sup>	5.60	36.98	165.11	4.22	29.48
孔9	张家峁	N15203	土基型	165.90	5 <sup>-2</sup>	5.60	36.98	165.90	6.60	29.63
Y3	榆树湾	20104	沙土基型	276.00	2 <sup>-2</sup>	5.50	25.60	128.00	4.65	23.27
Y4	榆树湾	20106	沙土基型	276.80	2 <sup>-2</sup>	5.50	25.40	138.30	4.65	25.15
Y5	榆树湾	20104	沙土基型	286.90	2 <sup>-2</sup>	5.50	27.10	135.40	4.93	24.62
Y6	榆树湾	20104	沙土基型	275.80	2 <sup>-2</sup>	5.50	20.60	118.60	3.75	21.56
Y7	榆树湾	—	—	—	—	5.00	—	57.71	—	—
ZP1	榆阳	2304	土基型	208.00	2 <sup>-2</sup>	3.50	17.20	96.30	4.91	27.50
ZP2	榆阳	2304	沙基型	188.00	2 <sup>-2</sup>	3.50	14.20	84.80	4.06	24.20
H3	杭来湾	30101	沙土基型	247.60	2 <sup>-2</sup>	4.50	20.50	112.44	4.40	22.50
H4	杭来湾	30101	沙土基型	—	2 <sup>-2</sup>	4.50	22.18	116.20	4.80	23.20
JT3	金鸡滩	—	—	209.60	2 <sup>-2</sup>	5.50	26.30	111.49	4.80	20.30
JT4	金鸡滩	12 <sup>-2</sup> 上-101	沙土基型	—	2 <sup>-2</sup>	5.50	29.18	126.40	5.30	23.00
JT5	金鸡滩	—	—	—	2 <sup>-2</sup>	5.50	20.58	146.18	3.70	26.60
JT6	金鸡滩	—	—	—	2 <sup>-2</sup>	5.50	27.70	120.25	5.00	21.70
L1	柳巷	30101	—	—	3	7.90	54.70	117.84	6.90	14.90
孔1	布尔台	22105	—	—	2 <sup>-2</sup>	3.00	—	79.40	—	26.47
孔2	布尔台	42106	—	—	4 <sup>-2</sup>	6.60	—	158.52	—	24.02

注:大柳塔、张家峁、柠条塔、红柳林煤矿部分钻孔的导水裂隙带发育到地表,因此,裂采比无数据;探测数据来源于陕西省一八五煤田地质有限公司、陕煤化集团所属煤矿、榆林能源集团所属煤矿、神东矿业集团公司及部分公开发表的文献。

同时,当煤层埋深较大时,弯曲下沉带往往会产生由上向下发育的下行张拉裂隙带。其宽度、深度与采深、采厚、顶板处置方式、土层性质及其厚度等诸多因素有关。笔者根据数值模拟试验得到:下行裂隙带深度一般为采高的2倍左右;但依据小保当矿区原位探测及开挖揭示的下行裂隙带均小于采高,可见,其具体发育深度应据实测和模拟等方法综合确定。而且下行裂隙带发育深度对地表水下渗影响显著,若一旦与上行裂隙带贯通,将造成地表生态水位的严重破坏。因此,开展下行裂隙带发育深度的精准判别及地质勘探技术分析,是采动

过程导水裂隙带发育规律研究的又一重要工作。

此外,上行、下行裂隙带发育形态也是采煤过程地质条件变化必须考虑的基础性工作,准确掌握其发育形态有利于实现导水裂隙带发育演化过程的系统化把握。据笔者团队及前期类似研究表明:陕北浅埋煤层上行导水裂隙带高度在采空区巷道、开切眼附近呈增大趋势,具体发育特征表现为:沿工作面倾向呈中间最低,向两边工作面巷道位置增高的“马鞍型”特征;而下行裂隙带因处于弯曲下沉带内,受弯曲下沉带张拉作用影响,其最大发育深度多位于采空区边界,呈“O型”环绕。在空间

区位上,2者最大发育长度存在一定错位。可见,准确判定最大隔水岩层厚度是防止隔水岩组发生破坏的关键问题。

### 3 西部生态脆弱区保水开采分区及地质判据

西部生态脆弱区地表生态系统对地下水位具有极强的依赖性,合理的生态水位埋深控制红线为:确保该区在采动过程中及采后地下水位埋深始终维持在1.5~5.0 m。该生态红线成为该区域地下水位调控、地下采煤方式及煤炭保水开采的重要依据。而实现西部煤炭开采过程中生态环境保护,需确保煤炭开采过程中生态水位始终处于合理范围。但因不同区域所禀赋地质环境差异性,其生态水位保护与隔水层稳定性状况密切相关。因此,开展保水开采分区及针对性地质依据判别分析,是西部生态脆弱区煤炭减损开采的关键科学问题之三,其具体包括:①西部生态脆弱区保水开采分区思路构建;②西部生态脆弱区保水开采地质判别方法等2个方面。

#### 3.1 西部生态脆弱区保水开采分区思路构建

笔者根据煤-水空间地质特征及采动作用下隔水层损伤演化规律分析,将采煤后隔水性变化分为4种区域:隔水性稳定区、隔水性损坏区、隔水性变化区、无水影响区,并藉此提出其各自保水开采等级,具体保水开采分区思路为:

(1) 隔水性稳定区。该区域特点为:采煤过程引起的上行导水裂隙带与下行裂隙带未实现贯通,且极限隔水岩层厚度满足稳定隔水要求,具有一定的安全储备,一般不会导致明显的地表潜水流失情况。即认为,该区域即便采用长壁全部垮落法开采,仍可确保隔水层处于稳定状况,但该区域需要考虑的核心问题是:因采煤导致的地表过渡沉降引起的地下水溢出情况,其重点工作是控制沉降。

(2) 隔水性损害区。考虑极端条件,不计下行裂隙的影响,如果隔水岩组很薄,采用普通长壁开采隔水层完全处于上行裂隙带内,导致隔水性丧失。此类区域只能采取充填开采等特殊方法,才能实现保水开采条件。因此该区域核心工作为:控制隔水层损害型。若规划为水资源保护区,推荐暂不开采。

(3) 隔水性变化区。若采动后隔水层位于裂隙

带和弯曲下沉带之间,可以根据上行裂隙和下行裂隙的最小距离,判断采动隔水性的稳定性。通过限制采高分层开采、协调开采等方式,降低上行导水裂隙带高度,同时,考虑裂缝弥合地质特性或采用裂缝弥合控制技术,以避免上行裂隙与下行裂隙贯通,实现保水开采。该区域属于可控保水限采型。

(4) 无水影响区。陕北部分区域存在无潜水层发育情况,应鼓励大规模开采,但该区域大部分位于黄土塬梁区,应注意大面积采空区形成后的顶板垮塌及其诱发的地表塌陷、崩塌、滑坡等地质灾害问题。

基于以上西部生态脆弱区保水开采分区思路,实现保水采煤方法步骤为:①分析影响采煤冒裂带发育高度的核心因素;②探究不同地质赋存、采煤方法条件下冒裂带发育高度及演化过程;③掌握冒裂带发育状况与目标保护含水层空间关系,评价采动隔水岩层厚度及其安全性;④基于采高、隔水岩组发育状况及含/隔水层空间关系等综合因素,划分该区域保水开采等级,并绘制平面区划图;⑤结合保水开采区划状况,推荐适用其实际情况的保水采煤方法。

以榆神府矿区为例,笔者根据开采厚度、隔水岩组及含(隔)水层的空间关系,确定分区原则为:①隔水岩组与采厚比 $> 33 \sim 35$ 倍的区域,采煤产生的裂隙带不会沟通含水层,但需要注意地表沉降引起的地下水溢出成湖问题,为控制沉降区;②对隔水岩组与采厚比 $< 18$ 倍的区域,采煤裂隙带将发育到含水层,疏干地下水,须采用特殊开采方式才能实现隔水层问题,为控制损害区;③隔水岩组厚度在 $18 \sim 35$ 倍采厚之间的区域,需限制裂隙带发育高度,即通过限高开采和协调开采方式,实现保水开采,为保水限采区;④针对无水影响区,其不存在保水采煤问题,但需要注意地表次生地质灾害,为防灾开采区。进而实现对不同区域隔水层稳定性的分区评价,进而确定各自对应的保水采煤方式,详细分区结果如图6所示。该分区思路可为西部生态脆弱区类似地质特征保水采煤区划分提供借鉴。

#### 3.2 西部生态脆弱区保水开采地质判别方法

基于上述分析,西部生态脆弱区浅埋煤层保水开采核心在于:采煤引起的冒裂带发育高度与所保护含水层的间距满足隔水要求。因此,笔者依据2者之间的空间位置关系,提出了确保隔水层稳定的

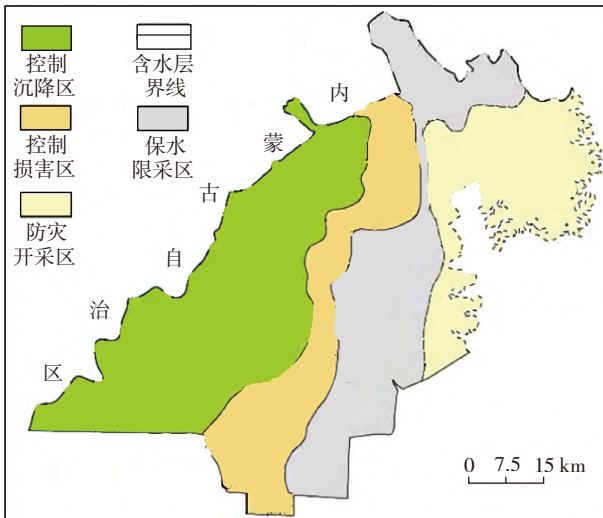


图6 陕北榆神府矿区保水开采分区

Fig. 6 Water conservation mining of Yushenfu mining area in Northern Shaanxi

地质判别依据为

$$H_f = H_g - (H_{dmax} + H_{smax}) > H_b \quad (2)$$

式中,  $H_f$  为最小隔水岩层厚度, m;  $H_g$  为隔水岩层厚度, m;  $H_{dmax}$ ,  $H_{smax}$  分别为下行导水裂隙带、上行导水裂隙带垂向投影最大长度, m;  $H_b$  为采后稳定隔水岩层厚度, m, 其与隔水岩层力学性质、水理性质等存在密切关系。

提高隔水岩组抗损害能力是减小裂隙发育高度的有效途径<sup>[3]</sup>。而下行、上行导水裂隙带垂向投影最大长度的确定, 是准确把握其隔水稳定性评价的前提性工作, 2者受煤层赋存特征、覆岩物理力学性质、采煤方法、采动覆岩移动破坏规律等诸多因素的影响。因此, 如何从导水裂隙带形成的地质机制出发, 通过多元勘探技术手段, 准确把握下行、上行导水裂隙带发育演化规律, 是实现准确判别分析的重要工作。此外, 采后稳定隔水岩层的厚度是判别隔水稳定性的“控制因子”, 现阶段常规推荐采用3~5倍采高, 其合理性选择仍有待系统化分析。

总体而言, 关于西部生态脆弱区保水开采地质判别方法研究任重而道远, 主要涉及到隔水岩层厚度、下行及上行导水裂隙带投影长度及采后稳定隔水岩层厚度等参数的准确确定, 是进一步完善保水开采地质判别方法的重要工作。

#### 4 西部生态脆弱区煤炭减损开采技术体系构建

立足于西部生态脆弱区实现“高效采煤、最小

扰水”的核心目标, 应以防止隔水岩组破坏为目标、科学合理采煤方法为基础、多元减损地质工程手段为支撑, 实现针对西部生态脆弱区不同地质条件的适宜性减损开采方法选取, 进而构建西部生态脆弱区煤炭减损开采技术体系, 系西部煤炭减损开采的关键科学问题之四, 包括: ① 煤炭减损开采技术适宜性评价; ② 西部生态脆弱区煤炭减损开采技术体系构建2个方面。

##### 4.1 煤炭减损开采技术适宜性评价

我国西部煤炭资源赋存条件较好、含煤岩系构造相对简单、特别是煤田面积大、煤层赋存状态比较稳定、中厚-厚煤层为主、含煤地层倾角较缓, 总体上煤炭开采条件优越, 适用于现代大规模开发。随着我国采掘装备与采煤技术的提高, 最大限度地提高了资源回采率、安全保障率、生产效率。现阶段, 长壁式大采高综采工艺<sup>[31-32]</sup>、短壁开采技术<sup>[33-34]</sup>及综采放顶煤技术<sup>[35-37]</sup>等采煤技术快速发展, 建成一批具有影响力的高产、高效、高回收率的千万吨矿井, 形成了西部煤炭资源的现代化开采模式。但受制于西部生态脆弱区可持续发展的需求, 维系合理的生态水位埋深, 成为西部生态脆弱区煤炭开采必须考虑的问题。发展适用于西部生态脆弱区的煤炭减损开采技术成为重大现实需求。基于此, 笔者对现阶段煤炭减损开采技术进行梳理, 并将相关减损开采方法归纳为: 充填法、加固法、减扰法、复合法等4种类型, 并结合其适用状况开展优劣性评价, 详见表2。

根据以上4种减损开采方法梳理, 各类方法均存在其优劣性, 立足于西部生态脆弱区减损开采现实状况, 探究适宜性减损开采技术应为下阶段需要重点关注的工作之一。

##### 4.2 西部生态脆弱区减损开采技术体系构建

基于上述分析可知, 实现西部生态脆弱区煤炭减损开采, 应树立以地质保障技术为基础、减少采动损害为途径, 以生态水位保护为核心的“三位一体”发展理念, 进而形成适宜于西部生态脆弱区的新型减损开采技术方法。具体应包括: ① 多元地质探测技术掌握煤层开采过程中地应力场、岩层应变场、地下水渗流场变化规律, 揭示煤炭开采对覆岩地质条件损害机理; ② 提出适合于赋存地质状况的煤炭开采减损地质工程理论及技术体系; ③ 构建采煤与生态环境保护协调发展的绿色减损开采方法,

表2 西部生态脆弱区煤炭减损开采技术汇总一览

Table 2 Summary of coal loss reduction mining technology in the fragile ecological area of Western China

减损方法	减损开采技术	优点	缺点
充填法	采空区全域充填开采 <sup>[38]</sup>	降低覆岩破断风险,可有效抑制地表沉陷、地表生态和生态水位保护效果佳	充填成本较高,全采空区充填存在资源浪费情况;充填方式有进一步优化的现实需要
	局部(间隔)充填开采 <sup>[39]</sup>	降低覆岩破断风险,可有效抑制地表沉陷、地表生态和水保障效果佳	充填间隔宽度及宽度确定尚不够成熟
	离层注浆充填开采 <sup>[40-41]</sup>	有效保障关键层稳定,降低地表生态环境扰动	注浆成本较高;注浆效果评价难度大
加固法	沿空留巷柔模支护 <sup>[42-43]</sup>	支护强度高、柔性好、施工工艺简单、速度快;减少掘进工程量,采出率高	局限于沿空留巷,使用条件受限
	预注浆加固导水裂隙带 <sup>[11]</sup>	有效封堵导水裂隙通道,降低冒落带过度发育,产生连通地表生态水位风险	施工难度大;注浆效果评价难度大
减扰法	(窄)条带开采 <sup>[38,44-45]</sup>	对地表沉陷控制效果好,提高顶板隔水层稳定性,保护上部含水层结构安全	采出率低,煤炭资源浪费多;条带开采布局及方法不成熟
	协调式跳采全采 <sup>[38,46]</sup>	煤炭采出率高,对原有生产方式改变低;可分阶段控制保护对象的总体变形量	停采后对隔水层存在安全影响;对潜水位较高或地表雨季积水难以排除地区效果不佳
	房柱式采煤法 <sup>[47]</sup>	对地表移动、变形的控制效果好	现阶段地表沉陷预测尚不充分;密集建筑物下效果不佳
复合法	深孔预裂弱化爆破开采 <sup>[48]</sup>	有效处理坚硬厚煤层顶煤难冒落问题,改善顶煤冒放性,提高采出率	适用条件局限于坚硬厚煤层
	限高分层开采 <sup>[49]</sup>	对厚煤层分层开采,有效抑制导水裂隙带发育高度,提高隔水层隔水效果	资源采出率低;采高、工作面长度选择与隔水层稳定性关系认知有待深入研究
复合法	离层分区隔离-注浆充填 <sup>[50]</sup>	留设隔离煤柱、地表离层空间注浆联合措施,有效防止覆岩发生整体大面积移动	技术可靠性和控制效果有待进一步验证
	条带开采-采空区充填 <sup>[51]</sup>	可节约充填材料、提高生产效率,降低地表生态环境扰动	在充分采动的情况下,充填支撑体稳定性与可靠性有待系统研究
	条带开采-垮落体加固 <sup>[38]</sup>	有利于控制地表采动影响,提高煤炭采出率	缺乏完善理论和技术体系(如:垮落体充填技术及充填量;条带开采与垮落充填工序等)
	宽条带全柱充填开采 <sup>[52]</sup>	采充分离,不影响正常生产;充填成本大大降低,回采高效	充填体强度和充填率确定难度大,生产效率低
	“采-充-留”协调开采 <sup>[53]</sup>	采出率、生产效率较高,并可有效控制地表变形	对充填体与煤柱联合支撑体稳定性研究不深入;充填体或柱体承载机理认知尚不清楚

形成适应于西部生态脆弱区的新型采煤工艺及方法。实现西部生态脆弱区煤炭开采绿色、高效、智能、可持续发展。

据此,笔者尝试构建西部生态脆弱区煤炭减损开采技术体系,具体包括:①以精细化地质勘探为基础;应采用智能化、精细化先进地质勘探手段,重点明确煤层、覆岩和含水层空间组合特征,掌握核心保护层(如:隔水层、关键层等)的地质结构发育特征;②以采动过程覆岩隔水性损害分区为途径;应立足于煤水空间地质特征及采动作用下隔水层损伤演化规律精细化分析,对采煤后隔水性变化进行科学分区,进而确定各自合理的保水开采等级;③以减小或避免地下生态水位变化的减损技术发展为核心;应探究不同采动损害条件下的多元减损技术方法;如:对煤层直接顶垮塌冒落可充满采空区的情况,要优先发挥顶板垮落体的碎胀特性,通

过点源式注浆方式形成原位式支护体;对直接顶冒落难以充填采空区范围的情况,应采用局部充填式支护方式,形成间隔式垛桩支护体;而对于基本顶大面积悬空情况,需要考虑通过预加固方式,以形成稳定性地下空间体,服务于矿区地下空间后期开发利用;④以采煤全过程地质保障与采煤方法协调选择为手段;应重视采前、采中、采后全过程地质保障技术的应用,结合全过程精细化地质监测,选择及动态化调整合理的采煤工艺及参数,以实现最大限度减小对隔水层损害;⑤以保障地表生态环境扰动处于承受范围为目标;应重点监测地下生态水位变化状况,始终确保生态水位处于合理的变化范围,对于已产生生态水位改变的情况(如:地下水位大幅抬升或降低),应及时采取必要措施,使其恢复至原有生态水位状况,以最大限度降低对地表生态环境的扰动影响。

## 5 西部生态脆弱区煤炭减损开采技术展望

立足于“煤炭资源作为国家基础能源保障地位短期不会改变”、“绿水青山就是金山银山”的双重战略高度,实现西部煤炭减损开采的核心要义为:用最小的环境扰动换取最大的煤炭资源开采效益,实现煤炭开采与生态环境保护协调发展。因此,创新发展符合西部地质特点的煤炭减损开采技术,研究确保西部生态脆弱区地质保障技术,是现阶段西部煤炭资源开采的现实需求。

基于西部煤炭减损开采技术构建思路,笔者对西部生态脆弱区煤炭减损开采技术未来发展进行展望,具体包括:

(1) 未来西部生态脆弱区煤炭开采应尤为重视煤炭地质勘探工作,地质勘探在实现资源量探明及赋存规律勘探的同时,查明煤层、隔水层、含水层空间组合特征,揭示维系地表生态系统安全、可持续发展的全方位地质保障条件,为煤炭减损开采和清洁利用提供基础地质依据。

(2) 未来西部生态脆弱区煤炭开采要坚持地质勘探先行,且地质勘探工作必须由地面走向地下矿井,基于全方位地质勘探技术实现采矿过程的安全、高效、可持续发展,通过智能化、精细化先进的地质勘探手段,准确把握开采过程中的地质条件变化规律及典型损害特征,为减少采动损害提供全面的地质保障。

(3) 未来西部生态脆弱区煤炭减损开采技术的发展应实现采矿工程与地质工程、岩土工程的深度融合,从综合地质基础化保障角度出发,发展适用于不同赋存地质环境的多元减损开采技术,并探究不同技术的最佳适用地质条件及应用场景。

(4) 未来西部生态脆弱区煤炭减损开采技术应遵循“绿色、协调、可持续”发展思路,实现地上生态环境保护与地下减损技术协调化布局,并从区域生态环境全生命周期考虑,确保采煤全过程及采后的长效生态环境安全。

(5) 未来西部生态脆弱区煤炭减损开采技术应重视新技术、新材料、新工艺的发展,积极发展智能化开采技术、大数据动态反馈减损开采技术、流态化开采技术及地下原位气化技术等;积极引入新材料(如:高效低廉充填材料、耐久加固材料、长距离可泵送材料、柔性支撑材料等)服务于减损开采;积

极发展新型减损工艺(如:井下定向钻孔注浆工艺、采空区垮落体碎胀加固支撑工艺、间隔式局部支撑减损工艺等)。

## 6 结论

(1) 准确掌握煤-水空间组合特征是西部生态脆弱区煤炭开采与环境保护协调发展的关键性科学问题,开展煤-水空间组合特征研究、科学合理确定煤-水空间组合类型,是预测掌握采动对含水层影响状况的基础性工作。

(2) 揭示西部生态脆弱区采动过程中的地质条件变化规律,需重点关注:① 采动过程覆岩破碎规律及多场耦合特征,② 采动过程中导水裂隙带演化规律;其中,采用科学合理的地质勘探方法及理论分析手段,确定导水裂隙带发育高度及空间发育特征是针对性发展减损开采技术的基础前提。

(3) 立足于西部生态脆弱区地下生态水位埋深的现实要求,应根据不同区域所禀赋的地质环境差异性,开展保水开采分区及针对性地质依据判别分析,实现隔水性变化科学分区,以进一步确定合理的保水开采等级。

(4) 西部生态脆弱区煤炭开采应重视减损开采方法的发展,并应考虑不同地质条件开展适宜性方法评价;同时,结合隔水性变化科学分区及保水开采等级要求,选择合理的减损开采技术方法。

(5) 初步构建了西部生态脆弱区煤炭绿色减损开采技术体系,包括:① 以精细化地质勘探为基础;② 以采动过程覆岩隔水性损害分区为途径;③ 以减小或避免地下生态水位变化的减损技术发展为核心;④ 以采煤全过程地质保障与采煤方法协调选择为手段;⑤ 以保障地表生态环境扰动处于承受范围为目标。

(6) 西部生态脆弱区煤炭减损开采技术未来发展方向应包括:① 尤为重视煤炭地质勘探工作,并实现全过程地质保障服务;② 地质勘探工作应由地面走向地下矿井,基于全方位、智能化、精细化地质勘探手段,实现开采过程地质条件变化及损害特征精准把握;③ 煤炭减损开采技术发展应实现多学科交叉融合,并应遵循“绿色、协调、可持续”的发展思路,积极探索新技术、新材料、新工艺的应用。

## 致谢

本文在资料搜集及整理过程中,得到了西安科技大学硕士研究生侯新、郝建帅、白志鹏、杨宏伟、魏欣等的大力协助;西安科技大学王生全教授、宋世杰副教授对提升行文质量提出了诸多建设性意见,在此一并表示感谢!

## 参考文献(References):

- [1] 王双明. 对我国煤炭主体能源地位与绿色开采的思考[J]. 中国煤炭, 2020, 46(2): 11-16.  
WANG Shuangming. Thoughts about the main energy status of coal and green mining in China[J]. China Coal, 2020, 46(2): 11-16.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采及其技术体系[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 1-5.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Resources and environment harmonics(green) mining and its technological system[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 1-5.
- [3] 顾大钊, 张勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1-7.  
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1-7.
- [4] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究30年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1-30.  
FAN Limin, MA Xionged, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 1-30.
- [5] 张东升, 李文平, 来兴平, 等. 我国西北煤炭开采中的水资源保护基础理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 36-43.  
ZHANG Dongsheng, LI Wenping, LAI Xingping, et al. Development on basic theory of water protection during coal mining in Northwest of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 36-43.
- [6] 郭俊廷, 管力, 杨国柱, 等. 煤矿开采减损技术评述[J]. 中国矿业, 2017, 26(S1): 333-337.  
GUO Juntong, GUAN Li, YANG Guozhu, et al. Review of mitigate mining-induced damage technology in coal mines[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S1): 333-337.
- [7] 王双明, 范立民, 黄庆享, 等. 陕北生态脆弱矿区煤炭与地下水组合特征及保水开采[J]. 金属矿山, 2009, 38(S1): 697-702, 707.  
WANG Shuangming, FAN Limin, HUANG Qingxiang, et al. Study on coal mining for protecting ecological water level in the ecological fragile mining area[J]. Metal Mine, 2009, 38(S1): 697-702, 707.
- [8] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7-14.  
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Study on overburden aquelude and water protection mining regionization in the ecological fragile mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 7-14.
- [9] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
WANG Shuangming, HUANG Qingxiang, FAN Limin, et al. Coal mining and ecological water level protection in ecologically fragile areas[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [10] 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 17-26.  
WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at Northern Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17-26.
- [11] 王双明, 范立民, 黄庆享, 等. 基于生态水位保护的陕北煤炭开采条件分区[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(3): 81-83.  
WANG Shuangming, FAN Limin, HUANG Qingxiang, et al. Study on the condition of mining project in Northern Shaanxi based on ecological water level protection[J]. Mining Safety & Environmental, 2010, 37(3): 81-83.
- [12] 刘晓琼. 生态脆弱区大型能源开发对区域发展的影响及优化调控[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.  
LIU Xiaoqiong. The influence of large scale energy exploitation and the corresponding optimal control in vulnerable eco-regions[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2007.
- [13] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 67-74.  
YANG Zeyuan, WANG Wenke, HUANG Jinting, et al. Research on buried depth of eco-safety about groundwater table in the blown-sand region of the Northern Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2006, 34(8): 67-74.
- [14] 杨泽元. 地下水引起的表生生态效应及其评价研究——以秃尾河流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2004.  
YANG Zeyuan. Study on supergene ecological effect excited by groundwater and its evaluatiin——Take Tuwei river drainage as an example[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [15] 侯恩科, 车晓阳, 冯洁, 等. 榆神府矿区含水层富水特征及保水采煤途径[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 812-819.  
HOU Enke, CHE Xiaoyang, FENG Jie, et al. Abundance of aquifers in Yushenfu coal field and the measures for water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 812-819.
- [16] 张茂省, 卢娜, 陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1299-1312.  
ZHANG Maosheng, LU Na, CHEN Jinsong. Ecological effects of vegetations during groundwater exploitation in the Northern Shaanxi Energy & Chemical Industry Base, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1299-1312.
- [17] 王威, 苏小四, 王小元. 地下水开采下的植被生态风险评价——以鄂尔多斯乌兰淖地区为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1344-1352.  
WANG Wei, SU Xiaosi, WANG Xiaoyuan. Vegetation ecological risk assessment research under the impact of groundwater withdraw: A case study of Wulannao area, Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University

- (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1344-1352.
- [18] 宋世杰, 赵晓光, 王双明, 等. 覆岩内砂岩层数对开采沉陷的影响分析与数值模拟[J]. 矿业安全与环保, 2014, 41(5): 9-12, 16.  
SONG Shijie, ZHAO Xiaoguang, WANG Shuangming, et al. Analysis on influence of sandstone layer number in overburden strata upon mining subsidence and its numerical simulation[J]. Mining Safety & Environmental, 2014, 41(5): 9-12, 16.
- [19] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术40a及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1): 013501.  
KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013501.
- [20] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973-984.  
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973-984.
- [21] 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.
- [22] 宋振骥. 实用矿山压力控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.  
SONG Zhenqi. Practical mine pressure control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988.
- [23] 王家臣. 基于采动岩层控制的煤炭科学开采[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(1): 013505.  
WANG Jiachen. Sustainable coal mining based on mining ground control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(1): 013505.
- [24] 黄庆享, 张文忠. 浅埋煤层条带充填保水开采岩层控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
HUANG Qingxiang, ZHANG Wenzhong. Strata control strip-filling in water preserving mining of shallow seam[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [25] 任艳芳, 齐庆新. 浅埋煤层长壁开采围岩应力场特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1612-1618.  
REN Yanfang, QI Qingxin. Study on characteristic of stress field in surrounding rocks of shallow coalface under long wall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1612-1618.
- [26] 李正杰. 浅埋薄基岩综采面覆岩破断机理及与支架关系研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.  
LI Zhengjie. Research on the overlying strata breakage mechanism and the relationship between supports and surrounding strata in shallow-buried and thin bedrock working face[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [27] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 122-126.  
XU Jialin, QIAN Minggao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 122-126.
- [28] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.  
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [29] 高保彬, 刘云鹏, 潘家宇, 等. 水体下采煤中导水裂隙带高度的探测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3384-3390.  
GAO Baobin, LIU Yunpeng, PAN Jiayu, et al. Detection and analysis of height of water flowing fractured zone in underwater mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3384-3390.
- [30] 国家安全监管总局等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.  
The State Administration of Work Safety, et al. Code for coal pillar retention and compressed coal mining in buildings, water bodies, railways and main shafts[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017.
- [31] 刘喜全. 厚煤层采煤技术的发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(14): 217-218.  
LIU Xiquan. Development of coal mining technology in thick coal seam[J]. China Petroleum Chemical Standard and Quality, 2019, 39(14): 217-218.
- [32] 武强, 申建军, 王洋. “煤-水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 8-16.  
WU Qiang, SHEN Jianjun, WANG Yang. Mining techniques and engineering application for “Coal-Water” dual-resources mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 8-16.
- [33] 刘玉德, 闫守峰, 刘东升. 浅埋薄基岩煤层短壁连采模式及应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 12(6): 51-56.  
LIU Yude, YAN Shoufeng, LIU Dongsheng. Study on the pattern and the application of short-wall continuous mechanical mining in shallow coal seam with thin bedrock[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 12(6): 51-56.
- [34] 刘克功, 徐金海, 缪协兴. 短壁开采技术及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007: 1-8.  
LIU Kegong, XU Jinhai, MIAO Xiexing. Short-wall mining technology and its application[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007: 1-8.
- [35] 王家臣. 我国综放开采技术及其深层次发展问题的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(1): 14-17.  
WANG Jiachen. Fully mechanized longwall top coal caving technology in China and discussion on issues of further development[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(1): 14-17.
- [36] 赵经彻. 我国综采放顶煤开采技术及其展望[J]. 中国工程科学, 2001, 3(4): 9-16.  
ZHAO Jingche. Longwall top coal caving method and its future in China[J]. Engineering Sciences, 2001, 3(4): 9-16.
- [37] 吴健. 我国放顶煤开采的理论研究与实践[J]. 煤炭学报, 1991,

- 16(3): 1-11.  
WU Jian. Theory and practice of sub-level caving method in China[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(3): 1-11.
- [38] 郭俊廷, 管力, 杨国柱, 等. 煤矿开采减损技术评述[J]. 中国矿业, 2017, 26(S1): 333-337.  
GUO Junting, GUAN Li, YANG Guozhu, et al. Review of mitigate mining-induced damage technology in coal mines[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S1): 333-337.
- [39] 张文忠, 黄庆享. 浅埋煤层局部充填开采上行裂隙发育高度研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 40-42.  
ZHANG Wenzhong, HUANG Qingxiang. Research on the height of upward crack development in partial backfill mining of shallow seam[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(4): 40-42.
- [40] 徐乃忠, 张玉卓. 覆岩离层注浆控制地表沉降技术的应用[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(9): 1-3.  
XU Naizhong, ZHANG Yuzhuo. Application of surface subsidence control under overburden grouting[J]. Coal Science and Technology, 2000, 28(9): 1-3.
- [41] 赵德深, 范学理, 刘文生. 采煤区覆岩与地表沉降控制技术研究与展望[J]. 中国安全科学学报, 1998, 8(3): 54-57.  
ZHAO Deshen, FAN Xueli, LIU Wensheng. Study and prospect of the control technology for surface subsidence and overlying strata at mining area[J]. China Safety Science Journal, 1998, 8(3): 54-57.
- [42] 李宇龙. 柔模泵注混凝土支护的沿空留巷技术研究[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(2): 5-8, 45.  
LI Yulong. Research on the gob-side entry retaining technology based on flexible formwork and pumped concrete support[J]. Shaanxi Coal, 2018, 37(2): 5-8, 45.
- [43] 吴玉意. 柔模泵注混凝土支护原理与参数研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.  
WU Yuyi. Research on the principles and parameters of flexible formwork and pump-concreted support[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.
- [44] 徐连利. 平朔一号井工矿顶板水害评价方法与应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.  
XU Lianli. Research method and its application on water damage of roof at Pingshuo No.1 Shaft[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2010.
- [45] 仵拨云. 窄条带式保水采煤技术及应用效果[A]. 2018年全国工程地质学术年会论文集[C]. 北京:《工程地质学报》编辑部, 2018: 432-438.  
WU Boyun. The technology and application effect of water-preserved mining with narrow strip[A]. Proceedings of the 2018 National Annual Conference on Engineering Geology[C]. Beijing: Editorial Department of Journal of Engineering Geology, 2018: 432-438.
- [46] 郭文彬. 孟加拉国Barapukuria井田三厚条件下协调减损开采理论研究与应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.  
GUO Wenbin. Research and its application of coordination mining considering disaster reduction prevention Bangladesh Barakupuria mine with all thick seam, loosen aquifer zone and sadstone roof[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [47] 姜岩, 韩晓冬, 卿熙宏. 房柱式开采地表沉降力学研究[J]. 矿山测量, 1999(3): 44-46, 59.  
JIANG Yan, HAN Xiaodong, QING Xihong. Prediction of surface subsidence due to coal mining with room-and-pillar system based on theory of elastic mechanics[J]. Mine Surveying, 1999(3): 44-46, 59.
- [48] 张立其, 李志军. 坚硬厚煤层综采放顶煤工艺巷预裂爆破开采技术[J]. 中国煤炭, 2011, 37(10): 50-52.  
ZHANG Liqi, LI Zhijun. Pre-split blasting mining techniques of full-mechanized caving mining technology roadway in hard thick seam[J]. China Coal, 2011, 37(10): 50-52.
- [49] 王飞龙. 浅埋深煤层河床下限高协调开采技术及应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.  
WANG Feilong. Partition height limit shallow seam mining research under the river[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.
- [50] 朱卫兵, 许家林, 赖文奇, 等. 覆岩离层分区隔离注浆充填减沉技术的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 458-462.  
ZHU Weibing, XU Jialin, LAI Wenqi, et al. Research of isolated section-grouting technology for overburden bed separation space to reduce subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 458-462.
- [51] 杜献杰. 煤矿结构充填开采“充填体-直接顶”复合承载结构稳定性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
DU Xianjie. Research on the stability of "backfill body-immediate roof" combined bearing structure in constructional backfill coal mining[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [52] 刘贵. 村庄下宽条带全柱开采及其应用的优化[A]. 全国“三下”采煤学术会议论文集[C]. 北京: 中国煤炭学会, 2012: 102-107.  
LIU Gui. Optimization of wide strip full-pillar extraction and its application under the village[A]. Proceedings of the National Conference of Coal Mining under Buildings, Railways and Water Bodies[C]. Beijing: China Coal Society, 2012: 102-107.
- [53] 戴华阳, 郭俊廷, 阎跃观, 等. “采-充-留”协调开采技术原理与应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1602-1610.  
DAI Huayang, GUO Junting, YAN Yueguan, et al. Principle and application of subsidence control technology of mining coordinately mixed with backfilling and keeping[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1602-1610.