

# 煤矿全生命周期绿色开采研究展望

许家林<sup>1,2</sup>,鞠金峰<sup>3</sup>,轩大洋<sup>2</sup>,秦伟<sup>1</sup>,朱卫兵<sup>2</sup>,胡国忠<sup>2</sup>,王晓振<sup>2</sup>,谢建林<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;3.中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心,江苏 徐州 221008)

**摘要:**煤矿绿色开采理念提出 20 a 来,理论研究与技术实践取得了重大创新进展,但在精确量化预测、提效降本控制等方面与生产实际需求仍然存在差距。阐述了煤矿全生命周期绿色开采技术框架,提出了煤矿绿色开采需要深入研究的若干方向和建议。在基础理论方面,应遵循关键层理论的“全地层”学术思想,深入研究采动覆岩卸荷膨胀累积效应及其对岩层移动的影响,建立自下而上涵盖煤层直至地表的全地层移动时空动态模型,实现采动应力、裂隙与沉陷的定量预测,最终形成不同地质开采条件下岩层移动的数字孪生模型。在技术方面,需充分利用岩层移动规律,研究发展适应煤矿高效生产的低成本绿色开采技术,具体而言,重点攻关方向之一是“一注五减”绿色开采解决方案,针对绿色开采中采动损害控制领域面临的煤矿充填材料不足问题与“双碳”目标,研发“煤矸石+粉煤灰+CO<sub>2</sub>”覆岩隔离注浆充填绿色开采技术,实现减沉(减少地表沉陷)、减漏(减少地下水漏失)、减震(减少应力集中与矿震)、减排(减少固废排放)、减碳(减少 CO<sub>2</sub>排放)等“五减”绿色开采效果。另一个需要重点攻关的方向是采动破坏含水层的修复技术,特别是在西部生态脆弱矿区(尤其是浅埋煤层),需给予充分重视,建议借鉴采后土地复垦,通过相关技术与标准研究将含水层修复列为必备环节,进一步落实全生命周期绿色开采。

**关键词:**岩层移动;关键层;覆岩隔离注浆充填;含水层修复;绿色开采

**中图分类号:**TD823.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-3357(2023)01-0079-12

## Prospects for green mining research of coal mine life cycle

XU Jialin<sup>1,2</sup>, JU Jinfeng<sup>3</sup>, XUAN Dayang<sup>2</sup>, QIN Wei<sup>1</sup>, ZHU Weibing<sup>2</sup>, HU Guozhong<sup>2</sup>, WANG Xiaozhen<sup>2</sup>, XIE Jianlin<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Exploration and Intelligent Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3.IOT Perception Mine Research Center, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** The concept of green mining in coal mines has been proposed for 20 years, and significant innovative progress has been made in theoretical research and technical practice. However, there is still a gap between accurate quantitative prediction, efficiency improvement, cost reduction control, and actual production needs. This article elaborates on the technical framework for green mining of coal mines life cycle, and proposes several directions and suggestions for in-depth research on green mining. In terms of basic theory, we should follow the academic idea of “whole strata” in the key strata theory, conduct in-depth research on the cumulative effect of unloading and expansion of mining overlying strata and its impact on strata movement, establish a spatiotemporal dynamic model of the entire strata movement from bottom to the surface, achieve quantitative prediction of mining stress, fractures, and subsidence, and

收稿日期:2023-11-03 修回日期:2023-12-03 责任编辑:郭晓伟

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52374143,52174212,U22A20169,52274097,52074265)

作者简介:许家林(1966—),男,江苏句容人,教授,博士生导师。E-mail:cumtxjl@cumt.edu.cn

引用格式:许家林,鞠金峰,轩大洋,等.煤矿全生命周期绿色开采研究展望[J].绿色矿山,2023,1(1):79-90.

XU Jialin, JU Jinfeng, XUAN Dayang, et al. Prospects for green mining research of coal mine life cycle[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 79-90.



移动阅读

ultimately form a digital twin model of strata movement under different geological mining conditions. In terms of technology, it is necessary to fully utilize the laws of strata movement and research and develop low-cost green mining technologies that are suitable for efficient production in coal mines. Specifically, one of the key research directions is the “one injection and five reductions” green mining solution. In response to the problem of insufficient coal mine filling materials and the “dual carbon” goal, the “coal gangue + fly ash + CO<sub>2</sub>” overburden isolated grout injection green mining technology is developed, Realize the “five reductions” of green mining effects, including reducing subsidence, reducing water leakage, reducing stress concentration and mining tremors, reducing solid waste emissions, and reducing CO<sub>2</sub> emissions. Another key direction that needs to be focused on is the restoration technology for mining damaged aquifers, especially in ecologically fragile mining areas in the western region (especially shallow coal seams), which needs to be given full attention. It is recommended to learn from post mining land reclamation and make aquifer restoration a necessary link through relevant technology and standard research, further implementing green mining of coal mine life cycle.

**Key words:** strata movement; key strata; overburden isolated grout injection; restoration for mining damaged aquifers; green mining

为了解决煤矿开采引起的一系列采动损害与环境问题,钱鸣高院士早在2000年前后就提出了煤矿绿色开采理念,并对其内涵和技术框架进行了系统阐述<sup>[1-15]</sup>。绿色开采提出后得到了国内外学术界和煤炭行业的积极响应。经过20 a的研究和工程实践,我国煤矿绿色开采技术创新百花齐放,实施成效显著<sup>[14]</sup>。

从实践来看,煤矿绿色开采虽取得了很大进展,但在精确量化预测、提效降本控制等方面与生产实际需求仍然存在差距。例如,当前尚没有全地层岩层移动时空动态模型,难以实现采动应力、裂隙与沉陷的定量预测,缺少用于采前预测、采中调控的岩层移动虚拟复刻模型。再如,采动损伤控制是绿色开采的核心,但充填减损技术仍需攻克高效率低成本等问题,尤其是需结合“双碳”目标与环境保护,实现煤矿超大量固气液充填减损技术突破。此外,对含水层采动破坏后修复的重视程度不够,含水层采动破坏改变了区域地下水径流与地表泉域,对地表生态造成严重影响,西部生态脆弱矿区(特别是浅埋煤层)尤为突出。这些均需要持续深入开展研究,形成煤矿的全生命周期绿色开采解决方案。

针对上述问题,笔者提出了绿色开采需要深入研究的若干方向和建议,重点对岩层移动时空动态规律、“一注五减”绿色开采解决方案、采动破坏含水层修复等3个方面进行了阐述。

## 1 煤矿全生命周期绿色开采技术框架

绿色开采是考虑环境保护与恢复、广义资源利用的煤炭开采技术,旨在通过控制或利用采动岩层运动,从源头减轻采煤对环境的不良影响,实现对煤层

及共伴生资源的共采或保护,在取得经济效益的同时,实现最佳的环境效益和社会效益。绿色开采的主要内涵包含以下3个方面:

(1)广义资源的理念。将与煤炭共存的瓦斯、地下水、地热、土地、煤矸石以及煤炭发电产生的粉煤灰和CO<sub>2</sub>等都作为矿区可开发利用或保护的资源,在开发利用煤炭资源的同时考虑对这些资源的保护和开发利用,通过绿色开采技术的创新实现瓦斯、地下水、地热等对煤炭安全生产有害的资源共采和保护,实现煤矸石、电厂粉煤灰及CO<sub>2</sub>等对环境有害的资源综合利用(主要作为矿井充填材料)。该理念彻底扭转了仅将煤炭作为矿区资源而漠视其他共存物甚至视其为有害物的传统观念。

(2)基于岩层运动规律的原则。煤炭开采引起的岩层运动是采动损害与环境问题的根源,岩层运动引起的应力场、位移场、裂隙场及渗流场分布演化规律是绿色开采的理论基础,因此,控制或利用采动岩层运动是绿色开采技术的基本手段。煤矿绿色开采技术的研究必须高度重视采动岩层运动规律的研究。

(3)源头减损及全生命周期的理念。在煤矿“采前—采中—采后”的全生命周期中规划绿色开采,重视从开采源头考虑煤共伴生资源(共存物)开发与环境保护。首先,必须在矿井规划设计阶段研究具体矿井条件下煤炭及其共伴生资源(共存物)与环境特点,评估煤炭开采岩层运动对共伴生资源(共存物)的影响,合理规划矿井绿色开采方案;在开采煤层过程中采用适宜的绿色开采技术保护其他资源或实现与煤共采,如充填开采、煤气共采、煤热共采、煤水共采等;对于现有技术难以有效控制(或在经济上不合理)的采动损害必须在采后进行修复,如地下含水层修复、土地复垦

等,其修复方案与技术研发应该结合采动岩层破断运动规律,以做到有的放矢和事半功倍。

绿色开采技术主要包括保水采煤、煤与瓦斯共

采、“三废”(固气液)减排、减沉开采与环境修复等方面,煤矿全生命周期的绿色开采技术框架如图 1 所示。

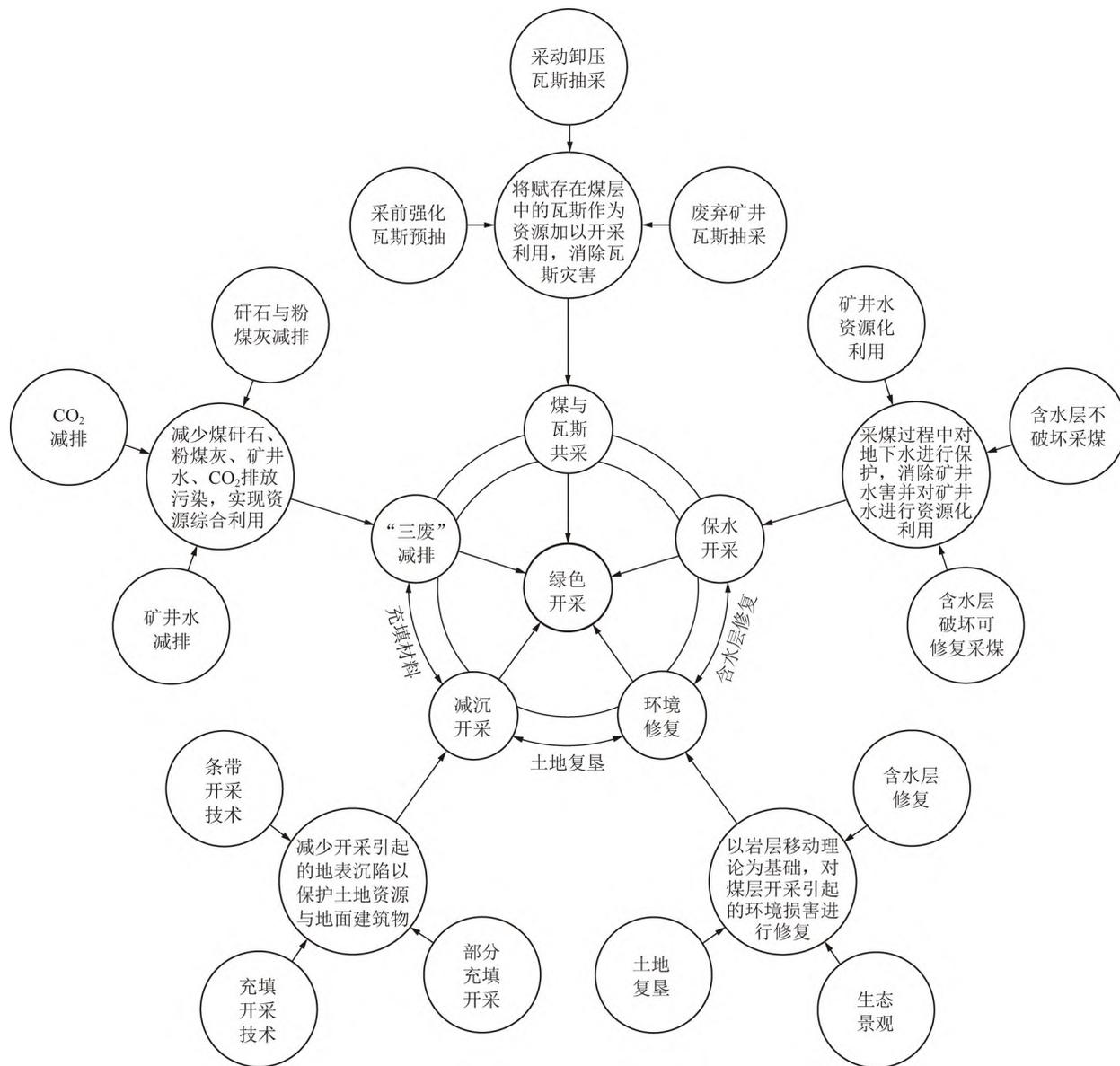


图 1 煤矿全生命周期绿色开采技术框架

Fig.1 Green mining technology framework of coal mine life cycle

目前,绿色开采理念已深入人心,“绿色开采”(green mining)一词也已成为国际采矿通用词汇。国家也将煤矿绿色开采纳入国家行业发展政策,先后出台了相关鼓励和支持政策<sup>[16-19]</sup>。中国矿业大学2008年开始连续举办“绿色开采理论与实践”国际研讨会(ISGM),有力促进了绿色开采技术的国际交流。2009年,中国矿业大学率先在采矿工程本科教学中开设《煤矿绿色开采技术》课程,主编出版了配套教材<sup>[11]</sup>,已在多个高校得到使用。绿色开采技术创新与实践也百花齐放、成效显著,尤其在煤与瓦斯共采、保水开采、充填开采等方面取得了重大进展<sup>[14]</sup>。

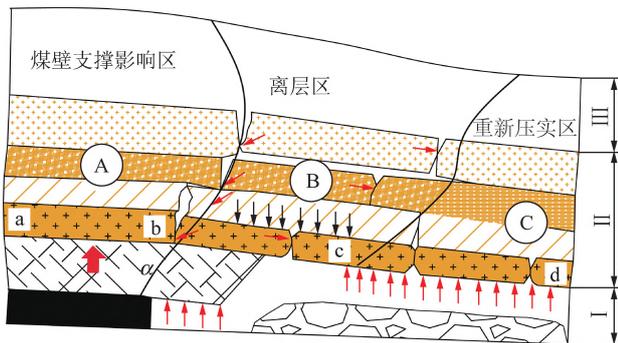
## 2 岩层移动时空动态规律

### 2.1 现状

煤层开采后,岩层移动是如何由下往上发展至地表的?岩层移动过程中内部岩体的采动应力、采动裂隙和采动变形是如何演化的?经过前人的长期不懈努力,目前对上述问题已有总体概貌的解答。

如,采矿工作者基本掌握了对回采工作面生产和支护影响较大的下部岩层的移动规律,同时针对岩层移动特征,就采场矿压显现的解释与控制提出了多种假说和理论,其中有代表性的有压力拱假说、悬臂梁

假说、预成裂隙假说、铰接岩块假说、砌体梁理论、传递岩梁等。“砌体梁”理论为采场矿压显现的科学解释、预测预报和控制提供了理论基础,形成了矿山压力及其控制的完备理论体系。该理论对上覆岩层直至地表的整体运动规律提出了“横三区”与“竖三带”认识(图2),即沿工作面推进方向上,覆岩分别经历煤壁支撑影响区(应力升高区)、离层区(应力降低区)和重新压实区(应力恢复区),由下向上岩层移动分为垮落带、裂缝带、弯曲下沉带。尽管形成了“三带”高度的经验预测方法,但对“三带”形成机理缺乏解释。图2所示的岩层移动是平面概貌而非三维空间的,是静态的而非动态过程的。



A—煤壁支撑影响区(a-b);B—离层区(b-c);  
C—重新压实区(c-d); $\alpha$ —支撑影响角  
I—垮落带;II—裂缝带;III—弯曲下沉带

图2 上覆岩层移动的“横三区”与“竖三带”

Fig.2 Conceptual model of overburden strata movement

地表沉陷研究形成了相对独立的学科分支,提出了一套描述地表沉陷特征的变形与角量指标体系,形成了地表沉陷预计方法,其中最具代表性的概率积分法是将覆岩视为随机介质,采用概率积分函数求解地表移动。该方法本质上是一种数学方法,对覆岩岩性进行了均化处理,没有充分体现岩性差异和覆岩运动特征,导致一些条件下沉陷预计结果误差偏大甚至失真。

由于学科设置原因,传统上在井下矿压、矿井水、瓦斯防治、地表沉陷等方面的研究是相互独立的,而这些问题都是因煤层开采后岩层运动由下往上发展过程引起的,需要从整体岩层运动规律出发才能更好地解决。岩层控制的关键层理论就是在此背景下提出的<sup>[20]</sup>。关键层是在岩层运动中起控制作用的某一层或几层相对厚硬的岩层。关键层在采动覆岩运动中的作用,上可影响至地表,下可影响至采场和支架,内部影响到采动裂隙与应力的分布和流体的运移,因而它可作为矿山压力、采动岩体内的瓦斯与水等流体运移、地表沉陷研究统一的基础。

关键层理论的基本学术思想主要体现在2个方

面:①将覆岩作为整体,研究清楚具体条件下煤层开采后岩层运动由下往上发展的过程和基本规律,以及其对矿压、流体和沉陷的影响;②抓主要矛盾,即找出覆岩中对岩层运动起控制作用的关键层,避免采用传统研究中对覆岩进行均化处理的方法。这就要求在岩层运动研究中遵循“全地层”学术思想,所谓“全地层”是指包含整个煤系地层中煤层与岩层的地质与力学属性等一系列信息的全取芯的完整钻孔柱状图,而非局部柱状或综合柱状。

在关键层理论全地层学术思想指导下,深入研究并揭示了关键层运动对裂隙演化、矿山压力、瓦斯卸压运移、地表沉陷的影响规律<sup>[20-29]</sup>,为绿色开采技术研发奠定了基础。

## 2.2 思路

尽管采动岩层移动规律研究取得了很大进展,但仍然存在有待深入研究的问题,尤其需要深入研究岩层移动的时空动态规律,揭示不同地质开采条件下(采深、覆岩岩性与结构、采高与采宽等)随着工作面推进,沿走向、倾向和垂向的覆岩动态移动规律,将图2所示的“横三区与竖三带”平面静态模型变为三维动态,建立岩层移动的时空动态模型。

在以往的岩层移动研究中,忽略了一个非常重要的问题——覆岩卸荷膨胀累积效应<sup>[30]</sup>。岩层卸荷后,会产生一定程度的膨胀,单层岩层卸荷膨胀量很小,但几百米地层的累积膨胀量却不可忽略;尤其是岩层采动形成破断块体后,出现的碎胀现象,极大加剧了岩体累积膨胀。

从全地层学术思想来看,采动覆岩卸荷膨胀与再压实是一个受覆岩关键层破断运动控制的动态过程。受关键层结构控制,上覆岩层由下向上成组破断运动。关键层破断前,阻断了上覆载荷向下方岩层的传递,导致其下方岩层因卸荷而产生膨胀。随着关键层破断高度增加,覆岩卸荷高度同步增大,因卸荷而膨胀的岩层总厚度不断增大;同时卸荷煤岩也受到已破断关键层载荷的压实作用,从而造成覆岩卸荷膨胀总量的不断变化,直至主关键层破断发育至地表。将这种覆岩卸荷膨胀总量随覆岩卸荷高度动态变化的现象定义为采动覆岩卸荷膨胀累积效应,并建立了覆岩卸荷膨胀累积效应模型<sup>[30]</sup>。

采动覆岩卸荷膨胀累积效应对岩层运动的动态过程产生了重要影响。比如,图2所示的“竖三带”形成原因就是覆岩卸荷膨胀累积效应导致的,最下部垮落带岩层因碎胀,限制了其上覆岩层破断后的回转空间,使得关键层破断块体相互咬合成“砌体梁”而不能发生垮落,便形成了裂隙带;再向上一定高度,关

键层破断回转受到下部岩层的累积卸荷膨胀限制,不能完全断开成块体,便形成了弯曲下沉带。弯曲下沉带内的关键层并非不破断,而是不能完全断开成块体。再如,覆岩卸荷膨胀累积效应会抑制覆岩关键层下离层量,这也是实测离层量普遍较小或没有离层的原因所在。覆岩卸荷膨胀累积效应还合理解释了不同条件下地表下沉系数差异的原因,比如,实测表明,

重复开采的地表最大下沉系数大于初次开采,造成这一现象的主要原因是初次采动已产生的采动覆岩卸荷膨胀累积量减少了重复开采时覆岩卸荷膨胀累积量,重复开采时地表下沉相对就大。因此,岩层移动时空动态规律研究应该与采动覆岩卸荷膨胀累积效应相结合,具体研究内容与框架如图 3 所示。

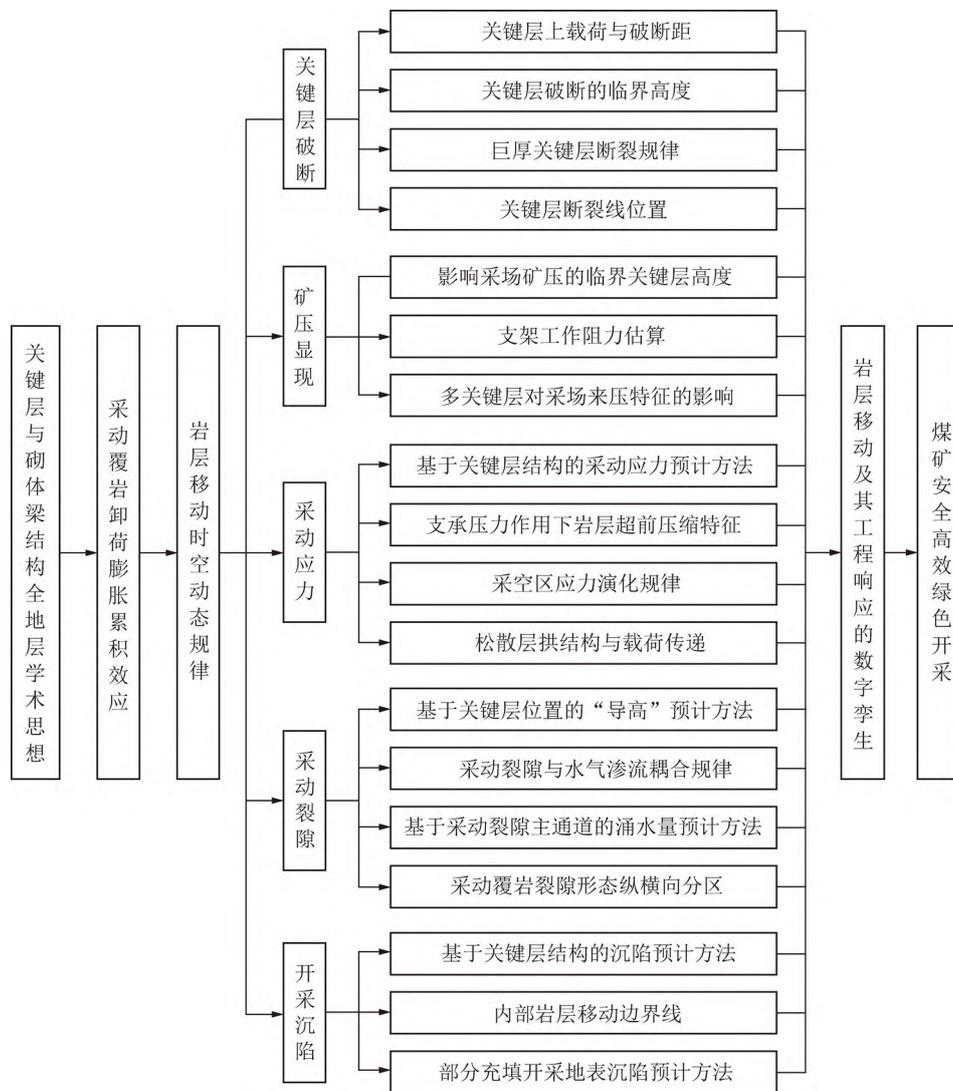


图 3 岩层移动时空动态规律研究框架

Fig.3 Research framework of spatiotemporal dynamic model of strata movement

### 3 “一注五减”绿色开采方案

#### 3.1 现状

采动损害与沉陷的根源是,煤层开采后覆岩关键层失去了下部支撑,在地层压力作用下断裂沉降导致的。充填是阻止关键层破断、减少采动损害的源头技术。绿色开采提出后 20 a 来,我国煤矿采空区充填开采得到了大的发展,形成了以固体、膏体和高水材料等为代表性的多种采空区充填采煤技术,充填

工艺与装备水平也得到了大幅提高,并在一些矿井进行了成功应用。国家也很重视煤矿充填开采,出台了一些鼓励的政策,比如充填采煤的资源税减征 50% 政策,在 2023 年 8 月到期后又延长到 2027 年底。

煤矿采空区充填开采尽管取得了很大的成就和进展,但是还面临 2 个难题需要进一步的解决:效率低、成本高。这是由充填采煤工艺的特点导致的,采煤与充填在同一个空间,相互干扰严重。针对这个问

题,笔者提出的解决方案是“采充分离+部分充填”。按照这个思路,在2006年提出了基于关键层控制的部分充填采煤技术体系<sup>[31-32]</sup>。部分充填是在采空区的局部区域实施充填,或者对直接顶垮落后形成的冒落区或覆岩离层区实施充填,利用充填体、隔离煤柱与覆岩关键层结构的联合控制作用实现减沉目的(图4)。从控制覆岩关键层稳定性出发,基于采动

空隙的传播与演化过程,研发了4种部分充填开采技术模式<sup>[33-38]</sup>:覆岩隔离注浆充填、冒落区嗣后充填、长壁墩柱同步充填与条带充填等技术,充填范围与作业方式更加灵活,充填与开采效率大幅提升,将充填开采推向了新高度。上述4个部分充填开采技术都得到了工程应用,其中应用最好、最多的是覆岩隔离注浆充填技术。

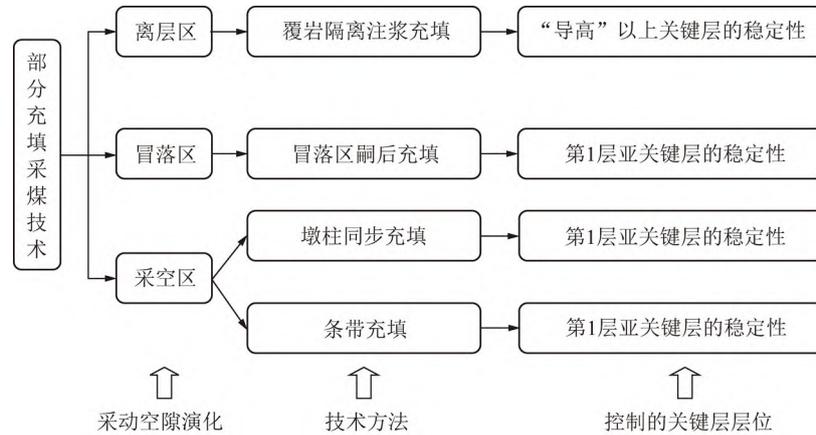


图4 部分充填采煤技术框架<sup>[31-32]</sup>

Fig.4 Technical framework of coal mining with partial backfilling<sup>[31-32]</sup>

覆岩隔离注浆充填技术创建了地面钻孔—注浆式高效绿色开采新模式,突破了井下充填效率低的技术瓶颈。基于采动覆岩卸荷膨胀累积效应对离层的抑制作用,提出了通过压实注浆充填新方法,将卸荷膨胀累积量压实转化为可注入空间,对关键层重新形成支撑,根本解决了传统离层注浆充填注浆量少、减沉率低的技术难题。与井下充填相比,其成本降低50%以上,单工作面年产量提高了2倍以上。

覆岩隔离注浆充填技术的优势是不改变井下采煤工艺,且不需要专用的充填支架,也不需要做井下工程。井下采煤和地面充填在2个空间同时进行,采充分离,极大地降低了充填与采煤干扰问题。该技术的适用性较广,可用于综采、综放工作面,以及单一煤层与多煤层开采。应用该技术的前提是,开采煤层上方的基岩必须满足一定厚度的要求。

覆岩隔离注浆充填技术已经在我国得到了全面推广应用,在东部矿区主要是解决建筑物下采煤,尤其是村庄不搬迁的问题,在安徽、山东、山西、河南、河北、江苏、内蒙古等省、自治区的64个工作面推广应用,采出压煤4000余万t。目前,该项技术也在矸石减排、减震防冲、减漏保水等方面开展了试验与实践。

### 3.2 思路

在煤矿生产实践中发现,充填开采都面临充填材料不足的问题,也是覆岩隔离注浆充填技术中制约单产与效率持续提升的关键问题。尤其对于西部千万

吨矿井而言,充填材料不足问题更为突出。如果要进一步推广覆岩隔离注浆充填技术,必须解决充填材料不足的难题。

众所周知,与金属矿有大量尾矿作为充填材料的特点不同,煤矿的煤矸石量一般仅占采出煤炭质量的15%左右,即使算上煤炭发电产生的粉煤灰量(质量约占采出煤炭质量的15%),可用于煤矿充填的固废(煤矸石与粉煤灰)仅占采出煤炭质量的30%左右,即使采用部分充填开采技术,30%的固废充填材料也是不能满足煤炭充填开采需求的。

煤炭发电不仅会产生粉煤灰,同时也会产生CO<sub>2</sub>温室气体(吨煤发电约产生2.5 t CO<sub>2</sub>)。如果将煤炭发电产生的CO<sub>2</sub>与煤矸石、粉煤灰组合作为充填材料,将有效解决充填材料不足的难题,而且可以为实现“双碳”目标做出贡献。

当前“双碳”目标对整个能源行业特别是煤炭为代表的传统化石能源提出了重大要求。煤炭在相当长时期内仍然是我国的主体能源,据统计,煤炭行业的碳排放量占总排放量的70%左右。因此,要实现“双碳”目标,减少煤炭等行业的碳排放是很重要的一个方面。

目前CO<sub>2</sub>处理技术主要包括地质封存和矿化封存。其中,地质封存通过高压压注将CO<sub>2</sub>转化为超临界状态向一定深度的封闭地层进行封存,主要包括深部咸水层封存、深部不可采煤层封存和废弃油气井封

存。矿化封存是 CO<sub>2</sub> 与天然矿物或碱性废弃物通过化学反应生成稳定的碳酸盐矿物的过程。目前,面临 CO<sub>2</sub> 封存量不足、封存成本较高、对地质条件要求较苛刻等问题。

针对煤矿的碳封存,部分专家学者做了大量探索,提出了采空区封存、功能性充填构建 CO<sub>2</sub> 封存储库等构想<sup>[39-40]</sup>。笔者提出了“煤矸石+粉煤灰+CO<sub>2</sub>”组合充填材料进行覆岩隔离注浆充填的学术构想,将

煤炭开采与利用(发电)过程产生的固废(煤矸石、粉煤灰)与 CO<sub>2</sub> 重新返回到地下岩层中,并对岩层移动进行控制,达到减沉(减少地表沉陷)、减漏(减少含水层漏失)、减震(减少应力集中与矿震)、减排(减少固废排放)、减碳(减少 CO<sub>2</sub> 排放)等“五减”绿色开采效果,实现煤炭资源绿色开采与低碳利用。图 5 为上述“一注五减”绿色开采技术构想示意。

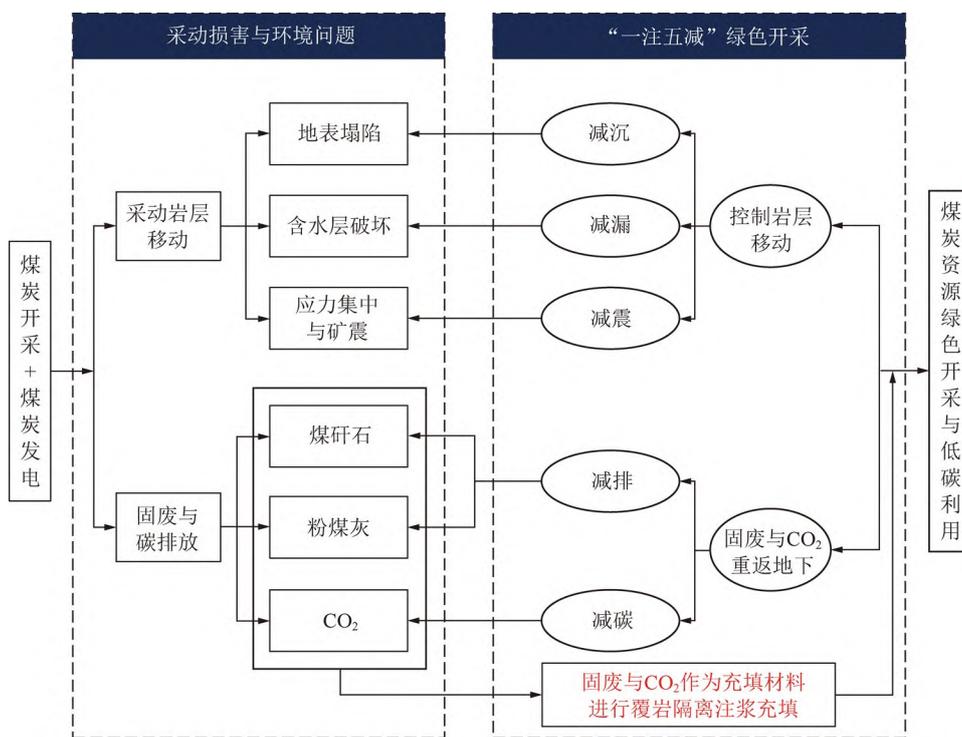


图 5 “一注五减”绿色开采技术构想

Fig.5 Framework of “one injection and five reduction” green mining solution

上述技术构想具有的优势在于:覆岩隔离注浆充填技术原理清晰,技术相对成熟,且积累了大量成功应用的工程经验;注浆充填区域是覆岩“导水”、“导气”裂隙带以上的弯曲下沉带,具有与周围岩层相对封闭的条件,便于 CO<sub>2</sub> 的封闭储存。

上述技术构想实现的难点在于 CO<sub>2</sub> 作为覆岩隔离注浆充填材料,在充填空间内的储存模式、工艺实现以及评价监测方法,需要对以下问题开展研究:

(1) CO<sub>2</sub> 在注浆充填区内的储存模式。研究煤矸石粉、粉煤灰对 CO<sub>2</sub> 的吸附作用,与 CO<sub>2</sub> 的反应及矿化作用,研究煤矸石粉-粉煤灰充填压实后骨架材料的孔隙特征及对游离态 CO<sub>2</sub> 封存作用、有利于 CO<sub>2</sub> 封存的充填材料级配,探求增强 CO<sub>2</sub> 封存作用的添加剂等。

(2) CO<sub>2</sub> 注浆充填工艺方法。研究 CO<sub>2</sub> 气体与煤矸石粉-粉煤灰浆体联合注入的最优方法,包括混合单孔同注、分孔同注、先注浆后注气、先注气后注浆、

交替注浆与注气等工艺模式。

(3) 技术评价与监测方法。研究注浆水析出对 CO<sub>2</sub> 运移与封闭影响;研究不利于 CO<sub>2</sub> 封闭作用的影响因素,包括注浆充填层位围岩岩性、岩石饱和度、断层构造、注浆工艺参数等因素影响。根据“煤矸石+粉煤灰+CO<sub>2</sub>”覆岩隔离注浆充填技术工艺特点,开展 CO<sub>2</sub> 气体封存密闭性长期监测研究。

#### 4 采动破坏含水层的修复

##### 4.1 现状

水是维持区域生态环境稳定的关键要素之一,因而,研究实施煤炭开采过程中的水资源保护与利用技术(保水采煤技术)是实现煤矿绿色开采的重要环节。自绿色开采理念提出以来,我国煤矿水体下的采煤实践经历了由单纯的水害防治到地下水保护的发展历程,极大丰富了保水采煤的理论与技术体系。从目前保水采煤技术的研究现状看,主要有 2 方面的技

术途径:一是限采降损,二是转移储存。

(1)限采降损。覆岩导水裂隙是引起矿井突水与地下水流失的主要通道,因而控制导水裂隙发育成为实现保水的重要手段。许多学者根据覆岩导水裂隙带是否波及目标含水层及其波及程度,开展了采煤对地下含水层影响程度评价<sup>[41-43]</sup>,据此将矿区能否正常采煤以及是否采取保水措施进行了区域划分,有效指导了井下防水防治及区域地下水保护。为了降低导水裂隙带的发育高度、实现含水层的原位保护,许多矿区研究开展了基于限高、充填、条带、短壁或房柱等开采方式的保水采煤实践<sup>[44-47]</sup>。上述方法一定程度满足了煤炭资源储量相对较少、开采强度相对偏低矿区的含水层保护要求,但对于诸如晋、陕、蒙等地的富煤矿区,含水层原位保护与高产高效采煤之间的矛盾常常难以调和。

(2)转移储存。对采动漏失水资源进行转移储存和循环利用,达到“煤水共采”<sup>[48-49]</sup>。其中,最为典型的是煤矿地下水保水技术,即利用采空区进行矿井水储存、净化与利用<sup>[49]</sup>,目前,该技术已在神东等多个矿区成功应用,有效缓解了西部缺水矿区的水资源保护与用水需求。然而,对于华北、华南等富水矿

区<sup>[50]</sup>,采空区有限的自由储水空间限制了井下大量涌水的安全蓄存,导致这一方法应用受限<sup>[51-52]</sup>。

由于上述现状及难题,许多富水、富煤矿区被迫采取直接疏排水方式以确保安全开采,由此导致矿区及周边出现区域性、大面积的地下水位下降、泉域改变甚至消失(尤其是西北部浅埋煤层条件)<sup>[43,53]</sup>,严重影响地表生态稳定。采取土地复垦、植被修复等措施,以试图阻止地表生态的持续退化。但这种“治标”方式仅能暂时维持植被长势,难以实现其长期生态自维持,导致矿区生态修复成本高、效果难以保持。因此,对采动破坏的含水层直接修复成为解决上述难题的重要途径<sup>[54-55]</sup>。但由于含水层处于地下而不可见,含水层采动破坏后的修复一直没有引起足够的重视。

#### 4.2 思路

采动破坏含水层修复的技术思路为:以沟通含水层的导水裂隙为修复靶区,采取注浆等工程技术手段,封堵地下水流失通道,实现含水层水位等生态功能表征的恢复(图6)。因此,该技术对策需解决2方面的理论与技术问题。其一,地下水流失通道(修复靶区)辨识;其二,裂隙通道的高效封堵或修复方法。

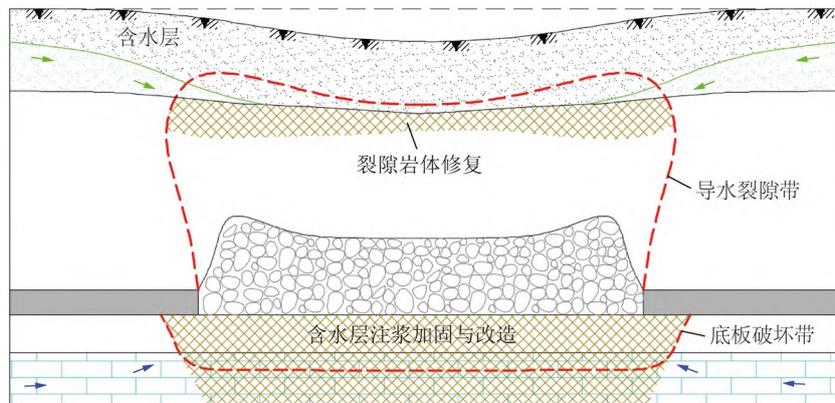


图6 顶、底板采动含水层导水通道注浆封堵的修复示意

Fig.6 Schematic diagram of blocking channels for water replenishment and outflow through grout injection in roof and floor

针对第1个问题,目前已取得较大研究进展<sup>[22,26-28,56]</sup>,基本掌握了采煤过程中岩层破断运移引起的导水裂隙时空演化规律,认识了覆岩关键层对导水裂隙动态发育的控制作用,形成了“基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法”等创新成果。同时还发现<sup>[57]</sup>,采动地下水并非均匀地由覆岩各区域漏失至采空区,而是沿采空区两侧边界内侧附近的导水裂隙显著发育区流动,即为地下水流失的“主通道”(图7)。显然,这一导水主通道分布区即是采动含水层修复的“靶区”;但在具体工程地质环境下,如何准确构建导水主通道随岩层移动的时空分布模型、

辨识地下水流失的路径轨迹,仍是未来需要重点解决的问题。

针对第2个问题,注浆是目前用于裂隙岩体加固与堵水的成熟技术手段<sup>[58]</sup>,然而,将其应用于煤矿顶板导水裂隙的修复实践时却遭遇瓶颈。实践发现<sup>[59]</sup>,受大面积采煤引起的导水裂隙发育范围广及其对浆体圈闭性差、动水冲蚀强等因素影响,水泥、水玻璃等传统注浆材料难以在裂隙通道中固结、停留,常易涌至井下采空区发生“跑/溃浆”现象;而若改用聚氨酯、脲醛等高分子有机化学材料,虽能实现裂隙有效封堵,但大量注浆又会导致成本过高或毒性污染

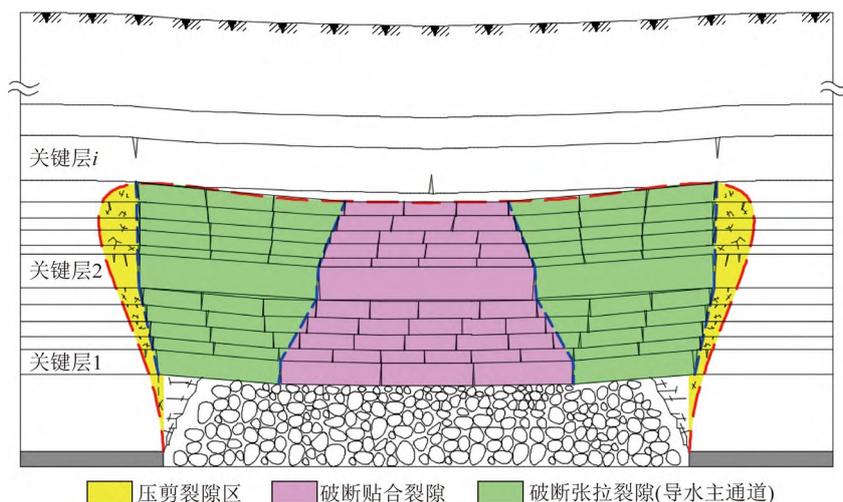


图7 采动覆岩导水裂隙分区及其主通道分布剖面模型(充分采动状态)

Fig.7 Partition of water-conducted fracture in overlying strata and the distribution model of main channel

等问题。因此,采取何种方式实现顶板导水裂隙的高效、可靠封堵,是采动破坏含水层生态功能修复实践中亟待解决的关键技术难题。

研究发现<sup>[60-62]</sup>,导水裂隙在其产生后的长期演变过程中,常易发生导水能力逐步降低的“自修复”现象,这主要与水-气-岩相互作用产生化学沉淀等衍生物的“吸附-固结”修复作用密切相关。利用该规律,文献[55,63-64]提出了向含水层下方裂隙岩体中注入可与地下水发生铁/钙质沉淀反应的“修复试剂”,以促进沉淀物修复导水裂隙的采动含水层修复方法,该方法的可靠性也得到了相关室内试验的验证。

然而,由于采矿环境及工程地质的复杂性,室内试验结果尚不足有效支撑该技术方法在具体工程中的实践应用,未来尚需开展进一步的研究,主要方向包括:①不同化学沉淀对不同导水裂隙的修复降渗规律;②导水裂隙修复靶区灌注修复试剂的具体工艺方法与配套技术;③化学沉淀在导水裂隙修复靶区迁移、修复过程中地下水径流轨迹的时空变迁特征;④利用铁/钙质化学沉淀进行采动破坏含水层修复的现场工程试验等。此外,在加强上述理论与技术方法的研究攻关外,还应重视相关采动破坏含水层生态功能修复法规标准的制定,明确含水层采后修复的必要性,有效规范相关技术方法的实施路径与效果评价。

## 5 结 语

(1)绿色开采是解决煤矿采动损害与环境问题的根本途径。绿色开采是一篇大文章,尽管已取得了很大进展,但仍不能完全适应我国煤矿实际需求,在量化预测理论、降本提效技术方面还有大量的工作

要做。

(2)岩层移动规律是绿色开采需要深入研究的重点之一。需要深入研究揭示采动覆岩卸荷膨胀累积效应及其对岩层移动的影响,建立自下而上涵盖煤层直至地表的岩层移动时空动态模型,实现采动应力、裂隙与沉陷的定量预测,最终形成不同条件下岩层移动的数字孪生模型。

(3)提效降本绿色开采技术研究的永恒主题。需要重点攻关“一注五减”绿色开采解决方案,发展“煤矸石+粉煤灰+CO<sub>2</sub>”覆岩隔离注浆充填技术,解决煤矿充填材料不足、充填产能低的难题,同时为实现“双碳”目标做出贡献。充分重视采动破坏含水层的修复,攻关人工促进含水层自修复技术。

## 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.  
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [2] XU Jialin, ZHU Weibing, LAI Wenqi, et al. Green mining techniques in the coal mines of China [J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004, 52(12): 395-398
- [3] 钱鸣高. 对中国煤炭工业发展的思考[J]. 中国煤炭, 2005, 31(6): 5-9.  
QIAN Minggao. Consideration on the development of China's coal industry [J]. China Coal, 2005, 31(6): 5-9.
- [4] 钱鸣高,许家林. 煤炭工业发展面临几个问题的讨论[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 127-132.  
QIAN Minggao, XU Jialin. Discussion of several issues concerning the development of coal industry in China [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(2): 127-132.
- [5] 钱鸣高. 煤炭产业特点与科学发展[J]. 中国煤炭, 2006, 32(11): 5-8.

- QIAN Minggao. Characteristics of coal industry and sustainable development[J]. China Coal, 2006, 32(11): 5-8.
- [6] 许家林, 钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架[J]. 科技导报, 2007, 25(7): 61-65.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(7): 61-65.
- [7] 钱鸣高. 煤炭的科学开采及有关问题的讨论[J]. 中国煤炭, 2008, 34(8): 5-9.
- QIAN Minggao. On scienized coal mining[J]. China Coal, 2008, 34(8): 5-9.
- [8] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 529-534.
- QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [9] 钱鸣高, 许家林. 科学采矿的理念与技术框架[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2011(3): 1-7.
- QIAN Minggao, XU Jialin. Concept and technical framework of sustainable mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2011(3): 1-7.
- [10] 钱鸣高. 岩层控制与煤炭科学开采文集[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [11] 许家林. 煤矿绿色开采[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [12] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 1-12.
- QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-12.
- [13] 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.
- [14] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.
- XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
- [15] 秦伟, 许家林, 轩大洋, 等. 煤矿绿色开采技术及经济评价方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 1092-1101.
- QIN Wei, XU Jialin, XUAN Dayang, et al. Research on technology and economic evaluation of coal mine green mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 1092-1101.
- [16] 财政部, 国家税务总局. 关于加快煤层气抽采有关税收政策问题的通知(财税[2007]16号)[EB/OL]. [http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/2008zcfb/200805/t20080524\\_35002.htm](http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/2008zcfb/200805/t20080524_35002.htm), 2020-7-9.
- [17] 国家能源局, 财政部, 国土资源部, 环境保护部. 关于印发《煤矿充填开采工作指导意见》的通知(国能煤炭[2013]19号)[EB/OL]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto85/201302/t20130204\\_1580.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto85/201302/t20130204_1580.htm), 2020-7-9.
- [18] 财政部, 国家税务总局. 关于实施煤炭资源税改革的通知(财税[2014]72号)[EB/OL]. [http://www.mof.gov.cn/gkml/caizhengwengao/wg2014/wg201411/201504/t20150427\\_1223632.htm](http://www.mof.gov.cn/gkml/caizhengwengao/wg2014/wg201411/201504/t20150427_1223632.htm), 2020-7-9.
- [19] 国土资源部, 财政部, 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局, 中国银行业监督管理委员会, 中国证券监督管理委员会. 关于加快建设绿色矿山的实施意见(国土资规[2017]4号)[EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/12/content\\_5192926.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/12/content_5192926.htm), 2020-7-9.
- [20] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [21] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [22] 许家林. 岩层采动裂隙演化规律与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
- [23] 许家林, 钱鸣高, 朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 787-791.
- XU Jialin, QIAN Minggao, ZHU Weibing. Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 787-791.
- [24] 许家林, 连国明, 朱卫兵, 等. 深部开采覆岩关键层对地表沉降的影响[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 686-690.
- XU Jialin, LIAN Guoming, ZHU Weibing, et al. Influence of the key strata in deep mining to mining subsidence[J]. 2007, 32(7): 686-690.
- [25] 朱卫兵, 许家林, 施喜书, 等. 覆岩主关键层运动对地表沉降影响的钻孔原位测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 403-409.
- ZHU Weibing, XU Jialin, SHI Xishu, et al. Research on influence of overburden primary key stratum movement on surface subsidence with in-situ drilling test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 403-409.
- [26] 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 380-385.
- XU Jialin, WANG Xiaozhen, LIU Wentao, et al. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 380-385.
- [27] 王晓振, 许家林, 朱卫兵. 主关键层结构稳定性对导水裂隙演化的影响研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 606-612.
- WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of primary key stratum structure stability on evolution of water flowing fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 606-612.
- [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] 屈庆栋, 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对邻近层瓦斯涌出影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1478-1484.
- QU Qingdong, XU Jialin, QIAN Minggao. Study on influences of key strata movement on gas emissions of adjacent layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1478-1484.
- [30] 许家林, 秦伟, 轩大洋, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J]. 煤

- 炭学报,2020,45(1):35-43.
- XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, et al. Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 35-43.
- [31] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1303-1312.
- XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303-1312.
- [32] 许家林, 朱卫兵, 李兴尚, 等. 控制煤矿开采沉陷的部分充填开采技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 6-11.
- XU Jialin, ZHU Weibing, LI Xingshang, et al. Study of the technology of partial-filling to control coal mining subsidence[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 6-11.
- [33] 许家林, 倪建明, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 8-11.
- XU Jialin, NI Jianming, XUAN Dayang, et al. Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 8-11.
- [34] 轩大洋, 许家林, 王秉龙. 覆岩隔离注浆充填绿色开采技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 28-40.
- XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong. Green mining technology of overburden isolated grout injection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 28-40.
- [35] XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong, et al. Borehole investigation of the effectiveness of grout injection technology on coal mine subsidence control[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(6): 2435-2445.
- [36] XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong, et al. Investigation of fill distribution in post-injected longwall overburden with implications for grout take estimation[J]. Engineering Geology, 2016, 206: 71-82.
- [37] ZHU Weibing, XU Jingmin, XU Jialin, et al. Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 96: 58-65.
- [38] 许家林, 尤琪, 朱卫兵, 等. 条带充填控制开采沉陷的理论研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(2): 119-122.
- XU Jialin, YOU Qi, ZHU Weibing, et al. Theoretical study of strip-filling to control mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(2): 119-122.
- [39] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO<sub>2</sub> 地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 45-60.
- WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO<sub>2</sub> storage and technical problems in coal mining area under the “dual carbon” target[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.
- [40] 刘浪, 王双明, 朱梦博, 等. 基于功能性充填的 CO<sub>2</sub> 储库构筑与封存方法探索[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1072-1086.
- LIU Lang, WANG Shuangming, ZHU Mengbo, et al. CO<sub>2</sub> storage-cavern construction and storage method based on functional backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1072-1086.
- [41] 武强, 黄晓玲, 董东林, 等. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 60-65.
- WU Qiang, HUANG Xiaoling, DONG Donglin, et al. “Three maps-two predictions” method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 60-65.
- [42] 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.
- [43] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711-1717.
- FAN Limin, MA Xionged, JI Ruijun. Progress in engineering practice of water-preserved coal mining in western eco-environment frangible area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [44] 康永华. 采煤方法变革对导水裂缝带发育规律的影响[J]. 煤炭学报, 1998, 23(3): 262-266.
- KANG Yonghua. The effect of various mining methods on development law of water flowing fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(3): 262-266.
- [45] 刘建功, 赵利涛. 基于充填采煤的保水开采理论与实践应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1545-1551.
- LIU Jianguo, ZHAO Litao. Theory of water protection and practice application in mining based on the backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1545-1551.
- [46] 邵小平, 石平五, 王怀贤. 陕北中小煤矿条带保水开采煤柱稳定性研究[J]. 煤炭技术, 2009, 28(12): 58-61.
- SHAO Xiaoping, SHI Pingwu, WANG Huaixian. Study on pillars stability by keeping water in strip mining for small and medium-sized mines in Northern Shaanxi Province[J]. Coal Technology, 2009, 28(12): 58-61.
- [47] 彭小沾, 崔希民, 李春意, 等. 陕北浅煤层房柱式保水开采设计与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 301-304.
- PENG Xiaozhan, CUI Ximin, LI Chunyi, et al. Design and practice of room & pillar water-preserved mining for shallowly buried coal seam in north of Shaanxi province[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 301-304.
- [48] PETER D. Future management of aquifer recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13: 313-316.
- [49] 顾大钊. 煤矿地下水理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
- GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [50] 武强, 赵苏启, 孙文洁, 等. 中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 901-905.
- WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 901-905.
- [51] 李全生, 鞠金峰, 曹志国, 等. 基于导水裂隙带高度的地下水

- 适应性评价[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 2116-2124.
- LI Quansheng, JU Jinfeng, CAO Zhiguo, et al. Suitability evaluation of underground reservoir technology based on the discriminant of the height of water conduction fracture zone[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 2116-2124.
- [52] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 西部缺水矿区地下水库保水的库容研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 381-387.
- JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Storage capacity of underground reservoir in the Chinese western water-short coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 381-387.
- [53] 张广磊, 鞠金峰, 许家林. 沟谷地形下煤炭开采对地表径流的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1219-1226.
- ZHANG Guanglei, JU Jinfeng, XU Jialin. Influence of longwall mining on surface runoffs in gully terrain area[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1219-1226.
- [54] 鞠金峰, 许家林. 含水层采动破坏机制与生态修复[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2019.
- [55] 鞠金峰, 李全生, 许家林, 等. 采动含水层生态功能修复研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 101-107.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Progress of ecological remediation technology of mining-damaged aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 101-107.
- [56] 鞠金峰, 许家林, 李全生, 等. 我国水体下保水采煤技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 125-128.
- JU Jinfeng, XU Jialin, LI Quansheng, et al. Progress of water-preserved coal mining under water in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 125-128.
- [57] 曹志国, 鞠金峰, 许家林. 采动覆岩导水裂隙主通道分布模型及其水流动特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3719-3728.
- CAO Zhiguo, JU Jinfeng, XU Jialin. Distribution model of water-conducted fracture main channel and its flow characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3719-3728.
- [58] 黄德发, 王宗敏, 杨彬, 等. 地层注浆堵水与加固施工技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [59] 杨静. 地面水平定向钻孔注浆封堵覆岩导水裂隙的合理层位研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YANG Jing. Study on reasonable horizon of grouting of horizontal directional borehole to seal water flowing fractured[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [60] JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Self-healing effect of water-conducting fractures due to water-rock interactions in undermined rock strata and its mechanisms[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(1): 287-297.
- [61] 鞠金峰, 李全生, 许家林, 等. 采动岩体裂隙自修复的水-CO<sub>2</sub>-岩相互作用试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3700-3709.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Water-CO<sub>2</sub>-rock interaction experiments to reveal the self-healing effect of fractured mining damaged rock[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3700-3709.
- [62] 鞠金峰, 许家林, 方志远. 酸性水对含铁破碎岩体降渗特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3388-3395.
- JU Jinfeng, XU Jialin, FANG Zhiyuan. Water-rock interaction experiments with acidic aqueous solution and iron bearing broken rocks and characteristics of water permeability decline[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3388-3395.
- [63] 鞠金峰, 李全生, 许家林, 等. 化学沉淀修复采动破坏岩体孔隙/裂隙的降渗特性试验[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 89-96.
- JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Experimental study on water permeability decrease character due to restoration function of chemical precipitation on holes or fractures in mining failure rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 89-96.
- [64] JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Experimental investigations on the effect of CaCO<sub>3</sub> precipitation on permeability reduction in dingle brown sandstone fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6647-6666.