

井工煤矿减损开采理论与技术体系

李全生^{1,2}

(1. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 102211; 2. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 煤炭开采改变了覆岩边界条件, 引起围岩应力重新分布和覆岩变形、运动、破断, 造成覆岩损伤自下而上传导, 引起含水层、地表附属物、矿区生态系统等损伤。现代开采在保障经济社会发展能源需求同时, 也对矿区地下水资源、生态环境和建/构筑物造成较大损伤。为解决规模化煤炭开采与矿区生态协调的问题, 在系统分析国内外减损开采理论与技术以及长期实践基础上, 根据“源头减损”理念和“采前源头损伤控制、采中优化减损、采后生态要素系统修复”的开采全过程减损思路, 提出了以“基于开采工艺参数优化的源头减损、硬岩采前预裂-软岩注浆改性与采后导水裂隙封堵控水、采中覆岩承载结构稳定性维持减损”的采前、采中、采后3类4项技术为主导的开采全过程减损技术措施, 创建了井工煤矿减损开采理论与技术体系, 明确了减损开采研究的重点和方向。在开采损伤监测方面, 由于监测技术时空差异大, 难以实现地表变形与裂缝的同时空监测和地表生态环境多要素一体化同步监测, 仍需针对性地提出煤矿井工开采损伤多源监测异步数据的同时空校正与处理方法。在损伤传导理论方面, 基于覆岩损伤传导理论, 从能量出发提出了采动损伤场模型, 并结合岩层软硬组合、岩土层介质的差异, 提出了涵盖“覆岩-含水层-地表-生态”多因素指标的煤炭井工开采覆岩损伤场量统一与跨界面传导理论。神东矿区上湾矿12401工作面采用采前开采参数优化, 采中垮落带注浆等减损技术, 地表最大沉降值相对减小25%, 地表裂缝由台阶型裂缝调控为动态小裂缝; 此外, 神东矿区自2010年实施减损开采技术以来, 植被覆盖度由原来平均31%上升到74.1%。

关键词: 煤炭开采; 损伤传导; 源头减损; 减损理论与技术; 绿色开采

中图分类号: TD82 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0988-15

Reduction theory and technical system of underground coal mining

LI Quansheng^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China; 2. National Energy Investment Group Co., Beijing 100011, China)

Abstract: The coal mining changes the overburden boundary conditions and causes the redistribution of the in-situ stress and the deformation, movement, fracture of overburden rock. The damage conducts from the bottom to top in overburden and causes the damage of aquifers, surface appurtenances, and mining area ecosystem. Besides, while the modern mining ensures the energy demand of social development, it also causes great damage to groundwater, ecological environment and construction/construction facilities in mining areas. In order to solve the problem of large-scale coal mining damage and the safe coordination of protected objects in the mining area, based on the systematic analysis of the damage reduc-

收稿日期: 2023-01-18 修回日期: 2023-06-18 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0078

基金项目: 煤炭开采水资源保护与利用重点实验室开放基金资助项目(WPUKFJJ2022-17); 北京市自然科学基金资助项目(8212032)

作者简介: 李全生(1965—), 男, 河南洛阳人, 教授级高工, 博士生导师。E-mail: quansheng.li@chnenergy.com.cn

引用格式: 李全生. 井工煤矿减损开采理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 988-1002.

LI Quansheng. Reduction theory and technical system of underground coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 988-1002.



移动阅读

tion mining theory and technology and long-term practice worldwide, according to the concept of “source damage reduction” and “pre-mining source control, mining optimization reduction and post-mining collaborative repair” for the entire mining process reduction, a pre-mining, mid-mining, post-mining reduction technology is proposed as the main measures for reducing mining damage throughout the entire mining process, which includes the three types and four technologies: “source reduction technology based on mining process parameter optimization, hard rock pre-fracturing-soft rock grouting modification and postmining water conduction fracture sealing and water control technology, as well as maintaining the stability of the overburden bearing structure during mining”. And the theoretical and technical system for reducing mining damage in underground coal mines has been constructed, and the focus and direction of research on reducing mining damage has also been clarified. In terms of mining damage monitoring, due to the significant spatiotemporal differences in monitoring technology, it is difficult to achieve a synchronous monitoring of surface deformation and cracks in the same space-time, as well as an integrated monitoring of multiple elements of the surface ecological environment. Therefore, it is still necessary to propose the targeted methods for correcting and processing asynchronous data from the multi-source monitoring of coal mining induced damage. In terms of damage conduction theory, based on the theory of overburden damage conduction, a mining damage field model is proposed from the perspective of energy indicators. Combined with the differences in the combination of soft-hard rock layers and the media of rock-soil layers, a unified damage field quantity and cross interface conduction theory for the multiple factor indicators of “overburden-aquifer-surface-ecology” is proposed. The 12401 longwall face of the Shangwan coalmine has adopted the measures of pre-mining parameter optimization and grouting in the caving zone during mining, the maximum surface settlement amount has been relatively reduced by 25%, and the surface cracks have been adjusted from step-like cracks to dynamic small cracks. In addition, since the technical implementation at the Shendong mining area in 2010, the vegetation coverage has increased from an average of 31% to a maximum of 74.1%.

Key words: coal mining; damage conduction; mining resources damage reduction; damage reduction mining theory and technology; green mining

损伤概念源于材料力学,以损伤变量表征。损伤变量是表征材料或结构劣化程度的量度,直观上可理解为微裂纹或空洞在整个材料中所占体积的百分比。损伤会引起材料微观结构和某些宏观物理性能的变化,所以损伤变量可从微观和宏观2方面选择^[1]。微观方面,可选裂纹数目、长度、面积和体积等;宏观方面,可选弹性模量、屈服应力、拉伸强度、密度等。不同损伤过程,可以选不同的损伤变量,即使同一损伤过程,也可以选择不同的损伤变量。自1980年以来,各国学者先后定义了多种损伤变量来描述材料或结构的损伤状态,但都以Kachanov定义的损伤变量为基础。Kachanov定义的损伤变量被认为是损伤变量最早且最经典的表述,其表达的物理意义为结构有效承载面积的相对减少^[2]。笔者提出的损伤特指煤炭开采引发的生态环境效应包括采动覆岩和含水层破坏、地下水补径排关系紊乱、地表沉陷、原生土壤结构损伤和植被影响等一系列现象(简称采动损伤)。

煤炭现代开采损伤常会引发大范围岩层破坏、地表沉陷、地表建(构)筑物损害以及生态系统影响,对当地生态环境保护与和谐发展带来挑战。矿区环境保护实质是建立矿山与其周围生态环境及社会经济

系统的和谐关系^[3-5]。当前国家对生态文明建设的重视达到前所未有高度,矿山开采损害防护的内涵从以往以保护地表建(构)筑物为目的,延伸到“岩-土-水-生态”系统性和多维度保护,增加了煤炭开采的环保技术难度和保护成本^[6-12]。因此,生态损伤是伴随现代煤炭开采必然发生的生态问题,如何最大程度地降低煤炭开采的生态影响是煤炭界长期持续努力解决的问题,也是社会关注的焦点。

为解决资源保供和开采损伤控制的协调问题,近百年来,国内外相关工程科技人员不断探索,取得一些行之有效的减损控制成果。煤炭开采减损实质上是一种系统减少煤炭开采引发的生态影响程度和缩短生态影响时间的主动行为,是基于生态影响机理和过程,创新应用现代科学技术,在开采全过程(采前-采中-采后)实施的系统行为,旨在最大限度地控制煤炭开采生态损伤影响空间范围和持续时间。为此,钱鸣高院士提出了绿色开采理念和技术方法^[13],为矿区减损开采提供了重要科技支撑,尤其我国中东部区域,绿色开采涉及的充填开采、煤与瓦斯共采、矸石井下筛选与充填等对煤炭绿色开采发挥了重要作用^[14-21]。这些技术的应用均是针对某一具体问题,而煤矿区实

质上是一个包含能源、水资源、土地资源和生态环境资源的复杂、开放系统。为此,笔者所述减损开采是从矿区系统视角,将开采活动引起的负面效应降到最低,保障矿区系统内各类资源功能动态稳定。因此,减损开采是在前人开采损害控制研究成果基础上的新发展,包括采前、采中和采后的减损规划布局与人工干预,为降低矿区系统的开采损伤程度和提升生态功能修复/恢复效果,开展煤炭安全高效开采与损伤程度控制相协调的系统研究。

1 煤炭开采面临的减损难题

煤炭开采引起的岩层运动波及范围广、对岩土体损伤程度大,伴随产生的导水裂隙、地表非连续沉降等影响地下水-土壤-植被等矿区生态系统。由于采煤活动长期持续性及其引起的生态损伤的动态变化性,导致矿区生态恢复与修复治理面临成本高、难度大等问题;如何高效监测和表征采动损伤,进而最大限度地降低采煤对生态的影响,并修复和保护矿区生态是煤炭界长期持续努力解决的社会焦点问题^[22-26]。基于此,笔者分析了现代高强度井工矿开采面临的生态环境挑战。

(1) 煤炭开采损伤传导规律缺乏系统研究。国内外针对开采损伤的研究多针对于某一方面的损害,常忽视各损害对象间的链式传导关系。如煤炭生产企业与采矿专家多关注生产的安全与效率问题,多致力于矿山压力、岩层运移控制与灾害防治,尤其是矿山顶板事故、矿震和突水等灾害的预防与治理。矿山测量方面的实践与研究人员,除特殊开采工艺外,更多关注地表移动变形、地表裂缝发育及地表附属物的损害,重点研究智能、高效监测与预测方法,并采用唯象学方法分析地表移动的采矿学原理。矿区覆岩、地表、含水层和生态等的损害^[6],均是煤炭井工开采引发的链式传播的环节,只有立足开采损伤的全局定义,系统研究开采损伤传导规律,才能深刻揭示开采损伤机理,进而提出行之有效的减损开采防治措施。

(2) 煤炭开采损伤表征与传导基础理论有待完善。煤矿开采损伤分析中,如何表征采动损伤是研究采动损伤传导、控制、修复的基础。采动损伤传导是指采动岩层运动及其对安全与环境的影响规律,这也是煤炭开采的基础科学问题。随着采矿学科不断发展,岩层运动逐渐由“黑箱”转为“灰箱”问题,提出了砌体梁理论、关键层理论、传递岩梁假说、铰接岩块假说、预成裂隙假说、悬臂梁假说以及压力拱假说等^[5],这些理论和假说已在实践中广泛应用与发展。但存在井下开采条件、岩层运动与损伤状态以及地表移动

变形的关联关系认识不足的问题,对岩层运移的研究存在割裂现象,即研究煤矿开采的学者主要关注覆岩运移及工作面矿压显现问题,而研究开采沉陷的学者更关注覆岩运移对地表下沉的影响。事实上,采动损伤是由煤层开采对岩土层造成的损伤借助覆岩载体向上传播的过程^[5-6,14,27-28],涉及采空区向上传播至地表以及影响生态的全过程。

(3) 煤炭开采损伤调控与防治技术系统性不强。根据井工开采各阶段煤炭开采减损技术可分为源头减损技术、过程调控技术和末端修复技术。源头减损技术可从开采工艺(充填开采、房柱开采、条带开采)^[15-21]、开采参数^[22-25,29-30](采高、工作面长度、推进速度)等,降低或控制有效采高,或使覆岩均匀形变,从本质上控制开采覆岩破坏程度。过程调控技术主要是在煤层开采过程中根据特定需求(如含水层或地表建筑物保护)对覆岩裂隙空间和软岩进行充填加固,常见的有覆岩离层注浆、采空区垮落带注浆、软弱隔水层注浆改性等^[15-16,25,31-33]。此外,在具有厚硬顶板矿区,开采过程中顶板难以破断,具有产生冲击地压的风险,这种条件下需采用顶板致裂放顶,释放积聚的能量,主要手段有水压致裂、深孔爆破等^[34-36]。末端修复技术则是针对工作面或矿区回采后,开采沉陷区修复利用(复垦),为保证沉陷区利用过程中的地基稳定性,需要对采空区覆岩进行加固,最常用的是地面注浆。对源头减损技术而言,限厚减损技术丢煤严重且不利于集约化开采,难以保障国家能源需求;开采参数调整依赖实践经验,缺乏科学指导的开采损伤控制的量化指标和量化方法^[22-23]。过程调控技术因采动损伤传递机制认识不清^[6,23],覆岩裂隙发育无法量化描述,造成注浆位置、注浆量、注浆时机难以确定,注浆实施效果不佳。

2 减损开采定义与特征

2.1 减损开采的定义

减损开采是在充分认识“损伤”与“减损”概念基础上提出的,是从开采的时空影响范围和程度最大限度控制煤炭开采损伤程度的开采方法,从而达到规模化煤炭开发与特定保护对象、区域生态安全相协同的目的。广义来看,减损开采是矿区开发活动周期内为实现矿区生态保护与特定受护对象安全采取的一系列与开采和减损有关的活动。实现减损开采的前提是开采损伤传导机理和开采影响规律的科学把握,以系统思想为指导,按照“源头减损”理念和“采前源头控制、采中减损优化、采后生态要素系统修复的开采全过程减损思路”,集成运用现代开采和减损开采技

术,最大限度控制煤炭开采影响空间和影响持续时间。其内涵主要包括以下几个方面:

(1) 减损开采是在开采损伤与传导机理认识基础上创新应用减损技术的活动。减损开采是在开采损伤及其传导机制、对生态或特定保护对象影响规律科学认识的基础上提出的。相对传统的条带开采、限厚开采、协调开采、充填开开采或保护对象的加固与改造等减损技术,减损开采侧重于煤炭现代高效开发条件下的开采源头最大限度控制采动损伤,辅以开采过程中的开采参数的优化调整、采后的生态修复的工程技术活动。因此,需要科学揭示现代开采下覆岩及地表损伤机理、传递规律、特定对象或生态影响的累积效应,针对具体保护对象,需要创建针对性理论与研发应用相应技术,如覆岩损伤与评价理论、地表变形与预测理论、开采影响的累积效应理论等。

(2) 减损开采是对整个矿区开采系统中重要保护对象的减损技术创新应用活动。矿区开采系统涉及直接影响的覆岩移动破坏、地层结构破坏、地表移动变形,间接影响的含水层破坏、土壤养分与水分分布变化、植被根系损伤、地表建(构)筑设施损害等。开采损伤控制是针对某一重要保护对象的移动变形量控制或多种受保护对象的综合影响最小为控制目标,采用一系列覆岩和地表下沉控制、裂隙发育控制、保护对象所在位置变形量控制的技术措施,实现保护对象的安全运行和生态系统的保护。

(3) 减损开采是以实现规模化煤炭开发与受保护对象、区域生态安全协同为目标的减损技术应用活动。减损是以最大限度控制煤炭开采损伤影响空间和持续时间为目的,在保障能源供给的同时,实现煤炭安全高效开采与区域生态安全的协同发展。理念是基于顶层规划的源头减损,关键是开采全过程的一体化减损与修复技术,以此实现最小的开采扰动和最大的资源回收率相协调的目标。在矿区初设阶段,应全面统筹除开采及开拓布局的相关因素外,将矿区开发系统的减损和生态安全问题纳入设计范畴,实现能源的科学开发与经济社会的和谐发展。

(4) 减损开采是按照“源头减损”理念和“源头控制、过程优化、要素协同”技术思路,集成运用现代开采和生态修复技术的一种开采影响控制活动。井工开采损伤控制的关键在于顶板下沉量或垮落带发育高度的控制。在系统研究开采影响理论和技术的基础上,创建了井工煤矿减损开采理论与技术体系,即从矿区规划布局入手,首先采用开采工艺布局或参数优化、制定覆岩结构发育高度控制或覆岩结构强化工程措施、引导覆岩或地表总体变形分布等方法,从开

采源头控制开采的影响程度和范围,最大限度控制开采损伤,开采过程中采取适当的工艺技术优化或离层区注浆措施减损,为避免受保护对象的功能退化或实现尽快修复,采用采后治理或生态修复措施,从而实现采前系统规划、采中过程优化、采后系统修复的一体化减损技术。

2.2 减损开采的特征

减损开采具有跨学科和煤炭开发全过程集成创新的特点。首先,煤矿区开发主体为煤炭的开采活动,还涉及生态的保护与修复及相关工程活动,为实现矿区开发与保护对象的安全协同目标,涉及地质、水文地质、采矿、测量、开采沉陷、生态等学科,具有煤炭开采、生态保护与修复、工程实施与管理的跨学科交叉的特征。其次,减损效果最好的充填开采无法满足现代开采在产能、效率及成本方面的要求,生态虽可人工修复但修复后生态功能和恢复时间在短期内无法达到本底生态系统的稳定特征。为实现矿区生态和保护在效率、产能、生态保护或特定对象的保护目标,需要研发开采和生态(水土植被)要素修复相协调的技术,以开采对生态扰动的最小化、辅以最少的工程修复干预,通过开采子系统、生态修复子系统或特定保护对象干预处理子系统的系统创新,开采、生态要素的协同集成,通过现代信息技术工程管理,实现减损开采关键技术的重大突破,形成减损开采的技术体系。再次,煤炭开发是一个包含地质勘探、设计施工、煤炭开采、生态修复(受损对象修复)的过程,减损开采是在系统观念指导下,以源头减损为基本理念,从采前布局、采中技术运用、采后修复工程实施等各个环节将减损纳入煤炭开发全过程。

3 减损开采理论技术体系概况

减损开采技术是在长期实践和开采影响规律运用基础上的创新成果。约在16世纪,比利时就颁布法律限定采深不得小于100 m,并对开采破坏列日城下用水含水层的人处以极刑。随着工业化进程的推进,英国、德国、波兰、苏联等国家煤炭需求量不断增加,易采煤层逐渐枯竭,逐步对建(构)筑物或其他保护设施下开展尝试性开采工作,形成了一系列减损开采技术。我国开展这方面工作较晚,1953年北京矿院矿山测量教研室聘请苏联开采沉陷专家哥尔迪克为青年教师和研究生讲授“岩层与地表移动”课程,并在开滦林西矿建成我国首个地表移动观测站——黑鸭子观测站,拉开了我国开采损害研究的序幕。经近70 a的研究,在吸取国外先进成果的基础上,形成了适应我国地质开采特征的减损开采技术体系(图1)。

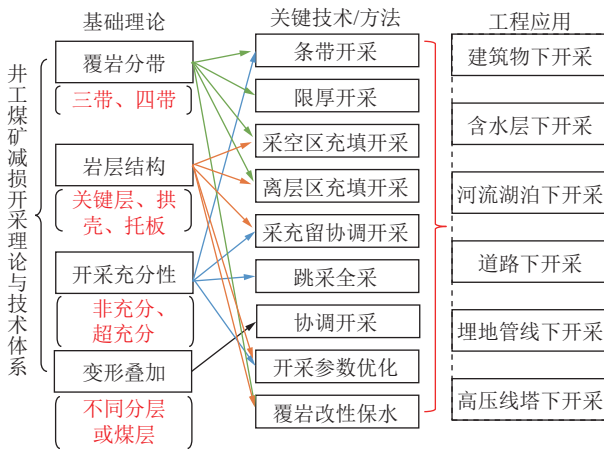


图1 井工煤矿减损开采理论与技术体系

Fig.1 Theory and technical system of damage reduction mining in underground coal mines

传统的减损开采主要针对含水层保护和井下安全、地表建/构筑物的安全使用,随着生产的实际需要,逐步涉及铁路、公路、河流湖泊、地下管线及高耸构筑物等压煤开采问题。我国现代开采减损理论主要包含覆岩分带理论、岩层结构理论、开采充分性理论和变形叠加理论^[5-6,37-42]。其中岩层结构理论运用较为普遍,该理论认为,只要控制覆岩内部影响整个地层运动的关键层位岩层的运动变形状态,即可调整开采影响状况;覆岩分带理论主要用于水体下开采问题,以控制隔水层完整性为核心,通过开采参数的优化或采取人工措施改变或封堵裂隙发育的范围,达到保水开采目标;开采充分性是在充分利用地表受护对象抗变形能力基础上,结合开采尺度的调整,使受护对象总体承受较小变形而提出,早期的减损开采措施便是基于这一原理;变形叠加理论运用相对较少,主要是针对厚煤层及多煤层开采条件,第1煤层或分层开采影响在受护对象可承受影响阈值内,开采第2煤层或分层时,使守护对象所处地表变形与第1次开采影响正负变形叠加消减,从而达到既采出煤炭资源,又不损坏受护对象的目的。

基于上述基础理论,我国主要采用的减损技术有条带开采、限厚开采、采空区全充或部分充填开采、离层区充填开采、采充留协调开采、跳采全采、协调开采等,这些技术不仅适用于传统“三下”开采,也适用当前生态矿区减损开采需求。随着社会经济的发展,能源需求量和开采条件发生变化,尤其一些地区出台了限制低回收率开采方法和废弃物外排相关政策。针对开采减损和煤炭科学产能、资源回收率的具体要求,发展了减损开采技术,提出了开采参数优化和超大工作面开采减损方法,以及采前预裂改性与采

后注浆封堵保水技术和覆岩承载拱壳结构稳定性维持减损技术。为完善当前开采需求下的减损开采技术措施,系统研究了煤炭井工开采覆岩损伤场量统一与跨界面传导理论。

4 煤炭减损开采理论与关键技术

4.1 煤炭开采损伤与传导机理

4.1.1 煤炭开采全链条损伤精准表征与系统界定

采动损伤量化表征是损伤界定、控制与修复的基础。本文结合现场实测与数值模拟进行覆岩损伤表征,基于损伤力学,将岩体分为基体与损伤体,给出了适用于覆岩损伤描述的损伤本构模型(式(1)),并嵌入数值模拟软件进行二次开发。在此基础上,将煤层开采研究范围内塑性单元体积总和与观测空间体积之比定义为覆岩损伤度,如图2所示。由定义可知,损伤度越大,覆岩破坏越严重。实现了开采区域三维空间覆岩损伤定量表征。

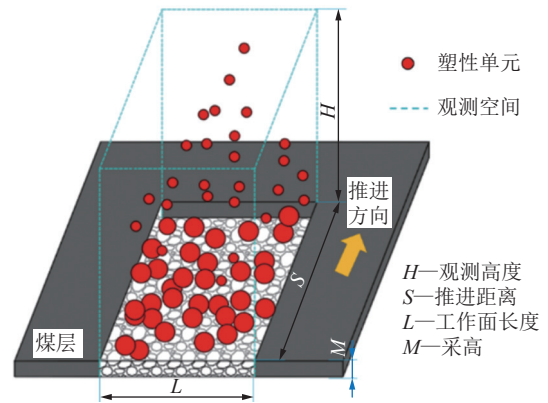


图2 覆岩损伤度计算模型示意

Fig.2 Schematic diagram of overburden damage constitutive model

$$\sigma_{ij} = \frac{G}{G^0} E_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \frac{1}{3} \left(1 - \frac{G}{G^0} \right) \delta_{ij} E_{mmkl} \varepsilon_{kl} \quad (1)$$

式中, E_{ijkl} 为基体弹性常数张量; E_{mmkl} 为岩体弹性常数张量; ε_{kl} 为基体应变张量; G 为岩体剪切模量; G^0 为基体剪切模量; δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

以工作面矿压、覆岩离层量、关键层下沉量、裂隙带发育高度、覆岩塑性区发育范围、覆岩裂隙分形维数等指标表征覆岩损伤量;以地表下沉量、裂隙发育密度、深度、开度、落差等指标表征地表土体损伤量;采用含水层水位、水压、矿井涌水量等表征含水层损伤量;采用植被覆盖度指标并剔除气候、人文、经济等影响表征生态损伤量;在此基础上,提出涵盖覆岩、地表、含水层、生态等因素的煤炭开采损伤触发临界值,构建井工开采“覆岩-含水层-地表-生态”损伤指

标体系与定量表达方法 (图 3)。但现代高强度开采条件下覆岩-地表-生态全链条损伤监测对象的多样性和复杂性, 虽然目前对于各个研究对象均有相应的监测技术、但监测技术时空差异大, 各监测数据难以实

现协同, 很难实现地表变形与裂缝的同时空监测和地表生态环境多要素一体化同步监测, 后期研究需要针对性地提出煤矿井工开采链式损伤多源监测异步数据的同时空校正与处理方法。

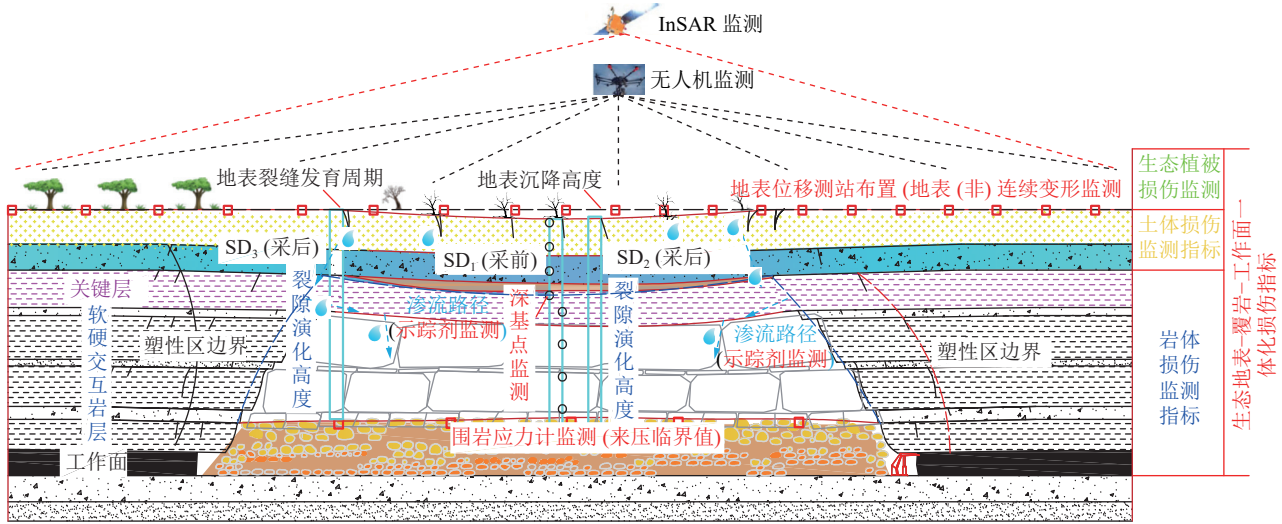


图 3 煤炭开采全链条损伤精准表征体系构建

Fig.3 Construction of accurate characterization system of coal mining chain damage

4.1.2 煤炭井工开采覆岩损伤场量统一与跨界面传导理论

覆岩损伤传导理论是损伤控制与修复的基础。基于目前覆岩移动研究成果的分析, 笔者团队提出了采动损伤场模型, 并通过能量指标给出了相应的计算方法。假设在同等开采条件下, 开采引起的损伤为一定值, 以能量的形式逐步传递至地表, 在传递过程中能量逐渐耗散衰减。采动损伤能量在传递过程中不断耗散, 当剩余损伤能量不足以引起覆岩损伤时, 采动损伤形成的范围可称为采动损伤场。COOK 在研究矿山岩爆时提出开采释放的潜能可以用开采出岩体的体积 V 和其埋深 H 进行计算 $\Delta E=VH$ 。GIBOWIEZ 认为挖掘岩体所释放的总能量 E_m 可用下式计算, 即

$$E_m = \theta \Delta(V)^B \quad (2)$$

其中, $\Delta(V)$ 为开挖空间, m^3 ; B 为岩体状态的特征参数; θ 为常数, 取决于开采岩体赋存特征、自身强度、开采工艺等。式 (1) 之所以复杂, 是因为考虑煤层开采后, 所有围岩均产生影响而释放的总能量。如果仅考虑煤炭开采部分造成的潜能释放, 则可通过煤层原始地应力计算获得, 假设煤层地应力近似等于上覆岩层重力, 则地应力所造成的体积应变 ε_V 可由式 (3) 计算:

$$\varepsilon_V = (1 + 2\lambda)\gamma H/K \quad (3)$$

其中, K 为煤炭的体积模量, Pa; λ 为测压系数; γ 为容重, N/m^3 。一般认为煤层未开采前属于弹性状态, 则

该部分体积应变所积累的应变能可简要计算为

$$E_V = K\varepsilon_V^2 MLvt/2 \quad (4)$$

其中, v 为工作面进尺速度, m/d ; L 为工作面长度, m ; M 为采高, m ; t 为推进时间, d 。根据式 (3) 可估算出开采一定体积煤层所释放的总能量, 假设为采动损伤能量。假设能量传递过程中某一岩层的极限弹性体应变为 ε_u , 当应变超过 ε_u 时, 岩体进入损伤区域。则极限损伤能量临界值 F_u 为

$$E_u = K_0 \varepsilon_u^2 V_m/2 \quad (5)$$

其中, V_m 为岩体体积; K_0 为弯曲下沉带内发生极限弹性应变岩体的弹性模量。根据式 (4) 可依次求出每一岩层损伤所需要的能量, 结合媒体开采释放的总能量 (式 (3)) 可大致给出损伤拱的范围。除了能量, 利用空间守恒同样可以估计覆岩损伤传导 (图 4), 笔者收集整理了西部矿区部分工作面的“三带”高度以及充分采动后的地表下沉系数, 运用 MATLAB 结合空间守恒拟合获得各分带的耗散系数:

$$(1 - q)M = 0.11H_1 + 4.2 \times 10^{-3}H_2 + 4.5 \times 10^{-3}H_3 \quad (6)$$

其中, q 为下沉系数; H_1 、 H_2 、 H_3 依次为垮落带、裂隙带及弯曲下沉带厚度, m 。

采动损伤场量聚焦于能量守恒、空间守恒将覆岩损伤场量统一表达, 但并未涉及含水层、地表、生态采动损伤场量统一表达。此外, 在以能量为基础的统一场

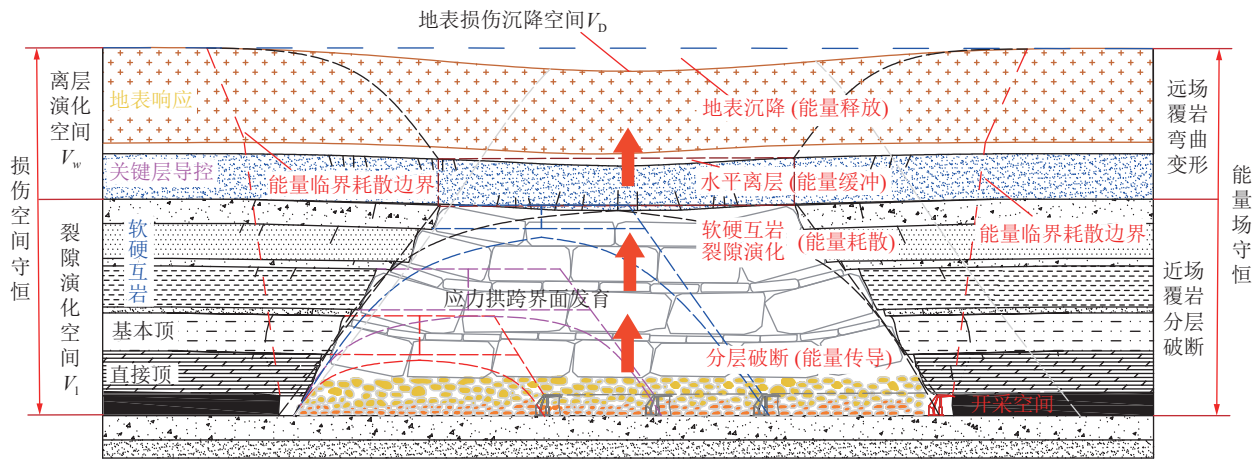


图4 基于空间和能量守恒的采动损伤传动模型

Fig.4 Damage conduction model based on the conservation of mining space and energy

量在传递过程中很难考虑岩层软硬组合、岩土层介质差异。后期研究可以覆岩应力拱传递为基础,将应力转为能量统一指标,并将含水层、地表、生态因素考虑进来,研究损伤跨界面(不同岩性界面、岩土界面、水土界面、土植界面)的传导模型,获得煤层开采释放能量在非均质岩土层中的传导耗散特征,构建采动损伤传导耗散模型。

4.2 煤炭减损开采关键技术

聚焦井工开采由下至上的覆岩含水层、地表附属物及生态环境等全方位保护要求,针对现代化开采引起损伤程度大和受护对象承受变形能力小的问题,按照“源头减损”理念和“源头控制、过程优化、要素协同”技术思路,聚焦煤炭开采全生命周期,兼顾现代煤炭开采特征,围绕覆岩损伤控制、含水层水位控制、地表变形控制等,提出了开采工艺参数优化、覆岩承载结构稳定性维持、导水主通道发育位置控制与封堵的现代化煤炭减损开采关键技术。

4.2.1 基于开采工艺参数优化的源头减损技术

开采损伤的影响包含地质与开采2类因素,其中地质因素改性成本相对较高,因此,开采工艺参数优化是最直接也是最经济的方法。但开采参数需要兼顾采出率和损伤控制2个方面目标,常用的条带开采、宽条带开采、协调开采、对称开采、全部充填开采、部分充填开采等均具有显著减损效果,但这些工艺方法存在采出率低或效率低的弊端,不符合现代开采需求。为满足现代开采要求,弥补仅靠经验确定参数的不足,在开采参数设计过程中可以采用损伤量化指标进行优化设计。如采用本文定义损伤比指标,开采影响范围内塑性发育体积/总体积(图2),并嵌入至数值模拟软件中,基于上湾矿12401工作面地质条件建立了损伤比与工作面采高、工作面长度以及工作面推进速度

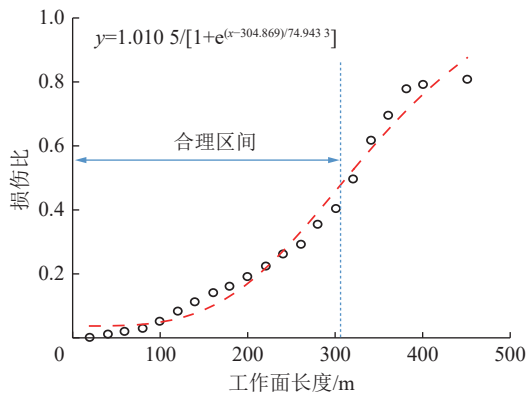
的量化关系(图5),确定了上湾矿控制损伤增长幅度的合理开采参数范围(工作面长度控制在304 m以内,采高尽量控制在7.8 m以内,推进速度大于11.9 m/d)。

基于资源禀赋特征与现代化开采特征,在满足安全前提下,煤层采高取决于煤层厚度,因此,虽然优化得出采高小于7.8 m损伤程度较小,但实际最大开采厚度达到了8.8 m。在工作面长度设定300 m时,唯一能调节的仅有工作面推进速度。笔者以神东上湾煤矿8.8 m大采高工作面为工程背景,利用相似模型探究了推进速度分别为5 m/d和15 m/d时的采动裂隙扩展规律^[23],如图6所示,在工作面达到充分采动前,相同开采尺寸下快速推进时采空区跨落矸石还未充分压实便已进入稳定阶段,主控岩层回转角减小,上覆岩层移动高度相对减小20%~40%,为覆岩结构稳定性控制和损伤传递控制提供了条件,在一定条件下减小了采动损伤程度和范围。

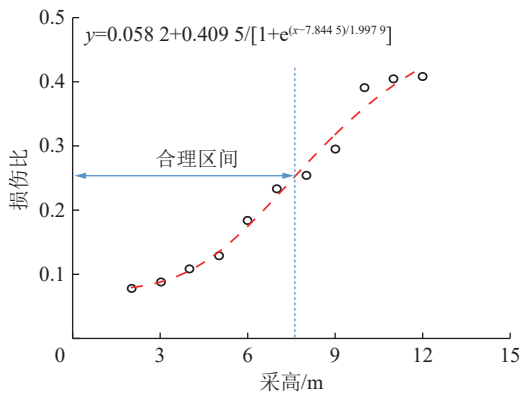
虽然以数值模拟配合损伤度指标对开采参数优化,能够一定程度上实现单一工作面开采参数的合理优化^[22,27],但在模拟过程中并未考虑水或者地表生态的影响,也未关注地表沉陷的具体要求,且在很多情况下,因煤层资源禀赋、安全生产要求等制约难以完全匹配设计参数。因此,后期研究过程中应形成基于覆岩地质条件(埋深、硬岩比例系数、关键层位置、含水层位置、隔水层位置)、开采工艺(充填开采、综放开采、房柱开采、条带开采、一次采全厚开采)、开采参数(采高、工作面长度、推进长度、推进速度)与采动损伤的量化关系,在源头减损设计的基础上,配合注浆改性、过程防控、末端修复等技术实现全矿井的减损开采设计。

4.2.2 采前预裂改性与采后注浆封堵保水技术

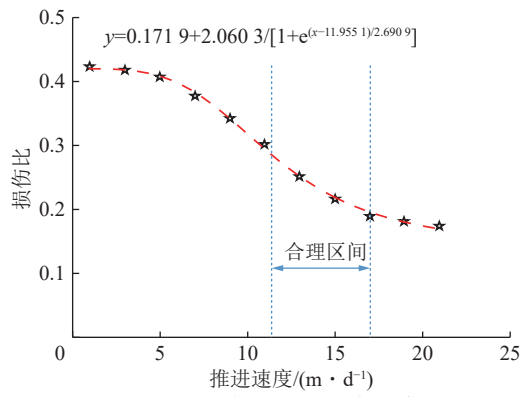
针对覆岩含水层控制目标,在开采参数优化的基



(a) 损伤比与工作面长度关系



(b) 损伤比与采高关系



(c) 损伤比与推进速度关系

图5 损伤比与工作面开采参数的关系

Fig.5 Relationship between damage ratio and mining parameters of working face

基础上,研究软岩与硬岩采动裂隙发育特征,研发基于岩层性质的预裂-注浆改性的隔水层再造技术^[11,32]。根据以往导水裂隙带统计结果,在相同采高时导水裂隙带高度随覆岩硬度变弱而明显降低。基于此,通过压裂工艺将连续性好的硬岩压裂成非连续性岩层,削弱采动导水裂隙在坚硬岩层中向上扩展的“尖端效应”,抑制导水裂隙发育高度。再采用黏土类软弱注浆材料将岩层改性为相对软弱的岩层,起到抑制导水裂隙带向上发育与降低上覆岩层导水能力的双重作用,从而实现煤层顶板含水层失水控制。由于地面预

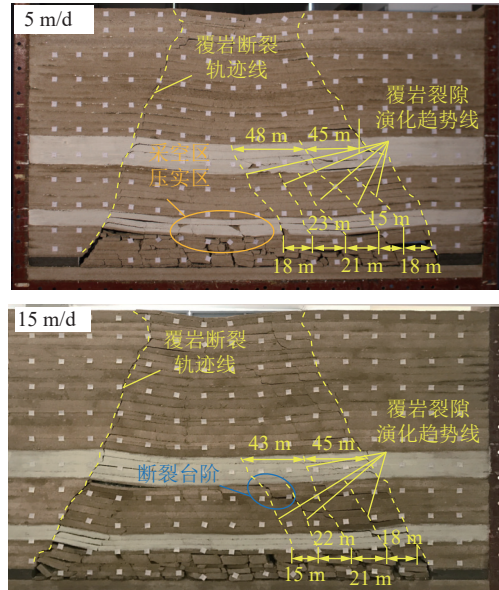
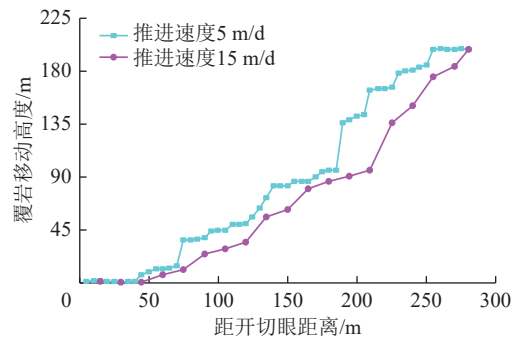


图6 相似模拟不同推进速度下裂隙扩展规律

Fig.6 Similar simulation of the crack propagation law at different advancing speeds

裂注浆工程量和成本相对较大,目前仍然处于设计阶段,后期研究将重点确定预裂改性层位选择、实施时间、注浆材料、压裂参数等一系列工艺参数;以及后续的基岩层压裂效果、注浆改性后的岩层力学强度和渗透能力变化,煤层顶板含水层失水控制效果等需要进一步开展室内实验和工程测试等研究工作。

笔者在工程实践发现,导水裂隙在其产生后的长期演变过程中会发生一定程度的“自修复”效应,出现裂隙导水能力下降、导水裂隙带范围减小等现象,这一现象的发生与采动破坏岩体水-气-岩相互作用过程中产生的化学沉淀反应密切相关^[42-47]。因此,对于采后开采区域中部处于压实状态,裂隙接近闭合,导水能力弱,重点封堵导水主通道区域,可提高实施效率并节省成本。在采动裂隙发育模型的基础上,研发基于导水裂缝主通道封堵的含水层原位修复技术与封堵材料,实现再造含水层,具体如图7所示。但目前利用自修复特性开展含水层引导恢复的相关方法尚处于理论探讨与概念设计阶段,距具体可实施的技术措施还存在差距。无论是利用化学沉淀的吸附—

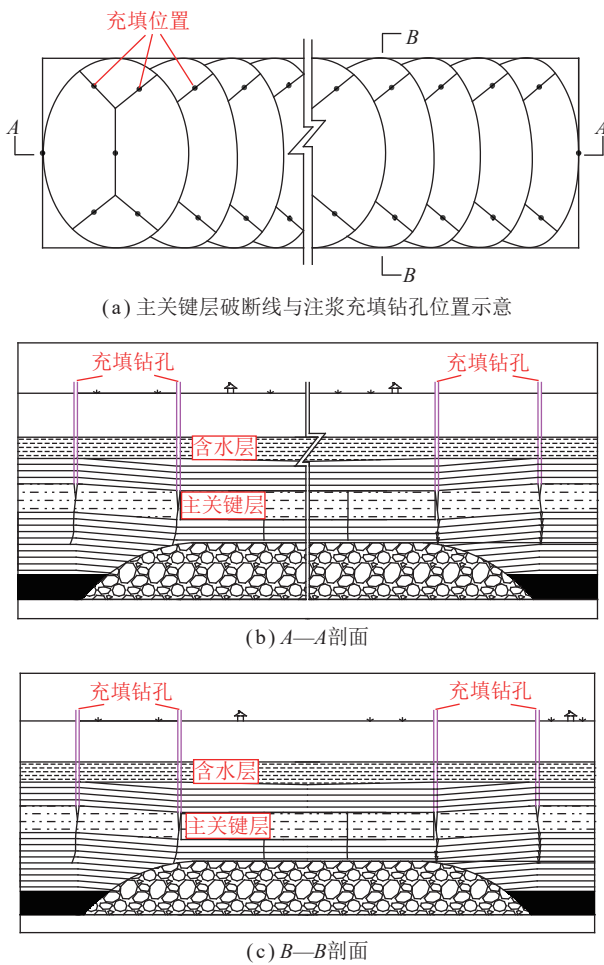


图 7 人工注浆封堵导水裂隙带再造含水层示意

Fig.7 Schematic diagram of artificial grouting to seal the water conduct fracture zone and reconstruct the aquifer

固结作用进行导水通道的封堵,还是通过降低裂隙通道尺寸促进裂隙自修复,都需要研究具体的实施工艺与配套技术,并在现场实践中进行应用和验证。以边界煤柱/体爆破以引导采区边界大开度张拉裂隙趋近闭合与修复的方法为例,爆破范围如何确定、爆破时

机以及爆破钻孔的空间布置等还需深入研究。

4.2.3 覆岩承载拱壳结构稳定性维持减损技术

覆岩承载拱壳结构稳定性维持减损技术旨在维持采后覆岩中承载结构的稳定性^[15,21,38,48-51],从而将岩层损伤控制在承载结构下方,阻止采动损伤向上传递,实现降低覆岩损伤范围、保护水资源和地表生态的目的。由数值模拟及相似模拟结果可知,覆岩结构位于裂隙带和弯曲带交界处,控制了采动损伤的传递。根据关键层理论,覆岩运移特征主要受厚硬岩层控制,厚硬岩层在工作面推进过程中逐层变形和破断形成拱壳结构。为便于减损设计,根据当前对覆岩结构的认识,分别按照压力拱结构和梁板结构计算保持结构稳定所需支撑体尺寸的合理范围^[15,32],从而进行垮落带或者离层区注浆。

笔者针对西部矿区高强度开采提出了垮落带注浆保护关键层+离层裂隙带注浆协同成拱的注浆方法,具体如图 8 所示。根据采动损伤分区耗散模型(式(6))可以看出,为了尽可能的降低地表损伤程度,应将采动损伤空间存储在覆岩各分区中。首先判定覆岩关键层所在位置,进一步计算得出关键层不破断的最大下沉量 W ,进而计算得出确保关键层不破断的垮落带注浆量 V_k :

$$V_k = dH_1L - V_g - (H_1 - M)bdL \quad (7)$$

式中, d 为工作面推进长度, m ; V_k 为垮落带注浆量, m^3 ; b 为垮落带碎胀系数; V_g 为关键层裂隙体注浆量, m^3 , 可由式(8)进行计算:

$$V_g = \pi WLd/3 \quad (8)$$

垮落带注浆和离层裂隙带注浆均可以采用地面注浆,注浆方式可以采用条带注浆或者敦式注浆,垮落带注浆方式可以参考文献[21],离层裂隙带注浆可

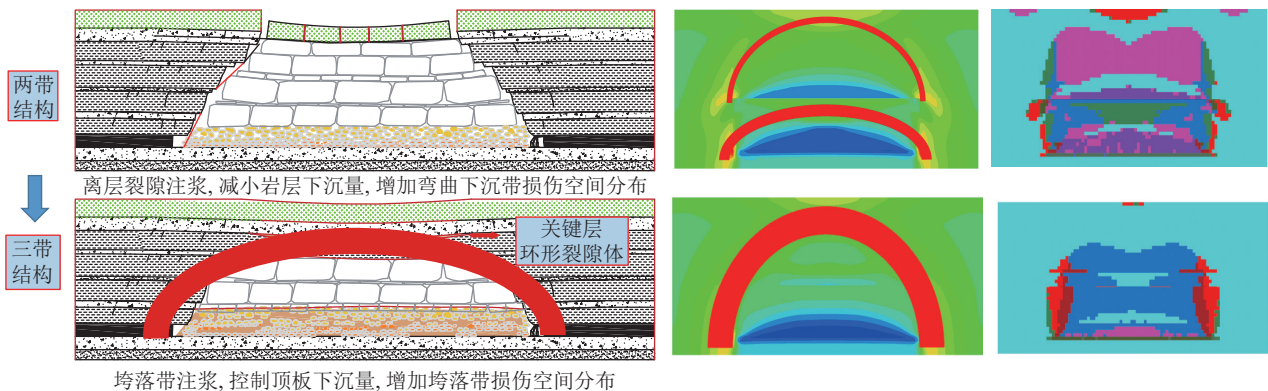


图 8 垮落带注浆护关键层+离层裂隙带注浆协同成拱技术

Fig.8 Key layer of grouting protection in the caving zone and grouting in the fracture zone of separation layer and arch forming technology

以参考文献[15-16,31-32]。笔者进一步模拟分析了离层注浆前后塑性区发育特征,具体如图 8 所示。

综上,覆岩承载拱壳结构稳定性维持减损技术主要是为了控制地表下沉量,但同时影响煤炭开采效率。同时,基于拱壳承载结构的岩层控制模式的前提是准确判断拱壳存在位置及演化规律。后期研究将进一步聚焦注浆位置和注浆强度与拱壳结构演化的对应关系,以实现靶向注浆。

5 煤炭减损开采工程实践

神东矿区是我国重要的煤炭生产基地,该区煤层赋存条件好、构造简单,以埋深浅、采厚大、超大工作

面、快速开采为主要特征,开采引起了覆岩及地表的高强度损害,使覆岩含水层及地表生态受到破坏^[6-9]。为降低神东矿区覆岩及地表的损害程度,避免含水层破坏进而影响地表生态或威胁井下生产安全,以上湾矿 12401 工作面为研究地,开展了基于开采参数优化的源头减损和垮落带、离层裂隙带注浆协同减损的应用。12401 综采工作面是世界首个 8.8 m 特大采高工作面,推进长度 5 250 m,工作面长度 300 m,开采损伤本底巨大,工作面布置如图 9 所示;地表风积沙层厚度为 0~27 m,上覆盖层总厚度为 124~244 m,平均埋深 200 m,推进速度平均 13 m/d,如图 10 所示。

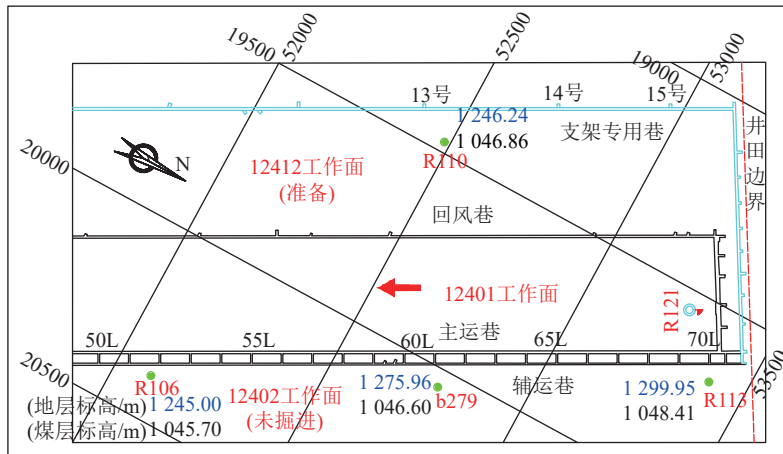


图 9 上湾矿 12401 工作面布置

Fig.9 Longwall fully mechanized panel 12401 of the Shangwan Coal Mine

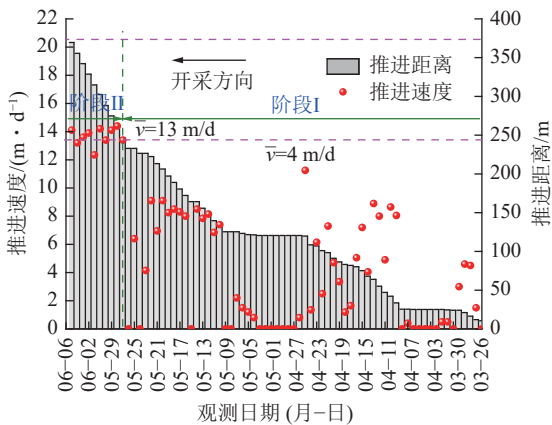


图 10 推进速度统计(2018年)

Fig.10 Advance speed statistics (2018)

5.1 推进速度优化减损效果验证

为验证不同推进速度对覆岩运移损伤特征的影响,笔者基于“井上下一体化链式监测系统”监测了上湾煤矿 12401 工作面推进初期 ($v \leq 5 \text{ m/d}$) 和正常推进情况下 ($v \geq 13 \text{ m/d}$) 的矿压显现与地表损伤特征(图 11、12)。在推进速度 $< 5 \text{ m/d}$ 时,地表最大沉降量约

6 000 mm,地表以台阶裂缝为主,在推进速度满足设计要求时 ($> 11.9 \text{ m/d}$),地表最大沉降量约 4 500 mm,相对减小 25%,同时地表裂缝以动态小裂缝为主。覆岩“三带”实测表明,正常推进情况下 ($v \geq 13 \text{ m/d}$) 覆岩存在“三带”特征,而在推进速度 $< 5 \text{ m/d}$ 时,工作面导水裂隙部分发育至地表。但随着推进速度的增加,工作面周期来压步距、动载系数均相应增大,如图 12 所示,推进速度小于 5 m/d 时工作面来压时动载系数为 1.6,平均周期来压步距 15.12 m,来压持续距离 2.13 m;而推进速度满足设计要求时 (大于 11.9 m/d) 时工作面动载系数达 1.77,相对增加 11%,平均周期来压步距 18.33 m,相对增加 21.23%,平均来压持续距离 3.66 m,相对增加 71.83%。

5.2 注浆减损效果验证

笔者针对西部高强度开采矿区存在地表生态损伤、修复困难等问题,基于“两带”结构转“三带”结构的垮落带与离层裂隙带注浆减损技术确定了上湾矿 12401 采空区垮落带注浆修复位置,并对开切眼及其

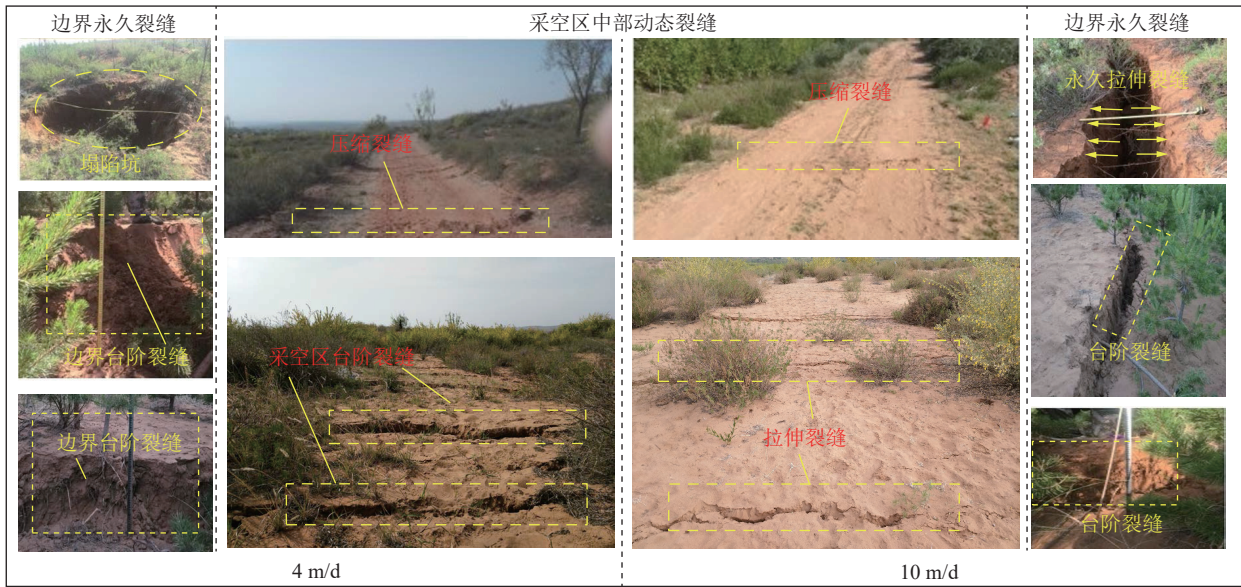
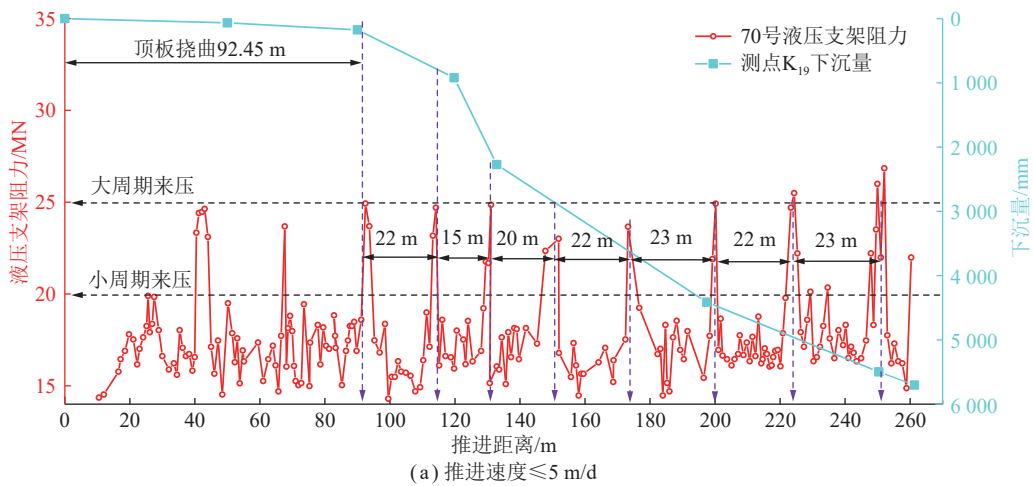
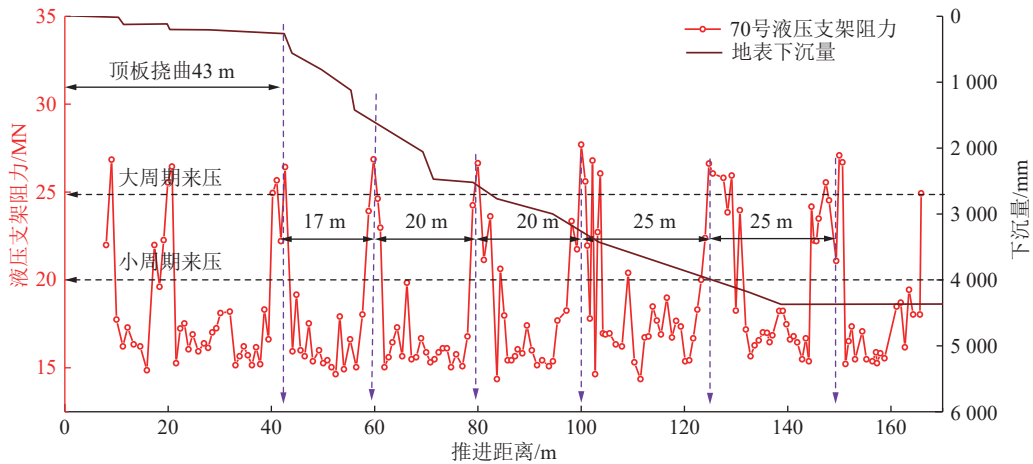


图 11 不同推进速度地表裂缝发育特征

Fig.11 Development characteristics of surface fractures at different advancing speeds



(a) 推进速度 ≤ 5 m/d



(b) 推进速度 ≥ 13 m/d

图 12 不同推进速度地表沉降与工作面来压协同特征

Fig.12 Synergistic characteristics of surface subsidence and longwall face pressure at different advancing speeds

平巷附近累计注浆 161 685 m³,使得采空区垮落带损伤耗散空间大幅度增加,从而达到保护主控岩层效果,

避免开采初期地表的大面积台阶式沉降。同时利用采前、采后钻孔冲洗液漏失量、水位、彩色电视观测

结果及钻进记录对注浆后覆岩裂隙发育进行探测验证, 如图 13、14 所示。

SD2 孔导水裂隙带顶界为 48.92 m, 高度为 118.08 m, 垮落带顶界为 133.75 m, 高度为 33.25 m(煤层顶板深度 167 m); SD3 孔导水裂隙带顶界为 39.17 m, 高度为 132.83 m, 垮落带顶界为 138.8 m, 高度为 33.2 m, 具体

如图 12 所示。由图 12 可知, 随着注浆后覆岩破坏模式的转变, 上湾矿特大采高工作面裂隙带并未发育至地表, 地表随弯曲下沉带协同运动, 地表裂缝由注浆前的台阶裂缝转化为注浆后的拉伸裂缝, 如图 15 所示, 有效降低了地表损伤程度, 有助于采后地表生态的协同修复与调控。

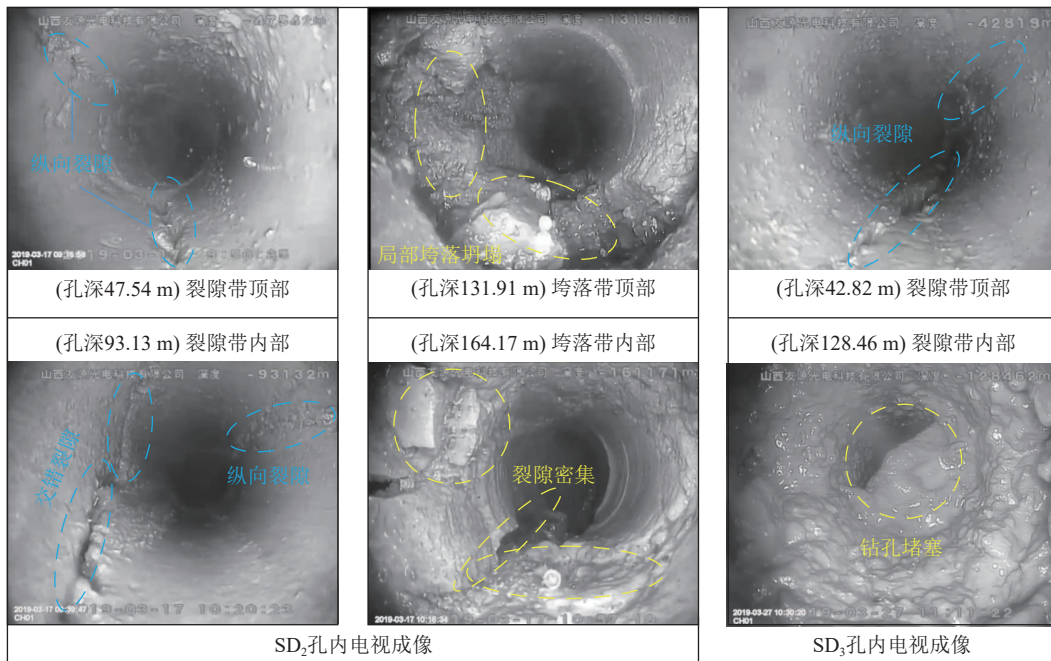


图 13 彩色电视观测结果

Fig.13 Observation results of color television

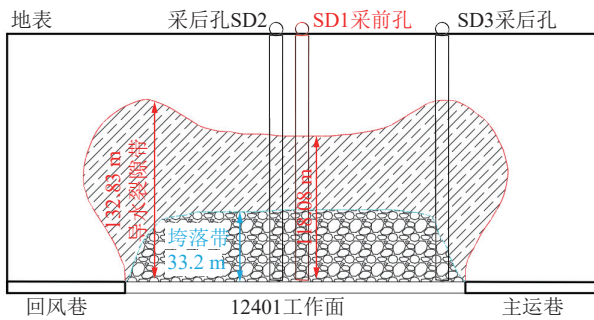


图 14 覆岩两带探测钻孔布置及发育示意

Fig.14 Exploration borehole layout and development of two zones in overburden

此外, 综合分析神东矿区减损开采工程应用效果, 2010 年后逐渐开展减损开采工程实践, 基于开采参数优化、地表裂缝分区填埋等减损开采技术, 生态环境逐渐改善。除 2001 年外, 2000—2004 年植被覆盖度基本稳定在 31.0% 左右, 没有明显的变化趋势, 2005—2012 年 (2010 年减损开采技术实施), 研究区内植被覆盖度呈波动性变化趋势。随着研究区内生态修复工程的开展, 2012 年后减损开采工程应用效果显现, 植被覆盖度呈上升趋势, 最大值为 74.1%。



图 15 垮落带与离层裂隙带注浆减损技术

Fig.15 Grouting loss reduction technology for caving zone and separated fracture zone

6 结 论

(1) 针对现代化煤炭开采引起损伤程度大和受护对象承受变形能力小的问题, 聚焦煤炭开采全生命周期, 采用“采前开采工艺参数优化与硬岩预裂-软岩注浆改性技术、采中垮落带注浆保护关键层+离层裂隙带注浆协同成拱的注浆方法、采后导水裂隙封堵控水技术”的多要素减损方法, 补充发展了煤炭开采的链式系统减损技术, 形成了井工煤矿减损开采的理论与技术体系。

(2) 基于覆岩损伤传导理论, 提出了井工开采“覆岩-含水层-地表-生态”损伤指标体系与定量表达方法, 同时结合能量守恒和空间守恒构建了采动损伤场模型。目前, ① 由于各监测技术的时空差异大, 很难实现地表变形与裂缝的同时空监测和地表生态环境多要素一体化同步监测, 后期仍需要针对性地提出井工开采链式损伤多源监测异步数据的同时空校正与处理方法; ② 以能量为基础的损伤统一场量很难考虑岩层软硬组合、岩土层介质差异, 后期可以覆岩应力拱传递为基础, 将应力转为能量统一指标, 构建“覆岩-含水层-地表-生态”多因素损伤跨界传导模型, 获得煤层开采释放能量在非均质岩土层中的传导耗散特征。

(3) 围绕覆岩损伤控制、含水层水位控制、地表变形控制提出了开采工艺参数优化、覆岩承载结构稳定性维持、导水主通道发育位置控制与封堵的现代化煤炭减损开采关键技术。但是仍存在以下问题: ① 由于地面预裂注浆工程量和成本相对较大, 目前仍处于设计阶段, 后期研究可重点确定预裂改性层位选择、实施时间、注浆材料、压裂参数等一系列工艺参数; 以及后续的基岩层压裂效果、注浆改性后的岩层力学强度和渗透能力变化; ② 目前利用自修复特性开展含水层引导恢复的相关方法尚处于理论探讨与概念设计阶段, 距离形成具体可实施的技术措施还存在很大差距, 仍需要研究具体的施工工艺与配套技术, 并在现场实践中进行应用和验证。

参考文献(References):

- [1] 刘鸿文. 高等材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [2] KACHANOV M. Effective elastic properties of cracked solids: Critical review of some basic concepts[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1992, 45(8): 304-335.
- [3] 郭文兵, 白二虎, 赵高博. 高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 509-523.
GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHAO Gaobo. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 509-523.
- [4] 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, 13(3): 1-7.
QIAN Minggao, XU Jialin. Concept and technical framework of sustainable mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology (Social Science)*, 2011, 13(3): 1-7.
- [5] 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.
- [6] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 28-47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, et al. Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 28-47.
- [7] 王新静, 胡振琪, 胡青峰, 等. 风沙区超大工作面开采土地损伤的演变与自修复特征[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(9): 2166-2172.
WANG Xinjing, HU Zhenqi, HU Qingfeng, et al. Evolution and self-healing characteristic of land ecological environment due to super-large coalface mining in windy and sandy region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(9): 2166-2172.
- [8] 张建民, 李全生, 南清安, 等. 西部生态脆弱区现代煤-水仿生共采理念与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 66-72.
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, NAN Qingan, et al. Study on the bionic coal & water co-mining idea and key technological system in the ecological fragile region of west China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 66-72.
- [9] 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 56-65.
SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, et al. Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China, *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 56-65.
- [10] 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): 12-19.
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): 12-19.
- [11] 缪协兴, 浦海, 白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(1): 1-4.
MIAO Xiexing, PU Hai, BAI Haibo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(1): 1-4.
- [12] 刘辉, 邓喀中. 采动地裂缝动态发育规律及治理标准探讨[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(5): 884-890.
LIU Hui, DENG Kezhong. Dynamic developing law and governance standard of ground fissures caused by underground mining[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2017, 34(5): 884-890.
- [13] 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): 5-10.
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal

- mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(4): 5–10
- [14] WANG Chenlong, ZHANG Changsuo, ZHAO Xiaodong, et al. Dynamic structural evolution of overlying strata during shallow coal seam longwall mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103: 20–32.
- [15] 徐良骥, 张坤, 刘潇鹏, 等. 离层注浆开采关键层变形特征及地表沉陷控制效应[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 931–942.
- XU Liangji, ZHANG Kun, LIU Xiaopeng, et al. Deformation characteristic of key strata and control effect of surface subsidence in mining with grouting into overburden bed-separation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 931–942.
- [16] 崔希民, 高宇, 李培琨, 等. 采动覆岩与地表下沉关系模型及离层量估算方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 74–82.
- CUI Ximin, GAO Yu, LI Peixian, et al. Relationships between mining overburden rock and surface subsidence and its application to estimate bed separation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 74–82.
- [17] 王家臣, 杨胜利. 固体充填开采支架与围岩关系研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(11): 1821–1826.
- WANG Jiachen, YANG Shengli. Research on support-rock system in solid backfill mining methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(11): 1821–1826.
- [18] 徐平, 周跃进, 张敏霞, 等. 厚松散层薄基岩充填开采覆岩裂隙发育分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(4): 617–622.
- XU Ping, ZHOU Yuejin, ZHANG Minxia, et al. Fracture development of overlying strata by backfill mining under thick alluvium and thin bedrock[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2015, 32(4): 617–622.
- [19] 刘贵, 张华兴, 徐乃忠. 深部厚煤层条带开采煤柱的稳定性[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(10): 1086–1091.
- LIU Gui, ZHANG Huaxing, XU Naizhong. Coal pillar stability of deep and high seam strip-partial mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(10): 1086–1091.
- [20] 蓝航, 韩科明, 韩震. 深部条带煤柱蠕变影响下地表残余沉降及煤柱稳定性分析[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(S1): 1–12.
- LAN Hang, HAN Keming, HAN Zhen. Surface residual subsidence and coal pillar stability influence by coal creep in deep strip mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(S1): 1–12.
- [21] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 基于关键层控制的部分充填采煤技术[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2019, 1(2): 69–76.
- XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Partial backfilling coal mining technology based on key strata control[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 69–76.
- [22] 何祥, 张村, 赵毅鑫, 等. 基于覆岩损伤本构模型的高强度开采参数确定及减损效果评价[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 439–448.
- HE Xiang, ZHANG Cun, ZHAO Yixin, et al. Parameters determination of high-intensity mining and reduction effect evaluation based on damage constitutive model of overburden rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 439–448.
- [23] 李全生, 郭俊廷, 张凯, 等. 西部煤炭集约化开采损伤传导机理与源头减损关键技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3636–3644.
- LI Quansheng, GUO Juntao, ZHANG Kai, et al. Damage conduction mechanism and key technology of source loss reduction of intensive coal mining in the west[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3636–3644.
- [24] 李全生, 李晓斌, 张凯, 等. 基于“空天地”一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 402–413.
- LI Quansheng, LI Xiaobin, ZHANG Kai, et al. Rock strata mining damage monitoring and application based on “space-sky-surface” integrated technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 402–413.
- [25] 李全生, 张村. 基于采动空间守恒的西部矿区高强度开采损伤传导模型及应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(1): 1–8.
- LI Quansheng, ZHANG Cun. Damage conduction model of high intensity mining in western mining area based on conservation of mining space and its application[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(1): 1–8.
- [26] 戴华阳. 岩层与地表移动变形量的时空关系及描述方法[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S2): 450–459.
- DAI Huayang. Mining subsidence variables and their time-space relationship description[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S2): 450–459.
- [27] 刘义新, 戴华阳, 姜耀东. 厚松散层矿区采动岩土体移动规律模拟试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(5): 700–706.
- LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong. Model test for mining-induced movement law of rock and soil mass under thick unconsolidated layers[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2012, 29(5): 700–706.
- [28] 徐祝贺, 李全生, 李晓斌, 等. 浅埋高强度开采覆岩结构演化及地表损伤研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2728–2739.
- XU Zhuhe, LI Quansheng, LI Xiaobin, et al. Structural evolution of overburden and surface damage caused by high-intensity mining with shallow depth[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2728–2739.
- [29] HAN Penghua, ZHANG Cun, REN Zhaopeng, et al. The influence of advance speed on overburden movement characteristics in longwall coal mining: insight from theoretical analysis and physical simulation[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2021, 18(1): 6–13.
- [30] 杨胜利, 王兆会, 蒋威, 等. 高强度开采工作面煤岩灾变的推进速度效应分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 586–594.
- YANG Shengli, WANG Zhaohui, JIANG Wei, et al. Advancing rate effect on rock and coal failure format in high-intensity mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 586–594.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 赵春虎,王皓,靳德武. 煤层开采覆岩预裂-注浆改性失水控制方法探讨[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 159–167.
ZHAO Chunhu, WANG Hao, JIN Dewu. Discussion on roof water loss control method of coal seam based on pre-splitting grouting reformation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 159–167.
- [34] 李仕牧,柳东林,李凡. 特厚煤层综放工作面水压致裂技术研究[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(9): 125–129.
LI Shimu, LIU Donglin, LI Fan. Research of hydraulic fracturing technique in comprehensive caving working face in extra-thick coal seam[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(9): 125–129.
- [35] 李楠. 综采工作面厚硬砂岩顶板深孔爆破预裂卸压技术与应用[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(7): 143–147.
LI Nan. Deep hole blasting presplitting pressure relief technology and its application in thick hard sandstone roof of fully mechanized mining face[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(7): 143–147.
- [36] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破与定向水压致裂防冲适用性对比分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(4): 706–719.
ZHAO Shankun. A comparative analysis of deep hole roof pre-blasting and directional hydraulic fracture for rockburst control[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(4): 706–719.
- [37] 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.
- [38] 许家林,鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(8): 1547–1556.
XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(8): 1547–1556.
- [39] 鞠金峰,许家林,刘阳军,等. 关键层运动监测及岩移5阶段规律——以红庆河煤矿为例[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 611–622.
JU Jinfeng, XU Jialin, LIU Yangjun, et al. Key strata movement monitoring during underground coal mining and its 5-stage movement law inversion: A case study in Hongqinghe Mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 611–622.
- [40] 王云广,郭文兵,白二虎. 高强度开采覆岩运移特征与机理研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(S1): 28–35.
WANG Yunguang, GUO Wenbing, BAI Erhu, et al. Characteristics and mechanism of overlying strata movement due to high-intensity mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(S1): 28–35.
- [41] 杨科,谢广祥. 采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(10): 1092–1096.
YANG Ke, XIE Guangxiang. Mining thickness effect of distribution and evolution characteristics of mining fractures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(10): 1092–1096.
- [42] 王文学,隋旺华,董青红,等. 松散层下覆岩裂隙采后闭合效应及重复开采覆岩破坏预测[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(10): 1728–1734.
WANG Wenxue, SUI Wanghua, DONG Qinghong, et al. Closure effect of mining-induced fractures under sand aquifers and prediction of overburden failure due to re-mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(10): 1728–1734.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 鞠金峰,李全生,许家林,等. 采动岩体裂隙自修复的水-CO₂-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-CO₂-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.
- [46] 李全生,鞠金峰,曹志国,等. 采后10a垮裂岩体自修复特征的钻孔探测研究——以神东矿区万利一矿为例[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1428–1438.
LI Quansheng, JU Jinfeng, CAO Zhiguo, et al. Detection of self-healing characteristics of mining fractured rock mass after 10 years of underground coal mining: A case study of Wanli Coal Mine Shendong mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1428–1438.
- [47] 黄炳香,刘长友,许家林. 采动覆岩破断裂隙的贯通度研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(1): 45–49.
HUANG Bingxiang, LIU Changyou, XU Jialin. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(1): 45–49.
- [48] 汪锋,许家林,陈绍杰,等. 松散层拱结构模型及其对覆岩运动的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(3): 497–504, 512.
WANG Feng, XU Jialin, CHEN Shaojie, et al. Arch structure in unconsolidated layers and its effect on the overlying strata movement[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(3): 497–504.
- [49] 汪锋,陈绍杰,任梦梓,等. 松散层拱结构及其对采动覆岩稳定性的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(5): 975–983.
WANG Feng, CHEN Shaojie, REN Mengzi, et al. Effect of arch structure in unconsolidated layers on failure of the overlying strata[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 975–983.
- [50] LI Quansheng, GUO Juntao, ZHA Cun, et al. Research findings on the application of the arch structure model in coal mining: A review[J]. *Sustainability*, 2022, 14: 14714.
- [51] WANG Feng, XU Jialin, XIE Jianlin. Effects of arch structure in unconsolidated layers on fracture and failure of overlying strata[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 141–152.