

# 矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系 构建及展望

朱卫兵<sup>1,2</sup>, 李 竹<sup>1</sup>, 赵波智<sup>2</sup>, 郭春雷<sup>2</sup>, 宁 杉<sup>2</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)

**摘 要:** 迄今为止, 通过充填开采实现地表沉陷控制、降低导水裂隙带发育高度等相关研究均是从顶板岩层入手, 充填空间主要聚焦于工作面后方未垮落采空区和覆岩离层区, 并未关注到采动底板卸压区亦可作为潜在充填区域。为此, 将采空区卸压底板岩层作为可用资源加以开发, 即向采空区卸压底板岩层要空间、找资源、借力量, 提出了“采空区卸压底板注浆充填、采空区卸压底板注水膨胀造拱、采空区卸压底板爆破致裂扩容增胀”3项源头减损绿色开采理念与技术方法, 并对矿山采空区底板空间资源综合利用进行了深度展望。采空区卸压底板注浆充填岩层控制技术, 即充分利用煤层开采后在采空区底板岩层中的卸压效应, 从地面或井下施工钻孔至卸压底板岩层中的目标注浆层, 向卸压底板目标层位进行高压注浆。注浆目标层及其上覆岩层在注浆压力作用下发生上凸隆起, 借此大幅降低采空区顶板岩层回转下沉空间以降低采动裂隙发育高度和减小开采沉陷。采空区卸压底板注液膨胀造拱岩层控制技术, 即针对卸压底板岩层中膨润土、蒙托石、伊利石等亲水矿物成分占比较高情形, 充分利用其遇水膨胀特性, 在底板岩层注水压裂形成高密缝网, 而后大量注液激活水岩深度作用, 诱导底板注水岩层体积大幅增胀, 促进底板均匀破裂带及底板破坏带向上鼓起, 形成拱桥结构以支撑采空区上覆岩层, 达到降低导高和减缓沉陷的效果。采空区卸压底板爆破致裂扩容增胀岩层控制技术, 即充分利用卸压底板岩层的爆破致裂碎胀效应和隆起特性, 通过定向爆破手段对煤层底板进行精准致裂和破碎处理, 借此增加底板岩层破碎程度以消弭部分煤层采出空间, 等效增加煤层开采后垮落带中岩层综合碎胀系数, 降低顶板岩层破断下沉运动空间。作为矿山采空区卸压底板岩层资源化利用的重要扩展, 进一步提出了地下水资源自重导流转移与含水层再造重构技术, 可将易与采动裂隙沟通的顶板含水层迁移至底板目标含水层。研究成果对进一步激发矿山采空区卸压底板资源化利用的科学思考, 引导卸压底板岩层资源化利用技术落地具有重要意义。

**关键词:** 底板资源; 采空区卸压底板; 绿色开采; 注浆充填; 固废处置; 岩层控制; 生态保护

**中图分类号:** TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)05-2355-12

## Construction and prospect of the technical system for the resource utilization of pressure-relieved floor rock strata in mine goafs

ZHU Weibing<sup>1,2</sup>, LI Zhu<sup>1</sup>, ZHAO Bozhi<sup>2</sup>, GUO Chunlei<sup>2</sup>, NING Shan<sup>2</sup>

收稿日期: 2025-01-21 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2025.0081

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902101); 国家自然科学基金资助项目(52074265)

作者简介: 朱卫兵(1978—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师。E-mail: zweibing@163.com

通讯作者: 李 竹(1989—), 男, 山西长治人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: cumtlizhu@cumt.edu.cn

引用格式: 朱卫兵, 李竹, 赵波智, 等. 矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系构建及展望[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2355-2366.

ZHU Weibing, LI Zhu, ZHAO Bozhi, et al. Construction and prospect of the technical system for the resource utilization of pressure-relieved floor rock strata in mine goafs[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2355-2366.



移动阅读

(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** So far, relevant studies on achieving surface subsidence control and reducing the development height of the water-conducting fissure zone through backfill mining have all been carried out from the perspective of the roof rock strata. The backfill spaces mainly focus on the uncollapsed roof region behind the working face and the separated layer area of the overlying rock strata. However, it has not been noticed that the pressure-relieved area of the mining-induced floor can also serve as a potential backfill area. Therefore, the floor of the goaf is regarded as a useful resource for development and utilization, that is, to obtain space, find resources and borrow strength from the floor. The author has creatively proposed three new green mining concepts and technical methods covering “grouting filling in the pressure-relieved floor of the goaf, water injection and expansion forming arch bridge structure in the pressure-relieved floor of the goaf, and blasting-induced cracking and expansion in the pressure-relieved floor of the goaf”, and has made a deep outlook on the comprehensive utilization of the space resources of the floor. The strata control technology of grouting and filling in the pressure-relieved floor. Grouting and filling in pressure-relieved floor, that is, fully utilize the pressure-relieved effect of the floor after coal mining, and drill from the ground to the target grouting layer of the pressure-relieved floor, and then carry out high-pressure grouting to the target layer of the pressure-relieved floor. Under the action of grouting pressure, the target layer and the overlying rock strata will bulge upward, thereby significantly reducing the space below the roof rock strata of the goaf to reduce the development height of mining-induced fractures and reduce mining subsidence. The strata control technology of water injection and expansion forming arch bridge structure in pressure-relieved floor, that is, for the situation where the proportion of hygroscopic minerals such as bentonite, montmorillonite and illite in the pressure-relieved floor rock strata is relatively high, fully utilize their water expansion characteristics, and after water injection and fracturing to form a high-density fracture network in the floor, a large amount of liquid is injected to activate the deep interaction between water and rock, inducing the volume of the water-injected floor to expand significantly, promoting the uniform fracture zone and the destruction zone of the floor to bulge upward, forming arch bridge structure to support the overlying rock strata of the goaf, achieving the effect of reducing the guide height and slowing down the subsidence. The strata control technology of blasting-induced cracking and expansion in floor, that is, fully utilize the blasting-induced cracking and expansion effect and the bulging characteristics of the unloading floor, and precisely crack and break the coal seam floor through directional blasting, thereby increasing the degree of fragmentation of the floor to eliminate part of the extracted space of the coal seam, and equivalently increase the comprehensive expansion coefficient of the rock strata in the collapse zone after coal mining, reducing the space for the downward movement of the roof. In addition, as an important extension, the technology of self-weight-induced groundwater diversion and aquifer reconstruction is proposed, which can transfer the roof aquifer that is prone to communication with mining-induced fractures and water loss to the target water storage layer of the floor. The research results are of great significance to further stimulate the scientific thinking of the resource utilization of the depressurized floor and guide the implementation of the leading technology of the resource utilization of the floor.

**Key words:** floor resources; pressure-relieved floor of goaf; green mining; grouting and filling; solid waste disposal; strata control; ecological protection

## 0 引 言

矿山开采必然引起岩体扰动及应力重新分布, 而造成一系列的安全问题及环境影响。2003 年, 钱鸣高院士<sup>[1-2]</sup>系统地提出了煤矿绿色开采理念, 从广义资源的角度将煤炭、地下水、瓦斯、土地、煤矸石视作开发对象并加以利用, 拟形成矸石减排、减沉开采、煤与瓦斯共采、保水开采等绿色开采技术体系; 随后在人

类与大自然相处“获取—使用—回归”健康发展的基础上, 进一步提出了煤炭科学开采理念。充填开采不仅能够快速处置煤矸石等固体废弃物, 而且有效达到减沉控制目标, 是实现绿色矿山与生态修复的重要变革性技术<sup>[3-4]</sup>。谢和平院士等<sup>[5]</sup>结合双碳目标, 提出了煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想, 着力创新现有的充填开采原理与技术。许家林等<sup>[6-7]</sup>、朱卫兵等<sup>[8]</sup>创新研发了覆岩隔离注浆充填技术, 建立了地面钻孔

“一注式减损”高效绿色开采新模式,并在全国得到推广应用。此外,煤矿近20a的充填开采技术实践发展,应运而生诸如综合机械化固体充填<sup>[9]</sup>、井下采选充+X<sup>[10]</sup>、膏体充填<sup>[11-12]</sup>、超高水材料充填<sup>[13]</sup>、长壁墩柱充填<sup>[14]</sup>、冒落区充填置换条带煤柱<sup>[15-16]</sup>、短壁嗣后充填<sup>[17]</sup>、“工字型”结构充填<sup>[18]</sup>、镁渣基全固废连采连充<sup>[19]</sup>、固体改性充填<sup>[20]</sup>、垮落带注浆充填<sup>[21-22]</sup>、长壁逐巷胶结充填<sup>[23]</sup>等技术,从资源开采的源头采取措施以实现降碳、减污、扩绿、增产。各领域的专家学者积极服务于国家重大战略需求,从各个角度已做出很多卓越的成就,袁亮院士<sup>[24]</sup>提出了深井首采关键卸压层无煤柱沿空留巷Y型通风煤与瓦斯共采方法,王双明院士等<sup>[25]</sup>、张东升等<sup>[26]</sup>等结合陕北生态脆弱矿区和西北五大煤炭基地提出了保水开采技术方法,彭苏萍院士等<sup>[27]</sup>研发了西部干旱半干旱区微生物修复生态环境扩绿技术等。行业人员始终在走绿色高质量发展之路,践行习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”的科学论断。

2023年,我国煤炭消费占一次能源消费总量的比重仍有55.3%,煤炭不仅不是夕阳产业,而是具有广阔新质发展前景的支柱产业。以往,解决煤炭工程难题和实现煤炭绿色开发的研究主体聚焦于煤层自身及其顶板,很少关注底板,仅在煤与瓦斯突出煤层底板布置抽放巷或防范底板突水开展底板破坏带和承压水导升带注浆堵塞裂隙等,之前从未将底板岩层作为一种资源加以开发利用。基于钱鸣高院士提出的绿色开采理念,既然可以将瓦斯、地下水和煤矸石等变废为宝,那么同样可以将处于无用状态的底板岩层加以开发利用。需从观念上破除轻视采空区底板的客观存在,要积极向底板进军,向采空区底板要空间、找资源、借力量,这将有助于健全绿色低碳发展机制,丰富生态环境治理体系。因此,围绕底板资源,从不同角度提出了几种采空区底板源头减损绿色开采技术及方法,深入阐释了相应的技术原理,并结合数值模拟与实验室模拟试验对潜在应用效果进行了分析研究,以激发不同学科领域之间的相互融合与深入探讨,初步探讨了矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术原理及展望,旨在抛砖引玉,以飨读者。

## 1 采空区底板作为资源利用理念的提出

### 1.1 采空区底板资源

在以往研究中,研究对象或关注重点主要集中于煤层开采引起的上覆岩层破断及运动规律,覆岩应力场、裂隙场、渗流场等多场耦合与协同演化规律及开采沉陷,研究范围覆盖了自煤层顶板至地面的全部地

层,并在此基础上形成了下自采场矿压,中至顶板含水层资源保护、卸压瓦斯高效抽采,上到地表沉陷控制与生态保护等一系列行之有效的工程控制技术。然而,上述研究均忽略了底板岩层在整个采动地层中潜在价值与利用前景,也尚未意识到底板岩层利用在采动岩层控制及绿色开采技术体系中的重要作用。纵观已有文献,可以发现采空区卸压底板岩层均被视为工程治理对象,其研究内容多为采动影响下底板岩层破坏机理与破坏深度<sup>[28]</sup>、底板承压水突水预测与底板围岩注浆加固<sup>[29-30]</sup>、高瓦斯煤层底抽巷布置<sup>[31-32]</sup>等,并未从思想及理念上将其视为一种资源而加以开发利用。

鉴于此,提出了矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系及展望,其核心思想在于充分利用卸压底板岩层自身特性,构建卸压底板岩层拱桥式承载地基结构,借此对上覆岩层形成高效支撑体系,降低煤层开采后覆岩变形与沉降以削减地层采动损害程度,实现采动导水与导气裂隙带高度、地表沉陷与环境损害同步弱化。其中,充分利用底板岩层拱桥式承载地基结构的构建,具体可分为采空区卸压底板注浆充填、采空区卸压底板注液膨胀造拱、采空区卸压底板爆破预裂膨胀等系列技术,基于该原理衍生的其他名称及类比的底板注浆与人工改造底板岩层以抑制顶板岩层运动、降低覆岩破坏高度与减弱应力集中与地面沉陷等技术均属该体系。

### 1.2 卸压底板资源化利用优势

提出的矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系及展望,旨在将底板岩层作为资源加以利用,通过前述多种方法及途径来构建底板岩层拱桥式承载地基结构以减弱顶板岩层运动与采动损害程度,采空区底板原位充填具有如下特点:

1) 采煤作业与充填系统互不影响。采空区卸压底板注浆充填通过地面或井下钻孔均可进行,充填系统与采煤系统相独立,充填能力与采煤能力可独立设计。

2) 源头减小顶板岩层回转下沉空间并降低垮落带和裂隙带高度。根据采空区卸压底板损伤破坏深度,设置一定厚度的阻浆岩层,在注浆压力作用下,注浆层位之上的底板岩层上凸隆起,且采空区底板浅表岩层变形及破碎程度加大,顶板垮落带及裂隙带高度随之降低。

3) 注浆充填浆液稳定赋存并固结于底板空间,消除浆液溃泄至工作面的风险;煤基固废充填浆液将不再与顶板含水层沟通,实现保水采煤的同时亦不会污染地下水资源。同时,由于采出空间被注浆隆起及破

碎底板碎胀补偿弥合,最大限度降低了工作面顶板裂隙带发育高度。

4) 煤基固废处置与充填浆液矿化固碳与封存。利用煤基固废材料形成注浆充填浆液矿化 CO<sub>2</sub>,同时底板注浆空间充填材料泌水形成多孔灰体吸附 CO<sub>2</sub>,底板注浆空间密闭性好,可作为 CO<sub>2</sub> 永久封存场所。

## 2 矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系

### 2.1 卸压底板岩层资源化利用技术体系

提出的矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系,其关键在于充分利用采空区底板卸压岩层特性,人为构建采空区卸压底板岩层拱桥结构,并使其与底板岩层爆破碎裂增胀岩层协同承载,大幅补偿煤层采出空间,从源头上减小煤层开采的初始采出空间,进而降低覆岩裂隙带发育高度并减小地表沉陷。卸压底板隆起及其人工碎裂增胀,具体可通过采空区卸压底板注浆充填、采空区卸压底板注液膨胀造拱、采空区卸压底板爆破致裂扩容增胀等措施实现,相应的技术框架如图 1 所示。

## 2.2 采空区卸压底板注浆充填岩层控制技术

### 2.2.1 技术原理与应用流程

为了向矿山卸压底板“要空间”,充分利用矿山卸压底板空间资源,提出了采空区卸压底板注浆充填岩层控制技术。该技术充分利用煤层开采后在采空区底板岩层中的卸压效应,科学选定煤层底板岩层中的目标注浆层位后,向卸压底板目标层位进行高压注浆。目标层位之上的岩层在注浆压力作用下发生上凸隆起,借此大幅降低采空区顶板岩层回转下沉空间,有效减小采动岩层破断运动范围与开采地表沉陷,显著提高地表建筑的安全性及稳定性,其技术原理如图 2 所示。

采空区卸压底板岩层注浆充填岩层控制技术的应用流程,可分为以下 2 个阶段:

1) 注浆承压层的科学选取。在采空区底板破坏带以下选取 1 层或多层弹性模量低、塑性变形能力强且具有隔水性能的岩层作为注浆承压层。该岩层在高压注浆过程中不仅能够发生显著上凸弹性弯曲变形,同时还具备良好的隔水性能以阻止高压浆液泄漏至采空区。注浆承压层科学选取尤为关键,一方面

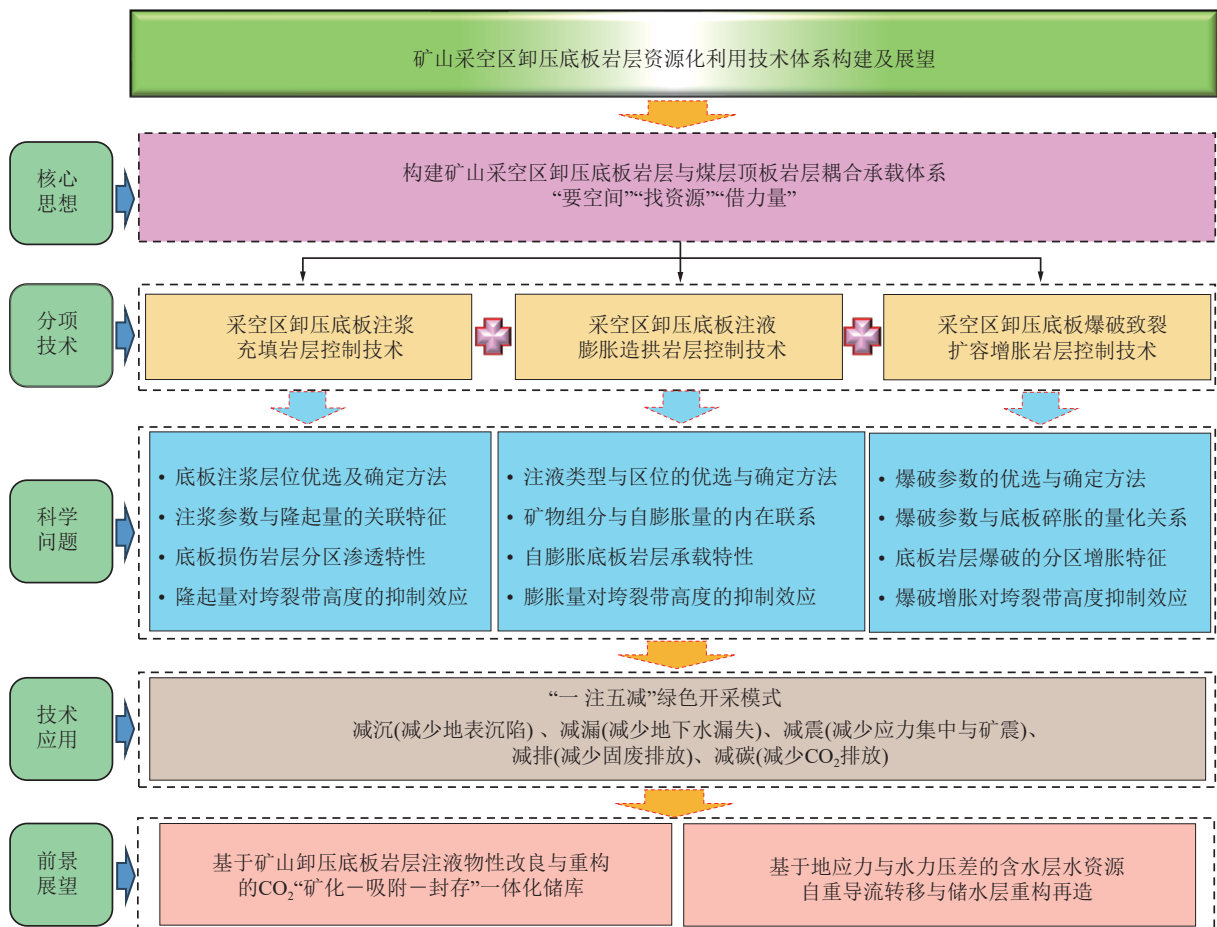


图 1 矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系

Fig.1 Technical system for resource utilization of pressure-relief floor rock layers in mining goaf

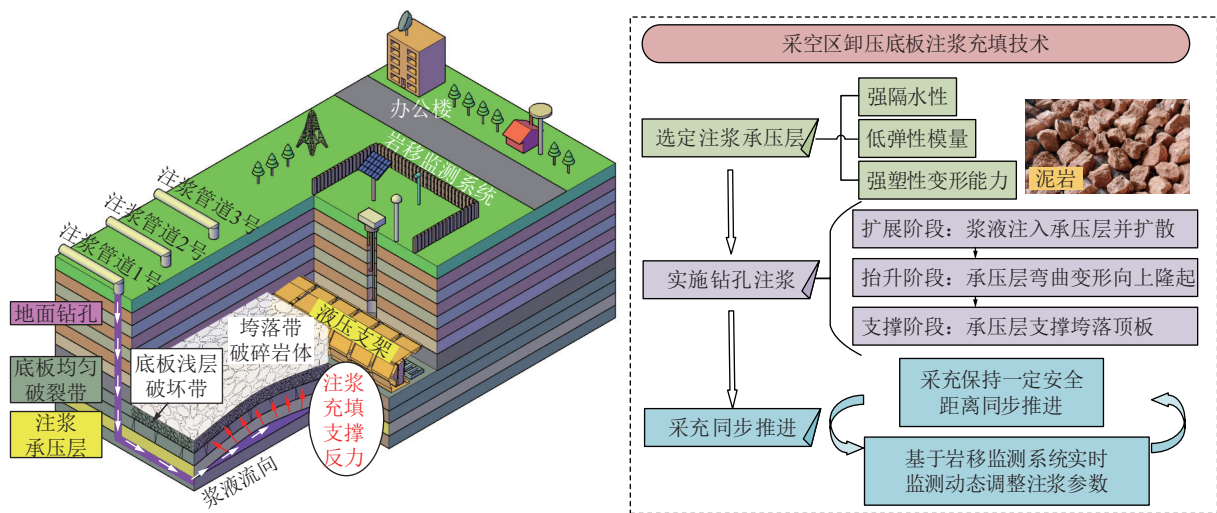


图 2 采空区卸压底板注浆充填技术原理与应用流程

Fig.2 Principles and application process of grouting filling technology for the pressure-relief floor in mining goaf

分散高压浆液压力,避免浆液压力集中导致的岩层破断与浆液流失;另一方面注浆承压层及其上覆岩层在浆液高压作用下上凸弯曲变形,借此减小煤层采出空间,降低顶板岩层断裂运动幅度。

2) 高压注浆承压层及底板岩层抬升。在工作面后方布置若干定向钻孔,同时选取粒径适宜、稳定性高且环境友好的注浆材料,确保浆液能够精准注入承压层下部。注浆过程可划分为 3 个阶段:在扩展阶段,浆液经钻孔注入至承压层,填堵承压层原生裂隙并沿层理面扩散;在抬升阶段,承压层在高压浆液作用下向采空区卸压区弯曲上凸,推动破裂岩层向上隆起;在支撑阶段,充填浆液固结体、承压层与上隆破裂层岩体形成联合地基支撑体系,为上覆顶板提供稳定支撑,减少沉降与回转变形。此外,在保持合理的空间错距的前提下,注浆作业可与采煤过程同步进行。

### 2.2.2 基于卸压底板注浆充填的岩层控制效果分析

鄂尔多斯矿区北部矿井上覆岩层广泛分布着白垩系含水层,具有厚度大、分布广、含水量高的典型特征。煤层开采过程中采动裂隙易沟通含水层,将会导致大量水资源浪费并诱发水害事故。提出的底板注浆充填采煤技术实现了采充分离互不影响,将充填层位设置于底板远离顶板含水层的位置,从根本上杜绝了水体污染。底板注浆充填技术大幅降低了导水裂隙带发育高度,实现了煤炭开采、水害治理与水资源保护、地表减沉的全面共赢。

为揭示底板注浆充填技术在降低采动导水裂隙带高度方面的显著作用,以鄂尔多斯矿区某矿为研究对象,采用 3DEC 离散元数值模拟软件,建立了尺寸为 800 m × 300 m × 500 m 的模型。其中,工作面宽度为 300 m、煤层厚度 9 m、推进长度 600 m,采用放顶

煤开采。煤层上覆地层中赋存 3 层关键层,其中白垩系含水层为主关键层 (PKS)。注浆层位布置于煤层底板下方 50 m。模型开采方案分为常规开采和底板注浆充填开采。模型参数以周边矿井导水裂隙带高度实测结果为准进行标定,即参照矿井中开采煤层厚度为 6 m,导水裂隙带高度为 120.3 m,裂采比为 20.1<sup>[33]</sup>。2 个方案中相应的覆岩位移场、底板岩层隆起与地面沉陷、导水裂隙带发育高度如图 3 所示。

由图 3a 和图 3b 可知,在常规开采时上覆岩层充分垮落,第一层亚关键层 KS1(距离煤层 30 m)和第二层亚关键层 KS2(距离煤层 90 m)均发生破断,且 PKS 底界面出现较大离层,而采用底板注浆充填开采后底板岩层在注浆压力作用下显著隆起,有效支撑了垮落的顶板,此时仅 KS1 发生了破断及小幅度回转变形,KS2 和 PKS 均未发生破断。由图 3c 和图 3d 可知,常规开采时地表最大下沉量为 0.69 m;采用底板注浆充填开采时地表最大下沉量骤减为 0.1 m,采空区中部底板最大抬升量为 5.3 m。数值模拟结果显示常规开采导水裂隙带发育高度为 170 m,裂采比为 18.9,与临近矿井裂采比实测结果一致,采动裂隙已发育至含水层底界面,如图 3e 所示;采用底板注浆充填开采导水裂隙带发育高度仅为 95 m,如图 3f 所示,裂采比减小至 10.6,采动裂隙不会与含水层沟通,有效避免了含水层水资源流失与顶板离层区水害,实现了煤炭高效开采、水害治理与水资源保护的协同发展。

## 2.3 采空区卸压底板注水膨胀造拱岩层控制技术

### 2.3.1 技术原理与应用流程

为了向矿山卸压底板“找资源”,充分挖掘采空区底板可利用资源,提出了采空区卸压底板注水膨胀造拱岩层控制技术,这是采空区底板资源利用与源头减

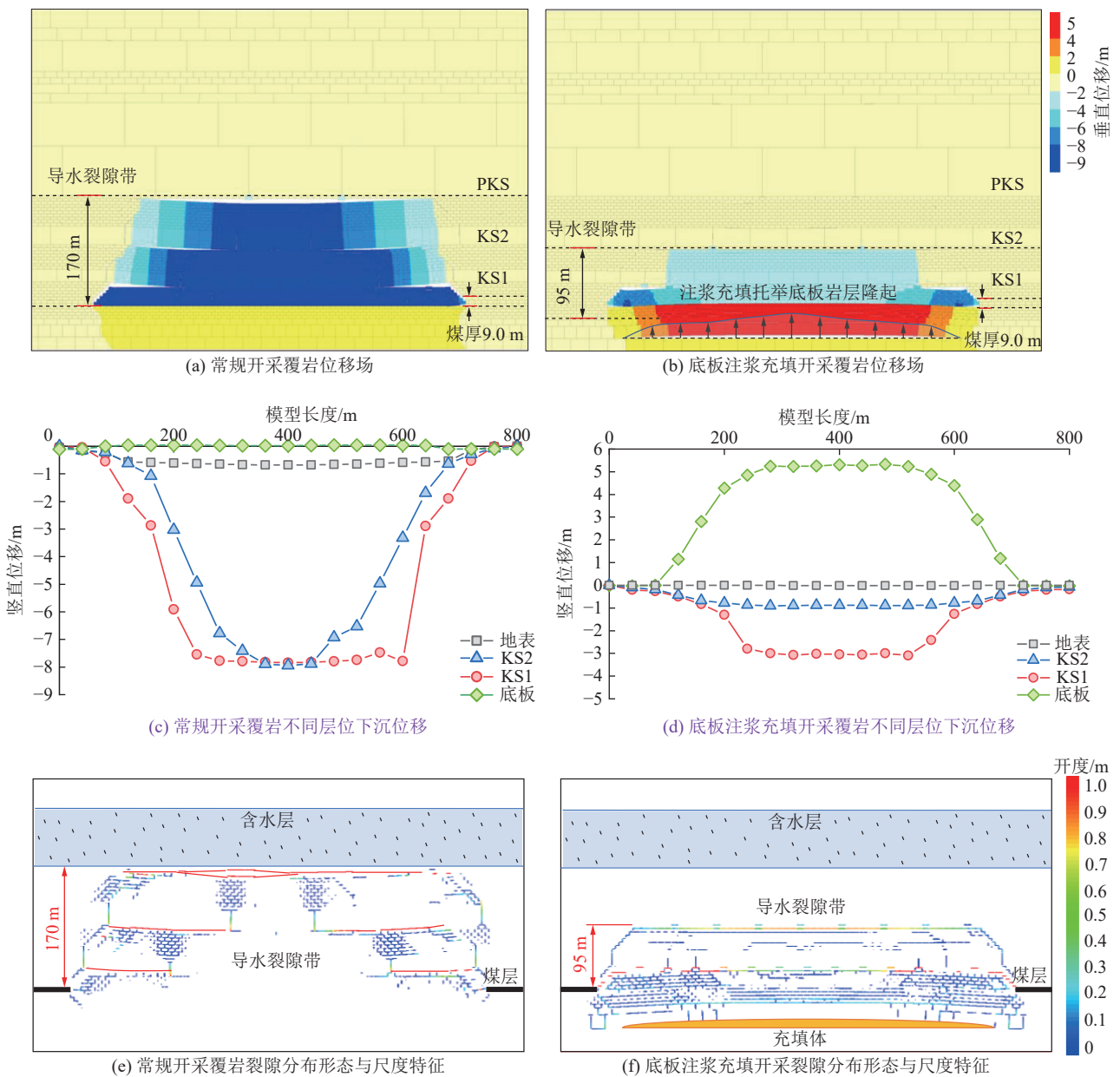


图 3 常规开采与底板注浆充填开采后岩层运动规律差异性分析

Fig.3 Analysis of differences in rock layer movement patterns between conventional mining and post-mining grouting filling of the pressure-relief floor

损开采的重要结合。该技术针对特定工况,如卸压底板岩层中膨润土、蒙托石、伊利石等亲水矿物成分占比较高的情形,利用回采后底板卸压及底板岩层吸水体积膨胀特性,在底板岩层注水压裂形成高密缝网而后大量注水激发水岩深度作用诱导底板注水岩层体积大幅增胀,促进底板均匀破裂带及底板破坏带向上鼓起形成拱桥结构以支撑采空区上覆岩层,从而达到减缓沉陷的效果。底板岩层注水膨胀造拱岩层控制技术原理与应用流程如图 4 所示。

采空区卸压底板岩层注水膨胀造拱岩层控制技术的应用流程,可分为以下 2 个阶段:

1) 确定注水膨胀带。在采空区底板破坏带以下

选取一定厚度、富含黏土矿物且具备遇水膨胀特性的岩层作为注水膨胀带。该岩层能够在高压注水作用下能够显著膨胀,产生向上的塑性弯曲变形,同时具有良好的隔水性能,可有效阻止高压水流泄漏至采空区。此外,其上方的隔离保护带与注水膨胀带相邻的岩层均为遇水不发生膨胀的岩层,进一步增强整体的稳定性与注水膨胀控制效果。

2) 注水膨胀带及底板岩层抬升。在工作面一侧或两侧巷道中施工定向钻孔,钻孔水平段施工于注水膨胀带,并在孔口安装封隔器,封闭底板破坏带与隔离保护带对应岩层。注浆过程可划分为 3 个阶段:在高压注水阶段,高压水流经钻孔压入至注水膨胀层,

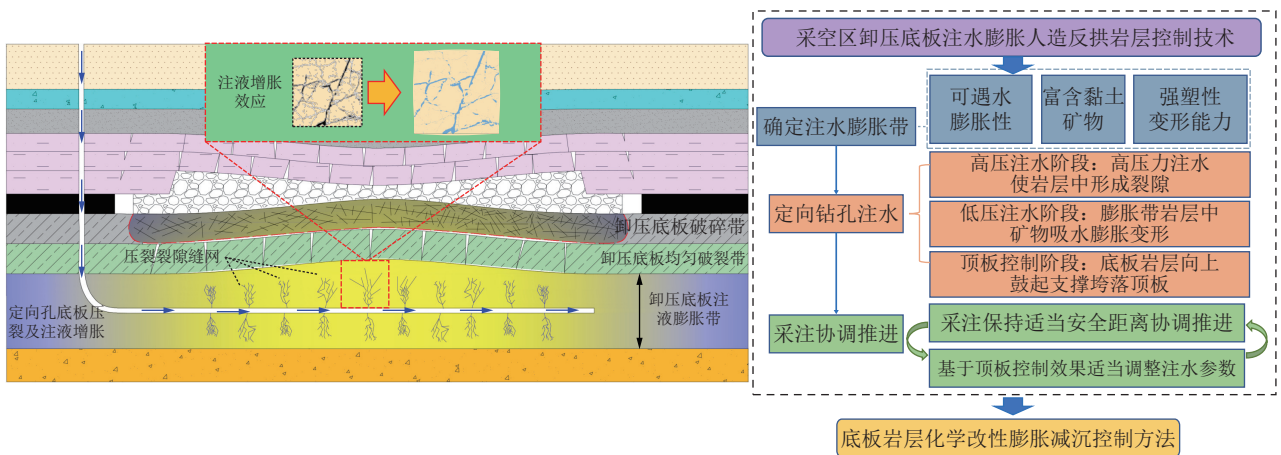


图 4 采空区卸压底板注水膨胀造拱岩层控制技术原理与应用流程

Fig.4 Principles and application process of water injection and expansion arching control technology for the pressure-relief floor in mining goaf

使得岩层中形成微裂隙,为后续注水膨胀带与水充分反应做铺垫;在低压注水阶段,控制注水压力以防止岩层过度破裂,精确控制注水量,确保岩层能够充分吸水膨胀;在顶板控制阶段,注水膨胀带岩层吸水膨胀后,抬升底板并为上覆顶板提供稳定支撑,从而减小了煤层的等效采高,降低采动裂隙发育高度,上覆岩层的下沉得到有效控制,进而减缓了地表沉陷。

### 2.3.2 基于卸压底板注水膨胀造拱的岩层控制效果分析

为进一步揭示底板岩层注水膨胀造拱效应及其对采动覆岩运动的控制效果,同时考虑到该技术主要针对底板岩层中富含膨润土、蒙托石、伊利石等亲水矿物成分工况进行应用,针对卸压条件下泥岩吸水垂向膨胀效应进行了量化研究。相似模型长×宽×高尺寸为 1.3 m × 0.1 m × 0.48 m,几何相似比为 1 : 100,密度相似比为 1 : 1.5,应力相似比为 1 : 150。模型中煤层底板下方铺设一层膨润土层,并在膨润土界面每隔 10 cm 设置一个注水点。为充分再现采动岩层运动与应力协同演化规律,即采空区底板为自由面,故在膨润土层前后均安装挡板,为底板岩层提供侧向水平位移柔性约束条件,确保垂向为底板岩层膨胀造

拱运移的主要方向,如图 5 所示。待工作面推进至相应注水点时,通过水泵向各注水点注水,同时采用散斑监测和高速摄影对回采过程底板岩层注水膨胀上移运动规律进行实时监测。

不同推进距时底板岩层注水膨胀上凸位移及其膨胀裂隙演化特征如图 6 所示。随着工作面推进距增大及注水后,底板膨胀量及其裂隙数量与扩展宽度随之增加。推进至 30 cm 时,底板出现 2 条水平裂隙,裂隙 1 的开度大于裂隙 2,此时采空区中部最大隆起量仅为 0.35 mm,如图 6a 所示。推进至 50 cm 时底板出现 3 条水平裂隙,但三者开裂程度均较小,采空区中部底板最大隆起量增加至 2.17 mm,如图 6b 所示。推进至 60 cm 时,底板水平裂隙 1 的开裂程度显著增大,且远大于其他 2 条水平裂缝,裂缝 1 高度为 2.2 mm;同时,裂隙 1 和裂缝 2 之间出现 3 条竖向裂缝,且竖向裂缝 4、5、6 均已贯通水平裂隙 1 和水平裂缝 2,采空区中央底板出现明显鼓起,形成开口向上的张拉裂缝,采空区中部底板最大隆起量高达 5.36 mm,如图 6c 所示。推进至 70 cm 时,顶板岩层发生破断,垮落岩层载荷作用下底板岩层上移幅度较小,仅增加至 5.71 mm;但岩层破断诱导上覆岩层载荷转移至采

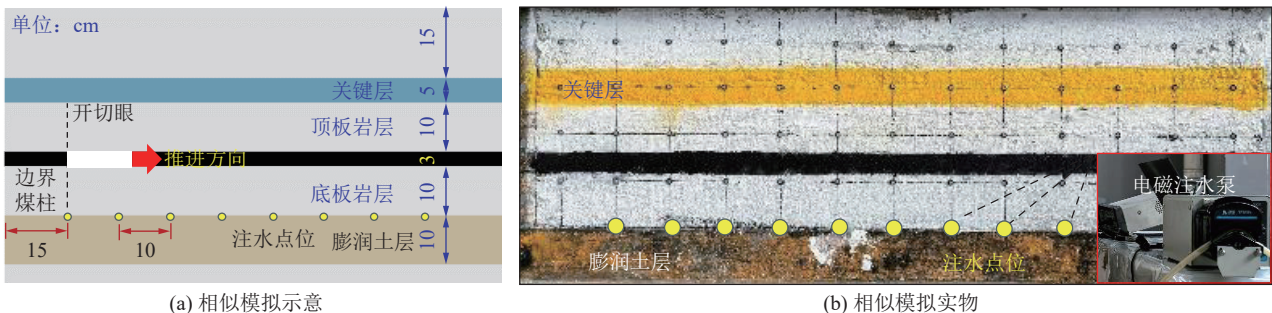


图 5 采空区卸压底板注水膨胀造拱岩层控制相似模拟

Fig.5 Similar simulation of water injection and expansion arching control for the pressure-relief floor rock strata in mining goaf

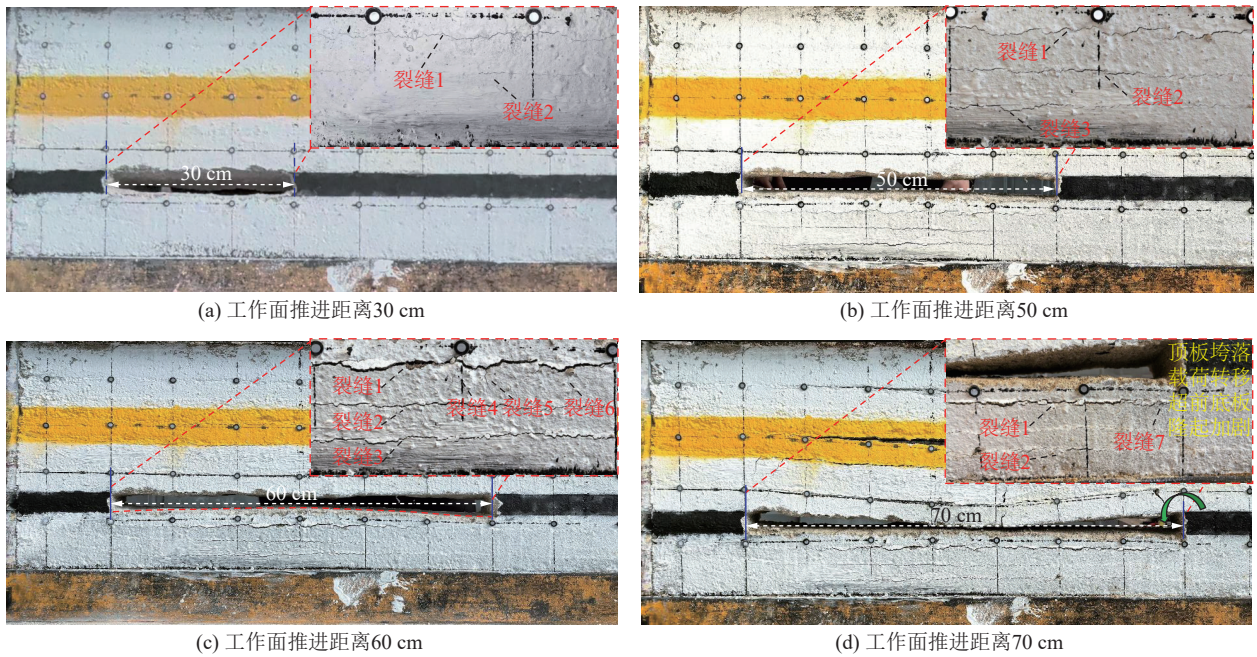


图 6 采后卸压底板岩层注水膨胀上隆效应与裂隙演化特征

Fig.6 Principles and application process of blasting-induced fracturing and expansion technology

空区,超前煤体集中应力随之减小,此处底板向上隆起显著并伴随出现竖向裂缝,如图 6d 中裂缝 7 所示。不同推进距时,注水自膨胀后采空区底板隆起量变化规律,如图 7 所示,可见煤层采出后顶板可下沉运动空间由 30 mm 减小至 24.21 mm,减幅高达 19%。

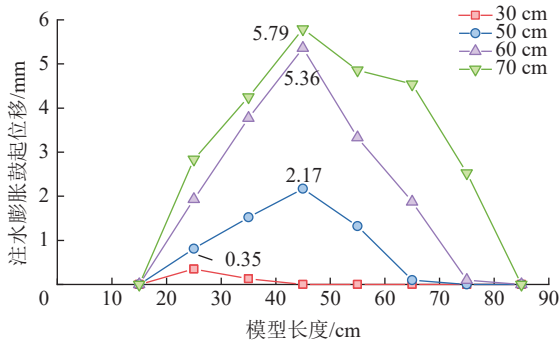


图 7 不同推进距下采空区卸压底板岩层注水膨胀鼓起位移变化

Fig.7 Variation of water injection expansion uplift displacement in the pressure-relief floor rock strata of mining goaf at different mining distances

### 2.4 采空区卸压底板爆破致裂扩容增胀岩层控制技术

#### 2.4.1 技术原理与应用流程

为了向矿山卸压采空区底板“借力量”,充分发挥采空区卸压底板的潜在价值,提出了底板岩层爆破致裂扩容增胀岩层控制技术,该技术是采空区底板资源利用与源头减损的另一项重要应用。利用采空区卸压底板中部易隆起特性,采用定向爆破手段对底板局

部区域进行精准致裂,提升底板岩层致裂碎胀扩容效果,增加底板岩层破碎程度以消弭部分煤层采出空间,等效增加煤层开采后顶底板不规则垮落岩体累计高度及碎胀系数,降低顶板岩层破断回转下沉运动空间。底板岩层爆破致裂扩容增胀岩层控制技术原理及应用流程如图 8 所示。

底板岩层爆破致裂扩容控制地表沉降技术的应用流程,可分为以下 3 个阶段:

1) 底板爆破钻孔科学布置。首先,在工作面两侧巷道内向煤层底板施工爆破钻孔,钻孔在平面上向切眼方向及采动区底板岩层方向倾斜,并按照相同的间隔距离成对布置。每对钻孔的垂直深度、角度及平面倾角保持一致,相邻钻孔爆破后形成连续的爆破致裂区域,并优先采用非炸药爆破方式(如二氧化碳爆破)以保障施工安全与环保。爆破钻孔应该自工作面巷道倾斜延伸至工作面后方采空区底板岩层,待工作面推进至距离孔口一定距离时,将该钻孔孔底区域岩层进行爆破致裂。孔底区域的底板位于卸压区,可产生有一定碎胀系数的块体进而支撑。

2) 爆破施工与顶板管理。当工作面回采至最近的爆破钻孔孔口约 5 m 时,此时该钻孔孔底区域已处于工作面后方采空区卸压底板岩层中,再对该钻孔实施爆破致裂增胀。爆破后,底板岩层发生裂隙扩展和破碎,碎胀作用使底板岩体隆起。破碎的底板岩体在实体煤侧压作用及自身膨胀作用下,与垮落的顶板岩层接触,形成对顶板岩层的有力支撑。

3) 减沉效果与持续回采。底板岩层的爆破碎胀

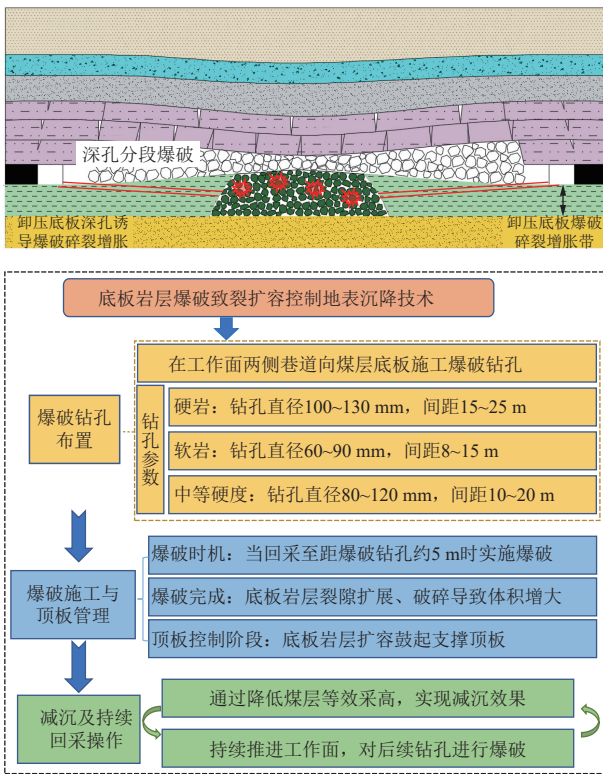


图8 爆破致裂扩容技术原理与应用流程

Fig.8 Principles and application process of blasting-induced fracturing and expansion technology

一定程度抵消了煤层开采产生的部分空间,进一步降低了煤层的等效采高。在此基础上,工作面回采持续推进,并按照上述方法对后续爆破致裂钻孔依次实施爆破。

2.4.2 基于卸压底板爆破致裂扩容的岩层控制效果分析

卸压底板岩层爆破致裂扩容等效于在煤层开采高度不变的条件下增加了顶底板不规则垮落岩层的累计厚度及碎胀系数,通过卸压底板岩层爆破致裂扩容引发的膨胀现象,消弭顶板岩层破断下沉的部分空间,从而降低顶板岩层的下沉量。无爆破致裂扩容时,煤层采出后上覆岩层可自由运动空间 $\Delta$ 可由式(1)表示;而采用爆破致裂扩容后,上覆岩层可自由运动空间 $\Delta'$ 可由式(2)表示。

$$\Delta = M + \sum h_i - K_p \sum h_i \quad (1)$$

$$\Delta' = M + \sum h_i - K_p \sum h_i - (K_d - 1) \sum h_d \quad (2)$$

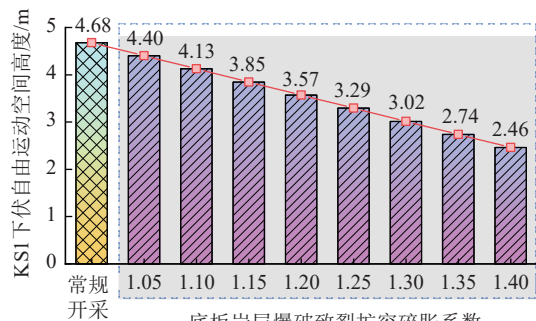
式中:  $M$ 为工作面采高,  $m$ ;  $\sum h_i$ 为顶板垮落带岩层累计厚度,  $m$ ;  $K_p$ 为顶板垮落带岩层碎胀系数;  $\sum h_d$ 为深孔爆破致裂底板岩层累计厚度,  $m$ ;  $K_d$ 为深孔爆破致裂底板岩层碎胀系数。

采用案例计算方法,说明卸压底板岩层爆破致裂

扩容增胀对上覆岩层下沉运动的抑制效果。山西某矿81306工作面埋深约为430m,工作面采高为5m,其地层柱状如图9所示。据图9可知,8号煤层采出后,1.6m细砂岩随之垮落,取其碎胀系数为1.2进行计算。而11.56m的粗砂岩,即KS1则形成砌体梁结构,由式(1)可知,KS1破断铰接块体下方自由运动空间 $\Delta$ 为4.68m。若采用卸压底板岩层爆破致裂扩容技术,假设针对已遭受采动应力损伤裂隙发育的、易于爆破致裂扩容的直接底,即4.31m中砂岩和1.22m泥岩进行爆破致裂。根据岩石爆破致裂后碎胀系数的相关研究成果<sup>[34-35]</sup>,爆破后岩体碎胀系数与岩体碎裂块度紧密相关,两者关联效应见表1,取碎胀系数1.05~1.4进行阶段式研究,此时KS1破断铰接块体下方自由运动空间 $\Delta'$ 的变化趋势如图9所示。4.31m中砂岩和1.22m泥岩爆破碎裂后,碎胀系数分

序号	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层位置
1	9.41	351.56	细砂岩	
2	6.06	357.62	砂质泥岩	
3	1	358.62	细砂岩	
4	20	378.62	砂质泥岩	
5	29.15	407.77	粗砂岩	亚关键层2
6	1	408.77	砂质泥岩	
7	1.37	410.14	7煤	
8	6.21	416.35	砂质泥岩	
9	11.56	427.91	粗砂岩	亚关键层1
10	1.6	429.51	细砂岩	
11	5.02	434.53	8煤	
12	4.31	438.84	中砂岩	
13	1.22	440.06	泥岩	
14	2.82	442.88	中砂岩	
15	2.39	445.27	泥岩	

(a) 81306工作面地层情况



(b) KS1下伏自由运动空间与底板岩层爆破碎胀系数的联系

图9 81306工作面地层柱状及KS1下伏自由空间量与爆破致裂碎胀系数的关联特征

Fig.9 Correlation between the stratigraphic column of the 81306 working face and the free space volume and the expansion coefficient of blasting-induced fracturing under KS1

别取 1.05、1.1、1.15、1.2、1.25、1.3、1.35、1.4 时, KS1 下部可回转运动高度自 4.68 m, 历经 4.40、4.13、3.85、3.57、3.29、3.02、2.74 m, 最终降低至 2.46 m, 对应的降幅分别为 5.98%、11.75%、17.74%、23.72%、29.70%、35.47%、41.45%、47.44%。由此可见, 底板岩层爆破碎裂后对顶板下沉运动具有极为显著的控制效果。

表 1 岩石炸裂后的碎胀系数<sup>[35]</sup>

Table 1 Broken expansion coefficient of rock after blasting<sup>[35]</sup>

块体尺寸/m	> 1.5	1.0~1.5	0.2~0.7	< 0.2
碎胀系数	1.03~1.1	1.2~1.3	1.4~1.65	1.5~1.85

### 3 矿山采空区卸压底板资源化利用前景展望

#### 3.1 构建基于矿山卸压底板岩层物性改造与重构的碳储库

为向矿山卸压底板“要空间”, 丰富矿山卸压底板空间资源利用模式, 除采空区卸压底板注浆充填岩层控制技术之外, 进一步提出采空区底板封存二氧化碳的负碳开采构想, 即充分利用上述煤基固废高钙充填浆液, 含 CO<sub>2</sub> 的高温废气流经充填浆液矿化为稳定碳酸盐, 浆液固结形成比表面积较大的多孔介质对游离 CO<sub>2</sub> 进行高效吸附, 同时底板充填空间形成 CO<sub>2</sub> 储库, 形成集“矿化—吸附—封存”于一体的新型碳储技术, 实现负碳开采的目标。

与此同时, 为了向卸压底板“找资源”, 基于采空区卸压底板注水膨胀造拱岩层控制技术, 可以进一步丰富为底板岩层化学改性膨胀减沉控制方法, 即除向采空区卸压底板注水之外, 还可以针对底板岩层矿物成分选择对应的膨胀化学药剂, 例如硅酸盐溶液与钙质岩层(白云岩、石灰岩等)反应生成硅酸钙水化产物, 促使体积增大<sup>[36]</sup>。该方法操作灵活, 靶向控制及膨胀效果显著, 可以实现精准控制膨胀范围和程度。

#### 3.2 地下水资源自重导流转移与含水层再造

煤层开采会引起上覆岩层的移动和破坏, 采动裂隙可能沟通含水层, 导致含水层水体通过采动裂隙涌入采空区, 不仅造成水资源浪费, 还极易诱发矿井水害事故。基于向底板“要空间”, 提出地下水资源自重导流转移与含水层再造重构方法, 其技术原理为在煤层底板岩层中选择具备裂隙发育及储水特性的目标岩层, 充分利用煤层开采卸压后目标岩层孔隙结构扩张及其渗透率增大的特性, 对底板岩层进一步改性处理来增强其渗透性。通过布置钻孔建立导流路径, 人为主动构建顶板含水层和底板目标储水层的连接通

道, 利用二者高差形成的水力压差驱使顶板含水层的水体向底板目标储水层进行转移, 如图 10 所示。该方法可以实现水资源的战略转移, 为地下水资源优化配置和煤炭开采与水体保护协同长效发展提供支持, 是矿山采空区卸压底板空间资源的另一个重要应用。

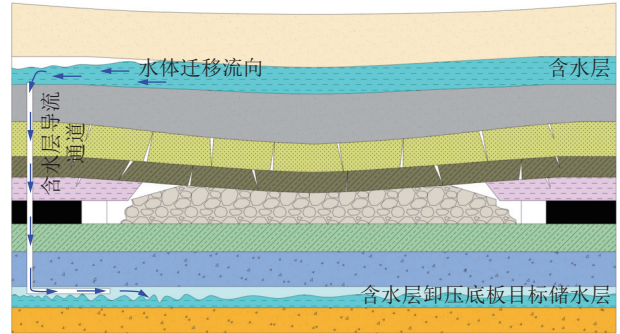


图 10 顶板含水层向底板岩层导流及含水层重构示意

Fig.10 Reconstruction schematic diagram of water flow from roof aquifer to floor rock strata

## 4 结 论

1) 深度融合国家“三深一土”科技创新发展战略, 发现了矿山采空区卸压底板岩层可作为重要资源加以利用, 据此提出了矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系, 具体涵盖“采空区卸压底板注浆充填、采空区卸压底板注水膨胀造拱、采空区卸压底板爆破致裂扩容增胀”于一体的 3 项源头减损绿色开采技术, 并深刻阐释了 3 项技术原理及应用流程。

2) 综合理论分析、数值模拟和相似材料模拟, 量化分析了采空区卸压底板岩层注浆充填、采空区卸压底板岩层注水膨胀造拱、采空区卸压底板爆破致裂扩容增胀对采动覆岩中不同层位岩层下沉特征与地表沉陷的影响规律, 揭示了 3 种技术对采动覆岩裂隙分区发育开度与裂隙带发育高度的抑制效应, 阐明了相应方法对减弱采动岩层运动及降低开采沉陷的控制原理。

3) 作为矿山采空区卸压底板岩层资源化利用技术体系的重要拓展, 进一步提出地下水资源自重导流转移与含水层再造重构技术, 人工构建底板岩层高渗透层与导流路径, 利用水力压差实现水资源自上向下的靶向转移, 为地下水资源优化配置与煤炭开采协同长效发展提供支持。

4) 所提出的矿山卸压底板岩层资源利用技术, 重点在于阐释清楚相应的技术原理可行性, 以激发广大科研工作者重新审视并探索底板岩层资源全新利用方法, 从另一个视角来进一步丰富充填开采岩层控制方法。针对于具体的工程实践与工艺参数细化问题,

如注浆压力动态调控与开采参数的匹配机制、充填浆液材料选配方法, 底板碎裂膨胀深孔爆破参数确定及上述参数与岩层运动控制效果的关联机制等内容仍有待深入研究。

### 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] 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): 1-13.  
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 1-13.
- [3] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. *绿色矿山*, 2023(1): 1-24.  
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. *Journal of Green Mine*, 2023(1): 1-24.
- [4] 吴爱祥, 张晋军, 王貽明, 等. 膏体充填: 金属矿绿色开采的变革性技术[J]. *中国有色金属学报*, 2024, 34(5): 1652-1666.  
WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill: Transformative technology for green mining in metal mines[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2024, 34(5): 1652-1666.
- [5] 谢和平, 张吉雄, 高峰, 等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 36-46.  
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon-negative and high-efficient backfill mining in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 36-46.
- [6] 许家林, 轩大洋, 李建. 覆岩隔离注浆充填技术实践与研究展望[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(6): 74-80.  
XU Jialin, XUAN Dayang, LI Jian. Application and research prospects of overburden isolated grouting backfilling technology[J]. *China Coal*, 2024, 50(6): 74-80.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张吉雄, 周跃进, 黄艳利. 综合机械化固体充填采煤一体化技术[J]. *煤炭科学技术*, 2012, 40(11): 10-13, 27.  
ZHANG Jixiong, ZHOU Yuejin, HUANG Yanli. Integrated technology of fully mechanized solid backfill mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2012, 40(11): 10-13, 27.
- [10] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4167-4181.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [11] 常庆粮, 冷强, 袁崇亮, 等. 急倾斜特厚煤层水平分层大采高充填膏体与煤体协调承载特性研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 919-928.  
CHANG Qingliang, LENG Qiang, YUAN Chongliang, et al. Study on bearing characteristics of filling paste and coal in steeply inclined extra-thick coal seams with large mining height and horizontal stratification[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 919-928.
- [12] 孙希奎, 范建国, 常庆粮. 浅埋特厚煤层下向分层膏体充填开采覆岩变形控制机理[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(3): 221-233.  
SUN Xikui, FAN Jianguo, CHANG Qingliang. Shallow and extra-thick coal seam mining in the bottom layer paste filling overburden deformation control mechanism[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(3): 221-233.
- [13] 冯光明, 贾凯军, 尚宝宝. 超高水充填材料在采矿工程中的应用与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(1): 5-9.  
FENG Guangming, JIA Kaijun, SHANG Baobao. Application and prospect of super-high-water packing material in mining engineering[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 5-9.
- [14] ZHU W B, XU J M, XU J L, et al. Pier-column backfill mining technology for controlling surface subsidence[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 96: 58-65.
- [15] ZHU W B, YU S C, XUAN D Y, et al. Experimental study on excavating strip coal pillars using caving zone backfill technology[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(18): 554.
- [16] 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.
- [17] LIU Wenbing, XU Jingmin, ZHU Weibing, et al. A novel short-wall caving zone backfilling technique for controlling mining subsidence[J]. *Energy Science and Engineering*, 2019, 7(5): 2124-2137.
- [18] 冯国瑞, 郭伟, 李竹, 等. 基于顶板结构断裂特征的煤矿结构充填关键位置确定方法[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 38-49.  
FENG Guorui, GUO Wei, LI Zhu, et al. Method determination on key position of coal mine constructional backfill based on fracture characteristics of roof structure[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 38-49.
- [19] 刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 83-92.  
LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, et al. Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 83-92.
- [20] 刘建功, 赵家巍, 刘扬, 等. 煤矿矿区普适性拓展型固体改性充填

- 采煤技术与装备[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 380–399.
- LIU Jiangong, ZHAO Jiawei, LIU Yang, et al. General-purpose expansion type solid modification backfilling mining technology and equipment for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 380–399.
- [21] 李兴尚, 许家林, 朱卫兵, 等. 条带开采垮落区注浆充填技术的理论研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(11): 1205–1210.
- LI Xingshang, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Theoretical study on the backfill grouting in caving area with strip mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11): 1205–1210.
- [22] 李志华, 耿倩, 杨科, 等. 综采工作面垮落带注浆充填开采覆岩采动裂隙定量表征试验研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(2): 159–167.
- LI Zhihua, GENG Qian, YANG Ke, et al. Quantitative characterization of mining-induced cracks in overlying strata of grouting filling mining in caving area of fully mechanized mining face[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(2): 159–167.
- [23] 邓雪杰. 特厚煤层上向分层长壁逐巷胶结充填开采覆岩移动控制机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- DENG Xuejie. Ground control mechanism of mining extra-thick coal seam using upward slicing longwallroadway cemented backfilling technology[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [24] 袁亮. 低透气性高瓦斯煤层群无煤柱快速留巷 Y 型通风煤与瓦斯共采关键技术[J]. 中国煤炭, 2008, 34(6): 9–13, 4.
- YUAN Liang. Key technology for simultaneous extraction of coal/gas in low permeable high gas content coal seam cluster under pillarless gob-side entry retained with Y type ventilation[J]. China Coal, 2008, 34(6): 9–13, 4.
- [25] 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(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(S1): 697–702, 707.
- [26] 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.
- [27] 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 57–64.
- PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 57–64.
- [28] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1571–1578.
- JIANG Yaodong, Lv Yukai, ZHAO Yixin, et al. Similar simulation test for breakage law of working face floor in coal mining above aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1571–1578.
- [29] 武强, 李博. 煤层底板突水变权评价中变权区间及调权参数确定方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2143–2149.
- WU Qiang, LI Bo. Determination of variable weight interval and adjust weight parameters in the variable weight assessment model of water-inrush from coal floor[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2143–2149.
- [30] 董书宁, 王皓, 张文忠. 华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2216–2226.
- DONG Shuning, WANG Hao, ZHANG Wenzhong. Judgement criteria with utilization and grouting reconstruction of top Ordovician limestone and floor damage depth in North China coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2216–2226.
- [31] 林柏泉, 张其智, 沈春明, 等. 钻孔割缝网络化增透机制及其在底板穿层钻孔瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1425–1430.
- LIN Baiquan, ZHANG Qizhi, SHEN Chunming, et al. Permeability-increasing mechanism of network slotting boreholes and application in crossing borehole gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(9): 1425–1430.
- [32] 王兆丰, 席杰, 陈金生, 等. 底板岩巷穿层钻孔一孔多用瓦斯抽采时效性研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 248–256.
- WANG Zhao Feng, XI Jie, CHEN Jinsheng, et al. Study on time effectiveness of gas drainage by crossing layer drilling in floor rock roadway with one hole and multi-purpose[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 248–256.
- [33] 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.
- [34] 李鸿昌, 钱鸣高. 孔庄矿上行开采的研究[J]. 中国矿业学院学报, 1982, 11(2): 17–29.
- LI Hongchang, QIAN Minggao. A study of ascending mining method at Kongzhuang Mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1982, 11(2): 17–29.
- [35] 郭广礼, 缪协兴, 张振南. 老采空区破裂岩体变形性质研究[J]. 科学技术与工程, 2002, 2(5): 44–47.
- GUO Guangli, MIAO Xiexing, ZHANG Zhennan. Research on ruptured rock mass deformation characteristics of longwall goafs[J]. Science Technology and Engineering, 2002, 2(5): 44–47.
- [36] 宋晓明. 白云质灰岩中的碱-碳酸盐反应及膨胀机理[D]. 江苏: 南京工业大学, 2013.
- SONG Xiaoming. Alkali-carbonate reaction and expansion mechanism in dolomite limestone[D]. Jiangsu; Nanjing University of Technology, 2013.