



## 我国“三下”采煤技术体系与工程实践

郭文兵 胡玉杭 胡超群 李龙翔 吴东涛 葛志博

### 引用本文:

郭文兵, 胡玉杭, 胡超群, 等. 我国“三下”采煤技术体系与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 19–38.

GUO Wenbing, HU Yuhang, HU Chaoqun. System and engineering practice of coal mining technology under buildings, water bodies and railways in China[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 19–38.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0349>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望

Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and linear structure, and above confined water in China

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 16–26 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0b843baf-c67d-40a7-98ea-f8cfd2f0c747>

#### “三下”采煤膏体充填开采技术研究

Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 218–224 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.017>

#### 采动覆岩离层注浆地表沉陷“四区”控制模型及应用

“Four Zones” control model and application for surface subsidence of bed separation grouting mining

煤炭科学技术. 2023, 51(8): 23–35 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0561>

#### 华北型煤田“三下一上”煤炭资源现状及开发利用研究

Study on status quo and development as well as utilization of coal resources “under buildings, water bodies, railways and above confined water” in North China Coalfields

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 129–135 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/efe5fc53-4fa6-4521-991e-0ea90abbde4d>

#### 煤层采动覆岩破坏规律与控制技术研究进展

Research status and development trend of mining overburden failure law and control technology

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 85–97 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9052de19-9050-4b69-9bc1-2fe16309f96d>

#### 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展

Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 28–47 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1d86ea6d-d151-4931-b86f-559a89702e3c>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

郭文兵, 胡玉杭, 胡超群, 等. 我国“三下”采煤技术体系与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 19–38.

GUO Wenbing, HU Yuhang, HU Chaoqun, *et al.* System and engineering practice of coal mining technology under buildings, water bodies and railways in China[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 19–38.

## 我国“三下”采煤技术体系与工程实践

郭文兵<sup>1,2</sup>, 胡玉杭<sup>1</sup>, 胡超群<sup>1</sup>, 李龙翔<sup>1</sup>, 吴东涛<sup>1</sup>, 葛志博<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000)

**摘要:**我国“三下”(建筑物、水体、铁路等线性构筑物下)煤炭资源丰富,开展“三下”采煤技术研究、解放“三下”压煤对提高煤炭资源采出率、优化井下采掘布局、延长矿井服务年限等具有重要意义。总结了我国“三下”压煤开采技术以及建(构)筑物保护技术,包括部分开采、充填开采、协调开采、覆岩离层注浆技术以及地面保护、维修加固技术,并分析了各种“三下”采煤技术的优缺点和适用条件等。提出“三下”压煤开采造成建(构)筑物损害的源头是煤炭地下开采引起的覆岩破坏与地表移动,控制地表沉陷、研究地表移动变形规律是建(构)筑物下采煤的关键,减少覆岩破坏、准确预测覆岩破坏高度是水体(覆岩含水层)下安全采煤技术的关键。从经验公式、理论计算、现场实测等方面综合分析了“三下”采煤覆岩破坏与地表移动规律、地表移动变形预测、地面建筑物保护技术等。研究认为高效率、低成本、全固废、智能化覆岩离层注浆和充填开采、地下水原位保护等源头减沉控损技术将是我国未来“三下”开采技术的发展方向,并建立覆岩与地表移动变形的“天-空-地-井”一体化监测、预警机制,加强“三下”采煤工艺、全固废材料、技术与装备水平的提升,科学构建并不断完善绿色低碳、智能、安全高效的“三下”采煤技术体系。

**关键词:**“三下”采煤;岩层移动;地表沉陷;采动损害与保护;覆岩离层注浆

**中图分类号:** TD325

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2025)01-0019-20

### System and engineering practice of coal mining technology under buildings, water bodies and railways in China

GUO Wenbing<sup>1,2</sup>, HU Yuhang<sup>1</sup>, HU Chaoqun<sup>1</sup>, LI Longxiang<sup>1</sup>, WU Dongtao<sup>1</sup>, GE Zhibo<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** There is a large amount of coal resources that are difficult to mine due to buildings, water bodies and railways in China. Conducting research on coal mining technology and liberating pressed coal under building, water body and railways are significant for improving the recovery rate of coal resources, optimizing the layout of mining and extending the service years of mines. The paper summarized the coal mining technology under buildings, water bodies and railways and buildings and structures protection technologies in China, including partial mining, filling mining, coordinated mining, overburden bed separation grouting technology and ground protection, repair and reinforcement techniques, the advantages, disadvantages and applicable conditions of each technique are also analyzed. It is proposed that the source of damage to buildings and structures caused by coal mining under buildings, water bodies and railways is the overburden destruction and surface movement. Controlling surface subsidence and studying the law of surface movement and deformation are the key to coal mining under buildings and structures. Reducing overburden failure and accurately predicting overburden failure height are the key to safe coal mining technology under water bodies (overburden aquifers). Comprehensively analyzed the law of over-burden destruction and surface movement, the prediction of surface movement and deformation, and the protection technology of ground buildings under buildings, water bodies and railways from the experience formula, theoretical calculations, and on-site measurements. Research considers

收稿日期: 2024-03-21

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0349

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U21A20108, U22A20620)

作者简介: 郭文兵(1969—), 男, 河南商丘人, 教授, 博士。E-mail: guowb@hpu.edu.cn

通讯作者: 胡玉杭(1997—), 男, 河南南阳人, 博士研究生。E-mail: 2072513978@qq.com

that high efficiency, low cost, all solid waste, intelligent overburden grout injection and filling mining, groundwater in-situ protection and other sources of subsidence reduction technology will be the development direction of coal mining technology under building, water body and railways in the future, and establish the “space-air-ground-well” integrated monitoring and early warning mechanism of overburden and surface movement and deformation, strengthen the improvement of coal mining technology under buildings, water bodies and railways, all solid waste materials, technology and equipment level, scientifically construct and continuously improve the green low-carbon, intelligent, safe and efficient mining technology system under buildings, water bodies and railways.

**Key words:** coal mining under buildings’ water bodies and railways; rock strata movement; surface subsidence; mining damage and protection; overburden grout injection

## 0 引言

“三下”采煤技术是在地表附属物下进行煤炭开采的一种开采技术,主要包括建筑物下、水体下及特殊构筑物下开采。随着我国经济快速发展和新型城镇化建设的加速,煤矿采掘活动不可避免地向城镇区域靠近,建筑物下、水体下以及特殊构筑物下煤炭资源的合理开采利用成为了亟需解决的问题。经过半个多世纪的研究与实践,“三下”采煤技术得到了迅速发展和提高,形成了具有中国特色的特殊开采技术体系。

我国煤炭资源丰富,煤炭在支撑国家经济发展中发挥着重要作用,并且在相当长时间内依然是我国最重要的能源资源之一<sup>[1]</sup>,而随着大量煤炭资源从地下采出,开采所引起的地表沉陷及环境灾害问题日益突出。吴涛等<sup>[2]</sup>对华北型煤田“三下一上”煤炭资源开发利用技术进行研究,分析了制约“三下一上”煤炭资源开发利用的主要因素,认为减沉技术和减害技术是目前“三下一上”煤炭资源开发利用最有效的技术手段。孙希奎<sup>[3]</sup>对“三下”采煤膏体充填开采技术进行研究,并结合济北矿区未来发展方向,指出膏体充填应该进一步在承压水体上开采的相关理论和工艺技术,重复采动影响下建筑物保护的理论和对应措施,复杂条件下充填工艺、设备、流程优化以及与井下煤研智能分选系统相结合等方面着重进行研究攻关。矿山开采沉陷不但破坏了人们赖以生存的矿区生态环境,而且对地表建筑物造成了严重损害。

结合非化石能源的可靠替代进程,我国“煤为主体”的基本国情短时期不会改变,且消费需求总量呈增长趋势,煤炭资源从地下岩层中大量开采剥离必然导致岩层失稳而引发地质及环境灾害<sup>[4-6]</sup>。近年来,随着我国生态文明建设的持续推进,实现工农关系稳定和矿区生态环境的协调发展,有必要对“三下”采煤技术的现状及进展进行总结,提高煤炭采出率,为煤矿“三下”采煤技术的研究提供参考。

## 1 建筑物下采煤

我国煤炭资源分布广泛,建筑物下压煤在“三下”压煤中所占比例最大,是困扰煤炭企业的重大问题,且在中东部矿区尤为明显。中东部矿区建(构)筑物密集,压煤量大,严重影响煤矿采掘接替。地下采煤后,地表发生移动和变形,破坏了建筑物与地基之间的初始应力平衡状态,伴着力系平衡的重新建立,使建筑物内产生附加应力,从而导致建筑物发生变形,变形较大时会使建筑物产生破坏。随着中东部矿区煤炭可采储量日益减少,解放建筑物下压煤成为中东部煤矿践行可持续发展理念的必由之路。

在保证地面建筑物安全的前提下,最大限度地开采煤炭资源是我国面临的主要问题。针对建筑物下采煤技术,基于采动影响的本质,通过不断探索研究与现场实践,我国已形成了较为完备的建筑物下源头减沉控损开采技术体系,如图 1 所示。

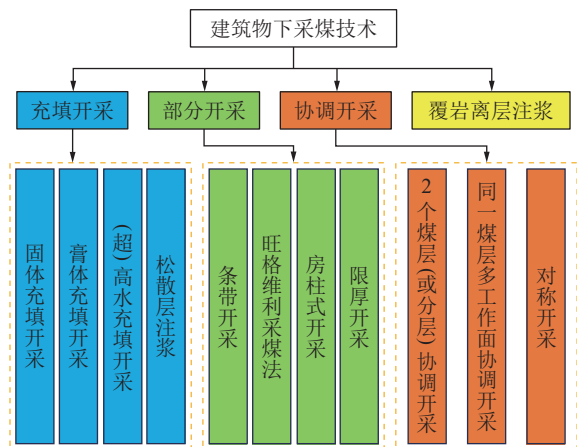


图 1 建筑物下采煤技术

Fig.1 Coal mining technology under buildings

### 1.1 充填开采

充填开采作为一种生态保护性开采技术,能够从源头解决固废资源堆积、采动覆岩破断、地表沉陷、采出率低等问题,以最小的生态扰动获取煤炭资源。近年来,充填开采取得了显著发展,已成为煤矿安全、绿色开采的重要发展方向,具有巨大的经济、技术和

环境优势以及广阔的前景。目前,我国充填开采常采用固体充填、膏体充填、(超)高水充填等。

固体充填开采是指将采掘及分选产生的矸石破碎后作为骨料,与粉煤灰、黄土、灰渣等辅料混合制备成充填材料放置在采空区,从而控制岩层移动以及缓解地表下沉,同时解决煤矸石排放及由此引发的土地资源占用问题,该方法已在很多矿区得到成功应用。固体充填液压支架如图 2 所示。张吉雄等<sup>[7]</sup>针对深部煤炭资源开发劣势,提出煤炭安全高效开采、煤矸智能分选、矸石充填一体化的“采选充+X”绿色开采新理念。黄艳利等<sup>[8]</sup>通过对综合机械化固体充填采煤的充填体时间相关特性进行研究,得出了综合机械化固体充填采煤工作面顶板下沉量与时间的具体流变方程,并在矿井工业性试验中进行了验证。刘建功等<sup>[9]</sup>通过深度调研分析了我国充填开采技术应用特点,提出了利用精准充填建设生态矿山与井下“采选充留”的开采思想。

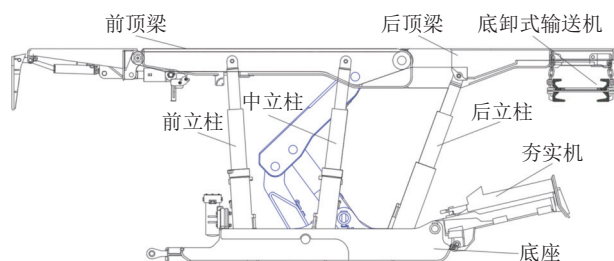


图 2 固体充填液压支架

Fig.2 Solid filled hydraulic powered support

膏体充填开采是指将破碎煤矸石、粉煤灰、工业炉渣等固体废物加工制成浆状充填材料,通过充填泵将充填浆体输送至采空区,膏体充填的工艺流程如图 3 所示。工作面膏体充填开采技术经过近 20 年的发展,从原理、充填材料、工艺技术、主要装备等都得到了很大的进步,应用范围也由最初建筑物下条带煤柱的置换开采扩展到高层建筑物保护、底板承压水害防治,应用范围越来越广泛,适应性越来越强,已经在河南、山东、河北等地进行了应用研究。孙希奎等<sup>[10]</sup>提出了条带遗留煤柱膏体充填开采回收技术,并通过确定合理的充填技术参数,实现了建筑物下安全开采,该技术在岱庄煤矿现场实践的过程中成功保护了地表建筑安全。徐斌等<sup>[11]</sup>基于充填开采顶板变形特征,提出了适用于昊源煤矿的连采连充式充填采煤技术,有效减轻了顶板沉降变形和地表沉陷。

(超)高水充填开采是将制备好的(超)高水充填材料通过管路输送至工作面采空区充填袋(包),待

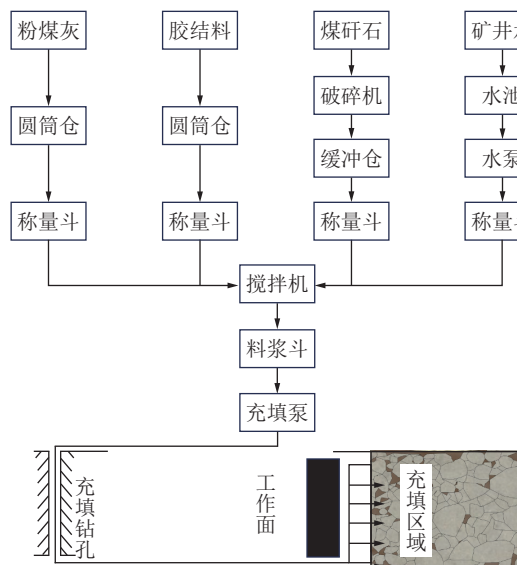


图 3 煤矿膏体充填工艺流程<sup>[12]</sup>

Fig.3 Technological process of paste backfilling mining

凝固后形成固定形状的支撑体,起到支撑顶板的作用<sup>[9]</sup>。(超)高水材料充填开采工艺流程如图 4 所示。(超)高水充填开采具有充填材料流动性好、强度增长速度快、凝固速度快、充填成本低和工艺简单等优点,但其长期稳定性与地表控制效果还需进一步验证。冯光明等<sup>[13]</sup>通过对(超)高水材料充填开采技术进行深入研究,能保证采空区充填率达到 85% 以上,并在陶一煤矿、王庄煤矿和金地煤矿等进行了应用,

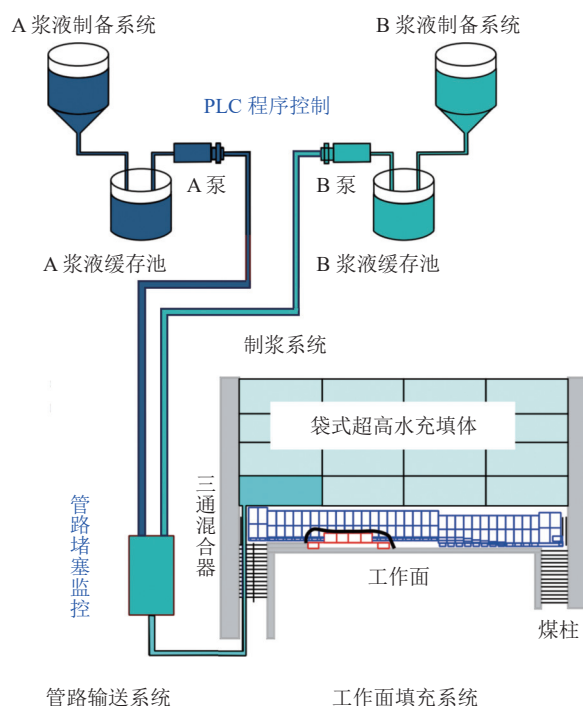


图 4 (超)高水材料充填开采工艺流程

Fig.4 Technical process of super-high water filling mining process flow



均达到理想的效果。王方田等<sup>[14]</sup>通过对现有(超)高水材料充填技术进行总结,指出了深化深部(超)高水材料充填开采岩层控制基础理论、提高(超)高水材料充填开采技术智能化水平,创新(超)高水充填与煤系共伴生资源协同开采技术体系,联合(超)高水材料充填开采与碳捕获、封存及再利用技术,优化智能化绿色开采监测评估体系与方法,为实现深部资源绿色化开采提供科学依据。

历经 20 余年产学研用联合攻关,我国充填开采技术已基本形成了一套系统化的充填技术框架。这些充填开采方法广泛应用于我国各大矿区,工程实施效果良好的同时也在实践中暴露了一些发展的阻力与难处,例如充填影响煤炭生产效率、大规模充填所需充填材料不足、充填作业成本高等问题,面临着不能实现“低碳、零碳、负碳”的绿色发展要求等严峻挑战。对此,谢和平等<sup>[15]</sup>提出了负碳高效充填开采技术全新构想,如图 5 所示,系统阐述了负碳高效充填开采的定义与科学内涵,明确了煤矿负碳高效充填开采“基础研究—技术攻关—工程示范”的“三阶段”发展规划,可望实现煤炭负碳开采、低碳利用的煤炭开发利用全过程自身实现碳中和的新格局。

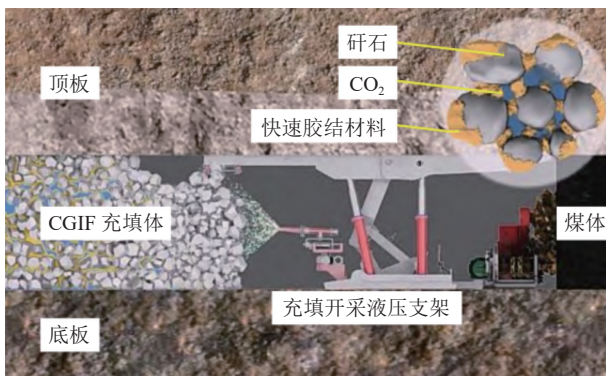


图 5 负碳高效充填开采技术

Fig.5 Carbon negative and efficient backfill mining technology

对于厚松散层薄基岩地质条件,在覆岩离层注浆的基础上衍生出松散层注浆,并在淮北矿区成功实施,减沉效果显著。

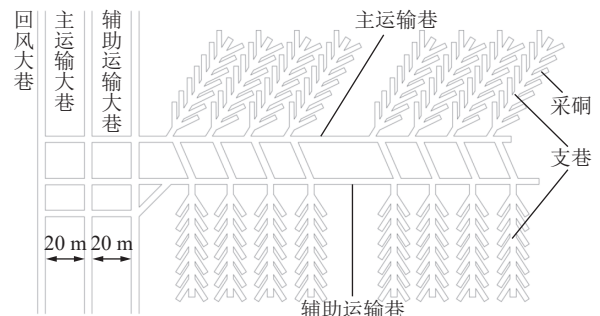
## 1.2 部分开采

部分开采是通过留设部分煤柱支撑覆岩、控制地表下沉的开采方法,主要包括条带开采、旺格维利采煤法、房柱式采煤法、限厚开采等。

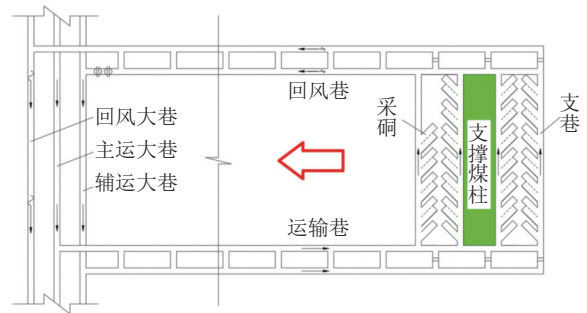
条带开采是我国早期建筑物下采煤的主要方法,经过半个多世纪的发展,在地表移动变形控制机理、预计方法、条带煤柱稳定性方面的研究已经非常成熟。可以在提高深部煤炭采出率的同时有效控制上

覆岩层和地表沉陷,保护地表建筑物和生态环境。但存在工作面宽度小(一般<50 m),采出率低(<50%),生产效率低等问题。随着充填开采以及工作面装备水平和采煤工艺的发展,条带开采的应用逐渐减少并慢慢淡出。

旺格维利采煤法(图 6a)克服了条带开采工作面搬家频繁、掘进效率低的劣势,但是存在通风条件差、不规则煤柱与刀间煤柱系统缺乏长期稳定性的弊端。在此基础上,郭文兵等<sup>[16]</sup>提出了条带式 Wongawilli 采煤技术(图 6b),揭示了条带式 Wongawilli 采煤的煤柱系统失稳机理及判据,优化了布置方式、工艺参数及设备选择并进行了应用,创新了井下源头减损开采新技术,从源头上减轻采动损害,实现了对建(构)筑物下压煤安全高效回收。



(a) Wongawilli 采煤法



(b) 条带式 Wongawilli 采煤法

图 6 Wongawilli 采煤法和条带式 Wongawilli 采煤法

Fig.6 Wongawilli and Strip Wongawilli coal mining

房柱式开采是在开采煤层内掘进一系列宽 5~7 m 的煤房,煤房间用联络巷相连,形成近似长条形的煤柱,煤柱宽度由几米至十几米不等。煤柱可根据条件留下不采或在煤房采完后按一定要求部分采出,剩余的煤柱用于支撑顶板,房柱式开采布置方式如图 7 所示。美国是世界上采用连续采煤机进行房柱式开采最早和产量最高的国家,回采率一般 50%~60%,地表下沉系数 0.35~0.68<sup>[17]</sup>。我国房柱法采煤工艺应用相对较少,陕西黄陵矿是我国第 1 个完全采用连续采煤机房柱式采煤法设计的大型矿

井；针对国外房柱式开采通风条件差的缺点，结合我国煤矿实际，衍生出了长壁布置房柱式采煤法，认为长壁布置房柱式采煤法能够有效保护地表建筑物的安全正常使用，技术、经济上可行，同时对促进了煤炭企业的可持续发展具有重要意义。

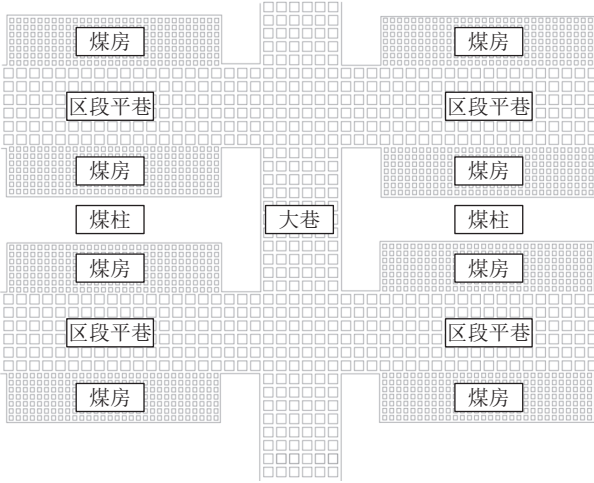


图7 房柱式开采典型布置

Fig.7 Typical layout of room-and-pillar mining

限厚开采的本质是通过合理控制煤层的开采厚度，使开采后所造成的地表变形不超过允许变形值，从而达到保护建筑物等的目的。通过对建筑物下限厚开采进行现场应用，结果表明限厚开采具有很强的可操作性，且开采后地表下沉量得到有效控制，保障了建筑物安全使用，不同采厚地表下沉值如图8所示。

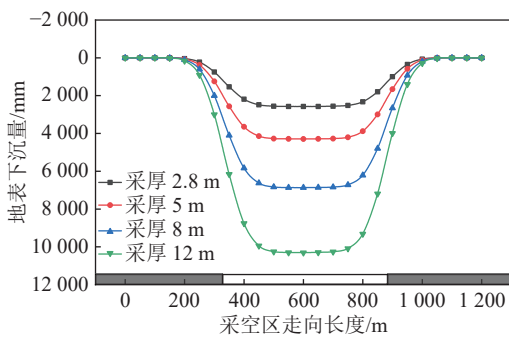


图8 不同采厚地表下沉示意

Fig.8 Surface subsidence of different mining thickness

根据概率积分法地表最大水平变形公式，可以计算出限厚开采的厚度  $M_d$ ：

$$M_d \leq \frac{\varepsilon_y H}{1.52bq \tan \beta} \quad (1)$$

式中， $\varepsilon_y$  为地表建筑物的允许变形值； $H$  为地表建筑物煤柱内平均开采深度； $q$  为实际下沉系数即下沉率，其中， $q = \frac{w_0}{M \cos \alpha}$ ， $w_0$  为工作面采后预测下沉量， $M$

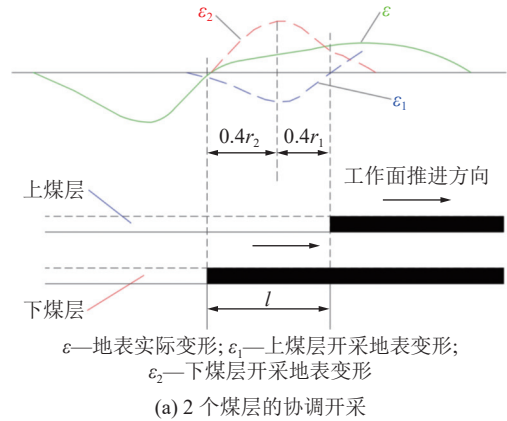
为实际采出厚度， $\alpha$  为煤层倾角； $b$  为水平移动系数； $\tan \beta$  为主要影响角正切。

### 1.3 协调开采

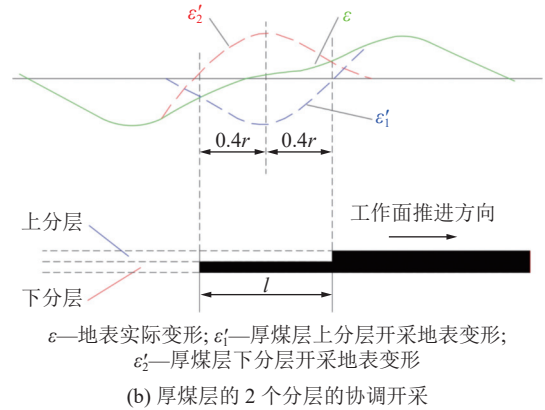
协调开采是基于开采过程中覆岩时空演化规律，通过合理设计开采布局，开采顺序、方向、时间等关键因素减缓开采地表变形值。协调开采大体上有3种做法：2个煤层（或分层）的协调开采、同一煤层多工作面协调开采、对称开采。

#### 1.3.1 2个煤层（或分层）的协调开采

上下2个煤层工作面保持一定错距，同时开采，使2个工作面开采引起地表拉伸与压缩变形部分抵消，达到减少地表建（构）筑物最大动态变形值及其开采影响次数的目的（图9a）。



(a) 2个煤层的协调开采



(b) 厚煤层的2个分层的协调开采

图9 2个分层或煤层的协调开采

Fig.9 Coordinated mining of two layers or each layer

上下煤层2个工作面互相错开的距离  $l$ ，可用下式计算：

$$l = 0.4(r_1 + r_2) = 0.4(H_1 + H_2)/\tan \beta \quad (2)$$

式中： $r_1$ 、 $H_1$  为第1个煤层的主要影响半径及采深，m； $r_2$ 、 $H_2$  为第2个煤层的主要影响半径及采深，m。

厚煤层2个分层工作面互相错开的距离  $l$ ，则可由下式计算（图9b）：

$$l = 0.8r = 0.8H_0/\tan \beta \quad (3)$$

式中： $r$  为主要影响半径， $m$ ； $H_0$  为平均采深， $m$ 。

1.3.2 同一煤层多工作面协调开采

采用一个大的工作面或几个工作面同时开采，使地表重要建筑物位于移动盆地的平底部位，使其只受动态变形的影响，从而保护地表重要建筑物，如图 10 所示。同时考虑开采过程中地表移动变形的动态影响，故将开采工作面按一定方式布置，减小开采动态变形影响。

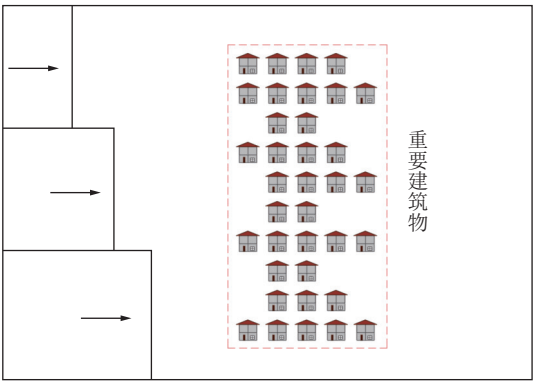


图 10 多工作面错距布置开采

Fig.10 Multi-face staggered arrangement mining map

1.3.3 对称开采

在高耸构筑物下开采时，如果高耸构筑物抵抗压缩变形的能力较大，而对倾斜和拉伸变形又十分敏感，则可以采用对称背向开采的方法(图 11)。例如，在受保护高耸构筑物正下方布置 2 个背向开采的工作面。在这种情况下，建筑物一开始就处于下沉盆地中央的压缩变形区内，不承受拉伸变形，不产生倾斜。这种方法一般只是在回采十分重要的单个建筑物煤柱时才采用。

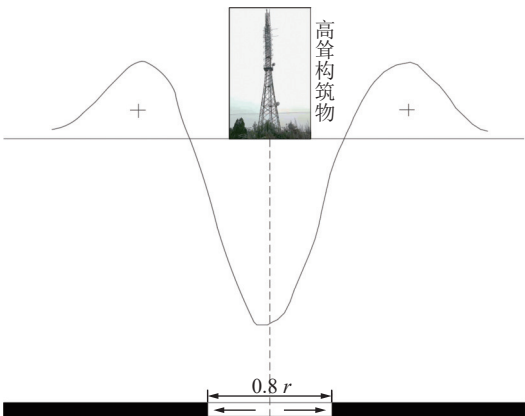


图 11 双工作面对称背向开采

Fig.11 Double working face symmetrical back mining

多煤层协调开采，可以将开采活动对覆岩变形及破坏速率降低，逐步释放总变形量，利用地表变形符号的变化，动态调整水平变形及倾斜等地表建筑

物稳定性敏感指标，提高采动建筑物的稳定性<sup>[18]</sup>。峰峰矿务局采用 7 个工作面协调开采方法进行了建筑物下开采试验，确保了 90% 以上房屋的安全使用；丰城八一煤矿在建筑物下采用 2 个工作面协调开采，使地表无明显采动边界，减小了地表变形。郭文兵等<sup>[19]</sup>基于协调开采减沉原理，提出了水库坝体下厚煤层放顶煤协调开采技术，并成功建立水库坝体下厚煤层放顶煤五因素协调开采模型，确保了水库坝体安全使用及煤炭安全回采，最大限度地提高了煤炭资源采出率，延长了矿井服务年限；戴华阳等<sup>[20]</sup>提出了厚煤层协调全采技术(图 12)，并通过实测和理论分析，揭示了协调全采方法精准控制地表变形、改善村庄地表变形过程和分布状况的机理，得出了开采各阶段工作面优化设计参数。经过不同煤厚、不同采深条件的多个矿井 20 年的应用研究，解放了大量滞压资源，实现了多个村庄下滞压资源的安全高效全采，避免了上千户村民的搬迁和异地耕作，创造了良好的经济效益和社会效益。

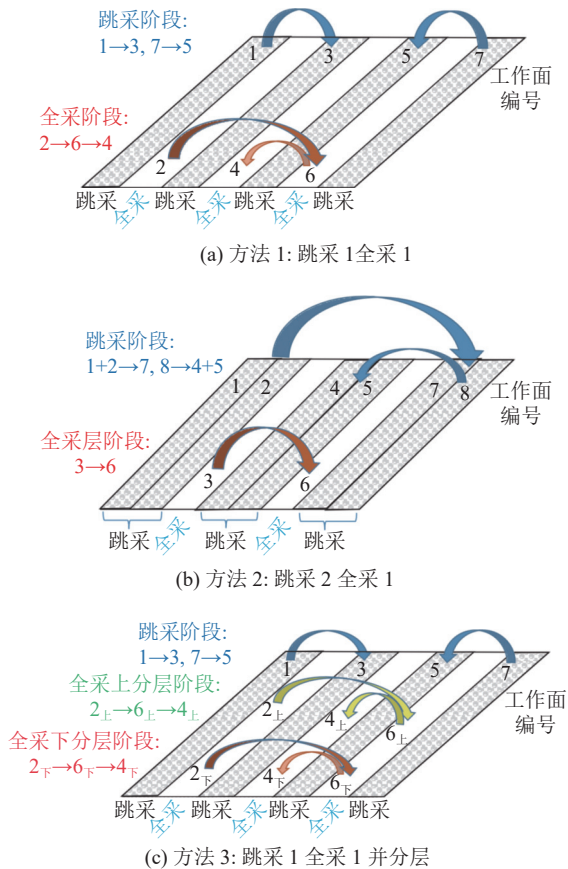


图 12 协调全采方法工作面布置与开采顺序

Fig.12 Faces layout and extraction order diagram of CSFM method

虽然协调开采能有效降低采动影响下地表移动变形量，但增大了地表下沉速度，且增加了生产管理



的复杂性及难度,因此该开采方法应用范围有限。

## 1.4 覆岩离层注浆

### 1.4.1 技术原理

覆岩离层注浆技术是一种整体减弱地表移动变形的注浆充填减沉开采新技术,揭示了煤系地层在采动影响下的离层发育及岩层移动规律,如图 13 所示。覆岩离层注浆核心原理在于准确识别控制地表移动变形的关键层,依据关键层初次破断步距计算采面合理面长,然后留设一定宽度具有承载力的稳定隔离煤柱,防止煤柱上方关键层上下区段离层区贯通,最后通过地面钻孔向其下方的封闭采动离层内注入高压浆液,起到填充离层空间,支撑上覆岩层、挤压下部岩层的作用,形成“关键层结构+注浆填充层+煤柱承载柱”的复合支撑承载结构,实现有效控制地表沉陷、保障建(构)筑物下采煤的安全、经济、合理性。许家林等<sup>[21]</sup>揭示了采动覆岩卸荷膨胀累积效应及其对离层的抑制作用,并根据覆岩隔离注浆技术将注采比提高至 50%,地表减沉率提高至 80%。王志强等<sup>[22]</sup>提出覆岩离层连续一体化注浆充填技术,使注浆减沉率达到 44.6%。覆岩离层注浆技术的提出和应用,标志着煤矿地下开采岩层控制领域的一个重要进步,对促进矿区环境保护和地质灾害防治具有重要的理论与实践意义。

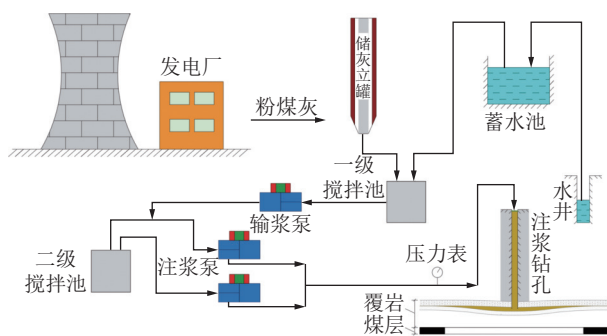


图 13 覆岩离层注浆示意

Fig.13 Schematic diagram of overburden grout injection

针对中等埋深、大采厚、覆岩软硬岩交互率大、岩层厚度小的地质条件,其没有明显关键层。在开采过程中,覆岩整体变形量大且移动速度快,采动覆岩离层发育一闭合—传递迅速,为有效捕捉离层,实现离层注浆减沉,笔者探索了“三软”厚煤层采动覆岩多层位离层注浆技术(图 14)。

中等埋深、大采厚的工作面进行覆岩离层注浆工作,计算保护层的合理厚度、变形以及判定保护层稳定性,是确保覆岩离层注浆层位安全、有效、合理的必要条件,采用综放开采覆岩离层注浆时,应根据覆岩离层注浆层位识别方法确定注浆层位后,再根

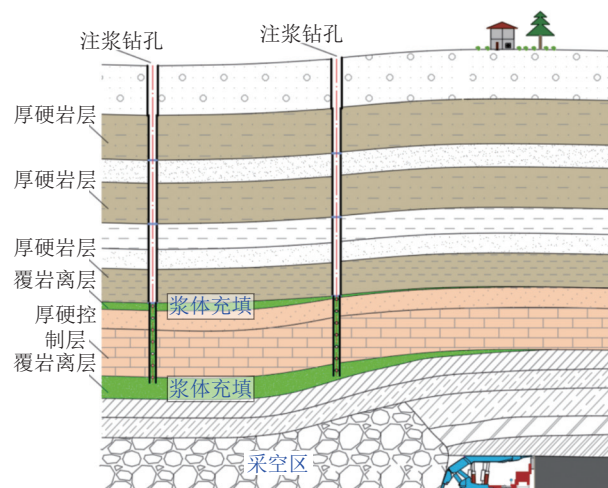


图 14 覆岩多层位离层注浆开采技术

Fig.14 Multi-bed separation grouting mining technology

据下式判别注浆层位是否安全可行<sup>[23]</sup>:

$$\begin{cases} H_z > H_d + H_f \\ H_f > \sqrt{\frac{\sqrt{T} - D \sin \varphi}{C \cos \varphi}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $H_z$  为注浆位置到煤层的距离;  $H_d$  为导水裂缝带高度;  $H_f$  为保护层厚度;  $C$ 、 $\varphi$  分别为保护层岩层的黏聚力、内摩擦角;  $D$  为保护层岩层在均布荷载作用下,由弯曲变形引起的主应力分量;  $T$  为保护层岩层在复杂应力状态下的非线性应力分量平方和。

### 1.4.2 工程实践

郑煤集团某矿位于新密市境内,井田面积约 0.19 km<sup>2</sup>。根据对缓倾斜煤层顶底板分类的研究,该矿开采的二<sub>1</sub>煤层是典型的“三软”不稳定煤层。该矿 22 151 工作面作为覆岩离层注浆研究区域,如图 15 所示。工作面走向长约为 350 m,倾向长约为 106 m,工作面平均埋深 302 m;煤层平均厚度约 7.1 m,煤层平均倾角约为 12°。工作面采用综合机械化放顶煤采煤方法,自然垮落法管理顶板。地面建(构)筑物较为密集,根据现场调查,建筑物多为 1~2 层砖混结构建筑物,少量建筑物为 3~5 层,还有一些加油站、医院等重要建筑物。

采用概率积分法对 22 151 工作面开采区域进行地表移动变形计算,根据《“三软”煤层开采沉陷规律及其应用》<sup>[24]</sup>中“郑州矿区主要矿井概率积分法预计参数”,经综合分析得到适合 22 151 工作面的概率积分法计算参数,计算出其正常开采下沉值。根据计算结果,若 22 151 工作面在不采取覆岩离层注浆情况下,地表最大下沉值为 3 378.9 mm,地表移动变形较为严重,地表移动变形最大值达 20 mm/m,工作面地表附近民房最大损害等级达到Ⅳ级,需要采取



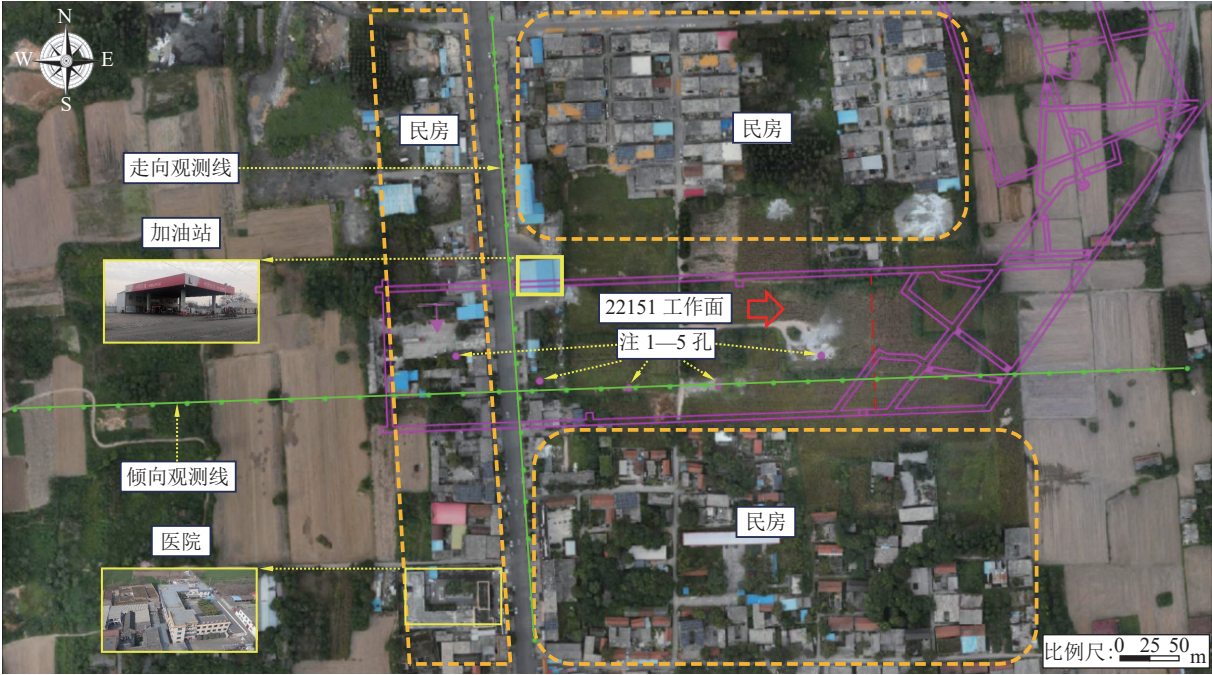


图 15 22151 工作面位置  
Fig.15 Map showing the location of 22151 working face

拆除重建措施。

为评价覆岩离层注浆减沉效果,共进行 86 次观测。根据最后一次的观测结果,基于 Matlab 的曲线拟合法求取下沉系数为  $q$  为 0.15,且实测地表变形值与拟合结果的拟合程度较高,说明求取的参数较精确。图 16 为覆岩离层注浆开采地表下沉量等值线。

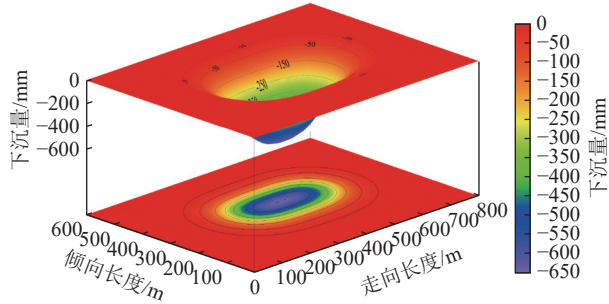


图 16 覆岩离层注浆开采地表下沉等值线  
Fig.16 Contour map of surface subsidence for overburden grout injection

根据现场实测结果,采用覆岩离层注浆开采后,地表最大下沉量为 649.8 mm,大部分民房处地表最大水平变形值在 I 级损害程度内,少数民房地表移动变形值超出 I 级范围,控制在 II 级损害以内。

综上,正常开采情况下,地表最大下沉量约 3 378.9 mm,采用多层位覆岩离层注浆开采地表最大下沉量为 649.8 mm(图 17),减沉率约为 80.77%,对控制采动引起地表沉陷及地表建(构)筑物保护具

有明显效果。

采用覆岩离层注浆充填技术提高了煤炭资源采出率,有效控制了地表沉陷,避免或减轻了地表建(构)筑物的采动影响,大幅减少了地表建(构)筑物的搬迁或赔偿费用,在绿色开采观念及地表生态保护战略下,经济效益显著。同时为矿井“三下”采煤探索了新的技术途径,积累了经验。

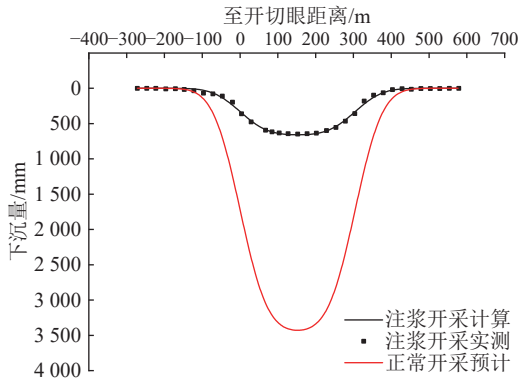


图 17 2 种开采方案地表预计下沉值结果对比  
Fig.17 Comparison of predicted surface subsidence values between two mining methods

经过多年的研究和实践,我国建筑物下采煤技术不断发展和完善,为我国煤矿绿色、科学采矿提供了重要理论与技术支撑。但是各种技术都有优缺点(表 1),且在以下 3 个方面需要加强研究:

1) 充填开采、离层注浆等地表沉陷规律及预测理论: 需要加强充填开采、离层注浆条件下的地表沉

表 1 各项技术的优缺点  
Table 1 Advantages and disadvantages of each technology

技术	充填开采	部分开采	覆岩离层注浆
优点	煤炭资源采出率高 矸石等固废资源化利用 覆岩与地表减沉效果好	地表减沉效果较好 地质条件适应性强 开采成本相对较低	地表减沉控制效果较好 粉煤灰等固废资源化利用 注浆作业对井下不干扰 煤炭资源采出率高
缺点	回采充填工艺复杂 开采及充填相互干扰 生产效率低、成本高	采出率低掘进率高 采煤工艺比较复杂 生产效率相对较低	开采成本相对较高 注浆时空关系难以把握 地面冒浆或井下溃浆风险

陷规律的现场监测研究,为开采方案设计优化提供依据。建立充填开采、离层注浆条件下地表沉陷预测模型,实现地表沉陷的高精度预测预报。

2)高效率、低成本、工艺简单的地表沉陷控制技术:充填开采仍存在成本高、效率低的问题,研发更清洁友好、成本低廉和性能优越的充填材料,进一步优化充填开采工艺,提高工作面效率和效益,充填工作面一般年产量在 100 万 t 左右。覆岩离层注浆作业与工作面推进的协调技术要求高,设计要求“以采定注”和实际工作中“以注定采”存在矛盾,未来急需建立高效智能化覆岩离层注浆系统,实现协调一体化作业。

3)充填开采、离层注浆对地下水环境是否有影响:不同的充填材料充填采空区,对地下水是否存在、存在多大的影响需要进一步研究。离层注浆材料扩散半径有多大,对地下水的影响如何,是不是真正的绿色开采技术。

### 1.5 建筑物抗变形措施

除了通过优化工作面布置和开采顺序以减小地表变形量和部分开采、充填开采、覆岩离层注浆直接或间接减少煤炭资源采出等方式外,还可以对建筑物实施抗变形措施。主要有建筑物预先加固、维修补强和地基基础注浆加固。

#### 1.5.1 建筑物预先加固

建筑物加固措施之前,依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》<sup>[25]</sup>对建筑物破坏等级进行预计,对于不同建筑物破坏等级采用相对应的措施。

建筑物加固措施可分为 2 类:一是通过对建筑物设置刚拉杆、钢筋混凝土圈梁、基础联系梁等增强建筑物抗变形能力,提高建筑物的刚度和整体性;二是设置变形缝、地表缓冲沟、滑动层等减小地表变形导致的建筑物附加内力,提高建筑物适应地表的能力。

#### 1.5.2 维修补强

对于已经发生破坏的建筑物,采取合理的补强

技术对梁、柱加固,提高建筑物的强度;采用化学灌浆、水泥压浆、喷射混凝土等补强技术修复墙体裂隙,恢复墙体整体性;通过基础调整与托换技术消除曲率和倾斜的影响。

除此之外,在现有采煤沉陷区或未来采动影响区范围内的新建建筑物,应避免可能会产生塌陷坑、裂隙、长期积水等地段。在条件允许的情况下,建筑物的长轴平行于地表下沉量等值线。

#### 1.5.3 地基基础注浆加固

注浆的分类较多,其中静压注浆可分为充填或裂隙注浆、渗透注浆、压密注浆和劈裂注浆,其都可用于充填裂隙、加固地基<sup>[26]</sup>。郭文兵等<sup>[27]</sup>提出的高耸构筑物地基精准注浆加固技术理念:基于概率积分法预计基础移动变形量,在工作面将要(或正在)影响至高耸构筑物时,对其地基(基础内部与基础周边)进行渗透注浆加固,通过控制不同注浆位置的注浆压力与注浆量,实现提高地基强度、补偿地基下沉、矫正地基角度(倾斜)目的,从而精准保护高耸构筑物,其流程如图 18 所示。

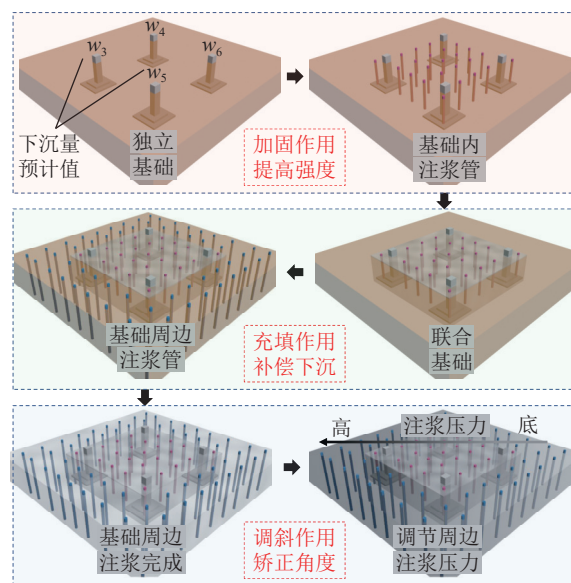


图 18 高耸构筑物精准加固技术流程

Fig.18 Flow chart of precise reinforcement technology for high rise structures



## 2 水体下采煤

当煤层位于水体下方进行开采时,称为水体下采煤。水体下采煤不仅可能对矿井安全生产造成威胁,而且会引起对水资源的破坏。随着中东部地区煤炭资源的开采,水体下压煤开采成为影响矿井可持续生产的重要问题之一。从 20 世纪 60 年代初开始,我国进行了大量覆岩破坏高度规律及水体下采煤的研究,再次基础上,进行了河流下、水库下、含水砂层下等采煤工程实践,提供了丰富的顶水开采案例。顶水开采首先要保证井下采煤工作的正常进行,同时也要保护地表水体及含水地层不被破坏。依据上述需求,众多学者从改变采煤方法、采空区处理方式等方面提出并实施了多种水体下安全采煤技术<sup>[28]</sup>。

## 2.1 水体下采煤发展现状

### 2.1.1 水体下采煤安全技术措施

### 1) 留设安全煤岩柱

留设安全煤岩柱是为了控制导水裂缝带发育高度,使其不触及水体或触及水体但不会发生工作面上方大量水体沿岩层裂缝溃入采空区现象。根据保护目的不同,安全煤岩柱可分为:防水安全煤岩柱、防砂安全煤岩柱和防塌安全煤岩柱。设计安全煤岩柱时应考虑矿区松散层和基岩中各层的水文地质条件;采煤方法及巷道布置情况;计算并观测导水裂隙带发育高度(图 19)。

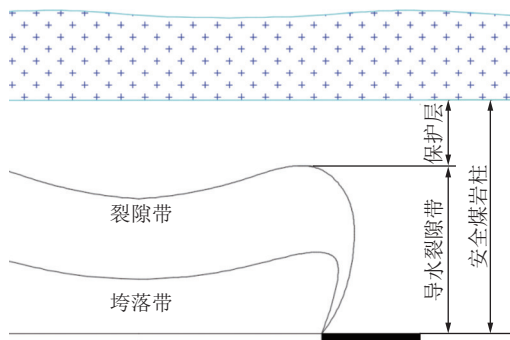


图 19 安全煤岩柱留设示意

Fig.19 Schematic diagram of safety coal rock pillar retention

## 2) 处理水体

处理水体是水体下(上)采煤的一项有效措施之一,通过对水体进行引流、抽排、截断水源补给等方法,直接对矿区地表水及含水层进行处理。现有处理水体措施主要包括 2 个方面:①疏降水体。当水体距离煤层很近,无法留设防水煤岩柱及改变开采措施时,需要通过钻孔疏降、巷道疏降、联合疏降等方式降低含水层水压和水量。②处理水体补给来源。

采用河流改道、帷幕注浆堵水、巷道截水等方式,对补给水体的主要来源进行处理,隔绝水源或引流改道使其远离采动影响范围,达到安全开采及保护水体的目的。

### 3) 开采技术措施

采用开采措施的目的是减小顶底板岩体的破坏范围,以达到安全采煤的目的。目前,应用于水体下开采技术措施可分为试探开采、充填开采、部分开采、协调开采等。

### 2.1.2 地表水体下采煤实例

工作面上方覆岩的移动与破断对矿区地表水体的扰动不可避免,严重时水体可能沿岩体裂隙进入井下淹没采掘空间,造成安全事故,同时导致径流断流,破坏矿区周边生态环境。针对河流、湖泊、水库等不同地表水体,我国学者研究并实践了多种水体下采煤安全措施,并在工程应用中取得了良好的效果。

河流下采煤是水体下采煤常见的一种情况,郭文兵等<sup>[29]</sup>以兴运煤矿 12051 和 12071 工作面为研究对象,对河流下厚煤层开采可行性进行了研究(图 20)。



图 20 工作面与河流相对位置关系

Fig.20 Relative position of working face and river

由于工作面采厚较大,采掘活动对其上覆岩层及地表水体的影响程度也相对较大,覆岩破坏规律更为复杂,笔者运用理论分析、数值模拟和现场观测相结合的方法,研究了导水裂隙带高度与水体的空间分布关系,综合分析了河流下厚煤层开采安全技术措施,最终采用河流水体处理、河底内封堵导水通道等方法,实现了河流下厚煤层开采(图21)。

陈俊杰等<sup>[30]</sup>以老道泉水库为例,通过计算覆岩破坏高度、预测水库库底变形等方法,分析了顶水开采后水体底部所受的采动影响,最终得到需要在导水裂隙带上方留设一定厚度的岩柱,以保证水库内



水体稳定,验证了大型水体下采煤的可行性。郭文兵等<sup>[19]</sup>对米村煤矿矿区内,宋沟水库下厚煤层放顶煤安全性进行了分析,通过计算“两带”理论发育高度,得到防水安全煤岩柱设计参数,提出了水库坝体下厚煤层放顶煤协调开采技术,验证了五因素(工作面推进方向、开采尺寸、位置、开采顺序、推进速度)协调开采模型对于水库坝体下采煤的适用性(图 22)。



(a) 沟道填埋

(b) 管道铺设过程中

图 21 地表水体处理

Fig.21 Surface water treatment



(a) 采后水库情况

(b) 采后水坝加固修复

图 22 采区对应的地表水库坝体

Fig.22 Surface reservoir dam corresponding to the mining area

### 2.1.3 含水层下采煤实例

为了防止矿井水害的发生,如今对含水地层的保护同样作为水体下采煤的研究重点之一。邢茂林等<sup>[31]</sup>计算并设计了含水层下防水安全煤岩柱厚度,为提高第四含水层下方工作面开采上限,运用注浆改造技术对含水砂岩进行了加固,结合砂层改造方法和留设防塌煤(岩)柱实现了上限开采的提高。徐智敏等<sup>[32]</sup>针对我国东部矿区所留设防水煤柱进行了分析,借助数值模拟、相似模拟等手段,研究了采煤活动后矿区的水文地质变化情况,为回收浅部块段防水煤柱提供了可行性研究。

除在工作面与含水层之间设置安全煤岩柱之外,还可通过疏降水体方法对含水层进行治理。郭文兵等<sup>[33]</sup>提出了将顶板水转化为矿井水的井上、井下联合贯通疏放水及利用技术,实现了对地下水的减灾利用。分析了含水地层综放开采下地表响应特征,实现了对矿区地表沉陷区的减沉增产及生态修复(图 23)。

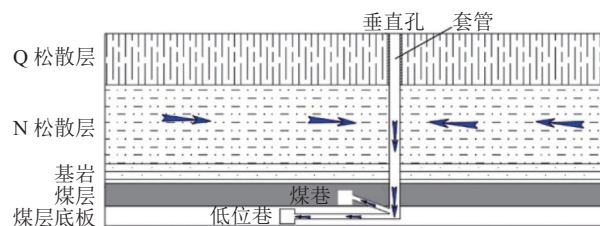


图 23 井上、井下联合贯通疏放水技术

Fig.23 Up and down well combined drainage technology

## 2.2 覆岩破坏高度发育规律

煤层开采后,其覆岩要发生变形移动和破坏,在采用顶板垮落法管理采空区的情况下,根据采空区覆岩移动破坏程度,正常情况下可以将顶板划分为 3 个带,即垮落带、裂隙带和弯曲下沉带<sup>[34]</sup>(图 24)。

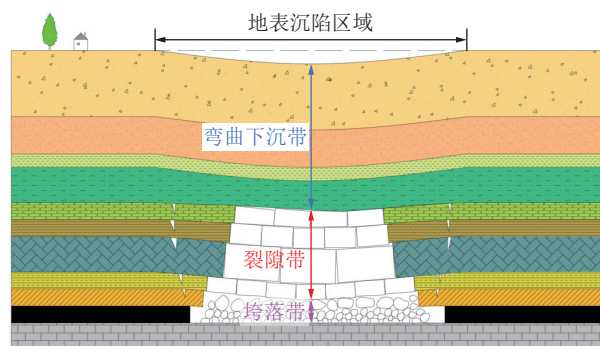


图 24 水平煤层采后“三带”分布示意

Fig.24 Distribution diagram of “vertical three zones” in horizontal coal seam after mining

为了维持地表水赋存稳定性,需要保证导水裂隙带与水体之间有稳定的水体—裂隙隔离层,故研究导水裂隙带发育高度是水体下采煤安全性分析的关键<sup>[35]</sup>。

### 2.2.1 导水裂隙带高度经验公式

不同覆岩岩性及开采方式对覆岩破坏发育高度有明显的影响,如今,导水裂隙带高度普遍选用《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》<sup>[25]</sup>内所给的经验公式计算。其中缓倾斜厚煤层放顶煤开采导水裂隙带高度计算公式见表 2。

表 2 综放顶煤开采导水裂隙带高度计算公式

Table 2 Formula of the height of fracture zone height in fully mechanized caving mining

岩性	计算公式之一	计算公式之二
坚硬	$H_{li} = \frac{100M}{0.15M+3.12} \pm 11.18$	$H_{li} = 30M + 10$
中硬	$H_{li} = \frac{100M}{0.23M+6.10} \pm 10.42$	$H_{li} = 20M + 10$
软弱	$H_{li} = \frac{100M}{0.31M+8.81} \pm 8.21$	$H_{li} = 10M + 10$

### 2.2.2 覆岩破坏高度理论分析

除经验公式外,国内外学者也从理论分析角度对导水裂隙带高度进行了研究。许家林等<sup>[36]</sup>分析了关键层位置对导水裂隙带发育高度的影响;并在此基础之上结合不同覆岩结构和关键层位置提出了不同采厚条件下导水裂隙带预测公式。张广超等<sup>[37]</sup>对巨厚松散层下软弱覆岩破坏规律进行了研究,采用理论分析、数值模拟与现场实测等方法,分析了覆岩破坏高度与采高、松散层厚度的关系。赵高博等<sup>[35]</sup>通过构建岩层力学模型,分析了覆岩初次破断机制、悬伸岩块结构失稳机制,进而提出一种综放开采导水裂隙带高度理论预测方法。张玉军等<sup>[38]</sup>利用钻孔冲洗液漏失量观测法实测与数值模拟软件方法,研究得出了水平分层综放开采导水断裂带高度预计公式。提出了梅河矿区急倾斜厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏高度的预计方法。杨伟强等<sup>[39]</sup>给出了破

断岩层的形成“砌体梁”的稳定条件和岩层破断临界条件下的挠度弯曲变形公式,基于上述公式提出了“竖三带”理论判别方法及其适用条件(图 25)。

分析了工作面在推进方向达到覆岩破坏充分采动情况下,即导水裂隙带高度不再随着工作面推进而增加的“竖三带”空间分布规律。基于数值模拟实验并结合砌体梁结构稳定性、岩层最大弯曲下沉变形的具体分析,提出考虑岩层挠度变形的“竖三带”的判别流程。

由于地质构造的复杂性及地层的不确定性,单从理论分析无法完全正确反映导水裂隙带发育高度,李博等<sup>[40]</sup>分析大量不同地质条件下工程案例,分析了开采厚度、开采深度、工作面斜长、硬岩岩性比例系数与导水裂隙带高度之间的关联度,构建了基于加权的综采导水裂隙带高度多元非线性回归预测修正模型,并选取工程实例对其进行了验证。

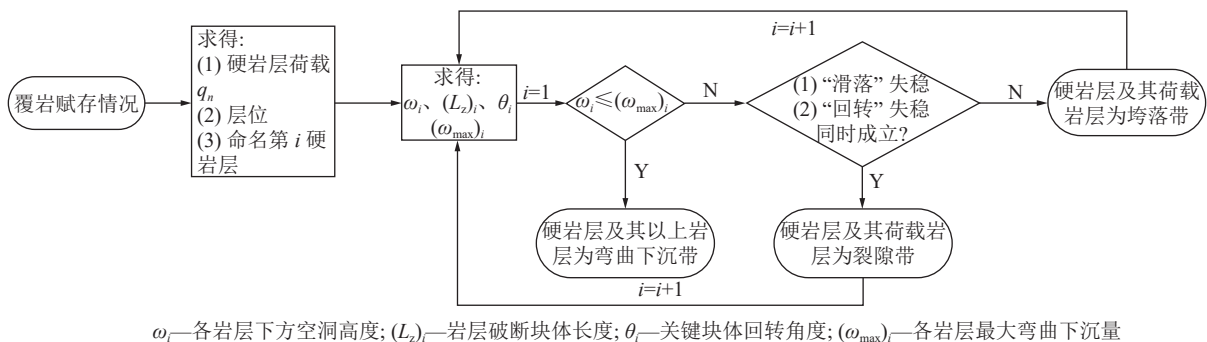


图 25 “竖三带”划分流程

Fig.25 Flow chart of “vertical three zones” division

### 2.2.3 覆岩破坏高度现场观测技术

现如今对于覆岩破坏高度研究主要通过现场实测、数值模拟、多元线性拟合等手段,相关学者分析了不同地质条件下,工作面上方导水裂隙带发育高度和岩层裂隙演化规律,为解放水体下压煤提供了现实依据(图 26、表 3)。

张广超等<sup>[37]</sup>运用井下钻孔注水漏失量观测对巨厚松散层软弱岩层条件下采空区上方导水裂隙带高度进行了观测,并采用数值模拟、方法分析了该地质条件下软弱覆岩破坏形态及裂隙发育拓展规律,将导水裂隙带发育分为缓慢增长阶段、快速增长阶段与稳定平衡阶段。

### 2.3 保水开采

随着我国中部煤炭资源的减少,水体下压煤问题日益凸显,众多学者对保水开采技术展开了研究和应用。保水开采技术是一种通过改变工作面参数、采空区处理方法或采用含水层修复等手段,实现对

地表水及含水层的保护,减小导水裂隙带高度的减小,以达到保水开采目的。保水开采技术最初主要针对我国西北干旱、半干旱地区开展研究,旨在实现高强度煤炭开采与含水层结构保护的统一,以保护矿区水资源和含水系统完整性,现如今广泛应用于各个水资源丰富矿区<sup>[41]</sup>。而保水开采技术发展仍然面临一系列技术研究难题,亟待研究内容见表 4<sup>[42]</sup>。保水开采技术从理论研究到工程实践,需要两者进行大量的结合,其最终应用需要在确保水资源可持续利用的同时,充分考虑到其对自然生态和社会发展的深远影响,以实现煤矿企业实现产能及效益的最大化。

为实现保水开采,首先需要根据矿区内水体赋存条件,合理选择开采区域;其次采取合理的采煤方法和水体处理措施;综合地质情况及采矿参数对保水开采方案进行可行性评价。张东升等<sup>[43]</sup>以西北矿区弱胶结地层条件作为研究对象,通过将工作面上方隔水岩层等效转化为阻水层、分析隔水层采动稳



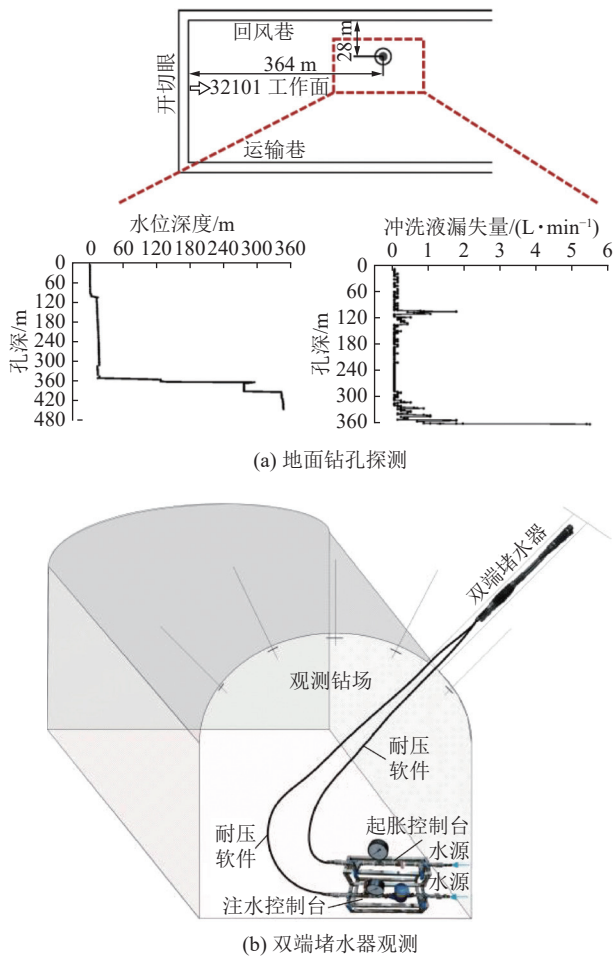


图 26 导水裂隙带高度实地观测  
Fig.26 Observation of the water-conducting zone

表 3 覆岩破坏高度观测技术

观测方法	观测内容
地面钻孔探测法	通过地面钻孔，观测冲洗液漏失量、水位变化等，判断导水裂隙带高度
岩心观察技术	取样，观察岩心裂隙情况，通过裂隙密度、规模判断导水裂隙带高度
双端堵水器观测法	向采空区上方打仰斜钻孔，使用钻孔双端封堵测漏装置向钻孔进行分段封堵注浆，对钻孔各段水的漏失流量进行测定
钻孔电视观测法	在钻孔中放入摄像探头，实时观测孔壁裂隙，分析图像确定导水裂隙带高度
地球物理测井	选用三侧向电阻率、密度(长短源距伽马)、声波时差等参数，分析数据判断裂隙发育情况

定性等角度,以采后覆岩地下水渗漏速度与目标含水层补给速度作为判别依据,分析水体的稳定性。创建以“等效采高”“等效阻水厚度”“等效水资源承载力”为判别依据的保水开采“三等效”理论,为水体稳定性分析提供了判别依据(图 27)。

刘贵等<sup>[44]</sup> 计算煤层开采后导水裂隙带发育高度与含、隔水层的空间关系,分析了工作面水体下采煤

表 4 保水开采技术研究内容

保水开采技术方向	保水开采关键技术	研究内容
地质条件探测识别	采煤对含水层扰动评价技术	地层结构探测技术
	保水开采地质条件分区技术	水煤空间关系分析
岩层移动控制技术	导水裂隙带发育高度预测技术	地质条件分类分区
		顶板结构分析建模
		载荷传递规律分析
	限高保水开采技术	
	壁式条带充填保水开采技术	
保水开采技术方法	连采连充保水开采技术	顶板含水层结构保护
	注浆保水开采技术	底板含水层结构保护
	固体充填保水开采技术	

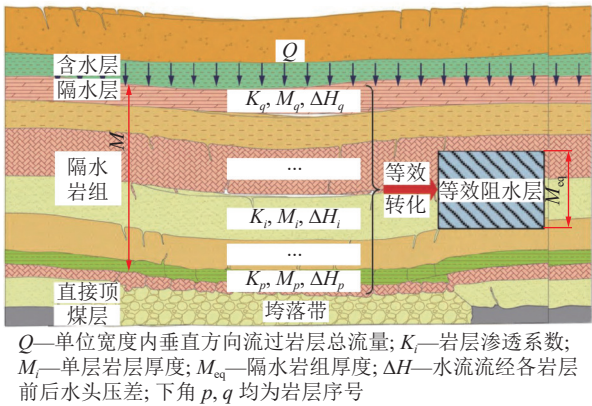


图 27 等效阻水厚度内涵示意  
Fig.27 Connotation of equivalent water resisting overburden thickness

的安全性,并预计开采后地表变形程度判断了水库下多煤层开采可行性。除地表水之外,地下含水层的稳定性对采煤活动、地表沉降及矿区生态环境同样有重要的影响。白二虎<sup>[45]</sup> 等针对黄河流域矿区生态保护提出了黄河流域煤—水协调开采的地下水原位保护技术,通过分析煤炭开采对工作面上覆岩层的影响,进一步阐述了采动影响下含水层的破坏机理(图 28)。

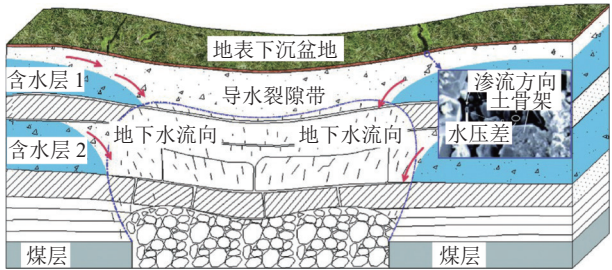


图 28 采动影响下含水层的破坏机理  
Fig.28 Failure mechanism of aquifer under the influence of mining



笔者针对含水层的破坏机理,介绍了地下水原位保护技术中加固煤柱的条带开采、留窄煤柱的置换煤柱充填开采 2 个技术步骤、施工参数及优势,并结合双柳煤矿地质特征建立了坚硬顶板破断力学模型,分析了加固煤柱的条带开采、留窄煤柱的置换煤柱充填开采的可行性,根据理论分析得到该地质条件下地下水原位保护的关键技术参数,并对条带开采留设煤柱及柱旁充填体进行了长期稳定性分析。研究证明该技术能有效保护含水层及地表生态环境,为采动影响下,地下水原位保护提供了理论支撑和工程应用实例。

### 3 特殊构筑下采煤

不同于传统的“三下采煤”(建筑物下、水体下、铁路下)采煤,新时代下的“三下采煤”还包括公路、隧道、管道、铁塔等特殊构筑物下方采煤。地表受煤炭开采的影响产生变形,不同构筑物的允许变形值也有差别,为保障构筑物的稳定性和持续性运行,须根据相关要求对其进行保护。

#### 3.1 铁路、公路、隧道下采煤

铁路具有运输量大,速度快、受天气影响小等优点,是我国重要运输方式。地表在采动和列车动载的影响下易产生破坏,需要采取井下保护和地面保护相结合的方式保障铁路的安全运行。常见的井下保护措施有:留设保护煤柱、限厚开采、条带开采、匀速开采、协调开采、充填开采、覆岩离层注浆和合理布置工作面等;地面保护措施有:对路基进行抬高和加宽,横向拨道、纵向起道、串轨、顺坡等方法减小地表变形对路基的影响,同时通过建立地表移动观测站或基于 DS-InSAR 等方式监测得到地表移动变形规律<sup>[46-47]</sup>,为后续开采沉陷预计提供数据支撑;唐山铁矿二区采用了覆岩离层注浆减沉开采技术,实施了铁路煤柱的开采,取得了明显的经济效益和社会效益,为类似条件下的煤柱开采提供了一种新的技术途径<sup>[48]</sup>(图 29)。



图 29 铁路拨道和改道  
Fig.29 Diversion and rerouting of railways

公路上车辆运行速度高、密度大,路基在采动影响下发生移动变形,降低公路的运输能力,甚至影响

行车安全。均匀下沉对路基的破坏较小,但路基的下沉量超过原潜水位时会导致路基积水;非均匀沉降会使路基受到拉伸和压缩,路基的坡度和路线等产生变化,降低了路基的稳定性。较小裂缝基本不影响正常行驶,但地表压缩变形造成路面凸起导致车辆跳车存在安全隐患。为保障正常通行,需要加强地面巡视和变形监测,发现路面损坏后,及时放置警示牌,并维修路面,恢复正常通行。维修措施有:加高、加宽路基,增强地基的稳定性和承载能力;调节路面接缝宽度,提高路基路面抗变形能力;采用填缝补强的方式修补路面裂缝、使用改性沥青技术修补路面;对于路面凸起,凿除后重新铺设沥青混凝土<sup>[49]</sup>(图 30)。



图 30 修补路面裂缝  
Fig.30 Repair of pavement cracks

不同于一般公路或铁路下采煤,隧道下采煤不仅破坏道路的路基、路面或轨道,隧道围岩受上覆山体和采动的双重影响,稳定性降低,导致衬砌开裂和隧道发生移动变形影响正常通行。一般而言煤层厚度越大、煤层距离隧道越近对隧道围岩的破坏越严重。轩大洋等<sup>[50]</sup>提出计算采动变形条件下隧道限界富余量的方法,推导出开采变形后隧道内轮廓的坐标方程,并计算其与限界的富余空间,判断是否满足通行条件。常见的隧道维护措施有:加强对隧道的监测,检测隧道内轮廓变形、衬砌背后空洞、裂缝和渗漏水情况,发现安全隐患后及时上报并处理;根据隧道变形预测结果,设置变形缝;二次衬砌时增加纵向筋和环向筋;注浆加固衬砌背后空洞、喷射混凝土套拱加固等;

#### 3.2 高耸构筑物下采煤

高耸构筑物一般指高度较大、横断面较小、高度和直径比值较大的构筑物,以水平荷载(风荷载)为主要设计依据的结构。如:高压线铁塔、信号发射铁塔、烟囱、风电塔筒、水塔、井架及地面煤仓等<sup>[27]</sup>(图 31)。

在采动影响下高耸构筑物地基、基础、上部结构具有协同作用<sup>[51]</sup>,三者变形同步发展,但量值依次减

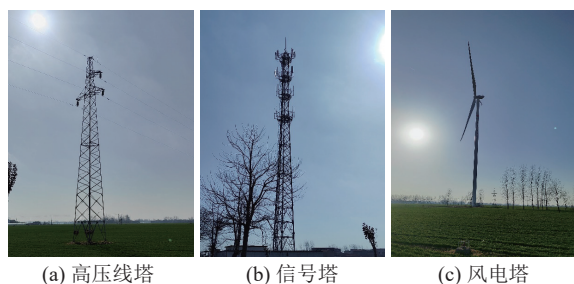


图 31 高耸构筑物

Fig.31 High-rise structures

少。高耸构筑物通过基础将自身荷载传递到地基的同时,地基反力对基础起支撑作用,高耸构筑物的地基反力分布规律与其所处采动区位置有关。通过建立地表移动观测站、高耸构筑物变形观测站和运用三维激光扫描技术,得到地表移动变形与高耸构筑物变形之间的关系和地基在不同的变形类型下高耸构筑物的变形和应力分布,有利于实现高耸构筑物的保护。

矿区地表移动变形监测研究开采影响规律、损害防治、矿区地质灾害预警、开采减损方案设计或优化的主要手段和依据<sup>[52]</sup>。随着现代科学技术的迅猛发展,各种新型监测手段不断涌现,监测方式也从传统的点式监测向面式、甚至体式监测发展<sup>[53-54]</sup>。利用卫星、无人机、RTK 等监测设备从不同尺度监测地表及附属建(构)筑物,结合井下钻孔测量、矿压监测等技术手段监测覆岩和工作面的动态变化,分析得到覆岩运移与地表移动的协同变化关系,构建“天-空-地-井”一体化监测、预警机制,实现高效、高精度监测,以应对矿井复杂多变情况下的地表建(构)筑物保护是未来监测技术发展的重要方向。卫星遥感技术具有自动化程度高,连续空间覆盖等特点,能够获取大范围的地表形变信息,且理论精度可以达到毫米级;无人机搭载多种传感器相机克服了卫星重访周期受限的劣势,能够实现短时间、高精度数据采集,具有灵活机动,高效快速,作业成本低等优势;随着我国 BDS 的建成<sup>[55]</sup>,地面手持 RTK 的定位精度得到了大幅度改善,达到毫米级甚至亚毫米级,激光雷达能够在短时间获取高密度点云数据,通过对比相邻 2 期数据,可以更直观看出地表及建(构)筑物的破坏形态,且能够实现短距离厘米级精度。综合发挥各种监测仪器优势,多技术优化组合,协同互补,利用天-空-地-井一体化监测技术更好地解决实际问题(图 32、图 33)。

高耸构筑物不同于一般建筑物,对地表移动变形的敏感性更强,郭文兵等<sup>[27, 56]</sup>针对高耸构筑物高度大、横断面较小、重心高、对地面移动变形较敏感

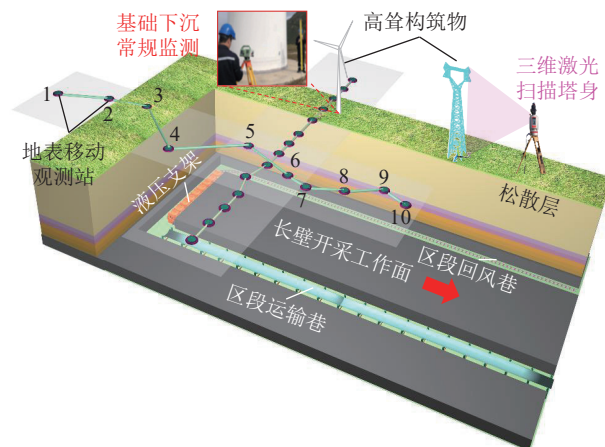


图 32 高耸构筑物采动变形监测技术

Fig.32 Observation technology of high-rise structure deformation by mining

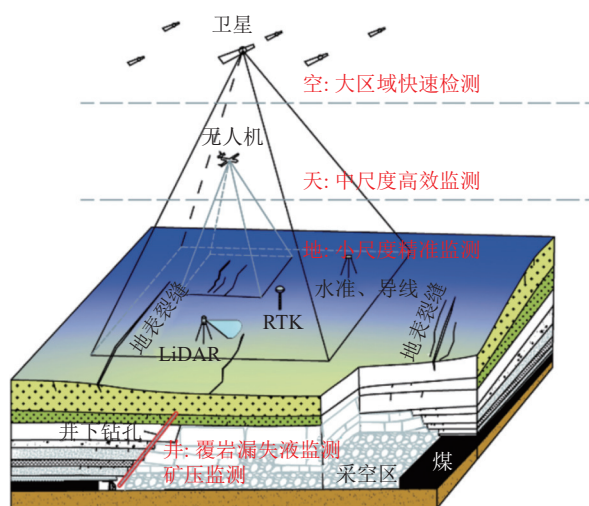


图 33 天-空-地-井一体化动态监测技术

Fig.33 Integrated dynamic monitoring technology of space-air-ground-well

等特点对其进行了深入研究,详细分析了地表变形对高压线铁塔、电视信号铁塔等高耸构筑物的影响,先后在郑州金龙煤矿、张沟煤矿,晋城寺河矿针对(特)高压输电线路的保护性开采研究,保证了输电线路的正常运行,最大限度的采出了煤炭资源。其成果对提高煤炭资源采出率和经济效益、促进矿区绿色开采及可持续发展具有重要意义。

学者们通过对高耸构筑物进行安全性评价,采取有效的手段保障其安全运行:徐乃忠等<sup>[57]</sup>通过控制地表变形值和对线塔基础的改造,实现了在平朔井工一矿太西区 4106 等工作面 380 kV 高压线输电线下特厚煤层的安全开采。冯军等<sup>[58]</sup>研究了大型风电塔在地表倾斜变形条件下轴向应力和变形特征关系,为采动影响下风力发电机的正常运转提供了理



论基础。

高耸构筑物下采煤的技术包括井下源头减损以减少地表移动变形和地表调控进一步控制高耸构筑物的变形程度,其中地表调控主要包括地基加固和纠偏,常见的方式有:将分裂基础改造为联合基础,提高基础的抗变形能力;增加临时拉线,抵消高耸构筑物的倾斜变形;地基精准注浆加固,提高地基强度、补偿地基下沉、矫正地基角度;增设基础高度调节系统,动态调斜保护;用锚杆静压桩制止纠偏<sup>[58]</sup>,控制上部结构的倾斜范围。为保证注浆效果,注浆压力不能过大,最大注浆压力  $P_{\max}$  表达式<sup>[27]</sup> 为

$$P_{\max} = \frac{2(1-\nu)(\sigma_c + 2K_0\gamma L)(\ln R_1 - \ln R)}{3-2\nu} \quad (5)$$

式中:  $\nu$  为地基土层的泊松比,一般小于 0.5;  $\sigma_c$  为地基土层的抗压强度, Pa;  $K_0$  为静止侧压力系数;  $\gamma$  为地基土层的容重,  $\text{N/m}^3$ ;  $L$  为注浆孔深度, m;  $R_1$  为扩散半径, m;  $R$  为注浆孔半径, m。

在浅埋煤层开采时,地表移动剧烈,对高耸构筑物影响更加显著,通常同时使用基础抗变形改造技术与铁塔调斜纠偏技术,如图 34 所示。最终实现全塔基础由井字调节梁和混凝土防沉梁取代,在铁塔受采动影响发生倾斜变形时,通过调节纠偏调斜装置降低铁塔倾斜度,实现对高压线塔的保护。

实践证明,通过采取合理的井下减损和地表调控技术,能最大限度回收煤炭资源,同时实现高耸构筑物的安全运行。

3.3 管道下采煤

我国化石能源伴生共存的禀赋特征,导致煤、油、气的交叉开采不可避免,西气东输等国家重点工程同样会对沿线煤田开采造成一定的影响。煤炭开采引起管道与土体的协同变化,影响西气东输等管道

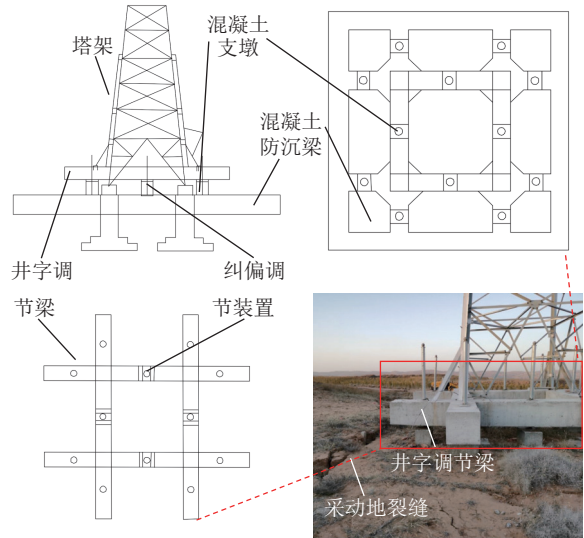


图 34 可调式基础抗变形加固改造设计与现场效果  
Fig.34 Design of the foundation reconstruction and on-site photo

设施的正常运行。学者们通过从不同方面对管道进行应力应变分析和监测,在保护地下管道的正常运行的前提下,减少工作面与管网间安全距离的留设,最大限度解放煤炭资源。任建东等<sup>[59]</sup> 通过理论分析提出了体积应变的理论算法,并分别构建了管道局部拉伸和压缩状态下失效破坏判别的新方法,通过数值模拟分析了管道轴向和环向的变形和体积应变(图 35),明确了埋地管道破坏的时序规律。王晓霖等<sup>[60]</sup> 基于概率积分法预测开采沉陷区地表三维变形,建立了沉陷区任意位置埋地管道的力学分析模型和解析计算方法,通过算例计算了不同开采条件下管道的应力、应变分布。张鹏等<sup>[61]</sup> 基于 ABAQUS 有限元软件建立三维管土模型,模拟不同穿越夹角以及不同煤层倾角时工作面逐步开采引起的埋地管道

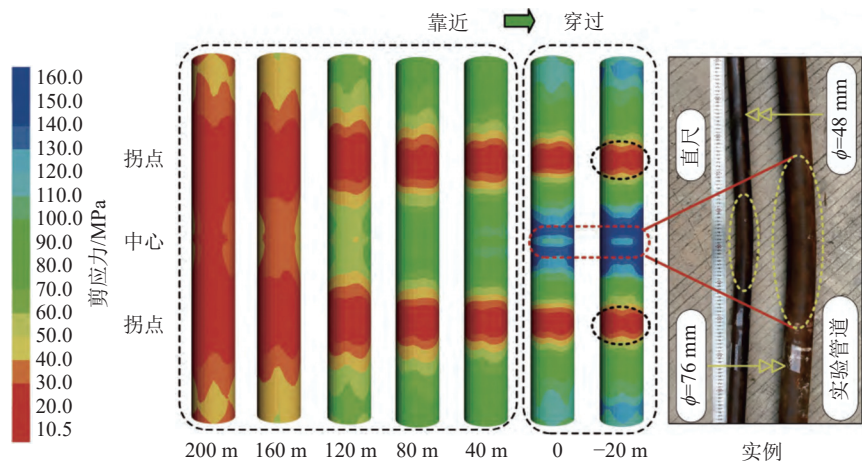


图 35 工作面推进过程中管道剪应力分布特征

Fig.35 Distribution characteristics of pipeline shear stress during advancing of panel



力学行为变化,得出埋地管道的力学行为变性规律。

由于难以提高管道的抗变形能力,实际工程中需要结合当地的地质条件和管道类型,根据具体情况采取留设合理的保护煤柱和优化工作面参数等措施保护管道安全。

#### 4 结语及展望

1)总结分析了我国“三下”压煤开采技术现状与研究进展,包括部分开采、充填开采、协调开采、覆岩离层注浆技术等地表移动变形控制技术,分析了各种技术的优缺点和适用条件,结合地面建(构)筑物保护技术,提出了井上下协同保护技术是解决我国“三下”压煤开采问题主要途径。

2)研究认为煤矿开采顶板运动、覆岩移动破坏与地表移动变形之间的耦合关系及一体化破坏机理及规律需要进一步研究,需要加强覆岩与地表移动的理论 and 现场实测研究,建立健全覆岩与地表移动变形的“天-空-地-井”一体化监测、预警机制。

3)研究认为减少采动覆岩破坏、控制地表沉降、研究覆岩破坏高度、地表移动变形规律是解决“三下”采煤问题的关键。研究认为应科学构建不断完善绿色、安全、高效、智能化的“三下”采煤技术体系。

我国煤矿“三下”压煤量巨大,地质采矿条件千差万别,煤炭开采对覆岩含(隔)水层以及地表各类建(构)筑物已造成了严重损害。“三下”采煤的本质问题是开采引起的覆岩破坏和地表移动变形。因此,因地制宜,减少覆岩破坏、控制地表沉降,研究覆岩破坏高度、地表移动变形规律是解决“三下”采煤技术问题的关键。

煤矿高效智能化覆岩离层注浆和充填开采、地下水原位保护等源头减沉控损技术将是我国未来“三下”开采技术未来的发展方向。随着我国煤矿科学技术的发展和装备水平的提升,在保障安全可靠的同时提高生产效率,研发新型注浆或充填材料以降低充填成本、研究新的注浆或工艺与装备提高注浆或充填效率和减沉控灾效果,最大限度地减轻采动损害,促进煤炭开采与自然生态环境的协调发展。

#### 参考文献(References):

- [1] 郭文兵,马志宝,白二虎.我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(9):16-26.  
GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and railways, and above confined water in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 16-26.
- [2] 吴涛,方向清,宁树正,等.华北型煤田“三下一上”煤炭资源现状及开发利用研究[J].煤炭科学技术,2021,49(9):129-135.  
WU Tao, FANG Xiangqing, NING Shuzheng, et al. Study on status quo and development as well as utilization of coal resources “under buildings, water bodies, railways and above confined water” in North China Coalfields[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 129-135.
- [3] 孙希奎.“三下”采煤膏体充填开采技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):218-224.  
SUN Xikui. Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 218-224.
- [4] 张吉雄,屠世浩,曹亦俊,等.深部煤矿井下智能化分选及就地充填技术研究进展[J].采矿与安全工程学报,2020,37(1):1-10,22.  
ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Research progress of technologies for intelligent separation and *in situ* backfill in deep coal mines in China[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(1): 1-10, 22.
- [5] 卞正富,于昊辰,雷少刚,等.黄河流域煤炭资源开发战略研判与生态修复策略思考[J].煤炭学报,2021,46(5):1378-1391.  
BIAN Zhengfu, YU Haochen, LEI Shaogang, et al. Strategic consideration of exploitation on coal resources and its ecological restoration in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1378-1391.
- [6] PENG S S, KOHLI K K, CHENG S L. Surface subsidence and structural damages due to underground longwall coal mining: A case study[C]//Proceedings of the 21st U. S. Symposium on Rock Mechanics. Rolla, Missouri: ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 1980: ARMA-80-0275.
- [7] 张吉雄,张强,巨峰,等.煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践[J].煤炭学报,2019,44(1):64-73.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Practice and technique of green mining with integration of mining, dressing, backfilling and X in coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 64-73.
- [8] 黄艳利,张吉雄,杜杰.综合机械化固体充填采煤的充填体时间相关特性研究[J].中国矿业大学学报,2012,41(5):697-701.  
HUANG Yanli, ZHANG Jixiong, DU Jie. Time-dependence of backfilling body in fully mechanized backfilling mining face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(5): 697-701.
- [9] 刘建功,李新旺,何团.我国煤矿充填开采应用现状与发展[J].煤炭学报,2020,45(1):141-150.  
LIU Jiangong, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141-150.
- [10] 孙希奎,赵庆民,施现院.条带残留煤柱膏体充填综采技术研究与应[J].采矿与安全工程学报,2017,34(4):650-654.  
SUN Xikui, ZHAO Qingmin, SHI Xianyuan. Research and application on the technology of paste backfilling fully mechanized in residual strip pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(4): 650-654.

- [11] 徐斌, 杨仁树, 李永亮, 等. 煤矿胶结充填开采覆岩移动三量关系及其控制原则[J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 49–60.  
XU Bin, YANG Renshu, LI Yongliang, et al. Three measurement relationship and control principle of overburden movement in cemented filling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 49–60.
- [12] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 154–158.  
ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, SUN Xikui, et al. Solid waste paste filling for none-village-relocation coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 154–158.
- [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] 王方田, 刘超, 郝文华, 等. 超高水材料充填减灾减损绿色开采理论与技术进展及展望[J]. 金属矿山, 2023(5): 14–30.  
WANG Fangtian, LIU Chao, HAO Wenhua, et al. Progress and prospect for disaster mitigation and damage reduction green mining theory and technology of super-high water material backfill[J]. Metal Mine, 2023(5): 14–30.
- [15] 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.
- [16] GUO W B, XU F Y. Numerical simulation of overburden and surface movements for Wongawilli strip pillar mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(1): 71–76.
- [17] PENG S S, CHENG S L. House damages due to room and pillar mining[C]//Proceedings of the 22nd U. S. Symposium on Rock Mechanics. Cambridge, Massachusetts: ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 1981: ARMA-81-0335.
- [18] 刘小平, 田延哲, 曹晓毅, 等. 多煤层开采条件下高陡山体变形控制[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 180–190.  
LIU Xiaoping, TIAN Yanzhe, CAO Xiaoyi, et al. Deformation control of high and steep mountain under condition of multi-coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 180–190.
- [19] 郭文兵, 邵强, 石显怡. 水库坝体下厚煤层放顶煤协调开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 133–137.  
GUO Wenbing, SHAO Qiang, SHI Xianyi. Coordinated top coal caving mining technology of thick seam under reservoir dam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 133–137.
- [20] 戴华阳, 阎跃观, 刘存玉, 等. 厚煤层协调全采沉陷控制技术及其在村庄下采煤中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4352–4364.  
DAI Huayang, YAN Yueguan, LIU Cunyu, et al. Subsidence control by coordinated full-area mining of thick coal seam and its application in mining under villages[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4352–4364.
- [21] 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.
- [22] 王志强, 郭晓菲, 高运, 等. 华丰煤矿覆岩离层注浆减沉技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3249–3255.  
WANG Zhiqiang, GUO Xiaofei, GAO Yun, et al. Study of grouting technology of overburden-separation to reduce ground subsidence in Huafeng coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3249–3255.
- [23] 郭文兵, 吴东涛, 郭明杰, 等. “三软”厚煤层开采覆岩多层位离层注浆减沉技术及应用[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–12[2024–06–16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240715.1210.004.html>.  
GUO Wenbing, WU Dongtao, GUO Mingjie, et al. Multi-bed separation grouting in “three soft” thick coal seams mining and their application[J/OL]. Coal Science and Technology: 1–12[2024–06–16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240715.1210.004.html>.
- [24] 郭文兵, 杨治国, 詹鸣. “三软”煤层开采沉陷规律及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [25] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017: 51–52.
- [26] LI ZHao, LUO Zuijiang, XU Chenghua, et al. 3D fluid-solid full coupling numerical simulation of soil deformation induced by shield tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 90: 174–182.
- [27] 郭文兵, 赵高博, 杨伟强, 等. 高耸构筑物采动变形特征与地基精准注浆加固机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 1908–1920.  
GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, YANG Weiqiang, et al. Deformation characteristics of high-rise structures due to coal mining and their precise grouting reinforcement mechanisms[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1908–1920.
- [28] 郭文兵, 王比比, 杨伟强, 等. 河流下多煤层开采安全性及保护技术[J]. 绿色矿山, 2024(1): 1–10.  
GUO Wenbing, WANG Bibi, YANG Weiqiang, et al. Safety and protection technology of multi-coal seam mining under river[J]. Journal of Green Mine, 2024(1): 1–10.
- [29] 郭文兵, 吴东涛, 杨伟强, 等. 兴运煤矿河流下厚煤层开采安全性分析和防控技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(2): 305–314.  
GUO Wenbing, WU Dongtao, YANG Weiqiang, et al. Safety analysis and prevention and control technology of thick coal seam mining under river in Xingyun coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(2): 305–314.
- [30] 陈俊杰, 郭文兵, 邹友峰. 大型水体下顶水安全开采的可行性研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(2): 57–62.  
CHEN Junjie, GUO Wenbing, ZOU Youfeng. Feasibility study on safe mining under large-scale water bodies[J]. China Safety Sci-

- ence Journal, 2011, 21(2): 57-62.
- [31] 邢茂林, 郑士田, 石志远, 等. 注浆改造厚含水砂层提高开采上限技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(5): 113-122.  
XING Maolin, ZHENG Shitian, SHI Zhiyuan, et al. Technology of raising upper limit of mining by grouting reconstruction in thick water-bearing sand layer and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(5): 113-122.
- [32] 徐智敏, 陈天赐, 李剑锋, 等. 衰老矿区松散含水层下提高残煤资源开采上限研究[J]. 煤炭科技, 2022, 43(4): 93-101.  
XU Zhimin, CHEN Tianci, LI Jianfeng, et al. Study on increasing mining upper limit of residual coal resources under loose aquifer in exhausted mining area[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(4): 93-101.
- [33] 郭文兵, 白二虎, 张璞, 等. 新近系含水层下厚煤层综放安全绿色开采及水资源清洁利用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 30-37.  
GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHANG Pu, et al. Safe and green mining of thick coal seam under Neogene aquifer and clean utilization of water resources[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 30-37.
- [34] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [35] 赵高博, 郭文兵, 杨达明, 等. 综放开采覆岩破坏模型及导水裂隙带高度研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(11): 144-149.  
ZHAO Gaobo, GUO Wenbing, YANG Daming, et al. Study on overburden failure models and height of water flowing fractured zone in fully mechanized caving mining[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(11): 144-149.
- [36] 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.
- [37] 张广超, 陶广哲, 孟祥军, 等. 巨厚松散层下软弱覆岩破坏规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(11): 3998-4010.  
ZHANG Guangchao, TAO Guangzhe, MENG Xiangjun, et al. Failure law of weak overburden stratum underlying extra-thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3998-4010.
- [38] 张玉军, 高超. 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 126-132.  
ZHANG Yujun, GAO Chao. Overburden rock failure features of steep thick seam horizontal slicing full-mechanized caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 126-132.
- [39] 杨伟强, 郭文兵, 赵高博, 等. 基于岩层挠曲变形的“竖三带”理论判别方法及工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 42-50.  
YANG Weiqiang, GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, et al. Theoretical judgement method of overburden “three-zone” based on rock strata deflection deformation and its engineering application[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 42-50.
- [40] 李博, 吴煌, 李腾. 基于加权的综采导水裂隙带高度多元非线性回归预测方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(3): 536-545.  
LI Bo, WU Huang, LI Teng. Height prediction of water-conducting fractured zone under fully mechanized mining based on weighted multivariate nonlinear regression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 536-545.
- [41] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究 30 年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1-30.  
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, et al. Review and thirty years prospect of research on water-preserved coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 1-30.
- [42] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 196-204.  
FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, et al. Technological system of water-conserving coal mining[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 196-204.
- [43] 张东升, 范钢伟, 张世忠, 等. 保水开采覆岩等效阻水厚度的内涵、算法与应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 128-136.  
ZHANG Dongsheng, FAN Gangwei, ZHANG Shizhong, et al. Equivalent water-resisting overburden thickness for water-conservation mining: conception, method and application[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 128-136.
- [44] 刘贵, 汪义龙, 高超, 等. 水库水体及坝体下多煤层开采可行性分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 185-191.  
LIU Gui, WANG Yilong, GAO Chao, et al. Feasibility analysis of multiple coal seams mining under reservoir and dam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 185-191.
- [45] 白二虎, 郭文兵, 张合兵, 等. 黄河流域中上游煤-水协调开采的地下水原位保护技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 907-914.  
BAI Erhu, GUO Wenbing, ZHANG Hebing, et al. In situ groundwater protection technology based on mining-conservation coordination in the middle and upper reaches of Yellow River Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 907-914.
- [46] 邓念东, 姚婷, 尚慧, 等. 铁路专线下综放开采地表沉降规律[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 121-125, 134.  
DENG Niandong, YAO Ting, SHANG Hui, et al. Surface subsidence law caused by fully mechanized caving mining under railway[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 121-125, 134.
- [47] 杨嘉威, 谭志祥, 邓喀中. 基于 DS-InSAR 的矿区铁路线沉降监测与规律分析[J]. 煤炭工程, 2021, 53(9): 143-148.  
YANG Jiawei, TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Deformation monitoring and law analysis of railway in mining area based on DS-InSAR[J]. Coal Engineering, 2021, 53(9): 143-148.
- [48] 黄旭. 唐山矿铁路煤柱覆岩离层注浆减沉开采方案分析[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(2): 25-28.  
HUANG Xu. Analysis on ground subsidence control mining plan with grouting in overburden separated strata above coal pillar under railway line in Tangshan Mine[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(2): 25-28.
- [49] 邓伟男, 李强, 王喜会, 等. 采煤沉降影响下高速公路路面破坏特征及应急措施[J]. 煤矿开采, 2017(5): 57-59, 40.



- DENG Weinan, LI Qiang, WANG Xihui, et al. Study of emergence measure and expressway pavement distress characters under mining subsidence[J]. *Coal Mining Technology*, 2017(5): 57-59, 40.
- [50] 轩大洋, 许家林. 铁路隧道下综放面覆岩隔离注浆充填开采试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(5): 1102-1110.
- XUAN Dayang, XU Jialin. Field study of longwall fully-mechanized caving mining by overburden isolated grouting under a surface railway tunnel[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(5): 1102-1110.
- [51] 谭志祥, 邓喀中. 采动区建筑物附加地基反力变化规律研究[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(9): 907-911.
- TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Study on change laws of additional ground reaction force of buildings in mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 907-911.
- [52] 张凯, 李全生, 戴华阳, 等. 矿区地表移动“空天地”一体化监测技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(2): 207-213.
- ZHANG Kai, LI Quansheng, DAI Huayang, et al. Research on integrated monitoring technology and practice of “space-sky-ground” on surface movement in mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 207-213.
- [53] 刘善军, 吴立新, 毛亚纯, 等. 天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2265-2276.
- LIU Shanjun, WU Lixin, MAO Yachun, et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2265-2276.
- [54] 汤伏全, 杨倩. 西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(12): 9-26.
- TANG Fuquan, YANG Qian. Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(12): 9-26.
- [55] YANG Y X, GAO W G, GUO S R, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.
- [56] 郭文兵, 赵高博, 马志宝, 等. 高耸构筑物采动损害与保护技术研究现状与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 403-415.
- GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, MA Zhibao, et al. Research status and prospect on mining damage characteristics and protective technology of high-rise structures[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 403-415.
- [57] 徐乃忠, 邓增兵, 孙万明, 等. 平朔矿区 380kV 高压输电线下特厚煤层开采技术[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(9): 31-35.
- XU Naizhong, DENG Zengbing, SUN Wanming, et al. Mining technology of ultra thick seam under 380 kV high voltage line in Pingshuo Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(9): 31-35.
- [58] 冯军, 谭志祥, 邓喀中. 采动地表倾斜变形对风力发电塔筒的影响研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(3): 130-133, 145.
- FENG Jun, TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Study on surface inclined deformation affected to wind turbine tower silo[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(3): 130-133, 145.
- [59] 任建东, 赵毅鑫, 孙中博, 等. 气煤叠置区高强度开采浅埋管道破坏时序规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(S2): 152-164.
- REN Jiandong, ZHAO Yixin, SUN Zhongbo, et al. Study on time series rule of buried pipe failure under high-intensity coal mining in a gas-coal overlapping area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S2): 152-164.
- [60] 王晓霖, 帅健, 张建新. 开采沉陷区埋地管道力学反应分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3373-3378, 3386.
- WANG Xiaolin, SHUAI Jian, ZHANG Jianqiang. Mechanical response analysis of buried pipeline crossing mining subsidence area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3373-3378, 3386.
- [61] 张鹏, 胡波, 李虎, 等. 不同穿越角度对采空区埋地管道力学行为的影响[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(5): 82-88.
- ZHANG Peng, HU Bo, LI Hu, et al. Influence of different crossing angles on mechanical behavior of buried pipeline in goaf[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(5): 82-88.