

采矿科学与工程



移动扫码阅读

王家臣, 许家林, 杨胜利, 等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展——纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论 40 年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 80–94.

WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, *et al.* Development of strata movement and its control in underground mining: In memory of 40 years of Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 80–94.

煤矿采场岩层运动与控制研究进展

——纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论 40 年

王家臣^{1,2}, 许家林^{3,4}, 杨胜利^{1,2}, 王兆会^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083; 2. 放顶煤开采煤炭行业工程研究中心, 北京 100083;
3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:自 1982 年钱鸣高院士提出的“砌体梁”理论得到国际公认以来, 煤矿采场矿山压力研究实现从定性假说到定量理论的跨越式发展。40 年来, 我国的采场岩层运动与控制研究已形成较系统的理论与技术体系, 服务于煤炭安全、高效、绿色开采。以“砌体梁”理论学术思想为主线, 综述了我国煤矿采场岩层运动与控制研究进展, 并提出了今后需要发展的研究方向。“砌体梁”理论采用“梁”“薄板”模型分析基本顶破断规律, 揭示了顶板断裂线位于采场煤壁前方; 煤壁和矸石支撑下基本顶破断岩块回转挤压, 咬合形成“砌体梁”结构; 发现了“砌体梁”结构的滑落(S)失稳和回转变形(R)失稳模式, 建立了 S-R 失稳的力学条件, 提出了基于“砌体梁”结构平衡的顶板压力计算方法, 首次实现了支架-围岩关系的定量分析。“砌体梁”结构采场矿山压力力学模型突破了传统定性假说, 为保障煤矿的安全和高产高效作出了历史性贡献。“砌体梁”理论指导煤矿采场顶板控制取得系列进展, 如支架-围岩三耦合关系、顶板动载荷模型、支架阻力确定的二元准则、中厚板模型、大空间采场远-近场模型等。在“砌体梁”理论的基础上, 钱鸣高院士于 20 世纪 90 年代中期提出了关键层理论, 建立了下至采场、上至地表全覆岩运动过程的力学联系, 实现了采场矿压、岩层移动和地表沉降研究的统一。“砌体梁”理论与关键层理论指导了我国煤矿采场矿山压力与岩层控制研究, 在采场矿压控制、覆岩裂隙分布、采动应力分布、岩层移动与开采沉降等方面取得重要成果, 为煤炭绿色开采与科学采矿奠定了基础。岩层运动与控制理论的进一步发展需集中到岩层运动统一场理论, 基于采动岩层控制的灾害防治与减损技术, 复杂条件岩层运动规律, 岩层运动可视化技术和智能岩层控制技术等方面。

关键词:岩层运动; “砌体梁”理论; 关键层理论; 岩层控制; 采场

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)01-0080-15

Development of strata movement and its control in underground mining: In memory of 40 years of Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian

WANG Jiachen^{1,2}, XU Jialin^{3,4}, YANG Shengli^{1,2}, WANG Zhaohui^{1,2}

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Top-coal Caving Mining Research Center of Coal Mining Industry, Beijing 100083, China; 3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Since widely accepted by international scholars, Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian helps the re-

收稿日期: 2022-11-30 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2071

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51934008, 51904304); 国家自然科学基金创新研究群体资助项目 (52121003)

作者简介: 王家臣(1963—), 男, 黑龙江方正人, 教授, 博士。E-mail: wangjiachen@vip.sina.com

通讯作者: 王兆会(1987—), 男, 山东泰安人, 副教授。E-mail: zhwang1024@163.com

search on underground mining pressure realize leapfrog development from the stage of qualitative hypothesis to quantitative analysis. In the past forty years, an integral system has been formed for strata movement theory and strata control technique, contributing to safe, efficient and green mining of underground coal seams. By underlining the voussoir beam theory, critical developments on strata movement and its control have been reviewed. Important topics are proposed for future research. In the voussoir beam theory, rupture characteristics of main roof are studied with beam and thin plate models. It is revealed fracturing line of main roof locates ahead of the longwall face. Due to supporting effects provided by coal wall and caving materials, the rotation of broken blocks of main roof results in the occurrence of compressive force, forming the voussoir beam structure. Both slipping and rotating instability modes of the structure are identified. The S-R instability conditions are determined. Based on such understanding, determination method for roof load is proposed through keeping the balance of voussoir beam structure, realizing quantitative analysis on the relation between hydraulic support and surrounding rock. Until now, the voussoir beam structure stands as the most impeccable model for explaining underground mining pressure. It is a major breakthrough for conventional qualitative hypothesis, which makes historic contributions to living safety and working efficiency of the miners. The Voussoir Beam Theory further brings about many achievements on strata control, including three-coupling relation between hydraulic support and surrounding rock, dynamic load model for roof control, medium plate model, far-near field model in longwall face with large space etc. Based on the voussoir beam theory, the key stratum theory is moreover proposed by Minggao Qian in the middle of the 1990s. Mechanical relation between different overburden strata is established during movement process. Coordinative analysis on mining pressure, strata movement and surface subsidence is realized. The Voussoir Beam Theory and key stratum theory provide significant guidance on the research of coal mining pressure and strata movement, contributing to a series of theoretical developments, such as mining pressure control at the face area, mining induced fracture distribution in strata, mining induced stress distribution, strata movement and surface subsidence. Such achievements serve as the foundation of green mining and scientific mining. Further development of the theory should pay attention to unified field theory for strata movement, strata movement based accident and damage prevention technique, strata movement under complex mining conditions, visualization of strata movement and intelligent strata control.

Key words: strata movement; voussoir beam theory; key stratum theory; strata control; longwall face

0 引 言

煤矿开采的本质是大规模地下开挖活动,这种开挖必然引起原岩应力重新分布,采矿工程围岩变形和覆岩运动,从而引起一系列矿山压力显现现象,如采场、巷道、硐室围岩破坏,顶板失稳、冲击地压、煤与瓦斯突出、采场突水、地表下沉等。这些矿山压力显现给煤矿安全生产和环境保护带来了诸多不利影响,因此,认识和利用岩层运动规律以及控制矿山压力现象一直是采矿从业者和科研人员的主要任务之一。早在春秋至南北朝时期,我国的采矿技术已有全面发展,已将巷道由仅作回采发展到作开拓、采准及探矿之用,立井井深可达 50~60 m,断面可达 1.4~2.0 m²,平巷高度可达 1.5~1.8 m。开始使用框式支架,甚至取消底梁,说明已认识到矿压的危害,需要对其加以控制。欧洲国家对矿压的认识大约开始于 15 世纪,1487 年欧洲出现了《防止采矿工作面破坏地表的协定》。19 世纪 30 年代以后,在比利时、德、法等主要采矿国家,为了防止地面房屋建筑、地下水系遭到煤矿开采活动的破坏,也曾提出过一些确定保护煤柱尺寸的方法,并颁布了一些法律法规。

20 世纪以来,煤矿开采规模日益扩大,与矿山压力相关的煤矿事故多发,迫使采矿人员更加重视和研究矿山压力问题。需要将矿山压力和岩层控制问

题的研究从经验总结上升到理论分析层面,指导煤矿安全高效生产。由于煤矿开采的特殊性、采场矿山压力显现的复杂性,难以直接借助经典力学、经典数学方法揭示采动岩层运动规律。为此,国内外学者提出了一些矿山压力假说,以揭示矿山压力现象的内在联系,推测或概括矿山压力和岩层运动规律。20 世纪初期诞生了早期的采场岩层运动与矿山压力假说,如德国学者斯托克(K. Stoke)于 1916 年提出的“悬臂梁”假说,哈克(W. Hack)和吉里策尔(G. Gillitzer)于 1928 年提出的“压力拱”假说等。随着长壁开采技术的推广应用,以及采场岩层运动观测技术、支护技术的提升,前苏联学者库兹涅佐夫(Кузнецов)于 1950—1954 年间提出了“铰接岩块”假说,比利时学者拉巴斯(La Paz)于 20 世纪 50 年代初提出了“预成裂隙”假说。上述假说在一定程度上对采场矿山压力现象、岩层运动规律、顶板岩层破碎后形成的结构进行了定性解释。

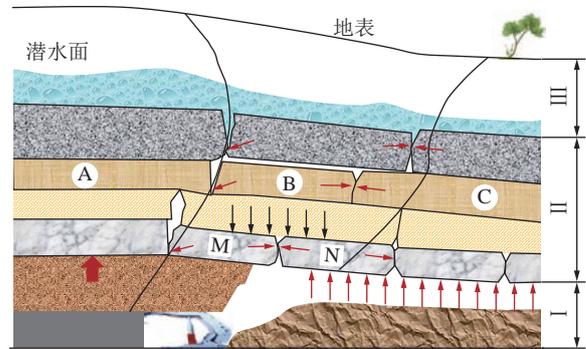
随着煤矿开采技术的进步和设备制造水平的提高,我国煤炭开采规模和开采强度不断加大。为实现煤炭安全高效开采,只对采场矿山压力现象进行定性描述显然是不够的。我国学者钱鸣高院士在总结“铰接岩块”假说和“预成裂隙”假说的基础上,结合煤层开采覆岩变形移动规律的大量现场观测数据,于 20 世纪 70 年代末至 80 年代初提出了岩体结构的

“砌体梁”理论模型,在世界范围内首次实现了采场覆岩运动规律的定量化描述。1982年钱鸣高院士在英国国际岩层力学大会上宣读了《长壁开采覆岩运动特征及其在岩层控制中的应用研究》(A study of the behaviour of overlying strata in longwall mining and its application to strata control)论文,得到了世界著名岩石力学专家和采矿专家的高度评价,将其称为“鸣高模型”^[1]。“砌体梁”理论模型为我国煤炭院校广泛采用,并于1989年获得了煤炭系统第一个国家自然科学奖。自从1982年“砌体梁”理论模型在世界范围内被广泛认可至今已有40年。这40年来,我国煤矿开采技术取得了巨大进步,服务于煤矿开采的岩层运动理论及控制技术也取得了重要进展^[2]。为了纪念钱鸣高院士的“砌体梁”理论,以及后续提出的“关键层”理论、绿色开采和科学采矿学术思想,特撰写本文。

1 “砌体梁”理论

“砌体梁”理论模型如图1所示,将采场前后及覆岩划分为“横三区”和“竖三带”。工作面推进方向上包括:煤壁支撑影响区A(高应力区)、离层区B(卸压区)和重新压实区C(应力恢复区);垂直方向上包括:垮落带I、裂缝带II和弯曲下沉带III^[3]。“砌体梁”理论对裂缝带内离层区岩层破断后可能形成的结构进行了严谨的数学、力学分析与推导,提出了基本顶破断后岩块相互挤压咬合可形成外表似梁,实质是以前方煤壁和采空区垮落矸石为支点的半拱结构,将其定义为“砌体梁”结构。该结构包含2个关键块M和N,关键块之间存在接触点,关键块M回转和关键块N反向回转在接触点形成水平挤压力,为结构平衡奠定了基础^[4-5]。随着工作面推进,“砌体梁”结构始终处于动态平衡状态,结构的周期性失

稳导致采场顶板来压。针对“砌体梁”结构的力学分析结果表明关键岩块存在滑落(Sliding)失稳和回转(Rotation)失稳2种模式,并给出了结构失稳的力学条件^[6-8]。



A—煤壁支撑影响区; B—离层区; C—重新压实区; I—垮落带; II—裂缝带; III—弯曲下沉带

图1 岩层运动分区模型

Fig.1 Zone division for overburden strata movement

“砌体梁”结构的自稳能力与关键块高跨比密切相关。为确定关键块长度,构建了基本顶断裂的弹性基础梁模型,提出了基本顶初次和周期断裂步距确定方法^[9-10]。弹性基础梁模型揭示了基本顶断裂线位于煤壁前方这一普遍的采场矿压现象,煤壁成为“砌体梁”结构的重要支点,也表明“砌体梁”结构普遍存在于采场上方的离层区^[11]。随着开采技术的发展,工作面长度逐渐增加,为研究工作面长度方向对基本顶破断步距的影响,将薄板理论引入基本顶断裂过程研究中,发现采动裂隙首先出现在长边中部,继而出现在短边中部,最终导致基本顶发生“O-X”型破断,如图2所示^[12-13]。基本顶“O-X”破断模式表明“砌体梁”结构模型更适用于工作面中部区域,工作面两端则形成弧形三角板,保护下位工作面端头和两巷空间。

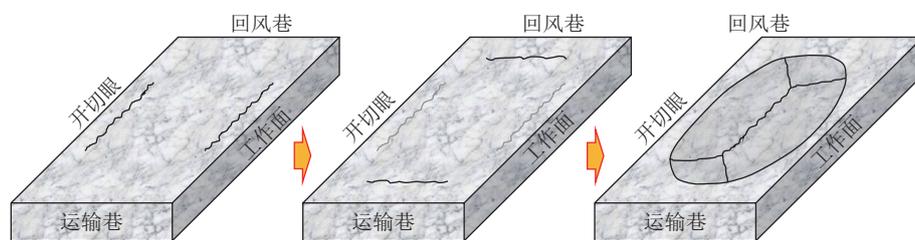


图2 基本顶“O-X”型破断过程

Fig.2 “O-X” typed rupture process of main roof

“砌体梁”结构的S-R稳定分析结果表明关键块之间的最大竖向剪力位于岩块M同前方未断裂岩层之间的接触点。若关键块回转角度小,水平挤压在该接触点产生的摩擦力不足以抵抗竖向剪力,则两

者之差加直接顶载荷就是防止结构滑落失稳所需液压支架提供的支护阻力。若关键块回转角度大,水平挤压力过大导致转角处岩块破碎,则水平挤压力达到转角强度时岩块回转产生的变形压力就是防止

结构回转变形失稳所需液压支架提供的支护阻力。据此提出了支架阻力确定的“砌体梁”结构平衡法，液压支架下缩特性与结构运动相适应，才能最大程度发挥“砌体梁”结构的自身承载能力。“砌体梁”结构平衡法的提出将顶板压力确定由4~8倍采高岩柱重力的经验法提升至定量分析层面^[14-17]。

“砌体梁”理论模型解释了采动岩层结构形态、采场前方支承压力的原因；指出了采场支架是处于“大变形”状态，支架的可缩量须满足“砌体梁”结构的下沉量，为分析和确定支架承受的载荷与变形奠定了理论基础。“砌体梁”理论模型的研究重点是采场基本顶范围内岩层，主要用于解释采场矿山压力现象，建立科学的支架-围岩关系，以及指导采场支护设计^[18-20]。“砌体梁”理论模型被认为迄今最完善的矿山压力力学模型，是对传统定性矿山压力假说的重大突破。后在“砌体梁”理论模型的基础上，构建了岩层运动整体结构力学模型，确定了岩层之间的力学传递关系，该模型被写入《中国大百科全书·矿业工程》^[21]。

2 关键层理论

为统一分析采场矿压、岩层移动和地表沉陷的内在联系，在“砌体梁”结构模型的基础上，1996年钱鸣高院士提出了岩层控制中的关键层理论。采场上覆岩层中一般存在多层坚硬岩层，对岩层运动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层，前者为主关键层，后者为亚关键层，如图3所示^[22]。

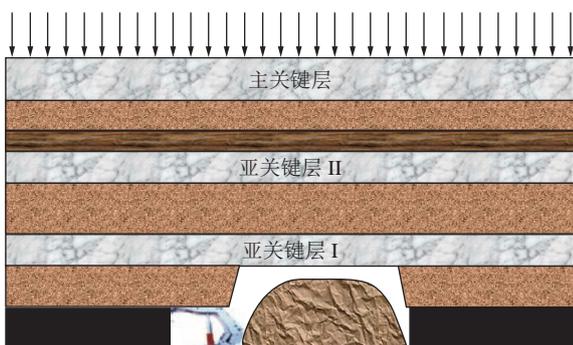


图3 关键层理论模型

Fig.3 Model for key stratum theory

采场上覆岩层中的关键层具备以下特征：①几何特征，相对其他岩层厚度较大；②岩性特性，相对其他岩层较为坚硬，即弹性模量大、强度高；③变形特征，关键层下沉变形时，其上覆全部或局部岩层的下沉量与它是同步协调的；④破断特征，关键层的破断将导致全部或局部上覆岩层的破断，引起较大范

围内的岩层移动；⑤承载特征，关键层破断前以板（梁）结构作为上覆岩层的承载主体，破断后形成“砌体梁”结构，继续发挥承载主体功能^[23]。关键层理论继承了“砌体梁”理论的主要学术思想，即抓住覆岩中的厚硬岩层破断问题这一主要矛盾；同时强调从覆岩运动的整体层面来研究采场矿压、流体渗流与地表沉陷，实现了过去分属不同学科的采场矿压、流体渗流与地表沉陷研究的有机统一。

基于变形和破断特征，提出了关键层判别的刚度条件和强度条件，开发了关键层判别的实用程序软件KSPB^[24-25]。研究了关键层上部载荷和下部支承压力的分布特征和变化规律，上部载荷和下部支承压力的非均布特征决定关键层破断特征。关键层最大拉应力位于采场中部岩层下缘位置处，结合强度理论给出了关键层破断步距确定方法；根据多层关键层破断步距的不同，提出了主关键层和亚关键层识别方法^[26-28]。发现了相邻坚硬岩层之间的复合变形与破断效应，将其定义为复合关键层，并提出了存在复合效应关键层同步与非同步破断的理论判据，关键层复合效应导致工作面来压的非均匀周期性变化，解释了大空间采场存在大小周期来压现象的原因^[29-30]。关键层同其上位岩层协调变形，同其下位岩层非协调变形，因此，关键层下缘普遍存在呈O形分布的离层区，成为煤层气的流动和积聚空间^[31]。根据关键层、含水层和采场的空间位置关系，提出了隔水关键层理论^[32]。此外，主关键层的变形和破断控制全部岩层运动进程，对地表下沉同样存在控制作用，主关键层的破断导致地表下沉的非均匀性，地表下沉速度同样呈现出与主关键层类似的周期性变化特征，地表下沉控制的基本原则是保证关键层不破断^[33-34]。

关键层理论自提出以来，对其判别方法，承载特征、破断规律、复合效应进行了深入研究，促进了关键层理论在采场矿压控制、岩层运动控制和地表沉陷控制中的应用。解释了工作面来压强度的离散性和支架-围岩关系的多变性，描述了地表沉陷的周期性、非均匀性变化规律和岩层移动边界线形态，深化了对开采过程中上覆岩层采动裂隙（特别是离层裂隙）发育规律的认识，促进了在采场矿压控制、岩层裂隙分布、采动应力分布、非固态共伴生资源运移、地表沉陷等方面理论研究工作的进展。

3 采场岩层控制研究进展

3.1 采场矿压控制

随着放顶煤和大采高开采技术在厚煤层开采中

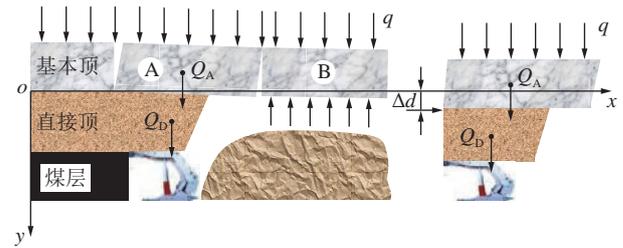
的推广应用,高强度开采引起的采动效应更强,采动影响范围更大,顶板岩层活动剧烈,控制难度升高。为提高大空间采场围岩控制效果,在“砌体梁”理论的指导下,采场矿压控制理论取得系列进展。

3.1.1 支架-围岩三耦合关系

王国法院士以液压支架设计为核心,认为液压支架依托底板支护顶板、防护煤壁、隔绝矸石,通过充分利用煤壁和“砌体梁”结构的自承能力,最大程度发挥液压支架的力学结构特性,促进液压支架与采场围岩耦合为一个动态平衡系统,维护采场安全。为保证液压支架结构力学特性与“砌体梁”结构回转运动特征相适应,提出了液压支架与围岩之间的强度耦合、刚度耦合和稳定性耦合关系,称为三耦合关系模型。强度耦合是指液压支架结构特性应保证充分利用围岩结构自承能力,将顶板动载荷充分吸收并转变为自身强度可以平衡的静载荷。刚度耦合是指将顶板-液压支架-底板视为一个整体,保证三者整体刚度可防止直接顶与基本顶离层,改变基本顶破断位置,防止动载冲击现象的发生。稳定性耦合是指液压支架旨在维护围岩稳定,通过优化液压支架结构参数,提高支架对围岩结构动态失稳的适应性,以液压支架自身稳定性为基础,保障围岩结构的稳定性^[35-37]。

3.1.2 顶板动载荷模型

厚煤层高强度开采工作面来压期间,基本顶断裂和失稳导致弹性应变能快速释放,转变为破断岩块的动能,破断岩块动态启动导致其与下位直接顶发生非静态接触,引起动载冲击现象,因此,该类采场液压支架普遍承受动载荷^[38]。动载冲击力通常大于“砌体梁”结构平衡法给出的顶板压力,是造成液压支架损坏、煤壁片帮的原因之一。为揭示厚煤层高强度开采条件下顶板动载冲击现象产生机理,将直接顶(含顶煤)视为弹性体,在“砌体梁”结构模型的基础上构建了动载冲击效应力学模型,如图4所示。工作面推进至基本顶断裂线位置时,若支架提供的支撑力难以满足结构平衡条件,结构发生失稳。借助动力学方法分析了“砌体梁”结构失稳后,关键块对下位直接顶和液压支架的动载冲击效应,提出了顶板动载冲击力确定方法。直接顶为弹性体且与基本顶无离层的条件下,动载冲击系数恒等于2。根据直接顶(顶煤)破碎程度提出了动载系数修正方法,直接顶离层会加剧动载冲击剧烈程度^[39]。顶板动载理论解释了高强度采场基本顶来压引起的动载冲击现象,是对“砌体梁”理论的有益补充与发展^[40-41]。



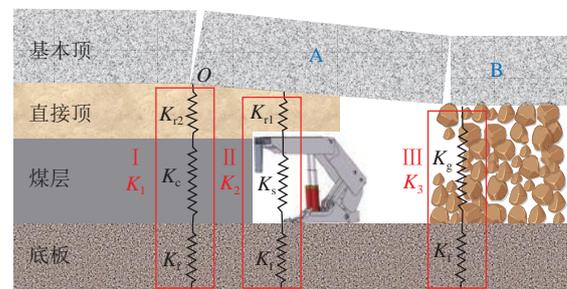
Q_B —直接顶重力; Q_A —基本顶重力; q —均布载荷

图4 顶板动载冲击力学模型

Fig.4 Roof dynamic load impact mechanical model

3.1.3 支架阻力确定的二元准则

“砌体梁”理论表明关键块A(图5)回转产生的变形压力主要由煤壁和液压支架承担。“砌体梁”结构平衡理论给出的顶板压力计算方法旨在充分发挥煤壁的承载能力,液压支架应具备灵活的可缩性,促使“砌体梁”关键块回转产生的变形压力快速向煤壁传递,液压支架则产生让压作用,从而保证支架-围岩系统的动态平衡。该时期顶板压力确定方法提出的背景是我国液压支架制造水平较低,为避免过大的顶板压力造成支架损坏现象,通过支架结构设计促使顶板压力向煤壁转移,充分发挥围岩自承能力,缓解传递至支架之上的顶板载荷。



K_1 、 K_2 、 K_3 —3个系统的刚度; K_{11} 、 K_{12} —完整和破碎直接顶刚度; K_c —煤体刚度; K_s —支架刚度; K_g —矸石刚度; K_f —底板刚度

图5 支架-围岩系统刚度模型

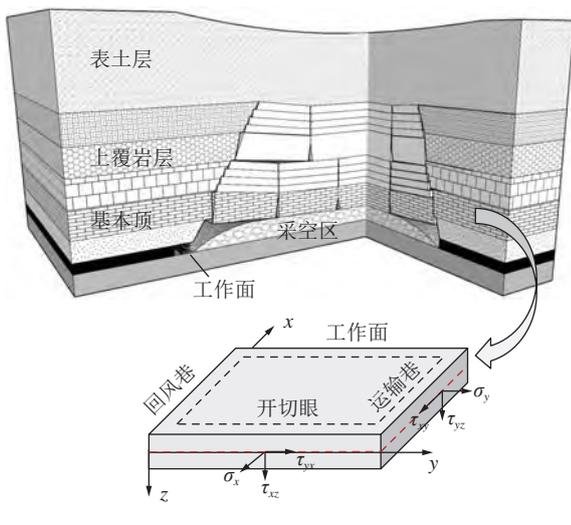
Fig.5 Stiffness model of support-surrounding rock system

随着我国液压支架制造水平的提高,当前最大额定工作阻力已达到26000kN,最大支撑高度已达8.8m。同时随着大空间采场在厚煤层开采中的普及,煤壁高度成倍增加,高帮煤壁稳定性降低,煤壁破坏成为制约大空间采场生产潜能发挥的关键因素。为提高煤壁稳定性,高强度重型液压支架在保证顶板稳定的同时,应分担更多顶板载荷,从而缓解作用于煤壁之上的顶板压力。同时考虑“砌体梁”结构平衡和煤壁稳定,提出了支架工作阻力确定的二元准则^[42]。顶板载荷在煤壁和支架上的分配比例由煤壁、直接顶、支架、底板和矸石组成的支撑体系决定,建

立了采场围岩支撑刚度体系模型,如图5所示。分析了系统组分刚度对顶板载荷分配比例的影响,为支架刚度确定提供指导,并形成了大空间采场高强度、高刚度协同支护思想^[43]。

3.1.4 厚硬顶板破断的中厚板模型

“砌体梁”理论采用“梁”、“薄板”模型分析基本顶破断规律,认为基本顶发生拉伸破断,断裂线位于采场煤壁前方,破断岩块挤压咬合形成平衡结构。对于厚硬顶板采场条件,基本顶可能发生剪切破断和滑落,引发顶板切落现象。为补充“薄板”模型未考虑的剪应力,揭示厚硬顶板剪切破断机理,采用中厚板理论构建了考虑基本顶厚度的板结构力学模型如图6所示,求解了不同边界条件下厚硬顶板内部应力分布。发现顶板厚度增加有效抑制了顶板内部拉应力发育,而剪应力水平显著提高。当顶板厚度达到一定限度后,剪应力达到甚至超过拉应力水平。根据厚硬顶板内部应力分布,将最大剪应力与最大拉应力比值定义为实际应力比,厚硬顶板抗剪强度与抗拉强度比值定义为极限应力比。将实际应力比达到极限应力比时的顶板厚度定义为极限厚度。采场上方存在达到极限厚度的岩层时,顶板在煤壁上方发生剪切破断,破断岩块失去下位煤壁支撑,引起切落现象。中厚板理论给出了厚硬顶板破断模式由拉伸型向剪切型过渡的力学条件,实现该类采场切顶压架危险性分区、分级控制^[44]。



σ_x 、 σ_y 、 σ_z —坐标轴应力分量; τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} —剪应力
图6 厚硬顶板破断中厚板力学模型

Fig.6 Medium plate mechanical model for main roof

3.1.5 长工作面顶板分区破断模型

随着煤炭开采强度升高,工作面长度不断增加。长工作面支架阻力呈现“中间小、两端大”的谷形分

布特征^[45]。将支架阻力和超前采动应力出现的三峰值分布现象作为长工作面的判据^[46]。长工作面不同推进阶段,顶板破断引起的高能级微震事件位置在工作面长度方向上动态变化,表明基本顶沿工作面方向的破断很难同步发生,存在分区破断和动态迁移现象^[47]。支架阻力和微震事件的非常规分布是由于长工作面顶板裂隙数量增多,破断模式由拉应力驱动向裂隙诱导型转变。此外,工作面长度与采动应力集中程度成正比,将超前采动应力大于基本顶初始屈服强度的区域定义为峰值影响区,区内应力集中驱动超前裂隙萌生,应力释放和应力旋转促进裂隙扩展,形成超前采动裂隙场。

构建了基本顶分区破断与动态迁移力学模型,原生裂隙和采动裂隙改变了基本顶局部边界条件,引发基本顶分区破断现象,如图7所示。由中部峰值影响区至工作面两侧,基本顶极限承载能力降低,导致分区破断的动态迁移现象。峰值影响区基本顶破断尺寸小于非峰值影响区,解释了长工作面支架阻力谷形分布原因。基本顶分区破断现象在2002年的大同坚硬顶板大采高项目研究中首次发现^[48],后在千米深井超长工作面研究中进行了理论创新和完善。该成果解释了长工作面非同步来压现象,丰富了“砌体梁”理论内容。

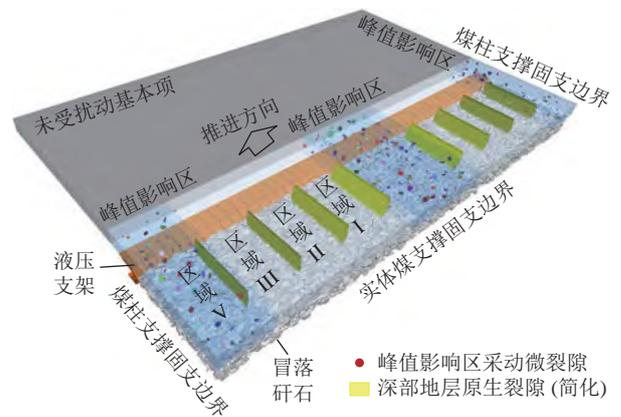


图7 基本顶裂隙分布与分区特征

Fig.7 Fracture distribution and zone division in main roof

3.1.6 浅埋采场压架机理

西部浅埋煤层开采实践表明浅埋采场矿压显现趋于强烈,“砌体梁”和关键层理论解释了该类采场强矿压现象产生的原因。在单一关键层结构且地表有厚风积沙、沟谷地形上坡段、近距离煤层重复采动出上覆煤柱、特大采高等几类特殊开采条件下,浅埋煤层开采易出现“砌体梁”结构的滑落失稳,导致支架活柱在短时间内急剧下缩甚至发生压死支架的现

象^[49]。基于“砌体梁”理论揭示了上述各类条件下压架灾害的发生机理与力学条件,建立了工作面压架危险区域的预测方法,形成了一套浅埋煤层工作面支架合理阻力的估算方法,提出了浅埋煤层开采压架灾害防治对策。有关研究成果在神东矿区浅埋煤层矿山压力控制与压架灾害防治实践中得到验证和应用^[50]。

3.1.7 大空间采场远-近场结构模型

特厚煤层开采条件下,受采动影响的岩层范围成倍增加,覆岩破断形成空间层位划分明显的坚硬岩层结构系统。由低位至高位的顶板结构在运动过程中相互作用,共同影响采场矿压显现特征和强度。根据空间层位、破断规律、结构特征和对采场矿压的影响程度的不同,提出了大空间采场近场岩层和远场岩层的概念,并构建了远-近场覆岩结构模型,如图8所示^[51]。近场岩层是指基本顶控制范围内的岩层,破断步距小,破断岩块形成“悬臂梁”+“砌体梁”结构,造成工作面复合周期来压。远场岩层是指基本顶控制范围外、采动影响范围内的岩层,破断步距大,形成特殊高位岩层结构,结构失稳影响范围广,波及工作面和巷道大面积区域,是大空间采场强矿压产生的主要诱因^[52]。

3.1.8 深埋薄基岩采场“高耸岩梁”模型

深埋厚冲积层薄基岩采场覆岩破断形态如图9a所示:厚冲积层中首先形成冒落拱,拱内冒落土体载荷快速向下位基岩传递,导致薄基岩发生全厚破断,形成拱脚高耸岩梁。同“砌体梁”结构的滑落和回转失稳模式相比,高耸岩梁运动以滑移下沉为主,回转运动受到抑制,水平挤压来源于滑动面剪胀效应,从而形成平衡结构。该类采场覆岩采动裂隙发育过程如图9b所示,破坏裂隙首先在高位厚冲积层中萌生,继而快速向下位扩展并抵达基岩上表面。由于采动裂隙扩展速度极快,裂隙尖端击穿基岩上表面继续向下扩展,直至基岩全厚发生整体破

断。构建了冲积层冒落拱与拱脚高耸岩梁复合结构力学模型,提出了冒落拱极限承载能力与实际边界载荷计算方法,得到了冒落拱发生结构失稳的力学判据。采动应力旋转促进冲积层载荷向拱脚两侧传递,增强了冲积层冒落拱自稳能力。提出了基岩破断面恒定法向刚度条件下高耸岩梁承载能力计算方法,确定了保持基岩岩梁平衡所需支架具备的支撑能力。基于厚冲积层冒落拱与拱脚高耸岩梁复合承载机理,提出了适用于深埋厚冲积层薄基岩采场的液压支架强度-刚度双参量选型方法^[53-54]。

3.2 岩层采动裂隙分布

岩层非协调变形和破断现象在覆岩中产生采动裂隙,采动裂隙是地下水和煤层气的主要流动通道,也是围岩失稳的根本原因。研究覆岩采动裂隙分布特征可为采场矿压、水害防治、瓦斯抽采、离层区注浆减沉等工程问题提供指导。煤层开采后,覆岩中形成层间离层裂隙和竖向破断裂隙,发现离层裂隙主要出现在关键层下缘,其发育过程分为初采和压实2个阶段。初采阶段采空区矸石冒落不充分且无支撑能力,采空区中部裂隙发育程度最高,呈高帽形分布;压实阶段采空区中部矸石发挥承载能力,采动裂隙闭合,采空区四周裂隙发育程度最高,呈驼峰形或马鞍形分布^[55]。采动裂隙发育高度随着推进范围

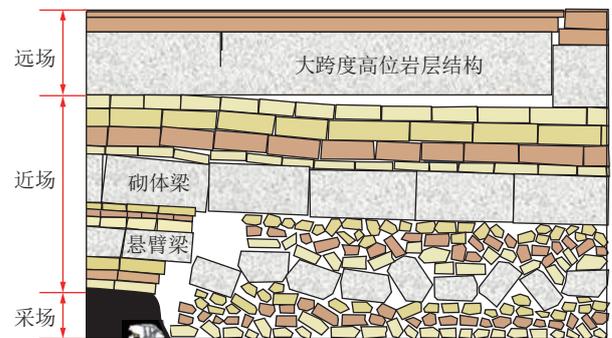


图8 大空间采场远-近场结构模型
Fig.8 Far-near field model in longwall face with large space

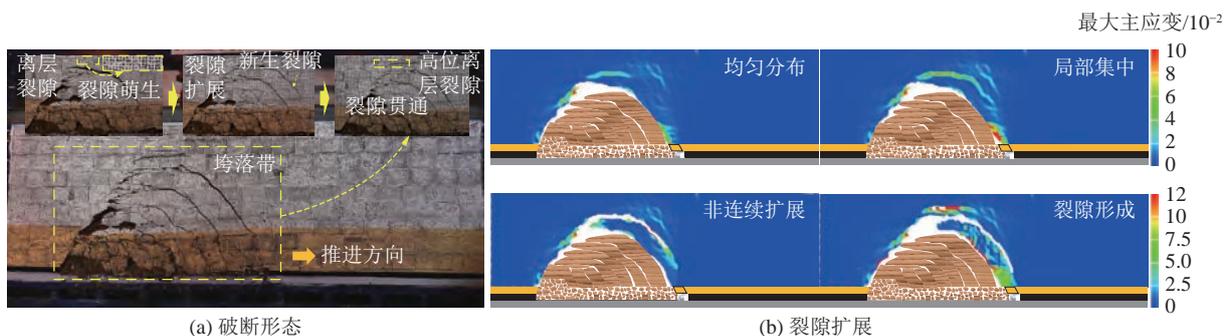


图9 深埋厚冲积薄基岩采场覆岩运动特征
Fig.9 Overburden movement in deep face with thick soil layer

的增加而增大,覆岩离层最大发育高度止于主关键层,关键层复合破断会抑制上部关键层下缘离层裂隙的产生,关键层破断后的离层量约为破断前的三分之一。发现了采空区四周存在联通发育的离层裂隙区,并将其称为采动裂隙“O”形圈,关键层厚度、刚度、强度和层位是影响“O”形圈尺寸和形态的关键因素,探讨了“O”形圈理论在瓦斯抽采和地面注浆减沉中的应用原理。借助关键层理论和砌体梁结构理论,揭示了覆岩“O”形圈离层区产生并保持长期稳定的内在原理,提出了“O”形圈宽度确定方法^[31,56]。在充分掌握覆岩离层裂隙分布特征的基础上,揭示了覆岩卸荷膨胀累积效应及其对覆岩离层量的抑制作用,为覆岩隔离注浆充填技术研发和实践奠定了基础^[57]。提出了基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法,弥补了传统预计方法对顶板岩性均化处理的不足^[58]。覆岩竖向破断裂隙超前工作面产生,是采场各种矿山压力现象的根源,人为控制坚硬岩层竖向破断裂隙的萌生位置是缓解矿压显现程度的主要措施。竖向裂隙发育特征取决于关键层位态,关键层破断导致竖向裂隙发育高度的非线性和突变式增加;破断块体的回转和反向回转控制采动裂隙的张开和闭合^[59]。此外,竖向裂隙也是导致覆岩纵向渗流速度加快的主要原因。值得注意的是煤层赋存条件的差异会改变采动裂隙分布特征,例如:深埋厚冲积层薄基岩采场覆岩采动裂隙呈拱形分布,离层裂隙发育受到抑制,如图9所示^[53]。

3.3 采动应力分布

关键层控制下的岩层运动引起载荷传递,工作面前方出现采动应力集中现象,通常称为超前支承压力,工作面两侧也会出现支承压力峰值。支承压力峰值系数通常大于2,影响范围可达数百米^[3]。关键层破断产生的震动能量场与超前支承压力场叠加,形成动-静组合加载效应,是煤矿冲击地压等动力灾害的主要诱因^[60]。千米深井超长工作面支承压力表现为三峰值空间分布特征,如图10所示。多峰和高应力梯度成为深部采场和巷道围岩大变形破坏的主要原因。矿压理论研究初期,将各类围岩破坏归咎于支承压力影响;随着研究深入,发现了大空间采场开挖引起的侧向卸荷现象。推进方向上侧向约束消失造成水平应力快速减小,称为采动应力释放现象。应力集中和应力释放现象均会促进煤岩体破坏,据此提出了厚煤层综放开采顶煤破坏的加卸载复合效应原理^[61-62]。

采动引起的应力重新分布包含应力大小和应力

方向2个方面,笔者分析了采动应力方向变化特征,并将其定义为采动应力旋转现象。采动应力旋转是指采掘扰动作用下岩石抗剪能力充分发挥,剪切位错导致初始主平面上出现剪应力,岩石主平面发生旋转,主应力偏离初始主轴方向的现象。口孜东矿深部超长工作面采动应力旋转轨迹如图11所示,单箭头直线代表工作面推进方向。 O 点位于工作面前方原岩应力区,采动影响后地应力发生旋转现象,旋转进程于煤壁附近的 C 点结束并进入垂直平面,旋转角度大于 40° 。以该平面为基准,超前采动应力旋转轨迹可划分为3个阶段:面外慢速偏离阶段(OA)、面外快速靠近阶段(AB)和面内协同旋转阶段(BC)^[63-64]。

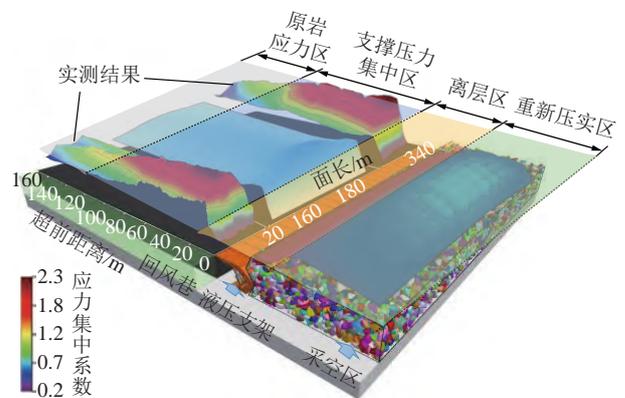
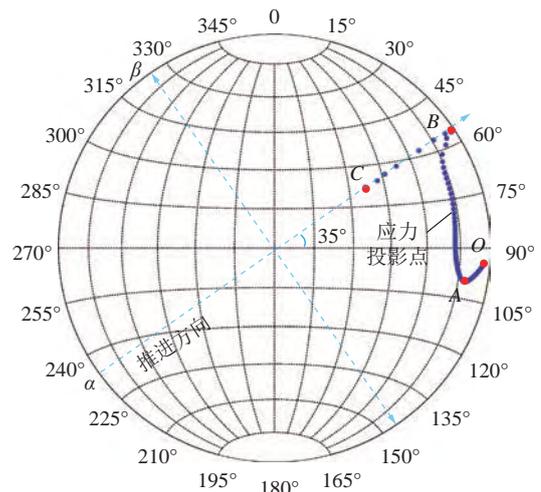


图10 超前支承压力分布特征

Fig.10 Distribution of front abutment stress



α 、 β —工作面推进方向、倾斜方向

图11 口孜东矿采动应力旋转轨迹

Fig.11 Mining stress rotation trajectory in Kouzidong Mine

煤系地层中含有大量的节理裂隙,导致煤岩体具有强烈的各向异性力学特征,承载能力和破坏模式对加载方向具有较高的敏感性,因此,采动应力旋

转现象必然对围岩稳定性和顶煤冒放性造成影响。根据采动应力旋转轨迹影响因素提出了轨迹形态控制方法,并提出了优势旋转轨迹确定原则,形成了从采动应力旋转轨迹优化角度提高围岩稳定性和顶煤冒放性的新思路。

3.4 非固态共生资源运移规律

煤系地层中伴生煤层气和地下水等多种非固态资源形式。早期开采以保证煤炭供应为首要目标,将瓦斯视为有害气体不予以重视,瓦斯沿采动裂隙流动运移至地下空间或地表,造成瓦斯灾害和空气污染。为评价充分采动条件下“O”形圈离层区积聚瓦斯容量,构建了受矸石支撑的关键层薄板力学模

型,得到了离层裂隙区关键层下沉位移曲线,采用曲面积分方法计算了关键层与冒落矸石之间的空间体积,提出了瓦斯容量计算方法,如图12所示。采动裂隙也是地下水资源流动通道,若采动裂隙发育高度抵达含水层,地下水沿采动裂隙向采出空间流动,造成地下水流失和污染等问题。若采动裂隙导通含水层与采场空间,地下水非可控流动引起矿井水灾,威胁采场生产安全^[65-66]。“O”形圈理论和隔水关键层理论为研究煤炭开采过程中非固态共生资源的运移规律提供了理论基础和研究手段。在掌握煤系地层中非固态资源赋存与流动规律的基础上,形成了共生资源协同开采和保水开采的思想。

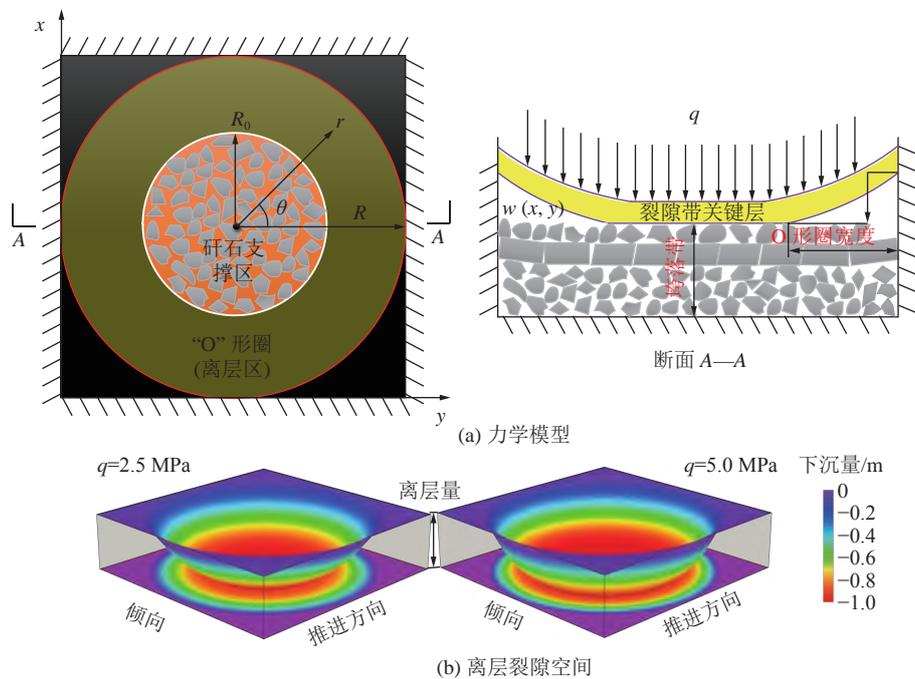


图12 关键层下“O”形圈离层空间计算模型

Fig.12 Model of O-shaped fracture under key stratum

3.5 岩层移动与地表沉降

岩层运动传递至地表引起地表沉降,形成沉降盆地。关键层运动对地表沉降具有控制作用,特别是覆岩主关键层的破断会引起地表下沉速度和地表下沉影响边界的明显增大和周期性变化^[33]。此外,关键层与表土层之间的耦合关系对地表沉降同样具有重要影响,根据“砌体梁”结构位移曲线及关键层与表土层的耦合关系可实现地表下沉特征预测^[34]。若基岩之上的第四系冲积层厚度大,对主关键层破断引起的快速下沉具有充分的吸收作用,则地表呈现为连续下沉形式;若第四系冲积层厚度不足以吸收主关键层破断引起的下沉量,则采动裂隙发育至地表破坏地表连续性^[67]。煤层埋深不大的条件下形

成大尺度张开裂隙和剪切错动裂隙。西部浅埋煤层开采过程中,地表裂隙张开度和错动量可达数米,大尺度裂隙导致潜水流失,破坏地表植被根系,造成植被退化,影响西部脆弱生态环境,如图13a所示。东部矿区开采深度增加,地表通常呈现连续沉降模式。但是,随着开采范围的增加,开采边界位置也会出现张开型采动裂隙,裂隙张开度可达数十厘米,破坏房屋和田地,影响高人口密度区域居民生活质量,如图13b所示。

若开采矿井地处高潜水位区域,地下水沿采动裂隙渗出,加之季节性降水与河流补给,在沉降盆地内部形成大范围积水,影响土地复垦和再利用^[68]。河南焦作矿区赵固二矿地处黄河下游冲积平原地区,

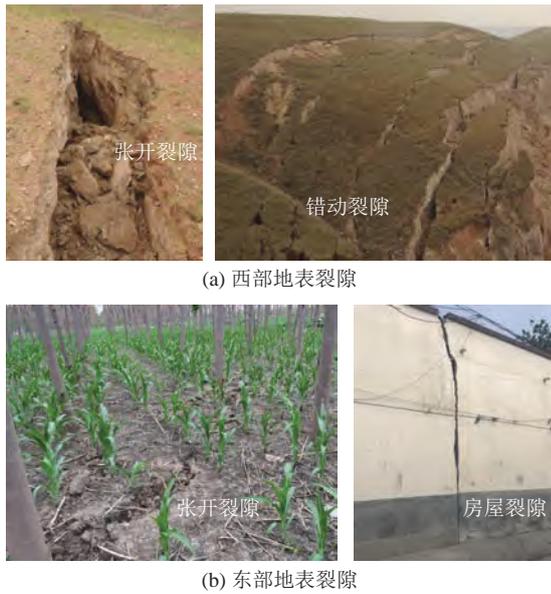


图 13 西部与东部地表裂隙发育特征

Fig.13 Surface fracture features of western and eastern areas
高潜水位与黄河支流补给导致采煤塌陷区积水严重,地表积水区的无人机航拍结果如图 14a 所示。

地表大范围下沉和大量积水导致近万亩农田和大量村庄房屋受损,影响当地居民生活质量,威胁区域粮食安全。为了实现对开采沉陷积水区域的再次开发利用,采用无人船测量方法得到水体下地表沉陷盆地空间几何形态如图 14b 所示。根据地 表 沉 陷 量 和 开 采 煤 层 厚 度 之 间 的 关 系,将沉陷盆地划分为稳定沉降区和非稳定沉降区 2 个部分。将稳定沉陷区改造为水库,采用拓扑分析方法计算了水库库容,为区域防旱和防洪提供了手段;非稳定沉降区改造为养殖区、游船区和采摘园等场所,如图 14a 所示。沉陷区的复垦和利用改善了矿区地表生态,丰富了土地利用方式,提高了当地居民收入水平。

在“砌体梁”和关键层理论的指导下,岩层运动与控制研究在采场矿压控制、采动裂隙分布、采动应力分布、非固态共伴生资源流动规律、岩层运动与地表沉陷等方面取得诸多进展,形成了较完善的理论与技术体系,为煤炭资源实现绿色开采和科学开采奠定了基础^[69-70]。

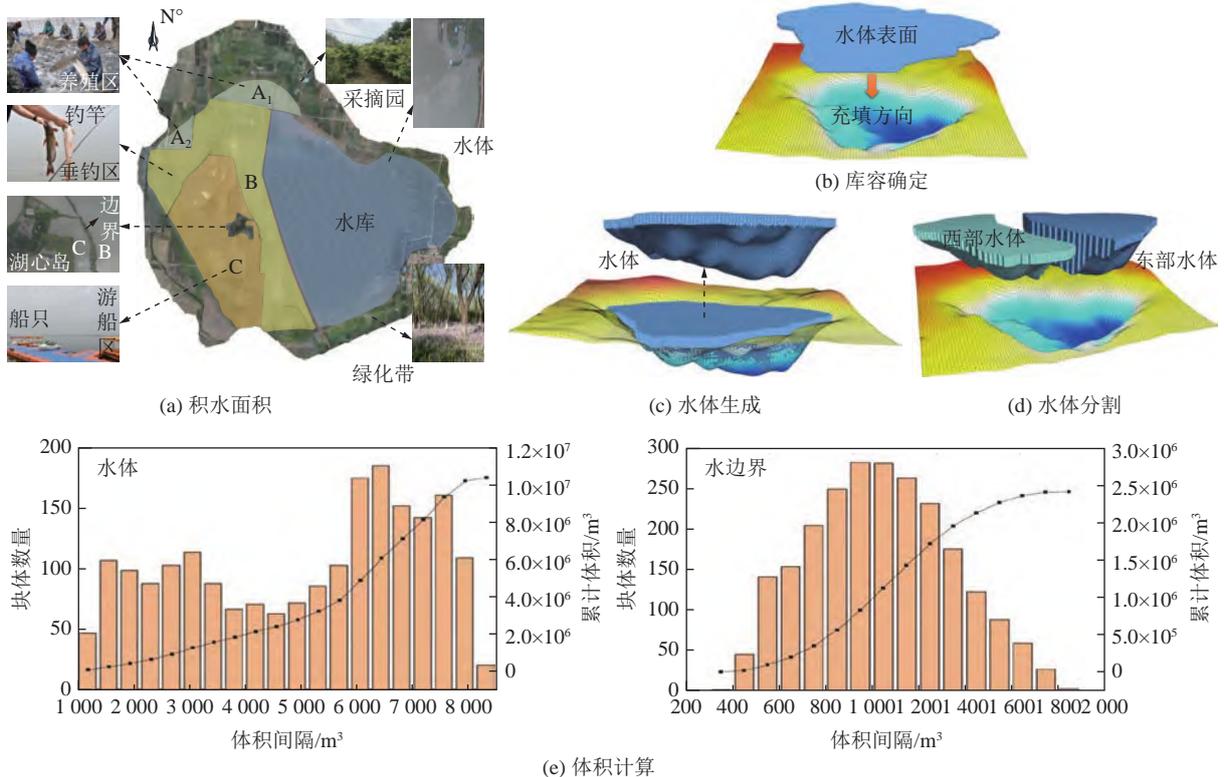


图 14 地表沉陷区积水边界与水体容积计算

Fig.14 Water boundary and water volume calculation in surface subsidence area

4 结语及展望

自钱鸣高院士提出的“砌体梁”理论模型得到国际公认以来,我国岩层运动与控制研究经历 40 年发

展,形成了较系统的理论与技术体系。岩层破断力学模型经历了从“梁”“薄板”到“中厚板”的发展过程,揭示了不同强度参数和几何参数顶板的破断条件和模式。坚硬岩层破断岩块相互咬合形成“砌体

梁”结构,分析了关键块体的S-R稳定条件,从“砌体梁”平衡角度提出了顶板压力计算方法,实现了支架-围岩关系的定量分析。在“砌体梁”理论的基础上,发展了适用于高强度采场的支架-围岩三耦合关系、顶板动载荷模型、支架阻力确定的二元准则等顶板控制方法。为建立采场矿压、岩层运动与地表沉陷的内在联系,钱鸣高院士提出了关键层理论,深入分析了关键层破断对覆岩运动的局部或整体控制作用,并衍生出隔水关键层理论和“O”形圈理论,在采动裂隙分布、采动应力分布、非固态共生资源运移和地表生态保护等方面取得诸多进展,为煤炭绿色开采与科学开采奠定了基础。今后岩层运动与控制理论与技术的进一步发展需要集中到如下5个方面。

1)岩层运动的统一场理论。关键层理论的提出将采场矿压、岩层运动和地表沉陷有机结合起来,为了建立三者之间的定量关系,需在实现岩层运动全程描述的基础上,构建岩层运动的统一场理论,协调统一位移场、裂隙场、应力场和能量场之间的关系。从位移场角度提出基于岩层运动模式的地表沉陷预测技术;从裂隙场角度研究岩层内部地下水和煤层气运移规律与控制技术;从裂隙场和应力场角度分析采场围岩的多种破坏现象;从应力场与能量场角度分析岩层运动引起的各类动力灾害产生机理与防控技术。研究过程中要考虑覆岩中气-固-液多场耦合作用对矿山压力现象的影响。岩层运动统一场理论模型的构建可实现岩层运动与开采引起的各类矿山压力现象的定量关系,服务地下煤炭资源真正实现科学开采。

2)基于采动岩层控制的减损与灾害防治技术。岩层运动是煤矿各类灾害与采动损害的根源。近场采动裂隙发育导致采场煤壁破坏、顶板失稳等各类围岩失稳现象,远场采动裂隙发育引发地下水和煤层气的运移,甚至破坏地表连续性。此外,岩层剧烈运动引起的动载冲击效应与超前采动应力场相互叠加,容易诱发冲击矿压、煤与瓦斯突出等动力灾害。为从源头实现对矿井灾害的防治,需要从岩层控制角度揭示致灾机理和灾变条件。在充分掌握岩层运动规律的基础上,将岩层运动模式和运动程度控制在工程允许的范围内,避免矿井灾害的发生,形成基于采动岩层控制的灾害防治技术体系和基于岩层运动规律的高效低成本的减损开采技术。

3)特殊赋存条件岩层控制技术。我国煤层赋存条件复杂多变,随着复杂难采煤炭资源开发提上日程,需要进一步揭示复杂难采工作面覆岩运动模式,

提出适用于该类工作面的岩层控制技术。当前坚硬顶板厚煤层、大倾角厚煤层、近直立巨厚煤层和深埋薄基岩厚煤层均进入开发阶段,特殊赋存条件导致采场矿压显现呈现出一系列新特点。目前提出了坚硬顶板井下预裂和地表压裂控制技术,大倾角工作面的R-S-F系统模型,近直立巨厚煤层分段综放开采顶板倾倒-滑塌模型,深埋薄基岩采场厚冲积层冒落拱与拱脚高耸岩梁复合承载结构模型等^[54,71-72]。但是特殊赋存条件采场岩层运动与控制研究相对独立。将来应加大该方向研究力度,完善岩层运动与控制理论。

4)岩层运动全程可视化技术。岩层运动与控制研究的高难度性归根结底于岩层内部运动过程的不可视性,因此,岩层运动问题最初被定义为“黑箱”问题。“砌体梁”结构模型与关键层理论的提出一定程度上揭开了岩层运动过程的神秘面纱。上述理论模型的构建基于大量假设性简化,从而实现对岩层破断前后所处状态的拟合性描述。为进一步实现对岩层运动轨迹的预测,今后研究中,应借助多种地球物理探测手段,实现岩层运动全程的可视化。岩层运动可视化技术的形成将彻底改变当前对各类矿压显现的机理性描述现状,真正从定量层面分析岩层运动过程,极大提高岩层控制效率。

5)智能化岩层控制技术。近几年智能开采技术快速发展,智能矿山建设势在必行。当前智能矿山建设的重点是智能矿山框架顶层设计、指标体系的确定、智能设备研制、开采数据的快速传输等方面。开采设备尺寸和稳定性提升,对岩层运动的控制能力增强。但是,开采设备处于围岩形成的开采空间,工作环境的优劣取决于岩层控制效果。将来应实现岩层运动信息的实时动态和多源异构感知,掌握岩层运动位态,并利用虚拟现实技术对岩层运动进程进行模型重构。根据岩层运动位态和控制目标快速搜索岩层控制方法并反馈给采场设备,对设备工况和姿态做出及时调整。借助先进物理信息系统实现岩层运动信息、开采环境的快速感知和开采设备的自适应控制,最后提出智能开采参数和工艺,完成岩层智能控制闭环^[73]。

参考文献(References):

- [1] QIAN Minggao. A study of the behaviour of overlying strata in longwall mining and its application to strata control[C]//Proceedings of the Symposium on Strata Mechanics, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982: 13-17.
- [2] 王家臣. 基于采动岩层控制的煤炭科学开采[J]. 采矿与岩层控

- 制工程学报, 2019, 1(2): 40-47.
- WANG Jiachen. Sustainable coal mining based on mining ground control[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2019, 1(2): 40-47.
- [3] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [4] 钱鸣高. 采场上覆岩层岩体结构模型及其应用[J]. 中国矿业学院学报, 1982, 5(2): 6-16.
- QIAN Minggao. A structural model of overlying strata in longwall workings and its application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1982, 5(2): 6-16.
- [5] 钱鸣高, 李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. 煤炭学报, 1982, 7(2): 1-12.
- QIAN Minggao, LI Hongchang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1982, 7(2): 1-12.
- [6] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994, 12(6): 557-563.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian. Analysis of key block in the structure of voussoir beam in longwall mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 1994, 12(6): 557-563.
- [7] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 5(2): 97-106.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining[J]. *Journal of Mining and Strata Control*, 1995, 5(2): 97-106.
- [8] 钱鸣高, 张顶立, 黎良杰, 等. 砌体梁的“S-R”稳定及其应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 1994, 9(3): 6-11, 80.
- QIAN Minggao, ZHANG Dingli, LI Liangjie, *et al.* “S-R” stability for the voussoir beam and its application[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1994, 9(3): 6-11, 80.
- [9] 钱鸣高. 老顶的初次断裂步距[J]. 矿山压力, 1987, 4(1): 1-6, 64.
- QIAN Minggao. First fracture length of main roof[J]. *Mine pressure*, 1987, 4(1): 1-6, 64.
- [10] 钱鸣高, 赵国景. 老顶断裂前后的矿山压力变化[J]. 中国矿业学院学报, 1986, 8(4): 14-22.
- QIAN Minggao, ZHAO Guojing. The influence of the fracture of the main roof on the mining ground pressure[J]. *Journal of China Institute of Mining & Technology*, 1986, 8(4): 14-22.
- [11] 付国彬, 钱鸣高. 利用顶板扰动进行矿压监测预报的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1990, 8(4): 4-10.
- FU Guobin, QIAN Minggao. Application of the roof disturbance to the monitor and prediction of the underground pressure[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1990, 8(4): 4-10.
- [12] 钱鸣高, 朱德仁, 王作棠. 老顶岩层断裂型式及对工作面来压的影响[J]. 中国矿业学院学报, 1986, 5(2): 12-21.
- QIAN Minggao, ZHU Deren, WANG Zuotang. The fracture types of main roof and their effects on roof pressure in coal face[J]. *Journal of China Institute of Mining & Technology*, 1986, 5(2): 12-21.
- [13] ZHU D R, QIAN M G. Structure and stability of main roof after its fracture[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1990: 25-34.
- [14] 钱鸣高, 刘双跃, 殷建生. 综采工作面支架与围岩相互作用关系的研究[J]. 矿山压力, 1989, 7(2): 1-8.
- QIAN Minggao, LIU Shuangyue, YIN Jiansheng. Study on interaction relationship between powered support and surrounding rock in fully-mechanized coal mining face[J]. *Mine Pressure*, 1989, 7(2): 1-8.
- [15] 钱鸣高, 缪协兴. 采场矿山压力理论研究的新进展[J]. 矿山压力与顶板管理, 1996, 6(2): 17-20, 72.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing. New progress in the theoretical research of stope mine pressure[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1996, 6(2): 17-20, 72.
- [16] 钱鸣高, 何富连, 王作棠, 等. 再论采场矿山压力理论[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 9(3): 1-9.
- QIAN Minggao, HE Fulian, WANG Zuotang, *et al.* A further discussion on the theory of the strata behaviors in longwall mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 9(3): 1-9.
- [17] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连, 等. 采场支架与围岩耦合作用机理研究[J]. 煤炭学报, 1996, 2(1): 40-44.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian, *et al.* Mechanism of coupling effect between supports in the workings and the rocks[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 2(1): 40-44.
- [18] 缪协兴, 钱鸣高. 综放采场围岩—支架整体力学模型及分析[J]. 煤, 1998, 12(6): 1-5.
- MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Surrounding rock-powered support overall mechanical model and analysis in fully-mechanized top coal caving mining face[J]. *Coal*, 1998, 12(6): 1-5.
- [19] 曹胜根, 钱鸣高, 刘长友, 等. 采场支架-围岩关系新研究[J]. 煤炭学报, 1998, 12(6): 17-21.
- CAO Shenggen, QIAN Minggao, LIU Changyou, *et al.* New research about support and surrounding rock relationship in working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 12(6): 17-21.
- [20] 张顶立, 钱鸣高. 综放工作面围岩结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 8(4): 27-33.
- ZHANG Dingli, QIAN Minggao. Theoretical analysis of surrounding rock structure in longwall sub-level caving mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 8(4): 27-33.
- [21] 缪协兴, 钱鸣高. 采场围岩整体结构与砌体梁力学模型[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12(Z1): 3-12, 197.
- MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Solid structure and model of voussoir beam of face surrounding rock[J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 1995, 12(Z1): 3-12, 197.
- [22] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 6(3): 2-7.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 6(3): 2-7.
- [23] 缪协兴, 钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 1(1): 25-29.
- MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Advance in the key strata theory of mining rockmass[J]. *Journal of China University of Min-*

- ing & Technology, 2000, 1(1): 25-29.
- [24] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 9(5): 21-25.
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 9(5): 21-25.
- [25] 缪协兴, 陈荣华, 浦海, 等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 4(8): 1289-1295.
MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, PU Hai. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 4(8): 1289-1295.
- [26] 钱鸣高, 茅献彪, 缪协兴. 采场覆岩中关键层上载荷的变化规律[J]. 煤炭学报, 1998, 4(2): 25-29.
QIAN Minggao, MAO Xianbiao, MIAO Xiexing. Variation of loads on the key layer of the overlying strata above the workings[J]. China University of Mining and Technology, 1998, 4(2): 25-29.
- [27] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采动覆岩中关键层的破断规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 3(1): 41-44.
MAO Xianbiao, MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Study on broken laws of key strata in mining overlying strata[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 3(1): 41-44.
- [28] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 软岩层厚度对关键层上载荷与支承压力的影响[J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 12(Z1): 4-6, 233.
MAO Xianbiao, MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Influence of soft interlayer on load exerted on key stratum and abutment pressure[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1997, 12(Z1): 4-6, 233.
- [29] 茅献彪, 缪协兴, 钱鸣高. 采动覆岩中复合关键层的断裂跨距计算[J]. 岩土力学, 1999, 6(2): 1-4.
MAO Xianbiao, MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Calculation for fracture span of compound key strata in mining rocks[J]. Chinese Journal of Rock, 1999, 6(2): 1-4.
- [30] 缪协兴, 茅献彪, 钱鸣高. 采动覆岩中关键层的复合效应分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 12(Z1): 19-21, 25.
MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, QIAN Minggao. The analysis of complex effect of key stratum in overlying strata within mining influence[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 12(Z1): 19-21, 25.
- [31] 钱鸣高, 许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 10(5): 20-23.
QIAN Minggao, XU Jialin. Study on the “O shape” circle distribution characteristics of mining induced fractures in the overlying strata[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 10(5): 20-23.
- [32] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 6(6): 561-564.
MIAO Xiexing, CHEN Ronghua, BAI Haibo. Fundamental concepts and mechanical analysis of water-resisting key strata in water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 6(6): 561-564.
- [33] 许家林, 钱鸣高. 关键层运动对覆岩及地表移动影响的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 4(2): 122-126.
XU Jialin, QIAN Minggao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. China University of Mining and Technology, 2000, 4(2): 122-126.
- [34] 许家林, 钱鸣高, 朱卫兵. 覆岩主关键层对地表下沉动态的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 3(5): 787-791.
XU Jialin, QIAN Minggao, ZHU Weibing. Study on influences of primary key stratum on surface dynamic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 3(5): 787-791.
- [35] 王国法, 庞义辉, 李明忠, 等. 超大采高工作面液压支架与围岩耦合作用关系[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 518-526.
WANG Guofa, PANG Yihui, LI Mingzhong, et al. Hydraulic support and coal wall coupling relationship in ultra large height mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 518-526.
- [36] 王国法. 工作面支护与液压支架技术理论体系[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1593-1601.
WANG Guofa. Theory system of working face support system and hydraulic roof support technology[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1593-1601.
- [37] 王国法, 庞义辉. 液压支架与围岩耦合关系及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 30-34.
WANG Guofa, PANG Yihui. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 30-34.
- [38] WANG J C, YANG S L, LI Y, et al. A dynamic method to determine the supports capacity in longwall coal mining[J]. International Journal of Mining Reclamation and Environment, 2015, 29(4): 277-288.
- [39] 王家臣, 王兆会. 高强度开采工作面顶板动载冲击效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3987-3997.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Impact effect of dynamic load induced by roof in high-intensity mining face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3987-3997.
- [40] 王家臣, 王兆会. 浅埋薄基岩高强度开采工作面初次来压基本顶结构稳定性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 175-181.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Stability of main roof structure during the first weighting in shallow high-intensity mining face with thin bedrock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2): 175-181.
- [41] 杨胜利, 王兆会, 吕华永. 大采高采场周期来压顶板结构稳定性及动载效应分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 315-322.
YANG Shengli, WANG Zhaohui, LYU Huayong. Analysis of structure stability of main roof and dynamic loading effect during periodic weighting in a large mining height stope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 315-322.
- [42] 王家臣, 王蕾, 郭尧. 基于顶板与煤壁控制的支架阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1619-1624.
WANG Jiachen, WANG Lei, GUO Yao. Determining the support capacity based on roof and coal wall control[J]. Journal of

- China Coal Society, 2014, 39(8): 1619–1624.
- [43] WANG J C, WANG Z H. Systematic principles of surrounding rock control in longwall mining within thick coal seams[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(1): 65–71.
- [44] 杨胜利, 王家臣, 李良晖. 基于中厚板理论的关键岩层变形及破碎特征研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2718–2727.
YANG Shengli, WANG Jiachen, LI Lianghui. Deformation and fracture characteristics of key strata based on the medium thick plate theory[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2718–2727.
- [45] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 深井超长工作面基本顶分区破碎模型与支架阻力分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 54–63.
WANG Jiachen, YANG Shengli, YANG Baogui, *et al.* Roof sub-regional fracturing and support resistance distribution in deep longwall face with ultra-large length[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 54–63.
- [46] 王国法, 张金虎, 徐亚军, 等. 深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 763–773.
WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, *et al.* Supporting stress characteristics and zonal cooperative control technology of long working face in deep thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 763–773.
- [47] WANG Zhaohui, YANG Shengli, TANG Yuesong, *et al.* A stress rotation based method for improving roof stability of a deep longwall panel [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, in press.
- [48] 王家臣, 张 剑, 姬刘亭, 等. “两硬”条件大采高综采老顶初次垮落力学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 5037–5042.
WANG Jiachen, ZHANG Jian, JI Liuting, *et al.* Study on mechanics model of the first cave in main roof for the large cutting height fully mechanized mining under the two hard conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5037–5042.
- [49] 许家林, 朱卫兵, 鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1625–1634.
XU Jialin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1625–1634.
- [50] 朱卫兵, 许家林, 鞠金峰. 浅埋煤层开采压架机理及防治[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [51] 于 斌, 杨敬轩, 高 瑞. 大同矿区双系煤层开采远现场协同控顶机理与技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 486–493.
YU Bin, YANG Jingxuan, GAO Rui. Mechanism and technology of roof collaborative controlling in the process of Jurassic and Carboniferous coal mining in Datong mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 486–493.
- [52] 于 斌, 高 瑞, 孟祥斌, 等. 大空间远现场结构失稳矿压作用与控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1134–1145.
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, *et al.* Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134–1145.
- [53] 王家臣, 王兆会, 唐岳松, 等. 深埋弱胶结薄基岩厚煤层开采顶板动载冲击效应产生机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2377–2391.
WANG Jiachen, WANG Zhaohui, TANG Yuesong, *et al.* Experimental study on mining-induced dynamic impact effect of main roofs in deeply buried thick coal seams with weakly consolidated thin bed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2377–2391.
- [54] 王兆会, 唐岳松, 李 猛, 等. 深埋薄基岩采场覆岩冒落拱与拱脚高耸岩梁复合承载结构形成机理与应用研究[J]. 煤炭学报, 2022: 1–12.
WANG Zhaohui, TANG Yuesong, LI Meng, *et al.* Development and application of overburden structure composed of caving arch and towering roof beam in deep longwall panel with thin bed-rock[J]. Journal of China Coal Society, 2022: 1–12.
- [55] 许家林, 钱鸣高, 金宏伟. 岩层移动离层演化规律及其应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 10(5): 632–636.
XU Jialin, QIAN Minggao, JIN Hongwei. Study and application of bed separation distribution and development in the process of strata movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 10(5): 632–636.
- [56] 许家林, 钱鸣高. 岩层采动裂隙分布在绿色开采中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 3(2): 17–20, 25.
XU Jialin, QIAN Minggao. Study and application of mining-induced fracture distribution in green mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 3(2): 17–20, 25.
- [57] 许家林, 秦 伟, 陈晓军, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应的影响因素[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 115–127.
XU Jialin, QIN Wei, CHEN Xiaojun, *et al.* Influencing factors of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 115–127.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 王家臣, 王兆会. 综放开采顶煤裂隙扩展的应力驱动机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2376–2388.

- WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Propagating mechanism of top-coal fracture in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2376-2388.
- [62] 王家臣,王兆会.综放开采顶煤在加卸载复合作用下的破坏机理[J].同煤科技,2017,6(3):1-8.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui. Failure mechanism of fully mechanized top-coal caving mining under the composite effect of loading and unloading[J]. Science and Technology of Datong Coal Mining Administration, 2017, 6(3): 1-8.
- [63] 王家臣,王兆会,杨杰,等.千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用[J].煤炭学报,2020,45(3):876-888.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui, YANG Jie, *et al.* Mining-induced stress rotation and its application in longwall face with large length in kilometer deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 876-888.
- [64] 王兆会,孙文超,水艳婷,等.千米深井超长工作面采动应力旋转轨迹及其推进方向效应[J].煤炭学报,2022,47(2):634-650.
- WANG Zhaohui, SUN Wenchao, SHUI Yanting, *et al.* Mining-induced stress rotation trace and its sensitivity to face advance direction in kilometer deep longwall panel with large face length[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 634-650.
- [65] 李树刚,钱鸣高,石平五.综放开采覆岩离层裂隙变化及空隙渗流特性研究[J].岩石力学与工程学报,2000,10(5):604-607.
- LI Shugang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Study on bed separated fissures of overlying stratum and interstice permeability in fully-mechanized top coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 10(5): 604-607.
- [66] 缪协兴,王安,孙亚军,等.干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):217-227.
- MIAO Xiexing, WANG An, SUN Yajun, *et al.* Research on basic theory of mining with water resources protection and its application to arid and semi-arid mining areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 217-227.
- [67] 许家林,连国明,朱卫兵,等.深部开采覆岩关键层对地表沉降的影响[J].煤炭学报,2007,7(7):686-690.
- XU Jialin, LIAN Guoming, ZHU Weibing, *et al.* Influence of the key strata in deep mining to mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 7(7): 686-690.
- [68] 刘辉,朱晓峻,程桦,等.高潜水位采煤沉陷区人居环境与生态重构关键技术:以安徽淮北绿金湖为例[J].煤炭学报,2021,46(12):4021-4032.
- LIU Hui, ZHU Xiaojun, CHENG Hua, *et al.* Key technology of human environment and ecological reconstruction in high submersible level coal mining subsidence area: A case study from Lujin Lake, Huaibei[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 4021-4032.
- [69] 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,2003,7(4):5-10.
- QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 7(4): 5-10.
- [70] 钱鸣高.煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2010,35(4):529-534.
- QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [71] 伍永平,负东风,解盘石,等.大倾角煤层长壁综采:进展、实践、科学问题[J].煤炭学报,2020,45(1):24-34.
- WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi. Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 24-34.
- [72] 王家臣,杨胜利,李良晖.急倾斜煤层水平分段综放顶板“倾倒-滑塌”破坏模式[J].中国矿业大学学报,2018,47(6):1175-1184.
- WANG Jiachen, YANG Shengli, LI Lianghui. Toppling-slumping failure mode in horizontal sublevel top-coal caving face in steeply-inclined seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(6): 1175-1184.
- [73] 杨胜利,王家臣,李明.煤矿采场围岩智能控制技术路径与设想[J].矿业科学学报,2022,7(4):403-416.
- YANG Shengli, WANG Jiachen, LI Ming. Technology path and assumptions of intelligent surrounding rock control at longwall working face[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(4): 403-416.