

# 岩层控制的全柱状学术思想与实践

许家林<sup>1,2</sup>, 朱卫兵<sup>2</sup>, 轩大洋<sup>2</sup>, 王晓振<sup>2</sup>, 秦伟<sup>1</sup>, 金洪伟<sup>3,4</sup>, 鞠金峰<sup>5,6</sup>, 胡国忠<sup>2</sup>, 谢建林<sup>1</sup>, 屈庆栋<sup>7</sup>,  
吴仁伦<sup>8</sup>, 汪锋<sup>9</sup>, 何昌春<sup>10</sup>, 李竹<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 5. 中国矿业大学 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008; 6. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 7. 澳大利亚联邦科学与工业研究组织可持续采矿技术研究所, 澳大利亚 昆士兰 4069; 8. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业工程学院, 北京 100083; 9. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 10. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 岩层控制是通过控制采动岩层破断运动来减轻或消除采动损害的一门科学, 目的是为了保障煤炭安全、高效、绿色开采。传统岩层控制研究思想与方法存在2方面局限: 对覆岩进行均化而不能抓住主要矛盾, 仅关注局部岩层运动而缺乏对全地层覆岩运动的研究。针对这些问题, 在关键层理论应用研究过程中, 形成了岩层控制的“全柱状”学术思想, 其内涵包括2方面: 一是“抓主要矛盾”, 找到对岩层运动起主要控制作用的关键层(即主要矛盾), 避免对覆岩均化处理。二是“关注全局”, 将采动覆岩作为整体研究, 充分考虑关键层所处的复杂地层场景条件可能对关键层破断的影响, 从整个岩层移动角度研究矿压显现、水与瓦斯运移、开采沉陷等。按照全柱状学术思想研究岩层控制时, 首先需要获取研究区域内不同开采尺度(矿井、采区、工作面及块段)地层的钻孔“全柱状”, 即包含从开采煤层直到地表所有岩层信息的全取心完整柱状, 根据研究区域内多个钻孔柱状的关键层判别, 形成研究区域内岩层赋存特征的整体画像, 避免仅采用局部柱状或综合柱状, 也不能对全柱状进行均化处理。充分考虑原岩应力、地质构造、地形地貌、水体载荷、开采部署等多种具体场景因素可能导致的关键层受载差异与破断异常, 以及不同区域柱状关键层位置的变化可能对岩层运动产生的影响。在此基础上, 建立关键层运动与各种采动损害的联系, 据此分析问题发生机理并提出针对性的岩层控制方法。全柱状学术思想推进了岩层控制理论发展与实践创新, 解决了压架、突水、沉陷等灾害防控的系列工程难题, 取得了显著成效。利用全柱状学术思想取得的岩层控制理论创新主要包括: 揭示了采动覆岩卸荷膨胀累积效应, 建立了采动覆岩“关键层-松散层拱”结构模型, 提出了基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法, 建立了基于关键层结构的地表沉陷预计方法, 为工程应用奠定了基础。全柱状学术思想在工程应用方面的典型实例包括: 找出了浅埋煤层沟谷上坡段、松散承压含水层下等特定条件下开采压架的根本原因, 彻底解决了压架防治工程难题; 量化关键层位置对“导高”的影响, 解决了顶板异常突水防治难题; 提出了煤层群卸压瓦斯的“三带”分布, 指导了卸压瓦斯抽采实践; 研发了覆岩隔离注浆充填技术, 创建了地面钻孔一注式高效充填绿色开采新模式, 解决了地表沉陷控制等难题, 已得到全面推广应用。

**关键词:** 全柱状; 关键层; 卸荷膨胀累积效应; 岩层控制; 绿色开采

**中图分类号:** TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0166-14

收稿日期: 2024-11-29 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1479

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A20169, 52374143, 42477497)

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

引用格式: 许家林, 朱卫兵, 轩大洋, 等. 岩层控制的全柱状学术思想与实践[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 166-179.

XU Jialin, ZHU Weibing, XUAN Dayang, et al. Thought of full-stratigraphy and its practice in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 166-179.



移动阅读

## Thought of full-stratigraphy and its practice in ground control

XU Jialin<sup>1,2</sup>, ZHU Weibing<sup>2</sup>, XUAN Dayang<sup>2</sup>, WANG Xiaozhen<sup>2</sup>, QIN Wei<sup>1</sup>, JIN Hongwei<sup>3,4</sup>, JU Jinfeng<sup>5,6</sup>,  
HU Guozhong<sup>2</sup>, XIE Jianlin<sup>1</sup>, QU Qingdong<sup>7</sup>, WU Renlun<sup>8</sup>, WANG feng<sup>9</sup>, HE Changchun<sup>10</sup>, LI Zhu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 4. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention of the Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 5. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Internet Application Technology on Mine, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 6. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 7. CSIRO Sustainable Mining Technologies, Queensland 4069, Australia; 8. College of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 9. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 10. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Ground control is a science of mitigating or eliminating mining damage by controlling the breaking motion of mining rock strata, with the aim of ensuring safe, efficient and green mining. There are two limitations in the traditional thoughts and methods of ground control research: only studying the local rock movement instead of the overall movement of the overlying rocks in the whole stratum, and homogenizing the overlying rocks instead of grasping the main contradictions. In view of these problems, in the process of key stratum theory research and engineering application, the ‘full-stratigraphy’ thought of ground control has been formed, whose basic connotation is as follows: firstly, ‘grasping the main contradiction’, to find the key stratum (i.e. the main contradiction) that plays a major role in controlling the overburden movement without homogenizing the overlying rocks. Secondly, it is ‘overall view’, which takes the overburden as a global object, considers all the factors that may have a significant impact on the breakage and instability of the key stratum from a global view, and analyses the manifestation of mining pressure, water and gas transport, and surface subsidence from the point of view of the whole activity of the overburden movement. According to the basic connotation of the thought of full-stratigraphy, when carrying out ground control research, it is necessary to collect full-stratigraphy data and key stratum discrimination studies within different mining scales (mine, mining area, workings and blocks), the complete coring columnar that contains all the information of the rock strata from the vicinity under the mined coal seam all the way to the surface, and then form an overall portrait of the rock stratum endowment characteristics in the research area through the comparison of the columnar of multiple drill holes. The comparison of multiple drill hole columns will form an overall picture of the characteristics of the rock strata in the study area, rather than using only partial columns or comprehensive columns, or homogenizing the whole column. It is necessary to consider the possible effects of changes in the location of the columns and key stratum in different regions on the movement of the rock layer. Secondly, it is also necessary to fully consider the original rock stress, geological structure, topography, water load, mining deployment and so on, which may lead to abnormal loads on the key stratum and its breakage. On this basis, the relation between key stratum movement and various mining engineering phenomena or disasters is established, based on which the mechanism of the problem is analyzed and the targeted rock control methods are put forward. The full-stratigraphy thought has promoted the theoretical development and practical innovation of ground control, solved a series of engineering problems of disaster prevention and control such as supports crushing, water-inrush, subsidence, etc., and achieved remarkable results. The main innovations in the theory of rock stratum control achieved by using the full-stratigraphy thought include revealing the accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief, establishing a structural model of ‘key stratum - loose stratum arch’ of the mining overburden, proposing a new method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key stratum, and initially establishing a method for estimating the surface subsidence based on the structure of key stratum, and so on. It lays a foundation for engineering application. Typical examples of the full-stratigraphy thought in engineering application include: finding out the root cause of pressurized racking in the uphill section of shallow buried coal seam gully and mining under unconsolidated confined aquifer, completely solving the engineering problems of pressurized racking prevention and control; quantifying the influence of the location of the key stratum on the ‘water flowing

fracture height', solving the problems of preventing and controlling the abnormal water breakout of the roof; proposing the 'three-zone' distribution of the unloaded gas in coal seam, which has guided the practice of unloaded gas extraction; it has developed isolated overburden grout injection and filling technology, and created a new mode of ground drilling and one-injection high-efficiency filling and green mining, which has solved the problems of surface subsidence control, and has been comprehensively popularized and applied.

**Key words:** full-stratigraphy; key stratum; accumulative effect of overburden strata expansion; ground control; green mining

## 0 引 言

煤炭开采可能引发一系列采动损害与环境问题,如各种顶板事故、地下水漏失与突水事故、瓦斯卸压涌出、地表沉陷等,开采造成的岩层移动和破断是这些问题的根源。为了保障煤炭安全、高效、绿色开采,必须掌握岩层移动破断规律,并设法加以控制,这就是岩层控制研究的主要内容<sup>[1-3]</sup>。长期以来,研究工作者投入了很大力量从不同角度研究岩层控制,取得了丰硕的成果,较好地促进了该学科的发展。

煤系层状地层往往存在数十上百层岩层,准确的建模和求解存在较大困难,实践中通常进行较大程度的简化,简化思路主要有数学和力学 2 种。数学简化的思路主要是均一化,一般不考虑具体岩层特性,以便能利用函数对岩层移动规律进行分析解答和预测。例如,地表沉陷预计中采用的概率积分法就是典型代表<sup>[4-11]</sup>,该方法是将覆岩视为随机介质,采用概率积分函数求解地表移动,在预计参数选取时,将覆岩类型分为坚硬、中硬、软弱 3 类以确定参数的经验值。再如,在顶板导水裂隙带高度预计中,将覆岩划分为坚硬、中硬、软弱、极软弱等 4 类,基于大量实测统计数据回归建立了对应的经验预计公式<sup>[4]</sup>。数学简化思路对覆岩岩性与结构进行了均化,没有充分体现岩性差异和覆岩结构运动特征,导致一些条件下预计结果误差偏大甚至失真,这在实践中有不少例子。力学简化的思路,一般是将覆岩中的主要承载结构简化为各种形式的拱、梁或板,以便能通过力学解析方法对岩层移动规律进行研究,这些方法常被称为覆岩结构理论。

在各种覆岩结构理论中,钱鸣高院士提出的砌体梁理论阐述清晰、实用性强,充分考虑了影响采场矿压显现的主要因素,并建立了定量分析的力学公式,能很好地解释各种采场矿压现象,被广泛地接受和应用<sup>[1-3]</sup>。在砌体梁理论的基础上,1996 年钱鸣高院士提出了关键层理论<sup>[12-14]</sup>,目的是研究煤层直至地表更大范围内的岩层移动规律和岩层控制方法,试图利用统一模型对各种采矿工程问题做出解释。砌体梁和关键层理论在建模时采用了相似的逻辑,即认为覆岩

中的厚、坚硬的岩层(所谓“骨架”或“关键层”)是覆岩承载主体,与其他岩层相比不容易断裂,因而其断裂时对岩层移动起着主要的控制作用,通过分析关键层的移动和破断就可以揭示岩层移动规律,通过控制关键层的破断就能够进行岩层控制。关键层理论的简化建模方法,逻辑清晰、符合辩证思维,在科学性和易用性之间取得了较好的平衡,近 30 a 来已被煤炭领域的科技人员广泛接受,并被大量地应用于顶板、瓦斯、水、沉陷等领域的现象解释和采动损害防治中<sup>[1-3, 14-16]</sup>。

然而,关键层理论在实际应用过程中,遇到了一些误解和误用,常规思维模式局限于仅分析关键层自身的破断,而没能根据关键层所处的复杂地层场景不同进行针对性研究。例如,在采场压架防治中,仅局限在基本顶关键层破断后的断块运动规律与矿压的关系,很多情况下无法找出压架原因,而将思维拓展到关键层周边的地形、松散层、含水层等多种地层场景条件后,发现其他因素实质控制着关键层破断与结构稳定性,从而对矿压形成影响,这就找到了症结,据此施策后压架防治难题很快迎刃而解。这正是本文所说的“关注全局”思维。也就是说,传统上对关键层理论的认识与应用更多停留在“抓主要矛盾”的层面,虽然做到了科学简化,但忽视了该理论需要同时从“关注全局”角度分析问题。要做到这一点,就不能仅考虑局部范围内的岩层,也不能只考虑整个覆岩内某一层或几层关键层本身,而必须要同时考虑关键层及其赋存地层的整体场景特征。为此,提出关键层理论应用时的“全柱状”学术思想(或称为“全地层”学术思想),以表述这种在“抓主要矛盾”基础上的关注全局思维方法。笔者首先阐述全柱状学术思想的内涵,通过各种实践案例证明该学术思想的必要性和有效性,以期为我国煤矿岩层控制研究提供参考和借鉴。

## 1 全柱状学术思想的内涵

由于传统学科专业划分相对过细偏窄,可能导致各专业对工程实际问题的研究缺乏整体观,影响工程问题的有效解决。譬如,传统上采矿工程专业负责并



下矿压控制方面的研究,水文地质专业负责矿井水防治方面的研究,矿山测量专业负责地表沉陷方面的研究。通常情况下,他们各自的研究与岩层移动规律是相互割裂的。事实上,矿压、突水、沉陷都是因煤层开采后岩层运动引起的,割裂式研究难以探究出问题的本源,进而影响了技术解决方案的有效性。为了更好地解决上述问题,需要建立统一的理论基础,岩层控制的关键层理论正是在此背景下提出的。

随着关键层理论研究的不断深入,发现关键层破断运动规律影响着采动工程现象,但仅局限于关键层自身的破断运动规律有时并不能解释采动工程现象的根本原因,还需要搞清楚关键层破断失稳的原因。事实上,影响关键层破断与结构稳定性的往往是其所赋存的多种地层场景条件,可能来自于更高的垂向(如地形影响)或更远的水平方向(如关键层位置变化影响)。在特定条件下,这些因素会变得异常重要,因此不得不加以考虑。比如:关键层上方所受载荷的不同往往对关键层的破断特征有重要影响;若关键层上方存在松散承压含水层时,含水层会通过水压传递作用将上覆所有地层载荷施加至关键层上,则容易导致关键层发生复合破断,相比其他一般条件的关键层逐层向上破断发展的运动特征差异显著;采动覆岩具有卸荷膨(碎)胀特性,其累积效应可能对关键层受载破断具有重要影响;关键层自身、或其上下方岩层的分布的不连续性也会对其受载破断产生影响,如岩层被节理或断层切割,或部分地层受沟谷地形侵蚀而出现缺失等情况。已有的实践和理论都证明这些情况对关键层的承载与破断规律产生重要影响,进而会导致工作面矿压显现、水和瓦斯运移、地表沉陷特征出现较大异常。

因此,在应用关键层理论进行岩层控制时,需要从2个不同的方面进行辩证思维。一方面,在问题简化时避免对覆岩均化处理,需要“抓主要矛盾”,即找出各个对岩层运动起主要控制作用的关键层,基于对关键层运动和破断的分析,使复杂的岩层控制问题可以被简化建模、分析解决。另一方面,还必须采取“关注全局”的思维,防止问题简化后被简单对待,即应避免忽略关键层周边影响条件而盲目机械地仅对关键层自身进行孤立式力学分析,应该将采动覆岩作为研究整体,充分考虑原岩应力、关键层自身形态、载荷作用形式、开采方式等因素的多样性,从更宏观的视角、更具体的方式分析多种因素对关键层运动和破断的影响,进而揭示工程问题机理并提出针对性防控方法。这种辩证思维逻辑称为关键层理论应用时的全柱状学术思想。

全柱状学术思想和关键层理论并不矛盾,而是基于辩证思维逻辑对关键层理论学术思想所做的更具体、更全面的阐释,是该理论应用中的进一步发展。实际上,关键层理论在建立初期已包含了“关注全局”思维,比如,在关键层理论判别方法中需要煤层上覆直至地表的全部岩层厚度与力学参数,否则难以判别出关键层。只是没有特别地给予强调,也导致在应用过程中出现了一定程度的误解和误用。本文所倡导的全柱状学术思想,实际上更加强调在岩层控制研究中“抓主要矛盾”基础上“关注全局”的重要性,更容易实现矿压、水、瓦斯、沉陷的一体化研究。

根据全柱状学术思想的基本内涵,在进行岩层控制研究时,需要从关注全局的角度考虑所有可能对关键层的判别、破断和失稳造成重大影响的因素。具体来说,首先需要收集各种采动工程现象与数据资料,获取研究区域内覆岩不同开采尺度(矿井、采区、工作面及块段)地层的钻孔完整取心柱状(“全柱状”),即包含从开采煤层直到地表所有岩层信息的全取心完整钻孔柱状,通过多个钻孔柱状的关键层判别,形成研究区域内岩层赋存特征的整体画像,而不能仅采用局部柱状或综合柱状,也不能对全柱状进行均化处理。要充分考虑原岩应力、地质构造、地形地貌、水体载荷、开采部署等因素导致的关键层受载差异与破断异常,还需要考虑不同区域柱状关键层位置的变化可能对岩层运动产生的影响。通过矿压、沉陷、裂隙、水文、瓦斯等工程现象进行关键层理论判别结果的验证,或直接开展内部岩层移动原位监测确定关键层。在此基础上,建立关键层运动与各种采动工程现象或灾害的联系,实现各种采动工程表象的归因溯源。最终,预测评估区域的潜在风险,针对具有致灾风险的区域,从弱化或维护关键层两种不同的控制角度出发,提出针对性预防或控制方法及施工工艺,实现科学靶向、降本增效的岩层控制目的。基于上述全柱状学术思想内涵和已有研究进展构建的全柱状学术思想应用流程如图1所示。

在全柱状学术思想指导下,对岩层移动理论获得了新的认识和进展,并解决了采场压架、突水、沉陷等方面的工程难题。本文后续将列出一些应用全柱状学术思想进行理论研究和工程实践的成功案例,这些案例既是应用全柱状学术思想的结果,也是对全柱状学术思想科学性的证实。

## 2 全柱状学术思想的实践与验证

### 2.1 采动覆岩卸荷膨胀累积效应

采动覆岩破坏为何会形成“三带”(垮落带、裂隙

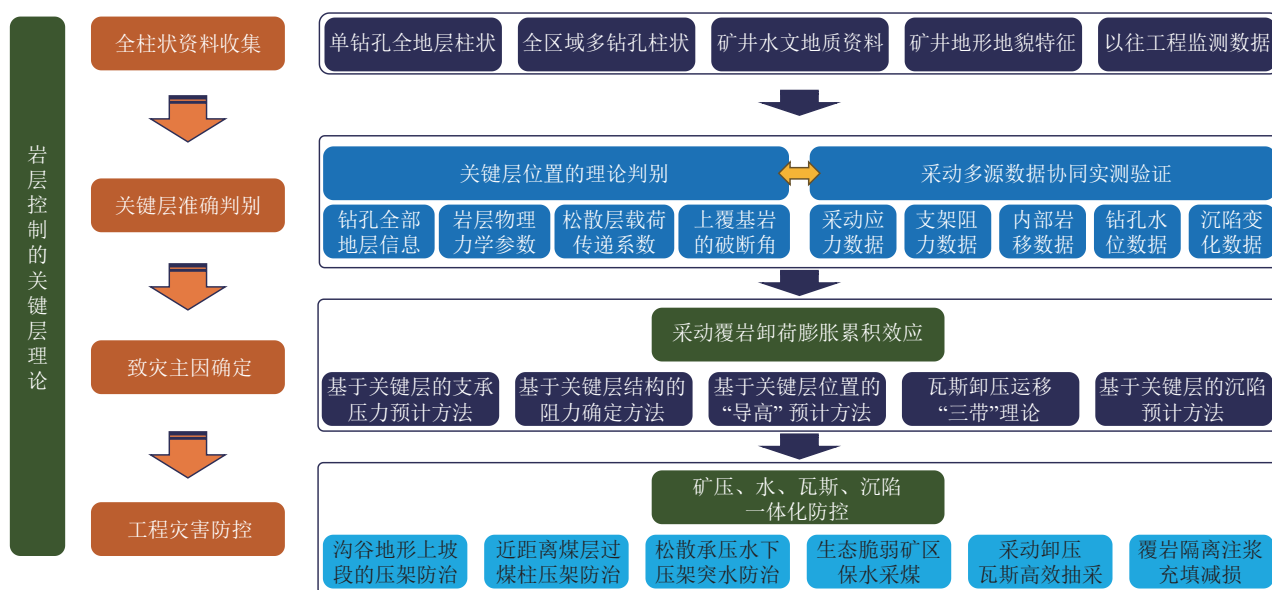


图1 全柱状学术思想的应用流程

Fig.1 Flowchart of application of the thought of full-stratigraphy in ground control

带、弯曲下沉带)? 位于弯曲下沉带的关键层是否发生了断裂? 导水裂隙带高度如何更准确预计? 基于全柱状学术思想揭示的采动覆岩卸荷膨胀累积效应可以对上述问题做出解答。

对于处在煤层上方的第1层关键层(也称基本顶), 其破断和失稳时会受到其下方垮落带岩石碎胀特性的影响。实际上, 对于更上方关键层, 同样受到其下方已破断岩层碎胀效应的影响。众所周知, 岩层卸荷会产生一定程度的膨胀, 单层岩层卸荷膨胀量很小, 但几百米地层的累积膨胀量却不可忽略。从全柱状学术思想来看, 采动覆岩卸荷膨(碎)胀与再压缩是一个受覆岩关键层破断运动控制的动态过程。受关键层结构控制, 上覆岩层由下向上成组破断运动, 关键层破断前, 阻断了上覆载荷向下方岩层的传递, 导致其下方岩层因卸荷而产生膨胀。随着破断关键层层位的不断上升, 覆岩卸荷高度同步增大, 因卸荷而膨

胀的岩层总厚度不断增大; 同时卸荷煤岩也受到已破断关键层载荷的压缩作用, 从而造成覆岩卸荷膨胀总量的不断变化, 直至主关键层破断后沉陷发育至地表而形成残余碎胀。将这种覆岩卸荷膨胀总量随覆岩卸荷高度动态变化的现象定义为采动覆岩卸荷膨胀累积效应<sup>[17]</sup>。这是在以往的岩层移动研究中被忽略的一个非常重要的现象。

将采动覆岩由下往上分为塑性膨胀区、弹性膨胀区和微弱膨胀区(图2), 建立了覆岩卸荷膨胀累积效应模型, 得到了覆岩卸荷膨胀累积量的计算公式和离层量估算公式<sup>[17-18]</sup>。

采动覆岩卸荷膨胀累积效应对采动岩层破断运动规律产生了重要影响<sup>[17-18]</sup>, 如: 卸荷膨胀累积效应对关键层下离层量具有显著的抑制作用, 科学解释了关键层下离层量较小(或未出现离层)的现场探测结果<sup>[17]</sup>。卸荷膨胀累积效应减少了关键层的回转空间

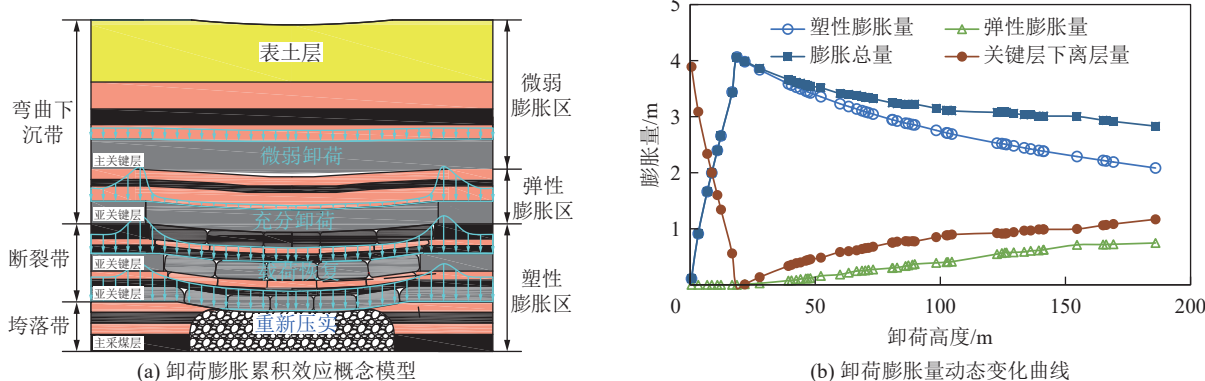


图2 采动覆岩卸荷膨胀累积效应模型及卸荷膨胀量变化规律

Fig.2 Model of accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief and variation rule of expansion



并对关键层受载造成影响,从而影响关键层破裂步距和关键层破裂能否贯穿其厚度,这也是覆岩破坏形成“三带”的原因所在。卸荷膨胀累积效应决定了邻近煤岩层卸荷增透程度,对邻近层卸压瓦斯能否有效抽采起决定性作用。残余卸荷膨胀量将直接决定地表下沉系数,残余卸荷膨胀量越大,地表下沉系数越小,因此,利用卸荷膨胀累积效应可以分析不同开采条件下地表下沉系数的差异。可见,在岩层控制研究中需要高度重视覆岩卸荷膨胀累积效应。

## 2.2 采动覆岩“关键层-松散层拱”结构

在传统岩层移动的试验与模拟研究中,常将研究范围以外的上部岩层(包括松散层)简化为均布载荷施加在模型顶部。从全柱状学术思想来看,该方法忽略了简化范围内的关键层结构对岩层载荷传递的影响,导致所研究岩层的载荷值和破断距与实际不符。这种失真不仅发生在基岩关键层被简化的情况<sup>[19]</sup>,甚至发生在仅将松散层简化为载荷的情况,因为当松散层厚度满足一定条件时,会形成拱结构,从而影响其载荷传递。

事实上,关键层(破断后的砌体梁)是采场上覆基岩中的主要承载结构,采场上覆松散层中的承载结构为松散层拱结构,其形成条件与松散层厚度、工作面宽度及基岩厚度等因素有关。从全柱状学术思想出发,同时考虑基岩关键层结构和松散层拱结构,建立了采动覆岩“关键层-松散层拱”结构的力学模型(图3)<sup>[20-21]</sup>,建立了松散层拱形成的临界松散层厚度判别方法,研究了松散层侧压系数、松散层黏聚力等参数对松散层拱形态的影响,研究了松散层拱对覆岩主关键层破断步距和“砌体梁”结构稳定性的影响,修正了覆岩关键层判别方法中的松散层载荷折减系数。当然在一些特殊条件下,如松散层的底部(基岩顶部)是渗透性和侧向补给能力较强的松散承压含水层,那

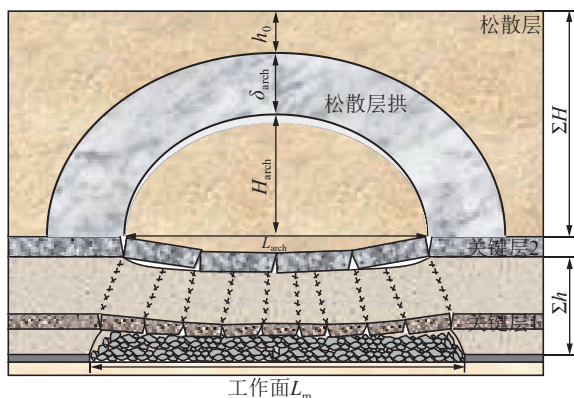


图3 采动覆岩“关键层-松散层拱”结构示意图<sup>[21]</sup>

Fig.3 Diagrammatic sketch of key strata and arch structure in unconsolidated layers<sup>[21]</sup>

么松散层在基岩顶部的成拱特点将发生改变,上部松散层载荷会通过含水层向下部基岩传递,后文将会介绍松散承压含水层下采煤压架突水案例。

## 2.3 基于关键层位置的“导高”预计方法

### 2.3.1 “导高”预计新方法

长期以来,顶板突水防治或保水采煤实践中,“导高”预计常采用《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(简称《规范》)中的统计经验公式<sup>[4, 22]</sup>,它对顶板岩性进行了均化处理,掩盖了关键层的作用,与全柱状学术思想相违背,在特定条件下“导高”预计结果比实际偏小或偏大,从而导致异常顶板突水事故,或机械降低采高防治顶板突水的盲目做法。

根据全柱状学术思想,需要找出对“导高”起控制作用的关键层。事实上,关键层产生拉破坏后必须达到一定回转度才能完全断开,即产生贯通裂缝,并具备导水能力。由于采动覆岩卸荷膨胀累积效应影响,对于煤层上方一定高度关键层而言,其回转受到下方已碎胀岩体的支撑,因回转量受限而无法断开,导水裂隙发育高度由此受阻。这也是采动覆岩破坏为何会形成“三带”的原因。应该指出的是,位于弯曲下沉带的关键层并非不发生破裂,而是发生了破裂但裂隙并没有贯通关键层。

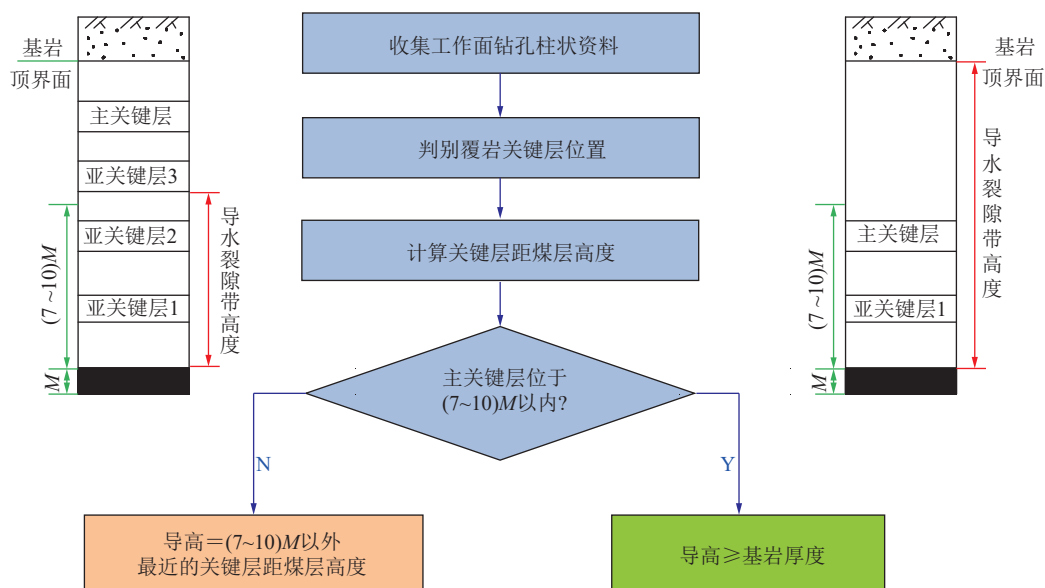
为了确定关键层贯通破裂的临界高度,建立了关键层贯通破断的临界高度模型<sup>[23]</sup>,基于卸荷膨胀累积效应简化计算得到了距煤层7~10倍采高范围内的关键层均能断开,超出10倍采高范围以外的关键层,尽管产生拉破裂,但在关键层厚度方向上破裂裂隙并不能贯通整层关键层,即断不开,意味着导水裂隙发育高度受限。

据此,提出了基于关键层位置的“导高”预计方法(图4)<sup>[23]</sup>。具体步骤为:收集钻孔柱状资料;进行关键层位置判别;计算各关键层距煤层高度;如果主关键层位于7~10倍采高以内,“导高”将发育到基岩顶部;如果主关键层位于7~10倍采高以外,导水裂隙将发育到7~10倍采高以上最近的关键层下部,“导高”等于7~10倍采高以上最近的关键层与煤层距离。

上述预计方法的可靠性已得到多个工程案例的验证<sup>[23-25]</sup>。需要指出,该方法的准确性依赖钻孔岩心编录情况,若岩层取心不完整或分层不准,会导致判别结果失真。

### 2.3.2 新方法的应用

近年来发生的多起顶板异常突水事故,按照传统顶板突水理论难以合理解释。按照全柱状学术思想,考虑覆岩关键层破断特征对“导高”影响,有效指导了

图 4 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法流程<sup>[23]</sup>Fig.4 Discriminant process for height of fractured water-conducting zone by key strata location<sup>[23]</sup>

部分矿井顶板突水防治实践。比如：祁东（参见本文 2.4 节）、补连塔、亭南等煤矿顶板突水防治。下面以补连塔煤矿应用为例进行介绍。

补连塔煤矿四盘区 31401 综采面从切眼推进至 1 650 m 后，工作面涌水量明显增大，顶板周期性出水，最大 400 m<sup>3</sup>/h，期间曾出现 2 次短时间内工作面被淹，造成 2 次 48 h 停产，影响工作面正常生产。

按《规范》中硬岩性“导高”预计公式，预计工作面顶板“导高”小于 55 m，远小于工作面基岩厚度 120~190 m，基岩上部的砂砾岩含水层不应该发生周期性突水，但事实与之相反。在突水区域的“导高”工程探测结果表明<sup>[26]</sup>，“导高”为 140.5~154 m，远大于预计的“导高”，达到基岩上部的砂砾岩含水层，从而引发了工作面突水。

为何工作面在开切眼至 1 650 m 没有突水，而在

1 650~2 550 m 处发生突水？排除含水层与构造因素后，按照全柱状学术思想和基于关键层位置的“导高”预计方法，对此作出了合理解释。对比工作面发生突水区域与没有突水区域的柱状图（图 5），发现覆岩关键层位置是有差别的。发生突水的区域，最上面的一层关键层（主关键层）距离煤层较近，间距仅为 33 m。没发生突水的区域主关键层距煤层较远，间距高达 95 m。覆岩主关键层位置距离开采煤层较近（小于 10 倍采高），是引起顶板“导高”沟通砂砾岩含水层的原因。

为了对 31401 工作面后续开采段及整个四盘区顶板突水进行防治，首先根据四盘区覆岩主关键层的位置变化，对可能发生顶板突水的区域进行判别。由于盘区取心柱状偏少，专门补打 20 个取心钻孔。同时，开展了钻孔内部岩移观测<sup>[27]</sup>，验证关键层判别结

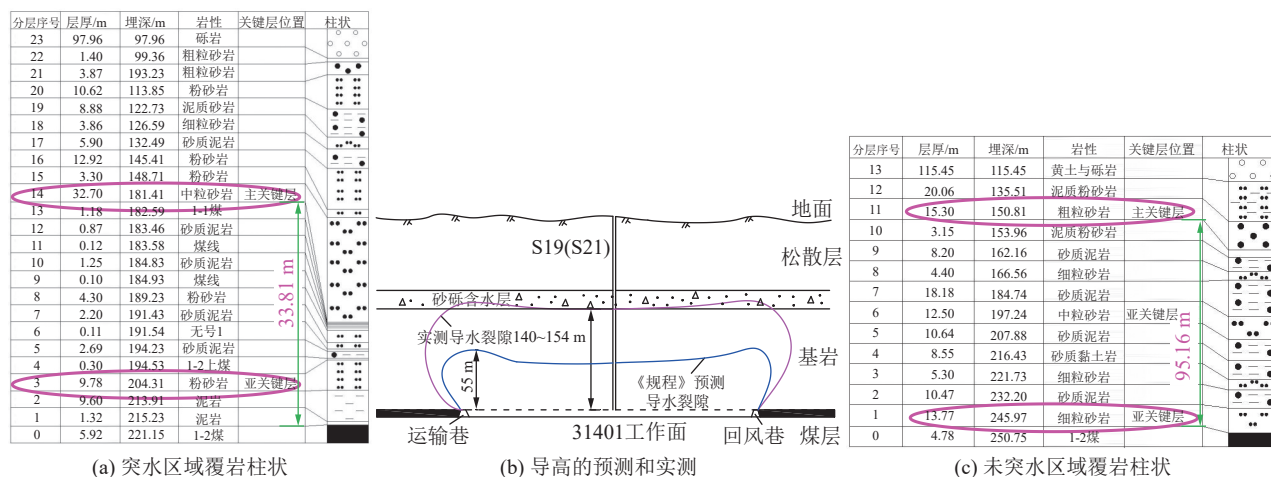


图 5 不同区域主关键层位置与“导高”实测结果

Fig.5 Primary key strata location and measured result of fractured water-conducting zone in different regions

果。在此基础上,找出了主关键层距离煤层高度在 10 倍采高以下的钻孔(即此类钻孔对应的区域“导高”发育到基岩顶部),根据这些钻孔圈出了突水危险区域<sup>[26]</sup>。根据预测结果发现,31401 工作面推进到 2 550 m 后就会采过突水危险区,往后直至终采线将不会再发生突水事故。鉴于此,取消了原计划停采搬家方案,即进行跳采,留设一定宽度的煤柱后重开切眼,更换为小采高支架限厚开采 31401 工作面剩余煤量,以避免顶板突水问题。31401 工作面后续推采过程中没有发生一次顶板突水,安全回采通过 3 个顶板富水区,保证了工作面的正常回采,产生了显著的经济和社会效益。

基于关键层位置的“导高”预计方法也在卸压瓦斯抽采(参见 2.6 节)、覆岩隔离注浆充填(参见 2.8 节)等绿色开采实践中得到应用。

### 2.3.3 新方法的意义

按关键层位置预计的“导高”随采高增大并非连续增加,受关键层位置影响,“导高”随采高增加呈现近似台阶式变化(图 6b),一定采高范围内“导高”是没有变化的。以亭南矿二盘区 ZK9-1 柱状为例(图 6),当采厚在 3~7 m 变化时,“导高”均发育至 17.1 m 粗砂岩亚关键层底界(与煤层间距 71.9 m),“导高”为 71.9 m,不随采高变化。当采厚增大至 7.5 m~14.5 m 时,“导高”均发育至厚度 31.4 m 的粗砾岩亚关键层的底界面(与煤层间距 147.4 m),“导高”为 147.4 m,也不随采高变化。上述结论得到了“导高”实测结果

的验证<sup>[25]</sup>。可见,综放工作面采高 7.5 m~14.5 m “导高”都是 147.4 m,都没有沟通洛河组含水层,因此,可以将实际采厚由 7.5 m 大幅增加但不超过 14.5 m。上述研究成果在亭南煤矿四盘区开采中得到应用,提高了煤层采出率和综放开采效率。

新的“导高”预计方法创新指出了“导高”随采高增加而连续增大的传统认识误区,并提供了科学计算的解决路径。工程中采用限厚开采防治顶板突水(保水)措施,受关键层位置影响,限厚在一定范围内“导高”并不变化,此时难以起到预想作用。工程中常根据实测“导高”值计算裂采比(即“导高”与采高比值),然后根据裂采比预计不同采高条件下的“导高”,这依然是一种均化思维,认为“导高”随采高增加而连续增大。正如图 6b 中所示,采高从 7.5 m 增大到 14.5 m 时,“导高”都是 147.4 m,但裂采比则从 19.7 降低到 10.2。可见,采用实测的裂采比预计“导高”也可能导致较大误差。

### 2.4 松散承压含水层下采煤压架突水防治

我国华东、华北许多矿区的煤系地层普遍被第四系巨厚松散层覆盖,该松散层底部存在着一层以非胶结沙土、砂砾、砾石为骨架的承压含水层,直接赋存于基岩顶部。在该松散承压含水层下采煤时,多个矿区曾发生压架突水事故,严重制约了矿井的安全、高效生产,造成采掘接替的紧张局面<sup>[28]</sup>。如,皖北煤电祁东煤矿自 2002 年投产以来,先后在 8 个综采工作面发生了 17 次压架突水事故,其中矿井投产后的 3<sub>22</sub>

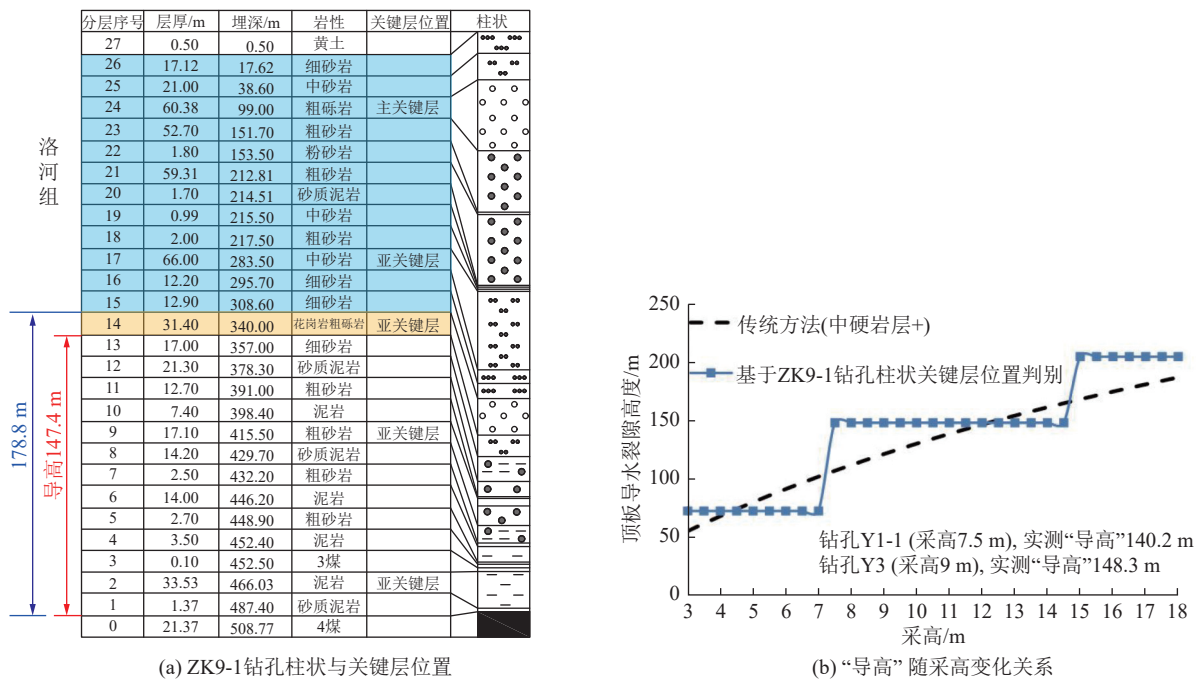


图 6 “导高”随采高台阶变化特征

Fig.6 Stepped development of fractured water-conducting zone with variation of mining thickness at Tingnan coal mine



首采工作面推进仅 42 m 时,发生压架,立柱卡环压裂,最大突水量达 1 520 m<sup>3</sup>/h,仅 1 d 便导致矿井被淹,造成巨大的直接经济损失。

松散承压含水层下采煤压架突水的显著特点是,工作面压架与顶板突水都是伴生的,即工作面突水前都会出现矿山压力显现异常增大甚至压架现象,并随工作面推进周期性的发生。按照传统矿压理论与突水理论难以合理解释此类压架突水灾害的发生机理。按照全柱状学术思想,考虑松散承压含水层特性对松散层拱载荷传递的影响,对此作出了合理解释。

研究发现,由于松散承压含水层的流动性和侧向补给作用,煤层开挖过程中作用于基岩顶界面的上覆松散层载荷不像通常条件下随煤层开挖显著降低(松散层拱效应),而是基本保持恒定,松散承压含水层起到了载荷传递的作用。由于松散承压含水层的载荷传递作用,邻近松散承压含水层开采时,易导致含水层下部基岩的整体破断(关键层复合破断)和“砌体梁”结构的滑落失稳,使得顶板导水裂隙带高度异常发育至基岩顶部,这是引发松散承压含水层下采煤异常压架突水事故的根本原因<sup>[29-30]</sup>。

松散承压含水层下采煤压架突水机理的掌握为采取有效的灾害防治奠定了理论基础,指导了祁东煤矿压架突水灾害防治实践<sup>[29-34]</sup>,形成了“危险区预测—支架阻力设计—关键层预裂—长观孔水位预警—支护质量监测”防治技术体系,扭转了该矿松散承压含水层下采煤不断发生压架突水的被动局面。

## 2.5 过沟谷地形上坡段压架防治

我国西部一些矿区地表受冲沟影响呈典型的沟谷地形,在沟谷处不仅松散层因冲蚀而缺失,部分基岩也因冲蚀而缺失。工作面在过沟谷地形上坡段时易发生动载矿压灾害,出现工作面切顶压架、地表台阶下沉(图 7),对工作面安全高效生产造成了严重的影响<sup>[35-37]</sup>。如:神东矿区活鸡兔井三盘区 21304 工作面沿走向有 3 个沟谷,落差 53~70.8 m。21304 综采工作面在过沟谷地形上坡段时曾发生 2 次动载矿压,第 1 次动载矿压发生在过沟谷地形上坡段的中部,有 42 台支架前方片帮 1~2 m,漏顶高度 1.5~2 m,支架

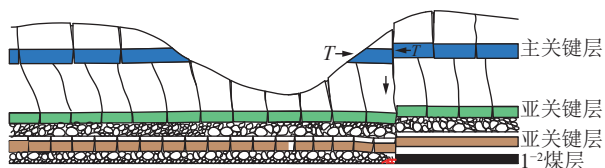


图 7 主关键层缺失时工作面过沟谷上坡段压架示意

Fig.7 Schematic drawing of supports crushing accident during uphill of gully terrain in missing condition of primary key stratum

立柱最大下缩量为 200 mm,对应地面裂缝最大台阶下沉量约 1.0 m;第 2 次动载矿压发生在过沟谷地形上坡段坡顶,有 48 台支架切顶严重,立柱最大下缩量达 420 mm,对应地裂缝宽度 4~5 m,台阶下沉 1~2 m。

过沟谷地形时的动载矿压主要发生在上坡段及上坡段的坡顶处,而在过沟谷下坡段和非沟谷地形的平直段,一般不易发生动载矿压显现。其机理与发生条件是什么?如何来防范上述动载矿压灾害?应用全柱状学术思想,考虑从煤层到地表所有关键层赋存与破断结构稳定特征,对上述问题做出了圆满解答<sup>[35]</sup>。

通过对活鸡兔井三盘区内 17 个地面钻孔柱状进行关键层位置判别,结合主关键层所处位置与对应区域的沟谷地形图对比发现<sup>[35]</sup>,该盘区内的主关键层都处于谷底标高之上,表明沟谷地形区域的主关键层已经受冲刷侵蚀而缺失。由图 7 可见,在下坡段,由于工作面推进方向面向沟谷,主关键层回转下沉时能够受到后方破断块体结构的侧向限制作用,有一定的侧向水平压力  $T$  限制,有利于块体结构的稳定。而在上坡段,由于工作面推进方向背向沟谷,因覆岩主关键层在沟谷段受侵蚀影响而缺失,过上坡段时主关键层破断块体侧向水平挤压力  $T=0$ ,不易形成稳定的“砌体梁”结构,其载荷将全部作用到下部单一关键层结构上,导致下部“砌体梁”结构载荷明显增大而产生滑落失稳,从而引起工作面的动载矿压。这是造成浅埋煤层过沟谷地形上坡段时工作面易发生动载矿压的根本原因。

基于全柱状学术思想揭示的过沟谷地形上坡段动载矿压机理,提出了相应的防治对策<sup>[35]</sup>。首先,过沟谷地形上坡段发生动载矿压的先决条件是沟谷段覆岩主关键层缺失。因此,可以通过判别沟谷段覆岩主关键层是否缺失来预测存在动载矿压危险的沟谷。其次,提高支架工作阻力是降低工作面动载矿压显现强烈程度的有效措施。为此,建立了过沟谷地形上坡段的工作面支架工作阻力估算方法,确定了控制“砌体梁”结构不发生滑落失稳的支架合理阻力。最后,对周期来压位置进行动态预测,同时做好支护质量监测,在发生动载矿压危险地段保证有良好的工程质量。通过上述技术措施的实施,保障了活鸡兔井后续工作面过沟谷地形的安全回采。

## 2.6 煤层群卸压瓦斯抽采“三带”理论

我国高瓦斯矿区多为煤层群开采条件,如阳泉矿区主采 15 号煤层时,上覆赋存多层高瓦斯煤层。掌握采动顶板不同高度瓦斯卸压程度,才能清晰地辨别不同储层的瓦斯可采性及其运移规律,这对瓦斯抽采方案设计、瓦斯可采资源量的评价以及瓦斯抽采率提

高都至关重要。

由于传统的研究无法给出煤层瓦斯卸压解吸的边界。因此,从全柱状学术思想出发,考虑关键层对卸压和裂隙的影响,根据瓦斯的卸压解吸和运移特征,将采动上覆煤岩划分为“三带”<sup>[38-41]</sup>:导气裂隙带、卸压解吸带和不易解吸带(图8)。

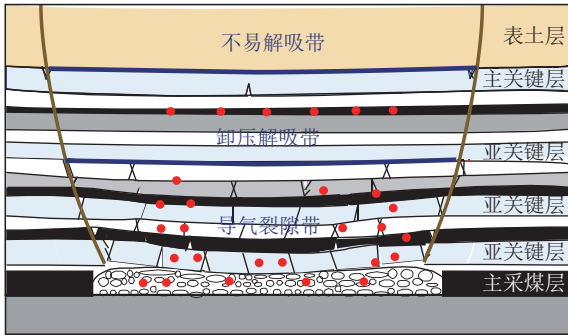


图8 煤层群开采瓦斯卸压运移的“三带”划分<sup>[38]</sup>

Fig.8 Regional division on “Three zones” of gas pressure relief and migration in coal seam group mining<sup>[38]</sup>

各个分带具有不同的裂隙形态和瓦斯卸压运移特征:

1) 导气裂隙带:具有竖向的贯通裂隙,该范围内瓦斯卸压解吸较为充分,可沿采动裂隙系统涌出到工作面,气体运移方式主要为沿较大裂缝的自由流动和细小裂隙的渗流,其高度等同于导水裂隙带。

2) 卸压解吸带:竖向裂隙不贯通,以顺层张裂隙为主。随采动应力转移,范围内瓦斯得到一定程度的卸压解吸,可沿顺层方向流动,但不能或仅有少量可下涌到工作面,气体运移方式主要为沿裂隙系统的渗流。其最大发育高度止于主关键层。随岩层应力的重新压实,解吸瓦斯可又重新吸附不易抽采。

3) 不易解吸带:该带无明显采动裂隙生成,覆岩应力受采动影响的改变程度不足以使瓦斯解吸,瓦斯的赋存特征基本不变,不易抽采。

煤层群开采瓦斯卸压运移“三带”可以直观表明瓦斯能够有效卸压解吸的范围和卸压瓦斯的流场特征。导气裂隙带表征了流体具备上下导通的能力,同时又隐含了可能涌入工作面的卸压瓦斯范围。卸压解吸带即表明了瓦斯具备的有效解吸范围,又表明了具有不同于导气裂隙带的瓦斯运移特征,是采动过程中易于抽采而在采后又不易抽采的区域。而不易解吸带则表明了该区域内的瓦斯赋存特征受采动影响改变不显著,是不易抽采区域。

瓦斯卸压运移“三带”的准确判别,可为煤层群开采条件下瓦斯卸压运移规律的认识以及煤与瓦斯高效共采技术的选择提供指导。从煤层群开采瓦斯卸

压运移“三带”划分的涵义可见,导气裂隙带具有与传统“三带”中导水裂隙带同样的特征,同为流体能够流通的裂隙发育高度,因而两者的高度应是十分相近的,也即导气裂隙带高度可以通过基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法来确定。从采动应力和岩体变形的角度来讲,卸压解吸带体现了岩体的充分卸压,换言之,即上覆地层压力在采动过程中得以转移,煤层不再继续承载上覆地层的载荷。覆岩移动是由下往上成组发展的,覆岩关键层之间的非协调变形止于覆岩主关键层以下,即表明卸压解吸带的最大高度将止于覆岩主关键层底界面。

基于煤层群卸压瓦斯抽采的“三带”理论,形成了采动卸压瓦斯巷(孔)优化布置方法,指导了淮北地面钻井抽采上覆远距离卸压瓦斯试验和阳泉矿区煤层群卸压瓦斯抽采实践<sup>[38-41]</sup>。

## 2.7 基于关键层结构的开采沉陷预计

传统地表沉陷预计方法(如概率积分法)一般较少考虑内部岩层运动的影响,而是将覆岩均化处理。地表下沉是煤层开采后覆岩移动由下往上逐步发展到地表的结果,是内部关键层破断运动的外在反映。在某些工程实际中,概率积分法预计的地表沉陷结果与实际存在较大偏差,对开采沉陷控制方案的制定是不利的,易造成生产被动。基于全柱状学术思想,充分考虑覆岩关键层对开采沉陷的影响,指导了开采沉陷预计和控制研究。

### 2.7.1 沉陷预计误差影响生产案例

山东某矿三采区开采3号煤层,煤厚平均2.2 m,埋深766~940 m,表土层厚度288 m。采区布置了4个走向长壁综采面,编号为13301、13303、13305、13307(图9),其中13307工作面一侧对应地表有一个村庄。为了评估采前是否需要对该村庄进行搬迁,矿井按照传统方法开展了地表沉陷预计工作。首先是利用概率积分法对13301、13303两个工作面开采后的实测地表下沉进行了地表移动计算参数反演;在此

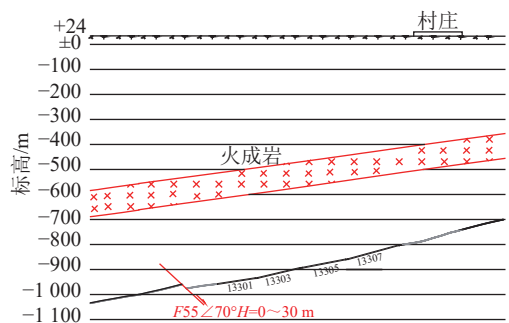


图9 某矿三采区倾向剖面示意图

Fig.9 Dip profile of No.3 working section in a coal mine



基础上,对后续 13305、13307 开采后的地表沉陷进行了预计;预计认为,4 个工作面开采后,地表下沉较小,村庄不会产生破坏,无需搬迁。然而后续开采实践发现,概率积分法预计的地表下沉量明显偏小,实际移动变形超过 I 级,村庄民房面临破坏风险,由于 13307 工作面已开采到村庄压煤范围,被迫暂停开采,严重影响矿井生产接续。

导致地表下沉预计明显偏小的原因,是因为概率积分法在对覆岩进行均化时忽略了关键层对地表沉陷的影响。事实上,距 3 煤层 280 m 处有一层厚 100 m 的火成岩,是覆岩主关键层,它不破断时地表下沉较小。第 1 个面 (13301) 开采后地表下沉很小 (30 mm),第 2 个面 (13303) 开采后地表下沉仍很小 (261 mm),说明主关键层未破断;但第 3 个面 (13305) 开采结束后,地表下沉明显增大至 1 189 mm,说明主关键层出现破断。显然,根据前面 2 个工作面开采后的地表实测下沉反演参数进行概率积分法预计,反映不出整体覆岩运动特点,无法体现火成岩主关键层对地表沉陷的控制作用,导致下沉预计结果错误。最后采用覆岩隔离注浆充填技术解决了矿井难题,实现了 13307 工作面正常开采,保证了村庄的安全。

### 2.7.2 基于关键层结构的开采沉陷预计

实验及实测研究结果证明<sup>[27]</sup>,关键层对地表移动起控制作用,主关键层的破断将导致地表快速下沉,地表下沉速度随主关键层周期性破断而呈现跳跃性变化。同时,地表下沉也是关键层与表土层耦合的结果<sup>[42]</sup>,一方面,关键层的破断块度大小影响着地表下沉曲线的特征,破断块度越大,对地表下沉曲线特征的影响越显著,曲线的非正态分布特征越显著。另一方面,表土层起着消化关键层非均匀下沉的作用,其厚度同样影响地表下沉曲线特征,表土层越薄,地表下沉曲线的非均匀、非正态特征越显著。对于表土层较薄或覆岩中有比较厚硬主关键层的条件,应根据主关键层破断后的下沉曲线来预计地表下沉曲线,才能保证预计结果的可靠性。

为此,开展了基于关键层结构的地表沉陷预计方法的探索<sup>[43]</sup>。针对主关键层处于裂隙带、弯曲下沉带时的不同破裂状态,分别基于结构力学和弹性地基梁建立了主关键层全位移方程力学模型,结合松散层的厚薄,建立了基于关键层结构的 4 类不同条件地表沉陷预计方法,并得到了实例验证<sup>[43]</sup>。如,某矿 31305 工作面走向地表实测下沉、基于关键层结构计算的下沉以及基于概率积分法计算的下沉曲线如图 10 所示<sup>[43]</sup>。可见,基于关键层结构计算的地表下沉与实测下沉相符性好,而基于概率积分法计算的地表下沉与实测下

沉的符合性略差,尤其是在边界处下沉快速收敛。

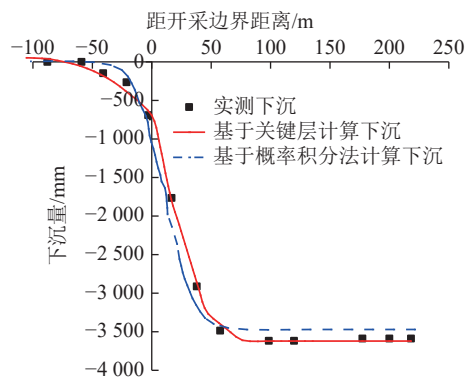


图 10 某矿实测和理论计算地表下沉<sup>[43]</sup>

Fig.10 Measured surface subsidence and predicted surface subsidence based on key strata subsidence and probability integral method along the strike in a coal mine<sup>[43]</sup>

## 2.8 覆岩隔离注浆充填技术

全柱状学术思想在地表减沉技术研发中起到了重要作用。从全柱状学术思想来看,地表沉陷是受到关键层控制的,若能利用关键层自身承载能力实施科学减沉,必然能起到少充高效的事半功倍效果。传统的减沉技术主要包括部分开采(如条带开采)与采空区充填,二者的主要思路基本一致,通过煤柱或充填体的支撑作用,阻止上覆关键层破断,从而实现减沉目的。对于采空区充填而言,控制的目标岩层往往是直接顶不垮落,因而高充实率是其追求的关键指标,显然对关键层的研究与利用不充分。

覆岩隔离注浆充填技术,首先对覆岩关键层进行判别,从中找到对岩层移动与地表沉陷起控制作用的关键层,对其实施充填支撑,从而实现减沉目的。因而,该项技术解决的首要难题正是“往哪注”,也就是要找准关键层,确定哪一层才能注的进去、注进去能达到效果。在这方面,传统离层注浆一直存在误区,认为注浆量是开采后覆岩内形成的离层量,因而传统研究停留于离层位置与离层量大小的计算中,以至于离层注浆处于被迫等待离层出现后灌注的局面,造成注浆量少、减沉率低,达不到建筑物下采煤的减沉控制要求。这也是离层注浆减沉技术 2000 年之前在我国昙花一现的主要原因,在 10 余个矿井试验后就很少再用。

覆岩隔离注浆充填技术原理(图 11),充分利用了发现的采动覆岩卸荷膨胀累积效应,根本改变了对离层形式、注浆充填的传统认识。由于覆岩卸荷膨胀累积效应对离层发育的抑制作用,关键层下最大离层量一般小于采高的 10%,覆岩可注浆充填空间并非传统认识上的离层,而主要是通过“压下托上”作用重新压



缩卸荷膨胀的岩体,产生可注入空间,从而大幅提高注浆量,这正是覆岩隔离注浆充填技术的创新所在。在这一理论成果指导下,覆岩隔离注浆充填的注采比与减沉率均得到了大幅提升,很好地解决了建筑物压煤开采难题。

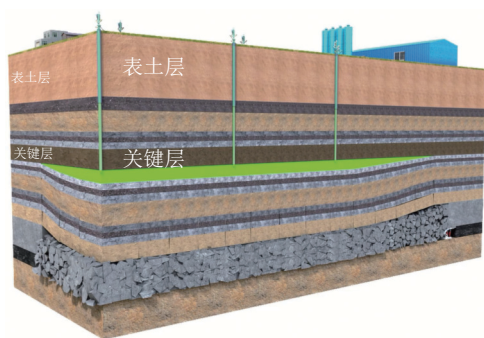


图 11 覆岩隔离注浆充填技术原理示意<sup>[44]</sup>

Fig.11 Technology of overburden isolated grout injection<sup>[44]</sup>

为了保证注浆充填对下部卸荷膨胀岩层的压实作用,注浆层位与导水裂隙带的间距(隔离层厚度)必须满足一定值,首先是具备安全条件。在全柱状学术思想指导下提出的基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法,在这一环节中发挥了极为重要作用,据此科学论证了极复杂困难条件下注浆充填的技术可行性。例如,针对鄂尔多斯矿区石拉乌素煤矸巨厚白垩系砂岩含水层下 10 m 厚煤层综放开采条件,成功实施了煤矸石覆岩注浆充填,再一次突破了传统认识判定注浆充填不可行的禁区。

与之类似,在确定注浆充填压力与注采比等参数时,也必须从全柱状角度出发。例如,注浆压力确定主要依据注浆层位上方岩层赋存条件,注采比计算时则要考虑下部岩体的残余卸荷膨胀、注浆层位高度、预期地表下沉系数等参数。同样,注浆钻孔结构与间距确定时,也要考虑煤层采高、注浆层位高度、关键层破断步距与采动裂隙“O”形圈宽度等因素,这些均离不开对全地层结构的深入研究。

实践表明,覆岩隔离注浆充填技术创建了地面钻孔一注式高效充填绿色开采新模式,在村庄压煤开采时地表下沉系数小于 0.1、建筑物变形处于 I 级以内,单面年产达 300 万 t/a,吨煤充填成本约 40~60 元/t。目前该技术已在安徽、山西、山东、河北、河南、内蒙古、江苏、陕西等省(区)得到推广应用,实现了减沉、减排、减震、减漏等绿色开采功效,综合效益显著<sup>[45-46]</sup>。

### 3 结 语

1) 全柱状学术思想秉持“抓主要矛盾”与“关注

全局”的辩证统一,避免了传统岩层控制研究中存在的均化、局部两方面局限,在研究方法上既实现了复杂煤系地层到关键层的适度简化,又避免了忽略周边可能对关键层运动产生影响的各种因素,是应用关键层理论必须遵循的基本学术思想。

2) 全柱状学术思想解决岩层控制工程问题的主要流程包括全柱状资料收集、关键层判别验证、致灾主因确定、工程灾害防控,核心是要找出覆岩关键层并建立其破断运动规律与采动损害现象的内在关系,目前已成为岩层控制理论与实践研究的重要方法,较好地解决了采场压架、顶板突水、卸压瓦斯抽采、地表沉陷等方面的系列工程难题,取得了显著成效。

3) 全柱状学术思想的基础是找到覆岩关键层,确凿的钻孔柱状资料是关键层判别的基础,需要进一步研究全柱状的准确高效获取方法,比如,进一步研究将随钻测量岩层力学参数、钻孔测井数据的智能判层与岩性识别、透明地质等方法应用于“全柱状”(全地层)资料获取中。需要进一步研究发展“井下矿压(采空区应力)-内部岩移-地表沉陷”三位一体智能监测方法,为关键层判别实测验证提供可靠方法。

**致谢** 钱鸣高院士生前对相关研究工作十分关心并给予了重要指导,谨以此文深切缅怀先生并致以最崇高的敬意。

### 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,许家林,王家臣,等. 矿山压力与岩层控制[M]. 3 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [2] 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.
- [3] 许家林. 岩层控制与煤炭科学开采: 记钱鸣高院士的学术思想和科研成就[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 1-6.  
XU Jialin. Strata control and scientific coal mining: A celebration of the academic thoughts and achievements of Academician Minggao Qian[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(1): 1-6.
- [4] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [5] 何国清,杨伦,凌庚娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [6] KRATZSCH H. Mining subsidence engineering[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [7] 鲍里索夫 A. A. . 矿山压力原理与计算[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
- [8] 刘国琛,廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [9] 邓喀中,马伟民,何国清. 开采沉陷中的层面效应研究[J]. 煤炭学

- 报, 1995, 20(4): 380–384.
- DENG Kazhong, MA Weimin, HE Guoqing. Investigation of effect of stratified plane in surface subsidence due to coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 1995, 20(4): 380–384.
- [10] 王悦汉, 邓喀中, 吴侃, 等. 采动岩体动态力学模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(3): 352–357.
- WANG Yuehan, DENG Kazhong, WU Kan, et al. On the dynamic mechanics model of mining subsidence[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(3): 352–357.
- [11] 吴立新, 王金庄, 刘延安, 等. 建(构)筑物下压煤条带开采理论与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [12] 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, 21(3): 225–230.
- QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 225–230.
- [13] 许家林. 岩层移动与控制的关键层理论及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1999.
- XU Jialin. Study and application of key strata theory in ground control [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 1999.
- [14] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [15] 金洪伟, 许家林, 朱卫兵. 覆岩移动的拱-梁组合结构模型的初步研究[C]//中国科学技术协会学会学术部. 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集. 重庆, 2009: 616–621.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 许家林, 钱鸣高, 马文顶, 等. 岩层移动模拟研究中加载问题的探讨[J]. *中国矿业大学学报*, 2001, 30(3): 252–255.
- XU Jialin, QIAN Minggao, MA Wending, et al. Discussion on loading problem in physical and numerical simulation of strata movement[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001, 30(3): 252–255.
- [20] 汪锋. 采动覆岩结构的“关键层-松散层拱”理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- WANG Feng. Structure of “key strata and arch structure in unconsolidated layers” and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.
- [21] 汪锋, 许家林, 陈绍杰, 等. 松散层拱结构模型及其对覆岩运动的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(3): 497–504, 512.
- WANG Feng, XU Jialin, CHEN Shaojie, et al. Arch structure in unconsolidated layers and its effect on the overlying strata movement [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(3): 497–504, 512.
- [22] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [23] 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.
- [24] 许家林. 岩层采动裂隙演化规律与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
- [25] 王晓振, 许家林, 韩红凯, 等. 顶板导水裂隙高度随采厚的台阶式发育特征[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(12): 3740–3749.
- WANG Xiaozhen, XU Jialin, HAN Hongkai, et al. Stepped development characteristic of water flowing fracture height with variation of mining thickness[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3740–3749.
- [26] 伊茂森, 朱卫兵, 李林, 等. 补连塔煤矿四盘区顶板突水机理及防治[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(3): 241–245.
- YI Maosen, ZHU Weibing, LI Lin, et al. Water-inrush mechanism and prevention for fourth panel roof in Bulianta coalmine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(3): 241–245.
- [27] 朱卫兵, 许家林, 施喜书, 等. 覆岩主关键层运动对地表沉陷影响的钻孔原位测试研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(2): 403–409.
- ZHU Weibing, XU Jialin, SHI Xishu, et al. Research on influence of overburden primary key stratum movement on surface subsidence with *in situ* drilling test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 403–409.
- [28] 许家林, 王晓振, 朱卫兵. 松散承压含水层下采煤压架突水机理与防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
- [29] 许家林, 蔡东, 傅昆岚. 邻近松散承压含水层开采工作面压架机理与防治[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(12): 1239–1243.
- XU Jialin, CAI Dong, FU Kunlan. Mechanism of supports crushing accident and its preventive measures during coal mining near unconsolidated confined aquifer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(12): 1239–1243.
- [30] 许家林, 陈稼轩, 蒋坤. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(4): 699–704.
- XU Jialin, CHEN Jiaxuan, JIANG Kun. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(4): 699–704.
- [31] 郝宪杰, 许家林, 朱卫兵, 等. 高承压松散含水层下支架合理工作阻力的确定[J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(3): 416–420.
- HAO Xianjie, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Determination of reasonable support resistance when mining under unconsolidated highly-pressured confined aquifer[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(3): 416–420.
- [32] 林青, 王晓振, 许家林, 等. 顶板预裂爆破技术在防止压架事故中

- 的应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 40–43.
- LIN Qing, WANG Xiaozhen, XU Jialin, et al. Application of roof pre-fracturing and blasting technology to prevent hydraulic powered support jamming accident[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 40–43.
- [33] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 松散承压含水层水位变化与顶板来压的联动效应及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1872–1881.
- WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Research on connected effect between water level variation of unconsolidated confined aquifer and roof weighting and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1872–1881.
- [34] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 松散承压含水层下采煤突水机理与防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 333–339.
- XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. Study on water-inrush mechanism and prevention during coal mining under unconsolidated confined aquifer[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 333–339.
- [35] 许家林, 朱卫兵, 王晓振, 等. 沟谷地形对浅埋煤层开采矿压显现的影响机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 179–185.
- XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, et al. Influencing mechanism of gully terrain on ground pressure behaviors in shallow seam longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 179–185.
- [36] 来兴平, 朱浩宇, 郭中安, 等. 浅埋煤层沟谷区高位关键层破断动载机理及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(5): 879–888.
- LAI Xingping, ZHU Haoyu, GUO Zhongan, et al. Breaking dynamic load mechanism and application of high key strata in gully area of shallow coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(5): 879–888.
- [37] 赵杰, 刘长友, 李建伟. 沟谷区域浅埋煤层工作面覆岩破断及矿压显现特征[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 34–40.
- ZHAO Jie, LIU Changyou, LI Jianwei. Overburden failure and strata pressure behavior characteristics under condition of shallow coal seam in gully terrain[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 34–40.
- [38] 屈庆栋. 采动上覆瓦斯卸压运移的“三带”理论及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- QU Qingdong. Study on the “Three Zones” theory of overlying gas release and migration in response to coal mining and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [39] 许家林, 钱鸣高. 地面钻井抽放上覆远距离卸压煤层气试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 78–81.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Study on drainage of relieved methane from overlying coal seam far away from the protective seam by surface well[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 78–81.
- [40] 吴仁伦. 关键层对煤层群开采瓦斯卸压运移“三带”范围的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 924–929.
- WU Renlun. Effects of key stratum on the scope of the “three zones” of gas pressure relief and migration in coal seam group mining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 924–929.
- [41] 胡国忠, 许家林, 秦伟, 等. 基于关键层运动的邻近层卸压瓦斯抽采优化设计方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 52–59.
- HU Guozhong, XU Jialin, QIN Wei, et al. Optimization designing method of pressure-relief gas drainage in adjacent layers based on key strata movement[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 52–59.
- [42] 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, 25(2): 122–126.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Study on the influence of key strata movement on subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 122–126.
- [43] 何昌春. 基于关键层结构的地表沉降预计方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- HE Changchun. Method to predict the surface subsidence based on the key strata structure[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2018.
- [44] 轩大洋, 许家林, 王秉龙. 覆岩隔离注浆充填绿色开采技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4265–4277.
- XUAN Dayang, XU Jialin, WANG Binglong. Green mining technology of overburden isolated grout injection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4265–4277.
- [45] 许家林, 倪建明, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填不迁村采煤技术[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 8–11.
- XU Jialin, NI Jianming, XUAN Dayang, et al. Coal mining technology without village relocation by isolated grout injection into overburden[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 8–11.
- [46] 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.