

煤矿采动覆岩离层水害致灾因素勘查与预测评价

乔伟^{1,2,3}, 刘梦楠¹, 孟祥胜¹, 程香港¹, 冯培超¹, 李小琴^{1,2}, 李文平^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 矿区深部零碳负碳教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 矿山水害防治技术基础研究国家级专业中心实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:采动覆岩离层突水在我国各地矿区均较为常见且危害性较大, 现有的规范中鲜有针对离层水害的具体工程地质和水文地质勘查方法。探索煤矿离层水害工程地质水文地质勘查与评价方法, 能够推动我国矿井水害防治水平进一步提升。首先从煤矿采动覆岩高位离层水害孕灾机制出发, 分析了离层水害从孕灾到致灾的工程地质条件, 将我国现有的离层水害归纳为3种典型类型: 离层动力突水、离层静水压涌突水和离层携泥砂突水。然后, 确定了“水源”“通道”“力源”和“物源”为控制离层水害类型与强度的关键隐蔽致灾因素, 将位于传统导水裂隙带以上, 可发生离层突水的复合层位称为采动覆岩“突水离层带”, 并提出了煤矿采动覆岩“突水离层带”的判别流程, 划分勘查阶段, 指明勘查要点。煤矿离层水害采前勘查应包括2个阶段: ①开展覆岩基本工程地质和水文地质条件勘探, 评估勘探区离层水害的可能性并确定潜在“突水离层带”的层位; ②将“突水离层带”和“物源”层作为勘查目标层, 开展离层水害致灾因素专项勘查, 评定离层水害类型和强度。回采期间对水动力条件和覆岩裂隙演化进行探查。最后, 基于离层水害致灾因素互馈演化致灾机制, 建立了适用于采动覆岩离层水害的矿井区域预测综合评价模型, 提出了全矿井/采区尺度的区域危险性分区、采前工作面突水位置判定及涌水量预计的煤矿采动覆岩离层水害预测评价方法。

关键词: 离层水害; 致灾因素; 采动覆岩“突水离层带”; 工程地质勘查; 预测评价

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-2031-14

Exploration and prediction evaluation on causative factors of water inrush from separation layers of mining overburden in coal mines

QIAO Wei^{1,2,3}, LIU Mengnan¹, MENG Xiangsheng¹, CHENG Xianggang¹, FENG Peichao¹, LI Xiaoqin^{1,2}, LI Wenping^{1,2,3}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Zero Carbon Negative Carbon in Deep Mining Area Engineering Research Center of Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3. National Professional Central Laboratory for Basic Research of Mine Water Damage Prevention Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The occurrence of mine water inrushes is common and poses significant hazards in various mining areas throughout China. However, the existing regulations lack of specific engineering geological and hydrogeological exploration guidelines tailored to the water inrush from separation layers (WISL). Exploring the methods of engineering geological and hydrogeological exploration and assessment for the WISL can contribute to further enhancing the prevention and control of mine water disasters in China. This paper begins by examining the mechanism behind WISL in coal mines. It

收稿日期: 2023-12-14 修回日期: 2024-04-01 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH23.1691

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (4193128, 41772302, 42007240)

作者简介: 乔伟 (1984—), 男, 山东蒙阴人, 教授, 博士生导师。E-mail: qiaowei@cumt.edu.cn

通讯作者: 刘梦楠 (1999—), 女, 山东金乡人, 博士研究生。E-mail: lmn@cumt.edu.cn

引用格式: 乔伟, 刘梦楠, 孟祥胜, 等. 煤矿采动覆岩离层水害致灾因素勘查与预测评价[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2031-2044.

QIAO Wei, LIU Mengnan, MENG Xiangsheng, et al. Exploration and prediction evaluation on causative factors of water inrush from separation layers of mining overburden in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2031-2044.



移动阅读

analyzes the geological conditions governing the progression of WISL from its inception to full-scale occurrence and categorizes three prevalent types of WISL in China, i.e., dynamic water inrush, hydrostatic water inrush, and mud and sand-carrying water inrush, all originating from separation layers. Subsequently, it identifies “water source” “channel” “force source” and “material source” as pivotal concealed factors dictating the nature and severity of WISL. Then, the concept of a “inrush separation zone” referring to composite stratigraphic layers situated above traditional water-conducting fractured zones is introduced, where the WISL may transpire during mining activities. Furthermore, it presents a method for delineating “inrush separation zone” in coal mines, outlining exploration stages and specifying crucial investigative focal points. The exploration of water damage in upper strata of coal mine should include two stages: first, the exploration of basic engineering geology and hydrogeological conditions of overlying rock should be carried out to evaluate the possibility of water damage in the exploration area and determine the horizon of potential mining overlying rock; second, regarding the “inrush separation zone” and “source” layer as the exploration target layer, the special investigation of the hidden disaster factors of the upper layer water damage should be conducted to assess the type and intensity of the water damage in the upper layer. The hydrodynamic conditions and the evolution of overburden fractures are investigated during the mining period. Lastly, a comprehensive forecast evaluation model is proposed and constructed on the coordinated evolutionary mechanisms arising from the interaction of causative factors like “water source” “channel” “force source” and “material source”. This model predicts and evaluates the types, locations, and inflows of water inrush at mining faces before operations commence.

Key words: water inrush from separation layers (WISL); causative factors; water inrush zone of mining overburden; engineering geological exploring; forecast evaluation

我国能源资源禀赋特点决定了煤炭将长期作为我国的主体能源,与此同时,我国煤矿工程地质与水文地质条件复杂、地区差异大,从而导致各类水害频发,属于煤矿五大灾害之一^[1]。离层水是一种在采动中形成的涌突水水源,离层突水具有瞬时量大、周期性、突发性的特征,有的携带泥砂石,危害极大,防控困难^[2-7]。据不完全统计,我国有30余对矿井存在离层水害威胁,随着我国煤矿开采深度加深、多煤层叠加开采、西部巨厚白垩系覆盖下等条件煤炭资源的开发和开采方式的变化,采动覆岩离层水害更加复杂化^[8-9]。

《煤矿防治水细则》^[10]第六十九条:受离层水威胁(火成岩等坚硬覆岩下开采)的矿井,应当对煤层覆岩特征及其组合关系、力学性质、含水层富水性等进行分析,判断离层发育的层位,采取施工超前钻孔等手段,破坏离层空间的封闭性、预先疏放离层的补给水源或者超前疏放离层水等。《煤矿防治水“三区”管理办法》^[11]针对受地表水、顶板水、底板水、老空水、构造水等不同类型水害威胁区域,分别规定了可采区、缓采区、禁采区的划定标准;其中顶板水中对离层水进行了说明,煤层开采不受离层水威胁的,或者采取可靠措施消除离层水害威胁的,划为可采区,而煤层开采存在离层水威胁且未采取有效措施治理的为缓采区。但规范并未给出具体的离层水害预测评价方法和对应的防控技术措施。

根据《中华人民共和国矿山安全行业标准》^[12],煤

矿水害防治的水文地质与工程地质勘查应与地质勘查工作阶段相适应。在勘探阶段评估存在突水可能性的矿井或采区后,应在生产阶段进行专门的水文地质与工程地质勘查,查明矿井或采区致灾因素并评估突水灾害危险性,预测涌水量,并提出防治措施并提交专项评价报告。

传统的矿区水文地质勘查、工程地质勘查和水害评价多集中在传统导水裂隙带范围内的水害预测,而缺乏针对采动覆岩离层水害的水文地质勘查内容。同时,煤矿水害评价方法也未覆盖离层水体的问题^[10-14]。因此,有必要进行针对离层水害勘查要点的研究,以确保煤矿开采过程中对离层水害有全面的了解和有效的防治措施。

各矿井煤层的赋存、开采参数、水文地质和工程地质条件存在较大差异,这导致同一矿井不同采区和不同工作面对离层水害的治理方法也各有差异。因此,需要针对具体的采煤工作面进行深入分析,尤其需要重视离层水的源头防控工作^[15-18]。然而,在离层水害预测评价的环节,目前尚未找到一种被广泛认可的具体方法,这导致了对离层水害的分析相对简化,并可能使得结论具有主观性。因此,对于离层水害预测评价的研究仍存在不足之处,需要更多的努力和探索来完善相关方法和技术。

为了加强离层水害的源头治理和超前防控,笔者结合十几年来煤矿离层水防治研究成果,在离层水害形成机理梳理的基础上提出了离层水害的3种类型,

以采动覆岩“突水离层带”为抓手理清针对离层水害的地质勘查目标层位和勘查要点,并提出了煤矿离层水害预测评价的方法。

1 煤矿离层水害致灾因素及类型划分

1.1 离层水害机理及致灾因素

煤矿高强度采动过程中,煤层上覆岩层产生层间

差异沉降,形成离层空间,若离层空间有含水层水补给,则形成离层积水水体,一旦采动导水裂隙与离层水体沟通,即发生离层大型涌水^[19]。离层水害本质上是来自于采动覆岩近场和远场岩层之间的协同变形、破断和失稳。如图1所示,煤层开采后,采煤工作面近场岩层快速变形破断,岩层下沉期间快速发育纵向导水裂隙,形成导水裂隙带。

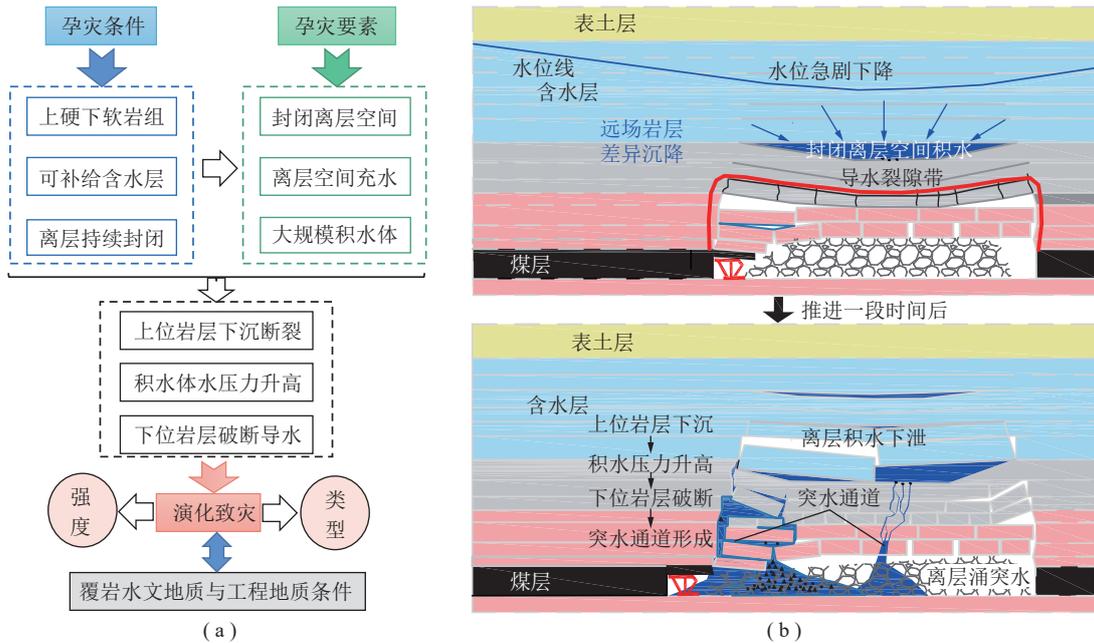


图1 离层水害孕灾条件-孕灾要素-演化致灾机理

Fig.1 Pregnancy conditions-factors-evolution mechanism of WISL

由于受采动影响较大,近场岩层揭露后快速变形破断,横向层间裂隙和纵向穿层裂隙近乎同时形成,因此可将近场覆岩形成导水裂隙网络的岩层视为传统“三带”模型中的垮落带和裂隙带,即传统意义上的“导水裂隙带”^[20-22]。位于弯曲下沉带的岩层,其横向裂隙与纵向裂隙的形成存在着明显的时间差。这种时间差能够保证周边含水层向离层空间汇集储水,等待周围岩层破断后,导水裂隙沟通离层积水,从而形成离层水害。

当导水通道在采空区形成时,或者工作面为仰采时水流无法进入采煤工作面迎头,离层积水体下泄至采空区,发生采空区离层涌突水;当离层在回采过程中动态生成,工作面支架或煤壁上方形成裂隙并与离层积水相通时,水流直接从支架上部迅速泄入工作面,发生工作面离层涌突水。

水源、通道和强度是衡量矿井涌突水致灾的基本要素^[23]。离层水害的“水源”为离层积水体,离层水害的“通道”本质上是岩层破断形成的导水裂隙与导水裂隙带贯通,而“通道”的形成机制和离层突水的类型密切相关:如若离层积水下位岩层在离层积水压力作

用下破断,则形成静水压涌突水^[6];而当离层积水的上位岩层聚集一定应变能后瞬间破断,随即产生强荷载导致保护层破断,从而形成动力突水^[7]。

在此基础上,笔者将引发形成离层突水通道的因素,包括离层积水压、上位岩层破断或因工程地质条件变化引发的自重荷载(如采高采速变化、岩层物理力学性质变化等),统称为离层水害的“力源”。“水源”(离层积水)规模和“力源”类型共同决定了离层水害的强度。此外,近年来我国煤炭开采中心向西部鄂尔多斯盆地侏罗系煤层转移,位于离层积水和工作面之间存在侏罗系软弱夹层或风化松散层,其为离层水害提供了“物源”,离层积水下泄的同时携带大量泥砂石涌入工作面,覆岩进一步崩解失稳,从而引发离层携泥砂突水伴随压架切顶事故,加剧了离层水害的致灾强度^[24]。

综上,可将离层水害致灾因素提炼为“水源”“通道”“力源”和“物源”4个方面,这4个基本因素的形成机制、孕育类型和强度规模,直接导致的离层水害的出现与否及其破坏性强弱。

1.2 离层水害类型

基于“水源”“通道”“力源”和“物源”4个致灾因素的典型特征,可将中国现有的离层水害归纳为3种典型类型:离层动力突水、离层静水压涌突水和离

层携泥砂突水。不同类型的离层水害在致灾要素方面各有特点,见表1,不同类型的离层水害在“水源”和“通道”原理上相似:均为形成离层积水和下位岩层破断;它们的主要区别在于“力源”和“物源”的孕灾特点。

表 1 部分煤矿离层水害类型及致灾因素统计^[2]

Table 1 Types of WISL and disaster factors of partial coal mines^[2]

类型	突水工作面	水源	通道	力源	物源
离层动力突水	海孜煤矿745工作面、新集一矿1307工作面、新集二矿1113104工作面、红柳煤矿1121工作面			上位岩层破断	无
离层静水压涌突水	济宁二11306和11305工作面、鱼田堡矿2403采区、南桐一井6404工作面、南桐二井5404采区、打通一S1821工作面、五轮山矿1601工作面	含水层补给离层形成积水体	下位砂泥岩隔水层发育导水裂隙与导水裂隙带贯通	重复采动导致离层扩容或上位岩层变形导致离层积水压力升高	
离层携泥砂突水	新上海一号111084工作面、招贤煤矿1304工作面、崔木煤矿21301、21302、21306工作面、照金煤矿202工作面				古风化壳岩层、泥质岩层和弱胶结砂岩层

离层动力突水^[7]是地下开采活动引起的,当整体块状结构坚硬岩层中弹性能积聚到一定程度时,岩层失稳并释放巨大动能(“力源”),导致含水层中产生超高水压和破裂导水通道,从而产生突水。突水事件没有明显的前兆,涌水量极大、水流凶猛、破坏力强,能在短时间内造成严重的破坏(图2(a))。

离层静水压涌突水^[6]是指在采场顶板形成离层水后,由于上位岩层下沉变形和周围含水层的补给,离层水对下位岩层施加荷载和静水压力(“力源”)。当加载或静水压力作用下,离层下位完整岩层发生垂向裂隙(“通道”),失去原有的阻隔水性,导致离层涌突水。异常增加的井下涌水量或探放水量不寻常上升,往往是突水事件即将发生的重要警示信号(图2(b))。

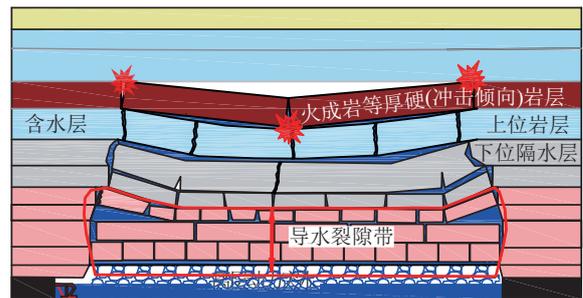
离层携泥砂突水^[24]是指在突水通道围岩层中存在古风化壳岩层、泥质岩层和弱胶结砂岩层等“物源”时,离层水会携带大量泥、砂、石进入工作面,严重情况下可能导致大面积的支架压垮和工作面淤堵,带来严重的安全隐患和作业障碍(图2(c))。

2 采动覆岩离层水害勘查要点

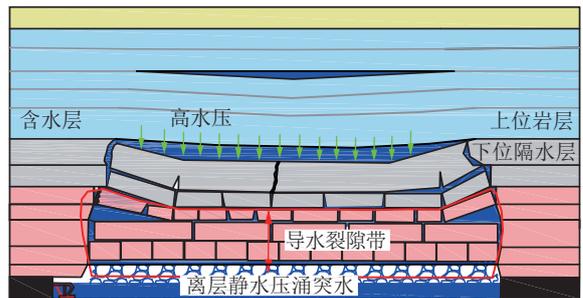
当前的勘查规范在针对离层水害方面显得缺乏针对性,依靠现有规范往往导致离层水害勘查范围过于宏观,缺乏足够的指导性。因此,本节旨在基于离层水害致灾因素和涌突水类型,建立离层水害勘查目标层模型,提出识别方法,并进一步围绕勘察目标层明确勘查要点,使勘查范围更加聚焦。

2.1 离层水害勘察目标层模型建立

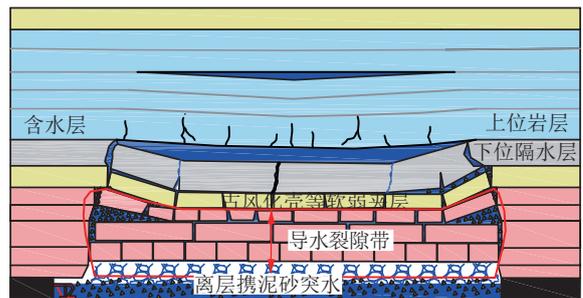
不同于传统顶板含水层涌水,离层水害的致灾因



(a) 离层动力突水



(b) 离层静水压涌突水



(c) 离层携泥砂突水

图 2 3种离层水害类型示意

Fig.2 Schematic diagram of three types of WISL

素具有较强的“隐蔽”性,具体包括:致灾水源——离层积水发育位置受覆岩天然水文地质条件和采掘工程条件的耦合作用产生;致灾导水通道——煤层开采引发的低位导水裂隙网络和由附加应力引发的岩层破断协调组合而成;致灾力源——采动等因素诱发上位岩层变形破断或离层扩容,导致离层积水水压急剧升高。

为了更清楚地阐释离层水害致灾因素,基于传统

覆岩“三带”或“四带”分区模型,笔者在文献[19]中提出了专门用于研究离层水害的采动覆岩“突水离层带”模型(图3),并证明了采动覆岩“突水离层带”裂隙结构演化对离层突水致灾类型和发生位置起到关键作用。将覆岩中可形成离层积水的复合层位视为潜在采动覆岩“突水离层带”。采动覆岩潜在采动覆岩“突水离层带”向采动覆岩“突水离层带”转化即为离层水害从孕灾到致灾的演化过程。

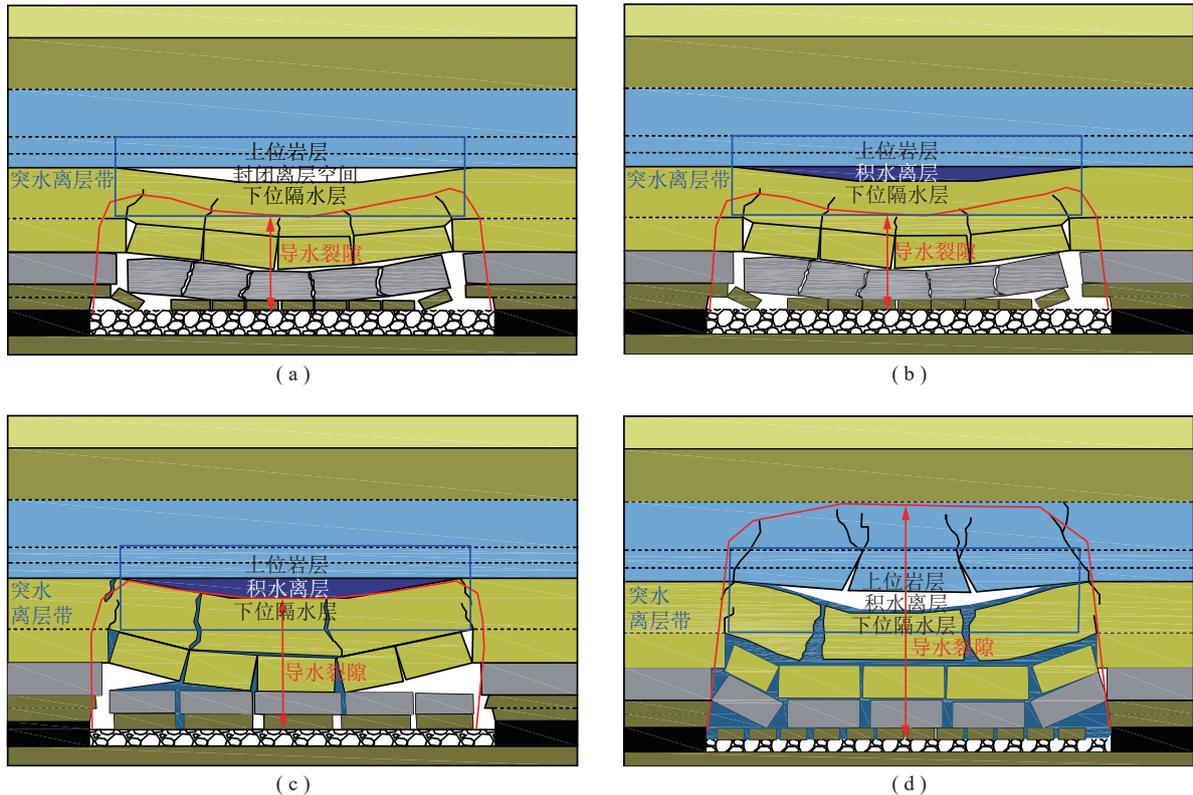


图3 采动覆岩“突水离层带”时空演化与离层突水关系

Fig.3 Relations between the spatial-time evolution of inrush separation zone of mining overburden and WISL

采动覆岩中的“突水离层带”模型不仅反映了离层水害形成的基本地质条件,更重要的是,该模型阐述了发生离层突水时“水源”和“通道”所需的特定时空演化关系。采动覆岩“突水离层带”与离层水害致灾因素关系如图4所示。“突水离层带”的特性和变化对离层水害的预测和评价具有重要意义。通过将“突水离层带”作为采动覆岩离层水害勘察的目标层,充分了解其空间分布、水文地质特征和采动演化规律,从而为煤矿采动过程中的离层水害预测评价提供科学依据。然而,文献[19]仅根据“突水离层带”的基本条件和工程经验,对实例煤矿的采动覆岩“突水离层带”层位进行粗略划分,并未提供具体的判定方法。

在全国各地不同工程地质条件的矿井中,精确识别和定位采动覆岩的“突水离层带”至关重要。这是灵活开展离层水害勘查、灾害预测、预报预警和制定

治理措施的基础。目前,针对近场导水裂隙带范围的岩层控制理论已经比较成熟,但对于导水裂隙带之上

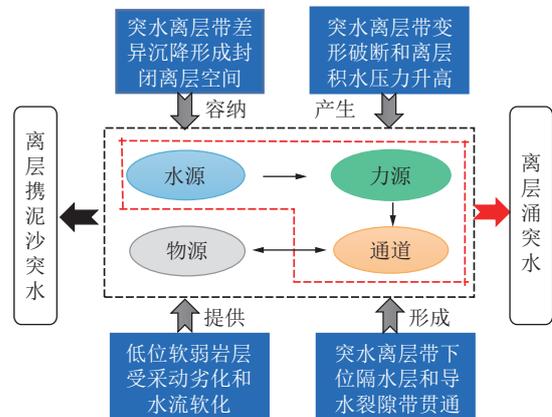


图4 采动覆岩“突水离层带”与致灾因素关系

Fig.4 Relations between the inrush separation zone of mining overburden and causative factors

的远场岩层关注不够。这种情况导致了识别和定位“突水离层带”的相关理论方法非常薄弱。因此,需将研究对象聚焦于导水裂隙带之上的岩层,进一步研究“突水离层带”的精确识别方法,以有效地识别采动覆岩“突水离层带”的具体层位。这将为煤矿采动覆岩离层水害目标层的勘查与预测评价提供基础支持。

2.2 离层水害勘察目标层位置识别

由于位于导水裂隙带之上的岩层变形下沉较为缓慢,离层的发育过程中,下位隔水层在某段时间内仍然保持隔水性,从而形成暂时封闭的可积水离层。因此,在确定覆岩导水裂隙带范围后,将其上方的基岩区视作潜在“突水离层带”的发育区,如图5所示。关键在于确定潜在“突水离层带”的发育区范围内封闭离层空间的垂向发育位置。

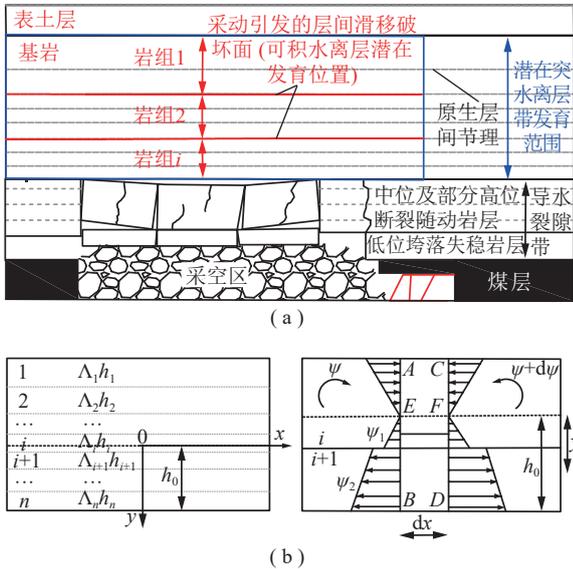


图5 “突水离层带”形成力学机理 (a) 及力学模型 (b)

Fig.5 Mechanical mechanism of inrush separation zone (a) and mechanical model (b)

可积水离层形成的力学机理^[21, 25-26]为:首先,相邻岩层间由于相对错动产生的剪应力超过原生层间节理(图5灰色虚线)的强度,导致沿着层面发生滑移,形成破坏面(图5红色线)。这一过程将导水裂隙带以上的基岩划分为多个相互分离的岩组。随着工作面的推进,当上下相邻岩组的物理特性差异较大,发生不协调变形,上层岩组无法对下层岩组形成有效的加载,从而沿滑移破坏面形成离层空间。因此,首先要确定在采动影响下,导水裂隙带以上基岩内沿层面滑移形成的破坏面位置,然后确定相邻岩组的沉降变形量,把出现上下相邻岩组分离的滑移破坏面视为可积水离层的发育位置。

为了深入理解采动覆岩“突水离层带”的力学行为,建立相应的岩层力学模型,如图5(b)所示。模型

中,导水裂隙带以上的基岩被视作由原生层间节理分割的组合岩层。这些组合岩层可以类比为多层的线弹性梁,每一层代表一个子梁,均具备弹性梁的特性。相邻两层子梁之间满足接触滑移状态^[27-29]。当采动作用下某个层间原生节理的剪切应力超过节理剪切强度时,沿层间原生节理形成层间滑移面,即为离层空间的潜在发育位置。

在组合岩层内部形成滑移面之前,假设:①组合岩层及其横截面在弯曲后仍保持平面结构;②假设岩体为线弹性体,使得组合岩层内部的应变呈线性分布;③原岩在开采前已产生一定的变形,而开采后的进一步变形主要由新增加的应力所引起。

如图5(b)所示,组合岩层由 n 种材料组成,可以称为“ n 层组合岩层”,根据假定, n 层组合岩层的轴向应力表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{x1} = \xi \Lambda_1 y, - \left(\sum_{i=1}^n h_i - h_0 \right) \leq y \leq - \left(\sum_{i=1}^n h_i - h_0 - h_1 \right) \\ \sigma_{x2} = \xi \Lambda_2 y, - \left(\sum_{i=1}^n h_i - h_0 - h_1 \right) \leq y \leq - \left(\sum_{i=1}^n h_i - h_0 - h_1 - h_2 \right) \\ \vdots \\ \sigma_{xi} = \xi \Lambda_i y, - \left(\sum_{i=1}^n h_i - h_0 - \sum_{m=1}^{i-1} h_m \right) \leq y \leq h_0 - \sum_{m=i+1}^n h_m \\ \vdots \\ \sigma_{xn} = \xi \Lambda_n y, h_0 - h_n \leq y \leq h_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, σ_{xi} 为第 i 层岩层的轴向应力; ξ 为比例系数; x 、 y 分别为横坐标和纵坐标,以中性面为零点,向下为正; Λ_i 为岩层 i 弹性模量; h_i 为第 i 层岩层厚度 ($i=1,2,3, \dots, i, \dots, m, \dots, n$); h_0 为中性面距底面的距离。

在外力作用下,组合岩层保持平衡状态,因而,在岩层的任意截面上,应保持内力平衡状态,故有

$$\sum_{i=1}^n \int_{s_i} \sigma_{xi} dA = 0 \quad (2)$$

式中, s_i 为第 i 层岩层的截面积; A 为单位面积。

将式(1)代入式(2),组合岩层的中性面距底面的距离 h_0 为

$$h_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \Lambda_i h_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \Lambda_i h_i \sum_{m=i+1}^n h_m}{2 \sum_{i=1}^n \Lambda_i h_i} \quad (3)$$

如图5(b)所示,在组合岩层中任截取两截面 AB 、 CD ,在截面中取一单元 $EBDF$,该单元顶底面平行于

中性面,且距中性面任意距离 y 。由力的平衡条件,水平合力 $\sum F_x = 0$,并假定组合岩层厚度为 1,有

$$\tau = \frac{1}{I_i} \frac{d\Psi_i}{dx} \int_y^{h_0} \sum_{m=i+1}^n h_m y dS + \frac{1}{I_{i+1}} \frac{d\Psi_{i+1}}{dx} \int_{h_0}^{\sum_{m=i+2}^n h_m} y dS \quad (4)$$

式中, τ 为剪应力; Ψ_i 为岩层 i 承受的弯矩; S 为组合岩层截面积; I_i 为岩层 i 的惯性矩。

进而得到 n 层组合岩层任一截面上剪应力计算式为

$$\tau = \begin{cases} -\frac{1}{2} \left\{ \Lambda_i \left[\left(h_0 - \sum_{i+1}^n h_{i+1} \right)^2 - y^2 \right] + \Lambda_{i+1} h_{i+1} \times \right. \\ \left. \left(2h_0 - h_{i+1} - \sum_{k=2}^n h_{i+2} \right) + \Lambda_{i+2} h_{i+2} \left(2h_0 - h_{i+2} - \sum_{i+3}^n h_{i+3} \right) + \right. \\ \left. \dots + \Lambda_{n-1} h_{n-1} (2h_0 - h_{n-1}) \right\} \frac{d^3 W}{dx^3}, \\ \text{(计算面位于第 } i \text{ 种岩石内)} \\ -\frac{1}{2} \Lambda_n (h_0^2 - y^2), \text{(计算面位于第 } n \text{ 种岩石内)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, W 为梁的挠度。

两端固支梁弯矩为

$$\Psi_i = -\Lambda_i I_i \frac{d^2 W}{dx^2} = \frac{1}{12} \left[6ql \left(x + \frac{l}{2} \right) - 6q \left(x + \frac{l}{2} \right)^2 - ql^2 \right] \quad (6)$$

式中, q 为由组合岩层自重产生的均布荷载, $q = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i$, γ_i 为第 i 层岩层容重; l 为固支梁跨距,即工作面走向长度。

由式 (6) 可得

$$\frac{d^3 W}{dx^3} = \frac{ql - 2qx}{2\Lambda_i I_i} \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (5), 得到采动覆岩层任意层面的最大剪切力 ($x=0$ 处) 为

$$\tau_{\max} = \begin{cases} -\frac{1}{4} \left\{ \frac{1}{I_i} \left[\left(h_0 - \sum_{i+1}^n h_{i+1} \right) - y^2 \right] + \frac{1}{I_{i+1}} h_{i+1} \times \right. \\ \left. \left(2h_0 - h_{i+1} - \sum_{i+2}^n h_{i+2} \right) + \frac{1}{I_{i+2}} h_{i+2} \left(2h_0 - h_{i+2} - \sum_{i+3}^n h_{i+3} \right) + \right. \\ \left. \dots + \frac{1}{I_{n-1}} h_{n-1} (2h_0 - h_{n-1}) \right\} l \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \\ \text{(计算面位于第 } i \text{ 种岩石内)} \\ -\frac{1}{2} \Lambda_n (h_0^2 - y^2) \text{(计算面位于第 } n \text{ 种岩石内)} \end{cases} \quad (8)$$

基于式 (8) 确定出采动覆岩层任意节理面的最大剪切力 τ_{\max} , 岩层滑移的力学判据 $[\tau]$ 选用库伦准则:

$$[\tau] = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (9)$$

式中, σ_n 为作用于节理面的正向应力; φ 为节理面摩擦角; c 为节理面黏聚力。

岩层 i 受到的上覆岩层荷载为

$$\sigma_n = \frac{\Lambda_i h_i^3 (\gamma_i h_i + \gamma_{i+1} h_{i+1} + \dots + \gamma_n h_n)}{\Lambda_i h_i^3 + \Lambda_{i+1} h_{i+1}^3 + \dots + \Lambda_n h_n^3} \quad (10)$$

当某层位剪应力首次超过原生节理面的剪切强度时,说明该处的上下相邻岩组之间出现滑移破坏面,即为可积水离层发育位置,即有

$$\tau_{\max} > [\tau] \quad (11)$$

在一定的地质环境中,相邻岩层的物理特征的差异是相邻岩层间形成的离层的决定性因素,差异越大,离层形成的可能性越高。选取采厚与开采煤层顶板至岩层底界面的距离的比值、相邻岩层物理特征量的比值、岩层 RQD 值、岩层的厚度与上覆岩层中最大的厚度的比值,提出离层位置的判别公式^[30]为

$$J = c_1 \sqrt{\frac{T}{l_a}} + c_2 \lg \left(\frac{\sigma_a m_a}{\sigma_b m_b} \right) + c_3 \text{RQD} + c_4 \frac{m_a}{m_{\max}} + c_5 \quad (12)$$

其中, T 为煤层开采厚度; l_a 为开采煤层至岩层底界面的距离; σ_a 和 σ_b 分别为上位和下位相邻岩组的平均单轴抗压强度; m_a 和 m_b 分别为上位和下位相邻岩组的厚度; m_{\max} 为导水裂隙带上部基岩中,单个岩层最大厚度; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 为经验常数,根据实测和经验,取 $c_1=0.051$ 、 $c_2=0.019$ 、 $c_3=0.034$ 、 $c_4=0.751$ 、 $c_5=0.001$ 。将实测数据以及实验数据代入判别公式,若 $J^1 > 5$,则不会离层;若 $J^1 < 5$,则可能形成离层。

此外,还需保证可积水离层具有一定的空间范围^[28],即有

$$T - \sum (K_i - 1) h_{ki} > 0 \quad (13)$$

式中, T 为开采煤层总厚度; h_{ki} 和 K_i 分别为煤层采后垮裂带内第 i 层岩层的原始厚度和碎胀系数。

只有同时满足式 (11)~(13) 时,覆岩的原生节理面处才可发育可积水离层。

2.3 勘察目标层工程地质判定流程

综合理论力学模型和工程地质条件勘查,判定采动覆岩是否发育采动覆岩潜在“突水离层带”并确定其层位可归纳为 3 步,具体流程如图 6 所示。

(1) 确定封闭离层空间。首先确定煤层开采导水裂隙带范围^[31-34],将导水裂隙带以上的基岩区域作为潜在采动覆岩“突水离层带”的发育区。接着,构建研究区覆岩的组合梁力学模型,并结合式 (11)~(13),确

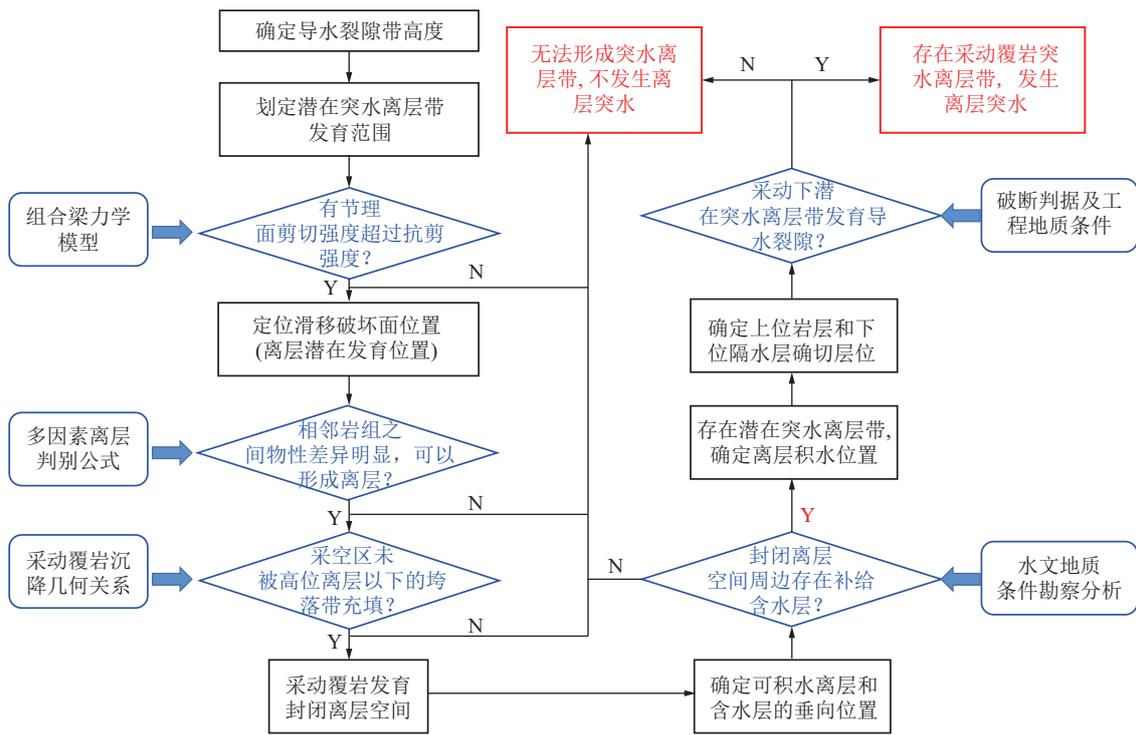


图 6 采动覆岩“突水离层带”判别流程

Fig.6 Discriminant process of inrush separation zone of mining overburden

认是否发育有可积水离层及其垂向位置。若存在可积水离层, 则可进行下一步判别。若不存在, 则可确定覆岩不发育潜在采动覆岩“突水离层带”, 从而确定勘查区不存在离层涌(突)水问题。

(2) 识别离层积水。根据覆岩水文地质条件, 识别导水裂隙带以上的含水层。结合确定的可积水离层位置, 筛选能从周围含水层接受水源补给的可积水离层。离层积水可出现在含水层内部或者含水层与围岩交界处^[15]。如果确定存在补给水源, 就可以确认存在采动覆岩的潜在“突水离层带”, 将其作为补充勘查的目标层。相反, 如果没有补给水源, 就可以排除离

层涌水问题的可能性, 断定覆岩中不发育潜在的“突水离层带”。

(3) 定位上位岩层和下位隔水层。采动覆岩“突水离层带”的形成取决于上位岩层和下位隔水层的破断。从工程地质角度看, 上位岩层通常为厚砂岩/砂砾岩或火成岩, 而下位岩层则为泥质岩层、砂泥岩互层或带有古风化壳的软弱夹层。上、下位岩层之间存在显著的工程地质特性差异。

从工程力学角度出发, 根据组合岩梁模型(图5和图7), 将导水裂隙带上方的基岩划分为分离的岩组。位于离层积水上方且无滑移破坏面的单一岩组被定

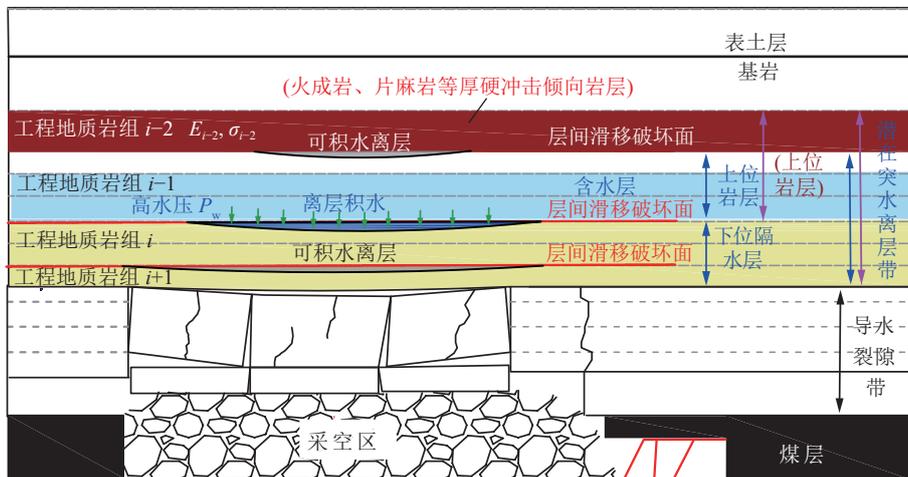


图 7 潜在“突水离层带”结构划分示意

Fig.7 Structure division of potential “inrush separation zone”

义为采动覆岩“突水离层带”的上位岩层。此外,如果离层积水上方存在硬厚冲击倾向岩层,如火成岩、片麻岩等,它们也被视为“突水离层带”上位岩层的一部分。离层积水至导水裂隙带顶部的区域构成了下位隔水层。

2.4 勘(探)查阶段划分及要点分析

离层水害的勘(探)查应包括开采前和回采期间2个阶段进行。

(1) 采前勘查要点。针对煤矿离层水害采前勘查应包括2个步骤,每步骤的勘查要点见表2。

表2 离层水害勘查要点
Table 2 Investigation key points of WISL

勘查阶段	探查要素	目标层位	勘察测试指标
勘探	基本条件	矿区覆岩	基本工程地质和水文地质参数
勘查	水源	离层积水	补给含水层的富水性 and 可积水离层发育规模
	通道	下位隔水层	弹性模量、容重、泊松比、抗压、抗拉及剪切强度等
	力源	上位岩层	上位岩层冲击倾向性、能量指标等
	物源	含泥古风化壳、破碎的泥化夹层、断层泥等	软化性、崩解性、矿物成分及含量等
	其他	离层突水间接诱发因素	构造破碎带发育情况
	测试指标侧重点	离层动力突水	上位岩层冲击倾向性评价指标
		离层静水压涌突水	下位隔水层阻水性能
	离层携泥砂突水	水流作用下物源层崩解、软化系数	

覆岩基本条件勘探。首先根据传统水害勘查规范的要求,对覆岩基本工程地质和水文地质条件进行前期勘探,明确勘探区基本工程地质和水文地质条件,测试覆岩层弹性模量、泊松比、抗压/剪强度等物理力学参数,基于图6的判别流程,确定采动覆岩潜在“突水离层带”的发育情况及赋存层位。

致灾因素专项勘查。识别潜在采动覆岩“突水离层带”只说明采动覆岩可能满足离层水害的“水源”条件。要准确评估离层突水风险是否存在,关键是判断是否存在有效的“力源”或“通道”。这需要对上位岩层和下位隔水层进行专项勘察,明确其工程地质力学特征,预测评价采动覆岩潜在“突水离层带”导水裂隙的发育情况,分析评价开采条件下可能发生的离层水害类型和强度。根据不同突水类型,确定指标侧重点。比如,对离层动力突水型,侧重分析上位岩层冲击倾向性评价指标^[35],对于离层静水压涌突水型,应重点下位隔水层阻水性能,而对离层携泥砂突水型,需重点探究物源层崩解、软化系数^[36]。

(2) 回采期间探查要点。工作面回采期间,着重对采动条件下含水层水动力条件动态变化和覆岩裂隙结构演化及进行探查。通过监测水位和流场,间接判断离层积水情况。同时,实时监测收集支架阻力和微震信号,侧面反应“通道”的发育情况。

3 离层水害预测评价方法

离层水害预测评价应包括2个方面:全矿井/采区

尺度的区域危险性分区预测以及工作面尺度的离层涌突水位置和涌水量预报。目前已有一些矿井水害危险性预测方法可为传统顶底板水害预测提供参考,包括三图-双预测法、统计分析法、特征参数法、灰色关联分析法和神经网络模型等。然而,这些方法在数据统计、因素选取、权重赋值和计算效率等方面存在一定不确定性或困难,并且忽略了离层水害自身独特的演化致灾机理。因此,有必要进一步研究离层水害预测方法,以提高其准确性和可靠性。

3.1 采前区域危险性预测评价方法

采动覆岩中的“突水离层带”是离层水害的关键层位,水源、通道、力源和物源是主要致灾因素,影响离层水害孕育、演化和强度。以“突水离层带”模型为基础,分别提出“水源”“通道”“力源”“物源”的评价指标计算公式,构建离层突水危险性综合预测数学模型。

“突水离层带”下位隔水层变形下沉量决定了积水离层空间规模,根据采动覆岩沉降模型,结合离层充水速度,提出表征“水源”(离层积水规模)的评价指标为

$$R = P_w K_w L [aM - (K_p - 1)T_{CS1}] \quad (14)$$

式中, P_w 为含水层水压; K_w 为含水层渗透系数; a 为开采煤层数; K_p 为近场顶板岩层碎胀系数; T_{CS1} 为下位隔水层底板到煤层顶板间距; L 为工作面宽度。

下位隔水层破断表示离层水导水通道的形成,影响下位隔水层稳定性的因素主要包括岩层厚度、强度、

岩性分布、空间赋存等。据此,提出表征“通道”的评价指标 P 为

$$P = \frac{L^2 a M}{T_{CS2} H_{CS2} \sigma_{CS2}} \quad (15)$$

式中, T_{CS2} 为下位隔水层厚度; H_{CS2} 为下位隔水层顶板到煤层顶板距离; σ_{CS2} 为下位隔水层单轴抗压强度。

采动诱发的上位岩层破断对下位隔水层施加附加动力荷载,导致下位隔水层形成导水通道,引发离层突水。因此,建立上位岩层稳定性(“力源”)的评价指标,一方面可以表征离层水害动力特征,另一方面可以间接反应突水通道的发育情况。基于岩层结构力学模型^[28],并考虑到地应力(埋深)对上位岩层(冲击倾向性岩层)应力集中的影响,建立表达式为

$$F = \frac{a M L D_{CS3}}{T_{CS3} H_{CS3} \sigma_{CS3}} \quad (16)$$

式中, T_{CS3} 为上位岩层厚度; H_{CS3} 为上位岩层顶板到煤层顶板距离; σ_{CS3} 为上位岩层单轴抗压强度; D_{CS3} 为上位岩层埋深。

西部侏罗系煤田溃入井下的泥砂主要来自上覆软弱夹层,软弱夹层遇水软化崩解的水理性质决定的顶板突水期间溃入工作面的泥砂量。软弱夹层泥岩含量越高,岩层遇水软化崩解性越强。因此提出“物源”评价指标,表达式为

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n H_i^m}{\sum_{i=1}^m H_i} \Phi \quad (17)$$

式中, $\sum_{i=1}^n H_i^m$ 为软弱夹层泥岩层累计厚度; $\sum_{i=1}^m H_i$ 为软弱夹层总厚度; Φ 为软弱夹层崩解系数。

考虑离层突水的形成机理,提出离层水害综合评价指标与水源、通道、力源和物源这4个致灾因素评价指标关系:

$$I(x, y) = [R(P + F)]^{Y+1} \quad (18)$$

式中, $I(x, y)$ 为煤矿离层突水区域预测综合评级指标,是平面位置 x 、 y 的函数,可基于 $I(x, y)$ 的值绘制危险性分区图进行区域预测。

表达式(18)的核心在于,它可以在一定程度上反应离层突水成灾背后4个致灾因素的时空演化关系。

水源 R 是综合指标的关键要素,当 R 趋近于0时,表示覆岩中不存在潜在的采动覆岩“突水离层带”,或者离层积水规模较小,无论通道、力源和物源指标如何,综合指标也会趋近于0,表示发生离层突水的危险

性较低。如果通道 P 和力源 F 两者均趋近于0,则表示导水裂隙贯通离层积水和工作面的可能性较小,综合指标也接近0。但如果 R 、 P 、 F 中至少有1个值较大,则离层水害危险性相应增加。当物源 Y 趋近于0时,离层水害危险性的评估将主要依赖水源、通道和力源指标。只有当突水发生且存在软弱泥化层(物源)时,才可能发生严重的携泥砂突水灾害。

将式(14)~(17)代入式(18),可得到离层水害全矿井/采区尺度区域预测的综合评价指标:

$$I(x, y) = \left\{ P_w K_w L \left[a M - (K_p - 1) T_{CS1} \right] \times \left(\frac{L^2 a M}{T_{CS2} H_{CS2} \sigma_{CS2}} + \frac{a M L D_{CS3}}{T_{CS3} H_{CS3} \sigma_{CS3}} \right) \right\}^{\left\{ \Phi \frac{\sum_{i=1}^n H_i^m}{\sum_{i=1}^m H_i} \right\} + 1} \quad (19)$$

3.2 工作面离层涌突水预报

在做好区域预测的同时,进一步开展工作面离层涌突水位置和涌水量预报。离层水害位置的判定关键在于采动覆岩“突水离层带”通道形成的预测。可通过计算上位岩层和下位隔水层的破断距^[19],同时兼顾构造破碎带发育情况,综合预测工作面推进期间离层突水的位置以及灾害类型。

假设采煤工作面覆岩中“突水离层带”中的离层空间未发生闭合,可根据式(20)近似计算工作面掘进期间“突水离层带”中可发育的最大离层总体积 V_{\max} 为

$$V_{\max} = \frac{1}{4} T \eta L L_d \quad (20)$$

式中, η 下沉系数; L_d 为工作面掘进长度。

当在工作面回采前实施超前疏放、下泄或抽出离层积水,使其以可控的方式均匀排出时,涌水量可以按照非稳定、定降深井流公式计算。根据地下水动力学中的非稳定流理论,涌水量 Q 可按下式计算:

$$Q = 2\pi T_q S_q G(\lambda), \quad \lambda = \frac{T_q t}{\mu_c r_0^2} \quad (21)$$

式中, T_q 为含水层导水系数; t 为抽水延续时间; μ_c 为储水系数; r_0 为抽水井半径; S_q 为含水层水位降深; $G(\lambda)$ 为 λ 的函数。

综上,如图8所示,煤矿采动覆岩离层水害勘查与预测评价的主要内容应包括:

(1) 首先基于覆岩基本工程地质和水文地质条件勘探结果,分析勘探区采动覆岩是否存在潜在采动覆岩“突水离层带”以及对应的上位岩层、离层积水和下位隔水层的位置,评估离层突水的可能性。

(2) 针对识别出的潜在采动覆岩“突水离层带”,开展致灾因素专项勘查,包括钻孔取心测试、构造发

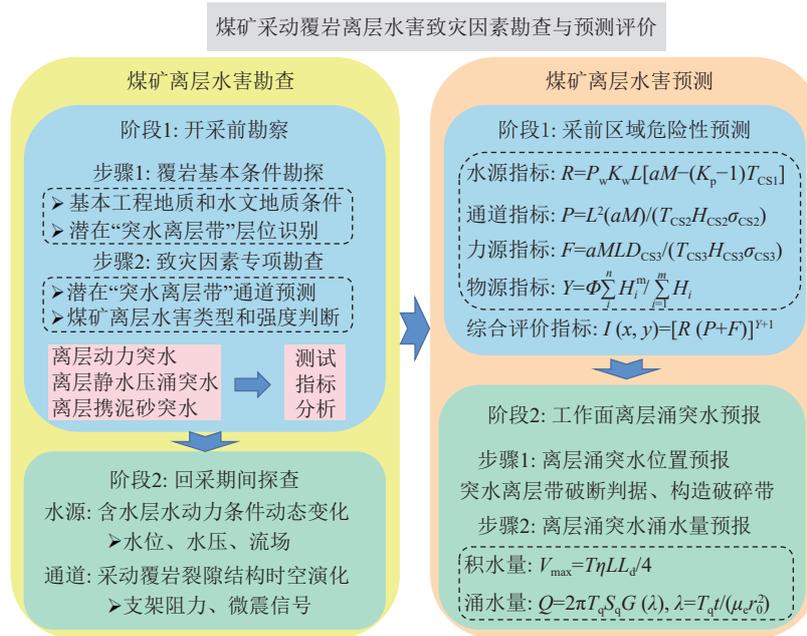


图 8 离层水害勘查与预测评价流程

Fig.8 Flow chart of Exploring and the prediction evaluation of water inrush from separation layers

育探测、上位岩层和下位隔水层破断计算, 进一步确定采动覆岩是否发育采动覆岩“突水离层带”, 即存在离层水害的类型和强度。

(3) 然后开展采全矿井/采区尺度的区域危险性分区预测和工作面尺度的离层涌突水位置及涌水量预报, 划定全矿区离层水害高风险区, 预测工作面涌水量及突水位置。并基于离层突水风险等级和突水类型, 提出针对性的防治建议, 开展防治水设计。

4 工程应用

4.1 矿井工程地质与水文地质条件

崔木煤矿位于永陇矿区东端, 行政区划归属麟游县、彬州市管辖。全井田划分为 7 个盘区, 目前东部 21 盘区已开采完毕, 正在回采西侧 22 盘区。崔木煤矿 21 和 22 盘区 3 煤到白垩系厚层砂砾岩含水层平均距离为 198.58 m, 白垩系 (K) 含水层平均总厚度 257.10 m, 3 煤平均厚度 16.62 m (采放高度约为 15 m); 安定组 (J_{2a}) 平均厚度 109.14 m, 以泥质岩类为主; 直罗组 (J_{2z}) 和延安组 (J_{2y}) 为弱富水含水层, 总平均厚度 83.72 m; 白垩系含水层单位涌水量 0.006 59~0.193 14 L/(s · m), 渗透系数为 0.002 446~0.142 500 m/d, 属富水性弱-中等的含水层, 但其厚度大, 静储量大, 且易与下伏安定组泥质岩产生不协调下沉变形进而产生离层积水空间。

崔木煤矿已采工作面中, 除了 22302 工作面外, 其余工作面回采期间均出现不同程度的突水溃砂事件, 造成巷道被泥砂淤堵, 且突水前白垩系含水层水

位出现明显下降, 突水具有明显的周期性。根据笔者课题组多年来开展的工程调查, 已证实崔木煤矿突水类型为离层携泥砂突水^[2, 5, 15, 36]。

4.2 采动覆岩“突水离层带”层位识别

基于矿井基本工程地质与水文地质条件, 对崔木煤矿的综合地层信息进行整理, 包括地层厚度、容重、弹性模量、抗压强度、RQD 等关键指标, 见表 3。利用现场“三带”监测试验, 确定工作面抵达钻孔时的覆岩裂采比为 3.21, 据此计算出矿井传统“导水裂隙带”高度约为 3.21×15=48.15 m, 表明潜在的“突水离层带”发育区位于顶板以上 48.15 m 以上的基岩区域, 即表中的 6~10 号岩层。

接下来, 将 6~10 号岩层视为由原生层间节理分割而成的组合岩层, 如 3.1 节中所述。根据剪切试验, 取节理面黏聚力为 5 MPa, 取内摩擦角 25°。基于式 (11)~(13), 计算出在 10 号和 9 号岩层之间、9 号和 8 号岩层之间以及 8 号和 7 号岩层之间可以形成滑移破坏面。然后, 将 10 号、9 号和 8 号岩层分别作为“岩组”, 通过式 (11) 和式 (12), 判定在 9 号和 8 号岩层、8 号和 7 号岩层之间发生不均匀沉降, 且可以形成封闭的离层空间。鉴于白垩系地层为主要含水层, 因此 9 号和 8 号岩层之间的离层可能会被充水, 从而形成离层积水。最终确定 9 号岩层为“突水离层带”的上位岩层, 6 号、7 号和 8 号岩层则位于导水裂隙带之上、离层积水之下, 被认定为“突水离层带”的下位隔水层。因此, 可以推断崔木煤矿采动覆岩“突水离层带”发育在工作面以上 115~208 m 的区域。

4.3 煤矿离层水害预测评价

根据式 (14)~(17) 涉及到的评价因子, 统计研究区 67 个钻孔数据。计算“水源”“通道”“力源”“物源”的评价指标, 代入式 (18) 得到每个钻孔的综合危

险性评价指标 $I(x,y)$ 。基于归一化的 $I(x,y)$, 绘制崔木 21、22 盘区离层水害区域的危险性评价图 (图 9(a)), 由图 9(a) 可知, 指标值越高, 代表着离层水害的危险性越大。

表 3 崔木煤矿综合地层信息
Table 3 strata information of Cuimu coal mine

组 编号	岩性	厚度/m	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	单轴抗压 强度/GPa	RQD	是否位于潜在 “突水离层带”范围	是否形成破 坏滑移面	是否可形成 封闭离层空间	是否可形成 可离层积水	“突水离层带”判别
K	10 粗砂岩	284.78	23.4	22.45	34.32	78	√	√	×		
	9 粗砾岩	20.20	25.8	25.14	25.70	80	√	√	√	√	S
J _{2a}	8 泥岩	89.75	22.0	3.25	16.41	55	√	√	√	×	X
	7 粗砂岩	4.26	22.5	3.24	13.75	45	√	×			X
	6 泥岩	18.46	23.2	3.05	16.41	45	√				X
	5 泥岩	9.21	22.1	3.05	11.17	40	×				
J _{2z}	4 细砂岩	3.56	23.9	16.58	16.41	15	×				
	3 泥岩	15.72	23.3	15.24	10.80	10	×				
J _{2y}	2 粗砂岩	6.32	23.4	10.24	9.70	10	×				
	1 泥岩	0.63	22.1	3.05	8.52	10	×				
	3煤	15.00									

注: √表示“是”, ×表示“否”; 标记在岩层*i*处指在岩层*i*的底板位置; S表示上位岩层, X表示下位隔水层。

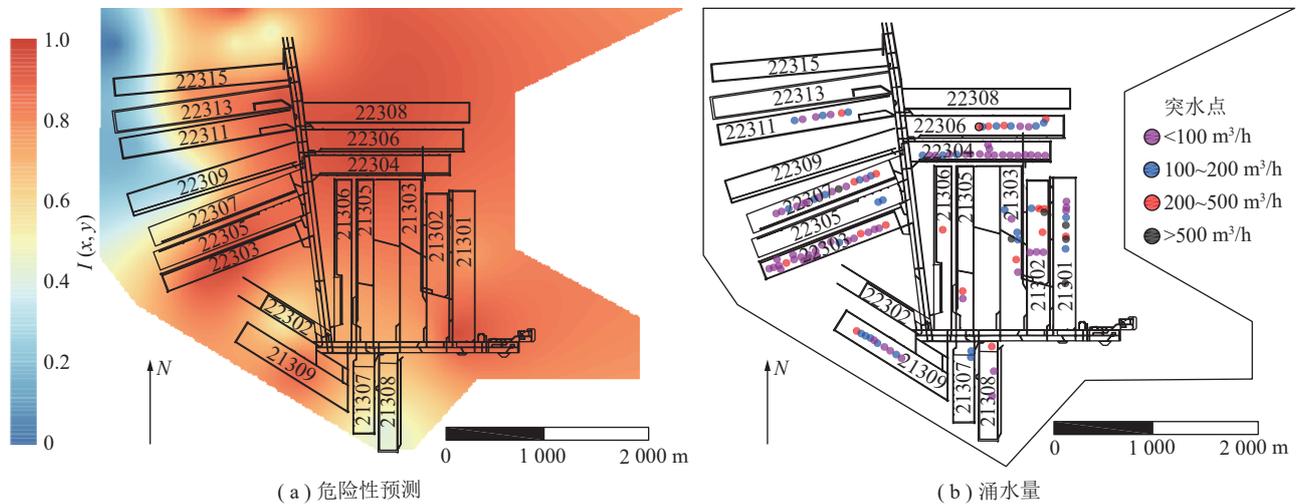


图 9 崔木离层水害区域危险性预测及工作面涌水量情况

Fig.9 Regional risk assessment of WISL of Cuimu mine areas

由图 9(a) 可以明显看出, 21301、21302、21306、22306、22303、22307 和 22311 工作面的危险性相对较高, 而 22302、21307 和 21308 工作面的危险性则相对较低。这一结果与实际工作面的涌突水情况基本吻合 (图 9(b)), 证明本文基于离层水害致灾因素的预测评价方法具有一定的实用性和准确性, 有效指导采矿活动的安全规划, 减少离层突水带来的潜在风险。

5 结 论

(1) 离层水害致灾因素和类型: 将离层积水称为“水源”, 将导水裂隙称为“水源”, 将导致通道形成的因素称为“力源”, 将引发携带泥砂的软弱泥化夹层称为“物源”。这 4 个因素共同影响离层水害的发生、类型和严重程度, 并将离层水害分为: 离层动力突水、离层静水压涌突水和离层携泥砂突水。

(2) 离层水害勘察要点: 提出了“采动覆岩‘突水离

层带”的概念,将其作为离层水害重点勘察的目标层位。提出了封闭离层空间的垂向发育层位判别公式,然后根据工程地质和水文地质条件,确定离层积水、上位岩层和下位隔水层的确切位置,确定采动覆岩是否存在“突水离层带”的可能性。离层水害的勘(探)查应包括开采前和回采期间2个阶段进行,采前应先后开展覆岩基本条件勘探和勘查目标层专项勘查,回采期间着重对采动条件下含水层水动力条件动态变化和覆岩裂隙结构演化及进行探查。

(3) 离层水害预测方法:离层水害的预测评价需要包括危险性分区预测和工作面离层水突出位置及涌水量预报。基于“水源”“通道”“力源”“物源”互馈致灾机理,提出了用于离层水害区域预测的综合评价指标,形成了从全矿井/采区至采前工作面的灾害预测评价方法。

(4) 复杂成岩环境下的挑战:西部鄂尔多斯盆地侏罗系煤田的复杂成岩环境增加了离层水害的预测评价难度。为了更好地理解离层水害的地质环境和机制,未来应建立多源数据融合的覆岩三维地质模型。此外,“复杂成岩环境下采动覆岩流变力学行为及尺度效应”是离层水害的关键科学问题。勘查阶段需要深入研究采动应力路径下不同沉积岩体的流变力学性质和尺度效应,以提高离层水害的准确预测。

参考文献(References):

- [1] 曾一凡,孟世豪,武强,等.天窗补给型衍生式矿井动力突水模式及其评价与治理技术[J].煤炭学报,2023,48(10):3776-3788.
ZENG Yifan, MENG Shihao, WU Qiang, et al. Derivative mine dynamic water inrush mode of skylight leakage and its evaluation and control technology system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3776-3788.
- [2] 乔伟,王志文,李文平,等.煤矿顶板离层水害形成机制、致灾机理及防治技术[J].煤炭学报,2021,46(2):507-522.
QIAO Wei, WANG Zhiwen, LI Wenping, et al. Formation mechanism, disaster-causing mechanism and prevention technology of roof bed separation water disaster in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 507-522.
- [3] 曹海东.煤层开采覆岩离层水体致灾机理与防控技术研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2018.
CAO Haidong. Study on prevention & controtechnology and disaster-causedmechanism of bed separationwater body in overburden strataduring coal seam mining[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [4] 李东,刘生优,张光德,等.鄂尔多斯盆地北部典型顶板水害特征及其防治技术[J].煤炭学报,2017,42(12):3249-3254.
LI Dong, LIU Shengyou, ZHANG Guangde, et al. Typical roof water disasters and its prevention & control technology in the north of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3249-3254.
- [5] 乔伟,黄阳,袁中帮,等.巨厚煤层综放开采顶板离层水形成机制及防治方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):2076-2084.
QIAO Wei, HUANG Yang, YUAN Zhongban, et al. Formation and prevention of water inrush form roof bed separation with full-mechanized caving mining of ultra thick coal seam[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2076-2084.
- [6] 乔伟,李文平,李小琴.采场顶板离层水“静水压涌突水”机理及防治[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):96-104.
QIAO Wei, LI Wenping, LI Xiaoqin. Mechanism of “hydrostatic water-inrush” and counter measures for water inrush in roof bed separation of a mining face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 96-104.
- [7] 乔伟,李文平,孙如华,等.煤矿特大动力突水动力冲破带形成机理研究[J].岩土工程学报,2011,33(11):1726-1733.
QIAO Wei, LI Wenping, SUN Ruhua, et al. Formation mechanism of dynamic impact failure zone of super dynamic water inrush in coal mine[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1726-1733.
- [8] 张培森,董宇航,张晓乐,等.2008—2021年我国煤矿水害事故统计规律分析及预测研究[J].煤炭工程,2022,54(11):131-137.
ZHANG Peisen, DONG Yuhang, ZHANG Xiaole. et al. Statistical law analysis and forecast of coal mine water disaster accidents in China from 2008 to 2021[J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 131-137.
- [9] 张培森,朱慧聪,吴玉华,等.我国煤矿离层涌突水致灾机理及其防控关键技术研究进展[J].工程地质学报,2021,29(4):1057-1070.
ZHANG Peisen, ZHU Huicong, WU Yuhua, et al. State-of-the-art of mechanism of water inrush from bed separation and key technology of prevention and pre-control in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 1057-1070.
- [10] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水细则[M].北京:煤炭工业出版社,2018.
- [11] 国家矿山安全监察局.煤矿防治水“三区”管理办法[Z].中华人民共和国应急管理部,2022.
- [12] 国家矿山安全监察局.中华人民共和国矿山安全行业标准[Z].2023.
- [13] 国家安全生产监督管理总局.煤矿安全规程[Z].中华人民共和国应急管理部,2022.
- [14] 国家安全监管总局.煤矿地质工作规定[Z].2013.
- [15] 贺江辉.煤层开采过程中覆岩离层动态演化研究及离层水害评价[D].徐州:中国矿业大学,2018.
HE Jianghui. Dynamic evolution of bed separation in coal seam mining and assessment of bed-separation water hazards[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018
- [16] 方刚,靳德武.铜川玉华煤矿顶板离层水突水机理与防治[J].煤田地质与勘探,2016,44(3):57-64.
FANG Gang, JIN Dewu. Research on the roof stratifugic water inrush mechanism and control in Tongchuan Yuhua coal mine[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2016, 44(3): 57-64.
- [17] 孙学阳,刘自强,杜荣军,等.煤层顶板次生离层水周期突水致灾过程模拟[J].煤炭学报,2016,41(S2):510-516.
SUN Xueyang, LIU Ziqiang, DU Rongjun, et al. Simulation on the

- progress of periodical water inrush caused by burst of water cells formed by overburden strata separation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 510–516.
- [18] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(4): 561–565.
WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(4): 561–565.
- [19] 乔伟, 刘梦楠, 李连刚, 等. 采动覆岩“突水离层带”岩体结构演化致灾机理及突水预测方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 818–83.
QIAO Wei, LIU Mengnan, LI Liangang, et al. Disaster mechanism induced by structure evolution of “water-inrushing separation zone” of mining rock mass and prediction method of water inrush from separation layer[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 818–83.
- [20] 施龙青, 曲兴玥. 导水裂缝带研究概述[J]. *煤炭科技*, 2022, 43(4): 36–51.
SHI Longqing, QU Xingyue. Summary of research on water conducting fracture zone[J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2022, 43(4): 36–51.
- [21] HEBBLEWHITE B. Fracturing, caving propagation and influence of mining on groundwater above longwall panels—a review of predictive models[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(1): 49–54.
- [22] 刘天泉. 大面积采场引起的采动影响及其时空分规律[J]. *矿山测量*, 1981(4): 70–77.
LIU Tianquan. Mining influence caused by large-area stope and its time-space distribution law[J]. *Mine Survey*, 1981(4): 70–77.
- [23] 武强, 黄晓玲, 董东林. 评价煤层顶板涌(突)水条件的三图-双预测法[J]. *煤炭学报*, 2000, 25(1): 60–65.
WU Qiang, HUANG Xiaoling, DONG Donglin, et al. “Three maps-two predictions” method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(1): 60–65.
- [24] 李文平, 朱厅恩, 王启庆, 等. 鄂尔多斯盆地巨厚白垩系下煤开采突泥溃砂物源及成灾模式[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 360–370.
LI Wenping, ZHU Ting'en, WANG Qiqing, et al. Material source and disaster model of mud-sand inrush in coal mining under extremely thick Cretaceous in Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 360–370.
- [25] PALCHIK V. Experimental investigation of apertures of mining-induced horizontal fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 502–508.
- [26] HEBBLEWHITE B G J M C. Impacts of underground coal mining on natural features in the southern coalfield: Strategic review[J]. Report to NSW Department of Planning, 2008, 3(4): 230–243.
- [27] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [28] 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.
- [29] 邓喀中. 开采沉陷中的岩体结构效应[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [30] 乔伟, 程香港, 江传文, 等. 一种覆岩垂向离层预测方法: ZL202110300812.8[P]. 2021–04–16.
- [31] LIU M, QIAO W, ZHAO S, et al. Stress intensity factor-based prediction method and influential factors of roof water inrush under longwall mining[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(3): 215.
- [32] HE C, LU W, ZHA W, et al. A geomechanical method for predicting the height of a water-flowing fractured zone in a layered overburden of longwall coal mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021, 143: 104798.
- [33] LI Y, LONG M, TANG J, et al. A hydraulic fracture height mathematical model considering the influence of plastic region at fracture tip[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 184–195.
- [34] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(4): 613–620.
HU Xiaojuan, LI Wenping, CAO Dingtao, et al. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 613–620.
- [35] 赵阳, 侯煜坤, 唐铁吾. 基于能量传递效率的煤冲击倾向性评价指标[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(1): 22–31.
ZHAO Yang, HOU Yukun, TANG Tiewu. Evaluation index of bursting liability of coal based on energy transfer efficiency[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(1): 22–31.
- [36] 张鑫, 乔伟, 等. 雷利剑. 综放开采覆岩离层形成机理[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(S2): 342–349.
ZHANG Xin, QIAO Wei, LEI Lijian, et al. Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top-coal caving[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 342–349.