



移动扫码阅读

许延春, 黄磊. 基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 370–383.
XU Yanchun, HUANG Lei. Full-time and space early-warning method for floor water inrush in working face based on microseismic monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 370–383.

基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法

许延春, 黄磊

(中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要:为分析采煤工作面不同时期、不同空间的微震响应特征差异,进而实现矿井水害预警和防治,基于典型案例分析提出了一种基于微震监测的工作面底板突水全时空预警的方法。所谓“全时空”是指包括采前时期、超前采动影响时期和开采时期在内的工作面全时间周期的3时段划分,以及工作面全空间的7个评价区域划分。在第1时段(采前时期),基于钻孔工程信息(钻孔涌水量、钻孔水压、钻孔注浆量)和微震响应特征,形成了突水危险性的表示方法,确定了原发性突水危险区,进而实现了采前时期突水危险性的长期预测;在第2时段(超前采动影响时期),设置“固定工作面”,并对微震事件及震源参数进行重新定位,在对微震事件核密度分析的基础上,获取突水前兆信息,确定了超前影响区、滞后影响区、侧向影响区的突水特征,进而实现了超前采动影响时期的突水危险性预警;在第3时段(开采时期),结合微震事件核密度分析,确定了顶板导水破坏区、底板破坏区、底板采动损伤区,引入2D-CE法在平面上对微震事件进行规范化,分析微震事件置信椭圆与预警含水层的位置关系,进而实现了工作面开采时期的突水危险性预报。同时根据开采验证结果,对前期预报方法进行修正,为后续工作面突水预报服务,使得焦作、邯邢矿区多个工作面基于微震监测的底板突水预测结果更加准确。

关键词:微震监测;全时空;底板突水;突水前兆;预警方法

中图分类号:TD745

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)01-0370-14

Full-time and space early-warning method for floor water inrush in working face based on microseismic monitoring

XU Yanchun, HUANG Lei

(School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the difference of microseismic characteristics in different periods and spaces of the working face and then realize the early warning of water damage, a full-time and space early-warning method for floor water inrush based on microseismic monitoring was proposed based on typical case analysis. The so-called “full-time and space” refers to the 3 time periods of the whole time cycle of the working face, including pre-mining period, advanced-mining period, and mining period, and the 7 evaluation zones of the whole space of the working face. In the first period, based on the engineering information of boreholes and microseismic response characteristics, the expression method of water inrush risk was formed, and the primary abnormal zones were determined, thus realizing the long-term prediction of water inrush risk in the pre-mining period. In the second period, the fixed working face was set up and the microseismic events were repositioned. Based on the nuclear density analysis of the frequency and energy of microseismic events at the “fixed working face”, the water inrush characteristics of the leading influence zone, the lagging influence zone and the lateral influence zone were determined, realizing the water inrush risk early-warning in the advanced mining period. In the third period, the 2D-CE method was introduced to normalize the microseismic events on the plane, the early-warning aquifer was defined, and the roof damage zone, the floor damage zone, and

收稿日期:2022-08-10 责任编辑:周子博 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2022-1286

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2022YQNY04)

作者简介:许延春(1963—),男,河北唐山人,研究员,博士生导师。E-mail:yanchun-xu@163.com

通讯作者:黄磊(1994—),男,山西长治人,博士研究生。E-mail:hl583654197@163.com

the floor mining damage zone were determined in combination with the frequency of microseismic events and the energy nuclear density analysis, realizing the water inrush risk prediction in the mining period. At the same time, according to the mining verification results, the prediction method in the early phase was modified to serve the water inrush early warning in the subsequent working face, making the prediction results of floor water inrush more accurate in Jiaozuo and Hanxing mining areas.

Key words: microseismic monitoring; full-time and space; floor water inrush; water inrush precursor; early warning method

0 引言

我国华北煤田煤系地层基底主要赋存有奥陶系灰岩和上方的石炭系薄层灰岩含水层。部分矿区奥灰距煤层近、厚度大、富水性强,再加上断裂构造的影响,导致矿井的底板水害问题十分突出^[1-3]。近年来,部分“大水矿区”仍会出现工作面底板突水等情况,严重地可能会导致淹矿井、淹采区等水害事故的发生,严重影响着我国煤矿的安全高效生产。

煤矿底板突水本质上就是以含水层为突水水源,以破碎裂隙带为导水通道,采矿扰动为影响因素,3个要素共同作用的结果^[4]。其中,控制水源和水量的含水层,因其区域性的特点相对易于查明和预测分析;而导水通道因其隐蔽性、局部性以及底板采动导水破裂变化性而导致难以预测^[5-6]。并且,导水通道在孕育、发展、直至发生的动态过程中,不同的阶段都有表现特征不同的前兆信息^[7];采矿扰动是导致工作面突水的直接诱因,开采导致底板隔水层的隔水能力降低、潜在的导水通道进一步形成。然而,单一的监测技术和预警方法很难客观地反映上述导水通道在采矿扰动作用下孕育和形成的全时空演化特征,因此提出一种高效、实时的全时空预警方法对于底板突水监测预警具有重大意义^[8-9]。

为防治底板水害,《煤矿防治水细则》^[10]第九条规定“受底板承压水威胁的水文地质类型复杂、极复杂矿井,应当采用微震、微震与耦合等科学有效的监测技术”。相比于岩爆等冲击动力灾害^[11-12],矿井突水过程所诱发的微震机制更为复杂,对微小震动信号的采集更为灵敏,以便于更好地感知导水通道的孕育程度^[13]。近年来,国内外学者利用微震监测系统,结合矿压、水文、地震等多种交叉学科,开展了突水监测预警等研究。例如,姜福兴^[14-15]通过对微震定位结果的三维展示,得到地质构造的活化规律、底板破裂深度、顶板破裂高度、合理煤柱尺寸等实测参数,实现对突水危险性的预测预报。孙健^[16]拟合现场微震监测的底板断层活化破坏深度数据,建立基于微震监测信号突变分析的底板突水预测模型;靳德武等^[17]提出基于微震能量密度及岩层破裂连通度反演导水通道的识别方法,并在现场通过视电阻率

监测数据进行了验证。赵永等^[18]建立了基于微震反演裂隙的各向异性损伤模型,将岩体宏观力学行为与裂隙发展相联系,确定了岩体采动诱发突水通道特征及其力学形成机理。查华胜等^[19]提出了基于微震和水流震荡信号时空分布特征联合分析的思路,确定了潘二煤矿煤层底板破坏带和承压水导高带的空间分布及互联情况,由此提出了监测预警方法。程关文^[20]通过对煤矿采动影响区微震事件的空间和能量的空间分布规律分析,构建了煤矿顶板沿垂直方向的分带模型,提出了基于微震监测的导水通道找寻方法。

上述研究学者们基于微震从多个角度评价了矿井的突水危险性,并提出了相应的预警方法,极大推动了微震监测技术在底板水害防治中的研究与应用。但目前基于微震监测的水害预警与评价的理论和实践尚不完善,尤其未充分考虑工作面不同时期、不同空间的微震相应特征的差异,导致了突水前兆信息被忽略,并且微震监测结果、导水通道形成以及超前/滞后突水的复杂非线性关系模糊不清,基于微震响应特征的水害预警方法尚不完善。因此,基于典型案例分析,提出了一种基于微震监测的工作面底板突水全时空预警的新方法。“全时空”是指工作面采前时期,超前采动影响时期和开采时期的全时间周期,以及工作面全空间划分为7个评价区域。以焦作、邯邢矿区的出水工作面作为依托,对微震事件进行时空定位和参数解释,结合矿山水文地质资料,探讨不同时期、不同空间位置的微震事件与突水危险性的相互关系,对实现华北型煤田矿井底板突水的实时、连续、全空间、超前预测预报,具有非常重要的理论和现实意义。

1 工作面底板突水全时空预警方法

工作面底板突水全时空预警方法是利用微震监测系统,对工作面采前时期,超前采动影响时期及开采时期进行实时监测,对微震事件进行时空定位,考虑水文地质、矿山压力、地质构造等与微震响应特征的互馈机制,多源深度挖掘突水前兆信息,从而完成对底板水害的全时空预警,以便采取相应的预防和治理措施。

1.1 工作面全时间周期的时段划分

从工作面时间顺序来看,可以划分为3时段,如图1所示。第一时段,在工作面采前时期,人工扰动激发微震活动,使水文异常显现,从而预测原发性突水危险区;第二时段,在工作面超前采动影响时期,超前激发微震活动,确定超前影响区、滞后影响区以

及侧向影响区,进而获取突水前兆信息;第三时段,在工作面开采时期,采动激发微震活动,确定底板破坏区、底板采动损伤区以及顶板导水破坏区,明确原生和新生的导水通道贯通与否,验证突水前兆信息。一方面对本工作面前期突水的预警结果进行验证和修正,另一方面对后续类似条件工作面进行突水预报。

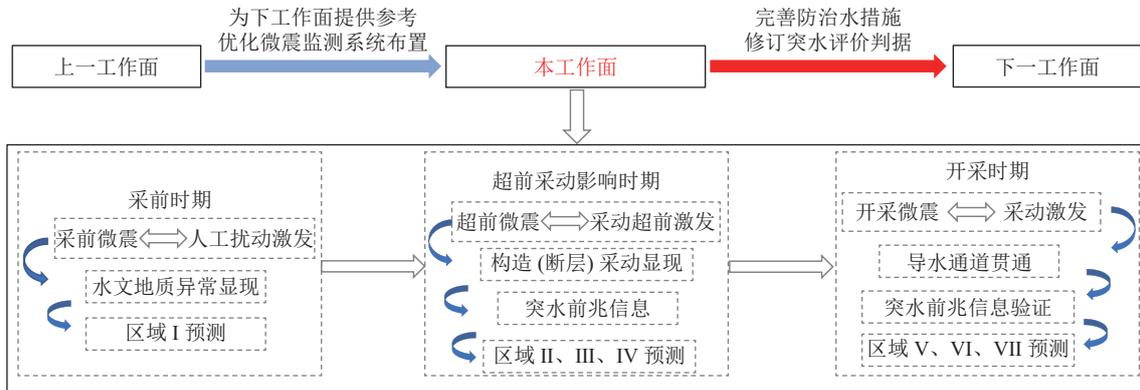


图1 基于微震监测的工作面底板突水全时空预警方法流程

Fig.1 Full-time and space early warning method for floor water inrush at working face based on microseismic monitoring

基于微震监测的底板突水全时空预警是一个长期且连续的过程,不仅对单一工作面具有重要作用,对于整个矿井乃至整个矿区都是有益的。上一工作面的预警可为下一工作面的微震的布置方式和监测方法的优化提供参考,本工作面的预警为下一工作面完善防治水措施,修订突水评价判据提供技术经验。

沿平面方向,采前时期将整个工作面划分原发性突水危险区(I区);超前采动影响时期将工作面及周围区域划分为超前影响区(II区)、滞后影响区(III区)和侧向影响区(IV区)。沿垂向方向,超前采动影响时期确定超前影响区(II区);开采时期确定底板破坏区(V区)、底板采动损伤区(VI)及顶板导水破坏区(VII区)。具体划分如图2所示。

1.2 工作面全空间的区域划分

从工作面空间位置来看,可以划分为7个区域。

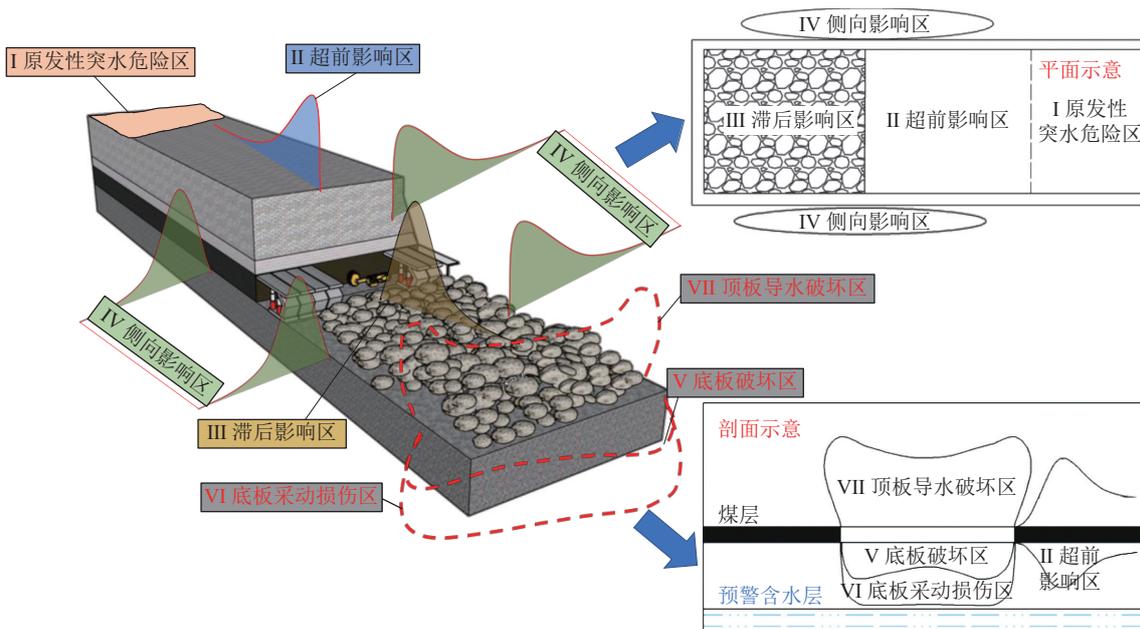


图2 基于微震的工作面空间划分

Fig.2 Spatial division of working face in different periods based on microseisms

其中,采前时期原发性突水危险区是指原岩应力下天然裂隙、构造及隐伏构造发育的区域,在注浆等人为扰动作用下显现,形成微震异常聚集,具有潜在的突水危险性。超前采动影响时期超前影响区内煤体受上覆岩层下沉而产生应力集中,顶、底板岩体不断破裂形成新的岩块,新结构不断形成造成微震活动性高;滞后影响区岩体破坏后应力转移,该区域重新平衡,微震活动性减弱;侧向影响区与前两者最大的区别在于侧向岩体结构、空间位置相对稳定,随着采线的远离,受本工作面的影响逐渐减弱;微震事件频次、能量等参数的突变特征值,尤其是异常增大的突变值是典型的突水前兆信息。开采时期基于微震事件频次、能量的演化规律将底板空间采动影响范围在垂直方向上分为底板破坏区和底板采动损伤区。采动影响下能否发生底板突水在于底板破坏区、底板采动损伤区是否波及预警含水层,一旦波及,则存在突水的威胁。

2 第一时段:采前时期的突水危险性长期预测

以往待采工作面的微震系统安装后,工作面尚未回采期间的微震特征及其工程应用的研究成果很少。工作面回采以前的微震可以称之为“原发性微震”,是由于人为工程(包括:底板注浆工程等)激发下在本工作面微震监测范围内获得的顶、底板微震事件,涉及工作面全空间划分的 I 区。

底板注浆工程中浆液注入岩层系统的过程中孔隙压力在恒定的主应力作用下增加,莫尔圆向左移动,当该圆到达与破坏包络线相切的点时,导致剪切破坏,造成裂缝扩展,从而激发微震事件。并且天然裂隙越发育,浆液的注入越容易激发微震事件,突水危险性更强,其原因是每个天然裂隙都是一个激发微震的成核处,当流动压力到达该处时,都有可能引起裂缝扩展,进而激发微震事件。基于以上特点,人

为工程激发的岩体微震可以引起待开采工作面区域内的水文地质特征和突水征兆的显现,使得裂隙发育的区域更容易被发掘,进而将通常认为无用的采前微震资料转化为有用的水文地质特征响应资料,从而对工作面防治水起到较长时间的预报作用。采前时期突水危险性分区的工作面应满足工作面采前时期进行区域底板注浆改造,且微震监测时间不晚于注浆工程。

2.1 工作面的突水危险性预测

2.1.1 工作面突水危险区确定方法

1)基于钻孔信息(钻孔位置、施工时间、钻孔深度、倾角、出水量、水压、注浆量等),对底板突水危险性沿工作面走向进行区域性评价^[21]。

2)建立采前微震监测系统,通过原发性微震的震源参数进一步判断水文异常区、疑似水文异常区的危险程度,确定原发性突水危险区(I区)的划分标准。

3)采用瞬变电磁、物探、钻探等手段验证原发性突水危险区划分的合理性。

2.1.2 底板突水危险性表示方法

1)含水层的裂隙发育程度与含水层的储水能力密切相关,同时也决定着含水层的补给和排泄条件,通常钻孔涌水量越大反映含水层裂隙发育程度越发育,富水性越强^[22]。

2)底板含水层的水压值是反映底板突水危险性的主要因素之一,当钻孔水压值越高时,表明含水层越危险。

3)钻孔注浆量在一定程度上可反映含水层裂隙发育程度,当注浆量越大时,表明含水层原始状态下裂隙发育且连通性好。

因此,通过钻孔涌水量、钻孔水压和钻孔注浆量可表示含水层危险性的大小。

参考邯邢、焦作矿区工程经验^[21]，“三参量”分级见表 1。

表 1 “三参量”分级标准
Table 1 “Three parameters” grading standard

单孔涌水量/(m ³ ·h ⁻¹)	分级	单孔水压/MPa	分级	单孔注浆量/t	分级
≥30	高涌水量	>山伏青水压	高水压	>10	高注浆量
10<Q<30	中涌水量	野青水压<P<山伏青水压	中水压		
≤10	低涌水量	<野青水压	低水压	<10	低注浆量

2.1.3 突水危险区的划分标准

工作面突水事故多发生在工作面底板含水层富水性强,且常受构造影响的区域。在其他条件基本

相同的情况下,基于沿工作面走向的钻孔涌水量、钻孔水压和钻孔注浆量,通常设定 25 m 为一个分析单元,对出水水源进行风险分级。

高涌水量、高水压、高注浆量的区域为水文异常区;当三参量中出现1个或2个为高值时,该区域为疑似水文异常区;低涌水量、低水压、低注浆量的区域为正常区。

通过原发性微震进一步判断各区域尤其是疑似水文异常区的危险程度。由上文可知,底板微震事件的空间分布规律与底板突水危险性存在一定关系。当沿工作面走向微震事件频次、能量每出现一个密集区,表明该区域天然裂隙发育,突水危险性高。

基于三参量和原发性微震事件的时空分布,最终将工作面划分为严重危险区、中等危险区及正常区,见表2。采前时期突水预测时间长,若工作面内存在严重危险区,可以有较充裕的时间在采前进行针对性的水害探测与治理,对于后续工作面的开采具有重要的警示作用。

表2 工作面采前时期的突水危险性划分

Table 2 Division of water inrush danger in pre-mining period of working face

“三参量”突水危险性分区	原发性微震分区	突水危险性评价
水文异常区	密集区	严重危险区
水文异常区	正常区	严重危险区
疑似水文异常区	密集区	严重危险区
疑似水文异常区	正常区	中等危险区
正常区	密集区	中等危险区
正常区	正常区	正常区

2.1.4 解析案例

以邯邢矿区某矿602工作面为例,该工作面于2018年11月开始回采,2018年1—10月进行区域治理及底板加固工程。其主要充水含水层为山伏青灰岩含水层,距工作面底板71~76m,平均厚度为5.5m,富水性较强且不均一。在工作面采前时期,微震监测布置如图3所示。

602工作面收集了174个注浆钻孔的工程信息,并统计了沿工作面走向的涌水量、水压和注浆量,如图4所示。依据“三参量”分级标准,在远离钟离村向斜轴的工作面里段无水文异常区,在工作面外段有2个水文异常区,分别位于断层F₆₀₂₋₆(距开切眼450~500m)和钟离村向斜轴区域(距开切眼550~800m);在距离开切眼50~75m、200~250m、350~400m、400~425m、525~550m、800~850m的区域均只有1~2个参量表现为高值,为疑似水文异常区,工作面其余区域均为正常区。

由图5可以看出,75.3%的微震事件集中在区域1和区域2,即微震事件密集区,与受断层F₆₀₂₋₆和钟离村向斜轴影响的水文异常区的位置基本重合。工作面其余24.7%的微震事件无聚集的倾向,且仅在区域治理前期(2018年1—3月)存在,在区域治理后期(2018年4—10月)工作面内微震事件响应消失,表明工作面内疑似水文异常区的突水危险性弱。在工作面区域治理后期区域2仍存在少量微震事件,表明区域2并未加固完全,突水的危险性较强。

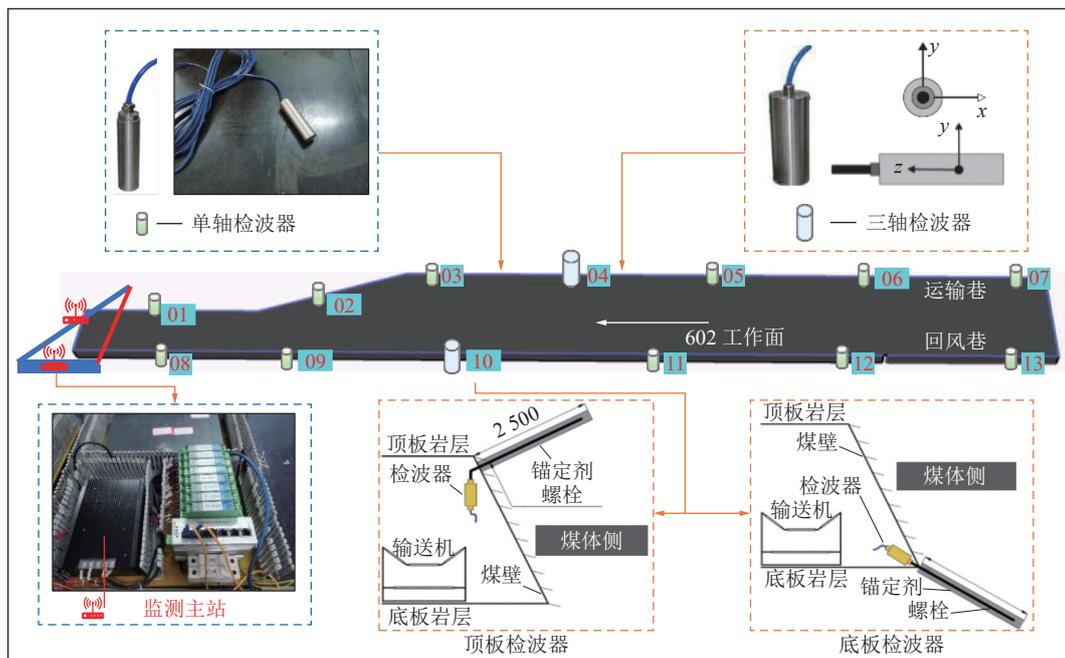


图3 602工作面微震监测布置

Fig.3 Microseismic monitoring system arrangement at No. 602 working face

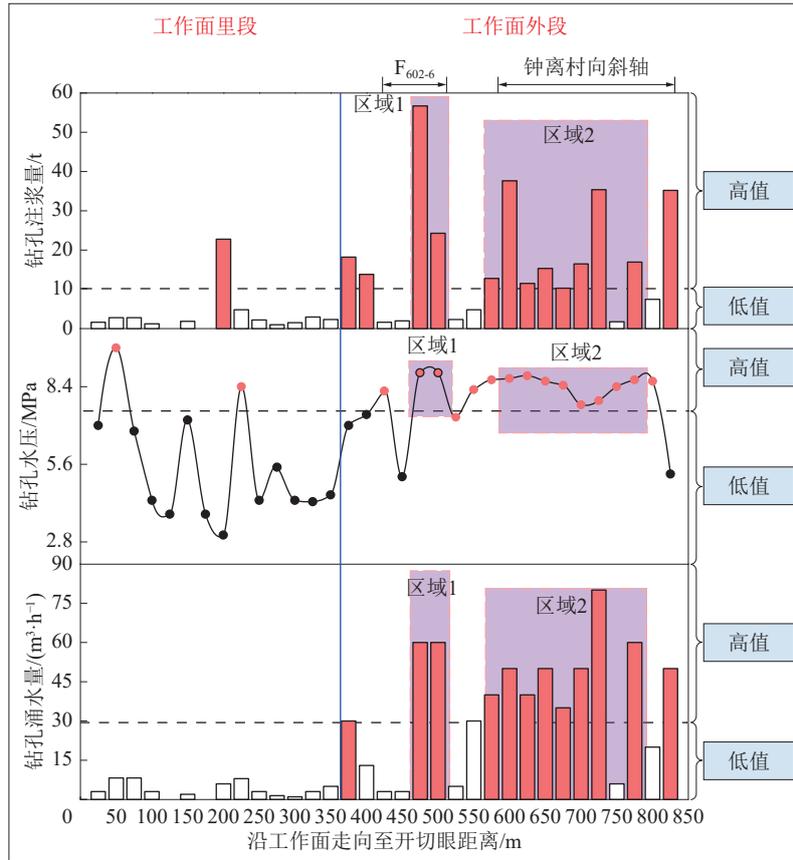


图 4 沿工作面走向底板突水危险性三因素变化情况

Fig.4 Changes in three factors of risk of floor water intrusion along working face

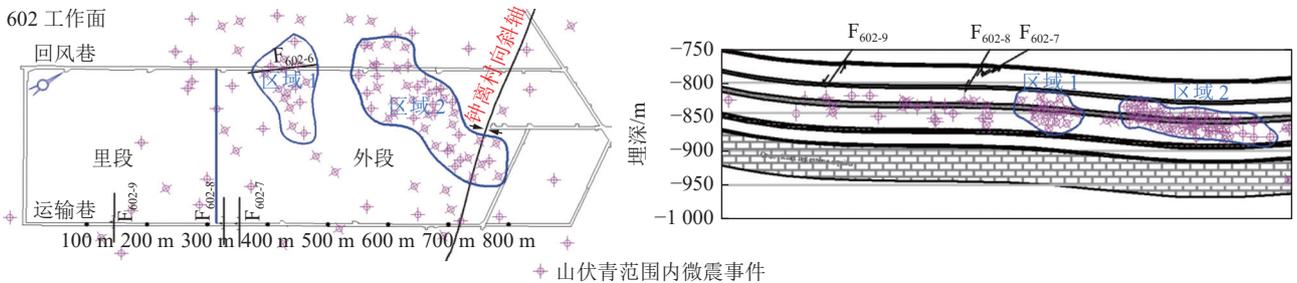


图 5 山伏青含水层范围内采前微震的时序性分布特征

Fig.5 Time-series distribution characteristics of pre-mining microseisms in range of Shanfuqing aquifer

2.2 网络并行电法验证

采用网络并行电法对工作面底板岩层的特性进行分析,如图 6 所示。根据以往勘探经验,异常区的视电阻率一般小于 20 Ω·m。在垂向上,异常区主要发育在山伏青灰岩范围内。在走向上,工作面里段有 2 个异常区 DF1 和 DF2(经后期钻孔探查表明为弱富水);工作面外段有 3 个异常区 DF3、DF4、DF5(后期钻孔探查表明为强富水),与前文确定的严重突水危险区的位置基本相同。

因此,602 工作面内的疑似水文异常区的突水危险性较弱,区域 1 和区域 2 属严重突水危险区,突水危险性强。

工作面回采期间区域 2 靠近回风巷的位置持续出现异常微震事件,随着采线的接近,微震异常的深度不断增加,突水风险持续加大。随后施工疏水钻孔,持续放水 130 m³/h,避免了突水的发生,进一步验证了突水危险性划分的合理性。

3 第二时段:超前采动影响时期的突水危险性短期预警

采场支撑压力演化规律是动力灾害防治的重要依据。动、静支撑压力的相关参数的预计对于突水危险性预警具有重要作用。

随着采空区面积的增大,断裂带上方关键层承

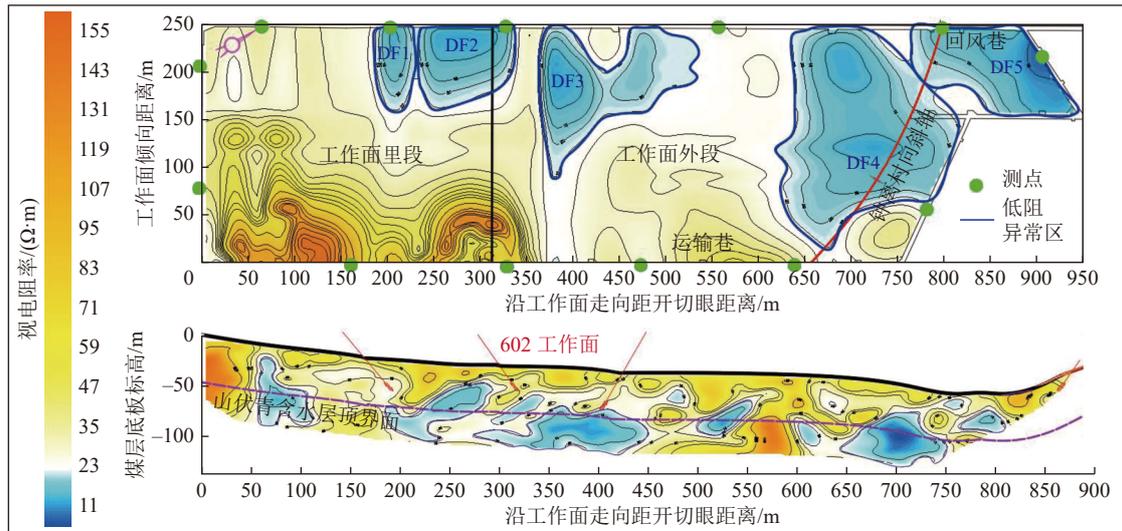


图6 基于网络并行电法的底板岩层物性特征

Fig.6 Physical characteristics of floor rock formations based on network parallel electrical method

受的载荷不断增大,原本受下方岩层支撑的关键层向两侧和前、后转移载荷,形成静态支承压力。相较于传统研究的动支承压力,其演化缓慢,可监测性差,一般需要采用监测设备持续1~2月才能监测到。微震可很好地实现静支承压力的监测,从而实现超前突水危险性预警^[23-24]。

3.1 “固定工作面”微震事件分析法

所谓“固定工作面”是将工作面位置在平面图上虚拟固定不动,考虑工作面日推进度,计算每天的各微震事件点与工作面的相对位置,再将其投影在平面图上,形成了工作面固定,每天的微震事件显示在固定工作面的显示方式,从而避免因未考虑工作面推进度,使微震事件随工作面的推进不断前移而造成的误差^[20]。

1) “固定工作面”微震事件坐标转换。将微震计算结果进行坐标转换,其地理坐标 (x, y, z) 转换为以工作面与巷道交点为原点、巷道所在直线方向 $(x_1$ 轴)、工作面方向 $(y_1$ 轴) 和垂直方向 $(z_1$ 轴), 建立相对的坐标系,其转换坐标为:

$$\begin{cases} x_1 = x \cos \theta + y \sin \theta \\ y_1 = y \cos \theta - x \sin \theta \\ z_1 = z - z_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 为微震事件的相对坐标; z_0 为工作面实际推采位置的地理坐标; θ 为置信椭圆长轴方向与煤层底板的夹角。

剔除累积推进度,建立“固定工作面”的空间坐标系,其转换坐标为:

$$\begin{cases} X_\alpha = x_1 - X'(T) \\ Y_\alpha = y_1 \\ Z_\alpha = z_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X'(T)$ 为 T 时刻的工作面累积推进度; $(X_\alpha, Y_\alpha,$

$Z_\alpha)$ 为“固定工作面”坐标系的位置坐标元素。

2) 采动支承压力影响范围估计。将微震事件投影至“固定工作面”坐标系后,确定微震事件的频次和能量的核密度值,然后建立正态分布概率模型,进行采动超前影响范围的估算。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

式中, σ 为微震频次(能量)的标准差; μ 为微震频次(能量)的均值。

3.2 采动支承压力影响的底板突水预测

3.2.1 采动支承压力影响范围的确定方法

1) 布置微震监测系统,进行顶、底板微震事件判定、微震事件定位及震源参数的确定;

2) 设置“固定工作面”,计算顶、底板微震事件的相对空间位置,确定微震事件频次、能量筛选范围及其计算网格特征,形成顶、底板微震事件频次、能量核密度云图;

3) 确定顶、底板微震事件频次、能量沿水平、垂直方向上的分布规律,确定微震事件沿水平、垂直方向的特征值,包括:最大值、最小值,突变增大值以及突变减小值。依据焦作、邯邢矿区工程经验,通过计算正态分布概率模型,估算采动超前支承压力最远端为最大核密度值的10%,严重影响区为最大核密度的20%。

频次、能量核密度值反映裂缝扩展路径和强度^[17]。

$$\rho_f = \frac{(\sum f_i)_j}{V_j} \quad (4)$$

式中, ρ_f 为频次核密度; $\sum f_i$ 为单元空间 j 内所有微震

事件数的总和; V_j 为单元空间 j 的体积。

$$\rho_E = \frac{(\sum E_i)_j}{V_j} \quad (5)$$

式中, ρ_E 为频次核密度; $\sum E_i$ 为单元空间 j 内所有微震事件能量的总和。

4)依据顶、底板微震事件核密度云图,在工作面平面方向上确定采动支承压力的超前影响区(Ⅱ区)、滞后影响区(Ⅲ区)和侧向影响区(Ⅳ区),在剖面方向上确定超前影响区(Ⅱ区)。

5)确定底板微震事件频次、能量阈值,获取底板突水前兆信息,即在超前影响区内出现自煤层底板至充水含水层之间的微震事件密集区,尤其关注高于能量阈值的微震事件。参照焦作、邯邢矿区工程经验,能量阈值为 10^4 J。

3.2.2 解析案例

以焦作矿区某矿 1604 工作面为例,主采煤层厚 5.3 m,倾角 14° ,其底板主要充水含水层为 L_8 含水层和 L_2 含水层。 L_8 含水层厚度为 8.3 m,距煤层底板 34.4 m,富水性中等至强; L_2 含水层厚度为 12.57 m,距煤层底板 85 m,富水性极强。统计了 2020-03-01—

2020-08-20 微震事件的分布情况,依次绘制“固定工作面”微震频次、能量核密度图例,如图 7 和图 8 所示。

1)“固定工作面”微震事件平面核密度分析。如图 7a、图 7b 所示,1604 工作面超前影响区范围 190~203 m,超前严重影响区范围 145~156 m;滞后影响区范围为 121~132 m,滞后严重影响区范围 82~96 m,侧向影响区范围 73~110 m。

2)沿走向“固定工作面”微震事件核密度分析。如图 8a、图 8b 所示,由于采场低位岩层超前断裂回转促使煤壁变形、屈服后形成的动支承压力峰值距煤壁 35~36 m;受控于关键层,断裂带上方高位岩层载荷按一定规律转移形成的静支承压力峰值距煤壁距离约 49~52 m。

3)导水通道显现的前兆信息。在 1604 工作面回风巷统尺 779~847 m 存在 2 个瞬变电磁探测到的低阻异常区,低阻异常区主要分布在煤层底板下方 L_8 灰岩附近、顶界面距离煤层较近且部分区域浅深部沟通(巷道底板下方 30 m 和 85 m 处低阻区域部分重叠),如图 9 所示。

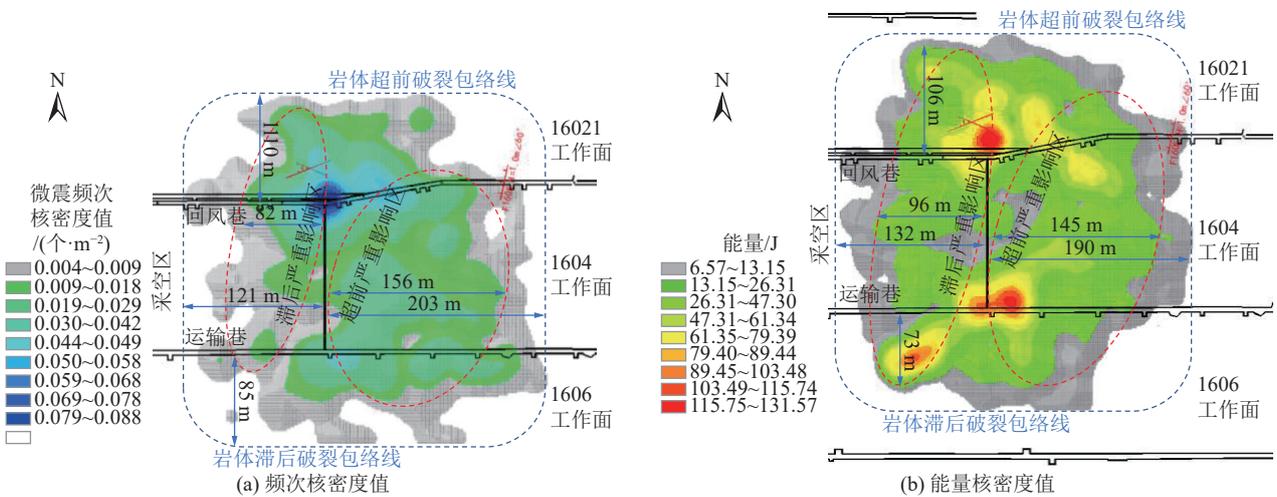


图 7 “固定工作面”微震事件核密度映射平面图

Fig.7 Microseismic kernel density mapping plan in fixed working face

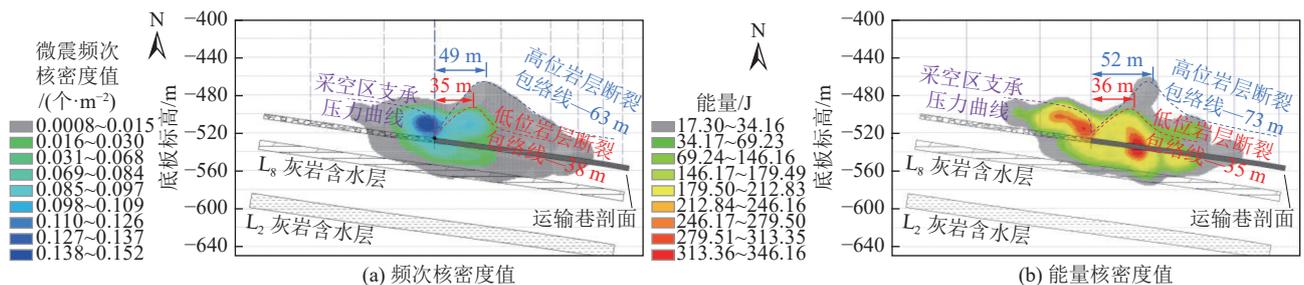


图 8 沿走向固定工作面微震事件核密度映射剖面

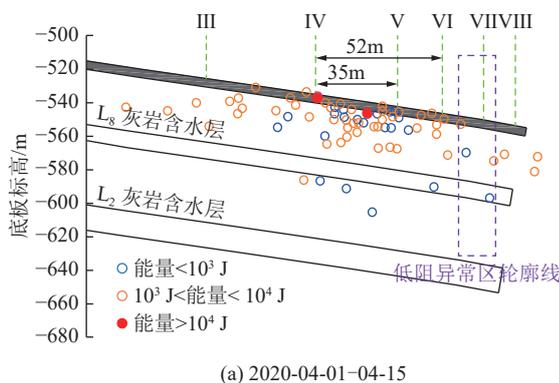
Fig.8 Microseismic kernel density mapping profile along strike of fixed working face



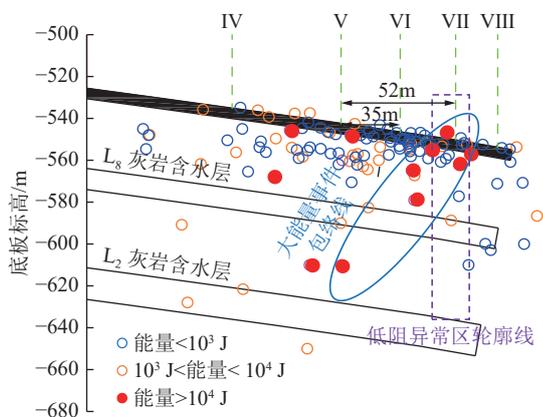
图9 瞬变电磁观测底板低阻异常区分布

Fig.9 Distribution of low resistance anomalies in transient electromagnetic observation

2020-04-01—2020-04-15期间的底板微震事件时序性分布如图10a所示,此时采线距离低阻异常区102 m,受超前支撑压力的影响,微震事件主要集中在工作面前方0~52 m的高应力区域,表明静支撑压力峰值未波及到低阻异常区。大能量事件仅有2个,且位于煤层底板0~5 m区域,未波及到 L_8 灰岩含水层,表明工作面前方50 m范围内突水危险性弱。



(a) 2020-04-01-04-15



(b) 2020-05-22-06-10

图10 不同时期工作面底板微震时序性分布

Fig.10 Time-series distribution of floor microseisms in working face in different periods

2020-05-22—2020-06-10期间的底板微震事

件时序性分布如图10b所示,此时采线距低阻异常区46 m,大能量事件在低阻异常区域形成自上而下的密集区,贯穿 L_8 灰岩含水层,接近 L_2 含水层,表明静支撑压力峰值波及到低阻异常区,使得低阻异常区的裂隙就具有明显的扩展和发育特征,突水危险性强。

自2020-07-14—2020-07-18期间,随着采线采至低阻异常区,工作面在底板持续出现大能量微震事件,突水风险持续加大,在2020-07-16,工作面采空区小量出水,规模约为 $36\text{ m}^3/\text{h}$ 。由此,表明基于微震监测的超前远端预警是可行且有效的。

4 第三时段:开采时期突水危险性预报

底板突水是在承压水和采动应力的联合作用下形成导水通道,使得承压水涌入采掘空间的现象。由于岩体的非均一性,地质构造的复杂性,底板破坏的发育规律差异明显。结合传统的底板采动分带模型,采用微震监测结果将底板空间采动影响范围在垂直方向上分为底板破坏区和采动损伤区。采动影响下能否发生底板突水在于底板导水破坏区、采动损伤区是否波及预警含水层,一旦波及,则存在突水的威胁。

4.1 底板导水破坏的突水危险性预测

4.1.1 底板导水破坏确定方法

1) 布置微震监测系统,进行顶、底板微震事件判定、微震事件定位及震源参数的确定。

2) 对微震事件震源参数进行核密度分析,确定微震事件的时空分布定位和能量大小。

3) 依据钻孔柱状对底板隔水层岩性进行分组分析,确定底板破坏层位、关键岩层以及基于底板微震核密度分布的底板破坏深度的相互关系,确定底板导水破坏深度(V区),并初步确定采动损伤深度(VI区),根据建立的正态分布概率模型,估算采动损伤区最远端为最大核密度值的10%,底板破坏区为最大核密度的20%。

4) 采用上述方法,可同时确定顶板导水破坏高度(II区)。

4.1.2 解析案例

以焦作矿区某矿1604工作面为例,统计微震事件,进行核密度分析。如图11a所示,微震事件在底板0~20 m范围内分布密集,频次核密度值介于0.054~0.260个/ m^2 ,底板破坏深度约20 m。如图11b所示,底板破坏深度约22 m。

依据1604工作面钻孔柱状可知,如图12所示。

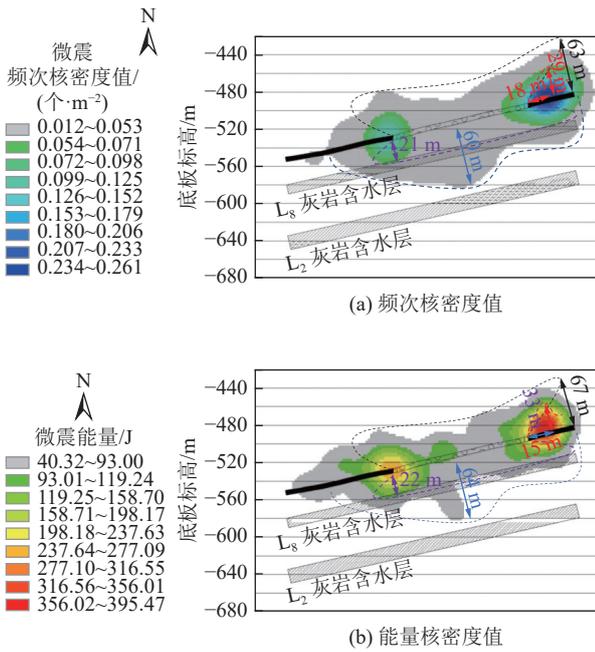


图 11 基于微震事件核密度分析的底板破坏深度

Fig.11 Depth of floor damage based on microseismic kernel density analysis

岩性	柱状 1:500	层厚/m	隔水岩层组
二 ₁ 煤		5.3	
炭质泥岩		0.46	第一隔水岩层组
泥岩		3.30	
粉砂岩		15.44	第二隔水岩层组
石灰岩		1.50	第三隔水岩层组
泥岩		4.20	
石灰岩		1.10	
泥岩		5.00	
粉砂岩		1.40	
泥岩		2.00	
L ₈ 灰岩含水层		10.07	

图 12 煤层底板隔水层划分

Fig.12 Division of water barrier at the bottom of coal seam

煤层与 L₈ 灰岩含水层之间的岩层厚度约为 34.4 m, 基于隔水层的岩性特征及其所处位置, 将其分为 3 段隔水岩层组。其中第三隔水岩层组为泥岩、石灰岩互层, 总厚度约为 15.2 m, 石灰岩强度高, 泥岩被

石灰岩夹持在中间不容易破坏, 由于泥岩在完整情况下隔水性极好, 因此该岩层组为底板主要隔水层。

综上, 结合微震事件核密度分析结果和底板岩性分析, 最终确定底板的破坏深度为 20.7 m。

同理, 采用该方法, 可确定工作面采动损伤深度为 62.6 m; 顶板导水破坏区发育高度为 65 m。

4.2 不同开采阶段底板采动损伤的突水危险性预测

采用微震核密度分析可以准确的确定底板破坏深度, 因为绝大部分微震事件集中在底板 20 m 以内的范围内, 岩体破坏程度大、微震活动性强。但仅确定底板破坏区深度, 无法判定深部岩层是否受采掘扰动从而导致裂隙发育形成导水通道。

采掘过程中矿山压力的垂向传递和承压水的贯穿使得底板深处岩体发生破坏和微破裂, 渗透性增强, 因动力作用形成可含水裂隙, 此区域为底板采动损伤区。前文利用核密度分析初步估计了工作面开采后的整体深度, 但由于要求监测时间长, 故对于不同开采阶段难以确定底板采动损伤区下边界。

因此, 引入 2D-Confidence Ellipse 法(以下简称 2D-CE), 在平面上对微震事件规范化, 确定微震事件置信椭圆(底板采动损伤区)的角度 θ 、面积 S 及高度 H , 如图 13 所示, 并根据微震活动性与预警含水层的位置关系, 从而预测底板突水危险性^[25]。

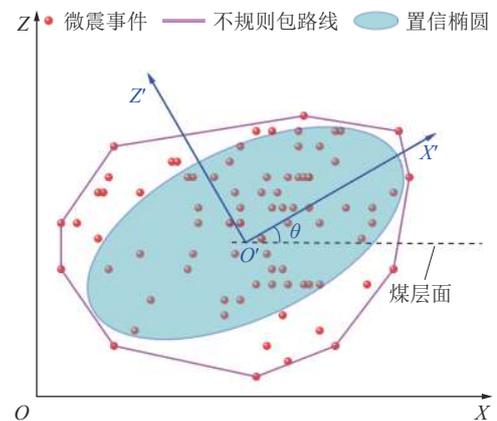


图 13 基于 2D-CE 法的微震事件规范化示意

Fig.13 Schematic representation of microseismic event normalization based on 2D-CE method

4.2.1 底板采动损伤区形成过程确定方法

1) 布置微震监测系统, 进行底板微震事件定位及震源参数的确定。

2) 根据微震事件核密度分布及底板岩性, 初步估计采动损伤深度(VI区)。

3) 依据含水层岩性及富水性, 确定底板突水预警含水层。

4)设置固定工作面,计算微震事件的相对空间坐标,对微震事件的不规则边界进行2D-CE规范化,形成置信椭圆。

定义椭圆方程:

$$ax^2 + cxy + by^2 = 1 \quad (6)$$

坐标变换,旋转坐标系:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

联立上式:

$$(a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta - c \sin \theta \cos \theta) y'^2 \quad (8)$$

式中: θ 为椭圆长轴与煤层底板的夹角; a 为椭圆长轴; b 为椭圆短轴; c 为椭圆参数。

①通常来说,95%置信椭圆可涵括所有大能量微震事件,置信椭圆长轴方向与煤层底板的夹角 θ ($\theta \in 0^\circ \sim 90^\circ$),当 θ 越接近 0° ,则表明微裂隙在煤层底板平行方向上较为发育;突水危险性小;当 θ 越接近 90° ,则表明微裂隙在垂直于煤层底板方向上较为发育,突水危险性大。参照焦作矿区经验:当 $\theta \geq 30^\circ$ 时,底板突水危险性较大,需提前采取防治水措施。②置信椭圆面积 S 越大,表明微震事件相对较多,裂隙扩展范围越大,岩体破坏范围越大,突水危险性越大。③置信椭圆的高度 H (椭圆边界距煤层的最大垂距),即底板采动损伤区(VI区)的深度,当 H 越大时,表明置信椭圆边界越向预警含水层靠拢,突水危险性越大。当 H 大于预警含水层到煤层底板

的距离时,很有可能发生底板突水。

5)开采后对本工作面前述3时段突水预报预警情况进行验收和分析,修改预警的阈值,积累经验,从而提升下阶段工作面突水预报预警精度。通过多重开采与预警预报的循环,不断提高矿区突水预报预警精度。

4.2.2 解析案例

以1604工作面为例,依据其水文地质条件确定预警含水层为 L_2 含水层,对微震事件的频次、能量进行分析,并进行2D-CE处理,其在不同时期的变化情况如图14—图15所示。

依据工作面与低阻异常区的相对距离,将微震监测划分为3个时期:2020-04-12—04-30为采前时期,采动影响未波及低阻异常区;2020-05-01—06-10为采动超前影响时期,支承压力传递至低阻异常区;2020-06-11—07-18为开采时期,工作面采至低阻异常区。

如图14a和图15所示,在2020-04-01—04-30期间,开采区域为未见低阻异常区的较完整区域,采动应力并未传递至低阻异常区,微震事件呈“低频次、低能量”的特点。微震椭圆角度 θ 为 2° ,椭圆面积 $S = 12\,664.9\text{ m}^2$,椭圆高度 $H = 38\text{ m}$,表明微震椭圆为扁平形,其椭圆边界接近但未贯通 L_8 含水层。综上,在该时期岩体破坏以浅部横向破坏为主,突水危险性小。

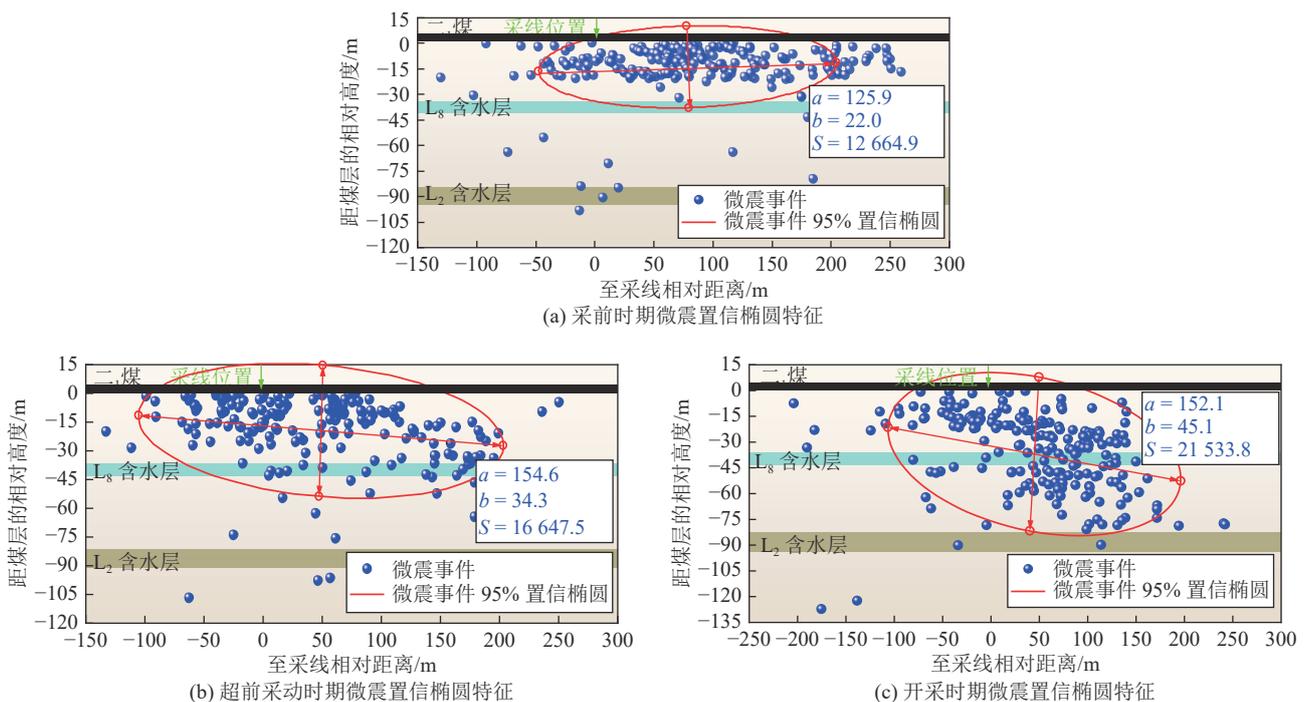


图14 基于2D-CE的不同时期微震置信椭圆的特征分析

Fig.14 Characterization of microseismic confidence ellipses based on 2D-CE in different periods

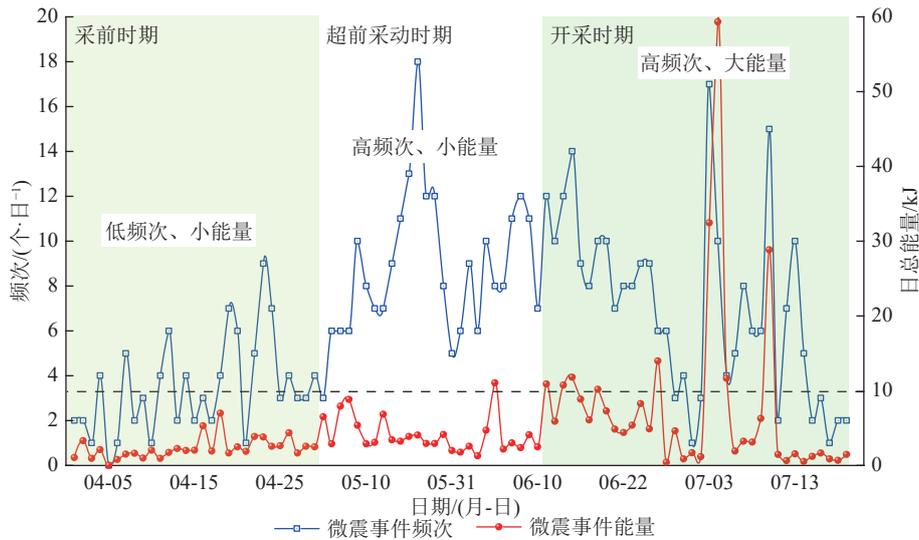


图 15 不同时期底板微震事件频次、能量分布特征

Fig.15 Characteristics of frequency and energy distribution of floor microseismic events in different periods

如图 14b 和图 15 所示,在采动超前影响时期,开采区域为未见低阻异常区的较完整区域,但超前支承应力波及至低阻异常区,微震事件呈“高频次、小能量”的特点。微震椭圆角度 θ 为 8.5° ,椭圆面积 $S = 16\ 647.5\ \text{m}^2$,椭圆高度 $H = 55\ \text{m}$,表明微震椭圆由扁平形向圆形过渡,其椭圆边界已贯通 L_0 含水层,但与 L_2 含水层仍有一段距离。在该时期工作面底板裂隙向深部延伸,是工作面突水的前兆信息。

如图 14c 和图 15 所示,在开采时期,开采区域为低阻异常区,微震事件呈“高频次、大能量”的特点。微震椭圆角度 θ 为 30.2° ,椭圆面积 $S = 21\ 533.8\ \text{m}^2$,椭圆高度 $H = 85\ \text{m}$,表明微震椭圆呈圆形,其椭圆边界已到达 L_2 含水层顶部,表明底板裂隙的发育方向由“小角度、小面积、横向发育”转变为“大角度、大面积、竖向发育”。在该时期岩体损伤已波及 L_2 含水层,深部承压水向上导通,在 2020-07-16,工作面采空区小量出水,规模约为 $36\ \text{m}^3/\text{h}$ 。验证了基于微震的突水前兆信息的正确性。

5 结 论

1) 基于典型案例分析,提出了一种基于微震监测的工作面底板突水全时空预警的方法。所谓“全时空”是指对工作面全时间周期的采前预测,超前采动预警和开采期间预报的三时段划分,工作面全空间的 7 个评价区域划分。

2) 在钻孔工程信息的基础上,建立基于微震响应特征的原发性突水危险区的确定方法,进而进行采前时期突水危险性的长期预测;采用“固定工作面”微震事件分析法,提出了采动支承压力影响区(超前

影响区、滞后影响区、侧向影响区)的确定方法,进而进行采动超前时期的突水危险性预警,获取了突水前兆信息;提出了底板破坏区、底板采动损伤区、顶板导水破坏区的确定方法,引入 2D-CE 法在平面上对微震事件进行规范化,分析微震事件置信椭圆与预警含水层的位置关系,进而进行工作面开采时期的突水危险性预报。

3) 开采后对工作面前述三时段突水预报预警情况进行验收和分析,修改预警的阈值,积累经验,从而提升下阶段工作面突水预报预警精度。通过多重开采与预警预报的循环,不断提高矿区突水预报预警精度。

参考文献(References):

- [1] 武 强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [2] 许延春, 戴华阳. 沉陷控制与特殊开采[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017.
- [3] 张党育, 蒋勤明, 高春芳, 等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 31-36.
ZHANG Dangyu, JIANG Qinming, GAO Chunfang, et al. Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water damage control in the floor of North China Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 31-36.
- [4] 杨天鸿, 师文豪, 李顺才, 等. 破碎岩体非线性渗流突水机理研究现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1598-1609.
YANG Tianhong, SHI Wenhao, LI Shuncai, et al. State of the art and trends of water-inrush mechanism of nonlinear flow in fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7):

- 1598–1609.
- [5] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932–1938.
JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, *et al.* Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1932–1938.
- [6] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28–47.
LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, *et al.* Research advances in mining fractures evolution law of rock strata and ecological treatment technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 28–47.
- [7] 尹尚先, 连会青, 刘德民, 等. 华北型煤田岩溶陷落柱研究70年: 成因·机理·防治[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 1–29.
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, LIU Demin, *et al.* 70 years of investigation on Karst collapse column in North China Coalfield: cause of origin, mechanism and prevention[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 1–29.
- [8] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2256–2264.
JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, *et al.* Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2256–2264.
- [9] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557–1566.
YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557–1566.
- [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] 赵毅鑫, 姜耀, 王涛, 等. “两硬”条件下冲击地压微震信号特征及前兆识别[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1960–1966.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, WANG Tao, *et al.* Features of micro-seismic events and precursors of rock burst in underground coal mining with hard-roof[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1960–1966.
- [12] 潘俊锋, 毛德兵, 夏永学, 等. 基于关联因素前兆监测的冲击地压发生区域与时期初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1650–1656.
PAN Junfeng, MAO Debing, XIA Yongxue, *et al.* Probing into the main occurred area and period of rockburst based on precursory monitoring of associated factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1650–1656.
- [13] 原富珍, 马克, 庄端阳, 等. 基于微震监测的董家河煤矿底板突水通道孕育机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1846–1856.
YUAN Fuzhen, MA Ke, ZHUANG Duanyang, *et al.* Preparation mechanism of water inrush channels in bottom floor of Dongji-ahé coal mine based on microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1846–1856.
- [14] 姜福兴, 杨淑华. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J]. 煤炭学报, 2003(4): 357–360.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua. Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by micro-seismic monitoring techniques[J]. Journal of China Coal Society, 2003(4): 357–360.
- [15] 姜福兴, 尹永明, 朱权洁, 等. 基于微震监测的千米深井厚煤层综放面支架围岩关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 167–174.
JIANG Fuxing, YIN Yongming, ZHU Quanjie, *et al.* Relationship between Support and Surrounding rock of fully mechanized caving face in thick coal Seam of kilometer deep mine based on microseismic monitoring technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 167–174.
- [16] 孙建, 王连国. 基于微震信号突变分析的底板断层突水预测[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1404–1410.
SUN Jian, WANG Lianguo. Floor fault water-inrush prediction based on catastrophe analysis of micro-seismic signals[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1404–1410.
- [17] 靳德武, 段建华, 李连崇, 等. 基于微震的底板采动裂隙扩展及导水通道识别技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 962–971.
JIN Dewu, DUAN Jianhua, LI Lianchong, *et al.* Microseismicity based research for mining induced fracture propagation and water pathway identification technology of floor[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 962–971.
- [18] 赵永, 杨天鸿, 王述红, 等. 基于微震反演裂隙的采动岩体损伤分析方法及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 305–314.
ZHAO Yong, YANG Tianhong, WANG Shuhong, *et al.* Damage analysis method for mining rock mass based on microseismic-derived fractures and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 305–314.
- [19] 查华胜, 张海江, 连会青, 等. 潘二煤矿A组煤层底板灰岩水害微震监测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3001–3014.
ZHA Huasheng, ZHANG Haijiang, LIAN Huiqing, *et al.* Microseismic monitoring on limestone water inrush at coal seam floor for group A coal layer of Pan'er Coal Mine. [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3001–3014.
- [20] 程关文, 王悦, 马天辉, 等. 煤矿顶板岩体微震分布规律研究及其在顶板分带中的应用: 以董家河煤矿微震监测为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S2): 4036–4046.
CHENG Guanwen, WANG Yue, MA Tianhui, *et al.* Research on the partitioning method of the overburden in coal mine based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4036–4046.
- [21] 许延春, 黄磊, 俞洪庆, 等. 基于注浆钻孔数据集的注浆工作面底板突水危险性评价体系[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1150–1159.
XU Yanchun, HUANG Lei, YU Hongqing, *et al.* Evaluation system for floor water inrush risk in grout-reinforced working faces based on grouting boreholes dataset[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1150–1159.
- [22] 许延春, 张二蒙, 沈星宇, 等. 奥灰顶部含水层注浆改造浆液扩

- 散主要影响因素试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3536-3549.
- XU Yanchun, ZHANG Ermeng, SHEN Xingyu, *et al.* Experimental study on the influence of grouting diffusion in fissure aquifer at the top Ordovician limestone[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3536-3549.
- [23] 刘金海, 姜福兴, 朱斯陶. 长壁采场动、静支承压力演化规律及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1815-1827.
- LIU Jinhai, JIANG Fuxing, ZHU Sitao. Study of dynamic and static abutment pressure around longwall face and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1815-1827.
- [24] 陈忠辉, 谢和平. 综放采场支承压力分布的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 436-439.
- CHEN Zhonghui, XIE Heping. Damage mechanics analysis on the distribution of abutment pressure around a coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 436-439.
- [25] 张党育, 盖秋凯, 黄磊, 等. 工作面过废弃巷顶板微震时空演化机制及危险性分区[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3805-3818.
- ZHANG Dangyu, GAI Qiukai, HUANG Lei, *et al.* Study on the temporal and spatial evolution mechanism and risk zoning of microseisms in working face passing through the roof of old roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3805-3818.