

煤矿覆岩主控致灾层位危险识别及现场应用

马玉镇¹, 朱斯陶^{1,3}, 潘俊峰², 高永涛¹, 张修峰³, 姜福兴¹, 刘金海¹, 王冰⁴, 陈洋³

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 3. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014; 4. 陕西彬长矿业集团有限公司, 陕西 咸阳 711300)

摘要: 针对煤矿地面水力压裂技术施工中工作面覆岩主控致灾层位难以准确辨识的难题, 以孟村煤矿 401102 工作面地面水力压裂工业试验为背景, 采用理论分析、微震监测、现场调研等方法, 揭示了煤矿厚硬覆岩运动诱发矿震和冲击地压的动力灾害机理, 分析了基于载荷三带理论的厚硬覆岩分区运动特征与诱发动力灾害之间的关系, 建立了基于关键层运动状态的矿震能量预测模型与采场等效附加应力估算模型, 提出了基于 K-means 聚类算法和肘部法则的煤矿覆岩主控致灾层位识别技术方法, 确定了现场压裂施工层位并进行工业试验, 根据现场微震监测数据及理论分析结果进行了效果验证, 得到结论如下: 孟村煤矿 401102 工作面致冲关键层及矿震关键层均为距离煤层 66 m 的安定组关键层 R_9 , 其初次破断运动采场等效附加扰动应力理论值为 7.23 MPa, 初次破断运动释放矿震能量理论值为 6.08×10^5 J, 致灾危险性较强; 震-冲关键层压裂后, 矿震能量理论值降幅 94%, 采场等效附加扰动应力理论值降幅 76%, 工作面上方 5×10^3 J 大能量微震事件出现明显上移趋势, 上移量约为 15 m; 10^3 J 及以上能级微震事件频次占比显著下降, 由 60.39% 降至 17.89%, 最大微震事件能量由 6.65×10^5 J 降至 9.75×10^3 J; 10^2 J 及以下能级微震事件频次占比显著上升, 由 39.61% 增至 82.11%。

关键词: 地面水力压裂; 冲击地压; 矿震; 覆岩主控致灾层位; 识别方法

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)06-2589-15

Identification and on-site application of the main hazard-causing stratum of overlying strata in coal mines

MA Yuzhen¹, ZHU Sitao^{1,3}, PAN Junfeng², GAO Yongtao¹, ZHANG Xiufeng³, JIANG Fuxing¹, LIU Jinhai¹, WANG Bing⁴, CHEN Yang³

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 4. Shaanxi Binchang Mining Group Co., Ltd., Xianyang 711300, China)

Abstract: In response to the challenging task of accurately identifying the main hazard-causing layer of overlying strata in the coal mine surface hydraulic fracturing construction, this study focuses on the industrial test of ground hydraulic fracturing at the 401102 working face of the Mengcun Coal Mine. The research is conducted using the methods of theoretical analysis, microseismic monitoring, and on-site investigation to reveal the dynamic disaster mechanism of mine earthquakes and rock bursts induced by the movement of thick and hard overlying strata in the coal mines. The relationship

收稿日期: 2023-05-24 修回日期: 2023-08-18 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0654

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004604); 国家自然科学基金资助项目(52374076); 中国科协青年人才托举工程资助项目(2021QNRC001)

作者简介: 马玉镇(1996—), 男, 山东济南人, 博士研究生。E-mail: mayuzhen1996@163.com

通讯作者: 朱斯陶(1990—), 男, 湖北荆州人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: zhusitao@ustb.edu.cn

引用格式: 马玉镇, 朱斯陶, 潘俊峰, 等. 煤矿覆岩主控致灾层位危险识别及现场应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2589-2603.

MA Yuzhen, ZHU Sitao, PAN Junfeng, et al. Identification and on-site application of the main hazard-causing stratum of overlying strata in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2589-2603.



移动阅读

between the movement characteristics of thick and hard overlying strata based on a three-zone structure loading model of overlying strata and induced dynamic disasters is analyzed, and a prediction model for mining seismic energy and an estimation model for equivalent additional stress in mining areas based on the movement state of key layers are established. A coal mine identification technology for the main hazard-causing layer of overlying strata is proposed based on the K-means clustering algorithm and the elbow rule. The construction layer for hydraulic fracturing is determined, and an industrial test is carried out on-site. The effectiveness is verified based on the microseismic monitoring data and theoretical analysis results, leading to the following conclusions. In the Mengcun Coal Mine's 401102 working face, both the key stratum responsible for rock bursts and mine seismic activities can be traced to the R₉ key stratum of the Anding Group, situated 66 meters away from the coal seam. The primary fracturing movement of this critical stratum R₉ imparts an equivalent supplementary disturbance stress value of 7.23 MPa, with the seismic energy liberated by this initial rupture motion quantifying to 6.08×10^5 J, thereby indicating a pronounced susceptibility towards catastrophic occurrences. After fracturing the key layer which induces mining earthquakes and rock bursts, the theoretical value of the mine earthquake energy is reduced by 94%, and the theoretical value of the equivalent disturbance stress of the working face is reduced by 76%. High-energy microseismic events above the working face with an energy of 5×10^3 J show a noticeable upward trend, with an upward movement of approximately 15 m. The frequency ratio of microseismic events with an energy level of 10^3 J or higher significantly decreases from 60.39% to 17.89%, and the maximum microseismic event energy decreases from 6.65×10^5 J to 9.75×10^3 J. The proportion of microseismic events with an energy level of 10^2 J and below significantly increases from 39.61% to 82.11%.

Key words: surface hydraulic fracturing; rock burst; mine earthquake; overburden main control hazard-causing layer; identification method

厚硬岩层通常指厚度大于10 m且单轴抗压强度大于60 MPa的岩层^[1],其运动过程伴随着震动能量的释放,尤其在强震动扰动条件下,容易诱发井下工作面的冲击地压和地表建筑物损伤,严重威胁着人民的生命财产安全^[2-3]。

目前国内外诸多学者针对厚硬覆岩致灾机理及防治技术方面开展了大量的研究。致灾机理方面,厚硬岩层运动所提供的强动载是主要致灾原因^[4-9],其为井下冲击地压和地表建筑物损伤提供了致灾条件。主动防治措施方面,主要有爆破、注水软化和井下水力压裂等主动防治措施,但根据现场施工情况发现上述措施对高位厚硬覆岩的防治效果不佳^[10]。

为解决上述存在的问题,地面水力压裂技术开始进入矿山动力灾害防治研究人员的视野,其为井工煤矿“防冲减震”提供了新思路^[11-15],即通过地面长钻孔预先压裂并释放厚硬岩层能量,进而达成冲击地压“卸压可控”、矿震“减震消灾”目标。于斌等^[11]为防治煤矿高位顶板失稳联动产生的采场强矿压,提出并实施了基于远近场协同控制理念的坚硬岩层远场地面压裂协同控顶技术,取得了较好的控制效果;朱斯陶等^[12]针对东滩煤矿巨厚硬岩运动导致的频繁矿震问题,提出了地面直井分段水压致裂防控深井巨厚硬岩运动型矿震的方法并进行了现场工业试验,有效降低了回采工作面1.5级以上矿震事件数量;高瑞等^[13]针

对特厚煤层工作面受到远场上覆煤柱大结构影响的强矿压显现机理及控制难题,提出利用地面压裂技术来控制强矿压的思路,通过实施地面压裂技术,工作面的来压强度明显降低,巷道超前变形情况也得到了明显改善;潘俊锋等^[14]以孟村煤矿为背景进行了区域性卸压机理及工程试验研究,开展地面水平井分段水力压裂施工后,回采工作面微震事件呈现高频低能分布,卸压效果较好;程远方等^[15]通过数值模拟手段,研究了地面水力压裂前后巨厚硬岩破断情况及能量演化特征,为东滩煤矿现场压裂施工提供了理论支撑。

然而,由于地面水力压裂技术应用于煤矿防治动力灾害的历史较短,现有的地面水力压裂防治煤矿动力灾害理论体系尚不完善,尤其针对压裂层位选择、压裂效果评价、压裂施工合理参数设计等关键问题亟待深入研究,其中覆岩主控致灾层位的识别是地面水平井水力压裂施工的基础,盲目选择压裂层位不仅达不到预期压裂效果,还可能会导致资源浪费与重复施工等问题,因此能否精准科学地识别覆岩主控致灾层位将直接决定着煤矿“防冲减震”效果。

笔者以陕西彬长矿区孟村煤矿401102工作面地面水力压裂工业试验为研究背景,采用理论分析、微震监测、现场调研等手段,揭示了煤矿厚硬覆岩运动诱发矿震和冲击地压动力灾害机理,分析了基于载荷三带理论的厚硬覆岩分区运动特征与诱发动力灾害

之间的关系,建立了基于关键层运动状态的矿震能量预测模型与采场等效附加应力估算模型,提出了基于K-means聚类算法和肘部法则的煤矿覆岩主控致灾层位识别技术方法,确定了401102工作面现场压裂施工层位,并通过现场微震监测数据分析验证了判识方法的有效性和工程适用性。研究成果丰富了我国煤矿冲击地压防治领域地面水力压裂技术理论研究,对其他类似条件工作面安全开采提供了一定的借鉴意义。

1 工程背景

1.1 401102 工作面概况

401102工作面位于孟村煤矿401盘区,平均埋深706.5 m,可采走向长度1 789 m,倾向长度180 m,巷道平行布置。工作面东侧为401盘区开拓大巷,西侧为403盘区开拓大巷,南距401101工作面采空区75 m,北距401103工作面40 m,工作面位置如图1所示。

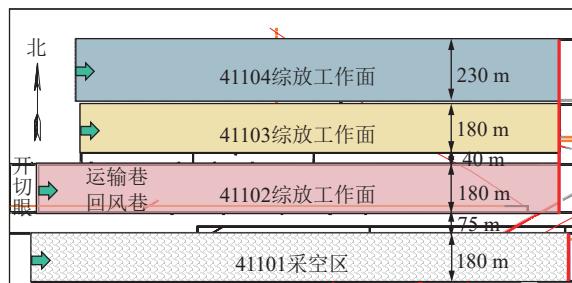


图1 孟村煤矿401102工作面位置示意

Fig.1 Location diagram of the 401102 working face at Mengcun Coal Mine

1.2 401102 工作面顶板覆岩信息

根据矿方提供的401102工作面附近M2-1、M3-2、104及M4-1钻孔勘探情况,获得了工作面区域钻孔综合岩层信息参数,详情见表1。

401102工作面上覆岩层存在多层厚硬砂岩关键层,由下及上分别为延安组、直罗组、安定组、宜君组、洛河组、华池组及表土层,其中延安组覆岩包含岩层R₁~R₄,组厚36.41 m;直罗组覆岩包含岩层R₅~R₈,组厚29.57 m,距离煤层36.41 m;安定组覆岩包含岩层R₉~R₁₂,组厚77.76 m,距离煤层65.98 m;宜君组覆岩为岩层R₁₃,组厚25.28 m,距煤层131.96 m;洛河组覆岩包含R₁₄~R₂₅,组厚359.79 m,距煤层169.02 m;华池组覆岩为R₂₆,组厚78.63 m,距煤层528.81 m;表土层为R₂₇,组厚117.63 m,距离煤层607.44 m。

1.3 动力灾害概况

401102工作面主采的4煤为近水平煤层,平均可采煤厚约为16 m。经冲击倾向性鉴定,4煤具有强冲击倾向性,煤层顶板具有弱冲击倾向性,煤层底板具

表1 401102工作面区域钻孔综合岩层参数
Table 1 Comprehensive rock layer parameters of the 401102 working face area drilling

岩层	岩性	厚度/m	岩层	岩性	厚度/m
R ₂₇	黄土	117.60	R ₁₃	粉砂岩	18.03
R ₂₆	泥岩	78.63	R ₁₂	中砂岩	1.52
R ₂₅	粗粒砂岩	10.82	R ₁₁	粗粒砂岩	6.31
R ₂₄	中砂岩	55.60	R ₁₀	细砂岩	13.62
R ₂₃	含砾砂岩	50.67	R ₉	粗砂岩	38.28
R ₂₂	细砂岩	46.58	R ₈	粉砂岩	8.74
R ₂₁	含砾砂岩	57.04	R ₇	粗粒砂岩	1.75
R ₂₀	砾岩	2.10	R ₆	砂质泥岩	12.13
R ₁₉	含砾砂岩	14.57	R ₅	粗粒砂岩	6.95
R ₁₈	中砂岩	41.44	R ₄	泥岩	9.96
R ₁₇	粗粒砂岩	30.61	R ₃	粉砂岩	11.13
R ₁₆	中粒砂岩	38.05	R ₂	细砂岩	6.87
R ₁₅	粗粒砂岩	12.31	R ₁	砂质泥岩	8.45
R ₁₄	砾岩	25.28	Coal	4煤	16.00

有无冲击倾向性。

随着孟村煤矿401盘区工作面采掘作业的不断进行,动力灾害问题日益凸显,动力显现的频次和强度逐渐增加,冲击显现情况十分严峻。2017—2020年间,401101工作面采掘作业期间共发生冲击地压事件12次,其中10次发生在中央大巷位置,其余2次分别发生在401101工作面运输巷和回风巷位置。根据401101工作面冲击危险因素排查,其上覆高位坚硬岩层大面积悬顶条件下初次破断运动产生的强烈动载是诱发冲击地压的重要因素,严重影响401盘区工作面的安全生产。

因此,针对孟村煤矿401盘区潜在存在的高位坚硬岩致灾问题,亟需采用地面水力压裂技术以降低高位覆岩产生的强动载,其中科学精准地识别覆岩主控致灾层位便显得尤为重要。

2 厚硬覆岩运动致灾机理研究

2.1 分区运动特征

覆岩分区运动特征是指工作面采掘期间由上覆关键层及其所控制岩层的时空运动状态及运动趋势,其中包括破断(初次破断及周期破断)、回转及滑移失稳,其与工作面开采条件、覆岩厚硬岩层赋存具有十分密切的关联。

传统矿压理论从覆岩空间运动模式角度出发,将工作面顶板岩层由下及上划分为“垮落带”、“裂隙带”和“弯曲下沉带”^[16]。然而,对于厚硬岩层顶板矿井而

言,由于厚硬岩层自身具有高弹性模量、高极限强度、大厚度、强整体性等显著特点,导致这类岩层存在较为明显的“延时滞后运动”效应,传统三带划分无法对厚硬顶板工作面动力灾害防治工作提供有效指导。

载荷三带理论从覆岩时空运动状态出发,考虑覆岩的空间结构形态与覆岩运动的动静载影响时间效应,于时空上揭示了覆岩分区运动特征及结构特点,即将工作面顶板覆岩划分为即时加载带(ILZ)、延时加载带(DLZ)和静载带(SLZ)^[17]。不同分区内的覆岩运动状态存在时空差异,具体表现为:

(1) 即时加载带 (ILZ) 内覆岩由于回采空间的出现会立即发生垮落和回转运动, 充填采空区并形成承载结构, 该带覆岩一般不会形成大范围悬顶, 释放能量较小, 因此其运动性较强、致灾性较弱。

(2) 延时加载带(DLZ)会在较长的一段时间内随着所承受的载荷超过自身强度而逐步发生离层、断裂、

回转或滑移运动,随着工作面推采面积增大会产生大面积悬顶,覆岩运动释放能量强烈,因此其运动性强、致灾性强。

(3) 静载带 (SLZ) 内覆岩于工作面充分采动后仅发生弯曲下沉, 不会发生大范围的能量释放运动, 因此其运动性较弱、致灾性较弱。

根据载荷三带分区运动特征,延时加载带内的覆岩运动性和致灾性较强,存在释放大量能量的覆岩运动行为,对井下工作面冲击地压事故及地表建筑物损伤威胁性较高,因此将延时加载带作为覆岩主控诱发层位的目标识别带。

为准确划定工作面覆岩载荷三带结构类型并确定三带厚度,建立了考虑工作面开采条件及坚硬岩层赋存状态的载荷三带结构划分判别模型(图2),工作面埋深为 H ,工作面面长的一半为 L ,工作面面长为 $b_0(2L)$,工作面采高为 h ,厚度为 m 的坚硬岩层距工作面为 S 。

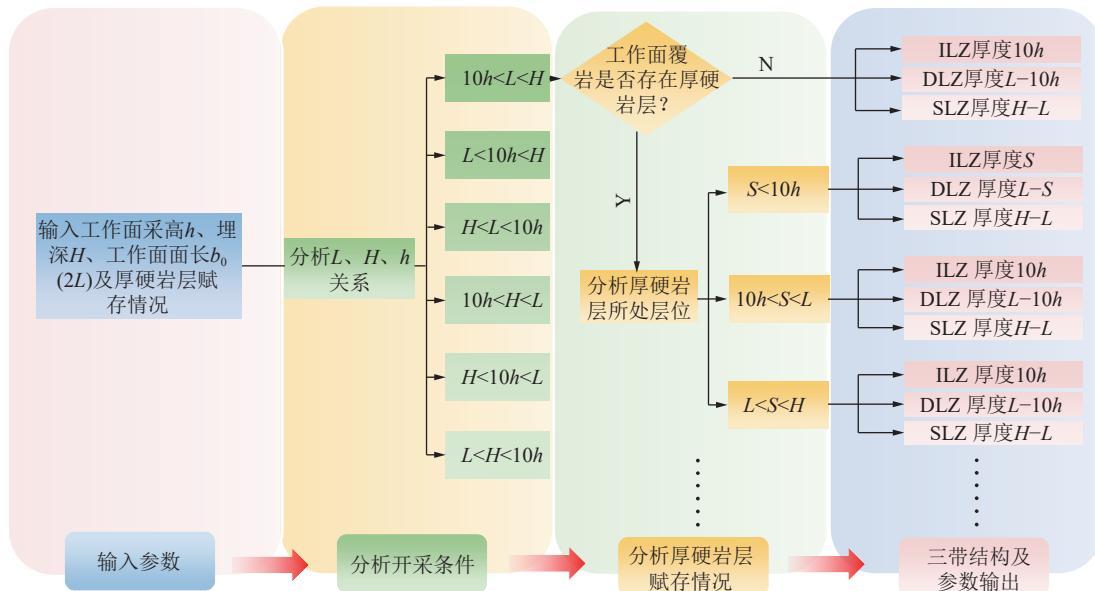


图 2 考虑工作面开采条件及坚硬岩层赋存状态的载荷三带结构划分判别模型

Fig.2 Load three-zone structure partitioning and discrimination model considering the working face mining conditions and the occurrence state of the thick and hard rock strata

载荷三带结构划分取决于工作面的采高 h 、面长 $b_0(2L)$ 和埋深 H ，但在某些特殊情况下，3 者之间的关系可能导致载荷三带的退化，具体为：

(1) 当工作面面长较小 ($L < 10h$) 时, 工作面顶板覆岩延时加载效应不显著, 此时覆岩载荷三带划分为即时加载带 (ILZ) 与静载带 (SLZ) 的二带结构。

(2) 当工作面的埋深较小 ($H < L$) 时, 上覆岩层垮落范围会逐渐扩展至地表, 静载带不存在, 此时覆岩载荷三带划分为即时加载带 (ILZ) 与延时加载带 (DLZ) 的二带结构。

同时,坚硬岩层的赋存情况对工作面覆岩载荷三

带结构划分也具有一定影响,具体表现为:

(1) 当厚硬岩层处于即时加载带 (ILZ) 内时, 厚硬覆岩能够在自身强度和底部支撑煤岩共同作用下形成大面积“岩板”或悬顶结构, 短时间不会受采动范围影响自身稳定性, 因此将厚硬岩层下方岩层划定为即时加载带 (ILZ), 厚硬岩层自身至延时加载带 (DLZ) 顶部为延时加载带 (DLZ), 静载带 (SLZ) 范围不变。

(2) 当厚硬岩层处于延时加载带 (DLZ) 及静载带 (SLZ) 内时, 根据两带运动特征, 厚硬覆岩运动状态不会影响两带的划分, 因此载荷三带厚度无显著变化。

上述推理模型依据工作面埋深 H 、采高 h 及工作

面面长 $b_0(2L)$ 的关系, 将工作面细分为 6 类工况, 分别讨论了每种工况下工作面顶板坚硬岩层是否赋存

及赋存层位情况, 从而获得了考虑开采条件及坚硬岩层赋存的载荷三带结构划分结果, 见表 2。

表 2 考虑开采条件及坚硬岩层赋存的载荷三带结构划分结果

Table 2 Partitioning results of the load three-zone structure considering the mining conditions and the occurrence state of the thick and hard rock strata

序号	H、L及h关系	厚硬岩层赋存		载荷三带厚度/m		
		是否赋存	赋存层位	即时加载带ILZ	延时加载带DLZ	静载带SLZ
1	$10h < L < H$	否	—	10h	$L-10h$	$H-L$
2		是	$S < 10h$	S	$L-S$	$H-L$
3		是	$10h < S < L$	10h	$L-10h$	$H-L$
4		是	$L < S < H$	10h	$L-10h$	$H-L$
5	$L < 10h < H$	否	—	10h	—	$H-10h$
6		是	$S < 10h$	S	$10h-S$	$H-10h$
7		是	$10h < S < H$	10h	—	$H-10h$
8		否	—	H	—	—
9	$H < L < 10h$	是	$S < H$	S	$H-S$	—
10		否	—	10h	$H-10h$	—
11		是	$S < 10h$	S	$H-S$	—
12		是	$10h < S < H$	10h	$H-10h$	—
13	$H < 10h < L$	否	—	H	—	—
14		是	$S < H$	S	$H-S$	—
15		否	—	H	—	—
16		是	$S < H$	S	$H-S$	—

2.2 诱灾力学分析

覆岩运动诱发是指处于非充分采动状态下的顶板覆岩运动所释放的能量, 以震动波的形式向震源点周围传播, 强震扰动不仅会引发井下冲击地压, 还可能引发地面建筑物损伤, 极大地影响当地人民群众的生产生活^[18]。

处于不同层位、运动形式的关键层运动所释放的能量强弱不一, 因而可能诱发矿震或冲击地压的影响程度也存有差异, 为了更好地区分和定位这些灾害的主控致灾层位, 提出了致冲关键层和矿震关键层的学

术概念, 两者均是基于致灾属性对关键层的细分。其中, 矿震关键层指覆岩运动释放矿震能量相对较大的单层或多层关键层; 致冲关键层是指覆岩运动引发井下采掘空间等效附加扰动应力相对较大的单层或多层关键层。由于不同矿井地层结构及开采条件存在差异, 矿震关键层及致冲关键层可能被识别为同一层位, 也可能被识别为不同层位, 具体识别结果因矿而异, 震-冲关键层运动致灾如图 3 所示。

2.2.1 覆岩运动震动能量预测

处于不同运动状态下的关键层所释放能量具有

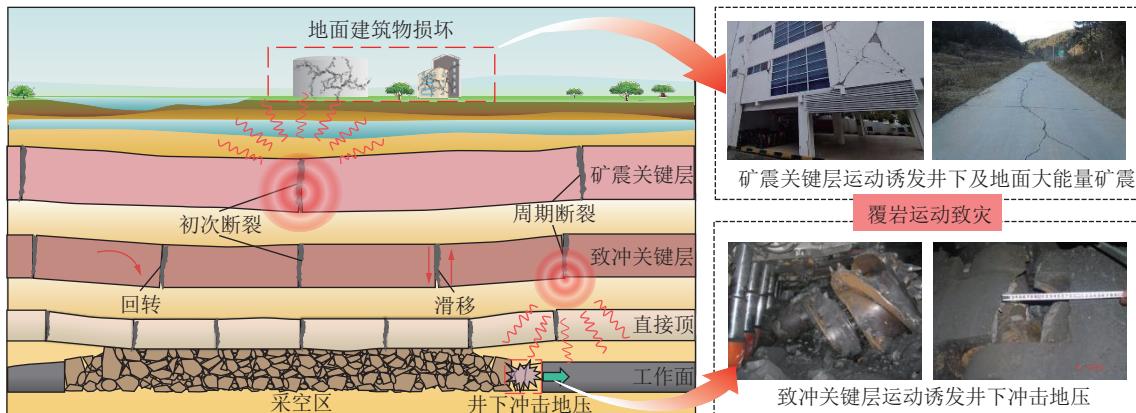


图 3 震-冲关键层运动致灾示意

Fig.3 Schematic diagram of disaster mechanism induced by mine earthquake and rock burst key layer movement

强弱差异,为探究关键层层位及运动状态对井下工作面致灾程度的影响,在关键层判别基础上^[19-20],建立了基于关键层运动状态的矿震能量预测模型,如图4所示,设顶板上方第n层关键层运动释放震动能量为 U_n ,第n层关键层运动释放震动能量传递至采场或地表的残余震动能量为 U'_n 。

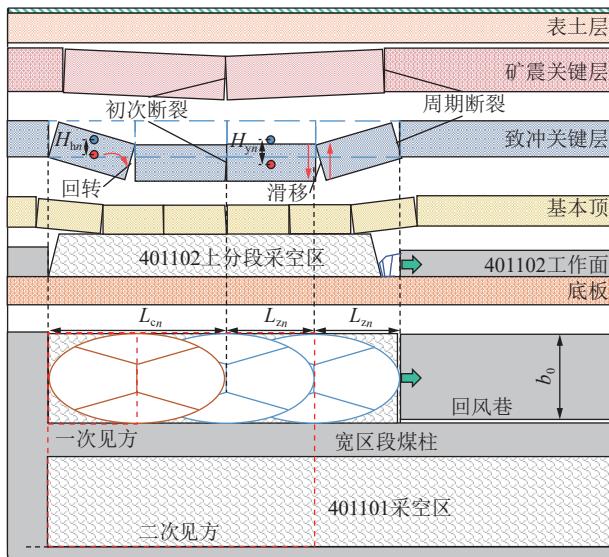


图4 基于关键层运动状态的矿震能量预测模型

Fig.4 Predictive model for mining seismic energy based on the movement state of key layers

关键层初次破断及周期破断所需能量主要源自岩梁的弯曲弹性能,破断后的关键层发生回转沉降及

滑移失稳运动所需能量则主要由自身自重产生,根据课题组研究,获得了基于关键层运动状态的矿震能量估算公式^[21],图5所示。

图4、5中, U_{cn} 、 U_{zn} 、 U_{hn} 、 U_{yn} 分别为第n层关键层初次破断、周期破断、回转沉降及滑移失稳释放的震动波能量, J 、 q_n 为第n层关键层自重及其上覆岩层附加单位长度折算载荷, MPa; E_n 为第n层关键层弹性模量, Pa; m_n 为第n层关键层厚度, m; b_n 为第n层关键层悬空跨度, m; η_n 为第n层关键层运动过程中震动波释放效率; L_{cn} 、 L_{zn} 分别为第n层关键层初次、周期破断步距, m; γ_n 为第n层关键层的平均容重, N/m³; H_{hn} 、 H_{yn} 分别为第n层关键层回转、滑移垂高, m; d_{hn} 、 d_{yn} 分别为第n层关键层发生回转、滑移运动块体倾向长度, m。

随着工作面开采,上覆岩层破裂沿一定角度 α 向上发展,因此工作面上覆第n层关键层悬跨宽度 b_n 可表示^[22]为

$$b_n = b_0 - 2S_n \cot \alpha \quad (1)$$

式中, α 为工作面岩层移动角, (°); S_n 为第n层关键层距工作面距离, m。

覆岩运动过程中由于滑移(回转)块体尺寸较小且释放能量大小主要由块体重力势能控制,因此同层位关键层的4类运动释放能量大小顺序可按初次破断、周期破断、滑移失稳或回转沉降进行排序,其中初次破断释放矿震能量最大。

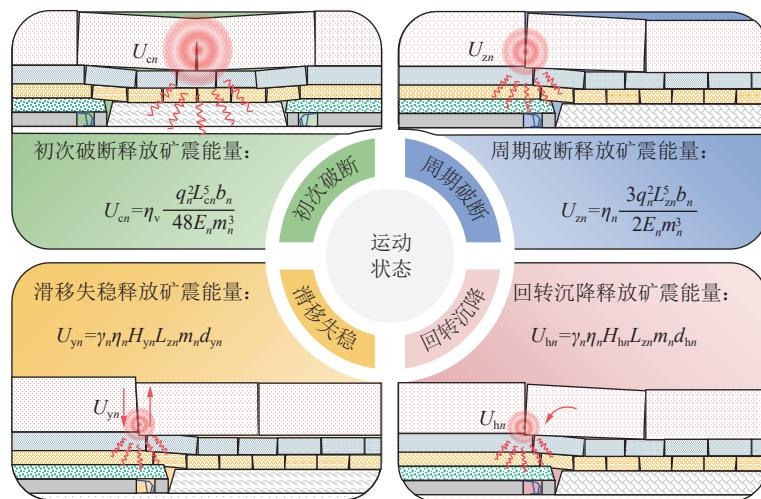


图5 基于关键层运动状态的矿震能量估算公式^[21]

Fig.5 Energy estimation formula for mining-induced seismic events based on the movement state of key layers^[21]

2.2.2 覆岩运动等效附加扰动应力估算

覆岩运动释放的震动波在岩层传播过程中,受传播介质中的摩擦阻力和能量耗散等因素影响,震动波能量会随着传播距离的增加而逐渐衰减^[8]。为便于分

析,假设震动波传播介质为均质且不考虑应力波传播过程中的折射、衍射及反射等其他效应,仅分析震动波衰减过程的距离因素,为此建立覆岩运动矿震能量传播衰减估算模型,如图6所示。

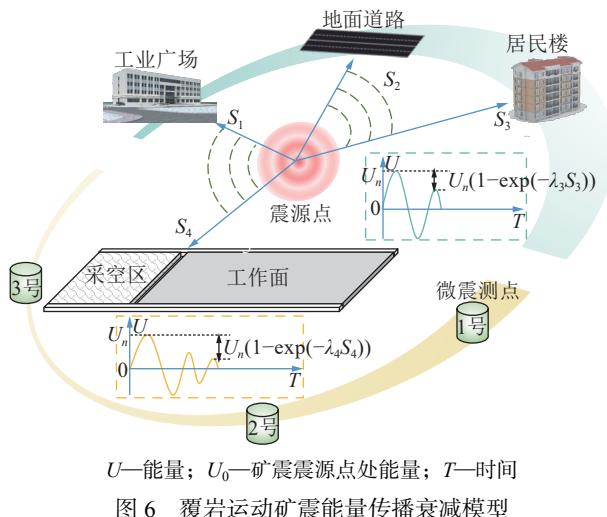


Fig.6 Propagation and attenuation model for the energy of mining seismic events generated by overlying strata movement

根据地震波传播理论, 地震波振幅随传播距离的增加而衰减, 同时震动波的能量与振幅平方存在正比关系。因此, 矿震能量衰减规律可以通过振幅衰减公式来描述, 指数衰减模型是主要考虑距离影响的常用振幅衰减公式^[23-24], 可表示为

$$U'_n = U_n e^{-\lambda_n S_n} \quad (2)$$

式中, λ_n 为第 n 层关键层运动矿震波衰减系数。

根据弹性波理论, 获得了工作面上覆第 n 层关键层运动震动波对采场产生的等效扰动附加应力 $\Delta\sigma_{zd}$ 估算公式:

$$\Delta\sigma_{zd} = \rho_b V_m V_{fn} \quad (3)$$

其中,

$$V_{fn} = \sqrt{\frac{2P_n U'_n}{\rho_b}} \quad (4)$$

式中, ρ_b 为地震波传播途经煤岩体的平均介质密度, kg/m^3 ; V_m 为矿震波传播速度, m/s ; V_{fn} 为第 n 层关键层运动震动波引起的质点峰值震动速度, m/s ; P_n 为第 n 层关键层运动引发矿震的能量作用系数。

综上所述, $\Delta\sigma_{cn}$ 、 $\Delta\sigma_{zn}$ 、 $\Delta\sigma_{hn}$ 、 $\Delta\sigma_{yn}$ 分别为第 n 层关键层初次破断、周期破断、回转沉降及滑移失稳运动诱发采场等效附加扰动应力, 表达式分别为

$$\Delta\sigma_{cn} = V_m \sqrt{\frac{P_n \eta_n q_n^2 L_{cn}^5 b_n \rho_b \exp(-\lambda_n S_n)}{24 E_n m_n^3}} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_{zn} = V_m \sqrt{\frac{3P_n \eta_n q_n^2 L_{cn}^5 b_n \rho_b \exp(-\lambda_n S_n)}{E_n m_n^3}} \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{hn} = V_m \sqrt{2P_n \rho_b \eta_n \gamma_n d_{hn} L_{zn} H_{hn} m_n \exp(-\lambda_n S_n)} \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_{yn} = V_m \sqrt{2P_n \rho_b \eta_n \gamma_n d_{yn} L_{zn} H_{yn} m_n \exp(-\lambda_n S_n)} \quad (8)$$

由于前文矿震能量的衰减传递主要考虑传播距离及衰减系数的影响, 所以可能会出现低位覆岩对采场产生的等效附加扰动应力估算结果过大的情况, 因此对于低位覆岩分析需结合现场微震监测等结果进行综合研判, 以便对低位覆岩计算结果进行修正。

2.3 诱灾工程判据与评价方法

2.3.1 诱灾工程判据

(1) 致冲关键层诱灾工程判据。

根据动静耦合理论^[25], 致冲关键层运动对采场产生的等效附加扰动应力诱发井下工作面冲击地压机制为

$$\Delta\sigma_{zd} + \sigma_0 + \sum_{t=1}^N \Delta\sigma_t(x) > \sigma_k \quad (9)$$

式中, σ_0 为煤层自重应力, MPa ; N 为诱发冲击地压影响因素数量, 包含构造、采空区、煤柱等; $\Delta\sigma_t$ 为第 t 个诱发冲击地压影响因素产生的应力增量, MPa ; $\Delta\sigma_{zd}$ 为覆岩致冲层运动对采场产生的等效附加扰动应力, MPa ; σ_k 为煤层冲击的临界应力, MPa 。

(2) 矿震关键层诱灾工程判据。

矿震关键层运动释放震动波传播至地面引起地面质点振动导致建筑物破坏机制为

$$V_{fn} \geq V_0 \quad (10)$$

式中, V_0 为地面建筑物容许极限振动速度, m/s 。

2.3.2 覆岩诱灾威胁度评价方法

目前关于覆岩诱灾危险性评价方法研究较少, 现尝试从诱灾结果角度出发, 分析造成相应灾害等级的工作面覆岩危险程度, 从而评价覆岩的危险等级。为此建立了基于地表建筑物损伤及井下工作面冲击地压的灾害分级模型, 如图 7 所示。



图 7 基于地表建筑物损伤及井下工作面冲击地压的灾害分级模型

Fig.7 Disaster grading model based on surface building damage and underground working face rock burst

冲击地压危险性评价方法较为成熟, 工程上通过应力集中程度 I_c 来表征采掘工作面的冲击危险性^[26]:

$$I_c = \frac{\Delta\sigma_{zd} + \sigma_0 + \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_i(x)}{[\sigma_c]} \quad (11)$$

式中, I_c 为冲击可能性系数, 当 I_c 分别位于 $(0, 1.5)$ 、 $[1.5, 2.0)$ 、 $[2.0, 2.5)$ 、 $[2.5, +\infty)$ 区间时具有无冲击危险 C_4 、弱冲击危险 C_3 、中等冲击危险 C_2 和强冲击危险 C_1 ; $[\sigma_c]$ 为工作面煤体单轴抗压强度。

地面建筑物损伤评价方法则以质点振动速度 V_m 为评价依据^[27-28], 将损伤等级划分为以下 3 个标准: ① $V_m \leq 5 \text{ mm/s}$, 建筑物安全且人震感不明显 B_3 ; ② $5 \text{ mm/s} < V_m \leq 30 \text{ mm/s}$, 建筑物安全但人震感强烈 B_2 ; ③ $V_m > 30 \text{ mm/s}$, 民用建筑物可能产生振动破坏并造成人员伤亡 B_1 。

综上所述, 致灾关键层导致的井下冲击地压危险等级由低到高分别为无冲击危险 C_4 、弱冲击危险 C_3 、中等冲击危险 C_2 和强冲击危险 C_1 ; 致灾关键层导致的地面建筑物损害等级由低到高分别为无~弱震感 B_3 、震感强烈 B_2 和建筑物损害 B_1 。

3 厚硬覆岩主控诱灾层位识别研究

3.1 诱灾层位聚类识别分析

覆岩运动诱灾层位识别可视为基于层位识别参数的聚类分析过程, 覆岩诱灾层位首先明确为关键层, 其中关键层运动震动能量 U_{cn} 用于识别矿震关键层, 采场等效附加应力 $\Delta\sigma_{cn}$ 用于识别致冲关键层。该过程通过度量目标识别带内 n 层关键层识别参数的相似性, 将识别参数相似较强的关键层归为同一类别, 而将相似性较差的关键层归为不同类别, 主要目标是在分析目标识别带内关键层类别相似性的同时, 最大化类别间的差异性, 从而识别目标识别带内单层或多层关键层致灾岩层。

K-means 算法是一种迭代聚类方法, 目标是将数据划分为 K 簇, 以便最小化簇内某参数的平方误差和 (E_{ss}), 同时最大化簇间 E_{ss} , 以达到进行聚类分析的目的^[29]。模型中误差平方和 E_{ss} 代表了聚类效果的好坏, 可用下式表示:

$$E_{ss} = \sum_{i=1}^K \sum_{x_j \in Z_i} |x_j^i - w_i|^2 \quad (12)$$

式中, K 为聚类簇数量; x_j^i 为第 i 簇内第 j 层致灾关键层识别参数, j 与 i 均为正整数; w_i 为第 i 簇致灾关键层识别参数集合的质心; Z_i 为第 i 簇对应的致灾关键层识别参数集合。

肘部法则是一种评估 K-means 聚类模型效果的方法, 通过绘制 $K-E_{ss}$ 曲线图, 寻找曲线的“肘部”点,

即 E_{ss} 增长速度显著变化点, 该点对应的 K 值便为最佳聚类数^[30], 如图 8 所示。

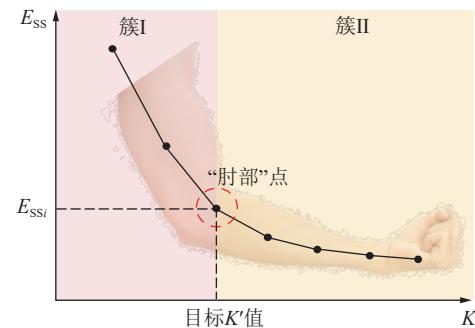


图 8 确定肘部法则中最佳聚类数 K' 示意

Fig.8 Schematic diagram illustrating the determination of the optimal number of clusters K' in the elbow rule

为了精准识别目标识别带内覆岩主控诱灾岩层, 建立了基于 K-means 聚类识别算法及肘部法则的厚硬岩层顶板工作面覆岩主控诱灾层位识别模型, 如图 9 所示。

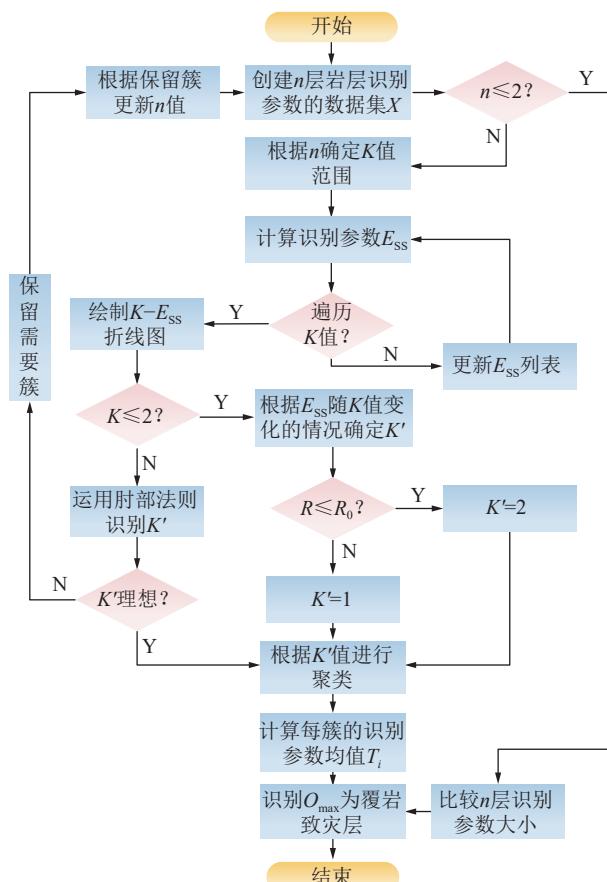


图 9 基于 K-means 聚类识别算法及肘部法则的厚硬岩层顶板工作面覆岩主控诱灾层位识别模型

Fig.9 Identification model for the hazardous layer caused by the main control of overlying strata in the roof of a thick and hard rock layer at the working face using the K-means clustering identification algorithm and the elbow rule

考虑到数据样本存在特殊性,为了确保获得的最佳聚类数 K' 客观合理,现对特殊节点样本数进行分类讨论:

(1) 当岩层数 $n \leq 2$ 时,此时由于数量样本过少,无法应用 K-means 算法进行聚类分析,因此仅需对比岩层识别参数来确定致灾层位即可,此时坚硬岩层致灾层 O_{\max} 识别为

$$O_{\max} = \arg \max_{\{i \in K | 1 \leq i \leq K'\}} (x_j^i) \quad (13)$$

(2) 当岩层数 $n > 2$ 时,此时样本数可成簇,能够利用 K-means 算法进行聚类分析,根据聚类簇族数量 K 大小,可划分为以下 2 种情况:

① 当聚类簇数量 $K=2$ 时,存在“肘部”点 K' 值不明显的情况,此时需根据 E_{SS} 值随 K 值变化的降低程度来确定“肘部”点 K' 值。为了定量判断 E_{SS} 随 K 值变化时减小幅度的大小,引入 E_{SS} 变化率 R 进行分析,变化率 R 可用式 (14) 表示:

$$R = \frac{E_{\text{SS}1} - E_{\text{SS}2}}{E_{\text{SS}1}} \quad (14)$$

根据工程经验、交叉验证等手段可获得判断 E_{SS} 降幅是否显著的阈值 R_0 。当 $R \leq R_0$ 时, E_{SS} 值降幅显著,表明较大的 K 值可能会带来更好的聚类效果,此时选择 $K=2$ 作为 K' ; 当 $R > R_0$, E_{SS} 值的降幅较小,说

明 K 值的增加并没有显著地改善聚类效果, $K=1$ 时可能已经足够捕捉数据集的结构,因此选择 $K=1$ 作为 K' 。

② 当聚类簇数量 $K > 2$ 时,可正常利用 K-means 聚类算法并结合肘部法则不断迭代确定最佳聚类数 K' 。

利用识别模型获得最佳聚类数 K' 后,可根据 K' 值将目标识别带内岩层划分为不同簇,各簇之间差异性可用识别参数的均值 T_i 进行表征,公式为

$$T_i = \frac{1}{D_i} \sum_{x_j^i \in Z_i} x_j^i \quad (15)$$

式中, T_i 为第 i 个簇内关键层识别参数均值; D_i 为第 i 个簇开展聚类时簇内关键层数量。

此时,坚硬岩层致灾层位 O_{\max} 识别实际上是寻找存在最大识别参数均值簇的过程,故其可用式 (16) 表示:

$$O_{\max} = \arg \max_{\{i \in K | 1 \leq i \leq K'\}} (T_i) \quad (16)$$

由于不同开采条件下坚硬岩层顶板工作面载荷三带结构划分情况存在差异,为此提出了不同开采条件下坚硬岩层顶板工作面主控诱发层位识别判据,见表 3,其中 O_{\max}^z 为覆岩矿震关键层识别层位; T_i^z 为矿震关键层识别参数均值; O_{\max}^c 为覆岩致冲关键层识别层位; T_i^c 为致冲关键层识别参数均值。

表 3 不同开采条件下坚硬岩层顶板工作面覆岩主控诱发层位识别工程判据

Table 3 Engineering criteria for identifying the hazardous layer caused by the main control of overlying strata in the roof of a thick and hard rock layer at the working face under different mining conditions

地层及开采条件	矿震关键层 O_{\max}^z 识别判据	致冲关键层 O_{\max}^c 识别判据
$10h < L < H$ ($S < 10h$)	$O_{\max}^z = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^z$ $m_{O_{\max}^z} \in [S, L]$	$O_{\max}^c = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^c$ $m_{O_{\max}^c} \in [S, L]$
$L < 10h < H$ ($S < 10h$)	$O_{\max}^z = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^z$ $m_{O_{\max}^z} \in [S, 10h]$	$O_{\max}^c = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^c$ $m_{O_{\max}^c} \in [S, 10h]$
$H < L < 10h$ ($S < H$)	$O_{\max}^z = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^z$ $m_{O_{\max}^z} \in [S, H]$	$O_{\max}^c = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^c$ $m_{O_{\max}^c} \in [S, H]$
$10h < H < L$ ($S < 10h$)	$O_{\max}^z = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^z$ $m_{O_{\max}^z} \in [10h, H]$	$O_{\max}^c = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^c$ $m_{O_{\max}^c} \in [10h, H]$
$H < 10h < L$ ($S < H$)	$O_{\max}^z = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^z$ $m_{O_{\max}^z} \in [S, H]$	$O_{\max}^c = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^c$ $m_{O_{\max}^c} \in [S, H]$
$L < H < 10h$ ($S < H$)	$O_{\max}^z = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^z$ $m_{O_{\max}^z} \in [S, H]$	$O_{\max}^c = \arg \max_{\{i \in K 1 \leq i \leq K'\}} T_i^c$ $m_{O_{\max}^c} \in [S, H]$

3.2 诱发层位识别工程技术方法

根据前文分析,总结提出了煤矿覆岩主控诱发层位识别工程技术方法,具体识别流程如图 10 所示。

(1) 获取矿井地质与采矿资料。包含工作面煤层赋存条件、采煤方法、工作面布置详情、钻孔柱状图、

地质构造和支护设计等。

(2) 确定载荷三带结构及目标识别带厚度。根据工作面地层开采条件,向载荷三带结构及参数划分模型中输入工作面埋深 H 、工作面采高 h 、工作面长 $b_0(2L)$ 、坚硬岩层赋存情况,确定工作面载荷三带结构



图 10 煤矿覆岩主控致灾层位识别工程技术方法
Fig.10 Engineering technical methods for identifying the hazardous layer caused by the main control of overlying strata in coal mining

类型及目标识别带(延时加载带)厚度。

(3) 基于关键层理论划分目标识别带内关键层。根据关键层划分依据,划分工作面覆岩目标识别带(延时加载带)内的n层关键层,确定各关键层厚度m_n、弹性模量E_n、悬跨宽度b_n等特征参数。

(4) 计算层位识别参数。基于覆岩运动致灾机制,计算目标识别带(延时加载带)内n层关键层的矿震关键层识别参数U_{cn}及致冲关键层识别参数Δσ_{cn}。

(5) 进行主控致灾层位识别。将步骤(4)计算的层位识别参数输入基于K-means聚类算法及肘部法

则的厚硬岩层顶板工作面主控诱发层位识别模型中,获得最终迭代的最佳聚类数K',随后通过分析不同簇的识别参数均值识别工作面覆岩矿震关键层O_{max}^z及覆岩致冲关键层O_{max}^c。

(6) 进行现场监测验证。通过现场微震监测等监测手段验证层位识别的科学合理性。

4 识别方法现场应用及验证

4.1 覆岩主控致灾层位识别及验证

4.1.1 识别理论分析

孟村煤矿401102工作面平均埋深H约为706.5 m,工作面面长b₀为180 m,平均采高h约为16 m。根据表1可知,401102工作面上覆约66 m处存在38.28 m厚的安定组粗砂岩R₉。将401102工作面开采条件及厚硬赋存情况代入载荷三带结构划分判别模型中,得到孟村煤矿401102工作面覆岩即时加载带厚66 m,延时加载带厚94 m,静载带厚度为546.5 m,主控诱发层位识别带范围为(66 m, 130 m)。

根据关键层划分方法,对目标识别带内关键层划分并确定各关键层相关参数,具体情况见表4。目标识别带内共划分4层关键层,分别为距煤层66 m的粗砂岩关键层R₉,厚度为38.3 m;距煤层104 m的细沙岩关键层R₁₀,厚度为13.62 m;距煤层126 m的粉砂岩关键层R₁₃,厚度为18.03 m;距煤层144 m的砾岩关键层R₁₄,厚度为25.28 m。

表 4 401102 工作面目标识别带关键层划分及岩层参数

Table 4 Identification and division of key layers in the target recognition zone of the 401102 working face, along with the information regarding the rock layer parameters

序号	地质层组	岩层	厚度/m	至煤层距离/m	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	关键层划分
6	宜君组	砾岩R ₁₄	25.28	143.74	17.12	2.83	关键层
5		粉砂岩R ₁₃	18.03	125.71	7.02	1.79	关键层
4		中砂岩R ₁₂	1.52	124.19	8.30	2.31	—
3	安定组	粗粒砂岩R ₁₁	6.31	117.88	11.06	2.57	—
2		细砂岩R ₁₀	13.62	104.26	13.08	2.05	关键层
1		粗砂岩R ₉	38.28	65.98	11.06	2.57	关键层

随后分别计算目标识别带内各关键层识别参数Δσ_{cn}及U_{cn}。根据现场工程经验,计算过程中取震动波震动效率η=2%,震动波衰减系数λ=6%,震动波传递速度V_m=3 000 m/s、矿震作用系数P=1%,计算结果见表5。

利用基于K-means聚类算法及肘部法则的厚硬岩层顶板工作面主控致灾层位识别模型进行分析,分别构建包含目标识别带内4层岩层识别参数Δσ_{cn}及

U_{cn}的数据集X₁={0.47,0.55,0.73,7.23}及X₂={2.68×10⁵,1.25×10⁵,6.20×10⁴,6.08×10⁵},针对不同K值,执行K-means算法并计算E_{ss},根据计算结果绘制K-E_{ss}折线图,如图11所示。

由图可知,致冲关键层识别时的最佳聚类数K'=2,将目标识别带关键层划分为簇I{0.47,0.55,0.73}和簇II{7.23},关键层R₉被识别为致冲关键层;矿震关键层识别时的最佳聚类数K'=2,将目标识别带关键层划

表 5 401102 工作面致灾覆岩识别参数

Table 5 Identification parameters for the hazardous overlying strata at 401102 working face

序号	地质层组	岩层	$\Delta\sigma_{cn}/\text{MPa}$	U_{cn}/J
4	宜君组	砾岩 R ₁₄	0.47	268 407.21
3		粉砂岩 R ₁₃	0.55	125 445.56
2	安定组	细砂岩 R ₁₀	0.73	62 045.29
1		粗砂岩 R ₉	7.23	608 417.68

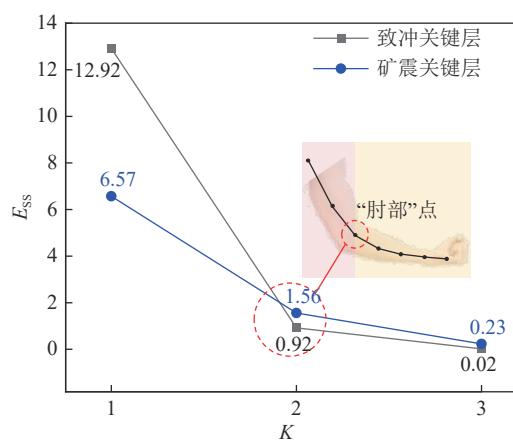
图 11 401102 工作面致灾覆岩层位识别的 $K-E_{ss}$ 折线示意

Fig.11 $K-E_{ss}$ (Sum of Squared Errors) line graph for identifying the hazardous overlying strata at the 401102 working face 分为簇 I $\{2.68 \times 10^5, 1.25 \times 10^5, 6.20 \times 10^4\}$ 和簇 II $\{6.08 \times 10^5\}$, 关键层 R_9 被识别为矿震关键层。

根据理论识别结果可知, 关键层 R_9 既为致冲关键层也为矿震关键层, 对井下防冲及地面建筑物保护工作威胁较大。

4.1.2 现场监测验证

根据孟村煤矿 401101 工作面观测孔监测数据可知, 工作面上方 20 m 范围内岩层具有随采随落特点, 裂隙发育速度较快; 随着推采工作的进行, 裂隙逐渐向上发育至直罗组顶界和安定组底界含砾的粗砂岩层段, 该过程裂隙发育时间放缓为 1 个月左右; 裂隙发育至稳定则需 3~4 个月, 最大垮落高度为 74.14 m, 与理论分析的目标识别带范围下限 66 m 接近, 说明顶板 74.14 m 以上岩层具有较强的“延时滞后运动”效应, 致灾威胁度较高。

同时, 根据现场 ARAMIS M/E 微震监测系统监测数据可知, 401101 工作面整个推采过程中共记录到了 1 512 次 10^4 J 及以上能级微震事件, 其中, 最大能量微震事件达到了 $6.65 \times 10^5 \text{ J}$, 多数大能量微震事件分布在煤层上方 (30 m, 100 m) 范围内, 与理论分析中目标识别带 (66 m, 130 m) 范围接近, 该范围存在的安定组砂岩属于钙质胶结与理论识别的震-冲关键层 R_9 一致, 因其完整性好、强度大、极难垮落等特点, 在

工作面推采过程中极易形成大范围悬顶^[14]。

综合覆岩主控致灾层位识别理论分析结果与 401101 工作面回采期间现场监测数据分析结果, 最终识别安定组关键层 R_9 为 401102 工作面主控致灾覆岩, 确定其为现场地面水平井分段水力压裂施工的目标层位。

4.2 现场压裂效果分析

覆岩主控致灾层位识别后, 孟村煤矿针对 401102 工作面展开了地面水平井分段水力压裂工业试验。试验在工作面开切眼及设计终采线附近分别施工了 MC-01L 型和 MC-02L 型水平井, 施工情况如图 12 所示。

由图 12 可知, 现场实际压裂层位为距离煤层 66 m 的砂岩层, 与理论识别层位一致; MC-01L 型水平井的设计开口标高为 +1 062 m, 设计长度为 1 597 m, 实际完成长度为 1 566 m, 压裂区域约为 401102 工作面切眼前方 (150 m, 920 m) 范围, 共计开展 16 段压裂, 平均压裂间距为 50 m; MC-02L 型水平井设计开口标高为 +988 m, 设计长度为 1 563 m, 实际完成长度为 1 539 m, 压裂区域约为 401102 工作面开切眼前方 (984 m, 1 754 m) 范围, 共计进行 15 段压裂, 平均压裂间距为 50 m; 整个压裂施工期间压裂平均缝长 268 m, 平均带宽 80 m, 平均缝高 50 m, 除工作面开切眼前方 (0 m, 150 m)、(920 m, 984 m) 外基本实现了覆岩主控致灾层位的全覆盖压裂。

4.2.1 现场微震监测分析

压裂施工完毕后, 进行 401102 工作面推采工作, 通过对比研究相同推采时间段 (16 个月) 内 401101、401102 工作面 $5 \times 10^3 \text{ J}$ 微震事件层位分布情况, 分析压裂层位选择的科学合理性及压裂效果的有效性, 详情如图 13 所示。

为减小微震定位误差对压裂效果评估的影响, 通过分析压裂前后 $5 \times 10^3 \text{ J}$ 及以上能级微震事件层位分布规律及其变化趋势评估压裂效果。由图 13 可知, 401101 工作面 50% 的 $5 \times 10^3 \text{ J}$ 事件分布在 (266 m, 312 m) 范围内, 中位层位为 292 m, 均值为 280 m; 401102 工作面 50% 的 $5 \times 10^3 \text{ J}$ 事件分布在 (281 m,

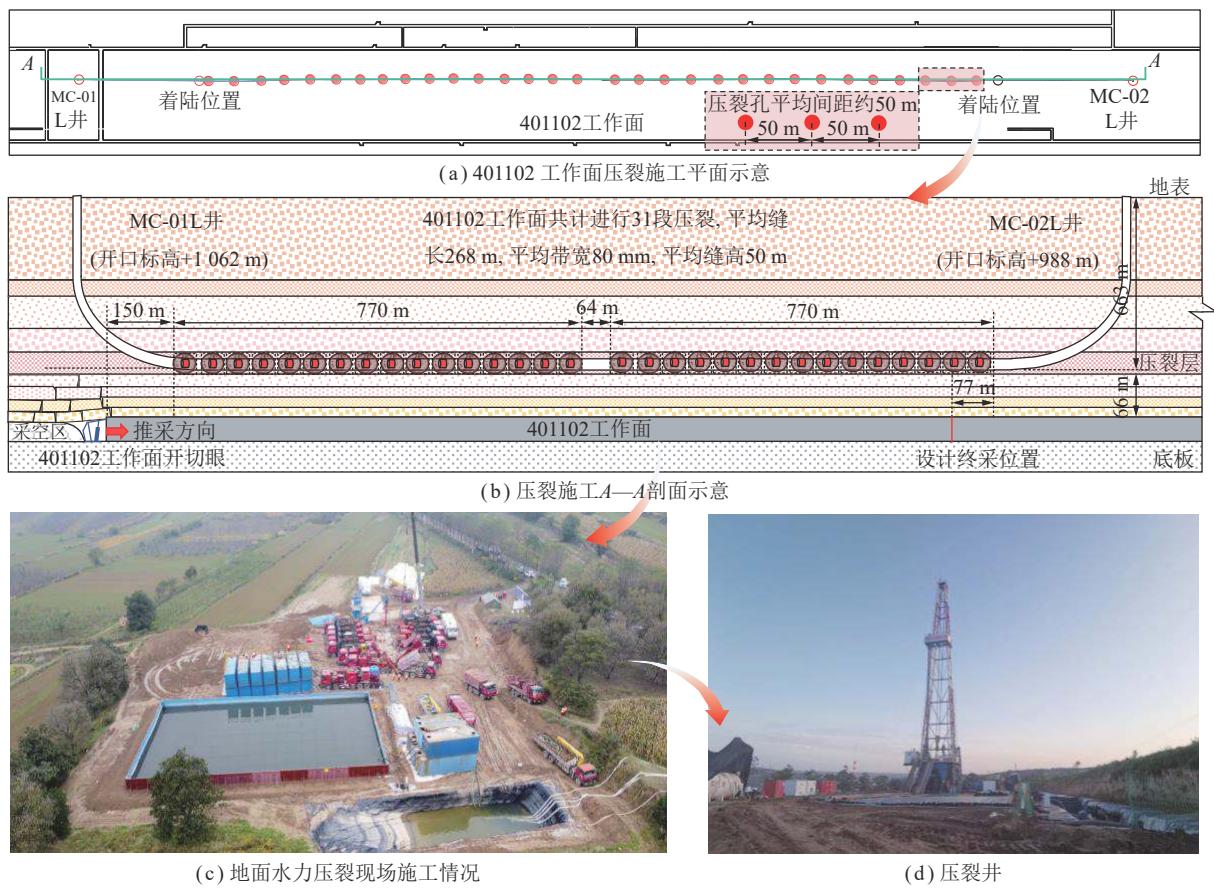
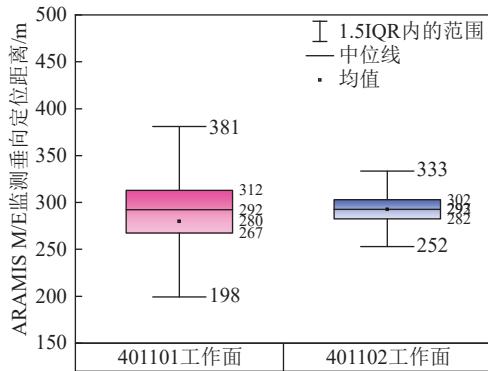


图 12 401102 工作面地面水力压裂施工示意

Fig.12 Schematic diagram of ground hydraulic fracturing construction at the 401102 working face

图 13 压裂前后工作面 5×10^3 J 微震事件层位分布箱线示意Fig.13 Box plot of the distribution of 5×10^3 J microseismic events in the working face before and after hydraulic fracturing

302 m) 范围内, 中位层位为 293 m, 均值为 293 m。由统计结果分析可知, 401102 工作面针对安定组关键层 R_9 实施压裂后, 工作面 5×10^3 J 微震能量事件出现上移趋势, 上移量约为 15 m, 说明地面水力压裂措施对于震-冲关键层的破断效果较好, 改善了震-冲关键层的破碎程度, 降低了震-冲关键层的威胁程度。

此外, 地面水平井分段水力压裂技术在降低大能量微震事件的频次和能级方面也取得了显著效果, 如图 14 所示。工作面初始推采 16 个月内, 10^2 J 及以下

能级微震事件占比由 39.61% 显著增加为 82.11%, 10^3 J 能级微震事件由 57.67% 显著减少至 17.19%, 10^4 J 及以上能级微震事件由 2.74% 减少至 0, 401102 回采工作面最大微震事件由 6.65×10^5 J 降至 9.75×10^3 J。

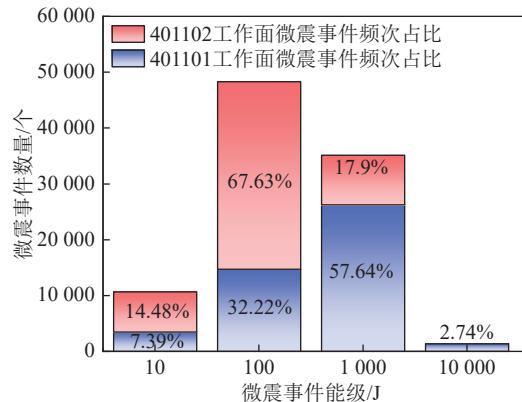


图 14 压裂前后工作面微震事件频次分布柱状示意

Fig.14 Bar chart of the frequency distribution of microseismic events in the working face before and after hydraulic fracturing

地面水力压裂施工显著改善了 401102 工作面的厚硬顶板微震事件的分布结构, 大能量微震事件频次显著降低, 小能量微震事件频次明显增加, 这表明覆

岩主控致灾岩层的能量释放得到了合理调整,降低了厚硬岩层运动产生动载的冲击危险性,有利于井工煤矿防冲工作。

4.2.2 效果理论分析

基于相同现场压裂参数与理论计算参数,假设对其余3层关键层开展压裂施工,分别计算目标识别带内4层关键层压裂后运动释放矿震能量及采场等效附加扰动应力理论值,详情见表6。

表6 压裂前后目标识别带关键层识别参数情况

Table 6 Comparison of key layer identification parameters in target identification zone before and after fracturing

序号	岩层	压裂前		压裂后	
		$\Delta\sigma_{cn}/\text{MPa}$	U_{cn}/J	$\Delta\sigma_{cn}/\text{MPa}$	U_{cn}/J
4	R_{14}	0.47	268 407.21	0.17	33 846.24
3	R_{13}	0.55	125 445.56	0.53	115 733.30
2	R_{10}	0.73	62 045.29	0.64	52 225.49
1	R_9	7.23	608 417.68	1.72	34 599.06

根据表6计算结果,实施压裂后,目标识别带内4层关键层的矿震能量及其采场等效附加扰动应力理论值均有所下降,其中 R_9 矿震能量理论值降幅约94%,采场等效附加扰动应力理论值降幅约76%; R_{10} 矿震能量理论值降幅约16%,采场等效附加扰动应力理论值降幅约12%; R_{13} 矿震能量理论值降幅约8%,采场等效附加扰动应力理论值降幅约4%; R_{14} 矿震能量理论值降幅约87%,采场等效附加扰动应力理论值降幅约64%。

通过4层关键层压裂前后识别参数变化情况可知, R_9 压裂后矿震能量及采场等效扰动应力理论值降幅最大,说明选择关键层 R_9 压裂对于矿井的“减震防冲”效果最好。

压裂前后现场微震监测及理论分析对比结果充分证实了地面水平井分段水力压裂措施的有效性,说明了选择安定组关键层 R_9 进行压裂更符合现场防冲工作需求,同时也验证了覆岩运动诱发层位识别技术方法的科学合理性。

5 结 论

(1) 分析了厚硬覆岩分区运动特征与诱发动力灾害之间的关系,将覆岩主控致灾层位划定在运动性和致灾性较强的延时加载带中,提出了考虑工作面开采条件及厚硬岩层赋存状态的载荷三带结构划分判别方法。

(2) 在关键层划分基础上,建立了基于关键层运动

状态的震动能量预测模型及采场等效附加应力估算模型,提出了震-冲关键层的诱发工程判据及诱发威胁度评价方法。

(3) 建立了基于K-means聚类算法及肘部法则的煤矿覆岩主控致灾层位识别工程技术方法,提出了不同开采条件下的厚硬岩层顶板工作面覆岩主控致灾层位识别工程判据。

(4) 根据理论分析,孟村煤矿401102工作面致冲关键层及矿震关键层均为距离煤层66 m的安定组关键层 R_9 ,其初次破断对采场产生的等效附加扰动应力为7.23 MPa,初次破断释放矿震能量为 $6.08 \times 10^5 \text{ J}$,致灾危险性较强;根据现场观测孔及微震监测,现场最大破裂高度为77.14 m,顶板上方(30 m, 100 m)范围内大能量微震事件居多,与理论分析中的目标识别带范围(66 m, 130 m)相近,震-冲关键层现场监测验证与理论分析一致。

(5) 401102工作面现场震-冲关键层压裂后,工作面上方 $5 \times 10^3 \text{ J}$ 大能量微震事件出现明显上移趋势,上移量约为15 m; 10^3 J 及以上能级微震事件频次占比显著下降,由60.39%降至17.89%,最大微震事件能量由 $6.65 \times 10^5 \text{ J}$ 降至 $9.75 \times 10^3 \text{ J}$; 10^2 J 及以下能级微震事件频次占比显著上升,由39.61%增至82.11%;通过效果理论分析,矿震能量理论值降幅约94%,采场等效附加扰动应力理论值降幅约76%,说明地面水平井分段水力压裂措施有效,压裂层位识别符合井下工作面防冲工作需求。

参考文献(References):

- [1] 齐庆新,马世志,孙希奎,等.煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构[J].煤炭学报,2023,48(5): 1861–1874.
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861–1874.
- [2] 李铁,蔡美峰,蔡明.采矿诱发地震分类的探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2): 3679–3686.
LI Tie, CAI Meifeng, CAI Ming. A discussion on classification of mining-induced seismicity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3679–3686.
- [3] 齐庆新,李晓璐,赵善坤.煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J].煤炭科学技术,2013,41(6): 1–5.
QI Qingxin, LI Xiaolu, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1–5.
- [4] 姜福兴,王平,冯增强,等.复合型厚煤层“震-冲”型动力灾害机理、预测与控制[J].煤炭学报,2009,34(12): 1605–1609.
JIANG Fuxing, WANG Ping, FENG Zengqiang, et al. Mechanism, prediction and control of “rock burst induced by shock bump” kind dynamic accident in composite thickness coal[J]. Journal of China

- Coal Society*, 2009, 34(12): 1605–1609.
- [5] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱发初探[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3396–3409.
ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(9): 3396–3409.
- [6] 李振雷, 何学秋, 窦林名. 综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 162–171.
LI Zhenlei, HE Xueqiu, DOU Linming. Control measures and practice for rock burst induced by overburden fracture in top-coal caving mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 162–171.
- [7] 王浩, 赵毅鑫, 牟宗龙, 等. 矿震扰动下采区煤柱应力偏量集中区诱发机制及防治方法[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1202–1210.
WANG Hao, ZHAO Yixin, MU Zonglong, et al. The mechanism of rockburst in district coal pillar with high deviatoric stress and mining tremors impact and its prevention methods[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(6): 1202–1210.
- [8] 高明仕, 徐东, 贺永亮, 等. 厚硬顶板覆岩冲击矿震影响的远近场效应研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 215–226.
GAO Mingshi, XU Dong, HE Yongliang, et al. Investigation on the near-far field effect of rock burst subject to the breakage of thick and hard overburden[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(2): 215–226.
- [9] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205–213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 205–213.
- [10] 高瑞. 远场坚硬岩层破断失稳的矿压作用机理及地面压裂控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
GAO Rui. The mechanism of ground pressure induced by the breakage of far-field hard strata and the control technology of ground fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [11] 于斌, 高瑞, 孟祥斌, 等. 大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1134–1145.
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1134–1145.
- [12] 尚晓光, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 地面直井水压致裂防控巨厚硬岩运动型矿震试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2): 639–650.
SHANG Xiaoguang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Experimental study on prevention and control of mine earthquake by high pressure water fracturing of huge thick strata in vertical shaft[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S2): 639–650.
- [13] 高瑞, 于斌, 孟祥斌. 工作面过煤柱强矿压显现机理及地面压裂控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(2): 324–331.
GAO Rui, YU Bin, MENG Xiangbin. Study on the mechanism of strong strata behavior influenced by overlying coal pillar and control technology of ground fracturing[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(2): 324–331.
- [14] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 636–648.
PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 636–648.
- [15] 梁彦波, 程远方, 黄娜, 等. 煤矿地面直井水压致裂技术防治巨厚岩层动力灾害研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(9): 98–102.
LIANG Yanbo, CHENG Yuanfang, HUANG Na, et al. Study on prevention and control of dynamic disaster of extra-thick rock stratum in coal mine by hydraulic fracturing technology in surface vertical well[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(9): 98–102.
- [16] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 2 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [17] 姜福兴, 刘懿, 张益超, 等. 采场覆岩的“载荷三带”结构模型及其在防冲领域的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2398–2408.
JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHANG Yichao, et al. A three-zone structure loading model of overlying strata and its application on rock-burst prevention[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(12): 2398–2408.
- [18] 张明. 厚硬岩层矿井矿震与冲击复合动力灾害防控研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
ZHANG Ming. Study on prevention and control of complex dynamic disasters of mine quake and rock burst under hard-thick strata[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [19] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463–467.
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29(5): 463–467.
- [20] 缪协兴, 茅献彪, 孙振武, 等. 采场覆岩中复合关键层的形成条件与判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 547–550.
MIAO Xiexing, MAO Xianbiao, SUN Zhenwu, et al. Formation conditions of compound key strata in mining overlayer strata and its discriminant[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(5): 547–550.
- [21] 朱斯陶, 刘金海, 姜福兴, 等. 我国煤矿顶板运动型矿震及诱发灾害分类、预测与防控[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 807–816.
ZHU Sitao, LIU Jinhai, JIANG Fuxing, et al. Classification, prediction, prevention and control of roof movement-type mine earthquakes and induced disasters in China's coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 807–816.
- [22] 蒋金泉, 张培鹏, 聂礼生, 等. 高位硬厚岩层破断规律及其动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1366–1374.
JIANG Jinquan, ZHANG Peipeng, NIE Lisheng, et al. Fracturing and dynamic response of high and thick strata of hard rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1366–1374.
- [23] KIJKO A, FUNK C W. Space-time interaction amongst clusters of

- mining induced seismicity[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1996, 147(2): 277–288.
- [24] HANKS T C, MCGUIRE R K. The character of high-frequency strong ground motion[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(6): 2071–2095.
- [25] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469–1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1469–1476.
- [26] 姜福兴, 舒凑先, 王存文. 基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2428–2435.
- JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(12): 2428–2435.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [28] 高明仕, 赵一超, 温颖远, 等. 震源扰动型巷道冲击矿压破坏力能准则及实践[J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 808–814.
- GAO Mingshi, ZHAO Yichao, WEN Yingyuan, et al. Stress and energy criterion of the roadway destruction subjected to disturbance type rock burst and its practice[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(4): 808–814.
- [29] 杨俊闯, 赵超. K-Means 聚类算法研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(23): 7–14, 63.
- YANG Junchuang, ZHAO Chao. Survey on K-means clustering algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(23): 7–14, 63.
- [30] 钟志峰, 李明辉, 张艳. 机器学习中自适应 k 值的 k 均值算法改进[J]. *计算机工程与设计*, 2021, 42(1): 136–141.
- ZHONG Zhifeng, LI Minghui, ZHANG Yan. Improved k -means clustering algorithm for adaptive k value in machine learning[J]. *Computer Engineering and Design*, 2021, 42(1): 136–141.