

文章编号:1671-251X(2021)03-0014-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17686

复合构造区域煤岩体应力分布及 冲击地压危险性评价

高家明^{1,2}, 夏永学^{1,2}, 杨光宇^{1,2}, 陈学慧^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013;
2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)



扫码移动阅读

摘要:工作面构造区域应力异常集中与冲击地压关系密切,而基于煤岩体波速与应力的良好相关性,地震波 CT 探测技术广泛用于冲击地压危险性评价与预警,但现有研究仅针对简单条件或单一构造区域,未对存在多种地质构造形成的复合构造区域进行探讨。以山东某矿 2305 综放工作面为例,针对其复合构造区域内微震事件集中且曾发生过冲击地压的情况,采用地震波 CT 探测技术获取构造区域内煤岩体应力分布情况,并引入含地震波波速和波速梯度的特征指数 c 分析应力分布特征及冲击地压危险性。研究结果表明:① 微震事件分布集中与邻近构造相关,可将集中区域按构造数量分为单一或复合区域,按受扰动程度分为强或弱扰动区域。② 强扰动复合构造区域静态应力集中程度最高,弱扰动单一构造区域应力集中程度最低;断层单一构造区域应力增高水平与受扰动程度呈正相关关系;低扰动复合构造区域内向斜较断层应力增高显著。③ 构造区域围岩静态应力集中是导致围岩活动剧烈的主要原因,综合考虑围岩静载荷与采动影响下动载荷增量情况,可得出不同微震事件集中区域的冲击地压危险性。

关键词:煤炭开采;采煤工作面;冲击地压;地震波 CT 探测;微震探测;复合地质构造;围岩应力
中图分类号:TD324 文献标志码:A

The stress distribution of coal and rock mass and the risk
evaluation of rock burst in the composite structure area

GAO Jiaming^{1,2}, XIA Yongxue^{1,2}, YANG Guangyu^{1,2}, CHEN Xuehui^{1,2}

(1. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The abnormal concentration of stress in the structure area of the working face is closely related to the rock burst. Based on the good correlation between the wave velocity and stress of the coal and rock mass, the seismic wave CT detection technology is widely used in the evaluation and warning of the risk of rock burst. However, the existing researches are mainly focused on simple conditions or single structure area. The composite structure area formed by multiple geological structures has not been discussed. Taking the 2305 fully mechanized working face of a mine in Shandong as an example, in the context of the concentration of microseismic events in the composite structure area and the occurrence of rock bursts, the seismic wave CT detection technology is used to obtain the stress distribution of coal and rock mass in the structure area and the characteristic index c including speed and speed gradient of seismic wave is introduced to analyze the stress distribution characteristics and the risk of rock burst. The research results show that: ① The concentration of microseismic events is related to adjacent structures. The

收稿日期:2020-11-30;修回日期:2021-03-03;责任编辑:李明。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804202);天地科技创新创业资金专项项目(2019-TD-2-CXY004,2019-TD-2-CXY006)。

作者简介:高家明(1996—),男,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为冲击地压理论与技术,E-mail:gaojiaming1996@163.com。

引用格式:高家明,夏永学,杨光宇,等.复合构造区域煤岩体应力分布及冲击地压危险性评价[J].工矿自动化,2021,47(3):14-19.

GAO Jiaming,XIA Yongxue,YANG Guangyu,et al. The stress distribution of coal and rock mass and the risk evaluation of rock burst in the composite structure area[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(3):14-19.

concentrated areas can be divided into single or composite areas according to the number of structures, and can be divided into strongly or weakly disturbed areas according to the degree of disturbance. ② The strongly disturbed area composite structure area has the highest static stress concentration, and the weakly disturbed single structure area has the lowest stress concentration. The stress increase level of the fault single structure area is positively correlated with the degree of disturbance. The syncline in the weakly disturbed composite structure area has a significantly higher stress than the fault area. ③ The static stress concentration of the surrounding rock in the structure area is the main cause of intense surrounding rock activity. Based on the static load of surrounding rock and the dynamic load increment under the influence of mining, the risk of rock burst in the concentrated area of different microseismic events can be obtained.

Key words: coal mining; coal working face; rock burst; seismic wave CT detection; microseismic detection; composite geological structure; surrounding rock stress

0 引言

我国煤炭资源赋存情况相对复杂,井田构造较发育,工作面构造区域冲击地压事件频发^[1-2]。研究表明,构造区域应力异常集中与冲击地压关系密切,研究工作面构造区域煤岩体应力分布特征是评价和防治冲击地压危险性的有效手段^[3-4]。

基于煤岩体波速与应力的良好相关性,近年来地震波 CT 探测技术广泛用于煤矿井下冲击地压危险性评价与预警,评价指标包括波速异常系数和波速梯度变化系数^[5-7]。王书文等^[8]提出了一种基于地震波波速异常率分布的采煤工作面冲击地压危险性评价方法,并采用地震波 CT 探测技术进行工作面内断层探测和超前支承压力分布划定。曹安业等^[9]分析了孤岛工作面临近断层时煤柱受力状态,并利用地震波 CT 探测技术对采掘现场进行冲击地压危险性动态实时预警。孙刘伟等^[10]采用地震波 CT 探测技术评价区段煤柱冲击危险性,并提出综合防控技术方案。上述研究仅针对简单条件或单一构造区域,未对断层、褶曲、相变等复合构造区域进行探讨。

山东某矿 2305 综放工作面(以下简称 2305 工作面)内微震事件在复合构造区域集中,且集中区域所在巷道区段发生了冲击地压。目前工作面前方存在多个与冲击地压发生区段条件相似的微震事件集

中区域,是否再次发生冲击地压难以评估。针对该问题,本文对 2305 工作面复合构造影响下的微震事件集中区域进行分类,并采用地震波 CT 探测技术获取工作面内复合构造区域的静态应力分布情况,引入特征指数 $c^{[6]}$ 分析复合构造区域的应力分布特征及冲击地压危险性,为现场冲击地压评价与防治提供参考。

1 工程背景

1.1 工作面概况

山东某矿 2305 工作面埋深超 1 000 m,其主采 3 号煤层平均厚度为 9.2 m,煤层基本顶和底板均为砂岩,煤岩均具有弱冲击倾向性。工作面西侧为 2304 工作面采空区,东侧为未回采的 2306 工作面。工作面回采巷道均布置在煤层中,其中 2305 上平巷为沿空巷道,区段煤柱宽度为 5 m。

2305 工作面平面布置如图 1 所示。该工作面区域构造发育,回采受到断层、褶曲等地质构造及煤层分叉、煤种变化影响。工作面区域内赋存 FD8 和 FD11 这 2 条落差较大的断层(赋存情况见表 1)。FD8 断层斜交切割 2304,2305 工作面,目前位于 2 个工作面采空区内的断层长度约占总长度的 2/3,受采动影响强烈;FD11 断层大部分位于 2305 工作面内,在 2305 二联巷揭露落差约为 15 m,在 2304 工作面揭露落差小于 10 m,其小部分位于 2304 工

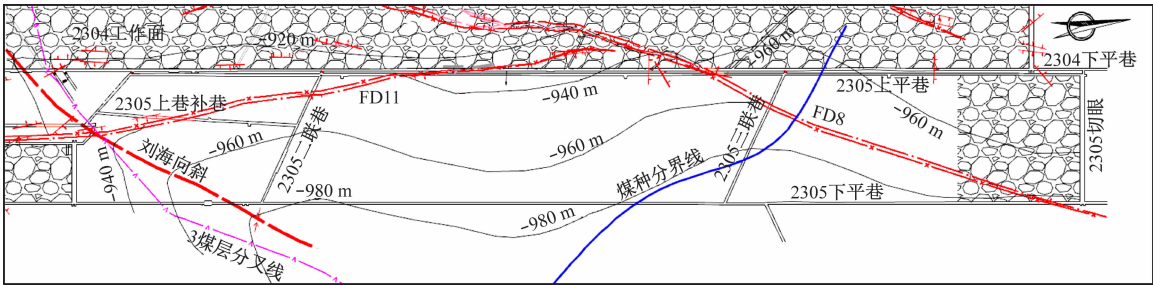


图 1 2305 工作面平面布置
Fig. 1 Plan layout of 2305 working face

作面采空区内,受采动影响较弱。2305 工作面大部分位于刘海向斜的西翼影响区域,刘海向斜轴部区域位于 2305 二联巷以南。

表 1 2305 工作面断层赋存情况

Table 1 Fault occurrence in 2305 working face						
断层名称	走向/ (°)	倾向/ (°)	倾角/ (°)	性质	落差/ m	受扰动程度
FD8	12~24	282~294	50~70	正	10~15	强
FD11	163~180	73~90	65~80	正	10~15	弱

钻孔勘测和实际揭露情况表明:2305 工作面煤层赋存条件复杂,其主采 3 煤层在工作面东南部出现分叉,在 3 煤层分叉线以南分为 3_上 煤层和 3_下 煤层;2305 三联巷附近大面积受煤种(肥煤、1/3 焦煤)变化带影响,煤种分界线西南侧和东北侧分别为肥煤和焦煤,同采区 2302 下平巷掘进期间曾发生以煤

体相变为主要诱因的动力现象。

1.2 构造区域微震事件分布特征

受地质构造和侧向采空区影响,2305 上平巷附近区域围岩在掘进期间微震事件活跃且分布密集,自北向南集中分布在 6 个区域,如图 2 所示。微震事件集中区域①为 FD8 断层与煤种分界线交汇区域;②为受 2304 工作面采空区内 FD8 断层影响的 2305 上平巷区域;③为受 2304 工作面采空区内 FD11 断层影响的 2305 上平巷区域;④为 FD11 断层与 2305 上平巷交汇区域;⑤为 FD11 断层与 2305 上巷补巷交汇区域;⑥为 FD11 断层、刘海向斜和 3 煤层分叉线交汇区域。以上微震事件集中区域附近均存在单一或复合构造,表明构造影响区域围岩动载荷释放强烈,与围岩内部静载荷叠加后导致冲击地压危险性大大增强^[11]。

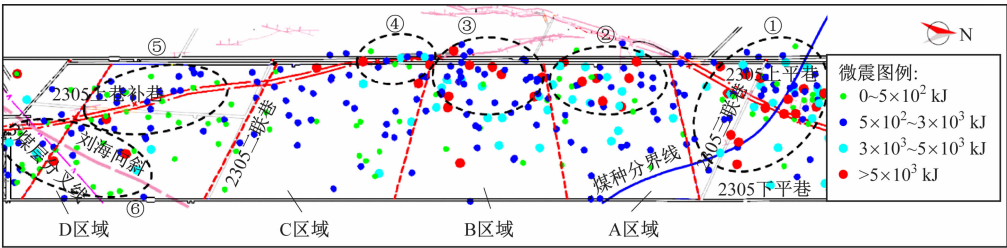


图 2 2305 上平巷区域微震事件分布

Fig. 2 Distribution of microseismic events in 2305 upper level roadway

为充分评估各微震事件集中区域的构造特征及其对微震事件分布的影响,按照区域附近存在的构造数量,将构造类型分为单一构造(构造数量为 1)和复合构造(构造数量不少于 2),同时将主要构造位于采空区的微震事件集中区域受扰动程度定义为强,其余区域受扰动程度定义为弱,得到微震事件集中区域①—⑥的构造赋存特征,见表 2。

表 2 微震事件集中区域构造赋存特征

Table 2 Occurrence characteristics of structure in microseismic event concentrated areas			
区域	附近构造	构造类型	受扰动程度
①	FD8 断层、煤种分界线	复合	弱
②	FD8 断层	单一	强
③	FD11 断层	单一	强
④	FD11 断层	单一	弱
⑤	FD11 断层、刘海向斜、3 煤层分叉线	复合	弱
⑥	FD11 断层、刘海向斜、3 煤层分叉线	复合	弱

在 2305 工作面推进至距开切眼约 250 m 时,微震事件集中区域①附近的 2305 上平巷区段发生冲击地压,导致区域巷道严重破坏。为进一步评估

2305 工作面前方构造区域的潜在冲击地压风险,采用地震波 CT 探测技术获取煤岩体静态应力分布。

2 复合构造区域地震波 CT 探测方案

2.1 理论基础

研究表明,实验室条件下煤岩体波速与应力存在显著的正相关性,矿震及地震发生规律验证了高应力梯度区域与高波速梯度区域的对应性。基于该结论,建立包含地震波波速和波速梯度的特征指数^[6,12-15]:

$$c = 0.5c_A + 0.5c_G = 0.5 \frac{V_p - V_p^0}{V_p^c - V_p^0} + 0.5 \frac{G_p}{G_p^c} \quad (1)$$

式中: c_A 、 c_G 分别为波速异常系数和波速梯度系数; V_p 为探测区域内某点纵波波速, m/ms; V_p^0 为探测区域内纵波波速平均值, m/ms; V_p^c 为探测区域煤岩体极限(发生临界破坏时)纵波波速, m/ms; G_p 为探测区域内某点的纵波波速梯度, s^{-1} ; G_p^c 为现场条件下探测区域煤岩体极限纵波波速梯度, s^{-1} 。

探测区域任意一点的 G_p 取地震波 CT 反演中该点周围 8 个网格单元的离散数据一阶方向导数的最大值; V_p 、 V_p^0 通过地震波 CT 反演直接获取; 由于 2305 工作面主采 3 煤层具有强烈动力现象, V_p^c 、 G_p^c

分别取地震波 CT 反演结果中的最大波速和最大波速梯度。

2.2 探测方案

采用 PASAT-M 型便携式微震探测系统采集地震波数据,设定系统采样频率为 2 kHz,检波器工作频段为 5~10 000 Hz,增益为 20 dB,采样长度为 0.512 s。采用炸药作为激发震源,炮间距为 6 m。震源激发方式为单炮顺序激发,多道同时接收。检波器安装在支护锚杆端部,以保证与围岩的耦合效果。

根据探测区域内构造影响类型,将微震事件集中区域②—⑥所在的约 1 320 m 范围近似均分为 A,B,C,D 4 个独立探测区域(图 2),激发震源和探测系统分别布置在 2305 下平巷和 2305 上平巷,各区域探测方案见表 3。探测期间工作面处于停产状态,且附近无采掘作业,可认为工作面煤岩体应力分布无大幅改变。

表 3 各区域探测方案

Table 3 Detection schemes of each area					
区域	构造影响类型	探测范围	激发炮点个数	有效炮点个数	检波器道间距/m
A	复合构造+强扰动	2305 三联巷以南 260 m	45	36	17.5
B	单一构造+强扰动	2305 三联巷以南 260~590 m	55	47	16.5
C	单一构造+弱扰动	2305 二联巷以北 360 m	60	50	16.0
D	复合构造+弱扰动	2305 二联巷以南 260 m	60	46	17.0

3 复合构造区域应力分布特征

3.1 数据处理

采用探测系统配套的 PASAT-RHA 软件进行数据处理,流程如图 3 所示。① 数据导入:将采集的地震波数据导入 PASAT-RHA 软件,根据现场情况和可视化波形图像剔除无效及初至模糊的地震波数据,按时间顺序将有效数据依次拼接。② 探测系统导入:录入有效数据对应的探测系统坐标,进行震源激发点射线模拟。③ 初至拾取:结合频谱分析和数字滤波自动拾取初至,人工修正后确定每道数据的初至时间。④ 反演成像:设定离散像元尺寸、背景速度、边界条件等反演参数,按照算法反演成像。

部分实测地震波波形及频谱如图 4 所示。可看出地震波波形同相轴连续性较好,初至波起跳明显,

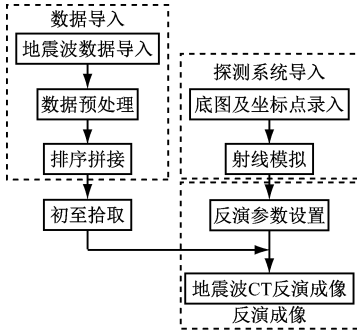


图 3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow

满足初至到时拾取要求;频谱分辨率高,杂波及背景噪声影响较小。总体来看,实测地震波数据良好,满足数据处理需要。

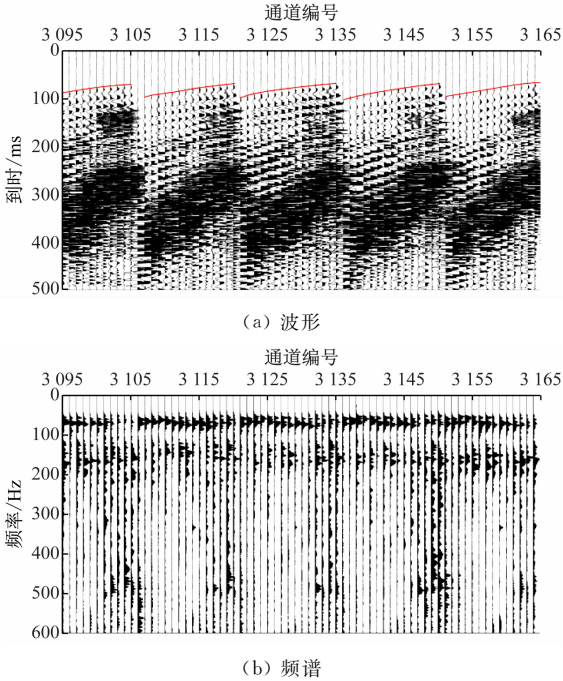


图 4 2305 工作面部分实测地震波波形及频谱

Fig. 4 Partial monitored seismic wave and frequency spectrum in 2305 working face

3.2 应力分布特征分析

采用特征指数 c 对 A,B,C,D 4 个区域的实测结果进行分析, c 越大表明该处受采动影响的应力增高程度越强^[6]。为方便表述,以绿色、黄色、红色和深红色渐变代表探测区域内 c 在 $[0,1]$ 内依次增大,相对应的应力增高区以Ⅳ、Ⅲ类、Ⅱ类和Ⅰ类表示。

A 区域应力分布受 FD8 断层和煤种分界线复合构造影响,其中 FD8 断层受扰动程度较强,断层周围岩体稳定性较差。A 区域特征指数 c 分布如图 5 所示。该区域整体应力增高程度在整个探测区域内最大,Ⅱ类及以上应力增高区占比过半,仅存在 2 处小范围Ⅳ类应力增高区。靠近 FD8 断层的高水平应力集中区与断层走向近似平行,且分布范围

较广;煤种分界线两侧应力分布变化较大,但附近应力增高区面积较小,表明 A 区域内处于强扰动条件下的 FD8 断层为导致煤岩体高水平应力集中的主要因素。

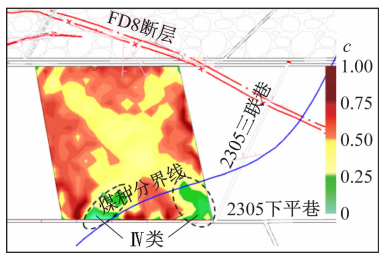


图 5 A 区域特征指数 c 分布

Fig. 5 Characteristic index c distribution in area A

B 区域应力分布仅受 FD11 断层单一构造影响,局部断层受扰动程度较强,但低于 FD8 断层。B 区域特征指数 c 分布如图 6 所示。Ⅱ类及以上应力增高区主要位于工作面内部和下平巷区域。上平巷区域以Ⅲ类应力增高区为主,分布较均匀,仅存在小面积的Ⅱ类及以上应力增高区。

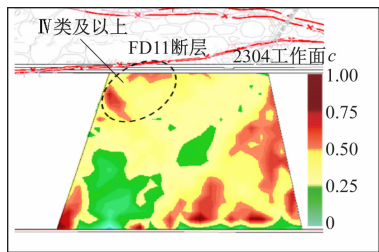


图 6 B 区域特征指数 c 分布

Fig. 6 Characteristic index c distribution in area B

C 区域属于单一构造和弱扰动影响区域,区域内部分 FD11 断层切割上平巷,减弱了侧向采空区悬顶的影响,对周围煤岩体产生一定卸压作用。C 区域特征指数 c 分布如图 7 所示。该区域高水平应力集中程度在整个探测区域内最弱,仅存在 1 处小面积Ⅱ类应力增高区,位于二联巷与上平巷交叉处。

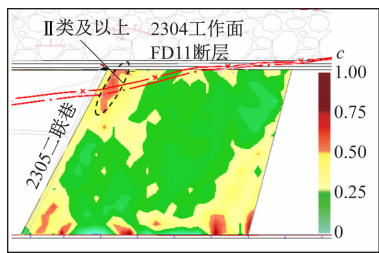


图 7 C 区域特征指数 c 分布

Fig. 7 Characteristic index c distribution in area C

D 区域内复合构造情况最复杂,FD11 断层、刘海向斜与 3 煤层分叉线于区域内部交汇,但各构造受扰动影响程度较弱。D 区域特征指数 c 分布如图 8 所示。Ⅱ类及以上应力增高区主要集中在复合构造交汇区,在低扰动条件下,向斜构造和 3 煤层分叉线区域的应力集中程度更高,且应力分布在向斜

轴部具有一定的对称性;上平巷区域存在 2 处面积较小的Ⅱ类及以上应力增高区,局部应力变化不明显。

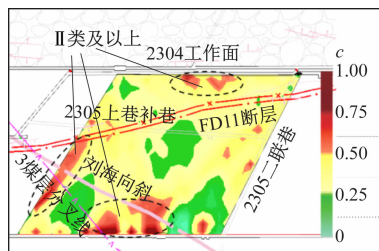


图 8 D 区域特征指数 c 分布

Fig. 8 Characteristic index c distribution in area D

通过分析得出以下结论:① 强扰动条件下复合构造区域高水平应力集中程度最强,弱扰动条件下单一构造区域高水平应力集中程度最弱。② 单一构造条件下,断层构造区域应力增高程度随断层受扰动程度增加而增强。③ 在受扰动程度较弱的条件下,向斜构造相对于断层构造的应力增高程度更强。

3.3 构造区域冲击危险性综合评判

通过对比地震波 CT 探测结果与微震事件集中分布情况,验证 CT 探测结果的可靠性^[7]。除微震事件集中区域④外,其余微震事件集中区域均与地震波 CT 探测结果中的高水平应力集中区相对应。而微震事件集中区域④应力增高不明显的原因是 FD11 断层切割上平巷顶板产生了卸压作用。可见地震波 CT 探测结果可靠性较高。

探测结果表明,构造区域高水平应力集中是围岩受扰动时活动剧烈的原因,同时围岩活动为冲击地压发生提供了动载荷,造成区域冲击地压危险性增大。对构造区域的冲击地压危险性进行综合评判:① 存在强扰动复合构造的 A 区域煤岩静态应力集中程度较高,上下平巷附近均存在大面积高水平应力集中区,冲击地压发生门槛最低。② B 区域受强扰动单一构造影响,上平巷西南角应力集中程度较高,且回采过程将对该处的 FD11 断层进一步扰动,导致该处冲击地压发生风险较高。③ C 区域受弱扰动单一断层构造影响,整体应力集中程度较弱,上平巷和二联巷交叉处静载荷水平较高,在巷道开挖过程中该区域未出现微震事件集中,此处冲击地压危险性以静载荷为主要因素。④ 类比上平巷微震事件集中区域①发生的冲击地压案例,可推测同属于弱扰动复合构造条件下的 D 区域在受到采动影响时微震事件集中,动载荷增量明显,此时局部高水平应力集中区的冲击地压危险性显著增大。综上所述得出微震事件集中区域②,③,⑤,⑥的潜在冲击地压危险性较大,应作为重点关注区域并采取有针对

性的防治措施。

4 结论

(1) 微震事件呈区域性集中现象与邻近构造关系密切,按照区域构造数量可分为单一或复合构造区域,根据受扰动程度可划分为强扰动或弱扰动构造区域。

(2) 构造区域地震波 CT 探测结果表明:① 强扰动复合构造区域静态应力集中程度最高,而弱扰动单一构造区域应力集中程度最低。② 断层单一构造区域应力增高水平与其受扰动程度呈正相关关系。③ 低扰动复合构造区域内向斜构造较断层构造的应力增高更明显。

(3) 地震波 CT 探测和微震监测结果表明,构造区域围岩静态应力集中是造成围岩剧烈活动的原因,使得围岩动静载荷整体水平较高。综合考虑围岩静载荷与采动影响下潜在动载荷增量情况,得出微震事件集中区域②,③,⑤,⑥的冲击地压危险性较大,是冲击地压防治重点区域。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
QI Qingxin,LI Yizhe,ZHAO Shankun,et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019,47(9):1-40.

[3] 姜福兴,魏全德,王存文,等.巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J].煤炭学报,2014,39(7):1191-1196.
JIANG Fuxing,WEI Quande,WANG Cunwen,et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. Journal of China Coal Society,2014, 39(7):1191-1196.

[4] 潘俊锋,刘少虹,秦子晗,等.深部盘区巷道群集中静载荷型冲击地压机理与防治[J].煤炭学报,2018,43(10):2679-2686.
PAN Junfeng,LIU Shaohong,QIN Zihan,et al.

Mechanism and prevention of concentrated static load type rock burst of roadway group in deep mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (10): 2679-2686.

[5] 窦林名,姜耀东,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):803-811.
DOU Linming,JIANG Yaodong,CAO Anye,et al. Monitoring and pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(4):803-811.

[6] 王书文,毛德兵,潘俊锋,等.基于煤层围岩波速结构探测的工作面冲击危险性预评价技术[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3847-3855.
WANG Shuwen,MAO Debing,PAN Junfeng,et al. Rockburst hazard pre-evaluation technology based on wave velocity structure detection of coal bed surrounding rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S2): 3847-3855.

[7] 窦林名,蔡武,巩思园,等.冲击危险性动态预测的震动波 CT 技术研究[J].煤炭学报,2014,39(2):238-244.
DOU Linming,CAI Wu,GONG Siyuan,et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (2): 238-244.

[8] 王书文,徐圣集,蓝航,等.地震 CT 技术在采煤工作面的应用研究[J].煤炭科学技术,2012,40(7):24-27.
WANG Shuwen,XU Shengji,LAN Hang,et al. Study on seismic CT technology applied to coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40 (7): 24-27.

[9] 曹安业,王常彬,窦林名,等.临近断层孤岛面开采动力显现机理与震动波 CT 动态预警[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3):411-417.
CAO Anye,WANG Changbin,DOU Linming,et al. Dynamic manifestation mechanism of mining on the island coalface along fault and dynamic pre-warning of seismic waves with seismic tomography[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(3):411-417.

[10] 孙刘伟,鞠文君,潘俊锋,等.基于震波 CT 探测的宽煤柱冲击地压防控技术[J].煤炭学报,2019,44(2):377-383.
SUN Liuwei,JU Wenjun,PAN Junfeng,et al. Rock burst prevention technology based on seismic CT detection in wide section coal pillar [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(2):377-383.

[11] 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.
- [12] 巩思园. 矿震震动波波速层析成像原理及其预测煤矿冲击危险应用实践[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.
- GONG Siyuan. Research and application of using mine tremor velocity tomography to forecast rockburst danger in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2010.
- [13] 王培德,李春来,WETZIG E,等. 用地震层析成像方法研究北京西北地区的活动断裂[J]. 地震学报, 2007,29(1):11-19.
- WANG Peide,LI Chunlai,WETZIG E,et al. Seismic active faults in the northwestern Beijing by seismic tomography[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1):11-19.
- [14] 胥颐,刘建华,刘福田,等. 天山-帕米尔结合带的地壳速度结构及地震活动研究[J]. 地球物理学报, 2006,49(2):469-476.
- XU Yi, LIU Jianhua, LIU Futian, et al. Crustal velocity structure and seismic activity in the Tianshan-Pamir conjunctive zone[J]. Chinese Journal of Geophys,2006,49(2):469-476.
- [15] LURKA A. Bent ray tomographic imaging of seismic velocity and seismic velocity gradient in Zabrze Bielszowice coal mine for seismic hazard assessment [C]//Proceedings of the 4th Internaional Symposium on Green Mining,Luoyang,2011:1-8.