



移动扫码阅读

曹安业,薛成春,吴芸,等.煤矿褶皱构造区冲击地压机理研究及防治实践[J].煤炭科学技术,2021,49(6):82-87.doi:10.13199/j.cnki.est.2021.06.009

CAO Anye,XUE Chengchun,WU Yun,*et al.* Study on mechanism of rock burst in fold structure area of coal mine and its prevention practice [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (6): 82 - 87. doi: 10.13199/j.cnki.est.2021.06.009

煤矿褶皱构造区冲击地压机理研究及防治实践

曹安业^{1,2},薛成春¹,吴芸³,王崧玮¹,郭文豪¹

(1.中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 江苏省矿山地震监测工程实验室,江苏 徐州 221116;
3.晋能控股煤业集团 塔山煤矿,山西 大同 037001)

摘要:针对胡家河煤矿402103工作面褶皱构造区开采期间煤岩应力异常和强矿震事件频发问题,基于数值模拟和现场实测方法分析了褶皱构造区工作面回采期间顶板、煤层和底板的应力演化特征,探讨了褶皱构造区冲击地压发生机理。模拟结果表明:工作面开采至褶皱构造不同区域时,褶皱构造区垂直、水平应力场分布具有明显的分区特性;褶皱构造区工作面开采时,水平应力起主控作用,开采至背斜轴部区域时顶板围岩稳定性降低,开采至向斜轴部区域时底板围岩稳定性降低,开采至翼部区域时煤层稳定性降低;基于煤矿褶皱构造区冲击地压发生机理,制定了402103工作面巷道围岩系统的顶板、煤层定向爆破释能降载防治方案,卸压后日均微震总能量下降47.6%,日均微震总频次上升16.7%,有效降低了工作面冲击危险性。研究结果对煤矿褶皱构造区工作面开采动力灾害防范具有一定借鉴意义。

关键词:应力演化;冲击地压;动力灾害;褶皱构造

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)06-0082-06

Study on mechanism of rock burst in fold structure area of coal mine and its prevention practice

CAO Anye^{1,2},XUE Chengchun¹,WU Yun³,WANG Songwei¹,GUO Wenhao¹

(1.School of Mines, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention (Jiangsu), China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Tashan Coal Mine, Jinneng Holding Coal Industry Group, Datong 037001, China)

Abstract: Aiming at the problems of abnormal stress of coal and rock and frequent occurrence of strong mine tremors during mining in the fold structure area of No.402103 working face of Hujiahe mine, the stress evolution characteristics of roof, coal seam and floor during mining in the fold structure area were analyzed based on numerical simulation and field measurement, and the occurrence mechanism of rock burst in fold structure area was discussed. The simulation results show that when the working face is mined to different areas of the fold structure, the distribution of vertical and horizontal stress fields in the fold structure area has obvious zoning characteristics. When the working face is mined in the fold structure area, the horizontal stress plays a dominant role. When the working face is mined to the anticline axis area, the stability of the roof surrounding rock decreases. When the working face is mined to the syncline axis area, the stability of the floor surrounding rock decreases. The stability of the coal seam decreases when mining to the fold wing area. Based on the occurrence mechanism of rock burst in fold structure area, the prevention and control scheme of directional blasting energy release and load reduction for roof and coal seam of roadway surrounding rock system in No.402103 working face was formulated. After pressure relief, the daily average total microseismic energy decreased by 47.6%, and the daily average microseismic frequency increased by 16.7%, which effectively reduced the risk of rock burst in working face. The research results have a certain reference significance for the prevention and control of mining dynamic disasters in coal mine fold structure area.

Key words: stress evolution; rock burst; dynamic disaster; folded structure

收稿日期:2021-02-28;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51734009,51674253,51874292);山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY02)

作者简介:曹安业(1982—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,博士。E-mail: caoanye@163.com

通讯作者:薛成春(1994—),男,河南周口人,博士研究生。E-mail: xccxue@126.com

0 引言

褶皱构造是煤岩层受垂直和水平方向应力挤压、扭转等作用发生弯曲变形而形成的,是地壳运动过程中最基本的构造型式^[1-4]。在我国煤炭开采中,褶皱构造区资源开采占比大,褶皱区存在较大的构造应力,在工作面采掘扰动影响下,极易诱发煤岩动力灾害事故^[5-10]。

因此,研究褶皱构造区煤岩层开采应力演化特征和冲击地压孕育机制,对实现工作面安全开采具有重要意义。国内众多学者从不同角度分析了褶皱构造应力场演化特征,取得了大量研究成果。井广成等^[7]基于震源机制矩张量反演,得到了工作面开采期间围岩应力演化情况。康红普等^[11]基于华砚矿区地应力场测量结果,发现井下构造应力占绝对优势,向斜构造对矿井地应力场分布产生较大影响。王宏伟等^[12]研究认为褶皱构造原岩应力场分布具有明显空间分布区域性,垂直应力、水平应力在向斜轴部、背斜轴部表现出不同的分区特性。陆菜平等^[13]建立了褶皱构造数值模型,分析了褶皱构造区工作面开采过程中顶板、煤层、底板的应力演化形式,研究了工作面不同开采时期的煤岩应力分布规律。贺志龙^[14]研究了褶皱应力场分布规律,比较了不同开采方式下,工作面顶板、底板与煤壁前方应力集中程度。

此外,还有专家学者对褶皱构造区冲击地压孕育规律进行了研究,取得了丰硕成果。王存文等^[15]基于案例分析探究了断层、褶皱及相变等区域冲击地压发生机理,并将褶皱各部位的受力状态划分5个区域。卜万奎等^[16]基于极坐标下曲梁的位移函数,研究了曲梁偏微分控制方程和位移分量、应力分量。陈国祥等^[17]基于对褶皱构造区冲击地压发生特征的总结归纳,在褶皱构造区巷道布置方位、工作面布局与冲击地压的关联性方面进行了探讨,从战略防御角度提出了褶皱构造区工作面冲击地压防范措施。齐庆新等^[18]从褶皱构造应力分布角度,研究了陶庄煤矿冲击地压与褶皱构造应力的潜在关系,以及冲击地压发生的力源问题。

胡家河煤矿402103工作面褶皱构造发育,采掘期间动力显现强烈。基于此,笔者建立了褶皱构造区数值模型,研究了褶皱构造区工作面开采期间顶板、煤层和底板的垂直、水平应力演化特征,探讨了煤层褶皱构造区冲击地压发生机理,制定了顶板、煤层爆破释能降载防治方案,为

煤矿褶皱构造区冲击地压防治提供理论及实践依据。

1 工程概况

胡家河煤矿402盘区褶皱构造赋存复杂,区域内赋存A4背斜和A5、A6向斜,煤岩层水平构造应力大,褶皱形态如图1所示。402103工作面为402盘区首采面,走向长度2 047 m,倾向长度180 m,平均开采深度约680 m,煤层厚度稳定,平均厚14.5 m,工作面上覆多层厚硬砂岩层,基本顶(粉砂岩)平均厚18.5 m,距煤层约3.5 m。

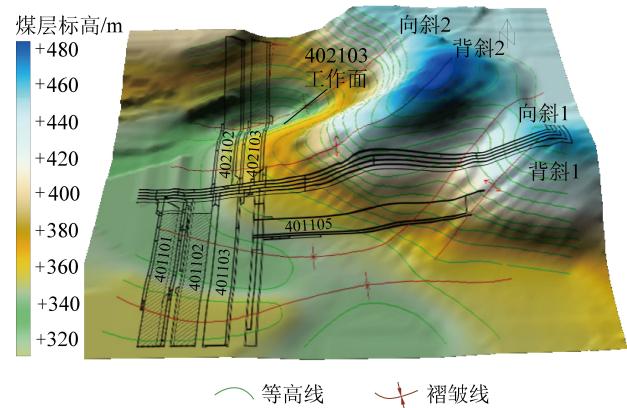


图1 煤矿褶皱构造形态

Fig.1 Morphology of coal mine fold structure

402103工作面泄水巷、运输巷等巷道掘进期间,受构造应力、采掘扰动等影响,工作面动力显现明显,多次造成巷道出现大面积顶板瞬间下沉,顶板锚索频繁破断,局部显著底鼓等现象。

2016年10月27日,402103工作面回采期间,工作面超前区域发生能量 2.76×10^5 J强矿震事件,震源位置平面走向上超前工作面约7 m,倾向距运输巷约25 m,距泄水巷约45 m,位于A4背斜轴部区域,如图2所示。

强矿震事件造成工作面运输巷超前20~35 m顶板下沉明显,下沉量为600~1 000 mm,泄水巷底板出现底鼓、开裂现象,底鼓量约200 mm,裂缝宽度约40 mm,巷道整体断面变形严重。

402103工作面开采期间强矿震事件频发,冲击危险性强,因此,研究褶皱构造区冲击地压发生机理对指导工作面安全开采尤为重要。

2 褶皱构造区应力场分布规律

2.1 模型建立

为研究工作面褶皱构造区回采期间的应力演化特征,以胡家河煤矿402103工作面为工程背景,经

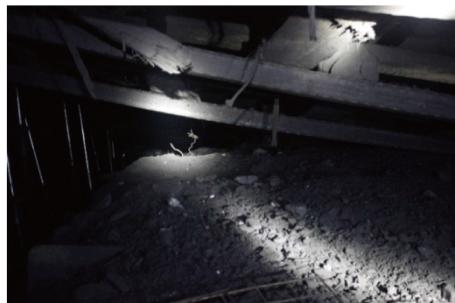
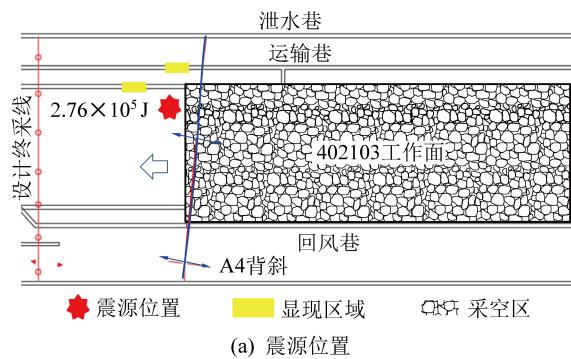


图2 强矿震震源位置及现场显现情况

Fig.2 Location of source of strong mine earthquake and its on-site appearance

适当简化地质条件后,构建褶皱构造条件下的FLAC^{3D}数值模型,如图3所示。模型尺寸:540、500、240 m(长、宽、高),设定模型褶皱构造参数为波长

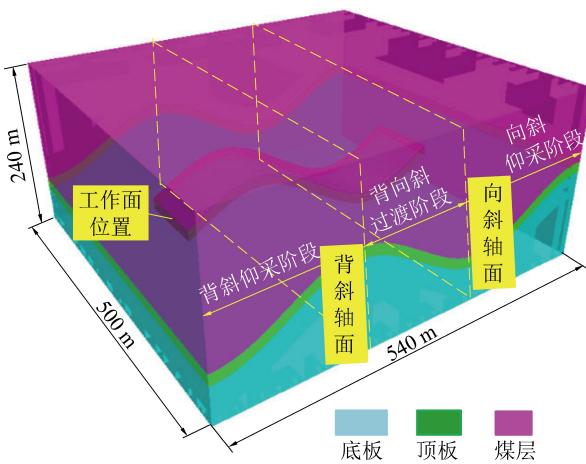


图3 褶皱构造数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model of fold structure

540 m,翼间角 120°,波幅 80 m。

褶皱构造模型煤岩体初始应力由自重应力、构造应力2个方面组成。对褶皱构造模型分2步施加边界条件:第1步模拟自重应力场,固定模型底面垂直位移,固定模型4个侧面法向水平位移,模型上边界施加10 MPa等效载荷(模拟埋深400 m);第2步模拟构造应力场,解除模型两侧法向水平位移约束条件,施加1个应力边界条件,构造应力按照线性梯度变化施加,即模型顶部施加20 MPa、底部施加32 MPa。

模型采用摩尔-库伦强度破坏准则,煤岩层物理力学参数依据试验结果,经适当折减后确定,见表1。

表1 模型煤岩层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model coal and rock strata

岩性	黏聚力/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦 角/(°)	体积模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	剪切模 量/GPa
粗砂岩	5.00	2 700	37	3.70	3.30	3.40
煤	2.50	1 300	25	1.50	1.00	0.80
粉砂岩	4.50	2 650	35	3.50	3.00	3.20
泥岩	2.50	2 200	26	2.00	1.50	1.60
中砂岩	5.40	2750	38	4.00	3.50	3.60

2.2 开采期间顶底板应力分布规律

为分析褶皱构造区工作面在邻近背、向斜轴部期间,受开采扰动作用下顶底板岩层应力分布及其演化规律,提取模型每次开挖后工作面超前10 m处顶板、底板处的支承压力峰值,绘制不同开采阶段顶底板岩层应力分布特征,如图4所示。

由图4a、图4b可知,随着工作面开采至褶皱轴部,褶皱构造区垂直应力在后方采空区顶底板岩层中均形成椭圆形卸压区;水平应力在后方采空区顶底板岩层中形成半椭圆形卸压区,即仅在顶板或底板形成卸压区。

由图4c可知,工作面回采邻近背斜轴部时,顶板水平应力占主导作用,此时顶板更易发生失稳破坏;工作面邻近向斜轴部时,底板水平应力占主导作用,此时底板更易发生失稳破坏。工作面回采至褶皱翼部时,顶板水平应力逐步降低,底板水平应力逐步上升,表明工作面褶皱翼部区开采时,高应力集中区逐渐由顶板向底板转移,且主要受水平应力影响。

工作面开采至褶皱构造不同区域时,褶皱构造区顶板和底板垂直、水平应力场分布具有明显的分区特性。

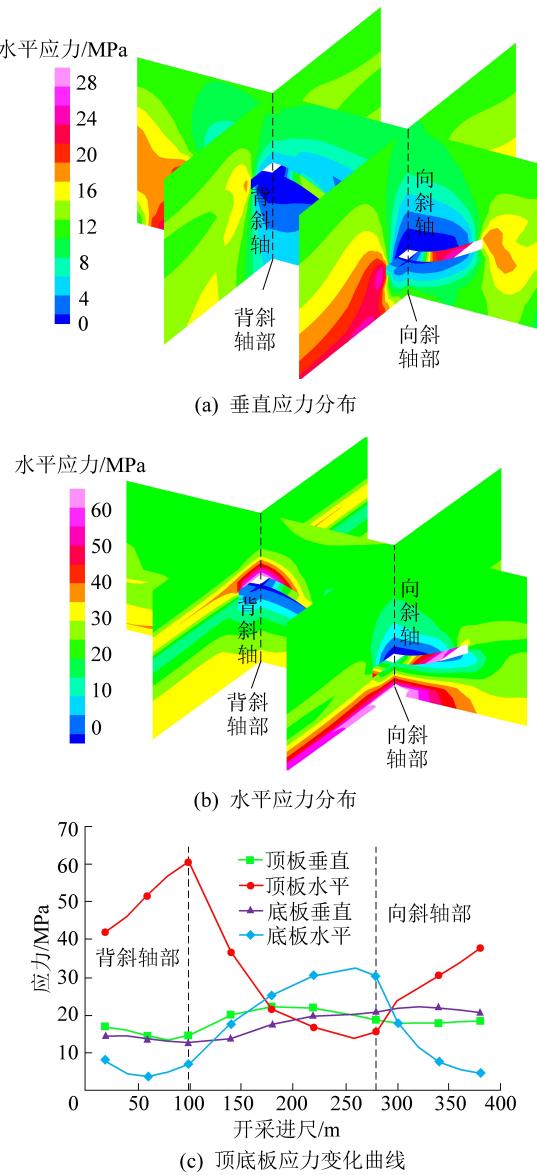


图4 褶皱构造区开采期间顶底板岩层应力演化特征

Fig.4 Stress evolution characteristics of roof and floor strata during mining in fold structure area

2.3 开采期间煤层应力分布规律

为分析褶皱构造区工作面在邻近背、向斜轴部期间,受开采扰动作用下煤层应力分布及其演化规律,提取模型每次开挖后工作面煤体超前10 m处的支承压力峰值,绘制褶皱构造区开采期间煤层中应力分布特征图,如图5所示。

由图5可知,当工作面自背斜至向斜开采时,煤层垂直应力整体呈现先降低后上升的趋势,应力最小值位于回采100 m(背斜轴部)处,应力最大值位于回采330 m处。煤层水平应力整体呈现降低→上升→降低的趋势,应力最小值位于回采50 m处,应力最大值位于回采280 m(向斜轴部)处。对比煤层垂直、水平应力峰值增幅可以看出,褶皱翼部开采期

间(背斜至向斜),煤层水平应力增幅大于垂直应力,表明随工作面开采邻近向斜轴部,水平应力对煤壁稳定性影响程度逐渐增大,冲击危险性逐步加强。

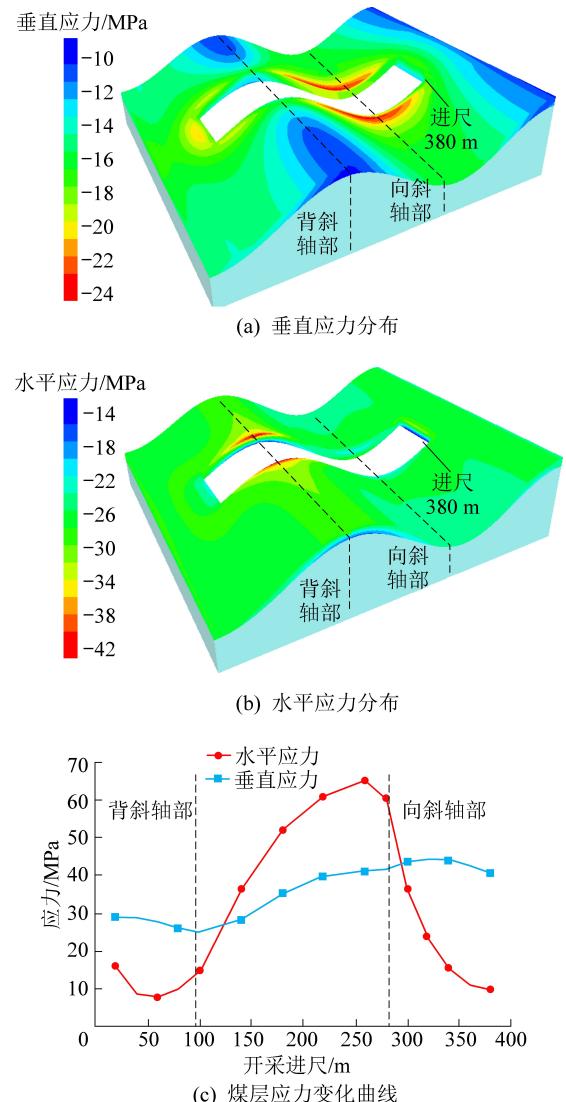


图5 褶皱构造区开采期间煤层应力演化特征

Fig.5 Coal seam stress evolution characteristics during mining in the fold structure area

综上所述,工作面开采至褶皱构造不同区域时,褶皱构造区垂直、水平应力场分布具有明显的分区特性,褶皱构造区工作面开采时水平应力起主导作用。

3 褶皱构造区冲击地压发生机理

众多现场冲击案例和文献[19]表明,矿井冲击地压动力灾害发生力源包括:煤岩体的静应力载荷和采掘活动诱发的动应力载荷。当煤岩体中静应力载荷与矿震形成的动应力载荷之和大于煤岩体冲击破坏的临界应力载荷,可诱发冲击地压灾害。可用式(1)表示

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b,min} \quad (1)$$

式中: σ_j 为煤岩体中的静应力载荷,主要提供煤岩

破坏的应力和能量基础; σ_d 为矿震形成的动应力载荷, 主要起触发损伤破坏的作用, 同时输入部分能量; $\sigma_{b,\min}$ 为发生冲击地压时的临界应力载荷。

褶皱构造背斜轴部区顶底板岩层赋存高水平应力, 煤层赋存高垂直应力, 巷道围岩系统整体处于高静载应力集中状态。此时, 当顶板厚硬岩层破断产生的强动载扰动传递至巷道时, 导致巷道围岩系统动静载应力增加, 若其超过巷道围岩系统动力失稳的临界值, 易诱发冲击地压。

综上, 褶皱构造区冲击地压发生机理可以简述为: 巷道围岩系统在构造应力作用下, 煤岩体赋存高静载荷, 此时顶板破断产生的动载荷传递至巷道围岩系统, 导致煤岩体动静载荷之和大于围岩系统冲击破坏的临界应力载荷, 诱发冲击地压灾害。402103 工作面褶皱构造发育, 随工作面开采距背斜轴部越近, 巷道围岩系统静载集中程度增大, 冲击危险性增强。此时, 402103 工作面上方厚硬顶板破断滑移运动时产生的矿震动载传递至巷道围岩系统, 超过其发生冲击地压时的临界应力载荷, 从而诱发冲击显现。

4 褶皱构造区冲击地压防治技术

4.1 防治方案

基于前述褶皱构造区的冲击地压发生机理分析可知, 构造区巷道围岩发生的失稳破坏主要与顶板破断释放的动载和巷道围岩高静载状态有关, 故防治该类冲击地压的关键点在于有效降低厚硬顶板结构内积聚的弹性能, 降低覆岩破断带来的动载扰动, 以及降低巷道围岩系统高静载状态^[20]。此外采取加强工作面巷道围岩系统支护强度、降低工作面开采速度作为辅助措施。结合本工作面开采特征, 在常规煤岩体卸压的基础上, 通过现场实测巷道围岩性质、塑性区分布情况, 设计巷道围岩顶板、煤层动态爆破解危卸压方案。爆破孔布置如图 6 所示, 爆破参数见表 2。

4.2 效果检验

解危卸压方案实施前后微震数据演化规律如图 7 所示, 2016 年 10 月 1 日至 10 月 27 日冲击地压事件发生前, 日平均微震总能量为 5.25×10^5 J, 日平均微震总频次为 36 个; 10 月 27 日冲击事故发生后工作面区域及时采取顶板、煤层爆破卸压, 10 月 28 日至 11 月 27 日间, 日平均微震总能量为 2.75×10^5 J, 日平均微震总频次为 42 个。解危卸压后日均微震总能量下降 47.6%, 日均微震总频次上升 16.7%, 微震总能量降低, 频次增加, 表明冲击显现后采取的动

态解危卸压措施效果良好。

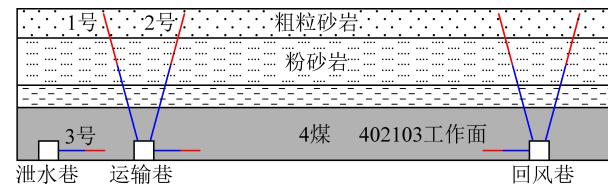


Fig.6 Schematic of blasting pressure relief scheme for surrounding rock of roadway

表 2 巷道围岩爆破卸压方案参数

Table 2 Parameters of blasting pressure relief plan for surrounding rock of roadway

钻孔 编号	孔深/ m	倾角/ (°)	孔径/ mm	装药量/ kg	封孔、装 药长度/m	孔间距/ m
1号	45	75	75	40	17,20	10
2号	45	75	75	40	17,20	10
3号	10	0	42	3	7,3	10

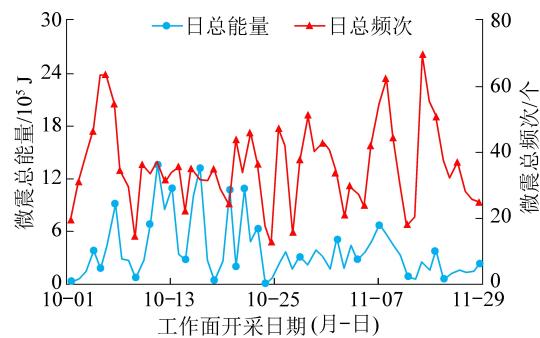


图 7 工作面解危卸压前后微震数据对比

Fig.7 Comparison of microseismic data before and after danger relief in working face

5 结 论

1) 模拟结果表明, 褶皱构造区工作面开釆时, 水平应力起主导作用; 工作面邻近背斜轴部时, 顶板岩层稳定性降低; 工作面邻近向斜轴部时, 底板稳定性降低; 工作面翼部开釆时, 煤层稳定性降低。

2) 巷道围岩系统在构造应力作用下, 煤岩体赋存高静载荷, 当顶板破断产生的动载荷传递至巷道围岩系统, 导致巷道围岩系统载荷应力增加, 易诱发冲击地压。

3) 基于褶皱构造区冲击地压发生机理, 制定了顶板、煤层定向爆破释能降载的冲击地压防治方案, 微震监测数据表明卸压效果良好。对类似条件下的工作面冲击地压防治具有指导借鉴意义。

参考文献(References) :

- [1] 陈书平, 韩煦, 黄新文. 东濮凹陷古近系伸展褶皱及形成机

- 理[J].大地构造与成矿学,2016,40(5):908-918.
- CHEN Shuping, HAN Xu, HUANG Xinwen, et al. Paleogene extensional folds in dongpu sag and their folding mechanism [J]. *Geotectonica Et Metallogenica*, 2016, 40(5): 908-918.
- [2] CAO A, JING G, DOU L, et al. Statistical analysis of distribution patterns of coal seams in fold zones in Northwest China [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28(5): 819-828.
- [3] 吴航,邱楠生,常健,等.川东多套滑脱层褶皱构造带形成物理模拟[J].地球科学,2019,44(3):784-797.
- WU Hang, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Phycical simulation on development of multilayer detachment fold belt in eastern Sichuan[J]. *Scientific Journal of Earth Science*, 2019, 44(3): 784-797.
- [4] 夏玉成,孙廷臣,梁倩文,等.韩城矿区纵弯褶皱的几何学特征及其形成演化机理[J].煤炭学报,2018,43(3):801-809.
- XIA Yucheng, SUN Tingcheng, LIANG Qianwen, et al. Geometry and geodynamic mechanism of buckle folds in Hancheng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 801-809.
- [5] 袁亮,姜耀东,何学秋,等.煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J].煤炭学报,2018,43(2):306-318.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 306-318.
- [6] 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.
- [7] 井广成.褶皱构造区厚煤层开采应力演化与冲击矿压孕育规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- JING Guangcheng, CAO Anye, DOU Linming, et al. Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 203-211.
- [8] 井广成,曹安业,窦林名,等.煤矿褶皱构造区冲击矿压震源机制[J].煤炭学报,2017,42(1):203-211.
- JING Guangcheng, CAO Anye, DOU Linming, et al. Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 203-211.
- [9] 解振,孙矩正,张子敏,等.基于褶皱构造的突出主控因素研究[J].安全与环境学报,2013,13(5):202-206.
- XIE Zhen, SUN Juzheng, ZHANG Zimin, et al. Main controlling factors of coal-gas explosive outbursts based on the fold study[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(5): 202-206.
- [10] 姜波,李明,程国玺,等.矿井构造预测及其在瓦斯突出评价中的意义[J].煤炭学报,2019,44(8):2306-2317.
- JIANG Bo, LI Ming, CHEN Guoxi, et al. Mine geological structure prediction and its significance for gas outburst hazard evaluation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2306-2317.
- [11] 康红普,吴志刚,高富强,等.煤矿井下地质构造对地应力分布的影响[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2674-2680.
- KANG Hongpu, WU Zhigang, GAO Fuqiang, et al. Effect of geological structures on in-situ stress distribution in underground coal mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S1): 2674-2680.
- [12] 王宏伟,邓代新,江灿,等.采动条件下褶皱构造区不均匀应力场演化特征研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):59-69.
- WANG Hongwei, DENG Daixin, JIANG Can, et al. Study on evolution characteristics of uneven stress field in mining induced fold tectonic area [J]. *Coal science and Technology*, 2020, 48 (2): 59-69.
- [13] 陆菜平,张修峰,肖自义,等.褶皱构造对深井采动应力演化的控制规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(2):44-50.
- LU Caiping, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Study on controlling law of fold structure on evolution of mining stress in deep mines [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 44-50.
- [14] 贺志龙.不同地质构造对冲击地压危险性影响研究[D].邯郸:河北工程大学,2019.
- [15] 王存文,姜福兴,刘金海.构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J].煤炭学报,2012,37(S2):263-268.
- WANG Cunwen, JIANG Fuxing, LIU Jinhai. Analysis on control action of geologic structure on rock burst and typical cases [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37 (S2): 263-268.
- [16] 卜万奎,徐慧,赵玉成.基于曲梁理论的褶皱构造中覆岩变形与应力分析[J].采矿与安全工程学报,2019,36(4):827-833.
- BU Wangkui, XU Hui, ZHAO Yucheng. Analysis on deformation and stress of overlying rock in fold structure based on elastic theory of curved beam [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(4): 827-833.
- [17] 陈国祥,窦林名,乔中栋,等.褶皱区应力场分布规律及其对冲击矿压的影响[J].中国矿业大学学报,2008,37(6):751-755.
- CHEN Guoxiang, DOU Linming, QIAO Zhongdong, et al. The stress field distribution in folding structure areas and its impaction on rock burst [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2008, 37(6): 751-755.
- [18] 齐庆新,梁政国.陶庄煤矿的冲击地压与构造应力[J].煤矿开采,1993(2):48-51.
- QI Qingxin, LIANG Zhengguo. Rock burst and tectonic stress in Taozhuang coal mine[J]. *Coal Mining Technology*, 1993(2): 48-51.
- [19] 窦林名,阚吉亮,李许伟,等.断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):24-32.
- DOU Linming, KAN Jiliang, LI Xuwei, et al. Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 24-32.
- [20] 温颖远,郭志刚,曹安业,等.基于微震数据评价的顶板深孔爆破卸压效果分析[J].煤炭科学技术,2020,48(6):57-63.
- WEN Yingyuan, GUO Zhigang, CAO Anye, et al. Analysis of pressure relief effect of roof deep hole blasting parameters based on micro-seismic data evaluation [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(6): 57-63.