中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

移动扫码阅读

韩 刚,李旭东,曲晓成,等.采场覆岩空间破裂与采动应力场分布关联性研究[J].煤炭科学技术,2019,47(2):53-58.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.02.009

HAN Gang,LI Xudong,QU Xiaocheng,*et al*.Study on correlation between spatial fracturing of overlying strata and distribution of mining stress field in stope[J]. Coal Science and Technology,2019,47(2):53-58.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.02.009

采场覆岩空间破裂与采动应力场分布关联性研究

韩 刚[1],李旭东[2],曲晓成[3],朱 磊[1],刘立新[4]

(1.中煤能源研究院有限责任公司,陕西 西安 710054;2.中煤西北能源有限公司,内蒙古 鄂尔多斯 017200;
3.北京安科兴业科技股份有限公司,北京 102200,4.乌审旗蒙大矿业有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 017307)

摘 要:针对上覆多层坚硬砂岩组破断时释放的动载荷耦合集中静载荷区弹性应变能易诱发冲击地压显现的问题,采用现场监测、统计分析的方法,探索了覆岩空间破裂与采动应力场关联性对冲击地压显现的影响,对覆岩空间破裂分布特征及采动应力场分布特征进行了监测分析,依据研究结果对临空巷道超前支护方式进行了优化与实践验证。研究表明:纳林河二号矿井 31102 工作面覆岩破裂剧烈区位于 3-1 煤层顶板上方 30.3 m,厚度为 14.85 m 的细粒砂岩层内,并超前工作面 30~40 m;超前支承压力影响距离至工作面前方 254~280 m,峰值点距工作面小于 66 m。覆岩破裂剧烈区与采动应力场峰值区(两区)相距较近,易诱发冲击地压灾害,在超前工作面 0~40 m 两区下方的临空巷道采用垛式液压支架超前支护顶板,可有效防治冲击地压。

关键词:冲击地压;微震监测;覆岩空间破裂;采动应力场;超前支护

中图分类号:TD323 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)02-0053-06

Study on correlation between spatial fracturing of overlying strata and distribution of mining stress field in stope

HAN Gang[1],LI Xudong[2],QU Xiaocheng[3],ZHU Lei[1],LIU Lixin[4]

(1. *China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an* 710054,*China*; 2. *China Coal Northwest Energy Co., Ltd., Erdos* 017200,*China*;
3. *Beijing Anke Xingye Technology Co., Ltd.,Beijing* 102200,*China*; 4. *Wushenqi Mengda Mining Co., Ltd., Erdos* 017307,*China*)

Abstract:Aiming at the problem that the elastic strain energy in the concentrated static load zone and fracturing shock of the overlying hard rock group is easily coupling to induce rockburst,method of on-site monitoring and statistical analysis is used to explore the overlying strata spatial fracturing law and the distribution characteristics of mining stress field.The correlation on both things to influencing rockbust is monitored and analyzed. Based on the research results, the advance support pattern of gob-side roadway was improved and verified in practice.This study showed that the severe overburden fracture zone in the No.31102 working face of Nalinhe No.2 Coal Mine is in the fine sandstone layer,30.3 m above the 3-1 coal roof and 14.85 m in thickness, and is ahead of the working face by 30~40 m.The influence of the lead bearing pressure is 254~280 m in front of the working face,and the peak point is less than 66 m from the working face.The result also shows that rockburst is likely to occur when the high stress zone is close to the severe overburden fracture zone.The raft type hydraulic supports were applied in gob-side roadway,ahead of the working face in 0~40 m and under the severe overburden fracture zone.Practice showed that it plays a key role in the process of rock burst control.

Key words:rock burst; microseismic monitoring; overlying strata spatial fracturing; mining stress field;advance support

0 引 言

随着煤矿开采深度的不断增加,由岩层运动引发的冲击地压灾害日趋严重,很多事故用平面岩层运动模型已难以合理解释和指导工程实践,因此,人们开始重视对采场围岩空间破裂规律的研究[1]。

收稿日期:2018-10-22;**责任编辑**:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801403,2016YFC0801408)

作者简介:韩 刚(1987—),男,陕西咸阳人,工程师。E-mail:hangang0910@126.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

煤矿采场围岩空间破裂形态与应力场的关系,是预测和防治冲击地压、矿井突水、煤与瓦斯突出以及顶板整体冒落等矿井灾害的基础[2]。目前,国内学者在覆岩破裂与采动应力场方面开展的研究取得了丰硕成果。姜福兴等[2]介绍了用微震定位监测技术揭示的采场覆岩空间破裂与采动应力场的关系,认为存在 4 种由采动引起的岩体破裂类型;蒋军军等[3]探讨了动载荷诱发卸荷煤体冲击失稳的动态响应机制,研究了弹性能量指数和滞回环面积的表征意义,并用以描述动载作用下能量积聚与耗散特性;文献[4-5]探讨了采场空间结构模型中应力分布和结构发育的力学特征,研究了冲击地压各监测参量之间的相互关系,通过对冲击地压发生机理、各监测手段的监测原理进行分析,运用大数据分析方法和云平台技术,开发了一种多参量联合监测的冲击地压监控预警平台。张广辉等[6]认为基于能量耗散分析建立的冲击倾向性煤损伤演化方程能够较好反映煤样的损伤演化过程;齐庆新等[7]深入研究了我国冲击地压矿井类型及防治方法,认为断层的构造应力、采动应力会诱发掘进巷道发生冲击地压;潘俊锋等[8]将冲击地压重新分为集中静载荷型和集中动载荷型,分析了各自冲击启动的能量判据,提出了统一的煤矿开采冲击地压启动理论;朱志洁等[9]基于关键层理论,认为覆岩大结构失稳的动压以及顶煤和直接顶产生的静压共同作用引起支架压力显著上升;文献[10-11]建立了冲击地压作用下的巷道围岩与支护响应的动力学模型,研发了防冲吸能巷道液压支架并进行现场试验研究。孙希奎等[12]认为基于煤岩体地质力学测试、以锚固与注浆为核心的支护加固技术是有效、经济的深部巷道围岩控制技术。

目前,结合实际监测数据对覆岩空间破裂与采动应力场关联性及其对冲击地压显现的影响,对临空巷道超前支护方式的要求研究较少。因此,笔者在分析由微震监测得到的覆岩破裂规律和应力监测得到的采动应力场分布特征的基础上,探索覆岩空间破裂与采动应力场关联性及其对冲击地压发生的影响程度,依据研究结果对临空巷道超前支护方式进行优化及实践验证。

1　工作面概况及应力监测系统布置

纳林河二号矿井位于内蒙古自治区鄂尔多斯市境内,首采煤层为 3-1 煤层,平均埋深 563 m。31102 工作面为该矿第 2 个回采工作面,工作面倾向长 247 m,走向长约 3 000 m,煤层平均厚度 5.6 m,为近水平煤层。直接顶为厚 7.3 m 粉砂岩,上部基本顶为 14.85 m 细粒砂岩。底板为砂质泥岩,具有水平层理,强度较低。31102 工作面北部为已回采完成的 31101 工作面采空区,区段煤柱宽 20 m,南侧为实体煤。31102 工作面回风巷(临空巷道)初采期间受到初次来压、该工作面首次“见方”、与相邻工作面二次“见方”、水仓煤柱、顶板疏放水、区段煤柱、断层等因素影响,容易造成巷道严重变形,冲击地压条件下的围岩变形控制问题亟待解决。

31102 工作面回采前建立了微震、应力监测系统,监测系统布置如 1 所示。

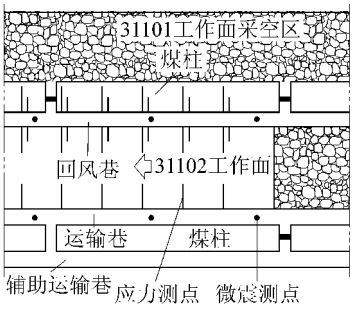


图 1　微震监测传感器和钻孔应力计布置示意

Fig. 1　Field layout of microseismic monitoring sensor and borehole stressmeter

微震测点(检波器)每隔 100 m 安装于回风巷及运输巷顶板的稳固锚杆上;回风巷两帮每隔 25 m 安装 1 组长、短孔应力计,在运输巷实体煤侧每隔 25 m 安装 1 个长孔应力计。

2　微震及煤层应力监测结果分析

2.1　微震事件沿覆岩垂直方向分布特征

纳林河二号矿井共有 97 个地质勘探钻孔,31101 工作面采前观测孔距离 31102 工作面最近,故以 31101 工作面观测孔揭露地层为依据进行微震事件沿覆岩垂直方向分布特征的分析。该钻孔实际揭露地层情况见表 1,列出了 3-1 煤层以上 100 m 范围内揭露地层情况。

2017 年 8 月 16 日—2017 年 12 月 1 日,31102 工作面微震监测系统总计接收有效微震约 2 960 个。以 31101 工作面采前观测钻实际揭露地层结构为单元,滚动累计各单元内微震数量,形成基于实际地层结构的微震事件沿覆岩垂直方向分布特征,如图 2 所示。由图 2 可知,①微震事件在垂直方向上总体呈现出单峰值的分布规律。峰值位于距 3-1 煤顶板 30.3 m,厚度为 14.85 m 的细粒砂岩层内,发生在该岩层中的微震事件占总数的 38%。该细粒

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

砂岩层为低位岩层中较厚的硬岩层,故顶板水力压裂靶向层位应为该硬岩层;②该硬岩层岩性较好、厚度较大、容易集聚能量、破断时释放的能量较大,其次,该岩层距离 3-1 煤较近,能量传播过程中衰减较少,破断时易引发临空巷道冲击地压显现,特别是在煤体应力集中程度较高时,故从冲击地压防治角度该岩层为诱冲关键层之一。

表 1　31101 工作面采前观测孔揭露地层情况

Table 1　Stratum of observation holes in No.31101 working face

深度/m	煤层上方岩层数	层厚/m	岩性
440.75	26	10.80	细粒砂岩
451.00	25	10.25	砂质泥岩
462.85	24	11.85	细粒砂岩
466.35	23	3.50	砂质泥岩
469.60	22	3.25	粉砂岩
479.85	21	10.25	细粒砂岩
481.45	20	1.60	砂质泥岩
488.15	19	6.70	细粒砂岩
488.95	18	0.80	砂质泥岩
490.60	17	1.65	细粒砂岩
492.20	16	1.60	砂质泥岩
495.30	15	3.10	粉砂岩
496.00	14	0.70	煤层
498.15	13	2.15	砂质泥岩
513.00	12	14.85	细粒砂岩
515.55	11	2.55	砂质泥岩
517.35	10	1.80	粉砂岩
518.15	9	0.80	砂质泥岩
520.30	8	2.15	细粒砂岩
522.45	7	2.15	砂质泥岩
530.20	6	7.75	粉砂岩
534.50	5	4.30	细粒砂岩
535.45	4	0.95	砂质泥岩
542.75	3	7.30	粉砂岩
543.30	2	0.55	砂质泥岩
544.75	1	5.90	3-1 煤层

2.2　工作面覆岩微震走向分布特征

将每个微震事件逐个进行坐标转换,以 10 m 为单元滚动累计单元内微震事件数量,形成微震事件“固定工作面”分布特征,如图 3 所示,图 3 中横坐标正值表示超前工作面距离,负值表示滞后工作面距离。

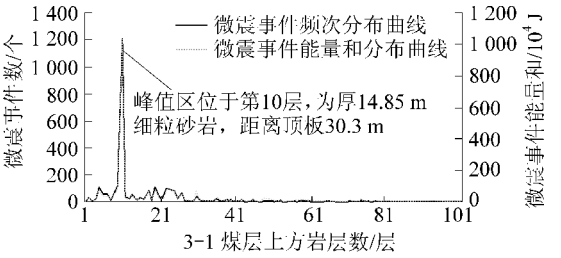


图 2　微震事件沿覆岩垂直方向分布特征

Fig. 2　Distribution characteristics of microseismic events along vertical direction of overstratum

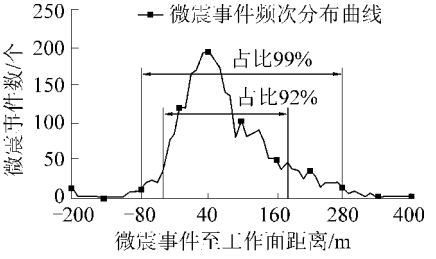


图 3　微震事件沿“固定工作面”走向分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of microseismic events along “fixed working surface” long direction

由图 3 可知,①31102 工作面微震事件频次沿走向呈现出单峰值的类正态分布规律,微震事件频次峰值位于超前工作面 30~40 m;在分布范围方面,滞后工作面 40 m 至超前工作面 180 m 微震事件数量占总数的 92%;②滞后工作面 80 m 至超前工作面 280 m 微震事件数量占总数的 99%,超前工作面 420 m 以外微震事件数量几乎为零,可以确定微震监测系统揭示的工作面超前影响范围为 280 m,从防灾角度而言,加强超前工作面 280 m 范围内的支护是防冲的重点之一。

2.3　应力监测揭示的采动应力场分布特征

对 2017 年 8 月 16 至 12 月 1 日 31102 工作面临空巷道(回风巷)内几次应力预警情况进行分析,形成应力测点(巷道帮部,距离底板 1.2~1.5 m 处)实测应力值变化曲线,如图 4 所示。

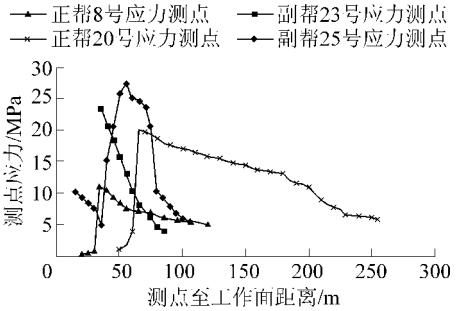


图 4　测点实测应力随测点至工作面距离变化曲线

Fig. 4　Stress of measuring point varies with distance from measuring point to working face

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

由图 4 可知,随着工作面的不断推进,井下各应力测点的实测应力值不断变化;8 号应力测点的实测应力值在超前工作面 120 m 时开始升高,此后缓慢增长, 34 m 时达到应力峰值;20 号应力测点的实测应力值在超前工作面 254 m 时开始升高,66 m 时达到应力峰值;23 号应力测点的实测应力值在超前工作面 86 m 时开始急速升高,34 m 时达到应力峰值;25 号应力测点的实测应力值在超前工作面 105 m 时开始升高, 54 m 时达到应力峰值,此后逐步下降。可见由应力监测系统得到的 31102 工作面超前影响距离约 254 m,超前支承压力峰值到煤壁的距离小于 66 m。

图 4 中 8、23 号应力测点出现应力突降的原因为现场冲击显现剧烈,为防止监测设备埋入煤体,提前进行设备移组。为确定移组后煤体内应力情况,2017 年 9 月 15 日,在 23 号测点超前工作面约 20 m 时,实施了钻屑检验,检验结果如图 5 所示。由图 5 可知,在 8~9 m 处钻屑量超标,施工至第 10 m 时出现严重吸钻现象,停止钻检,说明超前工作面约 20 m 的临空巷道煤柱侧煤体内应力集中程度依然较大,应力峰值位置可能小于 34 m,更靠近工作面。

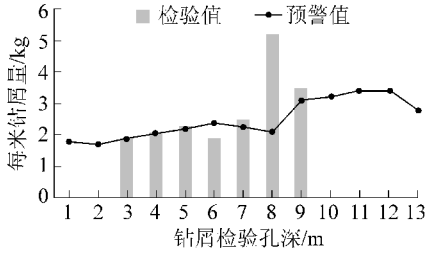


图 5　23 号测点附近的钻屑检验结果

Fig. 5　Test results of drilling cuttings near No.23 measuring point

3　覆岩破裂与采动应力场关联性对冲击地压显现的影响

3.1　覆岩破裂与采动应力场关联性分析

由图 3—图 4 可知,微震事件在垂直方向上的峰值位于距 3-1 煤顶板 30.3 m、厚度为 14.85 m 的细粒砂岩层内,发生在该岩层中的微震事件占总数的 38%;微震事件在工作面走向的频次峰值发生在超前工作面 30~40 m;微震事件是覆岩发生裂隙、破断过程中,所集聚的弹性能瞬间释放过程中的一种物理效应,即微震事件发生频次越高的区域,覆岩破裂更为充分,故纳林河二号矿井 31102 工作面覆岩破裂剧烈区高度方向上位于该细粒砂岩层内并走向超前工作面 30~40 m。由图 4 可知,超前支承压力峰值到煤壁的距离小于 66 m,超前支撑压力峰值区为集中静载荷区;覆岩破裂剧烈区与集中静载荷区位置关系,如图 6 所示。由图 6 可知,31102 工作面覆岩破裂剧烈区与集中静载荷区相距较近,存在部分或全部重合的可能。

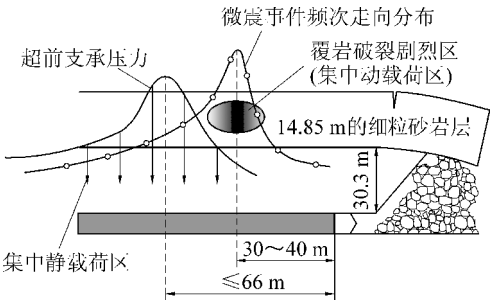


图 6　覆岩破裂剧烈区与集中静载荷区位置关系

Fig. 6　Positional relationship between severe overburden fracture zone and concentrated static load zone

3.2　覆岩破裂与采动应力场关联性对冲击地压显现的影响分析

1)岩层破裂发生在应力差大的区域,因此,覆岩破裂剧烈区总是与高应力差区域相重合,并与高应力场区域(集中静载荷区)相接近,冲击地压的发生与这 2 个区域密切相关[13]。现场几次冲击地压显现也位于覆岩破裂剧烈区与集中静载荷区内。2017 年 8 月 9 日—2017 年 11 月 6 日 31102 工作面共发生 4 次冲击地压显现事件,第 1 次顶板冒落,部分超前液压支柱安全阀开启,井下煤炮增多,第 2 次片帮较大,微震事件距离片帮位置仅 8 m 左右,第 3 次顶板下沉量 0.4 m,最大底鼓 0.9 m,部分液压支柱压弯,单元支架倾倒,第 4 次超前 0~30 m 单元支架间顶板下沉,3 根 π 型钢梁断裂,底鼓约 0.4 m,回柱绞车液压支柱断裂。冲击地压显现位置见表 2。由表 2 可知,前 3 次冲击地压显现事件均发生在临空巷道超前工作面 25 m 范围内,第 4 次发生在超前工作面 30 m 范围内。

表 2　31102 工作面冲击地压显现位置

Table 2　Position of rock burst in No.31102 working face

序号	推进量/m	超前距离/m	位置
1	395	0~5	临空巷道 37-38 联络巷
2	456	10~20	临空巷道 36 联络巷口
3	565	0~25	临空巷道 35 联络巷口
4	782	0~30	临空巷道

2)集中动载荷型冲击地压受煤帮应力集中和采场上覆坚硬顶板垮断同时影响[14-15],覆岩顶板悬顶造成工作面超前区域应力高度集中,储存弹性能多,上覆坚硬顶板悬臂产生的弯曲弹性能为煤壁前方提供了静载荷源,导致工作面巷道周围煤体静载荷集中度较大,产生集中静载荷区。该区域的应力

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

高度集中使得巷道围岩破碎,成为片帮、底鼓、冒顶事故频发的必要条件。

3)参考动静加载型冲击启动力学模型与能量判据[16],当集中静载荷区聚集的弹性应变能加上顶板断裂传递来的动载荷能量大于煤岩体破坏所需最小能量时,达到冲击地压启动的能量条件。纳林河二号矿井覆岩破裂剧烈区距离 3-1 煤顶板 30.3 m,距离巷道较近,该区域覆岩破断时释放的动载荷能量传递过程中衰减较少;其次,覆岩破裂剧烈区与集中静载荷区相距较近,存在部分或全部重合的可能性,集中静载荷区受覆岩破裂剧烈区的动载扰动较大,顶板断裂传递来的动载荷能量与集中静载荷区聚集的弹性应变能耦合后更易超过该区域煤岩体破坏所需的最小能量,进而诱发生冲击地压显现。

4　临空巷道超前支护防冲技术

在 31102 工作面回采初期,临空巷道超前工作面 0~40 m 段频繁冒顶、底鼓、片帮,而这一区域恰好是覆岩破裂剧烈区与集中静载荷区。经初步分析,当超前支承压力峰值点位于微震事件频次走向分布峰值点的前方时,若煤体卸压工程效果不佳,形成静载荷高度集中区域,随着工作面的回采,微震事件频次走分布峰值点位于该区域时,极易发生冲击地压显现。

在防治措施方面,一方面要加强监测,及时采取大直径卸压钻孔、煤体爆破、顶板水力压裂等解危措施以降低集中静载荷区域煤体应力集中程度,使其形成“低应力”状态;另一方面集中静载荷区受覆岩破裂剧烈区的动载扰动较大,需要增加该区域的支护强度,增大顶板支护面积,提高支护的抗动载能力,形成“强卸压、强监测、强防护”的防冲技术体系。

围岩支护是冲击地压防治局部解危措施的重点之一,巷道围岩控制原理及方法包括增大支护强度或改善支护方式[17-18]。现场对临空巷道超前 0~40 m 段超前支护方式进行了多次优化,最终采用垛式超前液压支架。

采用垛式超前液压支架以来,由于加大了该区域的支护强度,增加了支架对顶板支护面积,使得该区域围岩变形明显减小,未出现严重冒顶、片帮事故。实际应用效果表明,该超前支护方式适用于纳林河二号矿井 31102 工作面临空巷道,对矿井安全高效生产起到了关键性保障作用。

5　结　　论

1)冲击地压防治角度,距离 3-1 煤顶板 30.3 m,厚度为 14.85 m 的细粒砂岩层,为诱发冲击地压关键层之一。

2)覆岩破裂剧烈区垂直方向上位于距 3-1 煤顶板 30.3 m,厚度为 14.85 m 的细粒砂岩层内,走向方向上位于超前工作面 30~40 m。

3)由微震监测系统揭示的超前影响距离为 280 m;由应力监测系统得到的超前影响距离约 254 m,超前支承压力峰值点距工作面小于 66 m。

4)该工作面覆岩破裂剧烈区与超前支承压力峰值点相距较近,两者重合或相距较近时易发生冲击地压显现,这与现场几次冲击地压显现情况基本吻合。

5)针对 3-1 煤上覆多层坚硬砂岩组破断时释放动的载荷引发集中静载荷区频繁出现冲击地压显现的问题,在临空巷道覆岩破裂剧烈区的超前支护装备采用垛式超前液压支架。实际应用效果表明其适用于纳林河二号矿井 31102 工作面临空巷道,对矿井安全高效生产起到了关键性保障作用。

参考文献(References):

[1] 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,2003,28(4):357-360.
JIANG Fuxing,YANG Shuhua.Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by microseismic monitoring techniques[J].Journal of China Coal Society,2003,28(4):357-360.

[2] 姜福兴,XUN Luo,杨淑华.采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J].岩土工程学报,2003,25(1):23-25.
JIANG Fuxing,XUN Luo,YANG Shuhua.Microseismic monitoring study on spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(1):23-25.

[3] 蒋军军,邓志刚,赵善坤,等.动载荷诱发卸荷煤体冲击失稳动态响应机制探讨[J].煤炭科学技术,2018,46(7):41-47,92.
JIANG Junjun,DENG Zhigang,ZHAO Shankun,*et al*.Discussion on dynamic response mechanism of dynamic load-induced unloading coal[J].Coal Science and Technology,2018,46(7):41-47,92.

[4] 姜福兴,曲效成,王颜亮,等.基于云计算的煤矿冲击地压监控预警技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):199-206,244.
JIANG Fuxing,QU Xiaocheng,WANG Yanliang,*et al*.Study on monitoring & control and early warning technology ofmine pressure bump based on cloud computing[J].Coal Science and Technology,2018,46(1):199-206,244.

[5] 姜福兴,杨淑华,成云海,等.煤矿冲击地压的微地震监测研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1511-1516.
JIANG Fuxing,YANG Shuhua,CHENG Yunhai,*et al*.A study on microseismic monitoring of rock burstin coal mine[J].Chinese Journal of Geophysics,2006,49(5):1511-1516.

[6] 张广辉,欧阳振华,邓志刚,等.循环加载下冲击倾向性煤能量

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

耗散与损伤演化研究[J].煤炭科学技术, 2017,45(2):59-64.
ZHANG Guanghui, OUYANG Zhenhua, DENG Zhigang, *et al*. Study on energy dissipation and damage evolution of bump proneness coal under cyclic loadings[J].Coal Science and Technology, 2017,45(2):59-64.

[7] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.

[8] 潘俊锋,宁　宇,毛德兵,等.煤矿开采冲击地压启动理论[J].岩石力学与工程学报,2012,31(3):586-596.
PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, *et al*. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(3):586-596.

[9] 朱志洁,张宏伟,陈　莹,等.综放开采覆岩大结构作用下的冲击地压形成机制[J].煤炭科学技术,2018,46(5):59-64.
ZHU Zhijie,ZHANG Hongwei,CHEN Ying,*et al*.Mechanism study of rock burst induced by overburden large structural action of fully-mechanized caving mining[J].Coal Science and Technology,2018,46(5):59-64.

[10] 潘一山,肖永惠,李忠华,等.冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J].煤炭学报,2014,39(2):222-228.
PAN Yishan,XIAO Yonghui,LI Zhonghua,*et al*.Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(2):222-228.

[11] 唐　治,潘一山,王凯兴.冲击地压巷道围岩支护作用动力学分析[J].岩土工程学报,2015,37(8):1532-1538.
TANG Zhi, PAN Yishan, WANG Kaixing. Dynamic analysis of support for surrounding rock of rockburst roadway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(8):1532-1538.

[12] 孙希奎,吕卫东,赵庆民,等.基于冲击控制的释能吸能支护系统研究[J].煤炭科学技术,2018,46(8):51-56.
SUN Xikui,LYU Weidong,ZHAO Qingmin,*et al*.Research on energy-releasing and energy-absorbing support system based on rock burst[J].Coal Science and Technology,2018,46(8):51-56.

[13] Luo X,Hatherly P,Gladwin M.Application of microseismic monitoring to longwall geomechanics and safety[C].Proceedings 17th Conference Ground Control in Mining, Morgantown, USA. 1998,72-78.

[14] 窦林名,等.煤矿冲击矿压防治[M].北京:科学出版社,2017.

[15] 韦四江,李　奎,吴怡凡,等.冲击地压下巷道围岩失稳机制与控制技术研究综述[J].中国安全科学学报,2016,26(9):90-95.
WEI Sijiang, LI Kui, WU Yifan, *et al*. A review of instability mechanism and control technology of roadway surrounding rock under rock burst condition[J], China Safety Science Journal, 2016,26(9):90-95.

[16] 潘俊锋.冲击地压启动理论与成套技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2016.

[17] 姜福兴,魏全德,姚顺利,等.冲击地压防治关键理论与技术分析[J].煤炭科学技术,2013,41(6):6-9.
JIANG Fuxing,WEI Quande,YAO Shunli,*et al*.Key theory and technical analysis of mine pressure bumping prevention and control[J].Coal Science and Technology,2013,41(6):6-9.

[18] 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 anutment pressure around longwall face and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(9):1815-1827.