



移动扫码阅读

曹民远,陈建强,闫瑞兵,等.基于数据分析的近直立煤层冲击地压致灾因素研究[J].煤炭科学技术,2019,47(12):32-37. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.005

CAO Minyuan, CHEN Jianqiang, YAN Ruibing, *et al.* Study on factors affecting rock burst of sub-erect coal seam based on data analysis[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(12): 32-37. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.005

基于数据分析的近直立煤层冲击地压致灾因素研究

曹民远,陈建强,闫瑞兵,刘永红

(神华新疆能源有限责任公司,新疆 乌鲁木齐 830084)

摘要:为了掌握乌东煤矿南区近直立特厚煤层冲击地压致灾因素,基于矿井采掘布局及 B_{3+6} 煤层上覆煤柱赋存特征,采用数据统计的方法分别对矿井微震事件分布和 B_{3+6} 煤层综放工作面冲击地压事故进行了统计分析。研究结果表明:上覆煤柱是冲击地压显现的主要致灾因素,采掘扰动、采深、煤柱资源回采情况是冲击地压显现的影响因素。不同煤层综采和掘进工作面相向 80 m、相错 110 m 时,采掘扰动影响较明显,相向 0~30 m 时微震频次达到峰值; B_{3+6} 煤层冲击地压事故集中分布在大洪沟煤矿小井工业广场煤柱和大洪沟煤矿工业广场煤柱区域,经过多分层开采后,上覆煤柱应力影响作用仍存在,且随煤层开采层数增加,冲击地压显现时工作面的位置与煤柱关系呈“进煤柱前-煤柱下-出煤柱后”规律性变化。发生冲击地压时综放工作面集中分布在距煤柱边界 50 m 范围内,随着上覆煤柱走向长度增加,冲击地压事故发生时综放工作面与煤柱边界的距离增大,同时煤柱附近区域冲击地压事故的的概率和破坏强度也随之增加。

关键词:冲击地压;近直立煤层;上覆煤柱;开采布局;采掘扰动

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0032-06

Study on factors affecting rock burst of sub-erect coal seam based on data analysis

CAO Minyuan, CHEN Jianqiang, YAN Ruibing, LIU Yonghong,

(Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830084, China)

Abstract: In order to grasp the hazardous factors of rock burst in sub-erect coal seam in the southern part of Wudong coal mine, based on the mining layout and occurrence characteristics of overlying coal pillars in B_{3+6} coal seam, the data statistics method is used to separately distribute the mine microseismic events and rock burst accidents in fully-mechanized caving face of B_{3+6} coal seam. The results show that the overlying coal pillar is the main disaster-causing factor of rock burst, and mining disturbance, mining depth and coal pillar resource recovery are the influencing factors of rock burst. The influence of mining disturbance is obvious when the distance of fully mechanized mining face and the development face of different coal seams during mining is 80 m and when the mining crossing distance is 110 m, and the frequency of microseisms reaches the peak when advancing difference of the two faces is within 0~30 m. B_{3+6} coal seam rock burst accidents are concentrated in the pillar area of a small shaft and the industrial square area of Dahonggou coal mine. After multi-layer mining, the stress effect of overlying coal pillar still exists, and with the increase of the numbers of coal seam mining layers, the relationship between the location of the working face and the coal pillar changed following a regular law as "before the coal pillar - under the coal pillar - after the coal pillar". When the bump pressure occurs, the fully-mechanized top coal caving face during rock burst accident concentrated in the 50 m range of coal pillar boundary, and the location and times of rock burst accident are related to the length of the coal pillar. With the increase of the striking length of the overlying pillar, the distance between the fully-mechanized caving face and the boundary of the pillar increases when the rock burst accident occurs. At the same time, the probability and failure strength of the rock burst accident in the area near the coal pillar also increase.

Key words: rock burst; sub-erect coal seam; overlying coal pillars; mining layout; mining disturbance

收稿日期:2019-07-21;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804205);国家自然科学基金资助项目(51874231,51504184)

作者简介:曹民远(1981—),男,河南驻马店人,工程师。E-mail:287260471@qq.com

通讯作者:徐冰(1988—),男,河南南阳人,讲师,博士。Email: xubinghp@163.com

0 引言

微震监测法由于具备空间与时间上可连续监测、三维、抗干扰能力强等优点,应用于煤矿冲击地压防治后取得了快速发展,国内科研院所和冲击地压矿井开展了较多研究^[1-5]。文献[6-7]通过对冲击地压显现前后微震信号频谱变化规律进行研究,认为冲击地压前微震主要频谱成分集中在40~100 Hz,微震事件频次、能量、微震信号 b 值及主频均呈下降趋势。王书文^[8]开展了矿井微震信号 b 值计算样本及参数选取研究,提出了 b 值参数设置技术要求。文献[9-10]分别就综采工作面附近微震事件进行统计分析,认为在冲击地压危险时期微震能量显著增大,工作面在进入上覆采空区影响区的过程中,围岩震动呈现出了高能量和低频次的特征。吕进国等^[11]认为微震监测技术可在矿井全局范围内实时监测冲击危险区域以及掌握其动态发展情况;李剑锋等^[12]建立了微震频次、能量集中比,采用微震事件空间分布分析了工作面回采动态扰动速度和范围以及采区煤柱核心区域的微震分布及大能量微震事件演化过程;荣海等^[13]用高能量微震事件验证了乌东煤矿南采区冲击地压主要发生在高应力区和应力梯度区,上述研究为微震监测技术现场应用提供了技术指导。

作为国内外少见的近直立特厚煤层矿井,乌东煤矿南区冲击地压灾害存在以下特点:①初次冲击地压事故显现时工作面埋深较浅,垂直深度为295 m;②矿井冲击地压显现集中发生在 B_{3+6} 组合煤层中;③矿井为技术改造矿井,井田范围内存在多处小煤窑,局部存在特殊空间构造,该区域易出现应力异常^[14];④矿井采用“上采下掘”的单翼水平分段综采放顶煤工艺,易出现采掘工作面的采动影响叠加^[15]。特别是随采深增加,冲击事故显现频次和强度出现较大程度增加。针对冲击地压显现特点,矿井先后提出了“ B_2-B_3 煤层间岩柱撬动”致灾机理^[16]和“ B_6 煤层顶板滑移破断”致灾机理,并基于上述机理开展了专项的解压工程,优化调整了采掘空间布局,降低了开采强度,提前释放了工作面围岩的应力,一定程度上降低了工作面冲击地压危害程度。但前期的研究主要针对单一事故或单一影响因素开展,研究结果未能兼顾其他冲击地压显现事故之间及影响因素之间的关联研究,无法明确矿井冲击地压的主要影响因素,研究结果缺乏针对性和整体性。笔者通过对显现最集中的 B_{3+6} 煤层冲击地压数据分析,研究出影响乌东煤矿南区冲击地压显现

的最主要影响因素,为后期冲击地压危险性评价分级及灾害防治提供科学依据。

1 工程地质概况

1.1 矿井概况

乌东煤矿南区位于八道湾向斜南翼,主采 B_{1+2} 、 B_{3+6} 两组合煤层,其中 B_{1+2} 煤层最大厚度39.45 m,最小厚度31.83 m,平均厚度37.45 m; B_{3+6} 煤层最大厚度52.3 m,最小厚度39.85 m,平均厚度48.87 m;煤层平均倾角 87° ,为国内特殊的大倾角急倾斜特厚煤层。2组煤由岩墙隔开,岩柱宽度为53~110 m(图1)。

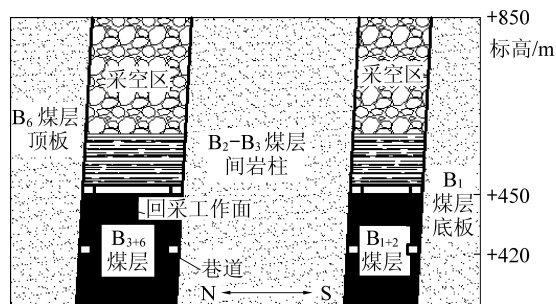


图1 乌东煤矿南区水平分段开采布置示意

Fig.1 Horizontal slicing in south mining area of Wudong

矿井采用单翼水平分段综采放顶煤工艺,自然垮落法管理顶板,综放工作面自东向西回采(图2),回采工作面巷道下方布置准备巷道,准备巷道自西向东掘进,准备巷道采用机械化掘进,锚网索联合支护。工作面进风巷和回风巷分别沿着煤层顶板和底板布置,工作面宽度即煤层厚度,分层高度为25 m,采放比为3:22。目前矿井已回采至+450 m水平,采深350 m。

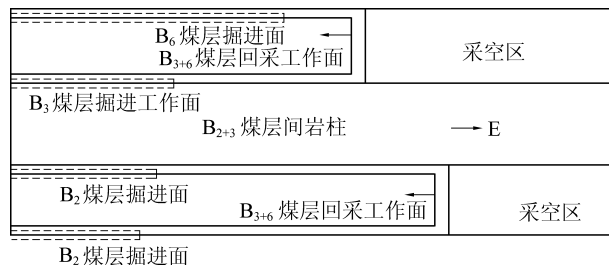


图2 乌东煤矿南区巷道布置平面示意

Fig.2 Layout of the roadway in south mining area of Wudong

1.2 B_{3+6} 煤层上覆煤柱赋存

采矿遗留的大量煤柱是应力集中的重要部位,特别是半岛形、孤岛形煤柱由于受多方应力叠加作用,其应力集中程度非常高。在多煤层开采时,遗留煤柱的集中应力不仅影响本煤层开采,而且对上下邻近煤层也影响显著,因此采矿遗留的煤柱是冲击地压灾害的高危险部位。乌东煤矿南区近直立特厚煤层水平分段综采放顶煤工艺下,上覆煤柱区域由

于煤炭资源的不均衡分布,煤炭资源的不均衡开采极易造成采空区侧顶底板之间悬空面积过大,在水平构造应力作用下极易产生应力集中,为了便于研究,根据 B_{3+6} 煤层历史开采情况,将 B_{3+6} 煤层上覆煤柱划分为 5 个区段,分别为:五一煤矿井田煤柱、五一煤矿与大洪沟煤矿边界煤柱、原大洪沟煤矿小井工业广场煤柱、大洪沟煤矿边界煤柱和大洪沟煤矿工业广场保护煤柱区域,各区段的开采情况详见表 1。

表 1 B_{3+6} 煤层上覆煤柱区域开采情况统计

Table 1 Mining statistics of overlying coal pillar in B_{3+6} coal seam

区段	工作面走向 距离/m	阶段标高/ m	矿压显现 标高/m
五一煤矿井田	934.0~1 361.7	+550—+522	+550
五一与大洪沟边界煤柱	1 361.7~1 420.0	+800—+522	+522
大洪沟小井工业广场煤柱	1 555~1 693	+800—+650	+555
大洪沟煤矿边界煤柱	1 837~1 857	+800—+650	+450
大洪沟工业广场保护煤柱	1 980.0~2 310.8	+800—+500	+500

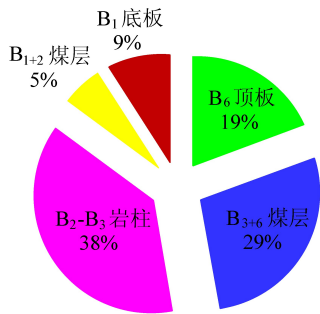
注:工作面走向距离为至分层石门的距离;矿压显现标高为首次显现时工作面标高。

2 微震事件数据统计分析

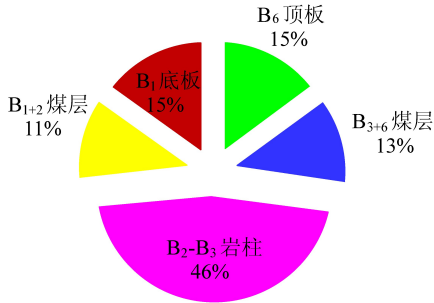
2.1 微震事件分布研究

冲击地压的影响因素主要为开采技术因素和自然地质因素 2 大类,其中自然地质因素包括开采深度、地质构造、顶板岩性、煤层厚度、煤层倾角、煤岩力学特性等^[20],受各种地质因素综合作用,在采掘工作面附近围岩中出现矿压显现。因此,为了实现冲击地压矿井解压,按应力集中轻重程度分层次实施解压工程,就必须准确掌握工作面围岩应力分布。

为此,研究按照煤岩赋存情况将工作面附近围岩划分为 B_1 煤层底板、 B_{1+2} 组合煤层、 B_2-B_3 煤层间岩柱、 B_{3+6} 组合煤层、 B_6 煤层顶板 5 个层位。通过对乌东煤矿南区 2013 年至 2017 年 4 年期间 ARAMIS 微震系统监测的 55033 个事件进行统计分析,如图 3—图 4 所示,发现 86% 的微震事件和 74% 的能级在 10^6 J 及以上微震事件分布在 B_{3+6} 煤层及顶底板中,表明 B_{3+6} 煤层应力集中程度大于 B_{1+2} 煤层,是冲击地压防治的重点。同时,各层位微震事件由多至少依次为 B_2-B_3 煤层间岩柱、 B_{3+6} 煤层、 B_6 顶板、 B_1 底板、 B_{1+2} 煤层,其中 B_2-B_3 煤层间岩柱分布最为集中,破坏性能级 10^6 J 及以上事件中 B_2-B_3 煤层间岩柱中占比将近 50%,为主要应力源,是造成应力集中的主要原因。



(a) 全部微震事件比例



(b) 能级 10^6 J 及以上微震事件比例

图 3 微震事件分布层位比例

Fig.3 The distribution of allmicroseismic events

2.2 开采布局关联分析

在煤层群开采时,多个工作面同时布置,煤层开采顺序以及工作面的布置方式、推进方向等因素对煤岩体的应力分布有较大影响。统计表明,冲击地压在工作面接近采空区,近距离煤层中的 2 个工作面同时开采,工作面相向推进时出现频率较高^[14]。在确定煤层开采顺序时应开采没有冲击地压危险或冲击地压危险小的煤层,工作面布置时尽量避免工作面叠加,工作面相向推进。

根据 B_{3+6} 煤层采掘扰动影响 FLAC^{3D} 数值模拟^[15],+475 m 水平回采工作面和+450 m 水平掘进工作面同向推进,相距 100 m 时采掘扰动影响开始出现,相距越近应力集中程度越大;采掘相向推进,相距 120 m 时,采掘同向相互影响开始明显,相距越近应力集中程度越大。非同一煤层采掘扰动影响距离研究对象为+500 m 水平 B_{3+6} 煤层回采工作面与+450 m 水平 B_2 煤层掘进工作面,期间两工作面位于正常回采区域,该区域未发生过冲击地压事故,消除了地质因素、上覆煤柱等因素干扰;同时, B_{1+2} 煤层未布置回采工作面,+475 m 水平 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_6 煤层巷道已施工完毕,避免了其他工作面开采扰动影响。通过统计分析采掘工作面附近能级 10^2 J 及以上微震频次、能量与采掘工作面距离(相向为+,相错为-)之间的关系,研究不同煤层间采掘工作面之间的扰动影响程度,具体如图 4 所示。

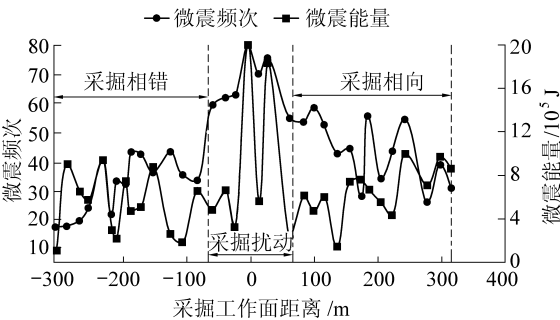


图 4 采掘叠加扰动期间微震事件分布

Fig.4 Distribution of microseismic events during superposition disturbance

通过对采掘工作面不同距离之间的微震频次和能量分析,认为当采掘工作面相向 80 m、相错 110 m 时,工作面附近微震频次出现明显增加;当推进至相向 0~30 m 时微震频次达到峰值,此时微震频次和、能量和出现异常峰值,表明前期针对 B₃₊₆ 煤层采掘工作面采掘扰动影响数值模拟结果同样适用于不同煤层间采掘工作面扰动影响判定。

3 冲击地压事故量化分析

通过对乌东煤矿南区 B₃₊₆ 煤层发生的具有明显破坏且单次事故微震能量大于 10⁶ J 的 8 次冲击地压事故进行统计分析,重点研究采深、上覆煤柱等冲击地压致灾因素与冲击地压事故之间的关联,掌握冲击地压事故发生的规律,从而找出造成冲击地压事故的主要致灾因素,来指导矿井冲击地压防治工作。

3.1 开采深度关联分析

根据研究,开采深度增加,煤岩所承受的上覆岩层的压力越大,应力越高,积聚的弹性能也随之增加^[17]。大量的冲击地压灾害统计表明^[18],我国冲击地压始发深度在 200~400 m,考虑到安全界限,深度 $H \leq 350$ m 时,一般不会发生冲击地压,深度 $350 \text{ m} < H \leq 500$ m,冲击危险性在一定程度上逐步增大。

表 2 B₃₊₆ 煤层冲击地压事故与上覆煤柱关联统计

Table 2 Statistical of associations between rock burst accidents and overlying coal pillar in B₃₊₆ coal seam

事故	水平/m	采深/m	煤柱	超前或滞后			分层数
				位置	距西边界/m	距东边界/m	
“9·19”事故	+555	295	大洪沟煤矿小井工业广场煤柱(1 555~1 693 m)	进煤柱前	6.0	144.0	多分层
“12·6”事故	+555	295		出煤柱后	149.5	11.5	多分层
“7·2”事故	+500	350		进煤柱前	145.0	7.0	多分层
“4·26”事故	+450	400		煤柱下	10.0	128.0	多分层
“2·27”事故	+500	350	大洪沟煤矿工	煤柱前	21.0	351.8	煤柱未采
“3·13”事故	+475	375	业广场保护煤柱	煤柱下	15.0	315.5	首分层
“11·24”事故	+450	400	(1 980.0~2 310.8 m)	煤柱下	45.0	285.8	二分层
“2·1”事故	+450	400	大洪沟煤矿边界煤柱(1 837~1 857 m)	煤柱下	15.0	5.0	多分层

在 $H > 500$ m 时,急剧增长,在开采深度非常大时(1 200~1 500 m),冲击地压发生的强度以及频率的递增梯度将会相对减小,但此时的值非常大。

经过统计分析,乌东煤矿南区首次冲击地压事故发生在+555 m 水平,深 295 m(地面标高按+850 m 计算),该水平发生冲击地压事故 2 次。随采深增加,B₃₊₆ 煤层冲击地压事故频次呈现明显的增长趋势,如图 5 所示。但+555 m 水平发生冲击地压事故后,矿井对采掘工作面进行系统治理,采掘工作面附近区域围岩支承应力超前得以释放,工作面附近应力集中程度弱化,冲击地压事故的破坏程度较上水平低。

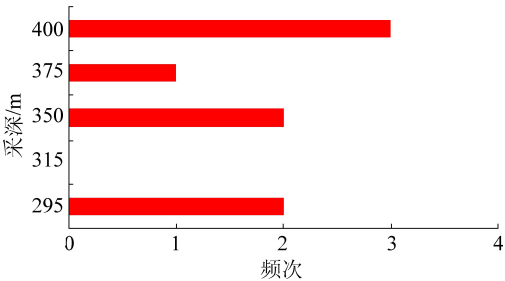


图 5 不同采深冲击地压事故频次分布

Fig.5 Frequencies of rock burst accidents with different depth

3.2 上覆煤柱关联分析

通过对乌东煤矿南区上覆煤柱应力分布数值模拟,上覆煤柱产生的应力集中分布在工作面进入或离开煤柱 50 m 范围内^[14]。统计的 8 次冲击地压事故全部发生在上覆煤柱附近,表明上覆煤柱是 B₃₊₆ 煤层冲击地压事故的主要致灾因素,其中大洪沟煤矿小井工业广场煤柱区域发生 4 次,大洪沟煤矿防洪渠煤柱区域发生 3 次,占全部事故起数的 88%,为冲击地压防治的重点区域。此外,为进一步研究上覆煤柱与工作面冲击地压事故的关系,特对冲击地压事故发生时工作面位置与煤柱边界、煤层回采之间关系进行统计分析,统计结果见表 2。

经过对冲击地压事故与上覆煤柱关联研究得出:

1) 经过多分层开采后,上覆煤柱应力影响作用仍存在。乌东煤矿南区特殊的煤层赋存条件和开采方式造成上覆煤柱经多分层开采后,仍然不能完全实现对上部煤炭资源的彻底回收,因此不平衡的煤炭资源采出率必然造成上覆煤柱附近区域的应力不平衡分布、释放。同时,随煤柱区域煤层开采层数增加,煤柱下方及进煤柱前发生冲击地压事故的概率将增加,即冲击地压显现时工作面的位置与煤柱关

系呈“进煤柱前-煤柱下-出煤柱后”规律性变化。

2) 发生冲击地压时综放工作面集中分布在煤柱边界 50 m 范围内,且工作面显现时的位置、次数与上覆煤柱走向长度有关,如图 6 所示。随着上覆煤柱走向长度增加,冲击地压事故发生时综放工作面与煤柱边界的距离增大,同时煤柱附近区域冲击地压事故的概率和强度也随之增高。统计的 8 次冲击地压事故中,大洪沟煤矿工业广场煤柱区域发生冲击地压事故 3 次,且 3 次事故显现的强度最大、破坏程度最严重。

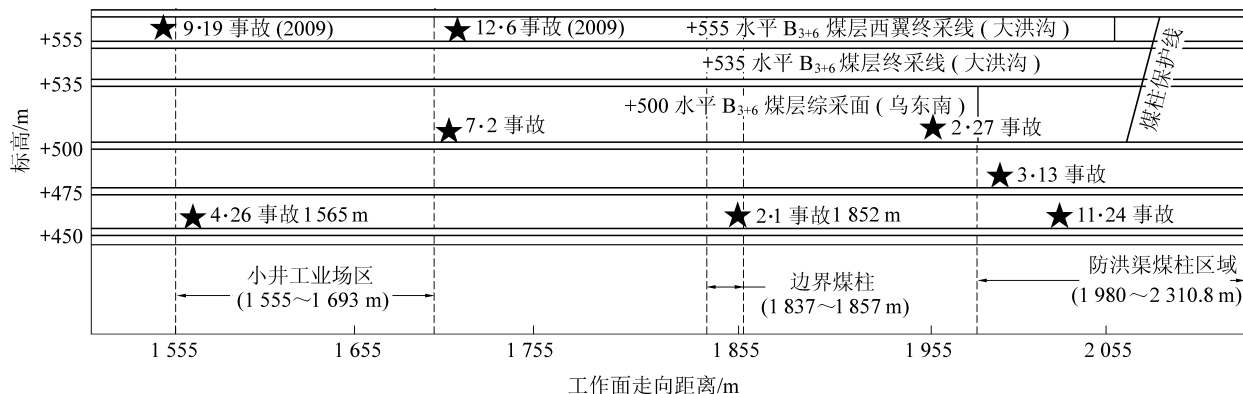


图6 不同采深冲击地压事故与上覆煤柱分布示意

Fig.6 Distribution schematic of rock burst accidents and overlying coal pillars at different depths

4 结 论

1) 通过微震数据分析, B_{3+6} 煤层应力集中程度大于 B_{1+2} 煤层,是冲击地压防治的重点,其中 B_2-B_3 煤层间岩墙微震事件分布最为集中。

2) 基于微震数据分析得出,不同煤层采掘工作面相向 80 m、相错 110 m 时,采掘扰动影响较明显,当推进至相向 0~30 m 时微震频次达到峰值,此时微震频次和、能量和出现异常峰值,且相错推进时应力集中程度较相向推进时小。

3) 上覆煤柱是 B_{3+6} 煤层冲击地压事故的主要致灾因素,其中大洪沟煤矿小井工业广场煤柱和大洪沟煤矿工业广场煤柱区域冲击地压事故最集中,为冲击地压防治的重点区域。

4) 经过多分层开采后,上覆煤柱应力影响作用仍存在。随煤柱区域煤层开采层数增加,冲击地压显现时工作面的位置与煤柱关系呈“进煤柱前-煤柱下-出煤柱后”规律性变化。

5) 冲击地压事故时综放工作面集中分布在煤柱边界 50 m 范围内,且工作面显现时的位置、次数与上覆煤柱走向长度有关。随着上覆煤柱走向长度增加,冲击地压事故发生时综放工作面与煤柱边界的距离增大,同时煤柱附近区域冲击地压事故的概

率和破坏强度也随之增加。

参考文献 (References):

- [1] 李世愚,和雪松,张少泉,等. 矿山地震监测技术的进展及最新成果[J]. 地球物理学进展,2004,19(4):853-859.
LI Shiyu, HE Xuesong, ZHANG Shaoquan, et al. Development and recent achievement of mining shock observation[J]. Progress in Geophysics,2004,19(4):853-859.
- [2] 齐庆新,李宏艳,邓志刚,等. 我国冲击地压理论、技术与标准体系研究[J]. 煤矿开采,2017,22(1):1-6.
QI Qingxin, LI Hongyan, DENG Zhigang, et al. Studying of standard system and theory and technology of rock burst in domestic[J]. Coal Mining Technology,2017,22(1):1-6.
- [3] 窦林名,何学秋. 采矿地球物理学[M]. 北京:中国科学文化出版社,2002:21-77.
- [4] 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 burst in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(5):1511-1516.
- [5] 夏永学,潘俊峰,王元杰,等. 基于高精度微震监测的煤岩破裂与应力分布特征研究[J]. 煤炭学报,2011,36(2):239-243.
XIA Yongxue, PAN Junfeng, WANG Yuanjie, et al. Study of rule of surrounding rock failure and stress distribution based on high-precision microseismic monitoring [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(2):239-243.
- [6] 赵毅鑫,姜耀东,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): 1961-1965.
- ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, WANG Tao, *et al.* Features of microseismic events and precursors of rock burst in underground coal mining with hard roof [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1961-1965.
- [7] 袁瑞甫, 李化敏, 李怀珍. 煤柱型冲击地压微震信号分布特征及前兆信息判别[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 81-85.
- YUAN Ruifu, LI Huamin, LI Huaizhen. Distribution of microseismic signal and discrimination of portentous information of pillar type rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 81-85.
- [8] 王书文. 矿井微震信号 b 值计算样本及参数选取研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 51-55.
- Wang Shuwen. Study on calculation sample and parameter selection of mine microseism signal b value[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 51-55.
- [9] 李浩荡, 蓝航, 杜涛涛, 等. 宽沟煤矿坚硬厚层顶板下冲击地压危险时期的微震特征及解危措施[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 7-11.
- LI Haodang, LAN Hang, DU Taotao, *et al.* Micro-seismic characteristic and danger-relief method in rock-burst danger period of mining face under hard and thick roof of Kuangou Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 7-11.
- [10] 张书敬, 姚建国, 鞠文君. 千秋煤矿冲击地压与微震活动关系[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S1): 7-12.
- ZHANG Shujing, YAO Jianguo, JU Wenjun. Relationship of rockburst and microseismic activity in Qianqiu Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 7-12.
- [11] 吕进国, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 冲击地压层次化监测及其预警方法的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1161-1167.
- LYU Jinguo, JANG Yaodong, ZHAO Yixin, *et al.* Hierarchical monitoring for coal bumps and its study and application of early warning methods [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(7): 1161-1167.
- [12] 李剑锋, 何岗, 何江, 等. 采区煤柱区域微震规律分析及冲击地压防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 22-27.
- LI Jianfeng, HE Gang, HE Jiang, *et al.* Analysis on regional microseism law of coal pillar in mining block and prevention and control technology of mine pressure bump [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 22-27.
- [13] 荣海, 张宏伟, 陈建强, 等. 基于多因素模式识别的急倾斜特厚煤层冲击地压危险性预测[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 125-131.
- RONG Hai, ZHANG Hongwei, CHEN Jianqiang, *et al.* Rockburst-risk prediction in steep-inclined and extremely thick coal seams based on the multi-factor pattern recognition method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 125-131.
- [14] 杨磊, 蓝航, 杜涛涛. 特厚近直立煤层上覆煤柱诱发冲击地压的机制研究及应用[J]. 煤矿开采, 2015, 20(2): 75-77.
- YANG Lei, LAN Hang, DU Taotao. Mechanism of rock-burst induced by overlying coal-pillar in extremely-thick and sub-erect coal-seam[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(2): 75-77.
- [15] 曹民远, 孙秉成, 刘旭东. 急倾斜煤层高应力条件让压掘进巷道布局优化[J]. 煤炭工程, 2017, 48(8): 14-17.
- CAO Minyuan, SUN Bingcheng, LIU Xudong. Layout optimization of post-weighting excavation roadway under high stress steep coal seam[J]. Coal Engineering, 2017, 48(8): 14-17.
- [16] 蓝航. 近直立特厚两煤层同采冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 308-314.
- LAN Hang. Rock-burst mechanism and prevention in mining sub-erect and extremely-thick coal seam with horizontal slicing method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 308-314.
- [17] 赵本钧. 冲击地压及其防治[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [18] 窦林名, 何学秋. 冲击地压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [19] 王志辉, 孙村矿冲击地压区域预测研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006: 13-27.
- [20] 韩玥. 基于主成分分析的冲击地压影响因素研究[J]. 煤矿安全, 2010, 36(8): 101-104.
- HAN Yue. A principal component analysis based on the factors of pressure bump[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 36(8): 101-104.
- [21] 杜涛涛, 李康, 蓝航, 等. 近直立特厚煤层冲击地压致灾过程分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 140-144.
- DU Taotao, LI Kang, LAN Hang, *et al.* Rock burst process analysis in steeply-inclined extremely-thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 140-144.