



移动阅读

齐庆新,李一哲,赵善坤,等.矿井群冲击地压发生机理与控制技术探讨[J].煤炭学报,2019,44(1):141-150.
doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1701
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun et al. Discussion on the mechanism and control of coal bump among mine group
[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 141-150. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1701

矿井群冲击地压发生机理与控制技术探讨

齐庆新^{1,3,4} 李一哲^{2,3,4} 赵善坤^{1,3,4} 潘鹏志⁵ 魏向志⁶

(1.煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013; 2.煤炭科学研究总院,北京 100013; 3.煤炭科学技术研究院有限公司安全分院,北京 100013; 4.煤炭科学研究总院煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013; 5.中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室,湖北武汉 430071; 6.河南大有能源股份有限公司,河南义马 472300)

摘要:大型地质体控制下,相邻矿井开采过程中时常发生冲击地压。为研究大型断层和巨厚砾岩层顶板条件下两个相邻矿井间相邻工作面开采过程中冲击地压的发生机理,以义马矿区跃进矿23070工作面和常村煤矿21220工作面为实际工程背景,对两工作面回采期间冲击显现特征和微震事件时空演化及能量特征展开现场实测分析,并对井间覆岩结构应力分布开展理论分析和数值模拟。研究表明,义马矿区F16逆冲断层的活化运动和巨厚砾岩层的整体控制作用,为冲击地压的孕灾提供了力源条件。井间相邻工作面同时回采期间,采空区上覆岩梁与井间煤岩柱系统构成“非对称T形”结构,21220工作面煤体冲击导致应力转移至井间煤柱和23070工作面,从而诱发23070工作面冲击;井间开采扰动导致应力转移并诱发冲击地压,与滞后开采工作面初始冲击强度及推进长度具有密切关系;基于理论与工程实测结果,提出了以弱化矿井间高应力传递的结构链为核心的井间“弱链增耗”防冲技术。为巨厚砾岩层顶板矿井群开采条件下相邻矿井工作面冲击地压发生机理及控制技术的研究提供理论基础。

关键词:冲击地压;巨厚砾岩;矿井群;微震活动;应力转移;弱链增耗

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2019)01-0141-10

Discussion on the mechanism and control of coal bump among mine group

QI Qingxin^{1,3,4}, LI Yizhe^{2,3,4}, ZHAO Shankun^{1,3,4}, PAN Pengzhi⁵, WEI Xiangzhi⁶

(1. CCTEG Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 6. Henan Dayou Energy Co., Ltd., Yima 472300, China)

Abstract: Coal bump often occurs in the mining process between two adjacent mines under the control of large geological bodies. In order to study the coal bump mechanism between adjacent working faces of two adjacent coal mines under the condition of large fault and huge thick overburden conglomerate, this paper investigates the 23070 working face at Yuejin coal mine and the 21220 working face at Changcun coal mine in China. The analyses of monitoring data are carried out on the characteristics of coal bump behavior, microseismic spatio-temporal evolution and microseismic energy. Furthermore, the theoretical analysis and numerical simulation of stress distribution of overburden structure during the mining process of two working faces are conducted. The results show that the activation of F16 thrust fault and overall control of massive conglomerates in Yima mining area provide the stress conditions for coal bump. During the mining process of two mines' adjacent working faces, the "asymmetric T-shaped" structure is formed between the rock beam

收稿日期:2018-12-03 修回日期:2018-12-27 责任编辑:郭晓炜

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804201, 2017YFC0804203);国家自然科学基金面上资助项目(51874176)

作者简介:齐庆新(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员。E-mail: qiqingxin@X263.net

通讯作者:李一哲(1991—),男,河南焦作人,博士研究生。E-mail: liyizhe1991@126.com

above the goaf and coal-rock pillar between two mines. The coal bump around the 21220 working face leads to the stress transfer onto the two mines' pillar and the 23070 working face, which induces the coal bump around the 23070 working face. Mining disturbance between two mines leads to stress transfer and induces rock burst, which is closely related to the initial bump intensity and mining length of later working face. Finally, based on theory and engineering monitoring, a coal bump controlling technique with chain-weakening and consumption-increasing between two coal mines is put forward, which regards the weakening of the structural chain of high stress transfer as core. The results provide a theoretical basis for the study on the mechanism and control of coal bump between two adjacent working faces in two adjacent mines.

Key words: coal bump; huge thick conglomerate; mine group; microseismic activity; stress transition; chain-weakening and consumption-increasing

工作面矿压显现不仅与采场覆岩结构密切相关,而且当相邻矿井的煤层同时开采时,同样将受到相邻工作面开采扰动的影响。尤其是在大型断层或巨厚砾岩层顶板条件下,如果一个矿井的开采引起断层活化或巨厚砾岩层垮断,必将对相邻矿井的开采产生影响。在这样的大型地质体控制下,开采导致的矿井间应力扰动范围更大,扰动程度更加剧烈,诱发相邻矿井工作面煤岩动力灾害的危险性就更高^[1]。

高位巨厚坚硬岩层是一种特殊的岩层赋存形式,其广泛分布于我国的多个矿区^[2-7]。对厚硬岩层下覆岩结构运移规律和破坏方式、煤岩体应力分布以及对冲击地压的影响研究方面,囊林名等^[8]研究了不同工作面相对位置下 OX-F-T 覆岩结构的演化规律;姜福兴^[9]研究了“O”型、“S”型、“C”型和“θ”型空间结构下的矿压规律;魏全德等^[10-11]认为“不对称工字型”和“不等距双孔桥”空间结构造成应力异常集中;蒋金泉等^[12-14]通过相似模拟试验得到上覆巨厚岩浆岩破断前下部岩层由月牙形向一字型演化,下方形成中部梯形压实区和两侧平行四边形破裂区。

在大型地质控制的矿井群开采条件下,当矿区不同矿井多个工作面同时回采时,上覆巨厚岩层对工作面矿压起着宏观控制作用,开采扰动将导致矿区开采区域煤体应力呈动态变化。尤其是在完整且坚硬巨厚岩层作用下,当采场局部高弹性能突然释放,将导致区域应力重新分布,巨厚岩层的传递应力、构造应力和特厚煤层膨胀应力耦合作用^[15-16]增加了煤岩体静载荷的积聚,为冲击地压的发生提供了力源条件。

对于巨厚砾岩层垮断诱发的冲击地压灾害,部分学者提出了以控制上覆岩层结构和消除煤体应力为主的防冲措施,包括囊袋离层加固^[17]、开采上保护层^[18]、煤层深孔爆破、大直径钻孔卸压等方法^[19-20]和多尺度分源防控技术^[21],可以在一定程度上降低冲击发生的可能。

目前,对大型地质体控制下多工作面开采扰动规律的研究多集中在同一矿井内的采区(盘区)尺度上,而对矿区尺度下矿井间覆岩结构体时空力学响应行为和开采扰动机制的研究不多。笔者以义马矿区跃进煤矿 23070 工作面和常村煤矿 21220 工作面开采为例,基于现场微震监测和动力显现实测,在理论分析的基础上,提出了井间“非对称 T 形”覆岩空间结构和应力转移诱冲机制,针对应力传递的巨厚砾岩因素,提出井间弱链增耗防冲技术,以期为矿井群开采条件下相邻矿井工作面冲击地压发生机理及控制技术的研究提供理论基础。

1 工程背景

我国矿区地质条件复杂多样,相当一部分矿区煤系地层附近存在不同形式的大型地质体,包括大型断层与褶皱、巨厚坚硬岩层、直立岩柱等,典型大型地质体控制下的矿井群开采条件有向斜构造的山西朔州矿区、B2-B3 直立岩柱的新疆乌东矿区、巨厚火成岩的安徽淮北矿区、F16 断层的河南义马矿区等。大型地质体的存在,将造成煤炭开采过程中形成高应力环境,容易导致冲击地压等煤岩动力灾害的发生。

义马矿区是我国典型的冲击地压多发区域,该矿区构造分布及开采状况如图 1 所示,该矿区自西向东分布 5 座矿井:杨村煤矿、耿村煤矿、千秋煤矿、跃进煤矿和常村煤矿。其南部存在走向近东西的 F16 大型逆冲断层,同时矿区南部煤层顶板赋存发育至地表或接近地表的厚度超 400 m 的巨厚砾岩。F16 断层和上覆巨厚砾岩层的基本特征为:

(1) F16 断层:位于义马矿区南部的井田边界处一上陡下缓的逆冲断层,属压剪性断裂。该断层走向近东西,落差较大(50~450 m),断裂面呈弧形上翘,浅部倾角较大而深部逐渐平缓,煤层及其顶板向上折返或倒转。其活化运动使工作面处于高水平应力环境,增加了工作面和巷道发生冲击地压的几率。

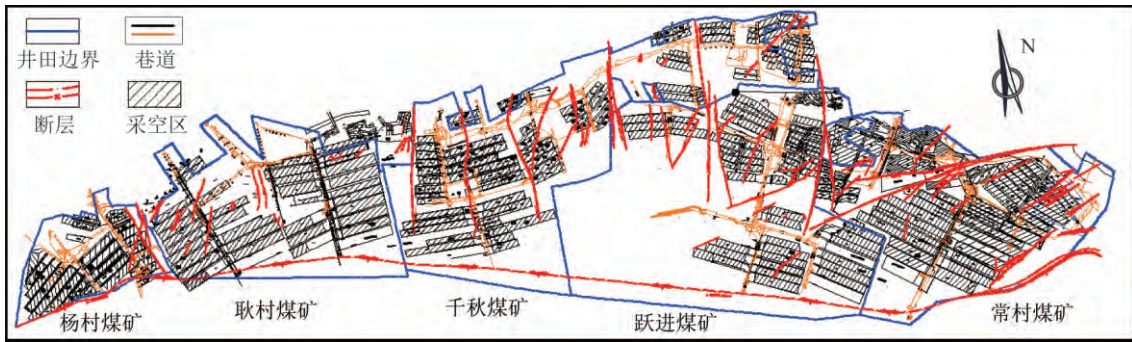


图 1 义马矿区构造分布及开采状况

Fig. 1 Distribution of geological structure and mining situation in Yima mining area

(2) 巨厚砾岩: 义马矿区大部分区域煤层顶板赋存巨厚砾岩, 砾岩在全煤田发育, 厚度由北向南、自浅到深、从东部和西部边界区域向煤田中南部区域逐渐增大, 特别是在跃进井田南部靠近 F16 断层区域厚度最大, 达 700 余 m。巨厚砾岩强度高且完整性好, 随工作面开采发生弯曲下沉, 其整体运动行为导致工作面垂直应力动态变化, 当矿区某一工作面发生顶板断裂或冲击地压时, 在巨厚砾岩层的作用下, 将造成矿井群区域应力重新分布, 导致其他矿井工作面应力升高而诱发冲击地压。

2 应力转移诱冲效应

已有研究表明, 义马矿区厚煤层重复采动和大范围高强度开采引起的覆岩破坏有可能波及上覆巨厚砾岩。在非充分采动条件下, 井间相邻工作面煤体应力发生动态变化, 井间煤柱附近煤系地层结构体处于非稳定高能动态平衡状态, 中间煤柱和两侧工作面煤体对上覆岩层起支撑作用。当一侧工作面煤体失稳破坏或发生冲击地压而导致其对上覆顶板承载降低, 通过巨厚砾岩梁作用造成煤柱两侧工作面压力重新分布, 从而导致应力转移至中间煤柱和另一侧工作面, 而诱发另一侧工作面冲击, 称为应力转移诱冲效应。

由义马矿区当前开拓布局及回采设计可知, 在矿区东西走向上, 矿区相邻矿井间、矿井相邻采区间和采区两翼间均留设不同宽度的井间煤柱、采区间煤柱及上下山煤柱, 不同类型的煤柱宽度分别为 140~200, 50~100 和 150~300 m。随着矿区煤炭资源的开发, 当前开采状态下存在大量的“采空区—煤柱—采空区”结构, 该结构因素促进了应力转移的发生。结合义马矿区实际开采情况, 跃进煤矿与常村煤矿存在井间近距离相邻工作面(23070 工作面和 21220 工作面)同时回采, 且这两个工作面回采期间均发生多次剧烈的冲击显现, 故对此开展针对性的研究。

3 井间应力转移诱冲效应现场监测

3.1 相邻矿井工作面条件

跃进煤矿 23070 工作面开采 2-1 煤, 开采深度为 698~795 m; 煤层厚度平均 9.3 m, 平均倾角 12°; 工作面倾斜长 210 m, 可采长度 960 m, 为孤岛工作面, 东与常村煤矿 21220 工作面相邻。常村煤矿 21220 工作面同样开采 2-1 煤, 开采深度为 710~815 m, 平均煤厚 11.86 m, 平均倾角 11.5°; 工作面倾斜长 265 m, 可采长度 689 m, 北侧为采空区, 南侧为实体煤。相邻工作面间留设宽度为 140 m 的井田边界煤柱, 两工作面开切眼宽度均为 7.5 m, 回采方式均为后退式回采, 工作面布置和 2-1 煤层开采情况如图 2 所示。

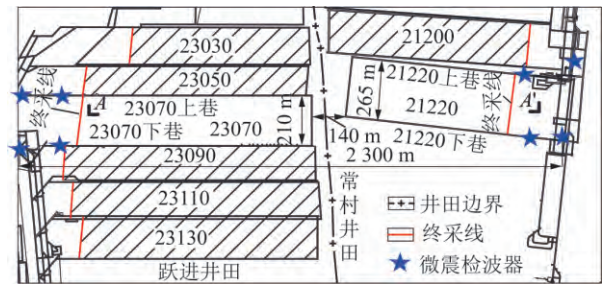


图 2 工作面布置平面

Fig. 2 Layout plan of working face

3.2 “非对称 T 形”覆岩空间结构

为弄清顶板覆岩结构, 在千秋煤矿由地表至 21121 工作面的采空区实施了地表钻孔, 实测获得了顶板“三带”的发育情况(图 3)。由 23070 工作面和 21121 工作面煤层及顶板岩层分布可知(表 1), 两工作面埋深差别不大, 且两工作面上方均存在 30 m 左右泥岩、200 m 左右的砂岩、砾岩互层和超过 400 m 的巨厚砾岩, 由此可以推测 23070 工作面垮落带与断裂带发育情况与 21121 工作面近似。根据钻孔探测结果, 判断 23070 工作面和 21220 工作面回采过程中将形成如图 3 所示的覆岩空间结构, 未破碎的煤岩体

剖面(图 2 中的 A-A' 剖面)类似于“T 形”,井间两侧工作面推采远离井间煤柱时,巨厚砾岩为“T”的上

横,井间煤岩柱为“T”的竖。由于两工作面回采进度不同,从而使两工作面覆岩呈“非对称 T 形”结构。

表 1 23070 和 21121 工作面煤层及顶板岩层情况

Table 1 Lithology of roof and coal seam of 23070 and 21121 working face

岩石名称	厚度/m		岩石特征
	23070 工作面	21121 工作面	
巨厚砾岩	509.43	401.55	杂色,以石英岩为主,可见度状结构,泥沙质填隙,基底式胶结
砂岩砾岩互层	195.15	217.60	以砾岩为主,砂岩薄层,砂岩杂色,以石英岩为主,泥质胶结,板状交错层理
泥岩	32.98	29.51	深灰色,具水平层理,局部夹棕色菱铁矿条带,极易冒落
2-1 煤	9.30	23.40	黑色,沥青光泽,半亮型煤为主,局部夹镜煤条带,具夹矸

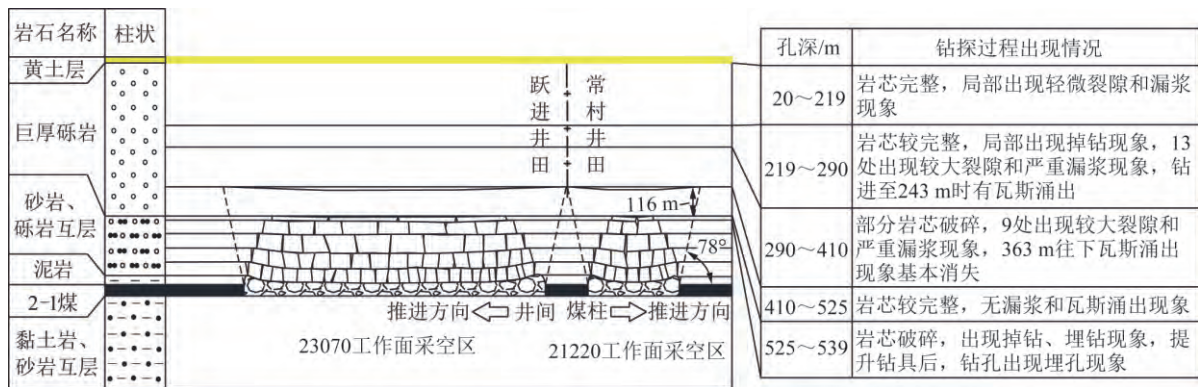


图 3 “非对称 T 形”覆岩空间结构

Fig. 3 Asymmetric T-shaped structure of overlying strata

3.3 井间应力转移监测方法

为获取 23070 工作面和 21220 工作面回采过程中“T 形”覆岩结构时空力学响应行为,采取了以下监测手段:① 现场记录人员对工作面及巷道动力显现进行现场记录;② 23070 和 21220 工作面分别使用波兰 ARAMIS M/E 和 SOS 微震监测系统对工作面煤岩体微震活动进行实时连续监测。

3.4 井间相邻工作面矿压显现

2015 年 2 月至 2016 年 8 月期间,23070 工作面处于回采后期,于 8 月底回采完毕,而该期间 21220 工作面完成开切眼贯通(2015 年 2 月至 2015 年 6 月)并回采 285.5 m(2015 年 11 月至 2016 年 8 月),两工作面及井间煤柱逐步形成“非对称 T 形”

结构,称该时期为应力转移时期。该时期两工作面诱冲频次、冲击时间先后特征和工作面动力现象见表 2。由表 2 可知,21220 掘进开切眼期间(2015 年 2 月至 2015 年 6 月),两工作面发生 18 次诱冲事件,冲击显现强度较弱,多为煤炮、煤尘及震感现象。当 21220 工作面进入回采阶段初期(2015 年 11 月至 2016 年 3 月),两工作面发生 5 次诱冲事件,冲击显现剧烈,液压抬棚和单体支柱出现不同程度的滑移甚至倾倒现象。随着 21220 工作面继续回采,井间煤柱两侧采空区范围逐步扩大,工作面开采扰动效应减弱,导致该时期两工作面冲击显现强度降低,液压抬棚发生轻微滑移,现场无明显破坏。

表 2 应力转移诱冲效应矿压显现

Table 2 Strata behaviors of bump induced by stress transfer

日期	诱冲次数	时间特征	23070 工作面和 21220 工作面冲击显现
2015 年 2 月至 2015 年 6 月	18	21220 早于 23070	两工作面及上下巷均出现煤炮和煤尘现象,现场有震感但两工作面均无明显破坏
2015 年 11 月至 2016 年 3 月	5	21220 早于 23070	两工作面下巷出现煤炮、严重底臃(2~58 cm)、液压抬棚滑移(5~70 cm)及单体支柱倾倒现象,两工作面下巷动力显现较剧烈
2016 年 4 月至 2016 年 8 月	2	21220 早于 23070	两工作面下巷出现煤炮、底臃和液压抬棚轻微滑移现象(5~10 cm),两工作面均无明显破坏

从两工作面冲击显现时间先后特征来看,均是 21220 工作面率先发生冲击显现,在巨厚砾岩作用下,使相邻矿井工作面应力重新分布,应力转移至 23070 工作面,诱发 23070 工作面冲击显现。

3.5 井间相邻工作面微震特征

图 4 为两矿井对同一微震活动的监测过程。从现场两工作面采掘过程中地质构造揭露情况可知,两工作面间未发育断层和褶皱等地质构造,同时,两条传播路径上煤岩体介质差别不大,故可近似认为 2 条路径上 P 波平均波速 v 大致相当。从图 4 三角形三边关系可以看到, $vt_2 - vt_1 < L$, 两矿井监测的同一微震事件震源发震时间间隔 $t_2 - t_1 < \frac{L}{v}$ 。两工作面推

进过程中,微震检波器位置始终超前工作面 150 m 布置,在极限条件下,即两工作面推至终采线时,两检波器距离最远相距 2 300 m,布置位置如图 2 所示。根据现场实测结果,P 波在煤、泥岩、砂岩、砾岩中传播波速分别为 1 736、3 816、4 382、4 952 m/s,故平均波速介于 1 736~4 952 m/s,若按煤层波速计算,可得极限状态下两矿井监测的同一微震活动震源发震时间间隔小于 2 s。对于波速增大或两矿井微震检波器距离减小的其他情况,该时间间隔将更短。因此将两矿井监测的震源发震时间间隔小于 2 s 的微震事件视为同一震源产生的事件。同时,将两工作面震源发震时间间隔在 2~120 s 的微震事件称为引发微震事

由图 5 可知,21220 工作面冲击显现多发生在采场及下巷,而应力转移引发的微震事件多分布于井间煤柱附近、23070 工作面及其上下巷。就工作面冲击显现微震能量来看,井间煤柱附近微震事件能量较高,而 23070 工作面附近微震能量较低,这是由于 21220 工作面冲击导致应力重新分布过程中,井间煤柱距离 21220 工作面较近,承担较高的支撑作用导致应力较高。同时,21220 工作面冲击动载与高应力静载作用导致井间煤柱附近微震能量较高。

4 应力转移诱冲效应理论分析

4.1 “非对称 T 形”结构力学模型

通过前面的分析和图 3 可以看出,井间相邻工作面同时开采形成了“非对称 T 形”结构,而这个非对称结构中的巨厚砾岩层呈现分层特性。对于这个覆岩空间结构,对井间相邻工作面起直接控制作用的岩层为巨厚砾岩层中低位的 116 m 砾岩层。当 21220 工作面开切眼贯通后,“非对称 T 形”结构形成,此时两工作面距离为 774 m,该长度远大于该砾岩层厚度,因此可将该砾岩层视为梁式模型进行求解。

件,认为先发生的微震事件由井间煤柱一侧工作面煤岩体破裂产生,在巨厚砾岩层岩梁作用下,应力转移至井间煤柱另一侧工作面,导致煤体及顶底板破裂,产生时间滞后的微震事件。

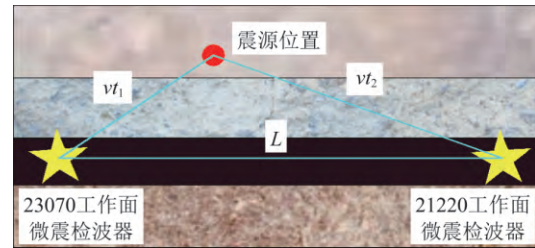


图 4 两矿井对同一微震活动的监测过程

Fig. 4 Monitoring process of the same microseismic event in two mines

图 5 为应力转移引发微震事件空间分布,经统计,应力转移时期共 110 组引发微震事件,其中 21220 开切眼掘进期间、工作面回采初期及后期正常回采期间引发微震事件分别为 87 组、10 组和 13 组,其中包含表 2 中两工作面均发生冲击显现的微震事件(图 5(a))和均无冲击显现的微震事件(图 5(b))。通过进一步分析可以看出,23070 工作面冲击显现的强度受 21220 工作面初始冲击强度影响较大,一侧工作面冲击显现越剧烈,煤体破坏越严重,其对上覆岩体承载就越低,在巨厚砾岩作用下,应力转移至另一侧工作面,导致另一侧工作面应力就越高,冲击显现的强度就越剧烈。

当井间煤柱两侧为采空区时,低位砾岩层由井间未破断岩层及两侧工作面上方砂砾互层支撑。为便于计算与分析,将砾岩层设为两边固支、中间铰支的状态,其受力状态如图 6(b) 所示。由于覆岩破裂按照一定角度向上发展,为正确求解低位砾岩层的悬空尺寸,需考虑覆岩破裂角 α 的影响,则低位砾岩层悬空长度 a 和 b 与采空区长度 a_0 和 b_0 的关系为

$$a = a_0 - 2 \sum H \cot \alpha \quad b = b_0 - 2 \sum H \cot \alpha \quad (1)$$

式中, $\sum H$ 为低位砾岩与煤层之间的间距, m; α 为上覆岩层的断裂角 ($^\circ$)。

根据 23070 和 21220 工作面现场实测, $\sum H = 228.13 \text{ m}$, $\alpha = 80^\circ$, 由式(1)可得

$$a = a_0 - 80 \quad b = b_0 - 80 \quad (2)$$

4.2 两种载荷下砾岩层岩梁力学分析

根据材料力学可知,两端固支梁在上部均布荷载和中部集中力作用下,砾岩层岩梁任意截面的剪力方程分别为

$$F_1(x) = \frac{ql}{2} - qx \quad (3)$$

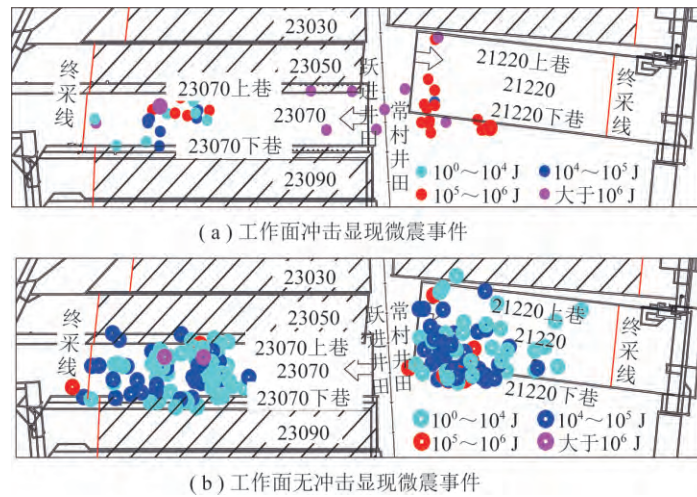


图 5 应力转移引发微震事件分布

Fig. 5 Distribution of microseismic events induced by stress transfer

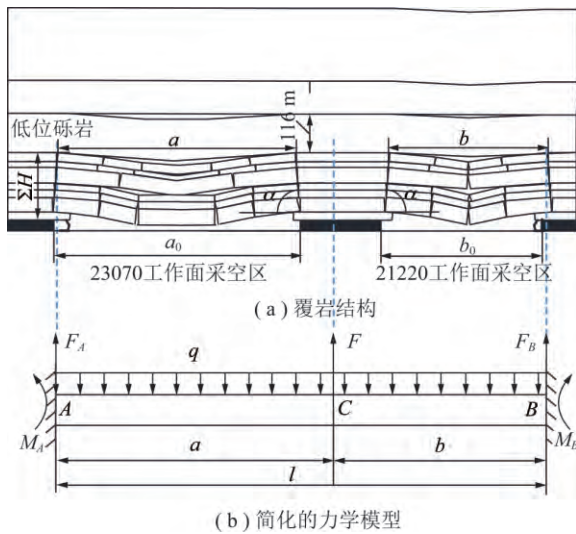


图 6 “非对称 T 形”结构力学模型及边界条件

Fig. 6 Mechanical model and boundary condition of the warping structure

$$F_2(x) = \begin{cases} -\frac{Fb^2}{l^2} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) & 0 \leq x < a \\ \frac{Fa^2}{l^2} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) & a < x \leq l \end{cases} \quad (4)$$

式中 l 为两工作面之间的水平距离, m ; F 为井间煤岩柱对低位砾岩的支撑力 N 。

两种荷载条件下砾岩层岩梁 C 处的挠度分别为

$$\omega_{c1} = \frac{qa^2b^2}{24EI} \quad (5)$$

$$\omega_{c2} = -\frac{F}{3EI} \frac{a^3b^3}{(a+b)^3} \quad (6)$$

其中 EI 为低位砾岩梁的弯曲刚度, $N \cdot m^2$ 。由材料力学叠加原理可知, 在上部均布荷载和中部集中应力作用下, 某一横截面上的剪力等于仅受上部均布荷载

和仅受中部集中应力条件下该横截面剪力的叠加, 即

$$F(x) = F_1(x) + F_2(x) \quad (7)$$

故 23070 工作面和 21220 工作面煤岩体对低位砾岩层岩梁支反力 F_A 和 F_B 以及砾岩梁在井间煤柱处 (C 点) 的挠度分别为

$$F_A = F(x=0) = \frac{ql}{2} - \frac{Fb^2}{l^2} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) \quad (8)$$

$$F_B = -F(x=l) = \frac{ql}{2} - \frac{Fa^2}{l^2} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \quad (9)$$

$$\omega_c = \frac{qa^2b^2}{24EI} - \frac{F}{3EI} \frac{a^3b^3}{(a+b)^3} \quad (10)$$

将井间煤柱及其上覆岩柱视为刚性体, 可得砾岩层岩梁 C 处的挠度为 0, 即 $\omega_c = 0$, 得到井间煤岩柱对上覆砾岩层支撑力为

$$F = \frac{ql^3}{8ab} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (8) (9), 最终可得两端固支中间铰支砾岩层岩梁 A 处与 B 处所受支反力为

$$F_A = \frac{ql}{2} - \frac{qlb}{8a} \left(1 + \frac{2a}{l}\right) \quad (12)$$

$$F_B = \frac{ql}{2} - \frac{qla}{8b} \left(1 + \frac{2b}{l}\right) \quad (13)$$

4.3 井间应力转移诱发冲击机制分析

4.3.1 23070 工作面垂直应力增量

若 23070 工作面或巷道发生冲击, 工作面或巷道煤体强度弱化, 冲击区域上覆岩体对上方砾岩层的支撑作用减弱, 故 F_B 降低。现考虑极限情况, 当 $F_B = 0$ 时, 即 B 端为悬臂状态, 此时“非对称 T 形”结构力学模型及边界条件如图 7 所示。

根据材料力学可知, 左侧工作面煤体对砾岩层岩

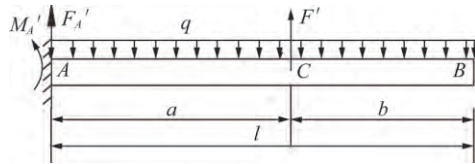


图 7 “非对称 T 形”右侧悬臂力学模型及边界条件

Fig. 7 Mechanical model and boundary conditions of right cantilever with “asymmetric T-Shape”

梁支反力 F'_A 和砾岩梁在井间煤柱处 (C 点) 的挠度分别为

$$F'_A = ql - F' \quad (14)$$

$$\omega_c = \frac{qa^2}{24EI}(a^2 + 6l^2 - 4al) - \frac{Fa^3}{3EI} \quad (15)$$

对于简化的井间刚形体煤岩柱, 由 $\omega_c = 0$, 得到井间煤岩柱对上覆砾岩层支撑力为

$$F' = \frac{q}{8a}(a^2 + 6l^2 - 4al) \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (14), 最终可得左端固支右端自由砾岩层岩梁 A 处所受支反力为

$$F'_A = \frac{q}{8a}(12al - a^2 - 6l^2) \quad (17)$$

21220 工作面发生冲击前后, 23070 工作面煤体垂直应力增量为

$$F'_A - F_A = \frac{q}{8a}(a^2 - ab - 5b^2) \quad (18)$$

根据 23070 和 21220 工作面实际回采情况, 21220 开切眼贯通时, 23070 已回采 619 m, 且两工作面日推进度较为接近, 因此 a_0 和 b_0 有

$$a_0 = b_0 + 619 \quad (19)$$

将式 (2) 代入式 (19) 得

$$a = b + 619 \quad (20)$$

将式 (20) 代入式 (18) 可得

$$F'_A - F_A = \frac{q}{8a}(-5b^2 + 619b + 383161) \quad (21)$$

对式 (21) 的二次函数分析可知:

(1) 21220 工作面上覆低位砾岩悬空长度 $0 < b < 345.56$ m 时, 即 21220 工作面推进长度 $0 < b_0 < 425.56$ m 时, $F'_A - F_A > 0$, 即 23070 工作面煤体垂直应力增加, 增大了 23070 工作面及巷道发生冲击的危险。结合表 2 2015 年 2 月至 2016 年 8 月期间 21220 工作面共回采 285.5 m, 满足上述范围区间。

(2) 21220 工作面低位砾岩悬空长度 $b = 61.9$ m 时, 即 $b_0 = 141.9$ m, 23070 工作面煤体垂直应力增量最大, 21220 工作面在该推进度前后一段范围内, 23070 工作面冲击危险性显著上升。结合表 2 21220 工作面回采初期 (2015 年 11 月至 2016 年 3 月) 推进

长度为 140.5 m, 该时期 23070 工作面冲击显现较为剧烈, 随 21220 工作面回采 (2016 年 4 月至 2016 年 8 月) 23070 工作面应力增量逐渐减小, 冲击显现强度与频度有所下降。

4.3.2 21220 工作面垂直应力增量

当 23070 工作面发生冲击, 极端情况假定“非对称 T 形结构” (图 6(b)) A 端悬臂而 B 端固支, 砾岩层岩梁 B 处所受的支反力为

$$F'_B = \frac{q}{8b}(12bl - b^2 - 6l^2) \quad (22)$$

23070 工作面发生冲击前后, 21220 工作面煤体垂直应力增量为

$$F'_B - F_B = \frac{q}{8b}(b^2 - ab - 5a^2) \quad (23)$$

由于 $a > b$, 显然 $F'_B - F_B < 0$, 即 21220 工作面煤体垂直应力减小, 冲击危险性降低, 说明 23070 工作面冲击难以诱导 21220 工作面发生冲击。

上述理论分析表明, 23070 工作面在 21220 工作面不同推进距离下发生冲击的强度及诱冲顺序与现场实际较为吻合。

5 应力转移诱冲效应数值模拟

为进一步弄清 23070 工作面和 21220 工作面回采期间井间煤柱、两工作面及其顶底板应力变化情况, 使用 FLAC^{3D} 模拟了两工作面回采过程工作面冲击前后垂直应力的变化, 模拟结果如图 8 所示。图 8(a) ~ (b) 表示两工作面的开采状态分别为: 23070 工作面累计回采 619 m, 21220 工作面开切眼贯通; 23070 工作面累计回采 669 m, 21220 工作面回采 50 m。这两种状态与实际开采基本一致。在图 8(b) 推进度下, 若工作面前方 50 m 范围内煤体发生冲击, 则该范围内煤体强度整体降低, 考虑极限情况, 冲击煤体完全破坏并失去承载能力, 可近似认为工作面前方 50 m 范围内的煤体被采出。表征 21220 和 23070 工作面前方 50 m 煤体发生冲击的模拟结果如图 8(c) 和 (d) 所示。

由图 8(a) 和 (b) 可知, 21220 工作面开切眼贯通后, 当两工作面同时回采 50 m 时, 21220 工作面煤体垂直应力由 50 MPa 上升至 80 MPa, 垂直应力的升高增大了 21220 工作面冲击危险性。对比分析图 8(b) 和 (c) 可知, 若 21220 工作面前方 50 m 范围内煤体发生冲击, 应力转移至 23070 工作面处, 导致煤体垂直应力有较小程度升高 (142 MPa 升至 145 MPa), 有可能诱发 23070 工作面冲击。对于图 8(b) 和 (d), 当 23070 工作面发生冲击, 21220 工作面煤体垂直应力

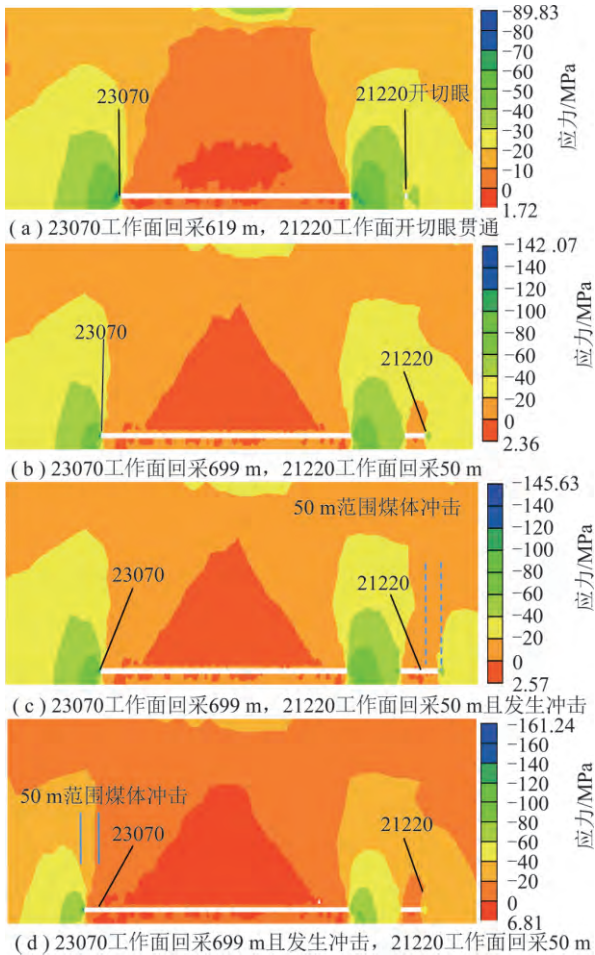


图8 两工作面回采过程中冲击前后垂直应力变化

Fig. 8 Changing of vertical stress before and after coal bump in mining process of two working faces

由 80 MPa 降低至 60 MPa,降低了该工作面发生冲击的可能性。上述分析表明,21220 工作面冲击能够造成 23070 工作面垂直应力升高,进而有可能诱发 23070 工作面冲击,反之则不成立,该现象与现场实际较为吻合。

6 矿井群井间冲击地压控制技术

目前我国煤矿冲击地压防治措施主要包括:优化开拓布置、保护层开采、煤层预注水、无煤柱开采等区域防范方法以及煤层高压注水(爆破)卸载、大孔径钻孔卸压、坚硬顶板超前预裂(水压致裂和爆破致裂)、断底爆破、底板切槽等局部解危方法。众多方法均是通过改变煤岩体自身结构和力学性质,消除煤岩体积聚的应力和弹性能。

为防止矿井群开采相邻矿井两个工作面回采期间覆岩活动异常和 F16 断层活化导致的煤体高应力集中,在 23070 工作面和 21220 工作面的超前工作面 300 m 范围内实施大直径钻孔卸压,在工作面及上下巷实施卸压爆破和煤层注水等措施。这些措施虽一

定程度上消除了煤体应力与能量积聚,但两工作面同时回采过程中仍发生多次较剧烈的冲击显现,为防止巨厚砾岩作用导致应力转移诱发井间工作面冲击,可采取基于弱化井间“T形”覆岩结构的“弱链增耗”防冲技术和工作面协调开采防冲技术,如图 9 所示。

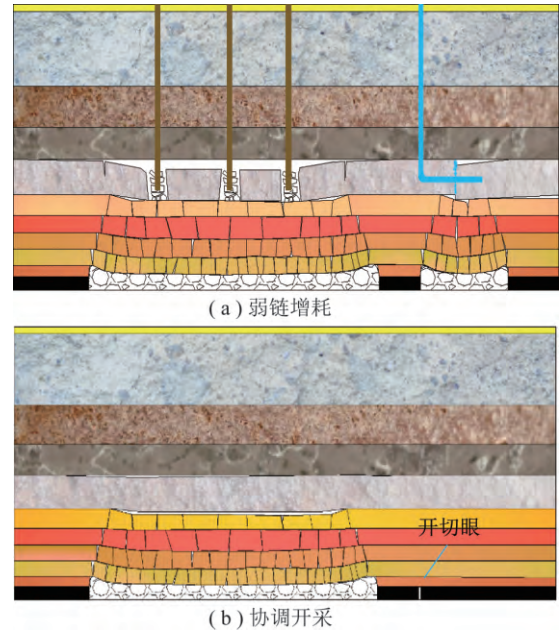


图9 矿井群井间冲击地压控制技术示意

Fig. 9 Sketch map of coal bump controlling with chain-weakening and consumption-increasing technique between two adjacent coal mines

(1) “弱链增耗”防冲技术。

井间“弱链增耗”防冲技术是对低位巨厚砾岩实施高能爆破或水压致裂,一方面削弱 23070 和 21220 工作面之间低位砾岩连续性,弱化矿井间高应力传递的结构链,避免因 21220 工作面冲击导致应力转移而诱发 23070 工作面及上下巷压力升高;另一方面,爆破区域岩体碎裂程度增高,形成的垫层能够缓和破碎区域上方巨厚砾岩移动产生的动载作用,增加能量传递过程中的损耗,破坏或弱化冲击地压发生的应力和能量传递条件,从而达到防治井间工作面冲击地压的目的。

(2) 协调开采防冲技术。

井间相邻工作面协调开采防冲技术是对两工作面回采设计进行优化,即率先回采井间一侧工作面,当其充分采动后,在井间另一侧布置工作面并正常回采。滞后的回采工作面发生冲击后,虽仍可能造成另一侧工作面终采线处煤体应力升高而诱发冲击,但由于该侧工作面作业人员、采煤及支护设备已安全撤出,冲击造成的影响较小。该技术通过避免井间相邻两工作面同时布置,从而移除冲击地压灾害作用对象,达到降低冲击地压灾害损失的目的。

7 结 论

(1) 在大型地质体控制的矿井群开采条件下, 相邻矿井工作面会因一侧工作面的回采而导致另一侧工作面的应力增加, 发生应力转移甚至诱发冲击地压。

(2) 义马矿区 F16 大型逆冲断层活化运动和巨厚砾岩的整体控制作用为冲击地压孕灾提供了力源条件, 巨厚砾岩控制下相邻矿井间可能发生诱发冲击现象, 滞后回采的 21220 工作面煤体冲击失稳导致井间煤柱两侧工作面应力重新分布, 应力转移至井间煤柱和 23070 工作面, 诱发 23070 工作面冲击地压。

(3) 井间开采扰动导致应力转移并诱发冲击地压与滞后回采工作面的初始冲击强度及推进长度具有密切关系, 21220 工作面回采期间冲击显现越剧烈或推进长度越短, 诱发 23070 工作面冲击显现就越剧烈。

(4) 提出以弱化矿井间高应力传递结构链为核心的井间“弱链增耗”防冲技术和避免井间相邻工作面同时布置的协调开采防冲技术, 破坏或弱化冲击地压发生的应力和能量传递条件, 从而有效防止冲击地压的发生。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 翟新献, 孙乐乾, 涂兴子, 等. 耿村煤矿综放开采覆岩移动和矿压显现规律研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 1-8.
ZHAI Xinxian, SUN Leqian, XU Xingzi, et al. Overlying strata movement deformation and strata pressure behavior of fully mechanized mining with sublevel caving in Gengcun coal mine [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2018, 37(4): 1-8.
- [3] 南华, 李志勇. 巨厚煤层冲击地压的防治研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 26(4): 370-376.
NAN Hua, LI Zhiyong. Research on the prevention of coal bumping tendency in mining extremely thick coal seam [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2007, 26(4): 370-376.
- [4] 张鑫, 乔伟, 雷利剑, 等. 综放开采覆岩离层形成机理 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 342-349.
ZHANG Xin, QIAO Wei, LEI Lijian, et al. Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top coal caving [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 342-349.
- [5] 张德峰, 陈勇. 综放工作面过断层顶板活动规律研究与应用 [J]. 中国煤炭, 2013, 39(4): 56-59.
ZHANG Defeng, CHEN Yong. Research and application of roof activity regulation when fully-mechanized caving face passing through fault [J]. China Coal, 2013, 39(4): 56-59.
- [6] 闫浩, 张吉雄, 张强, 等. 巨厚火成岩下采动覆岩应力场-裂隙场耦合演化机制 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2173-2179.
YAN Hao, ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, et al. Coupling evolution mechanism of mining-induced overlying strata stress field and crack field under extremely thick igneous rock [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2173-2179.
- [7] 轩大洋, 许家林, 朱卫兵, 等. 注浆充填控制巨厚火成岩下动力灾害的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1967-1974.
XUAN Dayang, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Field test on dynamic disaster control by grouting below extremely thick igneous rock [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1967-1974.
- [8] 窦林名, 贺虎. 煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 453-460.
DOU Linming, HE Hu. Study of OX-F-T spatial structure evolution of overlying strata in coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 453-460.
- [9] 姜福兴. 采场覆岩空间结构观点及其应用研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 30-33.
JIANG Fuxing. View point of spatial structures of overlying strata and its application in coal mine [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(1): 30-33.
- [10] 魏全德, 姜福兴, 姚顺利, 等. 特厚煤层下山煤柱区巷道冲击危险性实时监测预警研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 530-536.
WEI Quande, JIANG Fuxing, YAO Shunli, et al. Real-time monitoring and early warning of rock burst risk in dip coal pillar area of extra-thick coal seam [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(4): 530-536.
- [11] 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.
- [12] 蒋金泉, 王普, 武泉林, 等. 上覆高位岩浆岩下离层空间的演化规律及其预测 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1769-1779.
JIANG Jinquan, WANG Pu, WU Quanlin, et al. Evolution laws and prediction of separated stratum space under overlying high-position magmatic rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1769-1779.
- [13] 蒋金泉, 张培鹏, 秦广鹏, 等. 高位主关键层破断失稳及微震活动分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3567-3575.
JIANG Jinquan, ZHANG Peipeng, QIN Guangpeng, et al. Analysis of destabilized fracture and microseismic activity of high-located main key strata [J]. Rock and Soil mechanics, 2015, 36(12): 3567-3575.
- [14] 马富武, 蒋金泉, 武泉林, 等. 巨厚岩浆岩下覆岩运动规律及其致灾分析 [J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(6): 1-4.

- MA Fuwu ,JIANG Jinqun ,WU Quanlin ,et al. Movement rule of overlying strata under extra-thick magmatite and its disaster-causing analysis[J]. Mining Safety and Environmental Protection ,2015 ,42(6) : 1-4.
- [15] LIU Chuang ,LI Huamin ,HANI Mitri ,et al. Voussoir beam model for lower strong roof strata movement in longwall mining-Case study[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering ,2017(9) : 1171-1176.
- [16] 许胜铭 ,李松营 ,李德翔 ,等.义马煤田冲击地压发生的地质规律[J].煤炭学报 ,2015 ,40(9) : 2015-2020.
XU Shengming ,LI Songying ,LI Dexiang ,et al. Geological laws of rock burst occurrence in Yima coalfield [J]. Journal of China Coal Society ,2015 ,40(9) : 2015-2020.
- [17] 史俊伟 ,孟祥瑞 ,陈章良 ,等.巨厚砾岩下冲击地压发生机理及加固技术研究[J].中国安全生产科学技术 ,2017 ,13(12) : 118-124.
SHI Junwei ,MENG Xiangrui ,CHEN Zhangliang ,et al. Study on occurrence mechanism and reinforcement technology of rock burst under super thick conglomerate [J]. Journal of Safety Science and Technology ,2017 ,13(12) : 118-124.
- [18] 庞龙龙 ,徐学锋 ,司亮 ,等.开采上保护层对巨厚砾岩诱发冲击矿压的减冲机制分析[J].岩土力学 ,2016 ,37(S2) : 120-128.
PANG Longlong ,XU Xuefeng ,SI Liang ,et al. Analysis of prevention mechanism of upper protective seam mining on rock rockburst induced by thick conglomerate [J]. Rock and Soil Mechanics ,2016 ,37(S2) : 120-128.
- [19] 张宗文 ,安伯义 ,刘金亮.千米深井强冲击倾向煤层的冲击地压防治技术[J].煤炭科学技术 ,2010 ,38(7) : 17-20.
ZHANG Zongwen ,AN Boyi ,LIU Jinliang. Prevention and control technology of seam bumping from seam with high potential bumping in mine with depth over 1 000 m [J]. Coal Science and Technology ,2010 ,38(7) : 17-20.
- [20] 冀贞文 ,白光超.深部巨厚砾岩层下高应力煤柱冲击地压防治技术[J].煤炭科学技术 ,2014 ,42(11) : 5-7 ,25.
JI Zhenwen ,BAI Guangchao. Technology of bump prevention to high stress coal pillar under deep ultra thick conglomerate stratum [J]. Coal Science and Technology ,2014 ,42(11) : 5-7 ,25.
- [21] 齐庆新 ,潘一山 ,舒龙勇 ,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术构架[J].煤炭学报 ,2018 ,43(7) : 1801-1810.
QI Qingxin ,PAN Yishan ,SHU Longyong ,et al. Theory and technology framework of prevention and control with different sources in multi-scales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines [J]. Journal of China Coal Society ,2018 ,43(7) : 1801-1810.