



移动扫码阅读

武少国,赵 乾,刘 涛.防冲击煤柱宽度变化期间微震活动规律研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):88-94. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.010
WU Shaoguo,ZHAO Qian,LIU Tao.Study on microseismic activity law during change of anti-rockburst coal pillar width[J].Coal Science and Technology,2020,48(12):88-94. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.010

防冲击煤柱宽度变化期间微震活动规律研究

武少国,赵 乾,刘 涛

(中天合创能源有限责任公司 门克庆煤矿,内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要:为了研究呼吉尔特矿区冲击地压矿井煤柱宽度转换过渡初期微震事件时空活动规律,以门克庆煤矿 3102 工作面原宽 35 m 煤柱向宽 120 m 防冲煤柱过渡为背景,确定了宽 120 m 煤柱的防冲有效性并提出了过渡期间冲击地压综合防治措施。研究表明:受坚硬顶板、煤柱宽度变化的影响,煤柱宽度过渡期间大能量微震事件频发,但宽 120 m 防冲煤柱对顶板的承载作用能对本工作面及相邻工作面采空区进行阻隔,煤柱宽度过渡期内的微震事件主要集中于 3102 工作面内并略向煤柱区域偏移;对过渡期内的微震事件分析发现,大能量微震事件($\geq 10^5$ J)分布高度呈下降趋势,由高程+650 m 逐渐下移至+620 m,从中高位的粗砂岩顶板转移至中低位的中砂岩顶板;高能量微震事件($10^3 \sim 10^5$ J)分布高度由高程+615 m 上移至高程+625 m,中低位的中砂岩顶板活动加剧,震源高度呈上升趋势;低能量微震事件($< 10^3$ J)分布高度由高程+615 m 下移至+603 m 左右,小能量震动逐渐向煤层转移;采用震源机制解对煤柱过渡期内的 9 次大能量事件的破裂方式、角度以及破裂半径进行分析,推测工作面震源连接线可能为一条弧形破裂带。提出了工作面煤柱宽度过渡期间的冲击地压综合防治措施,为其他类似条件下的矿井生产提供了经验。

关键词:厚硬顶板;煤柱宽度;冲击地压;微震监测

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)12-0088-7

Study on microseismic activity law during change of anti-rockburst coal pillar width

WU Shaoguo,ZHAO Qian,LIU Tao

(Menkeqing Coal Mine,Zhongtian Hechuang Energy Company with Limited Liability,Ordos 017000,China)

Abstract: In order to study the temporal and spatial activity law of microseismic events in the initial stage of coal pillar transformation transition in Hujilte Mining Area, taking the original 35 m coal pillar to 120 m anti scour coal pillar in No.3102 working face of menkeqing coal mine as the background, the anti-rockburst effectiveness of 120 m coal pillar is determined, and the comprehensive prevention and control measures of rock burst during the transition period are proposed. The results show that: under the influence of the width change of hard roof and coal pillar, large energy microseismic events occur frequently during the transition period of coal pillar width, but the bearing effect of 120 m anti-rockburst coal pillar on the roof can block the goaf of this working face and adjacent working face. The microseismic events in the transition period of coal pillar width mainly concentrated in No.3102 working face and slightly shifted to the coal pillar area. It is found that the distribution height of high-energy microseismic events ($\geq 10^5$ J) shows a downward trend from +650 m to +620 m, and the distribution height of high-energy microseismic events ($10^3 \sim 10^5$ J) increases from +615 m to +625 m, and the activity of medium low-level medium sandstone roof is intensified and the focal height is up. The results show that the distribution height of low-energy microseismic events ($< 10^3$ J) decreases from +615 m to +603 m, and the small energy vibration gradually transfers to the coal seam; the fracture mode, angle and fracture radius of nine high-energy events in the transition period of coal pillar are analyzed by focal mechanism solution, and it is inferred that there may be an arc-shaped fracture zone in the focal connecting line of working face. The comprehensive prevention and control measures of rock burst during the transition period of coal pillar in working face are put forward, which provides experience for mine production under other similar conditions.

Key words: thick and hard roof; coal pillar width; rockburst; microseismic monitoring

0 引 言

冲击地压是煤炭开采过程中较为典型的一类动力灾害,极易造成采场支架、设备、井巷破坏,严重时会造成现场作业人员伤亡^[1]。按照诱冲主控因素的不同,冲击地压可分为煤柱型、坚硬顶板型、褶曲型和断层型 4 类。其中坚硬顶板是指在煤矿开采中,开采煤层上覆的具有厚度大、强度高、自承能力强、整体性强等特点的坚硬的砾岩、砂岩或石灰岩等岩层,上述岩层在采空区上方极易形成大面积悬顶,且短期内不易自然垮落^[2-4]。顶板岩层结构,特别是煤层上方坚硬厚层顶板是影响冲击地压发生的主要因素之一^[5],其主要原因是坚硬厚层顶板结构容易积聚大量的弹性能^[6]。区段护巷煤柱作为一种有效的护巷方法被多数现场使用,目前对于区段煤柱的留设参数并无可靠计算手段,主要依靠现场经验来获取,在我国近年来受冲击地压灾害威胁的新开发矿区,如内蒙古呼吉尔特矿区,区段煤柱适用性通常较差^[7]。不合理的煤柱尺寸极易引起巷道应力集中,受采掘扰动、爆破、构造或坚硬顶板破断影响极易诱发冲击地压,该类冲击地压破坏形式主要为煤柱的突然失稳与巷道底板的瞬间鼓起^[8-9]。文献[10-11]对采场覆岩边界状态进行细化研究,并根据覆岩运移演化规律将其空间形态分为“OX”、“F”、“T”形 3 类。文献[12-13]对采空区较多的情况下顶板群结构的破断失稳规律进行了研究,发现工作面上方顶板群结构破断的失稳率与工作面支架阻力大小具有相关性,进一步验证了工作面坚硬厚层顶板的失稳规律。谢广祥等^[14]建立了煤柱弹塑性极限平衡力学模型,对煤柱支承压力峰值分布规律进行了理论计算,为确定综放回采巷道护巷煤柱的合理尺寸提供了理论计算方法。上述研究内容明确煤柱冲击的发生不仅与其应力状态有关,同时也受覆岩结构特征的影响,但对多层坚硬顶板宽煤柱冲击地压工作面煤柱宽度过渡期间规律的研究尚未涉及。

门克庆煤矿是内蒙古呼吉尔特矿区的首个冲击地压矿井,其大埋深、多层厚顶板及宽(一般在 30~35 m)煤柱条件在呼吉尔特矿区具有典型性。门克庆煤矿 3102 工作面有煤体硬、顶板厚度大、煤柱留设宽度不合理等特点。在实际生产过程中,3102 工作面多次发生冲击动力显现事件,为保证工作面安全生产,自 2018 年 4 月 8 日停产以来,重新掘进 3102 工作面的二号回风巷,将煤柱宽度由 35 m 改为 120 m,并于 2019 年 1 月 25 日恢复生产,由于当

前 3102 工作面煤柱处于 35~120 m 过渡区域,顶板活动不规律,大能量事件频发,因此,对 3102 工作面恢复生产期间的微震活动规律进行研究,并提出相应综合防治方案,为 3102 工作面后期安全生产提供依据,并为周边相似地质条件矿井回采积累经验。

1 工程概况

1.1 生产地质条件

11-3102 工作面位于门克庆井田西南侧,东侧为平行布设的 11-3103 工作面,南侧邻近井田边界,北侧为 3-1 煤辅助回风大巷,西侧为 11-3101 工作面采空区,3102 工作面布置如图 1 所示。11-3102 工作面所采煤层为侏罗系中统延安组 3-1 煤层,煤层结构整体简单,内生裂隙较发育,常为黄铁矿及方解石薄膜充填,煤层中见黄铁矿结核。煤厚 1.72~5.30 m,平均 4.75 m,属厚煤层;煤层赋存稳定,总体北部煤厚大于南部。煤层倾角 1°~4°,平均 2°,起伏较小,为近水平煤层。

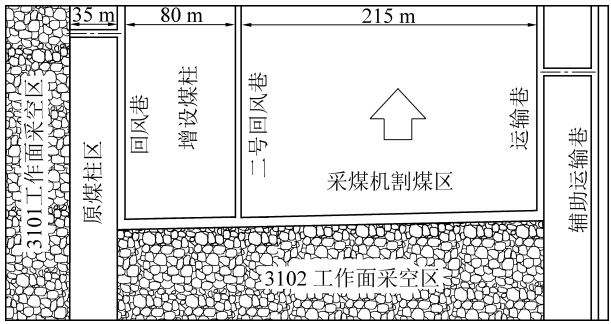


图 1 3102 工作面布置

Fig.1 Layout of No.3102 working face

3102 工作面所采 3-1 煤层直接顶为灰色的粉砂岩,平均厚度 2.26 m;基本顶为灰白色的中细砂岩,岩性较致密,平均厚度 19.79 m。距离 3-1 煤最近的亚关键层为厚 39.56 m 粗粒砂岩,3102 工作面回采期间,大能量事件主要集中于粗砂岩及中砂岩层,工作面综合柱状如图 2 所示。

1.2 煤柱破坏特征

3102 工作面作为矿井 3-1 煤南翼相邻工作面接续的第 2 个工作面,在工作面回采期间回风巷(紧邻宽 35 m 煤柱)超前区域压力显现明显,工作面割煤期间超前 100 m 范围围炮频繁,局部显现情况多集中超前 40 m 范围内,最大影响范围至超前 380 m。至开切眼 200~930 m,累计发生了 23 次局部冲击显现,不同程度地出现了帮鼓、顶板下沉、单体折损、煤块突出、底鼓等情形,其中“4·8”冲击显现事件影响最为严重。

2018 年 4 月 8 日早班,工作面停产 5 h,3102

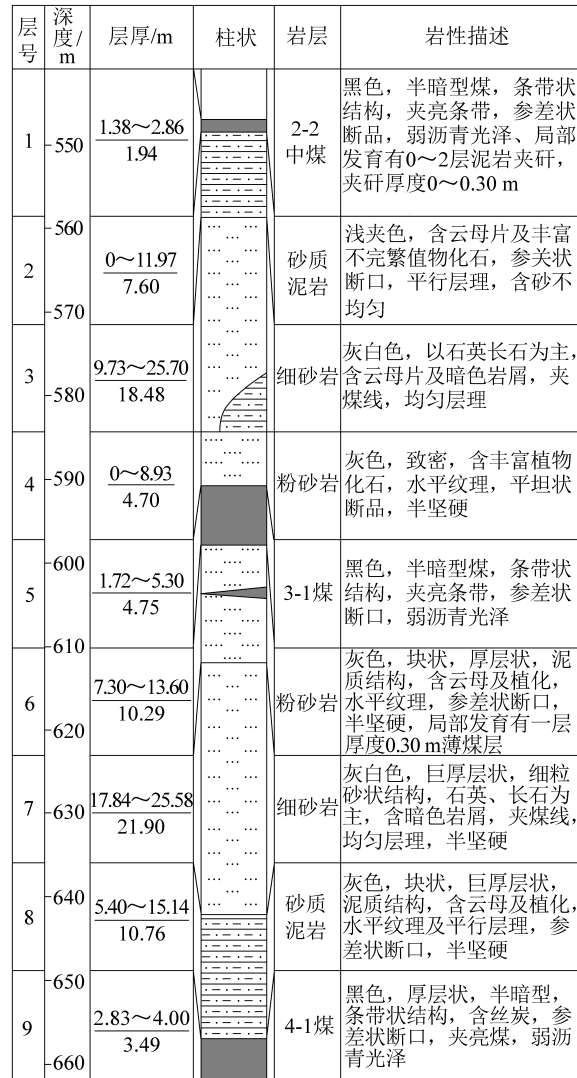


图 2 3102 工作面综合柱状

Fig.2 Oprehensive cylindrcial of No.3102 working face

工作面回风巷附近发生冲击显现,震源位于 3102 工作面机尾前约 150 m,震源标高+675 m(煤层顶板上 方约 71 m),能量为 3.3×10^7 J。冲击事件发生前,已 组织工作面人员撤离,未造成人员伤亡。现场勘察 发现工作面机尾回风巷口变形严重、出口堵塞,机尾 4 台端头支架前大量煤体堆积,机尾底板鼓起约 1.5 m;回风巷超前工作面 90 m 区段因底板鼓起巷道整 体堵塞、煤柱侧帮部煤块抛出,最大体积约 1 m³,煤 柱结构摧垮后,巷道顶板倾斜下沉约 0.4 m。

1.3 恢复生产期间大能量事件显现情况

2018 年 10 月 18 日至 2019 年 3 月 6 日,3102 工作面恢复生产共回采约 140 m,3102 工作面区域 共发生 10⁵ J 以上大能量微震事件 9 次,恢复生产前 期中高位粗砂岩、恢复生产后期中低位中砂岩顶板 高强度微震事件频发,但现场无冲击显现、无巷道变 形及支护破坏情况。

9 次大能量微震事件,平面上有 3 次分布在工作 面前方,6 次分布在采空区;剖面上有 3 次分布在 顶板较高位粗粒砂岩,6 次分布在中低位中砂岩层 位。事件详细信息见表 1。

2 恢复生产期间微震活动规律分析

2.1 3102 工作面微震数据整体分析

对 3102 工作面恢复生产期间的微震数据进行 统计,统计时间为 2019 年 1 月 25 日—2019 年 3 月 6 日,3102 工作面微震数据见表 2,共发生各种能级 震动 216 次,并主要以低于 10³ J 的小能量事件为主 (表 2)。

表 1 3102 工作面大能量事件统计

Table 1 Statistical table of large energy microseismic events in No.3102 working face

日期(年-月-日)	时刻	能量/10 ⁵ J	标高/m	回采线位置/m	事件与回采线位置关系	回采线间距/m	时间间隔/d
2018-10-29	22:25	5.89	+617	941	-13 m	—	11(10 月 18 日复采)
2019-01-27	07:28	20.70	+650	950	-65 m	9	3
2019-02-07	21:10	11.00	+644	991	-76 m	41	12
2019-02-15	18:05	10.80	+646	1 015	+20 m	24	8
2019-02-22	19:54	14.60	+626	1 041	-66 m	26	7
2019-02-25	19:46	15.20	+633	1 055	+5 m	14	3
2019-02-27	08:15	15.00	+621	1 065	+23 m	10	2
2019-03-03	14:32	6.54	+622	1 076	-23 m	11	4
2019-03-06	00:27	3.67	+620	1 082	-18 m	6	3

注:回采线位置即回采线至开切眼距离;事件与回采线位置关系为正即在回采线前方,反之而后方。

1 月 25 日恢复生产至 3 月 6 日停止生产期间, 3102 工作面的微震定位如图 3 所示。

由图 3 可得,恢复生产期间的微震事件主要集 中于 3102 工作面内,并略微向宽 120 m 煤柱区域偏

移。3102 工作面后方采空区存在不同能量的微震 事件,基本集中于宽 35 m 煤柱附近,采空区内微震 事件最远距离工作面约 900 m,说明 3102 工作面后 方采空区的宽 35 m 煤柱及顶板岩层活动尚未稳定;

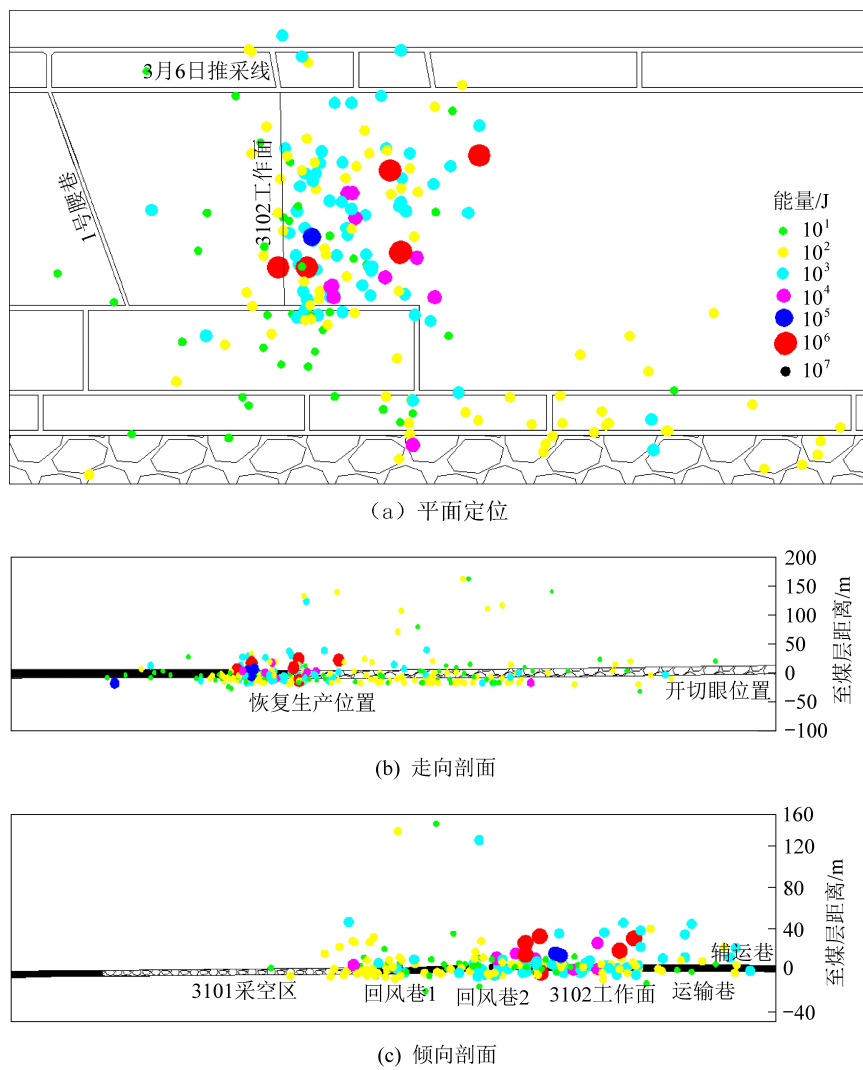


图3 3102工作面恢复生产期间微震定位

Fig.3 Microseismic location during restoration of No.3102 working face

表 2 3102 工作面微震数据

Table 2 Microseismic data of No.3102 working faces

能量等级	>10 ⁵ J	10 ⁴ ~10 ⁵ J	10 ³ ~10 ⁴ J	<10 ³ J
数量	8	9	64	135
占比/%	3.70	4.17	29.63	62.50

原宽 35 m 煤柱区域距离工作面越近,煤柱附近微震数量越多,越接近工作面的煤柱区域,受工作面扰动越大,微震个数越多。

从震源高度上来看,除极个别微震高度约在煤层上方 150 m 左右,大部分微震事件的高度主要集中在煤层上方0~50 m,说明 3102 恢复生产后较“4·8”大能量事件之前相比,工作面及采空区的顶板活动主要以中低位顶板运动为主,上方 50~200 m 的顶板活动有所降低。

从微震的倾向剖面来看,3102 工作面恢复生产期间,能量 10³~10⁵ J 的微震事件基本处于 3102 工

作面内,且平面分布较为均匀,并略微向宽 120 m 煤柱区域偏移。

2.2 3102 工作面大能量事件震源机制分析

将 3102 工作面恢复生产后 9 次大能量事件进行震源机制^[15-16]解分析,分析大能量事件的破裂方式、角度以及破裂半径。大能量事件震源机制解统计见表 3,从震源机制分析结果来看,大能量事件的震源以张拉破裂形式为主^[17],结合震源定位,推断粗砂岩、中粒砂岩 2 层厚硬顶板破断是引发大能量矿震的主因。

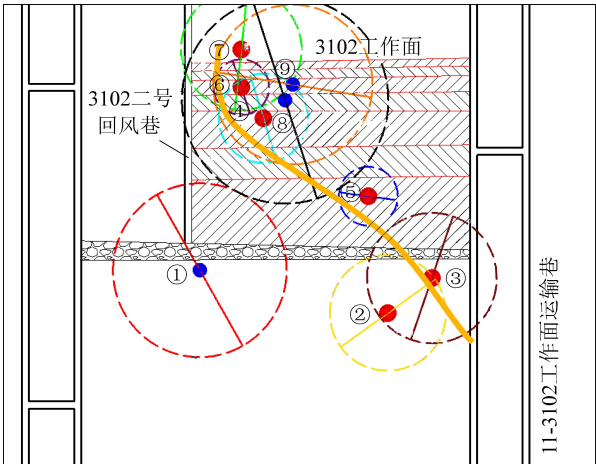
9 次大能量震动都集中在工作面顶板,且①、②、③和⑤号震动发生在工作面后方,④、⑥、⑦号震动发生在工作面前方。由图 4 所示,④、⑤、⑥、⑦号震动事件在破裂方向大致成一条弧线,且④、⑤、⑥号震动事件发生于工作面前方,推测在该区域沿着该弧线可能存在一条弧形破裂带^[18]。3102 工作面宽度缩小后煤柱宽度为 120 m,停产期间逐渐稳定

的顶板覆岩运动由于开采扰动重新开始运动,此时由于煤柱宽度变化导致的应力集中作用以及恢复生产初期推进速度快可能导致顶板大面积悬顶,根据顶板“板弯曲效应”^[19-20],最有可能从远离宽120 m煤柱的区域开始破断,造成大能量事件①、②、③,此后随着工作面逐渐推进,由于弧形破裂带的存在以及顶板所受的弯矩作用,震动事件分布大致成如图4所示的弧线。

表3 大能量事件震源机制解统计
Table 3 Focal mechanism solution statistics of high energy events

日期	破裂形式	能量/ 10 ⁵ J	震源半 径/m	煤层上方 高度/m	至工作面 距离/m
2018/10/29	张拉破裂-扩	5.89	66.95	13	-13 m
2019/01/27	张拉破裂-扩	20.70	44.73	38	-65 m
2019/02/07	张拉破裂-扩	11.00	50.10	40	-76 m
2019/02/15	张拉破裂-扩	11.00	34.38	45	+20 m
2019/02/22	张拉破裂-缩	15.00	22.70	26	-66 m
2019/02/25	张拉破裂-扩	15.00	21.41	29	+5 m
2019/02/27	张拉破裂-扩	15.00	46.53	17	+23 m
2019/03/03	张拉破裂-缩	6.54	79.64	12	-23 m
2019/03/06	剪切破裂	3.67	61.43	10	-18 m

注:至工作面距离为正即在工作面前方,反之而后方



①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨—按日期先后排序的大能量事件

图4 大能量事件定位及震源机制

Fig.4 Location of large energy microseismic events and focal mechanism solution

2.3 门克庆煤矿微震高度分析

3102工作面恢复生产后的每日的平均震源高度,不同能量等级的震源高度统计如图5所示,统计时间为2019年1月25日—2019年3月6日。从图6可以看出3102工作面恢复生产期间,整体震源平均标高基本无变化;能量10⁵ J以上的震源平均标高

呈下降趋势,由+650 m逐渐下降至+620 m,从中高位的粗砂岩顶板转移至中低位的中砂岩顶板;能量10³~10⁵ J的震源标高由+615 m增长至+625 m,说明随3102工作面回采对顶板的扰动加剧,中低位的中砂岩顶板活动加剧,震源标高呈上升趋势;能量小于10³ J的震源标高由+615 m下降至+603 m左右,小能量震动逐渐向煤层转移,说明随着工作面向前推进,煤体内受超前支承压力的影响,煤体应力升高,更多的小能量震动发生在煤体内。

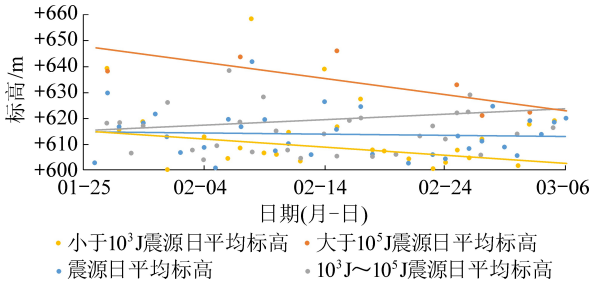


图5 3102工作面恢复生产期间微震标高统计

Fig.5 Statistical of microseismic height during restoration of No.3102 working face

3 恢复生产后防治措施

3.1 煤层大直径钻孔卸压方案

根据对小能量微震事件的震源高度分析,低能量的震动逐渐由中低位顶板转移至3-1煤层,说明当前3-1煤体内应力集中较为明显,因此,在超前3102工作面150 m以内的大直径卸压孔之间补大直径卸压孔,孔直径取150 mm,将原有孔间距1.50 m调整为0.75 m,孔深20 m,垂直于煤壁布置,距离底板1.2 m,水平布置,如图6所示。

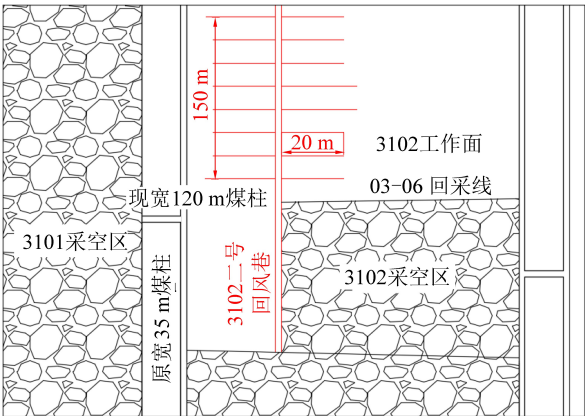


图6 3102工作面大直径卸压孔示意

Fig.6 Diagram of large diameter pressure relief hole in No.3102 working face

3.2 顶板深浅孔爆破方案

考虑到前期大能量震动主要集中于中高位粗砂岩顶板,后期大能量震动主要集中于中低位中砂岩,

为减小工作面上方中砂岩及粗砂岩对工作面动载显现的影响,采用深孔断顶爆破的方法,超前预裂顶板,利用矿山压力促进顶板自由跨落,以达到降低强矿压显现强度的目的。由于前期对 2 号回风巷、主运巷顶板已进行深孔爆破预裂处理,所以在恢复生产前对 3102 工作面 2 号回风巷、主运巷生产帮侧每组补充 2 个顶板爆破孔,钻孔与煤层层面夹角分别为 30°、60°,钻孔深度分别为 70、35 m,装药长度分别为 28、20 m,孔径均为 75 mm,间距为 20 m,与前期顶板爆破孔间隔布置,现场施工时,为确保顶板预裂效果,尽量保证钻孔垂直煤壁施工。

考虑到微震事件集中在 3102 工作面 2 号回风巷侧,其附近煤岩体内应力水平较高,因此为确保采空区顶板垮落充分,减小悬顶对回采的影响,在 2 号回风巷煤柱帮侧每组设计布置 1 个走向顶板爆破孔,孔径为 75 mm,爆破孔与煤层层面夹角为 60°,

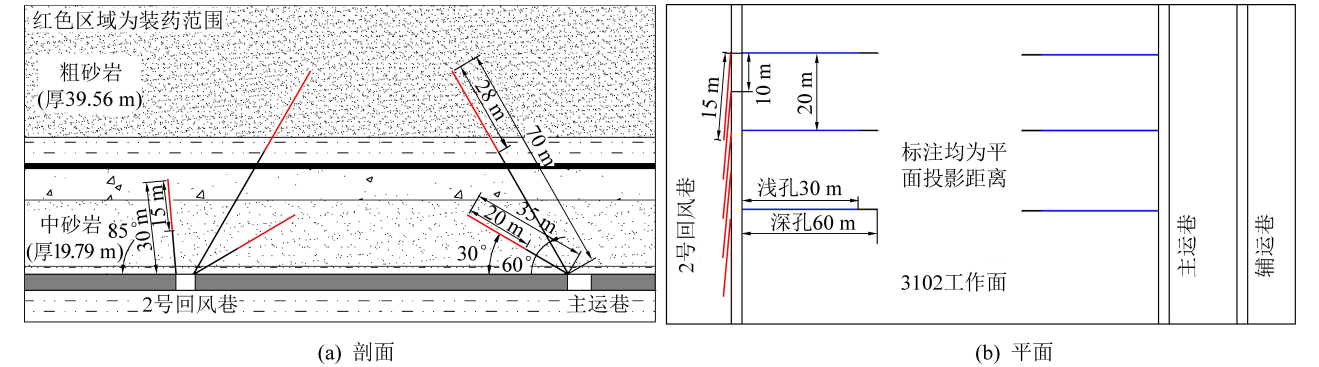


图 7 区段巷道顶板爆破孔

Fig.7 Roof blasting holes in tail entry and head entry

3.3 生产速度控制

考虑到 3102 工作面的 9 次大能量事件中,有 4 次发生在工作面停产后恢复生产阶段,因此,工作面的生产速度对大能量事件显现起到重要作用。

1) 工作面恢复生产时回采速度控制。对于 3102 工作面二次恢复生产,应当严格控制工作面的回采速度,恢复生产当日进刀数应当控制在 1 刀,次日增加至 2 刀,然后以每日 2 刀的速度匀速生产,等待 1~2 周后矿压显现规律稳定,没有出现大能事件,可逐步增加至 4 刀/d,稳定生产强度,等待推进过 3 月 6 日回采线前 150 m 以后,矿压显现规律稳定后,可再次进行加速。

2) 工作面停止生产回采速度控制。3102 工作面生产期间如遇到不可避免的问题需要停产,应当采取“缓刹车”的方式停产,回采速度每日降 1 刀,当回采速度降至 2 刀/d 时,稳定生产 3~4 d 后,未出现大能量事件,再次降速至停产。

钻孔方位与巷道夹角为 5°,钻孔深度为 30 m,装药长度为 15 m,间距 10 m。煤柱帮、回采帮爆破孔装药参数见表 4。具体钻孔布置如图 7 所示。为保证深浅孔爆破的效果,现场施工参数应严格按照方案执行,确保装药量能达到设计要求的 3 kg/m;同时应加强现场施工监测,保证钻孔深度等参数能满足设计要求。

表 4 爆破孔装药参数

Table 4 Parameters of blasting hole

钻孔类型	回采帮深孔	回采帮浅孔	煤柱帮钻孔
钻孔深度/m	70	35	30
钻孔水平倾角/(°)	60	30	60
钻孔方位角/(°)	90	90	185
装药长度/m	28	20	15
封孔长度/m	42	15	15
装药量/kg	84	60	45

4 结 论

1) 根据 3102 工作面的微震活动分析,大能量震动集中于 3102 工作面,说明调整后的宽 120 m 煤柱逐步发挥承载作用,能对 3101 工作面采空区和 3102 工作面采空区起到阻隔作用。

2) 根据 3102 工作面微震事件的高度分析,能量 10⁵ J 以上的震源平均标高呈下降趋势,由 +650 m 逐渐下降至 +620 m,从中高位的粗砂岩顶板转移至中低位的中砂岩顶板;能量 10³~10⁵ J 的震源标高由 +615 m 上升至 +625 m,中低位的中砂岩顶板活动加剧;能量小于 10³ J 的震源标高由 +615 m 下降至 +603 m 左右,小能量震动逐渐向煤层转移,煤体内应力升高,更多的小能量震动发生在煤体内。

3) 根据对 3102 工作面恢复生产期间的微震活动规律,提出包含煤层的大直径卸压钻孔,顶板的深浅孔爆破及工作面回采速度相结合的消费降载的综合防治措施。

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] 牛广军. 坚硬顶板综采工作面矿压显现规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.

[3] 孔维锋.坚硬顶板条件下采动岩体能量分布规律与矿压显现特征[J].煤矿安全,2017,48(9):194-196,200.
KONG Weifeng. Distribution laws of energy distribution and characteristics of strata behaviors in hard roof [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9): 194-196, 200.

[4] 汤建泉. 坚硬顶板条件冲击地压发生机理及控制对策[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2016.

[5] 邹德蕴,姜福兴.煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J].煤炭学报,2004,29(2):159-163.
ZOU Deyun, JIANG Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 159-163.

[6] 李新元,马念杰,钟亚平.坚硬顶板断裂过程中弹性能量积聚与释放的分布规律[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1): 2786-2793.
LI Xinyuan, MA Nianjie, ZHONG Yaping. Storage and release regular of elastic energy distribution in tight roof fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (S1): 2786-2793.

[7] 刘志刚. 呼吉尔特深部矿区坚硬顶板宽煤柱采场爆破减压降冲原理与实践[D]. 徐州:中国矿业大学, 2018.

[8] 李振雷,窦林名,蔡武.深部厚煤层断层煤柱型冲击地压机理研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):333-342.
LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (2): 333-342.

[9] 潘岳,王志强.狭窄煤柱冲击地压的折迭突变模型[J].岩土力学,2004,25(1):23-30.
PAN Yue, WANG Zhiqiang. Fold catastrophe model of rockburst in narrow coal pillar [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 23-30.

[10] 贺虎,窦林名,巩思园.覆岩关键层运动诱发冲击的规律研究[J].岩土工程学报,2010,32(8):1260-1265.
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan. Rock burst rules induced by cracking of overlying key stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 32(8): 1260-1265.

[11] 曹安业,朱亮亮,李付臣.厚硬岩层下孤岛工作面开采“T”型

覆岩结构与动压演化特征[J].煤炭学报,2014,39(2):328-335.
CAO Anye, ZHU Liangliang, LI Fuchen. Characteristics of T-type overburden structure and tremor activity in isolated face mining under thick-hard strata [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39 (2): 328-335.

[12] 刘长友,杨敬轩,于斌.多采空区下坚硬厚层破断顶板群结构的失稳规律[J].煤炭学报,2014,39(3):395-403.
LIU Changyou, YANG Jingxuan, YU Bin. Destabilization regularity of hard thick roof group under the multi gob [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 395-403.

[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] 谢广祥,杨科,刘全明.综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):545-549.
XIE Guangxiang, YANG Ke, LIU Quanming. Study on distribution laws of stress in inclined coal pillar for fully-mechanized top-coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (3): 545-549.

[15] 井广成,曹安业,窦林名,等.煤矿褶皱构造区冲击地压震源机制[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.

[16] 陈栋.煤矿微震震源参数反演及震源破裂机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

[17] 曹安业,窦林名.采场顶板破断型震源机制及其分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3833-3839.
CAO Anye, DOU Linming. Analysis of focal mechanism caused by rupture of stope roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3833-3839.

[18] 曹安业.采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[J].煤炭学报,2011,36(1):177-178.
CAO Anye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 177-178.

[19] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002.

[20] 许家林.岩层移动与控制的关键层理论及其应用[J].岩石力学与工程学报,2016,19(1):28-28.
XU Jialin. study and application of the key strata theory about strata movement and it's control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 19(1): 28-28.