

# 巨厚关键层对冲击矿压动静载作用机制研究

周坤友<sup>1,2,3</sup>, 窦林名<sup>4</sup>, 李家卓<sup>1</sup>, 杨科<sup>1</sup>, 马衍坤<sup>3</sup>, 段敏克<sup>1</sup>, 阚吉亮<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学安徽省煤炭安全精准开采工程实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 4. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 以陕西某千米深井巨厚关键层下采场冲击矿压显现为工程背景,分析了巨厚关键层矿震发育及采场冲击显现特征,采场第4、5工作面回采时巨厚关键层内矿震发育逐渐覆盖巨厚关键层全厚范围,且巨厚关键层下冲击显现主要发生在第4、5个工作面走向中部区域并监测到高能矿震。研究了巨厚关键层下采场覆岩结构及围岩应力演化特征并揭示了巨厚关键层对围岩动静载应力的作用机制。研究表明:巨厚关键层下采场第4、5工作面回采时,巨厚亚关键层和主关键层分别发生破断运动,顶板形成大尺度悬臂-铰接结构,其承担上覆载荷并转移至相邻实体煤区域,导致采场周围煤岩体静载应力显著升高;采动影响下大尺度悬臂-铰接结构发生多岩层协同破断,产生高能矿震动载扰动作用,导致高应力煤体动力失稳,冲击风险显著增加。提出了巨厚关键层下冲击矿压顶板深孔预裂爆破防治方案,实践结果表明该方案能够明显减小工作面顶板来压步距和矿震活动强度,显著降低冲击风险。

**关键词** 冲击矿压; 巨厚关键层; 动静载应力; 覆岩结构; 深孔预裂爆破

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2023.0255

## Effect of extra-thick key strata on the static and dynamic stress of rockburst

ZHOU Kunyou<sup>1,2,3</sup>, DOU Linming<sup>4</sup>, LI Jiazhao<sup>1</sup>, YANG Ke<sup>1</sup>,  
MA Yankun<sup>3</sup>, DUAN Minke<sup>1</sup>, KAN Jiliang<sup>1</sup>

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. Engineering Laboratory for Safe and Precise Coal Mining of Anhui Province, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 3. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining Ministry of Education, Anhui University of Science & Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** Taking rockburst occurrence in a large-scale stope under extra-thick key strata in Shaanxi Province as the engineering background, mining-induced seismicity in extra-thick key strata and rockburst in longwall faces was investigated. During the recovery of the 4th and 5th longwall faces, mining-induced seismicity gradually arose and eventually covered the whole extra-thick key strata. Rockburst occurred in the middle area of the 4th and 5th longwall faces along the strike direction, and high-energy seismicity was detected simultaneously. The collapse behavior, roof strata structure, and abutment stress

收稿日期: 2023-06-21

责任编辑: 侯世松

基金项目: 国家自然科学基金项目(52304197, U21A20110); 国家重点研发计划项目(2022YFC3004603); 安徽理工大学引进人才基金项目(2022yjrc38); 安徽省煤炭安全精准开采工程实验室开放课题基金项目(ESCMP202307)

作者简介: 周坤友(1990—), 男, 河南省商丘市人, 博士, 讲师, 从事冲击矿压、矿山压力与岩层控制等方面的研究。

E-mail: 2022047@aust.edu.cn

Tel: 17851983158

evolution of the large-scale stope under extra-thick key strata were analyzed, and the effect of extra-thick key strata on the static and dynamic stresses of surrounding rock was revealed. The following beneficial results were obtained. With the recovery of the 4th and 5th longwall faces, primary and secondary extra-thick key strata break, respectively, and a large-scale cantilever-articulated beam structure is formed in the roof. This structure serves to bear the overburden load and shifts it to the adjacent coal and rock mass, leading to a notable increase in the static stress there. Under mining disturbances, multiple rock strata in the large-scale cantilever-articulated structure break collaboratively and trigger high-energy seismicity, which exerts dynamic disturbances on the overstressed coal and rock mass and significantly promotes rockburst risk. Accordingly, a strategy for prevention and control of rockburst by deep-hole pre-splitting blasting was proposed. The monitoring results indicate a remarkable decrease in both the periodic weighting distance and the mining-induced seismicity intensity, demonstrating that the strategy succeeds in effectively lowering rockburst risk.

**Key words** rockburst; extra-thick key strata; static and dynamic stress; overburden structure; deep-hole pre-splitting blasting

我国多个矿区煤层顶板赋存有巨厚坚硬岩层,巨厚坚硬岩层下回采工作面普遍发生了大能量矿震、冲击矿压等动力灾害<sup>[1-2]</sup>,严重制约了矿井安全生产。郭惟嘉等<sup>[3]</sup>按照岩层厚度及其单轴抗压强度对采场覆岩类型进行了分类,其中“巨厚”岩层指岩层厚度大于100 m的岩层,“坚硬岩层”指岩样单轴抗压强度大于60 MPa的岩层。

针对巨厚坚硬顶板诱发冲击矿压等动力灾害问题,已有大量学者做了相关研究。王恩元等<sup>[4]</sup>研究了坚硬顶板断裂引发的远场震动效应,分析了顶板断裂过程动力学演化特征,建立了适用于分析煤矿特征尺度下坚硬顶板断裂过程的震源模型。翟明华等<sup>[5]</sup>通过分析巨厚坚硬岩层下冲击矿压的发生规律,提出了此类矿井冲击矿压存在“关键工作面效应”“震动诱冲效应”和“冲击震动效应”3个特征。刘少虹等<sup>[6]</sup>认为巨厚坚硬岩浆岩顶板的大面积悬顶以及局部强侵入带构成了对冲击矿压的静态作用,岩浆岩顶板破裂、“回转”运动产生的挤压构成了对冲击矿压的动态作用。许斌<sup>[7]</sup>分析了巨厚坚硬岩层运动对采场应力及能量的影响,在采场上覆巨厚坚硬岩层作用下,采场围岩的破坏程度更大、范围更广,巨厚坚硬岩层的破断对巷道造成的破坏也更加严重。曹光明等<sup>[8]</sup>、张科学<sup>[9]</sup>研究了巨厚砾岩及构造对回采巷道冲击的作用,认为巨厚砾岩顶板破断运动导致动载扰动,而复杂构造应力释放主要造成围岩水平应力的突然增加。魏全德<sup>[10]</sup>以义马矿区巨厚岩层下冲击矿压为研究背景,揭示了巨厚砾岩下特厚煤层“煤体塑性滑移型冲击”“顶、底板强剪切型冲击”和“底板屈曲型冲击”3类冲击类型及发生机理,并给出了各类冲击的力学条

件。赵科等<sup>[11]</sup>研究了上覆巨厚岩层的运动规律及其诱发高能矿震的机制,认为当岩层发生破断,其自身积聚的大量弹性能瞬间释放并向四周传递,同时破断失稳岩层会高速下沉,产生强烈震动,震动产生的冲击载荷会诱发煤岩体内矿震的发生。姚顺利<sup>[12]</sup>研究发现巨厚坚硬岩层破断运动对冲击矿压具有显著的控制作用,巨厚坚硬岩层失稳前采场冲击类型主要为静应力自发型冲击矿压,失稳过程中采场冲击为动静应力诱发型冲击矿压。吕进国等<sup>[13]</sup>研究了巨厚坚硬顶板条件下断层型冲击矿压的特征,综合区域地质构造特征、矿震活动特征、应力场分布特征3个方面揭示了冲击矿压发生机制。Liu等<sup>[14]</sup>研究了顶板预裂爆破对上覆厚硬顶板破断失稳特征及瓦斯运移的影响,研究结果表明在厚硬顶板实施超前预裂爆破能够有效降低厚硬顶板暴露程度、提高覆岩裂隙发育及瓦斯抽采效率。上述研究分别对巨厚坚硬岩层下采场覆岩运动、围岩应力演化及巨厚岩层破断释能及其对冲击危险的影响进行较为全面的研究。冲击矿压的发生是动静载应力叠加作用的结果<sup>[15-16]</sup>,进一步明确巨厚关键层对围岩动静载应力的作用机制对巨厚关键层下冲击矿压监测预警和防治具有重要意义。

论文以陕西彬长矿区某矿千米深井巨厚关键层下冲击矿压显现为工程背景,采用现场调研分析、物理模拟、理论分析及现场实践等方法研究巨厚关键层下多工作面采场覆岩结构及围岩应力演化特征,揭示巨厚关键层对冲击矿压动静载应力作用机制,并提出巨厚关键层下冲击矿压防控方案。

### 1 巨厚关键层下冲击矿压显现时空特征

#### 1.1 巨厚关键层赋存特征

彬长矿区某矿主采 4# 煤层厚度为 0.8~17.8 m, 平均 9.7 m, 煤层倾角 0°~8°, 埋深 800~1 000 m, 具有强冲击倾向性。二盘区共布置 201~205 等 5 个采煤工作面, 如图 1(a) 所示, 盘区倾向尺度为 900 m, 走向尺度为 1 050~1 450 m, 工作面间留设

宽 5.0~7.0 m 小煤柱。工作面采用长壁综采放顶煤后退式采煤方法, 全部垮落法管理顶板, 采放高度分别为 3.5 m 和 5.5 m。基于地质钻孔确定了二盘区覆岩关键层分布特征, 其中 27-2 钻孔关键层判别结果如图 1(b) 所示。可知, 煤层顶板赋存巨厚关键层结构, 巨厚主关键层平均厚度约为 200 m, 巨厚亚关键层平均厚度约为 100 m, 巨厚亚关键层与煤层间距 80~260 m。

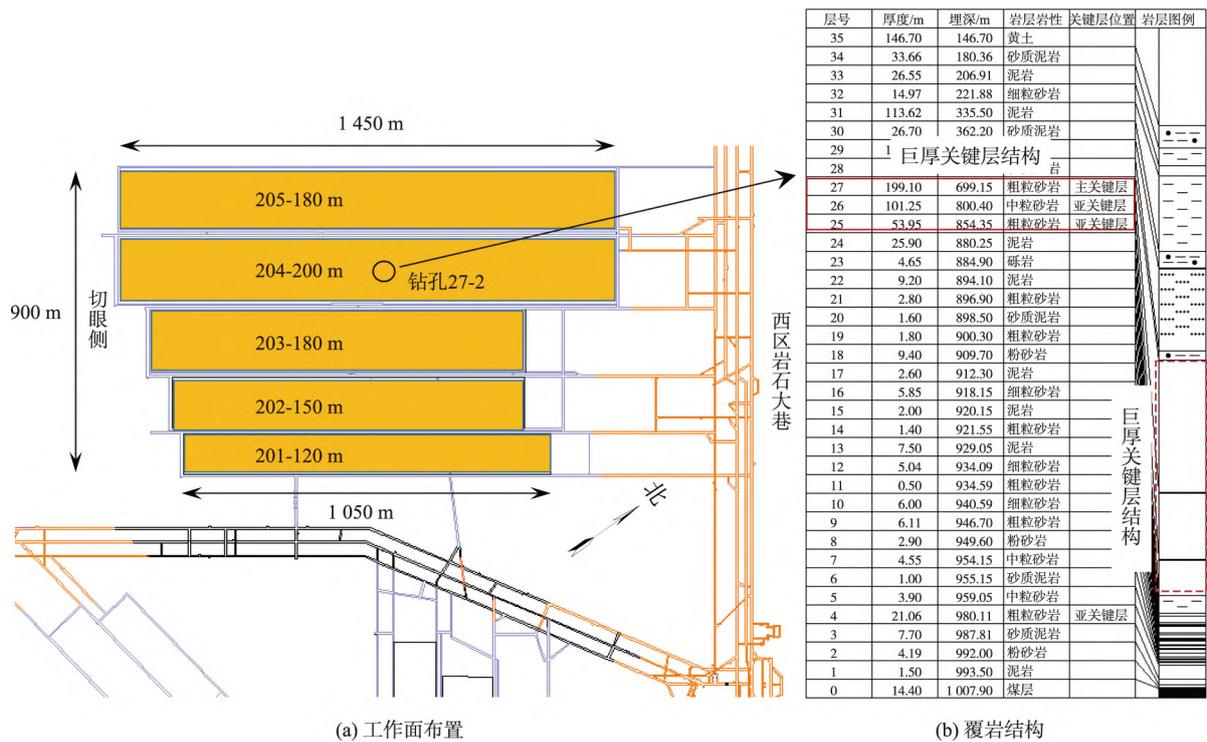


图 1 巨厚关键层下大尺度采场工作面布置及覆岩赋存特征

Fig. 1 Layout of longwall faces under extra-thick key strata and the sketch of overlying strata

#### 1.2 巨厚关键层下采场矿震活动特征

203~205 工作面回采时 O-O' 剖面处前后 200 m 范围内矿震分布如图 2 所示, 图中巨厚关键层包括图 1 中巨厚亚关键层和巨厚主关键层。203 工作面回采时矿震主要分布在煤层附近及其与巨厚关键层下部边界间岩层中, 在巨厚关键层下部有少量  $10^3 \sim 10^4$  J 和  $10^4 \sim 10^5$  J 能量矿震发生且与下覆岩层矿震活动不连续, 204 工作面回采时煤层附近区域及其与巨厚关键层间岩层矿震活动强度显著增加, 且巨厚关键层中下部有大量矿震产生, 以  $10^3 \sim 10^4$  J 和  $10^4 \sim 10^5$  J 能量矿震为主, 而 205 工作面回采时煤层附近及其与巨厚关键层间岩层和巨厚关键层内矿震能量以  $10^4 \sim 10^5$  J 和  $>10^5$  J 为主, 且高能矿震基本覆盖巨厚关键层全厚范围。

可以看出, 随采场尺度增大, 尤其是 204~205 工作面回采时上覆巨厚关键层由下至上矿震逐渐发育,

采动裂隙不断发育发展, 巨厚关键层稳定性逐渐降低甚至破断失稳, 同时产生的高能矿震对工作面和超前巷道产生动载扰动。另外, 水平方向上, 203 工作面回采时 204 工作面一定区域煤层内有矿震发生, 204 与 205 工作面回采时临近实体煤区域及其附近岩层内矿震较发育, 204 工作面回采时, 205 工作面及盘区煤柱内矿震以  $10^3 \sim 10^4$  J 能量矿震为主, 205 工作面回采时, 临近盘区煤柱内以  $10^4 \sim 10^5$  J 能量矿震为主, 说明 204 和 205 工作面开采尺度条件下工作面煤岩处于较高静载应力状态, 在矿震动载作用或扰动下易诱发冲击矿压等动力灾害。

#### 1.3 巨厚关键层下采场冲击显现特征

巨厚关键层下二盘区冲击显现时空特征如图 3 所示, 冲击矿压分别发生在 204 工作面和 205 工作面走向中部区域, 此时采场倾向尺度分别为 700 m 和 900 m。

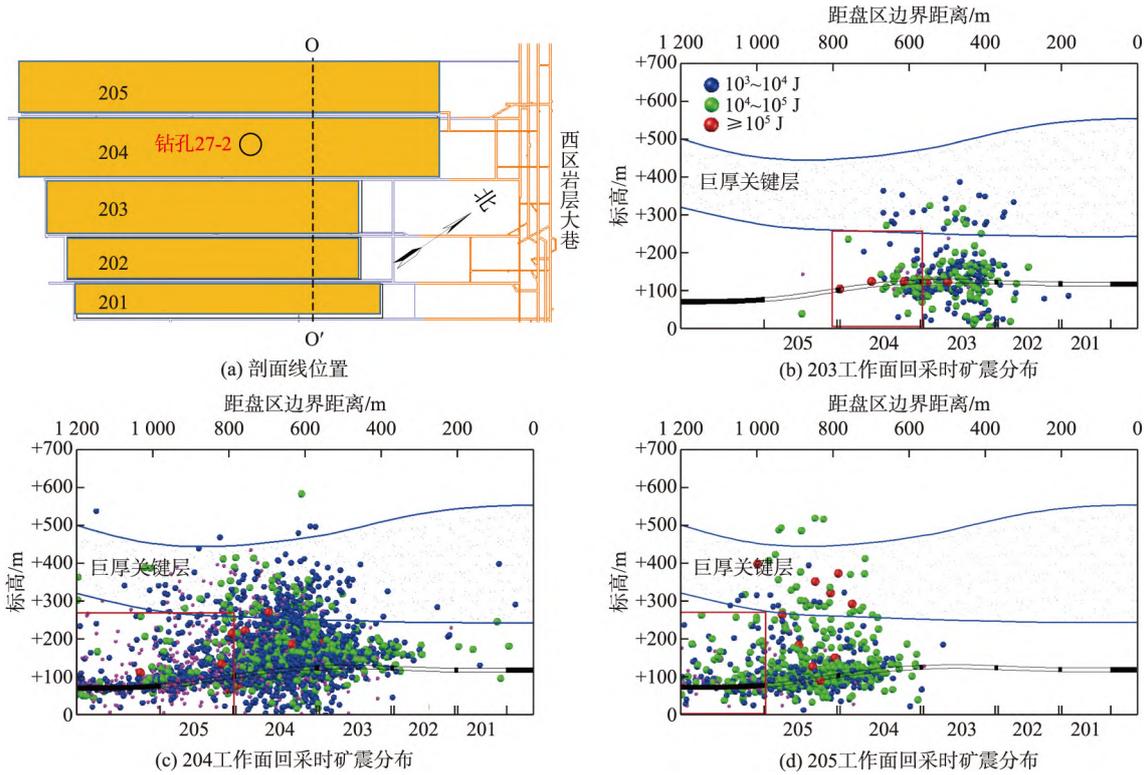


图 2 巨厚关键层下采场矿震活动特征

Fig. 2 Mining-induced seismicity in large scale panel under extra-thick key strata

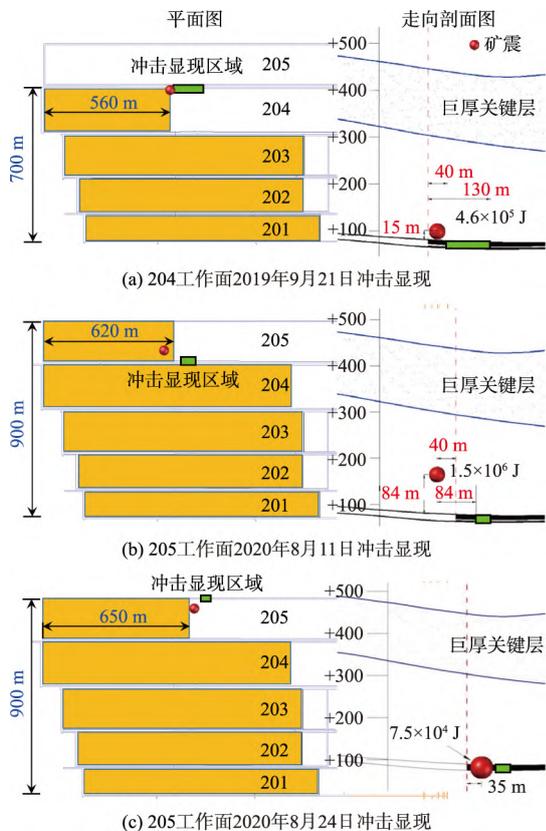


图 3 工作面冲击显现特征

Fig. 3 Spatio-temporal characteristics of rockburst in large scale panel under extra-thick key strata

其中 204 工作面 2019 年 9 月 21 日冲击显现导致超前 20~130 m 范围内运输巷严重底鼓,最大底鼓量达 1.5 m;205 工作面 2020 年 8 月 11 日冲击显现发生时,工作面距切眼 620 m,导致 205 工作面临空侧回风巷超前 40 m 处 3 组超前支架严重歪斜,立柱弯曲;205 工作面 2020 年 8 月 24 日冲击矿压发生时,工作面距切眼 650 m,导致 205 工作面运输巷超前 20~80 m 范围内部分区域非临空侧顶板下沉及临空侧煤帮溜帮。此外,两工作面冲击矿压发生时,在显现区域附近顶板岩层及煤层均监测到大能量矿震事件,其中 204 工作面冲击时矿震能量为  $4.6 \times 10^5$  J,震源位于于运输巷侧顶板岩层,距严重底鼓区域约 85 m;205 工作面 2020 年 8 月 11 日冲击发生时监测到的矿震能量为  $1.5 \times 10^6$  J,震源同样位于于回风巷顶板岩层,距冲击破坏区域约 120 m;205 工作面 2020 年 8 月 24 日冲击发生时监测到的矿震能量为  $7.5 \times 10^4$  J,震源位于于运输巷侧煤体中,距冲击显现区域约 40 m。

顶板巨厚关键层对采场覆岩运动及围岩动静载应力起到控制作用,二盘区冲击矿压发生区域较为集中,均发生在第 4 个工作面开采后(倾向尺度超过 700 m)工作面走向中部区域,且同时监测到高能矿震,说明二盘区冲击矿压与上覆巨厚关键层稳定性及其作用下覆岩结构特征密切相关。

## 2 巨厚关键层下多工作面采场覆岩结构运动演化特征

### 2.1 模型构建

根据图 1(b)巨厚关键层赋存条件,建立巨厚关键层下多工作面采场及相邻宽煤柱的大尺度相似材料模型,如图 4 所示。模拟尺寸为:长×高×厚=3 200 mm×1 500 mm×300 mm,根据相似理论<sup>[17]</sup>,模型应力、位移、强度和时间的相似比分别为 1:600,

1:400,1:600 和 1:20。模拟煤层埋深 930 m,厚度 10 m,底部岩层厚度 70 m,顶板岩层厚度 530 m 至巨厚关键层,利用气囊在顶部施加覆 400 m 岩层等效载荷 16 kPa。模拟 201~205 工作面倾向宽分别为 120、150、180、200、180 m,由于工作面间留设的 5.0~7.0 m 小煤柱基本不承载,模型中未考虑区段煤柱。基于相似材料选择原则<sup>[17]</sup>,选用细河砂为骨料,石灰、石膏为胶结物,水为黏结剂,云母粉用作层间的分界面。

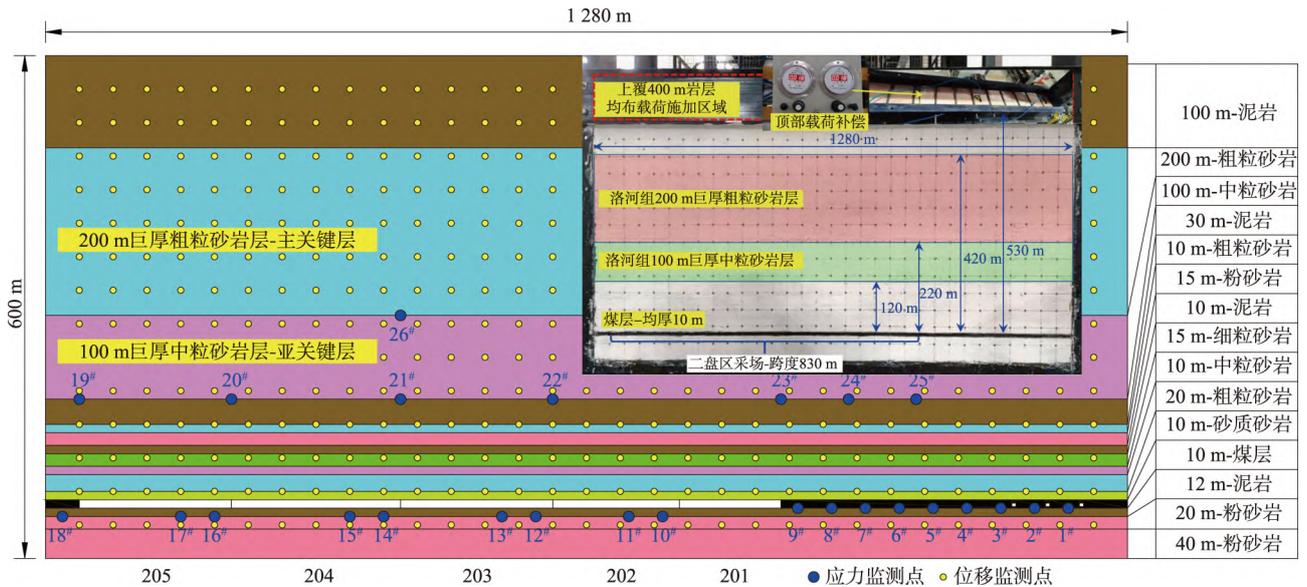


图 4 巨厚关键层下多工作面大尺度采场相似材料模型

Fig. 4 Physical model of large-scale panel under extra-thick key strata

模型采用 BZ2205C 程控静态电阻应变仪数据采集系统配合 26 个 DF-9-2 kg 薄膜式单点压力传感器监测围岩支撑压力变化;采用 DigiMetric 三维摄影测量系统及模型表面标记点监测试验过程中覆岩变形。试验时,从模型右侧向左依次开挖 201~205 工作面,由于模型为采场倾向方向,各工作面一次开挖完成,各工作面开挖时间间隔按模型时间相似比计算,分别为 15、16、25、16 d。

### 2.2 不同尺度采场覆岩破断运动特征

不同采场尺度下覆岩运动破坏特征如图 5(a)~(e)所示,其中 201~205 工作面采空区倾向尺度分别为 120、270、450、650、830 m。201 工作面回采后,顶板 10 m 厚砂质泥岩直接顶垮落。202 工作面回采后,距煤层顶板 10 m、厚度为 20 m 的粗粒砂岩层基本顶发生初次破断,形成长度为 130 m 和 105 m 的铰接结构,顶板离层发育至煤层顶板 60 m 处。203 工作面回采后,原基本顶破断形成的铰接结构再次失稳垮落,且 203 工作面内煤层顶板 60 m 范围内约 130 m 长岩层发生整体破断垮落,形成长约 80

m 悬臂梁结构,顶板离层发育至 100 m 中粒砂岩巨厚亚关键层,距煤层 60~120 m 范围内岩层发生明显的弯曲下沉。204 工作面回采后,基本顶分步破断,第一次破断长度为 120 m,第二次破断长度 105 m,同时顶板 120 m 范围内岩层大范围同步下沉并形成沟通煤层和巨厚亚关键层的贯通裂隙,在 204 工作面左侧形成长约 70 m 的悬臂梁结构;离层裂隙进一步向上发育至巨厚主关键层下部;在 201 和 202 工作面侧巨厚亚关键层内发育宏观水平、垂直和倾斜裂隙,巨厚亚关键层在 202 工作面采空区上方破断,此时 203~204 工作面上方巨厚亚关键层由两侧固支状态转为一侧固支状态,形成较大尺度悬臂-铰接结构。

类似地,205 工作面回采过程中,基本顶分步破断,破断步距分别为 120 m 和 70 m,第一次破断时顶板 120 m(煤层-巨厚亚关键层间)岩层整体同步下沉,第二次破断时顶板 220 m(煤层-巨厚主关键层间)岩层大范围整体下沉,巨厚亚关键层和主关键层间离层范围及离层量进一步增加,在顶板形成

沟通煤层至巨厚主关键层间的宏观裂隙。205 工作面回采后,在 202、203 工作面采空区对应巨厚主关键层中逐渐发育近似垂直的贯通裂隙,在 201 工作面采空区对应巨厚主关键层中上部逐渐发育倾斜裂隙,但在 204 和 205 工作面采空区对应巨厚主关键层中未见裂隙发育;巨厚主关键层在 202、203 工作面采空区范围内发生破断,此时 203~205 工作面

采空区对应巨厚主关键层由两侧固支梁结构转为一侧固支的大尺度悬臂-铰接结构,该结构需承担上覆岩层全部载荷,将显著提高 205 工作面及临近煤层静载应力,而 201 工作面采空区顶板巨厚主关键层破断后回转下沉则转变为铰接梁结构,该结构承载的上覆载荷部分由采空区破碎煤岩承担,对宽煤柱侧静载应力影响相对较小。

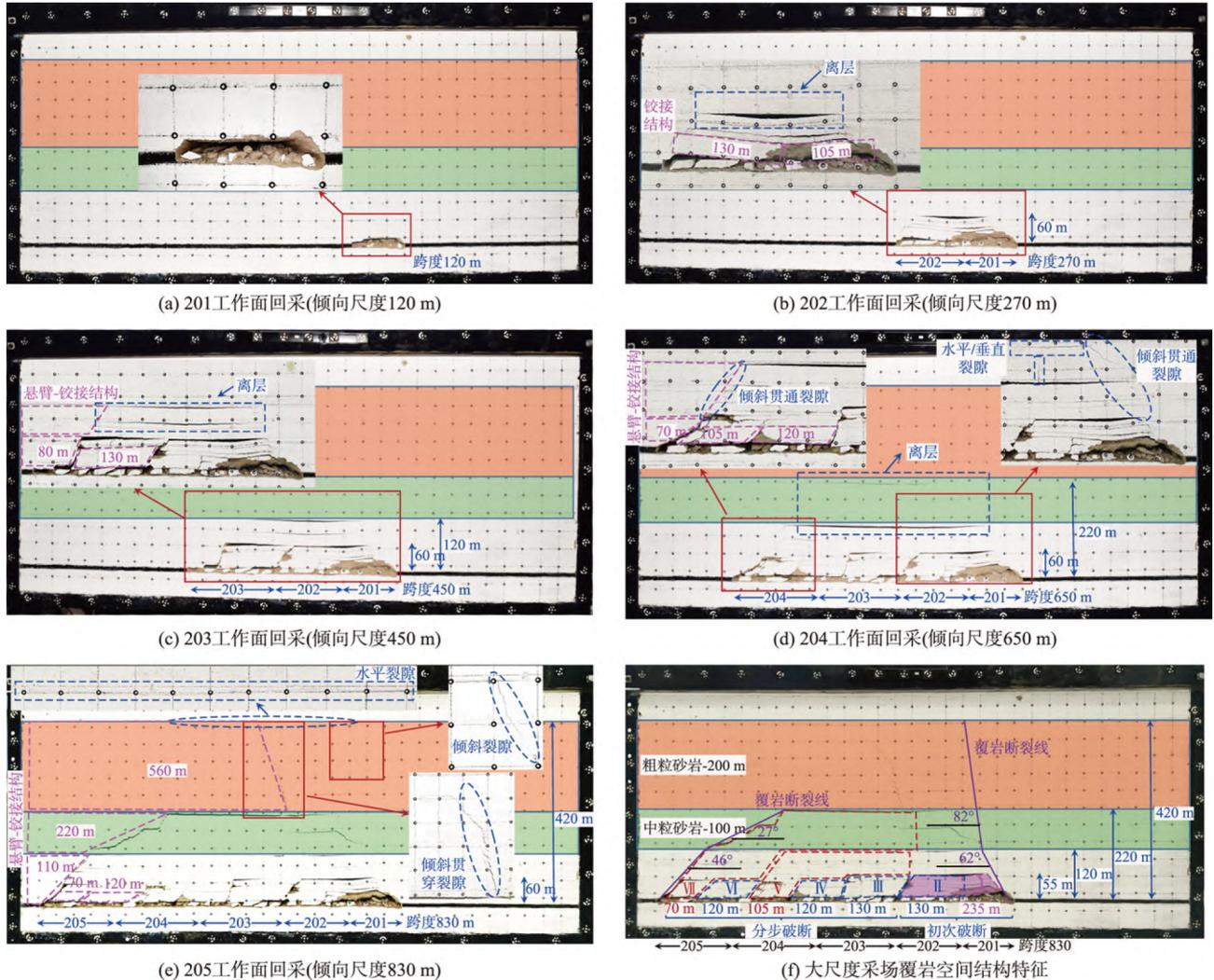


图 5 不同开采尺度下覆岩运动破坏特征

Fig. 5 Movement and failure characteristics of the strata at different panel scale

图 5(f) 为巨厚关键层下多工作面采场回采结束后覆岩结构形态,可以看出工作面依次回采过程中,基本顶依次出现初次破断和分步破断,初次破断步距为 235 m (区域 I),分步破断步距为 70~130 m (区域 II-VII)。实验中发现在 201~203 工作面回采过程中低位岩层(煤层顶板 60 m 范围内)破断下沉,以上岩层仅发生缓慢变形,而在 204 和 205 工作面回采过程中其覆岩运动均可分为两个阶段,其中阶段 IV 和 VI (破断距离 120 m) 仅发生低位岩层的破

断下沉,并未引起上覆岩层大范围运动,而在阶段 V 和 VII,低位破断距离明显降低,分别为 105 m 和 70 m,且低位岩层的破断下沉引起上覆岩层大范围运动,尤其是阶段 VII,导致长度约 350 m 巨厚亚关键层整体破断下沉,这也说明在 204 和 205 工作面回采时,其左侧低位岩层控制顶板大范围覆岩运动且承载了较高覆岩载荷,将导致两工作面左侧未开采区域煤岩体处于强冲击风险状态。不仅如此,覆岩大范围破断将导致岩层中尤其是巨厚关键层积聚

的弹性能突然释放,诱发大能量矿震事件,对临近采掘巷道和工作面造成强动载作用。

工作面全部回采结束后,201 工作面采空区侧顶板 120 m 范围内岩层破断角约为 62°,在巨厚关键层内(顶板 120~420 m 范围)破断角约为 82°;205 工作面侧顶板 118 m 范围内岩层破断角约为 46°,在巨厚关键层内(顶板 120~420 m 范围)破断角约为 27°。201~202 工作面回采过程中,采空区垮落带和裂隙带高度不断增加,203~205 工作面回采过程中,垮落带高度基本稳定在 55 m,而裂隙带高度仍随采场尺度增加不断增大,分别为 120、220、420 m。

### 2.3 不同尺度采场围岩应力演化特征

宽煤柱侧测点 9 及工作面侧 10、12、14、16、18 等 6 个压力传感器数据如图 6 所示,各测点均距相邻工作面 20 m。随 201~205 工作面相继回采,9# 监测点压力值呈台阶式上升[图 6(a)],由 8 N 依次升高至 27、93、155、241、436 N。10#、12#、14#、16#、18# 测点压力变化如图 6(b)~(f) 所示。10# 监测点压力值先上升后台阶式降低并保持稳定,201 工作面回采后,10# 监测点压力由 10 N 升高至 27 N,202 工作面回采过程中,基本顶破断形成的铰接岩梁结构支撑点位于 10# 监测点处,导致 10# 监测点处压力仍高于初始压力,203 工作面回采后铰接结构再次失

稳垮落,而后随采空区不断压实,压力逐渐恢复至初始压力并保持稳定。12# 监测点压力先台阶式上升后下降并保持稳定,201 工作面回采后,12# 监测点压力值由 21 N 升高至 33 N,202 工作面回采过程中基本顶破断导致 12# 监测点压力再次升高至 51 N,203 工作面回采后,基本顶发生分步破断,压力迅速降低并保持稳定。201 和 202 工作面回采后,14# 监测点压力基本保持稳定,为 2~15 N,此时采空区岩层运动对其静载应力影响较小,203 工作面回采后,14# 监测点压力逐渐跃升至 88 N,而 204 工作面回采后,压力突降至 15 N,随后,随采空区不断压实,压力呈台阶式小幅上升。201~203 工作面回采后,16# 监测点压力基本稳定,为 27~57 N,而 204 工作面回采后,压力跃升至 631 N,205 工作面回采后,顶板大范围分步垮落,压力突降至 11~20 N 并保持稳定。201~203 工作面回采后,18# 监测点压力基本稳定,为 15~21 N,204 工作面回采后压力升高至 38~51 N,说明在当前开采条件下,204 工作面侧向支承压压力影响范围超过 200 m,而 205 工作面回采后,采空区高位覆岩不断运动,18# 监测点压力逐渐跃升至 1 145 N 并逐渐趋于稳定。说明随采空区尺度不断增大,上覆岩层应力不断向两侧实体煤转移,尤其是 204 和 205 工作面回采后,周围煤岩体应力集中程度显著升高。

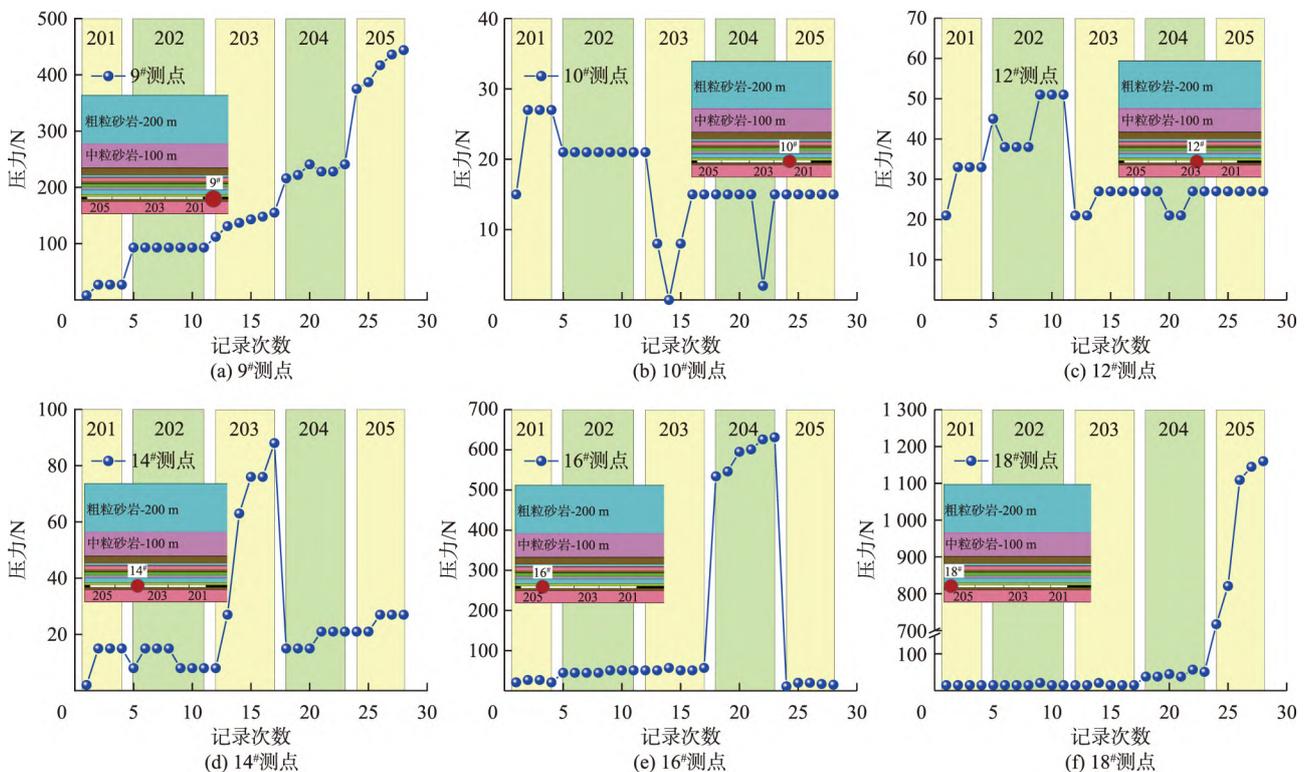


图 6 不同尺度采场两侧测点应力演化特征

Fig. 6 Stress curves of the measure points around longwall faces with different mining scale

### 3 巨厚关键层对围岩应力的作用机制

#### 3.1 静载应力

不同尺度采场两侧煤层及巨厚亚关键层底部支撑压力峰值演化如图 7 所示。支撑压力峰值均随采场倾向尺度增大而升高,采场侧支撑压力峰值及其变化范围明显高于宽煤柱侧。201、202 工作面回

采时支撑压力峰值增加缓慢,而 203~205 工作面回采引起大范围岩层运动,尤其是 204、205 工作面回采时引起巨厚关键层破断运动,此时顶板形成较大尺度悬臂-铰接岩梁结构,导致采场两侧支撑压力峰值和冲击风险显著升高,204 工作面为巨厚关键层下大尺度采场冲击危险升高的“关键工作面”。

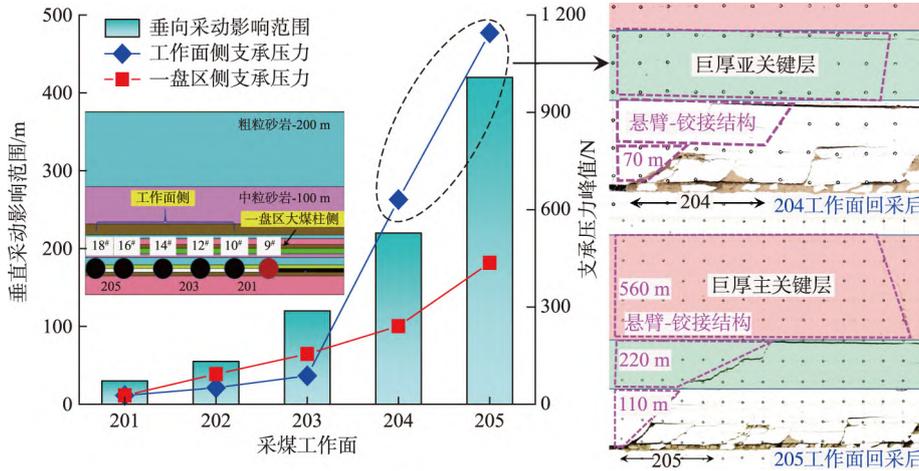


图 7 采场垂向采动影响范围及侧向支撑压力峰值演化

Fig. 7 Mining influence range in vertical direction and the peak abutment stress evolution during coal mining

以 205 工作面回采后覆岩结构为例,煤层顶板悬臂梁结构和铰接梁结构受力<sup>[18]</sup>如图 8 所示。此时将煤层-巨厚关键层中间岩层整体视为铰接结构作用于临近煤体。

对于悬臂梁[图 8(b)],为保持其结构稳定性,下位岩层受力  $F_s$  需满足:

$$F_s = \frac{\int_{h_1 \cot \alpha}^{l_1 + h_1 \cot \alpha} q_x x dx + G_1 l_{g1} - f_{p1} l_{p1}}{l_s} \quad (1)$$

式中:  $q_x$  为悬臂梁上覆载荷;  $l_s$  为支撑力距  $O$  点距离;  $G_1$  为单位厚度悬臂梁重量;  $h_1$  为岩层厚度;  $l_1$  为悬臂结构长度;  $l_{g1}$  为岩块中心距岩梁的支撑点距离;  $f_{p1}$  为矸石对岩梁的支撑;  $l_{p1}$  为矸石对岩梁的支撑点距煤壁的距离;  $\alpha$  为岩层断裂裂隙角。

对于铰接梁结构[图 8(c)],为保持其结构稳定性,采场临近的实体煤需提供的支撑力  $q$  需满足:

$$q = \frac{2 F_s (l_s + h_2 \cot \beta) + 2 T l_T + G_2 l_{g2} - Q_B l_B}{l_z^2} \quad (2)$$

式中:  $h_2$  为岩梁厚度;  $Q_B$  为已垮落关键岩块对铰接关键岩块的摩擦力;  $l_B$  为已垮落关键岩块对铰接关键岩块的摩擦力作用点距支撑点距离;  $l_z$  为铰接结构下实体煤受力区域宽度;  $T$  为工作面前方岩层对岩梁的水平作用力。

工作面回采后顶板悬臂梁-铰接岩梁结构仍承载上覆大量载荷并转移至采场两侧实体煤区域,由式(1)(2)可知,随结构尺度增大,下位岩层受力

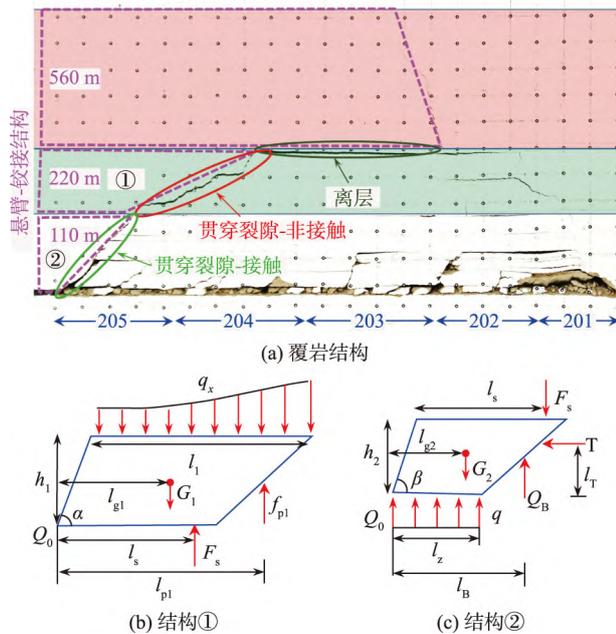


图 8 顶板悬臂梁和铰接梁结构受力分析

Fig. 8 Mechanical model of cantilever beam and articulated rock beam

( $F_s$  和  $q$ ) 不断增大,导致工作面侧采场支承压力的快速增加,临近区域冲击危险性升高。而宽煤柱侧采空区覆岩经历多次开采扰动且稳沉时间相对较长,覆岩变形破坏更为充分,顶板未形成较大尺度悬臂梁结构,宽煤柱侧支承压力的峰值增幅较缓。

### 3.2 动载应力

由矿震活动分析可知,工作面大能量矿震主要集中在煤层及其至巨厚关键层中间岩层,且煤层临近基本顶附近居多。工作面回采时基本顶依次经历初次破断和周期破断,破断时积聚的弹性能主要以矿震形式释放并作用于周围煤岩体中。顶板单位宽度初次破断时其受力可简化为图 9,顶板发生周期破断时可分为无铰接结构周期破断和有铰接结构周期破断,如图 10 所示。

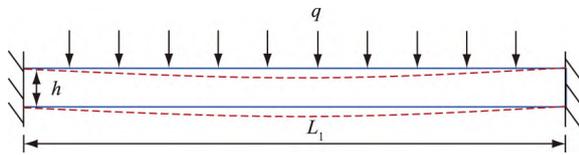


图 9 煤层顶板初次破断受力状态  
Fig. 9 The stress state of the first broken roof

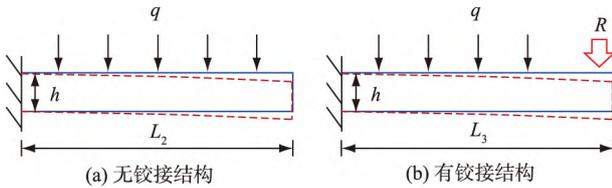


图 10 煤层顶板周期破断受力状态  
Fig. 10 Stress state of periodically broken roof

上述关键层初次破断释放能量  $U_1$  及周期破断无铰接和有铰接结构时释放能量 ( $U_2$  和  $U_3$ ) 如式 (3) ~ (5) 所示<sup>[19]</sup>:

$$U_1 = \left| \int_0^L \omega_1 q dx \right| = \frac{q^2 L_1^5}{120EI} \quad (3)$$

$$U_2 = \left| \int_0^L \omega_2 q dx \right| = \frac{q^2 L_2^5}{20EI} \quad (4)$$

$$U_3 = \frac{3 q^2 L_3^5 + 15 q R L_3^4 + 20 R L_3^3}{60EI} \quad (5)$$

式中:  $L_1 = 2h \sqrt{\frac{R_T}{3q}}$ ,  $L_2 = h \sqrt{\frac{R_T}{3q}}$ ,  $L_3 = \frac{h}{3} \sqrt{\frac{R_T}{q}}$ , 其中  $h$  为梁厚度, m;  $q$  为简支梁承担的自身荷载及上覆均布荷载,  $N/m^2$ ;  $R_T$  为梁抗拉强度, MPa;  $E$  为弹性模量, Pa;  $I$  为截面对中性轴的惯性矩,  $I = \frac{b h^3}{12}$ ,  $m^4$ 。

应该指出,由覆岩破断诱发矿震能量仅为由式

(3) ~ (5) 计算的单位宽度覆岩破断本身释放能量的 0.1% ~ 1%<sup>[20]</sup>, 当宽度为  $b$  的顶板破断时, 该能量还应乘以顶板破断宽度  $b$ 。

根据动静载叠加诱冲机理, 矿震产生的动载扰动是冲击矿压发生的重要诱因, 微震监测系统监测到的矿震能量一般岩体破裂释放总能量的  $\eta$  倍,  $\eta$  为岩体破裂释放能量和矿震间的能量转化系数。即:

$$U_0 = \eta U \quad (6)$$

式中:  $U_0$  为覆岩破断诱发矿震能量, J;  $U$  为覆岩破断释放能量, J。

相关震动波井下原位测试结果表明, 矿震能量与其峰值质点振动速度可近似表示为:

$$V_{0,max} = 0.064 5 U_0^{0.356 6} \quad (7)$$

式中  $V_{0,max}$  为震源附近峰值振动速度, m/s。

假设煤岩体为弹性各向同性连续介质, 则矿震产生的应力波在煤岩体中引起的震动波动载<sup>[21]</sup>可表示为:

$$\sigma_{d,L} = \rho v V_0(L) \quad (8)$$

式中:  $\sigma_{d,L}$  为震动波动载;  $\rho$  为煤岩体密度;  $v$  为震动波传播速度;  $V_0(L)$  为距震源  $L$  处质点振动速度。

研究表明, 矿震震动波在传播过程中呈幂函数形式衰减<sup>[22]</sup>, 如式 (9) 所示:

$$V_0(L) = V_{0,max} L^{-\lambda} \quad (9)$$

式中  $\lambda$  为煤岩体中震动波衰减系数。

由式 (7) ~ (9) 可得到, 矿震在围岩中产生的动载扰动为:

$$\begin{aligned} \sigma_{d,L} &= 0.064 5 \rho v U_0^{0.356 6} L^{-\lambda} \\ &= 0.064 5 \rho v (\eta U)^{0.356 6} L^{-\lambda} \end{aligned} \quad (10)$$

由相似模拟可知, 在采场倾向尺度较大时, 低位基本顶破断将导致包括巨厚关键层在内的多层岩层协同破断, 释放能量将明显增加, 此时岩层大范围协同破断产生的动载应力将大幅升高, 可表示为:

$$\sigma_{d,L\text{总}} = 0.064 5 \rho v \sum_{i=1}^n (\eta U_i)^{0.356 6} L^{-\lambda} \quad (11)$$

204 和 205 工作面回采时共监测到 10 个能量超过  $10^6$  J 的矿震, 其与采场倾向覆岩运动剖面对照如图 11 所示, 大能量矿震均位于发生多岩层协同破断的悬臂-铰接结构区域 (V 和 VII 区域), 说明在高静载应力作用下大尺度悬臂-铰接结构破断失稳引起的大范围顶板复合破断运动可诱发更大能级的矿震事件, 对围岩应力环境产生更强动载作用, 从而增加周围煤岩体动静载叠加诱发冲击风险。

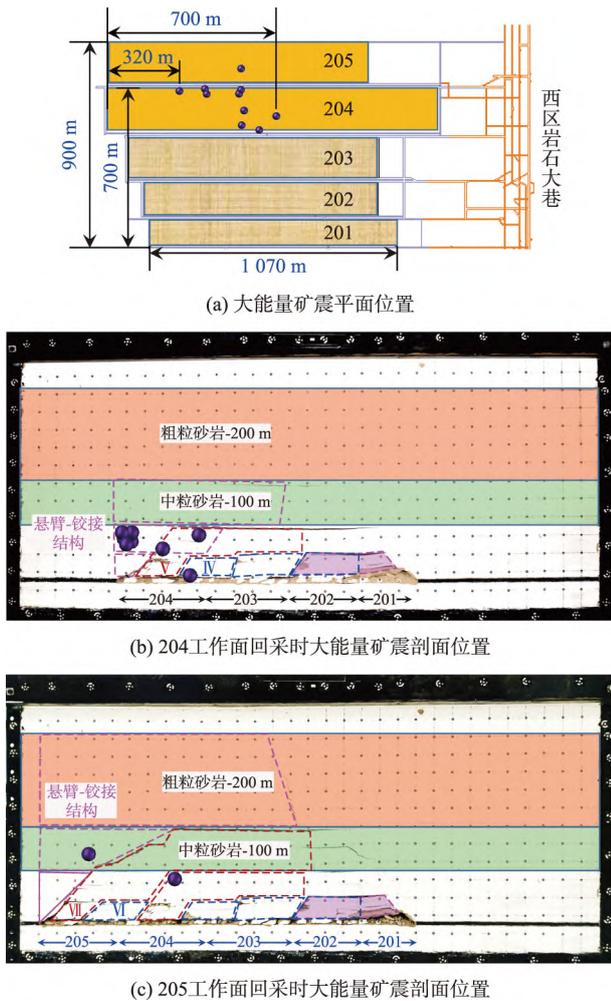


图 11 采场顶板大尺度悬臂-铰接结构失稳诱发大能量矿震  
 Fig. 11 High energy seismicity induced by the failure of the large-scale cantilever-articulated beam

## 4 巨厚关键层下冲击矿压防治实践

### 4.1 防治方案

由相似材料模拟及理论分析可知,当采场尺度较大时,上覆包括巨厚关键层在内的悬臂-铰接结构是工作面高静载和强动载产生的原因,而该结构稳定性与煤层基本顶结构稳定性密切相关。利用深孔预裂爆破<sup>[22-23]</sup>人工削弱基本顶结构稳定性,一方面可降低其悬露极限尺度及其应力集中和弹性性能积聚程度,另一方面可降低上覆悬臂-铰接结构尺度,从而降低工作面煤岩体动静载应力水平和冲击风险。

204、205 工作面回采后期,工作面超前区域实施顶板深孔预裂爆破进行补强卸压。以 205 工作面为例,顶板深孔爆破卸压方案为:① 运输巷侧:顶板深孔爆破一组 3 孔布置(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>),孔深分别为 61、50、50 m,② 回风巷侧:一组两孔布置(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>),孔深分别为 61 m 和 50 m。各组爆破孔装药量为 60 kg,孔径 85 mm,组距 15 m,孔底正向装药,封孔长度不小于 15 m,各组采用导爆索一次起爆。钻孔布置如图 12 所示。

### 4.2 防治效果分析

#### 1) 工作面来压步距分析

204 工作面和 205 工作面实施 4.1 节顶板预裂爆破方案前后周期来压步距变化如图 13 所示。可以看出,实施补强卸压方案后,工作面周期来压步距明显降低,平均周期来压步距分别由 22.4 m 和 21.2 m 降至 17.0 m 和 13.5 m,降幅分别为 24.1% 和 36.3%。

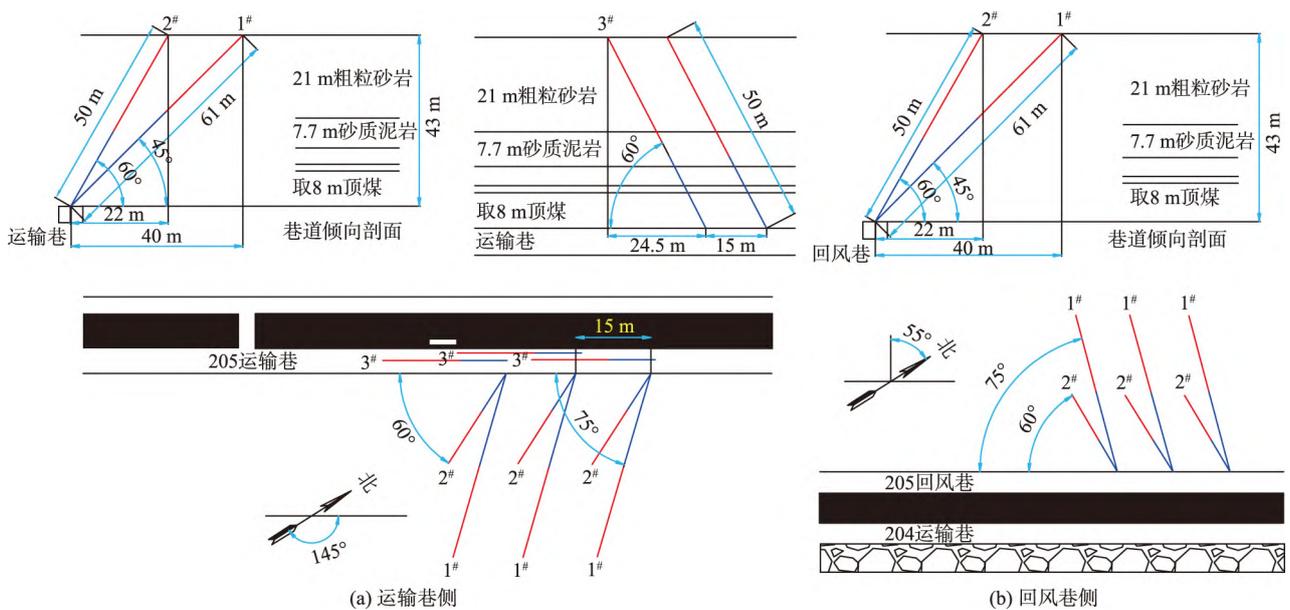


图 12 顶板深孔爆破钻孔布置方案  
 Fig. 12 Scheme of deep-hole pre-splitting blasting

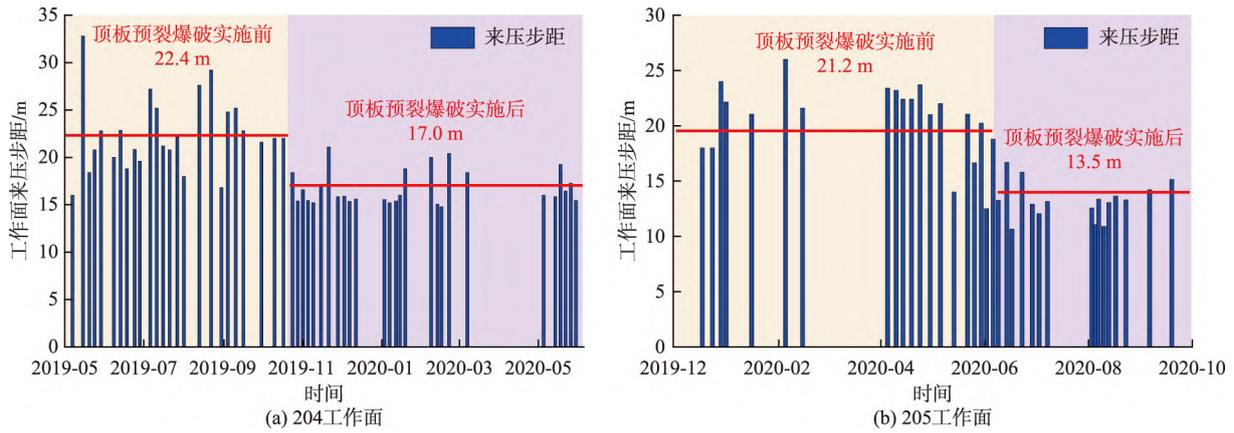


图 13 实施顶板预裂爆破前后工作面来压步距变化

Fig. 13 Periodic weighting distance of longwall faces before and after the application of deep-hole pre-splitting blasting

可知,实施顶板预裂爆破能够有效改变工作面低位坚硬顶板结构稳定性,促使其在较低矿山压力作用下破断垮落,避免形成大尺度悬臂-铰接结构及其结构内多层岩层大范围协同破断,降低由其导致的高静载和强动载,从而降低工作面冲击风险。

2) 矿震活动强度分析

204 工作面矿震活动强度(日矿震总能量和总频次)曲线如图 14 所示。

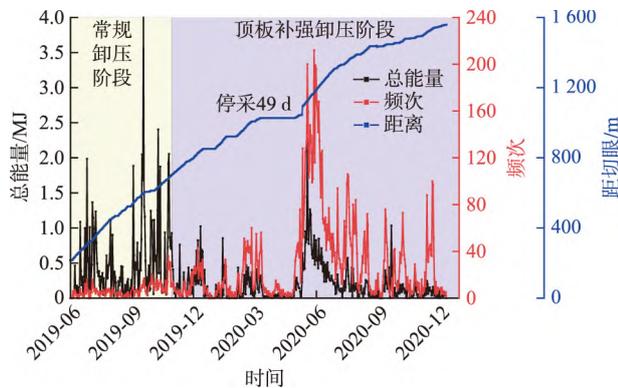


图 14 204 工作面矿震活动分布

Fig. 14 Seismic activity in 204 longwall face

可以看出,工作面实施顶板预裂爆破措施前,矿震活动呈“低频高能”特征,大能量矿震频发。2019 年 9 月 21 日工作面超前运输巷发生冲击破坏,工作面停产且在超前区域全面实施 4.1 节顶板预裂爆破补强措施,2019 年 11 月恢复生产后,工作面矿震活动逐渐呈“高频低能”特征,10<sup>4</sup> J 以下小能量矿震事件占比增多,说明工作面覆岩活动性有所增强,但由其导致的能量释放却明显降低。说明巨厚关键层下工作面顶板实施预裂爆破措施能够有效降低工作面矿震活动强度及冲击风险。应该指出,2020 年 3 月—2020 年 4 月期间工作面停产,工

作面复产后,导致覆岩再次失稳,一定时间内矿震活动有所增强。

5 结 论

1) 分析了巨厚关键层稳定性及冲击显现特征。采场第 4、5 工作面回采时巨厚关键层内矿震发育并逐渐覆盖全厚范围,巨厚关键层稳定性逐渐降低,且水平方向上相邻区域矿震较为发育,相邻区域煤岩体处于高静载应力状态;巨厚关键层下冲击矿压显现集中在第 4、5 工作面走向中部区域,同时监测到高能矿震,巨厚关键层稳定性及其作用下覆岩结构对围岩动静载应力具有控制作用。

2) 得到了巨厚关键层下多工作面采场覆岩结构及围岩应力演化特征并揭示了巨厚关键层对围岩动静载应力的作用机制。巨厚关键层下采场第 4 和第 5 工作面回采时,上覆巨厚亚关键层和巨厚主关键层分别发生破断下沉,且顶板形成大尺度悬臂-铰接结构,承担上覆载荷并转移至采场相邻实体煤区域,支承压力峰值显著增加,导致周围煤岩体静载应力升高;采动影响下大尺度悬臂-铰接结构发生多岩层协同破断,产生高能矿震动载扰动作用,导致高应力煤体失稳冲击风险显著增加。

3) 提出了巨厚关键层下冲击矿压防治方法并进行了应用实践。顶板深孔预裂爆破能够削弱基本顶结构稳定性,缩小上覆巨厚关键层下悬臂-铰接结构尺度,降低工作面煤岩体动静载应力水平;制定了巨厚关键层下工作面顶板深孔预裂爆破方案,现场实践后,工作面顶板来压步距和矿震活动强度明显减小,冲击风险显著降低。

参考文献:

[1] 王宏伟, 邓代新, 姜耀东, 等. 巨厚坚硬顶板变形及

- 垮落的动态演化特征研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(5): 548-557.
- WANG Hongwei, DENG Daixin, JIANG Yaodong, et al. Study on the dynamic evolution characteristics of deformation and collapse of the extra-thick hard roof[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(5): 548-557.
- [2] 何江, 窦林名, 王崧玮, 等. 坚硬顶板诱发冲击矿压机理及类型研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1122-1127.
- HE Jiang, DOU Linming, WANG Songwei, et al. Study on mechanism and types of hard roof inducing rock burst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1122-1127.
- [3] 郭惟嘉, 毛仲玉. 覆岩沉陷离层及工程控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.
- [4] 王恩元, 冯俊军, 孔祥国, 等. 坚硬顶板断裂震源模型及应力波远场震动效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 787-794.
- WANG Enyuan, FENG Junjun, KONG Xiangguo, et al. A hard roof fracture source model and its far-field seismic impact by stress wave[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 787-794.
- [5] 翟明华, 姜福兴, 朱斯陶, 等. 巨厚坚硬岩层下基于防冲的开采设计研究与应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1707-1715.
- ZHAI Minghua, JIANG Fuxing, ZHU Sitao, et al. Research and application of mining design based on prevention of rock burst under giant thickness hard strata[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1707-1715.
- [6] 刘少虹, 潘俊锋, 夏永学. 巨厚坚硬岩层岩床破裂运动诱发冲击地压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 499-510.
- LIU Shaohong, PAN Junfeng, XIA Yongxue. Study on induced mechanism of rock bursts by fracture movement of hard magmatic beds[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 499-510.
- [7] 许斌. 巨厚坚硬岩层覆岩结构与采动效应特征研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [8] 曹光明, 镐振, 刘洪涛, 等. 巨厚砾岩下回采巷道冲击破坏机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 290-297.
- CAO Guangming, HAO Zhen, LIU Hongtao, et al. Impact failure mechanism of mining roadway under ultra-thick conglomerate[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 290-297.
- [9] 张科学. 构造与巨厚砾岩耦合条件下回采巷道冲击地压机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015.
- [10] 魏全德. 巨厚砾岩下特厚煤层冲击地压发生机理及防治研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [11] 赵科, 张开智, 王树立. 巨厚覆岩破断运动与矿震活动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 118-122.
- ZHAO Ke, ZHANG Kaizhi, WANG Shuli. Study on movement law of ultra thick overlying strata broken and coal mine earthquakes [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 118-122.
- [12] 姚顺利. 巨厚坚硬岩层运动诱发力灾害机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [13] 吕进国, 姜耀东, 李守国, 等. 巨厚坚硬顶板条件下断层诱冲特征及机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1961-1969.
- LYU Jinguo, JIANG Yaodong, LI Shouguo, et al. Characteristics and mechanism research of coal bumps induced by faults based on extra thick and hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1961-1969.
- [14] LIU T, LIN B Q, YANG W, et al. Study of effects of hard thick roof on gas migration and field experiment of roof artificially guided pre-splitting for efficient gas control[J]. Natural Resources Research, 2020, 29(3): 1819-1841.
- [15] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 48-59.
- DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.
- [16] ZHOU K Y, DOU L M, LI X W, et al. Coal burst and mining-induced stress evolution in a deep isolated main entry area: a case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137: 106289.
- [17] 周坤友. 巨厚承压含水关键层的作用效应及疏水调压聚能诱冲机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [18] 任艳芳. 浅埋深工作面覆岩“悬臂梁-铰接岩梁”结构的提出与验证[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊1): 1-8.
- REN Yanfang. Presentation and verification of “cantilever beam-articulated rock beam” composite structure in shallow buried working face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(Sup 1): 1-8.
- [19] 王盛川. 褶皱区顶板型冲击矿压“三场”监测原理及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [20] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [21] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [22] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破与定向水压致裂防冲适用性对比分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 706-719.
- ZHAO Shankun. A comparative analysis of deep hole roof pre-blasting and directional hydraulic fracture for rockburst control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(4): 706-719.
- [23] CHEN D X, SUN C, WANG L G. Collapse behavior and control of hard roofs in steeply inclined coal seams[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(2): 1489-1505.