

倾斜煤层含矸煤柱区应力状态及防冲技术研究

吴学松^{1,2}, 曹安业¹, 买巧利³, 王崧玮¹, 陆祖军²

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 华亭煤业集团 砚北煤矿, 甘肃 华亭 744100; 3. 华亭煤业集团 华亭煤矿, 甘肃 华亭 744100)

摘要:针对倾斜煤层分层开采综放工作面临空侧含夹矸层巷道变形量大、冲击危险性高的问题,构建了侧向悬顶临空煤柱受力模型,运用数值模拟方法对工作面回采过程中煤柱区域围岩应力场和塑性区变化进行研究。研究表明:在煤柱弹性变形阶段,煤柱支撑力、变形量、煤柱积聚弹性能随着悬顶长度的增大而增大;临空煤柱在巷道区域存在夹矸弱层时,沿夹矸面产生的应力集中区致使巷道变形量增大,诱使周围煤岩运动加剧;当临空侧煤柱上方巷道顶板不易发生破坏时,可形成弹性能的良好载体和传递通道,造成巷道应力集中,加剧冲击地压发生危险性。同时,针对含矸临空煤柱自身抗破坏能力较差问题,提出远近结合、分批次的卸压方式,制定了顶板预裂、煤体爆破方案,有效降低巷道帮鼓变形量,微震震动点向远离工作面方向上方顶板偏移,冲击地压危险程度明显降低,有效保证工作面安全回采。

关键词:倾斜煤层;临空煤柱;夹矸弱层;卸压技术;数值模拟

中图分类号:TD324

文献标志码:A

Research on stress state and rock burst prevention technology in gangue-bearing pillar area of inclined coal seam

WU Xuesong^{1,2}, CAO Anye¹, MAI Qiaoli³, WANG Songwei¹, LU Zujun²

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Yanbei Coal Mine, Huating Coal Group Co. Ltd, Huating 744100, China;

3. Huating Coal Mine, Huating Coal Group Co. Ltd, Huating 744100, China)

Abstract: To solve the problems of large deformation and high rock burst risk of goaf side roadway containing gangue layer in fully mechanized top coal caving mining of inclined coal seams, this paper constructed a mechanical model of coal pillar at the side of the lateral overhanging roof to study the variations of the stress field and plastic zone of surrounding rock in coal pillar area during mining by numerical simulation. The results show that in the elastic deformation stage of the coal pillar, the support force, deformation, and accumulated elastic energy of the coal pillar increase with the increase of the suspended roof length. When there is a weak gangue layer in the coal pillar at the goaf side in the roadway area, the stress concentration zone along the gangue surface is generated, which can aggravate the deformation of the roadway and the movement of surrounding coal rock. When the roadway roof above the coal pillar on the side of the goaf is not easily damaged, a suitable carrier and transfer channel of elastic energy can be formed, resulting in the concentration of roadway stress, and increasing the risk of rock burst. In view of the poor anti-damage ability of the coal pillar at the goaf side containing gangue, a pressure relief method, which can relieve the near and far pressure in batches, was put forward. Then, schemes for roof pre-cracking and

收稿日期:2022-06-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51734009)

作者简介:吴学松(1988—),男,山东德州人,高级工程师,博士研究生,主要从事冲击矿压灾害治理研究。

E-mail:609243692@qq.com

曹安业(1982—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,主要从事冲击矿压方面的研究。

coal blasting were formulated, which could effectively reduce the deformation of roadway walls and shift the micro-seismic vibration point to the upper roof far away from the working face. The proposed method can significantly reduce the danger degree of rock burst and effectively ensure the safe mining of the working face.

Key words: inclined coal seam; coal pillars adjacent to goaf; weak layer of gangue; pressure relief technology; numerical simulation

随着我国煤矿井工开采深度和开采强度加大,冲击地压已成为煤矿开采的主要灾害之一。冲击地压灾害发生原因复杂,诱发因素多样^[1-2],煤柱及其影响区域是冲击地压易发、多发区域^[3-5]。冲击地压矿井在进行采掘部署时应优先选择无煤柱、负煤柱开采或小煤柱护巷,降低巷道的冲击危险性^[6]。临空侧煤柱致灾机理主要由采空区侧向静载、超前静载及采空区上覆顶板结构运动或其他动载因素联动造成的,不同类型煤柱以及不同地质赋存条件下的煤柱,其主要致灾因素各有不同^[7-8]。

据现场情况观察及相关研究,夹矸层是影响煤岩(煤柱)稳定性的重要因素之一。煤层夹矸对采场应力分布会产生重要影响,且随夹矸层厚度、性质的变化产生不同的应力异常^[9]。同时,含弱夹层组合岩石变形破坏过程受层间作用效应影响显著^[10],含软弱夹层厚煤层巷道会出现巷道上帮外错滑移变形的典型特征^[11],出现不同的冲击特性。另外,薛成春等^[12]对深部大倾角厚煤层开采能量演化规律与冲击地压发生机理进行研究,建立了倾斜悬顶结构力学模型,求解了顶板弯曲变形能分布特征,确定工作面下部端头、中上部为能量峰值点区域,为顶板防治重点区域。

在倾斜厚煤层开采以及临空煤柱冲击机理及防冲实践上,特厚煤层倾斜分层开采时所出现的临空侧、含夹矸煤柱综合冲击致灾机理尚不清楚。本研究以甘肃某矿特厚倾斜综放工作面为背景,通过力学分析、数值模拟和现场治理实践,对其临空侧、含有弱夹矸层煤柱的冲击特性进行研究,分析冲击地压发生的机理,以指导针对性防治措施制定,并为类似工作面安全生产提供借鉴。

1 工作面概况及冲击地压显现情况

1.1 工作面概况

甘肃某矿 150403 综放工作面是 1504 采区第三个回采工作面,工作面开采深度为 433~535 m,工作面东北部为 150402 工作面采空区,见图 1 和图 2。工作面可采走向长 1 478 m,倾斜宽为 101~176 m,平均倾斜宽 135.6 m,工作面倾角 10°~25°;分层煤厚为 7.8~21.1 m,平均厚 12.5 m。区域内构造较为复杂,褶皱构造发育。沿走向次级褶曲发育,呈波状起伏,底板起伏不平。

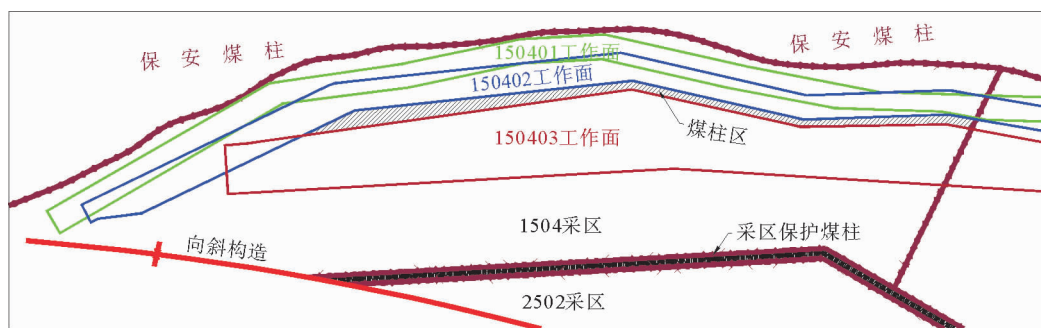


图 1 150403 工作面布置平面图

Fig. 1 Layout plan of 150403 working face

1.2 冲击地压显现情况

150403 综放工作面开采煤层为倾斜煤层,含有多层炭质泥岩夹矸。工作面煤层具有强冲击倾向性,顶、底板具有弱冲击倾向性,综合冲击地压指数为 0.71,具有中等冲击危险性,具备冲击地压显现条件。前两个

工作面(150401、150402 工作面)采用水平分段开采方法,但 150403 工作面采取倾斜分层开采方法。综合考虑防治水、防灭火需要,留取 15 m 左右的煤柱护巷,对冲击地压防治造成一定不利影响,在回采过程中临空侧巷道变形量大,微震震动频繁,冲击危险性较高,见图 3。

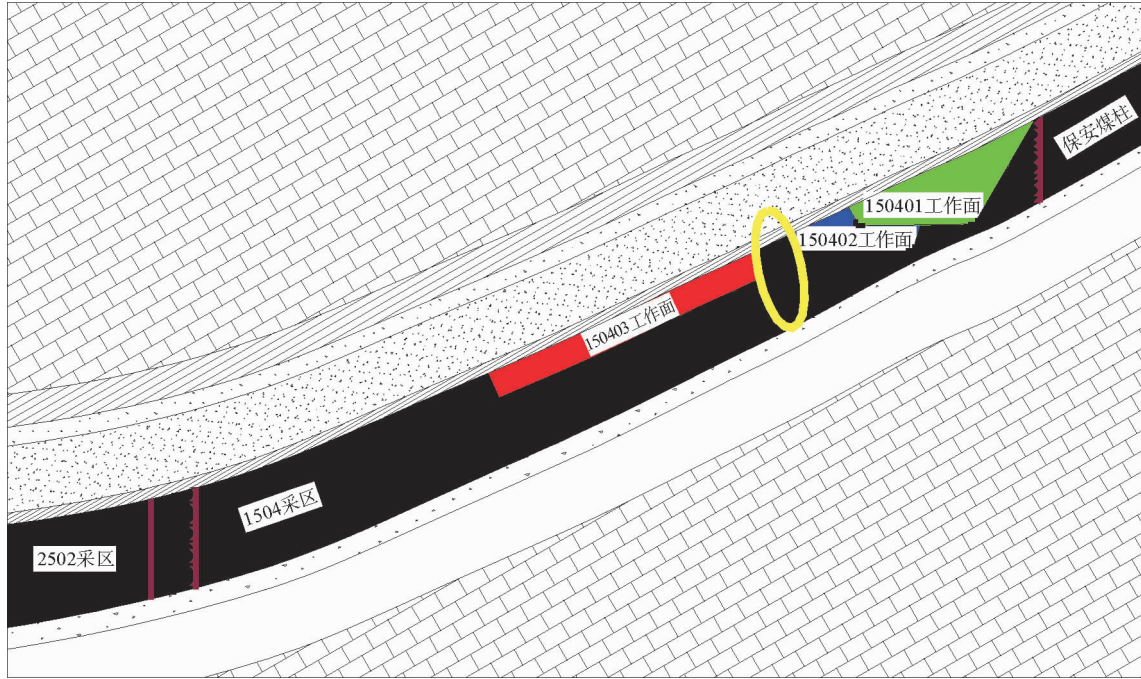


图 2 150403 工作面剖面图(部分区域)

Fig. 2 Sectional view of 150403 working face (part of the area)

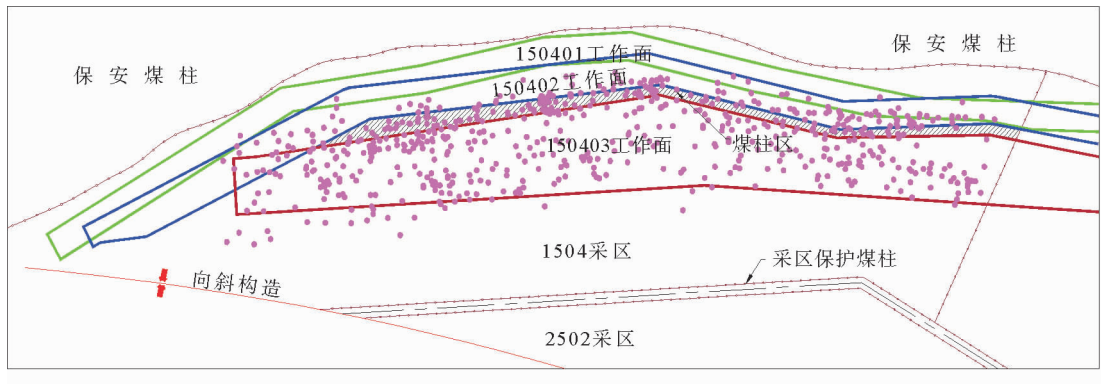


图 3 150403 工作面微震震动点分布($\geq 10^4$ J)

Fig. 3 Distribution of microseismic vibration points in 150403 working face ($\geq 10^4$ J)

2 煤柱受力模型建立与分析

该矿 1504 采区大倾角煤层,150401、150402 工作面采用水平分段布置方式,150403 工作面采用倾斜分层布置方式。当留取区段小煤柱护巷时,随着工作面回采,小煤柱会发生塑性变形破坏,不能形成冲击破坏力源。当采取大煤柱护巷时,大煤柱未发生或未完全发生塑性破坏,会发生弹性变形,积聚弹性变形能,形成冲击破坏力源,同时因大煤柱的支撑力作用,采空区不能或未完全形成贯通破坏,阻碍坚硬顶板的破坏,由此

构建侧向悬顶临空煤柱受力物理模型,见图 4。

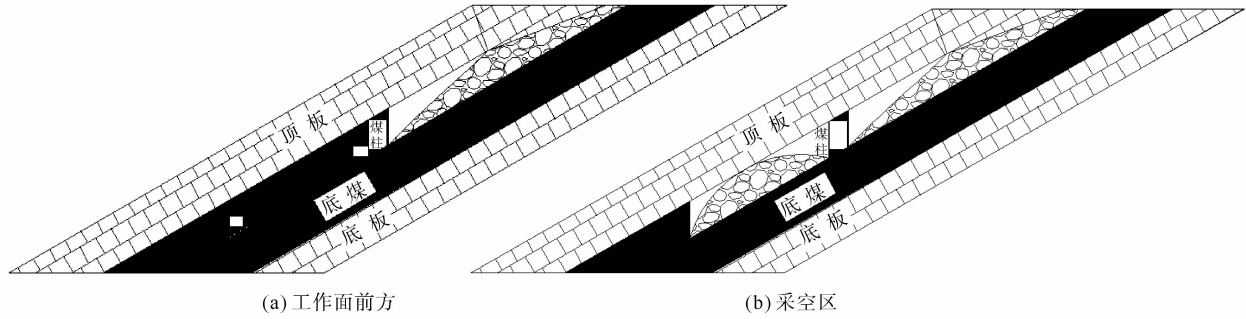


图 4 侧向悬顶临空煤柱物理模型

Fig. 4 Physical model of coal pillar with lateral overhang

为方便煤柱体受力分析,假定煤柱发生弹性压缩变形,取单位长度的煤柱为研究对象,根据胡克定律得:

$$F_{煤柱} = E_{煤柱} \times \frac{\Delta H}{H} \times D \quad (1)$$

其中: $F_{煤柱}$ 表示煤柱支撑力, H 为煤柱高度, D 为煤柱宽度, ΔH 为煤柱受力变形量, $E_{煤柱}$ 为煤柱弹性模量。

假定煤柱未发生破坏,处于弹性变形状态,煤柱中所积聚的弹性能

$$U = \frac{1}{2} F_{煤柱} \Delta H = \frac{E_{煤柱} D \Delta H^2}{2H} \quad (2)$$

在小变形条件下,由于上方采空区悬空覆岩对顶板的荷载通过圆心,弯矩为零,所以不考虑轴向荷载,得到煤柱受力结构力学模型,如图 5 所示。根据超静定理论,图 5 所示力学模型为一超静定结构,通过解除多余支撑反力 F_M 、 F_t 后,得到“一端固定,一端自由”的基本静定系。将顶板岩梁所承受的力简化为均布载荷 q ,则均布载荷 q 在 x 方向上任意处产生的挠度^[13]为:

$$f_q = -\frac{qx}{24EI} (L^3 - 2Lx^2 + x^3) \quad (3)$$

其中: E 表示岩梁的弹性模量, I 表示岩梁断面惯性矩, x 表示岩梁上任一点距梁端距离, L 表示岩梁总长度。

煤柱支撑力 $F_{煤柱}$ 在 x 方向上任意处产生的挠度^[13]为:

$$f_m = \begin{cases} \frac{qL_t x}{6LEI} (L^2 - x^2 - L_t^2), & 0 \leq x \leq L_M; \\ \frac{qL_t}{6LEI} \left[(L^2 - L_t^2)x - x^3 + \frac{L}{L_t} (x - L_M)^3 \right], & L_M \leq x \leq L. \end{cases} \quad (4)$$

其中: L_t 表示煤柱外侧悬空岩梁长度, L_M 表示煤柱支撑点距梁端距离。

由式(3)、式(4)可以推算,在煤柱 $x=L_M$ 处:

$$f_m = \frac{qL_t L_M}{6LEI} (L^2 - L_M^2 - L_t^2), \quad (5)$$

$$f_q = -\frac{qL_M}{24EI} (L^3 - 2LL_M^2 + L_M^3). \quad (6)$$

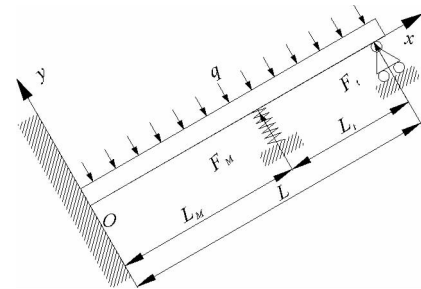


图 5 侧向悬顶临空煤柱结构力学模型

Fig. 5 Mechanical model of coal pillar structure with side overhanging roof

对于所建立的模型,均布载荷 q 、煤柱支撑力 $F_{煤柱}$ 所产生的挠度 f_q, f_m 具有以下关系:

$$\Delta H = f_q + f_m \tag{7}$$

将式(5)、式(6)代入式(7)中,得到:

$$\Delta H = \frac{qL_M}{24EI} \times \frac{-L_i^3 + 9L_M L_i^2 + 2L_M^2 L_i + L_M^3}{L_M + L_i} \tag{8}$$

现场生产过程中,随着 150401、150402 工作面回采,地表出现明显沉陷,表明老顶已出现断裂,结合图 1、图 2 三个工作面布置及图 3 中微震震源分布情况,可得出 $0 \leq L_i \leq L_M$ 。当工作面布置完成时, L_M 可看作常量。因此,在 $0 \leq L_i \leq L_M$ 情况下,对式(8)求导,得出:

$$\Delta H' = \frac{qL_M}{24EI} \times \frac{-2L_i^3 + 6L_M L_i^2 + 18L_M^2 L_i + L_M^3}{(L_M + L_i)^2} > 0 \tag{9}$$

当 $0 \leq L_i \leq L_M$ 时,式(8)中 ΔH 为 L_i 的单调递增函数,故煤柱的变形量 ΔH 随着悬顶长度 L_i 的增大而增大。根据式(1)、式(2),煤柱支撑力 $F_{煤柱}$ 、煤柱积聚弹性能 U 随着悬顶长度 L_i 的增大而增大,煤柱的应力、应变也随之增大,其受力结构可简化,如图 6 所示。当煤柱中含有夹矸层时,若夹矸层的破坏强度 σ 小于煤柱破坏临界值 σ_c ,夹矸层首先发生破坏,煤柱破坏临界值 σ_c 则取决于夹矸层破坏强度,更容易发生破坏。且对于大倾角煤层不规则煤柱,在煤柱变形破坏过程中,顶板发生回转变形,图 6 中 A 点及附近区域变形量大于其他区域,形成明显应力集中,与数值模拟中应力集中区位置基本一致。

3 数值模拟研究

3.1 模型建立

采用 FLAC^{3D} 软件,根据煤层赋存条件和工作面布置建立简化模型,模型尺寸 $X \times Y \times Z = 500 \text{ m} \times 400 \text{ m} \times 710 \text{ m}$,整体模型和夹矸层位置分别如图 7(a)、图 7(b)所示。模型在 X、Y 方向上两端施加水平位移约束,根据矿井地应力实测结果,施加 1.4 倍水平应力,在模型底部施加水平、垂直位移约束, Z 方向上建模至地表,顶部不施加作用力,模型计算分析采用摩尔-库伦模型。

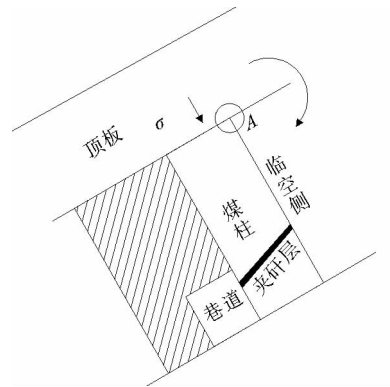


图 6 煤柱受力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the force of the coal pillar

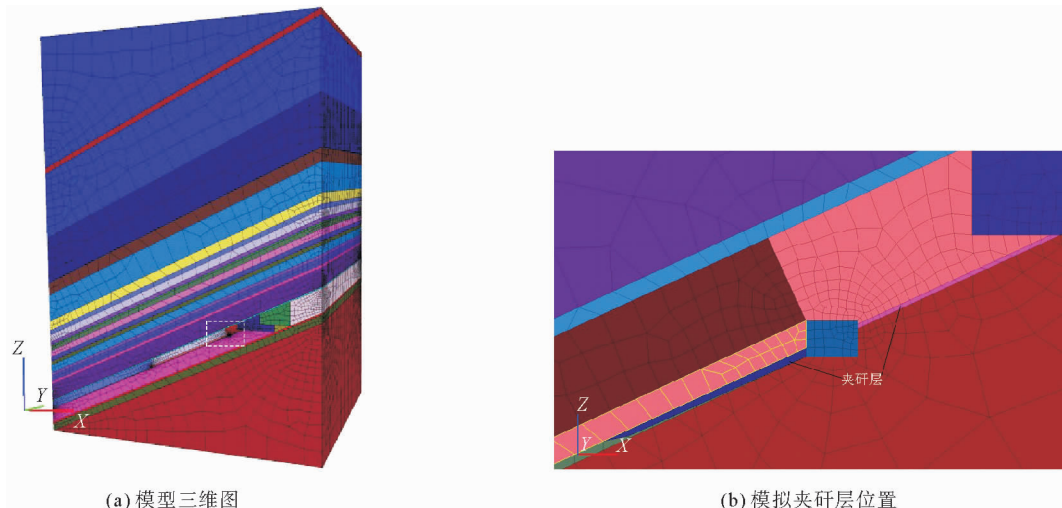


图 7 数值模拟模型

Fig. 7 Numerical simulation model

3.2 煤柱区域应力场分析

模拟中发现,150401、150402、150403 工作面回采后,顶板岩层均发生明显的塑性变形,但煤柱上方区域顶板未发生塑性变形。结合图 8 和图 9 可知,煤柱及上方顶板整体应力水平较高,形成一良好的蓄能区域。



图 8 工作面推进 300 m 塑性区变化

Fig. 8 Changes of plastic zone when the working face advanced 300 m

同时,煤柱上方未发生塑性变形的顶板,具有良好的承载和传载能力。由于 150403 工作面采煤方法发生变化,巷道区域正处于 150401、150402 采空区破断拱与 150403 工作面采空区破断拱的拱脚位置,是主要承载点,见图 9。高应力向下传递,致使煤柱区域产生高应力区。

通过对围岩应力场演变对比分析发现,在模拟回采过程中,煤柱上方区域产生明显的水平应力和垂直应力集中,最高达到 35 MPa,见图 10。水平和垂直应力集中区若在工作面回采过程中不能产生塑性变形破坏,则会积聚大量弹性能,构成冲击显现的能量源。

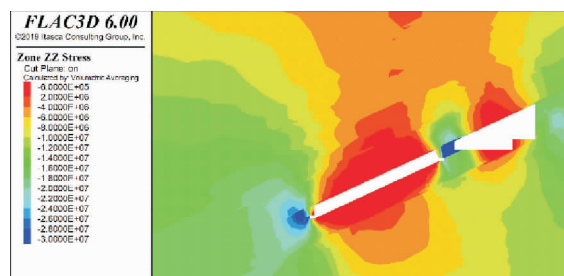


图 9 工作面采空区应力分布

Fig. 9 Stress distribution in the goaf of the working face

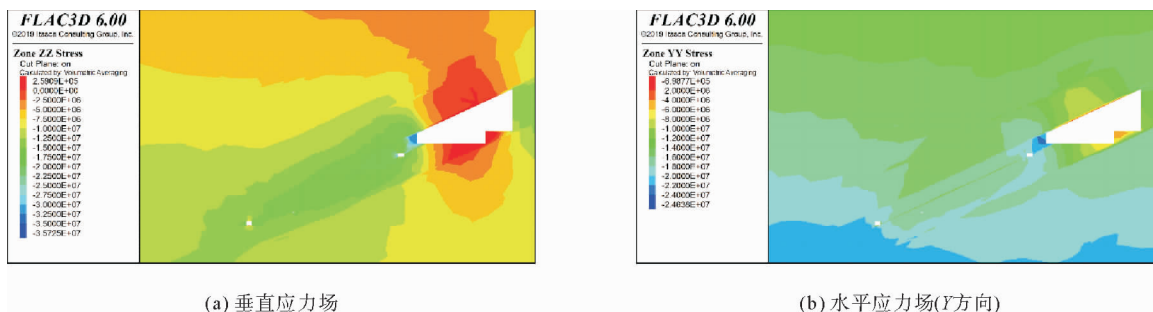


图 10 回采 100 m 时工作面前方 20 m 处应力场

Fig. 10 Stress field at 20 m in front of the working face when mining 100 m

3.3 夹矸弱层影响

在工作面推采过程中,前期巷道内夹矸层较为完整,强度变化不大,虽然对巷道周围应力场产生一定影响,但其巷道支护完全可以控制其变形量。随着推采过程中的围岩破裂,裂隙导通,夹矸层受 150401、150402 工作面采空区积水渗透影响,强度降低,变形量增大,沿夹矸面产生的应力集中区扩大(图 11),超过巷道支撑强度,导致巷道变形量增大。巷道变形进一步诱使周围煤岩运动加剧,将深部应力转移至巷道附近

区域,产生应力集中,而这种应力集中又进一步加剧了巷道变形,形成一种恶性循环。

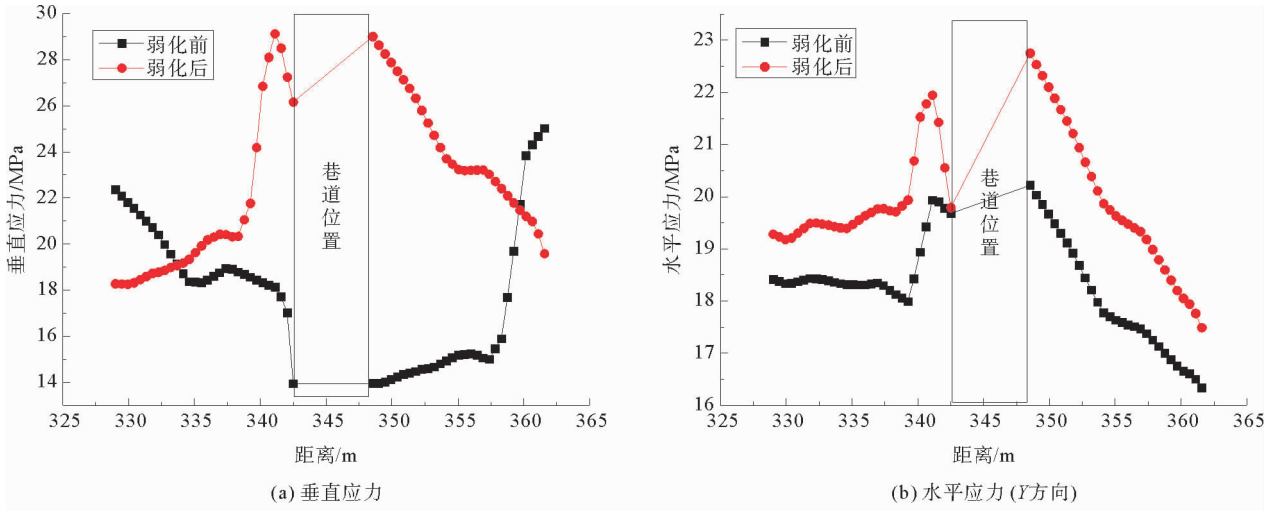


图 11 夹矸弱化前后应力变化

Fig. 11 Changes of stress before and after gangue weakening

4 防治方案制定与实践效果

根据冲击显现机理,降低煤柱静载是遏制冲击地压发生的有效途径,可以采取钻孔或爆破方式^[14-15]。通过对煤柱区域应力场分析,此区域的冲击地压防治方案制定可以从两方面入手:一是采取爆破方式,破坏顶板完整性,减少侧向悬顶距离,切断应力传导途径;二是采用爆破和钻孔卸压方式,破坏煤体完整性,消除高应力集中区。但对于含矸煤柱,其自身抗破坏能力较差,卸压措施不当会加剧巷道变形,造成安全隐患。综合考虑以上因素,提出远近结合、分批次的卸压方式,即在超前应力影响区以外区域采取首次预卸压,首次卸压应控制强度,在超前应力影响区以内采取再次强化卸压,这样既保证煤柱的有效支撑,又及时降低煤柱静载。具体卸压方案为:

1) 首次预卸压

①顶板预裂孔。在巷道临空侧顶板区域采用 ZDY270/170 型架柱式钻机施工一组 3 孔顶板预裂爆破孔,在巷顶向外帮侧布置,方位垂直巷道轴向,具体参数见表 1,爆破采用粉状乳化炸药(1 500 g/Φ63 mm×0.5 m),正向装药,预裂孔布置如图 12 所示。

②钻孔卸压。在巷道临空侧煤柱区域巷帮采用 CMS1-1450/37 型钻车施工一排大直径钻孔,在巷顶向外帮侧布置,方位垂直巷道轴向,孔径 150 mm,孔深 25 m,孔间距 1 m,爆破孔布置如图 13 所示。

2) 强化卸压

在巷道临空侧煤柱区域采用 ZDY270/170 型架柱式钻机施工一组 3 孔煤体爆破孔,爆破参数详见表 2,采用粉状乳化炸药(150 g/Φ32 mm×0.2 m),正向装药,如图 13 所示。

表 1 顶板预裂孔参数

Table 1 Parameters of roof pre-split holes

孔号	孔径/mm	孔深/m	倾角/(°)	组间距/m	药量/kg	装药长度/m
1	75	40	60	15	60	20
2	75	40	70	15	60	20
3	75	40	80	15	60	20

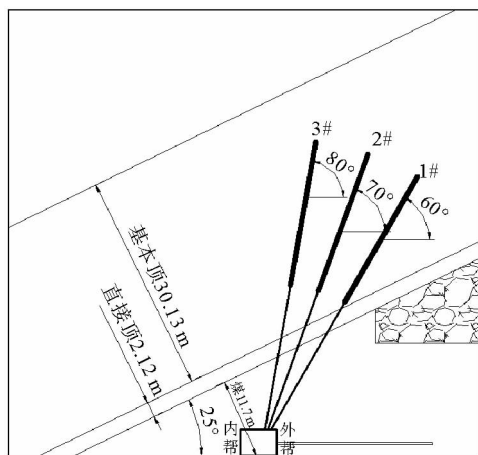


图 12 顶板预裂孔布置图

Fig. 12 Layout of roof pre-split blast holes

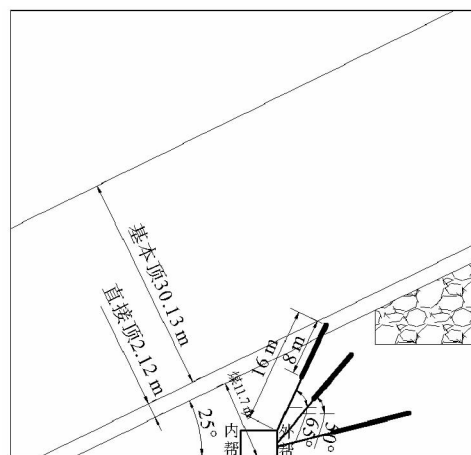


图 13 煤体爆破孔布置图

Fig. 13 Layout of coal blast holes

表 2 煤体爆破孔参数

Table 2 Parameters of coal blast holes

孔号	孔径/mm	孔深/m	倾角/(°)	组间距/m	药量/kg	装药长度/m
1	75	16	65	5	6	8
2	75	16	50	5	6	8
3	75	20	10	5	9	12

按照制定的卸压方案,现场对煤柱区域施工顶板预裂、煤体爆破,此方案施工区域对比已回采未施工区域,巷道临空侧顶板下沉量平均值由 410 mm 降至 182 mm,临空侧巷道帮鼓变形量平均值由 1 182 mm 降至 414 mm,巷道维修量大为降低。同时,该措施施工后监测微震震动点集中性降低,明显向远离工作面方向上方顶板偏移,达到卸压目的,冲击地压危险程度明显降低,能够有效保证工作面安全回采。

5 结论

1) 构建了大倾角特厚煤层倾斜分层开采侧向悬顶临空煤柱受力模型,在煤柱弹性变形阶段,煤柱支撑力、变形量、煤柱积聚弹性能随着悬顶长度的增大而增大。

2) 临空侧煤柱存在夹矸弱层时,沿夹矸面产生的应力集中区,致使巷道变形量加剧,诱使周围煤岩运动加剧。

3) 当临空侧煤柱上方巷道顶板不易发生破坏时,可形成弹性能的良好载体和传递通道,造成巷道应力集中,加剧冲击地压发生危险性。

4) 针对巷道高应力区分布及成因,综合考虑含矸临空煤柱自身抗破坏能力较差问题,提出远近结合、分批次的卸压方式,制定了顶板预裂、煤体爆破方案,有效降低巷道帮鼓变形量及微震震动点集中性,冲击地压危险程度明显降低,有效保证工作面安全回采。

参考文献:

[1] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展 70 年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9): 1-40.
 QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: Establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.

[2] 窦林名,牟宗龙,曹安业,等.煤矿冲击矿压防治[M].北京:科学出版社,2017:1-13.

- [3] 齐庆新,李一哲,李海涛,等.冲击地压应力流思想及其控制理论初探[J].采矿与安全工程学报,2021,38(5):866-875.
QI Qingxin,LI Yizhe,LI Haitao,et al.Preliminary theoretical study on stress flow thought for coal bump and its control[J].
Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(5):866-875.
- [4] 王博,姜福兴,朱斯陶,等.陕蒙接壤深部矿区区段煤柱诱冲机理及其防治[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):505-513.
WANG Bo,JIANG Fuxing,ZHU Sitao,et al.Mechanism and prevention of rock burst induced by segment pillars in the
deep mining areas of Shaanxi-Inner Mongolia adjacent regions[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2020,37(3):
505-513.
- [5] 曹明辉,刘钊,王同旭.断层活化过程及煤柱失稳机理的数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(2):
61-68.
CAO Minghui,LIU Fan,WANG Tongxu.Numerical simulation study of fault activation process and coal pillar instability
mechanism[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(2):61-68.
- [6] 朱斯陶,王博,姜福兴,等.基于冲击地压-矿震协同控制的隔离煤柱合理宽度研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):102-110.
ZHU Sitao,WANG Bo,JIANG Fuxing,et al.Study on reasonable width of isolated coal pillar based on rock burst mine
earthquake coordinated control[J].Coal Science and Technology,2021,49(6):102-110.
- [7] 朱斯陶,马玉镇,姜福兴,等.特厚煤层分层开采底煤整体滑移失稳型冲击地压发生机理研究[J].采矿与安全工程学报,
2021,38(1):31-40.
ZHU Sitao,MA Yuzhen,JIANG Fuxing,et al.Mechanism of rock burst in the bottom coal seam of super high seam with
overall slippage and instability[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(1):31-40.
- [8] 冯龙飞,窦林名,王皓,等.综放煤柱临空侧巷道密集区冲击地压机制研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(6):1100-
1110.
FENG Longfei,DOU Linming,WANG Hao,et al.Mechanism of rockburst in dense roadway area near the goaf of fully-
mechanized large pillars[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(6):1100-1110.
- [9] 宋解放,陆莱平,李振武,等.煤层夹矸赋存区应力分布特征及微震活动规律[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(4):
120-128.
SONG Jiefang,LU Caiping,LI Zhenwu,et al.Characteristics of stress distribution and microseismic activity in rock parting
occurrence area[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering,2021,3(4):120-128.
- [10] 许海亮,朱万字,宋义敏,等.含弱夹层组合岩石变形破坏演化特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(12):
2402-2410.
XU Hailiang,ZHU Wanyu,SONG Yimin,et al.Experimental study on deformation and failure evolution characteristics of
combination rock with weak interlayers[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(12):2402-2410.
- [11] 黄庆享,赵萌焯,张强峰,等.含软弱夹层厚煤层巷帮外错滑移机制与支护研究[J].岩土力学,2016,37(8):2353-2358.
HUANG Qingxiang,ZHAO Mengye,ZHANG Qiangfeng,et al.Mechanisms of outward dislocation sliding of roadway
sides and its support in a thick coal seam with a soft mudstone interlayer[J].Rock and Soil Mechanics,2016,37(8):2353-
2358.
- [12] 薛成春,曹安业,郭文豪,等.深部大倾角厚煤层开采能量演化规律与冲击地压发生机理[J].采矿与安全工程学报,2021,
38(5):876-885.
XUE Chengchun,CAO Anye,GUO Wenhao,et al.Energy evolution law and rock burst mechanism of deep thick seams
with large inclination[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2021,38(5):876-885.
- [13] 北京科技大学,东北大学.工程力学:材料力学[M].北京:高等教育出版社,2006:200-214.
- [14] 窦林名,阚吉亮,李许伟,等.断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J].煤炭科学技术,2020,48(1):24-32.
DOU Linming,KAN Jiliang,LI Xuwei,et al.Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its
effect estimation[J].Coal Science and Technology,2020,48(1):24-32.
- [15] 宋代福,马志涛,崔永强,等.高应力巷帮阶梯型卸压孔合理参数研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(4):
56-64.
SONG Daifu,MA Zhitao,CUI Yongqiang,et al.Research on reasonable parameters of stepped pressure relief holes in high
stress roadway[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2022,41(4):56-64.

(责任编辑:吕海亮)