

双系煤层孤岛结构对工作面矿压显现影响研究*

张宏伟^{1,2,3}, 付兴^{1,2}, 霍丙杰^{1,2}, 陈莹^{1,2,3}, 周坤友¹

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 煤炭资源安全开采与
洁净利用工程研究中心, 辽宁 阜新 123000; 3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,
江苏 徐州 221000)

摘要: 为了确定大同矿区侏罗系煤层群开采形成的孤岛覆岩结构对石炭二叠系工作面开采矿压显现的影响, 以同忻矿 8104、8106 工作面为研究对象, 通过理论分析确定侏罗系煤层群开采孤岛覆岩结构的形成条件, 构建 FLAC^{3D} 数值模型, 分析孤岛覆岩结构对石炭系煤层应力控制及矿压显现特征, 并结合微震监测数据进行了合理验证。研究表明: 当侏罗系煤层遗留煤柱宽度 ≥ 22.3 m 时可形成孤岛覆岩结构, 煤柱宽度为 80 m 时, 孤岛覆岩结构对石炭系煤层工作面影响达到峰值; 数值模拟说明 8106 工作面及 5105 巷道受到孤岛覆岩结构影响, 其矿压显现强度及范围明显增大, 围岩应力最大增至 40 MPa; 微震监测显示 8104 工作面推进孤岛覆岩结构过程中, 个别微震事件能量级别达到了 10^6 J, 具备了诱发冲击地压发生能量条件。

关键词: 双系煤层; 孤岛覆岩结构; 矿压显现; 微震监测

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)03-0845-07

Influence of the Structure of Reverse Ladder Overburden Island on Strata Behaviors during System Coal Mining

Zhang Hongwei^{1,2,3}, Fu Xing^{1,2}, Huo Bingjie^{1,2}, Chen Ying^{1,2,3}, Zhou Kunyou¹

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, P.R.China;
2. Engineering Research Center of Safe Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, P.R.China; 3. The Open Financial Aid Project of Coal Resources and Safety Mining in China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221000, P.R.China)

Abstract: In order to confirm the influence on carboniferous coal seam mining strata behaviors caused in structure of reverse ladder overburden island, FLAC3D numerical calculation model was built based on 8104 and 8106 mining face. Combined with microseismic monitoring data, the characteristics of stress control and strata behavior of carboniferous coal seam which caused by structure of reverse ladder overburden island were analyzed. The results show that the structure of reverse ladder overburden island was formed when the width of Jurassic system coal seam legacy pillar exceeded 22.3 m, the peak value of the effects of structure of reverse ladder overburden island on carboniferous coal seam appeared at the width of 80 m. Numerical Simulation indicates that strata behaviors intensity and range were increased obviously due to 8106 mining face and 5105 roadway have been affected by structure of reverse ladder overburden island, a maximum of surrounding rock stress enlarged to 40 MPa. Microseismic monitoring shows that the distribution of the high level of microseismic events on overlying strata increased gradually in the process of 8104 mining face advancing structure of reverse ladder overburden island. Individual energy classification

* 收稿日期: 2017-12-04(修改稿)

作者简介: 张宏伟(1957-), 男, 黑龙江汤原人, 博士, 教授, 博导, 主要从事矿山压力与岩层稳定性控制方面的研究。

E-mail: kyzhw@263.net

通讯作者: 付兴(1988-), 男, 辽宁省开原市人, 博士生, 主要从事矿山压力与岩层稳定性控制方面的研究。

E-mail: 15841815399@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51274117); 中国矿业大学开放基金(12KF04)

reached 10^6J , which that may induced rock burst.

Keywords: double system coal; structure of reverse ladder overburden island; strata behaviors; microseismic monitoring.

0 引言

双系煤层是大同矿区典型特征,侏罗系煤层经过几十年开采资源已接近枯竭,石炭二叠系煤层已成为矿区主力生产煤层^[1-2]。同忻矿是受双系煤层开采影响的代表矿井,该矿石炭二叠系煤层厚度大、结构复杂且赋存较深,对应上覆侏罗系煤层开采历史悠久,遗留多种尺寸煤柱体,形成复杂空间平衡结构导致石炭系煤层开采失稳破坏,易诱发强矿压及冲击地压^[3-4]。同忻矿开采实践表明,石炭系煤层开采期间多次发生强矿压显现或冲击地压现象,例如8105工作面生产期间共发生3次冲击型动力灾害,第3次冲击地压即发生在工作面通过永定庄矿侏罗系14#煤柱时,表明侏罗系煤层遗留煤柱对石炭系开采的矿压显现具有重要影响,给矿井正常的安全、高效的开采带来隐患。因此,掌握侏罗系遗留煤柱空间结构特征及其对石炭系煤层开采时矿压显现的影响,不仅可以确保双系煤层的生产安全,还对遗留煤柱回收、减少煤炭资源损失具有重要意义。

很多学者针对大同双系煤层开采矿压显现规律进行了研究,取得了丰富成果:窦林名等^[5]将覆岩空间结构分为OX、F与T型3类,分别阐述了不同结构的覆岩断裂运动与震源分布规律,为冲击震动的预防工作提供理论指导;贺虎等^[6]定义了覆岩空间结构失稳型冲击矿压,并揭示此类冲击地压机理,提出煤矿覆岩空间结构演化与诱冲机制;李庶林^[7]介绍了微震技术的特点及微震技术在地下工程安全监测中的作用;付玉平等^[8]通过大比例相似材料模拟实验,研究了神东矿区大采高综采工作面顶板垮落特征及覆岩“三带”高度等;杨敬轩与刘长友等^[9-10]基于大同矿区多采空区坚硬厚层破断顶板群的赋存条件,确定了顶板群结构的失稳规律及其对工作面来压的影响;陈莹等^[11]利用关键层理论、物探技术分析了双系煤层开采形成覆岩运动特征;张宏伟等^[12]以同忻矿开采为背景,确定了石炭系特厚煤层综放开采覆岩破坏高度;高富强等^[13]采用FLAC软件模拟巷道顶、底板的应力值状态,分析存在大范围的塑性屈服区域,具有发生岩爆的危险;张勋等^[14]以大同矿区双系煤层群协同开采为工程背景,分析了纵深大区域煤层群开采覆岩位移、裂隙及应力演化分布特征。

以同忻矿8104、8106工作面为研究对象,运用理论分析确定了侏罗系煤层开采遗留煤柱形成孤岛覆岩结构的力学条件,通过FLAC^{3D}数值模拟分析了孤岛覆岩结构对石炭系煤层矿压显现的影响,并通过现场微震监测数据对理论分析与数值模拟结果进行验证,为同忻矿防治强矿压及冲击地压事故提供参考。

1 工程概况

同忻矿主采石炭二叠系3-5煤层,平均厚度为15 m,直接顶为高岭质泥岩、炭质泥岩及砂质泥岩互层,基本顶为厚层状中硬以上粗粒石英砂岩、砂砾岩互层,同忻矿石炭系煤层部分工作面开采概况如图1所示。对应上覆侏罗系煤层群由大斗沟矿、忻州窑矿、煤峪口矿、永定庄矿、同家梁矿等多矿井开采,主采9#煤层~14#煤层,石炭系与侏罗系煤层群间距为150~200 m,侏罗系煤层群不同开采状态、顶板管理方式造成了侏罗系煤层采场应力场分布具备复杂的时空效应。同时,开采过程中遗留了多种尺寸的大型煤柱,如井田境界煤柱、大巷保护煤柱等,多层采动综合比值判别法显示 $K_2 = 3.08 < 6.3$,侏罗系煤层群遗留大型煤柱体两侧覆岩完整性破坏、裂隙带发育直达地表,侏罗系大型煤柱覆岩形成倒梯形孤岛结构,如图2所示。

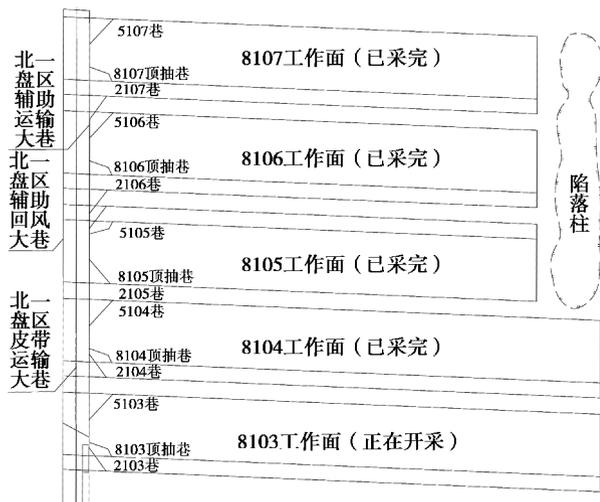


图1 同忻矿石炭系煤层部分工作面开采概况
Fig. 1 The situation of carboniferous coal seam mining face in Tonxin mine

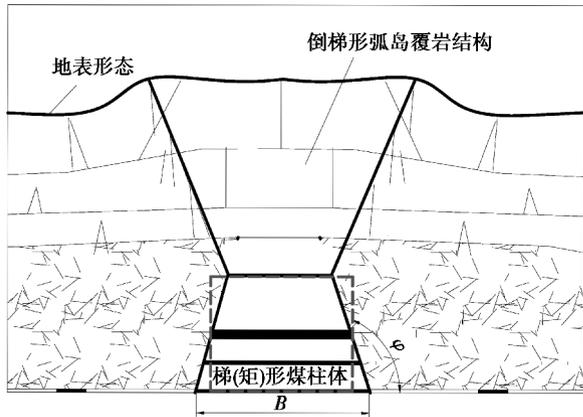


图2 侏罗系大煤柱形成倒梯形孤岛覆岩结构

Fig. 2 Jurassic system coal seam legacy pillar formed the structure of reverse ladder overburden island

2 孤岛覆岩结构形成条件及其力学分析

2.1 孤岛覆岩结构形成条件

基于极限平衡理论,遗留煤柱在两侧采空后围岩应力重新分布,首先导致煤柱两侧边缘遭到破坏,并逐步向深部扩展和转移。煤柱在自身承载能力与支承压力的双重作用下,存在一个使煤柱处于极限平衡的塑性区域,该塑性区的宽度 X 可认为支承压力峰值与煤柱边缘之间的距离^[15-16]:

$$X = \frac{m}{2\xi f} \ln \frac{P + c \cot \varphi}{\xi(p_1 + c \cot \varphi)} \quad (1)$$

式中: m 为煤层开采厚度; P 为支承压力峰值,为 γH 倍数; c 为煤体的黏聚力; φ 为煤体内摩擦角; p_1 为支架对煤帮阻力; f 为煤层与顶板接触面的摩擦因数; ξ 为三轴应力系数, $\xi = 1 + \sin \varphi / 1 - \sin \varphi$ 。

煤柱保持基本稳定条件为煤柱两侧产生塑性变形后,在煤柱中央存在一定宽度的弹性核,该弹性核宽度应不小于煤柱高度的2倍,即煤柱最小宽度 B 应满足^[17]:

$$B = X_{左} + 2m + X_{右} \quad (2)$$

式中: B 为煤柱最小宽度; $X_{左}$ 、 $X_{右}$ 为煤柱左、右塑性区宽度,代入参数得各到各侏罗系煤层遗留煤柱最小稳定宽度如表1所示。

表1 侏罗系煤层群的煤柱最小稳定宽度

Table 1 The minimum stable width of Jurassic system coal seam legacy pillar

煤层编号	煤层厚度/m	煤柱最小稳定宽度/m	煤层所属类别
9#煤层	1.95	7.40	侏罗系
11#煤层	2.25	22.3	侏罗系
12#煤层	4.65	10.3	侏罗系
14#煤层	2.00	10.3	侏罗系
3-5煤层	15.90	—	石炭二叠系

因此,如果侏罗系煤层形成孤岛覆岩结构,按照组成叠加煤柱体保持稳定最小宽度分析,其最小宽度应大于22.3 m;在煤柱宽度小于极限平衡的稳定宽度时,煤柱体发生塑性破坏,不能形成孤岛覆岩结构,此时煤柱体下覆应力应比两侧采空区稍高,但对石炭系煤层应力场影响不明显。

2.2 孤岛结构对石炭系煤层应力场控制力学分析

孤岛覆岩结构载荷是均匀加载在侏罗系遗留煤柱上,与集中载荷“应力泡”传递模式不同,该类结构可认为几乎与两侧覆岩不形成垂直方向上应力传递,因此,对下方应力场影响类似于自重应力的影响。根据北一盘区钻孔综合柱状数据,石炭系3-5煤层至地表共49层岩层,则作用在3-5煤层上方原始自重应力为:当侏罗系煤层群形成孤岛覆岩结构后,3-5煤层承受载荷 σ_0 变为两部分叠加,一部分为双系煤层间岩层的自重载荷 σ_1 ,另一部分为孤岛覆岩结构产生的自重载荷 σ_2 。

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sum_{i=1}^{i=24} \gamma_{Y_i} \cdot h_{Y_i} \\ \sigma_2 = \sum_{j=25}^{j=49} \left(1 + \frac{\cot \varphi \sum_{i=25}^{i=j} h_{Y_i}}{L} \right) \gamma_{Y_j} \cdot h_{Y_j} \\ \sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: γ 、 h 为上覆各岩层厚度及容重; L 为孤岛煤柱宽度; φ 为岩层垮落角,同忻矿岩层参数取值 65° 。代入相关数据,得到孤岛覆岩结构条件下3-5煤层所承受载荷与煤柱宽度 L 的关系,如图3所示。

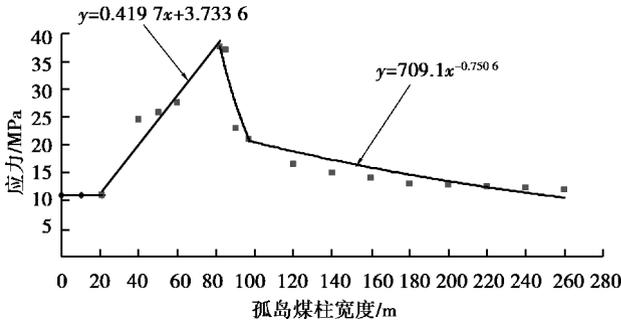


图3 孤岛煤柱宽度与石炭系3-5煤层应力关系

Fig. 3 Relationship between stress of the 3-5 coal seam and stable width

由图可知:当侏罗系煤层遗留煤柱宽度 < 22.3 m 时,遗留煤柱全部塑性破坏,此时达不到形成孤岛覆岩结构条件,石炭系 3-5 煤层垂直承受载荷约 11 MPa;当遗留煤柱宽度 ≥ 22.3 m 时,可形成孤岛覆岩结构,此时 3-5 煤层垂直承受载荷随煤柱宽度的增加而提高,当煤柱宽度介于 30~120 m 之间时,3-5 煤层承受载荷达到 20~37 MPa,其中峰值点 37 MPa 位置出现在煤柱宽度约 80 m 处,该状态下 3-5 煤层承受载荷与不形成孤岛覆岩结构时增大 233%,侏罗系大型遗留煤柱形成的孤岛覆岩结构与石炭系煤层应力场影响关系如图 3 所示。

石炭系 3-5 煤层所受应力与上覆侏罗系煤层群遗留煤柱宽度的拟合关系如式(4)所示。

$$\sigma_g = \begin{cases} 0.4197L + 3.7336 & 22.3 < L \leq 80 \\ 709.1L^{-0.7506} & L > 80 \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_g 为石炭系 3-5 煤层所受应力值; L 为侏罗系煤层群遗留煤柱宽度。

3 孤岛覆岩结构对石炭系煤层煤层 矿压显现数值模拟研究

根据 8106 工作面所在区域地质及开采技术条件,结合上部侏罗系煤层遗留煤柱对应关系构建 FLAC^{3D} 数值模型如图 4 所示,分析侏罗系遗留煤柱形成孤岛覆岩结构对石炭系煤层矿压显现影响。

上覆侏罗系煤层群采空后,8106 工作面开采前孤岛覆岩结构对 3-5 煤层应力特征分布影响如图 5 所示。受到孤岛覆岩结构的影响,垂直方向上孤岛覆岩结构应力传递影响范围超过了 175 m(3-5 煤层与侏罗系煤层层间距离约 175 m),在侏罗

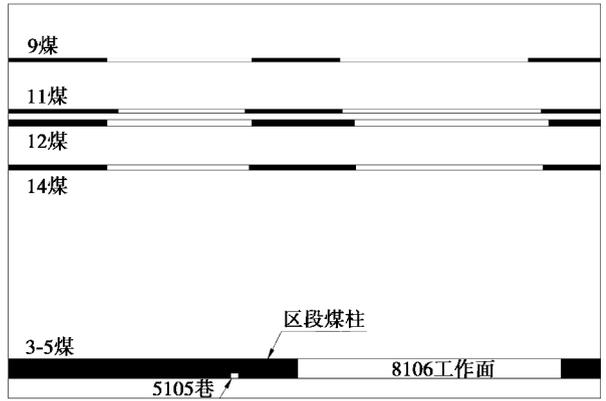


图4 8106工作面倾向力学模型

Fig. 4 Numerical simulation model of 8106 mining face
系煤层开采前 3-5 煤层原岩应力约为 11.1 MPa,在侏罗系煤层采空及孤岛覆岩结构形成后,3-5 煤层应力达到 15~20 MPa,提高了 35%~80%,与理论计算相吻合。

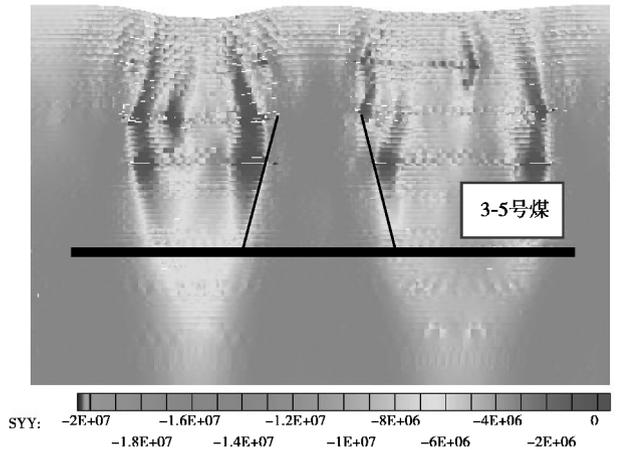


图5 侏罗系遗留煤柱形成孤岛覆岩结构对 3-5 煤层应力影响分布特征(单位:Pa)

Fig. 5 Stress distribution characteristics of 3-5 coal seam influenced by the structure of reverse ladder overburden island (unit: Pa)

孤岛覆岩结构与 8106 工作面开采扰动共同作用下 5105 巷道及护巷煤柱围岩应力分布特征如图 6 所示。5105 巷道护巷煤柱位于孤岛覆岩结构下方,在 8106 工作面开采侧向支承压力与孤岛结构载荷叠加影响下,5105 巷道及护巷煤柱应力升高,达到 30~40 MPa,较原岩应力提高了 170%~260%。8106 工作面侧向应力变化曲线如图 7 所示。8106 工作面侧向支承压力影响范围约 120 m,剧烈影响区为 70 m。因此,石炭系煤层在侏罗系

孤岛覆岩结构影响区域下进行采掘工程,巷道极易变形与破坏,存在发生强矿压显现或冲击地压的危险。

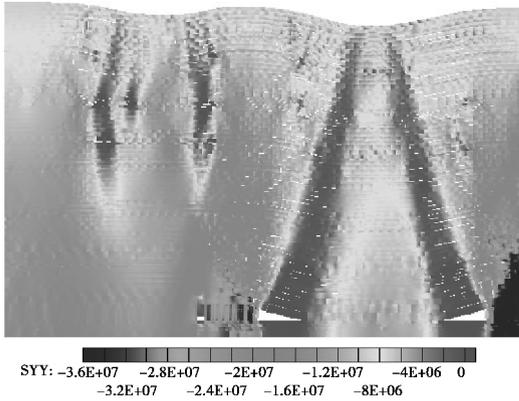


图6 3-5煤层8106工作面开采围岩应力分布特征(单位:Pa)

Fig. 6 Stress distribution characteristics of 8106 mining face surrounding rock on conditions of the structure of reverse ladder overburden island (unit: Pa)

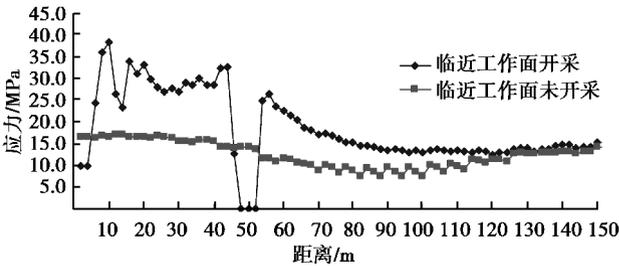


图7 倾向模型8106工作面侧向应力变化曲线
Fig. 7 Lateral stress curves of 8106 mining face

4 孤岛覆岩结构对石炭系煤层矿压显现影响微震监测分析

4.1 石炭系煤层8104工作面上覆孤岛覆岩结构情况说明

工作面微震监测信息反映了覆岩损伤及破裂的空间位置,因此,掌握微震活动的时空特征可以深入研究采动应力、覆岩运动与破坏规律。针对8104工作面,以10 d为单位对该工作面的微震事件进行统计,对应至工作面布置平面图,得出侏罗系煤层开采与8104工作面覆岩破坏的关系。

8104工作面埋深439 m,走向长度约1 950 m,倾向长度约207 m。工作面对应上覆两个永定庄煤矿侏罗系煤层群开采遗留的煤柱区域,当工作面

推至590~650 m位置时,上覆4个侏罗系煤层均有煤柱布置,其中14#、12#煤层为边界煤柱,11#、9#煤层为区段煤柱,暂定义该区域为边界煤柱重叠区域;当工作面推至720~760 m的位置时,14#、12#和11#煤层3个区段煤柱相互重叠,暂定义该区域为区段煤柱重叠区域。8104工作面推进500~900 m时,与侏罗系煤层群遗留煤柱的对应关系如图8所示。

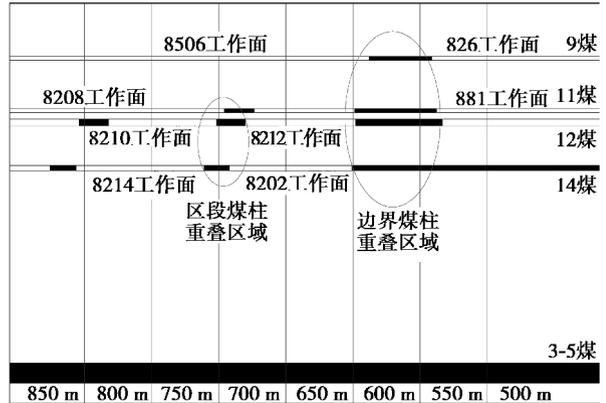


图8 8104工作面部分区域与侏罗系煤柱对应关系
Fig. 8 Corresponding relationship between 8104 mining face part area and the structure of reverse ladder overburden island

4.2 石炭系煤层8104工作面过孤岛覆岩结构期间微震事件分析

图9和图10给出了8104工作面通过孤岛覆岩结构期间微震事件分布情况。

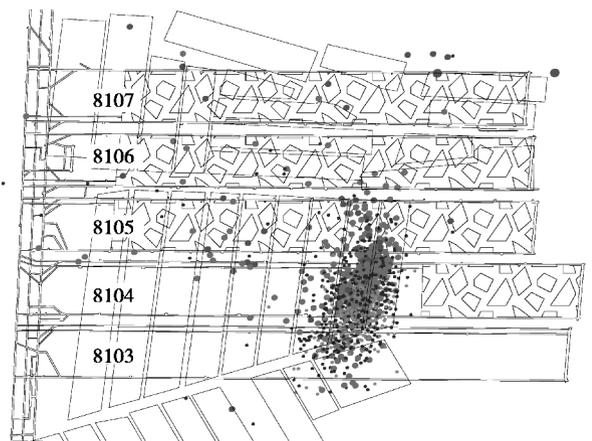


图9 8104工作面推进510~575 m (9月21日—9月30日)微震事件分布

Fig. 9 Microseism events 8104 mining face promoting 510-575 m in Sept. 21th-Sept. 30th

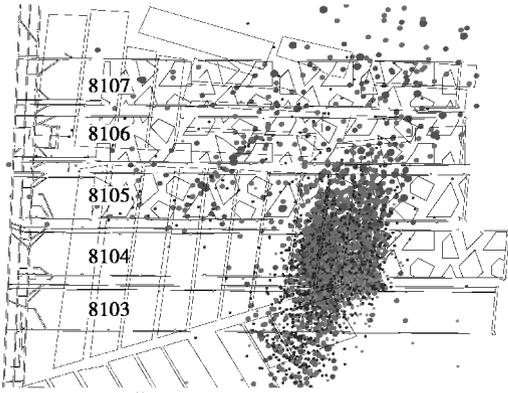


图10 8104工作面推进575~640 m

(10月1日—10月10日)微震事件分布

Fig. 10 Microseism events 8104 mining face promoting 575-640 m in Oct. 1th - Oct. 10th

8104工作面推进过程经历了由接近侏罗系煤层群孤岛覆岩结构(边界煤柱重叠区域)到穿过孤岛覆岩结构的转变。当工作面推进至510 m时,开始受到孤岛覆岩结构影响,工作面上覆岩层微震事件频度开始增加;当工作面推进至575 m时,工作面处于孤岛覆岩结构正下方,此时受到自身开采扰动与孤岛覆岩结构双重效应的影响,上覆岩体应力急剧增高,进而提高了能量积聚程度,使高级别微震事件分布程度加大,个别微震事件能量级别已达到了 10^6 J,说明孤岛覆岩结构对于石炭系煤层开采具有明显影响,引起工作面及回采巷道矿压显现增强,严重时可引发冲击地压。

5 结论

运用理论分析、FLAC^{3D}数值模拟等手段,对同忻矿双系煤层开采条件下孤岛覆岩结构对石炭系煤层工作面开采矿压显现影响进行研究,以微震监测方法对结果进行验证,得出如下结论:

(1)双系煤层开采覆岩结构往往具有复杂的时空效应,当侏罗系煤层群遗留煤柱尺寸宽度 ≥ 22.3 m时可形成孤岛覆岩结构,当侏罗系遗留煤柱宽度为80 m时,孤岛覆岩结构对石炭系煤层应力场影响达到峰值。

(2)孤岛覆岩结构对8106工作面及5105巷道矿压显现影响较大,其围岩应力最大增至40 MPa,工作面出现应力集中及能量积聚。微震监测显示,

8104工作面推进孤岛覆岩结构过程中,个别微震事件能量级别达到了 10^6 J,具备了诱发冲击地压发生的能量条件。

参考文献(References)

- [1] 于斌. 大同矿区特厚煤层综放开采强矿压显现机理及顶板控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014. (Yu Bin. Study on strong pressure behavior mechanism and roof control of fully mechanized top coal caving in extra thickness seam in Datong Coal Mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese))
- [2] 李胜,周利峰,罗明坤,等. 煤层群下行开采煤柱应力传递规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015, 34(6):661-667. (Li Sheng, Zhou Lifeng, Luo Mingkun, et al. The pillar stress transfer law of seam group downstream mining [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2015, 34(6): 661-667. (in Chinese))
- [3] 杜森. 同忻双系煤层千万吨级矿井设计优化分析[J]. 同煤科技,2015,6(2):18-21. (Du Miao. Design optimization analysis on more than ten million tons of coal production of mine Tongxin Coal Mine's double system coal seam [J]. Tong Mei Keji, 2015,6(2):18-21. (in Chinese))
- [4] 王计堂,王秀兰,马德元. 石炭系上组煤层开采与上覆侏罗系煤层开采相互间影响程度分析[J]. 山西煤炭,2007, 27(1):21-24. (Wang Jitang, Wang Xiulan, Ma Deyuan. Influence between the Mining in Carboniferous Seam and the Mining in Upper Jurassic Seam [J]. Shanxi Coal, 2007, 27(1): 21-24. (in Chinese))
- [5] 窦林名. 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. 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. (in Chinese))
- [6] 贺虎. 煤矿覆岩空间结构演化与诱冲机制研究[J]. 煤炭学报,2012,37(7):1245-1246. (He Hu. Research on the evolution mechanism of spatial structure of overlying strata and rock-burst inducing in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7):

- 1245-1246. (in Chinese))
- [7] 李庶林. 试论微震监测技术在地下工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 122-128. (Li Shulin. Discussion on microseismic monitoring technology and its applications to underground projects [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 122-128. (in Chinese))
- [8] 付玉平, 宋选民, 邢平伟, 等. 浅埋厚煤层大采高工作面顶板岩层断裂演化规律的模拟研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 366-371. (Fu Yuping, Song Xuanmin, Xing Pingwei, et al. Study on simulation of caving and evolution law of roof strata of large mining height workface in shallow thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 366-371. (in Chinese))
- [9] 杨敬轩, 刘长友, 于斌, 等. 坚硬厚层顶板群结构破断的采场冲击效应[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 8-15. (Yang Jingxuan, Liu Changyou, Yu Bin, et al. Impact effect caused by the fracture of thick and hard roof structures in a longwall face [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(1): 8-15. (in Chinese))
- [10] 刘长友, 杨敬轩, 于斌, 等. 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, et al. Destabilization regularity of hard thick roof group under the multi gob [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 395-403. (in Chinese))
- [11] 张宏伟, 朱志洁, 霍利杰, 等. 特厚煤层综放开采覆岩破坏高度[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 816-821. (Zhang Hongwei, Zhu Zhijie, Huo Lijie, et al. Overburden failure height of super high seam by fully mechanized caving method [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 816-821. (in Chinese))
- [12] 陈莹, 张宏伟, 朱志洁, 等. 双系煤层开采相互影响下的覆岩运动与破坏规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 67-73. (Chen Ying, Zhang Hongwei, Zhu Zhijie, et al. Research on the law overburden movement and failure under the influence of double period coal seam mining [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 67-73. (in Chinese))
- [13] 高富强, 高新峰, 康红普. 动力扰动下深部巷道围岩力学响应 FLAC 分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 680-685. (Gao Fuqiang, Gao Xinfeng, Kang Hongpu. FLAC Analysis of mechanical response of surrounding rock mass in deep tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 680-685. (in Chinese))
- [14] 张勋, 邓存宝, 王继仁, 等. 纵深大区域煤层群开采覆岩活动规律相似模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(6): 5-11. (Zhang Xun, Deng Cunbao, Wang Jiren, et al. Physical analogous simulation on activity law of overlying strata for the depth and large area coal seam group mining [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 5-11. (in Chinese))
- [15] 张瀚, 李英明, 杨明东. 偏 W 型通风工作面小煤柱设计公式的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 988-993. (Zhang Han, Li Yingming, Yang Mingdong. Study on pillar design formula of mining face with partial W-type ventilation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 988-993. (in Chinese))
- [16] 雷文杰, 张瑶, 孙钦昂. 有限元极限分析法探讨裂隙拱形成机理[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1153-1157. (Lei Wenjie, Zhang Yao, Sun Qing'ang. Analysis on formation of roof fissure arch by limited FEM [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1153-1157. (in Chinese))
- [17] 杨科, 谢广祥, 常聚才. 煤柱宽度对巷道围岩稳定性影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 991-995. (Yang Ke, Xie Guangxiang, Chang Jucai. Study on the stability of rock surrounding gateway with different coal-pillar widths [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5): 991-995. (in Chinese))