

文章编号: 1673-3363-(2015)04-0530-07

特厚煤层下山煤柱区巷道冲击危险性 实时监测预警研究

魏全德¹, 姜福兴¹, 姚顺利¹, 魏向志², 舒凑先¹, 郝其林²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 义马煤业集团股份有限公司, 河南 义马 472300)

摘要 通过理论研究和现场实测, 研究了特厚煤层煤巷下山发生冲击地压的原因和冲击危险性实时监测预警方法。研究表明, 下山煤柱区地层结构与开采形成的“不对称工字形”覆岩空间结构是造成异常应力集中的根本原因。通过建立下山煤柱区上覆岩层空间结构模型和走向支承压力估算模型, 得到了煤柱区域支承压力分布规律, 该支承压力分布区域的移动和量值的变化是导致下山煤柱区巷道发生冲击地压的主要原因。提出了震动场-应力场一体化监测预警下山煤柱区巷道冲击地压方法, 应用微地震系统监测覆岩断裂运动, 通过微震冲量快速预测“冲击危险区”, 通过钻孔应力动态预警“冲击危险程度”, 实现了下山煤柱区巷道“区域与局部相结合”和“冲击危险区与冲击危险程度相结合”的冲击地压实时监测预警。经千秋煤矿 21 采区下山煤柱区现场应用, 效果良好。

关键词 特厚煤层; 下山; 煤柱; 冲击地压; 监测预警

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.04.002

Real-time monitoring and early warning of rock burst risk in dip coal pillar area of extra-thick coal seam

WEI Quande¹, JIANG Fuxing¹, YAO Shunli¹, WEI Xiangzhi², SHU Couxian¹, HAO Qilin²

(1. School of Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Yima Coal Industry Group Corporation Ltd, Yima, Henan 472300, China)

Abstract By means of theoretical analysis and field observation, the occurrence cause of rock burst in dip coal pillar area of extra-thick coal seam, and the real-time monitoring and early warning technology were studied in this paper. The results show that the strata structure of dip pillar area and the asymmetric I-shaped spatial strata structure formed by excavation are primary causes of abnormal stress concentration. By establishing spatial strata structure model and strike abutment pressure calculation model in the dip pillar area, the stress distribution law of the overlying strata in the pillar area was obtained. It is revealed that the stress distribution area movement and value variation are the main causes of rock burst in the dip roadway near the coal pillar. In addition, the integrated monitoring and early warning of rock burst in dip coal pillar area were proposed, that is, the strata fracturing and movement were monitored by microseismic system, and the risk region of rock burst was predicted by index of microseismic mo-

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226803); 国家自然科学基金项目(51174016); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51204010)

作者简介: 魏全德(1985—), 男, 山东省潍坊市人, 博士, 从事矿山动力灾害防治方面的研究。

E-mail: wfwqd@126.com

Tel: 010-62332900

mentum, while the risk level of rock burst was further predicted by borehole stress meters. Thus, the monitoring and pre-warning system of “regional monitoring and prediction and local monitoring and early warning” were established. The research achievements were applied to the dip coal pillar area of No.21 mining district, Qianqiu coal mine successfully.

Key words extra-thick coal seam; district dip; coal pillar; rock burst; monitoring and early warning

据不完全统计, 2012 年至 2014 年, 我国在下山煤柱区巷道发生冲击地压事故 7 起, 造成数十人伤亡, 摧毁巷道上千米。国内外诸多专家学者, 对厚及特厚煤层冲击地压机理已有研究, 例如, 宋振琪等^[1]对冲击地压事故发生的原因、灾害实现条件及其动力信息进行了系统研究, 并提出了各类冲击地压预测和控制的方法; 潘立友等^[2]对深部矿井构造区厚煤层冲击地压机理进行了研究; 潘俊锋等^[3]对厚煤层综放开采冲击地压发生机理进行了研究; 姜福兴等^[4-5]以义马煤田典型冲击地压事故为研究背景, 对巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理进行了分析, 并提出复合厚煤层发生冲击地压的“震-冲”机理。对于冲击地压监测预警、预测方法及设备已有较多成果, 例如应力监测^[6-7]、微震监测^[8-10]、钻屑量监测^[11]、声发射监测^[12-13]、电磁辐射监测^[14-16]、震动波 CT 监测^[17-18]等, 但是, 这些预测、预警方法多是单套系统进行监测预测或预警, 多参量的预测或预警方法现场实践较少。迄今为止, 厚及特厚煤层下山煤柱区巷道冲击地压机

理研究较少, 未见系统性的研究成果, 且无可靠的、科学的冲击危险性实时监测预警方法。

千秋煤矿 21 采区下山煤柱区巷道、硐室群已多次发生冲击地压事件、矿震, 矿方采取了大量巷帮扩修、底板落底、大直径卸压钻孔等措施, 并在巷道交叉口应用“锚网索+大立柱”框架式强支护, 但是, 冲击地压事件、矿震仍然频繁发生, 下山巷道和硐室存在严重的冲击危险。21 采区深部煤炭资源储量巨大, 4 条下山仍要为该采区服务 20 a 以上, 因此, 以千秋煤矿 21 采区为背景, 通过理论研究和现场实测, 以“应力场”监测为主, “震动场”监测为辅, 对特厚煤层下山煤柱区巷道冲击危险性实时监测预警方法开展研究。

1 工程背景

千秋煤矿 21 采区开采情况和监测系统测点布置如图 1, 正在回采的工作面有 21141, 21172 工作面, 21141 工作面处于工作面开采末期。下山煤柱区平均煤厚 25.2 m, 是具有强冲倾向性的特厚煤层。

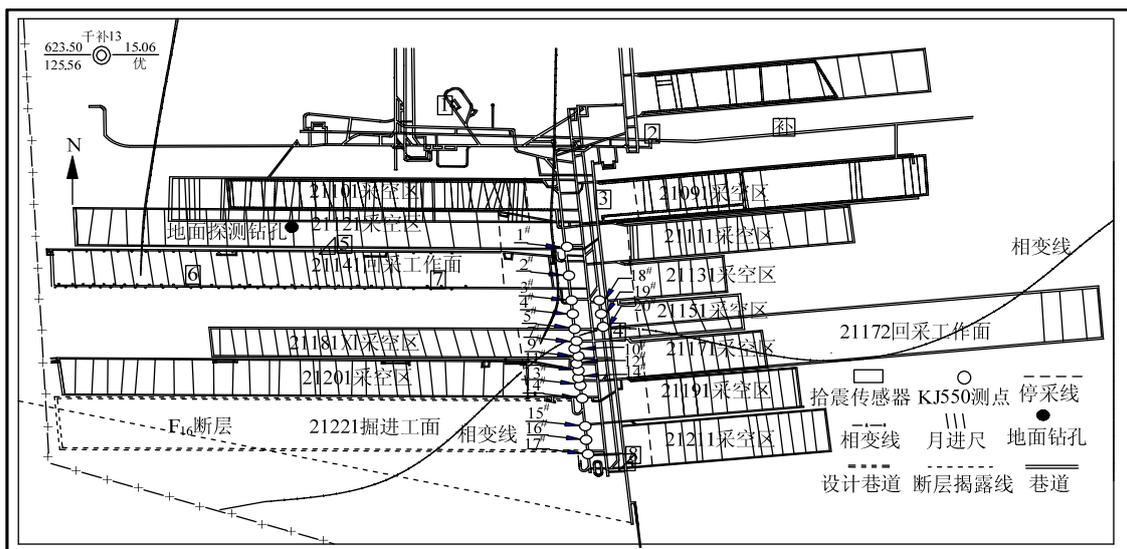


图 1 采区开采概况及震动场-应力场测点布置

Fig.1 Overview of the mining area and measuring point layout of vibration-stress field

煤层的顶底板岩性如图 2 中所示, 煤层底板自煤层向下为 6.17 m 的炭质泥岩、泥岩、粉砂岩、细砂岩互层, 大于 182.08 m 的粉砂岩、细砂岩。煤层

顶板岩层自下向上分别为 25.44 m 泥岩, 205.01 m 的砾岩、粉砂岩、细砂岩、泥岩混合岩层, 406.46 m 的砾岩层, 地表黄土层较薄, 部分地段砾岩层已裸

露。21 采区布置 4 条下山巷道，图 1 中从左到右分别为轨道下山、皮带下山、专用进风下山和专用回风下山。轨道下山、皮带下山和专用回风下山均沿

煤层顶板布置，专用进风下山为沿煤层底板留有 2 m 底煤布置，下山巷道均为煤巷。

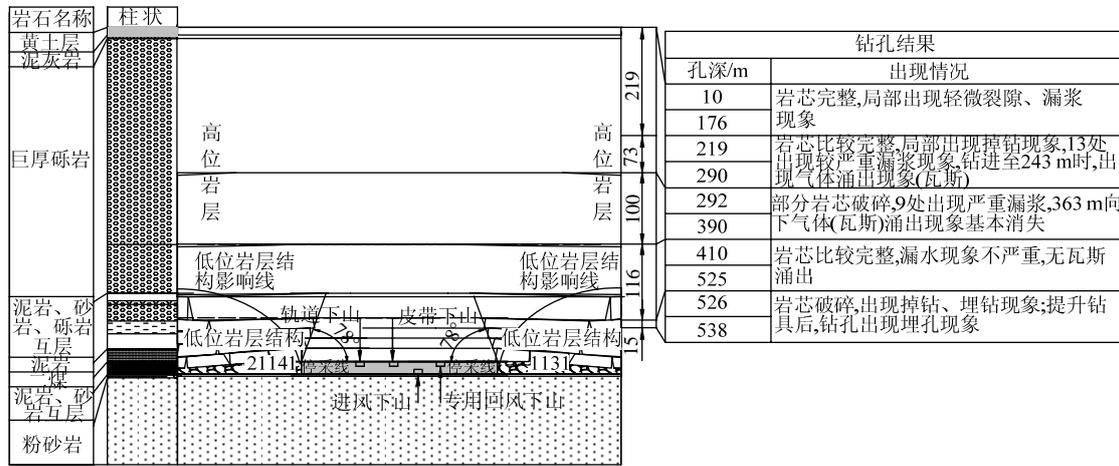


图 2 21 采区下山不对称“工”字形结构示意图
Fig.2 Asymmetric I-shaped layout of down-dip roadway in No.21 mining district

2 下山煤柱区巷道冲击原因分析

2.1 “不对称工字形”覆岩空间结构分析

经微地震事件实测结果与地面探测钻孔对比分析，21 采区下山两翼工作面回采至设计停采线时，形成如图 2 所示的覆岩空间结构，未破碎的煤岩体剖面类似于“工字形”^[19]。下山两侧工作面推采接近下山时，顶板为“工”字的上横，其上作用有楔形巨厚砾岩的自重力，底板为“工”字的下横，下山煤柱为“工”字的竖“|”，两边工作面距离下山煤柱的距离不同，称为“不对称工字形结构”。非充分采动条件下，工字形结构内存在低位岩层结构和高位岩层结构，高位岩层结构近似不动形成静载，低位岩层结构随着工作面开采动态变化，形成动载，若回采工作面停采线设计不合理，低位岩层结构对下山区域造成扰动。为确定动静支撑压力的叠加影响程度及范围，需要建立工作面走向支撑压力估算模型，对下山两侧支撑压力进行叠加应力估算，进而评估下山潜在的冲击危险区。

2.2 下山煤柱区应力估算

根据覆岩空间结构形态，以下山煤柱区一侧受力分析为例，建立非充分采动条件下支撑压力估算模型，如图 3 所示，以关键岩层为计算单位，其上软弱岩层及其自重作为载荷作用在关键岩层上，从煤层到地表分为 n 组，每组由于工作面的开采而发生离层，各关键层离层前端的连线即为岩层断裂线，该线与水平线的夹角 α 为岩层断裂角。

图 3 中： h_{max} 为压力传递拱的最大高度，m； H_{max} 为采深，m； M_i 为第 i 层关键岩层的厚度，m； H_i 为第 i 层关键岩层距离煤层底板的距离，m； L_{wi} 为第 i 层关键岩层的跨度，m； α 为岩层断裂角，(°)； X, Y 坐标系为移动坐标系，以工作面为 X 起点。其中压力传递拱的最大高度、各关键岩层的跨度和岩层断裂角根据微地震实测数据分析确定。

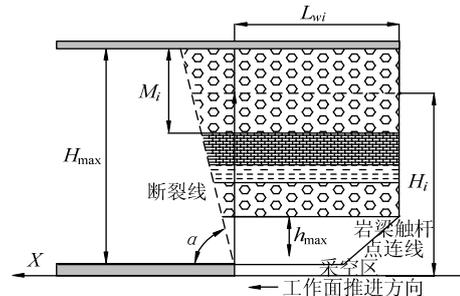


图 3 支撑压力估算模型
Fig.3 The calculation model of abutment pressure

煤层上支撑压力 σ 由以下 2 部分组成：

1) 在采空区上方各关键层暴露部分传递到工作面前方煤体上的压力之和称为支撑压力增量 $\Delta\sigma$ ：

$$\Delta\sigma = \sum \sigma_i \quad (1)$$

式中： $i=1\sim n$ ， i 指第 i 个关键岩层。

2) 上覆岩层自重产生的支撑压力 σ_q 。

支撑压力由下式计算：

$$\sigma = \Delta\sigma + \sigma_q \quad (2)$$

代入 2011 年 1 月 1 日 00:00:00 至 2011 年 11

月1日00:00:00的21141工作面开采条件和微震分析结果, 支承压力估算结果如图4所示。21141工作面动态支承压力随着工作面的回采向下山煤柱区移动。

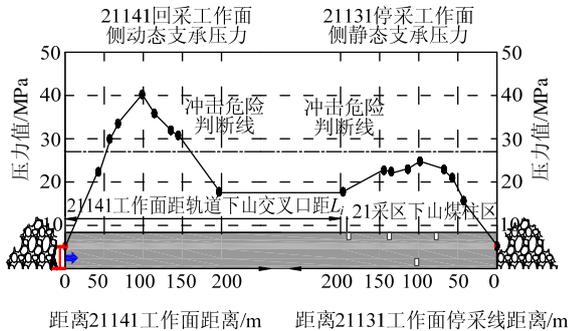


图4 支承压力估算结果

Fig.4 Estimated curve of abutment pressure

2.3 下山煤柱区巷道冲击地压原因分析

下山覆岩空间结构内, 高位岩层作为几乎恒定的外力作用在下部岩层及煤体上, 低位岩层形成的应力随着工作面的推采而动态分布, 逐渐向下山区域移动, 是变化的动载。在回采工作面超前支承压力影响范围未达到下山煤柱区巷道时, 在几乎恒定的高应力作用下, 下山煤柱区巷道围岩体已发生流变蠕变, 存在强度不够而破坏、稳定性不够而破坏以及围岩三向受力向单向受力演变过程中弹性能释放而导致的破坏或冲击^[20], 可称为蠕变型冲击。回采工作面影响范围进入下山煤柱区时, 剧烈的采动影响将增加下山煤柱区冲击地压发生的可能。因此, 下山两翼工作面形成的叠加支承压力分布区域的移动和量值的变化将导致巷道大变形或冲击, 是下山煤柱区巷道发生冲击地压的主要原因。

为便于现场冲击地压的防治, 假定冲击临界应力比 $\sigma/[\sigma_c] > 1.5$ 为冲击危险判断标准, 根据图4所示应力估算结果, 21141工作面运输平巷超前工作面65 m至165 m范围内在动静支承压力叠加作用下存在冲击危险。21141工作面与21131工作面停采线之间距离大于394 m时, 下山两侧支承压力未叠加, 其冲击临界距离约为340 m, 但是, 设计距离为330 m, 因此, 在不考虑其他条件影响下, 21141工作面回采至停采线附近时, 21采区轨道下山及其附近的联络巷、硐室群存在严重的冲击危险。

3 震动场-应力场一体化实时监测预警方法

支承压力分布区域的移动和量值的变化是导致下山煤柱区巷道发生冲击地压的主要原因, 因

此, 下山煤柱区域冲击危险性实时监测预警的关键是动态的支承压力分布和煤体应力变化量值。支承压力分布区域的移动是上覆岩层断裂造成, 通过震动场监测可得到覆层断裂、运动规律。煤体应力量值的变化可以通过钻孔应力监测, 对煤体应力量值的变化进行实时监测, 以“应力场监测为主, 震动场监测为辅”实现下山煤柱区巷道冲击危险性的实时监测预警。

3.1 监测预警系统布置方案

震动场监测选用微地震监测系统, 通过拾震传感器将上覆岩层的断裂、破裂信号实时采集。应力场监测选用实时在线式的煤层钻孔应力监测系统, 对煤体应力变化值进行实时监测。针对下山煤柱区发生冲击地压的原因, 对拾震传感器和煤层钻孔应力计测点进行统筹布置, 布置方法如下:

1) 对地层结构与开采条件分析, 建立相应的覆岩空间结构模型, 进行叠加应力估算, 得到相应开采条件下的支承压力分布规律。由于支承压力分布范围是动态变化的, 覆岩空间结构模型内部分参数根据后期震动场实测数据修正。

2) 根据叠加应力估算结果, 评估潜在冲击危险区域, 三维空间包裹式布置拾震传感器, 实现微地震监测内场定位, 提高震动场监测定位精度。

3) 覆盖冲击危险区域布置钻孔应力计, 对煤体应力变化(相对应力值和应力增量)进行实时在线监测。

4) 现场应用中, 应力场监测需要根据震动场监测分析结果或常规钻屑检验结果, 适当加密动态危险区测点密度或在异常危险区补增应力测点。

3.2 微震冲量

震动场监测数据分析中多采用微地震事件的平面投影、走向剖面投影、倾向剖面投影和微震事件能量、频次统计分析, 但是, 单独研究和分析微地震事件的频次、能量只能反映微地震活动的一个侧面, 在一定的时空域内, 对微地震事件的频次和能量进行综合研究, 对于现场应用才更有意义; 因此, 为提高震动场监测数据分析的准确性, 简化现场技术人员分析过程, 提出微地震冲量对冲击危险区进行预测。微地震冲量是基于微地震事件的时间、空间、能量和频次的综合指标, 其集中程度与冲击危险性成正向相关性, 简称微震冲量。

基于时空域(V, T)的岩体冲量等于该时空域中所有微地震能量的总和除以体积, 计算公式^[21]为

$$M(V,T) = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N e_i \quad (3)$$

式中： $e_i(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 为第 i 个微地震事件的震源能量； V 为空间域； T 为时间域； N 为时空域(V, T)内的微震事件数目。

3.3 预警方法

微震冲量是时间、空间、能量和频次的综合指标，且分析结果是渐变色等值线图，高度、中度、一般集中区域分别显示为红色、黄色、绿色或蓝色，黄色和红色为冲击危险预警，绿色和蓝色表示无冲击危险。应力场钻孔应力测点预警阈值分为绿色、黄色、红色 3 级。各矿不同条件下预警阈值不同，千秋煤矿预警阈值已修正，绿色预警 $\sigma \in [0, 10 \text{ MPa})$ 表示无冲击危险，黄色预警 $\sigma \in [10 \text{ MPa}, 15 \text{ MPa})$

表示中等冲击危险，红色预警 $\sigma \in [15 \text{ MPa}, \infty)$ 表示严重冲击危险。预警阈值是通过现场预警测点的钻屑量监测、检验和修正后确定，钻孔应力监测预警阈值的确定及修正方法已有研究成果发表^[22]。

震动场-应力场一体化实时监测预警方法：

- 1) 微震冲量快速预测冲击危险区域，实现“区域监测预测”，预测区域通常上百米。
- 2) 通过钻孔应力测点实时监测，实现“局部监测预警”，预警区域通常在 50 m 范围之内。
- 3) 震动场-应力场一体化实时监测预警以“应力场”监测为主，“震动场”监测为辅，两者相互验证，互补不足。将单指标预警进行层次化，得到综合预警结果，部分特殊区域采取钻屑抽检。预警准则如表 1 所列，预警判别流程如图 5 所示。

表 1 震动场-应力场一体化实时监测预警准则

Table 1 Integrated real time monitoring and early warning principle based on “vibration-stress field”

微震冲量(绿、黄、红)	应力预警等级(绿、黄、红)	钻屑检验	预警等级(绿、黄、红)
冲量(黄/红)集中	绿($\sigma_i > \sigma$)	对比一月内应力变化量值	应力量值增加 1 MPa 以上则定为黄色预警
冲量(黄/红)集中	黄($\sigma_i > \sigma \geq \sigma_j$)		黄色预警
冲量(黄/红)集中	红($\sigma \geq \sigma_j$)		红色预警
冲量(黄/红)集中	无应力测点	钻屑检验	钻屑指标确定预警等级，并增设应力测点
冲量绿/蓝色集中	绿($\sigma_i > \sigma$)		不预警
冲量绿/蓝色集中	黄($\sigma_i > \sigma \geq \sigma_j$)		黄色预警
冲量绿/蓝色集中	红($\sigma \geq \sigma_j$)		红色预警

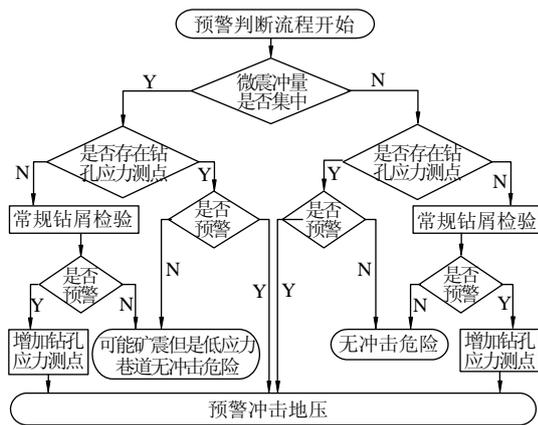


图 5 震动场-应力场一体化实时监测预警判断流程
Fig.5 Vibration field-stress field integration real-time monitoring and forewarning judge flow

4 监测预警实例

通过图 6 微震冲量分布图，可以快速预测千秋煤矿 21141 工作面前方及其对应下山煤柱区巷道出现微震冲量红色预警；21121 工作面上巷对应下山巷道、21181 工作面下巷对应下山巷道和 21172 回

采工作面前方出现微震冲量黄色预警。21121 工作面上巷对应段下山巷道无应力测点，对轨道下山巷道 360 m 处两帮进行钻屑检验，未出现超标且无顶钻、卡钻、吸钻、煤炮等动力现象。

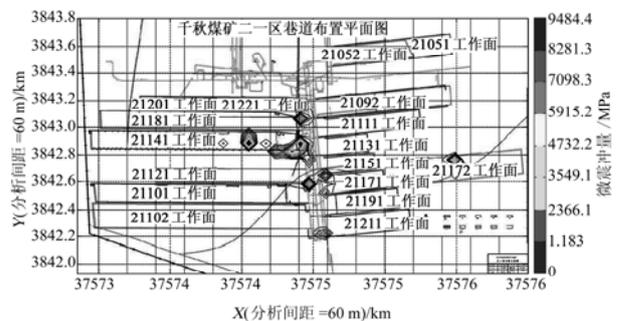


图 6 2012 年 2 月 1 日至 2 月 29 日微震冲量分布图

Fig.6 Microseismic impulse distribution from 2012-02-01 to 2012-02-29

2012 年 3 月 1 日下山监测区域预警测点如图 7 所示，轨道下山 6 号测点 10.67 MPa，8 号测点 11.29 MPa，13 号测点 11.44 MPa，轨道下山 3 号测点 9.14

MPa, 接近黄色预警且相对上月(7.76 MPa)应力量值增加 1.38 MPa。

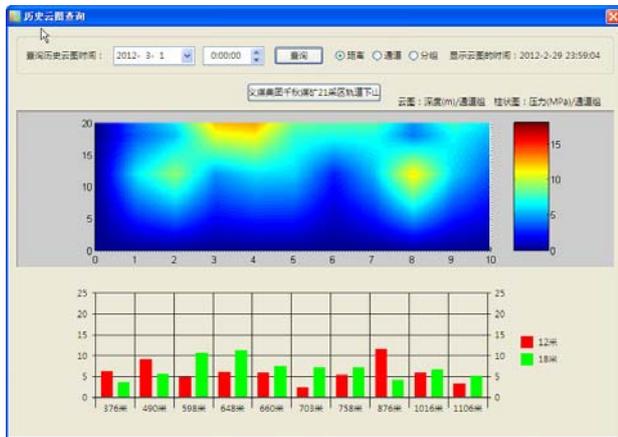


图7 2012年3月1日下山测点应力云图

Fig.7 Stress contour of the down-dip roadway measuring point on 2012-03-01

根据预警准则和预警判断流程,可以确定冲击地压预警区域如下:21141 工作面对应下山煤柱区巷道段为黄色预警;21121 工作面上巷对应下山巷道无冲击危险;21181 工作面下巷对应下山巷道为黄色预警;轨道下山 623 m(6号测点)、678 m(8号测点)为黄色预警。千秋煤矿及时对预警区域下达了预警通知,采取了大直径钻孔卸压和限制人员等措施,2012-03-06 T 1:08:00 在下山煤柱区发生 201 000 J 能量微震事件,矿震台震级 0.8,井下出现煤炮,震感强烈,但巷帮无破坏。

5 结论

1) 对下山煤柱区地层结构与开采形成的覆岩空间结构研究,发现下山煤柱区上覆岩层呈“不对称工字形”结构,建立了下山煤柱区上覆岩层空间结构模型和走向支承压压力估算模型,得到了支承压压力分布规律,揭示了该支承压压力分布区域的移动和量值的变化是导致下山煤柱区巷道发生冲击地压的主要原因。

2) 提出了震动场-应力场一体化监测预警下山煤柱区巷道冲击地压方法,通过微震冲量快速预测“冲击危险区”,通过钻孔应力动态预警“冲击危险程度”,实现了下山煤柱区巷道“区域与局部相结合”和“冲击危险区与冲击危险程度相结合”的冲击地压实时监测预警。

3) “震动场-应力场”一体化监测预警冲击地压方法,不但适用于两翼开采的特厚煤层下山冲击地压监测预警,而且适用于其他煤层厚度条件。但

是,预警指标需要现场实践修正。

4) 21141 工作面现场实测数据分析、估算得到的叠加应力结果表明,21141 工作面下平巷超前工作面 65 m 至 165 m 范围内存在严重冲击危险。

5) 本文给出了下山煤柱区巷道、硐室群发生冲击的原因和冲击危险性实时监测预警方法,可以避免事故的发生,但是,不能从根本上避免发生冲击地压,因此,合理下山保护煤柱宽度的留设和下山巷道层位选择方法有待进一步研究和实践。

参考文献:

- [1] 宋振骐, 卢国志, 彭林军, 等. 煤矿冲击地压事故预测控制及其动力信息系统[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2006, 25(4): 1-5.
SONG Zhenqi, LU Guozhi, PENG Linjun, et al. Forecast and control of rock burst in collieries and its dynamic information system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 25(4): 1-5.
- [2] 潘立友, 孙刘伟, 范宗乾. 深部矿井构造区厚煤层冲击地压机理与应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 126-129.
PAN Liyou, SUN Liuwei, FAN Zongqian. Mine pressure bump mechanism of thick seam in deep mine structure zone and application[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 126-129.
- [3] 潘俊锋, 连国明, 齐庆新, 等. 冲击危险性厚煤层综放开采冲击地压发生机理[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(6): 87-90.
PAN Junfeng, LIAN Guoming, QI Qingxin, et al. Mechanism of rock outburst occurred from fully mechanized longwall top coal caving and mining in thick seam with rock outburst danger in potential[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(6): 87-90.
- [4] 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.
- [5] 姜福兴, 王平, 冯增强, 等. 复合型厚煤层“震-冲”型动力灾害机理、预测与控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 1605-1609.
JIANG Fuxing, WANG Ping, FENG Zengqiang, et al. Mechanism prediction and control of “coal out burst induced by mine quake” kind dynamic accident in composite thickness coal[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 1605-1609.

- [6] 付东波, 齐庆新, 秦海涛, 等. 采动应力监测系统的设计[J]. 煤矿开采, 2009, 14(6): 13-16.
FU Dongbo, QI Qingxin, QIN Haitao, et al. Design for mining stress monitoring system[J]. Coal Mining Technology, 2009, 14(6): 13-16.
- [7] 王平, 姜福兴, 王存文, 等. 冲击地压的应力增量预报方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊 1): 5-9.
WANG Ping, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. The stress incremental forecasting method of rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(Sup 1): 5-9.
- [8] 陆菜平, 窦林名, 王耀峰, 等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 450-456.
LU Caiping, DOU Linming, WANG Yaofeng, et al. Microseismic effect of coal materials rockburst failure induced by hard roof[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 450-456.
- [9] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1511-1516.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua, CHENG Yunhai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511-1516.
- [10] 夏永学, 康立军, 齐庆新, 等. 基于微震监测的 5 个指标及其在冲击地压预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2011-2015.
XIA Yongxue, KANG Lijun, QI Qingxin, et al. Five index of microseismic and their application in rock burst forecastion[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2011-2015.
- [11] GU S T, WANG C Q, JIANG B Y, et al. Field test of rock burst danger based on drilling pulverized coal parameters[J]. Disaster Adv, 2012, 5(4): 237-240.
- [12] 齐庆新, 李首滨, 王淑坤. 地音监测技术及其在矿压监测中的应用研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(3): 221-232.
QI Qingxin, LI Shoubin, WANG Shukun. Application of AE technique in monitoring ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(3): 221-232.
- [13] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1262-1268.
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1262-1268.
- [14] 王恩元, 刘忠辉, 刘贞堂, 等. 受载煤体表面电位效应的实验研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1318-1325.
WANG Enyuan, LIU Zhonghui, LIU Zhentang, et al. Experimental study on surface potential effect of coal under load[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1318-1325.
- [15] HE X Q, CHEN W X, NIE B S, et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2011, 48(8): 1352-1358.
- [16] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 396-399.
DOU Linming, HE Xueqiu, WANG Enyuan. Electro-Magnetic emission technique of monitoring rock burst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 396-399.
- [17] 王书文, 毛德兵, 杜涛涛, 等. 基于地震 CT 技术的冲击危险性评价模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊 1): 1-6.
WANG Shuwen, MAO Debing, DU Taotao, et al. Rockburst hazard evaluation model based on seismic CT technology[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Sup 1): 1-6.
- [18] 窦林名, 蔡武, 巩思园, 等. 冲击危险性动态预测的震动 CT 技术研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 238-244.
DOU Linming, CAI Wu, GONG Siyuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238-244.
- [19] 姜福兴, 杨淑华, XUN Luo. 微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 357-360.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua, XUN Luo. Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by microseismic monitoring techniques[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 357-360.
- [20] 李春睿, 康立军, 齐庆新, 等. 深部巷道围岩分区破裂与冲击地压关系初探[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 185-189.
LI Chunrui, KANG Lijun, QI Qingxin, et al. Probe into relationship between zonal fracturing and rock burst in deep tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 185-189.
- [21] 缪华祥. 矿山微地震震源层析成像和活动特征分析[D]. 北京: 北京科技大学, 2011: 76-78.
- [22] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.
QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346-2351.