

窦林名,贺虎,何江,等. 冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 327-332. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.4155

DOU Linming, HE Hu, HE Jiang, et al. New method of rockburst risk assessment using relative stress concentration factor superposition [J]. Journal of China Coal Society 2018, 43(2): 327-332. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.4155

冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法

窦林名^{1,2}, 贺 虎³, 何 江^{1,2}, 王正义^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 冲击动力灾害是关乎矿井能否安全稳定生产的主要因素, 目前越来越多的矿井需要在采掘工作面设计阶段确定冲击危险等级与区域, 迫切需要发展科学、精确、定量、便于技术人员操作的冲击危险早期评价预警方法。为了解决冲击显现无法用现有强度准则进行表述、不同应力无法标量叠加的问题, 提出了冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法, 将某一待分析区域内影响冲击矿压发生的某因素引起的最大主应力与自重应力的比值, 称为相对应力集中系数分量, 各分量的乘积为该区域的相对应力集中系数。将影响冲击矿压的因素从载荷特性上分为静载荷和动载荷, 从对应力影响效果上分为增压型与减压型, 给出了影响冲击的主要动载因素, 以及相对应力集中系数计算方法。发生过冲击矿压的矿井利用冲击区域的总相对应力集中系数作为临界指标, 未发生冲击的矿井利用临界应力与自重应力的比值作为临界值, 根据相对应力叠加系数与临界值的比值对冲击危险等级进行了划分。现场应用表明, 相对应力集中系数叠加法与监测冲击危险区域与等级具有较高一致性。

关键词: 冲击矿压; 相对应力叠加系数; 危险评价; 监测预警

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2018)02-0327-06

New method of rockburst risk assessment using relative stress concentration factor superposition

DOU Linming^{1,2}, HE Hu³, HE Jiang^{1,2}, WANG Zhengyi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Dynamic disasters are the main factors relating to the safe and stable coal mine production. Therefore, more and more collieries need to carry out assessments for determining both the rockburst danger lever and prevention regions at the working face design stage. In this situation, it is urgent to develop new methods of rockburst risk early evaluation and timely warning characterized by much more scientific, accurate, quantitative and easily to operate for technical personnel. In order to address the problem that rockburst phenomenon cannot be expressed by the existing strength criterion as well as different stress cannot be assessed by scalar superposition, the authors put forward a new method of rockburst risk assessment using relative stress concentration factor superposition. The ration that divided by the maxi-

收稿日期: 2017-11-13 修回日期: 2017-12-07 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801403); 国家自然科学基金重点资助项目(51634001); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2015040)

作者简介: 窦林名(1963—), 男, 青海平安人, 教授, 博士。Tel: 0516-83995904, E-mail: lmdou@cumt.edu.cn

通讯作者: 贺 虎(1985—), 男, 安徽淮北人, 副教授, 博士。Tel: 0516-83591015, E-mail: hehu@cumt.edu.cn

imum principal stress induced by a certain influencing factor of rockburst and the gravity stress in the area to be analyzed is defined as relative stress concentration factor component, and then the product of each component is named as relative stress concentration factor of the region. In this paper, the stresses relating to rockburst are classified into static and dynamic loads based on the strain rate character, and into decompression and supercharge based on the effects on stress state. The main factors causing dynamic loads and the relative stress concentration factor calculation method are analyzed in this study. The total relative stress concentration factor is used as the critical indicators in the coal mines where rockburst had been occurred while the ration of critical stress and weight stress as the threshold in the areas where rockburst never happened. Using the specific value of relative stress concentration factor and threshold, the authors established the rockburst risk lever system which has been proved to be more accurate, more conducive and beneficial to guide a safe production by field application.

Key words: rockburst; relative stress concentration superposition factor; risk assessment; monitoring and warning

随着煤矿开采深度和强度的加大、地质与生产技术条件趋于复杂,导致采掘围岩所处应力环境逐渐恶化,由此诱发的煤岩动力灾害如冲击矿压越来越频繁,强度越来越大,以前发生过冲击矿压的矿井,灾害更加严重^[1]。目前越来越多的矿井需要在采掘工作面设计阶段就要确定冲击危险等级与区域,迫切需要发展科学、精确、定量、便于技术人员操作的冲击危险早期评价与及时预警方法,从而指导开采设计的优化,制定针对性的预防、监测以及治理技术措施。

冲击矿压的危险性评价与监测预警一直是研究的热点,取得了大量研究成果。笔者提出了综合指数法,张宏伟等^[2]建立了冲击矿压地质动力条件评价方法,以断裂的构造形式、活动性、最大主应力、应力梯度、煤岩力学性质等作为冲击矿压的主要判据,可实现区域与早期冲击危险评价。借助非线性与数量化理论以及计算机模拟,发展了冲击危险评价方法,如冯夏庭等^[3-4]基于神经网络系统理论,提出了岩爆危险预报的自适应模式识别方法,现场应用取得了较好的效果。ZHOU J 等^[5]基于启发式算法与支持向量机研究了岩爆的远期评价。SHARAN S K^[6]提出了一种新的模拟冲击的有限元算法,将岩体视为弹-脆-塑性体,不同阶段采用不同强度准则,模拟结果与深部硐室开挖过程中冲击危险性具有较高的一致性。PENG^[7], KIM K M^[8], DOU L M^[9]等学者均指出冲击矿压在力学本质是煤岩体在原岩应力场受采动影响后应力调整与重分布过程中的动力破坏行为,与高应力区域密切相关。采前利用地应力测试、数值模拟与矿压理论分析确定高应力区,制定评价冲击危险的等级与判据,对于提高冲击矿压危险性评价精度具有重要作用,能够提高治理效率,达到事半功半的效果。姜福兴等^[10]研究了应力叠加法评价工作面冲击危险性,齐庆新等^[11]提出以应力控制为中心,以单位应力梯度为表征的冲击矿压应力控制理论,并采用相

似模拟和数值模拟分析应力状态,从而指导冲击防治工作。以往的研究,在分析影响应力集中的因素上只考虑静载荷,如自重应力、构造应力、采动支承压力,没有考虑动载荷的影响,单元体应力值多为标量直接叠加。为了解决冲击现象无法用现有强度准则进行表述、不同应力无法标量叠加的问题,本文提出了冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法,对区域进行网格划分,计算不同网格内的总相对应力集中系数,将冲击危险划分为不同等级,相比传统评价方法更精确,可操作性更强。

1 冲击矿压发生的载荷特征与应力判据

1.1 冲击矿压的动静耦合加载特征

以应力法评价冲击危险状态,必须要明确冲击矿压发生的力学边界与载荷特征,才能全面分析影响冲击矿压发生的应力因素。目前危险评价方法主要基于冲击矿压的强度理论以及能量理论,即冲击矿压静载荷诱冲理论,监测的物理量主要为局部煤岩体变形破坏过程中输出的信息,忽略了孕育冲击的外部应力环境的变化规律。冲击矿压是典型的开放系统,其能量输入即包括静载应力,如原岩应力、采动应力,同时也包含动载应力波,如断层滑移、覆岩破断运动、卸压爆破、机组割煤等。研究表明,大部分冲击矿压是静载应力和震动波(动载)双重作用的结果,不同点是静载应力和动载应力波在冲击矿压发生时贡献的大小。并且影响冲击的外部应力范围很大,超出了一般矿山压力所研究的应力边界。图1为利用微震监测系统统计的全国范围内冲击矿压矿井,震源位置与冲击显现之间的关系,冲击矿压发生时震源距冲击地点可达500 m,集中分布在150 m范围内,影响冲击的顶板岩层可达90 m、底板60 m范围。震动波能量越高,发生的频次越高,引发冲击的可能性越大,如华亭矿区,10⁸ J能级的震动一定引发冲击,而小于10⁴ J

的震动诱发冲击的可能性较小。从统计结果可以看出,煤岩体的冲击破坏从加载载荷特征看,具有明显的动静耦合加载特征。静载荷或动载荷单一作用诱发冲击矿压是特殊情况。因此,对冲击矿压机理研究、冲击危险评价研究必须考虑动静载荷特征。

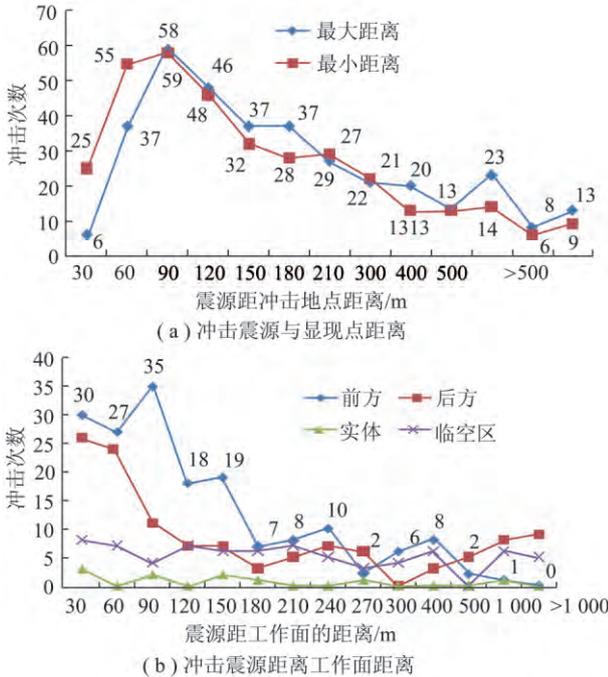


图 1 冲击矿压震源与显现之间的关系

Fig. 1 Relationship between seismic source and destruction location of rockburst

1.2 冲击矿压发生的应力判据

根据上述对冲击矿压系统载荷特征的分析,笔者提出了动静叠加诱冲原理^[12],对于冲击矿压系统而言,基于能量机理可得

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU_R}{dt} + \frac{dU_C}{dt} + \frac{dU_S}{dt} > \frac{dU_b}{dt} \quad (1)$$

其中 U_R 为围岩中的弹性能; U_C 为煤体中的弹性能; U_S 为动载荷输入能量; U_b 为煤体冲击破坏消耗的能量。考虑各向同性的线弹性体,将式(1)中能量采用应力进行表示:

$$U = \frac{([\sigma_{ij}]_j + [\sigma_{ij}]_d)^2}{2E} \quad U_b = \frac{([\sigma_{ij}]_{bmin})^2}{2E} \quad (2)$$

式中, $[\sigma_{ij}]_j$, $[\sigma_{ij}]_d$ 分别为煤岩体中的静载荷与动载荷; $[\sigma_{ij}]_{bmin}$ 为发生冲击矿压时的临界应力; E 为煤体弹性模量。

因此,冲击矿压的发生应满足

$$[\sigma_{ij}]_j + [\sigma_{ij}]_d > [\sigma_{ij}]_{bmin} \quad (3)$$

即采掘煤岩体系统上的静载荷与动载荷叠加后,超过了煤岩体冲击破坏的临界载荷时,发生冲击式破坏,造成冲击矿压的显现,图 2 为基于动静叠加诱冲

原理提出的冲击矿压发生模型,该模型能够解释现场冲击显现特征以及微震监测数据所反映的事实与规律。

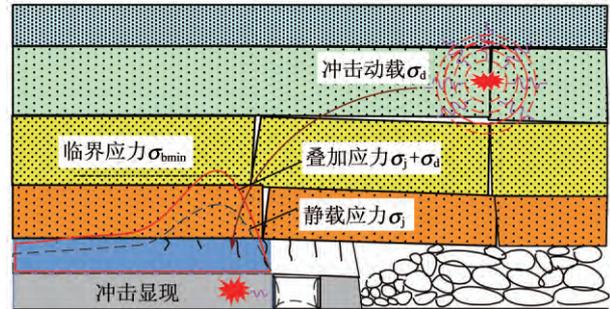


图 2 煤矿冲击矿压动静叠加诱冲机理

Fig. 2 Principle of rockburst inducing by coupled dynamic and static load in coal mine

2 冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法

2.1 相对应力集中系数

根据岩石力学原理,判断岩石是否发生破坏需要知道研究区域的应力状态以及强度准则,然而对于煤矿冲击矿压来说,目前还没有相应的强度准则,同时煤岩体的绝对应力状态也不易测试,而某一方向的相对应力变化是可以测试的。研究与统计表明,大部分冲击显现发生在应力异常区,尤其是高应力异常区。基于此,为了解决冲击显现无法用现有强度准则进行表述、不同应力无法标量叠加的问题,提出相对应力集中系数叠加法。将某一待分析区域内影响冲击矿压发生的某因素引起的最大主应力与自重应力的比值,称为相对应力集中系数分量,用 δ_{ij} 表示,各分量的乘积为该区域的相对应力集中系数,记为 δ_i ,即

$$\delta_{ij} = \frac{(\sigma_1)_{ij}}{\sigma_0} = \frac{(\sigma_1)_{ij}}{\gamma H}$$

$$\delta_i = \prod_{j=1}^n \delta_{ij} \quad (4)$$

式中 i, j 为下标,分别代表区域与因素; $(\sigma_1)_{ij}$ 为某因素作用下煤体单元中的最大主应力; σ_0 为区域煤体单元上的自重应力; γ 为岩层平均容重; H 为埋深。

2.2 冲击危险临界指标

(1) 本煤层发生过冲击矿压

对于在开采历史上本煤层发生过冲击矿压的情况,可以通过分析冲击矿压发生区域的相对应力集中系数作为上临界值,记为 δ_c ,同时,根据冲击发生的强度准则,将 $\frac{R_c}{\sigma_0}$ 作为下临界值, R_c 为煤体的饱和单轴抗压强度,将冲击矿压危险等级划分为无、弱、中、强,见表 1。

表 1 本煤层发生过冲击矿压的危险等级划分
Table 1 Risk lever classification in coal seam that rockburst occurred

危险等级	判据
无	$\delta_i < \frac{R_c}{\sigma_0}$
弱	$\frac{R_c}{\sigma_0} \leq \delta_i < \frac{1}{3}(\delta_c - \frac{R_c}{\sigma_0})$
中	$\frac{1}{3}(\delta_c - \frac{R_c}{\sigma_0}) \leq \delta_i < \frac{2}{3}(\delta_c - \frac{R_c}{\sigma_0})$
强	$\delta_i \geq \frac{2}{3}(\delta_c - \frac{R_c}{\sigma_0})$

(2) 本煤层未发生过冲击矿压

对于本煤层未发生过冲击矿压的矿井,一方面可参照煤体单轴抗压强度相差不大于 20% 的其它煤层或矿井临界相对应力集中系数 δ_c ,并按照上述判别准则进行。对于无参考资料的矿井,本文提出采用应力临界值作为临界指标。根据实验研究,发生冲击矿压的极限载荷与煤的单向抗压强度的大小有关。当煤的单向抗压强度大于 20 MPa 时,煤体发生冲击动力破坏的临界应力为 50 MPa;当煤的单向抗压强度小于 16 MPa 时,煤体发生冲击动力破坏的临界应力为 70 MPa;当煤的单向抗压强度在 16~20 MPa 时,发生冲击动力破坏的临界应力为 50~70 MPa,如图 3 所示。

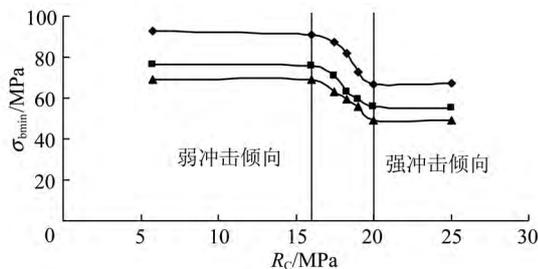


图 3 煤体单轴抗压强度与冲击破坏临界应力的关系
Fig. 3 Relationship between coal strength and rockburst critical stress

根据应力临界值,同样将冲击危险等级划分为无、弱、中、强,判据见表 2。

3 影响冲击危险因素及相对应力集中系数确定方法

3.1 冲击影响因素分类

冲击矿压影响因素众多,有地质的因素,也有采矿的因素。这些因素在煤岩体单元内引起的载荷按照性质划分可以是动载荷(取决于应变率),也可以是静载荷,从对应力的影响效果上可以是增压型,即 $\delta_i \geq 1$,也可以是减压型,即 $0 \leq \delta_i < 1$ 。静载增压型因

素主要有:采动支承压力、覆岩运动、地质构造、坚硬顶板等;静载减压型因素主要有:保护层开采、防冲卸压、降低生产集中度。不同因素引起的相对应力集中系数可以采用矿山压力理论、岩石力学理论、现场测试、数值模拟的方法得到。其中增压型静载尤其是采动支承压力可以通过弹塑性力学给出解析解,也可以通过实测得到,而地质构造所引起的构造应力,可以利用构造力学、密度椭球体理论^[13]、原位实测反演、数值模拟得到,已经有大量研究成果,本文不再赘述,重点对动载进行分析。

表 2 未发生过冲击矿压的危险等级划分
Table 2 Risk lever classification in coal seam that rockburst never occurred

危险等级	$R_c < 16$ MPa 判据	$R_c > 20$ MPa 判据
无	$\delta_i < \frac{R_c}{\sigma_0}$	$\delta_i < \frac{R_c}{\sigma_0}$
弱	$\frac{R_c}{\sigma_0} \leq \delta_i < \frac{70}{\sigma_0}$	$\frac{R_c}{\sigma_0} \leq \delta_i < \frac{50}{\sigma_0}$
中	$\frac{70}{\sigma_0} \leq \delta_i < \frac{90}{\sigma_0}$	$\frac{50}{\sigma_0} \leq \delta_i < \frac{70}{\sigma_0}$
强	$\delta_i \geq \frac{90}{\sigma_0}$	$\delta_i \geq \frac{70}{\sigma_0}$

3.2 煤矿动载应力计算方法

矿井开采中动载产生的来源主要有开采活动、煤岩体对开采活动的应力响应等。具体表现为煤岩体破裂、爆破、顶底板破断、岩层转移失稳、煤柱失稳、断层转移等。这些动载源可统一称为矿震。假设矿井煤岩体为三维弹性各向同性连续介质,则矿震应力波在煤岩体中产生的动载荷可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{dp} = \rho v_p (v_{pp})_p \\ \tau_{ds} = \rho v_s (v_{ps})_s \end{cases} \quad (5)$$

其中 σ_{dp} 、 τ_{ds} 分别为 P 波、S 波产生的动载; ρ 为煤岩介质密度; v_p 、 v_s 分别为 P 波、S 波传播的速度; $(v_{pp})_p$ 、 $(v_{ps})_s$ 分别为质点由 P 波、S 波传播引起的峰值震动速度。上述动载可根据微震监测系统观测到的矿震波形来确定 P 波、S 波传播引起的峰值震动速度。一般情况下,当矿震能量在 10^4 J 时,动载 σ_{dp} 、 τ_{ds} 分别为 10 MPa 和 12 MPa;当矿震能量在 10^5 J 时,动载 σ_{dp} 、 τ_{ds} 分别为 20 MPa 和 24 MPa;当矿震能量在 10^6 J 时,动载 σ_{dp} 、 τ_{ds} 分别为 30 MPa 和 36 MPa。

利用式(5)计算动载时,要考虑震动动载的衰减。通过井下原位测试可知,震动波质点峰值速度 $v_0(L)$ 与传播距离 L 呈幂函数关系,见式(6)。

$$v_0(L) = v_{0,max} L^{-\lambda} \quad (6)$$

式中 $v_{0,max}$ 为震源区质点峰值速度; λ 为煤岩体衰减

系数。

对于顶板破断过程中的震动动载, 可利用式(7)进行能量估算后, 转化为动载。

$$\begin{cases} U_{dc} = 0.1U_{wc}L^{-\lambda} = 0.1 \frac{q^2 l_c^5}{576EJ} L^{-\lambda} \\ U_{dz} = 0.1U_{wz}L^{-\lambda} = 0.1 \frac{q^2 l_z^5}{8EJ} L^{-\lambda} \end{cases} \quad (7)$$

式中, U_{dc} 、 U_{dz} 分别为初次、周期破断动载能量; U_{wc} 、 U_{wz} 分别为顶板初次、周期破断前积聚的弹性能; 0.1 为弹性能转化为震动能量系数; q 为顶板岩层上的载荷; l_c 、 l_z 分别为初次、周期破断步距; E 为顶板岩层的弹性模量; J 为惯性矩; L 为破裂点距煤岩单元体的距离。

4 相对应力集中系数叠加法使用流程

(1) 将需要评价的冲击危险区域按一定间距进行网格划分, 确定各网格节点 P_i 的坐标 (x_i, y_i) ;

(2) 根据确定的各网格节点 P_i 的坐标 (x_i, y_i) 分析评价区域内应力分布的影响因素, 确定用于冲击危险评价的影响因素 M_j ;

(3) 按国标 GB/T 23561.7—2009 测定煤的单轴抗压强度 R_C ;

(4) 计算自重应力 σ_0 ;

(5) 采用岩石力学理论分析或数值模拟软件计算各网格节点 P_i 处的各评价因素 M_j 引起的相对应力集中系数分量 δ_{ij} ;

(6) 分别对各网格节点 P_i 求相对应力集中系数 δ_i ;

(7) 按照表 1 或表 2 确定冲击危险临界指标与危险等级;

(8) 采用插值法对评价区域相对应力集中系数进行插值, 得到分布云图;

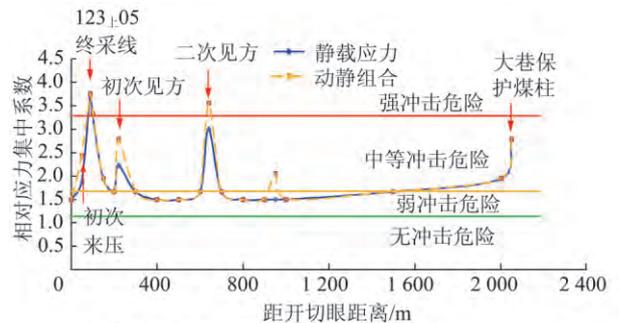
(9) 按照 (7) 确定的等级划分界限, 得到评价区域冲击危险区域及等级划分结果。

5 工程实践

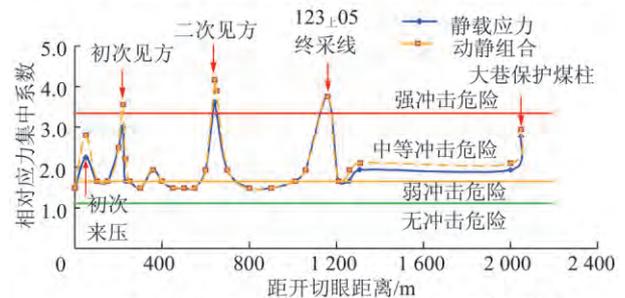
某矿 123_下04 工作面位于十二采区中部, 东邻 123_下03 采空区, 西部为 F8 断层保护煤柱, 北部靠近金桥集团保护煤柱, 距井田边界约 301 m, 终采线南距十二采 3_下回风巷 103.7 ~ 148.2 m。上方为 123_上05、123_上04 采空区及 3_上煤层冲刷区, 3_上煤与 3_下煤间距为 30.8 ~ 34.08 m, 平均 32.8 m。工作面标高为 -611.0 ~ -687.6 m, 平均为 -655.0 m。受断层影响, 工作面宽度在推进过程中有所变化, 123_下04 工作面分为 3 个块段, 第 1 块段推进长度 222 m, 净面长

257 m; 第 2 块段推进长度 860 m, 净面长 350 m, 第 3 块段推进长度 670 m, 净面长 218 m。工作面总体煤层较厚, 煤厚最大 7.0 m, 平均煤厚为 4.58 m。基本顶为中砂岩, 厚度为 14.52 ~ 26.54 m, 平均厚度 20.96 m, $f=8 \sim 10$ 。直接顶为粉砂岩, 厚度为 0 ~ 2.44 m, 平均厚度 1.22 m, $f=4 \sim 6$, 煤体单轴抗压强度 10 ~ 20 MPa。

本煤层发生过冲击矿压, 通过计算冲击地点的相对应力集中系数为 6.1。因此, 对于 123_下04 工作面, 危险等级为: 无冲击危险, $\delta_i < 1.11$; 弱冲击危险, $1.11 \leq \delta_i < 1.66$; 中等冲击危险, $1.66 \leq \delta_i < 3.33$; 强冲击危险, $\delta_i > 3.33$ 。根据以上分析, 综合考虑构造应力、采动支承压、残余支承压、顶板断裂动载、采动断层滑移动载的影响, 对 123_下04 工作面沿两巷应力水平进行了分析, 如图 4 所示。图 5 为 123_下04 工作面在回采过程中, 能量高于 5 000 J 的震动分布, 与采用相对应力集中系数叠加评价的结果具有较高的一致性, 提高了预警的精度与防冲效率, 保证了工作面的安全回采。



(a) 沿运输平巷相对应力集中系数法冲击危险评价结果



(b) 沿轨道平巷相对应力集中系数法冲击危险评价结果

图 4 123_下04 工作面沿两平巷相对应力集中系数评价冲击危险

Fig. 4 Rockburst risk assessment by the relative stress concentration factor along the roadways in LW123_{lower}04

6 结 论

(1) 明确了煤岩体发生冲击矿压的载荷特征为动静耦合加载。在进行冲击危险分析、评价过程中应分别考虑静载荷和动载荷的影响。

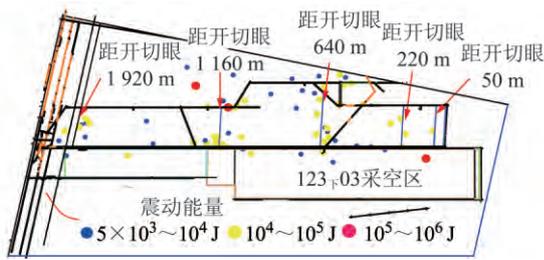


图 5 123_下04 工作面回采过程中高能(大于 5 000 J) 震动分布

Fig. 5 Seismic events with energy exceeds 5 000 J distribution during excavation of LW123_{lower}04

(2) 提出了冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法,将某一待分析区域内影响冲击矿压发生的某因素引起的最大主应力与自重应力的比值称为相对应力集中系数分量,各分量的乘积为该区域的相对应力集中系数。将影响冲击矿压的因素从载荷特性上分为静载荷和动载荷,从对应力影响效果上分为增压型与减压型。

(3) 提出了基于相对应力集中系数的冲击危险评价临界指标与危险等级。发生过冲击矿压的矿井利用冲击区域的总相对应力集中系数作为临界指标,未发生冲击的矿井利用临界应力与自重应力的比值作为临界值。根据相对应力集中系数与临界值的比值对冲击危险等级进行了划分。

(4) 通过具体分析、筛选评价区域具体的影响冲击矿压的因素,采用定量的相对应力集中系数,与其它工程类比法相比,分析更加全面、更具针对性,冲击危险等级划分考虑了本煤层特征,评价分级结果更可靠、更准确;另外,可将评价区域进行网格化,与已有方法对评价区域进行笼统评价相比,评价结果更细致,冲击防范更具针对性。现场应用表明,该评价方法与现场监测冲击危险等级具有较高的一致性,能够有效指导工作面冲击矿压防治工作。

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] 张宏伟,荣海,陈建强,等.基于地质动力区划的近直立特厚煤层冲击地压危险性评价[J].煤炭学报,2015,40(12):2755-

2762.

ZHANG Hongwei, RONG Hai, CHEN Jianqiang, et al. Risk assessment of rockburst based on geo-dynamic division method in suberect and extremely thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2755-2762.

- [3] 冯夏庭,张传庆,陈炳瑞,等.岩爆孕育过程的动态调控[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1983-1997.
FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, CHEN Bingrui, et al. Dynamical control of rockburst evolution process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1983-1997.
- [4] 冯夏庭.智能岩石力学[M].北京:科学出版社,2008.
FENG Xiating. Intelligent rock mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] ZHOU J, LI X B, SHI X Z. Long-term prediction model of rockburst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines [J]. Safety Science, 2012, 50(4): 629-644.
- [6] SHARAN S K. A finite element perturbation method for the prediction of rockburst [J]. Computers & Structures, 2007, 85(17-18): 1304-1309.
- [7] PENG S S. Coal mine ground control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013.
- [8] KIM K M, KEMENY J. Effect of thermal shock and rapid unloading on mechanical rock properties [A]. The 43rd US Rock Mechanics Symposium [C]. Asheville, ARMA 09-84, 2009.
- [9] DOU L M, CHEN T J, GONG S Y, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workplace [J]. Safety Science, 2012, 50: 736-740.
- [10] 姜福兴,舒凑先,王存文.基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2428-2435.
JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2428-2435.
- [11] 齐庆新,李晓璐,赵善坤.煤矿冲击地压应力控制理论与实践[J].煤炭科学技术,2013,41(6):1-5.
QI Qingxin, LI Xiaolu, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 1-5.
- [12] 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.
- [13] 于双忠,彭向峰,李文平,等.“密度平衡椭球体”理论研究的新进展[J].中国矿业大学学报,1989,18(3):33-42.
YU Shuangzhong, PENG Xiangfeng, LI Wenping, et al. New development of density equilibrium ellipsoid theory [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1989, 18(3): 33-42.