中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

曹民远,孙雪亮,杨 磊,等.急倾斜煤层综放工作面冲击危险性评价研究[J].煤炭科学技术,2019,47(2):47-52.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.02.008

CAO Minyuan,SUN Xueliang,YANG Lei,*et al*.Study on rock burst risk assessment of fully-mechanized top coal caving mining face in steep coal seam[J]. Coal Science and Technology,2019,47(2):47-52.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.02.008

移动扫码阅读

急倾斜煤层综放工作面冲击危险性评价研究

曹民远[1],孙雪亮[2],杨 磊[3],刘永红[1]

(1.神华新疆能源有限责任公司 冲击地压防治技术中心,新疆 乌鲁木齐 830084;2.神华新疆能源有限责任公司 碱沟煤矿,新疆 乌鲁木齐 830084;3.煤炭科学研究总院 开采设计研究分院,北京 100013)

摘 要:为了提高急倾斜煤层综放工作面冲击地压危险性评价指标的准确性和增强评价方法的适用性,采用数值模拟及理论计算的方法,得到了综采工作面过煤柱区域的应力分布,分析了采掘工作面应力扰动叠加的影响,提出了近直立煤层动态权重评价法的计算体系,介绍了近直立煤层冲击危险性评价指标和评价指标分级过程,并将动态权重评价法应用于+495 m 水平综放工作面冲击危险性评价中。研究结果表明:碱沟煤矿急倾斜综放工作面冲击地压的主要影响因素是煤柱和采掘工作面应力扰动叠加;+495 m 水平综放工作面冲击危险等级为Ⅱ级,具有弱冲击危险性,并划分了沿工作面走向 830~1 000 m、370~530 m、上分层终采线前后 50 m 范围 3 个冲击危险区域,现场验证了动态权重法能有效实现急倾斜煤层冲击地压危险性评价。

关键词:冲击地压;急倾斜煤层;动态权重法;综合指数法;冲击危险性

中图分类号:TD323 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-2336(2019)02-0047-06

Study on rock burst risk assessment of fully-mechanized top coal caving mining face in steep coal seam

CAO Minyuan[1],SUN Xueliang[2],YANG Lei[3], LIU Yonghong[1]

(1. *Technology Center of Rock burst Prevention and Control,Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd.,Urumqi* 830027, *China*;
2. *Jiangou Coal Mine,Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi* 830027, *China*;
3. *Coal Mining and Designing Branch,China Coal Research Institute,Beijing* 100013,*China*)

Abstract:In order to improve the accuracy of evaluation index and applicability of evaluation method for rock burst risk of fully-mechanized top coal caving mining face in steep coal seam, the stress distribution in the working face when passing through coal pillar area and superposition effect of excavation face and mining face were carried out by numerical simulation and theoretical calculation method.The calculation system of dynamic weight evaluation method in steep coal seam was formed. This paper determined and graded the risk assessment index for rock burst in steep coal seam, and applied the dynamic weight evaluation method to rock burst risk assessment in +495 m level working face.The results show that: the main influencing factors of rock burst in fully mechanized top coal caving mining face of Jian'gou Coal Mine are coal pillar and the superposition of stress disturbance of excavation face and mining face.The risk grade of rock burst is II in +495 m level fully-mechanized top coal caving mining face. It had weak risk of rock burst, and divided into three dangerous areas: 830~1 000 m strike of working face,370~530 m strike of working face,50 m range before and after upper layer' stopping mining line.The field test showed that the dynamic weight method can effectively realize the risk assessment of rock burst in steeply inclined coal seam.

Key words:rock burst; steeply coal seam; dynamic weight evaluation method; comprehensive index method; impact risk

0 引 言

冲击地压是指矿山井巷或采场周围煤岩体,由于弹性变形能的瞬间释放而产生的突然、急剧的破坏为特征的动力现象[1-2]。我国是开发利用煤炭资源比较早的国家,前期为满足国民经济发展需要对

收稿日期:2018-10-22;**责任编辑**:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804205);国家自然科学基金资助项目(51874231,51504184)

作者简介:曹民远(1981—),男,河南驻马店人,工程师。E-mail:287260471@qq.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

煤炭资源进行大规模开发利用,造成部分矿井由浅部向深部延伸,尤其老矿区矿井采深增加较为明显,个别矿井采深甚至达到千米以上。随着采深增加,原岩应力的强度和复杂程度随之增加,矿井冲击危险性增大[3]。如果在冲击地压灾害发生前能够实现对事故的准确预判,提前开展防范措施,及时撤离灾害风险区的人员和设备,便能大幅降低冲击显现产生的灾害损失。因此,全面、准确的冲击地压危险性评价是进行冲击地压灾害针对性防治的基础[4-5]。

近年来,我国学者围绕冲击地压前兆信息探测技术与方法开展了大量的研究,在冲击地压监测手段上取得了长足的发展,相继开发了基于微震法、地音法、电磁辐射法、钻孔应力监测法、钻屑法等岩石力学方法和地球物理方法相结合的冲击地压监测预警技术[6-7]。窦林名等[8-9]对冲击地压研究时提出了综合指数法的冲击地压危险性评价方法。曲孔典等[10]以葛亭煤矿 3305 工作面的地质及开采情况为工程背景,结合数值模拟结果和综合指数法中关于工作面周围采动状况的结论,得出了采空区宽度的评价指数参数修正方法;陈建强等[11]在前人研究的基础上采用综合指数法对各项因素进行了重新划分,使其适用于急倾斜煤层,并通过层次分析法对各项因素的权重进行确定。文献[12-14]基于冲击地压评价指标具有灰度、模糊性、未知性等不确定性特点,建立了模糊综合评判的冲击地压危险性评价危险性模型,确定了冲击地压危险性评价指标,该模型现场应用结果论证了该方法的准确性。张宏伟等[15]基于地质动力区划方法,对乌东井田发生冲击地压的地质动力环境进行了评价。邓志刚[16]以集贤煤矿西二采区为研究对象,开展了采区三维地应力场宏观区域的冲击危险评价。姜福兴等[17]提出了一种基于自重应力基础之上叠加各个冲击危险性因素产生的应力增量的冲击危险性评价方法。秦子晗[18]采用动态权重评价法成功实现了沿空工作面的冲击危险性评价,该评价方法能克服各指标之间的相互干扰,准确度较高,同时指标易于划分,操作性较强。

但国内常用的综合指数法等评价方法的相关指标大多来源于水平煤层及缓倾斜煤层,难以应用碱沟煤矿这种 87°的近直立特厚煤层中。为此,采用动态权重法对近直立特厚煤层冲击地压影响因素进行分析,确定+495 m 水平综放工作面的冲击危险性,进一步划分出危险区段,为冲击地压防治提供技术指导。

1　工程概况

碱沟煤矿为技术改造矿井,位于乌鲁木齐市米东区八道湾向斜南翼,主采 B_{1+2}、B_{3+6}组合煤层,B_{1+2}煤层厚度 22.15~37.26 m,平均厚度 30.01 m。B_{3+6}煤层位于 B_{1+2}煤层北部,与 B_{1+2}煤层平均间距 82.92 m,煤层平均厚度 40.39 m。两煤层平均倾角均达 87°,属急倾斜特厚煤层。矿井采用单翼水平分段后退式综采放顶煤工艺,自然垮落法管理顶板。

沿工作面走向距离西部阶段石门 473.0~1 008.7 m 为原安宁渠煤矿井田,其中 473~503 m 为西边界煤柱;503~880 m 为原安宁渠正常回采区域;880.0~1 008.7 m 为东边界及石门煤柱区域。

2　冲击地压影响因素

2.1　煤岩冲击倾向性

根据矿井煤岩冲击倾向性鉴定结果,碱沟煤矿现开采的 B_{1+2}和 B_{3+6}煤层及顶底板均具有弱冲击倾向性,已具备了发生冲击地压的必要条件,详见表 1—表 2,综合表 1 和表 2 中数据,B_{3+6}煤层、B_{1+2}煤层及各自顶底板均为Ⅱ类弱冲击危险性岩层。

表 1　煤岩冲击倾向性指标

Table 1　Index of coal seam rock burst proneness

评价因素	各煤层参数		各煤层冲击危险性	
	B_{3+6} 煤层	B_{1+2} 煤层	B_{3+6} 煤层	B_{1+2} 煤层
动态破坏时间/ms	254	285	Ⅱ类	Ⅱ类
弹性能量指数	1.46	1.91	Ⅰ类	Ⅰ类
冲击能量指数	1.59	2.02	Ⅱ类	Ⅱ类
单轴抗压强度/MPa	12.64	10.10	Ⅱ类	Ⅱ类

表 2　围岩冲击倾向性指标

Table 2　Index of surrounding rock rock burst proneness

煤层	区域	弯曲能量指数/kJ	冲击危险性
B_{3+6}	顶板	107.36	Ⅱ类(弱)
煤层	底板	20.01	Ⅱ类(弱)
B_{1+2}	顶板	19.26	Ⅱ类(弱)
煤层	底板	20.49	Ⅱ类(弱)

2.2　地质因素对冲击地压危险影响

1)开采深度。冲击地压的发生和煤层埋深有一定关系,统计分析表明开采深度越大,冲击地压发生的可能性也越大。对于急倾斜或近直立煤层,冲击地压的发生与开采深度的关系尚未有统计分析,但随着开采深度的增加,水平构造应力与垂直应力逐步增大,为冲击地压的发生提供了应力来源。以开采同一煤层的相邻煤矿乌东煤矿为例,当矿井开

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

采深度达到 300 m 时曾多次发生冲击地压显现,碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面开采深度超过 250 m,机掘工作面开采深度超过了 300 m,因此碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面在回采过程中存在发生冲击地压的可能。

2)顶底板岩性。研究表明,顶底板岩性,特别是煤层上方坚硬的厚层砂岩顶板是影响冲击地压发生的主要因素之一,其主要原因是坚硬厚层砂岩顶板容易积聚大量的弹性能。在坚硬顶板破断或滑移过程中,大量的弹性能突然释放,形成强烈震动,导致发生冲击压力型冲击地压或顶板型冲击地压。

根据碱沟煤矿地质勘探资料,B_{3+6}煤层直接顶为厚 8 m 的粉砂岩,基本顶为厚 70 m 的粉砂岩,岩性坚硬稳定,固结良好。B_{1+2}煤层南部存在厚 6.4 m 左右的粉砂岩底板。B_{3+6}煤层与 B_{1+2}煤层之间的岩柱平均厚度 82.92 m,岩性整体上为粉砂岩,坚硬稳定。且 B_{3+6}与 B_{1+2}煤层的顶底板岩层近似直立,开采过程中难以垮落或断裂,容易发生悬顶从而积聚大量弹性能,在其滑移或运动过程中会释放大量弹性能,引起强烈震动,导致冲击地压的发生。因此,顶底板岩性是影响碱沟煤矿工作面冲击地压的重要因素。

2.3　开采因素对冲击地压危险影响

由于开采方法、巷道布置形式、顶板管理方式等开采技术条件的不同,煤岩层发生冲击地压的危险性也具有一定差异,即开采技术条件也是冲击地压的主要影响因素。

1)煤柱影响。在缓倾斜及水平煤层开采中,受开采技术条件及煤层赋存的限制,不可避免的需要留设煤柱,在支承压力叠加与顶底板夹持效应的作用下,煤柱长期处于亚稳定状态,当受到外界干扰时,极易由亚稳态转为极限应力状态,发生冲击地压。对于近直立特厚煤层水平分段综采放顶煤工作面,开采过程中其冲击地压显现规律及发生机制与缓倾斜煤层开采大不相同,但历史原因产生的煤柱对冲击地压的也有影响,同煤层相邻矿井回采至煤柱附近区域时出现多次冲击显现。碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面将首次对原安宁渠煤矿煤柱区域进行回采,原安宁渠煤矿虽回采至+520 m 水平,但东西边界煤柱相对完整,与碱沟煤矿原石门保护煤柱相连,形成较大面积的上覆煤柱结构。

为掌握+495 m 水平综放工作面回采煤柱期间的应力分布情况,进而分析上覆煤柱对冲击地压的影响程度,基于碱沟煤矿围岩参数及安宁渠煤柱实际参数建立 FLAC^{3D}数值模型,分析+495 m 水平采掘工作面经过煤柱区域时的应力分布状态,计算结果如图 1 所示。

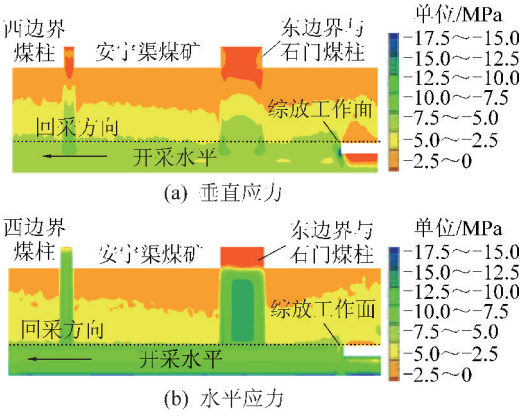


图 1　开采过程中煤体内应力分布

Fig. 1　Distribution of stress in coal during mining

从图 1 中可以看出,受安宁渠煤矿遗留煤柱影响,煤柱区域的垂直应力和水平应力均比非煤柱区域高,非煤柱区域的水平应力高于垂直应力。东边界与石门煤柱尺寸较大,其垂直应力呈马鞍形分布,且其边界的平均垂直应力是水平应力的 27 倍,但内部的平均水平应力约为垂直应力的 1.8 倍。西边界煤柱的垂直应力也呈马鞍形分布,但由于尺寸较小,垂直应力和水平应力差别不大。

随着工作面距离煤柱越来越近,工作面前方煤体内的垂直应力逐步增加,当工作面推进至煤柱边缘时,工作面前方煤体内的垂直应力急剧增长,表明当工作面推进至煤柱区域时,容易产生应力叠加现象,造成较高的应力集中,导致冲击地压的发生。

2)开采扰动。碱沟煤矿采用单翼水平分段综采放顶煤开采方法,决定了矿井上分层开采下分层掘进的采掘空间布局。随采掘工作面推进,采煤和掘进工作面之间距离逐渐减小,采掘工作面将逐渐进入对方的采动应力集中区,如图 2 所示。

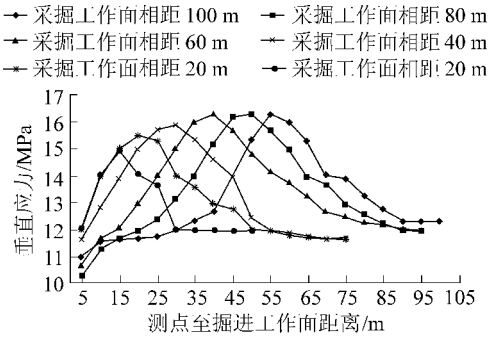


图 2　掘进工作面垂直应力变化

Fig. 2　Vertical stress change in excavation face

随着采煤掘进工作面之间距离的减小,掘进工作面处的垂直应力峰值微降,但应力峰值距离掘进

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

工作面位置明显减小,增大了掘进工作面的冲击危险性。

3 冲击地压危险动态权重评价

3.1 评价指标的确定

冲击地压影响因素较多,但整体来说包括 2 方面内容:①包含冲击倾向性、开采深度、煤岩层物理力学性质等方面的地质因素;②包含上覆煤层残采区、煤柱等开采技术因素。评价指标的确定首先开展采、掘工作面周围地质条件及开采条件对冲击地压的影响因素,再分析各因素对冲击地压危险状态影响的指数,将其综合起来,建立冲击危险状态等级评价的变权模糊评价方法。

3.2 动态权重的确定

在对冲击地压危险性进行评价时,由于涉及很多指标因素,当其中 1~2 个评价指标值特别危险时,无论采用何种算法,都有可能被其他危险性较小的指标中和,使评价系统的危险度降低,失去评价的客观公正性。为此,采用层次分析法确定指标的属性权重与等级权重,再运用最小信息熵原理把属性权重和等级权重综合为组合权重,进而建立冲击地压评价的相对熵变权重模型。其中,通过指标的属性权重 w_i' 和等级权重 w_i'' 可得到指标随样本而变化的综合权重 w_i,n 为指标个数。

$$w_i = \frac{[w_i' w_i'']^{0.5}}{\sum_{i=1}^{n} [w_i' w_i'']^{0.5}} \quad (i = 1,2,\cdots,n) \qquad (1)$$

式中:w_i'、w_i''、分别为 i 因素的属性权重数和等级权重数。

3.3 隶属函数计算

《防治煤矿冲击地压细则》将冲击危险性结果划分为无冲击、弱冲击、中等冲击和强冲击 4 个等级。同时基于国内冲击地压矿井经验和碱沟煤矿冲击地压防治实际情况制定单因素指标,具体冲击危险性评价指标及分级情况,见表 3。

表 3 冲击地压的评价指标分级

Table 3 Evaluation indexes classification of rock burst

一级指标	二级指标	各级指标评价			
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
地质因素	开采深度/m	<300	300~600	600~900	>900
	煤岩冲击倾向性	无	弱	—	强
	硬厚顶板至煤层距离/m	>90	60~90	30~60	<30
	煤层夹矸	—	简单结构	复杂结构	—
	煤层厚度变化	稳定煤层	较稳定煤层	不稳定煤层	极不稳定煤层
	构造应力程度(褶曲)	低	一般	较高	高
开采因素	采煤方法	长壁综放	长壁综采	水平分段综放	—
	开采速度/(m·d^{-1})	<4	4~8	8~10	>10
	开采扰动影响	弱	一般	较强	强
	煤柱影响	不明显	明显	强烈	非常强烈

3.4 计算模型与结果分析

运用多级模糊综合评价知识,先对第二级指标进行综合评价。设单因素模糊评判矩阵 $\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & r_{in3} & r_{in4} \end{bmatrix} \qquad (2)$$

式中:r_{in2} 为第 i 组指标中第 n 个指标关于等级Ⅱ的隶属度,$\boldsymbol{R}_i$ 为 i 组二级指标的模糊评判矩阵。

利用式(2)对第二级指标 $\boldsymbol{R}_i$ 作模糊矩阵运算,得到向量 $\boldsymbol{B}_i$。

$$\boldsymbol{B}_i = \boldsymbol{R}_i \cdot \boldsymbol{W}_i = [b_{i1} \quad b_{i2} \quad b_{i3} \quad b_{i4}] \qquad (3)$$

式中:$\boldsymbol{W}_i$ 为第 i 组指标的综合权重向量,对于定性指标,其所对应的级别隶属度取 1,其他级别隶属度取 0;$\boldsymbol{B}_i$ 为第 i 组的隶属向量。

利用公式(3)进行矩阵运算,即得到第一级指标对评价集的隶属向量 $\boldsymbol{B}$。

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{B}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{B}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_1 \cdot \boldsymbol{W}_1 \\ \boldsymbol{R}_2 \cdot \boldsymbol{W}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{R}_n \cdot \boldsymbol{W}_n \end{bmatrix} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4] \qquad (4)$$

对于结果,由于评价集是有序分割类,为实现评价结果的可操作性,引入“置信度”λ 识别准则,通常取值 0.6 或 0.7。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

$$k_0 = \min\left|k: \sum_{i=1}^{k} b_i > \lambda, k = 1,2,3,4\right| \quad (5)$$

式中:λ 为置信度;b_i为 i 级评价值的隶属向量元素;k_0为冲击危险等级。

由此判断冲击地压危险性属于第 k_0等级。将地质因素与开采因素的评价结果综合考虑,取其较为危险的评价结果作为最终的评价结果。

4　综放工作面冲击危险性评价实践

4.1　综放工作面动态权重评价

根据工作面的地质条件及煤岩冲击倾向性测定结果,确定其地质因素和开采因素的测定值见表 4。

表 4　冲击地压评价指标测定值

Table 4　Evaluation indexes measured values of rock burst

一级指标	二级指标	测定值
地质因素	开采深度/m	290
	煤岩冲击倾向性	弱
	硬厚顶板至煤层距离/m	<30
	煤层夹矸	简单结构
	煤层厚度变化	较稳定
	构造应力程度(褶曲)	一般
开采因素	采煤方法	水平分段综放
	开采速度/(m·d^{-1})	<4
	开采扰动影响	一般
	煤柱影响	明显

其隶属度矩阵上述公式进行计算可得:

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}} = \begin{bmatrix} 0.55 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{K}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中:$\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}}$、$\boldsymbol{R}_{\mathrm{K}}$分别为地质、开采指标的模糊评判矩阵。

由综合指标的属性权重 w_i' 和等级权重 w_i'' 可得到指标随样本而变化的组合权重 $w_i, i = 1,2,\cdots, n$,各指标的权重见表 5。

综合求得工作面自然因素的冲击危险评价的最终模糊评判集 $\boldsymbol{B}$:

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{D}} = [0.083 \quad 0.768 \quad 0 \quad 0.163]$$

$$\boldsymbol{B}_{\mathrm{K}} = [0.227 \quad 0.553 \quad 0.220 \quad 0]$$

式中:$\boldsymbol{B}_{\mathrm{D}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{K}}$分别为地质、开采指标的隶属向量。

表 5　综放工作面评价指标权重计算值

Table 5　Calculation weights of evaluation indexes for fully-mechanized top coal caving mining face

二级指标	属性权重	等级权重	综合权重
开采深度	0.164	0.21	0.150
煤岩冲击倾向性	0.197	0.31	0.199
硬厚顶板至煤层距离	0.181	0.31	0.191
煤层夹矸	0.143	0.21	0.140
煤层厚度变化	0.139	0.23	0.144
构造应力程度(褶曲)	0.176	0.27	0.176
采煤方法	0.219	0.23	0.220
开采速度	0.232	0.23	0.227
开采扰动影响	0.265	0.27	0.262
煤柱影响	0.284	0.31	0.291

按照“置信度”识别原则进行分析所得结果,设置信度 $\lambda = 0.6$,经计算得出 $k_0 = 2$。按照冲击危险等级划分,碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面冲击危险等级为Ⅱ级,为弱冲击危险等级。

4.2　工作面危险区域划分

通过对碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面冲击地压危险性评价,认为工作面主要受安宁渠煤柱和终采线煤柱影响,存在 3 个冲击危险区域,具体冲击危险区域见表 6。当工作面推进至危险区域时,应加强两巷及工作面顶板的支护强度,超前开展专项卸压工程,确保安全。

表 6　+495 m 水平综放工作面冲击危险区域

Table 6　Dangerous areas of +495 m level fully-mechanized top coal caving mining face

序号	至石门距离/m	影响因素
1	工作面走向 830~1 000 m	安宁渠东边界煤柱与东三石门煤柱
2	工作面走向 370~530 m	安宁渠西边界煤柱
3	上分层终采线前后 50 m	终采线煤柱

5　结　　论

1)通过对碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面冲击影响因素研究,认为地质因素中的顶板岩性、煤岩冲击倾向性与构造应力是影响冲击地压的主要因素,开采因素中影响较大的是开采扰动和煤柱的影响,受地质因素和开采因素耦合影响,工作面回采过程中存在冲击危险,其中安宁渠煤柱和开采扰动是冲击地压的最重要影响因素。

2)基于碱沟煤矿近直立煤层特性和冲击危险

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

动态权重评价方法,确定了近直立煤层冲击危险评价指标,并对评价指标进行了分级,形成了近直立煤层动态权重评价法的计算体系。与常规评价方法相比,动态权重法克服了其他指标因素的相互干扰产生的评价误差,提高了评价结果的准确度。

3)采用动态权重法,对碱沟煤矿+495 m 水平综放工作面进行了冲击危险性评价,评价结果认为该工作面冲击危险等级为Ⅱ级,为弱冲击危险等级,并将工作面划分成 3 个冲击危险区域。

参考文献(References):

[1] 齐庆新,窦林名.冲击地压理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008:32-38.

[2] LU Caiping,LIU Guangjian,LIU Yang.Microseismic multi-parameter characteristics of rock-burst hazard induced by hard roof fall and high stress concentration[J].International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2015,24(2):18-32.

[3] 韩　光,崔铁军,王来贵.不同采深及倾角条件下煤(岩)体冲击地压模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(2):308-315.
HAN Guang,CUI Tiejun,WANG Laigui.Research on coal (rock) burst process simulation under different mining depth and dip angle [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(2):308-315.

[4] 翟明华,刘金海,田昭军,等.深井综放工作面侧向支承压力分布及冲击危险性评价[J].煤炭科学技术,2017,45(12):19-22,29.
ZHAI Minghua,LIU Jinhai,TIAN Zhaojun,*et al*.Survey on side abutment pressure distribution and rock burst riskevaluation in deep fully-mechanized caving face[J].Coal Science and Technology,2017,45(12):19-22,29.

[5] 杜涛涛,李国营,陈建强,等.新疆地区冲击地压发生及防治现状[J].煤矿开采,2018,23(2):5-10.
DU Taotao,LI Guoying,CHEN Jianqiang,*et al*.Rock-burst occurrence and prevention status in Xinjiang Region[J].Coal Mining Technology,2018,23(2):5-10.

[6] 鞠文君,潘俊锋.我国煤矿冲击地压监测预警技术的现状与展望[J].煤矿开采,2012,17(6):1-5.
JU Wenjun,PAN Junfeng.Status and prospect of rock-burst monitoring and alarm technology in Chinese coal mine[J].Coal mining Technology,2012,17(6):1-5.

[7] 王书文,毛德兵,潘俊锋,等.基于煤层围岩波速结构探测的工作面冲击危险性预评价技术[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):3848-3854.
WANG Shuwen,MAO Debin,PAN Junfeng,*et al*.Rock-burst hazard pre-evaluation technology based on wave velocity structure detection of coal bed surrounding rock[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(2):3848-3854.

[8] 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,2001:88-97.

[9] 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):328-332.
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):328-332.

[10] 曲孔典,马文强,刘　钒,等.冲击地压综合指数法中采空区宽度评价指数修正[J].煤炭技术,2016,35(5):93-95.
QU Kongdian,MA Wenqiang,LIU Fan,*et al*.Evaluation index modification of gob width in comprehensive index method about rock-burst[J].Coal Technology,2016,35(5):93-95.

[11] 陈建强,闫瑞兵,刘昆轮.乌鲁木齐矿区冲击地压危险性评价方法研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):26-29.
CHEN Jianqiang,YAN Ruibing,LIU Kunlun.Study on evaluation method of rock-burst danger in Urumqi Mining Area[J].Coal Science and Technology,2018,46(10):26-29.

[12] 秦忠诚,陈光波,李　谭,等.基于集对分析-区间三角模糊数的冲击地压耦合评价模型及应用[J].山东科技大学学报:自然科学版,2019,38(1):16-24.
QIN Zhongcheng,CHEN Guangbo,LI Tan,*et al*.Evaluation model and application of rock-burst coupling based on set pair analysis and interval triangular fuzzy number[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Nature Science),2019,38(1):16-24.

[13] 尹永明,张兴凯,周建新,等.基于模糊综合评判的冲击地压危险性分区预评价技术研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):180-184.
YIN Yongming,ZHANG Xingkai,ZHOU Jianxin,*et al*.Study on zoning pre-evaluation technology of rock-burst risk based on fuzzy comprehensive evaluation[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(3):180-184.

[14] 曾繁慧,张　晶,汪北方,等.煤矿冲击地压危险性模糊综合评价[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2018,37(1):205-209.
ZENG Fanhui,ZHANG jing,WANG Beifang,*et al*.Fuzzy comprehensive evaluation of rock-burst risk in coal mine[J].Journal of Liaoning Technical University:Natural Science,2018,37(1):205-209.

[15] 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):2756-2761.
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):2756-2761.

[16] 邓志刚.基于三维地应力场反演的宏观区域冲击危险性评价[J].煤炭科学技术,2018,46(10):78-82.
DENG Zhigang.Danger evaluation of pressure bump in macro area based on 3D geostress field inversion[J].Coal Science and Technology,2018,46(10):78-82.

[17] 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.

[18] 秦子晗.沿空工作面冲击危险性动态权重评价方法研究[J].煤矿开采,2014,19(1):87-90.
QIN Zihan.Dynamic weight evaluation method for rock-burst danger in mining face along gob[J].Coal Mining Technology,2014,19(1):87-90.