

马念杰,张文龙,李军,等. 冲击地压机理要素分析与评价[J]. 矿业科学学报,2021,6(6):651-658. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2021.06.003
Ma Nianjie,Zhang Wenlong,Li Jun,et al. Analysis and evaluation of essential factors for rock burst mechanism[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(6):651-658. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2021.06.003

冲击地压机理要素分析与评价

马念杰,张文龙,李军,连小勇,任建举

中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083

摘要:本文提出了冲击地压的能量特征和机理要素,初步建立了巷道冲击地压机理评价指标与体系(简称“3+4”指标体系),体系的主准则层为冲击地压的能量释放特征指标和机理要素指标,次准则层为能量释放突发性、瞬间性、集中性以及形成要素、关键要素、假设条件、普遍规律性。采用层次分析法计算了各准则层的权重,提出了综合评价结果的计算方法和分级标准。按照建立的冲击地压机理评价指标体系对蝶型冲击地压机理进行评价,评价结果为“优秀”。研究结果可用于评价现有冲击地压机理,同时为冲击地压机理的后续研究指明了方向。

关键词:冲击地压机理;冲击地压特征;机理要素;评价指标;评价体系

中图分类号:TD 353

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2021)06-0651-08

Analysis and evaluation of essential factors for rock burst mechanism

Ma Nianjie,Zhang Wenlong,Li Jun,Lian Xiaoyong,Ren Jianju

School of Energy and Mining Engineering,China University of Mining and Technology-Beijing,Beijing 100083,China

Abstract:This paper puts forward the energy characteristics and mechanism elements of rock burst, and preliminarily establishes the evaluation index and system of roadway rock burst mechanism (“3 + 4” index system). The main criterion layer of the system is the energy release characteristic index of rock burst and the key element index of rock burst mechanism. The secondary criterion layer is sudden energy release, instantaneous energy release, concentrate energy release, and forming element, key element, hypothesis condition and universal regularity. The weight of each criterion layer is calculated by analytic hierarchy process method. The calculation method and classification standard of comprehensive evaluation results are put forward. According to the established evaluation index system of rock burst mechanism, the butterfly rock burst mechanism is evaluated, and the evaluation result is “excellent”. The research results can be used to evaluate the existing rock burst mechanism, and point out the direction for the follow-up research of rock burst mechanism.

Key words:rock burst mechanism; rock burst characteristics; mechanism elements; evaluation index; evaluation system

冲击地压是煤矿井下一种严重的动力灾害,与岩爆现象^[1-2]类似,其发生经常无明显预兆^[3],可

预测性较差。冲击地压破坏性较强,严重时可致数百米巷道瞬间破坏甚至完全闭合^[4-5],支护结构瞬

收稿日期:2021-03-05 修回日期:2021-04-14

基金项目:国家自然科学基金(51704294,51434006)

作者简介:马念杰(1959—),男,辽宁开原人,教授,博士生导师,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。Tel:13910506828,E-mail:njma5959@126.com

通信作者:张文龙(1987—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制、冲击地压机理与监测预警方面的科研工作。Tel:15615516665,E-mail:15615516665@163.com

间失效^[6]。冲击地压的发生经常没有规律,发生条件各异,很难统一解释与预测。要理清冲击地压的发生机理,首先要明确冲击地压机理研究应该揭示或解释的问题,进而建立冲击地压机理的评价指标与方法。对冲击地压机理进行评价,可以指明下一步应该研究的方向。

冲击地压归根结底是一种能量的释放过程,能量特征是冲击地压机理研究的基础,是冲击地压现象的基本特征。冲击地压发生机理的要素是研究对象和内容时应该说明的问题或遵循的原则。本文分析了冲击地压能量释放特征与机理要素,建立了冲击地压机理的评价体系,对现有冲击地压机理进行了分析,明确了蝶型冲击机理对评价体系的契合程度,并对冲击地压机理的后续研究方向进行了展望。

1 冲击地压机理研究现状

近70年来,国内外众多学者对冲击地压的发生提出了各自的机理(或理论、原理),从各个角度进行了诠释,主要理论包括刚度理论(刚度为冲击地压发生的条件^[7])、强度理论(强度决定了煤岩体的破坏^[8])、能量理论(外界给予系统的能量超过破坏所需能量^[9])、冲击倾向性理论(冲击倾向性是冲击地压发生内在因素^[10])、“三准则”理论(在“强度理论”“能量理论”和“冲击倾向性理论”基础上提出的约束准则^[11])、失稳理论(系统处于非稳定平衡状态临界点时,外界微小扰动即会导致瞬间失稳^[12])、“三因素”理论(内在因素、力源因素、结构因素^[13])、动静载原理(动载与静载的共同作用^[14])、冲击启动理论(冲击分为启动、传递、显现三个阶段^[15])、蝶型理论(围岩塑性区的蝶形突变^[16-17])等。学者们取得丰硕研究成果的同时,也存在一些问题,主要是:

(1) 冲击地压机理作为世界性难题,当前研究对其发生的根本原因尚未理清,仍然不能全面系统地揭示冲击地压灾害机理,还需要进一步深入研究。

(2) 学者们对于冲击地压机理各执己见,说法不一,缺乏统一的评价指标与体系。当前机理研究的量化评价工作迫在眉睫,只有明确了冲击地压机理研究的要素与指标,后期机理的研究才有章可循。

2 冲击地压能量释放特征

对于冲击地压而言,煤岩体的突然瞬时破坏归

根结底是能量驱动下一种状态的改变,因此从能量特征的角度对其进行研究会比较真实地反映其破坏规律^[18-19]。本文分析认为,冲击地压的能量释放具备突然性、瞬间性、集中性3个基本特征。

2.1 能量释放突然性

冲击地压的“能量释放突然性”表示其能量释放前,经常无明显征兆突然就发生了。例如,2014年发生在陕西省高家堡煤矿的“11.13”冲击地压事故,发生前未发现任何前兆;同年陕西省孟村矿的“6.5”冲击地压事故,也未发现任何前兆,微震系统也未监测到明显的震动事件^[20]。

冲击地压的发生是一种突变的过程(与突变理论类似),冲击地压发生前参与冲击地压的工程岩体处于平衡状态,但如果该平衡状态的控制变量(可能为巷道所处应力状态、触发应力、支护条件、水、采动影响等)位于临界点附近,那么控制变量的微小改变就可以导致巷道及围岩经历不平衡状态(巷道破坏、煤体抛出、支护破坏、煤尘等),达到另一个平衡状态(冲击地压结束的状态)。不平衡状态的破坏速度及程度,取决于临界点前后状态变量的变化速率及变化总量。

蝶型冲击地压机理认为,巷道塑性区(以最大半径 $R_{\max}$ 表征)在某受力状态前后存在突然扩展现象。本文以某岩石($\varphi=20^\circ$, $E/\lambda=2$; φ 为内摩擦角, E 为弹性模量, λ 为降模量)为基础,绘制了最小主应力 p_3 恒等于 20 MPa 条件下, $R_{\max}$ 随最大主应力 p_1 的不断增大的相应变化曲线(图1)。从图中可以看出,当 $p_1=58.6$ MPa(最大主应力与最小主应力的比值为 2.93)时,塑性区的半径突然增大了 10 倍以上,表明在该力学状态前后,塑性区状态变量发生了突变,揭示了冲击地压“能量释放突然性”的特征。

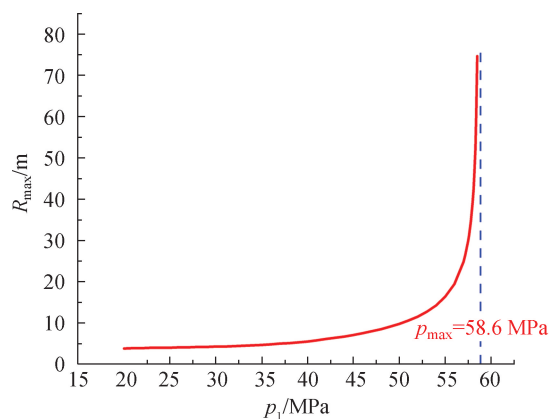


图1 蝶型冲击机理揭示的塑性区半径变化曲线

Fig. 1 Plastic zone radius curve revealed by butterfly rock burst mechanism

2.2 能量释放瞬间性

冲击地压的发生一定需要系统前期不断积累能量或进行能量的转变,当积累或转变的能量达到一定的临界点时,在一定的触发条件下就会发生大范围的动力破坏现象,这就是量变到质变的过程。而量变到质变的发展过程是需要时间的,因此冲击地压的能量释放过程一定与时间指标相关联^[21],而且从现场事故来看,这种量变到质变的发展过程是瞬间的,冲击地压通常持续零点几秒至十几秒。

对于临界系统而言,如果对其施加一定的外力(给予一定的能量)是“瞬间”给予的,对于系统的破坏也将可能是瞬间的,造成的破坏会更大;但如果是“缓慢”给予的,那么结果可能完全不同,系统或许根本不会破坏或破坏很小。这同样说明破坏的程度与力的施加时长有直接关系。冲击地压是系统能量的一种“瞬时”释放,这个“瞬时”为极短的时间,才会导致强烈的动力灾害。

冲击地压会在某一个时间节点停止,而不是持续进行,即系统由平衡状态转向不平衡状态,又从平衡状态转向平衡状态的过程是短暂的,而且转向后期平衡状态后,短时间内不会再形成冲击地压。这表明一次冲击地压事故会在较短的时间内结束或停止,持续时间很短。

蝶型冲击机理采用塑性区几何尺寸与触发应力波到达时间的比值指标,来表征该时间范围内煤岩体塑性区扩展的快慢程度,作为评判瞬间程度的指标。由于应力波在煤岩体中的传播速度较快,以P波为例,其在煤体中传播速度通常大于2 000 m/s,相比巷道围岩的尺寸而言,可以认为触发应力导致的塑性区扩展基本是同步的,即认为部分围岩在各个方向的单元体从弹性状态转为塑性状态的过程是瞬间完成的,从而导致弹性应变能的释放是瞬间的。

2.3 能量释放集中性

在所有的井工开采煤矿灾害中,冲击地压灾害的破坏性是排在前列的,其破坏性主要体现在:动辄几十上百米甚至上千米的巷道严重损毁、支护系统瞬间失效(锚杆锚索瞬时破断等)、设备冲毁、人员伤亡、煤体抛出(几吨到几百吨)、冲击波等。2014年4月8日发生在华亭煤矿的冲击地压,造成1 000 m巷道瞬间底鼓量超过1.5 m^[22]。从现场来看,冲击地压能量的释放是集中的。这里需要指出,“能量释放集中性”包含两方面含义:(1)明确能量释放的方式;(2)能量计算应该做到定量化。

本研究将地震领域中的“相关区域”概念引入到冲击地压领域中,认为“冲击地压震源既包括产生破裂失稳且消耗能量的破裂体,也包括参与岩体破裂和地层震动能量供给的‘相关区域’地层,相关区域尺度能够达到破裂体的几倍到几十倍”。图2显示了破裂体(半径为 r)与相关区域(半径为 R)之间的关系,将“相关区域”定义为释能体或应力相关区。“相关区域”概念直接扩大了冲击地压的研究范围,即冲击地压的研究不仅要研究巷道附近的围岩,而且要研究几倍到几十倍于巷道围岩的区域,这些区域为冲击地压的发生提供了能量来源。事实上冲击地压释放能量远大于破裂体蕴含的能量。这里需要研究“相关区域”到底多大,具体集中释放了多少能量,如何定量化计算。

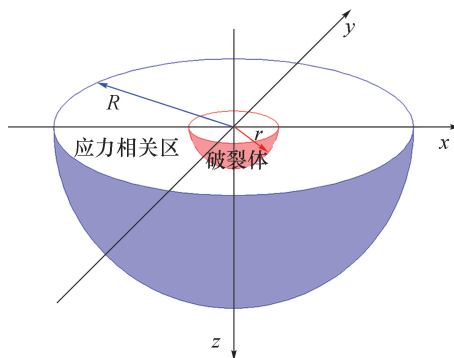


图2 破裂体与相关区域关系

Fig. 2 Diagram of relationship between fracture body and related area

蝶型冲击机理建立了简单的力学模型,利用4个模型两两相减的方式计算得到了力学状态改变过程释放的能量值,该过程消除了模型大小的影响。蝶型冲击机理对能量释放的量化计算体现了其集中程度。但需指出的是,蝶型冲击机理并未指出释放能量的具体地点(能量释放的起点),其仅按照创新性计算方法得到了释放能量值,至于动力破坏从何处首先发起,还应结合具体地质条件综合确定。

3 冲击地压机理要素

所谓机理,是指事物变化的理由和道理,机理首先要明确说明事物变化的理由(原因),提出明确的形成要素;其次要说明事物变化的道理,即事物自始至终是怎么变化的,要体现过程和结果。要特别说明的一点是,机理与机制不同,机制是指各要素之间的结构关系和运行方式,机理是大于机制的;机理与理论也是不同的,机理是理论形成的基

础,首先弄清楚机理,才能形成完整的理论,即理论>机理>机制。

冲击地压机理是众多机理研究中的一种,应该明确机理研究的要素,提出应该遵循的基本原则。

3.1 形成要素

著名的“因果”^[23]关系是哲学的重要研究内容之一,最早起源于古希腊亚里士多德的“四因说”,其中的“动力因”指出,机理应该明确解释事物或现象为什么开始运动,又为什么停止。“因果”是变化过程和原因的具体描述,一种现象通常由一个或多个原因引发的。冲击地压机理只有理清形成要素,才能真正算得上是“机理”。

另外,冲击地压机理揭示应尽量以方程式推导为基础,做到形成要素的具体化。

3.2 关键要素

系统论认为,关键要素指的是导致一个结果发生、变化、发展不可替代的要素^[24],即事物的结果中,关键要素较其他要素而言,起到了至关重要的作用,关键要素以外的要素起到的仅仅是催化或助力的作用。

要明确什么是冲击地压发生的关键因素,可以从冲击地压能量的主要来源进行分析。本研究将所述冲击地压机理分为两类:①冲击关键因素为“系统”外的能量,即冲击地压发生的关键要素为外部的震动干扰、顶板破断动能、动载影响等,这些因素决定了是否发生冲击事故;②冲击关键因素为“系统”本身的能量,即冲击地压发生的关键因素产生于系统本身,其力学状态起决定性作用,外部干扰仅仅是诱导因素。因此,要想确定关键因素,就需要确定冲击地压事故发生时,何种条件是必须参与的,何种条件不是必须参与的。对于不必须的条件而言,有的冲击地压事故并没有该条件的参与就发生了,那么其肯定不是关键因素。

因此,对于机理研究而言,应该在具体化形成要素的基础上,确定哪个或哪些要素是关键要素,指明结果的发生是何种关键要素导致的。

3.3 假设条件

著名的“奥克姆剃刀”原理^[25](又称简单性原理),是科学界常用的一个准则,它认为假设条件越少,机理揭示程度越高。具体表述为:如果多个理论同时都能解释某一现象,对于现象最简单的解释往往比复杂的解释更正确。因此,在揭示冲击地压机理时,应该尽量以最少的假设条件作为前提条件展开研究。然而对于科学研究而言,要想进行普遍性规律与机理的研究,很难综合考虑所有因素与

条件,必然要将某些条件理想化或者进行一些简化。表 1 中列出了主要冲击地压机理的假设条件。假设条件的多少并不决定机理的科学性,但假设条件更少的机理更正确。

蝶型冲击地压机理建立了简单的力学模型,通过严格的数学力学公式进行推导,来揭示冲击地压发生机理。它得出的结果适用于不同准则条件、不同巷道形状、不同层状围岩条件等,而其假设条件只有介质的连续变形。

表 1 冲击地压机理的假设条件

Tab. 1 Hypothesis of evaluation mechanism

理论名称	假设条件
刚度理论	冲击地压是否发生的判据是矿柱刚度与围岩刚度之间的关系
强度理论	材料处在单轴压力条件下,且破坏是冲击地压性质的
能量理论	冲击地压是否发生的判据是围岩储存弹性能与破坏阻力之间的关系
冲击倾向性理论	煤岩体冲击倾向性是冲击事故的主要因素,与外界条件不相关
“三准则”理论	①强度准则是煤岩体破坏准则;②能量准则及冲击倾向准则是突然破坏准则;③三个准则同时满足时才会导致冲击地压
失稳理论	①冲击地压要在峰值强度以后,煤岩出现应变软化的情况下才有可能发生;②均匀介质,连续变形;③系统各向均处于静水压力作用下
“三因素”理论	①结构面是导致冲击发生的主要结构因素;②只有同时满足内在条件、结构条件和应力条件时才有可能导致冲击地压
蝶型冲击机理	介质的连续变形
动静载原理	破坏是可积累的
冲击启动理论	①冲击地压的发生经历三个阶段:启动-传递-显现;②冲击启动区为巷帮极限平衡区

3.4 普遍规律性

“普遍性”是事物或规律的重要评判指标。哲学认为,马克思主义真理具有普遍性^[26],能够揭示普遍规律。辩证唯物主义认为,辩证法是现实世界中一切运动、一切生命、一切事物的推动原则,具有最高普遍性。规律、理论等的适用性问题上,能否揭示普遍规律,直接决定了规律或理论有没有找到最根本的问题。找到根本性问题,所有看似复杂的问题就只是根本问题的不同表现而已。

冲击地压机理属于工程科学问题,很难做到马

克思主义真理和辩证法的“普遍性”程度,但应尽量寻求事物发生或改变的本质,去揭示各种情况下冲击地压发生的本质共性。或者说,去研究或发现特定条件下的机理或规律,是为了更好地揭示事物发生或改变的本质问题,但要做到根本防治冲击地压,还是要研究“普遍性”机理。近些年,许多学者在冲击地压机理研究上做了大量工作,有的“普遍性”较强,有的只是揭示了特定条件下的发生机理,这些工作都为冲击地压机理的研究做出了贡献。

4 冲击地压机理评价体系

以前述指标和要素为基础,建立的冲击地压机理评价指标体系(简称“3+4”指标体系),如图3所示。

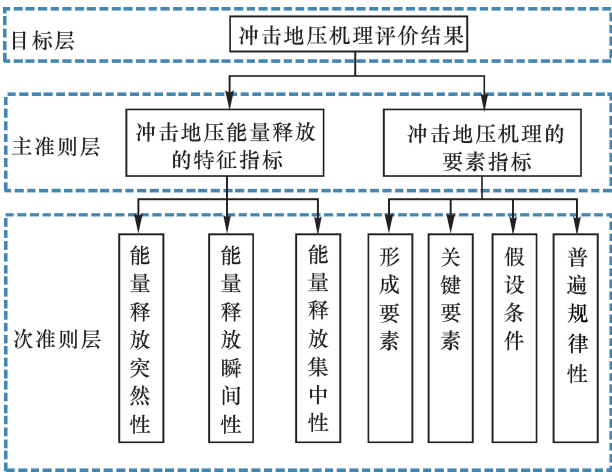


图3 冲击地压机理评价指标体系

Fig.3 Evaluation index system of rock burst mechanism

体系划分为目标层、主准则层、次准则层。目标层为冲击地压机理评价结果,主准则层为冲击地压能量释放的特征指标和冲击地压机理的要素指标。冲击地压能量释放的特征指标主准则层划分为三个次准则层,分别为能量释放突然性、能量释放瞬间性、能量释放集中性。冲击地压机理的要素指标主准则层包括四个次准则层,分别为具体化的形成要素、明确的关键要素、最少的假设条件和尽量揭示普遍规律。体系的评价分为四个等级,分别为优秀、良好、合格、较差。

4.1 评价指标权重的确定

本文提出的冲击地压机理指标权重计算采用层次分析法。体系包含两个主准则层指标,当体系中只有两个指标时,直接确定各自权重即可。两个主准则层指标重要程度相当,因此确定主准则层权重 u_1 和 u_2 均取值0.5。

次准则层均采用层次分析法进行计算,次准则层标度值采用经典的1~9级标度方法^[27]进行取值。

冲击地压能量释放的特征指标有3个次准则层:瞬间性指标是最重要的指标,体现了冲击地压与普通冒顶事故的区别;集中性是第二指标,体现了冲击地压能量释放的集中程度;突然性为第三指标,体现了状态变量在发生突变时无明显宏观征兆。基于以上原则,结合专家评判结果,得到3个指标的两两比较矩阵结果(式1)。

$$A_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0.33 & 0.50 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 0.50 & 1 \end{vmatrix}$$

(1)

冲击地压机理的要素指标中,关键要素最为重要,只有明确了关键要素,冲击地压的监测与防治才能抓住重点;形成要素为第二重要的指标,体现了导致冲击地压发生的具体条件;普遍规律性是机理研究的一项原则,重要程度在上述两项指标之后;假设条件是机理研究时的前提,机理研究时很难做到完全没有假设条件,因此其重要性排在最后。基于以上原则,结合专家打分结果,得到的4个指标的两两比较矩阵结果见式(2)。

$$A_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0.25 & 3 & 2 \\ 4 & 1 & 6 & 5 \\ 0.33 & 0.17 & 1 & 0.50 \\ 0.50 & 0.20 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

(2)

将矩阵 A_1 和 A_2 进行归一化处理后,计算得到特征指标次准则层的权重向量 $W_1 = (u_{11}, u_{12}, u_{13}) = (0.16, 0.54, 0.30)$;要素指标次准则层的权重向量 $W_2 = (u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}) = (0.20, 0.60, 0.08, 0.12)$ 。综上,得到的各准则层权重计算结果见表2。

表2 准则层权重计算结果				
Tab.2 Weight calculation results of criterion layer				
目标层	主准则层	主准则层权重	次准则层	次准则层权重
冲击地压机理评价	冲击地压能量释放的特征指标 u_1	0.50	能量释放突然性 u_{11}	0.16
			能量释放瞬间性 u_{12}	0.54
			能量释放集中性 u_{13}	0.30
	冲击地压机理的要素指标 u_2	0.50	形成要素 u_{21}	0.20
			关键要素 u_{22}	0.60
			假设条件 u_{23}	0.08
			普遍规律性 u_{24}	0.12

对各准则层权重进行一致性检验,计算得到 W_1 和 W_2 权重向量的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 分别为 3.01 和 4.06, UR 值分别为 0.005 和 0.02, 均小于 0.1。通过一致性检验表明,目前确定的准则层权重计算结果合理。

4.2 综合评价结果与评价等级

对各准则层进行打分(结果为 v_{ij}),结合权重结果即可得到冲击地压机理的综合评价结果 R (式 3)。每个准则层按[0~1]范围进行打分。对于能量释放突然性、瞬间性指标,按照揭示程度取[0~1];对于具体化的形成要素、明确的关键要素指标,能够体现指标的,即为 1,不能体现指标的,直接取 0;对于能量释放集中性指标,能够体现集中释放的,取 0.5,能够量化计算的,根据量化的程度取 0.6~1;对于相对性指标,如最少的假设条件指标,可采用以 1 为基础,每增加一个假设条件降低 0.2 的方法;对于模糊性指标,如尽量揭示普遍规律指标,如果仅从某一特例揭示机理,取 0.2~0.4,而从一定角度出发,研究确定普适性机理的,可根据揭示程度取值为 0.8~1。

$$R = u_1(u_{11}v_{11} + u_{12}v_{12} + u_{13}v_{13}) + u_2(u_{21}v_{21} + u_{22}v_{22} + u_{23}v_{23} + u_{24}v_{24}) \quad (3)$$

得到冲击地压机理的综合评价结果 R 后,根据结果可进行分类评价,具体评价等级划分区间见表 3。

表 3 评价等级取值区间

Tab. 3 Value range of evaluation grade

等级	优秀	良好	合格	较差
R 值	[0.85~1]	[0.7~0.85]	[0.6~0.7)	[0~0.6)

5 应用案例

基于以上指标评价结果,通过建立的评价体系对本文所述主要冲击地压机理进行了分析。结果显示,早期的刚度理论、强度理论、能量理论、冲击倾向性理论、“三准则”理论均提出了明确的形成要素,但部分机理对于 3 个能量特征指标揭示程度较差,没有体现明确的关键要素。近期的失稳理论、“三因素”理论、动静载原理、冲击启动理论也明确了机理的形成要素,揭示了普遍规律,但部分机理对能量释放突然性指标体现程度不足,对能量释放集中性指标的研究尚停留在定性程度,并未达到量化。

按照建立的评价方法对蝶型冲击地压机理进行了评价:

蝶型冲击地压机理中,前态塑性区的形成通常无

特异宏观表现,导致在冲击地压事故发生前无明显征兆可循,基本体现了冲击地压的突然性,但不排除巷道周边塑性区形成前兆的可能性,故 v_{11} 取值 0.8;围岩塑性区在某一主应力比值前后出现的瞬时突变现象一定程度上体现了冲击地压的瞬时性^[28-29],但由于时间长度并未绝对表达,故 v_{12} 取值 0.8;蝶型冲击机理以“4 个模型”^[30-32] 计算得到了冲击地压能量的来源及释放具体量值,对冲击地压的量化研究起到了一定作用,但并未完全体现其集中释放性,尤其在具体显现地点方面,因此 v_{13} 取值 0.8。

蝶型冲击地压机理中,明确指出冲击地压的形成要素为基本条件、前态塑性区、触发应力,其中基本条件为“已有采掘空间”和“强度关系($p_1 >$ 单轴抗压强度 σ_c)”,故 v_{21} 取值为 1;蝶型冲击地压机理论证了冲击地压发生的关键要素为前态塑性区、触发应力或二者组合,并明确了前态塑性区对于冲击地压事故的重要影响,故 v_{22} 取值为 1;蝶型冲击地压机理的假设条件仅有一个:介质的连续变形,故 v_{23} 取值为 0.8;蝶型冲击地压机理从塑性区和能量的角度出发,研究的是普适性机理,力求揭示不同条件下的本质共性问题,虽然达不到哲学等的“普遍性”程度,但其研究方法和研究原则在工程领域的机理研究中,已经较大程度地达到了揭示普遍规律的目标,故 v_{24} 取值为 0.8。

综上,按照式(3)的计算方法,蝶型冲击地压机理的综合评价结果为 0.88,达到了优秀级别。

6 结论与展望

本文提出了冲击地压机理研究应该体现的指标,初步建立了煤矿冲击地压机理的评价方法,主要研究成果如下:

(1) 建立了冲击地压机理“3+4”评价指标体系,主准则层包含“冲击地压能量释放的特征指标”和“冲击地压机理的要素指标”。

(2) 在冲击地压机理评价指标体系基础上,依据层次分析法计算了各指标的权重值,得到了综合评价结果的计算方法,并进行了结果分级。按照建立的冲击地压机理评价指标体系对蝶型冲击地压机理进行了评价,结果为“优秀”。

冲击地压归根结底是力学问题,首先应从力学角度出发,建立最简单的模型,以严谨的力学推导为研究方法,才能寻求到真正的科学真相,才能得到更科学合理的冲击地压机理。

参考文献

- [1] 王斌,宁勇,冯涛,等. 加锚砂岩单轴力学特性及屈曲型岩爆控制机制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2019,50(9):2285-2294.
Wang Bin, Ning Yong, Feng Tao, et al. Uniaxial mechanical characteristics of anchored sandstone and its mechanism of controlling buckling rockburst [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(9): 2285-2294.
- [2] 于洋,耿大新,童立红,等. 基于岩爆灾害的围岩变形量时间分形分析[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2017,45(7):36-40.
Yu Yang, Geng Daxin, Tong Lihong, et al. Analysis of time fractal behavior of deformation associated with immediate rockbursts[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 45(7): 36-40.
- [3] 袁亮,姜耀东,何学秋,等. 煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J]. 煤炭学报,2018,43(2):306-318.
Yuan Liang, Jiang Yaodong, He Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [4] 姜耀东,赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.
Jiang Yaodong, Zhao Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [5] 李臣,李鹏,鲁时雨,等. 断层保护煤柱下采煤工作面保留巷道破坏分析及其控制[J]. 矿业科学学报,2020,5(5):519-527.
Li Chen, Li Peng, Lu Shiyu, et al. Failure analysis and control of retained roadway at working face under protection coal pillar of the faults[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(5): 519-527.
- [6] 康红普,吴拥政,何杰,等. 深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J]. 煤炭学报,2015,40(10):2225-2233.
Kang Hongpu, Wu Yongzheng, He Jie, et al. Research and practice of bolting support in deep rock burst roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2225-2233.
- [7] Cook N G W, Hoek E P, Pretorius J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rock burst [J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 1966, 66(10): 435-528.
- [8] Brauner G. Kritische spannungen in kohlenflozen [J]. Gluckauf, 1975.
- [9] Cook N G W. A note on rockburst considered as a problem of stability[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 65(8): 437-446.
- [10] Bieniawski Z T, Denkhaus H G, Vogler U W. Failure of fractured rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1969, 6(3): 323-341.
- [11] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报, 1985, 14(3): 42-48.
Li Yusheng. Rockburst mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985, 14(3): 42-48.
- [12] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197-204.
Zhang Mengtao. Instability theory and mathematical model for coal/rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197-204.
- [13] 齐庆新,李宏艳. 冲击地压发生机理的再认识 [C]//中国科学技术协会学会学术部. 新观点新学说学术沙龙文集 51: 岩爆机理探索, 北京, 2010.
- [14] 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 Liming, 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.
- [15] 潘俊锋,宁宇,毛德兵,等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(3):586-596.
Pan Junfeng, Ning Yu, Mao Debing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586-596.
- [16] 赵志强,马念杰,郭晓菲,等. 煤层巷道蝶型冲击地压发生机理猜想[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2689-2697.
Zhao Zhiqiang, Ma Nianjie, Guo Xiaofei, et al. Mechanism conjecture of butterfly rock burst in coal seam roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2689-2697.
- [17] 马念杰,赵希栋,赵志强,等. 掘进巷道蝶型煤与瓦斯突出机理猜想[J]. 矿业科学学报,2017,2(2):137-149.
Ma Nianjie, Zhao Xidong, Zhao Zhiqiang, et al. Conjecture about mechanism of butterfly-shape coal and

- gas outburst in excavation roadway [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(2): 137-149.
- [18] 宋大钊. 冲击地压演化过程及能量耗散特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [19] 王之东, 黎立云, 刘一, 等. 型煤模型冲击失稳破坏中能量释放分析[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(6): 527-535.
- Wang Zhidong, Li Liyun, Liu Yi, et al. Analysis of energy release in impact instability damage of briquette model[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(6): 527-535.
- [20] 潘俊锋, 齐庆新, 刘少虹, 等. 我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 111-121.
- Pan Junfeng, Qi Qingxin, Liu Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 111-121.
- [21] 万志军, 赵阳升, 窦林名, 等. 煤矿冲击地压问题的系统分析法与时间相关性[C]//中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集, 西安, 2002.
- [22] 张月征, 纪洪广, 彭华, 等. 冲击地压与区域构造应力环境相关性及其应变响应特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 311-318.
- Zhang Yuezheng, Ji Hongguang, Peng Hua, et al. Correlation between rockburst and regional tectonic stress environment and its strain response characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S2): 311-318.
- [23] 张健. 关于 Granger 因果分析的方法学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [24] 卢丹. 突发事件演化过程控制的关键要素识别方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [25] Haitjema H. Occam's razor[J]. Ground Water, 2019, 57(3): 349.
- [26] 向开. 论马克思主义真理的普遍性[J]. 理论探索, 1992(2): 19-22.
- Xiang Kai. On the universality of marxist truth [J]. Theoretical Exploration, 1992(2): 19-22.
- [27] 于跟波, 杨鹏, 吕文生, 等. 基于层次分析法和模糊决策的残留矿柱回采方案优选[J]. 矿冶, 2014, 23(2): 11-14.
- Yu Genbo, Yang Peng, Lu Wensheng, et al. Scheme optimization of residual pillars recovery based on AHP and fuzzy decision[J]. Mining and Metallurgy, 2014, 23(2): 11-14.
- [28] 马念杰, 李季, 赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 206-213.
- Ma Nianjie, Li Ji, Zhao Zhiqiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 206-213.
- [29] 马念杰, 郭晓菲, 赵志强, 等. 均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2679-2688.
- Ma Nianjie, Guo Xiaofei, Zhao Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in homogeneous medium[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2679-2688.
- [30] 马骥, 赵志强, 师皓宇, 等. 基于蝶形破坏理论的地震能量来源[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1654-1665.
- Ma Ji, Zhao Zhiqiang, Shi Haoyu, et al. Sources of seismic energy based on butterfly failure theory [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1654-1665.
- [31] 马念杰, 马骥, 赵志强, 等. X型共轭剪切破裂-地震产生的力学机理及其演化规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1647-1653.
- Ma Nianjie, Ma Ji, Zhao Zhiqiang, et al. Mechanical mechanism and evolution of X-shaped conjugate shear fractures-seism [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1647-1653.
- [32] Zhang Wenlong, Ma Nianjie, Ma Ji, et al. Mechanism of rock burst revealed by numerical simulation and energy calculation[J]. Shock and Vibration, 2020(1): 1-15.

(责任编辑: 王晓玲)