

## 采矿科学与工程



移动扫码阅读

张俊文,宋治祥,刘金亮,等.煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J].煤炭科学技术,2022,50(2): 27-36.

ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, *et al.* Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.

## 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构

张俊文<sup>1</sup>, 宋治祥<sup>1</sup>, 刘金亮<sup>2</sup>, 董续凯<sup>1</sup>, 张 杨<sup>1</sup>, 齐庆新<sup>3,4,5</sup>, 赵善坤<sup>4,5</sup>, 秦 凯<sup>4,5</sup>,  
陈见行<sup>1</sup>, 颜廷杰<sup>2</sup>, 王 龙<sup>2</sup>, 赵 宁<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;2.山东能源新矿集团有限责任公司 华丰煤矿,山东 泰安 271413;

3.煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013;4.煤炭科学技术研究院有限公司安全分院,北京 100013;

5.煤炭科学研究总院煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

**摘 要:**煤矿冲击地压灾害频发依然严重制约煤炭深部安全高效开采,冲击地压灾害研究需将发生机理、监测预警及综合防治相互关联,建立深部开采冲击地压综合防治体系。以冲击地压防治为目的,提出了冲击地压灾害防治的结构调控理念、科学内涵以及冲击地压结构调控技术路线,分析认为煤岩体结构是导致围岩应力场演化的根源,系统结构变化是引起应力变化及转移的根本原因,应力仅是系统结构变化的外在显现形式,冲击地压灾害防治应从调控煤岩体结构出发。通过对冲击地压灾害机理及防治有关问题的梳理,提出了深部冲击地压灾害结构调控核心科学问题,包括扰动作用下冲击性煤岩体应力场时空演变、深部冲击地压多元前兆信息耦合辨识及预警、深部高应力煤岩体的结构调控及减冲机制。在此基础上,提出了应力-电磁辐射-地音-微震监测构成的多元监测预警体系,以实现 对采区范围内巷道、采场及覆岩结构破裂的多尺度监测。根据由区域子系统和局部子系统组成的深部开采冲击地压灾害结构调控技术路线,提出由保护层+负煤柱开采、水力压裂、深孔爆破及大直径 钻孔组成的结构调控体系来实现降低冲击地压灾害发生的危险性。结构调控体系已在山东某矿埋深 1 300 m 的 4 号煤层成功应用,验证了该体系防治冲击地压灾害的可行性及科学性。

**关键词:**深部开采;冲击地压;结构调控;监测预警

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)02-0027-10

### Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine

ZHANG Junwen<sup>1</sup>, SONG Zhixiang<sup>1</sup>, LIU Jinliang<sup>2</sup>, DONG Xukai<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, QI Qingxin<sup>3,4,5</sup>,  
ZHAO Shankun<sup>4,5</sup>, QIN Kai<sup>4,5</sup>, CHEN Jianhang<sup>1</sup>, YAN Tingjie<sup>2</sup>, WANG Long<sup>2</sup>, ZHAO Ning<sup>2</sup>

(1.School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Huafeng Mine, Shandong Energy Xinwen Mining Group Co., Ltd., Taian 271413, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The frequent occurrence of rock burst disasters in coal mines still seriously restricts the safe and efficient deep mining of coal. The study of rock burst disasters needs to correlate the occurrence mechanism, monitoring and warning and comprehensive prevention and control, and establish a comprehensive prevention and control system of rock burst in deep mining. For the purpose of rock burst prevention and control, the structural control concept, scientific connotation and technical route of rock burst structure control for rock burst disaster prevention and control are proposed. The analysis shows that the structure of coal and rock mass is the root cause of the evolution of surrounding rock stress field, and the change of system structure is the root cause of stress change and transfer. Stress is only the external

收稿日期:2021-10-02

责任编辑:朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.est.2021-1273

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52034009,51974319);越崎杰出学者资助项目(2020JCB01)

作者简介:张俊文(1977—),男,内蒙古凉城人,教授,博士生导师。E-mail: zhangjw@cumtb.edu.cn

manifestation of system structure change, and rock burst disaster prevention and control should start from the regulation of coal and rock mass structure. Based on the analysis of the mechanism and prevention of rock burst disasters, the core scientific problems of structural control of deep rock burst disasters are put forward, including the spatial and temporal evolution of stress field of coal and rock mass under disturbance, the coupling identification and early warning of multiple precursory information of deep rock burst, and the structural control and shock reduction mechanism of deep high stress coal and rock mass. On this basis, a multivariate monitoring and warning system composed of stress-electromagnetic radiation-geophone-microseismic monitoring is proposed to realize the multi-scale monitoring of roadway, stope and coating rock structural fracture within the mining area. According to the technical route of structural control of rock burst disaster in deep mining composed of regional subsystems and local subsystems, a structural control system composed of protective layer + negative coal pillar mining, hydraulic fracturing, deep hole blasting and large diameter drilling was proposed to reduce the risk of rock burst disaster. The structural control system has been successfully applied in the No.4 coal seam with a depth of 1 300 m in a mine in Shandong province, which verifies the feasibility and scientificity of the system in preventing rock burst disaster.

**Key words:** deep mining; rock burst; structural control; monitoring and forecast

## 0 引言

随着浅部矿物资源逐渐枯竭,资源开发不断走向地球深部,深部灾害成为必须解决的战略科技问题。煤炭是我国的主体能源,埋深 2 000 m 以浅的煤炭资源总量为 5.9 万亿 t,其中埋深超过 1 000 m 的占 50% 以上,主要分布在我国中东部地区,该地区的煤矿大部分已进入深部开采<sup>[1-2]</sup>。随着我国煤矿开采强度和开采深度不断增加,冲击地压灾害已经成为威胁煤矿安全生产的重大灾害之一<sup>[3-4]</sup>。

多年来,相关研究人员在冲击地压发生机理、预测预警、控制方法等方面进行了大量研究,并取得了重要进展。在发生机理方面,相继提出了强度理论、刚度理论、能量理论<sup>[5]</sup>、三准则<sup>[6]</sup>、材料失稳理论<sup>[7-8]</sup>、三因素机理<sup>[9]</sup>、冲击倾向性理论<sup>[10-11]</sup>、强度弱化减冲理论<sup>[12]</sup>、冲击启动理论<sup>[13]</sup>、应力控制理论<sup>[14]</sup>、冲击扰动响应失稳理论<sup>[15]</sup>等。在冲击地压监测预警方面,钻屑法、应力监测、地音法、声发射<sup>[16]</sup>、微震监测<sup>[17]</sup>、电磁辐射<sup>[18]</sup>等方法在实验室及工程现场中发挥了重要作用,这些监测预警方法不仅可以监测冲击地压发生的位置和时间,而且也可测定释放的能量及相关震动参量,对冲击地压监测预警发挥了积极作用。在冲击地压控制方面,普遍采用采矿优化设计、切缝、钻孔、爆破、水力压裂、切顶等人工卸压方法以求调整高应力状态,或采用更有效的支护方法,如冲击震动巷道围岩高预应力、强力锚杆+U 型钢支护法、防冲液压支架<sup>[19]</sup>、恒阻大变形锚杆(索)支护法<sup>[20]</sup>等。这些研究成果对我国冲击地压防治,特别是浅部开采发挥了重要作用。

随着煤矿进入深部开采,原岩应力增大,瓦斯压力增加,围岩应力场的复杂性、围岩的大变形和强流变性、动力响应的突变性、深部岩体的脆延转化特性

等,使得深部矿井冲击地压灾害表现出与浅部不同的特征<sup>[21]</sup>:强度更大;破坏影响范围更广;空间位置分布更加分散;发生更突然;复合灾害增多。深部开采冲击地压防控仍然面临重大难题,国内外冲击地压灾害仍时有发生,冲击地压灾害不管在致灾条件、致灾过程,还是在控制手段等方面取得的理论成果及技术水平与深部煤炭资源安全高效开采的需求相差甚远。因此,煤矿冲击地压灾害的有效治理仍然是严重制约煤炭深部安全高效开采的关键技术瓶颈。尽快突破煤矿深部开采中冲击地压灾害的关键技术难题,寻求冲击地压致灾演化、监测预警及治灾控制的科学规律,达到对冲击地压灾害的有效治理已迫在眉睫。

针对煤矿深部开采冲击地压的发生机理、监测预警及综合防治问题,笔者凝练了煤矿深部开采冲击地压致灾机理及综合防控的关键科学问题,提出了冲击地压灾害防治的结构调控理念及科学内涵,确立了深部冲击地压灾害多参量监测预警及结构调控减冲的技术架构,为有效遏制冲击地压灾害提供科学支撑及技术保障。

## 1 深部开采冲击地压灾害结构调控的科学内涵

冲击地压是指煤矿井巷或采煤工作面周围煤(岩)体由于弹性变形能的瞬时释放而产生的突然、急剧破坏的动力现象,常伴有煤(岩)体瞬间位移、抛出、巨响及气浪等。为揭示冲击地压的发生机理,强度、刚度、能量、三准则、三因素、变形系统失稳、冲击启动、应力控制等理论等论点相继提出,这些理论在一定程度上较好地解释了冲击地压的发生机理,对冲击地压的有效防治做出了重要贡献。但随着煤矿开采深度的不断增加,冲击地压灾害仍呈增长趋势,传统的冲击地压发生机理及防治理念已不能满足深

部安全开采的需要。因此,有必要追溯深部开采冲击地压灾害发生机理及有效防控的深层次原因。

从国内外研究现状来看,传统的冲击地压发生机理基本都是将应力和能量作为主要影响因素,普遍认为冲击地压是由于煤岩体中弹性能的大量聚集,当达到一定的极限后,煤岩体突然失稳,冲击地压灾害随之发生。冲击地压防治是一个复杂的系统工程,从系统工程角度看,岩石力学系统的结构形式是保证岩石力学系统功能和整体作用的基础,系统几何结构信息是系统控制变量的一个构成部分。系统结构形式的改变,其功能和整体作用就会改变。处于临界或不稳定状态的岩石力学系统,通过调整、优化其结构形式,可实现系统加固,提高系统的稳定度,防止系统失稳<sup>[22]</sup>。因此,一个系统结构变化是引起应力变化及转移的根本原因,应力仅是系统结构变化的外在显现形式。传统应力控制与结构调控防治冲击地压对比如图1所示,2种方法均采用工程卸压手段,前者强调对已形成的高应力转移,而后者突出对岩体结构调控,使之不形成高应力。

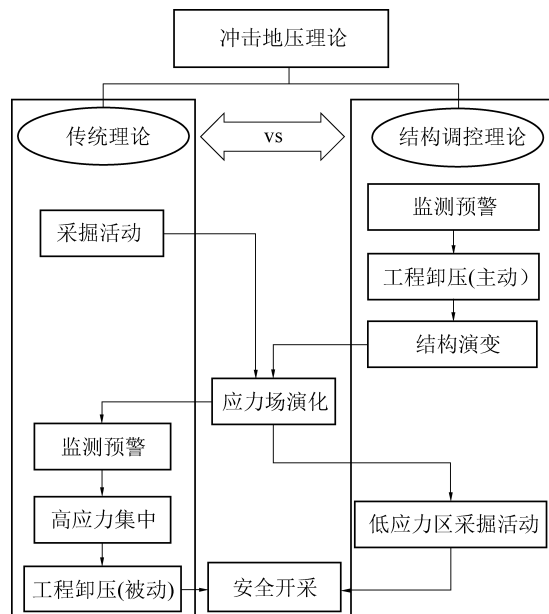


图1 冲击地压应力控制与结构调控理念对比

Fig.1 Concepts comparison of stress control and structural modulation in rock burst

深部开采冲击地压灾害结构调控主要由区域子系统结构调控和局部子系统结构调控组成。区域子系统结构调控包括了空间调控、工艺调控和采法调控;局部子系统结构调控由围岩调控和卸压调控2部分组成。具体到区域调控和局部调控又有较多工艺可供选择,系统结构调控的技术思路如图2所示,对于区域子系统,通过采用空间巷道布置、开采方法

等进行调控;对于局部子系统,通过采用围岩改性、水压致裂、卸压爆破等进行调控。

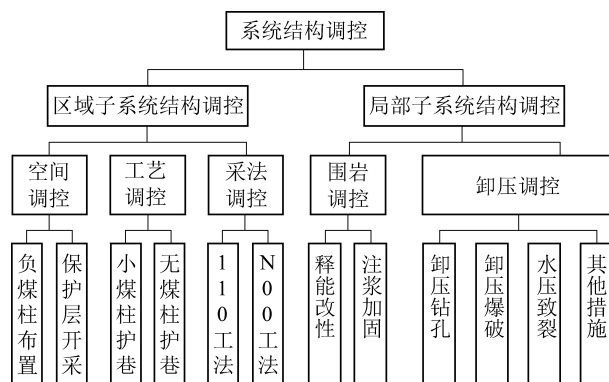


图2 冲击地压结构调控技术路线

Fig.2 Technical route for structural control of rock burst

## 2 深部冲击地压灾害结构调控核心科学问题

### 2.1 扰动作用下冲击性煤岩体应力场时空演变

具有高应力或高变形的冲击性煤岩体在外部动态扰动作用下,使得冲击能沿软弱结构面或易引起突变滑动的层状界面突然释放而引起冲击地压灾害。掌握煤岩体应力场分布特征对于煤矿安全开采、灾害防治至关重要。煤岩体应力场分布与煤岩介质材料、围岩结构、开采扰动、水化作用等密切相关,具有与时间、空间有关的动态演变特征。在卸荷作用下,三维应力场形态、卸荷边界及围岩应力场时空演化规律又关系着卸荷范围内应力演变力学机制。

### 2.2 深部冲击地压多元前兆信息耦合辨识及预警

冲击地压的监测预警是一个多维空间的信息描述问题,需要运用多学科,多种观测方法,对数据联合分析和处理,通过不同尺度范围的监测手段实现多元前兆信息识别及预警。如微震、应力监测、电磁辐射及地音监测各有优势及特点,且监测范围的尺度不同,如应力监测为点监测,地音法和电磁辐射法为局部监测,微震法为区域监测。将这4种监测信息进行耦合可弥补单一数据的不足,基本可以对采区范围内不同尺度的煤岩体破裂信息进行监测。多种监测信息不是简单的组合,需要利用多源异构数据处理技术,实现对多源监测数据提取、统一描述、特征分析及建模,构建一种分析算法,进行多元前兆信息耦合辨识及预警。

### 2.3 深部高应力煤岩体的结构调控及减冲机制

采区巷道优化布置是一种比较直接且经济的结构调控方式,负煤柱开采自然形成矸石层,可显著耗散上覆岩层突然断裂产生的弹性能或动能。除此之



外,水力压裂/深孔爆破或大直径钻孔方式通过参数的优化可改变煤岩体空间结构或内生结构,这些结构又直接影响着煤岩体中的应力场分布,如在低应力场中进行采掘活动会有效降低冲击地压灾害发生的风险。因此,结构调控的不同方式、不同参数优化后的减冲效应显得尤为重要。

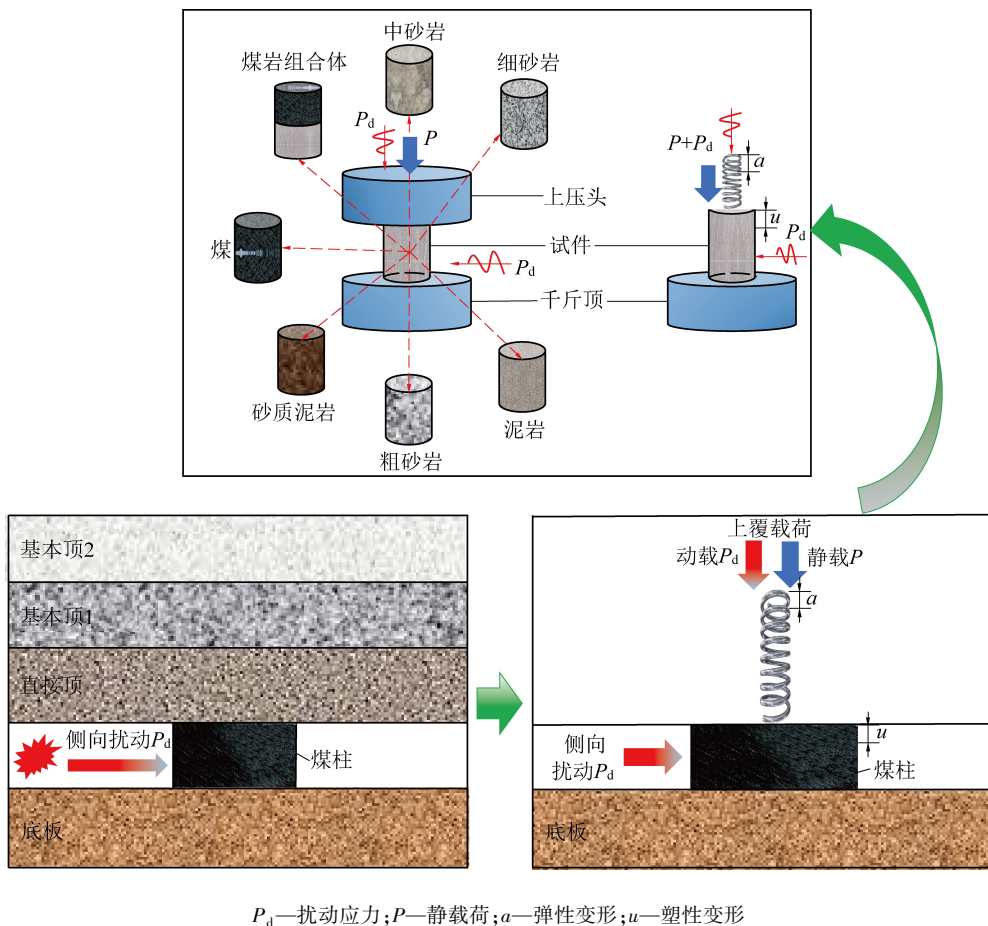
### 3 深部开采冲击地压灾害结构调控涵盖内容

#### 3.1 冲击地压灾害发生机理

##### 3.1.1 冲击性煤岩体损伤破裂材料效应

煤岩体是冲击地压灾害发生的直接载体,包括

煤体、岩体及煤岩组合体。不同的煤岩材料具有不同的力学特性,并非所有的煤岩材料都发生冲击地压灾害,只是冲击性煤岩体材料。地应力形成的静载荷和工程扰动形成的动载荷是冲击地压灾害发生的直接诱因,为研究静动载荷造成冲击地压灾害发生的机理,常采用试验手段进行模拟,从而获得冲击性煤岩体在静态加卸载、动静组合加卸载下的极限强度、变形特征、变形损伤及卸荷抗剪强度等特征,进而确定不同冲击性煤岩体在高应力下的岩石力学参数变化规律、能量演化规律及其灾变机制,冲击性煤岩体材料效应试验原理如图3所示。



$P_d$ —扰动应力; $P$ —静载荷; $a$ —弹性变形; $u$ —塑性变形

图3 冲击性煤岩体材料效应试验原理

Fig.3 Test principle of material effect for impacted coal and rock mass

##### 3.1.2 冲击性煤岩体损伤破裂结构效应

冲击地压的三因素理论<sup>[9]</sup>较系统地解释了冲击地压发生的3个因素:内在因素(煤岩的冲击倾向性)、力源因素(高度的应力集中或高变形能的赋存与外部的动态扰动)和结构因素(具有软弱结构面和易于引起突变滑动的层状介面),并被国内外学者广泛引用。三因素理论仅提出了影响冲击地压发生的3个关键因素,但未对各个影响因素展开系统研究。因此,冲击性煤岩体损伤破裂结构效应需

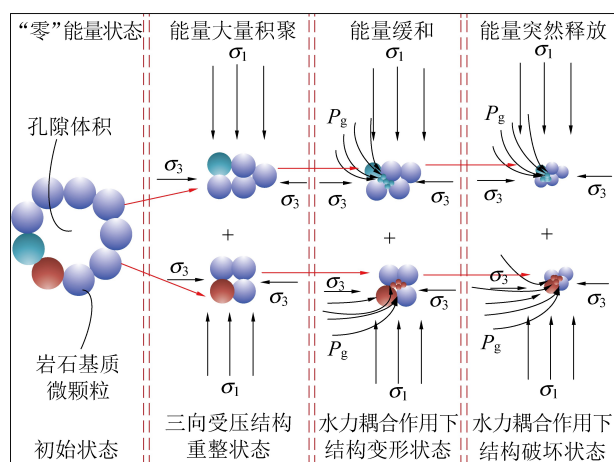
揭示冲击性煤岩体微元能量演化规律(图4),分析含裂隙及不同层理的煤岩体破坏与冲击地压发生机理之间的关系(图5),构建含结构弱面的冲击性煤岩体强度特征模型,并分析其破坏特征。

#### 3.2 冲击地压灾害监测预警

##### 3.2.1 应力场演化与冲击震动之间的相关性

坚硬顶板断裂、关键块体滑落失稳、爆破等产生的震动波是诱发冲击地压灾害的能量来源,采场围岩的应力场演化与冲击震动有密切关联。当冲击动





$\sigma_1$ —轴向应力; $\sigma_3$ —围压; $P_g$ —渗透压

图4 冲击性煤岩体微元能量演化模型

Fig.4 Micro-element energy evolution model for impacted coal and rock mass

压。因此,冲击地压灾害孕育过程中冲击震动的时空演化规律,不同类型冲击地压自发或诱导形成冲击地压的前兆信息特征,冲击地压的震级强度、震级能量与煤岩性质、开采扰动、巷道围岩应力-应变及空间位置之间的关系等都是研究重点。

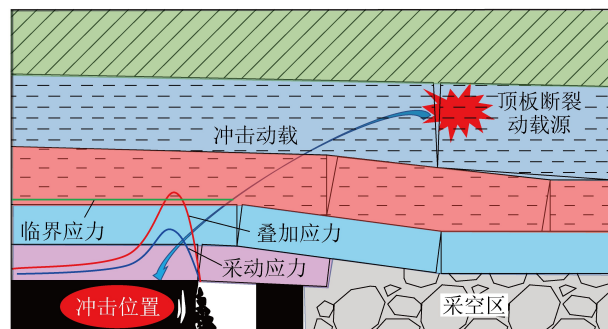


图6 动静载叠加诱发冲击地压原理<sup>[23-25]</sup>

Fig.6 Principle of dynamic and static load superposition induced rock burst<sup>[23-25]</sup>

### 3.2.2 冲击地压多元前兆信息耦合试验模型

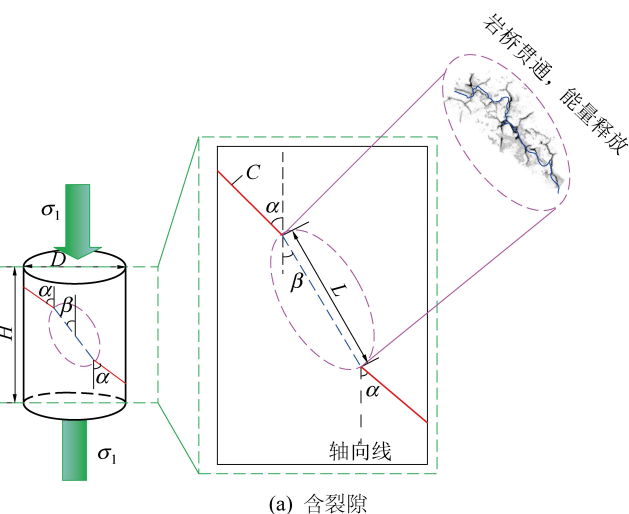
在受载作用下,煤岩体破裂会产生声发射、电磁辐射信号,通过分析应力、应变、声发射、电磁辐射等多元前兆信息,可以获得位移场、能量场、电磁场随应力场变化的规律,进而得到煤岩破裂的阈值及判别准则,应力-声发射-电磁辐射耦合试验模型如图7所示。

### 3.2.3 冲击地压灾害多元前兆信息监测

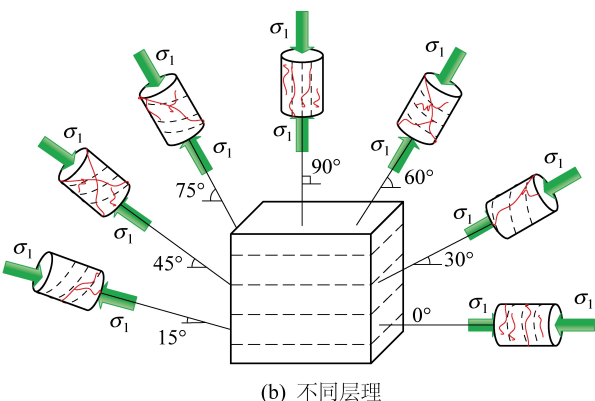
微震、应力监测、电磁辐射及地音监测是冲击地压矿井常用的监测手段,各监测数据不完全一致,甚至在预警结果上出现相悖的情况,导致煤矿现场无法正确选择监测预警方法,且部分矿井安装了多种监测系统,现场工作人员通常无法分析多个系统生成的海量数据,造成一定程度的数据浪费和预测结果的失真。微震、应力、电磁辐射及地音由于监测频率、能级不同,实际监测的范围及尺度有差别,因此应按照监测的空间尺度进行布局。如图8所示的监测包含巷道尺度、工作面尺度及采区尺度,监测的尺度范围由小到大,覆盖面大且没有盲区。将应力的增幅、增速,电磁辐射强度、脉冲变化率,地音的能量、频次,微震的震源集中度、冲击变形能指数等进行归一化处理的基础上建立耦合预警模型。

### 3.2.4 冲击地压灾害多元监测预警平台架构

采集工程现场微震、应力监测、电磁辐射及地音监测等多源数据信息,利用多源异构数据处理技术,构建多源监测数据提取、统一描述、特征分析及模型,应用信息特征提取、数据挖掘、模式识别、网络技术及计算机编程等手段,形成由数据采集传输、分析计算、数据可视化和决策支持组成的冲击地压远程



(a) 含裂隙



(b) 不同层理

$D$ —样本直径; $H$ —样本高度; $\alpha$ —裂隙倾角;  
 $\beta$ —岩桥倾角; $C$ —裂隙宽度; $L$ —预留裂隙长度

图5 冲击性煤岩体结构效应

Fig.5 Structural effects of impacted coal rock masses

载作用于煤岩体后,煤岩体首先发生结构演变,进而促使采动应力场发生迁移或应力骤增,发生冲击地

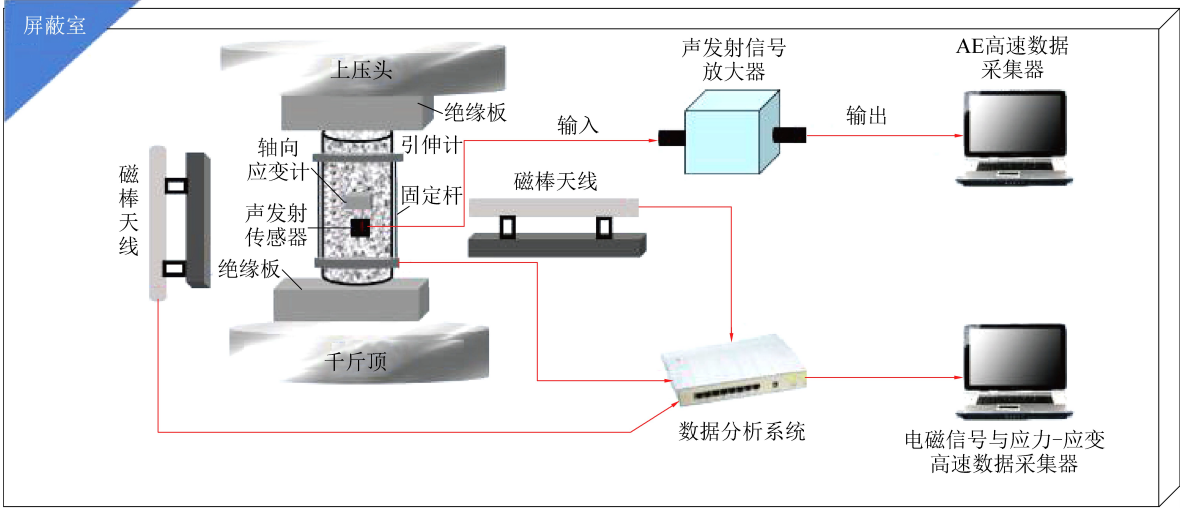


图 7 应力-声发射-电磁辐射耦合试验模型

Fig.7 Stress-acoustic emission-electromagnetic radiation coupling test model

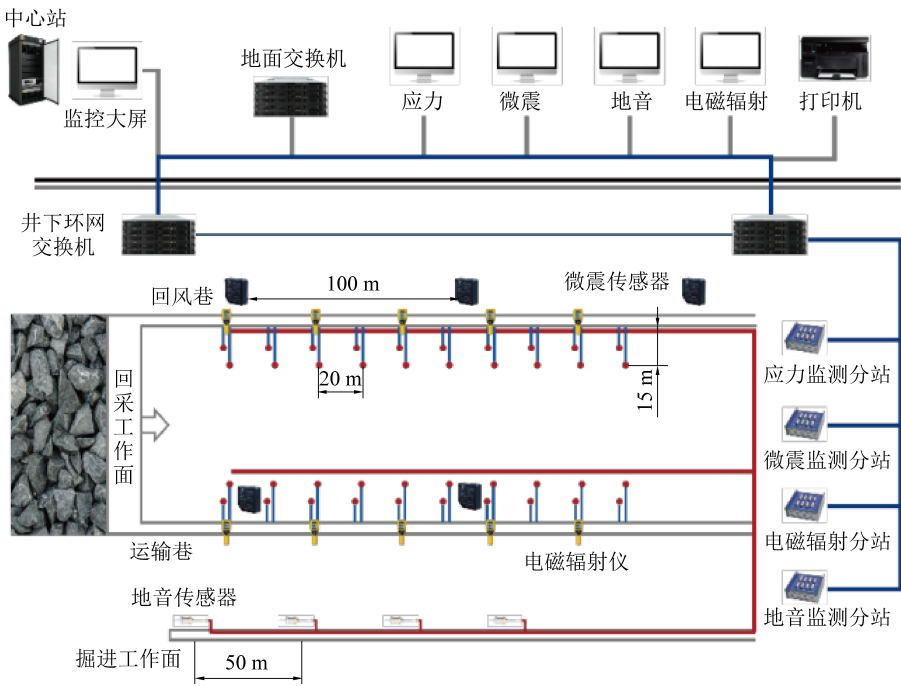


图 8 应力-电磁辐射-地音-微震监测多元前兆信息监测

Fig.8 Multiple precursor information monitoring of stress-electromagnetic radiation-ground sound-microseismic monitoring

监测预警平台,系统架构如图 9 所示。

3.3 冲击地压结构调控方法

3.3.1 覆岩结构调控

工作面回采后顶板正常会发生周期性垮落,上覆岩层形成铰接结构。由于地质条件的复杂性,有的工作面顶板垮落步距大、岩层厚、强度高,且难以形成铰接结构,如果顶板突然失稳,会形成冲击地压灾害的动力源,危险性极大。为此,需要提前进行覆岩结构调控,如于斌教授提出的地面压裂法<sup>[26]</sup>,这是一种有效的结构调控方法;另外,可以采用巷道优化布置方法,不需要任何的辅助设备,不仅无任何附

加成本,还提高了煤炭采出率,增加了经济效益。如负煤柱开采技术,该技术不仅适用于单一煤层,也适用于多煤层开采。如图 10 所示,单一煤层开采后,邻空侧自上而下的“覆岩-矸石层-底板”结构构成了“弹-塑-弹”力学模型,矸石层起到耗散能作用;对于多煤层开采,一个煤层可作为保护层,另一强冲击煤层再采用负煤柱开采,邻空侧自上而下的“覆岩-裂隙卸压带-底板”结构也构成“弹-塑-弹”力学模型,层间裂隙卸压带起到耗散能作用。因此,负煤柱开采充分利用了工作面开采自然形成的覆岩结构,实现了防冲目的,属于结构调控的范畴。

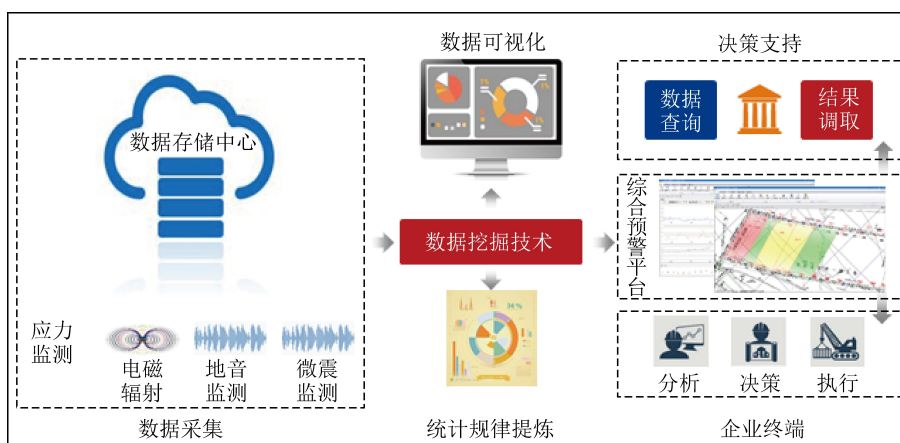
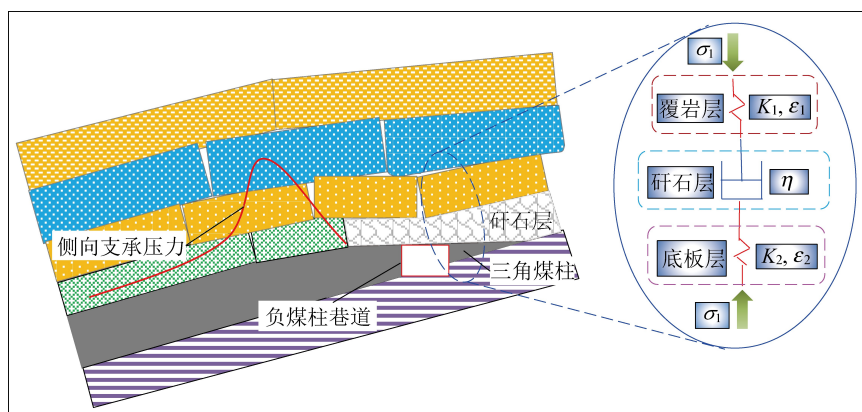
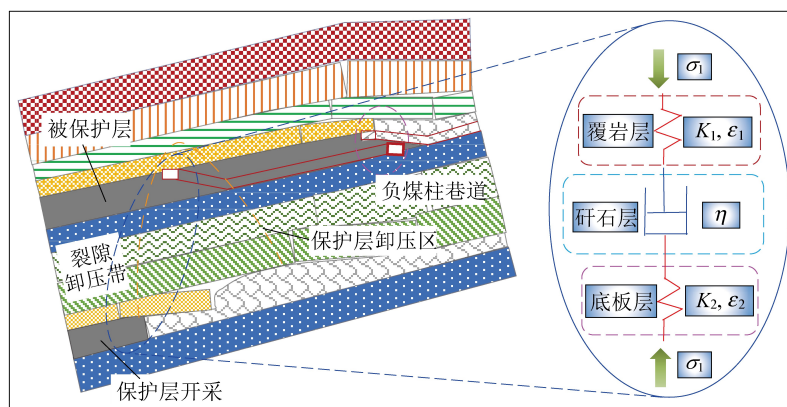


图9 应力-电磁辐射-地音-微震监测预警平台系统架构

Fig.9 System architecture of stress-electromagnetic radiation-ground sound-microseismic monitoring and warning platform



(a) 单一煤层开采(弹-塑-弹力学模型)



(b) 保护层开采(弹-塑-弹力学模型)

$K_1$ 、 $K_2$ —覆岩、底板弹性系数;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ —覆岩、底板变形量;  $\eta$ —黏性系数

图 10 负煤柱开采结构调控力学模型

Fig.10 Mechanical model of structural control for negative coal pillar mining

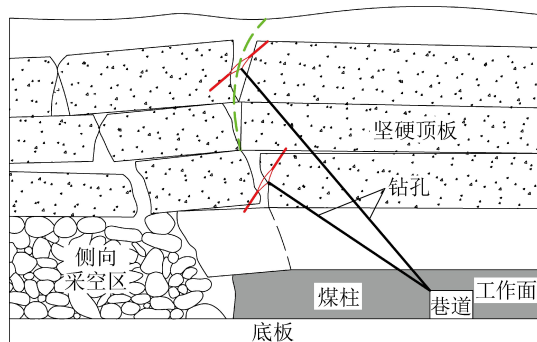
### 3.3.2 采场结构调控

采场结构调控主要采用水力压裂或深孔预裂爆破法。水力压裂是指裂纹由于其内部液体压力的作用而开裂并扩展的过程,有时也称作水压致裂或水力劈裂,主要起压裂和软化作用。深孔顶板定向水压致裂/顶板预裂爆破技术其核心在于根据主应力

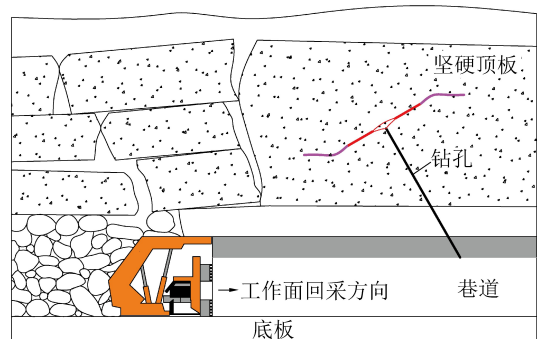
的方向不同,通过在煤层上方坚硬岩层中预先人为制造裂缝,促使顶板内部产生结构弱面,随着工作面的推采,利用矿山压力的作用促使完整厚硬顶板在预制结构弱面处发生垮断,破坏顶板积聚弹性变形能和连续传递高应力的能力,进而达到防冲解危的目的。防治煤柱型及工作面冲击的水力压裂、深孔



爆破结构调控如图 11 所示。



(a) 防治煤柱型冲击



(b) 防治工作面冲击

图 11 采场结构调控示意<sup>[27]</sup>

Fig.11 Schematic diagram of working face structural control<sup>[27]</sup>

### 3.3.3 围岩结构调控

围岩结构调控主要采用大直径钻孔法。大直径钻孔本质是通过改变巷道围岩的内生结构,在钻孔四周形成一个弱化带,引起巷道周边围岩内的高应力向深部转移,从而使巷道周边附近围岩处于低应力区。当冲击地压发生时,一方面大直径钻孔的空间能够吸收冲出的煤粉,防止煤体冲出;另一方面卸压区内顶底板的闭合产生“楔形”阻力带,也能够防止煤体冲出导致的灾害。大直径钻孔与煤体硬度、钻孔直径、钻孔间距、钻孔深度、钻孔角度等参数密切相关。若大直径钻孔参数未达到卸压的阈值,可能起不到结构调控减冲的目的;若钻孔参数超出了卸压阈值一定范围,可能破坏煤壁的完整性,增加巷道围岩的支护难度。大直径钻孔围岩结构调控示意如图 12 所示。

## 4 工程应用

山东某矿是我国典型的冲击地压矿井,开采深度已经达到了 1 300 m,为了应对冲击地压灾害带来的安全风险,成功应用了冲击地压结构调控理念,在覆岩尺度上采用了负煤柱开采技术,采场尺度上采用了深孔爆破切顶卸压技术,巷道尺度上采用了大直径钻孔卸压技术。同时在工作面采用应力、微震、

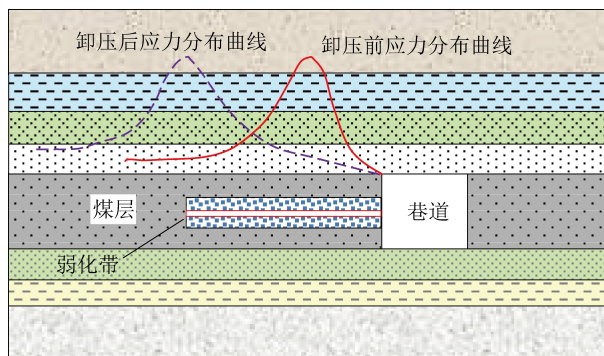
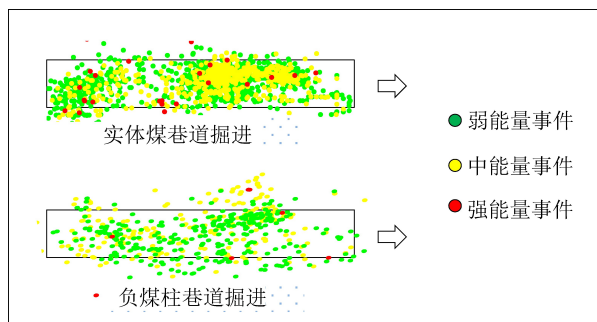


图 12 大直径钻孔围岩结构调控示意

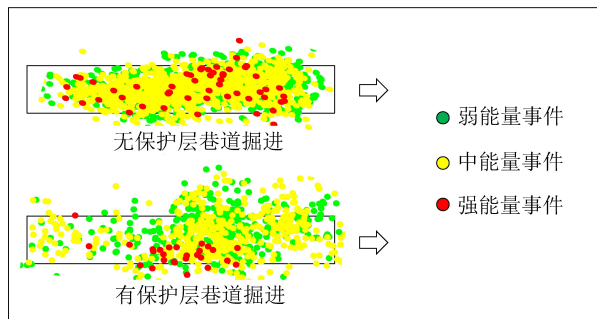
Fig.12 Schematic of structural control of large diameter drilling

地音、电磁辐射、钻屑量等多种监测预警措施,实现了深部煤炭资源的安全开采。

该煤矿共 5 个可采煤层,其中 4 号煤层为主采煤层,平均厚 6.2 m,如果首先开采 4 号主采煤层,则冲击地压灾害危险性极大。因此,基于结构调控防治冲击地压理念首先开采 1 号、6 号薄煤层(作为中部 4 号煤层的保护层)形成一定范围的低应力区,以保证 4 号煤层首采工作面的安全开采,4 号煤层下一个工作面再采用负煤柱巷道布置(系统布置如图 10 所示)。通过对比采用负煤柱及开采保护层前后的掘进工作面微震数据(图 13、图 14)发现:采用负煤柱及开采保护层的掘进工作面微震事件能量及频次都有很大程度减少,且微震能量与频次基本呈正相关关系,频次越高,释放的能量越多,说明能



(a) 实体煤与负煤柱巷道掘进对比



(b) 有、无保护层巷道掘进对比

图 13 微震事件分布

Fig.13 Distribution of microseismic events

量被多次释放,保障了巷道的安全掘进;相反,传统开采常有大能量事件发生,负煤柱及开采保护层形成的卸压结构对掘进工作面均有明显的卸压减冲作用,且巷道长期无明显变形。从保护层开采和负煤柱对比看,负煤柱的平均能量事件相对更小,因此卸压效果更好。

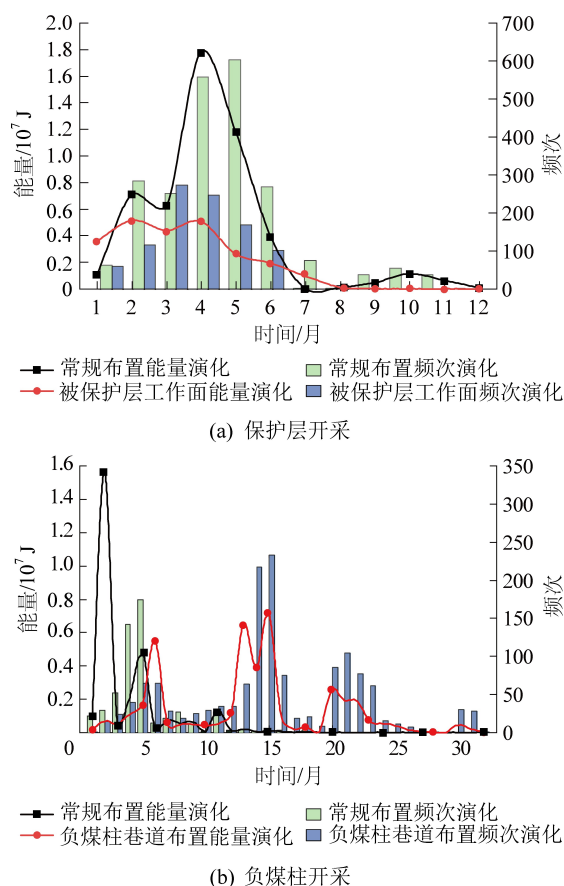


图14 开采微震事件能量及频次对比

Fig.14 Comparison of energy and frequency of microseismic events

## 5 结 论

1)提出了冲击地压灾害防控的结构调控理念及科学内涵,煤岩体结构是导致围岩应力场演化的根源,冲击地压灾害防控应从调控煤岩体结构入手。在采区尺度范围内,煤岩体结构包含巷道围岩结构、采场结构及覆岩结构。

2)提出了由应力、电磁辐射、地音、微震组成的多尺度监测预警体系,通过不同尺度范围的监测手段实现巷道、采场及覆岩结构破裂的多元前兆信息识别及预警。

3)在应力-电磁辐射-地音-微震监测构成的多元监测预警基础上,提出了冲击地压灾害防控的结构调控手段,包括负煤柱开采、开采保护层、水力压

裂/深孔爆破及大直径钻孔。

4)通过在山东某矿的成功应用,验证了结构调控理念防治冲击地压灾害的可行性及科学性。

## 参考文献 (References):

- [1] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报, 2019,44(5):1283-1304.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(5):1283-1304.
- [2] 康红普,王国法,姜鹏飞,等.煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J].煤炭学报,2018,43(7):1789-1800.  
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1 000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(7):1789-1800.
- [3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.  
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2803-2813.
- [4] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究及探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(11):2161-2178.
- [5] COOK N G W, HOEK E, PRETORIUS J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rock bursts[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 1965,66(10):435-528.
- [6] 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(3):37-43.  
LI Yusheng. Rockburst mechanism and its preliminary application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985(3):253-262.
- [7] 章梦涛.冲击地压机理的探讨[J].阜新矿业学院学报, 1985(S1):65-72.  
ZHANG Mengtao. Study of rockburst mechanism[J]. Fuxin Mining Institute, 1985(S1):65-72.
- [8] 章梦涛,徐曾和,潘一山,等.冲击地压和突出的统一失稳理论[J].煤炭学报,1991,16(4):48-53.  
ZHANG Mengtao, XU Zenghe, PAN Yishan, et al. Unified instability theory of rockburst and outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1991,16(4):48-53.
- [9] 齐庆新.层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[D].北京:煤炭科学研究总院,1996.  
QI Qingxin. The study on its theory and practice of rock burst led by the structure of bedded coal-rock mass[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 1996.
- [10] SINGH S P. Classification of mine workings according to their rockburst proneness[J]. Mining Science and Technology, 1989(8):253-262.

- [11] 齐庆新,彭永伟,李宏艳,等.煤岩冲击倾向性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2736-2742.  
QI Qingxin, PENG Yongwei, LI Hongyan, *et al.* Study of bursting liability of coal and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2736-2742.
- [12] 窦林名,陆莱平,牟宗龙,等.冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J].煤炭学报,2005,30(6):1-6.  
DOU Linming, LU Caiping, MOU Zonglong, *et al.* Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 1-6.
- [13] 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.
- [14] 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):35-40.  
QI Qingxin, LI Xiaolu, ZHAO Shankun. Theory and practices on stress control of mine pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 35-40.
- [15] 潘一山.煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J].煤炭学报,2018,43(8):2091-2098.  
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2091-2098.
- [16] 纪洪广,穆楠楠,张月征.冲击地压事件AE与压力耦合前兆特征分析[J].煤炭学报,2013,38(S1):1-5.  
JI Hongguang, MU Nannan, ZHANG Yuezheng. Analysis on precursory characteristics of coupled acoustic emission and pressure for rock burst events. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 1-5.
- [17] 姜福兴,王存文,杨淑华,等.冲击地压及煤与瓦斯突出和透水的微震监测技术[J].煤炭科学技术,2007,35(1):26-28.  
JIANG Fuxing, WANG Cunwen, YANG Shuhua, *et al.* Micro seismic monitoring and measuring technology for pumping pressure, coal and gas outburst and water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(1): 26-28.
- [18] 何学秋,聂百胜,何俊,等.顶板断裂失稳电磁辐射特征研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2935-2940.  
HE Xueqiu, NIE Baisheng, HE Jun, *et al.* Study on electromagnetic emission characteristics in roof failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2935-2940.
- [19] 潘一山,肖永惠,李国臻.巷道防冲液压支架研究及应用[J].煤炭学报,2020,45(1):90-99.  
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Guozhen. Roadway hydraulic support for rockburst prevention in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 90-99.
- [20] 何满潮,郭志彪.恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1297-1308.  
HE Manchao, GUO Zhibiao. Mechanical property and engineering application of anchor bolt with constant resistance and large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1297-1308.
- [21] 齐庆新,潘一山,舒龙勇,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构[J].煤炭学报,2018,43(7):1801-1810.  
QI Qingxin, PAN Yishan, SHU Longyong, *et al.* Theory and technical framework of prevention and control with different sources in multiscales for coal and rock dynamic disasters in deep mining of coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1801-1810.
- [22] 王来贵,黄润秋,王泳嘉,等.岩石力学系统运动稳定性理论及其应用[M].北京:地质出版社,1998.7
- [23] 何江,窦林名,蔡武,等.薄煤层动静组合诱发冲击地压的机制[J].煤炭学报,2014,39(11):2177-2182.  
HE Jiang, DOU Linming, CAI Wu, *et al.* Mechanism of dynamic and static combined load inducing rock burst in thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2177-2182.
- [24] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静叠加原理及其防治[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.
- [25] 窦林名,姜耀东,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):803-811.  
DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, *et al.* Monitoring and pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 803-811.
- [26] 于斌,高瑞,孟祥斌,等.大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1134-1145.  
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, *et al.* Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134-1145.
- [27] 赵善坤,张广辉,柴海涛,等.深孔顶板定向水压致裂防冲机理及多参量效果检验[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1247-1255.  
ZHAO Shankun, ZHANG Guanghui, CHAI Haitao, *et al.* Mechanism of rockburst prevention for directional hydraulic fracturing in deep-hole roof and effect test with multi-parameter[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(6): 1247-1255.