

# 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术

窦林名<sup>1</sup>, 何学秋<sup>2</sup>, REN Ting<sup>3</sup>, 何江<sup>1</sup>, 王正义<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100003;

3. Centre of Infrastructure Protection and Mining Safety, University of Wollongong, Australia, NSW, 2522)

**摘要:** 基于煤岩瓦斯动力灾害严重影响到煤矿安全生产, 提出了动静载叠加诱发高静载、强动载和低临界应力 3 种类型动力灾害原理; 建立煤矿开采静载、矿震动载和瓦斯压力的表达式. 总结了含瓦斯煤岩动力灾害监测预警及防治理论与技术, 包括冲击矿压监测方面的分区分级监测预警、微震监测法、电磁辐射、弹性波 CT 和震动波 CT 等, 煤与瓦斯突出监测方面的钻孔瓦斯涌出初速度法、 $R$  指标法和电磁辐射法等, 以及灾害治理方面的强度弱化减冲原理及手段、巷道围岩控制的强弱结构效应及围岩动静载的支护体系、区域及局部防突技术. 煤岩瓦斯动力灾害未来研究方向主要是: 1) 将动静载叠加原理进一步定量化表示; 2) 构建适用于煤岩瓦斯复合型灾害的监测预警指标体系; 3) 将冲击矿压和煤与瓦斯突出的防治措施有机的结合起来.

**关键词:** 煤岩瓦斯动力灾害; 动载; 静载; 瓦斯压力; 防治

中图分类号: TD 324 文献标志码: A 文章编号: 1000-1964(2018)01-0048-12

DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.000813

## Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology

DOU Linming<sup>1</sup>, HE Xueqiu<sup>2</sup>, REN Ting<sup>3</sup>, HE Jiang<sup>1</sup>, WANG Zhengyi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, School of Mines,

China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Centre of Infrastructure Protection and Mining Safety, University of Wollongong, Australia, NSW, 2522)

**Abstract:** Due to the coal mine safety production being seriously affected by the coal-gas dynamic disasters, the superposition mechanism of static and dynamic loads was proposed, which includes three types of dynamic disasters: high static load, high dynamic load and low critical load. The expressions of static loads, dynamic loads and gas pressures were established. Besides, the theory and technology of monitoring and prevention of coal-gas dynamic disasters were summarized. As for rockburst, the main monitoring methods includes: regional and classified monitoring, microseismic monitoring, electromagnetic radiation, elastic wave CT, shock wave CT and so on. While the common monitoring measures of outburst are drilling hole gas emission rate,  $R$  index and electromagnetic radiation and so on. Furthermore, the major means of prevention are as follows: the intensity weakening theory and method, strong-soft-strong

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0801403, 2016YFC0801408); 国家自然科学基金项目(51634001, 51404243); 江苏省重点研发计划项目(BE2015040)

通信作者: 窦林名(1963—), 男, 青海省平安县人, 教授, 博士生导师, 从事矿山压力、冲击矿压、采矿地球物理等方面的研究.

E-mail: lmdou@126.com Tel: 0516-83995904

引用格式: 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 48-59.  
DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 48-59.

structure for controlling roadway surrounding rock, supporting system resisting to dynamic and static loads and regional outburst prevention technology. Moreover, the future research directions of coal-gas dynamic disasters are: 1) the superposition mechanism of static and dynamic loads can be further quantitatively represented. 2) the monitoring and warning index system of coal-gas dynamic disasters should be established. 3) the prevention methods of rockburst and outburst can be organically combined.

**Key words:** coal-gas dynamic disaster; dynamic stress; static stress; gas pressure; prevention

随着煤炭开采深度和强度的增大,煤岩瓦斯动力灾害已成为煤矿普遍的安全问题<sup>[1-2]</sup>。此工程灾害是煤岩变形破裂与瓦斯运移动态演化共同导致的突发性灾害,针对其机理及监测预警与防治的研究是世界性难题,是迫切需要解决的科学问题。

在煤岩瓦斯动力灾害机理研究方面,国内外学者已进行了大量的研究工作,并根据实验和理论分析提出了多种煤岩动力灾害机理的假说,在冲击矿压方面,如能量理论<sup>[3]</sup>、刚度理论<sup>[4]</sup>、强度理论<sup>[5]</sup>、冲击倾向理论<sup>[6]</sup>、三准则理论、变形系统失稳理论<sup>[7]</sup>等。文献<sup>[8]</sup>以断裂力学、损伤力学和稳定性理论为基础,进行的围岩近表面裂纹的扩散规律、能量耗散和局部围岩稳定性研究备受关注。文献<sup>[9]</sup>建立了冲击矿压的摩擦滑动失稳模型,用摩擦滑动中的黏滑现象解释了冲击矿压的发生机理。文献<sup>[10]</sup>建立了煤岩冲击破坏的弹脆性体突变模型,较好解释了冲击矿压的发生、载荷的突变对煤岩体破坏的影响、煤岩体从流变到突变的破坏特征、释放能量的大小等。

在煤与瓦斯突出方面,存在单因素假说(地应力假说、瓦斯作用假说、化学本质假说)和综合作用假说等。文献<sup>[11]</sup>认为煤与瓦斯突出是由于采动影响破坏了含瓦斯煤体的平衡状态,导致地应力与煤体孔隙中瓦斯气体互相耦合而产生的类似流变的一种物理过程。文献<sup>[12]</sup>提出了煤与瓦斯突出球壳失稳假说。文献<sup>[13]</sup>认为煤与瓦斯突出是固体和流体相互耦合造成的煤体失稳破坏。文献<sup>[14]</sup>运用摩擦滑动模拟实验系统对煤与瓦斯突出进行物理模拟,发现煤与瓦斯突出过程中存在黏滑失稳现象,并提出了煤与瓦斯突出黏滑机理。文献<sup>[15]</sup>运用力学理论探讨了煤与瓦斯突出灾害,利用量纲分析得到了一般形式下的煤与瓦斯突出判据,文献<sup>[16]</sup>在此基础上建立了煤与瓦斯突出恒稳推进模型,并根据质量守恒方程和动量守恒方程得出了煤与瓦斯突出—维流动解和启动判据。文献<sup>[17]</sup>运用力学理论对煤与瓦斯突出各阶段进行了详细的描述,分析了力学作用条件下的煤与瓦斯突出过程。

在冲击地压和突出的统一失稳理论研究方面,最早提出将冲击地压和突出这两种现象放在一起进行统一研究的是苏联的佩图霍夫<sup>[18]</sup>。1987年在我国召开的第22届国际采矿安全会议上,再次呼吁“即有冲击地压又有突出危险两种事故的煤层非常常见,需要考虑其安全开采问题,因此研究冲击地压和突出的统一理论是非常必要的”。目前认为冲击地压是没有瓦斯作用的突出,突出是有瓦斯作用的冲击地压的呼声愈来愈高,国内有的学者也有这样的观点。文献<sup>[19-20]</sup>提出了突出和冲击地压的统一失稳理论,该理论认为煤与瓦斯突出是力学上的材料失稳问题,提出煤与瓦斯突出是在瓦斯压力和围岩应力共同作用下,部分煤体变形破坏后,变成应变软化材料,当变形平衡状态处于非稳定时,在外界扰动下的失稳,即煤与瓦斯突出就是有瓦斯作用的冲击地压。文献<sup>[21-22]</sup>通过采用内蕴时间塑性理论建立了煤和瓦斯耦合作用的本构关系以及煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论的数学模型和冲击地压系统,即失稳理论的数学模型。

本文基于复合动力灾害发生的力源本质,提出能够解释煤岩瓦斯动力灾害的动静载叠加理论,分析了诱发动力灾害的各力源组成,从静载、动载和瓦斯监测3个方面建立了多维多参量的监测体系,从强度弱化减冲治理、巷道围岩控制的强弱强结构效应及区域及局部防突技术等方面阐述了复合动力灾害的防治技术。

## 1 动静载叠加诱发含瓦斯煤岩动力灾害

如图1所示,煤岩瓦斯动力灾害发生的力源包括:煤岩体的静载应力 $\sigma_s$ 、采动诱发的动载应力 $\sigma_d$ 以及煤岩体裂隙中的瓦斯压力 $\sigma_g$ 。在临近采掘工作面的煤岩体,该区域静载应力较高,而对应的瓦斯压力和极限强度较低。复合动力灾害的机理归根结底还是复合载荷共同作用下煤岩体的组合载荷超过其承载强度发生破坏。当采动诱发的动载(主要是矿震)叠加到临近工作面区域,且满足煤岩体发生动力灾害的临界载荷时,就会诱发煤岩瓦斯动

力灾害,其应力表达式为

$$\sigma_s + \sigma_d + \sigma_g \geq \sigma_{bmin}, \quad (1)$$

式中  $\sigma_{bmin}$  为发生动力灾害时的临界载荷(最小载荷)。

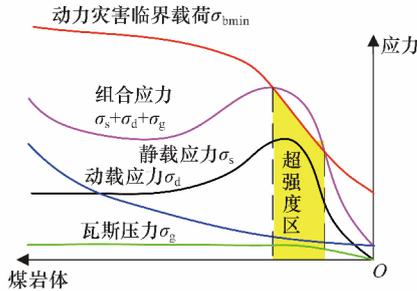


图 1 煤岩瓦斯动力灾害临近采掘工作面载荷叠加示意  
Fig. 1 Superposition of loads near mining and excavation working faces for coal-gas dynamic disasters

由式(1)可知,当采掘空间含瓦斯煤岩体中的静载荷、矿震形成的动载荷以及瓦斯压力这三者相互叠加,超过了含瓦斯煤岩体发生动力灾害的临界载荷时,就会发生煤岩瓦斯动力灾害,即煤岩瓦斯动力灾害发生的“动静叠加原理”,如图 2 所示。

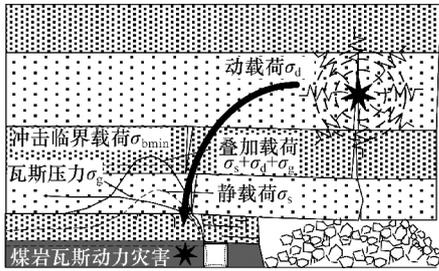


图 2 煤岩瓦斯动力灾害“动静叠加原理”模型示意  
Fig. 2 Mechanism model of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads

### 1.1 静载分析

一般情况下,采掘空间周围煤岩体中的静载荷由地压和支承压力组成,即

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} = (k + \lambda)\gamma H, \quad (2)$$

式中: $\gamma$  为上覆岩层的容重; $H$  为上覆岩层的厚度; $\lambda$  为侧压系数; $k$  为支承应力集中系数。

其中,地压则由自重应力和构造应力组成

$$\sigma_{s1} = \gamma H + \lambda\gamma H = (1 + \lambda)\gamma H. \quad (3)$$

支承压力则可表示为

$$\sigma_{s2} = (k - 1)\gamma H. \quad (4)$$

### 1.2 动载分析

矿井开采过程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。具体表现为采煤机割煤、移架、机械震动、爆破、顶底板破断、煤体失稳、瓦斯突出、煤炮、断层滑移等。这些动载源可统一称为矿震。

假设矿井煤岩体为弹性各向同性连续介质,则

应力波在煤岩体中产生的动载荷可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{dP} = \rho\nu_P (\nu_{pp})_P, \\ \sigma_{dS} = \rho\nu_S (\nu_{pp})_S, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{dP}, \sigma_{dS}$  分别为 P 波、S 波产生的动载; $\rho$  为煤岩介质密度; $\nu_P, \nu_S$  分别为 P 波、S 波传播的速度; $(\nu_{pp})_P, (\nu_{pp})_S$  分别为质点由 P 波、S 波传播引起的峰值震动速度。

### 1.3 瓦斯压力分析

由于瓦斯压力随埋深多呈线性变化关系,一般情况下,深部瓦斯压力的推测可用下式描述<sup>[23]</sup>

$$\sigma_g = \omega H + C = \sigma_{gc} + \omega(H - H_c), \quad (6)$$

式中: $\sigma_g, \sigma_{gc}$  分别为埋深  $H$  与  $H_c$  处的煤层瓦斯压力; $\omega$  为瓦斯增长率,即每米瓦斯压力增加数,一般为  $0.01 \pm 0.005$ ;  $H, H_c$  为煤层埋藏深度; $C$  为常数。

含瓦斯煤体中的瓦斯主要包括吸附瓦斯(约占 80%)和游离瓦斯(约占 20%)<sup>[24]</sup>。瓦斯压力的作用为一方面孔隙瓦斯压力对孔内壁产生推力,另一方面裂隙游离瓦斯对裂隙面产生推力;在煤与瓦斯突出的发展阶段瓦斯对煤体进一步破碎和搬运<sup>[25]</sup>。

### 1.4 动静载叠加的作用分析及灾害类型

根据式(1)的动静载叠加原理,首先可根据瓦斯内应力  $\sigma_g$  所占的比重对煤岩瓦斯动力灾害分类如下:当不考虑瓦斯作用时,即式(1)中瓦斯内应力  $\sigma_g$  的作用可忽略不计,此时发生的动力灾害即为传统意义上的冲击地压;当瓦斯内应力  $\sigma_g$  起主导作用时,此时发生的动力灾害即为传统意义上的煤与瓦斯突出;当  $\sigma_s + \sigma_d$  和  $\sigma_g$  作用相当时,此时发生的动力灾害将不具备典型冲击地压和典型煤与瓦斯突出的特点,称为复合型的煤岩瓦斯动力灾害。

不管属于哪种煤岩瓦斯动力灾害,都可按照动静载耦合叠加对煤岩瓦斯动力灾害的作用分为如下 3 种情形:

1) 高静载及高瓦斯压力( $\sigma_s + \sigma_g$ )型。深部开采过程中,巷道或采场围岩原岩应力及瓦斯内应力本身就很高,巷道开挖或工作面回采导致巷道或采场周边高应力集中,此时应力水平虽未达到煤岩体发生动态破坏的临界应力状态,但远场矿震产生的微小动应力增量可使动静载组合形成的应力场超过煤岩体动态破坏的临界应力水平,从而导致煤岩体动力灾害破坏。此时,矿震产生的动应力扰动在煤岩体破坏中主要起到一个诱发作用,这是目前深部开采最为普遍的一种形式。

2) 强动载( $\sigma_d$ )型。浅部开采过程中,巷道或采场围岩原岩应力和瓦斯内应力水平并不很高,但远

处矿震震源释放的能量很强。震源传至采掘空间周围煤体的瞬间动应力增量很大,巷道或采场周边静态应力与动态应力叠加超过动态破坏的临界应力水平,导致煤岩体突然动态动力破坏。另外,研究表明<sup>[26]</sup>,在较大的加载速率下,煤岩试样的动力灾害倾向性比标准状态动力灾害倾向性更强,原本鉴定为无动力灾害倾向的煤岩体,在高速率加载或动载作用下,也有可能发生动力灾害破坏。此时,矿震的瞬间动态扰动在动力灾害破坏过程中起主导作用,这给出了浅部开采及原本鉴定为无动力灾害倾向煤岩体中仍可发生煤岩瓦斯动力灾害的原因。

3) 低临界值( $\sigma_{bmin}$ )型。因煤岩体和瓦斯赋存的不均匀性及其物理力学性质的差异,不同区域发生煤岩瓦斯动力灾害的临界应力水平是不同的。当煤岩体中静载应力较低,而矿震引发的动载应力不高时,如果采掘空间周围煤岩体的物理力学性质突然发生变化(瓦斯压力起到重要作用),导致煤岩体动力灾害动态破坏临界应力水平降低,小于正常条件下的动静载叠加应力,也会诱发煤岩瓦斯动力灾害。如断层附近采掘作业时,断层面上受力处于临界平衡状态,煤岩瓦斯动力灾害的发生主要由断层滑移失稳诱发,具体可以由应力场的局部调整而触发,也可以由矿震震动波通过而触发。此时,动载荷通过改变断层区的力学状态或属性使动力灾害临界载荷降低而诱发煤岩瓦斯动力灾害。

## 2 煤岩瓦斯动力灾害监测预警

由煤岩瓦斯动力灾害的“动静载叠加诱冲原理”可知,煤岩瓦斯动力灾害主要是由静载、动载和瓦斯压力共同作用而发生,因此,由该理论指导的煤岩瓦斯动力灾害监测预警也主要从这几个方面进行。

对于冲击矿压,静载的监测主要是监测采掘工作面周围的应力分布状态,可采用煤体应力监测、

钻屑法探测、弹性波 CT 和震动波 CT 等;动载的监测主要监测煤岩体的破断运动规律,可采用微震监测、地音(声发射)进行工作面局部监测等。

对于煤与瓦斯突出,静载的监测主要是钻屑量法和钻屑倍率法;动载的监测主要是声发射监测技术、微震监测技术、电磁辐射监测技术等;对于瓦斯监测,主要是钻孔瓦斯涌出初速度法、 $R$  指标法等<sup>[27]</sup>。

### 2.1 冲击矿压监测预警

#### 2.1.1 分区分级监测预警

目前,冲击矿压矿井的监测预警方法是冲击矿压的分区分级监测预警方法<sup>[28]</sup>,见图 3 和表 1。在时间上,冲击矿压的预测分早期综合分析和即时预测。早期综合分析预测主要采用综合指数法和多因素耦合法,而即时预测则采用电磁辐射、微震和钻屑等方法。在空间上,冲击矿压的预测分区域预测、局部预测和点预测。区域预测主要采用综合指数法、多因素耦合法和微震监测方法,而局部预测采用综合指数方法、多因素耦合法、微震法和电磁辐射法,点预测则采用钻屑法。

冲击矿压危险程度分为 4 级进行预测,分别为:无动力灾害危险、弱动力灾害危险、中等动力灾害危险和强动力灾害危险,综合确定动力灾害危险等级,并对危险区域和地点采用强度弱化减冲技术进行治理。

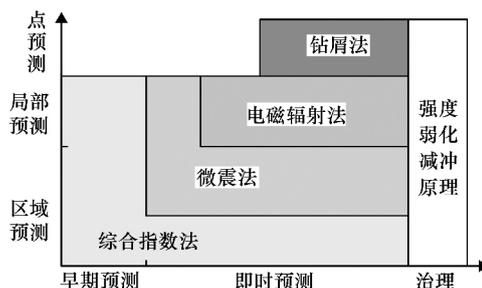


图 3 冲击矿压危险的分区分时预测

Fig. 3 Regional spatial-temporal prediction of rockburst risks

表 1 动力灾害危险程度的分级预测

Table 1 Classification and prediction of dynamic disaster risks

危险等级	危险状态	综合指数	防治对策
A	无	$\leq 0.25$	按无动力灾害地压危险采区管理,正常进行设计及生产作业
B	弱	$0.25 \sim 0.50$	按动力灾害地压影响设计,配备监测、卸压设备。制定监测和治理方案,进行危险监测、解危和效果检验
C	中等	$0.50 \sim 0.75$	按动力灾害地压影响设计,合理布置巷道及硐室及选择采掘、支护参数等 采取预卸压措施。限制人员、确定避灾路线。制定监测和治理方案,进行危险监测、解危和效果检验
D	强	$> 0.75$	按动力灾害地压影响设计,合理布置巷道及硐室及选择采掘、支护参数等。全面实施预卸压,经检验危险解除后进行作业。限制人员、确定避灾路线。制定监测和治理方案,加强周边监测,危险预警、解危和效果检验 经充分采取监测及解危后,仍存在危险时应停止生产或重新设计

### 2.1.2 弹性波 CT 探测技术

弹性波 CT 测试技术,即地震层析成像,其震源由人工激发,位置已知,故也称之为主动 CT 测试技术.国外对弹性波 CT 技术的研究较早,我国从 1986 年开始研究弹性波 CT 技术并用于矿井地质<sup>[29]</sup>,当时主要用于探测地质异常体如陷落柱、冲刷带、瓦斯富集区、断层、老窑采空区、火成岩等,弹性波 CT 数据采集系统主要为防爆数字地震仪.弹性波 CT 在冲击矿压预测中的应用是近几年的研究热点,并取得一定成果,它是基于冲击矿压的发生与煤岩体中应力状态密切相关的认识以及纵波波速与煤岩体受力呈幂函数关系<sup>[30-31]</sup>.在此方面,文献<sup>[30,32-34]</sup>对弹性波 CT 预测动力灾害危险区进行了详细研究,建立了相关评价指标,并将该技术在平煤十矿、跃进煤矿、星村煤矿、济三煤矿、梁宝寺煤矿、王楼煤矿等成功实施.

### 2.1.3 电磁辐射技术

煤岩变形破坏过程中会产生电磁辐射.关于煤岩变形破坏的电磁辐射机理,文献<sup>[35-36]</sup>已进行过详细研究,认为煤岩体在载荷作用下变形破坏产生电磁辐射,是源于煤岩体的非均质性,由应力作用下煤岩体中产生非均匀变速形变而引起的.文献<sup>[36-37]</sup>实验研究了煤岩试样单轴压缩过程中的电磁辐射信号变化规律,发现电磁辐射强度和脉冲随着加载及变形速率的增加而增强,煤岩试样在发生动力灾害性破坏以前,电磁辐射强度一般在某个值以下,而在动力灾害破坏时,电磁辐射强度突然增加.文献<sup>[38]</sup>研究了各种单轴加载条件下煤岩样(包括煤、岩、岩-煤-岩组合试样)整个变形及破坏过程中释放电磁辐射与施加载荷之间的关系,发现电磁辐射信号与施加载荷线性相关,而电磁辐射脉冲与施加载荷呈三次幂函数关系.这些研究表明,电磁辐射信号可以反映煤岩体受力状态、变形及破裂强度、内部应力状态.在上述研究基础上,冲击矿压危险的电磁辐射预警准则得到了深入研究<sup>[35-39]</sup>.

### 2.1.4 震动波 CT 反演技术

煤矿开采活动可诱发矿震,利用矿震震动波进行层析成像称为震动波 CT,因其震源位置未知且不可控,又称作被动 CT.矿震震动波 CT 测试技术是国内外近几年的研究成果.在国外,文献<sup>[40]</sup>将采煤机割煤诱发的震动信号作为激发源,并在两巷布置检波器.文献<sup>[41]</sup>将矿震作为激发源对工作面开采过程中的 P 波速度进行了反演,发现高应力区与高波速区吻合较好.文献<sup>[42]</sup>利用被动 CT 技术对波兰 Zabrze Bielszowice 等煤矿进行动力灾害

危险评价,发现动力灾害或强矿震往往出现在高波速区和高波速变化梯度区.在国内,文献<sup>[28]</sup>基于微震监测系统(目前支持 SOS 和 ARAMIS M/E),系统研究了震动波 CT 模型、求解原理及方法.文献<sup>[29]</sup>深入研究了震动波形选择及波形除噪技术,提高了 CT 反演精度.在微震定位及台网优化布设方面,文献<sup>[43]</sup>提出了波速、波速异常及波速梯度异常等 3 个参数为动力灾害危险判别指标,形成了相对完善的震动波 CT 技术,提高了冲击矿压监测预警的可靠度.目前,该技术已在跃进、星村、兴安、峻德、富力、南山、华亭、张小楼、济三等 10 多个煤矿应用,效果良好.

## 2.2 煤与瓦斯突出监测预警

我国常用的预警方法有钻孔瓦斯涌出初速度法、钻屑量法和钻屑倍率法、R 指标法等<sup>[27]</sup>.这些方法的实施,有效减少了煤与瓦斯突出事故的发生,但因低指标突出、漏报等导致的突出事故仍时有发生.有的学者另辟蹊径,如文献<sup>[44-45]</sup>应用神经网络预警煤与瓦斯突出,文献<sup>[46]</sup>采用安全线预测煤层瓦斯压力进而监测煤与瓦斯突出.地球物理方法是近几年发展起来的被认为是最有前途的预测预报煤矿动力灾害现象的方法.常用的煤与瓦斯突出预警的地球物理方法有声发射监测技术<sup>[47]</sup>、微震监测技术<sup>[48]</sup>、电磁辐射监测技术等<sup>[49-50]</sup>.文献<sup>[51]</sup>对矿井采煤过程中由爆破引起的矿山冲击及塌陷时的电磁辐射谱进行测试,并在实验室进行了复合岩层破坏电磁辐射测试.文献<sup>[52]</sup>对井下煤层打钻后电磁辐射进行了测试,结果表明在钻孔处电磁辐射脉冲数异常大.文献<sup>[53-55]</sup>结合现场利用点频为 100 kHz 的天线测定了不同采矿条件下的电磁辐射,采用电磁辐射脉冲数作为评价突出危险性指标,认为电磁辐射方法可以进行岩石与瓦斯突出预警.中国矿业大学煤岩瓦斯动力灾害研究所自 20 世纪 90 年代起,对煤岩电磁辐射的产生机理、特征、规律及传播特性等进行了深入研究,提出了电磁辐射预警煤岩动力灾害的原理及方法,研制了 KBD5 型和 KBD7 型电磁辐射监测仪<sup>[56-60]</sup>,并在全国多个煤矿进行推广应用.近年来,中国矿业大学针对原有电磁辐射监测技术及系统数据处理自动化程度低、突出危险自动识别率低、预警对人工依赖大等问题,对突出的电磁辐射前兆规律、动态趋势法与临界值法相结合的监测预警技术、监测系统及数据处理技术和软件进行了大量的研究、改进和完善,显著提高了监测系统的抗干扰能力和稳定性,系统能自动进行趋势性分析,自动进行突出危

险性预警提示。

### 2.3 煤岩瓦斯复合动力灾害监测预警

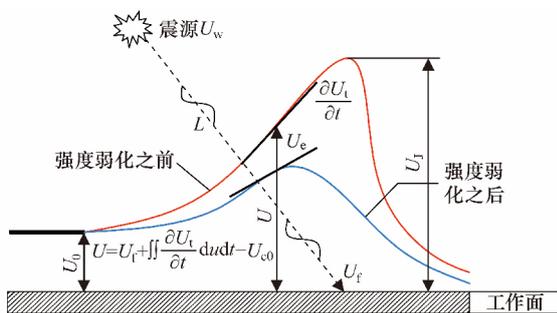
对于复合动力灾害,由于是煤岩体和瓦斯共同参与,因此,其监测手段需要兼顾冲击矿压和煤与瓦斯突出的监测方法,从静载、动载和瓦斯监测 3 个方面共同着手,建立多维多参量的监测体系。

## 3 动力灾害危险的防治技术

### 3.1 冲击矿压防治

#### 3.1.1 强度弱化减冲原理及手段

强度弱化减冲原理<sup>[61-62]</sup>是目前绝大多数煤岩瓦斯动力灾害矿井进行动力灾害防治的理论基础,它从能量的角度指导煤岩瓦斯动力灾害防治,认为动力灾害的发生必须满足煤岩体中存储的弹性能达到并超过极限弹性应变能  $U_j$  (发生动力灾害时煤岩体中所积聚的最小弹性应变能)。当任意时刻煤岩体中集聚的弹性能小于释放的弹性能,则煤岩体中存储的弹性能不断减小,距  $U_j$  越来越远,此时动力灾害危险性越来越小;当任意时刻煤岩体中集聚的弹性能大于释放的弹性能,则煤岩体中存储的弹性能不断增加,若达到  $U_j$ ,则此时处于能量的极限状态,再有微小的能量增加便会诱发动力灾害,此时,若对煤岩体实施卸压解危措施,人工释放煤岩体中集聚的弹性能,使存储的弹性能降至  $U_j$  以下甚至更小,则可抑制动力灾害的发生,如图 4 所示。值得注意的是,坚硬顶板破断和采动矿震可使煤岩体中存储的弹性能瞬间增大。



$U_0$  煤岩体中初始积聚与耗散的弹性应变能之差;  $U$  任意时刻煤岩体所积聚的弹性应变能;  $U_w$  矿震震中的能量;  $U_e$  震动波传递到工作面(巷道)煤岩体附近的剩余能量;  $U_j$  在工作面回采或巷道掘进过程中,任意时刻煤岩体内积聚弹性应变能的增量;  $U_{e0}$  煤岩体变形破坏耗散的表面能,包括热辐射、电磁辐射和声发射等能量耗散;  $U_j$  煤岩体的极限弹性储能能;  $U_e$  实施煤岩体强度弱化时,卸压爆破一次释放的弹性能;  $L$  震源中心距工作面的距离;  $u$  煤体距工作面的距离

图 4 煤岩体强度弱化前后能量集聚与释放

Fig. 4 Energy accumulation and release before and after strength weakening of coal-rock mass

煤岩瓦斯动力灾害防治可采用边回采(掘进)、边监测、边治理的强度弱化减冲技术,即“工作面回采(掘进)→动力灾害危险监测→能量积聚→卸压

解危→能量释放→生产→再监测→……”,这就是煤岩瓦斯动力灾害的强度弱化减冲理论实现的过程。它具有 3 个方面的含义:1)在动力灾害危险区域,采取松散煤岩体的方式,降低煤岩体的强度和动力灾害倾向性,使得动力灾害危险性降低;2)对煤岩体的强度进行弱化后,使得应力高峰区向岩体深部转移,并降低应力集中程度;3)采取一定的减冲解危措施后,使得发生煤岩瓦斯动力灾害时,动力灾害的强度降低。

强度弱化理论指出,冲击矿压解危的关键在于:1)松散煤岩体,改变煤岩体的物理力学性质,使松散后的煤岩体冲击倾向性降低,增大发生冲击矿压的临界应力。主要的方法有煤体松散爆破、煤层注水软化。2)使煤体应力向深部转移,降低煤岩体的应力水平,降低煤岩体储存能量的大小。主要的方法有煤体卸压爆破、顶板预裂爆破、顶板深孔切顶爆破、开采解放层、顶板定向水力致裂、煤体大直径钻孔卸压等。3)在较低应力水平时,人为诱发局部冲击矿压,释放煤体能量,减少发生冲击矿压的可能性。主要方法有煤体卸压爆破、大直径钻孔卸压等。

#### 3.1.2 巷道围岩控制的强弱强结构效应及围岩动静载的支护体系

最新的统计资料<sup>[63]</sup>表明,87%的冲击矿压发生在巷道,与以往统计的 72.6%<sup>[2]</sup>相比又有所增加,可见,巷道冲击灾害防治是研究重点。巷道围岩控制的强弱强结构原理为巷道防冲治理提供良好指导,它是基于对巷道冲击震动破坏机理的认识,即采矿活动等震源产生的震动应力波的传播和扰动是巷道发生冲击破坏的一个关键因素,当传递来的震动应力波与巷道周边围岩应力场叠加后的总体应力强度超过巷道围岩支护体的承载极限就会诱发巷道冲击破坏。该结构由文献<sup>[64-65]</sup>提出,并得到相对全面深入的研究。

图 5 为强弱强结构模型。从远至近依次分为冲击传递区大结构,围岩结构相对完整,强度较大,称之为外强结构;消波吸能区中间结构,围岩松散破碎,为弱结构;支护保护区小结构,需要强化支护保持其稳定性,为内强结构。中间弱结构的存在,使从大结构传递来的震动应力波在强、弱结构表面发生反射和透射,部分应力波被反射回外强结构中,透射进入弱结构的应力波幅值降低,并在弱结构内部经散射和吸收,应力强度进一步衰减,传递到巷道围岩内强小结构上的应力就大大减弱,叠加应力低于巷道支护体小结构的极限承载强度,从而维护小

结构的稳定性. 强弱强结构对震动应力波起到明显的衰减吸收效应, 使巷道周边处于较低的应力场区域. 而在无冲击震动状态下, 该结构将巷道周边的高应力转移至深部, 对于深部高应力环境下巷道稳定性具有有益作用.

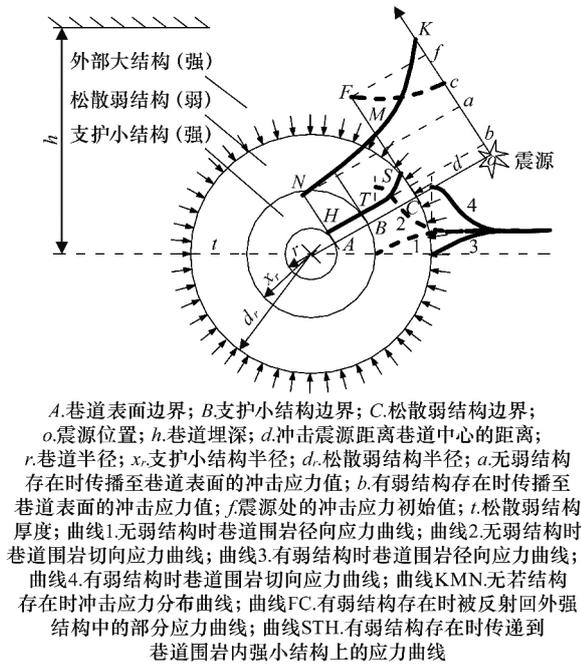


图 5 冲击危险巷道围岩强弱强结构模型

Fig. 5 Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst

冲击矿压巷道要求支护系统必须能抵抗高冲击动能, 提供适当的让压屈服变形量并具备起到缓冲吸能作用的柔韧性<sup>[66]</sup>. 锚杆支护以其主动、让压、吸能, 且能调动围岩自身承载能力的特性而成为冲击矿压巷道合理的支护形式<sup>[66-67]</sup>. 但锚杆支护技术仅能抵抗一定强度以下的冲击, 对高能量的冲击矿压, 需在锚杆支护的基础上增设吸能材料<sup>[68]</sup>, 通过消耗部分矿震能量来维护支护系统的稳定. 基于该认识, 文献<sup>[69-70]</sup>提出了由围岩、吸能材料和钢支架(刚-柔-刚)组成的刚柔耦合吸能支护结构模型. 从本质上讲, 该模型与强弱强力学模型<sup>[65]</sup>相同, 围岩、吸能材料和钢支架分别相当于强弱强模型中的外强大结构、中间弱结构和内强小结构. 以上述模型为理论基础, 成功研制刚柔一体化吸能支护体系<sup>[71]</sup>, 它由 3 部分组成, 即锚网索支护, 吸能材料和 U 型钢组成的 O 型棚支护(简称 O 型棚支护)以及刚性防冲支架, 形成三级支护体系, 吸能材料位于锚网索支护和 O 型棚之间. 该支护体系在义马煤业集团跃进煤矿得以实施, 有效避免了大能量冲击矿压事故对巷道、设备的破坏和造成的人员伤亡.

### 3.2 防突措施和技术

区域防突措施是指在突出煤层进行采掘前, 对突出煤层较大范围、较长时间采取的防突技术措施; 区域防突措施主要有开采保护层和预抽煤层瓦斯.

1) 开采保护层. 开采保护层是防止突出最简单、最有效、最经济的区域性措施. 自 1937 年法国最早采用这一措施以来, 几乎所有发生突出的国家, 只要具备开采保护层条件的都采用了这种措施. 我国自 1958 年开始, 在重庆、阳泉、淮南等地区进行保护层开采防控技术的试验, 取得了一定的成果, 并逐渐在其他矿区推广应用. 开采保护层防突机理可表述如下: 开采保护层→岩层移动→被保护层卸压(地应力降低、煤层膨胀变形)→透气性增加、瓦斯解吸→煤(岩)层瓦斯排放能力增高→瓦斯排放、钻孔瓦斯流量增大→瓦斯压力降低→瓦斯含量减少→煤机械强度提高→应力进一步降低→降低煤与瓦斯突出威胁.

2) 预抽煤层瓦斯. 所谓预抽煤层瓦斯, 就是采掘工作面没有生产以前, 就提前对其进行打钻、抽放, 并有足够的时间达到预期抽放效果. 通过预抽煤体中的瓦斯, 降低了突出煤层瓦斯压力和瓦斯含量, 煤体瓦斯潜能得到释放; 由于煤体瓦斯排放, 使煤体发生收缩变形, 煤体应力紧张得到缓解而卸压, 部分释放煤体弹性潜能; 除此之外, 由于瓦斯排放量的增加, 透气性和煤体强度的提高, 继而增大了煤体抵抗突出的阻力. 钻孔预抽是目前煤矿行业针对开采层瓦斯突出所采取的主要技术, 其分地面打钻预抽和井下布孔 2 种方式. 地面打钻抽放即由地面直接向开采层打钻孔对赋存瓦斯进行抽放, 此方法国外使用居多, 我国只在少数地方进行试验过. 目前我国的有些煤矿也着手对地面钻孔技术进行研究试验, 被做为煤层气开发、利用部署的一部分. 井下布孔抽放因地质条件的影响, 各矿采用的方式不一样, 大致可分为顺层钻孔和穿层钻孔 2 种.

局部防突措施是针对工作面预测尚有突出危险的局部煤层实施的防突措施, 在工作面实施区域综合防突措施后仍然有突出危险时, 就要实施工作面防突措施. 近年来, 国内外普遍采用的方法有震动爆破、远距离爆破、超前钻孔、煤层注水、水力冲孔、抽放瓦斯和金属骨架等. 实际生产中, 根据工作面类型的不同应采用不同的防突措施. 采煤工作面多采用浅孔瓦斯抽放和煤层浅孔注水, 掘进工作面多采用超前钻孔、深孔松动爆破、水力冲孔、深孔控

制卸压爆破以及高压磨料射流割缝防突技术等。

### 3.3 复合动力灾害防治

复合动力灾害可以将防冲和防突的防治技术有机结合起来,既共同作用,又相互补充,比如瓦斯抽放孔同样可以起到大直径卸压孔的作用等。

## 4 煤岩瓦斯动力灾害的未来研究方向

1) 在复合动力灾害机理研究方面,基于动静载叠加致灾原理,将各个载荷分量量化表示,最大限度地结合现场实际,切实指导现场工程实践。

2) 在复合动力灾害监测预警方面,建立动力灾害危险的多参量归一化无量纲监测预警模型与准则,并基于实验室试验和现场工程应用情况,构建适用于煤岩瓦斯复合型灾害的监测预警指标体系,并研发相应的监测技术与装备。

3) 在复合动力灾害防治措施方面,将现有的冲击矿压和煤与瓦斯突出的防治手段有机结合在一起,相辅相成,重合的部分可以相互替代,不重合的部分可以互相补充,从而建立煤岩瓦斯动力灾害的综合控制解危技术体系。

## 5 结 论

1) 煤岩瓦斯动力灾害是动静载叠加诱发的。按照动静载的不同组合,煤岩瓦斯动力灾害分高静载、强动载和低临界应力 3 种类型。

2) 含瓦斯煤岩动力灾害监测预警及防治理论与技术,包括冲击矿压监测方面的分区分级监测预警、微震监测法、电磁辐射、弹性波 CT 和震动波 CT 等,煤与瓦斯突出监测方面的钻孔瓦斯涌出初速度法、 $R$  指标法和电磁辐射法等。

3) 灾害治理方面的强度弱化减冲原理及手段、巷道围岩控制的强弱强结构效应及围岩动静载的支护体系、区域及局部防突技术。

4) 煤岩瓦斯动力灾害未来研究方向主要是:  
a. 将动静载叠加原理进一步量化表示;b. 构建适用于煤岩瓦斯复合型灾害的监测预警指标体系;  
c. 将冲击矿压和煤与瓦斯突出的防治措施有机的结合起来。

### 参考文献:

[1] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics for underground mining [M]. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 2004: 85-141.  
[2] 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: 2-6.

DOU Linming, HE Xueqiu. Theory and technology of rock burst prevention [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 2-6.  
[3] COOK N C G. A note on rock bursts considered as a problem of stability [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 65: 437-446.  
[4] PETUKHOV I M, LINKOV A M. The theory of post-failure deformations and the problem of stability in rock mechanics [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 57-76.  
[5] 李玉生. 动力灾害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.  
[6] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295-304.  
[7] 章梦涛. 动力灾害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]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197-204.  
[8] 张晓春, 缪协兴, 杨挺青. 冲击矿压的层裂板模型及实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 507-511.  
ZHANG Xiaochun, MIAO Xiexing, YANG Tingqing. The layer-crack-plate model and testing study of the rockburst in mines [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 507-511.  
[9] 齐庆新, 刘天泉, 史元伟, 等. 冲击地压的摩擦滑动失稳机理 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12(增 1): 174-177.  
QI Qingxin, LIU Tianquan, SHI Yuanwei, et al. Mechanism of fraction sliding disability of rock burst [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 12(Sup 1): 174-177.  
[10] 窦林名, 何学秋. 煤岩冲击破坏模型及声电前兆判据研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 14-18.  
DOU Linming, HE Xueqiu. Model for rock burst failure and its critical values of aeoustic and electromagnetic emission [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 14-18.  
[11] 周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说 [J]. 中国矿业大学学报, 1990, 19(2): 4-11.  
ZHOU Shining, HE Xueqiu. Rheological hypothesis

- of coal and methane outburst mechanism[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1990, 19(2):4-11.
- [12] 蒋承林,俞启香. 煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说[J]. 煤矿安全, 1995, 26(2):17-25.  
JIANG Chenglin, YU Qixiang. The hypothesis of spherical shell destabilization of coal and gas outburst[J]. Safety in Coal Mines, 1995, 26(2):17-25.
- [13] 梁冰,章梦涛,潘一山,等. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论[J]. 煤炭学报, 1995, 20(5):492-496.  
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, PAN Yishan, et al. Theory of instability of flow fixation coupling for coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(5):492-496.
- [14] 郭德勇,韩德馨. 煤与瓦斯突出黏滑机理研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6):598-602.  
GUO Deyong, HAN Dexin. The stick-slip mechanism of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6):598-602.
- [15] 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理[C]//郑哲敏. 郑哲敏文集. 北京:科学出版社, 2004:11-15.  
ZHENG Zhemin. Mechanism of coal and gas outburst from the order of magnitude and dimension analysis[C]//ZHENG Zhemin, ZHENG Zhemin's corpus. Beijing: Science Press, 2004:11-15.
- [16] 丁晓良,俞善炳,丁雁生,等. 煤在瓦斯渗流作用下持续破坏的机制[J]. 中国科学:A辑, 1989, 19(6):600-607.  
DING Xiaoliang, YU Shanbing, DING Yansheng, et al. Continuous damage mechanism of coal under gas seepage[J]. China Science: A, 1989, 19(6):600-607.
- [17] 胡千庭,周世宁,周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12):1368-1372.  
HU Qianting, ZHOU Shining, ZHOU Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12):1368-1372.
- [18] ПЕТУХОВ И М. 预防冲击地压的理论与实践[J]. 煤矿安全, 1988, 19(5):39-40.  
ПЕТУХОВ И М. Theory and practice of rock burst prevention[J]. Safety in Coal Mines, 1988, 19(5):39-40.
- [19] 章梦涛,赵本钧,徐曾和. 冲击地压机理、预报及防治[J]. 煤矿安全, 1988, 19(5):43-44.  
ZHANG Mengtao, ZHAO Benjun, XU Cenghe. Mechanism, prediction and prevention of rock burst[J]. Safety in Coal Mines, 1988, 19(5):43-44.
- [20] 章梦涛,徐曾和,潘一山. 冲击地压与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. A unified instability theory on coal(rock) burst and outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(4):48-53.
- [21] 梁冰. 煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论[M]. 北京:地质出版社, 2000:72-75.  
LIANG Bing. Theory of instability of flow fixation coupling for coal and gas outburst[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:72-75.
- [22] 梁冰,章梦涛,王泳嘉. 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2):135-142.  
LIANG Bing, ZHANG Mengtao, WANG Yongjia. Mathematical model and numerical method for coupled gas flow in coal seams and coal deformation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2):135-142.
- [23] 田靖安,王亮,程远平,等. 煤层瓦斯压力分布规律及预测方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4):481-485.  
TIAN Jingan, WANG Liang, CHENG Yuanping, et al. Research on distribution rule and forecast method of gas pressure in coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4):481-485.
- [24] 牛国庆,颜爱华,刘明举. 瓦斯吸附和解吸过程中温度变化实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(2):155-157.  
NIU Guoqing, YAN Aihua, LIU Mingju. Experimental study on temperature variation of gas being absorbed and extracted[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(2):155-157.
- [25] 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1985:64-69.  
YU Bufan. Mechanism of coal and gas outburst[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985:64-69.
- [26] 何江. 煤矿采动动载对煤岩体的作用及诱冲机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013:46-48.  
HE Jiang. Research of mining dynamic loading effect and its induced rock burst in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013:46-48.
- [27] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1992:79-95.  
YU Qixiang. Prevention and control of mine gases[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1992:79-95.

- [28] 窦林名,何学秋. 煤矿冲击矿压的分级预测研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(6):717-722.  
DOU Linming, HE Xueqiu. Technique of classification forecasting rock burst in coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2007,36(6):717-722.
- [29] 王文德,赵 炯,胡继武. 弹性波 CT 技术及应用[J]. 煤田地质与勘探,1996,24(5):59-63.  
WANG Wende, ZHAO Jiong, HU Jiwu. Elastic wave CT technique and its application[J]. Coal Geology & Exploration,1996,24(5):59-63.
- [30] 巩思园. 矿震震动波波速层析成像原理及其预测煤矿动力灾害危险应用实践[D]. 徐州:中国矿业大学,2010:89-91.  
GONG Siyuan. Research and application of using mine tremor velocity tomography to forecast rock-burst danger in coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2010:89-91.
- [31] 巩思园,窦林名,徐晓菊,等. 动力灾害倾向煤岩纵波波速与应力关系试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(1):67-71.  
GONG Siyuan, DOU Linming, XU Xiaoju, et al. Experimental study on the correlation between stress and P-wave velocity for burst tendency coal-rock samples[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(1):67-71.
- [32] DOU Linming, CHEN Tongjun, GONG Siyuan, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workface[J]. Safety Science,2012,50(4):736-740.
- [33] HE Hu, DOU Linming, LI Xuwei, et al. Active velocity tomography for assessing rock burst hazards in a kilometer deep mine[J]. Mining Science and Technology,2011,21(5):673-676.
- [34] 王书文,毛德兵,杜涛涛,等. 基于地震 CT 技术的动力灾害地压危险性评价模型[J]. 煤炭学报,2012(增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(Sup 1):1-6.
- [35] 窦林名,曹其伟,何学秋,等. 冲击矿压危险的电磁辐射监测技术[J]. 矿山压力与顶板管理,2002,19(4):89-91.  
DOU Linming, CAO Qiwei, HE Xueqiu, et al. EME monitoring technique of rock burst[J]. Ground Press Strata Control,2002,19(4):89-91.
- [36] 窦林名,何学秋,王恩元,等. 由煤岩变形动力灾害破坏所产生的电磁辐射[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(12):86-88.  
DOU Linming, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Electromagnetic emissions in rock and coal burst failures[J]. Tsinghua Univ (Sci & Tech),2001,41(12):86-88.
- [37] 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. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(4):396-399.
- [38] WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Xiaofei, et al. Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure[J]. Safety Science,2012,50(4):885-893.
- [39] 陈国祥,窦林名,曹安业,等. 电磁辐射法评定煤岩瓦斯动力灾害危险等级及应用[J]. 煤炭学报,2008,33(8):866-870.  
CHEN Guoxiang, DOU Linming, CAO Anye, et al. Assessment of rock burst danger and application on electromagnetic emission method[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(8):866-870.
- [40] LUO X, KING A, WERKEN M V D. Tomographic imaging of rock conditions ahead of mining using the shearer as a seismic source: A feasibility study[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2009,47(11):3671-3678.
- [41] LUXBACHER K, WESTMAN E, SWANSON P, et al. Three-dimensional time-lapse velocity tomography of an underground longwall panel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2008,45(4):478-485.
- [42] LURKA A. Location of high seismic activity zones and seismic hazard assessment in Zabrze Bielszowice coal mine using passive tomography[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2008,18(2):177-181.
- [43] 巩思园,窦林名,马小平,等. 提高煤矿微震定位精度的台网优化布置算法[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1):8-17.  
GONG Siyuan, DOU Linming, MA Xiaoping, et al. Optimization algorithm of network configuration for improving location accuracy of microseism in coal mine[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(1):8-17.
- [44] ZHANG Ruilin, LOWNDES I S. The application of a coupled artificial neural network and fault tree analysis model to predict coal and gas outbursts[J]. International Journal of Coal Geology,2010,84:141-

- 152.
- [45] ZHANG Jianqing. Study on the gas content of coal seam based on the BP neural network[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 1554-1562.
- [46] WANG Liang, CHENG Yuanping, WANG Lei, et al. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines [J]. Safety Science, 2012, 50: 523-529.
- [47] 邹银辉, 赵旭生, 刘 胜. 声发射连续预测煤与瓦斯突出技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(6): 61-65.  
ZOU Yinhui, ZHAO Xusheng, LIU Sheng. Research on sound transmitted continued prediction technology for coal and gas outburst[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(6): 61-65.
- [48] 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.
- [49] 何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 213-216.  
HE Xueqiu, WANG Enyuan, NIE Baisheng, et al. Electromagnetic dynamics of coal and rocks rheology [M]. Beijing: Science Press, 2003: 213-216.
- [50] 王恩元, 何学秋, 李忠辉, 等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 110-114.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LI Zhonghui, et al. Electromagnetic radiation technology of coal-rocks and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009: 110-114.
- [51] ХАТИАШВИЛИ Н Г. 论碱性卤素结晶体和岩石中裂隙形成时的电磁效应[C]//钱家栋. 地震地电学译文集. 北京: 地震出版社, 1989: 149-158.  
ХАТИАШВИЛИ Н Г. Electromagnetic effects of the formation of cracks in alkaline halogen crystals and rocks[C]//QIAN Jiadong. Translation corpus of seismological geoelectricity. Beijing: Seismological Press, 1989: 149-158.
- [52] ФРИД В И, ШАБАРОВ А Н, ДРУГИЕ И. Формирование электромагнитного излучения угольного пласта[J]. ФТПРПИ, 1992, (2): 40-47.
- [53] FRID V I. Rockburst hazard forecast by electromagnetic radiation excited by rock fracture[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1997, 30 (4): 229-236.
- [54] FRID V I. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast[J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38(2): 97-104.
- [55] FRID V I, SHABAROV A N, PROSKURYAKOV V H, et al. Formation of electromagnetic radiation in coal stratum[J]. Journal of Mining Science, 1992, 28 (2): 139-145.
- [56] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131-137.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131-137.
- [57] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩变形破裂的电磁辐射规律及其应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(2): 35-39.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, et al. The regularity electromagnetic radiation of coal or rock under load and its application[J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(2): 35-39.
- [58] 王恩元, 何学秋, 聂百胜, 等. 电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(3): 225-229.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu, NIE Baisheng, et al. Principle of predicting coal and gas outburst using electromagnetic emission[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 225-229.
- [59] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J]. 煤炭学报, 2003, 28(4): 366-369.  
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, et al. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 366-369.
- [60] WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Xiaofei, et al. A non-contact mine pressure evaluation method by electromagnetic radiation[J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75(2): 338-344.
- [61] 窦林名, 陆菜平, 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): 690-694.  
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): 690-694.
- [62] 陆菜平. 组合煤岩的强度弱化减冲原理及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 120-125.  
LU Caiping. Intensity weakening theory for rock-

- burst of compound coal-rock and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008: 120-125.
- [63] 潘俊锋, 毛德兵, 蓝航, 等. 我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 21-25.  
PAN Junfeng, MAO Debing, LAN Hang, et al. Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 21-25.
- [64] 高明仕. 冲击矿压巷道围岩的强弱强结构控制机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006: 94-96.  
GAO Mingshi. Study on the strong-soft-strong structure control mechanism of roadway subjected to rock burst[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006: 94-96.
- [65] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱强力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359-364.  
GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359-365.
- [66] 高明仕, 窦林名, 严如令, 等. 冲击煤层巷道锚网支护防冲机理及抗冲震级初算[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 402-406.  
GAO Mingshi, DOU Linming, YAN Ruling, et al. Prevention mechanism of roadway supported by bolt-mesh subjected to rock burst and degree calculation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 402-406.
- [67] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 巷道防冲机理及支护控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 40-44.  
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Mechanism of rockburst prevention and supporting control technology in roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 40-44.
- [68] 吕祥锋, 潘一山, 李忠华, 等. 高速冲击作用下锚杆支护巷道变形破坏研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 24-28.  
LÜ Xiangfeng, PAN Yishan, LI Zhonghua, et al. Study on deformation and failure of roadway of rock bolting under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 24-28.
- [69] 吕祥锋, 潘一山. 刚柔-刚支护防治冲击地压理论解析及实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 52-59.  
LÜ Xiangfeng, PAN Yishan. Theoretical analysis and experimental research on rockburst prevention mechanism of rigid-flexible-rigid supporting structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 52-59.
- [70] 潘一山, 吕祥锋, 李忠华. 吸能耦合支护模型在冲击地压巷道中应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 6-10.  
PAN Yishan, LÜ Xiangfeng, LI Zhonghua. The model of energy-absorbing coupling support and its application in rock burst roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 6-10.
- [71] 刘军, 欧阳振华, 齐庆新, 等. 深部冲击地压矿井刚柔一体化吸能支护技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 17-20.  
LIU Jun, OUYANG Zhenhua, QI Qingxin, et al. Rigid-flexibility integrated energy absorption support technology applied in deep mine with pressure bumping[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 17-20.

(责任编辑 王继红)