

窦林名, 周坤友, 宋士康, 等. 2021. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J]. 工程地质学报, 29(4): 917-932. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0337

Dou Linming, Zhou Kunyou, Song Shikang, et al. 2021. Occurrence mechanism, monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines [J]. Journal of Engineering Geology, 29(4): 917-932. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0337

煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究*

窦林名^{①②} 周坤友^② 宋士康^③ 曹安业^② 崔恒^④ 巩思园^② 马小涛^②

(①中国矿业大学深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 徐州 221116, 中国)

(②中国矿业大学矿业工程学院, 徐州 221116, 中国)

(③陕西正通煤业有限责任公司, 咸阳 712000, 中国)

(④淄博矿业集团有限责任公司, 淄博 255000, 中国)

摘要 随开采深度不断增加, 煤矿冲击矿压灾害形势严峻, 冲击矿压机理、监测预警技术及防控技术的研究对于煤矿安全生产至关重要。论文系统总结了团队多年来研究成果及进展, 提出了动静载叠加诱冲机理, 基于动静载力源和能量主体划分了冲击矿压类型。提出了冲击危险“应力-震动-能量”三场耦合监测原理, 建立了冲击危险应力场-震动场-能量场三场多参量综合监测预警技术体系, 并构建了多参量带权重的时空预警模型, 基于大数据和云平台技术, 开发了冲击矿压风险智能判别与多参量监测预警云平台, 实现冲击危险监测数据与防治措施信息的融合, 提高了冲击危险监测预警效能, 提出了冲击危险强度弱化减冲原理和巷道围岩强弱强结构原理, 并给出了基于动静载的冲击矿压分类监测预警和防治方案。研究成果有力推动了冲击矿压研究进展, 可为深部冲击矿压防治提供重要指导。

关键词 冲击矿压; 动静载叠加; 三场耦合监测; 云平台; 强度弱化减冲; 强弱强结构

中图分类号: TD324 **文献标识码**: A **doi**: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0337

OCCURRENCE MECHANISM, MONITORING AND PREVENTION TECHNOLOGY OF ROCKBURST IN COAL MINES

DOU Linming^{①②} ZHOU Kunyou^② SONG Shikang^③ CAO Anye^② CUI Heng^④ GONG Siyuan^②

MA Xiaotao^②

(①Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(②School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(③Shaanxi Zhengtong Coal Industry Co., Ltd., Xianyang 712000, China)

(④Zibo Mining Group Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract With increasing coal mining depth, the rockburst risk is becoming more serious. A thorough understanding of rockburst occurrence mechanism, monitoring and prevention technology is crucial to coal mine safety. In this paper, we systematically summarized the research findings of the team, put forward the mechanism

* 收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(资助号: 51934007, 51874292), 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(资助号: KYCX21_2341).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51934007, 51874292) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (Grant No. KYCX21_2341).

第一(通讯)作者简介: 窦林名(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力、冲击矿压、采矿地球物理等方面的科研与教学工作. E-mail: lmdou@126.com

that the superposition of static and dynamic loads causing rockburst, and accordingly subdivided the rockburst types based on the stress and energy body. We proposed the three field coupling monitoring principle for rockburst risk, including stress field, seismic field and energy field. Based on the three stress fields, we further established a multi-parameter comprehensive monitoring and pre-warning system as well as a space-temporal pre-warning model. Based on big data and cloud platform technology, we developed a cloud platform for intelligent identification and multi-parameter monitoring and pre-warning of rockburst risk. The cloud platform realized the integration of rockburst monitoring data and prevention measures information, and further improved the monitoring and pre-warning efficiency of rockburst risk. Finally, we proposed two theories, i.e., the strength weakening theory for rockburst risk reduction and the strong-soft-strong structure theory, and put forward the monitoring and prevention scheme for different rockbursts. The study results strongly promote the research of rockburst and provide significant guidance for the safety of coal mines suffering rockburst.

Key words Rockburst; Superposition of static and dynamic loads; Coupling monitoring of three field; Cloud platform; Strength weakening theory for rockburst; Strong-soft-strong structure

0 引言

由于长期高强度开发,我国煤炭资源开采逐渐向西部地区和深部转移。研究表明,深部开采不单指深度的增加,更是一种围岩力学状态的改变(谢和平等, 2015a)。图 1 为统计的我国煤炭开采深度与冲击矿压矿井数量的关系,可知,随着应力环境的恶化,深部煤炭开采过程中冲击矿压矿井数量大幅增加(窦林名等, 2001; 谢和平等, 2015a, 2015b; 蓝航等, 2016; 齐庆新等, 2019)。近年来,深部冲击灾害频发,造成严重的人员伤亡和经济损失,如 2017 年 11 月,辽宁红阳三矿冲击地压事故(开采深度约 1082 m),造成 10 人死亡; 2018 年 10 月,山东龙郓煤矿冲击地压事故(开采深度 1027~1067 m),造成 21 人死亡; 2019 年 6 月,吉林龙家堡煤矿冲击地压事故(开采深度 854~978 m),造成 9 人死亡; 2019 年 8 月,河北唐山煤矿冲击地压事故(开采深度近 800 m),造成 7 人死亡; 2020 年 2 月,山东新巨龙冲击地压事故(开采深度近 1000 m),造成 4 人死亡。据国家矿山安全监察局统计,目前全国 13 个省(区)正在生产的冲击地压矿井共 138 处(国家矿山安全监察局综合司, 2021),我国主要产煤基地均有冲击矿压灾害发生,深部煤炭开采冲击形势愈发严峻。因此,进一步加强深部开采冲击矿压机理研究,提出并研发行之有效的冲击危险监测和防控技术及装备已刻不容缓。

在冲击矿压方面,国内外众多专家学者已做了大量研究。其中:在冲击机理方面,相关学者分别提出了具有代表性的经典冲击地压机理,包括强度理

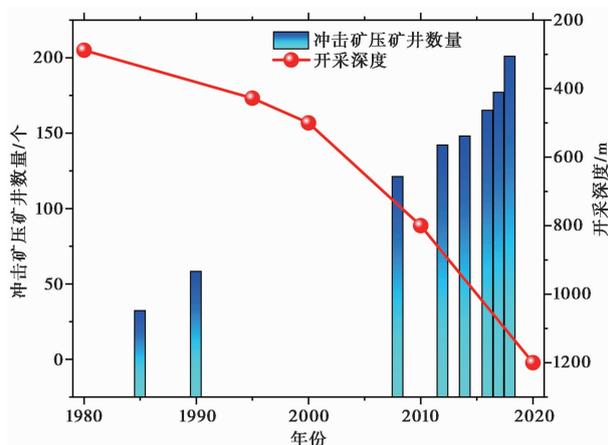


图 1 我国煤炭开采深度与冲击矿压矿井数量

Fig. 1 Coal mining depth and the number of rock burst coal mines in China

论(Tan, 2006)、刚度理论(Cook et al., 1966)、能量理论(邹德蕴等, 2004)、变形失稳理论(章梦涛, 1987)、冲击倾向理论(窦林名等, 2006)、“三准则”理论(李玉生, 1985)、“三因素”理论(齐庆新, 1997)等。近年来,随着相关研究手段及实验方法的完善,众多学者相继提出利用突变理论(张黎明等, 2009)、损伤断裂力学(李学龙, 2017)、分形理论(贾宝新等, 2015)等方法来解释相应冲击机理。另外,相关学者针对如褶皱区域(陈国祥等, 2008)、坚硬顶板(姜福兴, 2014)、断层区域(Cai et al., 2015b)、孤岛煤柱区域(Li et al., 2014)、大倾向煤层(来兴平等, 2017)等具体工程采掘和地质赋存条件等也提出了相应的冲击地压发生机理。

在冲击矿压危险早期预测方面,主要方法有综合指数法(窦林名等, 2013)、多因数耦合分析法

(牟宗龙等, 2015)、应力集中评价法(蔡武等, 2021)及数值模拟(郭晓菲等, 2021)等。在冲击监测预警方面, 主要方法有钻屑(Gu et al., 2012)、应力测量(刘金海等, 2014)、微震监测(姜福兴等, 2006)、电磁辐射(Wang et al., 2011)、地音法(窦林名等, 2000)、声发射监测(贺虎等, 2011)等。在此基础上, 相关学者也将多种监测数据综合分析, 进行冲击危险多参量监测预警。微震监测方法作为一种连续、无损、区域性监测方法得到广泛应用, 在覆岩运动研究、冲击危险时空预警方面发挥了重要作用。近年来, 相关学者对微震监测数据进行深度挖掘, 相继提出了 b 值、A(b) 等冲击危险监测预警指标并建立预警方法(夏永学等, 2010); 另外, 还将层析成像技术与微震监测相结合研发了震动波层析成像技术及装备(窦林名等, 2014), 利用矿震波形反演采掘区域波速场和应力场分布特征, 实现了冲击危险空间可视化探测。

在冲击矿压防治技术方面, 形成了区域防范和局部解危相结合的防治体系。区域防范措施主要有优化开拓布局及具有条件的可优先开采保护层(国家煤矿安监局, 2018); 局部卸压解危主要有钻孔卸压(张宏伟等, 2017)、煤体注水(张兆民等, 2021)、煤体爆破、顶板预裂爆破(薛成春等, 2021)、水压致裂(高亮等, 2020)等。另外, 相关学者对这些方法卸压解危效果也给出了相应的理论解释并进行相关参数优化(Chu et al., 2011; Lu et al., 2015; 李云鹏等, 2018)。目前, 这些方法已在大多数矿井进行了现场应用实践, 在降低冲击危险、保证安全生产方面起到重要作用。

冲击矿压是世界性难题, 冲击矿压发生影响因素较多, 目前, 冲击机理以及监测预警手段大多考虑单一因素, 现场实施的相关卸压解危措施的作用机理仍有待解释。近年来, 中国矿业大学冲击矿压研究团队通过长期理论研究、试验研究及现场实践在冲击矿压机理、监测预警和防治方面取得了长足的进展, 攻克了冲击矿压防治的多项关键技术难题, 形成了“一个理论、三种原理、八项技术, 一个云平台”的冲击矿压监测预警与防治技术装备体系, 如图 2 所示。

研究成果先后在我国 26 个矿业集团以及孟加拉国、波兰、澳大利亚等国家煤矿成功应用, 取得了良好的社会效益。相关成果编入了《煤矿安全规程》、《煤矿防治冲击地压细则》等规程规范和标准。其中综合指数法等冲击危险性预测评价技

术、电磁辐射等冲击危险监测技术及定向水力致裂等卸压解危技术已在现场得到成熟应用, 具体方法在其他文献中有详细论述。在此基础上, 本文详细论述了团队在冲击机理、监测预警、冲击危险防控方面的最新研究成果, 以期对深部冲击矿压研究和防治提供借鉴和指导。

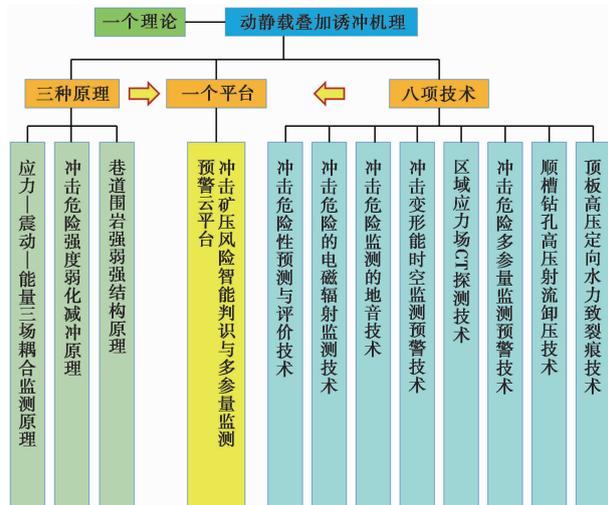


图 2 冲击矿压机理、监测预警与防治技术装备

Fig. 2 Rockburst mechanism and the technology and equipment for rockburst monitoring, early warning and prevention

1 冲击矿压机理及类型

1.1 动静载叠加诱冲机理

根据长期的理论研究、实验室试验、现场试验, 认为冲击矿压的发生必须要满足强度条件(Tan, 2006)、能量条件(邹德蕴等, 2004)等条件。即当煤岩体所受的应力没有超过极限强度时, 冲击矿压就不会发生; 煤岩系统中虽然积聚能量, 但如果能量的耗散速度大于其积聚速度, 也不会发生冲击矿压。

冲击矿压是在煤-岩系统所释放的能量大于其所消耗的能量条件下诱发的一种动力现象(李玉生, 1985; 苏振国, 2015)。其能量机制可用式(1)进行描述:

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

式中: U 为煤-岩系统总能量; U_R 、 U_C 为围岩和煤体中积聚的能量; U_D 为矿震等外部动载输入的能量; U_b 为冲击发生时煤岩体消耗的能量。

煤岩体中储存的能量和矿震能量可用式(2)表示, 其中: σ_s 为煤岩体静载荷; σ_d 为矿震诱发的动载荷。

$$U = \frac{(\sigma_s + \sigma_d)^2}{2E} \quad (2)$$

而冲击矿压发生是在煤岩体中耗散的最小能量可用式(3)表示,其中: $\sigma_{b,min}$ 为冲击矿压发生时煤岩体所承受的最小载荷。

$$U_{b,min} = \frac{\sigma_{b,min}^2}{2E} \quad (3)$$

因此,冲击矿压发生需满足式(4)所表述的应力条件:

$$\sigma_s + \sigma_d \geq \sigma_{b,min} \quad (4)$$

式(1)~式(4)表明,采掘工程活动导致采掘空间围岩应力与能量的重新调整,当围岩静载荷(σ_s)与外部动载引起的动载荷(σ_d)叠加超过煤岩冲击破坏的临界应力($\sigma_{b,min}$)时,则该煤-岩系统失稳破坏,诱发冲击显现(窦林名等, 2016b),动静载叠加诱冲机理如图3所示。

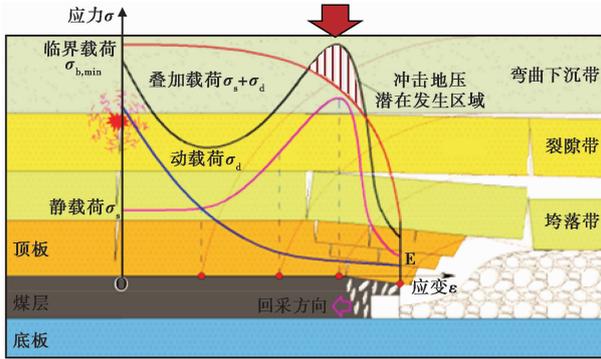


图3 动静载叠加诱冲机理(窦林名等, 2015b)

Fig. 3 Mechanism of the superposition of static and dynamic loads causing rockburst

1.2 冲击矿压类型

基于动静载叠加诱冲机理,按照煤岩体发生冲击矿压时的受力特征、动静载的来源、主控因素与能量释放的主体,可将其分为4类(蔡武, 2015; 窦林名等, 2016),如图4所示:

(1)煤柱压缩型:力源以静载垂直高应力为主+动载扰动,能量释放主体为煤柱。

(2)褶曲构造型:力源以静载构造水平高应力为主+动载扰动,能量释放主体为构造区煤体。

(3)顶板破断型:力源是静载应力+顶板强动载扰动,能量释放主体为顶板破断运动。

(4)断层滑移型:力源是静载应力+断层活化强动载扰动,能量释放主体为活化滑移的断层。

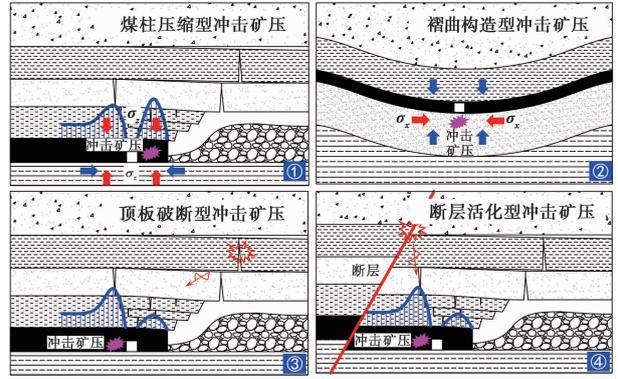


图4 冲击矿压类型(蔡武, 2015)

Fig. 4 Rockburst types

2 冲击危险监测预警技术

2.1 冲击危险“应力-震动-能量”三场耦合监测原理

根据动静载叠加诱冲理论,冲击矿压是煤岩应力场、震动场、能量场共同作用的结果。冲击矿压发生的前提是煤岩体所受应力超过其极限强度,而当应力小于极限强度时,就不会发生冲击矿压。通过监测煤岩体应力场的变化情况,可以达到冲击矿压预警的目的。冲击矿压发生时会有很强的震感,可以通过监测这一震动形式,来达到冲击矿压预警的目的。由于冲击矿压是巷道或采场围岩的弹性能的突然释放导致的,当冲击矿压发生时,部分已破碎煤岩体获得了较高的动能以较大速度向采掘空间抛出,因此只有当抛出的动能能量大于一定值时,才会发生冲击矿压,通过监测这一能量变化,来达到冲击矿压预警的目的(窦林名等, 2017, 2020)。图5表示受载煤岩体变形破坏过程中煤岩应力-震动-冲击变形能参数响应特征。因此,煤矿生产过程中,需要建立三场多参量综合监测预警技术体系,如图6所示,采取震动波CT反演、微震监测及冲击变形能监测等方法对采掘范围内的“应力场-震动场-能量场”三场信息进行精确捕捉,同时分析其冲击孕育程度、破坏模式及危险等级,做出综合预警。

2.2 冲击危险应力场监测技术

试验表明,受载煤岩体纵波波速随应力的增加而增加,如图7所示。煤岩体内弹性波传播速度(V_p)与煤岩体承载的载荷(σ)呈正相关关系,其可用式(5)所示的幂函数关系来表示。

$$V_p = a\sigma^\lambda \quad (5)$$

式中: a 和 λ 为拟合和选择的参数值。

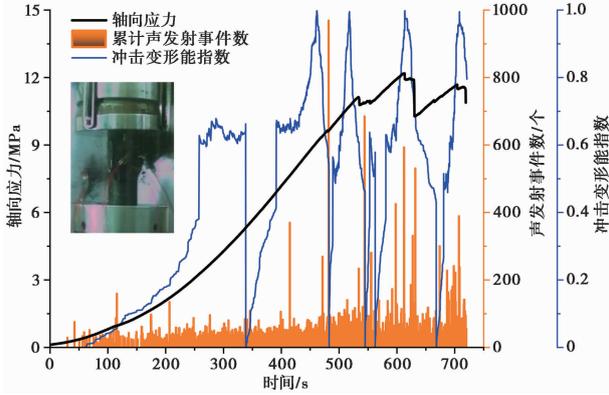


图 5 煤岩受载-失稳过程中应力-震动-能量参数变化特征
Fig. 5 The stress-energy-seismicity characteristics during the loading-failure process of coal-rock samples

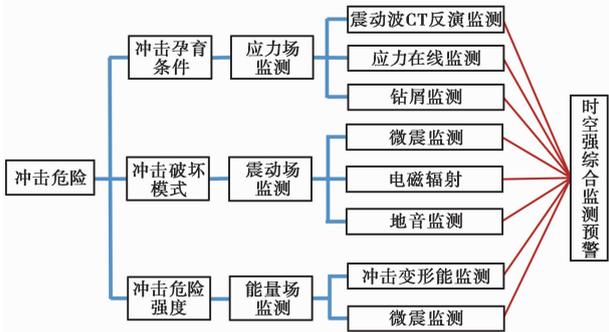


图 6 冲击危险“应力-震动-能量”三场耦合监测原理
Fig. 6 Coupling monitoring mechanism of stress field, seismic field and energy field

因此,采掘区域内煤岩体应力越高,震动波传播速度就越高(巩思园等, 2012a, 2012b)。工作面采掘过程中均伴随由煤岩体破裂、破断等诱发的能量大小不等的矿震,其位置和能量可通过微震监测系统确定。若确定震动波传播路径及不同位置处传播速度,便可量化采掘范围内煤岩体中震动波速度场和应力场分布规律,进而确定高应力区和潜在冲击危险区域。这可为冲击矿压灾害的精准防治提供可靠依据。

基于上述研究和认识,团队提出了冲击危险震动波 CT 反演方法(Cao et al., 2015; 蔡武等, 2016; Gong et al., 2019; Zhou et al., 2020),如图 8 所示。该方法首先将研究区域划分为若干网格,主要目的是确定采掘区域内震动波的速度场 $V(x, y, z)$ 或慢度场 $S(x, y, z) = 1/V(x, y, z)$ 分布规律。具体过程如式(6)~式(8):

$$V(x, y, z) = \frac{L}{T} \rightarrow V(x, y, z) T = L \quad (6)$$

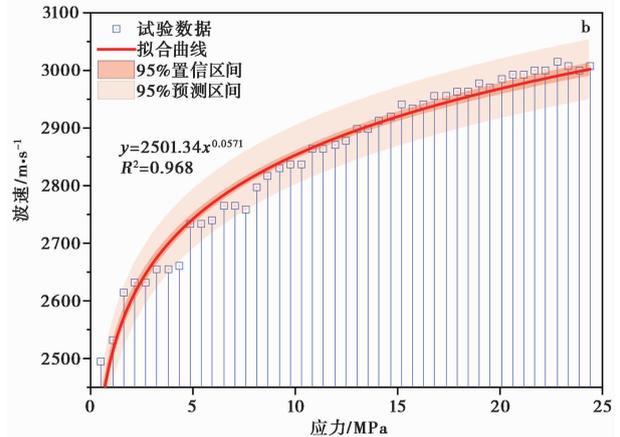
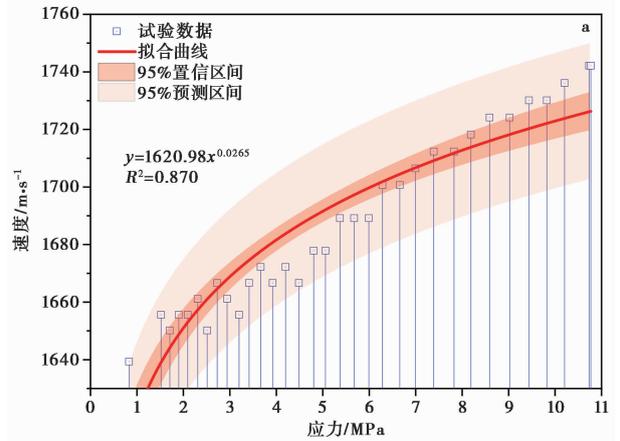


图 7 受载煤岩样应力-波速关系
Fig. 7 Stress-wave velocity relationship of loaded coal and rock samples

$$T_i = \int_{L_i} \frac{dL}{V(x, y, z)} = \int_{L_i} S(x, y, z) dL \quad (7)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m d_{ij} S_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: T_i 为震动波传播时间; L_i 为第 i 条射线传播路径; $V(x, y, z)$ 为震动波传播速度; $S(x, y, z)$ 为慢度; d_{ij}, S_{ij} 分别为第 i 条射线在第 j 个网格内传播路程和慢度; n, m 分别为反演区域内震动波射线条数和划分的网格数量。

利用上述方法即可反演出研究区域内震动波波速分布特征,进而确定高应力和潜在冲击危险区域。在此基础上,提出了基于波速异常和波速梯度异常的冲击危险相关的判别准则(Cao et al., 2015; 宾林名等, 2017),如表 1 和表 2 所示,其中:震动波速异常系数 A_n 和波速梯度变化系数 VG 计算方法为:

$$A_n = \frac{v_p - v_p^a}{v_p^a} \quad (9)$$

$$VG = v_p \cdot Grad \quad (10)$$

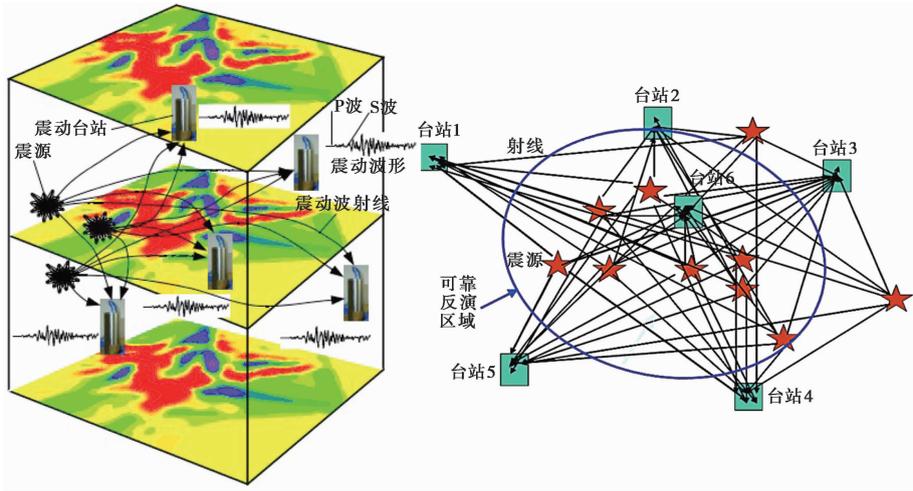


图 8 近远场冲击危险震动波 CT 探测技术(Cao et al.,2015)

Fig. 8 Seismic CT detection for rockburst hazard

表 1 震动波波速异常与冲击危险关系表(Cao et al.,2015)

Table 1 Relation between velocity anomaly and rockburst hazard

冲击危险指标	异常对应的冲击危险	波速正异常 $A_n/\%$
A	无	<5
B	弱	5~15
C	中等	15~25
D	强	>25

表 2 VG 值与冲击危险之间的关系(Cao et al.,2015)

Table 2 Relation between VG and rockburst hazard

冲击危险指标	异常对应的危险性特征	VG 异常/ $\%$
A	无	<5
B	弱	5~15
C	中等	15~25
D	强	>25

式中: v_p 为反演区域某网格的纵波波速值; v_p^a 为模型波速的平均值; $Grad$ 为反演区域内某网格的震动波波速变化梯度。

在应力场 CT 探测技术的基础上,为提高冲击危险反演效率和精度,团队开发了冲击危险震动波主被动探测技术及装备,如图 9 所示,采用双触发机制实现了可控震源(爆破或锤击)和自然震源双源震动波信号的采集和分析,实现采动应力场和冲击危险大范围、高分辨率和高效率监测分析(He et al.,2011)。

如图 10 所示为某矿工作面不同阶段开采时区域内震动波波速反演结果,其中为说明反演结果可靠与否,将上月波速反演结果与未来一个月发生的矿震进行对照叠加。可以看出,随工作面回采,区域内高波速区与矿震均随之不断转移,且后期矿震尤

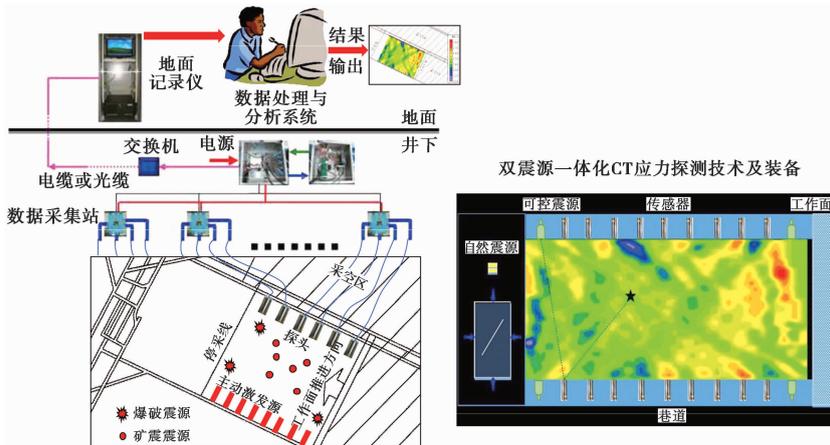


图 9 冲击危险震动波主被动探测系统

Fig. 9 Active and passive CT detection system

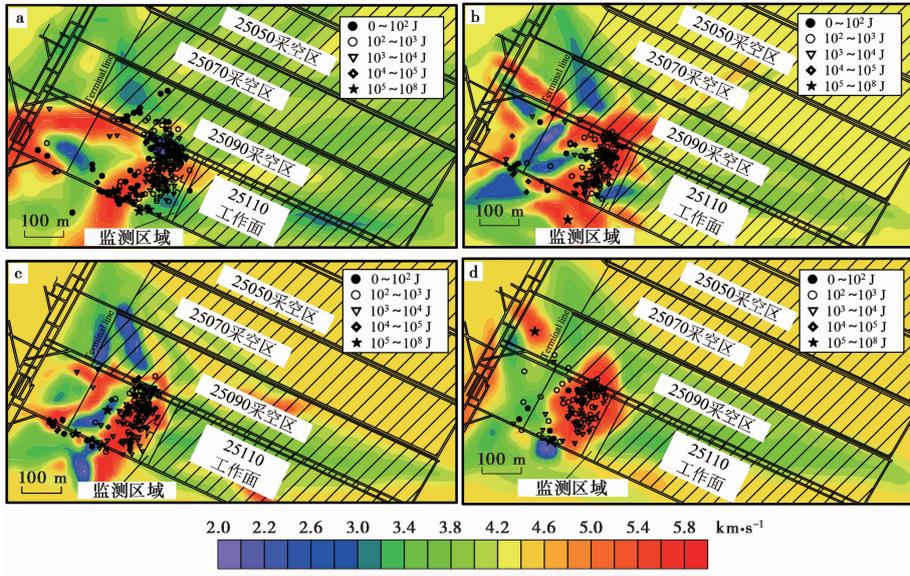


图 10 某矿工作面震动波 CT 连续反演结果 (Cai et al., 2015a)

Fig. 10 Successive tomography results for velocity distribution in a longwall face

其大能量矿震发生位置与反演确定的高波速区或梯度变化区较吻合,现场结果进一步说明了冲击危险震动波 CT 反演结果的可靠性 (Cai et al., 2015b)。

2.3 冲击危险震动场监测技术

矿井微震监测系统布置及某工作面矿震分布如图 11 所示,利用微震监测系统就是记录矿震波形,通过记录分析计算矿震发生的时间、震源的坐标、震动释放能量等参数,来确定煤岩体破断的时间、位

置、能量、矿震类型以及矿震传播规律 (杨纯东等, 2014)。以此为基础,进行冲击矿压危险性的监测预警 (姜福兴等, 2006; He et al., 2017)。

2.3.1 矿震活动时序监测

工作面覆岩破断运动以及采场围岩应力重新调整导致矿震发生,通过统计工作面回采速度与矿震活动相关性并与现场矿压显现、冲击显现进行对比,可以确定其相关关系,为工作面冲击危险监测预警与防治、工作面推进速度优化等提供依据。

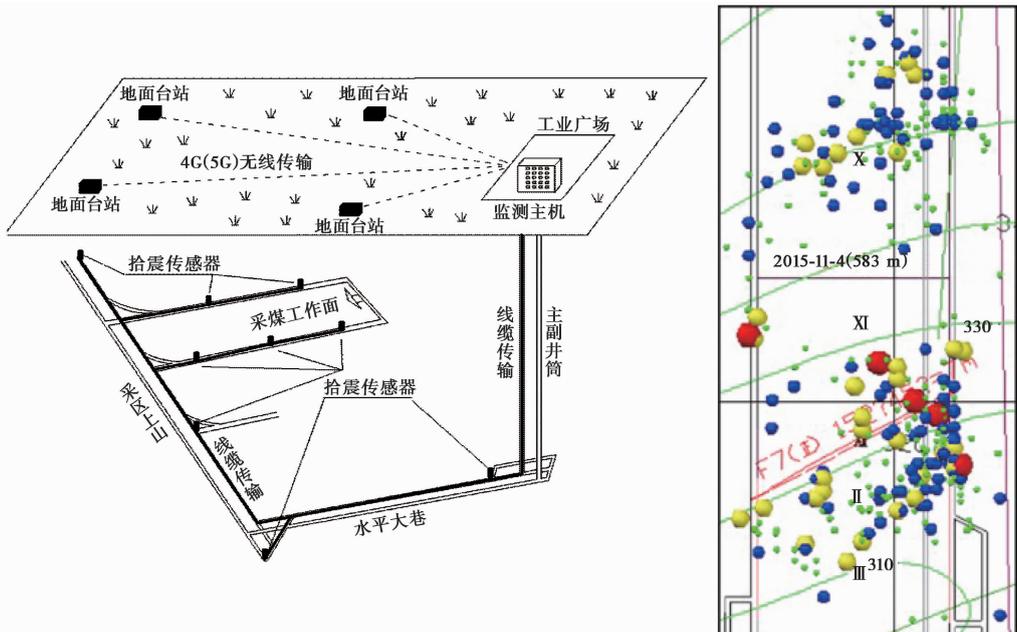


图 11 矿井微震监测系统布置及某工作面矿震分布

Fig. 11 Layout of Microseismic Monitoring System and the seismicity distribution of a longwall face

图12为某矿工作面矿震能量-频次变化曲线,在冲击显现发生前,工作面矿震频次逐渐降低、矿震能量逐渐升高,冲击显现时出现矿震能量的突然升高。应指出的是,冲击矿压发生影响因素较多,图12为具体工程案例,其冲击发生前矿震活动特征并不具有普适性,在矿震活动监测分析时,应根据具体工作面采掘条件、地质条件等具体分析,在充分分析、积累及总结经验的基础上进行时序预警。

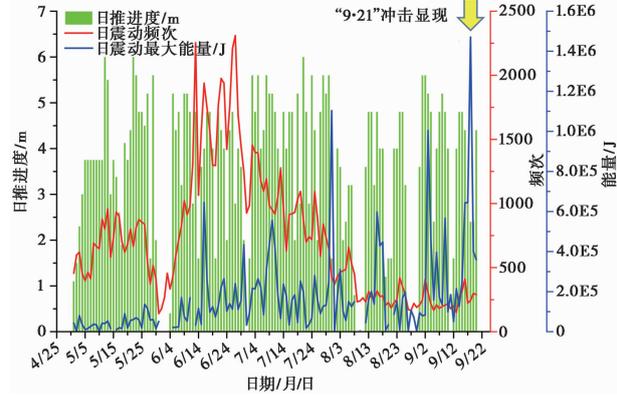


图12 某工作面矿震能量-频次统计曲线

Fig. 12 Microseismic activity curve of a longwall face

2.3.2 矿震活动空间监测

通过对典型矿震进行平剖面定位及震源机制分析,可确定矿震位置与该区域岩层分布、地质构造、断层等相对位置关系及矿震类型,为明确矿震及冲击矿压灾害应力-能量来源、矿震及冲击机制提供依据。图13为某矿井冲击显现时矿震空间位置及震源机制分析,可初步判定该矿震为顶板岩层拉张破裂诱发,该冲击力源为煤体高静载+顶板破断强动载。

工作面回采不仅会导致围岩静载应力重新分布,还会产生动载影响,矿震及冲击矿压是动静载叠加的结果,通过统计工作面回采过程中工作面走向及倾向矿震分布,可确定一定时期内工作面走向及倾向采动影响范围,为工作面超前支护、采掘布置及卸压方案优化提供参考。

图14为某工作面回采一段时间后统计的工作面走向矿震频次-能量归一化分布曲线,以最大值的10%为临界值判定超前煤岩体是否受采动影响,并取矿震频次和矿震能量两者中较大值,则此时工作面采动影响范围为120m,结果可为工作面超前支护及卸压范围的确定提供参考。

2.4 冲击危险能量场监测技术

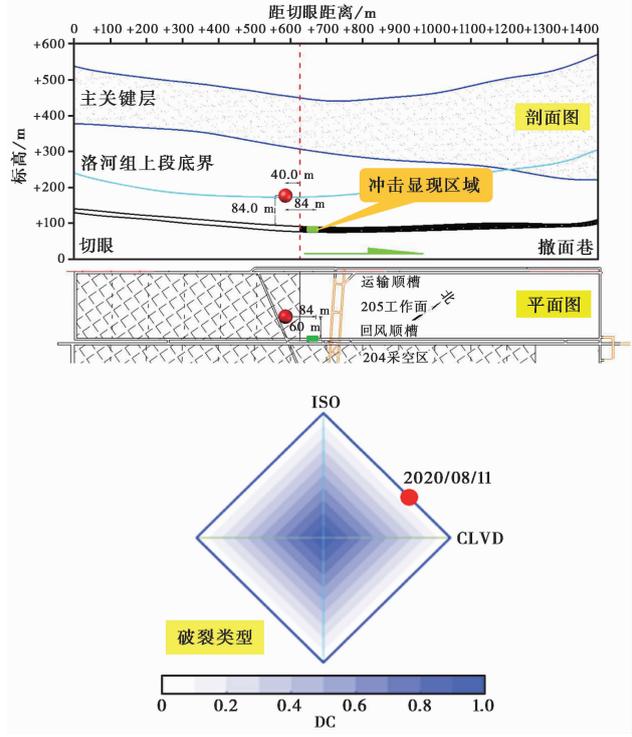


图13 冲击显现时矿震空间位置及矿震类型分析

Fig. 13 Spatial location and source mechanism of a microseismic events

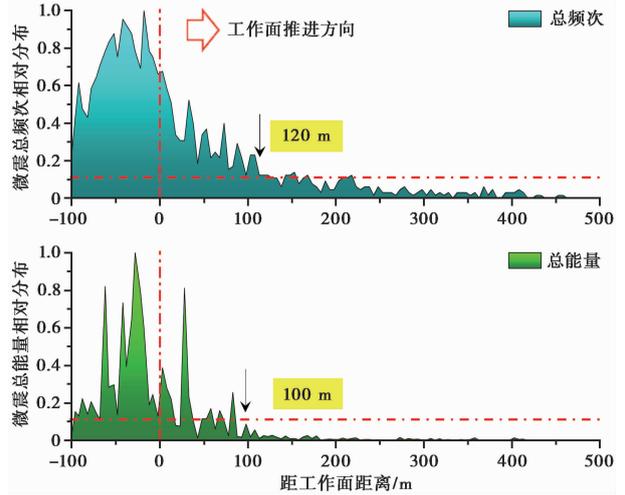


图14 工作面采动走向影响范围分析

Fig. 14 Mining influence range in the advancing direction

其不同阶段的声震演化规律(窦林名等, 2017)。

其中BC阶段是预警最终破坏最佳时期,该阶段震动能量与应力降和应变增量的平方成正比,即:

$$\sqrt{U_{AE}} \propto \Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 \propto \Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_0 \quad (11)$$

根据受载煤岩体BC阶段的应变递增不变特性,由此可构建如下应变时序当量指标:

图15表示开采扰动下煤岩体应力-应变状态及

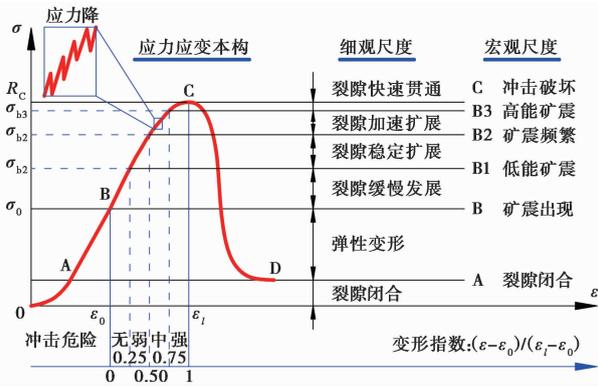


图 15 采动条件下煤岩应力-应变本构及其不同阶段的声震演化规律(窦林名等, 2017)

Fig. 15 Stress and strain of coal-rock and its acoustic and seismic evolution characteristics in different stages

$$W_{\varepsilon\text{-temporal}} = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{Nt-1}) + (\varepsilon_{Nt-1} - \varepsilon_{Nt-2}) + \dots + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{(\varepsilon_l - \varepsilon_{Nl-1}) + (\varepsilon_{Nl-1} - \varepsilon_{Nl-2}) + \dots + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}$$

$$= \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_l - \varepsilon_0}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{Nt} \sqrt{U_{AE-i}}}{\sum_{i=1}^{Nl} \sqrt{U_{AE-i}}} \quad (12)$$

式中: $0 \leq W_{\varepsilon\text{-temporal}} \leq 1$, 对应 4 个冲击危险等级: 无冲击危险 0.00 ~ 0.25, 弱冲击危险 0.25 ~ 0.50, 中等冲击危险 0.50 ~ 0.75 和强冲击危险 0.75 ~ 1.00; ε_0 为初始值, 即受载煤岩体开始出现矿震、声发射微破裂现象时对应的初始应变值; ε 和 Nt 为当前值, 即受载煤岩体当前对应的应变值和矿震、声发射数量; ε_l 和 Nl 为临界值, 即受载煤岩破坏冲击时对应的应变值和矿震、声发射数量; U_{AE-i} 为第 i 个震动事件释放的能量值。由于应变参量不同于应力参量, 它在煤层开采加卸载和动载作用过程中始终维持着整体递增状态, 因此更适于量化描述煤岩破坏冲击前的状态。由于指标 $W_{\varepsilon\text{-temporal}}$ 是采用应变参量

来描述冲击危险程度, 其中应变由矿震的能量换算得到。因此, 称该指标为冲击变形能指数(窦林名等, 2017; Cai et al., 2015a, 2019)。

在无限煤体内进行采矿, 每开采一定重量或体积煤体 V , 围岩释放出的变形能 $\sum \sqrt{U_{AE-i}}$ 与煤体破坏形式和程度息息相关, 重量或体积变形能释放率指标 $\sum \sqrt{U_{AE-i}}/V$ 可用于衡量煤体破坏诱发煤岩冲击动力灾害的危险性, 因此, 可构建如下冲击变形能空间预警指标:

$$W_{\varepsilon\text{-spatial}} = \frac{e - e^{1-\beta(t)}}{e - 1} \quad (13)$$

$$U_{\varepsilon} = \frac{\sum \sqrt{U_{AE-i}}}{SV} \quad (14)$$

$$\beta(t) = (U_{\varepsilon} - U_{\varepsilon\text{-min}})/(U_{\varepsilon\text{-max}} - U_{\varepsilon\text{-min}}) \quad (15)$$

式中: $0 \leq W_{\varepsilon\text{-spatial}} \leq 1$, 对应 4 个冲击危险等级: 无冲击危险 0.00 ~ 0.25, 弱冲击危险 0.25 ~ 0.50, 中等冲击危险 0.50 ~ 0.75 和强冲击危险 0.75 ~ 1.00; S 为统计区域面积或体积; V 为统计时间段内煤层开采重量或体积, 当工作面匀速开采时可用时间天数代替。

图 16 为冲击变形能时序预警曲线图, 图中 9 次冲击事件发生前, 6 次提前显示出了强危险预警等级, 其余 3 次显示出了中等危险预警等级。图 17 为冲击变形能空间预警云图, 图中危险性矿震发生之前, 指标值明显指示出危险区, 并在该区域急剧增加并逐渐往外围扩展, 直至动力事件产生。

2.5 冲击矿压风险智能判识与多参量监测预警云平台

根据动静载叠加诱冲机理, 冲击矿压监测预警须从应力场、震动场、能量场三方面同时进行。研发涵盖应力场、震动场、能量场的多参量综合监测预警

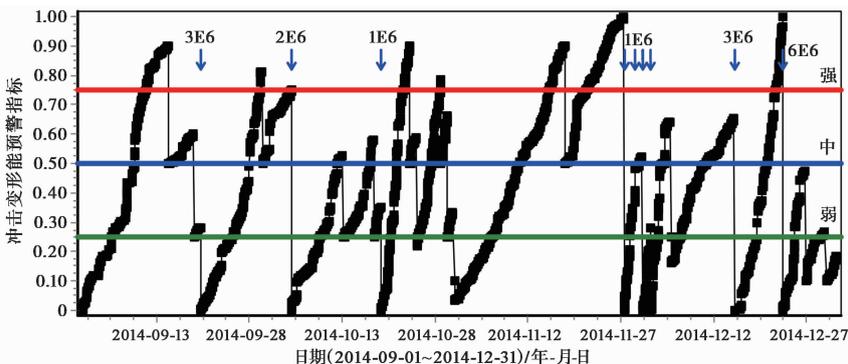


图 16 冲击变形能时序预警

Fig. 16 Temporal monitoring of bursting strain energy

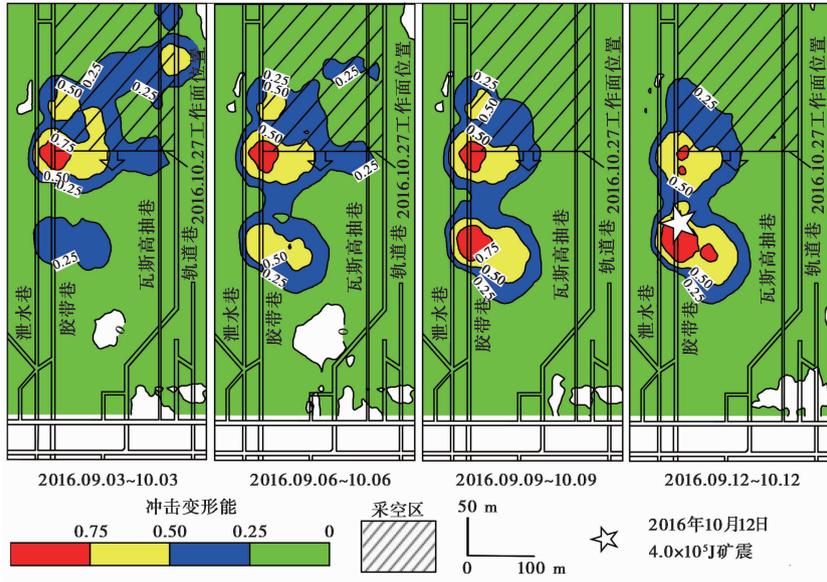


图 17 冲击变形能空间预警

Fig. 17 Spatial monitoring of bursting strain energy

技术,能够有效提高冲击矿压预警准确性。为此,利用大数据和云平台技术,开发了冲击矿压风险判别与多参量监测预警云平台(窦林名等, 2020),如图 18 所示。



图 18 冲击矿压风险智能判别与监测预警云平台入口

Fig. 18 Home page of the cloud platform of rockburst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning

冲击矿压风险智能判别及多参量监测预警云平台架构如图 19 所示。最底层是由微震、应力、地音、钻屑、卸压等多种监测系统形成的监测网络,该网络能够监测并采集矿井采掘过程中的震动及应力等信息;然后平台对所采集的数据进行预处理并将标准化格式数据上传至服务器数据库,将相关信息和数据统一管理;工程技术人员可通过调取此前上传的数据库数据,利用前期构建的冲击矿压风险判别模型及准则,判定工作面危险状态,在此基础上制定相应的防治及管理措施,指导现场卸压解危工作。

针对不同的监测系统和监测方式,平台建立了科学合理的预警指标,包括微震监测的时空强预警指标、冲击变形能指标和震动波 CT 反演(注重冲击矿压模型与冲击矿压危险空间、时间趋势分析)以

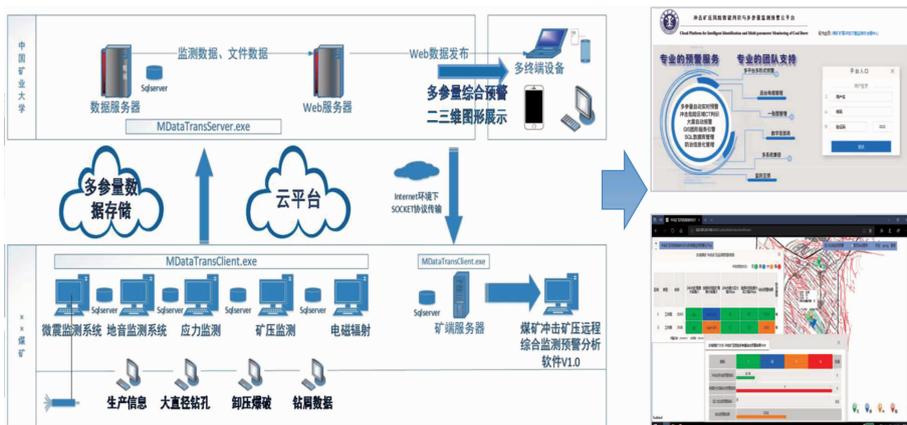


图 19 监测预警云平台架构

Fig. 19 Architecture of the cloud platform

及应力预警指标、矿压预警指标等预警指标体系(窦林名等, 2015a, 2020)(图 20), 并构建了基于冲击矿压类型支持下的“三场”多参量带权重时空预警模型(窦林名等, 2017)(图 21)。

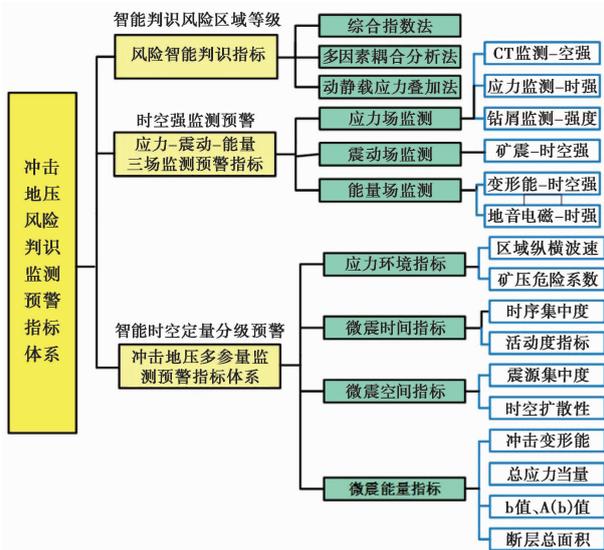


图 20 冲击矿压风险判识和多参量综合监测预警指标体系
Fig. 20 Indexes for rock-burst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning

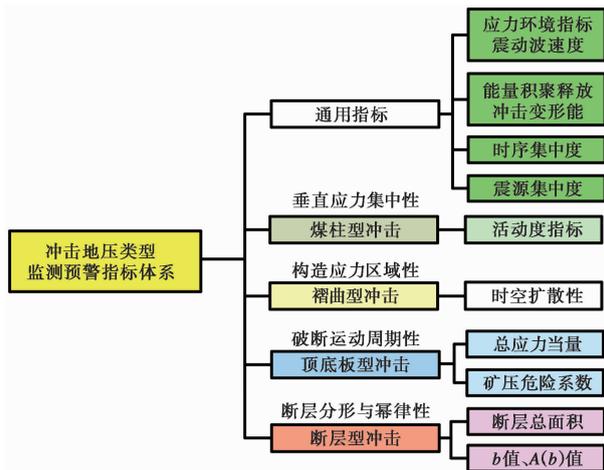


图 21 不同冲击矿压类型监测预警指标体系
Fig. 21 Indexes for the monitoring and early warning of different types of rockburst

云平台不但具有多参量数据采集存储、GIS 图形展示、多系统综合展示等常规功能, 更具有多参量综合预警、冲击变形能时序预警、震动波 CT 反演空间预警、防治信息化、多终端访问、多形式预警等特色功能, 以及 GIS 一张图管理和监测互锁的独特优势, 如图 22 所示, 能够极大满足煤矿企业对冲击矿压灾害监测预警和治理的综合性需求。该平台已



图 22 监测预警云平台特点
Fig. 22 Features of the cloud platform

在古城煤矿等 13 个煤矿进行了成功应用, 现场应用表明该云平台的综合预警信息及监测信息一张图功能能够有效指导现场冲击危险监测预警和防治工作。

3 冲击矿压防控原理

3.1 冲击危险防治原理

3.1.1 冲击危险强度弱化减冲原理(窦林名等, 2005a, 2005b; 陆菜平, 2008)

根据动静载叠加诱冲机理, 冲击矿压的防治应从静载和动载两方面入手, 对于静载, 采取降低应力集中程度和弹性能量的聚集、促使应力高峰向煤体深部转移的技术; 对于动载, 采用破坏煤岩体的结构, 减小其运动程度, 主动诱发能量释放的措施。

冲击危险强度弱化减冲原理如图 23 所示, 通过在冲击危险区域煤岩体中实施相关卸压解危措施, 破坏该区域煤岩系统整体结构, 释放积聚的弹性应变能以及由于煤岩破裂产生的矿震能量, 促使应力集中区进一步向深部转移, 降低应力和能量集中程度, 从而降低冲击矿压危险(窦林名等, 2005a, 2005b; 陆菜平, 2008)。

3.1.2 冲击危险防治技术

基于提出的强度弱化减冲原理, 可通过在采掘工作面煤体中实施大直径卸压钻孔、煤体爆破、注水软化、煤层钻孔高压射流卸压等措施, 弱化煤体强度和冲击倾向性, 释放煤体集聚的弹性应变能, 实现高应力区向深部转移, 降低冲击危险性。可通过在采掘工作面顶板坚硬岩层中实施断顶爆破、定向水力致裂等措施破坏覆岩完整性和连续性, 弱化其强度, 改变其破断运动形式, 降低因悬顶导致的煤岩体高应力集中和能量积聚, 降低顶板破断产生的动载强度, 降低冲击危险性。

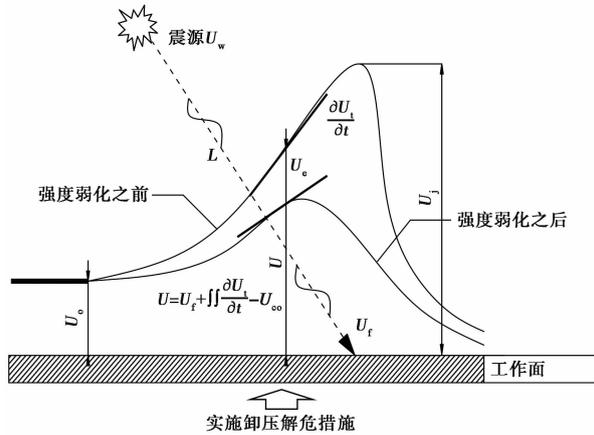


图 23 冲击危险强度弱化减冲原理(窦林名等, 2005a, 2005b)

Fig. 23 Strength weakening theory for rockburst hazard

3.2 巷道稳定性控制原理

3.2.1 巷道围岩的强弱强结构原理(高明仕等, 2008; 窦林名等, 2018)

在具有冲击危险的巷道围岩中实施相关煤岩体破坏措施后, 巷道围岩组成由里到外分别为: 最里圈, 由巷道支护组成的小结构(强结构); 卸压措施实施后形成的松散破碎的弱结构; 无扰动的原岩结构(强结构)。即巷道围岩由里向外具有强弱强的结构特征, 如图 24 所示。

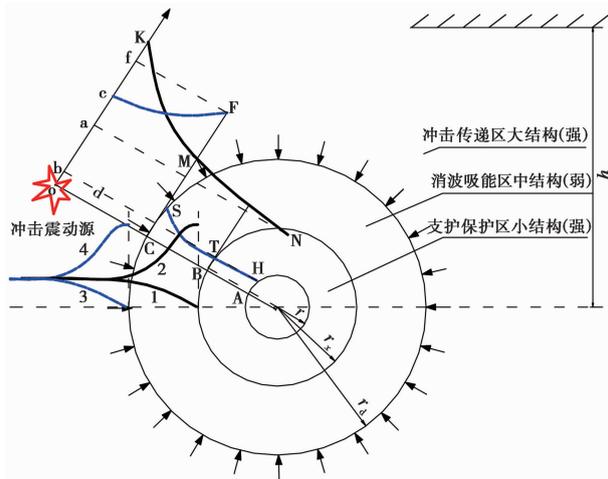


图 24 巷道围岩的强弱强结构力学模型(高明仕等, 2008)

Fig. 24 Mechanical model of the strong-soft-strong structure

由于围岩中间人工弱结构的影响, 巷道围岩应力再次重新调整, 高集中应力向深部进一步转移, 支承压力曲线由图 24 中 1 曲线、2 曲线转移至弱结构外的 3 曲线、4 曲线, 使内部支护小结构处于卸压区。另外, 当临近区域有矿震发生时, 震动波经中间

弱结构的散射和吸收, 进一步衰减, 最后传递到内部支护小强结构上的应力大幅降低(图 24 中 STH 曲线), 有利于巷道稳定。

3.2.2 巷道围岩控制技术

基于巷道围岩强弱强结构原理, 具有冲击危险的巷道围岩控制应从中间弱结构和巷道支护强结构两个方面入手。一方面, 通过在巷道围岩中实施深孔爆破等措施, 人为制造弱结构, 破坏煤岩体完整性和连续性, 释放其积聚的弹性能, 增大震动波传播过程中的衰减系数, 降低动载对巷道围岩稳定的影响。另一方面, 在巷道周围实施高强度预应力锚杆支护, 及时控制围岩变形, 可在锚杆支护系统中设置“让压”构件, 使锚杆支护系统在高支护阻力条件下具有一定的主动让压变形功能以降低冲击动载的影响, 提高巷道稳定性(高明仕等, 2020)。

4 冲击矿压的动静载监测与防治

由动静叠加诱冲机理可知, 冲击矿压是动静载共同作用的结果, 静载荷是煤岩失稳的应力和能量基础, 动载荷主要起诱发煤岩冲击破坏的作用。根据动静载力源及能量来源, 1.2 节将冲击矿压分为 4 类。因此, 冲击矿压的监测预警和防治也应根据冲击矿压类型从静载和动载两个方面同时进行。

对于静载, 主要监测对象为采掘区域围岩静载应力场, 可采用钻屑法、应力在线法及震动波 CT 反演法, 其中: 前两者属于局部监测, 探测范围有限。采掘过程中, 应根据采掘进度, 定期实施震动波 CT 探测, 明确采掘临近区域内波速异常范围, 进而确定潜在冲击危险区域。对于动载, 主要监测对象为采掘区域内煤岩体破裂、顶底板岩层破断及断层活性等, 主要采用微震法监测, 局部区域可采用地音和电磁辐射辅助监测。采掘过程中, 应根据采掘进度, 定期优化微震台网布置方案, 使微震台网对采掘区域形成包围状态。及时对微震系统采集到的矿震信号进行标定, 确定震源三维坐标及能级, 分析矿震空间分布特征及时序变化特征及其与现场矿震显现的相关关系, 在矿震活动异常时及时预警。通过对动静载的监测, 确定其冲击矿压类型(图 4), 并充分挖掘矿震、应力、矿压等信息, 确定适合该冲击矿压类型的监测预警指标(图 21), 基于多参量带权重时空预警模型实现对不同类型冲击矿压的多参量监测预警。

由于冲击动静载力源的差异, 在明确冲击矿压

类型及其监测预警指标体系的基础上,应对冲击矿压进行分类防治。对于煤柱型冲击矿压,力源以静载垂直高应力为主,动载扰动为辅,主要破坏形式为煤柱的压缩破坏及底板的瞬间鼓起,可通过优化煤柱尺寸(区段煤柱宜采用小煤柱或无煤柱)、煤柱内实施大直径卸压钻孔、煤体爆破等进行卸压解危。对于褶曲型冲击矿压,力源以静载构造水平高应力为主,动载扰动为辅,主要破坏形式为底板的瞬间鼓起及帮部破坏,可通过在底板及底角实施大直径钻孔及爆破等进行卸压并切断底板与周边的应力传递路径,同时,巷道应尽量减少甚至不留底煤。对于顶板型冲击矿压,力源以煤岩体静载应力和顶板破断诱发的强动载,主要破坏形式为煤岩体强烈震动、底板瞬间鼓起、巷帮破坏及锚网索断裂等,可通过对工作面覆岩厚硬顶板实施预裂爆破,破坏其完整性,降低破断诱发的动载强度来防治。对于断层型冲击矿压,力源为煤岩体高静载应力和断层活动诱发的强动载,主要破坏形式为断层附近煤岩体强烈震动、底板瞬间鼓起、巷帮破坏及锚网索断裂等,可采前对临近断层巷道帮部及底板实施大直径钻孔、煤体爆破等降低静载应力集中程度,同时对断层进行爆破处理,提前诱发断层活动释放能量。

5 结 论

(1)提出了动静载叠加诱冲机理,即当采掘空间围岩中的静载与矿震形成的动载的叠加载荷超过煤岩冲击临界载荷时,冲击矿压就会发生,并给出了动静载叠加诱发冲击矿压的能量和应力条件。

(2)基于动静载叠加诱冲机理,按照煤岩体发生冲击矿压时的受力特征、动静载的来源与能量释放的主体,将冲击矿压分为煤柱压缩型、褶曲构造型、顶板破断型、断层滑移型4类。

(3)提出了冲击危险“应力-震动-能量”三场耦合监测原理,建立了三场多参量综合监测预警技术体系及时空预警模型;开发了冲击矿压风险智能判识与多参量监测预警云平台,实现冲击危险监测数据与防治措施信息的融合,提高了监测预警效能。

(4)提出了冲击危险强度弱化减冲原理和巷道围岩强弱结构原理,即通过实施大直径钻孔、煤体爆破等,破坏煤岩体强度及结构,人为制造弱结构,降低应力集中,释放弹性能,同时增大震动波衰减系数,降低动载影响,从而降低冲击矿压危险。

(5)冲击矿压的监测预警和防治应根据冲击矿

压类型从静载和动载两个方面同时进行。首先确定不同类型冲击矿压监测预警指标,基于多参量带权重时空预警模型实现分类监测预警。其次针对不同冲击矿压动静载力源,采取不同措施实现分类防治。

参 考 文 献

- Cai W, Cao A Y, Dou L M, et al. 2021. A monitoring and early warning method of rockburst risk based on the combined dynamic and static stress analysis: China, CN111963243B[P]. 2021-05-07.
- Cai W, Dou L M, Gong S Y, et al. 2015a. Quantitative analysis of seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment[J]. *Natural Hazards*, 75(3): 2453-2465.
- Cai W, Dou L M, Li Z L, et al. 2015b. Mechanical initiation and propagation mechanism of a thrust fault: A case study of the Yima section of the Xiashi-Yima thrust (north side of the eastern Qinling Orogen, China)[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 48(5): 1927-1945.
- Cai W, Dou L M, Li Z L, et al. 2016. Verification of passive seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(1): 252-262.
- Cai W, Dou L M, Si G Y, et al. 2019. A new seismic-based strain energy methodology for coal burst forecasting in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 123: 104086.
- Cai W. 2015. Fault rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology.
- Cao A Y, Dou L M, Cai W, et al. 2015. Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 78: 1-9.
- Chen G X, Dou L M, Qiao Z D, et al. 2008. The stress field distribution in folding structure areas and its impact on rock burst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 37(6): 751-755.
- Chu H B, Yang X L, Liang W M, et al. 2011. Experimental study on the blast damage law of the simulated coal[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 28(3): 488-492.
- Cook N, Hoek E P, Pretorius J P G, et al. 1966. Rock mechanics applied to the study of rockbursts[J]. *Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy*, 66(10): 435-528.
- Dou L M, Cai W, Gong S Y, et al. 2014. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(2): 238-244.
- Dou L M, Gong S Y, Liu P, et al. 2015a. Remote online early warning platform of mine seismic and bump disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 43(6): 48-53.
- Dou L M, He J, Cao A Y, et al. 2015b. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 40(7): 1469-1476.
- Dou L M, He X Q, REN Ting, et al. 2018. 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*, 47(1): 48–59.
- Dou L M, He X Q. 2001. Theory and technology of rockburst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press.
- Dou L M, Jiang Y D, Cao A Y, et al. 2017. Monitoring and pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coal mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(4): 803–811.
- Dou L M, Li Z L, Zhang M. 2016. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 44(7): 41–46.
- Dou L M, Lu C P, Mu Z L, et al. 2005a. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 30(6): 690–694.
- Dou L M, Lu C P, Mu Z L, et al. 2005b. The theory of intensity weakening for rockburst in coal mine[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 24(3): 169–175.
- Dou L M, Lu C P, Mu Z L, et al. 2006. Rock burst tendency of coal-rock combinations sample[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 23(1): 43–46.
- Dou L M, Mu Z L, He H, et al. 2013. A predicting method for rockburst risk in coal mine. China, CN103244179A[P]. 2013–08–14.
- Dou L M, Wang S C, Gong S Y, et al. 2020. Cloud platform of rock-burst intelligent risk assessment and multi-parameter monitoring and early warning[J]. *Journal of China Coal Society*, 45(6): 2248–2255.
- Dou L M, He X Q, Bernard Drzezls. 2000. AE method of evaluating the danger of rock burst[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 29(1): 85–88.
- Gao L, Zhang N, Lü Q X. 2020. Experimental study on controlling strong strata behavior in mining face by cracking roof with directional hole hydraulic fracturing[J]. *Coal Science and Technology*, 48(8): 57–62.
- Gao M S, Dou L M, Zhang N, et al. 2008. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 29(2): 359–364.
- Gao M S, He Y L, Lu C P, et al. 2020. Coordination mechanism of internal strong active support, soft structure pressure relief and anti-punching of roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 45(8): 2749–2759.
- General Division of the National Mine Safety Administration. 2021. Analysis report on safety demonstration and special supervision of rockburst coal mines[R]. Beijing.
- Gong S Y, Dou L M, He J, et al. 2012a. Study of correlation between stress and longitudinal wave velocity for deep burst tendency coal and rock samples in uniaxial cyclic loading and unloading experiment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(1): 41–47.
- Gong S Y, Dou L M, Xu X J, et al. 2012b. Experimental study on the correlation between stress and P-Wave velocity for burst tendency coal-rock samples[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 29(1): 67–71.
- Gong S Y, Li J, Ju F, et al. 2019. Passive seismic tomography for rockburst risk identification based on adaptive-grid method[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 86: 198–208.
- Gu S T, Wang C Q, Jiang B Y, et al. 2012. Field test of rock burst danger based on drilling pulverized coal parameters[J]. *Disaster Advances*, 5(4): 237–240.
- Guo X F, Guo L F, Li C, et al. 2021. A quantitative assessment method of roadway rockburst risk based on the plastic zone shape coefficient[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 50(1): 39–49, 78.
- He H, Dou L M, Gong S Y, et al. 2011. Study of acoustic emission monitoring technology for rockburst[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4): 1262–1268.
- He H, Dou L M, Li X W, et al. 2011. Active velocity tomography for assessing rock burst risks in a kilometer deep mine[J]. *Mining Science and Technology(China)*, 21(5): 673–676.
- He J, Dou L M, Gong S Y, et al. 2017. Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on micro-seismic monitoring[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93: 46–53.
- Jia B X, Jiang M, Zhao P. 2015. Seismic phase arrival time identification methods of mine earthquake and its application based on fractal theory[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition)*, 34(10): 1125–1130.
- Jiang F X, Wei Q D, Wang C W, et al. 2014. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(7): 1191–1196.
- Jiang F X, Yang S H, Cheng Y H, et al. 2006. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(5): 1511–1516.
- Lai X P, Sun H, Cai M, et al. 2017. Mechanism of dynamic hazards due to coal and rock mass instability in extremely steep coal seams with the deepening mining[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 37(3): 305–311.
- Lan H, Chen D K, Mao D B. 2016. Current status of deep mining and disaster prevention in China[J]. *Coal Science and Technology*, 44(1): 39–46.
- Li X L. 2017. Research on dynamic fracture process and rockburst mechanism of cracked coal rock[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology.
- Li Y P, Zhang H W, Zhu Z J, et al. 2018. Study on safety parameters of pressure relief borehole in rockburst coal seam[J]. *China Safety Science Journal*, 28(11): 122–128.
- Li Y S. 1985. Rockburst Mechanism and its preliminary application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 14(3): 37–43.
- Li Z L, Dou L M, Wu C, et al. 2014. Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 70: 192–200.
- Liu J H, Zhai M H, Guo X S, et al. 2014. Theory of coal burst monitoring

- using technology of vibration field combined with stress field and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(2): 353-363.
- Lu C P. 2008. Intensity weakening theory for rockburst of compound coal-rock and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology.
- Lu Y Y, Song C P, Jia Y Z, et al. 2015. Analysis and numerical simulation of hydrofracture crack propagation in coal-rock bed[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 105(1): 69-86.
- Mu Z L, Dou L M, Gong S Y. 2013. Classification prediction method of underground rockburst in coal mines. China, CN103256073B[P]. 2013-08-21.
- National Mine Safety Administration. 2018. Regulations for rockburst prevention[S]. Beijing: National Mine Safety Administration.
- Qi Q X, Li Y Z, Zhao S K, et al. 2019. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. *Coal Science and Technology*, 47(9): 1-40.
- Qi Q X, Shi Y W, Liu T Q. 1997. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst[J]. *Journal of China Coal Society*, 22(2): 144-148.
- Su Z G. 2015. Law and control of rockburst in coal pillar under the condition of special thick and hard coal seam in Hujiahe coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology.
- Tan J K. 2006. Rockburst Case Record, Theory and Control[C]// *Proceedings of the International Symposium on Engineering in Complex Rock Formations*: 33-37.
- Wang E Y, He X Q, Wei J P, et al. 2011. Electromagnetic emission graded warning model and its applications against coal rock dynamic collapses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4): 556-564.
- Xia Y X, Kang L J, Qi Q X, et al. 2010. Five indexes of microseismic and their application in rock burst forecastion[J]. *Journal of China Coal Society*, 35(12): 2011-2016.
- Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. 2015. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 40(1): 1-10.
- Xie H P, Gao F, Ju Y. 2015. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(11): 2161-2178.
- Xue C C, Cao A Y, Niu F W, et al. 2021. Mechanism and prevention of rock burst in deep irregular isolated coal pillar[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 38(3): 479-486.
- Yang C D, Gong S Y, Ma X P, et al. 2014. Rock burst danger monitoring based on microseismic method[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 31(6): 863-868.
- Zhang H W, Li Y P, Chen Y, et al. 2017. Research on optimizing large diameter drilling scheme of rockburst prevention in isolated area under three hard conditions[J]. *Journal of Safety and Environment*, 17(5): 1823-1827.
- Zhang L M, Wang Z Q, Zhang X J, et al. 2009. Fold catastrophe model of rock dynamic destabilization[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(4): 552-557.
- Zhang M T. 1987. Instability theory and numerical simulation of rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 6(3): 197-204.
- Zhang Z M, Ren W T, Liu Z G, et al. 2021. Research and application of reducing rock burst technology based on deep-hole water injection[J]. *Coal Technology*, 40(3): 107-109.
- Zhou K Y, Dou L M, Gong S Y, et al. 2020. Study of rock burst risk evolution in front of deep longwall panel based on passive seismic velocity tomography[J]. *Geofluids*, (1): 1-14.
- Zou D Y, Jiang F X. 2004. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 19(2): 159-163.
- 蔡武, 曹安业, 窦林名, 等. 2021. 一种基于动静组合应力分析的冲击地压危险监测预警方法: 中国, CN111963243B[P]. 2021-05-07.
- 蔡武, 窦林名, 李振雷, 等. 2016. 矿震震动波速度层析成像评估冲击危险的验证[J]. *地球物理学报*, 59(1): 252-262.
- 蔡武. 2015. 断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 陈国祥, 窦林名, 乔中栋, 等. 2008. 褶皱区应力场分布规律及其对冲击矿压的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 37(6): 751-755.
- 窦林名, 蔡武, 巩思园, 等. 2014. 冲击危险性动态预测的震动波 CT 技术研究[J]. *煤炭学报*, 39(2): 238-244.
- 窦林名, 巩思园, 刘鹏, 等. 2015a. 矿震冲击灾害远程在线预警平台[J]. *煤炭科学技术*, 43(6): 48-53.
- 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 2015b. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. *煤炭学报*, 40(7): 1469-1476.
- 窦林名, 何学秋, Bernard Drzezls. 2000. 冲击矿压危险性评价的地音法[J]. *中国矿业大学学报*, 29(1): 85-88.
- 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 2018. 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*, 47(1): 48-59.
- 窦林名, 何学秋. 2001. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 北京: 中国矿业大学出版社.
- 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 2017. 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*, 36(4): 803-811.
- 窦林名, 李振雷, 张敏. 2016. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 44(7): 41-46.
- 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 2005a. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. *煤炭学报*, 30(6): 690-694.
- 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 2005b. 煤岩体的强度弱化减冲理论[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 24(3): 169-175.
- 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 2006. 组合煤岩冲击倾向性特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 23(1): 43-46.
- 窦林名, 牟宗龙, 贺虎, 等. 2013. 一种预测煤矿井下冲击矿压危险的评估方法: CN, CN103244179A[P]. 2013-08-14.
- 窦林名, 王盛川, 巩思园, 等. 2020. 冲击矿压风险智能判识与监测预警云平台[J]. *煤炭学报*, 45(6): 2248-2255.
- 高亮, 张农, 吕情绪. 2020. 顶板定向钻孔水压致裂工作面强矿压控制试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 48(8): 57-62.
- 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 2008. 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*, 29(2): 359-364.

- 高明仕,贺永亮,陆菜平,等. 2020. 巷道内强主动支护与弱结构卸压防冲协调机制[J]. 煤炭学报,45(8): 2749-2759.
- 巩思园,窦林名,何江,等. 2012a. 深部冲击倾向煤岩循环加卸载的纵波波速与应力关系试验研究[J]. 岩土力学,33(1): 41-47.
- 巩思园,窦林名,徐晓菊,等. 2012b. 冲击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,29(1): 67-71.
- 郭晓菲,郭林峰,李臣,等. 2021. 基于塑性区形态系数的巷道冲击危险性量化评估方法[J]. 中国矿业大学学报,50(1): 39-49, 78.
- 国家矿山安全监察局综合司. 2021. 冲击地压矿井安全论证及专项监管监察情况分析报告[R]. 北京: 国家矿山安全监察局综合司.
- 国家煤矿安监局. 2018. 防治煤矿冲击地压细则[S]. 北京: 国家煤矿安监局.
- 贺虎,窦林名,巩思园,等. 2011. 冲击矿压的声发射监测技术研究[J]. 岩土力学,32(4): 1262-1268.
- 贾宝新,姜明,赵培. 2015. 分形理论的矿震初至震相识别方法及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),34(10): 1125-1130.
- 姜福兴,魏全德,王存文,等. 2014. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报,39(7): 1191-1196.
- 姜福兴,杨淑华,成云海,等. 2006. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报,49(5): 1511-1516.
- 来兴平,孙欢,蔡明,等. 2017. 急斜煤层浅转深综放开采煤岩动力灾害诱发机理[J]. 西安科技大学学报,37(3): 305-311.
- 蓝航,陈东科,毛德兵. 2016. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术,44(1): 39-46.
- 李学龙. 2017. 裂隙煤岩动态破裂行为与冲击失稳机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 李玉生. 1985. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业大学学报,14(3): 37-43.
- 李云鹏,张宏伟,朱志洁,等. 2018. 冲击危险煤层卸压钻孔安全参数研究[J]. 中国安全科学学报,28(11): 122-128.
- 刘金海,翟明华,郭信山,等. 2014. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[J]. 煤炭学报,39(2): 353-363.
- 陆菜平. 2008. 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.
- 牟宗龙,窦林名,巩思园,等. 2015. 煤矿井下冲击矿压分区分级预测方法:CN,CN103256073B[P]. 2013-08-21.
- 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 2019. 我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术,47(9): 1-40.
- 齐庆新,史元伟,刘天泉. 1997. 冲击地压黏滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报,22(2): 144-148.
- 苏振国. 2015. 胡家河煤矿特厚坚硬煤层煤柱区冲击矿压规律及防治研究[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- 夏永学,康立军,齐庆新,等. 2010. 基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J]. 煤炭学报,35(12): 2011-2016.
- 谢和平,高峰,鞠杨,等. 2015a. 深部开采的定量界定与分析[J]. 煤炭学报,40(1): 1-10.
- 谢和平,高峰,鞠杨. 2015b. 深部岩体力学研究及探索[J]. 岩石力学与工程学报,34(11): 2161-2178.
- 薛成春,曹安业,牛凤卫,等. 2021. 深部不规则孤岛煤柱区冲击地压机理及防治[J]. 采矿与安全工程学报,38(3): 479-486.
- 杨纯东,巩思园,马小平,等. 2014. 基于微震法的煤矿冲击危险性监测研究[J]. 采矿与安全工程学报,31(6): 863-868.
- 张宏伟,李云鹏,陈莹,等. 2017. 三硬条件下孤岛区域大直径钻孔防冲方案优化[J]. 安全与环境学报,17(5): 1823-1827.
- 张黎明,王在泉,张晓娟,等. 2009. 岩体动力失稳的折迭突变模型[J]. 岩土工程学报,31(4): 552-557.
- 张兆民,任文涛,刘志刚,等. 2021. 基于深孔注水方法的减冲技术研究及应用[J]. 煤炭技术,40(3): 107-109.
- 章梦涛. 1987. 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,6(3): 197-204.
- 邹德蕴,姜福兴. 2004. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报,19(2): 159-163.