

文章编号: 1673-3363-(2025)01-0194-09

矿震动载效应及冲击地压瞬态触发-连锁破坏机理

王桂峰¹, 陈烽¹, 李宏维¹, 曹安业¹, 石佳琦¹, 静涛¹,
窦林名¹, 温颖远², 李庚¹, 冯淦^{3,4}

(1. 中国矿业大学煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 中矿鼎北科技(徐州)有限公司,
江苏 徐州 221116; 4. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要 由于冲击地压机理复杂、影响因素众多, 到目前为止还未真正完全掌握其发生规律和发生机理。通过定量表征巷道围岩震动速度、应力状态和冲击破坏形态, 系统研究了矿震动载作用下的巷道围岩动力响应特征和冲击破坏规律, 建立了动静载瞬态触发-连锁破坏冲击模型, 提出了基于机器学习模型的巷道抗冲能力智能评估技术。研究表明: 矿震动载强度、其与巷道的距离、围岩自身静载应力、卸压工程及支护条件等均是影响巷道围岩发生冲击破坏的重要因素。动载强度较小时, 巷道震动速度和底板位移小, 未发生冲击破坏; 动载强度增大到一定值后, 巷道瞬间发生冲击破坏, 且冲击破坏程度随动载强度增大而升高。采动、构造、煤柱等引发的巷道自身静载应力集中会减小其抗动载能力, 相同动载作用下的巷道更容易发生冲击, 且水平构造应力的影响更大。当构造导致的水平应力增大至 1.5 倍时, 相同动载作用下的巷道由稳定转变为冲击破坏。围岩支护与卸压均会提高巷道冲击破坏的临界条件, 避免巷道在同样动载荷作用下发生冲击。基于机器学习巷道抗冲能力评估模型的样本误差满足正态分布规律, 表明模型评价指标选取合理, 能够较好地反映巷道动力响应特征, 对巷道震动速度和冲击情况预测的准确性高。研究成果在一定程度上促进了冲击地压机理研究, 并为冲击地压防控提供了理论基础。

关键词 深部开采; 矿震; 冲击地压; 动力响应; 冲击机理

中图分类号 P 631 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2023.0380

Tremor dynamic loading effects and the transient triggering-linkage failure rockburst mechanism

WANG Guifeng¹, CHEN Feng¹, LI Hongwei¹, CAO Anye¹, SHI Jiaqi¹, JING Tao¹,
DOU Linming¹, WEN Yingyuan², LI Geng¹, FENG Gan^{3,4}

(1. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 3. China Mining Dingbei Technology (Xuzhou) Co Ltd, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 4. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract The occurrence law and mechanism of rockburst have not yet been fully understood as they

收稿日期: 2023-09-06

责任编辑: 杜薇

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1314203, 2020YFB1314204); 山东能源科技计划重大项目(SNKJ2022A15); 国家自然科学基金项目(51504248, 52274098); 江苏省自然科学基金项目(BK20140194); 江苏省重点研发计划项目(BE2015040); 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(52227901)

作者简介: 王桂峰(1982—), 男, 江苏省徐州市人, 博士, 副研究员, 从事冲击地压方面的研究。

通信作者: 陈烽

E-mail: ts23020099p31@cumt.edu.cn

Tel: 18142657026

are complex and affected by multiple factors. By quantitatively characterizing the vibration velocity, stress state, and failure mode of roadways, the dynamic response characteristics and rockburst failure laws of roadways under tremor dynamic loads were systematically studied. On this basis, a transient triggering-linkage failure rockburst model was established, and the intelligent evaluation technology for the rockburst resistance capacity of roadway based on machine learning models was developed. The results suggest that dynamic load intensity, distance of dynamic load from roadways, static stress of surrounding rock, stress relief engineering, and roadway support are all important factors that determine whether the roadway surrounding rock can resist rockburst failure. When the dynamic load intensity is low, the roadway vibration speed and floor displacement are mild, and no rockburst failure occurs. After the dynamic load intensity rises to a certain value, rockburst failure will occur instantaneously, and the failure degree increases with the growth of dynamic loading strength. The static stress concentration of the roadway itself caused by mining activities, geological structures, and coal pillars would reduce its dynamic load resistance capacity, making it more prone to rockburst under the same dynamic load, and the influence of horizontal tectonic stress is even greater. When the horizontal tectonic stress increases by 1.5 times, the roadway starts to undergo rockburst failure under the same dynamic load. Roadway support and stress relief measures could both improve the critical condition for rockburst failure and contribute to avoiding rockburst under the same dynamic load. The sample errors of the rockburst resistance evaluation model based on machine learning models follow normal distribution, which indicates reasonableness of the selected evaluation indicators for the model. Additionally, this also means that the model can well reflect the dynamic response characteristics of the roadway, and is highly accurate in predicting the vibration speed of the roadway and whether it can resist rockburst failure. Achievements obtained in the paper will effectively promote the research on rockburst mechanism and provide a basic theory for rock burst prevention and control.

Key words deep mining; tremor; rockburst; dynamic response; rockburst mechanism

近年来,冲击地压灾害已成为制约煤矿安全高效生产的主要灾害形式之一,如何有效防治冲击地压灾害已成为保障煤矿安全生产的重要课题^[1]。自 2018 年以来,随着越来越多的矿井进入深部开采,冲击地压愈发严重,山东龙郓、吉林龙家堡、河北唐山、山东新巨龙、陕西胡家河等煤矿连续出现冲击地压事故,严重威胁我国煤炭资源的安全开采。

在早期的研究中,国内外学者从不同角度提出了一系列经典的冲击模型和理论,主要包括冲击倾向性理论、强度理论、刚度理论、能量理论、三准则理论和失稳理论等。因研究角度和方法存在差异,目前这些理论仍具有一定的局限性^[2-5]。由于冲击地压机理复杂、影响因素众多,到目前为止还未真正完全掌握其发生规律和发生机理,缺乏具有普遍意义的冲击地压模型与条件判据。该领域的研究至今仍是岩石力学和采矿工程中最困难的课题之一。

冲击地压的发生与应力环境(包括静载和动载应力)、支护和卸压程度等密切相关^[6]。当前,综合考虑多因素影响的巷道动力响应和诱冲效应,进而揭示巷道冲击发生机理的研究鲜少,缺乏能够反映动静载组合作用及冲击发生全过程的理论模型。

本文通过定量表征动静载叠加作用的巷道围岩震动速度、应力状态、冲击破坏形态,系统研究了多因素影响下的巷道围岩动力响应特征和冲击破坏规律,在定量揭示巷道动力响应演化规律的基础上,提出了动静载瞬态触发-连锁破坏冲击模型,从动静组合的角度解释了多因素影响的巷道冲击机制,建立了基于机器学习模型的巷道抗冲能力智能评估技术。研究成果在一定程度上促进了冲击地压机理研究,并为冲击地压防控提供了理论基础。

1 矿震和冲击地压发生过程

1.1 矿震和冲击地压的关系

矿震即煤岩体破裂(裂隙)导致的矿山地震。煤矿开采过程中必然会伴随着煤岩体破裂,从而产生很多形式的矿震(破裂样式和能量大小不同)。当前,很多矿井将 1×10^4 J 以下的矿震称为微震。矿震主要包括煤体内爆型(局部应力集中)、顶底板破断型和断层滑移型 3 种形式,如图 1 所示。

某矿中部区二段工作面回采前期发生过 10 余次能量大于 1×10^5 J 的强矿震,其中仅有 2 次诱发冲击地压,如图 2 所示。2012 年 6 月 26 日发生了 $4.19 \times$

10⁶ J 的强矿震,在临空侧轨道诱发了冲击地压,破坏巷道为 45 m;2012 年 10 月 15 日在向斜构造区连续发生 2 次强矿震,能量分别为 1.29×10⁵ 和 3.02×10⁵ J,第二次强矿震诱发实体煤机道冲击破坏 104 m。

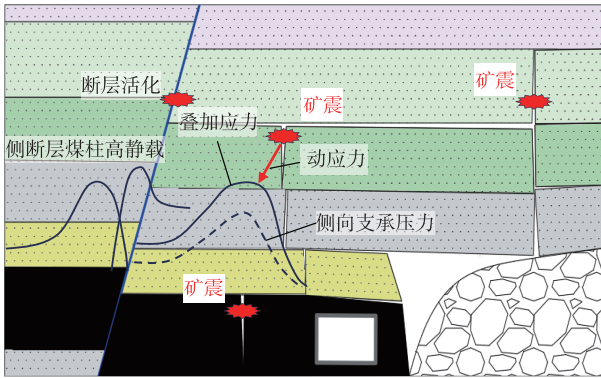


图 1 矿震类型和冲击地压

Fig. 1 Types of mining-induced tremors and rockburst

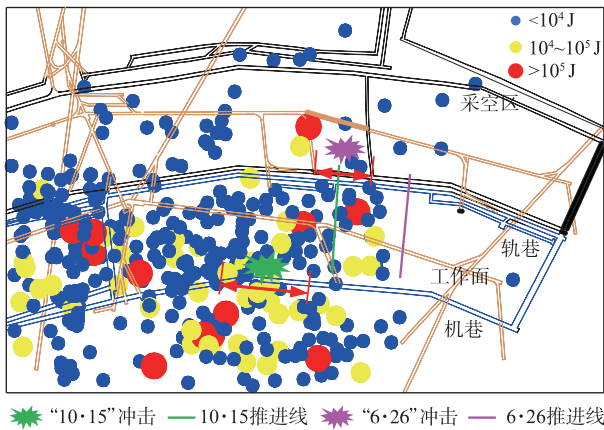


图 2 不同强度的矿震情况图

Fig. 2 Tremor occurrence with different intensities

由图 2 可知,仅有一小部分矿震能诱发冲击地压。矿震能量越大、距巷道越近越容易诱发冲击地压,但巷道是否发生冲击不仅与矿震有关,还取决于巷道周边自身应力水平、支护条件和卸压程度等。这些因素均会改变巷道的抗震能力,即改变巷道冲击破坏的临界条件。

煤矿开采过程中的动载(如顶板破断、断层错动、煤炮等)与采掘空间围岩高静载叠加后诱发围岩结构失稳破坏是大部分冲击发生的主要原因。煤岩体储能特性是冲击破坏的内因和动力源泉(为冲击提供持续破坏所需的能量)。冲击破坏的直接原因就是巷道周边岩体存储有瞬间使围岩破裂、抛出的动力源,即应力和能量积聚。

冲击地压的复杂性在于矿震动载特征的多样性,如不同震源位置、破裂形式与尺度、震动波传播

衰减幅度等。巷道周边自身应力集中(静载)的影响因素较多,如采掘应力、坚硬顶板、煤柱、断层、褶曲和隐伏构造等均会导致局部区域应力跃升,且往往出现多因素耦合现象,难以评估其应力大小。

1.2 冲击地压发生过程相似模拟试验

本文利用自主研发的动静组合加载相似模拟试验系统 D_SDCL Simulation 30 对不同强度矿震诱发冲击地压的过程进行模拟^[7],如图 3 所示。

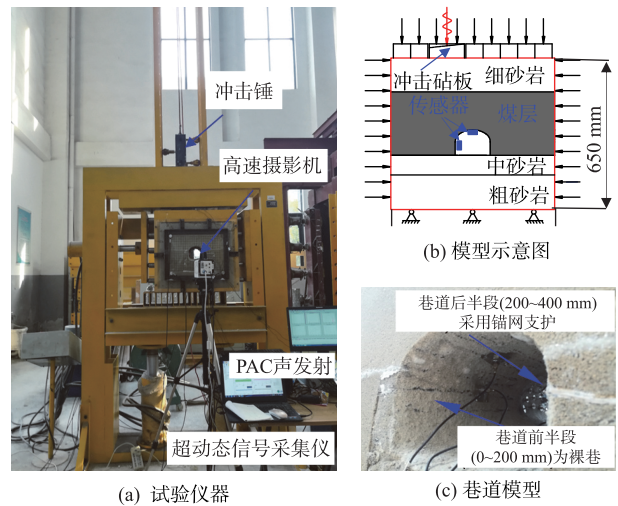


图 3 巷道冲击地压发生的相似模拟试验

Fig. 3 Similar simulation tests for rockburst occurrence

试验采用冲击锤来模拟矿震动载,通过调整冲击锤的高度模拟不同动载强度。模型上方放置的倾斜砧板将冲击锤施加的动载荷分为垂直和水平载荷。DH5960 超动态信号采集仪通过布置在巷道帮部及顶板的传感器采集震动加速度数据,研究巷道在动载作用下的响应特征。模型中巷道前段(0~200 mm)为裸巷,巷道后段(200~400 mm)采用锚网支护。由此,计算出落锤不同高度下产生的动载能量分别为 39.2,78.4,117.6 和 156.8 J。

试验过程中不同动载强度时巷道的震动加速度如图 4 所示。当施加动载能量为 78.4 J 时,巷道围岩呈现明显震荡而后衰减的特征,竖直方向裸巷震动加速度明显高于锚固巷道;随着动载能量逐步增大,裸巷和锚固巷道围岩震动加速度明显增大,但此时巷道仍未发生明显破坏;当动载能量达到 156.8 J 时,裸巷出现突发性动力破坏,锚固巷道仍未出现明显破坏,此时裸巷加速度曲线出现突变。试验结果表明:巷道围岩存在抵抗矿震动载的临界值,仅动载能量达到临界值时,巷道才会发生突发性冲击破坏;支护可以改变巷道冲击临界条件,显著提高巷道的抗震防冲能力。

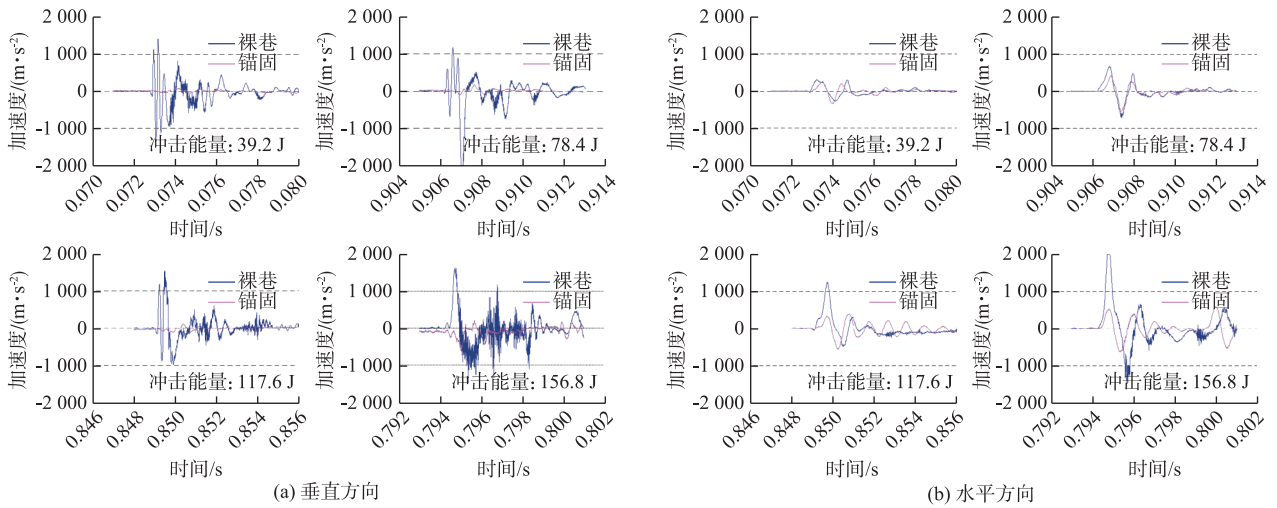


图 4 不同动载强度时巷道的震动加速度

Fig. 4 Vibration acceleration of roadways under different dynamic loads

2 动静载对巷道动力响应及冲击的影响规律

2.1 矿震动载强度的影响

以某煤矿 8514 工作面为工程背景建立数值计算仿真模型。8514 运输巷设计断面为直墙圆弧拱形巷

道,断面净宽度为 5.2 m,净高度为 3.6 m,采用锚网索支护。模拟采用的煤岩物理力学参数如表 1 所列。图 5 分别为不同动载作用下的巷道围岩水平应力分布和垂直应力分布情况。随着动载强度的增加,巷道底板应力集中程度逐渐增大,动载强度由 5 MPa 提高至 7 MPa 时,巷道由稳定转为突发冲击破坏。

表 1 UDEC 数值模型岩层块体物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of strata in UDEC model

岩层名称	材料参数			接触参数		
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	抗拉强度/MPa
泥质粉砂岩	2 590	5.6	4.2	8.0	38	1.54
粉砂岩	2 600	5.6	4.2	8.0	38	1.54
泥岩	2 540	3.5	1.3	1.7	32	2.97
5#煤	1 490	3.0	0.7	1.4	30	10.00

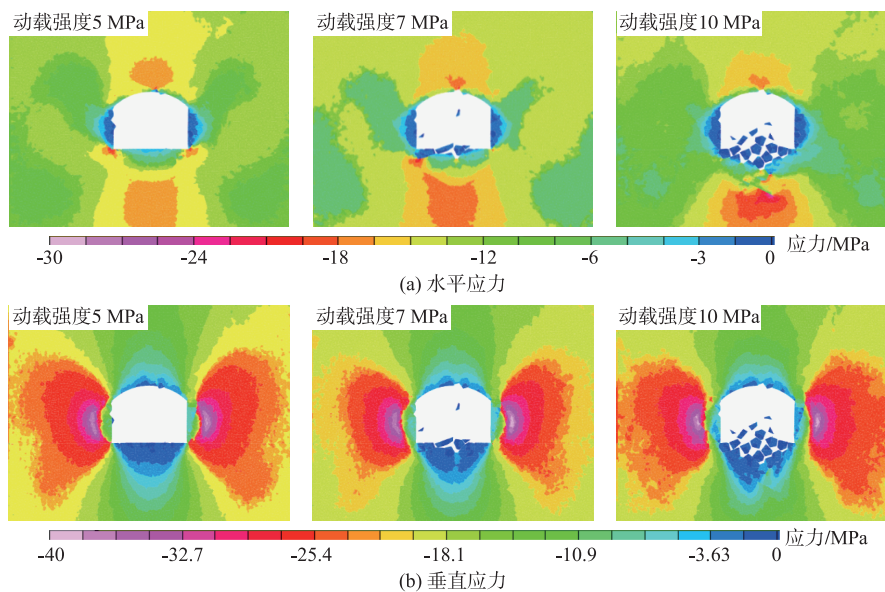


图 5 不同动载强度时应力分布云图

Fig. 5 Stress evolution of roadways under different dynamic stresses

图 6 为不同动载强度下巷道围岩的震动速度曲线。当 5 MPa 动载应力波作用时,巷道位移无明显变化,但出现明显的震动,其震动速度曲线呈现连续震荡并逐渐衰减的特征。随着动载强度增大,巷道围岩震动速度逐渐增大。当瞬间施加动载强度

达到 7 MPa 时,巷道发生突发性冲击破坏;当瞬间施加动载强度达到 10 MPa 时,巷道产生的冲击破坏更为剧烈。因此,巷道是否发生冲击及其破坏程度与动载强度呈正相关关系,这和井下矿震能量越大越容易诱发冲击地压的现象是一致的。

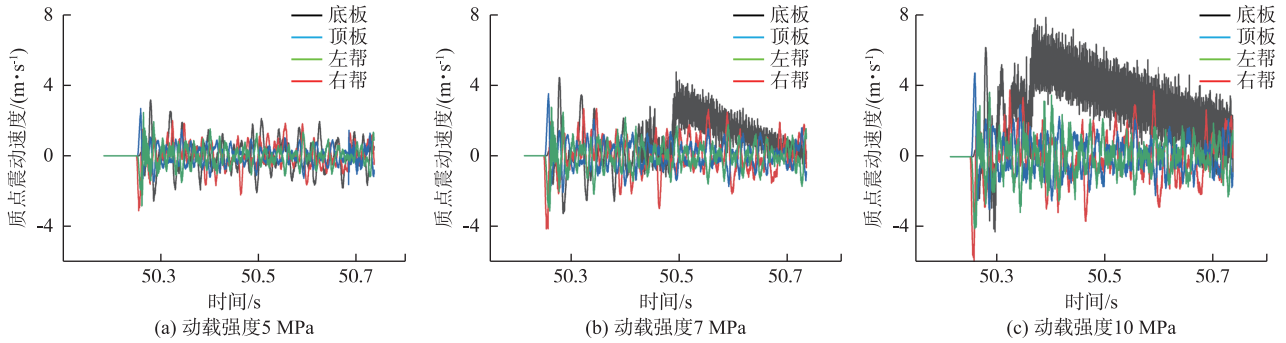


图 6 不同动载强度下巷道围岩的震动速度

Fig. 6 Vibration velocities of roadways under different dynamic stresses

2.2 矿震动载传播距离的影响

动载应力波形成后,应力波传播衰减明显^[8-9],不同距离动载源作用下的巷道响应特征如图 7 所示。动载源距巷道顶部 30 m 时,巷道未发生破坏。

随着动载源距巷道顶部距离减小至 20 m,巷道底板开始出现冲击破坏。当动载源距巷道顶部距离减小至 10 m 时,巷道破坏程度更为剧烈。因此,巷道冲击破坏的程度和动载传播距离呈负相关关系。

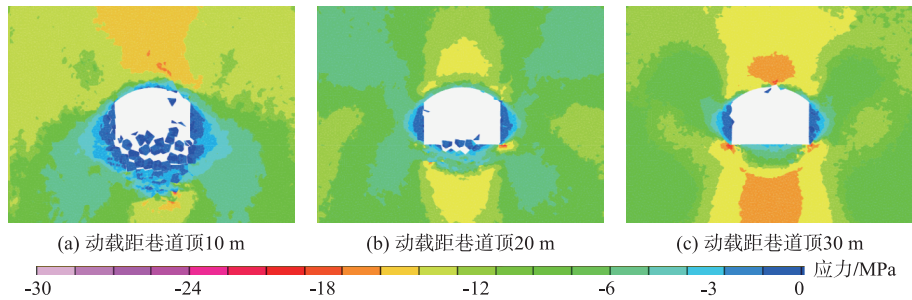


图 7 不同动载距离时巷道围岩水平应力云图

Fig. 7 Horizontal stress of roadway under dynamic stresses at different distances

2.3 围岩静载应力集中程度的影响

模拟不同构造应力时巷道围岩动力响应特征,如图 8 所示。

正常地应力条件下,6 MPa 动载作用的巷道未发生冲击破坏。当水平应力增大至 1.5 倍时,同样动载作用下的巷道发生冲击破坏,这说明高地应力容易引发巷道发生冲击地压。由采动、煤柱和构造等因素造成巷道自身应力集中程度较大时,巷道在同样动载作用下更容易发生冲击^[10]。

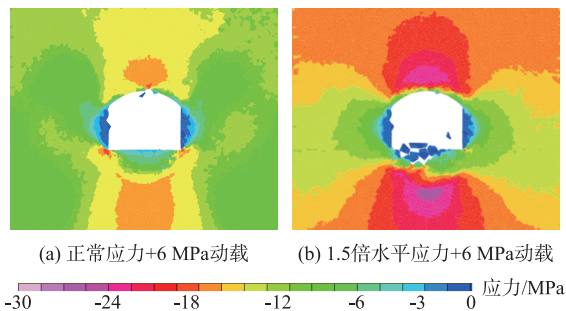


图 8 动载下不同构造应力时巷道围岩水平应力云图

Fig. 8 Horizontal stresses of roadways with different tectonic stresses under dynamic loads

3 支护和卸压对巷道动力响应及冲击的影响

3.1 卸压对冲击临界条件的影响

卸压钻孔可以改变巷道周边岩体结构及其力学状态,进而影响巷道围岩是否发生冲击地压^[11-12]。图 9 和图 10 为卸压实施前后巷道围岩动力响应特征。无卸压时,在 7 MPa 的动载强度作用

下,巷道底板发生了明显破坏。在帮部和底板采取大直径钻孔卸压措施后,巷道周边(特别是底板)应力明显降低。图 9(b)和图 10(b)中,同样动载作用下,巷道不再发生冲击。因此,通过围岩卸压,可以改变动载作用下巷道冲击的临界条件,提高巷道的抗震能力,避免巷道发生冲击。

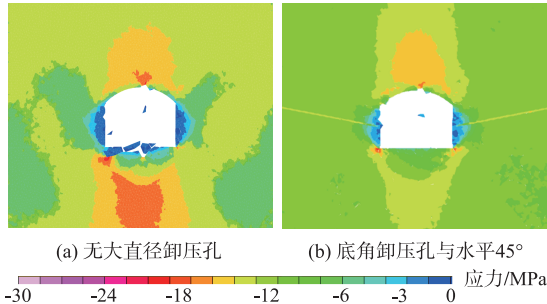


图 9 动载下卸压工程前后巷道围岩水平应力云图
Fig. 9 Horizontal stresses of roadways with and without stress-relief measures under dynamic loads

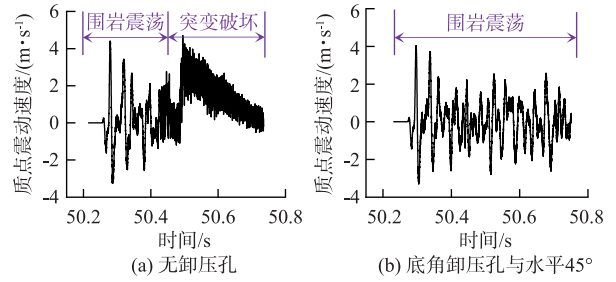


图 10 动载下卸压工程前后巷道底板震动速度变化
Fig. 10 Vibration velocity of roadways with and without stress-relief measures under dynamic loads

3.2 支护对冲击临界条件的影响

现场工程实践表明,合理的支护可以保持围岩完整性,改善围岩应力分布,降低冲击发生的可能性^[13-15]。锚网支护是现场普遍采用的一种支护方式,由锚网构件和围岩共同承载。不同底角锚杆的巷道围岩动力响应特征如图 11、12 所示。

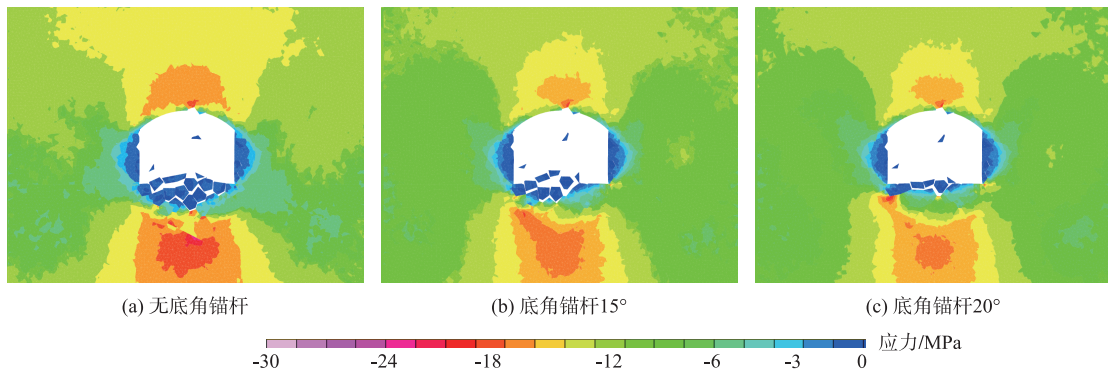


图 11 动载下不同底角锚杆的巷道围岩水平应力
Fig. 11 Horizontal stresses of roadways supported by bottom bolts with different angles

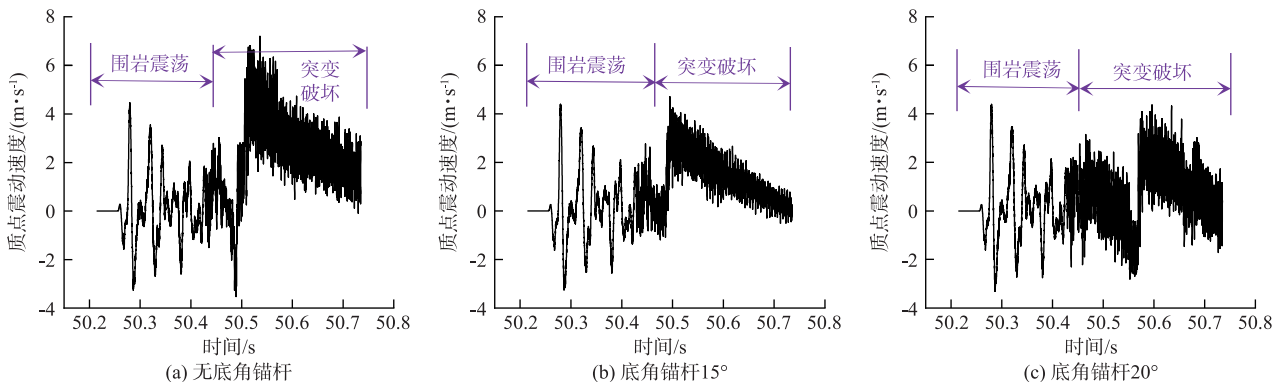


图 12 不同底角锚杆的巷道底板震动速度
Fig. 12 Vibration velocity of roadways equipped by bottom bolts with different angles

施加支护前,动载强度为 8 MPa 时,巷道周边应力集中程度高,巷道发生明显冲击破坏。施加锚杆支护后,巷道冲击破坏程度显著减小,锚杆底

角的变化也会改变巷道周边的应力和冲击破坏情况。因此,合理支护可以有效地提高巷道抗震防冲能力,这比冲击时减小破坏烈度更重要。

4 动静载瞬态触发-连锁破坏冲击模型

结合上文巷道围岩动载效应及冲击破坏规律,参考现有的岩爆层裂屈曲模型,建立了冲击地压瞬态触发-连锁破坏模型。将巷道围岩层裂视为岩板结构,依据突变理论,巷道围岩系统的不稳定性取决于势函数尖点方程局部极小值的变化。依据薄板理论及岩板受力情况,四边简支层裂板总势能^[16]为:

$$V = \frac{\pi^6 D}{16 a^5} A^4 + \left(\frac{\pi^4 D}{4 a^3} - \frac{\pi^2 N_x}{4 a} \right) A^2 - \frac{2 q a}{\pi} A \quad (1)$$

式中: A 为岩板挠度最大值, mm; D 为层裂板的弯曲刚度; a 为煤壁层裂岩板高度, m; N_x 为煤壁层裂岩板在竖直方向上的受力, 取决于静载与动载的叠加强度, N ; q 为岩板间传递力(垂直煤壁自由面), N 。

将式(1)中右边的各项分别简化为式(2):

$$\begin{cases} x = \left(\frac{\pi^6 D}{4 a^5} \right)^{\frac{1}{4}} A \\ u = 2 \left(\frac{\pi^4 D}{4 a^3} - \frac{\pi^2 N_x}{4 a} \right) \left(\frac{\pi^6 D}{16 a^5} \right)^{-\frac{1}{2}} \\ v = - \frac{2 q a}{\pi} \left(\frac{\pi^6 D}{4 a^5} \right)^{-\frac{1}{4}} \end{cases} \quad (2)$$

只有当 $u \leq 0$ 时, 系统才能跨越分叉集发生突变。经推算, 系统状态发生突变的必要条件为 $N_x \geq$

$$\frac{\pi^2 D}{a^2}。$$

本文建立了动静载瞬态触发-连锁破坏冲击模型, 如图 13 所示。具体原理如下:

1) 瞬间施加矿震动载导致峰值应力区超出强度极限时, 局部岩板首次破裂, 同时释放的能量以瞬间冲击载荷的形式向外传递。对巷道而言, 冲击载荷由内向外传递至巷道表面[图 13(b)], 表现为巷道附近岩板在冲击载荷的作用下, 受力后挠度由内向外依次增加。

2) 巷道表层岩板强度低, 当冲击载荷引起其破断失稳时[图 13(c)], 为内部岩体提供连续变形破坏的空间。巷道围岩在瞬间由外到内连续向二向和单向应力转变, 内部岩板平衡状态被打破, 引发连续失稳破坏[图 13(d)], 岩体积聚的大量变形能持续转变为动力破坏所需的能量, 造成剧烈的冲击地压灾害。

3) 当冲击载荷不足以引起巷道表层岩板失稳破断时, 瞬态冲击载荷由内向外传播后, 岩体结构仍保持稳定, 不会出现冲击显现, 局部岩板的破裂表现为煤炮或矿震。该模型较好地解释了动静载组合作用下巷道围岩从动载输入触发、瞬态冲击载荷由内向外传递、围岩连锁由外向内失稳、积蓄能量连锁释放的整个冲击发生过程。

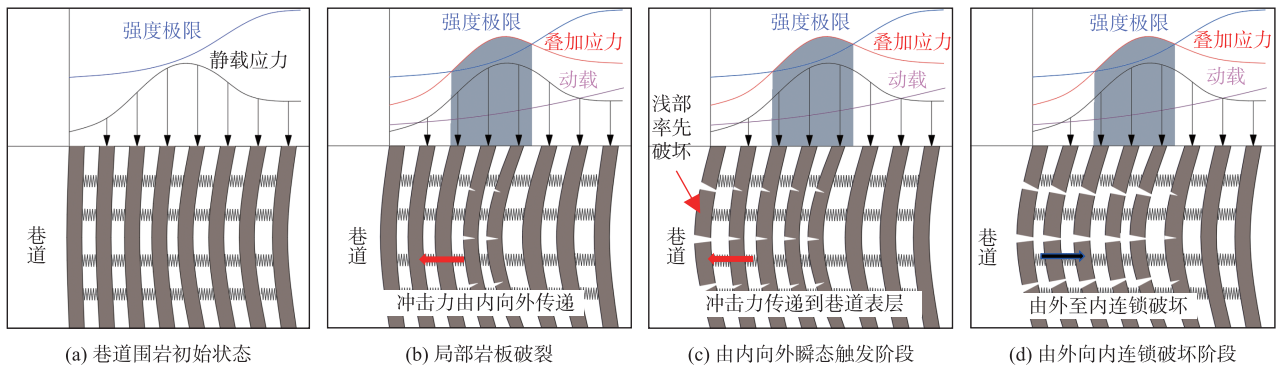


图 13 动静载瞬态触发-连锁破坏冲击模型

Fig. 13 Linkage buckling-breaking rockburst principle under coupled dynamic and static loads

5 巷道抗冲能力智能评估技术

5.1 机器学习模型构建

冲击地压影响因素众多, 很难对不同地质、开采条件的矿井建立统一的模型。因此, 本文选取特定工程背景下的巷道作为研究对象, 即在煤岩力学性质、岩层结构、巷道尺寸等相同的条件下, 将垂直应力、水平应力、动载强度、动载距离、帮部锚杆长度、底角锚杆长度、底角锚杆角度、底板最

大速度、是否瞬间破坏等作为评价指标, 利用数值模拟得到上述不同评价指标下巷道的震动速度及冲击破坏情况(共 66 组模拟结果), 结合机器学习建立巷道抗冲能力评估模型。

基于粒子群算法优化的 BP 神经网络模型建立不同应力、支护与底板最大速度之间的关系模型, 运用基于遗传算法(GA-SVM)优化支持向量机模型判断巷道围岩是否会发生破坏。机器学习模型原理如图 14 所示。

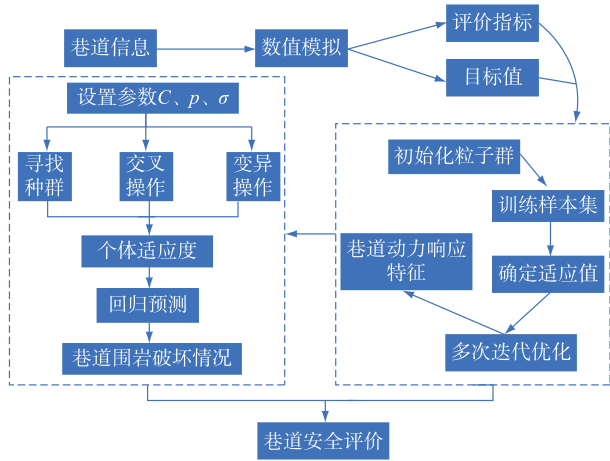


图 14 模型原理图

Fig. 14 Model schematic diagram

5.2 巷道抗冲能力评估模型预测结果分析

图 15 为底板震动速度预测值与模拟值的对比

情况,图 16 为预测模型误差分析结果。由图 16 可知, $R = 0.936 13$, 样本误差满足正态分布规律,中心误差为 $-0.032 92$,说明底板最大震动速度预测准确性为 97.8% 。这表明模型评价指标选取合理,能够较好地体现巷道动力响应的内在规律。

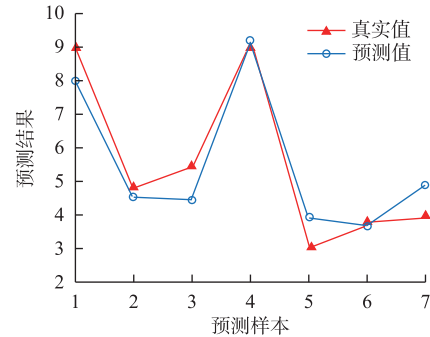
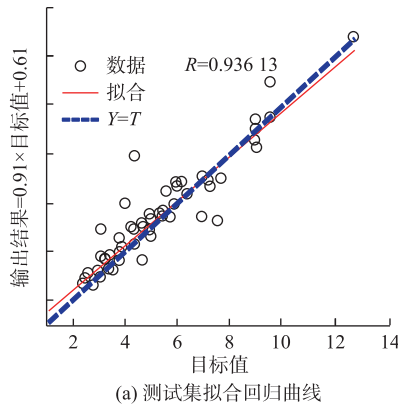
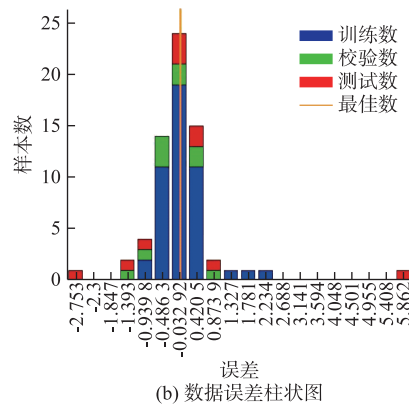


图 15 底板震动速度预测对比曲线

Fig. 15 Comparison curves between predicted and true vibration speeds



(a) 测试集拟合回归曲线



(b) 数据误差柱状图

图 16 预测模型误差分析

Fig. 16 Error analysis of the prediction model

运用 GA-SVM 神经网络模型判断巷道围岩是否会发生破坏,如图 17 所示。

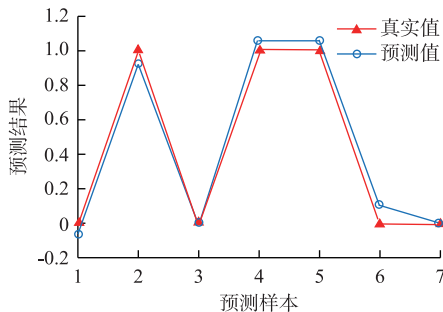


图 17 巷道冲击状态预测和真实情况的对比曲线

Fig. 17 Comparison curves between predicted and true rockburst situation

将巷道是否被破坏作为目标值,分别定为 1 和 0,预测值大于 0.5 表明巷道被破坏,预测值小于

0.5 表明巷道未被破坏。对比数值模拟结果发现,预测巷道破坏情况与实际情况较为相符。

6 结论

1) 矿震动载强度、距离以及巷道围岩静载应力、卸压、支护等都是影响巷道围岩是否会发生冲击破坏的重要因素。这些因素均会改变巷道的抗震能力,即改变巷道冲击破坏的临界条件。

2) 巷道围岩存在抵抗矿震动载的临界值,只有动载强度达到临界值时,巷道才会发生突发性冲击破坏;高应力集中区的巷道冲击临界条件会降低,同样动载作用下更容易发生冲击;合理的支护、卸压可以改变巷道在动载作用下冲击破坏的临界条件,提高巷道抗震能力,避免巷道发生冲击。

3) 考虑不同动载应力、静载应力、支护等评价

指标的巷道抗冲能力评估模型对围岩震动速度的预测准确性为 97.8%, 预测巷道破坏与实际情况较为相符, 表明模型能较好地体现巷道动力响应的内在规律。

参考文献:

- [1] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152-171. DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 王兴荣, 陈晓平, 苟尚培. 从不稳定能量触发机制探讨突发性灾害[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(1): 11-15. WANG Xingrong, CHEN Xiaoping, XUN Shangpei. Discussion on sudden disaster based on trigger mechanism of unstable energy [J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7(1): 11-15.
- [3] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 基于能量理论的冲击地压细观过程研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 474-480. CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. On the mesoscopic process rock burst based on the dynamic theory [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 474-480.
- [4] MIAO S J, CAI M F, GUO Q F, et al. Rock burst prediction based on in-situ stress and energy accumulation theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83: 86-94.
- [5] 潘岳. 关于“岩体动力失稳的折迭突变模型”的讨论[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 158-160. PAN Yue. Discussion on “fold catastrophe model of rock dynamic destabilization” [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 158-160.
- [6] 王桂峰, 刘阳, 曹安业, 等. 冲击地压的三参量能量致冲准则及多场监测预警和动态防治技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(5): 895-901. WANG Guifeng, LIU Yang, CAO Anye, et al. Rock burst energy criterion with three parameters and multi-field monitoring, early warning, and dynamic control and prevention [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(5): 895-901.
- [7] WANG G F, LI G, DOU L M, et al. Applicability of energy-absorbing support system for rockburst prevention in underground roadways [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104396.
- [8] MANOUCHEHRAN A, CAI M. Simulation of unstable rock failure under unloading conditions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(1): 22-34.
- [9] 曹安业, 陈凡, 刘耀琪, 等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 722-733. CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 722-733.
- [10] WANG G F, GONG S Y, LI Z L, et al. Evolution of stress concentration and energy release before rock bursts: two case studies from Xing'an coal mine, He-gang, China [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(8): 3393-3401.
- [11] 潘俊锋, 马宏源, 贺海鸿, 等. 煤层防冲卸压钻孔动载响应规律及其极限性[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 137-149. PAN Junfeng, MA Hongyuan, HE Haihong, et al. Dynamic load response law and limit of pressure relief drilling for coal seam prevention and control of rock burst [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 137-149.
- [12] 潘立友, 张立俊, 刘先贵. 冲击地压预测与防治实用技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [13] HUA A Z, YOU M Q. Rock failure due to energy release during unloading and application to underground rockburst control[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 241-246.
- [14] 王正义, 窦林名, 王桂峰, 等. 锚固巷道围岩结构动态响应规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1132-1140. WANG Zhengyi, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Research on dynamic response of anchoring roadway surrounding rock structure [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1132-1140.
- [15] 王爱文, 范德威, 潘一山, 等. 膨胀-摩擦式吸能防冲锚索及其力学特性[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 695-710. WANG Aiwen, FAN Dewei, PAN Yishan, et al. Expansion-friction energy-absorption anti-impact cable and its mechanical characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 695-710.
- [16] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 洞室层裂屈曲岩爆的突变模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 311-316. ZUO Yujun, LI Xibing, ZHAO Guoyan. A catastrophe model for underground chamber rock burst under lamination spallation bucking [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2005, 36(2): 311-316.