

文章编号：1673-3363-(2015)05-0741-07

新型加固结构对深部巷道动力扰动 缓冲效应的数值模拟分析

魏明尧^{1,2}, 王恩元², 刘晓斐²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国矿业大学安全工程学院, 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要 依据应力波理论分析了不同波阻抗介质分界面导致应力波衰减的特性, 并建立了能量衰减率与波阻抗比之间的理论关系。基于应力波的这种衰减规律, 提出一种新型加强支护结构——加固圈, 即通过在巷道围岩内部的环形范围内加固岩体强度, 在围绕巷道岩体内形成高强度的环形加固结构。此结构不仅增强了围岩整体强度, 而且加固圈的存在能够明显衰减应力波能量, 降低对巷道的破坏作用。为进一步验证本结构动力学特征, 采用 FLAC^{3D} 软件建立了相应的数值模型, 对比分析了巷道未设置和设置加固圈结构 2 种情况下受动载扰动后的破坏情况, 分别检测了应力波在围岩内的能量衰减特征。结果表明: 应力波能量在经过加固圈后发生明显减弱, 对巷道造成的破坏作用也降低。理论分析和数值模拟结果同时验证了加固圈结构具有加强支护和削弱动载扰动的双重效果, 可以有效地提高围岩的稳定性, 降低深部巷道破坏和变形, 这为深部围岩控制技术提供了新思路。

关键词 深部巷道; 加固圈; 波阻抗; 能量衰减

中图分类号 TD 32 文献标志码 A DOI 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.007

Numerical simulation and analysis of buffering effect of dynamic disturbance of new reinforcement structure on deep roadway

WEI Mingyao^{1,2}, WANG Enyuan², LIU Xiaofei²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Faculty of Safety Engineering, State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract This paper has conducted an analysis of the attenuation characteristic of the stress waves when propagating in different wave impedance interfaces between media based on stress wave theory. Subsequently, the theoretical relationship between energy attenuation and wave impedance ratio has been established. Based on the results of the analysis, the paper has put forward a new type of reinforced support structure, namely, the reinforced annular region. Specific reinforcement methods for the annular region are adopted within the roadway surrounding rock to reinforce the rock mass strength and then

收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474204, 51504235); 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放研究基金项目(13KF05); 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室开放课题项目(2011DA105287-FW201412)

作者简介: 魏明尧(1984—), 男, 江苏省徐州市人, 博士, 助理研究员, 从事非常规天然气开发方面的研究。

E-mail: mywei@whrsm.ac.cn

Tel: 0516-83884695

form the high-intensity annular reinforcing structure. This structure has not only enhanced the overall strength of the surrounding rock, but also significantly attenuated the energy of the stress wave in the reinforced annular region. Thus, the damaging effect on the roadway has been reduced. In order to further verify the results, a numerical model has been built using the software FLAC^{3D} for a comparative analysis of the damage situations via dynamic disturbance, with and without the setting of the reinforced circle on the roadway, and the energy attenuation characteristics of the stress wave has also been tested. The results have indicated that the stress wave shows clear energy attenuation with the reinforced circle, and the damaging effect on the roadway is reduced. The theoretical analysis and numerical simulation results have both verified that the reinforced structure effectively can improve the stability of the surrounding rock and reduce roadway deformation and damage through its dual function of strengthening the support and attenuating the dynamic disturbance. These features have presented potential applications for deep surrounding rock control technology.

Key words deep roadway; reinforced annular region; wave impedance; energy attenuation

冲击地压是采矿过程中的主要灾害之一,造成严重的人员伤亡事故和财产损失。目前开挖深度普遍已经达到 1 000 m,而煤炭资源埋深在 1 000~2 000 m 的约占保有储量的一半以上(53.17%),其他金属矿山的开采也在向深部发展,如金川镍矿、红透山铜矿等开采深度已超过千米^[1]。进入深部开采后,大多数巷道在承受高地应力的同时,还要经受原有采空区或原有巷道的应力影响,使得已经处于应力集中影响区域的巷道受到二次应力波及和影响,造成较为恶劣的应力环境,因此深部巷道出现大变形、支护难度大等问题^[2]。

大量学者对冲击地压机理进行了研究,认为冲击地压损伤机理可以归为 3 类^[3]:裂隙造成的膨胀、震动能量转移造成的岩块弹射、震动造成的岩石冒落。A. Yeryomenko 等^[4]研究了开采前期和开采过程中地质扰动对冲击地压危险的影响。康红普^[5]分析了采动应力场与支护应力场的关系,认为采动应力越强烈,对支护系统的要求也越高,动压巷道支护体受力要明显大于静压巷道,需要采用高强度、高刚度且具有足够延伸率的支护系统。吕祥锋等^[6]采用相似材料试验和数值模拟研究了巷道与支护相互作用下的巷道冲击破坏机制,认为锚杆支护适用于弱冲击地压巷道,强冲击巷道必须采取加固措施。侯朝炯等^[7]提出的“围岩强度强化理论”认为通过锚杆支护相当于对巷道围岩施加部分围压,可以增强巷道围岩的峰值强度和残余强度,从而控制巷道稳定。袁亮等^[8]采用现场大规模地质调查与试验检测、实验室岩石力学试验、数值模拟和理论分析等综合研究方法,系统地研究了淮南矿区深部岩巷围岩的复杂赋存条件,提出了具有针对性的围岩

稳定性控制措施体系。数值模拟方法是目前研究动力灾害机理的有效方法,Huang 等^[9]用 RFPFA 动力模块分析了动力扰动导致冲击地压发生的机理,并以水电站作为例子进行了现场分析。魏明尧等^[10]采用 FLAC^{3D} 软件动力模块模拟了动力扰动导致顶板断裂的过程,分析了动力扰动诱发冲击地压发生的作用。陈国祥、徐学锋等^[11-12]采用数值模拟手段分别对动力扰动诱发的开采工作面巷道内帮和巷道底板冲击地压机理进行了模拟分析,认为动态应力波造成煤体内产生高应力区,引起层裂破坏。高明仕等^[13]根据巷道冲击震动破坏的原因和机理,建立了冲击矿压巷道围岩稳定性控制的强弱强(3S)结构力学模型,分析了该力学模型防冲抗震机理。贺虎等^[14]在冲击巷道“强弱强”模型基础上,研究了巷道支护体“强结构”防冲机理、型式和要求,认为高强预应力锚杆能够降低冲击地压发生次数。这种支护结构利用了应力波在不同介质中传播会发生反射和透射的特征,通过设置弱结构层达到降低冲击波能量的目的。大量研究成果已明确了动力扰动是导致巷道维护困难和诱发深部巷道冲击地压的重要原因^[2-3,6],而如何消除或减小动力影响是深部巷道灾害防治的关键。

为了使支护结构更易操作和施工,保证巷道整体稳定,并减少支护成本,依据应力波在不同波阻抗介质分界面能量衰减的特性,提出在巷道围岩中设置加固圈,以此提高围岩稳定性和抵御动载扰动的影 响。首先理论分析了应力波穿越加固结构造成的能量衰减关系,并采用数值模拟手段进行模型分析。通过在数值模型中相应区域设置较大的力学参数模拟加固结构,并在一侧施加应力波产生动力扰

动，模拟含加固圈结构的巷道在动载作用下的响应。同时对比分析未设置和设置加固圈后巷道在动力扰动下的变形和破坏特征，得到应力波能量通过加固圈结构的衰减规律，其模拟结果与理论分析结果完全符合。

1 应力波能量传播规律

研究发现，应力波在岩土介质中传播时，随着传播距离的增加，应力波峰值逐渐减小，即应力波峰值与传播距离成反比关系^[15-17]；同时大量学者^[18]认为应力波的衰减取决于岩体中裂隙的特性和充填物的波阻抗。在一维情况下，假定弹性波从一种介质传播到另一种介质，传播方向垂直于分界面，且 2 种介质在界面处始终保持接触（既能承压又能承拉而不分离），则得出入射应力波经过界面后的透射应力波峰值和反射应力波峰值^[19]：

$$\sigma_T = \frac{2}{1+\lambda} \sigma_0, \sigma_R = \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \sigma_0 \quad (1)$$

其中 $\lambda = \frac{\rho_0 C_0}{\rho_1 C_1}$ (2)

式中： σ_0 ， σ_T 和 σ_R 分别为入射应力波、透射应力波和反射应力波的应力峰值； ρ_0 ， C_0 ， ρ_1 和 C_1 分别为第 1 种和第 2 种介质的密度和应力波波速。可以看出透射和反射应力波峰值由 2 种介质的波阻抗比 λ 所确定。

当 $\lambda < 1$ ，即 $\rho_0 C_0 < \rho_1 C_1$ 时，透射波的应力幅值大于入射波，相当于应力波由所谓的“软”材料传入“硬”材料的情况；当 $\lambda > 1$ ，即 $\rho_0 C_0 > \rho_1 C_1$ 时，透射波应力幅值小于入射波，相当于应力波由所谓的“硬”材料传入“软”材料的情况。

假如峰值强度为 σ_0 的弹性波由介质 M_1 正入射到 M_2 ，由式(1)可知，透射波能量 w_1 与入射波能量 w_0 之比为

$$\frac{w_1}{w_0} = \frac{4}{(1+\lambda)^2} \frac{E_0}{E_1} \quad (3)$$

式中： E_0 和 E_1 分别为介质 M_1 和 M_2 的弹性模量； λ 为介质 M_1 与 M_2 的波阻抗比值。

应力波穿越含夹层介质时，共经过 2 次分界面，如忽略夹层内的能量消耗，由式(3)可得出经过 2 次分界面后透射波的能量 w_2 与初始能量 w_0 之比为

$$\frac{w_2}{w_0} = \frac{w_1}{w_0} \frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{\sigma_1^2 E_0}{\sigma_0^2 E_1} \right) \left(\frac{\sigma_2^2 E_1}{\sigma_1^2 E_0} \right) = \frac{16}{(1+\lambda)^2 \left(1 + \frac{1}{\lambda} \right)^2} \quad (4)$$

可见，线弹性波的能量透反射也是由相邻介质

的波阻抗比决定的，而与入射波的强度无关。同时可以看出无论 λ 取任何值，透射波能量总是小于或等于初始能量。这说明任何强度的夹层都能起到反射能量的作用。图 1 为应力波透过加强层后透射能量与入射能量的比值随 λ 的变换曲线。可以看出在中间夹层强度高于两侧介质，即波阻抗比值 $\lambda < 1$ 时，随着波阻抗比减小，透射波能量亦减小。

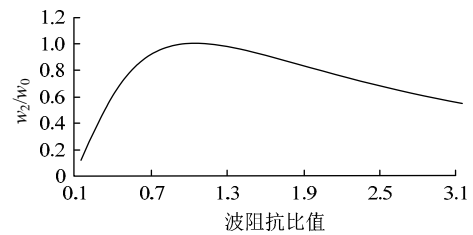


图 1 弹性波透射和入射波能量比值与波阻抗关系曲线

Fig.1 Relation curve between the energy ratio of elastic wave to the incident wave and wave impedance

因此基于上述理论分析认为，只要存在不同波阻抗介质分界面就可以降低应力波强度。基于应力波的这种特性，提出一种新型巷道围岩加固结构，即加固圈结构。这种新型结构的特点是：在常规支护系统基础上，在围岩内部一定范围内采取注浆等方法加固围岩，使巷道外围形成环形的加强保护结构，其结构示意图如图 2 所示。

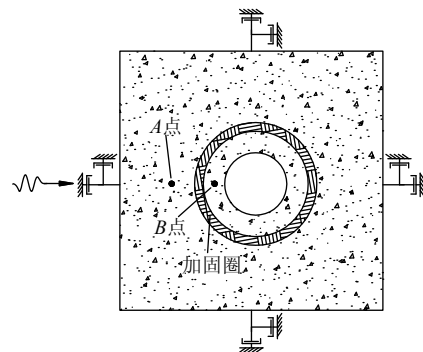


图 2 加固圈分布示意图

Fig.2 Reinforcement ring distribution diagram

2 数值模型建立

采用 FLAC^{3D} 软件对应力波扰动下的巷道动态破坏过程进行模拟。建立的几何模型尺寸为 40 m×40 m×40 m，总单元个数为 27 900。假定巷道位于岩层，断面为圆形，直径为 4 m，埋深为 800 m，围岩加固圈分布为环形，加固圈宽度 1 m，距离巷道壁 6 m，如图 2 所示，其中 A 点和 B 点为数据监测点。模型中忽略了支护结构影响，因此未设置锚杆等支护单元。施加的应力波取荷载波形中谐波的

一段^[20], 峰值强度取 50 MPa, 施加位置为模型左侧边界。模型力学阻尼选用瑞利阻尼形式, 其中最小临界阻尼比为 0.005, 最小中心频率为 10 Hz, 边界条件设置为静态边界。

由文献[21]可知应力波波速 $C = \sqrt{d\sigma / \rho d\varepsilon}$, 在弹性介质中, 波阻抗与材料的体积模量 K 和剪切模量 G 有关, 由于弹性模量 $E = 9GK / (3K + G)$, 因此得到介质波阻抗为

$$C\rho = \rho\sqrt{d\sigma / \rho d\varepsilon} = \sqrt{\frac{9GK}{3K+G}}\rho \quad (5)$$

整合式(4), (5), 可得到应力波能量衰减与夹层介质的力学参数之间的关系

$$\frac{w_2}{w_0} = \frac{16}{\left(1 + \sqrt{\frac{G_0 K_0 (3K_1 + G_1)}{G_1 K_1 (3K_0 + G_0)}}\right)^2 \left(1 + \sqrt{\frac{G_1 K_1 (3K_0 + G_0)}{G_0 K_0 (3K_1 + G_1)}}\right)^2} \quad (6)$$

式中: 下标 0 为原岩力学参数; 下标 1 为加固圈力学参数。

为了使加固圈具有较高的波阻抗, 由式(5)知, 在模型中可设定加固圈内的单元较大体积模量和剪切模量参数, 即“硬”材料。模型中所设原岩和加固圈的力学参数如表 1 所列, 此时波阻抗比 $\lambda = 0.41$ 。

表 1 模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters for the model

材料	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	剪胀角/(°)	摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
原岩	2	0.8	2	2	10	40	2 600
加固圈	8	5.0	2	2	10	40	2 600

3 数值模拟结果

3.1 加固圈对动载扰动的衰减作用

为了验证加固圈结构对巷道的影响, 分别建立 2 个数值模型, 其中一个未设置加固圈, 另一个设置加固圈。根据模拟结果对比动载作用下巷道的响应特征, 分析加固圈对动力缓冲的效果。

通过理论分析可知加固圈具有衰减应力波能量的作用, 为了验证这一结论, 通过在模型中的 A 点和 B 点位置监测其应力的动态变化数据, 监测结果如图 3 所示。

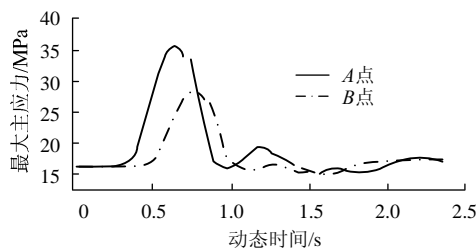


图 3 加固圈两侧 A 点和 B 点处应力波形图

Fig.3 Stress waves of points A and B on both sides of the reinforced annular region

在图 3 中 2 条曲线分别为 A 点和 B 点的最大主应力随时间的变化曲线, 图中实线代表加固圈 A 点主应力数据, 即未经过加固圈的应力波动, 虚线为经过加固圈后应力波动。可以看出应力波传播造成

测点 A 的应力波动情况, 致使测点受应力波扰动产生 35.5 MPa 的应力峰值, 应力值在扰动过后逐渐恢复到初始值。当应力波穿越加固圈后, B 点产生的应力峰值为 28.1 MPa, 下降幅度达 21%。根据式(4), (5)和表 1 数据计算得出透射能量与入射能量比值为 0.762, 同时计算出模拟结果中的两应力波能量比值为 0.715。这说明加固圈的存在降低了应力波峰值强度, 衰减了应力波能量。

应力波对巷道产生动态扰动作用, 加剧围岩的破坏和巷道变形。图 4 为 2 个模型计算后的位移云图。可以看出动载扰动后围岩的变形情况, 其中巷道附近的围岩变形较大, 此区域单元已发生塑性变形, 为围岩破碎区。距离巷道越远, 围岩变形越小。受动载直接扰动作用, 2 个模拟中围岩左侧均位移较大, 其中未设置加固圈模型中最大位移达到 0.269 m, 位于巷道左上角; 设置加固圈产生的最大位移为 0.2 m, 巷道变形量比未设置加固圈时降低 26%。经统计得到设置加固圈模型中发生塑性变形的单元个数为 3 600, 而未设置的模型塑性单元个数为 4 320。由模拟结果可以看出加固圈对应力波有明显衰减作用, 可以明显减小动力扰动产生的巷道变形和降低围岩破坏范围, 有效提高巷道稳定性和抗动力扰动能力。

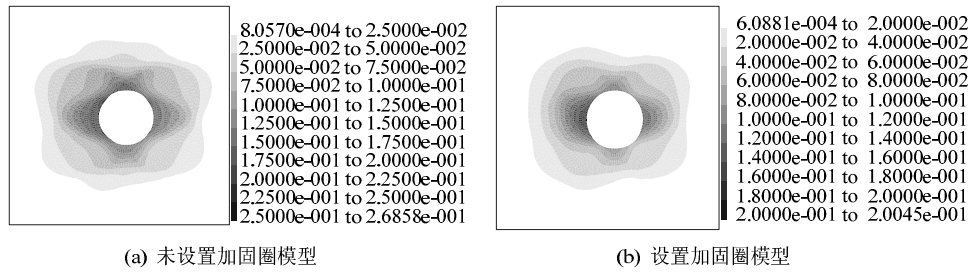


图 4 2 种模型的巷道位移云图 (m)

Fig.4 Roadway displacement contour plotting under two situations

3.2 加固圈宽度对动载扰动的影响

通过设置不同宽度范围的加固圈，分析加固圈宽度对应力波缓冲作用的影响。如图 5 为不同加固圈宽度条件下巷道受动载产生的最大位移，可以看出随着宽度的增加，产生的最大位移逐渐减小，在 2 m 宽度时产生的最大位移量仅是 0 m 宽度（即未设置加固圈）的 60%。因此加固圈宽度越大围岩变形越小，越能保证巷道的稳定性。图 6 为不同加固圈宽度时测点 B 的应力波波图形，发现加固圈宽度的增加对应力波衰减影响较小。不同加固圈宽度时的应力峰值变化较小，2 m 宽度透射波能量仅比 0.5 m 宽度时降低 5.4%。这可由前文的理论分析解释，即应力波的衰减主要发生在分界面，通过波阻抗的不同产生反射波而衰减入射波能量，而在加固圈内部透射波传播的能量衰减仅与岩性有关，因此加固圈宽度对应力波能量衰减影响较小。虽然增加加固圈宽度对衰减应力波能量影响较小，但是越宽的加固圈，越能够提高围岩的整体强度，因此增大加固圈宽度可以更有效地提高深部巷道稳定性。

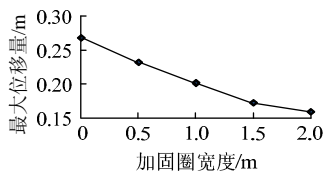


图 5 巷道最大位移与加固圈宽度关系图

Fig.5 Relationship diagram between the maximum displacement of roadway and the width of the reinforcement annular region

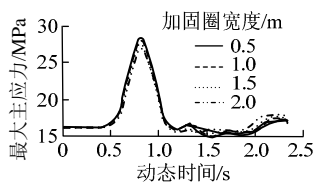


图 6 不同加固圈宽度透射应力波波图形

Fig.6 Stress wave transmission oscillogram through reinforcement rings of different width

3.3 加固圈结构强度对应力波能量衰减的影响

由式(6)可知，应力波穿越加固圈产生的应力波能量衰减程度与加固圈岩体强度有关。为了模拟加固圈强度对应力波能量衰减的影响，分别设置不同的体积模量和剪切模量参数，其参数设置如表 2 所列。在 3 种模型中原岩与加固圈介质的波阻抗比分别为 0.4, 0.6 和 0.8，经计算得到应力波能量衰减率如图 7。

表 2 不同波阻抗比的模型力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of models with different wave impedance ratios

材料		体积模量/GPa	剪切模量/GPa
原岩		2	0.8
加固圈	$\lambda=0.4$	8	5.5
	$\lambda=0.6$	3	2.5
	$\lambda=0.8$	2.5	1.3

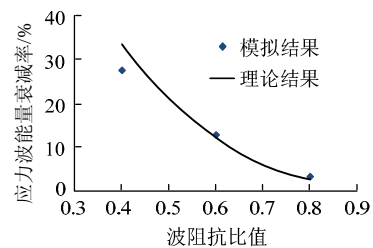


图 7 应力波能量衰减率与波阻抗比的关系

Fig.7 Relationship between energy attenuation rate of stress wave and wave impedance ratio

通过应力值与应变能乘积的时间积分可以计算出 A 点和 B 点单元体应力波的能量，因此可以计算出应力波通过加固圈后的能量衰减率。同时由式(4)可以计算出理论的应力波能量衰减率。计算结果如图 7 所示，可以看出数值模拟结果和理论计算得到的基本相符，即波阻抗比值越小，应力波能量衰减越明显。当波阻抗比为 0.4 时，加固圈最大可以削弱 27.7% 的应力波能量。对于已经承受较高地应力的深部巷道，降低扰动能量能够显著降低其对巷

道的破坏作用。因此, 增强加固圈岩体强度, 即降低波阻抗比值, 可以提高加固圈结构对动力的缓冲作用, 减小动力扰动对巷道破坏作用。

4 结 论

基于应力波传播理论, 分析了应力波能量在含加固圈岩体中传播规律, 得到了能量衰减率与加固圈岩体力学参数的关系; 并采用 FLAC^{3D} 软件模拟了含加固圈结构的巷道在动力扰动下的响应。理论分析结果认为加固圈结构存在波阻抗不一致的分界面, 分界面导致应力波发生反射, 削弱一部分应力波能量。而加固圈强度越大, 对应力波能量的衰减作用越明显。同样模拟结果也验证了加固圈对应力波的缓冲作用。通过对加固圈两侧的应力监测发现, 应力波穿过加固圈后应力峰值降低。在加固圈结构保护下, 巷道变形量和破坏区域明显减小。增加加固圈宽度可以增强巷道围岩整体结构强度, 但是对应力波衰减规律影响较小。通过增加模型中加固圈结构强度, 应力波的能量衰减度增大, 其衰减规律与理论计算相符。

目前深部巷道支护体系开始采用高强度吸能锚杆以及围岩内部注浆等手段, 在浅部围岩形成承载加固环, 增强围岩的动载抵御能力, 提高围岩力学性质。基于本文提出的新型加固结构, 在这些常规支护方案基础上, 通过对深部围岩进行注浆, 形成环绕巷道的环形加固岩体, 构造出加固圈结构模型, 以此实现深部巷道的加强支护效果。此外还可以改进现有的支护结构, 通过在支护体内设置高强度夹层, 与常规支护结构结合形成双重支护结构, 同样可以达到削弱冲击破坏的支护效果。

参考文献:

- [1] 刘泉声, 高玮, 袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 78-80.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813. HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] Canadian Rockburst Research Program 1990-1995: A comprehensive summary of five years of collaborative research on rockbursting in hard rock mines[R]. Sudbury, Canada: CAMIRO Mining Division, 1996: 10-15.
- [4] YERYOMENKO A, SKLYAR N I. Effect of geological disturbances on the danger of rock bursts in a rock mass[J]. Journal of Mining Science, 1999, 35(1): 12-18.
- [5] 康红普. 煤矿井下应力场类型及相互作用分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1329-1335. KANG Hongpu. Analysis on types and interaction of stress fields in underground coalmines[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1329-1335.
- [6] 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. LYU 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.
- [7] 侯朝炯, 勾攀峰. 巷道锚杆支护围岩强度强化机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 342-345. HOU Chaojiong, GOU Panfeng. Mechanism study on strength enhancement for the rocks surrounding roadway supported by bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 342-345.
- [8] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535-543. YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535-543.
- [9] HUANG R Q, WANG X N. Analysis of dynamic disturbance on rock burst[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 57(3): 281-284.
- [10] 魏明尧, 王恩元, 刘晓斐, 等. 动力扰动诱发顶板断裂的数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 532-536. WEI Mingyao, WANG Enyuan, LIU Xiaofei, et al. Numerical simulation of roof fracture induced by dynamic disturbance[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 532-536.
- [11] 陈国祥, 窦林名, 高明仕, 等. 动力扰动对回采巷道冲击危险的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 153-157. CHEN Guoxiang, DOU Linming, GAO Mingshi, et al. Numerical simulation of dynamic vibration affecting rock burst in mining gateway caused by tremor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 153-157.
- [12] 徐学锋, 窦林名, 刘军, 等. 动载扰动诱发底板冲击矿压演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 334-338. XU Xuefeng, DOU Linming, LIU Jun, et al. Analysis on evolution laws of floor burst induced by dynamic disturbance[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 334-338.

- [13] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱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): 359-364.
- [14] 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.
- [15] KOSHELEV É A. Spherical stress wave propagation during an explosion in a viscoelastic medium[J]. Journal of Mining Science, 1988, 24(6): 541-546.
- [16] 尚嘉兰, 沈乐天, 赵坚. 粗粒花岗闪长岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 212-215.
SHANG Jialan, SHEN Letian, ZHAO Jian. Attenuation law of stress wave in the bukittimah granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 212-215.
- [17] ALEKSANDROVA N I, AYZENBERG-STEPANENKO M V, SHER E N. Modeling the elastic wave propagation in a block medium under the impulse loading[J]. Journal of Mining Science, 2009, 45(5): 427-437.
- [18] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 42-46.
WANG Mingyang, QIAN Qihu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 42-46.
- [19] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 40-45.
- [20] 龙源, 冯长根, 徐全军, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(3): 1-7.
LONG Yuan, FENG Changgen, XU Qianjun, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(3): 1-7.
- [21] 张培源, 张晓敏, 汪天庚. 岩石弹性模量与弹性波速的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 785-788.
ZHANG Peiyuan, ZHANG Xiaomin, WANG Tiangeng. Relationship between elastic moduli and wave velocities in rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 785-788.

(上接第 740 页)

- [12] 冯伟, 柏建彪, 陈科. 预应力对穿锚索窄煤柱加固技术[J]. 煤矿安全, 2011, 42(1): 57-59.
FENG Wei, BAI Jianbiao, CHEN Ke. Opthread-prestressed strand anchor reinforcement technology for shallow pillar[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(1): 57-59.
- [13] 李向革, 赵卫民, 张朝武. 保安煤矿采区变电所硐室变形破坏分析及二次注浆加固技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(1): 86-89.
LI Xiangge, ZHAO Weimin, ZHANG Chaowu. Chamber deformation failure analysis and secondary grouting reinforcement technology in Bao'an coal mine substation[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(1): 86-89.
- [14] 魏树群, 张吉雄, 张文海, 等. 高应力硐室群锚注联合支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(3): 281-285.
WEI Shuqun, ZHANG Jixiong, ZHANG Wenhai, et al. Bolt-grouting combined support technology for large-scale cavern group with high ground pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(3): 281-285.
- [15] 张春光, 陈晓祥, 张万辉, 等. 石壕煤矿中央泵房加固技术研究与应用[J]. 山西焦煤科技, 2011, 35(10): 8-10.
ZHANG Chunguang, CHEN Xiaoxiang, ZHANG Wanhui, et al. Reinforced technology research and application for central pump room of Shihao coal mine[J]. Shanxi Cooking Coal Science & Technology, 2011, 35(10): 8-10.