



移动扫码阅读

窦林名,曹晋荣,曹安业,等.煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(6):23-31.  
doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.06.003

DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23-31. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.06.003

## 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究

窦林名<sup>1,2</sup>, 曹晋荣<sup>1,2</sup>, 曹安业<sup>1,2</sup>, 柴彦江<sup>1,2</sup>, 白金正<sup>1,2</sup>, 阚吉亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对煤矿矿震分类缺乏量化指标、矿震传播规律不清楚、危险性矿震难以判别等问题,综合采用数值模拟、理论分析及现场实测的方法,对煤矿矿震进行了分类,通过 UDEC 数值模拟再现了震动波在节理岩体中的传播过程,结合微震监测数据,统计分析了矿震震动波传播过程中质点峰值速度和震动波能量的衰减规律,初步探讨了危险性矿震判别方法。结果表明:煤矿矿震可分为采动破裂型、巨厚覆岩型和高能矿震型 3 种,其中高能矿震型又可细分为煤体内爆型、顶板失稳型和断层活化型。根据矿震是否对井下人员或设备造成危害,又可将矿震分为正常矿震和危险性矿震 2 大类。矿震震动波传播受多种因素影响,煤岩体中的不连续面对震动波传播作用明显。揭示了不连续面对震动波应力传递的阻断机制:当震动波传递的应力与原岩应力叠加超过不连续面强度时,不连续面发生破坏,出现一定位移,介质的不连续性阻断了震动波应力传播。矿震传播过程中,质点峰值速度与震动波能量之间具有内在联系,峰值速度、能量均与传播距离呈负指数型关系。实测表明:某矿区实体煤区域和采空区区域的质点震动速度吸收系数分别为 0.003 75 和 0.007 6,震动波能量吸收系数分别为 0.007 5、0.015 2,2 种区域内震动波衰减差异明显,不连续面对震动波传播影响显著,验证了数值模拟的正确性。

**关键词:** 矿震类型;震动波;能量衰减;冲击地压

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2021)06-0023-09

### Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves

DOU Linming<sup>1,2</sup>, CAO Jinrong<sup>1,2</sup>, CAO Anye<sup>1,2</sup>, CHAI Yanjiang<sup>1,2</sup>, BAI Jinzheng<sup>1,2</sup>, KAN Jiliang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Deep Coal Resource Mining, Ministry of Education of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the lack of quantitative indicators for the classification of coal mine tremor, the unclear propagation law of mine tremor, and the difficulty of identifying dangerous mine tremor. Methods of numerical simulation, theoretical analysis and field measurement are used in this study. Types of mine tremor are proposed. Through UDEC numerical simulation, the propagation process of shock wave in jointed rock masses is reproduced. Combined with micro-seismic monitoring data, the attenuation law of the peak velocity of the particle and the energy of the shock wave are analyzed during the propagation process. And the method of distinguishing dangerous mine tremor is discussed. The results show that: coal mine tremor can be divided into three types: induced by mining fracture, induced by broken of huge overlying strata and high-energy mine tremor. The high-energy mine tremor can be subdivided into failure of coal roof instability and fault activation. According to whether or not mine tremor is destructive, mine tremor can be divided into two categories: normal mine tremor and dangerous mine tremor. The propagation of shock wave in mines is affected by many factors, and the discontinuities in coal and rock masses have significant effects on the propagation of shock wave. The blocking mechanism of shock wave stress transmission on the discontinuous surface has been revealed: when the superposition of the stress transmitted by shock wave and original stress exceeds the strength of discontinuity surface, the discontinuity surface will failure and a certain displacement will occur, and the propagation

收稿日期: 2021-02-28; 责任编辑: 朱恩光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51934007, 51874292)

作者简介: 窦林名(1963—), 男, 青海平安人, 教授, 博士生导师。E-mail: lmdou@126.com

通讯作者: 曹晋荣(1994—), 男, 山西临汾人, 博士研究生。E-mail: jin-rongcao@cumt.edu.cn

of shock wave will be blocked because of discontinuity of the medium. During the propagation process of a mine tremor, there is an internal connection between the peak velocity of the particle and the energy of the shock wave, and there is a negative exponential relationship between the peak velocity or energy with the propagation distance. The velocity absorption coefficients of the solid coal area and the goaf area are 0.003 75 and 0.007 6, respectively, and the energy absorption coefficients are 0.007 5 and 0.015 2, respectively. There are obvious differences in the attenuation of shock wave in the two areas. The discontinuity has a significant impact on the propagation of shock waves, which verifies the correctness of the numerical simulation.

**Key words:** type of coal mine tremor; shock wave; energy attenuation; rock burst

## 0 引言

采矿诱发地震是指地面或几百米浅层和上千米深层的矿山开采引起的地震活动,简称矿震<sup>[1]</sup>。在煤矿中,矿震与冲击地压不能一概而论,矿震不一定会导致冲击地压的发生<sup>[2]</sup>。但少数强矿震发生后,可能诱发煤矿井下冲击地压<sup>[3-5]</sup>和煤与瓦斯突出<sup>[6-7]</sup>等灾害,有时甚至导致地面晃动、地表塌陷、建筑物损坏等严重后果<sup>[8]</sup>,在造成人员伤亡和设备损坏的同时,容易引发社会问题。

目前,针对煤矿矿震类型与特征、发生机制、传播规律及监测预警技术,国内外学者开展了诸多研究。朱佩武<sup>[9]</sup>区分了矿震、天然地震和爆破的震相特征,并据此将矿震分为冲击型与重力型2类。李铁等<sup>[10]</sup>对海孜煤矿9个强矿震进行震源机制分析,结合区域地应力测量结果,提出了海孜矿强矿震发生机理及防治思路。曹安业<sup>[11]</sup>通过矩张量反演方法研究了采动煤岩震源破裂机理,结果表明该方法可以较好地揭示矿震震源破裂特征。魏东等<sup>[12]</sup>基于煤矿现场微震监测,结合覆岩空间结构理论,分析得到了相邻采空区下工作面回采关键层失稳诱发矿震机理及防治方案。王树立等<sup>[13]</sup>研究了超厚高位红层砂岩破断矿震活动规律,强矿震的发生和红层破断密切相关。陈学华等<sup>[14]</sup>研究了地垒构造区域内工作面矿震分布特征,认为断层活化导致矿震能量及频次升高。苗小虎等<sup>[15]</sup>对一例异常矿震信号进行深入挖掘,提出矿震震动破坏诱发高应力区发生冲击地压机理。曹安业等<sup>[16]</sup>分析了矿震震动波能量的传播模式并给出了矿震诱冲的条件。为进一步精确描述矿震震动波传播过程,潘一山等<sup>[17]</sup>基于均匀各向同性介质假设,通过直接求解三维波动微分方程得到了描述震动波在三维空间中传播的三维激震模型。朱广安等<sup>[18]</sup>通过数值模拟发现断层对矿震应力波起着明显的阻隔和衰减作用。高明仕等<sup>[19]</sup>通过在不同介质中进行震动波传播试验,得出岩土介质中能量与传播距离呈乘幂关系衰减。为了准确预测矿震冲击灾害,袁林名等<sup>[20]</sup>结合微震监测

和互联网等技术,搭建了矿震冲击灾害远程在线预警平台,并成功应用于现场。

已有的矿震分类多是定性描述,缺乏量化指标,同时矿震危险性的判别值得关注。煤岩体中原生节理、采动裂缝以及地质构造等不连续面对矿震震动波传播影响显著,理论分析及有限元数值模拟研究方法存在一定局限性。笔者分析了多个矿区不同地质和开采条件下矿震震源信息、波形和井下矿压显现情况,根据矿震震动特征及危险程度对其进行分类。采用 UDEC 数值模拟研究了节理岩体震动波传播规律,揭示了不连续面对震动波应力传播的作用机制。提出了矿震震动波能量衰减拟合分析和危险性矿震判别方法,以某矿为工程背景,分别分析了实体煤区域和采空区内矿震震动波衰减特性。结果表明,现场实测与模拟结果具有较好的一致性。

## 1 煤矿矿震类型

矿震是煤矿采掘过程中煤岩体对区域或局部应力调整的一种响应,通常伴随着能量释放与震动,其本质原因是煤岩体中存在高应力或高应力差。如图1所示,在煤矿开采中,煤体宏观破裂及失稳、岩层破断及运动、断层活化等均会引发矿震。因此,采深、断层、褶曲、煤柱、坚硬顶板以及回采速度等是影响矿震频次和能量的重要因素。

基于 SOS 微震监测系统及矿井矿震远程在线监测预警平台,捕获并积累了大量不同地质、开采技术条件下煤矿开采过程中的矿震震动信号。在海量数据的基础上,通过对矿震能量、波形特征、震源位置、震动时煤壁震动速度以及煤矿井下矿压显现特征等的综合分析,提出将矿震分为采动破裂型、巨厚覆岩型和高能震动型3种类型,见表1。其中采动破裂型矿震是指采掘过程中由煤层及附近顶底板岩层破裂产生的矿震,其能量一般小于  $10^4$  J,属于采掘状态下采场周围煤岩体破裂有序释放能量的正常现象;巨厚覆岩型矿震是指距煤层 100 m 以上、厚度大于 100 m、岩石强度相对不大的巨厚岩层在采空区上方破断、滑移产生的矿震,能量大于  $10^5$  J,这

类矿震大部分能被地震台网记录; 高能震动型矿震是指能量  $10^4$  J 以上, 且震源位于采掘工作面附近实体煤及其顶底板岩层之中, 此类矿震也可能

被地震台网记录, 根据发生主体不同, 可将高能震动型矿震进一步细分为煤体内爆型、顶板失稳型和断层活化型。

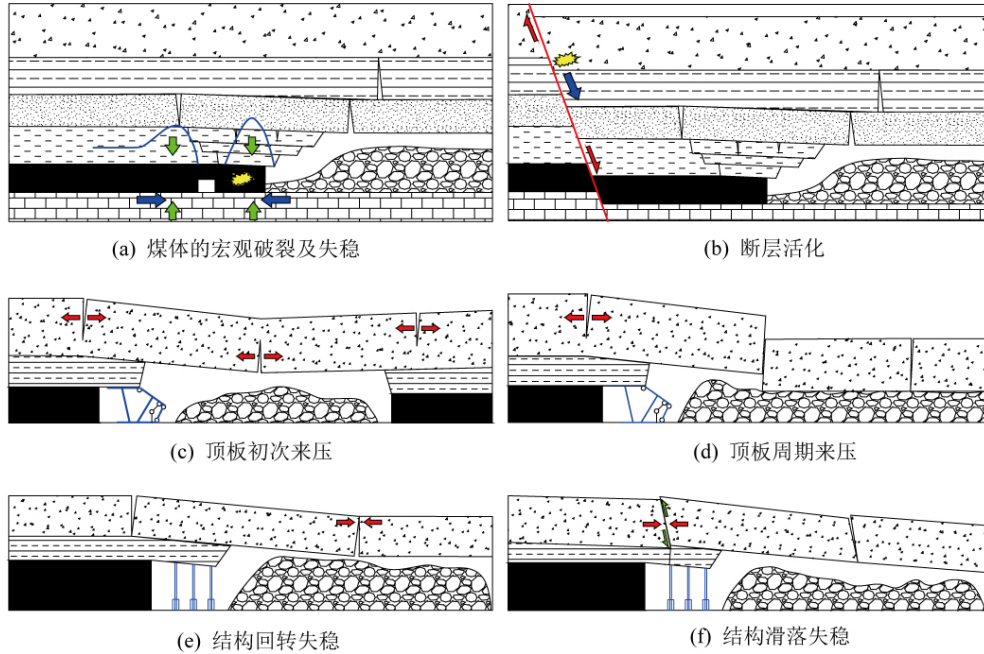


图 1 矿震成因示意

Fig.1 Schematic of causes of coal mine tremor

表 1 煤矿矿震分类

Table 1 Classification of coal mine tremor

矿震类型	震动能量/J	煤壁震动速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	波形特征	震源位置	矿压显现情况
采动破裂型	$<10^4$	$<200$	P、S 波不清晰, 持续时间短, 主频大于 10 Hz	采掘工作面煤层及其 50 m 范围内顶底板岩层	煤炮声, 采掘工作面有轻微震动, 地面无震感
巨厚覆岩型	$>10^5$	100~400	P、S 波清晰, 持续时间长, 主频小于 10 Hz	工作面采空区上方距煤层 100 m 以上的巨厚覆岩中	井上下均有震感, 地震监测系统有响应
高能震动型	$>10^4$	200~400	P、S 波清晰, 持续时间长, 主频小于 10 Hz	采掘工作面附近实体煤及其顶底板岩层中	井下有强烈震动与声响, 地面有时有震感, 可能诱发冲击地压, 造成井巷破坏

矿震是否对井下产生危害与其能量大小及相对采场的位置有关, 并不是所有的高能量矿震均会诱发冲击地压等矿井灾害。采动破裂型矿震虽然分布于采场周围的煤岩体中, 但震动能量小, 属于安全性矿震; 巨厚覆岩型矿震产生的能量大, 但距离采掘工作面较远且位于采空区中, 震动波衰减较快, 因此一般情况下对井下工作人员及设备的威胁不大, 但在特殊地质和开采因素下, 巨厚覆岩型矿震也具有危险性; 高能震动型矿震震源处于或邻近采场空间, 同时释放能量较大, 较强的震动波突然作用于采场周围煤岩体中的应力场和渗流场时, 极易诱发冲击地压、煤与瓦斯突出、突水等矿井灾害。结合矿震发生时煤矿井下矿压显现情况, 从矿震对井下人员或设

备危害性大小的角度出发, 可以将矿震分为正常矿震和危险性矿震 2 类, 如图 2 所示。

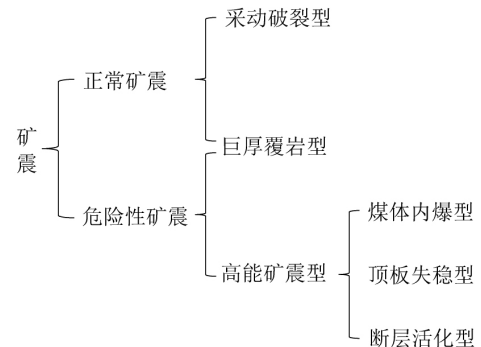


图 2 矿震危险程度分类

Fig.2 Classification of degree of danger of coal mine tremor

## 2 矿震震动波传播数值模拟

矿震震动波传播规律是揭示采动荷载诱发冲击地压机理的重要基础<sup>[21]</sup>。采用 UDEC 数值模拟方法研究岩体中震动波传播引起的应力响应和不连续面对震动波传播作用机制。由于考虑了不连续面的作用,该数值模拟方法被广泛应用于采矿工程相关问题研究中<sup>[22-23]</sup>。CAI 等<sup>[24]</sup>采用 UDEC 研究了多组平行裂缝对岩体弹性波衰减的影响规律。DENG 等<sup>[25]</sup>研究了节理岩体中地下结构在爆炸诱发应力波作用下的损伤机理。

### 2.1 数值模型与方案

在 UDEC 数值模型中,煤岩体由一系列块体和块体间的节理构成,节理按照力学准则允许发生剪切滑动或张拉位移,节理失效与否取决于其强度与应力状态,当微观损伤累积到一定程度后可观察到煤岩体的宏观破坏。数值模型如图 3 所示,长 60 m、高 50 m,节理间距设置为 10 m,模型顶部的箭头代表所施加应力的方向,为研究震动波传播过程中质点应力及速度变化规律,共布设 5 个监测点,高度  $H$  分别为 5、15、25、35、45 m。

岩层块体采用各向同性的线弹性模型,节理本

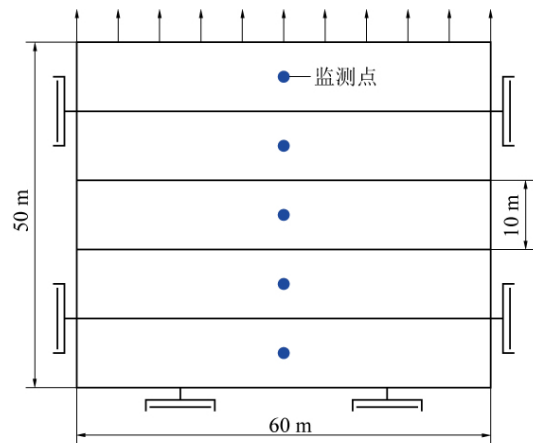


图 3 UDEC 数值模型

Fig.3 UDEC numerical model

构关系为 Mohr-Coulomb 滑移模型,模型物理力学参数采用试错法进行验证,岩石块体和节理性质见表 2,表中  $E$  为岩石弹性模量,  $k_n$ 、 $k_s$  分别指节理面的法向、切向刚度。将矿震震动波简化为半正弦拉伸应力波,幅值为 7 MPa、频率为 10 Hz,如图 4 所示。岩石的波速一般为 4 000 ~ 7 000 m/s,可知该模型下震动波波长为 400 ~ 700 m,模型最小尺寸为 0.5 m,远小于波长的 1/8 ~ 1/10,震动波参数满足在模型中传播的要求。

表 2 震动波传播数值模拟参数

Table 2 Numerical simulation parameters of shock wave propagation under impact load

项目	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E/\text{GPa}$	泊松比	项目	$k_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$k_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	黏聚力/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	抗拉强度/MPa
块体	2 600	100	0.26	节理	489.39	195.75	10	35	10/3

为模拟矿震震动波在节理岩体中传播,将数值模拟计算分为静态和动态 2 个阶段。在静态计算模式下,分别向模型垂直、水平方向上施加 5.0、7.5 MPa 的原始应力,固定模型四周边界,将数值模型计算至平衡。待模型静力平衡后,改变边界条件,输入震动参数,打开动力分析模式进行计算。

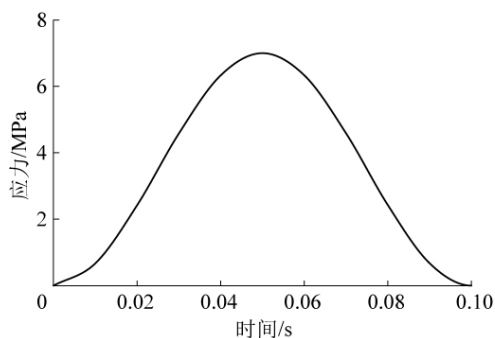


图 4 矿震震动波示意

Fig.4 Schematic of coal mine tremor waves

动力分析需选用合理的边界条件和阻尼。为减少震动波在模型边界反射的影响,改变平衡后模型

的边界条件,将两侧及下部边界设置为黏滞边界,模型顶部变为应力边界。阻尼采用 Rayleigh 阻尼, Rayleigh 阻尼可以表示为

$$C = \lambda M + \eta K \quad (1)$$

式中:  $C$  为黏性阻尼矩阵;  $M$  为质量矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $\lambda$ 、 $\eta$  分别为质量阻尼比例系数与刚度阻尼比例系数。

对于 Rayleigh 阻尼,需要确定 2 个参数: 临界阻尼比  $\xi_{\min}$  和模型的固有频率  $f_{\min}$ 。其中临界阻尼比  $\xi_{\min}$  一般为 2% ~ 5%,当模型可能发生大变形或者节理可能产生大的位移时,应选用较小的临界阻尼比,固有频率  $f_{\min}$  通常为输入波的频率<sup>[26]</sup>。因此,选用的临界阻尼比为 2%,固有频率为 10 Hz。

为了研究不连续面对震动波传播的作用机制,根据节理是否发生破坏共设置了 2 组数值试验,由于应力波为拉伸应力,模型更易出现拉伸破坏,因此试验中仅改变节理抗拉强度,其余参数相同,具体如下:

①模型中设置节理面,节理面抗拉强度为 10 MPa;

②模型中设置节理面,节理面抗拉强度为 3 MPa。

### 2.2 震动波传播应力响应过程

数值模型中的应力响应可以真实地反映震动波传播过程,选取震动波作用 1 个完整周期内不同时刻的应力进行分析,节理面抗拉强度为 10 MPa 时的垂直应力如图 5 所示。

在原岩梯度应力作用下,初始模型整体处于压应力状态,应力均为负值且绝对值随着监测点高度  $H$  的增加而减小。震动波施加于模型顶部后,模型

上部的应力状态首先发生改变,应力降低,表明初始垂直应力与震动波所传递的拉伸应力出现叠加,对原岩应力有较大影响。随着作用时间增加,震动波自上而下进行传播,模型中、下部的应力依次出现波动,震动波自施加边界向外部扩散。半正弦震动波作用 1 个周期内,模型中的垂直应力呈现“负-正-负”变化特征,应力状态也随之显著改变,由初始受压变为受拉,最后又回归到受压状态。

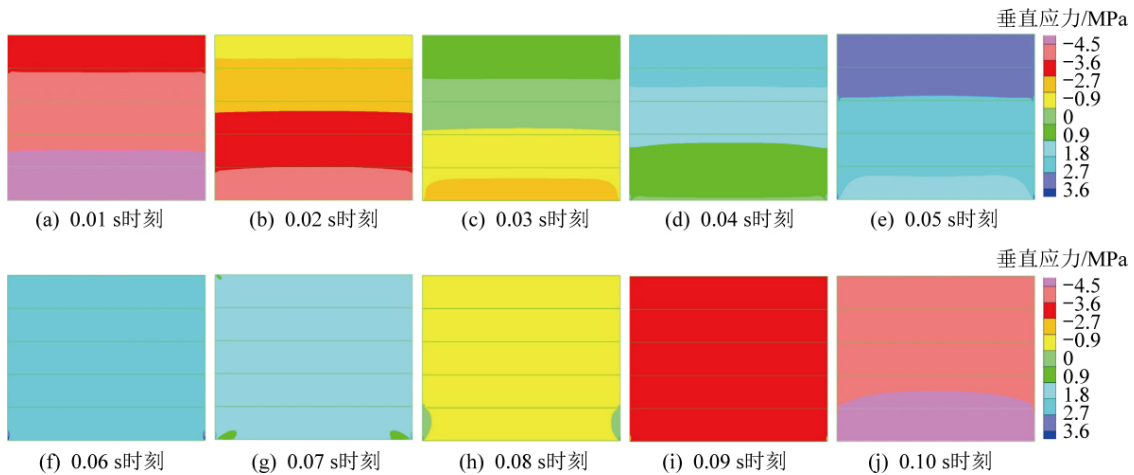


图 5 节理面抗拉强度 10 MPa 下垂直应力

Fig.5 Vertical stress of joint surface under tensile strength 10 MPa

震动波传播过程中测点处的应力、速度变化曲线如图 6 所示。模型各点处的应力、速度均与时间呈半正弦函数关系,与震动波呈相同的波动特征。但各测点的应力和速度响应也存在差异性,在震动波作用下,各测点应力及速度响应过程不同,距震动

波作用处越远,应力或速度发生改变的時刻越晚,具有明显的传递特征。当节理面强度较高时,岩体并没有发生破坏,震动波在全模型中传播,作用 1 个周期后,各点处的速度重新恢复为 0,应力状态也基本复原。

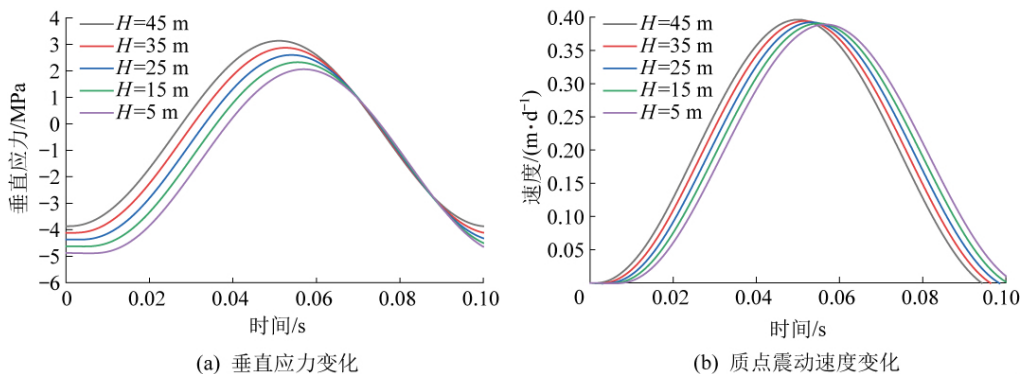


图 6 节理面抗拉强度 10 MPa 下测点应力及速度变化

Fig.6 Simulated stress and velocity of measuring point with tensile strength 10 MPa joint surface

### 2.3 不连续面的应力阻断机制

节理面抗拉强度为 3 MPa 时的垂直应力如图 7 所示。对比图 5 可知,震动波作用时间为 0.01~0.04 s 时,不同抗拉强度岩体中垂直应力分布情况相同,主要是由于震动初期震动波应力较低,岩体的应力状态由初始应力与震动波所传递的应力共同决定,

此阶段节理面上分布的拉应力较小,节理面未发生张拉破坏。当作用时间为 0.05 s 时,震动波应力达到 7 MPa,应力叠加使得模型上部应力状态由初始 4 MPa 左右的压应力转变为约 3 MPa 的拉应力,上层节理面的拉应力超过其抗拉强度时,节理发生张拉破坏,垂直方向上缺乏来自顶部的约束,中、下部

岩体中的应力迅速得到释放,岩体中部应力小于1 MPa。此时上分层已经脱离下部模型,震动波传递的拉应力只作用于上分层,导致上分层测点的质点震动速度在拉应力持续作用下出现突然升高,如图8所示。随着震动波作用时间进一步增加,震动

波应力逐渐下降,逐渐恢复至压应力状态,但节理破坏具有不可逆性,因此仅模型上分层中的应力状态发生变化,其下方各点不再受震动波的影响,不连续面阻断了震动波的应力传递过程。

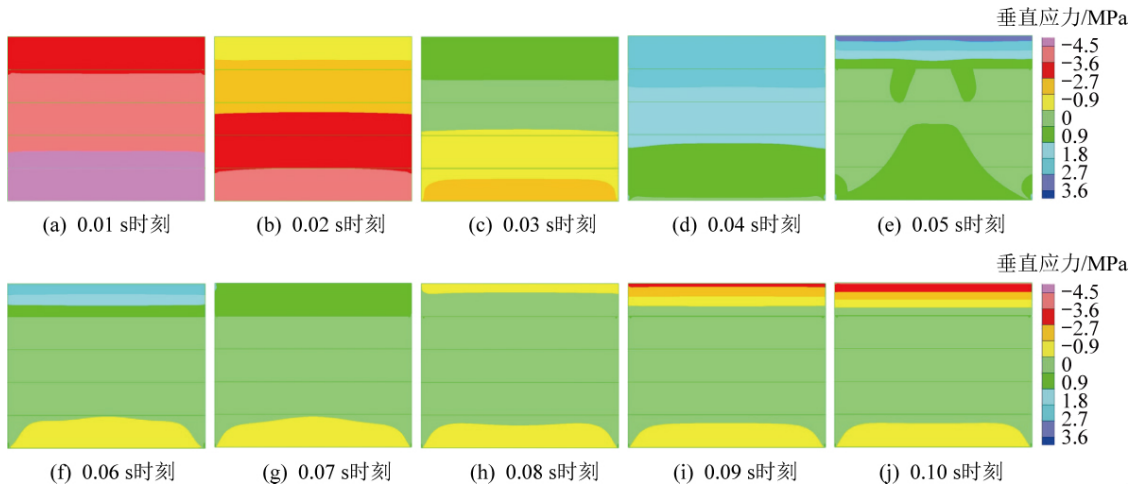


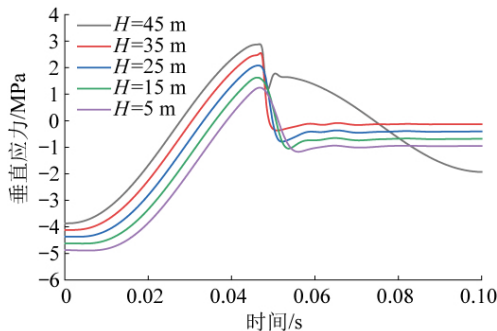
图7 节理面抗拉强度3 MPa下垂直应力

Fig.7 Vertical stress of joint surface under tensile strength 3 MPa

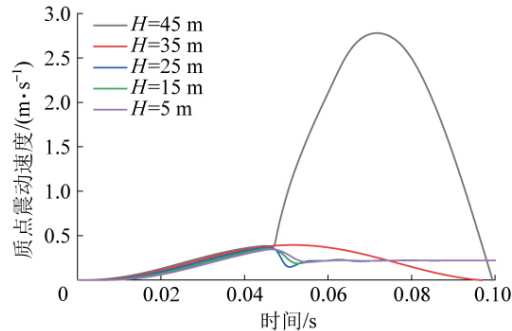
基于上述规律,可以得出矿震震动波传播过程中不连续面的应力阻断机制:不连续面为岩体中的弱面,通常最容易发生破坏。当震动波传递的应力与不连续面处的原岩应力相互叠加超过不连续面强度时,不连续面发生破坏,进而产生位移,介质不连续性阻断了应力波的传播。

### 3 矿震传播能量衰减规律与实测

为验证矿震震动波传播数值模拟结果,讨论工程现场中危险性矿震的判别方法,采用理论分析和现场实测的方法,从能量角度出发,进一步研究了矿区内震动波传播过程中的衰减规律。



(a) 垂直应力变化



(b) 质点震动速度变化

图8 节理面抗拉强度3 MPa测点应力及速度

Fig.8 Simulated stress and velocity of measuring point under tensile strength 3 MPa of joint surface

#### 3.1 震动波能量衰减规律

煤矿矿震对井下工作面或巷道破坏程度与震动波在煤岩体中的衰减特性密切相关。矿震震动波传播受传播距离、煤岩体介质、不连续面作用以及震源破裂特征等众多因素影响,采动作用下震源破裂模式和尺度等震源特征异常复杂,具有很大的不确定性。为便于统计分析,将矿震简化为点震源,震动波从震源到达接收点时,其震动速度的幅值会发生变化,其变化主要来源于波前的扩散和介质的吸收,前

者与距离  $r$  成反比,后者与距离  $r$  呈负指数的关系,震动波传播过程中微震监测系统台站所记录的质点震动速度衰减规律为

$$A_i = C_1 e^{-\alpha r_i} / r_i \quad (2)$$

式中:  $C_1$  为震源处质点震动速度;  $\alpha$  为速度吸收系数;  $r_i$  为震源至台站  $i$  的距离;  $A_i$  为台站  $i$  记录的幅值。

对任意弹性媒介,波在弹性媒介中传播时,各质点在其平衡位置附近振动,从而使弹性媒介具有动

能; 又因为振动造成了各质点之间的距离发生改变, 媒介发生形变, 从而使之具有形变势能。由于煤岩为脆性材料, 震动波在其中传播时所能引起的煤岩体形变势能改变量较小, 可认为动能是矿震震动波能量传递的主要部分。速度与动能  $E_{k_i}$  的关系见式 (3) 结合震动速度衰减规律, 可以得出震动波传播过程中能量衰减规律为

$$E_{k_i} = \frac{1}{2} m A_i^2 \quad (3)$$

式中:  $E_{k_i}$  为台站  $i$  所记录波形的动能;  $m$  为震动岩体的质量;  $A_i$  为台站  $i$  记录的幅值。

联立式 (2) 和式 (3) 得:

$$E_{k_i} = C_2 r_i^{-2} e^{-\beta r_i} \quad \beta = 2\alpha \quad (4)$$

式中:  $C_2$  为震源震动能量;  $r_i$  为震源至台站  $i$  的距离;  $\beta$  为能量吸收系数。

基于微震监测数据, 通过拟合可以确定矿井某个区域一定时期内质点震动速度衰减规律, 根据速度吸收系数  $\alpha$  计算出能量吸收系数  $\beta$ , 结合微震监测系统中所记录的震源能量, 即可得到矿震震动波传播过程能量衰减规律。由于不连续面对震动波传播有重要作用, 拟合应分为 2 种条件: 未开采的实体煤区域和裂缝场较发育的采空区区域。

### 3.2 现场实测

某矿主采煤层为 3 煤层, 平均厚度 8.4 m, 开采深度为 530~780 m。采区内已连续回采 3 个相邻工

作面, 形成较大的采空区, 其余为未开采的实体煤区域, 为监测工作面回采过程中矿震发生情况, 沿采空区周围均匀布置了微震监测台站, 6306 工作面位置及微震台站布置如图 9 所示。

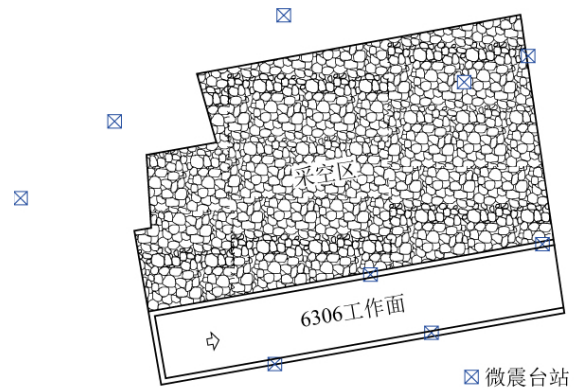


图 9 工作面及微震台站布置

Fig.9 Layout of working face and dispersion of micro-seismic stations

基于上述分析, 选取 6306 工作面不同开采时期的微震数据, 分别对实体煤区域和采空区中的矿震震动速度衰减规律进行拟合分析, 为减小差异性, 微震事件震源位置与能量大小应相近, 震源位置及选用的台站分布如图 10 所示。

图 11、图 12 分别为实体煤区域、采空区矿震震动速度衰减拟合结果, 随着传播距离增加, 震动速度呈负指数型衰减。矿震在实体煤区域传播时, 震动

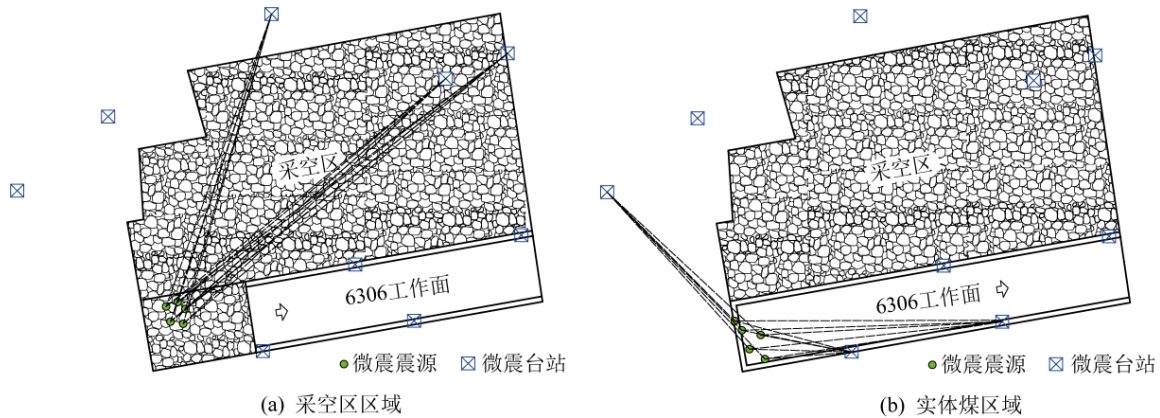


图 10 震源位置及台站选取

Fig.10 Location of seismic source and selection of stations

速度吸收系数平均值为 0.003 75; 当震动波经过采空区时, 震动速度吸收系数升高, 平均值为 0.007 6, 表明不连续面对震动波的衰减作用明显, 验证了数值模拟结果的正确性。

根据震动速度吸收系数与能量吸收系数之间的关系, 可以分别得到实体煤、采空区条件下矿震震动波能量吸收系数分别为 0.007 5、0.015 2。如果已知

矿震震源能量、震动波能量吸收系数和巷道抗冲击能力  $E_{max}$ , 根据式 (5) 即可求解得出安全距离  $r_s$ , 将实际震源至巷道的距离与安全距离进行比较, 如果实际距离小于安全距离, 表明对井下而言, 此次矿震具有危险性。

$$E_{max} = C_2 r_s^{-2} e^{-\beta r_s} \quad (5)$$

式中:  $E_{max}$  为巷道抗冲击能力;  $r_s$  为安全距离。

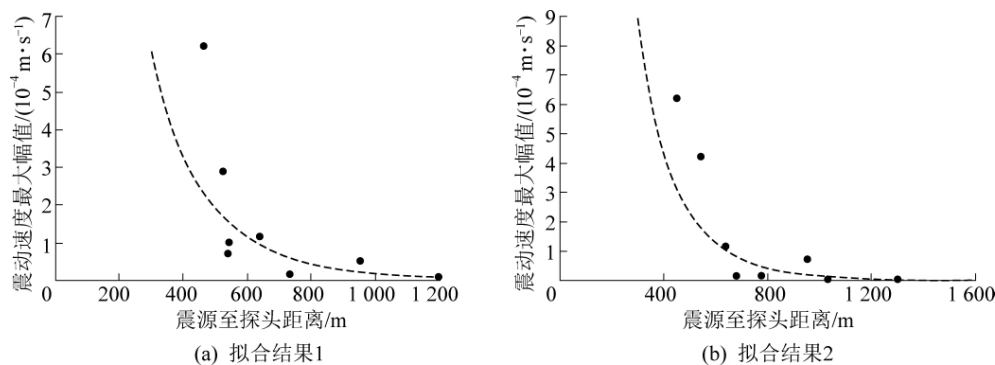


图11 实体煤区域震动速度衰减

Fig.11 Attenuation of seismic velocity in solid coal area

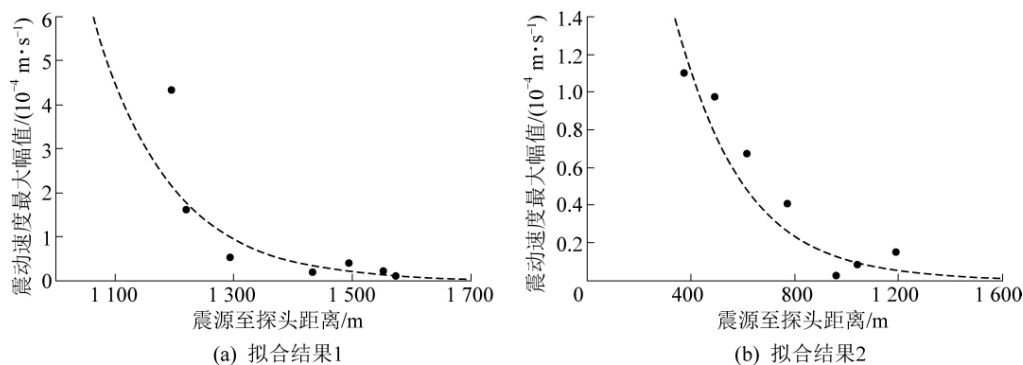


图12 采空区区域震动速度衰减

Fig.12 Attenuation of vibration velocity in gob

## 4 结 论

1) 综合分析矿震震源信息、波形特征和井下矿压显现情况,提出将矿震分为采动破裂型、巨厚覆岩型和高能震动型3种类型。根据矿震对采场及巷道是否具有危险性将其分为正常矿震和危险性矿震。

2) 采用 UDEC 数值模拟再现了节理岩体中矿震震动波传播过程,揭示了煤岩体中不连续面对矿震震动波传播的应力阻断机制:当震动波传递的应力与原岩应力叠加超过不连续面强度时,不连续面失效产生位移,介质不连续性阻断了震动波应力传播。

3) 以某矿为背景,实测得到矿区实体煤区域和采空区区域的质点震动速度吸收系数分别为 0.0037 5 和 0.007 6,能量吸收系数分别为 0.007 5、0.015 2,2 种区域内震动波衰减差异明显。

4) 提出了基于微震监测数据进行矿震震动波能量衰减规律分析的方法,综合分析矿震位置及能量、巷道抗冲击能力和震动波能量衰减规律,求解得出安全距离,将实际震源至巷道的距离与安全距离进行比较,如果实际距离小于安全距离,表明对井下而言,此次矿震具有危险性。提出的矿震类型、震动

波传播规律以及危险性矿震判别准则,对煤矿矿震的认知、防控及相关灾害治理具有一定的参考价值。

### 参考文献(References):

- [1] 张少泉,关杰,刘力强,等.矿地震研究进展[J].国际地震动态,1994(2):1-6.  
ZHANG Shaoquan, GUAN Jie, LIU Liqiang, et al. Progress in research on mine earthquakes [J]. Recent Developments in World Seismology, 1994(2):1-6.
- [2] 齐庆新,陈尚本,王怀新,等.冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1852-1858.  
QI Qingxin, CHEN Shangben, WANG Huaixin, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1852-1858.
- [3] 窦林名,牟宗龙,曹安业,等.煤矿冲击矿压防治[M].北京:科学出版社,2017:2-9.
- [4] 姜福兴,姚顺利,魏全德,等.矿震诱发型冲击地压临场预警机制及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3372-3380.  
JIANG Fuxing, YAO Shunli, WEI Quande, et al. Study of site forewarn mechanism of rock burst induced by shock bump and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3372-3380.
- [5] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.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,2019,47(9):1-40.



- QI Qingxin ,LI Yizhe ,ZHAO Shankun *et al.* Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. *Coal Science and Technology* 2019 ,47( 9) : 1-40.
- [6] 李 铁 ,蔡美峰.地震诱发煤矿瓦斯灾害成核机理的探讨[J]. *煤炭学报* 2008 ,33( 10) : 1112-1116.  
LI Tie ,CAI Meifeng. The mechanism of earthquake-induced gas disaster nucleation in coal mines [J]. *Journal of China Coal Society* 2008 ,33( 10) : 1112-1116.
- [7] 王 振 ,尹光志 ,胡千庭 等.高瓦斯煤层冲击地压与突出的诱发转化条件研究[J]. *采矿与安全工程学报* 2010 ,27( 4) : 572-575 ,580.  
WANG Zhen ,YIN Guangzhi ,HU Qianting ,*et al.* Inducing and transforming conditions from rockburst to coal-gas outburst in a high gassy coal seam [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering* 2010 ,27( 4) : 572-575 ,580.
- [8] 徐志双 ,高小跃 ,李志强 等.矿震和水库地震等非天然地震的公共服务需求调查研究[J]. *中国地震* 2020 ,36( 3) : 630-638.  
XU Zhishuang ,GAO Xiaoyue ,LI Zhiqiang ,*et al.* Investigation on public service demand of earthquakes induced by human activities including mining and reservoir impoundment [J]. *Earthquake Research in China* 2020 ,36( 3) : 630-638.
- [9] 朱佩武.辽源矿震的探索和研究[J]. *东北地震研究* ,1986( 2) : 29-41.  
ZHU Peiwu. Exploration and study of mine earthquake in Liaoyuan [J]. *Northeastern Seismological Research* ,1986( 2) : 29-41.
- [10] 李 铁 ,倪建明 ,李志凯.采动岩体强矿震破裂机制反演及其防治对策[J]. *采矿与安全工程学报* ,2016 ,33( 6) : 1110-1115.  
LI Tie ,NI Jianming ,LI Zhongkai. Rupture mechanism inversion of mining-induced strong mine earthquake and its preventive methods [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering* ,2016 ,33( 6) : 1110-1115.
- [11] 曹安业.采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.
- [12] 魏 东 ,贺 虎 ,秦原峰 等.相邻采空区关键层失稳诱发矿震机理研究[J]. *煤炭学报* 2010 ,35( 12) : 1957-1962.  
WEI Dong ,HE Hu ,QING Yuanfeng *et al.* Study on mechanism of mining tremor induced by key strata instability in the gob beside the working face [J]. *Journal of China Coal Society* ,2010 ,35( 12) : 1957-1962.
- [13] 王树立 ,张开智 ,蒋金泉 等.超厚高位红层砂岩破断运动与矿震活动规律[J]. *采矿与安全工程学报* 2016 ,33( 6) : 1116-1122.  
WANG Shuli ,ZHANG Kaizhi ,JIANG Jinquan *et al.* The fracture and rockburst laws of high-position hard and extremely thick red beds [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering* 2016 ,33( 6) : 1116-1122.
- [14] 陈学华 ,吕鹏飞 ,阮 航.地垒构造区域内工作面矿震发生规律研究[J]. *煤炭科学技术* 2017 ,45( 6) : 95-99 ,104.  
CHEN Xuehua ,LYU Pengfei ,RUAN Hang. Research on occurrence laws of shock bump in horst fault zone of working face [J]. *Coal Science and Technology* 2017 ,45( 6) : 95-99 ,104.
- [15] 苗小虎 ,姜福兴 ,王存文 等.微地震监测揭示的矿震诱发冲击地压机理研究[J]. *岩土工程学报* 2011 ,33( 6) : 971-976.  
MIAO Xiaohu ,JIANG Fuxing ,WANG Cunwen *et al.* Mechanism of microseism-induced rock burst revealed by microseismic monitoring [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* ,2011 ,33( 6) : 971-976.
- [16] 曹安业 ,范 军 ,牟宗龙 等.矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J]. *煤炭学报* 2010 ,35( 12) : 2006-2010.  
CAO Anye ,FAN Jun ,MU Zonglong ,*et al.* Burst failure effect of mining-induced tremor on roadway surrounding rock [J]. *Journal of China Coal Society* 2010 ,35( 12) : 2006-2010.
- [17] 潘一山 ,贾宝新 ,王 帅 等.矿震震波传播规律的三维模型及其应用[J]. *煤炭学报* 2012 ,37( 11) : 1810-1814.  
PAN Yishan ,JIA Baoxin ,WANG Shuai *et al.* Three-dimension of model and its application mines seismic wave propagation [J]. *Journal of China Coal Society* 2012 ,37( 11) : 1810-1814.
- [18] 朱广安 ,蒋启鹏 ,伍永平 等.应力波扰动作用下断层滑移失稳的数值反演[J/OL]. *采矿与安全工程学报*: 1-12 [2021-01-09]. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2020.0059>.  
ZHU Guang'an ,JIANG Qipeng ,WU Yongping ,*et al.* Numerical simulation of dynamic behavior of fault slip instability induced by stress waves [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering* ,1-12 [2021-01-09]. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2020.0059>.
- [19] 高明仕 ,窦林名 ,张农 等.岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J]. *岩石力学与工程学报* ,2007( 7) : 1365-1371.  
GAO Mingshi ,DOU Linming ,ZHANG Nong ,*et al.* Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rockburst in geomaterials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2007( 7) : 1365-1371.
- [20] 窦林名 ,巩思园 ,刘 鹏 等.矿震冲击灾害远程在线预警平台[J]. *煤炭科学技术* 2015 ,43( 6) : 48-53.  
DOU Linming ,GONG Siyuan ,LIU Peng ,*et al.* Remote online early warning platform of mine seismic and bump disaster [J]. *Coal Science and Technology* 2015 ,43( 6) : 48-53.
- [21] 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.
- [23] GAO Fuqiang ,STEAD D. The application of a modified Voronoi logic to brittle fracture modelling at the laboratory and field scale [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* , 2014 ,68: 1-14.
- [24] CAI Jiangang ,ZHAO Jian. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* ,2000 ,37( 4) : 661-682.
- [25] DENG Xifei ,ZHU Jianbo ,CHEN Shougen *et al.* Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses [J]. *Tunnelling & underground Space Technology* 2014 , 43( 6) : 88-100.