

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.022

## 爆破地震效应影响因素评估分析\*

刘华丽,刘 影,谢全民

(陆军工程大学,南京 210007)

**摘 要:** 为了准确、迅速地判断爆破地震动作用下爆破工程的安全问题,便于更好地控制由于爆破地震动引起的危害效应,采用定性与定量相结合的形式,将层次分析法和模糊数学方法结合起来,根据最大隶属度原理,分析爆破地震效应的影响因素。研究表明:采用爆破地震效应影响因素评价指标体系、模糊评判分析模型及安全评估软件系统,能迅速、准确地判断爆破方案导致的爆破地震效应对周围环境的影响,其危险影响比较小,计算结果与实际工程爆破所得结果一致。本方法与实验分析方法相比,其原理简单、结果可靠,计算迅捷、节省时间、可快速应用于爆破实际工程中,同时又节省大量的费用。

**关键词:** 爆破;爆破地震效应;模糊评判;安全分析;评估分析

**中图分类号:** TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0151-07

## Assessment and Analysis of Influencing Factors of Explosive Seismic Effect

LIU Hua-li, LIU Ying, XIE Quan-min

(Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to accurately and rapidly judge the safety problems and control the harmful effects of blasting ground motion, the influence factors of the blasting seismic effect were analyzed according to the maximum membership degree principle. During the process of this research, AHP and fuzzy mathematics were combined qualitatively and quantitatively. The results show that the evaluation index system, fuzzy evaluation analysis model and safety evaluation software system can be used to quickly and accurately judge the impact of blasting seismic effect on the surrounding environment. The risk impact is relatively small, and the calculation results are consistent with the actual engineering blasting results. Compared with the experiment analysis method, this method has the advantages of simple principle, reliable result, fast calculation, time saving, rapid application in blasting engineering and large cost saving.

**Key words:** blasting; explosion seismic effect; fuzzy evaluation; safety analysis; assessment analysis

目前的城镇化建设工程中,爆破技术已成为一种不可或缺的技术手段,它大大降低了人们的劳动强度,显著加快基础工程项目的建设进程。但爆破技术对周围环境造成的影响也越来越引起人们的

关注,因为爆破开挖改变了原有物体原来的约束条件,其结构及相互间力学关系发生了变化<sup>[1,2]</sup>。炸药爆炸时会释放出冲击波,冲击波随着传播距离的增大,会逐渐衰减为应力波和地震波,地震波引起近地表或地面的震动称为爆破震动,可能对爆区周围的建(构)筑物造成破坏性影响<sup>[3]</sup>。爆破地震效应受到爆源、传播介质、地形地貌等多重复杂因素的影响,动力响应规律较为复杂,且这些影响因素之间

收稿日期:2018-10-25

作者简介:刘华丽(1975-),女,河南省淮阳县人,副教授、博士,主要研究方向为防灾减灾。(E-mail)1429211066@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(NO.51508570)爆炸地震动作用下边坡滑动评价方法研究

关联性较强,加深了爆破地震危害效应控制研究的难度。因此,开展爆破地震效应的影响因素评估分析,对于减小爆炸地震动诱发的危害,确保工程周围环境安全,具有极其重要的经济和社会意义<sup>[4,5]</sup>。

目前国内外在爆破地震效应影响规律分析方面有很多研究工作,大多采用实验分析法<sup>[6-9]</sup>。实验分析法直观、准确,但成本高、时间长、工作量大、难以组织,且限制条件较多。许多参数需要多次实验分析,难以适应工程项目大范围、多点位预测工作的需要。还有一些学者仅从定性方面开展纯理论研究分析,缺少实际工程应用定量参考的依据。模糊综合评判法可将定性描述与定量分析进行有机结合,且不受被评价对象因素之间的影响,根据影响爆炸地震动的主要影响因素,建立爆破地震效应模糊评判分析模型,开发爆破地震效应影响因素评估分析系统,快速、准确地对爆破地震效应进行评估、分析、判断。并把这种方法应用于爆破工程的实际分析中,既节约了时间,满足了快速预测的需求,又节省了勘察、实验及计算的费用,简单实用,具有较大的经济和社会效益。

## 1 影响因素的选取分析

爆破地震效应影响因素多,如炸药种类、炸药量、高程、孔网参数、延期时间、雷管段别、一次齐爆药量、爆心距等。根据已有的研究成果<sup>[10-14]</sup>,对主要影响因素进行分析、甄别,将爆破地震效应影响因素划分为内部影响因素和外部影响因素。其中,内部影响因素主要包括结构特征尺寸、结构类型和支护结构状况等;外部影响因素是指作用在结构上促使内部条件发生变化的因素,包括炸药、爆破延期时间、高程差、雷管段数、爆心距、传播介质、地震波频率、地震波振幅、地震波持续时间等。工程实践表明,若选取的爆破安全距离过于保守,必将限制爆破规模;若选取的爆破安全距离过于激进,可能导致周边需保护目标的破坏。综合上述因素,并考虑工程实际经验后,建立了如图1所示的爆破地震效应影响因素评价指标体系。同时,根据工程经验将爆破地震效应下的效果分为四类等级,即安全、较安全、不安全、非常不安全。

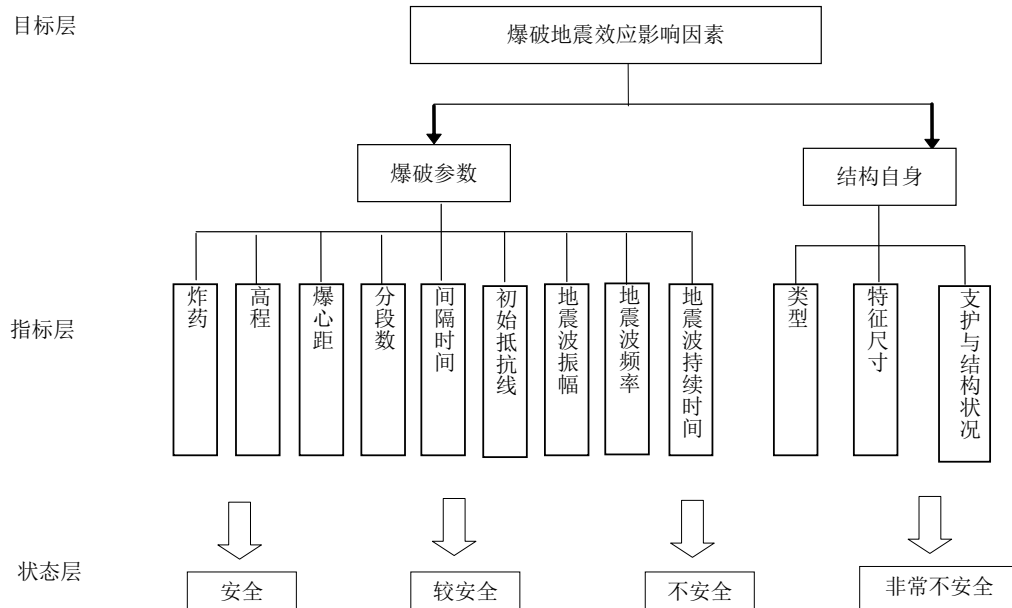


图1 爆破地震效应影响因素评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for influencing factors of blasting seismic effect

## 2 模糊综合评判模型

### 2.1 评价集与因素集的确定

根据模糊数学原理<sup>[15]</sup>,首先确定评价集: $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}=\{\text{安全, 较安全, 不安全, 非常不安全}\}$ ,其中 $m$ 为评价等级数,此处 $m=4$ 。根据图1的评价指

标体系,确定评价对象的主控因素集: $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}=\{\text{炸药, 高程, 爆心距, 分段数, 间隔时间, 初始抵抗线, 地震波振幅, 地震波频率, 地震波持续时间, 类型, 特征尺寸, 支护, 结构状况}\}$ ,式中 $n$ 为评价因子数,此处 $n=12$ 。见表1。

表 1 评价因子及分级标准  
Table 1 Evaluation factors and grading standard

因素	级别				
	安全	较安全	不安全	非常不安全	
爆破参数因素	炸药	较少	少	较多	多
	高程	大	较大	较小	小
	爆心距	远	较远	较近	近
	分段数	多	较多	较少	少
	间隔时间	长	较长	较短	短
	初始抵抗线	小	较小	较大	大
	地震波振幅	小	较小	较大	大
	地震波频率	高(>80 Hz)	较高(15 ~ 80 Hz)	较低(10 ~ 15 Hz)	低(1 ~ 10 Hz)
结构自身因素	地震波持续时间	短(0 ~ 500 ms)	较短(0.5 ~ 1 s)	较长(1 ~ 3 s)	长(>3 s)
	特征尺寸	大	较大	较小	小
	支护和结构状况	有	部分有	基本没有	没有
	类型	钢筋混凝土	砖石	木	土

2.2 隶属度函数

根据影响因素的指标分为离散变量和连续变量二种类型,依据模糊数学中隶属度建立的原则,对于离散型变量采用专家评定法确定变量的隶属度值,对于连续性变量采用公式法确定变量的隶属度值。

(1) 离散型变量的隶属度函数

根据专家工程实际经验采用打分法来确定离散型变量的隶属度值,如表2所示。表中,A/B/C表示的含义为:A为本文隶属度取值,B为参考文献[16]中的隶属度取值,C为参考文献[17]中隶属度取值,\*表示参考文献中没标注具体数据。表2是根据专家打分的方式可确定离散型变量的隶属度函数。

(2) 连续型变量的隶属度函数

根据公式法来确定连续型变量的隶属度值,即建立隶属度与指标数值之间的函数关系,确定连续型变量的隶属度函数,再将实测值代入式(1)即可得到。

$$\mu_j M : a_j \rightarrow \mu_j M(a_j) \quad u_j M(a_j) \in [0, 1] \quad (1)$$

在评价集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  中进行评价分析。以  $M_{ij} = g(b_i, a_j)$  表示第  $j$  个因素  $a_j$  对应第  $i$  个评价指标  $b_i$  的效果指标值,得到效果指标特征矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{m1} & M_{m2} & \dots & M_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

隶属度模型采用半梯形模型

$$r_{ij}(I) = \begin{cases} 1 & M_{ij} \leq c \\ \frac{d - M_{ij}}{d - c} & c < M_{ij} \leq d \\ 0 & M_{ij} > d \end{cases} \quad (3)$$

$$r_{ij}(II) = \begin{cases} 0 & M_{ij} < c \text{ 或 } M_{ij} > e \\ \frac{M_{ij} - c}{d - c} & c < M_{ij} \leq d \\ \frac{e - M_{ij}}{e - d} & d < M_{ij} \leq e \end{cases} \quad (4)$$

$$r_{ij}(III) = \begin{cases} 0 & M_{ij} < d \text{ 或 } M_{ij} > f \\ \frac{M_{ij} - d}{e - d} & d < M_{ij} \leq e \\ \frac{f - M_{ij}}{f - e} & e < M_{ij} \leq f \end{cases} \quad (5)$$

$$r_{ij}(IV) = \begin{cases} 0 & M_{ij} < e \\ \frac{M_{ij} - e}{f - e} & e \leq M_{ij} \leq f \\ 1 & M_{ij} > f \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\{i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n\}$ 。式中: $c, f$ 分别对应表1中连续型变量等级评定中的2个极值; $d, e$ 为2个极值间的分点。需要说明的是,工程项目等级

评定不同,  $c, f, d, e$  的取值也不同<sup>[18]</sup>。

### 2.3 权重确定

设  $T_j(O_{ik})$  表示在第  $j$  个专家(假设有 7 个专家)排序中排在  $O_{ik}$  之后的目标数, 则有

$$A'_{ik} = \sum_{j=1}^q T_j(O_{ik}) \quad k = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

再利用下式

$$A_{ik} = \frac{A'_{ik}}{\sum_{j=1}^7 A'_{ij}} \quad (8)$$

将  $A_{ik}$  进行归一化处理, 即可得到权重。

### 2.4 模糊综合评判体系

将效果指标矩阵转换为隶属度矩阵, 即

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由模糊算法原理, 基于式(9)可计算得到综合隶属度。

$$B = A \circ R \quad (10)$$

再由最大隶属度原则进行评价, 即

$$b_{i0} = \max_{1 \leq i \leq m} \{b_i\} \quad (11)$$

在  $V$  中所对应的位置可得到评估结果  $v_{i0}$ 。

表 2 离散型变量的隶属度值

Table 2 The membership value of discrete variables

离散型变量	变量特征	炸药				高程			
		较少	少	较多	多	大	较大	较小	小
隶属度 $u$	安全	0.8/0.8/0.65	0.3/0.3/0.2	0/0/0.1	0/0	0*/0	0.05*/0.05	0.2*/0.15	0.7*/0.6
	较安全	0.2/0.2/0.25	0.5/0.5/0.5	0.2/0.2/0.2	0/0/0.05	0.1*/0.15	0.05*/0.15	0.5*/0.65	0.15*/0.2
	不安全	0/0/0.05	0.2/0.2/0.2	0.5/0.5/0.5	0/0/0.05	0.3*/0.2	0.4*/0.45	0.25*/0.15	0.1*/0.15
	非常不安全	0/0/0.05	0/0/0.1	0.3/0.3/0.2	1.0/1/0.9	0.6*/0.65	0.5*/0.4	0.05*/0.05	0.05*/0.05
离散型变量	变量特征	分段数				初始抵抗线			
		多	较多	较少	少	小	较小	较大	大
隶属度 $u$	安全	0.6/0.65/*	0.25/0.25/*	0.1/0.05/*	0.05/0/*	0.65*/0.7	0.25*/0.25	0.05*/0.05	0.05*/0
	较安全	0.15/0.3/*	0.5/0.65/*	0.4/0.1/*	0.1/0.2/*	0.20*/0.2	0.5*/0.5	0.2*/0.2	0.1*/0.1
	不安全	0.15/0.1/*	0.2/0.1/*	0.45/0.6/*	0.3/0.1/*	0.10*/0.1	0.2*/0.2	0.5*/0.5	0.2*/0.2
	非常不安全	0.1/0/*	0.05/0/*	0.05/0.25/*	0.55/0.7/*	0.05*/0	0.05*/0.05	0.25*/0.25	0.65*/0.7
离散型变量	变量特征	支护和结构状况				类型			
		有	部分有	基本没有	没有	钢筋混凝土	砖石	木	土
隶属度 $u$	安全	0.8/0.85/*	0.2/0.15/*	0/0/*	0.05/0/*	0.65*/0.65	0.3*/0.15	0.2*/0.05	0*/0
	较安全	0.1/0.15/*	0.65/0.8/*	0.05/0.05/*	0.1/0.05/*	0.2*/0.25	0.5*/0.65	0.3*/0.15	0*/0.05
	不安全	0.1/0/*	0.1/0.05/*	0.85/0.8/*	0.15/0.1/*	0.1*/0.15	0.15*/0.15	0.45*/0.65	0*/0.1
	非常不安全	0/0/*	0.05/0/*	0.1/0.15/*	0.7/0.85/*	0.05*/0.05	0.05*/0.05	0.05*/0.15	1*/0.85

### 3 工程应用

某采石场位于水泥生产厂区南侧 1~1.5 km 之间, 拟自南向北、由低到高呈台阶状进行开采。水泥厂日需石灰石原料为 5000 t。采石场周边环境较好, 东侧 200 至 300 m 范围内有砖混结构居民房, 抗振性能比较差。该采石场爆破方案: 采用深孔松动台阶爆破技术, 孔径 90 mm, 台阶爆破爆高  $H$  为 12~15 m; 底盘抵抗线为  $W_d$  为 3.0~3.5 m; 超深  $h$  为 1.5~2.5 m; 孔深  $L$  为 13.5~17.5 m, 倾角为  $80^\circ \sim 86^\circ$ ; 多排矩形布孔方式, 炮孔间距  $a$  为 2.5~3.5 m, 排距  $b$  为 2.5~3.5 m; 岩石粉状乳化炸药, 爆速大于 3200 m/s, 炮孔耦合连续装药, 孔口为 3.5~4.0 m 的堵塞长度; 非电毫秒雷管, 采用反向传爆, 多排排间分段孔内微差起爆, 实际采用雷管段别为 1、3、5、7、9、11、13 段。

根据《爆破安全规程》(GB6722—2014) 的规定, 一般砖结构房屋最大安全允许振速  $V$  为 2.0~3.0 cm/s。本项目爆破地震效应的安全评估如下。

根据表 2 及式(3)至式(6)得到爆破参数、地震波、环境自身影响的模糊关系矩阵分别为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.15 & 0.6 & 0.7 & 0.25 \\ 0.2 & 0.15 & 0.6 & 0.15 & 0.2 & 0.5 \\ 0.5 & 0.1 & 0.2 & 0.15 & 0.1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.05 & 0.05 & 0.1 & 0 & 0.05 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0.25 \\ 0.45 & 0.4 & 0.65 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 \\ 0.15 & 0 & 0 \end{bmatrix} R_3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0.3 \\ 0.5 & 0.05 & 0.5 \\ 0.2 & 0.85 & 0.15 \\ 0 & 0.1 & 0.05 \end{bmatrix}$$

根据式(7)和式(8)得到各影响因素的权重分别为

$$\omega = [0.25 \quad 0.45 \quad 0.3]^T; \omega_1 =$$

$$[0.1 \quad 0.05 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.15]^T$$

$$\omega_2 = [0.2 \quad 0.5 \quad 0.3]^T; \omega_3 = [0.2 \quad 0.3 \quad 0.5]^T$$

根据式(10)计算得到隶属度

$$b_1 = R_1 \cdot \omega_1 = [0.4325 \quad 0.3125 \quad 0.185 \quad 0.07]^T;$$

$$b_2 = R_2 \cdot \omega_2 = [0.115 \quad 0.485 \quad 0.37 \quad 0.03]^T$$

$$b_3 = R_3 \cdot \omega_3 = [0.21 \quad 0.365 \quad 0.37 \quad 0.055]^T$$

$$b = R \cdot \omega = (b_1, b_2, b_3) \cdot \omega =$$

$$[0.222875 \quad 0.405875 \quad 0.32375 \quad 0.047500]^T$$

由计算数据表明: 本项目爆破地震效应对周围环境的影响处于安全状态下隶属度的值为 0.222875, 处于较安全状态下隶属度的值为 0.405875, 处于不安全状态下隶属度的值为 0.323750, 处于非常不安全状态下隶属度的值为 0.047500。由式(11), 即根据最大隶属度原则可知, 该爆破方案导致的爆破地震效应对周围环境的影响处于较安全状态, 计算结果与实际工程爆破所得结果一致。



图 2 软件输入界面

Fig. 2 Software input interface

### 4 爆破地震效应安全评估系统

采用 C 语言编制了基于上述分析、计算的爆破震动安全评估系统。其中图 2 为评价指标体系输入

界面, 输入参数分为爆破参数的影响、地震波的影响、环境自身的影响、权重设置、评估结果六个模块。前三模块包括了影响爆破地震效应的十二个因素, 每个因素对应四个数值调节按钮, 对应综合

评判等级,即安全、较安全、不安全、非常不安全的  
效果指标值;第四模块为相对权重模块,可对各因  
素在该大类影响因素中所占的权重进行调节;第五  
模块可对爆破参数、地震波、环境自身三个条件对  
爆破地震效应影响的权重进行调节;第六模块为评  
估结果,输入数据完毕后点击运算按钮可直接得到

对该方案爆破地震效应的评估结果。

将工程实际应用案例数据参数输入界面2中,  
得到如图3所示的计算结果。图3显示,其计算机  
计算结果与前面手工计算结果一致,且其系统可简  
单、迅速计算出爆破方案引起的爆破地震效应。

爆破参数的影响							地震波的影响			环境自身的影响		
炸药	高程	爆心距	分段数	间隔时间	初始抵抗线	振幅	频率	持续时间	类型	结构尺寸	支护与结构状况	
安全	0.00	0.70	0.15	0.60	0.70	0.25	0.20	0.00	0.25	0.30	0.00	0.30
较安全	0.20	0.15	0.60	0.15	0.20	0.50	0.45	0.40	0.85	0.50	0.05	0.50
不安全	0.50	0.10	0.20	0.15	0.10	0.20	0.20	0.60	0.10	0.20	0.85	0.15
非常不安全	0.30	0.05	0.05	0.10	0.00	0.05	0.15	0.00	0.00	0.00	0.10	0.05

相对权重						
0.10	0.05	0.20	0.20	0.30	0.15	0.20

权重设置		
爆破的影响	地震波的影响	环境自身的影响
0.25	0.45	0.30

评估结果			
安全	较安全	不安全	非常不安全
0.222875	0.405875	0.323750	0.047500

图3 结算结果

Fig. 3 Computing result

## 5 结论

爆破地震效应影响评价,大多采用工程经验法  
或实验分析法等等,这些方法虽然应用较广泛,但  
不能满足快速预测的需求。因此针对爆破地震效  
应的特点,采用模糊评判的方法判断爆破地震效  
应结果情况,既能满足快速预测的需求,具有较大  
的社会和经济效益,同时对于工程爆破技术人员制  
定与选择工程爆破方案,分析爆破状况,进而为采  
取必要的工程处理措施,具有一定的参考和依据。

### 参考文献 (References)

- [1] 张雪亮,王树堂. 爆破地震效应[M]. 北京:北京地震工程出版社,1981.
- [1] ZHANG Xue-liang, WANG Shu-tang. Blasting seismic effect [M]. Beijing: Beijing Earthquake Engineering Press, 1981. (in Chinese)
- [2] 李洪涛. 基于能量原理的爆破地震效应研究[D]. 武汉:武汉大学,2007. [2] LI Hong-tao. Study on effect of blast-induced seismic based on energy theory [D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese)
- [3] 言志信,吴德伦,王漪,等. 地震效应及安全研究[J]. 岩土力学,2002,23(2):201-203.
- [3] YAN Zhi-xin, WU De-lun, WANG Yi, et al. The study of blast vibration effect and safety [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 201-203. (in Chinese)
- [4] 钱七虎,王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [4] QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang. Impact explosion effect in rock and soil [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [5] 钱七虎,陈士海. 爆破地震效应[J]. 爆破, 2004, 21(2):1-5.
- [5] QIAN Qi-hu, CHEN Shi-hai. Blasting vibration effect [J]. Blasting, 2004, 21 (2): 1-5. (in Chinese)
- [6] AUSILIOE, CONTEE, DENTEG. Seismic stability analysis of reinforced slopes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19 (3): 159-172.
- [7] 黄润秋,李果,巨能攀. 层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5):865-875
- [7] HUANG Run-qiu, LI Guo, JU Neng-pan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (5): 865-875. (in Chinese)
- [8] LI J, DENG S, WANG M, et al. Weak disturbance-triggered seismic events: an experimental and numerical investigation[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2019, 78(4):2943-2955.
- [9] 肖卫国,王肖钧,劳俊. 不同方式地下爆炸地震耦合效应的数值模拟[J]. 计算物理,2011,28(6):797-802.

- [9] XIAO Wei-guo, WANG Xiao-jun, LAO Jun. Numerical simulation of seismic coupling effects in underground explosions with different explosion modes[J]. Computational Physics, 2011, 28(6): 797-802. (in Chinese)
- [10] 宗琦,汪海波,周胜兵. 爆破地震效应的监测和控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5):938-945
- [10] ZONG Qi, WANG Hai-bo, ZHOU Sheng-bing. Research on monitoring and controlling techniques considering effects of seismic shock [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 938-945. (in Chinese)
- [11] 林大超,白春花,张奇. 爆炸地震地面竖向振动的幅值特性[J]. 北京:北京理工大学学报,2001,21(2):173-176.
- [11] LIN Da-chao, BAI Chun-hua, ZHANG Qi. Amplitude characteristics of vertical ground surface vibration caused by explosion seism [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(2): 173-176. (in Chinese)
- [12] BERGKVIST N O, FERM R. Nuclear explosions 1945-1998[R]. Defence Research Establishment, 2000: 14-15.
- [13] 殷跃平,王猛,李滨,等. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,31(10):1969-1982.
- [13] YIN Yue-ping, WANG Meng, LI Bin, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2013, 31(10): 1969-1982. (in Chinese)
- [14] 沈蔚,徐全军,黄文华. 用灰关联分析法确定爆破震动参数的主要影响因素[J]. 工程爆破,2000,6(4):8-13.
- [14] SHEN Wei, XU Quan-jun, HUANG Wen-hua. Determination of main influencing factors on blasting vibration parameters by grey correlation analysis [J]. Engineering Blasting, 2000, 6(4): 8-13. (in Chinese)
- [15] 张跃,皱寿平,宿芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1992.
- [15] ZHANG Yue, ZHOU Shou-ping, SU Fen. Fuzzy mathematics method and application [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [16] 王俊平. 爆破地震波对周围物影响的分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.
- [16] WANG Jun-ping. Analysis of the influence of blasting seismic wave on nearby structures [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [17] 郑峰. 爆破地震效应影响因素的研究及工程应用[D]. 武汉:武汉科技大学,2007.
- [17] ZHENG Feng. Study and application on influence factors for the blasting seismic effect [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [18] 刘华丽,卢厚清,李宏伟,等. 模糊综合评判法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 解放军理工大学学报学报, 2013, 14(1): 84-88
- [18] LIU Hua-li, LU Hou-qing, LI Hong-wei, et al. Application of new method based on fuzzy comprehensive assessment for stability of landslide [J]. PLA University of Science and Technology, 2013, 14(1): 84-88. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第144页)

- [4] XU Jing-de, TIAN Si-yu, LIU Zhen-qian, et al. Research on excitation effect of membrane obstacle in propagation process of methane explosion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(7): 69-74. (in Chinese)
- [5] 刘振乾. 非均匀分布的瓦斯爆炸传播特性实验研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2017.
- [5] LIU Zhen-qian. Experimental study on explosion propagation characteristics of non-uniformly distributed gas [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2017. (in Chinese)
- [6] 李祥春,聂百胜,杨春丽,等. 封闭空间内瓦斯浓度对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响[J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 135-147.
- [6] LI Xiang-chun, NIE Bai-sheng, YANG Li-chun, et al. Effect of gas concentration on kinetic characteristics of gas explosion confined space [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(2): 135-147. (in Chinese)
- [7] Vollmer K G, Ettner F, Sattelmayer T. Deflagration-to-detonation in hydrogen-air mixtures with a concentration gradient [J]. Combust Sci Technol, 2012, 184(10-11): 1650-1661.
- [8] Boeck L R, Hasslberger J, Sattelmayer T. Flame acceleration in hydrogen/air mixtures with concentration gradients [J]. Combust Sci Technol, 2014, 186(10-11): 1903-1915.
- [9] ETTNER F, VOLLMER K G, SATTELMAYER T. Mach reflection in detonations propagating through a gas with a concentration gradient [J]. Shock Waves, 2013, 23: 201-206.
- [10] Wang C J, Wen J X. Numerical simulation of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixtures with concentration gradients [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 7657-7663.

英文编辑:陈东方