

微地震震源地震波能量的计算方法

王进强^{1,2)}✉, 胡乃联^{1,2)}, 姜福兴^{1,2)}, 吕文生^{1,2)}, 曲效成^{1,2)}

1) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: wangjq@ustb.edu.cn

摘 要 由工程爆破中普遍采用的质点峰值振动速度与炸药量和震源距关系的经验公式推导出质点峰值振动速度与震源能量和震源距关系的经验公式, 并作为微地震波能量衰减公式. 在公式中引入地震波能量特征系数 K_1 描述震源能量与震源峰值振动速度之间的比例关系, 并认为 K_1 主要与震源场地介质特征有关, 而与爆破参数无关. 通过校验炮数据的回归分析获取监测区域能量特征系数 K_1 . 采用能量衰减模型, 以微震事件各测点的峰值振动速度、震源距及 K_1 为已知量, 以震源能量及衰减系数为回归参数进行回归计算, 直接反演出震源能量. 本文方法为震源能量计算提供了新的思路和方法.

关键词 采矿; 爆破; 地震波; 监测; 衰减; 回归分析

分类号 TD324; P315.3

Calculation method for the seismic wave energy of microseismic hypocenters

WANG Jin-qiang^{1,2)}✉, HU Nai-lian^{1,2)}, JIANG Fu-xing^{1,2)}, LÜ Wen-sheng^{1,2)}, QU Xiao-cheng^{1,2)}

1) Key Laboratory of High-efficient Mining and Safety of Metal Mines (Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: wangjq@ustb.edu.cn

ABSTRACT An empirical formula to describe the relation of particle vibration velocity to explosive's quantity and distance from the explosion center is used in the blasting engineering field. Based on this formula, a new empirical equation to characterize the relation of particle vibration velocity to hypocenter energy and distance to the hypocenter is presented in this article, which is considered as the attenuation formula of seismic wave energy. In the new equation, the coefficient of seismic wave energy, K_1 , is introduced to describe the relationship between hypocenter energy and particle vibration velocity. It is thought that K_1 has strong relationship with the locale medium characteristic of the hypocenter, nothing to do with the blasting parameters. According to the energy data of check points, K_1 is calculated by regression analysis. By using the energy attenuation model, taking particle vibration velocity, distance to the hypocenter and K_1 of each microseismic incident as the known parameters, hypocenter energy and attenuation coefficient as the regression parameters, the hypocenter energy can be obtained by inverse calculation. This method provides a new idea to calculate the hypocenter energy.

KEY WORDS mining; blasting; seismic waves; monitoring; attenuation; regression analysis

微震监测技术以其实时、远程、动态和三维的特点^[1], 在矿山动力灾害监测预警工作中日益发挥重要作用^[2-3]. 震源能量作为描述岩体破裂所释放

弹性能大小的物理量是震源“时空强”三参数之一, 准确计算震源能量是进行岩体破裂场分析及岩体动力灾害预警的基础, 所以震源能量计算具有重要

收稿日期: 2012-03-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2010CB226803); 国家自然科学基金资助项目 (51104011; 51274020)

意义 [4].

微震震源能量计算主要借鉴地震学的原理及方法, 如 Gutenberg-Richter 法、能量密度法、震动持续时间法、地震图积分法和里氏震级法 [5]. 一方面这些方法比较复杂, 需要参数众多; 另一方面, 矿山微震在震源机制、震级、震相、地震波频率、检波器类型等方面又不同于天然地震, 不能直接照搬天然地震的方法及参数. 目前, 适用于矿山微震的经验公式还没有建立起来. 震源地震波能量研究最大的难点在于震源能量的无法直接量测性和能量衰减规律的复杂性, 相较于震源定位研究, 震源能量计算是微震监测领域的难点和薄弱环节.

本文的主要思路是借鉴爆破工程中有关地震波能量传播规律的研究成果, 依据测点峰值振动速度、震源距及震源能量之间的统计规律反演震源能量, 为微地震震源能量计算提供一种可行的方案.

1 工程背景

峰峰集团梧桐庄煤矿 182106 工作面存在突水危险性, 为了避免突水灾害的发生, 峰峰集团与北京科技大学合作, 采用北京科技大学研制的微地震监测系统 BMS 对开采过程中的岩层破裂规律、构造活化过程等进行监测, 开展微震监测技术用于底

板突水的监测和预警研究.

在检波器布设优化研究的基础上, 结合现场施工条件, 沿工作面上下顺槽, 在顶、底板中布设检波器, 检波器的平面投影如图 1 所示.

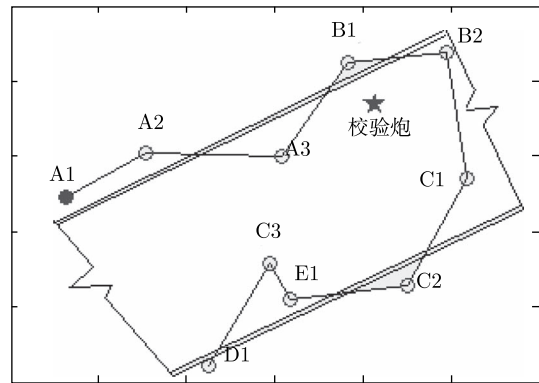


图 1 检波器及校验炮平面投影图

Fig.1 Plan projection of the geophones and check-shot

为进行微震监测系统的校验和相关参数的计算, 进行了放炮标定. 采用煤矿许用乳化炸药 16.6 kg, 齐发爆破方式, 爆破后各检波器获得了清晰的地震波形图, 如图 2 所示, 各测点的主要数据如表 1 所示.

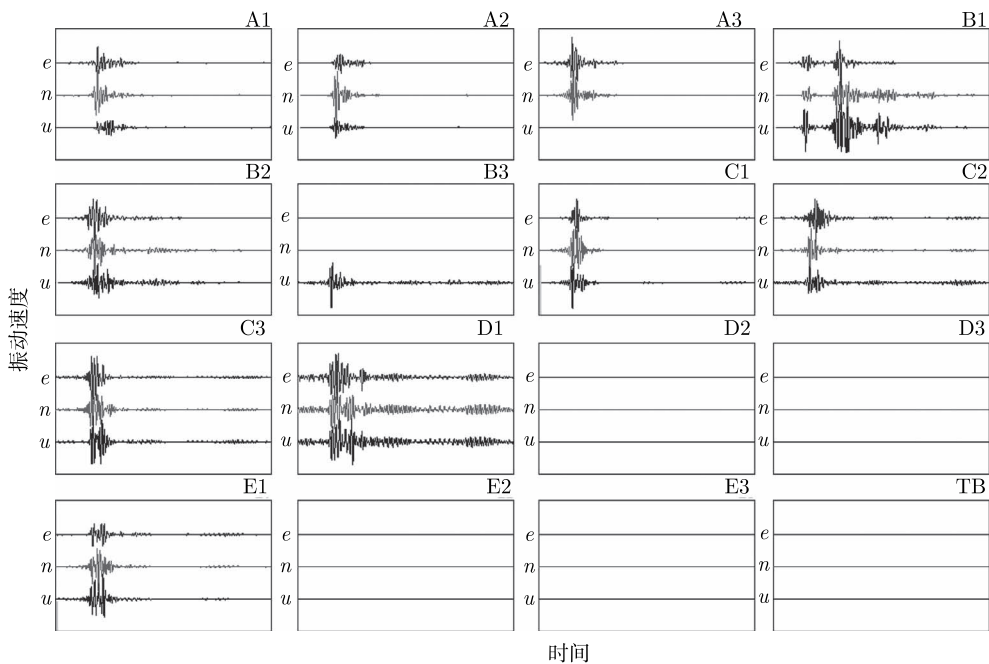


图 2 校验炮地震波形图

Fig.2 Seismic waves of the check-shot

2 震源能量计算

2.1 测点能量计算

要精确地计算出地震波传播过程中, 各个检波

器位置处地震波能量密度是非常困难的 [6], 工程中通常采用某一波形参数来表示测点能量大小, 如最大峰值振动速度、峰值振动速度平方、地震波持续

时间内各采样点振幅的平方和等, 一般认为地震波持续时间内各采样点振幅平方和表示能量更准确. 利用表 1 中数据, 计算得测点峰值振动速度与能量(地震波持续时间内采样点振幅平方和)之间的线性相关系数 $r=0.951$, 大于 0.7, 说明测点峰值速度与能量之间具有高度线性相关性. 进行峰值速度-能量的线性回归, 回归曲线及散点图如图 3 所示.

表 1 校验炮各检波器地震波参数

Table 1 Seismic wave parameters for each geophone of the check-shot

测点	震源距/m	峰值速度/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	能量/($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-2}$)
A1	185.6	0.51	2.75
A2	135.6	2.12	47.81
A3	71.0	0.95	16.56
B1	33.4	4.01	105.00
B2	69.8	1.73	51.88
C1	71.0	1.57	36.56
C2	121.7	0.63	36.56
C3	122.0	0.91	15.94
D1	195.8	0.30	2.89
E1	136.6	0.92	13.81

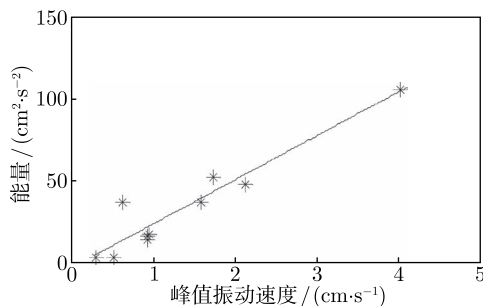


图 3 峰值振动速度-能量回归曲线

Fig.3 Regression curve of vibration velocity to energy

如此高的线性相关性, 说明在地震波能量传播规律研究中, 完全可以用质点振动峰值速度作为测点能量的标志, 而无需计算微震事件起止时间段内的振幅平方和. 这样一方面可以减少计算工作量; 另一方面因为峰值速度的计算不需要事件起止时间的拾取, 可以实现自动计算, 有利于提高微震监测系统整体的效能.

2.2 地震波能量衰减规律

2.2.1 地震波能量衰减

影响地震波传播过程中能量衰减的主要因素为波前扩散和吸收衰减. 在均匀介质中, 点震源的波前为球面, 随着传播距离的增大, 球面逐渐扩展, 但总能量仍保持不变, 而使单位面积上的能量减小, 振动的最大振幅与震源距呈反比关系, 表示为

$$A = \frac{A_0}{r}. \quad (1)$$

式中, A 为测点最大振幅, A_0 为震源振幅, r 为震源距.

由于实际岩层并非理想弹性介质, 地震波在传播过程中会因摩擦、液体流动、黏性张弛等原因造成衰减, 称之为吸收衰减. 吸收衰减的程度可用单位距离内振幅的衰减率表示, 称为吸收系数 β . 理论上已经证明, 吸收系数是频率的函数, 对某一种岩石介质, 在相同的振幅下, 频率越高, 吸收系数越大. 因此, 地震波随传播距离的增大, 高频部分很快被吸收, 而只保留较低的频率成分, 因此吸收系数也是震源距的函数. 地震波的吸收衰减表示为

$$A = A_0 e^{-\beta(r)\cdot r}. \quad (2)$$

地震波受波前扩散和吸收衰减的综合影响, 可表示成

$$A = \frac{A_0}{r} e^{-\beta(r)\cdot r}. \quad (3)$$

不同震源距位置处 β 值不同, 在天然地震的震动衰减规律计算中通常采用分段函数的形式, 而在微震监测中, 由于震源距范围有限, 为简化计算, 在一定的震源距范围内采用固定 β 值.

2.2.2 萨道夫斯基振动速度经验公式

爆破工程中质点振动速度衰减规律常用萨道夫斯基经验公式^[7-8]表示, 即

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^\alpha = V_0 \cdot r^{-\alpha}. \quad (4)$$

式中: V 为质点振动速度, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; r 为震源距, m; K 为场地系数; α 为衰减系数; Q 为最大段药量, kg; V_0 为震源初始振动速度, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

这里 V_0 只是回归曲线统计意义的震源振动速度, 或称为虚震源振动速度, 因为在爆破近区质点振动速度呈现完全不同的规律特性.

对于表 1 中数据, 回归得 $K=111.45$, $\alpha=1.3$.

工程爆破中经常采用萨氏公式预测质点振动速度或计算最大允许炸药量, 也是我国《爆破安全规程》(GB6722—2003) 推荐使用的回归方式.

2.2.3 地震波能量衰减规律回归模型

可用于地震波能量衰减规律的回归模型主要有两种: 第一种幂函数形式, 如式 (4); 第二种指数函数形式, 如式 (3). 采用表 1 中数据, 将指数模型与幂函数模型的回归结果进行对比显示, 如图 4 所示.

由图 4 可见幂函数模型与指数函数模型均适宜描述微震小尺度下地震波能量的衰减规律, 回归效果差异不大, 幂函数回归效果稍好一点. 幂函数更

适宜描述前期衰减迅速,后期衰减缓慢的特性,而且有大量幂函数回归模型中场地系数 K 和衰减系数 α 可供借鉴,所以在微震监测系统中选用幂函数回归模型计算地震波能量衰减规律.

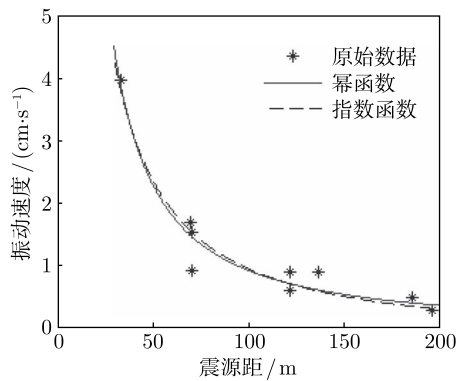


图 4 幂函数与指数函数回归模型比较

Fig.4 Comparison of power and exponential regression models

2.3 震源能量回归模型

萨氏公式直接用于微震震源能量计算并不方便. 场地系数 K 与震源介质及爆破参数有关, 炸药量 Q 对应的地震波能量也需要转换, 而相关参数的设置也比较复杂.

2.3.1 炸药能量转换系数

炸药爆炸产生的地震波能量 E 与炸药总能量 E_Q 之比, 定义为炸药爆破地震波能量转换系数 η ^[9-10], 即

$$\eta = \frac{E}{E_Q}. \quad (5)$$

能量转换系数可通过实验或经验公式计算得到. 国内外地震工作者先后进行了大量相关的现场测试及研究工作^[11], 地震台采用地震测试仪器, 测试计算爆破引起的地震震级及地震波能量, 基本确定了影响爆破地震波能量转换的因素及能量转换系数的大致范围. 一般来说, 在地面爆破和抛掷爆破中, 转换系数较低, 在地下爆破和硐室加强松动爆破中, 转换系数较高, 约为 10^{-3} 左右.

地震工作者张少泉和郭建明^[10] 在理论分析及大量实测数据基础上, 推导出完全由爆炸地震效应的统计参数确定地震波能量转换系数的公式, 并揭示了二者之间的内在关系, 具有较高的理论及实用价值.

$$\eta = (K \times 10^{-2-\alpha})^{3/\alpha}. \quad (6)$$

将校验炮数据计算结果代入式 (6), 得 $\eta=1.3 \times 10^{-3}$. 计算结果在合理范围之内, 可以用作震源能量计算.

2.3.2 震源能量特征系数

质量为 Q 的炸药爆炸产生的地震波能量 E 为

$$E = Q \cdot Q_v \cdot \eta. \quad (7)$$

式中, Q_v 为炸药的爆热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

将式 (7) 代入式 (4), 得

$$V = \frac{K}{(Q_v \cdot \eta)^{\alpha/3}} \left(\frac{\sqrt[3]{E}}{r} \right)^\alpha = \frac{V_0}{E^{\alpha/3}} \left(\frac{\sqrt[3]{E}}{r} \right)^\alpha. \quad (8)$$

设

$$K_1 = \frac{K}{(Q_v \cdot \eta)^{\alpha/3}} = \frac{V_0}{E^{\alpha/3}}, \quad (9)$$

定义 K_1 为震源的能量特征系数, 将式 (6) 代入式 (9) 得

$$K_1 = \frac{10^{2+\alpha}}{Q_v^{\alpha/3}}. \quad (10)$$

由式 (9) 和 (10) 可见, K_1 的取值主要与震源介质的动力学特征有关, 而与具体的爆破方式无关. 也就是说, K_1 反映了震源弹性波能量 E 与震源初始峰值振动速度 V_0 之间的比例关系, 在相同的实验条件下 K_1 的稳定性要优于场地系数 K .

将校验炮参数代入 (9), 计算得震源的能量特征系数 $K_1=3.19$.

2.3.3 质点峰值振速衰减公式

将式 (9) 代入式 (8) 得

$$V = K_1 \left(\frac{\sqrt[3]{E}}{r} \right)^\alpha. \quad (11)$$

式 (11) 即为峰值振动速度衰减公式. 由于 K_1 值与具体的震源能量方式无关, 可由校验炮数据取得, 而 α 值由微震事件中实测数据的回归得出, 从而使该公式方便用于微震震源能量计算.

将校验炮参数 $Q=16.6 \text{ kg}$, $Q_v=2.81 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\eta=1.3 \times 10^{-3}$, 代入式 (7), 得震源弹性波能量 $E=60.64 \text{ kJ}$.

在选定能量特征系数 K_1 后, 采用式 (11) 作为能量衰减规律回归模型, 以能量 E 和衰减系数 α 为参数, 采用最小二乘法进行回归计算, 直接得出震源能量. 实验数据的震源能量回归值 $E=61.61 \text{ kJ}$, 偏差为 1.6%.

3 震源能量计算优化

由震源能量的计算过程可知, 震源能量计算精度受多种因素影响, 要提高计算精度需要考虑如下方面.

(1) 震源定位精度. 由 (11) 可得震源能量计算公式,

$$E = \left(\frac{V}{K_1} \right)^{3/\alpha} \cdot r^3. \quad (12)$$

由式 (12) 可知, 震源能量与震源距的 3 次方成正比, 震源距是震源能量的敏感因素. 因而, 定位精度是决定震源能量计算精度的关键因素.

(2) 相关参数的计算与选取. 参数包括校验炮场地系数 K 、能量衰减系数 α 、炸药爆热 Q_v 、爆破地震波能量转换系数 η 、能量特征系数 K_1 等, 尤其能量衰减系数, 不同震源、不同传播介质条件下其衰减系数可能有较大区别, 对震源能量计算精度的影响也较大.

分析梧桐庄煤矿微震事件能量衰减系数, 发现底板微震事件的能量衰减系数要大于顶板微震事件的能量衰减系数, 有的高达 2.5, 可能与底板岩层的含水特性有关.

由于能量衰减系数是由监测数据直接回归得出的, 所以关键参数只剩能量特征系数 K_1 ; 而能量特征系数又决定于震源及传播介质特性, 所以在可能的情况下多做测试, 明确震源介质特性与 K_1 值对应关系.

(3) 回归计算初值. 由于震源能量的数值范围跨度巨大, 不合适的回归计算初值可能导致错误的结果, 在初步计算的基础上赋初值是十分必要的. 建议震源能量的回归初值为

$$E_0 = \left(\frac{V_i \cdot r_i}{K_1} \right)^3. \quad (13)$$

式中, E_0 为震源能量的回归初值, V_i 为任一测点的峰值速度, r_i 为与速度值对应的震源距.

(4) 参与计算测点的优化. 对回归结果进行残差校验, 剔除异常点后重新回归计算, 对提高震源能量计算精度十分重要.

由于微震震源机制、地震波传播介质及测点信号拾取的复杂性, 如介质的各向异性、节理裂隙、水、井巷工程等的影响, 震源本身不同的位错方式 (垂直错动、走向滑动和倾向滑动) 使地震波能量和能谱辐射具有一定的方向性^[12], 所以测点峰值速度偏离正常范围的情况经常发生. 这些异常值参与回归计算会影响最终结果的准确性, 尤其当有效测点较少时这种影响更大, 即使定位精度很高, 测点峰值速度的离散性也会使最终的能量计算产生很大的偏差. 由于微震监测的有效检波器数量通常较少, 应采用适于小样本的异常值判别准则, 本文采用 T 检验准则 (罗曼诺夫斯基准则) 进行异常值识别.

震源能量计算及优化的总流程如图 5 所示.

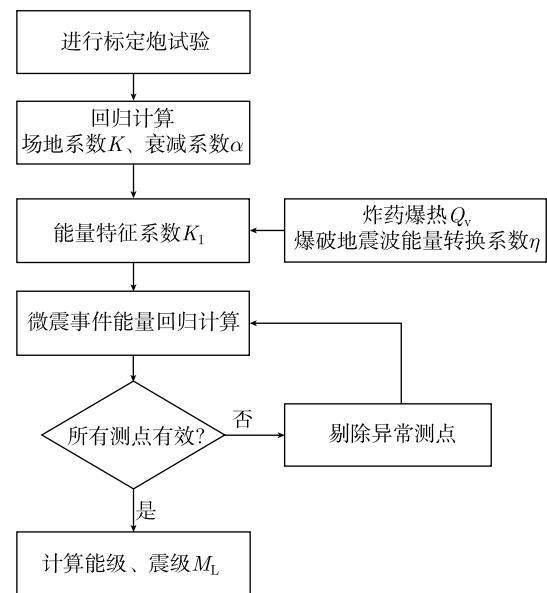


图 5 震源能量计算及优化流程

Fig.5 Calculation and optimization flow chart of seismic source energy

4 结论

(1) 在地震波质点峰值振动速度衰减规律经验公式基础上, 提出了用于反演微地震震源能量的公式, 给出了震源能量计算及优化过程, 并通过实例验证了方法的有效性.

(2) 提出了震源能量特征系数的概念. 该系数反映了特定震源及传播介质条件下, 震源弹性波能量与震源峰值振动速度之间的比例关系, 具有一定的通用性, 可推广应用到其他领域.

(3) 提高震源定位精度、异常测点的识别与剔除是提高震源能量计算精度的关键. 通过有效测点的回归计算及恰当回归初值的设置是提高计算精度的有效方法.

参考文献

- [1] Ge M. Comparison of least squares and absolute value methods in Ae/MS source location: a case study. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34(3/4): 91
- [2] Jiang F X, Xun L, Yang S H. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face. *Chin J Geotech Eng*, 2003, 25(1): 23
(姜福兴, Xun L, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23)
- [3] Wang J Q, Jiang F X, Lü W S, et al. Microseismic wave

- propagation velocity in situ experiment and calculation. *J China Coal Soc*, 2010, 35(12): 2059
(王进强, 姜福兴, 吕文生, 等. 地震波传播速度原位试验及计算. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2059)
- [4] Bertoncini C A, Hinders M K. Fuzzy classification of roof fall predictors in microseismic monitoring. *Measurement*, 2010, 43(10): 1690
- [5] Dou L M, He X Q, Wang E Y, et al. The mechanism of rock burst and seismic waves and its prevention. *Ground Pressure Strata Control*, 1999(Supp 1): 199
(窦林名, 何学秋, 王恩元, 等. 冲击矿压与震动的机理及预报研究. 矿山压力与顶板管理, 1999(增刊 1): 199)
- [6] Gao M S, Dou L M, Zhang N, et al. Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rock burst in geomaterials. *Chin J Rock Mech Eng*, 2007, 26(7): 1365
(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. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1365)
- [7] Li Z, Zhu R G, Hu Z L, et al. Studies on the characteristic coefficient and attenuation index in the measurement of blasting seismic wave. *Explos Shock Waves*, 1986, 6(3): 221
(李铮, 朱瑞庚, 胡再龙, 等. 爆炸地震波振速的特征系数与衰减指数的研究. 爆炸与冲击, 1986, 6(3): 221)
- [8] Yan Y F, Chen S H, Zhang Q H, et al. Optimization study on calculation of blasting vibration peak velocity. *Eng Blast*, 2010, 16(4): 9
(燕永峰, 陈士海, 张秋华, 等. 爆破振动峰值速度计算的优化研究. 工程爆破, 2010, 16(4): 9)
- [9] Fu H F. Experimental research of blasting excavation of soft rock for construction concrete face rock-fill dam. *Eng Blast*, 2005, 11(1): 56
(傅海峰. 利用软岩修筑面板堆石坝爆破开采技术试验研究. 工程爆破, 2005, 11(1): 56)
- [10] Zhang S Q, Guo J M. On the coupling factor of an explosion. *Chin J Geophys*, 1984, 27(6): 537
(张少泉, 郭建明. 爆炸地震的能量转换系数计算及其应用. 地球物理学报, 1984, 27(6): 537)
- [11] Peng Y Q, Liu S Y. Ground shock effect of mine explosion of Heishan iron mine. *Earthquake Res Shanxi*, 1997, 42(3): 18
(彭远黔, 刘素英. 承德钢铁公司黑山铁矿矿山爆破地震动效应. 山西地震, 1997, 42(3): 18)
- [12] Tan S Q. The delay stack explosion technique and its applications. *Geophys Prospect Pet*, 2003, 42(4): 427
(谭绍泉. 震源延迟叠加技术及应用效果. 石油物探, 2003, 42(4): 427)