

文章编号: 1000-7598-(2008)06-1540-05

凹形地貌对爆破振动波传播影响的数值模拟

唐 海^{1,2}, 李海波², 周青春², 李俊如², 夏 祥², 张磊奇³

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湘潭 411201; 2. 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, 武汉 430071; 3. 河南省南阳市水利勘测设计院, 河南 南阳 473063)

摘 要: 应用 UDEC 程序模拟了爆破振动波在凹形地貌中的传播特征, 并与广东岭澳核电站 2 期基础爆破开挖现场监测结果进行了对比。对比分析结果表明, 数值模拟结果与现场监测结果较为吻合。研究结果还揭示, 凹形地貌对爆破振动波具有明显的衰减作用, 质点水平向振动速度的衰减幅度大于质点垂直向。同时, 衰减系数随凹形地貌深度、宽度的增加而增加, 但随宽度增加的幅度较小。另外, 爆破振动波的衰减系数随爆源距增加而减小, 随最大段药量的增大而增大。

关 键 词: 凹形地貌; 爆破振动波; 衰减系数; 数值模拟

中图分类号: O 382

文献标识码: A

Numerical simulation of influence of concave landform on blasting vibration wave propagation

TANG Hai^{1,2}, LI Hai-bo², ZHOU Qing-chun², LI Jun-ru², XIA Xiang², ZHANG Lei-qi³

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201; 2. China State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Nanyang Reconnaissance and Design Institute, Nanyang 473063, China)

Abstract: Based on blasting vibration monitoring for the second phrase for Ling-ao Nuclear Power Station in Guangdong Province, the wave propagation characteristics under blasting in concave landforms are simulated with UDEC. It is founded that the numerical simulation results agree well with that by site monitoring. It is reported that the peak particle velocity (PPV) of blasting clearly decreased in concave landforms and the decreasing rate of PPV in horizontal direction is large than that in vertical direction. It is also reported that the attenuation coefficient increased with increment of depth and width of concave landforms; and the rising rates of attenuation coefficient with the width is less than that of depth. It is further suggested that the attenuation coefficient increases with increment of the charge weight and decreases with increment of explosive distance.

Key words: concave landforms; vibration wave of blasting; attenuation coefficient; numerical simulation

1 引 言

炸药在岩体中爆炸时除了对周围介质做功消耗能量外, 一部分能量以波的形式向外传播, 形成爆破振动波。一般认为, 爆破振动波的传播特征与爆源距、药量、爆破方式等因素相关, 但在地形起伏较大的情况下, 地形地貌对爆破振动波的传播具有较大影响。

凹形地貌是一种常见的地貌形态, 当爆破振动波经过凹形地貌时, 由于振动波的反射和折射, 使爆破振动波的振动强度明显降低。目前, 凹形地貌对爆破振动波传播影响多集中在现场试验方面, 例

如: 文献[1-3]通过现场爆破试验分析了凹形地貌对爆破振动波的衰减效应。文献[4]结合江苏田湾核电站 2 期工程, 研究了凹形地貌的减振作用, 认为凹形地貌的减振率是一个变量, 与爆破条件、地质状况、地形地貌的深度和位置等有关。在相同爆破条件下, 凹形地貌的减振效果随距离的增加而减弱, 在爆源近区, 减振效果十分明显, 可达 50% 左右。文献[5]的振动监测表明, 爆破振动波经过凹形地貌后, 质点速度峰值衰减系数为 30%~60%, 衰减效应取决于沟深 H 与波长 λ 之比, H/λ 之比越大, 衰减就越大, 而沟槽宽度对振动的衰减关系不大。文献[6]亦认为, 凹形地貌越深, 减振越好。文献[7-9]

收稿日期: 2007-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50439030)。

作者简介: 唐海, 男, 1970 年生, 博士, 讲师, 主要从事采矿和岩石力学方面的教学和研究。E-mail: tanghai001@21cn.com

认为，凹形地貌对爆破振动波的衰减系数可达 30%~70%，衰减效应随爆源距离的增加而减小。

结合现场监测结果，国内外学者针对凹形地貌对爆破振动波传播影响也进行了一些探讨性的研究。例如，文献[10]用有限差分法分析了瑞利波经过凹形地貌时的传播特征。研究表明，波的振动强度随 H/λ 增加而减小，随 b/λ （凹形地貌宽度与波长之比）变化不大。文献[11]应用 ANSYS / LS-DYNA 程序模拟了凹形地貌对爆破振动波的减振效应，分析结果表明，凹形地貌近区减振效果显著，远区则不太明显；同时，凹形地貌越深，减振效果越明显。文献[12]亦用 ANSYS / LS-DYNA 程序模拟了凹形地貌对爆破振动波的减振效应，认为爆破开挖面离凹形地貌（减振沟）越近，减振效果越好；减振沟的减振效果随减振沟深度的增加而增加，而减振沟的宽度变化对减振意义不大。文献[13]用动光弹方法进行了爆破振动波与沟槽及建筑物基础相互作用的全场动态研究，定性地分析了相互作用过程中的动力学问题。研究表明：在建筑物基础附近开挖具有一定深度的沟槽，对于降低爆破振动波对建筑物的危害具有明显的效果；当沟槽深度为瑞利波波峰深度的 3~4 倍，能有效地降低作用在

基础上的振动波强度，当槽深小于瑞利波波峰深度的 3 倍时，两者间应力场较强；槽的宽度增加对于振动波的传播影响不大。文献[14]认为 SH 波（水平偏振横波）经过凹形地貌时，波的衰减系数与波入射的角度、凹形地貌的深宽比有关。波的入射角越小，凹形地貌的深宽比越大，波的衰减系数越大。

值得指出的是，目前关于凹形地貌对爆破振动波传播规律影响的研究还只是一些初步工作，缺乏系统和综合研究成果。为此，本文结合广东岭澳核电站 2 期工程基础爆破振动监测结果，应用 UDEC 程序模拟了爆破振动波在凹形地貌中的传播规律以及影响因素，旨在为深入研究凹形地貌对爆破振动波传播特征提供借鉴。

2 计算模型

2.1 爆炸荷载模拟

炸药爆炸时近区岩体发生屈服以致破碎，应变很大，应变率效应明显。因此，岩体采用 Cowper-Symonds 模型，炸药爆炸采用 JWL(Jones-Wilkins-Lee)状态方程比较合适^[15]。爆区岩体为角岩，其有关的动力学学参数见表 1，炸药及 JWL 状态方程参数见表 2。

表 1 角岩基本力学参数
Table 1 Properties of hornstone

密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Cowper-Symonds 参数		切线模量 $E_{\text{tan}}/\text{GPa}$	抗拉强度 σ_s/MPa	抗压强度 σ_c/MPa	屈服强度 σ_0/MPa	泊松比 μ	杨氏模量 E_0/GPa
	C/s^{-1}	P						
27.14	2.5	4.0	40.92	2.05	150	75	0.211	68.56

表 2 炸药参数
Table 2 Properties of the explosive

密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	爆速 $D/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	A /GPa	B /GPa	R_1	R_0	ω	初始比内能 E_v/GPa
1300	5200	214.4	0.182	4.20	0.90	0.15	4.192

注：A, B, R_1 , R_2 , ω 均为与炸药相关的材料常数。

图 1 为 LS-DYNA 程序模拟炸药在角岩中爆炸爆炸孔粉碎区边界上岩体质点所受的爆炸荷载-时程曲线。

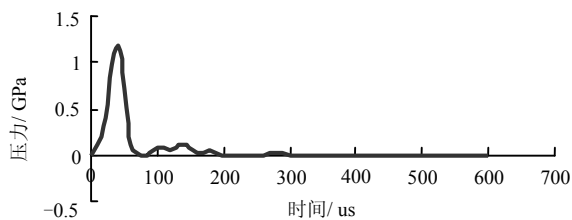


图 1 粉碎区边界岩体荷载曲线

Fig.1 Pressure history at the boundary of crushing zone

从图 1 可看出，冲击波作用时间约为 50 us，压力峰值约为 1.2 Gpa。之后，压力迅速衰减，与文献

[15]结论相一致。

2.2 岩体参数

根据地质勘察报告，爆破现场主要由角岩和花岗岩组成。为较真实地反映岩体材料的力学性质，离散元模型中实际考虑了 3 种岩体材料，根据岭澳核电站 2 期工程岩体力学室内试验报告，各岩体材料的力学参数见表 3。由于岩体在动荷载作用下发生硬化效应，计算时岩体的弹性模量和剪切模量均可取其对应的静态情况下的 1.2 倍^[16]。

表 3 岩石基本力学特性参数
Table 3 Properties of bed rock

力学特性	角岩	花岗岩	近地面岩体
密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.714	2.606	2.600
弹性模量 E_0/GPa	68.56	48.67	38.40
体积模量 K/GPa	40.92	25.95	20.72
剪切模量 G/GPa	28.42	20.58	16.46
泊松比 μ	0.211	0.181	0.225
凝聚力 c/MPa	31.1	27.7	22.2
抗拉强度 σ_s/MPa	2.05	1.61	3.3
摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	45.9	47.5	36.5

对于岩体节理的力学特性,没有为此进行相关试验,计算时多采用经验值的方法^[17],相应的3种节理的物理力学特性见表4所示,节理1分布在角岩中,节理2分布在花岗岩中,而节理3分布在近地面岩层中。

表4 岩体节理基本参数
Table 4 Properties of bed rock joints

力学特性	节理1	节理2	节理3
法向刚度 $K_n / \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	58	48	31
切向刚度 $K_s / \text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$	28	20	18
凝聚力 c / MPa	3.5	3.2	2.8
抗拉强度 σ_{st} / MPa	2.1	2.0	1.8
摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	35	30	25
剪胀角 $\psi / (^\circ)$	8	10	12

2.3 计算分析模型

岩体中离散元计算模型取自包括测点和爆源在内的岩体,模型尺寸高为100 m,长为200 m,见图2所示。

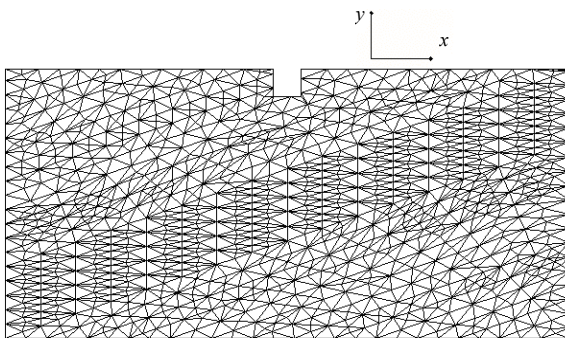


图2 离散元数值计算模型
Fig.2 Numerical model of discrete elements

岭澳核电站现场炸药试验参数为:炮孔直径为76 mm,装药长度为4~6 m,炸药为2#岩石乳化炸药,炮孔的排距、间距分别为1.2, 1 m,最大段药量为10 kg。

在用LS-DYNA程序模拟炸药在角岩中爆炸时,爆孔近区的模型网格运用程序的有关命令自动加密,到离爆孔5 m时,网格为3 m。

在离散元计算中,网格单元尺寸对计算精度有较大影响。网格单元尺寸越小,计算精度越高,但会占用更多的内存和消耗更多的计算时间。在UDEC中,一定网格尺寸所允许的在该系统中传播而不使波形失真的输入波的最高频率 f_{\max} 为

$$f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}} = \frac{c}{10\Delta l} \quad (1)$$

式中: λ_{\min} 为最短波长(m); Δl 为沿波传播方向的

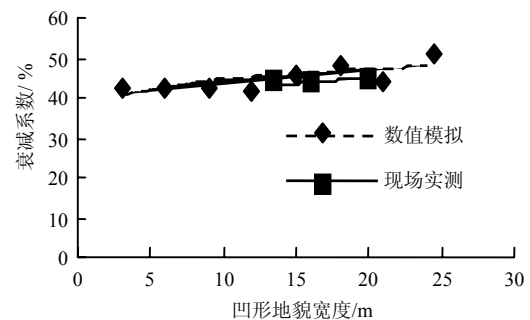
差分三角形网格单元的最大长度(m); c 为纵波波速和横波波速中的最小值(m/s)。

现场实测波速 c 为3700 m/s,本模型网格尺寸为3 m,模拟爆炸荷载输入主频为52.2 Hz。经计算可知,本模型网格尺寸所允许输入波的最大频率为123 Hz,因此,本模型网格尺寸合理。

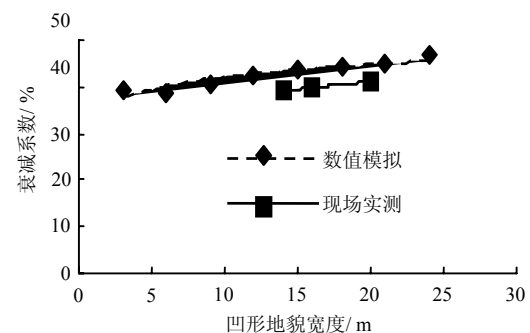
模型的左右侧面均设为黏性边界,其中 x 和 y 方向均不施加约束,模型的上边为自由面,下边固定。黏性阻尼系数取0.05。

3 计算结果及分析

图3给出了凹形地貌的宽度对爆破振动波衰减影响,并与现场实测结果进行了对比。从图中可看出,随凹形地貌宽度的增加,衰减系数增加,但增加的幅度较平缓。这与文献[5, 10, 12, 13, 18]认为凹形地貌宽度对爆破振动波的传播影响不大有相似的结论。



(a) 垂直向



(b) 水平向

图3 衰减系数与凹形地貌宽度的关系

Fig.3 Attenuation coefficient vs. concave landforms width

图4为凹形地貌深度与衰减系数变化的曲线。将数值模拟结果与现场实测进行比较,可以看出,无论是质点水平向还是垂直向的衰减系数,均随凹形地貌深度的增加而增加,且增加的幅度较大,呈线性趋势。这与文献[6, 11, 12]认为凹形地貌(减振沟)越深、减振效果越好有相同的结论。可见随着凹形地貌深度的增加,凹形地貌对爆破振动波的

衰减作用增大。

图 5 给出了最大段药量为 3.2 kg 和 1.8 kg 两种情况下衰减系数随爆源距的变化，并与现场实测结果进行了对比。可见随着爆源距增加，无论是岩体质点垂直向还是水平向，凹形地貌对爆破振动波的衰减均减小。这与文献[1—14, 18]认为凹形地貌具有明显的衰减效应相一致。比较岩体质点垂直向和水平向的衰减系数曲线可知，凹形地貌对质点水平

向的衰减较垂直向大。在相同爆源距下，最大段药量大，其衰减系数也大；随爆源距增加，衰减系数减小。这与文献[4, 7, 8, 9, 11, 12]认为凹形地貌的减振效果随距离的增加而减弱有相似的结论。另外，从图中还可看出，质点水平向衰减系数随爆源距增加呈线性衰减，衰减幅度较大；而质点垂直向衰减系数随爆源距增加呈幂指数衰减，衰减幅度较小。

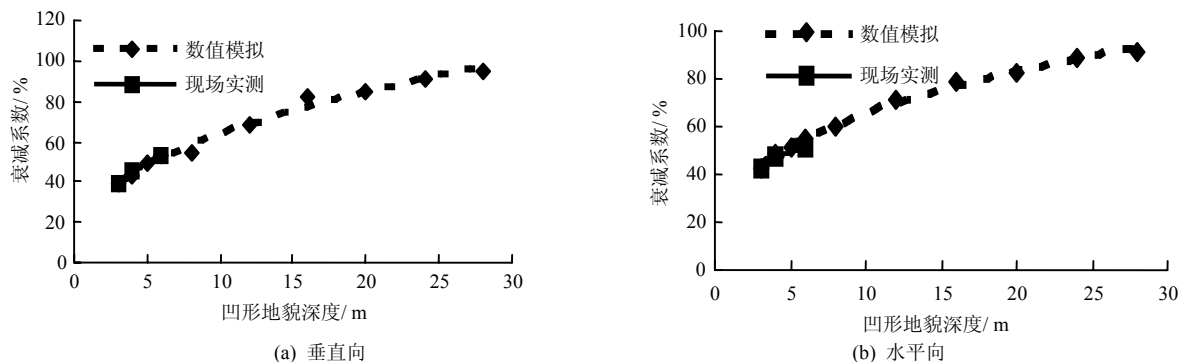


图 4 衰减系数与凹形地貌深度的关系
Fig.4 Attenuation vs. coefficient concave landforms depth

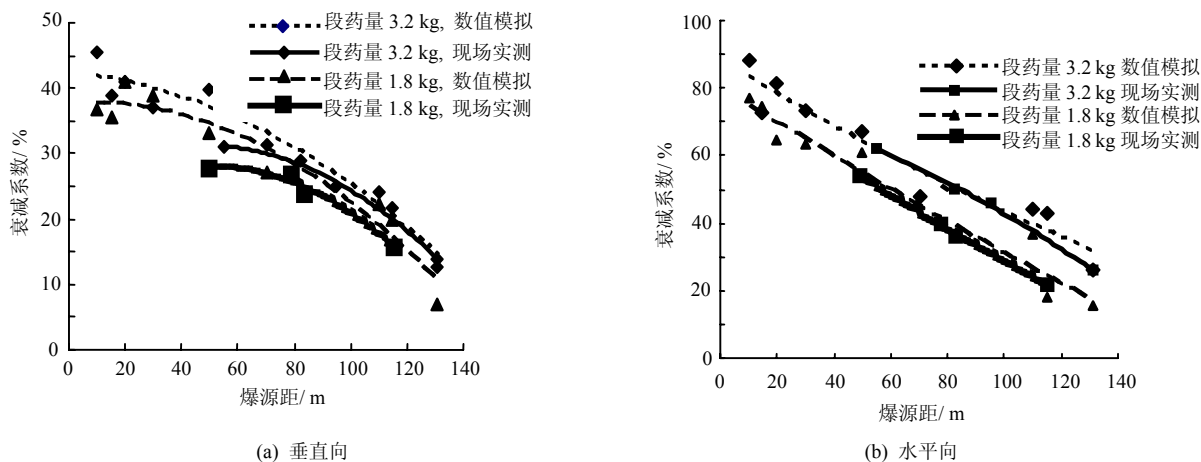


图 5 衰减系数与段药量和爆源距的关系
Fig.5 Attenuation coefficient vs. charge weight per delay interval and explosive distance

4 结 论

根据岭澳核电站爆破施工的装药参数和现场岩体的物理力学特性，应用离散元方法模拟了爆破振动波在凹形地貌条件的传播规律，并与现场实测结果进行了对比，揭示了凹形地貌对爆破振动波传播的影响，得到了如下结论：

(1) 凹形地貌对爆破振动波具有明显的衰减效应，其衰减效应的大小即爆破振动波的衰减系数与凹形地貌的宽、深度有关，还与最大段药量、爆源距有关。

(2) 爆破振动波衰减系数随凹形地貌宽度的增加而增加，但其增加的幅度较小，变化趋势平缓。由此可见，凹形地貌宽度对爆破振动波衰减影响较小。

(3) 爆破振动波衰减系数随凹形地貌深度的增加而增加，其增加的幅度较大，呈单调上升。

(4) 爆破振动波衰减系数随爆源距的增加而减小，且质点振动水平径向衰减系数的幅度大于质点垂直向。

(5) 在相同的爆源距处，最大段药量越大，其产生的爆破振动波经过凹形地貌时衰减越大。

参 考 文 献

- [1] 陆文, 郭学彬. 爆破地震效应中的沟槽减震作用研究[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(1): 11—14.
LU Wen, GUO Xue-bin. Study on the effect of channel on reduction of blasting vibration[J]. **Mining Safety & Environmental Protection**, 2001, 28(1): 11—14.
- [2] 郭学彬, 肖正学, 张志呈, 等. 爆破地震作用的沟槽效应[J]. 爆破器材, 1999, 28(3): 4—7.
GUO Xue-bin, XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, et al. Channel effect of blasting vibration[J]. **Explosive Materials**, 1999, 28(3): 4—7.
- [3] 吴立, 饶杨安, 黄常波. 爆破振动分析预测与控制方法综述[J]. 水文地质工程地质, 2004 (增刊): 136—140.
WU Li, RAO Yang-an, HUANG Chang-bo. Synthetic study on the methods of blasting vibration prediction and control [J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2004(Supp.): 136—140.
- [4] 方向, 高振儒, 龙源, 等. 减震沟对爆破震动减震效果的试验研究[J]. 工程爆破, 2002, 8(4): 20—24.
FANG Xiang, GAO Zhen-ru, LONG Yuan, et al. Experimental study on the effect of damping ditch on reduction of blasting vibration[J]. **Engineering Blasting**, 2002, 8(4): 20—24.
- [5] 李海波, 李延芥. 地质地貌构造对爆破振动波的影响分析[C]//见: 中国土木工程学会防护工程学会第六次学术年会论文集. [S. l.]: [s. n.], 1998, 500—505.
- [6] ZHANG Qi, BAI Chun-hua, LIU Qing-ming. Experimental research on amplitude change of blasting seismic wave with topography[J]. **Journal of Beijing Institute of Technology**, 2000, 9(3): 237—242.
- [7] 方向, 高振儒, 李的林, 等. 降低爆破地震效应的几种方法[J]. 爆破器材, 2003, 32(3): 22—26
FANG Xiang, GAO Zhen-ru, LI De-lin, et al. Several methods of reducing ground vibration effects from Blasting[J]. **Explosive Materials**, 2003, 32(3): 22—26
- [8] 邹奕芳. 预裂缝和减震槽减震效果的爆破试验研究[J]. 爆破, 2005, 22(2): 96—99.
ZOU Yi-fang. Experimental study on the vibration—isolating effect of pre-split crack and vibration—isolating slot[J]. **Blasting**, 2005, 22(2): 96—99.
- [9] 娄建武, 龙源, 周翔, 等. 爆炸波传播的沟槽效应及分析[J]. 矿冶工程, 2004, 24(1): 11—15.
LOU Jian-wu, LONG Yuan, ZHOU Xiang, et al. Damping ditch effect in propagation of blasting seismic wave and its analysis[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2004, 24(1): 11—15.
- [10] MASAHIKO FUYUKI, YOSHIRO MATSUMOTO. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench [J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1980, 70(6): 2 051—2 069.
- [11] 蒋伯杰, 邹奕芳, 易长平. 减震槽减震效果的动力有限元数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2004(8): 89—91.
JIANG Bo-jie, ZOU Yi-fang, YI Chang-ping. The dynamic FEM numerical simulation for the vibration-isolating effect of vibration-isolating slot[J]. **China Rural Water and Hydropower**, 2004, (8): 89—91.
- [12] 易长平, 陈明, 卢文波, 等. 减震沟减震的数值模拟[J]. 武汉大学学报 (工学版), 2005, 38(1): 49—52.
YI Chang-ping, CHEN Ming, LU Wen-bo, et al. Numerical simulation for damping effect of damping ditch [J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005(1): 49—52.
- [13] 朱振海, 杨永琦. 沟槽对建筑物减震作用的动光弹研究[J]. 爆炸与冲击, 1989(1): 55—60.
ZHU Zhen-hai, YANG Yong-qi. Research on effect decreasing quake of groove on the building with dynamic photo elasticity[J]. **Explosion and Shock Wave**, 1989, 19 (1): 55—60.
- [14] 袁晓铭, 廖振鹏. 圆弧形凹陷地形对平面 SH 波散射问题的级数解答[J]. 地震工程与工程振动, 1993, 13(2): 1—11.
YUAN Xiao-ming, LIAO Zhen-peng. Series solution for scattering of plane SH waves by a canyon of circular—arc cross section[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1993, 13(2): 1—11.
- [15] 夏祥, 李海波, 李俊如, 等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1 987—1 991.
XIA Xiang, LI Hai-bo, LI Jun-ru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1 987—1 991.
- [16] CHEN S G, ZHAO J, ZHOU Y X. UDEC modeling of a field explosion test [J]. **International Journal of Blasting and Fragmentation**, 2000, (4): 149—163.
- [17] DONZE F V, BOUCHEZ J. Magnier S.A. Modeling fractures in rock blasting [J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(8): 1 152—1 163.
- [18] 张树堂, 李茂林, 傅盛国, 等. 大连三道沟山体预裂爆破降震效果[J]. 东北地震研究, 1997, 13(1): 59—63.
ZHANG Shu-tang, LI Mao-lin, FU Sheng-guo, et al. Shocking reduction by pre-fracture demolition of Sandaogou hill body[J]. **Seismological Research of Northeast China**, 1997, 13(1): 59—63.