

# 接触面积对结构面传播特性的影响

王观石<sup>1,2</sup>, 李长洪<sup>2</sup>, 胡世丽<sup>1</sup>, 李世海<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 江西理工大学, 江西 赣州市 341000;

3. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:**岩体中大多数的结构面表现为既非连续也非完全不连续, 试验研究发现结构面的接触面积对其透射系数影响非常大。采用基于连续介质的块体离散元程序 (CDEM) 模拟结构面处应力波传播过程, 在结构面处进行了多尺度处理, 模拟结构面的凹凸不平, 研究了结构面的接触面积及其分布对应力波传播的影响, 拟合得到透射系数和接触面积与总面积之比的关系是: 纵波为  $T_p = 0.25 \ln(r) + 1.003$ , 横波为  $T_s = 0.252 \ln(r) + 0.98$ 。而且接触面积的分布也会影响应力波的透射系数和透射波的频谱分布。

**关键词:** 应力波; 结构面; 透射系数; 接触面积; 多尺度

**中图分类号:** ID235.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1005 - 2763 (2010) 02 - 0050 - 05

## Study on Effect of Contact Area of Structural Plane on Propagating Properties of Stress Wave

Wang Guanshi<sup>1,2</sup>, Li Changhong<sup>2</sup>, Hu Shili<sup>1</sup>, Li Shihai<sup>3</sup>

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing

100083, China, 2. Jiangxi University of Science and

Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 3. Institute

of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100080, China)

**Abstract:** Most of structural plane in rock mass is discontinuous but is not completely discontinuous. Experimental study find out that transmission coefficient is influenced greatly by contact area of structural plane. Propagation process of stress wave was simulated by CDEM (continuous block discrete element method). Roughness concentration of structural plane was simulated by multi-scale analysis on structural plane. The effects of contact area and distribution of structural plane on propagation of stress wave was studied. By fitting the relationship of transmission coefficients and the ratio of contact area to total area of structural plane was obtained: for longitudinal wave  $T_p = 0.25 \ln(r) + 1.003$ , for transverse wave  $T_s = 0.252 \ln(r) + 0.98$ . The study showed that transmission coefficients of stress wave and frequency spectrum of transmission wave are influenced by the distribu-

tion of contact area

**Key Words:** Stress wave, Structural plane, Transmission coefficient, Contact area, Multi-scale

应力波在结构面的传播特性是应力波在岩体中的传播规律和波动探测等的关键问题, 应力波在结构面的传播特性研究有赖于对结构面的抽象和简化。现有的研究主要是假设结构面为光滑平面<sup>[1~10]</sup>, 不考虑节理面粗糙性和结构面上强度的不均匀性, 结构面对应力波的影响主要有: 信号延迟、振幅衰减和高频滤波。文献 [5~10] 把结构面看成是具有位移间断的两弹性半空间的接触面, 用节理刚度来描述结构面, 采用理论推导和数值模拟等手段研究应力波在结构面的传播过程, 得到了单结构面透、反射系数, 并解释了结构面的低通滤波特性, 在此基础上, 还研究了一组平行结构面的透射系数及结构面非线性变形引起的波动现象。文献 [11, 12] 认为, 结构面是一个空间上不规则和不连续的结构面, 运用分形理论研究了应力波在结构面的传播, 给出透、反射系数与分形维数间的理论表达式。文献 [13] 运用散射理论研究了不同类型的结构面的散射场。

本文在实验研究的基础上<sup>[14]</sup>, 认为结构面既非连续也非完全不连续, 把结构面抽象为部分连续, 部分不连续, 为使问题简化, 同时也更能突显出应力波散射的波动现象, 把连续部分看成为接触单元, 把不连续部分看成是非接触单元, 采用基于连续介质的块体离散元程序 (CDEM) 模拟应力波在结构面的传播过程。该程序有效地模拟了岩体中爆炸波的传播过程, 爆破近区岩体内的应力场、位移场、鼓包和爆破漏斗等现象<sup>[15]</sup>。

· 收稿日期: 2009 - 04 - 20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (10632100)。

作者简介: 王观石 (1977 - ), 男, 江西于都人, 讲师, 博士研究生, 从事爆破和岩体力学方面的研究, Email: wgsy010@126.com。

## 1 试验设计

试验模型由 2 个 2 m 长的混凝土柱和 1 个 4 m 长的混凝土柱组成,混凝土柱的截面尺寸为 0.4 m × 0.4 m。模型的制作过程是:先将 3 个混凝土柱浇注并养护 28 d 后(各混凝土柱之间留有 10 cm 的间距),再用低强度的水泥砂浆连接各混凝土柱,并养护好(见图 1)。

试验前在两试块的连接结构面下方挖一条防震沟,在防震沟里用千斤顶加载使连接结构面发生剪

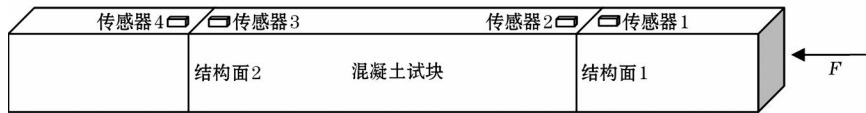


图 1 试块及传感器布置

## 2 试验数据及分析

结构面剪切破坏后,混凝土柱只能部分接触,实验采用改变混凝土柱两端的预压力来改变混凝土柱的接触面积,认为结构面是凹凸不平的,增加预压力就能增加结构面的接触面积。在冲击载荷作用下,应力波从右向左传播,分别记录了结构面两侧在压紧前后的震动信号。

### 2.1 压紧前后单结构面对震动信号的影响

结构面压紧前,2 点震动信号放大了 10 倍。本文定义结构面后的震动幅值与结构面前的震动幅值

之比破坏,形成结构面。试验用的爆源是可控爆源,可控爆源由铁笼子和塑料袋组成,铁笼子几何尺寸是 0.4 m × 0.4 m × 0.4 m,试验时先将塑料袋放在铁笼子里,然后将塑料袋充满水,把炸药放在铁笼子的中心处。炸药为 10 g 乳化药,用电雷管起爆。试验获得结构面两侧的震动信号,采集仪记录的是电压信号,采样率为 10 kHz,传感器的精度是 200 mV/g。传感器布置在结构面两侧,与结构面的距离为 20 cm,测点布置见图 1。用智能波速仪测得的波速为 3950 m/s。

之比透射系数,即  $T = A_b / A_f$  ( $A_b$  为结构面前的震动幅值,  $A_f$  为结构面后的震动幅值)。由图 2 可见,结构面对应力波震动幅值有十分明显的衰减作用,试验多次测得压紧前结构面的透射系数为 0.078。结构面对不同频率应力波的衰减作用是不同的,从频谱上看,该震动波形有 3 个主频,频率为 910 Hz 的谐波的透射系数为 0.0078;而频率为 350 Hz 和 42 Hz 的谐波的透射系数分别为 0.19 和 0.29,可知结构面对高频谐波的衰减作用更为明显。1, 2 两测点的延时约为 0.8 ms,按 0.8 ms 的延时计算出 1, 2 间的波速为 500 m/s,远小于混凝土的波速。

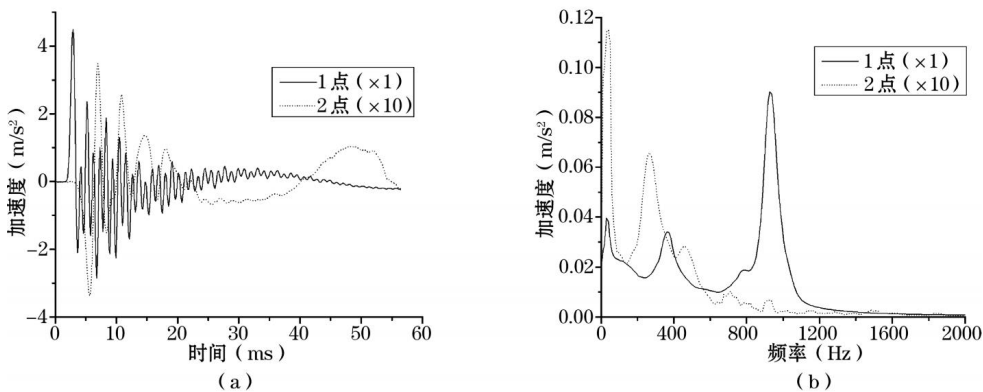


图 2 压紧前 1、2 点的震动波形及其频谱

结构面压紧后,1、2 点的波形及其频谱见图 3,多次试验测得结构面的透射系数为 0.2。从频谱上看,该震动波形主要有 3 个频率,频率为 830 Hz 的谐波,其透射系数为 0.03;而频率为 360 Hz 和 90 Hz 的谐波,透射系数分别为 0.15 和 0.53,可知压紧后结构面同样对频率高的波衰减作用更为明显,

但透射系数明显增加。1, 2 两测点的延时为 0.3 ms,按 0.3 ms 的延时计算出 1, 2 间的波速为 1333 m/s,也小于混凝土的波速。

比较压紧前后的震动波形:压紧前结构面前后的震动相对简单,都非常近似于自由衰减震动,第一个波峰是震动的最大峰值;压紧后结构面前后震动

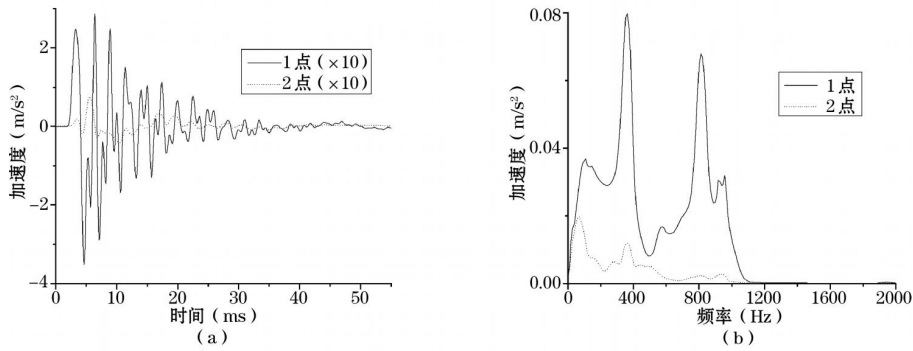


图 3 压紧后 1、2 点的震动波形及其频谱

都相对复杂,第一个波峰一般不能达到震动的最大峰值。压紧前后相位也发生变化,压紧前结构面前后的震动是反相位,压紧后是同相位。从频谱图可以看出:与压紧前相比,压紧后结构面的透射系数明显提高,高频谐波分量的透射系数提高尤为明显;压紧后主频略有降低,频谱向低频方向变化,这应该是由透射系数增加引起的。由于压紧前后结构面的透射率发生了变化,两者的频谱图也发生了变化,除了两个反映结构特征尺寸的频率(910 Hz 和 350 Hz)变化很小以外,还有一个低频谐波从 42 Hz 变为 90 Hz。压紧后结构面的延时明显减少,反映出波速增加。

### 2.2 压紧后第二个结构面对震动信号的影响

图 4 为压紧前结构面两侧的震动波形,从图中可以看出:压紧前结构面前有 3 个特征频率,分别为 57, 293, 461 Hz;结构面后有 1 个特征频率,大小为 51 Hz。图 5 为压紧后结构面二两侧的震动波形,从图中可以看出:压紧后结构面前有 3 个特征频率,分别为 29, 482, 813 Hz;结构面后有两个特征频率,分别为 47, 360 Hz。压紧前结构面的透射系数为 0.13, 压紧后的透射系数为 0.2。由此可以看出:结构面压紧前,对高频谐波衰减非常快,经过两个结构面后就只有 51 Hz 的主频,压紧后,其对高频透射能力明显提高了。

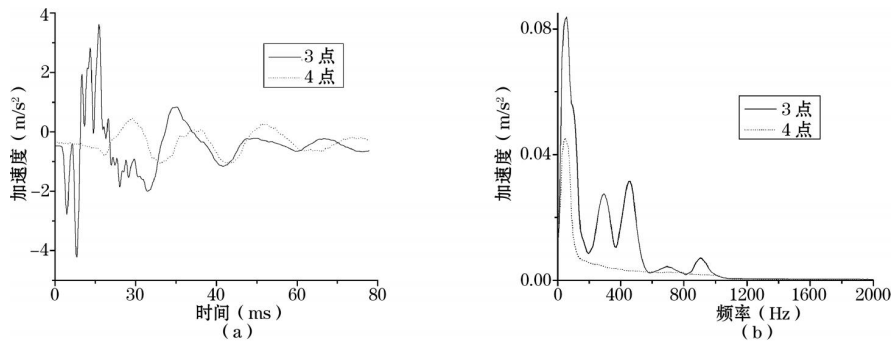


图 4 压紧前 3、4 点的震动波形及其频谱

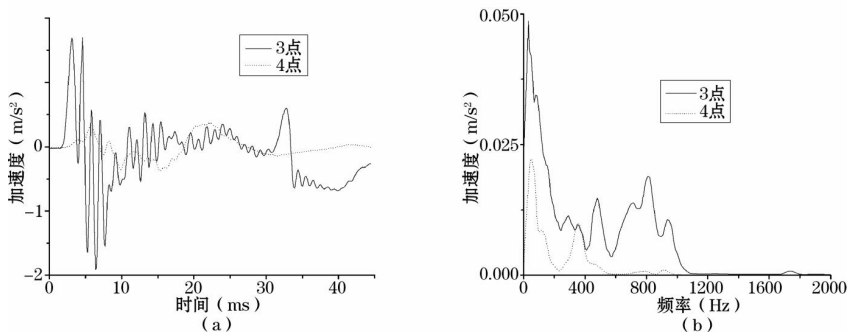


图 5 压紧后 3、4 点的震动波形及其频谱

由于试验过程中仅仅是改变结构面的应力状态,改变应力状态实际上是改变结构面的接触面积,

由此可以推断结构面接触面积变化引起了透射系数变化,从而导致频谱发生变化,增加接触面积会提高高频谐波的透射系数。由于结构面的接触面积是一个很难实测的量,因此采用数值模拟的方法研究结构面的接触面积与透射系数的关系。

### 3 块体离散元数值模拟

#### 3.1 离散元计算方案

考虑长为 6 m 的混凝土柱体,其横截面尺寸为 0.4 m  $\times$  0.4 m,网格划分为 2  $\times$  2  $\times$  30,在  $y = 2$  m 处有一结构面(见图 6)。混凝土柱两端为自由边界,在  $y = 0$  的截面形心加一动态载荷见图 7。

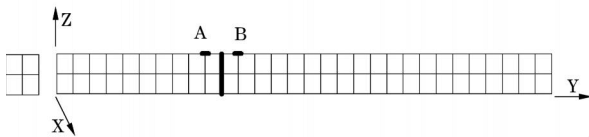


图 6 网格划分及结构面位置

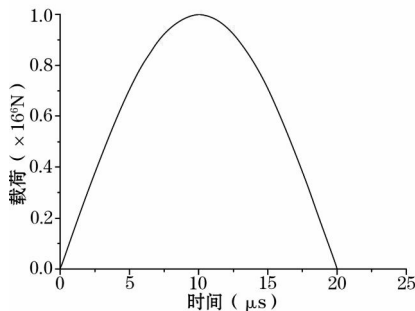


图 7 动态载荷

实际上,结构面是凹凸不平的,而且强度不均匀。在数值模拟中,要模拟这种破碎复杂的结构面构成,必须要划分很细的单元,如果研究区域内全部按照细小的单元划分,那么单元总数很庞大,势必大大降低计算效率。更重要的是,混凝土块体内具有很好的整体性,仅仅是结构面处的强度变化很大,用多尺度的计算方法,能够更为客观的反映实际的情况,反映出应力波在结构面传播过程的波动现象。

结构面处多尺度处理,结构面厚度为 2 cm,结构面面积为 0.4 m  $\times$  0.4 m,一共划分了 16  $\times$  16 个单元。结构面处的单元分为两种,一种为接触单元,其材料参数为混凝土的材料参数;另一种为非接触单元,其材料参数见表 1。结构面的单元(包括接触单元和非接触单元)与混凝土单元是固连的,即应力和位移都是连续的。接触单元和非接触单元在结构面上都是随机分布的。

表 1 结构面的材料参数

单元类型	弹性模量 $E$ (Pa)	泊松比 $\mu$	密度 ( $\text{kgm}^{-3}$ )	刚度阻尼	质量阻尼
混凝土	$3.0 \times 10^{10}$	0.25	2500	$10^{-5}$	2
非接触单元	10	0.25	1000	0	0

#### 3.2 接触面积与透射系数

结构面的网格为 16  $\times$  16 时,横波和纵波的透射系数与接触面积的关系见图 8。从图 8 可以看出:随着接触面积增加,横波和纵波的透射系数都增加;在接触面积相同时,纵波的透射系数比横波的透射系数稍大一点,但相差很小;定义接触面积与总面积比为  $r$ , $r = 0.4$  时,横波和纵波的透射系数约为 0.8, $r = 0.6$  时,横波和纵波的透射系数约为 0.9,由此可以认为:根据透射波幅值变化来探测结构面的接触面积时,有效探测范围是  $r \leq 0.6$ 。从图 8 还可以看出:透射系数和接触面积与总面积比近似成对数关系,拟合得到:纵波的拟合曲线为  $T_p = 0.25 \ln(r) + 1.003$ ,横波的拟合曲线为  $T_s = 0.252 \ln(r) + 0.98$ 。

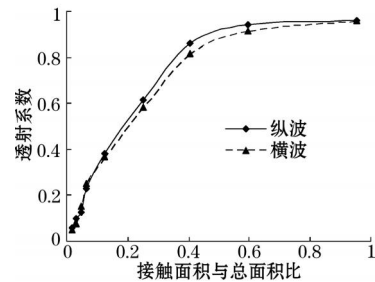


图 8 透射系数与面积比的关系

#### 3.3 面积分布对透射波频谱的影响

为进一步了解接触面积的分布对应力波传播的影响,对结构面采用了两种网格划分,一种为 8  $\times$  8,另一种为 16  $\times$  16。由于接触单元在结构面上是随机分布的,因此不同的网格划分实际上是影响接触面积在结构面的分布,网格划分越密,接触面积在结构面上分布就越均匀。在相同接触面积时,比较了接触面积的分布对应力波传播的影响,接触面积与总面积比  $r = 0.0625$  时,结构面后的质点震动加速度的波形见图 9,对应的频谱图见图 10。从图 9 可以看出:网格为 16  $\times$  16 时的加速度的首波能达到最大值,网格为 8  $\times$  8 时的加速度波形需要经过两次震动后才达到最大加速度。从图 10 可看出:网格为 16  $\times$  16 时主要有 3 个特征频率,其他频率不突出,与前者相比,网格为 8  $\times$  8 时加速度频谱明显更丰富,特征频率也更多。

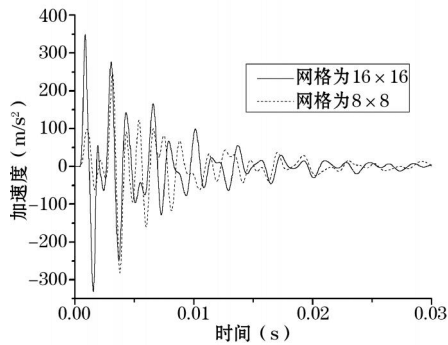


图9 结构面后的质点震动加速度波形 ( $r = 0.0625$ )

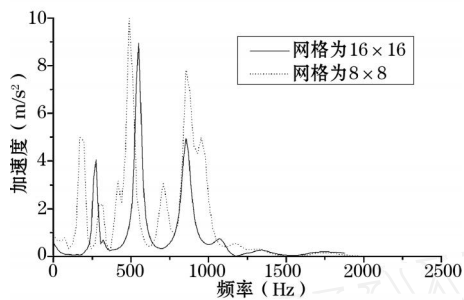


图10 加速度的频谱与接触面积的关系 ( $r = 0.0625$ )

根据惠更斯-夫列涅尔原理,任意时刻波前面的每一点都可看作是一个新的点源,由它产生二次扰动,形成元波前,而总的波前由各元波前包围形成,总波前各点的震动是各元波所产生的震动叠加形成的。因受结构面的几何形状、接触状况等因素的影响,震源激发的地震波入射到介质中大体会发生3种情况的响应:散射、绕射和反射。散射是最普遍的,产生条件也最宽泛;绕射次之;相对来说,反射的产生条件要求最严格,要在相对光滑的结构面上产生。从物理学角度来说,如结构面凹凸不平,但凹凸部分的尺度相对于波长很小的入射波,结构面将发生波的反射;而相对于波长较大的入射波则发生散射<sup>[13]</sup>。由此可认为:不仅接触面积与总面积之比会影响应力波的传播过程和特性,接触面积的分布也会影响应力波的透射系数和透射波的频谱分布。

## 4 结论

(1) 应力波在结构面处有显明的振幅衰减和延时,衰减系数和延时与结构面的应力状态有密切关系,当应力较小时,衰减系数在一个数量级以上。结构面的应力状态实际上反映的是结构面的接触状况,应力越大,接触面积也越大,当接触面积较小时,结构面主要是传播低频谐波,当接触面积较大时,结构面才能传播高频谐波。

(2) 采用基于连续介质的块体离散元程序(CDEM)模拟应力波在结构面的传播过程,计算得到,根据透射波幅值变化来探测结构面的接触状况时,有效的探测范围是接触面积与总面积之比  $r \leq 0.6$ ;拟合得到透射系数和接触面积与总面积之比的关系是:纵波为  $T_p = 0.258 \ln(r) + 1.003$ ,横波为  $T_s = 0.252 \ln(r) + 0.98$ 。

(3) 对结构面进行多尺度处理,结果表明:不仅接触面积与总面积之比会影响应力波的传播过程和特性,接触面积的分布也会影响应力波的透射系数和透射波的频谱分布。

### 参考文献:

- [1] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4): 334 ~ 342.
- [2] Roy S, Pyrak - Nolte L J. Interface wave propagating along tensile fractures in dolomite [J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(20): 2773 ~ 2777.
- [3] Pyrak - Nolte L J. The seismic response of fractures and the interrelation among fracture properties[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(8): 787 ~ 802.
- [4] 高文蛟. 爆炸应力波入射一定厚度结构面时透射系数分析[J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 16 ~ 18.
- [5] 卢文波. 应力波与可滑移岩石结构面间的相互作用研究[J]. 岩土力学, 1996, 17(3): 70 ~ 75.
- [6] Cai J G, Zhao J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, (37): 661 ~ 682.
- [7] 王鲁明, 赵坚, 华安增, 等. 节理岩体中应力波传播规律研究的进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(S): 602 ~ 606.
- [8] 田振农, 李世海, 肖南. 应力波在一维节理岩体中传播规律的试验研究与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2687 ~ 2693.
- [9] [9] 张秀丽, 焦玉勇, 刘泉声. 节理对爆炸波传播影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 717 ~ 721.
- [10] 赵坚, 蔡军刚, 赵晓豹, 等. 弹性纵波在具有非线性法向变形本构关系的节理处的传播特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 9 ~ 17.
- [11] 张铁军, 李业学. 应力波透射系数与结构面分形维数的关系初探[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(3): 25 ~ 27.
- [12] 李业学, 谢和平, 朱哲明, 等. 应力波穿越分形节理时的透射规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 120 ~ 129.
- [13] 李灿苹, 刘学伟, 王祥春, 等. 地震波的散射理论和散射特征及其应用[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(2): 81 ~ 90.
- [14] 王观石, 胡世丽, 李世海. 应力波在闭合结构面传播过程的波形特性[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(6): 34 ~ 36.
- [15] 田振农, 李世海. 三维离散元不同尺度结构面计算方法及其在岩土爆破中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3009 ~ 3016.