

采用改进的 RDCDMC 模拟花岗岩非弹性区爆炸应力波传播

严波¹, 曾新吾², 蔡清裕²

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对爆炸加载下花岗岩表现出不同于混凝土的特点, 对 RDCDMC 岩石本构模型中的状态方程进行改进; 考虑塑性体积变形对拉伸状态定义的影响并采用主应力拉伸失效准则。微装药填实爆炸应力波的数值模拟结果验证改进的 RDCDMC 能表征非弹性区花岗岩的响应特点, 能用于应力波传播的模拟。

关键词: 爆炸力学; 本构模型; 应力波; 数值模拟

中图分类号: O 382⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 3447 - 05

SIMULATION OF PROPAGATION OF EXPLOSIVE STRESS WAVE IN INELASTIC REGION OF GRANITE BY IMPROVED RDCDMC

YAN Bo¹, ZENG Xinwu², CAI Qingyu²

(1. College of Basic Education for Officers, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;
2. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Based on the properties of rock different from concrete under blasting loads, the state equation of RDCDMC is improved. The volumetric deformation of plasticity is taken into account in the definition of tension and the tension-failure rule is adopted. The results of numerical simulations for explosion-induced wave by tamped mili-explosive charge indicate that the improved model is capable of describing the response of the inelastic region of granite and available in numerical simulations on propagation of stress wave.

Key words: blasting mechanics; constitutive model; stress wave; numerical simulation

1 引言

地下化学爆炸中, 弹性边界内岩石的响应是与应变率相关、非线性的, 岩石在响应的过程中会出现损伤、破碎、失效、裂纹的成核与发展现象^[1]。该区域内的岩石动态本构一直受到广大学者的关注: 杨军等^[2]对此进行了总结和评述; L. M. Taylor 等^[3, 4]提出的 TCK 模型及其改进模型(连续损伤模

型), 能有效地模拟拉伸损伤及断裂, 但未采用状态方程表征冲击压缩状态下岩石的响应; HJC 材料模型^[5, 6]是 Johnson-Cook 模型在脆性材料领域中的应用扩展, 采用三段式状态方程描述压力与体积应变的关系, 能很好地模拟脆性材料压缩损伤规律, 但对拉伸状态下损伤的描述不是很理想, 在 TCK 和 HJC 模型基础上, 蔡清裕等^[7, 8]提出了混凝土冲击加载的 RDCDMC(rate-dependent continuum damage model for concrete)材料模型。

收稿日期: 2008 - 05 - 05; **修回日期:** 2008 - 07 - 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40574056)

作者简介: 严波(1973 -), 男, 博士, 1997年毕业于长沙理工大学路桥系桥梁工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石爆炸力学模拟方面的教学与研究工作。E-mail: boyan@nudt.edu.cn

用花岗岩试验冲击本构关系替换了 RDCDMC 材料模型中的三段式状态方程；考虑了花岗岩由于压实而产生的塑性体积变形对判断拉伸状态的影响，对拉伸状态的定义进行了局部改进；在拉伸状态下用主应力失效准则替换了拉伸极限准则。采用改进后的模型对实验室岩石微装药填实爆炸^[7]进行了数值模拟，计算结果较好地再现了试验的观测曲线，客观地反应了爆炸荷载下花岗岩的动态响应过程。

2 RDCDMC 简介

RDCDMC 是针对高应变率、高压、大变形加载条件下的混凝土和岩石的应用而建立的一种率相关连续损伤本构模型。该模型采用不同的方式处理拉伸与压缩，考虑了应变率效应、高压效应以及由微裂纹、压实、塑性所引起的损伤积累与演化，是压缩损伤模型 HJC 和拉伸损伤模型 TCK 的有机结合。

2.1 动态的应力 - 应变关系

RDCDMC 率形式的动态应力 - 应变关系为

$$\dot{\sigma}_{ij} = 3(\dot{K}_d\theta + K_d\dot{\theta})\delta_{ij} + 2(\dot{G}_de_{ij} + G_d\dot{e}_{ij}) \quad (1)$$

式中： $\dot{\sigma}_{ij}$ 为应力分量变化率； θ ， $\dot{\theta}$ 分别为体积应变及其变化率； e_{ij} ， \dot{e}_{ij} 分别为偏应变及其变化率； δ_{ij} 为狄拉克符号； $K_d = K(1-D)$ 和 $\dot{K}_d = -K\dot{D}$ 分别为损伤体积模量及其变化率； K 为体积模量； $G_d = G(1-D)$ 和 $\dot{G}_d = -G\dot{D}$ 分别为损伤剪切模量及其变化率； $D = \min(1, \alpha_t D_t + \alpha_c D_c)$ 为综合损伤度，压缩状态下拉伸损伤 D_t 不变，拉伸状态下压缩损伤 D_c 不变； α_t 和 α_c 分别为拉、压状态系数。

2.2 拉伸算法

RDCDMC 中定义岩石体积应变大于 0 的状态为拉伸状态，该状态下拉伸算法主要参考 TCK 模型，将裂纹密度参数 C_d 和拉伸损伤变量 D_t 分别定义为

$$C_d = \frac{5}{2} \frac{k}{(3K)^m} \left(\frac{K_{IC}}{\rho C' \dot{\epsilon}_{max}} \right)^2 P^m, \quad D_t = \frac{16}{9} \left(\frac{1 - \bar{\nu}^2}{1 - 2\bar{\nu}} \right) C_d \quad (2)$$

式中： k ， m 均为岩石的材料常数； K_{IC} 为岩石断裂韧性； $\bar{\nu} = \nu \exp(-16\beta C_d / 9)$ 为有效泊松比， ν 为泊松比， β 为硬化因子， $0 \leq \beta \leq 1$ ； ρ ， C' 和 $\dot{\epsilon}_{max}$ 分别为岩石密度、单轴弹性波速和局部体积段原所经

历的最大拉伸体积应变率。

根据式(2)及其变形可以得到拉伸状态下的应力 - 应变关系。

2.3 压缩算法

RDCDMC 中定义岩石体积应变小于 0 的状态为压缩状态，该状态下的压缩算法沿用了 HJC 模型的压缩损伤的定义和材料的状态方程。压缩损伤变量 D_c 用来反映材料的非弹性变形(包括非弹性体积应变和非弹性剪切应变)累积对岩石性质的影响， D_c 的定义为

$$D_c = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \epsilon_{v,p}}{D_1(P^* + T^*)^{D_2}} \quad (3)$$

式中： $\Delta \epsilon_p$ ， $\Delta \epsilon_{v,p}$ 分别为一次计算循环中的等效塑性应变和塑性体积应变的增量； $D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq \epsilon_{f,min}$ ， $\epsilon_{f,min}$ 为岩石断裂时的最小塑性应变，由试验测得； T^* ， D_1 ， D_2 均为与压缩损伤相关的材料常数； P^* ， T^* 分别为归一化压力和材料所能承受的归一化最大拉伸静水压力， $T^* = T / f_{cs}$ 。

强度模型为

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}]C \quad (4)$$

式中： σ^* 为规范化等效应力， $\sigma^* = \sigma_y / f_{cs}$ ， σ_y 为屈服应力， f_{cs} 为准静态单轴抗压强度； D 为综合损伤度； A ， B 和 N 均为材料常数； C 为应变率硬化系数^[9]，取为

$$C = \begin{cases} \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{sc} & (\dot{\epsilon} \leq 76 \text{ s}^{-1}) \\ (\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_{sc})^{0.2718} & (\dot{\epsilon} > 76 \text{ s}^{-1}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\dot{\epsilon}_{sc}$ 为参考应变率，取 $\dot{\epsilon}_{sc} = 76 \text{ s}^{-1}$ 。岩体进入塑性后，采用径向回归算法计算单元的等效塑性应变和应力分量。

采用 HJC 模型中的状态方程来描述静水压力和体积的关系，状态方程分为 3 区：第一区为线弹性区， $0 \leq P \leq P_{crush}$ ，斜率为弹性体积模量；第二区为过度区， $P_{crush} < P \leq P_{lock}$ ，插值计算得到卸载斜率；第三区为冲击加载区 $P_{lock} < P$ ，压力与体积应变的关系为

$$P = K_1 \epsilon'_v - K_2 \epsilon_v'^2 + K_3 \epsilon_v'^3 \quad (6)$$

式中： K_1 ， K_2 和 K_3 均为材料常数； $\epsilon'_v = (\epsilon_v - \epsilon_{v,lock}) / (1 + \epsilon_{v,lock})$ ； ϵ_v 为岩石材料当前体应变， $\epsilon_v = \rho / \rho_0 - 1$ ； ρ_0 为初始密度； $\epsilon_{v,lock}$ 为岩石材料空隙全部闭合时临界体应变， $\epsilon_{v,lock} = \rho_{grain} / \rho_0 - 1$ ， ρ_{grain} 为岩石晶体密度。

2.4 断裂或失效准则

RDCDMC 在拉伸状态下, 采用 2 种失效模式: 其一是拉伸极限准则, 当静水压力 P 超过拉伸极限阈值时单元失效; 其二是损伤失效, 当综合损伤度超过规定的阈值时, 单元丧失承载能力。压缩状态下采用最大塑性应变失效准则, 当塑性应变的累积满足最大塑性应变失效准则时, 单元失效, 丧失承载能力。

3 RDCDMC改进

3.1 状态方程的改进

源区附近花岗岩在爆炸冲击荷载下的响应是高应变率的动态响应, 研究表明: 在试验范围内(应变率为 $100 \sim 600 \text{ s}^{-1}$), 花岗岩在冲击荷载作用下的应力 - 应变曲线与静载应力 - 应变曲线有明显的区别, 静载下的曲线初期具有明显的压实阶段, 而冲击荷载下的曲线初期没有明显的压实阶段, 直接表现出弹性特征^[10]。目前没有试验数据证明花岗岩在其他应变率区间不具有这样的应力 - 应变特点的情况下, 本文认为: 在爆炸冲击荷载下源区附近花岗岩在初期直接表现出弹性特征, 压实阶段出现在冲击加载的中、后期。因此, 改进后的模型中加载过程的状态方程分两区: 第一区, 冲击加载的初期, 为线弹性区, $0 \leq P \leq P_{\text{crush}}$, 斜率为弹性体积模量; 第二区, 冲击加载的中、后期 $P_{\text{crush}} < P$ 压力 P 与体积应变 ε_v 的关系为

$$P = K_1 \varepsilon_v + K_2 \varepsilon_v^2 + K_3 \varepsilon_v^3 \quad (7)$$

当压力大于 4 GPa 时, 卸载的状态方程同式(7); 当 $P_{\text{crush}} < P \leq 4 \text{ GPa}$ 时, 采用变模量模型卸载, 卸载模量根据压力的大小在体积模量和 75.2 GPa 之间进行线性插值, 压力为 4 GPa 时的卸载模量为 75.2 GPa^[11]; $0 \leq P \leq P_{\text{crush}}$ 时, 按照线弹性卸载。

3.2 拉、压状态的改进

大量爆炸激发的地震波实测数据表明: 源区附近的岩石会出现“过冲”现象, 这种现象表现在粒子速度上为正脉冲后紧跟一个负脉冲。从状态上分析, 压缩状态之后紧跟一个拉伸状态。压缩状态下 $P_{\text{crush}} \leq P \leq 4 \text{ GPa}$ 时, 岩石被不同程度地压实而产生不可恢复的塑性体积变形。原模型中拉伸状态没有考虑这种塑性体积应变, 故改进后模型中, 定义单元的体积应变与压实产生的塑性体积应变之和大于

0 的状态为拉伸状态; 定义单元的体积应变与压实产生的塑性体积应变之和小于 0 的状态为压缩状态。

3.3 拉伸断裂或失效准则的改进

爆炸荷载下, 花岗岩在径向承受很大的压力, 但由于岩石的径向膨胀, 环向承受拉伸应力。此时单元的静水压力 P 可能大于 0, 对应的体积应变大于 0, 原模型将按照压缩状态下的失效模式处理。但岩石的动态抗拉强度小于抗压强度, 岩石很可能发生拉伸破坏, 原模型不能处理这类问题。参照金乾坤^[12]的最大主应力准则, 在改进的模型中认为主应力接近动态抗拉强度时, 岩石的响应主要为弹脆性, 主应力一旦超过岩石的抗拉强度, 单元拉伸断裂。

4 算 例

采用改进的 RDCDMC 对实验室微装药填实爆炸^[13]的非弹性区应力波的辐射模式进行了模拟。

4.1 有限元模型和材料参数

球形装药, PETN, 半径为 0.25 cm; 花岗岩外径为 10 cm, 由于模型的对称性, 图 1(a)为八分之一有限元模型, 球心区域表示炸药, 其他区域表示岩石, 岩石的外边界设置为无反射边界。图 1(b)为炸药部位的放大模型。炸药中心起爆, 采用 JWL 方程来描述爆轰产物的压力 - 体积 - 能量关系:

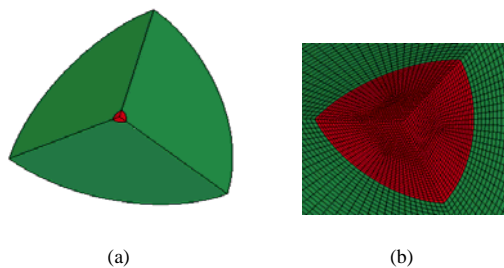


图1 有限元模型

Fig.1 Models of finite element

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (8)$$

式中: E 为能量密度; V 为爆轰产物体积与未发生爆轰炸药体积比; R_1 和 R_2 均为 JWL 方程系数。表 1 给出了 JWL 参数。

花岗岩采用改进的 RDCDMC 材料模型。炸药和岩石的参数如表 1, 2 所示。

表1 PETN的JWL系数

Table 1 JWL parameters of PETN

A/MPa	B/MPa	R_1	R_2	ω	E_0 /MPa
6.253	0.233	5.25	1.60	0.28	0.085 6

表2 岩石参数

Table 2 Parameters of rock

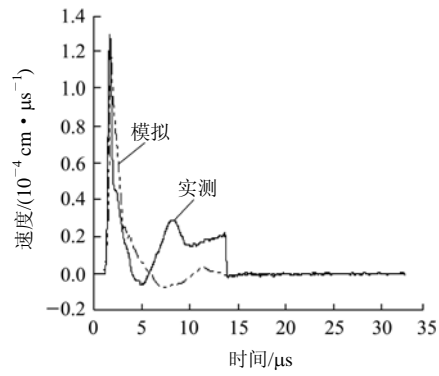
ρ ($g \cdot cm^{-3}$)	k/cm^{-3}	$K_{IC}/(MPa \cdot cm^{1/2})$	m	E/MPa
2.60	5.3×10^{20}	1.68×10^{-4}	6.0	0.66
f_{cs}/MPa	T/MPa	$\epsilon_{f, min}$	β_1/MPa	β_2/MPa
1.54×10^{-3}	1.22×10^{-4}	0.01	0.521 5	9.425 5
β_3/MPa	A'	B'	N	D_1
-69.068	0.79	1.60	0.61	0.06
D_2	P_{crush}/Mpa	$\epsilon_{f, eff}^{pl}$		
1.0	$3.3e-4$	0.3		

表1中PETN的参数来源于高能炸药性能数据手册^[14]。表2中花岗岩参数 k , K_{IC} , β , m 的取值主要参考金乾坤^[12]的研究成果;静态下的密度 ρ ,杨氏模量 E ,压缩强度 f_{cs} ,拉伸强度 T 、冲击压缩的材料常数 β_1 , β_2 , β_3 来自王占江等^[15]的研究成果;参数 A' , B' , N , D_1 , D_2 和 P_{crush} 的取值方法参考鞠杨等^[16]的研究成果。

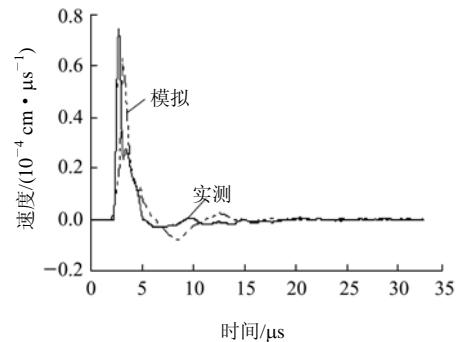
4.2 模拟结果及分析

图2(a)~(c)给出了花岗岩非弹性区(弹性半径约为50 mm)内爆心距分别为10, 15和20 mm处粒子的速度-时间曲线,其中虚线代表模拟的速度波形,实线表示实测的速度波形。从图2可以看出,除图2(a)中试验曲线的二次脉冲外(可能是测量误差),模拟速度波形和实测速度波形第一个速度脉冲(主要关心辐射模式,因为纵波的能量基本上集中于此)吻合较好。首先,波形的起跳时间非常一致,在图2(a)~(c)中,速度曲线的起跳时间分别为1.16, 2.25和3.28 μs ,根据起跳时间与爆心距,可以计算出爆心距离为10和15 mm处粒子的当地平均声速为5 km/s左右,与由试验数据拟合的花岗岩的当地声速4.8 km/s^[15](当粒子速度大于36.7 km/s时)基本一致。

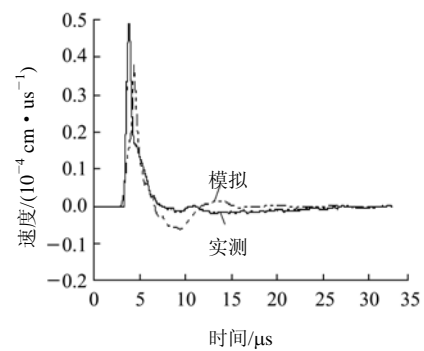
模拟曲线和试验曲线的第一个脉冲形状基本上相似,速度脉冲上升的时间明显短于下降的时间,同时,脉宽随爆心距的增大逐渐展宽,体现了弹性“双波区”的特征,速度峰值基本一致。数



(a)



(b)



(c)

图2 模拟的和实测的粒子径向速度波形

Fig.2 Simulated and experimental wave forms of particle

值模拟得到的近区速度响应与实测的速度波形吻合较好。

用 $r/w^{1/3}$ 对爆心距归一化得到比例爆心距(爆心距为10, 15, 20, 25, 30, 35和40 mm的比例爆心距分别为21.5, 32.5, 43.0, 53.7, 63.5, 75.3和86.2),再对模拟数据进行拟合,得到粒子径向速度峰值与比例爆心距的衰减规律为 $V = 5.3 \times 10^4 \times (r/w^{1/3})^{-2.0}$,基本上和试验数据的拟合关系 $V = 5.47 \times 10^4 \times (r/w^{1/3})^{-1.98}$ ^[11]相符。

5 结论

本文用花岗岩冲击本构特性和冲击压缩特性的

试验研究结果, 替换了 RDCDMC 材料模型中包含明显压实过程的三段式状态方程, 在拉伸状态的定义中考虑了塑性体积变形的影响, 在拉伸状态中采用主应力失效准则, 对实验室岩石微装药填实爆炸进行了数值模拟。模拟的速度曲线与试验数据在起跳时间、脉宽和峰值上基本吻合, 较好地再现了试验的观测曲线; 归一化后的粒子峰值速度关系基本和试验数据拟合关系相近。结果表明: 改进的 RDCDMC 能表征花岗岩在爆炸冲击荷载下的响应特征, 能用于花岗岩非弹性爆炸应力波辐射模式的模拟。

参考文献(References):

- [1] JOHNSON L R, SAMMIS C G. Effects of rock damage on seismic waves generated by explosions[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2001, 158(11): 1 869 - 1 908.
- [2] 杨 军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1999.(YANG Jun, JIN Qiankun, HUANG Fenglei. *Blasting theory model and numerical calculation*[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese))
- [3] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Micro-crack induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1986, 55(3): 301 - 320.
- [4] CHEN E P. Simulation of concrete perforation based on a continuum damage model[C]// CARPINTER A ed. *Proceedings of the IUTAM Symposium on Size-scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures*. Torino: Psychology Press, 1994: 574 - 588.
- [5] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H, et al. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]// *Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics*. Canada: [s. n.], 1993: 591 - 600.
- [6] JOHNSON G R. Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile[C]// *Proceedings of the 5th International Conferences on Structure under Shock and Impact*. [S. l.]: [s. n.], 1998: 793 - 806.
- [7] 蔡清裕. 爆炸及冲击加载下混凝土动态响应的数值模拟[博士学位论文][D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.(CAI Qingyu. *Numerical simulation on dynamic response of concrete under explosion and impact loading*[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.(in Chinese))
- [8] 齐振伟, 蔡清裕, 杨 涛. 应变率相关的混凝土连续损伤本构模型[J]. *弹道学报*, 2007, 19(4): 55 - 58.(QI Zhenwei, CAI Qingyu, YANG Tao. A rate-dependent continuum damage model for concrete[J]. *Journal of Ballistics*, 2007, 19(4): 55 - 58.(in Chinese))
- [9] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.(LI Xibing, GU Desheng. *Rock impact dynamics*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [10] 单仁亮, 陈石林, 李宝强. 花岗岩单轴冲击全程本构特性的试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(1): 32 - 37.(SHAN Renliang, CHEN Shilin, LI Baoqiang. Experimental study of granite constitutive properties under uniaxial impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(1): 32 - 37.(in Chinese))
- [11] 乔登江. 地下核爆炸现象学概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.(QIAO Dengjiang. *The survey of nuclear explosion underground*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.(in Chinese))
- [12] 金乾坤. 脆性岩石冲击损伤数值模拟研究[R]. 北京: 北京理工大学, 1999.(JIN Qiangkun. *Numerical study of rock damage under impact loading*[R]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1999.(in Chinese))
- [13] 王占江. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟试验研究[博士学位论文][D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.(WANG Zhanjiang. *Experimental investigation on tamped and cavity decoupled explosion in rock-soil by mili-explosive charge*[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.(in Chinese))
- [14] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. *LLNL explosives handbook, properties of chemical explosive and explosive simulations*[R]. California: University of California, 1985.
- [15] 王占江, 张德志, 张向荣, 等. 蓝田花岗岩冲击压缩特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 797 - 802.(WANG Zhanjiang, ZHANG Dezhi, ZHANG Xiangrong, et al. Testing study on shock compression for Lantian granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 797 - 802.(in Chinese))
- [16] 鞠 杨, 环小丰, 宋振铎, 等. 损伤围岩中爆炸应力波动的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(2): 136 - 142.(JU Yang, HUAN Xiaofeng, SONG Zhenduo, et al. Numerical analyses of blasting wave stress propagation and damage evolution in rock masses[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 136 - 142.(in Chinese))