文章编号：1000-5773(2012)05-0517-06

炸药混凝土中爆炸能量释放规律的研究*

王　猛[1,2]，马天宝[1]，宁建国[1]

（1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081；
2.安徽理工大学弹药工程与爆炸技术专业教研室，安徽淮南　232001）

摘要：通过对炸药在混凝土中爆炸的并行计算，分析其数值计算结果，并对爆炸力学基础理论进行研究后认为：炸药在土岩介质中爆炸，炸药能量将通过爆炸空腔中爆炸产物内冲击波的多次往复反射的方式进行释放，同时破坏并推动土岩介质移动，土岩介质与爆炸气体的界面在爆腔内稀疏波的作用下进行持续减速扩张运动。

关键词：爆炸产物；冲击波；反射；能量
中图分类号：O383.2　　**文献标识码**：A

1　引　言

研究土岩介质中炸药爆炸的能量释放规律有着重要意义，它是进行爆炸能量分析和工程爆破参数设计的依据。以往认为土岩介质破碎时炸药能量主要以两种形式进行释放：一种是冲击波动压的破坏作用，另一种是爆炸气体静压的膨胀推动作用[1]。炸药爆炸破碎土岩介质的代表理论有3种，即冲击波拉伸破坏理论[2]，爆炸气体膨胀压理论[3]和冲击波与爆炸气体综合作用理论。迄今为止，以上3种观点的争论一直贯穿爆破理论发展的整个阶段，尚没有形成一套完整而系统的爆破理论。

若想彻底弄清岩体的爆破机理，必先对炸药爆炸能量的分配进行计算，以获得定性的规律和定量的解答。关于炸药爆炸对目标介质作用的数值计算由于受到计算规模的限制，多数情况下是缩小模型后重点对爆炸目标介质进行研究，其不利因素是模型在同比缩小后，难于精确描述各物理量场。

为了扩大计算规模，加快求解速度，刻画炸药爆炸后产物内部细致的时空结构，应有针对性地对炸药能量释放规律进行研究。本工作采用自主开发的并行计算爆炸力学程序pMMIC3D，对球形TNT装药在混凝土中爆炸进行数值计算，通过对爆炸力学理论和数值计算结果进行分析，获得炸药在土岩介质中爆炸时的能量释放规律。

2　数值计算

采用消息传递接口(Message Passing Interface，MPI)方式[4]，在原有的串行程序MMIC3D的基础上，设计开发了并行计算爆炸力学程序pMMIC3D，对爆炸物理量场进行细致的大网格量求解。

计算采用的力学模型守恒方程组[5]为

$$\begin{cases}\left(\dfrac{\partial}{\partial t}+u\cdot\nabla\right)\rho=-\rho\nabla\cdot u & \text{质量守恒}\\ \rho\left(\dfrac{\partial}{\partial t}+u\cdot\nabla\right)u=-\nabla\sigma & \text{动量守恒}\\ \rho\left(\dfrac{\partial}{\partial t}+u\cdot\nabla\right)E=-\sigma:\nabla u & \text{能量守恒}\end{cases}\tag{1}$$

* **收稿日期**：2011-08-20；**修回日期**：2011-09-26
基金项目：国家重点基础研究发展计划(2010CB832706)；国家自然科学基金(11172041)
作者简介：王　猛(1974—)，男，博士研究生，讲师，主要从事工程爆破与爆炸力学研究.
通讯作者：马天宝(1981—)，男，博士，副教授，主要从事计算爆炸力学与弹药工程研究. E-mail：madabal@bit.edu.cn

式中：ρ 为密度；u 为速度；t 为时间；E 为内能；σ 为应力，$\sigma=\delta_{ij}\,p-s_{ij}$，$p$ 为压力，s_{ij} 为偏应力张量分量；$\sigma:\nabla u=\sigma_{ij}\dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}$，$\sigma_{ij}=s_{ij}-\delta_{ij}(p+q)$，$q$ 为人工粘性压力；$\dot{s}_{ij}=2\mu\left(\dot{\varepsilon}_{ij}-\dfrac{\delta_{ij}}{3}\dfrac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)+\dot{\delta}_{ij}$，$(i,j,k=1,2,3)$，$\mu$ 为剪切模量，ε_{ij} 为应变张量分量，$\dot{\delta}_{ij}$ 为旋转修正项。

并行程序 pMMIC3D 采用高维区域分解策略[6]，将三维计算区域分割成若干个子区域，每个子区域指定一个处理机，在具体分区时考虑各个进程的负载均衡因素，实现沿 3 个方向的任意分割。子区域的每个外部边界增加 2 层虚守护网格，用于进程间数据通信，其中最外层为接受数据虚网格层，其内侧为即将发送数据的虚网格层（如图 1 所示）。

若对串行计算爆炸力学程序 MMIC3D 进行区域并行化，必须分析解决各子区域与上时层毗邻子区域间的数据相关性问题。在同一时层内、空间三重循环下，若满足更新后的变量值影响周围网格相关变量的更新，数据间具有相关性，则必须解除其依赖关系[7]。

并行程序设计的重点是协调各子区域虚网格的相关变量的更新。原串行程序中，3 个方向的输运在一个三重循环下进行，更新后的网格体积量将影响周围网格相关量的更新，因此有很强的数据依赖性。为了消除数据依赖性，并截断依赖性的传播，并行程序使用更新前的值进行输运计算，将原先一个三重循环下 3 个方向输运的全局扫描，转变为在 3 个三重循环内进行（如图 2 所示），并且 3 个方向的输运顺序按时间步轮流交替进行。为减弱因算法改变而带来的影响，保持计算精度，每完成 1 个方向的输运，应更新所有网格（包括虚网格）的相关变量。

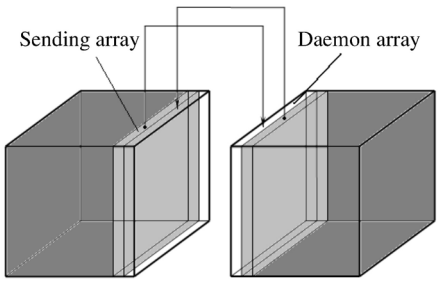


图 1 分区间数据交换示意图

Fig. 1 Data exchanges between partitions map

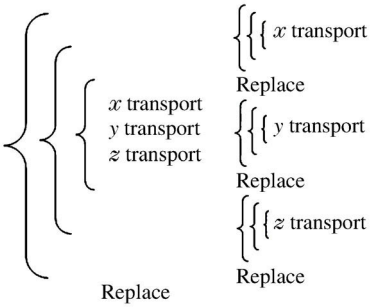


图 2 输运算法的差异

Fig. 2 Difference of transport algorithm

计算的几何模型为半径 30 m 的球形 TNT 装药，球心设置在计算域中心（200.0 m，200.0 m，200.0 m）处，剩余为混凝土占有体积（如图 3 所示），爆炸选用瞬时爆轰模型。网格步长 1.0 m，整个计算域的大小为 400.0 m×400.0 m×400.0 m，总网格数为 64×10^6。为易于取得参数，选用 TNT 炸药，爆轰产物选用 JWL 状态方程，选用混凝土介质并采用 HJC 模型[8]。pMMIC3D 程序在 8 结点服务器集群（每结点为双 CPU，每个 CPU 为四核 Intel E5620，内存为 12 GB，采用千兆交换机连接）区域分解为 64 分区，运行 2.5 万步后得到计算数据。

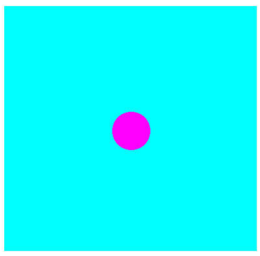


图 3 计算几何模型剖面图

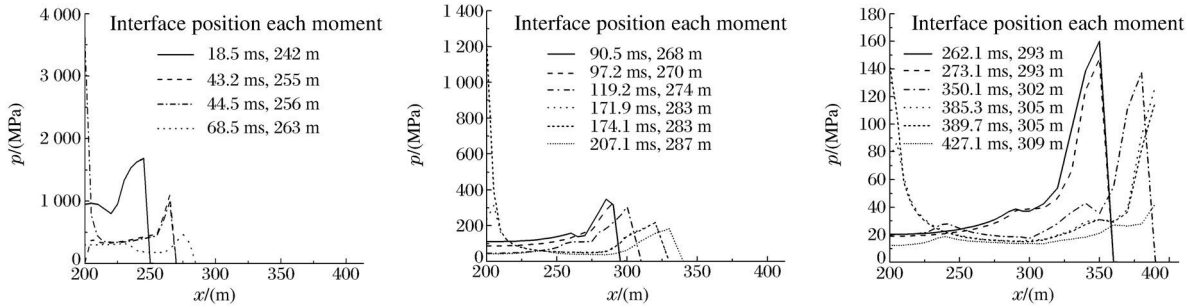
Fig. 3 Profile of computational geometric model

3 计算数据分析

图 4～图 11 为计算得到的半径为 30 m 的球形 TNT 装药在混凝土中爆炸各典型时刻压力与距离的关系。

计算的 p-x 曲线如图 4 所示，p-x 曲线以下的面积部分可以表征各时刻爆炸冲击波能量在空间的

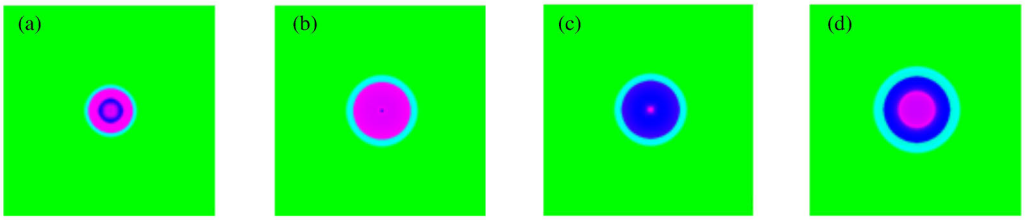
分布。通过能量分布可分析装药爆炸后爆炸产物内部波系的反射和透射情况,以及周围土岩介质中波传播能量的损失情况。从 p-x 计算结果可以观察到,炸药爆炸产物中的冲击波在多次对介质入射(透射)、反射汇聚——聚心碰撞(聚心球面波在中心反射,并使反射波后压力剧增[9-10])、反射散心的过程中不断驱动混凝土介质,急剧消耗能量,并由于几何扩散衰减的原因,强度迅速下降。首次冲击波强度最大,熵增剧烈,绝大部分能量用于破坏周围介质;多次反射冲击波虽然相对首次冲击波,压力急剧下降,但因持续时间很长,是炸药能量释放的主体部分,加之多次反射冲击波比首次冲击波通过介质时其熵增小得多,故缓释能量对界面的移动起主要作用。



(a) First convergence and reflection of shock waves (b) Second convergence and reflection of shock waves (c) Third convergence and reflection of shock waves

图 4 典型时刻 p-x 曲线

Fig. 4 p-x curves of typical moment



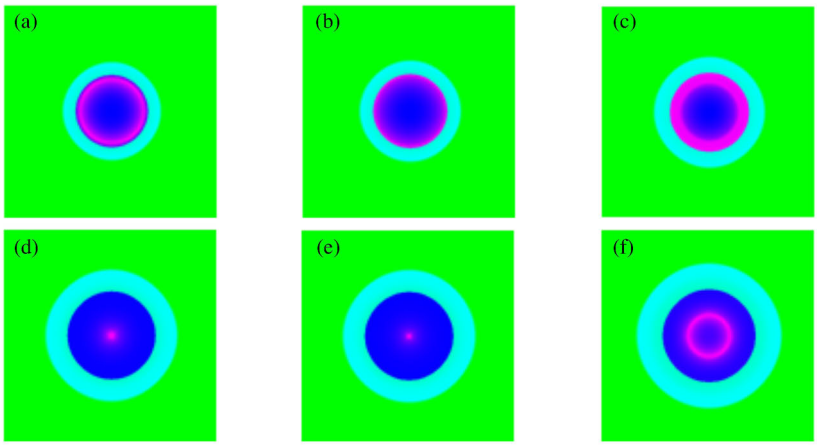
(a) First convergence of shock waves; (b), (c) Reflection at center of first convergence of shock waves; (d) Reflection of first convergence of shock waves chasing after stress waves at interface and in concrete

图 5 冲击波首次汇聚反射时典型时刻计算图像

Fig. 5 Compute pictures of typical moment of first convergence of shock waves and reflect process

计算的 p-t 曲线如图 8 所示。p-t 曲线以下的面积部分可以表征各观测位置爆炸冲击波冲量在时间的分布。通过对图 8 所示流场中各观测点的数值变化进行分析可知,由于冲击波在爆腔内不断反射,爆炸产物内将产生多个冲击波峰值,并在越过物质界面后迅速衰减。强度最大的首次冲击波在对土岩介质作用后,绝大部分冲量被吸收并衰减转化为目标介质的速度,并使目标介质的内能增大。文献[11]中提到的双峰值现象应该是本研究的一个特例,可以预测在更精密的爆炸实验条件下,将会在炮孔中测量到多峰值现象。

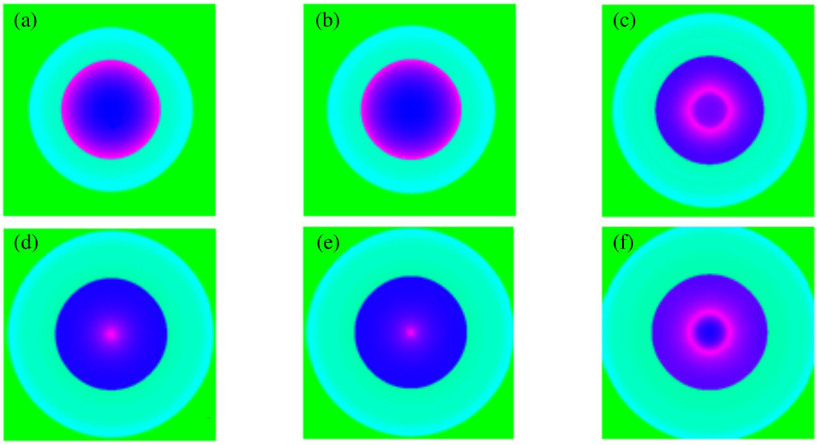
从图 9 可以观察到,由于稀疏波的作用,界面上第一个峰值压力在极短的时间内迅速衰减,散心冲击波到达后在界面产生第二个压力峰值。图 10 表明,在第二个压力峰值到达前,界面运动曲线的曲率最大,第二个压力峰值的到来使界面在几何扩张的情况下维持一段近乎恒定的速度。



(a),(b) Chase shock waves incidence chase stress waves and reflection shock waves at interface;
(c) Chase shock waves reflection at interface and second convergence;
(d),(e) Second convergence shock waves reflection at center;
(f) Second convergence shock waves reflection and chase after stress waves at interface and in concrete

图 6 冲击波再次汇聚反射时典型时刻计算图像

Fig. 6 Compute pictures of typical moment of second convergence and reflection process of shock waves



(a),(b) Chase shock waves incidence chase stress waves and reflection shock waves at interface secondly;
(c) Shock waves convergence thirdly; (d),(e) Third convergence shock waves reflection at center

图 7 冲击波三次汇聚反射时典型时刻计算图像

Fig. 7 Compute pictures of typical moment of third convergence and reflection process of shock waves

由于受计算条件的限制,为在充分大计算区域内研究土岩介质中应力波的发展情况,进行 1/3 原有模型尺寸的缩比计算,即进行半径为 10 m 的球形 TNT 装药在混凝土中爆炸的数值计算。从图 11 所示的计算结果中可以观察到图 4 所示时刻之后的冲击波历程、在土岩介质中显示的各种多峰值应力波结构,以及各次波的叠加过程(图 11(b)、图 11(c)中波阵面前方的小台体是由计算格式粘性造成的)。

以上计算结果表明,首次透射冲击波在土岩介质中迅速远离分界面并急剧衰减,可以认为首次冲击波只在极短的时间内对界面的推移作出贡献,在 1/3 缩比计算模型下,172 ms 以后基本可以认为首次冲击波已经不再驱动界面移动,计算至 600 ms 以后,爆炸气体产物内部的二次、三次乃至多次冲击波反射对界面起推移作用,直到炸药爆炸产物所包含的能量消耗至不足以破坏和推动介质移动为止。

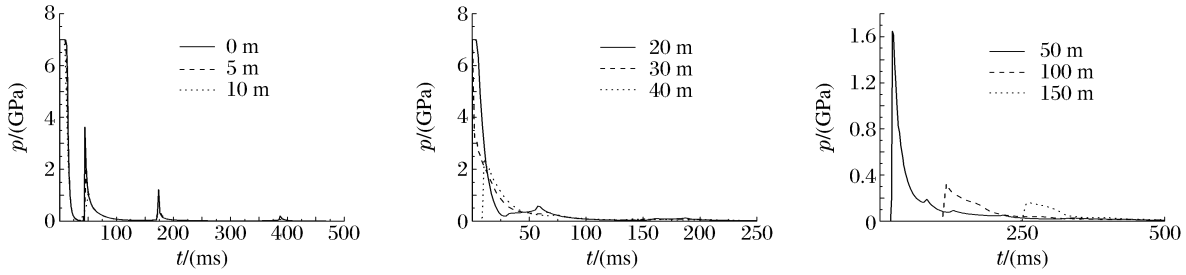


图 8　计算得到的半径为 30 m 的球形 TNT 装药在混凝土中爆炸固定观测点的压力与时间关系

Fig. 8　Radius 30 m TNT sphere charge blasting in concrete relation between pressure and time of each gage points by compute

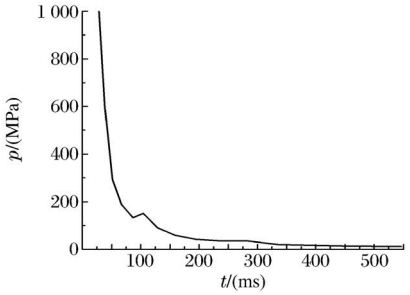


图 9　界面压力随时间的变化

Fig. 9　Change of interface pressure along with time

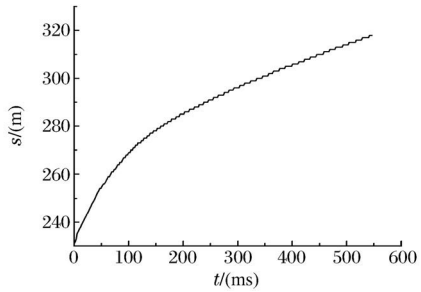
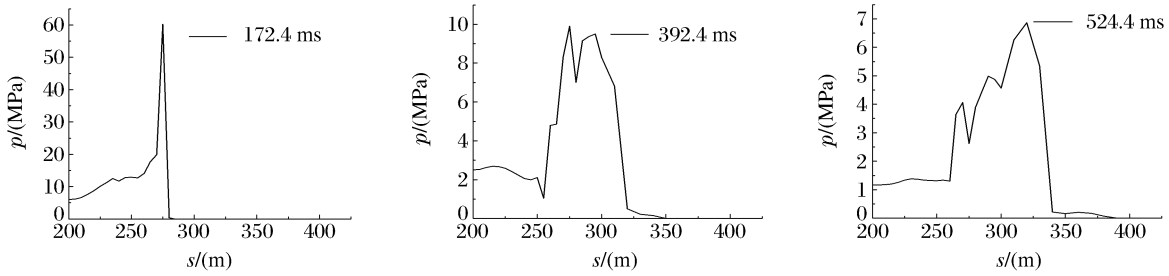


图 10　爆炸产物与混凝土界面运动情况

Fig. 10　Movement status of explosive products and concrete interface



(a) 172.4 ms,interface at 240 m　　(b) 392.4 ms,interface at 255 m　　(c) 524.4 ms,interface at 260 m

图 11　1/3 缩比模型爆炸产物内冲击波及混凝土中应力波情况模拟结果分析

(半径为 10 m 的球形 TNT 装药在混凝土中爆炸)

Fig. 11　1/3 scaled-down model analysis of simulation result of shock waves in explosive products and stress waves in concrete

(Radius 10 m TNT sphere charge blasting in concrete)

4　结　论

采用自主开发的并行计算爆炸力学程序 pMMIC3D,对球形 TNT 装药在混凝土中爆炸进行了数值计算,通过分析爆炸力学理论和数值计算结果,得到以下主要结论。

(1) 炸药在土岩介质中爆炸,介质破碎时,炸药能量主要以冲击波在爆腔内爆炸产物中多次往复反射的方式逐步释放。

(2) 首次冲击波在极短的时间内对土岩介质造成最大的破坏,同时推动介质向外运动,使爆腔扩张。界面物质粒子在反射冲击波后跟随的稀疏波作用和几何扩张因素下作减速运动。

(3) 首次冲击波后的往复反射冲击波在较长的时间内驱动土岩介质向外运动,对土岩介质造成的破坏较小。

流体运动是各种波相互作用的结果(在炸药爆炸近场处其偏应力的抵抗可以忽略不计,此区域内的固体物质可近似视为流体)。流和波不可分割,波驱动了流,波动带来的冲击压缩和稀疏膨胀等力和惯性效应驱动了凝聚态介质的运动。今后将系统地进行炸药爆炸产物与目标介质作用时,球面冲击波及柱面散心波汇聚多次反射、透射波系和界面轨迹等方面的理论推导,并与更贴切的理论物态方程数值计算结果进行对比,在实验条件允许的情况下进行实验验证。在此基础上,从不同角度对装药的起爆方向、能量释放、波阻抗匹配、炸药爆速和爆压与能量的利用关系,以及何种装药形状能更有效地利用炸药能量等研究方向开展更深入的工作。

References:

[1] Yu Y L. Theory and Technology of Engineering Blasting [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2004. (in Chinese)
于亚伦. 工程爆破理论与技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2004.

[2] Nino K. Theory of blasting with concentrated charge [J]. Japan J Industrial Explosives Society, 1954, 15(4): 11-27.

[3] Laugefors U, Kihlstrom B. The Modern Technique of Rock Blasting [M]. New York: Halsted Press, 1978.

[4] Du Z H. High-Performance Parallel Compute Programmer [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
都志辉. 高性能计算并行编程技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 2001.

[5] Yun S R, Tu H J, Liang D S, et al. Computation Method of Explosion Mechanics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
恽寿榕,涂侯杰,梁德寿,等. 爆炸力学计算方法 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995.

[6] Ning J G, Wang C, Ma T B. Explosion and Impact Dynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
宁建国,王 成,马天宝. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010.

[7] Fei G L, Ma T B, Hao L. Parallel computing of the multi-material eulerian numerical method and hydroscode [J]. Int J Nonlin Sci Numer Simul, 2010, 11(Suppl): 189-194.

[8] Fei G L, Ma T B, Ning J G. The parallel computation based on MPI for explosion in air [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(1): 26-30. (in Chinese)
费广磊,马天宝,宁建国. 基于消息传递接口的空中爆炸问题的并行计算 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(1): 26-30.

[9] Courant R, Friedrichs K O. Supersonic Flow and Shock Waves [M]. Beijing: World Publishing Corporation, 1999.

[10] Zhou Y L. One-Dimensional Unsteady Fluid Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
周毓麟. 一维非定常流体力学 [M]. 北京:科学出版社, 1998.

[11] Li Q S. Effectiveness of non-coupled explosive charges [J]. Journal of China Coal Society, 1987, 12(3): 47-54. (in Chinese)
李起山. 不耦合装药的作用 [J]. 煤炭学报, 1987, 12(3): 47-54.

Research of Energy Release Law of Explosive Blasting in Concrete

WANG Meng[1,2], MA Tian-Bao[1], NING Jian-Guo[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Section of Ammo Engineering and Blasting Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *China*)

Abstract: Based on parallel computation of explosive blasting in concrete and analysis of the numerical result as well as study on the foundational theory of explosion mechanics, a conclusion has been drawn that in the process of explosive blasting in rocks, explosive energy is released by way of shock waves' several times reciprocate reflect in blast cavity which is full of explosion product while rock mediums are damaged and moved, and the interface loses gradually its positive expansion velocity along with the rarefaction wave in blast cavity.

Key words: explosion product; shock waves; reflect; energy