文章编号：1000-5773(2012)02-0205-06

复合型切缝药包成缝机理及数值模拟实验*

谢华刚[1,2]，阮怀宁[1]，吴玲丽[3]

(1.河海大学岩土工程研究所，江苏南京　210098；
2.铜陵学院土木建筑系，安徽铜陵　244000；
3.铜陵天洋工业园投资有限公司，安徽铜陵　244000)

摘要：采用爆炸力学、岩石断裂动力学对3种切缝药包进行理论分析表明，复合型切缝药包在切缝方向的剪应力是常规切缝药包的1.59倍左右；采用有限元软件ANSYS10.0/LS-DYNA对其进行数值模拟实验，通过对比3种装药结构的爆炸效果，表明复合型切缝药包在切缝方向的聚能效应最佳；通过对比复合型切缝药包切缝方向和垂直切缝方向的等效塑性应变，得出切缝方向塑性应变峰值是垂直切缝方向的2.93倍左右；通过对比远区围岩压力，得出复合型切缝药包在远区形成的爆炸压力最小，对围岩的损伤程度最小，能量利用最充分。

关键词：复合型切缝药包；成缝机理；ANSYS10.0/LS-DYNA；数值模拟；定向爆破
中图分类号：O383；TD235　　**文献标识码**：A

1　引　言

切缝药包定向断裂控制爆破是在普通光面爆破的基础上发展起来的，目前已经广泛应用于隧道掘进、边坡开挖、贵重石材的开采与切割等工程中[1]。切缝药包定向断裂控制爆破破岩机理在于切缝药包的聚能效应，而为了保证切缝药包的聚能效应，合理的爆破参数和切缝管的材质起到一定的作用，前人大多是从切缝药包破岩机理、切缝宽度、切缝管材质、不耦合系数等因素对其进行研究[2-6]，而其中对改变装药结构的研究进行得较少。实施切缝药包定向断裂控制爆破，不仅要保证在定向方向爆炸产物的能流密度，同时要尽量抑制非切缝方向爆炸产物的能流密度，使其尽量向切缝方向汇聚。因此，对切缝管材料的性能和切缝管、炸药、炮孔三者耦合方式提出了较高要求。在现有材料性能的基础上，本研究提出了一种复合型切缝药包装药结构，旨在通过改变耦合方式来控制爆炸产物的能流密度，进而更好地实施定向断裂控制爆破。

2　切缝药包爆炸成缝机理

根据岩石爆破理论，在无限大岩体中爆破时，岩体内部将产生爆炸冲击波作用下的压碎区、爆炸应力波和爆生气体作用下的破裂区，以及具有地震效应的震动区。由于冲击波在震动区已经衰减得很弱，只能使质点产生振动，因而不能引起岩石结构的破坏，因此，重点研究爆破对压碎区和破裂区岩石孔隙结构的影响[7]。

2.1　裂缝形成的力学分析

切缝药包定向断裂控制爆破在爆炸瞬间，切缝处岩石受到的压应力最大，并且在这一微小区域上出现了压应力差[8]。因此，岩石在定向方向上发生断裂破坏。取这一区域内的任一单元体进行分析。单

* **收稿日期**：2010-11-18；**修回日期**：2011-08-17
基金项目：国家重点工程项目(2005805715)；铜陵学院自然科学基金(2011tlxy31)
作者简介：谢华刚(1978—)，男，博士研究生，讲师，主要从事岩土及爆破研究工作. E-mail：xiehg2005@126.com

元体在图1所示的应力状态可以形成径向剪应力的剪断破坏,则压力差所形成的剪应力为

$$\tau = p_1 - p_2 \tag{1}$$

对于炮孔柱状装药,炸药在水中激起冲击波压力的变化[9-10]为

$$p = 72.0\,\bar{R}^{-0.72} \tag{2}$$

式中:p 为距爆源中心 R 处的水中冲击波压力峰值;$\bar{R}$ 为比例距离,其值为 $\bar{R} = R/\sqrt{Q_c}$,Q_c 为所用炸药的 TNT 当量,kg/m,$Q_c = \pi d_c^2 \rho_0 / 4$,$d_c$ 为药包直径[10]。

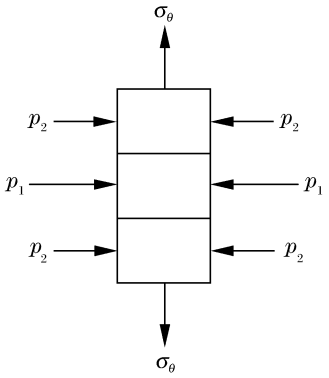


图 1 单元力学模型

Fig. 1 Unit mechanical model

当冲击波在切缝方向传播至炮孔壁时,其峰值压力为

$$p_1 = 72\,(d_c/d_b)^{0.72}\,(Q_{vt}/\pi\rho_0 Q_{vs})^{0.36} \tag{3}$$

式中:p_1 为切缝处炮孔壁的压力(MPa),d_b 为炮孔直径(mm),Q_{vs} 和 Q_{vt} 分别为所用炸药的爆热和 TNT 炸药的爆热。

根据波的反射折射理论,可求得在复合型切缝药包装药结构下非切缝处冲击波经过两层 PVC 管后,传播到炮孔壁时的峰值压力为

$$p_2 = \left(\frac{2\rho_p c_p}{\rho_p c_p + \rho_0 D_0}\right)^2 \cdot p_1 \tag{4}$$

而在常规药包(为了计算方便,认为 PVC 与炸药耦合和 PVC 与炮孔耦合的折射系数相同)非切缝处,冲击波经过一层 PVC 管后,传播到炮孔壁时的峰值压力为

$$p_2 = \frac{2\rho_p c_p}{\rho_p c_p + \rho_0 D_0} \cdot p_1 \tag{5}$$

式中:p_2 为非切缝处炮孔壁的压力(MPa);$\rho_0 = 1\,630$ kg/m^3,为炸药密度;$D_0 = 6\,500$ m/s,为炸药爆速;$\rho_p = 1\,300$ kg/m^3,为 PVC 管的密度;$c_p = 3\,450$ m/s,为 PVC 管的纵波速度。

经计算可得复合型切缝药包与常规药包爆炸产生的剪应力之比为

$$\frac{\tau_f}{\tau_c} = \frac{0.65 p_1}{0.41 p_1} = 1.59 \tag{6}$$

式中:τ_f 为复合型切缝药包的剪应力,τ_c 为常规药包的剪应力。由库仑定律得到岩石在定向方向形成裂缝的条件[4]为

$$\tau > S_{td} = \sigma_\theta \tan\varphi + C \tag{7}$$

式中:S_{td} 为岩石动态剪切强度(MPa),C 为岩石动态粘聚力(MPa),φ 为岩石动态内摩擦角。

2.2 裂缝扩展力学分析

当炮孔壁形成后,岩石内部应力发生变化。同时,岩石裂缝扩展不是简单的拉断或剪断,而是在复杂应力作用下的张开型脆性断裂破坏。根据岩石断裂力学理论,裂缝扩展过程中其尖端应力强度为[4,11]

$$k_I = p_s F \sqrt{\pi(r_b + a)} \tag{8}$$

式中:p_s 为裂缝中的准静态压力(GPa),a 为开裂缝长度(mm),r_b 为炮孔半径(mm),F 为应力强度因子修正系数。

当 $k_I \geqslant k_{IC}$ 时,裂缝即能起裂、扩展。此时,准静态压力 p_s 应满足

$$p_s \geqslant \frac{k_{IC}}{F\sqrt{\pi(r_b + a_0)}} \tag{9}$$

式中:a_0 为初始裂缝的长度(mm)。

3 3 种切缝药包装药结构

切缝药包定向断裂控制爆破的研究大都建立在采用 PVC 管与炸药耦合方式[1]、PVC 管与炮孔耦合方式[6]两种装药结构的基础上。两种耦合方式的爆炸性能不同:对于 PVC 管与炸药耦合装药结构,炸药爆炸时,爆炸产物首先冲击 PVC 管,然后再冲击炮孔壁,因此对 PVC 管材料性能的要求较高;对于 PVC 管与炮孔耦合装药结构,炸药爆炸时,爆炸产物首先冲击耦合介质,进而冲击 PVC 管,因 PVC 管受到炮孔壁的阻碍作用,使得过度粉碎减少,对非切缝方向的爆炸产物起到一定的抑制作用,从而提高切缝方向的爆炸能流密度,进而达到定向断裂的目的。而复合型切缝药包装药结构,综合了两种装药结构的优点,内层 PVC 管使爆炸气体产物得到聚能,外层 PVC 管使非切缝方向的爆炸产物得到抑制,进而最大可能地提高切缝方向的能流密度。

3.1 复合型切缝药包

复合型切缝药包[12-13]采用两层 PVC 管组合而成,直径分别为 10 mm 和 16 mm,并在 PVC 管两侧开 180°对称缝。其药包结构见图 2(a)。

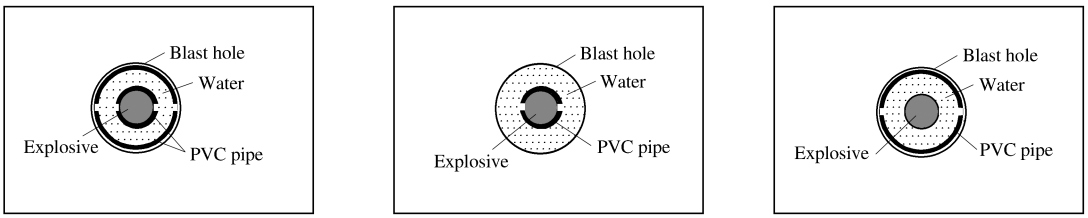
3.2 常规切缝药包

① PVC 与炸药耦合

本药包采用炸药和 PVC 管组合而成,PVC 管直径为 10 mm,并在管两侧开 180°对称缝。药包结构见图 2(b)。

② PVC 与炮孔耦合

本药包采用炮孔和 PVC 管组合而成,PVC 管直径为 16 mm,并在管两侧开 180°对称缝。药包结构见图 2(c)。



(a) Complex ligamented charge holders (b) PVC and explosive coupled (c) PVC and blast hole coupled

图 2 切缝药包

Fig. 2 Ligamented charge holders

4 数值模拟实验对比分析

4.1 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS10.0/LS-DYNA 进行数值计算。为了计算方便,将计算模型简化为“准”平面状态,采用 1/4 模型进行建模,尺寸分别为 200 mm×150 mm×5 mm,关于 x、y 两轴对称,有限元模型见图 3,爆破参数见表 1。模型中采用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN,结合 * EOS_JWL 状态方程来模拟炸药爆炸过程中的压力与体积的变化。采用 RDX 炸药,密度 ρ 为 1.63 g/cm^3,爆速 D 为 6 500 m/s,C-J 压力为 18.5 GPa。PVC 管的密度、弹性模量和泊松比分别为 1.3 g/cm^3、3.1 MPa

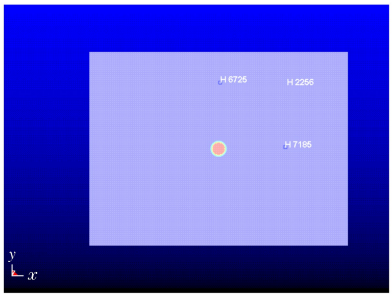


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

和 0.38[14]。采用水作为耦合介质。岩石采用塑性动力学模型* MAT_PLASTIC_KINEMATIC，它是与应变率有关和考虑失效的各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型[15]，参数见表 1。

表 1 岩石材料参数

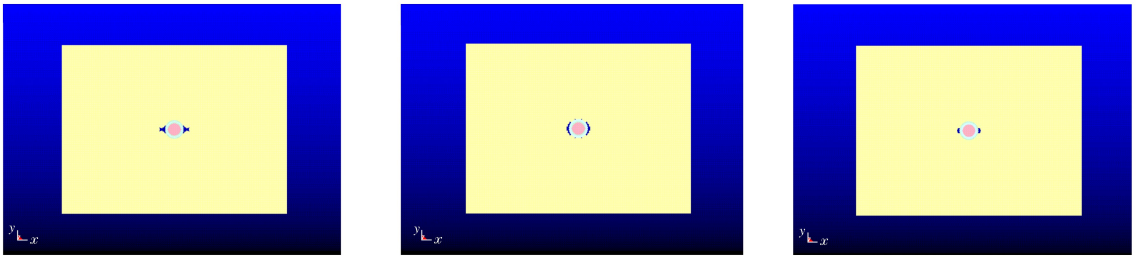
Table 1 Parameter of rock

Explosive	d_b/(mm)	Coupling medium	ρ/(Mg/m^3)	σ/(MPa)	E/(MPa)
RDX	16	Water	1.10	1.60	169.45

4.2 定向断裂爆破的应力分析

4.2.1 爆破效果对比

图 4 给出了 3 种装药结构下，爆炸初期 $t\approx2.29$ μs 时在切缝方向的定向断裂效果。对比 3 种装药结构下的爆破效果，得出 PVC 与炸药耦合装药结构在炮孔周围产生较大的裂缝，而定向方向裂缝较差，见图 4(b)；PVC 与炮孔耦合装药结构在切缝方向能够形成一定程度的定向裂缝，但开裂的程度小于复合型切缝药包装药结构在定向方向形成的裂缝，见图 4(c)；复合型切缝药包装药结构能够在切缝方向形成比较理想的定向裂缝，见图 4(a)。因此复合型切缝药包的定向效果优于常规切缝药包。



(a) Complex ligamented charge holders (t=2.298 8 μs)　(b) PVC and explosive coupled (t=2.291 1 μs)　(c) PVC and blast hole coupled (t=2.291 1 μs)

图 4 爆破效果图

Fig. 4 Blasting effect

4.2.2 力学参数对比

图 5 给出采用复合型切缝药包装药结构距炮孔中心 100 mm 处切缝方向 7 185 单元和垂直切缝方向 6 725 单元的等效塑性应变时程曲线，单元位置见图 3。从图 5 可以看出，切缝方向的塑性应变比非切缝方向的塑性应变高 2.93 倍左右。

图 6 给出了 3 种装药结构下，45°方向的单元压力时程曲线，2 256 单元位置见图 3。对于复合型切缝药包装药结构，该单元所受压力最小，见图中曲线 1；PVC 管与炸药耦合次之，见图中曲线 2；PVC 管与炮孔耦合最大，见图中曲线 3。说明复合型切缝药包装药结构的爆炸压力对围岩的损伤程度最小。

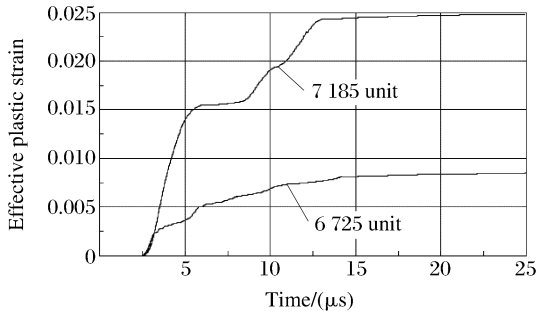


图 5 等效塑性应变

Fig. 5 Effective plastic strain

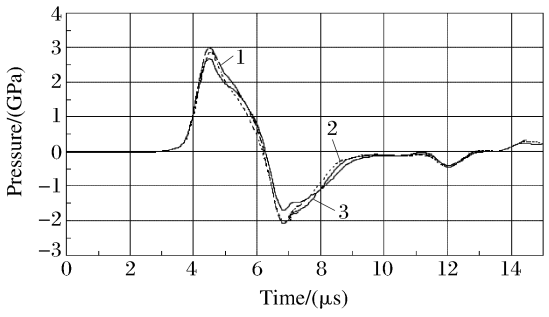


图 6 3 种装药结构单元压力图

Fig. 6 Three kind of cartridge structural unit pressure

4.2.3　等效塑性云图和压力云图

图 7、图 8 分别给出了复合型切缝药包装药结构,在爆炸初期 $t=2.29\ \mu s$ 时的等效塑性应变云图和压力云图。从图 7 中可以看出,最大塑性应变的形状像一个椭圆,而长半轴在切缝方向,其长度明显高于非切缝方向,从图 8 的压力云图也可以得到证明。说明复合型切缝药包装药结构,其爆炸应力场发生了一定的变化,切缝方向的爆炸压力明显大于非切缝方向,这一点也可以由理论分析得到验证。

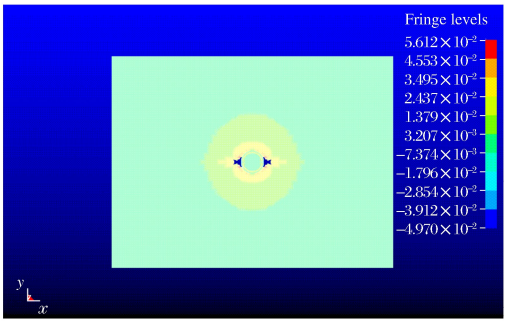


图 7　等效塑性应变云图

Fig. 7　Contours of effective plastic strain

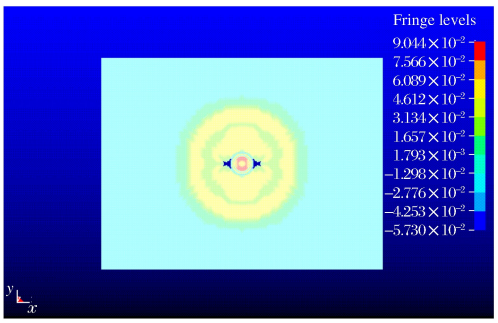


图 8　压力云图

Fig. 8　Contours of pressure

5　结　论

通过对 3 种切缝药包进行理论分析和数值模拟实验对比,得到如下结论:

(1) 经过理论推导,表明复合型切缝药包在切缝方向形成的剪应力是常规药包的 1.59 倍左右;

(2) 从切缝处的聚能效应上看,复合型切缝药包的聚能效应最佳,能量利用最充分;

(3) 从对远区围岩损伤程度来看,复合型切缝药包在远区岩石产生的压力最小,PVC 与炸药耦合次之,PVC 与炮孔耦合最大,因此复合型切缝药包对围岩的损伤程度最小。

综合以上,复合型切缝药包岩石定向断裂控制爆破是一个新型定向断裂控制爆破,切缝处聚能效应最佳,远区围岩的损伤程度最小,能量利用更充分,值得进行推广应用。

References:

[1] Luo Y, Shen Z W. Application study on orientation fracture blasting with slit-charge [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(4): 443-446. (in Chinese)
罗　勇,沈兆武. 切缝药包在定向断裂爆破中的应用研究 [J]. 地质灾害与环境保护,2005,16(4):443-446.

[2] Liang W M, Yang X L, Yu Y Q, et al. Research on theory on directional fracture controlled blasting [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(5): 702-704. (in Chinese)
梁为民,杨小林,余永强,等. 定向断裂控制爆破理论与技术应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报,2006,25(5):702-704.

[3] Foumey W L, Dally J W, Holloway D C. Controlled blasting with bigamented charge holders [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1978, 15: 121-129.

[4] Luo Y, Shen Z W. Study on the directional fracture controlled blasting with slit-charge in rock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 155-185. (in Chinese)
罗　勇,沈兆武. 切缝药包岩石定向断裂爆破的研究 [J]. 振动与冲击,2006,25(4):155-185.

[5] Xiao Z X, Lu Y S, Zhang Z C, et al. Dynamic photoelasticity experiment on energy cumulative effect of slit charge [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2005, 6(5): 447-450. (in Chinese)
肖正学,陆渝生,张志程,等. 切缝药包聚能效应的动光弹试验 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2005,6(5):447-450.

[6] Liu Y S, Fu H X, Wang M S, et al. Experimental research and analysis of mechanics on water-coupling directional fractural charge [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 109-112. (in Chinese)
刘永胜,傅洪贤,王梦恕,等. 水耦合定向断裂装药结构试验及机理分析 [J]. 北京交通大学学报,2009,33(1):109-112.

[7] Cao S G, Li Y, Liu Y B, et al. Influence of deep-hole controlled pre-cracking explosion on microstructure of coal

[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 673-678. (in Chinese)
曹树刚, 李 勇, 刘延保, 等. 深孔控制预裂爆破对煤体微观结构的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 673-678.

[8] Zhang Z C. Directional Fracture Controlled Blasting [M]. Chongqing: Chongqing Press, 2000. (in Chinese)
张志呈. 定向断裂控制爆 [M]. 重庆: 重庆出版社, 2000.

[9] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use [M]. Translated by Xiong J G, et al. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
亨利奇·J. 爆炸动力学及其应用 [M]. 熊建国, 等译. 北京: 科学出版社, 1987.

[10] Zong Q. Theoretical analysis of charge structure's influence on pressure on bore wall [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 26(5): 9-12. (in Chinese)
宗 琦. 装药结构对孔壁压力影响的理论探讨 [J]. 矿冶工程, 2006, 26(5): 9-12.

[11] Melih I, Mahmut Y, Hakan A. Reply to the discussion on "prediction of ground vibrations resulting from the blasting operations in an open pit mine by adaptive neuro-fuzzy inference system" by Yavuz Karsavran [J]. Environ Earth Sci, 2010, 60: 1343-1345.

[12] Xie H G, Liang W M, Yang X L, et al. Experimental study of complex cutting seam charge blasting [J]. Blasting, 2006, 23(1): 10-13. (in Chinese)
谢华刚, 梁为民, 杨小林, 等. 复合型切缝药包爆破试验研究 [J]. 爆破, 2006, 23(1): 10-13.

[13] Xie H G, Ruan H N, Wu L L, et al. Complex cutting seam charge mechanism analysis and millisecond blasting experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(suppl): 68-71. (in Chinese)
谢华刚, 阮怀宁, 吴玲丽, 等. 复合型切缝药包机理分析及微差爆破试验 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊): 68-71.

[14] Yang R S, Jiang L L, Yang G L, et al. Numerical simulation of directional fraction controlled blasting in rock [J]. Safety in Coal Mines, 2009, 7: 14-19. (in Chinese)
杨仁树, 姜琳琳, 杨国梁, 等. 煤岩定向断裂控制爆破数值模拟 [J]. 煤矿安全, 2009, 7: 14-19.

[15] Jiang P F, Tang D G, Long Y. Numerical analysis of influence of uncoupled explosive-charge structure on stress field in hard rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 275-279. (in Chinese)
姜鹏飞, 唐德高, 龙 源. 不耦合装药爆破对硬岩应力场影响的数值分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 275-279.

Slitting Mechanism and Numerical Simulation Experiments of Complex Ligamented Charge Holders

XIE Hua-Gang[1,2], RUAN Huai-Ning[1], WU Ling-Li[3]

(1. *Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
2. *Department of Civil Engineering and Architecture, Tongling university, Tongling* 244000, *China*;
3. *Tongling TianYang Industrial Park Investment Co., Ltd, Tongling* 244000, *China*)

Abstract: According to the theries of explosion mechanics and rock fracture dynamics mechanics, we found that the slits location shear stress of the complex ligamented charge holders is about 1.59 times of that of the conventional ligamented charge holders. The finite element software ANSYS10.0/LS-DYNA was employed to numerically compare the blasting effects of three kinds of seam cartridge, and it was found that the blasting effect of the complex ligamented charge holders is the best. Through comparing the effective plastic strain in the slits direction and vertical slits direction of the complex ligamented charge holders, we obtained that the effective plastic strain is the slits direction is 2.93 times of that in the vertical slits direction. After companing the pressure of surrounding rock in the far zone, we observed that the blasting pressure in the far zone of the complex ligamented charge holders is the lowest, which may lead to the minimum degree of injury to the surrounding rock and full use of the energy.

Key words: complex ligamented charge holders; slitting mechanism; ANSYS10.0/LS-DYNA; numerical simulation; directional blasting