

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.03.003

# 不耦合系数对深水岩石钻孔爆破水中冲击波传播特性影响的数值模拟研究<sup>\*</sup>

秦入平<sup>①②</sup> 顾文彬<sup>①</sup> 王振雄<sup>①</sup> 廖 昆<sup>①</sup> 陈学平<sup>①</sup> 胡亚峰<sup>①</sup> 董勤星<sup>①</sup>

①中国人民解放军理工大学(江苏南京,210007)

②65426 部队(黑龙江哈尔滨,150049)

[摘 要] 文章基于岩石材料的 HJC 本构模型,采用显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA,模拟了深水岩石钻孔爆破水中冲击波的传播过程,分析了不耦合系数对不同方向上冲击波传播特性的影响。结果表明:不耦合系数对水中冲击波峰值压力和比冲量都有重要影响;在不同的方向上,比冲量随距离的衰减规律是不同的,其大小受不耦合系数也即装药量的影响较大。

[关键词] 不耦合系数 水中冲击波 深水岩石钻孔爆破 数值模拟

[分类号] TD235.33

## 引言

爆破水中冲击波的试验与研究已有 100 多年的历史,过去主要从军事角度出发,探讨炸药在水下爆炸时的破坏效应。近年来,随着水下工程的发展,广泛采用水下裸露爆破和水下钻孔爆破法开挖基岩,水下爆破工程的规模越来越大,甚至在某些特殊情况下,要求在港口、水下建筑物或船舶附近直接进行水下爆破施工。这就对爆破安全和可靠程度提出了很高的要求,进一步促使了对水下钻孔爆破中产生的水中冲击波特性的研究<sup>[1]</sup>。

图 1 为水下钻孔爆破水中冲击波传播示意图。水下钻孔爆破形成的冲击波在水平面与水底介质之间扰动,其压力、能量在水中的分布规律是一个十分复杂的研究课题。总体来讲,水中冲击波主要由两部分组成:一是炸药爆炸后在岩体中形成的应力波,到达基岩和水的分界面时折射到水中形成冲击波,这部分的地—水冲击波衰减较水中裸露爆破更快,但作用持续时间长,约 1ms<sup>[2]</sup>;另一部分是高压爆炸气体膨胀从炮孔冲出到达水中产生冲击波,这部分冲击波的强度与岩石的完整性、炮孔的填塞质量有直接关系。前者先到达,波形上升斜率较缓,低频的成分较多;而后者多为后到达,波形的上升斜率较快,高频的成分也较为丰富。然而这只是相对而言,两部分冲击波随着爆破条件与环境的不同,对复合冲击波的贡献所占的比例也不相同。此外,水中冲

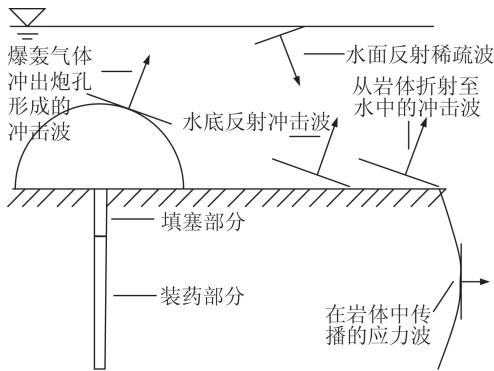


图 1 炮孔爆破水中冲击波传播示意图

Fig. 1 Propagation process of shock wave of rock-drilling blasting under water

击波还会在水底反射形成反射波,在水面处水中入射波反射为水中稀疏波。当水底不平坦时还会在水中产生绕射冲击波<sup>[3]</sup>,水底的淤泥等松散沉积物会消耗一部分从岩体中折射至水中的冲击波,因而水底地质地貌对冲击波的影响非常大。

本文采用数值模拟手段,对炮孔轴线方向、与水与基岩的分界面有一定夹角的方向以及距离水底不同高度的水平方向的水中冲击波传播特性进行研究。相对实验来说,数值模拟分析不仅省时省力,节约高昂的实验费用,而且很容易避免试验研究中出现的由于外界干扰及人为因素的影响而出现的一些意想不到的误差。更为突出的是,由于可以采用尽

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2012-12-04  
作者简介: 秦入平 (1986 - ), 男, 硕士, 从事火炮、自动武器与弹药工程的研究, E-mail: qrpj@163.com  
通信作者: 顾文彬 (1961 - ), 男, 博导, 主要从事火炮、自动武器与弹药工程的研究。

可能接近实际的复杂的数学模型,数值模拟能够表现整个水下爆破过程,得到全部的重要物理信息,这样有助于理解水下爆炸各个过程的机制,使分析变得更为容易和直接。但同时数值模拟受网格密度、状态方程和人工粘性等因素影响,与实际情况会存在一定误差。本文采用流固耦合算法<sup>[4]</sup>来分析水下爆炸这种复杂过程,模拟结果更具有真实性。其中炸药、水和空气均采用 ALE 算法,编为一个 ALE 多物质组;岩石采用 Lagrange 算法;岩石和 ALE 多物质组之间应用流固耦合算法。所有计算网格均采用六面体单元。

1 材料参数与计算模型

1.1 岩石材料模型

数值模拟中岩石采用 HJC( Holmquist-Johnson-Cook)本构模型,该模型是 Holmquist<sup>[5]</sup>等在第 14 届国际弹道会议上报道的,主要应用于高应变率、大变形下的混凝土与岩石模拟,适用于 Lagrange 和 Euler 算法。材料参数见表 1<sup>[6-7]</sup>。

表 1 岩石材料参数  
Tab.1 Properties of rock

变量	取值	变量	取值
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.65	$T/\text{GPa}$	0.0052
$\mu$	0.2	$\varepsilon_{\text{finin}}$	0.010
$E/\text{GPa}$	58.8	$p_{\text{crush}}/\text{GPa}$	0.016
$f'c/\text{GPa}$	0.072	$U_{\text{crush}}$	0.001
$D_1$	0.040	$p_{\text{lock}}/\text{GPa}$	0.800
$D_2$	1.000	$\varepsilon_0$	$1.0\times10^{-6}$
$A$	0.79	$K_1/\text{GPa}$	85.00
$\sigma_{\text{max}}^*$	7.0	$K_2/\text{GPa}$	-171.000
$N$	0.61	$K_3/\text{GPa}$	208.000
$C$	0.007	$U_{\text{lock}}$	0.100

1.2 炸药材料模型

LS-DYNA 中提供的" \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN"炸药材料模型和 JWL 状态方程,可以精确地描述炸药的物理化学性质。2 号岩石乳化炸药参数见表 2<sup>[8]</sup>。

表 2 炸药材料参数  
Tab.2 Properties of explosive

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$p_{\text{c3}}/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	
1150	3500	9.7	214.4	
$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0/\text{GPa}$
0.182	4.2	0.9	0.152	4.192

1.3 计算模型

模型中含有 3 种材料:炸药、水和岩石。图 2 为计算模型的几何尺寸示意图。为节省计算资源,建

立四分之一模型进行计算,总体尺寸为 8.0m × 3.5m × 18.8m,其中水层厚度 10.0m,岩层厚度 8.8m。炮孔直径 165.0mm,炮孔深 6.0m,装药长 4.8m。孔口和两段装药之间的填塞介质为水,孔口填塞长 1.5m,起爆点都设在装药底部。不耦合系数  $K_d$  分别取 1.2、1.5、1.8、2.0,共建立 4 个模型,每个模型含网格 2023176 个。数值模拟采用 cm-g- $\mu\text{s}$  单位制,计算时间 40000 $\mu\text{s}$ 。岩石和水的交界面为反射边界,其余界面为透射边界。

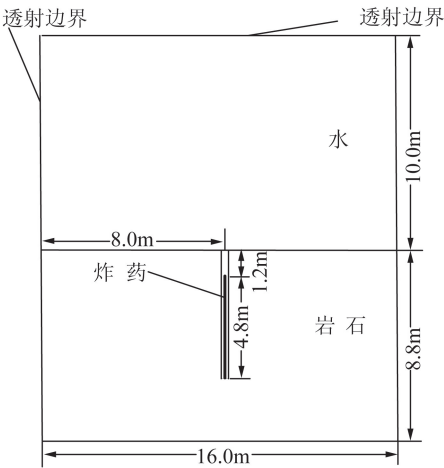


图 2 计算模型示意图  
Fig.2 Sketch of calculation model

2 数值模拟结果及分析

2.1 沿炮孔轴线方向水中冲击波传播特性

在炮孔口部上方沿轴线方向每隔 50cm 选取一个典型单元,最下方的单元与炮孔口部的垂直距离为 50cm,最上方的单元与炮孔口部的垂直距离为 250cm。为准确地获得典型单元的水中冲击波压力时程曲线,使用关键字" \* DATABASE\_ELOUT "和" \* DATABASE\_HISTORY\_SOLID" ,每隔 2 $\mu\text{s}$  记录一次数据。图3为不耦合系数  $K_d$  为 1.2 时位于炮孔口部上方 150cm 处单元的水中冲击波压力时程曲线。

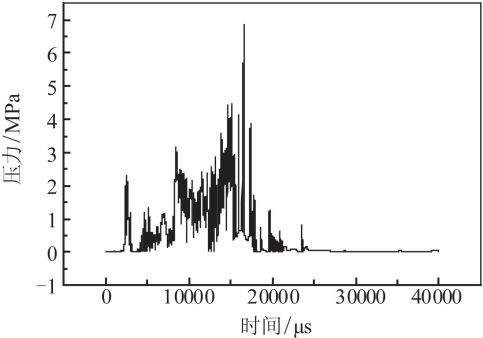


图 3  $K_d = 1.2$  时单元 190429 水中冲击波压力曲线  
Fig.3 Shock wave curves of typical element 190429 with time ( $K_d = 1.2$ )

炮孔口部上方的水中冲击波的形成有两方面的原因:一是炸药起爆后在水中形成冲击波,水中直达波以孔口中心为球心向四周传播,在炸药起爆后 3ms 左右到达炮孔口部上方 150cm 处,出现第一次峰值,压力较小、上升较快、持续时间短;二是爆轰产物冲出炮孔形成水中冲击波。

图 4 为数值模拟中爆轰产物从炮孔中冲出的情形。爆轰产物在炮孔上方形成的水中冲击波压力峰值较高、上升较慢、衰减较快。

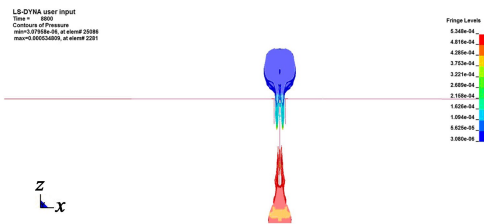


图 4 爆轰气体冲出炮孔

Fig. 4 Explosion gas flying out of blast hole

图 5 为炮孔轴线方向单元的直达波压力随距离的变化曲线。可以看出,直达波的峰值压力随着距离的增大呈指数衰减,同一单元处的直达波压力随着不耦合系数的增大而减小。

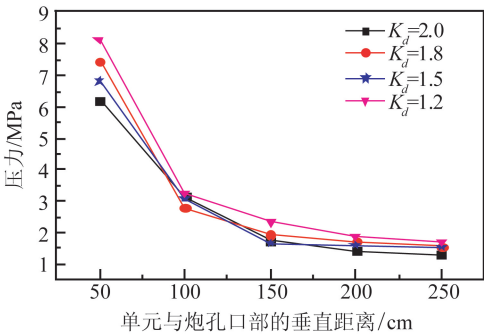


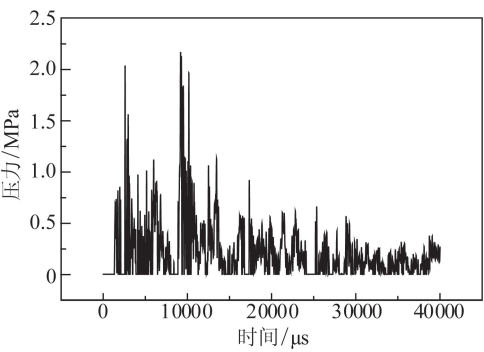
图 5 炮孔轴线方向直达波压力峰值随距离变化曲线

Fig. 5 Peak pressure curves with distance in blast hole axial direction

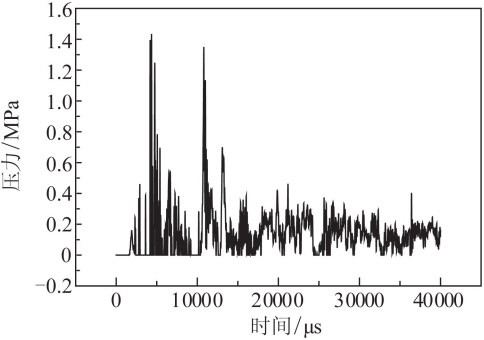
2.2 水底单元冲击波传播特性

在岩石与水的分界面水平方向每隔 60cm 选取一个典型单元,距离炮孔口部最近的单元与炮孔中心的水平距离为 50cm,最远的单元与炮孔中心的水平距离为 710cm。图 6 为不耦合系数  $K_d$  为 1.2 时与炮孔中心的水平距离为 170cm 和 410cm 处单元的水中冲击波压力时程曲线。

水底单元的冲击波波形复杂,其压力上升快,频率高。在岩体和水的分界面处存在波的反射和折射现象,由图 6 可以看出,该处的冲击波均存在两次峰值。岩体的声速高于水的声速,故第一次峰值为炸药爆炸后在岩体中形成应力波,传播至岩体和水的



(a)



(b)

(a) 与炮孔中心水平距离为 170cm ;  
(b) 与炮孔中心水平距离为 410cm

图 6 水底单元水中冲击波压力时程曲线

Fig. 6 Shock wave curves of typical elements under water with time

分界面时发生折射,在水中形成冲击波;第二次峰值是高压爆轰气体膨胀至水中产生冲击波,到达分界面后形成反射波。

图 7 为水底单元水中冲击波压力峰值随距离的变化曲线,由于在水底各方面波的干扰叠加较为复杂,随着距离的增加,峰值压力并非一致衰减,呈现出波动性。水底单元的冲击波峰值持续时间非常短暂,在短时间作用下的荷载,其绝对值是不足以说明荷载的作用的,在此情况下,主要是以单位面积上的冲量即比冲量作为载荷来确定冲击波对结构物的机

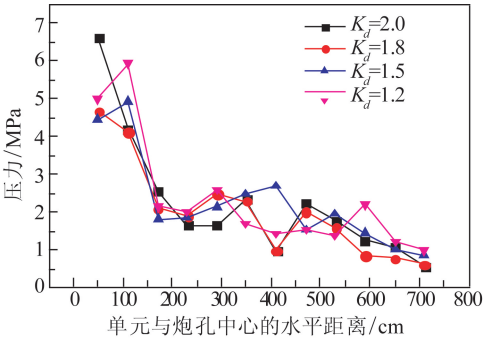


图 7 水底单元水中冲击波压力峰值随距离变化曲线

Fig. 7 Peak pressure curves of typical elements under water with distance

械作用。

图 8 为比冲量随距离变化曲线,各条曲线之间的层次区分明显,比冲量大小主要受不耦合系数影响,不耦合系数增大也即药量减少时,比冲量减小。

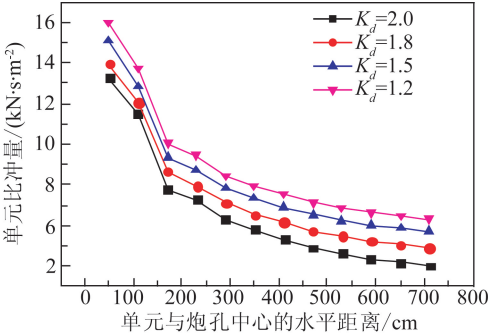


图 8 水底单元比冲量随距离变化曲线  
Fig. 8 Impulse curves of typical elements under water with distance

2.3 水平方向单元水中冲击波传播特性

图 9 为距离水底 1m 和 2m、沿水平方向单元水中冲击波压力随距离变化曲线。在距离炮孔较近的区域,不耦合系数不同时,同一单元处的峰值压力相差较大,装药量较大峰值压力相对较高。而距离炮孔较远的区域压力峰值则趋于一致,受装药量影响较小,孔口局部炸药产生的水中直达波是较远区域冲击波的主导波<sup>[9]</sup>。

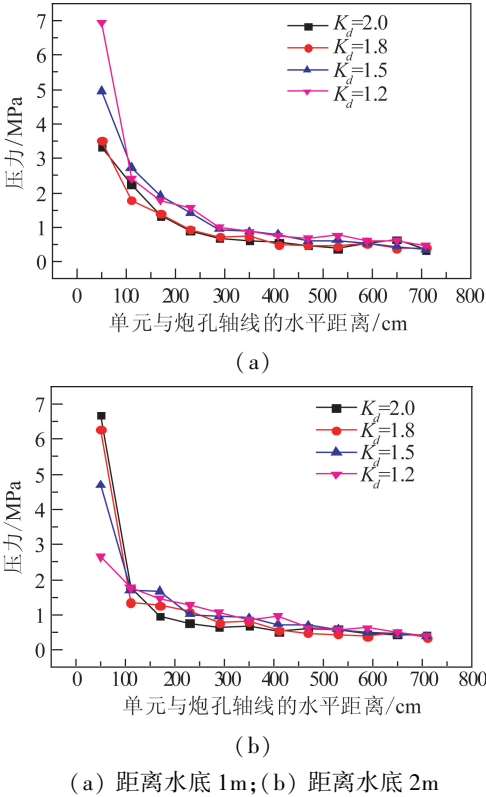
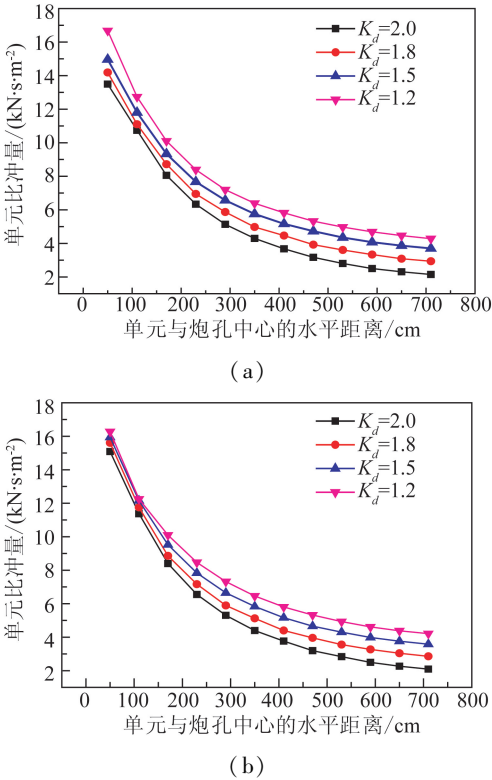


图 9 水平方向单元水中冲击波压力峰值随距离变化曲线  
Fig. 9 Peak pressure curves of typical elements with distance in horizontal direction

图 10 为水平方向单元比冲量随距离变化曲线,不耦合系数仍然是影响比冲量的主要因素,比冲量随距离的变化呈近似指数关系。



(a) 距离水底 1m ; (b) 距离水底 2m  
图 10 水平方向单元比冲量随距离变化曲线  
Fig. 10 Impulse curves of typical elements with distance in horizontal direction

2.4 以炮孔中心为圆心、与水底成 20°角半径方向单元水中冲击波传播特性

以炮孔中心为圆心,沿与水底成 20°的半径方向每隔 75cm 选取一个典型单元,距离炮孔最近的单元与炮孔中心的直线距离为 75cm,最远的单元与炮孔中心的直线距离为 525cm。

图 11、图 12 分别为这一方向单元水冲波压力峰值和比冲量随距离变化曲线。由图 12 可知,与前

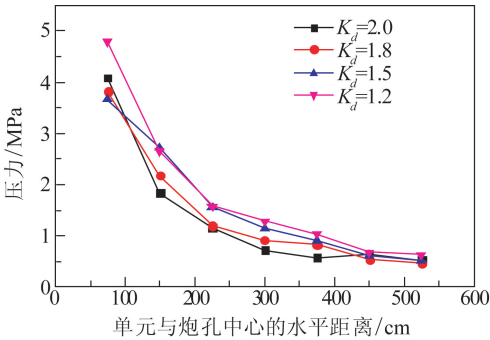


图 11 斜线方向单元水中冲击波压力峰值随距离变化曲线  
Fig. 11 Peak pressure curves of typical elements with distance in oblique direction



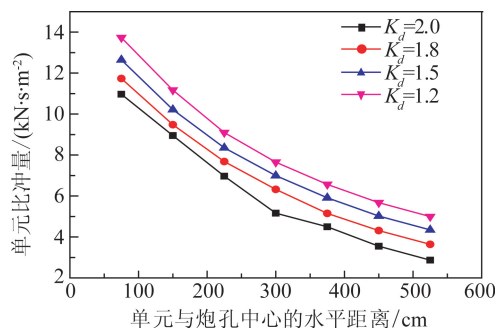


图 12 斜线方向单元比冲量随距离变化曲线

Fig. 12 Impulse curves of typical elements with distance in oblique direction

面所述几个方向的单元相比较,该方向比冲量的衰减更接近于线性关系。

### 3 结论

本文利用有限元分析软件,模拟了 10m 水深条件下的钻孔爆破,简要分析了不耦合系数  $K_d$  分别为 1.2、1.5、1.8、2.0 时,炮孔上方、水和岩石分界面、水平方向以及以炮孔中心为圆心、与水底成  $20^\circ$  角的半径方向上水中冲击波的传播特性。结果表明:

1) 炮孔孔口上方的水中冲击波峰值压力最高,衰减最快;水和岩石分界面处存在波的反射和折射,水中冲击波形成较为复杂;水平方向靠近炮孔的区域,冲击波峰值压力随不耦合系数的增大而降低,距离炮孔较远的区域则趋于一致,受装药量影响较小;

2) 不耦合系数也即装药量是影响比冲量的主要因素。在不同的方向上,比冲量随距离的变化规律是不同的,水平方向呈现出指数衰减,而与分界面成一定角度的直线方向上更接近于线性关系。

### 参考文献

- [1] 杨光煦. 水下工程爆破[M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [2] B. B 加尔基. 水下爆破工程[M]. 王中黔,吕毅,张旭,

译. 北京:人民交通出版社,1992.

- [3] 李洪涛,赵琳,宁永成,等. 球形装药海底裸爆压力测试与分析[J]. 工程爆破, 2005, 11(1): 16-21.  
Li Hongtao, Zhao Lin, Ning Yongcheng. Testing and analyzing pressure produced by submarine explosion with spherical charges [J]. Engineering Blasting, 2005, 11(1): 16-21.
- [4] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [5] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subjected to larger strains, high strain rates and high pressure [C]//14th international symposium ballistics. USA: American Defense Preparedness Association, 1995:591-600.
- [6] Gao Fuqiang, Hou Aijun, Yang Xiaolin. Numerical analysis of dynamic mechanical properties for rock sample under strong impact loading [J]. Information Engineering and Electronic Business, 2010(2):10-16.
- [7] 顾文彬,秦入平,王振雄,等. 间隔装药起爆顺序对深水岩石钻孔爆破影响的数值模拟[J]. 爆破, 2012, 29(3): 99-103.  
Gu Wenbin, Qin Ruping, Wang Zhenxiong, et al. Numerical simulation analysis of ignition order for spaced loading on rock drilling and blasting under deep-water [J]. Blasting, 2012, 29(3): 99-103.
- [8] 胡建军,龙涛,龚杰. 降低台阶爆破大块率的数值模拟研究与应用[J]. 有色金属:矿山部分, 2009, 61(6): 60-64.  
Hu Jianjun, Long Tao, Gong Jie. Numerical simulation study and application on reducing the boulder yield in bench blasting [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2009, 61(6): 60-64.
- [9] 柴修伟. 水下炮孔爆破水中冲击波传播特性[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.

## Numerical Simulation Study on the Influence of Decoupling on the Propagation of Shock Wave in Water for Deep-water Rock-drilling Blasting

QIN Ruping<sup>①②</sup>, GU Wenbin<sup>①</sup>, WANG Zhenxiong<sup>①</sup>, LIAO Kun<sup>①</sup>, CHEN Xueping<sup>①</sup>, HU Yafeng<sup>①</sup>, DONG Qinxing<sup>①</sup>

<sup>①</sup>PLA University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

<sup>②</sup>Unit 65426 of PLA (Heilongjiang Haerbin, 150049)

[ABSTRACT] Based on the HJC constitutive model, the variable process of shock wave in water for deep water rock-drilling blasting was simulated by the numerical program ANSYS/LS-DYNA, and the influence of decoupling on propagation of shock wave in water was analyzed in the paper. The simulation results suggest that decoupling has significant effects on the peak pressure of shock wave in water and unit impulse. The attenuation characteristic of unit impulse with distance is different in different directions. Moreover, the decoupling has great influence on the value of unit impulse.

[KEY WORDS] decoupling, shock wave in water, deep-water rock-drilling blasting, numerical simulation