

水下深孔爆破间隔装药起爆时差影响的数值模拟^{*}

王振雄 顾文彬 秦入平 徐浩铭 王 诤 王丙奎

解放军理工大学工程兵工程学院(江苏南京,210007)

[摘 要] 文章以舟山大神洲舢装码头前沿炸礁工程的数据为基础,采用 ANSYS/LS—DYNA 软件进行数值模拟,建立水下深孔孔内间隔装药结构中两段装药不同起爆时差的计算模型,分析了不同起爆时差对爆破效果和爆破振动的影响。计算结果表明:当孔内间隔装药两段装药的起爆时差为 6ms 时,既可以降低爆破振动带来的危害,又可以提高爆破效果。

[关键词] 水下爆破 爆破振动 起爆时差 数值模拟

[分类号] TD235.33 TJ510.3⁺6

引言

近年来国内针对水下爆破的研究成果报道较多:冯毅针对水下爆破中不同孔径炮孔设计进行了效果分析,蔡小虎等针对水下爆破空孔减振技术也提出了设计方案,修宗祥等对水下钻孔爆破不同起爆方式进行了数值模拟研究^[1],宋敬埔等提出了几种起爆技术在水下爆破中的应用^[2],李澎等对水下爆炸冲击波的传播进行了近似计算^[3],梁禹等也做过水下钻孔爆破堵塞长度的数值模拟研究^[4]。随着对爆破振动要求的不断提高,孔内间隔起爆的装药结构在爆破工程中已经广泛应用。

舟山大神洲舢装码头前沿炸清礁及挖泥工程中爆区东侧与舢装码头最近距离 2.5 m,爆破周围环境复杂,实际工程上采用间隔装药结构、孔内分段且下段先起爆的起爆方式^[5]。根据该工程爆破之后的爆破效果以及数值模拟结果分析,可以得出不同水下间隔装药起爆时差对爆破振动和爆破效果影响很大^[6]。因此对间隔装药起爆时差的分析结果可以为工程应用提供参考^[7]。

1 数值模拟模型的建立

水下爆炸受到岩石条件和水环境的影响,为了方便建模计算,提高运算效率,计算模型中假设不考虑爆炸形成的空腔爆破作用和水流速度对爆破效果的影响。认为模型中的空气、水、岩石以及炸药都定义为各向同性的连续介质,同时模型采用整体模型的 1/4 进行运算^[8]。

计算模型由空气、水、炸药、岩石和堵塞物(堵塞物为工程实际应用的水)5 种材料组成,模型选用实体单元 solid165 进行网格的划分。岩石与炸药、

水、堵塞物间采用流固耦合的算法,边界条件采用无反射边界,岩石拉格朗日单元和水的部分区域的欧拉单元重合^[9]。

图 1 为工程上运用到的装药结构示意图,水下岩石的垂直炮孔直径为 165mm,装药直径为 110mm,不耦合系数为 1.5,装药使用 2[#]岩石乳化炸药,炸药采用不耦合装药,其中炮孔上端和间隙都有水作为堵塞物^[10]。模型采用 LS—DYNA971 进行求解,单位制为 cm-g- μ s,几何模型和工程实际相吻合,见图 2。上端为 1 m 空气层,水深 10 m,岩石厚度为 8 m,炮孔深度 6 m,装药长度 4.5 m,其中,中间 0.5 m 为水间隔,模型宽度为 6 m。炸药为分段装药,起爆点设置在装药的中间部位。根据工程中采用的下端先起爆的间隔起爆方式,分别设定上下段起爆时差为 0、3、7、12 ms 和 18 ms,通过这 5 组模型的数值模拟结果对爆破效果和爆破振动进行初

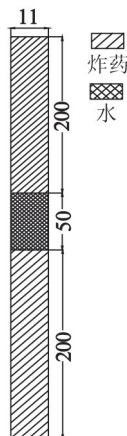


图 1 装药结构
(单位:cm)

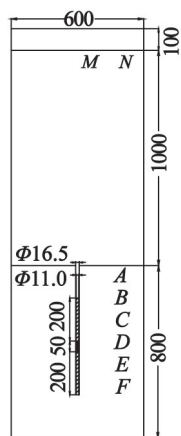


图 2 计算模型示意图
(单位:cm)

^{*} 收稿日期:2012-02-23

作者简介:王振雄(1987~),男,硕士,主要研究水下深孔爆破技术。E-mail:wangzhenxiong70310@126.com

通讯作者:顾文彬(1961~),男,教授,博士生导师,主要研究方向为火炮、自动武器与弹药工程。E-mail:guwenbin1@yahoo.com.cn

步分析。

2 计算模型及材料参数

2.1 空气计算模型及材料参数

计算模型中空气采用计算软件 LS—DYNA 所给出的空物质材料的本构模型 MAT_NULL, 状态方程形式如下:

$$p = (C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3) + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0$$
 (1)

式中: p 为压力; 空气密度 $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$; $C_1 \sim C_6$ 为常数; μ 为体积应变参数, $\mu = 1/(V - 1)$, 其中 V 为相对体积; E_0 为初始能量。

2.2 水计算模型及参数

水和空气一样采用空物质材料本构模型 MAT_NULL, 状态方程形式如下, 水状态方程参数见表 1。

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu [1 + (1 - \gamma_0/2)\mu - (\alpha/2)\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E_0$$
 (2)

式中: p 为压力; ρ_0 为材料初始密度; C 为 $\nu_s - \nu_p$ 曲线的截距; S_1, S_2, S_3 为 $\nu_s - \nu_p$ 曲线斜率的系数; γ_0 为 Gruneisen 常数; α 为 γ_0 和 μ 的体积修正量; E_0 为单位体积初始能量。

表 1 水状态方程参数

$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		$C / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		S_1
1.02		1650		1.92
S_2	S_3	γ_0	α	E_0 / GPa
-1.986	0.2268	0.5	0	0

2.3 炸药计算模型及参数

模拟中使用 2# 岩石乳化炸药参数, 其状态方程参数如表 2, 采用的本构模型为 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN, 状态方程的关系为:

$$p_{\text{eos}} = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}$$
 (3)

式中: p_{eos} 为炸药爆轰压力; V 为相对体积; ρ 为炸药的密度; E_0 为初始内能; A, B, R_1, R_2 和 ω 为试验确定的常数。

表 2 炸药状态方程参数

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		$D_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		A / GPa
1.1		4500		214.4
B / GPa	R_1 / GPa	R_2 / GPa	ω	E_0 / GPa
0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

2.4 岩石计算模型及参数

岩石介质采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 来

模拟, 其中, 应变率采用由材料应变率特性决定的常量 C, P 的 Cowper-ymonds 模型来考虑, 屈服应力 σ_c 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 的关系为^[1]:

$$\sigma_c = [1 + (\frac{\dot{\epsilon}}{C})^{\frac{1}{P}}](\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p)$$
 (4)

其中 $E_p = \frac{E_t \cdot E}{E - E_t}$ (5)

式中: σ_0 为岩石材料初始的屈服应力; ϵ 为岩石的加载应变率; β 为向同性硬化和随动硬化产生的硬化参数, 且 $0 \leq \beta \leq 1$; ϵ_p 为有效塑性应变。 E_p 为塑性硬化模量; E_t 为剪切模量; E 为杨氏模量。表 3 是岩石状态方程参数, 表中 σ_c 是屈服应力, σ_s 是拉伸应力, f_s 是屈服参数。

表 3 岩石状态方程参数

$\rho /$ (g · cm ⁻³)	$C_p /$ (m · s ⁻¹)	μ	$\sigma_c /$ MPa	σ_s / MPa	
2.68	5500	1.78	150	5.6	
<hr/>					
E_t / GPa	σ_0 / MPa	E / GPa	f_s	C	P
2.0	75	61	1.25	2.63	3.96

2.5 数值模拟结果和理论计算的对比

水耦合装药的炸药起爆形成的冲击波传至水和孔壁交界面时, 由弹性波在交界面反射透射理论^[11], 可求得透射到孔壁岩石上的压力 p_r , 计算公式如下:

$$p_r = \frac{\rho_m C_p}{\rho_m C_p + \rho_0 D_1} p_1$$
 (6)

式中: $\rho_m C_p$ 为岩石的波阻抗; $\rho_0 D_1$ 是耦合介质水的波阻抗; p_1 为孔壁入射压力。

炸药与孔壁之间距离只有 2 cm, p_1 值取炸药爆轰初始时的冲击波压力^[12]。选取模型中下段装药中离起爆点最近的岩石单元计算, 可得出炮孔岩石壁上单元的压力 p_r 为 3.07 GPa, 从数值模拟中该位置取该单元峰值压力为 2.98 GPa, 对比后看出, 计算结果和模拟结果相差在 5% 以内, 由此可以判断该数值模拟可以为实际工程提供可靠的参考。

3 数值模拟分析

3.1 起爆时差对爆破效果的影响

图 3 和图 4 分别为同时起爆、起爆时差为 6ms 时选取起爆之后 800μs 时计算模型的压力云图。根据数值模拟结果可得出, 当上下端装药同时起爆时, 岩石内的峰值压力为 198MPa; 而当起爆时差为 6ms 时, 峰值压力降为 160MPa。可以看出在不同起爆时差起爆后压力峰值也不相同, 通过分段间隔起爆, 降低峰值压力, 使得爆破产生的粉碎区减小, 理论上提

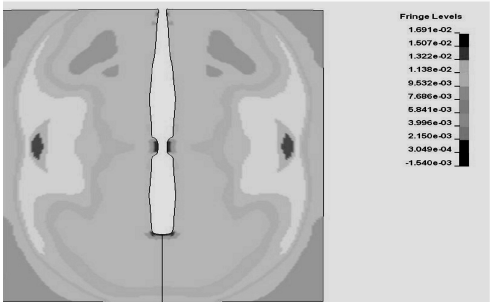


图 3 同时起爆岩石的压力云图

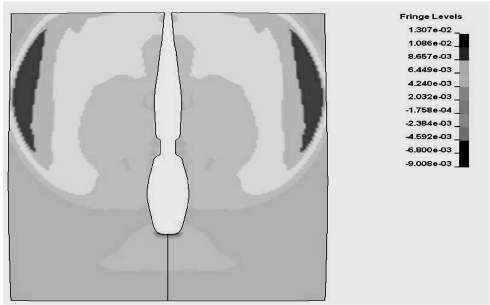


图 4 起爆时差 6 ms 岩石的压力云图

高了炸药利用率,从而有效改善了爆破效果。

根据材料模型的屈服极限和等效应力的对比,当等效应力超过屈服极限 150MPa 时,岩石开始失效,达到爆破效果,此时可得到岩石区域内的破坏范围。为了研究起爆时差对爆破效果的影响,选取位于装药孔水平距离为 1.5 m 的垂直方向取 6 个单元(图 2 中的 A、B、C、D、E、F),根据每个单元的等效应力来分析不同起爆间隔时差的爆破效果。表 4 是 6 个单元在不同起爆时差作用下的等效应力峰值。

表 4 不同起爆时差(0~18ms)各单元

等效应力峰值							MPa
起爆时差 t/ms	A	B	C	D	E	F	
0	147.31	170.94	168.25	178.09	165.33	132.10	
3	179.98	212.04	222.30	199.63	186.52	137.29	
7	111.97	126.99	128.87	128.68	117.91	95.70	
12	107.87	120.48	122.44	126.83	114.50	96.08	
18	106.38	116.46	116.80	126.83	114.50	96.08	

从表 4 可以看出,当起爆间隔时差为 3 ms 和 7 ms 时各个单元的等效应力峰值大小差距有很大变化,起爆时差为 7 ms 时爆炸形成的压力明显下降;当间隔时差大于 7ms 之后各单元的有效应力峰值变化趋于逐渐递减,但是不会发生很大变化。这说明起爆时差间隔对爆破效果有很大的影响,当达到一定的起爆时差后影响就不明显了。

为了更精确地研究,继续在 3~7 ms 这个时间

段内选取 3 个不同起爆时差进行数值模拟(表 5)。可以看出:当起爆时差为 4 ms 和 5 ms 时各个单元的等效应力峰值大于起爆时差 3 ms 的峰值应力;在起爆时差为 6 ms 时的等效应力峰值开始降低。结合表 4 中数据通过单元 A 和单元 C 在不同起爆方式下的等效应力峰值变化曲线(图 5 和图 6),可以直观地看出:在起爆时差为 4 ms 时爆破效果最好,3 ms 和 5 ms 的起爆时差的爆破效果也比其他的爆破时差爆破效果好;当起爆时差超过 6 ms 时,爆破效果就开始逐渐下降;起爆时差大于 7 ms 之后爆破效果下降明显;当起爆时差大于 12 ms 时单元 A 和单元 C 的等效应力峰值已经基本不发生大的变化,这就说明起爆时差大于 12 ms 时爆破效果已经不再得到改善,反而有所下降。

3.2 起爆时差对爆破振动的影响

工程上经常在近岸处使用间隔装药的起爆方式^[13],目的是为了降振。通过数值模拟,取节点 M

表 5 起爆时差(3~7ms)各单元的

等效应力峰值							MPa
起爆时差 t/ms	A	B	C	D	E	F	
4	187.48	220.36	220.96	200.04	187.27	134.80	
5	186.58	218.62	217.49	199.56	184.58	133.56	
6	155.77	178.67	186.72	175.29	155.20	133.78	

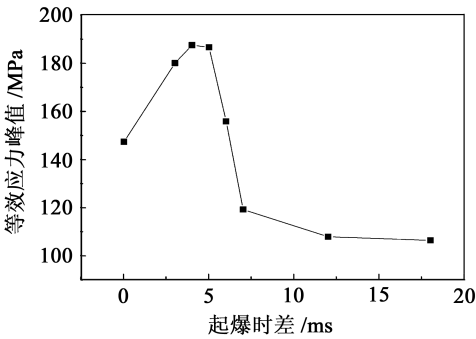


图 5 单元 A 不同起爆时差等效应力峰值

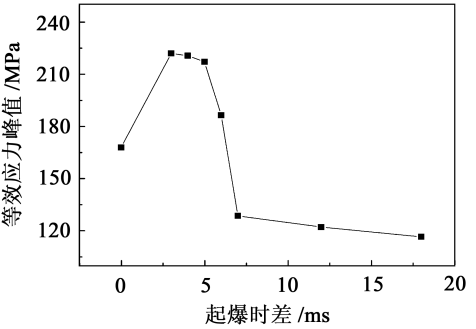


图 6 单元 C 不同起爆时差等效应力峰值

和 N (图 2) 在不同时差的振动速度 (表 6), 进而分析起爆时差对爆破振动的影响。

表 6 不同起爆时差(0~18ms)节点 M 和 N 振动速度 $m \cdot s^{-1}$

节点	0ms	3ms	4ms	5ms	6ms	7ms	12ms	18ms
M	9.84	11.10	10.79	10.53	7.43	4.62	2.44	2.13
N	5.18	8.90	7.47	5.58	4.84	3.87	1.86	1.51

通过岩石中节点 M 和 N 的振动速度可以进行爆破振动的对比分析。根据表 6, 可以得出间隔装药的起爆时差对爆破振动有很大的影响, 起爆时差为 3 ms 时产生的爆破振动最大。通过图 7 和图 8 可以看出, 不同的起爆时差也会形成不同的振动速度, 在模拟数据里, 存在一个在达到爆破效果时使振动速度最小的起爆时差 6 ms。当起爆时差大于 7ms 的时候, 虽然振动减小得比较明显, 但由于此时爆破效果迅速降低, 不足以使岩石产生大的振动, 虽然控制了爆破振动, 但制约了爆破效果。

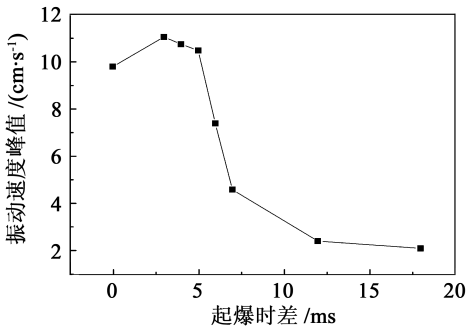


图 7 不同起爆时差节点 M 振动速度峰值

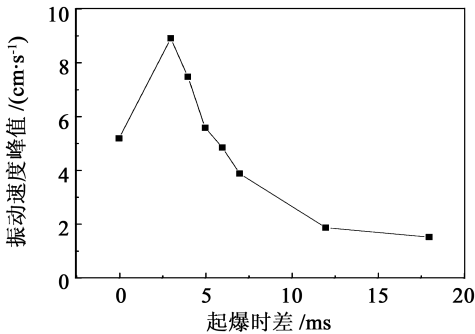


图 8 不同起爆时差节点 N 振动速度峰值

根据以上数据综合分析可看出, 间隔装药的起爆时差对爆破效果和爆破振动都有影响, 并且综合两者运用正交优化的思想可以得出一个比较合理的起爆时差 6 ms。起爆时差确定在 6 ms 时, 可以保证工程在安全振动要求下达到更好的爆破效果。

4 结论及建议

通过软件 ANSYS/LS—DYNA 模拟了舟山大神洲舾装码头前沿炸礁工程中用到的间隔起爆装药的起爆时差对爆破的影响, 得出以下结论并提出建议:

- 1) 根据特定的环境和爆破要求可以得到合理的起爆间隔时差为 6 ms, 可以根据相同方法得到其他环境下的合理起爆间隔时差, 为工程提供参考。水下爆破施工时, 应将微差爆破和其他降振方法结合使用, 从而减小爆破振动对周边建筑物的危害, 达到防护标准。
- 2) 合理的起爆间隔时差可以降低单耗, 提高经济效益。本文中使用的数据为实际工程使用数据是半理论半经验的, 因此在药量的使用以及超深等方面有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 修宗祥, 杨秀娟, 闫相祯, 等. 水下钻孔爆破不同起爆方式的数值模拟[J]. 中国港湾建设, 2009(159): 9-12.

[2] 宋敬埔, 吴红梅. 几种起爆技术在水下爆破中的应用[J]. 爆破器材, 2004, 33(4): 29-33.

[3] 李澎, 徐更光. 水下爆炸冲击波传播的近似计算[J]. 火炸药学报, 2006, 29(4): 21-24.

[4] 梁禹, 吴立, 左清军, 等. 水下钻孔爆破堵塞长度的数值模拟研究[J]. 爆破, 2011, 28(1): 92-97.

[5] 朱红兵, 卢文波, 吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 987-990.

[6] 谢先启. 精细爆破[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.

[7] 谭元军, 陈继府. 空气间隔径向不耦合装药条件下柱状药包的破岩机理研究[J]. 爆破, 2011, 28(1): 58-60.

[8] 齐世福, 刘新波, 李裕春. 水下钻孔爆破的数值模拟[J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 13-17.

[9] 时党勇, 李裕春, 张国民. 基于 ANSYS/LS2DYNA811 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[10] 颜事龙, 徐颖. 水耦合装药爆破破岩机理的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 921-924.

[11] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.

[12] 叶序双. 爆炸力学基础[M]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2004.

[13] 柏劲松, 陈森华, 李平. 水下爆炸过程的高精度数值计算[J]. 应用力学学报, 2003, 20(1): 103-106.

- al. Nanotechnology Based Environmentally Robust Primers [C]. // 34th Annual Institute of Chemical Technology Meeting. Karlsruhe, Germany, 2003.
- [2] Morris C. J., Mary B., Zakar E., et al. Rapid Initiation of Reactions in Al/Ni Multilayers with Nanoscale Layering [J]. J. Phys. Chem. Solids., 2010, 71(2): 84-89.
- [3] Zhang K., Rossi C., Alphonse P., et al. NiO Nanostructured Honeycomb Realized by Annealing Ni Film Deposited on Silicon [J]. J. Nanosci. Nanotechnol., 2008, 8(11): 5903-5907.
- [4] Zhang K., Rossi C., Ardila Rodriguez G. A., et al. Development of a Nano-Al/CuO Based Energetic Material on Silicon Substrate [J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(11): 113117.
- [5] Zhang K., Rossi C., Petrantonio M., et al. A Nano Initiator Realized by Integrating Al/CuO-Based Nanoenergetic Materials With a Au/Pt/Cr Microheater [J]. J. Microelectromech. Syst., 2008, 17(4): 832-836.
- [6] 徐云龙, 赵崇军, 钱秀珍. 纳米材料学概论[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2008: 16-17.
- [7] Duckham A., Spey S. J., Wang J., et al. Reactive Nanostructured Foil Used as a Heat Source for Joining Titanium [J]. J. Appl. Phys., 2004, 96(4): 2336-2342.
- [8] Fischer S. H., Grubelich M. C. Theoretical Energy Release of Thermites, Intermetallics, and Combustible Metals [C]. // The 24th International Pyrotechnics Seminar. Monterey, CA, 1998.
- [9] Masuda H., Fukuda K. Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina [J]. Science, 1995, 268(5216): 1466-1468.
- [10] Banerjee A., Halder N. Electrochemical Growth of Ordered Nickel Nano-Rods Within a Composite Structure of Anodic-Alumina-Membrane/Metal/Silicon Substrate [J]. J. Nanosci. Nanotechnol., 2010, 10(7): 4252-4258.
- [11] Jin X., Hu Y., Wang Y., et al. Template-based Synthesis of Ni Nanorods on Silicon Substrate [J]. Appl. Surf. Sci., 2012, 258(7): 2977-2981.
- [12] 王茜. 炸药的激光起爆特性及规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

Preparation and Laser Ignition Studies of Al/Ni Energetic Nanocomposite

JIN Xiaoyun, HU Yan, SHEN Ruiqi, YE Yinghua

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A new nanostructured Al/Ni energetic composite was prepared on silicon (Si) substrate using template method. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy dispersive X-ray spectra (EDS) were employed to observe the morphology and characterize the compositional properties of Al/Ni energetic nanocomposite, respectively. The thermal reactivity of Al/Ni energetic nanocomposite was determined by a differential scanning calorimetry (DSC). Moreover, ignition of nanocomposite was examined by a single pulsed laser irradiation. The results showed that the portion of nickel (Ni) nanorods is embedded in the aluminium (Al) film, which results in a larger physical contact between Al and Ni and a corresponding higher thermal reactivity of Al/Ni. After being ignited, it produces sparks lasting for several milliseconds, which is advantageous to its explosion application. The 50% firing energy of the Al/Ni energetic composite is about 36.28 mJ, with an energy density of about 46.22 mJ/mm².

[KEY WORDS] Al/Ni, energetic nanocomposite, characterization, the thermal reactivity, laser ignition, 50% firing

(上接第 11 页)

Numerical Simulation of the Effect of Initiation Time Difference on Underwater Deep-hole Compartment Blasting

WANG Zhenxiong, GU Wenbin, QIN Ruping, XU Haoming, WANG Zheng, WANG Bingduo

Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] Based on the data of Zhoushan Reef Explosion of Engineering, numerical simulation was carried out using ANSYS/LS-DYNA. The numerical simulation model of underwater detonation of deep hole with different initiation time is set up, and the effect of different initiation time on the blasting effects and blasting vibration is analyzed. It comes to a conclusion that when the initiation time is 6 ms, it can not only reduce the hazards posed by blasting vibration, but also improve the blasting effects.

[KEY WORDS] underwater blasting, blasting vibration, initiation time difference, numerical simulation