

文章编号: 1001-1455(2003)05-0460-06

浅层水中沉底的两个装药爆炸的数值模拟研究*

孙百连¹, 顾文彬², 蒋建平¹, 阳天海¹

(1. 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035;

2. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 根据试验模型和试验结果, 进行了浅层水中沉底的两个装药爆炸的数值模拟; 通过与水中单个装药爆炸, 以及无限水中两个装药同时爆炸的数值模拟结果的对比分析, 研究了水底水面对沉底的两个装药同时爆炸产生的冲击波传播与相互作用的影响。结果表明: 水底对冲击波压力峰值有削弱作用, 水面使冲击作用冲量明显减小, 冲击波相互作用压力叠加或多次冲击作用可提高爆炸威力。

关键词: 爆炸力学; 冲击波相互作用; 数值模拟; 水中爆炸

中图分类号: O382.1; TD235.11 国标学科代码: 130°3520 文献标志码: A

1 引 言

浅层水中单个装药爆炸作用研究^[1~2]表明, 水底水面对水中爆炸载荷大小、水中冲击波传播等有较大影响。众所周知, 冲击波相互叠加作用可使作用区域内压力有显著增强, 对于提高炸药破坏威力十分有利。因而, 无论在军事还是国民经济建设领域, 浅层水中两个或多个装药爆炸作用的应用越来越广泛。由于浅层水中两个装药爆炸作用机理更为复杂, 国内外关于浅层水中两个装药同步性爆炸作用研究不多。因此, 浅层水中两个装药爆炸作用的研究具有理论意义和应用价值。

在本文中, 进行了浅层水中沉底的两个装药同时爆炸的数值模拟, 研究了冲击波相互作用、压力分布与叠加规律等。

2 基本理论

对于连续体, 用 S_X 、 S_x 、 S_ξ 分别表示物质域 Ω_X 、空间域 Ω_x 和参考域 Ω_ξ 的边界, 而用 ρ_0 、 ρ 和 $\hat{\rho}$ 分别表示连续体各构形的密度。在不同构形中, 连续体的质量、动量和能量守恒分别表示为

$$M = \int_{\Omega_\xi} \hat{\rho} dV_\xi = \int_{\Omega_x} \rho dV_x = \int_{\Omega_X} \rho_0 dV_X \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_\xi} \hat{\rho} v_i dV_\xi = \int_{S_\xi} \hat{t}_i dS_\xi + \int_{\Omega_\xi} f_i dV_\xi \quad (2)$$

$$\dot{E} = VS_{ij} : \dot{\epsilon}_{ij} - (p + q) \dot{V} \quad (3)$$

式中: $\hat{\rho}(\xi, t) = J \rho(x, t)$ 、 $\rho_0(X, t) = J \rho(x, t)$; \hat{t}_i 是作用在边界 S_ξ 上的单位表面力; f_i 是作用于物体的体积力; E 为比体积内能; v_i 为现时构形下连续体的速度; V 为现时构形相对体积; S_{ij} 和 p 分别表示偏应力张量和静水压力; $\dot{\epsilon}_{ij}$ 为应变率张量; q 为体积粘性阻力。

其中

$$S_{ij} = \sigma_{ij} + (p + q) \delta_{ij} \quad (4)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} - q = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} - q \quad (5)$$

* 收稿日期: 2002-02-20; 修回日期: 2003-06-11

作者简介: 孙百连(1963—), 男, 博士研究生, 副教授。

定义水压缩过程的 Grüneisen 状态方程^[3]

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu [1 + (1 - \frac{\gamma_0}{2})\mu - \frac{a}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - \frac{S_2 \mu^2}{\mu + 1} - \frac{S_3 \mu^3}{(\mu + 1)^2}]} + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (6)$$

定义水膨胀过程的状态方程为

$$p = \rho_0 c^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E \quad (7)$$

式中： $\mu = \frac{1}{V} - 1$ ； c 是水介质的声速； S_1 、 S_2 和 S_3 是冲击波速度-质点速度曲线斜率系数； γ_0 是 Grüneisen 系数； a 是对 γ_0 的一阶体积修正； E 为材料的比体积内能。

炸药的 JWL 状态方程定义为^[4]

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

式中： A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为 JWL 状态方程参数； E 为炸药的比体积内能。

水底土壤的状态方程为

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (9)$$

在膨胀单元中， $C_2 = C_6 = 0$ 。

3 计算条件与模型

假设水、炸药和水底土壤为均匀连续介质；整个爆炸过程为绝热过程；水为可压缩流体，不考虑重力作用。水深 2.0 m，海水密度 $\rho = 1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，水的声速为 $c = 1480 \text{ m/s}$ 、 $S_1 = 2.56$ 、 $S_2 = -1.986$ 、 $S_3 = 0.2268$ 、 $\gamma_0 = 0.50$ 、 $a = 0$ ；装药为 TNT， $m = 36 \text{ kg}$ 、 $\rho = 1.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $D = 6930 \text{ m/s}$ 、比体积内能 $E = 27 \text{ GPa}$ ，炸药的 JWL 状态方程参数 $A = 374 \text{ GPa}$ 、 $B = 7.33 \text{ GPa}$ 、 $R_1 = 4.15$ 、 $R_2 = 0.90$ 、 $\omega = 0.30$ ；海底砂质土壤，其计算厚度取为 0.5 m，密度 $\rho = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

图 1 为浅层水中沉底的两个装药爆炸的几何构形。两个 TNT 集团装药间距为 8 m。计算模型共划分单元 600000，海水和装药均采用欧拉单元，海底土壤采用拉氏单元，其中 TNT 装药 108，海水 499892，土壤 100000。水表面为自由面，水与炸药、水与水底和炸药与水底接触面自由耦合，其余各面均为压力透射边界。

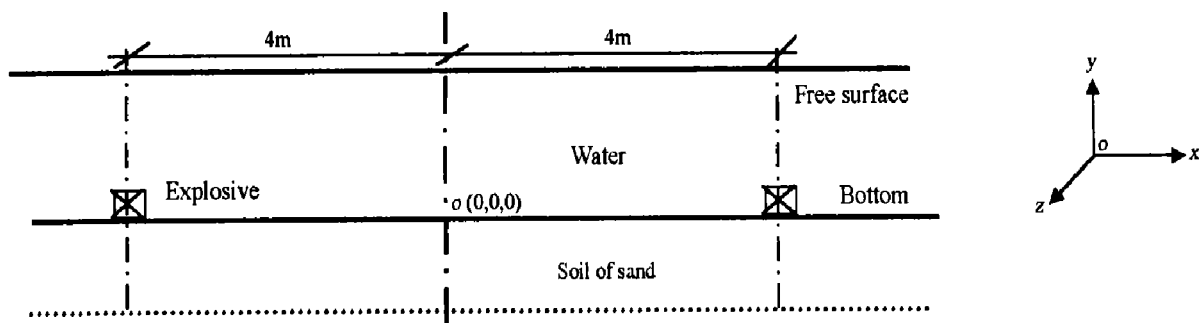


图 1 浅层水中沉底的两个装药爆炸的几何构形
Fig.1 Configuration of two charges exploding at bottom

4 数值计算结果分析

4.1 计算与试验结果比较

试验结果与数值模拟结果的对比如图 2。试验结果对应于 1.3 kg TNT 炸药在 0.8 m 水深中沉底爆炸时，距装药中心水平距离 1.14 m，距水底 0.16 m 处的实测值。数值模拟结果对应于距装药中心水

平距离 3.35 m, 距水底 0.4 m 空间点计算结果。两者对应几何比例因子为 0.4。由图 2 可知第一个入射冲击波(近测点装药爆炸产生)峰值压力计算值 $p'_{1s} \approx 38.21$ MPa, 实测冲击波峰值压力值 $p_{1s} \approx 39.1$ MPa。而根据浅层水中单个装药爆炸冲击波压力的半理论半经验公式^[5], 对应点的冲击波峰值压力计算值为 38.33 MPa。

三者之间的最大相对误差仅 2.3%。第二个入射冲击波(远测点装药爆炸产生)实测与计算结果分别为 25.5、26.0 MPa, 相对误差为 1.9%。两个装药爆炸对应点正压作用时间之比约 0.39, 基本满足爆炸相似率。由图还看出, 冲击波压力时程曲线变化规律基本相同。可见, 数值模拟、半理论半经验公式计算与实验结果较一致, 表明数值模拟结果能够反映浅层水中沉底的两个装药同时爆炸的作用过程。

4.2 爆炸冲击波相互作用分析

沉底的两个装药同时爆炸后, 冲击波相互碰撞前, 爆炸场参量分布和变化规律与浅层水中沉底的单个装药爆炸情况相同。约在 $t = 2325 \mu\text{s}$ 时, 两冲击波在对称面上发生碰撞。两装药中心连线上的碰撞为球面波正碰撞, 此外均为斜碰撞。这种碰撞使碰撞点流场压力较单个装药爆炸情况有显著提高。图 3(a)是冲击波相互作用前 yoz 面的压力等值面图, 图 3(b)是冲击波在 yoz 面上碰撞作用后产生的压力等值面图。

两个集团装药同时起爆, 冲击波同时到达 yoz 面。因此对相互碰撞冲击波, yoz 面可视为刚性壁。入射冲击波与对称面 yoz 作用, 产生反射冲击波, 在已受直达波扰动的水介质中继续传播, 压力值将有显著增加。在有水底反射波影响的区域, 反射波将先后与第二个压力波、水底反射波作用, 使空间点压力值加强^[6]。在有水面反射膨胀波影响的区域, 反射波将受水面反射膨胀波

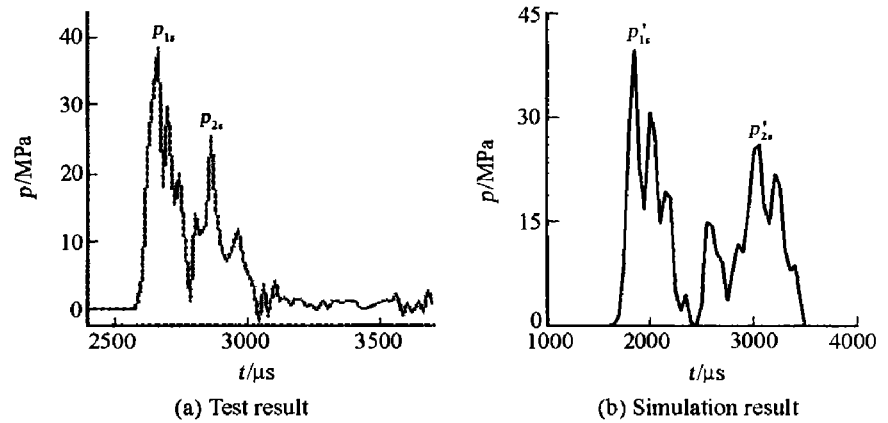


图 2 对应点计算与试验结果比较
Fig.2 Test and computation results for a same point

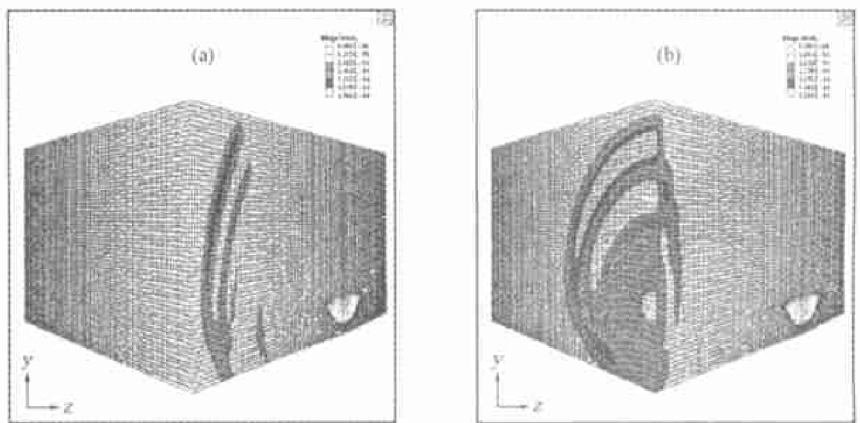


图 3 浅层水中沉底的两个装药同时爆炸作用过程
Fig.3 Proceeding of two-charge exploding at bottom in shallow-layer water

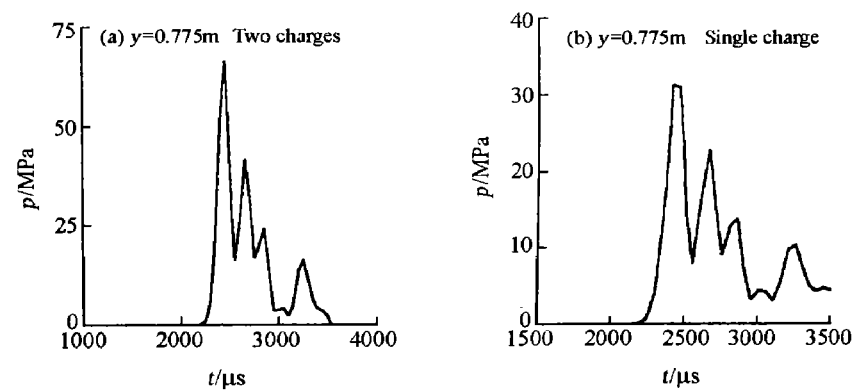


图 4 冲击波相互作用效应计算结果对比
Fig.4 Comparisons of interactive shock effect

作用,使压力时程曲线被切断。

浅层水中爆炸冲击波相互作用可使测点压力显著增强。图 4(a)为两个装药中心的 oy 轴上,距水底 0.775 m 测点的压力时程曲线,是冲击波相互作用的结果;图 4(b)是沉底的单个装药爆炸作用下,相同测点的压力时程曲线。

由图 4(a)可知,距装药中心 4 m 处,由于冲击波叠加作用,使该测点峰值压力达到 67.5 MPa,是单个装药爆炸相同距离处峰值压力的 2.17 倍。比较图中曲线可知:浅层水中的两个装药与单个装药爆炸时,压力衰减变化规律相同;随着测点高度的增加,直达冲击波峰值压力、第二个压力波压力叠加倍数逐渐增加。

4.3 水底对爆炸作用影响研究

图 5(a)、(b)分别是沉底的两个装药同时爆炸和沉底的单个装药爆炸时, xoy 平面内相同空间点(距较近装药 3.725 m,距水底 0.14 m)压力随时间变化的计算结果。由图可知,在 $t \approx 2530 \mu\text{s}$ 之前,两条曲线的变化规律相同,第一、第二个压力峰值也分别相等,表明冲击波未发生相互作用。此后,由于较远装药爆炸冲击波的作用,使图 5(b)中的第三个压力峰值由 13.82 MPa 增加到 28.70 MPa,形成了图 5(a)的第三个压力峰值。此后两条压力曲线的变化规律完全不同。由图 5(a)可知,浅层水中两个装药同时爆炸条件下,该空间点在约为 1500 μs 内经历 5 次压力大于 20 MPa 的冲击作用,与单个装药爆炸对该点的作用相比,不仅冲击作用次数增加,作用总冲量也极大地增加。计算结果表明,截止计算结束时刻,图 5(a)总冲量约为图 5(b)的 2 倍多。

图 6(a)为浅层水中两个装药爆炸的条件下, yoz 内距水底 0.14 m、距 yoz 面 0.125 m 处压力随时间变化的计算结果。图 6(b)为浅层水中单个装药爆炸时,对应空间点压力随时间变化计算结果。

由图可知,直达冲击波、第二个压力波^[4]和水底反射压缩波依次在对称面 yoz 内发生碰撞。图 6(a)、(b)中的第一个压力峰值分别为 50.5、25.2 MPa,两者之比约为 2.01。计算结果表明,第二个压力波叠加压力峰值约为沉底的单个装药爆炸作用的 1.8 倍;水底反射波叠加压力峰值约为沉底的单个装药爆炸的 1.5 倍。

4.4 水面对爆炸作用影响研究

图 7(a)、(b)分别为浅层水中两个装药同时爆炸的条件下, xov 平面内距水底 1.80 m 高度上,分别距 yoz 面 0.175 m、3.725 m 处压力随时间变化的计算结果与无限水中两个装药同时爆炸,相同空间点压力随时间变化的计算结果对比图。

由图 7(a)、(b)可知,由较近装药爆炸产生的第一个压力峰值分别为 35.25 MPa 和 38.1 MPa,由较远装药爆炸叠加作用产生的第二个压力峰值分别为 45.05 MPa 和 47.5 MPa,但它们到达空间点的时

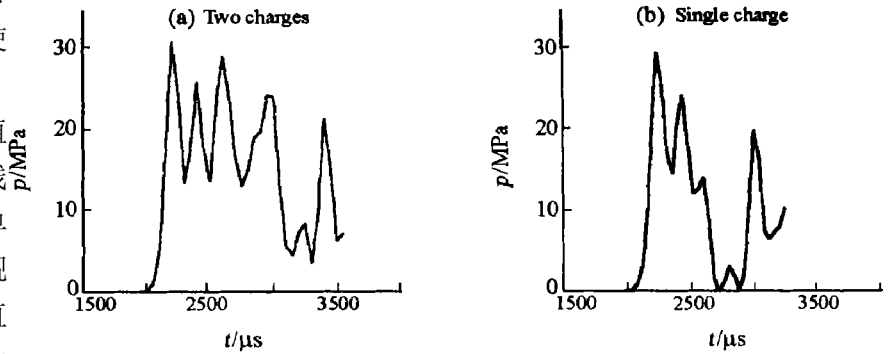


图 5 xoy 平面内压力受水底影响的计算结果
Fig.5 Simulation results of pressure affected by bottom in xoy plane

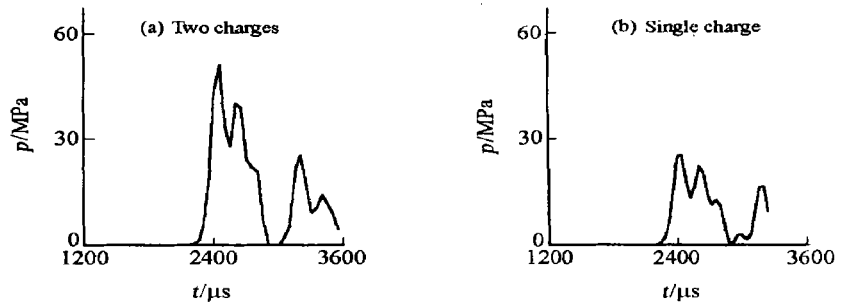


图 6 yoz 平面内压力受水底影响的计算结果
Fig.6 Computational results of pressure affected by bottom in yoz plane

间均相同,变化规律也相同。表明近水面测点的入射波峰值压力仍受水底影响,但影响较小,而压力变化规律不变。当 $t=2750 \mu\text{s}$ 之后,两条曲线的变化规律完全不同。与图 7(b)相比,受水面膨胀波作用,图 7(a)在 $t=2750 \mu\text{s}$ 之后,第二个压力波及水底反射压力波的绝大部分被削弱,作用总冲量极大地减弱。表明受水面反射稀疏波作用,近水面测点处爆炸作用将明显减弱。

图 7(c)、(d)表明测点处已没有较远装药爆炸叠加作用。与图 7(d)相比,受水底影响,入射波峰值压力为 118 MPa,较无限水中爆炸减少了 6%;受水面膨胀波作用,图 7(c)在 $t=1600 \mu\text{s}$ 时刻发生水面切断作用,此时的压力值仅为 16 MPa。表明空间点距装药对称面 $yo\text{z}$ 越远,水面反射稀疏波对直达波的影响越小。

图 8(a)、(b)分别为浅层水中两个装药同时爆炸,平面 $yo\text{z}$ 内距水底 1.80 m,距 xoy 平面 0.075 m 处压力随时间变化的计算结果与在无限水中的两个装药同时爆炸,相同空间点压力随时间变化的计算结果对比。

由于测点位于 $yo\text{z}$ 平面内,两个冲击波同时到达测点,冲击波的这种相互作用将极大地提高爆炸作用载荷的大小。比较图 8(a)、(b)可知,第一个峰值压力分别为 65.5 MPa 和 72.5 MPa。表明水底影响使冲击波相互作用较无限水中的这种作用减少 10%。由图 8(a)可知,当 $t=2900 \mu\text{s}$ 时,水面膨胀波到达测点处,立即发生水面切断作用。与图 8(b)相比,第二个压力波及水底反射压缩波作用消失,爆炸作用总冲量减少了约 40%,从而大大削弱了冲击波的相互作用效应。

5 结 论

综上所述,数值模拟与试验结果基本一致,表明数值模拟的理论及数值模拟结果基本正确。数值模拟结果的分析比较表明:在线性反射范围内,水面对入射冲击波峰值压力没有影响,但随测高增加,水面可使作用冲量减少 40%以上。沉底的两个装药同时爆炸作用的数值模拟结果与浅层水中单个装药爆炸的数值模拟结果的比较表明:(1)冲击波对称面上叠加作用使峰值压力相对沉底的单个装药爆

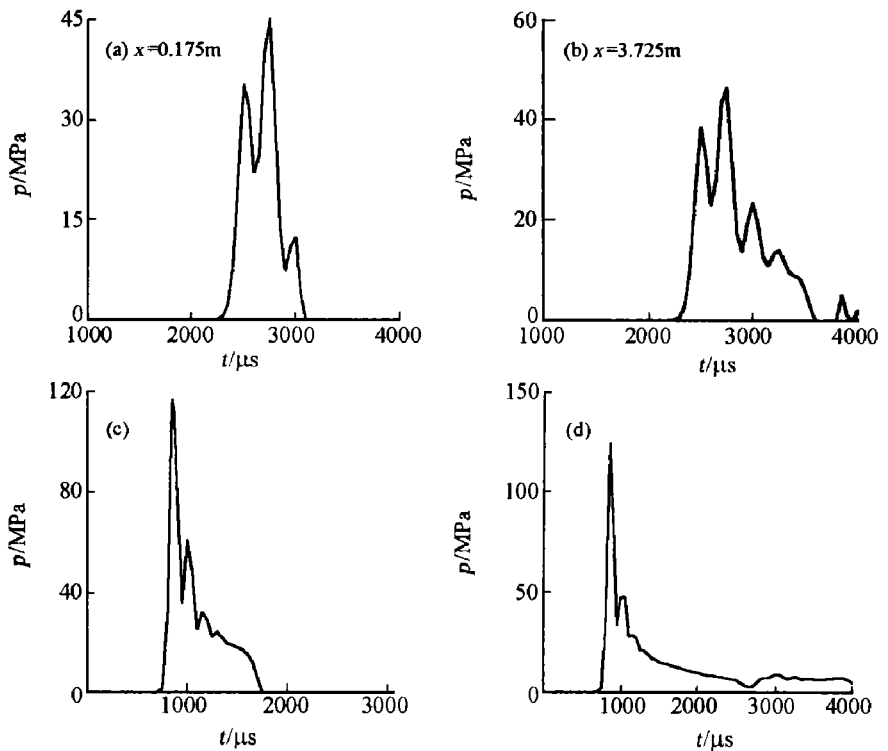


图 7 xoy 平面内压力受水面影响的计算结果

Fig. 7 Computational results of pressure affected by free surface in xoy plane

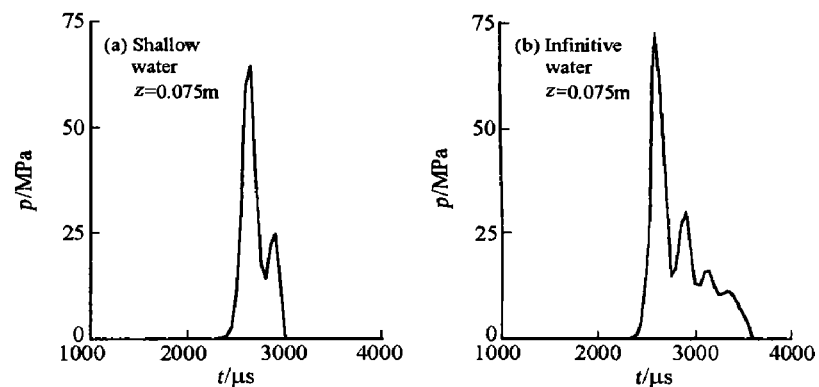


图 8 $yo\text{z}$ 平面内压力受水面影响的计算结果

Fig. 8 Computational results of pressure affected by free surface in $yo\text{z}$ plane

炸增加 2.17 倍, 第二个压缩波峰值压力增加 1.8 倍; (2) 一定范围内, 冲击波非对称面上的相互作用, 不但使冲击作用次数增加, 冲击压力峰值增加, 还使冲击作用冲量显著增加, 达到 2 倍以上。可见水底水面对装药爆炸作用影响较大, 使爆炸威力下降; 两个装药同步性爆炸, 冲击波相互作用可使冲击作用次数、冲击波峰值压力大小和冲击作用冲量等增加, 大大提高爆炸威力。

参考文献:

- [1] 顾文彬, 阳天海, 叶序双, 等. 单个装药浅层水中沉底爆炸的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(3): 51—55.
GU Wen-bin, YANG Tian-hai, YE Xu-suang, et al. Numerical simulation of single charge explosion on seabed in shallow water[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(3): 51—55.
- [2] 顾文彬, 叶序双, 张鹏翔, 等. 界面对浅层水中爆炸冲击波峰值压力影响的研究[J]. 解放军理工大学学报, 2001, 2(2): 55—58.
GU Wen-bin, YE Xu-suang, ZHANG Peng-xiang, et al. Experimental studies of bottom influence in shallow-layer water explosion[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(2): 55—58.
- [3] Steinberg D J. Spherical explosions and the equation of state of water [R]. UCID-20974, 1987.
- [4] 叶序双. 爆炸作用理论基础[M]. 南京: 工程兵工程学院, 1991.
- [5] 顾文彬. 装药浅层水中爆炸冲击波特性试验与数值模拟研究[R]. 南京: 解放军理工大学, 2000.
- [6] 顾文彬. 破障弹浅层水中爆炸威力研究[R]. 南京: 解放军理工大学, 2001.

Numerical simulation of explosion shock wave interaction in shallow-layer water

SUN Bai-lian^{1*}, GU Wen-bin², JIANG Jian-ping¹, YANG Tian-hai¹

(1. Institute of Engineer Equipment, Wuxi 214035, Jiangsu, China;

2. PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the test models and experimental results, the explosion of two charges at the bottom in shallow water is simulated numerically. Comparisons are made of the explosion processes of single charge and two charges at the bottom in shallow-layer water and two charges in infinite water. The effects of the bottom and free surface on the shock waves propagation and their interaction are analyzed. Affected by free surface and bottom, maximum value of shock-wave pressure and its impulse are reduced. Due to the interaction of two waves, blasting power is greatly increased.

Key words: mechanics of explosion; shock wave interaction; numerical simulation; explosion in shallow water

* Corresponding author: SUN Bai-lian E-mail address: gby88@wx88.net; Telephone: 0510-3704571