文章编号: 1001-1455(2012)05-0508-07

近自由面水下爆炸冲击载荷特性三维数值模拟*

明付仁,张阿漫,杨文山
(哈尔滨工程大学船舶工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 基于三维 SPH 方法,对传统链表搜索算法进行了变光滑长度改进,并提出了具有较好稳定性的多相物质交界面的处理方法,模拟了三维无限域水下爆炸问题,验证了改进的三维 SPH 方法模拟水下爆炸问题的可行性和有效性。在此基础上,建立了水下爆炸三维数值模型,模拟了近自由面水下爆炸过程,研究了冲击波传播特征、自由面下压力场和能量场特性以及水柱的产生过程。结果表明:自由面可将冲击波压力峰值和压力冲量最大衰减到 1/3 和 1/7;爆深的增加会导致压力比和冲量比的等值柱面曲率变小,产生的水柱也逐渐由破碎的喷柱向高而窄的水冢过渡。

关键词: 爆炸力学;截断效应;三维 SPH 方法;水下爆炸;近自由面
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

近自由面水下爆炸研究对现代国防建设及海洋开发有着重要意义。近自由面水下爆炸会伴随一系列复杂的物理现象(炸药爆轰、水面隆起、水柱上升及翻卷和水滴飞溅等),这些都使传统数值方法很难进行模拟,现用多数数据均来自于实验,对近自由面水下爆炸的模拟尚不成熟。符松等[1]从拓扑学角度出发,采用位标函数处理二维近自由面水下爆炸模拟时混合网格及捕捉运动界面问题,点明了水下爆炸的基本物理现象;师华强等[2]利用 Level Set 方法对二维近水面水下爆炸的多介质运动边界进行了捕捉,研究了冲击波与刚性结构的相互作用;杨刚等[3]利用 SPH 方法对二维近水面爆炸的基本物理现象进行了研究,比较了空气对近水面水下爆炸压力场和密度场的影响;以上数值模拟方法均需克服由于大变形,存在运动交界面等经常导致计算崩溃的难题,而且多数仅仅限于二维数值模拟,与真实的三维情况存在差距。顾文彬等[4]通过对实验数据的统计分析,对浅层水中爆炸界面冲击波的压力峰值进行了研究,但却依赖于耗费很大的实验研究。

本文中,采用无网格 SPH(smoothed particle hydrodynamics)方法对近自由面水下爆炸的冲击载荷进行研究。SPH 方法具有拉格朗日性质,对大变形、多相物质交界面以及运动界面的捕捉等传统网格方法处理具有很大困难的问题具有独特的优势[5]。基于三维 SPH 方法,通过应用改进的变光滑长度链表搜索算法和多相物质交界面处理方法,模拟无限域和近自由面水下爆炸的基本过程,通过对比分析,获得研究近自由面水下爆炸的冲击载荷特征,为工程提供参考。

1 基本理论

1.1 控制方程

SPH 方法在模拟水下爆炸时,涉及多相物质、阻抗不匹配等问题[6-7],所以应用适合处理密度比较大问题的 SPH 控制方程。

连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程分别为

$$\frac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t}=\rho_i\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\boldsymbol{v}_{ij}^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial \boldsymbol{x}_i^{\beta}} \tag{1}$$

* **收稿日期**: 2011-07-08; **修回日期**: 2011-10-26
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50939002);国家自然科学基金项目(10976008,50809018);
中央高校基本科研业务费专项项目(GK2010260108);霍英东教育基金项目(121073)
作者简介: 明付仁(1986—),男,博士研究生。

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_i^{\alpha}}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\left(\frac{p_i+p_j}{\rho_i}+\Pi_{ij}\right)\frac{\partial W_{ij}}{\partial \boldsymbol{x}_i^{\alpha}}+\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\frac{\mu_i\varepsilon_i^{\alpha\beta}+\mu_j\varepsilon_j^{\alpha\beta}}{\rho_i}\frac{\partial W_{ij}}{\partial \boldsymbol{x}_i^{\beta}} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}e_i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N}\frac{m_j}{\rho_j}\left(\frac{p_i+p_j}{\rho_i}+\Pi_{ij}\right)\boldsymbol{v}_{ij}^{\beta}\frac{\partial W_{ij}}{\partial \boldsymbol{x}_i^{\beta}}+\frac{\mu_i}{2\rho_i}\varepsilon_i^{\alpha\beta}\varepsilon_j^{\alpha\beta} \tag{3}$$

式中：ρ、m、t、$\boldsymbol{v}$、x、p、e、σ、ε 和 μ 分别代表密度、质量、时间、速度矢量、坐标、压力、能量、总应力张量分量、应变率张量和动力粘性系数，W 表示光滑函数，Π 采用 Monaghan 型人工粘度项[7]，下标 i、j 表示相互作用的一对粒子，上标 α、β 表示沿坐标轴的方向。

1.2　变光滑长度链表搜索算法

SPH 算法的最近相邻粒子搜索法中，直接搜索算法、树形搜索算法、链表搜索算法的复杂度阶数分别为 $O(N^2)$、$O(N\lg N)$、$O(N)$，其中 N 为问题域内的粒子总数。在模拟三维水下爆炸问题时，一般要求问题域比较大，粒子数 N 较大。

不同搜索算法耗时比较见表 1，表中 τ_1 为直接搜索算法平均每步耗时，τ_2 为变光滑长度链表算法平均每步耗时。由表可见，应用链表搜索算法时优势明显，计算效率会有很大提高。

表 1　不同搜索算法不同粒子数平均每步耗时对比

Table 1　Average time-consuming every timestep of different search algorithms and particle numbers

N	τ_1/s	τ_2/s	τ_1/τ_2
13 800	1.85	0.096 4	19.19
22 400	4.76	0.117 4	40.55
48 600	21.74	0.180 9	120.18
84 800	65.29	0.272 4	139.68
187 200	322.67	0.513 6	628.25
329 600	996.00	0.829 6	1 200.58

然而，传统链表搜索算法一般应用在光滑长度为常量时，如果应用到水下爆炸问题中，必须增加变光滑长度处理。

本文中提出变光滑长度的链表搜索算法，具体办法为：在计算模型离散为粒子后，每个时间步进行计算时，首先在问题域铺设临时网格并编号，网格单元的边长根据总粒子数和平均每个网格单元内的粒子数以及问题域的长宽高比例确定，然后遍历每一个粒子，确定自身所处的网格坐标。对于任意粒子 i 进行相邻粒子搜索时，根据自身的当前光滑长度换算为格子光滑长度，格子光滑长度等于自身光滑长度与网格单元边长的比值取整。然后根据自身所处网格坐标和格子光滑长度，确定最近相邻格子，再利用自身的光滑长度在最近相邻格子内确定用于自身物理量近似的粒子。所谓的变光滑长度主要体现在：一是按每个粒子的光滑长度确定自身的最近相邻格子；二是由自身光滑长度确定最近相邻格子内的最近相邻粒子。

1.3　交界面处理

水下爆炸涉及到爆轰产物与周围水介质的交界面，而粒子间所有信息的传递都是通过交界面，所以对于交界面的处理十分关键[6]。G. R. Liu 等[7]、M. B. Liu 等[8-9]针对水下爆炸问题提出了不同粒子交界面处理作用力，但它依赖光滑长度 h，在处理水下爆炸问题时，由于粒子的光滑长度需要更新，所以在进行优化松弛的过程中光滑长度是变化的，会出现矫枉过正现象。所以利用上式进行交界面处理时，由光滑长度项 h_i、h_j 确定力的大小会不稳定，这样很难保证交界面向外能量传递的稳定。

本文中利用 Lennard-Jones 形式的分子力进行交界面处理

$$P_{\mathrm{b},ij}=\begin{cases}\bar{p}\left[\left(\dfrac{r_0}{r_{ij}}\right)^{n_1}-\left(\dfrac{r_0}{r_{ij}}\right)^{n_2}\right]\dfrac{x_{ij}}{r_{ij}^2} & \dfrac{r_0}{r_{ij}}\geqslant 1\\ 0 & \dfrac{r_0}{r_{ij}}<1\end{cases} \tag{4}$$

式中：r_0 为截止半径，一般与粒子的初始间距相近。

由式(4)可以发现，利用 r_0/r_{ij} 确定交界面的力不存在由光滑长度引起的误差，能够保证较好的数值稳定性。

2 数值研究

2.1 数值验证

为了将近自由面水下爆炸的冲击载荷特征与无限域进行对比分析，先对无限域水下爆炸的冲击载荷进行研究，数值模拟中采用 6.7 kg 方形 TNT 装药在边长 $a=b=2$ m 的方形水域中心起爆。如图 1 所示，TNT 处于方形水域中心，l 为边长，R 为测点距爆心的距离。典型爆距 R 的冲击波压力时程曲线如图 2 所示，可以看出，在不同半径处压力峰值与经验公式基本吻合，脉宽基本相同，冲击波的压力冲量大致相同，可以作为研究近自由面水下爆炸的参照对象。数值计算的结果由于间断面的存在，在初始时刻压力的上升阶段会存在一定的坡度。同时，由于 TNT 爆轰后，产生的冲击波向外传播的同时，向药心传播着稀疏波，在稀疏波相遇后又形成冲击波向外传播，所以在压力下降的时候又出现了小峰现象。数值计算结果存在一定的数值震荡，主要原因是由于 TNT 与水的交界面处理时产生的数值不稳定，如果通过调节人工粘度消除震荡，会影响冲击波的压力峰值，所以本文通过调整相关参数，兼顾冲击波的压力峰值及数值震荡，使数值模拟存在了一定的震荡[10]。

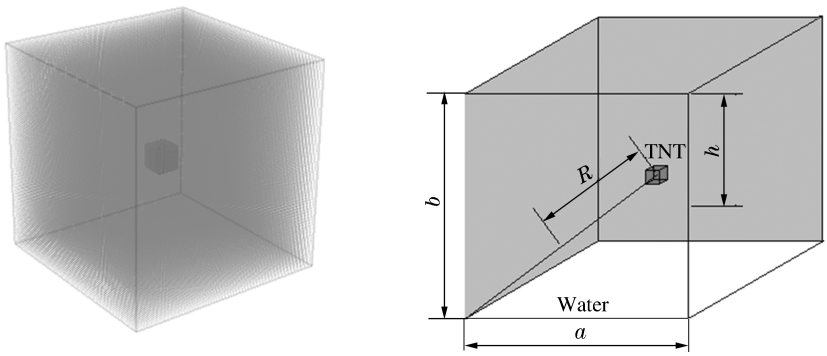

图 1 无限域水下爆炸的粒子分布和测点分布

Fig. 1 Particle and gauging point distribution of underwater explosion in free field

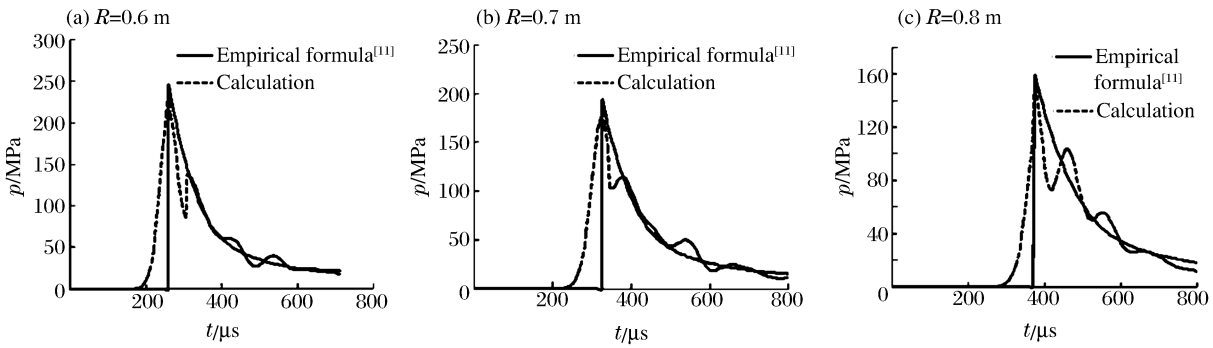

图 2 不同爆距的压力时程曲线

Fig. 2 Pressure-time curves at different distances

2.2 近自由面水下爆炸

2.2.1 数值模型

近自由面水下爆炸的数值模型如图 3 所示，其中 $a=2$ m，R 为爆距，H 为爆深，h 为测深，$b=a/2+H$ 为变量，TNT 药量与无限域数值模拟相同。为了使不同测点的冲击载荷特征的研究具有普遍意义，将所有长度对 TNT 边长的一半 $l/2$ 进行处理，定义相对测深 $\bar{h}=2h/l$，相对爆深 $\bar{H}=2H/l$，相对爆距 $\bar{R}=2R/l$，相对水平位置 $\bar{x}=2x/l$，相对垂向位置 $\bar{z}=2z/l$，其中 x、z 为距离药包中心的水平坐标和垂向坐标，坐标原点位于 TNT 中心。p_s 为近自由面水下爆炸压力峰值，p_f 为无限域压力峰值，$\bar{p}=p_s/p_f$；I_s 为近自由面水下爆炸压力冲量，I_f 为无限域压力冲量，$\bar{I}=I_s/I_f$。

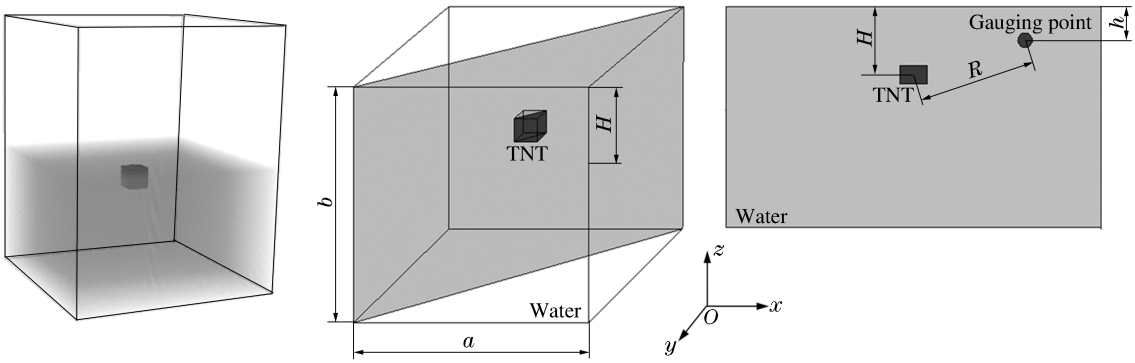

图 3 近自由面水下爆炸的粒子分布和测点分布

Fig. 3 Particle and gauging point distribution of underwater explosion near free surface

2.2.2 基本物理过程

近自由面水下爆炸中，当 TNT 引爆后，产生爆轰波和冲击波分别在 TNT 和水中传播，随着冲击波的不断向外传播，产生的高温高压的爆轰产物推动着水面向上凸起，形成水柱，水柱的上升速度按指数衰减。从图 4 可以看到，在此爆深很小时，产生的水柱较宽，而且很快破碎，喷溅范围较大。而从图 5 可知，在水面形成水冢的同时，冲击波开始产生和传播。冲击波波头具有较高的压力，以球面波的形式向外传播，当冲击波传到水面时，立即反射稀疏波，向深水中传播，追赶直达波，近自由面形成低压区。整个过程中，冲击波的压力衰减迅速。

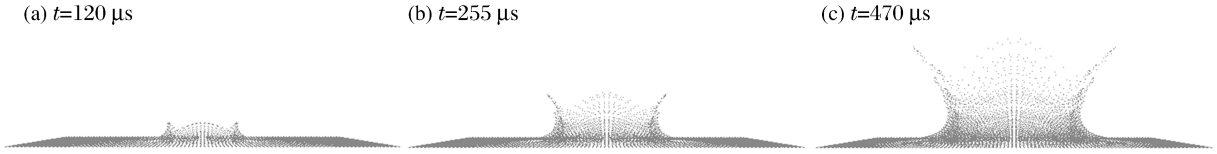

图 4 相对爆深 $\overline{H}=1.25$ 时水柱形成过程

Fig. 4 The water column formation when $\overline{H}=1.25$

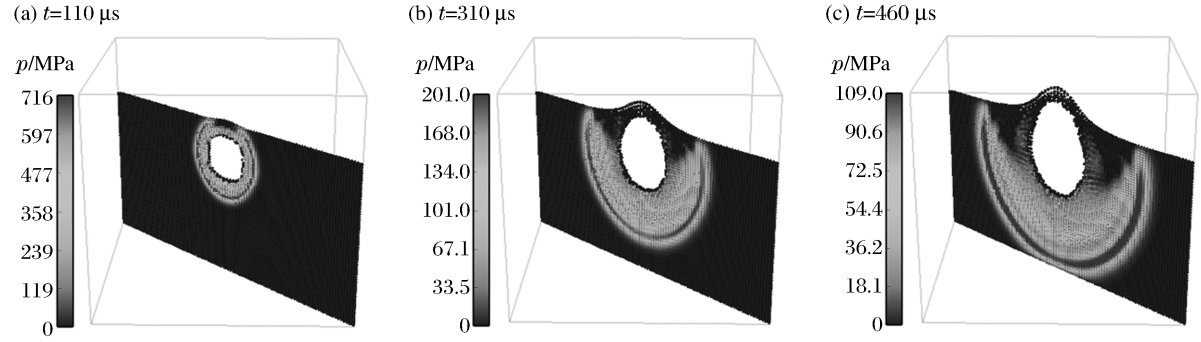

图 5 相对爆深 $\overline{H}=3.75$ 时冲击波的传播过程

Fig. 5 Shock wave propagation when $\overline{H}=3.75$

2.2.3 冲击波压力峰值和冲量

根据不同反射区的划分[11]，很容易捕捉到水面下的不同反射区的冲击波，以 $\overline{H}=3.75$ 为例，如图 6 所示。可以看出，$\overline{R}=4.33$、$\overline{h}=1.25$ 时冲击波受水面影响产生直接截断效应，并不影响峰值，$\overline{p}=1$，属于规则反射区；当 $\overline{R}=7.50$、$\overline{h}=1.25$ 时，水面的影响已经超过卸载波脉宽的 20%，而峰值几乎未受影响，$\overline{p}\approx1$，属于不规则反射区；当 $\overline{R}=9.19$、$\overline{h}=1.25$ 时，水面反射的稀疏波追上直达波，削弱了冲击波的波峰，$\overline{p}<1$，且减小了脉宽，属于不规则反射区[12-13]。

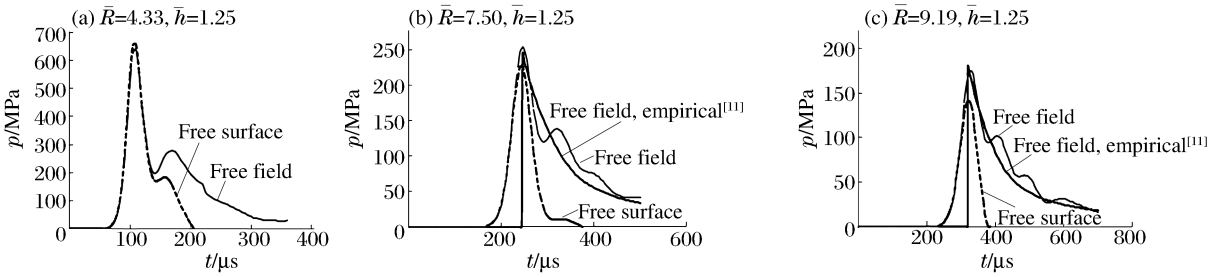

图 6 不同反射区的冲击波特征

Fig. 6 Shock wave characteristics of different reflection zones

为了充分认识近自由面水下爆炸的冲击波载荷特征，考虑爆深 H 的影响。近自由面与无限域水下爆炸的冲击波压力峰值比 $\bar{p}$ 与压力冲量比 $\bar{I}$ 如图 7 所示，TNT 中心坐标为(0,0)。TNT 在近自由面引爆后，由于自由面存在截断效应，当反射波到达时间迟于直达波峰压到达时间，不会削弱直达波峰值，就会形成规则反射区，此时 $\bar{p}=1$；若反射波到达时间先于直达波峰压，那么会形成不规则反射区，在近自由面的部分区域会直接削弱冲击波的压力峰值，致使 $\bar{p}<1$，不规则反射区(削弱峰值区域)与规则反射区(未削弱峰值区域)将形成一个内含装药的柱面。随着爆深的增加，这个柱面越贴近水面，且曲率逐渐变小，削弱峰值作用逐渐变弱，且蔓延到更远距离。当相对爆深为 $\bar{H}=2.50$ 时，峰值最大可削减为无限域的 0.32 倍，当 $\bar{H}=3.75$ 和 $\bar{H}=5.00$ 时，将分别为 0.44 和 0.52 倍。

相比自由面对冲击波压力峰值的影响，自由面对冲击波冲量的影响区域更大。从图 7 中可以看出，以 TNT 为中心，压力冲量比等值线将形成斗笠状的柱面，随着柱面的外张，越靠近水面，自由面对冲击波冲量的削减作用越强。同一测深，沿水平方向的一定范围内，由于自由面的截断，冲量的削弱效果呈增强趋势。同一水平距离不同测深时，向深水方向，冲量的衰减效果逐渐变弱。随着爆深的增加，自由面的反射变弱，严重衰减区域越贴近自由面，同一冲量比 $\bar{I}$ 形成的柱面越贴近自由面。当相对爆深为 $\bar{H}=2.50$ 时，最大衰减为 0.14 倍，当 $\bar{H}=3.75$ 和 $\bar{H}=5.00$ 时，将分别为 0.17 和 0.21 倍。

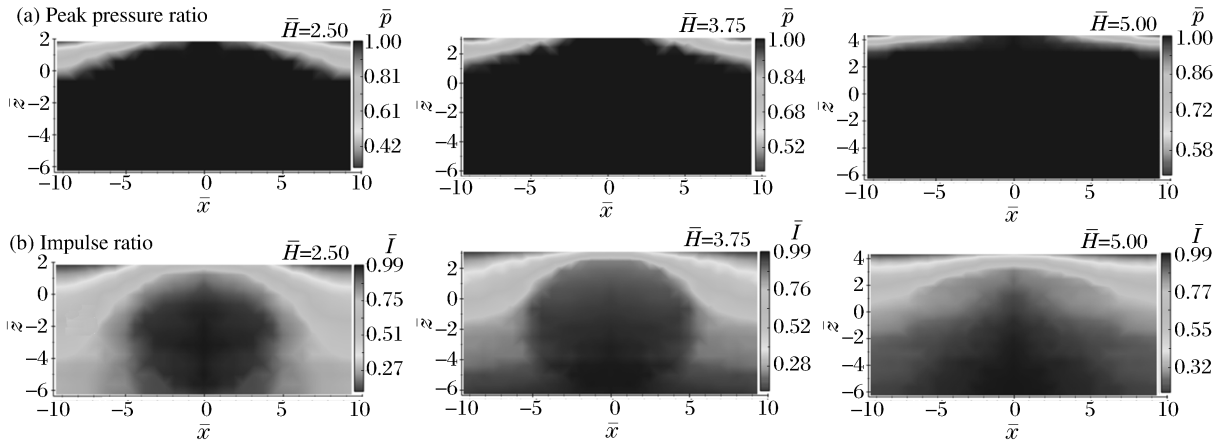

图 7 近自由面与无限域的压力峰值比 $\bar{p}$ 与压力冲量比 $\bar{I}$

Fig. 7 Peak pressure ratio $\bar{p}$ and impulse ratio $\bar{I}$ of explosion near free surface and in free field

2.2.4 爆深对水柱产生初期的影响

在近自由面水下爆炸中，当炸药爆轰后，形成的爆轰产物和水混合在一起，在水面形成水柱。一般有两种效应：一是高而窄的柱状喷柱，这类喷柱沿径向飞溅较小，飞溅的角度很小；二是相对较宽的，当水柱上升一段时间就开始破碎，沿径向飞溅很大的喷柱[14]。

为了探索不同爆深对不同形式水柱形成的影响，图 8 给出了 600 μs 时典型爆深水柱形成初期现象。可以看出，TNT 爆轰后产生的爆轰产物迅速膨胀，推动自由水面向上凸起。当爆深较大时，这种推动作用会引起水面较大范围的凸起，当相对爆深 $\bar{H}=5.00$、$\bar{H}=3.75$ 时水面产生较小的隆起，而当 $\bar{H}=$

3.13、$\overline{H}$=2.50 时水面已经产生了明显的水冢现象和逐渐上升的水柱，此类水柱会形成高而窄的柱状喷柱，径向飞溅很小，向上运动的趋势很大；当 $\overline{H}$=1.86 时产生的水柱已经破碎，到 $\overline{H}$=1.25 产生的已经是分布较广、沿径向飞溅水花的喷柱。

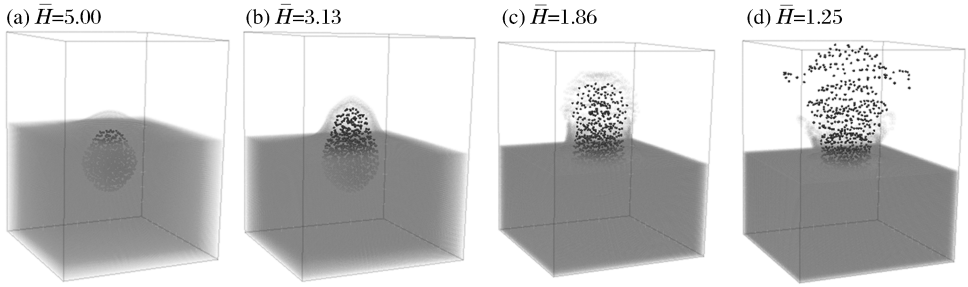

图 8 近自由面不同爆深的水柱初期现象

Fig. 8 Water column initial phenomena of different explosion depths near free surface

3 结　论

基于传统的三维 SPH 方法，提出了变光滑长度链表搜索算法和多相物质交界面处理技术，大大提高了计算效率，同时也保证了计算精度和数值的相对稳定性；在此基础上，模拟了无限域水下爆炸并与经验公式进行了对比分析，研究了近自由面水下爆炸的冲击载荷特征，通过研究得出以下结论：

(1)自由面最大可将冲击波压力峰值削减为无限域的 1/3 左右，冲量的削弱可达无限域的 1/7 左右；自由面下不规则反射区冲击波冲量的影响区域要远大于对压力峰值的影响。

(2)随着爆深的增加，自由面的截断效应逐渐变弱；压力比和冲量比形成的斗笠状等值柱面逐渐向自由面外张；严重削弱区域，沿着水平方向向远离装药方向扩散，沿垂直方向则向自由面贴近。

(3)随着爆深的减小，近自由面水下爆炸形成的水柱由高而窄、沿径向喷溅很小的水冢向破碎程度很大、沿径向分布较广的喷柱过渡。

参考文献：

[1] 符松，王智平，张兆顺，等. 近水面水下爆炸的数值研究[J]. 力学学报，1995，27(3)：267-275.
FU Song, WANG Zhi-ping, ZHANG Zhao-shun, et al. Numerical study of underwater explosion near air-water surface[J]. Acta Mechanica Sinica, 1995,27(3):267-275.

[2] 师华强，汪玉，宗智，等. 近水面水下爆炸二维 Level set 数值模拟[J]. 计算力学学报，2010，27(3)：409-414.
SHI Hua-qiang, WANG Yu, ZONG Zhi, et al. 2D numerical simulation of underwater explosion near free surface based on level set method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010,27(3):409-414.

[3] 杨刚，韩旭，龙述尧. 应用 SPH 方法模拟近水面爆炸[J]. 工程力学，2008，25(4)：204-213.
YANG Gang, HAN Xu, LONG Shu-yao. Simulation of underwater explosion near air-water surface by SPH method[J]. Engineering Mechanics, 2008,25(4):204-213.

[4] 顾文彬，叶序双，刘文华，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(5)：61-63.
GU Wen-bin, YE Xu-shuang, LIU Wen-hua, et al. Peak pressure investigation of exploding wave influenced by interfaces in shallow-layer water[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001,2(5):61-63.

[5] 刘谋斌，宗智，常建忠. 光滑粒子动力学方法的发展与应用[J]. 力学进展，2011，41(2)：217-231.
LIU Mou-bin, ZONG Zhi, CHANG Jian-zhong. Developments and applications of smoothed particle hydrodynamics[J]. Advances in Mechanics, 2011,41(2):217-231.

[6] 师华强，宗智，贾敬蓓. 水下爆炸冲击波的近场特性[J]. 爆炸与冲击，2009，29(2)：125-129.
SHI Hua-qiang, ZONG Zhi, JIA Jing-bei. Short-range characters of underwear blast waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):125-129.

[7] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics: meshfree particle method[M]. Singapore: World Scientific, 2003.

[8] Liu M B, Liu G R, Lam K Y. Investigations into water mitigation using a meshless particle method[J]. Shock Waves, 2002,12:181-195.

[9] Liu M B, Liu G R, Zong Z, et al. Computer simulation of the high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology[J]. Computer & Fluids, 2003,32(3):305-322.

[10] 刘谋斌,常建忠.光滑粒子动力学方法中粒子分布与数值稳定性分析[J].物理学报,2010,59(6):3654-3659.
LIU Mou-bin, CHANG Jian-zhong. Particle distribution and numerical stability in smoothed particle hydrodynamics method[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010,59(6):3654-3659.

[11] Zamyshlyayev B V, Yakovlev Y S. Dynamic loads in underwater explosion[R]. AD0757183,1973.

[12] Cole R H. Underwater explosions[M]. New Jersy: Princeton University Press, 1948.

[13] 冯刚,朱锡,张振华.近水面水下爆炸作用下舰艇结构损伤数值仿真[J].计算机辅助工程,2006,15(4):81-84.
FENG Gang, ZHU Xi, ZHANG Zhen-hua. Numerical analysis of hull structure damage due to underwater explosion near water surface[J]. Computer Aided Engineering, 2006,15(4):81-84.

[14] 郅斌伟,张志江,李健,等.近水面水下爆炸水柱效应研究[J].北京理工大学学报,2009,29(1):5-8.
ZHI Bin-wei, ZHANG Zhi-jiang, LI Jian, et al. A study on water columns produced by near water surface explosion[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(1):5-8.

Three-dimensional simulations on explosive load characteristics of underwater explosion near free surface*

MING Fu-ren, ZHANG A-man, YANG Wen-shan

(*College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: Based on the three-dimensional SPH method, the variable smoothing length modification is applied to the traditional linked-list search algorithm, and the stable approach of dealing with multi-phase material interface is put forward. Through simulating underwater explosion of free field, the feasibility and effectiveness of the modified method are verified. The three-dimensional numerical model is established, and the process of underwater explosion near free surface is reproduced. Characteristics of shock wave propagation, pressure field and energy field are summed up. The effect of different explosion depth on the initial water column formation is studied. Results show that free surface can attenuate the peak pressure and impulse to one third and one seventh of the original values, respectively. With the increase of detonation depth, curvature of the equivalent cylinder of peak pressure ratio and impulse ratio decrease, and the produced water column gradually transits from broken and spray column to high and narrow mound.

Key words: mechanics of explosion; truncation effect; three-dimensional SPH method; underwater explosion; near free field

---

* Received 8 July 2011; Revised 26 October 2011
Supported by the National Natural Science Foundation of China (50939002,10976008,50809018)
Corresponding author: ZHANG A-man, amanzhang@gmail.com

(责任编辑 丁 峰)