文章编号：1000-5773(2011)02-0165-08

水中空气隔层衰减冲击波性能研究*

姚熊亮，杨文山，初文华，张阿漫

（哈尔滨工程大学船舶工程学院，黑龙江哈尔滨　150001）

摘要：根据鱼雷对舰船毁伤的特点，建立了多介质水下爆炸数值模型，提出了交界面处理及广义光滑长度计算方法，编制了多介质水下爆炸计算程序，并对水下爆炸空气隔层衰减冲击波的性能进行了定量分析。结果表明：无论是接触爆炸还是非接触爆炸，空气隔层均可有效衰减冲击波，并且接触爆炸中空气隔层衰减冲击波的效果更好，最大可使冲击压力峰值降低约55%；空气隔层厚度与爆炸厚度之比为1时便可达到较好的衰减冲击波效果，继续增加空气隔层厚度对衰减冲击波效果影响不大。研究结果可为舰船结构防护及防雷舱的结构设计提供参考。

关键词：水下爆炸；空气隔层；衰减冲击波；光滑粒子流体动力学

中图分类号：O382.1；U661.43　　**文献标识码**：A

1　引　言

随着精确制导武器的广泛应用，水面舰船受鱼雷等武器攻击的概率不断增加。舰船受鱼雷的攻击多属于接触爆炸或非接触近场爆炸，形成压力极高的冲击波，对舰船造成毁灭性打击。为降低水下爆炸冲击波对舰船的破坏，舰船通常采用防雷舱结构。典型的防雷舱结构由多层隔舱组成：通常将第1层隔舱设为空舱，目的是迅速衰减水中爆炸的冲击压力，并给接触爆炸时的外板提供变形的空间，一般称为膨胀舱；第2层隔舱一般为液舱，目的是使鱼雷爆炸破片和第1层板破裂产生的破片在高速穿入液舱后速度迅速衰减，不至于对后面的舱室构成威胁，故又称吸收舱；膨胀舱和吸收舱内还可以设置多层空舱和液舱，以进一步衰减冲击波[1-4]。

国外进行了大量的防雷舱研究，并已将防雷舱装备于各型舰艇上，然而，由于军事应用的保密性，有关防雷舱的研究论文很少公开发表。国内也开展了防雷舱的相关研究，例如：朱锡等人[1-2]对水面舰艇防雷舱结构模型进行了水下抗爆实验，探讨了有、无水中防御结构的利弊及防护效果；陈卫东等人[5]开展了舰船防护结构模型的水下接触爆炸实验，并应用能量原理研究了破损机理。

防雷舱结构中的膨胀舱利用了空气隔层可衰减水中冲击波的原理。樊自建等人[6]通过小药量模型实验证明了空气隔层可以有效衰减水中冲击波峰值压力。然而，由于爆炸实验费用高昂，操作性也较差，因此通过大量爆炸实验来定量研究空气隔层各参变量对冲击波衰减的影响较为困难。数值模拟提供了更有效的方法，以减少实验费用和风险。本研究根据水下爆炸大变形、不均匀等特点，采用光滑粒

* **收稿日期**：2009-10-13；**修回日期**：2010-07-08

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(10976008，50809018)；科技部支撑计划项目(2007DFR80340)

作者简介：姚熊亮(1963－)，男，教授，博士生导师，主要从事船舶与海洋工程结构动力学及水下冲击载荷作用下的结构响应研究. E-mail：xiongliangyao@gmail.com

通讯作者：杨文山(1985－)，男，博士研究生，主要从事舰船结构动力学及水下冲击载荷作用下的结构响应研究. E-mail：heu_cb@126.com

子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics,SPH)方法编制了多介质(炸药、水和空气)水下爆炸计算程序,定量研究水中空气隔层各参变量对衰减冲击波性能的影响,为舰船结构防护及防雷舱的结构设计提供参考。

2 数值模型

2.1 控制方程

由于水中炸药的起爆速度和冲击波传播速度非常快,因此可以假设爆炸气体和水都是无粘性的,并且整个水下爆炸过程是绝热的。采用 Euler 方程和状态方程来模拟多介质水下爆炸过程,即

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = -\rho \dfrac{\partial v^{\beta}}{\partial x^{\beta}} \\ \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{1}{\rho} \dfrac{\partial p}{\partial x^{\beta}} \\ \dfrac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{p}{\rho} \dfrac{\partial v^{\beta}}{\partial x^{\beta}} \\ p = p(\rho, e) \end{cases} \tag{1}$$

式中:ρ、v、p、e、t 分别为密度、速度、压力、内能和时间。(1)式中前 3 个方程描述的是质量守恒、动量守恒和能量守恒,第 4 个方程为状态方程。本研究中,爆炸高压气体采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程,水采用 Mie-Grüneisen 状态方程,空气采用 γ 定律状态方程(γ 取为 1.4)。

2.2 离散公式

应用 SPH 核近似和粒子近似,对(1)式进行离散,可得到具有 SPH 形式的控制方程[7]

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t} = \displaystyle\sum_{j=1}^{N} m_j v_{ij}^{\beta} \dfrac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \\ \dfrac{\mathrm{d}v_i^{\alpha}}{\mathrm{d}t} = -\displaystyle\sum_{j=1}^{N} m_j \left(\dfrac{p_i}{\rho_i^2} + \dfrac{p_j}{\rho_j^2} + \eta_{ij} \right) \dfrac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \\ \dfrac{\mathrm{d}e_i}{\mathrm{d}t} = \dfrac{1}{2} \displaystyle\sum_{j=1}^{N} m_j \left(\dfrac{p_i}{\rho_i^2} + \dfrac{p_j}{\rho_j^2} + \eta_{ij} \right) v_{ij}^{\beta} \dfrac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\beta}} \end{cases} \tag{2}$$

为了防止求解结果的非物理振荡和粒子间的非物理穿透,在(2)式中的动量方程和能量方程中引入了 Monaghan 型人工粘性 η_{ij}。

2.3 交界面处理

带有空气隔层的多介质水下爆炸问题涉及高能炸药的起爆以及爆炸气体、空气隔层及周围水介质三者之间的相互作用。不同介质交界面的相互作用一直是 SPH 算法中的难点,通常采用守恒方程来处理,即求解守恒方程时考虑不同介质粒子的相互作用。但是,由于水下爆炸过程中粒子之间的相互作用极为激烈,加之空气和水的阻抗差异巨大,容易导致交界面附近粒子的非物理穿透和掺杂,进而致使计算结果错误甚至计算程序崩溃[7]。为此,本研究采用 Liu 等人[8]处理固定边界时的思想,用虚粒子对相邻实粒子施加作用力,以防止粒子穿透,也就是说当两个不同介质的粒子相互接近至某一距离时,认为两粒子有穿透趋势,此时,给两粒子施加相互作用力,以防止两粒子的进一步穿透。与计算分子力所使用的 Lennard-Jones 方程类似,相互作用力的方向沿两粒子的中心线,大小为

$$F = \begin{cases} D\left[\left(\dfrac{r_0}{r_{ij}} \right)^{n_1} - \left(\dfrac{r_0}{r_{ij}} \right)^{n_2} \right] \dfrac{r}{r_{ij}^2} & r_{ij} \leqslant r_0 \\ 0 & r_{ij} > r_0 \end{cases} \tag{3}$$

式中:r_0 为粒子的初始间距;r_{ij} 为不同介质的粒子间距;D、n_1、n_2 为参数,$n_1 = 12$,$n_2 = 4$,D 取与速度最大值的平方相等的量级。

2.4 广义光滑长度

光滑长度 h 在 SPH 方法中非常重要,它直接影响计算效率和结果精度。1989 年,Benz 提出了对光滑长度 h 进行动态变换的通用表达式,即

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \left(-\frac{1}{d}\frac{h_i^n}{\rho_i^n}\frac{\mathrm{d}\rho_i^n}{\mathrm{d}t}\right)\Delta t \tag{4}$$

式中:h_i^n、ρ_i^n 分别为第 n 个时间步粒子 i 的光滑长度和密度。为了模拟具有大变形或密度极不均匀问题,Liu 等人[8]提出了广义光滑长度,即

$$h_i^{n+1} = h_i^n + \theta\left(-\frac{1}{d}\frac{h_i^n}{\rho_i^n}\frac{\mathrm{d}\rho_i^n}{\mathrm{d}t}\right)\Delta t \tag{5}$$

式中:θ 为松弛因子,在 1.0 附近调节,直至当前相邻粒子数 N_i^{n+1} 与初始粒子数 N_i^0 相近为止。

采用(5)式计算光滑长度时,只有少量必需的相邻粒子进入到离散化求和过程中,在处理密度极不均匀问题时具有一定精度。但是,由于(5)式中 Δt 和 h_i^n/ρ_i^n 值非常小,需要多次迭代才能实现 N_i^{n+1} 与 N_i^0 接近,因此计算效率大大降低。本研究提出了另一种广义光滑长度,即

$$h_i^{n+1} = \theta\left[h_i^n + \left(-\frac{1}{d}\frac{h_i^n}{\rho_i^n}\frac{\mathrm{d}\rho_i^n}{\mathrm{d}t}\right)\Delta t\right] \tag{6}$$

用(6)式计算时,只需较少次的迭代便可实现 N_i^{n+1} 与 N_i^0 接近,既保证了计算精度,又提高了计算效率。

3 数值模型的验证

目前,由于保密、数值模拟难度高等原因,水中空气隔层衰减冲击波的数值模拟的相关报道非常少,因此很难找到合适的实验数据对建立的数值模型进行验证。本研究将采用自由场水下爆炸及空中爆炸问题对所建立的数值模型进行验证。

3.1 自由场水下爆炸

自由场水下爆炸的计算模型如图 1 所示。图 1 只给出了二维计算模型初始几何形状的 1/4,实际计算模型为圆形,中间圆形 TNT 炸药的半径 r 为 0.035 m,周围圆形水域的半径为 0.5 m,采用 7651 个均匀分布的粒子进行模拟。由于是自由场水下爆炸,因此模拟时水的外边界处没有设置虚粒子。

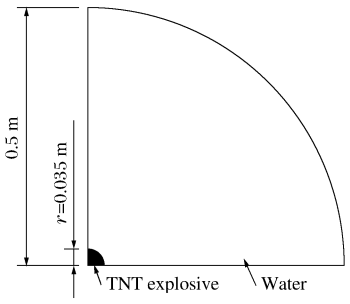


图 1 自由场水下爆炸计算模型

Fig. 1 Model of underwater explosions in free field

图 2 为计算得到的自由场水下爆炸 100 μs 时的压力云图。由图 2 可知,在中心引爆炸药后,会产生自爆心向外传播的圆形冲击波。以距爆心 0.25 m处为观测点,对压力计算结果和 Cole 经验公式计算结果进行比较,如图 3 所示。从图 3 中可知,本研究的压力计算结果和 Cole 经验公式得到的结果差别较小,压力峰值的最大误差仅为 7.3%,因此,新建立的数值模型具有一定精度。

3.2 空中爆炸

为了验证爆炸气体和空气相互作用的数值模型,对 TNT 炸药的空中爆炸过程进行了数值模拟。计算模型为:边长为 1 m 的正方形空气中心包含着边长为 0.05 m 的 TNT 药包。中心起爆后 30 μs 和 60 μs 时的粒子分布图和压力云图如图 4 所示,其中中心深色粒子代表爆轰气体,周围浅色粒子代表空气。从图 4 中可以看出,中心起爆后,爆轰气体不断压缩空气向周围传播,空气粒子和爆炸气体粒子在界面处没有发生非物理穿透和掺杂现象。由于空气具有较强的压缩性,在爆轰后很短的时间内爆轰气体就将空气压缩至边界,因此无法得到空中爆炸下某点的压力时程曲线。虽然缺少与经验公式的对比,但粒子分布图和压力云图反映的现象说明了所建立的空中爆炸数值模型的正确性。

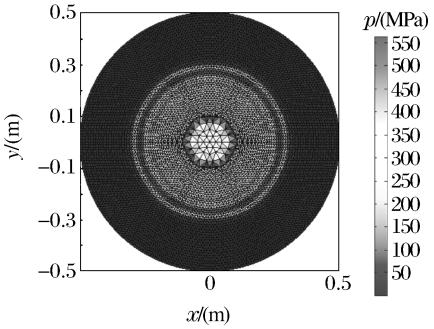


图 2 水下爆炸压力云图(100 μs)

Fig. 2 Pressure nephogram of underwater explosions (100 μs)

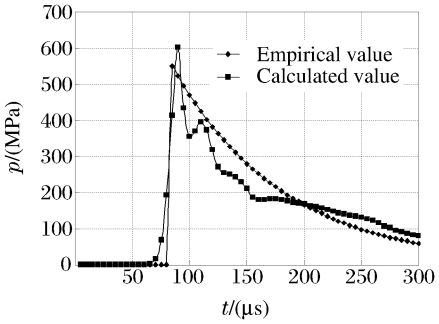


图 3 水下爆炸压力时程曲线(0.25 m)

Fig. 3 Pressure curves of underwater explosions (0.25 m)

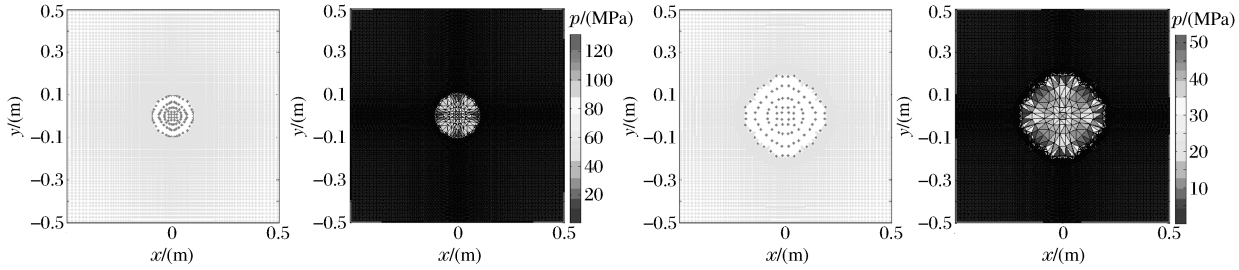


图 4 空中爆炸计算结果

Fig. 4 The calculated results of aerial explosion

4 水中空气隔层衰减冲击波性能

4.1 计算模型

鱼雷对舰船的攻击主要有接触爆炸和非接触近场爆炸两种形式。接触爆炸的次序为:鱼雷爆轰产生高温高压气体,进而形成压力极高的冲击波,冲击波首先到达舰船防雷舱的膨胀舱(空舱),经过衰减后到达吸收舱(液舱)。因此,鱼雷接触爆炸的模型应为 TNT 炸药-空气隔层-水介质。非接触近场爆炸的次序为:鱼雷爆轰产生高温高压气体,进而形成压力极高的冲击波,冲击波首先在防雷舱外侧水域传播,进而到达舰船防雷舱的膨胀舱(空舱),经过衰减后到达吸收舱(液舱)。因此,鱼雷非接触近场爆炸的模型应为 TNT 炸药-水介质-空气隔层-水介质。

根据鱼雷的两种爆炸毁伤模式的特点,建立了空气隔层接触爆炸和空气隔层非接触爆炸两种计算模型,其中忽略各隔层钢板对冲击波的反射和衰减作用。空气隔层接触爆炸的计算模型如图 5 所示。计算模型为圆形,图 5 仅给出了 1/4 图形,中间圆形 TNT 炸药的半径为 0.035 m,周围圆形水域半径为 0.5 m,TNT 炸药和水之间加入空气隔层,代表膨胀舱,其厚度为 a。空气隔层非接触爆炸的计算模型如图 6 所示。计算模型也为圆形,中间圆形 TNT 炸药半径为 0.035 m,周围圆形水域半径为 0.5 m,周围水介质内部加入空气隔层,将水域分为两部分,其中内部水域厚度为 b,代表鱼雷至舰船之间的水域,空气隔层厚度为 c,代表膨胀舱。图 5、图 6 中 D 点为观测点,距爆心距离为 0.25 m,空气隔层和内部水域的厚度均用爆炸厚度 0.035 m 正则化。

4.2 空气隔层接触爆炸结果及分析

当空气隔层厚度 a 为 0.03 m 时(正则化厚度为 0.86),空气隔层接触爆炸的压力云图如图 7 所示。由图 7 可知,TNT 炸药爆炸后,会产生向外传播的圆形冲击波;由于空气隔层与水、TNT 炸药之间的界

面存在着复杂的反射和透射,导致在空气隔层处产生向爆炸气体内部传播的冲击波。

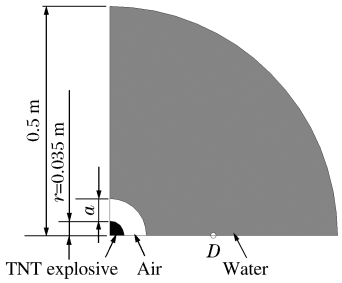


图 5　空气隔层接触爆炸计算模型

Fig. 5　Model of air buffer in contact explosions

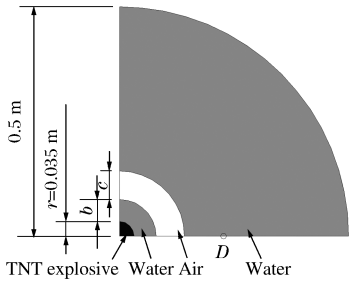


图 6　空气隔层非接触爆炸计算模型

Fig. 6　Model of air buffer in non-contact explosions

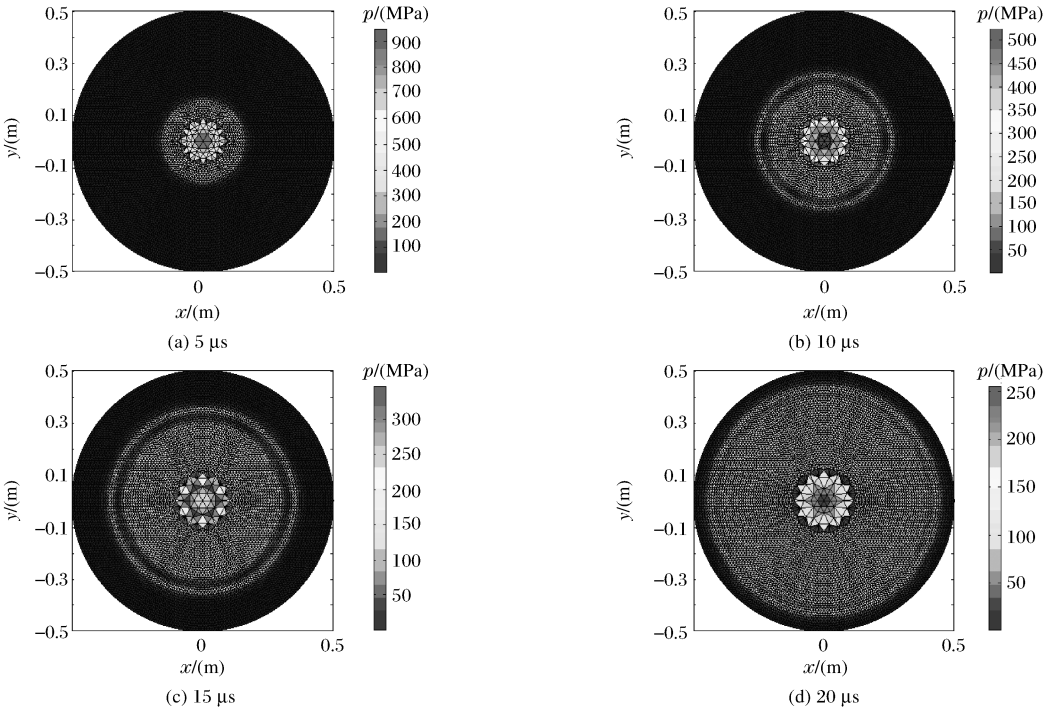


图 7　空气隔层接触爆炸压力云图($a=0.03$ m)

Fig. 7　Pressure nephogram of air buffer in contact explosions ($a=0.03$ m)

在不同厚度的空气隔层下,观测点 D 的压力时程曲线见图 8。由图 8 可知,观测点处的压力峰值随着空气隔层厚度的增加不断降低,且冲击波的到达时间随隔层厚度的增加不断后移。这主要是因为冲击波在空气中的传播速度比在水中慢,且衰减得更快[9-10],当 TNT 炸药和水之间加入空气隔层后,空气的存在会降低冲击波的压力峰值并延缓冲击波的到达时间。图 9 显示了冲击波压力峰值随空气隔层厚度变化的趋势。其中,冲击压力峰值 p 用没有空气隔层时的冲击压力峰值 $p_{a=0}$ 进行正则化,横坐标为正则化的空气隔层厚度。由图 9 可知:加入空气隔层后,冲击波压力峰值迅速降低,当空气隔层正则化厚度达到 1 时,冲击压力峰值降低缓慢。因此,接触爆炸时,正则化空气隔层厚度为 1 时,即可获得较好的冲击波衰减效果,冲击压力峰值可降低约 55%,再增加空气隔层厚度对衰减冲击波的作用不大。

4.3　空气隔层非接触爆炸结果及分析

对于非接触爆炸,固定中间水域厚度 b 为 0.04 m,研究空气隔层衰减冲击波的效果。空气隔层厚度 c 为 0.03 m(正则化厚度为 0.86)时,非接触爆炸的压力云图如图 10 所示。由图 10 可知,炸药中心

引爆后，产生的圆形冲击波向四周传播。与接触爆炸不同的是，非接触爆炸中的中心爆炸气体区为低压区，这是因为非接触爆炸波在交界面处的反射、透射更加复杂，包括冲击波在 TNT 炸药、水、空气、水等多种介质中的传播，导致在空气隔层处产生的向爆炸气体内部传播的冲击波幅值较小。

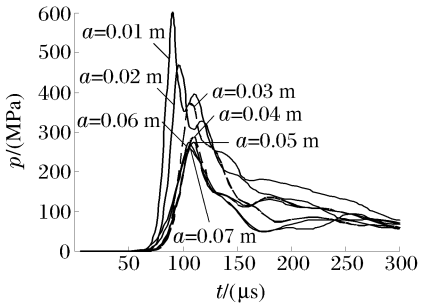


图 8 接触爆炸压力时程曲线($d=0.25$ m)

Fig. 8 Pressure curves in contact explosions ($d=0.25$ m)

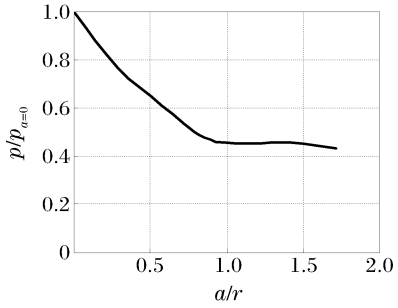


图 9 冲击压力峰值随空气隔层厚度的变化

Fig. 9 The relationship between the pressure peak of shock wave and the thickness of air buffer

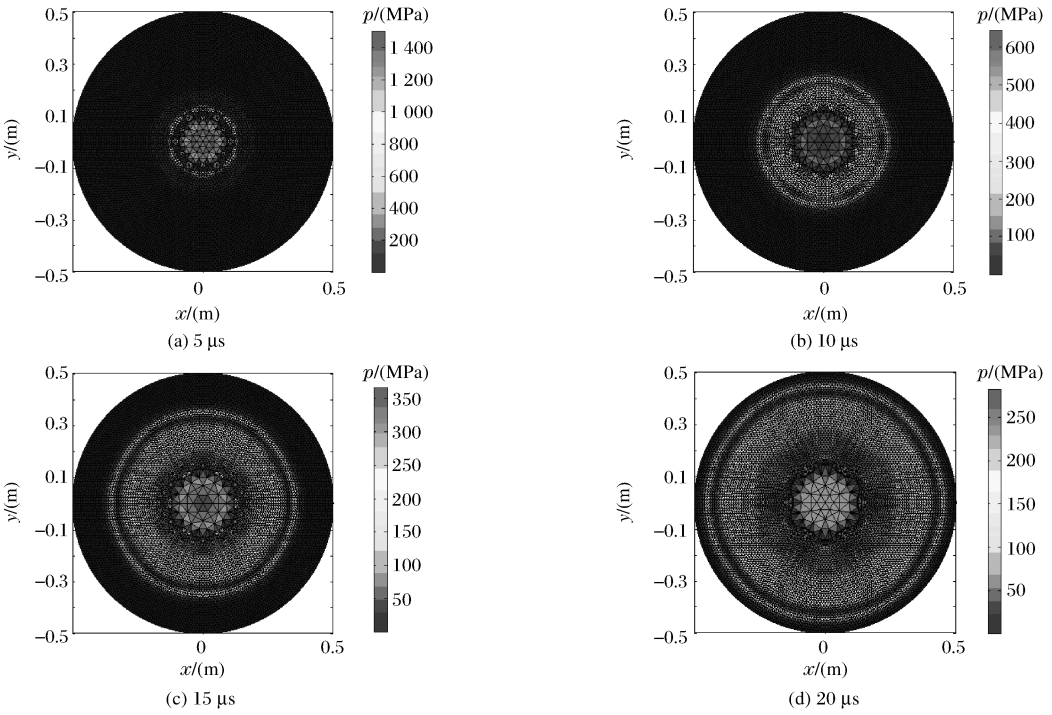


图 10 空气隔层非接触爆炸压力云图($c=0.03$ m)

Fig. 10 Pressure nephogram of air buffer in non-contact explosions ($c=0.03$ m)

中间水域厚度为 0.03 m 时，观测点处的冲击压力时程曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出，冲击波在空气中衰减较快，导致冲击压力峰值随空气隔层厚度的增加不断降低，且冲击波的到达时间随空气隔层厚度的增加不断后移。图 12 显示了非接触爆炸下冲击压力峰值随空气隔层厚度的变化趋势，其中冲击压力峰值和空气隔层厚度都进行了正则化。由图 12 可知，冲击压力峰值随空气隔层厚度的增加迅速衰减，直至正则化厚度为 1 时趋于稳定，此时冲击压力峰值约降低了 20%。

4.4 空气隔层距炸药距离对衰减冲击波的影响

固定空气隔层厚度($c=0.03$ m)，研究空气隔层距 TNT 炸药距离 b 对衰减冲击波的影响。空气隔层距 TNT 炸药不同距离下观测点的压力时程曲线如图 13 所示，观测点的冲击压力峰值随距离 b 的变

化曲线如图 14 所示。从图 13、图 14 中可以看出:冲击压力峰值随空气隔层距 TNT 炸药距离 b 的增加不断增大,当中间水域的正则化厚度为 1.2 时趋于稳定;接触爆炸(空气隔层正则化厚度为 0)时,空气隔层可使冲击压力峰值降低约 55%,而空气隔层正则化厚度为 1.2 时的非接触爆炸则仅降低约 20%,因此空气隔层在接触爆炸下衰减冲击波的效果更好。

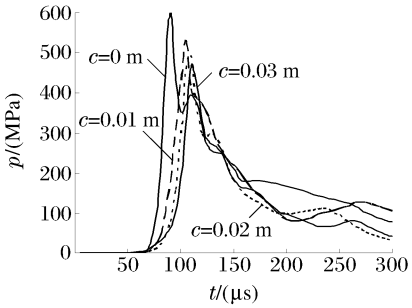


图 11　非接触爆炸压力时程曲线(d=0.25 m)

Fig. 11　Pressure curves in non-contact explosions (d=0.25 m)

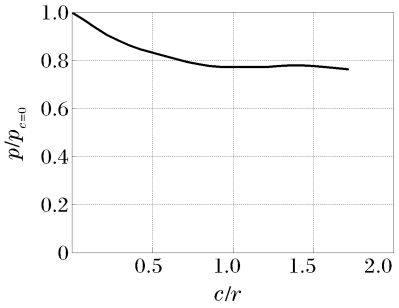


图 12　冲击压力峰值随空气隔层厚度的变化

Fig. 12　The relation between the pressure peak of shock wave and the thickness of air buffer

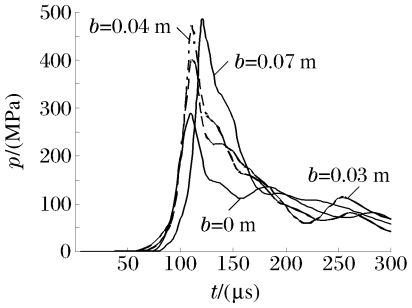


图 13　空气隔层距炸药不同距离时的压力时程曲线

Fig. 13　Pressure curves of air buffer in different distance from the explosive

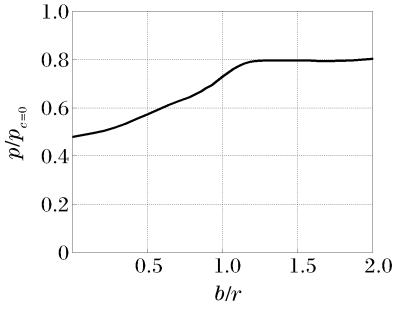


图 14　冲击压力峰值随距离 b 的变化关系

Fig. 14　The relationship between the pressure peak of shock wave and the distance b

5　结　论

根据鱼雷对舰船毁伤的特点,建立了多介质水下爆炸数值模型,提出了交界面处理及广义光滑长度计算方法,编制了多介质水下爆炸计算程序,对水下爆炸空气隔层衰减冲击波的性能进行了定量分析,得到的主要结论如下:(1)无论是接触爆炸还是非接触爆炸,空气隔层均可有效衰减冲击波,并且接触爆炸中空气隔层衰减冲击波的效果更好,最大可使冲击压力峰值降低约 55%;(2)空气隔层厚度与爆炸厚度之比为 1 时便可达到较好的衰减冲击波效果,再增加空气隔层厚度对衰减冲击波效果影响不大,这为合理设计防护舱中膨胀舱的厚度提供了理论依据;(3)当空气隔层距炸药的正则化距离小于 1.2 时,空气隔层距 TNT 炸药的距离对衰减冲击波效果影响显著,继续增加距离,则对衰减冲击波的影响不大。

References:

[1]　Zhu X, Zhang Z H, Liu R Q, et al. Experimental Study on the Explosion Resistance of Cabin near Shipboard of Surface Warship Subjected to Underwater Contact Explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 133-139. (in Chinese)
朱　锡,张振华,刘润泉,等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(2):133-139.

[2]　Zhang Z H, Zhu X, Huang Y Y, et al. Theoretical Research on the Defendence of Cabin near Shipboard of Surface Warship

Subjected to Underwater Contact Explosion [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(1): 113-119. (in Chinese)
张振华,朱 锡,黄玉盈,等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构水下抗爆防护机理研究 [J]. 船舶力学, 2006, 10(1): 113-119.
[3] Wang Y, Hua H X, Chen Y, et al. New Concept of Ship Anti-Shock Layer in Underwater Explosion Wave Isolation [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(3): 21-26. (in Chinese)
汪 玉,华宏星,谌 勇,等. 舰艇抗冲瓦整体冲击隔离新概念及其机理研究 [J]. 科技导报, 2009, 27(3): 21-26.
[4] Li Y J, Li G H, Zhao B L, et al. Influence of Double Hull Structure on the Effects of Underwater Explosion [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(5): 127-134. (in Chinese)
李玉节,李国华,赵本立,等. 双层壳体对水下爆炸作用的影响研究 [J]. 船舶力学, 2006, 10(5): 127-134.
[5] Yu S Y. Model Test and Numerical Calculation on the Ship Protective Structures Underwater Contact Explosion [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 44-58. (in Chinese)
于诗源. 舰船防护结构的水下接触爆炸模型试验研究及数值计算 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2007: 44-58.
[6] Fan Z J, Shen Z W, Ma H H, et al. Experimental Study on Attenuation of Underwater Shock Wave by Air Interlayer [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(10): 1306-1311. (in Chinese)
樊自建,沈兆武,马宏昊,等. 空气隔层对水中冲击波衰减效果的实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1306-1311.
[7] Liu G R, Liu M B. Smoothed Particle Hydrodynamics—A Meshfree Particle Method [M]. Translated by Han X, Yang G, Qiang H F. Changsha: Hunan University Press, 2005: 1-432. (in Chinese)
Liu G R, Liu M B. 光滑粒子流体动力学——一种无网格粒子法 [M]. 韩 旭,杨 刚,强洪夫,译. 长沙:湖南大学出版社, 2005: 1-432.
[8] Liu M B, Liu G R, Lam K Y. Investigations into Water Mitigation Using a Meshless Particle Method [J]. Shock Waves, 2002, 12(3): 181-195.
[9] Bai J S, Chen S H, Li P, et al. High Resolution Computation of the Under Water Explosion [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(1): 103-106. (in Chinese)
柏劲松,陈森华,李 平,等. 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.
[10] Tan H. Introduction to Experimental Shock Wave Physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 15-66. (in Chinese)
谭 华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京:国防工业出版社, 2007: 15-66.

Research on Performance of the Underwater Air Buffer Weakening Shock Wave

YAO Xiong-Liang, YANG Wen-Shan, CHU Wen-Hua, ZHANG A-Man

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

Abstract: Based on the characteristics of the damage on the ship caused by the torpedo, the numerical model of multi-medium underwater explosions was established, where the methods of treating interface and calculating generalized smooth length were presented. According to this new model, the programs of multi-medium underwater explosions were worked out, and a quantitative analysis was made on the performance of the underwater air buffer weakening shock wave. The results show that the shock wave can be significantly attenuated by the air buffer, whether in contact explosions or non-contact explosions. And the attenuation effect of the air buffer in contact explosions is better than that in non-contact explosions. The pressure peak of the shock wave can be decreased by nearly 55% by the air buffer in contact explosions. When the ratio between the thickness of the air buffer and explosion equals 1, the effect of the air buffer on weakening shock wave is obvious, and further increasing the thickness of the air buffer has little influence on the attenuation effect. The research results will provide reference for the structure design of the ship protection system and torpedo defense cabin.

Key words: underwater explosions; air buffer; weakening shock wave; smoothed particle hydrodynamics