

高压物理学报

水下爆炸冲击波数值仿真研究

胡亮亮 黄瑞源 李世超 秦健 王金相 荣光

Shock Wave Simulation of Underwater Explosion

HU Liangliang, HUANG Ruiyuan, LI Shichao,
QIN Jian, WANG Jinxiang, RONG Guang

引用本文:

胡亮亮, 黄瑞源, 李世超, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):015102. DOI: 10.11858/gywlb.20190773

HU Liangliang, HUANG Ruiyuan, LI Shichao, et al. Shock Wave Simulation of Underwater Explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):015102. DOI: 10.11858/gywlb.20190773

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190773>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水下爆炸强冲击波与平板结构相互作用的理论分析方法

Theoretical Analysis of the Interaction between the Plate Structure and Strong Shock Wave in Underwater Explosion
高压物理学报. 2017, 31(4): 443 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.013>

爆炸冲击波在仿桥梁结构内传播的数值模拟

Numerical Simulation of Explosive Shock Wave Propagation in Imitation Bridge Structure
高压物理学报. 2019, 33(4): 042301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180649>

聚能装药水下爆炸冲击波载荷规律

Shockwave Characteristics of Shaped Charge Exploded Underwater
高压物理学报. 2017, 31(4): 453 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.014>

铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及能量输出结构的影响

Effect of Al/O Ratio on Underwater Explosion Load and Energy Output Configuration of Aluminized Explosive
高压物理学报. 2019, 33(6): 065101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190745>

近场爆炸冲击波对屏蔽压装TNT的冲击引爆试验和仿真

Experimental and Numerical Study of Shock Initiation of Covered TNT by Near-Field Shock Wave
高压物理学报. 2019, 33(1): 015101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180604>

扰流板结构参数对冲击波衰减特性影响的仿真分析

Simulation Analysis of Influence of Spoiler Structural Parameters on Shock Wave Attenuation Characteristics
高压物理学报. 2018, 32(2): 025202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170585>

水下爆炸冲击波数值仿真研究

胡亮亮¹, 黄瑞源¹, 李世超¹, 秦健², 王金相¹, 荣光¹

(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;

2. 海军研究院, 北京 100161)

摘要: 由于在水下爆炸冲击波的数值仿真研究中, 水的状态方程、人工黏性系数和网格尺寸对数值计算结果影响很大, 采用常规 TNT 炸药的水下爆炸为例, 以冲击波的峰值压力和比冲量为衡量指标, 研究了这 3 个主要影响因素对数值仿真结果的影响。首先, 通过采用常用的 5 种水的状态方程进行系列仿真, 给出了各种状态方程的适用范围; 其次, 讨论了人工黏性系数对计算结果的影响, 并给出了一次与二次人工黏性系数的建议取值范围; 最后, 通过对不同炸药当量及不同网格尺寸开展系列运算, 从而得到不同炸药当量在满足工程计算精度要求下所对应的建议网格尺寸, 并得到了不同炸药当量所对应的建议网格尺寸的表达式。

关键词: 水下爆炸; 数值仿真; 水的状态方程; 人工黏性系数; 网格尺寸

中图分类号: O383

文献标识码: A

水下爆炸历来都是各国关注的重要研究项目。在军事上, 水下爆炸是水中兵器设计技术、破坏效应和爆破工程的基础问题; 在民用工业上, 挖凿河道、破除暗礁开航道以及爆炸成型等也都涉及到水下爆炸。因此, 研究水下爆炸对军事^[1]和民用工业^[2]都具有十分重要的现实意义。

目前关于水下爆炸的研究方法有理论研究、实验研究和数值仿真。对于理论研究, 水下爆炸过程非常复杂, 只有少数问题存在解析解。对于实验研究^[3-6], 水下爆炸实验周期长、耗费多、成功率低, 且所获得的数据有限。近年来, 随着计算机性能的迅速提高和数值仿真的深入发展, 水下爆炸冲击响应的数值仿真^[7-9]越来越受到重视。通过数值仿真, 不仅可以减少实验工作量, 而且还可以模拟分析实验无法达到的环境条件, 获得很多实验无法测得的数据, 把研究工作做得更深入、更系统、更完善。

水下爆炸对目标物的毁伤分为近距接触爆炸与远距非接触爆炸, 其中爆破开凿河道、水下兵器破坏效应等近距接触爆炸, 主要是通过水下爆炸冲击波和气泡脉动耦合作用使目标物产生严重破坏^[10]; 而在水下远距非接触爆炸中, 主要是水下爆炸产生的冲击波对远距离目标物进行毁伤, 因此冲击波产生和传播过程一直是抗爆防护研究的重点。冲击波的峰值压力与比冲量作为衡量冲击波毁伤威力的重要指标, 对其进行相关研究具有重要意义。对于水下爆炸冲击波的数值仿真的研究, 如何提高数值仿真的精度一直是学者们探讨的热点。徐豫新等^[11]对 Autodyn 程序中常用的水的两种状态方程进行了分析, 通过对比采用不同状态方程得到的峰值压力计算结果, 讨论了两种状态方程的优缺点。刘科种等^[12]通过 TNT 一维轴对称楔形计算模型, 分析了人工黏性系数对水下冲击波压力衰减的影响。方斌等^[13]采用 Dytran 程序分析了 50 kg 炸药水下爆炸情况下网格密度对仿真结果的影响。此外, 还有其他学者^[14-15]对影响水下爆炸计算精度的因素进行了研究, 但缺少三者因素对冲击波峰值压力与比冲量

* 收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(11802001, 11402266, 11672138); 装备预研基金(614260404021801); 中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心开放基金(20190303); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(30916011348)

作者简介: 胡亮亮(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水下爆炸数值仿真研究. E-mail: 18362906302@163.com

通信作者: 黄瑞源(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事爆炸力学与冲击动力学研究. E-mail: ryhuang@njjust.edu.cn

计算结果影响的详细探讨。本研究以常规 TNT 炸药的水下爆炸为例,系统地对水的状态方程、人工黏性系数和网格尺寸大小这 3 个主要影响因素进行探讨,从而探寻这些因素对水下爆炸冲击波数值仿真的影响规律,为提高不同工况下水下爆炸冲击波数值仿真精度提供借鉴,从而为较远距离水下爆炸冲击响应数值仿真提供一定的指导。

1 状态方程与参数设置

TNT 炸药状态方程采用标准的 JWL 状态方程,具体形式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 e \quad (1)$$

式中: $\eta = \rho/\rho_0$; A 、 B 、 ω 、 R_1 、 R_2 为常数,取值如表 1 所示。

表 1 TNT 炸药的主要参数^[16]

Table 1 Main parameters of TNT explosives^[16]

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$e/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$
371.2	3.231	4.15	0.95	0.3	1630	4.19×10^6

1.1 水的状态方程

1.1.1 Mie-Grüneisen 状态方程

目前对于水下爆炸数值仿真,众多学者^[17-18]采用 Mie-Grüneisen 状态方程,该状态方程形式为

$$\begin{cases} p = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu) e & \mu \geq 0 \\ p = \rho_0 C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) e & \mu < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为压缩比, $\mu = \eta - 1$ 。当 $\mu > 0$ 时,水处于压缩状态;当 $\mu < 0$ 时,水处于膨胀状态。 C_0 为声速, γ_0 为 Mie-Grüneisen 系数, a 为体积修正系数, S_1 、 S_2 和 S_3 为实验拟合系数。

Mie-Grüneisen 状态方程在常用商业软件 Msc.Dytran、Abaqus、Autodyn 和 Ls-Dyna 等都运用很广,根据其不同的简化表达式,可得到 SNL 状态方程、HULL 状态方程和 Steinberg 状态方程^[19]等,其参数选取如表 2 所示。

表 2 常用 Mie-Grüneisen 状态方程不同形式的参数

Table 2 Commonly used parameters of the Mie-Grüneisen equation of state

Equation of state	$C_0/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
SNL ^[20]	1.647	1.92	0	0	0	0
HULL ^[21]	1.483	1.75	0	0	0.28	0
Steiberg ^[22]	1.480	2.56	-1.986	0.226 8	0.50	2.67

1.1.2 多项式状态方程

多项式形式的状态方程也是常用的水的状态方程,也有许多学者^[12, 23-24]采用此类状态方程进行水下爆炸数值仿真,并取得了不少的成果。其中 Autodyn 多项式状态方程的具体形式为

$$\begin{cases} p = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 E_M & \mu \geq 0 \\ p = T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 E_M & \mu < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其常用的参数大小如表 3 所示。

表 3 Autodyn 程序提供的水多项式状态方程参数^[12, 23]Table 3 Polynomial state equation parameters of water provided by the Autodyn program^[12, 23]

A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	T_1/GPa	T_2/GPa	B_0	B_1
2.2	9.54	14.57	2.2	0	0.28	0.28

在 Msc.Dytran 中多项式形式的具体形式如式 (4), 参数如表 4 所示。

$$\begin{cases} p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2 + b_3\mu^3)\rho_0 E_M & \mu \geq 0 \\ p = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu)\rho_0 E_M & \mu < 0 \end{cases} \quad (4)$$

表 4 Dytran 中水的多项式状态方程的参数^[24-25]Table 4 Polynomial state equations parameters of water in Dytran^[24-25]

a_1/GPa	a_2/GPa	a_3/GPa	b_0	b_1	b_2	b_3
2.002	9.224	8.767	0.493 4	1.393 7	0	0

目前关于冲击波在水中的传播, 有 3 种应用较为广泛的冲击波理论^[10], 分别是基尔克乌特-别泽理论、基尔克乌特-布林克里理论和宾尼理论, 都是根据流体动力学的基本方程式得到的近似解。但是, 3 种理论的解法和所作假设的物理根据却不同。当距离与药包半径之比大于 10 时, 按基尔克乌特-布林克里理论计算出来的峰值压力与距离的关系曲线和实验值很一致; 按基尔克乌特-别泽理论所得到的曲线则比实验值大 15%~20%; 按宾尼理论所得到的曲线则比实验值要低, 但是在药包附近则急剧增加。相对于以上冲击波理论而言, 在工程上人们更习惯于使用由相似理论得到的经验公式, 而不同学者得到的经验公式却各不相同, 其中 Cole^[26]、Zamyshlyayev^[27] 等推导得到的经验公式一直被各国水下爆炸研究者引用, 本研究也以该经验公式作为数值仿真结果的对比参考, 探讨不同条件对数值仿真结果精度的影响, 其具体形式如式 (5) 和式 (6) 所示

$$p_m = \begin{cases} 44.1 \times 10^6 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.5} & 6 \leq \frac{R}{R_0} \leq 12 \\ 52.4 \times 10^6 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.13} & 12 \leq \frac{R}{R_0} \leq 240 \end{cases} \quad (5)$$

$$I = 5\,768 \times \sqrt[3]{W} \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{0.89} \quad (6)$$

式中: p_m 为冲击波峰值压力 (Pa), W 为炸药质量 (kg), R 为爆距 (m), R_0 为药包半径 (m), I 为比冲量 ($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$)。

1.2 水的状态方程对数值仿真结果的影响

关于水的状态方程对数值仿真的影响, 有许多学者进行了一系列的讨论。徐豫新等^[11]对 Autodyn 程序中常用的 SNL 状态方程与多项式状态方程进行了研究, 对采用不同状态方程计算得到的峰值压力进行了对比, 讨论了这两种状态方程的优缺点。方斌等^[13]对 Dytran 程序中 Mie-Grüneisen 状态方程与多项式状态方程进行了计算分析, 认为它们的计算结果有一定差别。其他学者^[20, 24]探究了水的状态方程对水下冲击波数值仿真的影响, 但缺少状态方程对冲击波比冲量计算结果的影响分析, 也没有给出各状态方程在不同比例爆距下的具体误差分析。为深入研究水的状态方程对水下爆炸数值仿真结果的影响, 本研究分别采用上述 5 种常用的状态方程对 1 kg TNT 在无限水域中的爆炸进行了系列计算, 以 2 mm 的网格划分, 监测爆距为 $7R_0$ 、 $10R_0$ 、 $15R_0$ 、 $20R_0$ 、 $25R_0$ 、 $30R_0$ 和 $35R_0$ 的点, 得到了不同状态方程下峰值压力与比冲量的计算结果, 与经验公式进行对比, 结果如图 1 和图 2 所示。

根据计算得到的峰值压力与比冲量, 对其进行总结, 并结合对比经验公式计算值, 如表 5 和表 6 所示。

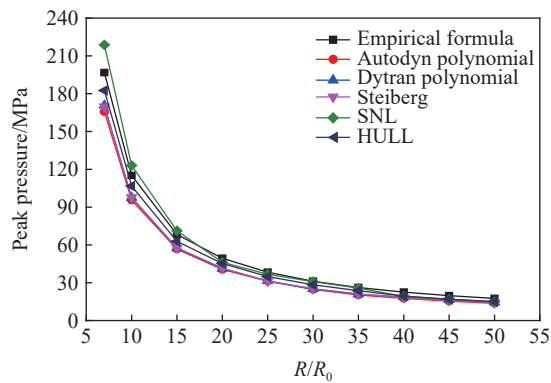


图 1 采用不同状态方程得到的峰值压力计算结果

Fig. 1 Calculated peak pressure results using different equations of states

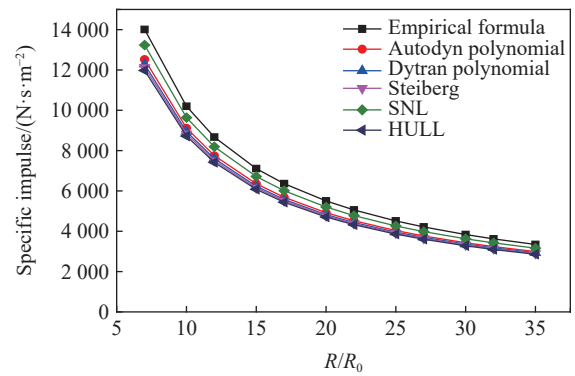


图 2 采用不同状态方程得到的比冲量计算结果

Fig. 2 Calculated specific impulse results obtained with different equations of states

表 5 1 kg 炸药无限水域爆炸冲击波峰值压力

Table 5 Shock wave peak pressure of 1 kg explosive infinite water fields explosion

MPa

State equation of water	R/R_0						
	7	10	15	20	25	30	35
Autodyn polynomial	165.7	95.6	56.7	40.6	31.3	24.6	20.3
Dytran polynomial	170.7	97.6	57.4	41.2	31.5	25.1	20.8
Steiberg	169.8	97.7	57.7	41.6	31.1	25.3	21.1
SNL	218.7	123.1	71.2	46.2	36.8	30.8	25.7
HULL	182.5	106.7	62.8	45.2	34.9	28.4	23.7
Empirical formula	196.7	115.2	68.3	49.4	38.4	31.2	26.2

表 6 1 kg 炸药无限水域爆炸冲击波比冲量

Table 6 Shock wave impulse of 1 kg explosives infinite water fields explosion

 $N \cdot s \cdot m^{-2}$

State equation of water	R/R_0						
	7	10	15	20	25	30	35
Autodyn polynomial	12 522.9	9 116.8	6 355.1	4 919.6	4 033.4	3 429.3	2 989.7
Dytran polynomial	12 284.8	8 943.4	6 234.2	4 826.0	3 956.7	3 364.1	2 932.8
Steiberg	12 130.7	8 831.3	6 156.0	4 765.5	3 907.1	3 321.9	2 896.0
SNL	13 237.3	9 636.9	6 717.6	5 200.2	4 263.5	3 624.9	3 160.2
HULL	11 976.6	8 719.1	6 077.9	4 704.9	3 857.5	3 279.7	2 859.2
Empirical formula	14 007.7	10 197.8	7 108.6	5 502.9	4 511.7	3 835.9	3 344.1

结合表 5 和表 6 可以看出,这 5 种状态方程都可以模拟水下冲击波的衰减过程,但每种状态方程衰减的规律不同,从近场到远场的冲击波峰值压力与比冲量计算结果也有所差别,其中采用 Autodyn 多项式状态方程得到的峰值压力整体误差偏大,远场误差较近场大,比冲量计算结果近场误差较小远场误差较大;Dytran 多项式与 Steiberg 状态方程计算结果衰减规律相似,在 $(10 \sim 20)R_0$ 爆距处衰减平稳,近场比冲量误差偏大;SNL 状态方程近场峰值压力比经验值大,在 $(7 \sim 20)R_0$ 爆距区间内衰减较快,远场误差较小,适合进行远场计算^[24];HULL 状态方程整体误差较小,近场误差较小,适合进行近场计算。根据不同水的状态方程对计算结果的影响,本节总结了这些状态方程的适用范围与特点,如表 7 所示。

表 7 5 种常用水的状态方程的适用范围与特点

Table 7 Applicable scope and characteristics of common five kinds of state equations for water

State equation of water	Scope of application
Autodyn polynomial	The overall error of the peak pressure is too large, and the far field error is larger than the near field. The near field error of the specific impulse calculation is smaller than the far field.
Dytran polynomial	The near-field peak pressure error is small, the specific impulse error is large, the far-field peak pressure error is large, and the specific impulse error is small.
Steiberg	The near-field peak pressure error is small, the specific impulse error is large, the far-field peak pressure error is large, and the specific impulse error is small.
SNL	The mid-field attenuation of the pressure peak is fast, and the far-field error is small. The difference between the near-field and the far-field error is not large, which is suitable for far-field calculation.
Empirical formula	The pressure peak error is small overall, and the specific impulse error is gradually increased from near to far, suitable for near-field calculation.

2 人工黏性系数

水下爆炸冲击波波阵面前后压力、密度等会出现突变,这种不连续的状态使得微分方程的求解面临困难,所以计算程序中通常引入人工黏性来解决这一问题,其中一次黏性系数削弱单位最高阶频率中的震荡,二次黏性引入一个阻抗压力来防止单元压溃。但是引入人工黏性会在计算域的几个网格宽度内光滑冲击波阵面,抑制陡峭峰值压力后的尾随振荡,影响冲击波峰值压力的大小。因此,人工黏性系数的选取对于计算结果有较大的影响。

在 Autodyn 程序中人工黏性一次项、二次项系数默认值为 0.2 和 1.0^[28],人工黏性的形式为

$$q = \begin{cases} \rho' (C_L l c \varepsilon + C_Q l^2 \varepsilon^2) & \varepsilon < 0 \\ 0 & \varepsilon \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_L 为一次项人工黏性系数, C_Q 为二次项人工黏性系数, l 为特征长度, ρ' 为材料密度, c 为材料中波速, ε 为体积变化率。

由于人工黏性系数对计算结果有着明显的影响,许多学者在进行水下爆炸数值仿真时,通过采用调整人工黏性系数来提高数值仿真的精度。徐豫新等^[11]在其他计算条件相同的前提下,修改一次项黏性系数 0.2 为 0.16、0.14,修改二次项黏性系数 1.0 为 0.8、0.6 进行计算得出冲击波波峰压力衰减的规律,认为通过减少黏性系数,可以提高冲击波峰值压力,使计算结果与经验公式更加接近。杨坤等^[29]在控制二次项黏性系数不变的情况下,通过调整一次项黏性系数,分析一次黏性系数对峰值压力的影响。

为了更系统研究人工黏性系数对水下爆炸模拟结果的影响,本节以 1 kg TNT 炸药在无限水域中的爆炸为例,采用 Autodyn 程序中的 SNL 状态方程,并采用 2 mm 网格进行计算,分别调整一次黏性系数与二次黏性系数,通过与经验公式的计算值对比来研究黏性系数对计算结果的影响。在保持二次项黏性系数为 0.9 不变的前提下,通过调整一次项系数分别为 0.005、0.010、0.020、0.040、0.080、0.200 及 0.400 进行系列计算,监测爆距分别为 $7R_0$ 、 $10R_0$ 、 $15R_0$ 、 $20R_0$ 、 $25R_0$ 、 $30R_0$ 与 $35R_0$ 的点,得到的计算结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,随着一次黏性系数的逐渐减小,峰值压力逐渐增大,近场区受一次项黏性系数的影响较大,并且当一次项系数小于 0.040 时,近场 $7R_0$ 处的峰值压力跟经验公式计算值的误差为 9.43%,已经完全能满足工程精度要求。再通过保持一次项黏性系数为 0.02 不变,通过调整二次项系数分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0,同样监测爆距分别为 $7R_0$ 、 $10R_0$ 、 $15R_0$ 、 $20R_0$ 、 $25R_0$ 、 $30R_0$ 、 $35R_0$ 的点,得到的计算结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,二次黏性系数的改变对计算结果的影响不大,在取值为 0.8~1.0 时,计算结果与经验公式基本吻合。

本研究也对 0.1、10、50 和 100 kg 进行计算分析,发现在不同当量工况下一次与二次黏性系数对于冲击波峰值压力与比冲量影响规律基本与 1 kg 一致,一次黏性系数对峰值压力影响较大,对比冲量的影响较小,当一次黏性系数增大,冲击波峰值压力减小,衰减更明显;二次黏性系数对峰值压力与比冲

量的影响较小。一次黏性系数对不同当量工况的影响情况如图 5 所示,从图中可以发现,当一次黏性系数在 0.005~0.040 之间时,不同当量工况下都能满足近远场精度要求。

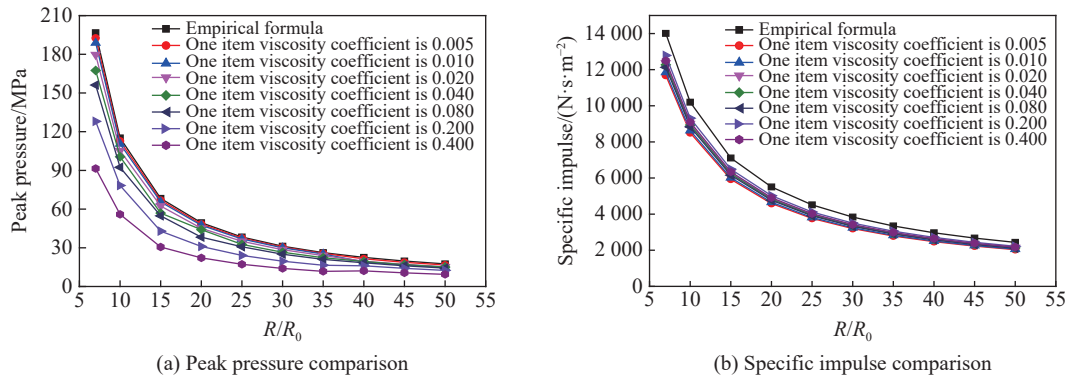


图 3 调整一次项黏性系数得到的计算结果

Fig. 3 Calculated results obtained by adjusting the viscosity coefficient of the primary term

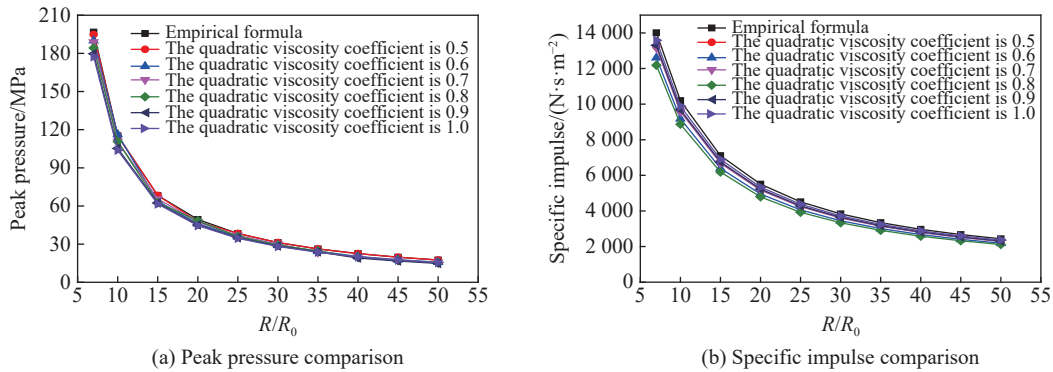


图 4 调整二次项黏性系数得到的计算结果

Fig. 4 Calculated results obtained by adjusting the viscosity coefficient of the quadratic term

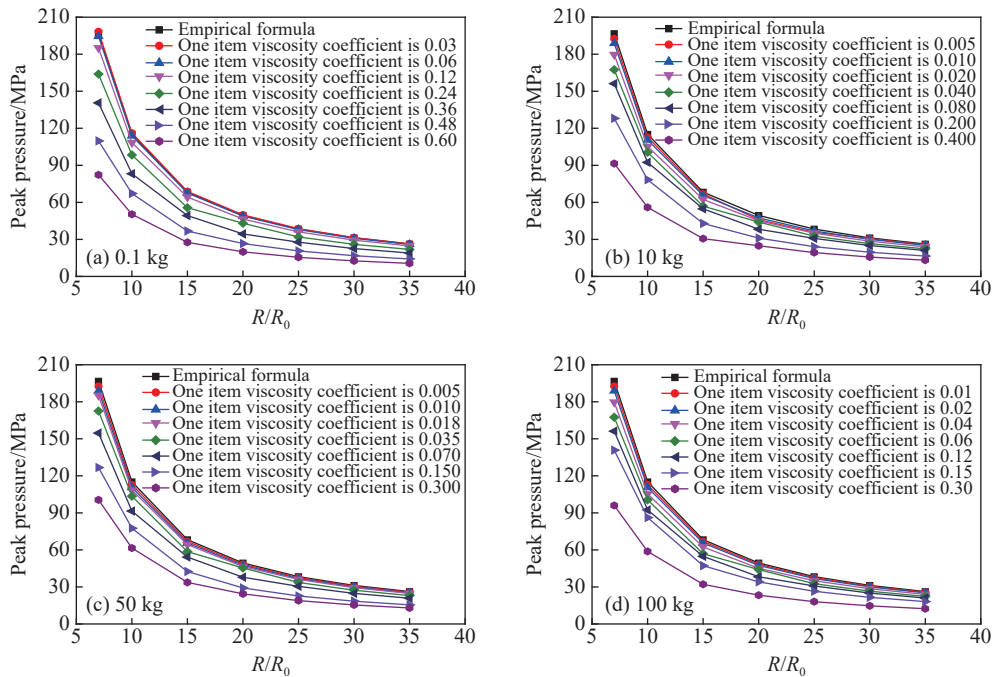


图 5 一次黏性系数对不同当量工况的影响

Fig. 5 Effects of primary viscosity coefficient under different equivalent conditions

根据以上对计算结果的分析, 本节对人工黏性对水下爆炸冲击波数值仿真计算结果的影响进行总结分析, 并给出了一次与二次黏性系数的建议取值范围, 如表 8 所示。

表 8 人工黏性对计算结果的影响
Table 8 Artificial viscosity effects on calculation results

Artificial viscosity coefficient	Recommended range of values	Impact on calculation results
Primary viscosity coefficient	0.005–0.040	The peak pressure of the underwater shock wave has a great influence, the contrast impulse has little effect, the primary viscosity coefficient increases, and the peak pressure decreases.
Secondary viscosity coefficient	0.8–1.0	Less influence on peak pressure and specific impulse.

3 网格尺寸对计算结果的影响

众所周知, 网格尺寸对于数值仿真的结果有很大影响, 进行数值仿真前一般都要进行网格无关性的验证^[30]。对于水下爆炸问题, 当计算域较大时很难实现过于细密的网格划分, 为了探寻水下爆炸数值仿真中不同工况下的合理网格尺寸, 张社荣等^[31]对不同当量炸药在无限水域内爆炸的网格尺寸进行了研究, 提出了炸药半径与网格尺寸之比为基准的网格划分的方法; 余晓菲等^[32]采用 Msc.Dytran 软件研究了 50、70 mm 等网格尺寸下水下爆炸冲击波峰值压力的计算误差; 方斌等^[33]对药量为 50 kg 的水下爆炸情况的网格尺寸影响进行了分析, 对网格尺寸大小与峰值压力误差的关系进行了讨论。此外, 还有许多学者^[34–36]对于水下爆炸冲击波数值仿真中的网格尺寸的选取做了一些研究, 但对不同当量的炸药工况采用多大网格尺寸能满足工程精度要求并未进行系统的讨论。本研究拟以冲击波峰值压力和比冲量为衡量标准, 通过系列仿真计算并进行总结归纳, 从而给出不同当量炸药在数值仿真中满足工程精度要求下的参考适宜网格尺寸。

首先本节以 1 kg 炸药无限水域爆炸工况为例, 分别采用 2、5、8、12、15 和 20 mm 网格尺寸进行计算, 监测从近场 $7R_0$ 到远场 $35R_0$ 处的冲击波峰值压力与比冲量, 得到的计算结果如图 6、图 7 所示, 不同网格尺寸下具体的峰值压力与比冲量计算值如表 9、表 10 所示。当采用的网格尺寸逐渐增大时, 峰值压力与比冲量相对误差都逐渐增大, 并且网格尺寸对于峰值压力的影响较比冲量大, 当峰值压力达到精度要求时, 比冲量计算结果基本也能达到精度要求。所以本节以峰值压力与经验公式计算值误差小于 10% 的精度要求为衡量标准, 当网格尺寸为 5 mm 时, 已经完全达到精度要求, 虽然 2 mm 网格的计算结果更加精确, 但采用 2 mm 网格需要的计算时间更长、对计算硬件要求更高, 在已经满足计算精度要求的情况下, 则认为 1 kg 炸药无限水域爆炸工况下, 最佳的适应网格为 5 mm。

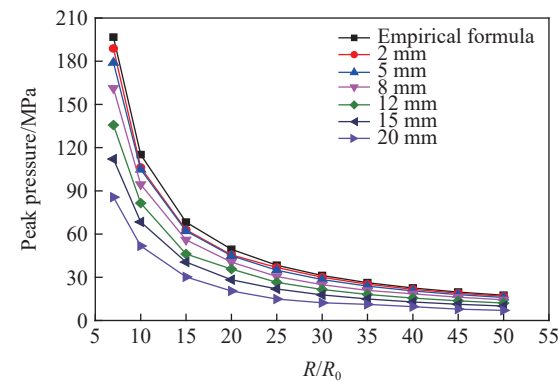


图 6 采用不同网格下得到的峰值压力
Fig. 6 Peak pressure obtained under different grids

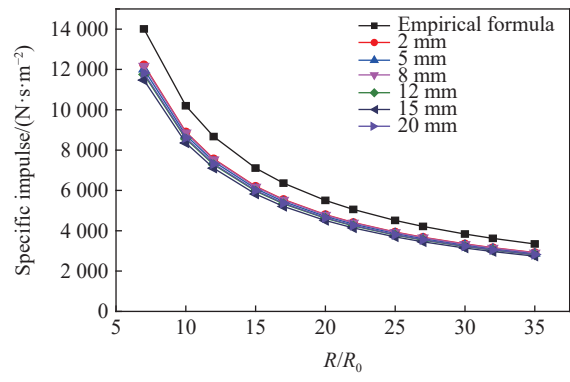


图 7 采用不同网格下得到的比冲量
Fig. 7 Specific impulse obtained under different grids

表 9 1 kg 炸药采用不同网格尺寸得到的峰值压力
Table 9 Peak pressure of 1 kg explosive with different grid sizes MPa

Grid size/mm	R/R_0						
	7	10	15	20	25	30	35
2	188.8	110.6	65.6	47.4	36.8	30.0	25.2
5	179.0	104.8	62.1	44.9	34.9	28.4	23.9
8	161.3	94.5	56.0	40.5	31.4	25.6	21.5
12	135.7	81.5	46.1	35.7	26.5	21.5	18.1
15	112.1	65.7	38.9	27.1	21.9	17.8	14.9
20	85.6	52.4	28.7	20.7	16.1	13.1	11.0
Empirical formula	196.7	115.2	68.3	49.4	38.4	31.2	26.2

表 10 1 kg 炸药采用不同网格尺寸得到的比冲量
Table 10 Specific impulse of 1 kg explosive with different grid sizes $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$

Grid size/mm	R/R_0						
	7	10	15	20	25	30	35
2	12 228.8	10 197.7	6 205.8	4 803.9	3 938.6	3 348.7	2 919.4
5	12 004.6	8 902.6	6 092.0	4 715.9	3 866.5	3 287.3	2 865.9
8	12 172.7	8 739.4	6 177.3	4 781.9	3 920.6	3 333.3	2 906.0
12	11 752.4	8 861.8	5 964.1	4 616.8	3 785.3	3 218.3	2 805.7
15	11 472.3	8 555.9	5 821.9	4 506.8	3 695.0	3 141.6	2 738.8
20	11 822.5	8 351.9	5 999.6	4 644.4	3 807.8	3 237.4	2 822.4
Empirical formula	14 007.7	10 197.8	7 108.6	5 502.9	4 511.7	3 835.9	3 344.1

同样对 0.1、0.5、10、50、100、500 和 1 000 kg 不同量级炸药水下爆炸工况进行系列计算,得到峰值压力计算结果如图 8 所示。并对不同尺寸网格下的得到的峰值压力进行误差分析,同样以峰值压力与经验公式计算值误差小于 10% 的精度要求为衡量标准,得到了这些当量下分别对应的最佳网格尺寸,如表 11 所示。

为了定性描述水下爆炸炸药当量 W 与适宜网格尺寸 l_i 之间的表达式,通过分析其他案例中的不同当量工况使用的网格尺寸与得到的精度误差,并结合本研究得到的表 11,发现当量与网格尺寸之间呈指数关系,取工况 $W_0 = 1 \text{ kg}$ 下的适宜网格尺寸 $l_0 = 5 \text{ mm}$ 作为基本量,采用式(8)的方程式进行描述,得到无量纲炸药当量 $\frac{W}{W_0}$ 与无量纲适宜网格尺寸 $\frac{l_i}{l_0}$ 之间的关系

$$\frac{l_i}{l_0} = n \left(\frac{W}{W_0} \right)^m \quad (8)$$

拟合图如图 9 所示,拟合效果良好,并得到材料参数 $n = 0.746$ 、 $m = 0.371$,从而为水下爆炸数值仿真中不同炸药当量下网格尺寸的选取提供合理参考。

基于对水的状态方程、人工黏性系数及网格尺寸对于水下爆炸冲击波的数值仿真计算结果精度的影响分析,本研究以三维大水域无限水下爆炸模拟为例,采用 Steinberg 状态方程对 0.1 kg TNT 球形炸药水下爆炸模拟,其中炸药和水采用多物质 Euler 算法,并采用无反射边界条件来模拟无限大水域情况,采用 1.5 mm 网格尺寸进行数值模拟,分别监测在 1、2 和 3 m 处测得到的冲击波时程曲线,得到的仿真结果如图 10(a)所示,可以看出数值仿真可以很好地模拟水下冲击波的衰减过程。并通过与尹群^[25]在 0.1 kg TNT 水下爆炸试验测得的 3 m 处的时程曲线进行了对比,如图 10(b)所示,从图中可以

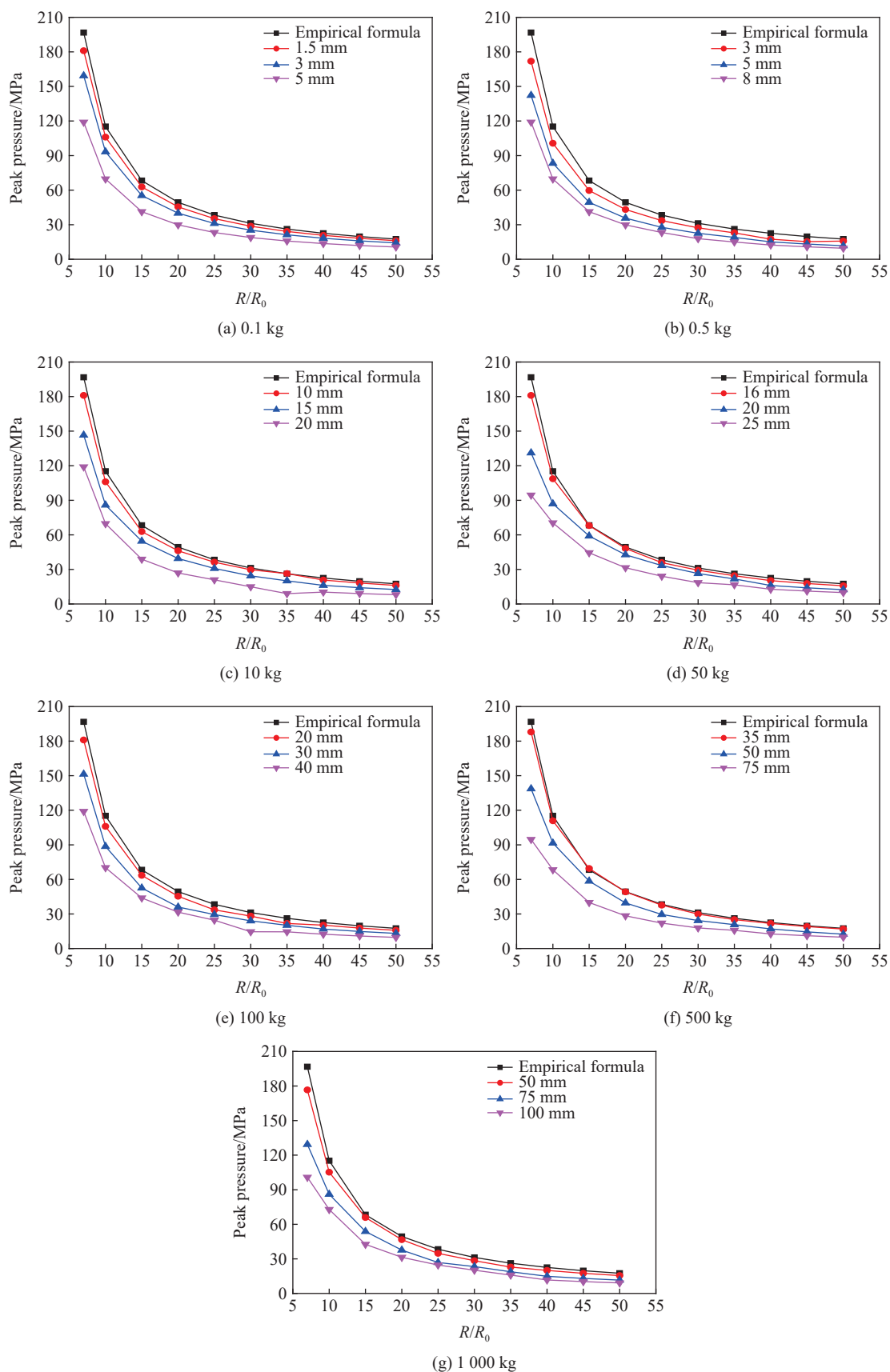


图 8 网格尺寸对不同炸药当量水下爆炸数值仿真的影响

Fig. 8 Influence of grid size on different explosive equivalents numerical simulation of underwater explosion

看出,数值仿真得到的冲击波时程曲线与试验测得的冲击波时程曲线重合度很好,验证了文中对于提高水下爆炸冲击波数值仿真精度的探讨的有效性,从而为水下爆炸数值仿真提供有益的借鉴。

表 11 不同炸药当量下适宜网格尺寸

Table 11 Appropriate grid size for different explosive equivalents	
Explosive equivalent/kg	Suitable grid size/mm
0.1	1.5
0.5	3
1	5
10	10
50	16
100	20
500	35
1 000	50

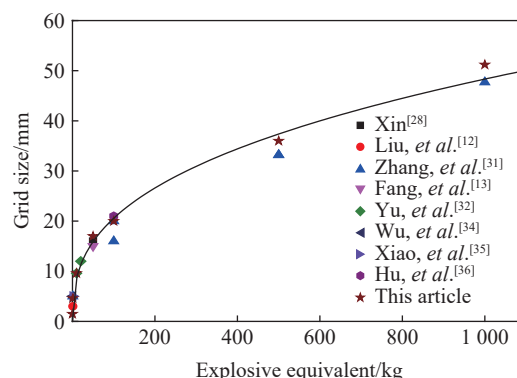


图 9 炸药当量与适宜网格尺寸的关系

Fig. 9 Relationship between explosive equivalent and suitable grid size

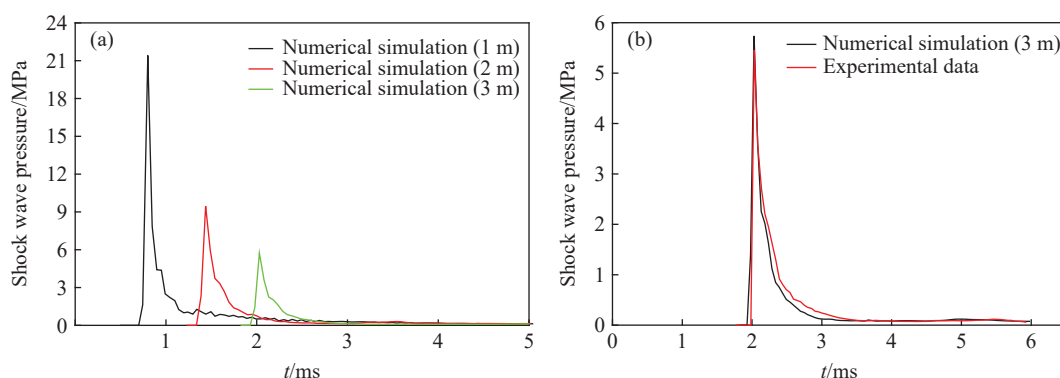


图 10 数值仿真得到的冲击波时程曲线与试验对比

Fig. 10 Numerical and experimental comparison of shock wave time history curve

4 结 论

针对水下远距非接触爆炸情况,以常规 TNT 炸药在水下爆炸冲击波中的数值仿真为例,采用冲击波的峰值压力与比冲量为衡量毁伤威力的指标,通过系列仿真并结合计算结果与经验公式的对比,分析了水的状态方程、人工黏性系数及网格尺寸对水下爆炸冲击波的数值仿真计算结果的影响。

(1)分别采用 5 种常用状态方程进行计算,对得到的水下冲击波峰值压力与比冲量的计算结果进行误差分析,得到了采用不同水的状态方程计算下的近远场峰值压力与比冲量相对误差,给出了这 5 种状态方程的特点与适用范围。

(2)通过系列仿真讨论了一次与二次人工黏性系数对水下数值仿真的影响,发现一次黏性系数对峰值压力的影响较大,对比冲量的影响较小,而二次人工黏性系数对计算结果影响较小。当一次黏性系数增大时,冲击波峰值压力减小,衰减加快。当一次黏性系数取值在 0.005~0.040 时,冲击波峰值压力误差较小,能满足精度要求。

(3)对不同量级当量炸药水下爆炸进行系列数值仿真,分析了网格尺寸对水下爆炸冲击波峰值压力与比冲量的影响,其中网格尺寸对峰值压力的影响较大,对比冲量的影响较小。并以峰值压力的相对误差小于 10% 为基准,得到了炸药当量对应的适宜网格尺寸,对其进行了无量纲下的定性分析。

参考文献:

- [1] 杨振, 沈晓乐. 爆破战斗部水中兵器爆炸威力评定方法研究 [J]. *爆破*, 2015, 32(2): 51–53.
YANG Z, SHEN X L. Research on evaluation method of underwater blast brisance of weapon's explosive [J]. *Blasting*, 2015, 32(2): 51–53.
- [2] 张志华, 钟强晖, 李庆民. 小药量水下爆炸对水下目标的毁伤有效值评估 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(10): 1344–1348.
ZHANG Z H, ZHONG Q H, LI Q M. Evaluation of damage valid value of underwater target detonated by small charge [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(10): 1344–1348.
- [3] SRINIVAS K A, UMAPATHI GOKUL K, PYDISETTY V K R, et al. Blast loading of underwater targets – a study through explosion bulge test experiments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 189–195.
- [4] ZHANG J, SHI X H, SOARES C G. Experimental study on the response of multi-layered protective structure subjected to underwater contact explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 100: 23–34.
- [5] 罗松林, 叶序双, 顾文彬, 等. 水下爆炸研究现状 [J]. *工程爆破*, 1999, 5(1): 84–87.
- [6] 梁向前. 水下爆破技术 [M]. 化学工业出版社, 2013.
- [7] QIAN K J, GANG Y D. A finite element analysis of ship sections subjected to underwater explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(7): 558–566.
- [8] BRETT J M, YIANNAKOPOULOS G. A study of explosive effects in close proximity to a submerged cylinder [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(4): 206–225.
- [9] 王军, 孙丰, 陈舸, 等. 水下爆炸载荷作用下 MK46 鱼雷结构动态响应分析 [J]. *鱼雷技术*, 2013(4): 293–298.
- [10] 北京工业学院八系《爆炸及其运用》编写组. 爆炸及其运用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [11] 徐豫新, 王树山, 李园. 水下爆炸数值仿真研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(6): 95–97.
XU Y X, WANG S S, LI Y. Study on numerical simulation of the underwater explosive [J]. *Journal of Projectiles Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(6): 95–97.
- [12] 刘科种, 徐更光, 辛春亮, 等. AUTODYN 水下爆炸数值模拟研究 [J]. *爆破*, 2009, 26(3): 18–21.
LIU K Z, XU G G, XIN C L, et al. Research on numerical simulation in underwater explosion by AUTODYN [J]. *Blasting*, 2009, 26(3): 18–21.
- [13] 方斌, 朱锡, 张振华, 等. 水下爆炸冲击波数值模拟中的参数影响 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, 26(4): 416–424.
FANG B, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Effect of parameters in numerical simulation of underwater shock wave [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2005, 26(4): 416–424.
- [14] 张振华, 朱锡, 白雪飞. 水下爆炸冲击波的数值模拟研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(2): 182–188.
ZHANG Z H, ZHU X, BAI X F. The study on numerical simulation of underwater blast wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(2): 182–188.
- [15] 梁龙河, 曹菊珍, 王元书. 水下爆炸特性的一维球对称数值研究 [J]. *高压物理学报*, 2002, 16(3): 199–203.
LIANG L H, CAO J Z, WANG Y S. One-dimensional numerical simulations of underwater spherical explosions [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2002, 16(3): 199–203.
- [16] DOBRATZ B M. Properties of chemical explosives and explosive simulants [J]. *International Journal of Neuroscience*, 1981, 51(3–4): 339–340.
- [17] 盛振新, 刘荣忠, 郭锐. 水下爆炸冲击波相互作用的仿真分析 [J]. *火工品*, 2012(3): 25–29.
SHENU Z X, LIU R Z, GUO R. Study on the shock wave interaction of underwater explosions [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2012(3): 25–29.
- [18] 荣吉利, 李健, 杨荣杰, 等. 水下爆炸气泡脉动的实验及数值模拟 [J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(12): 1035–1038.
RONG J L, LI J, YANG R J, et al. Experiment and numerical simulation for the bubble impulse in underwater explosion [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(12): 1035–1038.
- [19] 李晓杰, 张程娇, 闫鸿浩, 等. 水下爆炸近场非均质流的特征线差分分解法 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(6): 604–608.
LI X J, ZHANG C J, YAN H H, et al. Difference method of characteristics in isentropic flow of underwater explosion in near-field region [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(6): 604–608.
- [20] 辛春亮, 秦健, 刘科种, 等. 基于 LS-DYNA 软件的水下爆炸数值模拟研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(3): 156–158.
XIN C L, QIN J, LIU K Z, et al. Research on UNDEX numerical simulation based on LS-DYNA [J]. *Journal of Projectiles*,

- [Rockets, Missiles and Guidance](#), 2008, 28(3): 156–158.
- [21] STENBERG D J. Spherical explosions and the equation of state of water, UCID-2097 [R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1987.
- [22] SHIN Y S, LEE M, LAM K Y, et al. Modeling mitigation effects of watershield on shock waves [J]. [Shock and Vibration](#), 1998, 5(4): 225–234.
- [23] LIU M B, LIU G R, LAM K Y, et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion [J]. [Computational Mechanics](#), 2003, 30(2): 106–118.
- [24] 梅群, 侯中华, 朱俊锋, 等. 水下爆炸冲击波压力时程的数值模拟 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 57–59.
MEI Q, HOU Z H, ZHU J F, et al. Numerical simulation of underwater explosion shock wave [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science*, 2010, 31(4): 57–59.
- [25] 尹群. 水面舰船设备冲击环境与结构抗冲击性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
YIN Q. Studies on shock environment for equipments on surface ship and anti-shock characteristics of structures [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. DOI: [10.7666/d.d037570](#).
- [26] COLE R H. Underwater explosions [M]. New York: Dover Publications, 1965.
- [27] ZAMYSHLYAEV B V, YAKOVLEV Y S. Dynamic loads in underwater explosion [J]. *Dynamic Loads in Underwater Explosion*, 1973.
- [28] 辛春亮. 高能炸药爆炸能量输出结构的数值分析 [D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
- [29] 杨坤, 陈朗, 伍俊英, 等. 计算网格与人工黏性系数对炸药水中爆炸数值模拟计算的影响分析 [J]. 兵工学报, 2014(Suppl 2): 237–243.
YANG K, CHEN L, WU J Y, et al. The effects of computing grid and artificial viscosity coefficient on underwater explosion numerical simulation [J]. *Acta Armamentarii*, 2014(Suppl 2): 237–243.
- [30] KIM J H, SHIN H C. Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank [J]. [Ocean Engineering](#), 2008, 35(8/9): 812–822.
- [31] 张社荣, 李宏璧, 王高辉, 等. 水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 93–100.
ZHANG S R, LI H B, WANG G H, et al. A method to determine mesh size in numerical simulation of shock wave of underwater explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(8): 93–100.
- [32] 余晓菲, 刘土光, 张涛. 水下爆炸冲击波的载荷强度计算 [J]. 舰船科学技术, 2006, 28(5): 22–28.
YU X F, LIU T G, ZHANG T. Computation of the blast loading strength of underwater explosion shock waves [J]. *Ship Science and Technology*, 2006, 28(5): 22–28.
- [33] 方斌, 朱锡, 张振华. 水下爆炸冲击波载荷作用下船底板架的塑性动力响应 [J]. [哈尔滨工程大学学报](#), 2008, 29(4): 326–331.
FANG B, ZHU X, ZHANG Z H. Plastic dynamic response of ship hull grillage to underwater blast loading [J]. [Journal of Harbin Engineering University](#), 2008, 29(4): 326–331.
- [34] 吴国民, 周心桃, 肖汉林, 等. 水下爆炸数值仿真 [J]. [舰船科学技术](#), 2012, 34(9): 20–26.
WU G M, ZHOU X T, XIAO H L, et al. Numerical simulation of underwater explosion [J]. [Ship Science & Technology](#), 2012, 34(9): 20–26.
- [35] 肖秋平, 陈网桦, 贾宪振, 等. 基于 AUTODYN 的水下爆炸冲击波模拟研究 [J]. [舰船科学技术](#), 2009, 31(2): 38–43.
XIAO Q P, CHEN W H, JIA X Z, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave based on AUTODYN [J]. [Ship Science and Technology](#), 2009, 31(2): 38–43.
- [36] 胡毅亭, 贾宪振, 饶国宁, 等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究 [J]. [舰船科学技术](#), 2009, 31(2): 134–140.
HU Y T, JIA X Z, RAO G N, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse [J]. [Ship Science and Technology](#), 2009, 31(2): 134–140.

Shock Wave Simulation of Underwater Explosion

HU Liangliang¹, HUANG Ruiyuan¹, LI Shichao¹,
QIN Jian², WANG Jinxiang¹, RONG Guang¹

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University
of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*
2. *Naval Research Academy, Beijing 100161, China*)

Abstract: The state equation of water, artificial viscosity coefficient and mesh size have a great influence on the numerical results of underwater explosion shock wave. In order to improve the simulation accuracy of underwater explosion shock wave, the peak pressure and specific impulse of the conventional TNT explosive underwater explosion are taken as the measurement indicators, and the influence of these factors on the numerical simulation results is studied. For the five kinds commonly state equations of water, the specific values of the artificial viscosity coefficients under different working conditions and appropriate grid size for different explosive equivalents are given. These parameters can provide reference for improving simulation accuracy of underwater explosion shock wave under different working conditions. First, through a series of simulations of the commonly used five kinds of state equations of water, the calculation results of peak pressure and specific impulse are compared with the empirical formula, and the error analysis is carried out to give the applicable scope of each state equation. Secondly, the influence of the artificial viscosity coefficient on the calculation results is discussed, and a series of calculations are carried out for the primary and secondary artificial viscosity coefficients under different working conditions. The recommended range of values for the primary and secondary artificial viscosity coefficients under different working conditions is given. Finally, through a series of calculations on 0.1, 0.5, 1, 10, 50, 100, 500 and 1 000 kg equivalent explosives and different grid sizes, the recommended mesh sizes corresponding to different explosive equivalents under the requirement of engineering calculation accuracy are obtained by limiting the relative error of peak pressure less than 10%. The expressions of the recommended mesh sizes corresponding to different explosive equivalents are also given.

Keywords: underwater explosion; numerical simulation; equation of state; artificial viscosity; element density