

[引用格式] 敖启源, 卢熹, 姜智雅, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真精度研究 [J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(1): 158-165.

# 水下爆炸冲击波数值仿真精度研究

敖启源<sup>1</sup>, 卢熹<sup>1\*</sup>, 姜智雅<sup>2</sup>, 康珀阁<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳, 110159; 2. 山西江阳化工有限公司, 山西 太原, 030041)

**摘要:** 在水下爆炸数值仿真研究中, 网格尺寸和一次项人工粘性系数对冲击波峰值压力计算结果有较大影响。在预定计算精度条件下, 快速确定网格尺寸及人工粘性对数值计算意义重大。为此, 文中基于 LS-DYNA 有限元软件, 建立 78 g 三硝基甲苯(TNT)二维水下爆炸数值计算模型, 重点分析网格尺寸和一次项粘性系数对水下爆炸冲击波峰值压力和整体计算误差的影响规律。结果表明, 随着网格密度因子的增大, 计算峰值压力对网格的敏感性降低, 且网格密度较大时, 过小的一次项系数会导致计算峰值压力与经验公式值的相对误差增大。在此基础上获得 20% 范围内误差与网格尺寸、粘性系数之间的关系, 并构建出可用于快速确定网格尺寸和一次项人工粘性系数的误差预估模型, 通过 0.2~5 000 kg 范围内的 TNT 柱形装药(长径比为 1)和球形装药的水下爆炸计算, 验证了预估模型的普适性, 可为二维中近场范围内的水下爆炸冲击波数值仿真计算研究提供参考。

**关键词:** 水下爆炸; 数值仿真; 网格尺寸; 人工粘性系数; 误差预估模型

中图分类号: TJ630.2; U674

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2024)01-0158-08

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2023-0098

## Numerical Simulation Accuracy Study of Underwater Explosion Shock Waves

AO Qiyuan<sup>1</sup>, LU Xi<sup>1\*</sup>, JIANG Zhiya<sup>2</sup>, KANG Poge<sup>1</sup>

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Shanxi Jiangyang Chemical Company, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In the numerical simulation study of the underwater explosion, the grid size and the artificial viscosity coefficient of the primary term have a large impact on the calculation results of the peak pressure of the shock wave. Under the condition of predetermined calculation accuracy, it is of great significance to quickly determine the grid size and artificial viscosity for numerical calculation. For this reason, based on LS-DYNA finite element software, a two-dimensional underwater explosion numerical calculation model of 78 g trinitrotoluene (TNT) was established to analyze the influence of the grid size and the viscosity coefficient of the primary term on the peak pressure of the underwater explosion shock wave and the overall calculation error. The results show that with the increase in the grid density factor, the sensitivity of calculated peak pressure to the grid decreases. When the grid density is larger, a small primary term coefficient will cause the relative error between the calculated peak pressure and the empirical formula value to increase. On this basis, the relationship among the error, grid size, and viscosity coefficient within 20% is obtained, and an error prediction model that can be used to quickly determine the grid size and the artificial viscosity coefficient of the primary term is constructed. Through the underwater explosion calculation of cylindrical TNT charge (aspect ratio of 1) and spherical TNT charge in the range of 0.2–5 000 kg, the universality of the prediction model is verified, which can provide a reference for the numerical simulation of underwater explosion shock wave in the two-dimensional near-field range.

收稿日期: 2023-08-18; 修回日期: 2023-09-10.

作者简介: 敖启源(1999-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为水下爆炸.

\*通信作者简介: 卢熹(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水下高效毁伤技术研究.

OPEN ACCESS

**Keywords:** underwater explosion; numerical simulation; grid size; artificial viscosity coefficient; error prediction model

## 0 引言

水下武器作为舰船生命力的主要威胁之一,其爆炸冲击波及气泡载荷会对舰船造成严重的局部和总体破坏<sup>[1]</sup>。各国相继开展了大量水下爆炸试验,但实弹实测试验安全风险较高、成本高昂、重复性低且观测范围有限<sup>[2]</sup>。随着计算机性能和仿真技术的发展,数值仿真以其较高计算精度、低成本和高可重复性等优点成为继实验、理论研究后第 3 种水下爆炸研究方法<sup>[3]</sup>。因此开展水下爆炸数值仿真精度研究具有十分重要的意义。

数值仿真研究水下爆炸冲击波载荷问题时,为了处理冲击波的强间断面,抑制波阵面前后的数值振荡,引入了人工粘性。由于人工粘性的引入会在几个网格宽度上光滑冲击波波阵面,因此水下爆炸冲击波载荷计算结果直接受人工粘性的影响。同时,人工粘性的引入要求网格尺寸不能过大,否则计算过程中网格会忽略部分波阵面信息,致使峰值过低影响计算精度。Huang 等<sup>[4]</sup>通过典型三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)炸药水下爆炸数值分析,探讨了一次、二次粘性系数对数值计算结果的影响,并给出了一定比例爆距范围内的建议值。Wang 等<sup>[5]</sup>研究了不同装药质量下网格尺寸对冲击波峰值的影响,并引入与装药半径和单元边长相关的无因次量表征网格尺寸。胡亮亮等<sup>[6]</sup>以常规 TNT 水下爆炸为例,对水的状态方程、人工粘性系数和网格尺寸对于数值仿真结果的影响进行了研究。张社荣等<sup>[7]</sup>基于有限元软件 AUTODYN 建立了不同炸药量的水下爆炸数值模型,对比分析了网格尺寸对不同爆距处冲击波峰值压力及比冲量的影响。此外还有其他学者<sup>[8-13]</sup>讨论了网格尺寸及粘性系数对水下爆炸计算结果的影响,但现有研究无法在预定精度下快速确定网格尺寸和人工粘性系数。因此文中以 TNT 水下自由场爆炸数值计算为例,探究网格尺寸和一次项人工粘性系数对水下爆炸冲击波峰值压力的影响,综合分析不同工况下网格密度因子和一次项系数与峰值压力平均误差间的关系,构建出普适性较高的水

下爆炸数值误差预估模型,为预定精度的仿真模型设计提供依据。

## 1 水下爆炸数值仿真

### 1.1 数值模型

基于文献 [14] 中开展的爆炸水井试验,建立二维轴对称计算模型。试验水域尺寸 4.5 m×9 m,空气域尺寸 4.5 m×0.1 m,炸药为直径 2 cm 的等高药柱,炸药质量 78 g,放置在水深 4 m 位置处,采用中心起爆方式。网格的排列走向和过渡方式会影响计算结果,因此采用均匀网格划分方式。在距装药中心 0.4~2.8 m/kg<sup>1/3</sup> 比例爆距内选定 16 个观测点,采用关键字\*INITIAL\_HYDROSTATIC\_ALE 初始化静水压力,设置水域压力梯度,以模拟真实条件下的水下压强环境。炸药、空气和水介质均选用 ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)算法,数值计算模型如图 1 所示。

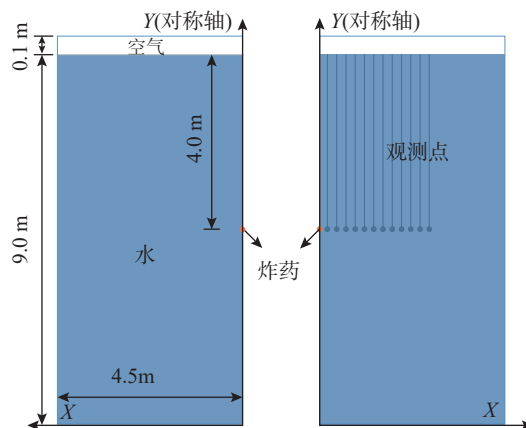


图 1 数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model

### 1.2 数值模型

装药选用典型的单质 TNT 炸药,采用 JWL (Jones Wilkins Lee)状态方程描述其爆炸过程,具体形式为

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

式中:  $V$  为相对体积;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  为常数,取值如表 1<sup>[15]</sup>所示;  $P$  为压力;  $\omega$  为药量;  $E$  为单位体积内能。

表 1 TNT 状态方程参数  
Table 1 State equation parameters for TNT

| A/GPa  | B/GPa | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | E/GPa |
|--------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 371.20 | 3.23  | 4.15  | 0.95  | 0.30     | 7.00  |

数值仿真中常用 POLYNOMIAL 和 GRUNEISEN 状态方程描述水介质, 但所使用的压力梯度关键字对 POLYNOMIAL 状态方程参数设置有一定要求, 因此水介质采用 GRUNEISEN 状态方程描述, 其形式根据水所处状态而定。

当水介质处于压缩状态时, 其状态方程为

$$P = \frac{\rho_0 C^2 [1 + (1 - \nu_0/2)\mu - (\alpha/2)\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2\mu^2/(\mu + 1) - S_3\mu^3/(\mu + 1)^2]^2 + (\gamma_0 + \alpha\mu)E} \quad (2)$$

当水介质处于膨胀状态时, 其状态方程为

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha\mu)E \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为水的压缩比;  $C$  为水中声速;  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  为常数;  $\gamma_0$  为 GRUNEISEN 系数;  $\alpha$  为体积修正系数;  $V_0$  为初始相对体积。以上参数取值如表 2 所示。

表 2 水状态方程参数  
Table 2 State equation parameters for water

| $C/(m/s)$ | $S_1$ | $S_2$  | $S_3$ | $\alpha$ | $E$ | $V_0$ |
|-----------|-------|--------|-------|----------|-----|-------|
| 1483      | 2.106 | -0.174 | 0.01  | -        | -   | 1.0   |

空气使用 POLYNOMIAL 状态方程进行描述, 其形式为

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2) \quad (4)$$

式中:  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$  和  $C_6$  为常数。取值如表 3 所示。

表 3 空气状态方程参数  
Table 3 State equation parameters for air

| $E/(J/kg)$        | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_6$ | $C_4$ | $C_5$ |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $2.5 \times 10^6$ | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.4   | 0.4   |

### 1.3 冲击波峰值压力计算结果

根据文献 [10], 长径比为 1:1 的柱形装药可以近似为球形装药, 对于球形装药水下自由场爆炸冲击波的传播, Cole<sup>[16]</sup> 通过大量试验标定了水下爆炸冲击波相似律的公式系数, 获得了不考虑水深影响的 TNT 炸药水下爆炸冲击波峰值压力计算公

式, Zamyshlyayev<sup>[17]</sup> 在其基础上将经验公式修正为

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

式中:  $P_m$  为冲击波峰值压力;  $R$  为爆距;  $W$  为装药质量;  $R_e$  为装药半径。

根据式(5)可计算出水中一定范围内的冲击波峰值压力, 即表 4 中的经验值。为获得水下爆炸冲击波传播演化规律, 文献 [14] 在爆炸水井中开展了水下爆炸冲击波试验, 获得了 78 g TNT 装药不同爆距  $Z$  处的冲击波峰值压力, 即表 4 中的试验值。基于爆炸水井试验, 利用 LS-DYNA 有限元软件对 78 g TNT 炸药水下爆炸过程进行仿真, 网格尺寸 0.25 cm, 一次项系数取值 0.06, 获得不同爆距处的冲击波峰压力, 即数值解。将试验值、数值解及经验值进行对比。

表 4 不同爆距处峰值压力对比  
Table 4 Comparison of peak pressure at different scaled blast distances MPa

| $P_m$ | $Z/(m/kg^{1/3})$ |       |       |       |
|-------|------------------|-------|-------|-------|
|       | 0.75             | 1.17  | 1.88  | 2.80  |
| 试验值   | 70.10            | 39.60 | 23.30 | 15.30 |
| 数值解   | 75.50            | 42.00 | 22.70 | 13.60 |
| 经验值   | 72.60            | 43.80 | 25.70 | 16.40 |

对比表 4 数据, 可以发现数值解与试验值最小误差仅 2.6%, 平均误差 6.9%; 与经验值最小误差 4%, 平均误差 9.2%。因此网格尺寸和一次项粘性系数取值合理时, 数值模型可获得较高的计算精度。经验值与试验值峰值压力平均误差 7.2%, 表明经验公式可以较为准确地预估水下爆炸冲击波峰值压力。因此, 在探究网格尺寸及人工粘性对数值计算精度的影响时, 仅比较数值解与经验值。

## 2 网格尺寸及人工粘性对 $P_m$ 的影响

在有限元计算中为了反映冲击波波阵面的强间断, 引入了人工粘性来光滑冲击波, 这使得数值计算峰值压力低于真实值。一次项人工粘性系数对冲击波峰值压力影响较大, 二次项人工粘性系数主要用于抑制冲击波衰减过程中的虚假振荡, 但对水中爆炸数值仿真计算中冲击波峰值影响较小。参阅文献 [8], 二次项人工粘性系数取定值

1.0。LS-DYNA 中人工粘性形式为

$$q = \begin{cases} \rho l (Q_1 l \varepsilon^2 - Q_2 C \varepsilon), & \varepsilon < 0 \\ 0, & \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为材料密度;  $Q_1$  为二次项人工粘性系数;  $Q_2$  为一次项人工粘性系数;  $l$  为特征长度;  $C$  为当地声速;  $\varepsilon$  为体积变化率。

在水下爆炸数值计算中, 网格密度和排列方式对计算结果影响很大, 过大的网格尺寸在计算过程中会忽略冲击波波阵面信息, 冲击波爬升至峰值所需时间变长; 而过小的网格尺寸对计算资源带来的压力也不可忽视。同时, 水域网格长宽比尽量接近于 1, 尤其是炸药附近的网格, 否则爆炸冲击波易出现失真<sup>[3]</sup>。在探究网格尺寸对数值计算结果的影响时, 引入与装药半径  $R_0$  和网格尺寸  $L_0$  相关的无因次量, 因此文中为研究网格尺寸对数值计算结果的影响<sup>[5, 7-8]</sup>, 其具体形式为

$$\lambda = \frac{R_0}{L_0} \quad (7)$$

为探究水下爆炸数值仿真中网格尺寸和  $Q_2$  对冲击波峰值压力的影响, 对 78 g TNT 水下自由场爆炸过程进行数值仿真计算。当  $Q_2 > 0.1$  时, 计算峰值压力误差较大<sup>[8]</sup>, 因此调整分别取  $Q_2 = 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08$  和 0.10。对于二维模型而言, 网格密度因子  $\lambda = 8$  时便满足大部分二维数值模型, 因此取  $\lambda$  分别取  $\lambda = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$  和 8, 共计算 64 个工况。为了从全局意义上分析网格尺寸和  $Q_2$  对  $P_m$  的影响, 引入平均误差, 定义为比例爆距 0.375~2.8 m/kg<sup>1/3</sup> 范围内选定观测点峰值压力相对于经验公式误差的平均值。

网格尺寸及  $Q_2$  对  $P_m$  结果如图 2~图 6 所示。

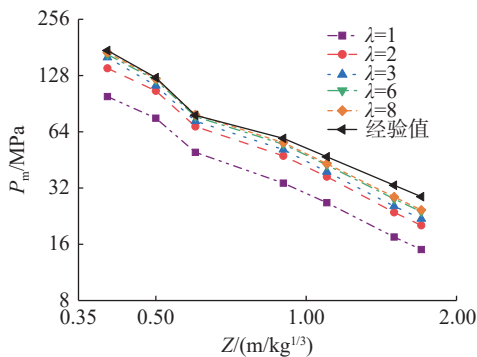


图 2  $Q_2=0.08$  时, 不同  $\lambda$  时  $P_m$  随比例爆距变化曲线  
Fig. 2 Variation of  $P_m$  with scaled blast distance for different  $\lambda$  at  $Q_2=0.08$

由图 2 和图 3 可知, 当  $\lambda$  较小时,  $P_m$  较低, 与经验公式值偏差较大, 随着  $\lambda$  的增加,  $P_m$  显著增大且近场峰值压力与经验值吻合较好。但随着  $\lambda$  增加,  $P_m$  趋于稳定, 不会随着  $\lambda$  的变化出现显著变化, 这表明随着网格密度的增加,  $P_m$  对网格的敏感性越来越低。与此同时, 网格尺寸对冲击波超压爬升

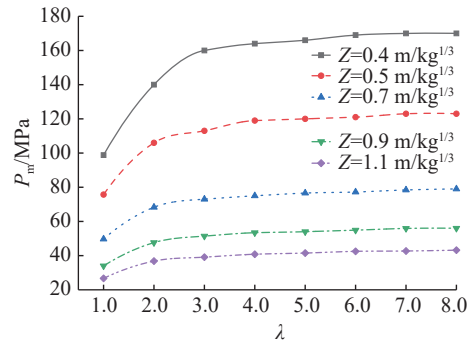


图 3  $Q_2=0.08$  时, 不同比例爆距处  $P_m$  随  $\lambda$  变化曲线  
Fig. 3 Variation of  $P_m$  with  $\lambda$  for different scaled blast distances at  $Q_2=0.08$

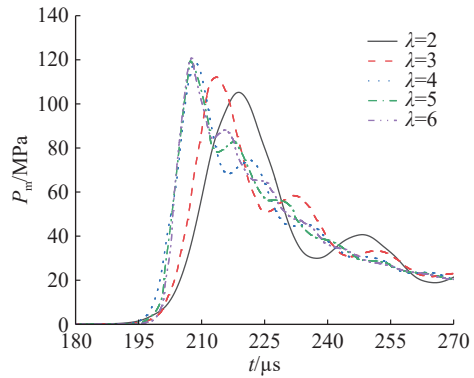


图 4  $\lambda$  对  $P_m$  上升速度影响  
Fig. 4 Effect of  $\lambda$  on the rate of increase of  $P_m$

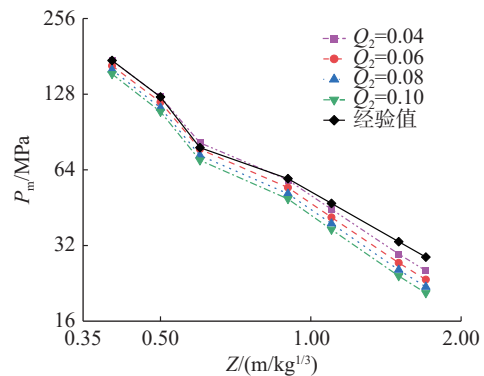


图 5  $\lambda=3$  时, 不同  $Q_2$  时  $P_m$  随比例爆距变化曲线  
Fig. 5 Variation of  $P_m$  with scaled blast distance for different  $Q_2$  at  $\lambda=3$

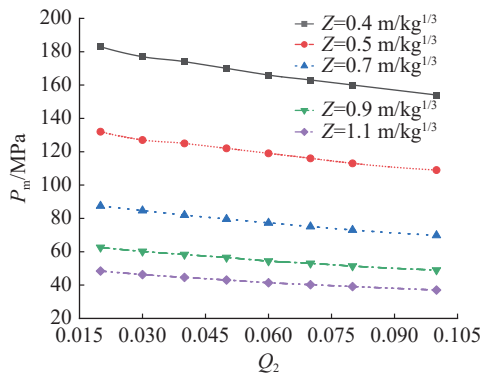


图 6  $\lambda=3$  时, 不同比例爆距处  $P_m$  随  $Q_2$  变化曲线  
Fig. 6 Variation of  $P_m$  with  $Q_2$  for different blast scaled distances at  $\lambda=3$

至峰值所需时间影响很大,  $\lambda$  越小, 冲击波超压爬升至峰值时间越长且峰值压力越低, 如图 4 所示。

由图 5 和图 6 所见, 随着  $Q_2$  逐渐变小,  $P_m$  逐渐增大, 且近场冲击波峰值压力受  $Q_2$  影响较大。由于  $Q_2$  取值范围较小, 不同比例爆距处  $P_m$  随  $Q_2$  的变化曲线与文献 [8] 中有所不同。在实际计算中发现, 当网格密度较大时, 过小的  $Q_2$  反而导致  $P_m$  数值解与经验值的偏差增大, 如表 5 所示。通过计算,  $Q_2=0.02$  时不同爆距处的平均误差为 11.2%, 而  $Q_2=0.06$  时平均误差仅 4.2%, 因此有必要探究  $\lambda$  和  $Q_2$  对峰值压力平均误差的影响。

表 5  $\lambda=6$  时, 不同比例爆距处冲击  $P_m$  对比  
Table 5 Different scaled blast distances peak pressure of shock waves at  $\lambda=6$

| 工况类型        | $Z/(m/kg^{-1/3})$ |         |        |        |        | MPa    |
|-------------|-------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
|             | 0.327             | 0.500   | 0.700  | 0.900  | 1.170  | 1.700  |
| $Q_2=0.020$ | 253.000           | 138.000 | 92.800 | 67.500 | 48.800 | 30.700 |
| $Q_2=0.060$ | 235.000           | 127.000 | 81.800 | 58.300 | 41.500 | 25.400 |
| 经验值         | 235.800           | 124.700 | 78.400 | 59.000 | 43.900 | 28.800 |

对比数值解和经验值在不同爆距处的冲击波峰值压力, 获得不同  $Q_2$  下峰值压力平均误差  $E_p$  随  $\lambda$  的变化关系, 如图 7 所示。整体来看, 随着  $\lambda$  的增大和  $Q_2$  的减小,  $E_p$  逐渐降低。但以  $Q_2=0.10$  为例, 随着  $\lambda$  的增大,  $E_p$  先减小后增大, 这是因为网格密度较大时, 过小的  $Q_2$  会加大伪振荡, 致使  $P_m$  数值解与经验的相对误差增大, 因此在数值计算中不能一味地减小网格尺寸和一次项系数。同时, 当  $\lambda=1$  时,  $E_p$  很大, 即使调整  $Q_2$  也未能

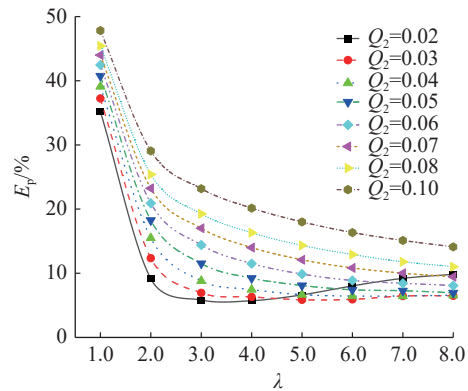


图 7 峰值压力平均误差  
Fig. 7 Average errors of peak pressure

使  $E_p$  满足工程精度。因此在水下爆炸数值计算中应首先确定  $\lambda$ , 同时调整  $Q_2$  方能得到精度较高的计算结果。

### 3 计算误差预估模型

为了便于应用, 实现在预定精度下快速确定网格尺寸和一次项系数, 需构建出关于  $\lambda$  和  $Q_2$  的误差  $E_p$  预估模型。考虑到实际工程需要, 误差应控制在 20% 以内。同时, 由前面分析可知, 较大的网格密度以及过小的一次项系数均可能导致计算误差增大。因此, 将误差预估模型的变量区间范围限定在  $0.03 \leq Q_2 \leq 0.10$  和  $3 \leq \lambda \leq 8$ , 则图 7 中的数据在该区间范围显示为图 8 中曲线。

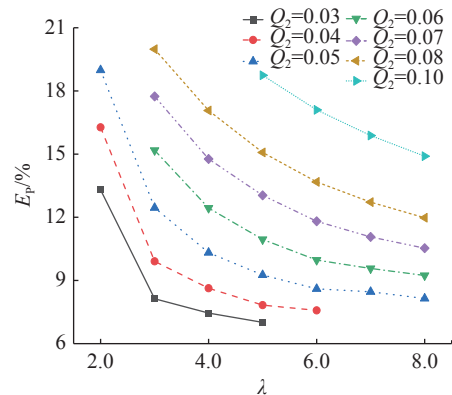


图 8 限定区间后峰值压力平均误差曲线  
Fig. 8 Average errors of peak pressure curves after limited interval

将图 8 中的  $E_p$  和  $\lambda$  取对数得到  $\lg E_p$  和  $\lg \lambda$  的关系曲线如图 9 所示,  $k$  为斜率,  $b$  为截距。可以看到, 各曲线呈近似平行的线性关系, 因此可构造线性表达式为



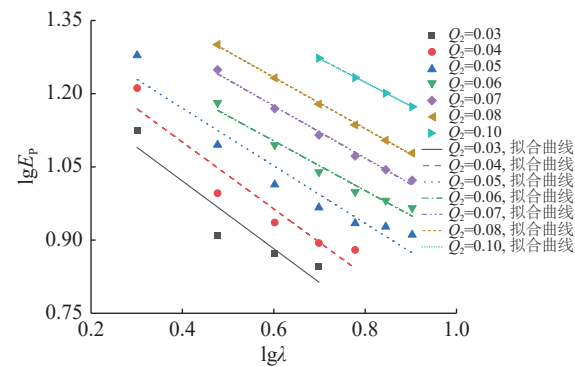


图 9  $\lg E_p$  和  $\lg \lambda$  关系曲线

Fig. 9 The relationship curves between  $\lg E_p$  and  $\lg \lambda$

表 6  $\lg E_p$  关于  $\lg \lambda$  的拟合参数

Table 6 Fitting parameters for  $\lambda$  in  $E_p$

| 拟合参数  | $Q_2$    |          |          |          |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|       | 0.030 0  | 0.040 0  | 0.050 0  | 0.060 0  | 0.070 0  | 0.1 000  |
| $k$   | -0.690 0 | -0.790 0 | -0.590 0 | -0.510 0 | -0.530 0 | -0.490 0 |
| $b$   | 1.300 0  | 1.420 0  | 1.410 0  | 1.410 0  | 1.500 0  | 1.610 0  |
| $R_1$ | 0.940 4  | 0.967 6  | 0.963 3  | 0.985 8  | 0.996 1  | 0.999 9  |
| $R_2$ | 0.884 3  | 0.936 3  | 0.927 9  | 0.971 7  | 0.992 2  | 0.999 8  |

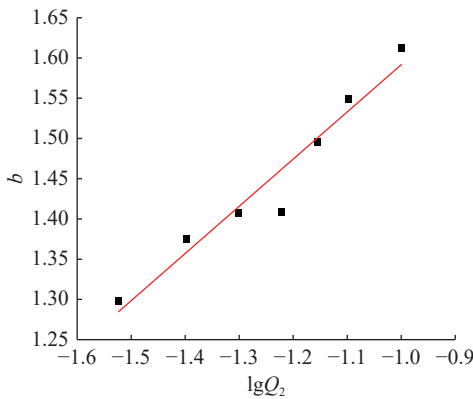


图 10 截距-对数粘性系数线性拟合

Fig. 10 Linear fitting of intercept-logarithm viscosity coefficient

利用式(9)对图 10 中数据进行线性拟合, 结果如表 7 所示, 可以看出数据具有较高拟合精度。将式(9)代入式(8), 整理得

$$E_p = 151.36 \times \left( \frac{Q_2^{1.895}}{\lambda} \right)^{0.38} \tag{10}$$

表 7  $b$  关于  $Q_2$  的拟合参数

Table 7 Fitting parameters for  $b$  in  $Q_2$

| $k_1$   | $b_1$   | $R$     | $R_2$   |
|---------|---------|---------|---------|
| 0.586 0 | 2.180 0 | 0.971 6 | 0.944 1 |

$$\lg E_p = k \lg \lambda + b \tag{8}$$

利用式(8)对图 9 中的数据进行拟合得到拟合系数如表 6 所示。其中, 复合相关系数  $R_1$  均值 0.979, 决定系数  $R_2$  均值 0.959, 可见数据线性拟合精度较高。表 6 中各曲线斜率  $k$  值比较接近, 为了得到归一化的误差预估模型, 可以取  $k$  值平均值, 并且将截距  $b$  看作关于  $Q_2$  的函数。如图 10 所示为截距  $b$  与  $\lg Q_2$  的关系, 可以看到二者近似呈线性关系, 因此可构建线性关系式

$$b = k_1 \lg Q_2 + b_1 \tag{9}$$

从式(10)可以看到, 误差  $E_p$  是关于  $Q_2^{1.895}/\lambda$  的函数。利用图 8 中的数据绘制  $E_p$  与  $Q_2^{1.895}/\lambda$  的关系曲线如图 11 所示。可以看到,  $E_p$  与  $Q_2^{1.895}/\lambda$  近似呈线性关系。因此, 为了进一步提高误差预估模型的拟合精度, 对图 11 中数据重新进行线性拟合, 其中, 拟合模型的复合相关系数  $R=0.998$ , 决定系数  $R_2=0.996$ , 说明拟合精度较高, 则式(11)为最终得到的误差预估模型

$$E_p = 1\,413.57 \times \left( \frac{Q_2^{1.895}}{\lambda} \right)^{0.76} + 4.06 \tag{11}$$

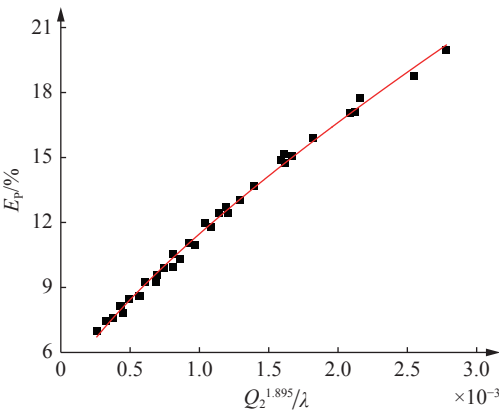


图 11 峰值压力平均误差拟合结果

Fig. 11 Fitting results of peak pressure average error

为验证误差预估模型具有较高的普适性,需要对不同药量和装药形状的炸药进行仿真计算,同时结合研究背景,对 0.2、5、500、1 500 和 5 000 kg TNT 柱形装药(长径比为 1)和球形装药水下爆炸进行计算。在距装药中心 0.327~2.8 m/kg<sup>1/3</sup> 比例爆距间设置 16 个观测点,取  $Q_2=0.06$ ,  $\lambda=6$ 。不同工况下的峰值压力平均误差及预估误差如表 8 所示。可以看到,预估误差与实际计算误差相近,因此误差预估模型对于不同装药量和装药形状 also 具有很高的适用性,有助于建立水下爆炸模型对整体计算精度和网格数量进行综合分析,为预定精度的仿真模型设计提供依据。

表 8 不同工况下峰值压力误差  
Table 8 Errors of peak pressure for different operating conditions

| 装药质量/kg | 装药形状 | 平均误差/% | 预估误差/% |
|---------|------|--------|--------|
| 0.2     | 柱形   | 9.75   | 10.36  |
| 0.2     | 球形   | 10.79  |        |
| 5.0     | 柱形   | 9.45   |        |
| 5.0     | 球形   | 10.45  |        |
| 50.0    | 柱形   | 10.83  |        |
| 50.0    | 球形   | 10.30  |        |
| 500.0   | 柱形   | 9.62   |        |
| 500.0   | 球形   | 10.18  |        |
| 1 500.0 | 柱形   | 9.57   |        |
| 1 500.0 | 球形   | 9.89   |        |
| 5 000.0 | 柱形   | 9.58   |        |
| 5 000.0 | 球形   | 9.76   |        |

4 结论

文中基于 LS-DYNA 有限元软件,分析了网格尺寸和一次项系数对中近场冲击波峰值压力和整体计算误差的影响,主要得到如下结论:

- 1) 在水下爆炸数值仿真中,近场冲击波峰值压力受一次项系数和网格尺寸影响较大,随  $\lambda$  的增大计算峰值压力对网格的敏感性降低,且网格密度较大时,过小的一次项系数会加大伪振荡,致使计算峰值压力与经验公式值的相对误差增大;
- 2) 通过研究网格尺寸及一次项人工粘性对冲击波峰值压力的影响,获得了 20% 范围内的平

均误差  $E_p$  与网格密度因子  $\lambda$  和一次项系数  $Q_2$  之间的关系,并进一步拟合,获得预定精度下快速确定网格尺寸和一次项人工粘性的预估模型为  $E_p = 1\,413.57 \times (Q_2^{1.895} / \lambda)^{0.76} + 4.06$ 。

3) 通过 0.2~5 000 kg 范围内的 TNT 柱形装药(长径比为 1)和球形装药的水下爆炸计算,验证了误差预估模型可适用于不同装药量的柱形(长径比为 1)和球形装药二维中近场范围内的水下爆炸计算问题。

参考文献:

[1] 蔡尚. 水下爆炸作用下舰船毁伤效能评估及水雷布阵策略优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

[2] 田影. 不同边界条件下近场水下爆炸载荷特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

[3] 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 Chunliang, Qin Jian, Liu Kezhong, et al. Research on UNDEX numerical simulation based on LS-DYNA [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2008, 28(3): 156-158.

[4] Huang H, Jiao J Q, Nie X J, et al. Numerical modeling of underwater explosion by one-dimensional ANSYS-AUTODYN[J]. Journal of Energetic Materials, 2011, 29(4): 292-325.

[5] Wang G, Wang Y, Lu W, et al. On the determination of the mesh size for numerical simulations of shock wave propagation in near field underwater explosion[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 1-9.

[6] 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): 102-114.

Hu Liangliang, Huang Ruiyuan, Li Shichao, et al. Shock wave simulation of underwater explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1): 102-114.

[7] 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 Sherong, Li Hongbi, Wang Gaohui, 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.

[8] 杨坤, 陈朗, 伍俊英, 等. 计算网格与人工粘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, 35(S2): 237-243.

Yang Kun, Chen Lang, Wu Junying, et al. The effects of computing grid and artificial viscosity coefficient on underwater explosion numerical simulation[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(S2): 237-243.

- [9] 闫秋实, 常松. 水下爆炸三维数值模拟特征参量敏感性分析[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(10): 1099-1108.  
Yan Qiushi, Chang Song. Underwater explosion 3D numerical simulation characteristic parameter sensitivity analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(10): 1099-1108.
- [10] 马腾, 王金相, 刘亮涛, 等. 不同长径比柱形装药水下爆炸冲击波演化规律[J]. 振动与冲击, 2022, 41(8): 149-157, 222.  
Ma Teng, Wang Jinxiang, Liu Liangtao, et al. Shock wave evolution of cylindrical charge with different slender ratios[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 149-157, 222.
- [11] 孟龙, 黄瑞源, 王金相, 等. 小当量梯恩梯水下爆炸气泡脉动的数值模拟[J]. 兵工学报, 2020, 41(S1): 64-71.  
Meng Long, Huang Ruiyuan, Wang Jinxiang, et al. Numerical simulation of bubble pulsation of small scaled TNT in underwater explosion[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(S1): 64-71.
- [12] Huang C, Liu M, Wang B, et al. Underwater explosion of slender explosives: Directional effects of shockwaves and structure responses[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 130(8): 266-280.
- [13] Wang J, Yang L, Xu Z, et al. Numerical simulation on underwater explosion in small-sized containers[J]. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 2016, 3(3): 151-156.
- [14] 高源. 炸药深水爆炸载荷研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.
- [15] 辛春亮. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [16] Cole R H. Underwater explosions[M]. New York: Dover Publications, 1965.
- [17] Zamyshlyayev B V, Yakovlev Y S. Dynamic loads in underwater explosion[R]. Washington, D. C: Naval Intelligence Support Center, 1973.

(责任编辑: 闫溶蔓)

## 《水下无人系统学报》相关文献导航

1. 王树山, 贾曦雨, 高源, 等. 水下爆炸动力学的起源、发展与展望. 2023, 31(1).
2. 郭锐, 俞旻晖. 水下爆炸声学效应研究现状与展望. 2022, 30(3).
3. 余俊, 初东阳, 王海坤, 等. 水下爆炸近自由面空化载荷特性分析. 2022, 30(3).
4. 张迪洲, 何镇宏, 何心怡, 等. 水下爆炸冲击波在圆柱壳结构表面绕射衰减分布. 2022, 30(3).
5. 刘奇奇, 刘亮涛, 王金相, 等. 冲击波及气泡载荷联合作用下变截面加筋圆柱壳动态响应. 2022, 30(3).
6. 孙远翔, 陈岩武. 水下爆炸载荷下水面舰艇双层结构的毁伤与防护研究进展. 2022, 30(3).
7. 唐正鹏, 李翔宇. 多次水下爆炸对船体梁累积毁伤试验研究. 2022, 30(3).
8. 王彦盛, 李伟兵, 于良. 爆炸载荷作用下夹持方板动态响应量纲分析. 2022, 30(3).
9. 盛振新, 刘建湖, 毛海斌, 等. 爆炸产物冲击带破口双层板结构内板壁压研究. 2022, 30(3).
10. 郑监, 卢芳云, 李翔宇, 等. 一种考虑初始弯矩的箱型梁水下爆炸试验方法. 2022, 30(3).
11. 徐维铮, 黄宇, 李业勋, 等. 管内小药量水下爆炸平面冲击波形成方法及其应用. 2022, 30(3).
12. 俞旻晖, 郭锐, 宋浦, 等. 含铝炸药水下两点爆炸冲击波超压特性研究. 2022, 30(3).
13. 胡宏伟, 王健, 卞云龙, 等. 带壳装药水中殉爆特性分析. 2022, 30(3).
14. 冯炜, 李恒, 刘海晓, 等. 基于夹层装药的水下 EFP 成型影响因素分析. 2022, 30(3).
15. 李海龙, 王博, 丁松, 等. 冲击波和侵彻体联合作用下聚脲涂层防护机理研究. 2022, 30(3).
16. 毛致远, 段超伟, 胡宏伟, 等. 水下爆炸威力试验与评价方法综述. 2022, 30(3).
17. 郭志荣, 陆文俊, 金晓宇. 鱼雷爆炸作用下潜艇鞭状运动响应仿真分析. 2021, 29(5).
18. 黄洪, 卢熹, 王健. 柱形装药水下爆炸近场冲击波数值仿真. 2021, 29(4).
19. 彭天一, 刘荣忠, 高科, 等. 一种多药包水下阵列爆炸威力场计算方法. 2020, 28(3).