

## 微型水下爆炸声源的数值模拟

耿立婷, 崔建功, 张国军, 张瑞敏

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:**针对传统换能器体积大、功耗高以及现有大尺度爆炸声源经验公式在微型化声源中出现尺度效应不匹配问题,本文基于小当量装药特性,通过药量-体积等效计算,设计了圆柱形树脂外壳。利用 ANSYS 平台建立了微型非金属爆炸声源数值模型,分析了装药量与声源级的定量关系。通过 400 m 标准基距下的收发合置实验,采用定深悬浮装置进行等深布置,实测数据与数值模拟结果的误差在 1~7 dB 范围内,验证了该微型爆炸声源设计方法的精确性和可靠性,为优化微型爆炸声源提供了有效技术支持。

**关键词:**非金属爆炸声源; 声源级; 季戊四醇四硝酸酯; 水下爆炸; 冲击波; 有限空间; ANSYS 平台; 数值模拟

**DOI:** 10.11990/jheu.202506012

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.u.20250624.1308.058>

**中图分类号:** O427.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1678-07

## Numerical simulation and experimental validation of miniature underwater explosive sound sources

GENG Liting, CUI Jianguo, ZHANG Guojun, ZHANG Ruimin

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, Zhongbei University, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** To address the undesirable large volume and high power consumption of traditional transducers and the mismatch of scale effects in existing empirical formulas for large-scale explosive sound sources in miniaturized sound sources, a cylindrical resin shell was developed by calculating the charge-volume equivalence, where the shell is characterized by a small equivalent charge. A numerical model of a miniature nonmetallic explosive sound source was established using the ANSYS platform, and the relationship between the charge and the sound source level was quantitatively analyzed. Using the 400 m standard base distance in the combined transceiver experiments and the fixed depth suspension device for isobath arrangement, the error in the measured data versus the numerical simulation results was in the range of 1-7 dB, verifying the accuracy and reliability of the design method for microexplosive sound sources. This study provides effective technical support for optimizing microexplosive sound sources.

**Keywords:** non-metallic explosive sound sources; source level; pentaerythritol tetranitrate; underwater explosion; shock wave; limited space; the platform of ANSYS; numerical simulation

随着水下探测技术在军事侦察与海洋监测等领域的深化应用,高能瞬态声源成为水下目标主动探测的核心技术手段<sup>[1]</sup>。爆炸声源凭借其高声源级、宽频带响应及瞬时能量释放特性,在声呐浮标系统中展现出显著优势。在爆炸声源的设计和应用中,装药量和约束条件是 2 个重要的设计指标,增大装药量可以提高声源级的探测能力<sup>[2]</sup>。

圆柱外壳是爆炸声源最常用的结构形式之一<sup>[3]</sup>,外壳约束条件的尺寸均为厘米级或米级。水下爆炸实验方面的研究主要集中在爆炸水池内进行,颜事龙等<sup>[4]</sup>在爆炸水池内进行了球形药包和柱状药包的冲击波测试研究。张阿漫等<sup>[5]</sup>探究双层圆柱壳结构在水下爆炸载荷下的响应特性,研究周期和距爆炸中心点(爆源)距离对双层圆柱壳结构的影响规律,分析该结构的毁伤特性。数值模拟方面,张社荣等<sup>[6-7]</sup>基于 AUTODYN 软件提出确定网格尺寸方法,并通过不同当量炸药爆炸模拟与试验结果对比验证了该方法的可靠性。在炸药声

收稿日期: 2025-06-06. 网络出版日期: 2025-06-24.  
基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62274149, 52175553).  
作者简介: 耿立婷, 女, 硕士研究生;  
崔建功, 男, 硕士生导师, 副教授.  
通信作者: 崔建功, E-mail: jgcu@nuc.edu.cn.

源特性研究领域,Michael<sup>[8]</sup>研究了不同炸药量和炸药密度与水下爆炸压力变化的关系。海上试验系统分析了爆炸声源的声学特性<sup>[9-11]</sup>,Weston<sup>[12]</sup>建立了不同含能材料的爆炸频谱归一化方法,提出以 0.45 kg 炸药为基准的等效谱理论。传统基于大尺度爆炸声源的经验公式在微型声源设计中表现出明显的局限性。

本文基于 ANSYS 平台建立了有限条件下的微型非金属爆炸声源数值模型,通过数值仿真与理论分析,建立在有限空间中的非金属爆炸声源的装药量与声源级之间的数学模型并进行了实验验证。聚焦毫米级非金属爆炸声源的有限空间效应,突破了传统大尺度经验公式的尺度效应限制。本文通过药量-体积等效计算与 3-D 打印技术结合,构建了微型树脂约束壳体与装药的耦合模型。

## 1 水下爆炸冲击波传播的数值模拟

基于 Cole 建立的冲击波传播理论框架,不同爆距范围内压力峰值  $P_m$  为<sup>[13]</sup>:

$$P_m = \begin{cases} 44.1 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.5}, & 6 \leq \frac{R}{r} < 12 \\ 52.4 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13}, & 12 \leq \frac{R}{r} < 240 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_m$ 为冲击波峰值超压,MPa; $I$ 为冲击波冲量,MPa·ms; $W$ 为季戊四醇四硝酸酯(pentaerythritol tetranitrate,PETN)炸药质量,kg; $R$ 为爆心到测点距离,m; $r$ 为 PETN 炸药半径,m。

将现有微型非金属爆炸声源参数代入式(1)发现,实验的测量条件和所用的传感器导致传统水下经验公式在微型化非金属爆炸声源实验中存在显著的尺寸效应。因此可通过 ANSYS 建立微型爆炸声源仿真模型,模拟复杂环境下的声波传播特性。

### 1.1 材料模型状态方程

本工作基于 SOLIDWORKS 软件建立了以 PETN 为爆炸声源的结构模型。如图 1 所示,0.45 g PETN 爆炸声源模型的几何参数设置为:内径 8 mm,外径 11 mm,环氧树脂壳体为 3 mm。为探究不同装药量的影响,同时建立了 1 g 和 2 g PETN 的对比模型,其几何尺寸分别设置为:1 g 装药量模型内径 16 mm、外径 22 mm、环氧树脂壳体 6 mm;2 g 装药量模型内径 20 mm、外径 26 mm、环氧树脂壳体 6 mm。所有模型均采用轴对称结构设计,通过参数化建模方法确保几何尺寸的精确控制,为后续爆炸声场的数值模拟提供准确的几何基础。

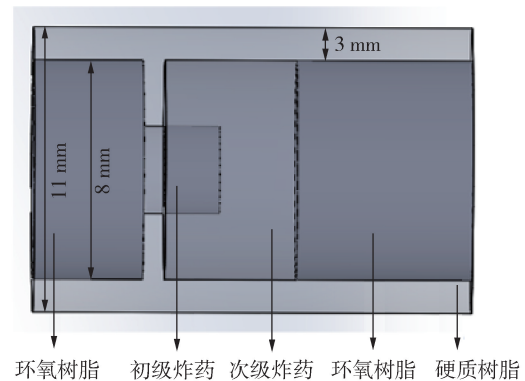


图 1 0.45 g PETN 结构模型

Fig. 1 0.45 g PETN structural model

在数值模拟中,涉及水、PETN 炸药和环氧树脂 3 种物质之间的计算,选择合适的状态方程可以使数值模拟结果更符合实际。本文将对这 3 种材料方程的选取进行分析。

#### 1.1.1 PETN 炸药的状态方程

PETN 炸药的爆轰产物可用 JWL 状态方程描述<sup>[14]</sup>,预测炸药爆炸后的压力、能量释放和冲击波传播,JWL 方程的表达式为:

$$P_{CJ} = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E}{\bar{V}} \quad (2)$$

式中: $P_{CJ}$ 为爆轰产物超压,MPa; $\bar{V}$ 为爆轰产物的相对体积,取其为 1,  $m^3$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为状态方程参数,取其分别为  $6.170 5 \times 10^5$  MPa、 $1.692 6 \times 10^4$  MPa、4.4、1.2、0.25。JWL 方程含 3 项,根据研究表明,第 1 项控制高压频段,对应爆轰波阵面的非线性冲击波,声能集中于高频;第 2 项控制中压频段,其反映膨胀过程的线性声波衰减,能量分布以中频为主;前 2 项对低压段的作用较小,而第 3 项对低压段的作用较为明显,适用于远场能量传播。AUTODYN 的材料库中有 4 种 PETN 炸药 JWL 状态方程参数,根据多次数值模拟计算结果与试验数据对比,采用 PETN-1.77 材料模型,得到的模拟结果更符合实际。

#### 1.1.2 环氧树脂的状态方程

在本文中,通过 Mie-Grüneisen 状态方程表征环氧树脂的材料响应,其状态方程表达式<sup>[15]</sup>为:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: $P$ 为压力,MPa; $V$ 为相对体积,取其为 1,  $m^3$ ;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为材料常数; $E_0$  为单位体积的初始内能,相关参数如表 1 所示。

表 1 环氧树脂 Mie-Grüneisen 状态方程参数  
Table 1 Epoxy resin Mie-Grüneisen Parameters of the equation of state

A/MPa	B/MPa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω	E <sub>0</sub> /(J/m <sup>3</sup> )
4.72×10 <sup>3</sup>	0.639×10 <sup>2</sup>	16.53	3.89	0.27	3.15×10 <sup>6</sup>

1.1.3 水的状态方程

常用水的 2 种状态方程分别为冲击状态方程和高压状态方程。由于水的冲击状态方程并不能准确反映爆炸冲击波在水中传播的过程<sup>[16]</sup>, 本文选用高压状态方程对爆炸声源进行模拟仿真。一般对凝聚态的液体材料进行爆炸冲击高压研究时, 通常采用固体形式的高压状态方程。经常使用的有 Mie-Grüneisen 状态方程(式 4)、Hugoniot 方程等<sup>[17]</sup>。本文选用 Mie-Grüneisen 高压状态方程<sup>[18]</sup>为:

$$P = \begin{cases} A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 E_M, & \mu \geq 0 \\ T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 E_M, & \mu < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 为压强量纲常数; B<sub>0</sub>、B<sub>1</sub> 为无量纲常数; E<sub>M</sub> 为单位质量内能增量:

$$E_M = \rho gh + P_0/\rho B_0 \quad (5)$$

式中: ρ 为水的密度; g 为重力加速度; h 为水域深度, 有限水域中 h 值取为 d/2; P<sub>0</sub> 为大气压。在冲击波模型中, 质点速度的正负由波传播方向和边界条件决定: 当波正向传播时, 质点速度不小于 0; 当存在反射波或逆流波时, 质点速度小于 0。由于水几乎不能承受由负压引起的拉伸, 因此在数值模拟过程中, 水的介质超压设为 0, 其高压状态方程参数如表 2 所示。根据计算经验, 采用水的高压状态方程来对有关水中爆炸的数值计算, 所得到的计算结果与经验值和试验数据更为接近。

表 2 水高压状态方程参数  
Table 2 Parameters of the water high-pressure equation of state

A <sub>1</sub> /MPa	A <sub>2</sub> /MPa	A <sub>3</sub> /MPa	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> /MPa	T <sub>2</sub> /MPa	ρ/(kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>M</sub> /(J/kg)
2.2×10 <sup>3</sup>	9.54×10 <sup>3</sup>	1.457×10 <sup>4</sup>	0.28	0.28	2.2×10 <sup>3</sup>	0	1 000	361.875

综上, 本文通过采用 JWL 状态方程描述 PETN 炸药的爆轰过程, 利用 Mie-Grüneisen 状态方程表征环氧树脂的材料响应, 并通过高压状态方程模拟水的力学行为。上述状态方程的合理设定与参数选取为后续爆炸冲击波在多介质耦合环境中的传播仿真奠定了理论基础。

1.2 数值模型仿真结果

为确保数值模拟方法的准确性, 本文基于 AUTODYN 仿真平台建立了二维轴对称计算模型(如图 2 所示)。采用多物质欧拉算法对水下爆炸声源产生的压力场进行数值模拟, 并将仿真结果与不同工况下的现场实测数据进行对比分析, 以评估数值模拟的有效性。该模型不仅完整考虑了爆炸产物的状态方程, 还充分考虑了水下爆炸过程中的流体力学特性, 可为后续水下爆炸效应研究及工程应用提供可靠的数值仿真基础。

模型构建时, 选取 0.45、1.2 g 的 PETN 分别作为爆炸声源, 按 2.1 节中所述模型设计, 以爆炸声源所在位置为中心, 设置了一个尺寸为 5 m×10 m 的水域(如图 2 点框区域所示), 边界条件设置为流出所有物质, 保证水体和爆炸产生的固体颗粒可以自由流出。较为密集的斜框区域为 PETN 炸药, 斜框区域为爆炸声源的硬质树脂约束壳体。整个水域被划分为 501 501 个网格, 并根据计算需求从爆炸源向外逐渐增大网格密度。采用 JWL 状态方程描述 PETN 的水下爆炸行为, 水域和树脂壳体则使用高压状态方程。

在模拟中, 以爆炸声源为中心, 每隔 1 m 设置一个观测点(如图 2 所示), 用于测量压力值以表征声压。结果表明, 爆炸能量以球面形式向外扩散(如图 3 所示), 距离相等的观测点的声压几乎相同。

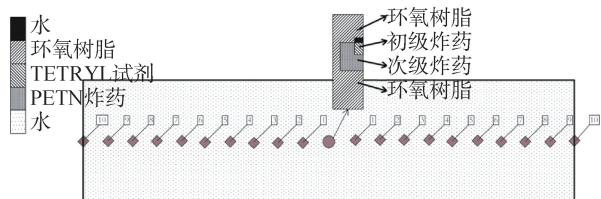
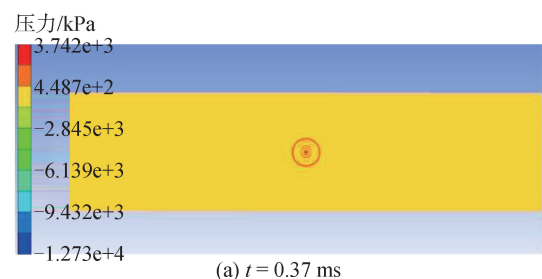


图 2 爆炸声源二维轴对称模型

Fig. 2 Two-dimensional axisymmetric modeling of explosion sound sources



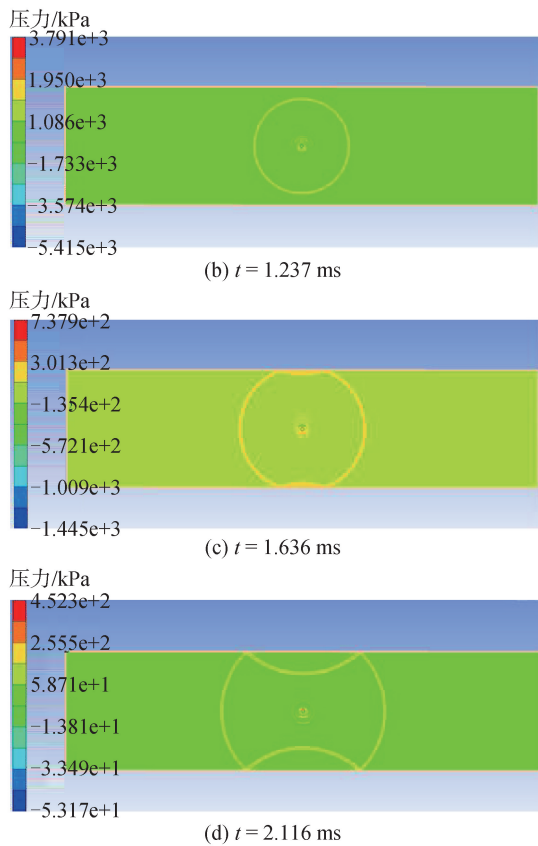


图 3 不同时刻水域压力分布

Fig. 3 Pressure distribution in water at different moments

0.45 g PETN 炸药在  $5\text{ m} \times 10\text{ m}$  的自由场中爆炸,设置边界条件为 Flow out-All equal (流出所有物质),图 4 为不同距离处各测点的冲击波峰值超压的时域图。

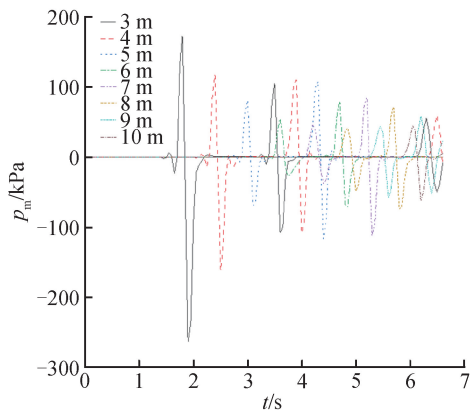


图 4 0.45 g 压力时域图

Fig. 4 0.45 g pressure time domain graph

图 5 所示为 3 种不同药量的曲线图,从图中可以看出,在 3 m 处,2 g PETN 的峰值压力  $P_{\text{peak}}$  为 379.63 kPa,1 g PETN 的峰值压力  $P_{\text{peak}}$  为 268.47 kPa,0.45 g PETN 的峰值压力为 164.28 kPa,随着药量增大冲击波峰值压力也会增大,但冲击波峰值压力随爆距的增大而降低;当冲击波传到测点处时,压力在瞬时达到峰值,随后随着时间的推移,冲击波超压呈指数型衰减并逐渐趋近于零,但不会降为零。

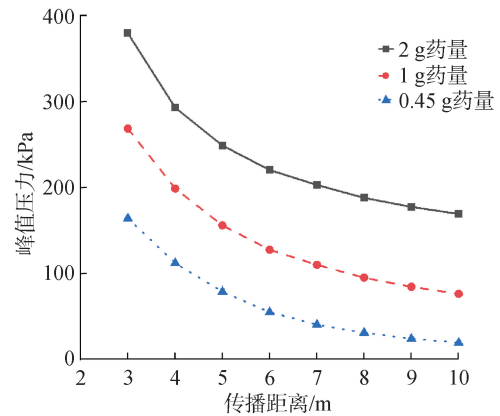


图 5 不同药量在不同位置处爆炸冲击波峰值压力对比  
Fig. 5 Comparison of peak pressure of explosive shock wave at different locations with different dosages

根据图 5 距声源不同位置处爆炸冲击波峰值压力对比拟合出声源在 1 m 处的压力峰值,声源级为<sup>[19]</sup>:

$$S_L = 20\lg P_{\text{peak}} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{peak}}$  为峰值压力;  $S_L$  为声源级。式 (6) 中  $20\lg P_{\text{peak}}$  可将  $10^6$  动态范围压缩为 120 dB 的线性标度,便于声呐浮标信号处理。可将乘法运算转换为加减法,显著简化动态范围压缩与系统级联计算。计算结果显示: 0.45 g PETN 的峰值声源级为 233.9 dB; 1 g PETN 的峰值声源级为 238.1 dB; 2 g PETN 的峰值声源级为 241.1 dB。

## 2 室外实验验证

实验采用收发合置的测试方法,将经过灵敏度标定 ( $-181\text{ dB} @ 1\text{ kHz}$ ) 的水听器 (型号: BK 8104) 固定于安静开阔水域作为接收装置。测试过程中,依次投放 0.45 g、1 g 和 2 g 3 种不同当量的 PETN 爆炸声源,并保持爆炸声源与水听器之间的水平距离恒定为 400 m。该实验方案可有效获取不同装药量条件下的水下爆炸声信号特征,为后续信号分析提供可靠的实验数据基础。

### 2.1 传爆结构与含能材料选取

爆炸声源采用二级传爆方式,初级炸药选用点火器装 30 mg 具有较高感度的斯蒂芬酸铅,能够在微弱的刺激下迅速做出反应,从而保障起爆的可靠性。次级炸药分别选用 0.45 g、1 g 和 2 g PETN 装入爆炸声源壳中。PETN 不吸湿,不溶于水,具有良好的爆轰感度,传爆性能好,适合作为水下爆炸声源。

### 2.2 爆炸声源发声系统设计

非金属爆炸声源封装流程及实物图如图 6 所示。使用 2 mm 的硬质树脂约束炸药,上方留有引燃主炸药的点火器孔,上下底部由环氧树脂胶封。针对小型爆炸声源在水下 10 m 深度难以稳定定位的问题,研制了黄铜材质的配重爆炸舱。该爆炸舱创新性地设

计了 4 个标准化槽位,可依次容纳并触发 4 枚爆炸声源,既保证了装置的水下稳定性,又实现了多声源的序列化精确引爆,显著提高了实验数据的准确性和可重复性。爆炸舱整体结构设计如图 7 所示。

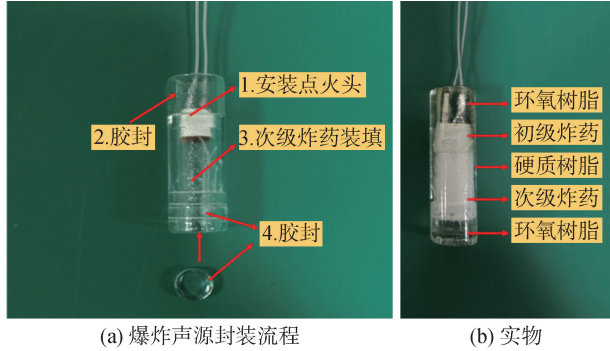


图 6 爆炸声源封装流程及实物

Fig. 6 Explosive sound source encapsulation process and physical diagram

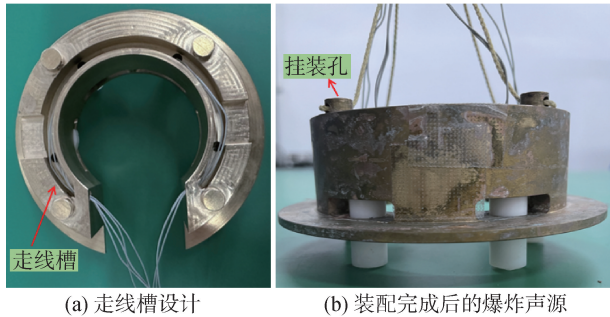


图 7 爆炸舱整体结构

Fig. 7 Overall structure of the blast chamber

### 2.3 不同药量爆炸声源对比实验

为了验证数值模拟仿真的可靠性,选取了如图 8(a)所示的实验环境,并开展了室外水下爆炸测试。实验将配置的 3 种不同药量的爆炸声源分别进行 4 次独立爆炸实验,实验的具体布放方式如图 8(b)所示,每次引爆后预留充分的时间间隔(30 s),确保水体环境稳定,避免爆炸信号相互叠加。

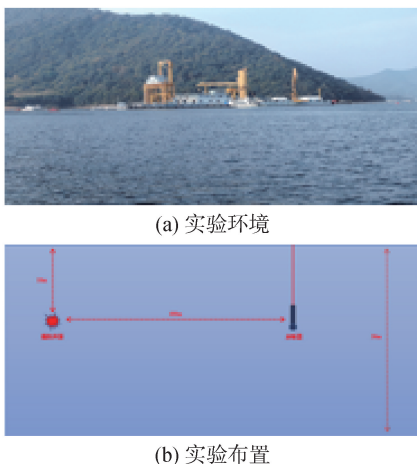


图 8 实验环境及实验布置

Fig. 8 Experimental environment and experimental setup

本文采用 BK 水听器与收发合置爆炸声源构建水下声学探测系统,其中爆炸声源作为主动发射端,BK 水听器作为接收装置同步采集水下爆炸声信号。将水听器接收信号实时传输至上位机监测平台,基于 LabVIEW 开发环境实现了爆炸声波幅值特性与时延参数的同步解析与可视化显示,形成完整的水下爆炸声信号时域分析系统。实验采集的时域图如图 9 所示,其中包含直达波、水面及水底反射波,以及气泡脉动信号。只取冲击波部分的直达波,利用式(6)计算声源级<sup>[20]</sup>,实验结果如表 3 所示。

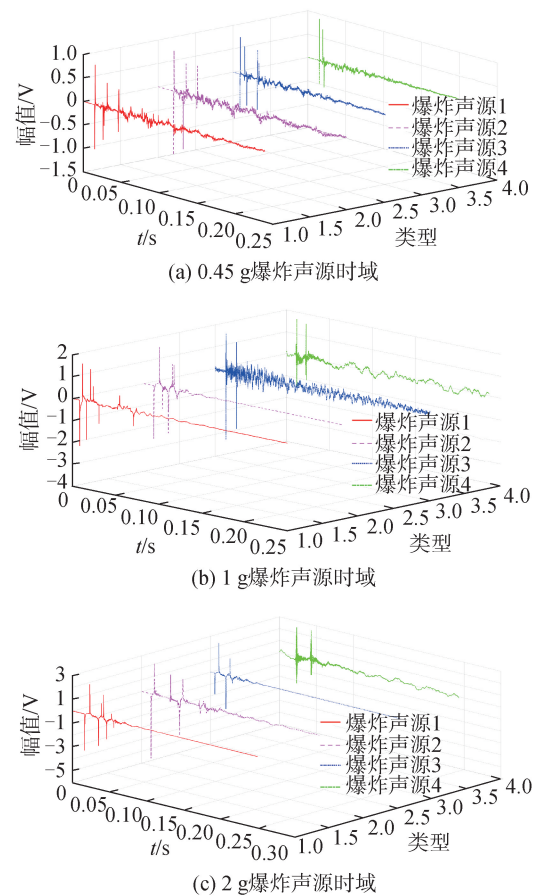


图 9 3 种爆炸声源时域

Fig. 9 Time-domain diagrams of three explosive sound sources

表 3 3 类爆炸声源的峰值声源级

Table 3 Source levels for three types of explosive sound sources

药量/ g	爆炸 1	爆炸 2	爆炸 3	爆炸 4	平均 值	仿真 值
0.45	226.0	226.7	227.5	228.1	227.1	233.9
1	234.3	235.1	234.9	235.7	235.0	238.1
2	239.2	239.5	240.4	240.7	239.5	241.1

在不同药量条件下,将实测的峰值平均声源级与数值模拟的峰值声源级进行对比,从表 3 中可以看出,各药量对应的爆炸声源的声源级与仿真模拟计算得到的声源级误差在 1% 以内,两者吻合较好,验证了仿真模型的正确性。

$$S_L = 20 \lg U_e - M + 20 \lg d \quad (7)$$

式中:  $U_e$  为输出电压有效值, V;  $M$  为水听器灵敏度,参考值  $0 \text{ dB} = 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ ;  $d$  为爆炸声源与水听器之间的距离, m。

### 3 结论

1) 基于 ANSYS 平台的数值仿真结果显示, 0.45 g 的 PETN 峰值声源级为 233.9 dB; 1 g 的 PETN 峰值声源级为 238.1 dB; 2 g 的 PETN 峰值声源级为 241.1 dB。微型非金属爆炸声源的数值模拟与实测数据相比, 峰值声源级的误差在 1~7 dB, 本文仿真模型可靠。

2) 本文为优化微型声呐浮标的爆炸声源设计提供了有效方法, 克服了传统经验公式在紧凑结构中的适用性局限。

3) 本文为微型爆炸声源的设计与优化提供了坚实的基础, 并为水下声学探测系统的发展提供了技术途径。

未来研究可以进一步探索不同装药材料、结构参数及环境因素对声源特性的影响, 提升声呐浮标的探测性能与可靠性。该技术在水下主动探测、海洋资源勘探、军事反潜作战及水下通信等领域具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 阮雨, 于福临, 于利民, 等. 水下爆炸载荷作用下加筋双层圆柱壳结构优化数值模拟[J]. 山东交通学院学报, 2024, 32(4): 143-149.  
RUAN Yu, YU Fulin, YU Limin, et al. Numerical simulation of optimization of reinforced double-layer cylindrical shell structure under underwater explosion loading [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(4): 143-149.
- [2] 李成龙. 高声压微爆炸剂设计及声辐射特征研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
LI Chenglong. Design of high sound pressure micro-explosive agent and study on acoustic radiation characteristics [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [3] 陈虎, 黄威, 李钊, 等. 新型双层圆柱壳结构水下抗冲击性能研究[C]//中国力学大会-2021+1 论文集. 西安, 2022: 707-717.
- [4] 杨树鑫, 张牲赫, 王龙侃, 等. 聚能装药和爆破装药对加筋平板毁伤数值模拟对比研究[C]//第十三届全国流体力学学术会议摘要集(下). 哈尔滨, 2024: 324.
- [5] 闫秋实, 张志杰, 王丕光, 等. 水下爆炸荷载作用下圆柱结构反射压力解析计算方法研究[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 247-256.  
YAN Qiushi, ZHANG Zhijie, WANG Piguang, et al. Research on analytical method of circular cylindrical scattered wave pressure subjected to underwater explosion [J]. Engineering mechanics, 2022, 39(7): 247-256.
- [6] HUANGHUANGHAO-XIANG@163.COM, JIE, XIN, et al. Numerical modeling of underwater explosion by one-dimensional ANSYS-AUTODYN [J]. Journal of energetic materials, 2011, 29(4): 292-325.
- [7] 王伟良, 张志强. 基于 ANSYS 的舰船结构冲击响应特性分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(4): 441-444.  
WANG Weiliang, ZHANG Zhiqiang. Analysis of ship-structure shock response based on ANSYS [J]. Journal of naval aeronautical and astronautical university, 2011, 26(4): 441-444.
- [8] KAN Runzhe, NIE Jianxin, LIU Zheng, et al. Non-ideal explosive underwater explosion shockwave model [J]. Physics of fluids, 2023, 35(8): 087121.
- [9] 裴善报, 刘荣忠, 郭锐. 水下连续爆炸声学特性分析[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(2): 144-148.  
PEI Shanbao, LIU Rongzhong, GUO Rui. Analysis of acoustic characteristics of sequential underwater explosion [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015, 39(2): 144-148.
- [10] 安世亚太. ANSYS AUTODYN 在水下爆炸模拟中的应用[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2005(7): 45-47.  
ANSYS-CHINA. Application of ANSYS AUTODYN in underwater explosion simulation [J]. CAD/CAM and manufacturing informatization, 2005(7): 45-47.
- [11] 郭锐, 俞晷晖. 水下爆炸声学效应研究现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(3): 266-282.  
GUO Rui, YU Yanghui. Progress and prospect of the acoustic effects of underwater explosions [J]. Journal of unmanned undersea systems, 2022, 30(3): 266-282.
- [12] 沈学华. 含能材料水下爆炸的混响效应[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.  
SHEN Xuehua. Reverberation effect of underwater explosion of energetic materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [13] 董晨懿, 陈梦英, 许伟杰, 等. 一种改进的水下爆炸冲击波信号修正方法[J]. 声学技术, 2022, 41(3): 376-381.  
DONG Chenyi, CHEN Mengying, XU Weijie, et al. An improved method for shock wave signal correction of underwater explosion [J]. Technical acoustics, 2022, 41(3): 376-381.
- [14] KUBOTA S, SABURI T, OGATA Y, et al. Numerical simulations of detonation phenomena in PETN by system-

- atic equation of state for detonation products[J]. Science and technology of energetic materials, 2010, 71(1-2): 44-50.
- [15] SZELUGA U, KURZEJA L, GALINA H. Dynamic mechanical properties of epoxy/novolac system modified with reactive liquid rubber and carbon filler[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2008, 92(3): 813-820.
- [16] 刘盛. 给排水管道中爆炸冲击波的传播规律[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
LIU Sheng. Propagation law of explosion shock wave in water supply and drainage pipeline[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [17] KOLI S, CHELLAPANDI P, BHASKARA R L, et al. Study on JWL equation of state for the numerical simulation of near-field and far-field effects in underwater explosion scenario[J]. Engineering science and technology, an international journal, 2020, 23(4): 758-768.
- [18] SHURSHALOV L V. On a modification of the two-term equation of state[J]. Fluid dynamics, 2020, 55(6): 751-759.
- [19] 刘清宇, 马树青, 杨华. 爆炸声源声源级数据分析方法[J]. 声学及电子工程, 2014(4): 1-4.  
LIU Qingyu, MA Shuqing, YANG Hua. Analysis method of sound source level data of explosion source[J]. Acoustics and electronics engineering, 2014(4): 1-4.
- [20] LI Qihu. Digital sonar design in underwater acoustics[M]. Springer, Berlin, Heidelberg: 2024:160-180.

### 本文引用格式:

- 耿立婷, 崔建功, 张国军, 等. 微型水下爆炸声源的数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1678-1684.  
GENG Liting, CUI Jiangong, ZHANG Guojun, et al. Numerical simulation and experimental validation of miniature underwater explosive sound sources[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1678-1684.

### (上接第 1643 页)

- [15] 李振, 张国军, 薛晨阳. 新型三维 MEMS 矢量水听器的设计[J]. 传感技术学报, 2013, 26(7): 950-954.  
LI Zhen, ZHANG Guojun, XUE Chenyang. Design of a novel three-dimensional vector hydrophone based on MEMS[J]. Chinese journal of sensors and actuators, 2013, 26(7): 950-954.
- [16] 方尔正, 洪连进, 杨德森. MEMS 型水听器的自噪声分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(3): 285-288.  
FANG Erzhen, HONG Lianjin, YANG Desen. Self noise analysis of MEMS hydrophones[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(3): 285-288.
- [17] PRZYBYLA R J, SHELTON S E, GUEDES A, et al. In-air rangefinding with an AlN piezoelectric micromachined ultrasound transducer[J]. IEEE sensors journal, 2011, 11(11): 2690-2697.
- [18] XU Liang, ZHANG Haigang, ZHANG Minghui. Training a deep operator network as a surrogate solver for two-dimensional parabolic-equation models[J]. Journal of the acoustical society of america, 2023, 154(5): 3276-3284.
- [19] 陈丽洁, 范茂军, 侯占民, 等. 压阻式加速度计的阻尼分析[J]. 传感器技术, 1999, 18(2): 15-17.  
CHEN Lijie, FAN Maojun, HOU Zhanmin, et al. Damping analysis of piezoresistive accelerometer[J]. Transducer and microsystem technologies, 1999, 18(2): 15-17.
- [20] WYGANTI O, KUPNIK M, KHURI-YAKUB B T. Analytically calculating membrane displacement and the equivalent circuit model of a circular CMUT cell[C]// 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. Piscataway, NJ, 2008: 2111-2114.

### 本文引用格式:

- 朴胜春, 雷亚辉, 张强, 等. 压电微机电系统水下特征信息检测传感微系统[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1635-1643, 1684.  
PIAO Shengchun, LEI Yahui, ZHANG Qiang, et al. Piezoelectric micro-electromechanical systems sensing microsystem for underwater feature information detection[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1635-1643, 1684.