

文章编号: 1000-5773(2002)03-0199-05

# 水下爆炸特性的一维球对称数值研究<sup>\*</sup>

梁龙河, 曹菊珍, 王元书

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 应用数值模拟方法对水下爆炸产生的诸如气泡脉动规律、脉动周期、水中冲击波压力的变化等特性进行了研究。给出了不同装药水下爆炸产生的气泡半径脉动的一些规律、脉动周期变化规律、气泡与水交界面处的压力曲线、爆炸产生的水中冲击波压力和速度的变化结果。

**关键词:** 水下爆炸; 气泡脉动; 脉动周期; 水中冲击波

**中图分类号:** O383<sup>+</sup>.1      **文献标识码:** A

## 1 引 言

水下爆炸是属于极其复杂且研究得很不完善的学科之一。这种爆炸虽然很早以前就在海战中发挥作用,但在理论研究方面开始得很晚。水下爆炸不仅在军事上十分重要,而且对民用工业也是很有意义的。比如挖凿河道、破暗礁开航道以及爆炸成型等。海战中,破坏舰船与潜艇战斗性能的主要手段是水下爆炸,要加强舰船、潜艇的作战及防护性能,必须充分了解水下爆炸产生的特性。在水下爆炸研究领域,国外的研究人员众多,取得的成果也较多,研究方向广泛;而国内该领域的工作可认为是刚刚起步,研究人员很少,取得的成果相对少得多,且现有的工作以理论研究、解析粗估和实验研究为主,数值模拟方面的研究工作则相对较少。我们开发了一个考虑了热传导的综合拉氏一维不定常弹塑性流体力学计算程序(SINL 程序),并应用该程序对水下爆炸的某些特性,如水下爆炸产生的气泡脉动规律、脉动周期、水中冲击波压力的变化等进行了较详细的数值模拟研究。并将研究结果与解析估算方法<sup>[1]</sup>及 Mader<sup>[2]</sup>的有关结果进行了对比,结果都符合很好。

## 2 数学模型

使用自编的拉氏一维不定常弹塑性流体动力学计算程序 SINL 程序,进行了水下爆炸有关特性的数值模拟研究。该程序中考虑了热传导、弹塑性、多种炸药反应率函数、多种状态方程及多种人为粘性形式,它可以同时计算多种炸药和多介质的一维问题,可分别计算平面、柱面和球面一维模型。程序中使用的一维平面、柱面、球面坐标中的拉氏守恒方程组为

$$v = R^{\alpha-1} \frac{\partial R}{\partial m} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -R^{\alpha-1} \frac{\partial \sigma}{\partial m} - (\alpha-1) \frac{v\phi}{R} \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{\partial(\sigma u R^{\alpha-1})}{\partial m} + \lambda \frac{\partial}{\partial m} \left( R^{\alpha-1} \frac{\partial T}{\partial R} \right) \quad (3)$$

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2001-07-16; 修回日期: 2001-09-14

作者简介: 梁龙河(1967—), 男, 硕士, 副研究员.

$$\frac{\partial S_x}{\partial t} = 2\mu \left( -\frac{\partial u}{\partial R} + \frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial S_z}{\partial t} = \frac{2}{3} \frac{\mu}{v} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (5)$$

式中:  $E = I + 0.5u^2$ ,  $\partial R/\partial t = u$ ,  $t$  为时间,  $E$  为总能量,  $S_x$ 、 $S_z$  为应力偏量,  $m$  为单位长度或单位立体角的质量,  $T$  为温度,  $u$  为质点速度,  $v$  为比容,  $\lambda$  为热传导系数,  $R$  为欧拉坐标,  $\mu$  为剪切模量,  $r$  为拉氏坐标,  $\alpha=1,2,3$  分别代表一维平面、柱面和球面。  $\sigma$  是粘性压力、静水压力以及应力偏量的总和。  $\phi = 2S_x + S_z$ , 对球对称情况, 由于  $S_z = (-1/2)S_x$ , 故  $\phi = (3/2)S_x$ 。

## 2.1 水的状态方程

本研究中水的状态方程采用如下形式

$$p = c_0^2(\rho - \rho_0) + (\gamma - 1)\rho e \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\rho_0$  为初始密度,  $e$  为比内能,  $c_0 = 1.485$  为水中初始声速,  $\gamma = 5.82842$  为常数。

## 2.2 炸药的状态方程

本研究中, 为将固体炸药与爆炸产物的状态方程联系起来, 并能反映化学能的释放, 用一个点火函数  $\eta$  将炸药区在固态、气态及爆轰过渡区三种状态下的状态方程统一写为如下形式

$$p = (\gamma - 1)\rho e \eta \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $e$  为比内能,  $\gamma$  为爆轰产物的多方指数。  $\eta$  的表达式可写为

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{对固体炸药区} \\ (1 - \omega)^A + \frac{D_J \Delta t}{B \cdot (\Delta R)_0} & \text{对爆轰过渡区} \\ 1 & \text{对爆轰产物} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为未反应炸药的质量分数,  $\Delta t$  为时间步长,  $D_J$  为 C-J 爆速,  $A = 0.45455$ ,  $B = 1.4$  为常数,  $(\Delta R)_0$  为初始网格宽度。

## 3 研究内容及结果

本研究以 SINL 程序为工具, 对 TNT 药球和 Tetryl 药球在水下爆炸的多种情况进行了数值模拟研究, 着重研究了气泡脉动特性和水中冲击波的传播规律等情况。本研究中所使用的炸药基本参数如下:

$$\text{TNT 炸药参数} \quad \rho_0 = 1.634 \text{ g/cm}^3, \gamma = 3.11, D_J = 6.95 \text{ km/s} \quad (9)$$

$$\text{Tetryl 炸药参数} \quad \rho_0 = 1.70 \text{ g/cm}^3, \gamma = 2.93, D_J = 7.629 \text{ km/s} \quad (10)$$

### 3.1 程序检验计算

为了检验 SINL 程序的可靠性, 首先对 Mader<sup>[2]</sup> 计算过的两个模型进行了数值模拟计算, 这两个模型是 249 g 的 Tetryl 裸药球分别在水下 46.6 km 和 4.62 km 处爆炸的情况, 计算给出了两种情况下的爆炸气泡半径的脉动情况以及气泡-水交界面处压力和水中冲击波压力的变化情况, 得到的计算结果及 Mader 的数值模拟结果分别示于图 1 和图 2 中。从计算结果看, 证明使用 SINL 程序对一维问题进行模拟计算, 得出的结果与 Mader 的数值模拟结果相一致, 验证了 SINL 程序的可靠性。

### 3.2 对不同药量、不同爆深等情况的研究

本研究考察了 TNT 炸药药量变化、爆炸深度变化等因素对气泡脉动规律及水中冲击波传播规律的影响。应用 SINL 程序对药量分别为 1 kg、5 kg 和 10 kg 的 TNT 裸药球分别在水深 5 km、10 km、20 km 和 30 km 处爆炸的各种情况进行了数值模拟研究。给出了气泡首次脉动的最大半径值  $r_m$ 、第一脉动周期值  $T_1$ 、气泡半径及气泡-水界面处压力的变化过程及水中冲击波压力的变化过程等。

考察水中固定点处的压力变化情况, 研究了药量为 249 g 的 Tetryl 裸药球在水深 46.6 km 处爆炸

的情况。得出了距离爆炸中心不同距离处的压力随时间的变化关系。

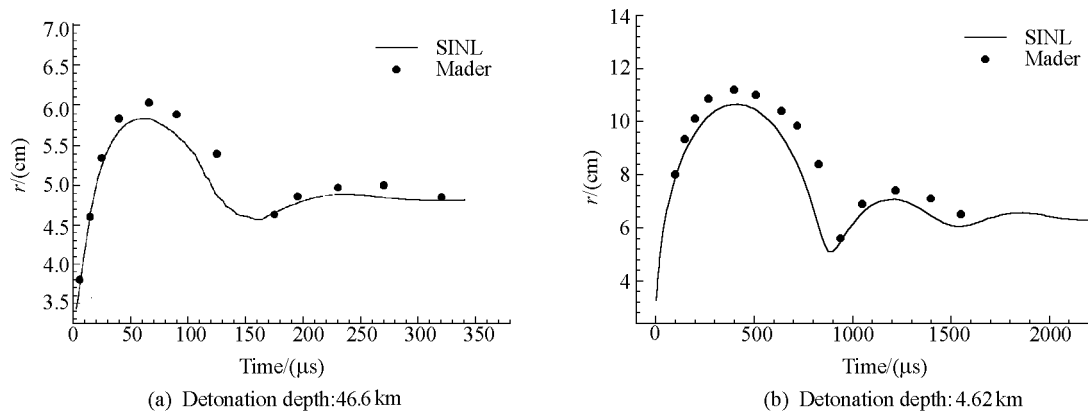


图 1 半径为 3.27 cm 的 Tetryl 裸药球水中爆炸时气泡半径随时间的变化  
Fig. 1 Radius of bubble generated by the detonation of a spherical Tetryl charge with a radius of 3.27 cm under water versus time

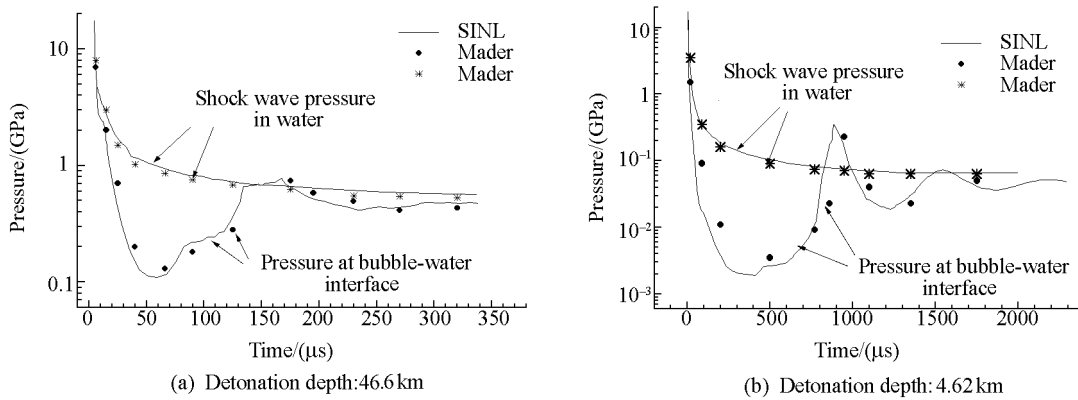


图 2 半径为 3.27 cm 的 Tetryl 裸药球水中爆炸时水中冲击波压力和气泡-水界面处的压力随时间的变化  
Fig. 2 Pressure at bubble-water interface and shock wave pressure in water versus time after the detonation of a spherical Tetryl charge with a radius of 3.27 cm under water

表 1 给出了不同药量在不同水深处爆炸等多种情况的首次气泡脉动最大半径  $r_m$  值和第一脉动周期  $T_1$  值。

表 1 不同情况下首次气泡脉动最大半径及第一脉动周期的计算结果  
Table 1 Numerical results of the maximum radii and the first pulsation durations of bubbles under different cases

Detonation depth/(km)	$r_m/(cm)$			$T_1/(\mu s)$		
	1 kg	5 kg	10 kg	1 kg	5 kg	10 kg
5	15.357	26.243	33.032	1230	2103	2645
10	12.533	21.449	27.015	700	1195	1505
20	10.481	17.953	22.631	420	710	900
30	9.618	16.442	20.714	320	542	682

图3给出了TNT裸药球在几个不同水深处爆炸后,气泡半径最大膨胀倍数与药量之间的关系。图4给出了不同药量的TNT裸药球水下爆炸后,气泡半径最大膨胀倍数随爆炸深度的变化情况。为了比较,图3和图4中均同时给出数值模拟结果以及相应药球的解析估算<sup>[1]</sup>结果。图中显示,气泡半径最大膨胀倍数与爆炸深度有关,而与药量无关;同时可见,数值模拟结果与解析估算结果符合得很好。

图5示出了药量为1kg的TNT裸药球在水下不同深度爆炸后水中冲击波速度随传播距离的变化情况。由图5可知:同一药量的TNT裸药球在不同水深处爆炸,当冲击波传播到同一距离处时,冲击波速度随爆炸深度的增加而增大,如1kg TNT裸药球分别在水深5km、10km和20km处爆炸,水中冲击波传播到2.5m远时,波速分别为1.59 km/s、1.66 km/s和1.76 km/s。

图6示出了1kg、5kg和10kg TNT裸药球在水深5km处爆炸,气泡半径随时间的脉动过程。从图中可知,不同药量的药球在水中同一深度处爆炸,产生的气泡脉动图像呈相似性变化。

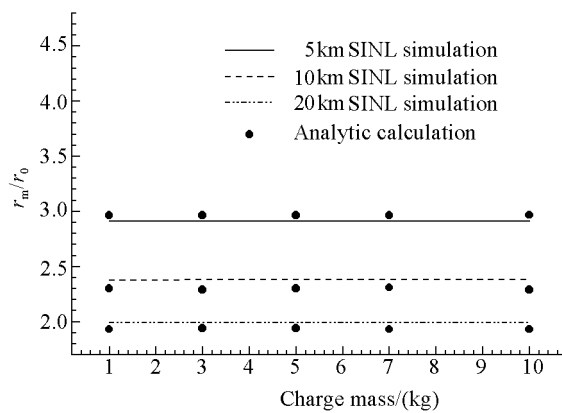


图3 气泡半径最大膨胀倍数与药量的关系  
Fig. 3 Maximum radius ratio versus charge mass

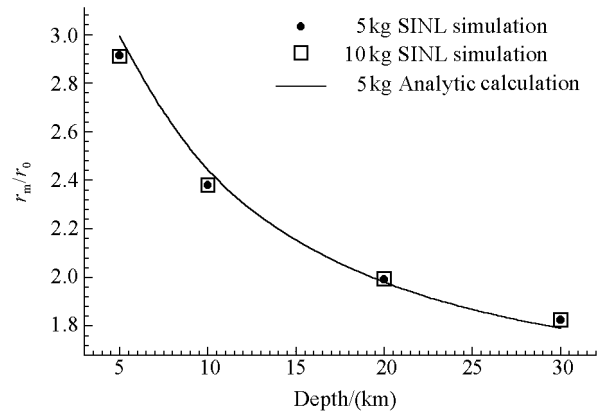


图4 气泡半径最大膨胀倍数随爆炸深度的变化  
Fig. 4 Maximum radius ratio versus detonation depth

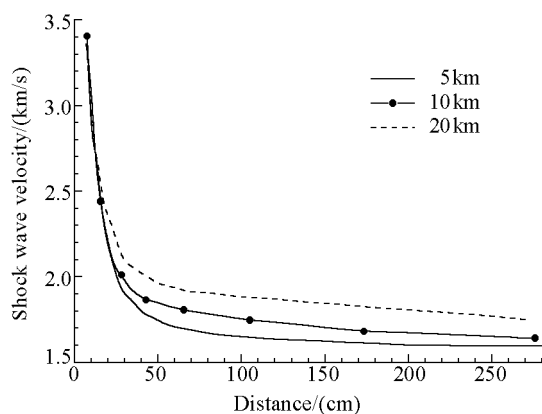


图5 水中冲击波速度随传播距离的变化  
Fig. 5 Underwater shock wave velocity versus distance

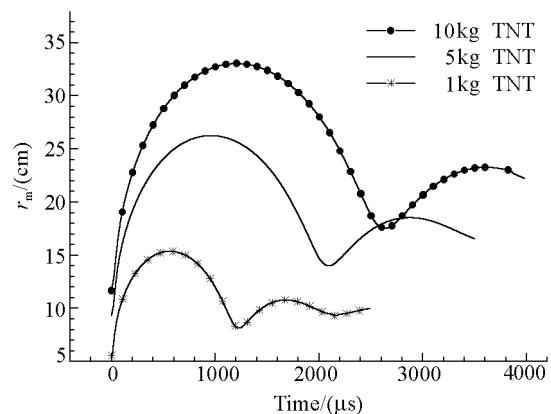


图6 不同情况下气泡半径随时间的变化  
Fig. 6 Bubble radius versus time under different cases

## 4 结论与讨论

(1) 由研究结果可知,裸药球在深水中爆炸,都产生多次气泡脉动的现象。对水下爆炸特性问题的研究,本文以 SINL 程序为基础的数值模拟方法给出的气泡半径、气泡-水界面处的压力和水中冲击波超压等随时间变化的曲线与 Mader 的数值模拟结果符合较好。因此,本研究方法给出的结果应该是可信的。

(2) 裸药球在水中同一深度爆炸,随着药量增加,气泡最大半径和第一脉动周期都增大;同一药球在水中不同深度爆炸,随着爆炸深度的增加,气泡最大半径和第一脉动周期都减小。

(3) 不同药量裸药球在水下同一深度爆炸,气泡半径最大膨胀倍数  $r_m/r_0$  为一常数,与药量无关。同一药量裸药球在水下不同深度爆炸,随爆炸深度增加,其  $r_m/r_0$  减小。

(4) 水下爆炸产生的水中冲击波传播到一定远的距离后,即可作声学近似处理。对同一种炸药,这一距离的大小取决于爆炸深度和药量的大小。

SINL 程序还可以用于计算有弹性外壳包着的装药水下爆炸问题,作者下一步准备对带有橡胶外壳的装药水下爆炸问题进行研究。需要说明的是,本研究中没有考察水的状态方程中诸如水的粘性、含盐量大小等复杂因素对计算结果的影响,今后有必要在这方面作进一步研究,以确定有关因素对结果的影响。

## 参考文献:

- [1] Liang Longhe, Cao Juzhen, Wang Yuanshu. Investigation on the Characteristics of Underwater Explosion [A]. Zhang Shouqi, Zhao Yuhua. Proceedings of the 3rd International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics [C]. Chengdu, China: Sichuan Publishing House of Science and Technology, 1999. 324—329.
- [2] Mader C L. 爆轰的数值模拟 [M]. 朱建士,李智伟译.北京:北京应用物理与计算数学研究所,1981. 306—344.

## ONE-DIMENSIONAL NUMERICAL SIMULATIONS OF UNDERWATER SPHERICAL EXPLOSIONS

LIANG Long-he, CAO Ju-zhen, WANG Yuan-shu

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

**Abstract:** The characteristics of underwater explosions such as pulsation law and pulsation cycle of bubbles, and pressure time histories of shock waves in water were investigated numerically. Numerical results of the characteristics are given in this paper.

**Key words:** underwater explosion; bubble pulsation; pulsation cycle; shock wave