

边界条件对水下爆炸气泡运动特性的影响分析

牟金磊¹, 朱石坚², 刁爱民², 李海涛²

(1. 海军工程大学 舰船工程系, 武汉 430033; 2. 海军工程大学 科研部, 武汉 430033)

摘要: 在近距爆炸条件下, 受到边界的影响, 水下爆炸气泡会出现非球状运动情况。为了得到球状气泡假设的适用条件, 对深水自由场、近自由液面、近刚性壁和弹性边界等不同边界条件下水下爆炸气泡的动态特性进行了仿真计算。通过对气泡最大半径和脉动周期仿真结果的对比分析, 可以得到如下结论: 当爆心距离边界约等于气泡最大半径时, 自由表面会使气泡的最大半径略有减小, 周期缩短, 刚性壁的影响与之相反, 弹性边界的影响介于二者之间; 在近自由边界条件下爆距大于2倍气泡半径, 近弹性结构和刚性壁边界条件下爆距大于3倍气泡半径时, 水下爆炸气泡可近似认为球状脉动。

关键词: 水下爆炸; 球形气泡假设; 气泡脉动; 边界条件; 数值仿真

中图分类号: O346; U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.13.017

Analysis on the characteristics of UNDEX bubbles under different boundary conditions

MU Jin-lei¹, ZHU Shi-jian², DIAO Ai-min², LI Hai-tao²

(1. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Office of Research and Development, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The underwater explosion bubbles are mostly non-spherical because of the existence of different boundaries. In order to find the suitable conditions of applying the spherical bubble hypothesis, the numerical simulation of bubble movement was carried out under different boundary conditions, such as free field in deep water, near free surface, near rigid surface and near elastic boundary. By analyzing the maximum radius and the first pulse period, it can be put forward that the maximum radius and the bubble first pulse period may decrease near the free surface when the standoff distance is approximate to the maximum radius. The influence of the rigid surface is on the contrary. The influence of elastic boundaries is intervenient. While the standoff distance exceeds the triple of the maximum radius, the spherical bubble hypothesis is suitable for analyzing the movement of UNDEX bubbles during the first pulse period under elastic and rigid boundary conditions, and when under the near free surface condition, the distance should exceed the double of the maximum radius.

Key words: underwater explosion (UNDEX); spherical bubble hypothesis; bubble pulse; boundary conditions; numerical simulation

水下爆炸气泡运动受边界条件影响特别明显, 自由场、自由面、刚性边界和弹性边界条件下气泡运动展现出不同的特性。在理论研究中, 为简化问题, 一般将炸药在水中爆炸产生的气泡假设为球形^[1-2], 致使结论具有局限性。但是在理论分析中不采用规则模型, 难以做到定量的计算。因此非常有必要对不同边界条件下水下爆炸气泡球形假设的适用范围进行探讨。

针对不同边界条件下水下爆炸气泡的运动特性,

国内外学者开展了一定的研究工作。Klaseboerk等^[3]用试验方法研究水下爆炸气泡与结构的之间的相互作用, 利用高速摄影仪捕捉气泡的膨胀、坍塌及回弹的过程, 试验中使用了刚性和弹性的圆形板、平板; 张立等^[4]在浅水体外将 CCD 高速摄影机实拍和图像处理技术引入气泡脉动参数的测试研究, 得到了 0.3gDDNP 装药的气泡半径随时间变化轨迹和脉动周期; 朱锡等^[5]利用高速摄影技术进行了一系列不同药量的 TNT 炸药水下爆炸试验, 对气泡脉动周期和最大气泡半径等参数进行了研究。这些实验数据为水下爆炸气泡的研究提供了珍贵的资料。水下爆炸试验受场地、试验条件等众多因素制约, 偶然性因素特别多, 且数据量有

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51109216, 51309231); 海军工程大学自然科学基金青年基金(HGDQNEQJJ12011)

收稿日期: 2013-05-15 修改稿收到日期: 2013-08-22

第一作者 牟金磊 男, 博士, 讲师, 1980 年生

限,难以得到规律性的结论。姚熊亮、张阿漫等^[6-10]以边界元积分法为基础,对水下爆炸气泡进行了系统的数值仿真研究,对自由面、刚性壁面、水中结构及各种复杂边界附近的气泡运动特性进行了详细研究,证明了数值仿真在该领域研究的有效性,得到了很多有价值的成果。

本文利用数值仿真手段,对深水自由场、近自由液面、近刚性壁和弹性边界等不同边界条件下水下爆炸气泡的动态特性进行了计算,系统地分析了不同边界条件对水下爆炸气泡的影响规律,并基于计算结果,提出了球形气泡假设的适用范围,为该领域的理论分析提供参考。

1 状态方程

状态方程用来定义固体或流体在各种不同状态下的压力、密度和比内能之间的函数关系。正确选取状态方程中的参数对于仿真结果的可靠性至关重要。以下分别讨论了水和 TNT 材料状态方程的参数设置。

1.1 水的状态方程

水下爆炸冲击波压力一般小于 25 000 个大气压,属于中等强度冲击波。这时爆炸冲击波通过介质后熵值变化很小,接近于等熵过程,由水的等熵状态方程:

$$P = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

其中:参数 $B = 3.045 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$, $n = 7.15$, ρ 和 ρ_0 分别为水的密度、水在常温状态下的参考密度。

在有限元软件中多采用多项式状态方程,如式(2)所示:

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2 + b_3\mu^3)\rho_0 e \quad (2)$$

其中: e 为单位质量的内能, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 。因此需要将式(1)变换为多项式形式。将式(1)按 Taylor 展开有:

$$p = 2.18 \times 10^9 \mu + 6.69 \times 10^9 \mu^2 + 1.15 \times 10^{10} \mu^3 \quad (3)$$

对比式(2)可得状态方程(3)中各参数的值。取水的初始密度 $\rho_0 = 1\,000 \text{ kg/m}^3$, 初始质量比内能 $e_0 = 83\,950 \text{ J/kg}$ 。图 1 比较了式(1)和式(3)的计算结果。从图中可以看到,当 μ 小于 0.2 时,两者吻合得很好。即使是 μ 为 0.25 时,两者相差也不到 5%。当水的密度达到 $1\,250 \text{ kg/m}^3$ 时,冲击波压力约为 $1\,500 \text{ MPa}$ 。而 $1\,000 \text{ kg TNT}$ 水中爆炸时,在距离爆炸中心 1 m 处的压力也不过 $1\,260 \text{ MPa}$ 。因此这个范围能够满足一般爆炸的要求。

1.2 TNT 的状态方程

TNT 的状态方程采用标准的 JWL 方程:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 e \quad (4)$$

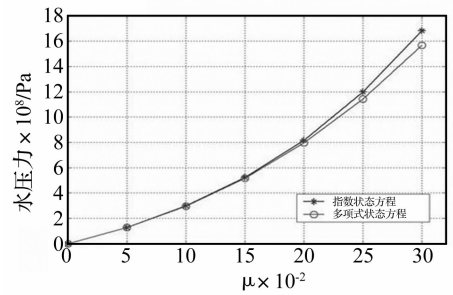


图 1 指数状态方程和多项式状态方程的比较

Fig. 1 The comparability of two constitutive equations

其中: $\eta = \rho/\rho_0$, A, B, w, R_1, R_2 为常数。对于标准 TNT 装药:

$$A = 3.712 \times 10^{11} \text{ Pa}, \quad B = 3.231 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$R_1 = 4.15, \quad R_2 = 0.95, \quad \omega = 0.3$$

TNT 的密度取 $1\,580 \text{ kg/m}^3$, 初始质量比内能为 $4.19 \times 10^6 \text{ J/kg}$, 初始爆轰速度为 $6\,930 \text{ m/s}$ 。

2 数值模型

为研究不同边界条件下水下爆炸气泡的动态特性,利用 MSC. Dytran 通用有限元软件进行了大量的仿真计算。对于自由液面、刚性壁可以采用全欧拉的方法进行建模仿真,对于弹性边界,需要建立结构模型,采用一般耦合法进行仿真。

对于自由面仿真,数值模型采用六面体欧拉单元划分网格。整个欧拉域定义为多材料三维欧拉体,包括水、空气、TNT 三种材料,其相互覆盖部分单元的材料属性定义不同的材料优先级。欧拉域的边界均设置为介质可以自由流入和流出的无反射边界(即无限流场区域),表面空气压力取为一个大气压,在水介质中考虑了重力加速度的影响。

对于刚性壁边界条件,不建立空气单元,刚性壁位置设置为刚性边界,其余模型设置与自由液面模型相同,其余边界条件设置为自由流入和流出的无反射边界。

对于弹性边界情况,在距离炸药一定位置建立结构模型,通过一般耦合法建立流体和固体相互作用的数值模型。如图 2 所示。

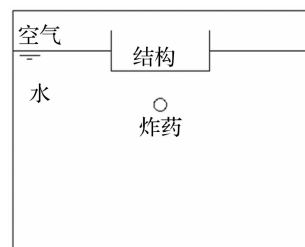


图 2 弹性边界数值模型示意图

Fig. 2 Numerical model at elastic boundary

描述水下爆炸气泡脉动的参数主要是最大气泡半径和周期,本研究主要探讨在不同边界条件下爆心到边界距离对气泡脉动参数的影响。水下爆炸气泡的半径和脉动周期可以分别用式(5)和(6)进行计算^[1]。其中, W 为炸药质量(kg), d 为炸药水深(m), D_0 为用水TNT炸药一般取 $J = 3.36 \text{ m}^{4/3} \text{ kg}^{-1/3}$, $K = 2.11 \text{ s m}^{5/6} \text{ kg}^{-1/3}$ 。

$$R_m = J(W/D_0 + d)^{1/3} \quad (5)$$

$$T = KW^{1/3}/(D_0 + d)^{5/6} \quad (6)$$

按照式(5)和(6)计算得到的气泡最大半径和第一次脉动周期为在自由场条件下的结果,由于气泡最大半径和第一次脉动周期受边界条件影响,为使研究工作具有普遍意义,研究结果中的时间、气泡半径及气泡中心距离边界的距离均采用无量纲化表示,在无量纲化工程中分别以式(5)和式(6)的计算结果作为特征长度和特征时间,即分别以 R_m 、 T 将其无量纲化。无量纲气泡半径 R' 、无量纲时间 T' 和无量纲气泡中心上升距离 H' 分别定义为:

$$R' = R/R_m \quad (7)$$

$$T' = T_s/T \quad (8)$$

$$H' = H/R_m \quad (9)$$

其中: R 和 T_s 分别为仿真得到的气泡半径和气泡脉动时间。同样,爆心到边界的距离也利用 R_m 进行无量纲化:

$$\gamma = r/R_m \quad (10)$$

其中: r 为炸药爆心到边界的距离。

3 不同边界条件下气泡运动仿真计算

3.1 深水自由场

为了便于比较不同边界条件对气泡运动特性的影响,首先对不受边界影响的气泡运动进行了仿真。如图3所示,气泡第一次脉动的最大半径和周期无量纲值都接近1,这说明仿真计算结果与理论计算相吻合。图4给出了气泡中心随时间变化的情况,计算结果表明在浮力和重力共同作用下,气泡在膨胀阶段,气泡受到的阻力较大,气泡中心上升不明显,几乎原地不动;

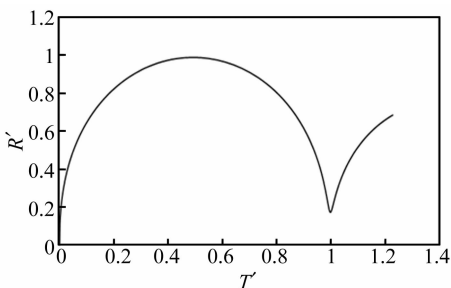


图3 深水自由场中气泡半径-时间曲线

Fig. 3 The radius-time curve in deep water free field

在气泡收缩阶段,阻力小,气泡上升速度加快。其中 H 为无量纲气泡中心上升的距离。

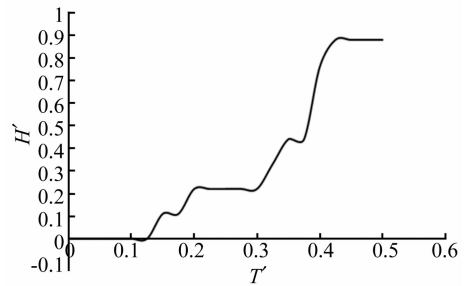


图4 气泡中心上升距离-时间曲线

Fig. 4 The ascend distance-time curve at deep water free field

3.2 近自由面边界

自由液面为气泡提供一个常压边界条件,当气泡中心离自由面比较近时,在气泡破裂过程中的自由液面上将形成一束水柱。对于水下爆炸气泡,一般气泡尺寸较大,浮力的作用很重要,近自由面气泡的运动特性更加复杂。

由于最大半径和周期是气泡运动的主要参数,因此主要针对这两个参数的变化进行分析。图5给出了近自由面边界条件下不同工况下的仿真结果。图6以 $\gamma = 0.96$ 为例给出了近自由面在不同时刻的气泡仿真结果。当气泡中心离自由面越近,自由面水柱越高,对气泡第一次脉动的最大半径 R'_m 和周期 T'_0 影响越大。当 $\gamma > 1.5$ 时,自由面对 R'_m 影响不再明显,当 $\gamma < 1$ 时,气泡会在收缩阶段受到自由液面的影响发生远离自由液面的射流,在 $\gamma > 1$ 时,在收缩阶段可能发生向上的射流。当 $\gamma > 1.4$ 时,在气泡脉动第一个周期内就不会发生射流,但是随着时间的推移,气泡在浮力作用下向上运动,气泡运动仍会受到自由液面影响,如图7所示,在气泡第一次收缩至最小时,基本保持球形。当 $\gamma > 1.5$ 时,自由液面对 R'_m 基本无影响,当 $\gamma > 2.0$ 时自由液面对 T'_0 基本无影响,综合考虑,在自由液面条件下当 $\gamma > 2.0$ 时可以采用球状气泡假设。

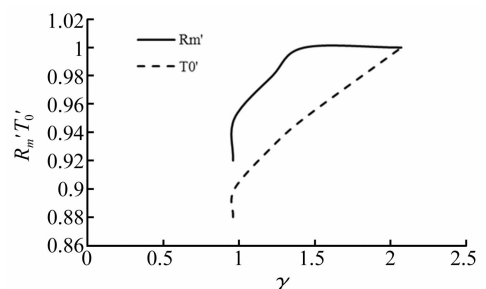


图5 气泡最大半径和周期随爆距变化结果

Fig. 5 The maximum radius and the pulse period

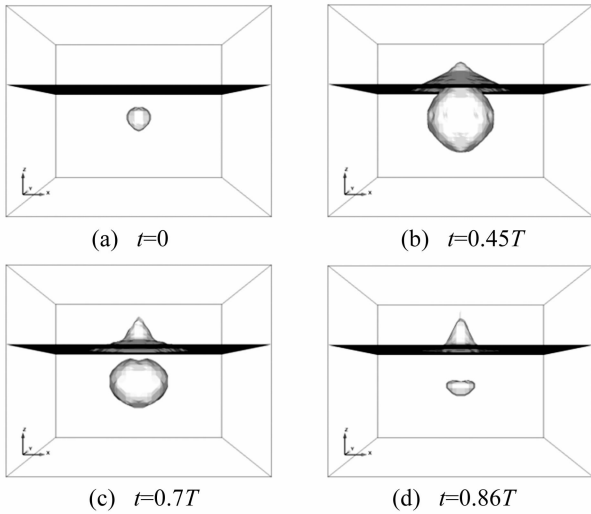


图 6 近自由面气泡仿真结果($\gamma = 0.96$)
Fig. 6 Numerical simulation results near free surface($\gamma = 0.96$)

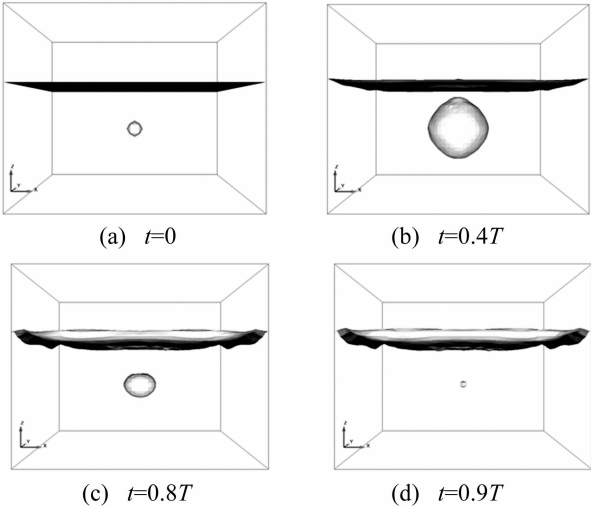


图 7 近自由面气泡仿真结果($\gamma = 1.43$)
Fig. 7 Numerical simulation results near free surface($\gamma = 1.43$)

3.3 刚性壁边界

刚性壁是一种理想边界条件,在刚性壁处,流体速度为 0,所有材料均不能通过刚性边界。与自由液面只能出现在上方不同,刚性边界可以以多种形式出现。下面分别讨论上方水平刚性面、下方水平刚性面和竖直刚性面三种典型位置的刚性边界对气泡脉动的影响。

3.3.1 上方水平刚性面

刚性壁在气泡上方时,刚性壁的位置,与气泡所受浮力方向一致。在不同爆距下,气泡的最大半径和脉动周期的变化数据如图 8 所示,图 9 以 $\gamma = 2.5$ 为例给出了该类边界条件下气泡的运动过程。从图 8 的数据结果可以看出,随着 γ 的增大,无量纲气泡半径和气泡周期逐渐接近于自由场情况,随着 γ 的增大, $\gamma > 1.5$

时, R'_m 趋向于 1,上方刚性壁边界对气泡半径的影响减弱,当 $\gamma > 3.0$ 时,气泡脉动周期接近 1。因此当在上方刚性边界条件下, $\gamma > 3.0$ 时,可以不考虑上方刚性边界的影响,在计算和分析中可以利用球状气泡假设。

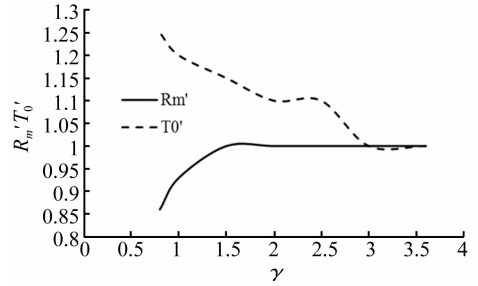


图 8 上方水平刚性面仿真结果
Fig. 8 The numerical results near the up-rigid surface

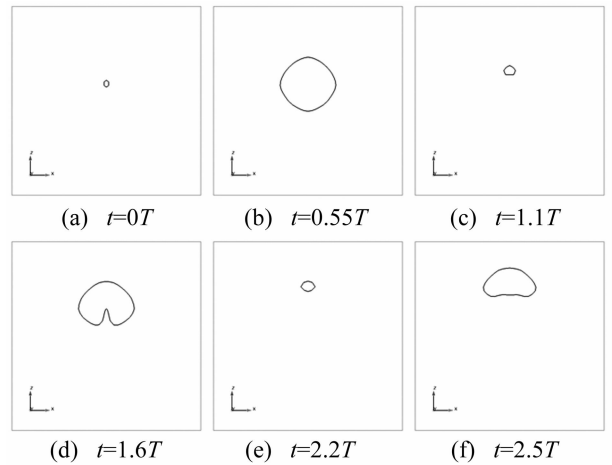


图 9 上方水平刚性面气泡运动过程($\gamma = 2.5$)
Fig. 9 The numerical results near the up rigid surface

3.3.2 下方水平刚性面

当爆炸发生在边界上方时就会出现刚性边界在气泡下方的情形,此时刚性边界的位置与气泡所受浮力方向相反。

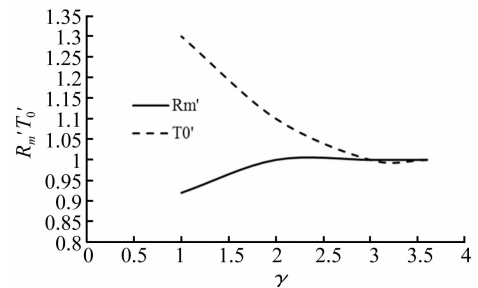


图 10 下方水平刚性面仿真结果
Fig. 10 The numerical results near the down-rigid surface

在不同爆距下,气泡的最大半径和脉动周期的变化规律如图 10 所示,随着 γ 的增大,无量纲气泡半径和气泡周期逐渐接近于自由场情况,随着 γ 的增大, γ

>2.0时, R'_m 趋向于1, 下方刚性壁边界对气泡半径的影响减弱, 当 $\gamma > 3.0$ 时, 气泡脉动周期接近1。因此当在下方刚性边界条件下, $\gamma > 3.0$ 时, 可以不考虑下方刚性边界的影响, 在计算和分析中可以利用球状气泡假设。

3.3.3 竖直刚性面

在竖直刚性壁条件下, 气泡所受浮力方向与边界位置方向垂直。该条件下不同爆距气泡的最大半径和脉动周期的变化规律如图11所示。

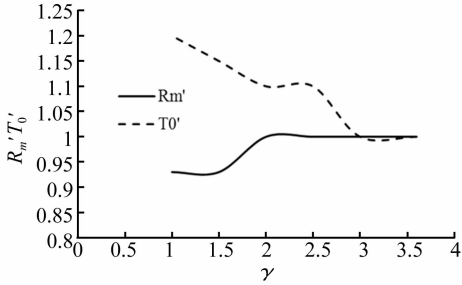


图11 竖直刚性面仿真结果

Fig. 11 The numerical results near the upright-rigid surface

从图11中的数据可以看出, 随着 γ 的增大, 无量纲气泡半径和气泡周期逐渐接近于自由场情况, 随着 γ 的增大, $\gamma > 2.0$ 时, R'_m 趋向于1, 竖直刚性壁边界对气泡半径的影响减弱, 当 $\gamma > 3.0$ 时, 气泡脉动周期接近1。因此当在竖直刚性边界条件下, $\gamma > 3.0$ 时, 可以不考虑竖直刚性边界的影响, 在计算和分析中可以利用球状气泡假设。

综合以上三种刚性边界条件下水下爆炸气泡的仿真分析, 可以认为在刚性边界条件下当 $\gamma > 3.0$ 时可以采用球状气泡假设。

3.4 弹性边界条件

在爆距近似等于最大气泡半径情形下, 对方弹性结构附近的气泡运动进行仿真, 气泡半径随时间变化的曲线以及与自由场情况下的比较如图12所示。其半径变化与刚性边界比, 与自由场更接近。

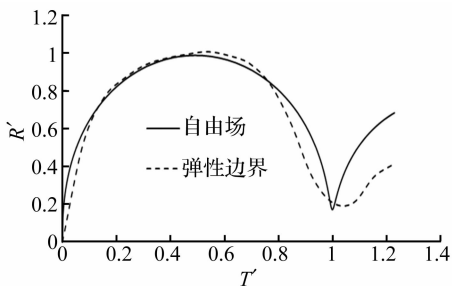


图12 弹性边界处气泡半径-时间曲线

Fig. 12 The bubble radius-time curve near the elastic boundary

弹性结构边界处气泡的运动特性与弹性边界的刚性程度有关。弹性边界的刚性大, 则影响近于刚性壁, 柔性大则影响近于自由面, 所以其第一次脉动周期和半径更接近于自由场情况。因此, 弹性边界条件下, 球状气泡假设的适用条件可以参考自由面和刚性壁边界确定。

4 对比分析

综合以上仿真结果, 对 $\gamma = 1.0$ 条件下, 自由场、弹性边界、刚性壁、自由表面对气泡运动的影响比较, 如图13所示。

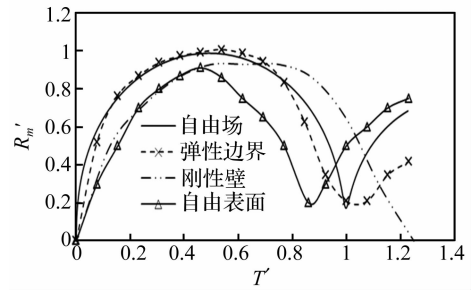


图13 不同边界条件气泡半径-时间曲线

Fig. 13 The bubble radius-time curves near different boundaries

从图13中可以看出, 在不同边界条件下气泡第一次膨胀过程相差不大, 半径随时间的变化接近于自由场情况, 这时由于气泡膨胀初期距离边界相对较远, 在膨胀阶段特别是膨胀初期基本不受边界影响。但是在气泡膨胀到最大后的收缩阶段, 不同边界影响开始显现: 与自由场比较, 自由表面会使气泡的最大半径略有减小, 周期缩短, 约为自由场周期的0.86倍; 刚性壁使气泡周期变长, 约为自由场周期的1.25倍, 对最大半径影响不大; 而弹性结构边界影响比较复杂, 介于自由表面与刚性壁两种边界之间, 与弹性结构的强弱有关, 弹性边界的刚性大, 则影响近于刚性壁, 柔性大则影响近于自由面, 所以其第一次脉动周期和半径更接近于自由场情况。

表1 不同边界条件下球形气泡假设适用条件

Tab. 1 The suitable conditions for spherical bubble hypothesis

边界条件	自由面	刚性边界			弹性边界
		上方	下方	竖直	
不影响气泡半径	$\lambda > 1.5$	$\lambda > 1.5$	$\lambda > 2.0$	$\lambda > 2.0$	取决于边界的刚度强弱
不影响脉动周期	$\lambda > 2.0$	$\lambda > 3.0$	$\lambda > 3.0$	$\lambda > 3.0$	

在不同边界条件下, 气泡的最大半径和周期不受边界条件影响的条件如表1所示, 综合来看当 $\gamma > 2.0$

时,近自由面气泡第一次脉动半径和周期都不受边界影响,可以适用球状假设分析;刚性边界条件下 $\gamma > 3.0$ 时,边界对气泡第一次脉动半径和周期的影响可以忽略;弹性结构边界则取决于边界的刚性强弱,球状气泡假设适用的临界条件,介于自由面和刚性边界之间,即 $2.0 < \gamma < 3.0$,所以保守取其上限,当满足 $\gamma > 3.0$ 时,球状气泡假设适用。

5 结 论

(1) 通过深水自由场仿真结果可以看出本研究建立的仿真方法与理论经验公式吻合;

(2) 就气泡第一次脉动而言,不同边界条件对气泡膨胀阶段影响较小;而对气泡膨胀后的收缩阶段不同边界条件的影响开始出现,气泡出现环状收缩变形。自由表面会使气泡的最大半径略有减小,周期缩短,刚性壁的影响与之相反,弹性边界的影响介于二者之间;

(3) 球状气泡假设的适用范围:近自由面边界条件下 $\gamma > 2.0$;近刚性壁和弹性结构边界下 $\gamma > 3.0$ 。

参 考 文 献

[1] Best J P. The effect of non-spherical collapse on determination of explosion bubble parameters [R]. ADA407861, 2002.

[2] Blake J R, Gibson D C. Growth and collapse of a vapour cavity near a free surface [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 111: 123 - 140.

[3] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure [J]. J. Fluid Mech, 2005, 537: 387 - 413.

[4] 张立, 章桥龙, 郭进, 等. 装药浅水爆炸的气泡脉动参数研究 [J]. 煤矿爆破, 2005 (2): 5 - 8.
ZHANG Li, ZHANG Qiao-long, GUO Jin, et al. A study on bubble pulsation parameters of blasting with charging below shallow water [J]. Coal Mine Blasting, 2005 (2): 5 - 8.

[5] 朱锡, 牟金磊, 洪江波, 等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28 (4): 365 - 368.
ZHU Xi, MU Jin-lei, HONG Jiang-bo, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosion [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28 (4): 365 - 368.

[6] 姚熊亮, 张阿漫. 简单 Green 函数法模拟三维水下爆炸气泡运动 [J]. 力学学报, 2006, 38 (6): 749 - 759.
YAO Xiong-liang, ZHANG A-man. Simulation of the motion of three-dimensional underwater explosion bubble using simple green function method [J]. Chinese Journal of Theoretical And Applied Mechanics, 2006, 38 (6): 749 - 759.

[7] 张阿漫, 姚熊亮. 近壁面气泡的运动规律研究 [J]. 物理学报, 2008, 57 (3): 1662 - 1671.
ZHANG A-man, YAO Xiong-liang. The law of the bubble motion near the wall [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57 (3): 1662 - 1671.

[8] 张阿漫, 姚熊亮, 李佳, 等. 不同边界附近气泡的三维数值模拟与实验值对比研究 [J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38 (7): 896 - 907.
ZHANG A-man, YAO Xiong-liang, LI Jia, et al. Study on different bubble near the border of three dimensional numerical simulation and experimental results [J]. Scientia Sinica (G), 2008, 38 (7): 896 - 907.

[9] 张阿漫, 姚熊亮. 近边界三维水下爆炸气泡动态特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28 (2): 124 - 130.
ZHANG A-man, YAO Xiong-liang. On dynamics of an underwater explosion bubble near a boundary [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28 (2): 124 - 130.

[10] 初文华, 张阿漫, 王诗平. 壁面与自由液面联合作用下气泡动态特性实验研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (13): 112 - 117.
CHU Wen-hua, ZHANG A-man, WANG Shi-ping. Experimental study on bubble pulse features under combined action of wall and free surface [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (13): 112 - 117.