文章编号:1000-5773(2010)03-0168-07

近壁面气泡运动特性的数值计算*

李 健[1,2],荣吉利[1]

(1.北京理工大学宇航学院,北京 100081;
2.广西工学院汽车工程系,广西柳州 545006)

摘要:采用体积加速度模型确定水下爆炸气泡运动的初始条件,基于 MSC.DYTRAN 有限元软件开发了定义流场初始条件和边界条件的子程序,对气泡在水平刚性壁面附近的运动特性进行了数值模拟,通过对比发现数值计算结果与实验结果具有较好的一致性,证明了初始条件定义、子程序开发和有限元模型建立的正确性和数值计算的准确性。以此为基础,研究了水深、泡心与刚性底面之间的距离对气泡动态特性和射流速度的影响,通过数值计算得到了一些有规律的曲线。计算模型、方法及结果对相关的工程研究和计算具有一定的参考价值。

关键词:水下爆炸;气泡脉动;近壁面;射流;数值计算
中图分类号:O381 **文献标识码**:A

1 引 言

当气泡在结构表面附近振荡时,气泡在膨胀阶段被结构表面轻微地排斥开,而在坍塌阶段被结构强烈地吸引,坍塌发生在远离壁面一侧,沿着坍塌的方向会形成一股高速射流,射流会击穿气泡最终作用在结构表面。射流的成因可以用著名的 Bjerknes 效应来解释。在气泡与结构相互作用方面,Subramaniam[1]、Rajendran[2]、Karagiozova[3]、李海涛[4]等人的研究取得了较理想的成果。然而,由于气泡与壁面之间相互作用的现象非常复杂,仍有许多现象没被揭示,关于射流特征、环形气泡形成等方面的研究文献甚少。为此,本研究从气泡与水平刚性壁面相互作用的基本现象入手,系统地研究刚性壁面附近气泡的动力学特性,包括气泡与壁面距离、水深对气泡整体运动和射流速度的影响,旨在为相关研究提供参考。

2 理论背景

2.1 气泡运动初始条件

要模拟气泡的运动,需要先求出气泡的初始半径。Frost、Harper[5]和 Hunter[6]的研究成果,提出了气泡体积加速度模型

$$p(R,t)=\frac{\rho}{4\pi R}\left(\frac{a_c}{R}\right)^A\ddot{V}\left[t\left(\frac{a_c}{R}\right)^{-B}\right] \tag{1}$$

式中:p 为压力,R 为传播距离,V 为气泡体积,ρ 为流体密度,a_c 为药包半径,A、B 为常数。由文献[6-8]得到流场中压力、药包半径、距离、时间等变量之间的关系

$$p(R,t)=p_c\left(\frac{a_c}{R}\right)^{1+A}\left\{0.8251\exp\left[-1.338\frac{t}{T_c}\left(\frac{a_c}{R}\right)^{-B}\right]+0.1749\exp\left[-0.1805\frac{t}{T_c}\left(\frac{a_c}{R}\right)^{-B}\right]\right\} \tag{2}$$

* **收稿日期**:2009-06-03;**修回日期**:2009-08-28
基金项目:国防基础科研资助项目(A2220060028)
作者简介:李 健(1980—),男,博士,副教授,主要从事水下爆炸气泡运动理论与数值模拟研究.E-mail:lijian327@gmail.com
通讯作者:荣吉利(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事水下爆炸理论与数值模拟研究.E-mail:rongjili@bit.edu.cn

式中:$p_c=K_1(m_c^{1/3}/a_c)^{1+A}$,$T_c=K_2m_c^{1/3}(m_c^{1/3}/a_c)^B$,$m_c$、$a_c$ 分别为药包的药量和半径;K_1、K_2、A、B 为与炸药有关的材料参数。令(1)式与(2)式相等,并进行简化,有

$$\dot{V}(t)=\frac{4\pi a_c}{\rho f}p_c\left[0.8251\exp\left(-1.338\frac{t}{T_c}\right)+0.1749\exp\left(-0.1805\frac{t}{T_c}\right)\right] \tag{3}$$

对(3)式进行积分,利用初始条件 $\dot{V}(0)=0$ 和 $V(0)=(4/3)\pi a_c^3$ 即可得到气泡体积和体积变化率的表达式,计算结果与文献[6]中的表达式略有不同

$$V(t)=\frac{4}{3}\pi a_c^3+\frac{4\pi a_c}{\rho f}p_c\left[1.5856T_ct-5.8292T_c^2+0.4609T_c^2\exp\left(-1.338\frac{t}{T_c}\right)+5.3683T_c^2\exp\left(-1.805\frac{t}{T_c}\right)\right] \tag{4}$$

$$\dot{V}(t)=\frac{4\pi a_c}{\rho f}p_c\left[1.5856T_c-0.6167T_c\exp\left(-1.338\frac{t}{T_c}\right)-0.9690T_c\exp\left(-0.1805\frac{t}{T_c}\right)\right] \tag{5}$$

考虑到 $r_0=(3V/4\pi)^{1/3}$、$\dot{r}_0=\dot{V}/4\pi r_0^2$,即可求出不同时刻气泡的初始半径和径向速度。

2.2　状态方程

本研究忽略气泡运动对气体压力的影响,认为气体的压力仅和气泡的初始状态及其体积有关,即气泡内的压力 p 与气泡体积 V 的关系

$$p=p_c+p_0(V_0/V)^\gamma \tag{6}$$

$$p_0=1.39\times10^5(W/V_0)^\gamma \tag{7}$$

式中:p_c 为可冷凝气体的饱和蒸汽压,量级与大气压相当,一般可忽略;p_0 和 V_0 分别为气泡形成时的初始压力和初始体积,W 为装药量,γ 为气体的比热比,对于 TNT 水中爆炸的爆轰产物而言,γ 取 1.25。

3　近刚性底面气泡脉动的数值计算

针对水下爆炸流场的特点,本研究采用 FORTRAN 语言开发定义流场初始条件与边界条件的子程序,结合 MSC.DYTRAN 有限元软件对气泡在水平刚性平面附近的运动特性进行数值模拟。研究初始泡心与刚性壁面距离、初始水深等参数对近壁面气泡运动和射流速度的影响。

3.1　有限元模型

为了验证数值计算的正确性与准确性,首先对文献[9]实验进行数值模拟,以验证模型建立、子程序开发和数值计算的合理性及正确性,数据可参考文献[9]。以此为基础,研究初始水深、爆心与刚性底面距离对气泡脉动的影响。有限元模型采用一个 3.0 m×3.0 m×3.0 m 的正方体,模型的单元数量大约为 50 万个,流场采用欧拉单元描述,爆心处网格较密,其单元对角线长度约为药包半径的 0.35 倍,周围网格较疏,其中最大单元对角线长度约为药包半径的 1.2 倍。水介质、空气以及炸药分别采用多项式状态方程、理想气体状态方程以及 Tait 状态方程描述。

3.2　流场初始条件与边界条件定义

有限元模型除下底面外,其它均为条件透射边界,即当边界两侧存在压力差时,水介质会从高压区通过边界向低压区流动,下底面为刚性边界,即为全反射边界。由于 MSC.DYTRAN 并不能通过直接定义重力加速度实现流场静水压力的定义,因此,根据初值及边界条件特点,利用定义初始条件和边界条件的子程序接口 EXINIT 及 EXFLOW2,采用 FORTRAN 语言开发了定义流场初值和边界条件的子程序,其思路就是根据模型中各单元节点的实际位置,将与之相对应的静水压力通过 EXINIT 和 EXFLOW2 子程序逐一赋到整个流场的单元节点上。

3.3　与实验结果对比

图 1(a)表示气泡的初始状态,气泡迅速向外膨胀;图 1(b)表示气泡在继续膨胀,气泡的下表面略呈扁平,但基本保持球形;图 1(c)表示气泡半径达到最大,并在刚性壁面的 Bjerknes 力作用下气泡的下表面呈扁平状,气泡被壁面排斥;图 1(d)表示气泡开始收缩,开始被刚性底面所吸引;图 1(e)表示气泡在远离底面的一侧继续收缩,形成“锥状”气泡,图 1(f)表示气泡从顶端开始坍塌,图 1(g)和图 1(h)表示气泡在惯性作用下继续坍塌,并形成指向刚性底面的射流;图 1(i)表示射流击穿气泡,并最终撞击到刚性

底面上;图 1(j)表示气泡持续收缩后,体积达到最小。对比数值计算结果与实验结果可以看到,二者具有比较好的一致性。

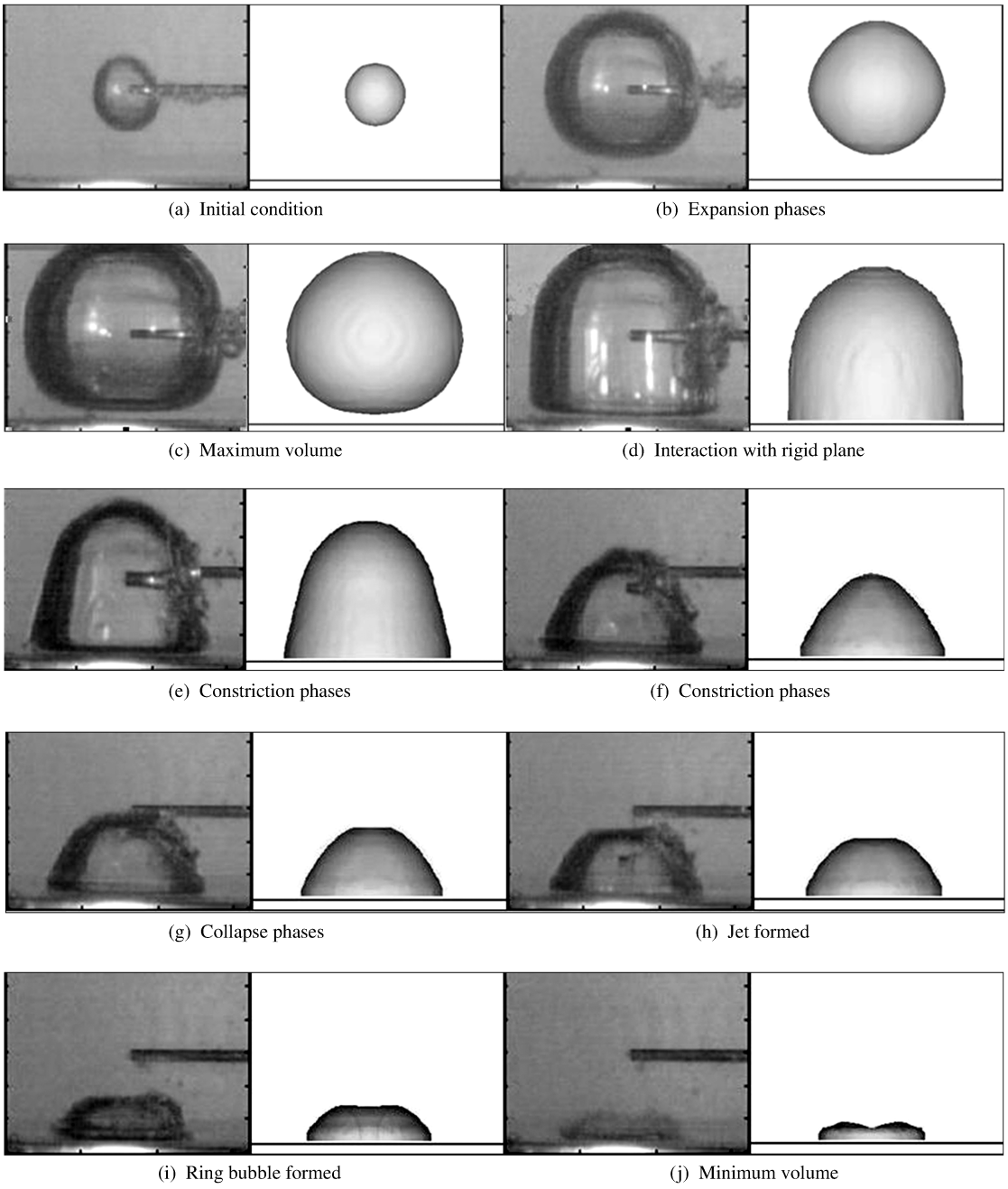


图 1 气泡与刚性底面相互作用结果对比

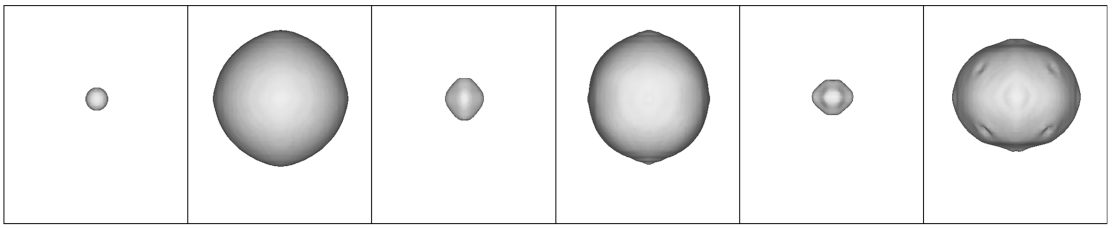
Fig. 1 Comparison for the experimental and calculated results of interaction between bubble and rigid plane

3.4 特征距离参数对气泡运动的影响

为了研究泡心与刚性底面之间特征距离对气泡运动的影响,以气泡脉动过程中最大半径为特征长度,研究在刚性底面所处水深不变的情况下,特征距离变化对气泡运动和射流速度的影响,所选工况为:刚性底面所处水深为 50.0 m,炸药为质量 1.0 kg、密度为 1 600.0 kg/m^3 的球形 TNT,爆心初始位置分别为 47.0、48.0、48.5 及 49.0 m,即爆心与刚性底面的距离为气泡最大半径的 3.3～1.1 倍之间。

图 2、图 3 和图 4 为气泡初始水深分别为 47.0、48.0 及 49.0 m 时气泡前 3 个周期内的变化情况。

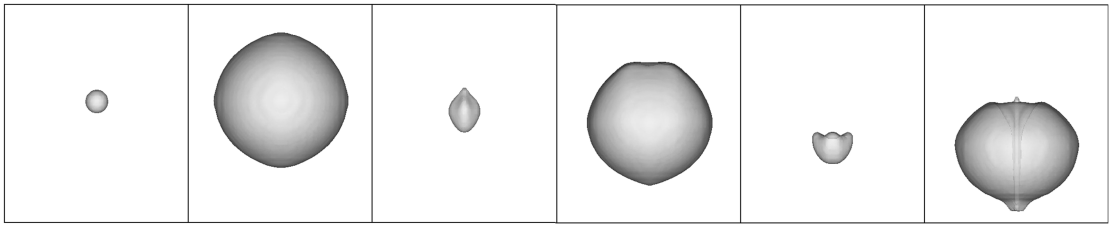
当气泡初始水深为 47.0 m 时,气泡在整个脉动过程中沿竖直方向基本没有位移,仅在原处进行膨胀-收缩的脉动,说明浮力与 Bjerknes 力对气泡的作用力大体相当,且方向相反。从图 3 可以看出,由于爆心与刚性底面的初始距离较上一种工况缩短了,此时,Bjerknes 力会略占优势,气泡在脉动过程中会逐渐向刚性底面移动,且射流方向会指向刚性底面。从图 4 可以看出,当爆心与刚性底面的初始距离进一步减小时,相对浮力而言,Bjerknes 力明显占优,气泡在脉动过程中会有明显被刚性底面吸引的现象,表现为气泡在脉动过程中会迅速向底面运动,同时有明显的射流产生,最终气泡会完全吸附在刚性底面上。



(a) t=0.0 ms　(b) t=35.5 ms　(c) t=71.0 ms　(d) t=106.0 ms　(e) t=142 ms　(f) t=177 ms

图 2　1.0 kg 球形 TNT 炸药在 47.0 m 处气泡脉动全过程

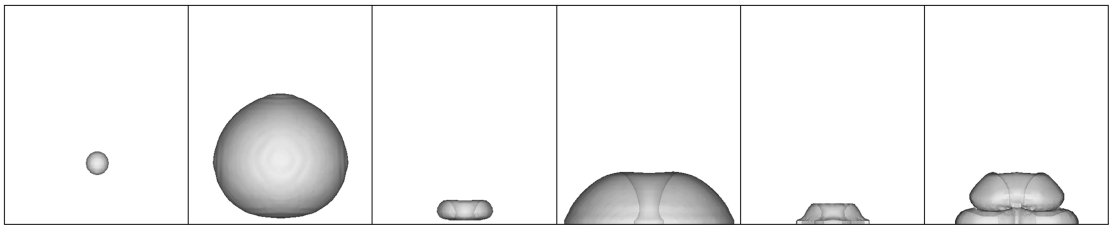
Fig. 2　The whole process of bubble impulse for 1.0 kg TNT at the depth of 47.0 m



(a) t=0.0 ms　(b) t=35.0 ms　(c) t=70.0 ms　(d) t=105.0 ms　(e) t=140.0 ms　(f) t=175.0 ms

图 3　1.0 kg 球形 TNT 炸药在 48.0 m 处气泡脉动全过程

Fig. 3　The whole process of bubble impulse for 1.0 kg TNT at the depth of 48.0 m



(a) t=0.0 ms　(b) t=34.0 ms　(c) t=68.0 ms　(d) t=102.0 ms　(e) t=136.5 ms　(f) t=171.0 ms

图 4　1.0 kg 球形 TNT 炸药在 49.0 m 处气泡脉动全过程

Fig. 4　The whole process of bubble impulse for 1.0 kg TNT at the depth of 49.0 m

图 5 和图 6 分别为各种工况下,气泡顶端和底端移动速度随时间变化的曲线,从图 5 可以看出,当刚性底面所处水深不变情况时,气泡受到特征距离的影响相当明显,气泡顶端坍塌速度会随着特征距离的减小而增加,即当泡心与刚性底面距离越近时,其射流速度越快。图 6 为气泡底端气泡壁速度变化曲线,从图中可以看出,气泡底端气泡壁速度变化并不明显,速度随着泡心与刚性壁面距离的减小而减小。当爆心与底面的距离约为 1.0 倍气泡最大半径时,当气泡底端与刚性壁面接触后,即会紧贴壁面不再分离,因此其速度变化不大。

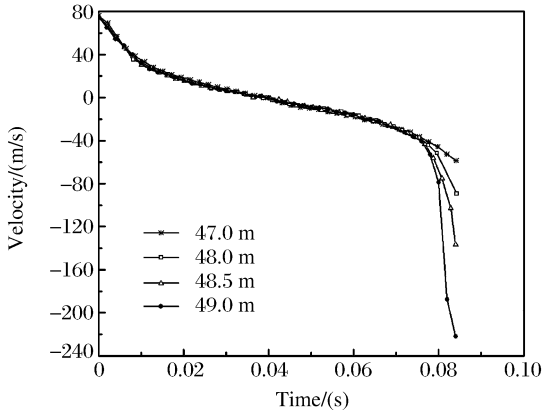


图 5 气泡顶端气泡壁径向速度随时间变化曲线

Fig. 5 Velocity-time curves at the top of bubble under different depths

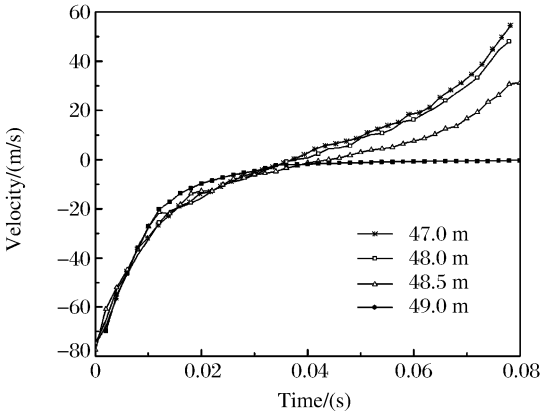


图 6 气泡底端气泡壁径向速度随时间变化曲线

Fig. 6 Velocity-time curves at the bottom of bubble under different depths

3.5 水深对气泡运动的影响

本节主要研究爆心与刚性底面距离不变的情况下，爆心所处水深对气泡运动状态的影响。所选工况为：将爆心与刚性底面的距离固定在 1.0 m，炸药为质量 1.0 kg、密度是 1600.0 kg/m^3 的球形 TNT，炸药爆心初始水深分别为 10.0、20.0、30.0、40.0 及 50.0 m，即爆心与刚性底面的距离均在 1.5 倍气泡最大半径以内。

图 7 为气泡壁顶端及底端位移随时间变化的曲线，从图中可以看到，由于爆心与刚性底面的距离均在 3.0 倍气泡最大半径范围以内，受 Bjerknes 力影响比较明显，因此气泡在脉动过程中均会向壁面方向运动。

根据图 7 可知，当爆心与刚性底面的距离处于一定范围内时，则无论爆心初始水深如何变化，气泡在脉动过程中都会受到刚性底面强烈的吸附作用，同时沿着气泡坍塌的方向也产生了指向刚性底面的射流。为此，固定泡心与刚性底面的初始距离，研究初始水深对气泡运动特性的影响。假定爆心与刚性底面的距离固定在 3.0 倍气泡最大半径处，爆心初始水深分别为 10.0、50.0 以及 100.0 m，根据计算，质量为 1.0 kg 的球形 TNT 炸药其气泡最大半径分别为 1.20、0.87 以及 0.71 m，故爆心与刚性底面的距离分别定义为 3.6、2.6 以及 2.1 m，提取气泡壁位移时程曲线，如图 8 所示。从图中可以看到，当爆心与刚性底面的距离约为 3 倍气泡最大半径时，沿着竖直方向，并没有明显的位移产生，仅在原处进行单纯的膨胀-收缩运动，说明此时气泡所受到的浮力与 Bjerknes 力作用效果基本相同，可以认为此位置为气泡垂向位移的临界点，即当爆心与刚性底面的距离小于 3 倍气泡最大半径时，气泡会被刚性底面吸附而产生向下的位移，而当爆心与刚性底面的距离大于 3 倍气泡最大半径时，气泡会远离刚性底面而产生向上的位移。

图 9 为气泡壁顶端径向速度随时间变化的曲线，从图中可以看出，当爆心与刚性底面的距离不变、且小于 1.0 倍气泡最大半径时，气泡壁顶端的速度会随着水深的增加而减小。图 10 为气泡壁底端径向速度随时间变化的曲线，从图中可以看出，当爆心与刚性底面的距离不变、且小于 1.0 倍气泡最大半径时，气泡壁底端的速度会随着水深的增加而增加，其主要原因是当气泡最大半径大于爆心与刚性底面的距离时，气泡在没有膨胀到最大时，气泡壁底部就已经与刚性底面相吸附了，而后气泡壁底部就一直被底面吸附而速度保持为零。

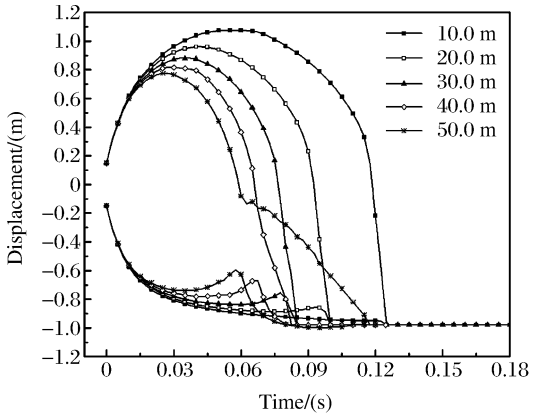


图 7　气泡壁位移随时间变化的曲线

Fig. 7　Displacement-time curves at the wall of bubble under different depths

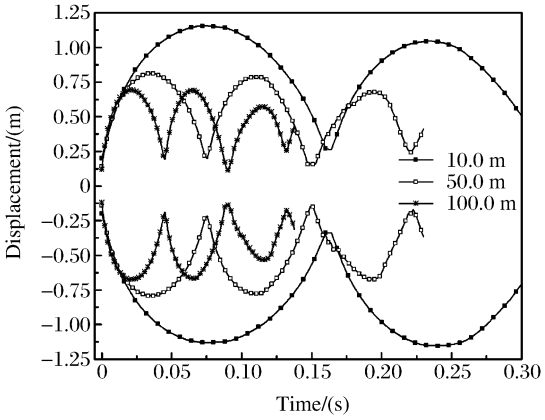


图 8　不同水深处气泡壁位移曲线

Fig. 8　Displacement-time curves at the wall of bubble under different depths

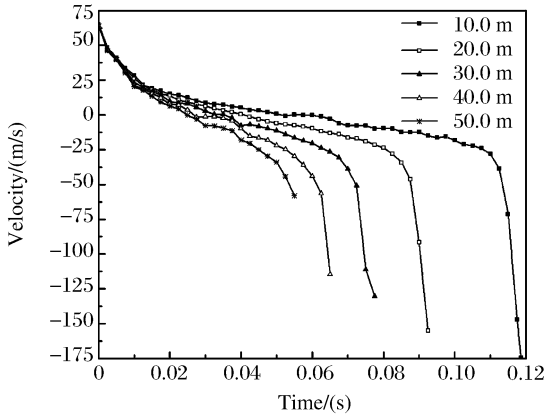


图 9　气泡壁顶端径向速度随时间变化曲线

Fig. 9　Velocity-time curves at the top of bubble under different depths

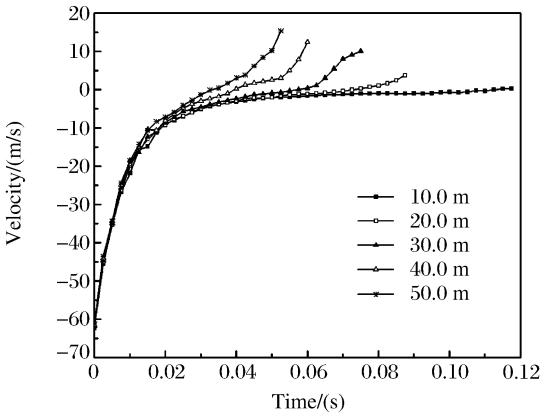


图 10　气泡壁底端径向速度随时间变化曲线

Fig. 10　Velocity-time curves at the bottom of bubble under different depths

4　结　论

根据 Frost 和 Harper 提出的气泡体积加速度模型,确定了水下爆炸气泡脉动的初始条件数学模型,开发了定义流场初始条件和边界条件的子程序,采用 MSC. DYTRAN 非线性有限元软件对刚性底面附近气泡运动进行了数值计算,并将计算结果与现有实验结果进行对比,验证子程序开发、有限元模型建立的正确性和数值计算的准确性,以此为基础,研究了距离参数、水深对刚性底面附近气泡动态特性、射流速度的影响,通过对数值计算结果的总结分析,得到以下主要建议及结论:

(1) 基于流场压力分布特点提出的气泡体积加速度模型所确定的气泡初值适用于对水下爆炸气泡动态特性的数值计算。

(2) 根据 MSC. DYTRAN 软件提供的子程序接口,可以采用 EXINIT 和 EXFLOW2 子程序对流场初始条件和边界条件进行定义,并能够准确地模拟出水下爆炸流场的特点。

(3) 气泡在刚性壁面附近运动时,泡心与刚性壁面的距离对气泡运动特性影响比较明显。当爆心与刚性底面的距离小于 3.0 倍气泡最大半径时,气泡被刚性底面吸附而出现向下位移,而当爆心与刚性底面的距离大于 3.0 倍气泡最大半径时,气泡远离刚性底面而出现向上的移动。

(4) 气泡在近刚性底面运动时,由于 Bjerknes 力较浮力明显占优,因此,沿着气泡坍塌方向产生的射流会从气泡顶端开始,方向指向刚性底面,最终射流会击穿气泡作用在刚性底面上。

(5) 射流速度受水深和气泡与刚性壁面之间的特征距离影响明显,当刚性底面所处水深不变时,射流速度会随着特征距离的增加而减小,当泡心与刚性壁面距离不变时,射流速度会随着水深的增加而增加。

References:

[1] Subramaniam K V, Weimin N, Yiannis A. Blast Response Simulation of an Elastic Structure Evaluation of the Fluid-Structure Interaction Effect [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36: 965-974.

[2] Rajendran R. Numerical Simulation of Response of Plane Plates Subjected to Uniform Primary Shock Loading of Non-Contact Underwater Explosion [J]. Materials and Design, 2009, 30: 1000-1007.

[3] Karagiozova D, Nurick G N, Langdon G S, et al. Response of Flexible Sandwich-Type Panels to Blast Loading [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 754-763.

[4] Li H T, Zhu X, Huang X M. On the Characteristics of Cavitation Formation Subjected to Underwater Blast Shock Wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(2): 181-186. (in Chinese)
李海涛,朱 锡,黄晓明,等. 水下爆炸冲击波作用下空化区域形成的特性研究 [J]. 高压物理学报, 2008, 22(2): 181-186.

[5] Frost P A, Harper E Y. Acoustic Radiation from Surfaces Oscillating at Large Amplitude and Small Mach Number [J]. J Acous Soc Am, 1975, 58: 318-325.

[6] Hunter K S. Global-Shape-Function Models of an Underwater Explosion Bubble [D]. Faculty of Graduate School of the University of Colorado, 2001: 16.

[7] Cole J S, Christian E A, Slifko J P, et al. Shock-Wave Parameters from Spherical TNT Charges Detonated Underwater [R]. Washington D. C: Office of Naval Research, 1945: 1085-1105.

[8] Price R S. Simulitude Equations for Explosives Fired Underwater [R]. NSWC: Technical Report NSWC TR, 1979: 80-299.

[9] Gherlrre G L, Penoue T O, Tucre R C B. 89001 Dynaflow [R]. Dynaflow, Inc. Technical Report, 1989: 1.

Numerical Study on Bubble Motion near the Wall

LI Jian[1,2], RONG Ji-Li[1]

(1. *School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Department of Automobile Engineering, GuangXi University of Technology, Liuzhou* 545006, *China*)

Abstract: The volume-acceleration model was introduced to determine the initial condition for bubble motion of underwater explosion. From the basic phenomenon of the interaction between bubble and rigid wall, the dynamic behavior of bubble near wall, including ring rebound of bubble and jet flow, was simulated and analyzed using MSC. DYTRAN finite element analysis software with developed subroutine defining the initial value and boundary condition of fluid field. The computational result of the behavior of bubble was compared with the experimental result. The comparison of results show that the former is consistent with the latter. The dynamic behavior of bubble near rigid wall and velocity of jet flow were studied systematically. It is summarized that the dynamic behavior near bottom rigid wall is close relevant to depth and distance. The research is of value to relevant theory modelings and engineering calculations.

Key words: underwater explosion; bubble impulse; near wall; jet flow; numerical simulation