

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.007

水下爆炸气泡运动对自由液面形态影响研究*

周文哲¹, 徐立君², 郭锦泽¹, 刘筹资¹, 程永舟^{1,3}, 郑长青⁴

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南水利水电职业技术学院, 长沙 410100;
3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114; 4. 珠海爆破新技术开发公司, 珠海 519099)

摘要: 为了研究近水面水下爆炸在不同炸药当量下产生的气泡运动对水面形态的影响, 运用 ANSYS 软件, 基于 ALE 算法, 建立了水下爆炸气泡运动模型, 对水冢形成过程进行研究; 在同一水深距离参数条件下, 通过对时间参数归一化处理, 对不同当量 TNT 炸药在水下爆炸时形成的水冢形态变化、气泡运动特性和水面波动特征进行分析。结果表明: 在水下爆炸过程中, 随着水深距离参数的增大, 水冢形成类型依次为零碎型水冢、飞溅型水冢、酒杯型水冢和皇冠型水冢, 且水冢所产生的空腔半径也在逐步增大, 在酒杯型水冢空腔半径达到最大; 在相同水深距离参数下, 装药量改变对于水冢基本形态的影响较小; 随着装药量增大, 爆炸产生的气泡脉动第一周期时间增加, 形成的水下爆炸气泡半径增大, 气泡中心点在竖直方向的位移在气泡第一周期收缩阶段后在逐渐向上运动; 随着装药量的增大, 皇冠型水冢特征宽度、中心水柱高度呈现增大的变化趋势, 产生的水面波动高度也在逐渐增大, 水面波动达到最大的归一化时刻也在不断地提前。

关键词: 水下爆炸; 气泡; 水冢; 水面兴波; 炸药当量

中图分类号: TV139.2⁺34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)03-0048-08

Research on Impact of Bubble Movement on Free Surface Shape in Underwater Explosion

ZHOU Wen-zhe¹, XU Li-jun², GUO Jin-ze¹, LIU Chou-zi¹, CHENG Yong-zhou^{1,3}, ZHENG Chang-Qing⁴

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Polytechnic of Water Resources and Electric Power, Changsha 410100, China; 3. Key Laboratory of Water and Sand Science and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 4. Zhuhai Blasting New Technology Development Company, Zhuhai 519099, China)

Abstract: When underwater explosions with different explosive equivalent are conducted near water surface, bubble movement has certain effect on water surface morphology. Thus, the formation of water spike of free surface, which is critical to this effect, was studied by establishing a bubble motion model of underwater explosion. And the model was realized based on ALE algorithm and ANSYS software. More specifically, the morphological changes of the free surface spike, bubble motion characteristics and surface fluctuation characteristics induced by underwater explosion were analyzed by normalizing of time parameters under the conditions of same water depth and distance parameter and different TNT equivalents. The results show that the formation types of the spikes of free surface are in order of fragmented water spike, splash water spike, cup-shaped water spike and crown-shaped water spike with the increase of water depth and distance parameter. At the same time, the cavity radius of the spike of free surface also increases gradually with the maximum value for the cup-shaped water spike. At the same water depth and distance parameter, charge quantity has little influence on the basic morphology of water spike. However, with the increase of charge amount, both the first cycle time of bubble pulsation and bubble radius increase. The vertical displacement of

bubble center point gradually moves upward after the first period of bubble contraction. In addition, greater charge amount also increases the characteristic width of crown-shaped water spike and the height of the center water column. The height of the surface fluctuation is increases gradually, and the normalized moment of the maximum surface fluctuation also advances continuously.

Key words: underwater explosion; bubble; spike of free surface; explosion-generated water wave; explosive equivalent

水下爆破在现阶段是一种快速有效的水下施工技术,在水下作业的很多方面都有着不可替代的作用,有着广泛的应用^[1]。水下爆炸形成的气泡脉动与自由液面相互作用产生形态不同的水冢^[2],水冢在重力的作用下回落到水面会对周围的结构等物体产生较大的冲击。当炸药的装药量过大,形成的水下波动会对周围的水生动植物产生冲击^[3],还会产生较大的水面波动,威胁周围船舶、建筑安全。因此研究水下爆炸气泡运动对水面形态的影响和水面兴波规律,对指导水下爆炸实施时周围建筑物的安全防护具有重要意义。

在水下爆炸气泡运动对自由液面影响方面, Szymezak 等基于 BEM 方法^[4],对水下爆炸气泡运动进行模拟,将水面的变化的过程分为空穴形成、空穴塌落、气泡上浮出水、气泡射流和水柱回落五个阶段;张阿漫等基于 BEM 方法^[5],研究在不同距离、浮力、强度参数下气泡的脉动过程,对比各过程下的自由面的水冢现象。李健等采用等效初始气泡替代炸药的方式^[6,7],研究了近自由液面时的气泡膨胀过程和相对应的自由液面变化过程,研究了距离参数对自由面水冢变化的影响规律。Li 等^[8]、陈莹玉等利用物质欧拉求解方法及流固耦合技术^[9],研究气泡运动形态对水冢宽度与高都的影响。李帅等对皇冠型水冢的形成过程进行了模拟^[10],研究了水深距离、韦博数对皇冠型水冢特征参数的影响。Safiyari 等基于 SPH 方法^[11,12],对爆炸气泡与自由液面的相互作用过程简化,将自由液面变化过程简化为空腔的扩张、坍塌,进而引起水面波动的过程,研究爆炸后自由液面的波动变化。李汪玮等将爆炸后自由液面的变化简化为锥形水柱的冲击水面的过程^[13]。Wang 等将气泡运动在水面附近形成的水冢简化为水下空腔和水面水柱两种形态^[14],对水面变化形态进行研究。

前人在研究气泡与自由液面相互作用时,大多考虑水深距离参数的对气泡脉动以及水冢形态的影响,较少考虑装药量的不同;在自由液面形态变化方面,主要关注于气泡运动对水冢形态的影响,在对水冢产生后的水面波动过程研究较少,对水面兴波过程的研究基本建立在水冢形态简化条件下。在实际工程中,水下爆破后水面将会产生一个持续的波动过程,且装药量的变化对水面运动形态的影响较大。基于此,采用 ANSYS 非线性有限元软件,基于 ALE 算法,结合水冢形成过程及其特征几何参数、气泡运动特性与水面波动过程,就不同装药量条件下,水下爆炸气泡运动对水面形态的影响机理开展研究。

1 水下爆炸气泡运动数值模拟

1.1 基于 ALE 方法的气泡运动模拟

采用 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 算法对气泡运动进行三维数值模拟,ALE 算法具有在保持物质界面的同时防止网格过度变形造成计算失效的特点,该算法兼顾 Lagrange 算法与 Euler 算法的优点,在模拟爆炸产生气体的大变形现象的同时,保持对不同物质之间界面的捕捉,能较好地模拟水下爆炸过程中流体的大范围变形与气泡、水流的高速流动。

在 ANSYS 软件中进行数值计算时,为了提高计算效率同时保证模拟结果的正确性,在气泡最大半径 1.5 倍范围内采用与装药半径尺寸相同的均匀网格,其他区域采用由均匀网格区域至流域外边界逐渐渐变的网格。为了兼顾计算效率,采用三维 1/4 模型,在对称面上施加对称边界条件,在空气域和水域外边界处设置 pressure outflow 边界单元层,以模拟无限边界条件,模型的 x/y 方向和装药下方的水域深度应至少为气泡脉动最大半径的 4 倍,空气层的高度满足水冢中心水柱向上发展的要求。几何模型如图 1。

炸药使用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型,采用 JWL 状态方程

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

收稿日期:2022-06-27

作者简介:周文哲(1996-),男,硕士,从事港口航道工程相关研究,(E-mail)380757015@qq.com。

通讯作者:徐立君(1979-),女,副教授,硕士,从事水利工程相关研究,(E-mail)747071120@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(52071031);湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-48);湖南省教育厅优秀青年项目(18BJ32)

式中: p 为爆轰产物压强,Pa; V 相对体积, $V = v/v_0$, v_0 为初始相对体积; e 为单位体积内能, J/m^3 ; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为状态方程参数,见表1。

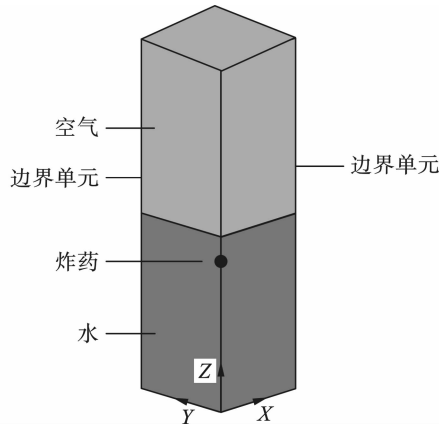


图1 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model

水使用 * MAT_NULL 材料模型,采用 Grüneisen

状态方程

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

式中: p 为压强,Pa; ρ_0 为水体密度, kg/m^3 ; C 为水中声速; E 单位体积内能, J/m^3 ; V 为相对体积; γ_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 为 GRUNEISEN 状态方程参数, α 为 γ_0 的一阶体积系数; P_c 为截断压强,Pa,水的截断压强为饱和蒸气压; η 水的粘滞系数, $Pa \cdot s$ 。水的材料方程与状态方程参数见表2。

空气使用 * MAT_NULL 材料模型,采用线性多项式状态方程

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

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (4)$$

表1 TNT炸药的材料方程和状态方程参数取值^[15,16]

Table 1 The material equation and state equation parameter value of TNT explosive^[15,16]

$\rho_w/(kg \cdot m^{-3})$	$D/(m \cdot s^{-1})$	P/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0
1630	6930	21	371.20	3.23	4.15	0.95	0.3	700

表2 水的材料方程和状态方程参数取值^[15,16]

Table 2 Water material equation and state equation parameter values^[15,16]

$\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	P_c/Pa	$\eta/(Pa \cdot s^{-1})$	$C/(m \cdot s^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	α	E_0
1000	-3361	8.79e-4	1500	2.56	1.986	1.2268	0.5	0	0

对于理想气体有下列关系式

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = \gamma - 1 \quad (5)$$

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E \quad (6)$$

式中: p 为压强,Pa; γ 为单位热值率,对于理想气体 $\gamma = 1.4$; E_0 为单位体积初始内能; C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为线性多项式方程参数。空气的材料方程与状态方程参数见表3。

表3 空气的材料方程和状态方程参数取值^[15,16]

Table 3 Air material equation and state equation parameter values^[15,16]

$\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	P_c/Pa	$\eta/(Pa \cdot s^{-1})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	E_0	C_6
1.29	-10	1.84e-5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	253.3	0.0

1.2 气泡运动模型的验证

为了验证气泡运动模型的有效性,设置与文献[17]实验相同的工况,使用5.2 g TNT的球形装药(与实验中4 g PENT炸药等效),装药半径为0.009 m,模型计算尺寸为1 m × 1 m × 4 m,渐变网格划分尺寸最小为0.009 m,最大为0.1 m,均匀网格处网格尺寸为0.009 m。如图2所示,就文献中近水面条件(装药位置位于水面以下0.13 m)下的

气泡运动趋势相对比,发现实验结果和数值模拟结果两者在气泡脉动的模拟结果,一致性较好。

对于TNT炸药水下爆炸气泡脉动的第一周期及气泡半径计算,已经形成了能够应用于工程实际的经验公式^[17]。如表4所示,通将数值模拟结果与经验公式计算值进行对比,发现气泡半径及气泡周期变化误差在10%以内,表明数值模拟结果可靠。

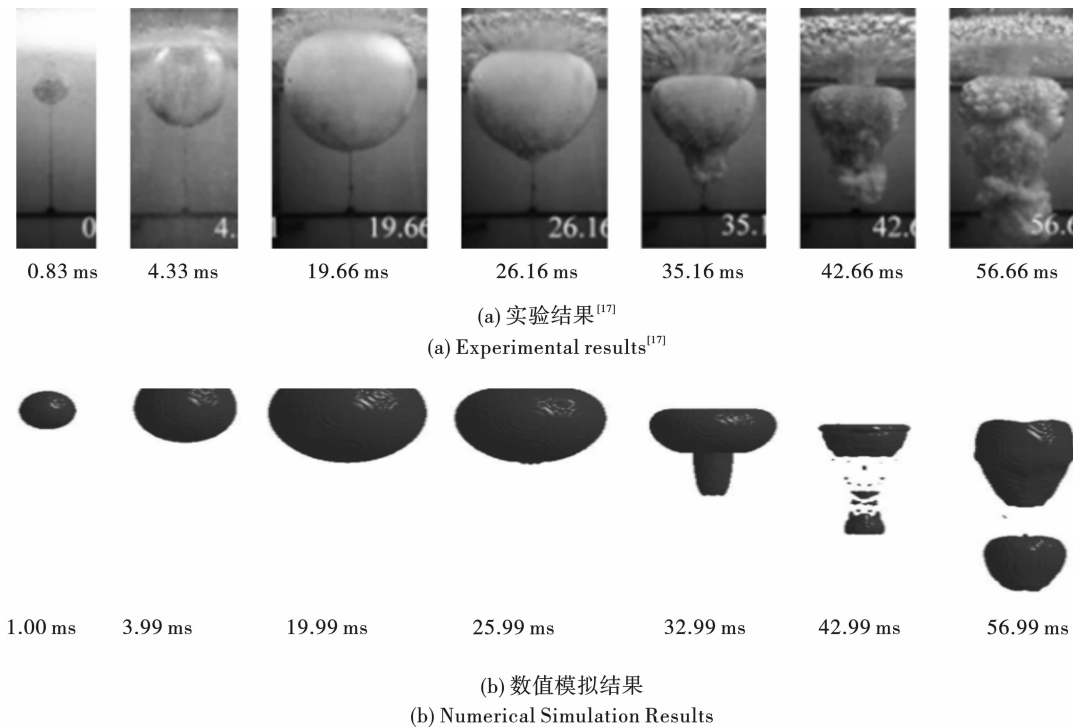


图 2 近自由液面条件下气泡运动趋势对比

Fig. 2 Comparison of bubble movement trends near free surface of water

$$R = 3.43 \frac{W^{1/3}}{(D + 10.3)^{5/6}} \quad (7)$$

$$T = 2.11 \frac{W^{1/3}}{(D + 10.3)^{1/3}} \quad (8)$$

式中: R 为气泡第一次脉动的气泡最大半径, m ; T 为脉动周期, s ; W 为装药当量, kg ; D 为装药位置处水深, m 。

表 4 气泡最大半径与周期误差计算结果

Table 4 Calculation result of bubble radius and period error

	数值模拟结果	实验结果 ^[17]	与实验的误差	经验公式 ^[17]	与经验公式误差
气泡半径/cm	28.2	-	-	27.3	0.368%
气泡周期/ms	40	42.665	6.25%	-	-

表 5 不同水深距离参数 γ_f 下的水冢形态

Table 5 Morphology of spike of free surface under different water depth and distance parameters γ_f

水冢类型	γ_f	装药水深/m	空腔最大半径/m
零碎型	0.0002	0.0004	2.0535
飞溅型	0.0829	0.2150	2.5890
酒杯型	0.5490	1.5000	2.7320
皇冠型	0.9980	2.6920	2.6970

2 气泡运动对水面形态的影响

2.1 不同类型水冢形成过程与水面形态

不同水冢现象的发生取决于起爆点水深距离参数 $\gamma_f = h/R_{max}$ ^[18], 式中: h 为炸药装药位置距水面的距离, m ; R_{max} 为气泡脉动过程的最大半径, m 。那立民等通过大量工况计算^[19], 总结出水冢形态与距离参数 γ_f 的关系, 将水冢形态划分为零碎型 ($0 \leq \gamma_f \leq 0.06$)、飞溅型 ($0.06 \leq \gamma_f \leq 0.03$)、酒杯型 ($0.3 \leq \gamma_f \leq 0.7$)、皇冠型 ($0.7 \leq \gamma_f \leq 1.4$) 等。为研究不同水深距离参数下水冢的形成过程, 选用 5 kg 球形 TNT 炸药, 控制炸药质量不变, 改变炸药中心至水面距离, 对四种特征水冢的形成进行模拟。模拟参数与结果如表 5。

如图 3 所示, 5 kg 球形 TNT 炸药在水下爆炸的模拟结果表明, 随着水深距离参数的不断增大, 依次产生了零碎型、飞溅型、酒杯型及皇冠型等不同类型的水冢, 且水冢所产生的空腔最大半径也在逐步增大, 在酒杯型水冢空腔最大半径达到最大。

2.2 不同装药量对水冢形态的影响

皇冠型水冢形态较为稳定, 以形成皇冠型水冢

的特征水深距离参数 $\gamma_f = 1$ 作为基准参数,对不同装药量下水冢形态发展进行研究。表 6 所示,在 0.5 kg、5 kg、50 kg 装药量条件下,爆炸气泡脉动第一周期时间分别为 186 ms、318 ms、665 ms。气泡第

一周期时间与装药水深相关^[17],在同一距离水深参数条件下,不同装药量产生的气泡半径大小不同,需要的装药水深不同,气泡第一周期脉动时长不同。随着装药量增大,气泡脉动第一周期时长增加。

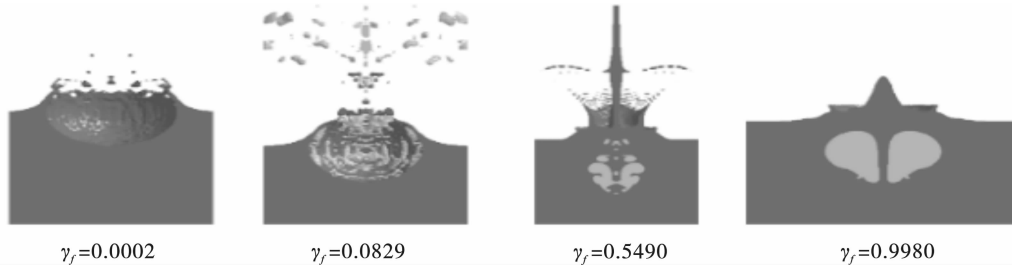


图 3 不同水深距离参数 γ_f 下的水冢形态

Fig. 3 Water mound morphology under different water depth and distance parameters γ_f

表 6 不同装药量下气泡特征
Table 6 Bubble characteristics under different explosive quantities

装药量/kg	γ_f	空腔最大半径/m	气泡脉动第一周期时长/ms
0.5	1.003	1.311	186
5.0	0.998	2.697	318
50.0	0.999	5.521	665

为了对水冢形成过程进行直观对比,以当前时刻/气泡脉动第一周期时长对时间单位进行归一化处理。5 kg 球形 TNT 炸药,在水深距离参数 $\gamma_f = 0.998$ 条件下将产生皇冠型水冢,如图 4 所示。水冢形态发展过程为:0.483 时刻,气泡膨胀至最大半径,水面被气泡顶起;0.9 时刻,由于气泡坍塌,形成向下气泡射流,并向上形成水射流,与气泡顶起的水体一起组成了中心水柱;1.317 时刻,随着气泡射流

发展的同时,向上水射流也在不断发展,并促进了中心水柱的发展。环形水体也在气泡膨胀的推动下开始突出水面向上发展,并与中心水柱一起构成了皇冠型水冢;2.4 时刻,气泡经过多次脉动分裂成两个部分,水冢也在多次气泡脉动作用下形成了位置不同的环状水体;2.65 时刻后,水面水柱达到最大高度,此时四周的水冢已经在重力作用下下坠,冲击水面并形成波动向外传播。

图 5、图 6 分别为 0.5 kg、50 kg 装药量下水冢发展过程。在归一化 1 时刻,自由液面均形成中心水柱(图 5d、图 6d),随后中心水柱与环形水体发展成为冠状结构(图 5e、图 6e),该过程与 5 kg 装药量下皇冠型水冢的形成过程类似。对比图 4、图 5、图 6 可知,在相同水深距离参数条件下,装药量的增大并不会改变水冢的基本形态。

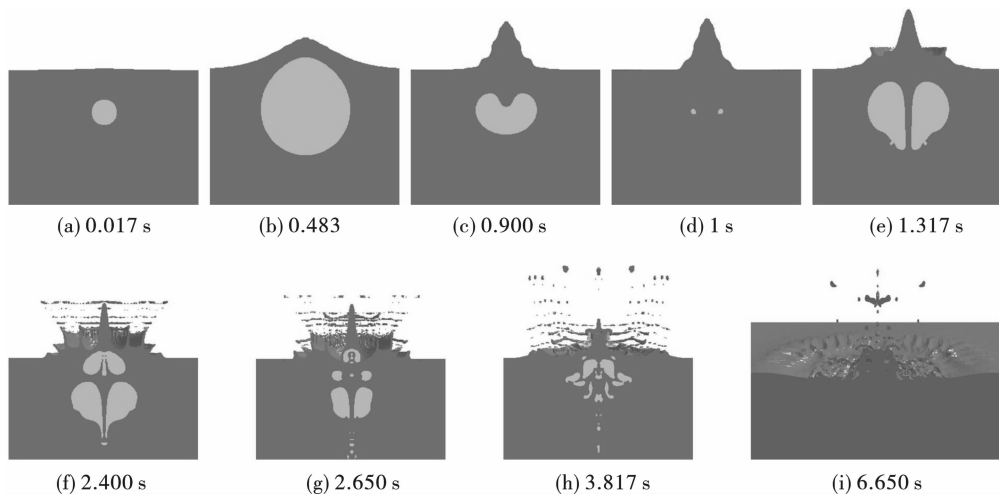


图 4 5 kg 装药量, $\gamma_f = 0.998$ 条件下水冢形态发展过程(a)~(i)为归一化时间

Fig. 4 The development process of water spike morphology under the condition of $\gamma_f = 0.998$ and charge amount of 5 kg((a)~(i) are normalized time)

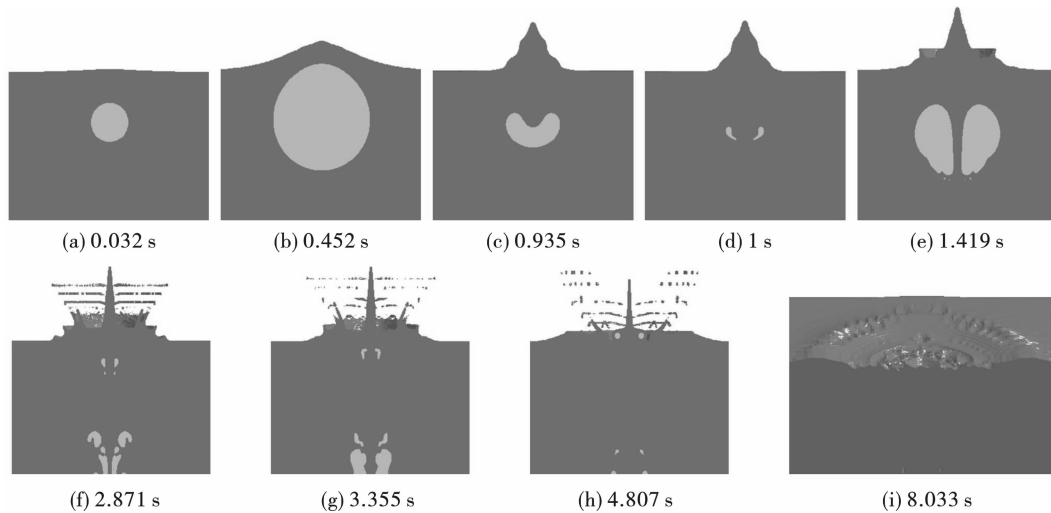


图 5 0.5 kg 装药量, $\gamma_f = 1.003$ 条件下水冢形态发展过程(a) ~ (i) 为归一化时间

Fig. 5 The development process of water spike morphology under the condition of $\gamma_f = 1.003$ and charge amount of 0.5 kg((a) ~ (i) are normalized time)

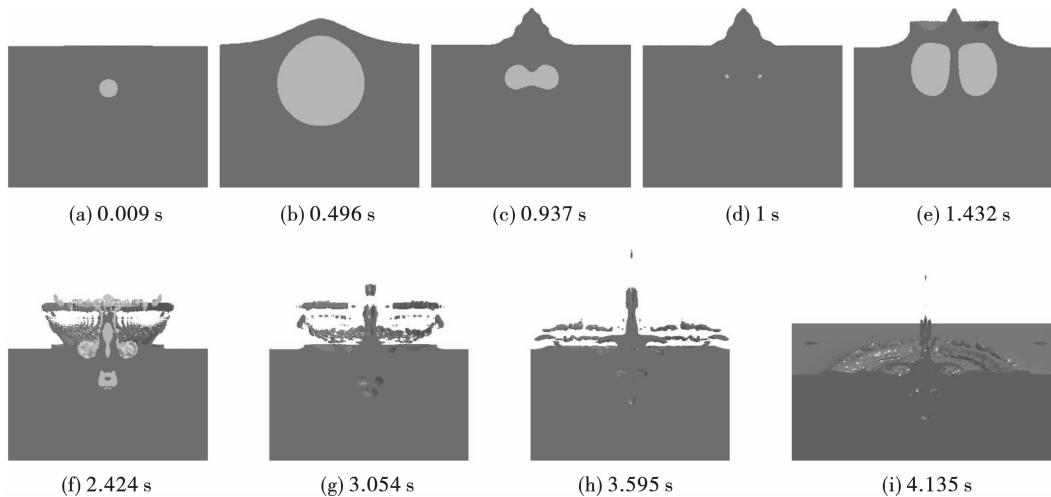


图 6 50 kg 装药量, $\gamma_f = 0.999$ 条件下水冢形态发展过程(a) ~ (i) 为归一化时间

Fig. 6 The development process of water spike morphology under the condition of $\gamma_f = 0.999$ and charge amount of 50 kg((a) ~ (i) are normalized time)

对比三种装药量下的水冢形成过程。在气泡脉动第一周期收缩阶段,0.5 kg、5 kg 装药量下形成的收缩气泡呈现果仁状,产生向下的射流,同时水面形成向上的水射流,对应的归一化时刻分别为 0.935 s(图 5c)、0.900(图 4c);50 kg 装药量下在气泡收缩过程中,在气泡的上表面形成了向下射流,下表面形成了向上射流,对应时刻为 0.937 s(图 6c)。在水冢冠状结构发展过程中,0.5 kg、5 kg 装药量下形成多个不同位置的环状水体,对应时刻为 2.871 s(图 5f)、2.400(图 4f);50 kg 装药量下形成的环状结构较为破碎,对应时刻为 2.424 s(图 6f)。

2.3 不同装药量对气泡运动的影响

对比图 4、图 5、图 6,装药量增大使爆炸形成的

气泡体积增大,气泡运动趋势发生改变。对不同装药量下的气泡运动特征进行对比分析,图 7(a)为在归一化时间下的气泡时程变化曲线,气泡最大半径随着装药增大而增大。图 7(b)为在归一化时间下气泡的无量纲位移(气泡中心位移/气泡最大半径)历程曲线,在第一周期膨胀阶段,三种装药量条件下的气泡中心均向自由面移动。在第一周期收缩阶段,0.5 kg 装药量下气泡中心的向远离自由面方向移动;5 kg 装药量下气泡中心位移基本稳定在初始位置附近;50 kg 装药量下气泡中心始终向自由面移动。在张阿漫等对近自由面气泡运动规律研究中^[5],无量纲水深距离 $\gamma_f = 1$ 的条件下,气泡中心位移变化与浮力参数相关。可见在相同水深距离参数

下,装药量的增大会使气泡最大半径增大,引起浮力参数的变化,从而产生不同的射流情况。在0.5 kg、5 kg 装药量情况产生的气泡体积较小,自由面的 Bjerknæs 作用力占主导地位,气泡在收缩阶段形成

远离自由面方向的射流;而在50 kg 装药量情况下,气泡体积较大受到的浮力作用增强,在收缩阶段气泡表面和底端均形成射流。

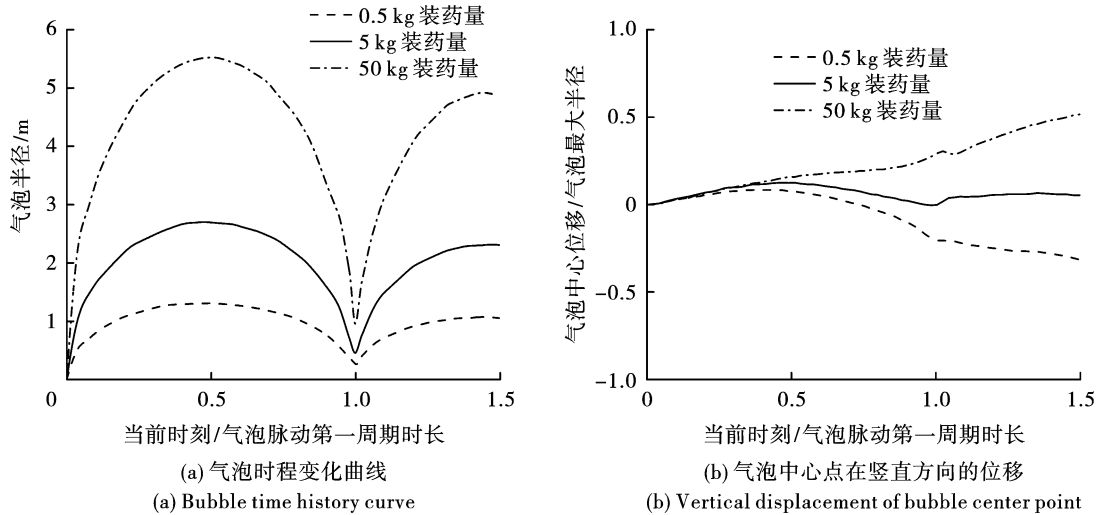


图7 不同装药量气泡运动特征对比

Fig. 7 Comparison of bubble motion characteristics with different charges

2.4 不同装药量下的水冢特征参数及水面波动对比

冠型水冢特征宽度为气泡脉动第二周期收缩至最小时刻形成的水冢底部宽度,特征高度为中心水柱最高点距自由液面高程的距离。对0.5 kg、5 kg、50 kg 三种装药量下的计算结果进行了比较,如图8所示。在0.5 kg 时水冢宽度为2.428 m,中心水柱高度为2.315 m;5 kg 时水冢宽度为4.978 m,中心水柱高度为4.437 m;50 kg 时水冢宽度为11.538 m,中心水柱高度为10.179 m。随着装药量的不断增大,水冢宽度、中心水柱高度逐渐增大。

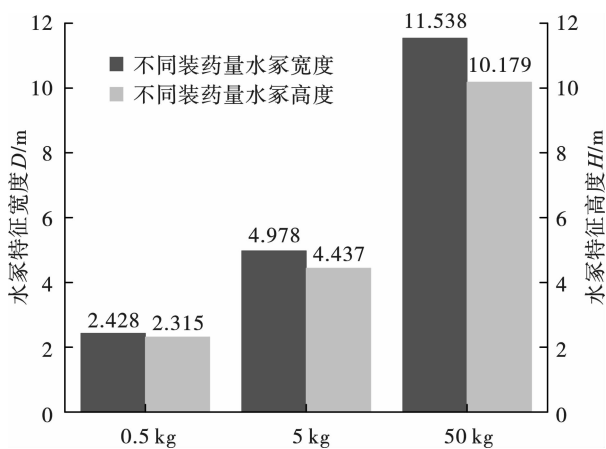


图8 不同装药量下水冢特征尺寸对比

Fig. 8 Comparison of characteristic sizes of water mounds with different charges

在最大气泡半径2倍位置处设置监测点,对0.5 kg、5 kg、50 kg 装药量下的水面波动特性进行分析,如图9所示。0.5 kg、5 kg、50 kg 装药量在监测点处形成的最大水面波动高度分别为40.978 cm、53.636 cm、153.684 cm,随着装药量的增加,产生的水面波动在增大。对于50 kg 装药量,由于气泡的上浮效应,能够托动更多的水体上升,冲击水面形成的水面波动最大高度也相对较大。在2时刻以内,水面波动由爆炸初期气泡顶起的水体产生,气泡半径将影响水面波动的大小。随着中心水柱以及环形水体的发展,监测点处自由液面先上升后下降,并随着中心水柱及环形水体的下坠冲击,出现波动状况。从图9中可看出,随着装药量增大,达到最大波动的时间在不断提前。经计算,水面波动从水域中心传播到2倍气泡半径处的平均速度分别为1.985 m/s、2.894 m/s、3.533 m/s,由于水面中心水柱和环状水体所具有的势能大小不同,从而影响了水面波动到达测点的时间。随着装药量的增加,水面波动高度在逐渐增大,且水面波动达到最大的时刻也在不断提前。

3 结论

通过 ANSYS 非线性有限元程序对水下爆炸气泡运动过程进行了模拟,研究水下爆炸气泡运动对自由液面形态变化的影响,得到如下结论:

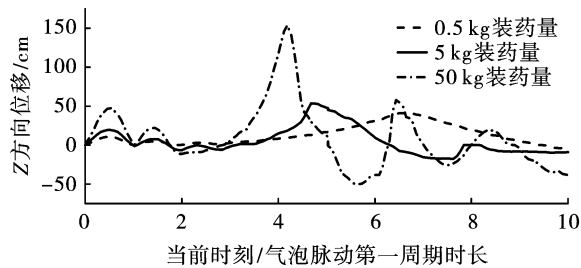


图9 不同装药量条件下水面波动历时曲线

Fig. 9 The water surface fluctuation duration curve under the condition of different charge amount

(1) 相同装药量下,随着水深距离参数的增大,自由液面由破碎状态逐渐形成具有气泡脉动周期的皇冠型水冢,爆炸所产生的空腔半径在逐步增大。

(2) 在相同水深距离参数下,装药量大小变化对水冢基本形态影响较小,水冢类型主要受水深距离参数影响。爆炸产生的气泡最大半径受装药量影响,不同半径气泡在第一周期收缩阶段产生的射流方向不同,气泡中心点在竖直方向无量纲位移趋势不同,随着装药量增大,逐渐向自由液面方向移动。

(3) 随着装药量增加,水冢特征宽度、特征高度的变化呈增大趋势。爆炸产生的水面波动高度与气泡半径大小相关,水面波动速度与波动高度成正比。

参考文献 (References)

- [1] 汪竹平,张道振,徐榘杨,等. 复杂环境内河航道疏浚水下控制爆破[J]. 工程爆破,2013,19(6):50-52,56.
- [1] WANG Zhu-ping, ZHANG Dao-zhen, XU Bing-yang, et al. Underwater controlled blasting for dredging inland waterway in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2013,19(6):50-52,56. (in Chinese)
- [2] ZHANG S, WANG S P, ZHANG A M. Experimental study on the interaction between bubble and free surface using a high-voltage spark generator[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(3):032109.
- [3] 赵根,吴从清,王文辉. 爆破水中冲击波对鱼类损伤研究[J]. 工程爆破,2011,17(4):103-105,93.
- [3] ZHAO Gen, WU Cong-qing, WANG Wen-hui. Research on blasting shock wave in water to damage of fish[J]. Engineering Blasting, 2011, 17(4):103-105,93. (in Chinese)
- [4] SZYMEZAK W G, WARDLAW A B. Numerical methods for explosion plume predictions[R]. Numerical Methods for Explosion Plume Predictions, 1993:3-27.
- [5] 张阿漫,姚熊亮. 近自由面水下爆炸气泡的运动规律研究[J]. 物理学报,2008(1):339-353.
- [5] ZHANG A-man, YAO Xiong-liang. The law of the underwater explosion bubble motion near free surface[J]. Journal of Physics, 2008(1):339-353. (in Chinese)
- [6] 李健,荣吉利,项大林. 近自由面水下爆炸气泡运动的数值计算研究[J]. 工程力学,2011,28(6):200-205,218.
- [6] LI Jian, RONG Ji-li, XIANG Da-lin. Numerical study of bubble motion by underwater explosion near free surface[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(6):200-205,218. (in Chinese)
- [7] 李健,黄红生,林贤坤,等. 基于VOF法的近自由面水下爆炸气泡运动数值模拟[J]. 北京理工大学学报,2016,36(2):122-127.
- [7] LI Jian, HUANG Hong-sheng, LIN Xian-kun, et al. Numerical study on bubble motion by underwater explosion near free surface based on VOF[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016,36(2):122-127. (in Chinese)
- [8] LI J, RONG J L. Bubble and free surface dynamics in shallow underwater explosion[J]. Ocean Engineering, 2011,38(17-18):1861-1868.
- [9] 陈莹玉,姚熊亮. 近水面水下爆炸气泡强耦合运动特性研究[J]. 中国造船,2016,57(3):65-71.
- [9] CHEN Ying-yu, YAO Xiong-liang. Dynamics of underwater explosion bubble near free surface[J]. Shipbuilding of China, 2016,57(3):65-71. (in Chinese)
- [10] 李帅,张阿漫,王诗平. 气泡引起的皇冠型水冢实验与数值研究[J]. 物理学报,2013,62(19):308-318.
- [10] LI Shuai, ZHANG A-man, WANG Shi-ping. Experimental and numerical research on crown-shaped water tombs caused by bubbles[J]. Journal of Physics, 2013, 62(19):308-318. (in Chinese)
- [11] SAFIYARI O R, JANNAT A, REZA M, et al. SPH simulation of waves associated with underwater explosion[J]. International Journal of Coastal Offshore Engineering, 2017,1(1):43-52.
- [12] SAFIYARI O R, JANNAT M R A, BANIJAMALI B. Investigation of physical issues of the initial conditions of free water surface due to underwater disturbances on the basis of SPH numerical simulation of the phenomenon[J]. International Journal of Coastal, 2019, 13(1):75-94.
- [13] 李汪讳,宗智,孙雷. 水下爆炸兴波及其对结构物作用问题的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A辑,2010(6):792-805.
- [13] LI Wang-hui, ZONG Zhi, SUN Lei. A numerical study of underwater explosion induced waves and their effects on nearby marine structures[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010(6):792-805. (in Chinese)