



爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响^{*}

董 琪^{1,2}, 韦灼彬², 唐 廷², 张 宁³

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033;

2. 海军勤务学院, 天津 300450;

3. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266071;)

摘要:考虑水面和水底的影响,采用ALE算法构建浅水爆炸全耦合模型,运用LS-DYNA对不同爆炸深度下的浅水爆炸进行数值模拟,通过与COLE经验公式对比,验证了模拟的可靠性。考察了不同爆炸深度下气泡脉动的形态及荷载特性,并分析了爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响。结果表明:随着爆炸深度增大,气泡脉动受自由面和重力的影响减小,受静水压力和边界面的影响增大,气泡收缩时产生的射流方向由向下逐渐转变为向上,气泡最大半径到达时间和脉动周期亦增大;比冲量随水深增大而增长的趋势先增强后减弱,当爆炸深度靠近水底时,荷载分布基本趋于一致,但荷载沿传播距离的衰减速度随着爆炸深度增大而变缓;危险爆炸深度随测量深度增大而增大的趋势先陡后缓,至趋近水底面后基本不再变化。

关键词:浅水爆炸; 数值模拟; 气泡脉动; 爆炸深度

中图分类号: O382.1 **文献标识码:**A

浅水爆炸是码头、桥梁等水工建筑面临的重要毁伤荷载,其区别于常规水下爆炸问题的特征是存在水面和水底两个特定的边界,以及由此带来的更为复杂的物理运动过程和荷载变化规律。同时,从能量的角度来看,初始冲击波能量约占水下爆炸总能量的53%,而气泡脉动能量约占47%^[1],故开展浅水爆炸气泡脉动荷载的研究具有重要意义。

水下爆炸领域早期代表性的研究成果是Cole的著作《Underwater Explosion》,该书对20世纪中叶前的水下爆炸研究成果进行了系统的总结^[1]。此后,Zamyshlyayev等^[2-3]将Cole的研究成果进一步发展,研究了冲击波在自由表面和水底区域的强非线性效应。顾文彬等^[4-7]在实验研究基础上,系统地分析了水面和水底对浅水爆炸冲击波传播的影响规律和作用机理,总结了爆炸冲击波荷载随水深、炸高、测高等因素变化的规律。朱锡等^[8-13]对水下爆炸数值模拟技术进行了研究,分析了状态方程、网格密度、人工黏性等参数对水下爆炸数值模拟的影响,通过MSC.DYTRAN模拟了近自由面和不同边界条件下水下爆炸气泡脉动全物理过程,考察了气泡脉动的动态特性。张阿漫等^[14-17]针对水下爆炸气泡三维动态特性和流场特性开展了大量研究,形成了较完整的水下爆炸气泡脉动理论。杨莉等^[18]通过开展装药沉底爆炸原理性实验得到了不同水底条件对装药沉底爆炸气泡运动和冲击波压力的影响。韦灼彬等^[19]通过分析港口水下爆炸冲击波的传播过程和气泡膨胀规律发现,自由水面对冲击波荷载和气泡膨胀荷载均有较大影响,水底对气泡膨胀荷载的影响不大,而对冲击波荷载有较大影响。

现有浅水爆炸研究具有以下几个特点:(1)在实验研究和数据分析基础上,开展不同工况下的数值模拟是主要研究手段;(2)多为近自由面爆炸或沉底爆炸,同时涉及水面和水底影响的研究较少;(3)对于冲击波荷载的研究较多,对于气泡脉动荷载的研究较少;(4)多关注气泡脉动全物理过程和动态特性,对于荷载分布和变化规律的研究较少;(5)多以压力作为考量荷载的主要指标,比冲量使用较少。

* 收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-05-22

基金项目: 军队后勤科研计划项目(CHJ13J006)

作者简介: 董 琪(1990—),男,博士研究生,主要从事港口工程、防护工程研究. E-mail:dq_1990@163.com

通信作者: 唐 廷(1980—),男,博士,讲师,主要从事港口工程、防护工程研究. E-mail:kublai@126.com

在浅水爆炸研究中,炸药的爆炸深度既对气泡脉动和整体运动形态具有重要影响,又间接影响水面和水底的作用,是浅水爆炸的重要影响因素之一。本工作同时考虑水面和水底的影响,采用ALE算法构建浅水爆炸的全耦合模型,运用LS-DYNA对浅水爆炸进行数值模拟,通过对不同爆炸深度下气泡脉动的运动及荷载特性,得出爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响。

1 有限元模型

如图1所示,计算模型尺寸为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 27\text{ m}$,其中空气高 12 m ,水域深 10 m ,土壤深 5 m ,空白区域深度为 1.8 m 。炸药为 100 kg TNT集团装药,距离四周水域边界均为 10 m ,装药半径为 0.29 m ,通过关键字INITIAL_VOLUME_FRACTION_GEOMETRY和INITIAL_DETINATION实现球形装药和中心起爆。共设置8个工况,以 1 m 为差值,药包中心位置分别距离水面 $1\sim 8\text{ m}$ 。采用六面体单元划分网格,空气、水、空白单元使用多物质ALE算法,土壤单元采用拉格朗日算法,通过关键字CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID定义流固耦合。欧拉域单元长度为 0.2 m ,单元数量为919 200个;拉格朗日域采用渐变网格,共有单元19 198个。

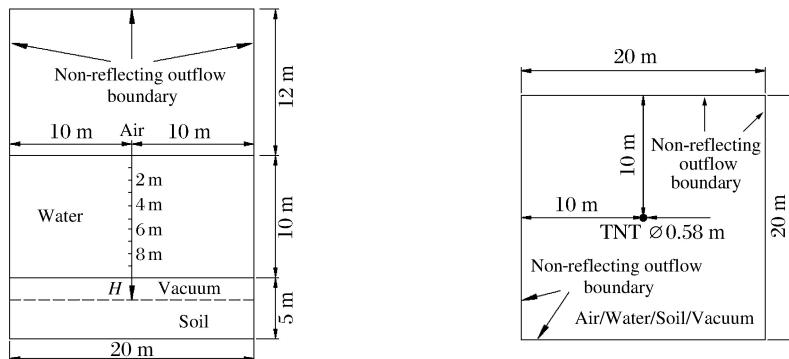


图1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element calculation model

定义大小为 9.8 m/s^2 的加速度场,并设水域边界的压力随深度的增大而增大,以模拟重力场和静水压力。欧拉域采用无反射的Outflow边界,使出口流通符合完全发展条件。除压力之外,其他参量梯度为零,且荷载在人工截断边界处无反射,以尽量消除人工截断边界的影响。模型涉及空气、水、炸药、空白和黏土5种材料,具体材料参数如表1所示,其中 ρ 为材料密度。

炸药采用JWL状态方程描述, A 、 B 、 ω 、 R_1 、 R_2 为JWL状态方程参数;空气用线性多项式状态方程描述, $C_0\sim C_6$ 为线性多项式状态方程参数, E_0 为空气的初始单位质量内能;水采用Grüneisen状态方程描述, C 、 S_1 、 S_2 、 S_3 为Grüneisen状态方程参数, γ_0 为Grüneisen常数;土壤采用线弹性模型描述, E 为弹性模量, G 为剪切模量;空白材料通过关键字MAT_ALE_VACUUM定义。

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_0/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$
Gas	1.293	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^5
Material	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C	S_1	S_2	S_3				γ_0
Water	1 000	0.1647	1.921	-0.096	0				0.35
Material	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	ω		R_1	R_2		
Explosive	1 654	374	3.23	0.3		4.15	0.95		
Material	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		E/MPa			G/MPa			
Soil	1.860		22.4			8			

2 有效性验证

设气泡为球形, 在不考虑上浮运动和流体可压缩性, 并忽略气泡与周围介质的热量交换的假设下, 可得 TNT 炸药水下爆炸气泡脉动压力部分参数表达式^[20]

$$T = 2.08W^{1/3}(H + 10.33)^{-5/6} \quad (1)$$

$$p_m = 7.24W^{1/3}/S \quad (2)$$

$$I_b = 3.245 \times 10^4 W^{1/3} H^{-1/6}/S \quad (3)$$

式中: T 为第 1 次气泡脉动周期, W 为炸药装量, H 为爆炸深度, S 为传播距离, p_m 为气泡脉动荷载峰压, I_b 为气泡脉动比冲量。为方便描述, 引入比例爆深 \bar{H} 、比例测深 \bar{h} 、比例水平距离 \bar{r}

$$\bar{H} = H/W^{1/3} \quad (4)$$

$$\bar{h} = h/W^{1/3} \quad (5)$$

$$\bar{r} = r/W^{1/3} \quad (6)$$

式中: h 为测点深度, r 为药包中心与测点的水平距离。

不同工况下第 1 次气泡脉动周期的比较见表 2, T_m 和 T_e 分别为模拟周期和基于经验公式计算的周期, δ_T 为两者之间的相对偏差。由表 2 可知: 不同工况下, 第 1 次气泡脉动周期的模拟值均小于经验公式计算值。这是由于相对于实际情况, 数值模型中水自由面对气泡发展的限制作用不明显, 气泡发展更迅速。随着爆炸深度增大, 气泡膨胀位置加深, 自由面影响减小, 模拟值逐渐趋近于计算值; 当爆炸深度大于 5 m 时, 模拟值已与经验公式拟合较好, 说明数值模型可以较好地模拟气泡的形态变化。

表 2 第 1 次气泡脉动周期的比较

Table 2 Comparison of the first bubble pulsation

No.	H/m	T_m/s	T_e/s	$\delta_T/\%$	No.	H/m	T_m/s	T_e/s	$\delta_T/\%$
1	1		1.28		5	5	0.80	0.99	-19.19
2	2	0.63	1.19	-47.06	6	6	0.82	0.94	-12.77
3	3	0.69	1.15	-40.00	7	7	0.83	0.90	-7.78
4	4	0.75	1.05	-28.57	8	8	0.81	0.85	-4.71

对于炸药附近位置, 荷载传播距离受气泡整体运动影响较大, 模拟结果与经验公式偏差较大, 故只对距炸药水平距离 4~8 m 区域进行分析。表 3 给出了工况 5 条件下距炸药水平距离为 4~8 m 时气泡脉动荷载模拟结果与经验公式计算结果的比较, 其中 p_{sim} 和 p_{calc} 分别为模拟和数值计算得到的荷载峰压, I_{sim} 和 I_{calc} 为相应的荷载比冲量, δ_p 和 δ_I 分别为荷载峰压和比冲量模拟值与计算值的相对偏差。

表 3 气泡脉动荷载比较

Table 3 Comparison of the load of bubble pulse

r/m	p_{sim}/MPa	p_{calc}/MPa	$\delta_p/\%$	$I_{sim}/(kN \cdot s \cdot m^{-2})$	$I_{calc}/(kN \cdot s \cdot m^{-2})$	$\delta_I/\%$
4	5.53	8.40	-34.17	98.27	133.66	-26.48
5	4.31	6.72	-35.86	81.35	106.93	-23.92
6	4.31	5.60	-23.04	68.74	89.10	-22.85
7	3.45	4.80	-28.13	61.92	76.38	-18.93
8	3.20	4.20	-23.81	59.29	66.83	-11.28

由表 3 可知, 荷载峰压和比冲量的数值模拟结果均小于经验公式计算值, 这是由于经验公式未考虑气泡的整体运动, 荷载传播距离与真实情况不符导致的。随着水平距离的增大, 偏差逐渐减小。另外, 比冲量的偏差明显小于峰压的偏差, 这是由于模型边界定义不能完全模拟无限水域情况, 边界效应使超压时间延长, 压强衰减变缓, 比冲量模拟结果偏大, 距边界越近时越明显, 一定程度上抵消了气泡整体运动带来的偏差。同时, 根据文献[21]结果, 当炸药半径为网格尺寸的 3 倍时, 数值模拟精度趋于稳定, 而

本研究模型中炸药半径是网格尺寸的1.45倍,网格效应对模拟结果有一定影响。总体而言,数值模拟结果偏差较小(峰压的平均偏差为-29.00%,比冲量的平均偏差为-20.69%),可保证模拟精度,说明该模型能够较好反映浅水爆炸气泡脉动形态和荷载情况,具有一定的可信性。

3 宏观现象

表4为不同工况下气泡的脉动特性, T_{re} 为气泡最大半径到达时间。由表4可知,随着爆深的增大,气泡最大半径到达时间和脉动周期均增大,其变化过程可分为3个阶段。(1)当 $\bar{H} \leq 0.43 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,由于膨胀过程中气泡顶破水面,爆轰产物部分泻出,水体下落后重新形成的封闭气泡内外压力差较小,导致气泡脉动振幅和周期较小。(2)当 \bar{H} 的取值为 $0.43 \sim 1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,气泡脉动形态变化基本一致,随着爆深增大,气泡外静水压力升高,气泡脉动变缓,脉动周期增大。(3)当 \bar{H} 取值为 $1.29 \sim 1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,气泡与水底的相互作用强烈,限制了气泡的膨胀和脉动;同时,由于气泡早期运动位置均位于水底附近,气泡外静水压力相近,故最大半径到达时间和脉动周期的增长放缓。

表4 气泡脉动特性

Table 4 Characteristic of bubble pulsation

No.	H/m	$\bar{H}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	T_{re}/s	T/s	No.	H/m	$\bar{H}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	T_{re}/s	T/s
1	1	0.22			5	5	1.08	0.35	0.80
2	2	0.43	0.23	0.63	6	6	1.29	0.37	0.82
3	3	0.65	0.29	0.69	7	7	1.51	0.38	0.83
4	4	0.86	0.31	0.75	8	8	1.72	0.39	0.81

气泡脉动是爆轰生成的高温高压气体产物在向外扩散过程中形成的空化区域在内外压力作用下进行的周期性脉动。在浅水爆炸中,气泡受到自由面、边界面、静水压力和重力的共同影响。对于本研究数值模型,在气泡膨胀初期(0.01 s 内),气泡以球形不断膨胀,各工况宏观现象基本相同,随着气泡继续膨胀,其形态变化出现以下4种情况。

工况1中,药包起爆后气泡迅速顶破水面,爆轰产物泻出,水体被向外顶出且下落后未形成明显封闭气泡,未出现气泡脉动。工况2的宏观现象如图2所示,气泡逐渐以“鸭梨”状膨胀,形成高出水面的水冢;0.08 s时顶破自由面,随后在重力作用下水体下落重新形成封闭气泡,气泡开始收缩同时上表面塌陷形成向下的射流;0.46 s时,射流击穿气泡下表面,以环状气泡形态继续收缩;在内外压力差和惯性共同作用下,气泡持续收缩至0.63 s时达到最小,环状气泡发展为多连通域,随后气泡膨胀上浮,逐渐形成众多独立的小气泡,水体扰动剧烈。

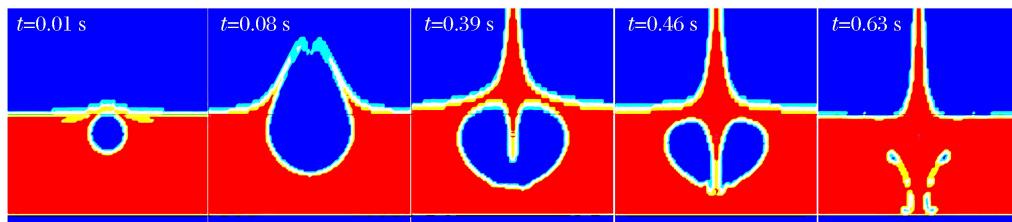


图2 气泡形态图($\bar{H}=0.43 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

Fig. 2 Configuration changing process of bubble form ($\bar{H}=0.43 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

工况3~工况6气泡宏观形态相似,以工况5为代表,其气泡形态变化如图3所示。气泡在膨胀过程中亦逐渐转变为“鸭梨”形,水面被顶起,形成的水冢不断升高;0.35 s时,气泡膨胀至最大,此时气泡达到最大半径并开始收缩,自由表面则继续隆起形成水柱,气泡的上表面开始塌陷,产生向下射流,最终穿透气泡形成环状气泡并持续收缩;0.80 s时,气泡开始回弹进入下一个脉动周期并上浮。对比工况3~工况6可以发现,爆炸位置越接近自由面,射流形成得越早,形状也越细。

工况7和工况8中,以工况8为代表,其气泡形态变化如图4所示。随着气泡膨胀,下表面逐渐临近水底面,自由水面开始隆起,水底向下明显凹陷;受自由面影响气泡顶部逐渐变尖,同时由于水底面的限制,气泡底部趋向扁平,失去球形状态。0.04 s时,水底出现空化现象;0.39 s时,气泡膨胀至最大,随后开始收缩,在气泡上下表面静水压力差作用下,下表面形成不断发展的向上射流最终击穿上表面,形成环状气泡;0.81 s时,多连通域的环状气泡达到最小体积,然后开始膨胀并上浮。

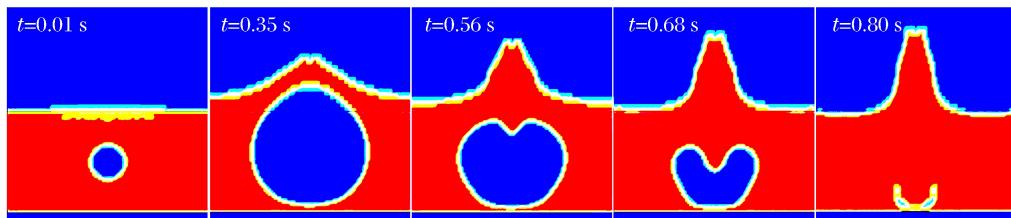


图3 气泡形态图($\bar{H}=1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

Fig. 3 Configuration changing process of bubble form ($\bar{H}=1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

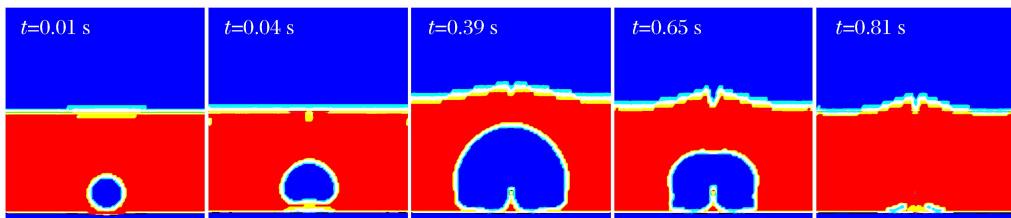


图4 气泡形态图($\bar{H}=1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

Fig. 4 Configuration changing process of bubble form ($\bar{H}=1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)

总的来说,随着爆炸深度增大,浅水爆炸气泡脉动受自由面和重力的影响减小,受静水压力和边界面的影响增大,气泡收缩中产生的射流方向由向下逐渐转变为向上。

4 爆炸深度对气泡脉动荷载的影响

文献[14]研究表明,气泡在第1次脉动后,剩余能量的破坏作用只有初始能量的7%左右,故只对第1次气泡脉动荷载进行分析。另外,以下讨论中取水平比例距离 $\bar{r}=1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

4.1 爆炸深度对荷载分布特点的影响

图5为不同比例爆深下,水平比例距离 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 处气泡脉动荷载比冲量沿水深的分布曲线。由图5可知,各爆炸深度下荷载比冲量分布特点相似,荷载作用均主要集中在炸药爆炸深度及其以下水域。在近水面处,爆炸深度对比冲量分布的影响较小。当 $\bar{H}<0.86 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,不同爆炸深度下比冲量变化趋势出现差异,当 $\bar{H}=0.43 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时比冲量基本不变;当 \bar{H} 为 $0.65\sim1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,气泡受自由面和水底的影响均较小,随着爆炸深度增大气泡外静水压力增大,气泡收缩至最小时的内外压力差亦增大,故气泡膨胀辐射出的脉动压力增大,使得当爆炸深度越大时,比冲量随水深增大而增大的趋势越大;当 \bar{H} 为 $1.29\sim1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,比冲量分布曲线基本趋于一致,这是由于气泡脉动受水底限制作用明显,脉动变化形态相似,气泡膨胀辐射出的脉动压力亦基本一致。

图6为不同比例爆深下比冲量沿水平比例距离的衰减曲线,其中 I_x 的下标“x”为比例爆深取值。由图6可知,爆深越大,气泡沿水深方向的整体位移越小,荷载实际传播距离随水平距离增大而增大的趋势越小,故表现出比冲量随爆炸深度增大而衰减的趋势变缓,且变缓幅度逐渐减小的规律。

综上所述,随着爆炸深度的增大,气泡脉动比冲量随水深增大而增大的趋势变大,当比例爆深大于 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 后,荷载分布曲线基本趋于一致,气泡脉动荷载沿水深的分布受爆炸深度影响减小。而荷载沿传播距离衰减的速度则随着爆炸深度增大而变缓。

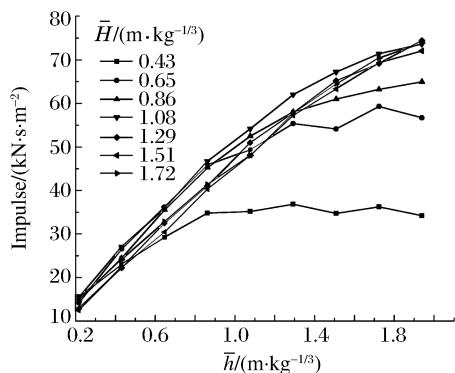


图5 水下爆炸荷载分布

Fig. 5 Distribution of underwater explosion loading

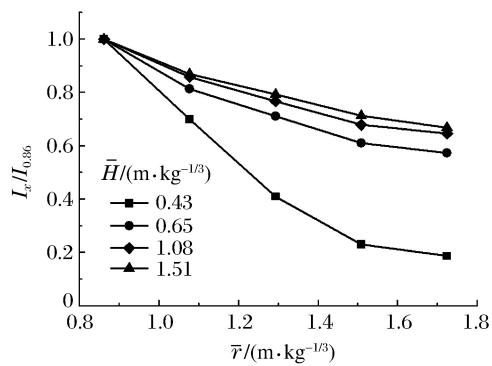


图6 比冲量衰减曲线

Fig. 6 Specific impulse decay curve

4.2 不同水深位置荷载受爆炸深度的影响

参考文献[22]关于“最佳爆深”的定义,引入“危险爆深”的概念,定义为对特定位置处造成最大荷载作用的炸药爆炸深度。本节以气泡脉动荷载为指标对危险爆深进行分析,表5和表6分别给出了不同爆深下气泡脉动荷载峰压和比冲量。根据表5和表6中数据可得不同测深下气泡脉动荷载峰压和比冲量随爆深的变化情况,如图7和图8所示。由表5可知,随着测深的增大,危险爆深先减小后增大,主要是由于气泡整体运动和最小体积时的气泡形态导致的。对于近水面位置($\bar{h} \leq 0.43 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$),当爆深 $\bar{H}=1.29 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,气泡脉动荷载峰压最大;随着水深的增大,危险爆深为 $0.65 \sim 0.86 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$;当 $\bar{h} \geq 1.51 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,最大荷载均出现在爆深为 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时。

表5 不同爆深下各水深气泡脉动荷载峰压

Table 5 Peak pressure of bubble impulse vs. explosion depth in different depths

$\bar{H}/$ ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	p_m/MPa								
	$\bar{h}=0.22$	$\bar{h}=0.43$	$\bar{h}=0.65$	$\bar{h}=0.86$	$\bar{h}=1.08$	$\bar{h}=1.29$	$\bar{h}=1.51$	$\bar{h}=1.72$	$\bar{h}=1.94$
0.43	0.41	0.66	0.94	0.95	1.25	1.13	1.17	1.19	1.24
0.65	0.57	1.12	1.57	1.98	2.11	2.29	2.30	2.27	2.54
0.86	0.56	1.26	1.30	2.00	1.86	2.72	2.26	2.62	3.02
1.08	0.56	1.00	1.15	1.99	1.76	2.60	2.38	3.41	3.29
1.29	0.70	1.40	1.15	1.71	1.56	2.06	2.33	2.48	2.85
1.51	0.57	0.76	1.02	1.49	1.47	1.88	2.02	2.29	2.62
1.72	0.56	0.86	0.93	1.27	1.46	1.69	2.03	2.21	2.53

Note: The unit of \bar{h} is $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$.

表6 不同爆深下各水深气泡脉动荷载比冲量

Table 6 Peak pressure of bubble impulse vs. explosion depth in different depths

$\bar{H}/$ ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$)	$I/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$								
	$\bar{h}=0.22$	$\bar{h}=0.43$	$\bar{h}=0.65$	$\bar{h}=0.86$	$\bar{h}=1.08$	$\bar{h}=1.29$	$\bar{h}=1.51$	$\bar{h}=1.72$	$\bar{h}=1.94$
0.43	15.57	23.05	29.26	34.81	35.17	36.82	34.74	36.25	34.23
0.65	14.17	27.04	36.19	45.86	49.39	55.38	54.14	59.30	56.71
0.86	14.74	24.41	35.58	45.25	52.46	58.02	60.98	63.20	64.97
1.08	15.44	26.58	35.84	46.75	54.16	62.04	67.21	71.40	73.65
1.29	12.89	22.25	32.42	41.02	50.95	57.80	65.15	69.21	74.42
1.51	12.53	22.35	30.45	40.39	48.12	57.30	63.35	69.37	72.06
1.72	14.89	24.16	32.79	41.32	48.06	57.76	64.49	70.41	73.88

Note: The unit of \bar{h} is $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$.

在自由面和临近水底面位置反射作用较强,使气泡脉动荷载升压和衰减速度较慢。荷载比冲量表现出与峰压不一样的规律。由表6可知,随着水深的增大,危险爆深逐渐增大至 $0.65 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$;此后,危险爆深迅速增大,当 $\bar{h} \geq 0.86 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,危险爆深稳定在 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 附近。综上所述,当水深小于 $0.65 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,危险爆深为 0.65 或 $1.29 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$;当水深为 $0.65 \sim 1.29 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,危险爆深为 $0.86 \sim 1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$;当水深大于 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 时,危险爆深为 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

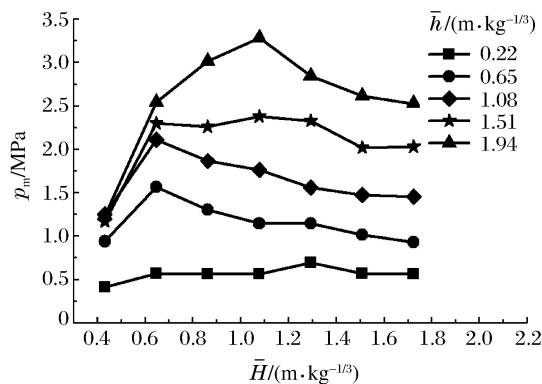


图7 爆深对不同水深位置荷载峰压的影响

Fig. 7 Peak pressure versus explosion depth in different depths

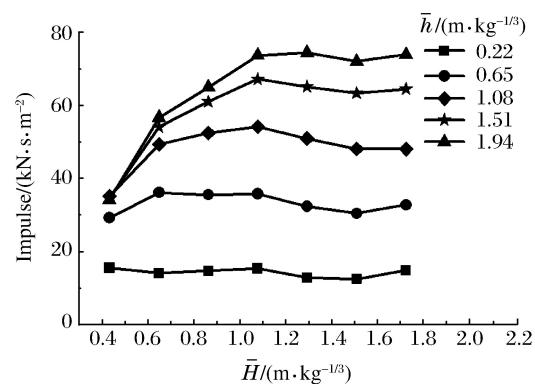


图8 爆深对不同水深位置比冲量的影响

Fig. 8 Specific impulse versus explosion depth in different depths

5 结论

将LS-DYNA扩展到浅水爆炸研究中,同时考虑水面和水底的影响,建立了可较好反映浅水爆炸气泡脉动形态和荷载情况的全耦合数值模型,对不同爆炸深度下的浅水爆炸进行了数值模拟,通过与经验计算公式对比验证了仿真的可信性。考察不同爆炸深度下气泡脉动的形态变化和水中荷载分布情况,研究爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响,得到如下结论。

(1) LS-DYNA可模拟不同材料在爆炸场中的状态,提供稳定可靠的耦合方式;通过软件自带的初始化和边界定义命令,可有效定义浅水爆炸中静水压力分布和边界条件的实际情况。

(2) 随着爆炸深度增大,浅水爆炸气泡脉动受自由面和重力的影响减小,受静水压力和边界面的影响增大,气泡收缩中产生的射流方向由向下转变为向上;气泡最大半径到达时间和脉动周期亦增大,增长趋势“先陡后缓”。

(3) 当爆炸位置在近水面区域时,气泡脉动比冲量随水深增大而增大的趋势随着爆炸深度增大变大;当比例爆深大于 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 后,荷载分布曲线基本趋于一致,气泡脉动荷载沿水深的分布受爆炸深度影响减小。而荷载沿传播距离衰减的速度则随着爆炸深度增大变缓。

(4) 危险爆深随测深增大而增大的趋势先陡后缓,至趋近水底面后基本不再变化。水深越深的位置,气泡脉动荷载受爆炸深度的影响越大。

(5) 提出“危险爆深”的概念,对于浅水爆炸及其毁伤效应研究具有重要意义。

爆炸深度对于浅水爆炸的影响规律受炸药当量、水域范围、水深、水底和水面条件等多种因素的影响,有待进一步开展更加深入的研究,得到更具普遍性、广泛性的定量结论。

参考文献:

- [1] COLE R H. Underwater explosion [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948: 118-127.
- [2] ZAMYSHLYAYEV B V, YAKOVLEV Y S. Dynamic loads accompanying an underwater explosion [M]. Sudostroyeniye, Leningrad, 1967.

- [3] ZAMYSHLYAYEV B V. Dynamic loads in underwater explosion; AD-757183 [R]. 1972;86-120.
- [4] 顾文彬,叶序双,张朋祥,等.浅层水中爆炸水底影响的试验研究 [J].解放军理工大学学报,2001,2(2):55-58.
GU W B, YE X S, ZHANG P X, et al. Experimental studies of bottom influence in shallow layer water explosion [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(2):55-58.
- [5] 顾文彬,叶序双,刘文华,等.界面对浅层水中爆炸冲击波峰值压力影响的研究 [J].解放军理工大学学报,2001,2(5):61-63.
GU W B, YE X S, LIU W H, et al. Peak pressure investigation of exploding wave influenced by interfaces in shallow-layer water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(5):61-63.
- [6] 顾文彬,孙百连,阳天海,等.浅层水中沉底爆炸冲击波相互作用数值模拟 [J].解放军理工大学学报,2003,4(6):64-68.
GU W B, SUN B L, YANG T H, et al. Numerical simulation of explosive shockwave interaction in shallow-layer water [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2003, 4(6):64-68.
- [7] 顾文彬,马海洋,唐勇,等.水底对浅水中装药爆炸效果的影响 [J].爆破,2003,20(4):88-92.
GU W B, MA H Y, TANG Y, et al. Influence of water bottom on the explosion effect of shallow-layer water charging [J]. Blasting, 2003, 20(4):88-92.
- [8] 张振华,朱锡,白雪飞.水下爆炸冲击波的数值模拟研究 [J].爆炸与冲击,2004,24(2):182-188.
ZHANG Z H, ZHU X, BAI X F. The study on numerical simulation of underwater blast wave [J]. Explosions and Shock Waves, 2004, 24(2):182-188.
- [9] 方斌,朱锡,张振华,等.水下爆炸冲击波数值模拟中的参数影响 [J].哈尔滨工程大学学报,2005,26(4):419-424.
FANG B, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Effect of parameters in numerical simulation of underwater shock wave [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(4):419-424.
- [10] 方斌,朱锡.不同边界条件下水下爆炸气泡的数值模拟 [J].海军工程大学学报,2008,20(2):85-90.
FANG B, ZHU X. Numerical simulation of underwater explosion bubble with different boundaries [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(2):85-90.
- [11] 卞金磊,朱锡,张振华.近自由面水下爆炸气泡现象的数值仿真研究 [J].舰船科学技术,2008,30(4):113-116.
MU J L, ZHU X, ZHANG Z H. Numerical simulation study of bubbles induced by undex near a free surface [J]. Ship Science and Technology, 2008, 30(4):113-116.
- [12] 卞金磊,朱锡,张振华,等.近自由面水下爆炸气泡相似问题的仿真研究 [J].系统仿真学报,2009,21(17):5568-5570.
MU J L, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Numerical study of similarity of bubbles induced by undex near free surface [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17):5568-5570.
- [13] 袁建红,朱锡,张振华.水下爆炸载荷数值模拟方法 [J].舰船科学技术,2011,33(9):18-23.
YUAN J H, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Numerical simulation method study of underwater explosion load [J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(9):18-23.
- [14] 张阿漫.水下爆炸气泡三维动态特性研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006:2-5.
ZHANG A M. 3D Dynamic behavior of underwater explosion bubble [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006:2-5.
- [15] 张阿漫,姚熊亮.水深和药量的变化对水下爆炸气泡射流的影响研究 [J].工程力学,2008,25(3):222-229.
ZHANG A M, YAO X L. The effect of charge and water depth on the underwater explosion bubble [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3):222-229.
- [16] 李帅,张阿漫,韩蕊.气泡多周期运动时引起的流场压力与速度 [J].力学学报,2014,46(4):533-543.
LI S, ZHANG A M, HAN R. Numerical analysis on the velocity and pressure fields induced by multi-oscillations of an underwater explosion bubble [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(4):533-543.
- [17] 姚熊亮,刘文韬,张阿漫,等.水下爆炸气泡及其对结构毁伤研究综述 [J].中国舰船研究,2016,11(1):36-45.
YAO X L, LIU W T, ZHANG A M, et al. Review of the research on underwater explosion bubbles and the corresponding structural damage [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1):36-45.
- [18] 杨莉,汪玉,黄超,等.不同水底介质对有限域中装药沉底爆炸特性的影响 [J].高压物理学报,2012,26(5):545-550.
YANG L, WANG Y, HUANG C, et al. Effects of different grounds on the loading characteristics of limited under-

- water explosion from a bottom charge [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(5): 545-550.
- [19] 韦灼彬, 唐廷, 王立军. 港口水下爆炸荷载冲击特性研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 18-22.
WEI Z B, TANG T, WANG L J. The study on shock characteristics of underwater explosion in port [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 18-22.
- [20] 陈永念. 舰船水下爆炸数值仿真及抗爆结构研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 43-46.
CHEN Y N. Study on damage mechanism in ship underwater explosion and structure anti-shock [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008: 43-46.
- [21] 张社荣, 李宏璧, 王高辉, 等. 水下爆炸冲击波数值模拟的网格尺寸确定方法 [J]. 振动与冲击, 2015(8): 93-100.
ZHANG S R, LI H B, WANG G H, et al. A method to determine mesh size in numerical simulation of shock wave of underwater explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(8): 93-100.
- [22] 梁斌, 钱立新, 任时成. 装药埋深对机场跑道爆破效应影响数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 101-104.
LIANG B, QIAN L X, REN S C. Numerical simulation of influence of blasting depth on runway damage effect [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(3): 101-104.

Influence of Explosion Depth on Bubble Pulsation in Shallow Water Explosion

DONG Qi^{1,2}, WEI Zhuobin², TANG Ting², ZHANG Ning³

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Naval Logistics College of PLA, Tianjin 300450, China;
3. Naval Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the numerical model established using the ALE algorithm in consideration of the influencing factors of the water surface and the water bottom, the shallow water explosion in different explosion depths was simulated using LS-DYNA, and the credibility of the simulation results were verified by the comparison of numerical results and empirical formula. Then the bubble pulsation's form and loading characteristics in different explosion depths were explored, and the influence of the explosion depth on the bubble pulsation in shallow water explosion was analyzed. The results show that with the increase of the explosion depth, the influence of the free surface and gravity diminish, the influence of the hydrostatic pressure and the boundary surface rise up, the jet flow direction constantly changes from downward to upward during the bubble shrinkage process, and the times of the maximum bubble radius and pulsation period also gradually increase; that the specific impulse-water depth curve increases at first and then decreases, and the load distributions are basically consistent with each other when the explosion depth is close to the water bottom; the decline of the load slows down with the explosion's spreading distance; and that the growing trend of hazard explosion depth tends to slow down after rising steeply along with the increase of the depth measured, becoming stable towards the water bottom.

Keywords: shallow water explosion; numerical simulation; bubble pulsation; detonation depth