

我国高压物理领域  
唯一专业期刊

# 高压物理学报

CHINESE JOURNAL OF HIGH  
PRESSURE PHYSICS

水下爆炸

2018

中国物理学会  
高压物理专业委员会 主办

高 压 物 理 学 报

GAOYA WULI XUEBAO

1987 年 9 月创刊

2018 年主题专刊

· 水下爆炸 ·

## 目 次

爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响.....	董 琪, 韦灼彬, 唐 廷, 张 宁
有机玻璃-空气层结构对爆炸水池水下爆炸地基振动的影响 .....	
..... 汪 泉, 汤有富, 李志敏, 宫 婕, 程扬帆, 刘上豪, 李成孝	
温压炸药水中爆炸的后燃反应研究.....	冯 淞, 饶国宁, 彭金华, 王伯良
水下爆炸下有限尺度平板的载荷特性及结构响应试验研究.....	刘丽滨, 李海涛, 刁爱民, 王晓强
距离参数对浅水中气泡运动影响规律的实验和数值模拟 .....	孟 禺, 张 舵, 郑 监
《高压物理学报》2018 年主题专刊名录 .....	《高压物理学报》编辑部
2018 年“水下爆炸”主题专刊论文引用信息 .....	封 三



官方网站: [www.gywlxb.cn](http://www.gywlxb.cn)

官方邮箱: [gaoya@caep.cn](mailto:gaoya@caep.cn)

联系电话: 0816-2490042



# 爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响<sup>\*</sup>

董 琪<sup>1,2</sup>, 韦灼彬<sup>2</sup>, 唐 廷<sup>2</sup>, 张 宁<sup>3</sup>

(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%<sup>[1]</sup>,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<sup>[1]</sup>。此后,Zamyshlyayev等<sup>[2-3]</sup>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<sup>[4-7]</sup>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<sup>[8-13]</sup>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<sup>[14-17]</sup>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<sup>[18]</sup>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<sup>[19]</sup>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1~8 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。

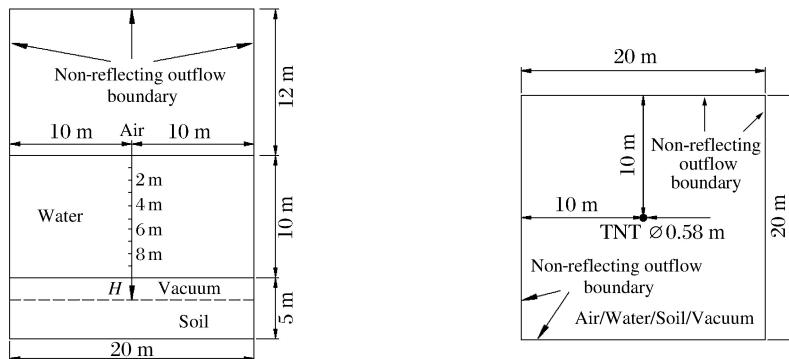


图1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element calculation model

定义大小为 $9.8\text{ m/s}^2$ 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 $\rho$ 为材料密度。

炸药采用JWL状态方程描述, $A$ 、 $B$ 、 $\omega$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 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, $\gamma_0$ 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	$2.5 \times 10^5$
Material	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C$	$S_1$	$S_2$	$S_3$				$\gamma_0$
Water	1 000	0.1647	1.921	-0.096	0				0.35
Material	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$\omega$		$R_1$	$R_2$		
Explosive	1 654	374	3.23	0.3	4.15				0.95
Material	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		$E/\text{MPa}$			$G/\text{MPa}$			
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<sup>[20]</sup>

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

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

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

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,  $\delta_T$  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,  $\delta_p$  和  $\delta_I$  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.	$H/\text{m}$	$\bar{H}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$T_{re}/\text{s}$	$T/\text{s}$	No.	$H/\text{m}$	$\bar{H}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$T_{re}/\text{s}$	$T/\text{s}$
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( $0.01 \text{ s}$ 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。

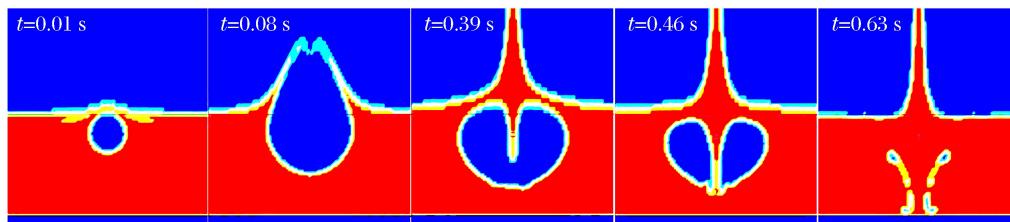


图2 气泡形态图( $\bar{H}=0.43 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ )

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。

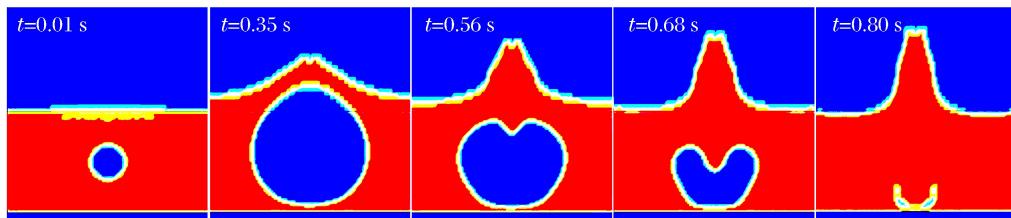


图3 气泡形态图( $\bar{H}=1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ )

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

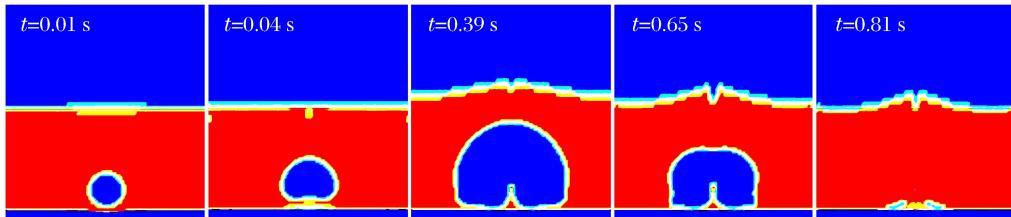


图4 气泡形态图( $\bar{H}=1.72 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ )

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。

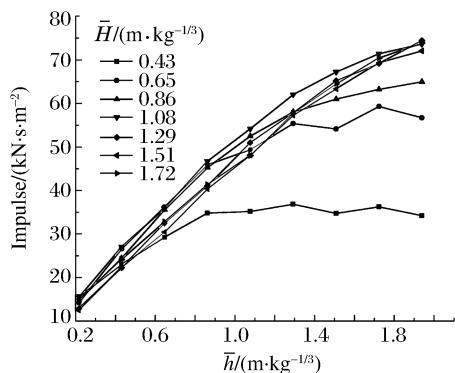


图5 水下爆炸荷载分布

Fig. 5 Distribution of underwater explosion loading

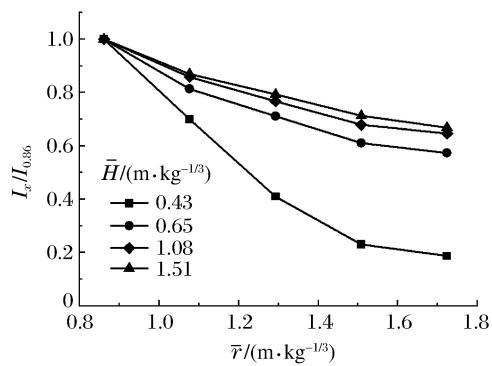


图6 比冲量衰减曲线

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

$\bar{H}/$ ( $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ )	$p_m/\text{MPa}$								
	$\bar{h}=0.22$	$\bar{h}=0.43$	$\bar{h}=0.65$	$\bar{h}=0.86$	$\bar{h}=1.08$	$\bar{h}=1.29$	$\bar{h}=1.51$	$\bar{h}=1.72$	$\bar{h}=1.94$
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 $1.08 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 。

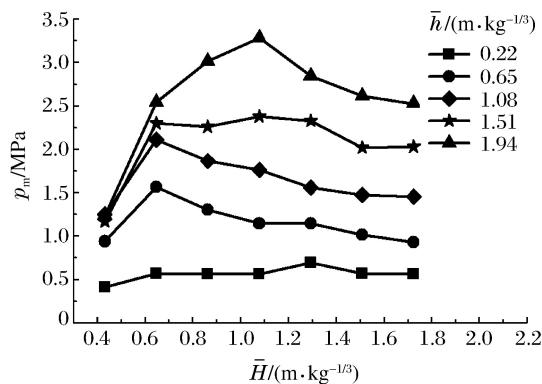


图7 爆深对不同水深位置荷载峰压的影响

Fig. 7 Peak pressure versus explosion depth in different depths

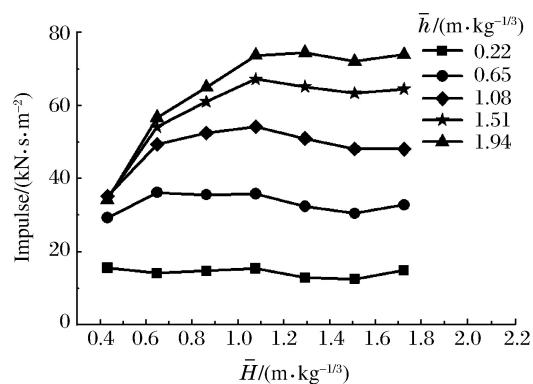


图8 爆深对不同水深位置比冲量的影响

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<sup>1,2</sup>, WEI Zhuobin<sup>2</sup>, TANG Ting<sup>2</sup>, ZHANG Ning<sup>3</sup>

(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



# 有机玻璃-空气层结构对爆炸水池 水下爆炸地基振动的影响<sup>\*</sup>

汪 泉<sup>1,2</sup>, 汤有富<sup>1,3</sup>, 李志敏<sup>1</sup>, 宫 婕<sup>1</sup>, 程扬帆<sup>1</sup>, 刘上豪<sup>1</sup>, 李成孝<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学化学工程学院,安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学土木工程博士后流动站,安徽 淮南 232001;

3. 浙江物产光华民爆器材有限公司,浙江 衢州 324400)

**摘要:**为了研究有机玻璃-空气层结构对水下爆炸振动的影响,采用NUBOX-6016爆破振动测试仪监测小水池(直径5.5 m、高3.62 m)中该结构下水下爆炸引起地基振动信号,研究不同空气层厚度对最大振动速度的影响;基于Matlab软件编写相关程序对测得的振动信号进行Hilbert-Huang变换(HHT),分析不同空气层厚度对振动信号全局频率的影响。结果表明:对于有机玻璃-空气层结构,随着空气层厚度的增加,最大振动速度呈先减小后增大的趋势,当空气层厚度为120 mm时隔振效果最佳;通过对振动信号的HHT分析得到全局频率所对应的幅值,5~15 Hz低频区间段的幅值衰减较明显,且振动作用时间缩短,能够有效防止水下爆炸与建/构筑物之间产生共振现象。所得试验结果及分析对水下爆破工程防护及军事舰艇防雷仓结构设计等具有一定参考价值。

**关键词:**水下爆炸;有机玻璃-空气层结构;爆炸振动;Hilbert-Huang变换

**中图分类号:** O383.1      **文献标识码:**A

随着海洋资源的开发与水下爆破技术的发展,水下爆破安全防护问题逐渐受到人们的重视。在陆地岩石中爆破,地震波能量一般不足爆破总能量的10%;而在水下介质中爆破时,地震波能量可达20%。水下爆破时结构的振动效应较陆地岩石中更复杂,一般是低频波与高频波共同作用的结果,其主要特征是振动频带宽、高频丰富、振幅大<sup>[1-3]</sup>。在浅水域近距离处开展水下钻孔爆破工程时,通过采用水下预裂爆破、气泡帷幕防护、空气层防护、多段延时起爆等措施削减地震波和水中冲击波<sup>[4]</sup>。由于空气的波阻抗比水小很多,当水下冲击波传播到空气与水的交界面时,水下冲击波将在介质交界面处发生反射,其透射系数较小,少部分能量透射到空气介质中,可有效缓冲水下冲击波和衰减地震能量<sup>[5-6]</sup>。樊自建等<sup>[7]</sup>、贾虎等<sup>[8-9]</sup>、寇晓枫等<sup>[10]</sup>开展实验研究了空气隔层对水中冲击波的衰减效果,得出结论:空气隔层能有效衰减冲击波峰值压力、冲击波冲量及总能量,对保护对象有较好的防护效果。姚熊亮等<sup>[11-12]</sup>、刘欣等<sup>[13]</sup>建立了多介质水下爆炸数值模型进行模拟计算,其研究结果表明,空气层结构不仅可以防护接触爆炸产生的冲击波,而且对非接触爆炸也有很好的防护效果。

本课题组前期针对不同段别雷管的水下爆炸振动信号进行了Hilbert-Huang变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)分析<sup>[14]</sup>,但未进行有机玻璃-空气层结构对水下爆炸振动影响的研究,且国内外相关文献在此方面报道甚少。基于此考虑,本工作在小水池中进行有机玻璃-空气层结构约束下的水下爆炸振动测试,研究空气层厚度对水下爆炸最大振动速度的影响,通过HHT分析其地基振动信号,探究空

\* 收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(11502001); 中国博士后基金面上项目(2014M561808); 安徽省博士后基金项目(2014B035)

作者简介: 汪 泉(1980—),男,博士,副教授,主要从事爆炸力学研究. E-mail:wqau@163.com

气层厚度对水下爆炸振动全局频率的影响,为爆炸水池减振、隔振以及减弱爆炸振动对建筑物的破坏作用提供理论支撑。

## 1 振动信号 HHT 分析理论

HHT 法适用于处理非线性、非平稳信号,主要由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)和 Hilbert 变换两部分组成<sup>[15-17]</sup>。相对于小波分析,EMD 分解克服了小波基选择问题,避免了由于基函数不同所带来的影响。另外,原始信号经 EMD 分解后得到的固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)具有不同特征尺度,该过程是自适应的、高效的。通过 EMD 分解得到的各 IMF 分量经 Hilbert 变换后,得到各 IMF 分量的瞬时频谱,综合所有 IMF 分量的瞬时频谱得到 Hilbert 谱。

爆炸振动原始信号中包含 3 个方向的信号,依据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)中的 13.2.2 条规定,选取振动速度值最大的垂向振动信号(记为  $X(t)$ )进行分析。基于 HHT 法对爆炸振动信号进行 EMD 分解以及 Hilbert 变换,过程如下。

原始信号  $X(t)$  经  $n$  次 EMD 分解,可表示为

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中: $C_i(t)$  为经 EMD 分解得到的第  $i$  阶 IMF 分量, $r_n(t)$  为原始信号减去  $n$  个 IMF 分量之和的残差。

对得到的 IMF 分量做 Hilbert 变换

$$H[C_i(t)] = \frac{1}{\pi} P_V \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_i(t')}{t - t'} dt' \quad (2)$$

式中: $P_V$  表示柯西主值。

构造解析信号  $Z(t)$

$$Z(t) = C_i(t) + jH[C_i(t)] = a_i(t)e^{j\varphi_i(t)} \quad (3)$$

式中: $a_i(t)$  为幅值函数, $\varphi_i(t)$  为相位函数。

$$a_i(t) = \sqrt{C_i^2(t) + H^2[C_i(t)]} \quad (4)$$

$$\varphi_i(t) = \tan^{-1} \frac{H[C_i(t)]}{C_i(t)} \quad (5)$$

原始信号分解后可表示为

$$X(t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{\int \omega_i(t) dt} \quad (6)$$

Hilbert 谱可表示为

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{\int \omega_i(t) dt} \quad (7)$$

式中: $\omega$  表示角频率。

根据以上理论,采用 Matlab 编写程序代码,加载相应模块即可作出相关 Hilbert 谱。

## 2 有机玻璃-空气层结构条件下小水池水下爆炸振动试验

### 2.1 试验装置与仪器

设计了 4 种类型的有机玻璃-空气层结构,空气层厚度(直径)分别为 40、80、120 和 160 mm。中心装药管为壁厚 1 mm 的有机玻璃管,外层为壁厚 2 mm 的有机玻璃壳体,装药中心与复合结构中心在同一高度,如图 1 所示。

采用 NUBOX-6016 型爆破振动测试仪记录振动信号,其传感器使用 TP-3V-10144 型号,采用单次采样方式,采样频率和时间分别为 5 kHz、2 s,延时点数—256,触发方式为通道出窗触发,触发条件为 0.05 cm/s,耦合方式为直流耦合。

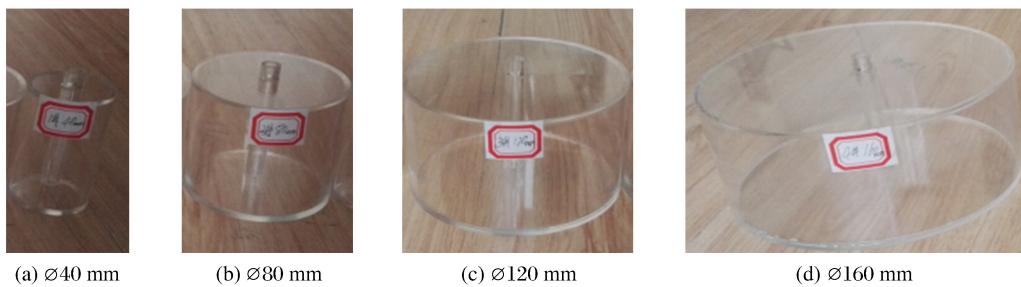


图1 有机玻璃-空气层结构  
Fig. 1 Picture of plexiglass-air interlayer structure

## 2.2 试验系统

在直径为5.5 m、高3.62 m的小型爆炸水池中进行水下爆炸试验。入水深度的选取是基于消除爆炸水池边界效应的考虑。一般装药置于水池中心总深度的2/3处时,来自水面和池底的边界效应可互相抵消<sup>[18]</sup>,因此装药中心的入水深度选取为2.4 m。选用3台测振仪,分别布设在距爆炸水池筒体外壁1、2、3 m处(地基振动速度在3 m处已衰减到较小数值,而1、2、3 m处测点为等间距的典型观测点,分别标记为1#、2#、3#)。试验系统如图2所示。

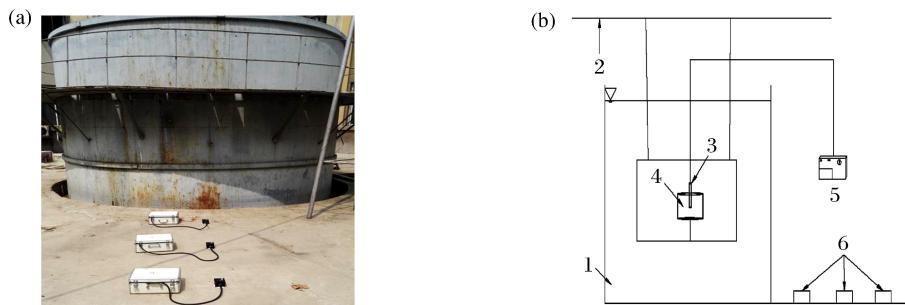


图2 振动测试系统(1. 爆炸水池;2. 固定架;3. 8号标准雷管;4. 空气隔层;5. 发爆器;6. 1#、2#、3# 测振仪)  
Fig. 2 Vibration test system (1. Explosion pool; 2. Fixed mount; 3. Detonator; 4. Air interlayer;  
5. Initiator; 6. 1#, 2#, 3# vibration measurer)

## 2.3 试验结果与分析

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)规定,选取x、y、z 3个方向中振动速度最大的z方向(与地面垂直方向)振动信号进行分析。测试得到不同距离、不同厚度空气层条件下的水下爆炸振动参数,如表1所示。为了探究有机玻璃壳体对水下爆炸振动速度的影响,进行填充水和空气层的对比试验。表2为不同距离、不同厚度水隔层情况下的水下爆炸振动参数。

由表1和表2可看出:相对于水隔层,不同厚度空气层条件下各测点处主振频率皆有所降低;部分情况下出现主振频率值不变的现象,可能由于爆炸当量较小及测振仪灵敏度较小等原因,因此需要进一步对信号进行频谱分析。图3、图4分别为不同厚度空气层、水隔层结构对各测点振动速度的影响。

表1 不同距离、不同厚度空气层对水下爆炸振动的影响

Table 1 Influence of distances and thickness of air interlayer on underwater explosion vibration

Distance/ m	Direction	Main vibration frequency/Hz				Maximum vibration velocity/(cm·s <sup>-1</sup> )			
		Ø40 mm	Ø80 mm	Ø120 mm	Ø160 mm	Ø40 mm	Ø80 mm	Ø120 mm	Ø160 mm
1	z	56.763	56.763	56.763	56.763	0.086	0.070	0.054	0.070
2	z	56.763	56.763	56.763	44.556	0.118	0.097	0.082	0.101
3	z	56.763	56.763	56.763	56.763	0.080	0.071	0.061	0.086

表2 不同距离、不同厚度水隔层对水下爆炸振动的影响

Table 2 Influence of distances and thickness of water interlayer on underwater explosion vibration

Distance/ m	Direction	Main vibration frequency/Hz				Maximum vibration velocity/(cm·s <sup>-1</sup> )			
		Ø40 mm	Ø80 mm	Ø120 mm	Ø160 mm	Ø40 mm	Ø80 mm	Ø120 mm	Ø160 mm
1	<i>z</i>	62.256	62.256	62.256	56.763	0.086	0.169	0.184	0.185
2	<i>z</i>	62.256	62.256	62.256	62.256	0.155	0.145	0.160	0.161
3	<i>z</i>	62.256	62.256	62.256	62.256	0.101	0.097	0.107	0.116

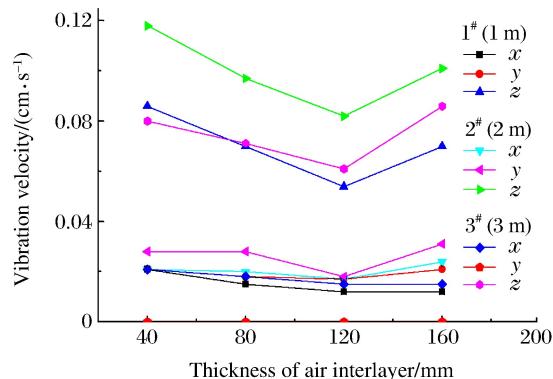


图3 不同厚度空气层对各测点振速的影响

Fig. 3 Influence of different thicknesses of air interlayer on vibration velocity

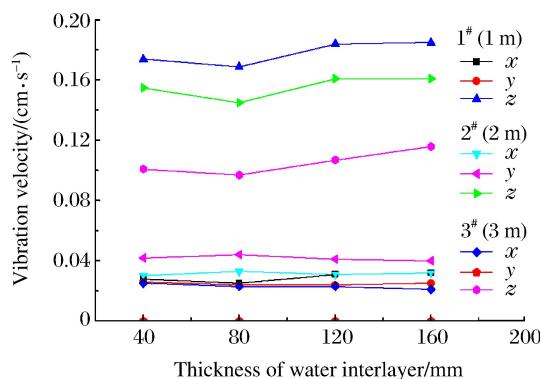


图4 不同厚度水隔层对各测点振速的影响

Fig. 4 Influence of different thicknesses of water interlayer on vibration velocity

从图3、图4可看出,对比相同厚度的空气层和水隔层结构,空气层结构对水下爆炸振动的衰减更明显。相同厚度水隔层结构条件下:3 m处的振动速度衰减程度最大,振动速度值最小;2 m处速度值次之;1 m处速度值最大。而相同厚度空气层结构条件下:1 m处的振动速度衰减程度最大,振动速度值最小;3 m处速度值次之;2 m处速度值最大。可见空气层结构对近区1 m处的振动速度影响较大。

### 3 振动信号的HHT分析

目前国内使用的振动信号采集仪主要采集最大振幅所对应的频率,即主振频率,无法对振动信号整个过程的振动频率进行监测;但爆破工程中需要保护的对象有其自身的固有频率,为了避免共振造成的破坏,需要测试振动信号的全局频率,以观测危险频段的振幅值是否需要进一步防护。本试验爆破当量较小,振动信号相对较弱,同时可能由于测振仪灵敏度较小,出现部分情况主振频率值不变的现象。因此,有必要对振动信号进行 Hilbert 谱分析。

#### 3.1 EMD 分解

通过 Matlab 软件编写相应程序,将振动测试仪采集到的振动信号读取到矩阵中,并根据试验设置的采集频率、采集时长等设置运行参数。对事先装载的 EMD 工具箱,只需调用命令函数即可使用 EMD 分解算法。以空气层厚度为 40 mm、距离 1 m 处的垂直方向振动信号为例(见图 5),利用 EMD 分解该爆炸振动信号得到各 IMF 分量,如图 6 所示。

从图 6 可看出,采用 EMD 分解得到 12 个 IMF 分量  $C_1 \sim C_{12}$  和一个余量  $r_{12}$ 。其中: $C_1$  和  $C_2$  分量频率最高,所含能量较低,代表振动测试过程中周围

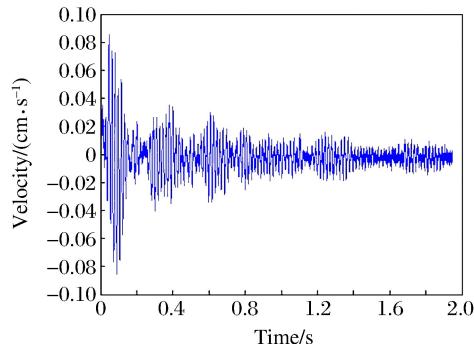


图5 原始振动信号

Fig. 5 Original vibration signal

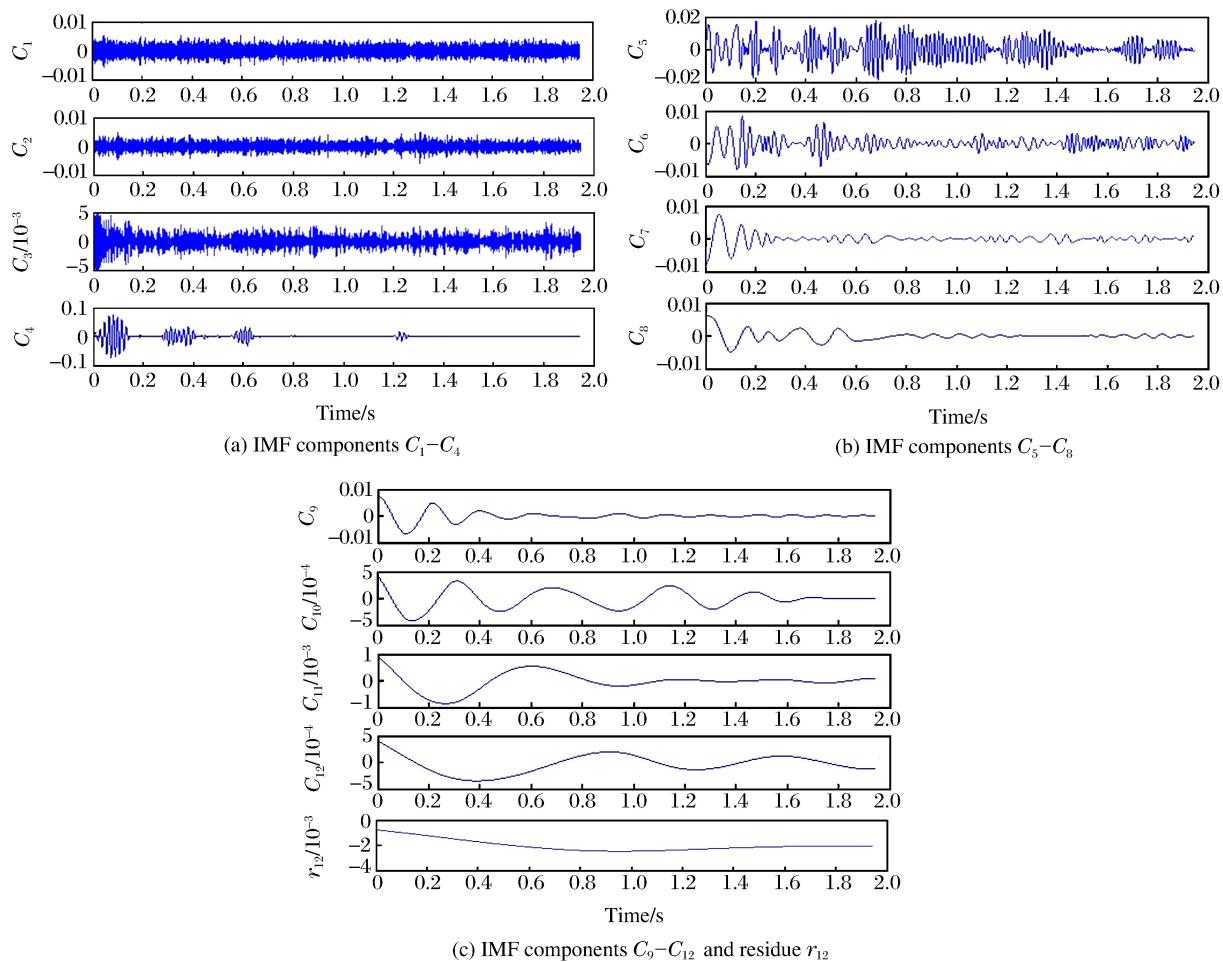


图 6 EMD 分解后得到各 IMF 分量

Fig. 6 IMF components by EMD decomposition

环境的高频噪声; $C_3$ 分量代表信号的高频成分; $C_4 \sim C_9$ 分量幅值最大,所含的能量最多,是信号的优势频率段,包含信号的最显著特征; $C_{10} \sim C_{12}$ 为信号的低频成分; $r_{12}$ 幅值很小,可能是信号微弱的趋势或仪器的飘零。

对水下爆炸振动信号经 EMD 分解后得到的各 IMF 分量与原始信号进行相关分析,得到相关分析参数,如表 3 所示。从表 3 可看出:各 IMF 分量的方差值几乎全为零,且包含信号主要信息的 IMF 分量段的贡献率达到 96.77%。可见,EMD 分解过程具有准确性、高效性和自适应性,保证了信号经分解后仍保留水下爆炸振动信号的非平稳特性,表明 HHT 分析方法适用于水下爆炸振动信号处理。

表 3 信号经 EMD 分解后相关参数

Table 3 Related parameters of the signal by EMD decomposition

IMF	Variance	Proportion/%	IMF	Variance	Proportion/%
$C_1$	0	1.6463	$C_7$	0	1.2548
$C_2$	0	0.8629	$C_8$	0	1.0814
$C_3$	0	0.6268	$C_9$	0	1.7196
$C_4$	0.0001	70.3079	$C_{10}$	0	0.0150
$C_5$	0	20.2007	$C_{11}$	0	0.0606
$C_6$	0	2.2089	$C_{12}$	0	0.0150

### 3.2 振动信号 Hilbert 谱分析

对垂向爆炸振动信号经 EMD 分解得到的 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 得到频率-时间-振幅三维 Hilbert 谱。以距离 1 m、水隔层厚 80 mm 的情况为例, 对其振动信号的 IMF 分量进行 Hilbert 变换得到 Hilbert 谱, 如图 7 所示。

从图 7 可看出: 幅值较大(即颜色较深)的样点主要分布于 7000 时间采样点(即 1.4 s)之前, 且 800 时间采样点(即 0.16 s)前振动幅值最大, 相对应的频率为 60~65 Hz, 与测试仪采集到的主振频率接近; 频率为 5~15 Hz 处对应的幅值较大, 且作用时间较长, 该频率段与房屋等建筑物的固有频率较为接近, 因此可能对建筑物造成更大的破坏, 在实际工程爆破中需要加以防护。为此, 采用不同厚度的空

气层结构进行防护, 并对采集到的振动信号进行 Hilbert 谱分析, 如图 8 所示。

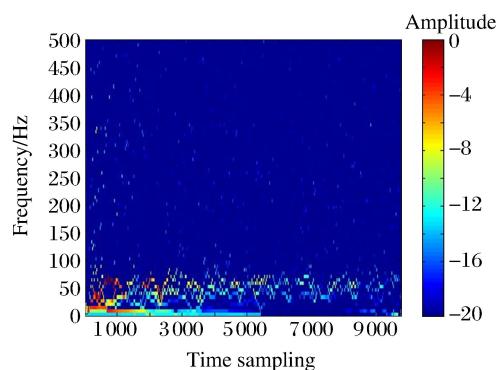


图 7 1 m 处充 80 mm 水隔层垂向振动 Hilbert 谱  
Fig. 7 Vertical vibration Hilbert spectrum of the 80 mm water-filled interlayer at 1 m

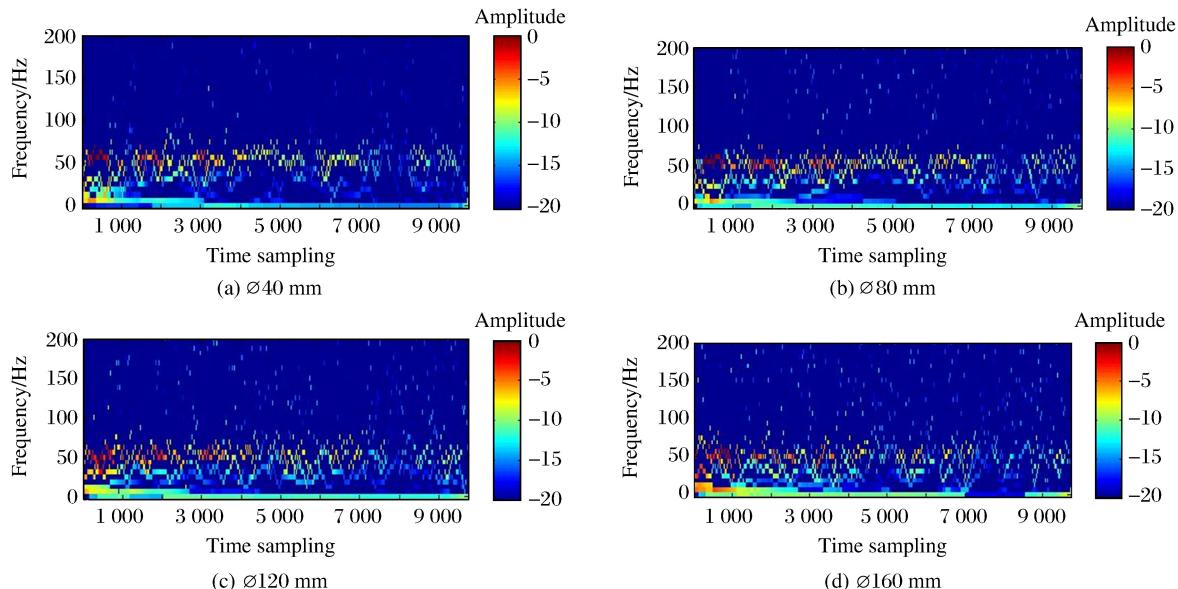


图 8 不同空气层厚度条件下的垂向振动 Hilbert 谱  
Fig. 8 Hilbert spectrum of vertical vibration of different thicknesses of air interlayer

从图 8 可看出, 在有机玻璃-空气层结构下, 最大振幅所对应的主振频率为 45~55 Hz, 与测振仪采集到的主振频率接近。相比于水隔层, 有机玻璃-空气层结构下 5~15 Hz 区间段的幅值减弱较明显, 且作用时间得到缩短, 但随着空气层厚度的增加, 该频带所对应的幅值有所增加。可见, 针对本试验条件, 为了减小水下爆炸引起的地基振动, 并非空气层越厚越好, 当其厚度为 120 mm 时防护效果较好。

## 4 结 论

(1) 对于有机玻璃-空气层结构, 随着空气层厚度的增加, 水下爆炸最大振动速度呈先减小后增大趋势, 且当空气层厚度为 120 mm 时, 振动速度值最小, 对地基振动的衰减效果较好。

(2) HHT 法能有效解决振动测试仪对小药量振动频率监测不敏感等问题, 同时可以得到全局频率所对应的幅值, 直观得出所需要防护的振动频率。

(3) 通过 HHT 法分析得出,有机玻璃-空气层结构作用下,能有效衰减 5~15 Hz 低频区间段的振动速度,且能够缩短作用时间,有效防止与建/构筑物之间产生共振。

## 参考文献:

- [1] 库尔·P. 水中爆炸 [M]. 罗耀杰,等译. 北京:国防工业出版社,1960.  
COLE P. Underwater explosion [M]. Translated by LUO Y J, et al. Beijing: National Defense Industry Press, 1960.
- [2] RAJENDRAN R,LEE J M. Blast loaded plates [J]. Marine Structures,2009,22(2):99-127.
- [3] 张社荣,孔源,王高辉. 水下和空中爆炸冲击波传播特性对比分析 [J]. 振动与冲击,2014,33(13):148-153.  
ZHANG S R,KONG Y,WANG G H. Comparative analysis on propagation characteristics of shock wave induced by underwater and air explosions [J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(13):148-153.
- [4] 高建华,陆林,何洋扬. 浅水中爆炸及其破坏效应 [M]. 北京:国防工业出版社,2010.  
Gao J H,LU L,HE Y Y. Explosion and its damage effect in shallow water [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [5] WANG G H,ZHANG S R,YU M,et al. Investigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries [J]. Applied Ocean Research,2014,46(2):40-53.
- [6] PETROV N V,SCHMIDT A A. Multiphase phenomena in underwater explosion [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2015,60:367-373.
- [7] 樊自建,沈兆武,马宏昊,等. 空气隔层对水中冲击波衰减效果的实验研究 [J]. 中国科学技术大学学报,2007,37(10):1306-1311.  
FAN Z J,SHEN Z W,MA H H,et al. Experimental study on attenuation of underwater shock wave by air interlayer [J]. Journal of University of Science and Technology of China,2007,37(10):1306-1311.
- [8] 贾虎,郑伟花,罗强,等. 爆炸气泡帷幕对水中冲击波能量的衰减特性 [J]. 含能材料,2015,23(10):1015-1019.  
JIA H,ZHENG W H,LUO Q,et al. Attenuation characteristics of underwater explosion bubble curtain on the shock [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2015,23(10):1015-1019.
- [9] 贾虎,沈兆武. 空气隔层对水中冲击波的衰减特性 [J]. 爆炸与冲击,2012,32(1):61-66.  
JIA H,SHEN Z W. An investigation into attenuation of underwater shockwave by air interlayer [J]. Explosion and Shock Waves,2012,32(1):61-66.
- [10] 寇晓枫,王高辉,卢文波,等. 空气隔层对水下爆炸冲击波的缓冲效应 [J]. 振动与冲击,2017,36(3):7-13.  
KOU X F,WANG G H,LU W B,et al. Mitigation effects of air interlayer on underwater explosion shock wave [J]. Journal of Vibration and Shock,2017,36(3):7-13.
- [11] 姚熊亮,杨文山,初文华,等. 水中空气隔层衰减冲击波性能研究 [J]. 高压物理学报,2011,25(2):165-172.  
YAO X L,YANG W S,CHU W H,et al. Research on performance of the underwater air buffer weakening shock wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2011,25(2):165-172.
- [12] 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.
- [13] 刘欣,顾文彬,陈学平. 气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的数值模拟研究 [J]. 爆破,2015,32(3):79-84.  
LIU X,GU W B,CHEN X P. Numerical simulation study of attenuation characteristics of water shock wave under bubble curtain [J]. Blasting,2015,32(3):79-84.
- [14] 汤有富,汪泉,朱恺波,等. 基于 HHT 变换的小水池水下爆炸振动分析 [J]. 工程爆破,2017,23(1):29-33.  
TANG Y F,WANG Q,ZHU K B,et al. Underwater explosion vibration analysis based on HHT transform in small pond [J]. Engineering Blasting,2017,23(1):29-33.
- [15] 张义平. 爆破震动信号的 HHT 分析与应用研究 [D]. 长沙:中南大学,2006.  
ZHANG Y P. HHT analysis and its application of blasting vibration signals [D]. Changsha: Central South University,

2006.

- [16] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis [C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.
- [17] PENG Z K, PETER W T, CHU F L. An improved Hilbert-Huang transform and its application in vibration signal analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(1): 187-205.
- [18] 张立, 汪大立. 水下爆炸炸药能测量消除边界效应的研究 [J]. 爆破器材, 1995(2): 1-6.  
ZHANG L, WANG D L. A study on elimination of boundary effects in underwater explosion testing of explosive [J]. Explosive Materials, 1995(2): 1-6.

## Influence of Plexiglass-Air Interlayer Structure on Foundation Vibration of Small Pool Underwater Explosion

WANG Quan<sup>1,2</sup>, TANG Youfu<sup>1,3</sup>, LI Zhimin<sup>1</sup>, GONG Jie<sup>1</sup>,  
CHENG Yangfan<sup>1</sup>, LIU Shanghao<sup>1</sup>, LI Chengxiao<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Postdoctoral Research Station of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

3. Zhejiang Guanghua Property Blasting Equipment Company Limited, Quzhou 324400, China)

**Abstract:** To study the influence of the plexiglass-air interlayer structure on underwater explosion vibration, the foundation vibration signals for this structure caused by underwater explosion in the small pool (5.5 m in diameter and 3.62 m in height), the influence of different air interlayer thicknesses on the maximum vibration velocity was studied, HHT (Hilbert-Huang Transform) was used to analyze the vibration test signals by writing relevant programs based on Matlab software, studying the influence of different air interlayer thickness on the global frequency of vibration signals. Experimental results show that: under the condition of plexiglass-air interlayer structure, with the increase of air interlayer thickness, the maximum vibration velocity decreases first and then increases, and the vibration isolation effect is the best when the thickness is 120 mm. The amplitude corresponding to the global frequency can be obtained by means of HHT analysis, the amplitude attenuation of the 5–15 Hz low frequency section is obvious, the action time is shortened, which can effectively prevent the resonance phenomenon between the building and structure. The experimental results and analysis have certain theoretical reference value for underwater blasting engineering protection and structural design of lightning protection bunker for military ship.

**Keywords:** underwater explosion; plexiglass-air interlayer structure; explosion vibration; Hilbert-Huang transform

# 温压炸药水中爆炸的后燃反应研究<sup>\*</sup>

冯 淞,饶国宁,彭金华,王伯良

(南京理工大学化工学院,江苏南京 210094)

**摘要:**为了研究温压炸药的后燃反应,采用双层容器充气装置,通过水下爆炸实验,计算了温压炸药的冲击波能、气泡能。通过对温压炸药的水下爆炸能量输出结构的研究,计算得到了不同气体氛围下的后燃反应释放能量。作为对比参照,在相同实验条件下,对TNT进行同等实验研究,结果表明:在2.5 MPa氧气环境下,铝粉含量为40%时,温压炸药的比冲击波能最大,当铝粉含量为50%时,温压炸药的比气泡能与总比能量最大,分别为同等实验条件下1.99倍、1.62倍、1.55倍TNT当量;随着气体中含氧量的增大,后燃效应增强,TNT在氧气中的后燃值是空气中的1.94倍,温压炸药在氧气中的后燃值是空气中的2.70倍。

**关键词:**温压炸药;水下爆炸;后燃反应;冲击波能;气泡能

**中图分类号:**TQ560.1;O389

**文献标识码:**A

温压炸药包含高能炸药、氧化剂、还原剂(金属粉)和黏结剂等组分,是燃料空气炸药的一种发展形式<sup>[1-3]</sup>。因配方中含有金属粉等还原剂,所以温压炸药是一类典型的贫氧高能炸药<sup>[4-5]</sup>,炸药爆炸产生的产物中含有未被完全氧化的C、H、N以及金属粉等组分,这些富含燃料的产物与周围的氧气可以继续混合燃烧,释放更多的热量,即为后燃效应<sup>[6-7]</sup>。研究温压炸药的后燃反应,掌握温压炸药能量输出结构具有重要意义,可以指导空中与水中武器设计,发挥各兵种武器优势。

Dewey等<sup>[8]</sup>首次发现TNT在空气中爆炸的后燃现象,在之后几十年里,各国科研人员在后燃效应方面取得了重大进步。Kiciński等<sup>[9]</sup>在量热弹里分别填充4种高压气体(氩气、氮气、空气和氧气),测量RDX基非理想炸药在不同气体氛围下的爆热,同时检测爆炸生成物,实验结果表明,有氧气存在的条件下,爆炸产物基本可以完全燃烧,在氩气与氮气环境下,爆炸产物基本相同。Wolański等<sup>[10-13]</sup>研究了凝聚炸药在钢结构容器内的后燃反应,在不同气体氛围下,对炸药的冲击波传播历程进行计算与分析。曹威等<sup>[14]</sup>设计一种可填充气体的双层圆筒结构试验装置,以TNT为研究对象,研究其水下爆炸能量输出结构以及后燃效应。

为了研究温压炸药的水下爆炸能量输出结构以及不同铝粉含量对后燃反应的影响,我们采用可填充气体的双层圆筒结构试验装置,设计不同铝粉含量配方的温压炸药,对冲击波能、气泡能进行计算分析,通过对总能量的计算得到后燃反应释放的能量,为水下武器配方设计提供小当量实验依据。

## 1 实 验

### 1.1 炸药装药与起爆系统

实验中采用两种主装药,分别为TNT与温压炸药圆柱形压装药,TNT装药直径为40 mm,质量为170 g,密度为1.54 g/cm<sup>3</sup>,温压炸药装药直径为40 mm,质量为170 g,以RDX为基含铝量为20%、

\* 收稿日期:2017-12-01;修回日期:2018-01-11

基金项目:国家自然科学基金青年基金(11102091);高等学校博士学科点专项科研博导类基金(20113219110010)

作者简介:冯 淞(1989—),男,博士,主要从事含铝炸药水下爆炸研究. E-mail:fs8500@126.com

通信作者:饶国宁(1978—),男,博士,讲师,主要从事爆炸力学研究. E-mail:njraoguoning@126.com

30%、40%、50%和60%，氧平衡分别为-0.35、-0.42、-0.49、-0.55和-0.62，密度分别约为1.76、1.82、1.88、1.95和1.96 g/cm<sup>3</sup>；因传爆需要，每次实验使用JH-2传爆药柱（96.5%RDX、3%氟橡胶2603和0.5%胶体石墨），直径为40 mm，密度约为1.64 g/cm<sup>3</sup>，药柱质量为30 g，8#铝壳电雷管起爆。

## 1.2 爆炸容器

为了研究TNT与温压炸药在不同气体氛围下的能量输出结构以及后燃反应，采用双层容器试验装置<sup>[15]</sup>，如图1和图2所示。该装置为双层圆筒结构，包含内外层两个容器密闭空间，内层容器内装入炸药，外层容器内充填一定压力的气体。经过防水处理后，内层中的炸药首先被起爆，内层容器壁破裂后，冲击波继续传播，直到外层容器壁破裂。爆炸容器材料为20钢，装配完成后爆炸容器的质量约为15 kg，外层容器体积为6.024 L。实验时，外层容器内分别填充空气、氧气和氩气，每种实验条件下均进行两发平行实验。

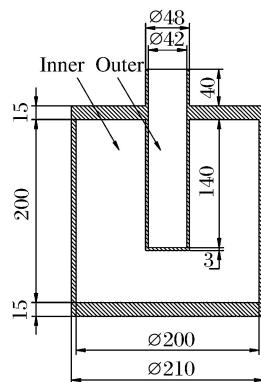


图1 试验装置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch of the experimental device (Unit:mm)

## 1.3 试验现场布置

实验布局如图3所示，由于爆炸容器质量较大，故采用双根草球绳作为承重绳索。爆炸水池为Ø8 m×8 m的刚性水池，水池池壁与池底材质均为钢板。爆炸容器中心与压力传感器置于同一水平线，放于水下4.25 m处，两者之间的距离为2.5 m，爆炸容器距离水池壁的距离为3.0 m。

## 1.4 测试系统

采用PCB138A系列水下压力传感器进行测试，采用PCB232A系列信号调理仪、国产纵横JV5200数据采集仪以及Jovian软件进行信号采集、存储和处理，测量并记录水下固定位置处的冲击波变化规律与气泡脉动规律。

## 2 能量计算公式修正

### 2.1 冲击波能计算

炸药在水中爆炸时，测点处的冲击波比冲能计算公式为<sup>[16-17]</sup>

$$e_s = K_e \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w} \int_0^\tau p^2(t) dt \quad (1)$$

$$K_e = 1 + 0.29\gamma + 0.016\gamma^2 \quad (2)$$



图2 试验装置实物图

Fig. 2 Actual experimental device

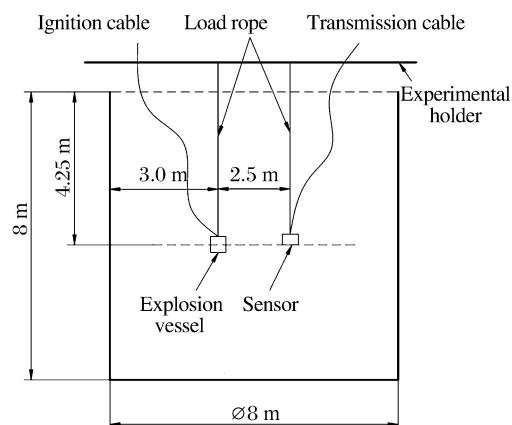


图3 实验布局示意图

Fig. 3 Sketch of experimental arrangement

$$\gamma = \frac{d}{c_w \theta} \quad (3)$$

式中: $R$ 为爆炸中心至测点的距离,m; $W$ 为炸药的装药质量,kg; $\rho_w$ 为水的密度,kg/m<sup>3</sup>; $p(t)$ 为 $t$ 时刻测点处冲击波瞬时超压,Pa; $\tau$ 为积分上限,由于温压炸药冲击波压力时程曲线衰减较慢,此处我们取51.7θ,θ为冲击波时间衰减常数,取压力从峰值 $p_m$ 衰减到 $p_m/e$ 所需的时间间隔,s; $d$ 为压力传感器传头的直径,m; $c_w$ 为水中音速,1500 m/s; $K_e$ 为比冲击波能的修正系数。

## 2.2 气泡能计算

因为气泡的脉动周期为毫秒量级,所以来自水池的水底、侧壁以及水面反射波对气泡脉动周期有一定影响,在有限水域边界存在的情况下,经修正的比气泡能计算公式<sup>[16-17]</sup>为

$$e_b = \frac{1}{8WC^3K_1^3} \left[ \sqrt{1 + 4CT_b} \left( \frac{p_i + p_h}{p_0 + p_h} \right)^{5/6} - 1 \right]^3 \quad (4)$$

$$K_1 = 1.135 \frac{\rho_w^{1/2}}{p_h^{5/6}} \quad (5)$$

式中: $C$ 、 $K_1$ 为与给定水池给定装药位置有关的常数,此处 $C$ 取0.4147 s<sup>-1</sup>; $W$ 为炸药的装药质量,kg; $T_b$ 为实测的气泡脉动周期,s; $\rho_w$ 为水的密度,1000 kg/m<sup>3</sup>; $p_i$ 为实验时水面实测大气压,Pa; $p_h$ 为装药深度处的静水压力,Pa; $p_0$ 为水面标准大气压,Pa。

## 2.3 总比能量计算

炸药总比能量计算公式<sup>[16-17]</sup>为

$$e_t = K_f (\mu e_s + e_b) \quad (6)$$

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-2} p_{CJ} - 6.5775 \times 10^{-5} p_{CJ}^2 + 1.2594 \times 10^{-7} p_{CJ}^3 \quad (7)$$

式中: $K_f$ 为装药形状系数,对于球形装药 $K_f=1$ ,对于非球形装药 $K_f$ 为1.02~1.10; $\mu$ 为冲击波衰减系数,仅与炸药的爆轰压力 $p_{CJ}$ 有关。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 雷管与传爆药柱水下爆炸能量输出特性

由于炸药在水下爆炸时需要起爆和传爆系统引爆,所以必须用雷管与传爆药柱作为空白试样取代试验装置,对其进行爆炸能量计算。在实验中计算主装药水下爆炸能量时,扣除空白试样的能量,计算结果如表1所示。空白样进行两次平行实验,各实验结果误差较小,最大相对误差小于5%,重复性较好。

表1 空白样的水下爆炸能量输出结果

Table 1 Results of underwater explosion energy output of a blank sample

No.	$p_m$ /MPa	$\theta/\mu\text{s}$	$T_b/\text{ms}$	$E_s/\text{kJ}$	$E_b/\text{kJ}$	$e_t/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
1	4.74	32.53	76.68	29.65	74.33	4.80
2	4.83	32.53	77.98	30.98	78.18	5.03
Average	4.79	32.53	77.33	30.32	76.26	4.92

Notes:  $\mu=2.3$ ,  $K_f=1.03$ .

### 3.2 带壳体TNT在不同气氛下水下爆炸能量输出特性

#### 3.2.1 空气环境

表2给出了TNT在不同气氛下能量输出特性,表中气体压力数值为绝对压力值。如表2所示,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>结果表明:TNT加入爆炸容器实验装置后,TNT的峰值超压会大幅度降低,炸药爆炸后,爆炸容器内的TNT产生的冲击波首先经过容器内气体传播,导致冲击波衰减,冲击波在传入水中之前,会将爆炸容器破坏,损失一部分能量;而裸药柱TNT爆炸后,冲击波直接在水中传播,所以冲击波衰减较小,峰值超压较大。对于不同压力下的不同气体氛围,冲击波峰值压力没有明显的规律性变化。

表2 TNT不同气氛下能量输出特性

Table 2 Energy output of TNT in different atmospheres

No.	Gas	Pressure/MPa	$p_m$ /MPa	$T_b$ /ms	$e_s/(kJ \cdot g^{-1})$	$e_b/(kJ \cdot g^{-1})$	$e_t/(kJ \cdot g^{-1})$
1	Air	5.1	6.01	202.56	0.57	5.34	6.70
2	Air	0.1	5.64	129.95	0.19	1.54	1.89
3	Bared	Charge	9.64	151.43	0.82	2.43	4.09
4	Ar	2.5	7.22	153.69	0.25	2.54	3.35
5	Ar	5.1	5.68	175.43	0.35	3.45	4.04
6	O <sub>2</sub>	2.5	7.12	209.57	0.57	7.07	8.48
7	O <sub>2</sub>	5.1	6.13	235.26	0.73	7.35	9.19

Notes:  $\mu=2.015$ ,  $K_f=1.034$ .

2#容器内填充常压空气,其中含氧量仅为1.67 g,后燃反应释放的能量较少,而爆炸过程中一部分能量用于破坏爆炸容器,所以相对于3#裸药TNT,峰值超压、气泡脉动周期、比冲击波能、比气泡能与总比能量均大幅度下降。当加大容器内空气压力至5.1 MPa后,氧气含量升高,TNT的后燃反应释放更多的热量,从1#与2#结果来看,冲击波能增大为原来的3倍,气泡能约增大为原来的3.5倍。

### 3.2.2 氖气环境

在爆炸容器内填充惰性气体氖气,是为了与空气与氧气对比,此时TNT并无额外的后燃反应释放能量。而4#与5#结果说明,增大容器内氖气的压力,比冲击波能、比气泡能与总能量均有所升高,是由于容器填充的气体具有较高的压力,可以提供更多能量以及更高的气泡初始压力。

### 3.2.3 氧气环境

理论上170 g TNT完全氧化需氧量为125.8 g,2.5 MPa氧气与5.1 MPa氧气含氧量分别为197.92、403.75 g,两种压力下,对于TNT而言,氧含量均过剩。6#与7#结果表明,随着容器内氧气压力的增大,比冲击波能、比气泡能与总能量变化趋势与空气相同,有所升高,其中冲击波能增大28%,气泡能增大不明显,两种压力下后燃反应程度都较充分,较高的氧气压力可以加快后燃反应速度,冲击波波头获得更多的能量,冲击波能大幅度提升。1#、5#与7#结果表明, $e_t(O_2) > e_t(Air) > e_t(Ar)$ ,即在相同压力下,随着含氧量的提高,TNT后燃反应越来越剧烈,释放更多的热量。

## 3.3 带壳体温压炸药水下爆炸能量输出特性

### 3.3.1 气氛组成相同时不同压力对温压炸药能量输出的影响

爆炸容器内填充不同压力氧气气体,温压炸药能量输出特性结果如表3所示。对于不同配方温压炸药,理论上完全氧化最大需氧量为105.4 g,在5.1、2.5 MPa氧气氛围下,含氧量分别为403.75和197.92 g,氧含量均过剩,1.2 MPa氧气氛围下,含氧量为95 g,氧含量不足。致使当压力从1.2 MPa上升至2.5 MPa时,气泡能大幅度增加,此时后燃反应提供更多的热量;而当压力从2.5 MPa上升至5.1 MPa时,即氧含量均过剩时,气泡能增幅不明显,冲击波能增幅较大,这与TNT变化一致,原因大致相同,不再赘述。随着填充氧气压力增大, $e_t(5.1 \text{ MPa}) > e_t(2.5 \text{ MPa}) > e_t(1.2 \text{ MPa})$ ,进一步说明氧气含量的升高可以释放更多的后燃能量。

表3 温压炸药在不同压力氧气氛围下能量输出特性

Table 3 Energy output of thermobaric explosives under different pressures of oxygenic atmosphere

$w_{Al}/\%$	Gas	Pressure/MPa	$p_m$ /MPa	$T_b$ /ms	$e_s/(kJ \cdot g^{-1})$	$e_b/(kJ \cdot g^{-1})$	$e_t/(kJ \cdot g^{-1})$
50	O <sub>2</sub>	1.2	5.60	224.18	0.52	8.43	10.56
50	O <sub>2</sub>	2.5	5.22	245.65	0.59	11.45	13.15
50	O <sub>2</sub>	5.1	4.89	256.63	0.77	12.16	14.19

Notes:  $\mu=2.203$ ,  $K_f=1.029$ .

### 3.3.2 气氛压力相同时不同气氛组成对温压炸药能量输出的影响

表4给出了含铝量( $w_{Al}$ )为40%的温压炸药在相同压力、不同气体氛围的水下爆炸能量计算结果。结果表明,  $e_s(O_2) > e_s(Air) > e_s(Ar)$ ,  $e_b(O_2) > e_b(Air) > e_b(Ar)$ ,  $e_t(O_2) > e_t(Air) > e_t(Ar)$ 。在氩气氛围下,没有多余的氧与爆炸产物进行后燃反应,冲击波能与气泡能较小;在氧气氛围中,比同等压力空气中的氧更充足,后燃效应更剧烈,所以氧气氛围下,各项能量参数最大。

表4 温压炸药不同气氛下能量输出特性

Table 4 Energy output of thermobaric explosives in different atmospheres

$w_{Al}/\%$	Gas	Pressure/MPa	$p_m/\text{MPa}$	$T_b/\text{ms}$	$e_s/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_b/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_t/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
40	Ar	2.5	5.84	170.77	0.39	4.09	5.37
40	Air	2.5	5.25	196.83	0.54	6.19	7.70
40	O <sub>2</sub>	2.5	6.05	238.63	1.13	10.16	12.19

Notes:  $\mu=2.307$ ,  $K_f=1.03$ .

### 3.3.3 不同铝粉含量对温压炸药能量输出的影响

图4给出了温压炸药含铝量为50%时,水下爆炸冲击波与气泡脉动典型压力时程曲线,从图4中可以得到冲击波超压以及气泡脉动周期。

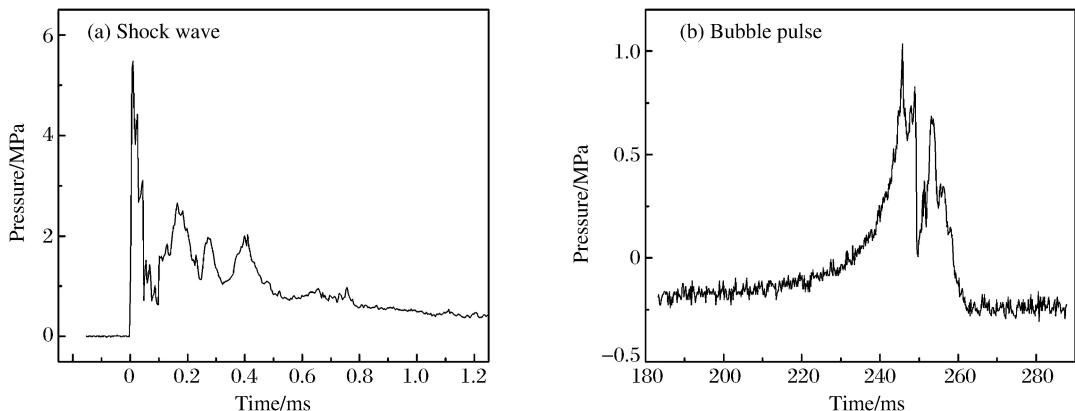


图4 铝含量为50%温压炸药的冲击波与气泡脉动压力时程曲线

Fig. 4 Shock wave and bubble pulse pressure histories of thermobaric explosive with aluminum powder content of 50%

表5给出了不同铝粉含量下温压炸药水下爆炸能量计算结果。图5所示为温压炸药随着铝粉含量的变化,比冲击波能、比气泡能和总比能量的变化规律,以及各参数结果的同等实验条件下TNT当量。根据表5与图5可知,比冲击波能、比气泡能和总比能量随着铝粉含量的升高,变化规律一致,均为先增大后减小,冲击波能在铝粉含量为40%时达到最大,为相同实验条件下1.99倍TNT当量,随着铝粉含量的进一步增大,RDX比例减小,炸药总体爆轰性能降低,比冲击波能急剧下降。气泡能与总能量在铝粉含量为50%时达到最大,为相同实验条件下1.62倍TNT当量和1.55倍TNT当量,后燃反应释放的能量大幅度提高气泡能,当铝粉含量继续增大,主炸药RDX含量降低,爆炸产物中气体含量减少,致使气泡压力减小,周期降低,气泡能开始下降。

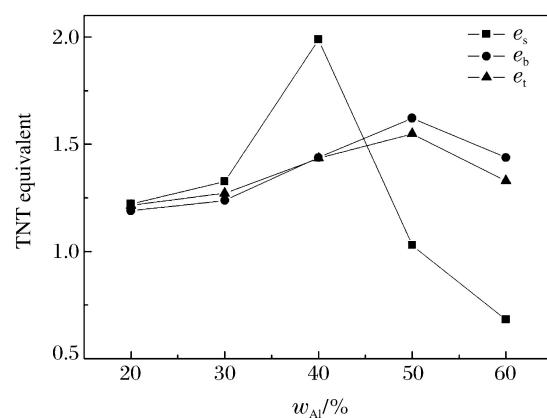


图5 不同铝粉含量温压炸药的能量参数比当量

Fig. 5 TNT equivalent of energy parameter ratio of thermobaric explosives with different aluminum contents

表5 温压炸药在相同压力氧气气氛下能量输出特性

Table 5 Energy output of thermobaric explosives under the same pressure of oxygenic atmosphere

$w_{\text{Al}}/\%$	Gas	Pressure/MPa	$p_m/\text{MPa}$	$T_b/\text{ms}$	$e_s/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_b/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$e_t/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
20	O <sub>2</sub>	2.5	6.71	223.20	0.67	8.40	10.31
30	O <sub>2</sub>	2.5	6.39	224.96	0.76	8.74	10.79
40	O <sub>2</sub>	2.5	6.05	238.63	1.13	10.16	12.19
50	O <sub>2</sub>	2.5	5.22	245.65	0.59	11.45	13.15
60	O <sub>2</sub>	2.5	4.77	238.50	0.39	10.16	11.29
TNT	O <sub>2</sub>	2.5	7.12	209.57	0.57	7.07	8.49

## 4 后燃效应分析

假设温压炸药不与惰性气体 Ar 发生后燃反应,同时假定每发实验爆炸容器破裂所需的能量都相同,不同的是后燃反应能量的释放。由于每发药量相同,在不同填充气体、相同填充压力下,炸药在空气与氧气环境下发生后燃反应所释放的能量等于释放的总能量减去炸药在惰性气体 Ar 环境下释放的总能量,由此可以计算出 TNT 与温压炸药后燃释放的能量,具体结果如表 6 与表 7 所示。当气体压力为 2.5、5.1 MPa 时,氧气均充足,TNT 在氧气中的后燃释放能为空气中的 1.94 倍,温压炸药在氧气中的后燃释放能为空气中的 2.70 倍,两种炸药的实验结果均表明在氧气环境下,后燃效应更剧烈,对比两种气体氛围下,温压炸药在氧气环境中的后燃能量提升幅度更大,因为在后燃反应中,铝粉的燃烧可以释放更多的热量。

表6 TNT 在不同气氛下后燃反应所释放的能量

Table 6 Energy released by afterburning reaction of TNT in different atmospheres

Gas	Pressure/MPa	Oxygen content/g	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
Air	5.1	85.17	2.66
O <sub>2</sub>	5.1	403.75	5.15

表7 温压炸药在不同气氛下后燃反应所释放的能量

Table 7 Energy released by afterburning reaction of thermobaric explosive in different atmospheres

Gas	Pressure/MPa	Oxygen content/g	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$
Air	2.5	41.75	2.33
O <sub>2</sub>	2.5	197.92	6.82

## 5 结 论

通过充气双层圆筒结构水下爆炸装置,研究温压炸药与 TNT 的水下爆炸能量输出结构和后燃反应,得到以下结论:

- (1) 在填充同等压力下,氧气环境下二者释放的冲击波能、气泡能与总能量最大,空气环境下次之,氩气环境下最小;
- (2) 在填充同等气体下,随着填充压力越大,二者释放的冲击波能、气泡能与总能量越大;
- (3) 当铝粉含量为 40% 时,温压炸药的冲击波能最大,为相同实验条件下 1.99 倍 TNT 当量,当铝粉含量为 50% 时,温压炸药气泡能与总能量最大,为相同实验条件下 1.62 倍 TNT 当量和 1.55 倍 TNT 当量;
- (4) 压力为 5.1 MPa 时,TNT 在氧气中后燃释放的能量是空气中的 1.94 倍,压力为 2.5 MPa 时,温压炸药在氧气中后燃释放的能量是空气中的 2.70 倍。

## 参 考 文 献 :

- [1] XING X L,ZHAO S X,WANG Z Y,et al. Discussions on thermobaric explosives (TBXs) [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics,2014,39(1):14-17.

- [2] SIMIC D,POPOVIC M,SIROVATKA R,et al. Influence of cast composite thermobaric explosive compositions on air shock wave parameters [J]. Scientific Technical Review,2013,63(2):63-69.
- [3] 李芝绒,王胜强,殷俊兰.不同气体环境中温压炸药爆炸特性的试验研究 [J].火炸药学报,2013,36(3):59-61.
- LI Z R,WANG S Q,YIN J L. Experiment study of blast performance of thermobaric explosive under different gas environment [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2013,36(3):59-61.
- [4] KIM C K,LAI M C,ZHANG Z C,et al. Modeling and numerical simulation of afterburning of thermobaric explosives in a closed chamber [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing,2017,18(7):979-986.
- [5] 王晓峰,冯晓军.温压炸药设计原则探讨 [J].含能材料,2016,24(5):418-420.
- WANG X F,FENG X J. Discussion on the design principle of thermobaric explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2016,24(5):418-420.
- [6] 阚金玲,刘家骢.一次引爆云爆剂的爆炸特性-后燃反应对爆炸威力的影响 [J].爆炸与冲击,2006,26(5):404-409.
- KAN J L,LIU J C. The blast characteristic of SEFAE-effect of after-burning on blast power [J]. Explosion and Shock Waves,2006,26(5):404-409.
- [7] 郑波,陈力,丁雁生,等.温压炸药爆炸抛撒的运动规律 [J].爆炸与冲击,2008,28(5):433-437.
- ZHENG B,CHEN L,DING Y S,et al. Dispersal process of explosion production of thermobaric explosive [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(5):433-437.
- [8] DEWEY J M. The air velocity in blast waves from TNT explosions [C]//Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society,1964,279(1378):366-385.
- [9] KICINSKI W,TRZCINSKI W A. Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives [J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry,2009,96(2):623-630.
- [10] WOLANSKI P,GUT Z,TRZCINSKI W A,et al. Visualization of turbulent combustion of TNT detonation products in a steel vessel [J]. Shock Waves,2000,10(2):127-136.
- [11] TRZCINSKI W A,CUDZIŁO S,PASZULA J. Studies of free field and confined explosions of aluminium enriched RDX compositions [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics,2007,32(6):502-508.
- [12] CARNEY J R,LIGHTSTONE J M,MCGRATH II T P,et al. Fuel-rich explosive energy release:oxidizer concentration dependence [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics,2009,34(4):331-339.
- [13] KUHL A L,REICHENBACH H. Combustion effects in confined explosions [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2009,32(2):291-2298.
- [14] 曹威,何中其,陈网桦.TNT后燃反应的水下爆炸实验研究与数值模拟 [J].高压物理学报,2014,28(4):443-449.
- CAO W,HE Z Q,CHEN W H. Experimental research and numerical simulation of afterburning reaction of TNT explosion by underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2014,28(4):443-449.
- [15] 曹威,何中其,陈网桦,等.水下爆炸法测量含铝炸药后燃效应 [J].含能材料,2012,20(2):229-233
- CAO W,HE Z Q,CHEN W H. Measurement of afterburning effect of aluminized explosives by underwater explosion method [J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2012,20(2):229-233
- [16] BJARNHOLT G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics,1980,5(5):67-74.
- [17] COLE R H. Underwater explosions [M]. Princeton,NJ:Princeton University Press,1948.

## Afterburning Reaction of Thermobaric Explosive by Underwater Explosion

FENG Song, RAO Guoning, PENG Jinhua, WANG Boliang

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science  
and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In the present work we calculated the shock wave energy and bubble energy of thermobaric explosive to study the afterburning reaction of the thermobaric explosive using the double container gas charging device and underwater explosion test. Through the study of the energy output structure of the underwater explosion of the thermobaric explosive, the energy released by the afterburning reaction in different gas atmospheres was calculated. As a comparative reference, the same experimental study was carried out on TNT under the same experimental conditions. The experimental results show that when the pressure of the oxygen was 2.5 MPa, the specific shock wave energy of thermobaric explosive with the aluminum powder content of 40% were maximum, the specific bubble energy and total energy of thermobaric explosive with the aluminum powder content of 50% were maximum. It was respectively 1.99, 1.62 and 1.55 times TNT equivalent under the same experimental conditions and, with the increase of the oxygen content in the gas, the afterburning effect was enhanced. The energy of TNT released by the afterburning reaction in the oxygen is 1.94 times that in the air. The energy of the thermobaric explosive released by the afterburning reaction in the oxygen was 2.70 times that in the air.

**Keywords:** thermobaric explosive; underwater explosion; afterburning reaction; shock wave energy; bubble energy

# 水下爆炸下有限尺度平板的载荷特性 及结构响应试验研究<sup>\*</sup>

刘丽滨, 李海涛, 刁爱民, 王晓强

(海军工程大学舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**为研究近结构边界下水下爆炸冲击波和气泡载荷特性,设计几种典型尺寸的平板模型,通过调整爆径比、平板厚度等参数,试验研究了水下非接触爆炸下的气泡脉动过程,分析平板边界处的低压流场特性,并基于应变分析获得了平板结构的局部及整体响应特征。研究发现:在近平板爆炸气泡的运动过程中,平板边界处会出现低压(负压)流场,低压维持时间约占气泡脉动周期的60%~80%,最大负压值可达0.1 MPa;随着爆径比的减小,平板的最终变形由弹性变形、中垂变形向中拱变形转变。

**关键词:**水下爆炸;负压;载荷特性;气泡脉动;结构响应

**中图分类号:** O383.1      **文献标识码:**A

舰船结构边界下爆炸冲击波载荷和气泡脉动载荷特性研究是舰船整体响应研究的基础。水下爆炸过程十分复杂,主要包括初始爆轰、冲击波的产生和传播、气泡膨胀和收缩,其中气泡运动可引起滞流、水冢、高速射流等。冲击波的压力峰值较高,但作用时间较短,呈现高频特性,主要对舰船结构造成局部损伤<sup>[1-2]</sup>;气泡脉动载荷峰值相对较低,但作用时间较长,在近结构边界条件下其负压载荷特性明显,可能造成舰船结构的整体损伤<sup>[3-4]</sup>。当前对水下爆炸冲击波壁压载荷的研究多基于Taylor平板理论<sup>[5]</sup>,然而理论求解十分困难,因此相关研究多集中于相对简单的结构(板、圆柱壳等)<sup>[6-9]</sup>。例如:唐廷等<sup>[8]</sup>考虑冲击波在平板内的透射和反射过程,得到空气背板对水下爆炸冲击波响应的波动理论公式;李海涛等<sup>[9]</sup>以Taylor平板理论为基础,推导了全入射角度下冲击波壁压载荷计算公式,并结合试验对壁压载荷进行了修正,得到有限尺度平板壁压经验公式。近年来,爆炸气泡逐渐成为学者们关注的焦点。爆炸气泡易引起舰船等梁型结构产生低阶运动模态,导致中拱弯曲损伤<sup>[10-11]</sup>。随着研究的深入,人们发现爆炸气泡在一定条件下可造成梁型结构的中垂弯曲损伤。例如:Zhang等<sup>[12]</sup>利用数值仿真方法研究了近场条件下气泡运动特性及舰船整体响应,发现气泡脉动造成舰船出现严重的中拱或中垂整体损伤;李海涛等<sup>[13]</sup>也发现梁型结构会在气泡脉动过程中发生中垂损伤,并对损伤机理进行了分析。在上述工作基础上,本研究设计了几种典型尺寸的平板模型,模拟水面舰船遭受水下近距离非接触爆炸攻击,通过试验探讨爆径比、平板厚度等参数对舰船结构边界下爆炸载荷特性的影响,分析结构处的壁压载荷,以期为舰船结构整体损伤的理论研究提供一定的试验支撑。

## 1 试验设计

### 1.1 试验模型

设计两个平板模型,尺寸为1200 mm×1200 mm×3 mm和1200 mm×1200 mm×6 mm,分别命

\* 收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51679244)

作者简介: 刘丽滨(1993—),男,硕士研究生,主要从事舰船结构抗爆抗冲击研究. E-mail: hit\_llbin@163.com

通信作者: 李海涛(1979—),男,博士,副教授,主要从事舰船结构抗爆抗冲击研究. E-mail: navy\_lht@163.com

名为 M3 和 M6。采用金属压板和橡胶密封圈将平板模型压紧并固定于方框形钢质托架上，并用螺栓紧固，密封圈厚度为 4 mm。试验平板和钢质托架均采用 Q235A 钢制作，具体结构和尺寸见图 1，实物见图 2。

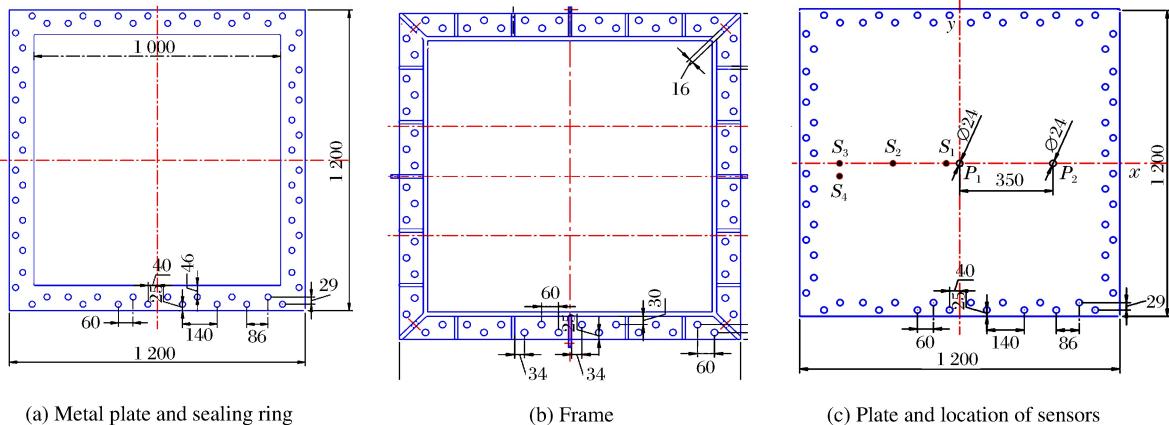


图 1 模型结构和尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Model's structure and dimension (Unit:mm)



图 2 模型实物

Fig. 2 Photograph of actual model

## 1.2 测点布局及试验工况

为了研究水下近场爆炸载荷特性和结构响应，沿模型轴线方向布置壁压测点  $P_1$ 、 $P_2$  和应变测点  $S_1 \sim S_4$ ，其中：压力测点分别位于轴线中心 ( $P_1$ ) 及 350 mm 处 ( $P_2$ )；应变测点  $S_1 \sim S_3$  距中心的距离分别为 50、250 和 450 mm， $S_4$  位于  $S_3$  测点一侧 50 mm 处，在每个测点处分别沿轴线方向 ( $x$  方向) 和垂直轴线方向 ( $y$  方向) 布置单向应变片，具体布局见图 1(c)。

爆炸试验在室内爆炸容器中进行。平板模型由钢索固定于试验场地内，保持平板模型在水中水平，外板距离水面 10 cm。水深设置为 2 m，TNT 炸药布置在外板中心正下方。流场域内布置一个自由场传感器，与炸药处于同一水深，距离为 1 m。试验模型布置情况如图 3 所示。

通过改变药量和爆距，研究不同爆炸条件下爆炸载荷特性及模型的整体响应，具体试验工况如表 1 所示，其中  $h$ 、 $w$ 、 $R$ 、 $r_{\max}$  和  $T_b$  分别表示炸药深度、药量、爆距、气泡最大半径和气泡的第 1 次脉动周期，其中  $r_{\max}$  和  $T_b$  由文献[14]计算得到。试验过程中，利用高速摄影仪记录整个水下爆炸过程，拍摄速度设置为 250 幅每秒。

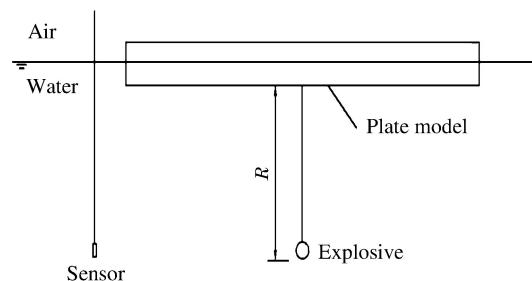


图 3 试验布局示意

Fig. 3 Illustration of test layout

表1 试验工况

Table 1 Test cases

Case	Model	$h/m$	$w/g$	$R/r_{\max}$	$T_b/ms$	Case	Model	$h/m$	$w/g$	$R/r_{\max}$	$T_b/ms$
1	M3	1.0	18	2.46	69.82	4	M3	0.4	18	0.97	72.51
2	M3	0.8	18	1.96	70.34	5	M6	1.0	10	2.99	56.98
3	M6	0.6	18	1.46	71.40	6	M6	1.0	5	3.77	45.23

## 2 试验现象与结果

### 2.1 爆炸载荷

图4为工况2条件下自由场压力传感器获得的压力时程曲线。可以看出,压力曲线存在3个明显压力峰值,第1个(A点)为冲击波压力峰值,第2个(B点)和第3个(C点)为气泡两次脉动辐射压力峰值,分别为6.963 MPa(理论值为14.51 MPa)、1.274 MPa和0.416 MPa,峰值之间的时间间隔分别为67.10 ms(理论值为70.34 ms)和50.45 ms,冲量分别为566.79、563.59和242.84 N·s。可见,气泡和冲击波的冲量相当,但气泡脉动压力峰值远小于冲击波压力,并且随着脉动次数的增加而逐渐减小,脉动频率逐渐增大。冲击波峰值的试验值与理论值有较大差别,主要原因可能是试验采集设备的灵敏度不够,采样频率较低,而气泡脉动周期试验值与理论值能较好地吻合,说明试验数据是准确可信的。其他工况下的压力时程曲线变化趋势与工况2相似。

表2给出了各工况下冲击波压力峰值和气泡脉动压力峰值对比,其中: $p_w$ 、 $p_{bl}$ 和 $p_{b2}$ 分别表示冲击波压力峰值、气泡第1次和第2次脉动压力峰值。可以发现:气泡第1次脉动压力峰值约为冲击波压力峰值的9%~19%,第2次脉动压力峰值更小;在工况4中,爆径比( $R/r_{\max}$ )接近1,气泡脉动过程受模型边界及自由边界的影响较大,气泡仅完成一次脉动过程,且能量损失较大,故气泡脉动压力相对于同为18 g药量的工况2略小。

表2 不同工况下冲击波和气泡脉动的压力峰值  
Table 2 Peak pressures of shock wave and bubble pulsation in test cases

Case	$R/r_{\max}$	$p_w/MPa$	$p_{bl}/MPa$	$p_{b2}/MPa$	$\frac{p_{bl}}{p_w} / \%$	Case	$R/r_{\max}$	$p_w/MPa$	$p_{bl}/MPa$	$p_{b2}/MPa$	$\frac{p_{bl}}{p_w} / \%$
1	2.46					4	0.97	6.932	0.637		9.18
2	1.96	6.963	1.274	0.416	18.30	5	2.99	5.464	0.950	0.406	17.38
3	1.46	8.804	1.097	0.522	12.46	6	3.77	4.610	0.762	0.218	16.53

### 2.2 响应过程

下面以工况2和工况4为例分析水下近场爆炸气泡运动特性及平板模型的响应过程。

图5为高速摄影仪记录的工况2条件下水下爆炸全过程。炸药爆轰瞬间,产生大量高温高压爆轰产物,强烈地挤压周围流场介质形成初始冲击波。随着爆炸过程的进行,高温高压爆轰产物(即初始气泡)在内外压力差和流体惯性的作用下发生脉动。试验中,观察到两次明显的气泡脉动过程,其历程和物理现象十分相似,但第2次脉动过程更复杂些,气泡不稳定,且变为椭球形。气泡在收缩过程中受到结构边界、惯性力和滞后流的联合作用,坍塌形成高速射流,直接冲击模型的结构边界。伴随着气泡的

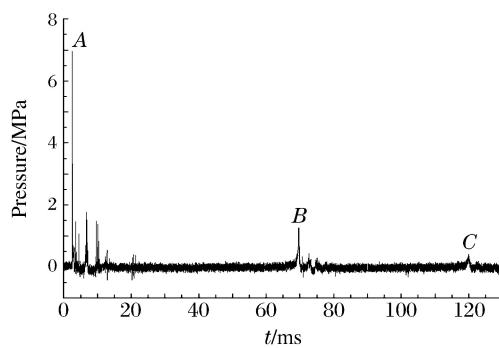


图4 工况2下自由场压力历程

Fig. 4 Pressure history of free field in Case 2

膨胀和收缩过程,平板模型出现小幅的整体上下升沉运动,但未出现明显的整体变形。观察气泡脉动过程发现,在多次脉动过程中气泡的脉动周期和半径逐渐减小。

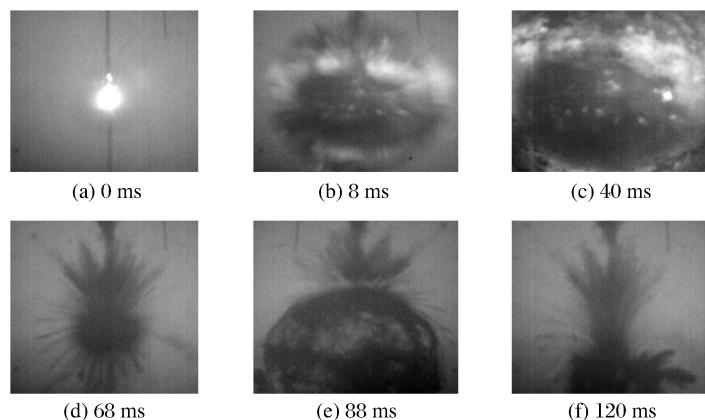


图 5 工况 2 下水下爆炸过程

Fig. 5 Underwater explosion process in Case 2

图 6 为工况 4 条件下的水下爆炸过程。在工况 4 中,爆径比接近 1,气泡膨胀到最大时基本与平板模型接触,结构边界对气泡脉动过程的影响十分明显,气泡由球状转变为椭球状;气泡第 1 次膨胀到最大后的收缩过程中,气泡与模型之间出现明显的锥形空化区域。试验后,观察到模型出现局部的中拱塑性变形。

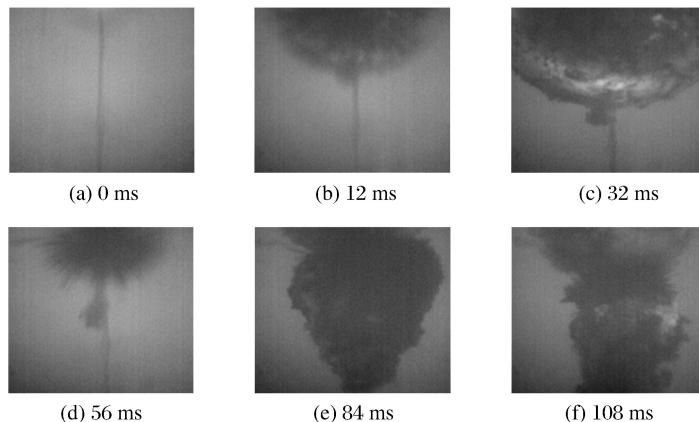


图 6 工况 4 下水下爆炸过程

Fig. 6 Underwater explosion process in Case 4

分析现有工况下气泡运动过程还发现:气泡脉动过程中,其运动方向背离平板模型,不断向下运动,与自由边界下的气泡脉动过程存在较大差别。其主要原因是近距离平板结构边界对气泡运动过程的影响较大:平板模型在冲击波和膨胀气泡的联合作用下整体向上运动,当气泡收缩时,模型回落带动周围流场向下运动,同时气泡脉动压力波经结构边界反射后反作用于气泡,共同推动气泡朝着背离平板边界的方向运动。

### 2.3 变形情况

图 7 给出了 3 种典型工况下平板最终塑性变形情况的比较,其中曲线是基于三维扫描仪扫描生成的平板中纵剖面变形数据结合后期处理软件 Geomagic 拟合而成,  $L$  表示测点距离边线的距离,  $\Delta$  为变形量。通过分析可以看出:工况 1 中,平板呈现整体中垂变形,但是因爆距较大,整体变形量不大,最大变形量为  $-0.44 \text{ mm}$ ;工况 2 中,平板整体变形既有中拱变形,也有中垂变形,整体变形量也不大;工况 4

中,爆径比接近1,爆炸条件剧烈,平板呈现明显的中拱变形,最大变形量为27.85 mm;工况1、工况2和工况4的药量相同,但是随着爆径比逐渐接近1,平板结构响应的非线性急剧增加。

### 3 试验数据分析

#### 3.1 应变响应

在爆炸冲击波和气泡的联合作用下,模型出现明显不同的应变响应过程。下面将此响应过程分为中拱、中垂和稳定3个阶段,选取各阶段的应变峰值,分析应变响应特点。

表3给出了不同工况下各个响应阶段的应变峰值(y方向)。

可以看出:工况1中,平板的中拱和中垂响应均较明显,且中拱应变峰值普遍大于中垂应变峰值,而结构最终表现为轻微的中垂变形;工况2中,平板的中垂应变峰值与中拱基本相当,最终变形为中拱与中垂并存,平板的多阶模态变形特征较明显;工况4中,由于爆径比接近1,平板结构响应剧烈,在中拱变形阶段,靠近板中心的测点S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>处于中拱受拉状态,而测点S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>处于中垂受压状态,在中垂变形阶段,整个平板均处于中垂受压状态,稳定后平板呈现中拱变形;工况1和工况2的药量相同,但是随着爆径比的减小,平板响应由中垂变形的单一模态转变为中拱与中垂并存的多阶模态;工况5和工况6的平板变形特征与工况1类似,但是由于平板厚度增加,总体响应为弹性变形。

表3 不同工况下平板在各个阶段的应变峰值

Table 3 Peak strains at each stage of plate in different cases

Case	$R/r_{\max}$	Peak strain/( $10^{-3}$ )											
		Hogging phase				Sagging phase				Stabilization phase			
		S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
1	2.46	0.577	0.684	0.306	0.366	-0.212	-0.470	-0.267	-0.334	-0.090	-0.014	-0.026	-0.011
2	1.96	0.780	0.606	0.388	0.305	-0.385	-0.503	-0.371	-0.321	0.011	0.023	-0.031	-0.050
4	0.97		0.533	-0.148	-0.171	-0.008	-0.111	-0.539	-0.600	0.407	0.055	-0.403	-0.452
5	2.99	0.543	0.535	0.269	0.345	-0.472	-0.492	-0.746	-0.939	0	0	0	0
6	3.77	0.613	0.553	0.097	0.097	-0.338	-0.240	-0.177	-0.233	0	0	0	0

图8为工况2条件下测点S<sub>3</sub>的应变时程曲线(x方向)。结合高速摄影得到的气泡脉动过程可知:该工况下,平板模型经历了多次气泡脉动冲击,冲击波以及后续气泡脉动压力形成的结构应变峰值分别为 $1.071 \times 10^{-3}$ 、 $0.903 \times 10^{-3}$ 、 $0.868 \times 10^{-3}$ 和 $0.635 \times 10^{-3}$ ,幅值逐步降低;前两次气泡脉动频率分别为14.9和19.1 Hz。A时刻,初始冲击波作用到平板模型上,形成第1个应变峰值,结构发生整体中拱变形,并伴随局部高频振动;B时刻,冲击波过后,随着爆炸气泡膨胀,流场压力逐渐减小,平板在低压流场和外部大气压联合作用下产生明显的中垂变形;C时刻,气泡快速收缩,流场压力逐渐升高,气泡崩溃形成的高速射流产生瞬态冲击作用于结构,

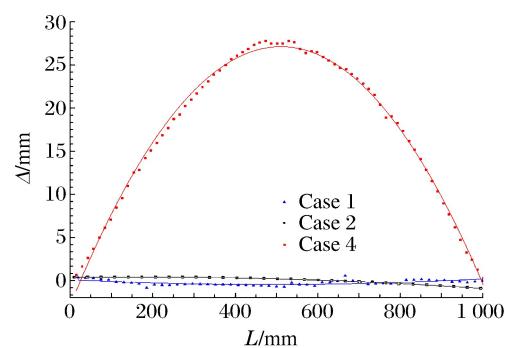


图7 典型工况下平板最终塑性变形

Fig. 7 Final plastic deformations of plates in typical cases

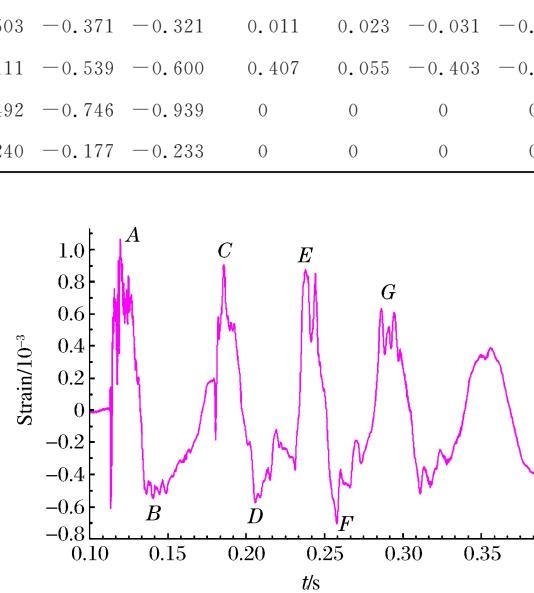


图8 工况2下测点S<sub>3</sub>的应变时程曲线

Fig. 8 Strain history at point S<sub>3</sub> in Case 2

导致平板模型产生中拱变形,其应变峰值与 A 点相当;D 时刻,气泡第 2 次脉动膨胀,平板再次发生中垂变形。气泡溃灭后,平板模型进入低频自由振动。

其他工况下各测点应变时程曲线的变化趋势基本与工况 2 相同,此处不再赘述。需要指出的是,在工况 4 条件下,平板模型在气泡溃灭后的自由振动阶段,其应变峰值甚至超过冲击波和气泡第 1 次脉动冲击所产生的结构应变,表明结构与爆炸载荷之间发生了耦合共振现象。

综合以上分析发现,虽然气泡脉动压力峰值较冲击波压力峰值小得多,约为冲击波压力峰值的 9%~19%,但是其结构响应的应变峰值却与冲击波的应变峰值相当,而且气泡多次脉动的作用时间远远长于冲击波,脉动过程可能引起结构的耦合运动,因此气泡对结构的整体损伤作用不容小觑。

### 3.2 壁压载荷

近距离爆炸条件下平板结构的壁压载荷能够一定程度地反映流固耦合作用,同时也是结构响应研究的基础,因此采集并研究壁压载荷特性很有意义。本试验采用 PCB 压力传感器,测得平板在爆炸载荷作用下的壁压时程曲线。

图 9 显示工况 4 下测点  $P_2$  的压力时程曲线。可以看出:冲击波作用到 A 点时,壁压瞬间升高;随着气泡膨胀,壁压迅速衰减;气泡膨胀后期至收缩初期这一较长时间段,壁压为负压;气泡快速收缩后期,测点处压力逐渐上升,并在气泡第 1 次脉动的 C 时刻形成压力峰值;C 点到 E 点为气泡第 2 次脉动过程,壁压变化过程与第 1 次脉动相似,只不过峰值压力略有减小,但气泡膨胀收缩过程中的最低负压值依然相当。图 10 显示了工况 2 下测点  $P_2$  的压力时程曲线,其中气泡第 1 次脉动阶段的压力时程曲线与图 9 基本一致。

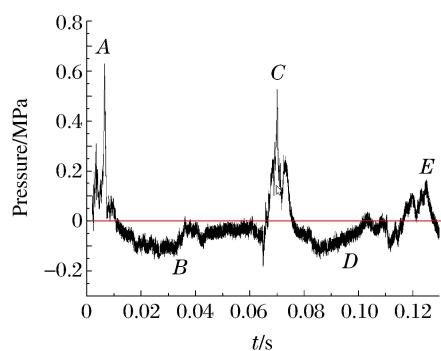


图 9 工况 4 下测点  $P_2$  的压力曲线

Fig. 9 Pressure history at point  $P_2$  in Case 4

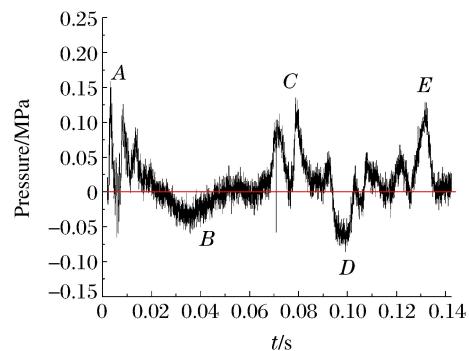


图 10 工况 2 下测点  $P_2$  的压力曲线

Fig. 10 Pressure history at point  $P_2$  in Case 2

表 4 给出了工况 2 和工况 4 条件下测点  $P_2$  壁压曲线的数据对比,其中  $t_{p1}$ 、 $t_{p2}$ 、 $t_{n1}$ 、 $t_{n2}$ 、 $p_{n1}$ 、 $p_{n2}$  分别表示气泡第 1 次和第 2 次脉动过程中气泡膨胀早期正压维持时间、气泡脉动中的负压维持时间和负压峰值。从表 4 可以看出:在气泡第 1 次脉动过程中,工况 2 和工况 4 的负压维持时间相当,约为脉动周期的 80%,工况 4 条件下,流场压力进入负压更迅速,且负压峰值相对更大;在气泡第 2 次脉动过程中,工况 2 和工况 4 下流场压力进入负压的速度相当,而工况 4 的负压作用时间较工况 2 长,且负压峰值也较大。综合分析发现,爆炸气泡两次脉动过程中,壁压的负压维持时间均较长,约占脉动周期的 60%~80%,而且负压幅值大,甚至超过 0.1 MPa。

表 4 工况 2 和工况 4 的压力对比

Table 4 Comparison of pressures in Case 2 and Case 4

Case	First pulsation			Second pulsation		
	$t_{p1}$ /ms	$t_{n1}$ /ms	$p_{n1}$ /MPa	$t_{p2}$ /ms	$t_{n2}$ /ms	$p_{n2}$ /MPa
2	13.90	51.45	-0.067	5.33	40.95	-0.095
4	4.40	55.05	-0.184	5.60	52.77	-0.142

综合以上分析可知:在近结构边界水下爆炸条件下,气泡脉动导致边界附近的流场压力降低,并在边界底部产生负压区;该负压区不仅维持时间长,而且压力值较大,平板模型在负压区及外部大气压的联合作用下容易发生中垂弯曲变形。

### 3.3 爆径比对气泡脉动的影响

为了研究近距离爆炸条件下结构边界对气泡脉动的影响,利用自由场传感器采集各工况下的气泡脉动周期。下面以爆径比  $R/r_{\max}$  为变化参数,分析其对气泡第1次脉动周期的影响。

表5给出了各工况脉动周期的试验值和经验值<sup>[13]</sup>比较。可以看出:当  $R/r_{\max}$  接近1时,气泡脉动周期的试验值与理论值的相对偏差较大,此时气泡受结构边界的影响较大,未能充分膨胀和收缩,气泡呈椭球状运动;随着  $R/r_{\max}$  的增大,气泡脉动周期试验值与理论值的相对偏差减小,表明气泡受结构边界的影响变小,气泡更接近球形脉动。

表5  $R/r_{\max}$  对气泡脉动周期的影响

Table 5 Effect of  $R/r_{\max}$  on the period of bubble pulsation

Case	$R/r_{\max}$	Bubble pulsation period			Case	$R/r_{\max}$	Bubble pulsation period		
		Test/ms	Theor./ms	Error/%			Test/ms	Theor./ms	Error/%
1	2.46		69.82		4	0.97	66.32	72.51	8.5
2	1.96	67.10	70.34	4.6	5	2.99	53.34	56.98	6.4
3	1.46	67.17	71.40	5.9	6	3.77	42.22	45.23	6.7

## 4 结 论

(1) 冲击波和气泡脉动均会造成结构应变响应,虽然气泡脉动的压力峰值仅为冲击波的9%~19%,但是气泡多次脉动过程中低压往复冲击且作用时间长,所造成的结构应变响应与冲击波相当。

(2) 在近场非接触水下爆炸的气泡脉动过程中,结构边界处形成低压(负压)流场,其峰值可达0.1 MPa,而且作用时间较长,约为气泡脉动周期的60%~80%,导致结构出现较大的中垂变形过程。

(3) 爆径比对气泡脉动过程和平板结构整体响应的影响均较大:爆径比越接近1,气泡脉动过程受结构边界的影响越大;随着爆径比的减小,平板的最终变形由弹性变形、中垂变形向中拱变形转变,结构响应的非线性急剧增加。

## 参考文献:

- [1] 刘建湖.舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用 [D].无锡:中国船舶科学研究中心,2002.
- [2] 罗泽立,周章涛,毛海斌,等.水下爆炸强冲击波与平板结构相互作用的理论分析方法 [J].高压物理学报,2017,31(4):443-452.  
LUO Z L,ZHOU Z T,MAO H B,et al. Theoretical analysis of the interaction between the plate structure and strong shock wave in underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2017,31(4):443-452.
- [3] 李海涛,朱锡,段存成,等.船舶工程领域内水下爆炸气泡的相关研究 [J].船舶工程,2008,30(4):72-76.  
LI H T,ZHU X,DUAN C C,et al. Related research on bubbles due to underwater explosion in the field of ship engineering [J]. Ship Engineering,2008,30(4):72-76.
- [4] 黄晓明,朱锡,牟金磊,等.近距水下爆炸作用下箱形梁模型中垂破坏试验研究 [J].振动与冲击,2011,30(2):19-23.  
HUANG X M,ZHU X,MU J L,et al. Sagging damage test of box-beam models subjected to close range underwater explosion [J]. Journal of Vibration and Shock,2011,30(2):19-23.
- [5] TAYLOR G I. The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates [M]//TAYLOR G I. The Scientific Papers of Taylor G I; Vol III. UK:Cambridge University Press,1963:287-303.

- [6] ZHANG P,GEERS T L. Excitation of a fluid-filled, submerged spherical shell by a transient acoustic wave [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(2): 696-705.
- [7] GAUCH E,LEBLANC J,SHILLINGS C,et al. Response of composite cylinders subjected to near field underwater explosions [M]//Dynamic Behavior of Materials: Volume 1. Springer, 2017: 153-157.
- [8] 唐廷,朱锡,韦灼彬,等.水下爆炸冲击波作用下空气背衬平板的运动 [J].兵工学报,2012,33(7):831-835.  
TANG T,ZHU X,WEI Z B,et al. Movement of air backed plane plates subjected to shock wave of underwater explosion [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(7): 831-835.
- [9] 李海涛,朱石坚,陈志坚,等.全入射角度下平板冲击波的壁压载荷及局部空化特性 [J].爆炸与冲击,2014,34(3): 354-360.  
LI H T,ZHU S J,CHEN Z J,et al. Characteristics of wall pressure and cavitation on the plate subjected to underwater explosion shockwaves at any angle of incidence [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 354-360.
- [10] 陈学兵,李玉节.圆柱壳在水下爆炸气泡作用下的动态塑性响应研究 [J].船舶力学,2010,14(8):922-929.  
CHEN X B,LI Y J. Investigation of the dynamic responses of cylindrical shell subjected to underwater explosion bubble [J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(8): 922-929.
- [11] KLASEBOER E,KHOO B C,HUNG K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure [J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 21(4): 395-412.
- [12] ZHANG A M,YAO X L,LI J. The interaction of an underwater explosion bubble and an elastic-plastic structure [J]. Applied Ocean Research, 2008, 30(3): 159-171.
- [13] 李海涛,朱石坚,刁爱民,等.水下爆炸气泡作用下梁中垂损伤及流场变化特性 [J].高压物理学报,2012,26(5): 494-500.  
LI H T,ZHU S J,DIAO A M,et al. Characteristics of flow-field and sagging damage of free-free beam subjected to underwater explosion bubbles [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(5): 494-500.
- [14] 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 X,MU J L,HONG J B,et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(4): 365-368.

## Experimental Investigation on Load Characteristics and Structure Response of Finite-Size Plate Subjected to Underwater Explosions

LIU Libin, LI Haitao, DIAO Aimin, WANG Xiaoqiang

(College of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to study the loading characteristics of underwater explosion shock wave and bubble near the structural boundary, we designed and tested several plate models. By changing the ratio of stand-off to the maximum bubble radius, the flat thickness and other parameters, we analyzed the bubble pulsation and the low-pressure flow field at the plate boundary, as well as the local and global response characteristics of the slab based on the strain analysis. The results show that a low-pressure (negative pressure) flow field appears at the boundary of the plate during the movement of the bubble in near-flat explosion. The duration of the low-pressure accounts for 60%-80% of the bubble pulsation period and the maximum negative pressure can reach 0.1 MPa. With the reduction of the ratio of stand-off to the maximum bubble radius, the final deformation of the plate changes from elastic and sagging deformation to hogging deformation.

**Keywords:** underwater explosion; negative pressure; load characteristics; bubble pulsation; structure response

# 距离参数对浅水中气泡运动影响规律的 实验和数值模拟<sup>\*</sup>

孟 祎, 张 航, 郑 监

(国防科技大学文理学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**当爆炸气泡在浅水中运动时,同时受到自由面和水底壁面的作用而产生极其复杂的水面现象,气泡的运动特性与在自由场中或单一边界附近处爆炸相比会发生很大变化。为探究其规律,通过电火花诱导气泡实验,利用高速摄影技术对气泡与组合多边界的相互作用进行了研究,总结了自由面距离( $\gamma_f$ )和壁面距离( $\gamma_w$ )对气泡运动和水冢类型的影响。并用OpenFOAM进行了数值模拟,分析了距离参数对射流载荷的影响。结果表明:自由面距离参数较壁面距离参数对水冢类型影响更大;射流速度随自由面距离的增大而减小,在 $0 < \gamma_w < 2$ 时,射流速度随壁面距离的增大先减小后增大;壁面压力与距离呈负相关,射流冲击面积与距离呈正相关。

**关键词:**浅水爆炸;气泡运动;距离参数

**中图分类号:**O359.1      **文献标识码:**A

随着水下爆炸在国防工业领域中的应用日益广泛,研究范围也从自由场中单气泡运动延伸到复杂边界条件下的气泡运动。根据文献[1]中的实验结果,当边界大于气泡最大半径( $R_{\max}$ )的3倍以上时,边界影响将不明显。因此,本研究定义浅水中气泡运动的边界距离应当小于3倍气泡最大半径。当爆炸气泡在浅水中运动时,会同时受到自由面和水底壁面的作用而引起极其复杂的水面现象,气泡的运动特性与在自由场中或单一边界附近处爆炸相比会发生很大变化。在宏观尺度问题中,浅海海滩中爆炸可以产生向上高速喷射的水柱,军事上可以用来抵御贴水面飞行的物体的袭击,气泡坍塌形成的高速射流能够引起舰船结构的局部毁伤。在小尺度范围下,生物领域的激光诱导向前转移(LIFT)技术利用气泡射流将生物材料传递到接收板上。浅层水中爆炸由于受到自由液面和水底壁面的同时影响,产生了不同于无限水介质中爆炸的水面现象,可以说多界面大大增加了水下爆炸研究的困难程度。

对于气泡引起的流场脉动载荷以及射流载荷特性的相关研究较多。Plesset等<sup>[2]</sup>早在1949年已对水中气泡运动进行了理论研究,提出的运动方程为众多气泡运动理论研究提供了参考。Klaseboer等<sup>[3]</sup>研究了炸药爆炸气泡与垂直放置钢板的相互作用,其实验结果已经成为水中爆炸气泡动力学数值模拟的主要参考数据。Koukouvinis等<sup>[4]</sup>用流体体积法模拟了加速度场中激光泡的膨胀和非球形坍塌,发现在坍塌过程中气泡底部某点较大的坍塌速度会导致动量的集中,进而引起局部坍塌。Liu等<sup>[5]</sup>采用Front-Tracking法,模拟了固壁附近不同比例距离处的气泡运动,发现比例距离 $\gamma \leq 0.6$ 时气泡完全贴附于壁面,气泡和壁面之间的水层消失,射流会引起壁面上压力的最高峰值,而气泡内部压强会引起第2个峰值。李帅等<sup>[6]</sup>提出“气泡载荷分解法”,将气泡总载荷分解成脉动载荷和射流载荷两部分,并给出了相应的数值计算方法,计算结果与解析解高度吻合。郑监等<sup>[7]</sup>提出气泡两次脉动引起的水面现象叠加是产生不同水冢的实质性机理,而气泡到自由液面的无量纲距离对水冢类型起着决定性作用。梁浩哲等<sup>[8]</sup>用AUTODYN软件进行

\* 收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-05

作者简介: 孟 祎(1994—),女,硕士研究生,主要从事计算流体力学与应用方面的研究. E-mail:18390951358@qq.com

通信作者: 张 航(1977—),男,博士,副教授,主要从事结构爆炸破坏效应与评估技术研究. E-mail:zhangduo@nudt.edu.cn

了计算,发现深水形成的射流速度约350 m/s,远大于浅水下的150 m/s,与刚性壁接触后射流头部的压力也大于浅水中的压力,说明深水环境下的射流更易对结构造成严重破坏。董琪等<sup>[9]</sup>运用LS-DYNA对不同爆炸深度下的浅水爆炸进行数值模拟,分析了爆炸深度对浅水爆炸气泡半径和射流方向的影响。目前,关于无限水域水下爆炸气泡的研究成果非常丰富,而对多界面影响下的水下爆炸气泡的相关研究略显匮乏,浅水中气泡射流载荷造成结构破坏方面的研究也开展得比较少,有关射流冲击结构过程中的一些现象和破坏机理还没有比较深入的研究。

因为气泡在浅水中的运动主要受距离参数的影响,所以本研究改变气泡初始深度,利用电火花诱导气泡技术进行了一系列实验,并借助高速摄影设备对水下微爆炸过程进行了观察,收集了大量实验图片和数据。对气泡运动水面现象和射流载荷进行了研究,分析了自由面距离和壁面距离对浅水中气泡运动的影响。

## 1 实验设计

### 1.1 实验平台

电火花诱导气泡原理<sup>[1]</sup>是利用电热效应,即通过电极燃烧产热、使水介质汽化生成气泡。电火花诱导气泡实验布置如图1所示,本研究利用该平台进行了气泡与自由液面、水底壁面组合边界相互作用的实验。该平台包括MCH-K1205D型直流稳压电源、FASTCAM-SA1.1型高速摄像机、120 W的LED灯、电极(直径0.1 mm的细铜丝)和25 mm×25 mm×25 mm的正方形水箱。实验过程中高速摄像机设置为6000帧每秒、1024×1024像素,用于观测气泡运动以及水面现象。

控制装置用于控制电火花的起爆和高速摄影的同步触发。

### 1.2 实验工况设计

气泡在自由液面或水底壁面附近运动时,会受到边界的影响而呈现非球状,在坍塌过程中气泡内部会产生射流,气泡运动过程相对于自由场也有所改变。因此,通过调整气泡与界面的距离来研究浅水中气泡运动的规律,第Ⅰ组实验令壁面距离 $\gamma_w$ 不变,改变自由面距离 $\gamma_f$ 来考察其影响;第Ⅱ组实验保持自由面距离 $\gamma_f$ 不变,改变壁面距离 $\gamma_w$ 来考察 $\gamma_w$ 的影响。实验工况设计见表1。

将特征压力选择为距离爆炸中心水平无穷远处静水压力 $p_\infty$ ,特征长度选择为在压力为 $p_\infty$ 的无黏、无旋、不可压缩自由场中球状膨胀气泡的最大半径 $R_{\max}$ <sup>[10]</sup>。由此引入距离参数 $\gamma_f=d/R_{\max}$ 和 $\gamma_w=(h-d)/R_{\max}$ ,分别为气泡到自由液面的无量纲距离 $\gamma_f$ 和气泡到壁面的无量纲距离 $\gamma_w$ ,其中 $h$ 表示自由液面和水底固壁之间的距离, $d$ 表示气泡初始中心到自由液面的距离。本研究选取不同的无量纲距离参数,在电压为100 V时(在自由场中产生气泡最大半径为6 mm<sup>[6]</sup>)进行了实验研究,分析了不同无量纲距离下气泡运动形态和水射流发展过程。

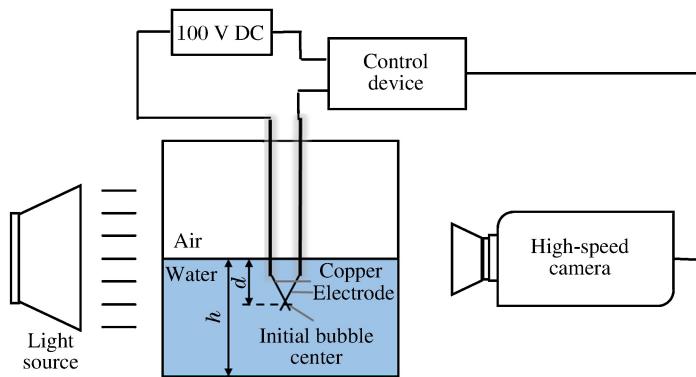


图1 实验装置布置图

Fig. 1 Layout of experimental equipment

表1 实验工况设计

Table 1 Experimental conditions

Group	Number	$\gamma_f$	$\gamma_w$
I	1	0.63	
	2	1.54	0.31
	3	2.26	
II	1		0.75
	2	0.38	1.88
	3		3.01

## 2 数值模型及有效性验证

本研究基于 OpenFOAM 软件包中的可压缩两相界面捕获求解器 CompressibleInterFoam, 利用流体体积方法(Volume of Fluid, VOF)求解, 考虑了液体黏性、表面张力和流场中重力的存在, 建立如图 2 所示的轴对称模型, 进行浅水中气泡运动的数值模拟, 边界条件在表 2 中列出,  $\alpha$ 、 $p$ 、 $U$  和  $T$  分别为相分数、压强、速度和温度。

为了验证 OpenFOAM 计算水下爆炸气泡运动过程的有效性, 把仿真结果与用经验公式计算的结果进行对比, 分别对半径为 0.2、0.3 和 0.4 cm 的球形 TNT 炸药在水面下 20 cm 处起爆的过程进行模拟。模拟值与经验公式计算值的对比见表 3, 由表 3 可以看出, 虽然仿真结果与经验值存在一定偏差, 但是偏差在可接受范围内, 可以用该模型模拟水下爆炸气泡运动过程。其中 I(1)工况和 II(1)工况特征时刻仿真结果如图 3 和图 4 所示。

表 2 自由场中气泡脉动模型的 CFD 边界条件

Table 2 Boundary conditions for CFD of single bubble pulsation in a free field

Boundary	$\alpha$	$p$	$U$	$T$
Empty (left)	Empty	Empty	Empty	Empty
Advection (right & top)	Advection	Advection	Advection	Advection
Wedge (front & back)	Wedge	Wedge	Wedge	Wedge
Wall (bottom)	zeroGradient	fixedValue(0,0,0)	zeroGradient	zeroGradient

表 3 气泡半径和周期的对比<sup>[11]</sup>

Table 3 Comparation of the bubble radius and the period<sup>[11]</sup>

Charge radius $r/cm$	Charge amount $W/g$	$R_m/cm$			$T/ms$		
		Empirical	Simulation	Deviation/%	Empirical	Simulation	Deviation/%
0.2	0.055	6.0	6.3	6.18	11.5	11.2	-2.8
0.3	0.184	8.9	8.3	-6.6	17.2	14.6	-15.3
0.4	0.437	11.9	10.6	-10.1	23.0	18.5	-19.5

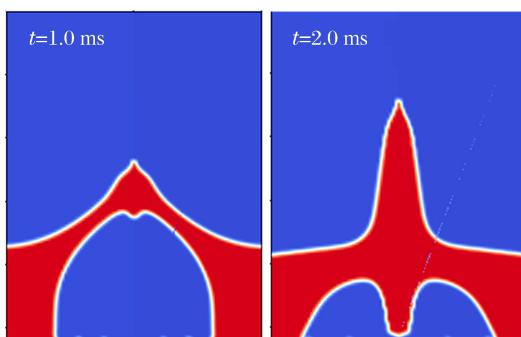


图 3 工况 I(1) 气泡开始收缩和射流穿透气泡瞬间数值模拟结果

Fig. 3 Instantaneous simulation results of bubble shrinking and penetrated by jet in condition I(1)

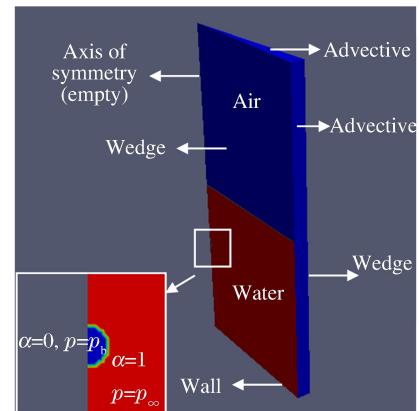


图 2 自由场中气泡脉动模型的边界条件<sup>[11]</sup>  
Fig. 2 Boundary patches for CFD of single bubble pulsation in a free field<sup>[11]</sup>

表 3 气泡半径和周期的对比<sup>[11]</sup>

Table 3 Comparation of the bubble radius and the period<sup>[11]</sup>

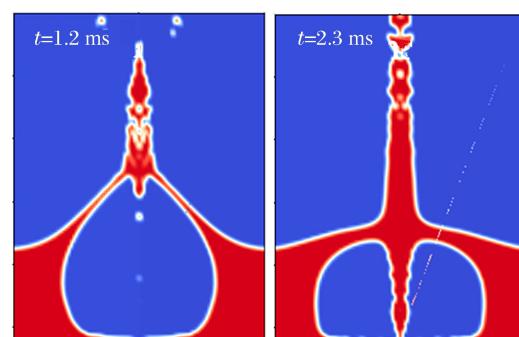


图 4 工况 II(1) 气泡开始收缩和射流穿透气泡瞬间数值模拟结果

Fig. 4 Instantaneous simulation results of bubble shrinking and penetrated by jet in condition II(1)

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 自由面距离 $\gamma_f$ 对气泡运动及水面现象的影响

$\gamma_f$  取值范围是 0.63~2.26,选取 3 种典型的实验工况如图 5、图 6、图 7 所示,分别对应表 1 中的工况 I(1)、工况 I(2)、工况 I(3)。工况 I(1)放电产生的气泡实测最大半径约为 5.3 mm。从图 5(c)  $t=1.0$  ms 时可以看出,此工况在气泡膨胀的初期,气泡上半部分保持为球形向外膨胀,气泡下半部分与壁面紧紧贴附,中间的水层变得非常薄,自由液面在气泡上部形成向上竖直喷射的细水柱。在气泡坍塌过程中(图 5(c)~图 5(f)),气泡下表面一直贴附于壁面,下表面收缩慢,上表面收缩快,气泡整体呈倒漏斗状。

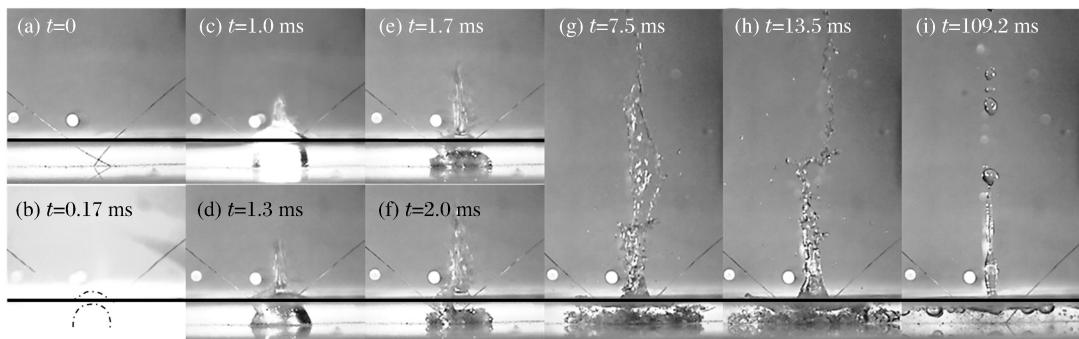


图 5 自由液面与水底固壁之间气泡运动特性( $\gamma_w=0.31, \gamma_f=0.63$ )<sup>[12]</sup>

Fig. 5 Characteristics of bubble motion between free surface and bottom wall ( $\gamma_w=0.31, \gamma_f=0.63$ )<sup>[12]</sup>

工况 I(2)放电产生的气泡实测最大半径约为 6.5 mm。气泡膨胀现象与工况 I(1)类似。在  $t=1.0$  ms 时(图 6(c)),气泡膨胀到最大体积,自由面微微凸起。随后气泡保持半球状收缩至最小体积,气泡表面不再光滑,流场变得紊乱。在第 2 次气泡脉动过程中(图 6(d)~图 6(i)),液面上缓慢发展出水柱,由于水裙速度大于中心水柱速度,所以初始水冢呈现内凹形。后期水柱中心速度增大,中心高度追赶上水裙高度,粗壮水柱不断发展,最大高度约为 69 mm( $t=93.0$  ms)。

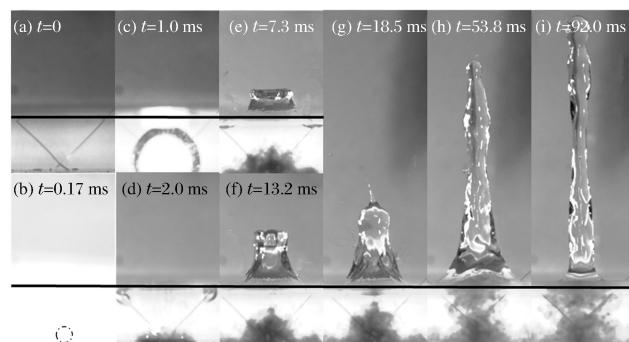


图 6 自由液面与水底固壁之间气泡运动特性( $\gamma_w=0.31, \gamma_f=1.54$ )

Fig. 6 Characteristics of bubble motion between free surface and bottom wall ( $\gamma_w=0.31, \gamma_f=1.54$ )

工况 I(3)放电产生的气泡实测最大半径约为 7.0 mm。气泡膨胀现象同工况 I(1)和 I(2)类似,但是液面在气泡膨胀过程中抬升不明显。气泡收缩过程中(图 7(b)、图 7(c)),气泡顶端液面仍然几乎保持不变。在第 2 次气泡脉动过程中(图 7(c)、图 7(d)、图 7(e)),气团向四周散开,自由面上缓慢发展出顶部较尖的丘形水冢,在  $t=41.0$  ms 时,水冢达到最大高度,约为 16.3 mm。

在壁面距离  $\gamma_w$  保持为 0.31 时,不同的自由面距离  $\gamma_f$  可产生不同形态的水面现象。 $\gamma_f$  较小时,二次脉动形成的水裙未能追赶上初次水柱,形成细长、不稳定的喷射型水冢,二次水裙若能追赶上初次水

柱,则会形成内凹型水冢; $\gamma_f$  较大时,二次脉动的水裙与初次水柱融合,二者形状差距不大,则形成较稳定的丘型水冢。可以看出,气泡距离自由面越近,其受自由面的影响越大,水面现象越激烈。

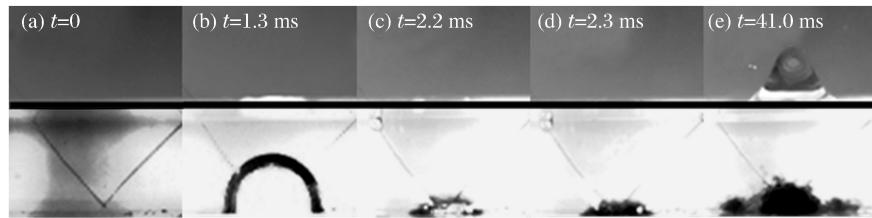


图7 自由液面与水底固壁之间气泡运动特性( $\gamma_w=0.31, \gamma_f=2.26$ )

Fig. 7 Characteristics of bubble motion between free surface and bottom wall ( $\gamma_w=0.31, \gamma_f=2.26$ )

### 3.2 壁面距离 $\gamma_w$ 对气泡运动及水面现象的影响

$\gamma_w$  介于 0.75 和 3.01 之间,3 种典型的工况如图 8、图 9、图 10 所示,分别对应工况 II(1)、工况 II(2)、工况 II(3)。工况 II(1)放电产生的气泡实测最大半径约为 5.3 mm,从图中可以看出,在气泡膨胀的初期(图 8(c), $t=0.67$  ms),气泡贴近水底壁面呈圆柱状向外扩展,自由液面在气泡上部闭合后形成竖直向上喷射的细水柱。在气泡坍塌过程中(图 8(d)、图 8(e)、图 8(f)),靠近自由液面的部分收缩速度快,靠近水底固壁的部分收缩速度慢。工况 II(2)最大半径约为 5.3 mm。在气泡产生的初期(图 9(a)),自由液面破碎后迅速闭合。气泡收缩过程中,自由液面的排斥作用和刚性壁面的吸引作用都很剧烈,气泡顶部变得扁平,底部呈尖角状,气泡内部形成向下的、较强的、冲向壁面的射流,如图 9(b)。气泡底部受到壁面吸引,贴近壁面发生坍塌过程(图 9(d)、图 9(e)、图 9(f))。在第 2 次气泡脉动过程中,自由面不断上升,发展出粗壮的水柱,最大高度约为 74 mm。工况 II(3)放电产生的气泡实测最大半径约为 5.3 mm,过程与工况 II(2)类似。

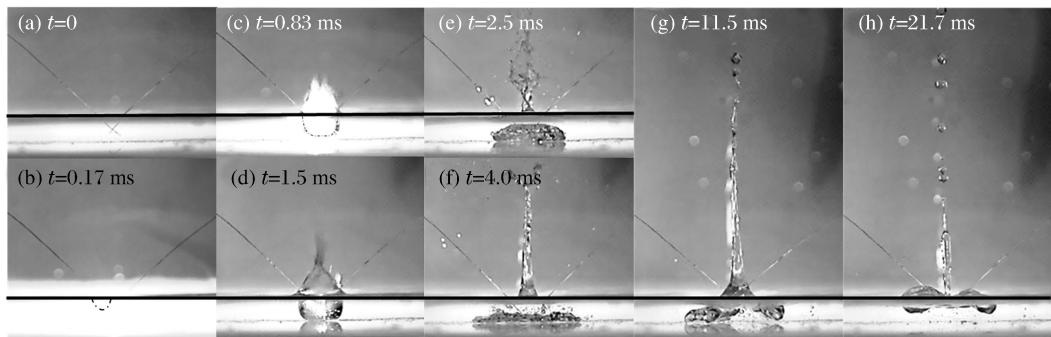


图8 自由液面与水底固壁之间气泡运动特性( $\gamma_f=0.38, \gamma_w=0.75$ )<sup>[12]</sup>

Fig. 8 Characteristics of bubble motion between free surface and bottom wall ( $\gamma_f=0.38, \gamma_w=0.75$ )<sup>[12]</sup>

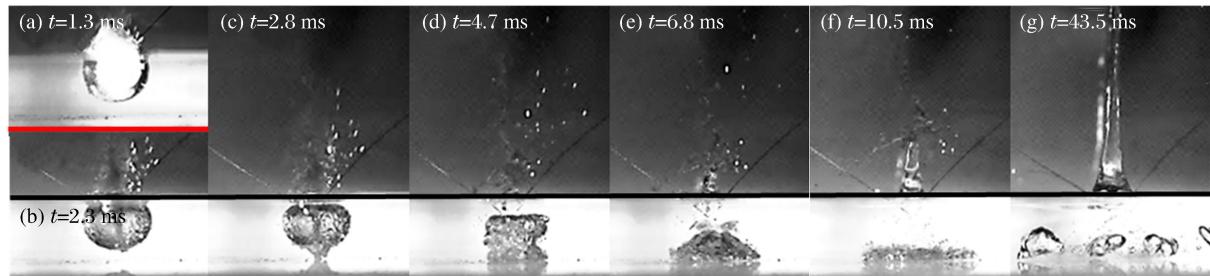
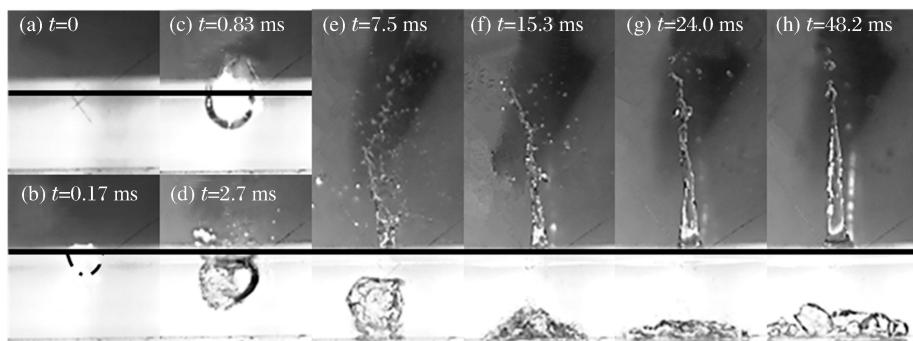


图9 自由液面与水底固壁之间气泡运动特性( $\gamma_f=0.38, \gamma_w=1.88$ )

Fig. 9 Characteristics of bubble motion between free surface and bottom wall ( $\gamma_f=0.38, \gamma_w=1.88$ )

图 10 自由液面与水底固壁之间气泡运动特性( $\gamma_f = 0.38, \gamma_w = 3.01$ )Fig. 10 Characteristics of bubble motion between free surface and bottom wall ( $\gamma_f = 0.38, \gamma_w = 3.01$ )

可以发现,气泡形态演化受刚性壁面约束较大,水冢形态基本不受壁面影响。气泡越靠近刚性壁面,其形状越难保持为球形。壁面距离较小时,气泡会被壁面限制发展;随着壁面距离的增大,壁面和气泡之间存在水层,气泡在收缩过程中会受到壁面的吸引作用,底部呈现尖角状;壁面距离大于 3 倍气泡最大半径时,壁面对气泡的形态变化无明显影响。

现将无量纲的自由面距离  $\gamma_f$  和壁面距离  $\gamma_w$  对气泡和水冢形态的影响分类归纳成图 11 的分布图。图 11 横坐标轴为  $\gamma_f$ ,随着  $\gamma_f$  的逐渐增大,水冢形态依次经历了破碎型、喷射型、皇冠型、内凹型和丘型;纵坐标为  $\gamma_w$ ,随着  $\gamma_w$  的逐渐增大,水冢形态无明显变化。

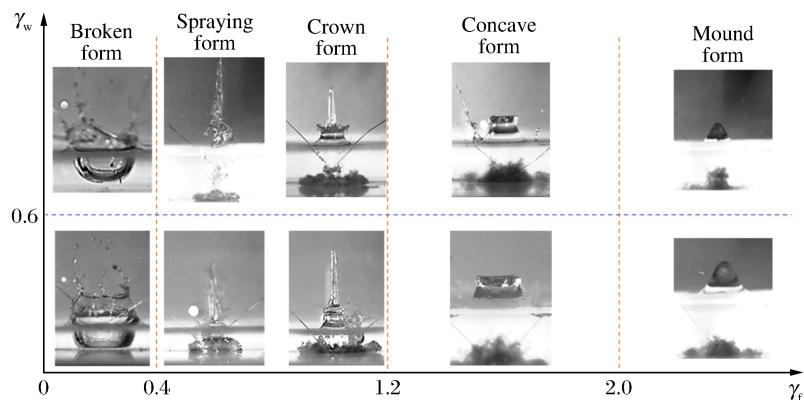


图 11 水冢形态分布

Fig. 11 Distribution of water mounds shape

#### 4 距离参数对气泡动力学的影响

不同的距离参数下,壁面附近气泡的形态差异很大,指向壁面射流的速度大小、冲击压力等变化也很明显。为了研究自由面无量纲距离  $\gamma_f$  和壁面无量纲距离  $\gamma_w$  的影响,分别改变  $\gamma_f$  和  $\gamma_w$  以研究不同距离参数下气泡射流冲击载荷变化规律。在气泡与双重界面相互作用的过程中,水冢速度  $v_w$  是指水冢顶端的液体前进速度,射流速度  $v_j$  是指射流顶端的液体前进速度,壁面压力  $p$  是指在气泡射流载荷作用下壁面上受到的压力大小,三者关系如图 12 所示。射流

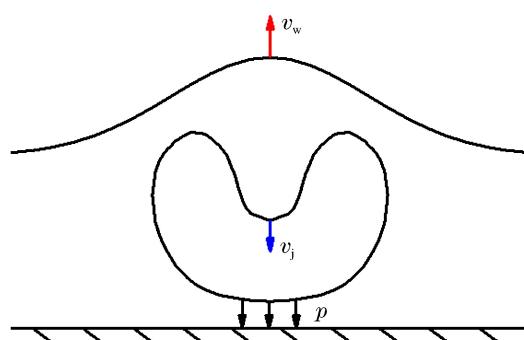


图 12 气泡运动模型图

Fig. 12 Bubble motion model diagram

穿透气泡瞬间,气泡正下方壁面压力较大,壁面上的压力沿径向迅速减小,图13给出了压力剖面的示意图,取气泡正下方压力较大的部分,其宽度为射流载荷作用的有效宽度 $w$ 。当气泡与壁面距离较近时,将产生接触射流<sup>[13]</sup>,即射流直接作用于壁面而不是有一定缓冲作用的水层,如图14所示,当距离参数较大时,则发生非接触射流。

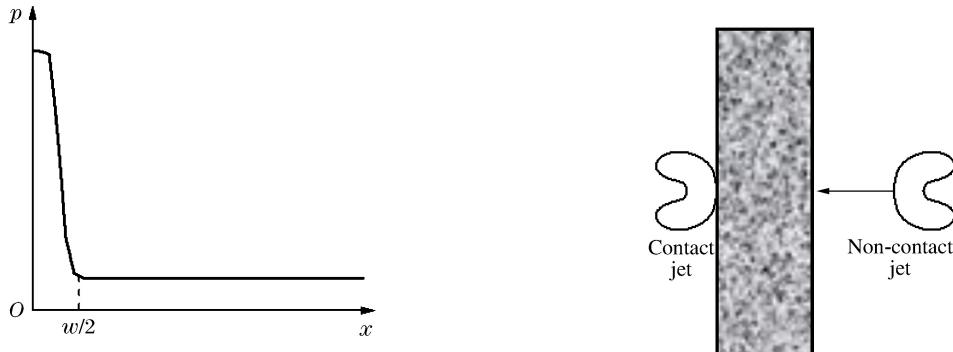


图13 壁面压力沿气泡径向分布图

Fig. 13 Distribution diagram of pressure  
on the wall along the bubble radius

图14 “接触射流”与“非接触射流”示意图

Fig. 14 Schematic diagram of “contact jet”  
and “non-contact jet”

#### 4.1 水冢顶端速度 $v_w$ 分析

根据实验图像,提取不同时刻水冢顶点高度,进而得到水冢顶点速度 $v_w$ 随时间的变化。图15为第I组实验 $v_w-t$ 曲线。因为不同自由面距离 $\gamma_f$ 导致了不同的水冢类型,所以 $v_w$ 变化趋势相差比较大。对比3个工况可以看出,工况I(1)( $\gamma_w=0.31$ )水冢最大速度为15.9 m/s,水冢形成时间为5.7 ms;工况I(2)( $\gamma_w=1.54$ )水冢形成时间为20 ms,水裙吞没水冢后在顶端封闭,流体冲击使顶端产生微射流<sup>[1]</sup>,所以图15(b)中会有急剧凸起的尖端,最大速度约为5.7 m/s;工况I(3)( $\gamma_w=0.31$ )最大速度为0.78 m/s,在38.3 ms时水冢形态比较稳定。可见,气泡距离自由面越远,水面运动越缓和,水冢速度越小,形成水冢稳定形态的时间越长。

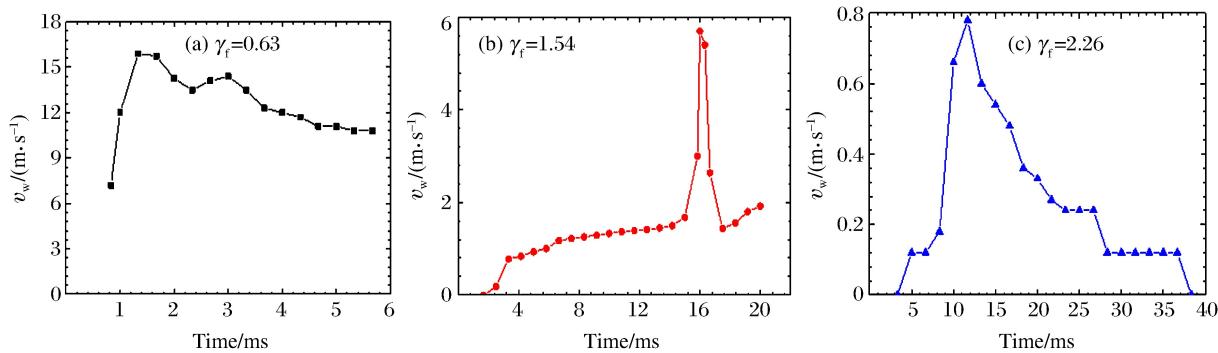
图15 水冢速度 $v_w$ -时间曲线( $\gamma_w=0.31$ )

Fig. 15 Variation of the velocity at the top of the dome with time ( $\gamma_w=0.31$ )

图16为第II组实验水冢顶点速度 $v_w$ 随时间的变化曲线。从图16可以看出,在气泡坍塌阶段,水冢开始减速上升。随后气泡顶端和水冢之间形成高压区<sup>[8]</sup>,使水冢速度也重新上升,在射流穿透气泡瞬间,水冢顶端速度达到第2个极值。与 $\gamma_w=0.91$ 工况相比, $\gamma_w=1.82$ 的工况中水冢上升速度更高,壁面使水冢顶端最大速度增加了约9.9%。这是因为中远壁面距离时,壁面对气泡发展过程的阻碍作用变小,使水冢运动速度和剧烈程度显著增加。

#### 4.2 距离参数对射流速度 $v_j$ 的影响

用 OpenFOAM 软件进行仿真,选取  $\gamma_w=0.31, 0.63$  和  $0.91$  时的 3 组实验,提取每个工况中射流速度  $v_j$  的最大值,图 17 为射流速度  $v_j$  随距离参数的变化曲线,其中符号为仿真值,实线为拟合曲线。从图 17 可以看出,在  $\gamma_w=0.31, 0.63$  和  $0.91$  时的 3 组数据中,  $v_j$  随着  $\gamma_f$  的增加而减少。倪宝玉<sup>[13]</sup>指出,当  $\gamma_w < 0.6$  时,  $v_j$  随  $\gamma_w$  减小而增大;当  $\gamma_w > 0.6$  时,  $v_j$  随  $\gamma_w$  增大而增大。在图 17 中,  $\gamma_w=0.63$  时的速度曲线位于  $\gamma_w=0.31$  和  $\gamma_w=0.91$  的下方,说明  $\gamma_w=0.63$  的工况  $v_j$  更小,这与文献[13]所得结论一致。对于壁面冲击压力而言,接触射流的毁伤性更大,此外,非接触射流速度不可能随着距离参数的增加而无限增大。当距离参数更大后(大约  $\gamma_w > 3$ <sup>[13]</sup>),气泡将不会形成指向壁面的射流,气泡的运动与自由场中气泡运动类似。

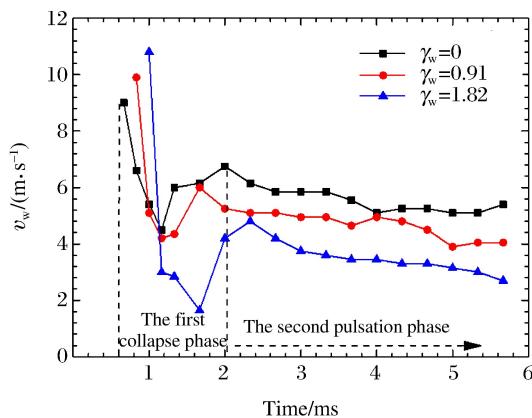


图 16 水冢速度  $v_w$ -时间曲线( $\gamma_f=0.91, \gamma_w=0, 0.91$  和  $1.82$ )

Fig. 16 Variation of the velocity at the top of the dome with time ( $\gamma_f=0.91; \gamma_w=0, 0.91$  and  $1.82$ )

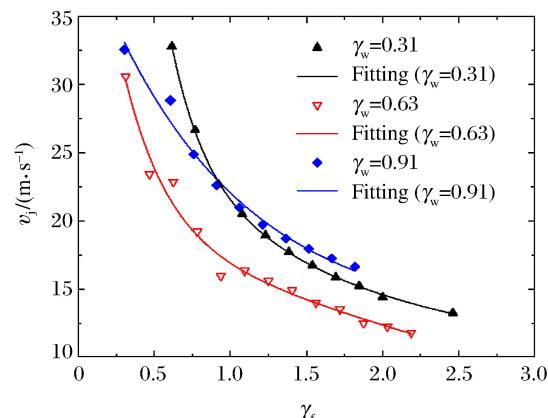


图 17 气泡射流速度  $v_j$  随距离参数的变化

Fig. 17 The curve of bubble jet velocity with distance parameter

#### 4.3 距离参数对壁面压力的影响

用 OpenFOAM 进行仿真,当  $\gamma_w=0.31$  时,  $\gamma_f$  从  $0.62$  变化到  $1.69$ , 提取各工况射流穿透气泡瞬间壁面压力分布进行对比,如图 18 所示。可以看出,随着  $\gamma_f$  的增加,射流穿透瞬间壁面中心( $x=0 \text{ mm}$ )处的压力逐渐减小。其主要原因是: $\gamma_f$  越小,自由液面对气泡的击退效应越显著,射流穿透气泡瞬间,气泡内部形成的射流越完整,使壁面中心压力越大; $\gamma_f > 1.2$ ,  $\gamma_f$  过大时,气泡内部射流微弱,以致壁面中心压力变化不明显。当  $\gamma_f=0.91$  时,  $\gamma_w$  从  $0.15$  变化到  $1.82$ , 提取各工况射流穿透瞬间壁面压力分布进行对比,如图 19 所示。

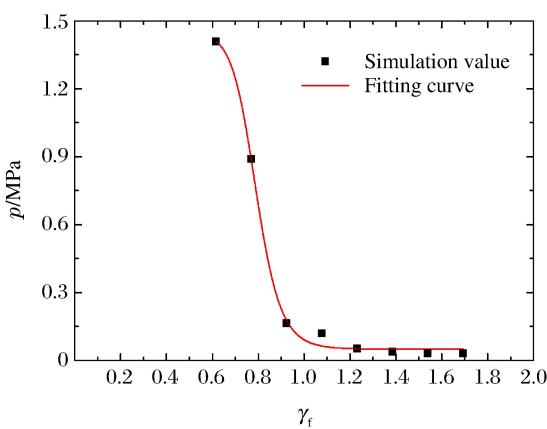


图 18 壁面压力  $p$  随自由面距离  $\gamma_f$  的变化

Fig. 18 Variation of wall pressure with free surface distance parameter

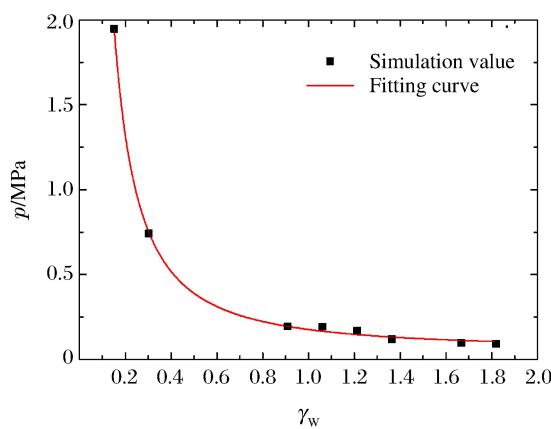


图 19 壁面压力  $p$  随壁面距离  $\gamma_w$  的变化

Fig. 19 Variation of wall pressure with wall distance parameter

随着 $\gamma_w$ 的增大,壁面中心( $x=0\text{ mm}$ )处的压力逐渐降低。这是因为 $\gamma_w$ 较小时,气泡产生了“接触射流”,如图12所示,射流穿透气泡瞬间直接作用于壁面,而不是作用在有一定缓冲作用的水层上,导致气泡距离壁面越近,射流压力越大。根据图20和图21,压力有效宽度 $w$ 随着 $\gamma_f$ 和 $\gamma_w$ 的增加而增加。虽然 $\gamma_f$ 和 $\gamma_w$ 较大时,射流冲击壁面的有效宽度有所增加,但是射流作用在壁面上的压力幅值下降明显,射流对壁面的作用由局部小区域的较强作用转变为较大区域的较弱作用。

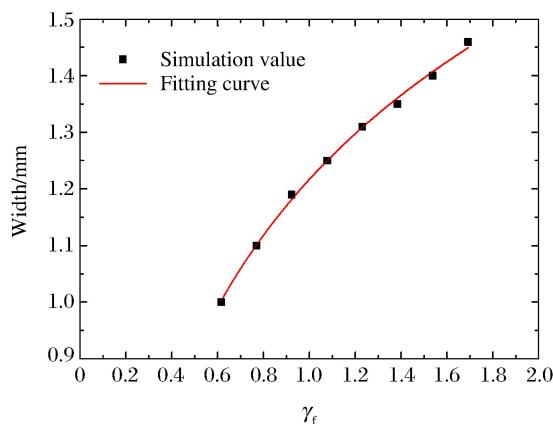


图20 压力有效宽度随自由面距离 $\gamma_f$ 的变化

Fig. 20 Curve of pressure width with free surface distance parameter

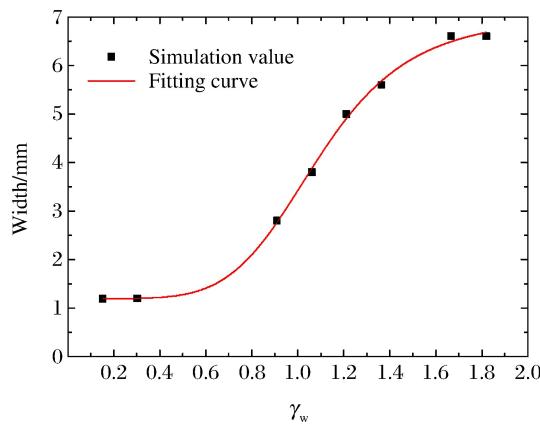


图21 压力有效宽度随壁面距离 $\gamma_w$ 的变化

Fig. 21 Curve of pressure width with wall distance parameter

## 5 结 论

利用电火花诱导气泡技术对浅水中不同距离参数下的气泡运动进行了实验,同时考虑了自由液面和水底壁面的影响,总结了距离参数对水面现象的影响;同时,结合OpenFOAM软件,对应实验工况建立了仿真模型,研究了距离参数对射流载荷的影响。

(1) 不同的自由面距离可产生不同形态的水面现象,水冢形态受自由面的影响比较大;壁面距离对水冢形态影响不明显,但是对气泡运动形态影响大。

(2) 自由面无量纲距离范围为 $0 < \gamma_f < 3$ 时,气泡射流速度随着 $\gamma_f$ 的增加而减少。壁面距离 $\gamma_w$ 对射流速度的影响分为两段:当 $0 < \gamma_w < 0.6$ 时,气泡射流速度随着 $\gamma_w$ 减小而增大;当 $0 < \gamma_w < 2$ 时,气泡射流速度随着 $\gamma_w$ 增大而增大。这是因为 $0 < \gamma_w < 0.6$ 时,气泡坍塌时内部产生“接触射流”,导致气泡距离壁面越近,射流的速度越大。对于中远距离壁面附近的气泡,壁面的存在会阻碍气泡的完全发展,从而也会阻碍射流的充分发展,所以射流速度随着壁面距离的增大而增大。

(3) 射流穿透瞬间,随着自由面无量纲距离的增加( $0 < \gamma_f < 2$ ),自由面对气泡的排斥作用逐渐减弱,Bjerknes力也变小,导致壁面中心处的压力逐渐减小;随着壁面距离的增大( $0 < \gamma_w < 2$ ),同样地,壁面Bjerknes力越来越小,使壁面中心处的压力也逐渐降低。此外,在 $0 < \gamma_f < 2$ 和 $0 < \gamma_w < 2$ 时,壁面压力随距离增大而减小,但有效宽度与距离呈正相关,因此需综合考虑压力大小和有效宽度两个因素来确定射流载荷对壁面的破坏效果。

## 参考文献:

- [1] CUI P, ZHANG A M, WANG S P, et al. Experimental investigation of bubble dynamics near the bilge with a circular opening [J]. Applied Ocean Research, 2013, 41(6): 65-75.
- [2] PLESSET M S. The dynamics of cavitation bubbles [J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 277-282.

- [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]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 537: 387-413.
- [4] KOUKOUVINIS P, GAVAISES M, SUPPONEN O, et al. Numerical simulation of a collapsing bubble subject to gravity [J]. Physics of Fluids, 2016, 28(3): 032110.
- [5] LIU L T, YAO X L, ZHANG A M, et al. Numerical analysis of the jet stage of bubble near a solid wall using a front tracking method [J]. Physics of Fluids, 2017, 29(1): 012105.
- [6] LI S, HAN R, ZHANG A M, et al. Analysis of pressure field generated by a collapsing bubble [J]. Ocean Engineering, 2016, 117: 22-38.
- [7] 郑监, 张舵, 蒋邦海, 等. 气泡与自由液面相互作用形成水射流的机理研究 [J]. 物理学报, 2017, 66(4): 169-178.  
ZHENG J, ZHANG D, JIANG B H, et al. Mechanism study on water jet formation caused by interaction between bubbles and free liquid surface [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(4): 169-178.
- [8] 梁浩哲, 张庆明, 杨莉. 刚性壁面附近深水爆炸气泡射流特性数值模拟 [J]. 兵工学报, 2017, 38(增刊1): 130-135.  
LIANG H Z, ZHANG Q M, YANG L. Numerical simulation of deep water explosion bubble jet characteristics near rigid wall surface [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(Suppl 1): 130-135.
- [9] 董琪, 韦灼彬, 唐廷, 等. 爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(2): 024102.  
DONG Q, WEI Z B, TANG T, et al. Effects of explosion depth on the fluctuation of bubbles in shallow water explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 32(2): 024102.
- [10] 王诗平, 姚熊亮, 张阿漫, 等. 三维气泡与刚性壁面的相互作用研究 [J]. 计算力学学报, 2008, 25(6): 803-807.  
WANG S P, YAO X L, ZHANG A M, et al. Interaction between three-dimensional bubbles and rigid walls [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(6): 803-807.
- [11] MENG Y, ZHANG D. Simulation of bubble expansion and collapse between a free surface and a rigid wall [C]// 13th OpenFOAM Workshop (OFW13). Shanghai, China, 2018: 25-28.
- [12] 孟祎, 张舵. 浅水中气泡运动及水射流行为实验研究 [C]// 第十届全国爆炸力学实验技术学术会议. 无锡, 2018.  
MENG Y, ZHANG D. Experimental research on bubble motion and water jet behavior in shallow water [C]// 10th National Academic Conference on Experimental Technology of Explosive Mechanics. Wuxi, China, 2018.
- [13] 倪宝玉. 水下黏性气泡(空泡)运动和载荷特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 140-153.  
NI B Y. Study on motion and load characteristics of underwater viscous bubbles (air bubbles) [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 140-153.

## Experimental and Numerical Simulation Study on the Influence of Distance Parameter on Bubble Motion in Shallow Water

MENG Yi, ZHANG Duo, ZHENG Jian

(College of Liberal Arts and Sciences, National University  
of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** When the bubble develops in shallow water between the free surface and the bottom, extremely complex phenomena of the free surface will be caused. The bubble motion characteristics are different from that in the free field. To explore its patterns, spark induced bubble experiments are carried out and high-speed video-photography is employed to study the interaction between bubbles and combined boundaries. The influence of distance parameter on dome type and bubble motion has been summarized. The influence of distance parameter on jet loading is analyzed by numerical simulation using OpenFOAM. The results show that the free surface distance parameter has a greater influence on the type of dome than that of the wall distance parameter. The jet velocity decreases with the increase of the free surface distance. The jet velocity first decreases and then increases with the increase of the wall surface distance. The pressure on the wall decreases with the distance increasing while the jet impact area increases with the distance increasing.

**Keywords:** shallow water explosion; bubble motion; distance parameter



## 《高压物理学报》2018年主题专刊名录

- ❖ 氢
- ❖ 高压物性实验研究
- ❖ 高压物性第一性原理计算
- ❖ 高压合成新材料
- ❖ 高压地球科学
- ❖ 静高压实验技术
- ❖ 动高压实验技术
- ❖ SHPB 实验技术
- ❖ 高压下材料和结构的力学性能和动态响应
- ❖ 界面不稳定性
- ❖ 高压科学应用——炸药起爆及安全性
- ❖ 高压科学应用——水下爆炸
- ❖ 高压科学应用——侵彻与防护
- ❖ 高压科学应用——破片
- ❖ 高压科学应用——爆燃及燃烧
- ❖ 高压科学应用——高压食品科学

★ 获取地址：<http://www.gywlxb.cn/topics>

## 2018 年“水下爆炸”主题专刊论文引用信息

- ☆ 董琪, 韦灼彬, 唐廷, 等. 爆炸深度对浅水爆炸气泡脉动的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(2): 024102.  
DONG Q, WEI Z B, TANG T, et al. Influence of explosion depth on bubble pulsation in shallow water explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(2):024102.
- ☆ 汪泉, 汤有富, 李志敏, 等. 有机玻璃-空气层结构对爆炸水池水下爆炸地基振动的影响 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(2):024201.  
WANG Q, TANG Y F, LI Z M, et al. Influence of plexiglass-air interlayer structure on foundation vibration of small pool underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(2):024201.
- ☆ 冯淞, 饶国宁, 彭金华, 等. 温压炸药水中爆炸的后燃反应研究 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 035204.  
FENG S, RAO G N, PENG J H, et al. Afterburning reaction of thermobaric explosive by underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3):035204.
- ☆ 刘丽滨, 李海涛, 刁爱民, 等. 水下爆炸下有限尺度平板的载荷特性及结构响应试验研究 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(5):055101.  
LIU L B, LI H T, DIAO A M, et al. Experimental investigation on load characteristics and structure response of finite-size plate subjected to underwater explosions [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5):055101.
- ☆ 孟祎, 张舵, 郑监. 距离参数对浅水中气泡运动影响规律的实验和数值模拟 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(6):065103.  
MENG Y, ZHANG D, ZHENG J. Experimental and numerical simulation study on the influence of distance parameter on bubble motion in shallow water [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(6):065103.

## 征 稿 简 则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物。征稿内容包括：动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力、热、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程，高压地学，材料动态断裂，冲击和爆轰现象等。《高压物理学报》接受中、英文稿件。

自1987年创刊以来，《高压物理学报》取得了较大成就。2001年，《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为“中国期刊方阵”双效期刊。国际主要检索系统Scopus、JSTChina、CA长期收录《高压物理学报》发表的文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续七版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在1个月甚至更短时间内刊出。欢迎广大专家学者向《高压物理学报》投稿！



官方网站：[www.gywlxb.cn](http://www.gywlxb.cn)

官方邮箱：[gaoya@caep.cn](mailto:gaoya@caep.cn)

联系电话：0816-2490042