DOI: 10.11883/bzycj-2017-0321

离心机和密闭加压容器中水下爆炸相似关系*

宋 歌,龙 源,钟明寿,王 敏,吴建宇
(陆军工程大学野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘要:水下爆炸冲击波和气泡脉动的共同作用不能仅依据几何相似条件进行模型试验,相关的尺寸缩比模型试验可以借助密闭加压罐或离心机进行。通过量纲分析和 π 定理对模型试验的相似理论进行了推导,分别探讨了密闭加压容器和离心机中水下爆炸的相似关系及其适用范围,并对原型工况和尺寸缩比为 1/20 和 1/30 的模型工况基于 LS-DYNA 进行了数值模拟。结果表明:加压模型试验中水下爆炸冲击波、气泡脉动半径和周期可以满足相似关系,但是气泡迁移和射流不符合相似关系;离心模型试验中水下爆炸冲击波和气泡脉动基本完全相似。

关键词:水下爆炸;模型试验;离心模型;加压模型;LS-DYNA
中图分类号:O382.4 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

水下爆炸研究在国民经济和国防建设中具有重要的地位。小当量炸药的水下爆炸试验可以在实验室或者特制的爆炸水池内进行,但是对于大当量炸药爆炸效应的原型试验,通常具有耗费大、危险性高、可重复性弱、不确定因素多的特点,仅通过原型试验,很难深入研究爆炸效应的变化规律和毁伤机制。因此,开展水下爆炸缩比模型试验具有重要意义。

水下爆炸的荷载效应主要包括水中冲击波和气泡脉动两部分,其次还有水下爆炸引起的涌浪对目标的作用。关于水中冲击波的研究已经较为成熟[1],认为水下爆炸冲击波符合传统的相似关系,即简单的尺寸相似。然而,Murphy[2]指出在常规 1 倍重力场中,缩比模型试验不能合理地模拟重力荷载;Gel'Fand等[3]对水下爆炸相似准则进行了研究,认为水下爆炸冲击波试验相似不必考虑重力,冲击波峰值、冲击波衰减、比冲量和能量密度均同几何比缩小,但是气泡脉动必须考虑重力效应。张效慈[4-5]对水下爆炸的冲击波和气泡脉动相似律进行了推导,认为水下爆炸不可能做到完全相似,只能做到选择性的相似,并提出不考虑重力效应的气泡相似关系,只可保证第一次气泡脉动周期和最大气泡半径相似,但要求水池封闭加压。若想同时满足水下爆炸冲击波和气泡脉动相似,则必须满足重力相似。刘文韬等[6]对相似理论进行了推导,提出了利用离心机进行水下爆炸试验的方法,并通过数值计算验证了离心相似律。目前已经有很多学者利用离心机进行了土中爆炸试验研究[7-11],然而对在离心机中进行水下爆炸的研究报道较少。Song 等[12]、Hu 等[13]进行了一定的研究,通过离心机水下爆炸试验、理论分析和数值模拟,验证了离心相似律。马坤等[14]利用密闭容器,通过增大水面大气压强的方式模拟深水环境,开展了小当量的水下爆炸试验,但未进行相似模型试验研究。

本文中,主要依据量纲分析法推导采用封闭加压和离心机两种方法进行水下爆炸试验的相似关系,并结合数值模拟探讨这两种方法的缩比模型中冲击波和气泡脉动是否符合相似性以及适用范围。

1 离心模型和加压模型水下爆炸相似性

研究水下爆炸冲击波和气泡脉动时,假设水介质在爆炸作用中的黏性力影响可忽略不计,且爆炸过程为绝热过程,仅考虑以下参量对爆炸过程的影响,即炸药参量:装药半径 r,装药密度 ρ_c,爆速 D,爆热

* **收稿日期**:2017-09-05;**修回日期**:2017-12-05
基金项目:国家自然科学基金项目(51339006)
第一作者:宋 歌(1989—),男,博士研究生,slevin324@qq.com;
通信作者:龙 源(1958—),男,博士,教授,博士生导师,long_yuan@sohu.com。

q;介质参量:水介质密度 ρ_0,水介质声速 c;其他参量:加速度 a_g,装药沉深 h,静水压力 p_d($p_d=p_0+\rho_0 a_g h$,p_0为大气压强)。待测参量为水中冲击波的峰值压力 p_s,时间常数 τ,爆距 d;以及气泡脉动的最大半径 R 和脉动周期 T。于是有:

$$f(p_s,d,\rho_c,D,Q,p_d;\rho_0,c,r)=0 \tag{1}$$

$$f(\tau,d,\rho_c,D,Q,p_d;\rho_0,c,r)=0 \tag{2}$$

$$f(R,a_g,h,\rho_c,D,Q,p_d;\rho_0,c,r)=0 \tag{3}$$

$$f(T,a_g,h,\rho_c,D,Q,p_d;\rho_0,c,r)=0 \tag{4}$$

选取水介质密度 ρ_0、水介质声速 c、装药半径 r 为基本量,由 π 定理可得:

$$\frac{p_s}{\rho_0 c^2}=f_1\left(\frac{d}{r},\frac{\rho_c}{\rho_0},\frac{D}{c},\frac{Q}{c^2},\frac{p_d}{\rho_0 c^2}\right) \tag{5}$$

$$\frac{\tau c}{r}=f_2\left(\frac{d}{r},\frac{\rho_c}{\rho_0},\frac{D}{c},\frac{Q}{c^2},\frac{p_d}{\rho_0 c^2}\right) \tag{6}$$

$$\frac{R}{r}=f_3\left(\frac{a_g r}{c^2},\frac{h}{r},\frac{\rho_c}{\rho_0},\frac{D}{c},\frac{Q}{c^2},\frac{p_d}{\rho_0 c^2}\right) \tag{7}$$

$$\frac{Tc}{r}=f_4\left(\frac{a_g r}{c^2},\frac{h}{r},\frac{\rho_c}{\rho_0},\frac{D}{c},\frac{Q}{c^2},\frac{p_d}{\rho_0 c^2}\right) \tag{8}$$

在进行模型试验时,炸药和水介质的性能参数确定,则 ρ_c,D,Q,ρ_0,c 均为常数,于是式(5)~(8)可分别化简为:

$$p_s=f_1\left(\frac{d}{r}\right) \tag{9}$$

$$\tau=rf_2\left(\frac{d}{r}\right) \tag{10}$$

$$R=rf_3\left(a_g r,\frac{h}{r},p_d\right) \tag{11}$$

$$T=rf_4\left(a_g r,\frac{h}{r},p_d\right) \tag{12}$$

从式(5)~(12)可得出,决定冲击波和气泡脉动的主要影响项有 $\pi_1=d/r$,$\pi_2=a_g r/c^2$,$\pi_3=h/r$,$\pi_4=p_d/(\rho_0 c^2)$。π_1 体现了爆距 d 对冲击波的影响,π_2 体现了加速度 a_g 对气泡脉动的影响,π_3 体现了装药沉深 h 对气泡脉动的影响,π_4 体现了静水压力 p_d 对气泡脉动的影响。

为了使模型试验与原型试验的待测参量冲击波的峰值压力 p_s、时间常数 τ 以及气泡脉动的最大半径 R 和脉动周期 T 严格满足一定的相似关系,则需要使模型与原型的无量纲项 π_1、π_2、π_3 和 π_4 都相等。几何相似模型已经满足模型与原型的 π_1 相等,也说明使水下爆炸冲击波满足相似关系的条件是几何相似。但若要同时使气泡脉动甚至气泡脉动引起的二次压力相似,则还需要使 π_2、π_3 和 π_4 相等,即不仅需要几何相似,还需使重力相似。这样的模型试验在常规条件下的水池中是无法进行的,可以借助离心机或密闭加压罐进行。

若考虑加速度 a_g 和装药沉深 h 仅是通过影响静水压力 p_d 从而决定气泡脉动的参数,不考虑由重力场产生的水中压力梯度和水与空气间自由面的影响,便可忽略 π_2 和 π_3,只保持 π_1 和 π_4 不变,模型相对于原型仅等比缩小爆距 d 和装药半径 r,保持模型和原型的装药沉深 h 相等即可。然而这种情况仅适用于深水爆炸试验,这样的简化虽然可以使试验在露天水池进行,但是要达到与原型试验相等的水深是困难的,失去了模型试验的意义。

若忽略重力场产生的水中压力梯度的影响,仅使模型与原型的无量纲项 π_1、π_3 和 π_4 相等,可以通过密封加压的方式,使:

$$\frac{d_m}{r_m}=\frac{d_p}{r_p},\qquad \frac{h_m}{r_m}=\frac{h_p}{r_p},\qquad p_{0m}+\rho_0 a_g h_m=p_{0p}+\rho_0 a_g h_p \tag{13}$$

式中:d_m、r_m、h_m、p_{0m} 和 d_p、r_p、h_p、p_{0p} 分别为模型和原型中的爆距、装药半径、装药沉深、大气压强。其

中 p_{0p}即为原型中的标准大气压，p_{0m}为模型试验中需要通过密闭加压的方式增加的大气压强。

若是可以借助离心机进行水下爆炸模型试验，通过离心力模拟重力加速度，使：

$$\frac{d_m}{d_p}=\frac{r_m}{r_p}=\frac{h_m}{h_p}=\frac{a_{gp}}{a_{gm}} \tag{14}$$

则不需要改变大气压强，即可使无量纲项 π_1、π_2、π_3和 π_4都相等。根据以上分析，可得到模型与原型的相似关系如表 1 所示。

表 1　相似关系

Table 1　The similarity relations

参量分类	参数名称	原型参量	离心模型		加压模型	
			模型参量	参量缩比	模型参量	参量缩比
长度参数	装药半径	r	λr	λ	λr	λ
	爆距	d	λd	λ	λd	λ
	装药沉深	h	λh	λ	λh	λ
	特征长度	l	λl	λ	λl	λ
速度参数	流速	v	v	1	v	1
重力参数	加速度	a_g	a_g/λ	$1/\lambda$	a_g	1
压力参数	大气压强	p_0	p_0	1	$p_0+\rho_0 a_g h(1-\lambda)$	
装药参数	装药质量	m	$\lambda^3 m$	λ^3	$\lambda^3 m$	λ^3
冲击波参数	峰值压力	p_s	p_s	1	p_s	1
	时间常数	τ	$\lambda\tau$	λ	$\lambda\tau$	λ
	冲量	I	λI	λ	λI	λ
气泡参数	气泡半径	R	λR	λ	λR	λ
	脉动周期	T	λT	λ	λT	λ

2　离心模型和加压模型水下爆炸相似关系的数值模拟

2.1　有限元模型建立

基于 LS-DYNA 程序进行水下爆炸数值模拟，需建立炸药、水和空气模型，采取 Euler 网格和 ALE 算法对水下爆炸的冲击波传播和气泡脉动进行计算。为建少计算时间，建立 1/4 模型，在对称面上施加固定约束，四周边界为固支边界，建立的水域尺寸为装药半径的 20 倍以上，如图 1 所示。空气采用空白材料 NULL 本构模型和线性多项式状态方程[15]；水是流体介质，材料模型采用空白材料，状态方程采用 Grüneisen 状态方程[16]；炸药及爆轰产物的材料模型采用高能燃烧模型，状态方程采用 JWL 方程[17]。通过在模型节点施加不同大小的载荷以模拟不同倍数的加速度，通过设置空气初始内能以模拟不同的大气压强。

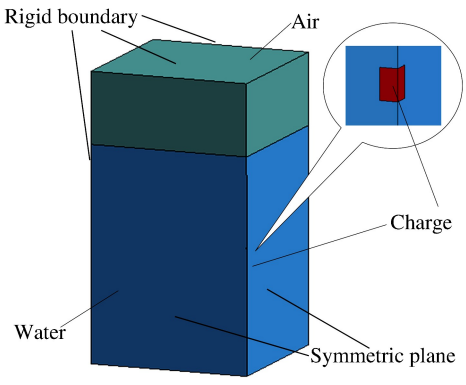


图 1　数值模型

Fig. 1　Finite element model

Song 等[12]、Hu 等[13]已进行了水下爆炸离心模型试验和数值模拟，以等效药量为 50 mg 的微型电雷管为爆源，开展了两组尺寸缩比分别为 1/30 和 1/20 的模型试验，这两组模型试验相对应同一原型，将模型试验的冲击波和气泡脉动等参数依据相似关系换算到原型进行对比，以验证离心相似关系。在此基础上，依据表 1 中的相似关系再设计加压模型工况，如表 2 所示，工况 1 为原型，工况 2 和工况 3 为对应原型工况 1 不同缩比的离心模型[12-13]，工况 4 和工况 5 为对应原型工况 1 不同缩比的加压模型。

对于原型工况 1,建立的水域尺寸为 800 cm×800 cm×1 200 cm,最小网格尺寸为 4.5 cm;对于模型工况 2～4,水域尺寸为 40 cm×40 cm×60 cm,最小网格尺寸为 0.15 cm。

表 2 工况设置

Table 2 The working conditions

模型	工况	m	h/cm	a_g/g	p_0/MPa	长度缩比	m_p/g	h_p/cm
原型	1	1 200 g	750.0	1	0.101 0	1	1 200	750.0
离心模型	2	50 mg	25.0	30	0.101 0	1/30	1 350	750.0
	3	150 mg	37.5	20	0.101 0	1/20	1 200	750.0
加压模型	4	50 mg	25.0	1	0.172 1	1/30	1 350	750.0
	5	150 mg	37.5	1	0.170 8	1/20	1 200	750.0

2.2　离心模型计算结果及分析

Song 等[12]对工况 2,试验和数值模拟得到的气泡最大半径均为 4.95 cm,脉动周期分别为 7.26 和 6.82 ms,相差 6.0%;对工况 3,试验和数值模拟得到的气泡最大半径分别为 8.23 和 7.02 cm,相差14.7%,脉动周期分别为 12.24 和 10.84 ms,相差 11.4%。图 2 和图 3 为对工况 3 进行的离心模型试验和数值模拟得到的气泡脉动过程。图 4 为对离心模型工况 2(50 mg-30g-25 cm)和工况 3(150 mg-20g-37.5 cm)进行数值计算得到的气泡半径随时间的变化曲线,图 5 为对离心模型工况 2 和工况 3 中的气泡半径和时间依据相似关系换算到原型且与原型工况 1 进行对比。模型工况 2 尺寸缩比为 1/30,工况 3 尺寸缩比为 1/20,试验数据对应到原型,气泡半径分别为 148.5 和 164.6 cm,脉动周期分别为 217.8 和 244.8 ms;模拟数据对应到原型,气泡半径分别为 148.5 和 140.4 cm,脉动周期分别为 204.6 和 216.8 ms。

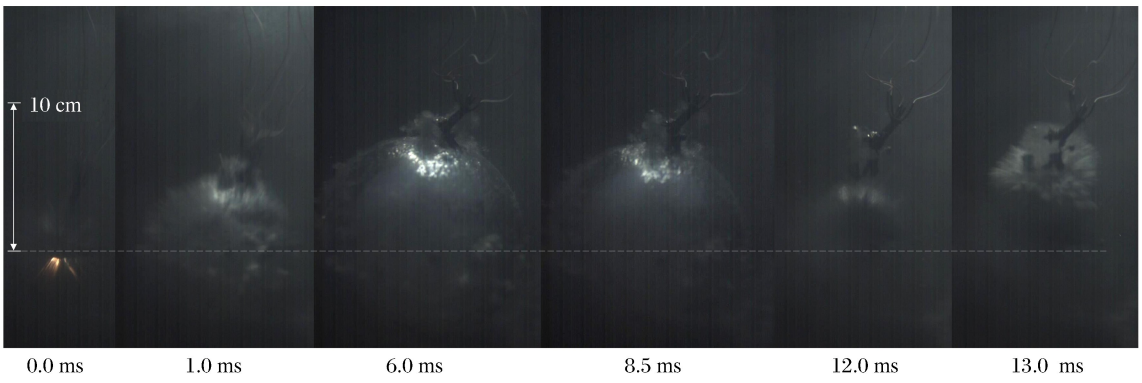


图 2 150 mg 药量在 20g 加速度、37.5 cm 水深下爆炸气泡脉动过程试验结果(工况 3)[12]

Fig. 2 Test bubble pulsation process for 150 mg charge explosion in the water depth of 37.5 cm under 20g acceleration (condition 3)[12]

对离心模型的 2 种工况,分别沿水平方向选取距离爆源中心 5.0 和 7.5 cm 的测点,则比例距离($d/m^{1/3}$)分别为 1.36 和 1.41 cm/mg$^{1/3}$,两者近似相等;计算得到的冲击波峰值压力分别为 25.80 和 27.03 MPa,到达时刻分别为 30 和 46 μs;二次压力峰值分别为 5.78 和 6.14 MPa,到达时刻为 6.86 和 10.86 ms;其冲击波压力-时间曲线如图 6 所示。对原型工况 1 选取测点距离爆源中心 150.0 cm,计算得到的冲击波峰值压力为 28.84 MPa,到达时刻为 0.90 ms;二次压力峰值为 6.62 MPa,到达时刻为 222.2 ms。依据相似关系对模型的压力-时间曲线进行换算,得到对应原型的压力-时间曲线,如图 7 所示。从试验和数值计算结果可以得出,水下爆炸离心模型中的爆炸冲击波和气泡脉动周期经过相似关系的换算,冲击波压力和气泡脉动二次压力大小不变,到达时刻扩大相应的缩比尺度,冲击波的到达时刻分别为 0.90 和 0.92 ms,二次压力到达时刻分别为 205.8 和 217.2 ms,与原型冲击波和气泡周期基本一致。

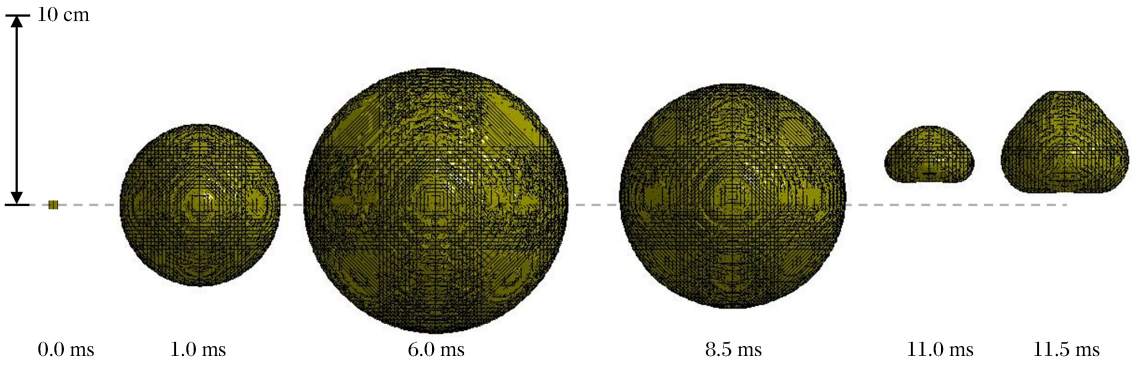


图 3　150 mg 药量在 20g 加速度、37.5 cm 水深下爆炸气泡脉动过程数值模拟结果(工况 3)[12]

Fig. 3　Numerical simulated bubble pulsation process for 150 mg charge explosion in the water depth of 37.5 cm under 20g acceleration (condition 3)[12]

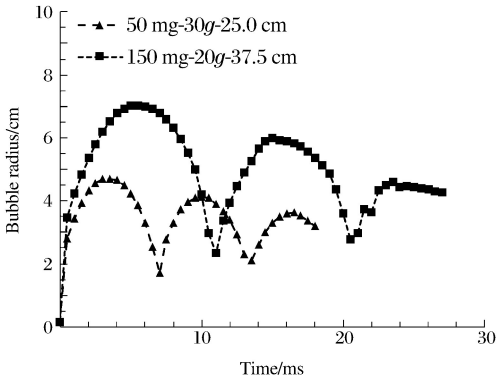


图 4　离心模型工况 2 和工况 3 的气泡半径数值结果

Fig. 4　Numerical bubble radius histories under working conditions 2 and 3 of the centrifugal model

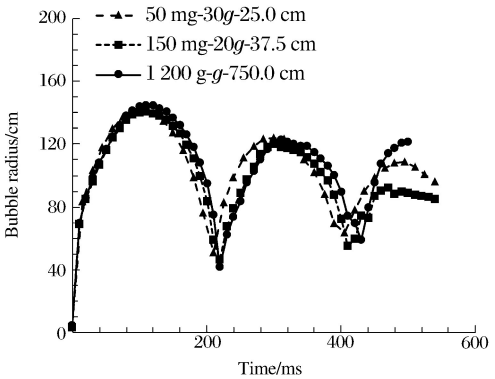


图 5　离心模型换算到原型的气泡半径数值结果

Fig. 5　Numerical bubble radius histories for converting the centrifugal model into the prototype

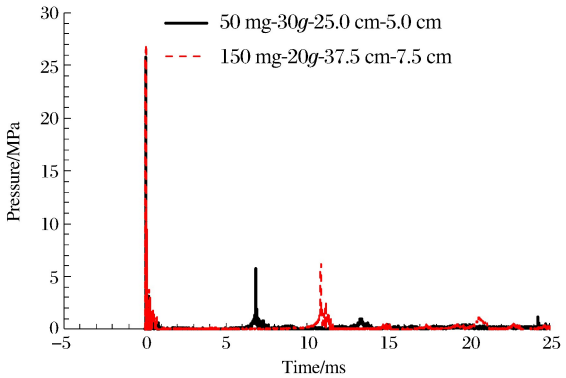


图 6　离心模型工况 2 和工况 3 的冲击波数值结果

Fig. 6　Numerical shock wave pressure-time curves under working conditions 2 and 3 of the centrifugal model

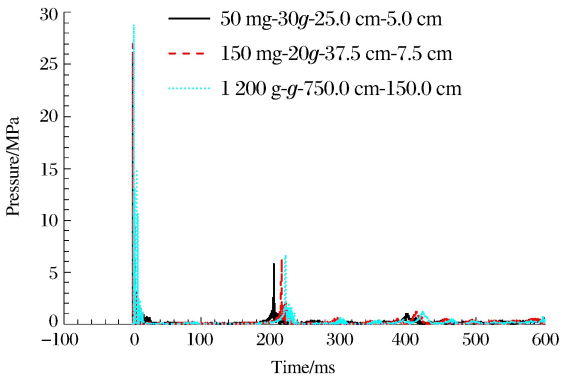


图 7　离心模型换算到原型的冲击波数值结果

Fig. 7　Numerical shock wave pressure-time curves for converting the centrifugal model into the prototype

2.3　加压模型计算结果及分析

图 8 为对加压模型工况 5 进行数值模拟得到的气泡脉动过程。图 9 为对加压模型工况 4 (50 mg-g-25.0 cm-0.172 1 MPa)和工况 5 (150 mg-g-37.5 cm-0.170 8 MPa)进行数值模拟得到的气泡半径随时间的变化曲线：工况 4 中气泡最大半径为 4.69 cm，脉动周期为 6.85 ms；工况 5 中气泡最大半径为 7.02 cm，脉

动周期为 10.82 ms。图 10 为对加压模型工况 4 和工况 5 中的气泡半径和时间依据相似关系换算到原型且与原型工况 1 进行对比的情况:原型工况 1 中气泡最大半径为 144.2 cm,脉动周期为 221.3 ms;换算后加压模型工况 4 对应到原型的气泡最大半径为 140.7 cm,脉动周期为 205.5 ms;换算后加压模型工况 5 对应到原型的气泡最大半径为 140.4 cm 脉动周期为 216.4 ms。由数值结果得出,加压模型中冲击波和气泡半径基本符合相似关系,尤其是气泡第一次脉动,模型的半径变化依相似关系换算后与原型吻合较好,第二次脉动相差也不大,静水压力对气泡第一次脉动的最大半径和周期起到关键作用;同时说明通过调整大气压强,满足气压相似条件,可以使气泡第一次脉动达到相似。

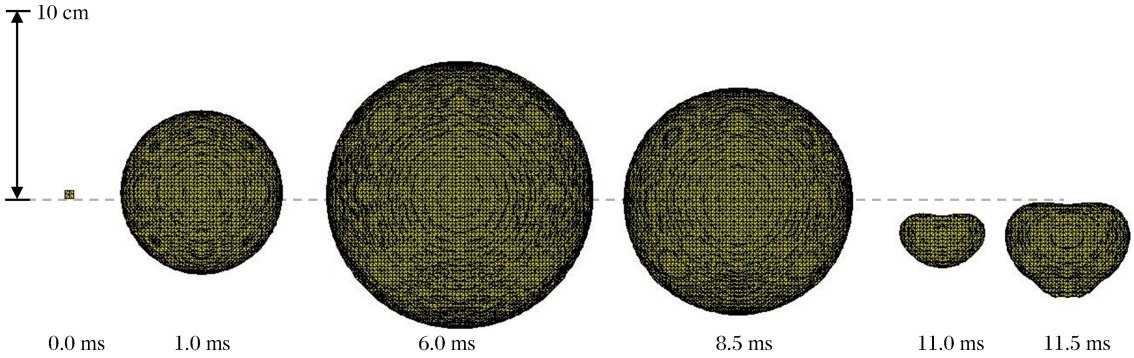


图 8 150 mg 药量在 0.170 8 MPa 气压、37.5 cm 水深下爆炸气泡脉动过程数值模拟结果(工况 5)

Fig. 8 The numerical simulated process of bubble pulsation of 150 mg charge in the water depth of 37.5 cm under the atmospheric pressure of 0.170 8 MPa (condition 5)

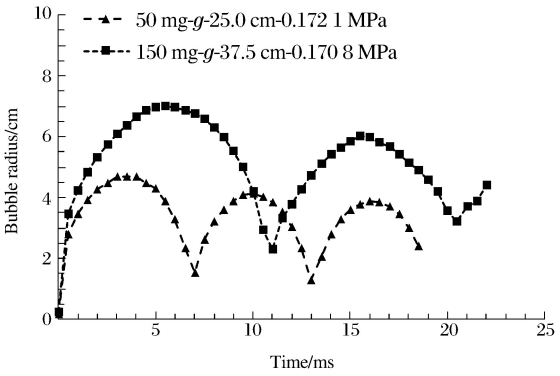


图 9 加压模型工况 4 和工况 5 的气泡半径数值结果

Fig. 9 Numerical bubble radius histories under working conditions 4 and 5 of the pressurized model

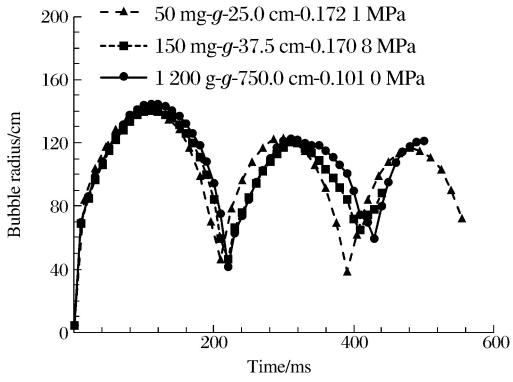


图 10 加压模型换算到原型的气泡半径数值结果

Fig. 10 Numerical bubble radius histories for converting the pressurized model into the prototype

图 11 和图 12 为加压模型及对应原型的压力时程曲线的数值结果。数值计算得到加压模型工况 4 和工况 5 的冲击波峰值压力分别为 25.80 和 27.03 MPa,二次压力峰值为 6.58 和 6.93 MPa。表 3 所示为数值计算得到的离心模型和加压模型工况中冲击波峰值压力、气泡最大半径、气泡脉动周期的大小以及对应到原型中的大小。工况 2 和工况 4,工况 3 和工况 5 分别采用了相同的装药量、装药沉深、水域大小以及网格划分,不同的是离心模型工况增加重力,加压模型工况增加气压。从计算结果中可知,冲击波峰值压力基本不受重力或气压的影响;不论通过增加重力还是气压,在使静水压力相同的情况下,二次压力峰值和到达时刻,第一次气泡脉动的最大半径和周期也基本一致。因此,在研究水下爆炸气泡第一次脉动周期内的冲击波和二次压力作用时,加压模型可以得到和离心模型相近的结果。

图 13～14 为模型及对应原型的气泡垂直方向迁移运动的数值结果,结合图 8 可以看出,加压模型中,气泡一次脉动后沿垂直方向向下运动,且射流方向也是垂直向下,与原型气泡迁移方向和射流方向不一

致，运动规律也不符合相似关系；而两个不同尺寸缩比的离心模型气泡运动位移依据相似关系换算后与原型基本吻合。虽然在之前的分析中，加压模型中气泡第一次脉动半径和周期与原型基本符合相似关系，如图 10 所示，在第二次的脉动过程中半径和周期也与原型偏差不大，但是气泡的运动方向却与原型截然相反，在相同的装药量和重力条件下，增加气压或水深，则气泡半径会缩小，受到的浮力也会减小，因而在加压模型中气泡的运动方向发生了改变。浮力和静水压力梯度在气泡的垂直运动中有重要作用，因此在研究气泡运动以及射流作用时，模型必须满足重力相似条件才能符合相似关系，加压模型不能反映原型，只能通过离心模型试验进行研究。

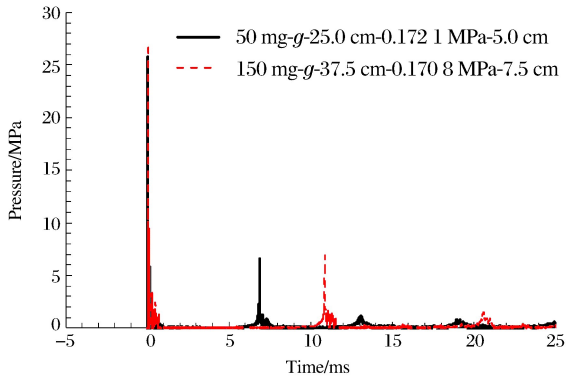


图 11　加压模型工况 4 和工况 5 的冲击波数值结果

Fig. 11　Numerical shock wave pressure-time curves under working conditions 4 and 5 of the pressurized model

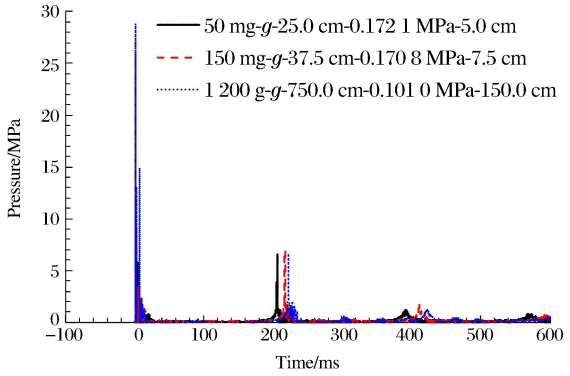


图 12　加压模型换算到原型的冲击波数值结果

Fig. 12　Numerical shock wave pressure-time curves for converting the pressurized model into the prototype

表 3　模型和原型数值计算结果对比

Table 3　Comparison of the numerical calculation results between the models and prototype

工况	工况参数				d/cm	模型			原型		
	m	a_g/g	h/cm	p/kPa		p_s/MPa	R_{max}/cm	T/ms	p_s/MPa	R_{max}/cm	T/ms
1	1 200 g	1	750.0	0.101 0	150.0				28.84	144.2	221.3
2	50 mg	30	25.0	0.101 0	5.0	25.80	4.95	6.82	25.80	148.5	204.6
3	150 mg	20	37.5	0.101 0	7.5	27.03	7.02	10.84	27.03	140.4	216.8
4	50 mg	1	25.0	0.172 1	5.0	25.80	4.69	6.85	25.80	140.7	205.5
5	150 mg	1	37.5	0.170 8	7.5	27.03	7.02	10.82	27.03	140.4	216.4

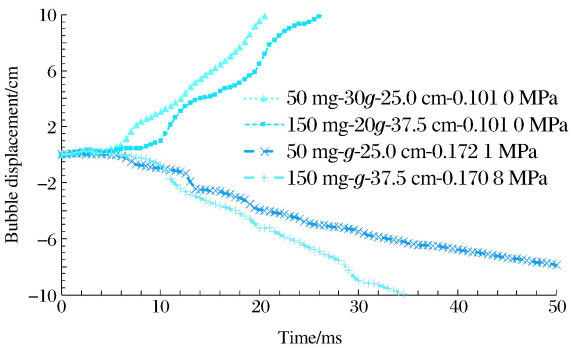


图 13　加压模型气泡垂直方向迁移运动的数值结果

Fig. 13　Numerical vertical motion of the bubble for the pressurized model

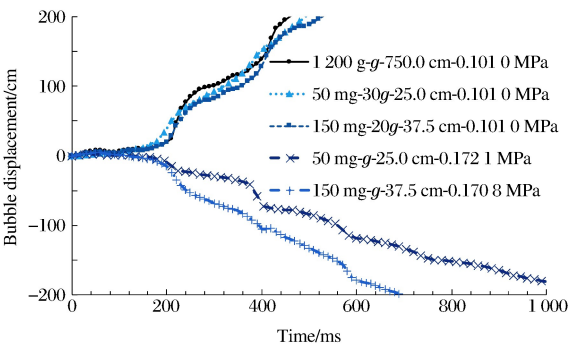


图 14　加压模型换算到原型气泡垂直方向迁移运动的数值结果

Fig. 14　Numerical vertical motion of the bubble for converting the pressurized model into the prototype

3 结　论

依据量纲分析法和 π 定理对水下爆炸相似律进行了推导，探讨了离心模型和加压模型的相似关系和适用范围，并结合对两种模型和原型的水下爆炸数值模拟具体分析了冲击波和气泡脉动的相似性，得到以下结论：

(1)水下爆炸冲击波研究可以利用几何相似律，但是气泡脉动特性受到了重力的影响，不符合传统的几何相似关系；进行水下爆炸缩比模型试验研究气泡脉动特性或冲击波与气泡脉动的共同作用，需要依据离心模型相似关系或加压模型相似关系。

(2)爆点处的静水压力对气泡半径的影响很大，考虑静水压力的离心模型和加压模型中气泡半径变化基本都与原型相似，气泡的一次脉动基本完全相似，二次脉动存在一定误差。另外，冲击波以及气泡脉动引起的二次压力也基本符合相似关系。

(3)重力场产生的静水压力梯度对气泡的迁移运动和射流起着至关重要的作用，气泡的迁移运动和射流在加压模型中完全不相似，而在离心模型中基本相似。

(4)由于冲击波及二次压力在加压模型中一定程度上符合相似关系，加压模型对于研究远场水平方向上的水下爆炸效应具有一定意义；若要研究近场的水下爆炸冲击波和气泡的共同作用，则需要借助离心模型试验。

参考文献：

[1] COLE R H. Underwater explosion[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.

[2] MURPHY G. Similitude in engineering[M]. New York: Ronald Press Co., 1950.

[3] GEL'FAND B E, TAKAYAMA K. Similarity criteria for underwater explosions[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2004,40(2):214-218. DOI:10.1023/B:CESW.0000020144.55275.df.

[4] 张效慈. 水下爆炸试验相似准则[J]. 船舶力学,2007,11(1):108-118. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2007.01.014.
ZHANG Xiaoci. Similarity criteria for experiment of underwater explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(1):108-118. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2007.01.014.

[5] 张效慈. 水下爆炸试验模型律的若干问题[J]. 船舶力学,2009,13(5):783-787. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2009.05.016.
ZHANG Xiaoci. Some problems for model law of underwater explosion tests[J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(5):783-787. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2009.05.016.

[6] 刘文韬,姚熊亮,李帅,等. 离心机水下爆炸缩比实验原理及数值研究[J]. 爆炸与冲击,2016,36(6):789-796. DOI:10.11883/1001-1455(2016)06-0789-08.
LIU Wentao, YAO Xiongliang, LI Shuai, et al. Experimental principle and numerical study of scaled-down underwater explosion model on a centrifuge apparatus[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(6):789-796. DOI:10.11883/1001-1455(2016)06-0789-08.

[7] SCHMIDT R M, HOUSEN K R. Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987,5(1/4):543-560. DOI:10.1016/0734-743X(87)90069-8.

[8] HOUSEN K R, SCHMIDT R M, HOLSAPPLE K A. Crater eject a scaling laws: fundamental forms based upon dimensional analysis[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88:2485-2499. DOI:10.1029/JB088iB03p02485.

[9] KUTTER B L, O'LEARY L M, THOMPSON P Y. Centrifugal modeling of the effect of blast loading on tunnels [C]// Addendum to Proceedings of the Second Symposium on the Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures. Panama City Beach Florida, April 15－18, 1985.

[10] 范一锴,陈祖煜,梁向前,等. 砂中爆炸成坑的离心模型试验分析方法比较[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30:4123-4128.
FAN Yikai, CHEN Zuyu, LIANG Xiangqian, et al. Comparison of three methods for geotechnical centrifuge model tests of explosion cratering in sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30:4123-

4128.

[11] 马立秋,张建民,胡耘,等.地面爆炸条件下浅埋地下结构物响应的离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29:3672-3678.
MA Liqiu, ZHANG Jianmin, HU Yun, et al. Centrifugal model tests for responses of shallow-buried underground structures under surface blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29:3672-3678.

[12] SONG Ge, CHEN Zuyu, LONG Yuan, et al. Experimental and numerical investigation of the centrifugal model for underwater explosion shock wave and bubble pulsation[J]. Ocean Engineering, 2017,142:523-531. DOI:10.1016/j.oceaneng.2017.04.035.

[13] HU Jing, CHEN Zuyu, ZHANG Xuedong, et al. Underwater explosion in centrifuge: Part I: validation and calibration of scaling laws[J]. Science China: Technological Sciences, 2017,60(11):1638-1657. DOI:10.1007/s11431-017-9083-0.

[14] 马坤,初哲,王可慧,等.小当量炸药深水爆炸气泡脉动模拟实验[J].爆炸与冲击,2015,35(3):320-325. DOI:10.11883/1001-1455-(2015)03-0320-06.
MA Kun, CHU Zhe, WANG Kehui, et al. Experimental research on bubble pulse of small scale charge exploded under simulated deep water[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(3):320-325. DOI:10.11883/1001-1455-(2015)03-0320-06.

[15] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA[Z]. Livermore, CA, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2012.

[16] 李晓杰,张程娇,王小红,等.水的状态方程对水下爆炸影响的研究[J].工程力学,2014,31(8):46-52. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180.
LI Xiaojie, ZHANG Chengjiao, WANG Xiaohong, et al. Numerical study on the effect of equations of state of water on underwater explosions[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(8):46-52. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0180.

[17] LEE E, FINGER M, COLLINS W. JWL equation of state coefficients for high explosives: Rept-UCID-16189[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1973.

Similarity relations of underwater explosion in centrifuge and pressurizing vessels

SONG Ge, LONG Yuan, ZHONG Mingshou, WANG min, WU Jianyu

(*College of Field Engineering, Army Engineering University, Nanjing* 210007, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: The collective effect of underwater explosion shock wave and bubble pulsation does not meet the traditional geometric similarity relation, and the scaled model test must be carried out in a closed pressurized tank or centrifuge apparatus. Through the dimensional analysis and π theorem, the similarity theory of the model tests was deduced. The prototype condition and model conditions with the scaled ratio of 1/20 and 1/30 were simulated based on LS-DYNA, which shows the similarity relations and application scope of the pressurized model and centrifugal model. The shock wave, bubble radius and bubble period can meet the similarity relations but the bubble motion and jet can not meet the similarity relations in the pressurized model; and the shock wave and bubble pulsation almost meet the similarity relations in the centrifugal model.

Keywords: underwater explosion; model test; centrifugal model; pressurized model; LS-DYNA

(责任编辑　张凌云)