DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0789-08

离心机水下爆炸缩比实验原理及数值研究*

刘文韬,姚熊亮,李 帅,张阿漫
(哈尔滨工程大学船舶工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:对离心机水下爆炸缩比实验方法进行探究,对离心机水下爆炸缩比实验的相似理论进行了推导,通过数值计算分析,探究了原模型、离心机缩比实验及常规缩比实验的冲击波载荷、气泡载荷以及气泡动力学行为。结果表明:常规缩比实验不能对气泡行为及垂直方向的近场载荷进行准确的预报,若要保证远场气泡脉冲峰值误差小于 10%,则爆距需大于 9.5 倍气泡最大半径。而离心机缩比实验能够对原模型进行准确的预报,以小当量装药模拟大当量装药水下爆炸整个物理过程,且冲击波和气泡两个阶段完全相似。同时,水深也可以进行几何缩比,克服了常规缩比方法的缺陷。

关键词:爆炸力学;缩比实验;离心机;水下爆炸;气泡
中图分类号:O382.4 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

在现代舰艇水下爆炸防护能力的考核体系中,最有效的方法就是进行实船水下爆炸实验,但是实验成本高、不确定因素多,无法广泛开展。此外,关于水下爆炸的数值计算方法仍然不成熟。因此,水下爆炸缩比模型实验的研究便具有很重要的意义。

以相似理论为缩比实验的理论基础。R. H. 库尔[1]对水下爆炸冲击波载荷的相似规律进行了描述,并提出了水下爆炸缩比实验的前提条件是:原型和缩比实验在相同水深处起爆(环境压力相等)。深水实验难度大,实验可在加压的密闭容器中进行[2],即使如此气泡阶段也很难相似。目前,传统水下爆炸缩比实验可以保证冲击波峰值不变,冲击波衰减、比冲量和能量密度均同几何缩比缩小,但是没有考虑重力效应,不能对爆炸水深进行缩比。气泡浮力对它运动有重要的影响,常规缩比实验均不能满足气泡相似条件[2]。所以,冲击波和气泡相似无统一准则,必须分开处理;常规的缩比实验条件难以同时满足冲击波和气泡的相似条件。

在土爆成坑缩比实验[3-5]中,通常利用离心机制造惯性力场环境。由于离心机惯性力场的可控性,在缩比实验时,可以将重力加速度进行缩比。根据相似律关系,模型中的爆破能量相当于 λ^3 倍的原型能量(λ 为离心加速度与地球重力加速度的比)。因此采用极少量的炸药,就可以模拟原型巨量炸药的爆破效果。A. N. Schofield[6]和 A. J. Chabai[7]曾采用离心机缩比实验技术对核爆进行过研究。该实验手段为水下爆炸缩比实验提供了新思路,但是在离心机上进行水下爆炸实验的相关文献十分罕见。

本文中,基于土爆缩比实验中通过离心加速制造惯性力场的思想,在水下爆炸缩比实验中进一步考虑重力效应,通过相似关系试图发现:在离心机上进行水下爆炸缩比实验是否可以很好地解决不能对爆点深度进行缩比的问题,而且冲击波载荷、气泡载荷和气泡动力学行为的相似条件是否可以在同一个相似准则下同时满足。是否常规缩比实验的不足被克服,以极小当量的装药就可以模拟真实情况中的大当量装药水下爆炸。

1 水下爆炸相似理论

对于水下爆炸,主要关注冲击波压力峰值 $p_{s,max}$、冲击波时间衰减常数 T_s、气泡最大脉动压力 $p_{b,max}$、气泡脉动周期 T_b 和气泡最大半径 $R_{b,max}$ 等。这些因变量受到炸药属性、水介质特性以及工况条

* **收稿日期**:2015-01-21;**修回日期**:2016-10-08
基金项目:国家自然科学基金项目(U1430236,51479041,51279038)
第一作者:刘文韬(1991—),男,博士研究生,liuwentao0@hotmail.com。

件的影响，即装药密度 ρ_c、装药半径 r、炸药爆热 Q、爆距 R、爆点处未扰动的水介质压力 p_w、水介质密度 ρ_w、水中声速 c_w、水的状态方程指数 n 及重力加速度 g 的影响。在气泡的变形运动阶段，由于黏性作用和表面张力作用都是在气泡体积很小时才起作用（对于表面张力，通常是 $R\leqslant 0.04$ mm 时才必须考虑），而本文中水下爆炸气泡属于大尺度气泡，$R_{b,max}$ 量级为 1 m，则 We 量级为 10^7、Re 量级为 10^8，对应的表面张力和黏性效应可以完全忽略[8]。

表 1 量纲

Table 1 Dimensions

变量	物理量	符号	量纲
因变量	冲击波/气泡压力峰值	p_{max}	$L^{-1}MT^{-2}$
	周期/衰减常数	T	T
	气泡最大半径	$R_{b,max}$	L
自变量	流体密度	ρ_w	$L^{-3}M$
	爆点处流体静水压	p_w	$L^{-1}MT^{-2}$
	炸药密度	ρ_c	$L^{-3}M$
	药包半径	r	L
	单位质量爆热	Q	L^2T^{-2}
	水中声速	c_w	LT^{-1}
	重力加速度	g	LT^{-2}

所选取的因变量的量纲，见表 1。自变量即气泡周围流体参数、炸药的相关参数等物理量的量纲，见表 1，未列出一些具有相同量纲的物理量。

因变量和自变量之间的关系[2-3]可以写成：

$$p_{s,max}=F_1(R,Q,p_w,\rho_w,c_w,\rho_c,r,g,n) \tag{1}$$

$$p_{b,max}=F_2(R,Q,p_w,\rho_w,c_w,\rho_c,r,g,n) \tag{2}$$

$$T_s=F_3(Q,p_w,\rho_w,\rho_c,r,g,n) \tag{3}$$

$$T_b=F_4(Q,p_w,\rho_w,\rho_c,r,g,n) \tag{4}$$

$$R_{b,max}=F_5(Q,p_w,\rho_w,\rho_c,r,g,n) \tag{5}$$

选取 ρ_c、g 及 r 为基本量，应用 Π 定理[6-7]，对式(1)～(5)中的物理量进行量纲一化：

$$\pi_1=F_1(\pi_6,\pi_7,\pi_8,\pi_9,\pi_{10},n) \tag{6}$$

$$\pi_2=F_2(\pi_6,\pi_7,\pi_8,\pi_9,\pi_{10},n) \tag{7}$$

$$\pi_3=F_3(\pi_6,\pi_7,\pi_9,n) \tag{8}$$

$$\pi_4=F_4(\pi_6,\pi_7,\pi_9,n) \tag{9}$$

$$\pi_5=F_5(\pi_6,\pi_7,\pi_9,n) \tag{10}$$

式中：$\pi_1=\dfrac{p_{s,max}}{\rho_c g r}$，$\pi_2=\dfrac{p_{b,max}}{\rho_c g r}$，$\pi_3=T_s/\left(\dfrac{r}{g}\right)^{0.5}$，$\pi_4=T_b/\left(\dfrac{r}{g}\right)^{0.5}$，$\pi_5=\dfrac{R_{b,max}}{r}$，$\pi_6=\dfrac{\rho_w}{\rho_c}$，$\pi_7=\dfrac{p_w}{\rho_c g r}$，$\pi_8=\dfrac{R}{r}$，$\pi_9=\dfrac{Q}{gr}$，$\pi_{10}=\dfrac{c_w}{(gr)^{0.5}}$。

当装药形状为球形时，装药半径 $r=(3W/4\pi\rho_c)^{1/3}$，因此上述装药半径可以用炸药药量表示。

当模型实验与原型的量纲一 Π 系数都相等时，可以保证模型和原型严格相似。即只需满足以下相似条件：

$$\pi_i=\pi_{mi}\qquad i=1,2,\cdots,10 \tag{11}$$

其中：π_{mi} 表示缩比模型，π_i 表示原始模型。

模型实验与原型采用相同的炸药和外部流体，即炸药密度 ρ_c、炸药爆热 Q、流体密度 ρ_w、水中声速 c_w 和水的状态方程指数 n 为常数。在这种情况下，令 $\lambda=L/L_m$，使模型和原型应满足几何相似，此时模型和原型自变量和因变量之间的相似关系见表 2。

假设原模型中，药量为 1 000 kg，起爆水深为 50 m，爆距为 20 m。通过在高速旋转的离心机上进行水下爆炸缩比实验，缩比实验中离心加速度为 $100g$，则几何缩比系数为 $\lambda=100$，对应的实验参数为：药量 1 g，水深 0.5 m，爆距 0.2 m。得到的实验数据，再通过表 2 中的相似关系可换算到原模型，对应的冲击波和气泡载荷峰值与原模型相同，对应的时间比例为 100。

表 2 模型与原型的相似关系

Table 2 Similar relation between original experiment and scaled down experiment

物理量	符号	原型模型比	物理量	符号	原型模型比
爆距	R	λ	重力加速度	g	$1/\lambda$
爆热	Q	1	装药质量	W	λ^3
爆点处流体静压	p_w	1	冲击波压力峰值	$p_{s,max}$	1
流体密度	ρ_w	1	二次脉动压力峰值	$p_{b,max}$	1
声速	c_w	1	冲击波时间衰减常数	T_s	λ
装药密度	ρ_c	1	脉动周期	T_b	λ
药包半径	r	λ	气泡最大半径	$R_{b,max}$	λ

这里还需要说明的是，气泡的动力学行为通常由气泡初始条件和边界条件确定。对于自由场球状装药而言，气泡初始条件主要有强度参数 ε 和浮力参数 δ，分别定义为[9]：

$$\varepsilon=\frac{p_{ini}}{p_w},\qquad \delta=\sqrt{\frac{\rho_w g R_{b,max}}{p_w}} \tag{12}$$

式中：p_{ini} 为气泡内部初始压力。通过如上的量纲分析，离心机上气泡的强度参数 ε 和浮力参数 δ 与原模型相等，所以离心机上气泡的动力学行为与原模型一致。

综上所述，在离心机上进行水下爆炸缩比实验，可以对冲击波载荷、气泡行为和气泡载荷在同一相似关系下进行缩比，达到完全相似，这是常规缩比实验无法实现的。

2 计算结果和讨论

对于冲击波载荷的计算，已有较成熟的半经验公式[1,10]，不再赘述。

对于气泡的运动和载荷计算，采用基于势流理论的边界积分法，流体控制方程为 Laplace 方程[11]：

$$\nabla^2\varphi=0 \tag{13}$$

式中：φ 为速度势。通过 Green 第三公式，速度势 φ 满足边界积分方程[12-13]：

$$\chi\varphi(i)=\iint_S\left[\frac{\partial\varphi(j)}{\partial n}\frac{1}{|\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j|}-\varphi(j)\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{1}{|\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j|}\right)\right]\mathrm{d}S \tag{14}$$

式中：S 为气泡表面等所有流体边界面，i 和 j 分别为边界上的控制点和积分点，$\boldsymbol{r}_i$ 和 $\boldsymbol{r}_j$ 分别为 i 和 j 两点位置矢量，法线 $\boldsymbol{n}$ 指向流场外，χ 为 i 点处观察流场的立体角。通过该方程，可以求解气泡表面法向速度。

关于边界积分法的其他相关理论与数值解法，可参见文献[9,14]。

先给出对比的计算工况，见表 3，其中缩尺比 $\lambda=100$。常规缩比实验中需要保证起爆位置环境压力相等，所以只能在深水或加压环境中进行实验，但在离心机上可以考虑重力效应，实现水深缩比，以小当量炸药在浅水环境中进行实验。在下面讨论不同问题时，爆距也取不同值。这里也分别针对冲击波阶段和气泡阶段进行讨论。

表 3 工况设置($\lambda=100$)

Table 3 Conditions

模型	药量/kg	水深/m	惯性加速度/g
原模型	500	50	1
常规缩比实验	5×10^{-4}	50	1
离心机缩比实验	5×10^{-4}	0.5	100

在离心机爆炸缩比实验时，离心加速度为 $100g$，水深对应缩小 100 倍，但爆心位置对应的静水压力与原模型还是相等，所以相似关系($\pi_7=\pi_{m7}$)容易满足。常规缩比实验必须在相同水深处进行，或在加压罐中进行，以保证爆点处静水压力与原模型一致。综上，离心机水下爆炸缩比实验能克服常规缩比实验中爆点水深不能缩比的问题，实现水下爆炸冲击波相似和气泡相似在同一相似准则条件下同时满足。

2.1 冲击波阶段

对表 3 的原模型工况，假设爆距为 10 m，则根据几何缩尺关系，得到两个缩比实验的爆距均为 0.1 m。分别计算各工况中测点处的冲击波载荷，常规缩比实验和离心机缩比实验的计算结果如图 1～2 所示，可见两者的峰值均为 40.4 MPa，且变化趋势一致。

将两个缩比实验的结果换算到原模型中，只需将对应的时间轴变大 100 倍即可，得到的结果与原模型的计算结果如图 3 所示，可见三者吻合良好，说明离心机缩比实验和常规缩比实验均可以对原模型的的冲击波载荷进行准确的预报，即在冲击波载荷方面体现了很好的相似性。

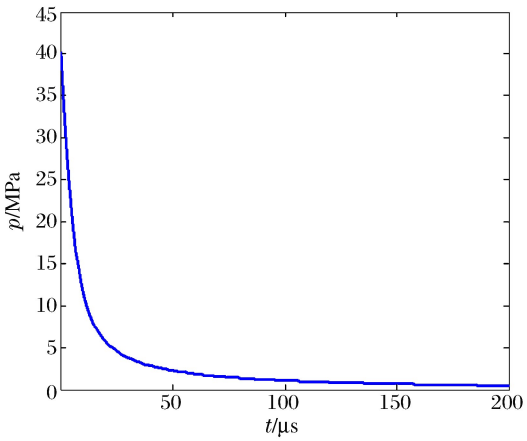

图 1 常规缩比实验中测点处的冲击波压力

Fig. 1 Pressure of measurement point in conventional scaled down experiment

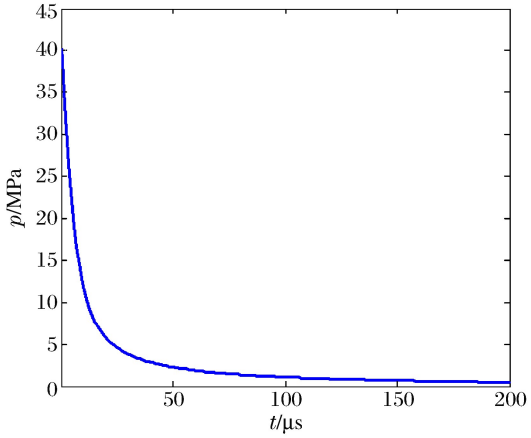

图 2 离心机缩比实验中测点处的冲击波压力

Fig. 2 Pressure of measurement point in centrifuge scaled down experiment

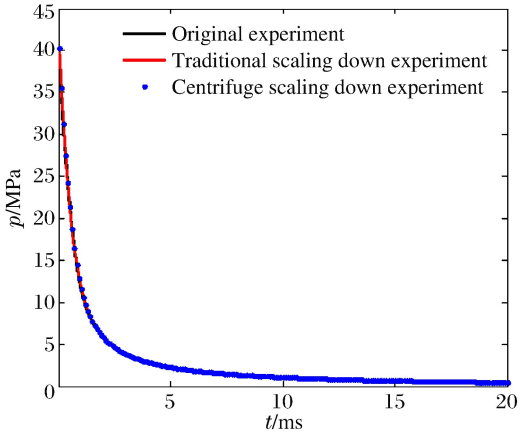

图 3 缩比实验结果与原模型的对比

Fig. 3 Comparison of scaled down experiment with original experiment

2.2 气泡阶段

采用边界元法对气泡运动和流场载荷进行计算，由于离心机缩比实验和原模型爆炸气泡完全相似，两者的量纲一参数完全一致，所以通过量纲一参数计算得到的气泡运动与气泡载荷相同，即离心机缩比实验可以准确模拟原模型的气泡运动和载荷。下面只给出离心机缩比实验的计算结果，不再给出对应原模型的计算结果。

如图 4 所示，在常规缩比实验中，气泡在膨胀、坍塌以及回弹阶段都基本保持球状，这是由于炸药当量较小，而且水深相对较大，气泡受到的浮力相对可以忽略，所以气泡在脉动过程中很难形成向上的射流现象，整个运动过程可近似为球状脉动。因此，常规缩比实验在气泡动力学行为相似性方面有着无法弥补的不足，不能反映原模型中气泡的运动情况。

在图 5 中，给出了离心机缩比实验中量纲一形式的气泡膨胀、坍塌和回弹 3 个阶段的示意图。在膨胀阶段，气泡基本保持球状，在坍塌阶段气泡在强浮力的作用下产生一股高速射流，气泡射流是典型的非球状特征。气泡射流击穿气泡顶部后演化成环状气泡，并在达到最小体积后开始回弹，而且气泡在最小体积处向上迅速迁移。可以看出，离心机缩比实验相比常规缩比实验，在气泡动力学行为方面体现了良好的相似性。

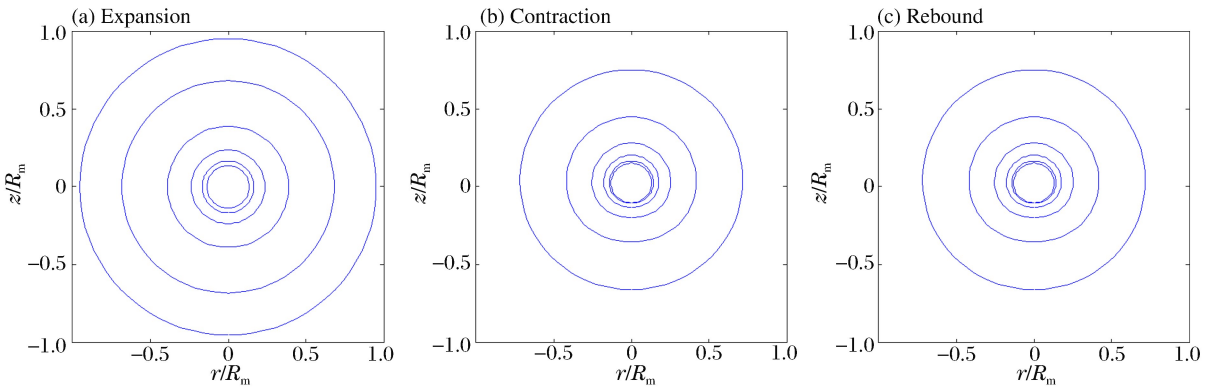

图 4　常规缩比实验中的气泡运动行为

Fig. 4　Bubble motion behavior in conventional scaled down experiment

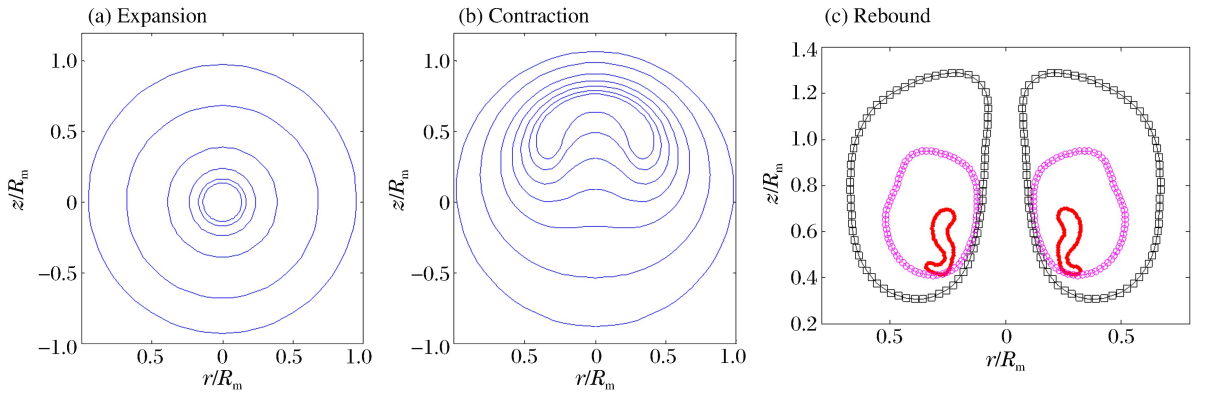

图 5　原模型和离心机缩比实验的气泡运动行为

Fig. 5　Bubble motion behavior in original and centrifuge scaled down experiment

如图 6 所示，给出了原模型、常规模型实验和离心机模型实验中气泡底部位置的速度。在 2 ms 以前，浮力对气泡膨胀影响较小，常规缩比实验与原模型吻合良好。气泡坍塌阶段，两者之间的差异越来越大，在常规模型实验中气泡不存在射流，只存在一个坍塌速度最大值，在气泡坍塌至最小体积时刻，气泡表面速度再次减小为零。而离心机缩比实验与原模型吻合良好，相对常规缩比实验，离心机上气泡底部坍塌时间更早，对于离心机的工况，该速度为射流速度，在气泡射流穿过气泡顶部时达到 134 m/s。

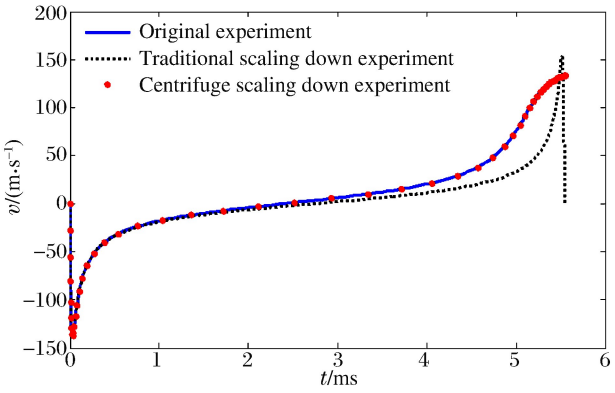

图 6　气泡底部位置的速度

Fig. 6　Velocities at bottom of bubble

下面针对气泡在近场产生的载荷特性进行分析。图 7 给出了原模型和两个不同缩比实验中，在起爆点正上方 0.07 m 处气泡的载荷。同原模型相比，常规缩比实验中的压力波形差异明显，常规缩比实验中只有一个峰值，与球状气泡产生的气泡脉冲波形一致；而离心机缩比实验的气泡载荷波形同原模型一致，且数值吻合良好，两个峰值中第 1 个峰值对应气泡射流，第 2 个峰值对应气泡达到最小体积，这与真实的气泡动力学行为一致。从载荷峰值来看，原模型和离心机缩比实验为 31.2 MPa，常规缩比实验为 11.3 MPa，两者相差 63.8%。综上，常规缩比实验在还原真实模型时，存在明显的误差。

在水平方向距离爆心 0.07 m 位置，原模型和两个缩比实验中的气泡载荷，如图 8 所示。由于该方向基本不受气泡射流的作用，所以此时常规缩比实验和原模型的压力峰值相差不大，前者的压力峰值为 11.03 MPa，后者的为 11.01 MPa。但是，由于气泡行为的差异（有无射流），在载荷波形上仍有较大差异，而离心机缩比实验不管是脉冲波形还是脉冲峰值，均和原模型吻合良好。

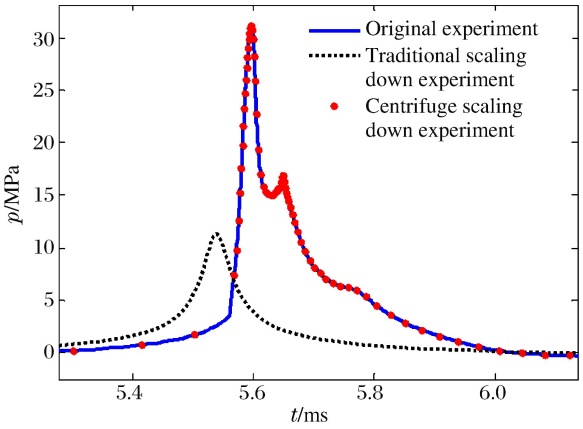

图 7 距爆心垂直方向 0.07 m 处的气泡载荷

Fig. 7 Bubble pressures with vertical distance 0.07 m from explosion center

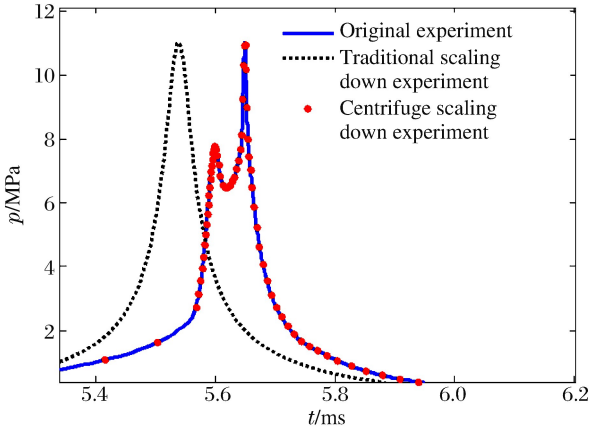

图 8 距爆心水平方向 0.07 m 处的气泡载荷

Fig. 8 Bubble pressures with horizontal distance 0.07 m from explosion center

下面针对远场载荷进行对比分析。图 9 为垂直方向距离爆心 0.4 m 处的气泡载荷（对应原模型的爆距为 40 m）。该测点的爆距可认为是远场爆炸，气泡射流对其影响较小，压力峰值分别是 1.94、2.18 和 1.94 MPa，常规缩比实验与原模型相差 11.2%。可见，随着爆距的增大，常规缩比实验的偏差缩小，偏差的变化规律将继续在下面讨论。图 10 为水平方向距离爆心 0.4 m 处的气泡载荷，压力峰值分别是 1.68、1.77 和 1.68 MPa，常规缩比实验偏差 5.1%。

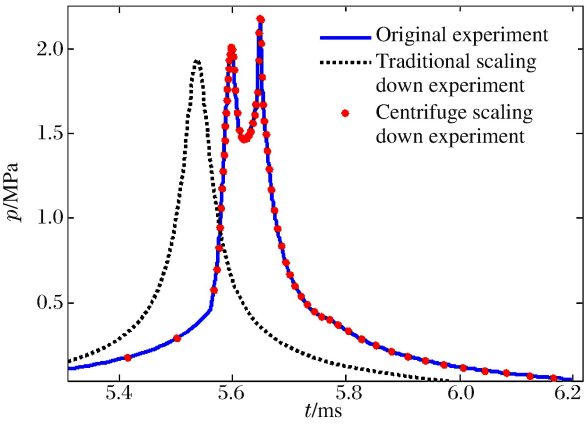

图 9 距爆心垂直方向 0.4 m 处的气泡载荷

Fig. 9 Bubble pressures with vertical distance 0.4 m from explosion center

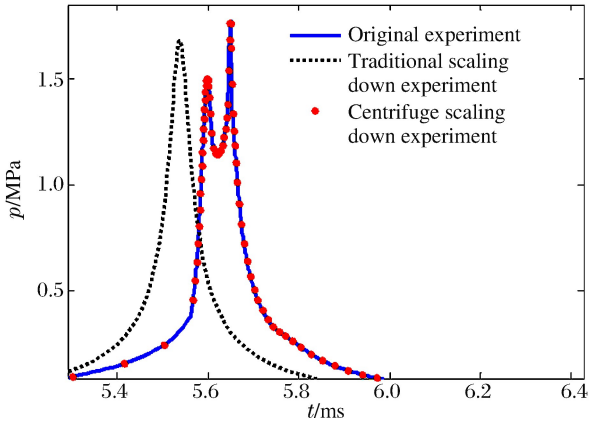

图 10 距爆心水平方向 0.4 m 处的气泡载荷

Fig. 10 Bubble pressures with horizontal distance 0.4 m from explosion center

为了进一步探讨常规缩比实验的气泡载荷预报，进一步考察缩比实验中气泡载荷峰值比 η（$\eta=p_{\mathrm{ori}}/p_{\mathrm{tra}}$）随爆距的变化，如图 11 所示，这里对爆距采用气泡最大半径 R_{m} 进行了量纲一化。在垂直方向上，η 变化明显，尤其在近场位置，不同缩比实验之间的差距可达 2.8 倍，随着爆距增加，η 逐渐减小并趋于一个稳定值。在 $6R_{\mathrm{m}}$ 位置，$\eta=1.12$；在 $30R_{\mathrm{m}}$ 位置，$\eta=1.07$；如保证 η 在 1.1 以内，则爆距需大于 $9.5R_{\mathrm{m}}$。在水平方向，η 变化平缓，且始终保持在 1.06 以内。

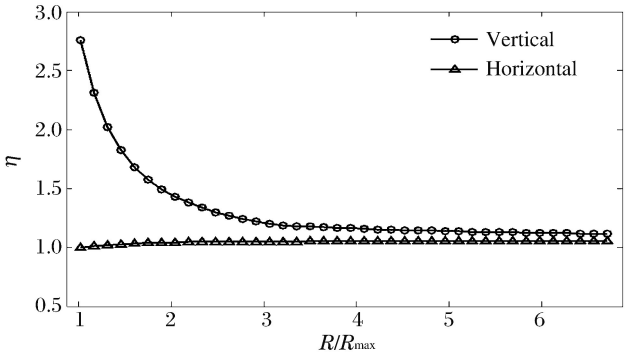

图 11 原模型与常规缩比实验的气泡峰值压力比

Fig. 11 Bubble peak pressure ratio of original to traditional scaling down experiment

综上所述，离心机缩比实验和常规缩比实验，在冲击波载荷方面都体现了很好的相似性。在气泡阶段，两种缩比实验有较大差异。常规缩比实验中，气泡不能产生射流，与原模型有很大的差别，对于气泡正上方的近场载荷峰值预报有很大的偏差，所以常规缩比实验不能预报原模型的近场气泡载荷。爆距大于 9.5R_m 的远场爆炸，常规缩比实验预报的气泡脉冲峰值相对误差可以保证在 10%以内。而离心机缩比实验与原模型中气泡动力学行为可以达到完全相似，既能模拟气泡射流等重要的物理现象，也能对气泡载荷进行换算。

3 结　论

从理论上（量纲分析）推导了离心机水下爆炸缩比实验的相似关系，并通过计算讨论了原模型、常规水下爆炸缩比实验和离心机缩比实验的冲击波和气泡载荷（运动），得到以下结论。

（1）在离心机上进行水下爆炸缩比实验在理论上可靠可行，考虑惯性加速度后，解决了常规缩比实验不能缩比爆点水深的问题，实现了冲击波载荷、气泡载荷和气泡动力学行为相似条件的同时满足。

（2）常规水下爆炸缩比实验和离心机水下爆炸缩比实验在冲击波阶段均有很好的相似性，但是常规缩比实验中气泡不能完成射流，而离心机缩比实验能够保证气泡射流行为与原模型相似。

（3）近场水下爆炸气泡载荷曲线常出现多峰现象，在气泡正上方位置，常规缩比实验的载荷峰值不能随意换算到原模型，若要将远场载荷峰值相对误差控制在 10%以内，测点必须大于 9.5 倍气泡最大半径。在爆点水平方向，气泡脉动载荷峰值能与原模型之间进行较好的换算，误差在 6%以内，但是载荷波形仍不一致。

感谢中国水利水电科学研究院陈祖煜院士提供了宝贵意见。

参考文献：

[1] Cole R H, Weller R. Underwater explosions[J]. Physics Today, 1948,1(6):35.

[2] 张效慈. 水下爆炸实验相似准则[J]. 船舶力学，2007,11(1):108-118.
Zhang Xiaoci. Similarity criteria for experiment of underwater explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(1):108-118.

[3] 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(增刊2): 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(Suppl 2): 4123-4128.

[4] 范一锴，梁向前，陈祖煜，等. 土工离心机用于爆炸模拟的实验研究[C]// 中国力学学会工程爆破专业委员会. 2011全国爆破理论研讨会论文选编. 2011.

[5] 王秋生，陈祖煜，梁向前. 应用离心模型实验研究爆炸荷载效应[C]// 中国力学学会爆炸力学专业委员会，中国土木工程学会防护工程分会. 第七届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 2009.

[6] Schofield A N. Geotechnical centrifuge development corrects Tezaghi's errors[C]// Tokyo Conference of TC2. 1998.

[7] Chabai A J. Scaling dimensions of craters produced by buried explosions[J]. Journal of Geophysical Research,

1965,70(20):5075-5098.

[8] 倪宝玉.水下粘性气泡(空泡)运动和载荷特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

[9] 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 Shuai, Zhang Aman, Han Rui. 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.

[10] 姚熊亮.舰船结构振动冲击与噪声[M].北京:国防工业出版社,2007.

[11] Newman J N. Marine hydrodynamics[M]. MIT Press, 1977.

[12] Zhang Aman, Yang Wenshan, Huang Chao, et al. Numerical simulation of column charge underwater explosion based on SPH and BEM combination[J]. Computers and Fluids, 2013,71(3):169-178.

[13] Zhang Aman, Wang Shiping, Huang Chao, et al. Influences of initial and boundary conditions on underwater explosion dynamics[J]. European Journal of Mechanics B: Fluids, 2013,42(2):69-91.

[14] Li Shuai, Li Yunbo, Zhang Aman. Numerical analysis of the bubble jet impact on a rigid wall[J]. Applied Ocean Research, 2015,50(8):227-236.

Experimental principle and numerical study of scaled-down underwater explosion model on a centrifuge apparatus

Liu Wentao, Yao Xiongliang, Li Shuai, Zhang Aman

(*College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *Heilongjiang, China*)

Abstract: In this paper, we investigated a novel method by carrying out a sclaed down underwater explosion experiment on a centrifuge apparatus and set up the similarity theory between the scaled down and actual underwater explosion experiment. Using numerical simulation, we also investigated the shock-wave load, the bubble load and bubble dynamic behaviors between original models, the novel scaled down experimental method and the conventional method. The results from our study indicate that the conventional scaled down model experiment is unable to accurately predict the bubble dynamics and the vertical near-field loading induced by the bubble collapse. When the deviation of the far-field bubble pulse is limited within 10%, the distance between the explosion source and the measuring point has to be larger than 9.5 times that of the maximum radius of the bubble. However, the novel experimental method can make a precise prediction for the original model. The experiment of a mini-charge underwater explosion almost reproduces the whole physical process of a mass-charge underwater explosion with the completely similar stages of the shock wave and the bubble. In addition, the depth of the water can also be scaled down, thereby overcoming the disadvantages of the conventional method. The present study aims at providing a novel way to perform underwater explosion model experiments.

Key words: mechanics of explosion; scaled down experiment; centrifuge; underwater explosion; bubble

(责任编辑 丁 峰)