

# 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

#### 引用本文:

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 Libin, LI Haitao, DIAO Aimin, 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.

当期更多内容≫

#### 您可能感兴趣的其他文章:

水下爆炸强冲击波与平板结构相互作用的理论分析方法 罗泽立,周章涛,毛海斌,刘建湖 DOI: 10.11858/gywlxb.2017.04.013

聚能装药水下爆炸冲击波载荷规律 王长利,周刚,马坤,陈春林,赵南,冯娜 DOI: 10.11858/gywlxb.2017.04.014

水下近距爆炸作用下船体梁的动态响应特性 朱锡,李海涛,牟金磊,黄晓明 **DOI**: 10.11858/gywlxb.2010.05.005

导弹动爆对模拟船舱毁伤效果试验研究 杜红棉,王燕,祖静,徐鹏,马游春 DOI: 10.11858/gywlxb.2011.03.011

水中空气隔层衰减冲击波性能研究 姚熊亮,杨文山,初文华,张阿漫 DOI: 10.11858/gywlxb.2011.02.013

水下爆炸载荷作用下水下目标结构的可靠性研究 李万,张志华,李华,李大伟 DOI: 10.11858/gywlxb.2014.03.010 DOI: 10.11858/gywlxb.20180516

# 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

(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后 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[1-2];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[5],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)[69]。例如:唐廷 等[8]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。近些年来,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[10-11]。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[13]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

**基金项目**:国家自然科学基金(51679244)

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-04-10

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4mm。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。



(a) Metal plate and sealing ring

图 1 模型结构和尺寸(单位: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<sub>4</sub> 位于 S<sub>3</sub> 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1m。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<sub>max</sub>和 T<sub>b</sub> 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。

Table 1   Test cases											
Case	Model	h/m	w/g	$R/r_{ m max}$	$T_{\rm b}/{ m ms}$	Case	Model	h/m	w/g	$R/r_{ m max}$	$T_{\rm b}/{ m ms}$
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

表1 试验工况

#### 试验现象与结果 2

#### 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 的压力峰值,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: pw、 phi和 phe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/rmax)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18g药量的工况2略小。

Case	$R/r_{\rm max}$	$p_{\rm w}/{ m MPa}$	$p_{\rm bl}/{ m MPa}$	$p_{\rm b2}/{ m MPa}$	$\frac{p_{\rm bl}}{p_{\rm w}} \Big/ \frac{p_{\rm bl}}{p_{\rm w}}$	Case	$R/r_{\rm max}$	$p_{\rm w}/{ m MPa}$	$p_{\rm bl}/{ m MPa}$	$p_{\rm b2}/{ m MPa}$	$\frac{p_{\rm b1}}{p_{\rm w}} \bigg/ \frac{1}{2} \bigg/ \frac{1}{2} \bigg/ \frac{1}{2} \bigg/ \frac{1}{2} \bigg/ \frac{1}{2} \bigg _{0} \bigg$
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

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

#### 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 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,*Δ*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 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。





Fig. 7 Final plastic deformations of plates in typical cases

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 为中拱与中垂变形并存,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

		Peak strain/(10 <sup>-3</sup> )											
Case	$R/r_{\rm max}$	nax Hogging phase			Sagging phase				Stabilization phase				
		$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
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 1.071×10<sup>-3</sup>、0.903×10<sup>-3</sup>、0.868×10<sup>-3</sup>和 0.635×10<sup>-3</sup>,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 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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。







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 P2 壁压曲线的数据对比,其中 tpl、tp2、tnl、tn2、pnl、pn2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。

	Tal	ble 4 Compa	rison of pressure	s in Case 2 and	d Case 4				
C		First pulsatio	n	Second pulsation					
Case -	$t_{ m pl}/ m ms$	$t_{\rm nl}/{ m ms}$	$p_{\rm n1}/{ m MPa}$	$t_{ m p2}/ m ms$	$t_{\rm n2}/{ m ms}$	$p_{ m n2}/{ m MPa}$			
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			

lla 4	Com	anian of anomalia Core 2 and C	۱ <u>.</u>
	表 4	工况 2 和工况 4 的压力对比	

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<sub>max</sub>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*<sub>max</sub>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*<sub>max</sub>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。

			Lusie e Ellee	or it, i max or	the peri		puisation			
C	<b>D</b> /	Bub	ble pulsation pe	eriod	Casa	D /	Bubble pulsation period			
Case	$\Lambda / T_{\rm max}$	Test/ms	Theor. $/ms$	Error/%	Case	$\mathbf{K}/\mathbf{T}_{\max}$	Test/ms Theor./ms I	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	

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

#### 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