文章编号：1001-1455(2014)03-0354-07

全入射角度下平板冲击波的壁压载荷及局部空化特性*

李海涛[1]，朱石坚[1]，陈志坚[2]，牟金磊[2]
(1. 海军工程大学科研部，湖北 武汉 430033；
2. 海军工程大学舰船工程系，湖北 武汉 430033)

摘要：以平面波理论为基础，推导了无限平板在全入射角度下的冲击波壁压载荷计算公式，利用实验数据对壁压公式进行修正，提出了一种适用于计算有限尺度平板壁压的经验公式；分析了不同入射角度下壁压载荷的变化特性，初步研究了壁压载荷负压特性对平板局部空化的影响。结果表明：修正后的壁压曲线与实际壁压曲线吻合较好；入射角度的增大会加快壁压衰减过程，并使最低壁压的绝对值减小；随着药量或平板厚度的增加，壁压最低负压的绝对值增大，形成局部空化的能力增强；局部空化仅在一定条件范围内才会形成，空化范围受局部空化形成压力及冲击强度等因素的影响较大。

关键词：爆炸力学；平板壁压；水下爆炸；冲击波；局部空化；斜入射
中图分类号：O383；U661.7　　**国标学科代码**：13035　　**文献标志码**：A

当水下爆炸冲击波传播到结构边界时，会产生反射、透射等现象，结构物的存在造成冲击波载荷特性发生变化。结构边界处冲击波壁压载荷的确定是研究水下爆炸作用下结构早期响应的前提条件，可为研究后续爆炸气泡运动引起的结构响应提供初始运动参数；同时，壁压载荷的确定也可为数值模拟及理论计算提供相对准确的载荷输入条件。

对平板结构的壁压载荷及结构初期响应，主要利用平面波近似法对简单结构进行理论求解[1-3]，而对有限尺度平板结构的准确响应解析模型尚未充分研究。对于有限尺度结构处的冲击波壁压载荷，金辉等[4]、程素秋等[5]、樊宝顺等[6]对实船及舱段模型的结构冲击波壁压进行了初步的实验研究，比较了壁压载荷曲线与自由场压力曲线的变化规律，但未就壁压载荷衰减变化特性以及与入射角度之间的关系等问题进行深入的探讨。

本文中以平面波理论为基础，推导无限平板在全入射角度下的冲击波壁压载荷理论计算公式，利用前期冲击波壁压实验数据对该理论公式进行修正，提出一种壁压修正方法和经验公式，深入分析斜入射角度下壁压载荷的变化特性，并根据壁压的负压特性对平板局部空化进行初步研究，为后续研究局部空化对结构响应的影响奠定基础。

1　平板壁压计算公式

将舰船结构在冲击波作用下的早期响应过程简化为无限平板在平面波作用下的响应过程，平板两侧分别为水和空气介质，整个简化物理模型如图 1 所示。对于无限平板结构，当任意角度入射冲击波 p_i 作用到平板边界时，会在平板边界面上形成反射波 p_r 和透射波 p_t，入射波和反射波叠加即为结构流固耦合面处的壁压载荷。在不同介质中传播的冲击波满足平面波反射和折射定理。

理论计算过程中，进一步引入如下假设：

(1)水为不可压缩、无旋、无黏的理想流体；

* **收稿日期**：2012-10-08；**修回日期**：2013-03-17
基金项目：国家自然科学基金项目(51109216)
作者简介：李海涛(1979—　)，男，博士，讲师。

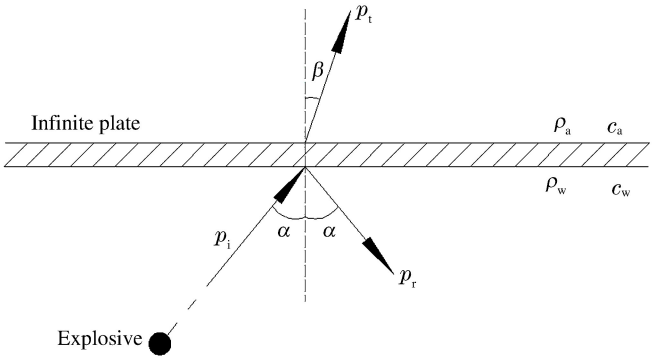


图 1 任意角度入射冲击波作用下的无限平板

Fig. 1 Infinite plate subjected to an inclined plane shockwave

(2)与平板相邻的水质点和平板具有相同的运动速度；

(3)忽略压缩波对平板变形的影响，平板两侧边界质点速度相同；

(4)假设不同入射角度冲击波同时到达平板，忽略因入射冲击波作用时间差异而引起的平板运动参数变化。

图 1 中 α 为入射角和反射角，β 为透射角，ρ_a、ρ_w 和 c_a、c_w 为空气、水的密度和声速。根据连续性边界条件，在斜入射条件下，平板两侧质点的法向速度必须相等。入射面一侧质点速度为 $(p_i - p_r)\cos\alpha/(\rho_w c_w)$，透射面一侧质点速度为 $p_t\cos\beta/(\rho_a c_a)$，因此

$$v_p = (p_i - p_r)\cos\alpha/(\rho_w c_w) = p_t\cos\beta/(\rho_a c_a) \tag{1}$$

式中：v_p 为平板边界质点的法向运动速度。根据牛顿第二运动定律，平板两侧的压力差提供平板面积质量 m_p 运动的惯性力 $m_p \dfrac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t}$，列出动力平衡方程式

$$(p_i + p_r - p_t) = m_p \frac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

根据平面波折射定理，入射角度 α 和透射角 β 之间满足如下方程：

$$\frac{\sin\alpha}{c_w} = \frac{\sin\beta}{c_a} \tag{3}$$

方程(1)～(2)中，p_r、p_t 和 β 为未知量，其他均为已知量，联立求解得斜入射条件下平板边界理论壁压

$$p_w = p_i + p_r = \frac{2p_{max}}{\zeta - \eta + 1}\left[(\zeta - \eta)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\theta}} + \mathrm{e}^{-(\frac{1+\zeta}{\eta\theta})t}\right] \tag{4}$$

式中：p_{max}、θ 分别为自由场入射冲击波峰值压力和入射冲击波衰减常数，$\zeta = \dfrac{\rho_a c_a \cos\alpha}{\rho_w c_w \sqrt{1-(c_a\sin\alpha/c_w)^2}}$，$\eta = \dfrac{m_p\cos\alpha}{\rho_w c_w \theta}$，均为已知量。以上公式也适用于垂直入射条件下的壁压载荷计算。

2　壁压公式的实验修正

有学者对某特定实船及结构模型的冲击波壁压峰值进行了测量及数据分析，获得了一些斜入射条件下冲击波壁压实验值。以该实验数据为基础，同时结合小尺度平板模型壁压实验数据，可以对已建立的斜入射条件下无限平板冲击波壁压计算公式进行初步修正。

2.1　壁压峰值修正

当有限尺度结构受水下爆炸冲击波作用时，实际壁压值比理论计算值偏小，需引入壁压修正系数 C_p（C_p 为壁压实验峰值 p_{we} 和理论峰值 p_{wt} 之比）。本文中作者前期对垂直入射条件下冲击波壁压峰值修正工作开展了初步研究，在系列小尺寸钢板爆炸冲击实验基础上，获得了部分工况条件下壁压峰值修正系数 C_p 的实验值，初步总结出经验公式如下[7]：

$$C_p = K\left(\sqrt{m_e}/R\right)^{\varphi_1}\left(m_p\right)^{\varphi_2} \tag{5}$$

式中：m_e 为炸药当量，R 为炸药与测点的距离，系数 $K=0.614\ 2$、$\varphi_1=-0.072\ 2$、$\varphi_2=0.007\ 8$。

针对斜入射条件，拟在垂直入射壁压修正系数公式基础上，进一步考虑入射角度对修正系数的影响，将全入射角度冲击波壁压峰值修正系数 C_p 表示为如下形式：

$$C_p = K\left(\sqrt{m_e}/R\right)^{\varphi_1}\left(m_p\right)^{\varphi_2} f(\alpha) \tag{6}$$

式中：α 为入射角度。当 $\alpha=0$ 时，$f(\alpha)=1$，此时公式(6)即为垂直入射时的平板壁压峰值修正公式。

利用前期壁压实验数据对函数 $f(\alpha)$ 进行拟合分析，确定其函数形式，具体实验工况及数据见表 1。其中，工况 1～3 来自于本文中作者新完成的 1 m 尺度方板水下爆炸实验；工况 4～5 来源于文献[4]；工况 6～7 来源于文献[5]；工况 8～15 来源于文献[6]。

通过对表 1 中不同工况下壁压实验数据的分析，确定 $f(\alpha)$ 的函数形式为：

$$f(\alpha)=2.289\ 4\cos^3\alpha-4.062\ 2\cos^2\alpha+2.900\ 4\cos\alpha-0.090\ 718 \tag{7}$$

表 1 不同爆炸工况下冲击波壁压峰值实验值及理论值对比

Table 1 Comparison of theoretical and experimental results of wall pressure in test cases

No.	m_e/kg	R/m	$(\sqrt{m_e}/R)$/(kg$^{0.5}$ · m^{-1})	m_p/(kg · m^{-2})	α/(°)	p_{wt}/MPa	p_{we}/MPa	C_p
1	0.005	0.10	0.707	7.8	3	191.680	124.960	0.652
2	0.005	0.15	0.471	7.8	5	121.220	80.010	0.660
3	0.050	1.00	0.224	7.8	6	33.820	22.560	0.667
4	6.000	19.55	0.125	93.6	6	7.420	5.580	0.752
5	6.000	10.21	0.240	93.6	20	15.520	12.240	0.789
6	6.000	15.23	0.100	23.4	67	0.154	0.068	0.442
7	6.000	15.23	0.100	23.4	4	0.170	0.127	0.747
8	1.000	12.59	0.079	23.4	83	5.910	0.990	0.168
9	1.000	12.99	0.077	23.4	64	5.770	2.250	0.390
10	1.000	8.83	0.113	23.4	69	8.920	4.890	0.548
11	1.000	5.33	0.188	23.4	65	15.780	9.050	0.574
12	1.000	4.69	0.213	23.4	27	18.240	14.140	0.775
13	6.000	16.56	0.148	23.4	77	8.600	2.240	0.260
14	6.000	16.50	0.148	23.4	69	8.640	3.600	0.417
15	6.000	15.07	0.163	23.4	50	9.580	4.200	0.438

注：工况 1～3、5～8、13～15 为函数 $f(\alpha)$ 拟合样本点工况；工况 4、9～12 为考查点工况。

图 2 中对函数 $f(\alpha)$ 拟合值及实验值进行了比较。从图中可以看出，通过实验数据拟合得到的不同斜入射角度下的 $f(\alpha)$ 函数曲线，对于考查实验工况数据也有较好的预报精度；随着入射角度的增大，壁压峰值修正系数值非线性减小，这与实验数据反映的规律基本一致；当冲击波入射角度较小时，该拟合曲线预报精度较高，而对于入射角度接近于 90°的情况，本函数提供的计算数据会存在一定的预报误差。

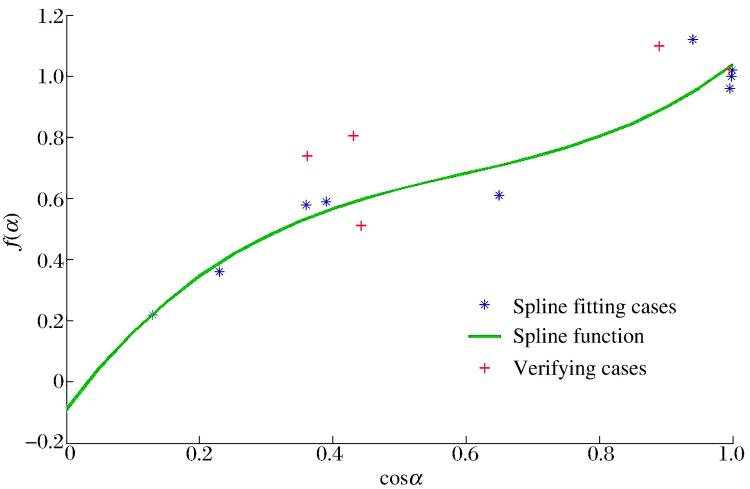


图 2 函数 $f(\alpha)$ 计算值与实验值的比较

Fig. 2 Comparison of theoretical and experimental results of $f(\alpha)$

2.2 衰减常数的选取

实验研究发现，冲击波壁压曲线

在衰减过程中也基本满足指数衰减规律，但与自由场压力相比，壁压曲线的衰减速度更快。表 2 中列出了不同工况下理论壁压衰减常数 θ_{pt} 与实验壁压衰减常数 θ_{pe} 的对比情况，表中 ε 表示误差。从表中数据可以看出，对于壁压衰减常数而言，理论值和实验值相差较小，均在 10% 以内，可基本认为实验壁压曲线的早期衰减过程与理论壁压曲线一致。在目前实验数据偏少的情况下，有限尺度平板处壁压衰减常数可以参考无限平板壁压衰减常数进行计算。

表 2　不同爆炸工况下冲击波衰减常数实验值及理论值对比

Table 2　Comparison of theoretical and experimental results of θ in test cases

No.	m_e/kg	R/m	$(\sqrt{m_e}/R)$/(kg$^{0.5}$ · m^{-1})	m_p/(kg · m^{-2})	α/(°)	θ_{pt}/μs	θ_{pe}/μs	ε/%
1	0.005	0.10	0.707	7.8	3	3.5	3.2	8.6
2	0.005	0.15	0.471	7.8	5	3.6	3.6	0.0
3	0.050	1.00	0.224	7.8	6	4.5	4.5	0.0
4	6.000	10.21	0.240	93.6	20	13.6	13.3	2.2
5	2.000	15.21	0.093	23.4	81	2.5	2.3	8.0

2.3　壁压修正公式

从上述壁压实验数据和理论数据的对比情况看，在全入射角情况下，冲击波壁压峰值的实验值比理论值要小，需要利用峰值修正系数 C_p 对理论壁压峰值进行修正；壁压实际衰减常数可取理论值。修正后的平板结构处壁压 p'_w 可表示为

$$p'_w = C_p \times 2p_{max} e^{-\frac{t}{\theta_{pt}}} \tag{8}$$

式中：θ_{pt} 为由式(4)计算得到的冲击波壁压衰减常数。

3　分析与讨论

3.1　壁压载荷特性

为分析有限尺度平板冲击波壁压载荷实际变化特性，针对尺寸为 1 m×1 m、厚 1 mm 的钢质平板开展了水下爆炸实验研究。实验时，所取冲击波入射角度较小，基本为垂直入射状态。图 3 给出了表 1 中工况 2、3 条件下冲击波壁压曲线理论值和实验值的比较情况。

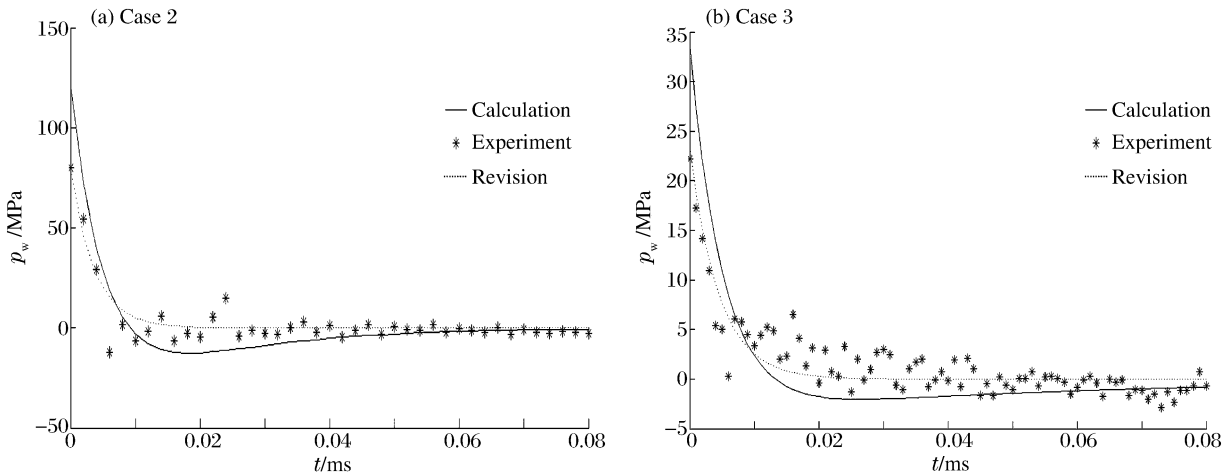


图 3　冲击波壁压理论值和实验值的比较

Fig. 3　Comparison of theoretical and experimental results of wall pressure

从图 3 可以看出，冲击波壁压衰减的前期过程基本满足指数衰减规律，且衰减速度很快；衰减后期阶段，理论和实验壁压曲线均出现负压值，这是反射稀疏波与入射波叠加的效果；在冲击波前期衰减过程中，经指数函数修正后的壁压值与实验值吻合较好，但因指数函数本身特点，修正壁压值不会出现负

压情况，这与实验壁压曲线不一致，而无限平板理论壁压公式能够较好地反映冲击波壁压衰减后期的变化特性。因此，指数函数壁压修正曲线仅适用于前期衰减过程，对于后期阶段，仍需要通过理论壁压公式分析其后续变化规律。

为了分析入射角度对冲击波壁压曲线的影响特性，选定 50 g TNT 炸药在 3 mm厚平板下方爆炸为研究工况，且保持冲击因子为 0.112 $kg^{0.5}/m$ 不变。从图 4 可以看出，针对平板某一入射点而言，随着入射角度的增大，冲击波壁压峰值虽然保持不变，但其壁压曲线衰减过程加快，且衰减速度与入射角度变化过程存在非线性关系；入射角度越小，冲击波壁压曲线出现最低负压值的时间越晚，且最低负压绝对值越大，该处因负压存在而形成局部空化的能力增强。

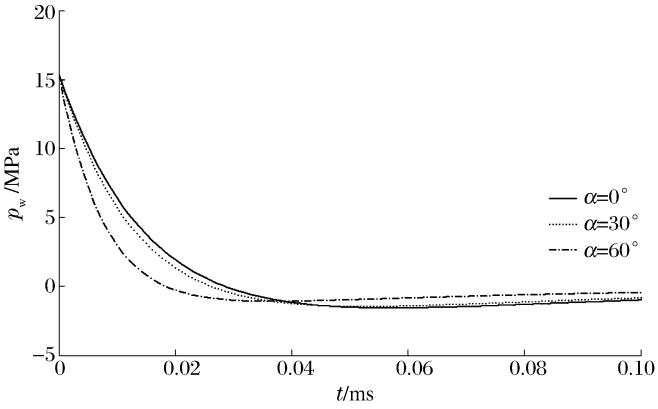


图 4 相同冲击因子下入射角度对壁压曲线的影响

Fig. 4 Effect of incidence angle on wall-pressure value

为进一步分析全入射角度下冲击波壁压曲线衰减常数的变化特点，选定 50 g TNT炸药在 3 mm 厚平板下方爆炸为研究工况，且保持冲击因子为 0.224 $kg^{0.5}/m$不变。从图 5 可以看出，对于同一爆源，垂直入射处的冲击波壁压曲线衰减时间最长；随着入射角度的增大，其壁压衰减常数减小；而对同一入射点处的自由场压力曲线而言，入射角度越大(即考查点爆距越大)，压力衰减过程越长；对于所选计算工况而言，垂直入射时的壁压衰减常数约为自由场压力曲线的 1/5，随着入射角度的增大，两种压力曲线的衰减常数值相差越大。

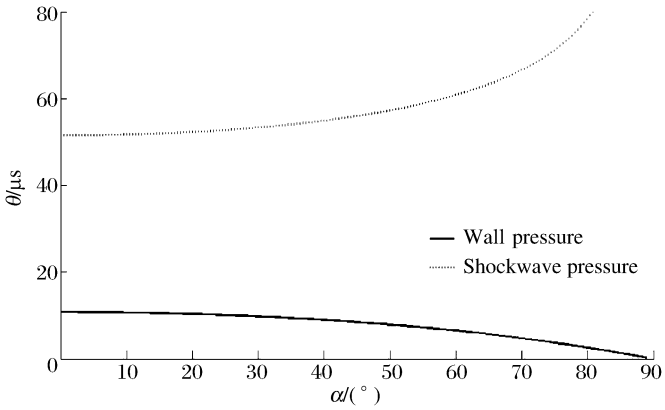


图 5 入射角度对同一点处冲击波压力衰减常数的影响

Fig. 5 Effect of incidence angle on θ

3.2 负压及空化特性

从壁压载荷特性研究可以看出，冲击波壁压衰减后期会出现负压值，随着爆炸工况的变化，最低负压值的大小及出现时间均会发生变化。选定厚度 $\tau=15$ mm 平板下方垂直爆距 $H=10$ m 的工况为研究对象，进一步分析药量 m_e 及入射角度 α 变化对最低负压值 p_{wn} 的影响特性。从图 6 可以看出，随着入射角度的增大，冲击波最低负压的绝对值非线性减小，当 $\alpha<20°$时，最低负压值变化缓慢，当 $20°<\alpha<70°$时，最低负压值存在快速变化过程，当 $\alpha>70°$时，最低负压值的变化又趋于平缓；同一入射角度条件下，随着药量的增加，最低负压的绝对值是增大的，说明大药量更容易造成平板处发生空化现象，但药量的增加对造成最低负压绝对值增大的效果是逐步减小的，最低负压存在一个极限值。

当平板冲击波壁压出现负压时，在平板边界面上可能会出现局部空化现象。文献[8]在分析过程中，取水的空化压力为−3.0 MPa，本文中也选取该值作为空化临界压力，对典型爆炸工况下无限平板局部空化的形成范围进行初步研究。

由于几何对称性，炸药爆炸时会在平板上形成圆形的局部空化区域。选定 500 kg TNT 炸药在无限平板下方爆炸作为分析工况，研究不同平板厚度时空化区域半径 R_c 与垂直爆距 H 之间的变化规律。

从图 7 可以看出，对于同一厚度平板，随着垂直爆距 H 的增大，平板上形成局部空化的面积会出现先增大后减小的过程，且当 H 超过某一值时，整个平板会因为最低负压值达不到空化条件而无法出现局部空化；随着平板厚度 τ 的增加，同一爆距条件下，爆炸形成局部空化的能力增强，空化区域范围也将增大，这说明板厚对空化的形成也有重要影响：板厚越大，壁压的最低负压绝对值越大，平板在更大爆距范围内出现空化现象的可能性增大。

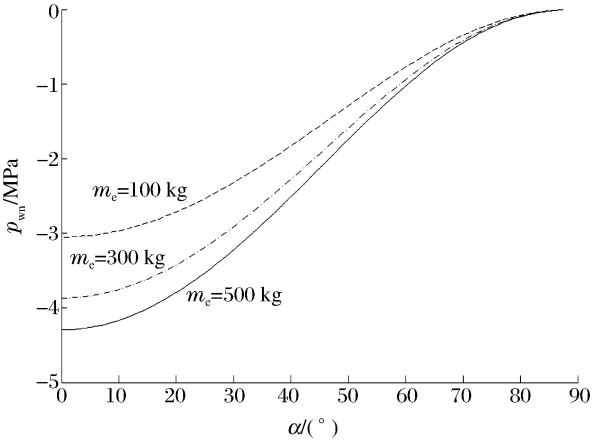


图 6　不同药量条件下入射角度对最小壁压值的影响

Fig. 6　Effect of incidence angle on minimum wall-pressure value

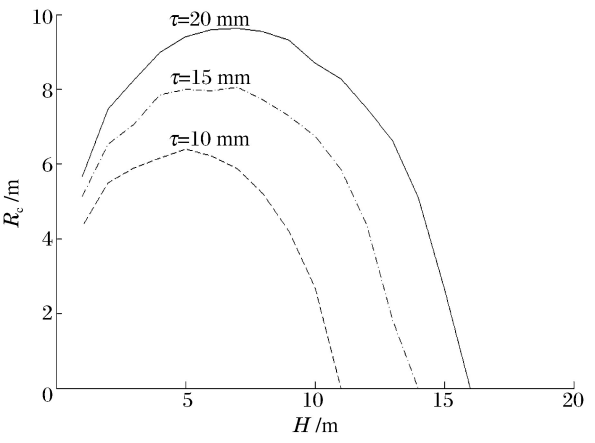


图 7　不同板厚条件下垂直爆距对局部空化区域半径的影响

Fig. 7　Effect of minimum stand-off distance on radius of local cavitation zone

4　结　论

(1)全入射角度下有限尺度平板结构冲击波壁压公式仅需要在无限平板理论壁压公式基础上进行峰压修正，修正后的壁压曲线与实际壁压曲线吻合较好；随着入射角度的增加，壁压曲线修正系数非线性减小。

(2)相同冲击因子条件下，随着入射角度的增大，冲击波壁压形成最低负压的时间越早，其负压绝对值也相对减小，形成局部空化的能力降低。

(3)相同条件下，随着药量或者平板厚度的增大，壁压的最低负压绝对值也增大，形成局部空化的能力增强；炸药在某一垂直爆距范围内变化时，局部空化范围会出现先增大后减小的过程，超过该爆距范围，整个平板会因为最低负压值达不到空化条件而无法出现局部空化。

参考文献：

[1]　Jiang J, Olson M D. Rigid-plastic analysis of underwater blast loaded stiffened plates[J]. International Journal of Mechanic and Science, 1995,37(8):843-859.

[2]　Makinen K. Cavitation models for structures excited by a plane shock wave[J]. Journal of Fluids and Structures, 1998,12:85-101.

[3]　Santiago L D. Fluid-interaction and cavitation effects on a surface ship model due to an underwater explosion[R]. California: Naval Postgraduate School, 1997.

[4]　金辉，周学滨，周华，等. 水下爆炸中自由场压力和船体壁压的测量与分析[J]. 海军工程大学学报，2009,21(5):82-87.

Jin Hui, Zhou Xue-bin, Zhou Hua, et al. Measurement and analysis of free-field pressure and ship hull pressure under water explosion[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2009,21(5):82-87.

[5]　程素秋，樊宝顺，薛飞，等. 水下非接触爆炸作用下舱段模型的动态响应[J]. 爆炸与冲击，2008,28(4):360-366.

Cheng Su-qiu, Fan Bao-shun, Xue Fei, et al. Dynamical response measurement of a cabin model subjected to non-

contact underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(4):360-366.

[6] 樊宝顺,程素秋,韩峰.舰船舱段模型在水下爆炸作用下的壁压分析[J].中国舰船研究,2009,4(5):20-22.
Fan Bao-shun, Cheng Su-qiu, Han Feng. Wall pressure analysis of cabin model subjected to underwater explosion [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009,4(5):20-22.

[7] 李海涛,朱锡,张振华.水下爆炸球面冲击波作用下船体梁的刚塑性动响应特性[J].工程力学,2010,27(10):202-207.
Li Hai-tao, Zhu Xi, Zhang Zhen-hua. Dynamic rigid-plasitc response of ship-like beam subjected to underwater spherical shockwaves[J]. Engineering Mechanics, 2010,27(10):202-207.

[8] 顾文彬,苏青笠,刘建青,等.水下平面爆炸冲击波作用下空化区域形成及其特征[J].爆破,2004,21(4):8-11.
Gu Wen-bin, Su Qing-li, Liu Jian-qiang, et al. Formation process of cavitation region affected by underwater plane blast shock wave and its characteristics[J]. Blasting, 2004,21(4):8-11.

Characteristics of wall pressure and cavitation on the plate subjected to underwater explosion shockwaves at any angle of incidence*

Li Hai-tao[1], Zhu Shi-jian[1], Chen Zhi-jian[2], Mou Jin-lei[2]

(1. *Office of Research & Development, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei, China*;
2. *Department of Warship Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *Hubei, China*)

Abstract: Wall pressure as a load parameter should be confirmed exactly, and then offered for investigating dynamic response of structure such as a plate subjected to underwater explosion. On the basis of plane shock wave hypothesis, a theoretical formula was deduced and proposed to calculate the wall pressure values of an infinite plate subjected to underwater explosion shockwaves at any angle of incidence. By using the wall pressure data derived from underwater explosion experiments, the theoretical formula of wall pressure was revised to be suitable for plates with finite dimensions. With the revised formula, the characteristics of the wall pressure on the plate were analyzed by considering various incidence angles, and the effects of the negative wall pressure values on local cavitation on the plate were discussed primarily. The results show that the wall pressure values derived from the revised formula agree well with those from the experiments. As the incidence angle increases, the wall pressure decays more rapidly, and the absolute value of the minimum wall pressure decreases. With the more explosive or the thicker plate, the absolute value of the minimum wall pressure is larger, and local cavitation takes place more likely. Local cavitation can only come into being in certain conditions, and the cavitation range will be affected by the factors such as cavitation pressure criterion, shock intensity, and so on.

Key words: mechanics of explosion; plate wall-pressure; underwater explosion; shockwaves; local cavitation; oblique incidence

* Received 8 October 2012; Revised 17 March 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51109216)
Corresponding author: Li Hai-tao, navy_lht@163.com

(责任编辑 曾月蓉)