

文章编号: 1001-1455(2008)04-0360-07

水下非接触爆炸作用下舱段模型的动态响应*

程素秋, 樊宝顺, 薛 飞, 王 巍

(91439 部队 96 分队, 辽宁 大连 116041)

摘要: 对舱段缩比模型遭受水下爆炸冲击载荷时的动态响应进行了测量与分析。模型是参照水面舰船的典型舱段而设计的, 用于评估普通船用钢材模型的冲击响应。试验工况为远场非接触爆炸, 介绍了药包/模型的几何特性, 以及用装在舱室内、甲板处和龙骨上的加速度计来测量舱段模型的冲击运动。

关键词: 爆炸力学; 动态响应; 水下非接触爆炸; 舱段缩比模型

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引 言

水下爆炸试验是对舰船结构、舰载设备或舱段模型遭受的抗冲击能力的测试。通过建造舱段缩比模型, 来研究小型舰载设备的动态响应和普通船用钢材材料的抗冲击安全距离的方法, 在国外靶场的冲击响应测量中是常用的方法。

早在 20 世纪 70 年代, Taylor 采用一维笛卡尔坐标, 将水视为线性流体, 提出了气背板在水下爆炸弱冲击波作用下的精确解^[1], 但在分析中没有考虑空穴效应。之后, H. G. Snay 等^[2]采用模态法进一步研究了气背板在水下爆炸强冲击波作用下的动态响应。与 Taylor 不同的是, 他们将水视为非线性流体, 得到了该问题的一维笛卡尔坐标下的解析解, 但同样也没有考虑空穴效应。

顾王明等^[3]结合实验结果得到了圆柱壳受水下爆炸作用时的壁压分布公式, 并对实验壁压进行了解释。他认为当仅考虑冲击波效应时, 球面波压力与水质点的关系仍然近似满足平面波的公式, 壳体迎爆面受入射压力和散射压力作用, 由于应力波波速比冲击波快, 因而侧爆面先受辐射压力作用, 而后绕射压力叠加上去, 背爆面则仅受辐射压力作用。

关于水中兵器战斗部在水下爆炸时对水面舰艇和潜艇等船体的破坏作用是当前国际上研究的热点

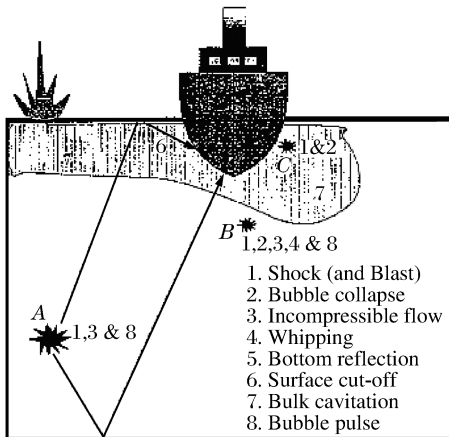


图 1 舰船对水下爆炸的响应示意图

Fig. 1 Response of ship subjected to underwater explosion



图 2 舱段缩比模型

Fig. 2 Cabin scale model

* 收稿日期: 2007-03-06; 修回日期: 2007-06-20

作者简介: 程素秋(1968—), 女, 硕士, 工程师。

之一。如图 1 所示,当装药在水下爆炸时,对舰船会产生多种加载效应,如冲击波、气泡脉动压力波、海面反射波引起的片空泡、结构表面的局部空泡、空泡塌缩的脉冲压力及海底反射波等。但对于舰船的实际加载情况,还要视具体情况具体分析^[4-6]。

为考核水下非接触爆炸对壳体结构的影响而设计制造的舱段模型如图 2 所示,长为 2.5 m,宽为 1.2 m,高为 1.2 m。

舱段两端分别设有水密间,可以保证模型在壳体破裂后仍能浮在水面。模型中间开设一方形开口,方便各种传感器及电缆的连接。而要考察的小型舰载设备可刚性连接在模型开口处,舱段模型和设备对冲击的响应用速度传感器、加速度传感器及相关装置测量。

为考察模型在不同冲击因子下的动响应情况,模型经受了 3 次水下爆炸,每次试验时选用的药包装药质量 m 不同,布放水平距离 a 、垂直距离 b 不同,设计的龙骨冲击因子 β 也不一样,详见表 1。在模型外挂有 4 个自由场压力传感器,用来测量水中冲击波的自由场压力和确定爆心位置。装在模型上的压电式加速度计,可记录模型的加速度响应。

表 1 模型爆炸试验的设计冲击因子

Table 1 Shock scale of model explosion tests

试验编号	m/kg	a/m	b/m	$\beta/(\text{kg}^{1/2}/\text{m})$
1	6	14	6.0	0.10
1	2	15	2.5	0.13
3	1	4	2.5	0.16

2 试验方法和工况

2.1 模型与爆源的几何特性

舱段模型的水下爆炸试验是在某海域的近海岸完成的。装药为 1 kg TNT 球形药包和 6 kg TNT 球形药包。模型水下爆炸试验时爆源与模型的相对位置见图 3,模型与药包的几何特性相似,对模型进行多次水下爆炸试验。

2.2 模型的冲击响应测量

舱段模型的垂向冲击响应,使用 7 个不同位置上的压电加速度计测量。模型甲板上的加速度计沿纵向分布,舱室内的加速度计设于龙骨中心、左、右压载铁,具体位置如图 4 所示,加速度计分别用 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_6 、 A_7 、 A_9 和 A_{10} 标明。加速度计 A_4 位于模型甲板四分之一处的桅杆顶端。模型的横向冲击响应,分别用迎面舱壁中心的加速度计 A_8 和背爆面舱壁中心的加速度计 A_5 测量。

压力传感器对爆源起爆后的自由场压力以 1 MHz 采样率记录。 P_3 附近设置一壳体壁压测点,以便和自由场压力对比。

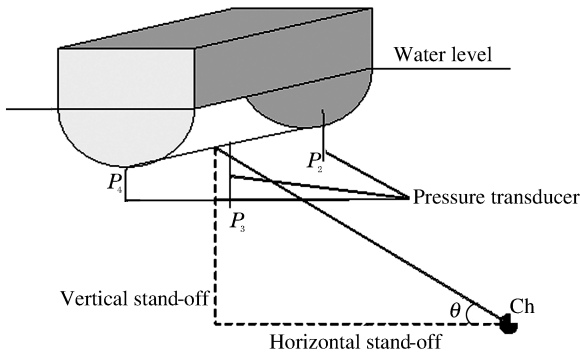


图 3 模型试验的几何特性

Fig. 3 Geometry characteristic of model tests

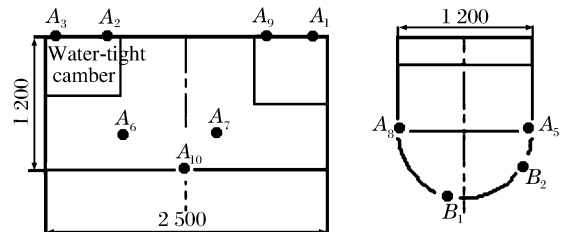


图 4 模型的几何尺寸和加速度计位置

Fig. 4 Geometry size of the model and disposal of accelerometers

3 试验结果和讨论

3.1 冲击波压力和模型壳体壁压

表2总结了3次试验中2个壁压测点与附近的自由场压力测点的无量纲处理结果。其中, B_1 和 P_3 测点相距约22 cm, B_2 和 P_1 测点相距约30 cm, P_1 和 P_3 测量值可近似看作壁压测点处的自由场压力, 来对比壁压与自由场压力, 但会给分析结果带来误差。从表2的数据可以看出, 虽然第一次试验与第二次试验中设计的冲击因子略有差别, 但从自由场压力3个测点的结果可知, 实际冲击因子却是第二次试验要略小于第一次试验, 其原因在于试验组织实施时对爆源的布放不可能做到和预设的一样。另外, 表2的数据也表明运用冲击因子来表征水下爆炸载荷的强度是合理可信的。

表2 模型爆炸试验的压力测量结果

Table 2 Pressure measurement of model explosion tests

试验 编号	壁压测点 p_{B_1} /MPa	自由场测点 p_{P_3} /MPa	壁压测点 p_{B_2} /MPa	自由场测点 p_{P_1} /MPa	自由场测点 p_{P_4} /MPa
1	0.068	0.077	0.127	0.085	0.080
2	0.093	0.077	0.132	0.080	0.076
3	0.173	0.128	0.351	0.145	0.129

经过分析可知, 第一次试验中药包离模型距离较远, 药包入水较深, 而 B_1 测点的位置在模型底部中心偏后处, 介于迎爆面与背爆面中间地带, 受绕射波影响较大或受局部空泡效应, 测量值低于该点的自由场压力; 第三次试验中药包离模型距离较近, 药包入水较浅, 药包爆炸可引发多种效应, 如冲击波、气泡脉动、滞后流、片空泡、气泡塌陷等, 而 B_2 测点高于该点自由场压力的2倍, 是多种效应中的几种共同作用的结果。表中数据除第一次试验中的 B_1 和第3次试验中的 B_2 两个数据外, 其余的壁压峰值都小于同一点处自由场压力值的2倍, 与理论分析结果一致。

为对比测量结果, 图5~6给出同一点自由场压力和壁压的时间历程。图5所示的是第二次试验 P_3 自由场压力时间历程, 其峰值压力上升时间约为 $11 \mu\text{s}$, 脉冲持续时间约为 0.3 ms 。

图6为壳体 B_1 点的壁压时间历程, 其峰值压力约为 P_3 点自由场压力的1.2倍, 上升时间约为 $80 \mu\text{s}$ (高于 P_3 点), 脉冲持续时间约为 0.1 ms (低于 P_3 点)。这是冲击波和模型相互作用的结果。模型是漂浮于水中的, 其对冲击波的响应导致局部空化效应, 伴随着压力发生变化, 当邻近壳体的被空化的水压力接近于静水压力时, 空化效应结束了。但同时水流到塌陷的空化空间, 而空化塌陷产生的水流重新加载到壳体。图6显示了初始压力的增加和延迟的典型结果。

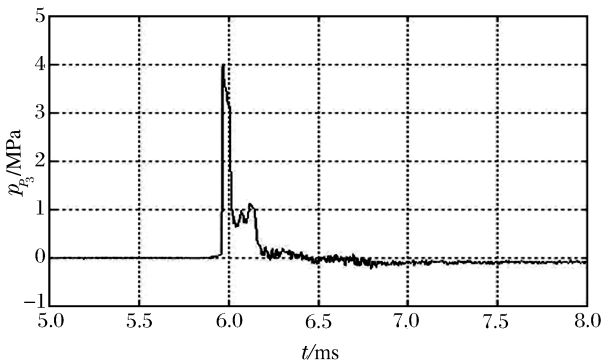


图5 自由场压力曲线(第二次试验)

Fig. 5 Free field pressure histories (shot 2)

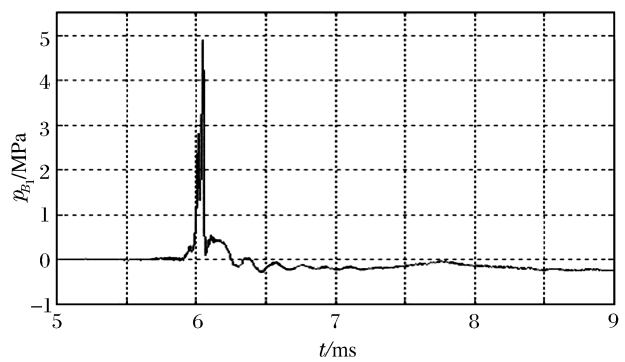


图6 壳体壁压曲线(第二次试验)

Fig. 6 Model hull pressure histories (shot 2)

3.2 模型的动态响应

由于试验过程中有的加速度计出现松动或损坏等问题, 试验结果要剔除这些有问题的测点。如 A_4 测点没有刚性连接, A_{10} 加速度计在试验后发现有所松动现象, A_8 传感器坏了, 其他各测点正常。 A_1 和

A_3 、 A_2 和 A_9 、 A_6 和 A_7 、 A_5 和 A_8 加速度计由于所在位置的对称性,其测量值有一定的对比性,但 A_8 处于迎爆面、 A_5 位于背爆面。

从表 3 的数据可知,除 A_{10} 测点外,其余各点的测量值均符合以下规律:冲击因子越大,模型上各点的响应强度越大,并且模型甲板上 1/4 处的响应强度要大于边缘处,迎爆面处(A_8)的响应强度大于背爆面(A_5),这和实船爆炸试验的趋势一致^[6,8]。但第一次试验中 A_5 与 A_8 却并不符合上述规律,原因是药包入水较深,距离模型较远,冲击波到达壳体后在结构传递的应力波会对加速度计再次加载。

表 3 模型爆炸试验的加速度测量结果

Table 3 Acceleration measurement of model explosion tests

试验编号	a_{A_1}/ms	a_{A_2}/ms	a_{A_3}/ms	a_{A_5}/ms	a_{A_8}/ms	a_{A_9}/ms	$a_{A_{10}}/ms$
1	47.0	80.8	56.6	76.0	62.3	57.9	70.0
2	38.8	49.9	36.4	45.6	76.1	44.8	98.8
3	77.7	111.9	81.5	107.6	134.5	90.9	77.3

图 7、8 中记录了 A_1 与 A_3 加速度曲线 30 ms 内的最大垂向响应及随时间逐渐衰减的振动。从中可以看出对称位置的加速度计测量曲线趋势基本相同,加速度峰值在同一量级,但由于试验现场对爆源布放不可能和预先设想的完全一致,使传感器位置不能完全对称;另外二者传感器灵敏度的不同及安装上的误差,导致峰值和曲线存在一定的差异。

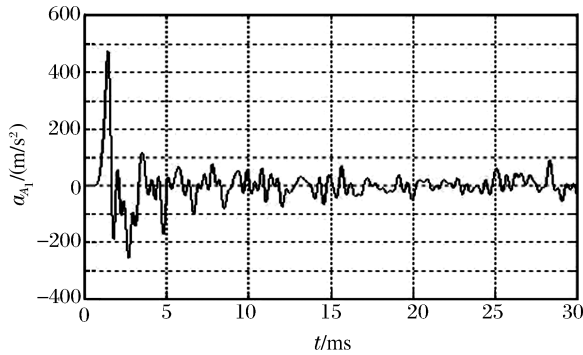


图 7 第一次试验、滤波后 A_1 点处的最大垂向加速度随时间的变化

Fig. 7 Maximum vertical acceleration histories at the point A_1 after filter for the experiment 1

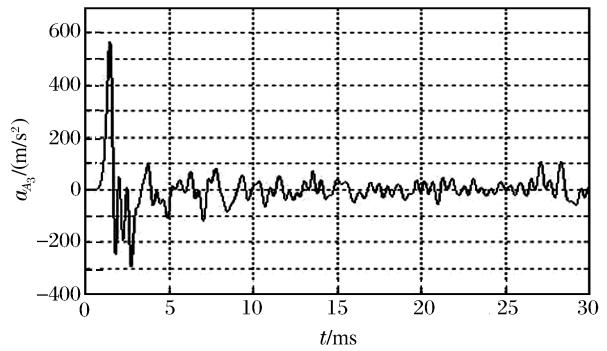


图 8 第一次试验、滤波后 A_3 点处的最大垂向加速度随时间的变化

Fig. 8 Maximum vertical acceleration histories at the point A_3 after filter for the experiment 1

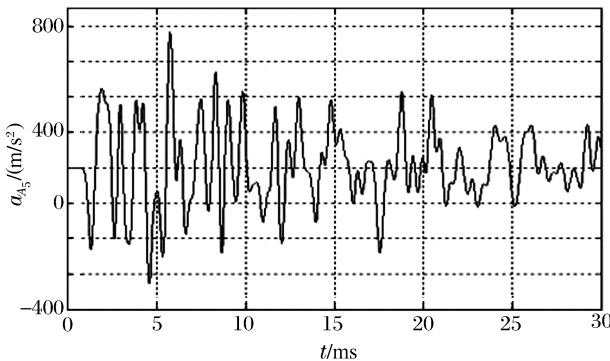


图 9 第一次试验、滤波后 A_5 点处的最大横向加速度随时间的变化

Fig. 9 Maximum horizontal acceleration histories at the point A_5 after filter for the experiment 1

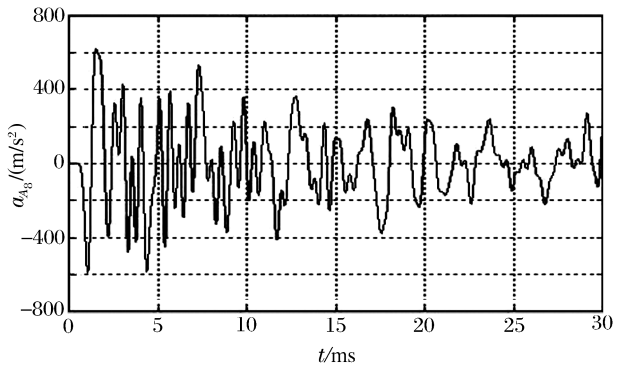


图 10 第一次试验、滤波后 A_8 点处的最大横向加速度随时间的变化

Fig. 10 Maximum horizontal acceleration histories at the point A_8 after filter for the experiment 1

图9、10中的加速度曲线记录了30 ms内的最大横向响应,及随时间逐渐衰减的振动。从中可算出迎爆面加速度计A₈的响应时间稍早于背爆面A₅,其幅值也高于背爆面A₅。

图10中背爆面处峰值出现的时间要晚于图9中迎爆面处加速度峰值出现的时间,延迟约3.8 ms,而该两点在壳体上最短距离为1.88 m,以冲击波在钢体中的传播速度计算,应力波到达背爆面处最快时间为3.77 ms,这两个时间重合表明以上分析是正确的;而第二次、第三次试验中由于药包离模型的距离较近,应力波还没有传到测点,加速度计已达到峰值,等应力波到达时只是引起曲线的小幅振荡。

运用后处理软件,可对上面的加速度曲线进行积分,得到测点的速度曲线,如图11、12所示。从曲线上可以看到速度响应是冲击波的作用结果,而气泡脉动的影响表现在加速度响应上。

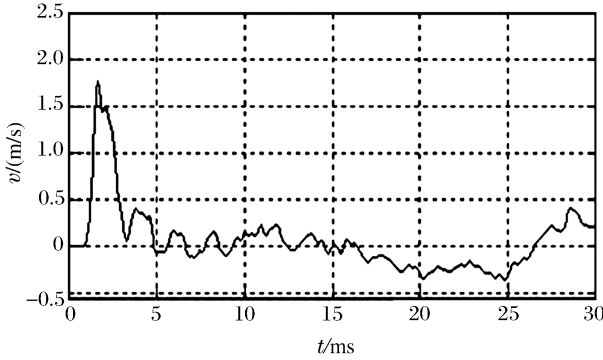


图11 A₁点加速度曲线积分后得到的速度曲线
Fig. 11 Velocity histories at the point A₁ from the acceleration integral

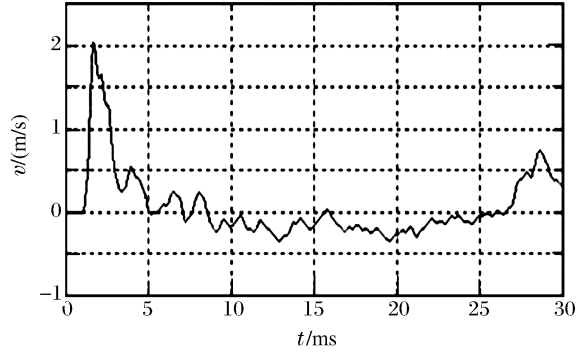


图12 A₃点加速度曲线积分后得到的速度曲线
Fig. 12 Velocity histories at the point A₃ from the acceleration integral

4 理论分析与计算

模型底板因有龙骨、肋骨、隔壁等加强,而被分割成多块四周加固的矩形板(虽然模型底部形状为半圆形,但在局部可近似为矩形板)。当水下冲击波入射到这些矩形板上时,开始矩形板表面几乎均向前运动,但四周加固的矩形板边界向前运动要小得多,因而在边界处产生挠曲波,在挠曲波和底部、边缘等处传来的绕射波到达之前,矩形板中心部分可以按无限大的自由刚性平板处理;当挠曲波到达以后,则大致上要按矩形板的基频振形运动了。

为简化分析,假定矩形板为无限大,因此可应用“泰勒”平板理论来计算壳体的壁压和峰值速度^[1,3-4,7-8]。如图13所示,一平面波作用到平板上,会产生一反射波,根据牛顿第二定律可以写出平板的运动方程

$$mdu/dt = p_i + p_r \tag{1}$$

式中: m 为单位面积的平板质量; u 为平板受人射波作用后的速度; p_i 为入射压力; p_r 为反射压力; v_i 为入射波质点速度; v_r 为反射波质点速度。

平板的速度可根据界面连续性条件有

$$u(t) = v_i(t) - v_r(t) \tag{2}$$

对一维平面波有 $p = \rho\alpha u$, 因此入射波压力和反射波压力可写成

$$\begin{cases} p_i = \rho_0 c_0 v_i \\ p_r = \rho_0 c_0 v_r \end{cases} \tag{3}$$

式中: ρ_0 为水的密度; c_0 为水中的声速。整理可得

$$p_r(t) = p_i(t) - \rho_0 c_0 u = p_m e^{-\frac{t}{\tau}} - \rho_0 c_0 u \tag{4}$$

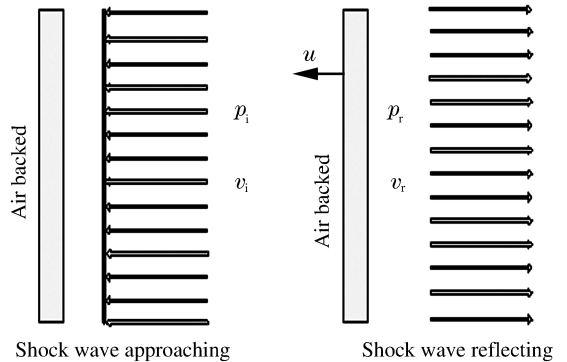


图13 受平面波入射的“泰勒”平板
Fig. 13 Taylor plate subjected to plan wave

平板的运动方程可改写为

$$mdu/dt + \rho_0 c_0 u = 2p_m e^{-t/\theta} \tag{5}$$

初始条件： $t=0, u=0$ 。方程(5)为一阶线性差分方程,其通解由下式表示

$$u = \begin{cases} \frac{p_m \beta}{\rho c (1 - \beta)} [e^{-\frac{\beta t}{\theta}} - e^{-\frac{t}{\theta}}] & \beta \neq 1 \\ \frac{p_m \beta t}{\rho c \theta} e^{-\frac{t}{\theta}} & \beta = 1 \end{cases} \tag{6}$$

式中： $\beta = 2\rho_0 c_0 \theta / m, t > 0$ 。

平板的总压力为

$$p_i + p_r = \begin{cases} p_m \left(\frac{2 - \beta}{1 - \beta} e^{-\frac{\beta t}{\theta}} - \frac{\beta}{1 - \beta} e^{-\frac{t}{\theta}} \right) & \beta \neq 1 \\ p_m e^{-\frac{t}{\theta}} \left(2 - \frac{t}{\theta} \right) & \beta = 1 \end{cases} \tag{7}$$

在上述方程中,随着 β 值的增大,或板的质量较轻时,总压力很快就会变成负压。由于水不能受拉,负压不可能存在。因此,当压力降到水的蒸汽压以下,出现局部空化。此时,板的压力被截断,平板的速度达到最大。

在不考虑水面截断、气泡迁移等物理效应对平板的影响时,方程(6)~(7)已成功地描述了经受水下爆炸时平板的早期动态响应。将“泰勒”平板理论扩展到船体壳板,就可得到壳板的峰值速度和壁压。经 MATLAB 编程计算出模型的壁压见图 14。图中 P_8 壁压测量峰值为 6.908 2 MPa,理论峰值为 9.010 4 MPa,理论计算值与测量值之比为 1.3。

从图 14 中可以看出,对平板的早期高频响应,计算值与实测值符合较好,误差不到 1%,但对平板的中低频响应则不能很好地预估,主要原因还在于该理论的前提假设与实际差别较大,首先平板不是无限大,其边界效应对其影响没有考虑,如果在计算模型中加入绕射波和挠曲波的影响,那么曲线将更好地与实测曲线吻合。

根据药包装药量和药包/模型的几何特性,利用方程(6)可以计算模型各测点的速度,图 15、16 即为理论计算图,对比图 11、12 的实测曲线,理论计算值远低于测量值。这是由于现场测量时没有加装机械滤波器,造成加速度的测量结果明显耦合了结构的高频响应,虽然经过软件的数字滤波,但实际上仍没有完全滤掉高频响应。

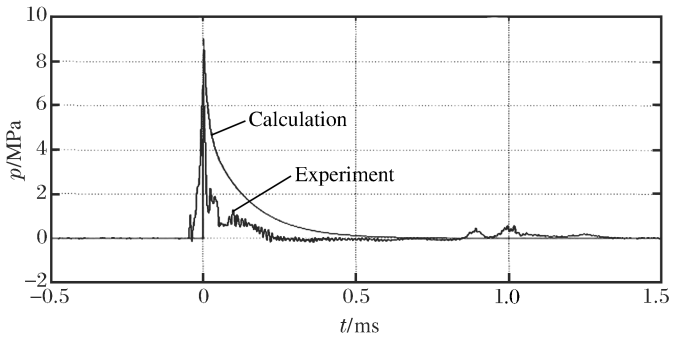


图 14 壳体 P_8 点壁压曲线对比图

Fig. 14 Comparison of the hull pressure histories at the point P_8 between experiment and calculation

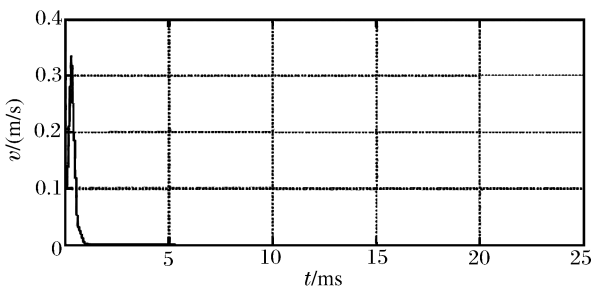


图 15 A_2 测点的速度计算曲线

Fig. 15 Calculated velocity histories at the point A_2

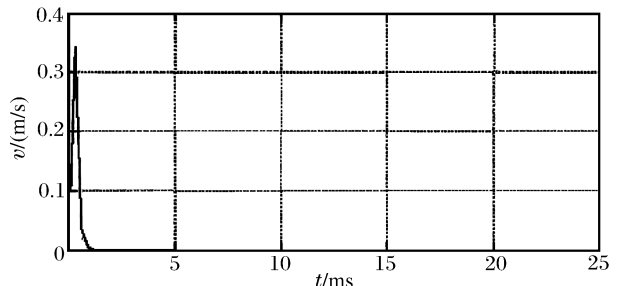


图 16 A_{10} 测点的速度计算曲线

Fig. 16 Calculated velocity histories at the point A_{10}

5 结 论

通过在不同冲击因子下的水下爆炸试验来考察舱段模型对水下爆炸的动响应,试验结果表明模型上各测点的加速度响应随着冲击因子的增大而增大,而在一次试验中,舱段模型中心处响应强度最大,其次是模型1/4处,再次是模型边缘处,这一结论也和实船爆炸试验结果相一致^[6]。另外,运用泰勒平板理论计算了龙骨冲击因子 $\beta=0.1\text{ kg}^{0.5}/\text{m}$ 时的壳体壁压和壳体峰值速度,并对比实测值,指出了泰勒平板理论的适用范围及误差原因。另外舱段模型试验结果表明,在工程上运用龙骨冲击因子 β 来设计水下爆炸试验工况和预测冲击强度是可行的。本文的研究成果对于今后的模型试验有一定指导作用。

参考文献:

- [1] 库尔·P. 水下爆炸[M]. 北京:国防工业出版社,1960.
- [2] 第六机械工业部船舶系统工程部. 某型实艇水下爆炸试验资料汇编[R]. 北京:中国船舶集团总公司,1982.
- [3] 顾王明,黄骏德,陈巧观,等. 圆柱壳承受水下爆炸作用时的动响应[J]. 海军工程大学学报,1990,(1):48-55.
GU Wang-ming, HUANG Jun-de, CHEN Qiao-guan, et al. The dynamic response of the cylindrical shell under underwater explosion[J]. Journal of Naval Academy of Engineering, 1990,(1):48-55.
- [4] 汪玉,华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [5] 程素秋. 水面舰船抗冲击数值仿真[D]. 北京:北京理工大学,2006.
- [6] Warren D R. The response of ships to underwater explosions[R]. ADA326738, 1997.
- [7] Hung C F, Hsu P Y, Hwang-Fuu J J. Elastic shock response of an air-backed plate to underwater explosion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31: 151-168.
- [8] Snay H G, Christian E A. The response of air-backed plates to high-amplitude underwater shockwaves[R]. NAVORD Report 2462, 1952.

Dynamical response measurement of a cabin model subjected to noncontact underwater explosion

CHENG Su-qiu^{*}, FAN Bao-shun, XUE Fei, WANG Wei

(91439 Unit, Chinese People's Liberation Army, Dalian 116041, Liaoning, China)

Abstract: Dynamical responses of a cabin model under far-field underwater explosion load were experimentally measured and theoretically analyzed. The scale model was designed by referring to a representative cabin of naval ships and was used to assess the shock response of common hull steel models. The shock motions of the model were recorded by the accelerometers mounted on the model bulkheads and deck plate. The geometry characteristics of the charge and model and the disposals of the accelerometers were presented. Researched results are helpful to the future model experiments.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; noncontact underwater explosion; cabin scale model

^{*} Corresponding author: CHENG Su-qiu
E-mail address: csq@4028@sina.com.cn
Telephone: 86-411-85888078