

doi: 10.7690/bgzdh.2015.02.002

## 基于声固耦合法的环肋壳水下冲击数值仿真试验

陈高杰, 沈晓乐, 王树乐, 程素秋

(中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041)

**摘要:** 环肋壳是潜艇耐压壳的常见结构形式之一, 水下冲击响应分析对潜艇抗水下爆炸设计具有重要意义。利用声固耦合法对由环肋圆筒和 2 个半球组成的小型潜艇耐压壳简化模型进行水下冲击数值仿真试验, 分析环肋壳在水下爆炸载荷作用下的瞬态动力响应。结果表明: 该方法在流固耦合面上会形成局部空化, 中截面上迎爆面的塑性应变小于背爆源, 可为潜艇耐压壳的优化设计提供参考。

**关键词:** 耐压壳; 声固耦合法; 水下冲击; 数值仿真

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation Test of Ring-Stiffened Hull Subjected to Underwater Shock Based on Coupled Acoustic-Structural Arithmetic

Chen Gaojie, Shen Xiaole, Wang Shule, Cheng Suqiu

(No. 91439 Unit of PLA, Dalian 116041, China)

**Abstract:** The ring-stiffened hull is one of the most common types of submarine pressure hull. Underwater shock response analysis is important for anti-shock design of submarine. The coupled acoustic-structural arithmetic was used to simulate and analyze the transient dynamic response of a submarine pressure hull with a ring-stiffened cylinder and two hemispherical ends, which experienced loading by an underwater explosion (UNDEX). The results showed that the distribution of local cavitations formed on the fluid-structure interface and the plastic strain at front position was smaller than at back position on the middle section. The numerical method presented in this paper can be used in designing stiffened optimum submersible vehicle.

**Keywords:** pressure hull; coupled acoustic-structural arithmetic; underwater shock; numerical simulation

### 0 引言

耐压壳是潜艇的重要组成部分之一, 通常占总重量的 1/4~1/2。小型潜艇耐压壳最常见的结构形式有单球、连球和两端半球中间环肋的圆筒等。考虑到内外构造、流线型、造价和组装易用性等因素, 两端半球中间环肋的圆筒结构性能更为优越<sup>[1]</sup>。炸药在水中被引爆时化学能的突然释放产生高温高压气体。冲击波压力超过空气中的冲击波且在水中产生气泡脉动, 对潜艇造成巨大威胁。潜艇耐压壳在水下爆炸作用下的响应分析对于确定不同武器对潜艇的威胁具有重要意义。

国内外相关研究通常将潜艇耐压壳简化为圆柱壳结构。贾宪振等<sup>[2]</sup>对深水环境下圆柱壳结构的爆炸冲击波响应进行了数值模拟研究, 考虑了静水压力产生的预应力的影响; 汪俊等<sup>[3]</sup>对加筋圆柱壳结构水下爆炸冲击波动响应进行数值模拟研究, 并利用试验数据对结果进行了验证; Jen<sup>[1,4]</sup>、Kwon<sup>[5-6]</sup>、Hooker<sup>[7]</sup>等通过试验与数值模拟手段对水中壳结构

受爆炸冲击波作用后的响应进行了分析。笔者在此基础上, 考虑气泡脉动压力和空化效应的影响, 基于声固耦合法, 研究了远场非接触水下爆炸载荷作用下小型潜艇耐压壳简化缩比模型的动态响应。

### 1 非接触水下爆炸载荷描述

非接触水下爆炸可分为近场水下爆炸和远场水下爆炸 2 类。当药包和目标之间的距离  $R$  小于第一次气泡脉动的最大半径  $R_{\max}$  时为近场水下爆炸, 当  $R$  大于  $R_{\max}$  时为远场水下爆炸,  $R_{\max}$  的经验计算公式为

$$R_{\max} = k\sqrt[3]{W - p_0} \quad (1)$$

其中:  $W$  是装药重量, kg;  $P_0$  是爆炸深度的静水压力,  $k=1.63$  是 TNT 当量。

对远场水下爆炸而言, 若要忽略自由水面效应的影响, 则距离水面的距离  $h_{\text{sur}}$  满足的条件可用经验公式表示为

$$h_{\text{sur}} \geq 9.0\sqrt[3]{W} \quad (2)$$

收稿日期: 2014-09-24; 修回日期: 2014-10-09

作者简介: 陈高杰(1981—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事水下爆炸仿真与评估研究。

冲击波压力时间函数  $p(t)$  由峰值压力  $p_{max}$  以指数函数形式衰减。根据库尔经验公式, 得

$$p(t) = p_{max} e^{-(t/\lambda)}, t \geq t_1 \quad (3)$$

其中:  $p_{max}$  是冲击波峰值压力;  $t$  是冲击波到达时间;  $\lambda$  是时间衰减常数。

$$p_{max} = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^4 \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$\lambda = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{A_2} \text{ (ms)} \quad (5)$$

其中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  是炸药常数。

气泡脉动压力及其相关参数的计算采用 Geers & Hunter 模型<sup>[8]</sup>来描述。

### 2 环肋壳动态响应的数值模拟

声固耦合法在进行水下爆炸冲击响应分析时, 把水的流体单元作为传播声介质处理。冲击波加载的压力时程曲线利用实验数据或者经验公式来计算。流体网格不会产生位移, 也不因爆炸快速膨胀或流体单元的压缩而产生大变形, 不会导致计算过程中断或结果不准确。通过总波公式计算流体单元总压力, 可考虑空化效应的影响。

假设环肋壳放置在水下 10 m 处, 受到 18.3 kgTNT 当量炸药在爆距为 7.62 m 处产生的冲击波作用, 如图 1 所示。环肋壳材料取 HY-100 钢, 屈服应力为 690 MPa, 强度极限为 793.5 MPa, 采用 Mises 塑性屈服条件, 材料为各向同性。

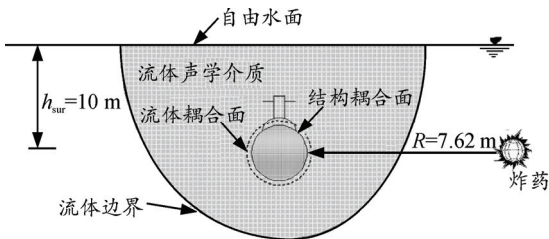
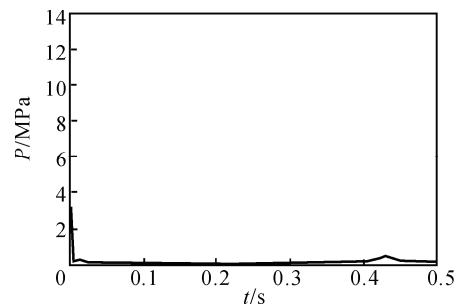


图 1 冲击载荷工况

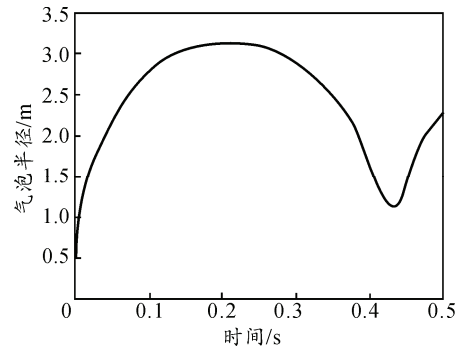
声学流体内总压力包括入射波压力和散射波压力。入射波由水下爆炸产生, 散射波由入射波与环肋壳相互作用产生。上述工况中入射波性质可由公式 (3)~公式 (5) 和 Geers&Hunter 公式确定, 时程曲线如图 2 所示, 用球面入射波的方式加载在流固耦合面上。冲击波峰值压力为 15.72 MPa, 时间衰减系数为 0.308 ms, 气泡脉动周期为 0.43 s, 气泡最大半径为 3.1 m。考虑气泡脉动对冲击响应的影响, 显式动力分析时间取 0.54 s, 时间步长取 0.524  $\mu$ s。

图 3 为包括内部 23 个等距加强筋的环肋壳及外部流体有限元模型(隐藏了部分单元)。环肋壳采用

S4R 四节点壳单元划分为 4 626 个节点和 4 624 个单元。壳单元法向指向外部流体。外部流体采用四节点 AC3D4 声学四面体单元划分为 11 727 个节点和 62 329 个单元。外部水域的外边界由中间圆柱面和两端半球面组成, 并设置为无反射边界。外部流体的特征半径取圆柱壳半径  $R_s$  的 6 倍。图 4 所示是外部流体和环肋壳的网格划分情况, 流体外边界的节点种子设置为 0.1 m, 对应于每个声波长分成 9.7 个单元。流体与环肋壳接触面节点种子设置为 0.04 m。对应于每个声波长分成 24.4 个单元。

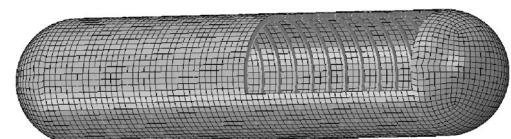


(a) 压力时间曲线

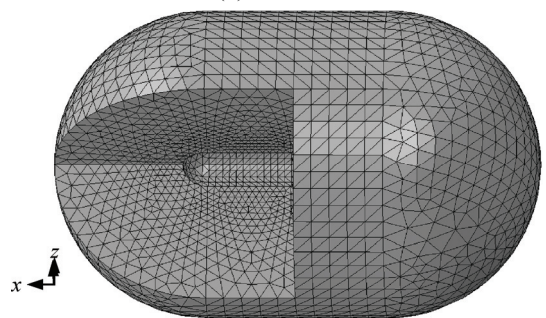


(b) 气泡最大半径时间曲线

图 2 入射波载荷时程曲线



(a) 环肋壳



(b) 外部流体

图 3 环肋壳及外部流体的网格划分

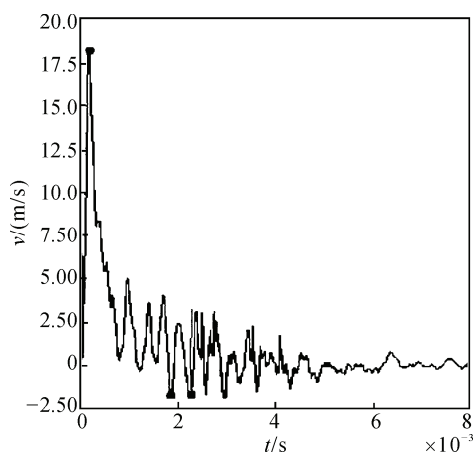


图 4 加载点速度时间曲线

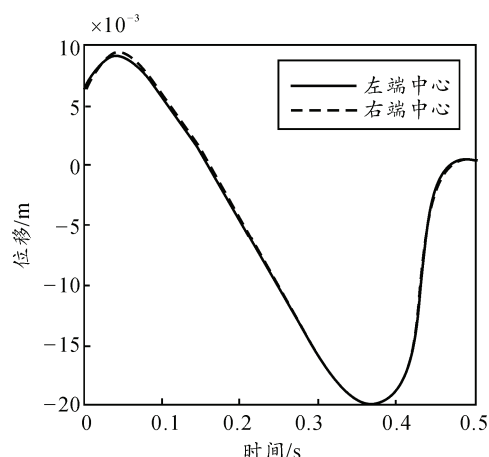


图 6 两端半球中点 y 方向的位移时间曲线

### 3 结果分析

#### 3.1 局部空化效应

当入射冲击波到达背空环肋壳结构表面时，发生反射产生负压，并衰减到静水压力时在流体和环肋壳之间产生局部空化效应，使环肋壳与水分离，以及在冲击波作用下改变了环肋壳的运动方向。当局部空化消失时，水重新作用到环肋壳上产生二次加载。

图 4 所示的环肋壳在加载点 B1 处的速度时间曲线可以清楚地观察到局部空化效应。冲击波作用到环肋壳后发生空化，大约在 2.0 ms 时刻结束，此时水重新作用到环肋壳上产生二次加载。

#### 3.2 结构响应模式

图 5 为两端半球中点的轴向位移时间曲线，表明周期响应与结构的轴向模态有关。图 6 所示的是两端半球中点冲击波传播方向 (y 方向) 的位移时间曲线，表明环肋壳有一个刚体位移，振动与固有弯曲模态有关。

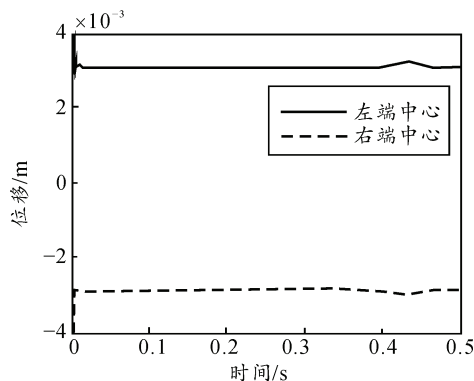


图 5 两端半球中点的轴向位移时间曲线

#### 3.3 等效塑性应变 (PEEQ)

图 7 为 B 截面 B1-B4 单元的 PEEQ 变化曲线。虽然冲击波首先到达 B1 单元，但 PEEQ 最小，B3 单元离炸药最远，但 PEEQ 最大，因为几何和加载条件对称。B2 和 B4 单元应变比较接近，图 8 为冲击波作用阶段 B3、C3 单元处的塑性应变，0~0.28 ms 内 C3 单元处于弹性阶段，0.28 ms 时开始屈服，首次出现塑性应变。此时塑性应变达到  $3.33 \times 10^{-3}$ ，并保持一段时间后再次增大。这是由于 0.28 ms 时冲击波加载消失，应变并没有恢复而产生永久变形。重新加载后材料的屈服强度提高，0.92 ms 时单元第 2 次出现塑性应变。0.96~1.24 ms 内没有出现塑性应变，此时材料处于弹性状态。1.32 ms 时第 3 次达到屈服，在循环加载过程中，C3 单元屈服了 3 次。材料的屈服强度随着加载次数不断提高。B3 单元的 PEEQ 比 C3 单元要大。

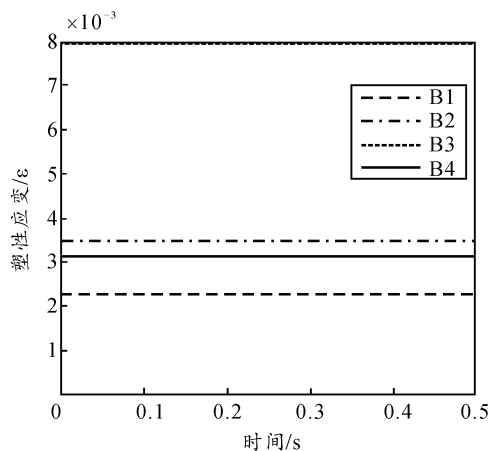


图 7 截面 B 等效塑性应变时间曲线

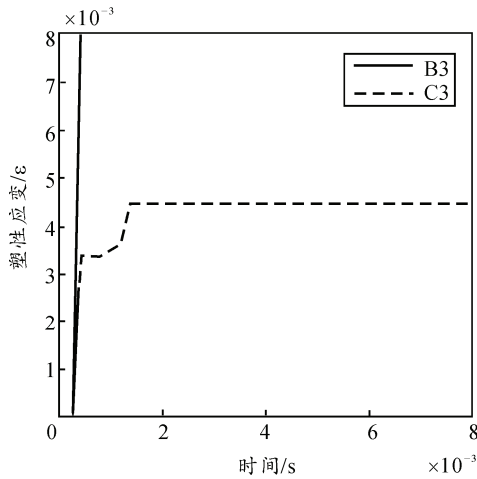


图 8 B3 与 C3 处等效塑性应变时间曲线

### 4 结论

笔者研究了水下爆炸作用下潜艇耐压壳简化缩比模型的瞬态响应，得到如下结论：当冲击波到达环肋壳后，局部空化效应在流固耦合面形成；结构周期响应和模态相关；两端面的等效塑性应变整体变化趋势相同。冲击波最先到达的单元最小，离炸药最远的单元最大。文中描述工况下爆炸产生的冲击波使环肋壳产生了屈服，但没有发生破坏。分析结果可应用于潜艇优化设计，从而提高抗水下爆炸冲击损坏的能力。

\*\*\*\*\*

(上接第 6 页)

[7] Scharf L L, Friedlander B. Matched subspace detectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8): 2146-2157.

[8] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 11-25.

[9] Bose S. Invariant Hypothesis Testing with Sensor Arrays[D]. a doctor dissertation of Cornell University, 1995: 12-117.

[10] Huaijin G. Review and re-examination of adaptive array and signal processing. In: IEEE Tutorial at the CIE International Conference on Radar[M]. Shanghai: IEEE, 2006: 1-11.

[11] Bose S, Steinhardt A O. Adaptive Array Detection of Uncertain Rank One Waveforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(11): 2801-2809.

[12] Hyung-soo K. Adaptive Target Detection in Radar Imaging[D]. Michigan: a doctor dissertation of Electrical Engineering Department in the University, 2001: 27-40.

[13] Kelly E J. An adaptive detection algorithm[J]. IEEE

### 参考文献:

[1] Jen C Y. Coupled acoustic-structural response of optimized ring-stiffened hull for scaled down submerged vehicle subject to underwater explosion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 52(2): 96-110.

[2] 贾宪振, 胡毅亭, 董明荣, 等. 深水环境下水下爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 160-165.

[3] Jia Xianzhen, Hu Yiting, Dong Mingrong. Dynamic response of cylindrical shell subjected to underwater explosion shock waves in deep water[J]. Journal of vibration and shock, 2008, 27(5): 160-165.

[4] 汪俊, 刘建湖, 李玉节. 加筋圆柱壳水下爆炸动响应数值模拟[J]. 船舶力学, 2006, 10(2): 126-137.

[5] Jen C Y, Lai W H. Transient dynamic response of multiple intersecting spheres deep-submerged pressure hull subjected to underwater explosion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 48(2): 112-126.

[6] Kwon Y W, Fox P K. Underwater shock response of a cylindrical subjected to a side-on explosion[J]. Computers & Structures, 1993, 48(4): 637-646.

[7] Kwon Y W, Cummingham R E. Comparison of USA-DYNA finite element models for a stiffened shell subject to underwater shock[J]. Computers & Structures, 1998, 66(1): 127-144.

[8] Hooker D T, Shin Y S. Damage response of submerged imperfect cylindrical structures to underwater explosion [J]. Computers & Structures, 1996, 60(5): 683-693.

[9] Geers T L, Hunter K S. An integrated wave-effects models for an underwater explosion bubble[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1584-1601.

[10] Kelly E J. An adaptive detection algorithm[J]. Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 22(1): 115-127.

[14] Robey F C, Fuhrmann D R, Kelly E J, et al. A CFAR Adaptive Matched Filter Detector[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(1): 208-216.

[15] Yowling G, Reed I S. An Improved Reduced-Rank CFAR Space-Time Adaptive Radar Detection Algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(8): 2139-2146.

[16] Kalson S Z. An Adaptive Array Detector with Mismatched Signal Rejection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(1): 195-207.

[17] Kraut S, Scharf L L, McWhorter L T. Adaptive subspace detectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(1): 1-16.

[18] Echard J D. Estimation of radar detection and false alarm probabilities[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(2): 255-260.