

水下爆炸冲击下环肋圆柱壳体结构动力学特性研究

刘晓欧 尹韶平 严光洪

西安精密仪器研究所

水下爆炸冲击下环肋圆柱壳体结构动力学特性研究

The structural dynamics research of the ring-stiffened cylindrical shell under the shock of underwater explosion

刘晓欧 尹韶平 严光洪

(西安精密仪器研究所)

摘要: 水下爆炸冲击下环肋圆柱壳体结构动力学特性研究对于水下航行器设计具有重要的指导意义。本文以 MSC. Dytran 有限元计算分析软件为平台,建立了环肋圆柱壳体结构的有限元计算模型、炸药模型以及水域模型,并进行了仿真计算,得出了炸药水中爆炸形成的冲击波的传播和作用过程,以及冲击波作用在圆柱体上的动态响应过程,分析了不同距离起爆炸药对圆柱体动态响应的影响。证明了应用 MSC. Dytran 计算水下爆炸结构响应工程上的可行性。

关键词: MSC. Dytran; 水下爆炸; 冲击波; 结构响应;

Abstract: It is very important to research the structural dynamics of the ring-stiffened cylindrical shell under the shock of underwater explosion for the design of underwater vehicle. Based on the finite element analysis software MSC. Dytran, with the ring-stiffened cylindrical shell model, explosive model, water model, this paper calculated the course of the blast of explosive, the shock response of the cylindrical shell, and analyzed the effect of different explosion distances. It shows that the calculation of the structural dynamics of the ring-stiffened cylindrical shell under the shock of underwater explosion with MSC. Dytran is viable in engineering.

key words: MSC. Dytran; underwater explosion; shock wave; response of structure

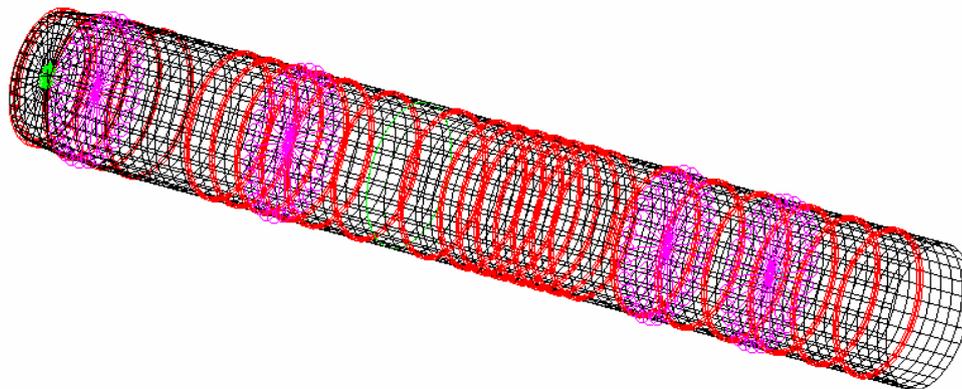
1 引言

环肋圆柱壳体广泛应用于各种结构,特别是水下航行体,主要是几段环向加筋圆柱壳体由楔环联结而成,因此水下爆炸冲击下环肋圆柱壳体结构动力学特性研究对于水下航行器设计具有重要的指导意义。但由于水下爆炸过程复杂,且结构动态响应过程属大变形、强非线性问题,同时还涉及到水下爆炸冲击波和圆柱体结构相互耦合作用问题,这使得分析环肋圆柱壳体在水下爆炸作用下的动态响应十分困难。本文则应用日趋成熟的 MSC. Dytran 大型商用有限元软件,进行了水下爆炸冲击波作用下的环肋圆柱壳体响应计算,得到了壳体的动力学特性,并从中总结了一套通用的水下爆炸冲击波作用下的环肋圆柱壳体响应计算分析的方法。

2 有限元模型

2.1 环肋圆柱壳体的有限元模型的建立

对环肋薄壁圆柱壳体，有限元建模时按结构的力学功能把壳体简化为 2D shell 板壳单元；环向加强筋可用 1D beam 梁单元建模；一些零部件对圆柱壳体刚度矩阵影响很小，但对质量矩阵影响很大^[20]，可用 0D 质量元建模，在不影响精度条件下简化建模。同时通过对壳体加强筋、楔环联结方式、集中载荷等问题进行一系列的简化处理，建立了合理的环肋圆柱



壳体有限元模型。(如图 1)

图 1 全雷有限元模型

2.2 炸药有限元模型

在 MSC. Dytran 程序中炸药的引爆过程就是根据 CJ 理论来模拟。通过起爆卡定义炸药的起爆点、爆轰波速和起爆时间，炸药某一单元的起爆时间则根据该单元到起爆点的距离和爆速确定。当该单元引爆后单元内的炸药就在一定的燃烧时间内反应释放出能量。炸药引爆以后，其爆轰产物的压力根据标准 JWL 炸药方程式来模拟各种炸药爆炸过程，它可以精确地描述在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特性。状态方程形式如下：

$$P = A\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B\left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right)e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\eta\rho_0 e$$

其中， $\eta = \frac{\rho}{\rho_0}$ ； e 为单位质量内能； ρ_0 为参考密度； ρ 为总体材料密度； A, B, ω, R_1, R_2

为常数。由于上述五个参数是与炸药组分、装药密度等多个因素有关，需由“圆筒试验”来确定，MSC. Dytran 帮助文件中也给出了部分常用炸药的五个参数值，但不完全，如果计算所应用炸药参数不确定，可以将其转换成密度为 $1.64e-9 \text{ Ton/mm}^3$ 的 TNT 炸药来进行计算，方法比较简单。

根据所应用炸药形状、质量、坐标位置分布建立炸药有限元模型。

2.3 水域有限元模型

2.3.1 网格划分

水单元紧密地填充在炸药单元周围，形成一个连贯的欧拉场，使炸药起爆后所产生的能量可以通过水介质传递作用在圆柱体结构上。由于水下爆炸模型很大，水单元又占据着其中的绝大部分，所以合理地建立并划分水域模型对整个模拟过程起着关键作用。

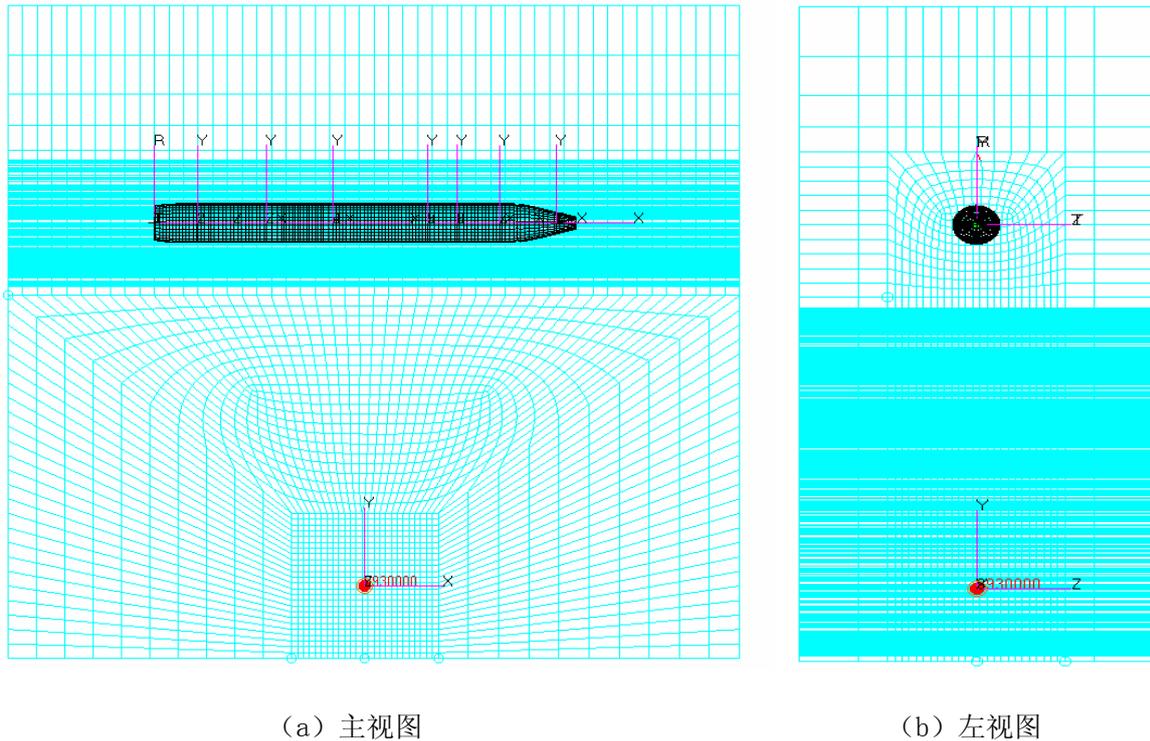


图 2 炸药在雷体重心正下方起爆水域有限元模型

本文中依据炸药与结构的距离, 兼顾考虑圆柱壳体受到冲击的刚性位移以及冲击波的反射, 建立了以爆炸源为中心, 冲击波传播水域梯形区域过渡, 圆柱壳体周围的网格划分密集, 冲击波经过圆柱壳体后网格密度随坐标值逐渐加大的长方形水域有限元模型 (见图 2), 这样一方面控制了三维模型的规模, 使计算时间可以接受, 另一方面也保证了所关心区域的精度。

2.3.2 边界条件确定

本文计算网格的边界是欧拉场的边界, 如果不对边界条件进行处理, 而应用固定壁边界, 为防止冲击波在固壁的反射带来计算误差, 必须将计算时间内冲击波传播距离内的水域全部建出, 即使周围水域网格密度很大, 还要建立几十万甚至上百万的网格, 使得计算无法进行或时间无法忍受。

因此流场边界均定义为水介质可流出的无反射边界, 使得冲击波的传播基本上不受自由界面反射的稀疏波的影响, 并且避免了冲击波在欧拉网格内产生挤压。在 Dytran 软件中有三种定义流场边界条件的方法, 分别为流进型、流出型、流进流出型。根据文中的实际情况我们可以选择后两种, 但是经过实际计算后得到的水单元的压力曲线, 我们发现流进流出型边界会产生比较严重的冲击波反射, 对计算结果有很大影响, 因此只建立包含炸药与雷体的部分水域, 在论文中将水域六个自由面定义流出型边界来模拟无限水域, 在保证仿真效果的基础上大大减小计算规模。

2.3.3 流固耦合方法

耦合的目的是为了让欧拉网格与拉格朗日网格发生相互关系, 即液体固体之间产生相互

作用。首先要做的是在拉格朗日网格上创建封闭的耦合面，这个面用来在欧拉域和拉格朗日域之间传递力。对于欧拉网格中的材料流动来说，该面是其边界，同时，欧拉单元内的压力使得相邻的耦合面受到力的作用，从而使拉格朗日单元发生变形。在 MSC. Dytran 中有两种耦合方式：一般耦合和任意拉格朗日-欧拉耦合，可以根据具体计算问题选择具体的耦合方式。本文中由于结构复杂，任意拉格朗日耦合方式实现比较困难，因此应用一般耦合方式。

根据 Dytran 内部要求，耦合面应当是封闭的，而且必须具有正体积，这就要求所有面段的法线方向指向外面。为了形成封闭的曲面，有时必须建造一些虚拟单元，人为地扩展耦合面。由于虚拟单元的节点在空间不定，建造虚拟单元时应当注意保证：拉格朗日模型在发生变形和运动之后，封闭曲面包含的仍然是正体积。在本文中，由于圆柱体后端面不是封闭结构，所以建立了虚拟单元来满足耦合面的要求。

3 水中冲击波仿真结果

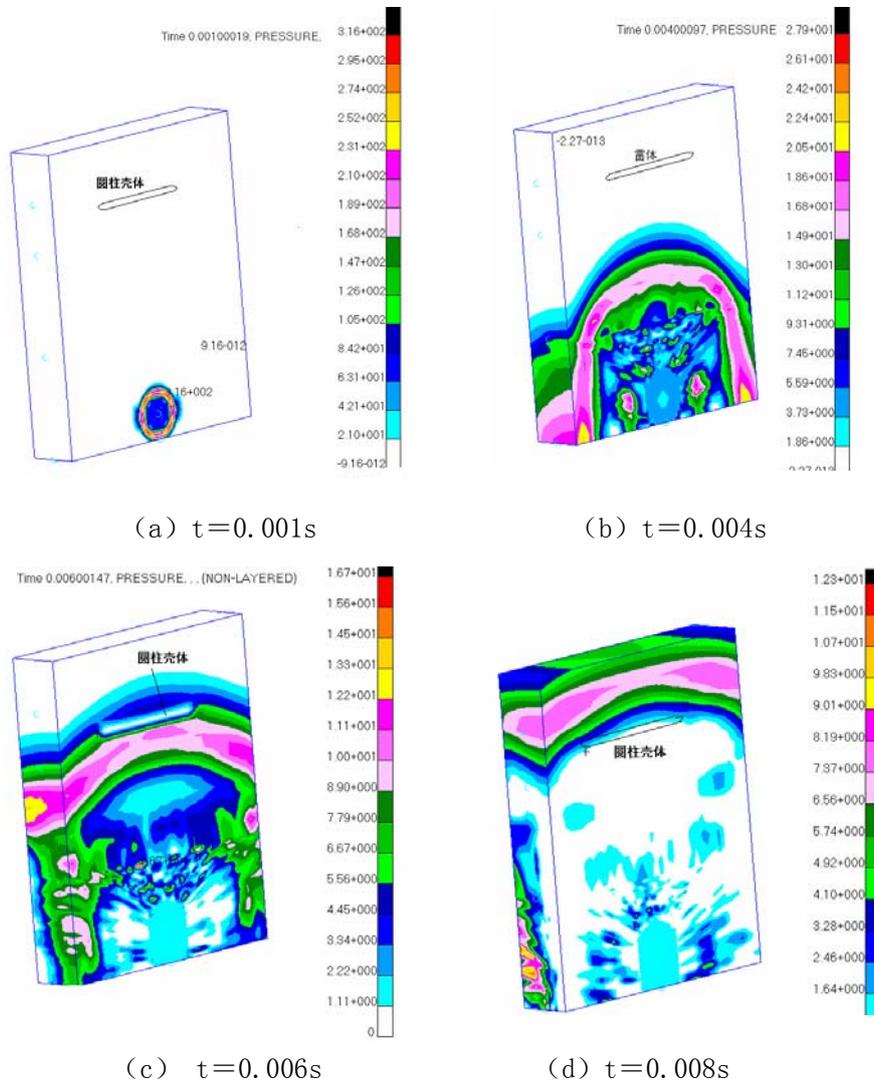


图3 爆炸源在雷体重心正下方8米，不同时刻冲击波压力图

对于在无限水介质中，当爆轰波阵面到达水的接触面时，在水中产生冲击波，而向爆轰产物内反射稀疏波。稀疏波向中心汇集，到达中心就发生反射，反射冲击波到达接触界面折

射形成冲击波又向水内和爆轰产物中传播, 这种过程可持续重复, 但冲击波强度越来越小。图 3 是爆距为 8 米, 爆炸源在雷体重心正下方这种现象的为了便于看到冲击波的传播情况, 取水域的一半观察结果。从图中可清晰直观地看到在不同时刻冲击波在水中的传播图像, 从不同的颜色上可以区分出在某一时刻距离爆炸中心不同位置的的压力大小。由图可见, 冲击波刚开始加在球面边界时, 并不是很均匀, 这是由于在冲击波传播方向上单元长度不完全相同导致。随着冲击波向前传播, 分布逐渐均匀。当冲击波传到水面上时, 由于定义了自由边界, 压力迅速降低, 但水下部分继续向前传播。当冲击波扫过雷体后, 从界面流出。

4 环肋圆柱壳体结构响应结果

4.1 壳体响应过程

以爆距 2 米, 炸药在圆柱壳体重心正下方起爆为例, 分析环肋圆柱壳体响应整个过程。图 4 为圆柱壳体迎爆面各节点附近水节点压力峰值曲线, 图 5 为各节点压力达到峰值时刻的曲线, 两图横坐标均为节点距左端面的距离值。从压力凸线得知重心点附近压力值最大, 并向两端面逐渐减小; 时间凹线则表示球面冲击波最先到达重心点附近的点, 然后逐渐向两端面部扩散; 分析原因主要是炸药在重心点下方起爆, 重心点即为炸药与圆柱壳体直线距离最短处, 因此, 爆炸产生的球面冲击波最先到达重心点, 并引起最大的冲击响应, 随着冲击波继续传播, 冲击波强度减小, 壳体两端响应也随之减小。两图中表示的趋势与冲击波传播理论相一致, 结果正确。

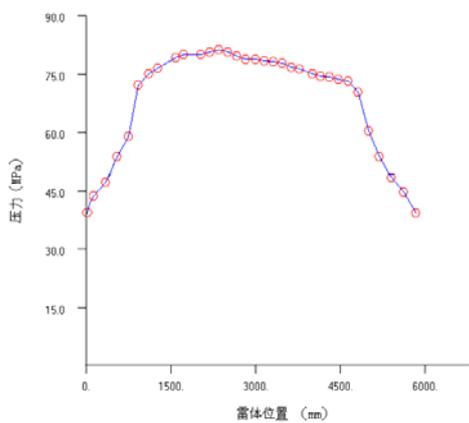


图 4 体迎爆面各节点附近压力峰值曲线

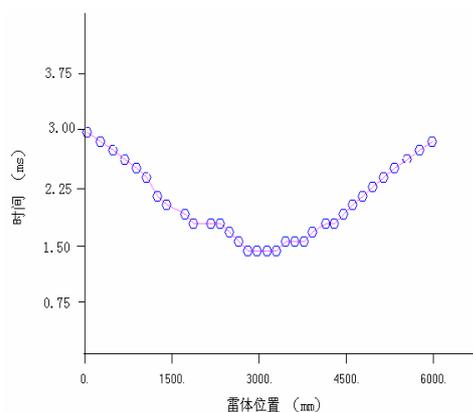


图 5 体迎爆面各节点达到峰值时间

在水下航行器设计过程中, 除考虑壳体受水下爆炸冲击发生破裂漏水, 轴承扭曲等严重的结构破坏, 还要重点考虑电子元器件的冲击响应。由于本文中只建立了外部的壳体 2D 结构, 无法直接得到各电子元器件的响应结果, 因此将元器件位置处相应的节点响应等效为该电子元器件的冲击响应。

如图 6 为圆柱体迎爆面上某节点附近水单元中压力随时间变化的曲线, 冲击压力从 1.1ms 左右开始爬升, 达到峰值压力 78MPa 后, 于 2.4ms 降到最小值, 正压作用时间即脉冲时间为 1.3ms。之后, 由于流体与雷体结构的相互作用, 水压又再次升高, 出现二次加载现象。图 7 为该节点附近圆柱壳体节点的加速度曲线, 与压力曲线变化趋势相同, 时间上相差 0.3ms 左右为壳体的响应滞后时间。据此, 可以根据各种标准, 判断电子元器件的破坏情况。

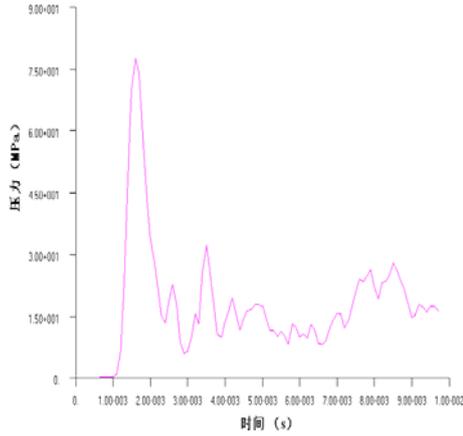


图 6 雷体附近水域的冲击波曲线

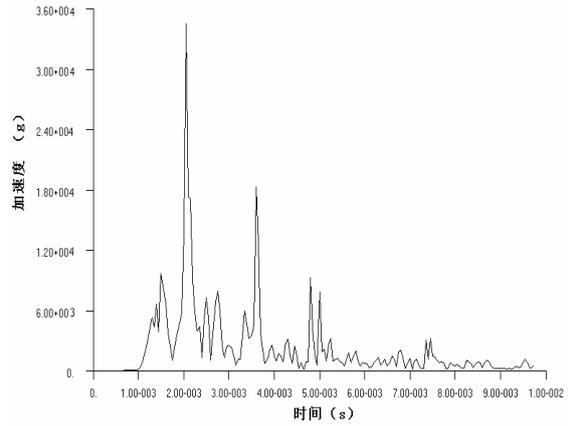


图 7 相应节点的加速度曲线

4.2 迎爆面、侧爆面、背爆面上节点的响应情况

迎爆面即圆柱壳体正对爆炸冲击波来袭方向的一面；背爆面即圆柱壳体上背对爆炸冲击波来袭方向的一面；侧爆面是在圆柱壳体上介于迎爆面、背爆面中间的面。具体位置见图 8，A 为迎爆面上的点，BC 为两侧爆面上的点，D 为背爆面上的点。

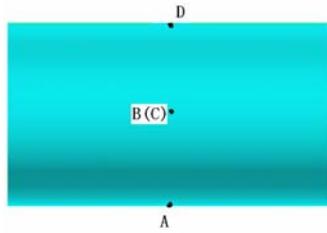


图 8 A、B、C、D 点位置示意图

图 9 为 5 米爆距圆柱某段壳体受水下爆炸冲击波作用的变形过程，分别取了四个不同的时间点，图中壳体的位移包括刚体位移和塑性运动位移。从图中可以看出壳体对冲击波的响应过程。雷体迎爆面作为冲击载荷的主要承受者其加速度响应最大，弹性波自下而上充分地传递，变形位移最大出现在图中迎爆面 A 点，且出现了明显的内凹变形，接着随着位移场向壳体两端和四周扩散最后覆盖整个壳体。

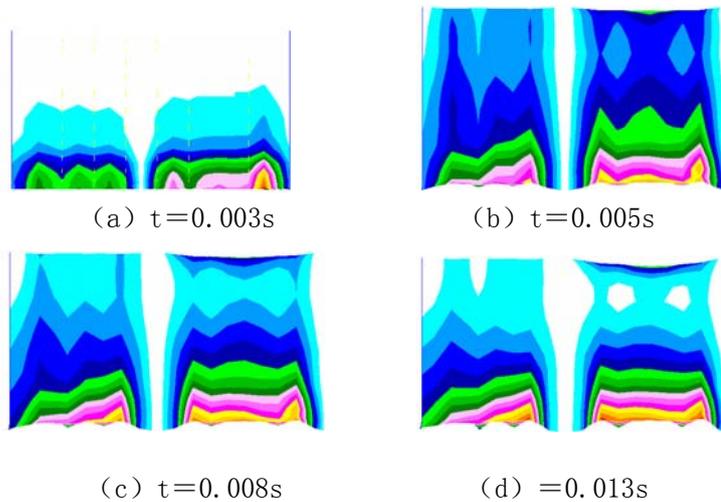


图 9 5 米爆距壳体某段变形过程

从图 9 中还可以看出：A 点的等效应变明显大于 B、C、D 三点。对于迎爆面破坏的主要因素显然是冲击波的作用，由于水中爆炸冲击波的传播呈指数衰减形式，经过绕流，冲击波达到壳体的侧爆面时，冲击波峰值压力已经衰减了很多，因此侧爆面的破坏主要是由于壳体的总体变形以及迎爆面单元在冲击压力作用下向壳体内部变形，导致侧爆面单元向外突出，再加上水压力的联合作用而造成的。对于背爆面，该处的等效应变与侧爆面的等效应变没有绝对的大小关系，这主要是因为应力波在结构中的传播在背爆面汇合的原因。而且壳体在冲击波的作用下整体弯曲也是背爆面破坏的原因之一。另外由于球面冲击波的对称性，两侧爆面上的节点的应力应变都比较一致。A、B、C、D 具体等效塑性应变峰值见表 1。

表 1 壳体 A、B、C、D 四点等效塑性应变峰值

节点号	A 节点	B 节点	C 节点	D 节点
等效塑性应变 (%)	2.2	1.4	1.4	1.5

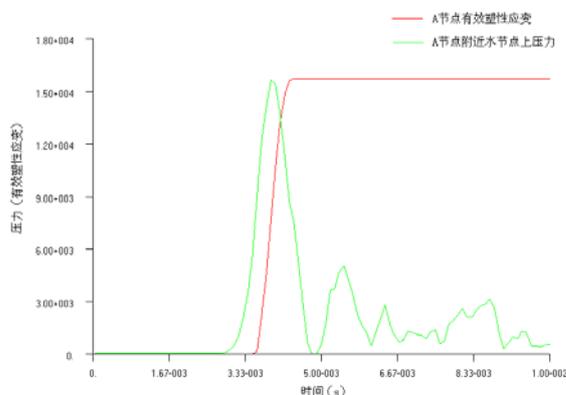


图 10 5 米 A 节点等效应变与压力比较图

图 10 给出 A 点的等效应变以及紧靠节点的水单元压力随时间的变化曲线。可以看到在 $t=4\text{ms}$ 左右压力已经达到了峰值，但是结构弹塑性变形并没有达到最大。而当压力开始进入卸载阶段时，结构弹塑性变形却达到最大，表明结构的动态响应有一定的时延，时延的具体值计算比较复杂，在文中不进行进一步的计算。

4.3 环肋加强筋对全雷响应结果的影响

以某两段壳体：一段分布大量加强筋，另一段无加强筋为例，分析加强筋对冲击响应的影响。图 11 为 2 米爆距内部分布大量的加强筋某段壳体等效应力云图，可以看出加强筋位置产生比较规则带状应力集中，这主要是加强筋的存在使得结构较强，因而承载较大。图 13 为此时刻沿壳体纵轴方向迎爆面各点上加速度峰值曲线，可以看出：有加强筋分布的位置加速度峰值有所下降，等效应变也减小很多。

对于图 12 显示 2 米爆距内部没有加强筋支撑某段壳体位移云图，可以看出各节点产生位移均较大，等效应变也比有加强筋情况增大，抗爆能力比较差。

由此可以看出：加筋是增强结构体抗爆能力的有效方法，并且增加筋距密度，对减小等效应变有很大贡献。

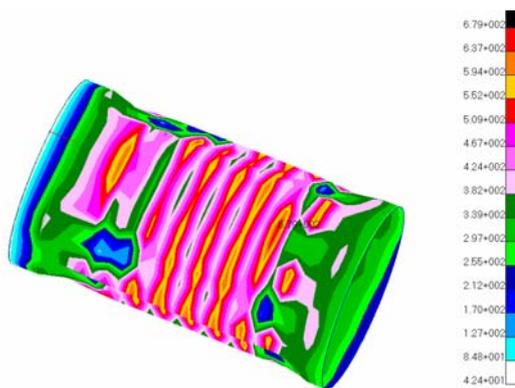


图 11 某段有加强筋壳体等效应力云图

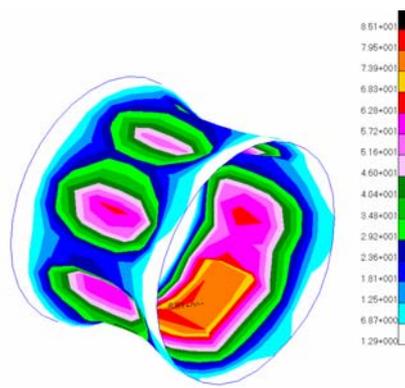


图 12 某无加强筋壳体位移云图

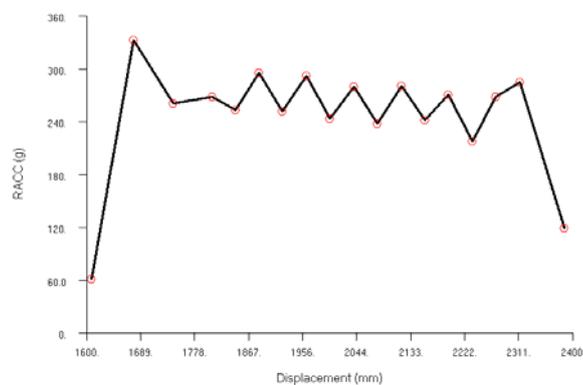


图 13 有加强筋壳体迎爆面各节点加速度峰值曲线

5 不同爆炸距离对冲击响应的影响

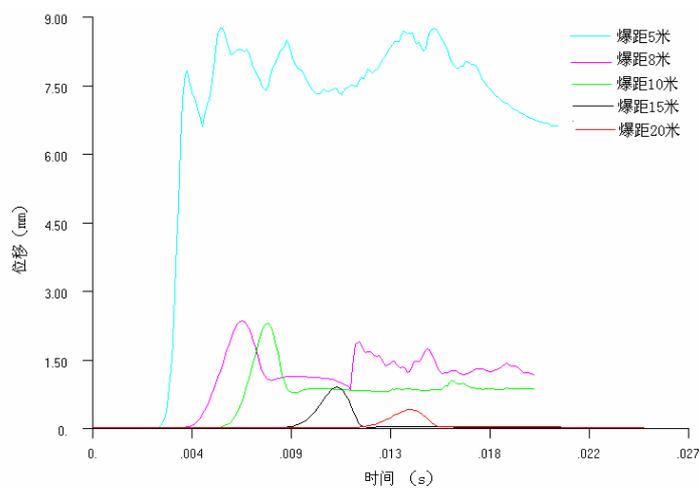


图 14 不同爆距某节点位移随时间变化曲线比较图

炸药起爆点与雷体重心之间的直线距离称为爆距，爆距不同将使来袭鱼雷产生的响应结果大不相同。本文分别计算了雷体水下深度为 0 米时，爆距为 2 米、3 米、5 米、8 米、10 米、13 米、15 米、16 米、17 米、20 米的情况下鱼雷的响应情况。随着爆距增大，节点位移曲线、加速度曲线、等效应力曲线、等效塑性应变曲线的趋势均没有本质的变化，只是随着距离的增大，到达环肋圆柱壳体上的能量降低，产生的位移、速度、加速度的响应值以及壳体的等效应力、等效塑性应变峰值逐渐减小（见图 14、15、16）。随着爆距的增加，残余变形逐渐减小，在爆距 20 米时，刚性位移与残余变形之和为 0.01mm，可近似为 0。

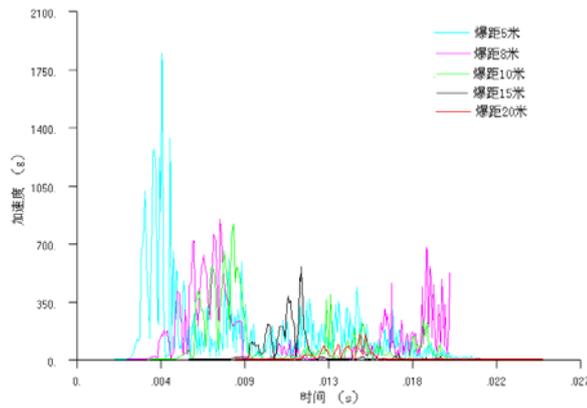


图 15 不同爆距某节点加速度随时间变化曲线比较图

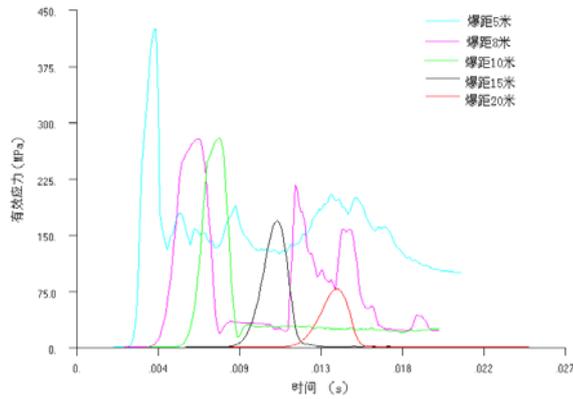


图 16 不同爆距某节点等效应力随时间变化曲线比较图

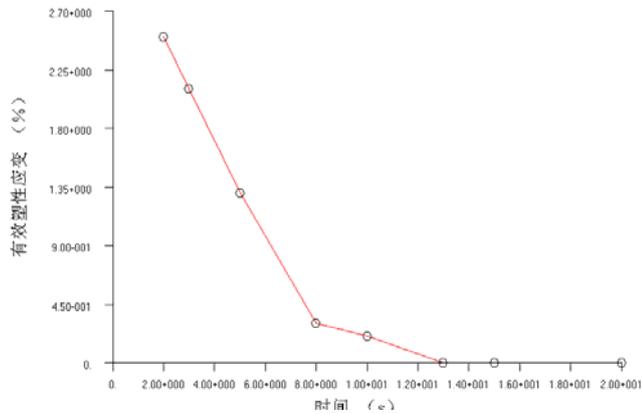


图 17 不同爆距时壳体某节点等效塑性应变峰值曲线图

从图 17 中可以看出：随着爆距增加，壳体产生的等效塑性应变迅速下降，当爆距 13 米后，壳体没有产生等效塑性应变，即壳体不再产生不可恢复的塑性变形。比照壳体应用材料的最大塑性应变值，根据计算得到的壳体产生等效塑性应变曲线，可以判断壳体的毁伤情况，这对水下航行体设计及应用有着重要意义。

6 结论

(1) 应用 MSC. Dytran 软件，可以从等效应力、等效塑性应变，响应位移，响应速度，响应加速度等不同角度进行水下爆炸冲击下环肋圆柱壳体结构动力学特性研究，计算结果趋势正确，与经验公式结果吻合。

(2) 应用 MSC. Dytran 软件，可以将流固耦合原理应用到水下爆炸下环肋圆柱壳体结构动力学特性研究中，改进了将流体冲击波压力作为“预先确定”的载荷作用在结构上计算响应的传统算法，为今后类似课题的计算工作开辟了新的思路。

(3) 在欧拉网格边界条件选择时，一定要注意边界反射对计算结果的影响，在考虑实际情况的同时，尽量选择反射小的边界条件类型进行定义。如果硬件条件允许，可以将全部水域建出，避免由边界条件简化产生的结果不准确。

7 参考文献

- [1] COLE. 水下爆炸[M]. 北京：国防工业出版社，1960
- [2] 卞文杰，万力. 瞬态动力学 CAE 解决方案 MSC. Dytran 基础教程. 北京：北京大学出版社，2004
- [3] 汪玉，华宏星. 舰船现代冲击理论及应用. 北京：科学出版社，2005
- [4] 袁卫峰，吴连元. 壳体结构受水下爆炸的危害距离讨论. 福州大学学报，1994 年，第 22 卷第 4 期
- [5] 张振华，朱锡. 水下爆炸载荷作用下自由环肋圆柱壳的非线性动态响应研究. 第七届全国爆炸力学学术会议文集，昆明，中国力学学会