文章编号:1000-5773(2008)02-0208-07

深水爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应影响因素的数值模拟研究*

贾宪振[1],胡毅亭[1],董明荣[2],许学忠[2],刘家骢[1]

(1. 南京理工大学化工学院,江苏南京 210094;
2. 西北核技术研究所,陕西西安 710024)

摘要:运用通用有限元程序 ABAQUS,对圆柱壳在深水爆炸冲击波作用下的动态响应进行了数值模拟,研究了圆柱壳所处深度、爆心方位和预应力对于圆柱壳动态响应的影响。研究结果表明:在同样的水下爆炸冲击波作用下,随着深度的增大,圆柱壳的毁伤逐渐加重,而且响应过程中的变形逐渐增大,低频响应阶段的速度曲线趋于平坦;爆距不变时,不同的爆心方位在不同深度上的毁伤效果存在一定差异;预应力的存在使圆柱壳的毁伤加重,并且预应力对圆柱壳动态响应的影响与爆心方位有关。研究结果对于潜体结构的生命力评估具有一定参考价值。

关键词:爆炸力学;动态响应;数值模拟;圆柱壳;深水爆炸
中图分类号:O383.3 **文献标识码**:A

1 引 言

研究圆柱壳在水下爆炸冲击波作用下的动态响应,对于潜艇结构的抗爆防护具有重要的意义。Fox[1]利用 LS-DYNA/USA 程序模拟了远场水下爆炸冲击波对圆柱壳的毁伤效应,Kwon[2]提出了圆柱壳在水下爆炸冲击波作用下的动态响应的模型简化方法,并与 LS-DYNA/USA 的计算结果进行了比较,Lam[3]提出了双层圆柱壳在平面冲击波作用下的动态响应的流固耦合模型,Woyak[4]利用 ABAQUS 程序模拟了水下爆炸冲击波对圆柱壳的毁伤效应,汪俊[5]等利用 ABAQUS 程序研究了加筋圆柱壳的水下爆炸动响应规律。

在以往的研究中,一般不考虑静水压力的影响,研究结果只适用于浅水。随着现代潜艇的航深不断增大,静水压力和结构预应力必然导致结构在深水爆炸冲击波作用下的毁伤效果与浅水中不同,在浅水中得到的结构响应规律不能照搬到深水当中去。因此,研究圆柱壳在深水爆炸冲击波作用下的动态响应就有了现实的意义。本研究利用 ABAQUS 程序研究了深水中的圆柱壳在水下爆炸冲击波作用下的动态响应,分析了圆柱壳所处深度、爆心方位和预应力对圆柱壳动态响应的影响,得出了一些规律性的认识。

2 模拟方法与算法

对于深水中的圆柱壳,在其遭受水下爆炸冲击波作用之前,流场已经在圆柱壳外表面施加了一定的静水压力,这会使圆柱壳中出现预应力。而当圆柱壳遭受水下爆炸冲击波作用时,施加在壳体表面的静水压力和结构中的预应力是同时存在的,因此,研究深水爆炸冲击波作用下圆柱壳的动态响应,必须考虑静水压力和预应力的影响。由于结构预应力需要通过静力分析才能得到,所以这就需要采用静力分

* **收稿日期**:2007-05-13;**修回日期**:2007-09-20
作者简介:贾宪振(1982—),男,博士研究生,主要从事水下爆炸毁伤效应研究. E-mail:jiaxz1027@yahoo.com.cn
通讯作者:胡毅亭(1973—),男,博士,讲师,主要从事安全科学与安全工程研究. E-mail:huyiting@hotmail.com

析和动力分析相结合的方法进行研究。ABAQUS 程序包括 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 两个主分析模块,前者能够进行静力分析,后者则适合显式动力分析,而且 ABAQUS 程序提供了在主分析模块之间传递计算结果的功能,从而可以处理这种包含不同分析类型的问题。本研究中的圆柱壳的静力分析采用 ABAQUS/Standard 完成,计算得到圆柱壳在静水压力作用下的预应力场,然后将静力分析结果输入到 ABAQUS/Explicit 当中,以此作为动力分析的初始条件,并在动力分析过程中考虑静水压力的影响。

深水环境中的圆柱壳在受到静水压力的作用时发生变形,当变形在弹性范围内时,圆柱壳的有限元方程可以由弹性静力学有限元法得到

$$\boldsymbol{K}\{u_{\mathrm{h}}\}=\{f_0\} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{K}$ 为结构刚度矩阵,$\{u_{\mathrm{h}}\}$为位移,$\{f_0\}$为静水压力所产生的载荷。

静水压力所产生的载荷由流体静力学得到:

$$f_0=\int_A \rho g h \,\mathrm{d}A \tag{2}$$

式中:A 为圆柱壳的外表面,ρ 为水的密度,取 1 000 kg/m^3,g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2,h 为圆柱壳所处深度。

位于水中的圆柱壳受到冲击波作用时发生振动,使其周围的流场发生变化,这种变化反过来又使圆柱壳所受的冲击波载荷发生变化,这就形成了反馈的结构和流场相互作用的流固耦合过程。流固耦合是水下爆炸分析中的难点问题,通常得不到解析解,所以需要采用数值方法进行研究,常用的数值方法主要包括有限元法、边界元法、DAA 法等。ABAQUS/Explicit 通过有限元法来模拟水下爆炸冲击波作用下结构与流体的流固耦合作用,当考虑静水压力时,结构有限元方程可由结构动力学有限元法得到

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}\{\ddot{u}\}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}\{\dot{u}\}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}\{u\}=\{f_1\}+\{f_0\} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}$、$\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}$ 分别为圆柱壳结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,$\{u\}$为结构的位移,$\{f_1\}$为入射波压力和反射波压力所产生的载荷。

$\{f_1\}$由下式得到

$$\{f_1\}=-\boldsymbol{S}_{\mathrm{fs}}^{\mathrm{T}}(\{p_{\mathrm{i}}\}+\{p_{\mathrm{s}}\}) \tag{4}$$

式中:p_{i} 为入射波压力,也就是水下爆炸冲击波载荷,p_{s} 为散射波压力,$\boldsymbol{S}_{\mathrm{fs}}$为转换矩阵,转换矩阵定义在流固作用面上,用于耦合流体和结构的自由度。

流体有限元方程由下式给出

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{f}}\{\ddot{p}\}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{f}}\{\dot{p}\}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{f}}\{p\}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{fs}}T \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{M}_{\mathrm{f}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{f}}$ 和 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{f}}$ 分别为流体的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,T 为流体动力,p 为总压力。

p 的计算公式为

$$p=p_{\mathrm{i}}+p_{\mathrm{s}} \tag{6}$$

由(3)式、(4)式、(6)式得到结构有限元方程的另一形式

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{s}}\{\ddot{u}\}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{s}}\{\dot{u}\}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}\{u\}=-\boldsymbol{S}_{\mathrm{fs}}^{\mathrm{T}}\{p\}+\{f_0\} \tag{7}$$

(5)式和(7)式是耦合的,通过求解这两个式子就可以计算圆柱壳结构的动态响应。

3　有限元模型与模型验证

本研究中的圆柱壳模型取自文献[1],圆柱壳长度为 1.067 m,直径为 0.305 m,壳体厚度为 0.635 cm,圆柱壳两端的端盖厚度为 2.54 cm,壳体材料为铝合金,弹性模量为 75.6 GPa,泊松比为 0.33,屈服应力为 300 MPa。

3.1　静力分析模型

静力分析模型中只包含圆柱壳,采用壳单元模拟。模拟时圆柱壳水平放置,受到静水压力的作用,静水压力作用在圆柱壳的外表面上。

3.2 动力分析模型

图 1 是动力分析有限元模型示意图。为了便于说明问题,图中只给出了二分之一水域模型,圆柱壳位于有限元模型的中心,并被水域包围,水域中部为圆柱形,两端为半球形,圆柱体和半球体的直径取为 1.83 m,并采用四面体声单元划分网格,与圆柱壳相邻处流场的网格尺寸为 4 cm,最外层网格尺寸为 10 cm,并在流场边界处设置了无反射边界条件。圆柱壳与静力分析中的相同,圆柱壳中轴线和爆心位于同一水平面,爆心位于圆柱壳中轴线的垂直平分线上,爆距为 7.62 m,爆距是从爆心到圆柱壳的最短距离。由于常温下的铝合金为典型的应变率不敏感材料,所以在进行动力分析时不考虑铝合金的应变率效应。

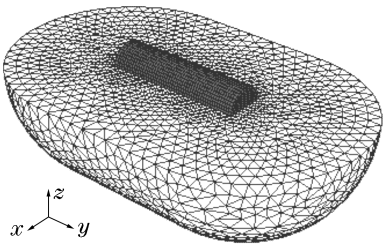


图 1 动力分析有限元模型

Fig. 1 Finite element model of dynamic analysis

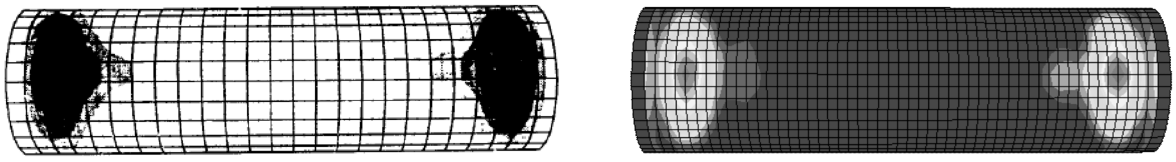
3.3 冲击波载荷

在利用 ABAQUS/Explicit 计算水下爆炸问题时,水下爆炸冲击波载荷是先在前处理中添加,然后计算时将冲击波载荷直接加载到结构上去的。作为水下爆炸冲击波作用下结构动态响应分析的基础输入,水下爆炸冲击波载荷能否准确描述直接决定着模拟结果的精度。对于特定的水下爆炸问题,最好能通过试验得到水下爆炸冲击波自由场压力时程曲线,然后将其添加到程序当中来计算结构的动态响应,本研究就是采用了这种方法。本研究模拟时采用的冲击波载荷取自文献[1],为 27.3 kg 的 HBX-1 炸药在水中爆炸之后,通过试验测得的在爆距为 7.62 m 处的冲击波自由场压力时程曲线。

3.4 验证算例

为了验证有限元模型的有效性和精度,首先对文献[1]中的圆柱壳水下爆炸试验进行数值模拟。该试验中,圆柱壳置于水下 3.66 m 处,属于浅水爆炸,因此模拟时不考虑静水压力的影响。

图 2 给出了圆柱壳迎爆面的最终有效应变分布的对比图。由图 2 可知,计算得到圆柱壳有效应变分布规律与文献[1]基本一致,圆柱壳的有效应变主要分布在迎爆面的两端。计算得到的圆柱壳最大有效应变位于迎爆面两端距离迎爆面中心 43 cm 的部位,而文献给出的这一结果为 44 cm,二者基本吻合。由此可见,计算结果能够准确反映该圆柱壳在冲击波作用下的毁伤规律,从而验证了有限元模型的有效性和精度。



By Ref. [1] By this study

图 2 迎爆面有效应变分布对比图

Fig. 2 Constrast of two modes of effective plastic strain

4 计算结果与讨论

在验证了有限元模型的基础上,模拟了深水环境中圆柱壳在水下爆炸冲击波作用下的动态响应。模拟结果表明,深度、爆心方位和预应力均影响圆柱壳的动态响应。

4.1 深度

为了研究圆柱壳的动态响应随深度增加而变化的规律,本研究设定了 6 种圆柱壳所处的深度,即 100、150、200、250、300 和 350 m,这里的深度是指从圆柱壳中轴线到水面的最短距离。

图 3 是由静力分析得到的圆柱壳在水深 100 m 处的静态有效应力分布图,视角位于水平方向一侧。

由图 3 可见,圆柱壳上的静态有效应力呈对称分布,但是水平方向侧面和竖直方向侧面的有效应力是不相等的。在圆柱壳和端盖的连接处出现了局部的应力集中,有效应力最大值约为 29 MPa,其它深度时的圆柱壳静态有效应力分布规律与图 4 基本相同,不同之处只是圆柱壳的有效应力值随着深度的增加而增大。图 4 给出了由静力分析得到的不同深度时圆柱壳静态最大有效应力,可见圆柱壳的静态最大有效应力随着深度的增加呈线性增加。

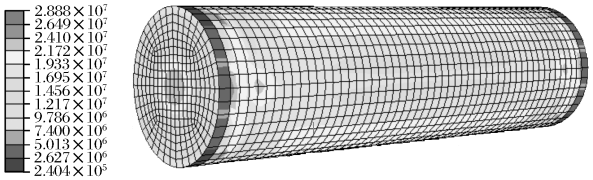


图 3　水深 100 m 处圆柱壳静态有效应力分布图

Fig. 3　Static effective stress of cylindrical shell at a depth of 100 m

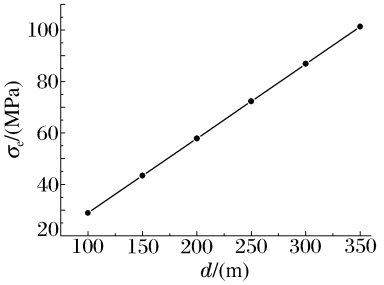


图 4　不同深度时圆柱壳静态最大有效应力

Fig. 4　The maximum static effective stress of cylindrical shell at different depths

图 5 是动力分析得到的水深为 100 m 时的圆柱壳迎爆面的最终有效应变分布图,对比图 3 和图 5,可知在水深为 100 m 处圆柱壳的有效应变分布规律与浅水中相同,仍主要位于圆锥壳的两端,而且产生最大有效应变的位置没有变化,但是壳体表面产生有效应变的区域明显扩大,向侧爆面和迎爆面中部扩展,而且壳体有效应变水平明显增大,最大有效应变由 8.919×10^{-3} 增大至 1.208×10^{-2}。图 6 为不同深度处的圆柱壳塑性应变能时程曲线。由图 6 可知,在 0～300 m 的深度范围内,深度每增加 100 m,圆柱壳的塑性应变能增大 60%左右。

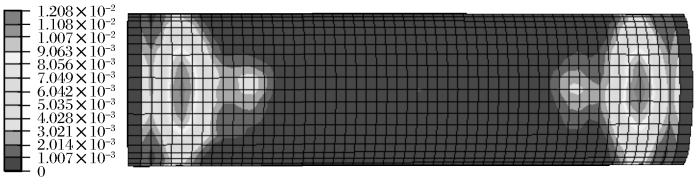


图 5　圆柱壳在水深 100 m 处的有效应变

Fig. 5　Effective strain of cylindrical shell at a depth of 100 m

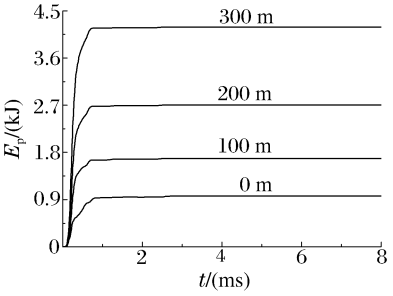


图 6　不同深度时圆柱壳塑性应变能

Fig. 6　The plastic strain energy of cylindrical shell at different depths

图 7 为圆柱壳迎爆面中心点分别在浅水中和水深 350 m 处的横向速度时程曲线。由图 7 可知,与浅水中相比,深水中的横向速度的最大值基本不变,而最大值之后的速度曲线的波峰明显减小,低频段的速度波动现象变得不明显,速度曲线趋于平坦。图 8 为圆柱壳迎爆面中心点在不同深度处的横向位移时程曲线。由图 8 可知,随着深度的增加,位移曲线的最大值逐渐增加,这是由于静水压力的增加,导致动态响应过程中圆柱壳迎爆面的变形程度不断增大。

4.2　爆心方位

为了研究爆心方位的影响,将爆心方位移至圆柱壳的正上方,爆距不变,爆心仍位于圆柱壳中轴线的垂直平分线上。将原来的爆心方位定义为水平爆心,将改变后的爆心方位定义为竖直爆心。图 9 是深度为 350 m 时的两种爆心方位所对应的圆柱壳的动态响应结果,此时竖直爆心时圆柱壳发生了整体

屈服，而水平爆心时圆柱壳却没有屈服。这说明对于该圆柱壳而言，当深度在 100 m 和 250 m 之间时，水平方向爆炸的毁伤能力更强，而当深度大于 250 m 时，竖直方向爆炸则更具有威胁。图 10 给出了这两种爆心方位所对应的不同深度处的圆柱壳最大有效应变曲线。由图 10 可知，两种爆心方位的毁伤效果是不同的，当深度小于 250 m 时，水平爆心对圆柱壳的毁伤更严重，而当深度大于 250 m 时，竖直爆心的毁伤能力更大。

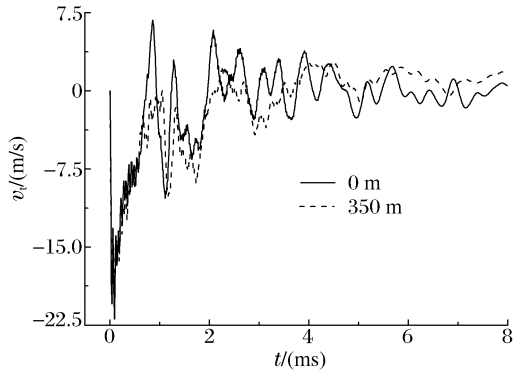


图 7 迎爆面中心点的横向速度时程曲线

Fig. 7 Transverse velocity of central point

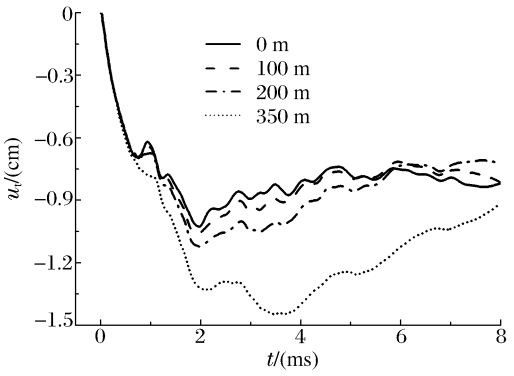


图 8 迎爆面中心点的横向位移时程曲线

Fig. 8 Transverse displacement of central point

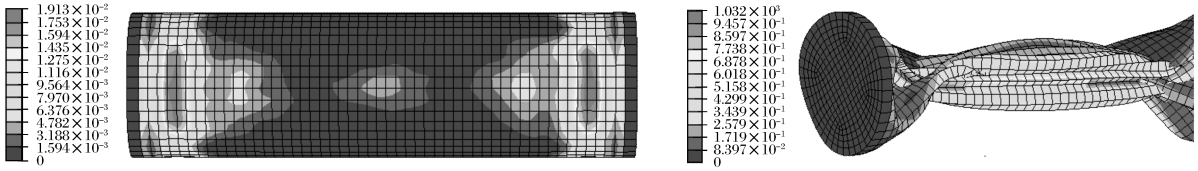


图 9 深度为 350 m 时圆柱壳的动态响应结果

Fig. 9 Dynamic response of the cylindrical shell at a depth of 350 m

4.3 预应力

图 11 和图 12 分别为深度为 300 m 处是否考虑预应力时圆柱壳迎爆面中心点的横向速度和横向位移曲线。由图 11 和图 12 可知，预应力使高频响应时期速度的各个波峰有所减小，而对低频时期速度的影响不明显，并且预应力使圆柱壳在动态响应过程中的变形明显增大。

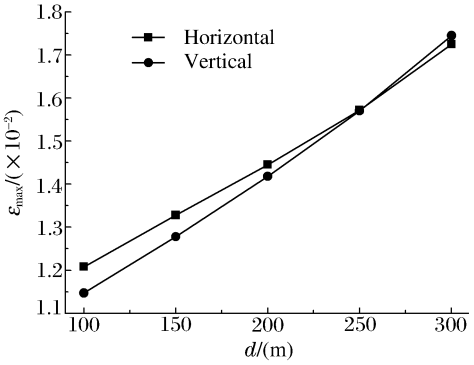


图 10 不同爆心方位的圆柱壳最大有效应变

Fig. 10 ε_{max} of two orientations of explosion

图 13 是水平爆心时预应力对于圆柱壳最大有效应变的影响曲线。由图 13 可知，预应力的存在增大了圆柱壳的毁伤程度，但是深度大于 250 m 时这种增大作用已不明显，这说明水平爆心时预应力在不同深度时对于圆柱壳动态响应的影响是不同的。图 14 是竖直爆心时预应力对于垂直方向结构响应影响的曲线。由图 14 可知，预应力导致垂直方向结构的毁伤效应增大。由此可见，预应力对于水平爆心和竖直爆心这两种爆心方位时圆柱壳动态响应的影响是不同的，这可能是由圆柱壳预应力在水平方向侧面和竖直方向侧面分布的不对称所造成的。

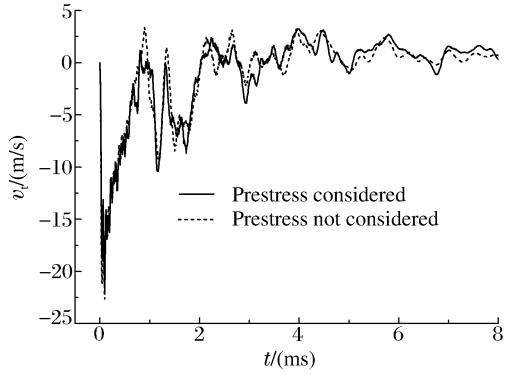


图 11　预应力对横向速度的影响

Fig. 11　Influence of prestress on transverse velocity

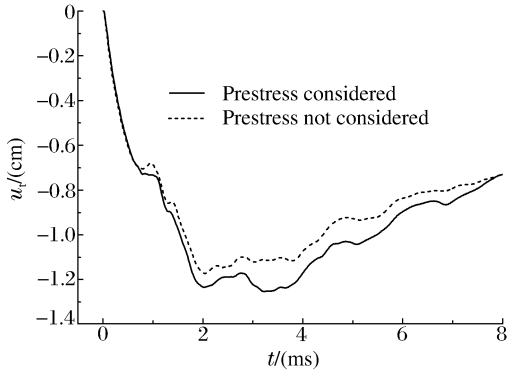


图 12　预应力对横向位移的影响

Fig. 12　Influence of prestress on transverse displacement

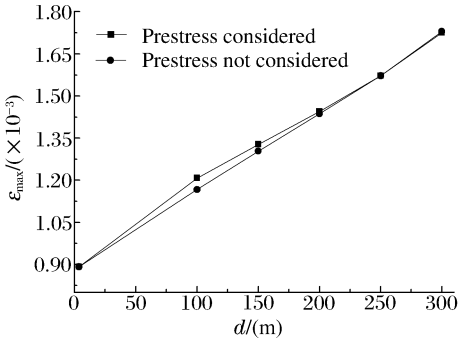


图 13　预应力对水平爆心时动态响应的影响

Fig. 13　Influence of prestress (horizontal explosion)

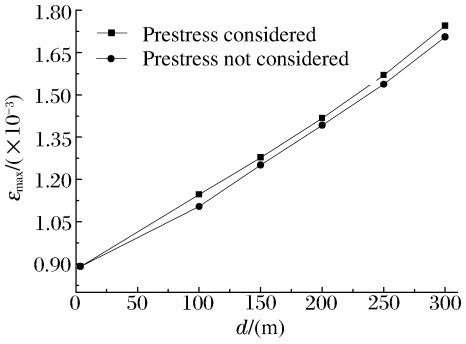


图 14　预应力对竖直爆心时动态响应的影响

Fig. 14　Influence of prestress (vertical explosion)

5　结　论

本研究运用 ABAQUS 程序研究了深水爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应的影响因素,得到以下主要结论:

(1) 对于深水中圆柱壳的冲击响应问题,必须采用静力分析和动力分析相结合的方式进行研究。

(2) 在同样的爆炸冲击波作用下,圆柱壳的毁伤程度随着深度的增加而增大,表现为圆柱壳的最大有效应变、塑性应变能和壳体变形均随着圆柱壳所处深度的增加而增加。同时,与浅水中相比,深水中的圆柱壳质点速度曲线的最大值基本不变,而速度曲线的其它波峰明显减小,速度曲线趋于平坦。

(3) 在深水中,不同的爆心方位所引起的圆柱壳的毁伤程度不同,而且存在一个临界深度,在该深度上下,水平爆心和竖直爆心对圆柱壳的毁伤能力的大小关系发生改变。

(4) 深水中的结构预应力增大了爆炸冲击波对圆柱壳的毁伤效果,并使高频响应时期的圆柱壳质点速度明显减小,使响应过程中圆柱壳的变形增大。同时,预应力对圆柱壳动态响应的影响与爆心方位有关。

References:

[1]　Kwon Y W, Fox P K. Underwater Shock Response of a Cylindrical Subjected to a Side-on Explosion [J]. Comput Struct, 1993, 48(4): 637-646.

[2] Kwon Y K, Cunningham R E. Comparison of USA-DYNA Finite Element Models for a Stiffened Shell Subjected to Underwater Shock [J]. Comput Struct, 1998, 66(1): 127-144.

[3] Lam K Y, Zhang Z J, Gong S W, et al. The Transient Response of a Two-Layered Elastic Cylindrical Shell Impinged by an Underwater Shock Wave [J]. Composites, 1998, 29(6): 673-685.

[4] Woyak D B. Modeling Submerged Structures Loaded by Underwater Explosions with ABAQUS/Explicit [A]// ABAQUS Users' Conference [C]. Newport, Rhode Island, 2002.

[5] Wang J, LIU J H, LI Y J. Numerical Simulation of Dynamic Response of Ring-Stiffened Cylindrical Shell Subjected to Underwater Explosions [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(2): 126-137. (in Chinese)
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.

[6] Blevins R D. Formulas for Natural Frequencies and Mode Shapes [M]. New York: Robert E. Fruger Publishing Co, 1979.

Numerical Study on Influencing Factors of Dynamic Response of Cylindrical Shell Subjected to Deep Water Blast Wave

JIA Xian-Zhen[1], HU Yi-Ting[1], DONG Ming-Rong[2], XU Xue-Zhong[2], LIU Jia-Cong[1]

(1. *Institute of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*)

Abstract: Numerical investigation was carried out on a cylindrical shell subjected to deep water blast wave by using ABAQUS software package. The simulation contained static analysis by using ABAQUS/Standard and dynamic analysis by using ABAQUS/Explicit, and the analysis result of the former was imported into the latter as the initial condition, and then the influencing factors of dynamic response of cylindrical shell were identified. The calculated results indicated that the dynamic response of cylindrical shell was influenced by depth, orientation of explosion and prestress. The damage and distortion of cylindrical shell increases with depth, and the velocity-time history of cylindrical shell particle becomes smoother as the depth increases. The dynamic response to different orientations of explosion is distinct. Prestress leads to severe damage and distortion of the cylindrical shell, which also relates to orientation of explosion. Research results are valuable in evaluating the vulnerability of submarines.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; numerical simulation; torpedo shell; deep water explosion