

基于 ALE 方法的加筋圆柱壳水下接触爆炸计算研究

董金鑫¹, 黄伟佳¹, 卢 熹²

(1. 中国人民解放军 92337 部队, 辽宁 大连 116023; 2. 沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 随着水下制导技术的发展, 接触爆炸对水下结构的毁伤问题越加受到关注。为研究加筋圆柱壳结构水下接触爆炸毁伤特性, 采用 LS-DYNA 软件的任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 方法模拟爆炸冲击波的形成、传播及其对圆柱壳结构的毁伤过程, 探讨水下接触爆炸作用下单、双层加筋圆柱壳的毁伤响应特性, 并分析不同药量和爆距条件下加筋圆柱壳的破坏模式。研究表明: 在不同药量和爆距的水下接触爆炸条件下, 加筋圆柱壳呈现多种破坏模式, 加筋和加肋位置处易出现撕裂状破口, 板壳结构的破坏主要表现为凹陷变形及沿着加筋位置处扩展的裂纹, 其中爆距对破坏模式的影响更明显。本文结果可为水下接触爆炸冲击波作用下水下航行体结构强度分析和防护设计提供参考。

关键词: 水下接触爆炸; 加筋圆柱壳; 数值模拟; 破坏模式

中图分类号: O383⁺.1; U661.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.04.012

Numerical Study of Ring-stiffened Cylindrical Shell Subjected to Underwater Contact Explosion Based on ALE Method

DONG Jinxin¹, HUANG Weijia¹, LU Xi²

(1. Unit 92337 of PLA, Dalian 116023, China; 2. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: With the development of underwater guidance technology, the problem of contact explosion damage to underwater structures has been more and more concerned. In order to study the underwater contact explosion damage characteristics of ring-stiffened cylindrical shell structure, LS-DYNA's arbitrary Lagrange-Euler method is used to simulate the formation of the explosion shock wave, propagation and its damage to the cylindrical shell structure. The underwater contact explosion under the action of a single, double-layered stiffened cylindrical shell damage response characteristics is investigated and the damage patterns of the stiffened cylindrical shell under the conditions of different charge and blast distance are analyzed. The result of research shows that: under the conditions of underwater contact explosion with different charge and blast distance, the stiffened cylindrical shell shows a variety of damage patterns, the position of the reinforcement and ribbing is prone to tear-like rupture, the damage to the plate and shell structure is mainly manifested in the depression and deformation and along the position of the reinforcement of the extended cracks, and the blast distance has a more obvious effect on the damage patterns. This study can provide a reference for the structural strength analysis and protection design of underwater navigation body under the action of underwater contact explosion shock wave.

Key words: underwater contact explosion; ring-stiffened cylindrical shell; numerical simulation; damage patterns

精确制导撞击起爆、吸附式爆破是现代水下武器的常用作战方式,这些方式多为水下接触爆炸,由于爆距小,毁伤威力大,给舰船造成巨大威胁。水下接触爆炸冲击波载荷压力峰值大且具有强非线性,目前的传感器和测量技术很难对其完成定量测量,也缺少成熟的冲击载荷计算评估方法^[1]。加筋圆柱壳是水下航行体和海洋结构物的常见结构形式,受上述试验和理论研究现状的影响,其水下接触爆炸结构毁伤模式和防护研究面临较多困难。

水下接触爆炸载荷对结构的破坏毁伤研究主要借助于大型商用软件及水下接触爆炸试验。Peng 等^[2]针对各种舰船舷侧结构,采用数值模拟方法研究了其在水下接触爆炸作用下的破坏毁伤特性,得到了舷侧防护结构的毁伤过程及破坏形式;尹群等^[3]通过数值模拟方法研究了水下接触爆炸载荷作用下舰船多舱防护结构的毁伤效应;沈超等^[4]和苏标等^[5]采用试验方法研究了水下接触爆炸对板壳结构的破坏损伤特性;柴崧淋等^[6]通过试验研究了不同结构形式舷侧防雷舱在水下接触爆炸作用下的变形吸能特性。对于水下爆炸作用下圆柱壳结构的破坏毁伤问题,张开朋^[7]采用缩比模型实验并辅以数值模拟的方法,研究了水下爆炸冲击波与气泡载荷作用下加筋圆柱壳的毁伤特性;Nie 等^[8]通过有限元方法分析了水下爆炸冲击波作用下圆柱壳环向和轴向的塑性屈曲问题;Ren 等^[9]和古滨等^[10]分别利用试验和数值模拟方法对近场和中远场水下爆炸载荷作用下圆柱壳结构的毁伤特性进行了研究,并探究了不同参数对结构破坏毁伤的影响规律。综上,对于接触爆炸的毁伤研究多针对多层舷侧防护结构,对圆柱壳的毁伤分析多数以近场及中远场水下爆炸为研究条件,而在接触爆炸工况下的破坏毁伤研究较少。开展水下接触爆炸冲击波载荷作用下加筋圆柱壳结构的破坏毁伤特性研究,对提高加筋圆柱壳结构水下航行体抗爆炸冲击和生存能力具有重要的指导意义。

本文采用 LS-DYNA 软件中的任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法建立典型加筋圆柱壳舱段的有限元计算模型,模拟爆炸冲击波的形成及其对舱段结构的破坏毁伤过程,并分析非耐压壳及耐压壳的防护特性及不同工况下加筋圆柱壳的破坏

模式。

国内外学者对接触爆炸尚未给出明确的定义或划分依据^[11]。Cole^[12]在研究水下爆炸现象时,认为爆心至结构的距离与药包半径的比值小于10时为水下接触爆炸;牟金磊等^[13]在研究不同爆距对加筋板结构破坏模式的影响时,以比例爆距 $R/W^{1/3}$ (R 为爆距, W 为炸药当量) 小于 0.4 作为水下接触爆炸的判据;周章涛等^[14]认为,在 6 倍装药半径的爆炸范围内,水下爆炸冲击波对结构的局部毁伤作用更为明显;接触爆炸由于药包和结构距离很近,气泡难以充分膨胀,进而抑制气泡脉动载荷与气泡射流载荷的形成,因此接触爆炸的主要载荷形式为爆炸冲击波^[15]。本文选定接触爆炸工况满足上述研究中对接触爆炸的定义。

1 水下爆炸冲击波的数值模拟

1.1 ALE 方法

本文采用 ALE 方法开展水下接触爆炸载荷对加筋圆柱壳的破坏毁伤模拟计算。ALE 方法最初用于解决流体动力学问题的模拟计算,兼具拉格朗日方法和欧拉方法的优势,能够较好地处理水下爆炸问题中涉及的结构大变形及多相界面追踪问题。ALE 方法的控制方程如下^[16]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \operatorname{div}(\mathbf{v}) - (v_i - u_i) \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij} - \rho(v_j - u_j) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} - \rho(v_j - u_j) \frac{\partial e}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; x 为坐标; \mathbf{v} 为流体质点速度;下角标 i 和 j 表示不同的方向; v_i 和 v_j 分别表示 i 方向和 j 方向的流体质点速度; u_i 和 u_j 分别表示 i 方向和 j 方向的网格运动速度; e 为流体内能; σ_{ij} 和 ε_{ij} 分别为应力和应变。

1.2 材料的状态方程

对于三硝基甲苯(TNT)爆轰产物,可采用 JWL 方程^[17]计算爆轰压力,计算式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left(1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \eta \rho_0 U \quad (4)$$

式中: p 为爆轰产物的压力; $\eta = \rho/\rho_0$, 为爆轰产物

的相对比容,其中 ρ_0 为炸药的初始密度; ω 、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 为实验数据拟合所得的与炸药状态有关的常数; U 表示高能炸药的单位质量内能。各参数的取值见表1^[18]。

表1 TNT状态方程参数

Table 1 Parameters of state equation of TNT

参数	$\rho_0/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$A/$ GPa	$B/$ GPa	R_1	R_2	ω	$U/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
数值	1 630	371.2	3.21	4.15	0.95	0.3	3 680

表2 Q235钢的材料参数

Table 2 Material parameters of Q235 steel

参数	$\rho_1/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$E/$ MPa	λ	$\sigma_0/$ MPa	$E_h/$ MPa	C	n	ε_c
数值	7 850	2.1×10^5	0.3	235	250	40.4	5	0.23

1.3 数值模型验证

参照文献[20]中的简单平板接触爆炸试验模型验证本文数值模型的有效性。简单平板有效尺寸为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 2.73\text{ mm}$,钢板材料为Q235钢,装药形状为柱形,装药当量为 5 g TNT ,装药中心到平板结构距离为 7.5 mm ,装药高度为 15 mm 。

在进行数值模拟时,欧拉域尺寸为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,欧拉域包括空气、水等流体介质及TNT。计算模型如图1所示。

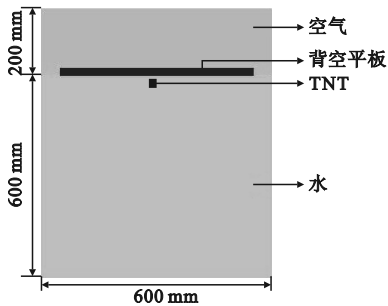


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

试验得到平板的最终破坏情况^[20]如图2所示,图3为本文数值模拟结果。对比图2和图3可以发现,验证试验工况下,试验和数值模拟结果中平板结构中心均产生圆形破口,试验结果中破口直径为 30.82 mm ,数值模拟结果中破口直径为 34.1 mm ,两者相对误差为 10.6% 。从平板的破坏形式和破口尺寸来看,数值模拟结果和试验结果吻合良好,说明本文所采用的数值方法与材料参数可以有效地模拟水下接触爆炸结构毁伤

舱段材料采用船用高强度Q235型钢。采用Cowper-Symonds模型描述Q235钢的材料应变率,其动态屈服强度的计算式为^[18]

$$\sigma_d = \left(\sigma_0 + \frac{EE_h}{E - E_h} \varepsilon_p \right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/n} \right] \quad (5)$$

式中: σ_d 为动态屈服强度; σ_0 为初始屈服应力; E 为弹性模量; E_h 为应变硬化模量; ε_p 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率; C 、 n 为常数。Q235钢的材料参数如表2所示^[19],表中 λ 为泊松比, ε_c 为失效应变, ρ_1 为Q235钢的密度。

问题。

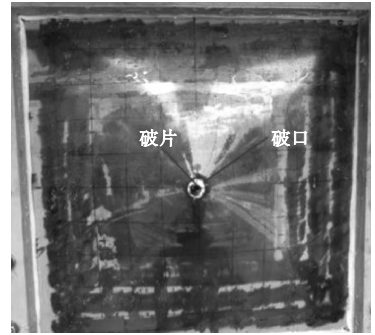


图2 试验结果^[20]

Fig. 2 Experiment result^[20]

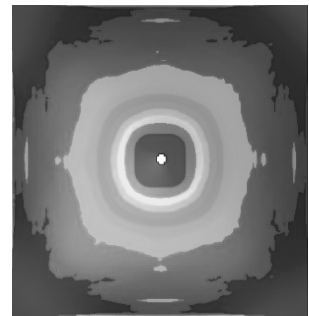


图3 数值模拟结果

Fig. 3 Calculation result

2 水下爆炸冲击波对舱段结构的毁伤

2.1 加筋圆柱壳结构

根据作战环境和受力特性,水下航行体横截

面形状通常设计为圆形、椭圆形、矩形或者圆柱截剖面等^[21],其中圆形剖面形状在抵抗深水压力方面性能最优,因此被广泛采用并沿用至今。耐压船体典型的结构形式如图 4 所示。

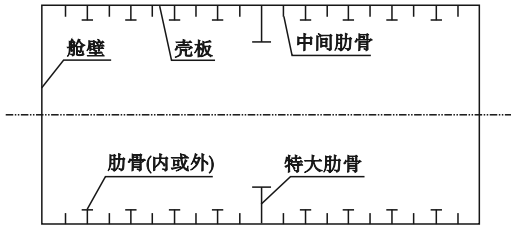


图 4 耐压船体典型结构形式^[21]

Fig. 4 Typical structure of pressure hull^[21]

基于上述研究背景,本文建立如图 5 所示的单、双层加筋圆柱壳舱段模型。图中: D 为肋板间距; d 为梁间距; L 为舱段长; R_a 、 R_b 分别为耐压壳与非耐压壳半径。舱段结构包括非耐压壳体、肋板、T 型梁、耐压壳体以及两端舱壁。耐压壳板厚度为 28 mm,非耐压壳板厚度为 16 mm。T 型梁结构如图 6 所示,各构件的 T 型梁尺寸如表 3 所示。

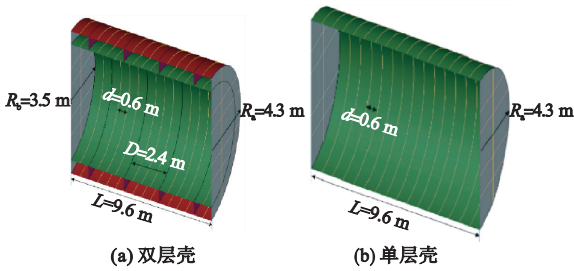


图 5 舱段结构剖面模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cabin structural section

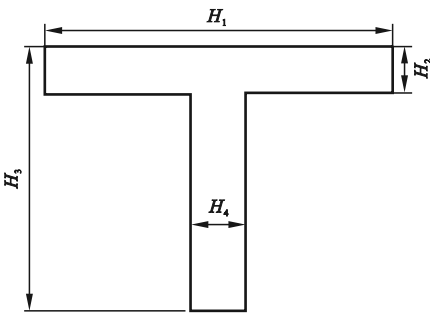


图 6 T 型梁模型

Fig. 6 T-beam model

表 3 各构件 T 型梁尺寸

Table 3 Size of T-beam components m

构件	H_1	H_2	H_3	H_4
耐压壳梁	0.08	0.026	0.224	0.014
舱壁梁	0.08	0.026	0.224	0.014

加筋圆柱壳模型采用壳单元和梁单元。流场模型采用实体单元,划分渐进式网格,填充 TNT 炸药、空气以及水材料。炸药采用球形装药,设置于流场中心处。取非耐压壳迎爆面中心处的壁压峰值(P_m)进行网格无关性分析,对圆柱壳划分了不同网格数量(N)的计算结果如图 7 所示。综合考虑收敛精度和计算效率,确定圆柱壳的网格数量为 30 万个。

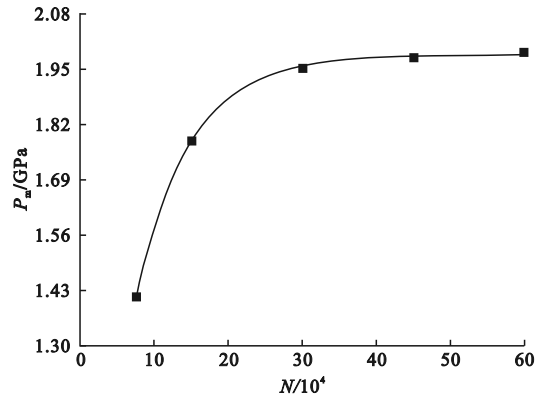


图 7 网格数量对圆柱壳壁压的影响

Fig. 7 Effect of the number of meshes on the wall pressure of the cylindrical shell

2.2 水下爆炸冲击波对双层加筋圆柱壳的毁伤

根据上述计算模型,将药包质量定为 30 kg,药包表面距离非耐压壳 0.1 m,满足前述接触爆炸定义。流场边界设定无反射边界条件以消除反射波的影响,耐压壳内流体为空气,层间介质和流场介质均为水。计算模型的设定及流场中压力测点布置如图 8 所示。

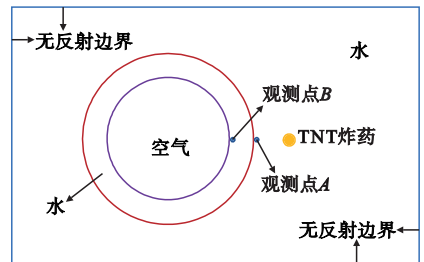


图 8 双层加筋圆柱壳计算模型

Fig. 8 Calculation model of double-layer ring-stiffened cylindrical shell

双层加筋圆柱壳接触爆炸过程中几个典型时刻冲击波传播压力云图及其作用于结构的过程如图 9 所示。由图 9 可以看出:装药起爆后 0.1 ms 时,爆炸产生的高压冲击波作用于非耐压壳并形成反射和透射波,引起非耐压壳产生凹陷变形;0.5 ms 时,在水层内传播的透射冲击波开始作用

于耐压壳;3.5 ms时,非耐压壳在冲击波及爆轰气体的作用下产生冲塞破口,爆轰气体作用于耐压

壳体,并使耐压壳体产生凹陷变形。

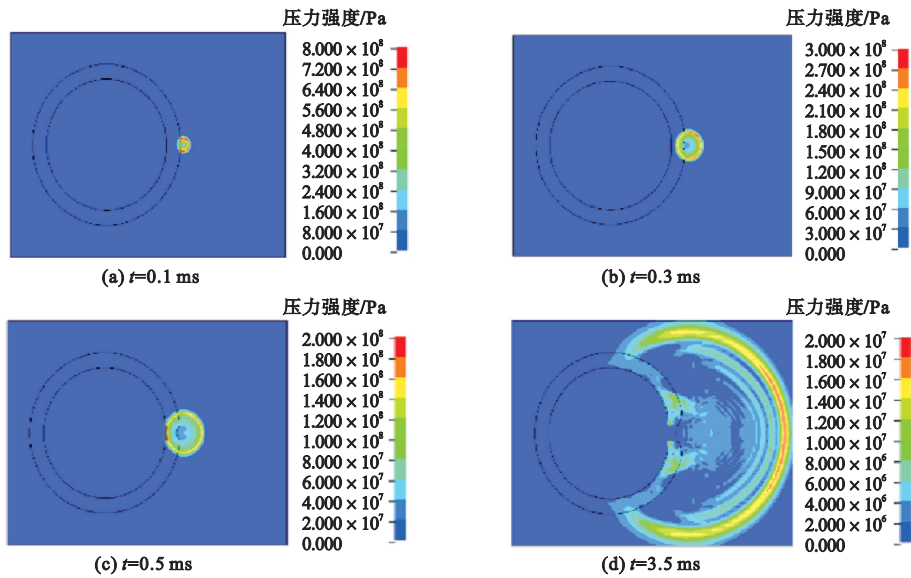


图9 双层加筋圆柱壳接触爆炸过程中典型时刻压力云图

Fig. 9 Typical time pressure cloud maps of double-layer ring-stiffened cylindrical shell in the process of contact explosion

流场中测点A、B压力时历曲线如图10所示。由图10可见,装药起爆后,冲击波在0.1 ms内到达非耐压壳处,测点A处冲击波峰值压力约为1.95 GPa,冲击波在0.5 ms时到达耐压壳表面,测点B处的压力峰值为0.19 GPa,说明冲击波在传播及穿过程中发生能量衰减,B处衰减后的压力仅为A处的10%左右。

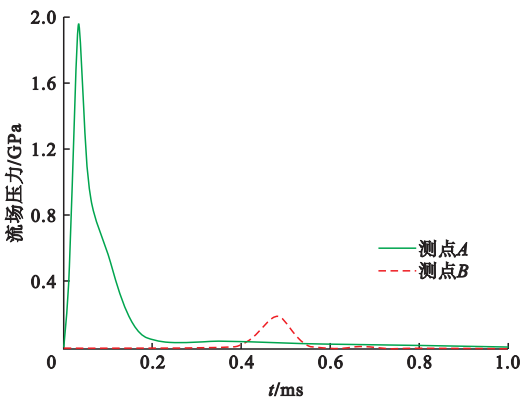


图10 压力时历曲线

Fig. 10 Time curves of pressure

图11给出了双层圆柱壳接触爆炸过程中典型时刻等效应力变化云图(中间剖面图)。如图11(a)所示,在装药起爆后0.3 ms时,迎爆面中心区域产生了高应力区,由于爆炸冲击波在流场中以球面波向外传播,高应力区呈现圆形,中心区域最大应力达到590 MPa;随着应力波在非耐压壳

中继续传播,高应力区进一步扩大,同时通过层间水的传递作用,冲击波作用于耐压壳,耐压壳中心区域开始出现高应力区,如图11(b)所示;随着应力波的继续传播,结构的高应力区不断扩大,非耐压壳板出现凹陷变形,如图11(c)和图11(d)所示;随着冲击波和爆轰气体的持续作用,非耐压壳板呈现冲塞凹陷变形,耐压壳板向内凹陷变形,如图11(e)所示;结构最终变形如图11(f)所示,非耐压壳板出现剪切破口,耐压壳板产生凹陷变形。

环肋结构是连接非耐压壳和耐压壳的重要部件,起到支撑非耐压壳板以及增强结构整体抗毁伤性能的作用。本文模型中环肋结构厚度为16 mm,环肋结构最终的应力云图及塑性应变云图如图12所示。

由图12(a)中环肋结构的最终变形结果可以看出,环肋结构的高应力区主要出现在迎爆面中心区域的两个肋位处,环肋出现弯曲变形,说明环肋结构起到了非耐压壳和耐压壳中间的支撑作用,其中与耐压壳连接处出现高应力区。由图12(b)可知,与耐压壳连接处有效塑性应变最大达到0.26,环肋结构发生塑性损伤。

综上,双层加筋圆柱壳在水下接触爆炸载荷作用下的毁伤主要表现为非耐压壳的冲塞破口以及耐压壳的凹陷变形,环肋结构与耐压壳连接处容易出现高应力区。

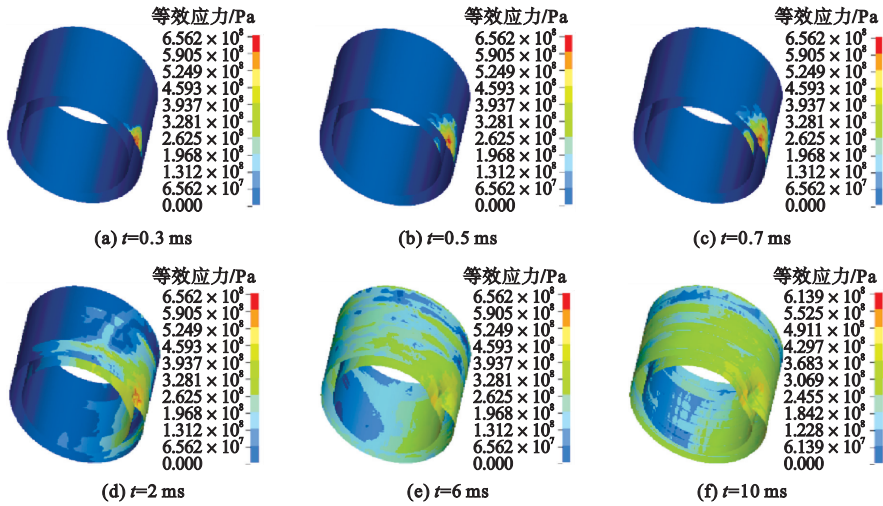


图 11 双层加筋圆柱壳接触爆炸过程典型时刻等效应力云图

Fig. 11 Typical time equivalent stress cloud maps of double-layer ring-stiffened cylindrical shell in the process of contact explosion

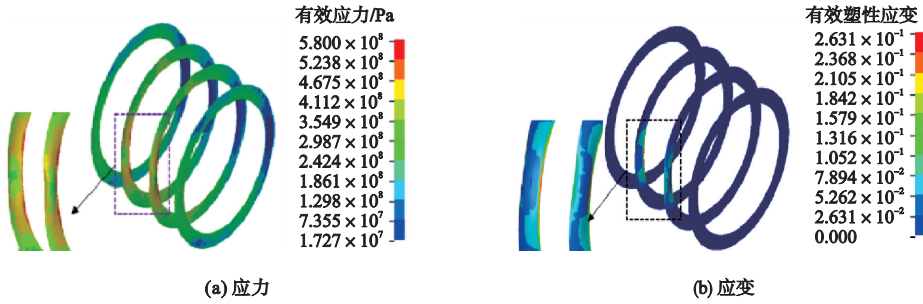


图 12 环肋结构应力云图和应变云图

Fig. 12 Stress nephogram and strain cloud maps of ring rib structure

2.3 水下爆炸冲击波对单层加筋圆柱壳的毁伤

单层加筋圆柱壳工况设定与上文一致,冲击波压力变化云图及其作用于结构的过程如图 13 所示。可以看到,装药在起爆后 0.4 ms 内作用于

耐压壳体,并引起耐压壳体凹陷变形;随着冲击波不断向外传播,冲击波及爆轰气体持续作用于壳体,在 0.8 ms 时引起了壳体向内的冲塞凹陷;在 1.8 ms 时,耐压壳体在爆轰气体的作用下产生冲塞破口。

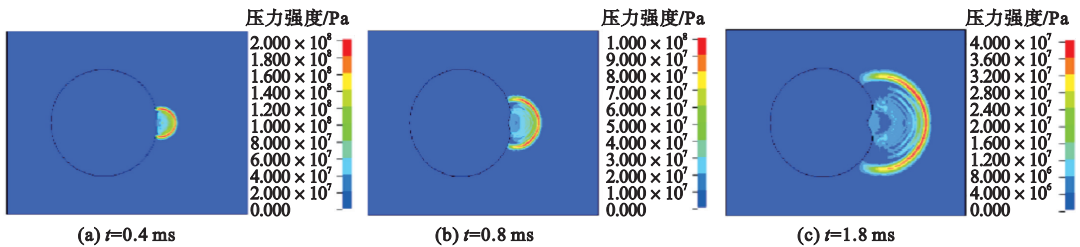


图 13 单层加筋圆柱壳接触爆炸过程典型时刻压力云图

Fig. 13 Typical time pressure cloud maps of single-layer ring-stiffened cylindrical shell in the process of contact explosion

图 14 给出了单层圆柱壳等效应力变化云图。如图 14(a)所示,装药起爆后,耐压壳在冲击波的作用下迎爆面出现圆形的高应力区;随着应力波在结构中的持续传播,圆形区域不断扩大,如图 14

(b)所示;随着冲击波的持续作用,爆点正对的三根 T 型梁位置出现应力集中现象,如图 14(c)所示;在装药起爆后 2.2 ms 时,迎爆面正中的 T 型梁位置开始出现长条状撕裂破口,如图 14(d)所

示;随后,正中T型梁两侧的T型梁也开始出现长条状撕裂破口,且破口不断扩大,结构的最终变形

如图14(f)所示。

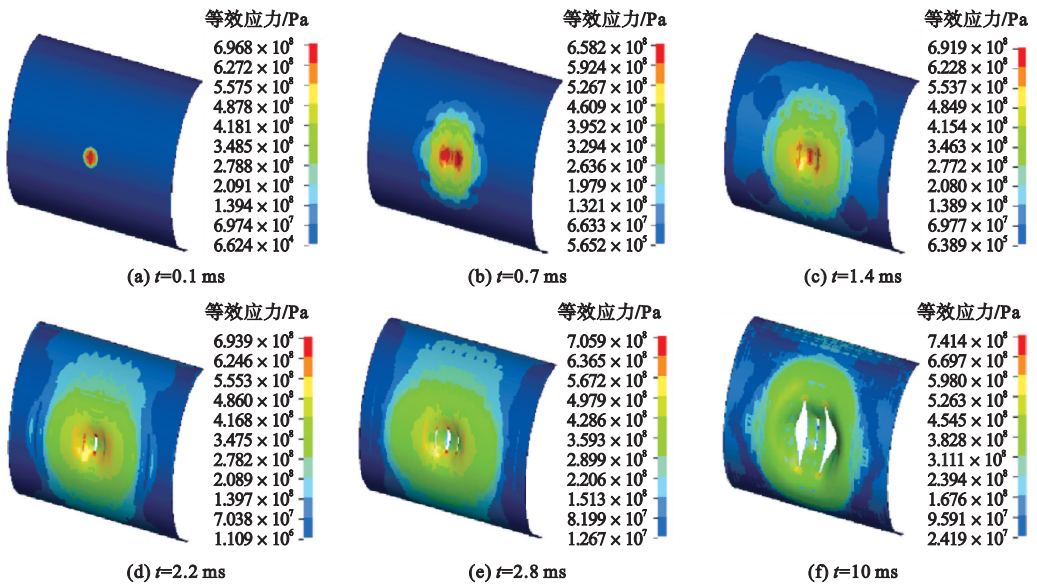


图14 单层加筋圆柱壳接触爆炸过程中几个典型时刻等效应力云图

Fig. 14 Typical time equivalent stress cloud maps of single-layer ring-stiffened cylindrical shell in the process of contact explosion

结构最终有效塑性应变云图如图15所示。由图15可以看出,单层加筋圆柱壳在接触爆炸作用下产生三条长条状撕裂破口,且破口位置均出现在T型梁处,其中两侧的破口近乎对称且破口尺寸明显大于中间的破口。由图中结构最终变形的中间剖面线可见,迎爆面产生大面积凹陷变形,迎爆面的壳板发生向内的翻卷及拉伸破口。

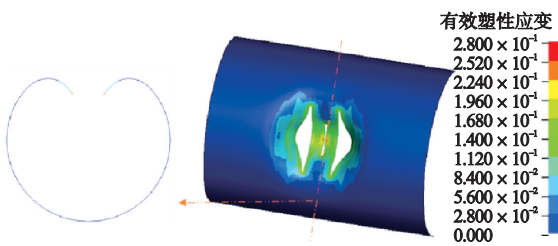


图15 单层加筋圆柱壳有效塑性应变云图

Fig. 15 Effective plastic strain cloud map of single-layer ring-stiffened cylindrical shell

3 水下接触爆炸作用下圆柱壳结构破坏模式分析

本节进一步探究不同药量工况下加筋圆柱壳的破坏模式,计算模型同上文,计算工况如表4所示。

表4 计算工况

Table 4 Calculation conditions of simulation

工况编号	1	2	3	4	5	6
药量/kg	10	20	30	30	40	40
爆距/m	0.1	0.1	0.1	接触	接触	0.1

双层加筋圆柱壳在不同药量和爆距接触爆炸作用下的最终破坏形态(截取结构四分之一)如图16所示,破坏模式汇总于表5。

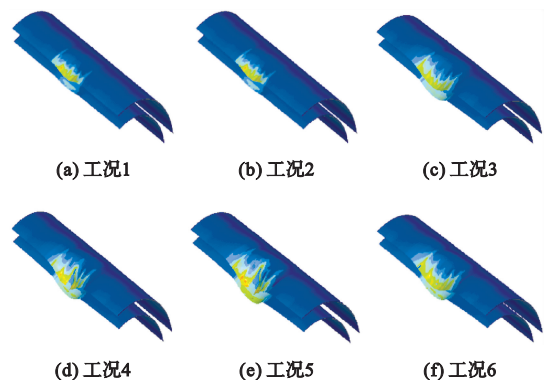


图16 双层加筋圆柱壳最终破坏形态

Fig. 16 Ultimate failure patterns of double-layer ring-stiffened cylindrical shell

由图16中前三种工况对比可知,爆距一定的情况下,结构迎爆面凹陷面积和凹陷程度与药量大小呈正相关;对比工况3和工况4可知,接触爆

炸条件下,双层加筋圆柱壳的破坏模式受爆距影响较大,微小的爆距变化也会改变双层加筋圆柱壳的破坏模式;对比工况 5 和工况 6 同样可以发现上述爆距对破坏模式的影响规律。

表 5 双层加筋圆柱壳破坏模式汇总

Table 5 Damage patterns summary of double-layer ring-stiffened cylindrical shell

工况	破坏模式
1	非耐压壳整体凹陷变形;耐压壳中心局部凹陷变形
2	非耐压壳整体凹陷变形;耐压壳整体凹陷变形
3	非耐压壳整体凹陷变形;耐压壳整体凹陷变形
4	非耐压壳条纹状破口及整体凹陷变形;耐压壳整体凹陷变形
5	非耐压壳条纹状破口及整体凹陷变形;耐压壳整体凹陷变形
6	非耐压壳整体凹陷变形;耐压壳整体凹陷变形

不同药量和爆距条件下单层加筋圆柱壳的毁伤结果(截取结构二分之一)如图 17 所示,破坏模式汇总于表 6。

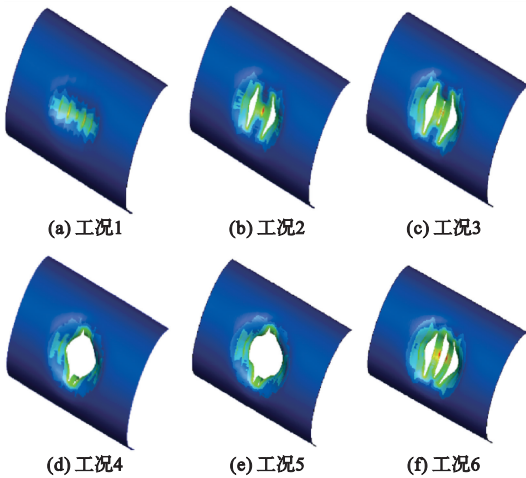


图 17 单层加筋圆柱壳最终破坏模式

Fig. 17 Ultimate damage patterns of single-layer ring-stiffened cylindrical shell

表 6 单层加筋圆柱壳破坏模式汇总

Table 6 Damage patterns summary of double-layer ring-stiffened cylindrical shell

工况	破坏模式
1	圆柱壳中心局部凹陷变形
2	圆柱壳中心整体凹陷变形及 T 型梁处条纹状撕裂破口
3	圆柱壳中心整体凹陷变形及 T 型梁处条纹状撕裂破口
4	圆柱壳中心整体凹陷变形及中心处大面积花瓣状开裂
5	圆柱壳中心整体凹陷变形及中心处大面积花瓣状开裂
6	圆柱壳中心整体凹陷变形及 T 型梁处条纹状撕裂破口

由图 17 可以看到,在小当量装药作用下,加

筋圆柱壳迎爆面中心呈现局部凹陷变形,当药量达到一定程度后,圆柱壳迎爆面 T 型梁位置处会出现由于应力集中造成的条纹状撕裂破口,且爆距一定时,破口尺寸与药量大小呈正相关。对比工况 3 和工况 4 可知,微小的爆距改变会影响结构的破坏模式,当爆距从 0.1 m 改变为接触后,破坏模式从条纹状撕裂破口变为大面积花瓣状开裂。

4 结论

本文基于 LS-DYNA 软件的 ALE 方法,选取单、双层加筋圆柱壳为典型舱段结构,模拟了其在水下接触爆炸冲击波作用下的毁伤过程,并分析了不同工况下舱段结构的破坏模式,得到以下结论。

1) 接触爆炸载荷作用下,同一给定工况的双层加筋圆柱壳和单层加筋圆柱壳破坏模式不同,双层加筋圆柱壳耐压壳主要呈现壳板的塑性凹陷,单层加筋圆柱壳中心会出现撕裂状破口。由于载荷的衰减、层间水的吸能和肋的支撑作用,双层结构耐压壳的毁伤程度明显小于非耐压壳,双层结构的耐压壳毁伤程度小于单层耐压壳,加筋圆柱壳双层结构防护作用优于单层结构。

2) 接触爆炸载荷作用下,加筋圆柱壳的 T 型梁与壳板结合处、环肋与壳板结合处出现应力集中,会形成相对薄弱区域,壳板易出现局部撕裂状破口,壳板结构的破坏过程主要表现为沿着加筋和环肋位置处扩展裂纹。

3) 接触爆炸对圆柱壳冲塞作用明显,迎爆区域呈现大应变,药量和爆距对接触爆炸条件下的结构破坏模式有明显影响,可呈现出变形、撕裂、断裂、破口等多种破坏模式,爆距的微小变化亦可改变结构的破坏模式。

参考文献 (References):

- [1] 张阿漫,王诗平,彭玉祥,等. 水下爆炸与舰船毁伤研究进展[J]. 中国舰船研究,2019,14(3):1-13.
ZHANG A M, WANG S P, PENG Y X, et al. Research progress in underwater explosion and its damage to ship structures [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(3): 1-13. (in Chinese)
- [2] PENG Y X, ZHANG A M, MING F R, et al. A meshfree framework for the numerical simulation of elasto-plasticity deformation of ship structure [J]. Ocean Engineering, 2019, 192:106507.
- [3] 尹群,徐成悦,沈中祥,等. 水下接触爆炸载荷作用下舰船多舱防护结构毁伤效应研究[J]. 舰船科学技术,2022,44

- (15):1-5.
- YIN Q, XU C Y, SHEN Z X, et al. Research on damage of warship multicamerate defense structure subjected to underwater contact explosion load[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(15):1-5. (in Chinese)
- [4] 沈超, 张磊, 周章涛, 等. 水下近距和接触爆炸载荷作用下板架结构动态响应机理[J]. *兵工学报*, 2023, 44(4):1050-1061.
- SHEN C, ZHANG L, ZHOU Z T, et al. Mechanism of dynamic responses of grillage structures under loads of close-in and contact underwater explosions[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(4):1050-1061. (in Chinese)
- [5] 苏标, 姚熊亮, 孙龙泉, 等. 水下接触爆炸作用下双层加筋板架结构的损伤特征[J]. *兵工学报*, 2021, 42(S1):127-134.
- SU B, YAO X L, SUN L Q, et al. Damage characteristics of double-layer stiffened shell subjected to underwater contact explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(S1):127-134. (in Chinese)
- [6] 柴崧淋, 侯海量, 金键, 等. 水下接触爆炸下舷侧防雷舱吸能结构形式试验研究[J]. *兵工学报*, 2022, 43(6):1395-1406.
- CHAI S L, HOU H L, JIN J, et al. Experimental study on the energy-absorbing structure of broadside defense cabin subjected to underwater contact explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(6):1395-1406. (in Chinese)
- [7] 张开朋. 水下爆炸冲击波与气泡载荷作用下加筋圆柱壳毁伤特性实验与数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [8] NIE B C, ZHANG H Q. Hoop and axial plastic buckling modes of submerged cylindrical shells subjected to side-on underwater explosion shock wave[J]. *Marine Structures*, 2022, 84:103200.
- [9] REN S F, SONG Y, ZHANG A M, et al. Experimental study on dynamic buckling of submerged grid-stiffened cylindrical shells under intermediate-velocity impact[J]. *Applied Ocean Research*, 2018, 74:237-245.
- [10] 古滨, 李炳南, 姚熊亮, 等. 水下冲击波作用下双层壳结构响应特征研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(11):11-18.
- GU B, LI B N, YAO X L, et al. Research of impact response of double-shell based on underwater explosion shock wave[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(11):11-18. (in Chinese)
- [11] 武海军, 成乐乐, 陈文戈, 等. 典型舰船结构的水下爆炸耦合毁伤研究进展[J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(5):439-459.
- WU H J, CHENG L L, CHEN W G, et al. Review on coupling damage effects of underwater explosion on typical ship structures[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(5):439-459. (in Chinese)
- [12] COLE R H. *Underwater explosions*[M]. Princeton: Princeton Univ. Press, 1948.
- [13] 牟金磊, 朱锡, 张振华, 等. 水下爆炸载荷作用下加筋板的毁伤模式[J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(5):457-462.
- MU J L, ZHU X, ZHANG Z H, et al. Failure modes of stiffened plates subjected to underwater explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(5):457-462. (in Chinese)
- [14] 周章涛, 刘建湖, 裴红波, 等. 水下近距和接触爆炸流固耦合作用机理及加载效应研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(S1):136-145.
- ZHOU Z T, LIU J H, PEI H B, et al. Fluid-structure interaction mechanism and loading effect in close-in and contact underwater explosions[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(S1):136-145. (in Chinese)
- [15] 金键, 朱锡, 侯海量, 等. 大型舰船在水下接触爆炸下的毁伤与防护研究综述[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11):15-39.
- JIN J, ZHU X, HOU H L, et al. Review on the damage and protection of large naval warships subjected to underwater contact explosions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11):15-39. (in Chinese)
- [16] KIM J H, SHIN H C. Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(8/9):812-822.
- [17] JACOBS S J. On the equation of state for detonation products at high density[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1969, 12(1):501-511.
- [18] 唐廷, 朱锡, 侯海量, 等. 大型水面舰艇防雷舱结构防护机理数值仿真[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(2):142-149.
- TANG T, ZHU X, HOU H L, et al. Numerical simulation study on the defense mechanism of a cabin near the shipboard for large surface vessels[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(2):142-149. (in Chinese)
- [19] 秦业志, 王莹, 王志凯, 等. 小当量柱型装药水下近场爆炸固支单层方形钢板毁伤特性研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(7):29-36.
- QIN Y Z, WANG Y, WANG Z K, et al. Damage characteristics of fixed single-layer square steel plate under near-field underwater explosion of small equivalent column charge[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(7):29-36. (in Chinese)
- [20] 陈莹玉. 水下近场爆炸时不同结构形式的壁压与毁伤特性试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [21] 石德新, 王晓天. *潜艇强度*[M]. 修订版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.

(责任编辑: 宋颖韬)