DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0210-08

双层环肋圆柱壳受多个物体撞击下的结构动响应*

刘俊杰,万正权,祁恩荣
(中国船舶科学研究中心,江苏 无锡 214082)

摘要: 针对双层环肋圆柱壳受到多个物体的撞击问题,采用 MSC. Dytran 软件对受撞过程中的结构损伤变形、撞击力变化和能量转换进行数值模拟,并与模型试验相对比后发现:双层环肋圆柱壳结构同时受多物体撞击是一个瞬态动响应过程,在巨大瞬时冲击载荷作用下,受撞区壳板会迅速超越弹性变形而产生塑性变形;多物体撞击会造成外壳板一定区域的损伤变形,撞击力会相互干扰,导致其非线性特征更明显。结果表明,双层圆柱壳的外壳能对内壳起到较好的防护作用,在外壳没被撞穿的情况下,其结构变形会吸收绝大部分的撞击动能,可以通过优化外壳的吸能效率来达到双层壳体结构物内壳防撞的目的。

关键词: 固体力学;结构损伤;模型试验;双层圆柱壳;撞击力;能量转换
中图分类号: O347 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

双层环肋圆柱壳作为一种典型结构,在潜艇中被广泛应用。由于作业环境恶劣,一旦发生撞击事故,会造成重大损失[1]。针对潜艇受到碰撞或潜艇搁浅的问题,梅志远等[2-3]、朱新阳等[4]对潜艇典型结构受撞损伤特征开展了数值模拟和模型试验研究。关于环肋圆柱壳结构撞击问题,Y. W. Kim 等[5]利用能量法计算了环肋圆柱壳在阶跃冲击作用下的动态响应;孙清磊等[6]考虑静水压作用,对环肋圆柱壳受不同形状撞击体的撞击过程进行了数值模拟,探讨了不同撞头形状对结构变形吸能及碰撞力的影响规律。潜艇受撞击与导弹穿甲或侵彻问题不同,后者是金属在高速冲击和冲击产生高温的联合作用下瞬时被击穿形成破口的过程,破口周围的结构几乎不产生变形,穿甲机理包含力学和热力学作用[7]。而前者的撞击速度较低,撞击过程中热力学作用微小,可以忽略,且结构的变形范围不仅局限于接触区。目前,对圆柱壳受撞问题的研究,撞击物多为单一体,而实际中常会遇到多个物体同时或连续撞击的案例,而该类问题的研究却少见报道。本文中拟针对双层环肋圆柱壳受多物体撞击问题进行数值模拟和模型试验,对多物体撞击下的壳体结构损伤机理和典型特征开展研究,以期为相关工程设计提供参考。

1 数值模拟

1.1 数值模型

选取双层环肋圆柱壳受撞一侧的半圆结构作为研究对象,由内、外层环肋圆柱壳通过实肋板连接而成。内外壳结构的特征参数如表 1 所示,其中 R 为壳体半径,t 为壳体板厚,L 为壳体上环肋骨间距,F 为环肋骨横剖面积,下标 1、2 分别代表外壳和内壳;撞击物为 5 只相同的实心钢球,半径为 150 mm,每只钢球的质量为 111 kg。

表 1 模型结构特征参数

Table 1 Parameters of the model's structural characteristics

R_1/t_1	$L_1/\sqrt{R_1t_1}$	F_1/L_1t_1	R_2/t_2	$L_2/\sqrt{R_2t_2}$	F_2/L_2t_2
363.3	4.2	0.25	153.3	1.62	0.56

建模前首先对模型网格尺度对计算结果的影响进行分析,以单个物体(钢球)撞击双层壳体的环肋外壳为例,采用 4 种不同尺度的网格建立模型。从计算得到的撞击力和壳体变形能对比曲线,如图 1 所

* **收稿日期**: 2014-09-10; **修回日期**: 2015-04-09
第一作者: 刘俊杰(1978—),男,博士,高级工程师,junjie197803@163.com。

示。从图中可以看出，模型网格特征长度为 20 和 12 mm 的计算结果基本吻合，表明前者能满足计算结果的稳定。根据结构受撞损伤的局部特性[8-9]，考虑计算效率，建模时在壳体受撞及附近区域采用特征长度为 20 mm 的网格，远离受撞区采用较粗网格。

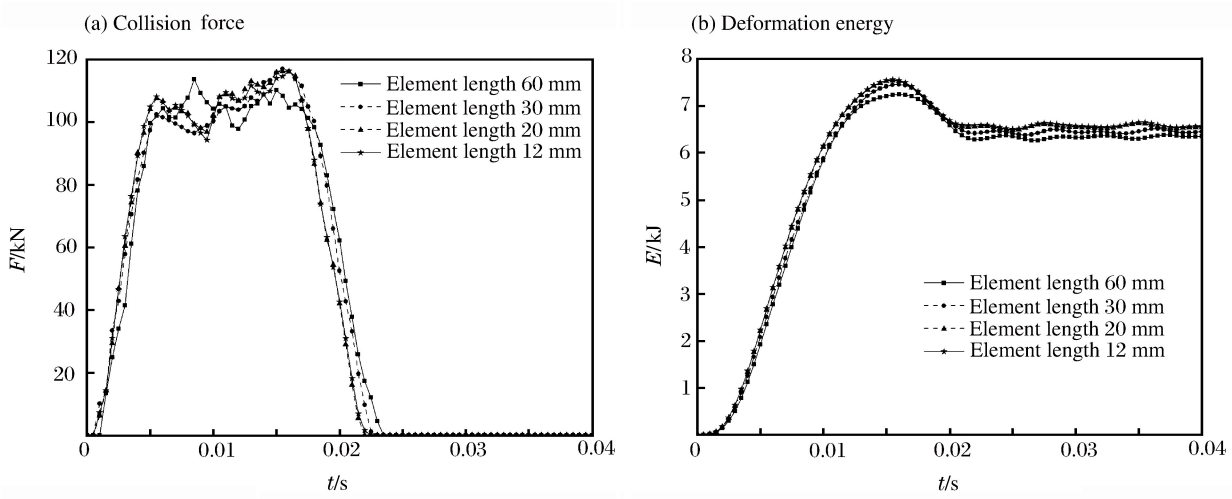

图 1　不同网格特征长度数值模拟结果对比

Fig. 1　Comparison of calculation results between different element lengths

采用 MSC. Patran[10] 建立的双层环肋半圆柱壳结构及撞击物（钢球）的数值模型如图 2 所示，图中还给出了钢球的分布。模型中所有构件均采用壳单元模拟，单元数为 50 388，节点数为 50 479。通过在撞击物上施加 11.71 m/s 的初始速度来模拟 5 只钢球从距离圆柱壳顶端 7 m 的高度同时自由坠落撞击壳体，同时考虑撞击过程中重力加速度以及摩擦作用的影响，动、静摩擦力因数都取 0.1。

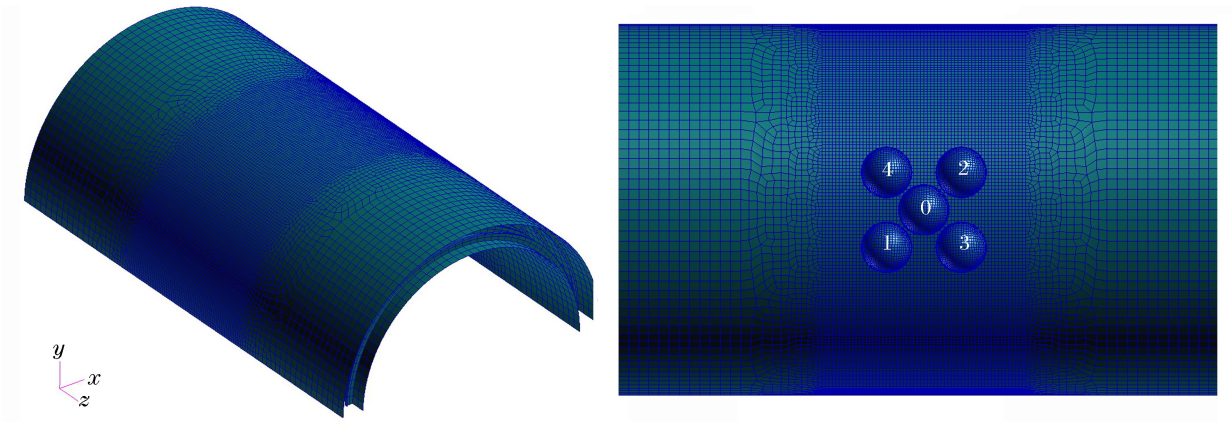

图 2　双层环肋半圆柱壳结构和撞击物有限元模型

Fig. 2　Finite element models of double ring-stiffened cylindrical shell structure and colliding bodies

为了与模型试验相对应，双层环肋半圆柱壳结构的材料采用普通船用 Q235 钢，计算时考虑材料的应变率敏感性，用弹塑性材料来模拟，相关材料参数如下：材料密度，7 850 kg/m^3；屈服应力，290 MPa；弹性模量，206 GPa；泊松比，0.3；最大塑性失效应变，0.386；应变率敏感系数 $D=40.4$，$q=5$[11]。实心钢球相对于壳体结构的刚度较大，变形可忽略不计，因此采用刚体材料来模拟。

1.2　数值模拟结果及损伤机理分析

采用 MSC. Dytran 的主从面自适应接触算法对壳体受撞损伤过程进行计算，并用 MSC. Patran 对计算结果进行后处理，对结构的动态响应过程进行分析。

1.2.1　结构损伤变形

图 3～4 所示分别为钢球达到最大撞深时壳体上产生的等效应力和损伤变形分布，可以看出，外壳上 5 个撞击点形成的网状面内的壳板多处产生屈服，损伤变形主要以受撞点处的凹陷为主，此外，受撞

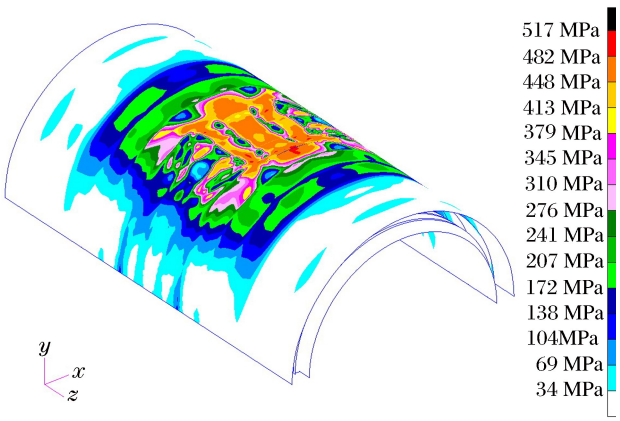

图 3 受撞壳体结构的等效应力分布

Fig. 3 Distribution of von Mises stress on shell structure

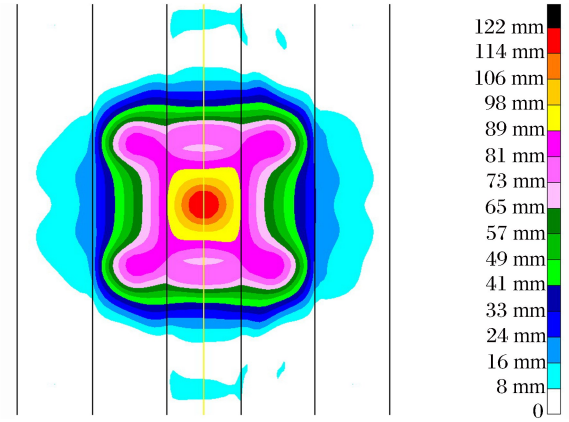

图 4 受撞壳体结构的变形分布

Fig. 4 Distribution of deformation on shell structure

点之间的壳板变形也较明显。远离受撞区的壳板等效应力和结构变形都很小。中间钢球造成的壳体损伤变形最大,最大撞击深度达到了122 mm,表明相同撞击条件下,沿圆柱壳板径向撞击造成的壳体损伤最严重。根据受撞壳体结构的特征参数可以推断,达到最大撞深时外壳板将会与内壳上的环向肋骨产生接触。

图 5 所示为钢球达到最大撞深时受撞壳体内壳的等效应力分布,可以看出,内壳上产生的塑性变形区较小,主要集中在与外壳板发生接触区以及与实肋板相连的环向肋骨上,撞击造成的内壳变形很小,表明在受撞环境下双层环肋圆柱壳的外壳能够对内壳起到很好的防护作用。

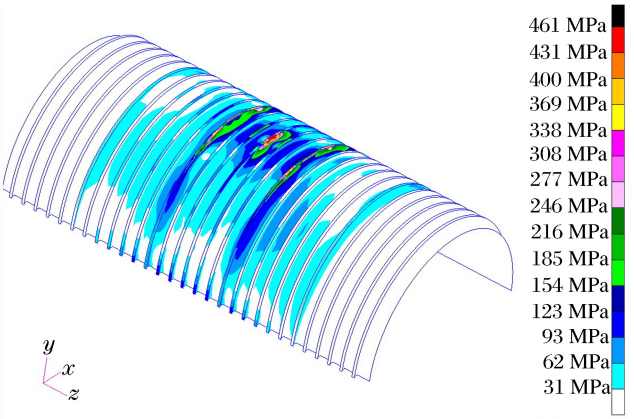

图 5 受撞内壳等效应力分布

Fig. 5 Distribution of von Mises stress on inner shell

1.2.2 撞击力变化

图 6 所示为 5 只钢球产生的撞击力时程曲线,可以看出,撞击力曲线的非线性现象十分明显,0 号球的撞击力峰值要大于其余 4 只球,表明相同条件下沿圆柱壳板径向撞击形成的撞击力最大。撞击位置相似的钢球产生的撞击力基本相同。

0 号球的撞击力曲线出现了 2 个明显的峰值,从撞击过程的动态模拟中观察分析,第 1 个峰值是由于 0 号球位于圆柱壳弧顶端,5 只钢球同一平面同时落下时,0 号球首先与圆柱壳接触,撞击力随着接触面的增加而增加,随后其余 4 只球与圆柱壳接触,它们的撞击造成了圆柱壳的凹陷,使得 0 号球与撞击位置的壳板接触面减小,因此会出现撞击力的卸载;此时 0 号球仍然具有撞击速度,随着接触的继续增加,撞击力继续增加,直至 0 号球的撞击速度减为零,撞击力达到最大值,出现第 2 个峰值。从图中还可以看出,其余 4 只钢球的撞击力曲线在卸载过程中也受到了 0 号球撞击产生的影响,表明多物体撞击过程中的撞击力会相互影响,产生耦合现象,这也是其区别于单物体撞击的显著特征。

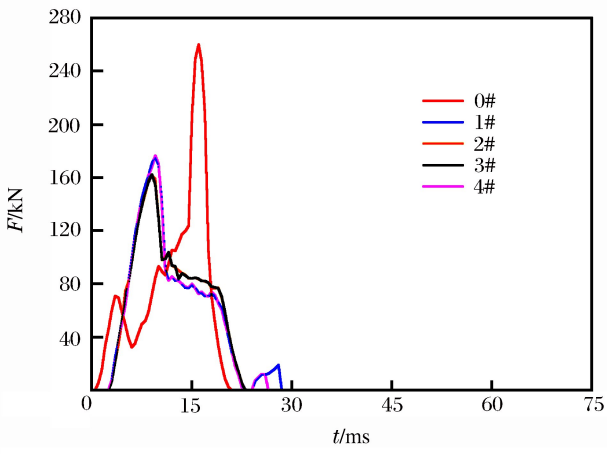

图 6 钢球撞击力时程曲线

Fig. 6 Histories of collision force exerted by steel balls

1.2.3　能量转换

壳体受撞过程遵守能量守恒定律，在整个过程中钢球的撞击动能绝大部分将会被耗散，转变成以下几种能量：受撞壳体的动能、结构变形能以及接触摩擦产生的热能，在计算中还有一部分会转变成模型的沙漏能。直接从中间钢球（0 号球）与壳体即将接触时刻开始计起，图 7 给出了整个过程中各种能量的变化曲线。可以看出，钢球的初始动能随着撞击过程的进行将会被耗散，损失的动能有 97.3%转变成了受撞壳体的结构变形能。撞击引起的壳体运动很小，因此壳体动能很小，同时，数值模拟中的沙漏能也很小，都可以忽略不计。从图中还可以发现，钢球在撞击过程中发生了反弹现象，还剩余一部分的撞击动能，考虑重力影响，反弹后的钢球动能将会转变成重力势能，再次下落撞击壳体结构，最终转变成壳体结构的变形能。

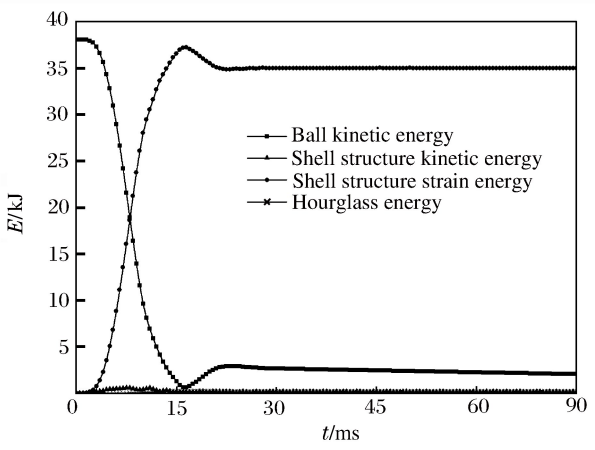

图 7　壳体受撞过程中能量转换时程曲线

Fig. 7　Histories of energy conversion in collision process

2　模型试验验证

2.1　试验模型

为了与数值模拟结果进行对比，开展了相应的模型试验。通过采用特定的装置和措施，使得 5 只钢球按照给定高度、分布方式坠落，撞击壳体的指定位置，受撞壳体结构模型及撞击钢球如图 8 所示。

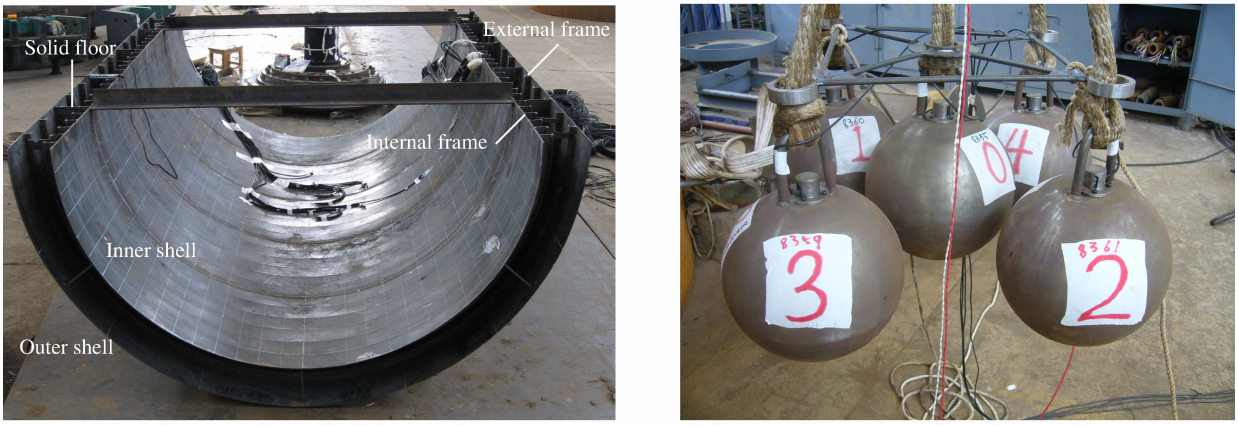

图 8　试验模型

Fig. 8　Test model of the shell

试验开始前，受撞圆柱壳模型放置在特定的试验池内，弧顶向上，两侧的纵边与试验池底钢板焊接来模拟刚性固定的边界条件。5 只撞击钢球悬挂在受撞圆柱壳中间位置的弧顶正上方，距离弧顶 7 m，通过连接在吊车上的电磁钩瞬间释放自由下落撞击壳体模型。壳体模型受撞过程中的撞击力是通过安装在钢球起吊端一侧的加速度传感器来测量的，通过动态测试仪器可以直接得到该过程中的加速度值，然后根据 $F_i = m_i a_i$ 可以求出各个钢球的撞击力，式中 F_i、m_i 和 a_i 分别为 i 号钢球的撞击力、质量和加速度，加速度传感器分别安装在 0～3 号球上。

2.2　试验结果及对比分析

对壳体模型受撞损伤的过程进行了高速摄像，受撞瞬间的接触状态及受撞后发生的钢球反弹现象如图 9 所示。从高速摄像可以观察到，撞击是在十几毫秒内完成的，时间极其短暂。壳体模型在瞬时撞

击载荷作用下,受撞区结构产生了明显的变形,同时整体还产生了明显的振动现象。钢球发生了反弹现象,0 号钢球反弹方向基本是垂直向上的,而 1～4 号钢球由于模型弧度的影响,反弹方向是稍微偏向外侧的。反弹后的钢球在重力作用下会再次撞击模型,但造成的二次结构损伤不是很明显。

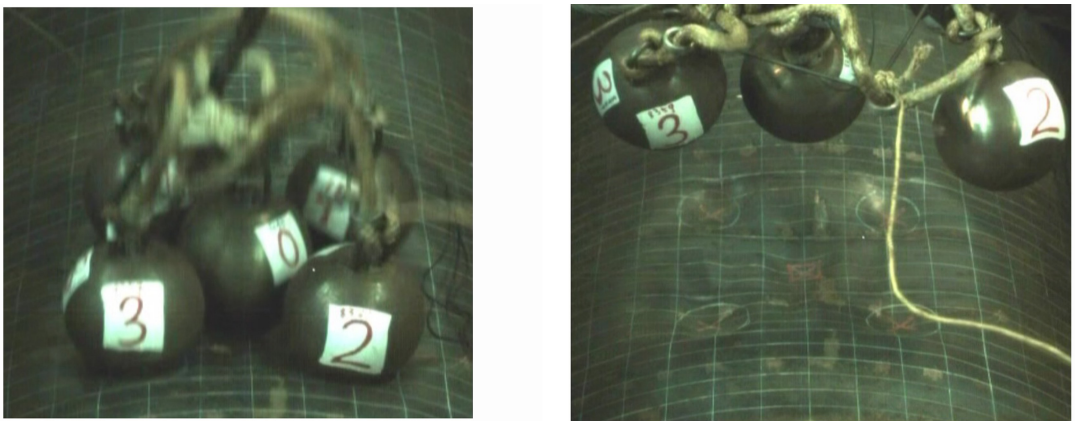

图 9 试验中的模型状态

Fig. 9 The state of the model in test

2.2.1 撞击力对比

图 10 所示为 0 号和 1 号球撞击力的模型试验结果与数值模拟结果对比图,可以看出,2 种结果吻合得较好,两者撞击力峰值和变化趋势都有很好的相似性。与数值模拟结果相比,试验得到的 0 号球撞击力曲线同样存在 2 个较明显的峰值,模型试验首次峰值的量值和卸载时间都比数值模拟计算的更大,造成这种差异的原因可能是 0 号球与其余 4 只球之间的距离在模型试验和计算之间存在微小差异,导致其余 4 只球的撞击对 0 号球产生的影响不同,但对 0 号球的撞击力最大峰值的影响很小。

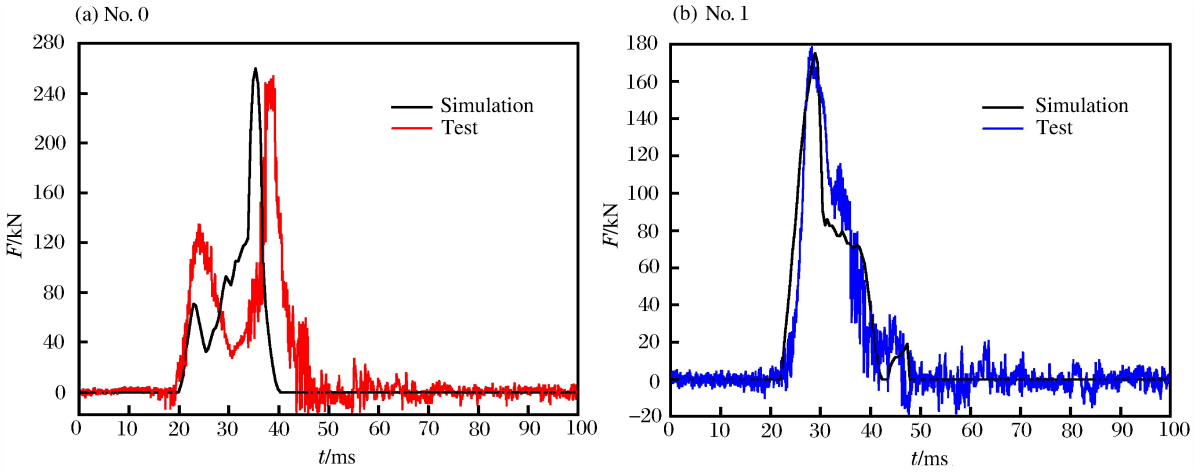

图 10 撞击力时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of the collision force histories

2.2.2 壳体结构变形对比

受撞后外壳和外壳环肋骨上产生的损伤变形的模型试验结果与数值模拟结果对比如图 11 所示。首先,从结构损伤变形范围来看,2 种结果都显示:损伤变形集中在外壳板上 5 个受撞击点形成的面内,变形在实肋板处存在较明显的终止现象。其次,从损伤模式来看,2 种结果均显示:外壳板的变形模式主要包含 2 种变形模式,一种是 5 只钢球撞击点处的壳板凹陷,另一种是连接 1～4 号钢球相邻撞击点的外壳板屈曲变形,如图 11(a)所示。这部分是由相邻受撞区壳板凹陷变形引起的连接区壳板面内挤压而造成的,即多物体撞击产生的变形耦合现象,这也是其区别于单物体撞击的典型特征。此外,外壳内表面上的环肋骨随壳板变形产生了屈曲失稳、压皱和扭曲等变形模式。

采用激光跟踪仪对试验结束后的模型外壳板受撞损伤变形量进行了测量，图 12 给出了外壳板上 5 只钢球撞击深度的试验测量结果和数值模拟结果。对比可以看出，0 号球造成的撞深最大，试验测量和数值模拟计算分别为 103.2 和 106.0 mm，两者比较接近；其余 4 只球撞深的 2 种结果差异较大。产生这种现象的原因可能有：(1)变形测量时的操作误差，例如激光定位时没有扫描到最大变形处；(2)模型的初始挠度误差；(3)撞击前钢球位置存在偏差，越靠近圆弧两侧，产生的撞深越小。上述原因也正是模型试验不确定性的表现，但从整体来看，模型试验和数值模拟结果吻合较好，有限元数值模拟能够较准确地反映壳体结构受多物体撞击的损伤特性。

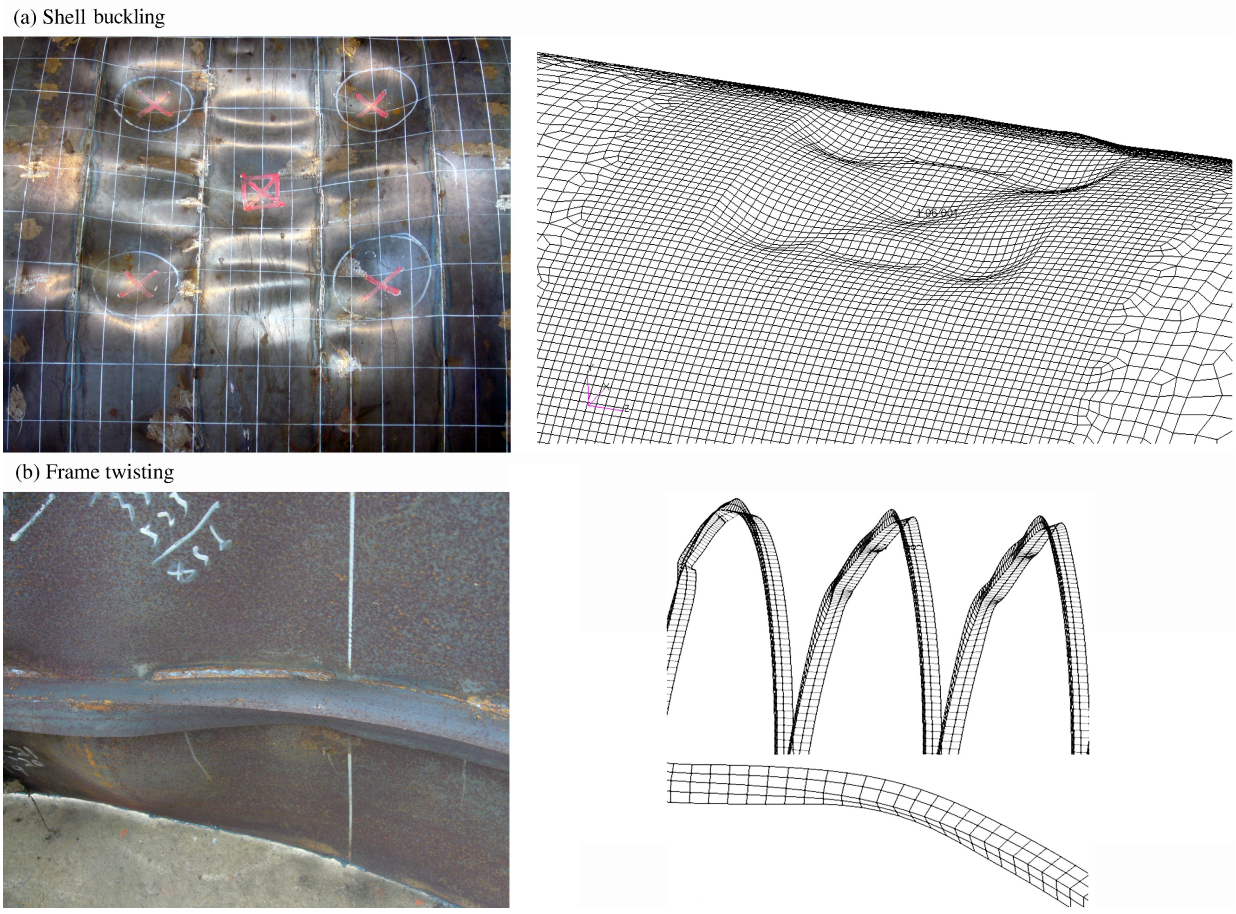

图 11　结构变形对比

Fig. 11　Comparison of deformations on the shell's structure

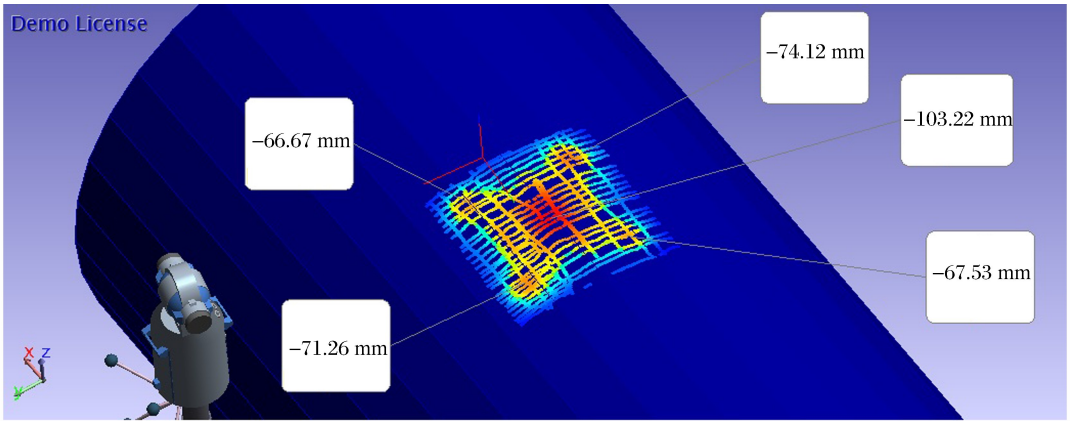

图 12(a)　壳体损伤变形试验测量结果

Fig. 12(a)　Damage deformation in test

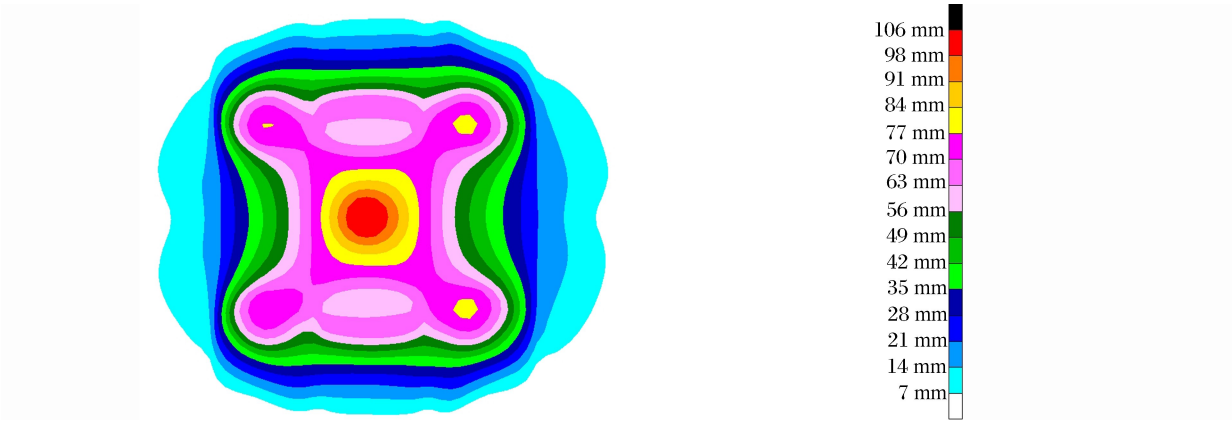

图 12(b) 壳体损伤变形数值模拟结果

Fig. 12(b) Damage deformation by simulation

3 结 论

针对双层环肋圆柱壳结构受到多物体撞击问题,分别开展了数值模拟计算和模型试验,通过对两者结果的比较,得到如下结论:

(1)双层环肋圆柱壳结构同时受多物体撞击是一个瞬态动响应过程,在巨大瞬时冲击载荷作用下,受撞区壳板会迅速超越弹性变形而产生塑性变形;撞击的物体、速度、方向均相同的前提下,沿圆柱壳板径向撞击形成的撞深和撞击力最大。

(2)多物体撞击会造成外壳板一定区域的损伤变形,当撞击物分布均匀、紧密时,壳板的损伤区域不仅包括与撞击物接触区,还包括连接这些部位的区域,后者是由多物体撞击引起的变形耦合而产生的,这也是区别于单物体撞击的典型特征。

(3)多物体撞击产生的撞击力会相互干扰,导致其非线性特征更明显;

(4)双层圆柱壳的外壳能对内壳起到较好的防护作用,在外壳没被撞穿的情况下,其结构变形会吸收绝大部分的撞击动能,可以通过优化外壳的吸能效率来达到双层壳体结构物内壳防撞的目的。

参考文献:

[1] 池建文. 潜艇海上碰撞:惊险却难免[J]. 现代舰船,2001(4):18-19.

[2] 梅志远. 基于 MSC Dytran 的潜艇结构撞击强度分析[J]. 计算机辅助工程,2006,15(S1):71-74.
Mei Zhiyuan. Numerical analysis based on MSC Dytran collision strength of submarine structure[J]. Computer Aided Engineering, 2006,15(S1):71-74.

[3] 梅志远,李卓. 单双壳体典型结构耐撞性模型试验研究及仿真分析[J]. 船舶力学,2011,15(11):1248-1249.
Mei Zhiyuan, Li Zhuo. Experimental and numerical research for impact-resistance characteristic of double or single shell structure in water[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011,15(11):1248-1249.

[4] 朱新阳, 梅志远, 吴梵. 潜艇典型结构在撞击载荷作用下动态响应的试验研究[J]. 船海工程,2009,38(4):88-91.
Zhu Xinyang, Mei Zhiyuan, Wu Fan. Research on dynamic response test of submarine typical structure unit's under impact load[J]. Ship & Ocean Engineering, 2009,38(4):88-91.

[5] Kim Y W, Lee Y S. Transient analysis of ring-stiffened composite cylindrical shells with both edges clamped[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002,252(1):1-17.

[6] 孙清磊,刘令,吴梵. 撞头形状对环肋圆柱壳水下碰撞特性的影响[J]. 船海工程,2012,41(4):98-101,109.
Sun Qinglei, Liu Ling, Wu Fan. Underwater collision properties of ring-stiffened cylinder effected by different shape of strikes[J]. Ship & Ocean Engineering, 2012,41(4):98-101,109.

[7] 浦发. 穿甲原理的新探索[J]. 弹箭与制导学报,2000(4):1-4.
Pu Fa. A new study on the theory of penetration[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2000

(4):1-4.

[8] Liu Junjie, Wan Zhengquan, Qi Enrong, et al. Numerical simulations of the damage process of double cylindrical shell structure subjected to an impact[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010,14(6):660-669.

[9] 王自力.船舶碰撞损伤机理与结构耐撞性研究[D].上海:上海交通大学,2000.

[10] MSC Software Corporation. MSC. Patran user's guide[M]. MacNeal-Schwendler Corporation, 1998.

[11] 王自力,顾永宁.船舶碰撞动力学过程的数值仿真研究[J].爆炸与冲击,2001,21(1):29-34.
Wang Zili, Gu Yongning. Numerical simulations of ship/ship collisions[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(1):29-34.

Dynamic response of double ring-stiffened cylindrical shell structure collided by multiple bodies

Liu Junjie, Wan Zhengquan, Qi Enrong

(*China Ship Scientific Research Center*, *Wuxi* 214082, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Aiming at solving the problem of the double ring-stiffened cylindrical shell structure collided by multiple bodies, a numerical simulation and a dynamic model test were carried out to explore the structural deformation, the impact force change and the energy conversion by using MSC. Dytran. Compared with the model tests, it is found that the double ring-stiffened cylindrical shell impacted by multiple bodies is a transient dynamic response process. Under enormous impact loading, shell plates in collision region will quickly generate plastic deformation; the shell impacted by multiple bodies will result in a damage to a certain degree; the impact forces will interfere with each other and then lead to the nonlinearity becoming even more significant. The results show that the external shell of the double ring-stiffened cylindrical shell can provide a better protection for the inner shell. The deformation of the structure will absorb most of the impact energy. So by optimizing the external shell's energy-absorbing efficiency a better protection against the impact can be achieved.

Key words: solid mechanics; structural damage; model test; double cylindrical shell structure; collision force; energy conversion

(责任编辑　王易难)

本刊关于稿件、版权等的声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中，作者需注意如下问题：

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果，无抄袭，无一稿多投，未在国内外公开发表过。

2. 稿件无政治错误，不涉及保密和拟申请专利的内容，已经过作者单位保密审查。

3. 作者署名和排序无异议，单位署名和排序无争议，且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中，如有作者或单位署名变更，需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。

4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时，编辑部将在 4 个月内反馈处理结果。若超过 4 个月未答复的，作者有权另行处理稿件，但需事先通知编辑部。

5. 对录用的稿件，在尊重稿件内容的基础上，编辑部有权作必要的修改和删减，按规定进行标准化和规范化。

6. 稿件录用后，稿件的所有出版权归编辑部。

7. 稿件发表后，编辑部赠送样刊，并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2016 年 3 月 25 日