

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0072

水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构 动态响应行为试验研究*

徐维铮, 赵宏涛, 李业勋, 黄宇, 傅华

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为加深水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构动态响应行为认识, 设计典型圆柱壳结构模型, 开展了水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构动态响应光电联合测试, 获得了冲击波、气泡与圆柱壳结构相互作用高速光学物理图像、动态应变、超压载荷、毁伤模式等试验数据。通过高速光学物理图像和三维激光扫描毁伤形态的分析, 给出了冲击波、气泡与圆柱壳结构相互作用物理过程及最终毁伤模式; 通过动态应变的分析, 给出了圆柱壳结构迎爆面和背爆面在加载过程中应变拉伸压缩转变和响应阶段的划分; 通过超压载荷的分析, 明确了装药爆轰完全性以及接触爆炸加载下结构吸能对超压的影响。研究表明: 爆距的变化会显著影响圆柱壳结构的毁伤形态, 近距加载下圆柱壳结构主要呈现塑性大变形, 接触加载下圆柱壳结构主要呈现撕裂破坏; 近距加载下圆柱壳结构迎爆面空化区的形成及溃灭形成的二次加载毁伤效应不容忽视, 值得深入研究; 研究成果可为水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构毁伤评估提供参考和依据。

关键词: 水下爆炸; 近距爆炸; 接触爆炸; 冲击波; 气泡; 高速破片; 圆柱壳; 毁伤模式

中图分类号: O382.1 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

An experimental study on dynamic response of cylindrical shell under near-field/contact underwater explosion

XU Weizheng, ZHAO Hongtao, LI Yexun, HUANG Yu, FU Hua

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: In order to deepen the understanding of the dynamic response of cylindrical shell under near-field/contact underwater explosion, small-scale model of cylindrical shell was designed and then optical and electronical tests were conducted to investigate the dynamic response of the model. The physical images of the interaction of shock wave/bubble with cylindrical shell were obtained using a camera with high frequency and high resolution. At the same time, dynamic strain, overpressure and damage mode were obtained. By analyzing the damage morphology of 3D laser scanning and high-speed optical physical images, the physical process of the interaction between shock waves, bubbles, and cylindrical shell structures as well as final damage mode are presented. Through the analysis of dynamic strains, the transformation of tension and compression strains and the division of response stages of the explosion-facing surface and back surface of cylindrical shell structure during loading are revealed. Through the analysis of overpressure loads, the completeness of charge detonation and the influence of structural energy absorption on overpressure under contact explosion loading are clarified. Research results have shown that changes in detonation distance can significantly affect the damage morphology of cylindrical shell structures. Under close range loading, cylindrical shell structures mainly exhibit large plastic deformation, while under contact loading,

* 收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-08-20

基金项目: 中国工程物理研究院培育基金(PY20200003); 装备预先研究领域基金(80928010101)

第一作者: 徐维铮(1991—), 男, 博士, 助理研究员, xuweizheng@whut.edu.cn

通信作者: 黄宇(1986—), 男, 博士, 助理研究员, huangyu@buaa.edu.cn

cylindrical shell structures mainly exhibit tearing failure. The formation and collapse of the cavitation zone on the explosion facing surface of cylindrical shell structures under close range loading cannot be ignored, and the damage effect caused by secondary loading should be further studied. The research results can provide a reference basis for the damage assessment of cylindrical shell structures under near-field/contact underwater explosion.

Keywords: underwater explosion; near-field explosion; contact explosion; shock wave; explosion bubble; high speed fragment; cylindrical shell; damage mode

随着炸药性能的不不断提升和水中兵器(例如鱼雷、水雷等)制导技术的发展,水下近距/接触爆炸是导致潜艇、UUV(unmanned underwater vehicle)等水下航行器圆柱壳体结构失效的主要攻击方式之一,因此,研究水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳体结构的动态响应与破坏特性具有重要的理论和工程应用价值。水下近距/接触爆炸过程涉及冲击波、爆轰产物、高速破片等多载荷耦合以及加载结构材料、几何、边界非线性等问题,一直是水下爆炸毁伤研究的难点。

近年来,针对圆柱壳结构在水下爆炸冲击波加载下的动力响应问题,学者们从数值、试验等方面开展了大量的研究工作。数值研究方面,姜涛等^[1]采用 AUTODYN 有限元软件,分析了潜艇典型双壳体舱段结构在鱼雷近距/接触爆炸($W=400\text{ kg}$; $R=2, 4, 6\text{ m}$; $R/R_0=5.1, 10.2, 20.4$, 其中 W 为等效 TNT 当量, R 为爆距, R_0 为等效药球半径)加载条件下壳体的动态变形及破坏形态。计算结果表明,潜艇在鱼雷接触加载条件下,耐压及非耐压壳体出现撕裂破口,且耐压壳体破口范围更大;在近距爆炸加载条件下,耐压及非耐压壳体主要呈现塑性大变形毁伤模式。Yuan 等^[2]采用 MSC-DYTRAN 有限元软件模拟研究爆炸角度、深度对典型圆柱壳的毁伤影响规律($W=0.08\text{ kg}$, $R=0.83\text{ m}$, $R/R_0=36.2$),结果表明: 90° 加载方向圆柱壳毁伤最严重, 0° 加载方向圆柱壳毁伤较轻;随着水深的增加,圆柱壳毁伤程度加大,呈现屈曲压溃毁伤模式。Brochard 等^[3]采用 LS-DYNA 软件数值研究了爆炸深度对圆柱壳结构变形的影响规律,随着静水压力的增大,圆柱壳迎爆面塑性凹陷大变形加剧($W=1.1\text{ kg}$, $R=0.42\text{ m}$, $R/R_0=7.6$)。上述文献的数值模拟计算中仅给出了最终的破坏形态,没有给出冲击波、气泡与圆柱壳的相互作用过程。Nguyen 等^[4]采用自主开发的两相流数值模拟程序开展了单发装药和双发装药水下爆炸加载圆柱壳结构数值计算($W=8\text{ kg}$; $R=0.25, 0.50\text{ m}$; $R/R_0=2.3, 4.7$),获得了冲击波、气泡与圆柱壳结构流固耦合作用过程的物理图像,然而,模拟中壳体为刚性,并没有考虑壳体的变形。试验研究方面: Brett 等^[5-6]采用两端刚固的钢制圆柱壳模型进行水下爆炸远场加载试验($W=0.005, 0.01\text{ kg}$; $R=0.15, 0.3\text{ m}$; $R/R_0=16.5, 26.1$),测量获得了冲击波和气泡载荷作用下圆柱壳典型部位的加速度曲线、挠度变化值,初步阐明了冲击波和气泡载荷对结构毁伤的影响;试验的加速度曲线充分说明目标载荷对于结构的毁伤过程分为冲击波和气泡两个阶段,圆柱壳结构迎爆面主要呈现弹塑性小变形凹陷。Hung 等^[7]在水箱中开展了水下不同爆距加载下不同加筋形式铝制/钢制圆柱壳结构毁伤试验研究($W=0.001\text{ kg}$, $R=0.35\sim 2.1\text{ m}$, $R/R_0=65.7\sim 394.3$),测试了应变、加速度响应等动态参数并采用高速相机获得了加筋圆柱壳结构在爆炸加载下的动态响应物理图像,试验结果表明:远场加载下圆柱壳主要产生弹性冲击振动,近场加载下圆柱壳迎爆面主要产生弹塑性小变形。Gannon 等^[8-9]在爆炸水池中开展近自由面和近刚性底面炸药水下爆炸冲击波/气泡载荷作用下不同长径比铝制圆柱壳结构毁伤试验($W=0.0015\text{ kg}$; $R=0.0365, 0.1775\text{ m}$; $R/R_0=5.99, 29.1$),并测试了典型位置应变和压力载荷数据,同时采用高速相机获得了近自由面/底面附近气泡与圆柱壳结构流固耦合作用图像。上述文献中的试验研究主要集中在水下远场、中近场($R/R_0>6$)加载下圆柱壳结构的弹塑性小变形,而水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构会出现弹塑性大变形、局部撕裂等毁伤特征,也是现代高精度制导水中兵器作战的主要命中工况,对其物理过程的认识将为武器设计和毁伤评估提供参考和依据,具有重要的物理意义和工程应用价值。

为此,本文将开展水下近距/接触爆炸($R/R_0<6$)加载下圆柱壳结构动态响应行为的光电联合测试试验研究,获得圆柱壳结构动态响应历程高速光学物理图像、典型部位应变及毁伤模式数据,揭示水下爆炸冲击波、气泡与圆柱壳结构相互作用物理过程,加深对水下爆炸近距/接触加载下圆柱壳结构毁伤机理的认识。

1 试验模型及测试布置

1.1 试验模型

试验模型为典型的圆柱壳结构,长 400 mm、内径 200 mm、壳体厚 3 mm,两端面采用 10 mm 厚的封板进行密封,并设置上下吊耳,便于使用细钢丝绳在水中悬挂圆柱壳结构,壳体材料采用 Q235 结构钢,图 1 为圆柱壳结构的实物图。



图 1 圆柱壳结构模型

Fig. 1 Model of cylindrical shell

1.2 测试布置

试验在 4 m×4 m×5 m 的爆炸水箱中开展,水箱采用厚钢板外加筋方式焊接,前部设置透光性较好的有机玻璃窗口,便于高速物理图像的拍摄,可承载 150 g TNT 当量的水下爆炸,满足本次试验加载的要求。

本次试验共设置两种爆炸工况,试验装药为 JH-14,其组分为 96.5% 的黑索今和 3.5% 的添加剂,密度约 1.70 g/cm³,爆压 27.67 GPa,爆速 8 190 m/s,爆热 5 795 kJ/kg,约 1.2 倍的 TNT 当量;试验装药为药柱,采用 26#雷管在药柱上端面中心处进行单点起爆。工况 1:药柱尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,药量为 72 g,炸药中心距离圆柱壳迎爆面上沿中心 130 mm ($R/R_0 = 4.33$),主要模拟圆柱壳结构在水下近距爆炸加载下动态响应行为;工况 2:药柱尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$,药量为 36 g,炸药中心距离圆柱壳迎爆面上沿中心 15 mm ($R/R_0 = 1.0$),主要模拟圆柱壳结构在接触爆炸加载下的动态响应行为。图 2 为试验加载工况图。

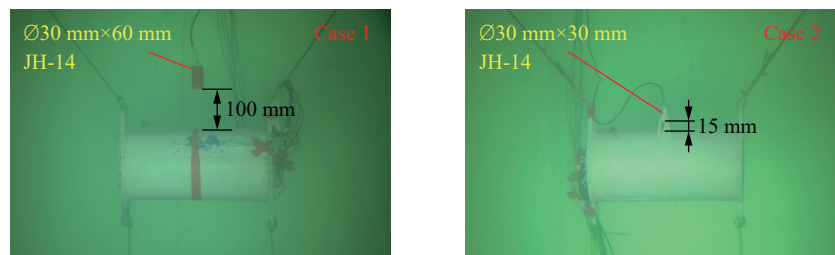


图 2 试验加载工况图

Fig. 2 Experimental loading cases

本次试验测试参数主要包括圆柱壳结构动态响应过程高速光学物理图像、圆柱壳典型部位应变、水中压力。结构响应过程的高速光学测试,利用高功率、长照明无频闪冷光灯实现前照明,采用高速相机进行拍摄,拍摄幅频为 50 000 s⁻¹,曝光时间为 5.0 μs 。动态应变测试方面,工况 1 为近距爆炸加载,圆柱壳迎爆面以弯曲塑性大变形为主,在圆柱壳外表面设置 4 个应变测点。其中,圆柱壳迎爆面上沿布置 2 个测点: P1~P2,背爆面下沿布置 2 个测点: P3~P4,沿着圆柱壳轴向粘贴应变片,主要用于获得近距爆炸加载下圆柱壳典型部位轴向应变响应特征。工况 2 为接触爆炸加载,圆柱壳迎爆面以剪切冲塞和撕裂破坏为主,炸药与圆柱壳结构上表面接触处无法布置应变测点,因此设置 3 个应变测点,圆柱壳迎爆

面上沿布置 1 个测点: P1, 背爆面下沿布置 2 个测点: P2~P3, 沿着圆柱壳环向粘贴应变片, 主要用于获得接触爆炸加载下圆柱壳典型部位的环向应变响应特征; 针对水中爆炸压力测试, 布置 1 个压力测点, 两种工况测点与装药爆心在同一深度平面上, 且距离爆心的直线距离分别为 1 640、1 660 mm, 主要用于监测炸药爆轰的完全性。图 3 给出了试验测试布置示意图。

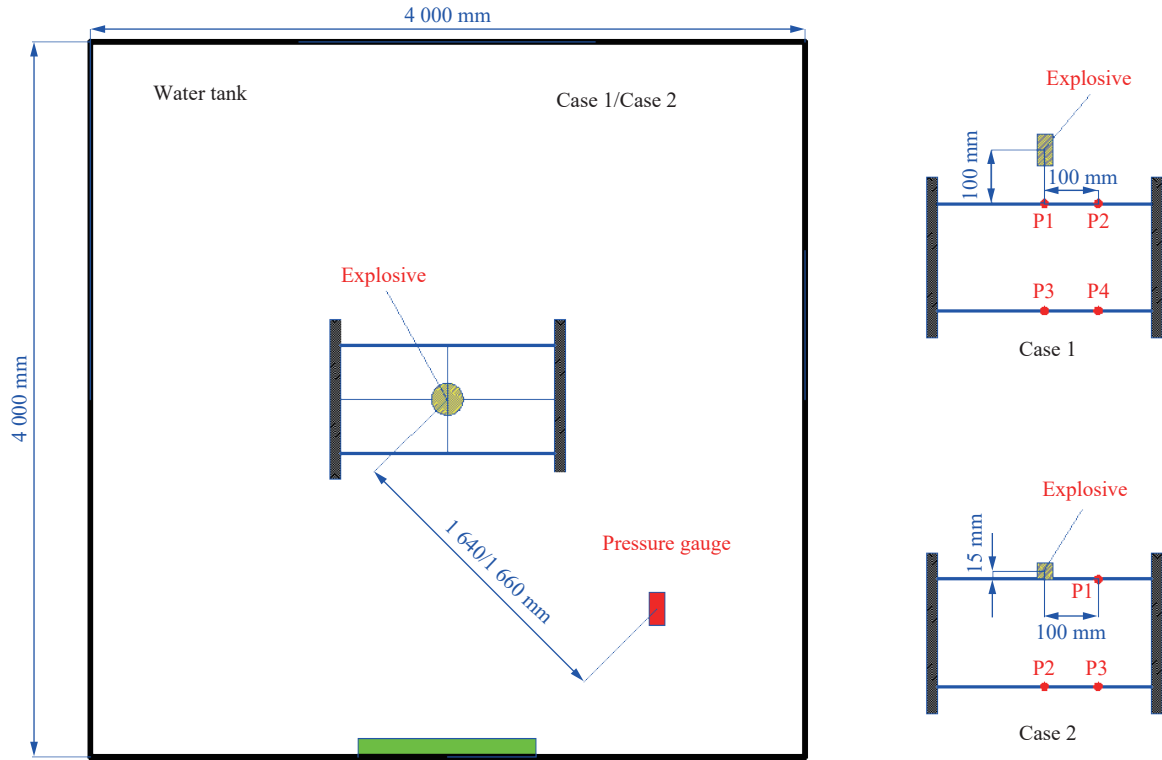


图 3 试验测试布置示意图(左为俯视图, 右为正视图)

Fig. 3 Experimental layout (left: top view, right: front view)

2 试验结果分析

2.1 水下近距爆炸动态响应物理图像及毁伤模式分析

图 4 给出了近距爆炸冲击波、气泡与圆柱壳结构相互作用时的物理图像(工况 1)。由图 1 可知, 由于装药长径比为 2, 装药起爆后, 爆炸近场冲击波以近似椭球波的形式于 $t = 60 \mu\text{s}$ 入射到圆柱壳结构迎爆面, 到达结构壁面后发生正规反射, 随着规则反射区的增大, 壁面空化区开始形成。反射波于 $t = 100 \mu\text{s}$ 左右与爆炸气泡界面相遇, 由于气泡阻抗较小, 反射波冲击气泡界面将反射稀疏波使得空化区进一步扩大(图 4 中 $t = 160 \mu\text{s}$ 时刻)。反射波对气泡界面的冲击作用使得气泡界面形态由原来的椭圆形演化为梨形(图 4 中 $t = 100 \sim 240 \mu\text{s}$ 时刻); 之后, 由于圆柱壳结构的 Bjerknes 吸引力, 气泡逐渐被拉伸成下端变尖的椭球形态, 气泡界面与圆柱壳结构之间的间距逐渐缩小, 空化区域开始逐渐溃灭, 在 $t = 300 \mu\text{s}$ 左右空化区基本溃灭消失, 此时冲击波已经扫过整个圆柱壳结构, 冲击波及空化区溃灭的二次冲击加载使得圆柱壳结构迎爆面呈现局部弯曲小变形。随着气泡的进一步膨胀, 圆柱壳结构变形加剧, 迎爆面呈现弯曲大变形凹陷, 背爆面呈现中拱弯曲小变形(图 4 中 $t = 800 \sim 1500 \mu\text{s}$)。

针对圆柱壳结构壁面空化区的形成机理, 可根据文献 [10] 中修正的 Taylor 平板理论进行解释, 壁面空化发生时刻 t_{va} 为:

$$\frac{t_{va}}{\theta} = \frac{\ln \psi_a}{\psi_a - 1} \quad (1)$$

式中: 无量纲参数 $\psi_a = \rho_w c_w \theta / m$; θ 为冲击波衰减常数, s ; m 为单位面积平板的质量, kg/m^2 ; ρ_w 为水的密度, 取值为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; c_w 为水的声速, m/s , 由于试验工况 1 为近距爆炸, 水的声速在近场区域内变化具有强烈的非线性, 不能采用传统的远场声速 $1500 \text{ m}/\text{s}$, 其计算方法采用水的非线性 $D-u$ 关系拟合得到的经验公式^[10]:

$$c_w = 53.92 (R/W^{1/3})^{-1.429} + 1496 \quad (2)$$

工况 1 中, 圆柱壳壁面为 3 mm 厚的 Q235 钢板, 根据式 (1) 计算可知, $t_{va} \geq 17.4 \mu\text{s}$, 即空化将在入射冲击波到达结构壁面后约 $17.4 \mu\text{s}$ 之后开始形成; 从图 4 中 $t = 80 \sim 100 \mu\text{s}$ 时间段中可清晰看到, 随着反射冲击波的传播, 壁面区域附近逐渐出现肉眼可见的空化区域, 这说明在薄壁圆柱壳结构壁面附近流场的空化形成主导机制是 Taylor 平板效应。

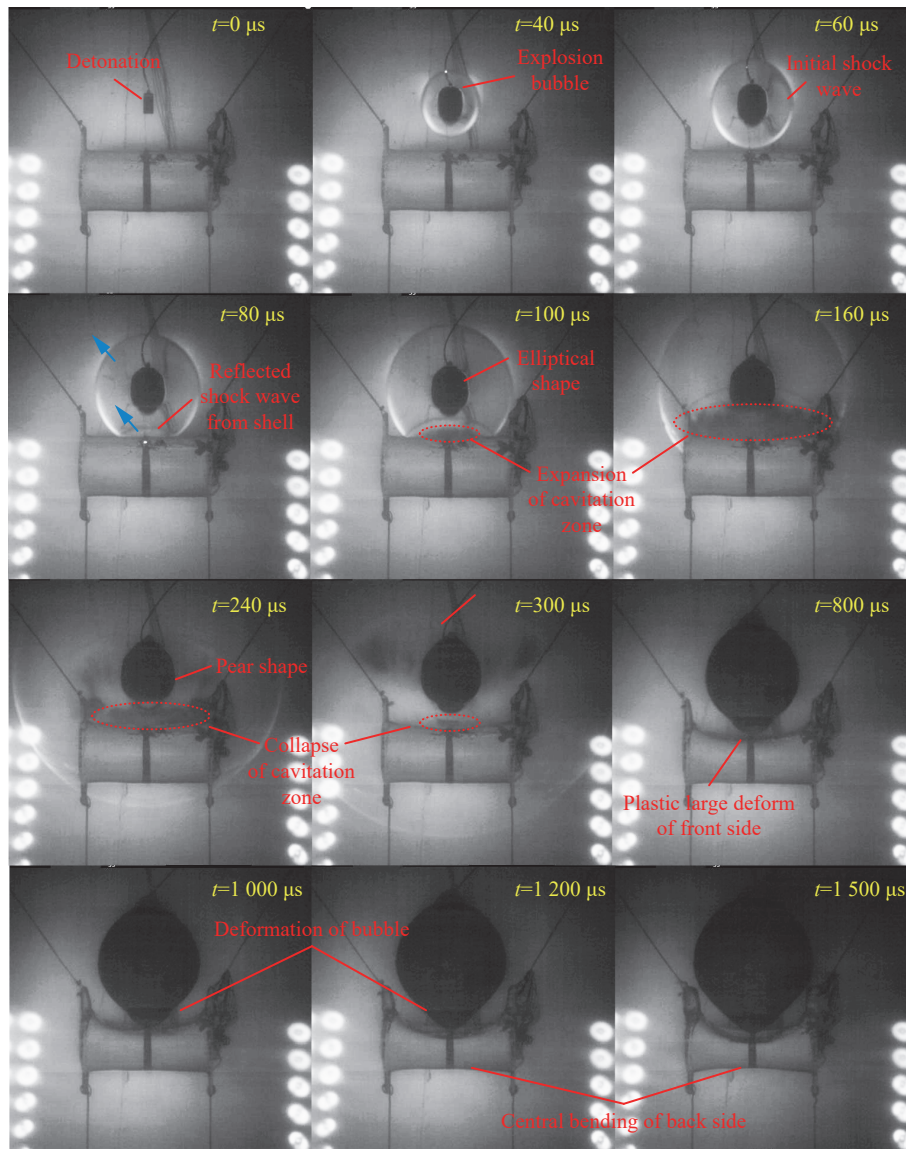


图 4 近距爆炸加载圆柱壳结构动态响应物理图像(工况 1)

Fig. 4 Physical picture of dynamic response of cylindrical shell under near-field explosion(case 1)

图 5 中给出了工况 1 中圆柱壳结构弹塑性大变形毁伤模式图像。从图中可知: 近距爆炸加载下圆柱壳结构总体毁伤模式主要为迎爆面塑性凹陷大变形, 变形最大值约为 91.6 mm , 接近圆柱壳的半径值,

背爆面塑性凹陷小变形, 变形最大值约为 22.5 mm, 圆柱壳长度方向中心位置剖面的上下端面两点间距离为 55.3 mm, 上端面中心点距离变形边缘的水平距离为 118.6 mm。圆柱壳迎爆面塑性大变形拉伸使得左右两个封板出现向内的扭曲, 扭曲角度约为 9.2° 。

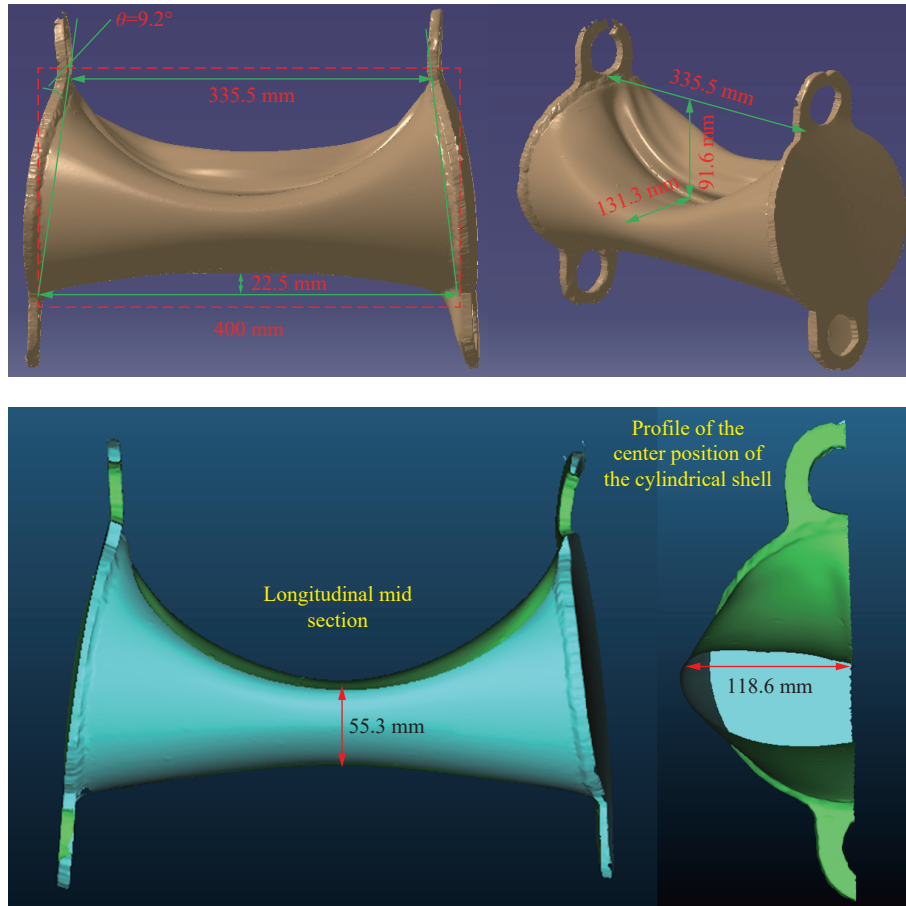


图 5 近距爆炸加载圆柱壳毁伤模式图像(工况 1)

Fig. 5 Damage mode of cylindrical shell under near-filed explosion (case 1)

2.2 水下接触爆炸动态响应物理图像及毁伤模式分析

图 6 中给出了接触爆炸冲击波、爆轰产物与圆柱壳结构相互作用的物理图像(工况 2)。分析可知, 装药起爆后, 爆炸冲击波以半球波的形式沿着圆柱壳结构迎爆面传播, 随着爆轰产物的膨胀压缩, 圆柱壳结构迎爆面中心区域开始出现局部凹陷(图 6 中 $t = 120 \mu\text{s}$); 在吉帕量级高压爆轰产物驱动下, 圆柱壳迎爆面会形成局部冲塞破片, 该冲塞破片在爆轰产物的驱动下, 在 $t = 160 \mu\text{s}$ 左右高速撞击圆柱壳结构背爆面形成冲塞块, 冲塞块高速冲击入水使得圆柱壳背爆面出现二次冲击波(图 6 中 $t = 160 \sim 220 \mu\text{s}$); 随着冲塞块在水中的高速运动, 水中逐渐出现竖向尖椭球形空腔, 在此过程中, 爆轰产物也将通过背爆面冲塞破口逐渐溢出到空腔中, 具体溢出过程需要详细的数值模拟进行分析; 随着爆轰产物的膨胀压缩, 圆柱壳结构迎爆面逐渐形成 V 字形凹陷(图 6 中 $t = 400 \sim 1000 \mu\text{s}$)。

图 7 中给出了工况 2 下圆柱壳结构撕裂破坏毁伤模式图像。分析可知: 接触爆炸加载下圆柱壳结构总体毁伤模式主要以剪切冲塞破坏和撕裂型破坏为主, 迎爆面破口边界呈现四瓣花瓣形破裂, 破口形状近似为菱形, 菱形长边、短边分别接近 400、150.8 mm, 平均破口半径约为 137.7 mm; 背爆面形成的剪切冲塞破口形状近似为椭圆形, 长轴为 28.5 mm, 短轴为 22.5 mm。从圆柱壳正视图来看, 圆柱壳形成的 V 字形凹陷的角度接近 76.6° , 背爆面底部左右两端呈现略微上翘的挠度。由于接触爆炸炸药加载能量

大部分被圆柱壳迎爆面塑性变形和撕裂破坏吸收,使得左右两个封板向内扭曲的角度较工况 1 减小,扭曲角度约为 2.2° 。

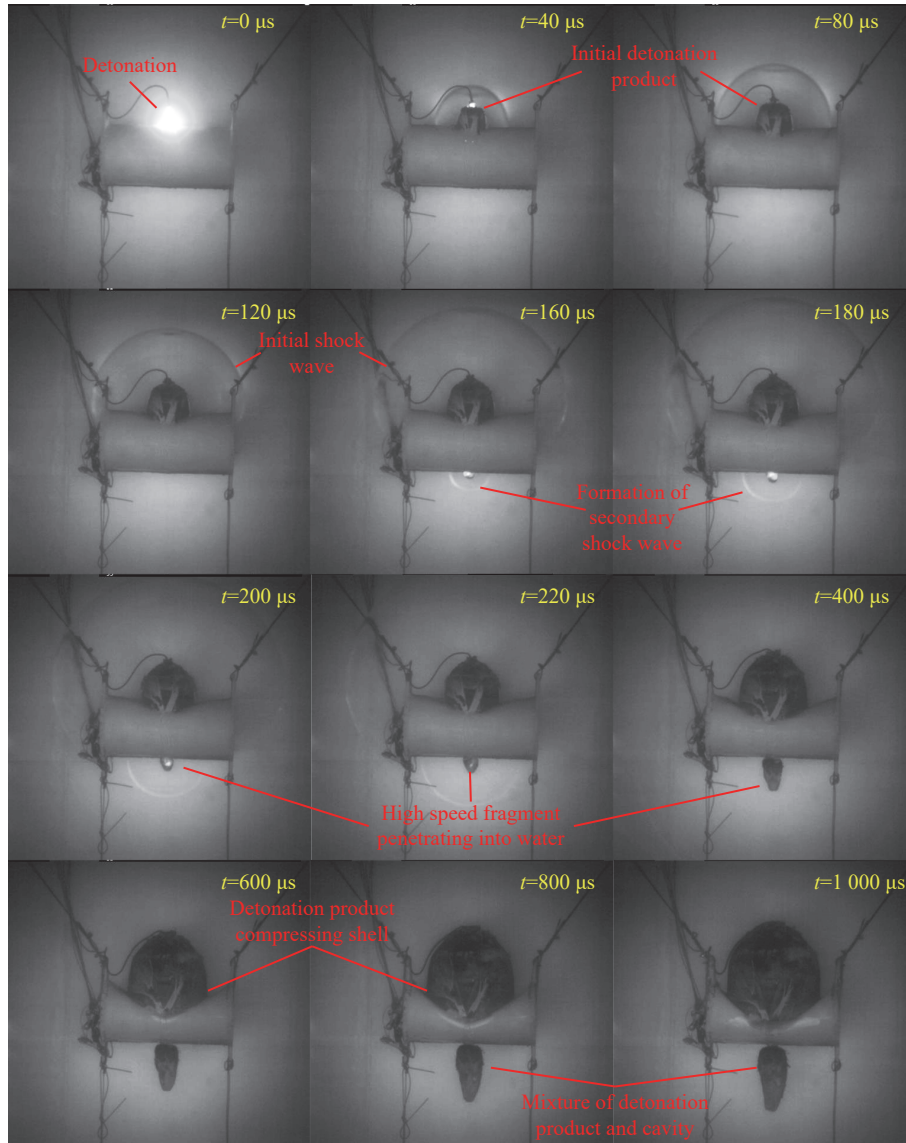


图 6 接触爆炸加载圆柱壳结构动态响应物理图像(工况 2)

Fig. 6 Physical pictures of dynamic response of the cylindrical shell under contact explosion(case 2)

针对水下接触爆炸载荷作用下板壳破口半径的计算问题,已有大量的实验和理论研究。文献 [11] 中基于能量原理提出了水下爆炸破口的经验公式:

$$R_p = \sqrt{\frac{2\eta W Q_{\text{TNT}}}{\pi t \sigma_y \varepsilon_f}} \quad (3)$$

式中: η 为装药能量转化为板变形的能量百分比,取值为 0.1236; Q_{TNT} 为炸药的爆热,取值为 4.69 MJ/kg; σ_y 为板的静态屈服强度,取值为 235 MPa; ε_f 为板破坏的极限应变,取值为 0.2469; t 为板的厚度,取值为 3 mm。针对试验工况 2 计算可得估计的破口半径 $R_p = 302.6$ mm,约为试验破口半径的 2.2 倍。分析认为,形成以上偏差的主要原因有以下 3 点:(1)当板尺寸相对装药直径足够大时,该公式预估结果较好,而本文的试验工况中圆柱壳板直径尺寸与装药直径比仅为 6 左右;(2)本文试验工况为圆柱壳结构,具

有弧度特征, 变形特征不同于平板结构; (3) 圆柱壳结构背爆面和两端封板对迎爆面裂纹持续传播起到了一定的阻碍作用, 也使得最终的破口尺寸减小。

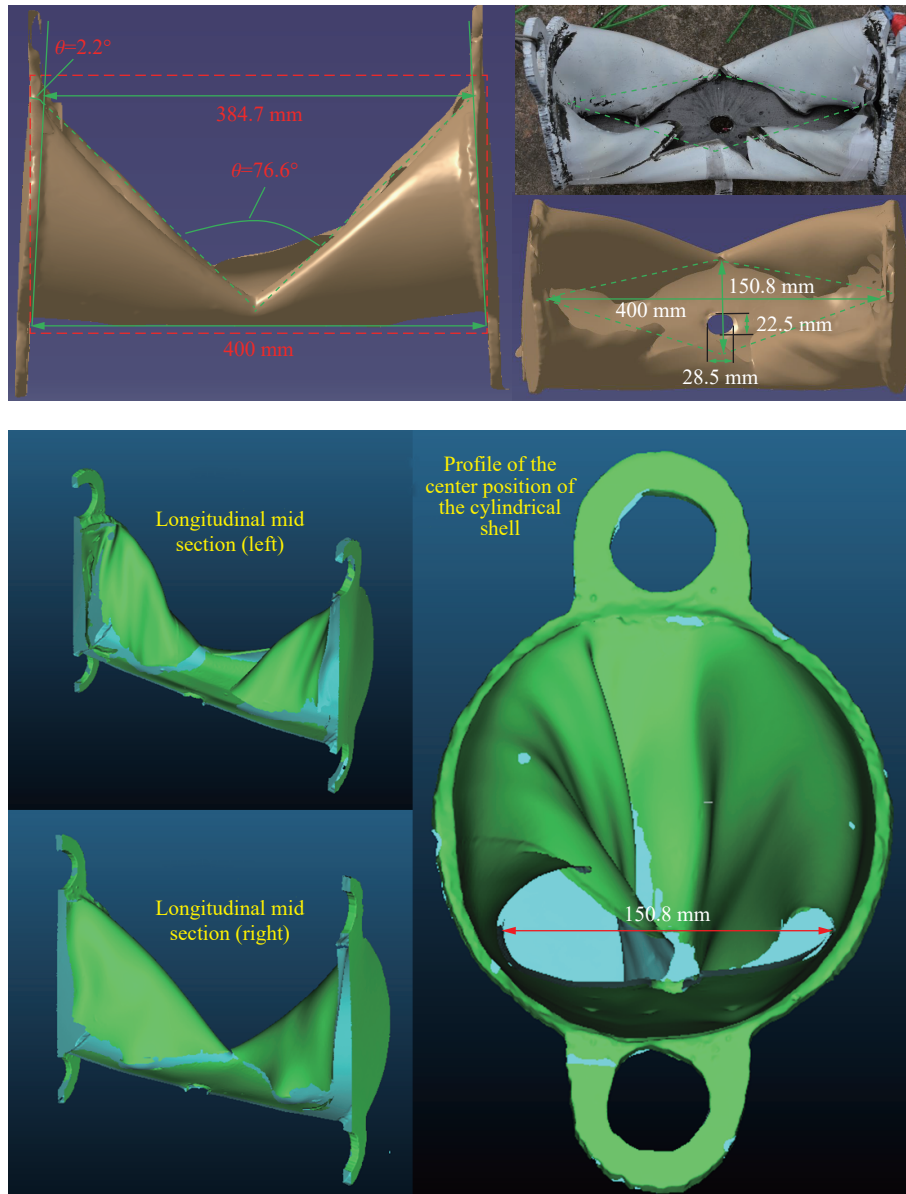


图 7 接触爆炸加载圆柱壳毁伤模式图像(工况 2)

Fig. 7 Damage mode under contact explosion(case 2)

2.3 动态应变响应分析

图 8 中给出了近距加载下圆柱壳结构迎爆面和背爆面轴向动态应变响应时间历程曲线(工况 1)。分析图 8(a)可知, 迎爆面测点 P1 在 $t = 62 \mu\text{s}$ 受到冲击波加载(图 4 中 $t = 60 \mu\text{s}$ 时刻), 壳体在响应初期处于弹塑性小变形阶段, 应变状态为压缩状态, 压缩应变平台基本维持在 4.0×10^{-3} , 持续时间约 $192 \mu\text{s}$, 随着壳体变形的增大, 膜效应增强, 壳体中面拉伸应变占主导, 在 $274 \mu\text{s}$ 后壳体应变状态由压缩应变反转为拉伸应变; 由于迎爆面测点 P2 靠近圆柱壳端部, 在 $t = 82 \mu\text{s}$ 受到冲击波加载(图 4 中 $t = 80 \mu\text{s}$ 时刻), 由于端部强约束, 靠近端部的壳体类似悬臂梁弯曲状态, 处于快速拉伸应变状态; 由于迎爆面应变测线在爆炸近区被冲击波拉断或应变过载失效导致后续的应变信号没有得到捕捉。分析图 8(b)可知, 背爆面

测点 P3、P4 受载后, 总体响应主要划分为三个阶段: 第一个阶段为压缩应变响应时段, 持续时间约 980 μs (对应背爆面壳体的初期弹塑性小变形), 第二个阶段为拉伸应变响应阶段, 持续时间约为 1 146 μs , 第三个阶段两个测点的应变约在 4.5 ms 左右达到平稳状态, 最终残余塑性拉伸应变分别为 8.215×10^{-3} 、 0.939×10^{-3} (对应背爆面壳体的后期弹塑性大变形)。

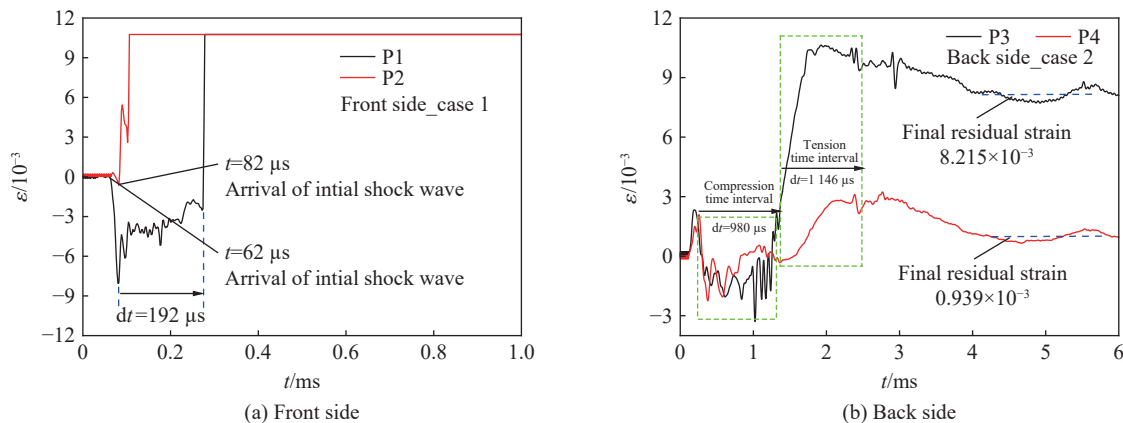


图 8 动态应变响应时间历程曲线(工况 1)

Fig. 8 Time histories of dynamic strain for case 1

图 9 中给出了接触加载下圆柱壳结构迎爆面和背爆面环向动态应变响应时间历程曲线(工况 2)。分析图 9(a)可知, 迎爆面测点 P1 在 $t = 60 \mu\text{s}$ 受到冲击波加载(图 6 中 $t = 40 \sim 80 \mu\text{s}$ 时刻), 壳体在响应初期环向处于快速压缩应变状态, 压缩应变持续时间约 96 μs , 在爆轰产物驱动下壳体沿着径向发生大变形凹陷, 在 $t = 156 \mu\text{s}$ 后壳体环向应变状态由压缩应变反转为拉伸应变并超出应变片最大量程, 导致后续信号没有得到捕捉; 测点 P2 在背爆面下沿中心位置, 在 $t = 140 \mu\text{s}$ 时刻圆柱壳迎爆面接触爆炸形成的高速破片直接撞击冲塞背爆面中心位置形成破口(图 6 中 $t = 160 \mu\text{s}$ 时刻), 使得该测点位置应变测线失效; 背爆面测点 P3 靠近圆柱壳端部, 在 $t = 210 \mu\text{s}$ 左右开始受到背爆面冲塞破片入水形成的二次冲击波加载(图 6 中 $t = 200 \sim 220 \mu\text{s}$ 时刻), 环向处于压缩应变状态。分析图 6(b)可知, 测点 P3 受载后, 总体响应主要划分为两个阶段: 第一个阶段为压缩应变响应时段, 持续时间约 1.9 ms, 第二个阶段为平稳响应阶段(约在 2.5 ms 左右到达), 最终残余环向压缩应变为 20.4×10^{-3} 。

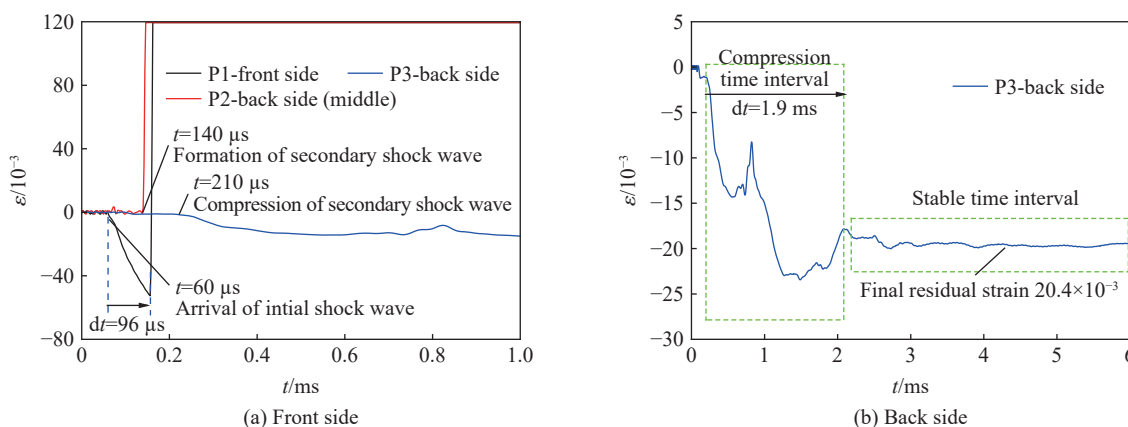


图 9 动态应变响应时间历程曲线(工况 2)

Fig. 9 Time histories of dynamic strain for case 2

2.4 超压测试结果分析

JH-14 炸药的完全爆轰, 是可靠加载圆柱壳结构毁伤的前提, 图 10 中给出了两种试验工况下自由场

超压的时间历程曲线。

分析图 10(a)可知, 装药爆炸后, 初始冲击波在 $t = 1.064$ ms 到达超压测点, 峰值压力为 12.457 MPa; 在 $t = 1.145$ ms 时刻, 圆柱壳体迎爆面反射冲击波(见图 4 中 $t = 80 \sim 300$ μ s 时间段内壁面反射冲击波传播)到达超压测点, 峰值压力为 5.053 MPa; 由于传感器测点放置在箱体角隅处, 两个壁面反射冲击波分别在 $t = 1.957, 2.030$ ms 到达超压测点, 峰值压力分别为 5.406、5.171 MPa。分析图 10(b)可知, 装药爆炸后, 初始冲击波在 $t = 1.095$ ms 到达超压测点, 峰值压力为 7.403 MPa; 由于传感器测点放置在箱体角隅处, 两个壁面反射冲击波分别在 $t = 2.032, 2.089$ ms 到达超压测点, 峰值压力分别为 2.556、3.702 MPa。

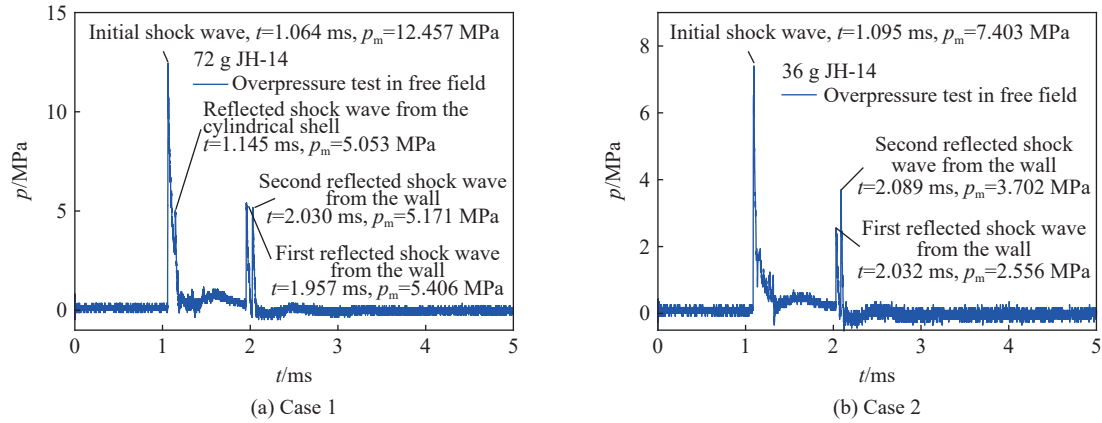


图 10 两种试验工况下超压的时间历程曲线

Fig. 10 Overpressure time histories of two experimental cases

进一步通过文献中经验公式检验试验过程中装药爆轰完全性。不同装药水中爆炸冲击波超压峰值计算的公式为:

$$p_m = k \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中: p_m 为冲击波超压峰值, MPa; k 和 α 为炸药在水中爆炸时冲击波的超压系数, 与炸药物理化学性质有关, 其大小由试验确定。传统 TNT 炸药的 k 和 α 值分别为 52.4 和 1.13; 针对本文试验采用的 JH-14 炸药, 文献 [12] 在爆炸水池中测试了 200 g JH-14 炸药在不同水深和作用距离处的冲击波峰值超压, 拟合给出 k 和 α 值分别为 57.01 和 1.131, 即 JH-14 炸药的水下爆炸冲击波峰值压力计算公式为:

$$p_{m\text{-JH-14}} = 57.01 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1.131} \quad (5)$$

试验工况 1 中的药量为 72 g, 根据式 (5) 计算得到的初始冲击波峰值压力为 12.083 MPa; 试验测试值为 12.457 MPa, 与经验公式计算值偏差约为 3.1%, 认为装药已经完全爆轰。试验工况 2 药量为 36 g, 根据式 (5) 计算得到的初始冲击波峰值压力为 9.177 MPa; 试验测试值为 7.403 MPa, 与经验公式计算值偏差约为 -23.3%, 分析认为: 主要由于试验工况 2 为接触爆炸, 部分爆炸初始能量被用于破坏壳体结构, 从而导致传播到自由场中的冲击波峰值减弱; 根据超压峰值反推等效 TNT 当量的方法, 则近似估算得到用于加载圆柱壳结构能量及气泡能占爆炸总能的比例约为 43%, 圆柱壳结构更精确的吸能占比需要结合理论分析和数值模拟进行确定。

3 结论

设计典型圆柱壳结构, 在爆炸水箱中开展了水下近距/接触爆炸加载下圆柱壳结构动态响应行为光电联合测试试验研究, 获得了圆柱壳结构动态响应高速光学物理图像、动态应变时历曲线以及压力载

荷, 通过试验数据的对比分析主要得到以下结论。

(1) 本文爆炸工况下, 近距加载下圆柱壳结构主要呈现弹塑性大变形毁伤模式, 迎爆面呈现弯曲大变形凹陷, 背爆面呈现中拱弯曲小变形; 圆柱壳结构从弹性小变形到弹塑性大变形演变的过程中, 膜力效应的增强会导致壳体应变状态发生转变。

(2) 本文爆炸工况下, 接触爆炸加载下圆柱壳结构主要呈现花瓣型撕裂和局部剪切冲塞毁伤模式, 迎爆面破口形状接近菱形, 整体变形为 V 字形凹陷, 背爆面出现局部剪切冲塞破口, 左右两端呈现略微上翘的挠度。

(3) 近距加载下圆柱壳结构迎爆面会由于 Taylor 平板效应形成空化区, 空化区溃灭形成的二次加载毁伤效应不容忽视; 接触爆炸加载下迎爆面形成的高速冲塞破片可使得背爆面出现冲塞破口, 在水中形成二次加载冲击波。

参考文献:

- [1] 姜涛, 王桂芹, 詹发民, 等. 基于 AUTODYN 的潜艇典型舱段水中爆炸冲击损伤研究 [J]. *爆破器材*, 2015, 44(6): 61–64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.014.
JIANG T, WANG G Q, ZHAN F M, et al. Impact damage analysis of typical submarine compartment subjected to underwater blasting based on AUTODYN [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(6): 61–64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.014.
- [2] YUAN J H, ZHU X. Dynamic response of a ring-stiffened cylindrical shell subjected to underwater explosive loading [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 105: 931–936. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.105-107.931.
- [3] BROCHARD K, LE SOURNE H, BARRAS G. Estimation of the response of a deeply immersed cylinder to the shock wave generated by an underwater explosion [J]. *Marine Structures*, 2020, 72: 102786. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102786.
- [4] NGUYEN V T, PHAN T H, DUY T N, et al. Numerical modeling for compressible two-phase flows and application to near-field underwater explosions [J]. *Computers and Fluids*, 2021, 215: 104805. DOI: 10.1016/j.compfluid.2020.104805.
- [5] BRETT J M, YIANNAKOPOULOS G. A study of explosive effects in close proximity to a submerged cylinder [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(4): 206–225. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.01.007.
- [6] BRETT J M, YIANNAKOPOULOS G, VAN DER SCHAAF P J. Time-resolved measurement of the deformation of submerged cylinders subjected to loading from a nearby explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(9): 875–890. DOI: 10.1016/S0734-743X(00)00023-3.
- [7] HUNG C F, LIN B J, HWANG-FUU J J, et al. Dynamic response of cylindrical shell structures subjected to underwater explosion [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(8): 564–577. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.02.001.
- [8] GANNON L. Submerged aluminum cylinder response to close-proximity underwater explosions—a comparison of experiment and simulation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 133: 103339. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103339.
- [9] GANNON L. Simulation of underwater explosions in close-proximity to a submerged cylinder and a free-surface or rigid boundary [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 87: 189–205. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2019.03.019.
- [10] 刘晓波, 李帅, 张阿漫. 水下爆炸冲击波壁压理论及数值计算方法改进研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(1): 014202. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0106.
LIU X B, LI S, ZHANG A M. An improvement of the wall-pressure theory and numerical method for shock waves in underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(1): 014202. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0106.
- [11] RAJENDRAN R, NARASIMHAN K. Damage prediction of clamped circular plates subjected to contact underwater explosion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(4): 373–386. DOI: 10.1016/S0734-743X(00)00051-8.
- [12] 周明, 赵云涛, 李万全, 等. JH-14 装药水中爆炸特征研究 [J]. *爆破器材*, 2019, 48(3): 18–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.004.
ZHOU M, ZHAO Y T, LI W Q, et al. Research on underwater explosion characteristics of JH-14 charge [J]. *Explosive Materials*, 2019, 48(3): 18–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.004.

(责任编辑 曾月蓉)