

水下爆炸作用下圆柱壳周围压力场分布

邵宗战

(91439 部队, 辽宁 大连 116041)

摘要:为研究水下爆炸对鱼雷、水雷等水下目标的破坏机理开展了一次水下爆炸试验,采用长 2.2 m、直径 0.53 m 的圆柱壳结构作为目标,采用 1 kg 标准 TNT 球形装药作为爆源在水平距离 5.5 m 处爆炸,测量了圆柱壳正面、背面和侧面的压力场,得到了冲击波时程曲线,测量及分析结果表明:正面和侧面由于反射波的影响均会发生截断效应,背面由于前驱波影响前段上升缓慢,当冲击波到达时迅速上升,之后以指数形式衰减,圆柱壳结构正面的冲击波冲量最大,侧面次之,背面最小,对于结构侧面的破坏作用最小。

关键词:水下爆炸;圆柱壳;压力场

本文引用格式:邵宗战. 水下爆炸作用下圆柱壳周围压力场分布[J]. 兵器装备工程学报,2017(3):38-41.

Citation format:SHAO Zong-zhan. Pressure Field Distribution Around Cylindrical Shell Subjected to Underwater Explosion [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017(3):38-41.

中图分类号:TN919.3;O382

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)03-0038-04

Pressure Field Distribution Around Cylindrical Shell Subjected to Underwater Explosion

SHAO Zong-zhan

(The No. 91439th Troop of PLA, DaLian 116041, China)

Abstract: To study the damage mechanism of torpedo and mine, underwater target explosion test was carried out, and taking a cylindrical shell, with length of 2.2 m and diameter of 0.53 m as the target and using 1 kg TNT as the standard spherical charge explosion sources in horizontal distance 5.5 m, we measured the pressure field of cylindrical shell front on the back side and obtained shock wave curve. The results show that the front and side effects due to reflection occurs due to the truncation effect, and the back segment precursor effect rises slowly, and when the shock wave arrived after the rapidly rising exponentially, cylindrical shell positive shock wave reaches the maximum impulse, and the side and back is the smallest, and the destructive effect on the side is the minimum to structure.

Key words: underwater explosion; cylindrical shell; pressure field

圆柱壳结构是水中兵器(如鱼雷、部分水雷、探雷具等)常见结构形式,这些装备在战时不可避免受到水下爆炸冲击作用,对于小目标来说水下爆炸作用主要体现在冲击波的作用,气泡脉动对其破坏很小,因此研究水下爆炸冲击波对圆柱壳结构的破坏机理是研究其战时生命力的重要基础,在复杂边界条件下水下爆炸冲击波也比较复杂,有壳体反射作用形成的反射波、冲击波作用在壳体以后在壳体内部形成的应

力波等。冲击度的作用又在壳体周围形成复杂的压力场,压力场直接决定了壳体的破坏形式,因此研究圆柱壳结构在水下爆炸作用下周围的压力场对于进一步分析圆柱壳结构的破坏情况非常重要。国内外对于水下爆炸的现象及能量输出结构等开展过大量的研究^[1-4],对于水下爆炸作用下船体结构的冲击响应方面的研究也较充分^[5-6],对于圆柱壳在水下爆炸作用下的冲击响应,姚熊亮等^[7]开展了加肋双层圆柱

收稿日期:2016-10-27;修回日期:2016-12-15

作者简介:邵宗战(1972—),男,高级工程师,主要从事水中兵器试验总体技术研究。

壳冲击响应的仿真研究,余晓菲等^[8]计算了加筋圆柱壳对水下爆炸冲击波的响应并比较分析了不同尺寸参数对结构抗爆性能的影响,袁建红等^[9]研究了水下爆炸载荷作用下加筋圆柱壳结构弹塑性动力响应。这些研究成果多以仿真为主,对于圆柱壳结构周围压力场的分布形式研究开展得很少,由于压力场的分布受多种边界条件影响而异常复杂,同样的爆源爆炸时在不同的结构物周围形成的压力场会有很大不同,因此对于不同的结构形式要根据其特点开展研究,分析其压力场分布情况。

1 圆柱壳体

试验用圆柱壳结构采用 921 钢焊接而成,长 2.2 m、直径 0.53 m、板厚 7 mm,内部采用环形加强筋加固,加强筋间距 200 mm,采用 T 形截面环。为便于内部加强筋焊接及应变片粘贴,整个壳体由四段焊接而成,每段长 0.55 m,段内焊接两条加强筋,间距 0.25 m,圆柱壳体端面有一开孔便于测量电缆从壳体内引出,电缆引出后用胶泥将通孔封住,防止进水,圆柱壳体纵剖面图如图 1。

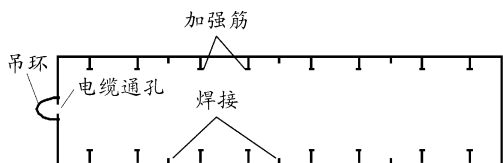


图 1 圆柱壳体纵剖面图

2 实验过程

在圆柱壳中心采用卡箍固定 3 个传感器支架,每个支架上安装一枚压力传感器,传感器距离壳体表面 0.1 m,在壳体内部对应位置粘贴 3 个应变片用于测量结构变形量,爆源中心与圆柱壳几何中心距离 5 m 且在同一水平面上,整个结构布于水下 15 m。实验爆源采用 1 kg 标准 TNT 球形装药,采用电雷管+扩爆药柱起爆。传感器及爆源布置图如图 2。

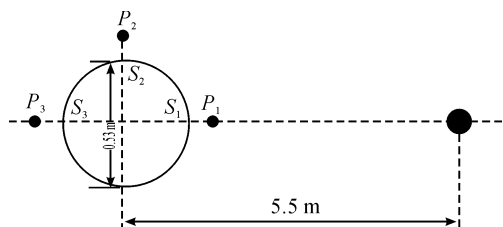


图 2 传感器及爆源布置图

实验在水库进行,水深约 30 m,爆源布放位置距岸 80 m,爆源及圆柱壳体入水深度为 6 m,实验水域为开阔水域,可以

忽略边界反射的影响。水下爆炸理论气泡半径按式(1)估算^[10]:

$$R_b = 3.383 \times \left(\frac{W}{9.8 + H_1} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式(1)中: W 为装药量; H_1 为爆源入水深度(m)。将 $W=1$, $H_1=6$ 代入式(1)得 $R_b=1.35$ m。由于圆柱壳体与爆源的距离远大于气泡半径且位于爆源侧面,气泡产生后由于水压作用向上迁移运动,气泡脉动压力峰值远小于冲击波,可忽略气泡脉动对壳体的破坏作用。

实验时首先将圆柱壳体布放入水,圆柱壳体下面加配重使其具有负浮力,圆柱壳通过绳子与水面的浮标相连,其悬浮在水中。距离壳体 5.5 m 处吊放爆源入水,起爆缆附在保护绳上拉至岸边,起爆器置于岸上,数据采集仪置于距离壳体 20 m 的小船上,传感器的信号传输电缆通过浮标拉至小船上与采集设备连接。采集设备采用 NI PXI 数据采集仪,PCB138 系列传感器,采样率为 1 M/s,采用 BF120 型单向应变片,粘贴方向为横向,采样率为 10 K/s,实验实施态势如图 3 所示。

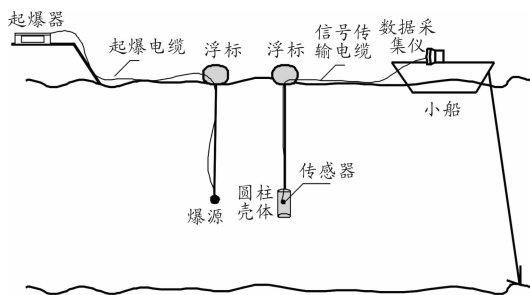


图 3 实验实施态势图

3 压力场分析

由于在圆柱形结构周围压力场较为复杂,有直达波、反射波、绕射波等相互叠加,还有冲击波经过结构物以后形成的前驱波^[11]。对于正面冲击主要是直达波和反射波的综合作用,波形相对简单,如 P_1 和 P_2 测点由于冲击波可以直接到达,所以上升沿比较陡峭,但是当反射波到来时迅速将冲击波切断造成明显的截断效应。但背爆面的测点由于冲击波不能直接到达波形较为复杂,前段表现为缓慢上升阶段,这是由于冲击波首先到达圆柱壳体迎爆面,之后在结构中以远大于声速的速度传播形成前驱波,前驱波到达背爆面后又进入水中,这时强度已大大削弱。当冲击波经过壳体绕射到达背爆面时与前驱波叠加,这时表现为压力迅速上升,达到峰值之后以指数形式衰减,各测点压力时程曲线如图 4 所示。

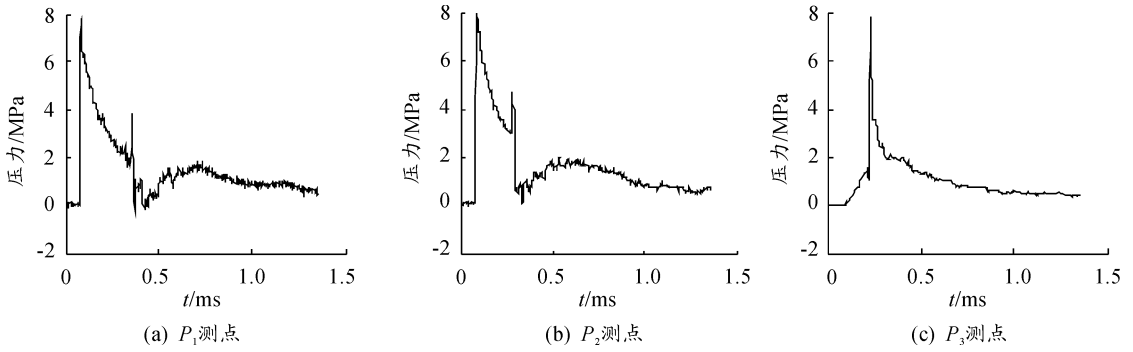


图4 各测点压力时程曲线

从表1可以看出各个测点的冲击波压力峰值相当。压力峰值只代表冲击波到达时刻的瞬时压力,它主要取决于爆源的药量以及传感器与爆源的距离。瞬时压力的大小并不是造成结构破坏的主要因素,还有一个更重要的参量就是时间常数,时间常数是指冲击波从峰值衰减到峰值的 $1/e$ 所需的时间,它表示冲击波的持续时间,从3个测点所测得的时间常数来看, P_1 测点(即正对爆源的测点)时间常数最大, P_2 测点(即侧对爆源的测点)次之, P_3 测点(即背对爆源的测点)时间常数最小。通过对冲击波时域曲线的数值积分得到冲击波的冲量,冲量的大小是决定冲击对结构物破坏程度的重要参量。由于压电式传感器受环境影响通常会产生零点漂移。零点漂移可描述为:输入电压为零,输出电压偏离零值的变化,它又被简称为零漂,用带有零漂的信号直接计算冲量会带来很大的计算误差甚至得出完全错误的结论,必须对其进行修正。零漂很难在源头上消除,只能通过后处理的方法修正,对于简单的零漂(即零漂大小基本不随时间变化)可以采用式(2)修正,对于复杂零漂可以采用多项式最小二乘法或滑动平均法修正^[12]。修正后的信号按式(3)进行积分运算,积分时间一般取5~6.7倍时间常数。这里取6.7倍时间常数进行积分计算,从冲量计算结果来看也是正面最大,背面最小。

$$P_i = P_{0i} - \frac{1}{m-j} \sum_{i=1}^{m-j} P_{0i} \quad (2)$$

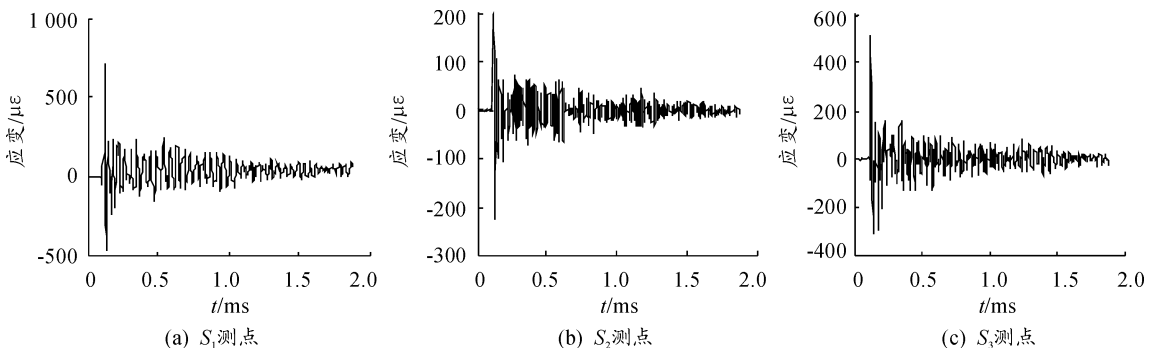


图5 各测点应变时程曲线

$$I = \int_0^t p(t) dt \quad (3)$$

在自由场状态下(即传感器周围包围海水,附近没有其他物体反射冲击波)冲量的大小约等于压力峰值与时间常数的乘积。本次实验中由于圆柱壳体影响压力场分布,计算结果与自由场状态下的理论值偏差较大。

表1 各测点测量参数

传感器编号	压力峰值/MPa	时间常数/s	冲量/(Pa·s)
P_1	7.88	0.000 278	1 939
P_2	7.94	0.000 201	1 809
P_3	7.92	0.000 038	1 148

冲量是压力场持续作用在目标物上压力的时间累积量,但是由于本次实验主要目的是掌握圆柱壳周围的压力场分布,爆源与目标距离较远,冲击波不足以使目标产生塑性变形,但是从测量得到的弹性变形量(图5)看,正面变形较大,背面变形次之,侧面也有变形。主要是正面变形凹陷钢板运动引起,并非冲击波直接作用引起,这一点值得关注。对于侧面并未遭到冲击波正面冲击,而是侧面掠过,并未对壳体造成直接冲击,虽然从测量结果看侧面冲量也较大,但是破坏作用却是最小。

从能量角度讲,在开阔水域水下爆炸所释放的能量是均匀向四周扩散的,但是当冲击波遇到遮挡或边界时会表现出不均匀性,掌握圆柱壳在水下爆炸作用下的压力场分布,对于进一步分析能量扩散情况,在自由场状态冲击波能与气泡能相当。对于小目标,气泡脉动的作用很小,冲击波冲量是造成结构破坏的主要原因,同时又与冲击波的作用方向密切相关。这里只是以圆柱壳结构为例进行实验测试及分析,对于其他结构形式需根据其特点进行仿真分析或试验研究。

4 结论

水下爆炸冲击波到达圆柱壳结构时会产生反射现象并在结构中形成前驱波,前驱波到达边界后会再次进入水中与冲击波叠加,形成复杂的叠加效应。当入射冲击波与反射冲击波叠加时会产生截断效应,对于刚性边界这种效应异常明显,冲击波会被突然截断。水下爆炸对小目标破坏效应主要取决于冲击波,冲击波的时间衰减常数和冲量是影响结构破坏程度的主要因素,对于圆柱壳结构其迎爆面冲量大于侧面,侧面大于背爆面,但对侧面的破坏作用不明显。

参考文献:

- [1] 李洪涛,赵琳,宁永成.球形装药海底裸爆压力测试与分析[J].工程爆破,2005,11(1):16-21.
- [2] 孙云厚,施存程,刘峥.均匀自由场中球形 TNT 装药爆炸数值计算分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2015,16(4):401-406.
- [3] 张朋祥,叶序双,顾文彬.浅层水中水底爆炸冲击波压力测试与分析[J].工程兵工程学院学报,1999,14(2):34

-39.

- [4] COLE R H. Underwater explosion[M]. Princeton:Princeton University Press,1948.
- [5] 余晓菲,刘土光,余宏坤.圆柱壳在水下爆炸载荷下的流-固耦合响应分析[J].振动与冲击,2007,26(7):125-128.
- [6] 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.
- [7] 姚熊亮,曹宇,郭君.水下爆炸时加肋双层圆柱壳冲击响应的统计分析[J].中国舰船研究,2006,1(1):33-40.
- [8] 余晓菲,刘土光,张涛.水下爆炸载荷作用下加筋圆柱壳的响应分析[J].振动与冲击,2006,25(5):106-115.
- [9] 袁建红,朱锡,张振华.水下爆炸载荷作用下加筋圆柱壳结构弹塑性动力响应研究[J].振动与冲击,2012,31(24):131-136.
- [10] 松佐夫.水下和空中爆炸理论基础[M].北京:国防工业出版社,1965.
- [11] 姚熊亮,许维军.多发武器同时命中时潜艇冲击环境研究[J].船舶工程,2004,26(5):42-49.
- [12] 宋敬利,张姝红,周学滨.水下爆炸作用下船体结构应变信号修正方法[J].爆破,2011,28(3):30-34.
- [13] 陈高杰,沈晓乐,王树乐,等.基于声固耦合法的环肋壳水下冲击数值仿真试验[J].兵工自动化,2015(2):7-10.
- [14] 宋敬利,张玉涛.某浮动冲击平台外载荷与冲击环境分析[J].兵器装备工程学报,2016(9):16-19.

(责任编辑 周江川)