

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.010

圆锥-球缺药型罩聚能战斗部结构优化设计*

周方毅^① 詹发民^① 吴晓鸿^② 商海铭^① 马蒙蒙^①^①海军潜艇学院防险救生系(山东青岛,266042)^②海军潜艇学院训练部(山东青岛,266042)

[摘要] 针对现代舰船抗爆炸与冲击能力的日益提升,提出了一种圆锥-球缺组合药型罩聚能战斗部在鱼雷上的应用,建立了该战斗部水中接触爆炸钢质靶板的力学物理模型,并通过试验对数值模拟结果进行了验证性研究。采用正交设计方法,设计了16种不同参数的圆锥-球缺聚能战斗部的结构,利用该模型进行了数值计算,得到了战斗部的最佳结构,为高效聚能战斗部的设计提供了理论依据。

[关键词] 聚能战斗部;结构优化;正交设计;爆炸成型弹丸

[分类号] TD235.4 TJ760.3⁺1

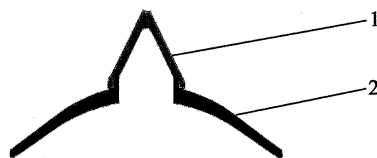
引言

现代舰船的抗爆炸与冲击能力随着科技的进步而日益增强;壳体材料采用高强度合金钢,壳体结构一般采用双层壳体或者复合结构^[1]。因此,采用普通爆破型战斗部的鱼雷,仅仅依靠装药爆炸在水中形成的冲击波和气泡脉动毁伤目标,其能量利用率低,已很难重创现代舰艇;即使采用普通聚能型战斗部,也难以达到严重毁伤现代舰艇的目标^[2-3]。为此,科研人员设计了各种新型战斗部以提高聚能战斗部对新型装甲的侵彻能力。随着鱼雷自导精度与命中概率的提高,可以使用具有更大威力的新型高效聚能战斗部,以对目标进行有效的毁伤^[4-5]。

圆锥-球缺组合式变锥角聚能战斗部对目标具有良好的毁伤效果^[1,6]。因此,本文设计了具有组合药型罩结构的战斗部缩比模型,将试验与数值模拟相结合,对药型罩结构进行了优化设计,得到了药型罩的最佳结构设计方案,并设想将其应用于鱼雷等水中兵器,来提高聚能战斗部的威力,以有效毁伤抗爆炸与冲击能力不断增强的现代舰艇。

1 结构设计与原理

圆锥-球缺聚能战斗部的药型罩由前级副药型罩(圆锥罩)和后级主药型罩(球缺罩)复合组成,如图1所示。圆锥罩主要用于形成金属射流对目标进行穿孔,球缺罩用于形成EFP对目标实施毁伤。设计的聚能战斗部缩比模型如图2所示,高度217.2 cm,底部直径12.5 cm,雷管室直径2.1 cm;装药采用注装B炸药,装药量为1 600 g;总质量为2 282 g;



1 - 圆锥罩;2 - 球缺罩

图1 组合药型罩结构示意图

Fig.1 Sketch map of structure for the combined liner

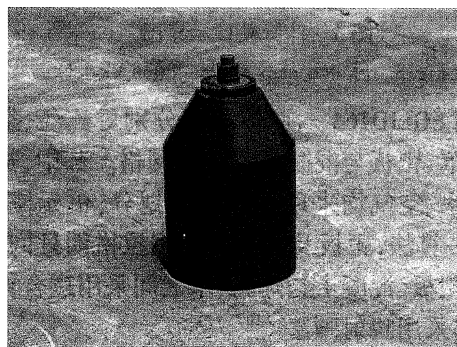


图2 聚能战斗部缩比模型

Fig.2 Scale model of shaped charge warhead

其底部设置有10 cm的防水密封炸高。

圆锥罩在炸药的爆炸作用下,产生压垮运动,其上部形成的高速射流首先完成对目标的穿孔破坏作业。随之,圆锥罩底部在压合作用下与球缺罩碰撞复合形成爆炸成型弹丸(EFP)。低速弹丸在射流拉动下快速成型并加速,完成对目标的二次侵彻作用^[1,7]。由于圆锥罩的作用能够为后续的EFP随进破坏开辟通道,可减少运动过程中的能量损耗,能提高装药的利用率,非常有利于对目标的破坏。

* 收稿日期:2014-04-01

作者简介:周方毅(1978~),男,讲师,博士,研究方向为水下爆破的理论与实践。E-mail:zhoufangyi-qd@163.com

2 数值模拟

2.1 物理模型与网格划分

按照与战斗部缩比模型 1:1 的尺寸,采用软件 ANSYS/LS-DYNA 建立圆锥-球缺聚能战斗部水中接触爆炸钢质靶板的力学模型(图 3)。模型采用 cm-g- μ s 单位制。装药为圆台形,底部直径为 10.0 cm、顶部直径为 6.2 cm、装药高度为 11.0 cm,装药类型选用 B 炸药。组合药型罩材料为紫铜;圆锥罩厚度为 0.2 cm,半锥角为 30°,罩高为 1.0 cm;球缺罩厚度为 0.5 cm,曲率半径为 6.7 cm;炸高(空气部分)取 10.0 cm。靶板采用 30 cm×30 cm×2 cm 的合金钢板,为便于试验过程中靶板的固定,将其放置于 60 cm×60 cm×60 cm 的混凝土板上。由于模型为轴对称,为减小计算量,建模取四分之一模型^[8]。

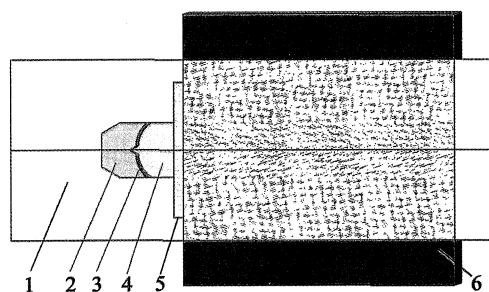


图 3 计算模型示意图

Fig. 3 Sketch map of simulation model

采用 SOLID164 六面体单元分别对炸药、空气、水、药型罩、靶板与混凝土等划分网格。其中,炸药、药型罩、水、空气均采用欧拉网格划分,单元使用多物质 ALE 算法,靶板及混凝土采用拉格朗日网格划分,并且靶板、混凝土与炸药、水之间采用耦合算法。网格全部采用映射画法^[9-10]。

2.2 本构方程与材料参数^[9-11]

1) 炸药爆轰产物的状态方程采用 JWL 方程。其中,B 炸药密度 1.724 g/cm³,爆速 8 080 m/s。

2) 空气采用 LS-DYNA 3D 程序中的 Null 材料模型,密度取 0.001 25 g/cm³。状态方程采用气体状态方程模拟。

3) 水的密度为 1.025 g/cm³。水冲击压缩时,采用 Gruneisen 状态方程。水膨胀过程状态方程参见文献[10]。

4) 药型罩材料采用紫铜,密度取 8.96 g/cm³,剪切模量取 47.7 GPa,泊松比取 0.34。靶板材料采用合金钢,密度取 7.83 g/cm³,杨氏模量取 210 GPa,泊松比取 0.28。药型罩与靶板均采用 Johnson-Cook 本构方程。

5) 混凝土采用 * Mat_Plastic_Kinematic 材料模型。密度为 2.65 g/cm³,弹性模量为 23.6 GPa,屈服强度为 0.04 GPa。

3 试验设计与结果分析

试验在 3.0 m×3.0 m×1.5 m 蓄水池中进行。混凝土板先放置在蓄水池中央,将一块 30 cm×30 cm×2 cm 的合金钢板放置在混凝土板侧面;将战斗部缩比模型固定在厚度为 2 cm 的合金钢板上,并将钢板固定于混凝土板上,混凝土板被 1.5 m 深的水淹没。在此情况下起爆装药(图 4)。



图 4 装药设置图

Fig. 4 Charge setting

装药爆炸后,钢板被抛出池外,钢板被完全击穿,钢板中央留有一个规则的圆孔,圆孔入口直径为 13.0 cm,出口直径为 12.0 cm,达到 1.2 倍以上的破孔直径,混凝土板完全破碎(图 5)。与试验相对应的数值模拟结果如图 6 所示:靶板入口穿孔直径为 15.8 cm,出口穿孔直径为 15.0 cm,并且混凝土板也完全破碎。数值计算结果大出试验结果 20% 左右,分析认为应该这是由于装药密度未达到要求或者装药不均匀所致,该误差在可接受范围之内^[9]。



图 5 试验效果图

Fig. 5 Test results

组合药型罩中前级圆锥罩形成的聚能射流能实现对目标的穿孔破坏,后级球缺罩形成的 EFP 可以进入介质内部对目标实施毁伤。试验结果证明建立的数值计算模型合理,参数选取合适。

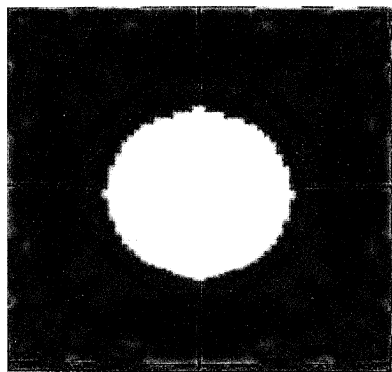


图6 数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results

4 结构优化

为减少试验次数,节约试验经费,并且使战斗部各参数的不同取值进行合理搭配,可以通过正交设计实现聚能战斗部的结构优化设计。

4.1 正交设计

通过对影响装药爆炸效果的因素分析,这里重点考虑组合药型罩的 5 个参数,分别为圆锥罩壁厚、罩高与锥角、球缺罩曲率半径与壁厚。结合聚能战斗部在轻型鱼雷上的应用,装药底部直径恒定为 30 cm,装药高度 H 恒定为 40 cm。对于球缺罩,其圆心角分别取 90° 、 120° 、 150° 和 180° ,对应的曲率半径分别为 21.2、17.3、15.5 cm 和 15.0 cm。4 水平 5 因素的具体参数选取详见表 1。

表1 因素与水平表

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素				
	圆锥罩壁厚 δ_1 / cm	圆锥罩罩高 h_1 / cm	锥角 2α / ($^\circ$)	球缺罩曲率半径 r_2 / cm	球缺罩壁厚 δ_2 / cm
1	0.20	6	40	21.2	0.40
2	0.30	8	50	17.3	0.60
3	0.40	10	60	15.5	0.80
4	0.50	12	70	15.0	1.00

对于 4 水平 5 因素的试验可选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表来进行设计(表 2)。

4.2 仿真结果

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对表 2 中 16 种方案进行数值模拟计算,分别从前级射流参数、后级 EFP 参数以及组合破坏效果等方面进行对比分析。射流重点考虑最大速度及头部速度,弹丸重点考虑穿孔前后速度,组合破坏效果重点考虑破孔直径与位移大小。数值仿真结果分别见表 3。

根据仿真结果,从装药量、射流速度、EFP 速度以及破孔直径等多方面综合判断可知:破坏效果良

表2 表头设计方案

Tab. 2 The orthogonal test table design

方案	δ_1 /cm	h_1 /cm	$2\alpha/(^\circ)$	r_2 /cm	δ_2 /cm
1 [#]	0.20	6	40	21.2	0.40
2 [#]	0.20	8	50	17.3	0.60
3 [#]	0.20	10	60	15.5	0.80
4 [#]	0.20	12	70	15.0	1.00
5 [#]	0.30	6	50	15.3	1.00
6 [#]	0.30	8	40	15.0	0.80
7 [#]	0.30	10	70	21.2	0.60
8 [#]	0.30	12	60	17.3	0.40
9 [#]	0.40	6	60	15.0	0.60
10 [#]	0.40	8	70	15.5	0.40
11 [#]	0.40	10	40	17.3	1.00
12 [#]	0.40	12	50	21.2	0.80
13 [#]	0.50	6	70	17.3	0.80
14 [#]	0.50	8	60	21.2	1.00
15 [#]	0.50	10	50	15.0	0.40
16 [#]	0.50	12	40	15.5	0.60

好的方案为 3[#]、6[#]、15[#];效果中等的方案为 1[#]、13[#]、14[#];效果一般的方案为 2[#]、5[#]、7[#]、8[#]、11[#]、12[#]、16[#];效果较差的方案为 4[#]、9[#]、10[#]。其中,方案 3[#]的各项参数均最优,射流头部速度超过 10 000 m/s;EFP 头部速度超过 4 000 m/s,剩余速度接近于 2 000 m/s;破孔直径超过 60 cm,相当于 2 倍的装药直径,位移超过 20 cm。方案 3[#]即为最佳的结构设计方案,可通过试验予以验证。

最佳结构的聚能战斗部爆炸后的应力云图如图 7 所示。由于设计有密封炸高,装药爆炸后其聚能射流和 EFP 先在空气中运动一段距离,然后进入水中。图 7 中,(a)~(d)所示为射流和 EFP 在空气中运动的情形,(e)~(f)所示为射流和 EFP 在水中运动的情形。分析可知:起爆约 45 μ s 后,圆锥罩开始形成金属射流,高速冲击靶板,对其进行穿孔破坏;然后,球缺罩形成的翻转弹丸紧随其后,对靶板进行二次破坏。

采用组合药型罩对含有 1 m 中间水层的双层靶板进行结构毁伤数值模拟计算,靶板厚度分别取 1、4 cm。数值模拟结果如图 8 所示。当该战斗部接触爆炸靶板时,首先射流穿透 1 cm 厚外层靶板,随之 EFP 对外层靶板继续破孔,其破坏直径达到 70 cm;在射流开辟通路的基础上,EFP 在 1 m 厚的水层中高速运动,其受到水的阻力相对减小,最终在 4 cm 厚的内层靶板上击穿两个直径为 28 cm 的孔洞,并呈“8”字型破坏效果。可见,圆锥罩形成的金属射流能够为后续的 EFP 随进破坏开辟了通路,减少了

表 3 数值仿真结果
Tab. 3 Numerical simulation results

方案	前级射流参数		后级 EFP 参数		组合破坏效果		
	最大射流速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	头部速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	穿孔前速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	穿孔后速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	破孔直径		靶板位移 /cm
					正面/cm	背面/cm	
1 [#]	6 017	5 500	3 512	1 220	27.6	25.3	6.9
2 [#]	5 996	4 585	3 184	1 163	20.2	18.7	7.1
3 [#]	10 134	9 399	4 554	1 720	62.0	61.0	21.2
4 [#]	4 973	4 684	2 632	1 007	17.1	12.5	5.4
5 [#]	6 538	4 738	2 744	1 086	20.1	16.6	4.9
6 [#]	7 683	5 845	3 397	1 263	24.1	18.6	6.8
7 [#]	7 304	5 894	3 121	1 224	23.9	16.7	5.9
8 [#]	7 298	6 128	2 934	1 287	22.8	21.6	8.9
9 [#]	6 617	5 524	2 584	1 286	16.1	4.8	4.9
10 [#]	7 033	5 873	3 431	1 314	19.9	19.2	8.2
11 [#]	6 404	4 880	2 922	2 148	21.9	15.6	6.4
12 [#]	7 121	6 077	2 946	1 618	22.5	18.5	6.2
13 [#]	8 013	5 198	3 430	1 730	25.0	19.1	5.7
14 [#]	7 081	5 414	2 928	1 013	25.2	20.0	6.5
15 [#]	5 866	5 024	3 402	1 189	31.5	12.7	4.8
16 [#]	7 548	5 584	3 216	1 476	20.9	17.5	6.4

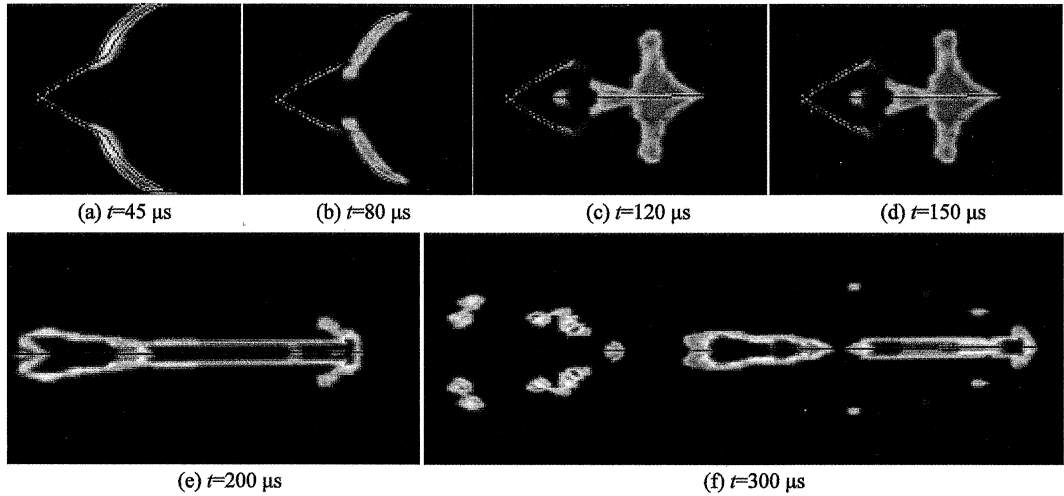


图 7 聚能战斗部爆炸后的应力云图
Fig. 7 Distribution of stress field of shaped charge warhead after explosion

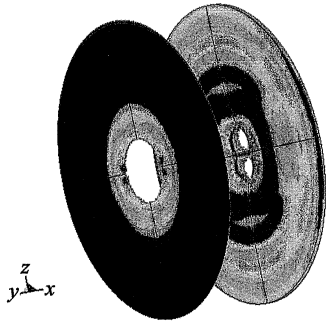


图 8 组合药型罩聚能装药对
双层靶板作用模拟结果
Fig. 8 Simulation results of combined liner
shaped charge acting on double layer target

运动过程中的能量损耗,提高了装药利用率,增强了对目标的破坏效果。

圆锥罩锥角和罩口部直径将影响射流的穿孔直径和穿孔深度,设计时要求锥角和罩高取较大值,从而有利于后续 EFP 的破坏;但是,圆锥罩锥角和罩口部直径增大又会对 EFP 成型造成一定影响,其值不能太大,否则容易造成 EFP 破裂,从而影响毁伤效果。由于圆锥罩位于球缺罩顶部,爆轰波首先对其产生作用,并且射流速度又大于 EFP 速度,两者之间的运动时间差正好有利于对目标的毁伤。

5 结论

对上述仿真结果进一步分析,可以得出关于组

合药型罩结构优化设计的结论:

1)圆锥罩的罩高最佳取值范围为 8~10 cm;角度不宜太大(应小于 70°),可选取为 60°;壁厚的影响效果不明显,可在 0.2~0.5 cm 之间选取。

2)球缺罩圆心角应大于 150°,曲率半径需小于 15.5 cm,不但节省药量,而且破坏效果良好;球缺罩壁厚不能太大,应小于 1.0 cm,最佳厚度为 0.8 cm。

参 考 文 献

- [1] 周方毅,詹发民,姜涛,等.一种组合药型罩聚能战斗部[J].鱼雷技术,2012,20(5):380-383,400.
Zhou Fangyi, Zhan Famin, Jiang Tao, et al. An idea about shaped charge warhead with combined charge liner for torpedo [J]. Torpedo Technology, 2012, 20(5):380-383, 400.
- [2] 姜涛,张可玉,詹发民.一种新型鱼雷战斗部的设想[J].鱼雷技术,2006,14(1):54-56.
Jiang Tao, Zhang Keyu, Zhan Famin. An idea about new torpedo warhead [J]. Torpedo Technology, 2006, 14(1):54-56.
- [3] 齐子凤.提高深水炸弹战斗部威力的途径探讨[J].水雷战与舰船防护,2002(2):35-37.
- [4] 步相东.鱼雷聚能战斗部新型起爆技术研究[J].鱼雷技术,2003,11(3):25-27.
Bu Xiangdong. A study of the new type initiation for the shaped charge of torpedo [J]. Torpedo Technology, 2003, 11(3):25-27.
- [5] 王团盟,向春.鱼雷聚能战斗部 EFP 侵彻潜艇结构模拟靶数值模拟[J].鱼雷技术,2008,16(1):44-47.
Wang Tuanmeng, Xiang Chun. Numerical simulation of penetrating simulant targets of submarine structures by explosively-formed projectile of torpedo shaped charge warhead [J]. Torpedo Technology, 2008, 16(1):44-47.
- [6] 何洋洋,龙源,张朋军,等.圆锥、球缺组合式战斗部空气中成型技术数值模拟研究[J].火工品,2008(4):33-37.
He Yangyang, Long Yuan, Zhang Pengjun, et al. Simulation study on formation mechanism of tapered & spherical group liner warhead [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008 (4):33-37.
- [7] 安二峰,杨军,陈鹏万.一种新型聚能战斗部[J].爆炸与冲击,2004,24(6):546-552.
An Erfeng, Yang Jun, Chen Pengwan. Study on a new shaped charge warhead [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(6):546-552.
- [8] 时党勇,李裕春,张胜民.基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [9] 周方毅,詹发民,吴雨强,等.不同药型罩聚能装药水中接触爆炸毁伤效应[J].工程爆破,2014,20(1):9-12,46.
Zhou Fangyi, Zhan Famin, Wu Yuqiang, et al. Damage effect from underwater contact blasting of different liners shaped charge [J]. Engineering Blasting, 2014, 20(1):9-12, 46.
- [10] 周方毅,王伟力,姜涛,等.变锥角聚能装药水中爆炸数值模拟研究[J].爆破,2012,29(4):99-102.
Zhou Fangyi, Wang Weili, Jiang Tao, et al. Simulation study on metamorphic tapered angle shaped charge under underwater explosion [J]. Blasting, 2012, 29(4):99-102.
- [11] Zhou Fangyi, Jiang Tao, Wang Weili, et al. Simulation study on tapered and spherical shaped charge under underwater explosion [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 157-158:852-855.

Optimal Design of Structure for Tapered and Spherical Combined Liner Shaped Charge Warhead

ZHOU Fangyi^①, ZHAN Famin^①, WU Xiaohong^②, SHANG Haiming^①, MA Mengmeng^①

^①Department of Rescue and Salvage, Navy Submarine Academy(Shandong Qingdao, 266042)

^②Training Department, Navy Submarine Academy(Shandong Qingdao, 266042)

[ABSTRACT] A kind of tapered and spherical combined liner shaped charge warhead was designed, for that anti-explosion and shock resistance of modern ships is improved increasingly. The physics model of this warhead underwater contact blasting to steel target was built, and numerical simulation result was validated by using test. The structures of tapered and spherical combined liner shaped charge warhead were planned by orthogonal design with 16 kinds of different parameters. Numerical simulation was done by using the above model, and the best structure of warhead was gotten, which supplied theoretical basis for design of high-powered shaped charge warhead.

[KEY WORDS] shaped charge warhead; optimal structure; orthogonal design; explosively formed projectile (EFP)