

三类聚能侵彻体鱼雷战斗部对目标毁伤数值模拟*

陈冬梅¹, 陈智刚¹, 侯秀成¹, 杨力², 范少博¹

(1 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2 中国兵器工业第203研究所, 西安 710065)

摘要:利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 对形成三类聚能侵彻体(射流、杆式射流和自锻破片)鱼雷战斗部进行目标毁伤数值模拟及对比分析, 以寻求成型装药结构对毁伤效果的影响。给出了三类聚能侵彻体在水介质中的运动规律和破甲毁伤效果, 为鱼雷战斗部的设计及提高战斗部威力提供参考。

关键词:射流; 杆式射流; 自锻破片; 鱼雷战斗部; 目标毁伤; 数值模拟

中图分类号: TJ410.33 文献标志码: A

The Simulation on Target Damage of Three Shaped-charge Penetrators Torpedo Warheads

CHEN Dongmei¹, CHEN Zhigang¹, HOU Xiucheng¹, YANG Li², FAN Shaobo¹

(1 School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2 No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: Abstract: By using the finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA, the numerical simulation and comparison analysis were made for target damage of three shaped-charge penetrators (jet, rod-like jet and the self-forging fragment) torpedo warheads to seek the effect of damage effect with different shaped charge structure. The speed attenuation degree and sunder armor damage effect of three shaped-charge penetrators in water medium were got. This article provides reference for the torpedo warhead design and warhead's lethality improvement.

Keywords: jet; rod-like jet; self-forging fragment; torpedo warhead; target damage; numerical simulation

0 引言

随着双层和多层装甲防御结构在大、中型水面舰艇及潜艇上的广泛应用, 作为水下兵器之一的鱼雷采用的爆破式战斗部已经无能为力, 这就给鱼雷战斗部的研究提出了新的要求——高效毁伤。由于制导技术的长足进步, 大大提高了鱼雷对目标的命中率, 这给鱼雷采用新的战斗部技术提供了更大的可能性。目前, 反装甲聚能装药的总体技术日趋完善, 水中兵器借鉴反装甲武器的技术, 采用定向聚能效应把爆炸释放在各个方向上的能量, 聚集于攻击目标的同一方向上, 从而大大提高了破甲毁伤能力。文中利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对形成三类聚能侵彻体鱼雷战斗部进行目标毁伤数值模拟, 分析不同聚能侵彻体在水介质中速度衰减程度和对目标的毁伤效果, 为进一步开展该类聚能鱼雷战斗部的实验研究和工程设计提供了可参考的理论依据。

1 聚能鱼雷战斗部结构设计及破甲计算模型

根据形成聚能效应的三大类侵彻体(射流、杆式射流和自锻破片)设计出三种典型药型罩聚能鱼雷战斗部装药结构, 如图1所示。

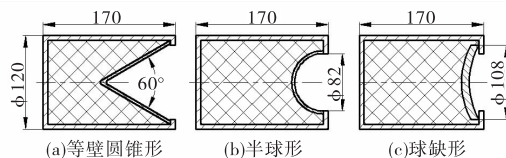


图1 三种不同形状药型罩装药结构

地面静态水箱模拟装置^[1]是根据目前世界上已经装备海军的一般轻型核潜艇双层结构设计的。模拟装置从左至右依次为鱼雷聚能战斗部、鱼雷自导头段模拟靶、潜艇非耐压壳模拟靶、潜艇模拟水舱、潜艇耐压壳模拟靶、6层后效靶等。鱼雷战斗部破甲计算模型结构布置如图2所示。

* 收稿日期: 2011-06-13

作者简介: 陈冬梅(1981-), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 研究方向: 高效毁伤战斗部设计及数值仿真。

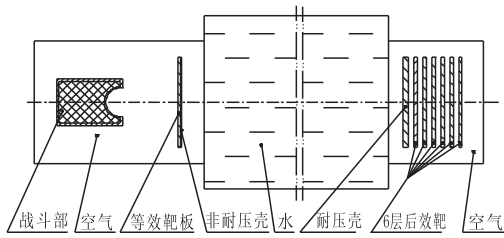


图2 鱼雷战斗部破甲计算模型结构布置

2 计算模型和物理参数

2.1 基本假设

计算模型的建立基于以下假设:整个破甲过程为绝热过程,忽略重力作用且不考虑温度的影响,药型罩、壳体和靶板的初始应力均为零。

2.2 有限元模型

由于鱼雷战斗部侵彻目标计算模型具有结构对称和爆炸作用载荷对称的特性,为缩短计算时间,建立1/2模型。等壁圆锥形药型罩和半球形药型罩与空气、炸药、水采用欧拉算法,壳体和靶板采用拉格朗日算法,通过多物质流-固耦合^[2];球缺形药型罩采用 Lagrange 型网格,对靶板的侵彻采用侵蚀接触。单位制采用 g-cm- μ s。三类聚能战斗部破甲有限元模型如图3、图4和图5所示。

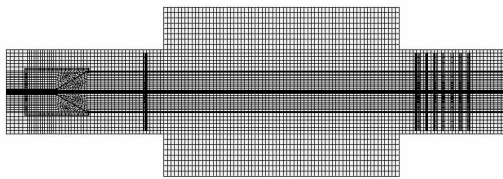


图3 等壁圆锥形药型罩鱼雷战斗部破甲有限元模型

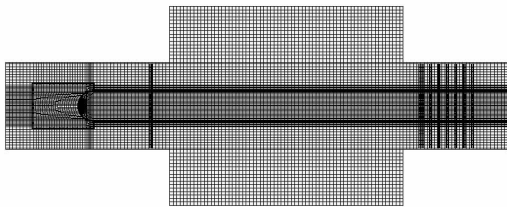


图4 半球形药型罩鱼雷战斗部破甲有限元模型

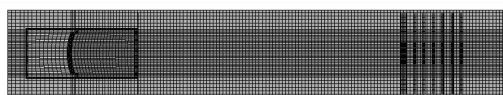


图5 球缺形药型罩鱼雷战斗部破甲有限元模型

2.3 材料模型及参数

数值模型由B炸药、药型罩、水介质、空气、壳体、等效靶板、潜艇壳体及后效靶板等八部分组成。

主装药采用B炸药, $\rho = 1.787\text{g/cm}^3$,爆速 $D =$

8390m/s,高能炸药燃烧与增长模型(Explosive Burning and Growing),JWL状态方程^[2]。

药型罩材料为紫铜, $\rho = 8.93\text{g/cm}^3$,剪切模量 $G = 47.7\text{GPa}$ 。由于不同形状药型罩的成形机理不同^[3],等壁圆锥形药型罩和半球形药型罩在成形过程中已变为流体行为,采用 Steinberg-Guinan 材料模型和 Gruneisen 状态方程^[2,4-5];而球缺形药型罩在成形过程中由流体行为向塑性行为过渡,采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程^[2,4-5]。

水选为空白材料模型,Gruneisen 状态方程:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha\mu)E$$

式中: $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, $C = 0.148$, $S_1 = 1.75$, $S_2 = S_3 = 0$, $\gamma_0 = 0.4934$, $\alpha = 0$ 。

空气选为空气物质流体模型(NULL),状态方程为线性多项式^[2], $\rho = 0.001293\text{g/cm}^3$ 。

战斗部壳体和鱼雷自导头段模拟靶选用塑性随动强化材料模型, $\rho = 2.77\text{g/cm}^3$,弹性模量 $E = 75\text{GPa}$,泊松比 $\gamma = 0.28$;潜艇非耐压壳、耐压壳和后效靶选用塑性随动强化材料模型, $\rho = 7.83\text{g/cm}^3$,弹性模量 $E = 206\text{GPa}$,泊松比 $\gamma = 0.33$ 。

3 模拟结果和分析

3.1 射流在水介质中的运动规律

在水介质模型中每隔10mm处取一点,每一点记录着射流经过该点时的速度与时间,得到射流在水介质中运动速度随时间变化规律的曲线,如图6所示。从图中可以看出速度曲线形成了5条明显的轨迹。

AB段对应射流头部在水介质中速度变化过程。射流头部在 $70\mu\text{s}$ 时开始侵彻水面,速度为 6636.8m/s ,在 $230\mu\text{s}$ 时侵出水介质,速度衰减最大。

CD段对应射流在水介质中速度变化过程。射流头部侵入水介质后,在水介质周围形成空腔,从而能使射流在水介质中保持低阻运动。

EF段对应射流与杆体之间的一段侵彻体在 $460 \sim 660\mu\text{s}$ 时间内在水介质中的速度变化。

GH段对应前段杆体在 $210 \sim 920\mu\text{s}$ 时间内在水介质中的速度变化。前段杆体进一步侵彻水介质形成更大的空腔,受到水介质的阻力,其速度衰减较大。

IJ段对应后段杆体在 $240 \sim 1050\mu\text{s}$ 时间内在水

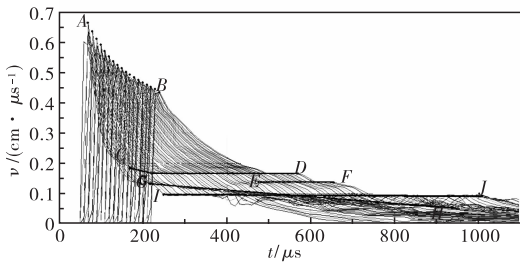


图 6 射流在水介质中各点处的速度与时间关系
 介质中的速度变化。后段杆体在水介质中空腔内保持高速低阻运动,在 530 μ s 时前、后两段杆体之间的距离最大,如图 7 所示。

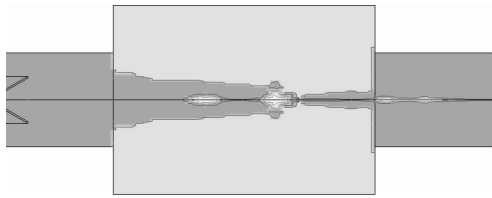


图 7 530 μ s 时射流在水介质中的位置

3.2 杆式射流在水介质中的运动规律

同样,在水介质中每隔 10mm 处取一点,杆式射流在水介质中运动速度随时间变化的规律曲线如图 8 所示,从图中看出速度曲线形成了 2 条明显的轨迹。

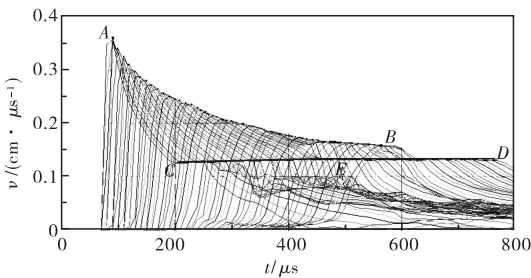


图 8 杆式射流在水介质中各点处的速度与时间关系

AB 段是杆式射流的准射流头部在水介质中的速度变化曲线。准射流在 80 μ s 时侵入水介质,速度为 3648.3m/s,在 540 μ s 时杆式射流头部穿出水介质,速度为 1553.7m/s。AB 段反映了侵彻体在水中运动的速度衰减规律,速度越大,衰减得越快。

CD 段是杆式射流的准杆体在水介质中的速度变化曲线。其速度基本没有衰减,因为高速运动的准射流使水介质分流而形成空穴,使得准杆体在水介质中保持低阻运动,如图 9 所示。

3.3 自锻破片在水介质中的运动规律

球缺形药型罩为常应力实体单元,可直接得到自锻破片在整个模拟过程中的速度曲线,如图 10 所示。

在爆轰压力的作用下球缺形药型罩向后翻转变形,形成向后翻转型自锻破片。自锻破片在 A 点

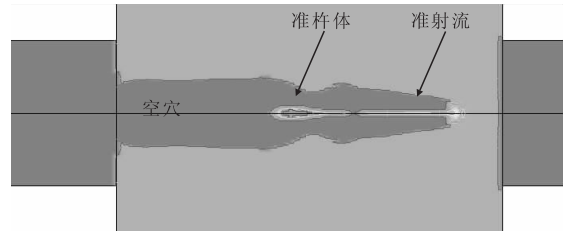


图 9 450 μ s 时杆式射流侵彻水介质位置

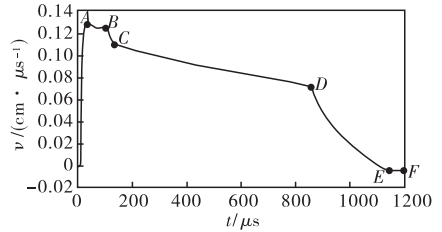


图 10 自锻破片在整个模拟过程中的速度曲线

(36 μ s 时)速度达到最大 1296 m/s;BC 段对应自锻破片侵彻等效壳体与非耐压靶板的速度变化,速度衰减了 170 m/s,如图 11 所示,此时,头部墩粗,速度急剧变化;CD 段对应自锻破片在水介质中的速度衰减,如图 12 所示;DE 段对应自锻破片侵彻间隙靶的速度衰减。

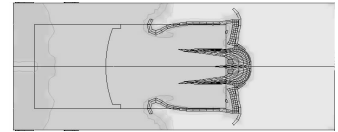


图 11 自锻破片入水时刻变形

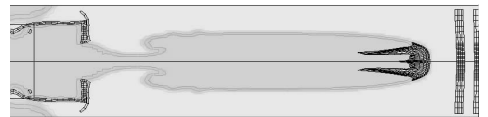


图 12 自锻破片在水介质中某一时刻位置

3.4 三种成型装药结构毁伤目标比较

如表 1 所示三种聚能侵彻体在水介质中侵入一倍口径的速度衰减。射流速度衰减最大,其次是杆式射流,自锻破片速度衰减最小。对靶板后效作用主要取决于聚能侵彻体在贯穿水介质后的剩余速度及其质量。三种成型装药最后破甲效果对比如图 13 所示,半球形药型罩成形的杆式射流毁伤目标效果最好,穿透 4 层后效靶板。因为圆锥形药型罩成形的射流在水中速度衰减很厉害且杆体直径大、速度低不利于在水介质中侵彻和最后的破甲;球缺形药型罩成形的自锻破片受到鱼雷壳体的影响而变形不利于在水中航行,尽管较其他两种侵彻体在水中速度衰减小,但其剩余速度很低也不利于破甲;只有半球形药型罩成形的准射流和准杆体(杆式射流)具有一定初速及速度梯度,介于前面两者之间,其侵彻水层和破甲效果最好。

表 1 侵彻体在水介质中侵彻一倍口径的速度衰减

	入水层速度/ (m/s)	出水层速度/ (m/s)	速度衰减/ (m/s)
射流	6636.8	4369.3	407.9
杆式射流	3648.3	1553.7	282.6
自锻破片	1079.8	719.4	64.9

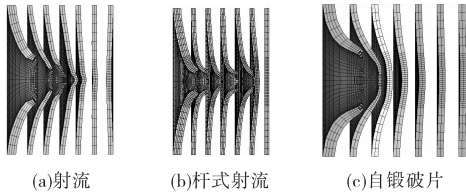


图 13 三类聚能侵彻体破甲效果

4 结论

文中采用数值模拟的方法对鱼雷战斗部成型装药结构对目标毁伤效果的影响进行了模拟分析,得到以下结论:

1) 侵彻体侵彻水介质时,入水速度越低,在水介质中速度衰减越小,侵彻体头部磨损变形也越小,有利于侵水深度的提高;但入水速度也不宜过低,入水

速度过低不利于后期破甲。

2) 半球形药型罩成形的杆式射流(准射流和准杆体)能形成具有一定初速及速度梯度的杆式侵彻体,可以产生明显的水下空腔随进效应,准射流为准杆体提供无能耗通道,其破甲威力显著优于等壁圆锥形药型罩成形的射流和球缺形药型罩成形的自锻破片。因此,半球形药型罩成形的杆式侵彻体是实现聚能装药水下作用空腔随进效应和提高破甲威力的关键。

参考文献:

[1] 凌荣辉,钱立新,唐平,等. 聚能型鱼雷战斗部对潜艇目标毁伤研究[J]. 弹道学报,2001,13(2):23-27.
 [2] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.
 [3] 陈智刚,赵太勇,侯秀成. 爆炸及其终点效应[M]. 北京:兵器工业出版社,2004.
 [4] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
 [5] 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.

(上接第 109 页)

种方法所得结果差值较大;当攻角大于 15° 时,两种方法所得结果差值较小,在 10% 以内。

3.3.3 面角对切割毁伤特性的影响

在杆条切割靶板的过程中,面角 γ 起着重要的作用,为了研究 γ 对切口长度的影响,选取 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\beta = 90^\circ$ 的典型情况,模拟 γ 在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化时杆条对靶板的侵彻,得到切口长度随面角 γ 的变化曲线,同时列出对应的投影计算结果,如图 9 所示。由图可知,两条曲线变化规律相同,切口长度随面角的增大而增大,投影计算所得曲线略低于模拟计算所得曲线,但两者差值很小,随着 γ 的变化,两者差值一直在 10% 以内。

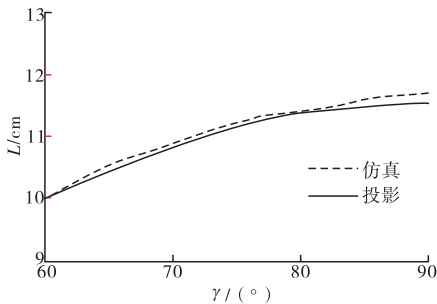


图 9 面角对切口长度的影响

4 结论

文中对影响杆条切割毁伤特性的因素进行了分析,指出杆条对薄靶板的切割毁伤特性除了受杆条和靶

板自身因素影响外,还受到杆条速度、攻角、入射角及面角等入射条件的影响;然后建立了高速杆条对薄靶板切口长度的投影计算模型,并对典型入射条件下杆条对薄靶板的切割毁伤进行了数值模拟,模拟计算结果与投影计算结果规律一致,杆条长度随攻角、入射角、面角的增加而增大,攻角大于 15° 时,投影计算结果与模拟计算结果差值在 10% 以内。当杆条能够穿透靶板时,用投影计算模型预测高速杆条对薄靶板的切口长度具有较好的精确度,该投影计算模型可用于目标易损性分析。

参考文献:

[1] 胡景林,张运法. 杆状破片对 A3 钢板的极限穿透速度研究[J]. 弹道学报,2001,13(2):18-22.
 [2] 靳佳波,王树山,司红利. 高速杆条小着靶角侵彻靶板的三维数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2003,23(1):160-161.
 [3] 卢永刚,杨世全. 基于 THOR 方程的杆条复杂姿态穿甲分析模型[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(1):27-30.
 [4] John G Avery. Design Manual for Impact damage tolerant aircraft structure, AD - A 109290[R]. 1982.
 [5] 侯日立,涂明武,孙峰山,等. 一种离散杆战斗部威胁下的飞机损伤计算模型[J]. 计算机仿真,2006,23(6):85-87.