

# 鱼雷制导头段对聚能战斗部毁伤威力的影响

冯誉恒, 梁安琪, 刘星雨, 尹建平, 伊建亚, 张雪朋

(中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为了研究鱼雷制导头段结构对水下聚能战斗部毁伤威力的影响, 采用 AUTODYN 有限元分析软件, 对聚能侵彻体受不同模拟头段结构影响下的毁伤性能进行了数值仿真, 分析了不同模拟头段结构下冲击波绕射、靶后载荷传播和毁伤靶板的全过程。研究表明: 侵彻体头部速度和后效靶扩孔半径随模拟头段总长度和模拟头段层数增大而整体呈上升趋势; 在一定范围内, 增加模拟头段层数可以有效地优化爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 的成型形态, 从而提升其后续侵彻能力; 在不同模拟头段总长度条件下, 存在一个最佳总长度使侵彻体保持较高头部速度的同时不发生颈缩断裂。

**关键词:** 聚能战斗部; 水下冲击波; 水下爆炸; 爆炸成型弹丸; 侵彻; 颈缩

**中图分类号:** TJ630.3; O385 **文献标识码:** A

在海洋作战体系中, 聚能战斗部因其高效毁伤能力被广泛用于反舰武器中, 通过水下爆炸产生的冲击波、气泡脉动及聚能侵彻体等多重毁伤元的叠加可以对舰船造成有效毁伤<sup>[1]</sup>。国内外学者围绕着战斗部装药特性、药型罩材料与结构及外部环境条件开展了众多有关聚能战斗部毁伤性能的研究<sup>[2][9]</sup>。古滨<sup>[10]</sup>分析了水深对冲击波衰减与结构动力响应的影响; 李海龙<sup>[11]</sup>探究了聚能装药水下爆炸中多毁伤元耦合机制, 揭示了结构破坏机理; 黄贤智等<sup>[12]</sup>研究了爆破冲击波作用下水下墩柱结构的动力响应特征; 张晓伟等<sup>[13]</sup>基于爆炸实验与数值模拟, 研究了隔爆墙后爆炸载荷下的冲击波绕射; 张迪洲等<sup>[14]</sup>分析了水下爆炸冲击波沿圆柱壳绕射的衰减过程; 屈子悦<sup>[15]</sup>对冲击波进行了仿真分析, 得到了反射冲击波、透射冲击波、绕射冲击波的形成过程与特点; 张之凡等<sup>[16]</sup>揭示了聚能装药水下爆炸中冲击波与侵彻体的时序耦合规律; 蒋文灿等<sup>[17]</sup>开展了水下组合药型罩对靶板毁伤的数值模拟, 分析了其穿靶过程和穿靶机理; 潘乾坤等<sup>[18]</sup>研究了不同组合药型罩鱼雷战斗部对含水复合结构的毁伤性能; 王长利等<sup>[19]</sup>通过实验和数值模拟对比, 研究了聚能装药对典型含水复合结构的毁伤过程。

实际中鱼雷制导头段的内部结构非常复杂, 通过建立合适的理论模型可以作为预测鱼雷聚能战斗部对目标侵彻威力的手段, 目前许多学者据此开展过研究。戴君全等<sup>[20]</sup>采用了 2 层 45# 钢靶作为鱼雷制导头段的等效靶, 拟合出了高速射弹在水介质中的运动规律曲线; 凌荣辉等<sup>[21]</sup>使用单层铝靶来等效鱼雷制导头段, 分析了聚能战斗部对潜艇目标的毁伤能力; 陈冬梅等<sup>[22]</sup>选用单层靶板模拟鱼雷制导头段, 给出了三类聚能侵彻体在水介质中的运动规律和毁伤效果; 朱奇峰等<sup>[23]</sup>采用单层 10mm 厚铝板和若干层累计一定厚度的间隔铝板组成的模拟头段分别模拟了鱼雷制导头段, 通过理论计算和试验对比验证了其理论模型的合理性。

现有关于简化鱼雷制导头段的数值模拟研究中, 学者们多采用简化模型, 如固定参数的单层铝靶, 而对不同层数和结构长度的模拟头段对毁伤威力的影响研究较少, 尤其是模拟头段对冲击波传播路径的干扰作用、对聚能侵彻体成型形态的影响规律, 以及二者耦合作用下对毁伤威力的动态干扰机制尚不明确。本文针对现有鱼雷制导头段简化模型单一固定化问题, 将鱼雷制导头段结构的差异等效为模拟头段长度和层数的变化, 分析不同简化模型对聚能战斗部毁伤威力的影响, 开展水下爆炸数值模拟, 研究不同鱼雷制导头段结构对冲击波传播和侵彻体成型形态的影响机制。研究成果可为鱼雷聚能战斗部提高毁伤威力和结构优化设计提供参考。

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2025-11-13

基金项目: 国家自然科学基金 (12572421, 12402441)

作者简介: 冯誉恒 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事高效毁伤技术研究. E-mail: 13772212510@163.com

通讯作者: 张雪朋 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事弹药高效毁伤技术和毁伤评估技术研究. E-mail: zhangxp@nuc.edu.cn

# 1 数值模拟建模

## 1.1 数值模型及方案

本文中所设计的战斗部主要由装药和药型罩组成。装药直径  $D=100\text{mm}$ ，药型罩内外曲率半径分别为  $195\text{mm}$  和  $193\text{mm}$ ，装药高度  $H=100\text{mm}$ ，等壁厚球缺药型罩的厚度为  $2\text{mm}$ 。考虑到聚能战斗部侵彻目标具有对称性，为缩短计算时间，建立了  $1/2$  聚能战斗部有限元模型如图 1 所示。

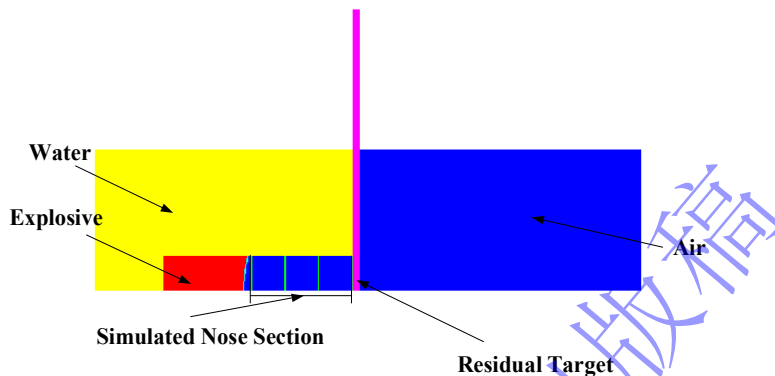


图 1 聚能战斗部二维仿真模型

Fig 1 Two-Dimensional Simulation Model of a Shaped Charge Warhead

聚能战斗部有限元模型由聚能战斗部、模拟头段、水、空气和后效靶组成。药型罩、空气、炸药和水均采用欧拉算法，在流域周围添加自由流出边界条件。模拟头段和后效靶采用拉格朗日算法和自动耦合方式，对模拟头段和后效靶的侵彻采用侵蚀接触。起爆方式为顶部单点中心起爆。数值模拟中单位制采用  $\text{mm-mg-ms}$ 。为了更好地观测侵彻体接触后效靶前一刻的头部速度，在后效靶周围设置多个观测点，如图 2 所示。

考虑到网格尺寸对聚能射流毁伤威力的影响，聚能射流速度在网格为  $1.5\text{mm}$  处已收敛<sup>[25]</sup>，为保证计算精度和计算效率，本文在聚能装药、靶板碰撞区域和其余区域均采用  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的网格。

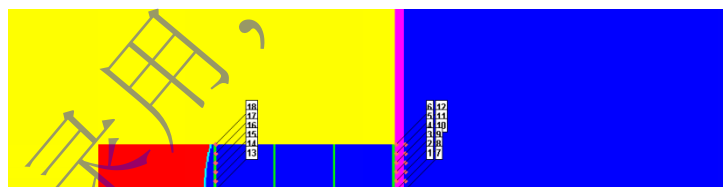


图 2 观测点位置

Fig 2. Locations of Observation Points

本文将鱼雷制导头段简化为模拟头段，将鱼雷制导头段结构的差异等效为模拟头段长度和层数的变化，将模拟头段的总厚度设置为  $10\text{mm}$ ，保持模拟头段的一端紧密与药型罩底部贴合，另一侧紧贴后效靶。模拟头段总长度定义为  $L$ ，模拟头段层数定义为  $M$ ，模拟头段总长度设置为  $1\sim 2.5$  倍装药直径 ( $1\sim 2.5D$ )。为了减少误差，在模拟头段总长度一定的情况下，保持靶间距均匀分布在该段长度内，单层铝靶厚度分别为  $10$ 、 $5$ 、 $3.3$ 、 $2.5$  和  $2\text{mm}$ ，对应模拟头段层数分别为  $1$ 、 $2$ 、 $3$ 、 $4$ 、 $5$  层，模拟头段层数与单层铝靶板厚度关系如表 1 所示。

表 1 模拟头段层数与单层铝靶板厚度关系

Table 1 Relationship Between the Number of Nose Layers and the Thickness of a Single Aluminum Target Plate

模拟头段层数/(层)	单层铝靶板厚度/(mm)
1	10
2	5
3	3.3

4	2.5
5	2

### 1.2 材料模型及参数

战斗部装药采用 PBX-9501, 采用 JWL 状态方程。9501 炸药材料模型如表 2 所示, 其中: 密度  $\rho=1.84\text{g/cm}^3$ , 爆速  $D$  为  $8800\text{m/s}$ ,  $A, B, R_1, R_2$  和  $\omega$  均为表征炸药特性的参数,  $E$  为比热力学能。

表 2 9501 炸药材料模型

Table 2 Material parameters of 9501 explosive

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-3})$
1.84	8800	85.24	1.802	4.55	1.3	0.38	10.2

药型罩材料为紫铜, 采用 shock 状态方程。紫铜材料模型如表 3 所示, 其中: 密度  $\rho=8.9\text{g/cm}^3$ ,  $C_1, C_2$  为速度参数,  $S_1, S_2$  为无单位常数参数,  $\Gamma$  为格林尼森系数。

表 3 紫铜材料模型

Table 3 Material parameters of COPPER

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$\Gamma$
8.9	3958	0	36	0.45	2.0

模拟头段材料为铝, 选 Tillotson 状态方程, 密度  $\rho=2.7\text{g/cm}^3$ ; 后效靶板的材料为 4340 钢, 4340 钢的材料模型如表 4 所示。其中: 密度  $\rho=7.83\text{g/cm}^3$ ,  $A, B$  为应力参数,  $n$  为硬化指数,  $C$  为应变率常数。

表 4 4340 钢的材料模型

Table 4 Material parameters of STEEL 4340

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$n$	$C$
7.83	0.792	0.51	0.26	0.014

水的密度  $\rho=1.0\text{g/cm}^3$ , 状态方程采用 Polynomial, 水的材料模型如表 5 所示。其中:  $A_1, A_2, A_3$  为水的应力参数,  $B_0, B_1$  为水的无单位常数参数。

表 5 水的材料模型

Table 5 Material parameters of WATER

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$A_1/\text{GPa}$	$A_2/\text{GPa}$	$A_3/\text{GPa}$	$B_0$	$B_1$
1.0	2.2	9.54	14.57	0.28	0.28

上述四种材料参数均取自 AYTODYN 的材料参数库<sup>[26]</sup>。

### 1.3 数值计算结果的有效性验证

为了验证数值计算结果的准确性, 参照文献<sup>[27]</sup>试验, 利用本文使用的数值计算方法和材料参数, 建立了相对应的数值计算模型, 如图 3 所示。

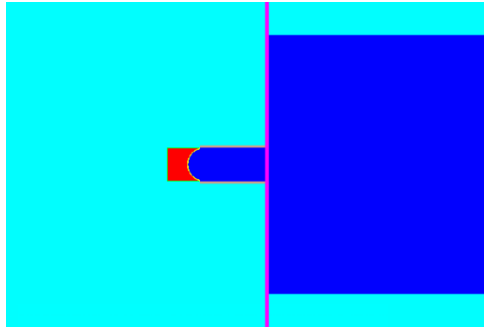


图3 与试验相对应的计算模型

Fig 3 Computational model corresponding to test.

水下单层靶板扩孔的数值计算与试验测量孔径对比如图4所示。可以看到水下试验的靶板扩孔孔径为33mm，数值模拟结果为30mm，误差为9.1%，试验测量值与数值计算值较为吻合，因此本文的数值模拟计算结果可以满足工程应用的精度要求。

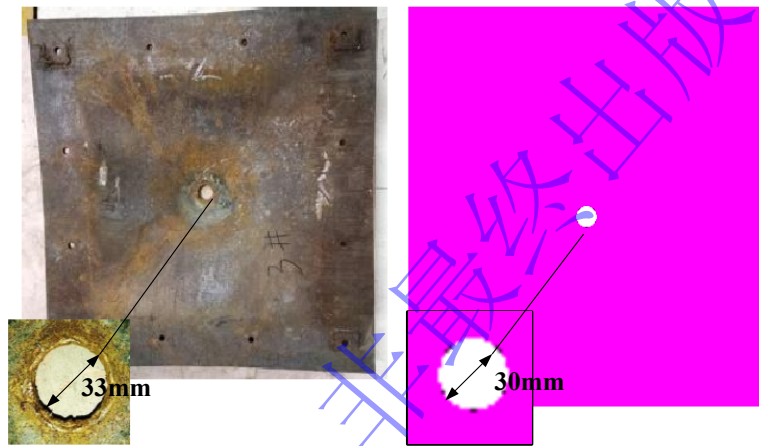


图4 数值计算与试验测量孔径对比图

Fig 4 Comparison of Apertures between Numerical Simulation and Experimental Measurement

## 2 数值模拟

### 2.1 冲击波绕射典型过程

模拟头段层数为1、模拟头段总长度为1D下炸药在水下爆炸产生的冲击波绕射过程如图5所示。在 $t=0.017\text{ms}$ 时，爆轰波阵面作用于药型罩，驱动药型罩开始塑性压垮。前沿冲击波穿过药型罩与紧贴药型罩的铝靶板发生碰撞接触，受到铝靶板的阻挡，波阵面在中心区域的传播受到抑制，未被阻挡的波阵面沿靶板边缘迅速向外侧弯曲传播，形成绕射波。爆轰产物高速向周围膨胀扩散，在爆轰产物与水的界面处产生反射稀疏波，向起爆中心传播与入射冲击波叠加，在爆轰产物与冲击波尾部邻接处形成负压区； $t=0.019\text{ms}$ 时，药型罩压垮进一步加剧，爆轰产物驱动EFP侵彻体高速冲击铝靶板中心，导致铝靶板表面因应力集中导致压力和密度骤然升高，形成图中红色区域。绕射波持续向靶板两侧传播，波阵面弯曲程度增大； $t=0.023\text{ms}$ 时，在稀疏波的作用下，靶板前面的高压气体向靶板边缘运动，在气体运动过程中受到靶板两侧入射冲击波的影响，其流动方向发生偏转，在靶板两侧边缘处形成环流向前传播，环流绕射到靶板后继续运动<sup>[28]</sup>，绕射波传播至靶板后方，波阵面进一步弯曲并趋于平缓，冲击波绕射过程基本结束。

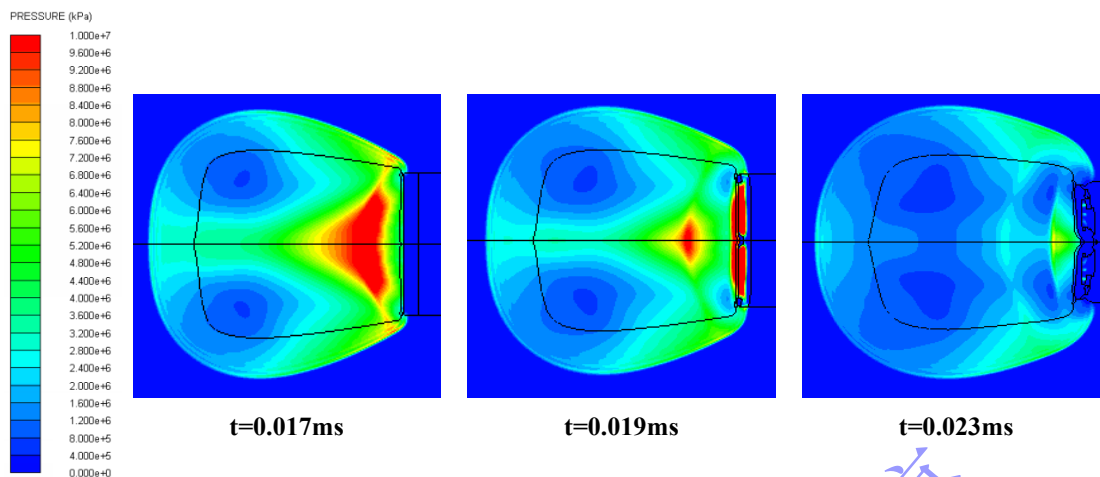


图 5 冲击波绕射过程

Fig 5 Diffraction of shock waves

## 2.2 冲击波靶后传播过程

模拟头段层数为 4、模拟头段总长度为 2D 下冲击波绕射铝靶后的载荷传播过程如图 6 所示。在  $t=0.018\text{ms}$  时，高温高压的爆轰产物作用到药型罩时，药型罩还未完全翻转闭合形成爆炸成型弹丸，侵彻体高速接触第一层铝靶板前端直接对靶板实施强烈挤压；在  $t=0.037\text{ms}$  时，侵彻体持续向前传播，可以看到此时侵彻体头部未与第二层铝靶板发生碰撞接触，但此时第二层铝靶板已经发生破碎，这是由于侵彻体在水中高速运动会产生弹道波，而弹道波必先于侵彻体作用目标<sup>[11]</sup>，因此是弹道波先作用于第二层铝靶板使其破碎随后由侵彻体对铝靶板进行侵彻破坏；在  $t=0.060\text{ms}$  时，可以看出此时弹道波的威力已经不足以提前使第三层铝靶板破碎，而是等 EFP 侵彻体头部基本成型后与铝靶板发生碰撞接触造成靶板破坏；在  $t=0.083\text{ms}$  时，可以从图中看出侵彻体头部两侧的直达波还未与后效靶接触，而侵彻体头部的弹道波已穿过第四层铝靶板并在后效靶上发生透射现象，此时侵彻体头部同样未与后效靶发生接触碰撞，可看出侵彻体头部速度是高于侵彻体两侧直达波的传播速度。

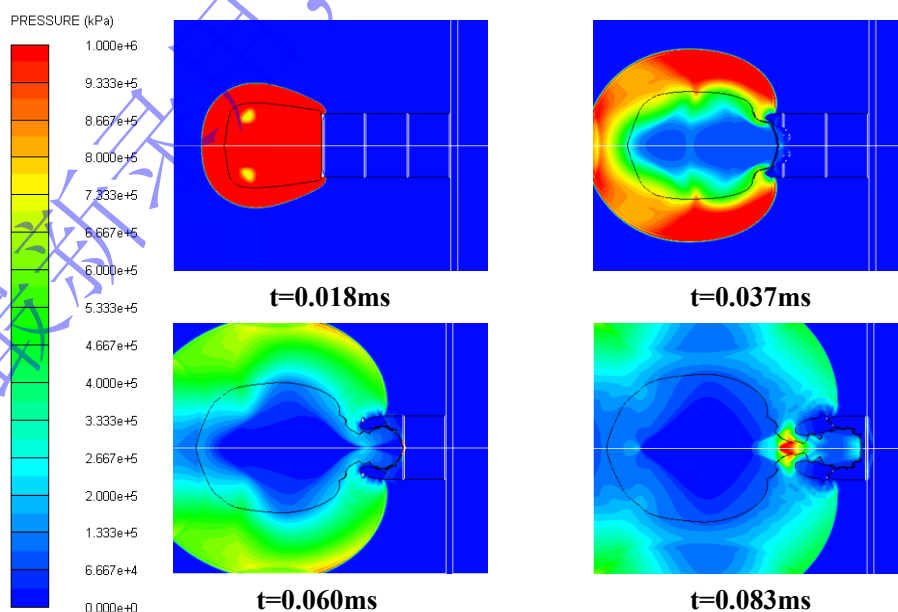


图 6 冲击波靶后传播过程

Fig 6 Propagation Process of Shock Wave behind the Target

### 2.3 高速侵彻靶板过程

模拟头段层数为 5、模拟头段总长度为 2.5D 下侵彻体高速侵彻后效靶过程如图 7 所示。在  $t=0.078\text{ms}$  时，侵彻体头部周围以蓝色低压区为主，两侧直达波的压力显著高于侵彻体头部压力，靠近侵彻体头部区域刚结束冲击波绕射现象，附近压力场仍维持着绕射弯曲状态。此时侵彻体完成对第四层铝靶板的穿透，侵彻体和两侧直达波同步向后效靶方向传播；在  $t=0.105\text{ms}$  时，EFP 头部开始接触后靶板，后靶板中心在压力的作用下开始慢慢变形向内凹陷，随着 EFP 的运动，后靶板所承受的挤压越来越大，发生的形变也随之增大，靶板中心发生脆性断裂，随着侵彻体的持续侵彻，其头部不断挤压后效靶导致靶板中心部分区域被侵彻体向后推出，发生剪切冲塞破坏，赛块侧面可见明显的撕裂现象。此时两侧直达波传播至后效靶处并与后效靶发生接触碰撞，并开始在后效靶上发生透射现象；在  $t=0.124\text{ms}$  时，后效靶中心区域已被侵彻体头部整体推出靶板，靶板背面伴随着层裂崩落现象，后效靶中心部分略微向后弯折。两侧直达波与后效靶发生碰撞后产生的反射波，与正向直达波在靶板前侧相遇并产生波的叠加；在  $t=0.166\text{ms}$  时，侵彻体已完全穿透后效靶板。在爆炸冲击波和爆轰产物膨胀作用下，后效靶破孔附近形成水流冲击靶板，造成靶板破孔周围局部塑性变形<sup>[29]</sup>，至此，侵彻体对靶板的侵彻过程结束。

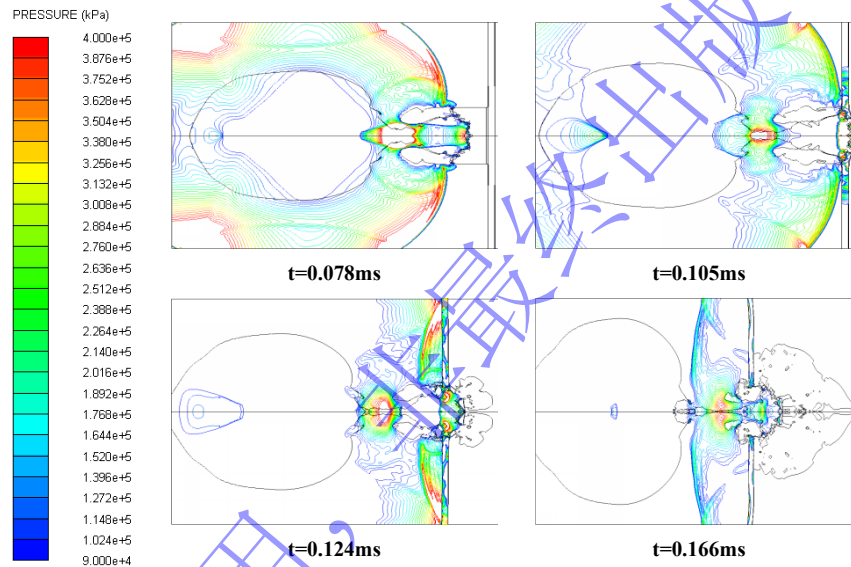


图 7 高速侵彻靶板过程

Fig 7: High-Speed Penetration Process of Target Plates.

## 3 影响因素分析

### 3.1 模拟头段层数对毁伤威力的影响

为了了解不同模拟头段层数对聚能战斗部毁伤威力的影响，对设计的 5 种不同模拟头段层数方案进行了数值模拟。模拟头段总长度为 2D 时，不同模拟头段层数下 EFP 侵彻体碰撞每层铝靶板前和达到后效靶前一刻侵彻体成型过程如图 8 所示。通过增加模拟头段层数  $M$ ，可以有效地优化 EFP 的成型形态，从而提升其后续的侵彻性能。当模拟头段层数为 1 层时，EFP 侵彻体整体呈细长形态；模拟头段层数为 2 层时，EFP 侵彻体头部呈哑铃型；当层数增加至 3 层时，EFP 侵彻体头部进一步演变为半圆球状；模拟头段层数为 4 层时，EFP 侵彻体整体呈规整纺锤体状；模拟头段层数为 5 层时，EFP 侵彻体整体呈扁平饼状。模拟头段层数为 3、4、5 层时，侵彻体未与第二层铝靶板发生接触碰撞而铝靶板已发生破碎，这是由于弹道波先侵彻体一步对铝靶板进行毁伤作用。随着模拟头段层数的增加，EFP 侵彻体头部的形态从细长逐渐向扁平演变。这是由于模拟头段层数  $M$  的增加，使得单层铝靶板厚度相应减薄，从而减少了冲击波在靶板处的反射效应，使能量更多透射至径向方向，推动头部材料向四周扩展。

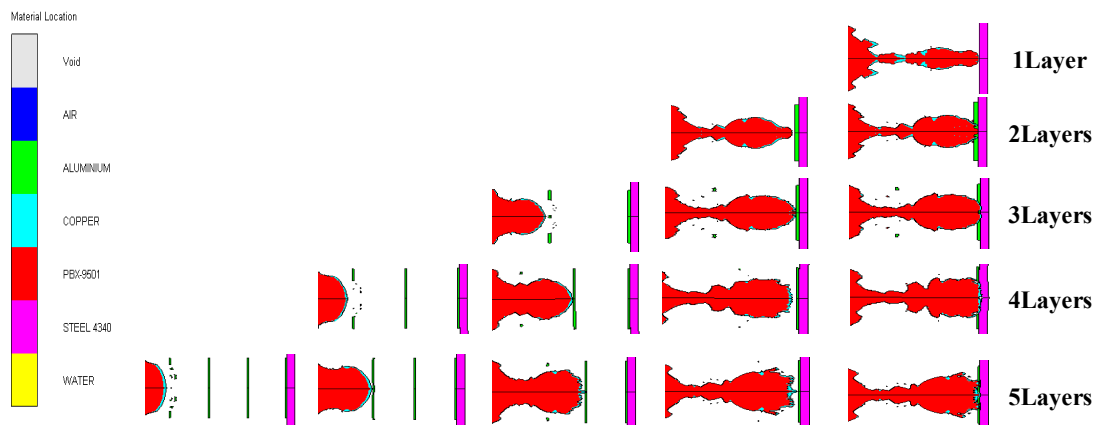


图 8 不同模拟头段层数下 EFP 侵彻体成型图

Fig 8 Formation of EFP Penetrators with Different Nose Layer Numbers

在 EFP 侵彻体冲击后效靶板的过程中，挠度作为衡量靶板抗变形能力的关键指标。各模拟头段层数下，后效靶挠度随总长度的变化规律如图 9 所示，当模拟头段总长度为 1D~2.5D 时，挠度均随模拟头段层数的增加先上升后降，这是因为模拟头段层数增加初期靶厚降低会减小冲击波与爆轰产物动能的耗散，使得挠度上升，而后随着层数的持续增加，此时靶板厚度降低且分布较为紧密，使得冲击波多次反射消耗能量使得挠度下降，最终后效靶的变形作用是在 EFP 和水介质中压力的共同作用下形成的。

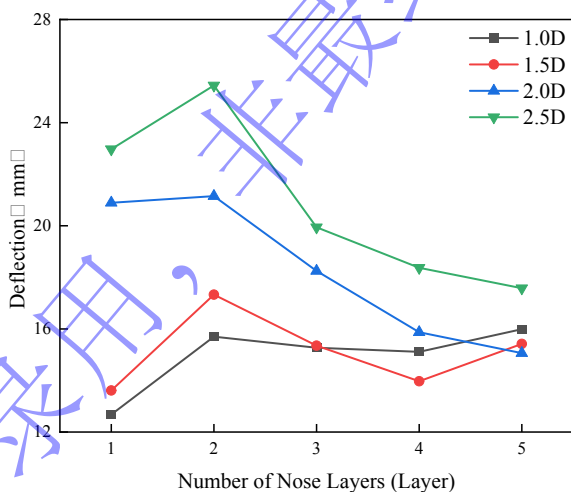


图 9 模拟头段层数对后效靶挠度的影响

Fig 9 Effect of Number of Nose Layers on Deflection of Residual Target

为研究不同模拟头段层数下，各种模拟头段总长度对于侵彻体头部速度和侵彻体对后效靶的开孔孔径的影响，开展了不同模拟头段层数下对聚能战斗部毁伤威力的影响，不同模拟头段层数下侵彻体头部速度和侵彻体对后效靶的开孔孔径如图 10 所示。

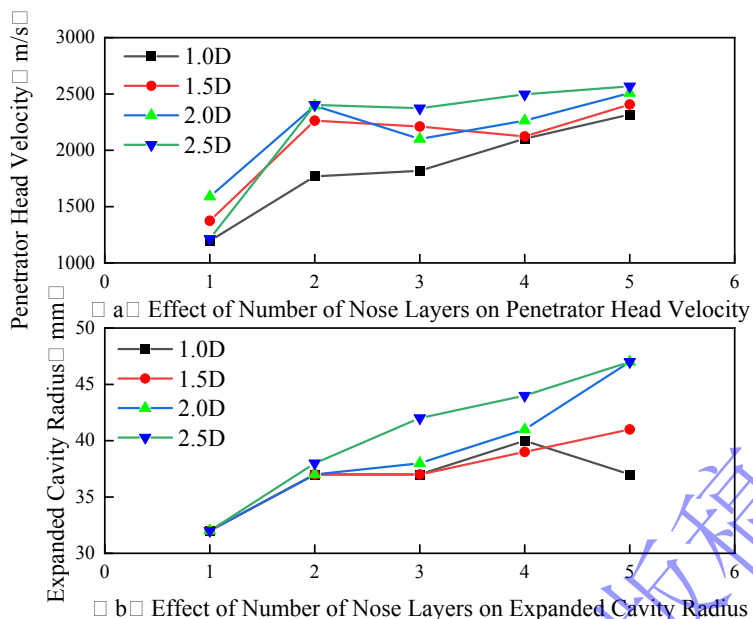


图 10 模拟头段层数对聚能战斗部毁伤威力的影响

Fig 10 Effect of Number of Nose Layers on Lethality of Shaped Charge Warhead

由图 10 (a) 可知, 模拟头段总长度  $L$  在  $1D$  到  $2.5D$  的范围内, 侵彻体头部速度随模拟头段层数  $M$  的增加整体呈上升趋势。模拟头段层数从 1 层增至 2 层时, 侵彻体头部速度大幅度上升, 这表明在初始阶段通过减薄靶厚降低动能消耗的效果极为显著; 当模拟头段层数从 2 层增至 5 层时, 侵彻体头部速度仍持续增长, 但增量幅度逐渐下降, 这表明随着单层靶板厚度的不断降低, 靶板对侵彻体头部速度的消耗能力趋于饱和, 减薄靶板厚度带来的动能收益也随之递减。

从图 10 (b) 中可以看出, 当模拟头段总长度  $L$  在  $1D \sim 2.5D$  的范围内, 后效靶的扩孔半径随模拟头段层数  $M$  的增加整体呈增大趋势。当模拟头段总长度  $L=1.0D$  时, 后效靶扩孔半径随模拟头段层数  $M$  的增加呈现先增大后减小, 整体呈增加的变化趋势, 且在模拟头段层数为 5 层时出现扩孔半径下降。这是因为此时层数的增加导致冲击波反射能量叠加导致动能分散, 进而引发扩孔半径的下降; 当模拟头段总长度  $L \geq 1.5D$  时, 扩孔半径随模拟头段层数从 2 层增至 5 层呈逐渐上升趋势。这是因为更长的模拟头段总长度为 EFP 的成型提供了充足空间, 且随着靶板厚度的降低, 靶板抑制侵彻体径向扩孔能力的作用随之减弱。

### 3.2 模拟头段总长度对毁伤威力的影响

4 种不同模拟头段总长度下, 模拟头段层数为 1 时模拟头段结构对 EFP 成型影响的结果如图 11 所示。模拟头段总长度过短为  $1D$  时, EFP 侵彻体成型不充分, 而当模拟头段总长度  $L \geq 2D$  时, 侵彻体尾部因过度拉伸而断裂。当模拟头段总长度为  $1D$  时, EFP 侵彻体头部尖锐, 尾部平滑收敛, 但侵彻体未充分拉伸; 模拟头段总长度为  $1.5D$  时, EFP 侵彻体整体被拉长出现轴向拉伸颈缩, 头部中心凸起且两侧伴随轻微隆起; 模拟头段总长度为  $2D$  时, EFP 侵彻体尾部开始发生颈缩断裂, 头部呈扁平蘑菇头, 颈部为细束且伴随周向裂纹; 模拟头段总长度为  $2.5D$  时, 由于成型时间过长, EFP 侵彻体尾部断裂现象加剧, 但断裂后, 侵彻体头部仍能保持较高动能, 因侵彻体头部弹道波已预先作用于靶板。上述现象表明: 模拟头段总长度  $L$  的增加为侵彻体成型提供了更充足的拉伸空间。随着模拟头段总长度从  $1D$  增加至  $1.5D$  时, 模拟头段总长度的增加延长了传播距离为 EFP 侵彻体提供了拉伸空间, 使其从短粗的泪滴状发展为更优的长杆状。而当  $L \geq 2D$  时, 过长的传播距离导致侵彻体被过度拉伸, 其塑性变形能力达到极限, 从而引发颈缩断裂。

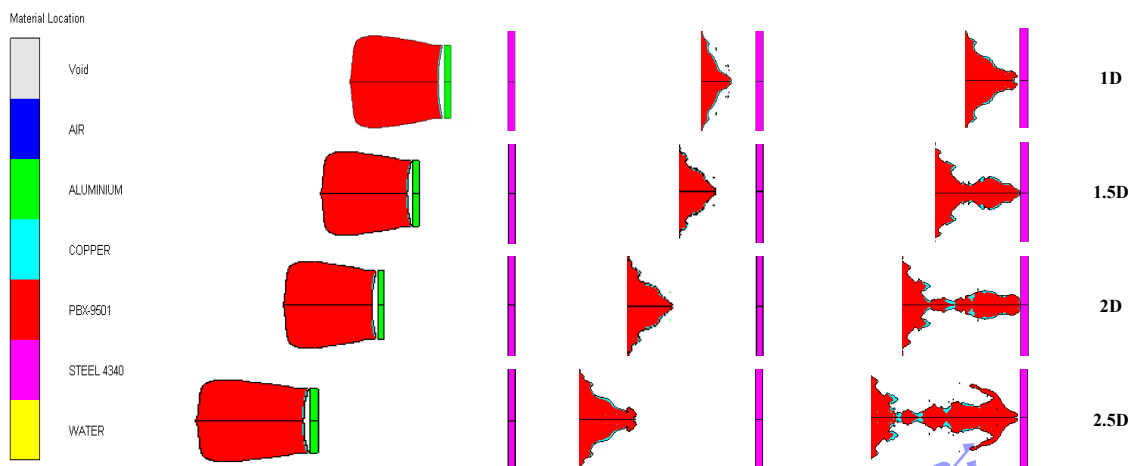


图 11 不同模拟头段总长度形成的 EFP 侵彻体

Fig 11 EFP Penetrators Formed by Nose Sections with Different Total Lengths

本研究针对聚能战斗部侵彻体后效靶，通过改变模拟头段总长度，分析了其对后效靶挠度大小的影响规律，不同模拟头段总长度对后效靶挠度大小的影响如图 12 所示。模拟头段层数为 1~3 层时，挠度随模拟头段总长度的增加而显著增大，这是由于模拟头段总长度较短时，EFP 拉伸空间不足，药型罩压垮过程受限，成型形态不完整，从而导致挠度较小；而模拟头段层数为 4~5 层时，挠度会随着模拟头段总长度的增加呈先减小后增大的趋势，这是由于铝靶板层数过多导致冲击波发生多次反射消耗能量，而模拟头段总长度的增大会抵消靶板分布过密的负面作用，使后效靶挠度逐渐上升。这一规律表明：当模拟头段层数过多时，需通过增加模拟头段总长度来抵消靶板分布密集的负面影响，从而优化动能传递效率。

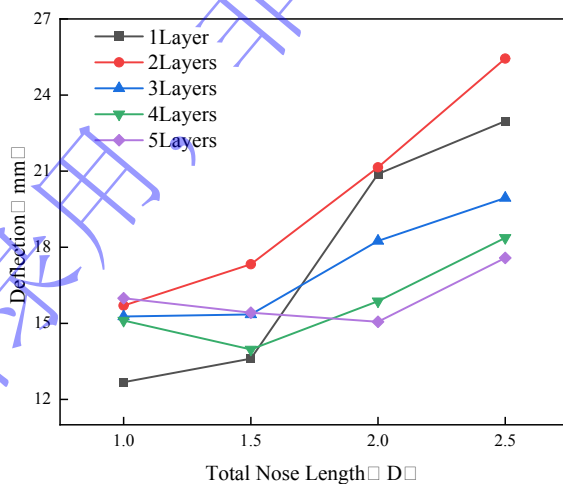


图 12 不同模拟头段总长度对挠度大小的影响

Fig 12 Effect of Total Nose Length on Deflection

不同模拟头段总长度对侵彻体毁伤威力的影响如图 13 (a) 所示。当模拟头段层数在 1 层增至 5 层的范围内变化时，侵彻体头部速度随模拟头段总长度  $L$  的增加整体呈现出上升趋势。当模拟头段层数为 1 层时，侵彻体头部速度明显低于其他层数，且随模拟头段总长度的增加呈现先上升后下降的非单调特性，模拟头段总长度  $L$  从 1D 增至 2D 时速度上升，从 2D 增至 2.5D 时速度持续下降。这一现象的核心原因在于模拟头段层数为 1 层时铝靶板最厚为 10mm，对侵彻体成型的干扰最为严重。在  $L=1.5D\sim 2D$  时获得短暂优化后，更长的拉伸距离使速度短暂提升，但当  $L>2D$  时，过长的拉伸距离导致成型不稳定的侵彻体发生过度拉伸甚至断裂，动能损耗加剧，最终引发速度下降；当

模拟头段层数  $M=2$ 、 $M=4$  和  $M=5$  时，侵彻体头部速度随模拟头段总长度从  $1D$  上升至  $2.5D$  时整体均呈上升趋势。这是因为多层结构导致单层靶板厚度显著减薄，其对侵彻体成型的干扰作用大幅削弱，在此前提下，增加模拟头段总长度能更有效地扩展 EFP 的成型空间，使其充分拉伸和加速，从而达到更高的头部速度。而当模拟头段层数为 3 层时，侵彻体头部速度变化趋势与  $M=2$ 、4、5 层基本一致，但在  $L=1.5D$  之后，其速度增长曲线趋于平缓，增速放缓。这是由于模拟头段层数  $M \geq 2$  层时，靶板厚度下降对侵彻体的干扰作用减弱，因此侵彻体头部速度的增长趋势变缓。

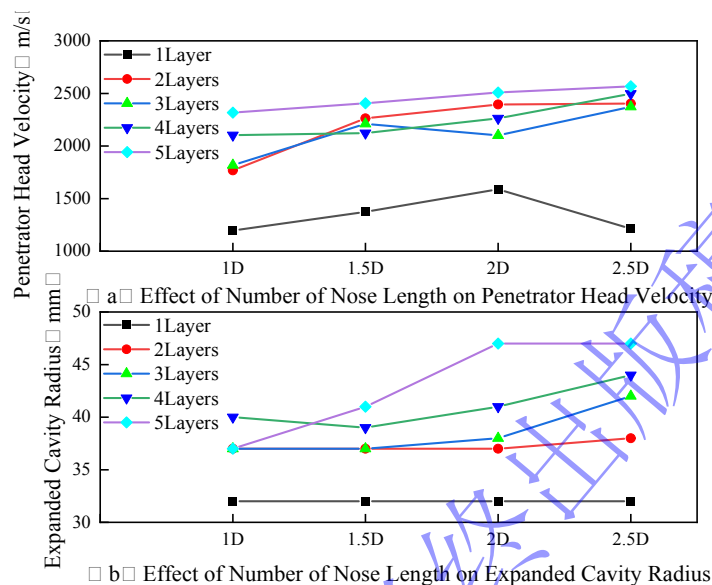


图 13 模拟头段总长度对聚能战斗部毁伤威力的影响

Fig 13 Effect of Total Nose Length on Lethality of Shaped Charge Warhead

从图 13 (b) 中可以看出，当模拟头段层数为 1 层时，此时扩孔半径最小为 32mm，且随模拟头段总长度  $L$  增加无任何增量。这是因为 10mm 厚的单层铝靶在药型罩未完全翻转阶段就与未成型的 EFP 侵彻体发生碰撞，严重干扰并限制了药型罩的压垮过程，导致最终形成的侵彻体形态不规则，有效扩孔能力被限制；当模拟头段层数为 2 层时，扩孔半径随模拟头段总长度的增大而增加，但增量较小。尽管更长的模拟头段总长度为 EFP 成型预留了更多空间，但 5mm 的单层靶板厚度仍较大，其对侵彻体的径向扩孔能力限制作用依然显著，导致扩孔能力提升有限；当模拟头段层数  $M=3$ 、 $M=4$  层时，扩孔半径随模拟头段总长度增加而逐渐增大。随着单层靶板厚度的进一步下降和成型时间的延长，铝靶板对侵彻体的开孔阻力明显降低，侵彻体成型更为充分，能量更聚集，径向扩孔能力持续增强，扩孔半径随之稳步增长；当模拟头段层数为 5 层时，扩孔能力达到最大值。此时单层靶板厚度最薄仅为 2mm，对侵彻体径向扩孔的阻力降至最低，同时充足的成型时间确保侵彻体充分拉伸，虽然过长的拉伸导致侵彻体断裂，但断裂主要发生在中后段，对头部的结构完整性影响较小，最终实现最大扩孔半径。更长的模拟头段总长度为 EFP 的成型提供了更充分的空间和时间，从而使侵彻体能够获得更高的动能。为实现最高的侵彻体头部速度，应优先采用多层薄靶即  $M \geq 2$  的结构设计，并为其匹配足够的模拟头段总长度  $L \geq 2.5D$ 。

#### 4 结 论

本文采用数值模拟的方法模拟分析了鱼雷制导头段结构对后效靶扩孔半径和侵彻体头部速度的影响，得到以下结论：

(1) 侵彻体头部速度和扩孔能力在  $1D \sim 2.5D$  的范围内，随模拟头段总长度增大而提高。当模拟头段为 5 层时，侵彻体头部速度与扩孔半径同时达到最大，分别为 2567.6m/s 和 47mm。

(2) 当模拟头段总长度为 2.5D，模拟头段层数由 2 增加至 5 层时，侵彻体头部速度和后效靶扩孔半径随模拟头段层数增加而增大，侵彻体头部速度和后效靶扩孔半径分别增加了约为 6.83% 和 23.68%。

(3)当模拟头段层数为4层、模拟头段总长度为1.5D时,可使EFP侵彻体保持较高头部速度的同时不发生颈缩断裂。

最新录用, 非最终出版稿

## 参考文献

- [1] 郭雁潮. 聚能装药对舰船典型靶板的毁伤特性研究[D]. 中北大学, 2020.  
GUO Y C. Research on The damage efficiency of shaped charge to warship typical target plates[D]. North Univesity of China, 2020.
- [2] 李昊. 爆破型鱼雷对潜艇毁伤效能评估[D]. 中北大学, 2022.  
LI H. Damage effectiveness evaluation of blasting torpedo on submarine[D]. North Univesity of China, 2022.
- [3] CHEN Z Q, WU H, CHENG Y H. Dynamic behaviors of concrete gravity dam against combined blast wave and bubble pulsation of underwater explosion[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 302: 117677.
- [4] 胡亮亮, 黄瑞源, 李世超, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1): 015102.  
HU L L, HUANG R Y, LI S C, et al. Shock wave simulation of underwater explosion[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(1): 015102.
- [5] 蔡泽喆, 朱小龙, 王鹤然, 等. 水下冲击波载荷作用下复合材料层合板的动态失效机理[J]. 火炸药学报, 2024, 47(08): 730-737.  
CAI ZZ, ZHU XL, WANG H R, et al. Dynamic Failure Mechanism of Composite Laminates under Underwater Shock Wave Load[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(8): 730-737.
- [6] CAMARGO D V F. Survey on Experimental and Numerical Approaches to Model Underwater Explosions[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(1): 15.
- [7] WU H, CHEN Z Q, CHENG Y H. Influence of explosion position on blast resistance of concrete gravity dam against underwater explosion blast wave and bubble pulsation[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 169: 109188.
- [8] 严侃. 典型水下航行器爆炸毁伤动力学特性研究[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(06): 1108-1116.  
YAN K. Dynamic characteristics of explosive damage to typical undersea vehicles[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2024, 32(6): 1108-1116.
- [9] YIN C, YU H, JIN Z, et al. Investigation of shock wave propagation and water cavitation in a water-filled double plate subjected to underwater blast[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 253: 108400.
- [10] 古滨, 李炳南, 姚熊亮, 等. 水下冲击波作用下双层壳结构响应特征研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 11-18.  
GUB, LIBN, YAOX L, et al. Research of Impact Response of Double Shell Based on Underwater Explosion Shock Wave[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(11): 11-18.
- [11] 李海龙. 聚能装药水下爆炸对结构多模式破坏与防护机理研究[D]. 大连理工大学, 2024.  
LI H L. Research on multi-models structural damage and protection mechanisms subjected to shaped charge associated with underwater explosion[D]. Dalian University of Technology, 2024.
- [12] 黄贤智, 陈艺, 王彬谕, 等. 水下爆破冲击波特性及其对水下墩柱作用的影响分析[J]. 西部交通科技, 2024, (12): 211-215.  
HUANG Z X, CHEN Y, WANG B Y, et al. Analysis of Underwater Blasting Shock Wave Characteristics and Their Effects on Underwater Piers[J]. *Western China Communication Science & Technology*, 2024, (12): 211-215.
- [13] 张晓伟, 张浩, 杨茂林, 等. 隔爆墙后爆炸冲击波绕射与超压分布规律[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(04): 372-379.  
ZHANG XW, ZHANG H, YANG M L, et al. Diffraction and Overpressure Distribution of Blast Wave Behind Explosion Isolation Wall[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(4): 372-379.
- [14] 张迪洲, 何镇宏, 何心怡, 等. 水下爆炸冲击波在圆柱壳结构表面绕射衰减分布[J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(03): 371-377.  
ZHANG D Z, HE Z H, HE X Y, et al. Diffraction Attenuation Distribution of Underwater Explosion Shock Waves on the Surface of a Cylindrical Structure[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2022, 30(3): 371-377.
- [15] 屈子悦. 水下爆炸作用下圆柱壳绕射特性及压力分布特征研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2019.  
QU Z Y. Study on diffraction characteristics and pressure distribution of cylindrical shell under underwater

- shock wave[D].Harbin Engineering University,2019.
- [16] 张之凡,李海龙,张桂勇,等.聚能装药水下爆炸冲击波和侵彻体载荷作用时序研究[J].爆炸与冲击,2023,43(10):3-14.  
ZHANG Z F,LI H L,ZHANG G Y, et al.Action time sequence of underwater explosion shock waves and shaped charge projectiles[J].Explosion And Shock Waves,2023,43(10):3-14.
- [17] 蒋文灿,程祥珍,梁斌,等.一种组合药型罩聚能装药战斗部对含水复合结构毁伤的数值模拟及试验研究[J].爆炸与冲击,2022,42(8): 083303.  
JIANG W C, CHENG X Z, LIANG B, et al. Numerical simulation and experimental study on the damage of water partitioned structure by a shaped charge warhead with a combined charge liner[J]. Explosion And Shock Waves, 2022, 42(8): 083303.
- [18] 潘乾坤,袁浩,任凯,等.不同组合式聚能战斗部对水下目标的毁伤研究[J].兵器装备工程学报,2024,45(05):173-179.  
PAN Q K, YUAN H, REN K, et al. Research on damage to underwater targets by different combined shaped charge warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(5): 173-179.
- [19] 王长利,周刚,马坤,等.典型含水复合结构在聚能装药水下爆炸作用下的毁伤[J].船舶力学,2018,22(08):1001-1010.  
WANG C L,ZHOU G,MA K, et al.Damage analysis of typical water partitioned structure under shaped charge underwater explosion[J].Journal of Ship Mechanics,2018,22(08):1001-1010.
- [20] 戴君全,叶本治,冯民贤,等.射弹在水介质中的运动规律的测试研究[J].测试技术学报,1995,(01):33-39.  
DAI J Q,YE B Z,FENG M X, et al. Study and tests on the movement of projectile in water medium[J].Journal of Test and Measurement Technology,1995,(01):33-39.
- [21] 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,(02):23-27.  
RONG L H,QIAN L X,TANG P, et al.Target damage study of shaped-charge warhead of antisubmarine torpedo[J].Journal of Ballistics,2001,(02):23-27.
- [22] 陈冬梅,陈智刚,侯秀成,等.三类聚能侵彻体鱼雷战斗部对目标毁伤数值模拟[J].弹箭与制导学报,2012,32(02):110-113.  
CHEN D M,CHEN Z G,HOU X C, et al. The simulation on target damage of three shaped-charge penetrators torpedo warheads[J].Journal of Projectiles,Rockets, Missiles and Guidance,2012,32(02):110-113.
- [23] 朱奇峰,黎勤,王团盟,等.鱼雷聚能战斗部侵彻含水复合装甲理论与试验[J].水下无人系统学报,2024,32(06):1100-1107.
- [24] ZHU Q F,LI Q,WANG T M, et al.Theories and experiments of torpedo shaped charge warhead penetration into water-partitioned armor[J].Journal of Unmanned Undersea Systems,2024,32(06):1100-1107.
- [25] 刘晓波.聚能射流载荷及气泡载荷联合作用下结构毁伤特性研究[D].哈尔滨工程大学,2022.  
LIU X B.Study on the damage performance of structure under the combined action of the shaped charge jet and the explosive bubble[D].Harbin Engineering University,2022.
- [26] ANSYS AUTODYN User Manual:Release 12.1[M]. ANSYS Inc,November 2009.
- [27] 黄洪.聚能装药水下爆炸对目标的毁伤特性研究[D].沈阳理工大学,2021.  
HUANG H.Damage characteristics of shaped charge underwater explosion to target[D].Shenyang Ligong University,2021.
- [28] 李翼祺,马素贞.爆炸力学[M].科学出版社,1992.  
LI Y Q,MA S Z.Explosion Mechanics[M]. Science Press,1992.
- [29] 付海清.前向空腔对装药水下爆炸威力的影响规律研究[D].沈阳理工大学,2022.  
FU H Q. Study on the Influence Law of Forward Cavity on the Underwater Explosive Power[D]. Shenyang Ligong University,2022.

## Effect of Torpedo Guidance Nose on Lethality of Shaped Charge Warhead

FENG Yuheng, LIANG Anqi, LIU Xingyu, YIN Jianping, YI Jianya, ZHANG Xuepeng  
(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** To investigate the influence of torpedo guidance nose configuration on the lethality of an underwater shaped charge warhead, a series of numerical simulations were performed using the AUTODYN finite element code. The damage performance of the shaped penetrator under different simulated nose structures was studied, analyzing the complete process including shock wave diffraction, behind-target load propagation, and target damage. The results indicate that both the penetrator head velocity and the behind-target hole diameter generally increase with the total length and number of layers of the simulated nose. Within a certain range, increasing the number of nose layers effectively optimizes the formation of the explosively formed projectile (EFP), thereby enhancing its penetration capability. Furthermore, there exists an optimal total nose length that maximizes the head velocity while preventing necking and fracture of the penetrator.

**Keywords:** shaped charge warhead; underwater shock wave; underwater explosion; explosively formed projectile; penetration; necking