

武器装备

# 药型罩参数对聚能射流水下运动的影响

欧靖<sup>a</sup>, 杨易钊<sup>a</sup>, 郁文杰<sup>a</sup>, 唐奎<sup>b</sup>

(南京理工大学 a. 钱学森学院 b. 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

**摘要:** **目的** 研究药型罩结构参数对所形成的聚能射流在水中运动的影响, 改进水中聚能射流的运动特性。**方法** 采用多物质单元 ALE 法就锥形罩射流对水介质的侵彻进行数值模拟, 分析锥形装药结构中药型罩锥角和厚度对所形成的聚能射流侵彻水时运动参数的影响。**结果** 锥形罩锥角大小及药型罩厚度对聚能射流在水中的形状、射流速度、加速度等有着明显的影响。侵彻体进入水中 10 cm 后, 药型罩的锥角从 30° 增加到 150° 的过程中, 剩余速度先增大、后减小, 在 90° 时达到最高。药型罩厚度为 1.5~4 mm 时, 剩余速度变化起伏小; 厚度为 4~6 mm 时, 剩余速度开始大幅下降。**结论** 当锥角为 90° 时, 罩厚为 4 mm 的药型罩所形成的射流在水中表现最好, 形成的射流侵彻深度最长, 侵彻水介质 10 cm 后的剩余速度最大, 存速能力最强。**关键词:** 聚能射流; 水介质; 药型罩; 运动特性; ALE 法; 侵彻体  
**中图分类号:** O358 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)02-0001-09  
**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.02.001

## Effects of Parameters of Charge Cover on Underwater Movement of Shaped Charge Jet

OU Jing<sup>a</sup>, YANG Yi-zhao<sup>a</sup>, YU Wen-jie<sup>a</sup>, TANG Kui<sup>b</sup>

(a. Qian Xuesen College, b. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of the structural parameters of the charge cover on the movement of shaped charge jet in water and improve the movement characteristics of shaped charge jet in water. Numerical simulation of water penetration by conical casing jet was carried out with the multi-material element ALE method, and the effects of cone angle and thickness on the movement parameters of shaped charge jet were analyzed. The results showed that the cone angle of conical cover and the thickness of charge cover had obvious effects on the shape, velocity and acceleration of shaped charge jet in water. The remaining velocity of the invading body after entering the water of 10 cm was analyzed, and it was found that in the process of increasing the cone angle of the charge cover from 30° to 150°, the remaining speed increased first and then decreased, and reached the fastest at 90°; when the thickness of the charge cover was between 1.5 mm and 4 mm, the remaining speed changed little, and when the thickness was between 4 mm and 6 mm, the remaining speed began to decrease significantly. According to

收稿日期: 2022-05-21; 修订日期: 2022-06-10

Received: 2022-05-21; Revised: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(12102202); 南京理工大学本科生科研训练“百千万”计划(202010288157Z)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12102202); Nanjing University of Science and Technology Undergraduate Research training Project Named “Bai Qian Wan” (202010288157Z)

作者简介: 欧靖(1999—), 男。

Biography: OU Jing (1999-), Male.

通讯作者: 唐奎(1990—), 男, 博士。

Corresponding author: TANG Kui (1990-), Male, Doctor.

引文格式: 欧靖, 杨易钊, 郁文杰, 等. 药型罩参数对聚能射流水下运动的影响[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 000-000.

OU Jing, YANG Yi-zhao, YU Wen-jie, et al. Effects of Parameters of Charge Cover on Underwater Movement of Shaped Charge Jet[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 000-000.

the results of the numerical simulation in this work, when the cone angle is  $90^\circ$ , the jet formed by the charge cover with a thickness of 4 mm performs better in the water, the jet formed has the longest penetration depth, and the remaining speed after invading the aqueous medium of 10 cm is the largest, and the storage capacity is the strongest.

**KEY WORDS:** shaped charge jet; water medium; charge cover; motion characteristic; ALE method; penetration

传统水中爆破性战斗部主要通过冲击波和气泡脉动对目标进行毁伤,其能量利用率低,毁伤效率低。聚能战斗部的优点是能量比较集中、装药利用率较高,故世界上的许多国家相继开展了在水中运用聚能战斗部的研究<sup>[1-10]</sup>。

在实验和数值模拟研究方面,国内许多学者进行了大量的研究工作,其中大多数的研究集中在爆炸成型弹丸<sup>[11-15]</sup>、普通射流<sup>[16-20]</sup>和杆式射流<sup>[21-25]</sup>等方面。曹兵<sup>[11]</sup>通过侵彻实验研究了 EFP 战斗部在空中和水中对靶板的破坏效果,发现水下战斗部在水中爆炸形成的 EFP 对水下目标靶的破坏威力更大。王长利等<sup>[12]</sup>发现,聚能装药在水下爆炸形成的聚能侵彻体在与水的作用过程中,会形成弹前激波,并且该激波会追赶爆炸冲击波,之后两者叠加,使得冲击波强度增强,从而解释了曹兵的研究。张向荣等<sup>[19]</sup>采用 Autodyn 软件对材料为钨铜合金的射流在空气和水中对钢板的侵彻深度进行了数值模拟,结果表明,无论是在空气中还是在水中侵彻,都存在一个最合适炸高。当炸高小于 4 倍的装药直径时,在水中的侵彻深度会大于在空气中的情形。可以看出,水介质在模型中起着增大炸高的作用,并且水介质也会在一定程度上侵蚀射流头部。张会锁等<sup>[20]</sup>考虑在相同装药条件下,采用 ANSYS 中集成的 LS-DYNA 模块,进行有限元数值模拟,在深度考虑并模拟了各种药型罩壁厚的工况下 3 种 127 型石油射孔弹的金属射流,通过软件进行数值仿真来模拟实际的形成过程,同时对模拟结果进行比较分析。结果表明,1.5 mm 壁厚的药型罩所产生的射流头部速度高,动能较大。李明星等<sup>[21]</sup>采用 Autodyn 软件研究了鱼雷在水下发生接触与非接触爆炸时对靶板穿孔孔径的影响,以及不同的聚能装药在考虑水下压力时的爆炸成形运动特性。结果表明,爆炸成形弹丸头部速度衰减最慢,杆式射流稍快,普通射流的速度衰减最快。王海福等<sup>[22]</sup>采用 Autodyn 软件通过数值模拟研究了聚能装药在水下的作用行为,初步明确了药型罩的半径曲率、中心、形状等平面数值对水下发射的聚能装药具有较大的影响作用。

针对药型罩参数对射流水中运动特性的影响,国内学者也进行了一些研究。周方毅等<sup>[26]</sup>针对圆锥-球缺组合药型罩的不同参数,采用正交试验设计的方法设计了 16 种战斗部结构在水中侵彻的模型。数值计算结果表明,圆锥-球缺组合药型罩的结构优化方向为,圆锥罩角度可选  $60^\circ$ ,圆锥罩壁厚在 0.2~0.5 cm

选取,球缺罩圆心角应大于  $150^\circ$ ,球缺罩的最佳壁厚为 0.8 cm。廖莎莎等<sup>[27]</sup>运用实验方法对比研究了 2 种不同金属材料药型罩形成的射流在水中的侵彻特性,结果表明,由钨铜合金药型罩形成的射流可以在水中保持较高的剩余速度。王海福等<sup>[22]</sup>通过研究药型罩形状对聚能装药水下作用行为,发现锥形装药结构所形成聚能射流在水中运动速度的衰减最快,偏心亚半球形装药结构所形成聚能射流在水中运动速度的衰减最慢。同时,他们针对偏心亚半球形铜罩的不同罩厚进行了数值模拟和实验验证,确定偏心亚半球形铜罩壁厚为 1.8 mm 时,侵彻体水下穿甲能力最优。

本文针对锥形装药结构所形成聚能射流在水中运动速度衰减过快的问题,采用多物质单元 ALE 法进行数值模拟,研究了锥形罩射流对水介质的侵彻,重点探讨锥形装药结构中药型罩锥角和厚度对所形成的聚能射流侵彻水时运动参数的影响。

## 1 数值模拟

### 1.1 模型设计

射流形成模型的数值模拟具体分为 4 个过程,分别为聚能装药发生爆轰、药型罩压垮、射流的初步形成和射流的拉伸。为了研究射流在水中的运动特性,设计了一种锥形聚能装药战斗部,结构如图 1 所示。该战斗部的主装药采用 TNT,装药高度为  $H$ ,装药直径为  $D$ ,药型罩的实验材料选择为紫铜,锥角为  $\alpha$ ,药型罩的厚度为  $h$ 。

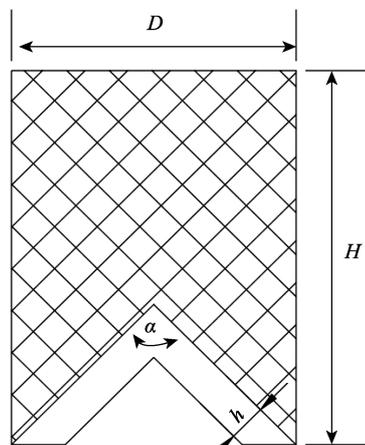


图 1 锥形聚能装药战斗部  
Fig.1 Conical shaped charge warhead

根据实际战斗部结构的对称性, 并结合实际, 考虑数值模拟计算所需的时间成本与长周期, 按照要求建立了 1/2 战斗部有限元模型, 由炸药、药型罩、空气、水、隔板 5 部分组成, 如图 2 所示。将 ALE 单元定义成流体, 它们之间的连接为流固耦合。计算中所有单元类型都是选用 8 节点实体单元 Solid164, 如图 3 所示。将聚能装药爆炸后模拟计算得到的射流用耦合的方式将压力和能量冲击到金属隔板上, 完成了对隔板的侵彻。击穿隔板后射流进入水中, 开始对水的侵彻。采用 Euler 网格对炸药、水、空气和药型罩进行建模, 采用 Lagrange 网格对隔板进行建模, 而单元使用多物质 ALE 算法。计算中, 模型的单位制为 g-cm- $\mu$ s, 网格边长为 1 mm, 并采用 0.1 mm 厚度实体网格。这种简化既可以充分利用多物质 ALE 算法, 又可以将模型尺寸大大减小。

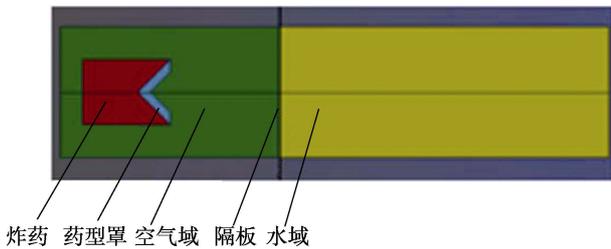


图 2 数值模拟模型  
Fig.2 Numerical simulation model

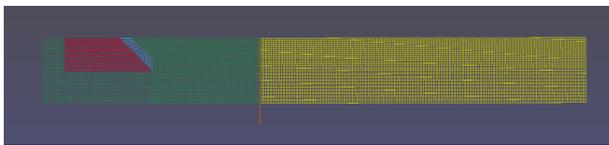


图 3 1/2 有限元模型网格划分  
Fig.3 Meshing of 1/2 finite element model

### 1.2 基于 ALE 网格的流固耦合算法

根据网格划分的不同, 仿真计算方程的计算方法大体上可以分为欧拉法和拉格朗日法。欧拉法的计算原理是, 在网格划分上使介质空间始终保持固定不动, 物体运动, 在欧拉网格空间中填满介质, 其被欧拉网格划分为诸多离散单元, 这种方法适合用来处理大畸变的问题, 常用于解决超高速撞击的问题。但是物质交界面必须要作专门的处理, 当出现较复杂的问题时, 计算网格的数目会大幅度提升, 花费较长的计算时间。拉格朗日算法的计算原理是, 在网格划分上使物体始终保持固定不动, 网格固定在物体内部, 随物体运动而运动, 且随物体的变形而变形。在一定程度上, 拉格朗日算法能更精确地追踪到研究物体的边界, 所需的计算网格数也较少。但是它存在一定的缺陷, 就是无法用于计算大畸变和大变形问题, 因为当网格发生大变形时, 计算不稳定, 可能会产生负体

积、负质量或者其他病态现象, 使计算无法继续进行。另一方面, 由于计算网格需固定在材料内, 计算网格随材料不同而畸变, 一旦畸变严重, 就必须重新对网格进行划分, 否则计算无法继续下去<sup>[1]</sup>。

文中使用 ANSYS 中集成的 LS-DYNA 模块中的 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 算法, ALE 法是同时包括拉格朗日法与欧拉法的一种算法。ALE 算法可以分为 3 步<sup>[13]</sup>: 第一步是显示 Lagrange 计算, 即只将压力梯度分布对速率和能量的影响作为参考指标, 取动量方程中前一时刻的压力数值, 此时式子是显式格式; 第二步是用隐式格式的方法来解开动量方程, 与此同时, 将第一步所求的速度分量作为接下来一个迭代算法的初始值; 第三步, 在前面方程的基础上重新划分网格, 并计算网格之间的运输量。基于 ALE 算法的网格结构, 在 LS-DYNA 模块中可以轻易地运行欧拉-拉格朗日耦合算法, 从而实现流固耦合计算。ALE 算法能够很好地解决涉及网格大变形、材料流动的问题。

### 1.3 材料模型和状态方程

1) 模型中药型罩材料选择紫铜, 材料模型选择 Steinberg 模型进行描述, 其运动的状态使用 Gruneisen 状态方程 (1) 进行近似模拟, 状态方程 (2) 为药型罩膨胀状态方程<sup>[28]</sup>。材料参数见表 1。

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

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (2)$$

式中:  $C$  为声速;  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  为  $D-\mu$  曲线斜率的系数;  $\gamma_0$  为 Gruneisen 系数;  $\alpha$  是对  $\gamma_0$  的一阶修正<sup>[28]</sup>。

表 1 紫铜材料参数  
Tab.1 Material parameters of red copper

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$G / \text{GPa}$	$\gamma_0$	$C / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
8.93	47.7	1.99	3.94	1.49	0.6	0

2) 炸药采用的是 TNT, 材料模型为 High\_ Explosive\_Burn, 状态方程为 JW1 状态方程<sup>[28]</sup>, 见式 (3)。材料以及式 (3) 中的输入参数见表 2。

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

3) 隔板材料选择 45 钢, 采用随动硬化模型进行描述, 材料参数见表 3<sup>[28]</sup>。

4) 靶板材料为水, 模型中水和空气均采用 MAT\_NULL 模型以及 \*EOS\_Gruneisen 状态方程, 材料参数见表 4<sup>[28]</sup>。

表2 TNT材料参数  
Tab.2 Material parameters of TNT

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	PCJ/GPa	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega_c$	$E_0/\text{GPa}$
1.63	6 930	27	371.3	3.74	4.150	0.90	0.30	4.29

表3 45钢材料参数  
Tab.3 Material parameters of 45 # steel

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$C^*$	$n$	$m$
7.83	496	434	0.014	0.26	1.03

## 2 不同锥角射流对水介质侵彻的仿真结果

### 2.1 仿真工况

隔板厚度为 0.5 mm, 药型罩厚度为 2 mm, 聚能战斗部的侵彻炸高保持在 50 mm。在确保整体装药直径 30 mm 和顶部装药高度 25 mm 不变的前提下, 通

过改变模型的药型罩锥角来建立不同的有限元模型。起爆点位于主装药顶部前后边界中心位置处, 取锥角为  $30^\circ\sim 150^\circ$ , 每隔  $30^\circ$  确定不同仿真研究方案, 对不同锥角方案进行数值模拟计算。

考虑到大型水面舰艇大部分采用多层的板架舷侧防护结构<sup>[29]</sup>, 防护结构一般有多道防雷隔舱, 隔舱可以是空舱或者液舱, 根据参考文献[30], 水舱的宽度一般为 10 cm, 因此本文针对聚能射流侵入水深 10 cm 的情况进行讨论。

### 2.2 仿真结果

不同锥角的药型罩形成聚能射流击穿隔板并侵入水深 10 cm 时的形态如图 4 所示。

表4 空气和水相关参数<sup>[23]</sup>  
Tab.4 Relevant parameters of air and water<sup>[23]</sup>

	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$G/\text{GPa}$	$\gamma_0$	$c/(\text{km}\cdot\text{s}^{-3})$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
水	0.998	-10	0.493 4	1 480	2.56	-1.986	0.226 8
空气	1.25	-1.0	0	3.44	0	0	0

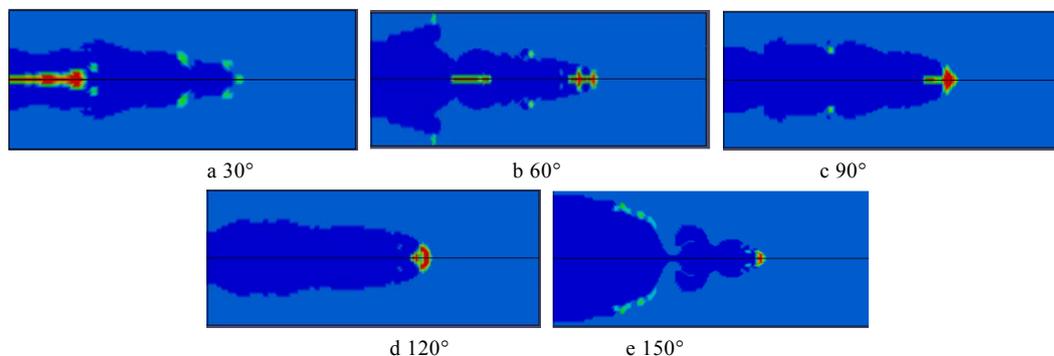


图4 不同锥角形成聚能射流侵入水深 10 cm 的形态  
Fig.4 Shape of jet formed by different cone angles after invading water depth of 10 cm

将仿真数据进行曲线拟合, 可以得出聚能侵彻体侵入水深 10 cm 所需的时间, 以及此时的剩余速度随锥角变化曲线, 如图 5 所示。

### 2.3 分析与讨论

从图 4 和图 5 可知, 由于小锥角的药型罩形成射流的杵体质量大, 射流质量小, 而射流头部速度高, 射流在击穿隔板并入水后, 头部与杵体分离, 头部质量较小, 射流形状分散, 受到水的阻力的影响较为明显, 入水后速度衰减很快, 存速能力较差。大锥角的药型罩在 TNT 炸药所产生的爆轰下也会产生射流和对应的杵体, 但由于杵体的质量小, 压合角比较大, 药型罩大部分会转换为头部, 形成直径

较大、速度相对较低的 EFP, 在击穿隔板并入水后, 整体质量集中, 因此其入水后速度衰减较慢, 受到水的阻力的影响较小。

从图 4 可以看出, 药型罩锥角过大时, 由于形成的 EFP 直径过大, 且速度低, 在入水前击穿隔板时, 能量消耗严重, 入水后侵彻体质量分散, 实际侵彻部分质量较小, 不利于后续水中侵彻运动。由图 5 可知, 随着锥角的增大, 聚能侵彻体侵入水深 10 cm 的剩余速度先增大、后减小。当锥角从  $30^\circ$  增加到  $90^\circ$  时, 剩余速度增加; 当锥角从  $90^\circ$  增加到  $150^\circ$  时, 剩余速度减小。

厚度为 2 mm、锥角为  $90^\circ$  的药型罩形成射流侵彻过程如图 6 所示。

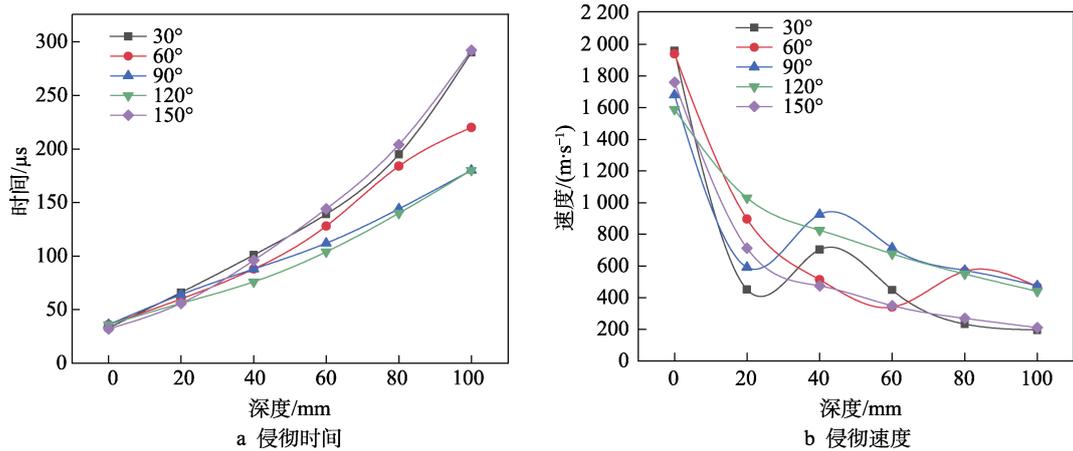


图 5 射流水中侵彻时间和侵彻速度随侵水深度的变化

Fig.5 Variation of penetration time (a) and penetration velocity (b) in jet water with the depth of penetration

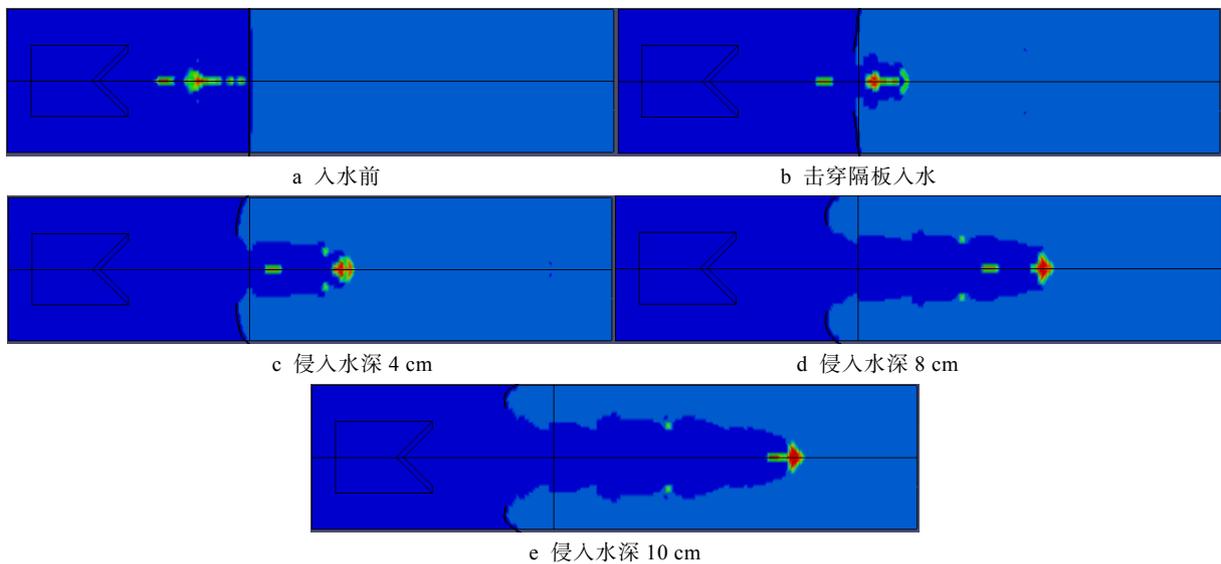


图 6 厚度为 2 mm、锥角为 90° 的药型罩形成射流的侵彻过程

Fig.6 Penetration process of the jet formed by the charge cover with a thickness of 2 mm and a cone angle of 90°: a) before entering the water; b) breaking through the partition and entering the water; c) intrusion depth 4 cm; d) intrusion depth 8 cm; e) intrusion depth 10 cm

由图 6 中射流的侵彻过程可以看出, 图 5a 中拐点的形成是由于射流进入水中, 头部和杵体分离, 头部分割水域形成了一个空腔, 杵体在空腔中运动阻力较小, 随后头部速度减弱, 杵体在后部推动射流前进, 使得头部速度加快, 产生了拐点。综合数值模拟的结果, 由图 4 和图 5 可以看出, 锥角为 90° 的聚能装药所形成的聚能射流在水中表现较好, 到达水深 10 cm 所需的时间较短, 且射流的剩余速度最大。

### 3 不同罩厚射流对水介质侵彻的仿真结果

#### 3.1 仿真工况

从第 2 节的仿真结果分析可知, 锥角为 90° 的聚

能装药所形成的射流在水中表现较好。因此, 保持药型罩的锥角为 90°, 隔板厚度为 0.5 mm, 顶部装药的高度保持 25 mm, 直径保持 30 mm, 起爆点仍位于主装药顶部前后边界中心位置处, 炸高保持在 50 mm, 只改变药型罩的厚度, 建立有限元模型。

#### 3.2 仿真结果

不同厚度的药型罩形成聚能射流击穿隔板并侵入水深 10cm 时的形态见图 7。

将仿真数据进行曲线拟合, 可以得出射流侵入水深 10 cm 所需的时间, 以及此时的剩余速度随厚度变化曲线, 如图 8 和图 9 所示。

将计算所得加速度数据进行曲线拟合, 可以得出射流侵入水深 10 cm 后, 加速度随厚度的变化曲线, 如图 10 所示。

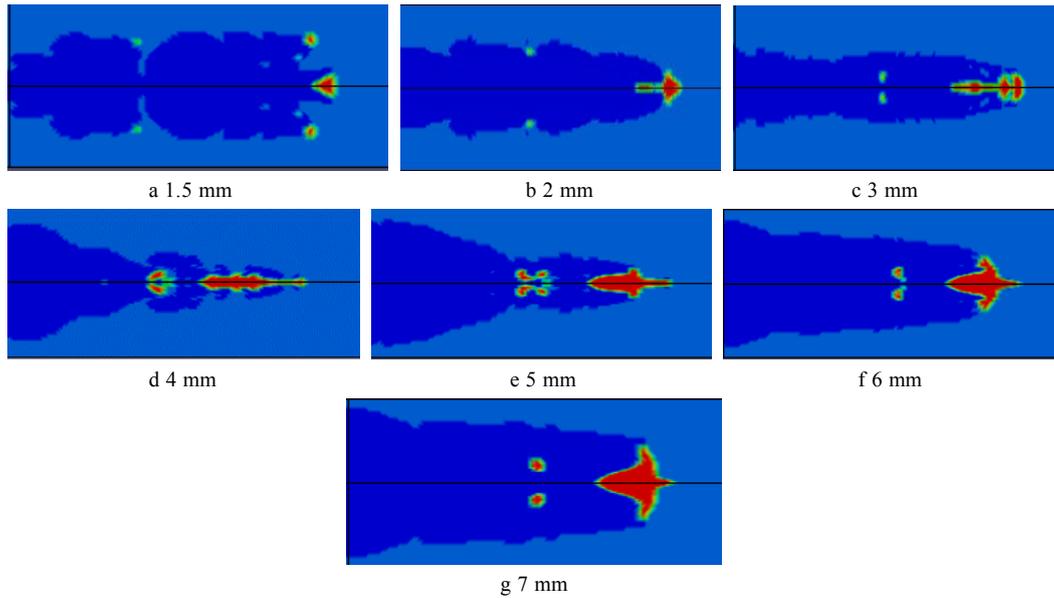


图 7 不同厚度形成聚能射流侵入水深 10 cm 的形态  
Fig.7 Shape of shaped charge jet formed by different thickness after intrusion depth of 10 cm

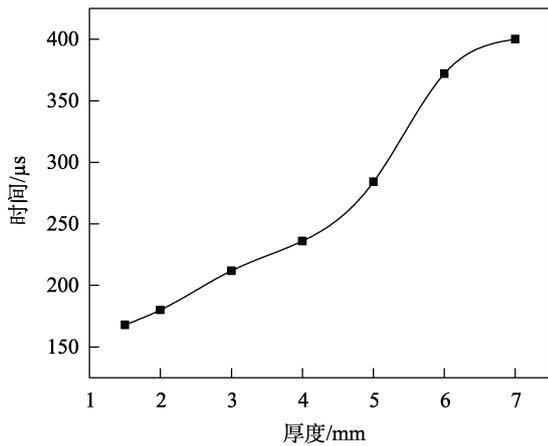


图 8 射流侵入水深 10 cm 所需的时间随罩厚的变化曲线  
Fig.8 Variation curve of time required for jet intrusion into water depth of 10cm with the cover thickness

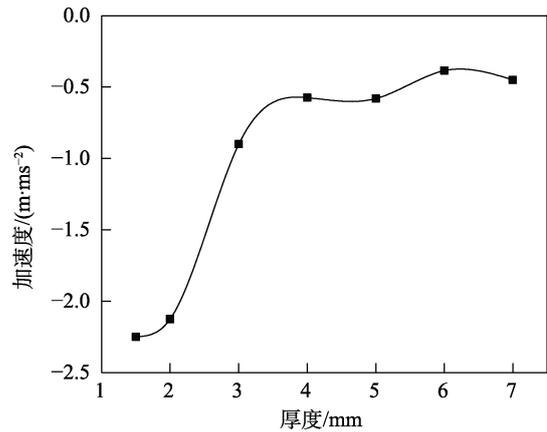


图 10 射流侵入水深 10 cm 后加速度随罩厚的变化曲线  
Fig.10 Variation curve of acceleration with cover thickness after jet intrusion into water depth of 10 cm

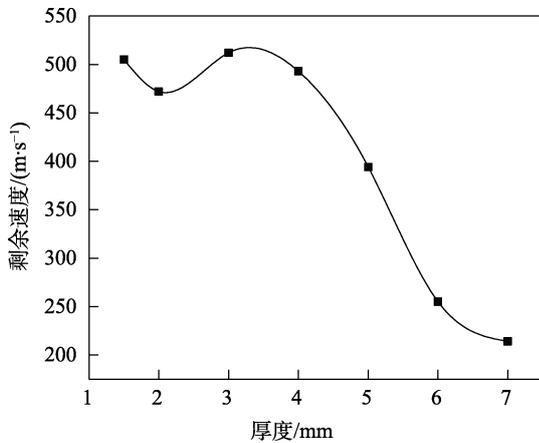


图 9 射流侵入水深 10 cm 后剩余速度随罩厚的变化曲线  
Fig.9 Variation curve of residual velocity with cover thickness after jet intrusion into water depth of 10 cm

### 3.3 分析与讨论

分析图 8—10 中的曲线可以得到如下结论：

1) 随着药型罩厚度的增大，射流侵入水深 10 cm 所需的时间是逐渐增大的。当药型罩厚度为 1.5~4 mm 时，所需时间平缓增加；当药型罩厚度为 4~7 mm 时，所需时间快速增加。

2) 随着药型罩厚度的增大，射流侵入水深 10 cm 后，剩余速度具有减小的趋势。当药型罩厚度为 1.5~4 mm 时，射流剩余速度变化起伏小；当药型罩厚度为 4~6 mm 时，射流剩余速度开始大幅下降；当药型罩厚度大于 6 mm 以后，射流剩余速度开始平缓减小。

3) 随着药型罩厚度的增大，射流侵入水深 10 cm 后，速度的衰减具有减小的趋势。

不同药型罩厚度条件下，射流在水中的速度衰减

程度不同: 药型罩厚度越小, 射流初始的动能越大, 射流质量小, 速度衰减越快; 药型罩厚度越大, 射流初始的动能越小, 射流质量较大, 速度衰减越缓慢。

这些现象是由于入水初速随罩厚增加而降低, 射流质量逐渐增大, 水中侵彻过程的速度衰减减缓。这说明罩厚增大是有利于射流水中侵彻能力的提高, 但如果罩厚过大, 会导致入水速度过低, 对后期侵彻效果不利。

分析图 7 中的射流形状可知, 厚度较小的药型罩形成的射流在侵入水深 10 cm 后形状分散, 实际侵彻体质量小; 厚度较大的药型罩形成的射流在侵入水深 10 cm 后, 整体质量较为集中, 有利于提高后期侵彻

效果。因此, 在保持装药结构不变的前提下, 适当增加药型罩的厚度, 可以有效地提高射流在水中的速度抗衰减能力。综合数值模拟的结果, 由图 8—10 可以看出, 当锥角为  $90^\circ$  时, 罩厚为 3~4 mm 的药型罩所形成的射流在水中表现较好, 侵入水深 10 cm 后, 剩余速度较大, 且速度衰减较慢, 具有较好的存速能力。

针对药型罩厚度 4 mm、锥角为  $90^\circ$  的较优方案, 得到射流水中运动的形貌。图 11 中展示了 0~800  $\mu\text{s}$  的时间段中, 每 200  $\mu\text{s}$  射流在水中的运动状态, 其中不同颜色表示不同的流体密度。可以看出, 此方案药型罩产生的射流呈现出梭子型, 水下受阻较小, 运动稳定且头部和杵体分离, 具有二次毁伤的效果。

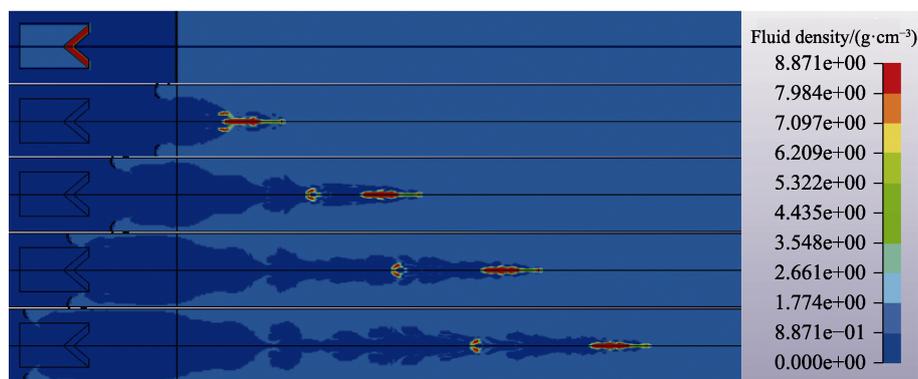


图 11 厚度为 4 mm、锥角为  $90^\circ$  形成射流的侵彻过程

Fig.11 The thickness is 4 mm and the cone angle is  $90^\circ$ , forming the jet penetration process

## 4 结论

基于 Ls-dyna 有限元软件, 对水下聚能侵彻体的聚能装药设计开展了优化, 重点针对药型罩结构进行了仿真研究, 分析了药型罩厚度和锥角对聚能射流侵彻体水下成形和运动的影响, 得到了聚能射流侵彻体成形及侵彻水介质的全部过程。模拟结果表明, 药型罩的厚度与锥角会明显影响其形成的聚能射流在水中的存速能力。

1) 增加药型罩的壁厚会增加射流侵彻体的质量, 从而提高其存速能力, 但是会降低射流的初始动能。适当增加药型罩的厚度能够提高射流在水中的速度抗衰减能力, 仿真结果表明, 药型罩厚度为 4 mm 时, 射流的剩余速度最大, 侵彻距离最深。

2) 增加药型罩锥角会使得形成的杵体质量较小, 转换为头部的药型罩更多, 形成直径较大、速度相对较低的 EFP, 但其受到水中阻力的影响较小。当药型罩锥角为  $90^\circ$  时, 形成的射流侵入水深 10 cm 后, 剩余速度最大。

3) 根据数值模拟的结果可以看出, 当锥角为  $90^\circ$  时, 罩厚为 3~4 mm 的药型罩所形成的射流在水中的运动速度最快, 表现较好, 侵入水深 10 cm 后, 剩余速度较大, 且速度衰减较慢, 具有较好的存速能力。

## 参考文献:

- [1] 李裕春, 杨万江, 沈蔚. 药型罩曲率半径对爆炸成型弹丸参数的影响[J]. 火工品, 2003(1): 45-48.  
LI Yu-chun, YANG Wan-jiang, SHEN Wei. Influence of Liner Curvature Radius on Parameters of Explosively Formed Penetrator (EFP)[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(1): 45-48.
- [2] RAWLING W. The Challenge of Modernization: The Royal Canadian Navy and Antisubmarine Weapons, 1944-1945[J]. The Journal of Military History, 1999, 63(2): 355.
- [3] HU F, WU H, FANG Q, et al. Impact Performance of Explosively Formed Projectile (EFP) into Concrete Targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 150-166.
- [4] LI R, LI W B, WANG X M, et al. Effects of Control Parameters of Three-Point Initiation on the Formation of an Explosively Formed Projectile with Fins[J]. Shock Waves, 2018, 28(2): 191-204.
- [5] CHAN S K. An Improvement in the Modified Finite Element Procedure for Underwater Shock Analysis[C]//Proceeding of 63nd Shock and Vibration Symposium. Las Cruces: The Shock and Vibration Exchange, 1992.
- [6] 张志春, 孙新利, 孟会林, 等. EFP 成型影响因素的数

- 值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(S1): 227-228.  
ZHANG Zhi-chun, SUN Xin-li, MENG Hui-lin, et al. Numerical Simulation for the Parameter Study of Explosively Formed Projectile[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(S1): 227-228.
- [7] 王海福, 江增荣, 俞为民, 等. 杆式射流装药水下作用行为研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(3): 189-192.  
WANG Hai-fu, JIANG Zeng-rong, YU Wei-min, et al. Behavior of Jetting Penetrator Charge Operating Underwater[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(3): 189-192.
- [8] 金键, 朱锡, 侯海量, 等. 水下爆炸载荷下舰船响应与毁伤研究综述[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(6): 396-409.  
JIN Jian, ZHU Xi, HOU Hai-liang, et al. Review of Dynamic Response and Damage Mechanism of Ship Structure Subjected to Underwater Explosion Load[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(6): 396-409.
- [9] 尹群, 陈永念, 胡海岩. 水下爆炸研究的现状和趋势[J]. 造船技术, 2003(6): 6-12.  
YIN Qun, CHEN Yong-nian, HU Hai-yan. Present Situation and Trend of Underwater Explosion Research[J]. Journal of Marine Technology, 2003(6): 6-12.
- [10] 宗智, 邹丽, 刘谋斌, 等. 模拟二维水下爆炸问题的光滑粒子(SPH)方法[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2007, 22(1): 61-67.  
ZONG Zhi, ZOU Li, LIU Mou-bin, et al. SPH Simulation of Two-Dimensional Underwater Explosion[J]. Journal of Hydrodynamics (SerA), 2007, 22(1): 61-67.
- [11] 曹兵. EFP 战斗部水下作用特性研究[J]. 火工品, 2007(3): 1-5.  
CAO Bing. Study on the Performance of EFP Warhead Operating Underwater[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007(3): 1-5.
- [12] 王长利, 周刚, 马坤, 等. 聚能装药水下爆炸冲击波载荷规律[J]. 高压物理学报, 2017, 31(4): 453-461.  
WANG Chang-li, ZHOU Gang, MA Kun, et al. Shock-wave Characteristics of Shaped Charge Exploded Underwater[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(4): 453-461.
- [13] 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.  
LING Rong-hui, QIAN Li-xin, TANG Ping, et al. Target Damage Study of shaped-Charge Warhead of Antisubmarine Torpedo[J]. Journal of Ballistics, 2001, 13(2): 23-27.
- [14] 胡功笠, 刘荣忠, 李斌, 等. 复合式鱼雷战斗部威力试验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2005, 29(1): 6-8.  
HU Gong-li, LIU Rong-zhong, LI Bin, et al. Power Experiments on Compound Torpedo Warhead Assembly[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2005, 29(1): 6-8.
- [15] 步相东, 王团盟. 鱼雷聚能战斗部自锻弹丸水中运动特性仿真研究[J]. 鱼雷技术, 2006, 14(3): 44-47.  
BU Xiang-dong, WANG Tuan-meng. Simulation Study on Kinematic Characteristic of Explosively Formed Projectile(EFP) in the Water for Torpedo Shaped Charge Warhead[J]. Torpedo Technology, 2006, 14(3): 44-47.
- [16] LEE M, LONGORIA R G, WILSON D E. Cavity Dynamics in High-Speed Water Entry[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 540-550.
- [17] 张世泽, 曹雄, 胡双启, 等. 锥形罩锥角对射流形成和侵彻影响的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2005, 26(6): 17-20.  
ZHANG Shi-ze, CAO Xiong, HU Shuang-qi, et al. Numerical Simulation of the Influence of Cone Angle of Conical Cover on Jet Formation and Penetration[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2005, 26(6): 17-20.
- [18] 侯秀成, 杨金龙, 陈智刚, 等. 罩顶药高影响药型罩的射流转化特性[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(2): 67-70.  
HOU Xiu-cheng, YANG Jin-long, CHEN Zhi-gang, et al. Study on Conversion Characteristics of Jet of Liner Influenced by Explosive Height above Liner[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(2): 67-70.
- [19] 张向荣, 黄风雷. 炸高对钨铜射流空气及水中侵彻的影响[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 262-264.  
ZHANG Xiang-rong, HUANG Feng-lei. Effects of Standoff on the Penetration of WCu-Pseudo-Alloy Shaped Charges in the Air and Water[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(3): 262-264.
- [20] 张会锁, 赵捍东, 王芳, 等. 药型罩壁厚对聚能射流影响的数值模拟[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 47-49.  
ZHANG Hui-suo, ZHAO Han-dong, WANG Fang, et al. Numerical Simulation of Effect of Shaped Charge Jet on the Different Wall Thicknesses of Liners[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(1): 47-49.
- [21] 李明星, 王志军, 伊建亚, 等. 不同聚能装药水下作用效果的对比分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(5): 95-99.  
LI Ming-xing, WANG Zhi-jun, YI Jian-ya, et al. Comparative Analysis of Underwater Effect for Different Shaped Charge[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(5): 95-99.
- [22] 王海福, 江增荣, 李向荣. 药型罩参数对聚能装药水下作用效应的影响[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 405-409.  
WANG Hai-fu, JIANG Zeng-rong, LI Xiang-rong. Influences of Liner Parameters on the Effects of Shaped Charge Operating Underwater[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(5): 405-409.
- [23] 何洋扬, 龙源, 张朋军, 等. 水介质中组合式战斗部成型技术研究[J]. 火工品, 2009(2): 52-56.  
HE Yang-yang, LONG Yuan, ZHANG Peng-jun, et al. Study on Combined Shaped Charge Warhead Shaping in the Water[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2009(2): 52-56.
- [24] 李惠明, 陈智刚, 赵东华, 等. 典型战斗部水下爆炸侵

- 彻仿真[J]. 工程爆破, 2016, 22(4): 39-42.
- LI Hui-ming, CHEN Zhi-gang, ZHAO Dong-hua, et al. Penetration Underwater Explosion by Typical Warhead Simulation[J]. Engineering Blasting, 2016, 22(4): 39-42.
- [25] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.
- WU Han-ling, DUAN Zhuo-ping, WANG Yong-qing. Simulation Investigation of Rod-Like Jets[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4): 328-332.
- [26] 周方毅, 詹发民, 吴晓鸿, 等. 圆锥-球缺药型罩聚能战斗部结构优化设计[J]. 爆破器材, 2014, 43(6): 43-47.
- ZHOU Fang-yi, ZHAN Fa-min, WU Xiao-hong, et al. Optimal Design of Structure for Tapered and Spherical Combined Liner Shaped Charge Warhead[J]. Explosive Materials, 2014, 43(6): 43-47.
- [27] 廖莎莎, 吴成, 毕世华. 钨铜合金药型罩水介质中侵彻规律的实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(2): 99-101.
- LIAO Sha-sha, WU Cheng, BI Shi-hua. A Penetrating Feature Investigation of Shaped Charge with Tungsten Copper Alloy Liner in Water[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(2): 99-101.
- [28] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keywords User's Manual[K]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [29] QIU Gang, HENKE S, GRABE J. Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(1): 30-39.
- [30] 朱锡, 张振华, 刘润泉, 等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 133-139.
- ZHU Xi, ZHANG Zhen-hua, LIU Run-quan, et al. Experimental Study on the Explosion Resistance of Cabin near Shipboard of Surface Warship Subjected to Underwater Contact Explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(2): 133-139.

责任编辑: 刘世忠