

## 杆式射流水中运动特性影响因素分析

陈兴<sup>1</sup>, 卢永刚<sup>1\*</sup>, 张存旺<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 重庆铁马工业集团有限公司, 重庆 400050)

**摘要:**为深入研究杆式射流在水中的运动特性,通过实验与数值模拟相结合的方法,系统探讨了药型罩壁厚、材料以及装药长径比对杆式射流水中运动特性的影响规律。研究发现,杆式射流入水后,其头部会发生微粗现象,并伴随质量侵蚀效应。射流的有效长度在运动过程中呈现先增长后下降的阶段性变化,而其平均速度则呈指数形式衰减。进一步分析表明,增大药型罩壁厚和装药长径比均能显著提升杆式射流的抗侵蚀能力和存速能力。药型罩壁厚的最佳取值范围为 $0.036D_k \sim 0.055D_k$ ,而当装药长径比超过1.25时,装药结构对杆式射流水中运动特性的影响逐渐减弱。此外,材料密度对杆式射流在水中侵彻过程中的速度衰减规律具有重要影响:密度越高,射流的存速能力越强;若材料密度相近,则射流速度衰减规律趋于一致。通过对紫铜、钽和钨三种不同材质药型罩的研究表明这三种材料均适合应用于水下聚能战斗部。本研究为优化水下聚能战斗部的设计提供了理论依据和参考价值。

**关键词:**杆式射流;运动特性;水下侵彻;数值模拟

中图分类号:TJ412.2 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)03-213-09



论  
文  
拓  
展

## Research on the influences of motion characteristics of rod jet under water

CHEN Xing<sup>1</sup>, LU Yonggang<sup>1\*</sup>, ZHANG Cunwang<sup>2</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Chongqing Tiema Industries Group Co., Ltd, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** To thoroughly investigate the underwater motion characteristics of rod jets, the effects of liner thickness, material, and charge length-to-diameter ratio on the underwater motion characteristics of rod jets were systematically explored by combining experimental methods with numerical simulations. The results show that after entering the water, the rod jet undergoes head upsetting and experiences mass erosion effects. The effective length of the jet initially increases and then decreases during its motion, while its average velocity decays exponentially. Further analysis indicates that increasing the liner thickness and charge length-to-diameter ratio can significantly enhance the jet's resistance to erosion and its ability to maintain velocity. The optimal range for liner thickness is  $0.036D_k \sim 0.055D_k$ . When the charge length-to-diameter ratio exceeds 1.25, the influence of charge structure on the underwater motion characteristics of the rod-shaped jet gradually diminishes. Additionally, material density has a significant impact on the velocity decay law of the rod jets during underwater penetration; the higher the density, the stronger the jet's ability to maintain velocity; when material densities are similar, the velocity decay laws of the jets tend to be consistent. The study also demonstrates that liners made of copper, tantalum, and tungsten are all suitable for underwater shaped-charge warheads. This research provides important theoretical support and reference for the design optimization of underwater shaped-charge warheads.

**Keywords:** rod jet; movement characteristics; underwater penetration; numerical simulation

现代军舰侧舷采用“空舱-液舱-空舱”的多层板架防护结构,能够将爆破型战斗部产生的毁伤程度控制在允许的范围内,舰船防护性能的提升让传统爆破型战斗部面临巨大挑战。而聚能

战斗部产生的高速金属射流与冲击波相比具有更高的能量密度,金属射流穿透壳体结构后的剩余射流依旧可以破坏舰船内部的设备和结构。因此,聚能装药为水中兵器实现高效毁伤提供了一

收稿日期:2023-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11672278)

第一作者:陈兴(1993—),男,重庆潼南人,博士研究生,E-mail:chenxing21@gscaep.ac.cn

\*通信作者:卢永刚(1973—),男,四川遂宁人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:lygcaep@263.net

引用格式:陈兴,卢永刚,张存旺. 杆式射流水中运动特性影响因素分析[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(3): 213-221.

Citation: CHEN X, LU Y G, ZHANG C W. Research on the influences of motion characteristics of rod jet under water[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(3): 213-221.

种新思路。学者已经对聚能射流、爆炸成型弹丸 (explosively formed projectile, EFP) 和杆式射流三种聚能侵彻体在水中的侵彻性能进行了对比研究, 结果表明杆式射流水中侵彻产生的空腔随进效应能为后续侵彻体提供无损通道, 适合对多层含水结构进行侵彻<sup>[1-3]</sup>。

关于匀速弹体 (球形弹和杆式弹) 对充液结构的侵彻效应的研究成果较为丰富, 主要集中在侵彻产生的液压水锤效应、弹体速度衰减、空腔膨胀与收缩、结构壁面损伤等问题<sup>[4-7]</sup>。而杆式射流具有速度梯度, 水中侵彻效应与匀速弹体不同, 目前研究主要集中于杆式射流毁伤能力及其影响因素两方面。

对于杆式射流毁伤能力研究, 王长利等<sup>[8]</sup>开展水下静爆试验研究了相同爆炸当量条件下爆破型装药和聚能型装药的毁伤差异, 研究表明爆破型装药仅对空舱结构造成破孔, 而聚能型装药形成的杆式射流可对液舱前、后板造成直径在  $(1/3)D_k \sim (1/2)D_k$  ( $D_k$  为装药直径) 范围内的穿孔; 李兵等<sup>[9]</sup>基于光滑粒子流体动力学 - 有限元方法 (SPH - FEM) 耦合算法, 模拟了聚能战斗部对双层圆柱壳结构的毁伤过程, 研究表明金属射流穿透力强, 能造成结构的局部小尺寸破口, 在冲击波载荷及气泡载荷的联合作用下, 引起结构的大面积破口及塑性凹陷。

战斗部结构参数对于射流成型及毁伤能力具有直接影响<sup>[10-12]</sup>。陈兴等<sup>[13-14]</sup>分析了药型罩结构参数对杆式射流成型效果及水下毁伤能力的影响, 获得了最佳的药型罩结构参数取值范围, 并且研究发现高密度的钨和钽药型罩在水下聚能战斗部中具有广阔的运用前景。王雅君等<sup>[15]</sup>的研究也证明材料密度对侵彻体在水中的存速能力具有很强的影响, 材料密度越高, 侵彻体存速能力越强, 密度相近则速度衰减规律相近。杨珊等<sup>[16]</sup>在水下大炸高条件下研究了典型成型装药结构对多层间隔靶的侵彻威力, 结果表明采用顶厚边薄的渐变壁厚半球罩比等壁厚半球罩形成的杆式射流侵彻能力更强, 剩余侵彻能力提高了 25%。张春辉等<sup>[17]</sup>和蒋文灿等<sup>[18]</sup>在球缺罩的顶部增加副药型罩, 用以形成前级杆式射流, 研究表明后级射流在前级射流形成的空腔中运动, 能够降低动能损耗, 提高毁伤效果; 另外, 副药型罩采用低密度材料能够形成前、后级分离的杆式射流, 其毁伤能力显著优于传统的单一药型罩和单一材质组合式药型罩形成的杆式射流。

综合分析可知, 目前对杆式射流水中侵彻能

力及其影响因素的研究主要关注于对目标的毁伤效果, 缺乏对杆式射流水中成型效果、弹体形态变化和速度衰减规律的研究。因此, 本文采用 LS-DYNA 有限元分析软件, 结合杆式射流水中侵彻试验, 研究药型罩壁厚、材料、装药长径比对杆式射流水中运动特性的影响规律, 研究成果为水下聚能战斗部设计提供参考依据。

## 1 杆式射流水下侵彻试验与数值模拟

### 1.1 战斗部结构

本文中设计的杆式射流聚能战斗部结构如图 1 所示。战斗部由药型罩、主装药和壳体三部分组成, 其中主装药为 GO-2 塑性黏结炸药, 装药直径  $D_k = 11$  cm, 装药高度  $H = 9$  cm; 壳体为 2A12 铝合金, 厚度为 0.5 cm; 药型罩为等壁厚的弧锥组合罩, 如图 2 所示, 材质为紫铜, 厚度  $T = 0.44$  cm, 圆弧半径  $R = 4.4$  cm, 锥角  $\alpha = 130^\circ$ 。起爆点位于主装药尾部中心。

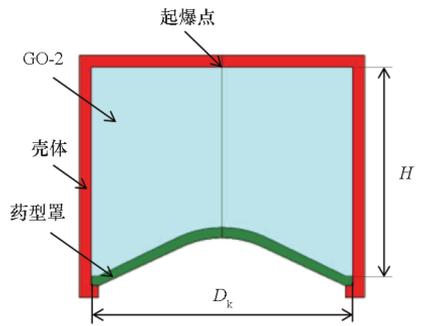


图 1 杆式射流聚能战斗部结构示意图  
Fig. 1 Structural diagram of rod jet shaped charge warhead

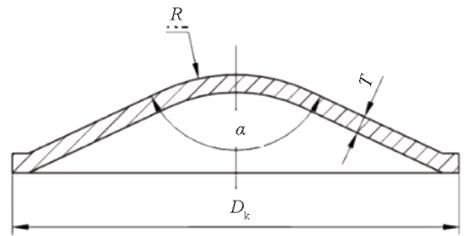


图 2 弧锥结合罩结构  
Fig. 2 Structure of ace-cone liner

### 1.2 数值计算模型

采用 LS-DYNA 有限元分析软件建立二维轴对称数值计算模型, 如图 3 所示, 模型中包含了壳体、炸药、药型罩、空气和水。其中, 战斗部壳体采用 Lagrange 网格, 炸药、药型罩、空气和水采用 Euler 网格, Lagrange 网格和 Euler 网格采用流固耦合算法进行耦合。在空气和水域边界添加非反

射边界,防止冲击波的反射。模型采用 g-cm- $\mu$ s 单位制建立,整个 Euler 域尺寸为 60 cm  $\times$  200 cm,网格尺寸为 0.1 cm  $\times$  0.1 cm<sup>[13]</sup>。

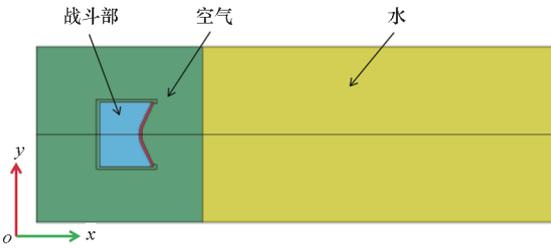


图3 数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model

### 1.3 材料模型与参数

本文主装药为 GO-2 高能炸药,数值计算采用 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型和 \* EOS\_JWL 状态方程描述<sup>[15]</sup>;采用 \* MAT\_NULL 空白材料模型及 \* EOS\_GRUNEISEN 状态方程描述空气和水<sup>[15]</sup>;采用 \* MAT\_JOHNSON-COOK 模型和 \* EOS\_GRUNEISEN 状态方程描述金属材料<sup>[16]</sup>。

### 1.4 杆式射流水下侵彻试验

#### 1.4.1 试验布置

试验现场布置如图 4 所示。战斗部结构如图 1 所示,试验时将其置于“V”形木质支撑架上,战斗部轴线与水箱的中心线重合,水箱前面板为 0.3 cm 厚的 2A12 铝合金靶板,距战斗部端面为 8 cm。战斗部头部端面平行正对水箱前板,保证射流垂直侵彻水箱。靶标为三层间隔靶,靶板尺寸为 40 cm  $\times$  40 cm  $\times$  1 cm,材质为 45#钢,每层靶板间隔 5 cm。共进行了两发试验,水层的厚度  $L_w$  分别为 60 cm 和 100 cm,靶板四周固定于三角支架上。

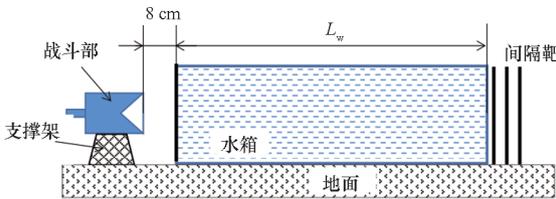


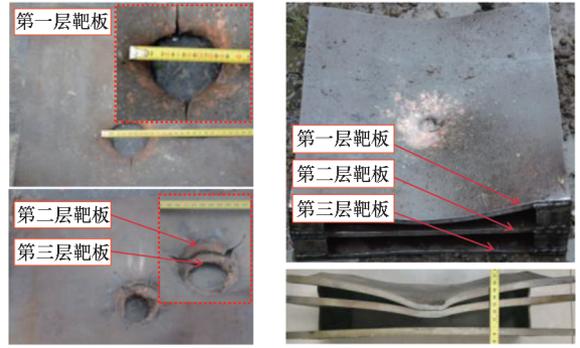
图4 试验布置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the experiment

#### 1.4.2 试验结果与分析

靶板毁伤结果如图 5 所示。水层厚度为 60 cm 时,杆式射流穿透了三层靶板,穿孔直径分别为 6.5 cm、6.2 cm、4.96 cm,平均穿孔直径为 0.54 $D_k$ ,穿孔背面表现出明显的翻转扩孔特性;水层厚度为 100 cm 时,杆式射流穿透水层后仅对

第一层靶板造成了一个直径约为 4.5 cm 的侵彻凹坑,测量得到前两层靶板的最大变形量分别为 7.5 cm、2 cm。



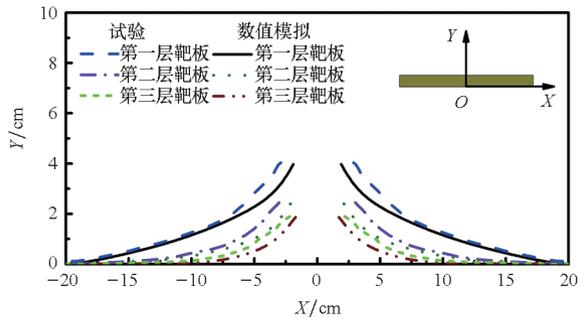
(a)  $L_w = 60$  cm

(b)  $L_w = 100$  cm

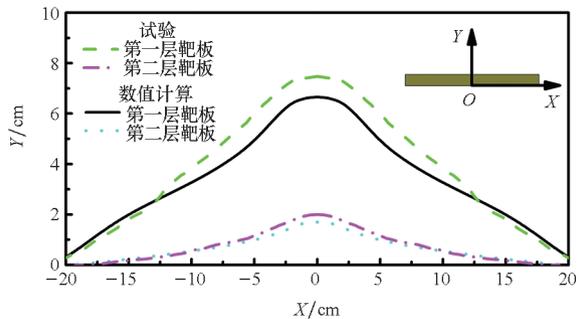
图5 间隔靶的毁伤结果

Fig.5 Damage results of spaced targets

采用前文所述数值模拟方法对试验进行数值计算。图 6 为靶板轮廓变形量对比结果,可知间隔靶毁伤模式与试验结果相符,并且靶板中心区域变形量的试验值高于数值计算值。对靶板穿孔直径和最大变形量进行比较,如表 1~2 所示,数值计算与试验的偏差在 16.1% 以内。另外,计算结果均为负偏差,这主要是由约束方式造成的。试验中靶板边界处的约束力不足,导致靶板边界发生移动,而数值模拟中靶板边界是完全约束,因此靶板变形量和孔径的试验值高于数值计算值。



(a)  $L_w = 60$  cm



(b)  $L_w = 100$  cm

图6 靶板轮廓变形对比

Fig.6 Comparison of the deformation of target

表 1 靶板穿孔结果对比

Tab.1 Comparison of the perforation results on target

| 间隔靶<br>靶板 | 穿孔直径/cm |      | 偏差/%  |
|-----------|---------|------|-------|
|           | 试验      | 数值仿真 |       |
| 第一层       | 6.5     | 5.8  | -10.8 |
| 第二层       | 6.2     | 5.2  | -16.1 |
| 第三层       | 4.96    | 4.44 | -10.5 |

表 2 靶板变形结果对比

Tab.2 Comparison of the deformation results on target

| 间隔靶<br>靶板 | 变形/cm |      | 偏差 / % |
|-----------|-------|------|--------|
|           | 试验    | 数值仿真 |        |
| 第一层       | 7.5   | 7.1  | -5.3   |
| 第二层       | 2     | 1.75 | -12.5  |
| 第三层       | 0     | 0    | 0      |

### 1.5 杆式射流水下运动特性分析

#### 1.5.1 有效长度变化规律

高速弹体在水中侵彻会形成一个锥形的空腔，使得只有弹体头部与水接触。杆式射流水中侵彻过程头部压力云图如图 7 所示，在水中侵彻期间，射流头部始终存在一个局部高压区，其峰值压力达到了 GPa 级，远高于射流材质的强度 (MPa 级)。因此，杆式射流头部变形的同时也伴随着质量侵蚀。



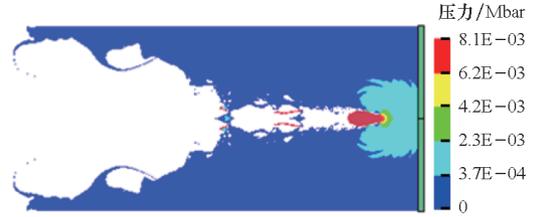
(a)  $t = 60 \mu s$



(b)  $t = 110 \mu s$



(c)  $t = 220 \mu s$



(d)  $t = 400 \mu s$

图 7 杆式射流水中行进过程

Fig.7 Process of rod jet penetration into water

定义射流头部至尾部的垂直距离为有效长度，用符号  $L_x$  表示， $L_x$  随距离的变化规律如图 8 所示。图中同时给出了杆式射流在空气中有效长度随距离的变化规律，可知杆式射流在空气中有效长度近似线性增加，在水中有效长度先增加后降低。在增长阶段，在速度梯度的作用下杆式射流处于拉伸状态，同时长度增加的速率大于射流头部的侵蚀速率，因此在增长阶段杆式射流的有效长度随距离近似线性增加；当杆式射流长度增加速率小于侵蚀速率时，杆式射流的有效长度逐渐降低。

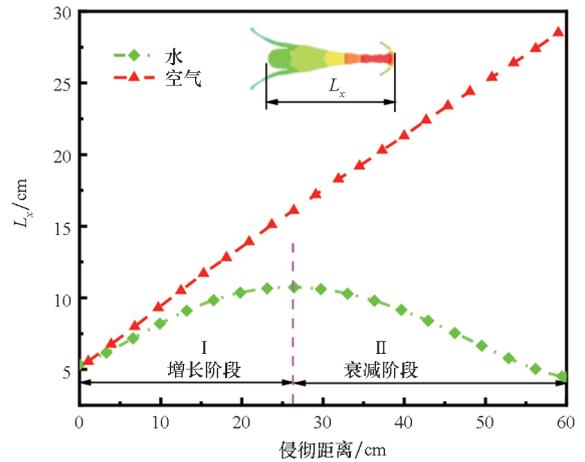


图 8 杆式射流有效长度变化

Fig.8 Variation of the effective length of rod jet

#### 1.5.2 速度衰减规律

由于水的阻力作用，杆式射流在水中行进过程中速度会逐渐降低。由于射流存在着速度梯度，弹体各部分速度并不相同，因此文中所研究的速度均为射流平均速度，通过数值计算得到。文献[15]中根据牛顿第二定律和动量方程给出了速度衰减公式，具体形式如下：

$$V_x = V_0 \times \exp[-A(x + Bx^2 + Cx^3)] \quad (1)$$

式中， $V_0$  为侵彻体的初始速度， $x$  为移动距离， $A$ 、 $B$ 、 $C$  为拟合系数。根据文献中的拟合结果可知， $x^2$  和  $x^3$  项系数的量级分别为  $10^{-5}$  和  $10^{-8}$ ，可见  $x^2$  和  $x^3$  项的影响较小。因此，将表达式(1)只保

留  $x$  的一次项,在保证简便性的同时也能保证拟合精度,表达式简化如下:

$$V_x = V_0 \times \exp(-Kx) \quad (2)$$

式中,  $K$  为速度衰减系数。

采用式(2)进行数据拟合,如图9所示,得到杆式射流在水中的平均速度衰减系数  $K$  为 1.057 3。

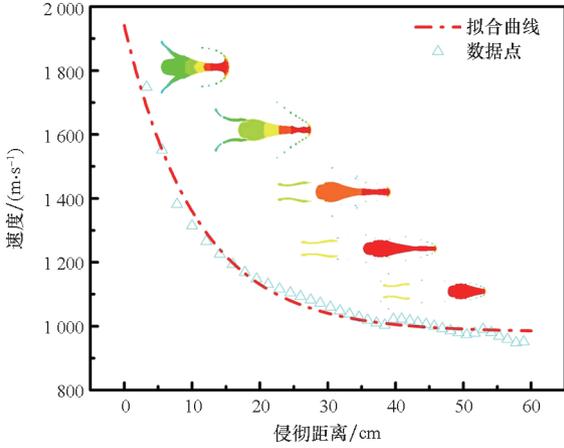


图9 杆式射流速度拟合

Fig.9 Velocity fitting of rod jet

## 2 水中运动特性影响因素分析

药型罩结构和装药参数直接影响杆式射流的成型效果,进而影响其水中运动特性。因此本文研究药型罩壁厚(2~6 mm)、材料(铝、纯铁、10#钢、20#钢、紫铜、钽、钨)、装药长径比(0.5~1.5)三种因素对杆式射流水中运动特性的影响,分析射流在水中的形态和速度衰减的变化规律。

### 2.1 药型罩壁厚的影响

在不改变装药结构的前提下,药型罩壁厚  $T$  由 2 mm 增加至 6 mm,增量为 1 mm。表3为不同药型罩壁厚下杆式射流成型效果。当  $T$  为 2 mm 和 3 mm 时,杆式射流的杆体直径较小,另外  $T=2$  mm 时,杆式射流没有明显的杆体结构,结构多处产生“颈缩”,并最终断裂成多段侵彻体;当  $T$  为 4 mm、5 mm、6 mm 时,杆式射流结构较为粗壮,射流速度梯度较小,因此只在杆体和杆体连接处产生“颈缩”,并且杆体呈密实球形结构,能够保证杆体被完全侵蚀后,剩余的侵彻体依旧具有较大的毁伤能力。有效长度变化规律如图10所示,在增长阶段,有效长度随着壁厚的增加而增加,但是当壁厚大于 4 mm 后,增加的趋势逐渐趋于稳定;在衰减阶段,壁厚由 2 mm 增加到 4 mm 时,有效长度逐渐增加,当壁

厚继续增加时,有效长度的值逐渐降低。

表3 杆式射流成型效果(不同药型罩壁厚)  
Tab.3 Formation effect of rod jet  
(different liner wall thicknesses)

| $T/$<br>mm | 侵彻距离  |       |       |
|------------|-------|-------|-------|
|            | 15 cm | 30 cm | 45 cm |
| 2          |       |       |       |
| 3          |       |       |       |
| 4          |       |       |       |
| 5          |       |       |       |
| 6          |       |       |       |

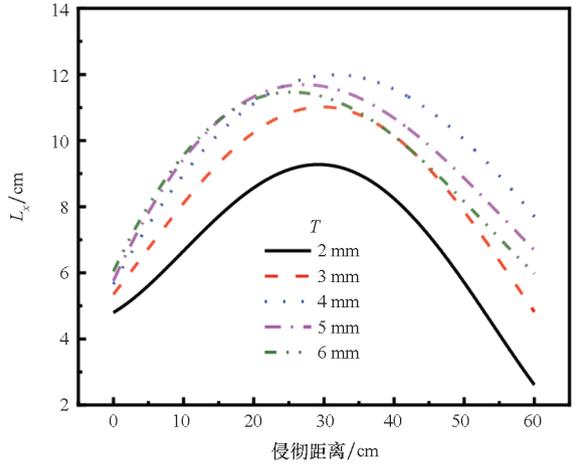
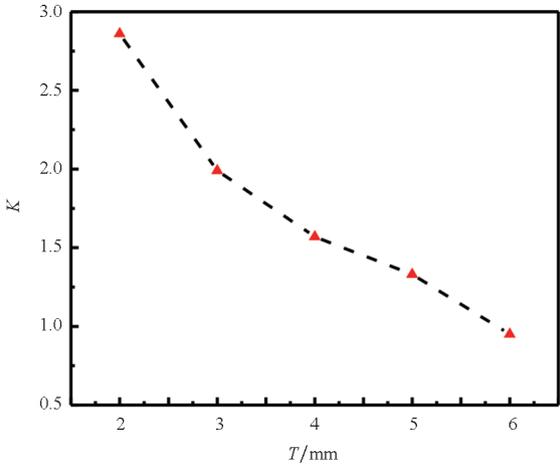


图10 杆式射流有效长度(不同药型罩壁厚)

Fig.10 Effective length of rod jet  
(different liner wall thicknesses)

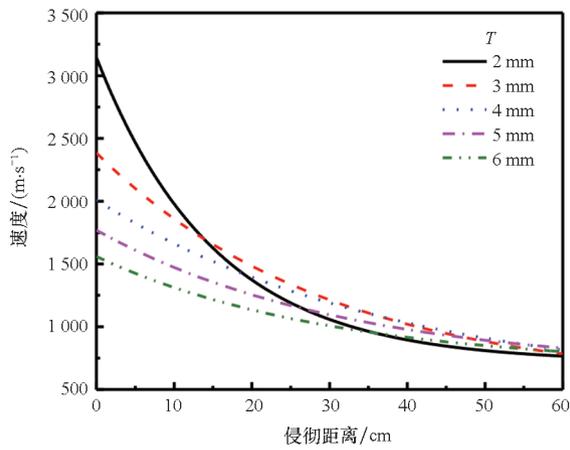
随着药型罩的壁厚由 2 mm 增加到 6 mm,药型罩的质量逐渐增加,药型罩单位质量上所获得的爆轰能量逐渐降低,导致杆式射流初始入水平均速度由 3.2 km/s 降低 1.6 km/s,速度衰减系数由 2.86 降低到 0.95,下降程度达到了 66.8%,如图11(a)所示。尽管增加药型罩壁厚会影响杆式射流的初始入水速度和速度衰减系数,但是当杆式射流在水中的行进距离达到 60 cm 时,剩余侵彻体的速度逐渐趋于一致,稳定在 750 m/s 至 850 m/s 之间,如图11(b)所示。

研究表明,增加药型罩壁厚能够提高杆式射流的抗侵蚀能力和存速性能;综合考虑药型罩壁



(a) 速度衰减系数

(a) Velocity decay coefficient



(b) 速度

(b) Velocity

图 11 速度衰减规律(不同药型罩壁厚)

Fig.11 Velocity decay law (different liner wall thicknesses)

厚在 4 ~ 6 mm ( $0.036D_k \sim 0.055D_k$ ) 范围内取值杆式射流具有较好的水下运动特性。

### 2.2 药型罩材料的影响

为了形成侵彻性能较好的毁伤元,要求药型罩材料具备良好的塑性、高密度、高熔点和适当的强度等性能。因此本文选择铝、纯铁、10#钢、20#钢、紫铜、钽和钨共 7 种材质的药型罩,研究不同密度和同密度的材料对杆式射流水中运动特性的影响。表 4 为杆式射流在水中行进过程中的形态变化。可以发现,铝杆式射流形态最差,尾部呈空心结构,铝材质的杆式射流在行进过程中很容易产生质量侵蚀,最终在水中飞行 25 cm 后被完全侵蚀,失去毁伤能力;钨药型罩形成了长径比较小且带有大直径尾裙结构的 EFP;其余材质的药型罩均能形成细长型的杆式射流结构。另外,铁、10#钢和 20#钢三种

材质的密度相同,而材料的强度逐渐增加,对比杆式射流的成型效果可知,杆式射流的拉伸程度随着强度的增加而降低。

表 4 杆式射流成型效果(不同药型罩材料)

Tab.4 Formation effect of rod jet (different liner materials)

| 材料   | 侵彻距离  |       |       |
|------|-------|-------|-------|
|      | 15 cm | 30 cm | 45 cm |
| 铝    |       |       |       |
| 铁    |       |       |       |
| 10#钢 |       |       |       |
| 20#钢 |       |       |       |
| 紫铜   |       |       |       |
| 钽    |       |       |       |
| 钨    |       |       |       |

图 12 为不同材质侵彻体的有效长度随距离的变化规律。可以发现,钽杆式射流的有效长度在整个水中侵彻过程最大,其次是铁和紫铜,其余材质的侵彻体抗侵蚀的能力较差。考虑到材料的性能不同,文中基于材质的密度对侵彻体的速度衰减规律进行分析,结果如图 13 所示。总体而言,速度衰减系数随着材料密度的增加而降低(图 13(a))。铝的密度较低,在相同爆炸能量下能获得最大的入水初始速度(图 13(b)),因此铝质侵彻体的速度衰减系数最大,为 4.81;铁、10#钢和 20#钢这三种材料的密度相同,杆式射流的入水速度在 2.1 ~ 2.3 km/s 之间,速度衰减系数在 1.71 ~ 1.91 范围内轻微变化;紫铜杆式射流的速度衰减系数为 1.57,略低于钢质杆式射流;钽和钨属于高密度材料,入水速度和速度衰减系数均较低。另外,钨射流的速度衰减系数相比于钽射流略微增加,这主要是由于钨药型罩形成了 EFP 结构,因此水中的行进阻力较大,增加了速度衰减系数。

研究表明在药型罩构型相同时,药型罩密度是影响杆式射流水中运动特性的关键因素,密度较高的杆式射流具有更好的存速能力;紫铜和钽药型罩能形成杆式射流,适合对多层防护结构进行侵彻;钨药型罩虽然形成了直径较大的 EFP,但

是水中存速能力强,适合对单层防护结构进行侵略,可造成大直径穿孔破坏。

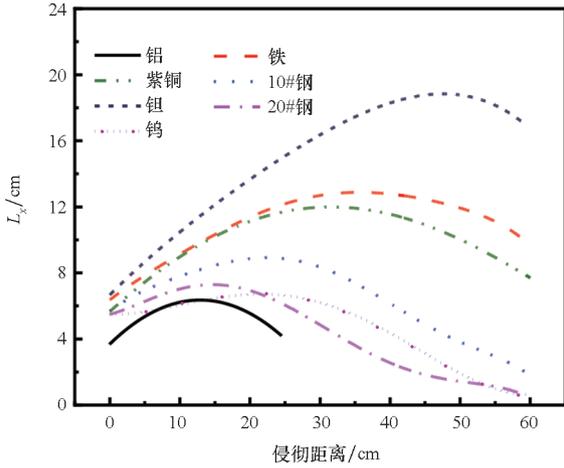
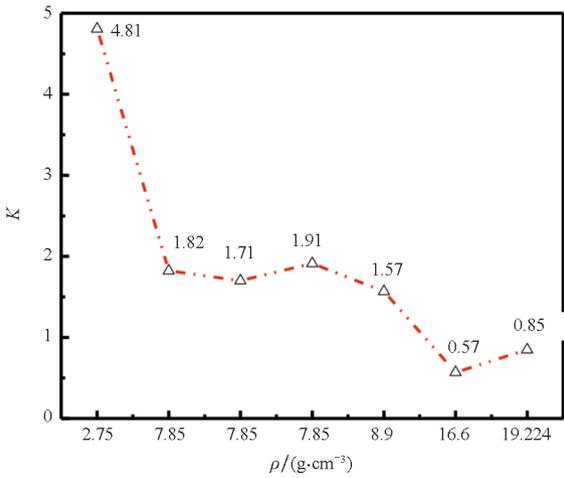
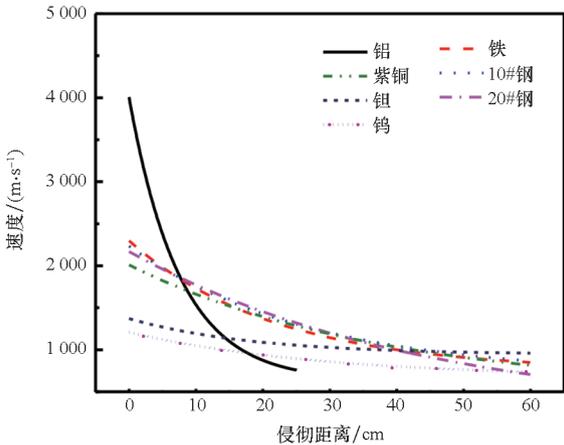


图12 杆式射流有效长度(不同药型罩材料)  
Fig. 12 Effective length of rod jet (different liner materials)



(a) 速度衰减系数  
(a) Velocity decay coefficient



(b) 速度  
(b) Velocity

图13 速度衰减规律(不同药型罩材料)  
Fig. 13 Velocity decay law (different liner materials)

### 2.3 装药长径比的影响

在不改变装药直径  $D_k$  的前提下,通过改变装药的高度  $H$ ,使装药的长径比由 0.5 增加至 1.5 (增量为 0.25)。表 5 中展示了装药长径比对杆式射流成型效果的影响。从数值计算结果可以看出,增加装药的长径比,杆式射流的拉伸程度更高,最终形成有效长度较大的杆式射流;当装药长径比大于 1.25 后,杆式射流在形态上的差异不明显,有效长度随装药长径比的增加也逐渐增加,但是增加的幅度逐渐减小,如图 14 所示。因为随装药高度的增加,爆轰波的成长时间越充分,到达药型罩顶端时的球面波半径也越大,此时爆轰波阵面与药型罩外壁的夹角也越小,较小的夹角可增加作用在药型罩上的压力,提高药型罩的压垮速度,更有利于杆式射流的拉伸成型;但是,随着装药高度的进一步增加,爆轰波阵面的差异逐渐减小。

表 5 杆式射流成型效果(不同装药长径比)

Tab. 5 Formation effect of rod jet (different charge length-to-diameter ratios)

| $H/D_k$ | 侵彻距离  |       |       |
|---------|-------|-------|-------|
|         | 15 cm | 30 cm | 45 cm |
| 0.50    |       |       |       |
| 0.75    |       |       |       |
| 1.00    |       |       |       |
| 1.25    |       |       |       |
| 1.50    |       |       |       |

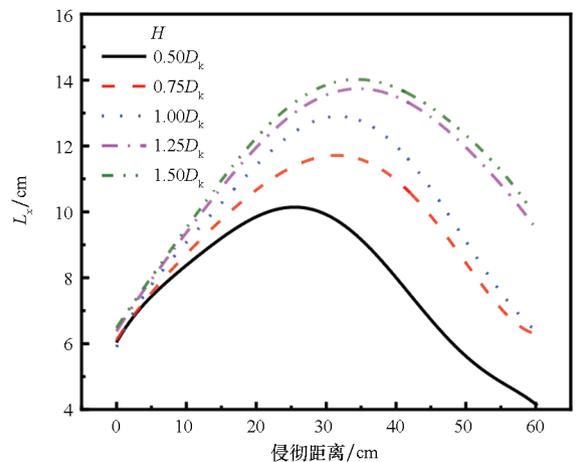
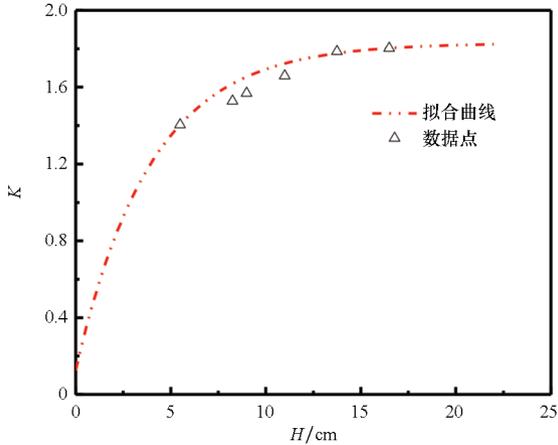


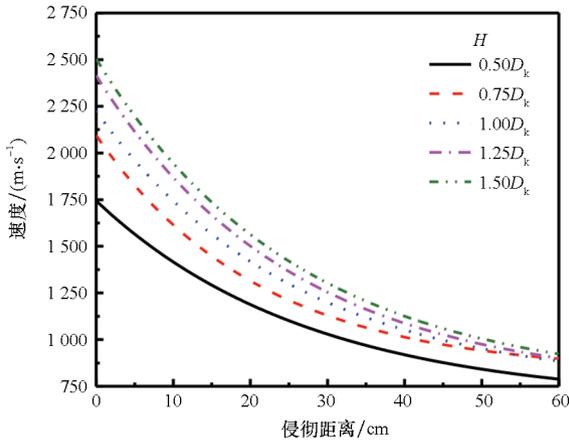
图14 杆式射流有效长度(不同装药长径比)  
Fig. 14 Effective length of rod jet (different charge length-to-diameter ratios)

图 15 为杆式射流的速度衰减随装药长径比的变化规律。由图 15 (a) 可知, 速度衰减系数随装药长径比呈指数形式增加。然而, 当装药长径比超过 1.25 后, 继续增加装药长径比对速度衰减系数的影响较小。这是因为长径比大于 1.25 后, 射流初始增加不明显(图 15(b)), 因此射流速度速度衰减系数变化逐渐趋于平缓。



(a) 速度衰减系数

(a) Velocity decay coefficient



(b) 速度

(b) Velocity

图 15 速度衰减规律(不同装药长径比)

Fig. 15 Velocity decay law (different charge length-to-diameter ratios)

综上所述可以看出, 当装药长径比大于 1.25 后, 装药结构对杆式射流水中运动特性的影响较小, 因此装药长径比可控制在 1.25 以内。

### 3 结论

本文以杆式射流为对象, 开展杆式射流水中毁伤试验, 并利用 LS-DYNA 有限元分析软件研究药型罩参数(壁厚、材料)、装药长径比对杆式射流在水中的运动特性的影响规律, 得到如下主要

结论:

1) 杆式射流在水中侵彻过程伴随着速度衰减和质量侵蚀两种效应, 有效长度先增加后降低, 速度在水中以  $V_x = V_0 e^{-Kx}$  形式衰减。

2) 在不改变药型罩构型的前提下, 增加药型罩壁厚能够提高杆式射流的抗侵蚀能力和存速能力, 药型罩壁厚的最佳取值范围为  $0.036D_k \sim 0.055D_k$ ; 增加装药长径比, 能够提高杆式射流的拉伸程度, 获得有效长度较大的侵彻体, 但长径比可控制在 1.25 以内。

3) 材料密度对杆式射流在水中侵彻过程的速度衰减规律具有重要影响, 密度越高则速度衰减越缓慢, 若密度相近则速度衰减规律趋于一致; 结合杆式射流的抗侵蚀能力, 研究表明紫铜和钽材质的药型罩能形成杆式射流, 适合对多层防护结构进行侵彻; 钨材质的药型罩虽然形成了直径较大的 EFP, 但是水中存速能力强, 适合对单层防护结构进行侵彻, 造成大直径穿孔破坏。

### 致谢

感谢重庆红宇精密工业集团有限公司高级工程师曾晓华、黄开书、彭泓铮对试验提供的帮助。

### 参考文献 (References)

- [1] SHI J W, LUO X B, LI J M, et al. Investigation on penetration model of shaped charge jet in water[J]. Modern Physics Letters B, 2016, 30(2): 1550268.
- [2] 王雅君, 李伟兵, 王晓鸣, 等. EFP 水中飞行特性及侵彻间隔靶的仿真与试验研究[J]. 含能材料, 2017, 25(6): 459 - 465.  
WANG Y J, LI W B, WANG X M, et al. Numerical simulation and experimental study on flight characteristics and penetration against spaced targets of EFP in water [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(6): 459 - 465. (in Chinese)
- [3] 孙远翔, 胡皓亮, 张之凡. EFP 水下成型影响因素的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2020, 34(6): 125 - 135.  
SUN Y X, HU H L, ZHANG Z F. Simulation study on influential factors of EFP underwater forming [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(6): 125 - 135. (in Chinese)
- [4] CHEN A R, LI X D, ZHOU L W, et al. Experimental study on the cavity evolution and liquid spurt of hydrodynamic ram[J]. Defence Technology, 2022, 18(11): 2008 - 2022.
- [5] CHEN A R, LI X D, ZHOU L W, et al. Study of liquid spurt caused by hydrodynamic ram in liquid-filled container[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 144: 103658.
- [6] JI Y Z Y, LI X D, ZHOU L W, et al. Comparison of the hydrodynamic ram caused by one and two projectiles impacting water-filled containers [J]. International Journal of Impact

- Engineering, 2020, 137: 103467.
- [7] GUO Z T, CHEN T, ZHAO G, et al. Hydrodynamic ram analysis in high-speed projectile penetrating into water-filled vessels[J]. Ocean Engineering, 2022, 251: 111092.
- [8] 王长利, 马坤, 周刚, 等. 防雷舱结构在聚能装药水下爆炸作用下的毁伤研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1145 - 1154.
- WANG C L, MA K, ZHOU G, et al. Damage effect of cabin near shipboard under shaped charge exploding underwater[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(5): 1145 - 1154. (in Chinese)
- [9] 李兵, 刘念念, 陈高杰, 等. 水中聚能战斗部毁伤双层圆柱壳的数值模拟与试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(1): 38 - 45.
- LI B, LIU N N, CHEN G J, et al. Numerical simulation and experimental research on damage of shaped charge warhead to double-layer columniform shell [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(1): 38 - 45. (in Chinese)
- [10] MA T B, LIU J, WANG Q. Influence of shaped charge structure parameters on the formation of linear explosively formed projectiles[J]. Defence Technology, 2022, 18(10): 1863 - 1874.
- [11] YANG D, LIN J J. Numerical investigation on the formation and penetration behavior of explosively formed projectile (EFP) with variable thickness liner[J]. Symmetry, 2021, 13(8): 1342.
- [12] XUE W Z, LI M, MEN J B, et al. Forming control of rod-shaped tantalum-tungsten alloy explosively formed projectile[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 772(1): 012071.
- [13] 陈兴, 卢永刚, 程祥珍. 药型罩结构参数对JPC水下作用效应影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(11): 1127 - 1135.
- CHEN X, LU Y G, CHENG X Z. Study on influence of liner's structure parameters on effects of JPC operating underwater[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(11): 1127 - 1135. (in Chinese)
- [14] 陈兴, 周兰伟, 李福明, 等. 杆式射流对充液防护结构的毁伤机理及影响因素的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2021, 35(2): 025202.
- CHEN X, ZHOU L W, LI F M, et al. Numerical simulation on damage mechanism and influencing factors of JPC shaped charge on liquid-filled defensive structure [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(2): 025202. (in Chinese)
- [15] 王雅君, 李伟兵, 黄炫宁, 等. 药型罩材料对EFP水中运动特性影响研究[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(s2): 15 - 20.
- WANG Y J, LI W B, HUANG X N, et al. Effect of liner material on motion characteristics of EFP in water [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(s2): 15 - 20. (in Chinese)
- [16] 杨珊, 王树山, 王韞泽, 等. 成型装药水下大炸高对多层间隔靶的侵彻威力[J]. 火炸药学报, 2022, 45(2): 243 - 248.
- YANG S, WANG S S, WANG Y Z, et al. Penetration power of large underwater explosion height of shaped charge to multi-layer spacer target [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(2): 243 - 248. (in Chinese)
- [17] 张春辉, 张斐, 王志军, 等. 复合材质杆式射流侵彻水下目标的数值模拟[J]. 爆破器材, 2019, 48(1): 8 - 14.
- ZHANG C H, ZHANG F, WANG Z J, et al. Numerical simulation of composite-material rod-like jet penetrating underwater targets[J]. Explosive Materials, 2019, 48(1): 8 - 14. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)