

杆式射流对双层间隔靶板侵彻效应影响分析

田玮莹, 马小英*, 吴思源

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年6月26日; 发布日期: 2026年7月3日

摘要

为研究反潜武器在潜艇浮出水面状态下起爆时, 药型罩结构参数对聚能杆式射流成型的影响以及射流成型后对潜艇壳体侵彻能力的影响。本文采用正交试验的方法对药型罩的结构参数进行组合, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件开展了药型罩结构参数对聚能杆式射流影响规律的分析, 通过极差分析得到了成型能力较好的结构参数组合, 并以该组参数为基础分析了聚能杆式射流对双层间隔靶板的侵彻影响。结果表明: 当药型罩锥角 $\alpha = 90^\circ$ 、药型罩壁厚 $\delta = 0.30 \text{ cm}$ 、装药长径比 $H/D = 1.0$ 时, 形成的聚能杆式射流成型效果好, 侵彻能力强。在该组参数下形成的聚能杆式射流, 射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 、射流长度 L_j 、侵彻孔径 D 和侵彻深度 L 的数值均得到显著提升。本文的研究结果可为聚能杆式射流药型罩的结构参数优化以及对双层间隔靶板的侵彻能力分析提供理论依据。

关键词

聚能射流, 药型罩, 侵彻, 动力学仿真

Analysis of the Penetration Effect of Rod Jet on Double-Layer Spaced Target Plates

Weiyang Tian, Xiaoying Ma*, Siyuan Wu

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: June 3, 2026; accepted: June 26, 2026; published: July 3, 2026

Abstract

To investigate the influence of structural parameters of the shaped charge liner on the formation of the shaped charge jet rod and the penetration capability of the formed jet rod against submarine

*通讯作者。

hulls when an anti-submarine weapon detonates with the submarine in a surfaced condition, this paper adopts an orthogonal experimental design to combine the structural parameters of the shaped charge liner, uses ANSYS/LS-DYNA software to analyze the influence law of the shaped charge liner's structural parameters on the shaped charge jet rod, obtains a combination of structural parameters with favorable forming performance via range analysis, and analyzes the penetration effect of the shaped charge jet rod against double-spaced target plates based on this parameter combination. The results show that when the cone angle of the shaped charge liner $\alpha = 90^\circ$, the wall thickness of the shaped charge liner $\delta = 0.30$ cm, and the charge aspect ratio $H/D = 1.0$, the formed shaped charge jet rod achieves excellent forming performance and strong penetration capability. For the shaped charge jet rod formed under this set of parameters, the values of jet tip velocity V_j , velocity difference between the jet tip and tail ΔV , jet length L_j , penetration aperture D and penetration depth L are all significantly improved. The research findings of this paper can provide a theoretical basis for the structural parameter optimization of shaped charge liners for shaped charge jet rods and the penetration capability analysis against double-spaced target plates.

Keywords

Convergent Jet, Shaped Charge Liner, Penetration, Dynamics Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代的海洋战争中, 潜艇凭借其高隐蔽性和强大的攻击力成为了决定海洋战争能否胜利的重要因素之一[1][2]。为对其实施精准打击, 各国致力于发展不同规格的鱼雷武器, 根据战斗部重量不同可分为重型鱼雷和轻型鱼雷[3], 其中, 重型鱼雷采用重达数百公斤的爆破型战斗部, 通过装药爆破后产生的冲击波、气泡脉冲等对目标进行破坏, 而轻型鱼雷为提高能量的利用率并且在装药量较少的情况下依旧具有较好的破坏能力, 轻型鱼雷则采用聚能装药技术, 通过炸药爆炸, 使得聚能装药结构中的药型罩变形形成具有较高能量密度的金属射流, 对潜艇造成破坏[4][5]。因此, 针对聚能型鱼雷战斗部的侵彻效应分析, 多位学者进行了相关研究。Guo 等通过 ANSYS/AUTODYNA 软件对抛物线型药型罩结构进行数值模拟, 并针对侵彻深度等参数与圆锥形药型罩进行对比分析[6]。Yuri Voitenko 等针对不同的聚能装药结构进行数值模拟, 分析得到了药型罩种类和起爆方式对金属射流头部速度的影响[7]。李强等通过 ANSYS/AUTODYNA 软件建立数值仿真模型, 对不同药型罩厚度下的轻质射流成型和侵彻钢靶的过程进行数值模拟, 分析得到了药型罩厚度对穿孔直径和侵彻深度的影响[8]。张雪丽等基于 ANSYS/AUTODYNA 软件和试验, 分析了炸高对聚能射流源侵彻性能的影响, 并量化分析了炸高对射流头部速度和侵彻深度的影响[9]。方一舟等通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对普通聚能射流侵彻有限厚度靶板的过程进行数值模拟计算, 分析了有限厚靶板厚度、炸高和靶后效应物密度对剩余射流引爆威力参数的影响[10]。王萧鉴等通过 LS-NDYNA 软件对三种装药结构在不同炸高条件下侵彻 45#钢靶的过程进行数值模拟, 分析了不同药型罩罩顶结构对射流成型以及侵彻能力的影响[11]。

国内外学者的研究主要集中于分析不同种类药型罩在不同炸高条件下对金属射流成型和侵彻能力的影响, 并未考虑不同药型罩结构参数对侵彻损伤效应的影响。因此本文分析了药型罩锥角 α 、药型罩壁厚 δ 和装药长径比 H/D 对金属射流成型的影响规律, 并对最优结构参数组合的药型罩侵彻双层间隔靶板的

过程进行数值仿真分析。

2. 聚能战斗部结构

2.1. 聚能战斗部结构设计

由于药型罩锥角和爆轰波压垮机制的不同，金属射流根据其成型特征可分为：普通聚能射流、聚能杆式射流和爆炸成型弹丸。普通聚能射流由于头部速度较高并且具有较大的速度梯度，在飞行过程中易发生颈缩断裂现象并形成离散金属颗粒；聚能杆式射流头部速度适中并存在一定的速度梯度，在飞行过程中不容易发生断裂并保持较好的结构完整性；爆炸成型弹丸由于整体速度较低并且几乎不存在速度梯度，最终形成短粗状弹丸，极小的长径比对侵彻深度产生较大限制。

对上述三种金属射流的动力学特征进行综合考虑后发现，兼具结构完整性和适中长径比的聚能杆式射流具有更好的成型和侵彻能力。为在数值层面上分析聚能杆式射流的成型和侵彻能力，本文设计了一种圆锥形聚能战斗部模型，为提高仿真效率，对所设计的模型进行简化处理，不考虑装药壳体对金属射流成型和侵彻能力的影响，因此该战斗部由药型罩和主装药两部分组成[12]，其结构如图1所示。其中主装药的装药直径 D_k 取 5 cm，装药高度 H 取 6.5 cm，起爆点位于主装药后端的中心位置，并采用等壁厚的药型罩结构。

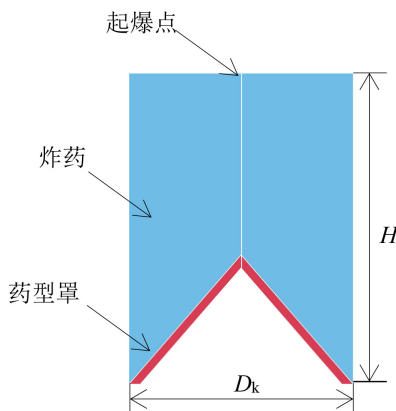


Figure 1. Schematic diagram of the shaped charge warhead structure
图 1. 聚能战斗部结构示意图

2.2. 材料模型及参数确定

炸药、药型罩和空气采用 Euler 算法进行描述[13]，在空气域的计算边界添加非反射条件，防止冲击波到达边界时反弹回计算域内部，影响计算的正常运行[14]。采用 g-cm- μ s 单位制建立模型，空气域尺寸为 $7.5 \text{ cm} \times 35 \text{ cm}$ ，网格尺寸为 $0.05 \text{ cm} \times 0.05 \text{ cm}$ 。

选择无氧高导电铜(即 OFHC CU)作为药型罩材料[15]，对应的材料参数如表 1 所示，采用 *MAT_STEINBERG 材料模型和*EOS_GRUNEISEN 状态方程进行描述[16]，其表达式如公式(1)所示。

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

式中： μ 为压缩比，反映材料的体积变化； C 为声速截距，反映材料在常压下的体积声速； γ_0 为 Gruneisen 系数，反映晶格振动产生的热压对总压力的贡献率； a 为体积修正系数； E 为单位体积内能； ρ_0 为初始密度； S_1 、 S_2 和 S_3 为斜率系数。

选择 COMP B 炸药作为主装药材料[17]，对应的材料参数如表 2 所示，采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 *EOS_JWL 状态方程进行描述，其表达式如公式(2)所示。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (2)$$

式中： V 为相对体积，反映爆轰产物的膨胀程度； R_1 、 R_2 为指数常数，反映压力衰减的梯度； ω 为格鲁内森常数，反映爆轰产物的绝热指数； E 为单位体积内能； A 、 B 为压力常数。

空气采用 *MAT_NULL 材料模型和 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程进行描述，其对应的材料参数如表 3 所示[18]。

Table 1. Material parameters of the shaped charge liner

表 1. 药型罩材料参数

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$G_0/(\text{Mbar})$	$SIGO/(\text{Mbar})$	A	B	$GAMO$
OFHC CU	8.93	0.417	0.0012	63.5	2.83	2.02

Table 2. Explosive material parameters

表 2. 炸药材料参数

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	$A/(\text{Mbar})$	$B/(\text{Mbar})$	R_1	R_2	ω_c	$P_{CJ}/(\text{Mbar})$	$E_0/(\text{Mbar})$
COMP B	1.717	0.798	5.24	0.0768	4.2	1.1	0.34	0.295	0.085

Table 3. Air material parameters

表 3. 空气材料参数

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_0/(\text{Mbar})$
Air	0.00129	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5×10^{-6}

2.3. 数值计算结果有效性验证

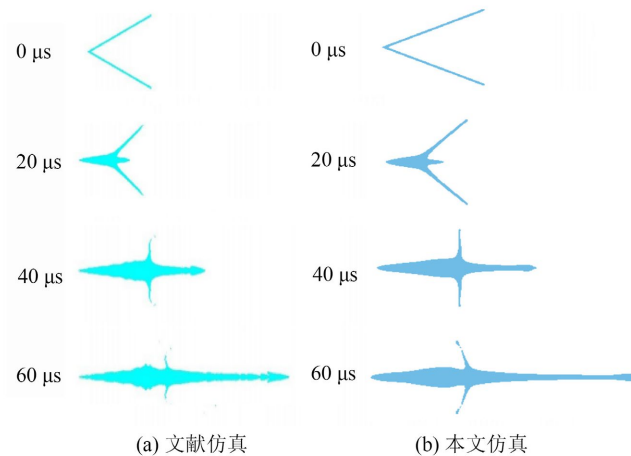


Figure 2. Simulation comparative analysis

图 2. 仿真对比分析

为验证数值计算结果的有效性,对文献[19]中聚能金属射流在空气中的成型过程进行仿真分析,发现与本文仿真的成型过程基本相似,如图2所示;绘制聚能金属射流成型过程头部速度-时间变化曲线,发现变化趋势基本相同,如图3所示。因此,本文采用的数值模拟方法可靠性较高,数值计算结果具有良好的有效性。

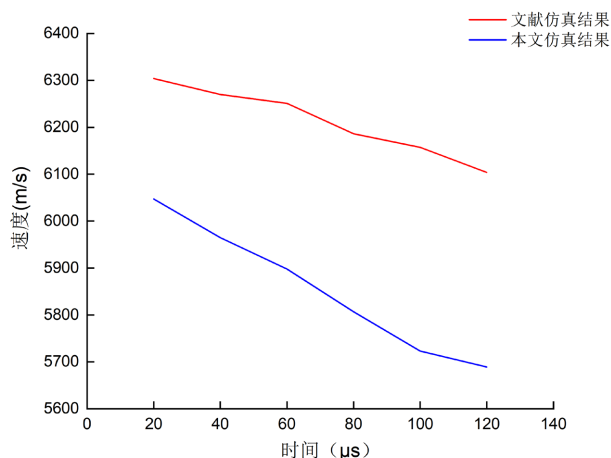


Figure 3. Velocity-time variation curve of the jet head
图3. 射流头部速度 - 时间变化曲线

3. 正交试验设计与数据分析

3.1. 正交试验设计

正交试验设计是一种研究多因素、多水平的试验设计方法,可以通过尽可能少的试验次数,找出最优组合,从而达到通过少数的试验便能分析出各因素影响规律的目的。

本文以药型罩锥角 α 、药型罩壁厚 δ 和装药长径比 H/D 作为影响因素,采用正交试验法[20]设计三因素(A/B/C)五水平(1~5)正交试验,正交试验设计如表4所示。其中, α 的取值范围为 $70^\circ\sim 110^\circ$, δ 的取值范围为 $0.15\text{ cm}\sim 0.35\text{ cm}$, H/D 的取值范围为 $0.8\sim 1.2$ 。

Table 4. Orthogonal experimental design scheme
表4. 正交试验设计方案

组别	锥角 $\alpha/(\circ)$	壁厚 δ/cm	长径比 H/D
1	70 (A1)	0.15 (B1)	0.8 (C1)
2	80 (A2)	0.20 (B2)	0.9 (C2)
3	90 (A3)	0.25 (B3)	1.0 (C3)
4	100 (A4)	0.30 (B4)	1.1 (C4)
5	110 (A5)	0.35 (B5)	1.2 (C5)

3.2. 计算结果分析

对聚能杆式射流在 $60\ \mu\text{s}$ 时的成型情况进行仿真分析,得到射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 和射流长度 L_j 的变化情况,如表5所示。

根据数理统计理论可知,极差 R [21]可以用来衡量不同因素对不同指标的影响程度大小,本文以正

交试验数据为基础进行极差分析, 得到聚能杆式射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 和射流长度 L_j 的极差值如表 6 所示。

Table 5. Orthogonal experiment numerical analysis
表 5. 正交试验数值分析

组别	$\alpha(^{\circ})$	δ/cm	H/D	$V_j/(\text{m/s})$	$\Delta V/(\text{m/s})$	L_j/cm
1	70	0.15	0.8	4796	4317	25.62
2	70	0.20	0.9	4454	3907	23.24
3	70	0.25	1.0	4228	3907	21.73
4	70	0.30	1.1	4055	3542	20.85
5	70	0.35	1.2	3923	3437	20.08
6	80	0.15	0.9	4593	3778	22.45
7	80	0.20	1.0	4313	3562	20.94
8	80	0.25	1.1	4107	3391	19.89
9	80	0.30	1.2	3940	3292	19.03
10	80	0.35	0.8	3234	2684	16.68
11	90	0.15	1.0	4546	1118	20.35
12	90	0.20	1.1	4232	3239	19.00
13	90	0.25	1.2	4064	3145	18.25
14	90	0.30	0.8	3285	2532	15.80
15	90	0.35	0.9	3183	2455	15.25
16	100	0.15	1.1	4082	2835	17.46
17	100	0.20	1.2	3827	2618	16.11
18	100	0.25	0.8	3661	2587	15.54
19	100	0.30	0.9	3472	2468	14.76
20	100	0.35	1.0	3386	2404	14.15
21	110	0.15	1.2	3921	2432	15.04
22	110	0.20	0.8	3674	2204	14.07
23	110	0.25	0.9	3512	2174	13.47
24	110	0.30	1.0	3318	2071	12.64
25	110	0.35	1.1	3247	2021	12.34

Table 6. The result of the range calculation

表 6. 极差分析结果

组别	$V_j/(\text{m/s})$	$\Delta V/(\text{m/s})$	L_j/cm
$\alpha(^{\circ})$	756.8	1600.2	8.789
δ/cm	993.1	757.8	4.483
H/D	228.2	168.2	0.421

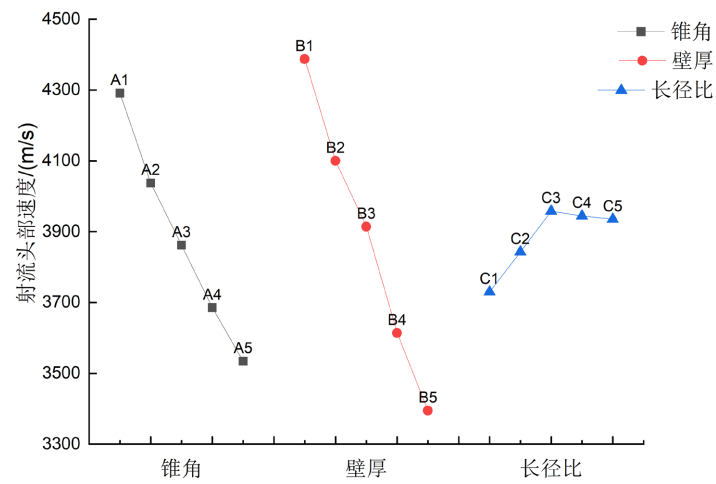
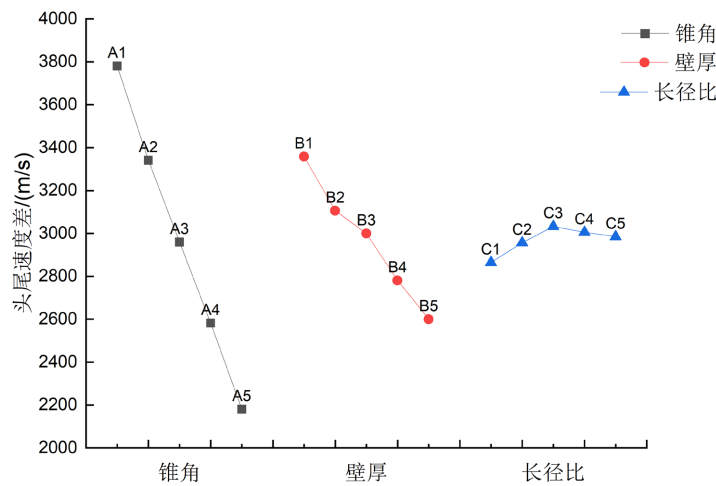
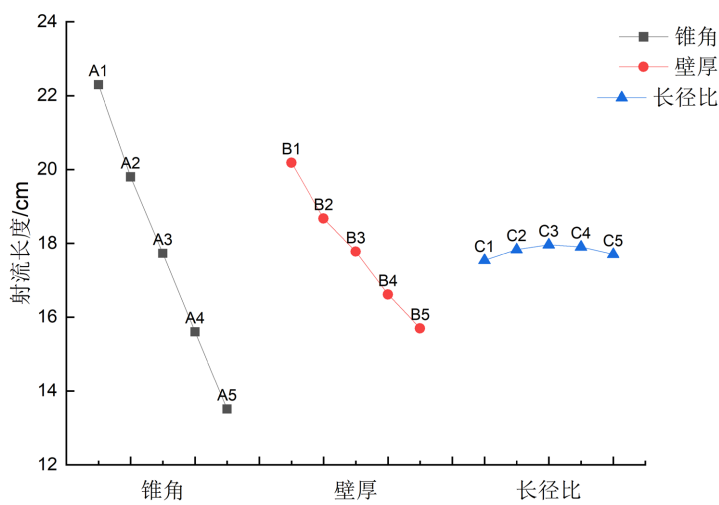
(a) 射流头部速度 V_j 随结构参数变化曲线(b) 头尾速度差 ΔV 随结构参数变化曲线(c) 射流长度 L_j 随结构参数变化曲线

Figure 4. Diagram of change relationship

图 4. 变化关系示意图

通过分析表 6 中的数据可知, 聚能杆式射流头部速度 V_j 影响因素的重要程度排序为 δ 、 α 、 H/D , 头尾速度差 ΔV 影响因素的重要程度排序为 α 、 δ 、 H/D , 射流长度 L_j 影响因素的重要程度排序为 α 、 δ 、 H/D 。

聚能杆式射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 和射流长度 L_j 与药型罩结构参数的变化关系示意图如图 4 所示, 由图 4 中各曲线波动可知:

1) 随着药型罩锥角 α 的增大, 射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 和射流长度 L_j 均呈现明显的下降趋势。由数值仿真分析可知, 当锥角从 70° 增加至 80° 时, 处于普通聚能射流向聚能杆式射流的过渡阶段, 头尾速度差 ΔV 均超过 3200 m/s , 容易发生颈缩断裂现象; 当锥角达到 90° 到 100° 时, 射流头部速度 V_j 处于 3600 m/s ~ 3900 m/s 的中高水平, 并且头尾速度差 ΔV 保持在理想区间, 此时药型罩压垮形成一根长径比适中、无明显断裂的聚能杆式侵彻体。综合考虑选择药型罩锥角 α 为 90° 。

2) 随着药型罩壁厚 δ 的增大, 射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 和射流长度 L_j 均减小并且射流头部速度的下降趋势较为显著。由数值仿真分析可知, 0.15 cm 和 0.20 cm 的药型罩过薄, 射流头部速度 V_j 虽超过 4100 m/s , 但形成的聚能杆式射流总体质量较低; 0.35 cm 的药型罩则过厚, 装药爆炸产生的能量无法有效压垮药型罩, 产生能量浪费。综合考虑选择药型罩壁厚 δ 为 0.30 cm 。

3) 随着装药长径比 H/D 的增大, 射流头部速度 V_j 呈现先快速升高后趋于平稳的趋势, 而头尾速度差 ΔV 和射流长度 L_j 呈现先微弱上升后略微下降的趋势, 峰值均出现在中间位置。综合考虑选择装药长径比 H/D 为 1.0 。

通过以上分析得到最优结构参数组合为: 药型罩锥角 $\alpha = 90^\circ$ 、药型罩壁厚 $\delta = 0.30 \text{ cm}$ 、装药长径比 $H/D = 1.0$, 该组参数下的聚能杆式射流成型过程如图 5 所示。

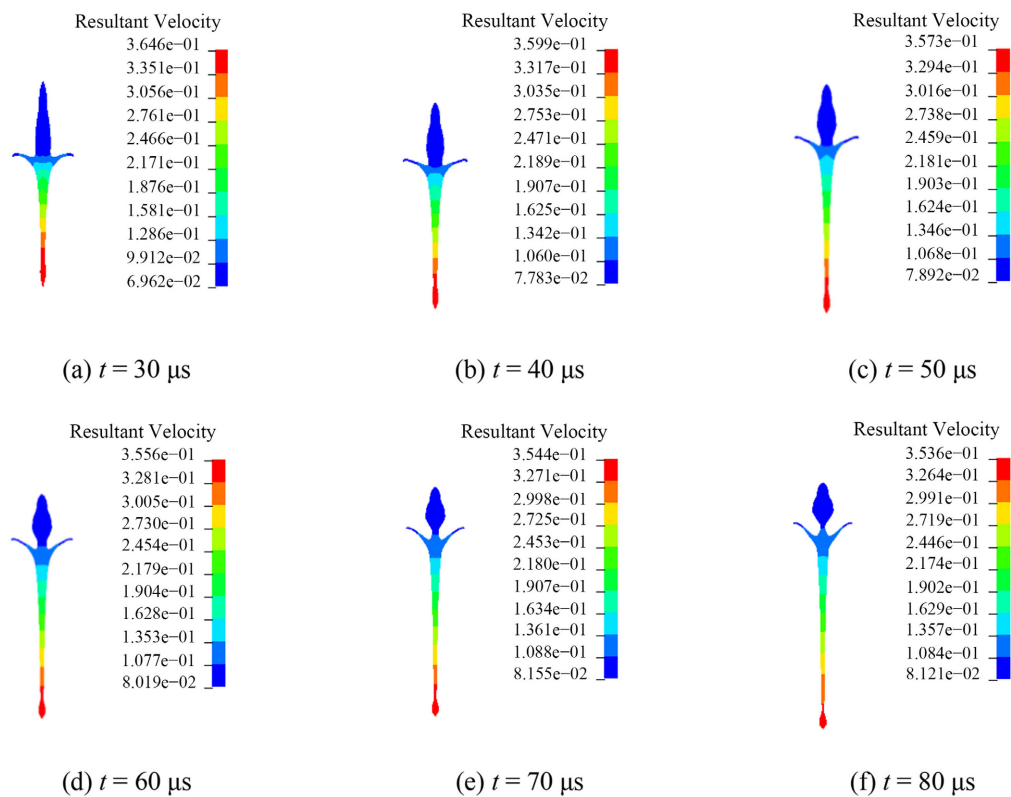


Figure 5. The process of energy-concentrated rod-type jet molding
图 5. 聚能杆式射流成型过程

4. 聚能杆式射流侵彻仿真分析

4.1. 双层间隔靶板模型和材料参数

为模拟聚能杆式射流对潜艇的侵彻过程，利用双层间隔靶板模拟潜艇双层壳体结构，数值计算模型如图 6 所示。聚能战斗部右端依次是厚度为 2 cm 和 7 cm 的靶板，第一层靶板模拟双层壳体潜艇的非耐压壳体，对聚能杆式射流产生干扰并消耗射流能量，第二层靶板模拟耐压壳体，以侵彻深度 L 和侵彻孔径 D 对聚能杆式射流的侵彻能力进行评估，两层靶板之间的间距为 6 cm，用以模拟双层间隔靶板之间的空气介质，设置炸高为 $2D_K$ ，即 2 倍装药直径。

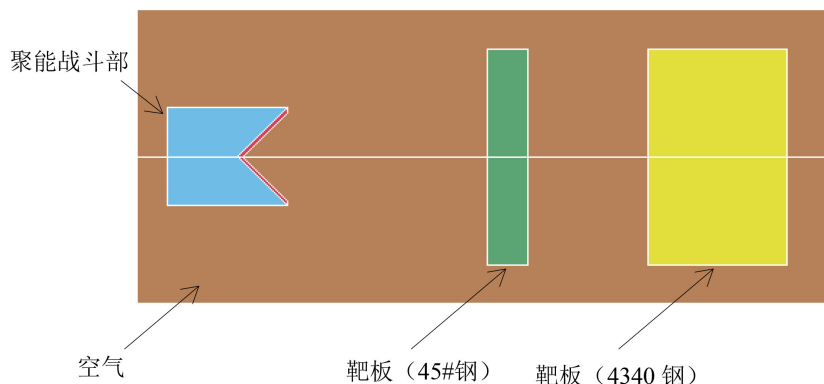


Figure 6. numerical calculation model

图 6. 数值计算模型

两层金属靶板采用 Lagrange 算法，炸药、药型罩和空气采用 Euler 算法，利用流固耦合(FSI)方法对上述两种算法进行协同分析。金属靶板采用 *MAT_JOHNSON_COOK 材料模型和 *EOS_GRUNEISEN 状态方程进行描述，其中第一层靶板采用 45#钢，第二层靶板采用 4340 钢，对应材料参数如表 7 所示。

Table 7. Metal material parameters

表 7. 金属材料参数

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$A/(\text{Mbar})$	$B/(\text{Mbar})$	n	c	m	$T_m/(k)$	$T_r/(k)$
45#钢	7.85	0.00507	0.0032	0.28	0.064	1.06	1733	293
4340 钢	7.83	0.00792	0.0051	0.26	0.014	1.03	1793	293

4.2. 聚能杆式射流侵彻双层间隔靶板仿真分析

最优结构参数组合下聚能杆式射流侵彻双层间隔靶板过程如图 7 所示。 $t = 30 \mu\text{s}$ 时，聚能杆式射流成型并具有明显速度梯度，此时头尾速度差 $\Delta V = 3325.5 \text{ m/s}$ ，射流长度 $L_j = 8.2 \text{ cm}$ ； $t = 40\sim 50 \mu\text{s}$ 时，聚能杆式射流侵彻第一层靶板并在射流头部出现“翻边”现象，此时头尾速度差 $\Delta V = 1697 \text{ m/s}$ ，射流长度 $L_j = 11.3 \text{ cm}$ ； $t = 60\sim 70 \mu\text{s}$ 时，聚能杆式射流在第一层靶板上形成完整侵彻破孔并继续向内侵彻，此时头尾速度差 $\Delta V = 1492.3 \text{ m/s}$ ，射流长度 $L_j = 12.9 \text{ cm}$ ； $t = 80 \mu\text{s}$ 时，聚能杆式射流侵彻第二层靶板，此时头尾速度差 $\Delta V = 1196 \text{ m/s}$ ，射流长度 $L_j = 14.8 \text{ cm}$ 。通过聚能杆式射流侵彻双层间隔靶板的仿真分析得到第一层靶板的侵彻孔径 D 为 0.660 cm，第二层靶板的侵彻孔径 D 为 0.496 cm，侵彻深度 L 为 1.236 cm。

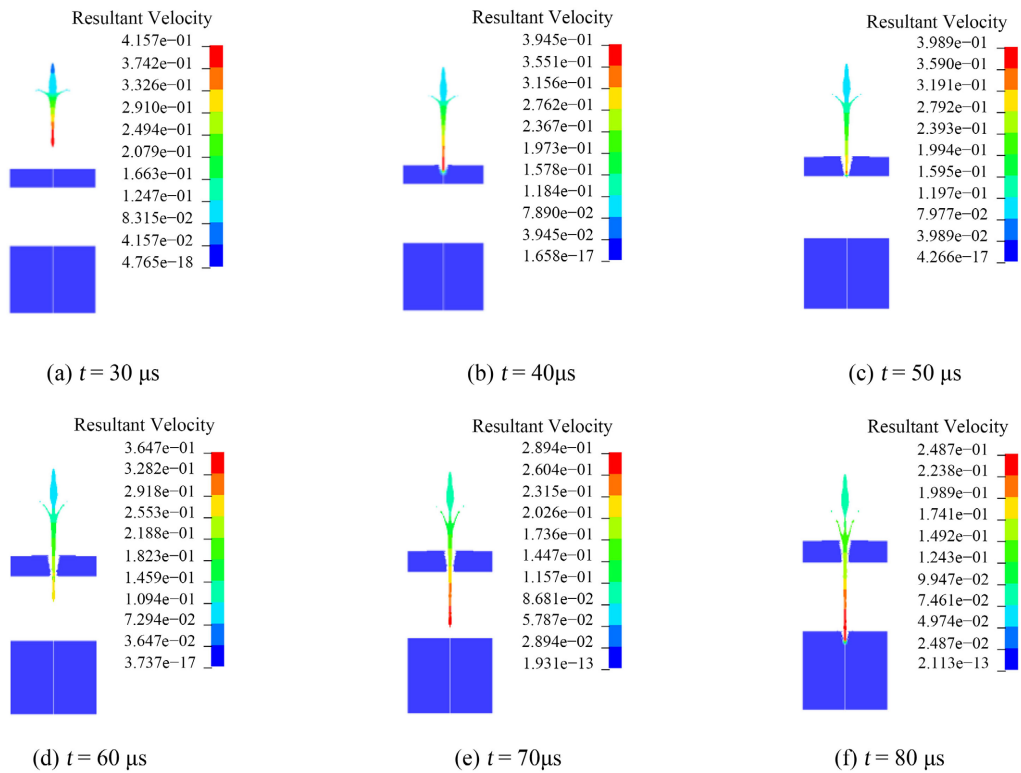


Figure 7. The process of jet implosion penetration of a double-layer spaced target plate using a concentrated rod-type jet
图 7. 聚能杆式射流侵彻双层间隔靶板过程

4.3. 结果分析

在 25 组正交试验中，选择药型罩锥角 $\alpha = 90^\circ$ 、药型罩壁厚 $\delta = 0.25 \text{ cm}$ 、装药长径比 $H/D = 1.2$ 为对照基准组进行仿真分析，并与优化后的参数组合进行对比，相关数据对比如表 8 所示。

Table 8. Penetration damage data comparison
表 8. 侵彻毁伤数据对比

	V_j /(m/s)	提升百分比/%	ΔV /(m/s)	提升百分比/%	L_j /cm	提升百分比/%	D /cm	提升百分比/%	L /cm	提升百分比/%
对照基准组	3536	—	2724	—	22.00	—	0.445	—	1.108	—
正交优化组	4052	14.59%	3145	15.45%	23.80	8.18%	0.496	10.28%	1.236	11.55%

结合表 8 中的数据可知，优化后的聚能杆式射流在成型质量和终点毁伤效能上均得到了显著提升。聚能杆式射流头部速度 V_j 、头尾速度差 ΔV 、射流长度 L_j 分别提高了 14.59%、15.45% 和 8.18%；针对第二层金属靶板，侵彻孔径 D 和侵彻深度 L 分别增大了 10.28% 和 11.55%。上述效能的提升与结构参数的改变具有密切关系。

在射流成型阶段，装药长径比由 1.2 下降至 1.0，有效削弱了装药尾部稀疏波对爆轰波阵面的干扰，作用于药型罩顶部的爆轰波形更加平整。由于药型罩壁厚的增加，药型罩压垮碰撞区域的驻点压力显著提升，药型罩的质量分配比例在高压环境下得到改善，更多能量沿轴线方向汇聚，实现射流头部速度 V_j 的提升。同时，头尾速度差 ΔV 的增大使聚能杆式射流得到充分拉伸，射流长度 L_j 在发生颈缩断裂前进一步增大。

在侵彻靶板阶段, 药型罩壁厚的增加使优化后的聚能杆式射流得到更大的整体质量和径向尺寸。根据定常流体力学侵彻理论, 射流长度 L_j 的增加可提供更持久的侵彻冲量, 侵彻深度 L 得到显著提升; 当剩余射流侵彻第二层靶板时, 射流头部速度 V_j 的增大可提供更高的初始动压, 靶板材料出现更明显的塑性屈服与径向扩孔效应, 导致侵彻孔径 D 增大。

5. 结论

建立了聚能杆式射流战斗部仿真模型, 采用正交试验法对不同药型罩结构参数进行组合, 并通过极差分析得到不同药型罩结构参数对聚能杆式射流成型的影响规律, 基于优化后的药型罩结构参数建立聚能杆式射流侵彻双层间隔靶板的数值模拟, 并对双层间隔靶板的毁伤情况进行分析, 得出如下结论:

1) 针对药型罩锥角 α 、药型罩壁厚 δ 和装药长径比 H/D 三个结构参数, 对射流头部速度 V_j 的影响程度依次为 δ 、 α 、 H/D ; 对头尾速度差 ΔV 的影响程度依次为 α 、 δ 、 H/D ; 对射流长度 L_j 的影响程度依次为 α 、 δ 、 H/D 。

2) 通过极差分析得出成型能力较好的结构参数组合, 即 $\alpha = 90^\circ$ 、 $\delta = 0.30 \text{ cm}$ 、 $H/D = 1.0$ 。通过数值仿真分析可知, 在该组合下的射流头部速度 $V_j = 4052 \text{ m/s}$, 头尾速度差 $\Delta V = 3145 \text{ m/s}$, 射流长度 $L_j = 23.80 \text{ cm}$ 。

3) 优化后的聚能杆式射流在成型质量与终点毁伤效能上均得到了显著提升。其射流头部速度 V_j 提高了 14.59%, 头尾速度差 ΔV 提高了 15.45%, 射流长度 L_j 提高了 8.18%, 侵彻孔径 D 提高了 10.28%, 侵彻深度 L 提高了 11.55%。

基金项目

辽宁省属本科高校基本科研业务费专项(LJ212410144039)。

参考文献

- [1] 吴晨, 游源, 李奔, 等. 国外常规潜艇发展现状及技术趋势分析[J]. 舰船科学技术, 2026, 48(1): 81-85.
- [2] 陈高杰, 李羽超. 聚能型战斗部对 BeTSSi 潜艇的毁伤效应仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2025, 45(3): 182-185.
- [3] Pai, A., K., S.P., Rodriguez-Millan, M., Kini, C.R. and B., S.S. (2025) Computational Analysis of Submerged Submarine Bow Hull Dynamics Subjected to Torpedo Blunt Impact and Warhead Detonation Events. *Applied Ocean Research*, **154**, Article ID: 104330. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104330>
- [4] Tian, Y., Zhang, A.M., Xu, L.Y. and Ming, F. (2025) Experimental Study on the Coupling Dynamics of Metal Jet, Waves, and Bubble during Underwater Explosion of a Shaped Charge. *Engineering*, **50**, 168-187. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.04.001>
- [5] Wang, J., Wang, H., Liu, A., Ge, C., Zhang, J., Yu, Q., *et al.* (2026) Research on Kinetic Energy Attenuation Mechanism and Characteristics of JPC Penetrator under Water. *International Journal of Impact Engineering*, **208**, Article ID: 105556. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2025.105556>
- [6] Guo, Y.C., Yang, R.S., Peng, S.P. and Xiao, C. (2024) Experimental Study on Decoupled Charge Blasting-Induced Crack Propagation with Parabolic Shaped Charge. *Engineering Fracture Mechanics*, **304**, Article ID: 110178. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110178>
- [7] Voitenko, Y., Sydorenko, Y., Zakusylo, R., Boyko, V., Artemiev, O., Bugaiets, V., *et al.* (2024) Influence of Liner Form and Explosive on the Velocity and Mechanical Action of a Shaped-Charge Jet. *Central European Journal of Energetic Materials*, **21**, 320-337. <https://doi.org/10.22211/cejem/193819>
- [8] 李强, 陈玉坤, 刘承哲. 轻质合金聚能射流成型行为与毁伤钢靶作用[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(6): 2410-2418.
- [9] 张雪丽, 沈永福, 张丁雄, 等. 炸高对聚能射流源侵彻性能影响的量化研究[J]. 爆破器材, 2026, 55(1): 32-37, 44.
- [10] 方一舟, 张先锋, 熊玮, 等. 聚能射流侵彻有限厚钢靶后效参数的特性[J]. 含能材料, 2024, 32(9): 899-910.
- [11] 王萧鉴, 李文军, 梁增友, 等. 罩顶形状对小口径聚能装药侵彻性能影响[J]. 弹箭与制导学报, 2025, 45(5): 900-

- 910.
- [12] 时晨祎, 徐永杰, 郑娜娜, 等. 不对称爆轰下线性聚能装药侵彻性能仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2025, 45(6): 1268-1275.
 - [13] 刘猛, 马铎, 单海江, 等. 基于正交优化的双层双锥形药型罩结构设计[J]. 兵器材料科学与工程, 2026, 49(1): 144-151.
 - [14] 刘莹, 张晓伟, 张庆明. 聚能装药结构参数对钢筋混凝土靶侵彻开孔行为影响规律的试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(3): 118-128.
 - [15] 刘晓波, 梁德利, 刘启庆, 等. 不同聚能射流水下毁伤性能对比分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(8): 1434-1441.
 - [16] 赵丽俊, 王涛, 李晓婕, 等. 基于正交设计的周向线性药型罩结构优化及仿真分析[J]. 弹箭与制导学报, 2025, 45(6): 1089-1097.
 - [17] 翁立浩, 徐永杰, 郑娜娜, 等. 药型罩结构对环形向内切割器切割能力的影响[J]. 弹道学报, 2026, 38(1): 96-104.
 - [18] 余天晨, 杜宁, 潘明然, 等. 基于 GA-BP 神经网络的水介质药型罩结构优化[J]. 弹道学报, 2026, 38(1): 105-112.
 - [19] 李明星. 聚能型鱼雷战斗部对潜艇典型结构的毁伤研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018: 32-33.
 - [20] 何卓朗, 王志军, 郝志伟. 基于正交设计的柱锥结合药型罩多参数结构优化[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(2): 70-75.
 - [21] 胡中伟, 毛益明, 丁文, 等. 聚能射流作用于带壳 B 炸药非爆轰解体的研究[J]. 爆破器材, 2025, 54(4): 1-8.