

聚能侵彻体水中行进特性数值模拟

王桂龙^{1,2}, 陈兴^{2*}, 崔中华², 叶天源², 郭明开²

(1. 中北大学, 机电工程学院, 山西太原 030051;

2. 重庆前卫科技集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 为了研究金属射流 (Shaped Charge Jet, JET)、爆炸成型弹丸 (Explosively Formed Projectile, EFP) 和聚能杆式射流 (Jetting Projectile Charge, JPC) 3种聚能侵彻体水中行进特性, 在 $0.5D_k$ 、 $1D_k$ 、 $1.5D_k$ 、 $2D_k$ (D_k 为装药直径) 4种炸高条件下, 运用 AUTODYN 软件进行数值计算, 对比分析3种侵彻体水中成型情况、有效长度、速度、动能4个方面特性。研究表明: 当炸高大于 $0.5D_k$ 时, 相较于 JET 和 EFP, JPC 在水中行进过程中的拉伸程度适中, 侵彻体连续性较好, 空腔效应最优, 整体速度和头部速度衰减量最小且衰减最慢, 较长时间区间内整体动能最大且衰减最慢, 有利于水中行进, 炸高为 $2D_k$ 时其水中行进特性达到最优; 当炸高等于 $0.5D_k$ 时, JPC 未能充分拉伸且水中行进特性较差, 其性能处在 JET 和 EFP 之间。

关键词: 聚能杆式射流; 聚能战斗部; 水中兵器; 水中目标毁伤

中图分类号: TJ410.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)06-001-11

Numerical Simulation of Traveling Characteristics of Explosively Formed Penetrators in Water

WANG Guilong^{1,2}, CHEN Xing^{2*}, CUI Zhonghua²,

YE Tianyuan², GUO Mingkai²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi;

2. Chongqing Qianwei Technology Group Co., Ltd., Chongqing 401121)

ABSTRACT: To investigate traveling characteristics of penetrators like shaped charge jet (JET), explosively formed projectile (EFP) and jetting projectile charge (JPC) in water, numerical calculations were carried out by AUTODYN software under four conditions of the stand-off distance including $0.5D_k$, $1D_k$, $1.5D_k$ and $2D_k$ (D_k : charge diameter). Thereby, characteristics including formation, effective length, velocity and kinetic energy of the three shaped charge penetrators were compared and analyzed. Results showed that when the stand-off distance is higher than $0.5D_k$, JPC has a moderate degree of stretching, a better continuity of the penetrator and the optimal cavity effect than JET and EFP. Simultaneously, it has smallest and slowest attenuation of the remote velocity and the head velocity. Moreover, in a long time interval, JPC has biggest remote kinetic, whose attenuation is slowest. These characteristics of JPC is conducive to the traveling in the water. When the stand-off distance is $2D_k$, the traveling characteristics of JPC in water is op-

收稿日期: 2024-06-25

第一作者: 王桂龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事弹药终点效应与目标毁伤评估研究。E-mail: 1032790175@qq.com

通信作者: 陈兴 (1993—), 男, 博士, 主要从事弹药终点效应与目标毁伤评估研究。E-mail: chenxnjust@foxmail.com

引用格式: 王桂龙, 陈兴, 崔中华, 等. 聚能侵彻体水中行进特性数值模拟[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (6): 1-11.

timal. When the standoff is $0.5D_k$, the JPC fails to stretch sufficiently and has poor traveling characteristics in the water. At this time, the performance of JPC is between those of JET and EFP.

KEYWORDS: JPC; shaped charge warhead; underwater weapons; underwater target destruction

随着防护技术的发展, 新型防护结构和技术相继出现, 使典型水下目标的防护能力大幅提升, 为了对典型水下目标造成有效毁伤, 运用聚能装药技术效果显著。聚能型战斗部在炸药爆炸后, 其药型罩最终形成金属射流 (Shaped Charge Jet, JET)、爆炸成型弹丸 (Explosively Formed Projectile, EFP) 或聚能杆式射流 (Jetting Projectile Charge, JPC) 3 种侵彻体^[1]。

关于聚能战斗部形成的 3 种侵彻体对水中典型目标的毁伤, 国内外做了许多研究^[2]。周方毅等^[3-4]设计的全尺寸圆锥-球缺组合药型罩聚能战斗部, 可以完全穿透“10 mm 非耐压壳体+1 000 mm 中间水层+40 mm 耐压壳体靶板”的水复合装甲结构; 陈兴等^[5-6]通过研究锥弧组合状药型罩和半球形药型罩两种聚能战斗部对充液防护结构的毁伤, 得到药型罩结构参数对杆式射流水下作用效应的影响特性。杨贵涛等^[7]提出了形成串联爆炸成型弹丸的组合药型罩战斗部结构, 并通过理论分析和数值模拟证明了该结构于水中的高效侵彻性; 欧靖等^[8]研究了锥形药型罩的锥角和厚度对形成的聚能侵彻体水下运动的影响, 研究表明锥角为 90° 、罩厚为 4 mm 的药型罩所形成的射流在水中侵彻深度最长, 存速能力最强; 姬祥等^[9]也研究了药型罩圆锥角变化对聚能射流速度的影响, 研究表明锥角为 90° 的药型罩形成的聚能射流形状最佳、速度最大且穿透效果最好; 崔魁文等^[10]研究锥弧组合罩的角度对聚能杆式侵彻体成型参数的影响规律, 研究表明角度为 $100^\circ \sim 110^\circ$ 时杆式侵彻体连续性、稳定性及侵彻性能最优; 程素秋等^[11]利用 LS-DYNA 软件数值模拟研究了聚能战斗部侵彻双层含水靶的过程, 并以实爆试验测量所得的穿孔大小和侵彻深度对数值模拟结果进行了准确验证; Zhang 等^[12-13]采用无网格和拉格朗日性质的光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法, 模拟了 JET 侵彻水中靶板这一复杂物理现象的全过程; 在分析不同介质中 EFP 的形成过程时, 研究了空气炸高对 EFP 成型的影响, 得到炸高为装药直径的 1.5 倍时, 其拉伸长度、断裂程度、入水

速度等参数最优; Hussain 等^[14]通过仿真与试验的方法研究了 EFP 水中行进以及侵彻靶板的过程, 探究了 EFP 水中速度变化及有效炸高; 步相东等^[15]通过数值仿真研究了等壁厚的大锥角紫铜罩形成的爆炸成型弹丸在水中运动的特性, 以及其自身形态对穿孔孔径的影响; 王雅君等^[16]采用 LS-DYNA 数值模拟方法, 进行了水下爆炸成型弹丸等效模型的速度和质量损耗规律的数值模拟, 并结合具体实验, 研究弹体在水环境中对不同间距靶板的侵彻规律; 周迪锋等^[17]采用数值模拟的方法, 对单锥罩式聚能装药在水中的作用过程进行了数值模拟, 并对射流在水中的运动规律进行了直观描述, 即射流在水介质中运动时, 速度下降比较快; Chick 等^[18]利用多个闪光 X 光摄像记录了超高速射流在水中侵彻的特征, 得到了射流在水中的侵彻速度-距离关系曲线。

聚能战斗部形成的聚能侵彻体对水中目标的毁伤效果, 主要取决于侵彻体经过一定距离的水介质后侵彻目标时的剩余速度、有效长度和动能^[19]。对以上文献分析可知, 目前的研究内容主要集中于目标靶板的终点毁伤效应, 而对 3 种类型侵彻体在水中的成型效果、速度、有效长度、整体动能等水中行进特性的相关研究较少。因此, 本文参考 56 基准破甲弹设计一种聚能战斗部, 通过改变药型罩角度产生 3 种类型聚能侵彻体, 从多个角度对其水中行进特性展开研究。

1 聚能战斗部结构与数值计算模型

1.1 聚能战斗部结构设计

56 基准破甲弹聚能射流成型稳定, 被广泛用于聚能战斗部侵彻性能的基础研究。因此, 本文以 56 基准破甲弹的聚能装药结构为参照设计战斗部, 展开 3 种聚能侵彻体水中行进特性研究。战斗部结构如图 1 (a) 所示, 装药高度 h 为 73.3 mm, 直径 D_k 为 56 mm, 装药采用 B 炸药且尾部中心为起爆点, D_z 为炸高, 壳体材料采用 AL6061-T6 铝合金, 厚度为 2 mm; 药型罩结构如图 1 (b) 所示, 药型罩材料采用 CU-OFHC 紫铜, 顶端直径 D_i 为

5.65 mm, 底端直径 D_2 为 54.15 mm, 药型罩厚度 δ 为 2 mm。在研究过程中, 通过改变药型罩锥角 α (60° 、 110° 、 150°) 大小来控制聚能装药结构, 进而产生不同类型聚能侵彻体, 其中: $\alpha = 60^\circ$ 对应 JET, $\alpha = 110^\circ$ 对应 JPC, $\alpha = 150^\circ$ 对应 EFP。

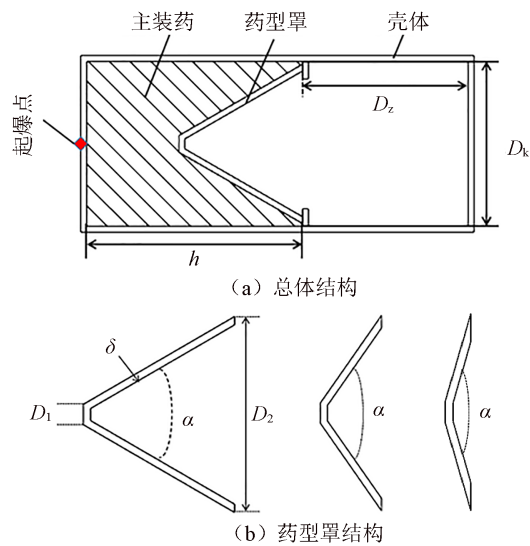


图 1 聚能装药结构
Fig. 1 Structure of the shaped charge

1.2 数值计算模型

采用 AUTODYN 有限元分析软件建立 2D 轴对称数值计算模型。如图 2 所示, 数值计算域尺寸为 $100\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, 数值计算中空气、水、炸药、药型罩等都用 Euler 单元描述, 壳体采用 Lagrange 单元描述, 空气和水边界设置非反射 (flow out) 边界条件, 防止冲击波反射对数值计算结果产生影响。单位制为 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 。

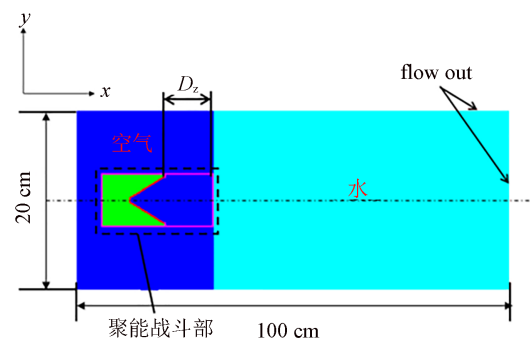


图 2 数值计算模型
Fig. 2 Numerical calculation model

1.3 材料本构及状态方程参数

数值计算涉及的材料有空气、水、炸药、药型罩、壳体, 所选材料对应参数均参照文献[5]、[20]和 AUTODYN 材料库自带材料。药型罩和壳

体都采用本构模型 Steinberg Guinan 和 Shock 状态方程来描述, 具体参数见表 1 和表 2; Comp B 炸药, 采用 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程来描述, 具体参数见表 3; 空气采用理想气体 Ideal Gas 状态方程来描述, 密度为 $1.225 \times 10^{-3}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 绝热系数为 1.4; 水采用 Shock 状态方程来描述, 具体参数见表 2。

表 1 铜、铝合金本构模型参数
Tab. 1 Parameters of constitutive models of the copper and the aluminum alloy

参数	CU-OFHC	AL6061-T6
剪切模量/GPa	47.7	27.6
屈服应力/MPa	120	290
最大屈服应力/MPa	640	680
硬化常数	36	125
硬化指数	0.45	0.1
dG/dp	1.35	1.8
dG/dt	-17.98	-17.0
dY/dt	0.003 396	0.018 908
熔化温度/K	1 790	1 220

注: p 为压力; G 为剪切模量; Y 为屈服强度。

表 2 铜、铝合金和水状态方程参数
Tab. 2 Parameters of equations of state of the copper, the aluminum alloy and water

参数	CU-OFHC	AL6061-T6	水
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	8.93	2.703	1
Gruneisen 系数	2.02	1.97	0
$C_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3 940	5 240	1 647
S_1	1.489	1.4	1.921
参考温度/K	300	300	
比热容 $/(J\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	383	885	

注: C_1 、 S_1 为材料初始压缩波速 (或称为冲击波速) 相关参数。

1.4 模型收敛性分析

为了得到合适的网格尺寸, 保证本研究所用数值计算模型的合理性, 本节对 3 种聚能侵彻体水中行进的过程进行数值计算, 经处理得到不同网格尺寸模型对应的侵彻体头部速度 v_{top} , 拟合得到侵彻体头部速度与网格尺寸的关系曲线, 如图 3 所示。

表 3 Comp B 炸药材料相关参数
Tab. 3 Parameters of explosive material Comp B

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$v_{\text{cl}}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_{\text{cl}}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	p_{cl}/GPa
1.717	524.23	7.678	4.2	1.1	0.34	7 980	8.5×10^6	29.5

注：A、B、 R_1 、 R_2 、 ω 为JWL状态方程常数； v_{cl} 为炸药爆速； E_{cl} 为炸药单位体积内能； p_{cl} 为炸药爆压。

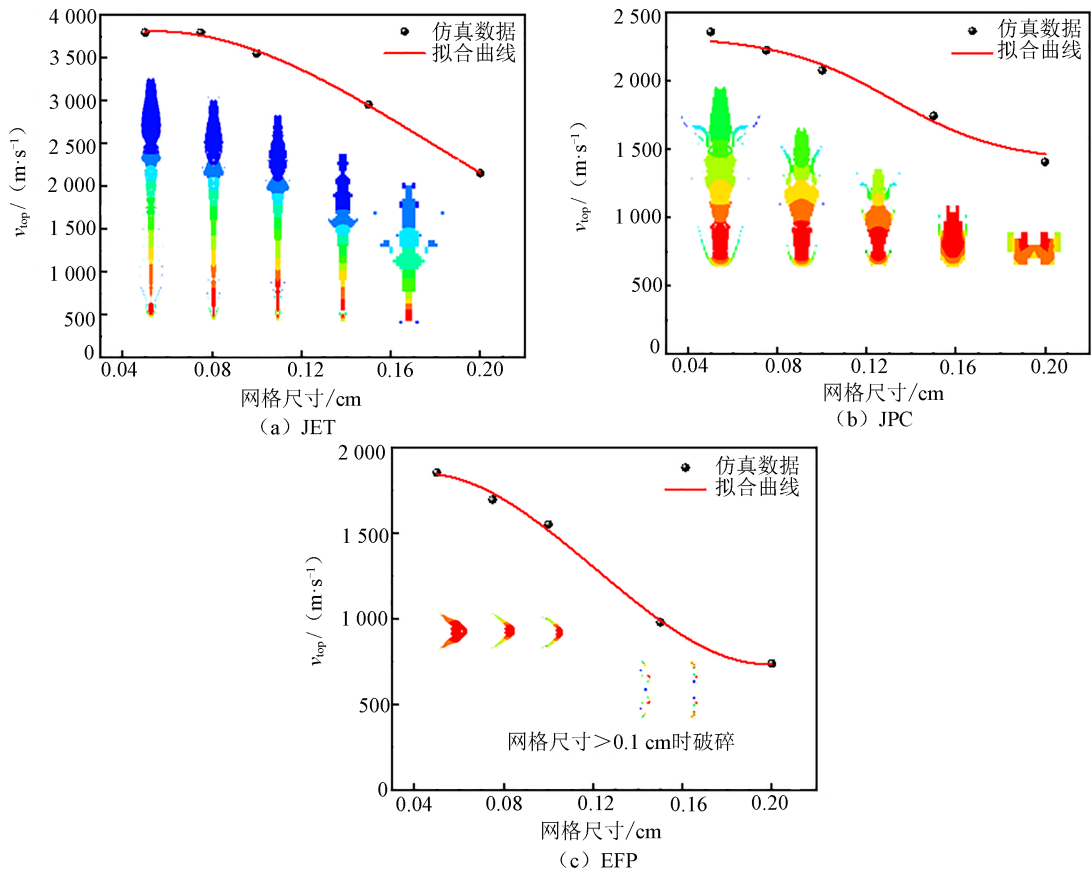


图 3 不同网格尺寸时3种侵彻体头部速度

Fig. 3 Head velocities of 3 penetrators for different mesh sizes

随着网格尺寸的不断减小，侵彻体形态趋于完整，拟合曲线在网格尺寸为0.05 cm×0.05 cm时收敛，因此，本文采用0.05 cm×0.05 cm的网格尺寸进行数值计算。

1.5 模型准确性验证

为了验证本文数值计算模型的准确性，根据本文所用建模方法和材料参数建立文献[16]中方案3的EFP侵彻含水介质间隔靶的计算模型，网格尺寸为0.05 cm×0.05 cm，其数值计算结果如图4所示。侵彻过程中EFP的形态变化和空腔效应与试验结果进行了对比，再将计算结果后处理得到侵彻体水中侵彻深度-时间关系曲线（ X_s 为侵彻体水中侵彻深度），与实验记录数据对比分析如

图5所示。分析得计算误差最大为13.8%，因此，本文所用数值计算模型准确有效。

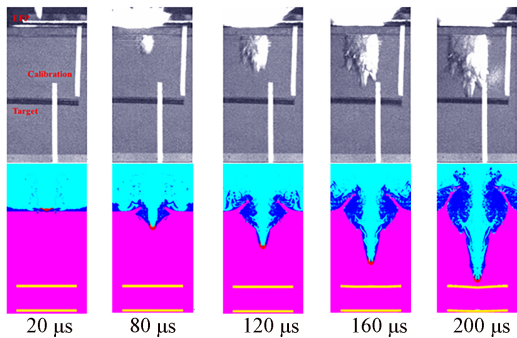


图 4 不同时刻EFP水中行进过程

Fig. 4 Traveling process of EFP in water at different moments

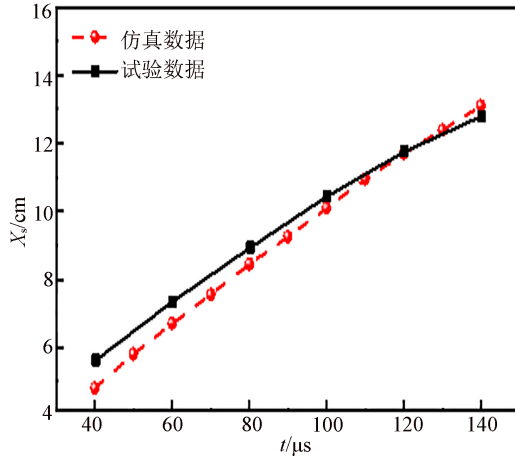


图5 EFP在水中的侵彻距离

Fig. 5 Penetration distances of EFP in water

2 水中行进特性对比分析

在4种空气炸高 $0.5D_k$ 、 $1D_k$ 、 $1.5D_k$ 、 $2D_k$ 条件下, 对3种聚能侵彻体水中成型情况、有效长度、速度、整体动能4个方面展开研究。

2.1 侵彻体水中成型情况

以 $D_z = 1D_k$ 为例, 对3种聚能侵彻体水中成型情况进行分析。3种聚能侵彻体水中成型过程的数值计算结果如图6~8所示。

由图6可以看出, JET在 $50\mu s$ 时基本成型, $90\mu s$ 时已开始断裂为多段, 直至 $260\mu s$, JET由于较大的速度梯度而保持持续拉伸状态, 各段侵彻体的间距持续增大。相比另外两种侵彻体, JET

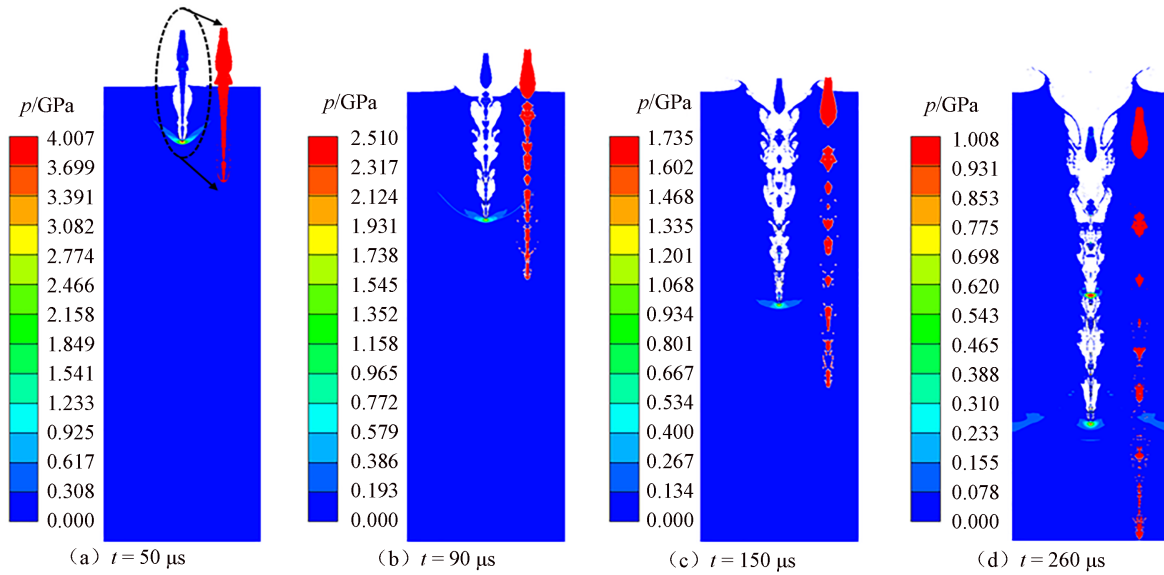


图6 JET侵彻体水中成型数值计算结果

Fig. 6 Numerical calculation results of formation of JET in water

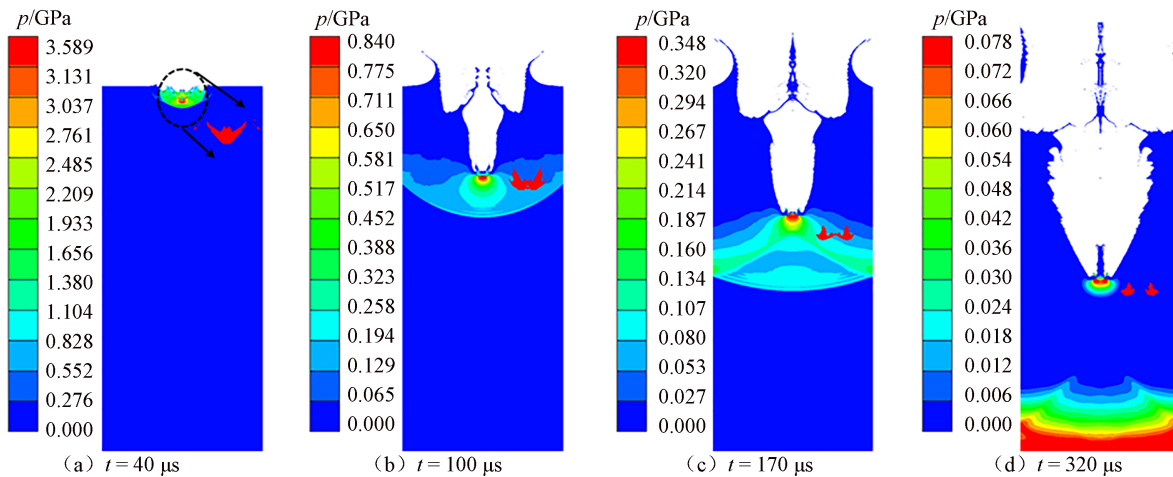


图7 EFP侵彻体水中成型数值计算结果

Fig. 7 Numerical calculation results of formation of EFP in water

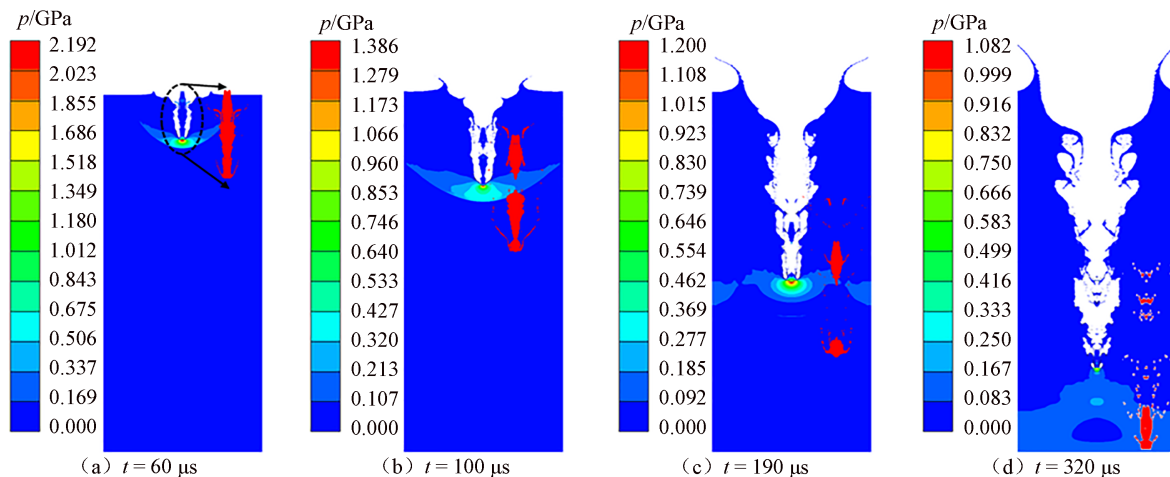


图 8 JPC 侵彻体水中成型数值计算结果

Fig. 8 Numerical calculation results of formation of JPC in water

形成的空腔径向尺寸最小且不连续，后续多段侵彻体的随进受到水介质干扰。

由图 7 可以看出：EFP 在 $40\ \mu\text{s}$ 时刚好全部进入水中，其形态为“燕形”； $100\ \mu\text{s}$ 时，EFP 的形态相比 $40\ \mu\text{s}$ 时未拉伸，其中间段压缩，“燕翅”段由于水介质阻力向中心轴线靠拢； $170\ \mu\text{s}$ 时，侵彻体中间段压缩至将要断裂，“燕翅”段已经与轴线平行且有一定程度压缩； $320\ \mu\text{s}$ 时，EFP 已断裂为对称的两段。整体分析 EFP，其径向尺寸及与水的接触面积最大，受水介质影响最大。虽然 EFP 形成的空腔最大，但其本身高度集中，空腔作用不明显，故水中侵深最小。

由图 8 可以看出：JPC 在 $60\ \mu\text{s}$ 时基本成型，表现为粗细均匀的杆状形态； $100\ \mu\text{s}$ 时 JPC 断裂为“裙状”尾部、杵体、杆体 3 段； $190\ \mu\text{s}$ 时杆体形态由细长变为墩粗，是由于受到水介质阻碍作用被不断侵蚀磨损、压缩导致； $320\ \mu\text{s}$ 时杵体与形态墩粗的杆体重合。JPC 在行进过程中杆体开辟理想的空腔，杵体行进于其中近乎无损，其形态未发生明显变化，利于后续水中行进或对水中目标侵彻。

2.2 侵彻体有效长度

聚能侵彻体有效长度为 L_s ，3 种侵彻体在 $0.5D_k \sim 2D_k$ （间隔为 $0.5D_k$ ）炸高条件下，有效长度与侵彻深度关系如图 9 所示。

可以看出，4 种炸高条件下侵彻体入水时的有效长度、入水后侵彻体有效长度的增长量及增长速率和有效长度达到峰值的时间都是 JET 最大、EFP 最小，进一步说明 JET 在水介质中的拉伸能力最强，EFP 受水阻影响最大，甚至 EFP 有效长

度的极差未超过 $1\ \text{cm}$ 。炸高为 $1.5D_k$ 、 $2.0D_k$ 两种条件下的 EFP 无有效长度增长阶段，是由于其入水后头部速度迅速衰减至小于尾部速度，处于压缩状态。炸高为 $0.5D_k$ 时，由于炸高过小，JPC 入水前拉伸效果不良，后续分析不予以参考；其他 3 种炸高条件下 JPC 整体长度都大于 EFP，且两者长度差值随着炸高增大也呈增大趋势， $D_z = 2D_k$ 时差值最大。JPC 与 JET 相比，随着炸高的增大，两者长度峰值及长度变化率不断接近，JET 长度随炸高增加变化不大，而 JPC 长度随炸高增加而增大，当 $D_z = 2D_k$ 时最大。

结合前文侵彻体水中成型分析可知：JET 虽长度最大，但其拉伸过度时断裂为多段会降低其侵彻能力；EFP 拉伸能力弱，且径向尺寸及与水的接触面积最大，侵彻能力受到很大影响；JPC 在适当炸高条件下可以规避两者的缺陷，获得更优的侵彻能力。

2.3 侵彻体速度

将侵彻体侵彻距离与时间关系进行一次微分，得到侵彻体在水中行进过程中的整体速度随时间变化关系，结果如图 10 和图 11 所示，其中 v_s 表示侵彻体整体速度。

可以看出 4 种炸高条件下 JET 整体速度最大、JPC 次之、EFP 最小。炸高为 $0.5D_k$ 时，由于 JET 和 JPC 入水前拉伸效果不良，其速度衰减关系不予以参考。以 $200\ \mu\text{s}$ 为基准，虽然 JET 整体速度大于 JPC，但是在 $1D_k$ 至 $2D_k$ 炸高条件下侵彻体整体速度衰减量及衰减率都是 JPC 最小、JET 最大。

进一步结合图 11 对比分析得，当炸高为 $2D_k$ 时，JPC 整体速度衰减最慢且于 $175\ \mu\text{s}$ 时对 JET

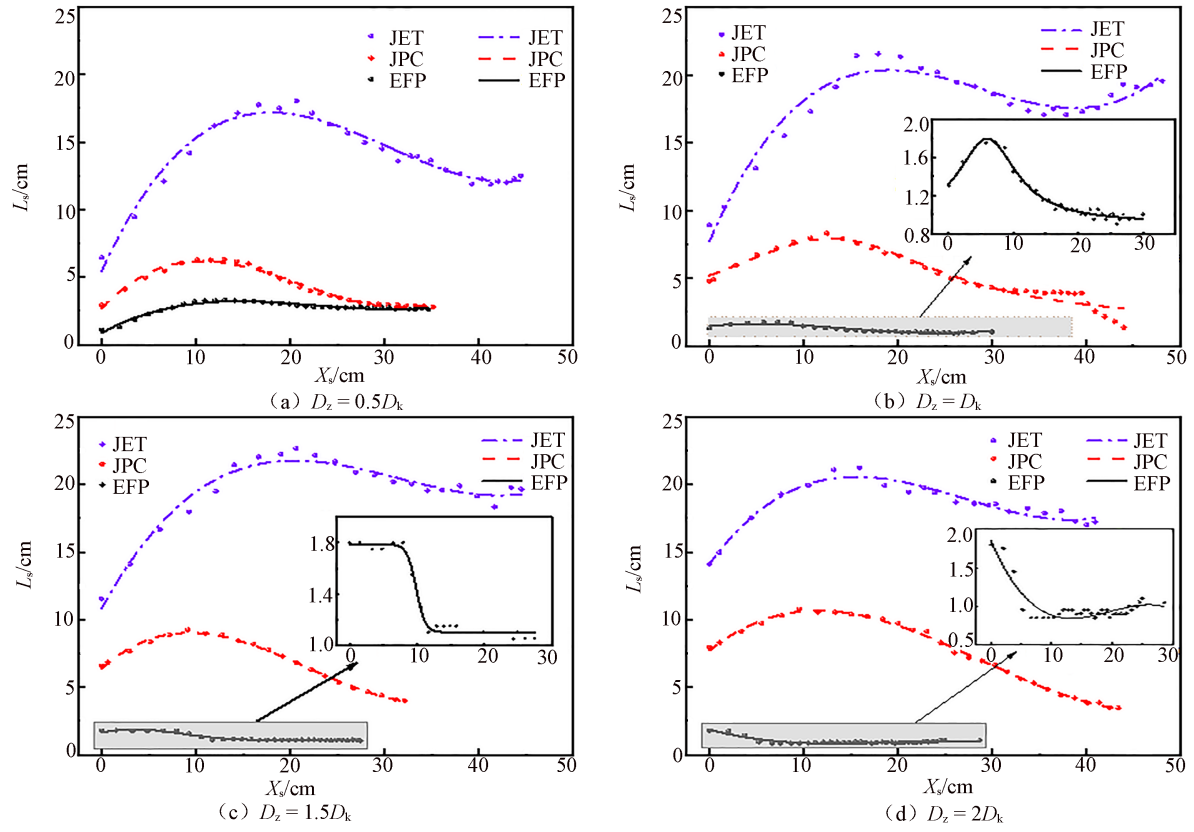


图 9 侵彻体有效长度与侵彻深度的关系

Fig. 9 Relationships between effective length of the penetrator and depth of penetration

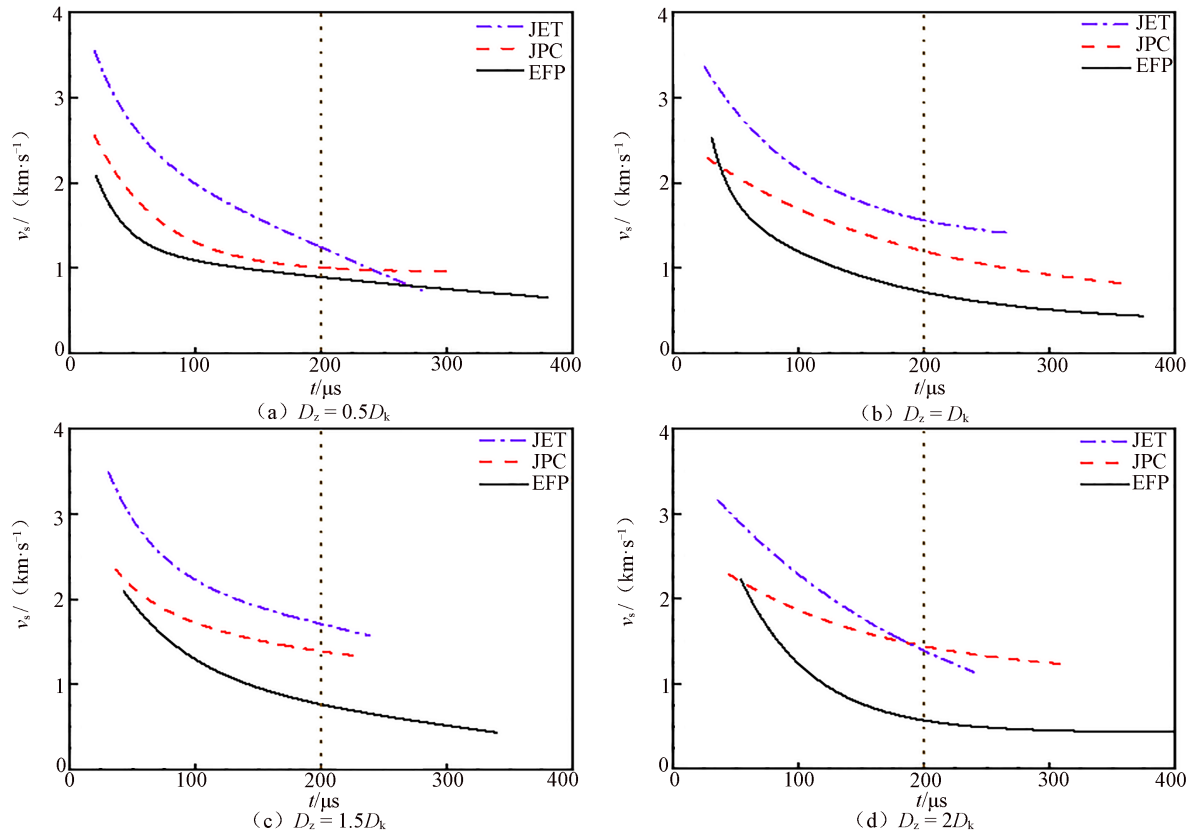


图 10 侵彻体整体速度变化

Fig. 10 Variations of the remote velocity of the penetrator

实现反超。因为杆式侵彻体入水初速降低, 速度衰减减缓有利于水中侵彻能力的提升^[21-22]。因此, 综合分析可得, JPC 水中行进特性优于 EFP 和 JET, 且在所设定的 4 种炸高条件中, $D_z = 2D_k$ 时其水中行进特性最优。

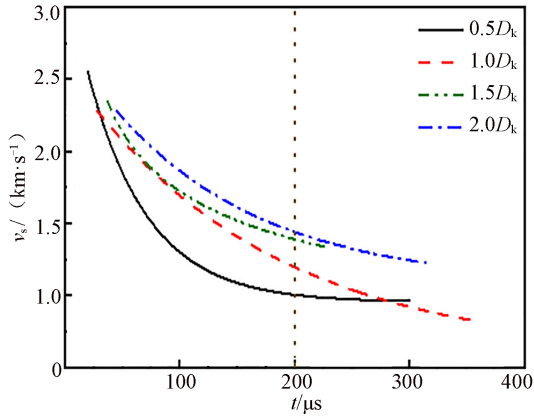


图 11 4 种炸高条件下 JPC 整体速度变化

Fig. 11 Variations of JPC remote velocity under four conditions of stand-off distance

侵彻体头部速度 v_{top} 也是评判侵彻体性能的重要依据, 图 12 为侵彻体头部速度变化与侵彻距离

关系的拟合曲线。

图 12 (b) 中, JPC 杆体速度于 27 cm 处开始低于杆体, 杆体追及杆体在 41 cm 处两者汇合, 所以, 41 cm 处 JPC 头部速度出现跳变, 拟合分析过程中忽略该区间内头部速度值。由拟合曲线分析易得, JPC 头部速度衰减率最低, 与侵彻体整体速度相对应。

炸高为 $0.5D_k$ 条件下, JPC 和 JET 入水前未充分拉伸, 速度相关规律不予以参考。炸高为 $1D_k$ 至 $2D_k$ 条件下, 3 种侵彻体于 20 cm 侵彻水深时的速度衰减量如表 4 所示。可以看出: JET 速度衰减量略大于 EFP, 远大于 JPC; 随着炸高的增大, JET 和 JPC 的速度衰减量逐渐减小, EFP 反之; 同时, JPC 在 20 cm 水深处的剩余头部速度随炸高的增加而增大。综合考量侵彻体头部速度衰减量、衰减率和剩余头部速度可知, JPC 水中行进特性最优。

2.4 侵彻体整体动能

侵彻体在水中行进时其质量和速度是动态变化的, 因此, 选取整体动能作为侵彻体水中行进特性的重要分析依据。由于药型罩构型的变化, 导致 3 种聚能战斗部药型罩质量和装药质量均不统

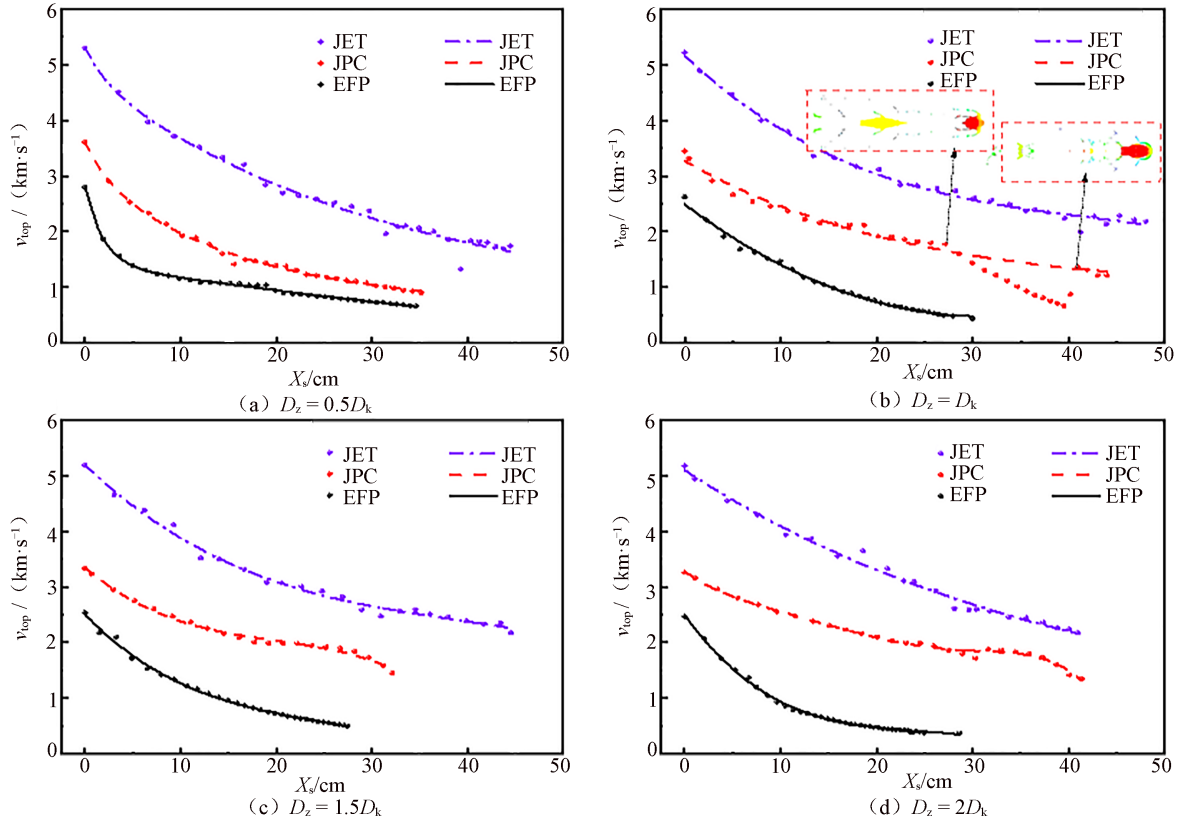


图 12 侵彻体头部速度与侵彻距离的关系

Fig. 12 Relationships between penetrator head velocity and penetration distance

一, 即药型罩所获初始能量不同。因此, 对整体动能数据进行归一化处理, 图 13 为侵彻体水中行进时整体动能随时间变化的曲线, 其中 E_{kin} 为侵彻体整体动能。由于 JET、JPC 在 $0.5D_k$ 炸高条件下未能充分拉伸, 动能关系不予以参考。

表 4 3 种侵彻体头部速度

Tab. 4 Head velocities of three kinds of penetrator

炸高	侵彻体	入水时头部速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	20 cm 处头部速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度差 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
D_k	JET	5 218	3 116	2 102
D_k	JPC	3 444	1 913	1 531
D_k	EFP	2 625	762	1 863
$1.5D_k$	JET	5 185	3 090	2 095
$1.5D_k$	JPC	3 331	1 988	1 343
$1.5D_k$	EFP	2 536	727	1 809
$2D_k$	JET	5 175	3 164	2 011
$2D_k$	JPC	3 261	2 098	1 163
$2D_k$	EFP	2 469	475	1 994

由图 13 可知, 3 种侵彻体入水后的动能均近似呈指数衰减, EFP 的整体动能衰减最快, 其衰减速率远大于 JPC 和 JET。其他炸高条件下 JET

和 JPC 整体动能衰减率大小关系为: 初入水时 JET 大于 JPC, 水中行进一段时间后 JPC 大于 JET。针对此关系结合侵彻体头部速度分析可知, 初入水时 JET 头部速度远大于 JPC, 行进一段时间后 JET 头部速度迅速降低, 虽依旧大于 JPC 但两者速度差值变小, 而且 JPC 头部在行进过程中变得较粗, 与水接触面积远大于 JET。又因为侵彻体在水中所受阻力基本由速度、与水接触面积两个因素共同决定且随两个决定因素正增长, 阻力越大聚能侵彻体动能衰减程度则越大。因此, 初入水时速度为主要决定因素, 水中行进一段时间后与水接触面积为主要决定因素, 则 JET 与 JPC 呈现出图 13 中的动能衰减率关系。由于药型罩所获初始能量差值极小, 因此, 图 13 中曲线可反映整体动能大小关系, 随炸高的增大 JPC 整体动能大于 JET 的时间区间逐渐增加且动能差值也逐渐增大, $D_z = 2D_k$ 时, 时间区间和动能差值增大至峰值。

因此, 炸高合适情况下, 较长时间区间内 JPC 整体动能大于 JET 和 EFP 且动能衰减最慢, 适于水中行进或目标侵彻。

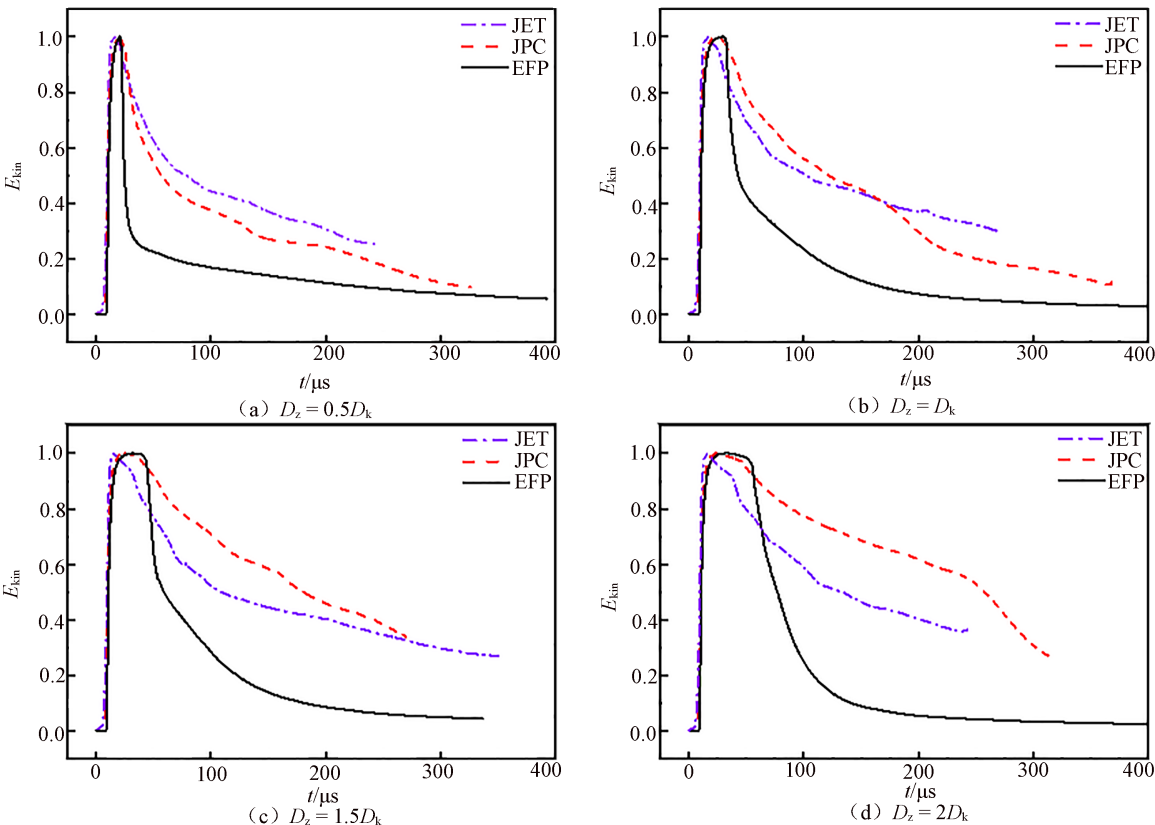


图 13 侵彻体水中行进整体动能变化

Fig. 13 Variations of remote kinetic energy of penetrator traveling in water

3 结论

通过 AUTODYN 软件对 3 种侵彻体在水中的行进过程进行数值计算, 对比研究其水中行进特性, 得到如下主要结论。

1) 有效长度增长量和增长速率由大到小依次为 JET、JPC、EFP。JET 过度拉伸断裂为多段, 所形成空腔不连续, 受水介质干扰严重; EFP 基本处于压缩状态, 空腔最大但作用效果不明显; JPC 拉伸程度适中且空腔效应良好。

2) 速度衰减量和衰减速率由大到小依次为 JET、EFP、JPC。JPC 于三者中速度虽然小于 JET, 但是其速度衰减量和衰减速率最小, 存速能力最强, 有利于水中侵彻能力的提升。本文所研究的 4 种炸高条件中, $D_z = 2D_k$ 时 JPC 速度衰减程度最小。

3) 整体动能近似呈指数衰减, EFP 的整体动能衰减远大于 JPC 和 JET, JPC 和 JET 的动能衰减情况接近, 但 JPC 整体动能大于 JET 整体动能的时长随炸高增大而增加, 且两者整体动能差值也随之增大, $D_z = 2D_k$ 时, 时间区域和动能差值增大至峰值。

通过侵彻体水中成型情况、有效长度、速度、整体动能 4 个方面的研究可知, JPC 水中行进特性最优。本研究对水下聚能战斗部设计选型具有参考价值, 但是实际工程应用中, 不同水下目标的毁伤指标要求不同。因此, 在 3 种聚能侵彻体水中行进特性研究的基础上, 展开 3 种聚能侵彻体对水中典型目标的毁伤机理和毁伤效果等方面的研究具有必要性。

参考文献

- [1] 崔平, 闫建林, 施冬梅, 等. 聚能装药破甲效能影响因素分析及研究进展[J]. 爆破, 2021, 38(2): 4-16.
CUI P, YAN J L, SHI D M, et al. Influencing factors on damage effectiveness of shaped charge and some recent progress[J]. Blasting, 2021, 38(2): 4-16.
- [2] 李兵, 房毅, 冯鹏飞. 聚能型战斗部水中兵器毁伤研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(2): 1-6.
LI B, FANG Y, FENG P F. Process of damage research on shaped-charge warhead of underwater weapon[J]. Journal of Ordnance Equipment Engi-

neering, 2016, 37(2): 1-6.

- [3] 周方毅, 詹发民, 黄雪峰, 等. 全尺寸圆锥-球缺组合药型罩聚能战斗部毁伤试验[J/OL]. 兵工学报, 2024[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240307.0854.002.html>.
ZHOU F Y, ZHAN F M, HUANG X F, et al. Test research on damage effect full-size conical spherical combined liner shaped charge warheads[J/OL]. Acta Armamentarii, 2024[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240307.0854.002.html>.
- [4] 周方毅, 詹发民, 黄雪峰, 等. 圆锥-球缺组合药型罩战斗部侵彻双层水间隔靶板[J/OL]. 兵工学报, 2024[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240307.1028.004.html>.
ZHOU F Y, ZHAN F M, HUANG X F, et al. Research on damage effect of Conical-spherical combined liner warhead to double layers target plate with water interlayer[J/OL]. Acta Armamentarii, 2024[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240307.0854.002.html>.
- [5] 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): 143-153.
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): 143-153.
- [6] 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.
- [7] 杨贵涛, 郭锐, 宋浦, 等. 形成串联爆炸成型弹丸的组合药型罩结构参数研究[J/OL]. 兵工学报, 2024[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240312.1920.004.html>.
YANG G T, GUO R, SONG P, et al. Study on the structural parameters of the combined liner forming tandem explosively formed projectile[J/OL]. Acta Armamentarii, 2024[2024-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20240312.1920.004.html>.
- [8] 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):

- 1-9.
- OU J, YANG Y Z, YU W J, et al. Effects of parameters of charge cover on underwater movement of shaped charge jet[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2023, 20(2): 1-9.
- [9] 姬祥, 明付仁, 张梁. 水下聚能金属射流载荷特性及毁伤效应研究[J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(1): 15-20.
- JI X, MING F R, ZHANG L. Research on load characteristics and damage effect of underwater shaped metal jet[J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(1): 15-20.
- [10] 崔魁文, 米双山, 高敏. 药型罩锥角对聚能杆式侵彻体影响的数值分析[J]. *兵工自动化*, 2018, 37(11): 67-71.
- CUI K W, MI S S, GAO M. Numerical analysis on effect of jetting projectile charge by liner cone angle[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2018, 37(11): 67-71.
- [11] 程素秋, 陈高杰, 赵红光. 聚能战斗部对双层靶板结构毁伤的数值模拟研究[J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(2): 53-57.
- CHENG S Q, CHEN G J, ZHAO H G. Numerical damage analysis of shaped charge warheads on double-deck target plates[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(2): 53-57.
- [12] ZHANG Z F, MING F R, ZHANG A. Numerical simulation of shaped charge JET penetrating a plate using smoothed particle hydrodynamics[C // OL]// IV International Conference on Particle-based Methods: Fundamentals and Applications, 2015: 171-182. [2024-08-30]https://www.researchgate.net/publication/282604391.
- [13] ZHANG Z F, LI H L, WANG L K, et al. Formation of shaped charge projectile in air and water[J]. *Materials*, 2022, 15(21): 7848.
- [14] HUSSAIN G, HAMEED A, HETHERINGTON J G, et al. The explosively formed projectile (EFP) as a standoff sea mine neutralization device[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2013, 31(2): 100-114.
- [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 X D, WANG T M. 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] 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.
- [17] 周迪锋, 唐娟, 赖建云. 水下聚能爆破技术研究[J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(2): 45-47.
- ZHOU D F, TANG J, LAI J Y. Research of shaped underwater blasting technology[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2013, 34(2): 45-47.
- [18] CHICK M, BUSSEL T, LINNANE A P. Water penetration by high velocity projectiles[C]// 11th Australasian Fluid Mechanics Conference, University of Tasmania, Hobart, Australia, 1992.
- [19] 顾建农, 张志宏, 范武杰. 旋转弹丸入水侵彻规律[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 341-349.
- GU J N, ZHANG Z H, FAN W J. Experimental study on the penetration law for a rotating pellet entering water[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 341-349.
- [20] 李明星. 聚能型鱼雷战斗部对潜艇典型结构的毁伤研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- LI M X. Study on the damage to typical structure of submarine of submarine by shaped torpedo warhead[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [21] 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 H F, JIANG Z R, YU W M, et al. Behavior of jetting penetrator charge operating underwater[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(3): 189-192.
- [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 H F, JIANG Z R, LI X R. Influences of liner parameters on the effects of shaped charge operating underwater[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(5): 405-409.