

# 不同药型罩材料在空气及水介质中射流的演化规律\*

曹杰<sup>1</sup>, 刘兴伟<sup>1</sup>, 王严<sup>1</sup>, 刘金旭<sup>1,2</sup>

(1.北京理工大学材料学院, 北京 100081;

2.北京理工大学冲击环境材料技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 聚能射流在水介质中的运动研究较少, 导致在水介质中其速度与形态演化规律及影响因素不清晰, 且射流水介质中运动学方程缺失。针对上述问题, 采用数值模拟与试验相结合的方法, 对比研究了铝、钛、锆、铁、铜五种药型罩材料在空气与水介质中的射流演化行为。研究发现, 在水介质中, 射流速度衰减剧烈, 4倍炸高内射流速度下降约80%, 且衰减速率与材料密度呈负相关; 基于试验及仿真结果, 结合流体力学理论, 构建了射流在水介质中的速度衰减数学模型, 误差为9.8%, 影响射流速度衰减过程的主要材料因素权重排序为熔点、强度、密度; 药型罩材料密度、强度和塑性是影响水介质中射流演化行为的主要材料因素, 其中高密度和高塑性有利于提高射流抗断裂能力, 延缓射流离散过程, 与空气介质相比, 水介质中射流离散程度增加41.4%以上; 水介质通过隔绝氧气与冷却效应显著抑制了活性材料的氧化释能, 使其射流特征与惰性材料相似。研究结果揭示了水介质中材料属性对射流减速、断裂及离散行为的影响, 为水下聚能战斗部的优化设计提供了理论依据。

**关键词:** 聚能射流; 水介质; 药型罩材料; 速度衰减; 形态演化; 数值模拟

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

## Comparative study on the evolution patterns of shaped charge jets with different materials in air and water

CAO Jie<sup>1</sup>, LIU Xingwei<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, LIU Jinxu<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China;

2. China National Key Laboratory of Science and Technology on Materials Under Shock and Impact, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

**Abstract:** Research on the underwater motion of shaped charge jets (SCJs) remains limited, leaving the evolution patterns and influencing factors of jet velocity and morphology in this medium insufficiently understood. Furthermore, established kinematic equations describing jet motion in water remain scarce. To address these gaps, a combined numerical and experimental approach was employed to investigate the evolution behavior of jets formed from five distinct metallic liner materials—aluminum, titanium, zirconium, iron, and copper—in both air and water. A three-dimensional Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) model of jet flight was established based on ANSYS finite element software to investigate the velocity and stress variations of jets in air and water. Concurrently, an experimental platform for jet flight was constructed, and the dynamic evolution processes in both media were recorded using high-speed imaging. The results demonstrate that jet velocity undergoes significant and rapid attenuation in water,

\*收稿日期: 2026-03-17; 修回日期: 2026-05-19;

基金项目: 冲击环境材料技术重点实验室基金 (WDZC2025-4);

第一作者: 曹杰 (2001—), 男, 硕士研究生. E-mail: wy2055917886@163.com;

通信作者: 刘金旭 (1982—), 男, 博士, 教授. E-mail: liujinxu@bit.edu.cn.

decreasing by approximately 80% within 4 times the standoff distance, and the attenuation rate is negatively correlated with material density. Moreover, based on experimental and simulation results, combined with hydromechanics theory, a mathematical model was developed to predict jet velocity attenuation in water, achieving a Mean Absolute Relative Error (MARE) of 9.8%. Based on this model, the primary material factors influencing the jet velocity attenuation process are identified, with the weighted influence ranked as melting point, strength, and density. Additionally, the density, strength, and plasticity of the liner are the key factors governing jet evolution behavior in water. Specifically, high density and high plasticity effectively enhance the jet's fracture resistance and significantly delay its dispersion process. Notably, the resistance force acting on the jet tip in water can reach up to 2000 MPa, which intensifies jet fracture, leading to an increase of over 41.4% in the degree of jet dispersion compared to that in air. Furthermore, water significantly inhibits the oxidation energy release of the reactive materials via oxygen isolation and cooling effects, rendering their energy release characteristics similar to those of inert materials. These findings elucidate the influence of material properties on jet deceleration, fracture, and dispersion in water, providing a theoretical basis for the optimized design of underwater shaped charge warheads.

**Keywords:** shaped charge jets (SCJs); underwater environment; liner material; velocity attenuation; morphological evolution; numerical simulation

## 1 引言

金属药型罩 (Shape Charge Liner, SCL) 在炸药爆轰驱动下发生动态压垮变形, 并以超高应变率沿轴向汇聚形成高速金属射流, 其头部速度可达 6000-9000 m/s, 在有利炸高条件下, 能轻易穿透装甲、混凝土工事、以及各类岩层<sup>[1-3]</sup>, 已广泛应用于武器装备、油气井射孔弹、工业切割等领域<sup>[4-7]</sup>。

聚能射流在空气中的成形与侵彻研究已较为成熟。Birkhoff<sup>[8]</sup>等将药型罩视为理想不可压缩流体, 基于稳态模型计算射流的速度与质量, 并提出了密度比侵彻理论。Pugh<sup>[9]</sup>等对稳态理论进行了改进, 提出了 PER (Pugh, Eichelberger, and Rostoker) 理论。该理论通过引入药型罩动态压垮速度梯度模型, 更准确地描述了射流成形过程中的材料流动行为与速度分布情况。基于 PER 理论, 后续研究对其中的压垮速度、压垮角和变形角的计算公式进行了修正, 并考虑了射流强度和速度梯度对侵彻深度的影响, 从而形成了较为完善的射流成形与侵彻理论体系。该体系已在战斗部应用研究中得到了广泛验证<sup>[3,10,11]</sup>。依托该理论体系, 相关研究深入揭示了空气介质中装药结构与药型罩材料属性对战斗部毁伤效能的影响规律。在装药结构方面, Elshenawy<sup>[12]</sup>等通过对比四种不同形状的药型罩, 明确了双锥形与半球形药型罩分别在穿深与扩孔性能方面的优势, 证实了形状效应对射流性能的调控作用; 在材料属性方面, Shi<sup>[13]</sup>等探究了药型罩材料性能对射流成形过程的影响, 结果表明, 材料的熔点与热软化效应对射流的速度、长度及直径影响显著, 而屈服强度与应变率效应的影响则相对有限。这些研究成果系统地阐明了在空气介质中, 装药结构、材料属性与射流成形与侵彻性能之间的内在关联, 为战斗部装药结构的优化与新型药型罩材料的研发提供了理论支撑。

然而, 当环境介质由空气变为水时, 水介质的高密度、高粘度会引起显著的介质阻力, 导致射流演化过程与空气中截然不同, 进而影响射流毁伤效能。在射流成形阶段, 由于水介质的波阻抗远高于空气, 炸药在水中爆炸产生的冲击波压力不易耗散, 更多爆轰能量可有效传递至药型罩, 从而显著提升射流速度<sup>[14]</sup>; 而在射流飞行阶段, 水介质的高密度导致射流飞行时承受的流体阻力远大于空气, 速度损失严重<sup>[15]</sup>。Jing<sup>[16]</sup>与 Kazuo<sup>[15]</sup>等人的研究表明, 与空气中射流速度呈缓慢、线性的下降趋势不同, 射流在穿过炸高空腔进入水介质的瞬间达到速度峰值, 随后受强阻力抑制, 其速度呈现指数级衰减趋势。同时, 水介质的阻力与冷却作用还会干扰射流的正常拉伸, 并引发显著的侵蚀效应, 导致射流长度表现出先增后减的阶段性变化, 严重削弱其对材料的穿透效果<sup>[17,18]</sup>。为缓解水介质对射流运动特性的干扰, 研究人员尝试通过优化药型罩材料成分来提高射流的稳定性。根据动量守恒定理, 高密

## Explosion and Shock Waves

度材料能更有效地抵抗介质阻力引起的速度衰减作用，从而维持较高的飞行速度<sup>[18]</sup>。相关研究已证实了这一机制：Zhang<sup>[19]</sup>和 Wang<sup>[20]</sup>等通过对比不同密度的药型罩材料发现，高密度 W-Cu 射流或 Cu 射流在水介质中的速度衰减显著低于低密度材料射流，表现出更高的剩余速度与更强的侵彻能力。除材料属性外，战斗部装药结构和起爆方式也会影响射流在水介质中的成形质量与侵彻性能。Gu<sup>[21]</sup>等通过数值模拟与试验研究发现，射流在水介质中的侵彻深度随炸高增加呈先增后减的趋势，而随药型罩锥角和厚度的增加呈减小趋势；此外，相比于常规单点起爆，环形起爆方式通过优化爆轰波波形，显著改善射流成形质量并提高侵彻深度。

尽管水介质对聚能射流的影响已引起学界关注，但该领域现有研究仍存在以下薄弱环节：首先，现有理论框架大多基于空气环境建立，未能充分考虑水介质的强阻力效应，导致对水介质中射流演化过程的认知尚不完善，尤其是水介质中射流速度衰减和形态演变的影响机制仍待深入探究；其次，现有研究多倾向于定性描述，缺乏能够定量表征材料属性对射流速度衰减影响的理论模型，难以精确评估各材料参量对射流速度衰减的影响权重。在此背景下，原本基于空气介质确立的材料优选准则在水介质中面临判据偏移或失效的风险，其在适用边界与有效性仍有待进一步验证。上述关键问题的存在，使水介质中的射流行为难以预测，限制了水下聚能战斗部的优化设计。

为解决上述问题，本文的主要工作如下：采用数值模拟与靶场试验相结合的方法，选取铝（Al）、钛（Ti）、锆（Zr）、铁（Fe）、铜（Cu）五种典型纯金属材料作为研究对象，探究不同药型罩材料条件下射流在水介质中的运动特性和形态演变，并设置空气对照组进行对比，以明确水介质对射流行为的干扰，从而揭示材料性能与环境介质对射流演化规律的影响机制。同时，基于试验及仿真结果，结合流体力学理论，构建射流在水介质中的速度衰减模型，并通过非线性优化算法拟合衰减系数修正项，从而定量揭示材料属性对水下射流速度衰减的影响规律。

## 2 试验研究方法

### 2.1 聚能战斗部制备

聚能战斗部如图 1 所示，主要由金属药型罩、成形装药、起爆雷管三部分组成。药型罩采用 Al、Ti、Zr、Fe、Cu 五种纯金属材料（如图 2 所示），均通过对相应金属圆柱体精密机加工制成，其中药型罩锥角为 60°，口径为 30 mm。战斗部装药采用 8701 炸药，压制成型后高度为 45 mm，平均密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>，采用单点中心起爆方式。在保持药型罩主体结构参数（如锥角、口径）与装药结构不变的前提下，为满足相同炸药与药型罩质量比原则，本研究通过调整药型罩壁厚来补偿材料间的密度差异，使药型罩质量尽可能趋于一致，其中，不同材料药型罩对应的壁厚如表 1 所示。此设计可使不同材料药型罩在相同装药下所获得的爆轰能量相近，从而凸显材料自身属性对射流的影响。

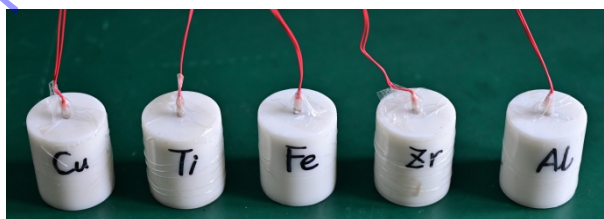


图 1 不同材料的聚能战斗部

Fig. 1 Shaped charges with different liner materials

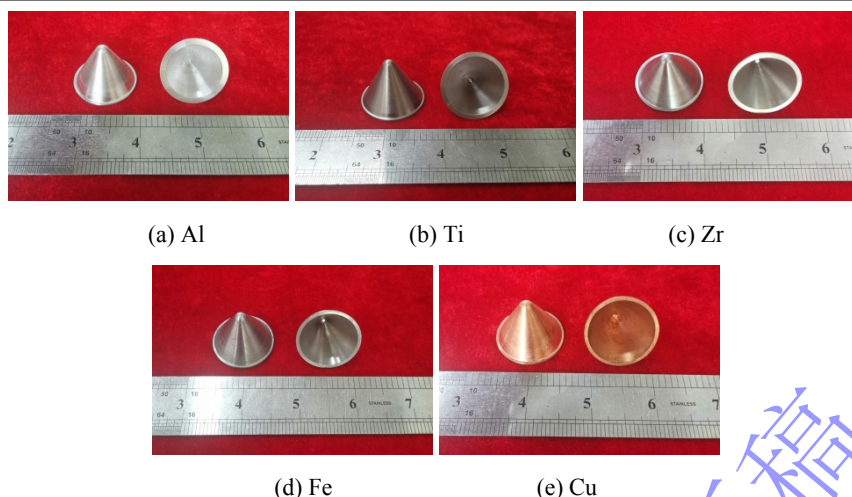


图 2 不同材料的药型罩

Fig. 2 Liners made of different materials

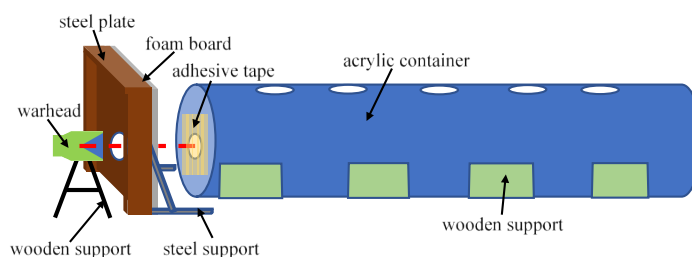
表 1 不同材料药型罩壁厚

Table 1 Thickness of liners with different materials

材料	壁厚/mm
Al	2.5
Ti	2.0
Zr	1.4
Fe	1.2
Cu	1.0

## 2.2 试验装置与方案

不同介质中的射流飞行试验装置及现场布置分别如图 3、图 4 所示。两组试验均采用相同规格的战斗部。在战斗部前方约 60 mm 处布置带中心通孔的 10 mm 厚装甲钢板，用于阻挡炸药火光并阻隔部分爆轰波，并确保战斗部轴线与钢板通孔中心共线，使射流顺利穿过。随后，根据介质差异进行分类布置。水下试验中，水域环境由圆柱形亚克力容器构建，容器长 3 m，截面直径 30 cm。容器底部开设有入射孔供射流进入，侧壁开孔用于注水与压力调节。入射孔采用透明胶带密封，在防止水体泄露的同时大幅减小了密封措施对射流运动的干扰。容器整体通过木制支架固定，以限制其在试验过程中的横向移动。为防止爆轰波及产物在射流入水前破坏亚克力容器，在钢板与容器之间增设聚苯乙烯泡沫板，用于吸收冲击载荷并耗散残余能量。此外，战斗部至入水点的距离设定为 175 mm，以满足预设的入水前炸高需求。空气试验（对照组）中则在保持前述战斗部、开孔钢板等前端配置完全一致的前提下，简化了中后段结构，仅在开孔钢板后方 2 m 处设置 40 cm 厚的聚氨酯靶板。



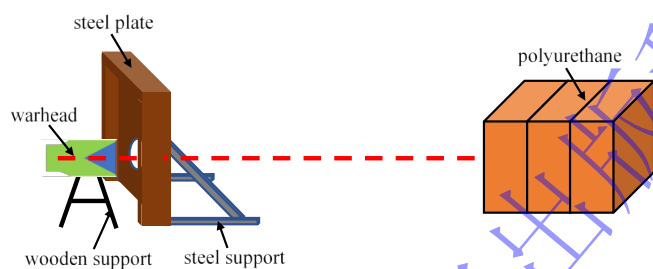
(a) Schematic



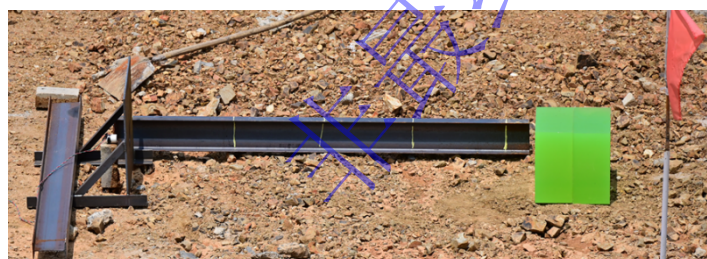
(b) Actual layout

图3 射流水中飞行试验装置

Fig. 3 Experimental setup for jet flight tests in water



(a) Schematic



(b) Actual layout

图4 射流空气中飞行试验装置

Fig. 4 Experimental setup for jet flight tests in air

### 3 数值模拟研究方法

#### 3.1 数值计算方法

药型罩在炸药爆轰驱动下形成的射流头部速度可达数千米每秒，其飞行阶段的可观测时间极短，仅为数百微秒。为精确捕捉射流在水介质中的完整运动过程及其与水介质的相互作用，数值仿真技术已成为揭示上述复杂物理机制的重要手段。在射流成形过程中，药型罩会发生极高应变率的变形，传统数值方法面临显著挑战：基于物质跟踪的拉格朗日算法虽能够精确反映材料变形行为，但在处理剧烈变形时极易出现因网格畸变导致数值不稳定的情况<sup>[22]</sup>；而采用空间固定网格的欧拉算法虽可有效处理极端变形问题<sup>[23]</sup>，但对物质界面的捕捉依赖高密度网格，显著增加计算成本<sup>[24]</sup>。任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 算法融合了两者的优势<sup>[25]</sup>，通过引入动态参考坐标系，既能精确描述材料变形，又能实现网格自适应优化，解决了拉格朗日算法网格畸变过大和传统欧拉算法计算时间过长的弊端<sup>[26,27]</sup>。研究表明，ALE 算法在处理聚能射流的极端变形以及跨介质传播问题上具有显著优势。通过该算法模拟得到的射流侵入深度与扩孔直径误差可控制在 5% 以内，且获得的射流形态和速度特征与试验结果高度吻合<sup>[28,29]</sup>。因此，本文基于 ALE 方法构建三维有限元模型，可有效模

拟射流在水介质中的运动过程。

### 3.2 数值仿真模型

数值仿真模型如图 5 所示，该模型由金属药型罩、高能炸药、空气域与水域四部分构成，关键几何参数如下：药型罩锥角 ( $2\alpha$ ) 为  $60^\circ$ ，装药直径 ( $D$ ) 为 30 mm，装药高度 ( $h$ ) 为 45 mm，炸高 ( $H$ ) 为 175 mm，水域长度 ( $L$ ) 为 1000 mm。不同材料药型罩对应的壁厚如表 1 所示。此外，为明确水介质对射流演化过程的影响，建立了空气介质对照模型。除将水域部分替换为空气外，该模型的几何尺寸及材料参数均与水介质模型保持一致。

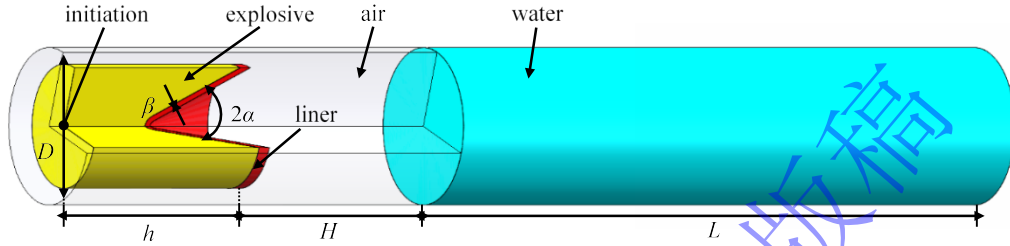


图 5 射流水中飞行数值模型

Fig. 5 Numerical simulation model of jet underwater flight

本研究利用 ANSYS 有限元分析软件，建立了三维 ALE 数值仿真模型，模型网格尺寸为 0.6 mm。为提高计算效率，本研究基于聚能射流问题的对称性，建立了 1/4 模型，并利用 \*BOUNDARY\_SPC\_SET 关键字设置对称约束。在空气和水的外部边界处，采用 \*BOUNDARY\_NON\_REFLECTING 关键字施加无反射边界条件，以消除边界处的激波反射对射流运动过程的干扰。数值计算基于 LS-DYNA 显式动力学求解器，通过设置合理的时间步长缩放因子在计算过程中动态调整求解步长，确保计算稳定性的同时兼顾求解效率。

### 3.3 材料模型及参数设置

所用药型罩材料均采用 Johnson-Cook 模型和 Grüneisen 状态方程来描述其动态响应过程。其中，Johnson-Cook 模型能够描述材料在高应变、高应变率和高温条件下的力学行为<sup>[30]</sup>。该模型定义的应力  $\sigma$  表示为

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中， $A$ 、 $B$ 、 $n$ 、 $C$  和  $m$  是模型的本构参数， $A$  是初始屈服强度， $B$  和  $n$  是应变硬化系数和应变硬化指数， $C$  是应变率硬化系数， $m$  是温度软化指数。 $\varepsilon_p$  是等效塑性应变， $\dot{\varepsilon}^*$  是无量纲应变率， $T^*$  是无量纲温度<sup>[31,32]</sup>。

而 Grüneisen 状态方程则能够很好地描述材料在高应变率下的物理状态<sup>[18]</sup>，该模型定义的压力  $P$  表示为

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \varepsilon \left(1 - \frac{\gamma_0}{2}\right)}{(1 - S_1 \varepsilon)^2} + \gamma_0 U \quad (2)$$

式中， $\rho_0$  和  $C_0$  是材料在  $\varepsilon = 0$  时的密度和声速， $S_1$  是激波 Hugoniot 在声速-粒子速度平面内的斜率， $\gamma_0$  是材料在常压状态下的 Grüneisen 系数， $U$  是材料内能<sup>[33]</sup>。药型罩材料参数如表 2 所示<sup>[34-40]</sup>。

炸药装药采用 8701 炸药，选用 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程，炸药参数如表 3 所示<sup>[41]</sup>。JWL 状态方程能够准确地描述炸药爆炸过程中的压力、体积和能量特征，所定义的压力  $P$  表示为

$$P = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \#(3)$$

式中,  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  是表征炸药爆炸性能的常数,  $V$  是相对体积,  $E$  是比内能<sup>[29]</sup>。

水域采用 NULL 模型和 Grüneisen 状态方程进行描述, 空气域采用 NULL 材料模型和线性多项式状态方程进行描述<sup>[42]</sup>, 其中线性多项式中的定义的压力  $P$  表示为

$$P = C_1 + C_2 \mu + C_3 \mu^2 + C_4 \mu^3 + (C_5 + C_6 \mu + C_7 \mu^2) E_0 \#(4)$$

式中,  $C_1 \sim C_7$  是多项式方程的系数,  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ , 其中  $\rho/\rho_0$  是当前密度与初始密度的比值,  $E_0$  是内能<sup>[43]</sup>, 水和空气的材料参数如表 4 所示<sup>[14,18,44,45]</sup>。

表 2 药型罩材料参数

Table 2 Material parameters of liners

材料	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$S_1$	$\gamma_0$	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$	$T_m/\text{K}$
Al	2.70	5240	1.49	1.97	67	109	0.23	0.029	0.50	993
Ti	4.50	5220	0.77	1.09	277	895	0.57	0.060	0.60	1923
Zr	6.53	3757	1.02	1.09	283	338	0.48	0.027	1.00	2125
Fe	7.86	4600	1.49	2.02	440	510	0.26	0.014	1.03	1808
Cu	8.96	3940	1.49	2.02	85	308	0.54	0.025	1.09	1356

表 3 8701 炸药参数

Table 3 Material parameters of 8701

炸药	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$P_{cJ}/\text{GPa}$	$E/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	$\omega$
8701	1.7	8315	854.5	20.5	4.6	1.35	29.5	$8.5 \times 10^6$	0.25

表 4 水和空气材料参数

Table 4 Material parameters of water and air

介质	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$S_1$	$S_2$	$\gamma$	$C_5$	$C_6$	$E_0/\text{Pa}$
空气	0.00129	-	-	-	-	0.4	0.4	$2.5 \times 10^5$
水	1.0	1480	1.92	-0.096	0.35	-	-	$2.9 \times 10^5$

## 4 结果与分析

### 4.1 空气介质中的射流特性

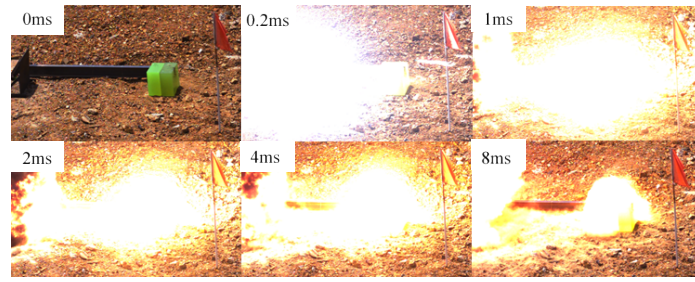
#### 4.1.1 射流运动特性分析

利用所搭建的试验平台, 开展了空气介质中射流运动过程的试验研究。图 6 所示为射流空气中飞行试验的高速摄像图像, 将火光出现前的一帧 (即炸药起爆瞬间) 定义为  $t = 0$  时刻, 展示了不同药型罩材料形成的射流在空气中的运动过程。炸药起爆后, 药型罩在爆轰压力加载下发生压垮变形, 形成聚能射流。剧烈的塑性变形引起绝热温升, 导致射流温度急剧升高, 进而引发其与空气中的氧气发生剧烈反应, 在射流周围产生持续、明亮的火光<sup>[46,47]</sup>。由于射流速度极高, 有效数据窗口期极短, 待强光减弱时, 射流已撞击靶板, 因此无法直接通过高速摄影捕捉射流运动轨迹。

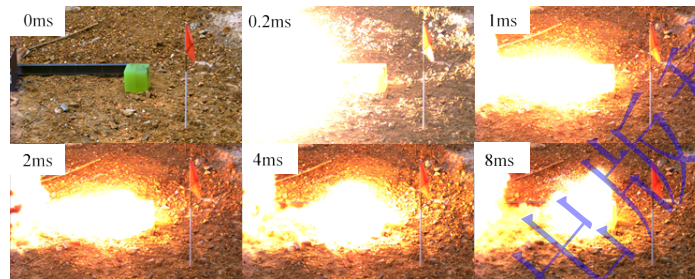
为提取射流位置, 本研究采用一种间接几何方法。假定射流头部被近似等厚的发光层包裹, 强光区域外轮廓可视为射流真实轮廓的平行外扩 (如图 7 所示), 即射流头部至强光前端外轮廓的距离近似相等<sup>[48-51]</sup>。基于该假设, 利用图像处理软件分割并提取强光区域, 随后在射流轴线附近识别满足上述等距条件的特征点 A, 将其视为射流头部的实际位置, 进而获取射流运动轨迹, 并根据轨迹计算射流侵彻速度。为深入分析射流演化行为, 本研究同步开展了相应的数值模拟。图 8 展示了射流在空气

Explosion and Shock Waves

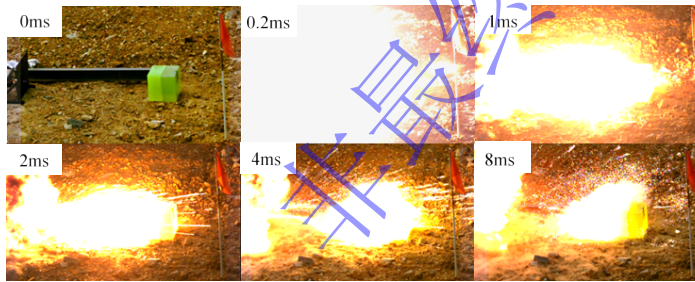
中运动的数值模拟结果。基于模拟结果，提取了与试验对应时刻的射流头部位置和射流侵彻速度。



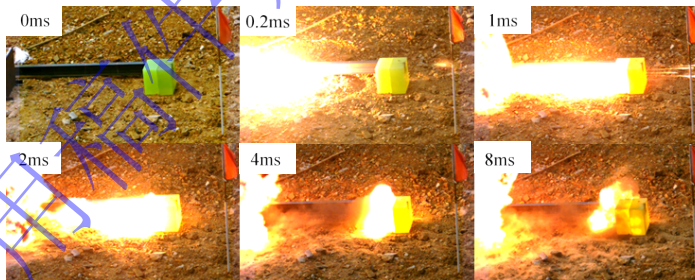
(a) Al



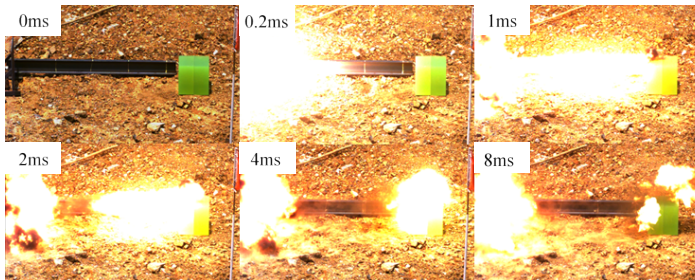
(b) Ti



(c) Zr



(d) Fe



(e) Cu

图6 不同材料的射流空气中飞行试验高速摄像图像

Fig. 6 High-speed camera images of jets with different liner materials in air

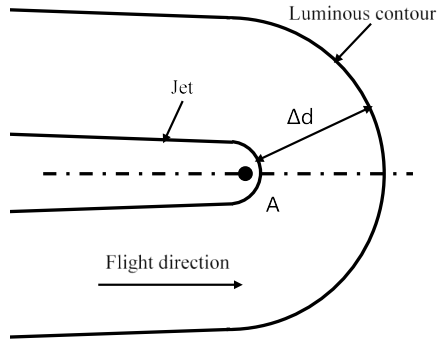


图 7 射流与强光区域关系示意图

Fig. 7 Schematic illustration of the relationship between the jet and the observed luminous region

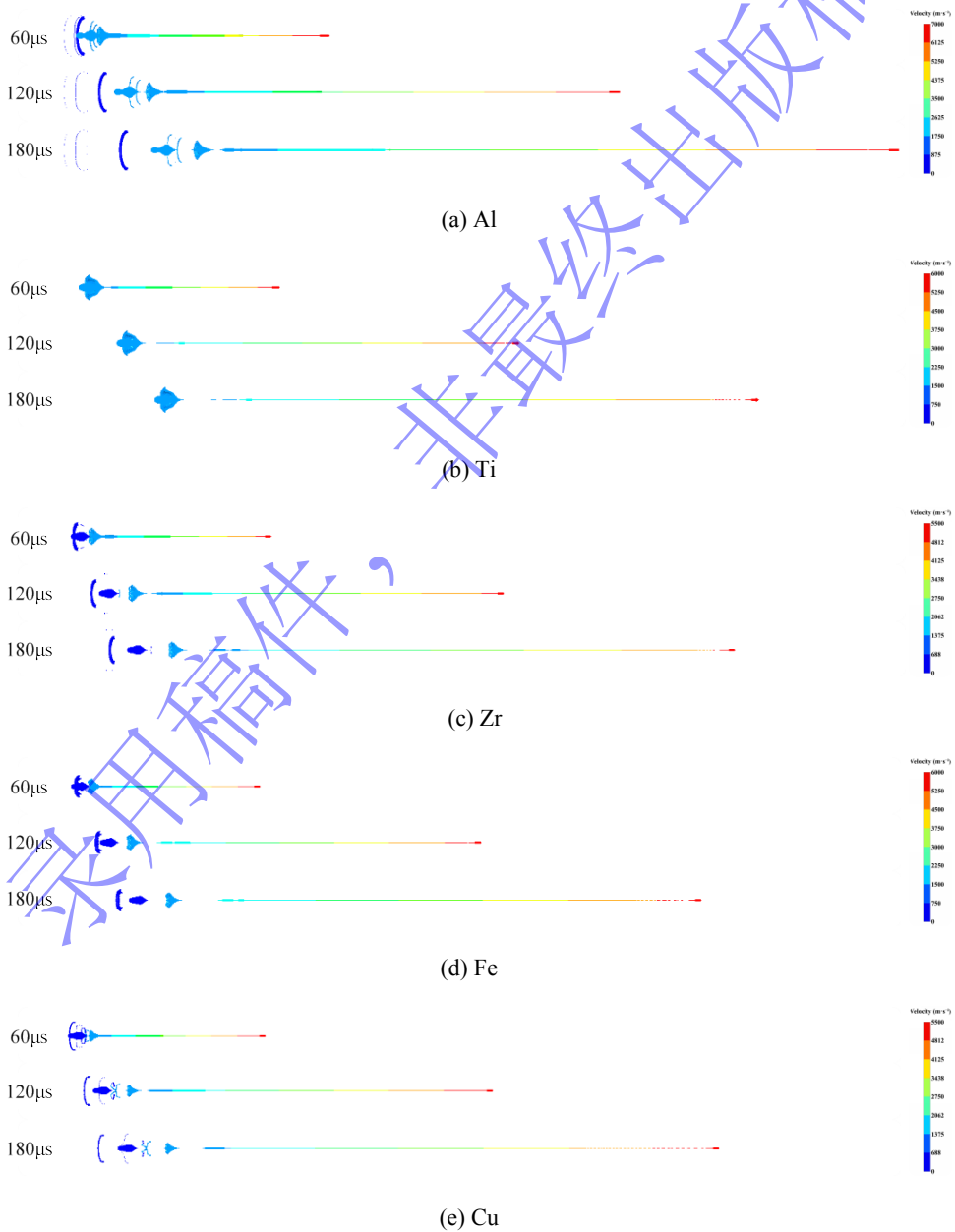


图 8 不同材料的射流在空气中的数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of jets with different liner materials in air

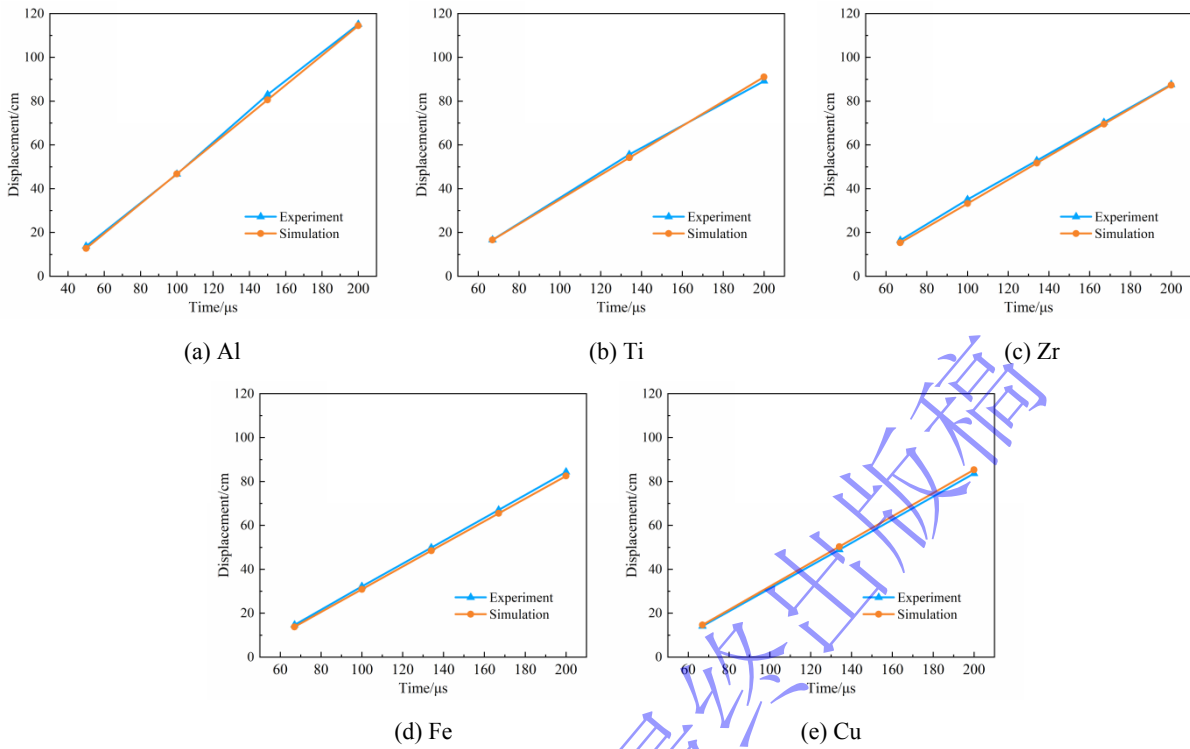


图 9 射流在空气中的位移-时间曲线

Fig. 9 Displacement curves of jets with different liner materials in air

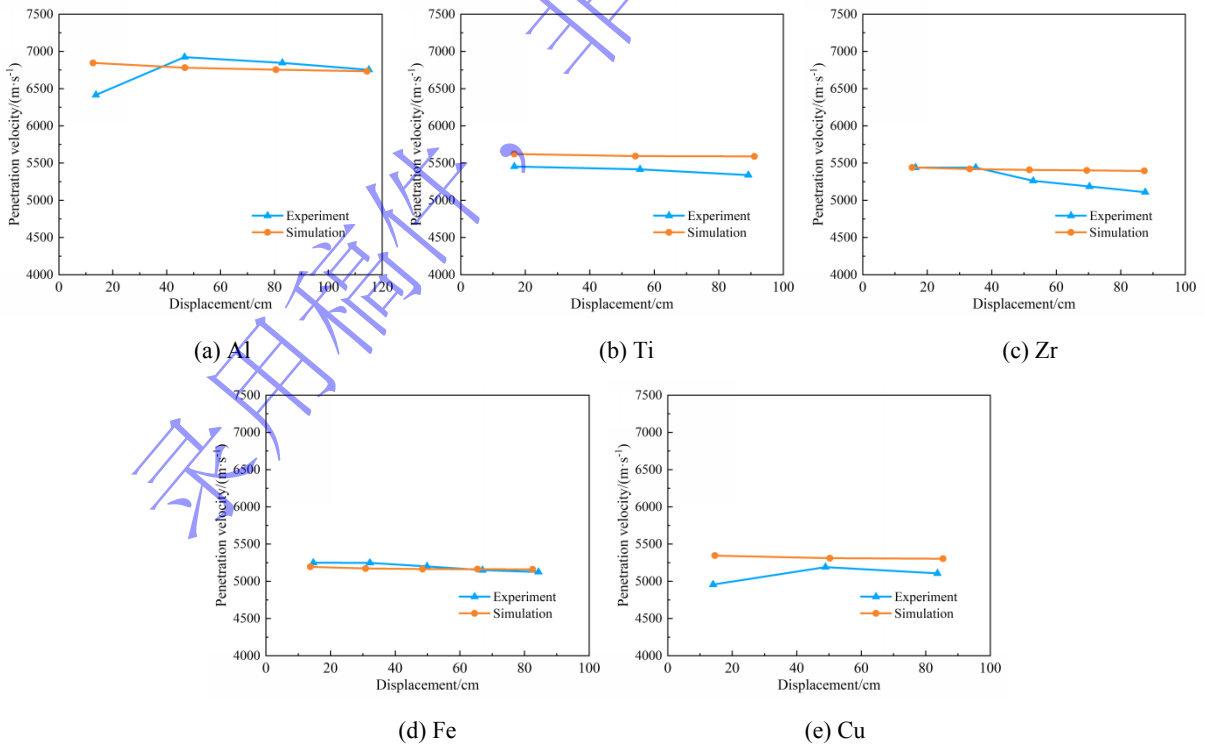


图 10 射流在空气中的侵彻速度-位移曲线

Fig. 10 Penetration velocity curves of jets with different liner materials in air

针对获取的运动数据，本研究将距药型罩底部中心 175 mm 处的平面（对应水介质模型中的空气

Explosion and Shock Waves

-水介质界面) 定义为位移零点 ( $x = 0$ ), 以此建立统一的对比基准面, 确保两种介质下射流运动状态具有一致的参考起点。由此得到了空气中的射流位移-时间 ( $x-t$ ) 曲线与侵彻速度-位移 ( $v-x$ ) 曲线, 分别如图 9 与图 10 所示。结果表明, 射流位移随时间变化基本呈线性增长。对比不同材料的射流在  $t = 200 \mu\text{s}$  时的位移可见, 随着材料密度的增加, 射流位移逐渐降低, 依次为 114.4、91.0、87.3、82.5 和 85.3 cm。其中, 从 Al 到 Cu, 射流位移降低 25.4%。结合图 10 进一步分析发现, 射流侵彻速度整体变化较小, 且高密度射流平均侵彻速度较低, 其中铝射流的速度约为铜射流的 1.28 倍。上述各图中所示模拟结果与试验数据整体吻合良好, 验证了所用数值模型的可靠性。

为深入分析射流在减速过程中的运动特性, 有必要引入“飞行速度”以描述射流的实时运动状态。需要明确的是, 射流的“飞行速度”与“侵彻速度”在物理定义上存在本质差异。如图 11 所示, 飞行速度主要表征射流头部的瞬时速度, 而侵彻速度则对应射流排开靶板物质或介质的推进速率。根据流体力学中的准定常侵彻理论, 二者之间的定量关系遵循伯努利方程:

$$v_p = \frac{v_f}{1 + \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j}}} \quad \#(5)$$

式中,  $v_p$  为侵彻速度,  $v_f$  为飞行速度,  $\rho_m$  和  $\rho_j$  分别为介质和射流的密度。由于空气介质密度极低, 式中的密度比  $\rho_m/\rho_j$  趋于零, 使得空气中的射流飞行速度与侵彻速度在数值上近似相等, 如图 11 所示 (图中速度提取自射流尖端位置, 对应稳定飞行阶段中的  $80 \mu\text{s}$  时刻, 图 20 同)。

图 11 射流在空气中飞行速度与侵彻速度的关系示意图

Fig. 11 Schematic of the relationship between jet flight velocity and penetration velocity in air

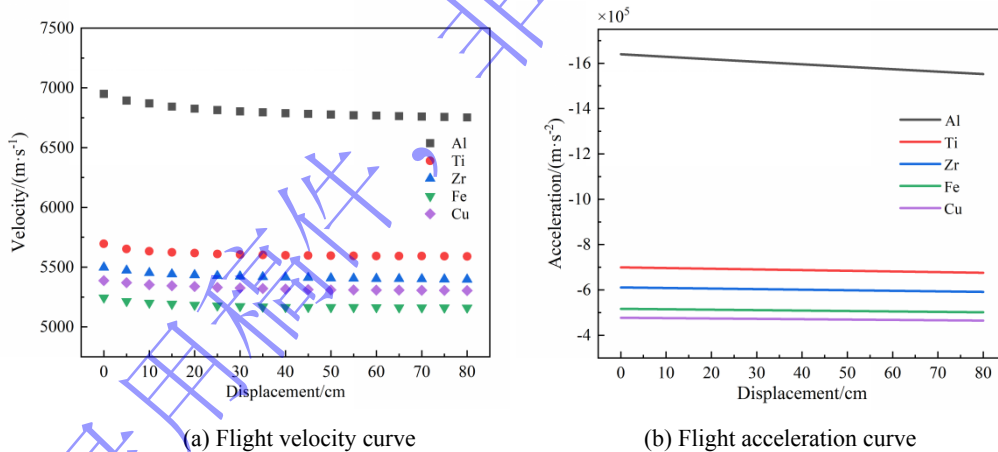


图 12 不同药型罩材料下射流在空气中的飞行速度与加速度随位移变化的仿真曲线

Fig. 12 Simulated velocity and acceleration profiles of jets as functions of displacement with different liner materials in air

图 12(a)展示了数值模拟得到的不同材料射流在空气中飞行速度变化曲线。由图可知, 射流初始速度随材料密度的增加呈下降趋势。从 Al 到 Cu, 射流初速降幅约为 22.5%, 具体数值依次为 6950、5695、5498、5244 及 5387 m/s。值得注意的是, 模拟结果显示 Fe 射流的初始速度低于 Cu, 这表明射流成型过程不仅受到材料密度影响, 还与材料强度有关。通过对比 Fe 与 Cu 材料 Johnson-Cook 本构模型的屈服强度参数 (A 值) 可知, Fe 的屈服强度为 440 MPa, 而 Cu 的屈服强度为 85 MPa。相较于 Cu, 高强度的 Fe 药型罩在压垮过程中需要克服更大的流变应力, 导致更多的能量转化为塑性变形热而非有效动能, 进一步降低了射流初始速度。在飞行 4 倍炸高距离 (70 cm) 后, 射流速度依次维持在 6760、5592、5401、5162 和 5306 m/s, 较初速变化较小。这表明空气阻力对射流运

动状态的影响微弱。

图 12(b)展示了数值模拟过程中射流在空气中飞行加速度变化曲线。结果显示，射流在空气中的初始加速度幅值可达  $4\sim 17\times 10^5 \text{ m/s}^2$ 。尽管该数值很大，但由于射流的整个飞行过程时间极短（微秒量级），其对射流飞行速度的影响甚微（如在  $100 \mu\text{s}$  内速度降幅仅约  $100 \text{ m/s}$ ）。该结果进一步验证了空气阻力对射流运动的影响十分有限。随着飞行距离的增加，射流加速度幅值略有降低，基本保持恒定。对比不同材料可见，随着材料密度的增加，射流加速度幅值逐渐减小。

为量化分析射流的速度衰减特性，本文引入了相对速度损失  $\delta$  作为评价指标，其定义为射流飞行至 4 倍炸高距离时的速度损失量与初始速度的比值，计算公式如下：

$$\delta = \frac{v_0 - v_{4H}}{v_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中， $v_0$  为射流初始速度， $v_{4H}$  为射流行进至 4 倍炸高处的速度。空气中的计算结果如表 5 所示。数据表明，射流在空气中的速度衰减幅度很小，最大相对速度损失仅为 2.7%。进一步分析发现，射流的相对速度损失与材料密度密切相关：从 Al 到 Cu，射流的相对速度损失随材料的密度增加而逐渐降低。

表 5 基于数值模拟的空气中射流相对速度损失

Table 5 Relative velocity loss of jets in air based on numerical simulation

材料	相对速度损失/%
Al	2.7
Ti	1.8
Zr	1.8
Fe	1.6
Cu	1.5

上述研究表明，在空气介质中，射流运动主要受材料属性主导。射流初始速度与材料密度呈负相关，即低密度射流往往具有更高的初始速度。此外，射流成型过程还受材料强度的影响：高强度药型罩在压垮过程中塑性耗散更大，导致射流初始速度进一步降低。由于空气密度低，介质阻力对射流运动的影响甚微，射流飞行过程中的速度损失很小。因此，在空气中，低密度射流能凭借其显著的初速优势，在相同时间内的飞行距离更远。

#### 4.1.2 射流形态演化与离散特性

为揭示药型罩材料对空气中射流形态的影响机制，本节基于图 8 的数值模拟结果，聚焦于分析空气中射流的形态演化与离散特性。模拟结果显示，在炸药爆轰驱动下，药型罩被压垮变形并在轴线处汇聚，形成具有一定速度梯度的高速射流。按形态结构，射流可分为三个部分：前端射流、中部尾裙和尾部杵体。前端射流直径较细，质量占比较低，但整体速度最高，且轴向速度梯度显著；该速度梯度持续驱动前端射流拉伸，主导了射流整体的拉长。相比之下，尾裙和杵体直径较大，质量占比较高，但速度较低（其中裙尾速度高于杵体）且速度梯度不明显，因此其长度变化较小。此外，前端射流、尾裙和杵体之间的连接区域存在几何突变，易产生应力集中。在剧烈的轴向拉伸作用下，射流将首先在这些区域发生颈缩，导致射流断裂。整体而言，空气中的射流保持了良好的形态完整性与速度稳定性，其有效长度（定义为射流在轴线上的总长度）持续增加，且未出现明显的质量损耗迹象。低密度射流（如 Al）的头部速度更高，其有效长度也更长。在剧烈拉伸条件下，除塑性更高的 Al 射流仍能保持较完整的形态外，其余射流的前端在飞行末期均发生断裂。研究表明，在空气中，射流形态较为完整，其有效长度与材料密度呈负相关。随着材料密度的增加，射流内部的速度梯度逐渐减小，这在宏观上减缓了射流的轴向拉伸速率，进而导致射流有效长度减小。

(a) Compressive stress

(b) Tensile stress

图 13 射流在空气中的受力分布情况

Fig. 13 Stress distribution within jets in air

图 13 进一步展示了射流在空气中的受力分布情况。结果表明，在空气中，射流未受到明显的外部压应力，仅在其轴线局部区域存在因内部变形挤压产生的压应力，射流头部仍能保持较好的流线型水滴状。这表明射流在空气中的形态演化主要由其内部动力学主导。在此环境下，射流表现出较高的形态完整性，其演化过程受内部初始速度梯度驱动，表现为稳定的轴向拉伸。

尽管射流在空气中表现出较好的连续性，但内部显著的速度梯度将持续驱动其拉伸，最终导致射流断裂与离散。图 14 展示了空气中射流在靶板上的落点分布试验结果。由图可见，落点数目较多且分布相对分散，呈现出一定程度的射流离散。图中圆圈标记区域为射流落点的主要聚集区，可近似作为空气中射流的离散分布范围。据此测量得到的射流离散区域直径见表 6。由表可知，射流在空气中的离散程度顺序为： $Al < Cu < Ti < Zr < Fe$ 。其中，塑性较高的 Al 和 Cu 射流离散程度较低，表明空气中射流离散特性受材料塑性影响。与高塑性的 Al 相比，低塑性的 Fe 射流其离散区域直径增加 20.7%。整体而言，空气中射流离散区域直径均不超过 16.31 cm，表现出较高的运动稳定性。

在空气中，介质阻力对射流的干扰较小。高塑性材料能够通过显著的塑性变形，有效补偿由速度梯度引起的拉伸应变，从而抑制射流失稳并延缓断裂，降低射流离散程度。因此，在空气等低阻力介质中，材料塑性是影响射流离散程度的关键因素。

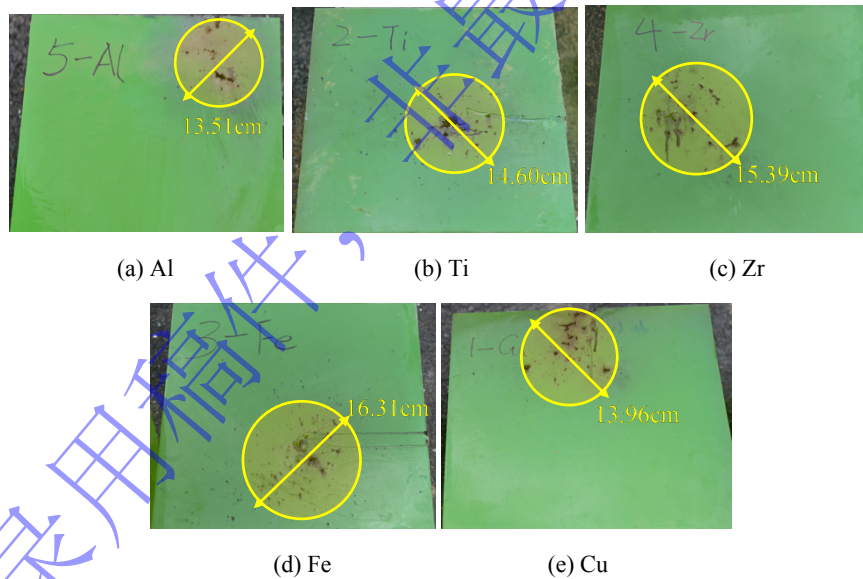


图 14 空气中射流在靶板上的落点分布

Fig. 14 Impact point distribution of jets on the target with different liner materials in air

表 6 空气中射流离散区域直径统计结果

Table 6 Statistical results of jet dispersion diameters in air

材料	离散区域直径/cm
Al	13.51
Ti	14.60
Zr	15.39
Fe	16.31

### 4.1.3 射流释能特性

如图 6 所示,射流成形过程中,剧烈的塑性变形会累计绝热温升,促使射流与氧气发生剧烈氧化反应,产生持续且明亮的火光。形成的高速射流伴随着火光向前运动,其轮廓呈椭球状,在数百微秒内飞行约 2 m 后撞击靶板。随着后续射流持续侵彻靶板,空气中的射流物质不断减少,反应强度逐渐减弱,火光亮度与范围也随之衰减。在装药结构相同的条件下,火光的亮度、空间分布及持续时间等特征直观地反映了药型罩材料在高速冲击环境下的释能特性。对比不同材料射流的释能情况,在 0.2 ms 时刻,Zr 和 Al 射流产生的火光强度最高、范围最大,Ti 次之,而 Cu 和 Fe 射流仅呈现较小范围的光火。在 4~8 ms 时刻,除炸药爆轰区域的残余火光外,靶板区域仍可观察到燃烧现象,其中 Cu 和 Fe 仅存在短暂且小范围的光火,Ti 和 Al 仍保持较为稳定且明显的光火,而 Zr 除光火外,还伴有大量燃烧的破片向四周飞散,这表明 Zr 和 Al 具有更强的释能能力。图 15 进一步展示了通过高速红外热像仪采集到的射流空气中飞行试验的温度场分布情况。由图可知,高速飞行的射流被拉伸成长条状,其前端射流的温度场呈现出明显的径向梯度分布特征,即轴线处温度最高,并沿径向向外逐渐递减<sup>[52,53]</sup>。该温度场的形成是由于药型罩压垮成形过程中,材料向轴线汇聚并沿轴向拉伸,剧烈的塑性变形功转化为温升,形成长条状高温区;同时,轴线附近的挤压和剪切变形最为严重,使得轴线处的温度最高。高温升促使射流边缘区金属元素与氧发生剧烈氧化反应放热,不同材料射流的峰值温度排序为:Al > Zr > Ti > Fe > Cu,这进一步证实了 Zr 和 Al 的强释能特性,其反应剧烈程度显著高于其他材料。

图 15 不同材料的射流空气中飞行试验温度场图像

Fig. 15 Temperature field distributions of jets with different liner materials in air

上述结果表明,在空气中,射流释能特性显著,且活性材料的释能强度明显高于惰性材料。具体表现为活性材料射流周围产生持续时间更长、范围更广且稳定的剧烈火光。这表明射流释能特性与药型罩材料化学活性密切相关。

综上所述,由于空气介质密度较低,对射流运动的阻力作用较弱,其速度衰减与形态演化主要受材料自身属性(如密度、塑性)影响。然而,当环境介质变为水时,介质阻力显著增强,射流演化过程将发生显著变化。下文将进一步探讨水介质对射流特性的影响规律。

## 4.2 水介质中的射流特性

### 4.2.1 射流运动特性及速度衰减模型

射流在水介质中的运动特性与空气中差异显著。图 16 所示为射流水中飞行试验的高速摄像图像,将火光出现前的一帧(即炸药起爆瞬间)定义为  $t = 0$  时刻,展示了不同药型罩材料形成的射流在水中的运动过程。由图可知,射流在进入水介质前仍伴有强烈的火光,并可观察到明显的爆轰产物。但当射流进入水介质中后,其表面的火焰迅速熄灭,此时可清楚地观测到射流在水介质中拖曳出的一系列锥形气泡团,这为定位射流位置提供了明确的物理特征。因此,本研究通过图像处理直接提取了射流头部的实际位置,进而获取其运动轨迹,并根据轨迹计算射流侵彻速度。为深入分析射流演化行为,本研究同步开展了相应的数值模拟。图 17 展示了射流在水中运动的数值模拟结果,其中虚线表示空气与水介质的初始界面。基于模拟结果,提取了与试验对应时刻的射流头部位置和射流侵彻速度。需要说明的是,受爆轰火光强烈干扰,水下试验早期数据提取困难且误差较大,本研究仅保留了强光消散后、观测条件可靠的试验数据。

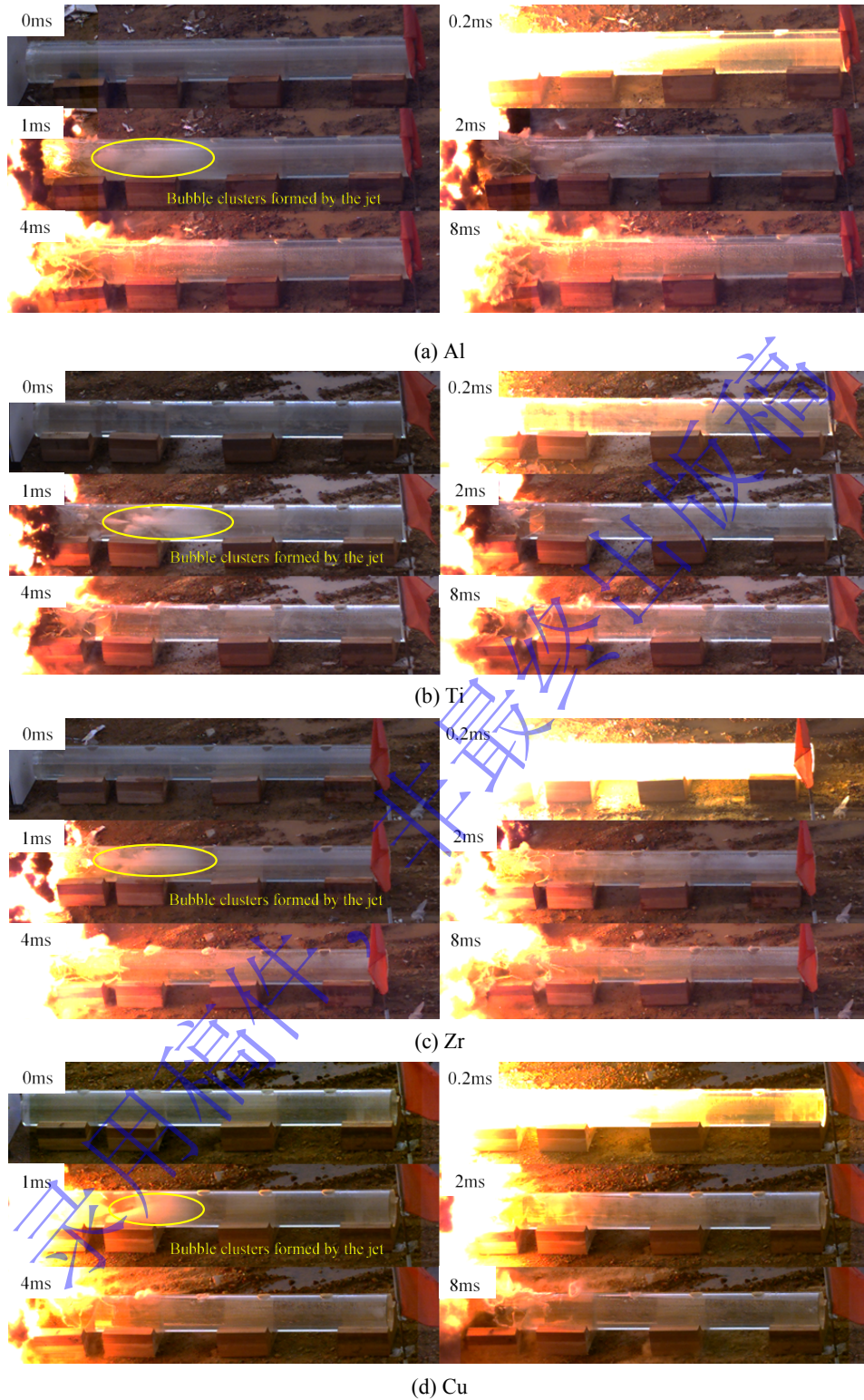


图 16 不同材料的射流水中飞行试验高速摄像图像

Fig. 16 High-speed camera images of jets with different liner materials in water

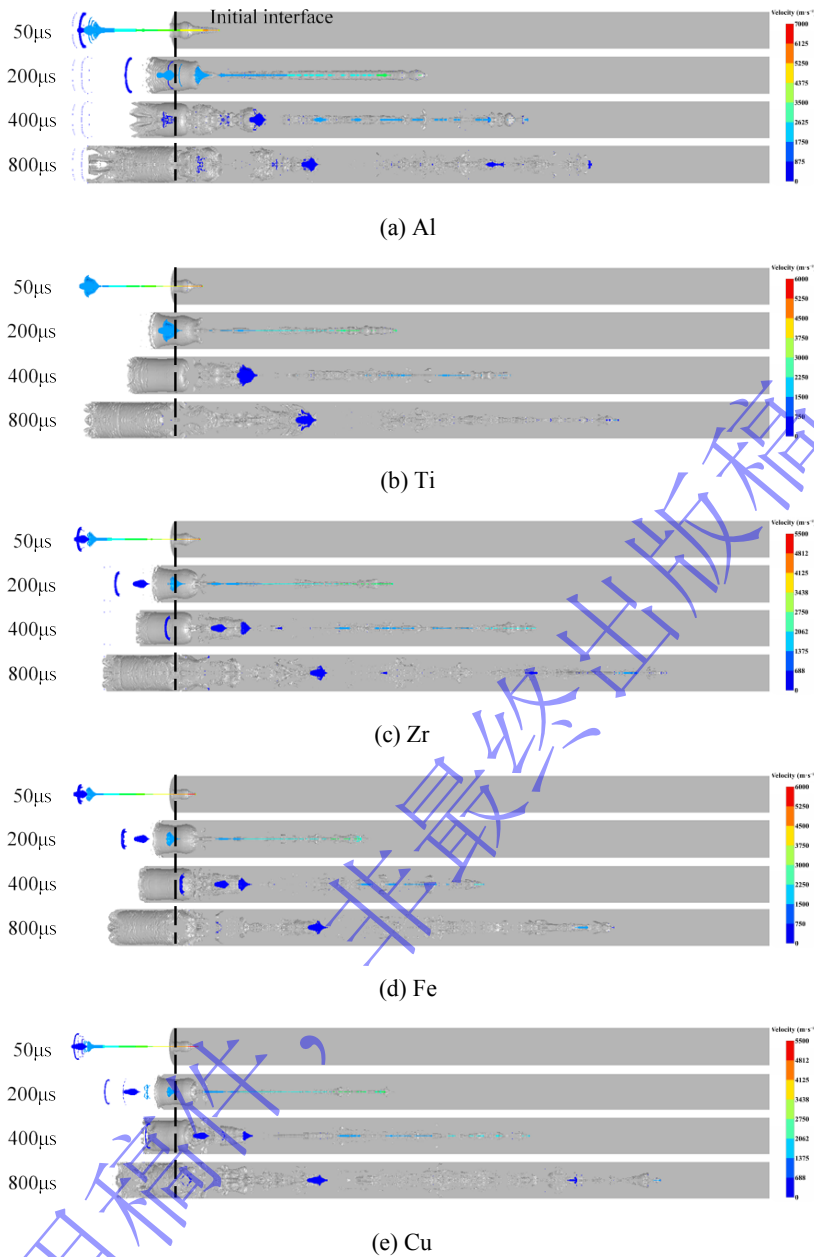


图 17 不同材料的射流在水中的数值模拟结果

Fig. 17 Numerical simulation results of jets with different liner materials in water

针对所获取的运动数据，为与空气介质中的结果进行一致对比，本研究沿用 3.1.1 节确立的基准面，将距药型罩底部中心 175 mm 处的平面（即空气-水介质界面）定义为位移零点 ( $x=0$ )。由此得到了水介质中的射流位移-时间 ( $x-t$ ) 曲线与侵彻速度-位移 ( $v-x$ ) 曲线，分别如图 18 与图 19 所示。结果显示，射流位移-时间曲线呈现出明显的非线性特征，其初始斜率较大且随时间不断减小，反映了射流在水介质中剧烈的减速过程。对比不同材料的射流位移情况发现，在  $t = 200 \mu\text{s}$  时刻，随着材料密度的增加，射流位移逐渐降低，依次为 42.2、37.2、36.6、32.5 及 36.5 cm，这与空气中的变化趋势相同；但在  $t = 800 \mu\text{s}$  时刻，随着材料密度的增加，射流位移却逐渐增加，依次为 70.1、74.6、82.8、73.9 及 81.7 cm，与早期时刻的趋势完全相反。结合图 19 进一步分析发现，射流在水介质中运动时，其侵彻速度迅速减小，且低密度材料的射流在相同距离内的速度衰减更为显著。

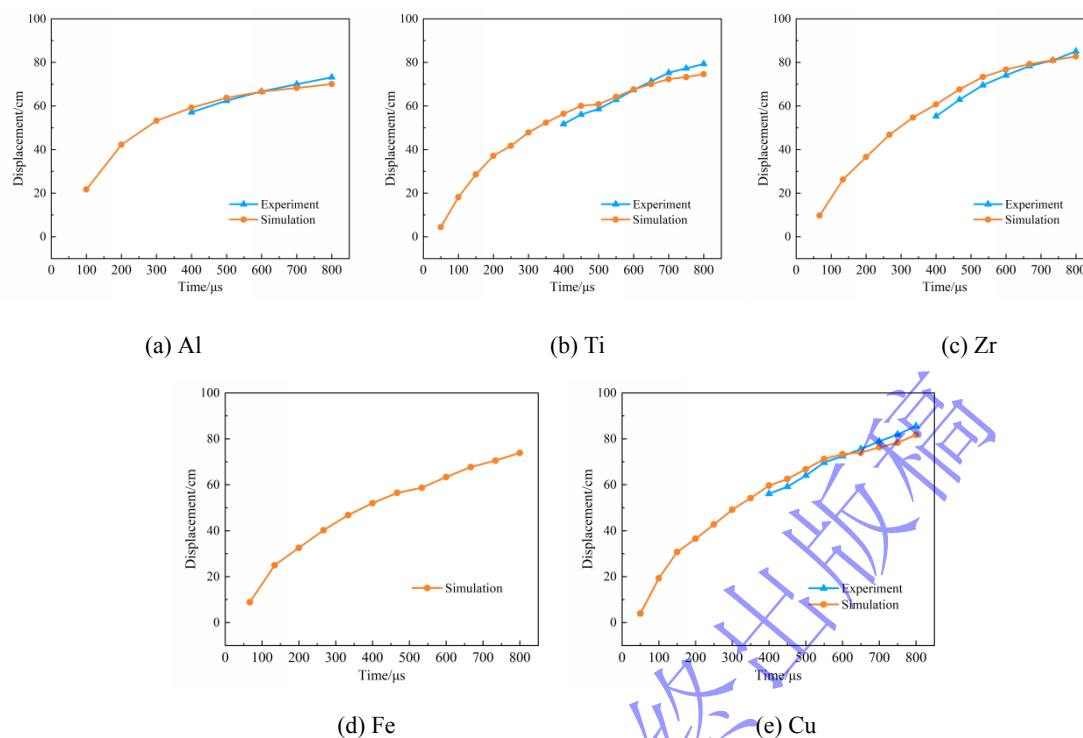


图 18 射流在水介质中的位移-时间曲线

Fig. 18 Displacement curves of jets with different liner materials in water

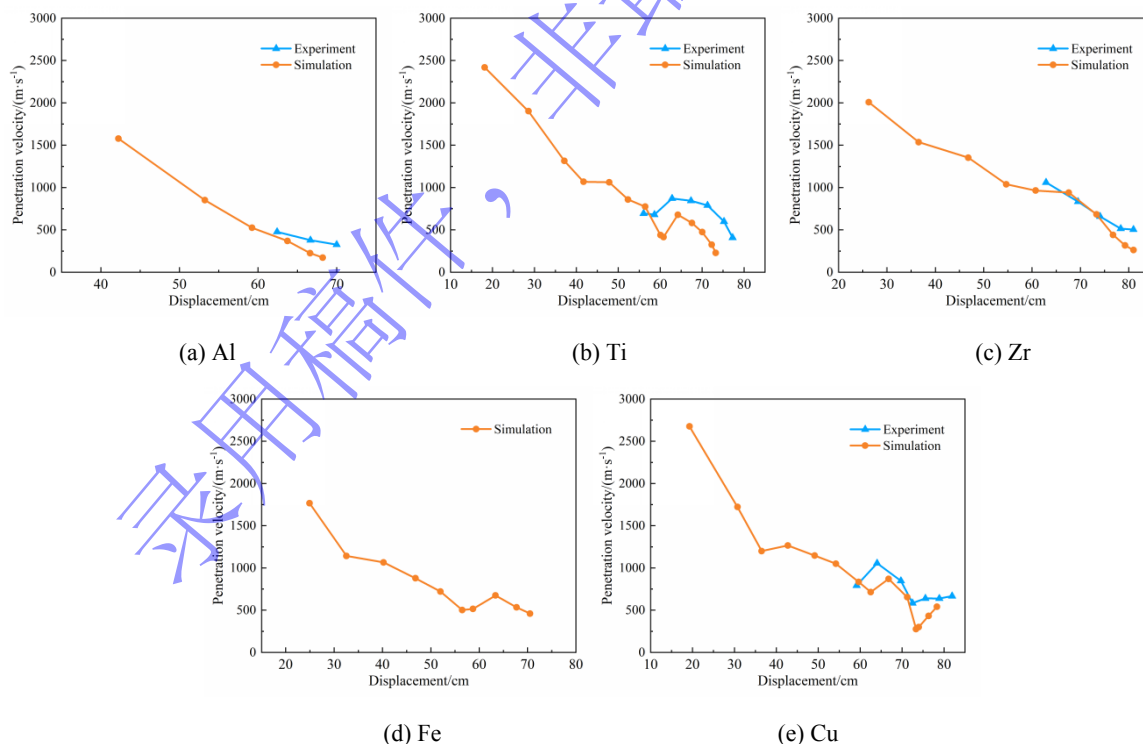


图 19 射流在水介质中的侵彻速度-位移曲线

Fig. 19 Penetration velocity curves of jets with different liner materials in water

与空气介质中的分析逻辑一致，为直接获取射流在水介质中的实时运动状态，需进一步探讨其飞行速度。不同之处在于，由于水介质密度较大，根据式(5)可知，密度比  $\rho_m/\rho_j$  不可忽略，使得水介质

中的射流飞行速度远高于其侵彻速度，二者的数值差异显著，如图 20 所示。

图 20 射流在水中飞行速度与侵彻速度的关系示意图

Fig. 20 Schematic of the relationship between jet flight velocity and penetration velocity in water: (a) flight velocity, (b) penetration velocity

图 21(a)展示了数值模拟得到的不同材料射流在水介质中飞行速度变化曲线。如图所示，各材料射流在水介质中的初始速度与空气中基本一致，从 Al 到 Cu，具体数值依次为 7005、5714、5515、5252 及 5425 m/s。射流初速同样随材料密度的增加呈下降趋势，其中 Fe 射流初速偏低的机理与前文所述一致。然而，射流在水介质中的速度衰减特性与空气中存在明显差异。在水介质中飞行 4 倍炸高距离（70 cm）后，射流速度便急剧下降至 577、883、1225、904 和 1380 m/s，较初速降幅显著。值得注意的是，初始速度最高的 Al 射流在水介质中的剩余速度反而最低。这表明，水介质的高密度特性对射流产生了极强的阻力作用，且减速效果受射流材料密度影响。

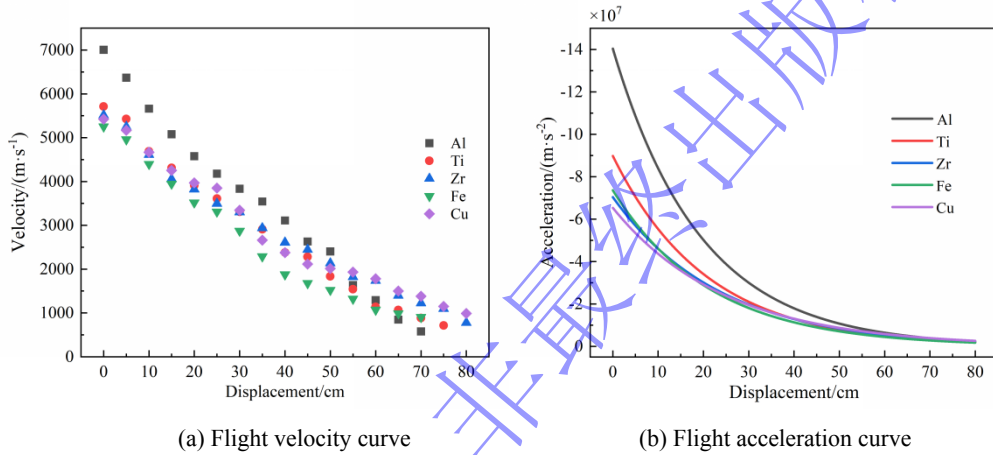


图 21 不同药型罩材料下射流在水介质中的飞行速度与加速度随位移变化的仿真曲线

Fig. 21 Simulated velocity and acceleration profiles of jets as functions of displacement with different liner materials in water

图 21(b)展示了数值模拟过程中射流在水介质中飞行的加速度变化曲线。结果显示，射流在水介质中的初始加速度幅值可达  $6\sim 14\times 10^7$  m/s<sup>2</sup>，较空气中提升了约两个数量级，导致射流飞行速度急剧衰减。这表明水介质的阻力作用对射流运动的影响显著。随着飞行距离的增加，射流加速度幅值逐渐降低。对比不同材料发现，射流加速度幅值与材料密度呈负相关关系：密度最低的铝射流，其加速度幅值最大，减速最为剧烈；而密度更高的铜射流则表现出更强的运动保持能力。

为量化分析射流在水介质中的速度衰减特性，本节同样以相对速度损失（定义见式(6)）作为评价指标。计算结果如表 7 所示。数据表明，与空气介质相比，射流在水介质中的速度衰减幅度显著加剧，最小相对速度损失仍高达 74.6%，表现出强烈的介质阻力作用。对比不同材料可以看出，从 Al 到 Cu，随着材料密度的增加，射流的相对速度损失逐渐降低，密度最高的 Cu 射流在水介质中的相对速度损失最小，表现出更强的存速能力（抵抗速度衰减的能力）。

表 7 基于数值模拟的水中射流相对速度损失

Table 7 Relative velocity loss of jets in water based on numerical simulation

材料	相对速度损失/%
Al	91.8
Ti	84.5
Zr	77.8
Fe	82.8

上述研究表明,在水介质中,射流运动受介质阻力影响显著。由于水的密度远高于空气,射流在水介质中运动时需克服巨大的介质阻力。尽管低密度射流具有更高的初始速度,但其受到的介质阻力影响更为显著,导致射流速度急剧衰减。相比之下,高密度射流因运动惯性大,存速能力更强,其速度最终能够反超低密度射流,从而获得更远的飞行距离。

为了进一步揭示射流在水中的速度衰减规律,并定量表征材料属性的对射流速度衰减的影响,本研究基于不同药型罩材料形成的射流在水中的速度-位移演化关系,构建了相应的数学模型。为简化计算并突出物理本质,模型建立在以下假设基础之上<sup>[54,55]</sup>:

- (1) 将射流简化为具有恒定横截面积的连续等径长杆模型,忽略其断裂与尺寸变化。
- (2) 不考虑水的可压缩性和水中冲击波的影响。
- (3) 射流减速过程由其头部所受正向流体阻力支配,忽略其它外力的影响。

根据流体力学理论,高速运动的物体在介质中受到的流体阻力  $F_d$  可表示为:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_w A_j v_j^2 \quad \#(7)$$

式中,  $C_d$  为阻力系数,  $\rho_w$  为水介质密度 (取  $1.0 \text{ g/cm}^3$ ),  $A_j$  为射流横截面积,  $v_j$  为射流瞬时速度。根据动量定理,射流减速过程的运动方程为:

$$-F_d = m_j \frac{dv}{dt} \quad \#(8)$$

式中,  $m_j$  为射流质量。利用链式法则引入位移项  $x$ ,代入式(8)并求解微分方程,可得到速度随位移  $x$  的指数衰减关系,如下式所示:

$$v_j(x) = v_0 e^{-\beta_0 x} \quad \#(9)$$

式中,  $v_0$  为射流初始速度,  $\beta_0$  为基础衰减系数,其定义为:

$$\beta_0 = \frac{C_d \rho_w A_j}{2 \rho_j V_j} \quad \#(10)$$

式中,  $\rho_j$  为射流密度,  $V_j$  为射流体积。对于阻力系数  $C_d$ ,其取值主要取决于雷诺数  $Re$ ,其定义为:

$$Re = \frac{\rho_w \cdot v_j \cdot D_j}{\mu_w} \quad \#(11)$$

式中,  $D_j$  为射流直径;  $\mu_w$  为水的粘度 (取  $1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{S}$ )。在流体力学中,当雷诺数处于较高区间 (通常  $Re > 10^3$ ) 时,钝头物体的阻力系数会进入一个“自相似区”,此时  $C_d$  不再随雷诺数发生显著变化,而近似为常数。计算表明,本研究中射流的雷诺数远超此临界值 (达  $10^6$  量级),参考相关文献<sup>[56]</sup>,其阻力系数通常分布在  $0.4 \sim 0.6$  范围内,故本文取  $C_d = 0.5$  进行计算。

然而,在实际物理过程中,射流与水介质的相互作用并非仅由几何参数和密度决定。前文研究表明,材料的力学性能对射流演化过程影响显著;同时,高熔点材料由于具有更高的热稳定性,可延缓材料进入剧烈软化或相变阶段,有利于保持射流的结构完整性。为了更准确地反映不同材料性能对速度衰减特性影响的差异,本研究在基础衰减系数  $\beta_0$  的基础上,引入密度比、温度比和强度比等无量纲参量进行半经验修正<sup>[57]</sup>,构建如下修正模型:

$$v_j(x) = v_0 e^{-\beta x} \quad \#(12)$$

式中,修正速度衰减系数  $\beta$  的表达式为:

$$\beta = \beta_0 \times K \left( \frac{\rho_j}{\rho_w} \right)^a \left( \frac{\sigma_j}{\sigma_0} \right)^b \left( \frac{T_j}{T_m} \right)^c = \frac{C_d A_j K}{2 V_j} \left( \frac{\rho_j}{\rho_w} \right)^{a-1} \left( \frac{\sigma_j}{\sigma_0} \right)^b \left( \frac{T_j}{T_m} \right)^c \quad \#(13)$$

Explosion and Shock Waves

式中,  $\rho_j$  为射流密度,  $\rho_w$  为水介质密度,  $\sigma_j$  为材料屈服强度,  $\sigma_0$  为基准强度 (取 100 MPa),  $T_j$  为射流温度,  $T_m$  为材料熔点,  $K$ 、 $a$ 、 $b$  和  $c$  为待定拟合参数。在修正模型中, 引入密度项旨在校验并量化密度差异对速度衰减规律的贡献。考虑到水介质的高比热容和高导热性会使射流热量快速耗散, 其温度可近似采用环境温度  $T$ 。此外, 鉴于所选药型罩材料的强度与塑性呈现显著的负相关性, 为提升模型简洁性并避免参数冗余, 仅选择强度作为修正因子。

为了确定修正项中的待定系数, 本研究基于试验与仿真结果, 采用全局平均绝对相对误差 (Mean Absolute Relative Error, MARE) 作为目标函数进行了非线性优化, 旨在通过最小化不同材料下所有观测点的仿真值与预测值偏差, 确保模型具有良好的普适性。目标函数定义如下:

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{v_{\text{exp},i} - v_{\text{pred},i}}{v_{\text{exp},i}} \right| \quad \#(14)$$

式中,  $N$  为所有观测点的总数,  $v_{\text{exp},i}$  和  $v_{\text{pred},i}$  分别表示第  $i$  个观测点的仿真值和模型预测值。求解过程采用 L-BFGS-B (Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Bound constraints) 非线性优化算法<sup>[58]</sup>在四维参数空间内进行迭代搜索。作为一种准牛顿方法, 该算法在处理带有变量边界约束的非线性优化问题时具有较高的计算效率<sup>[59]</sup>。为确保优化结果符合物理一致性, 本研究在求解过程中施加了边界约束: 限制密度指数  $a < 1$ , 以准确表征密度对速度衰减的影响规律。经过迭代计算, 最终获得的拟合参数如表 8 所示。将上述参数代入式(13), 整理得到水介质中的射流速度衰减模型, 如式(15)所示:

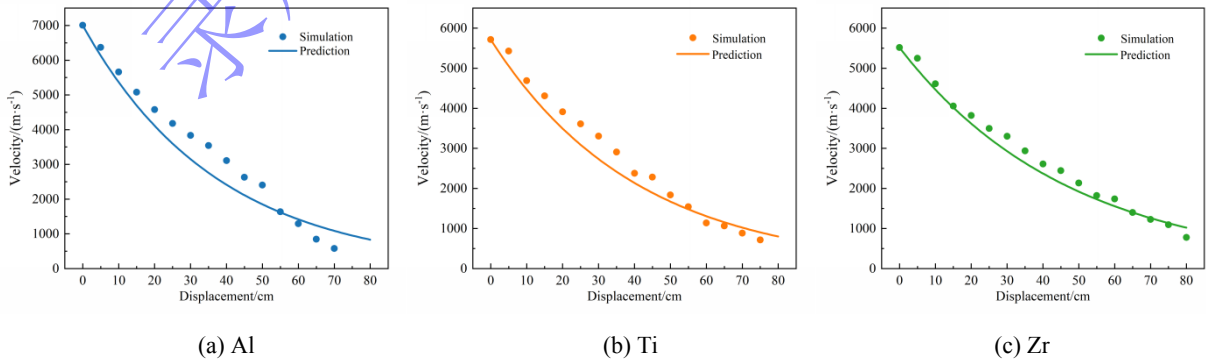
$$v_j(x) = v_0 e^{-3.049 \frac{A_j}{V_j} \left( \frac{\rho_j}{\rho_w} \right) - 0.149 \left( \frac{\sigma_j}{100} \right) 0.243 \left( \frac{T_r}{T_m} \right) 0.484 x} \quad \#(15)$$

表 8. 射流速度衰减修正模型拟合参数汇总

Table 8. Summary of fitting parameters for the modified jet velocity attenuation model

$K$	$a$	$b$	$c$
12.197	0.851	0.243	0.484

为验证模型的准确性, 本研究对比了五种药型罩材料在水介质中的射流速度仿真结果与模型预测结果。如图 22 所示, 各材料的仿真数据均紧密围绕预测曲线分布, 且演化趋势高度一致。误差统计结果 (见图 23) 显示, 绝大部分数据点的相对误差均处于较低区间, 仅个别数据点误差较大, 这是由于射流运动后期的颈缩断裂导致速度突变, 以及理论曲线构建以误差平均值最小为参考原则。整体来看, 全局 MARE 仅为 9.8%。考虑到射流在水介质中的运动过程涉及破碎断裂以及界面相互作用, 该误差水平足以证明本模型具有良好的可靠性。



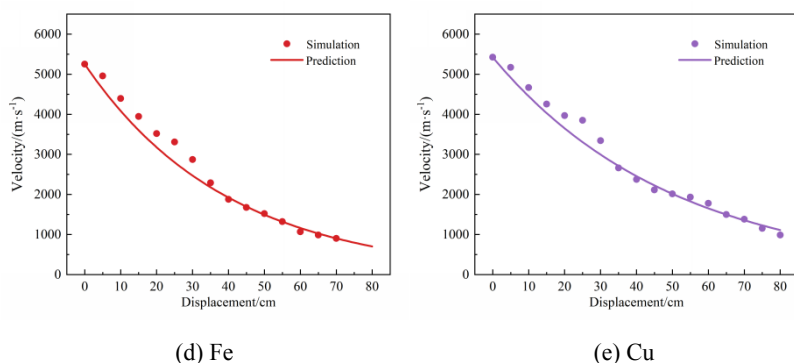


图 22 不同药型罩材料下射流水下速度衰减仿真结果与预测模型对比

Fig. 22 Comparison of simulated and predicted velocity attenuation for underwater jets with different liner materials

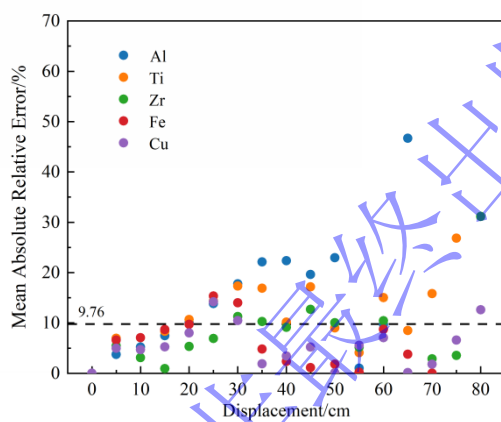


图 23 不同药型罩材料下射流速度衰减预测模型的误差分析

Fig. 23 Error analysis of jet velocity attenuation prediction models for different liner materials

研究表明，水介质中射流速度衰减受材料密度、强度及熔点等多因素共同影响。具体而言，材料强度越高，射流速度衰减越快；而材料密度与熔点越高，则速度衰减越慢。随着材料强度的升高，射流在拉长过程中的塑性变形功增加，导致更多能量以热形式耗散；同时，高强度材料往往塑性较低，在水介质阻力作用下易发生绝热剪切失稳乃至断裂。这不仅导致射流有效质量骤减，而且产生的碎片会增加射流表面积，进而增大介质阻力，加快动能耗散，最终表现为射流速度显著衰减。相比之下，高熔点有助于延缓材料在绝热温升条件下的软化与相变过程，维持射流结构的完整性，进而减缓速度衰减。为定量评估上述各因素的相对影响，本研究通过对比各项指数的绝对值，明确了材料参量对射流速度衰减影响的相对重要性排序，由高到低依次为：熔点、强度、密度。据此可知，具有高密度、高熔点特征的材料在水介质中具有最优的存速能力，受介质阻力影响导致的速度下降过程最为缓慢。

综合上述建模与验证过程，本研究构建了一套射流运动特性分析与预测方法。利用该方法可系统对比不同药型罩材料在特定介质中的射流速度演化差异，并定量揭示材料关键属性对射流速度衰减的影响机理。

#### 4.2.2 射流形态演化与离散特性

为进一步探究材料与介质属性对射流形态的耦合影响，本节基于图 17 的数值模拟结果，聚焦于分析水介质中射流的演化过程。模拟结果显示，射流在水介质中的初期形态与空气中相似，亦可划分为三个典型部分。但在水下运动过程中，射流前端会形成锥柱形空腔，仅射流头部与水直接接触。由于水的介质阻力较大，射流迅速减速并出现轻微扰动。此时，射流主体仍保持相对连续，但局部已显现分散迹象。随后，在持续的介质阻力与内部速度梯度的共同作用下，射流发生明显断裂并受到强烈

## Explosion and Shock Waves

的流体侵蚀。与空气中射流的行为不同，水介质中射流速度衰减显著，且在较短飞行距离内发生断裂，其有效长度呈现先增加后迅速减小的趋势。在侵入初期（200  $\mu\text{s}$ ），低密度的 Al、Ti 射流受强烈介质阻力作用，尖端部分消耗显著，断裂程度更大；在 400  $\mu\text{s}$  时刻，高塑性的 Al、Cu 射流表现出更好的结构完整性，能够维持较长的连续段，而非碎裂为多个细小段；及至 800  $\mu\text{s}$  时刻，大部分射流已消耗殆尽，仅剩少量残余，其主要为速度较低、质量较大的杆体部分。

在水介质中，射流断裂现象显著，其断裂行为受材料密度与塑性共同影响，断裂程度随着二者的增加而减轻。具体表现为，在入水初期，极高的撞击速度使射流承受的冲击压力远超其材料强度，射流表现出类似流体的特性，其塑性抗力可以忽略，此时材料密度成为影响稳定性的主导因素。高密度射流因运动惯性大，减速更为平缓，不易出现速度梯度瞬间激增或紊乱的情况，从而保持较好的形态稳定性。至入水后期，射流速度降低，并重新表现出固体特性，此时塑性的影响开始凸显，射流的断裂程度与塑性呈现负相关。

(a) Compressive stress

(b) Tensile stress

图 24 射流在水中的受力分布情况

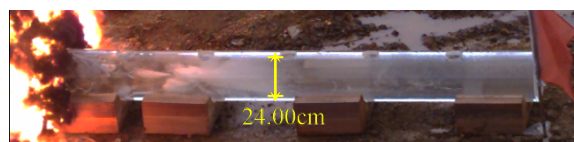
Fig. 24 Stress distribution within jets in water

尽管高密度、高塑性的材料具有一定优势，但在水介质的持续侵蚀作用下，所有射流均随时间推移发生显著的形态破坏与质量损耗。这主要是由于水的密度与粘度远高于空气，射流在水介质中运动时会受到显著的流体阻力作用，导致射流速度急剧衰减并引发颈缩断裂。为探究水介质对射流力学响应的影响，图 24 展示了射流在水介质中的受力分布情况。结果显示，射流在水介质中运动时需持续排开高密度介质，其头部承受的流体阻力可达 2000 MPa 以上，导致其头部形态发生钝化，演变为半球状。与此同时，射流周侧与水介质接触区域则承受约 400 MPa 的压应力。对比发现，头部所受正向阻力远大于侧面挤压，表明轴向阻力是影响水下射流演化的主导因素。射流头部因介质阻力产生局部“堆积效应”，呈现暂时的轴向压缩状态，从而掩盖了头部区域潜在的拉应力特征。同时，射流周侧受到回流介质的径向挤压，同样抑制了侧面区域拉应力特征的显现。而此时尚未进入水介质的尾裙与杆体部分，其受力状态与空气中基本一致，主要受自身速度梯度支配，在表面区域呈现典型的拉应力特征。这进一步说明了水介质对射流的显著作用。射流在水介质中受外部载荷与自身速度梯度的叠加影响，其内部形成了复杂的拉-压应力场。这种复杂的应力状态加剧了射流的颈缩，破坏了其形态的稳定性，导致射流失稳断裂。

在此基础上，本文进一步通过水下试验观测了射流的离散特性。如图 25 所示，射流进入水介质中后呈弥散状飞行，并拖曳出一系列锥形气泡团。这些气泡团分布范围广且呈现明显的径向扩展，表明射流在水介质中离散显著。为定量描述射流离散程度，本文以气泡团相对于射流飞行轴线的径向分布范围作为评价指标，将最外侧气泡团间的径向跨度定义为离散区域直径。需要说明的是，由于射流碎片特征尺寸较小，单个碎片的形态差异对气泡团轮廓影响可以忽略；同时水箱泄压孔可有效削弱水体扰动，尤其是边界反射波作用，因此该指标能合理反映射流的整体离散特征。通过图像处理软件增强了最外侧气泡团轮廓，并测量了轮廓之间的最大径向距离。测量结果列于表 9 中。根据表中数据，射流在水介质中的离散程度顺序为：Al > Ti > Zr  $\approx$  Cu。分析认为，水介质中射流离散特性主要与材料密度相关：从 Al 到 Cu，随着材料密度增加，离散区域直径反而减少 7.7%。水介质中射流离散区域直径均不小于 23.06 cm，与空气环境相比，离散区域相对扩大 41.4% 以上。这表明水介质会显著降低射流运动稳定性，进而加剧其离散程度。



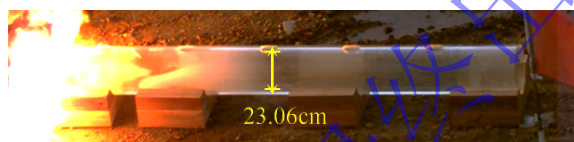
(a) Al



(b) Ti



(c) Zr



(d) Cu

图 25 射流在水介质中的离散分布情况

Fig. 25 Dispersion characteristics of jets in water

表 9 水介质中射流离散区域直径统计结果

Table 9 Statistical results of jet dispersion diameters in water

材料	离散区域直径/cm
Al	24.83
Ti	24.00
Zr	23.08
Cu	23.06

鉴于水的密度和粘度远高于空气，射流在水介质中运动时，受到的流体阻力显著增加，其表面也会承受强烈的介质扰动。这不仅导致射流轴向动量迅速衰减，还会加剧射流质量损耗，并诱发颈缩、断裂等结构失稳现象。同时，在实际试验中，射流往往承受非轴对称载荷。由于水介质高阻力特性，射流碎片对扰动极为敏感，微小的侧向偏移会在流体动力矩作用下迅速放大，进而演变为剧烈翻转，最终导致射流离散程度显著增加。在水等高阻力介质中，材料自身的抗扰动能力更为关键。高密度材料在相同条件下具有更大的运动惯性，能更有效地抵抗流体阻力产生的横向扰动，因此其离散特性转由材料密度主导。

#### 4.2.3 射流释能特性

射流在水介质中的释能过程与空气中差异显著。如图 16 所示，射流在进入水介质前仍伴有强烈的火光，但当射流入水后，其表面的火焰迅速熄灭。对比不同材料的试验结果发现，在 1 ms 时刻，水介质中大部分强光干扰已消失，可清晰观察到射流在水介质中拖曳出一系列锥形的气泡团，表明射流在水中并未持续发生剧烈反应；仅在 Al 和 Zr 的试验中仍能观察到刚进入水介质的射流尾部残留部分火光。至 4 ms 时刻，水介质中的射流火光已基本消失，仅炸药附近的空气区域仍存在由炸药爆轰

引起的明显火焰。

试验结果表明,射流在水介质中的释能过程受到显著抑制。具体表现为:射流入水后仅出现短暂且微弱的火光,随后迅速熄灭,未观察到明显的持续释能现象。此时,活性材料与惰性材料的表现趋于相似。这表明在水介质中,不同材料之间的释能特性差异不再突出。造成该现象的主要原因如下:一方面,水包围了射流物质,大幅减小了射流物质与氧气的有效接触面积;另一方面,水的高比热容和高导热性使得射流表面热量被快速耗散,导致温度骤降,难以维持剧烈氧化反应所需的温度条件。上述两种机制共同抑制了射流在水介质中的氧化反应进程,从而大幅削弱了活性材料的释能能力。

上述研究表明,空气与水介质中射流演化行为的本质差异主要源于两种介质的密度差异。由于水的密度远高于空气,射流在水中所受惯性阻力大幅提升,且射流与水的相互作用会诱发更强的介质扰动,导致射流速度衰减剧烈,同时破坏射流运动的稳定性,使射流形态高度离散并易于断裂。此外,水介质隔绝了射流与氧气的接触,且水的高导热性使热量快速耗散,共同抑制了射流在水中的氧化释能过程。

## 5 结论

在本研究中,采用数值模拟和试验相结合的方法,系统地研究了药型罩材料和环境介质对射流演化行为的影响。通过对比分析不同药型罩材料在空气与水介质中的运动特性和形态演变,揭示了材料性能与环境介质对射流演化规律的影响机制,建立了射流水下速度衰减预测模型,主要结论如下:

(1) 射流初始速度受材料密度与强度共同影响。随着材料密度增加,射流初始速度降低。从 Al 到 Cu,射流初速降幅达 22.5%。此外,高强度材料因塑性变形产生的热损耗更高,初速进一步降低。相较于空气中稳定的运动状态,射流在水介质中速度衰减剧烈,4 倍炸高内射流速度下降约 80%,且衰减速率与材料密度呈负相关。高密度射流凭借更强的存速能力在运动后期可实现位移反超。

(2) 基于试验及仿真结果,结合流体力学理论,本文构建了射流在水介质中的速度衰减数学模型,其误差仅为 9.8%。该模型明确了材料参量对速度衰减影响的重要性排序为熔点、强度、密度,揭示了材料性能对射流速度衰减的影响规律。具体而言,高密度、高熔点材料在水介质中的存速能力更优,受介质阻力影响导致的速度下降过程更缓慢。

(3) 在射流形态方面,药型罩材料密度、强度和塑性是影响水介质中射流形态演化的关键因素。高密度与高塑性有利于提高射流的抗扰动能力,从而维持其形态稳定并抑制离散过程。与空气相比,水介质具有更高的密度与粘度,射流在水中运动时会受到显著的流体阻力,易引发射流颈缩断裂,其离散程度增加 41.4%以上。

(4) 针对射流释能特性,活性材料在空气中释能显著,而水介质通过隔绝氧气与冷却效应显著抑制了活性材料的氧化反应,使其射流在水中的毁伤效能与惰性材料趋于相似。

## 参考文献

- [1] WU H, HU F, FANG Q. A comparative study for the impact performance of shaped charge jet on UHPC targets [J]. Defence Technology, 2019, 15(4): 506-518. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.005.
- [2] ZHANG Z, JIN W W. Finite element modeling of the shaped charge jet and design of the reusable perforating gun [J]. Petroleum Science, 2020, 17(5): 1389-1399. DOI: 10.1007/s12182-020-00468-4.
- [3] SHI J, HUANG Z X, ZU X D, et al. Cohesiveness and penetration performance of jet: theoretical, numerical, and experimental studies [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 175: 104543. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104543.
- [4] ŻOCHOWSKI P, WARCHOL R. Experimental and numerical study on the influence of shaped charge liner cavity filing

- on jet penetration characteristics in steel targets [J]. *Defence Technology*, 2023, 23: 60-74. DOI: 10.1016/j.dt.2022.09.007.
- [5] ŻOCHOWSKI P, WARCHOŁ R, MISZCZAK M, et al. Experimental and numerical study on the PG-7VM warhead performance against high-hardness armor steel [J]. *Materials*, 2021, 14(11): 3020. DOI: 10.3390/ma14113020.
- [6] MA B, HUANG Z X, GUAN Z W, et al. Theoretical analysis of the acceleration effect of the magnetic field on the shaped charge jet [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 133: 283-287. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.07.045.
- [7] CHEN J Y, FENG D L, DENG S X, et al. GPU-accelerated smoothed particle hydrodynamics modeling of jet formation and penetration capability of shaped charges [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 99: 103171. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.103171.
- [8] BIRKHOFF G, MACDOUGALL D P, PUGH E M, et al. Explosives with lined cavities [J]. *Journal of Applied Physics*, 1948, 19(6): 563-582. DOI: 10.1063/1.1698173.
- [9] PUGH E M, EICHELBERGER R J, ROSTOKER N. Theory of jet formation by charges with lined conical cavities [J]. *Journal of Applied Physics*, 1952, 23(5): 532-536. DOI: 10.1063/1.1702246.
- [10] JIANG K, DENG S C, LI H B. Theoretical calculation and analysis of the velocity of shaped charge jet with modified collapse velocity model [J]. *Petroleum Science*, 2024, 21(6): 4311-4327. DOI: 10.1016/j.petsci.2024.06.017.
- [11] TANG E L, LIU P, WANG R Z, et al. Jet forming of Al/PTFE-W/Cu double-layer liner considering reactivity and damage to medium-thick concrete target [J]. *Polymer Testing*, 2025, 146: 108792. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2025.108792.
- [12] ELSHENAWY T, LI Q-M, ELBEIH A. Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes design [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(1): 12-26. DOI: 10.1016/j.dt.2020.11.019.
- [13] SHI J, HUANG Z X, ZU X D, et al. Experimental and numerical investigation of jet performance based on Johnson-Cook model of liner material [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 170: 104343. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104343.
- [14] CAO C, WANG J X, KONG L Q, et al. Study on the formation characteristics of underwater hemispherical shaped charge jet and its penetration performance into concrete [J]. *Defence Technology*, 2024. DOI: 10.1016/j.dt.2024.12.004.
- [15] SHIMAMURA K, OOTSUKA T. Study of water entry of high-speed projectile [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 232-239. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.027.
- [16] HAN J, LI S F, LIU W T, et al. Simulation of underwater shaped charge jet formation and penetration of metal plates by coupling riemann-updated lagrangian particle hydrodynamics and cohesive peridynamics [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: 116811. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.116811.
- [17] WU J Y, ZHONG M S, LIU Y, et al. Study on the influencing factors of underwater unexploded ordnance destruction based on shaped charged jet [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1507(3): 032007. DOI: 10.1088/1742-6596/1507/3/032007.
- [18] CHEN X, LU Y G. Research on the influences of motion characteristics of jetting projectile charge under water [J]. *Defence Technology*, 2024, 33: 411-425. DOI: 10.1016/j.dt.2023.07.009.
- [19] ZHANG X R, WU C, HUANG F L. Penetration of shaped charge jets with tungsten-copper and copper liners at the same explosive-to-liner mass ratio into water [J]. *Shock Waves*, 2010, 20(3): 263-267. DOI: 10.1007/s00193-010-0248-0.
- [20] WANG C, DING J X, ZHAO H T. Numerical simulation on jet formation of shaped charge with different liner materials [J]. *Defence Science Journal*, 2015, 65(4): 279. DOI: 10.14429/dsj.65.8648.
- [21] GU Y C, WANG J X, LI H, et al. Formation characteristics and penetration performance of an underwater shaped charge jet [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 258: 111695. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111695.
- [22] JOHNSON G R, STRYK R A. Conversion of 3D distorted elements into meshless particles during dynamic deformation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(9): 947-966. DOI: 10.1016/S0734-743X(03)00012-5.
- [23] KONG C Y, LI Y, JIN Y Y, et al. Analysis of the influence of charge liner on the penetration effect of shaped charge jet

- assisted window sidetracking [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 243: 213300. DOI: 10.1016/j.geoen.2024.213300.
- [24] KATAYAMA M, KIBE S, YAMAMOTO T. Numerical and experimental study on the shaped charge for space debris assessment [J]. *Acta Astronautica*, 2001, 48(5): 363-372. DOI: 10.1016/S0094-5765(01)00073-X.
- [25] HIRT C W, AMSDEN A A, COOK J L. An arbitrary Lagrangian–Eulerian computing method for all flow speeds [J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 135(2): 203-216. DOI: 10.1006/jcph.1997.5702.
- [26] YAO Z F, ZHOU T Q, SHEN Z W, et al. Numerical simulation of applying shaped charge cutting technology to explosive switch [C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010: 102-106. DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5619136.
- [27] YIN J P, HAN Y Y, WANG X F, et al. A new charge structure based on computer modeling and simulation analysis [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, 64: 102613. DOI: 10.1016/j.jvcir.2019.102613.
- [28] 叶贵根, 孟康. 聚能射孔弹粉末药型罩本构参数反演研究 [J]. *实验技术与管理*, 2024, 41(9): 92-100. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2024.09.013.
- YE G G, MENG K. Constitutive parameters for powder liner in shaped charge: an inversion study [J]. *Experimental Technology and Management*, 2024, 41(9): 92-100. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2024.09.013.
- [29] GU Y C, WANG J X, LI H, et al. Comparative study on the forming characteristics and penetration effects of shaped charge jet in water and air [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(11): 115901. DOI: 10.1063/5.0139683.
- [30] CAO Y G, ZHEN Y, SONG M, et al. Determination of Johnson–Cook parameters and evaluation of Charpy impact test performance for X80 pipeline steel [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 179: 105627. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105627.
- [31] MILANI A S, DABBOUSSI W, NEMES J A, et al. An improved multi-objective identification of Johnson–Cook material parameters [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(2): 294-302. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.02.003.
- [32] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [33] CARPENTER A J, CHOCRON S, ANDERSON C E. Linking the equation of state for fiber-reinforced composites to those of the individual fiber and matrix constituents [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 204: 383-389. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.785.
- [34] 王艳辉. 1060 铝搅拌摩擦焊温度场数值模拟 [D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2013: 19-32.
- WANG Y H. Numerical simulation of 1060 aluminum friction stir welding temperature field [D]. Zhenjiang, China: Jiangsu University of Science and Technology, 2013: 19-32.
- [35] TARVER C, MAY C M. Short pulse shock initiation experiments and modeling on LX16, LX10, and ultrafine TATB [C]// 14th International Detonation Symposium. USA: Office of Naval Research, 2010: 648-654.
- [36] 李英华. 锆的低压冲击相变特性研究 [D]. 四川绵阳: 中国工程物理研究院, 2007: 10-32.
- LI Y H. Study on phase transformation characteristics of zirconium under low pressure impact [D]. Mianyang, China: China Academy of Engineering Physics, 2007: 10-32.
- [37] 邓希光. 纯钛及 Ti-xAl(x=2,4,6)合金动态变形行为研究 [D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2014: 70-96.
- DENG X G. Study on the dynamic deformation behavior of pure Ti and Ti-xAl(x=2,4,6) alloys [D]. Beijing, China: Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, 2014: 70-96.
- [38] 徐金中, 汤文辉. SPH 方法在层裂损伤模拟中的应用 [J]. *强度与环境*, 2009, 36(1): 1-7.
- XU J Z, TANG W H. Applications of SPH method to simulate spalling damage [J]. *Structure & environment engineering*, 2009, 36(1): 1-7.
- [39] MA D F, CHEN D N, WU S X, et al. Analysis of thermoviscoplastic effects on dynamic necking of pure copper bars during

- impact tension [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2012, 13(2): 125-136. DOI: 10.1515/ijnsns.2011.101.
- [40] MCGUIRE E M, TARVER C M. Reactive flow modeling of the interaction of TATB detonation waves with inert materials [C]// Goldwasser J M. 12th International Detonation Symposium. USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002: 18.
- [41] LU X H, ZHOU C G, WANG Z J, et al. Dynamic response analysis of an armored vehicle under explosive loading [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(5): 624-628. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.013.
- [42] 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): 83303-83315. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0389.
- 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): 83303-83315. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0389.
- [43] ZHAO Z Q, LI T, SHENG D L, et al. Machine learning optimization strategy of shaped charge liner structure based on jet penetration efficiency [J]. *Defence Technology*, 2024, 39: 23-41. DOI: 10.1016/j.dt.2024.04.006.
- [44] ZHANG Y F, LIU L T, WANG J X, et al. Study on the impact characteristics of underwater explosion bubble jets induced by plate structure [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112641. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112641.
- [45] MARRS F, HEIGES M. Soil modeling for mine blast simulation [C]// 13th International LS-DYNA Conference. USA: Livermore Software Technology Corporation, 2014.
- [46] 侯先苇, 张先锋, 熊玮, 等. 活性无序合金冲击的释能特性及在毁伤元中应用研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(9): 91401-91439. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0189.
- HOU X W, ZHANG X F, XIONG W, et al. Research progress on impact energy release characteristics of reactive disordered alloy and its application in kill elements [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(9): 91401-91439. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0189.
- [47] 王存洪, 曹玉武, 陈进, 等. 金属型含能材料力学行为研究进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(7): 71101-71122. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0251.
- WANG C H, CAO Y W, CHEN J, et al. Research progress in mechanical behaviors of metallic energetic materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(7): 71101-71122. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0251.
- [48] 黄炳瑜, 熊玮, 张先锋, 等. 双层含能药型罩 K 装药射流成型及侵彻性能试验 [J]. *含能材料*, 2021, 29(2): 149-156. DOI: 10.11943/CJEM2020231.
- HUANG B Y, XIONG W, ZHANG X F, et al. Experimental study on jet formation and penetration performance of double-layered reactive liners with K-charge [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(2): 149-156. DOI: 10.11943/CJEM2020231.
- [49] 徐恒威, 梁斌, 刘俊新, 等. 起爆偏心对聚能装药射流成型过程及威力参量的影响 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(1): 129-140. DOI: 10.11858/gywlyb.20220635.
- XU H W, LIANG B, LIU J X, et al. Effect of initiation eccentricity on shaped charge jet forming process and power parameters [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(1): 129-140. DOI: 10.11858/gywlyb.20220635.
- [50] 宋静静, 乐京霞, 李晓彬, 等. 结构参数对聚能射流侵彻性能的影响 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(7): 151-155. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.07.020.
- SONG J J, LE J X, LI X B, et al. Influence of configuration parameters on the penetration performance of shaped charge jet [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(7): 151-155. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.07.020.
- [51] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2026.01.005.

- ZHANG X L, SHEN Y F, ZHANG D X, et al. Quantitative study on the influence of explosion height on penetration performances of the shaped charge jet source [J]. *Explosive Materials*, 2026, 55(1): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2026.01.005.
- [52] 陈闯, 王晓鸣, 李文彬, 等. 爆轰波波形与药型罩结构匹配对杆式射流成形的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 812-819. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0812-08.
- CHEN C, WANG X M, LI W B, et al. Effect of matching of detonation waveform with liner configuration on the rod-like jet formation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 812-819. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0812-08.
- [53] 袁康博, 姚小虎, 王瑞丰, 等. 金属材料的率-温耦合响应与动态本构关系综述 [J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(9): 91401-91434. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0416.
- YUAN K B, YAO X H, WANG R F, et al. A review on rate-temperature coupling response and dynamic constitutive relation of metallic materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(9): 91401-91434. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0416.
- [54] FEDOROV S V, BAYANOVA Y M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility [J]. *Technical Physics*, 2011, 56(9): 1266-1271. DOI: 10.1134/S1063784211090088.
- [55] 薛东宇, 吴成, 安丰江. 典型重金属聚能侵彻体对水介质及后效靶的侵彻特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(6): 58-65, 274. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.06.009.
- XUE D Y, WU C, AN F J. Study on the penetration effect of liner's penetrators with heavy metal materials to water-steel plate medium [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(6): 58-65, 274. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2024.06.009.
- [56] MCKINNEY L W. Effects of fineness ratio and reynolds number on the low-speed crosswind drag characteristics of circular and modified-square cylinders [M]. Washington, D.C., USA: National Aeronautics and Space Administration, 1960: 8-16.
- [57] WANG Y, LIU J, LIU X, et al. Revealing the influence of material properties of shaped charge liner on penetration performance via numerical simulation and machine learning [J]. *Materials*, 2025, 18(12). DOI: 10.3390/ma18122742.
- [58] BYRD R H, LU P, NOCEDAL J, et al. A limited memory algorithm for bound constrained optimization [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1995, 16(5): 1190-1208. DOI: 10.1137/0916069.
- [59] BEMPORAD A. An L-BFGS-B approach for linear and nonlinear system identification under  $l_1$  and group-lasso regularization [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2025, 70(7): 4857-4864. DOI: 10.1109/TAC.2025.3541018.