爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves
DOI：10.11883/bzycj-2026-0262

入水角度与尾翼对高速入水弹体横向冲击载荷和弹道特性的影响*

郑晓波，薛洪，宋海生，欧阳科，李敏灵，姚伟光，李腾，桂毓林

（1.中国工程物理研究院流体物理研究所，四川 绵阳 621900）

摘　　要：为揭示入水角度与尾翼对高速入水弹体横向冲击载荷和弹道特性影响规律，本文基于流体域体积（Volume of Fluid, VOF）多相流方法、改进的延迟分离涡模拟（Improved Delayed Detached-Eddy Simulation, IDDES）湍流模型及 Schnerr-Sauer 空化模型，建立了弹体倾斜入水的数值仿真模型，并通过水平入水实验验证数值仿真模型。通过数值模拟系统研究了入水角度、弹体密度及尾翼结构有无对弹体高速倾斜入水过程的影响。研究结果表明：不同入水角度弹体在水下均经历多周期尾拍运动，小角度入水具有更低的水下环境压力因而提升水下侵彻距离；提升弹体密度可增加尾拍次数，延长尾拍周期从而提升侵彻距离；弹体密度的提升降低了弹体横向过载，速度衰减更慢，尾拍阶段的侵彻距离大幅提升。

关键词：水下运动；尾翼；冲击载荷；空泡；尾拍

中图分类号：O352　　**国标学科代码**：13025　　**文献标识码**：A

Effects of water entry angle and tail fins on transverse impact load and ballistic characteristics of high-speed water entry projectiles

ZHENG Xiaobo，XUE Hong，SONG Haisheng，OU Yangke，LI Minling，YAO Weiguang，LI Teng，GUI Yuli

(*1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: Based on the VOF multiphase flow method, IDDES turbulence model and Schnerr-Sauer cavitation model, a numerical simulation model of a projectile with tail fins inclined into the water is established to reveal the influence of water entry angle and tail fins on the transverse impact load and ballistic characteristics of high-speed projectiles. Horizontal water entry tests were conducted using a 120-mm balanced gun launcher, an assembled water tank, a high-speed camera system, and acceleration recorders. The test projectile consisted of a nose cavitator, a middle conical section, an aft cylindrical section, and tail fins. The underwater motion attitude and cavity evolution of the projectile were captured, and the triaxial impact load histories were recorded. By comparing the cavity evolution and transverse impact load time histories between the experiment

*收稿日期：2026-08-14；　修回日期：2026-10-28；
基金项目：中物院科技创新发展基金（JCXKS12026011）；
第一作者：郑晓波（1986－ ），男，博士，高级工程师. E-mail: zxb3710@163.com；
通信作者：桂毓林（1973－ ），男，博士，正高级工程师. E-mail: ifp015@163.com。

录用稿件，非最终出版稿

and simulation, the computational accuracy of the simulation model was validated. And the mesh independence of the simulation model was verified. The validated model was then used to investigate the effects of different water entry angles, projectile densities, and the presence or absence of tail fins on the transverse impact loads and ballistic characteristics during high-speed oblique water entry of a cylinder-cone projectile with an angle of attack. The results show that the projectiles with different entry angles underwater all undergo several tail-slapping motions, with the low-angle entry has lower underwater environmental pressure, thus increasing the underwater penetration distance. Increasing the projectile density increases the number of tail slaps and prolongs the tail-slap period, thereby increasing the penetration distance. Increasing the projectile density also reduces the transverse overload and leads to slower velocity attenuation, substantially increasing the penetration distance during the tail-slap stage.

Keywords: underwater motion; fin; impact load; cavity; tail-slapping

0 引言

超空泡减阻技术作为水下高速运动体的革命性解决方案，通过弹体水下高速运动时产生的超空化现象[1-3]，在弹体外表面形成稳定的包覆空泡，可显著降低流体黏性阻力，大幅提升航行体水下运动速度和运动距离。通过该技术驱动的超空泡射弹系统在对水下目标（鱼雷、水雷、UUV 等）毁伤等现代海战场景中展现出重大应用潜力[4,5]。当射弹高速（通常大于 100 m/s）在水下运动时，会诱发气-液-汽三相介质的剧烈相变过程，形成具有强瞬态特性的非定常空泡流场。此过程中伴随空泡断裂、湍流掺混、尾流拍击等复杂物理现象[6,7]，导致流体动力载荷呈现高度非线性特征。非线性载荷不仅会影响弹体水下运动姿态和弹道轨迹，也会对弹体内部结构产生不利影响。因此，系统揭示多相流场演化机理及其与弹体载荷的耦合机制，具有重要的理论意义和军事应用价值。

弹体在水下高速运动过程中，受到初始扰动或非对称载荷的影响，弹体在超空泡内绕头部转动，导致出现弹体尾部与超空泡壁面的周期性碰撞，即尾拍现象[8,9]。Rand 等人[10]基于动力学理论模型，研究发现尾拍频率与弹体速度成反比，初始尾拍角速度越大，尾拍次数越多。Ruzzene 等人[11]将弹体简化为细长杆，建立了以弹体头部为中心的尾拍动力学模型，给出了在尾拍横向冲击作用下的弹体结构响应特征。此后，研究人员通过实验和数值模拟两方面对弹体尾拍开展了大量研究。Hrubes[12]系统开展从亚音速到超音速的弹体水下实验，采用高速摄影技术捕捉到不同速度下超空泡演化规律和弹体水下弹道特征，发现尾拍可以有效提升弹体水下运动稳定性。赵成功等人[13]通过实验系统研究了细长形弹体在不同初始空化数条件下水中高速运动过程中超空泡演化特征，发现初始扰动角速度对弹体水下弹道有一定的影响。侯东伯等人[14]通过水洞试验研究了航行体模型在不同压差系数、通气率下的尾部空泡形态与压力脉动特征。鹿麟等人[15]针对弹丸倾斜入水过程中的尾拍运动问题开展了实验研究，发现随着入水初速的提高，尾拍过程中弹尾最大沾湿面积逐渐增大；随着弹丸尾拍次数的增加，尾拍时间间隔逐渐缩短，单次尾拍过程中速度衰减幅值增大，同时弹丸损耗的能量逐渐增多，弹丸存速能力下降。

随着计算流体力学技术(CFD)的发展，越来越多的研究人员通过多相流数值仿真开展弹体水下尾拍运动研究[16]。张劲生等人[17]采用数值仿真方法，研究了弹体质量、刚度和初始角速度对超空泡射弹尾部冲击载荷的影响规律。赵成功等人[18]采用基于均质平衡流理论，通过 CFD 方法系统研究了质

录用稿件，非最终出版稿

心位置对超空泡弹体尾拍运动特征和超空泡形态特征的作用规律。陈伟善等人[19]采用数值模拟方法研究弹体空化器形状对尾拍运动的影响规律，并对比分析了多种头型空化器对超空泡射弹水下弹道特征的影响规律。梁景奇等人[20]采用移动计算域技术，建立了弹体和空泡双向耦合模型，研究了在不同初始速度条件下弹体水下运动过程中的尾拍运动特征。马文轩等人[21]采用 CFD 方法模拟了含空化现象的多相流动，获得弹体阻力系数与头部几何形状之间的关系，并完成弹体外形优化设计。刘如石等人[22]基于有限体积法和 Mixture 多相流模型，详细分析了不同尾部结构（尾椎、尾翼、尾裙等）的弹体尾拍运动特征。李尧等人[23]基于 VOF 多相流方法开展了跨介质入水结构体及其附体带攻角倾斜入水工况下自空泡产生、发展至溃灭全过程的载荷研究，分析了入水结构体主体及附体结构入水全过程的载荷特性。

目前对超空泡弹体水下运动特征的研究主要集中在弹体运动特征和空泡演化规律方面，对弹体在发生尾拍运动时的横向冲击载荷特性研究较少。本文采用实验测试和数值仿真相结合的方法，首先基于成熟的弹载三轴加速度测试技术[24,25]，开展水平入水实验，获得弹体在水中高速运动时空泡演化规律、尾拍运动特征和弹体冲击载荷信号。随后基于雷诺时均 N-S 方程、VOF 多相流模型、DES 湍流模型以及 Schnerr-Sauer 空化模型建立水平高速入水数值仿真模型，根据水平实验结果对模型参数进行校核，提高模型的置信度。最后采用校核后数值仿真模型分析研究入水角度、弹体密度、尾翼有无对弹体横向冲击载荷和弹道特性的影响规律。

1 水平入水实验

水平入水实验系统由发射装置、实验水箱、拦截装置和高速摄像系统组成，如图 1 所示。实验水箱尺寸为长 9m、宽 1.5m、高 1.5m。水箱顶部开口，底部、左侧、后侧使用钢板和角钢进行拼接，前侧设置多个钢化玻璃观察窗用于观察弹体在水中的运动姿态以及空泡演化过程。水箱右侧设置方形入水窗口，窗口使用有机玻璃进行密封。实验前对水箱注水，水深维持在 1.5m，水箱上方为自由液面。采用 120mm 口径平衡炮作为发射装置，平衡炮火线高度为 750mm，弹道线瞄准水箱入水窗口中心。为了可以准确获取弹体在水中的运动以及空泡演化参数，在水箱后面板的弹道线上粘贴直径为 Φ200mm 的圆形标记。高速相机幅频为 5000 幅每秒，分辨率为 1024×288。为了有效回收弹体，在水箱左侧放置由沙袋和钢筋混凝土组成的拦截装置。

录用稿件，非最终出版稿

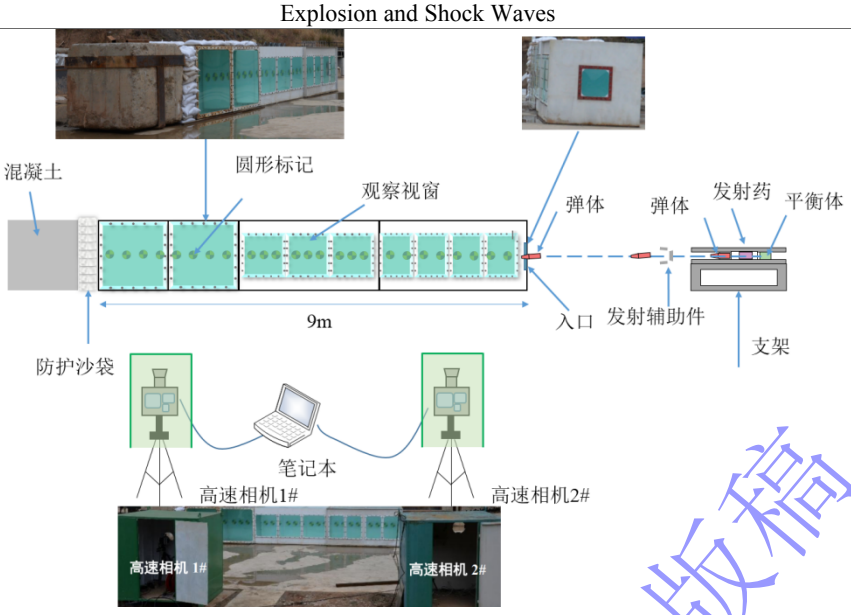


图 1　水平入水实验系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the horizontal water entry system

实验弹质量为 4.8　kg，由空化器、锥段、圆柱段和 6 个均布尾翼组成。弹体外形见图 2。弹体头部空化器直径为 D_1=30mm，头部空化器长度 L_1 为 26mm，弹体头部锥角 120°，弹体重量 4.8kg。弹体全长 420mm，柱段长 180mm。尾翼厚度 10 mm，尾翼高度(b)20 mm，尾翼长度(a)24 mm，尾翼倾角(α)为 45°。弹体内部通过挖盲孔调节质心，并放置加速度记录仪。弹载三轴加速度记录仪由山西科泰航天防务技术股份有限公司提供，实物图见图 3。记录仪安装于弹体内部，通过压环与弹体连接。记录仪内装有三轴压电加速度传感器，量程为-5000g~5000g，测量精度＜5%。

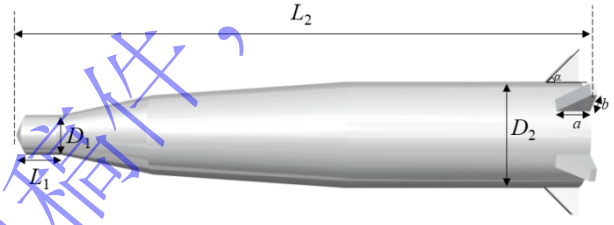


图 2　实验弹外形示意图

Fig. 2　Geometrical characteristics of the vehicle in the investigation.



图 3　加速度记录仪

Fig. 3　Accelerometer

录用稿件，非最终出版稿

加速度记录仪测试原理如图 4 所示。三轴压电冲击传感器装在记录仪内部，负责感知外界的冲击信号并将其转换为电信号。记录仪中的信号处理模块负责将传感器输出的电信号进行处理和滤波，转换成可以供采集的电压信号。A/D 转换模块负责将信号处理模块输出的模拟信号进行信号调理、ADC 变换，并将采集的模拟量数据编码形成一定格式的数据流。控制模块负责整个记录仪工作流程控制、数据重新编码等工作。记录模块负责数据储存。电源模块负责给记录仪供电。

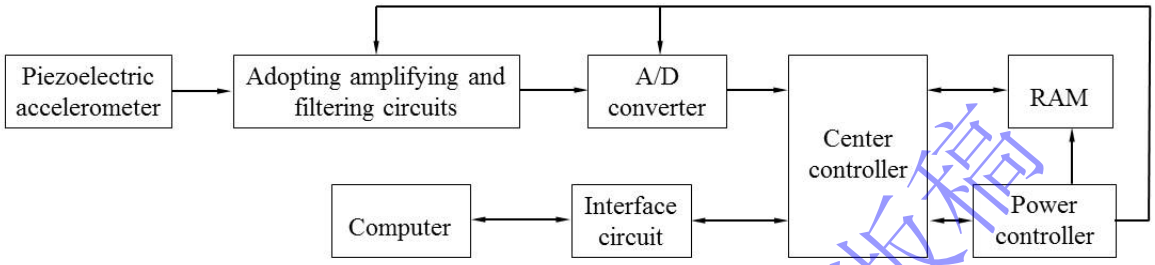


图 4　加速度记录仪工作原理图

Fig. 4　Schematic diagram of accelerometer

2 数值仿真方法

2.1 基本方程

弹体高速入水运动过程涉及水、空气和水蒸气的多相耦合作用，具有强瞬时性和非定常性，同时伴随有湍流、空化、弹道偏转等复杂流动现象。本文基于重叠网格技术和有限体积法结合 VOF 多相流模型建立了弹体高速入水仿真计算模型。模型中各相（水、空气、水蒸气）共享速度场和压力场，并假设整个过程中流体是不可压缩的，并忽略流体黏性产生的热耗散。控制方程如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho \boldsymbol{v})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{v})+\nabla(\rho \boldsymbol{v}\boldsymbol{v})=-\nabla P+\rho g+\nabla(\mu(\nabla \boldsymbol{v}+\nabla \boldsymbol{v}^{T})) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{v}=\frac{\alpha_a \rho_a \boldsymbol{v}_a+\alpha_w \rho_w \boldsymbol{v}_w+\alpha_v \rho_v \boldsymbol{v}_v}{\rho} \tag{3}$$

$$\rho=\alpha_a \rho_a+\alpha_w \rho_w+\alpha_v \rho_v \tag{4}$$

其中，ρ 是混合相密度，t 为时间。α 为体积分数，下标 a、w 和 v 分别代表空气、水和水蒸气（下同），且有 $\alpha_a+\alpha_w+\alpha_v=1$。$\boldsymbol{v}$ 为各相速度矢量，P 是混合介质压力，g 是重力加速度。μ 是混合项动力粘度系数，表达式为：

$$\mu=\alpha_a \mu_a+\alpha_w \mu_w+\alpha_v \mu_v \tag{5}$$

其中，μ_a, μ_w, μ_v 分别为各相的动力粘度系数。

本研究中，使用了改进的延迟分离涡模拟（Improved Delayed Detached-Eddy Simulation, IDDES）方法[26]。分离涡模拟（Detached-Eddy Simulation, DES）是一种混合建模方法[27]，它将流体某些部分

录用稿件，非最终出版稿

的雷诺平均方法（Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS）模拟特征与流体其他部分的大涡模拟（Large Eddy Simulation, LES）特征相结合。在靠近固体边界使用 RANS 模式进行求解；在自由流场区域采用 LES 求解。因此，所需的网格数量比 LES 的要求更低，显著降低了计算成本。DES 方法中，RANS 到 LES 的转换完全取决于网格尺度大小。某些情况下，RANS 会提前转换为 LES 求解，导致应力耗散（Modeled Stress Depletion, MSD），从而带来网格诱导分离、对数层不匹配等问题。为解决网格诱导分离，Spalart 等[28]提出延迟脱体涡方法（Delayed Detached-Eddy Simulation，DDES）来解决网格诱导分离问题。IDDES 方法是将 DDES 方法与 WMLES（Wall-Modelling LES）结合进一步解决对数层不匹配问题。在 DES 模型中的 RANS 模拟部分，选择了剪应力传输 SST k-ω 湍流模型。

弹体高速入水时会发生空化现象形成空泡，引入空化模型来精确模拟空泡演化过程，结合计算效率和应用经验，采用 Schnerr-Sauer 空化模型描述液相和气相之间的质量传递：

$$\begin{cases} R_e = F_{vap}\dfrac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha_v\left(1-\alpha_v\right)\dfrac{3}{R_B}\sqrt{\dfrac{2}{3}\dfrac{\left(P_v-P\right)}{\rho_l}}, P_v > P \\ R_c = F_{cond}\dfrac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha_v\left(1-\alpha_v\right)\dfrac{3}{R_B}\sqrt{\dfrac{2\left(P-P_v\right)}{\rho_l}}, P_v \le P \end{cases} \tag{6}$$

其中，R_e 和 R_c 分别为水蒸气的生成源项、凝结源项，ρ_v 和 ρ_l 分别为水相和水蒸气相的密度，α_v 为水蒸气相的体积分数。u_v 为水蒸气相的速度，P_v 为饱和蒸气压，R_B 为空泡半径。气化系数 F_{vap} = 50，冷凝系数 F_{cond} = 0.01。在数值模拟中，水的密度为 997.6kg/m^3，动力粘度为 8.89×10^{-4} Pa-s，空气的密度为 1.18kg/m^3，动力粘度为 1.86×10^{-5} Pa-s。

2.2 模型参数

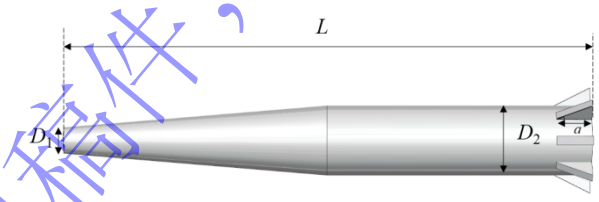


图 5 弹体结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the projectile

本文计算模型为带尾翼柱锥弹体，如图 5 所示。弹体长度 L = 600 mm，锥段和柱段各 300 mm，D_1 和 D_2 分别为 30 mm 和 80 mm。三角形尾翼总计 6 个，沿圆柱段周向均布，单个长度 a = 40mm，尾翼与弹体轴线倾角为 30°，厚度为 10 mm。弹体质量为 11.6kg，质心距离前端 360mm。弹体入水速度为 300m/s，入水角度 β 取 30°、45°、60°、75°，入水攻角 θ 为 5°。图 6 以 β = 60°、θ = 5°示意，弹体速度与水平面夹角为入水角 β。

录用稿件，非最终出版稿

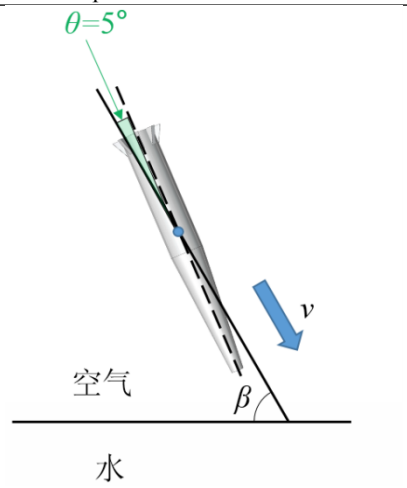


图 6　入水过程中角度 θ 和 β 示意图

Fig. 6　Schematic diagram of the θ and β during water entry

2.3 计算域网格划分

图 7 为流体计算域及网格划分图。流体计算域分为空气域与水域，由于本文需要计算从空泡形成至夹断溃灭全过程并考虑消除壁面效应的影响，空气和水域尺寸分别为 50 m×50 m×15 m 以及 50 m×50 m×70 m。空气域顶端为压力出口，水域底面为壁面，其余面为对称边界。根据前述验证的基于重叠网格的数值模型中网格划分方案，按照中网格划分方案的路径加密范围、网格增长速率进行网格划分，网格总数约 2670 万。

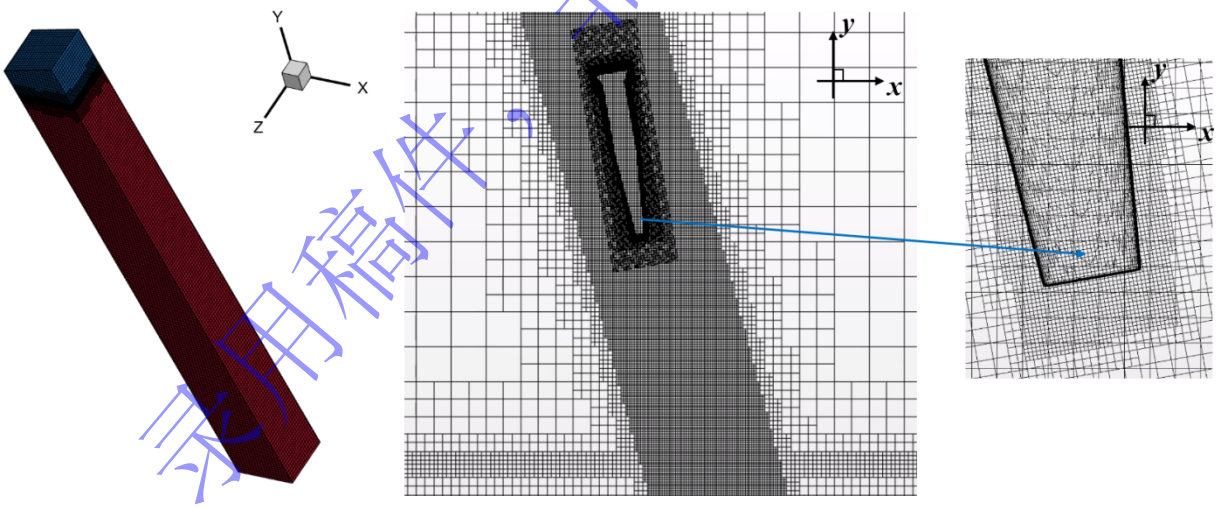


图 7　计算域网格划分

Fig. 7　Volume fraction of water on the mid-plane for different meshes

2.4 数值模型校核

开展入水计算之前，首先对高速入水数值计算模型进行网格无关性验证、有效性验证。利用重叠网格方法，根据实验水箱构型、实验弹模型、初始条件建立计算域，计算域分为背景域和重叠域。在背景域中，对弹体运动路径、自由液面进行加密。在重叠域中的弹体壁面附近进行局部加密处理，如图 8 所示。采用三套网格(分别为粗网格、中等网格和细网格)开展网格无关性验证，以中等网格数

录用稿件，非最终出版稿

值结果和入水试验结果开展有效性验证。三组网格的数量分别约为 967 万、1450 万、1948 万。三组网格背景域基础尺寸分别选择 80 mm，70 mm，60 mm。而图 7 中背景域网格基础尺寸为 70 mm，即与中等网格的基础尺寸相同。

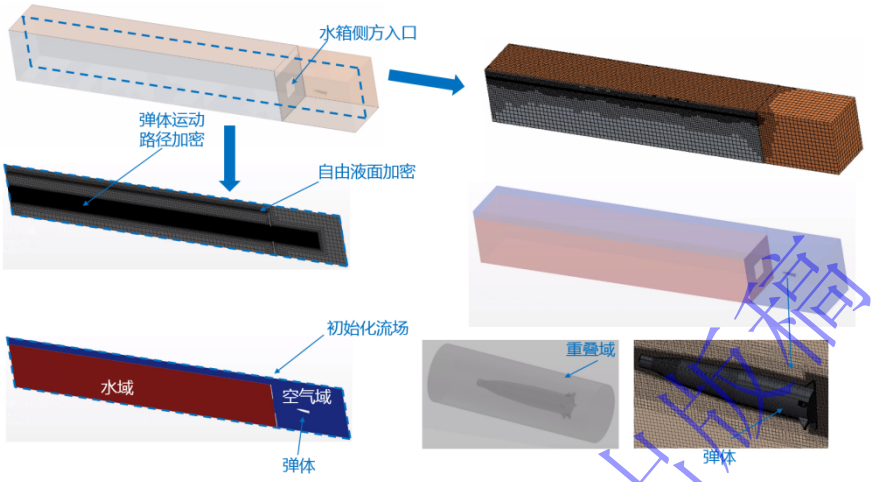


图 8　计算域示意图

Fig. 8　Schematic diagram of accelerometer

水平入水实验主要验证本文数值模型在多相流、空化、横向过载方面的有效性。仿真模型的基本控制方程、湍流模型、空化模型和重叠网格方法具有普适性，因此水平入水实验与数值校核可证明该模型对水下高速运动问题的基础预测能力。在有效性验证中，将空泡形态和载荷变化作为验证参数。图 9 上侧和下侧分别为数值模拟与实验获取的空泡形态。由于大范围视场相机存在图像边缘畸变，因此在图中标注了水箱前侧各个钢板的边界 *a*-*f*，以及对应的水箱后侧各钢板边界 *a*’-*f*’。从 *a*(*a*′)到 *f* (*f*′)与水箱最右侧距离分别为 9 m,7.5 m,5 m,4 m,3 m,1.5 m。弹体在水箱内经历了近 9 m 行程时，数值空泡在整体形态上与实验符合较好，各尾拍位置附近形成的空泡凸起形态如 A 点到 E 点所示也对应较好。证实了该数值模型在空泡形态上具有较好的预测精度。数值模拟空泡在入水 0-3 m 区域与实验对应区域有所差别的原因，随着弹体的运动深入，玻璃碎片、弹托、推板等跟随弹体进入水箱，在窗口附近形成尺寸较大的不规则空泡群，造成 0-3 m 区域水体浑浊和空泡变形。

录用稿件，非最终出版稿

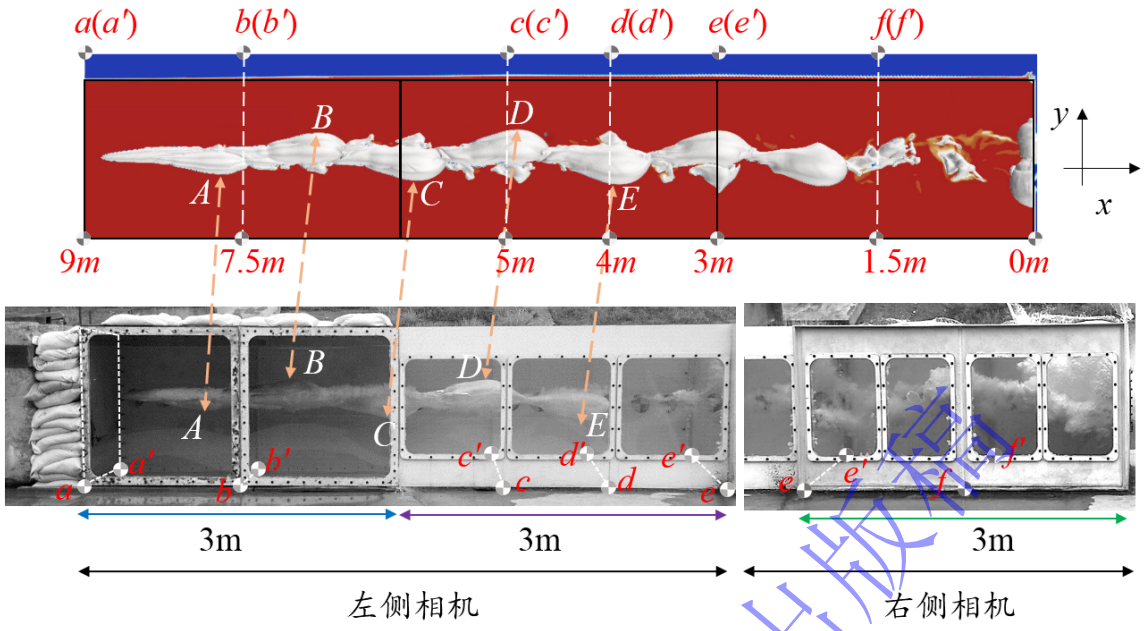


图 9　数值和实验空泡对比

Fig. 9　Comparison of cavity between numerical simulation and experimental results.

对试验弹内部过载记录仪获取的横向过载与数值模拟对比如图 10。数值模拟捕捉到的首个峰值(约 425g, 12.8ms)与实验值(约 433g, 12.7ms)偏差低于 2%，后续振荡频率偏差在 5%以内。两者横向过载在峰值、频率、衰减趋势上吻合良好，验证了本文数值模型的有效性。

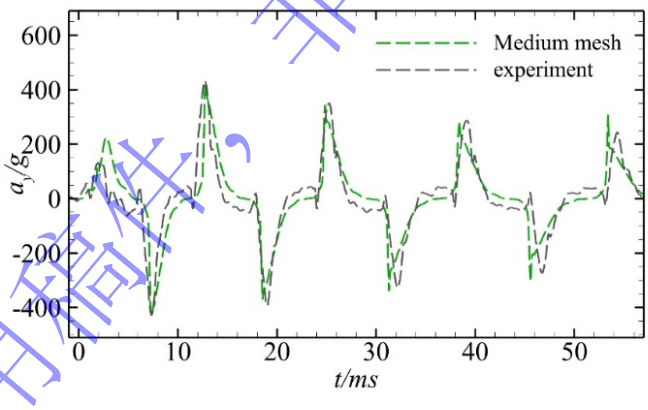
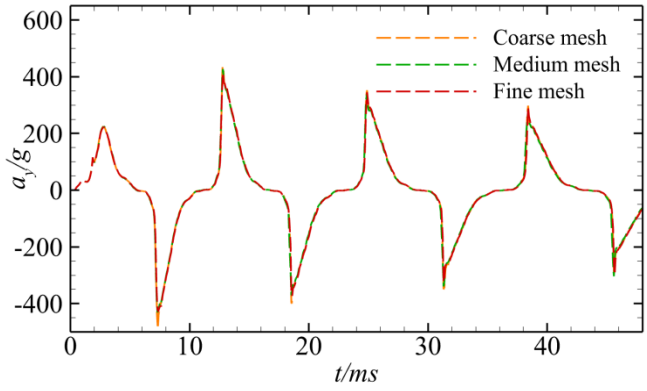


图 10　数值和实验横向载荷对比

Fig. 10　Comparison of transverse impact load between numerical simulation and experimental results



录用稿件，非最终出版稿

图 11　不同网格的横向过载对比

Fig. 11　Comparison of transverse impact load under different meshes

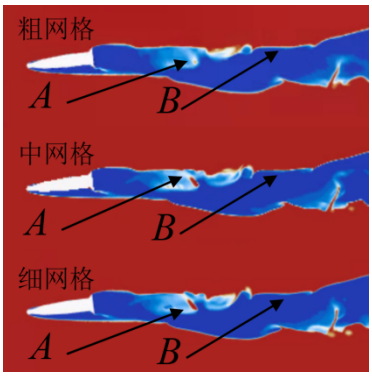


图 12　不同网格的弹体中截面水相体积分数场

Fig. 12　Volume fraction of water on the mid-plane for different meshes

如图 11 所示，依据三组网格，利用建立的入水仿真模型进行无关性验证，得到不同网格数量下各弹体横向过载。结果表明，粗网格的横向过载峰值在第 7.3ms 都存在较为明显的毛刺现象，其过载值约为 470g,而中网格和细网格分别为 428g 和 423g。粗网格相比于中网格和细网格的过载偏差均超过 5%，而中网格和细网格的过载偏差小于 2%。相似的粗网格过载毛刺现象也发生在 12.8ms 和 18.5ms，而中网格和细网格的过载在 12.8ms 和 18.5ms 偏差很小。同时对比空泡形态，粗网格和中网格、细网格相比，在流动细节的揭示上有明显区分。例如，图 12 中的 A 位置，粗网格对于空泡内部组分场的解析精度较差，而中网格和细网格均能够明显捕捉到空泡内部的水相聚集区域。在 B 位置，粗网格的界面较为模糊，而中网格和细网格均能够解析更清晰的气水交界面。根据上述三组网格划分策略，针对本文后续的斜入水侵彻工况也进行了网格无关性验证。该工况弹体入水为 75°，附带 5° 攻角，即起始姿态角均为 80°。ρ=15g/cm^3。三组网格的数量分别约为 1755 万、2670 万、3612 万。三组网格背景域基础尺寸分别选择 80 mm，70 mm，60 mm。图 13 显示了入水弹体偏转角度变化及空泡形态对比。在入水 25.5ms 时，从三个空泡形态的左上角气水交界面可知，粗网格的弹体从云图左上角发展至当前位置时，偏转程度低于中网格和细网格的弹体偏转更小，而结合三组网格偏转角度的对比，在 25.5ms 时刻，三组网格的偏转角分别为 26.2°、29.9° 和 31.0°。从粗网格到中网格，偏转角的偏差为 14.1%，从中网格到细网格，偏转角的偏差为 3.6%，因此，综合考虑总网格数量和计算效率，在后续的研究中，按照中网格划分方案的路径加密范围、网格增长速率等进行本文后续工况进行网格划分和计算。

录用稿件，非最终出版稿

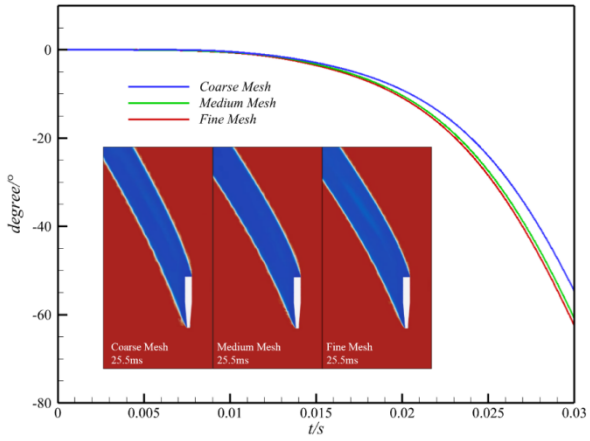


图 13　不同网格的弹体中截面水相体积分数场

Fig. 13　Volume fraction of water on the mid-plane for different meshes

3 入水角度对带尾翼弹体横向冲击载荷影响

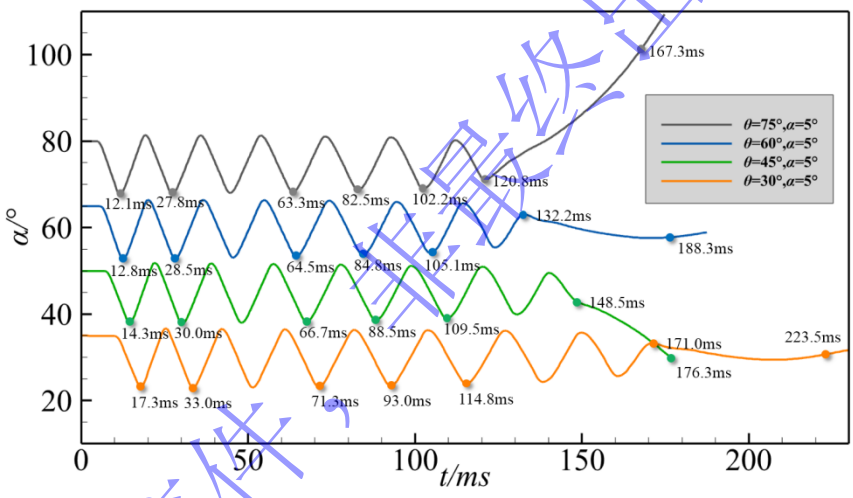


图 14　带尾翼弹体姿态角随时间变化

Fig.14　The attitude angle of projectile with tail fins varies with time

图 14 显示了带尾翼弹体在攻角 $\theta=5°$、入水角度 β 分别为 75°、60°、45°、30°时，姿态角随时间变化。姿态角 $\alpha=\beta+\theta$，因此弹体起始姿态角分别为 80°、65°、50°、35°。不同入水角度的弹体在入水后均经历了多周期的尾拍运动，尾拍幅度都随着时间推移而逐渐降低，直到弹体完成各自的最后一次尾拍后，进入溃灭沾湿阶段。随着入水角度 β 从 75°降低到 30°，弹体入水后的第 1 次尾拍时刻从 12.1ms 逐渐延后至 17.3ms；第 11 次尾拍时刻从 102.2ms 逐渐延后至 114.8ms，因此弹体平均尾拍周期从 9.01ms 单调递增至约 9.75ms。此外，随着入水角度 β 从 75°降低到 30°，弹体的尾拍总次数单调递增。$\beta=75°$入水时，弹体经历了第 13 次尾拍(t=120.8ms)，而 $\beta=30°$时，弹体尾拍次数延长至第 16 次(t=171.0ms)。

为探究尾拍次数增加、尾拍周期增大对弹体侵彻距离的影响，图 15 显示了弹体质心轨迹随时间的变化。弹体侵彻距离 s 定义为入水后某一时刻的弹体位置与入水点的直线距离。将图 14 中不同入

录用稿件，非最终出版稿

水角度的弹体从入水点至各自最后一次尾拍时刻的侵彻距离进行对比(β=75°时 t = 120.8ms、β=60°时 t = 132.2ms、β=45°时 t = 148.5ms 和 β=30°时 t = 171.0ms)，以实心圆点标记于图 15 中。在图 15 中，上述实心圆点的左上区域为尾拍阶段，实心圆点的右下方区域为空泡溃灭失稳阶段。在尾拍阶段，弹体的轨迹均呈现近似直线，但随着入水角度 β 从 75°降低到 30°，带来了尾拍次数增加和尾拍周期增大，进一步导致了弹体尾拍阶段的侵彻距离从 s = 23.94m 单调递增到 s = 30.85m。

弹体侵彻深度的单调递增与弹体的速度下降趋势有关。图 16(a)和(b)分别显示了弹体轴向和横向速度随时间的变化。如图 16(a)所示，随着入水角度 β 从 75°降低到 30°，弹体的轴向速度下降趋势越来越慢，因此侵彻深度增加。如图 16(b)，第一次尾拍时弹体横向速度峰值随着入水角度 β 从 75°降低到 30°而逐渐下降；随着时间推移，在第 13 次尾拍时，随着入水角度 β 从 75°降低到 30°，横向速度峰值而逐渐上升。上述差异说明了随着入水角度 β 从 75°降低到 30°，横向速度的下降趋势越来越慢。考虑到弹体轨迹自入水以后呈现近似直线行程无偏移，且不同入水角度弹体附带攻角均为 5°，因此可忽略重力在尾拍阶段的影响。横向速度的下降趋势变慢的原因为入水角度越小，水深压力增加越慢。

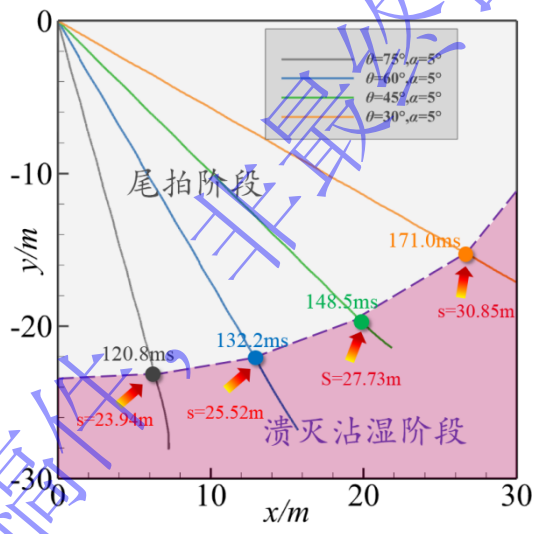
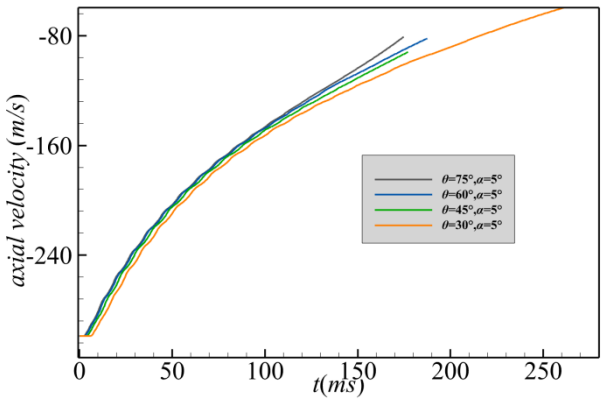


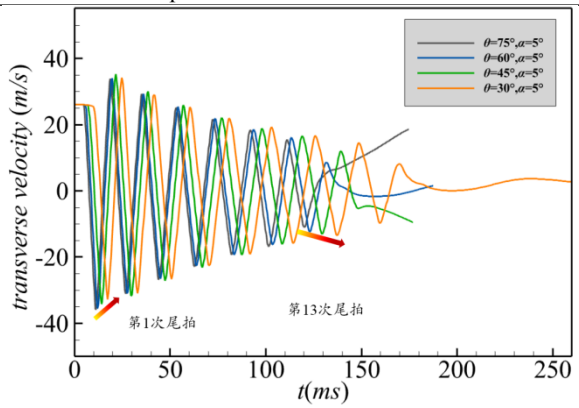
图 15　带尾翼弹体轨迹

Fig.15　The trajectory of projectile with tail fins



(a)

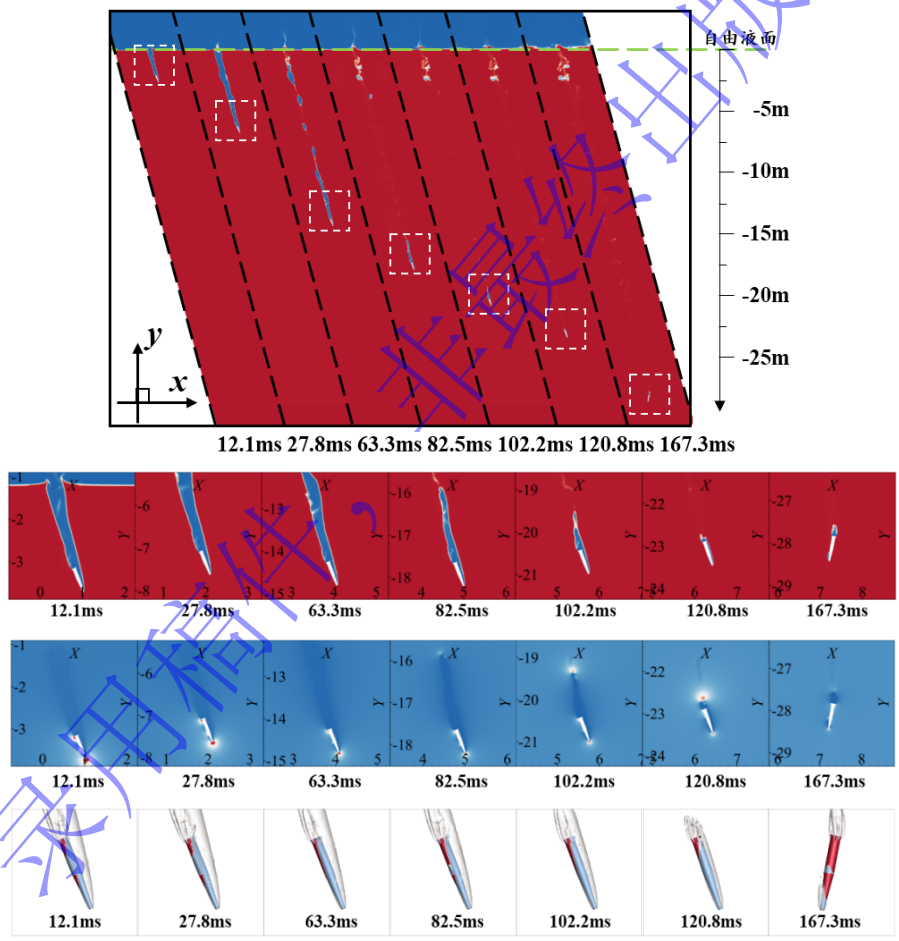
录用稿件，非最终出版稿



(b)

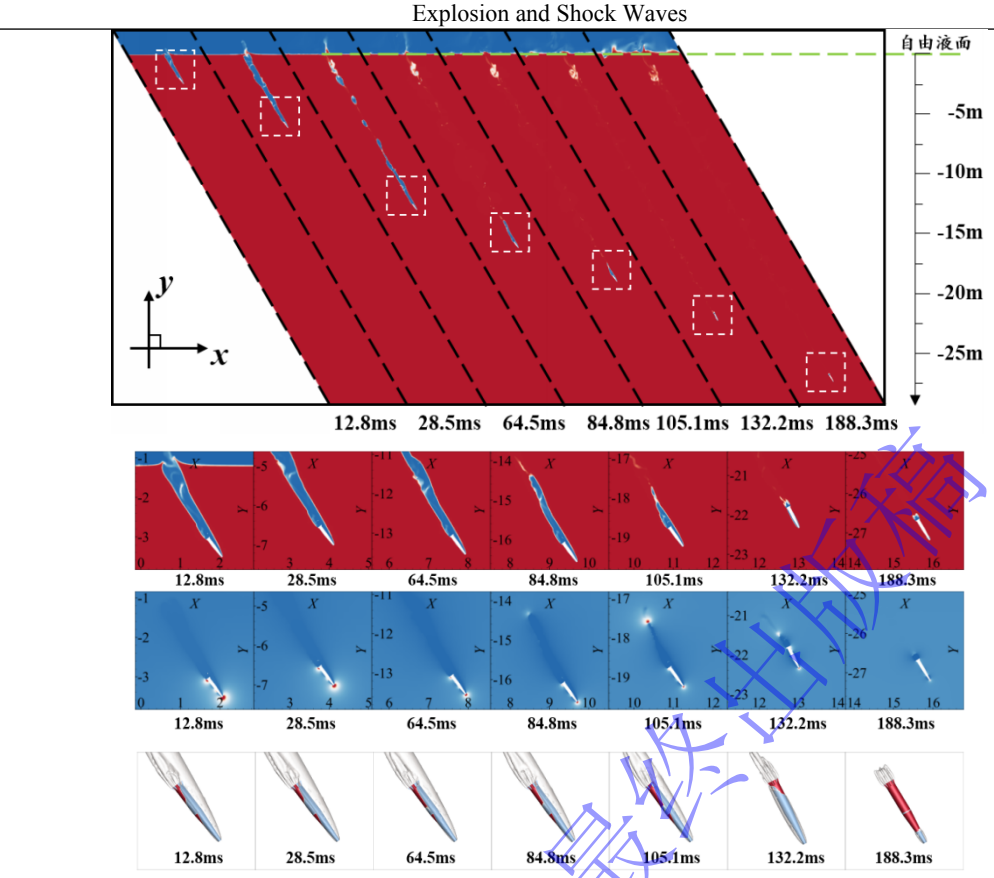
图 16　带尾翼弹体速度随时间变化。(a)轴向速度；(b)横向速度

Fig.16　The velocity of projectile with tail fins varies with time. (a) axial velocity; (b)transverse velocity

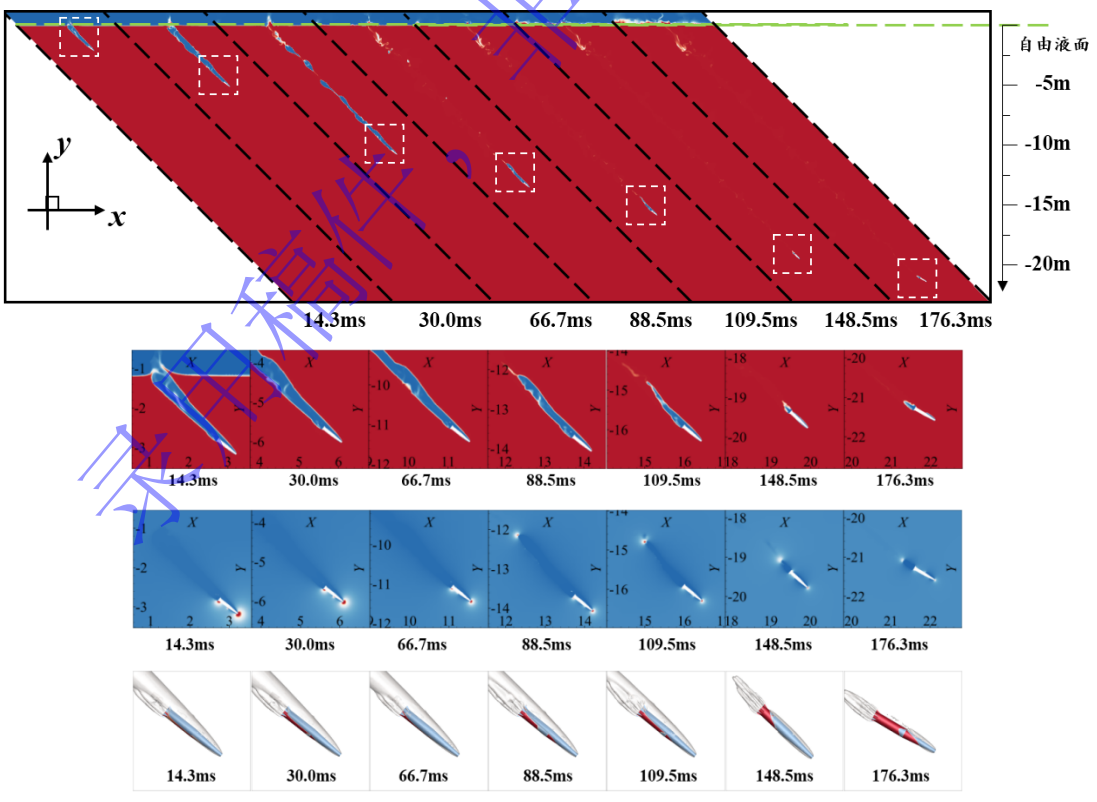


(a) $\beta = 75°$、$\theta = 5°$

录用稿件，非最终出版稿

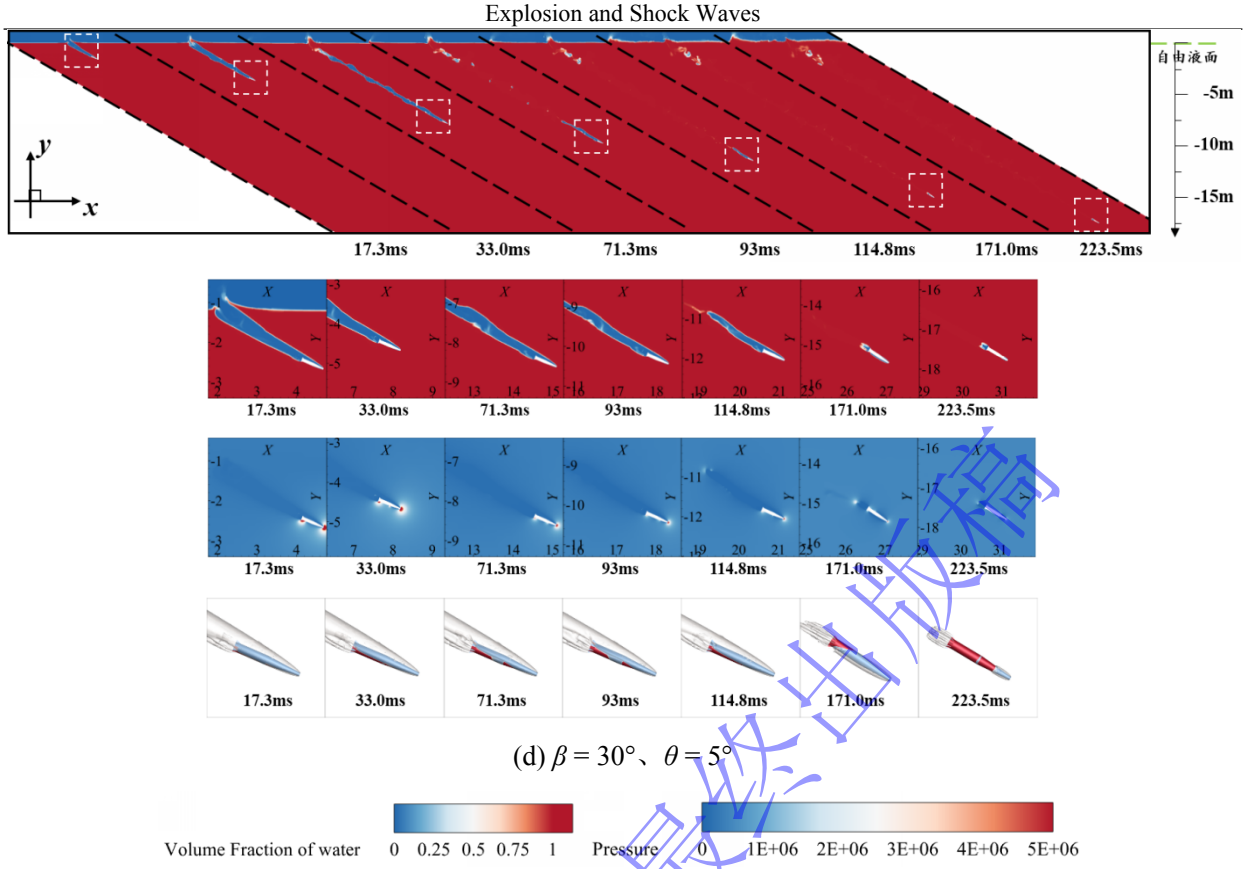


(b) $\beta = 60°$、$\theta = 5°$



(c) $\beta = 45°$、$\theta = 5°$

录用稿件，非最终出版稿



(d) $\beta = 30°$、$\theta = 5°$

图 17　带尾翼弹体中截面体积分数场、压力场和空泡

Fig. 17　Volume fraction of water, pressure on the mid-plane, and cavity for projectile with tail fins

图 17 展示了高速倾斜入水不同阶段的物理场分布与空泡形态，其中(a)-(d)子图分别对应入水角度为 75°、60°、45°和 30°。在每个子图(a-d)中：第 1 行为不同时刻带尾翼弹体中截面的水相体积分数场；第 2 行为第 1 行白色虚线框区域的局部水相体积分数场放大图；第 3 行为第 1 行图中白色虚线框区域的局部压力场放大图；第 4 行展示了不同时刻的弹体姿态与空泡形态。

如图 17(a)和图 14 所示，弹体经历第 1 次尾拍时(t = 12.1ms)，头部形成高压区，此时空泡尚未闭合；第 7 次尾拍时(t = 63.3ms)，空泡已在自由液面下方闭合，并在中部发生断裂，形成了多个独立空泡；第 11 次尾拍时(t = 102.2ms)，尾部高压区向弹体方向移动，空泡已收缩至弹体尾部约 1 个弹长位置；最后一次尾拍时(t = 120.8ms)，空泡体积进一步收缩，尾部高压区移动至弹体尾部附近，空泡整体长度进一步缩小。随后，弹体进入溃灭沾湿阶段，在 t = 167.3ms, 空泡仅残存于弹体锥段的空化头附近、弹体肩部部分区域，而弹体的锥段和柱段大部分区域都已沾湿，尾翼完全沾湿。

随着入水角度从 75°减小至 30°，如图 17(b-d)和图 14 所示，第 1 次尾拍时刻从 12.1ms 延后至 17.3ms，且弹体尾部的沾湿面积减小(图 17(a-d)第 4 行)。对比 75°入水和 30°入水的第 5 次尾拍时刻，入水角度 75°时出现空泡中部断裂现象(图 17(a), t = 63.3 ms)；而入水角度 30°时，空泡整体依然保持完整，仅在中部出现了颈缩现象(图 17(d), t = 71.3 ms)。以上结果表明，减小入水角度，将延缓空泡溃灭过程，导致了空泡体积向弹体方向收缩花费的时间延长，造成弹体沾湿现象出现更晚。对比第 11 次尾拍时刻的水相体积分数(图 17(a)，t = 120.8ms、图 17(d)，t = 114.8ms)，入水角度从 75°减小至

录用稿件，非最终出版稿

30°时，空泡长度从约 3 倍弹长增加至约 6 倍弹长。空泡剩余长度的增加导致了额外的尾拍次数：第 11 次尾拍后，75°入水角度下约 3 倍弹长剩余空泡仅支撑了第 12、第 13 次尾拍(图 17(a)，t = 120.8 ms)，随后进入溃灭沾湿阶段；30°入水角度下约 6 倍弹长的剩余空泡支撑弹体至第 16 次尾拍后(图 17(d)，t = 171.0 ms)才进入溃灭沾湿阶段。

实际上，不同入水角度弹体的空泡演化过程并无本质区别，主要差异体现在空泡溃灭速度、尾拍次数、尾拍频率。弹体在尾拍阶段的运动轨迹均为准直线，尾拍时刻的沾湿现象也无显著差别，进一步证实了上述差异的主要原因是入水角度单调减小时，水深压力逐渐降低。

不同入水角度下弹体的横向过载如图 18 所示。弹体以非零攻角入水时，一侧首先撞击水面并开始划水。随后弹体进行尾拍运动，受抨击水面及划水影响，前几次尾拍产生的横向过载并未随入水角度减小而单调降低，这与弹体前几次尾拍时刻的横向速度峰值随角度变化非单调的现象相符。经过第 1 至 5 次尾拍的调整后，从第 6 次尾拍开始，水深压力随入水角度减小而显著降低，导致横向过载呈现随入水角度减小而单调下降的趋势。

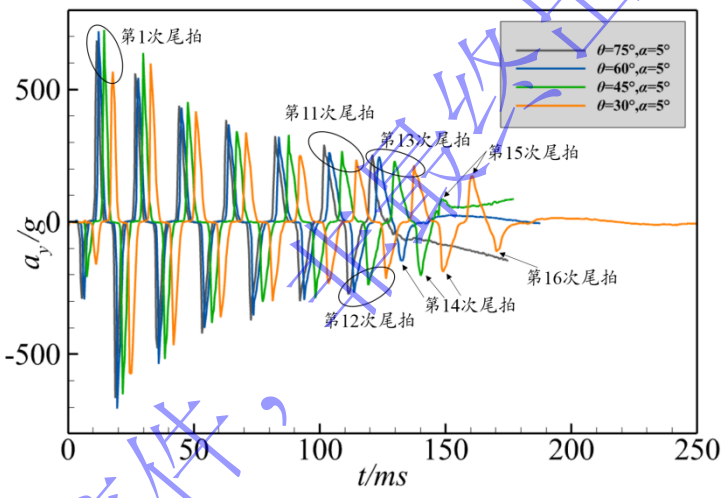
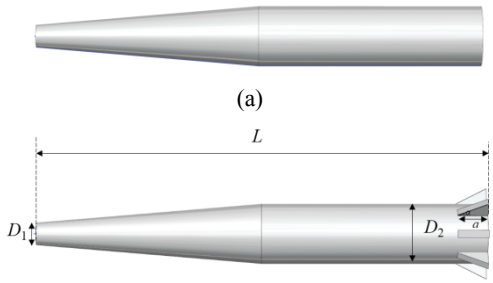


图 18 带尾翼弹体横向过载随时间变化

Fig.18 The transverse impact load of projectile with tail fins varies with time

4 尾翼对入水弹体横向冲击载荷影响研究



(a)

(b)

图 19 弹体示意图(a) 无尾翼弹体(b) 有尾翼弹体

Fig.19 The sketch of projectile(a) projectile without tail fins; (b) projectile with tail fins

录用稿件，非最终出版稿

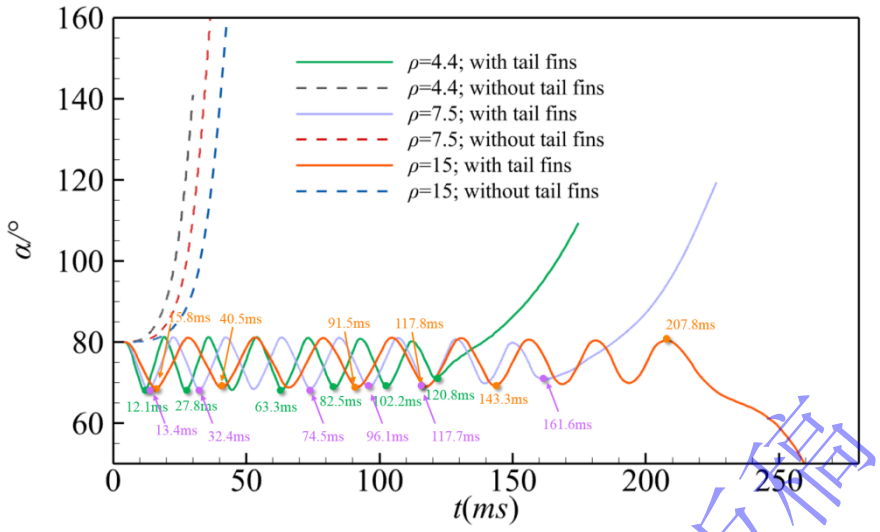


图 20 有尾翼与无尾翼弹体姿态角随时间变化

Fig.20 The attitude angle of projectile with and without tail fins varies with time

本文第 3 节讨论了不同入水角度对带尾翼弹体空泡演化、尾拍运动、横向冲击载荷的影响规律，获取了不同入水角度时弹体侵彻深度。在弹体水下运动过程中，改变弹体密度和尾翼结构也会对侵彻深度造成影响。因此，本节在第 3 节内容的基础上，选取了入水角度 75°工况，分别对有尾翼与无尾翼构型弹体设置了低密度(ρ=4.4g/cm^3)、中密度(ρ=7.5g/cm^3)和高密度(ρ=15g/cm^3)三种弹体密度，开展空泡演化、尾拍运动、横向冲击载荷研究。有尾翼与无尾翼弹体构型如图 19 所示，其中有尾翼弹体与图 1 弹体结构参数完全相同，无尾翼弹体为有尾翼弹体结构去掉其 6 个尾翼，仅保留原有锥段和柱段。

图 20 显示了有尾翼与无尾翼弹体分别在低密度、中密度和高密度条件下，入水后姿态角随时间变化。所有弹体入水均为 75°，附带 5°攻角，即起始姿态角均为 80°。无尾翼弹体入水后均迅速翻转，其中低密度无尾翼弹体比低密度有尾翼翻转更快。三种有尾翼弹体均呈现多周期的尾拍运动，低密度至高密度的有尾翼弹体的尾拍次数依次为 13 次、15 次、16 次，最后一次尾拍时间从 120.8ms 延后至 161.6ms，最终在高密度时延后至 207.6ms。此外，结果表明密度的增加未改变尾拍幅度，但延长了尾拍周期。

图 21 显示了有尾翼与无尾翼弹体质心轨迹随时间的变化。无尾翼弹体因入水后迅速偏转，侵彻水深均停留在 15 m 以内。低密度和中密度有尾翼弹体侵彻距离分别为 23.94m 和 34.42m。高密度有尾翼弹体侵彻距离进一步提升至 48.61m。因此，密度提升可显著增加水下弹道的有效射程。

录用稿件，非最终出版稿

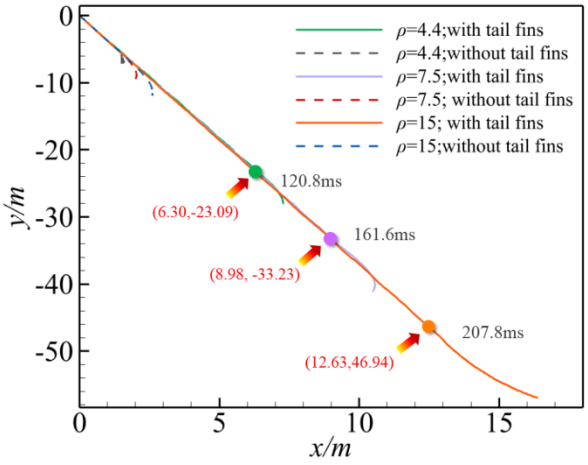


图 21　有尾翼与无尾翼弹体轨迹

Fig.21　The trajectory of projectile with and without tail fins

弹体密度的提升也影响了弹体速度衰减趋势。图 22(a)和(b)分别显示了弹体轴向和横向速度随时间的变化。无尾翼弹体入水后轴向速度迅速衰减，横向速度迅速增加而弹体失稳。对于有尾翼弹体，弹体密度增加导致了轴向速度下降趋势变慢；横向速度的周期性振幅衰减趋势减慢，振荡周期变长，振荡次数增多，导致侵彻深度增加。

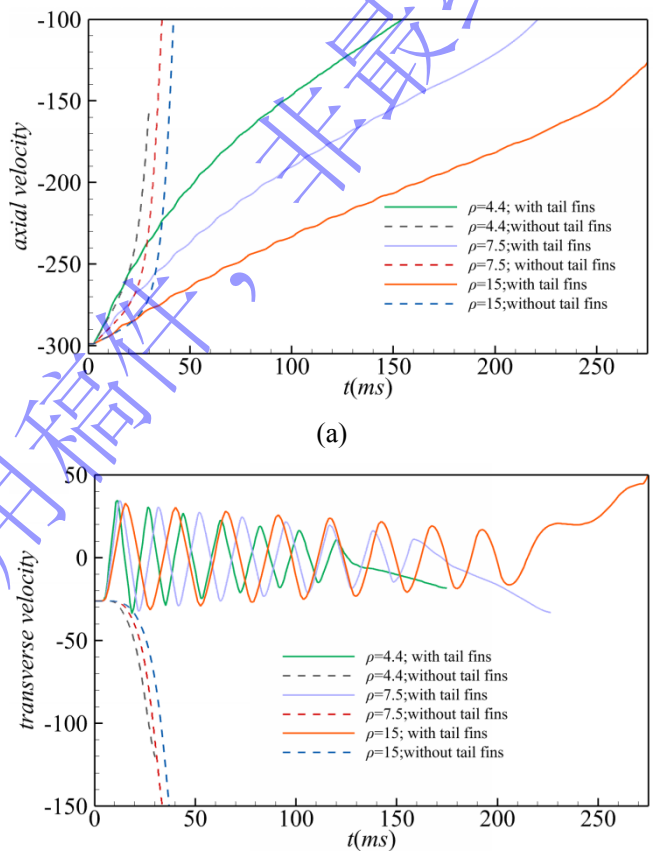
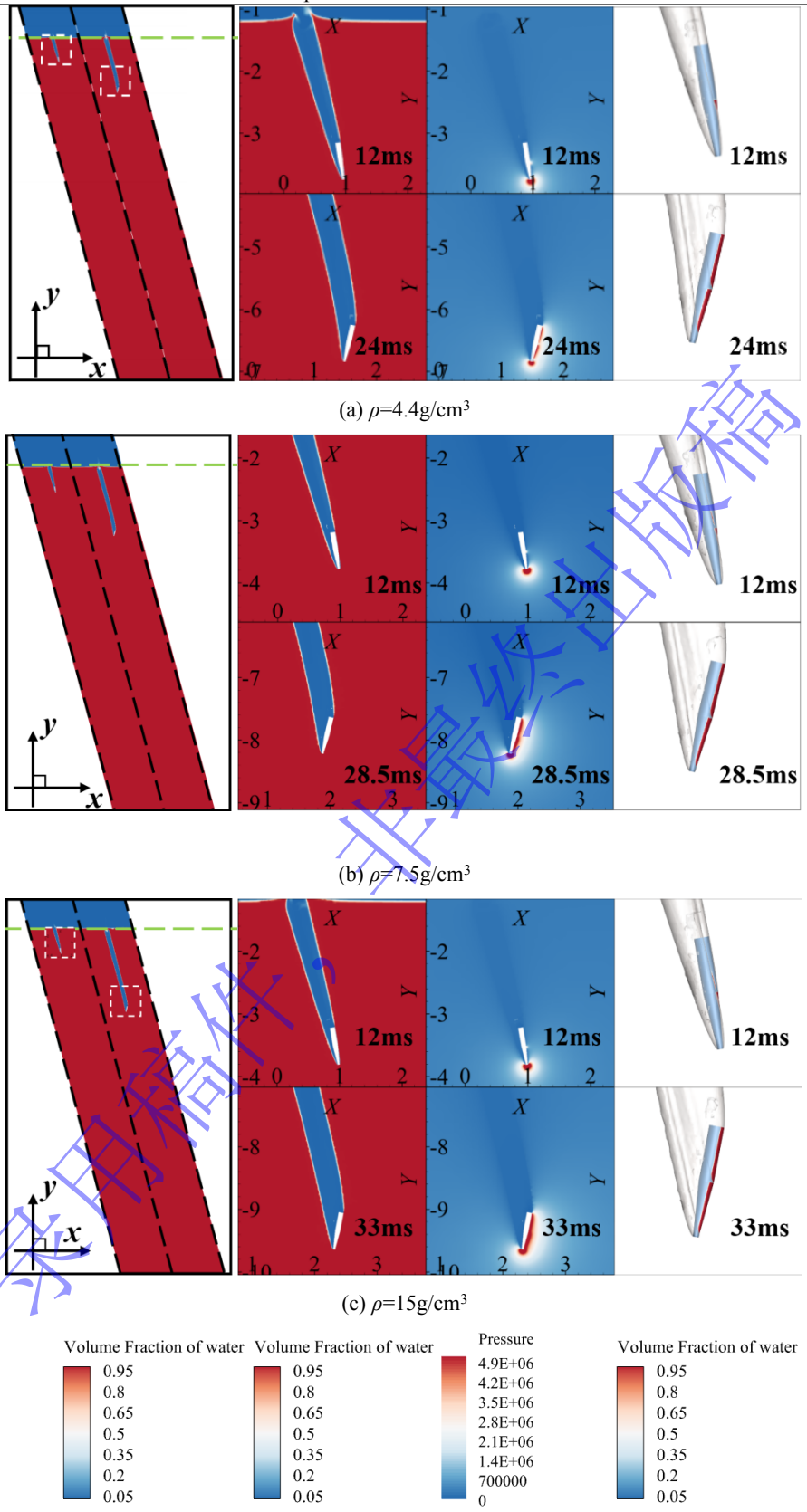


图 22　有尾翼与无尾翼弹体速度随时间变化。(a)轴向速度(m/s)；(b)横向速度(m/s)

Fig.22　The velocity of projectile with and without tail fins varies with time. (a) axial velocity(m/s)；(b)transverse velocity(m/s)

录用稿件，非最终出版稿



(a) ρ=4.4g/cm^3

(b) ρ=7.5g/cm^3

(c) ρ=15g/cm^3

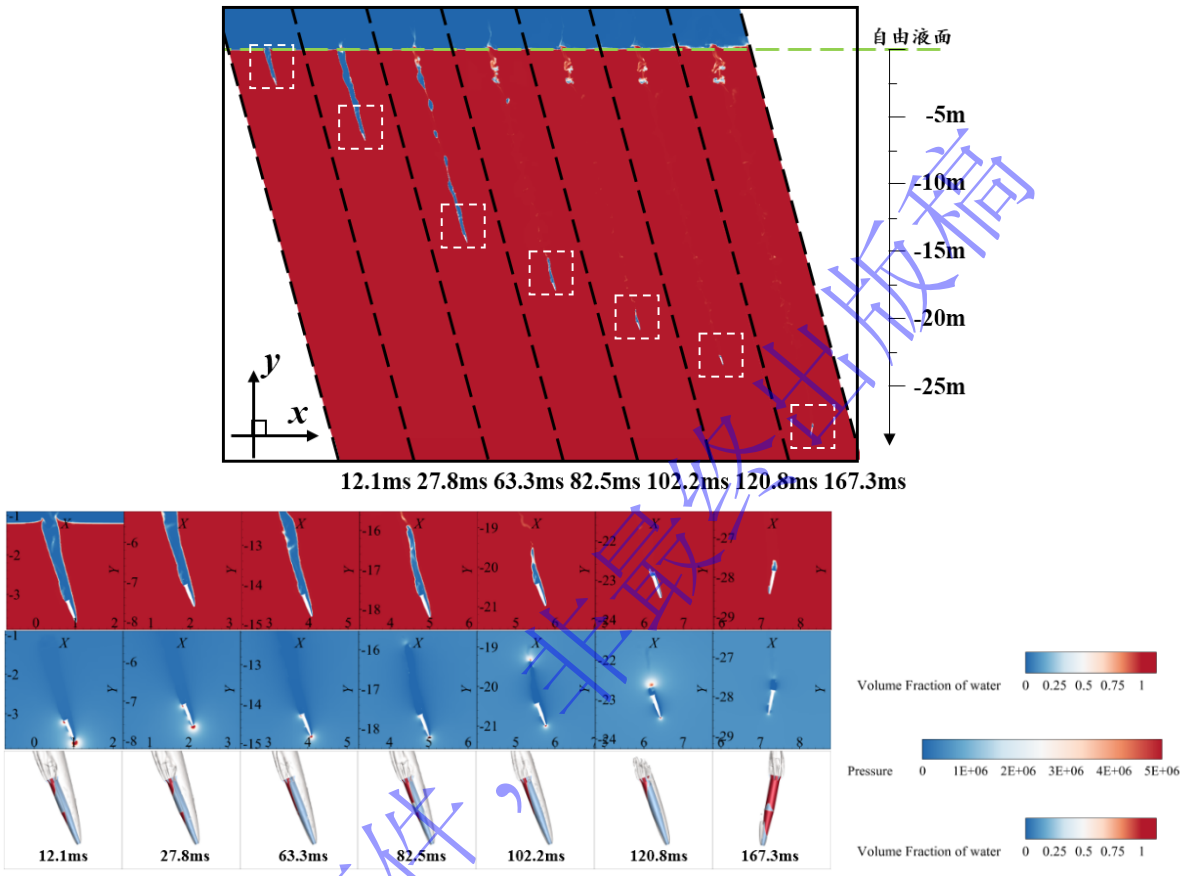
图 23　无尾翼弹体入水过程(a) ρ=4.4g/cm^3; (b) ρ=7.5g/cm^3; (c) ρ=15g/cm^3

Fig.23　The water entry process of projectile without tail fins (a) ρ=4.4g/cm^3; (b) ρ=7.5g/cm^3; (c) ρ=15g/cm^3

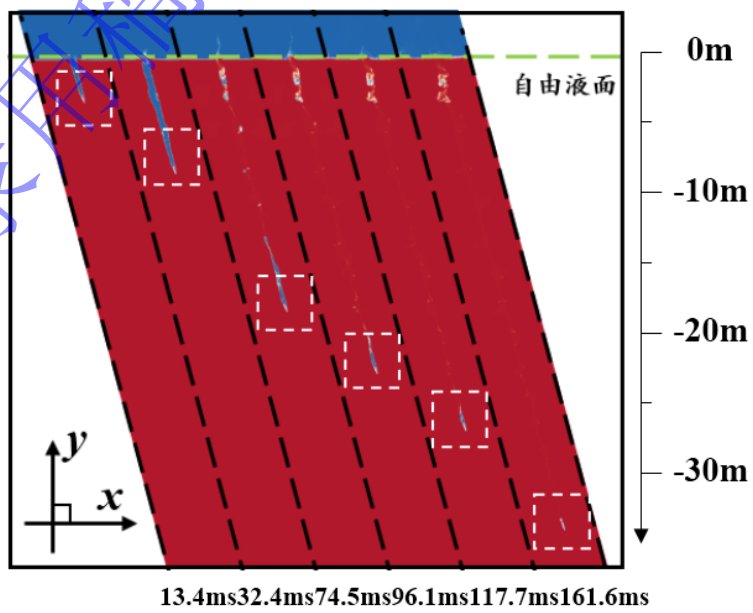
图 23 展示了无尾翼弹体水下运动时物理场分布与空泡形态，其中(a)-(c)子图分别对应低密度、

录用稿件，非最终出版稿

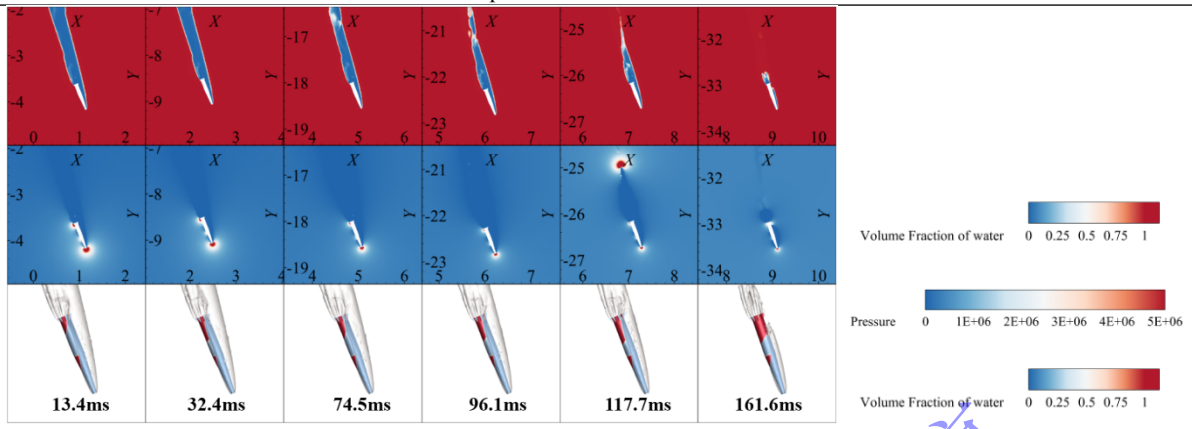
中密度和高密度弹体。在子图(a-c)中：第 1 列为不同时刻带尾翼弹体中截面的水相体积分数场；第 2 列为第 1 列白色虚线框区域的局部水相体积分数场放大图；第 3 列为第 1 列图中白色虚线框区域的局部压力场放大图；第 4 列展示了不同时刻的弹体姿态与空泡形态。弹体入水后一侧完全沾湿开始划水，图 23(a-b)第 3 列展示了无尾翼弹体入水后高压区分布，在弹体失稳后，一侧形成高压区，弹体完全沾湿而失稳。



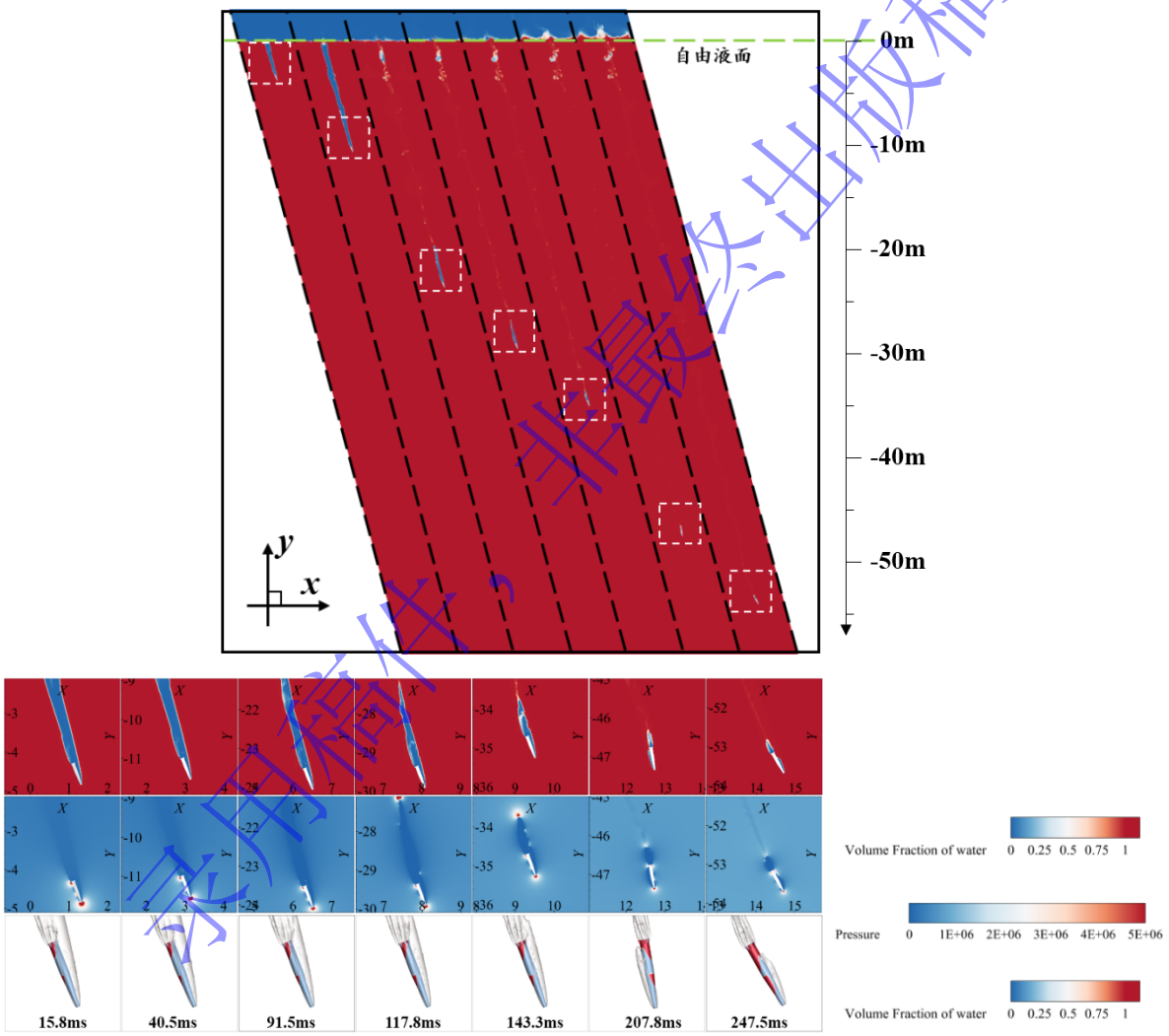
(a)



录用稿件，非最终出版稿



(b)



(c)

图 24　有尾翼弹体入水过程(a) ρ=4.4g/cm^3; (b) ρ=7.5g/cm^3; (c) ρ=15g/cm^3

Fig.24　The water entry process of projectile with tail fins (a) ρ=4.4g/cm^3; (b) ρ=7.5g/cm^3; (c) ρ=15g/cm^3

图 24 展示了不同密度的有尾翼弹体高速倾斜入水不同阶段的物理场分布与空泡形态，其中(a)-(c)子图分别对应低、中密度到高密度弹体。在子图(a-c)中：第 1 行为不同时刻带尾翼弹体中截面的水相体积分数场；第 2 行为第 1 行白色虚线框区域的局部水相体积分数场放大图；第 3 行为第 1 行图中

录用稿件，非最终出版稿

白色虚线框区域的局部压力场放大图；第 4 行展示了不同时刻的弹体姿态与空泡形态。

对于低密度与高密度有尾翼弹体，如图 24 和图 20 所示，低密度弹体和中密度弹体分别在 82.5ms、96.1ms 时，空泡已收缩至约 4 倍弹长；高密度弹体在 117.8ms 时，空泡收缩至约 5 倍弹长。高密度弹体更慢的速度下降趋势导致了空泡的溃灭速度下降，进一步提升了弹体的深水侵彻能力。低密度有尾翼弹体在 120.8ms、中密度有尾翼弹体在 161.6ms、高密度有尾翼弹体在第 207.8ms(图 20 和图 21)均为最后一次尾拍，此时通过对比图 24(a-c)第 4 行对应时刻空泡形态图，可知尾翼全部沾湿，空泡无法包裹弹身，此后均进入溃灭失稳阶段。

不同密度的有尾翼与无尾翼弹体横向过载如图 25 所示。对于无尾翼弹体，入水失稳过程中低密度弹体侧向过载增长速度远高于高密度弹体。对比两个有尾翼弹体，低密度有尾翼弹体过载峰值高于 500g，且每周期内的过载峰值随着周期数增加而下降；高密度弹体过载峰值始终低于 200g，过载峰值随着周期数推进变化极小，该低过载特性维持到溃灭失稳阶段。弹体密度的提升降低了横向过载，且低过载峰值随尾拍周期的推进变化较小，速度衰减更慢，从而获得了更高的侵彻距离。

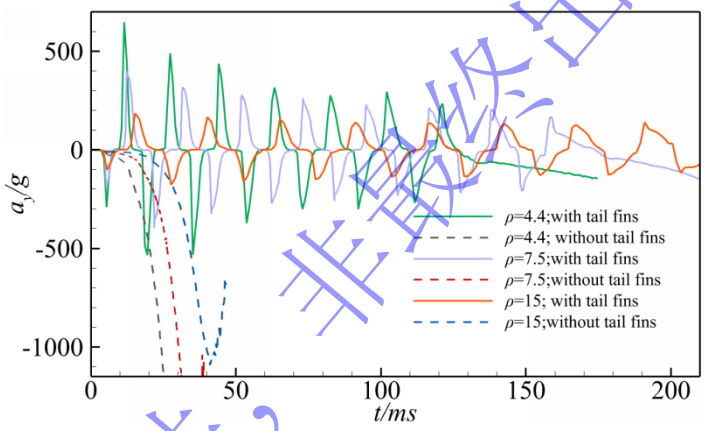


图 25 有尾翼与无尾翼弹体横向过载随时间变化

Fig.25 The transverse impact load of projectile with and without tail fins varies with time

4 结 论

本文基于水平入水试验构建并校核入水仿真模型，进一步对有尾翼与无尾翼弹体高速倾斜入水后的空泡演化、尾拍运动、横向冲击载荷等特性展开数值研究，获得主要结论如下：

(1)不同入水角度弹体在水下均经历多周期尾拍运动，随着入水角度 β 从 75°降至 30°，首次尾拍出现时间延后，尾拍运动平均周期增大，总尾拍次数由 13 次增加至 16 次，速度的下降趋势减缓，尾拍阶段的侵彻距离从 23.94 m 增加至 30.85 m。通过流场分析，小角度入水时与大角度入水相比，在相同侵彻距离时经历了更低的水下环境压力梯度，其速度降更慢，从而增加了侵彻距离。

(2)当前构型的无尾翼弹体入水后迅速失稳，增加尾翼结构可在弹体深水侵彻时维持数次尾拍运动。弹体密度从 ρ=4.4g/cm^3 提升至 ρ=15g/cm^3，横向过载降低，且高密度弹体的低过载峰值随尾拍周期的推进变化较小，速度衰减更慢，尾拍阶段的侵彻距离从 23.94m 提升至 48.61m。

录用稿件，非最终出版稿

参考文献

[1] Nesteruk I. Supercavitation[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 79-106.

[2] 赵成功，王聪，魏英杰，等. 细长体水下运动空化流场及弹道特性实验[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 439-446. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08.

ZHAO C G, WANG C, WEI Y J, et al. Experiment of cavitation and ballistic characteristics of slender body underwater movement[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 439-446. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08.

[3] 崔乃刚， 陈亮， 曹伽牧， 等. 水下航行体减阻技术综述[J]. 宇航总体技术， 2023， 7(1): 1-13. DOI: 10.20210/j.issn.2096-4080.2023.01.001.

CUI N G, CHEN L, CAO J M, et al. Review of drag-reduction techniques for underwater vehicles[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(1): 1-13. DOI: 10.20210/j.issn.2096-4080.2023.01.001.

[4] 严平，赵垭丽，李昕，等. 基于耗能模型的超空泡射弹水下侵彻鱼雷等效关系研究[J]. 爆炸与冲击，2021，41(9): 093901. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0240.

YAN P, ZHAO Y L, LI X, et al. Research on the equivalent relationship of torpedo penetrated by underwater supercavitation projectile based on energy consumption model[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(9): 093901. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0240.

[5] 李昕，严平，谭波，等. 超空泡射弹水下侵彻靶板三相耦合数值模拟[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1): 015103. DOI: 10.11858/gywlxb.20190798.

LI X, YAN P, TAN B, et al. Three-Phase Coupling Numerical Simulation of Underwater Penetration of Supercavitating Projectile into Target Plate [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1): 015103. DOI: 10.11858/gywlxb.20190798.

[6] RUZZENE M, SORANNA F. Impact Dynamics of Elastic Stiffened Supercavitating Underwater Vehicles[J]. Journal of Vibration and Control, 2004, 10(2): 243-267. DOI: 10.1177/1077546304035607.

[7] 郭子涛，张伟，郭钊，等. 截卵形弹水平入水的速度衰减及空泡扩展特性[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(4):727-733. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0727-07.

GUO Z T, ZHANG W, GUO Z, et al. Characteristics of velocity Attenuation and cavity expansion induced by horizontal water-entry of truncated-ogive nosed projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(4):727-733. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0727-07.

[8] KULKARNI S S, PRATAP R. Studies on the dynamics of a supercavitating projectile[J]. Applied Mathematical Modelling, 2000, 24(2):113-129. DOI: 10.1016/S0307-904X(99)00028-1.

[9] 孟庆昌，张志宏，顾建农，等. 超空泡射弹尾拍分析与计算[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 56-60. DOI: 1001-1455(2009)01-0056-05.

MENG Q C, ZHANG Z H, GU J N, et al. Analysis and calculation for tail-slaps of supercavitating projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 56-60. DOI: 1001-1455(2009)01-0056-05.

[10] Rand R, Pratap R, Ramani D, et al. Impact dynamics of a supercavitating underwater projectile[C] ASME Proceedings of DETC California, 1997: 1-11. DOI: 10.1115/DETC97/VIB-3929.

[11] RUZZENE M, KAMADA R, BOTTASSO C L, et al. Trajectory optimization strategies for supercavitating underwaters vehicles[J]. Journal of Vibration and Control, 2008, 14(5): 611-644. DOI: 10.1177/1077546307076899.

[12] HRUBES J.D. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30(1): 57-64. DOI: 10.1007/s003480000135.

[13] 赵成功，王聪，魏英杰，等. 细长体水下运动空化流场及弹道特性实验[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(3): 439-446. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08.

ZHAO C G, WANG C, WEI Y J, et al. Experiment of cavitation and ballistic characteristics of slender body underwater

录用稿件，非最终出版稿

movement [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 439-446. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)03-0439-08.

[14] 侯东伯，王聪，夏维学,等. 弹性尾缘对超空泡航行体空泡形态与压力脉动特性影响的水洞试验研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 534-541. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-1093.2020.03.014.

HOU D B, WANG C, XIA W X, et al. Experimental Investigation into the Cavity Shape and Pressure Characteristics of Supercavitating Vehicle with Elastic Trailing Edge[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 534-541. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-1093.2020.03.014.

[15] 鹿麟， 闫雪璞， 胡彦晓,等. 弹丸倾斜入水尾拍运动特性实验[J]. 爆炸与冲击， 2023， 43(7): 073302. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0266.

LU L, YAN X P, HU Y X, et al. Experiment on tail-slapping motion characteristics for oblique water-entry of a projectile[J]. EXPLOSION AND SHOCK WAVES, 2023, 43(7): 073302. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0266.

[16] KUBOTA A, KATO H, YAMAGUCHI H. A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 240:59-96. DOI: 10.1017/S002211209200003X.

[17] 张劲生，张嘉钟，魏英杰，等. 超空泡射弹尾部冲击载荷的仿真研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(7): 19-22. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2011.07.004.

ZHANG J S, ZHANG J Z, WEI Y J, et al. Simulation analysis of impact loads on tails of supercavitating projectiles[J], Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(7): 19-22. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2011.07.004.

[18] 赵成功，王聪，魏英杰，等. 质心位置对超空泡射弹尾拍运动影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1754-1760. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0014.

ZHAO C G, WANG C, WEI Y J, et al. Analysis of the effect of mass center position on tailslap of supercavitating projectile[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(12): 1754-1760. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0014.

[19] 陈伟善，郭则庆，刘如石，等. 空化器形状对超空泡射弹尾拍运动影响的数值研究[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 248-256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.06.0328.

CHEN W S, GUO Z Q, LIU R S, et al. Numerical simulation on the influence of cavitator shapes on the tail-slap of supercavitating projectiles[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 248-256. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.06.0328.

[20] 梁景奇，徐保成，王瑞，等. 初速对高速射弹尾拍特性影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(2): 130-139. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2020.02.032.

LIANG J Q, XU B C, WANG R, et al. Study on the Influence of Initial Velocity on the Characteristics of High Speed Projectile Tail-slapping[J]. Journal of Projectiles,Rockets,Missiles and Guidance, 2020, 40(2): 130-139. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2020.02.032.

[21] 马文轩， 于勇， 胡俊. 小口径超空泡子弹头部外形的优化设计[J]. 爆炸与冲击， 2021， 42(3): 033305. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0092.

MA W X, YU Y, HU J. Optimal design of the head shape of a small-caliber supercavitating projectile[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(3): 033305. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0092.

[22] 刘如石， 郭则庆， 张辉.尾部形状对超空泡射弹尾拍运动影响的数值研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(10): 2984-2994. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0689.

LIU R S, GUO Z Q, ZHANG H. Numerical Investigation of Tail Shape Effects on the Tail-slap of Supercavitating Projectiles[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(10): 2984-2994. DOI: 10.12382/bgxb.2022.0689.

[23] 李尧，张东俊，孙铁志. 结构体高速倾斜入水的尾拍载荷及姿态稳定性[J]. 爆炸与冲击, 2026, 46(1): 011101. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0160.

LI Y, ZHANG D J, SUN T Z. Tail-slapping load and trajectory stability of a trans-media vehicle during high-speed oblique water entry[J]. EXPLOSION AND SHOCK WAVES, 2026, 46(1) : 011101. DOI: 10.11883/bzycj-2025-0160.

录用稿件，非最终出版稿

[24] Forrestal M J. Penetration into dry porous rock[J]. International Journal of Solids and Structures, 1986, 22(12): 1485-1500. DOI: 10.1016/0020-7683(86)90057-0.

[25] 赵小龙, 马铁华, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土加速度信号测试及分析[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 347-353. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0347-07.

ZHAO X L, MA T H, XU P, et al. Acceleration signal test and analysis for projectile penetrating into concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 347-353. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0347-07.

[26] Shur M L, Spalart P R, Strelets M K, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(6): 1638-1649. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001.

[27] Spalart P R, Jou W H, Strelets M, Allmaras SR. Comments on the feaslibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach[C]. Proceedings of first AFOSR international conference on DNS/LES, Ruston, Louisiana, 1997:137-147.

[28] Spalart P R, Deck S, Shur M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20(3):181-195. DOI: 10.1007/s00162-006-0015-0.

（责任编辑　爆炸与冲击）

录用稿件，非最终出版稿