

基于 ALE 方法的弹体尾部导流罩高速入水的冲击特性

李鹏举, 张帅, 温庆国

西安建筑科技大学, 陕西 西安 710000

摘要: 弹体高速入水所承受的高强度冲击载荷, 会引发其结构的动态响应与变形, 进而导致结构变形甚至损坏, 对此开展研究具有重要意义。为揭示尾部带导流罩弹体高速入水过程中的流固耦合作用及尾部结构变形机理, 本文基于任意欧拉-拉格朗日方法 (Arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 对尾部带导流罩弹体以 40m/s 高速入水过程中的流固耦合作用开展数值模拟研究。通过数值仿真与实验结果对比及网格独立性验证, 验证了数值模型的可靠性与准确性。在此基础上, 分析了入水角度和攻角对于弹体入水过程中的空泡演化、冲击载荷、应力传递及尾部导流罩的变形的影响。结果表明: 在不同入水角度条件下, 入水角度越小, 空泡不对称性越强, 自由液面变化及空化现象越复杂, 弹体整体冲击载荷随之减小。尾部导流罩变形量受应力波传播与空化作用共同影响, 随入水角度呈现先减小后增大的变化趋势, 在入水角度为 60° 时达到最小值。正攻角入水引起的空泡不对称性强于负攻角, 其加速度峰值随攻角增大而减小; 负攻角条件下, 加速度峰值随攻角绝对值增大呈先减小后增大的变化, 较大攻角会诱发尾部二次触水, 产生“尾拍效应”, 形成第二加速度峰值, 且正攻角更为显著。正攻角显著增大尾部导流罩变形, 负攻角在小范围内可减小变形, 但随绝对值增大变形。

关键词: 高速入水; ALE 方法; 尾部导流罩; 冲击载荷

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

Investigation of high-speed water-entry impact characteristics of a projectile with a tail fairing based on the ALE method

LI Pengju, ZHANG Shuai, WEN Qingguo

Xi'an University Of Architecture And Technology Xi'an 710000 Shaanxi China

Abstract: High-intensity impact loads experienced by a projectile during high-speed water entry can induce pronounced dynamic structural responses and deformation, and may further lead to structural damage or failure. Therefore, investigating this process is of great significance. To reveal the fluid-structure interaction characteristics and the deformation mechanism of the tail structure of a projectile equipped with a tail fairing, a numerical simulation based on the arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method was conducted for its water-entry process at a velocity of 40 m/s. The reliability and accuracy of the numerical model were validated through comparisons with experimental results and grid-independence verification. In the model, the water and air domains were described using an Eulerian formulation, while the projectile structure was modeled using a Lagrangian formulation. The compressibility of water and air was considered through corresponding equations of state, and the projectile material was defined using an elastoplastic constitutive model. The fluid-structure interaction between the projectile and the surrounding fluid was realized using a penalty-based coupling algorithm. To improve the stability and reliability of the coupling calculation, different penalty factors were compared, and the acceleration response and sliding interface energy were analyzed to determine an appropriate coupling parameter. A three-dimensional computational domain containing both water and air was

*收稿日期: 2026-03-05; 修回日期: 2026-08-27;

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51705394);

第一作者: 李鹏举 (1984—), 男, 博士, 副教授. E-mail: lipengju@xauat.edu.cn;

通信作者: 张 帅 (2000—), 男, 硕士研究生. E-mail: 3534863973@qq.com。

established, and local mesh refinement was applied to the impact region and key structural regions of the tail fairing. The reliability of the numerical model was validated by comparing the simulated cavity morphology, projectile displacement, and projectile velocity with experimental results. Meanwhile, a grid-independence study was conducted to balance computational accuracy and efficiency. Based on the validated numerical model, the effects of entry angle and angle of attack on cavity evolution, impact load, stress-wave transmission, and deformation of the tail fairing were systematically investigated. The results indicate that, as the entry angle decreases, the cavity becomes increasingly asymmetric, accompanied by more complex free-surface deformation and cavitation phenomena, while the overall impact load on the projectile decreases accordingly. The deformation of the tail fairing is jointly governed by stress-wave propagation and cavitation effects, exhibiting a non-monotonic dependence on the entry angle: it first decreases and then increases, reaching a minimum at an entry angle of 60° . For oblique entry with a positive angle of attack, the cavity asymmetry is stronger than that under a negative angle of attack, and the peak acceleration decreases with increasing angle of attack. Under negative angles of attack, the peak acceleration first decreases and then increases as the absolute value of the angle of attack grows. A sufficiently large angle of attack can trigger secondary tail re-entry, producing a “tail-slap effect” and a second acceleration peak, which is more pronounced for positive angles of attack. In addition, a positive angle of attack markedly increases the deformation of the tail fairing, whereas a small negative angle of attack can reduce the deformation; however, the deformation increases again as the magnitude of the negative angle of attack further increases.

Keyword: high-speed water entry; ALE; Tail fairing; Impact load

0 引言

随着海洋国防的进步,空投的弹体结构种类日益增多。弹体在高速入水过程中会与水面接触瞬间会产生巨大的冲击载荷,引发复杂的空泡演化,并可能导致弹体结构变形甚至失效破坏^[1,2]。本文研究对象为尾部带导流罩的弹体。尾部导流罩不仅能够起到保护螺旋桨的作用,还可有效改善弹体的水动力性能。然而,尾部导流罩为薄壳结构,当其发生大变形或者损坏时,会导致螺旋桨无法正常工作。因此,系统研究弹体在不同入水姿态下的高速入水冲击特性及其对尾部导流罩结构响应的影响,对于弹体结构优化设计和入水安全性评估具有重要的理论意义和工程价值。

在弹体高速入水问题的研究中,实验研究为揭示入水过程中的机理提供了重要依据。张伟^[3]等通过实验记录了三种弹头形状弹体在入水早期阶段的水弹道轨迹和空泡形状。杨衡^[4]等通过实验研究了不同头型弹体低速入水过程中的空泡形态,指出头部外形对入水空泡发展具有重要影响。Chen^[5]等实验研究表明,高速入水弹道稳定性受撞击速度和入水角度影响,且不稳定性随二者增加而加剧。Truscott^[6]等人通过高速摄影技术对球体及轴对称体的高速入水过程进行研究,指出入水速度和物体几何参数对空泡尺度及冲击强度具有显著影响。

随着计算机数值计算能力的提升,数值方法已经成为研究弹体高速入水问题的重要手段。Gao^[7]等采用雷诺平均法研究高速弹体的斜入水空泡演化及弹体运动特性。潘光^[8]等建立弹体入水受力模型,指出入水速度增大会显著提高载荷峰值,而入水角度增大时径向载荷减小、轴向载荷增加。Liu^[9]等人的数值研究进一步指出,带攻角弹体高速入水时,下表面润湿引起的非对称水动力主导弹道失稳与结构失效,弯曲变形集中于锥体-弹尾连接处。明付仁^[10]等系统综述了高速跨介质入水多相流动与流固耦合特性,指出空泡演化、冲击载荷、结构响应和数值计算方法是该领域的关键研究内容。张彤运^[11]等针对大尺度跨介质航行器高速倾斜入水问题,建立三维非定常数值模型,分析了平头和锥头航行器的冲击载荷差异,结果表明头型对轴向、纵向冲击载荷及其峰值出现时刻具有明显影响。

高速入水过程中流体对弹体的巨大冲击不可避免地引起结构响应,因此流固耦合效应不容忽视。Hirt^[12]等提出了任意朗格朗日-欧拉(arbitrary Lagrange-Euler, ALE)法,该方法兼顾拉格朗日法精确追踪固体界面和欧拉法处理大变形流场的优点,能够有效处理流固耦合过程中结构变形与自由液面的大尺度运动。基于ALE方法,Shi^[13]等人揭示了峰值冲击载荷与入水速度的平方成正比,轴向峰值载

荷与入水角度的平方成正比，径向载荷峰值与入角平方成反比。汪振^[14]等研究表明实心弹体的径向载荷在达到峰值后逐渐趋于稳定。针对结构变形问题，施红辉^[15]发现空弹性圆柱壳的变形随锥角增大而增强。Xia^[16]等指出小角度入水更易引发尾部结构大变形；增加航行器的不稳定性。潘光^[17]和 Fan^[18]等分别从壳厚效应和应力波传播角度分析了高速入水过程中的结构变形机理。

综上，尽管现有研究已对弹体高速入水的空泡特性、冲击载荷及结构响应进行了较为深入的分析，但针对尾部带导流罩结构的弹体以不同姿态高速入水流固耦合的研究较为有限。本文基于 ALE 方法，系统研究不同入水角度和攻角条件下弹体高速入水冲击特性及尾部导流罩结构变形行为。

1 模型介绍

1.1 几何模型

弹体结构如图 1 所示，弹体最大直径 D 为 120mm，长度 L 为 1200mm，长径比为 10。尾部导流罩内圈直径 d 为 96mm，螺旋桨直径 $d_i=95\text{mm}$ 。

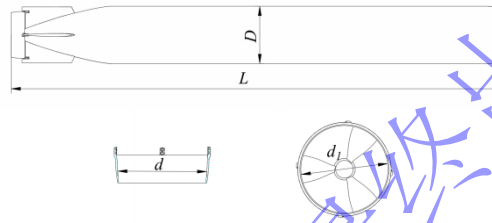


图 1 弹体几何参数

Fig.1 Projectile geometric parameters

1.2 数值模型

本文采用任意拉格朗日—欧拉算法(arbitrary Lagrange-Euler, ALE)，其结合了拉格朗日法和欧拉法的优势。该算法允许计算网格在空间中进行自由移动，既能精确追踪材料界面运动，又可保持网格的合理形态，从而有效避免剧烈变形引发的网格畸变问题。ALE 方法适用于求解大变形、流固耦合等复杂问题，其基本控制方程可由下列守恒方程给定^[19]：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} \bigg|_x + c_i \frac{\partial \rho_w}{\partial x_i} + \rho_w \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\rho_w \frac{\partial v_i}{\partial t} \bigg|_x + \rho_w c_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} + \rho_w b_j \quad (2)$$

能量守恒方程：

$$\sigma_{ij} = -p_s \delta_{ij} + \mu_d (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3)$$

式中： x 为空间坐标； c_i 为 ALE 描述的对流速度； v_i 为流体指点的物质速度； ρ_w 为流体速度； b_i 为流体体积； σ_{ij} 为应力张量。 E 是内能； $\sigma_{ij,j}$ 的下标表示 j 的微分； b 为作用在流体上的体积力。

为了真实的反映弹体入水过程，要考虑水和空气的可压缩性，由状态方程描述，采用关键字 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 定义，其状态参数方程见表 1。压力用以下方程表示：

$$P_a = c_0 + c_1\mu_a + c_2\mu_a^2 + c_3\mu_a^3 + (c_4 + c_5\mu_a + c_6\mu_a^2)E_a \quad (4)$$

式中：\$P_a\$ 为气压；\$c_0\$-\$c_6\$ 为常数；\$\mu_a\$ 为空气体积变化率；\$E_a\$ 为空气的单位体积初始内能。

表 1 空气状态方程参数

Table 1 Air equation-of-state parameters				
\$c_0\$-\$c_1\$	\$c_4\$	\$c_5\$	\$c_6\$	\$E_a\$
0	0.4	0.4	0	2.533e+5

通过粘性应力本构关系,建立水的 Gruneisen 状态方程材料模型,水的状态方程由关键字 *EOS_GRUNEISEN 定义,其状态方程见表 2。水压用以下方程表示;

$$p_w = \frac{\rho_w C^2 \mu_w \left[1 + \left(1 + \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu_w - \frac{a}{2} \mu_w^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu_w - S_2 \frac{\mu_w^2}{\mu_w + 1} - S_3 \frac{\mu_w^3}{(\mu_w + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \mu_w) E_w \quad (5)$$

其中 \$p_w\$ 为水压；\$\rho_w\$ 为水的密度；\$C\$ 表示声波在水中传播速度；\$\gamma_0\$ 为 Gruneisen 系数；\$\mu_w\$ 为水体积变化率，\$a\$ 是一阶体积修正系数；\$S_1\$、\$S_2\$、\$S_3\$ 是无量纲系数；\$E_w\$ 为水的单位体积初始内能。

表 2 水的状态方程参数

Table 2 Water equation-of-state parameters					
\$C(m/s)\$	\$S_1\$	\$S_2\$	\$S_3\$	\$\gamma_0\$	\$E_w/ Pa\$
1647	1.921	-0.096	0	0.35	2.895e+5

水和空气使用 *MAT_NULL 本构模型本构模型具体参数如表 3。

表 3 空气和水本构模型参数

Table3 Constitutive model parameters for air and water			
材料	密度 \$\rho/(kg/m^3)\$	截止压力 Pc/Pa	动力粘度 \$\mu/(N \cdot s \cdot m^{-2})\$
空气	1.30	-1.0e-10	2.0e-5
水	998.21	-10	0.8684e-3

弹体为拉格朗日网格,采用 solid 实体单元,弹体的材料为 Al 7075-T6,采用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 定义材料为弹塑性材料,具体材料参数如表 4 所示。

表 4 Al 7075-T6 材料参数

Table4 Material parameters of Al 7075-T6						
密度\$\rho(kg/m^3)\$	弹性模量 E/MPa	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/MPa	应变率参数 SPC	应变率参数 SRP
2700	71.7	0.33	480	1330	1337	6.43

流体边界四周通过关键字*BOUNDARY_NO_REFLECT 定义无反射边界条件,底部固定边界,并且空气和水通过共节点建立接触。空气和水通过关键字*ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP 定义为多物质组。使用*ALE_STRUCTURED_MESH_CONTROL_POINTS 控制流体网格参数化节点信息,使用*ALE_STRUCTURED_MESH 控制参数化网格生成。使用罚函数法实现流固耦合过程中结构响应信息的捕捉,通过*ALE_STRUCTURED_FSI 实现流固耦合过程。

在罚函数耦合算法中,罚函数因子 FPAC 主要用于调节流固耦合界面处的罚刚度,从而影响流体

与固体结构之间耦合力的传递特性。FPAC 取值过大时, 界面约束刚度增大, 耦合力传递过程可能产生较强的局部数值扰动, 易引起网格畸变甚至负体积, 导致计算中断; FPAC 取值过小时, 界面约束作用减弱, 可能导致流固界面载荷传递不足, 从而影响结构动力响应计算结果的可靠性。因此, 有必要对 FPAC 取值进行敏感性分析, 以确定兼顾计算稳定性与耦合精度的参数取值。

本文选取 FPAC=0.1、0.05、0.01、0.005、0.001 和 0.0005 进行对比计算。计算结果表明, 当 FPAC 取值为 0.1 和 0.05 时, 模型在计算过程中出现负体积并导致计算终止, 因此, 后续主要针对 FPAC=0.01、0.005、0.001 和 0.0005 工况开展敏感性分析。以 40m/s、60°入水工况为例, 分别对不同 FPAC 取值下的弹体加速度响应和滑动界面能进行对比分析。

图 2 给出了不同 FPAC 取值下弹体加速度随时间的变化曲线。由图可知, FPAC=0.0005 时加速度峰值与其他工况存在明显差异, 表明过小的 FPAC 导致界面耦合力传递不足, 使结果偏离其他工况结果。随着 FPAC 增大, 峰值差别不大, 10ms 后的加速度波动减小。图 3 给出了不同 FPAC 取值下滑动界面能随时间的变化曲线。滑动界面能可反映流固耦合界面处相对运动和界面作用力引起的能量交换, 其变化趋势可用于判断界面载荷传递连续性和耦合计算稳定性。结果表明, FPAC 取值较小时, 滑动界面能呈正值并随时间增加, 说明界面处存在能量累积; 随着 FPAC 增大, 滑动界面能逐渐向负值方向变化, 表明界面能量交换特性对罚函数因子较为敏感。其中, FPAC=0.005 时滑动界面能整体维持在零值附近, 未出现明显突增或持续累积现象, 说明该取值下界面载荷传递较连续, 耦合计算稳定性较好。综上, 本文后续流固耦合计算中罚函数因子 FPAC 取值为 0.005。

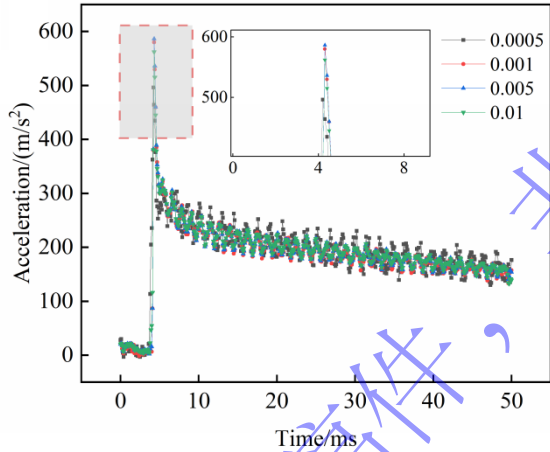


图 2 不同 FPAC 条件加速度对比

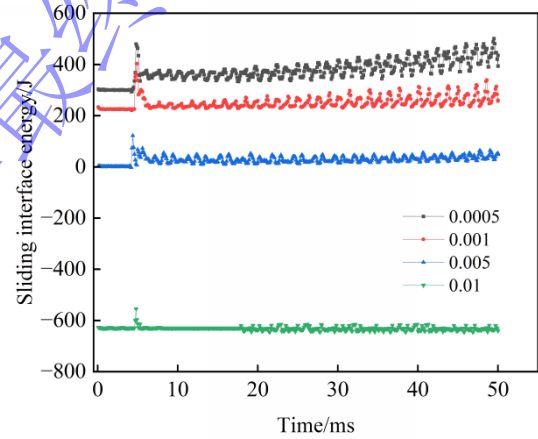


图 3 不同 FPAC 条件滑动界面能对比

本文的计算模型如图 4 所示, 长度 a 为 3000mm, 宽度 b 为 1000mm, 水域高度 h_w 为 2000mm, 空气域高度 h_a 为 1500mm。定义如图 5 所示的坐标系, 其中 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 为地面坐标系, $O-x_0y_0z_0$ 为弹体坐标系。其中 α 为弹体坐标系 x_0 轴与速度 v_0 夹角, 即入水攻角; θ 为弹体坐标系 x_0 轴与液面夹角, 即入水角度。

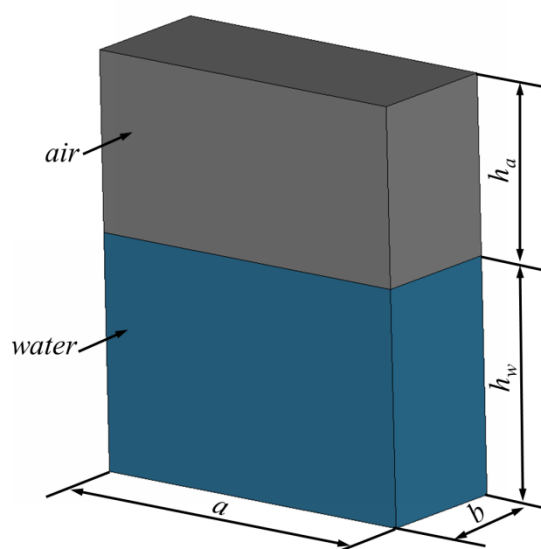


图 4 计算域尺寸

Fig.4 Computational domain dimensions

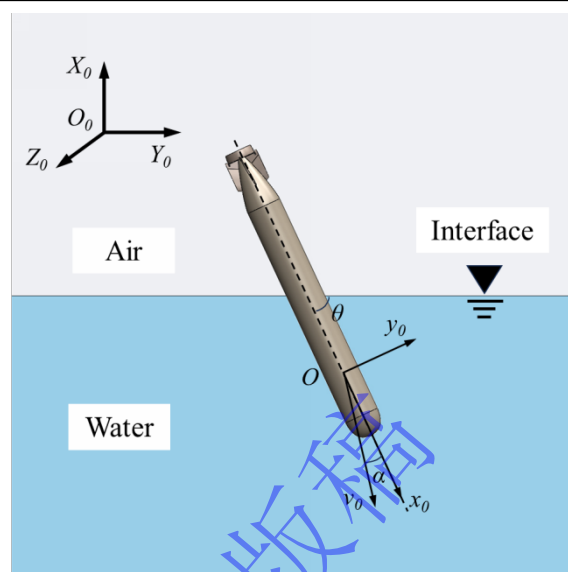


图 5 计算坐标系

Fig.5 Computational coordinate system

2 数值模型验证

为了验证数值方法的正确性，本文对比 Z.J. Song^[20]开展的弹体入水实验，弹体主要参数见表 5。

表 5 实验弹体几何参数

Table5 Geometric parameters of the experimental projectile

弹体直径/mm	弹体长度/mm	弹体锥角/°	入水角度/°	入水速度/(m/s)
8	49.82	91.89	70	80.88

不同时间空腔形状的数值结果与实验图像及空腔轮廓形状进行了比较，如图 6 所示，不同时间点数值预测的空腔形状与实验照片的基本相符。

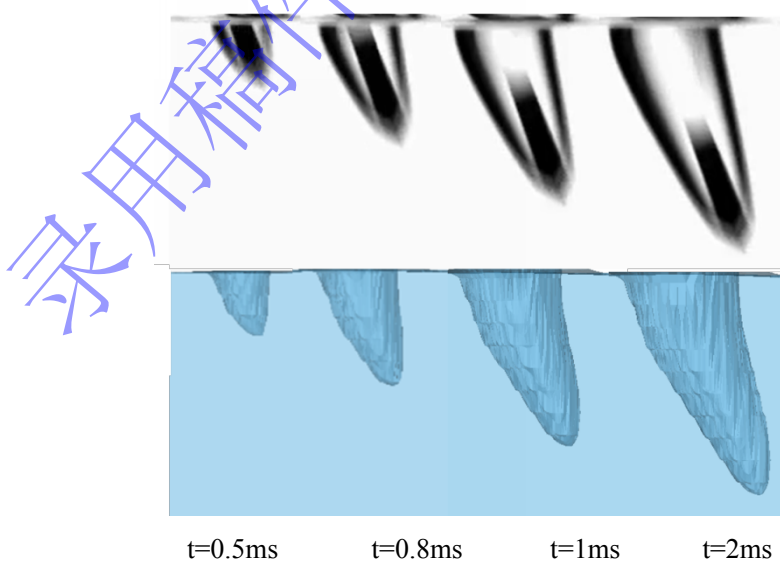


图 6 不同时刻空泡数值结果对比

Fig.6 Comparison between experimental and numerical results

此外，图 7 展示了实验数据与弹体入水轨迹数值结果的比较。如图 7 所示，数值结果与实验结果

趋势一致，所有误差始终小于 5%，在 $t=2.5\text{ms}$ 时最大误差为 4.3%。因此上述仿真结果真实可靠。

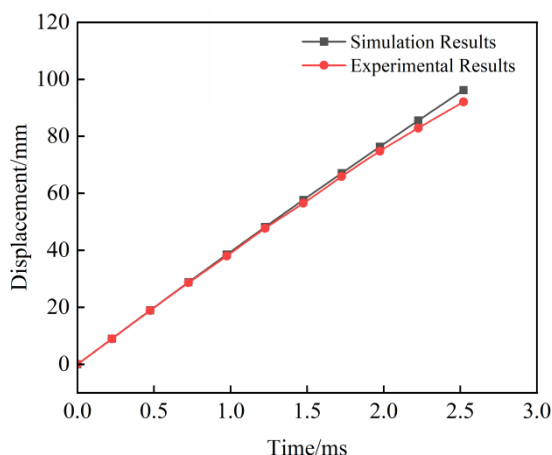


图 7 弹体位移-时间的实验与仿真结果对比

Fig.7 Comparison of experimental and numerical results of projectile displacement versus time

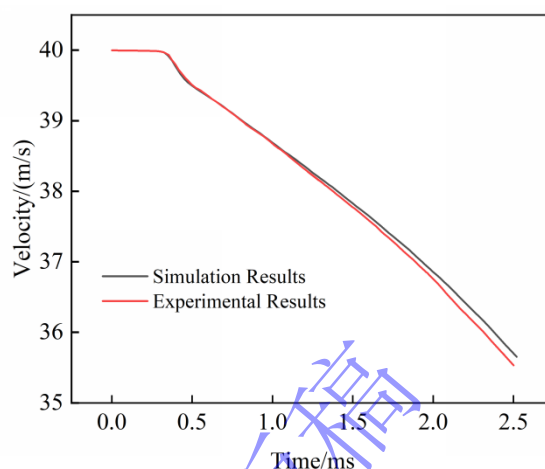


图 8 弹体速度-时间的实验与仿真结果对比

Fig.8 Comparison of experimental and numerical results of projectile Velocity versus time

为了保证仿真结果准确性且节约运算成本，本文选取弹体速度 40m/s 、入水角度 60° 、攻角 0° 的工况开展网格无关性验证。流体域采用六面体网格，基础网格尺寸为 40 mm ，并对冲击区加密至 15mm ，总网格数约 46 万。固体域采用四面体网格，并在关键部位进行局部细化，具体网格尺寸与网格统计见表 5

表 5 固体区域网格尺寸

Table 5 Mesh size in the solid region

网格编号	最大网格尺寸 ($G_{\max}$) /mm	最小网格尺寸 ($G_{\min}$) /mm	网格数量/万
网格 1	0.5	10	696.1
网格 2	1	20	142.5
网格 3	2	40	22.3
网格 4	4	80	5.7

图 9 为不同网格尺寸对应的加速度随时间变化曲线，不同网格的加速度随时间变化趋势一致，网格 4 峰值结果与其他网格结果差异较大，网格 2 的峰值结果与网格 1 峰值结果接近，并且根据图 10 峰值与仿真时间关系，网格 2 在精度较好的情况下仿真时间远少于网格 1 的时间，综合考虑选择网格 2 作为后续仿真固体网格参数。最终的网格如图 11 所示。

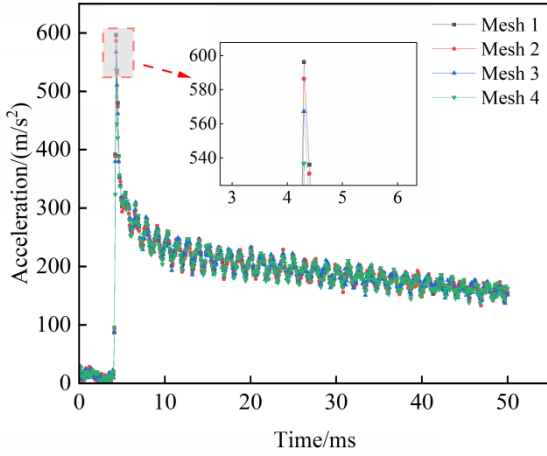


图 9 不同网格数量加速度随时间变化曲线
Fig.9 Acceleration-time curves for different mesh densities

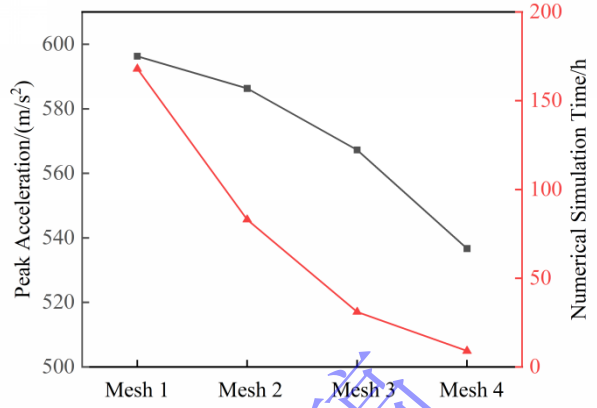


图 10 不同网格的加速度峰值和仿真时间对比
Fig.10 Comparison of acceleration peak values and simulation time for different mesh densities

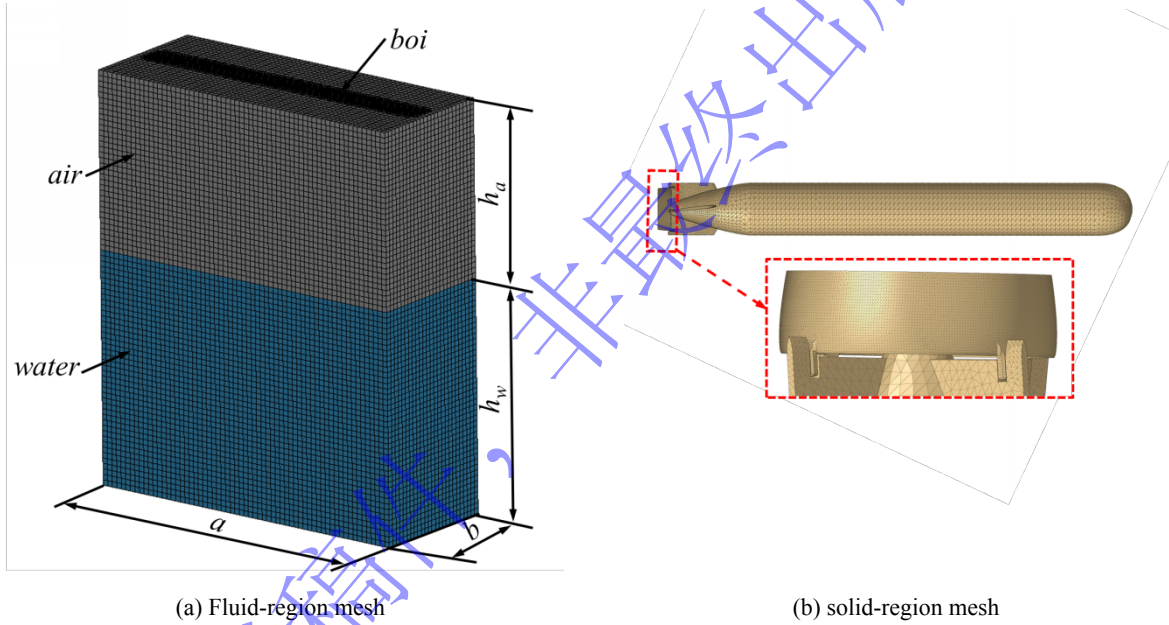


图 11 数值模型网格
Fig.11 Mesh of the numerical model

3 结果与讨论

为了揭示弹体高速入水时的流场演化与结构响应之间的作用机理, 本文首先基于典型工况系统地分析了入水空泡的形成与发展规律、速度及加速度变化以及应力波在结构中的传播与局部集中现象。在此基础上, 进一步分析了以不同入水角度、不同入水攻角对空泡形态参数、冲击载荷、弹体应力发展规律及尾部导流罩变形影响, 为弹体入水姿态优化与结构安全评估提供参考。

3.1 典型工况弹体入水冲击特性研究

弹体高速入水过程具有显著的瞬态冲击与非线性动力学特征, 图 12 为弹体以 40m/s、45°入水角、0° 攻角入水研究弹体入水过程中空泡演化历程。在 5ms 时弹体接触自由液面, 由于高速冲击产生负压使得水气化形成空泡空腔。在 10ms 之后, 随着弹体进入水的深度增加, 液面隆起高度增加, 空泡空腔体积不断增加。斜入水时, 弹体先触自由液面侧遭遇水体的强烈冲击与阻滞, 形成局部高压区,

显著抑制了该侧空泡的发展，后入水侧由于气液自由界面与弹体表面构成的狭长泄气通道，以及流动分离产生的低压区，共同促进了空气的剧烈卷吸与空化现象的发生，从而在该侧产生非对称空泡结构。

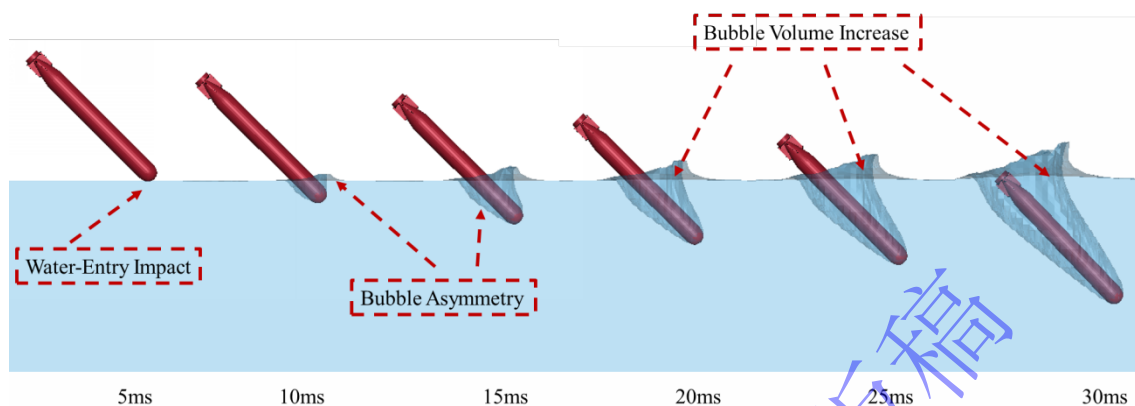
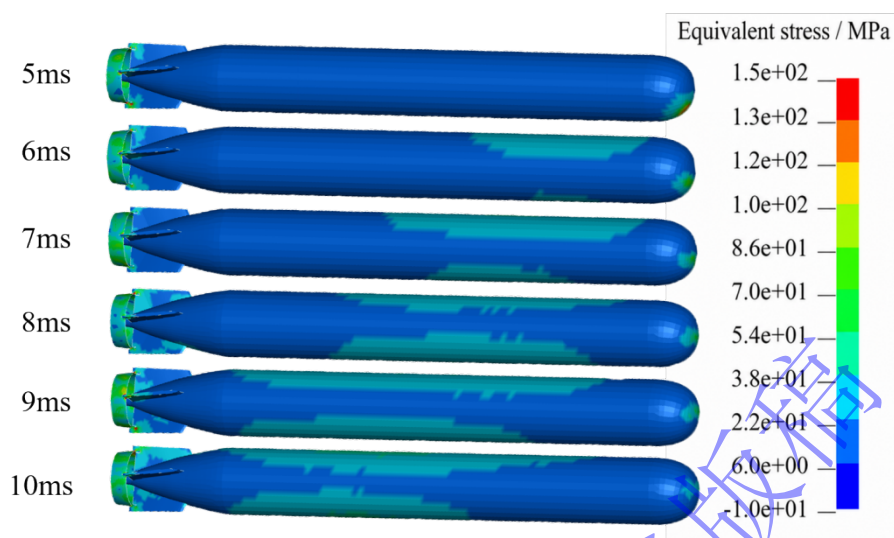


图 12 弹体入水空泡发展图

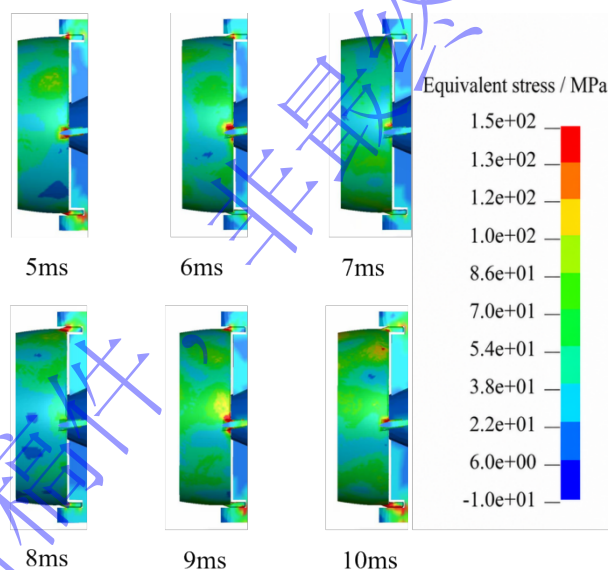
Fig.12 Evolution of the cavity during projectile water entry

由图 13 可知，弹体头部与自由液面接触后，高应力区首先出现在头部撞击区域，随后沿弹体轴向逐渐向中后部扩展，表明入水冲击载荷并非仅局限于头部局部区域，而是以结构应力波的形式沿弹体传递。由于弹体尾部导流罩与舵板连接处存在明显的截面变化和局部刚度突变，当头部冲击产生的应力波传播至尾部区域后，易在连接部位发生局部集中，使导流罩连接处及邻近壳体区域形成较高的等效应力。由 5 - 10 ms 典型时刻的应力云图可以看出，弹体头部高应力区逐渐衰减的同时，尾部导流罩区域应力响应逐步增强，说明头部入水冲击产生的结构应力传递是尾部导流罩早期应力响应的重要来源。

同时，弹体高速斜入水过程中，空泡沿弹体表面不断发展，尾部附近流场受到空泡扩展、局部流动分离和自由液面扰动的共同影响，形成非定常压力作用。该压力扰动会进一步改变尾部导流罩外表面的局部载荷分布，并与结构内部应力波在尾部连接区域的反射叠加共同作用，从而加剧导流罩局部应力集中。因此，尾部导流罩变形并非单纯由头部冲击应力波或空泡压力扰动单独控制，而是由头部冲击应力波沿弹体轴向传递、尾部结构刚度突变引起的应力反射叠加，以及空泡发展过程中非定常压力扰动共同作用的结果。



(a) Stress evolution of the projectile



(b) Stress evolution of the tail fairing

图 13 弹体入水时应力随时间变化云图

Fig.13 Time evolution of stress contours in the projectile during water entry

弹体以 45° 入水运动响应如图 14 所示, 图 14(a) 为弹体入水加速度随时间变化, 由图可知, 弹体头部与自由液面接触后, 加速度迅速增大并形成入水冲击峰值, 随后出现高频振荡并逐渐衰减。该现象主要由高速入水过程中的瞬态流固耦合作用引起。入水初期, 弹体头部撞击液面, 使局部水体在短时间内发生剧烈动量交换, 形成较大的初始冲击载荷。随着弹体继续下潜, 空泡发展、自由液面扰动及流体压力脉动使弹体表面载荷呈现非正常变化。同时, 冲击产生的应力波沿弹体轴向传播, 并在结构截面变化及尾部导流罩连接区域发生反射和叠加, 引起结构振动响应。因此, 加速度峰值后表现出明显振荡特征。随着流场逐渐趋于稳定, 载荷脉动减弱, 加速度振荡幅值逐步衰减。图 14(b) 为弹体入水速度随时间变化, 在接近 4ms 时速度显著降低, 其与加速度冲击相对应, 从缩略图看出 4-5ms

速度衰减速度减小并且以一种接近线性的方式减少。

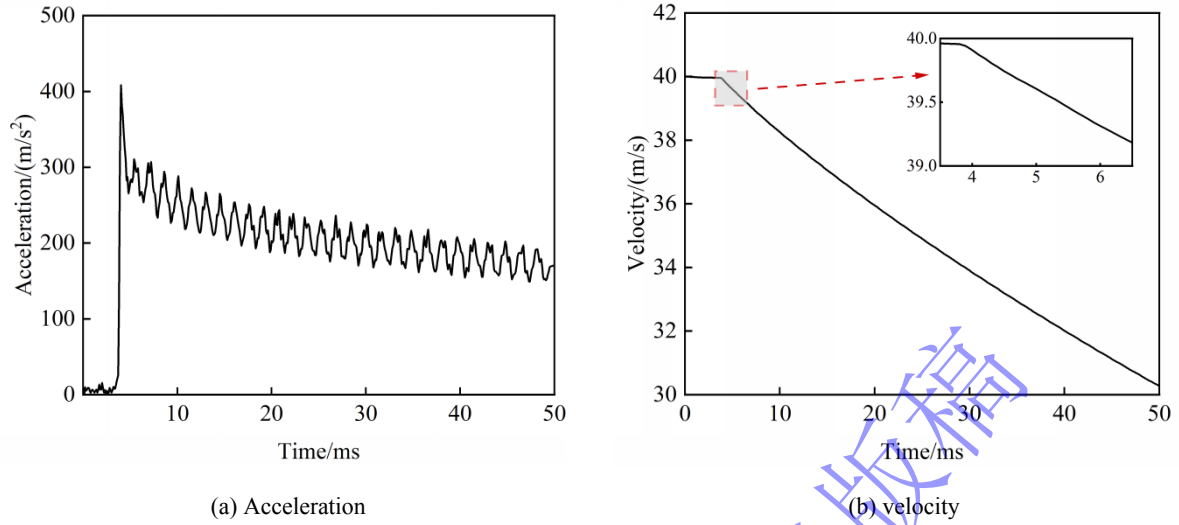


图 14 弹体 45°入水加速度与速度随时间变化曲线

Fig.14 Acceleration and velocity time-history curves of the projectile during 45° water entry

3.2 不同入水角弹体入水冲击特性研究

本节将从不同入水角度入手，研究速度 40m/s、攻角为 0° 的条件下，弹体入水过程中的空泡演化状态，加速度载荷冲击，同时在弹体上设置若干应力监测点，用以评估尾部导流罩的变形受损情况。

图 15 为 45°~70°入水角 10~30 ms 内空泡轮廓的演化对比，空泡均在自由液面附近生成，并随弹体下潜沿轴向快速拉伸，随时间推进空泡长度与下伸深度持续增加，弹体尾部均未与自由液面发生碰撞，不同入水角工况间的形态差异逐渐放大；在 10ms 时各工况空泡处于初始生成期，整体轮廓差异较小，空泡关于弹体轴线对称性较好；至 20 ms，空泡进入快速增长期，入水角对空泡形态的作用明显增强，入水角越大，空泡越细长、轴向下伸越充分，空泡轴线更接近弹体运动方向，入水角较小时，空泡上部横向外展更显著，自由液面附近局部形态差异更突出；30 ms 时上述趋势进一步累积，随着入水角度的变小空泡关于弹体轴线不对称性更加显著。

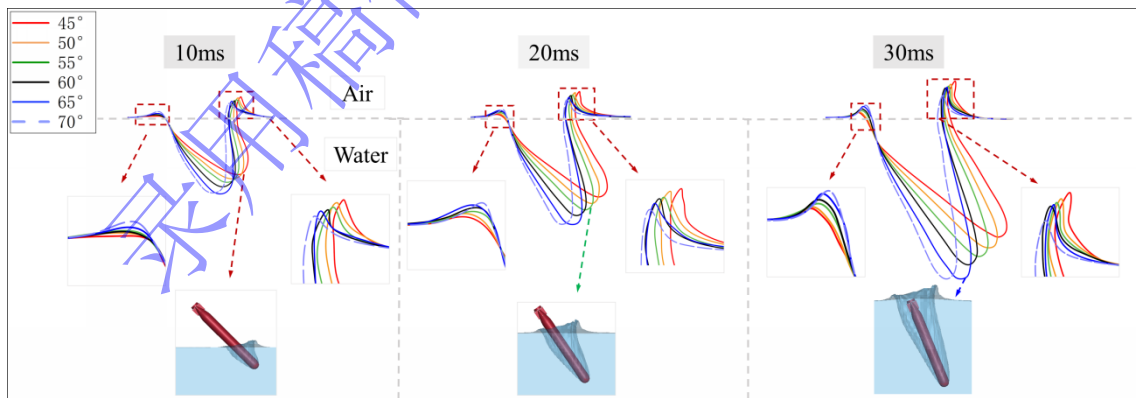


图 15 不同入水角度下弹体入水空泡演化过程（10-30ms）

Fig.15 Cavity evolution during projectile water entry at different angles (10-30ms)

弹体不同角度入水过程的加速度如图 16 所示，弹体最大加速度发生在 70°，随着入水角度减小，加速度峰值逐渐降低，并且入水角度越小加速度衰减速度越慢。该趋势由于弹体入水角度越小，头部与自由液面接触面积越大，在同一时间内动能传递到水体的量减少，从而降低冲击载荷。入水角度较

大时, 弹体速度在垂直于自由液面方向上的分量较大, 头部与水体发生更强的瞬时动量交换, 局部冲击压力快速升高, 因此加速度峰值较大。入水角度减小时, 弹体与自由液面的接触过程更加延长, 冲击载荷在时间上分布相对分散, 峰值加速度随之降低。与此同时, 小入水角条件下弹体沿自由液面方向的运动分量增加, 空泡非对称性增强, 自由液面扰动和流体分离现象更加明显, 弹体表面所受压力脉动持续时间增加。因此, 较小入水角工况下加速度振荡衰减相对缓慢, 而较大入水角工况下虽然初始冲击峰值较高, 但弹体入水过程更接近直接穿透自由液面, 冲击载荷集中释放后振荡衰减相对较快。上述现象表明, 入水角度不仅影响初始冲击载荷峰值, 也会通过改变空泡非对称发展和流体载荷脉动过程影响加速度振荡特性。

在 V-T 变化曲线 (图 17) 中, 较大的入水角度使弹体入水时速度变化更明显。然而, 由于弹体入水过程通常持续数微秒, 冲击反作用力对弹体的影响极短, 随后速度减少幅度趋于一致。

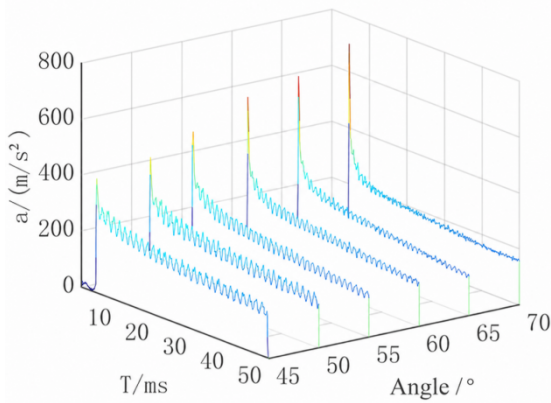


图 16 不同入水角度下弹体加速度-时间响应对比

Fig.16 Comparison of projectile acceleration-time responses at different water-entry angles

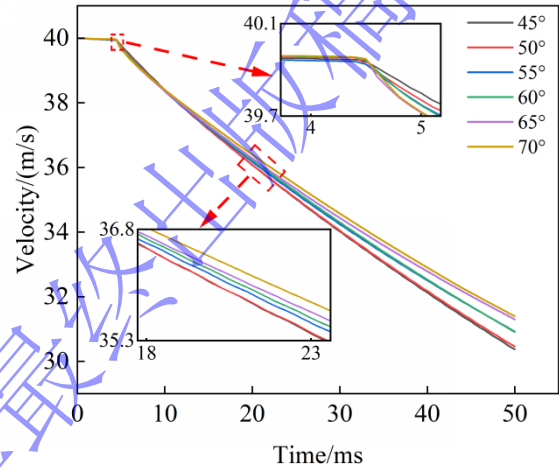


图 17 不同入水角度下弹体速度-时间响应对比

Fig.17 Comparison of projectile velocity-time responses at different water-entry angles

如图 18 所示, 在弹体结构上共布置 9 个监测点, 头部监测点 1 为动态监测点, 位于弹体与水面撞击时刻的切点位置, 监测点 1-3 监测弹体所受压力。监测点 4-9 用于监测尾部导流罩在高速入水过程中的等效力。考虑到尾部导流罩在入水过程中受流体冲击具有显著的非对称性, 其靠近水面一侧更易承受集中冲击载荷并诱发空化现象, 因此导流罩监测点均布置于靠近水面一侧, 以重点捕捉结构的危险响应区域。在尾部导流罩上, 监测点 4、5、6 布置于导流罩与舵板的连接区域, 并沿轴向均匀分布, 用以表征连接部位因结构刚度突变和约束效应所引起的应力集中及其轴向传播特性; 监测点 7、8、9 布置于两个连接处之间的导流罩中部区域, 并沿轴向等间距分布, 用以反映导流罩壳体在入水冲击作用下的整体受力。上述布点方式能够覆盖尾部导流罩危险区域。

图 19 为弹体以 60° 入水时监测点 1、监测点 2、监测点 3 所受压力随时间变化曲线, 监测点 1 剧烈增加随后趋于稳定, 监测点 2 及监测点 3 的压力突变迟于监测点 1, 并且监测点 2 及监测点 3 的压力处于震荡状态, 根据弹体入水空泡发展规律可知监测点 1 为头部直接受到弹体冲击, 随后头部始终与水接触, 保持其压力稳定并且趋于平稳, 监测点 2、3 为弹体中部及尾部, 其压力来源于高速入水空化效应及头部压力传递产生, 空化效应产生不稳定负压以及头部传递的不稳定压力导致其监测点 2 及监测点 3 处于震荡。

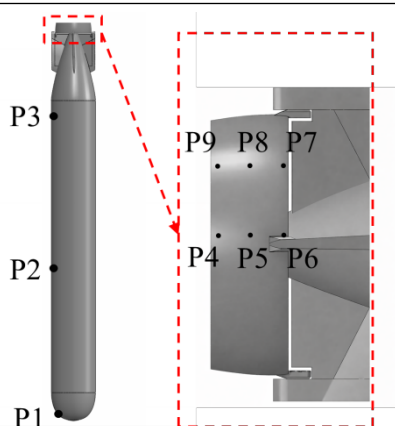


图 18 弹体监测点 (1-9)

Fig.18 Schematic of monitoring points (1-9)

弹体在监测点 1 的最大压力与入水角度的变化曲线如图 20 所示, 弹体监测点 1 的最大压力为 70° 入水, 随着入水角度的减小, 最大压力变小。监测点 2 及监测点 3 最大压力与入水角度的关系如图 21, 监测点 2 及检测点 3 没有与自由液面直接接触, 其所受压力变化较为平缓。

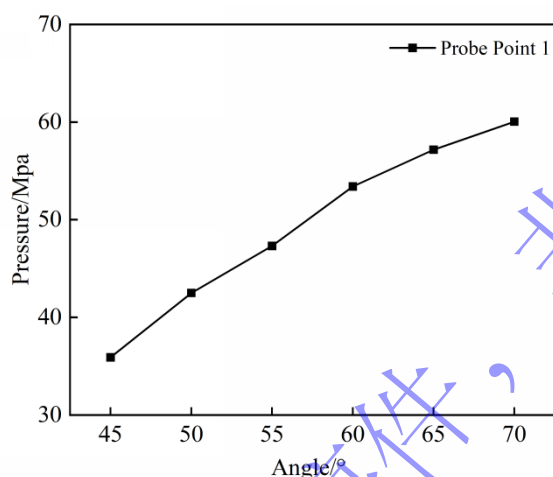


图 20 不同入水角度监测点 1 最大压力值

Fig.20 Maximum pressure at monitoring point 1 under different water-entry angles

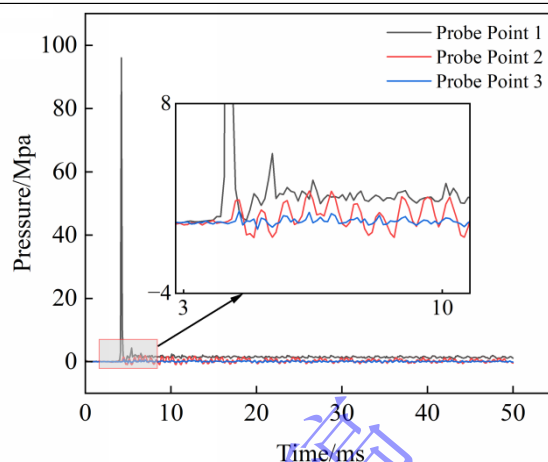


图 19 弹体不同监测点压力随时间变化曲线

Fig.19 Pressure time histories at monitoring points

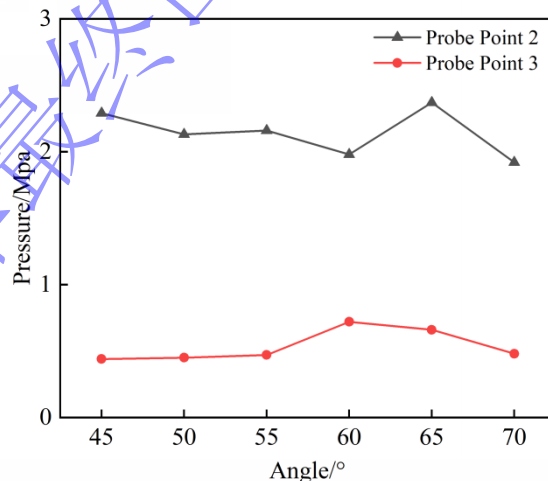


图 21 不同入水角度监测点 2 和监测点 3 最大压力值

Fig.21 Maximum pressure at monitoring points 2 and 3 under different water-entry angles

如图 22, 通过在尾部导流罩建立 4-9 监测点可发现, 各监测点的等效应力随时间变化趋势基本一致。尾部导流罩应力集中主要位于与舵板的连接处及导流罩中部区域, 且在高速入水冲击作用下应力呈现明显的循环震荡特征, 其中最大等效应力出现在靠近连接处的监测点 6。对不同角度监测点的最大等效应力分析, 如图 23, 不同角度入水时尾部导流罩各监测点的最大等效应力变化趋势一致。其中, 当弹体以 60° 入水时, 尾部导流罩的等效应力水平最低, 而以 45° 入水时, 其等效应力达到最大。

结合图 19 和图 22 可知, 监测点 1 压力在入水初期迅速升高并趋于稳定, 反映头部直接冲击载荷作用; 监测点 2 和监测点 3 压力响应滞后且呈振荡特征, 说明弹体中后部流体载荷受空泡发展、流动分离及压力传递影响。尾部导流罩监测点 4-9 等效应力也呈现振荡, 且连接区域应力较高, 表明导流罩对结构应力传递和尾部压力脉动均较为敏感。由此可知, 头部冲击产生的应力波沿弹体轴向向尾部传播, 为导流罩早期应力响应提供传递路径; 而空泡发展引起的非定常压力扰动进一步调制尾部局部

载荷, 促使导流罩应力集中和变形累积。因此, 不同入水角下导流罩应力和变形变化, 是应力波传递与空泡压力扰动共同作用的结果。

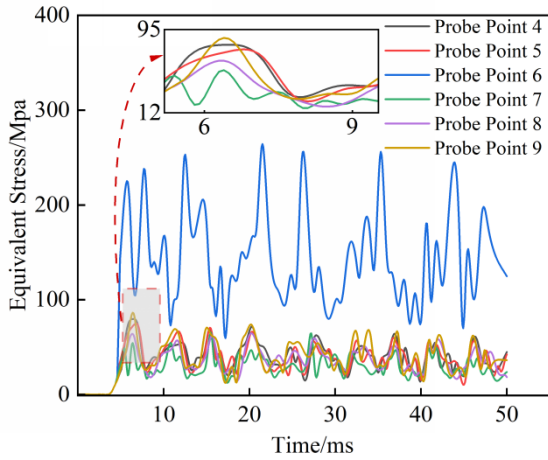


图 22 监测点 4-9 等效应力

Fig. 22 Time histories of equivalent stress at monitoring points 4-9

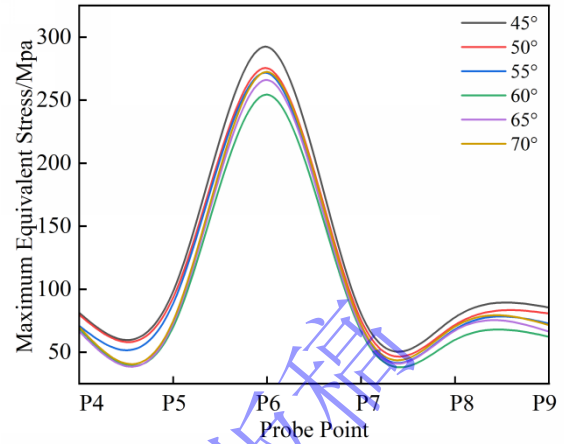


图 23 不同角度导流罩监测点最大等效应力

Fig.23 Maximum equivalent stress at fairing monitoring points for different water-entry angles

尾部导流罩内部布置有螺旋桨, 在高速入水时可能导致螺旋桨与导流罩发生干涉, 从而导致功能失效。为此, 引入径向变形率 ε 描述导流罩变形情况, 具体参数如图 24 所示, 径向变形率 ε 公式为:

$$\varepsilon = (d - d_{min}) / d \quad (6)$$

式中 ε 为径向变形率; d 为导流罩内径; d_{min} 为导流罩变形后的内径。

弹体在不同入水角度条件下尾部导流罩的径向变形率随时间的变化情况如图 25 所示, 总体来看弹体尾部导流罩的径向变形率 ε 随入水角度先减小后增大。弹体以 60° 入水时导流罩的径向变形率最小, 对应的结构变形量也最小; 当入水角度小于 60° 时, 导流罩的径向变形率随角度的变小显著增加。

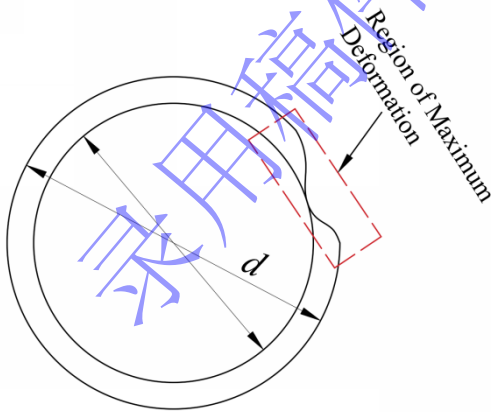


图 24 尾部导流罩变形率示意图

Fig.24 Schematic of deformation rate of the tail fairing

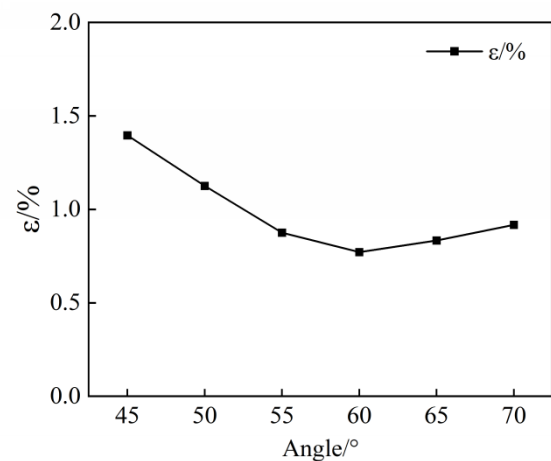


图 25 不同角度的导流罩变形率

Fig.25 Deformation rate of the fairing at different angles

3.3 不同攻角弹体入水冲击特性研究

本节将从不同入水攻角入手, 研究以 40m/s、 60° 入水角度情况下, 弹体入水过程中的空泡演化

状态、加速度峰值，并且结合加速度二次峰值、应力监测点分析尾部导流罩的变形受损情况。

图 26 为弹体在 -8° ~ 8° 攻角条件下入水后 10-30ms 内的空泡形态演化。10ms 时空泡处于起始生成阶段，各工况空泡整体轮廓差异较小，自由液面附近仅表现出轻微的形态偏转。至 20ms，空泡进入快速增长阶段，空泡长度及向水下的延伸深度显著增加，不同攻角曲线的分离度明显增大，表明攻角对空泡非对称发展的影响开始主导该阶段的空泡形态，其中 -4° 工况空泡形态最为对称；当攻角为正时，随着攻角增大，空泡轴线偏转加剧、左右形态差异增大，对称性逐步劣化。进而导致 30ms 时以 8° 攻角入水出现弹体尾部撞击自由液面导致左侧出现较高液体飞溅。

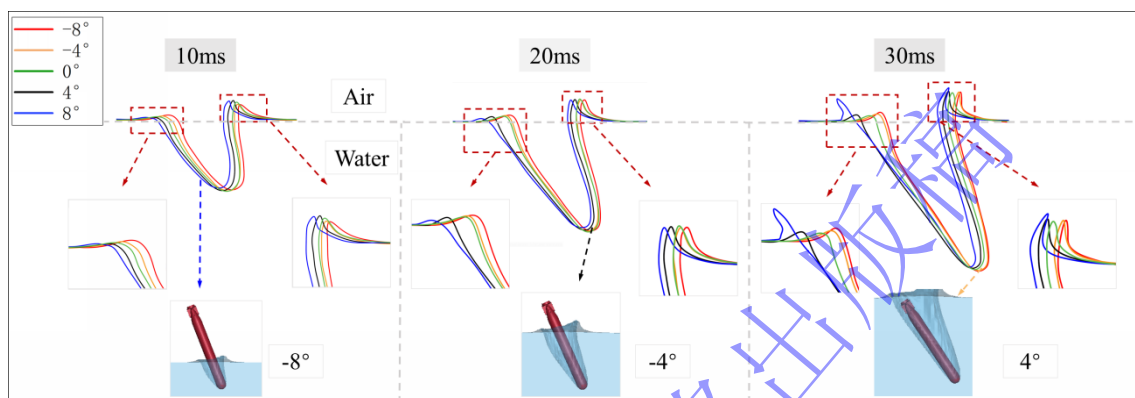


图 26 不同入水攻角空泡发展趋势 (10-30ms)

Fig.26 Cavity development trends at different water-entry angles of attack(10-30ms)

弹体以不同攻角入水加速度随时间变化如图 27 所示，正攻角与负攻角对弹体影响程度是不同的。如图 28 所示加速度峰值随着正攻角变大而变小，随负攻角绝对值增大呈现先减小后增大的特点。并且当攻角过大时，会产生第二个加速度峰值，负攻角对应的第二个加速度峰值大于正攻角的第二个加速度峰值。根据入水空泡发展趋势可知：较大攻角会导致弹体入水时尾部撞击自由液面导致的“尾拍效应”，此时对尾部产生巨大冲击，从而导致二次加速度峰值的产生。

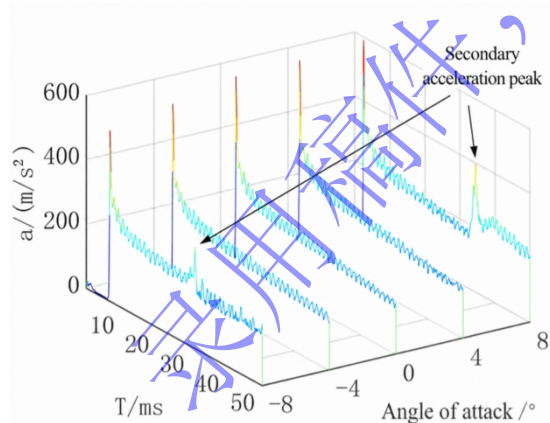


图 27 不同攻角下弹体加速度 - 时间响应对比

Fig. 27 Comparison of acceleration-time responses of the projectile under different angles of attack

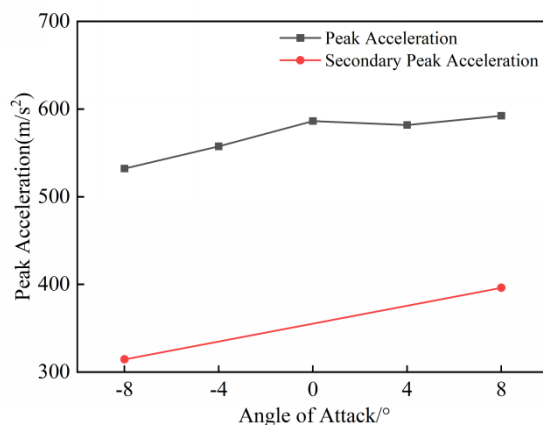


图 28 不同攻角弹体加速度峰值和二次加速度峰值

Fig.28 Primary and secondary acceleration peaks of the projectile under different angles of attack

弹体以不同攻角入水时，尾部导流罩监测点 4-9 的等效应力时程如图 29 所示。各工况下应力响应呈现明显的空间非均匀性，其中监测点 6 的等效应力始终显著高于其余测点且波动幅值最大，表明尾部连接区域为载荷传递与应力集中的敏感部位，可判定为导流罩的主要危险位置。对于小攻角工况 (-4° 、 0° 、 4°)，除监测点 6 外其余测点应力整体处于较低水平并以小幅振荡为主。当攻角增大至

-8°与 8°时, 等效应力在 30–40 ms 出现显著增加, 多个监测点同步抬升, 反映出尾部与自由液面相互作用增强并诱发明显的二次冲击特征, 从而显著提高尾部导流罩的整体应力水平。进一步对比可见, 绝对值相等的攻角, 正攻角的峰值更高且峰值更集中, 说明大正攻角入水对尾部结构安全更为不利。

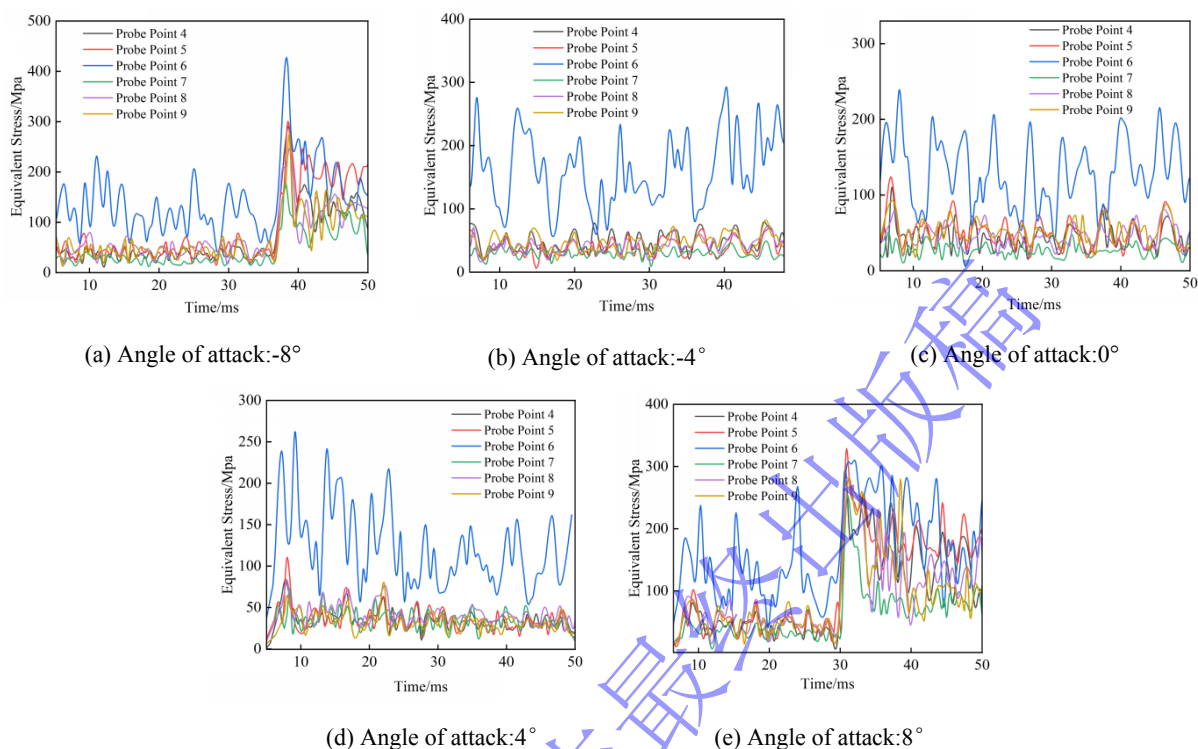


图 29 不同攻角监测点 4-9 等效应力

Fig.29 Equivalent stress at monitoring points 4-9 under different angles of attack

弹体尾部导流罩径向变形率随攻角变化如图 30 所示, 弹体尾部导流罩变形率随负攻角绝对值的增加呈先减小后增加的趋势, 在-4° 攻角入水时, 变形量最小。当弹体以正攻角入水时, 尾部导流罩变形量随攻角增加而增大, 以 8°攻角入水时尾部导流罩变形量最大, 达到 23.7%。从图 31 可以看出 8° 攻角入水尾部导流罩已经严重变形。

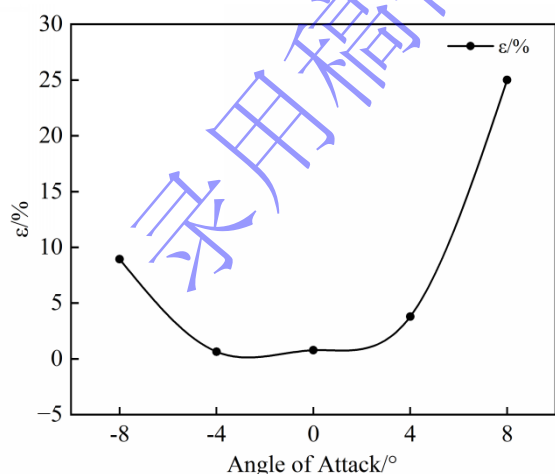


图 30 不同攻角导流罩变形率

Fig.30 Deformation ratio of the tail fairing under different angles of attack

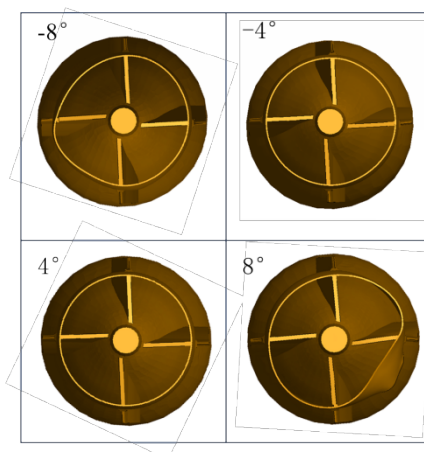


图 31 不同攻角导流罩变形图

Fig.31 Deformation contour of the tail fairing under different angles of attack

4 结果与讨论

本文基于 ALE 流固耦合方法对尾部带导流罩弹体以不同姿态以 40m/s 高速入水响应特性展开研究, 得到以下结论:

1) 弹体高速入水时, 头部与自由液面瞬时撞击而产生空泡, 并使弹体承受显著冲击载荷, 随后载荷逐步趋于稳定。弹体撞击处产生较大应力, 应力以应力波形式朝尾部传递, 在导流罩尾部发生应力集中, 受到空泡扰动与应力波共同作用尾部导流罩发生变形。

2) 在不同入水角度工况下, 入水角度减小空泡不对称性增加, 空泡下伸深度减小, 液面隆起高度增加, 弹体入水加速度峰值减小。各角度条件下, 加速度时程变化规律一致, 各监测点应力时程变化趋势也保持一致; 尾部导流罩各监测点最大应力与变形量均在 60° 入水时最小。

3) 在不同入水攻角工况下, 入水攻角较大, 加速度出现两个峰值, 第一个峰值由弹体头部与自由液面撞击引起, 第二个峰值由弹体尾部导流罩与自由液面撞击引起。相较于正攻角, 负攻角入水的加速度载荷更小; 在小范围负攻角条件下, 可提高空泡对称性并降低尾部导流罩变形, 尾部导流罩变形量在 -4° 攻角入水时最小。

参考文献

- [1] CHE P, SHI Y, ZHAO H, et al. Study on the cavity evolution and load characteristics of large projectile during high-speed water entry[J/OL]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117673. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117673.
- [2] HAO C L, DANG J J, HUANG C, et al. Investigation of oblique water entry of high-speed supercavitating projectiles using transient fluid-structure interaction simulation[J/OL]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117702. DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.117702.
- [3] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579-584. ZHANG W, GUO Z T, XIAO X K, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011, 31(6): 579-584.
- [4] 杨衡, 张阿漫, 龚小超, 等. 不同头型弹体低速入水空泡试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(9): 1060-1066. DOI:10.3969/j.issn.1006-7043.201304035. YANG H, ZHANG A M, GONG X C, et al. Experimental study of the cavity of low speed water entry of different head shape projectiles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(9): 1060-1066. DOI:10.3969/j.issn.1006-7043.201304035.
- [5] CHEN T, HUANG W, ZHANG W, et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles[J/OL]. Ocean Engineering, 2019, 175: 16-24. DOI:10.1016/j.oceaneng.2019.02.021.
- [6] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water entry of projectiles[J/OL]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46(Volume 46, 2014): 355-378. DOI:10.1146/annurev-fluid-011212-140753.
- [7] GAO J G, CHEN Z H, HUANG Z G, et al. Numerical investigations on the oblique water entry of high-speed projectiles[J/OL]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 362[2025-12-18]. DOI:10.1016/j.amc.2019.06.061.

- [8] 潘光, 杨悝. 空投鱼雷入水载荷[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5): 521-526. DOI:10.11883/1001-1455(2014)05-0521-06.
- PAN G, YANG L. Impact force encountered by water-entry airborne torpedo[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(5): 521-526. DOI:10.11883/1001-1455(2014)05-0521-06.
- [9] LIU X, CAI X, HUANG Z, et al. Comparative study on the oblique water-entry of high-speed projectile based on rigid-body and elastic-plastic body model[J/OL]. Defence Technology, 2025, 46: 133-155. DOI: 10.1016/j.dt.2024.11.007.
- [10] 明付仁, 王嘉捷, 刘文韬, 等. 高速跨介质入水多相流动与流固耦合特性研究综述[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(1): 68-85. DOI:10.7638/kqdlxxb-2023.0197.
- MING F R, WANG J J, LIU W T, et al. Review of multiphase flow and fluid-structure interaction of high-speed water entry[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(1): 68-85. DOI:10.7638/kqdlxxb-2023.0197.
- [11] 张彤运, 王聪, 许海雨, 等. 大尺度跨介质航行器高速倾斜入水冲击载荷特性研究[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(3): 426-433. DOI:10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0021.
- ZHANG T Y, WANG C, XU H Y, et al. Impact load characteristics of large-scale trans-medium vehicles during high-speed oblique water entry[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(3): 426-433. DOI:10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0021.
- [12] An arbitrary lagrangian-eulerian computing method for all flow speeds[J/OL]. Journal of Computational Physics, 1974, 14(3): 227-253. DOI:10.1016/0021-9991(74)90051-5.
- [13] SHI Y, PAN G, YAN G X, et al. Numerical study on the cavity characteristics and impact loads of AUV water entry[J/OL]. Applied Ocean Research, 2019, 89: 44-58. DOI:10.1016/j.apor.2019.05.012.
- [14] 汪振, 吴茂林, 戴文留. 大口径弹体高速入水载荷特性研究[J]. 弹道学报, 2020, 32(1): 15-22. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2020)01-003. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2020)01-003.
- WANG Z, WU M L, DAI W L. Study on Load Characteristics of High-speed Water-entry of Large Caliber Projectile[J]. Journal Of Ballistics, 2020, 32(1): 15-22. DOI: 10.12115/j.issn.1004-499X(2020)01-003. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2020)01-003.
- [15] 施红辉, 周栋, 温俊生, 等. 基于 ALE 方法的弹性圆柱壳入水时的流固耦合模拟[J]. 弹道学报, 2020, 32(1): 9-14, 46. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2020)01-002.
- SHI H W, ZHOU D, WEN J S, et al. Fluid-solid Interaction Simulation of Elastic Cylindrical Shell Penetrating Water Based on the ALE Method[J]. Journal Of Ballistics, 2020, 32(1): 9-14, 46. DOI:10.12115/j.issn.1004-499X(2020)01-002.
- [16] XIA S, WEI Y, WANG C, et al. Cavity evolution and response of a hollow structure during oblique high-speed water entry[J/OL]. Physics of Fluids, 2025, 37(9)[2025-12-18]. DOI:10.1063/5.0277916.
- [17] 赵海瑞, 施瑶, 潘光, 等. 不同厚度航行器高速入水冲击载荷及壳体变形特性[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(2): 111-

125. DOI:10.7638/kqdlxxb-2023.0120.

ZHAO H R, SHI Y, PAN G, et al. Impact load and deformation characteristics of a vehicle with different shell thickness during high-speed water entry. [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(2): 111-125. DOI:10.7638/kqdlxxb-2023.0120.

[18]FAN X, ZHAO J, QI C, et al. On the water entry impact characteristics of high-speed vehicle with an arbitrary lagrangian-eulerian method[J/OL]. Applied Ocean Research, 2024, 150[2025-11-14]. DOI:10.1016/j.apor.2024.104118.

[19]魏海鹏, 史崇镔, 孙铁志, 等. 基于 ALE 方法的航行体高速入水缓冲降载性能数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 115-126. DOI:10.11883/bzycj-2020-0461.

WEI H P, SHI C B, SUN T Z, et al. Numerical study on load-shedding performance of a high-speed water-entry vehicle based on an ALE method. [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10): 115-126. DOI:10.11883/bzycj-2020-0461.

[20]SONG Z J, DUAN W Y, XU G D, et al. Experimental and numerical study of the water entry of projectiles at high oblique entry speed[J/OL]. Ocean Engineering, 2020, 211[2025-11-19]. DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.107574.