

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0461

基于 ALE 方法的航行体高速入水 缓冲降载性能数值研究*

魏海鹏¹, 史崇宾², 孙铁志^{2,3}, 鲍文春¹, 张桂勇^{2,3,4}

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

2. 大连理工大学船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

3. 大连理工大学工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

4. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 针对航行体高速入水过程中的降载问题, 设计了缓冲组件模型, 并采用有限元任意拉格朗日-欧拉(ALE)的流固耦合方法, 建立精确数值计算模型, 对安装缓冲组件的航行体高速入水问题进行数值计算分析, 获得入水过程中缓冲罩壳与缓冲泡沫的动态破坏过程及航行体运动参数, 从而分析不同缓冲方案的缓冲性能。结果表明已设计的缓冲组件在航行体入水时能够吸收一定的冲击能量发生破坏并及时脱离航行体, 同时缓冲泡沫的分层设计改变了缓冲罩壳的破坏方式, 使罩壳破坏时间提前; 撞水时在罩壳的头部与预设沟槽处会出现明显的应力集中, 并且罩壳的沟槽设计能有效的引导其破坏形态, 分层后的缓冲泡沫不易完全破坏, 出现了二次缓冲的现象; 缓冲组件使航行体入水速度曲线变化更加平缓, 相同时间内航行体位移更大, 分层缓冲泡沫方案降载率可达 73.2%, 缓冲效果较单层泡沫方案更好。

关键词: 高速入水; 缓冲性能; 流固耦合; 变形破坏

中图分类号: O352

国标学科代码: 13025

文献标志码: A

Numerical study on load-shedding performance of a high-speed water-entry vehicle based on an ALE method

WEI Haipeng¹, SHI Chongbin², SUN Tiezhi^{2,3}, BAO Wenchun¹, ZHANG Guiyong^{2,3,4}

(1. *Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;*

2. *School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;*

3. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,*

Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

4. *Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)*

Abstract: Aiming at the problem of load shedding in high-speed water entry of a vehicle, a composite structural buffer has been designed. Meanwhile, an accurate numerical model with the fluid-solid coupling is established to analyze the crushing process based on the arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) algorithm and evaluate the effects of different schemes. The results show that the designed buffer can absorb the impact energy, leading to the damage and separation from the vehicle properly. The layered design of cushion foam changes the damage mode of the nose cap and causes it to be failure in advance. When the buffer is in contact with water, stress concentration occurs at the top of nose cap and preset groove. The groove effectively guides the destruction mode of the cap, such that the layered foam will not be too easy to be completely destroyed and the

* 收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(52071062); 中国博士后科学基金(2019T120211); 辽宁省自然科学基金(2020MS106); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC1908027); 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT20TD108, DUT20LAB308)

第一作者: 魏海鹏(1982—), 男, 博士, 研究员, weihaipeng1982@163.com

通信作者: 孙铁志(1986—), 男, 博士, 副教授, suntiezhi@dlut.edu.cn

phenomenon of secondary cushion can occur. The velocity curve of the vehicle with the buffer changes more smoothly, the displacement is greater in the same time, and the load reduction rate of the layered foam scheme can reach 73.2% which is better than the single-layer foam scheme.

Keywords: high-speed water entry; buffer performance; fluid-structure interaction; deformation and failure

结构物以一定的速度穿过自由液面的过程被称为入水过程, 入水是一个短暂、变化剧烈而又复杂的力学过程, 特别是在入水冲击瞬间通常会形成很大的冲击载荷^[1]。空投鱼雷入水即为一个典型常见的入水问题, 入水冲击过程中由于介质密度的突变形成的轴向力作用可能导致航行体头部变形、仪器设备失效等, 并可能使结构弯曲破坏^[2]。因此, 降低入水冲击载荷受到广泛关注, 且具有重要的工程意义。

目前用于入水缓冲降载的措施主要有利用结构物外形降载、主动喷气降载和利用缓冲组件降载等。利用结构物外形降载指的是通过改变入水结构物外形, 从而降低入水过程中的砰击载荷峰值, 主要的措施有改变结构物头型、在结构物表面设计凹槽等。石汉成等^[3]研究了半球头、锥形头结构入水载荷, 发现锥形头相比于半球头结构能有效降低入水瞬时载荷。Sharker 等^[4]通过 3D 打印入水模型开展入水冲击动力学实验研究, 发现基于跳水类海鸟的头型可有效降低入水加速度。Shi 等^[5]采用数值模拟方法, 通过对比阻力系数研究了不同头型参数的自主水下航行器 (autonomous underwater vehicles, AUV) 入水砰击载荷, 发现入水载荷随着头部半球角的增大而增大。此外, 入水时向外通出非凝结气体可改变结构物与周围的接触环境, 从而改善入水冲击载荷和空泡载荷的影响。张学广等^[6]研究了具有一定深度的凹槽圆柱体入水载荷, 相比于平底圆柱体, 凹槽内存在的空气可降低入水冲击载荷, 延长了冲击作用时间。潘龙等^[7]在对头部喷气平头圆柱体入水缓冲机制的研究中也得到了类似的结论。Sun 等^[8]对比了通气空泡和自然空泡对结构表面载荷的影响, 发现通气后可改变自然空化过程与结构表面的剧烈作用, 从而降低空泡对结构表面的脉动压力。利用缓冲组件进行降载是最常见的方法, 主要的措施为安装缓冲罩壳吸收入水产生的能量。缓冲罩壳降载最早由 Howard^[9]提出, 通过在鱼雷等入水结构物头部固定一个流线型头罩, 在入水过程中罩壳破碎, 从而降低入水载荷。宣建明等^[10]对鱼雷头部模型开展了有缓冲罩壳入水实验, 发现缓冲罩壳可以有效地降低入水冲击载荷并延长作用时间。钱立新等^[11]研究了鱼雷罩壳破坏机制和理论设计方法, 并进行了入水动力学数值模拟和实验验证, 提出“撑进破坏”是罩壳的有效破坏模式。Shi 等^[12]设计了一种由缓冲罩壳、缓冲垫、定位结构以及连接器组成的缓冲组件, 通过数值计算得到安装该缓冲组件的航行体入水冲击降载率可以达到 42.2%。Li 等^[13]通过对使用不同缓冲泡沫材料的缓冲组件进行高速入水数值计算研究, 对比不同材料下缓冲罩壳的动态破坏过程, 为缓冲泡沫材料的选择提供参考。

本文中, 首先, 基于有限元分析软件 LS-DYNA 中的任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) 模型, 建立高速入水流固耦合数值计算模型。ALE 方法由于结合了拉格朗日方法和欧拉方法的优点, 被广泛应用于带自由液面的液体晃动问题和固体材料的大变形问题。然后, 设计缓冲罩壳模型, 对内部结构进行改进并设计罩壳内部缓冲泡沫模型。最后, 利用已建立的数值模型对加装缓冲罩壳后航行体入水过程进行数值计算研究, 分析不同缓冲方案下缓冲罩壳和缓冲泡沫的破坏过程以及整体流场演化过程, 并对航行体的运动参数进行分析, 从而对比不同方案的降载效果, 为入水缓冲罩壳设计提供参考。

1 数值方法与计算模型

1.1 基本控制方程与耦合方法

LS-DYNA 中的 ALE 算法兼具拉格朗日方法和欧拉方法的优点并改进二者的缺点, 在结构边界运动的处理上引进了拉格朗日方法的特点, 能够有效跟踪物质结构边界的运动, 在内部网格的划分上结合了欧拉方法的优点, 在对本文中的航行体高速入水并伴随罩壳和缓冲泡沫破坏的过程模拟时非常有利。流体区域涉及气相和液相流动, 使用欧拉网格进行描述, 航行体及缓冲组件由拉格朗日网格进行描述。ALE 算法下的控制方程包括质量、动量和能量守恒方程。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

(3) 能量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; v 为流体的速度; w 为由计算得到的流体质点速度与参照坐标之间的相对速度, 包含此速度的通常称为对流项; x 为欧拉坐标; b 为作用在流体上的体积力, 体积力相对较小时可以忽略; E 为能量; 下标 i, j 为不同方向欧拉坐标; $\sigma_{ij,j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$, 其中 σ_{ij} 为应力张量分量。 σ_{ij} 的表达式为:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

式中: p 为压力, μ 为动力黏度, δ_{ij} 为克罗内克函数, $v_{i,j} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$, $v_{j,i} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$ 。

在建立几何模型及进行网格划分时, 固体结构与流体的几何形状以及网格可以重合。通过罚函数耦合约束方法将结构与流体耦合在一起, 实现力学参数的传递。罚函数约束方式是通过追踪主从节点间的相对位移从而判断是否引入界面力, 如果出现相对位移即表面的贯穿, 则界面力 F 就会分布到欧拉流体的节点上, 界面力的大小与发生贯穿的数量成正比^[14], 即:

$$F = k_i \cdot d \quad (5)$$

式中: k_i 为基于主、从节点质量模型特性的刚度系数; d 为结点对主物质表面的贯穿量。由于在每一个时间积分步上都要对等式中的界面力进行求解, 可以认为 F 是等式中一个外力, 因此每一时间积分上都可以对总节点力进行求解, 由总节点力所引起结构加速度、速度和位移等的变化。

1.2 流体材料模型

在 LS-DYNA 中, 通过关键字 *MAT_NULL 来定义流体黏性应力的本构关系, 流体介质的压力由状态方程进行描述。水介质选择 Grüneisen 状态方程, 并通过关键字 *EOS_GRÜNEISEN 进行设置:

$$p_w = \frac{\rho_0 c^2 \mu_w \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu_w - \frac{\alpha}{2} \mu_w^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu_w - S_2 \frac{\mu_w^2}{\mu_w + 1} - S_3 \frac{\mu_w^3}{(\mu_w + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu_w) E_w \quad (6)$$

式中: c 为声音在水中的传播速度; α 为对 Grüneisen 系数 γ_0 的一阶修正; S_1 、 S_2 、 S_3 为 $u_s - u_p$ 曲线斜率无量纲系数, u_s 为冲击波速度, u_p 为流体质点的速度; E_w 为水的体积内能; μ_w 为水的体积变化率。表 1 中给出了水状态方程的参数, 其中 E_{w0} 为水的初始体积内能, V_{w0} 为水的初始相对体积。

表 1 水状态方程参数

Table 1 Equation-of-state parameters for water

$c/(m \cdot s^{-1})$	S_1	S_2	γ_0	E_{w0}	V_{w0}
1647	1.921	-0.096	0.35	0	0

对于空气介质使用 LINER-POLY-NOMIAL 线性状态方程, 通过 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 关键字施加, 状态方程压力公式用下式表示:

$$p_a = C_0 + C_1 \mu_a + C_2 \mu_a^2 + C_3 + (C_4 + C_5 \mu_a + C_6 \mu_a^2) E_a \quad (7)$$

式中: μ_a 为气体体积变化率; E_a 为气体的体积内能; $C_0 \sim C_6$ 为线性多项式状态方程系数, 对于空气而言, $C_0 = C_1 = C_2 = C_5 = C_6 = 0$, $C_3 = C_4 = 0.4$ 。

1.3 计算模型与材料参数

本文的数值模拟与缓冲组件设计方案如图 1 所示, 航行体最大直径为 324 mm, 长 2 720 mm。由于本文中只考虑缓冲组件的破坏变形和航行体的运动参数, 不考虑自身变形, 因此将其视为刚体模型。

罩壳模型如图 2 所示。罩壳壁厚为 5 mm, 在罩壳内部预设一定数量的深度为 2 mm 的沟槽, 以便于控制罩壳的破坏特性并使罩壳及时脱离航行体, 同时罩壳中有凸台用于固定泡沫的位置。

材料选择方面, 缓冲罩壳的材料选择了以不饱和聚氨酯树脂为基体、短切玻璃纤维为增强基体的复合材料, 在瞬时强冲击载荷下, 该复合材料易发生脆性破坏。这种复合材料的参数取自文献 [13]: 密度为 1 200 kg/m³, 杨氏模量为 8.5 GPa, 泊松比为 0.33, 屈服应力为 45 MPa, 切线模量为 9 MPa, 在 LS-DYNA 中利用 PLASTIC KINEMATIC 关键字定义罩壳材料参数。

缓冲泡沫的材料选择了聚甲基丙烯酸亚胺 (polymethacrylimide, PMI) 泡沫, 该材料能在保证撞水后吸收能量的同时也较为容易破坏^[15]。并在对缓冲泡沫进行分层设计时, 选择了不同力学参数的 PMI 泡沫, 将单层泡沫模型按长度三分分进行不同参数的设置。PMI 泡沫材料参数见表 2。

网格划分时, 空气域与水域共节点, 航行体、罩壳、缓冲泡沫与流域均采用实体单元进行划分, 并对航行体入水路径与缓冲组件进行网格加密, 提高计算效率, 网格划分完成后共 2 104 138 个单元, 2 945 706 个节点, 截取的罩壳与水域部分网格如图 3 所示。

进行数值模拟时, 航行体均以 150 m/s 的初速度垂直入水, 为了对比安装缓冲组件后的缓冲性能并探讨对缓冲泡沫进行分层设计带来的改变, 本文中选取了 3 种工况进行数值模拟, 具体工况如表 3 所示, 其中内层、中层和外层泡沫距离航行体头部由近及远排布。



图 1 航行体模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the vehicle

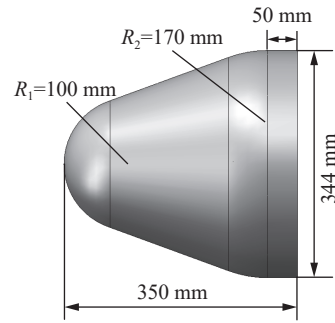


图 2 缓冲罩壳模型
Fig. 2 A buffer cover model

表 2 聚甲基丙烯酸亚胺泡沫 (PMI) 材料参数

Table 2 Material parameters of polymethacrylimide (PMI) foam

材料编号	密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	剪切强度/MPa	拉伸膜量/MPa
71WF	71	1.7	1.3	105
110WF	110	3.6	2.4	180
200WF	205	9.0	5.0	350

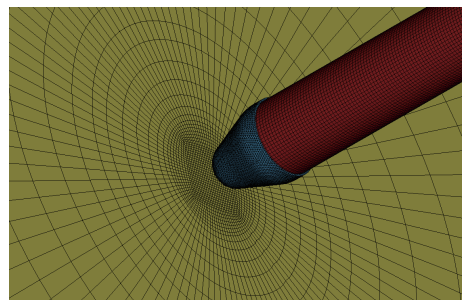


图 3 局部网格划分示意图
Fig. 3 Part of the finite element mesh

表 3 工况

Table 3 Simulation cases

工况	速度/(m·s ⁻¹)	罩壳	缓冲泡沫
1	150	无罩壳	无泡沫
2	150	有罩壳	单层泡沫(71WF)
3	150	有罩壳	三层泡沫(内层71WF, 中层110WF, 外层200WF)

2 计算结果及分析

2.1 计算模型有效性验证

为保证数值模型的准确性,下面分别对材料建模、材料破坏模型及 ALE 模型参数等进行验证。首先验证泡沫材料建模和破坏模型,基于杨洋等^[16]开展的密度为 110 kg/m^3 的聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫 (110WF) 平面断裂实验研究,建立了与实验相同的泡沫模型并通过关键字进行材料参数的定义,对泡沫模型施加与实验相同的载荷,得到泡沫断裂形态如图 4 所示。从图 4 可以看到所建立的泡沫模型和破坏模型能够较好地模拟材料的破坏过程。

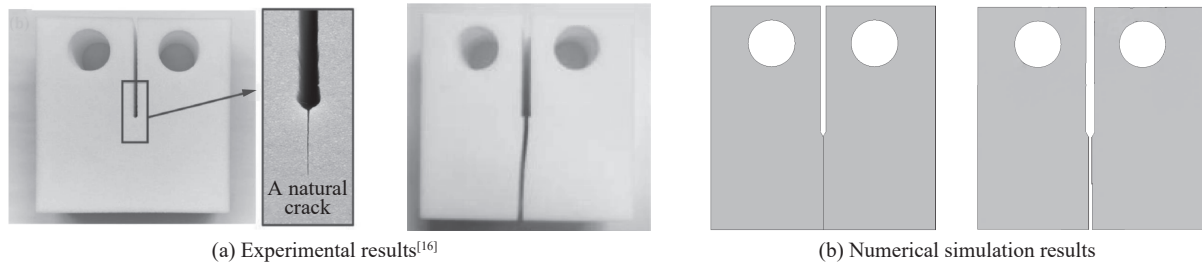


图 4 材料破坏模型验证

Fig. 4 Validation of the material failure model

验证材料建模和材料破坏模型后,下面将验证文中使用的 ALE 数值计算方法的合理性。基于 Chen 等^[17]开展的不同头型弹体高速入水实验,选择扁平头型弹体,入水初速度为 106.8 m/s 的垂直入水工况进行对比,计算模型尺寸和初始条件均与实验相同。实验结果、数值计算结果对比如图 5 所示,可以看到本文中所使用的 ALE 数值计算模型能够较好地模拟结构物高速入水过程。综上所述,本文中所使用的材料建模、材料破坏模型和数值算法具有较高的有效性。

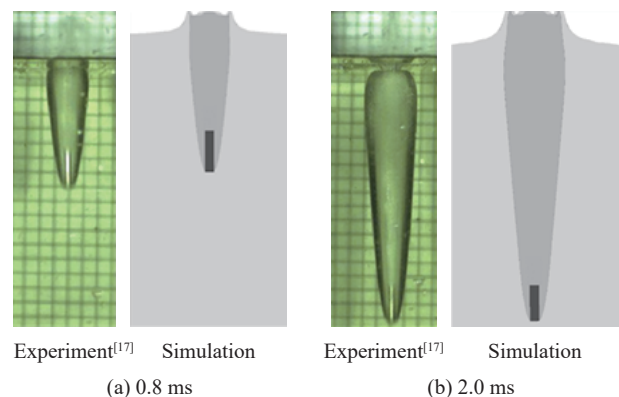


图 5 数值计算模型验证

Fig. 5 Validation of the numerical calculation model

2.2 航行体入水流场演化特性与缓冲组件整体破坏过程

首先从航行体入水空泡演化过程与缓冲组件整体破坏特性进行分析。图 6 给出了使用单层 71WF 泡沫作为缓冲材料的工况空泡演化与缓冲组件破坏的过程,将罩壳与水接触的时刻定义为时间零点。可以看到入水时罩壳头部首先接触自由面,在强冲击载荷的作用下发生破坏,随后缓冲泡沫进一步吸收撞击产生的能量也迅速破坏,在 $t = 1.5 \text{ ms}$ 时看到罩壳在航行体、水与泡沫的共同作用下发生了变形弯曲,罩壳此时没有发生开裂;而在 $t = 2.0 \text{ ms}$ 时,罩壳已经沿预设沟槽开裂,发生撑进破坏;由于 71WF 泡沫最易破坏,随着航行体的下落,泡沫也同时完全失效,因此起到的吸能缓冲效果有限,随着缓冲过程的结束,罩壳残片向周围散开虽然没有完全破坏,但对空泡影响较小。

图 7 为将缓冲泡沫分为 3 层作为缓冲材料的入水空泡演化与缓冲组件破坏过程,将泡沫模型三等分并分别赋予 3 种泡沫材料参数,靠近航行体部分选择最容易破坏的 71WF 泡沫,靠近罩壳部分选择最难破坏的 200WF 泡沫,中间段为 110WF 泡沫。在罩壳头部破坏后,由于泡沫硬度的增加与其流线型的结构,在 $t = 1.0 \text{ ms}$ 可以看到泡沫仍保持较为完整的形态不被破坏; $t = 1.5 \text{ ms}$ 时中后段泡沫在水与航行体的共同作用下挤压变形,导致罩壳沿沟槽开裂; $t = 2.0 \text{ ms}$ 时中后段泡沫完全破坏,到 $t = 3.0 \text{ ms}$ 时头部 200WF 泡沫仍保持一定的形态,由此可见分层后的泡沫可以延长缓冲作用的时间,出现二次缓冲的效果。

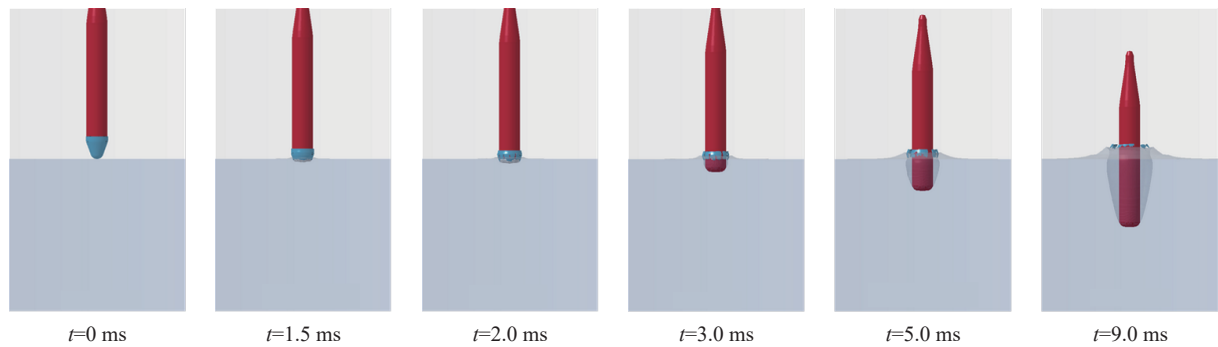


图 6 工况 2 入水流场演化与破坏过程

Fig. 6 Flow field evolution and destroyed process in case 2

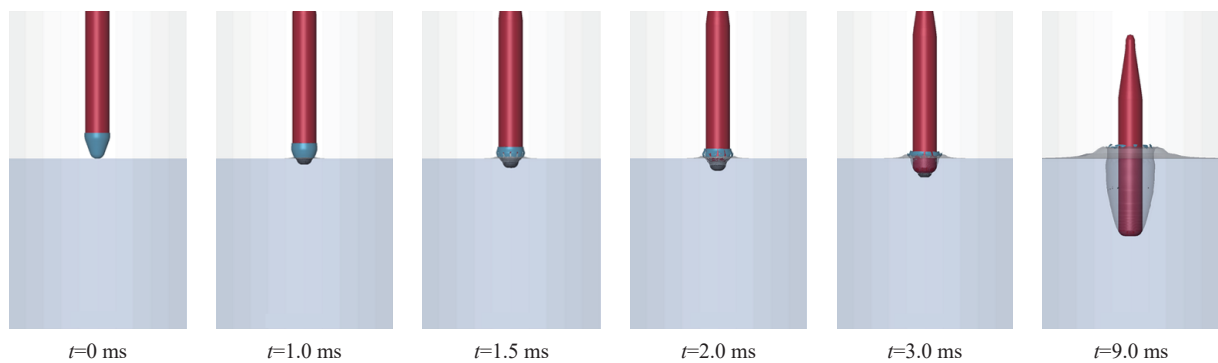


图 7 工况 3 入水流场演化与破坏过程

Fig. 7 Flow field evolution and destroyed process in case 3

2.3 缓冲罩壳、泡沫破坏特性与应力云图

图 8 和图 9 分别给出了工况 2、工况 3 入水过程中缓冲罩壳破坏过程及应力云图。从图 8~9 中可以看出在撞水时罩壳头部均出现了明显的应力集中现象,同时罩壳尾端边缘与沟槽处首先产生了应力,应力以应力波的形式在罩壳传递。罩壳头部与预设沟槽处应力更大,头部破坏后沿预设沟槽发生开裂,并最终完全破坏。使用分层泡沫也会对罩壳的破坏时间产生影响,工况 2 在 $t = 1.5$ ms 时罩壳开始出现裂痕,而工况 3 在 $t = 1.1$ ms 时罩壳已开始开裂;同时也会影响罩壳的破坏形式,工况 2 罩壳完全开裂后,剩下的残片长度较大,而工况 3 罩壳完全开裂后余下残片被破坏成两部分。

图 10 和图 11 分别给出了缓冲泡沫破坏过程与应力云图,可以看到应力从缓冲泡沫头部开始沿径向和轴向传递并导致泡沫发生破坏。从时间来看,工况 3 泡沫完全破坏的时间远大于工况 2;从破坏形态来看,工况 2 的单层 71WF 泡沫在罩壳破坏的同时开始破坏,而工况 3 对泡沫分层后,头部 200WF 泡沫在罩壳破坏后并不会迅速破坏,中后段泡沫破坏后,在航行体与水的共同作用下才发生破坏,可以说分层后会出现二次吸能的作用,具有更好的缓冲效果。

图 12 和图 13 为缓冲泡沫中截面的应力云图,可以清楚地看到应力在不同层泡沫之间的传递以及泡沫的破坏规律。应力首先集中在最外层,随后向内层传递。从图 12 可以看到单层泡沫工况应力传递比较平滑,且中间应力传递速度最快。而图 13 中则可以明显的看到分层后对应力传递造成的影响,每层泡沫能承受的最大应力不同,撞水后应力出现分层,当传递到内层泡沫时由于其强度最弱,因此最先发生破坏,其次是中间层泡沫,最后为外层泡沫,可以看到分层后的泡沫破坏形式发生了明显的变化。

为了更直观地对比不同缓冲方案罩壳与泡沫破坏的相关特征时刻,提取了罩壳头部开始破坏、罩壳中段开裂、罩壳完全破坏与泡沫头部开始破坏、泡沫完全破坏的时刻并绘制了散点图,如图 14 所示。可

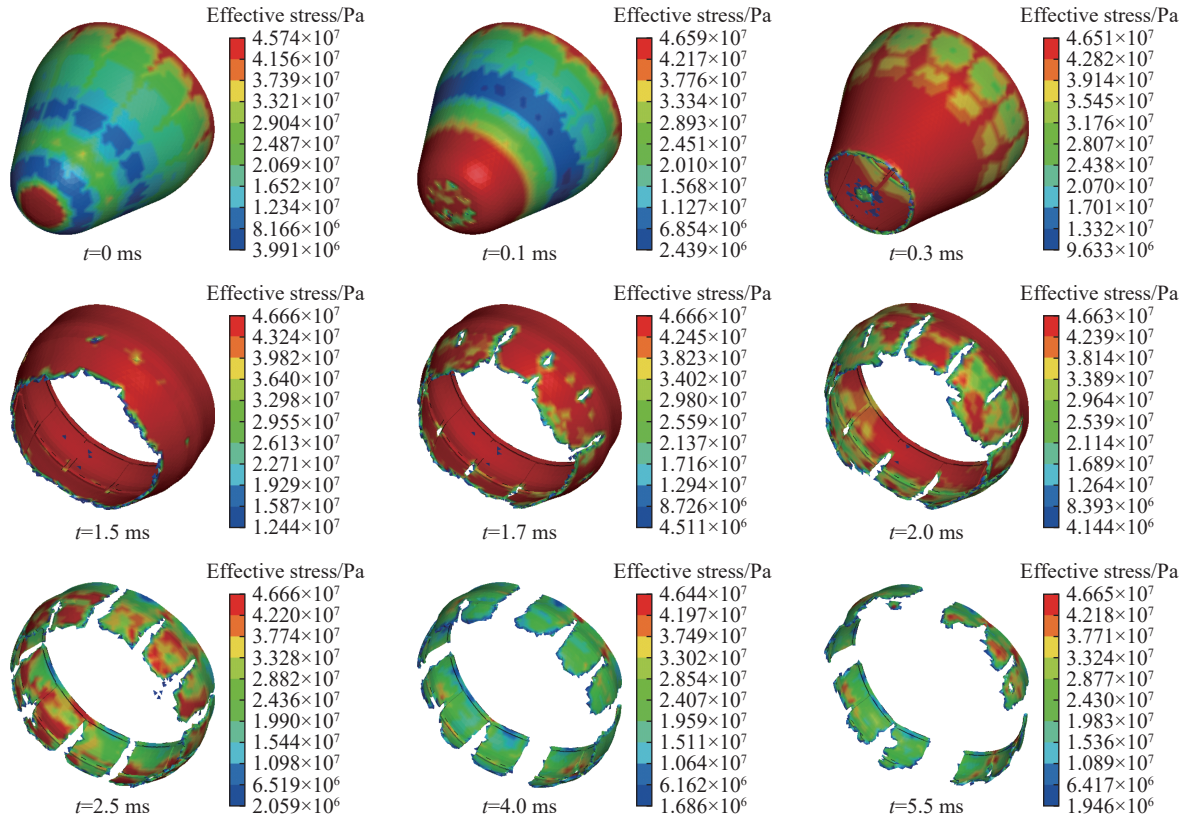


图 8 工况 2 罩壳应力云图与破坏过程

Fig. 8 Stress cloud of the nose cap and destroyed process in case 2

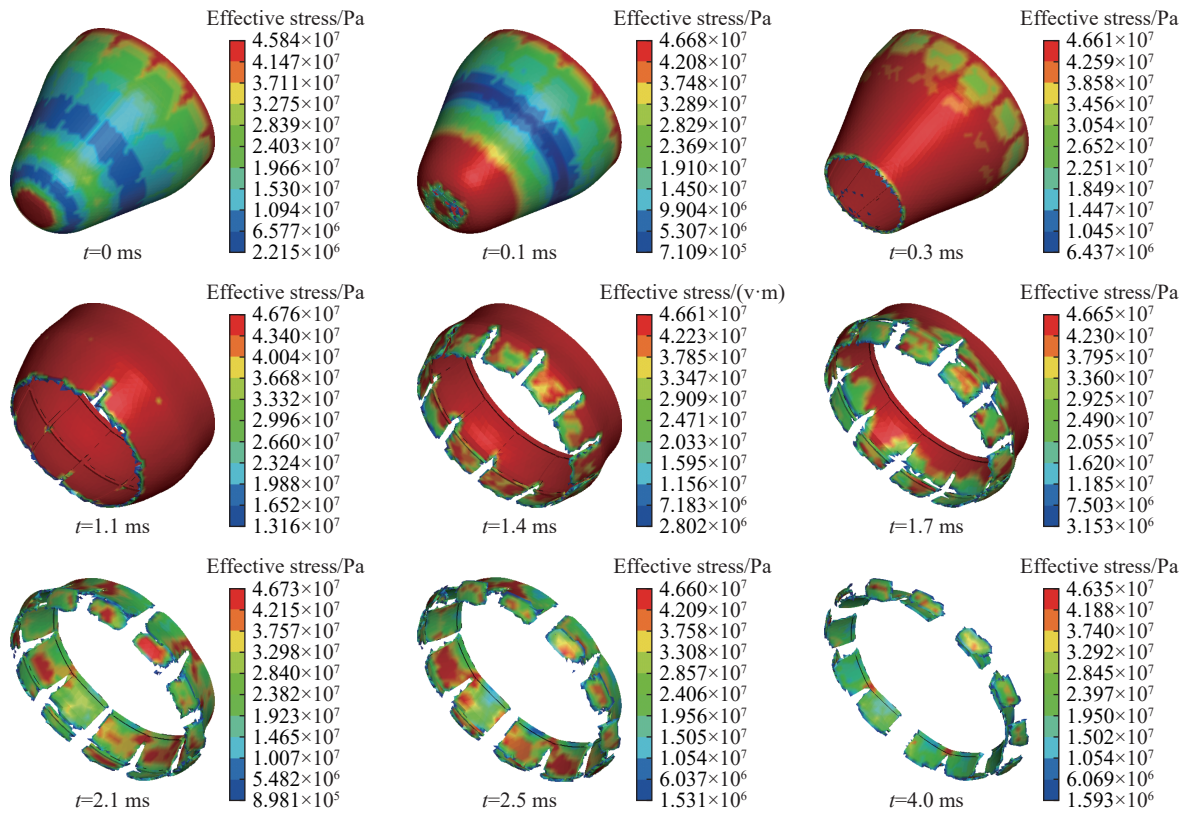


图 9 工况 3 罩壳应力云图与破坏过程

Fig. 9 Stress cloud of the nose cap and destroyed process in case 3

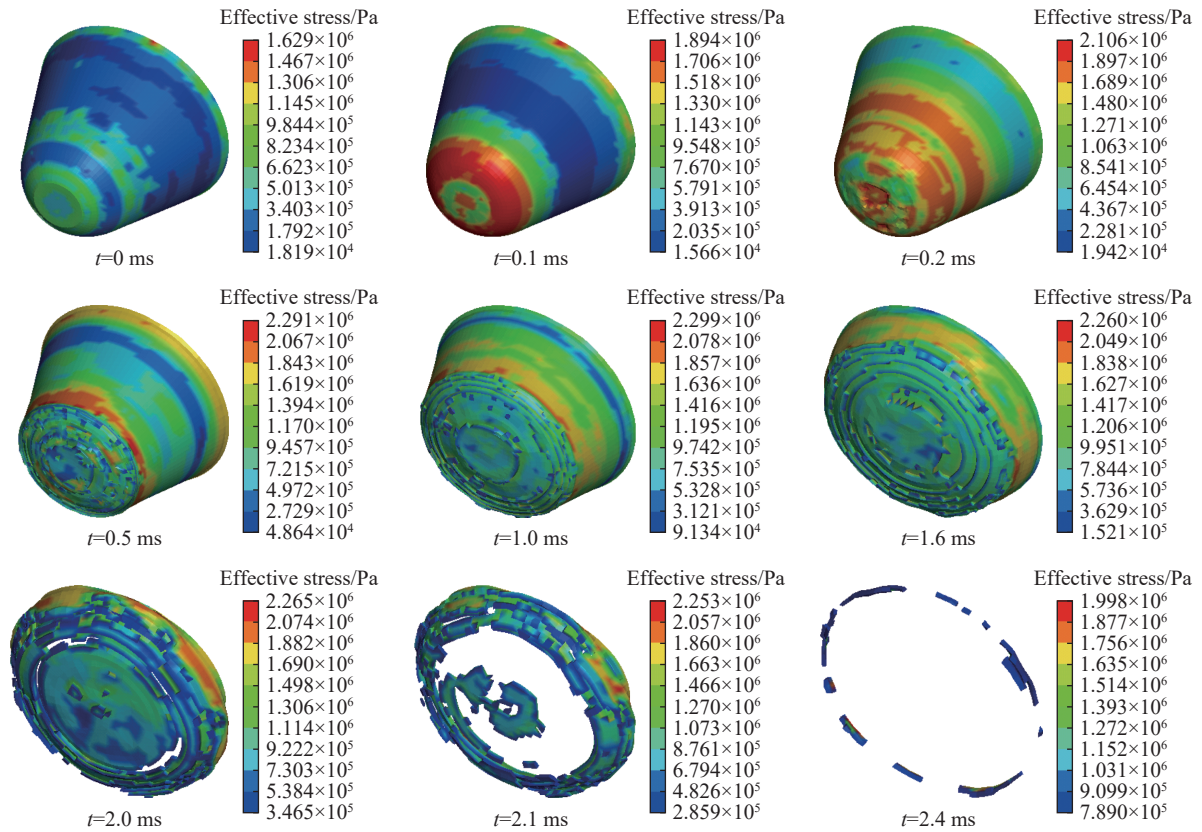


图 10 工况 2 泡沫应力云图与破坏过程

Fig. 10 Stress cloud of the foam and destroyed process in case 2

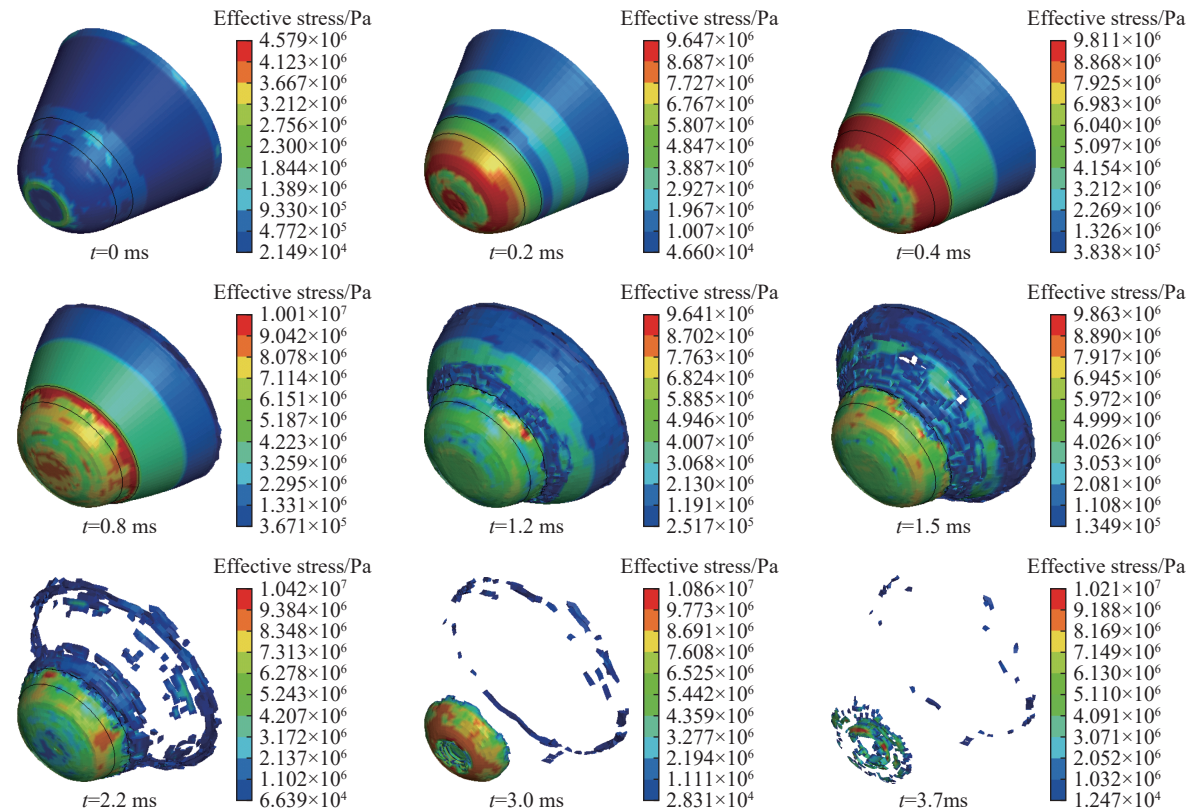


图 11 工况 3 泡沫应力云图与破坏过程

Fig. 11 Stress cloud of the foam and destroyed process in case 3

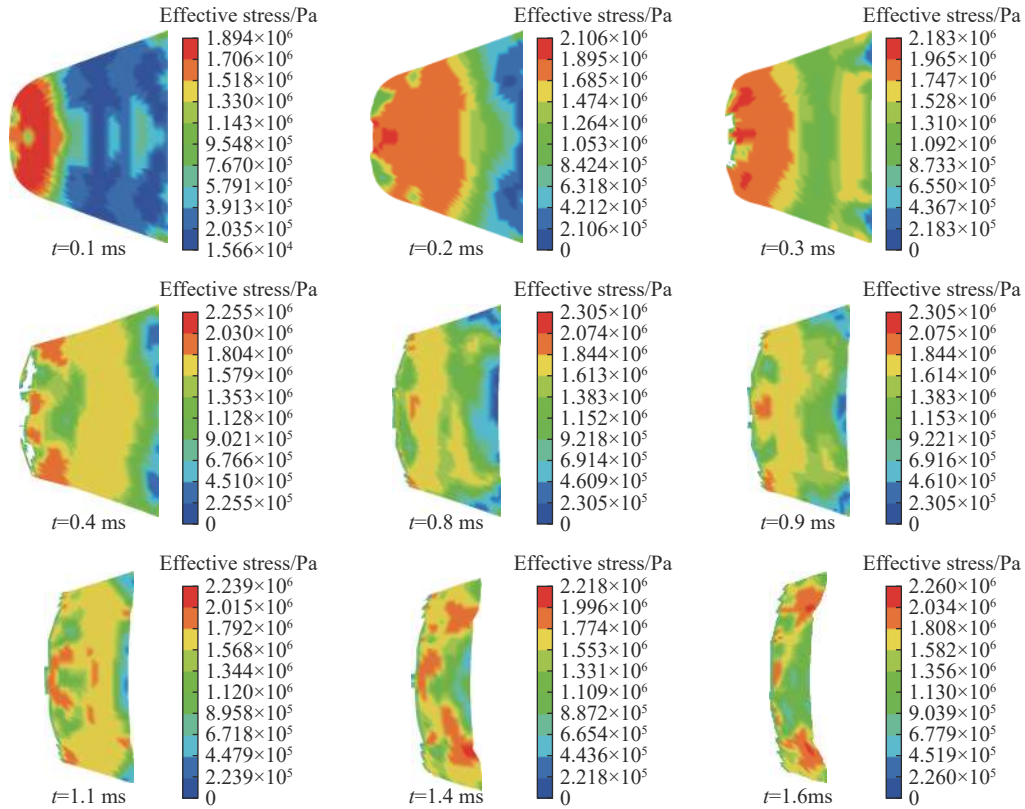


图 12 工况 2 泡沫内部应力云图与破坏过程

Fig. 12 Stress cloud of the inside foam and destroyed process in case 2

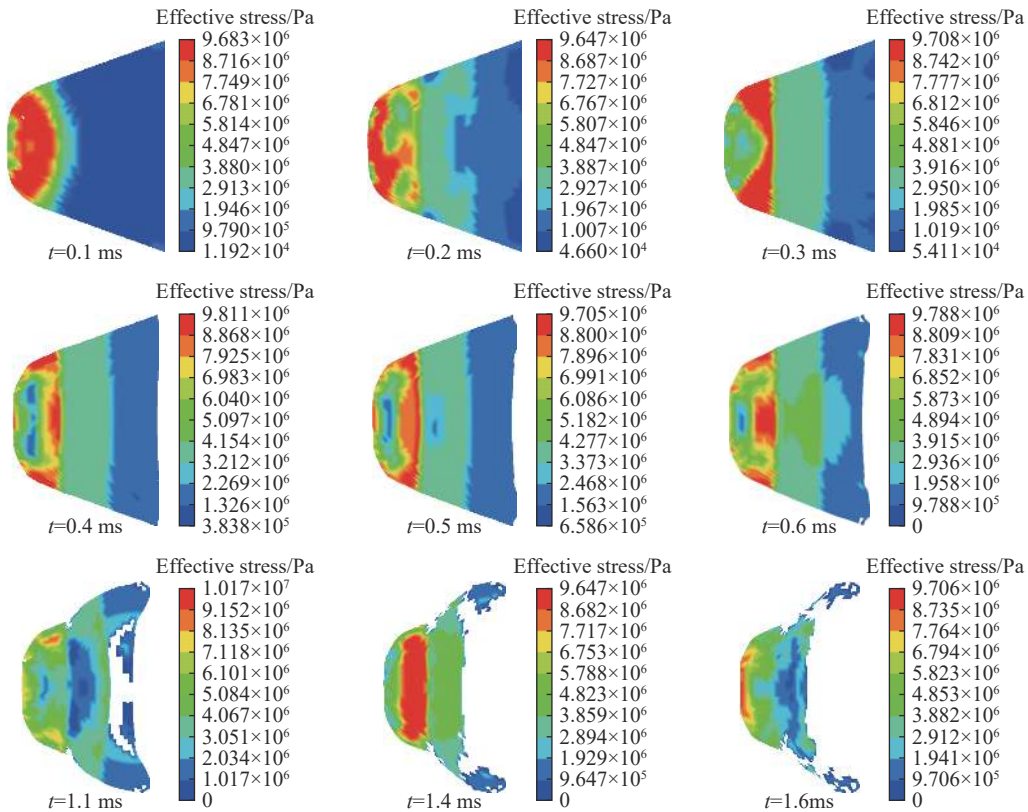


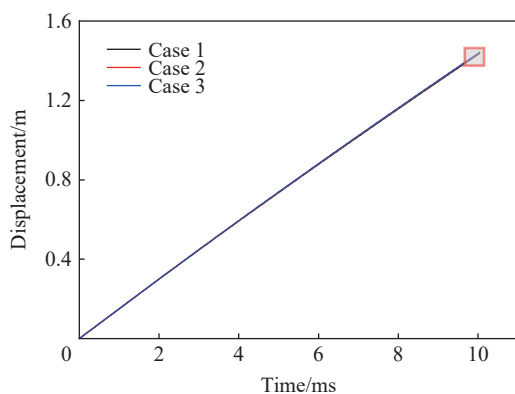
图 13 工况 3 泡沫应力云图与破坏过程

Fig. 13 Stress cloud of the inside foam and destroyed process in case 3

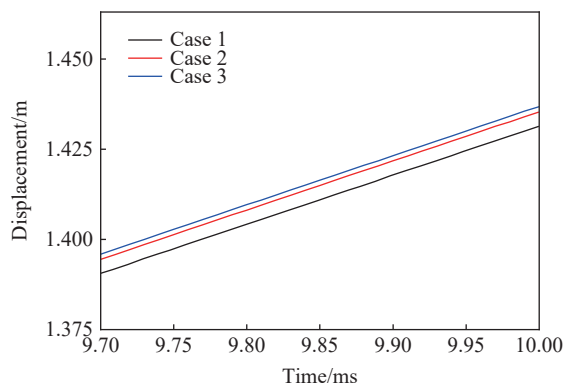
以看到泡沫分层后罩壳各个时刻均出现提前, 总破坏时间缩短; 相反泡沫的破坏时刻出现延后, 并且总破坏时间延长。

2.4 航行体运动参数对比分析

航行体的运动参数能够反映出加装缓冲组件后对高速入水冲击载荷的改善情况, 也是判断缓冲性能的重要指标, 因此本部分内容通过提取不同工况运动参数进行对比分析。图 15 为不同工况的航行体位移曲线, 可以看到由于入水过程是一个极短暂过程, 因此在相同时间内航行体位移大致相同。通过放大 $t = 10 \text{ ms}$ 时刻附近的曲线能看到工况 3 具有最大的位移, 工况 1 位移最小, 说明安装缓冲组件后会增加入水相同时间内的位移, 位移增加量与缓冲方案相关。



(a) Complete displacement-time curves



(b) Local amplification of displacement-time curves

图 15 不同工况下航行体的位移-时间曲线

Fig. 15 Displacement-time curves of the vehicle in different cases

航行体的速度曲线也能体现出缓冲性能的优劣, 图 16 给出了不同工况的速度曲线。可以看到航行体速度在入水初期阶段衰减最快, 没有缓冲组件时航行体在撞水瞬间受到巨大冲击载荷, 速度以几乎垂直的斜率下降。工况 2 由于缓冲罩壳先吸收了一部分能量, 因此在罩壳撞水后航行体速度降低较为平缓, 但随着泡沫与罩壳的完全破坏, 速度也出现了快速降低。工况 3 由于对泡沫进行了分层处理, 各层缓冲能力不同, 因此速度曲线始终以较为平缓的趋势降低, 也从侧面体现了工况 3 的方案具有最好的缓冲效果。

最后提取了航行体的加速度曲线, 如图 17 所示, 加速度曲线的峰值直接说明了受到冲击载荷的大小。在无缓冲作用下入水加速度瞬间上升到峰值, 随后迅速下降, 在极短时间内受到巨大的冲击; 工况 2 中航行体受到的冲击明显减小, 说明该方案具有较好的缓冲效果; 而工况 3 中航行体加速度曲线变化趋势发生改变, 出现了两个加速度峰值, 并且峰值远小于无缓冲的工况, 证明了将缓冲泡沫进行

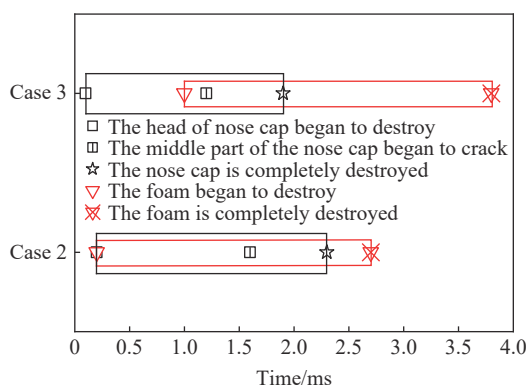


图 14 特征时刻散点图

Fig. 14 Scatter plot of characteristic moments

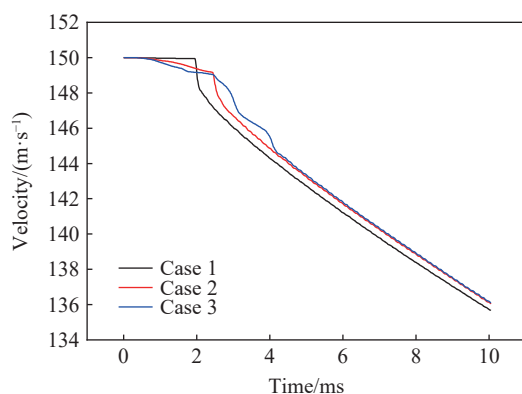


图 16 不同工况下航行体的速度-时间曲线

Fig. 16 Velocity-time curves of the vehicle in different cases

分层设计后出现了二次缓冲的作用,显著降低了高速入水时受到的冲击。同时将工况 2、工况 3 特征时刻的缓冲泡沫进行提取,可以看到载荷最大值出现在泡沫完全破坏时刻,将泡沫分层后,内层泡沫先破坏时航行体也会受到一个较为明显的冲击载荷。

将无缓冲工况 1 航行体入水加速度峰值作为基准,计算了工况 2 与工况 3 缓冲方案的降载率,如图 18 所示。可以看到将泡沫分层设计的工况 3 降载率为 73.2%,缓冲效果远好于使用单层泡沫的工况 2(降载率 31.8%)。

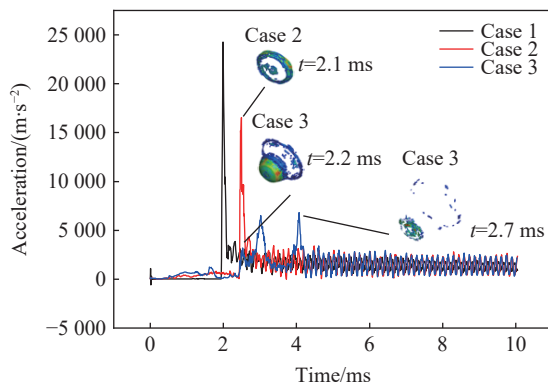


图 17 不同工况下航行体的加速度-时间曲线

Fig. 17 Acceleration-time curves of the vehicle in different cases

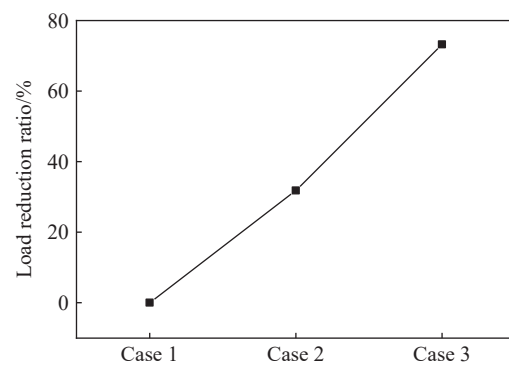


图 18 降载率对比

Fig. 18 Comparison of load reduction ratios

3 结 论

对航行体高速入水缓冲降载问题进行了研究,设计了缓冲罩壳与相应的缓冲泡沫,利用 ALE 方法对入水时罩壳与泡沫的动态破坏过程进行了数值计算研究,并分析了不同缓冲方案的缓冲性能。结果表明:

(1)通过在航行体头部安装缓冲罩壳与缓冲泡沫,能够在撞水时吸收一定的冲击能量发生破坏,罩壳的破坏形式受泡沫变形的影响,同时材料的选择也会影响泡沫的破坏形式,将缓冲泡沫分层后,能够加快罩壳的破坏并延长自身的破坏时间,本文中设计的罩壳与泡沫均能够及时破坏并脱离航行体。

(2)应力主要以应力波的形式在罩壳与泡沫中传递,撞水时应力会明显集中于罩壳头部与预设的沟槽处,罩壳会沿预设沟槽进行破坏,可以通过改变预设沟槽的形式调整罩壳破坏特性。泡沫分层后头部坚硬部分在入水一段时间后在航行体与水的共同作用下破坏,产生了二次缓冲的效果。

(3)安装缓冲组件后会增加航行体入水后相同时间内的位移,使速度曲线更平缓,通过对比加速度曲线,可知使用分层缓冲泡沫的方案具有最好的缓冲效果,降载率可达到 73.2%,而单层泡沫由于其破坏速度较快,吸能效果较差,降载率为 31.8%,两种方案均能有效降低入水冲击载荷。

参考文献:

- [1] 王永虎, 石秀华. 入水冲击问题研究的现状与进展 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(3): 276–282. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0276-07.
WANG Y H, SHI X H. Review on research and development of water-entry impact problem [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(3): 276–282. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0276-07.
- [2] 潘光, 杨樨. 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 K. 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.
- [3] 石汉成, 蒋培, 程锦房. 头部形状对水雷入水载荷及水下弹道影响的数值仿真分析 [J]. *舰船科学技术*, 2010, 32(10): 104–107. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2010.10.027.

- SHI H C, JIANG P, CHENG J F. Research on numerical simulation of mine water-entry impact acceleration and underwater ballistic trajectory under the different mine's head shape [J]. *Ship Science and Technology*, 2010, 32(10): 104–107. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2010.10.027.
- [4] SHARKER S I, HOLEKAMP S, MANSOOR M M, et al. Water entry impact dynamics of diving birds [J]. *Bioinspiration and Biomimetics*, 2019, 14(5): 056013. DOI: 10.1088/1748-3190/ab38cc.
- [5] SHI Y, PAN G, YIM S C, et al. Numerical investigation of hydroelastic water-entry impact dynamics of AUVs [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 91: 102760. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2019.102760.
- [6] 张学广, 边金尧, 方世武. π 形圆柱体大角度撞水载荷计算及缓冲问题的研究 [J]. *中国舰船研究*, 2007, 2(5): 30–32, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2007.05.007.
- ZHANG X G, BIAN J Y, FANG S W. Water impact load calculation and buffering design of π type cylinder structure at large angle [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2007, 2(5): 30–32, 41. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2007.05.007.
- [7] 潘龙, 王焕然, 姚尔人, 等. 头部喷气平头圆柱体入水缓冲机制研究 [J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(8): 1691–1695.
- PAN L, WANG H R, YAO E R, et al. Mechanism research on the water-entry impact of the head-jetting flat cylinder [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(8): 1691–1695.
- [8] SUN T Z, WANG Z H, ZOU L, et al. Numerical investigation of positive effects of ventilated cavitation around a NACA66 hydrofoil [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106831. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106831.
- [9] HOWARD E A. Protective nose cap for torpedoes: U. S. Patent 2889772 [P]. Washington, DC: U. S. Patent and Trademark Office, 1959.
- [10] 宣建明, 宋志平, 严忠汉. 鱼雷入水缓冲保护头帽解体试验研究 [J]. *鱼雷技术*, 1999, 7(2): 41–46.
- XUAN J M, SONG Z P, YAN Z H. Experimental study on disintegration of torpedo nose cap during water entry [J]. *Torpedo Technology*, 1999, 7(2): 41–46.
- [11] 钱立新, 刘飞, 屈明, 等. 鱼雷头罩入水破坏模式研究 [J]. *鱼雷技术*, 2015, 23(4): 257–261.
- QIAN L X, LIU F, QU M, et al. Failure mode of torpedo nose cap in water-entry [J]. *Torpedo Technology*, 2015, 23(4): 257–261.
- [12] SHI Y, GAO X F, PAN G. Design and load reduction performance analysis of mitigator of AUV during high speed water entry [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 314–329. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.062.
- [13] LI Y, ZONG Z, SUN T Z. Crushing behavior and load-reducing performance of a composite structural buffer during water entry at high vertical velocity [J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112883. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112883.
- [14] 魏洪亮, 赵静, 徐志程, 等. 基于流固耦合的航行体高速入水规律研究 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2020(2): 33–37. DOI: 10.7654/j.issn.1004-7182.20200207.
- WEI H L, ZHAO J, XU Z C, et al. Study on high-speed water entry law of trans-media vehicle based on fluid solid coupling [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2020(2): 33–37. DOI: 10.7654/j.issn.1004-7182.20200207.
- [15] 曲春艳, 谢克磊, 马瑛剑, 等. 聚甲基丙烯酸酯亚胺 (PMI) 泡沫塑料的制备与表征 [J]. *材料工程*, 2008(11): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4381.2008.11.005.
- QU C Y, XIE K L, MA Y J, et al. Preparation and characterization of polymethacrylimide foams [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(11): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4381.2008.11.005.
- [16] 杨洋, 陈新文, 王翔, 等. 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫平面断裂韧性实验研究 [J]. *科技与创新*, 2021(4): 12–14. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.04.005.
- YANG Y, CHEN X W, WANG X, et al. Experimental study on plane fracture toughness of PMI foam [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2021(4): 12–14. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2021.04.005.
- [17] CHEN T, HUANG W, ZHANG W, et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 175: 16–24. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.02.021.

(责任编辑 张凌云)