

# 航行体高速入水时多孔泡沫的缓冲降载特性\*

原凯<sup>1,2</sup>, 吴琪衡<sup>3</sup>, 孙铁志<sup>3</sup>, 杨娜娜<sup>1</sup>

- 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
- 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
- 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 针对航行体高速入水时的缓冲降载问题, 设计了适用的缓冲头罩及多种开孔形式的缓冲泡沫构型, 基于任意拉格朗日-欧拉方法, 建立了航行体高速入水缓冲降载数值计算模型。并通过数值仿真对不同开孔形式的缓冲泡沫降载性能进行了深入研究。结果表明, 多孔缓冲泡沫在分散航行体入水冲击力及吸收冲击能量方面表现出显著优势, 具有更好的缓冲效果。同时, 缓冲头罩在入水时会发生局部渐进破碎, 缓冲罩壳与航行体之间的连接器处的缓冲头罩外壁面的变形和破裂是由于撞水时产生的应力集中分布引起的。多孔泡沫接触水面时, 前端部分会进入坍塌阶段, 吸收大量能量并产生塑性变形, 孔隙减少, 此阶段为缓冲泡沫的主要能量吸收阶段。相比之下, 不开孔泡沫的降载性能较差。因此, 采用多孔泡沫是一种更优的航行体高速入水缓冲降载方案。

**关键词:** 高速入水; 缓冲降载; 能量吸收; 多孔泡沫

中图分类号: XXXX.X

国标学科代码: XXXXX

文献标识码: A

## Study on load reduction characteristics of porous foam buffer for high speed water entry vehicle

Yuan Kai<sup>1,2</sup>, Wu Qiheng<sup>3</sup>, Sun Tiezhi<sup>3</sup>, Yang Nana<sup>1</sup>

- College Of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, HeiLongJiang, China;
- Beijing Institute Of Astronautical, System Engineering, Beijing 100076, China;
- College Of Shipbuilding Engineering, Dalian University Of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** Addressing the buffering and load reduction challenges during high-speed water entry vehicle, applicable buffer head covers and various open-cell buffer foam configurations were designed. In the Arbitrary Lagrangian-Euler method, as the material flows within the spatial grid, the grid itself is able to move. This unique feature allows the Arbitrary Lagrangian-Euler method to harness the advantages of both the Lagrangian and Euler methods. It not only overcomes numerical calculation challenges stemming from element distortion but also facilitates accurate computation of large deformations and displacements in solids and fluids. This makes it particularly well-suited for addressing high-speed water buffer load reduction problems. Based on the Arbitrary Lagrangian-Eulerian method and considering the large deformation of the buffer foam and the hood, a numerical calculation model for buffering and load reduction during high-speed water entry of navigational bodies was established. Through numerical simulations, an in-depth study was conducted on the load reduction performance of buffer foams with different open-cell patterns. The results indicate that open-cell buffer foam exhibits significant advantages in dispersing the impact force and absorbing impact energy during water entry of navigational bodies, offering better buffering effects. Simultaneously, the buffer head cover experiences local progressive fragmentation upon water entry. The deformation

\*收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-09-19;

基金项目: 基础科研计划资助 (JCKY2021203B003);

第一作者: 原凯 (1989-), 男, 博士研究生, 高级工程师. E-mail: [beihangkai@126.com](mailto:beihangkai@126.com);

通信作者: 杨娜娜 (1980-), 女, 博士, 教授 博士生导师. E-mail: [yangnana@hrbeu.edu.cn](mailto:yangnana@hrbeu.edu.cn)。

and rupture of the outer wall surface of the buffer head cover at the connector between the buffer shell and the navigational body are caused by the stress concentration distribution generated during water impact. When the open-cell foam contacts the water surface, the front part enters the collapse stage, absorbing a large amount of energy and undergoing plastic deformation, resulting in a reduction of pores. This stage is the primary energy absorption phase for the buffer foam. In comparison, closed-cell foam exhibits poorer load reduction performance. Therefore, the adoption of open-cell foam represents a superior solution for buffering and load reduction during high-speed water entry of navigational bodies.

**Keywords:** high-speed water entry; buffer load reduction; energy absorption; porous foam

航行体在高速入水时，由于空气与水的介质性质差异巨大，其会受到极大的冲击载荷。这种载荷不仅对航行体的头部结构稳定性构成了严峻的挑战，还可能导致结构的损毁。因此，为了保护航行体免受冲击载荷的破坏，研究并采取有效的降载措施显得至关重要。诸多学者在深入研究后，提出了多种降载策略。目前主流的降载措施主要有航行体头部形状控制降载<sup>[1]</sup>，引入气体缓冲降载<sup>[2]</sup>和加装缓冲头帽装置降载<sup>[3]</sup>等方式。

其中，改变航行体的头部形状是最直接且有效的方法之一。通过流线型设计，航行体在入水时的流体动力性能得以改善，从而减少了自由液面对其头部的冲击力。Kubota 和 Mochizuki<sup>[4]</sup>的研究实验进一步证实了头部形状对航行体入水时的冲击载荷及流场分布具有显著影响。他们发现，合理的头部形状设计可以有效地分散入水冲击力，从而降低航行体入水时的载荷。石汉成等<sup>[5]</sup>学者则通过数值仿真的方法，对不同头部形状的水雷在入水过程中的头部加速度和速度变化进行了深入研究。他们的研究结果显示，斜锥形的头部设计在降载方面具有更好的效果。SHI<sup>[6]</sup>等人更进一步，结合数值仿真模拟与实验，详细分析了不同头部形状的航行体入水时的表现。他们发现，在同等条件下，尖拱形头部的航行体在入水时所受的最大冲击载荷明显小于钝头形状的航行体，且这一载荷仅为钝头形状航行体最大冲击载荷的四分之一。此外，Guo 等<sup>[7]</sup>学者则通过试验与理论相结合的方法，研究了不同头部形状航行体（包括扁平型、椭圆型和半球型）在高速水平入水时的冲击载荷特性。他们的研究发现，提高航行体的头部形状系数（CRH），其阻力系数会随之减小。这意味着，通过合理的头部形状设计，不仅可以降低航行体在入水时的冲击载荷，还可以改善其整体的流体动力性能。

尽管航行体头部形状控制降载方法无需增加额外的设备和材料，有利于简化航行体的结构，但是多用于低速入水问题，对于高速入水问题，仅仅依靠头部形状优化难以达到理想的降载效果。除了改变头部形状外，还有其他降载措施也被广泛研究，如引入气体缓冲降载，这是通过在航行体入水前在其的头部或周围通入气体来形成一个气体缓冲层，利用气体的流动特性来分散和吸收航行体入水时产生的巨大冲击力，这种方法能够有效的减少航行体入水冲击力，降低对航行体结构的损伤。潘龙<sup>[8]</sup>等人率先提出了通过主动通气技术来实现降载的方法，并进一步验证了这一方法在减少航行体入水冲击载荷方面的有效性，同时揭示了气体缓冲降载方法背后的缓冲机制及原理。SUN<sup>[9]</sup>等人采用在航行体头部引入气体的方法，成功的创建了一层人工气垫，并且证明了该人工气垫在缓冲降载方面的作用。王峻<sup>[10]</sup>等人深入探讨了不同的喷射气体量对航行体入水过程中的载荷影响、喷气产生的空泡大小以及航行体入水弹道稳定性的影响，发现通过调整喷气量的大小能够有效降低航行体头部在入水时遭受的最大砰击压力，并且指出随着喷气量的增加，会带来更好的降载效果。赵海瑞等<sup>[11]</sup>研究了装备头部喷气装置对航行器高速入水冲击载荷的影响，发现装备了圆盘空化器和侧向喷气装置的航行体，其喷出的气体能够促进航行体入水超空泡的形成，进而能在一定程度上减小航行体高速入水时与水面的接触面积，来达到有效降低航行体高速入水时受到的巨大砰击载荷的目的。

引入气体缓冲降载方法可以通过调整喷气量大小灵活控制降载效果，但需要配备相应的喷气控制系统，增加了航行体的复杂性，并且这种方法在针对更高速入水问题有所不足。除了改变头部形状和引入气体缓冲外，加装缓冲装置也被广泛研究，加装缓冲头帽装置降载方法是通过在航行体的头部安装专门设计的缓冲头帽，这些缓冲装置能够在航行体高速入水时起到减震缓冲的作用，在航行体入水

时, 缓冲头帽先接触水面, 通过其快速溃灭来吸收大量的能量, 实现降低航行体高速入水过程中的对航行体头部的冲击。本文的研究方向就隶属于加装缓冲头帽降载装置这一大类。宣建明<sup>[12]</sup>等的研究深入探讨了缓冲头帽入水流场及其罩壳破碎机制, 验证了使用泡塑等缓冲材料制成的头帽在降低入水冲击载荷方面的有效性, 研究结果指出, 鱼雷入水时采用泡塑缓冲件的缓冲头帽在降低鱼雷入水冲击载荷方面发挥了积极作用。Horton<sup>[13]</sup>等则提出一种利用吸能材料作为缓冲介质的方法, 以保护航行体免受高速入水冲击的损害。在众多吸能材料中, 泡沫材料<sup>[14]</sup>因其低密度和优秀的能量吸收能力成为吸能降载材料的首选, 特别是泡沫铝以其显著的吸能效果备受关注。曾斐<sup>[15]</sup>等人对泡沫铝的降载特性进行了综合评估, 为缓冲头帽的材料选择和设计提供了科学依据, 研究结果表明泡沫铝作为一种优秀的缓冲材料, 能够有效地减缓高速入水过程中对航行体的砰击, 提高结构的稳定性。在数值模拟方面, SHI<sup>[16]</sup>等人通过任意拉格朗日-欧拉方法对携带泡沫铝缓冲结构的自主水下航行器进行了仿真, 发现缓冲头帽能够在弹体垂直入水时能够显著降低入水砰击压力峰值, 达到 42.2% 的降低效果。孙龙泉<sup>[17]</sup>等人通过耦合欧拉-拉格朗日方法对携带泡沫铝缓冲块的高速入水航行体降载性能进行了数值仿真研究, 发现提高航行体入水速度使得航行体入水加速度峰值的降载率在减小, 并且降载率也随着所用泡沫铝的密度提高而表现出先高后低的趋势。

本文致力于探索航行体在高速入水过程中的缓冲降载策略, 针对航行体高速入水缓冲降载问题开展数值仿真研究, 深入分析多孔泡沫结构在减轻航行体入水冲击方面的效能。基于任意拉格朗日-欧拉方法 **Error! Reference source not found.** 建立高速入水数值计算模型并加以验证。随后通过引入多孔泡沫缓冲结构, 进而开展一系列航行体高速入水多孔泡沫缓冲降载数值计算, 分析多孔缓冲泡沫结构对航行体高速入水过程中入水流场、动力学特性及入水砰击载荷的影响。通过与传统非多孔缓冲泡沫方案对比分析, 本文的研究结果进一步揭示了多孔泡沫结构在降低航行体高速入水时的砰击压力方面的优势, 为航行体高速入水缓冲降载结构的研究提供参考。

## 1 计算方法

### 1.1 控制方程

任意拉格朗日-欧拉方法很好的结合了拉格朗日方法与欧拉方法的优势, 能够对复杂物理过程进行有效模拟。具体控制方程如下:

质量守恒方程:

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

动量守恒方程:

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

能量守恒方程:

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

应力张量  $\sigma_{ij}$  用于描述流体或固体内部各点处的应力状态, 其表达式为:

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

### 1.2 罚函数

在进行几何模型构建和网格细分的过程中，一个关键步骤就是允许固体结构与流体结构的网格在空间中相交或重叠。为了实现这两种不同介质之间的有效耦合，并确保力学参数能够正常传递，通常采用罚函数耦合<sup>[18]</sup>的约束方法来模拟固体和流体界面的动力学行为。罚函数法主要用于处理流体和固体相互作用时界面上的不连续性问题，运用罚函数的方法<sup>[19]</sup>，可以通过在界面上施加额外的界面力来补偿这种不连续。

罚函数约束方式的核心理念在于，一旦检测到固体与流体界面上存在表面穿透或相对位移，就需要引入罚函数来调整界面力的大小，确保力的平衡。这种界面力的分布取决于穿透现象的严重程度，即界面力的强度与表面穿透的程度成正比<sup>[20]</sup>，从而允许根据实际情况调整力的大小。通过追踪和调节固体和流体之间的界面力，能够提高数值模拟的可靠性。

界面力方程<sup>[21]</sup>：

$$F = k_i \cdot d = p \cdot \frac{KA}{V} \cdot d \quad (5)$$

## 2 数值方法验证与计算模型设置

### 2.1 数值方法验证

为证明所采用数值计算方法的准确性和可靠性，在此分别对航行体高速入水过程和航行体高速入水缓冲降载过程将数值结果与试验进行对比验证。

#### 2.1.1 航行体高速入水过程验证

为了证实本文所采用计算方法在模拟航行体高速入水问题上的有效性，采用与已知试验对比的方法来验证数值计算的有效性。基于李尧<sup>[22]</sup>开展的钝头航行体高速入水实验研究，建立了与实验相同的数值计算模型，如图 1 所示， $D=120\text{mm}$ 。

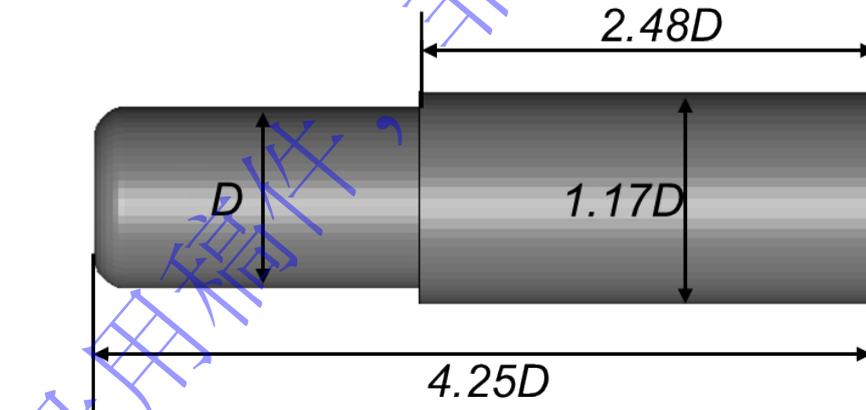


图 1 实验数值计算模型

Fig.1 Experimental numerical calculation model

如图 2 所示为钝头航行体以 89.67m/s 速度入水空泡演化过程对比图，从图中可以看出，在不同时刻数值与试验对比形态基本相同，可以说明建立的数值方法可以有效计算高速入水过程流场演化。

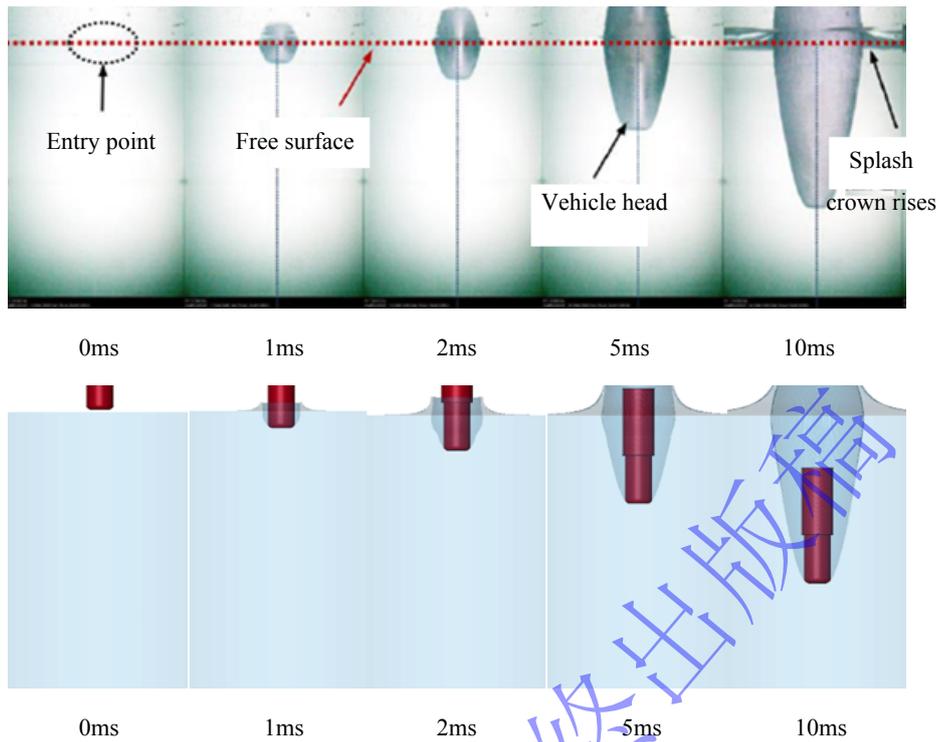


图2 航行体以 89.67m/s 速度入水空泡演化过程对比

Fig.2 Comparison of cavitation evolution process of the vehicle entering water at 89.67m/s

图3所示为钝头航行体以 89.67m/s 速度入水加速度曲线对比，可以看出数值模型计算的加速度峰值与试验测得的结果非常接近，验证了所建立的航行体入水数值模型足以求解该类问题，也说明了本文采用的数值计算方法的合理性。

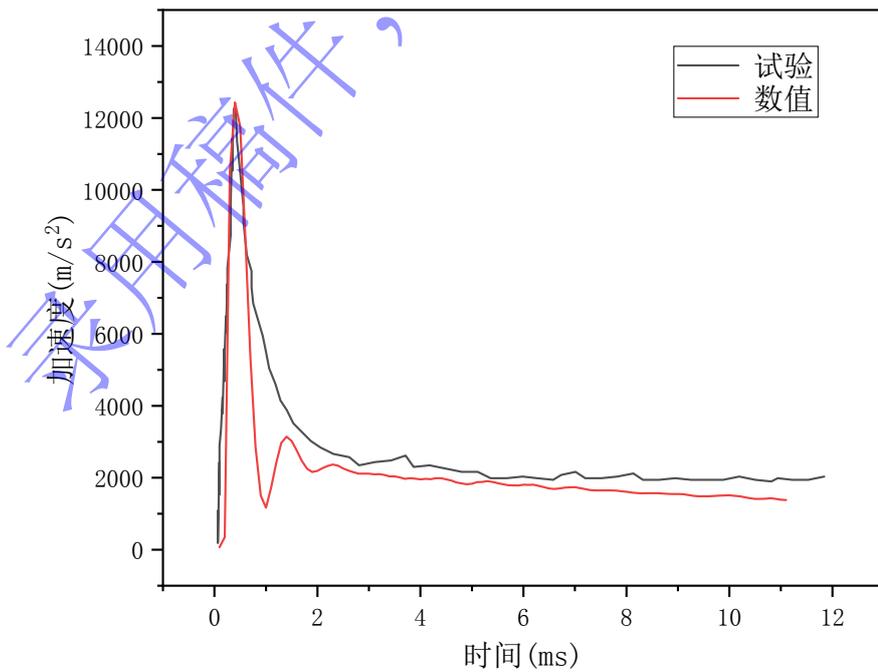


图3 航行体以 89.67m/s 速度入水加速度曲线对比

Fig.3 Comparison of acceleration curve of vehicle entering water at 89.67m/s

### 2.1.2 航行体高速入水缓冲卸载过程验证

为了研究缓冲卸载材料构型对航行体入水所受冲击载荷的影响，本文采用数值计算来模拟航行体高速入水缓冲卸载过程，故缓冲卸载数值模拟的合理性和可行性至关重要。基于李尧<sup>[22]</sup>开展的钝头航行体高速入水实验研究，建立了与实验相同的数值计算模型，钝头航行体与上文图 1 所示一致，缓冲模型示意图如图 4 所示， $D=120\text{mm}$ ， $b=1\text{mm}$ 。

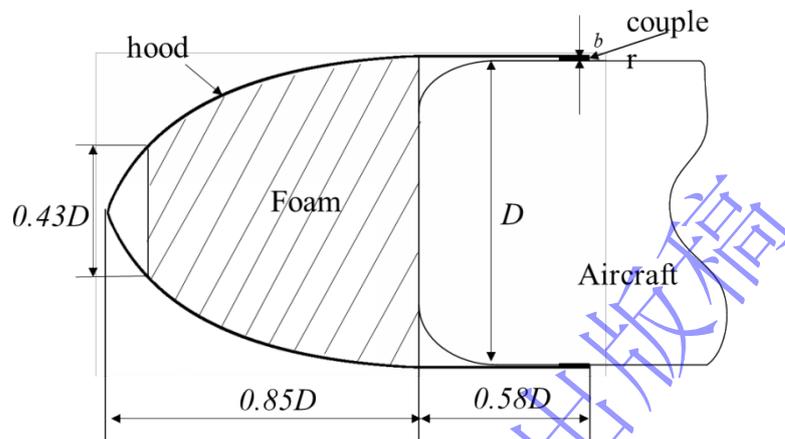


图 4 缓冲模型示意图

Fig.4 Buffering model diagram

如图 5 所示为钝头航行体以  $89.67\text{m/s}$  速度入水空泡演化过程对比图，从图中可以看出，在不同时刻数值与试验对比形态基本相同，数值计算得到的航行体高速入水缓冲卸载过程空泡演化以及自由液面的变化与试验结果吻合较好。

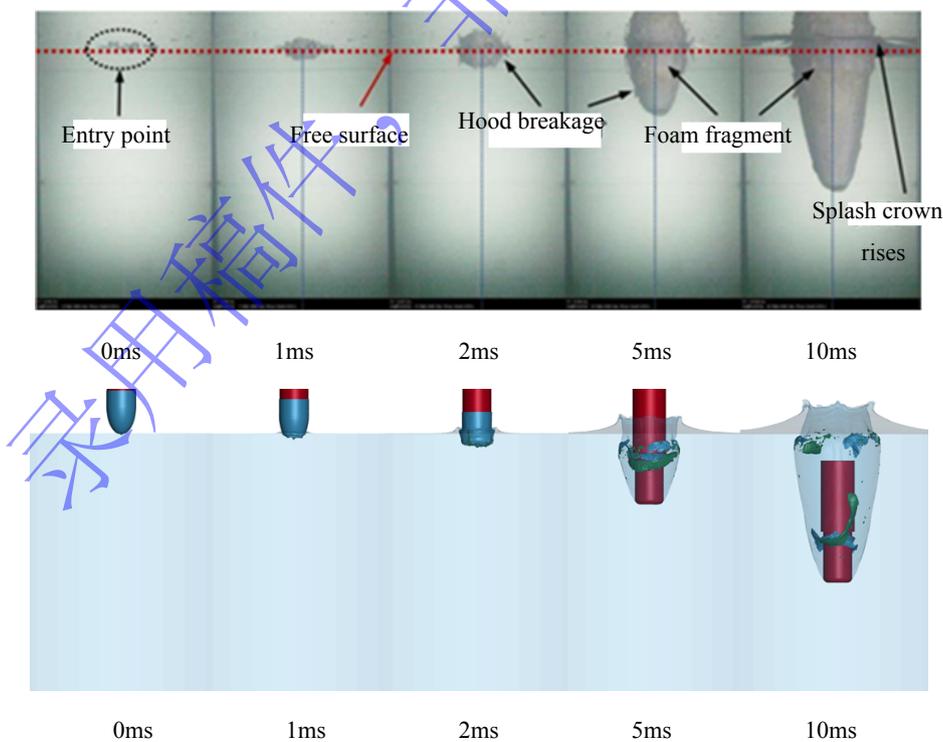


图 5 航行体以  $89.67\text{m/s}$  的速度入水的数值与试验对比

Fig.5 Comparison between the numerical value and the test of the vehicle entering the water at a speed of  $89.67\text{m/s}$

图 6 所示为钝头航行体以 89.67m/s 速度入水加速度曲线对比，可以看出数值模型计算的加速度峰值与试验测得的结果非常接近，验证了所建立的航行体入水数值模型足以求解缓冲降载问题。

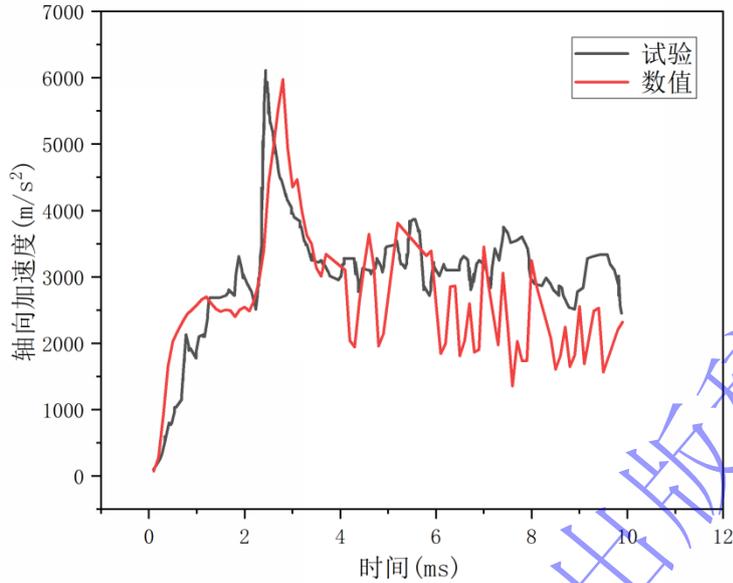


图 6 钝头航行体以 89.67m/s 速度入水加速度曲线对比

Fig.6 Comparison of acceleration curve of a blunt body entering water at 89.67m/s

### 2.1.3 网格无关性验证

为进行网格无关性验证，以航行体以 89.67m/s 速度入水为验证模型，将流域分别划分为三种不同尺寸大小的网格模型，分别是粗网格（流域最小网格尺寸为航行体头部中心网格尺寸的 1.76 倍）、中网格（流域最小网格尺寸为航行体头部中心网格尺寸的 1.6 倍）、细网格（流域最小网格尺寸为航行体头部中心网格尺寸的 1.44 倍），计算结果如图 7 所示，粗网格加速度峰值明显高于中网格和细网格加速度峰值，并且中网格加速度峰值与细网格加速度峰值误差范围在 5% 以内，可以认为，采用中网格尺寸进行计算能够使结果收敛。

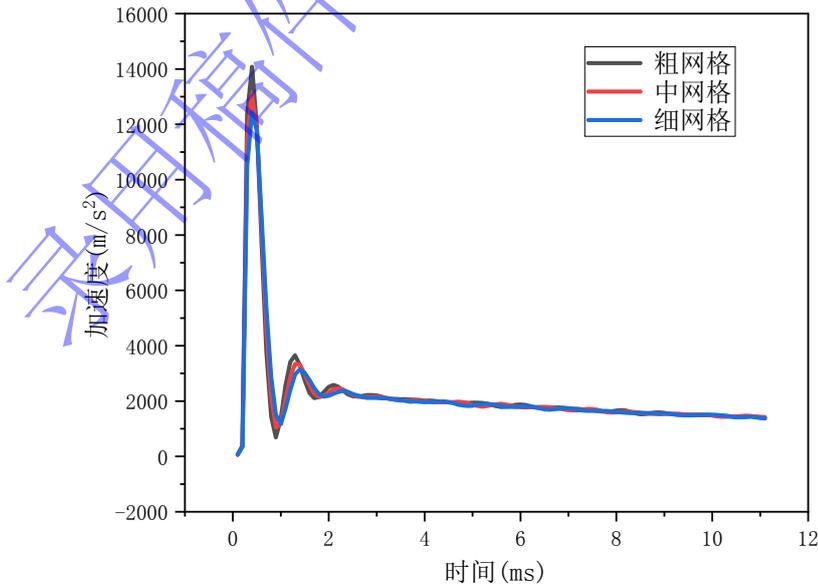


图 7 不同网格尺寸轴向加速度对比曲线

Fig.7 Comparison curve of axial acceleration with different mesh sizes

## 2.2 计算模型设置

本文设计了一种结合整流罩和填充泡沫的缓冲头帽，用于在航行体高速入水时吸收入水冲击力。该缓冲头帽的设计一方面，需要具备足够的强度以保证在入水前运动过程中的完整性，另一方面，它还需要在撞击水面时能够迅速破碎，以免干扰航行体后续的运动轨迹。为了实现这一目标，本节选用了一种特殊的复合材料来模拟缓冲罩壳，该材料基于不饱和聚氨酯树脂，以短切玻璃纤维作为增强材料<sup>[23]</sup>。这种复合材料在遭受瞬时强冲击载荷时容易发生脆性破坏，从而能够满足缓冲头帽在入水冲击时的快速破碎，具体的复合材料参数详见表 1，连接器的材料选取与罩壳一致。航行体及其缓冲头帽的数值计算模型如图 8 所展示，其中包括航行体本身、整流罩以及缓冲泡沫的基本构型，而缓冲头帽的设计示意图则在图 9 中给出， $D=324\text{mm}$ ， $b=2.5\text{mm}$ 。本文主要研究多孔缓冲泡沫对航行体入水降载的影响，不关注航行体本身的结构响应，因此假设航行体为刚体，取 7075 铝合金的密度  $2810\text{kg/m}^3$ 。缓冲泡沫采用聚氨酯泡沫 (PU) 泡沫，材料参数见表 2，尺寸见图 9。此外，为了模拟整个航行体高速入水过程及缓冲效果，构建了数值计算域并对其进行网格细分，如图 10 所示，整个计算域为直径 6 米、高 8 米的圆柱体。为了消除应力波的影响，计算域的前后两侧以及底部都采用了无反射边界条件。

表 1 罩壳复合材料参数

Table 1 Shell composite material parameter table

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服应力 /MPa	切线模量 /MPa
缓冲头帽	1200	8.5	0.33	45	9

表 2 缓冲泡沫材料参数

Table 2 Buffer foam material parameter table

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
缓冲泡沫	100	1	0.24	1.4

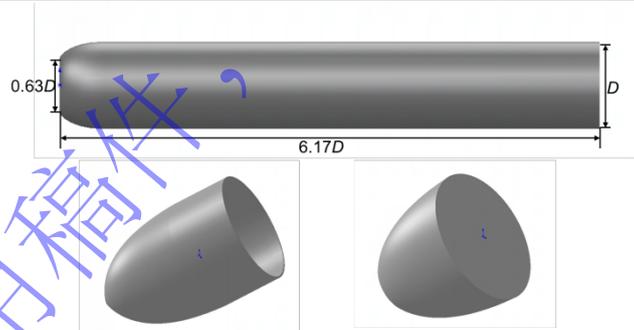


图 8 航行体及整流罩与缓冲泡沫计算模型

Fig.8 Calculation model of vehicle and fairing and buffer foam

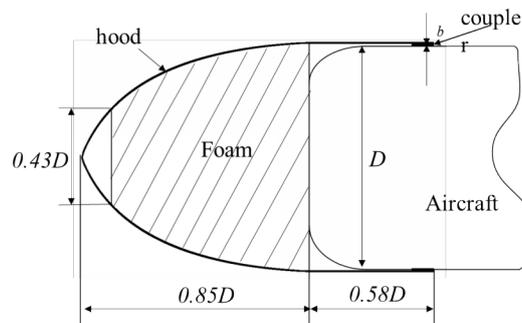


图 9 缓冲头帽示意图

Fig.9 Buffer head cap diagram

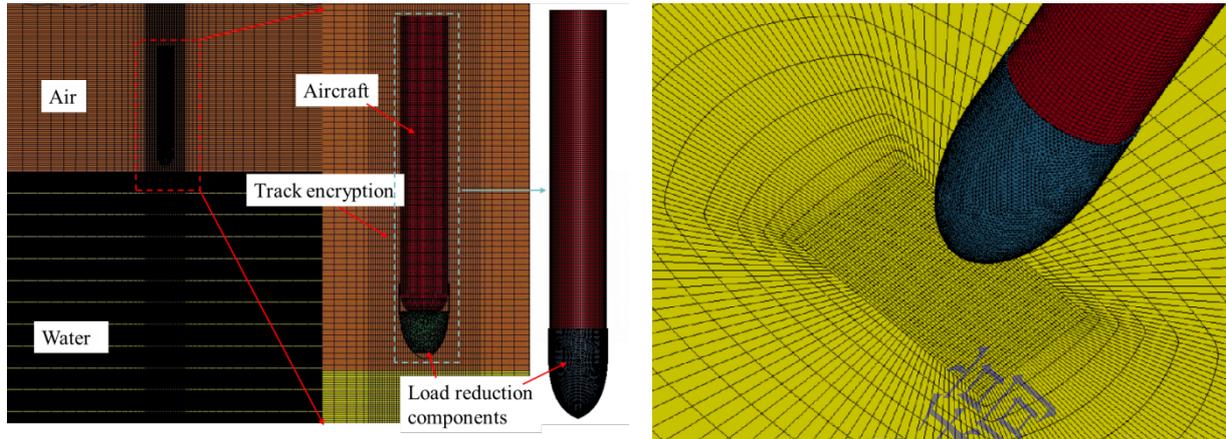


图 10 数值计算域及带缓冲部件航行体网格划分示意图

Fig.10 Numerical calculation domain and grid division diagram of vehicle with buffer component

为深入探究各种缓冲泡沫构型的性能，共选取了六种不同的工况进行数值仿真分析，具体的工况详见表 3。此外，图 11 展示了五种具有不同开孔构型的缓冲泡沫的设计示意，每种构型的开孔直径均设定为 20mm。

表 3 工况

Table 3 Simulation cases

工况	速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	缓冲泡沫
1	80	不开孔
2	80	弯孔 1
3	80	轴向孔 2
4	80	周向孔
5	80	轴向孔 1
6	80	弯孔 2

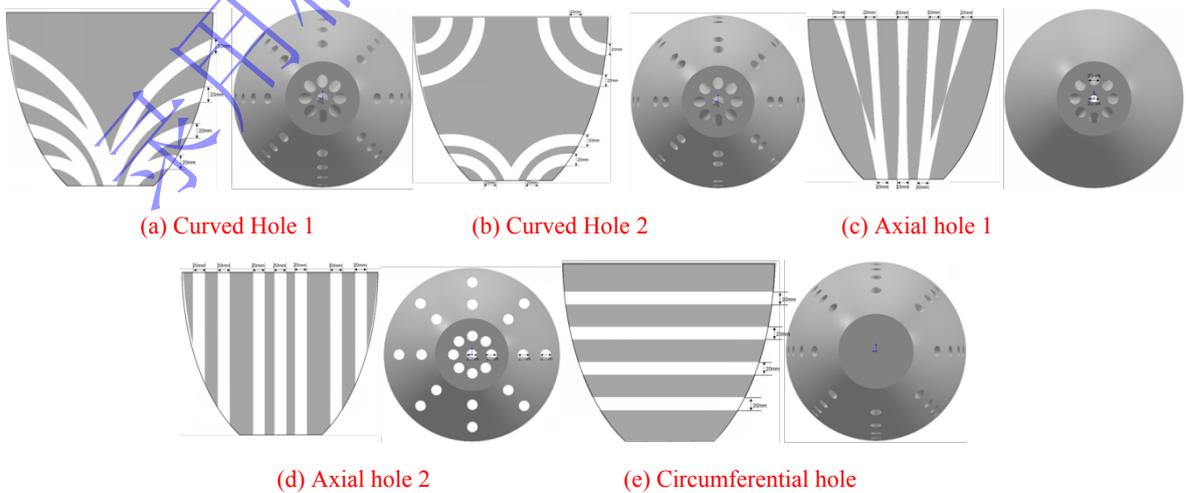


图 11 不同开孔构型的缓冲泡沫示意图

Fig.11 Diagram of buffer foam with different open cell configurations

### 3 结果与分析

#### 3.1 多孔泡沫缓冲条件下入水流场演化特性

如图 12 所示为缓冲泡沫采取弯孔 1 形式开孔工况的入水空泡演化与缓冲装置破坏的过程。从图中可以观察到，航行体在入水初期，缓冲头罩首先接触自由液面，并在强烈的冲击力作用下开始破坏。随后，缓冲泡沫开始发挥作用，吸收由撞击引起的能量，同时也迅速开始破碎。随着航行体继续深入水中，罩壳的残片向外扩散，虽然未能完全破碎，但对于空泡的形成和演化影响可以忽略不计。在  $t=5\text{ms}$  时，缓冲头罩和缓冲泡沫发生明显的挤压变形，但此刻两者尚未完全破碎。随着航行体入水位移增加，到了  $t=10\text{ms}$  时刻，缓冲头罩发生了明显的破碎。在这一过程中，航行体挤压缓冲头罩产生的初期空泡，随着航行体的继续运动，缓冲泡沫在航行体头部和水面的共同作用下沿着航行体的轴向被压缩，同时在径向上发生膨胀。这种纵向膨胀对缓冲头罩施加了进一步的撑进力，导致缓冲头罩在受到挤压的同时发生破裂，并向侧面扩散。随着缓冲泡沫的快速溃灭，航行体与水面之间的间隔逐渐缩小，直至发生直接接触。此时，航行体的直接接触水进一步引发了入水空泡的新一轮扩张，这个新扩张阶段的空泡与原有的空泡壁面相融合，形成了向航行体方向收缩的空泡壁面。

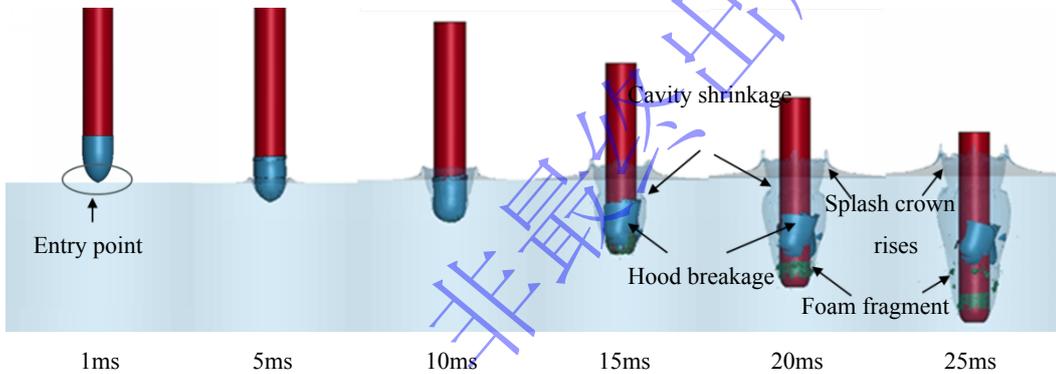


图 12 工况 2 入水流场演化与破坏过程

Fig.12 Evolution and failure process of inflow flow field in condition 2

如图 13 所示为工况 2 入水加速度随时间变化曲线，在  $t=1.6\text{ms}$  时缓冲泡沫接触自由液面，此时航行体入水加速度迅速上升并达到峰值，后随着缓冲泡沫的压实变形吸能逐步恢复稳定，这个时段的变化趋势与无缓冲条件入水工况具有一定的相似。

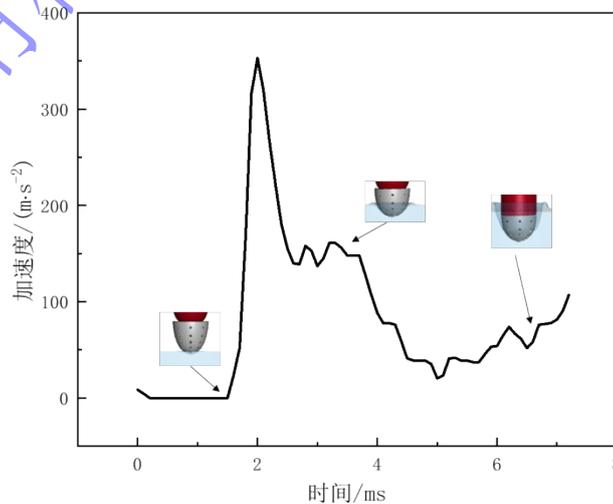


图 13 工况 2 入水加速度随时间变化曲线

Fig.13 Condition 2 Water acceleration curve with time

如图 14 所示为无缓冲工况与工况 2 和工况 1 的航行体总能量随时间变化曲线，通过航行体入水后的总能量变化趋势也能体现出缓冲性能的优劣，可以看到无缓冲条件航行体入水后衰减速度最快，在  $t=5\text{ms}$  时航行体开始接触水面，在撞击水面的瞬间航行体受到极大的冲击载荷，使得航行体的总能量在极短时间内迅速衰减。工况 1 是携带不开孔缓冲泡沫的降载方案，随着缓冲头罩接触水面先吸收了一部分能量，使得缓冲头罩撞水后航行体总能量下降较为平缓，但随着航行体入水位移的增加，航行体总能量快速降低。工况 2 是携带开弯孔缓冲泡沫的降载方案，从曲线中可以看出开弯孔缓冲泡沫的工况比不开孔缓冲泡沫工况的航行体总能量下降更为平缓。如图 15 所示为无缓冲工况与工况 2 和工况 1 的航行体轴向加速度随时间变化曲线，从图中可以看出航行体携带开孔泡沫入水工况的轴向加速度相比不开孔泡沫工况的轴向加速度更低，这是因为开弯孔的结构可以将航行体的入水冲击力分散到整个缓冲泡沫，并利用弯孔形状的改变来进一步的吸收航行体的入水冲击能量，从而提高缓冲泡沫的吸能效果和能能力。

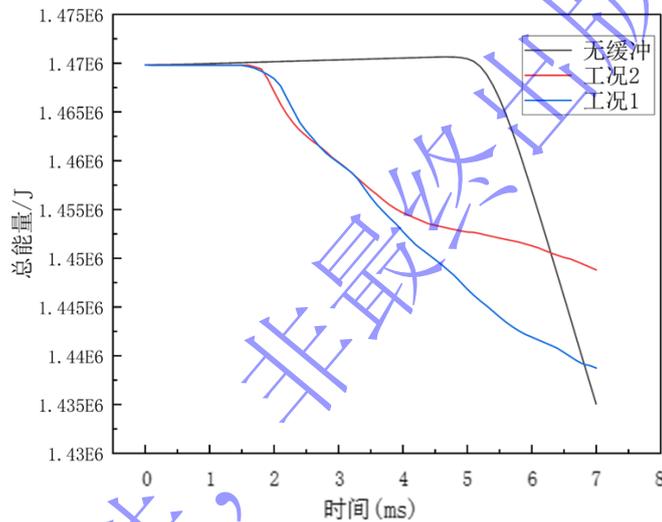


图 14 无缓冲工况与工况 2 和工况 1 的航行体总能量随时间变化曲线

Fig.14 Time variation curve of total vehicle energy under unbuffered conditions and conditions 2 and 1

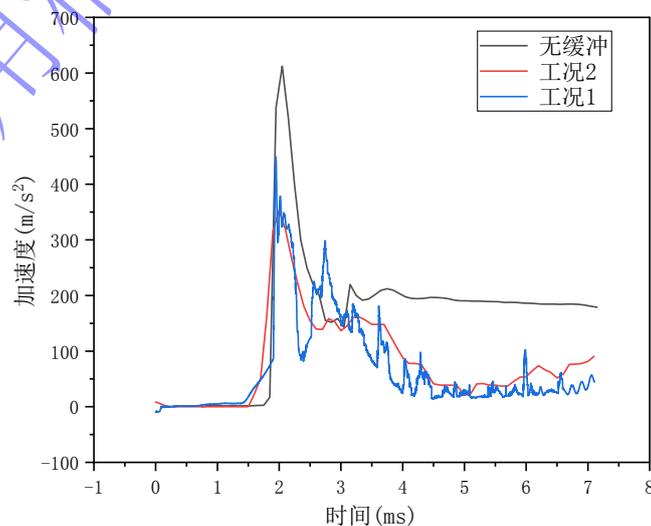


图 15 无缓冲工况与工况 2 和工况 1 的航行体加速度随时间变化曲线

### 3.2 不同开孔泡沫缓冲条件下入水流场演化特性

图 16 到图 20 为其他五种工况下航行体以 80m/s 的速度入水流场演化与动态破碎过程，图 21 所示为无缓冲条件下航行体以 80m/s 速度入水空泡形态，取航行体刚入水的时刻为 1ms，可以看出，无缓冲条件下，航行体头部猛烈撞击水面，形成一个迅速向外扩张的空泡，在水流的冲击力和惯性的作用下继续扩大，空泡壁面呈现出明显的向外扩张的现象。有缓冲工况下缓冲头罩和缓冲泡沫在撞击水面的瞬间开始发挥作用，缓冲头罩首先接触到自由液面，能够吸收和分散一部分冲击力，随后缓冲泡沫在撞击过程中压缩和溃灭，进一步吸收和减缓了剩余的冲击力。航行体入水后形成的空泡壁面呈现出向内收缩的现象，这意味着航行体入水冲击力被有效地降低。同时由于缓冲头罩与缓冲泡沫的破碎溃灭，使得有缓冲工况航行体入水空泡直径小于无缓冲条件下航行体入水空泡直径，进一步证实了缓冲降噪措施的有效性。不同孔型泡沫工况的破碎时间与空泡轮廓均有所差异。

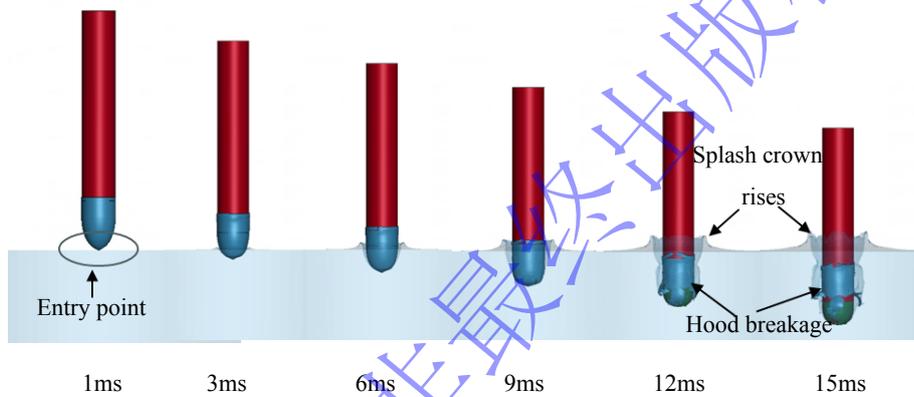


图 16 工况 1 入水流场演化与破坏过程

Fig.16 Evolution and failure process of inflow flow field under condition 1

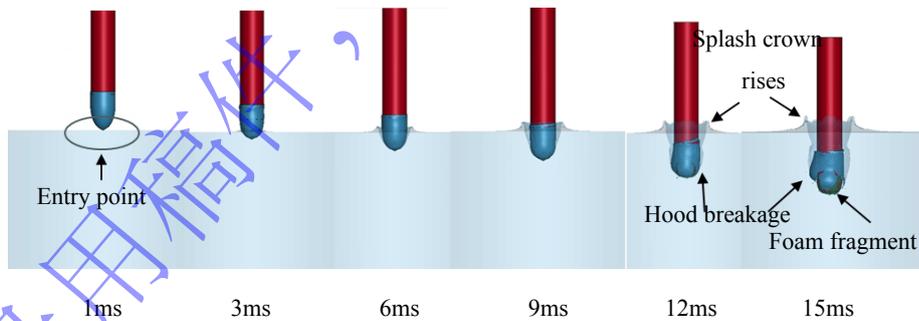


图 17 工况 3 入水流场演化与破坏过程

Fig.17 Evolution and failure process of inflow flow field under condition 3

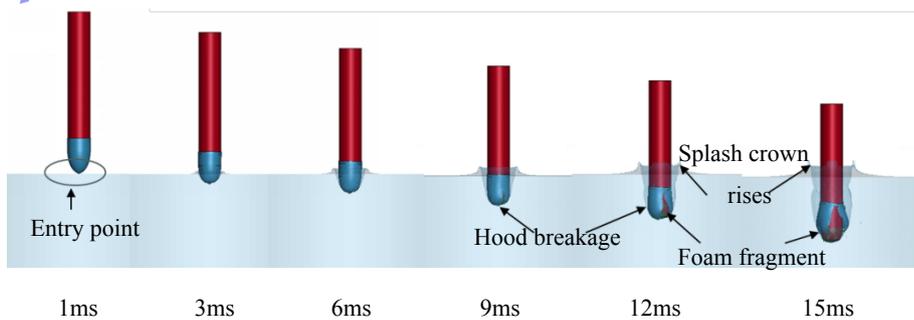


图 18 工况 4 入水流场演化与破坏过程

Fig.18 Evolution and failure process of inflow flow field under condition 4

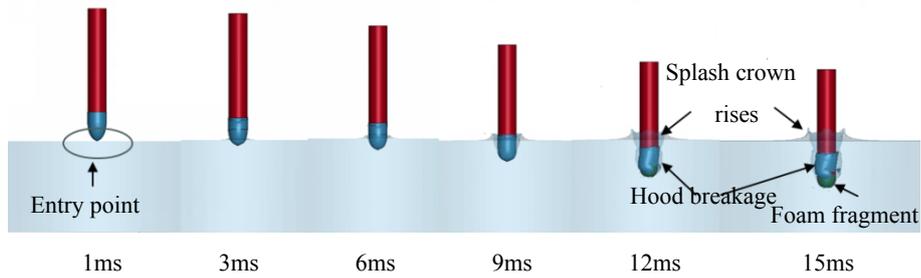


图 19 工况 5 入水流场演化与破坏过程

Fig.19 Evolution and failure process of inflow flow field under condition 5

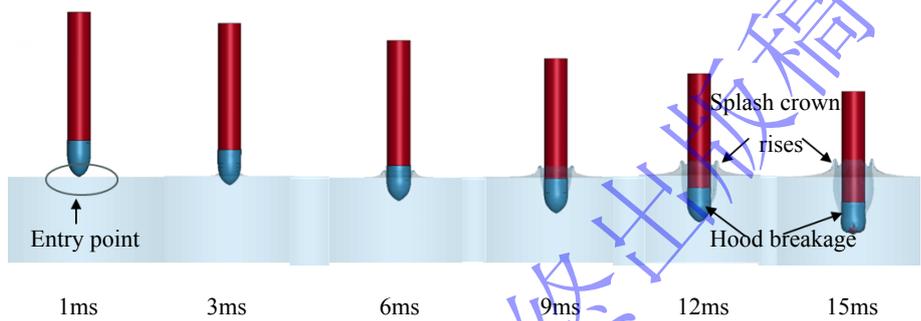


图 20 工况 6 入水流场演化与破坏过程

Fig.20 Evolution and failure process of inflow flow field under condition 6

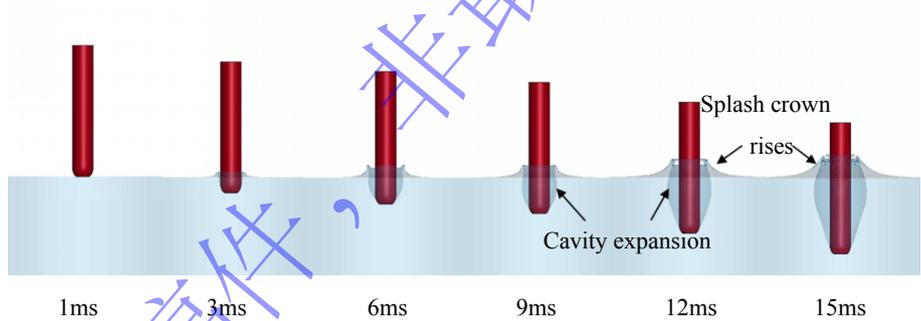


图 21 无缓冲条件下入水空泡演化

Fig.21 Evolution of water inlet cavitation under unbuffered conditions

### 3.3 入水过程中整流罩的动态损伤与缓冲泡沫变形吸能演化

图 22 到图 27 为六种工况下航行体以 80m/s 的速度入水的动态破碎图，从图中可以看出缓冲头罩尖端首先接触水面并发生局部渐进破碎，这个破碎现象并非一次性发生，而是随着时间的推移，以一种渐进的方式进行。连接器处的缓冲头罩外壁面变形破裂，具体表现为该位置处出现了应力集中并且有环状的变形，这是由于冲击力的分布和局部破碎引起的，进一步说明了高速入水过程中冲击力的重要性和复杂性。随着航行体入水深度的增加，缓冲头罩尖端的局部渐进破碎面积迅速变大，这表明随着入水位移的增加，冲击力和能量吸收的需求也在增加。

工况 1 头罩前端破碎，罩壳尾部相对完整，这是因为工况 1 携带的缓冲泡沫为不开孔泡沫，航行体入水后，缓冲头罩尖端发生局部渐进式破碎，随着航行体入水位移的增加，缓冲泡沫受到挤压变形吸能并向径向扩张，对缓冲罩壳前端施加一个撑进力，使得缓冲罩壳前端破碎，而罩壳尾部在相同入水位移处保持相对完整。工况 2 到工况 5 这四个工况属于不同形式的缓冲泡沫开孔方式，由于所携带的缓冲泡沫增加了孔洞与通道，使得航行体入水后将水流通过孔洞分散，使得缓冲泡沫挤压变形的径

向扩张对缓冲罩壳产生的撑进力作用在缓冲罩壳的前部及后部，缓冲罩壳破碎相对完整。工况 6 是航行体所携带缓冲泡沫头部与尾部均开弯孔的开孔形式，在航行体入水后，在头尾均开弯孔的作用下，缓冲泡沫随着航行体入水位移的增加而变形溃灭，此时的缓冲头罩受到缓冲泡沫撑进力的作用破碎的时间后移。

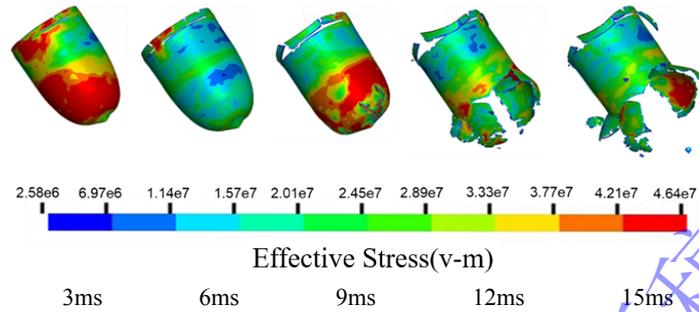


图 22 工况 1 条件下整流罩的动态损伤

Fig.22 Dynamic damage of fairing under working condition 1

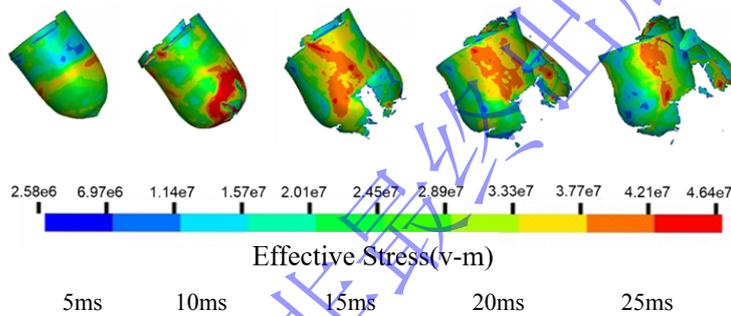


图 23 工况 2 条件下整流罩的动态损伤

Fig.23 Dynamic damage of fairing under working condition 2

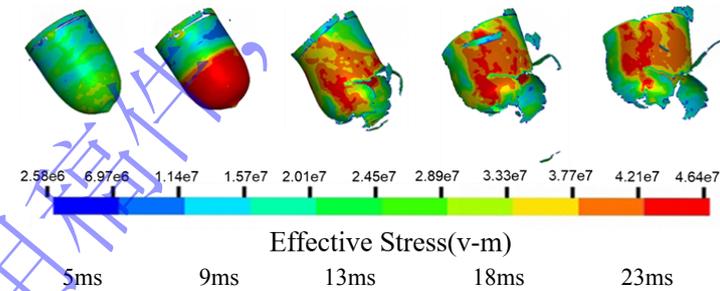


图 24 工况 3 条件下整流罩的动态损伤

Fig.24 Dynamic damage of fairing under working condition 3

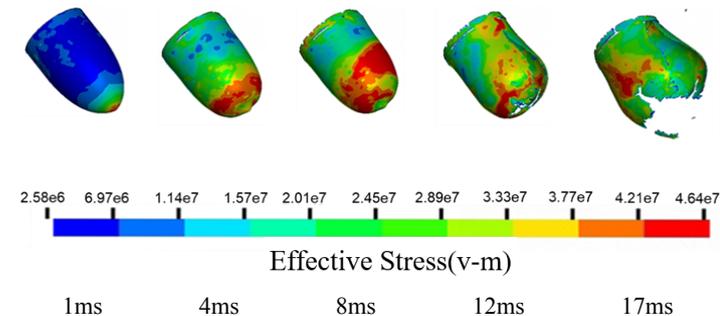


图 25 工况 4 条件下整流罩的动态损伤

Fig.25 Dynamic damage of fairing under working condition 4

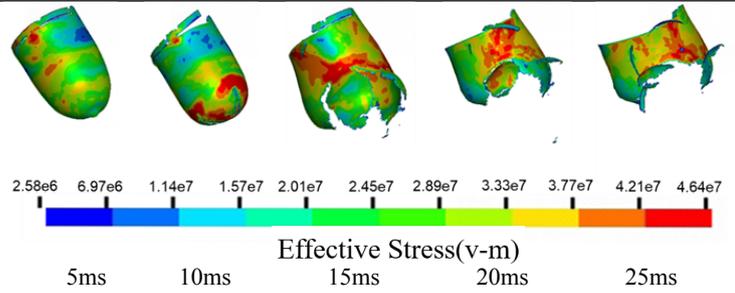


图 26 工况 5 条件下整流罩的动态损伤

Fig.26 Dynamic damage of fairing under working condition 5

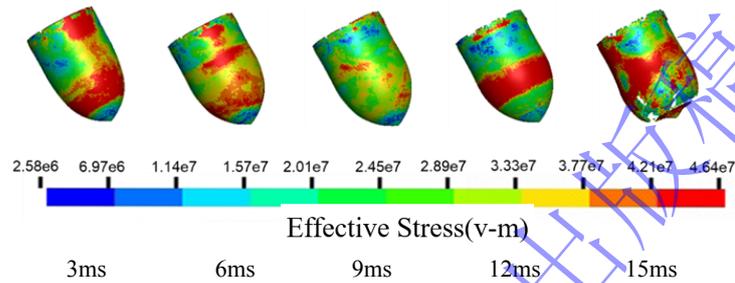


图 27 工况 6 条件下整流罩的动态损伤

Fig.27 Dynamic damage of fairing under working condition 6

图 28 为不开孔泡沫的应变云图及破坏过程，可以看出泡沫不开孔工况下只有泡沫前端溃灭，而泡沫主体结构仍然存在，泡沫发生挤压变形。图 29 到图 33 为多孔泡沫的应变云图及破坏过程。随着航行体入水对泡沫的挤压，缓冲头罩尖端局部破碎后，泡沫前端接触到水面，此时由于冲击载荷的作用，泡沫前端部分材料进入坍塌阶段，此时多孔泡沫吸收大量的能量，泡沫材料产生塑性变形，孔隙变少，这个阶段为缓冲泡沫的主要能量吸收阶段。

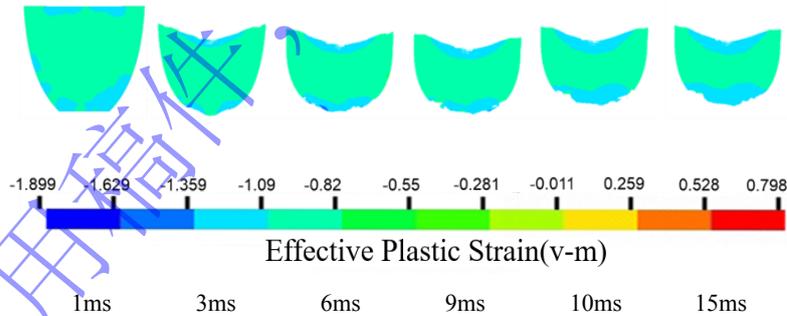


图 28 工况 1 条件下泡沫应变云图及破坏过程

Fig.28 Strain cloud image and failure process of foam under working condition 1

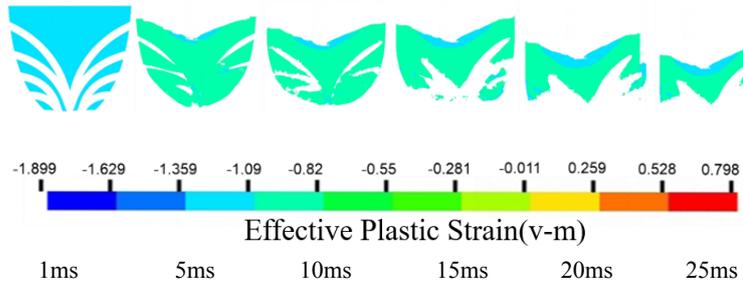


图 29 工况 2 条件下泡沫应变云图及破坏过程

Fig.29 Strain cloud image and failure process of foam under working condition 2

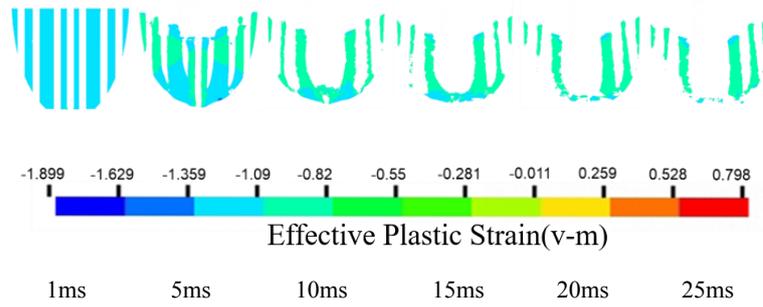


图 30 工况 3 条件下泡沫应变云图及破坏过程

Fig.30 Strain cloud image and failure process of foam under working condition 3

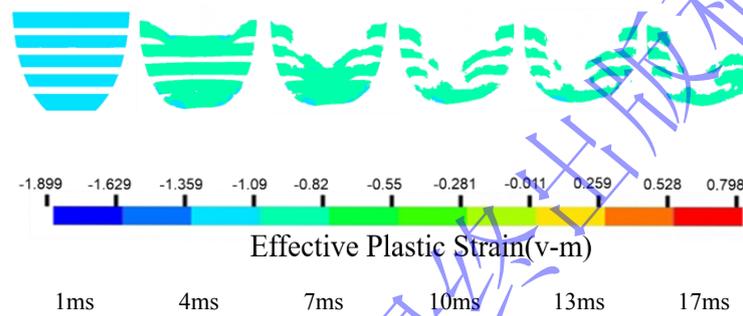


图 31 工况 4 条件下泡沫应变云图及破坏过程

Fig.31 Strain cloud image and failure process of foam under working condition 4

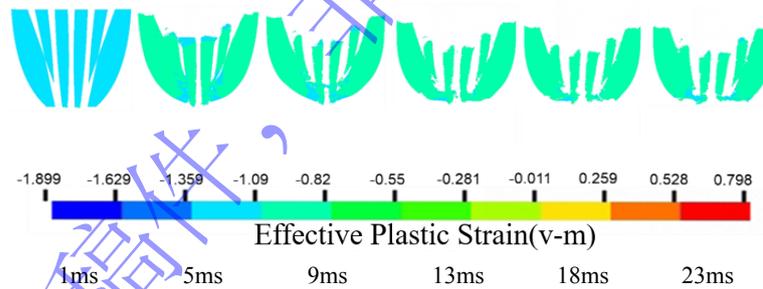


图 32 工况 5 条件下泡沫应变云图及破坏过程

Fig.32 Strain cloud image and failure process of foam under working condition 5

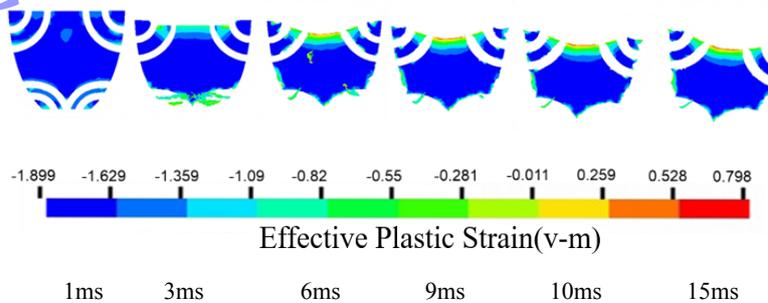


图 33 工况 6 条件下泡沫应变云图及破坏过程

Fig.33 Strain cloud image and failure process of foam under working condition 6

### 3.4 航行体运动参数分析

如图 34 所示为不同工况下航行体位移变化曲线。可以看出不同工况下的位移变化差异较小。

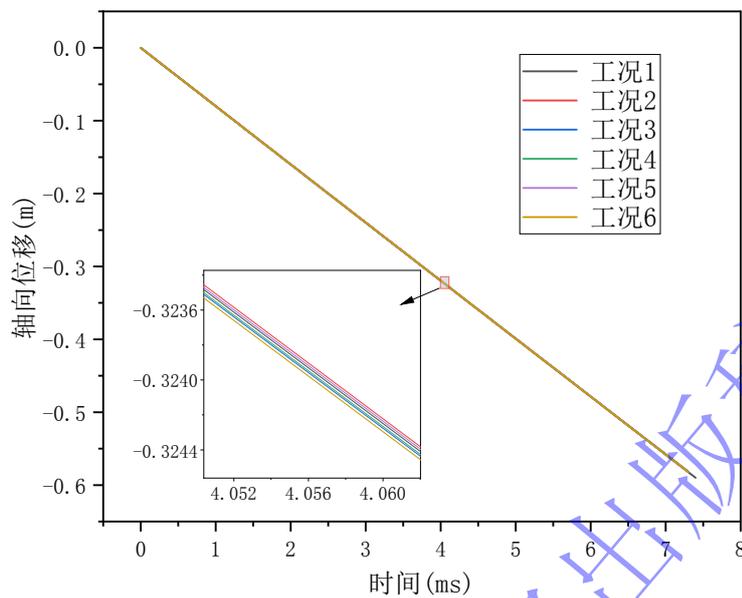


图 34 不同工况下航行体位移时域曲线

Fig.34 Time domain curve of shifting position under different working conditions

图 35 所示为不同工况下航行体入水轴向加速度随时间变化曲线，图 36 所示为不同工况下航行体入水轴向加速度随时间变化曲线，图中的缓冲区表征航行体入水时缓冲泡沫吸收和分散了航行体的入水动能，降低了航行体入水冲击力。当缓冲材料被压实脱落的瞬间，会对航行体产生较大的冲击，并产生应力波由航行体头部传向航行体尾部，此时为泡沫压实区，出现第二个加速度峰值，在传播的过程中应力波会随着航行体入水以及泡沫溃灭而逐渐衰减。

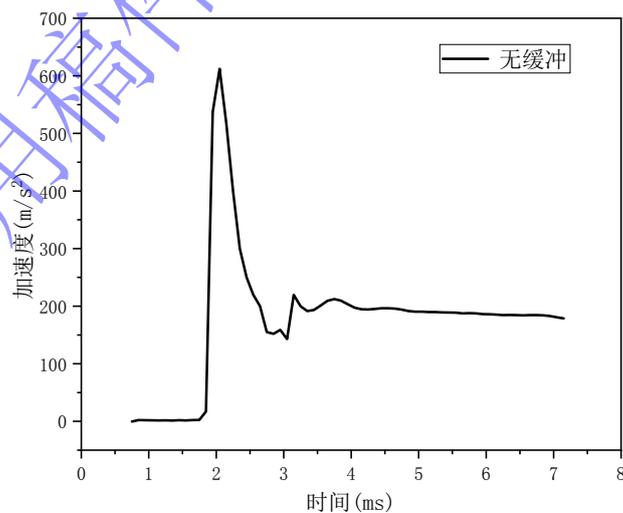


图 35 无缓冲工况下航行体加速度时域曲线

Fig.35 Time domain curve of vehicle acceleration under unbuffered condition

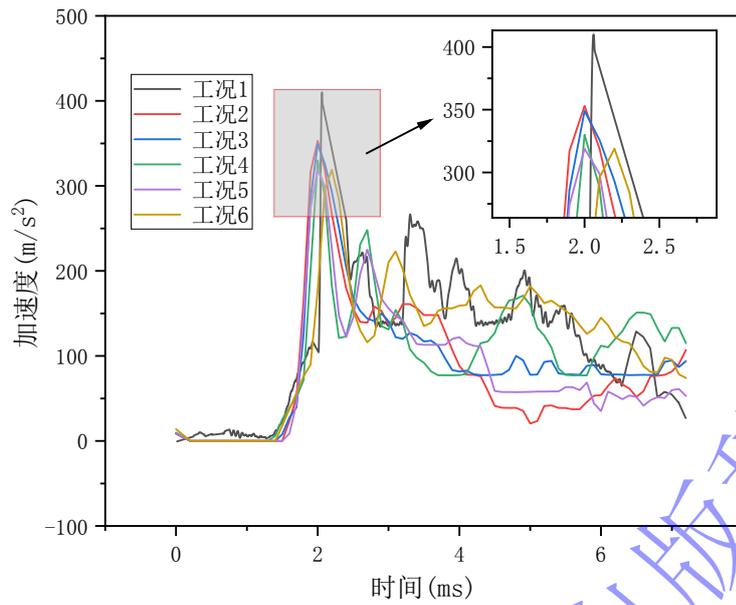


图 36 不同工况下航行体加速度时域曲线

Fig.36 Time domain curve of vehicle acceleration under different working conditions

如图 37 所示为不同工况下航行体入水降载率的对比曲线，从图中可以看出相比于不开孔泡沫，多孔泡沫对航行体入水降载效能更优。这是因为多孔泡沫具有更多的孔洞和通道，当航行体入水后，水会通过孔洞进入，将冲击能量分散到缓冲泡沫中，降低冲击力向航行体传递，起到分流的作用，其次孔洞与通道的存在使得缓冲泡沫的体积和密度分布不均匀，这有助于将航行体入水冲击能量分散到整个泡沫结构中。

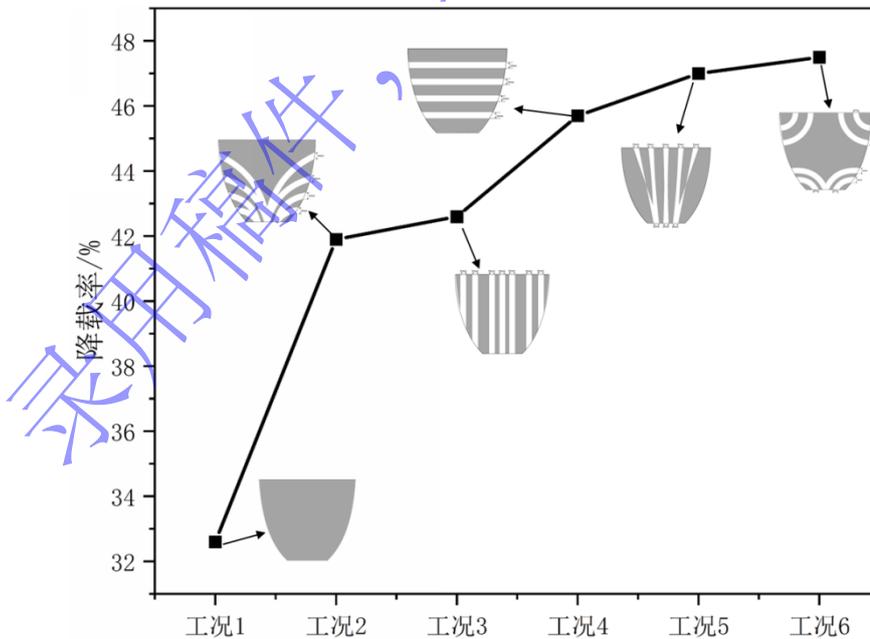


图 37 不同工况下降载率对比

Fig.37 Comparison of load reduction in different working conditions

## 4 结论

本文针对航行体高速入水缓冲降载问题进行研究,并设计了相应的缓冲头罩与不同形式的开孔缓冲泡沫,对不同开孔形式缓冲泡沫的降载性能进行评估,得出以下结论:

(1) 无缓冲条件下航行体入水后航行体总能量衰减速度最快,而在携带不开孔缓冲泡沫和多孔缓冲泡沫的情况下,航行体的总能量下降速度相对较慢。尤其是多孔缓冲泡沫方案,能够更有效地分散航行体入水冲击力并吸收能量,具有更好的缓冲效果。

(2) 缓冲头罩在入水时会发生局部渐进破碎,这种破碎现象是随着时间的推移和入水位移的增加而逐渐发展的。连接器处的缓冲头罩外表面的变形和破裂是由于撞水时产生的应力集中分布引起的。不同开孔形式泡沫的变形受自身孔型结构影响,多孔泡沫接触水面时,前端部分会进入坍塌阶段,吸收大量能量并产生塑性变形,孔隙减少,此阶段为缓冲泡沫的主要能量吸收阶段。

(3) 通过对比加速度曲线,可以知道多孔泡沫的降载效能相比于不开孔泡沫更优,其中的弯孔2形式开孔方案降载率可达到47.5%,而不开孔泡沫方案的降载率仅为32.6%,多孔泡沫具有更多的孔洞和通道,能将冲击能量分散到整个泡沫结构中,降低冲击力对航行体的传递,起到分流的作用。同时,孔洞与通道的存在也导致缓冲泡沫的体积和密度分布不均匀,也有助于将航行体入水冲击能量分散到整个泡沫结构中。

## 参考文献

- [1] 吕红庆,许磊,王振清.不同头型旋成体入水初期流场特性数值分析[J].兵器装备工程学报,2022,43(12):34-42. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.12.006.  
LV H Q, XU L, WANG Z Q. Numerical research on flow field characteristics of axisymmetric bodies with different head shapes during initial water entry[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(12): 34-42. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.12.006.
- [2] Tang S, Zhang Y, Sun S, et al. Experimental investigation on the air-cushion effect during free fall of a trimaran section using an air escape control method[J]. Ocean Engineering, 2022, 254: 111417. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111417.
- [3] Wu S, Shao Z, Feng S, et al. Water-entry behavior of projectiles under the protection of polyurethane buffer head[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106890. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106890.
- [4] Kubota Y, Mochizuki O. Influence of head shape of solid body plunging into water on splash formation[J]. Journal of Visualization, 2011, 14: 111-119. DOI: 10.1007/s12650-011-0071-4.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] GUO Z, ZHANG W, XIAO X, et al. An Investigation into Horizontal Water Entry Behaviors of Projectiles with Different Nose Shapes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49(2): 43-60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.04.004.
- [8] 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(08): 1691-1695. DOI: CNKI:SUN:GCRB.0.2015-08-016.  
PAN L, WANG H R, YAO E R, et al. Mechanism Research on the Water-Enter Impact of the Head-Jetting Flat Cylinder[J]. Journal Of Engineering Thermophysics, 2015, 36(08): 1691-1695. DOI: CNKI:SUN:GCRB.0.2015-08-016.

- [9] SUN T, WANG S, BAI P, et al. Cavity dynamics of water entry for a head-ventilated cylinder[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(7): 073302. DOI: 10.1063/5.0094249.
- [10] 王峻, 刘珑翔, 陈瑛. 头部喷气圆柱高速入水空泡与降载特性的数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2023, 38 (02): 195-204. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.02.005.
- WANG J, LIU L X, CHENG Y. Numerical Investigation on the High-speed Water Entry Cavity and Load Reduction of Air-jetting Cylinder[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2023, 38 (02): 195-204. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.02.005.
- [11] 赵海瑞, 施瑶, 潘光. 头部喷气航行器高速入水空泡特性数值分析[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(04): 810-817. DOI: 10.1051/jnwpu/20213940810.
- ZHAO H R, SHI Y, PAN G. Numerical analysis of cavitation characteristics for high speed water entry of headjet vehicle[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(04): 810-817. DOI: 10.1051/jnwpu/20213940810.
- [12] 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(02): 41-46. DOI: CNKI:SUN:YLJS.0.1999-02-010.
- 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. DOI: CNKI:SUN:YLJS.0.1999-02-010.
- [13] Horton D M. Shock-mitigating nose for underwater vehicles: U.S. Patent 6536365[P]. 2003.
- [14] M. Avalle, G. Belingardi, R. Montanini. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(5): 455-472. DOI: 10.1016/S0734-743X (00) 00060-9.
- [15] 曾斐, 潘艺, 胡时胜. 泡沫铝缓冲吸能评估及其特性[J]. *爆炸与冲击*, 2002(04): 358-362. DOI: 10.11883/1001-1455 (2002) 04-0358-5.
- ZENG F, PAN Y, HU S S. Evaluation of Cushioning Properties and Energy-absorption Capability of Foam Aluminium[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002(04): 358-362. DOI: 10.11883/1001-1455 (2002) 04-0358-5.
- [16] SHI Y, GAO X, 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.
- [17] 孙龙泉, 王都亮, 李志鹏, 等. 基于 CEL 方法的航行体高速入水泡沫铝缓冲装置降载性能分析[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(20): 80-88. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.20.011.
- SUN L Q, WANG D L, LI Z P, et al. Analysis on load reduction performance of foamed aluminum buffer device for high-speed water entry of vehicle based on a CEL method. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(20): 80-88. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.20.011.
- [18] David Henneaux, Pierre Schrooyen, Philippe Chatelain, et al. High-order enforcement of jumps conditions between compressible viscous phases: An extended interior penalty discontinuous Galerkin method for sharp interface simulation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2023, 415: 116215. DOI: 10.1016/j.cma.2023.116215.
- [19] LI Y, ZONG Z, SUN T Z. Classification of the collapse of a composite fairing during the oblique high-speed water entry[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 182(12): 110260. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110260
- [20] 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.
- [21] 孙琦, 周军, 林鹏. 基于 LS-DYNA 的弹体撞水过程流固耦合动力分析[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(06): 1498-1501. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2010.06.005.
- SUN Q, ZHOU J, LIN P. Dynamic Analysis of Fluid-Structure Interaction for Water Impact of Projectile Using LS-DYNA[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(06): 1498-1501. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2010.06.005.
- [22] 李尧. 航行体高速入水缓冲头帽的降载机制与行为特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023: 23-25, 53-56

---

[23] 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.

(责任编辑 爆炸与冲击)

录用稿件，  
非最终出版稿