

# 表面闭合优先发生情况下入水动力学建模与分析

王宇飞<sup>1,2,\*</sup>, 叶秉晟<sup>1,2</sup>, 王一伟<sup>1,2</sup>, 黄晨光<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京, 100190

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京, 100049

\*Email: wangyufei18@mailsucas.ac.cn

**摘要:** 本文研究了三维细长弹体以固定速度垂直入水问题, 研究范围被限制在表面闭合优先于深闭合发生情况下的空气腔形成阶段。我们建立了弹体发射实验装置, 通过高速相机拍摄了入水过程的时序图像。我们还在开源流体力学平台 OpenFOAM®上开发了基于压力的可压缩多相求解器, 用于开展入水流场特性数值模拟研究, 采用数值计算得到的空泡形态与实验结果吻合良好。本文讨论了在不同佛汝德数工况下, 弹体阻力系数、压力分布、空腔轮廓和流动特性随着无量纲时间的变化规律。分析结果表明, 阻力系数在接触水面的瞬间发生突变达到峰值, 随后快速下降并达到一个相对稳定的值, 空腔入口处和弹体的肩部存在着明显的低压, 随着气体侵入的减少和空气腔体积的增大, 泡内的整体压力不断降低。

**关键词:** 入水; 空泡动力学; 表面闭合; 空腔内部压力; OpenFOAM®

## 1 引言

结构物入水作为一种自然界中的常见现象, 从科学角度看, 是包含了复杂非线性多项流动与自由液面大变形的典型流固耦合问题, 并伴有湍流和涡的产生; 从工程角度看, 射弹入水的相关研究普遍具有国防工业、船舶海洋工程和航空航天等领域的背景, 其成果运用前景广泛。

对于入水问题, 很长时间以来, 冲击载荷和弹体的水下运动学规律一直是学者们关注的焦点, 大量文献通过采用实验或数值模拟手段对这类问题进行了反复深入的探讨。随着科技进步, 高速摄像机已经具备了每秒拍摄万张以上照片的能力, 可以准确记录入水流体的形成和发展过程和空泡形态变化<sup>[2-3]</sup>。Aristoff 等<sup>[4]</sup>通过大量实验揭示了疏水性物体入水后, 空气腔有 4 种可能的闭合形式, 包括准定常闭合、浅闭合、深闭合以及表面闭合, 其

中 Bond 数、Froude 数和 We 数是决定出现哪种闭合方式的关键无量纲参数。更先进的图像粒子测速同样被用于研究入水问题,通过测量流场的速度分布情况,进一步获取流场结构。基于 N-S 方程求解的数值模拟方法能够较为准确的对流场的速度压力分布进行计算。马庆鹏等人<sup>[1]</sup>基于有限体积法离散、求解雷诺时均 N-S 方程,采用 Schnerr-Sauer 空化模型,并引入动网格技术,对带有不同角度锥头二维圆柱体的高速入水问题开展数值模拟研究,得到不同头型条件下高速入水运动参数及空泡形态发展规律、流场的压力分布及速度分布规律。

随着机理研究的深入,精细的流场数值模拟方法逐渐成为了入水研究的重要和热点手段。本文基于大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法,考虑流体可压缩性和空化效应,基于 OpenFOAM 软件二次开发新求解器计算了弹体入水问题,并将空泡形态与实验结果对比证实了数值模拟的可靠性。本文讨论了在不同佛汝德数工况下,弹体阻力系数、压力分布、空腔轮廓和流动特性随着无量纲时间的变化规律。

## 2 数值模拟方法

在入水问题中,考虑低压区可能出现的空化相变效应,流场中包含水、水蒸气与不可凝结空气介质,流场内任意流体微团均由三相介质以不同的比例混合而成,本文采用流体体积(Volume of Fluid, VOF)方法求解多相流动及模拟交界面变化。

令  $\alpha_l$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_a$  为 3 种介质的体积分数,则有:

$$\alpha_l + \alpha_v + \alpha_a = 1 \quad (1)$$

对于可压缩流体,可以写出各相的质量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{u}) &= -\frac{\alpha_l}{\rho_l} \frac{D\rho_l}{Dt} + \frac{\dot{m}}{\rho_l} \\ \frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \mathbf{u}) &= -\frac{\alpha_v}{\rho_v} \frac{D\rho_v}{Dt} - \frac{\dot{m}}{\rho_v} \\ \frac{\partial \alpha_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_a \mathbf{u}) &= -\frac{\alpha_a}{\rho_a} \frac{D\rho_a}{Dt} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\dot{m}$  为质量传输源项,  $\rho_l$ 、 $\rho_v$ 、 $\rho_a$  分别为液体、水蒸气和空气的密度。混合物的动量方程可写为:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_{eff} \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) \right] + \rho \mathbf{g} + \sigma \kappa \nabla \alpha_l \quad (3)$$

其中  $\rho$  和  $\mu$  代表整个流场区域的密度和动力黏度,表达式为:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_a \rho_a \quad (4)$$

$$\mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \alpha_a \mu_a \quad (5)$$

大涡模拟方法最先由 Smagorinsky 提出, 目前被认为是模拟湍流的重要手段之一。大涡模拟首先在选定区域内采用滤波操作, 将涡分为大尺度涡和小尺度涡, 对于大涡直接通过求解 N-S 方程得到, 对于小尺度的涡通过引入亚格子模型, 体现其对于大尺度涡的影响。

在大涡模拟中, 经过滤波操作以后的物理以横杠标记:

$$\bar{\varphi}(x, t) = \int G(|x - x'|) \varphi(x', t) dV' \quad (6)$$

其中  $G(|x - x'|)$  代表滤波函数, 本文中采用盒式滤波,

$$G|x - x'| = \begin{cases} \frac{1}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3} & |x'_i - x_i| \leq \frac{\Delta x_i}{2} \quad i = 1, 2, 3 \\ 0 & |x'_i - x_i| > \frac{\Delta x_i}{2} \quad i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$  和  $\Delta x_3$  代表网格各个方向的尺寸。

对于可压缩流动, 为了避免滤波后产生的非线性应力项, 使方程封闭, 因此还需采用 Favre 滤波, 滤波后 N-S 方程中产生的亚格子应力张量通过 Boussinesq 假设封闭:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu_t \tilde{S}_{ij} \quad (8)$$

其中  $\nu_t$  代表湍流涡黏系数,  $\tilde{S}_{ij}$  代表应变率张量,  $\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right)$ 。

亚格子黏性项通过 Smagorinsky-Lilly 模型封闭,  $\nu_t = \rho L_s^2 \sqrt{2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}}$ ,  $L_s$  为亚格子的混合长度。我们之前的工作显示, 采用这种方法可以有效准确的模拟多相界面及其流动情况<sup>[5-6]</sup>。

本节以 90° 圆锥头型的实心圆柱体作为研究对象进行数值模拟。定义坐标原点在弹头和弹身交界面的圆心处, 固定弹体不动, 液体从速度入口流入, 压力出口设置为一个标准大气压。对计算域划分了结构化网格, 边界层网格进行了加密, 网格数约为 884 万, 如图 1 所示, 时间上采用一阶隐式离散, 空间上采用高斯线性插值, 时间步长通过克朗数  $C_o$  控制, 且满足  $C_o < 0.5$ 。入水的初速度  $V_0 \in [30, 50]$  m/s, 对应 Fr 数从 31.91~53.19。

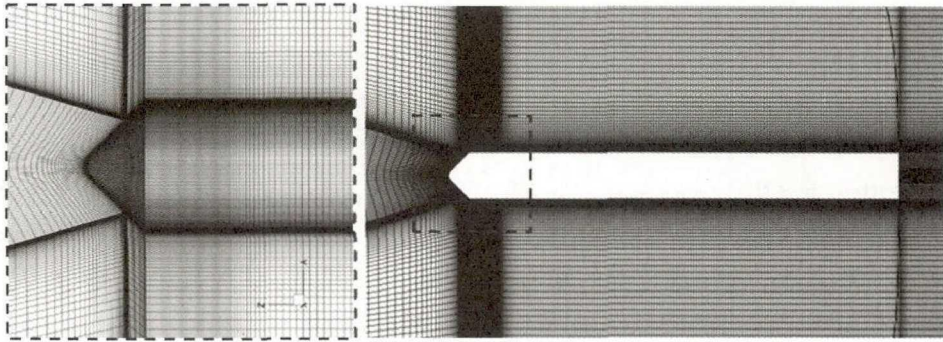


图 1 计算网格划分

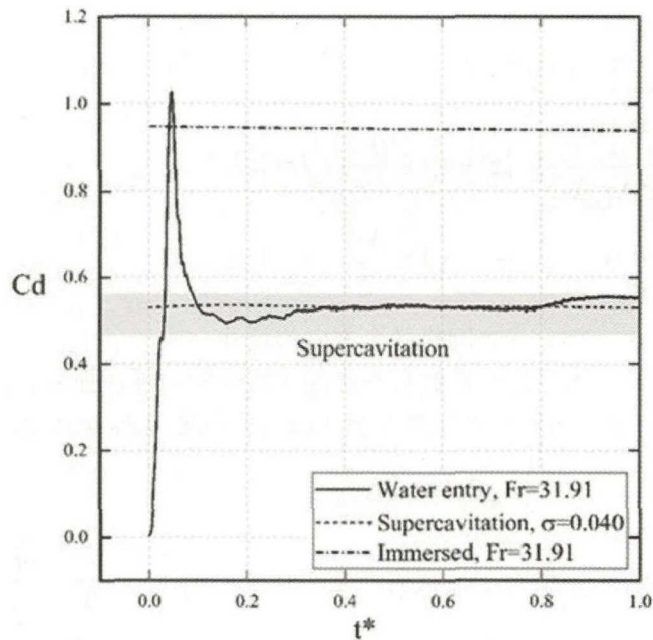


图 2 阻力系数对比

### 3 结果与讨论

本节首先对弹体入水过程中的阻力系数进行了记录，阻力系数在弹头接触水面的瞬间发生突变达到峰值，随后快速下降并达到一个相对稳定的值，这表明在入水过程中冲击载荷的影响十分剧烈。图 2 将航行体入水过程中阻力系数的变化和入水初速度一致，超空化情况来流速度为 70m/s，对应空化数 0.040，我们发现，水下航行时的阻力系数远大于入水相对稳定时阻力系数，而入水稳定后的阻力系数大致与超空化的情况相当，期减阻原理与超空化类似。航行体入水过程中，会附着一个包裹弹体的空气腔，只有弹体头部一小部分和液

体接触，因此阻力系数远小于一般水下航行时的状态。

锥头试件入水时，只有头部与液体接触，水动力载荷集中分布在很小的区域内，因此头锥表面上的压力分布是工程中重要的关注对象。图为  $t^*=0.267S$ ， $Fr=31.91$  时的头锥附近压力分布。头锥表面压力梯度变化十分剧烈，在头锥顶点处压力最大，而在航行体的肩部，液体与弹体壁面发生流动分离，在这一区域压力达到最低，低于一个标准大气压。

图 3 为  $Fr=31.91$  时空泡轮廓随无量纲时间的变化，为了方便对比，将水平液面变换到同一高度上，可见空气腔的轮廓尺寸随着时间的推进不断增长，在水平液面的地方，水平方向的直径一开始会快速增加，由于泡内外压力差的作用，扩张速度会不断减慢，然后向内收缩，最终闭合，在本文研究的范围内，空泡体积随着无量纲时间的增加而增大。

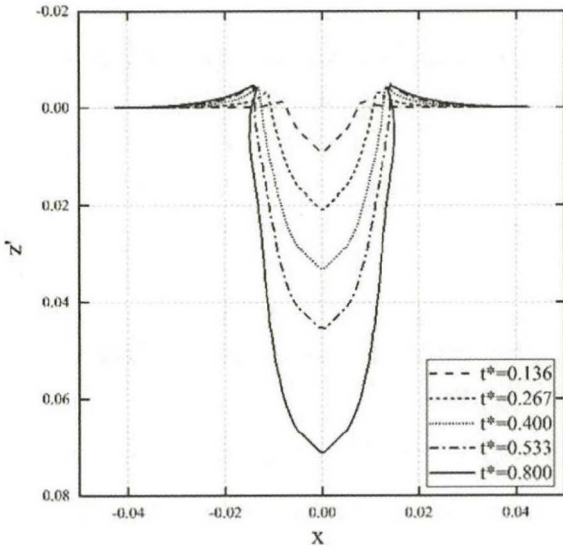


图 3 不同时刻空泡轮廓

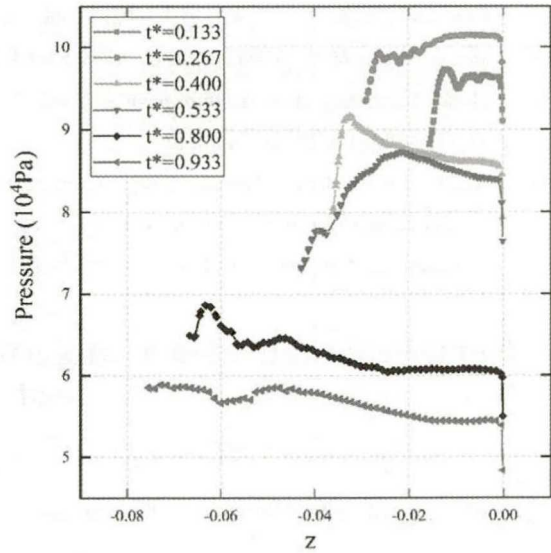


图 4 空泡内压力分布

图 4 为  $Fr=31.91$  时航行体肩部和水平液面附近压力最低点连线上的压力随无量纲时间的变化，除了水平液面和航行体肩部存在的明显压降以外，泡内压力变化相对平缓。从整体上看，自  $t^*=0.267$  时刻开始，泡内的平均压力随着时间推进不断降低，这是因为涡旋的运动诱会导自由液面向中间合拢，使得气体分子无法侵入空泡内部，随着航行体向水下运动，空泡体积不断增大，这就使得泡内空气密度减小，压强降低，与之对比，入水的初始阶段，空泡敞开与大气域连通，气体分子可以顺利进入空泡内，故维持了空泡内密度压力的相对稳定。总而言之，涡旋运动及其引发的连锁效应最终导致了空泡闭合。出乎我们意料的一点是，在本文研究范围内，空泡内的最低压力始终高于饱和蒸气压，因此并无空化现象发生，空泡内部没有因相变产生的水蒸气，但是泡内的压力随着无量时间和  $Fr$  的增加有降低的趋势，因此，当弗劳德数进一步增大时，就有可能在某个时间发生空化。

## 参 考 文 献

- 1 马庆鹏, 魏英杰, 王聪,等. 不同头型运动体高速入水空泡数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(11):24-29.
- 2 Vincent, Lionel & Xiao, Tingben & Yohann, Daniel & Jung, Sunghwan & Kanso, Eva. (2017). The Dynamics of Water Entry. *Journal of Fluid Mechanics*. 846. 10.1017/jfm.2018.273.
- 3 G. Bodily, Kyle & J. Carlson, Stephen & Truscott, Tadd. (2014). The water entry of slender axisymmetric bodies. *Physics of Fluids*. 26. 072108. 10.1063/1.4890832.
- 4 M. Aristoff, Jeffery & Bush, John. (2009). Water entry of small hydrophobic spheres. *Journal of Fluid Mechanics*. 619. 45 - 78. 10.1017/S0022112008004382.
- 5 Wang, Yiwei & Xu, Chang & WU, XIAOCUI & Huang, Chenguang & Wu, Xianqian. (2017). Ventilated cloud cavitating flow around a blunt body close to the free surface. *Physical Review Fluids*. 2. 10.1103/PhysRevFluids.2.084303.
- 6 Xu, Chang & Huang, Jian & Wang, Yiwei & WU, XIAOCUI & Huang, Chenguang & Wu, Xianqian. (2018). Supercavitating flow around high-speed underwater projectile near free surface induced by air entrainment. *AIP Advances*. 8. 035016. 10.1063/1.5017182.

### Numerical simulation of projectile water entry in cases of surface seal cavity

WANG Yu-fei<sup>1,2</sup>, YE Bing-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Yi-wei<sup>1,2</sup>, HUANG Chen-guang<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190.
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049.  
Email: wangyufei18@mails.ucas.ac.cn

**Abstract:** Water entry of a 3-D slender projectile with a constant vertical velocity is considered in this passage, we constrain the scope of our investigation to cavity forming stage with surface seal occurs prior to deep seal. A pressure-based compressible multiphase solver with Kunz cavitation model is developed within OpenFOAM® platform. The results analysis indicate the drag coefficient is generally independent with  $Fr$  number, the pressure distribution inside the semi-open cavity is also observed and discussed, obvious pressure drop appear near the cavity entrance and the projectile's shoulder. The average pressure in cavity decreases with time because reduction of air invasion and the volume of cavity increases continuously.

**Key words:** water entry , surface seal, cavity pressure, OpenFOAM®