

高速物体入水过程的数值模拟研究

褚学森¹, 韩文骥¹, 张凌新^{2*}

(1 中国船舶科学研究中心, 无锡, 214082; 2 浙江大学工程力学系, 杭州, 310027)

Email: zhanglingxin@zju.edu.cn)

摘要: 本研究发展了一种可压缩性计算方法对高速物体入水过程进行研究。建模方面, 考虑流场中存在 3 种流体, 分别为空气、水蒸汽和液体水, 其中水蒸汽由液体水蒸发而来。每种流体介质均认为可压缩, 将 3 种流体的状态方程引入控制方程。另外, 物体的移动通过动网格方法实现。对两种不同物体的垂直入水过程进行了数值模拟, 包括小球和平头锥体。模拟结果给出了物体入水空泡形态、诱导冲击波传播过程, 并与一些实验观测进行了对比。

关键词: 入水过程; 压缩性; 激波

1 引言

物体高速入水, 会形成巨大的冲击力和对流场的强烈干扰, 干扰包括水下的冲击波以及细长的空穴生成等。低速时, 空穴一般由空气组成, 而高速时, 除了空气外, 一般也包含水汽化后的水蒸汽。最早的高速入水研究来自于 McMillen^[1]的实验研究, 他通过阴影法记录了小球高速入水的过程以及诱导的冲击波。Hrubes^[2]则进行了水下物体超声速航行实验, 过程中观察到了脱体激波。这些研究表明, 高速入水过程中必需考虑流体的压缩性。

一些工作已对气液两相流的可压缩性计算方法进行了研究。Venkateswaran 等^[3]、Neaves 和 Edwards^[4]采用了一种预处理的算法来考虑两相流体的压缩性。Zhang 等^[5]发展了一种基于压力的算法来处理气液两相流的压缩性。在可压缩的框架下, 一些作者已对高速入水问题进行数值模拟和分析。不过, 当前依然还没有超声速入水的工作报道。

在高速入水过程中, 另一个重要的问题是空化。典型的高速, 比如空气中的超声速, 该速度范围已足以发生空化现象。近年来, 已发展了一些空化模型, 如基于输运方程的 Singhal^[6]、Schnerr-Sauer^[7]空化模型和基于状态方程的空化模型^[8]。相比而言, 基于状态方程的模型考虑的物理因素更为全面, 比较适合高速入水问题的建模。

本研究尝试建立一种适用于高速入水问题的数值计算方法。在建模中, 考虑流场中存

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.11772298) 和国家自然科学基金重点项目 (No.91852204)

在 3 种流体，分别为空气、水蒸汽和液体水，其中水蒸汽由液体水蒸发而来。采用基于输运方程的 Schnerr-Sauer 空化模型来解释液体与水蒸汽之间的相变率。考虑流体的压缩性，引入 3 种流体的状态方程。为了模拟物体运动，网格跟随物体运动，这样网格拓扑结构不需要改变。对两种不同物体的垂直入水过程进行了数值模拟，包括小球和平头锥体。

2 控制方程

控制方程如下：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_m \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_f + \boldsymbol{\tau}_t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_w = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{u}) = \frac{\dot{m}}{\rho_l} \quad (4)$$

其中， \mathbf{u} 和 p 分别为速度和压强， $\boldsymbol{\tau}_f$ 是流体应力， $\boldsymbol{\tau}_t$ 是湍流应力，由 RNG k-epsilon 模型封闭。 α_w 是水相的体积分数，水相包括液体水和水蒸汽，液体水的体积分数由 α_l 表示。方程(4)中， \dot{m} 代表 Schnerr-Sauer 模型的相变率。 ρ_m 为混合流体的密度，由下式计算得到：

$$\rho_m = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_g \quad (5)$$

$$\rho_w = \alpha_l \rho_l + (1 - \alpha_l) \rho_v \quad (6)$$

其中， ρ_g 和 ρ_w 为气相和水相的密度， ρ_l 和 ρ_v 为液体水和水蒸汽的密度。各相的状态方程表示为：

$$\rho_g = \frac{1}{c_g} p \quad (7)$$

$$\rho_l = \frac{1}{c_l^2} p \quad (8)$$

$$\rho_v = \frac{1}{c_v^2} p \quad (9)$$

c_g 、 c_l 和 c_v 分别为三相的声速。

Schnerr-Sauer 空化模型中，相变源项的表达式为：

$$\dot{m} = B \cdot \sqrt[3]{(1 + \alpha_{Nuc} - \alpha_l)^2 [1 - (1 - \alpha_l)(1 - \rho_v / \rho_l)]} \cdot \text{sign}(p - p_v) \sqrt{|p - p_v|} \quad (10)$$

其中， α_{Nuc} 指初始体积分数， p_v 为饱和蒸汽压， B 的表达式为

$$B = 3\rho_v \sqrt[3]{\frac{4n_0\pi}{3}} \sqrt{\frac{2}{3\rho_l}} \quad (11)$$

这里， n_0 为单位体积内的气核数目。

3 结果与讨论

在模拟中，空气声速设定为 340m/s，水中声速设定为 1500m/s。第一个例子为小球入水，小球入水速度为 1073m/s，该速度在空气中为超声速，在水中为亚声速。第二个例子为平头锥体，其入水速度为 1540m/s，该速度在水中为超声速。计算全采用三维模拟，小球入水的网格大约 500 万左右，平头锥体的网格大约 780 万左右。

图 1 给出了小球高速入水的数值模拟结果。随着小球的运动，小球后方形成空泡，由于物体移动速度很快，所以空泡要很长时间才能闭合，我们的计算只给出了入水一段时间内的结果。空泡尾部呈开放状态，同时入水过程导致自由面上方水花喷溅，使得空泡尾部更加的复杂。一道强烈的冲击波在水下生成，呈半球形在水下传播。冲击波的速度快于小球的移动速度，因此冲击波的锋面离小球的距离越来越远，这也是水下亚声速运动的基本特征。在高速运动的小球头部前方，是一个高压区，是小球阻力的主要来源。

图 2 给出了平头锥体超声速入水的数值模拟结果。至今还没有看到超声速入水的实验，唯一可以参考的是 Hrubcs^[2] 在水下进行的超声速实验。对于固定的水中声速，该入水速度换算成马赫数为 1.027。可以看到，物体头部有一道脱体弓形激波，与物体移动速度一致。在亚声速入水过程中，冲击波是远离物体的，而在超声速入水过程中，激波跟随物体运动，

这是超声速运动的基本特征。另外，由于物体是锥形，所以物体尾部与空泡以及流场存在比较显著的相互作用。这种相互作用导致空泡界面不是很光滑，流场中也存在局部激波。图 3 给出了 Hrubes 的实验观测结果，观测到的激波形状、脱体距离等结果均与数值结果较为吻合。

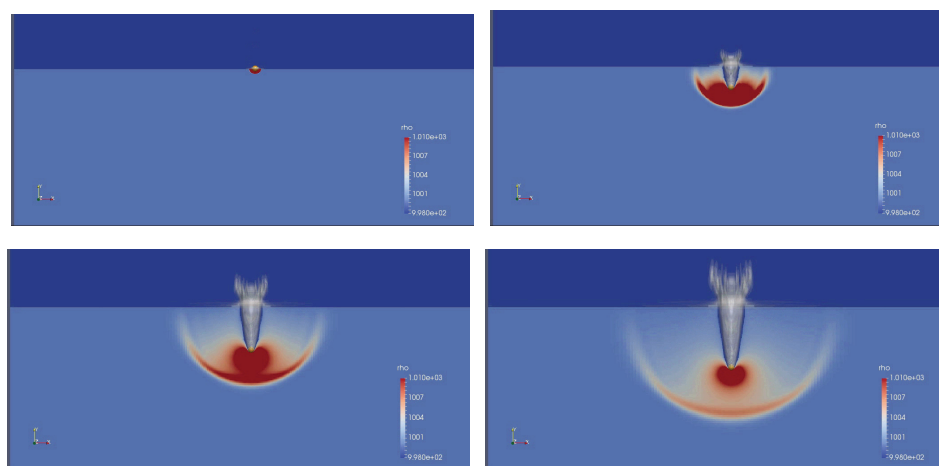


图 1 小球入水过程模拟的密度等值面及密度云图

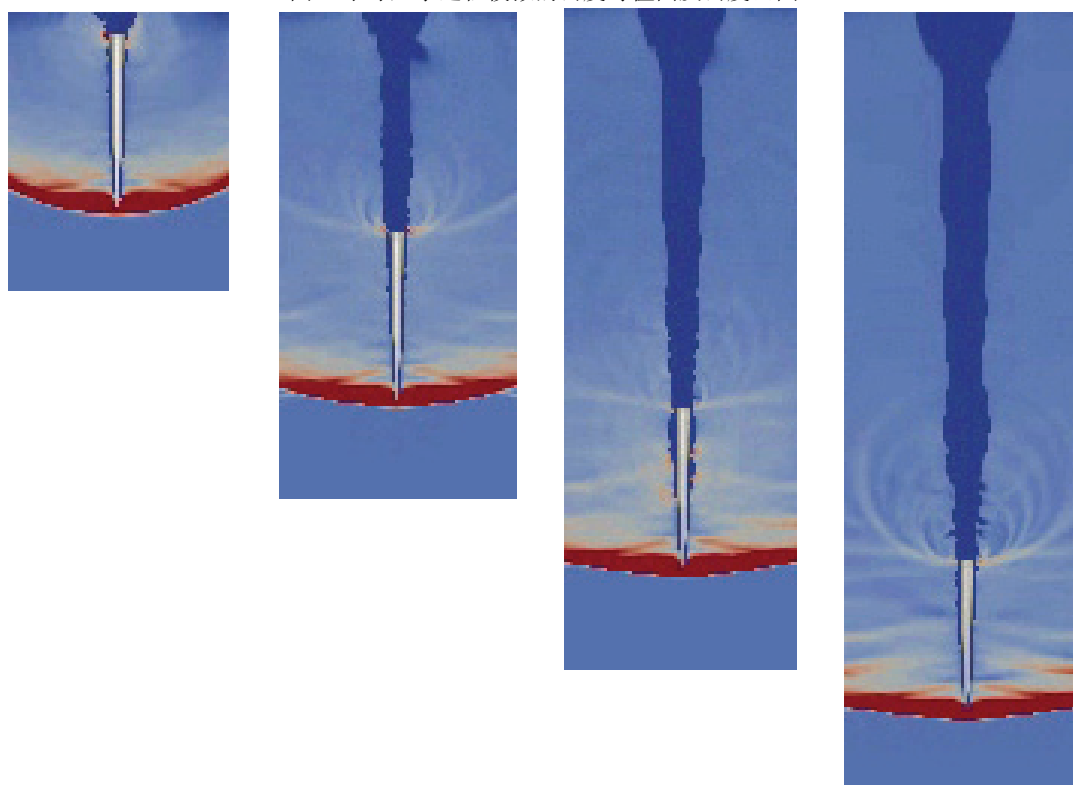


图 2 平头锥体高速入水模拟的压力云图

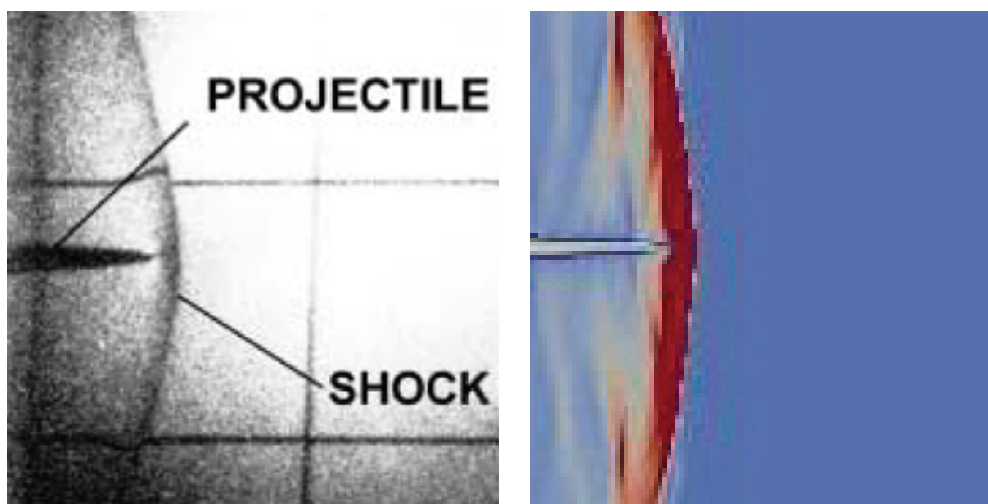


图3 水中的弓形激波, 左图为 Hrubes 的观测^[2], 右图为数值模拟的结果

参 考 文 献

- 1 McMillen JH. Shock wave pressures in water produced by impact of small spheres[J]. Physical Review, 1945, 68:198-209.
- 2 Hrubes JD. High-speed imaging of supercavitating underwater projectiles[J]. Experiments in Fluids, 2001, 30:57-64.
- 3 Venkateswaran S, Lindau JW, Kunz RF, Merkle CL. Computation of multiphase mixture flows with compressibility effects[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 180: 54-77.
- 4 Neaves MD, Edwards JR. All-speed time-accurate underwater projectile calculations using a preconditioning algorithm[J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128:284-296.
- 5 Zhang LX, Khoo BC. Dynamics of unsteady cavitating flow in compressible two-phase fluid[J]. Ocean Engineering, 2014, 87:174-184.
- 6 Singhal AK, Athavale MM, Li HY, Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124:617-624.
- 7 Schnerr GH, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics[C]. Proceeding of 4th International Conference on Multi-phase Flow, New Orleans, USA, 2001.
- 8 Coutier-Delgosha O, Reboud JL, Delannoy Y. Numerical simulation of unsteady cavitating flow[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluid, 2003, 42:527-548.

Numerical study on the water entry of high-speed objects

CHU Xue-sen¹, HAN Wen-ji¹, ZHANG Ling-xin²

(1. China Ship Scientific Research Center, 214082 Wuxi; 2. Department of Mechanics, Zhejiang University, 310027 Hangzhou. Email: zhanglingxin@zju.edu.cn)

Abstract: A compressible multiphase numerical method is developed for the computation of high-speed water-entry. In the modeling, we consider there are three medium in the fluid field, including gas, vapor and liquid in which the vapor comes from the phase change of the liquid. Each medium is regarded as a compressible fluid so that the equations of state of three fluids are involved in the governing equations. In addition, the dynamic mesh method is used to simulate the movement of objects. The motions of two objects, i.e., a sphere and a flat-nose projectile, are simulated. Numerical results of cavity shape and induced pressure waves are presented. Some of the results are compared with the experimental observations.

Key words: Water-entry; Compressible method; Shock wave.