

细长体自然超空泡与燃气射流相互作用的数值模拟

舒畅 宫兆新 刘桦

上海交通大学 水动力学教育部重点实验室

shuchang@sju.edu.cn hliu@sju.edu.cn

研究背景

当水下航行体高速运动时，其周围流场流速会增大，导致航行体肩部等位置的局部压强减小。随着运动速度增大，当壁面压强等于水的饱和蒸汽压时，水会由液相转变为蒸汽，在航行体肩部等位置出现空化现象。通常可依据空泡的长度与航行体长度的相对大小，将空化流动分为空泡封闭于航行体表面的局部空泡和包裹整个航行体的超空泡。有关无动力航行体的自然空泡形状、气液两相流动和水动力学载荷理论、实验和数值模拟研究已得到广泛关注，尽管在发展先进的空泡内部流动测量技术和数值模型等方面仍面临挑战，但有关研究也已在空泡水动力学领域取得进一步成果与进展^[1]。考虑有动力高速水下航行体的流体动力性能时，航行体尾部燃气发动机喷流与自然超空泡的相互作用则成为有待研究的新问题，相关的公开研究成果相对较少，尚需深入认识这类流动机理与流体动力载荷的预示方法

数值方法

基于 RNG k-ε 两方程湍流模型、VOF 多相流模型和自然空化模型，求解连续性方程、动量方程和能量方程，以跟踪气、液、水三相流动中各组分的质量分数变化。连续性方程和动量方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \rho_m \overline{u_i' u_j'} \right] + \rho_m f_i$$

其中： ρ_m 为平均密度， u_i 为脉动速度， p 为压强， f_i 为体力， μ_m 为平均动力粘度。能量方程：

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial (u_i (\rho E + p))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_{j,q} J_{j,q} + (\tau_{ij} u_i) \right) + s$$

其中： k_{eff} 是有效导热系数， J_j 是物质 j 的扩散通量， $h_{j,q}$ 是相 q 中物质 j 的焓， $J_{j,q}$ 是相 q 中物质 j 的扩散通量， s 为自定义体积热源。RNG k-ε 两方程湍流模型方程为：

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_p + S_k$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{2\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon$$

其中： $C_{1\epsilon} = 1.42$, $C_{2\epsilon} = 1.68$ 。 G_k 表示平均速度梯度引起的湍流动能的产生； G_b 是由浮力产生的湍流动能； Y_p 表示可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献； α_k 和 α_ϵ 分别是 k 和 ϵ 有效普朗特数的倒数。

基于 Schnerr-Sauer 空化模型，不考虑空泡生长的加速度、粘性力和表面张力。汽、液两相间单位体积传质速率为：

$$\dot{m} = n_0 \alpha_l 4\pi R^2 \frac{dR}{dt}$$

其中： n_0 为单位体积流体中气核数； R 是气泡半径，满足关系式： $R^3 = \alpha_g / [\frac{4n_0\pi(1-\alpha_g)}{3}]$ 。 dR/dt 可由简化 R-P 方程导出：

$$\frac{dR}{dt} = \pm \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_v}}$$

验证

建立二维轴对称数值仿真模型，再现 Maeda 等^[17]的实验结果，以验证对欠膨胀超音速喷流进行模拟的数值方法。拉瓦尔喷管初始压强为 4atm。模型数值模型的几何参数和流体的物理性质与该实验一致。

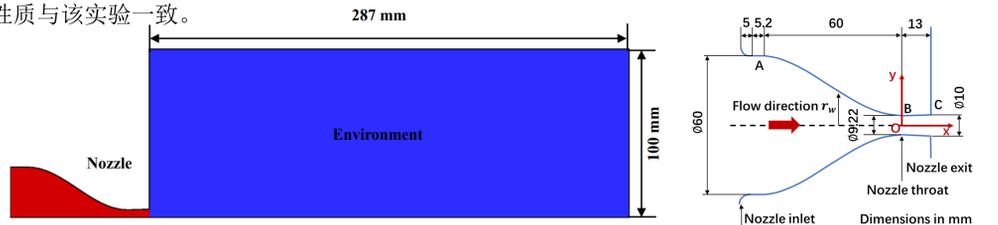


图1 验证算例计算几何图形

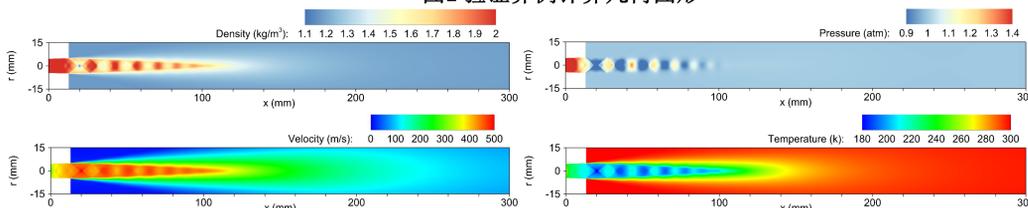


图2 验证算例计算结果

数值方法对捕捉欠膨胀喷流的流动结构分布表现良好。仅在轴线密度最大值的定量捕捉上与 Maeda 等人实验结果存在差异，可清晰准确捕捉欠膨胀喷流的马赫环结构与激波格栅，与 Maeda 等人的实验结果对比良好。

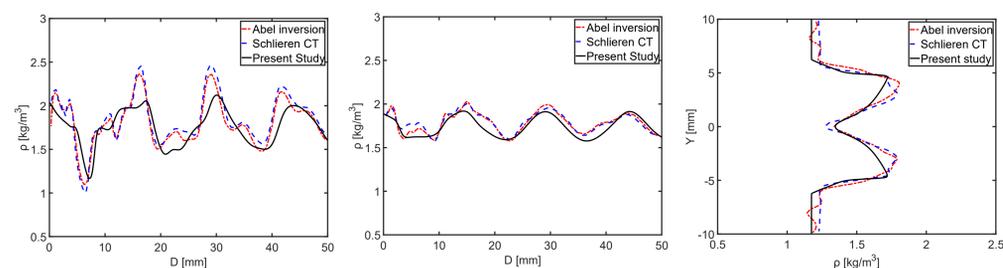


图3 数值模拟结果与实验结果的对比如验证

结论

本文基于商业软件二次开发，采用 RANS 湍流模型、空化模型和 VOF 方法，建立了轴对称航行体尾喷流与超空泡之间的相互作用的数值模型。在应用实验结果验证欠膨胀超音速喷流模拟结果的基础上，数值模拟了狭窄自然超空泡环境、开放蒸汽环境与大气环境中航行体尾喷流与自然空化超空泡之间的相互作用特征。数值结果表明，航行体尾部喷流射出后，喷流气体迅速充满空泡；与超空泡尾部封闭区的回射流相互作用，回射水流被燃气喷流推开扩散到两侧，超空泡尾部溃灭，燃气泡脱落下泄；超空泡迅速坍塌成更小的空泡。这一过程中也伴随着喷流激波结构的剧烈变化。本文的研究工作为进一步考虑热效应的高温高压燃气射流与自然空泡及通气空泡的相互作用数值模拟打下了基础。

[1] WU T Y. Cavity and wake flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1972, 4:243-284.

[2] MAEDA H, FUKUDA H, KUBO K. Structure of underexpanded supersonic jets from axisymmetric laval nozzles[J]. Journal of Flow Visualization & Image Processing, 2018, 25(1):33-46.

结果与讨论

各流体相的物理参数如下左表所示。设计了三组工况（分别为开阔大气、开阔蒸汽与狭窄自然超空泡，如下右表所示。水蒸汽的比热满足分段多项式： $C_p = 1563 + 1.6T - (2.93 \times 10^{-3})T^2 + (3.22 \times 10^{-6})T^3 - (1.16 \times 10^{-9})T^4$ ， T 为温度。

表1 不同环境中的工况设置分类

Case	Environment	Environment Pressure (pascal)
Case 1	Air	101325
Case 2	Vapor	3540
Case 3	uperCavitation	202650

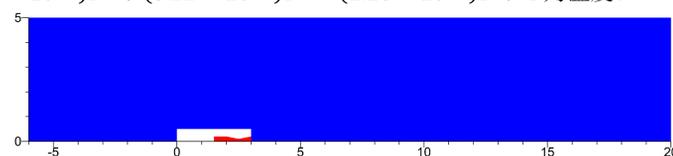


图4 计算域几何外形

航行体尾部发动机喷出的燃气射流将与包裹航行体的自然空化超空泡之间发生剧烈的相互作用。如下左图所示，上半部分显示各相分布，红色为燃气，绿色为蒸汽，蓝色为水，黑线为蒸汽体积分数 0.5 等值线，区分颜色。下半部分显示压强分布，黑线为水体积分数 0.5 等值线，区分空泡壁面。燃气从燃烧室射入超空泡，被吸入头部空泡区域，同时向超空泡尾部扩散。超空泡变为燃气泡，超空泡尾部形成水射流，燃气射流与水射流相互作用，燃气泡溃灭，尾部脱落下泄。如下右图给出流场速度与温度演化。黑线为水体积分数 0.5 等值线，上半部分为速度分布，下半部分为温度。喷流向下游扩散受阻，始终保持在空泡内发育。

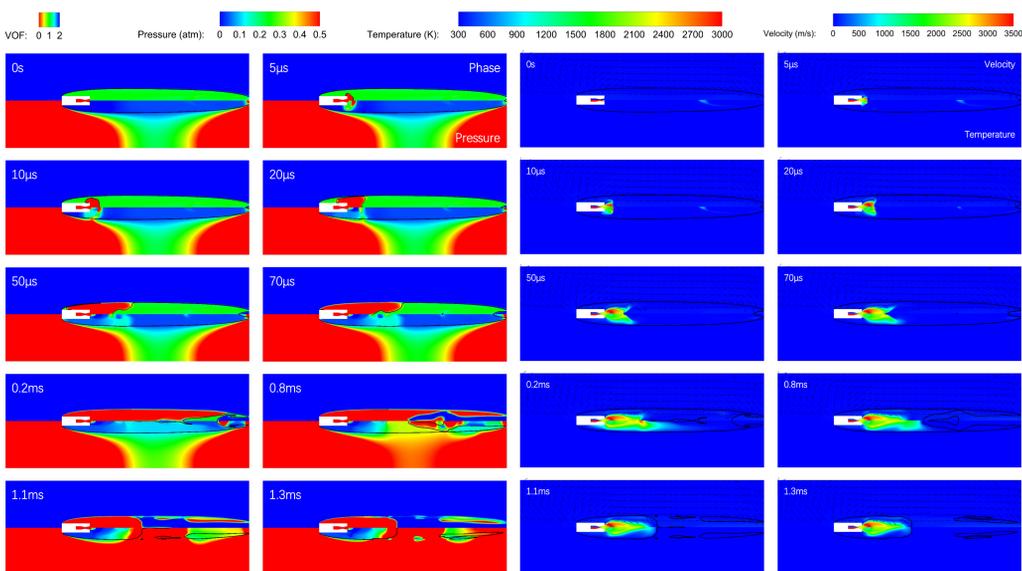


图5 三相、压强、速度及温度分布随时间变化情况

给出泡尾溃灭后泡内流场特征，与大气和蒸汽环境对比，分列上下两侧，如下图所示。超空泡中的喷流影响区域体积大于开放的大气环境，小于蒸汽环境，主要原因系超空泡中环境压强约为饱和蒸汽压，与开放蒸汽环境更为相似，但仍受空泡壁面一定影响。

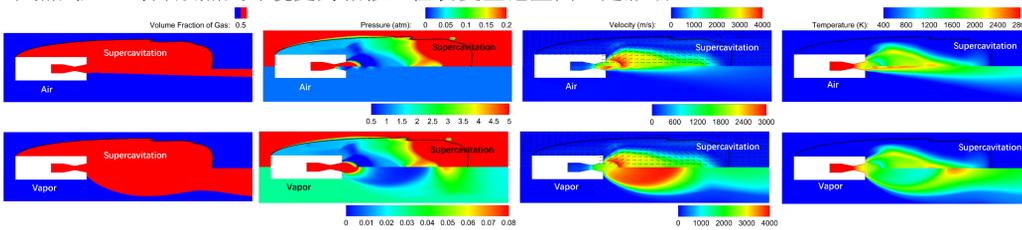


图6 超空泡环境分别与开放蒸汽环境与开放空气环境下的计算结果对比

下图给出初始压强 10atm、温度 3000K 的喷流在超空泡（溃灭后）、蒸汽与空气中各物理量沿轴线变化。原点位于喷管口，蓝线为超空泡环境，红线为开放空气环境，黄线为开放蒸汽环境。超空泡环境下，由于在 $x=5.28$ 处为超空泡壁面，在壁面两侧分别为燃气与水，所以在空泡壁两侧的物理量有着明显不同的特征和变化趋势。空气环境自出口后迅速迎来马赫盘结构，在出口附近，超空泡中射流与蒸汽环境下更为相似，但由于狭窄空泡壁面限制，其下游激波结构更为复杂。

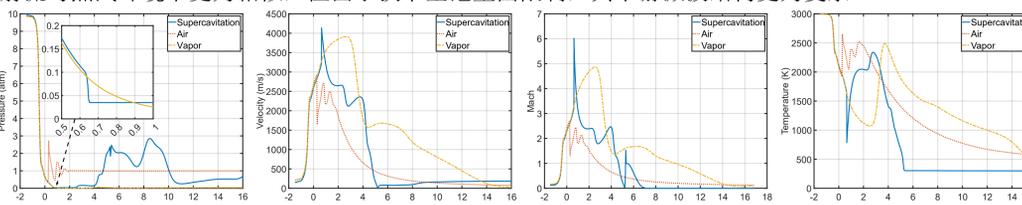


图7 喷流在超空泡、开放蒸汽与开放空气中沿轴线下游计算结果对比