

含相变过程的激光诱导空化泡在固体壁面附近反弹现象的数值模拟研究

尹建勇, 张永学, 张宇宁, 吕良

(中国石油大学(北京)过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京, 102249, Email: jianyongyin@foxmail.com)

摘要: 本研究基于开源计算流体动力学软件 OpenFOAM, 考虑空化泡与液体之间相变过程, 通过采用有限体积方法离散控制方程组, 并利用 PISO 算法求解压力场与速度场的非线性耦合, 同时运用流体体积法追踪相间运动界面, 建立了含相变过程的激光诱导空化泡生长与溃灭过程的数值模型。实验验证结果表明: 相比于不含相变的数值模型, 含相变的数值模型计算的空化泡无论是在空化泡形状还是其演变时间上都与实验结果吻合更好, 验证了该数值模型的可靠性及准确性。当初始条件都相同时(如初始半径、初始压力), 泡内组成为空气的气泡的最大膨胀半径及其演变周期(第一周期)均高于泡内为蒸汽和空气的气泡。然而, 泡内为蒸汽和空气的气泡能够溃灭至更小的半径。

关键词: 空化泡; OpenFOAM; 有限体积法; 相变; 流体体积法

1 引言

空化现象普遍存在于自然界和各种工业领域中, 如水力机械的空化与空蚀^[1]、超声波清洗^[2]、钻井工程中空化射流辅助强化破岩^[3]等, 这些空化现象大都以泡群空化为主, 受空化和湍流的耦合影响, 其物理机制极其复杂, 要深入认识首先需从单空泡动力学研究做起。由于单空泡尺度小(微米级或毫米级), 生长和溃灭过程剧烈, 且常与周围介质和结构相互作用, 溃灭后期会产生压力波^[4], 其复杂变化过程对实验测量和数值模拟提出了巨大的挑战。而气泡在固体壁面附近时, 其动力学过程往往伴随着射流及压力波的产生, 进而产生材料破坏等效应, 因此受到广泛的关注。Philipp 等^[5]对空泡的动力特性及其对固体壁面造成的损伤进行了详细的实验研究, 发现当气泡与固体壁面的距离小于它最大半径 2 倍时(即 $\gamma < 2$, $\gamma = L/R_{\max}$, L 是初始时刻气泡中心距离固体壁面的距离, R_{\max} 是气泡最大半径), 观测

¹ 基金项目: 国家自然科学基金(51606221, 51876220)

到固体表面有损伤。Koch 等^[6]忽略相变及传热过程，基于 OpenFOAM，使用非冷凝气体数值模拟了激光泡溃灭过程，获得了与实验较为吻合的结果。但 Zeng 等^[7]基于 OpenFOAM 分析空化泡射流造成的壁面切应力时发现气泡再次膨胀半径与实验存在较大偏差，他们认为是在气泡内非冷凝气体的缓冲作用造成了能量损失的减少，从而导致气泡再次膨胀半径过大，并给出了通过增大气体绝热指数的方式来耗散过多的能量，但并未对气泡反弹过程中压力场及速度场进行分析。Lee 等^[8]基于实验结果对气泡溃灭期间能量损失进行了修正，使用边界积分法成功模拟了气泡反弹现象，但并未对反弹气泡的形态进行分析。

基于开源的计算流体力学软件 OpenFOAM (版本 4.1)，运用流体体积法 (Volume of Fluid, VOF) 追踪相间的运动界面，考虑气 (汽) 液相间的可压缩性、表面张力、动力黏度等对空泡的影响以及空化泡与液体之间相变过程，着重模拟了固体壁面附近激光诱导空化泡溃灭后再次膨胀过程中的现象及其动态演化过程。

2 计算模型

2.1 控制方程

考虑气 (汽) 液相间的黏性，气泡的表面张力和重力的影响，其连续方程和动量方程分别为：

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

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{g} + \int_{S(t)} \sigma \kappa (\mathbf{x}') \mathbf{n} (\mathbf{x}') \delta (\mathbf{x} - \mathbf{x}') dS' \quad (2)$$

式中： ρ 表示流体的平均密度； \mathbf{U} 为流体流动的速度； p 为压力场； σ 为表面张力系数； \mathbf{g} 为重力加速度； κ 为表面曲率； \mathbf{T} 为黏性应力张量； \mathbf{n} 为界面的法向单位矢量； δ 为狄利克雷函数； $S(t)$ 为交界面； \mathbf{x}' 为交界面上的参考点位置； \mathbf{x} 为求解点空间位置。

实际的空化泡是由小部分的不可凝结气体和大部分的水蒸汽组成的。为便于研究，假设不可凝结气体为空气。因此，液相和气相 (汽) 的体积分数控制方程为：

$$\frac{\partial (\rho_l \alpha_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l \mathbf{U}) = \dot{m} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_v \alpha_v \mathbf{U}) = -\dot{m} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho_g \alpha_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g \mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

式中, \dot{m} 为相变质量转换速率且满足 $\dot{m} = \dot{m}^+ - \dot{m}^-$, \dot{m}^+ 为凝结速率, \dot{m}^- 为蒸发生成速率; α_l , α_v 和 α_g 分别是液相, 水蒸汽相和空气相的体积分数且满足 $\alpha_l + \alpha_v + \alpha_g = 1$; ρ_l , ρ_v 和 ρ_g 分别是液相, 水蒸汽相和空气相的密度且满足 $\alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v + \alpha_g \rho_g = \rho$ 。

采用 VOF 方法追踪相界面的体积分数输运方程 (如液相) 为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\alpha_l \alpha_v (\mathbf{U}_l - \mathbf{U}_v) + \alpha_l \alpha_g (\mathbf{U}_l - \mathbf{U}_g)) = -\frac{\alpha_l}{\rho_l} \left[\frac{D\rho_l}{Dt} \right] (1 - \alpha_l) + \alpha_l (\nabla \cdot \mathbf{U}) \\ + \alpha_l \left[\frac{\alpha_v}{\rho_v} \frac{D\rho_v}{Dt} + \frac{\alpha_g}{\rho_g} \frac{D\rho_g}{Dt} \right] + \dot{m} \left(\frac{1}{\rho_l} - \alpha_l \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, 第三项为人工压缩项, 只作用于界面区域, 目的是抵消界面数值扩散的影响, 由于它的引入, 可以对交界面进行更为精确的追踪。

考虑到气 (汽) 体和液体的可压缩性, 使用理想的状态方程联系密度与压力, 即:

$$\rho = \psi p \quad (7)$$

式中, ψ 为可压缩系数。

2.2 空化模型

Schnerr-Sauer 空化模型是基于气泡动力学的 Rayleigh-Plesset 方程发展而来的空化模型。为了考虑泡内还有少量的空气, 其最终形式的蒸发生成速率和凝结速率^[9]修正为:

$$\dot{m}^- = \frac{3\rho_l \rho_v}{\rho} \alpha_l \max(1 - \alpha_l - \alpha_g, 0) (rR_b) \sqrt{\frac{2}{3\rho_l (|p - p_v| + 0.001p_v)}} \min(p - p_v, 0) \quad (8)$$

$$\dot{m}^+ = \frac{3\rho_l \rho_v}{\rho} \alpha_l \max(1 - \alpha_l - \alpha_g, 0) (rR_b) \sqrt{\frac{2}{3\rho_l (|p - p_v| + 0.001p_v)}} \max(p - p_v, 0) \quad (9)$$

$$rR_b = \left(\frac{4\pi n \alpha_l}{3(\max(1 - \alpha_l - \alpha_g, 0) + \alpha_{Nuc})} \right)^{1/3} \quad (10)$$

$$\alpha_{Nuc} = \frac{n\pi (d_{Nuc})^3}{6 + n\pi (d_{Nuc})^3} \quad (11)$$

式中: p_v 为饱和蒸汽压力; rR_b 为空化核半径的倒数; n 为液相中的空泡数目; α_{Nuc} 为成核部位的体积分数。

3 结果分析

图 2 展示了气泡半径随时间变化的数值模拟结果和实验测量结果。实验中, 气泡由脉冲激光生成 (波长 532 nm, 持续时间 6 μs , 激光能量 10 mJ), 使用高速相机记录气泡的生长与溃灭过程, 实验中所使用的拍摄速度为 100000 帧/s, 曝光时间为 1 μs 。初始气泡中心距离壁面的距离为 2.0 mm, 气泡最大膨胀半径为 0.81 mm。数值模拟中, 初始气泡半径均为 0.072 mm, 气泡初始压力均为 5×10^7 Pa, 初始气泡中心距离壁面距离与实验值相同 (如图 1 红色区域所示)。另外, 对于气泡组成为蒸汽和空气的数值模拟, 初始气泡内蒸汽与空气的体积比为 10:1。正如图 2 所示, 当初始条件都相同时 (如初始半径、初始压力), 泡内组成完全是空气的气泡的最大膨胀半径及其演变周期 (第一周期) 均高于泡内为蒸汽和空气的气泡。然而, 泡内为蒸汽和空气的气泡能够溃灭至更小的半径。此外, 泡内为蒸汽和空气的气泡模拟结果在气泡第一周期及其反弹膨胀阶段与实验的结果吻合良好。图 3 细节地展示了特定时刻下模拟气泡与实验气泡形态的比较。正如图 3 所示, 实验中气泡反弹阶段形成的细长射流尾迹能通过数值模拟的方式准确地预测出。

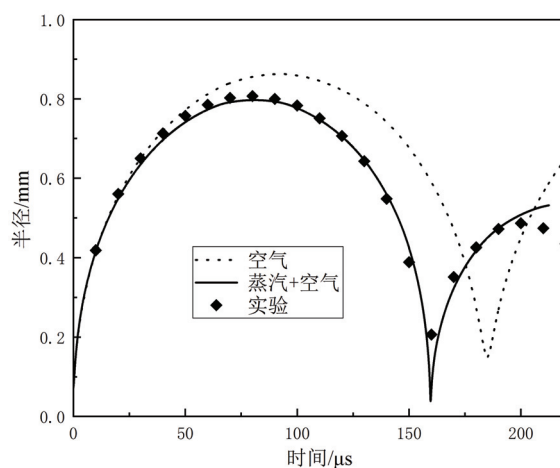


图 2 数值模拟与实验气泡当量半径比

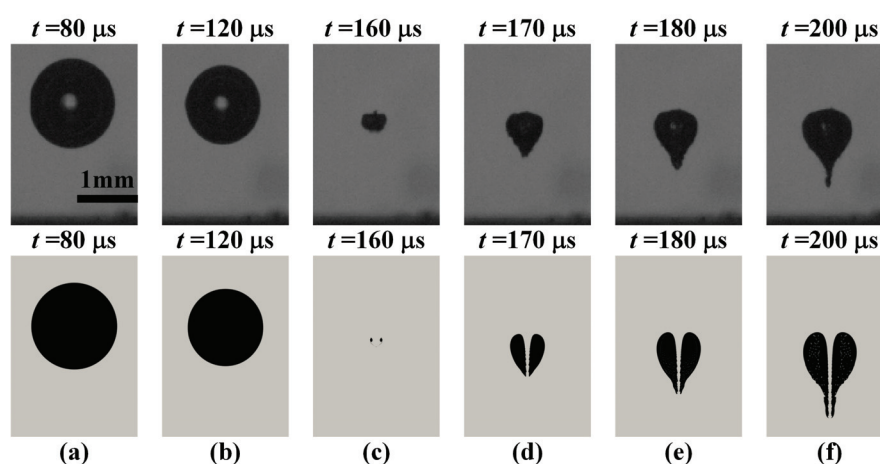


图 3 数值模拟与实验图像比较（实验与模拟每帧大小均为 $2.35 \text{ mm} \times 3.31 \text{ mm}$ ）

4 结论

基于 OpenFOAM 平台，运用 VOF 方法追踪相间的运动界面，并着重考虑相变过程对气泡变化的影响，对激光诱导空化泡在固体壁面附近反弹现象进行数值模拟研究。并和已做的实验数据进行对比，验证了数值模拟的正确性和可靠性。通过数值模拟的方法，准确地捕捉到气泡反弹过程中细长的射流尾迹。当初始条件都相同时（如初始半径、初始压力），泡内组成完全是空气的气泡的最大膨胀半径及其演变周期（第一周期）均高于泡内为蒸汽和空气的气泡。然而，泡内为蒸汽和空气的气泡能够溃灭至更小的半径。

参 考 文 献

- 1 Shengcai L 2006 Cavitation enhancement of silt erosion—an envisaged micro model [J]. *Wear*, 260 1145-1150
- 2 Chahine G L, Kapahi A, Choi J K, et al. Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse [J]. *Ultrasonics - Sonochemistry*, 2015, 29:528-549.
- 3 李根生, 沈忠厚, 李在胜, 等. 自振空化射流提高钻井速度的可行性研究 [J]. *石油钻探技术*, 2004, 32(3):1-4.
- 4 Wang Q. Multi-oscillations of a bubble in a compressible liquid near a rigid boundary [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 745(4):509-536.
- 5 Philipp A, Lauterborn W. Cavitation erosion by single laser-produced bubbles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 361: 75-116.

- 6 Koch M, Lechner C, Reuter F, et al. Numerical modeling of laser generated cavitation bubbles with the finite volume and volume of fluid method, using OpenFOAM [J]. Computers & Fluids, 2016, 126(3):71-90.
- 7 Zeng Q, Gonzalez-Avila S R, Dijkink R, et al. Wall shear stress from jetting cavitation bubbles [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 846:341-355.
- 8 Lee M, Klaseboer E, Khoo B C. On the boundary integral method for the rebounding bubble [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 570(570):407-429.
- 9 Yu H, Goldsworthy L, Brandner P A, et al. Development of a compressible multiphase cavitation approach for diesel spray modelling[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017, 45: 705-727.

Numerical simulation of the rebound of the laser generated bubble near the solid wall considering phase change

YIN Jian-yong, ZHANG Yong-xue, ZHANG Yu-ning, LYN Liang

(Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, China University of Petroleum, Beijing

102249, Email: jianyongyin@foxmail.com)

Abstract: Based on open source software OpenFOAM, the phase change is considered. The finite volume method is applied for discretization the governing equations and velocity-pressure coupling is solved by PISO algorithm. Meanwhile, the volume of fluid method is established to track the movement of the gas-liquid interface. A numerical simulation model of a laser induced cavitation bubble with phase change near the solid wall is established. Compared with the model without phase change, the numerical results with phase change agree well with the experimental data, including the bubble shape and the bubble growth and collapse time (the first cycle time), which demonstrates the correctness and reliability of the model. The simulation also shows that when the initial conditions are the same (e.g., the initial radius and pressure), the maximum bubble radius and the first cycle time predicted by the model without phase change are higher than that predicted by the model with phase change. While, the collapse radius predicted by the model with phase change is smaller.

Key words: Cavitation bubbles; OpenFOAM; the Finite Volume Method; phase change; the volume of fluid method.