

近壁空泡溃灭及能量传输机制

张靖, 邵雪明, 张凌新

(浙江大学工程力学系, 杭州, 310027, Email:zhanglingxin@zju.edu.cn)

摘要: 本文通过直接数值模拟方法研究了近壁空泡溃灭的动力学特征。建模中, 考虑了两相黏性、压缩性以及界面的表面张力, 采用流体体积法 (VOF) 对气液界面进行捕捉。在数值模拟的基础上, 定义了 3 种能量来描述空泡流场特征, 分别为空泡势能、流场中的总动能以及压力波能。研究发现: 溃灭完成前, 气泡势能全部转化为流场中的动能; 溃灭完成瞬间, 部分动能转化为压力波能。

关键词: 空泡; 溃灭; 压力波; 能量

1 引言

Rayleigh 在 20 世纪初对空泡运动问题进行了分析, 建立了不可压缩流中理想球形气泡运动的理论。后来为了进一步考虑流体黏性、表面张力和可压缩性等因素, Plesset 以及 Noltingk 等学者从不同方面发展了 Rayleigh 的气泡运动方程, 其中影响比较广泛的是考虑了黏性和表面张力的 Rayleigh-Plesset 方程^[1-2]。球泡模型常被直接应用于研究空化初生、溃灭及噪声等问题。

然而在空泡溃灭过程中气泡并不总是保持球形。非球形气泡首先在实验研究中被发现, 经过多年的发展, 这个领域的研究已经在技术手段、现象揭示等方面取得了积极的进展。Lauterborn 等^[3] 以及 Tomita 等^[4]通过激光诱导空泡进行了一系列的实验, 分析了单个空泡溃灭的射流形态、近壁泡的距离对射流的影响。Ida 等^[5]利用核磁成像技术显示了液态汞内多泡的生长过程, 分析了泡-泡相互作用对空泡生长率的影响。数值模拟方面, Johnsen 等^[6]以及 Tian 等^[7]研究了单泡在无界和近壁流场中的溃灭过程, 对空泡形态演化、诱导射流等问题进行了分析。Fortes-Patella 等^[8]引入了压力波能的概念, 分析了单泡溃灭中的波能转换率。Annaland 等^[9]采用 VOF 方法模拟了两个泡的运动, 分析了泡-泡间的相互作用。

鉴于气泡溃灭壁面冲击机理尚不清晰, 本文尝试对近壁空泡溃灭问题进行细致模拟和分析, 在获得速度、压力场的演化过程的基础上, 建立空泡溃灭流场中的能量概念, 分析能量在空泡演化过程中的变化趋势以及传输机制。

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)

2 控制方程

控制方程如下：

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

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

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

其中， \mathbf{u} 和 p 分别为速度和压强， $\boldsymbol{\tau}_f$ 是流体应力， σ 为表面张力系数， k 为表面曲率， \mathbf{N} 是表面法线方向。 α 是水相的体积分数， ρ_m 为混合流体的密度，由下式计算得到：

$$\rho_m = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

其中， ρ_1 和 ρ_2 为水相和汽相的密度。为了考虑压力波的传播，引入液相的状态方程：

$$\rho_1 = \rho_{10} + \frac{1}{c_1^2} p \quad (5)$$

c_1 为水的声速。为了模拟蒸汽泡的行为，汽泡采用恒压模型。

3 结果与讨论

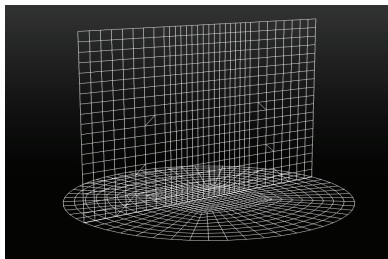


图 1 计算域及网格示意图

计算采用一个柱形计算域，如图 1 所示，直径 50mm，高 50mm。底部为壁面边界，其余为压力边界条件。初始时刻，流场静止，液体中压强为 1 个大气压，汽泡内压强为 3154Pa。初始汽泡为球形，半径 2mm。定义无量纲距离 γ ，为汽泡中心距壁面的距离除以汽泡半径。首先在无界流场中对网格精度进行了验证。图 2 给出了不同网格精度下的汽泡半径演化结

果，结果显示，当一个汽泡直径方向上分布 30 个网格时，结果达到了较高精度。

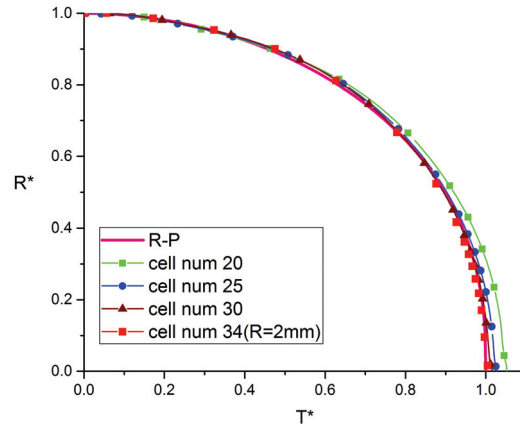


图 2 汽泡无量纲半径随时间的变化，时间轴由 Rayleigh 时间无量纲化。

定义了三个能量，分别为空泡势能、流场动能以及压力波能，它们的表达式如下所示：

$$E_{po} = \frac{4}{3} \pi R^3 \Delta p, \quad E_k = \int \frac{1}{2} \rho U^2 dV, \quad E_{wave} = \int \frac{\Delta p^2}{(\rho c_1)^2} dV \quad (6)$$

压力波能与空泡起始势能的比率可以写为：

$$\eta = \frac{E_{wave}}{E_{po-max}} \quad (7)$$

图 3 给出了近壁距离 12.5 以及近壁距离 1.5 的能量变化图。从图 3 中可以看出，初始势能最大，随着汽泡的溃灭，势能减小，动能增大。在汽泡溃灭前，势能全部转化为动能。汽泡溃灭瞬间，动能快速下降，波能快速上升，部分动能转化为了波能。当汽泡近壁距离比较远时，最大波能要更为显著一些，而近壁距离小时，转化的波能要弱一些。与此相关联的，波能强的情况，动能下降要快一些，波能弱的情况，动能下降要慢一些。

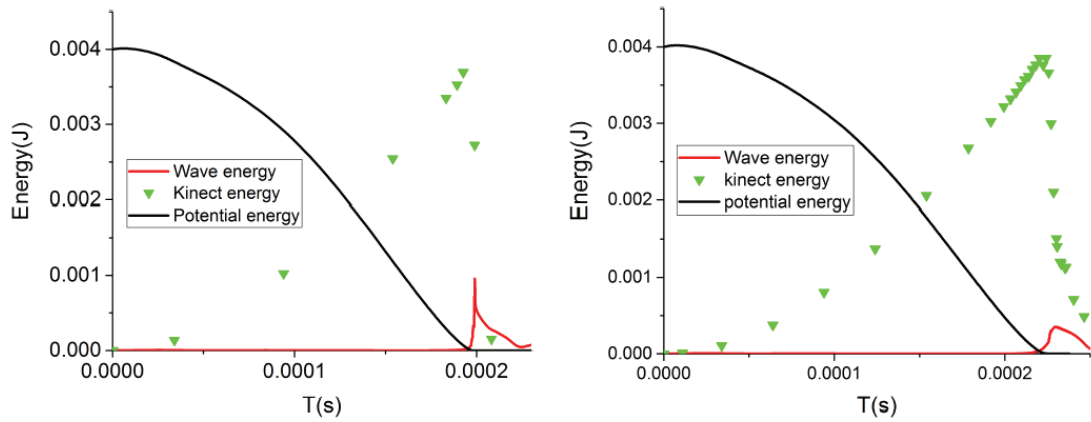


图3 流场中能量的变化，左图为近壁距离 12.5 的结果，右图为近壁距离 1.5 的结果。

表 1 不同近壁距离下的最大能量及波能转化率

γ	E_k (mJ)	E_{wave} (μ J)	η (%)
1.5	3.94	352.2	10.73
1.65	3.90	418.1	12.74
1.85	3.97	543.8	16.57
2.0	3.94	564.2	17.19
2.5	4.08	608.8	18.55
3.0	3.95	579.3	17.65
3.5	4.01	630.1	19.20
4.0	4.10	620.6	18.91
12.5	4.36	961.3	29.29

表 1 给出了不同近壁距离下的最大动能、最大波能以及波能转化率。可以看出，随着近壁距离的减小，动能变化不大，而转化的波能却有相当大的变化，体现在波能转化率上，大致从无界流场的 30%转化率，变化到近壁工况下的 10%转化率。结合动能的演变过程可以发现，在气泡近壁距离比较小的情况下，气泡会发生凹形变形以及诱导射流，这一部分能量体现在动能中。波能不是壁面冲击的唯一来源，相反，离壁面近的时候，波能转化率反而更小，所以需要进一步对射流动能进行更为细致的分析。

参 考 文 献

- 1 戚定满, 鲁传敬, 何友声. 空泡溃灭及空化噪声研究综述. 上海力学, 1999, 20:1-9.
- 2 Brennen CE. Cavitation and bubble dynamics. Oxford University Press, 1995.

- 3 Lauterborn W, Bolle H. Experimental investigations of cavitation-bubble in the neighborhood of a solid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 72:391-399.
- 4 Tomita Y, Robinson PB, Tong RP, et al.. Growth and collapse of cavitation bubbles near a curved rigid boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 466:259-283.
- 5 Ida M. Direct observation and theoretical study of cavitation bubbles in liquid mercury. *Physical Review E*, 2007, 75:046304.
- 6 Johnsen E, Colonius T. Numerical simulations of non-spherical bubble collapse. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 629:231-262.
- 7 Tian WX, Qiu SZ, Su GH, et al. Numerical solution on spherical vacuum bubble collapse using MPS method. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2010, 132:102920.
- 8 Fortes-Patella R, Challier G, Reboud JL, et al. Energy Balance in Cavitation Erosion: From Bubble Collapse to Indentation of Material Surface. *J. Fluids Eng.*, 2014, 135:011303.
- 9 Annaland M, Deen NG, Kuipers JAM. Numerical simulation of gas bubbles behavior using a three-dimensional volume of fluid method. *Chemical Engi. Science*, 2005, 60:2999-3011.

The collapse of a bubble near a wall and the mechanism of energy conversion

ZHANG Jing, SHAO Xue-ming, ZHANG Ling-xin

(Department of Mechanics, Zhejiang University, 310027 Hangzhou. Email: zhanglingxin@zju.edu.cn)

Abstract: The collapse of a bubble near a wall is investigated by using the direct numerical simulation method. We consider the viscosities, compressibility and the surface tension force in the modeling and capture the interface using the VOF method. Based on the simulation results, we further define and analyze three concepts of energy, including potential energy, kinetic energy and wave energy. The results show that the potential energy completely converts into the kinetic energy before the collapse, and then following the collapse, a part of the kinetic energy converts into the wave energy.

Key words: Cavitation bubble; Collapse; Pressure wave; Energy.