

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.002

基于VOF的蒸汽泡溃灭过程数值研究*

刘 兰,张凌新*

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对蒸汽泡在外界压力作用下溃灭的问题,基于OpenFOAM平台对单个三维纯蒸汽泡在外界压力驱动下溃灭及回弹的动态变化过程进行了数值模拟研究;提出了一种运用流体体积(VOF)方法追踪相间的运动界面,并考虑表面张力、粘度和汽液两相的可压缩性,采用汽液相变模型模拟蒸发和冷凝等相变过程的计算方法,通过蒸汽泡与气体泡的结果对照得到了蒸汽泡溃灭的一系列特征。研究表明,该计算方法能有效模拟蒸汽泡的溃灭过程,捕捉到高温高压现象。在第一次溃灭过程中,蒸汽泡、气体泡半径变化与解析解保持一致,但蒸汽泡溃灭达到的最小半径则远小于气体泡,蒸汽泡中心点处压强远大于气体泡;在回弹阶段,蒸汽泡只回弹到了初始半径的25%左右,而气体泡回弹半径几乎与初始半径相同。

关键词: 蒸汽泡;相变模型;直接数值模拟;流体体积法

中图分类号: O351; TH113 文献标志码: A

文章编号:1001-4551(2015)04-0447-06

Numerical study on the vapor bubble collapsing based on VOF method

LIU Lan, ZHANG Ling-xin

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Department of Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at investigating the problem of vapor bubble collapse under the effect of outer pressure, the dynamic process of a single 3D pure vapor bubble collapsing and rebounding driven by outer pressure was numerically simulated basing on OpenFOAM platform, considering the effects of surface tension, viscosity and compressibility of both vapor and liquid phases. A computational method was proposed, using the volume of fluid (VOF) method to track the dynamic phase interface and the vapor-fluid phase change model to emulate the phenomena of evaporation and condensation and considering the effects of surface tension, viscosity and compressibility of both liquid and vapor phases. A series of significant features of vapor bubble collapsing was obtained by comparing the simulation results with those of gas bubble. The results indicate that this computational method is quite effective in vapor bubble collapse simulation and can successfully capture the high temperature and high pressure phenomena. And the radius evolution process of vapor bubble during the first-stage collapse is in good agreement with analytical solution, which is quite the same with the gas bubble case, but the minimum radius a vapor bubble can reach is much smaller than a gas bubble and the central pressure of it can be much higher. Besides, The radius of vapor bubble is found to reach only about 25% of the initial radius during its first rebound, while the gas bubble's reaches almost the initial radius.

Key words: vapor bubble; phase transformation model; direct numerical simulation; volume of fluid (VOF) method

收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(11272284);国家自然科学基金重点资助项目(11332009)

作者简介: 刘 兰(1990-),女,湖南永州人,主要从事多相流及流体机械相关问题方面的研究. E-mail:21224015@zju.edu.cn

通信联系人: 张凌新,男,副教授,博士生导师. E-mail:zhanglingxin@zju.edu.cn

0 引 言

空化现象普遍存在于自然界和各种工业领域中,水力机械、高速涵洞、水翼、舵、水中兵器等都会遇到空化问题。空化过程中,空泡急速产生、扩张和溃灭,在液体中形成激波或高速微射流。金属材料受到冲击后,对材料产生强烈的剥蚀作用,致使机械效率降低,并产生振动和噪声。人们对空化现象的认识和研究,至今已有一百多年的历史。空化现象极其复杂,由于空泡尺度小,生长、溃灭过程剧烈,寿命短,同时泡界面处有热、质量交换(蒸发、凝结)、溃灭后期还会产生压力波(冲击波),至今对空化流动特性以及作用机理仍缺乏足够的认识。不少学者致力于空化方面的研究,以期进一步提高对空化机理的认识,寻求避免产生空化的规律和方法。

对空化问题的研究,目前主要有3种方法:实验研究法、理论研究法和数值模拟法。

在实验研究方面,2009~2010年间,Quinto-Su等^[1-4]用单束激光产生多个空泡,研究了泡泡间的相互作用;2013年,Dular等^[5]用刹管法产生空泡,首次直接测量得到了空泡溃灭的热力学效应,为空泡机理研究提供了直观的现象、数据支持。但实验研究也存在一定局限性,由于使用设备与实验条件的限制,很多流场信息无法获得。

在理论研究方面,1917年,Rayleigh在研究单个空泡在无限流场中的溃灭过程时,推导出空泡的运动方程,Plesset考虑了液体的粘度和空泡的表面张力,给出了Rayleigh-Plesset方程;1974~1976年,Nigmatuliu等^[6-8]结合连续性方程、热流方程,引入热力学作用、相变作用,计算了单个泡的振荡、溃灭过程;2009年,Chahine等^[9]考虑周围介质的可压缩性和压力场的非均匀性,提出了修正的Rayleigh-Plesset-Keller-Herring公式;2011年,Fuster等^[10]根据势流假设,提出了考虑流体压缩性与泡泡间相互作用的类R-P方程。

总体来说,关于泡及泡群的理论研究主要在于考虑更复杂情况下的Rayleigh-Plesset方程的修正,但不少修正的R-P方程无法获得解析解。

在数值模拟方面,目前主要有等效均匀连续介质模型、欧拉-拉格朗日模型、欧拉两相流模型等等,随着计算机技术的发展和计算能力的提升,数值模拟单个泡、少数几个泡到成百上千个泡组成的泡群都取得了很大进展。2011年,Fuster等采用欧拉-拉格朗日模型,计算了4个泡、8个泡到二维椭圆空泡云、圆柱状空泡云遭受正弦压力波的情况,获得了泡平均半径及压

力随时间的变化。而运用欧拉两相流模型,如何实现气液界面捕捉十分重要。目前,界面捕捉方法主要包括Level-set和VOF方法^[11]。2012年,Lauer等^[12]运用Level-set方法,提出了考虑水蒸汽相变过程的控制方程,对近壁面的球形泡和椭球形泡溃灭进行了计算,获得了速度场、温度场、压力场的详细云图。Level-se方法概念简单,易于实施,但在计算大变形或复杂涡流场时,计算精度受限制,对于界面处存在相变情况,控制方程需要修正。VOF方法采用质量守恒格式,无需进行质量修正,但需进行界面重构^[13]。

本研究将基于欧拉两相流模型,运用VOF方法追踪相间的运动界面,考虑汽液两相的可压缩性,用汽液相变模型模拟相间的蒸发和冷凝现象,模拟蒸汽泡的溃灭过程,给出一个数值模拟得到的压力场、温度场结果;同时关注蒸汽泡溃灭过程与气体泡溃灭过程,并进行比较。

1 控制方程

空泡形态的变化采用VOF方法进行捕捉,该方法通过一个标量的输运方程来描述各相的体积分数 α ,各相流体的体积分数之等于1,即:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (1)$$

式中:下标1,2—液相和汽相。

液相和汽相的体积分数控制方程为:

$$\frac{\partial(\alpha_1 \rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 \mathbf{U}) = \dot{m} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_2 \rho_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \mathbf{U}) = -\dot{m} \quad (3)$$

考虑液体粘性、气泡表面张力,忽略重力,空泡流场的控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \mathbf{D}) - \frac{2}{3} \nabla (\mu \nabla \cdot \mathbf{U}) + \sigma \kappa \mathbf{n} \quad (5)$$

式中: ρ , μ —两相流的密度和粘度; D —应变率张量, $D = [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] / 2$; σ —表面张力系数; κ —表面曲率; \mathbf{n} —界面的单位法向量。

其中:

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (7)$$

另外,补充能量方程,以描述流体的温度变化:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (8)$$

式中: h , k —两相流的比焓和热导率; S_h —容积发

热率。

其中:

$$h = \alpha_1 h_1 + \alpha_2 h_2 \quad (9)$$

$$k = \alpha_1 k_1 + \alpha_2 k_2 \quad (10)$$

$$h_1 = C_{p1} T, h_2 = C_{p2} T \quad (11)$$

$$S_h = \begin{cases} \dot{m}L & \text{凝结} \\ -\dot{m}L & \text{蒸发} \end{cases} \quad (12)$$

式中: C_p —一定压比热容; L —汽化潜热, kJ/kg。

采用刘暉等^[14]拟合的汽化潜热公式:

$$L = a(1 - T_r)^b e^{ct} \quad (13)$$

其中, $T_r = T/T_{cr}$, $T_{cr} = 647.096$ K (水的临界温度),

$a = 2\ 931.081\ 4$, $b = 0.396\ 927\ 88$, $c = 0.141\ 155\ 97$ 。

考虑到液体和气体的可压缩,需要将水的状态方程 $dp = c^2 dp$ (Comander & Prosperetti^[15])和理想气体的状态方程 $p = \rho R_g T$ 加入模型中:

$$\rho_1 = \psi_1 p \quad (14)$$

$$\rho_2 = \psi_2 p \quad (15)$$

目前仍缺乏准确的汽液相变模型,无法准确模拟相间的蒸发和冷凝现象,在已有的相变模型中, Lee^[16]提出的模型得到了最广泛的应用。参考该相变模型,本研究提出以下形式的相变模型,相变率 \dot{m} 的表达式为:

$$\dot{m} = \begin{cases} K_1 \alpha_2 (p - p_{\text{sat}}) & (p - p_{\text{sat}}) \geq 0 \\ K_2 \alpha_1 (p - p_{\text{sat}}) & (p - p_{\text{sat}}) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: K_1 , K_2 —控制相变强度的因子,针对不同问题该变量具有不同的取值。

相变只发生在两相界面处。Hertz-Knudsen-Langmuir 理论提出,当汽-液相界面温度超过临界点 ($T_{cr} = 647.096$ K, $p_{cr} = 22.064$ MPa),水蒸汽和水之间的质量转换停止。

饱和气体压力 p_{sat} 只与温度有关,本研究采用 August-Roche-Magnus 公式求解:

$$p_{\text{sat}} = 610.94 \exp\left(\frac{17.625(T - 273.15)}{T - 30.11}\right) \quad (T \text{ in Kelvin}) \quad (17)$$

2 数值方法

在 OpenFOAM 平台下,开发了基于隐式压力修正方程的计算方法。该方法采用 PISO 算法思想,其中,压力速度通过耦合求解得到。

由公式(2,3,14,15)可得:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = -\left(\frac{\alpha_1 \psi_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_2 \psi_2}{\rho_2}\right) \frac{Dp}{Dt} + \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) \dot{m} \quad (18)$$

对耦合问题迭代的本质就是修正。本研究首先获得离散后的速度代数方程,利用速度代数方程的系

数,建立压力方程,并进一步离散化求解。定义系数对角矩阵 \mathbf{a}_d 、系数非对角矩阵 \mathbf{a}_n 和关于速度相关项离散得到的源项 \mathbf{b} ,由动量方程(5)可得到:

$$\mathbf{U} = \frac{H(\mathbf{U})}{\mathbf{a}_d} - \frac{1}{\mathbf{a}_d} \nabla p \quad (19)$$

其中: $H(\mathbf{U}) = \mathbf{b} - \mathbf{a}_n \mathbf{U} + \sigma \kappa \mathbf{n}$ 。

定义方程(19)右边与压力无关的项 $H(\mathbf{U})/\mathbf{a}_d$ 为中间速度 \mathbf{U}^* ,该项不需要压力对其修正,可根据预估压力场求解得到。将式(19)代入式(18),得到压力方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U}^* - \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mathbf{a}_d} \nabla p\right) = -\left(\frac{\alpha_1 \psi_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_2 \psi_2}{\rho_2}\right) \frac{Dp}{Dt} + \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) \dot{m} \quad (20)$$

因此,压力速度的耦合过程如下:

- (1) 求解液相体积分控制方程(2);
- (2) 根据动量方程(5)和预估压力场,计算中间速度 \mathbf{U}^* ;
- (3) 根据能量方程(8)和中间速度场 \mathbf{U}^* 、预估压力场,求解温度场和饱和压力场 p_{sat} ;
- (4) 根据中间速度场 \mathbf{U}^* 迭代求解压力场(20),得到压力场 p ;
- (5) 将得到的压力场代入式(19)修正速度,对速度场更新;
- (6) 根据新的压力更新两相密度;
- (7) 循环(2)~(6),直到压力速度场迭代收敛;
- (8) 进入下一时间步。

方程组的离散采用有限体积法,一阶时间导数采用 Euler 隐式格式,梯度项采用高斯积分的线性离散格式(Gauss linear),拉普拉斯算子采用高斯积分的线性限制性非正交修正离散格式(Gauss linear limited 0.5),对流项采用高斯积分的一阶迎风离散格式(Gauss upwind)。

3 单泡溃灭过程验证

空泡的尺寸可以从几毫米到几十毫米,本研究数值计算的单个球形泡的初始半径为 7.5 mm。为了消除计算域边界对空泡溃灭运动的影响(符合无界流场计算条件),笔者选取的计算区域为边长 0.1 m 的立方体,将计算的空泡置于立方体的中心。整个计算域的网格为正交网格,并在距离泡中心 10 mm 的区域内进行网格了加密。计算域的边界条件设为固定压力,值为 10^5 Pa,气泡内的初始压力设为 298.15 K 的饱和蒸汽压 3 169 Pa,整个区域的初始速度为 0,初始温度为 298.15 K。

整个三维计算区域及其网格划分如图 1 所示。

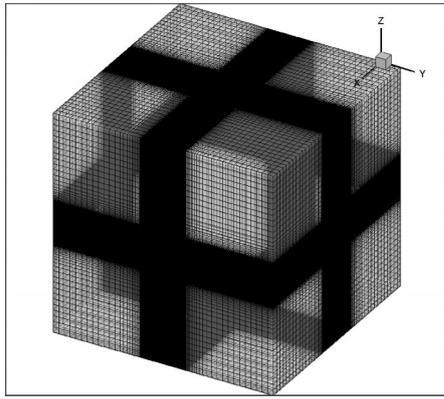


图1 计算域及网格示意图

本研究采用3套网格分别对单个蒸汽泡的溃灭过程进行数值计算,最小网格大小分别为 $\Delta x_{\min} = 0.375$ mm, 0.25 mm, 0.166 7 mm。笔者将3套网格下蒸汽泡溃灭的直接数值模拟结果与单泡溃灭的 Rayleigh 方程解析解对比,对比情况如图2所示。半径与时间分别采用初始气泡体积 R_0 和 Rayleigh 溃灭时间 $t_c \approx 0.921R_0 \sqrt{\rho_l / (p_\infty - p_0)}$ 无量纲化。

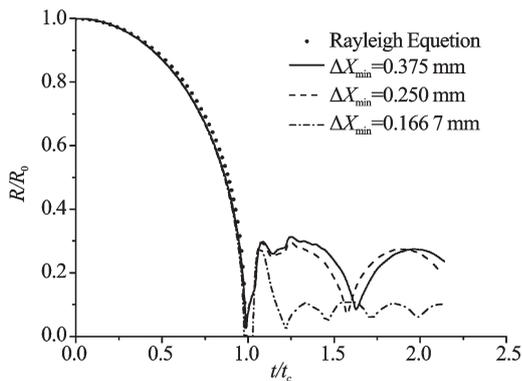


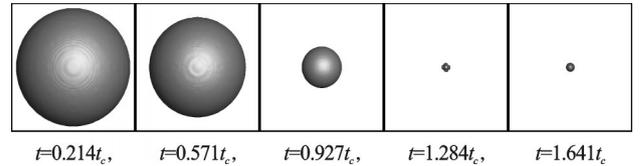
图2 不同网格精度下蒸汽泡半径随时间的变化

不同网格精度下蒸汽泡半径随时间的变化如图2所示。由图2可知,在泡第一次溃灭过程中,网格精度对数值模拟的影响可以忽略,且与 Rayleigh 方程解析解非常吻合。但泡第一次回弹过程的泡半径差异很大。考虑到蒸汽泡相变过程发生在泡界面处,对泡界面的捕捉越精细,相变过程的模拟越准确,因此,本研究选取 $\Delta x_{\min} = 0.166 7$ mm, 网格数为 $170 \times 170 \times 170$ 的网格,初始时刻,沿泡半径方向的网格数为45。

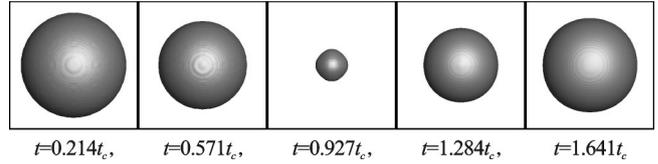
4 计算结果与分析

4.1 蒸汽泡溃灭与气体泡溃灭比较

本研究将相同条件下直接数值模拟得到的蒸汽泡溃灭过程与气体泡溃灭过程进行比较,二者在不同时刻对应的形态变化对比如图3所示。蒸汽泡和气体泡溃灭过程半径随时间的变化比较如图4所示。蒸汽



(a) 蒸汽泡的形态变化



(b) 气体泡的形态变化

图3 不同时刻蒸汽泡和气体泡的形态变化

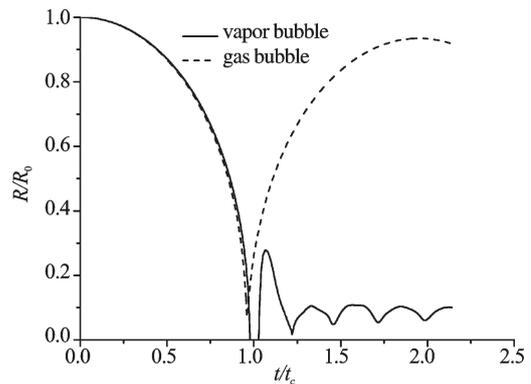


图4 蒸汽泡和气体泡溃灭过程半径随时间的变化

泡在 $t = 0.978 t_c$ 达到最小半径(约为0),气体泡在 $t = 0.961 t_c$ 达到最小半径($0.071 4 R_0$)。蒸汽泡第一次溃灭达到的最小半径远远小于气体泡第一次溃灭达到的,并且在溃灭之后的第一次回弹蒸汽泡只回弹到了初始半径的25%左右,而气体泡达到的半径几乎与初始半径相同。

造成这种明显差异的根本原因在于:蒸汽泡溃灭过程中存在相变,随着泡被周围液体挤压,泡内压力上升,高于饱和蒸汽压,蒸汽泡内水蒸汽液化成为水,泡内水蒸汽含量减少。而气体泡内的气体质量是守恒的,溃灭后期泡内气体产生的反弹力更大。因此,蒸汽泡第一次溃灭能达到更小的体积,回弹更小。

蒸汽泡和气体泡溃灭过程中心处压强随时间的变化比较如图5所示。在溃灭后期,泡体积急剧减小,泡中心点处压力急剧上升。当溃灭达到最小半径时,蒸汽泡中心点处压强达到了123.470 4 MPa,而气体泡的最大压强只达到了42.091 9 MPa。造成这个现象的原因可能是蒸汽泡溃灭达到的最小体积远小于气体泡,因此能达到更高的压强。

4.2 蒸汽泡溃灭过程压力场、温度场分析

蒸汽泡溃灭过程不同时刻的压力与温度分布如图6所示。

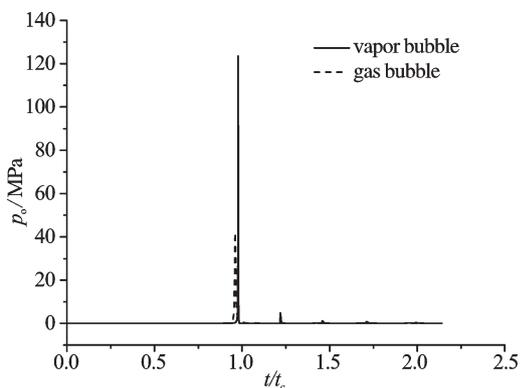


图5 蒸汽泡和气体泡溃灭过程中心点处压强随时间的变化

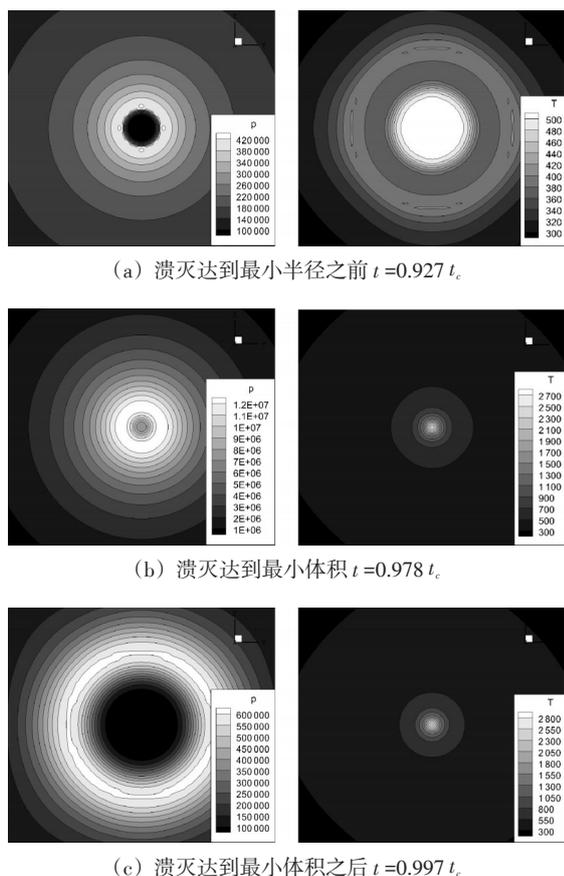


图6 蒸汽泡不同时刻在 $x=0$ 截面上的压力和温度分布

从图6中可以看出,在溃灭达到最小半径前(如图6(a)所示),泡内部压力均匀分布,泡边缘处压力等值线密集,说明存在很大的压力梯度,最大压力位于泡表面,压力随着距泡表面距离的增大而减小,在距泡中心0.022 5 m处,压力近似等于无限远场的压力值。

当泡溃灭达到最小半径时(如图6(b)所示),泡周围压力剧烈增大,达到了远场压力值的10倍以上的量级,最大压力甚至达到了100倍以上;此时在距泡中心0.01 m处范围内都存在较大的压力梯度。

当泡溃灭达到最小半径之后(如图6(c)所示),溃灭时刻产生的最大压力向外传播,全场压力变化都比

较大,而泡内压力降低。

而在溃灭前后,温度变化的区域基本没有变,大约在距泡中心0.006 m处范围内,温度上升,该范围外温度没有变化,仍为298.15 K。这是由于初始流场速度为0,对流项的影响很小,主要依靠扩散项实现热的交换。泡内温度分布均匀,泡边缘处温度梯度最大,相变存在气-液界面处,水蒸汽凝结为水,汽化潜热放出。溃灭达到最小体积时(如图6(b)所示),泡中心点处温度达到最大值2 918.063 8 K。

2012年,Lauer等运用Level-set方法,提出了考虑水蒸汽相变过程的控制方程,对近壁面的球形泡和椭球形泡溃灭进行了计算,获得了不同情况下泡的形态、压力场、回射流形式、速度,他们得到的最大压强达到 10^4 bar量级。2001年,Akhatov等^[17]提出考虑水蒸汽相变过程的蒸汽泡模型,对球形泡溃灭计算获得了温度场分布,他们在文中给出的泡溃灭过程中心处能达到的最高压力是 10^5 bar,最高温度约为11 000 K。2012年,Dula等用刹管法产生空泡,得到空泡近壁面生长溃灭过程,并用高速热视相机捕捉泡周围液体温度,他们实验得到,对于中心在壁面处的泡,生长过程中,是蒸发阶段,周围温度下降的最大幅度是~2 K,溃灭过程中,周围温度上升的最大幅度是~3 K。

目前,公认的空泡溃灭后期是一个高温高压过程,但是具体的压力、温度数值还没有定论,需要进行进一步的实验、理论研究。

5 结束语

笔者研究了单个蒸汽泡在高压环境中的溃灭情况。将相同条件下,蒸汽泡与气体泡计算得到的结果进行了对比:在溃灭到最后阶段,蒸汽泡达到最小半径远小于气体泡达到的,并且蒸汽泡回弹的半径也比较小;蒸汽泡中心点处压强是气体泡的最大压强的3倍左右。造成现象上的差别的根本原因在于,蒸汽泡存在水蒸汽和水的相变,溃灭过程中蒸汽泡的水蒸汽质量是在减少的,而气体泡不存在相变。同时,本研究对蒸汽泡溃灭达到最小半径前后时刻的压力场、温度场进行了分析,泡边缘处存在很大的压力、温度梯度,溃灭达到最小半径时刻,泡中心点处压力、温度达到最大值。

实际的空泡是由极少部分的不可凝结气体和大部分的水蒸汽组成的。因此,考虑汽液相变(蒸发、冷凝现象)的蒸汽泡模型,更符合真实情况。本研究采用的数值方法,对单个蒸汽泡溃灭过程的模拟捕捉到了高温高压现象,有利于进一步应用于蒸汽泡群溃灭的研究。

参考文献(References):

- [1] QUINTO-SU P A, OHL C D. Interaction between two laser-induced cavitation bubbles in a quasi-two-dimensional geometry[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2009(633):425-435.
- [2] QUINTO-SU P A, LIM K Y, OHL C D. Cavitation bubble dynamics in microfluidic gaps of variable height[J]. **Physical Review E**, 2009, 80(4):317-324.
- [3] QUINTO-SU P A, OHL C D. Bubble cluster explosion[J]. **Physics of Fluids**, 2010, 22(9):1.
- [4] VAN DER KROON I, QUINTO-SU P A, LI F, et al. Acoustically driven cavitation cluster collapse in planar geometry[J]. **Physical Review E**, 2010, 82(6):1246-1252.
- [5] DULAR M, COUTIER D O. Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2013(736):44-66.
- [6] NIGMATULIN R I, KHABEEV N S. Heat exchange between a gas bubble and a liquid[J]. **Fluid Dynamics**, 1974, 9(5):759-764.
- [7] NIGMATULIN R I, KHABEEV N S. Dynamics of vapor bubbles[J]. **Fluid Dynamics**, 1975, 10(3):415-421.
- [8] NIGMATULIN R I, KHABEEV N S. Dynamics of vapor-gas bubbles[J]. **Fluid Dynamics**, 1976, 11(6):867-871.
- [9] MA J, HSIAO C T, CHAHINE G L. Euler-Lagrange Simulations of Bubble Cloud Dynamics Near a Wall[C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [10] FUSTER D, COLONIUS T. Modelling bubble clusters in compressible liquids[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2011(688):352-389.
- [11] 闻仲卿. 泡群溃灭的直接模拟及统计特性分[D]. 杭州:浙江大学航空航天学院, 2013.
- [12] LAUER E, HU X Y, HICKEL S, et al. Numerical modelling and investigation of symmetric and asymmetric cavitation bubble dynamics[J]. **Computers & Fluids**, 2012(69):1-19.
- [13] 张凌新, 尹 琴, 邵雪明. 水中气泡溃灭的理论及数值研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2012, 27(1):127-132.
- [14] 刘 晖, 肖 红. 一组适合炼厂水蒸汽参数的快速计算方程[J]. 内蒙古石油化工, 2011(1):52-53.
- [15] COMMANDER K W, PROSPERETTI A. Linear pressure waves in bubbly liquids: Comparison between theory and experiments[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1989, 85(2):732-746.
- [16] 孙东亮, 徐进良, 王 丽. 求解两相蒸发和冷凝问题的气液相变模型[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7):7-11.
- [17] AKHATOV I, LINDAU O, TOPOLNIKOV A, et al. Collapse and rebound of a laser-induced cavitation bubble[J]. **Physics of Fluids**, 2001, 13(10):2805-2819.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

刘 兰, 张凌新. 基于VOF的蒸汽泡溃灭过程数值研究[J]. 机电工程, 2015, 32(4):447-452.

LIU Lan, ZHANG Ling-xin. Numerical study on the vapor bubble collapsing based on VOF method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(4):447-452. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第446页)

参考文献(References):

- [1] HUANG D, SWANSON E, LIN C, et al. Optical coherence tomography[J]. **Science**, 1991, 254(22):1178-1181.
- [2] ZHONG S, SHEN Y, HO L, et al. Non-destructive quantification of pharmaceutical tablet coatings using terahertz pulsed imaging and optical coherence tomography[J]. **Optics and Lasers in Engineering**, 2011(49):361-365.
- [3] 林惠珍, 高应俊, 金重星. 基于LabVIEW的光学相干层析成像控制系统[J]. 应用光学, 2011, 32(3):452-455.
- [4] 王 防, 潘双夏. 汽车制动性能检测方法及其虚拟仪器的研究[J]. 机电工程, 2006, 23(6):14-16.
- [5] 金 玮, 范征宇, 姜新华. Matlab的ActiveX接口[J]. 微型电脑应用, 1999, 15(12):52-57.
- [6] 钟舜聪, 丁 康, 孙智娟. Matlab与VB混合编制信号分析与处理系统软件包[J]. 微型电脑应用, 2001, 17(6):36-39.
- [7] 李亚军, 赵 刚, 王 华. 在Matlab图形用户界面设计中应用ActiveX控件[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(12):135-137.
- [8] 王 颖, 胡宗军, 邹介棠, 等. ActiveX:从Visual Basic6. 0调用Matlab的实现方法[J]. 机电工程, 1999, 16(5):172-174.
- [9] 张建珍, 廖建胜. 基于Matlab/ActiveX控件的汽车仪表盘的设计[J]. 热带农业工程, 2011, 35(2):24-26.
- [10] 魏晨阳, 朱健强. 用Matlab控制NI采集卡实现高精度数据采集与分析功能[J]. 微计算机信息, 2005, 21(2):27-29.
- [11] 刘新文, 王惠南, 钱志余. 小波变换对OCT图像的降噪处理[J]. 光子学报, 2006, 35(6):935-939.
- [12] 占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和Retinex的红外图像增强方法[J]. 光学学报, 2010, 30(10):2788-2793.
- [13] NASON G P, SLIVERMAN B W. The stationary wavelet transform and some statistical application in wavelet and statistics[J]. **Lecture Notes in Statistics**, 1995(103):281-299.
- [14] 郭 昕, 王向朝, 步 鹏, 等. 样品散射对频域光学相干层析成像光谱形状和深度分辨率的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(1):189-194.

[编辑:李 辉]