

T 型微通道内气液两相流数值模拟

王琳琳, 李国君, 田辉, 叶阳辉

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用相场方法, 在湿壁面条件下对 T 型微通道内不可压缩气液两相流动进行了模拟研究. 数值模拟中得到微通道内特有气泡——Taylor 气泡形成的过程, 发现其形成共经历了 4 个阶段, 气泡在形成过程中主要受到挤压力、表面张力、黏性力的作用, 分析各阶段这 3 种力对气泡的作用, 得到 Taylor 气泡形成机理. 计算结果表明, 挤压力和表面张力在气泡整个形成过程都起作用, 表面张力在气泡脱离前达到最小值, 黏性力仅在气泡形成前两阶段起作用并在阻塞阶段取得最大值. 这些基本规律为有效控制微通道内气泡尺寸和微通道系统设计提供了一定的依据.

关键词: 微通道; 两相流; 数值模拟; 相场法; 气泡

中图分类号: TQ021.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)09-0065-05

Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a T-Junction Micro-Channel

WANG Linlin, LI Guojun, TIAN Hui, YE Yanghui

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The numerical simulation was performed to investigate the incompressible gas-liquid two-phase flow in a T-junction micro-channel with wetted walls using a phase field method. The formation process including four stages of a well defined Taylor bubble was achieved. The Taylor bubble is exerted by three forces in formation process, i. e., extrusion force, surface tension force and shear stress force of the continuous phase, and the formation mechanism of the Taylor bubble was obtained. The numerical results show that both the extrusion force and the surface tension force act in the formation process of the Taylor bubble, and the surface tension force reaches a minimum value before detachment. The shear stress force acts only in the preceding two stages of the formation process, and it has a maximum value in the blocking stage

Keywords: micro-channel; two-phase flow; numerical simulation; phase field method; bubble

20 世纪 80 年代, 随着微电子机械系统 (MEMS) 的提出, MEMS 内微通道两相流引起了学者的广泛关注. 微通道的特征尺度一般小于 1 mm, 管道内的流动几乎可忽略重力作用, 因此微通道内的流动性质和传热特性可“等价于”微重力条件下的情况^[1]. 另外, 微型气泡或液滴混合^[2]、纳米级粒子的合成^[3]、蛋白质结晶^[4]、生物鉴定^[5] 和 DNA 分

析^[6] 等都属于微通道两相流动, 使微通道内两相流动问题成为研究的热点. 常见的两相混合微通道分为 T 型、Y 型和十字型等, 其中 T 型微通道使用率较高. 在 T 型微通道的两个入口处分别注入气体和液体, 当毛细数 C_a 小于 10^{-2} 时, 可规律地产生大小和间距一致且不聚合的 Taylor 气泡^[7], 这种气泡流能够降低气泡的轴向混合, 加速液柱的循环流动, 提

高换热和传质能力,减少物质损失^[8]. Taylor 气泡在形成过程中会受到通道形状、大小的限制,它是微通道内特有的气泡类型,与常规尺度通道内气泡运动相比,微通道内 Taylor 气泡在形成过程中阻碍液相流动,使液相压强增大,液相中持续增加的压强是趋使气泡在颈部断裂的主要原因,同时 Taylor 气泡还受表面张力、黏性力的影响,这些都使微通道内流动复杂性增加. Taylor 气泡的长度影响换热率,许多应用领域要求精确控制微通道内气泡的长度、体积和产生率. 因此,研究 Taylor 气泡的形成机理,阐明影响因素,对有效控制气泡尺寸等方面具有重要意义.

由于微通道尺度极小,通过实验精确观察或测量气泡的变形、脱离,以及气泡脱离后的长度、体积和通道内流场与压强分布难度大^[7]. 随着计算机技术的迅速提高,采用数值模拟研究微通道内的流动成为主要手段,并取得了较大的进展. 目前,研究两相流界面运动常用的数值方法有水平集法(LSM)、流体体积函数法(VOF)、标记粒子单元法(MAC)、相场法(PFM)等,这些方法为深入研究微通道内两相流动提供了有效和便利的途径. 基于流体自由能量模型的相场方法借助 Cahn-Hilliard 方程,利用化学势描述两相界面,以分离两种不同的流场,在相场模型中采用标准对流技巧,使得它在使用非结构化网格或有限元技巧模拟中相比其他方法更容易实施,并能够模拟能量耗散流动^[9].

本文采用相场方法,借助质量守恒方程、N-S 方程和 Cahn-Hilliard 方程,对 T 型微通道内密度比接近 1 : 1 000 的气水两相流动进行数值模拟,得到 Taylor 气泡的形成过程,通过分析 Taylor 气泡产生过程中的受力情况和通道内压强分布,总结出微通道内流动特性和气泡产生机理,为微通道气液两相流系统的设计和气泡尺寸控制提供参考.

1 物理模型及数值方程

1.1 物理模型

本文以 T 型微通道作为物理模型,如图 1 所示. 气体通道延伸进水平通道的部分称为气液混合区. 空气和水分别从管道的上部和左侧进入,在混合区混合,从出口流出,通道直径 D 为 $111\text{ }\mu\text{m}$,空气通道长 $3D$,水通道长 $6D$,主管道长 $28D$,混合区宽度为 $111\text{ }\mu\text{m}$. 水和空气的物理性质见表 1.

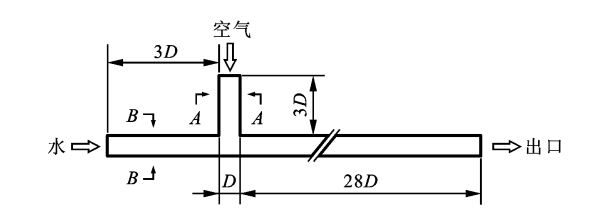


图 1 T 型微通道示意图

表 1 水和空气的物理性质

流体	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	黏性系数/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	表面张力系数/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
水	998	0.001 2	0.072 8
空气	1.2	0.000 018	

1.2 控制方程和边界条件

1.2.1 控制方程 由于水和空气的入口速度不高, Re 小,故认为微通道内流动为不可压缩黏性层流流动. 连续方程和动量方程分别为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t} + (\boldsymbol{U} \cdot \nabla) \boldsymbol{U} =$$

$$\nabla \cdot \left[-\frac{p}{\rho} \boldsymbol{I} + \frac{\mu}{\rho} (\nabla \boldsymbol{U} + (\nabla \boldsymbol{U})^T) \right] + \frac{1}{\rho} \boldsymbol{F}_\sigma + \boldsymbol{g} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{U}$ 是速度向量; p 是压强; 密度 ρ 和动力黏性系数 μ 由以下方程得到

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) V_2 \tag{3}$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) V_2 \tag{4}$$

其中下标 1、2 分别表示空气和水. 流体体积分数 $V_1 = \frac{1-\phi}{2}$ 、 $V_2 = \frac{1+\phi}{2}$. ϕ 为归一化的相场变量,在 -1 到 1 之间变化. 空气、水对应的 ϕ 分别是 $-1, 1$, 因此气液界面就是 ϕ 从 -1 变化到 1 的区域. ϕ 通过 Cahn-Hilliard 方程求解

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \boldsymbol{U} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\gamma \lambda}{\epsilon^2} \nabla \phi \tag{5}$$

式中: 相场辅助变量 $\psi = -\nabla \cdot \epsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1) \phi$; γ 是迁移率; λ 是混合能量密度; ϵ 是两相界面厚度,通常设 $\epsilon = \frac{h_c}{2}$, $\gamma = \epsilon^2$, h_c 为网格的特征尺寸. λ 满足以下方程

$$\sigma = \frac{8^{1/2}}{3} \frac{\lambda}{\epsilon} \tag{6}$$

式中: σ 是表面张力系数. 表面张力 F_σ 通过以下方程求得

$$F_{\sigma} = G \nabla \phi \tag{7}$$

式中: $G = \lambda \left[-\nabla^2 \phi + \frac{(\phi^2 - 1)\phi}{\epsilon^2} \right] = \frac{\lambda}{\epsilon^2} \psi$ 是化学势。

本文工作针对二维微通道两相流进行,计算中采用三角形网格。经验证,当网格数大于 11 000 时,计算结果与网格数无关,故计算网格数取 32 472,时间步长取 0.000 2 s。

1.2.2 边界条件 空气和水的入口速度分别为 0.04、0.042 m/s,方向垂直于入口边界;出口压强为 0 Pa;水和壁面接触会浸润壁面,在气液固交界处形成接触角 θ ,其变化范围为 $0 \sim \pi$, $\theta = 0$ 表示壁面与水完全浸润, $\theta = \pi$ 表示壁面与水完全不浸润。气液界面单位法向量

$$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{n}_w \cos \theta + \boldsymbol{t}_w \sin \theta \tag{8}$$

式中: $\boldsymbol{n}_w$ 、 $\boldsymbol{t}_w$ 分别是壁面单位法向量和单位切向量。计算中取接触角为 36° 。

1.2.3 初始条件 设初始时刻的气体通道内充满空气,整个水平通道内充满水,且微通道内流体都处于静止状态。

2 数值结果与机理分析

2.1 气泡形成过程

气相在气液混合区拐角处断裂,形成的气泡称为 Taylor 气泡。T 型微通道通常分为对流接触通道和错流接触通道两类。对于对流接触的 T 型微通道,文献[10]将其内 Taylor 气泡的形成分为 3 个阶段。本文模拟错流接触的 T 型微通道,图 2 给出此通道内 Taylor 气泡的形成过程。通过分析可见,Taylor 气泡在通道内的形成可归纳成 4 个阶段:

(1)气泡进入气液混合区阶段($t = 0 \sim 0.002$ s),随着进气量增加,气泡前端进入气液混合区;

(2)阻塞阶段($t = 0.002 2 \sim 0.004$ s),继续增大的气泡几乎阻塞气液混合区,只有少量水从气泡底部流过;

(3)塌陷阶段($t = 0.004 2 \sim 0.008$ s),气泡底部和壁面接触,气泡主体部分向主通道下游运动,气泡后端的流体向气体通道内运动,气泡被逐渐拉长,在气泡后端出现颈部,随着气泡向下游运动,颈部变细;

(4)脱离阶段($t = 0.008 2$ s),气泡在颈部处断裂,此刻一部分气体收缩回气体通道,另一部分气体收缩回主通道,在主通道内形成两端呈圆形的 Taylor 气泡。

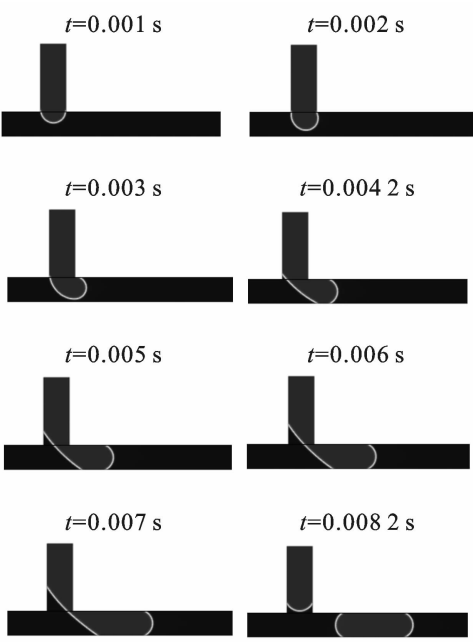


图 2 微通道内气泡形成过程

2.2 气泡表面作用力的变化特性及机理分析

Taylor 气泡在形成过程中主要受到 3 种力:液体的挤压力、黏性力、表面张力[11],其中挤压力和黏性力对气泡表面起破坏作用,而表面张力起维持作用。

2.2.1 压力变化特性及机理分析 水的挤压力对 T 型微通道中 Taylor 气泡的形成起到非常重要的作用。下面分析水对气泡作用力的变化规律,水平通道中轴线上的压强分布如图 3 所示。

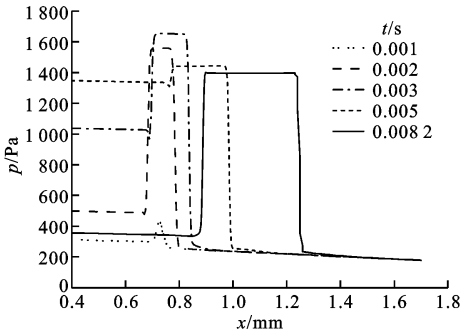


图 3 气泡形成过程中水平通道中轴线上的压强分布

由图 3 可见:在气泡形成的第 1 阶段,水和气泡内压强逐渐增大,水中压强从 300 Pa 增大到 500 Pa,气泡内压强从 400 Pa 增大到 1.55 kPa;在阻塞阶段,水中压强加速增大到 1 kPa,气泡内压强出现最大值,约为 1.68 kPa,比第 1 阶段小幅增长,压强最大的区域变宽,说明气泡沿水平通道向下游增长;

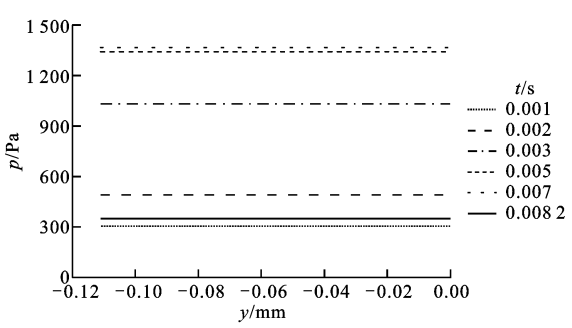
在塌陷阶段,水中压强较第 2 阶段继续增大到 1.4 kPa 左右,气泡内压强开始减小,最终下降到 1.43 kPa,这一阶段内气液压强变化小,气液界面附近压差减小,气泡后端开始向下游移动,并且气泡沿水平通道继续向下游增长;在脱离阶段,气泡从颈部脱离,气泡内压强保持脱离前大小,与塌陷阶段相同,水中压强回落至接近第 1 阶段大小,气泡后端较其前端压强偏高,气泡内外压差约为 1.08 kPa. 气泡脱离前,液体通道内压强达到最大值,气泡后端内外压差达到最小值.

水平通道中轴线上压强变化的原因是:随着气泡前端进入气液混合区,气泡开始阻挡水的流动,水中压强增大,在表面张力作用下,使气泡内外存在压差,出现压强跳跃区;随气泡体积继续增大,气泡对水的流动阻挡作用增强,使水中压强迅速增大;最终增大的压强能够推动气泡主体部分向主通道下游运动,小部分向气体通道内运动,在气泡后端形成颈部,气泡后端表面的曲率半径增大,这样增大了气泡的表面自由能,但消耗了气泡内的压能,使气泡内压强降低,随着气泡向下游运动,缓解了气泡对水的阻塞作用,使水中压强增长缓慢,气泡颈部在水的挤压下变细;最后,气泡在颈部断裂,并在表面张力作用下两端收缩为圆形,气泡内压强保持脱离前的大小,此时水不再受气泡的阻塞,水中压强骤降,回落至初始时刻大小.

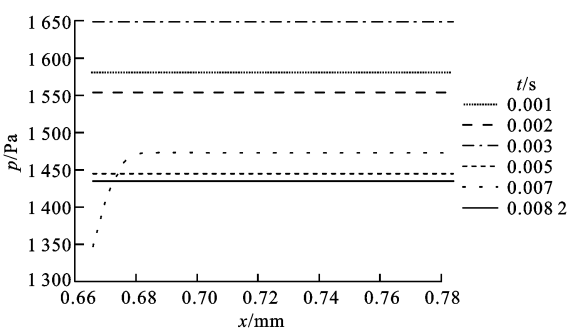
为考察气泡在产生过程中气体和液体通道内压强的变化情况,在这两通道内分别取线段 A-A、B-B (两线段与 T 型交汇位置的距离均为 D ,见图 1),这两条线段上的压强变化如图 4 所示.

对比图 4a、4b 中气液通道内的压强变化,可见气体通道内的压强在 1.44~1.67 kPa 之间变动,压强波动幅度小,与文献[12]中的结论相同. 观察图 2,气泡始终向水中凸出,即曲率半径 $r < 0$,由 Young-Laplace 方程 $\Delta P = P_g - P_l = -\frac{\sigma}{r}$ 知,气体通道内的压强始终高于液体通道内的压强,这与图 4 中的计算结果一致,克服了气体通道内压强忽高忽低与液体通道内压强的不足. 液体通道内压强波动幅度大,与文献[10]结论一致,约为 1.2 kPa.

2.2.2 气泡表面黏性力作用特性及分析 黏性剪切应力与速度梯度成正比,对气泡表面变形起重要作用. 气泡在形成过程中的速度分布如图 5 所示,可看到在气泡形成的第 1、2 阶段,气泡顶部水的速度方向与壁面平行,由于流道变窄,水的速度增大;在



(a)液体通道内的压强变化



(b)气体通道内的压强变化

图 4 气液通道内的压强变化

塌陷阶段以后,气泡表面和壁面接触,气泡后端水的速度方向与气泡表面垂直. 根据黏性剪切应力与速度梯度之间的关系,后两阶段切应力可忽略,因此气泡表面切应力持续时间约占气泡形成总时间的 37.5%.

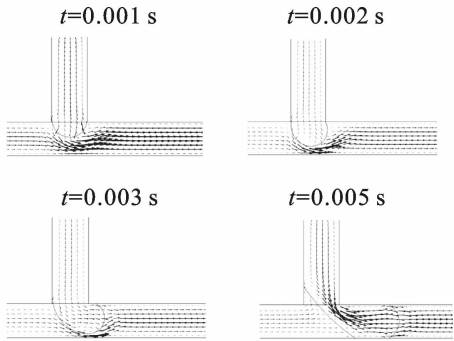


图 5 气泡形成过程中的速度分布

为比较前两阶段气泡表面所受切应力的大小,图 6 给出该两阶段气泡表面到下壁面的速度分布. 由此图可知,速度梯度随时间的延长而增大,对应的切应力由 5.23 Pa 增大到 17.8 Pa,最大值在阻塞阶段取得.

利用文献[11]中的切应力估算公式 $\tau = \mu u_{gap} / \epsilon_0$

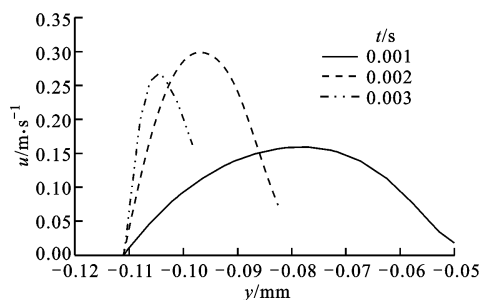


图6 气泡顶部液体速度分布

(其中 $u_{\text{gap}} = Q_w / \varepsilon_0$, ε_0 是气泡表面到壁面的距离, Q_w 是水的入口流量), 可估算得到前两阶段气泡附近剪切应力从 1.25 Pa 增大到了 28.89 Pa. 比较前面的计算结果, 发现利用切应力估算式得到的数据量级与模拟计算得到的数据量级相同, 这说明数值计算结果是合理的.

2.2.3 表面张力作用特性及分析 表面张力对气泡表面起维持作用, 观察图 2 可知, 气泡后端曲率半径逐渐增大, 根据 Young-Laplace 方程知气泡后端内外压差随时间的延长而减小. 利用气泡表面的曲率半径, 可估算出气泡受到的表面张力. 气泡形成的前两阶段, 气泡曲率半径接近气体通道的半径, 表面张力约为 1 324 Pa; 在塌陷阶段, 气泡后端出现颈部, 其后端曲率半径继续增大, 脱离前达到最大值, 此刻后端所受表面张力最小.

3 结 论

本文采用相场方法, 对 T 型微通道中特有的气泡——Taylor 气泡在水中的形成过程进行数值模拟, 得到气泡形成中经历的 4 个阶段. 通过分析对气泡表面起主要作用的挤压力、表面张力和黏性力, 发现微通道内流体挤压力和表面张力在气泡形成的整个过程都起作用, 水对气泡的挤压力随时间的延长而增大, 在气泡脱离前达到最大值; 气泡后端所受表面张力随时间递减, 塌陷阶段达到最小值; 黏性力仅在气泡形成前两阶段起作用, 较前两种力小 2~3 个量级, 在气泡形成后两阶段可忽略不计, 水的流动受到扩张气泡阻碍, 产生逐渐增大的挤压力是使得气泡从颈部脱离的主要原因. 本文工作为设计微通道系统和控制微通道内气泡尺寸提供了新的依据.

参考文献:

[1] GALBIATI L, ANDREINI P. Flow pattern transition for horizontal air-water flow in capillary tubes; a mi-

crogravity equivalent system simulation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1994, 21(4): 461-468.

- [2] TICE D, SONG H, LYON D, et al. Formation of droplets and mixing in multiphase microfluidics at low values of the Reynolds and the capillary numbers[J]. Langmuir, 2003, 19(22): 9127-9133.
- [3] GUNTHER A, KHANS A, THALMANN M, et al. Transport and reaction in microscale segmented gas-liquid flow[J]. Lab Chip, 2004, 4(4): 278-286.
- [4] ZHENG B, TICE D, ISMAGILOV F. A microfluidic system for screening protein crystallization conditions inside nanoliter droplets with on-chip X-ray diffraction[J]. Micro Total Analysis Systems, 2005, 2(297): 145-147.
- [5] SRINIVASAN V, PAMULA K, FAIR B. An integrated digital microfluidic lab-on-a-chip for clinical diagnostics on human physiological fluids[J]. Lab Chip, 2004, 4(4): 310-315.
- [6] BURNS A, JOHNSON N, BRAHMASANDRA N, et al. An integrated nanoliter DNA analysis device[J]. Science, 1998, 282(5388): 484-487.
- [7] 王昆, 王嘉骏, 顾雪萍, 等. 微通道内 Taylor 流的计算流体力学数值模拟研究进展[J]. 化工进展, 2010, 29(10): 1806-1810.
- WANG Kun, WANG Jiajun, GU Xueping, et al. Progress in modeling of Taylor flow within microchannels by computational fluid dynamics[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(10): 1806-1810.
- [8] LIU H, ZHANG Y. Droplet formation in a T-shaped microfluidic junction[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(3): 1-6.
- [9] JACQMIN D. Calculation of two-phase Navier-Stokes flows using phase-field modeling[J]. Journal of Computational Physics, 1999, 155(1): 96-127.
- [10] DAI L, CAI W, XIN F. Numerical study on bubble formation of a gas-liquid flow in a T-junction micro-channel[J]. Chemical Engineering and Technology, 2009, 32(12): 1984-1991.
- [11] GARSTECKI P, FUERSTMAN J, STONE A, et al. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction: scaling and mechanism of break-up[J]. Lab on a Chip, 2006, 6(3): 437-446.
- [12] KASHID N, RENKEN A, KIWI-MINSKER L. CFD modelling of liquid-liquid multiphase microstructured reactor: slug flow generation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2010, 88(3): 362-368.

(编辑 荆树蓉)