

粒子网格混合方法模拟液滴夹带起始点

郭 贇¹, 石渡佑树², 池尻智史², 冈芳明²

(1. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 哈尔滨 150001; 2. 东京大学 原子力学专攻, 日本 3191188)

摘要: 环状流动的特性对反应堆事故工况分析具有重要意义, 本研究基于粒子网格混合方法对这一现象中的液滴夹带起始点问题进行了数值分析, 利用网格求解流场, 利用粒子模拟液膜及液滴的运动, 探讨了气水流动大密度比情况下, 不同流动方向, 不同流体粘度, 不同液膜厚度下的液滴夹带所需的临界气相流速, 结果同经典关系式进行了对比, 吻合良好. 这一方法对于反应堆事故中的两相流动研究具有参考意义.

关键词: 粒子网格; 液滴夹带; 环状流; 数值模拟; 反应堆事故

中图分类号: TL331

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)05-0091-04

Numerical simulation of the onset of droplet entrainment in annular flow by particle-grid hybrid method

GUO Yun¹, ISHIWATARI Yuki², IKEJIRI Satoshi², OKA Yoshiaki²

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Nuclear Professional School, The University of Tokyo, Ibaraki 3191188, Japan)

Abstract: In this paper the particle-grid hybrid numerical method is used to investigate the onset of droplet entrainment in annular flow. The flow field is solved on the grid and the motion of fluid film and droplet is solved by particles. Under large density ratio between gas and liquid the critical velocities of droplet entrainment for different flow directions, viscosities and fluid film thicknesses were obtained. The results are in good agreement with classical correlation. This method provides valuable references and guidelines for further study of the two-phase flow in nuclear reactor accident.

Key words: particle-grid; droplet entrainment; annular flow; numerical simulation; reactor accident

福岛核事故为所有致力于发展核电的国家敲响了警钟, 对核安全提出了更加苛刻的要求, 中国也不例外. 反应堆事故情况下堆芯内流道中可能会出现环状流动, 此时加热壁面上附有很薄的液膜, 高速的汽流从流道中心通过, 在一定条件下, 汽流会从液膜卷吸夹带走液滴, 极端情况下会使得液膜消失, 出现干涸, 使得加热面烧毁, 引起事故. 所以汽流能够夹带液滴的临界速度受到研究者的关注, 早期的研究多见于实验, Rossum 在实验中测量了不同液体流速下的临界速度, 采用韦伯数与雷诺数总结了实验关系式^[1]. Kulov 利用气

相和液相雷诺数区分了夹带区和非夹带区, 同时他指出不同的实验方法给出的结果有可能千差万别^[2]. 近年来更多的学者针对环状流动的传质与传热问题开展了更为细致的相关实验研究^[3-6]. 但是对于环状流动中的液滴夹带起始点还没有见到采用数值方法分析的研究实例, 本论文尝试采用粒子-网格混合方法来对这一现象进行模拟, 一方面可以式进行比对; 另一方面可以展示这一新兴数值方法在两相流动分析方面的能力.

1 数学物理模型

粒子-网格混合方法由东京大学提出, 综合了传统网格法与粒子法的优势, 利用粒子来进行界面跟踪, 利用界面跟踪法全场统一求解的思路, 在网格上对两相流场统一求解, 两相的作用通过

收稿日期: 2012-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10805011), 黑龙江省留学归国科学基金项目(LC201033).

作者简介: 郭 贇(1979—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 郭 贇, yunguoxjt@gmail.com.

粒子与网格之间的数据传递来实现^[7]. 其基本模型由两部分组成, 首先说明网格计算模型, 由于不考虑传热, 所以基本方程如下:

质量守恒方程

$$\oint_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = - \oint_S p \bar{\mathbf{I}} \cdot \mathbf{n} dS - \oint_S \bar{\boldsymbol{\tau}} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \mathbf{f}_V dV. \quad (2)$$

式中: t 表示时间; $\mathbf{v}$, p 和 ρ 分别是速度矢量、压力和流体密度; $\bar{\mathbf{I}}$ 是单位矩阵; V 是流体体积; S 是控制体的表面积; $\mathbf{n}$ 是外单位向量, 垂直于 S ; $\mathbf{f}_V$ 表示作用在流体上的力; $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 是应力张量.

对上述方程可以在网格上进行离散后, 采用 SIMPLE 方法进行求解^[8], 对于湍流本研究中采用的是低雷诺数模型^[9], 这主要是因为本研究中附着在壁面上的液膜是关注重点, 且流速较低.

粒子部分的计算主要是基于粒子法来对粒子的位置进行修正. 粒子从网格的速度场中根据其位置获得速度后会移动到新的位置, 这一位置有可能不满足液相密度的要求, 所以要对其位置进行修正以获得合理的液相分布. 首先可以由下式计算粒子的新位置

$$\mathbf{r}_i^* = \mathbf{r}_i^n + \mathbf{v}_i^n \Delta t. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{r}$ 表示粒子位置, $\mathbf{v}$ 是粒子速度矢量, Δt 是时间步长.

根据压力梯度可以得到粒子速度的修正项

$$\mathbf{v}' = - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla p'. \quad (4)$$

式中 $\nabla p'$ 为压力修正项, 结合式(3)和(4)可以进行粒子修正后位置的求解. 有关粒子方面的计算可以进一步参考 Koshizuka 等的论文^[10-12].

由于有相间交界面的存在, 所以表面张力的计算尤为关键, 本方法利用表示液膜表面的粒子来计算界面曲率, 由于粒子有一定大小, 所以曲率计算不会出现突变的情况, 有利于网格求解收敛^[13].

$$\mathbf{f}_{sa} = \sigma \kappa_i \hat{\mathbf{n}}_i. \quad (5)$$

式中: σ 是表面张力系数, κ 是表面曲率, $\hat{\mathbf{n}}$ 是垂直于表面的向量.

2 求解方法及算例

粒子网格混合方法的求解过程如图 1 所示, 其核心部分在于网格对压力场与流场的求解和粒子位置的修正.

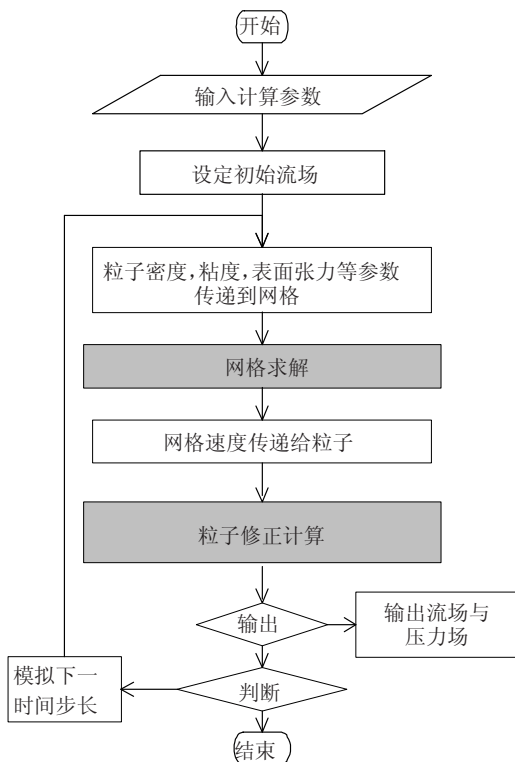


图 1 粒子网格混合方法求解过程

本论文所要研究为环状流动下的液滴夹带起始点的问题, 在图 2 中给出了有关这一问题的网格及粒子设定示意, 计算区域为 $5 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ 的矩形, 其中黑色及绿色粒子表示壁面, 蓝色粒子表示液膜, 气体覆盖在网格上. 流体从下向上流动, 如果气流的流速足够高, 由于夹带和卷吸作用, 液膜首先会出现不规则的表面, 然后部分液体会被气流拖曳, 从而进入气流中, 形成夹带液滴的流动.

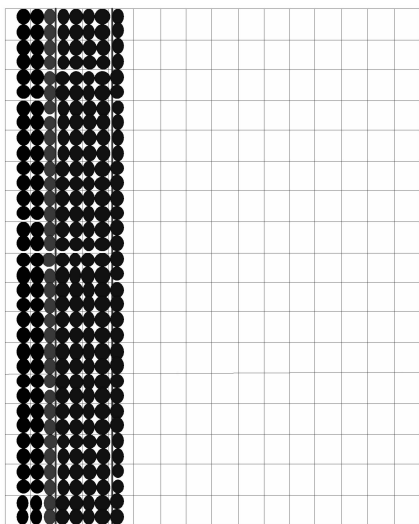


图 2 网格及粒子设定

首先需要在不同的网格数及粒子大小的条件下进行结果独立性分析. 图 3 和 4 给出了不同网

格数下的气相及液相平均流速随时间的变化曲线. 此处未给出粒子大小, 这是由于每个网格上布置 4 个粒子, 所以网格数量增多, 描述同样厚度的液膜所需的粒子尺寸在减小, 数量相应增加, 也就是说在改变网格的同时粒子尺寸也在同时变化. 从图 3 中可以看出, 22×100 的网格显然不能满足计算要求, 其余三套网格趋势基本一致; 再进一步考察图 4, 可以发现在 64×300 的网格上基本可以得到液相平均流速的无关解. 所以最终本文计算采用的网格数为 64×300 , 粒子数随着液膜厚度不同从 5 400 到 10 200. 计算机的 CPU 主频为 2.66 GHz, 内存为 24 GB, 操作系统为 Linux. 进出口采用周期性边界条件, 左边界为壁面, 右边界为对称, 流体速度取决于给定的压力梯度.

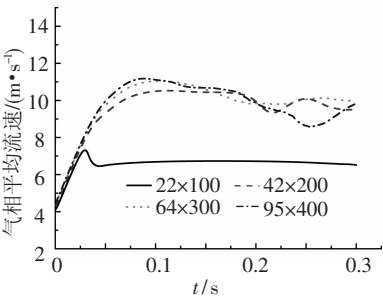


图 3 网格数对气相平均流速的影响

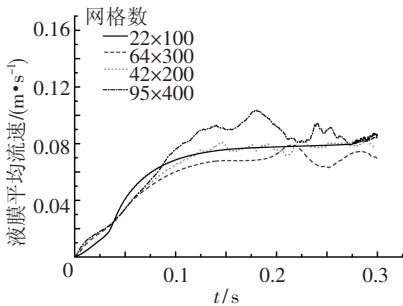


图 4 网格数对液相平均流速的影响

2.1 结果讨论

通过改变压力梯度可以改变计算域内的流体流速, 从而发现液滴夹带临界气相流速. 表 1 给出了在不同计算条件下的数值计算结果以及 Ishii 关系式的计算结果. Ishii 关系式具体表示形式如下:

$$\begin{cases} J_{gc}^* = \min(11.78N_\mu^{0.8}, 1.35) Re_f^{-1/3}, & 1\,635 > Re_f > 2; \\ J_{gc}^* = \min(N_\mu^{0.8}, 0.1146) Re_f^{-1/3}, & Re_f > 1\,635. \end{cases}$$

式中: $J_{gc}^* = \frac{\mu_l J_{gc}}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$ 为临界气体速度, v_f 是液膜

速度, $N_\mu = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma}} \left(\frac{g \Delta \rho}{\sigma} \right)^{1/4}$ 为粘度数, δ 是液膜厚

度, $Re_f = 4\rho_f v_f \delta / \mu_f$ 为液膜雷诺数. 由于 Ishii 关系式包含了较多的流动参数, 且同多个实验吻合较好, 所以本研究选择这一关系式作为参考^[14].

图 3 中采用液膜雷诺数 Re_f 为横坐标, 无量纲气体速度 $\left(\frac{1}{N_\mu} \right)^{0.8} \frac{\mu_l j_g}{\sigma} \sqrt{\rho_g / \rho_f}$ 为纵坐标.

表 1 不同工况下数值结果同 Ishii 关系式比较

工况号	流动方向	密度(气-液)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘度(气-液)/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	液膜厚度/(mm)	平均液膜流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	数值模拟临界气相流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Ishii 关系式结果/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	垂直向上	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 9.16\text{e-}5$	0.017 6	0.16	0.12	18.2	20.4
2	垂直向上	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 9.16\text{e-}5$	0.017 6	0.24	0.12	18.6	17.5
3	垂直向上	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 9.16\text{e-}5$	0.017 6	0.40	0.08	15.6	16.8
4	垂直向上	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 9.16\text{e-}5$	0.017 6	0.56	0.03	20.3	21.2
5	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 9.16\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.22	16.9	15.4
6	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 5\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.20	20.4	17.4
7	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 20\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.32	19.3	14.9
8	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 50\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.16	16.7	21.1
9	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 150\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.12	16.3	26.9
10	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 3\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.17	13.0	19.2
11	水平	1~739.7	$1.81\text{e-}5 \sim 7\text{e-}5$	0.020 0	0.24	0.20	18.2	16.2
12	水平	1.2~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.072 8	0.24	0.36	21.8	26.6
13	水平	1.2~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.050 0	0.24	0.15	17.1	31.0
14	水平	1.2~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.030 0	0.24	0.15	15.8	25.3
15	水平	1.2~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.020 0	0.24	0.14	15.8	21.6
16	水平	1.2~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.010 0	0.24	0.12	13.6	17.6
17	45°向上	1.1~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.030 0	0.24	0.24	17.2	22.6
18	45°向上	1.1~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.030 0	0.40	0.31	11.7	17.4
19	45°向上	1.1~998.2	$1.81\text{e-}5 \sim 0.001$	0.030 0	0.56	0.40	11.2	13.7

表1中给出了不同流动方向,不同密度比,不同粘度,不同液膜初始厚度以及不同表面张力下的临界气相流速的数值模拟结果与 Ishii 关系式结果. 在多种工况下,数值模拟结果同 Ishii 关系式结果均吻合较好. 流动方向,密度比,流体粘度与液膜厚度对临界气相流速的影响比较复杂,很难从目前的结果中发现规律. 表面张力的作用则非常明显,从工况12到16可以看出,随着表面张力的减少,临界气相流速也随之减小,这主要是因为液滴脱离液膜需要克服表面张力的作用. 从图5中可以进一步看出数值模拟结果的分布规律亦较好,其平均误差为21.3%.

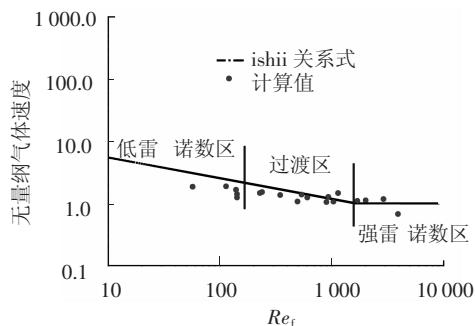


图5 数值模拟结果同 Ishii 关系式比较

3 结 论

本研究对环状流动中的液滴夹带起始点进行了数值模拟的研究,计算了多个不同参数下的液滴夹带临界气相流速,同 Ishii 关系式进行了对比,从结果中可以看出粒子-网格混合方法可以用于环状流动的数值模拟,其结果可供参考. 粒子-网格混合方法结合了两种数值算法的优点,在一定程度上解决了界面跟踪的问题,这一方法在两相流动的数值模拟研究中值得进一步推广. 但是若想将这一方法用于分析实际问题依然需要大量的研发改进工作,该方法十分耗费计算机机时,对于本文这样的很小规模的计算需要数天乃至数周,所以还无法应用于大规模的计算分析;在出现大量液滴夹带的情况下,也就是存在多个两相交界面或交界面十分复杂时计算难以收敛,部分情况下会发散. 下一步将通过采用并行计算与改进压力修正方程数值算法来尝试解决这些难点.

参考文献

[1] Van ROSSUM J J. Experimental investigation of horizontal liquid films wave formation, atomization, film thickness [J]. Chemical Engineering Science, 1959, 11(1):35-52.

[2] KULOV N N. Pressure drop, mean film thickness and entrainment in downward two-phase flow [J]. The Chemical Engineering Journal, 1979, 18(1):183-188.

[3] OKAWA T. Experiments for liquid phase mass transfer rate in annular regime for a small vertical tube [J]. International Journal of Heat Transfer, 2005, 48(3):585-598.

[4] LOPEZ M A. Annular flow entrainment rate experiment in a small vertical pipe [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 178(1):61-70.

[5] HOLOWACH M J, HOCHREITER L E, CHEUNG F B. A model for droplet entrainment in heated annular flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(4):807-822.

[6] OKAWA T, KATAOKA I. Correlations for the mass transfer rate of droplets in vertical upward annular flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(10):4766-4778.

[7] LIU Jie, KOSHIUZKA S, OKA Y. A hybrid particle-mesh method for viscous, incompressible, multiphase flows [J]. Journal of Computational Physics, 2005, 202(1):65-93.

[8] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001:198-225.

[9] JONES W P, LAUNDER B E. The calculation of Low-Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1973, 16(5):1119-1130.

[10] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation incompressible fluid [J]. Nuclear Science and Engineering, 1996, 123(3):421-426.

[11] NOMURA K, KOSHIZUKA S, OKA Y. Numerical analysis of droplet breakup behavior using particle method [J]. Journal Nuclear Science Technology, 2001, 38(12):1057-1065.

[12] YOON H Y, KOSHIZUKA S, OKA Y, et al. Direct calculation of bubble growth, departure, and rise in nucleate pool boiling [J]. Int. J. Multiphase Flow, 2001, 27(2):277-285.

[13] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. Journal Computer Physics, 1992, 100(2):335-340.

[14] ISHII M, GROLMES M A. Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow [J]. A. I. CH. E. J., 1975, 21(2):308-318.

(编辑 苗秀芝)