

水在流动油介质中雾化机理的数值模拟研究

章国芳^{1,2}, 袁竹林²

(1 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022)

2 东南大学 洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

[摘要] 基于一种制取流体冰的新方法, 对水在流动的互不相溶的油介质中的雾化机理进行了三维数值模拟, 求解连续性方程和动量守恒方程并考虑重力及表面张力的影响, 对压力速度耦合采用 PISO (Pressure Implicit Splitting Operators) 算法, 利用 VOF (Volume of Fluid) 方法中的 PLIC (Piecewise Linear Interface Construction) 技术追踪水与油介质之间的移动界面, 模拟多种情况下的流动状况, 分析了水在喷口处的流速、油的入口流速以及喷口直径对于雾化水滴大小的影响。模拟结果表明, 雾化形成的水滴平均直径随水在喷口处的流速增加而增大, 随油的入口流速的增加而减小; 喷口直径越大, 水滴的平均直径越大。

[关键词] 雾化, VOF 方法, 数值模拟

[中图分类号] TB61+1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2006)03-0031-05

Investigation on Water Atomization in Oil Flow with Numerical Simulation Method

ZHANG Guofang^{1,2}, YUAN Zhulin²

(1 School of Mechanical and Electronic Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

2 The Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Ministry of Education,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract Based on a new method to produce fluid ice, water atomization in immiscible oil flow is simulated numerically in this paper. A set of three-dimensional transient conservation equations of mass and momentum are established by taking surface tension and gravitational force effects into consideration. The governing equations are solved by using Pressure Implicit Splitting Operators (PISO) algorithm. The volume-of-fluid (VOF) method in conjunction with the multi-dimensional piecewise linear interface construction (PLIC) is applied to characterize the behavior of water-oil interface movement. The flow phenomena in different working conditions are researched. The results of simulation show that the average atomization diameter of water droplets increases with the velocity of water and decreases with the velocity of oil and it increases with the diameter of atomization pipe.

Key words atomization, VOF method, numerical simulation

0 引言

冰蓄冷空调在我国正得到推广使用。目前的冰蓄冷空调中普遍采用静态制冰, 随着制冰量的增加, 水与冷媒之间的热阻逐渐增大, 制冰率因而减小, 增加了能量损失。近年来, 流体冰的制作、研究及应用越来越引起制冰界的注意, 尤其是在发达国家。流体冰较块冰、片冰和壳冰而言, 最为显著的优点是在制冰过程中固体传热面上无冰层产生, 实现完全流动换热, 因此传热系数大, 传热温差小, 制取流体冰的性能系数 COP 可比制取块冰提高近一倍。目前制取流体冰的方法有很多^[1-2], 本文研究内容的背景是一种新提出的制取流体冰的方法: 载冷介质油流过蒸发器被冷却到 0℃以下, 在制冰通道中, 通过浸没于载冷介质中的喷头将淡水雾化成细小水滴并顺流喷入。水滴与周围低温载冷介质直接接触换热, 在流动过程中被冻成冰

收稿日期: 2005-11-10

作者简介: 章国芳 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事多相流动数值模拟的学习和研究。E-mail: zhang99@163.com

通讯联系人: 袁竹林 (1955-), 教授, 博士生导师, 主要从事气固两相流数值模拟计算的研究。E-mail: zlyuan@seu.edu.cn

颗粒. 流体冰在滤冰容器中进行分离, 冰晶送至蓄冰罐, 油介质则进入下一次循环^[3]. 在该制取流体冰新方法中, 水在流动油介质中的雾化特性至关重要, 研究喷口处水的流速、油的入口流速、喷口直径等对雾化水滴大小的影响并总结规律, 对雾化过程进行优化是急需解决的关键问题之一. 目前对一种液体在另外一种不相溶的液体中雾化的研究较少. 本文采用 VOF 方法对水在油介质中的雾化过程进行了数值模拟, 分析了水在喷口处流速、油的入口流速以及喷口直径对雾化水滴大小的影响.

1 VOF 方法与界面重构技术^[4]

VOF 方法通过定义一个流体体积函数 f , 使 f 的值等于一个单元内流体体积与该单元体积之比, 如果 $f = 1$ 说明该单元内充满流体; 如果 $f = 0$ 说明该单元内不含流体; 如果 $0 < f < 1$ 说明该单元内含有自由界面. 流体体积函数 $f(x, y, z, t)$ 满足:

$$\frac{df}{dt} = 0$$

(1)

在某一时刻, 只要求出 f , 就可以根据其值构造出每个网格上的自由面, 然后根据自由面的位置离散求解物理量的控制方程, 并且在自由面上可以进行一些细微处理, 以提高精度和分辨率.

本文采用 Youngs^[5] 提出的 PLIC 方法对移动界面进行重构, 在单个网格内用直线段近似界面. 先计算网格内界面的法向, 利用附近的 9 个网格在一起组成求解中心界面网格中界面法向的差分格式:

$$\mathbf{n} = (n_{ij}^x, n_{ij}^y)$$

(2)

其中, $n_{ij}^x = (f_{i+1,j+1} + 2f_{i+1,j} + f_{i+1,j-1} - f_{i-1,j+1} - 2f_{i-1,j} - f_{i-1,j-1})/\delta_x$,
 $n_{ij}^y = (f_{i+1,j+1} + 2f_{i,j+1} + f_{i-1,j+1} - f_{i+1,j-1} - 2f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1})/\delta_y$

然后根据法向可以确定界面与 x 轴的夹角 β , 并将其规格化为 α , 这样得到界面在网格内的 16 种不同的组合经过对称和翻转可以简化为 4 种情形 (如图 1 所示). 利用此夹角和网格内体积函数可以确定属于哪种类型, 然后计算直线的斜率与位置, 构造该网格内的界面, 并计算在一个时间步内流过四周边界的相邻网格的流体体积分量, 以修改本网格和四周相邻网格的流体体积函数, 迭代求解.

$$\beta = \tan^{-1}\left(-\frac{n^x}{n^y}\right)$$

(3)

$$\alpha = \tan^{-1}\left[\frac{\delta_x}{\delta_y} \tan\beta\right], \quad \pi/2 \leq \alpha \leq \pi$$

(4)

2 物理模型与数学模型

2.1 物理模型

根据本文的工程背景, 归纳获得以下物理模型: 水由单孔向上顺流喷入流动的油介质中, 形成雾化水滴. 如图 2 所示, 水与油的入口均为速度边界条件, 出口为压力边界条件, 其他为固体壁面边界条件, 管壁面为黏附条件. 本文在计算中考虑了重力和液体表面张力的影响.

2.2 基本控制方程

动量方程、连续性方程分别为:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T)] + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_b$$

(5)

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

(6)

式中, ρ 为密度; \mathbf{V} 为速度; p 为压力; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{F}_b 为体积力; μ 为粘度.

2.3 流体体积函数方程

定义一个流体体积函数 f , 使 f 的值等于一个单元内水的体积与该

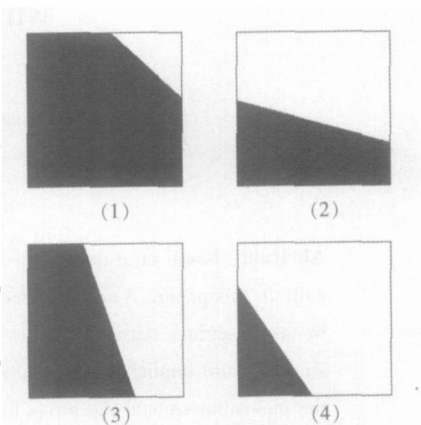


图 1 PLIC 方法的 4 种重构图像

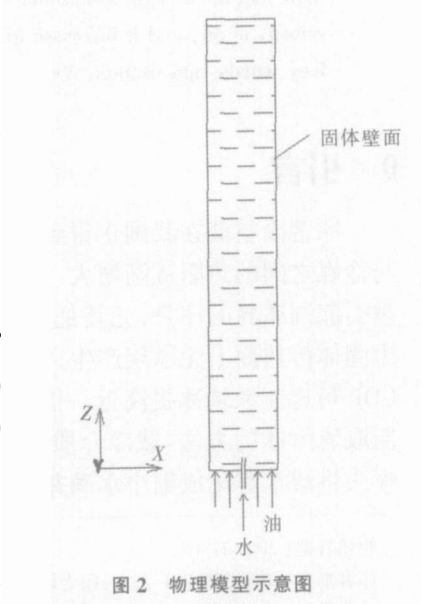


图 2 物理模型示意图

单元体积之比, 即:

$$f(x,y,z,t)=\begin{cases} 1 & \text{该网格内充满水} \\ >0 \text{ } <1 & \text{该网格内含有分界面} \\ 0 & \text{该网格内充满油} \end{cases} \tag{7}$$

该函数满足:

$$\frac{df}{dt}=0 \tag{8}$$

即:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+(V\cdot \nabla)f=0 \tag{9}$$

2.4 附加标量方程

计算网格内混和流体的平均密度和粘度依据下列两式进行计算:

$$\rho=f\cdot \rho_w+(1-f)\cdot \rho_o \tag{10}$$

$$\mu=\frac{f\cdot \rho_w\cdot \mu_w+(1-f)\cdot \rho_o\cdot \mu_o}{\rho} \tag{11}$$

式中, ρ_w 、 ρ_o 、 μ_w 、 μ_o 分别为水相、油相的密度和粘度.

2.5 表面张力

本文采用连续表面张力模型^[6] 模拟相界面上的表面张力, 使用散度原理可以将表面张力表示为体积力, 即:

$$F_b=\sigma k n|\nabla f| \tag{12}$$

作为源项添加到动量方程中. σ 为表面张力系数, k 为界面曲率. 曲率 k 可从垂直于界面的表面的局部梯度计算得出:

$$k=-\nabla\cdot n \tag{13}$$

3 网格划分与数值算法

本文建立与求解区域相适应的三维非结构化网格, 采用有限体积隐式迭代, 对流体体积函数方程、连续性方程、动量方程采用分离求解. 对流项为二阶迎风格式离散. 压力项离散采用 body force weighted 方法, 假定压力和体积力之差的法向梯度为定值. 对压力速度耦合采用 PISO 算法, 在 SMPLE 算法的基础上做了两个附加修正: 临近修正^[7]和偏斜修正^[8]. 临近修正采用一步或多步附加循环, 使修正速度满足连续性方程和动量方程, 从而减少重复计算; 偏斜修正在获得压力修正方程的初始解后, 对压力修正梯度进行重新计算, 更新质量通量修正, 从而改善由于网格偏斜而引起网格内质量通量修正与临近网格压力修正之间关系的粗略问题.

4 数值模拟结果

4.1 初始条件

以水和 25号变压器油为介质, 两相物性参数如下: 密度 $\rho_w=998.2\text{ kg/m}^3$; $\rho_o=895\text{ kg/m}^3$; 粘度 $\mu_w=0.001\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$; $\mu_o=0.179\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$; 表面张力系数 $\sigma=0.07269\text{ N/m}$.

4.2 边界条件

水在喷口处流速变化范围为 $1.5\sim 5\text{ m/s}$; 油在入口处流速变化范围为 $0.6\sim 1.35\text{ m/s}$; 压力出口 $P=0\text{Pa}$ (表压).

为了分析水和油的入口流速以及喷口直径大小对水在流动油介质中雾化水滴直径的影响, 保持水、油物性参数不变, 在不同喷口直径条件下, 水在喷口处流速不变而改变油的入口流速和油的入口流速不变而改变水在喷口处流速, 对水在流动油介质中的雾化过程进行了模拟, 参数如表 1 所示.

表 1 边界条件参数设置

喷口直径 <i>d</i> /mm	水在喷口处流速 <i>V</i> _水 /(m·s)	油的入口流速 <i>V</i> _油 /(m·s)
0.3	1.5	0.6~1.35
	1.5~5	0.75
0.5	1.5	0.6~1.35
	1.5~5	0.75

4.3 数值模拟结果

4.3.1 界面形状

图 3和图 4为流动方向 (z轴正向)上三维体积分数的截面图. 图 3为同一时刻 ($t=0.05\text{ s}$) 在孔径为 0.5 mm 、保持水在喷口处流速不变 (1.5 m/s) 的工况下所模拟的油的不同入口流速条件下水在油介质中的体积分布. 图 4为同一时刻 ($t=0.05\text{ s}$) 在孔径为 0.5 mm 、保持油的入口流速不变 (0.75 m/s) 的工况下所模拟的水在喷口处不同的流速条件下水在油介质中的体积分布. 其中, 深色代表水, 浅色代表油.

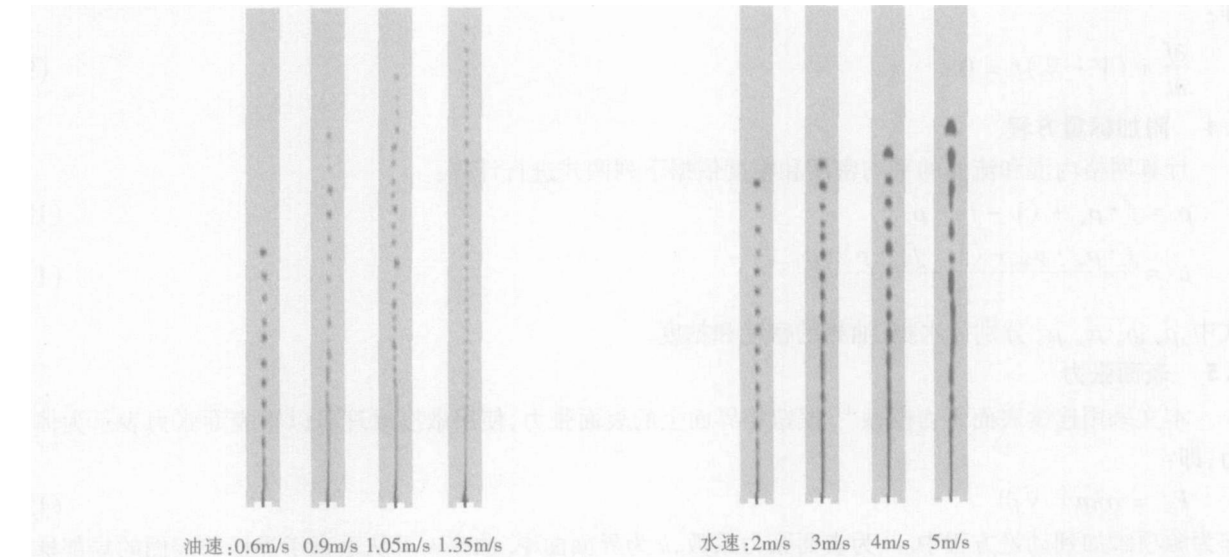


图 3 水速不变时水在油介质中雾化过程的数值模拟结果

图 4 油速不变时水在油介质中雾化过程的数值模拟结果

4.3.2 水滴直径

在对模拟结果的分析中, 由于水滴尺寸很小, 表面张力足以使之成为球形, 可以通过监测一定截面上水的流量获得水滴直径. 研究发现, 相同几何参数和雾化条件下, 水在油介质中雾化所形成的水滴直径存在一定的离散性, 如图 5 图 6所示. 图 5给出的是孔径为 0.5 mm 、保持水在喷口处流速不变 (1.5 m/s)、改变油的入口流速的条件下, 水在油介质中形成的第 1 到 6 个水滴的直径. 图 6给出的是孔径为 0.5 mm 、保持油的入口流速不变 (0.75 m/s)、改变水在喷口处流速的条件下, 水在油介质中形成的第 1 到 6 个水滴的直径.

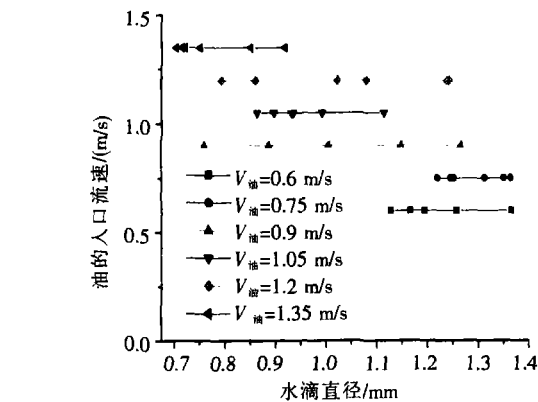


图 5 水在喷口处流速不变时水滴的直径

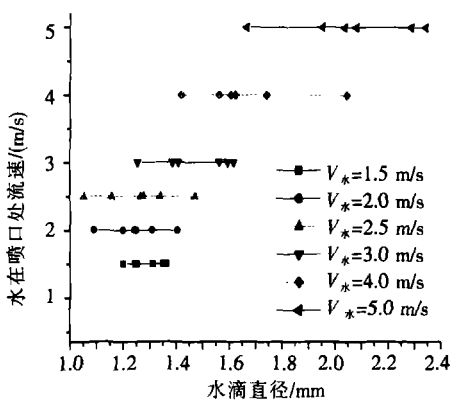


图 6 油的入口流速不变时水滴的直径

4.3.3 水滴平均直径

对每种工况雾化所形成的第 1 到 6 个水滴的直径取算术平均值作为水滴平均直径, 图 7所示为水在喷口处流速不变条件下水滴平均直径与油在入口流速以及喷孔直径之间的关系, 图 8所示为油在入口流速不变条件下水滴平均直径与水在喷口处流速以及喷孔直径之间的关系. 可以看出, 水速不变时雾化水滴的大小随油速的增大而减小, 油速不变时雾化水滴的大小随水速的增大而增大.

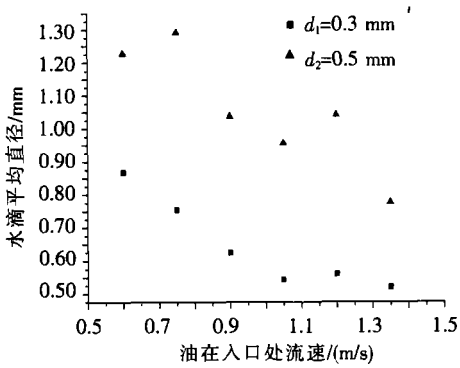


图7 水在喷口处流速不变时水滴平均直径

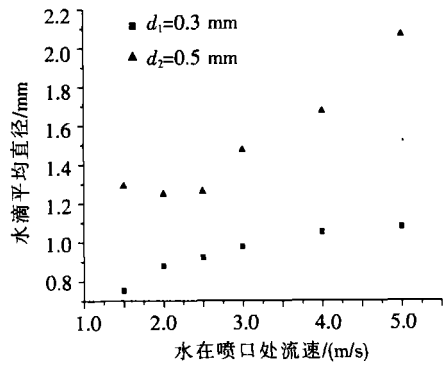


图8 油的入口流速不变时水滴平均直径

5 结论

本文通过模拟不同的油的入口流速、水在喷口处流速以及喷口直径条件下水在流动油介质中的雾化过程,对雾化水滴直径的变化特征及规律进行分析,得出以下结论:

- (1) 本文利用 VOF 方法成功地模拟出水在流动油介质中的雾化情况;
- (2) 相同几何参数和雾化条件下,水在流动油介质中雾化所形成的水滴直径存在很大的离散性,但其平均直径的变化趋势很明显;
- (3) 喷口直径增大,雾化水滴平均直径增大;水在喷口处流速不变时,雾化形成的水滴的平均直径随油的入口流速的增大而减小;油的入口流速不变时,水滴的平均直径随水在喷口处流速的增大而增大。

[参考文献] (References)

- [1] NABA H. Fundamental study on continuous icemaking using flowing supercooled water[J]. Journal JSME, 1994, 37(2): 385-393
- [2] OKAWA S, SAITO A, M NAM I R. The solidification phenomenon of the supercooled water containing solid particle[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(1): 108-117
- [3] 袁竹林. 制取流体冰新方法及其高效冰蓄冷研究[J]. 能源研究与利用, 2004(4): 36-40
YUAN Zhulin. New method of ice slurry production and high efficiency of ice-cooling storage[J]. Energy Research and Utilization, 2004(4): 36-40 (in Chinese)
- [4] 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
LIU Ruxun, WANG Zhifeng. Numerical Simulation Method and Moving Interface Tracking[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001 (in Chinese)
- [5] YOUNGS D L. Time-Dependent multimat erial flow with large fluid distortion[C] // MORTON K W, BAINES M J. Numerical Methods for Fluid Dynamics. New York: Academic Press, 1982. 273-285
- [6] BRACKBILL J U. A continuum method for modeling surface tension[J]. Journal of Computational Physics, 1992, 100(3): 335-354
- [7] ISSA R I. Solution of implicitly discretized fluid flow equations by operator splitting[J]. J Comput Phys, 1986, 62(1): 40-65
- [8] FERZIGER J L, PERIC M. Computational Methods for Fluid Dynamics[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1996

[责任编辑: 刘 健]