

引用格式:谢震非,许兰喜,李殿卿. 旋转液膜反应器高度对临界流量影响的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 107–111.

XIE ZhenFei, XU LanXi, LI DianQing. A study of the influence of the height of a rotating liquid film reactor on its critical volume flow rate[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(5): 107–111.

旋转液膜反应器高度对临界流量影响的研究

谢震非 许兰喜* 李殿卿

(北京化工大学 理学院, 北京 100029)

摘要:提出了一种计算临界流量(CVFR)的数值方法,它基于计算流体力学和 Navier–Stokes (N–S) 方程,依据旋流数选取湍流模型,使模型的选取规范化;同时引入可攀爬壁面函数来提高边界处流体速度的计算精度,并采用自适应时间步长以及网格自适应方法对反应器临界流量进行数值求解,进一步提升计算准确度。通过对不同转速、高度、夹缝宽度及倾角的临界流量数值研究发现,计算结果与实验结果一致性较好,验证了算法有一定的可靠性。在此基础上进一步研究了临界流量与反应器高度的关系,并分析了临界流量对反应器高度和速度的偏弹性。

关键词:旋转液膜反应器; 临界流量; Navier–Stokes (N–S) 方程

中图分类号: O242.1 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.05.016

引言

沉淀法是制备纳米材料主要手段之一。传统搅拌釜反应器由于自身结构以及反应物混合效率的局限,无法对沉淀反应过程精准控制,影响了生成物作为功能材料的性能。Guo 等^[1]使用旋转液膜反应器研究可控的沉淀反应后发现,该反应器的沉淀产物与传统反应器相比粒径更小,而且沉淀产物的粒径分布范围更窄,同时当给定间隙和转速时,反应物溶液进入反应器的流量为一固定值,此时不会有空气随物料进入反应器;当流体的加入速度小于固定流量时,旋转液膜反应器的反应空间中会被带入大量空气,导致沉淀反应的影响因素复杂化,使反应器数学模型的建立十分困难,而当流体的加入速度大于固定流量时,物料将从反应器的入口处溢出。因此定义反应器在固定的间隙与转子转速下无空气进入且无物料溢出时的最大流量为临界流量(CVFR)。

临界流量是反应器进行纳米颗粒生成实验和产物粒径数值模拟的重要前提,文献[2–6]研究了旋

转液膜反应器模型的流场,但没有涉及临界流量。艾俐博等^[7]首次计算了不同间隙宽度和转速下的临界流量,但是得到的数值解相对实验结果的误差较大。董利君等^[8]采用文献的计算方法研究了反应器侧面与底面夹角对临界流量的影响。

本文在文献[7]计算方法的基础上,考虑了壁面湍流对临界流量的影响并引入了边界层网格;采用可攀爬壁面函数替代增强型壁面函数,提高了壁面处的计算精度;采用网格自适应以及自适应时间步长以提高计算精度;同时采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型替换 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。计算发现,新方法得到的数值解与实验值吻合较好。在验证方法可靠性的基础上,分析了反应器模型临界流量随反应器高度的变化情况,并比较了临界流量对转子转速和反应器高度的敏感程度。

1 反应器数学模型

1.1 反应器几何结构

旋转液膜反应器由内部的转子、外部的定子以及导流区3部分组成,流体从导流区进入定子与转子的间隙。目前,实验室订制了新的旋转液膜反应器,新反应器高 $H = 45\text{ mm}$, 上底半径 $R_3 = 20.94\text{ mm}$, 下底半径 $R_1 = 25.75\text{ mm}$, 侧面与底面夹角 $\alpha = 85^\circ$ (原反应器 $H = 17\text{ mm}$, $R_3 = 20.4\text{ mm}$, $R_1 = 25\text{ mm}$, $\alpha = 75^\circ$)。反应器转子绕 z 轴旋转,夹缝间隙 $d =$

收稿日期: 2019-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(21627813)

第一作者: 男, 1994年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: xulx@mail.buct.edu.cn

$R_2 - R_1$, 值在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 之间变化; 转子转速 Ω 在 $500 \sim 5000 \text{ r/min}$ 范围内变化; 导流区高度 h 取 2 mm 。实验中通过调节定子的半径 R_2 来改变夹缝宽度。反应器具体结构如图 1 所示。

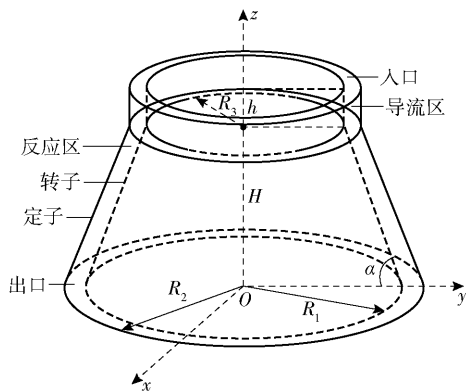


图 1 旋转液膜反应器结构图

Fig. 1 The geometric shape of the rotating liquid film reactor

1.2 数学模型

反应器入口处静压与出口处静压都接近大气压, 为简便计算, 设入口和出口静压都等于大气压。测量临界流量时以水作为研究对象, 满足不可压 Navier-Stokes (N-S) 方程, 侧面边界条件为无滑移。考虑反应器的几何结构, 在柱坐标下进行运算。此时控制方程可以表示成如下形式。

动量方程

$$\frac{Du_r}{Dt} - \frac{u_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\Delta u_r - \frac{u_\theta}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

$$\frac{Du_\theta}{Dt} + \frac{u_r u_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\Delta u_\theta - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \quad (2)$$

$$\frac{Du_z}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta u_z \quad (3)$$

连续性方程

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

且满足

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial}{\partial z}$$

式中, ρ 、 p 和 ν 分别表示密度、压力和运动学黏性系数, u_r 、 u_θ 、 u_z 分别为流体速度在 r 、 θ 、 z 方向上的分量。设流体速度为 \mathbf{u} , 则有 $\mathbf{u} = u_r \mathbf{e}_r + u_\theta \mathbf{e}_\theta + u_z \mathbf{e}_z$, 其中 \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_θ 、 \mathbf{e}_z 为单位向量。壁面的边界条件为

$$\begin{cases} u_r|_{\text{rotor, stator}} = u_\theta|_{\text{stator}} = u_z|_{\text{rotor, stator}} = 0 \\ p|_{\text{inlet}} = p|_{\text{outlet}} = p_0 \\ u_\theta|_{\text{rotor}} = (R_1 - z \cot \alpha) \Omega \end{cases} \quad (5)$$

式中 p_0 是标准大气压。

2 数值方法

基于 N-S 方程(式(1)~(4))以及边界条件(式(5)), 使用有限体积法进行计算。从反应器中选择一个横截面, 在柱坐标下求解临界流量。为了提高精度, 在反应器壁面上引入边界层, 并采用网格自适应以及自适应时间步长在 Fluent 上计算得到收敛的解。

模型采用压力入口和压力出口, 在 Gambit 中基于四边形模型区域进行网格划分, 边界层厚度的计算值不同, 划分的网格数也有所不同, 从几万到一百多万个不等。

在临界流量的计算中, 模型的选取十分重要, 模型选取又和反应器内流体的分类相关。因为反应器内流体属于旋转对称流, 因此需要考察旋流数, 其定义如下

$$S = \frac{2G_\phi}{(R_1 + R_3)G_x} \quad (6)$$

式中, G_ϕ 和 G_x 分别为角动量的轴向通量和轴向动量的轴向通量。当旋流数 $S > 0.5$ 时, 应使用雷诺应力模型, 当 $S < 0.5$ 时, 应使用 $k-\varepsilon$ 模型。通过计算发现 $S < 0.5$, 且采用 $k-\varepsilon$ 模型中的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型稳定性最好, 所以采用该模型进行计算。

反应器中边界处理对临界流量的计算很关键, δ 是由雷诺数决定的, 其经验公式为

$$\delta = 0.035 d Re^{-\frac{1}{7}} \quad (7)$$

其中雷诺数 Re 的表达式为

$$Re = \frac{\Omega(R_3 + R_1)d}{2\nu} \quad (8)$$

通常在距壁面距离为 δ 到 $y^+ = 5$ 之间有 5 层网格, 在壁面距离为 $y^+ = 5 \sim 30$ 之间有 20 层左右的网格, 使用边界层可提高对边界处小扰动的解算能力, 增加模型精度。

反应器网格具体结构如图 2 所示。

计算发现, 使用可攀爬壁面函数与 Realizable $k-\varepsilon$ 模型最匹配, 因此选用该函数作为壁面函数, 并在此基础上使用网格自适应以及自适应时间步长来提高模型的精度。

模型中的湍流作用会导致计算结果不收敛, 需

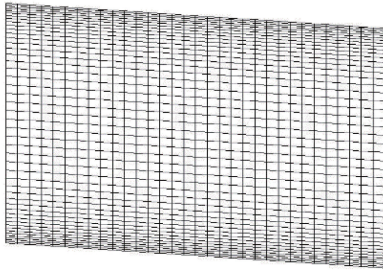


图 2 原反应器夹缝宽 0.3 mm 时的网格分段示意图

Fig. 2 A segment of the original mesh of the rotating liquid film reactor for a gap size of 0.3 mm

要分步计算提高结果的稳定性。首先计算未受旋转影响的流场情况,通过对流场预估来提高结果的精确性。然后使反应器转子开始旋转,只计算旋转产生的动量变化对流场的影响,同时要考虑到出现湍流的情况。结果稳定后忽略旋转对流场的影响,转而考虑其他方向速度对流场的影响,这一步也要考虑湍流的影响,结果稳定后联立方程并计算得到充分耦合的解。

3 数值模拟结果

3.1 算法的可靠性

图 3 是高 17 mm、倾角 75° 的反应器在夹缝间隙 $d=0.3\text{ mm}$ 、转速从 1000 r/min 变化到 5000 r/min 时的实验结果及数值结果对比,可以发现临界流量的数值解与实验值吻合较好,说明反应器模型和算法比较可靠。

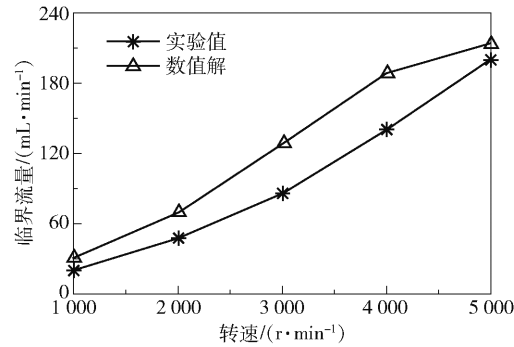


图 3 夹缝 0.3 mm 时原反应器临界流量实验值与计算结果比较

Fig. 3 Comparison of the experimental and the numerical results of the CVFR with a gap size of 0.3 mm

为了证明这种 $k-\varepsilon$ 模型和算法适用于较广泛的倾角、夹缝和高度,通过新反应器模型进行验证,新反应器高 45 mm,倾角 85°。图 4 是该模型在 $d=0.15\text{ mm}$ 时不同转速下的实验值与计算值对照。可以看出,临界流量的实验值与计算结果差距不大。

结合图 3 可知,本文数学模型及计算方法对不同的反应器参数都有一定的适用性,综合来看可以运用该模型对不同高度的反应器进行研究。

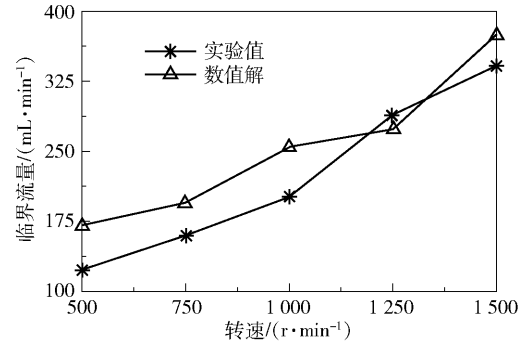


图 4 夹缝 0.15 mm 时新反应器临界流量实验值与数值计算结果比较

Fig. 4 Comparison of the experimental and the numerical results of the CVFR with a gap size of 0.15 mm

3.2 反应器高度对临界流量的影响

本节针对倾角 85°、夹缝宽 0.3 mm 的新反应器模型,研究其入口半径不变,高度 H 分别为 17 mm、24 mm、31 mm、38 mm、45 mm 时临界流量随转速的变化情况,结果如图 5 所示。

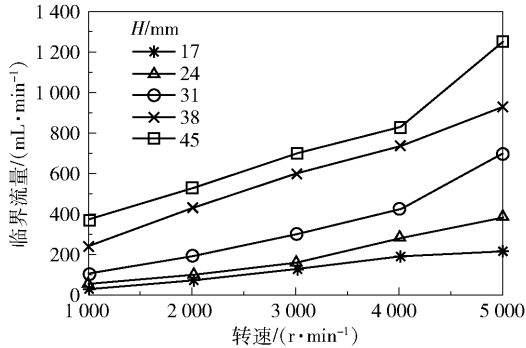


图 5 不同高度下临界流量数值计算结果随转速变化情况

Fig. 5 Numerical results of the CVFR with respect to the rotor speed for different heights

由图 5 可以看出,同一转速下,随着高度的增加,临界流量也随之增大,高度为 45 mm 和 38 mm 时反应器的临界流量增幅最大。

3.3 临界流量对反应器高度和转速的偏弹性

为了计算临界流量对高度的偏弹性,本文引入偏弹性的概念。假设临界流量是反应器高度 H 和转速 Ω 的函数,用 $f(\Omega, H)$ 表示。若使用坐标表示模型中转子的转速以及高度,则临界流量在点 (Ω_0, H_0) 处对 H 和 Ω 的偏弹性分别由式 (9)、(10) 计算。

$$\left. \frac{Ef}{EH} \right|_{(\Omega_0, H_0)} = \frac{f(\Omega_0, H_0 + \Delta H) - f(\Omega_0, H_0)}{f(\Omega_0, H_0)} \frac{H_0}{\Delta H} \quad (9)$$

$$\left. \frac{Ef}{E\Omega} \right|_{(\Omega_0, H_0)} = \frac{f(\Omega_0 + \Delta\Omega, H_0) - f(\Omega_0, H_0)}{f(\Omega_0, H_0)} \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega} \quad (10)$$

设 $\Delta H = 7 \text{ mm}$, $\Delta\Omega = 1000 \text{ r/min}$, 基于方程(9)、(10)计算图5中临界流量数值解对高度和速度的偏弹性, 结果如图6和图7所示。

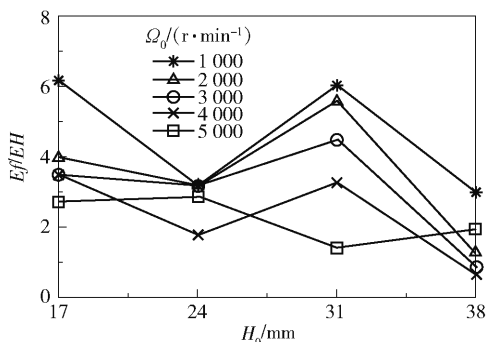


图6 不同转速下临界流量对高度的偏弹性

Fig. 6 Variation of the partial elasticity of the CVFR with height for different rotor speeds

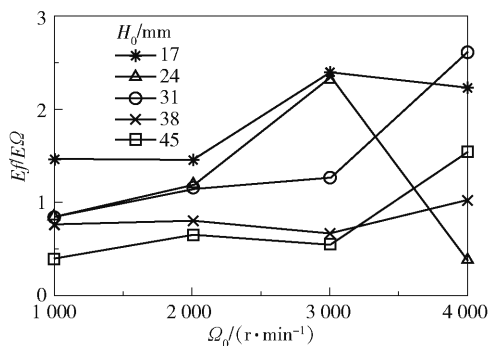


图7 不同高度下临界流量对转速的偏弹性

Fig. 7 Variation of the partial elasticity of the CVFR with rotor speed for different heights

从图6中可以看出, 临界流量对高度的偏弹性在 $\Omega_0 = 1000 \text{ r/min}$ 、 $H_0 = 17 \text{ mm}$ 处达到最大值, 为 6.15; 随着转速的增大, 临界流量对高度变化的敏感度整体呈下降趋势。

从图7可以看出临界流量对转速的偏弹性在 $\Omega_0 = 4000 \text{ r/min}$ 、 $H_0 = 31 \text{ mm}$ 处达到最大值; 随着高度的增加, 临界流量对转速的敏感度整体呈下降趋势。

综合二者来看, 临界流量对高度的敏感度整体上要大于对转速的敏感度, 但是随着转速和高度的增大, 对转速和高度的敏感性均逐渐减弱。

4 结论

本文提出了一种求解旋转液膜反应器临界流量的方法, 并计算了在新、旧两种参数的反应器中临界流量随转速的变化情况, 计算结果与实验符合较好, 证明本文方法对不同高度、不同倾角、不同夹缝宽度以及不同转速的反应器都有一定的适用性。临界流量随反应器高度的变化情况及其对高度和转速偏弹性的计算结果表明, 临界流量对高度的敏感性要大于对转速的敏感性。本文得到了对临界流量的初步计算结果, 后续将对湍流模型进行一定的修正, 使模型与反应器更契合, 计算结果的精确度更高。

参考文献:

- [1] GUO S C, EVANS D G, LI D Q, et al. Experimental and numerical investigation of the precipitation of barium sulfate in a rotating liquid film reactor[J]. *AIChE Journal*, 2009, 55(8): 2024–2034.
- [2] NOUIMEHIDI M N, OHMURA N, KATAOKA K. Mechanism of mode selection for Taylor vortex flow between coaxial conical rotating cylinders[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2002, 16: 247–262.
- [3] XU X F, XU L X. A numerical simulation of flow between two rotating coaxial frustum cones[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2009, 14: 2670–2676.
- [4] NOUIMEHIDI M N, OHMURA N, KATAOKA K. Numerical computation of apex angle effects on Taylor vortices in rotating conical cylinders systems[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2002, 35(1): 22–31.
- [5] ZHANG Y X, XU L X, LI D Q. Numerical computation of end plate effect on Taylor vortices between rotating conical cylinders[J]. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, 2012, 17: 235–241.
- [6] LI Q S, WEN P, XU L X. Transition to Taylor vortex flow between rotating conical cylinders[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2010, 22(2): 241–245.
- [7] 艾俐博, 许兰喜, 李殿卿. 旋转液膜反应器内临界流量的数值模拟[C]//第二十六届全国水动力学研讨会论文集. 青岛, 2014: 1138–1143.
- [8] AI L B, XU L X, LI D Q. Numerical investigation of critical volume flow rate in a rotating liquid film reactor[C]//*Proceedings of the 26th National Seminar on Hydro-dynamics*. Qingdao, 2014: 1138–1143. (in Chinese)
- [8] 董利君, 许兰喜, 艾俐博. 旋转液膜反应器倾斜角对临界流量影响的研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*

科学版), 2015, 42(6): 120 – 123.

DONG L J, XU L X, AI L B. A study of the influence of the tilt angle of the rotating liquid film reactor on its critical volume[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2015, 42 (6): 120 – 123. (in Chinese)

A study of the influence of the height of a rotating liquid film reactor on its critical volume flow rate

XIE ZhenFei XU LanXi * LI DianQing

(Faculty of Science , Beijing University of Chemical Technology , Beijing 100029 , China)

Abstract: A rotating liquid film reactor is considered to an ideal reactor for controlling the process of precipitation. Precipitation reactions have been carried out in such a reactor at a critical volume flow rate, which was obtained experimentally. In this work, a numerical method for computating the critical volume flow rate (CVFR) based on computational fluid dynamics and the Navier–Stokes (N–S) equations is introduced. The turbulence model is selected by calculating the swirl number in order to standardize model selection. Choosing a scalable wall function is helpful in reducing errors. The computational accuracy is also increased by using a self-adaptive mesh and an adaptive time step. The results agree well with experiment, which suggests the method has good reliability. We subsequently used the method to study the relationship between the CVFR and the reactor height, and analyzed the changes in partial elasticity of the CVFR as a function of rotor speed for different heights, and as a function of height for different rotor speeds.

Key words: rotating liquid film reactor; critical volume flow rate; Navier–Stokes (N–S) equations

(责任编辑:汪 琴)