

文章编号:1671-6833(2006)02-0052-04

搅拌反应器流场的数值模拟

魏新利,任杰,王定标,孟祥睿

(郑州大学化工学院,河南 郑州 450002)

摘要:使用数值模拟的方法研究了一种搅拌反应器的流场特点,采用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型分析流场,采用多重参考系法处理搅拌桨区域.结果显示:改进的弧形叶桨形成的流场具有典型的径向流特点,而且轴向流动有所加强;标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型均能较准确地预测搅拌槽内轴向的最大速率,但 RNG $k-\epsilon$ 模型所得结果更为准确;搅拌槽内的湍流能量主要产生于桨叶周边区域和槽近壁区域;但是桨叶下方区域受循环流动的影响比较弱,而且 k 值比较小,应该使桨叶更接近槽底部,或者采用带 45° 倾角的折叶桨,从而加强桨叶的轴向输送能力,改善混合效果.

关键词:数值模拟;搅拌反应器;湍流模型;多重参考系法

中图分类号: TQ 051.8 **文献标识码:** A

0 引言

搅拌反应器^[1]是一种在化学、化工和制药工业中常见的反应器类型,它既可用于均相反应,又可用于多相反应,既可间歇操作,又可连续操作,而且具有搅拌桨结构多样、操作范围宽、设计技术成熟等诸多优点.

对于一些生化反应,固体物料在反应液中的分散程度直接影响着反应的效率.常见的生化反应器都采用循环流动效果较好的径流式搅拌桨,但是往往得不到理想的混合效果,底部固体物料堆积比较严重.如果采用轴流式搅拌桨,又由于轴向速率过大而影响了反应的进行,所以本研究采用了一种改进的径流式搅拌桨,由于其特殊的结构可以加强轴向输送能力,从而改善了混合效果,提高了反应的效率.

本研究采用的是计算流体力学(CFD)的方法,该方法针对传递过程及反应性能的特点,使用模拟软件求解描述过程局部性能的方程组,从而可以准确地直观地描绘出搅拌反应器内部的混合过程及流动状况.本研究使用 CFD 软件 Fluent 对搅拌反应器的流场进行数值模拟,并对宏观流场、时均速度及湍动性能进行分析,然后对搅拌桨和反应器的结构提出改进意见.

1 数学模型与模型方法

1.1 控制方程

CFD 方法的基本步骤就是建立控制方程,并离散化,然后求解离散方程,判断其收敛性从而得出计算结果.其中控制方程包括连续方程、动量方程、能量方程^[2]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \bar{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \bar{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \bar{u}) = \text{div}(\mu \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (5)$$

式中: ρ 为密度; μ 为动力黏度; t 为时间; T 为温度; p 为压力; k 为传热系数; c_p 为比热容; u, v, w 为速度矢量 \bar{u} 的三个分量; S_u, S_v, S_w 为广义源项; S_T 为黏性耗散项.

1.2 湍流模型

搅拌反应器的流场以湍流为主,对于这种高度非线性复杂流动形式,需要对瞬态的 Navier-Stokes 方程作时间平均处理. Reynolds 平均法(RANS)是目前应用最广泛的湍流数值模拟方法,

收稿日期:2006-01-30;修订日期:2006-03-03

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(004031500);国家“211工程”重点学科建设资助项目.

作者简介:魏新利(1956-),男,河南省辉县人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事高效节能过程装备的研
万方数据 究与开发.

本研究使用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型对搅拌反应器的流场进行数值模拟. 标准 $k-\epsilon$ 模型先求解湍流动能 k 方程和湍流耗散率 ϵ 方程, 然后再用得到的 k 和 ϵ 的值计算湍流黏度, 最后根据 Boussinesq 涡黏假设得到 Reynolds 应力的解, 从而使 Reynolds 时均化方程组封闭^[3]. RNG $k-\epsilon$ 模型是根据重正化群 (Renormalization Group) 理论, 在标准 $k-\epsilon$ 模型的基础上发展起来的改进形式. 通过对黏度项的修正体现了小尺度的影响, 考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况^[2], 因此可以更好地处理流线弯曲程度较大的流动.

1.3 模型方法

在对搅拌反应器进行模拟时, 一个重要的问题就是解决运动的桨叶和静止的挡板之间的相互作用, 为此提出了不同的模型方法: “黑箱”模型法^[4]、内外迭代法^[5]、多重参考系法^[6]、滑移网格法^[7]、大涡模拟法^[8]. 本研究使用多重参考系法 (MRF), 将搅拌反应器分为搅拌桨区域和桨外区域, 两个不同区域的速度匹配直接通过在交接面上的插值转换来实现. 该方法的优点是对整体流场的稳态数值模拟, 计算量小, 比较适合预测桨叶与挡板相互作用较弱的体系. 该方法已经植入 CFD 软件 Fluent 中.

2 数值模拟

2.1 几何模型

本研究的对象是一个生化制氢反应的搅拌反应器, 本来使用的搅拌桨是径流式的平直叶桨, 但发现混合效果并不好, 反应器底部固体物料堆积比较严重, 根据洪厚胜^[9]的研究, 应该加强该反应器的轴向输送能力, 使固体颗粒易于悬浮, 使物料混合更加均匀, 从而提高反应的效率和氢气的产出率.

计算所采用的搅拌槽为圆柱形, 槽直径为 183 mm, 液位高为 190 mm. 使用的搅拌桨的结构如图 1 所示, 形状类似于平直叶桨, 但叶片呈弧形, 桨叶直径为 110 mm, 离槽底的高度为 50 mm. 搅拌桨的转速为 70 r/min.

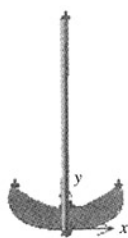


图1 搅拌桨结构图

万方数据 1 Structure of stirring impeller

2.2 网格划分与边界条件

本研究采用非结构单元划分网格, 搅拌桨区域采用四面体的非结构化网格, 桨外区域采用六面体的非结构化网格, 共有 423 166 个单元网格, 如图 2 所示.



图2 搅拌槽内网格图

Fig.2 Grid in stirred tank

根据多重参考系法, 搅拌桨区域采用旋转坐标系, 该区域流体随桨叶转动; 桨外区域采用静止坐标系, 槽壁、搅拌轴壁均取固壁条件; 自由液面假定为在搅拌过程中始终水平, 取为压力入口条件.

2.3 数值解法

计算使用 Fluent6.2 软件, 采用有限体积法来离散方程, 对流项的离散采用二阶迎风格式, 压力插值的方式采用 PRESTO 格式, 压力-速度耦合的方式采用 SIMPLEC 格式. 湍流模型分别采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型, 靠近壁面的区域采用标准壁面函数处理.

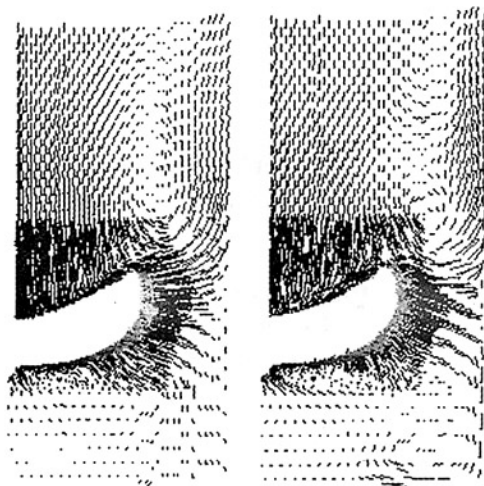
3 模拟结果及分析

3.1 宏观流场

图 3 为采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型所得到的宏观流场速度矢量图. 两种模型得到的结果基本相似, 由槽内整体的流动形式可以看出, 这种搅拌桨具有典型的径向流“双循环”流动形式. 流体在桨叶区产生高速径向射流, 撞击到槽壁后, 径向排出的流体分为两部分: 一部分沿槽壁向上流动, 到达液面后又沿搅拌轴向下流回叶轮区; 另一部分向下流向槽底, 到达槽底后又沿搅拌轴向上流回叶轮区.

但是与典型的平直叶桨宏观流场不同的是其径向流动相对减弱, 轴向流动有所加强, 而且桨叶下方的循环流动区域减小, 有利于固体颗粒的悬浮. 同时从图中也可以看出, 桨叶下方区域受循环流动影响比较弱, 速度矢量比较小, 所以应该增加

桨叶的插入深度,使桨叶更接近槽底部,加强桨叶的轴向输送能力,充分带动底部物料的循环流动.



(a) 标准 $k-\epsilon$ 模型 (b) RNG $k-\epsilon$ 模型

图 3 宏观流场速度矢量图

Fig.3 Velocity vector field in stirred tank

3.2 时均速度

沿着桨叶尖端做两条直线,如图 4 中 a, b 所示,分别考察采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型所得到的直线 a, b 上的速率分布.

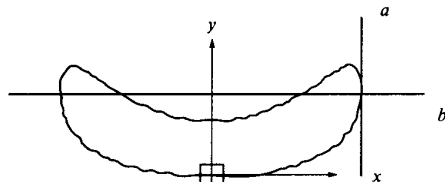


图 4 直线 a, b 位置示意图

Fig.4 Location of straight lines a and b

图 5 为沿搅拌轴方向的直线 a 上的速率分布图(y 为轴向坐标).可以看出,在桨叶尖端($y = 0.03$ m)两侧的速率 u 非常大,与桨叶下方和槽上部循环区域的速率相差较多.而且采用两种湍流模型的模拟结果比较相近,对搅拌槽内轴向的最大速率的预测还是比较准确的.

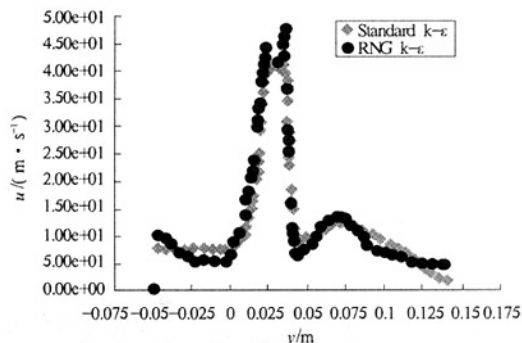


图 5 直线 a 上的速率分布图

Figure 5 Velocity distribution of straight line a

图 6 为沿搅拌槽半径方向的直线 b 上的速率分布图(r 为径向坐标).可以看出,在桨叶尖端($r = \pm 0.055$ m)两侧的速率 u 非常大,与桨叶弧形区域和槽近壁区域的速率相差较多.虽然采用两种湍流模型在搅拌槽主体区域的模拟结果比较相近,但是在桨叶弧形区域的模拟结果明显不同, RNG $k-\epsilon$ 模型的结果比标准 $k-\epsilon$ 模型的大.这是因为 RNG $k-\epsilon$ 模型通过修正湍动黏度,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,所以 RNG $k-\epsilon$ 模型所得结果应该更为准确.

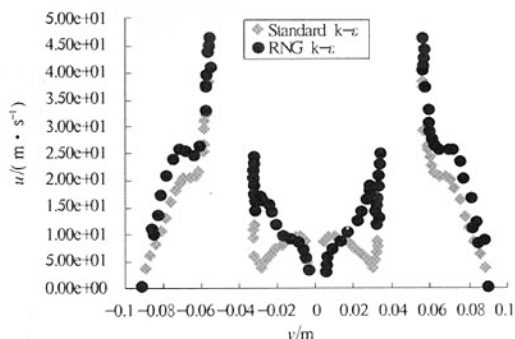


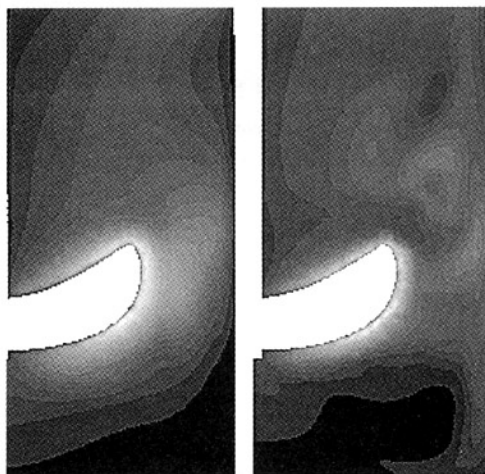
图 6 直线 b 上的速率分布图

Fig.6 Velocity distribution of straight line b

3.3 湍动性能

搅拌槽内的湍动性能参数分布与固液混合效果密切相关.图 7 为采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型所得到的湍流动能分布图.湍流动能 k 定义为单位质量流体的湍流脉动动能^[10],它是平均速度 \bar{u} 和湍流强度 I 的函数:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{u} I)^2 \quad (6)$$



(a) 标准 $k-\epsilon$ 模型 (b) RNG $k-\epsilon$ 模型

图 7 湍流动能分布图

Fig.7 Distribution of turbulent kinetic energy

由图可以看出,桨叶周边区域的 k 值最大,沿搅拌槽主体区域逐渐减小,在液面处和槽底部的 k 值最小,并且在槽近壁区域的 k 值也较大,这说明湍流能量主要产生于桨叶周边区域和槽近壁区域,这些区域湍动程度比较高,混合效果比较好。

但是同时从图中也可以看出,在桨叶下方区域的 k 值还是比较小,而且仅仅靠增加桨叶的插入深度来改进所得效果并不明显,建议采用带 45° 倾角的折叶桨。这种桨为混流式搅拌桨,不仅可以改善循环流动效果,而且可以减少底部固体物料的堆积,具有径流式桨和轴流式桨的优点。

4 结论

(1) 该搅拌反应器的弧形叶桨形成的流场具有典型的径向流“双循环”流动形式,而且轴向流动有所加强,有利于固体颗粒的悬浮。但是桨叶下方区域受循环流动的影响还是比较弱,应该使桨叶更接近槽底部,加强桨叶的轴向输送能力。

(2) 采用标准 $k-\epsilon$ 模型和 RNG $k-\epsilon$ 模型对搅拌槽内轴向的最大速率的预测还是比较准确的。但是 RNG $k-\epsilon$ 模型通过对湍动黏度的修正,所得结果比标准 $k-\epsilon$ 模型的更为准确。

(3) 搅拌槽内的湍流能量主要产生于桨叶周边区域和槽近壁区域,这些区域的混合效果比较好。但是在桨叶下方区域的 k 值还是比较小,建议采用带 45° 倾角的折叶桨,不仅可以改善循环流动

效果,而且可以减少底部固体物料的堆积。

参考文献:

- [1] 郑津洋,董其伍,桑芝富.过程设备设计[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [2] 王福军.计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 魏新利,张海红,王定标.旋风分离器流场的数值计算方法研究[J].郑州大学学报(工学版),2005,26(1):57~60.
- [4] HARVEY P S, GREAVES M. Turbulent flow in an agitated vessel(Part I): a predictive model[J]. Trans Inst Chem Eng, 1982, 60(a): 195~200.
- [5] BRUCATO A, CIOFALO M, GRISAFI F, et al. Complete numerical simulation of flow fields in baffled stirred vessels: the inner - outer approach [A]. 8th Euro Conf on Mixing[C]. Cambridge, 1994. 155~162.
- [6] LUO J V, ISSA R I, GOSMAN A D. Prediction of impeller induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference[J]. IChemE Symp Ser, 1994, 136: 549~556.
- [7] LUO J V, GOSMAN A D, ISSA R I, et al. Full flow field computation of mixing in baffled stirred reactors[J]. Trans IChemE, 1993, 71(A): 342~344.
- [8] EGGLES G M. Direct and large - eddy simulations of turbulent flow using the lattice - boltzmann Scheme[J]. Int J Heat Fluid Flow, 1996, 17: 307~323.
- [9] 洪厚胜,张庆文,万红贵,等. CFD 用于机械搅拌生化反应器液固两相混合的研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2004, 20(3): 249~254.

Numerical Simulation of Flow Field in a Stirred Reactor

WEI Xin - li, REN Jie, WANG Ding - biao, MENG Xiang - rui

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The flow field feature in a stirred reactor has been studied by numerical simulation. This study uses $k-\epsilon$ Two - Equation turbulent model, and disposes the area around stirring impeller with multi - reference frame method. As the results show, the flow field generated by the improved arc blade impeller has typical radial flow feature, and the axial flow has been enhanced. The turbulent model of Standard $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ both can accurately predict axial maximum velocity in stirred tank, and the outcome of RNG $k-\epsilon$ model is more accurate. The turbulent energy in stirred tank is mainly generated in the area around impeller and near tank wall. But the area under stirring impeller is influenced by circular flow more weakly, and the parameter k is smaller. So the stirring impeller should be located more near towards the bottom of stirred tank, or should use folding blade impeller with 45° pitch angle, in order to enhance the axial delivering capability of stirring impeller and improve the mixing effect.

Key words: numerical simulation; stirred reactor; turbulent model; multi - reference frame method