

1-3-2019

CFD Based Analysis and Improvement of the Flow Field of Stirred Tank Reactor for Crystallization

Zewen Ma

School of Control Science and Engineering (SCSE), Dalian university of technology, Dalian 116024, China;

Liu Tao

School of Control Science and Engineering (SCSE), Dalian university of technology, Dalian 116024, China;

Xudong Sun

School of Control Science and Engineering (SCSE), Dalian university of technology, Dalian 116024, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

CFD Based Analysis and Improvement of the Flow Field of Stirred Tank Reactor for Crystallization

Abstract

Abstract: The computational fluid dynamics (CFD) method is adopted to analyze the flow field of 1L stirred tank reactor for crystallization. *A popular CFD software named FLUENT is used to analyze the influence of a single layer turbine agitator on the flow field in a stirred tank reactor. The standard turbulence model of $k-\varepsilon$ is employed to simulate a three-dimensional single-phase flow field of water solution.* Simulation studies indicate that the simulated flow field is consistent with real distribution of the flow field, while it is seen that uniform blending can be achieved in the lower and middle parts of the 1 L stirred tank reactor, but the flow field in the upper part is not uniform. *To solve the problem, dual impellers are proposed for stirring so as to maintain a uniform speed for both the lower and upper parts of the reactor.* Simulation results show that the two flow fields generated by the dual impellers can be well connected, and the blending effect is obviously better than that of traditional single-impeller style.

Keywords

stirred tank reactor, computational fluid dynamics, FLUENT, single-phase flow field, numerical simulation

Recommended Citation

Ma Zewen, Liu Tao, Sun Xudong. CFD Based Analysis and Improvement of the Flow Field of Stirred Tank Reactor for Crystallization[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1900-1907.

基于 CFD 的结晶搅拌反应釜流场分析与改进

马泽文, 刘涛, 孙旭东

(大连理工大学 控制科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 采用计算流体力学(CFD)的方法对 1 L 结晶搅拌反应釜进行流场分析, 首先利用一种 CFD 软件—FLUENT 模拟分析单层涡轮式搅拌桨对搅拌釜内流场分布的影响, 使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对搅拌水溶液的单相流场进行三维仿真模拟, 仿真研究表明模拟流场与实际流场分布相符, 可以看出对 1 L 结晶反应釜的中下部能达到混合均匀, 然而反应釜的中上部流场分布不均匀。为此, 提出采用两层搅拌桨的方式解决反应釜上下速度不均匀的问题, 仿真结果表明两层搅拌桨所产生的上下两个流场能够较好地连接起来, 搅拌效果明显优于传统的单桨方式。

关键词: 搅拌反应釜; 计算流体力学; FLUENT 软件; 单相流场; 数值模拟

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1900-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805036

CFD Based Analysis and Improvement of the Flow Field of Stirred Tank Reactor for Crystallization

Ma Zewen, Liu Tao, Sun Xudong

(School of Control Science and Engineering (SCSE), Dalian university of technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The computational fluid dynamics (CFD) method is adopted to analyze the flow field of 1L stirred tank reactor for crystallization. A popular CFD software named FLUENT is used to analyze the influence of a single layer turbine agitator on the flow field in a stirred tank reactor. The standard turbulence model of $k-\varepsilon$ is employed to simulate a three-dimensional single-phase flow field of water solution. Simulation studies indicate that the simulated flow field is consistent with real distribution of the flow field, while it is seen that uniform blending can be achieved in the lower and middle parts of the 1 L stirred tank reactor, but the flow field in the upper part is not uniform. To solve the problem, dual impellers are proposed for stirring so as to maintain a uniform speed for both the lower and upper parts of the reactor. Simulation results show that the two flow fields generated by the dual impellers can be well connected, and the blending effect is obviously better than that of traditional single-impeller style.

Keywords: stirred tank reactor; computational fluid dynamics; FLUENT; single-phase flow field; numerical simulation

引言

结晶反应釜中最常用的混合方式是搅拌, 搅



收稿日期: 2016-05-26 修回日期: 2016-07-20;
基金项目: 国家自然科学基金(61633006), 大连理工大学重点培育基金(DUT18ZD201);
作者简介: 马泽文(1990-), 男, 回族, 辽宁丹东, 硕士生, 研究方向为基于计算流体力学的结晶反应釜流场分析。

拌操作是通过搅拌器执行, 使流体物料在搅拌反应釜中按照一定流型流动, 从而达到均匀分散和混合物料的目的^[1]。搅拌可以使两种或多种不同的物质在彼此之中互相分散, 从而达到均匀混合的目的; 也可以加速传热和传质过程。例如在实验室里制备某种盐类的水溶液时, 为了加速溶解, 常常用玻璃棒将玻璃杯中的液体进行搅拌^[2]。

<http://www.china-simulation.com>

• 1900 •

从结晶的角度出发,混合的过程对晶体的生成有着重要的影响。结晶反应釜任何局部的不均匀分布都有可能产生不均匀的过饱和度,进而会直接影响到结晶成核、生长等过程,最终将直接影响到晶体产生的质量^[3]。

计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是通过计算机数值计算和图形显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统做定量分析^[4-5]。应用 CFD 的方法,国内外学者先后研究过搅拌罐的尺寸对流场的影响^[6-7],搅拌桨的类型对流场的影响^[8],搅拌桨安装的位置对流场的影响,搅拌桨的直径对流场的影响^[9],是否加装挡板对流场的影响^[10-12]以及多层搅拌桨对流场的影响等^[13]。

由于 1 L 结晶反应釜属于小体量的反应釜,国内外对于小体量的反应釜的流场研究较少。故本文采用 CFD 专业软件 FLUENT 对 1 L 的结晶反应釜进行单相流场模拟。利用 ICEM 软件采用非结构网格的方法对 1 L 搅拌反应釜进行多区域网格的创建。使用多重坐标系 (Multiple Reference Frame Model, MRF) 方法实现搅拌桨转动的动态模拟。利用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对搅拌桨所在的单相流场进行三维模拟,计算出其三维速度场,从计算流体力学的角度研究涡轮式搅拌桨的混合过程。针对单层涡轮式搅拌桨混合不均匀的问题,通过搅拌流场分析,设计双层涡轮式搅拌桨进行改进,相对于传统的单桨方式,取得了明显改善的搅拌效果。

1 流体力学模型

1.1 控制方程

流体流动要遵守基本的物理守恒定律,包括:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律^[4]。

质量守恒定律:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

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

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

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

式中: ρ 、 \mathbf{u} 、 u 、 v 、 w 、 p 、 t 、 μ 分别指密度、速度矢量、速度矢量在 x 方向的分量、速度矢量在 y 方向的分量、速度矢量在 z 方向的分量、流体微元体上的压力、时间和动力粘度; S_u 、 S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项。

通过计算反应釜搅拌桨在转速为 150 rpm 时流体的雷诺数,可得流体处于湍流状态,所以系统还要附加湍流输运方程—标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[14], i 方向的湍流动能方程 k 和扩散方程 ε 分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能; ε 为湍流动能耗散率; x_i 、 x_j 为使用张量指标形式表示连续方程的 x ; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数; $C_{3\varepsilon}$ 为可压流体流动计算中与浮力相关的系数; σ_k 为湍流动能对应的 Prandtl 数; σ_ε 为耗散率对应的 Prandtl 数。

湍流粘度 μ_t 可以表示成 k 和 ε 的函数:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

通常情况,当流动为不可压缩时 $S_k=0$, $S_\varepsilon=0$, $G_b=0$, $Y_M=0$, 这时标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型可以被简化^[15]。本文使用的为该简化模型。模型中的常量通常使用以下的默认值: $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_{\mu}=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。 S_k 和 S_ε 为源项。

通过联立公式(1)~(7)可以求解出未知变量 u , v , w , p , k 和 ε 。根据所求解的速度矢量 \mathbf{u} 在 x 、 y

2.2 建立模型

利用几何建模软件 solidwork2013 分别对反应釜的罐体与搅拌桨建模, 并对模型进行简化如图 3。罐体为椭圆底封头搅拌釜模型, 搅拌桨为四叶式涡轮搅拌桨。

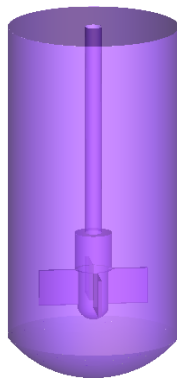


图 3 1 L 单桨结晶器反应釜体几何模型
Fig. 3 Geometry model of 1 L single-paddle crystallizer

2.3 网格划分

利用网格划分软件 ICEM, 选用非结构网格对几何模型进行网格划分。采用 MRF 模型解决部件与旋转的搅拌桨之间所存在的相对转动问题。所以整个区域分为两个部分。外层为静止区域, 在惯性坐标系下计算。内层为旋转搅拌桨区域, 在转动坐标系下计算, 如图 4。

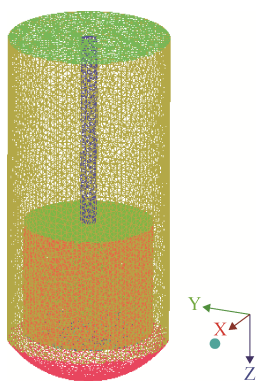


图 4 1 L 结晶器反应釜体网格
Fig. 4 Grid of 1 L crystallizer body

在 ICEM CFD 通常要经过以下步骤划分多区域网格: (1) 创建 Body 进行计算区域标定。(2) 利用几何分割功能进行模型的切分, 这里采用的是面

切割。(3) 分区域对网格进行划分。(4) 网格模型重新组装。(5) 将网格导入 FLUENT 后将 interface 进行配对, 以便配对后进行数据的传递。

权衡考虑仿真模拟的准确性和仿真的效率选择网格划分数量^[17]。这里在静区域中, 网格的大小是 3 mm, 共生成了 436 299 个网格; 在动区域, 网格的大小为 2 mm, 共生成了 243 609 个网格。故一共生成了 679 908 个网格。

2.4 求解方法

仿真采用 MRF 模型求解稳态时搅拌流场。使用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值求解。选择单相水作为流体, 温度为 298 K, 密度为 998.2 kg/m^3 , 粘度为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$, 一个标准大气压。在旋转坐标系中, 选用默认的 z 轴为正方向, 转速为 150 rpm, 重力加速度为 $g=9.8 \text{ g/m}^2$ 。

2.5 边界条件

将搅拌桨半径范围内的区域定义为旋转坐标系, 定义该区域的角速度为 150 rpm, 在该坐标系下定义搅拌桨随着该区域一起转动, 即搅拌桨定义为该坐标系下的固定边界条件。转动区域以外的区域定义为静止区域, 在惯性坐标系下定义搅拌轴的转速与转动区域的转动角速度一致。结晶器的底部和四周定义为墙(wall); 搅拌桨和转动轴定义为墙; 结晶器的顶部为有效液面, 故定义为对称面(symmetry); 转动区域和静止区域交界面定义为界面(interface)。

3 1 L 结晶搅拌釜内流场分析

3.1 单层搅拌桨对流场的影响

根据涡轮式搅拌桨径向流场的流动可知, 当结晶反应釜安装这种搅拌桨时, 搅拌桨位于反应釜的中下部, 桨叶排出的径向流碰到反应釜壁的时候会折向下, 当速度达到一定值时, 会在搅拌釜的中心形成较强的涡旋上升流, 最后回到叶轮区, 整个过程在搅拌釜的下部形成了一个循环。与此同时, 搅拌桨排出的径向液流还有一部分会碰到反应釜的

壁面向上流动，当达到一定高度时，再折转向下，这样搅拌桨的上部也形成了一个循环。至此，在搅拌桨的上下两部分会各自形成循环，结晶反应釜所示，图 5 左侧为现有文献报导结果^[19]，右侧是通过 FLUENT 模拟的流场。通过对比发现模拟的流场与实际的流场分布相符。

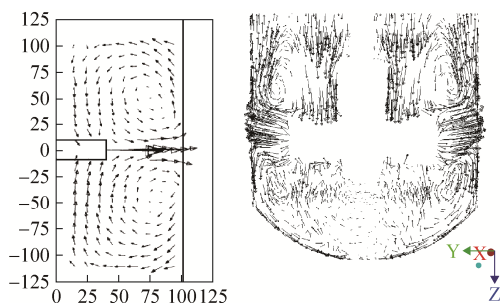
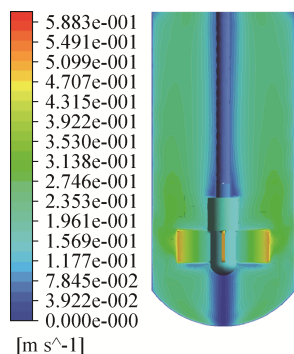
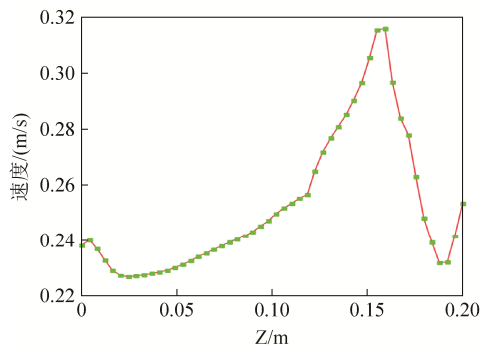


图 5 单桨搅拌轴向速度矢量示意图与仿真结果
Fig. 5 Schematic and simulation result of the axial-direction velocity vector of single stirring paddle

由于不同类型不同尺寸的搅拌桨有各自的作用范围，实验仿真采用的是直径为 $D=64\text{ mm}$ 的涡轮式搅拌桨，通过查阅搅拌设备手册^[9]可知该类型搅拌桨的轴向作用范围大约是搅拌桨的直径 D 。同时通过图 5 的仿真也可以看出该搅拌桨的主流区包括四个涡流，从仿真结果可以得到涡流的跨度大约为 D 。同时这个现象在图 6(a)和图 6(b)的速度仿真云图和距离搅拌轴 30 mm 的轴向速度分布都可以看出，从曲线可以看出在 $Z=0.16\text{ m}$ 左右对称的位置速度变化特别明显，而这一位置正好是搅拌桨安装的位置。从速度明显上升的 $Z=0.115\text{ m}$ 到与其速度相同的位置 $Z=0.175\text{ m}$ 之间的距离大约为 0.06 m ，与搅拌桨直径值 D 也相近。



(a) 1 L 结晶反应釜轴向的速度分布云图



(b) 距离搅拌轴心 30 mm 的轴向速度分布

图 6 速度分布示意图
Fig. 6 Schematic of the velocity distribution

因为所采用的结晶搅拌釜的高度为 $h=210\text{ mm}$ ，显然搅拌桨的作用范围为 60 mm ，无法有效的完成高质量的混合搅拌，从图 7 也可以看出湍流动能基本上集中在搅拌桨周围的区域。

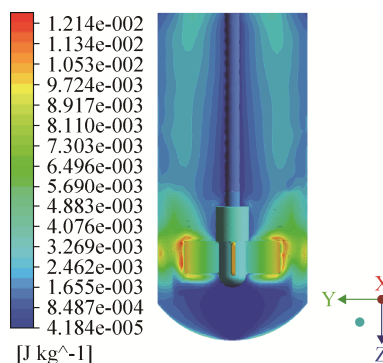


图 7 1 L 结晶反应釜轴向的湍流动能分布图
Fig. 7 Distribution plot of the turbulence energy along the axial-direction of 1 L crystallizer

综上所述，由图 5 的实验仿真我们确实可以看出在搅拌桨的区域形成了上下两组涡流，但结晶反应釜的径向流速明显较大(图 8(a)、图 8(b))，相对而言，在轴向的流速比较小如图 9 所示，轴向的流动并不是十分充分。这种情况下虽然也会使物料混合，但对结晶的过程而言，可能会导致二次成核增强。因为轴向的流动并不充分如图 6(a)和图 6(b)，可能会使颗粒沉积在反应釜底部，影响混合效果，从而很难得到粒度较大的晶体。同时，轴向的不均匀流动，会使物料在轴向分布不均匀，使局部过饱和过大，从而产生大量的细晶。因此在工业中，应该考虑使用多级搅拌桨，这里我们使用双层桨。

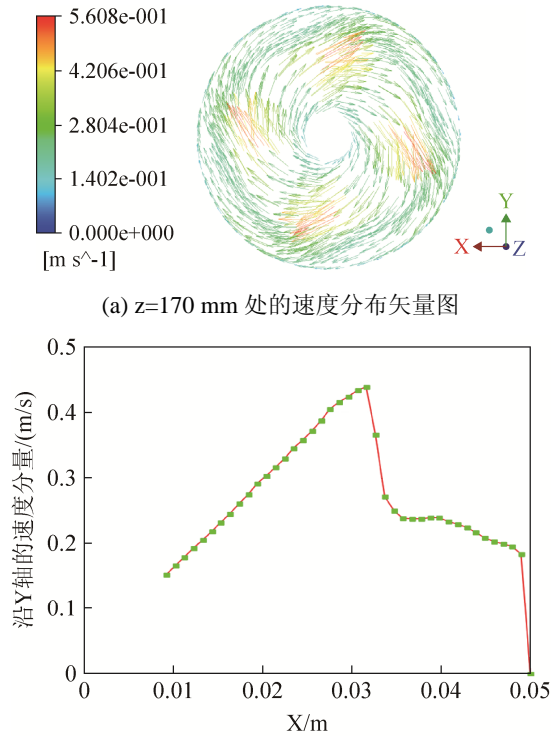
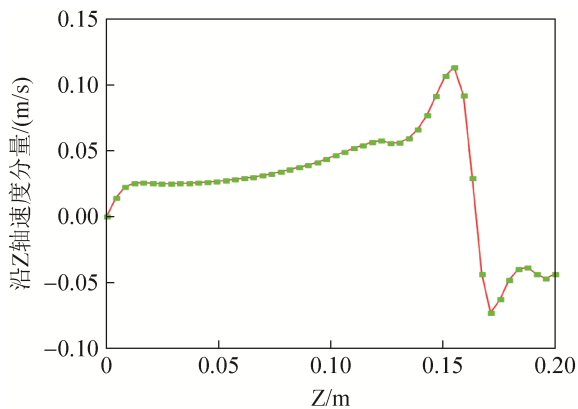


图 8 速度分布矢量图

Fig. 8 Vector plot of the velocity distribution

图 9 距离轴心 30 mm 处沿 z 轴的速度分布Fig. 9 Velocity distribution along the z -axis with a distance of 30 mm to the axis

3.2 双层搅拌桨对流场的影响

如图 10, 在距离液面 60 mm 处加装一个同种类型的涡轮式搅拌桨, 另两个搅拌桨之间的距离大约为 65 mm 这和搅拌桨的直径 D 大致一致。根据对桨间距的研究^[20], 当搅拌桨的层间距太小时, 两个相邻的搅拌桨产生的流场会相互干扰, 因此形成连接流, 从搅拌效果上看, 轴向流场的搅拌区域

分布也较为集中; 当层间距太大时, 流体的流动表现为平行流, 有可能会产生流动分区的现象也不利于混合; 所以这里选择与桨直径近似的层间距, 以达到最理想的搅拌效果。

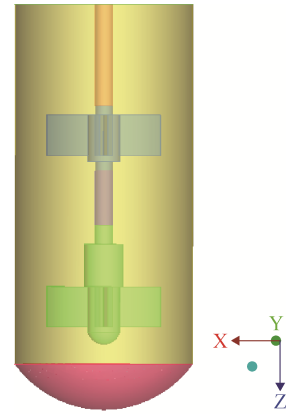


图 10 1 L 双层桨结晶器反应釜体几何模型

Fig. 10 Geometry model of 1 L double-paddles crystallizer

采用与单层桨相同的仿真方法对双层桨结晶器进行仿真。从图 11 湍流动能仿真云图可以看出, 双层桨的轴向湍流动能分布显然比单层桨均匀, 在双层搅拌桨之间形成了较为均匀的连接流, 搅拌桨所产生的上下两个流场能够较好地连接起来。这样可以有效的解决轴向流动不充分的问题, 从而使物料在轴向可以达到均匀的分, 得到颗粒较大的晶体。

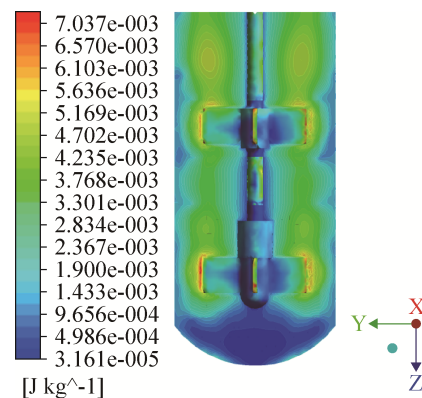


图 11 1 L 双层桨结晶反应釜轴向的湍流动能分布图

Fig. 11 Distribution plot of the turbulence energy along the axial-direction of 1 L double-paddles crystallizer

从图 12 的单桨与双桨在距离搅拌轴心 30 mm 的轴向速度比较, 可以清楚地看出, 使用双层搅拌桨时, 速度要明显大于使用单搅拌桨, 因为双层搅

拌桨的搅拌动力显然比单搅拌桨大,所以速度的提升是不言而喻的,从这个角度看同样可以使搅拌更加充分。观察曲线的波动性可以看出,双层桨搅拌时速度的波动性比单桨要小,既双层桨在搅拌的过程中所形成的流场比单层搅拌桨所形成的流场均匀。这样可使轴向流动均匀,解决局部的过饱和度过大的问题。

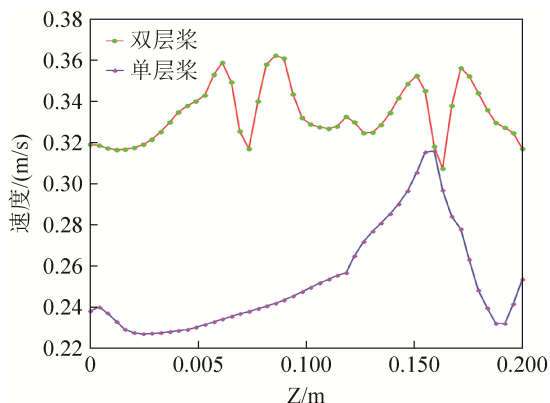


图12 距离搅拌轴心 30 mm 的轴向速度分布比较
Fig. 12 Comparison of velocity distribution along the axial direction with a distance of 30 mm to the stirring axis

同时,从图13的单桨与双桨在距离搅拌轴心30 mm的轴向湍流动能分布比较可以看出,除了在 $Z=0.13\text{ m}$ 到 $Z=0.17\text{ m}$ 的位置,双层桨结晶器的湍流动能均大于单层桨结晶器的湍流动能。但是从曲线可以看出在 $Z=0.13\text{ m}$ 到 $Z=0.17\text{ m}$ 这个范围单层搅拌桨的湍流动能要明显大于双层搅拌桨的湍流动能,而且出现了一个很大的峰值。

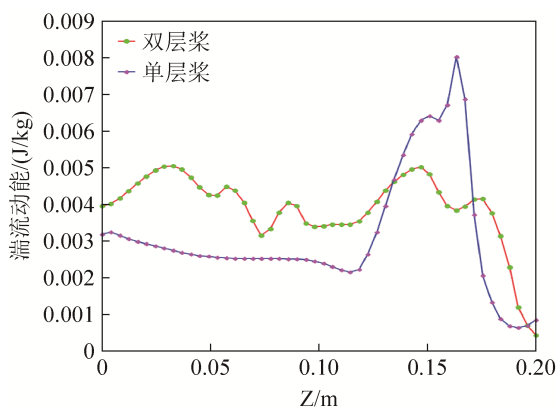


图13 距离搅拌轴心 30 mm 的轴向湍流动能比较
Fig. 13 Comparison of the turbulence energy along the axial-direction with a distance of 30 mm to the stirring axis

出现这个现象的原因是双层搅拌桨工作的时候出现了连接流的现象,上下搅拌桨所流出的流体会有一部分的动能相互抵消的现象。由于结晶反应釜的容积为1 L,是反应釜里较小的体量,这个现象会更明显。这种现象的优点在于可以使反应釜的轴向湍流动能分布更均匀,不会产生局部过饱和度过大的现象,使物料在轴向分布更加均匀。

4 结论

本文对于桌上式1 L夹套反应釜建立了与其尺寸相同的三维几何模型,应用计算流体力学理论对结晶搅拌反应釜中的流场分布做了分析和模拟,阐述了使用计算流体力学模拟旋转流场的基本方法——多参考系模型。通过对1 L单层搅拌桨结晶反应釜进行流场模拟,发现反应釜的径向流动充分且均匀,但从反应釜的轴向流场分布上看,流速小、流动不充分且不均匀。为此设计了双层桨搅拌结晶反应釜,并进行了流场模拟,结果表明双层搅拌桨能够较好地解决单层搅拌桨反应釜所存在的问题,保证轴向流动充分、搅拌均匀,因而能够有效地优化流场分布,可参考用于提高结晶生产过程质量。

参考文献:

- [1] Rane C V, Ganguli A A, Kalekudithi E, et al. CFD simulation and comparison of industrial crystallizers[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering (S1939-019X), 2014, 92(12): 2138-2156.
- [2] Ding J, Wang X, Zhou X F, et al. CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production[J]. Bioresource Technology (S0960-8524), 2010, 101(18): 7005-7013.
- [3] 朱振兴. 硫酸铵结晶过程的研究及其固-液多相流的计算流体力学研究[D]. 天津: 天津大学出版社, 2008. Zhu Zhenxing. Study on the crystallization process of ammonium sulphate and computational fluid dynamics of solid-liquid multiphase flow[D]. Tianjin: Tianjin University Press, 2008.
- [4] 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. Wang Fujun. Analysis of computational fluid mechanics: CFD software principle and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

- [5] 杨立平, 马修真, 宋恩哲, 等. 带有浴盆形燃烧室天然气发动机燃烧特性三维仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1): 215-220.
Yang Liping, Ma Xiuzhen, Song Enzhe, et al. Three-dimensional Simulation on Combustion Characteristics of Natural Gas Engine with Bathtub Combustion Chamber[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(1): 215-220.
- [6] 刘飞飞, 王兵, 林飞, 等. 钨矿强化碱煮搅拌釜的放大设计研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015, 7: 14.
Liu Feifei, Wang Bing, Lin Fei, et al. Research on intensification design of a stirring reactor for Tungsten ore alkali [J]. Non-ferrous metals (smelting part), 2015, 7: 14.
- [7] 周睿. 四种搅拌器放大技术的实验研究与数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007.
Zhou Rui. Experimental research and numerical simulation of four mixer amplification techniques [D]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007.
- [8] 贾慧灵, 齐岩, 李沼希. 圆盘涡轮式桨叶对搅拌槽混合特性影响的 CFD 研究[J]. 化工进展, 2014, 33(5): 1118-1122.
Jia Huiling, Qi Yan, Li Zhaoxi. A CED study on the effect of disc turbine blades to mixing characteristics of stirred tanks[J]. Chemical progress, 2014, 33(5): 1118-1122.
- [9] 陈志平, 章序文, 林兴华, 等. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
Chen Zhiping, Zhang xuwen, Lin Xinghua, et al. Design manual of stirring and mixing devices[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [10] 王星星, 刘志炎, 龙伟民, 等. 椭圆底封头十字形挡板搅拌釜内流场研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 156-164.
Wang Xingxing, Liu Zhiyan, Long Weimin, et al. Study on the flow field in the stirred tank of the cross baffle with elliptical bottom head[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 156-164.
- [11] Satjaritanun P, Khunatorn Y, Vorayos N, et al. Numerical analysis of the mixing characteristic for napier grass in the continuous stirring tank reactor for biogas production[J]. Biomass and Bioenergy (S0961-9534), 2016, 86: 53-64.
- [12] Lin P Y, Lee H L, Chen C W, et al. Effects of baffle configuration and tank size on spherical agglomerates of dimethyl fumarate in a common stirred tank[J]. International Journal of Pharmaceutics (S0378-5173), 2015, 495(2): 886-894.
- [13] 梁瑛娜, 高殿荣, 拜亮. 双层桨搅拌槽内层流流场与混合时间的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 185-195.
Liang Yinna, Gao Dianrong, Bai Liang. Numerical simulation of laminar flow field and mixing time in a stirred tank with double-layered paddle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(16): 185-195.
- [14] 胡杰桦, 谷正气, 何忆斌, 等. 汽车尾部流场湍流模型数值分析与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 321-325.
Hu Jiehua, Gu Zhengqi, He Yibin, et al. Numerical Simulation and Experimental Research on Turbulent Wake of Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(2): 321-325.
- [15] Veerstedt H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method[M]. Harlow: Longman House, 1995.
- [16] 胡坤. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
Hu Kun. Detailed project examples of ANSYS ICEM CFD[M]. Beijing: People Post Press, 2014.
- [17] Handbook of Ansys FLUENT 14.0, User's Guide [K]. Pittsburgh: ANSYS Inc., 2012.
- [18] Ismail Y, McNeely J B, Shaaban M, et al. Fast motion estimation system using dynamic models for H. 264/AVC video coding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology (S1558-2205), 2012, 22(1): 28-42.
- [19] 王凯, 冯连芳. 混合设备设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Wang Kai, Feng Lianfang. Mixing device design[M]. Beijing: Journal of Mechanical Engineering, 2000.
- [20] 逢启寿, 王福辉, 周雄军. 双层桨搅拌槽内流场的数值模拟[J]. 北京: 湿法冶金, 2013, 6: 414-417.
Pang Qishou, Wang Fuhui, Zhou Xiongjun. Numerical simulation of flow field in a stirred tank with double-layered paddle[J]. Beijing: Hydrometallurgy, 2013, 6: 414-417.