

信息技术应用

# 基于 CFD 对 DTB 结晶器内 搅拌桨构型的优选

汤俊杰, 易争明\*, 郭璐

(湘潭大学化工学院, 湖南湘潭 411100)

**摘要:**使用计算流体力学(CFD)数值模拟的方法,以单相流模型为基础,对 DTB 结晶器内的搅拌桨构型进行了优选。首先以 20℃ 的水为介质模拟了搅拌槽内特定转速下的功率准数并与实验值进行了对比,较好地符合实际情况;后考察了 DTB 结晶器内 3 种不同的桨型、同种桨不同安装高度、双层搅拌桨不同安装间距对结晶器内速度、剪切速率、功率消耗及介质质量流率的影响。结果发现,此结构下的 DTB 结晶器,四斜叶桨性能总体要优于三叶推进桨和六直叶涡轮桨;搅拌桨安装高度为  $H/4$  时的性能要优于安装高度为  $H/3$  及  $H/5$ ;双层搅拌桨时,搅拌桨间距较小时性能相对较好,但是此 DTB 结晶器中双层搅拌桨较单层搅拌桨的优点并不显著。

**关键词:**计算流体力学;DTB 结晶器;搅拌桨

中图分类号:O35

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)01-0209-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.01.045

## CFD-based optimization of configuration of agitator blade in DTB crystallizer

TANG Jun-jie, YI Zheng-ming\*, GUO Lu

(College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411100, China)

**Abstract:** Using computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation method, based on single-phase flow model, the configuration of agitator blade for DTB crystallizer is optimized. Firstly, the power number at specific speed in the stirred tank is simulated with water as medium at 20℃, and is compared with the experimental value, which agrees well with the practical situation. The effects of three different blade types, different installation heights for the same blade type and different installation distances between dual blades at different levels in the DTB crystallizer on the velocity, shear rate, power consumption and mass flow rate of medium in the crystallizer are studied. Study results show that the performance of four-inclined-blades under this structure is better than that of three-propeller and six-straight blade turbine propeller. The performance of the blade with an installation height of  $1/4 H$  is better than that with an installation height of  $1/3 H$  and  $1/5 H$ . The shorter the distance is, the better the performance is when dual blades are employed. However, dual blades have not significant advantage than single blade in this DTB crystallizer.

**Key words:** computational fluid dynamics; DTB crystallizer; agitator blade

结晶是化工重要的单元操作之一,能量消耗、操作温度低,在石油、化工、医药等领域中具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。工业界的结晶反应器大多是搅拌釜式反应器,若结晶器内混合不充分,流场不能迅速混合均匀,易造成局部过饱和,导致爆发成核,降低产品质量,所以结晶器内流场分布的均匀性对于结晶产品的质量至关重要。

刘作华等<sup>[2]</sup>和银建中等<sup>[3]</sup>的研究表明,桨型、桨安装高度、桨层数以及层间距对搅拌式反应器中流体流动有影响。薛兆鹏等<sup>[4]</sup>发现结晶器内流体动力性能与桨的结构参数为非线性关系,但通过仿真可找到最优参数。Jaworski 等<sup>[5]</sup>首次运用 CFD 技术,研究了双层桨的搅拌混合过程。Alves 等<sup>[6]</sup>和

Alliet 等<sup>[7]</sup>的研究结果表明,多层组合桨影响反应釜的流场结构。Jahoda 等<sup>[8]</sup>运用仿真软件预测了搅拌槽内单层桨和双层桨体系的一般混合过程。Murthy 等<sup>[9]</sup>用 CFD 研究了釜内桨的能耗等。

DTB 结晶器属于双圆筒、搅拌式结晶器,器内流场分布的均匀性对结晶器的操作过程和产品质量有很大影响<sup>[10]</sup>。而前人对搅拌桨的优选多集中在带普通挡板的结晶器中。针对此情况,本文中对工业上常用的带搅拌桨的 DTB 结晶器内的搅拌桨进行了系统地考察,从桨型、桨安装高度、双层桨不同桨间距方面分析了速度、剪切速率分布,能耗和导流筒内流体循环通量等,以期在流场较均匀时降低能耗和晶体的剪切破碎率,对 DTB 结晶器中搅拌桨的

收稿日期:2018-06-11;修回日期:2018-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(21306158)

作者简介:汤俊杰(1993-),女,硕士生;易争明(1981-),男,博士,副教授,研究方向为传质与分离工程,通讯联系人,8977211@qq.com。

优化设计提供一定的参考。

## 1 实验验证

为对模拟的方法进行验证,现以马鑫等<sup>[11]</sup>的实验装置为原型,建立模型如图 1。其中桨直径  $d_1 = 200$  mm,叶片宽  $d_w = 40$  mm,厚  $d_e = 3$  mm。

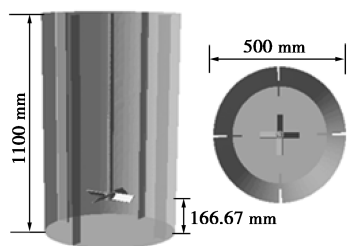


图 1 搅拌槽结构

以 20℃ 水为介质,液位高度 750 mm,桨转速为 240 r/min。在考虑重力的情况下用压力基稳态求解器、标准  $k-\varepsilon$  湍流模型、SIMPLE 算法和多重参考系法定义此搅拌装置。等到计算收敛后,根据 fluent 自带的后处理程序,输出搅拌桨扭矩如表 1,即搅拌桨的扭矩为 1.003 388 N·m。功率计算如公式(1),功率准数计算如公式(2)。

表 1 搅拌桨的输出扭矩膜 N·m

区域	力矩		
	压力	黏度	总和
搅拌桨	0.9960034	0.0073846374	1.003388

$$P = 2\pi I \times M \times N \quad (1)$$

$$N_p = (P/N^3) \times d^5 \times \rho \quad (2)$$

式中, $M$ 为力矩,N·m; $N$ 为转速,r/s; $P$ 为功率,W; $d$ 为桨叶直径,m; $\rho$ 为介质密度,kg/m<sup>3</sup>。

带入公式计算出功率  $P$  为 25.205 W,功率准数  $N_p$  为 1.23。和文献[11]得到的实验数据对比如表 2。

表 2 模拟值与实验值的对比

PBT	模拟值	文献实验值	相对误差/%
单层	1.23	1.20	2.5

可看出,该方法的计算值很好地贴合了实验值,具有一定的现实指导意义。现以该方法对 DTB 结晶器内的搅拌桨进行优选。

## 2 计算模型与模拟方法

### 2.1 计算模型

#### 2.1.1 结晶器模型

所采用的 DTB 结晶器结构如图 2。其中结晶器的主要尺寸为:外径  $\phi 5\ 200$  mm,器体总高度 6 038

mm,折流筒直径  $\phi 2\ 700$  mm,高 3 000 mm,导流筒直径  $\phi 1\ 100$  mm,高 4 300 mm,叶片直径为 400 mm,厚度为 20 mm。

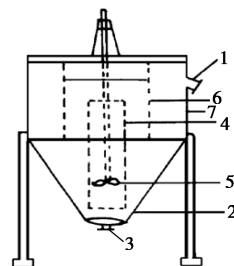


图 2 DTB 结晶器

#### 2.1.2 搅拌桨模型

对搅拌式结晶器的 CFD 研究多集中于斜叶桨和六直叶涡轮桨 2 方面。下面以图 3 中常用的 3 种搅拌桨为例,考察桨结构对结晶器内流场的影响。

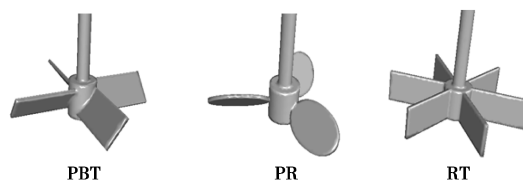


图 3 桨型

#### 2.1.3 网格划分

用前处理软件 ICEM 对结晶器进行四面体网格划分,首先进行网格无关性验证,以带 PBT 搅拌桨的结晶器为例,分别划分不同数量的网格,计算结晶器内流场监测点的速度,收敛后将数据导出如表 3。为节省计算资源,认为 35.6 万时的划分方法为宜。

表 3 网格数与速度的关系

网格数/个	105906	179214	245082	356301	484294	697210
平衡时速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2.249	2.954	3.026	2.981	2.968	2.877
与上一级相对误差	—	0.313	0.0244	0.0149	0.00436	0.0307

## 2.2 数值模拟方法

以 20℃ 水为介质,利用 FLUENT15.0 对结晶器内不同桨结构产生的流场进行了数值模拟,在考虑重力的情况下运用压力基稳态求解器,多重参考系法定义动静域,湍流模型为标准  $k-\varepsilon$  模型,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,采用二阶迎风差分格式,残差设为 0.000 1。

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 桨型的影响

#### 3.1.1 桨型对流场的影响

桨型对结晶器内的流场分布具有很大的影响,

为对其进行优选,现考察比较有代表性的 RT、PBT、PR 3 种桨型在转速为 300 r/min 时的流场分布,计算收敛后取轴截面速度云图及搅拌桨附近径向速度矢量图如图 4。

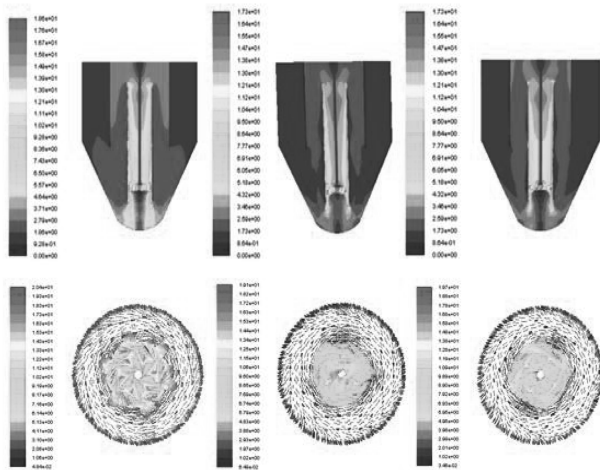
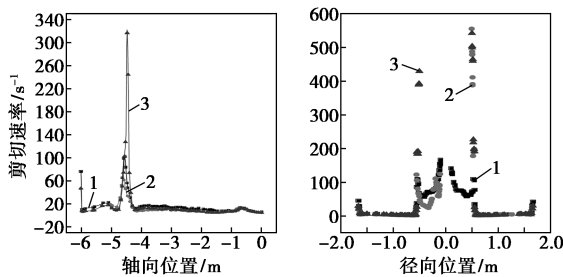


图 4 不同桨型下的流场分布

可看出 RT 产生的速度流场整体大于 PBT 和 PR,较大的速度有利于介质混合;但 DTB 结晶器分为内循环区和外沉降区,从流场均匀性角度,PBT 产生的流场较均匀,更有利于传质和晶体成长。

### 3.1.2 桨型对剪切速率的影响

剪切速率也是衡量结晶过程好坏的标准。晶体所受剪切速率越大,二次成核的几率就会增加,不利于晶体长大,这时产生的晶体颗粒相对较小,很难满足工业需求。搅拌桨是产生剪切力的主要原因,因此需要比较剪切速率大小。导出导流筒内轴向和搅拌桨附近径向剪切速率如图 5。可看出,PBT 桨在搅拌桨附近产生的剪切速率相对较大,而 RT 桨的径向剪切速率稍大。



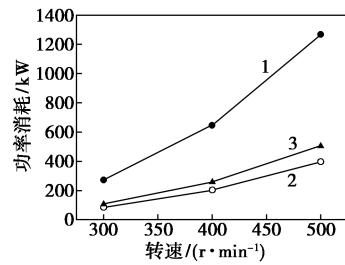
1—RT;2—PR;3—PBT

图 5 剪切速率分布

### 3.1.3 桨型对功率消耗的影响

搅拌设备所消耗的功率主要与搅拌设备的几何尺寸、介质的性质以及操作条件有关。采用公式(1)、(2)计算不同桨型在不同转速下的功率消耗如

图 6。从节能角度,PR 和 PBT 桨较优,但 PR 产生的流场均匀性不如 PBT,综合考虑,认为 PBT 桨最佳。

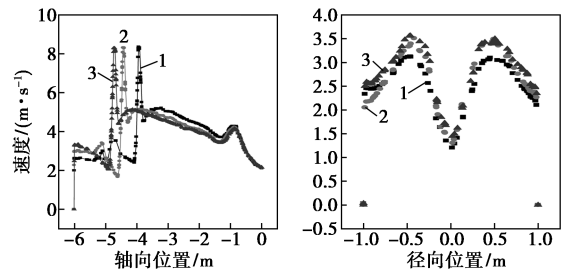


1—RT;2—PR;3—PBT

图 6 不同转速下的功率

### 3.2 桨安装高度的影响

对搅拌桨桨型进行优化后,现对搅拌桨安装高度进行探讨,分别设计搅拌桨安装高度为结晶器高度的 1/3、1/4、1/5,收敛后导出导流筒内轴向速度和底部径向分布如图 7,发现速度分布基本一致,考虑到晶体一般会沉积在底部,要求导流筒内循环速率较大的同时底部速度较大,综合考虑,H/4 时最优。



1—H/3;2—H/4;3—H/5

图 7 结晶器内速度分布

### 3.3 桨个数及桨间距的影响

#### 3.3.1 桨间距的影响

安装高度为 H/4 时,考察双层桨不同桨间距对流场的影响,分别计算桨间距为 932.125、1 864.250、2 796.375 mm 的情况,得到轴截面速度云图如图 8(a)。可看出流场分布大致相似,主要区别集中在导流筒内,现将导流筒内轴向及结晶器底部径向速度导出如图 8(b)。发现间距较小时导流筒内速度的连续性相对较好且底部速度略大,有利于介质均匀混合和底部晶体悬浮。认为桨层间距为 932.125 mm 时最好。

#### 3.3.2 桨个数的影响

现对优化的双层搅拌桨与单层搅拌桨进行对比分析,分别导出导流筒内轴向速度和不同水平截面的径向速度如图 9。可看出双层搅拌桨对底部轴向速度影响不大,对径向速度有一定的增加作用;导流

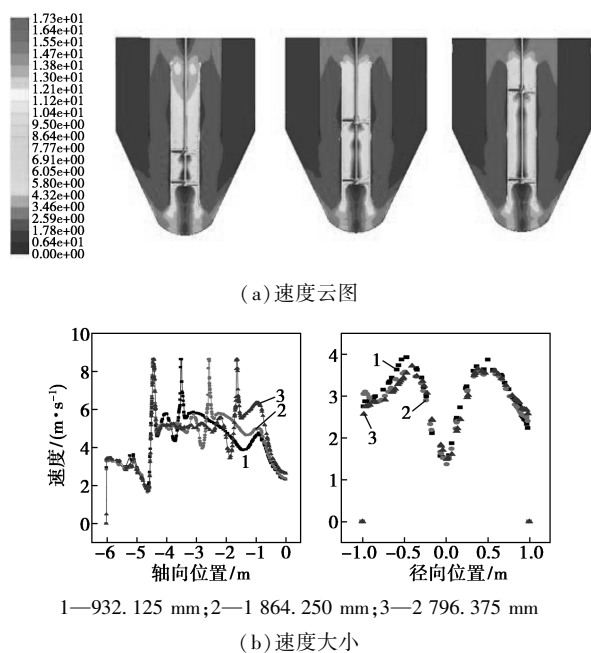


图 8 不同桨间距时速度云图和大小

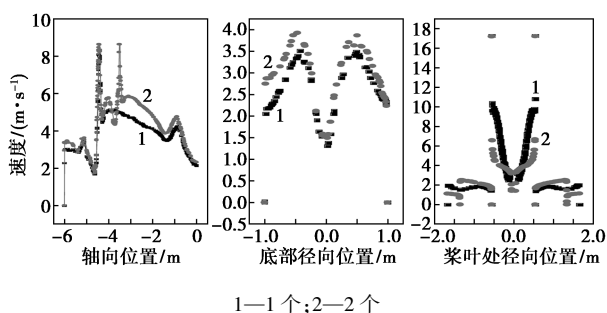


图 9 桨个数对速度的影响

筒内单层搅拌桨产生的径向速度总体较大,导流筒外双层搅拌桨的径向速度则较大。通过后处理计算出搅拌桨的消耗功率及导流筒内介质流率如表 4,发现双层搅拌桨消耗的功率大于单层搅拌桨而质量流率明显小于单层搅拌桨,这可能由于双层搅拌桨的协同作用导致,不利于节能和介质的循环传质。认为此时单层搅拌桨较好。

表 4 桨个数不同时的功率和流率

	1 个	2 个
功率/kW	108.65	151.79
流率/(kg·s <sup>-1</sup> )	5868.308	2092.17

#### 4 结论

(1) 模拟值与实验值进行对比,较好地贴合,说明该方法可用于开展工作。

(2) 对于 PR、PBT 和 RT 3 种桨型,RT 产生的速度最大,有利于介质快速混合,PBT 产生的流场

相对较为均匀,有利于晶体均匀成长,考虑到 RT 消耗功率过大,此时 PBT 较为理想。

(3) 考察桨安装高度分别为  $H/3$ 、 $H/4$ 、 $H/5$ ,  $H/4$  和  $H/5$  时结晶器下部速度稍大,有利于底部的晶体浮起与介质接触; $H/4$  时导流筒内速度较  $H/5$  时大,有利于介质循环传质。此时搅拌桨的安装高度为  $H/4$  时最佳。

(4) 双层搅拌桨时,搅拌桨上下间距分别为 932.125、1864.25、2796.375 mm 时,对导流筒外的速度及剪切速率影响不大,相比较而言,间距最小时,结晶器下部速度略大,有利于下部晶体悬浮,且导流筒内剪切速率相对较小,有利于减少晶体破碎率,认为间距 932.125 mm 最好。

(5) 将优化后双层搅拌桨和单层搅拌桨进行对比,发现双层搅拌桨在速度场和剪切速率方面并无明显优势,而消耗功率却较大,导流筒内介质质量流率较小,不利于节能和介质循环。认为单层搅拌桨时较好。

#### 参考文献

- [1] 姚玉英.化工原理(下册)[M].天津:天津大学出版社,2001:302-305.
- [2] 刘作华,周政霖,朱俊,等.湿法提钼浸出段搅拌反应器结构的优化[J].化工进展,2015,12(5):1241-1245.
- [3] 银建中,程绍杰,贾凌云,等.搅拌式反应器内固-液两相悬浮特性的 CFD 模拟[J].应用科技,2009,36(11):11-16.
- [4] 薛兆鹏,徐燕申,牛文铁,等.基于流体分析的工业结晶器搅拌桨结构优化[J].西南交通大学学报,2003,38(5):501-504.
- [5] Jaworski Z, Bujalski W, Otomo N, et al. CFD study of homogenization with dual rushton turbines-comparison with experimental results; Part I: Initial studies[J]. Chem Eng Res Des, 2000, 78(A3):327-333.
- [6] Alves S S, Maia C I, Vasconcelos J M T. Experimental and modeling study of gas dispersion in a double turbine stirred tank[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(1):487-496.
- [7] Alliet Gaubert M, Sardeing R, Xuereb C, et al. CFD analysis of industrial multi-staged stirred vessels[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2006, 45(5):415-427.
- [8] Jahoda M, Mostek M, Kukukova A, et al. CFD Modelling of liquid homogenization in stirred tanks with one and two impellers using large eddy simulation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(A5):616-625.
- [9] Murthy Shekhar S, Jayanti S. CFD study of power and mixing time for paddle mixing in unbaffled vessels [J]. Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, 2002, 80(A):482-498.
- [10] 贾玮.导流筒结晶反应器的优化[D].北京:北京化工大学,2014.
- [11] 马鑫,李志鹏,徐鸿.四斜叶桨搅拌槽内的流动特性[J].北京化工大学学报,2008,35(2):5-9. ■