



## 连续操作状态下结晶器内颗粒悬浮状态的研究

王学魁, 舒 畅, 沙作良

(天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

**摘 要:** 使用计算流体力学的方法, 在连续操作状态下, 模拟研究结晶器内晶体悬浮状态. 重点考察在不同搅拌速度下, 不同粒径的晶体在结晶器内的混合状态和分布与排料位置的关系. 对在容积为 10 L 的 DTB 结晶器进行模拟. 结果表明, 晶体的粒径和搅拌速度对混合状态有很大的影响, 而排料口的高度则对结晶器的混合状态无明显影响.

**关键词:** CFD; 悬浮状态; 排料位置; 颗粒粒径

中图分类号: TQ019 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2011)01-0019-04

## Study on the Particle Distribution in a DTB Crystallizer with Continuous Operation

WANG Xue-kui, SHU Chang, SHA Zuo-liang

(Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** The particle distribution in crystallizer was studied with computational fluid dynamics simulation under continuous operation. The effect of mixing intensity and product remove location on particle distribution were studied for different sizes particles. The simulation was carried out in a 10 liter DTB crystallizer. The results show that the particle distribution in a crystallizer is strongly dependent on the size of the particle and the mixing intensity. The product remove location does not affect much under the studied condition.

**Keywords:** CFD; state of suspension; remove position; particle size

DTB (draft tube baffle) 型结晶器是 20 世纪 50 年代末出现的一种效能较高的结晶器, 是连续结晶器的主要型式之一<sup>[1]</sup>, 最早用于氯化钾工业, 后广泛应用于化工、食品、制药等工业生产<sup>[2]</sup>. 由于这种类型的结晶器设有导流桶, 形成了典型的晶浆内循环系统, 与无搅拌结晶罐、循环母液结晶器、强制外循环结晶器相比, 其能效更佳<sup>[3]</sup>.

大多数结晶过程的研究把结晶器操作假设为完全混合悬浮、完全混合排出 (MSMPR) 型结晶器<sup>[4]</sup>, 但是在大型结晶过程中, 结晶器内的结晶几乎不可能达 MSMPR 要求的条件, 因此, 实验室的研究结果不能准确预测晶体产品颗粒尺寸分布. 目前, 研究者对结晶过程的晶体成长与成核等方面进行了很多研究, 但

很少涉及到结晶器内影响结晶的关键因子——晶体混合状态对结晶过程的影响. Sha 等<sup>[5-6]</sup>研究连续结晶过程, 认为晶体悬浮状态、取样口位置变化对结晶过程的影响明显. 因此, 如果要更加清楚地了解结晶过程, 并对结晶的操作条件作出正确的选择, 必须对结晶器内的流体动力学和固体悬浮状态作进一步了解.

本课题组曾对 DTB 结晶器的流体动力学状态及其对 KCl 结晶过程影响进行过研究, 考察冷却结晶过程的流体动力学状态和结晶器的结构<sup>[7]</sup>. 本文在其研究基础上, 应用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的方法, 以硫酸钾在水溶液中的结晶过程为研究的模型体系, 通过探讨流体动力学状态, 重点对 DTB 连续结晶器的晶体悬浮状态进行研究, 考

收稿日期: 2010-10-14; 修回日期: 2010-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21076157)

作者简介: 王学魁 (1956—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师; 通信作者: 沙作良, 教授, zsha@tust.edu.cn.

察不同排料位置、不同粒径对颗粒悬浮状态的影响.

动的影响.

### 1 模型

结晶过程涉及的体系多数为多相流体系,多相流体系的流体力学状态可用欧拉-欧拉的方法. 根据欧拉-欧拉方程,多相流场中的各种参数的变化规律可用如下通用传递方程表示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_{\alpha}\rho_{\alpha}\Phi_{\alpha})+\nabla\cdot[\varphi_{\alpha}(\rho_{\alpha}U_{\alpha}\Phi_{\alpha}-\Gamma_{\alpha}\nabla\Phi_{\alpha})]=\varphi_{\alpha}S_{\alpha}+\sum_{\beta=1}^{N_p}c_{\alpha\beta}(\Phi_{\beta}-\Phi_{\alpha})+\sum_{\beta=1}^{N_p}(m_{\alpha\beta}\Phi_{\beta}-m_{\beta\alpha}\Phi_{\alpha})$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示不同的相;  $N_p$  为相的个数;  $\varphi$  和  $\rho$  分别为相的体积分数和密度;  $\Phi$  是过程任意参数, 可以是矢量也可以是标量;  $\Gamma_{\alpha}$  是扩散系数;  $S_{\alpha}$  为传递方程的源项, 表示除扩散传递外其他因素引起的参数变化;  $c_{\alpha\beta}(\Phi_{\beta}-\Phi_{\alpha})$  描述参数  $\Phi$  在  $\alpha$  相和  $\beta$  相间的传递通量,  $c_{\alpha\beta}$  为相间传递系数, 因而  $c_{\alpha\alpha}=0$ ,  $c_{\alpha\beta}=c_{\beta\alpha}$ .

多相流场中各相的动量方程(以  $\alpha$  相为例)为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha})+\nabla\cdot[\varphi_{\alpha}(\rho_{\alpha}U_{\alpha}\otimes U_{\alpha}-\mu_{\text{eff},\alpha}\times(\nabla U_{\alpha}+(\nabla U_{\alpha})^T))]=-\varphi_{\alpha}\nabla p_{\alpha}+\sum_{\beta=1}^{N_p}c_{\alpha\beta}^{(d)}(U_{\beta}-U_{\alpha})+\varphi_{\alpha}S_{\alpha}$$

式中:  $\mu_{\text{eff},\alpha}(\nabla U_{\alpha}+(\nabla U_{\alpha})^T)$  表示流体受到的剪应力, 主要由流体的有效黏度  $\mu_{\text{eff},\alpha}$  和速度梯度  $(\nabla U_{\alpha}+(\nabla U_{\alpha})^T)$  决定;  $c_{\alpha\beta}^{(d)}(U_{\beta}-U_{\alpha})$  表示  $\alpha$  相与  $\beta$  相间的作用力;  $c_{\alpha\beta}^{(d)}$  为相间动量传递系数.

在多相流过程中,动量传递的特征主要为相间的动量传递,主要由相间相互作用力产生. 在多相流中有多种相间作用力,例如湍流阻力,曳力和形体阻力等. 在此模拟中,仅考虑曳力,相间曳力系数  $c_{\alpha\beta}^{(d)}$  由下式估算.

$$c_{\alpha\beta}^{(d)}=\frac{3}{4}\frac{c_D}{d}\varphi_{\beta}\rho_{\alpha}|U_{\beta}-U_{\alpha}|$$

式中:  $d$  为颗粒直径; 系数  $c_D$  可有很多种模型, 本研究中使用 Schiller 等<sup>[8]</sup>的模型

$$c_D=\max\left(\frac{24}{Re}(1+0.15Re^{0.687}),0.44\right)$$

在结晶器内,流体的流动状态一般为湍流. 一般认为标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型<sup>[9]</sup>可以满足工程流场计算的要求. 因此,使用标准  $\kappa$ - $\epsilon$  模型描述湍流特征对流体流

### 2 模拟

在连续结晶过程中,在一定搅拌速度下,不同粒径的晶体在结晶器内的分布不同. 因此,在结晶器的不同位置排出产品的粒度不同,这必然导致结晶过程产生很大变化,使得对结晶过程的分析更加困难. 为了解结晶器内晶体的悬浮状态和结晶器内晶体含量与排料位置的关系,将结晶过程简化为一简单模型.

本研究将对连续结晶过程的模拟简化为单一晶体悬浮状态的模拟. 结晶器中结晶的稳态的基本特征是排料位置的晶体浓度与结晶过程的产量应该相等,因而在 CFD 模拟中,设进料液中有晶体带入,代替结晶过程产生的晶体,从而考察在不同晶体粒度在结晶器内的悬浮状态和结晶器内晶体含量与晶体粒度、排料位置的关系.

模拟所使用的结晶器为 DTB 结晶器,容积为 10 L,高和直径均为 235 mm. 底部为平滑的 W 型结构. 内设宽为 20 mm 的 4 个挡板. 内置导流桶高为 80 mm,直径为 136 mm. 进料管位于导流桶内,长为 148 mm,直径为 10 mm. 出料管在导流桶外,罐端距底部高度为  $h$ ,直径为 10 mm. 搅拌桨由 3 个倾斜 45° 的长方形平直板桨叶组成,其结构如图 1 所示.

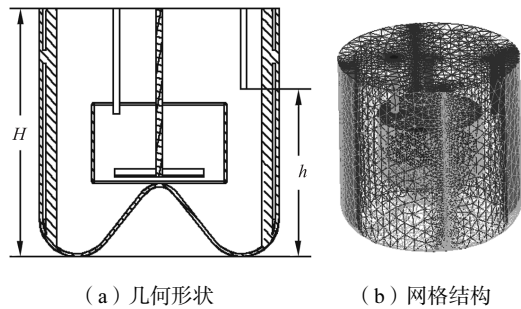


图 1 DTB 结晶器几何图形和网格结构  
Fig.1 Geometry and meshes of DTB crystallizer in simulation

模拟中,以水作为连续相,密度为  $997\text{ kg/m}^3$ ,黏度为  $0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$ . 晶体颗粒被定义为分散相,密度为  $2900\text{ kg/m}^3$ ,分散相以颗粒粒径为特征参数,考察不同晶体粒径的悬浮状态. 模拟使用质量流体模型,在模拟中分别设颗粒的直径为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm. 对不同的晶体粒径,模拟研究不同搅拌速度不同排料位置的晶体悬浮状态. 搅拌速度分别讨论: 150、350、550、750 r/min. 排料位置以相对位置  $h/H$  作为参数,其值分别为: 0.043、0.340、0.510、0.680,分

别位于: 结晶器的底部, 导流桶底部、中部、上部. 进料中晶体的体积分数为 10%, 结晶器内的初始晶体含量与进料中的相同, 进料速度为 0.07 m/s.

### 3 结果分析

#### 3.1 粒径对悬浮状态的影响

图 2 为不同粒径颗粒的悬浮状态(以搅拌速度=550 r/min,  $h/H=0.34$  为例). 从图中看出: DTB 结晶器中颗粒尺寸较小的晶体体积分布比较均匀, 晶体悬浮状态较好. 随着颗粒尺寸的增加, 结晶器底部的颗粒体积分数逐渐增加, 甚至在底部及侧壁上沉积, 悬浮状态变差.

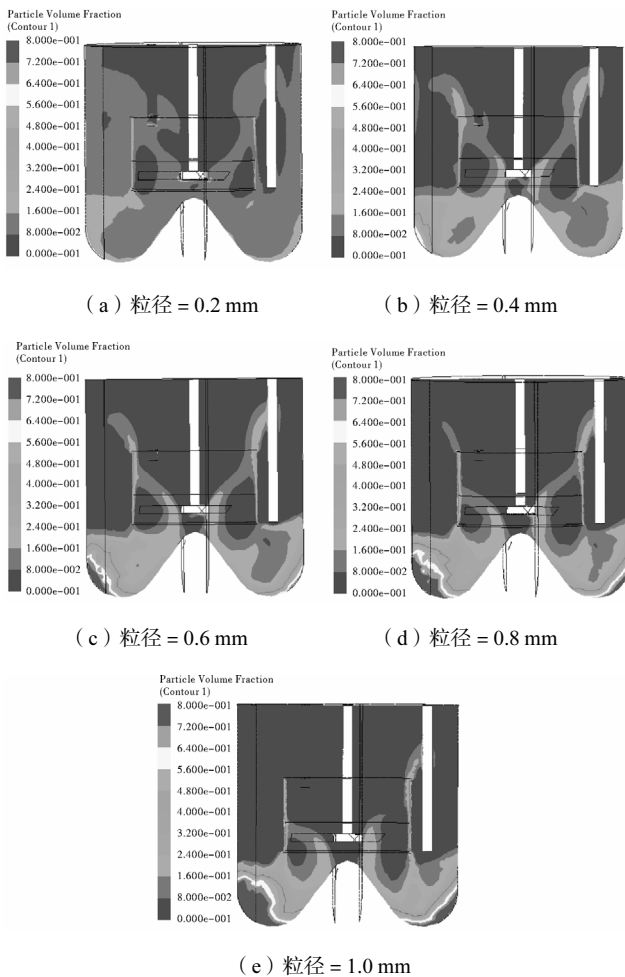


图 2 不同粒径条件下颗粒的体积分数分布  
Fig.2 Volume fraction distributions of particles on different particle size

图 3 为不同粒径条件下在结晶器不同高度上的平均颗粒体积分数分布情况(搅拌速度=550 r/min), 由图 3 可看出, 尺寸较大的颗粒体积分数在  $h/H=0.4$  的部位以下时, 颗粒体积分数分布变化明显. 由图 4

可以看出: 由于搅拌桨带动料液的曳力作用, 搅拌桨的底部溶液的速度较大, 而结晶器底部, 尽管溶液的矢量方向指向搅拌桨, 但是速率较小, 雷诺数较结晶器其他部位也比较小, 这在一定程度上增加了颗粒在结晶器底部沉积的几率. 同时, 结晶器下部靠近内壁的地方晶体的速度矢量与内壁几乎垂直, 使得部分晶体容易附着于结晶器内壁, 从而增加了这一区域的平均颗粒体积分数, 随着颗粒粒径的增加, 底部的颗粒体积分数也随之增加, 甚至可能出现沉积.

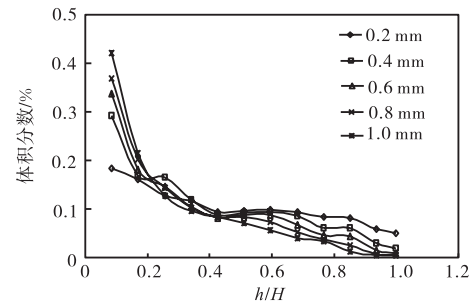


图 3 不同粒径条件下的体积分数与高度的关系  
Fig.3 Relation between particle volume fraction and height on different size

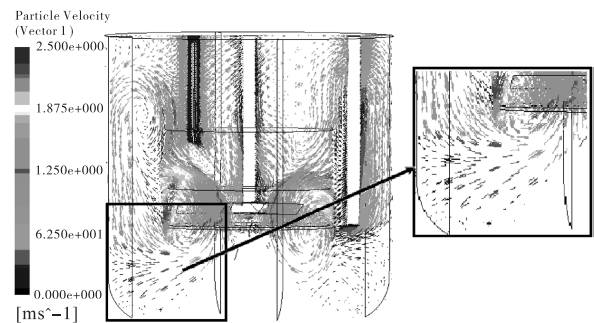


图 4  $h/H=0.34$  的流场分布  
Fig.4 Flow field distribution( $h/H=0.34$ )

#### 3.2 搅拌速度对悬浮状态的影响(以 $h/H=0.34$ 、粒径=0.6 mm 为例)

由图 5 可知, 随着搅拌速度的增加, 结晶器的混合状态明显好转, 550 r/min 时结晶器底部还有部分沉积, 当达到 750 r/min 时, 颗粒的混合状态基本达到完全悬浮状态.

#### 3.3 排料位置对悬浮状态的影响(以搅拌速度=550 r/min、粒径=0.6 mm 为例)

图 6 是同一粒径在不同排料位置下模拟的颗粒悬浮状态. 在一定搅拌转速下, 结晶器内的固体颗粒混合均匀时, 不同高度的平均颗粒体积分数分布趋势几乎一致, 但是排料位置位于导流桶上部时, 结晶器底部的颗粒体积分数相对较大, 有可能出现沉积.

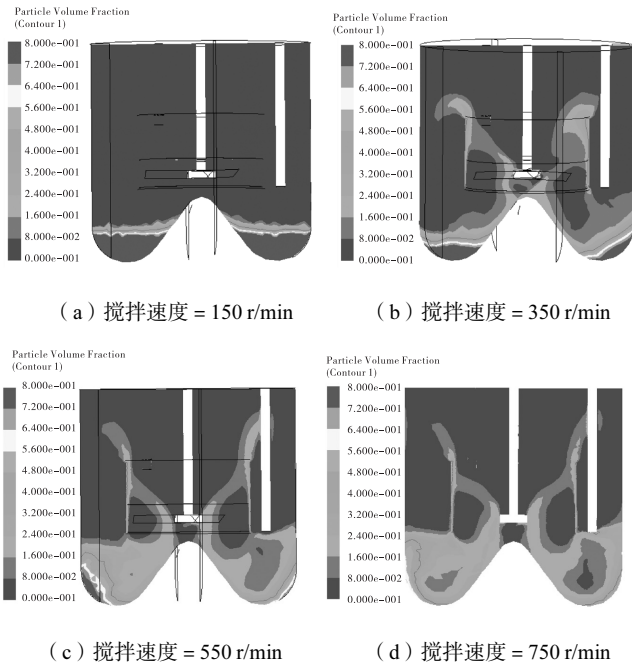


图5 不同搅拌速度下的颗粒体积分数分布

Fig.5 Volume fraction distributions on different stirring speed

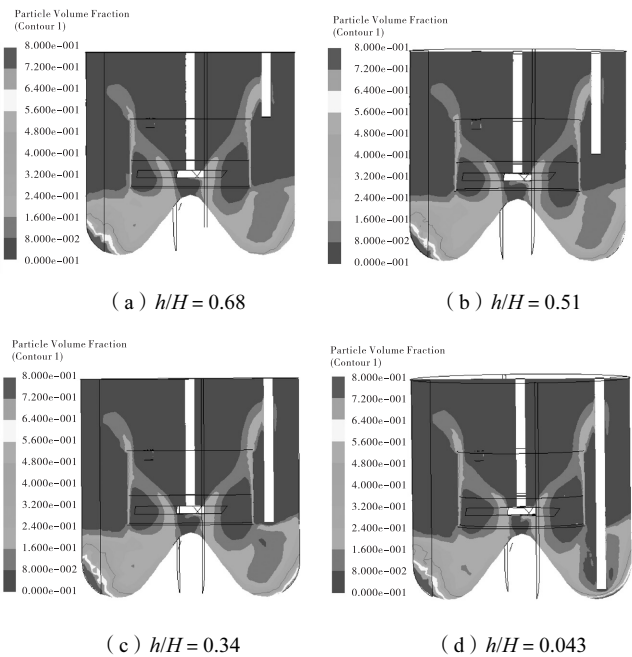


图6 不同出料位置的颗粒体积分数分布

Fig.6 Volume fraction distributions of particles on different remove position

### 4 结论

(1) 当搅拌速度一定时, 结晶器中颗粒尺寸大小对颗粒体积分数分布有很大的影响, 较小的晶体的体积分数分布比较均匀, 晶体悬浮状态较好. 随着颗粒尺寸的增加, 结晶器底部的颗粒体积分数逐渐增加,

固体悬浮状态变差.

(2) 当搅拌速度达到一定数值时, 结晶器内固体悬浮会呈现较好的混合状态, 不同的出料位置对结晶器的颗粒体积分数分布影响不大. 但是并不是搅拌速度越大, 混合程度越好, 搅拌速度越大, 晶体之间和晶体与结晶器之间的碰撞也越剧烈, 在实际工业应用中, 会增加能耗和晶体破损的几率, 不利于晶体的生长. 因此在设计结晶器时, 应考虑涡动的速度矢量方向与 W 型底部结构的切向的一致性.

(3) 在一定搅拌速度下, 结晶器内的固体颗粒混合均匀时, 排料位置对结晶器内不同高度的平均颗粒体积分数分布影响不大, 且当改变排料口高度时, 出料口轴向上的颗粒体积分数分布发生相应的变化: 出料口的初始浓度与改变排料位置后出料口浓度相当时, 轴向上的颗粒体积分数变化不大; 出料口的初始浓度小于改变排料位置后出料口浓度时, 平衡后轴向上的颗粒体积分数增加.

### 参考文献:

- [ 1 ] Gupta B S, Dutta T K. Mixing in continuous DTB and FC crystallizers[J]. Chemical Engineering & Technology, 1990, 13 (1) :349-356.
- [ 2 ] 谢东宏. DTB 型结晶器[J]. 化工机械, 1994, 21 (1) :55-61.
- [ 3 ] 丁绪淮. 工业结晶[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.
- [ 4 ] Sha Z L, Seppo P. Mixing and crystallization in suspensions[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55 (10) : 1797-1806.
- [ 5 ] Sha Z L, Palosaari S. Modeling and simulation of crystal size distribution in imperfectly mixed suspension crystallization [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2002, 35 (11) :1188-1195.
- [ 6 ] Sha Z L. Continuous crystallization in imperfectly mixed suspension[D]. Finland:Lappeenranta university of technology, 1997.
- [ 7 ] 王学魁, 武首香, 沙作良, 等. DTB 结晶器的流体动力学状态及其对 KCl 结晶过程的影响[J]. 天津科技大学学报, 2008, 23 (4) :18-22.
- [ 8 ] Kerdouss F, Bannari A, Proulx P, et al. Two-phase mass transfer coefficient prediction in stirred vessel with a CFD model[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32 (8) :1943-1955.
- [ 9 ] Akhot V, Orzag S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1 (1) :3-11.