

磷酸陈化槽两相流搅拌的数值模拟

魏化中^{1,2}, 陶保林¹, 舒安庆^{1,2}, 金 恋¹

(1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉市压力容器压力管道安全技术研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘 要:为建立相对精确的磷酸陈化槽的固-液两相混合过程数值模拟的方法, 指导此类搅拌器的设计并优选搅拌结构, 使用计算流体力学软件 FLUENT 对磷酸陈化槽内的固体颗粒与液体的搅拌混合过程进行了三维数值模拟, 根据 Zwietering 的关联式得出搅拌临界转速, 利用多相流模型中的欧拉模型来解决悬浮液中的固体颗粒沉降问题, 采用多重参考系法(MRF), 选用标准 $k-\epsilon$ 湍流模式, 模拟出平底磷酸陈化槽中液体的流动情况和体积分数的分布、分析垂直面内和水平面内液相的流场分布规律、固相颗粒体积分数特点, 并探讨了产生这种情况的原因。模拟结果表明 PBT 搅拌桨所产生的轴向流型比较适合固-液搅拌操作。

关键词:磷酸; 陈化槽; 三维数值模拟; 固-液两相流; 临界转速

中图分类号: TQ027.2

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2012.12.013

0 引 言

磷酸是重要的基本化工原料之一, 又是磷化工中重要的中间产品。磷酸采用湿法生产的占多数, 用硫酸、硝酸或盐酸分解磷矿制得的磷酸统称为湿法磷酸, 而用硫酸分解磷矿制得磷酸的方法是湿法磷酸生产中最基本的方法^[1-3]。湿法磷酸生产技术的关键在于获得粗大、均匀、稳定易于过滤的硫酸钙水合结晶, 以利于磷石膏与磷酸的分离^[4]; 有资料表明搅拌器的结构型式和混合特性很大程度上决定了磷酸陈化槽内固液物质的混合效果^[5], 深入研究磷酸陈化槽搅拌器的结构对进一步改善磷酸陈化槽固-液混合效果、提高后续的过滤效果及减低功率消耗, 避免磷石膏在槽底沉积结垢都具有重要的现实意义。

然而, 实际情况是搅拌槽内物质的流动通常都是非常复杂的。对搅拌装置的设计和放大方法还停留在传统的经验设计阶段, 这种方法的短板是不能触及搅拌槽内复杂流体流动过程的本质, 所以这种方法始终不能圆满解决搅拌装置的设计和放大问题。另外, 用于测量搅拌流场的实验仪器价格一般都很昂贵, 并且流场测量的工作是一项非常费时的工作; 有时还会因为搅拌槽内介质特性的原因, 从而造成对该物质的搅拌混合实验无法进行。

近年来, 计算流体力学(CFD)技术发展迅速,

运用 CFD 的方法获取搅拌槽中的信息成为可能。本文以某公司的磷酸陈化槽装置为原型, 利用商业 CFD 软件 ANSYS13.0 里的 FLUENT 为工具, 对磷酸陈化槽内固体颗粒与高粘度溶液的搅拌混合过程进行了数值模拟、解析, 以期为磷酸陈化槽搅拌器的后续设计、优化提供参考。

1 模型与数值方法

1.1 磷酸陈化槽物理模型

模拟所采用的磷酸陈化槽为圆筒形, 其结构如图 1 所示。槽体直径为 $T=1\ 000\text{ mm}$, 液面高度为 $H=1\ 000\text{ mm}$, 沿圆周方向均布四块挡板, 挡板宽度为 100 mm 。所采用的液固物系为磷酸溶液和磷石膏颗粒, 固体相的体积分数为 5.0% , 固体颗粒形状设为圆形; 由于介质中磷石膏颗粒直径大于 0.045 mm 的占 70% , 故取固相颗粒直径为 0.045 mm , 密度为 $2\ 320\text{ kg/m}^3$ 。磷酸溶液的密度为 $1\ 285\text{ kg/m}^3$, 动力粘度为 $0.015\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

搅拌桨为四叶 PBT 桨, 如图 2 所示, 桨叶离底的高度为 $C=\frac{T}{3}$, 详细参数如表 1 所示。

表 1 PBT 搅拌桨参数表

Table 1 Parameters of the PBT airfoil impeller

Agitator	D/mm	$D\cdot T^{-1}$	t_b/mm	$\theta/(\circ)$	n_b
PBT	166	0.33	80	145	4

收稿日期: 2012-10-12

作者简介: 魏化中 (1955-), 男, 湖南永州人, 教授。研究方向: 压力容器压力管道、流体机械和搅拌设备的开发、新型高效过程装备及仿真技术。

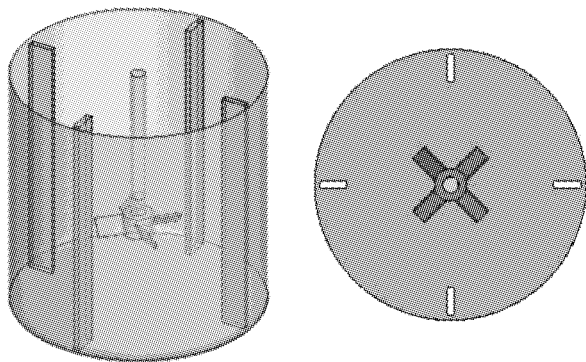


图 1 磷酸陈化槽几何模型

Fig. 1 Geometric model of phosphate aging tank

1.2 搅拌转速的确定

在搅拌设备的工业应用中,固-液两相混合的使用目的主要有以下两个:**a.** 使固体颗粒物质在搅拌槽中均匀悬浮起来,简称均匀悬浮。**b.** 使固体颗粒物质在搅拌槽中完全离底悬浮起来,简称为完全离底悬浮。

完全使固体颗粒物质达到离底悬浮状态时的最低搅拌转速叫做临界转速 N_{js} 。自从在 50 年前引入临界转速 N_{js} 概念后,它一直都是人们在处理固-液两相流问题时所采用的最主要设计参数之一。在搅拌装置设计过程中,对于固-液两相流体系,有不少人发表了关于临界转速的关联式的文章。在实际的生产过程中发现 Zwietering 的关联式最为精确。

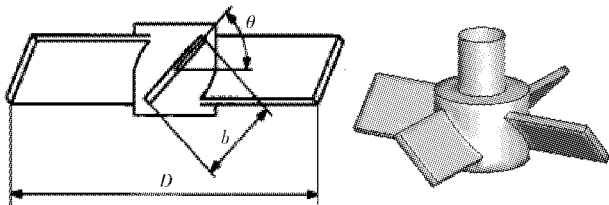


图 2 PBT 搅拌桨示意图

Fig. 2 Configuration of PBT airfoil impeller

Zwietering 的完全离底关联式可写为以下形式:

$$N_{js} = s \left(\frac{\mu_l}{\rho_l} \right)^{0.1} \left(\frac{g \Delta \rho}{\rho_l} \right)^{0.45} d_p^{0.2} X^{0.13} D^{-0.85}$$

其中 μ_l 是液体粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); ρ_l 是液体密度 (kg/m^3); $\Delta \rho$ 是固体和液体的密度差; d_p 是悬浮粒子直径 (m); X 是固体颗粒浓度; s 是无因次几何因子,从手册中查到 PBT 的 s 值约为 10. 可以计算出磷石膏颗粒在陈化槽内临界转速为 1.6 r/s, 即 90 r/min, 工程上通常要乘以安全系数 1.5, 结果为 135 r/min, 取为 150 r/min.

1.3 固-液悬浮判据

事实上,在大多数固-液两相流悬浮体系中,固体颗粒在搅拌槽内是不可能真正达到均匀分布

的。单层球状固体颗粒不受压堆积在一起时,空间内固体颗粒的最大体积分数值 φ_{\max} 应不大于 $\frac{\pi}{6}$ (近似取值 0.52)。因此在搅拌槽中,当某区域内 φ_{\max} 大于 0.52 时,这就说明该区域固相物质没有完全离底悬浮,该区域发生了固相物质堆积现象。当搅拌槽中固相物质离底悬浮时, φ_{\max} 的值必小于 0.52。由此,可以用 φ_{\max} 来作为搅拌槽中固-液悬浮的判据^[6]。

1.4 模拟策略

1.4.1 网格划分 采用 fluent MixSim 对模型进行网格生成,生成的网格是非结构四面体网格,然后通过 FLUENT 软件进行处理最后转化为六面体网格,这样处理就能使网格的数量大大减少,从而提高了软件的计算速度。由于搅拌桨桨叶结构比较复杂,为了提高近桨区域的流场的计算精度,所以对此区域内的网格进行加密处理,最后生成的总网格数量为 170 302。

1.4.2 模拟方法 使用 ANSYS 13.0 里的 Fluent 软件进行计算,使用有限体积法求解离散方程,选用 Eulerian-Eulerian 模型对陈化槽的固液体系进行数值模拟,液相湍流模型选用 standard $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁区域流动的处理方法采用标准壁面函数法,由于计算体系中斯托克斯数要比 1 小很多,因此多相 $k-\epsilon$ 湍流模型选用 Dispersed 湍流模型^[7-8]。颗粒最大堆积体积取 0.6,相间阻力系数使用 Gidaspow 模型,采用多重参考系法(MRF)对陈化槽内固-液两相流流场进行数值模拟,桨叶及其附近的区域定义为内计算域,其它区域定义为外计算域,内计算域采用旋转坐标系,外计算域采用静止坐标系。控制方式的传递项采用 SIMPLE 算法,差分格式采用一阶迎风格式,时间步长设为 0.01 s,流体流动为定常流动,所有项的残差收敛标准均采用 10^{-9-10} 。

2 模拟结果及分析

2.1 流场分布

图 3 为磷酸陈化槽 CFD 模拟所得出的搅拌槽 $x=0$ 轴截面的速度矢量图,其所显示的为陈化槽的流场,其中矢量的大小代表液相速度的大小。从图 3 中可以得出以下几点结论,①叶轮尖端附近的液流速度最大,自由液面处的速度最小。②叶轮两侧各有一个大的漩涡,说明在叶轮的高速转动下,磷酸陈化槽内形成了一个大的循环区域。③叶轮附近的液体在电机所提供的外力作用下经过叶轮的作用冲向槽底,最后沿着陈化槽的壁面流

向液面,在此循环过程中磷石膏颗粒在叶轮所提供的冲击力和溶液的速度带动在搅拌槽中流动,以致混合或悬浮,最终达到搅拌混合的目的.④在叶轮的下方形成了一个倒锥体区域,在这个区域中液相的流动方向与周围其他区域内的液流方向相反,为自下向上,同时这个区域的流速与周围区域的流速相比比较小,因此在搅拌转速不够的情况下这个区域相对于其它区域来说更容易发生磷石膏固体颗粒堆积的现象.同时还可以看出在槽底靠近壁面区域的液流速度与周围速度相比相差两个数量级几乎为 0,此区域可以说是死区,固体颗粒在此区域极易发生堆积现象.

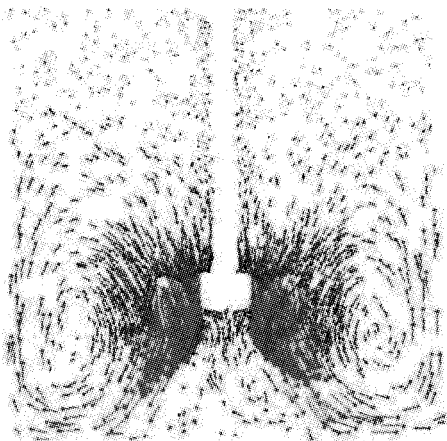


图 3 轴截面速度矢量分布

Fig. 3 Velocity vector distribution on axis cross-section

为了更详细地来描述磷酸陈化槽的搅拌流场,现截取磷酸陈化槽横截面的速度矢量图,图 4 所示平面为距离陈化槽底部垂直方向上方 $z=10$ mm 处的水平截面速度矢量图.

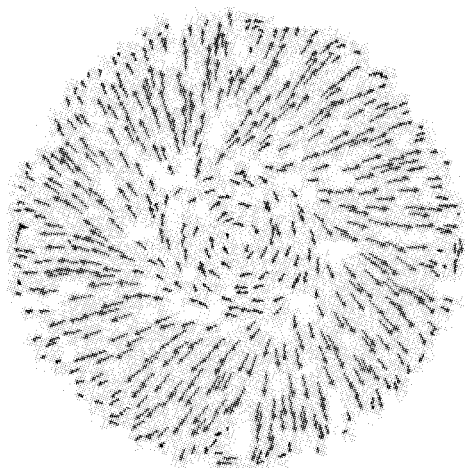


图 4 水平截面速度矢量分布

Fig. 4 Velocity vector distribution on horizontal cross-section

从图 4 中可以看出,水平平面的速度矢量方向是以搅拌轴为中心向四周发散的,这与图 3 中所观察到的情形是一致的,即液流汇聚成体积流后,在剪切力的作用下沿叶轮推进方向运动,最终使槽内介质达到搅拌混合的目的.

2.2 浓度分布

图 5 是磷酸陈化槽内 $x=0$ 轴截面上磷石膏固体颗粒体积分数分布的相图,图 6 是磷酸陈化槽内 $z=10$ mm 水平截面上的固体颗粒体积分数分布的相图.从图 5 和 6 图中可以看出,在挡板附近以及槽底的角落位置和中心位置的磷石膏固体颗粒体积分数较大,整个大循环漩涡区域以及搅拌桨尖端附近的磷石膏固体颗粒体积分数相对来说较低,液面附近的磷石膏固体颗粒体积分数几乎为 0.

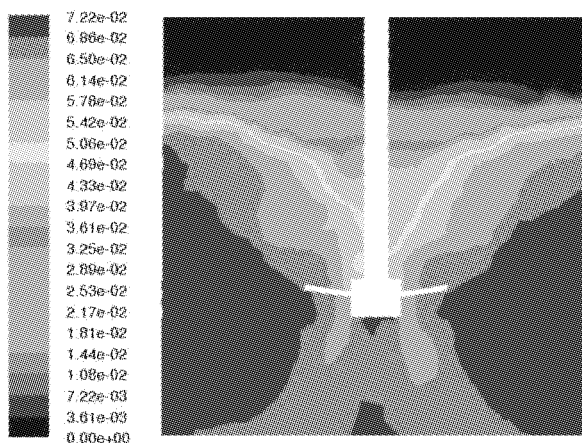


图 5 轴截面固体颗粒体积分数分布

Fig. 5 Axis cross-section volume fraction contours of the solid

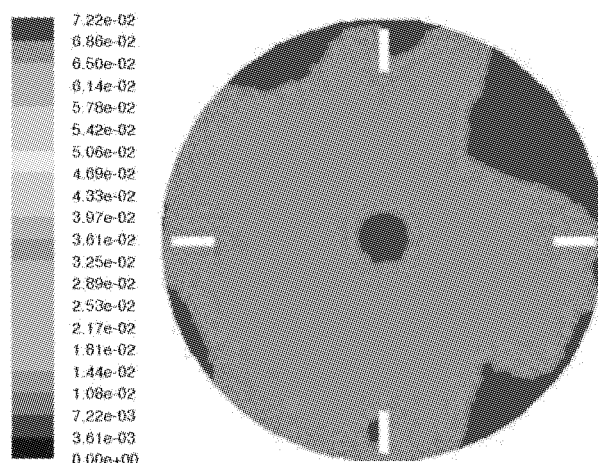


图 6 水平截面固体颗粒体积分数分布

Fig. 6 Horizontal cross-section volume fraction contours of the solid

通过上述分析可以认为,在搅拌过程中,磷石膏固体颗粒受到两个力的作用:由于地球引力作用所产生的重力和由于粘性作用而使流体在流动过

程中所产生的剪切力,重力使固体颗粒在运动过程中具有向下运动的重力加速度,剪切力使固体颗粒能够随液体流动。磷石膏固体颗粒在搅拌槽中最终所沉淀的位置是由这两个力叠加作用的结果。在叶轮正下方由于存在一个倒锥体流型,此流型形成液流绝缘区,故此区域固体颗粒体积分数较高;槽底壁面是整个陈化槽内循环的转向地点,又由于槽底与壁面接触处为直角,故此处也会沉积固体颗粒;在液面上,由于离桨叶处较远,又由于磷酸为高粘度流体,因此液面附近流体流动的速率较小,故而在液面附近区域重力起主导作用,又由于重力方向是指向陈化槽底面的,磷石膏固体颗粒在重力的作用下会向下运动,所以液面处固体颗粒体积分数很低,在搅拌转速不大的情况下此区域固体颗粒体积分数几乎为 0。

3 结 语

a. 从陈化槽槽底固体颗粒的体积分数的最大值为 0.072 2,小于 0.52,说明陈化槽底部没有发生磷石膏固体颗粒堆积现象,从模拟结果所得出的固体颗粒体积分数分布情况来看槽底的颗粒是处于完全悬浮状态的,从而说明利用 Zwietering 的完全离底关联式在以磷酸溶液和磷石膏固体颗粒为介质的情形下适用于磷酸陈化槽搅拌设备临界转速的估算。

b. 从整个磷酸陈化槽内液流的流型来看,磷酸陈化槽内流动以轴向流为主,液体从液面经叶轮流下,在叶轮外力作用下冲击陈化槽的槽底,然

后从陈化槽的壁面流向液面,在整个循环流动过程中,陈化槽利用叶轮所产生的冲击力和流体的速度带动磷石膏固体颗粒流动,从而达到搅拌混合的目的。

参考文献:

- [1] 张允湘. 磷肥及复合肥料工艺学[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [2] 王树林,黄志良,罗欣,等. 宜昌磷矿工艺矿相学研究[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(2):55-59.
- [3] 田兴,石和彬,池汝安,等. 湖北某中低品位硅质磷矿工艺矿物学研究[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(3):45-50.
- [4] 欧阳峰. 新型穿流式搅拌桨在湿法磷酸反应器中的应用[J]. 西南交通大学学报,2000,35(2):145-150.
- [5] 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.
- [6] 钟丽,黄雄斌,贾志刚,等. 固-液搅拌槽内颗粒离底悬浮临界转速的 CFD 模拟[J]. 北京化工大学学报,2003,30(6):18-22.
- [7] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞,等. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [8] 舒安庆,刘凯,魏化中,等. 生物反应器内搅拌器的优化设计[J]. 武汉工程大学学报,2011,33(11):66-69.
- [9] He X, Yan S, Hu Y. Face recognition using Laplacianfaces[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2005,27(3):328-340.
- [10] 赵洪亮,张延安,张超,等. 改进 Intermining 桨种分槽搅拌性能的数值模拟[J]. 过程工程学报,2011,11(1):15-19.

Numerical simulation of two phase flow in phosphate aging tank

WEI Hua-zhong^{1,2}, TAO Bao-lin², SHU An-qing^{1,2}, JIN Lian²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Wuhan research center of pressure vessel and pipeline safety engineering, Wuhan 430074, China)

Abstract: To establish a possible method for phosphate aging tank solid-liquid mixing process simulation, and to optimize the solid-liquid mixers, three-dimensional numerical simulation of phosphate aging tank solid-liquid mixing process was carried out by using computational fluid dynamics software FLUENT. The Zwietering correlate equation was used to calculate the critical speed of rotation, The multi-reference frame(MRF) and standard $\kappa-\epsilon$ turbulent model were used to describe the rotational turbulent flow in stirred tank, and the Euler-Euler model was used to analyze the solid-liquid two-phase flow. Finally, the flow situation and the density distribution of the phosphate aging tank were simulated, the fluid distribution laws of the liquid and the density characteristics of the solid particles in vertical and horizontal plains were analyzed. The result of the simulation shows that the axial flow pattern made by PBT airfoil impeller type agitator is suitable for solid-fluid mixing.

Key words: phosphate; aging tank; numerical simulation; two-phase flow; mixer

本文编辑:陈小平