

文章编号:1674-2869(2011)10-0086-04

磷酸反应槽内临界离底悬浮转速的 CFD 模拟

董厚生¹, 魏化中^{1,2*}, 舒安庆^{1,2}, 刘 凯²
(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:使用计算流体软件 Fluent 对磷酸反应槽内颗粒的临界离底悬浮转速进行了数值模拟. 搅拌槽直径 $T=0.5\text{ m}$, 四块挡板均布, 搅拌桨采用 45° 斜叶桨. 两相物系为磷石膏—硫酸, 固体体积百分比浓度 $\varphi=4.65\%$. 使用浓度判据得到颗粒离底临界悬浮转速 N_{js} , 模拟计算结果的误差在工业允许的范围内. 模拟得出搅拌槽中液体的流动状况和固体体积分数的分布; 同时对 6 个不同搅拌转速下的固体颗粒悬浮状况进行比较, 得出均匀悬浮临界转速.

关键词:计算流体力学(CFD); 临界离底悬浮转速; 搅拌槽

中图分类号:TQ027.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.10.020

0 引 言

如何以最小的能耗获得所需的搅拌效果一直以来是固液悬浮技术研究的重点. 因此, 找出固液体系的临界离底转速显得尤为重要^[1]. 当颗粒全部处于运动时, 且颗粒在槽底停留时间不超过 $1\sim 2\text{ s}$, 即认为达到了完全离底悬浮, 而达到此状态所需的最低搅拌转速称为临界转速 N_{js} . 在固液悬浮操作中, 对完全离底悬浮的研究较多, 也发表了不少有关临界转速的关联式. 其中, Zwietering 提出的完全离底悬浮临界转速关联式应用的最为广泛. 目前得出的 N_{js} 值大多是在实验室尺度的槽中通过冷模实验估算获得的, 再放大到工业反应器中. 而对于工业上应用的高温、高压等复杂条件下的大尺度反应器, 是无法通过实验获得所需的详尽信息的. 因而需要寻找一种新的途径来对工业中应用的搅拌槽内的临界悬浮转速 N_{js} 进行预测. 计算流体力学(CFD)技术的发展让这种预测成为可能. 关于完全离底悬浮临界转速 N_{js} 方面的报道比较少, 本文的目的是预测搅拌槽内固液悬浮的临界悬浮转速, 将模拟结果和文献数据进行对比, 验证 Fluent 软件对搅拌槽内临界离底悬浮转速进行预测的合理性.

1 计算体系与模拟方法

1.1 计算体系

1.1.1 搅拌槽结构 模拟采用的搅拌槽槽体为圆柱形, 四块挡板均布, 搅拌槽直径 $T=0.5\text{ m}$, 液面高 $H=0.46\text{ m}$, 挡板宽 $W=\frac{T}{20}$, 挡板离底距离为 0.01 m . 桨型采用 45° 斜叶桨(搅拌桨示意图如图 1 所示, 参数如表 1 所示), 桨叶离底距离 $C=\frac{T}{3}$.

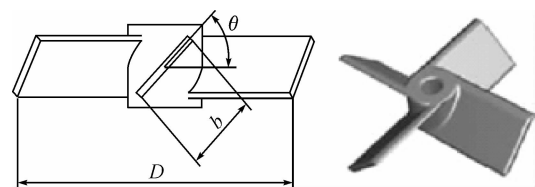


图 1 PBT 搅拌桨示意图

Fig. 1 Configuration of PBT airfoil impeller

表 1 搅拌桨参数表

Table. 1 parameters of the PBT airfoil impeller

	参数				
	D/mm	$D\cdot T^{-1}$	b/mm	$\theta/(^\circ)$	σ_b
搅拌桨	200	0.4	40	45	4

1.1.2 计算物系 介质为磷石膏和硫酸, 固体相的体积分数为 4.65% , 颗粒的平均直径为 $72\text{ }\mu\text{m}$, 密度为 $2\,320\text{ kg/m}^3$. 流体操作密度为 $1\,500$

kg/m³,操作粘度为 5 MPa·s.

1.1.3 网格划分 根据流动对称性,选取槽体的四分之一为计算域.由于模拟所采用的搅拌桨的结构不规则,网格划分采用非结构化的网格,共 1 014 262 个网格节点,如图 2 所示.

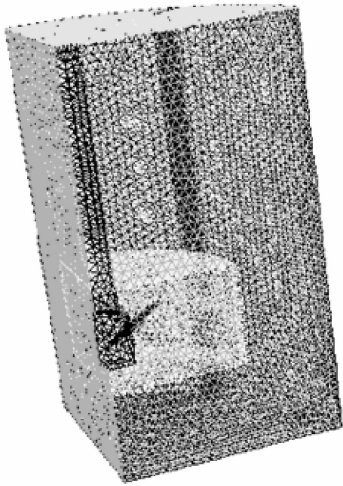


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Meshing for the stirred tank

1.2 模拟方法

计算使用的软件是 Fluent 6.3,利用 Euleian 模型模拟该固—液两相流^[2-3].Euleian 模型分别解每一相动量方程,并通过连续相对分散相的曳力与动量交换项来模拟两相间相互作用.并采用标准的壁面函数法来处理近壁区域流动的计算.而液相湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 方程模型.计算中假设固—液两相间无质量传递,由于固相浓度较低,所以相应的阻力系数采用 wen-yu 模型^[4-5].流动场的计算使用多重参考系法,并设定流动性质为定常流动.相应的压力速度耦合选择 Phase Coupled SIMPLE 法,并采用一阶迎风的差分格式^[6-7].

2 结果与讨论

均匀悬浮临界转速的确定最常用的方法是通过测釜内各点的固相浓度,根据釜内固相浓度分布(固体颗粒的体积分数分布情况反映了固体颗粒的浓度分布状况)的均匀度来判断.

衡量搅拌釜内固体颗粒浓度分布均匀性的判据很多,广泛采用的是浓度分布的标准偏差 $\bar{\sigma}$.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i}{c_o} - 1 \right)^2}$$

式中: n 为测点数目.

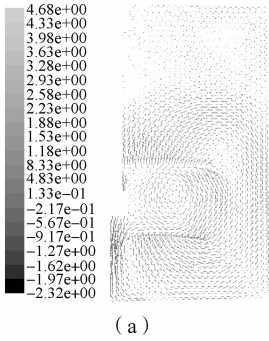
$\frac{c_i}{c_o}$ 为测点固相浓度与全釜平均固相浓度之比.

$\bar{\sigma}$ 越小,固体颗粒在釜内分布的均匀程度就越高.随着功率(转速)增加, $\bar{\sigma}$ 减小并趋于定值,即达到均匀悬浮.此时所需要的最小转速(功率)即为均匀悬浮临界转速.达到均匀悬浮时的均匀度($\bar{\sigma}$ 值)与叶轮型式和转速有关^[8].

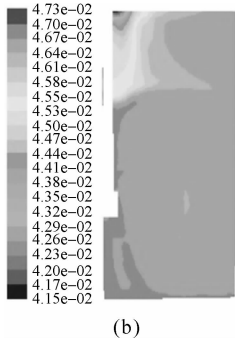
本文研究选取数值模拟的搅拌转速为 20 r/min、30 r/min、40 r/min、50 r/min、60 r/min、70 r/min,其对应的雷诺数分别为 0.83×10^5 , 1.25×10^5 , 1.67×10^5 , 2.08×10^5 , 2.5×10^5 , 2.92×10^5 .

2.1 均匀悬浮状态

均匀悬浮状态下的速度、浓度分布如图 3 所示.



(a)



(b)

图 3 固液悬浮流场分布

Fig.3 Flow field for dilute suspension

图 3 为 60 r/min 转速下的 Fluent 数值模拟后的混合流的液相速度矢量图与固相体积分数分布图.图 3(a)为经过搅拌轴垂直面内的流场,其中矢量长度代表速度大小,搅拌桨区域的速度值较大,而自由液面区的速度值较小.图 3(b)为固相体积分数分布图,表示了槽内的固体分布情况.

2.2 不同转速下的颗粒浓度分布

图 4 列举了 20~70 r/min 转速下的浓度分布图.

从图 4 中固体颗粒的体积分数分布可以看出,20 r/min 转速时,液面处的浓度大小跟其他转速下的浓度大小不在一个数量级上.这是由于在液面处,速度过小时,重力起主导作用造成的.

另外,随着转速的增加,槽内颗粒浓度更加趋于均匀状态,在搅拌槽的自由液面区颗粒浓度也

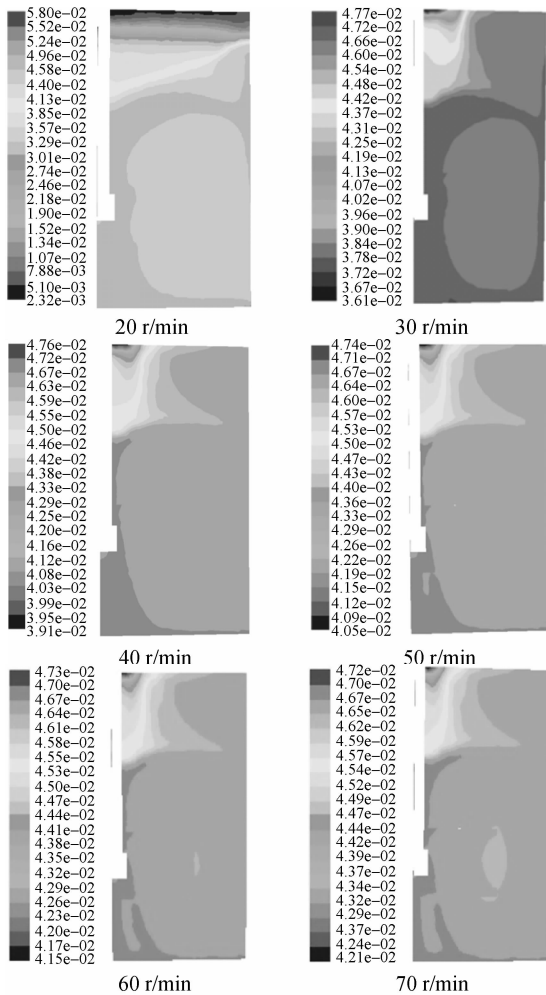


图 4 不同转速下垂直截面固相体积分数分布

Fig. 4 Vertical direction volume fraction contours of the solids with different rotation speeds

随之增大。随着转速的不断增大，槽内颗粒浓度分布的标准偏差 $\bar{\sigma}$ 趋于定值时，即认为达到了均匀悬浮。此时所需的最小转速即为均匀悬浮临界转速^[9]。

2.3 临界悬浮转速

归纳以上几种转速下槽内的颗粒浓度分布状况，绘制沿图 5 中测试线 L 中的几个测试点随着转速的增加其颗粒浓度的标准偏差 $\bar{\sigma}$ ，结果如图 6 所示。

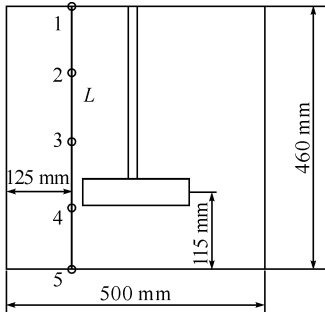


图 5 测试点示意图

Fig. 5 The distribution of testpoints

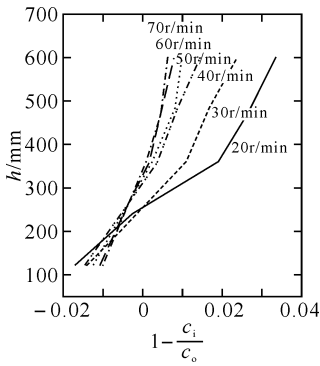


图 6 颗粒浓度偏差图

Fig. 6 the concentration variance of solids

从图 6 中可以得出转速在 20~70 r/min 内，槽内上层颗粒浓度偏差均较大，往下则偏差越来越小，当转速达到 40 r/min 时，槽内的浓度分布标准偏差 $\bar{\sigma}$ 减小并趋于稳定，即认为达到了均匀悬浮状态，由此可推断得到本体系的颗粒悬浮转速 $N_{JS}=40$ r/min，根据文献经验公式计算得出 N_{JS} 为 38~45 r/min，经计算两者误差为 5%~12.5%^[10-12]。

3 结 语

以上是使用计算流体力学的方法对搅拌槽内的低浓度固液悬浮状况进行了模拟，通过模拟计算，得出不同搅拌转速下的固体颗粒浓度分布图。利用浓度判据的方法推断出临界离底悬浮转速 N_{JS} 。模拟结果与文献结果比较吻合，不过，此结果仍需用实验来验证，初步验证了 CFD 技术对 N_{JS} 预测的可能性，模拟方法与结果可对设备的设计和放大起到一定的指导作用。

参考文献：

[1] 陈志平. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京：化学工业出版社，2004.

[2] 马青山，包云雨，聂毅骏. 搅拌槽内的三维流场的数值模拟[J]. 化工学报，2003，54(5)：612-618.

[3] 朱荣生，李维斌，黄道见，等. 搅拌器搅拌流场的三维数值模拟[J]. 农机化研究，2003，10(4)：75-77.

[4] 王振松，黄雄斌，李良超，等. 固-液搅拌槽内槽底流场的 CFD 模拟[J]. 北京化工大学学报，2005，32(4)：5-9.

[5] 王军，吴铎，杨志春，等. 热声谐振管压比影响因素的数值模拟[J]. 武汉工程大学学报，2010，32(2)：80-83.

[6] 孙亚忠，陈作炳，董新营. 立磨内部流场的数值模拟[J]. 武汉工程大学学报，2011，33(4)：89-93.

[7] 常玉锋，陈锋. 排烟方式对火场人员疏散影响的数值模拟[J]. 武汉工程大学学报，2010，32(9)：46-49.

[8] 黄雄斌,闫宪斌,施力田,等. 固—液搅拌槽内液相速度的分布[J]. 化工学报,2002,53(7):717-722.

[9] 李良超,黄雄斌. 固液搅拌槽内近壁区液相速度研究[J]. 北京化工大学学报,2005,32(1):33-38.

[10] 金中丽,黄雄武,贾志刚. 固液搅拌槽内颗粒离底悬浮转速的 CFD 模拟[J]. 北京化工大学学报,2003,30(60):18-22.

[11] 祝铃钰. 固液悬浮搅拌器中的局部速度测量[D]. 北京:北京化工大学,1996.

[12] 包丽云. 固液搅槽中液相速度测量技术开发及搅拌装置在水处理过程中的应用研究[D]. 北京:北京化工大学,1995.

CFD simulation of critical suspension Impeller speed in a phosphoric acid reaction tank

DONG Hou-sheng¹,WEI Hua-zhong^{1,2},SHU An-qing^{1,2},LIU Kai²

(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: Based on the function provided by Fluent, the critical suspension impeller speed, N_{js} , in a phosphoric acid reaction tank was simulated. The investigation was carried out in a fully baffled, flat bottom, cylindrical vessel with 500 mm diameter, equipped with PBT impeller. The phosphogypsum of 4.65% was chosen as the dispersed phase. The original criterion was used to determine N_{js} from the numerical results, and the error of simulation is acceptable to the industry standard. Solid concentration distribution and the velocity distribution of solid and liquid were predicted. The performance of solid suspension under the different agitation speeds was also studied, the critical suspension impeller speed was obtained.

Key words: computational fluid dynamics(CFD);critical suspension speed of impeller;stirred tank

本文编辑:陈小平