

粉煤灰-氢氧化钠浆液槽 放大准则数值模拟研究

刘丽艳¹, 李晨辰¹, 朱国瑞¹, 张战军², 孙俊民², 谭蔚^{1*}

(1. 天津大学化工学院, 天津 300072; 2. 大唐国际再生资源开发有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010206)

摘要: 粉煤灰-氢氧化钠浆液槽固液两相混合效果对整条高铝粉煤灰制备氧化铝工艺生产线的顺利运行至关重要, 以某单位生产现场浆液槽为基准建立了3个几何相似的搅拌槽模型, 应用多相流模型对搅拌槽固液悬浮的放大准则进行了研究。模拟计算了达到均匀悬浮时搅拌槽内各项性能参数的变化情况, 分析了不同放大方法的效果, 计算得到一种适合于粉煤灰-氢氧化钠浆液槽固液悬浮的放大判据 $N \propto D^{-0.842}$, 在节省功耗的基础上可以使搅拌过程较好地重现。

关键词: 浆液槽; 几何相似; 固液悬浮; 数值模拟; 放大准则

中图分类号: TQ027.2; TQ019

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2014)02-0148-04

Computation study of scale-up laws for fly ash-sodium hydroxide slurry tank

LIU Li-yan¹, LI Chen-chen¹, ZHU Guo-rui¹, ZHANG zhan-jun², SUN Jun-min², TAN Wei^{1*}

(1. College of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Limited Company of Datang International Recycling Resource Development, Hohhot 010206, China)

Abstract: The mixing effect in fly ash-sodium hydroxide slurry tank is critical for the smooth running of alumina preparation production line. Three geometrically similar stirring tank models are built according to the slurry tank in site and multiphase flow model is used to study the scale-up laws of solid-liquid suspension in them. The variations of various performance parameters achieving uniform suspension are simulated and the effects of different scaling laws are analyzed. Then a scale-up criterion suitable for solid-liquid suspension in fly ash-sodium hydroxide slurry tank is put forward, that is $N \propto D^{-0.842}$, which can reproduce the mixing process well and save power at the same time.

Key words: slurry tank; geometrical similarity; solid-liquid suspension; numerical simulation; scale-up law

由于实际生产过程的复杂性和多样性, 进行生产设备可靠设计时多需要通过小试实验获得所需设计参数。从小试实验设备到生产设备的放大过程会存在放大效应问题, 比如针对某一目的设计的搅拌系统的放大过程并非单纯增加设备几何尺寸, 还包括放大后搅拌器的转速、搅拌功率等一系列操作参数的调整。根据相似理论, 小试实验数据推广到大型设备时需满足几何相似、运动相似、动力相似等相似条件^[1]。由于相似条件很多, 同时各种条件对一个过程往往又有着相互矛盾的影响, 因此几乎不可能满足一个过程的所有相似条件。所以, 要根据具体搅拌过程及搅拌效果寻找对该过程影响最显著的相似条件, 舍弃次要因素, 从而得出最接近实际过程的模拟放大结果^[2]。

预脱硅是高铝粉煤灰提取氧化铝工艺的第一步, 而粉煤灰-氢氧化钠浆液槽位于整条工艺线最前端, 通过搅拌实现粉煤灰和氢氧化钠溶液预混、细

化颗粒的目的。在预混及细化过程中固相的均匀分布可以使粉煤灰充分反应, 避免对下游反应造成影响^[3]。目前对于单相流搅拌的模拟研究已经比较充分, 涵盖了牛顿流体以及非牛顿流体领域^[4], 而固液悬浮操作涉及到多相流搅拌流场的数值模拟, 相对比较复杂, 而且实际工业生产中的大型搅拌槽由于观测采集数据非常困难, 无法实时了解槽内的流场情况, 因此也无法验证小试实验数据的放大效果。采用数值模拟的方法对大型搅拌槽正常以及非正常操作工况进行研究是一种行之有效的手段, 本文中拟通过数值模拟方法探讨对比几种放大准则的适用性, 进而得到一种适合浆液槽体系的放大方法, 为工业应用提供指导。

1 放大方法

若2个搅拌系统的构型相同, 则可以使用同一功率曲线, 即它们的功率特征数符合同一个特征数

收稿日期: 2013-09-27; 修回日期: 2013-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(21376167); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAB49B00)

作者简介: 刘丽艳(1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为传质与分离; 谭蔚(1965-), 女, 博士, 教授, 非均相分离理论与技术, 通讯联系人, 022-27408728, wtan@tju.edu.cn。

关联式,通过测量小型设备的搅拌功率便可推算出生产设备的搅拌功率。在几何相似系统中,要取得相似的工艺过程结果,可以参考的放大判据有雷诺特征数 Re 、弗鲁德数 Fr 、韦伯数 We 、叶端线速度 u_T 、单位流体体积的搅拌功率 P_v 等。目前对流量型搅拌^[5]、气液搅拌^[6-7]、液液分散搅拌^[8]、固液悬浮搅拌^[9-10]、固液搅拌传质^[11]以及结晶、聚合等反应^[12]的放大均进行了一定的研究,但是由于固液悬浮搅拌操作的复杂性和多样性,在多数情况下不同尺寸的搅拌设备间只能达到过程的近似相似,通过对固相颗粒质量分数、粒径^[13]以及均匀悬浮高度^[14]的研究得到了不同的放大准则。搅拌设备内部流场运动非常复杂,目前对其研究还未形成完善的理论体系,设计者往往依靠经验和实验数据进行设计,但是按照这类传统方法所设计的搅拌器大多未处于最佳工作状态,因此如何准确描述搅拌槽内部的流动以及混合过程一直是设计者所关注的问题。近年来,随着计算流体力学(CFD)技术的迅速发展,运用数值模拟的方法得到搅拌槽中的信息成为可能,以往对放大准则的研究多数在实验模型中开展,很少运用数值模拟方法。本文中利用数值模拟方法研究一种适用于高铝粉煤灰制氧化铝工艺生产线上大型搅拌槽的放大准则,分析对比现有的一些放大准则对搅拌过程重现性的影响,为今后开展一系列针对浆液槽的实验研究提供理论指导,浆液槽物料的均匀混合是保证整条粉煤灰制备氧化铝工艺线顺利运行以及产品质量的首要任务,也是研究放大准则的最主要参考条件。

2 数值模拟

2.1 模型建立

建立了几何相似的 A、B、C 3 个模型,槽径分别为 0.375、1.5、6 m,双层三叶 CBY 搅拌桨,槽内均布 3 块挡板,具体结构参数如表 1 所示,装填系数 0.85,其中 C 模型结构尺寸依照实际搅拌装置建立。建模忽略了桨叶及挡板厚度,划分网格方法类似,不同区域采用不同的网格尺度,首先对桨叶以及挡板等重点区域表面生成尺寸较小、质量较高的面网格,再对搅拌桨周围流场(旋转域)生成尺寸较大的四面体非结构网格,最后对流场其余部位进一步加大四面体网格尺寸。采用 Gambit 2.3.16 划分网格,经过网格无关性验证之后,选取计算较快的网格方案,网格数为 161 万。图 1 为选取了其中一个模型的网格示意图。

表 1 浆液槽结构尺寸				m
搅拌槽模型	A	B	C	
槽径 D_i	0.375	1.5	6	
高度 h	0.375	1.5	6	
桨叶直径 D_d	0.15	0.6	2.4	
桨叶间距 h_1	0.15	0.6	2.4	
下桨与槽底间距 h_0	0.05625	0.225	0.9	
挡板宽度 W_d	0.0375	0.15	0.6	

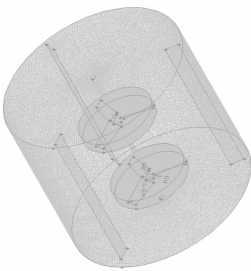


图 1 C 模型搅拌槽网格图

2.2 物性参数

模拟的固液悬浮浆液成分为粉煤灰和氢氧化钠溶液,主要物性参数如表 2 所示。

表 2 悬浮液物性参数					
物性参数	浆液密度 $\rho_l /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	浆液黏度 $\mu_l /$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	颗粒密度 $\rho_s /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒尺寸 $d_s /$ μm	颗粒相体 积分分数 $\varphi /$ %
数值	1280	0.12	2000	60	17

2.3 数值方法及研究内容

浆液槽内为固-液两相,模拟计算中采用欧拉-欧拉多相流模型进行数值模拟分析,使用 Ansys FLUENT 14.0,首先对不同搅拌转速下的固液两相分布进行稳态模拟研究,进一步分析 3 种尺寸模型的固液悬浮状态,探索一种适用于研究体系的放大判据。

2.4 边界条件及求解方法

静壁面包括槽壁面、底面以及挡板,动壁面包括桨叶表面和搅拌轴表面。动静壁面对液相均设置为无滑移壁面;对颗粒相设置为自由滑移壁面。搅拌液面设置为自由液面,采用 MRF 方法进行计算,桨叶所在区域的参考系旋转角速度与桨叶一致,其他区域使用静止参考系,2 个区域交界面定义为 interface。

采用有限体积法对浆液槽流场进行离散,使用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,近壁区采用标准壁面函数,对流项

采用 Quick 迎风格式,与一阶离散格式相比,Quick 离散格式的计算精度有很大的提高,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,各参数的计算残差收敛在 1×10^{-3} 以内,在内存为 96 G 的惠普 Z800 工作站上进行计算。

3 结果分析与讨论

3.1 搅拌转速

随着搅拌转速的增加,颗粒相逐渐均匀分布于搅拌槽中,可以用固含体积分数标准差表示颗粒相在整个搅拌槽内分布的均匀程度。固含分布标准差是指某个截面根据网格密度,对截面网格内的颗粒相体积分数与整个截面的平均值作标准差计算,得到的结果可以直观科学体现某一截面上颗粒分布的均匀程度。固含体积分数标准差随着搅拌转速的增加不断减小,但减小的幅度变小,存在一拐点,在此之后槽内不存在上层清液区,体系均匀性变化不大,继续提高转速只会造成能耗的浪费,将此拐点处的转速定义为最优均匀悬浮转速,将最优均匀悬浮转速处的固液悬浮状况确定为放大的基准。图 2 为模型 C 中固含标准差随搅拌转速的变化情况,颗粒粒径 $60\text{ }\mu\text{m}$ (体积平均粒径)。可以看到固相颗粒达到均匀悬浮的最优均匀悬浮转速为 36 r/min ,同样的方法得到 A、B 模型最优均匀悬浮转速分别为 372 、 101 r/min 。工厂提供的生产中均匀悬浮转速为 36 r/min ,与本文中模拟得到的结果一致,可以证明本文中模拟在定量和定性上的有效性。

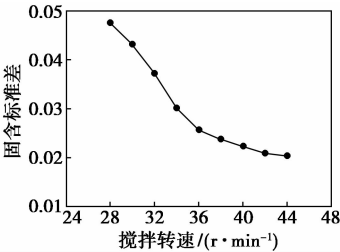


图 2 不同搅拌转速下的固含标准差分布

3 个模型中固相颗粒在最优均匀悬浮转速下的分布状况如图 3 所示,可以看到所有模型中颗粒相分布基本相似,不存在上层清液区,整体上满足固相均匀悬浮的放大要求,但在放大过程中几何相似搅拌槽的流场不可能达到所有参数完全一致,随着搅拌转速增加,上层浆产生的漩涡更加明显,3 个模型的固含分布图在整体上接近的情况下局部会有微小差异,存在各自操作条件下独有的特点,在放大过程中难以避免。

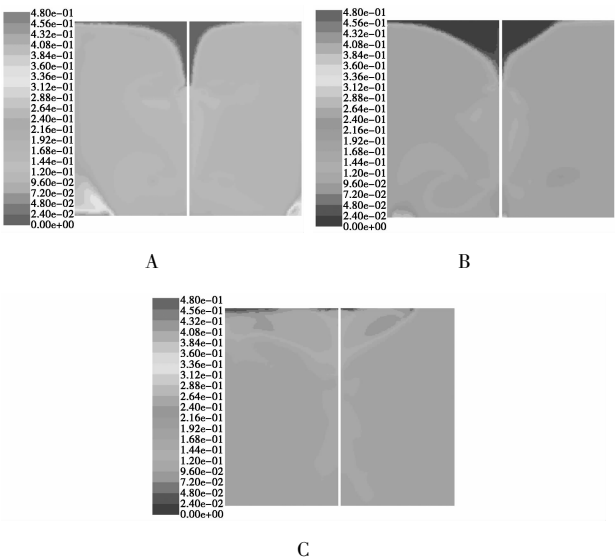


图 3 A、B、C 模型临界转速下的固相颗粒分布情况

3.2 放大准则的确定

均匀悬浮条件下通过数值模拟计算得到各个模型的一些性能参数如表 3 所示。

表 3 A、B、C 模型均匀悬浮条件下的各项性能参数

	A	B	C
临界搅拌转速 $N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	372	101	36
叶端线速度 $u_T/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	7.30	7.93	11.31
搅拌功率 P/kW	0.016	0.31	11.86
单位体积搅拌功率 $P_v/(\text{kW} \cdot \text{m}^{-3})$	4.52×10^{-1}	1.38×10^{-1}	8.22×10^{-2}
搅拌雷诺数 Re	1.08×10^5	4.68×10^5	2.67×10^6

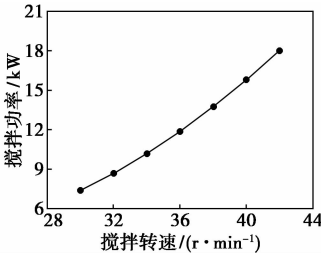


图 4 不同搅拌转速下的功率分布

由表 3 可以看到,3 个搅拌槽中当固相颗粒达到均匀分布时,随着搅拌槽尺寸的增加,叶端线速度和搅拌雷诺数增大,而单位体积搅拌功率减小,这是由于设备增大壁表面积相对减小且流体循环功率减小的结果。因此采用保持叶端线速度和搅拌雷诺数的放大方法将不能重现小试模型的过程结果,且大槽的单位体积搅拌功率会比小槽的小很多;采用保持单位体积搅拌功率的放大方法往往偏于保守,此

时大槽的叶端线速度和搅拌雷诺数会远远大于小槽的,会导致过多不必要的能耗浪费。如图 4 所示,搅拌功率与搅拌转速近似呈线性关系,转速微小的增加对于工厂中数十个大型搅拌槽 1 年的运行来说亦会大大增加生产成本,所以寻找一种降低功耗又能重现搅拌过程的放大判据至关重要。通过 3 个模型的最优均匀悬浮转速拟合得到浆液槽固液两相均匀悬浮的放大准则为 $N \propto D^{-0.842}$,介于一般固液悬浮放大准则 $N \propto D^{-0.75}$ 和 $N \propto D^{-1}$ 之间,与 Leng 得到的容易悬浮固液系统的放大准则 $N \propto D^{-0.85}$ 基本一致,说明本文中研究的 60 μm 颗粒属于容易悬浮颗粒,如果盲目采用一般固液悬浮的放大准则会造成能耗浪费或者结果难以重现,证明了数值模拟对于放大准则研究的灵活有效性,可以更好地贴近实际情况。

4 结论

通过研究表明,数值模拟在研究搅拌操作的放大问题中是完全可行的,对 0.375、1.5、6 m 3 种直径的搅拌槽模型进行数值模拟研究,得到了固相颗粒达到均匀分布时 3 个模型的最优均匀悬浮转速分别为 372、101、36 r/min,叶端线速度和搅拌雷诺数随着搅拌槽尺寸的增加而增大,单位体积搅拌功率随着搅拌槽尺寸的增加而减小,总结出一种适合于浆液槽固液两相混合的放大准则 $N \propto D^{-0.842}$,相比于以往常用的一般固液悬浮放大准则以及保持单位体积搅拌功率 P_v 恒定的放大准则,本文中提出的放大判据在节省能耗的基础上能够很好地重现搅拌过程。另外,本文中的模型尺寸涉及到工业实际使用的浆液槽以及实验室可以实现的小试模型,因此提出的放大准则对于实际操作具有更好的指导意义,可为今后实验室开展一系列实验研究以及工厂扩大

生产提供理论指导。

参考文献

- [1] 吕盘根. 搅拌罐(釜)的工程放大方法和经济分析[J]. 现代化工, 1996, (4): 39-41.
- [2] 陈乙崇. 搅拌设备设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [3] 张战军. 从高铝粉煤灰中提取氧化铝等有用资源的研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [4] 张敏革, 张吕鸿, 姜斌, 等. 双螺旋-螺杆搅拌桨在不同流体中的搅拌流场特性[J]. 天津大学学报, 2009, 42(10): 884-890.
- [5] Hick. How to design agitators for the desired process response[J]. Chem Eng, 1976, 83(26): 102-109.
- [6] Wu Hua. An issue on application of disk turbine for gas-liquid mass transfer[J]. Chem Eng Sci, 1995, 50(17): 2801-2811.
- [7] Veljković V B, Bicok K M, Simonović D M. Mechanism, onset and intensity of surface aeration in geometrically-similar, sparged, agitated vessels[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1991, 69(4): 916-926.
- [8] 栗山雅文. 乱流搅拌槽[J]. 化学工学论文集, 1995, 21(3): 508-513.
- [9] Geisler R K, Buurman C, Mersmann A B. Scale-up of the necessary power input in stirred vessels with suspensions[J]. The Chemical Engineering Journal, 1993, 51(1): 29-39.
- [10] Leng. Succeed of scale up[J]. Chem Eng Prog, 1991, 87(6): 23-31.
- [11] 车红荣, 苟小峰, 郭笃信, 等. 茶多酚乙醇水溶液提取过程及搅拌槽放大规律[J]. 现代化工, 2001, 21(1): 29-31.
- [12] 百永真士. Agitation effete on rige distribution in the crystallization of phenoxy acetic compounds[J]. 化学工学论文集, 1984, 10(2): 192-197.
- [13] Molerus O, Latzel W. Suspension of solid particles in agitated vessels[J]. Particulate Science and Technology, 1987, 5(3): 235-260.
- [14] Buurman C, Resoort G, Plaschkes A. Scaling-up rules for solids suspension in stirred vessels[J]. Chemical Engineering Science, 1986, 41(11): 2865-2871. ■

一种耐高温脱模涂料及其制备方法 (CN 103551495)

本发明公开了一种耐高温脱模涂料,采用碱性硅溶胶、石墨粉、分散剂按 100:5~20:0.1~1 的比例制得;所述的碱性硅溶胶的 SiO_2 含量为 20%~40%;所述的石墨粉的粒度为 30~100 目。本发明通过在碱性硅溶胶中添加石墨粉可大大降低其粘连性,涂刷后得到的涂料保护层厚薄均匀,平整光滑,底部侧边都可以保护到;且用量少,只需喷涂上薄薄一层,就可形成坚固的保护膜,另外由于石墨粉与硅溶胶混合均匀,形成保护层后的石墨粉是分散在硅溶胶内的,不会分散到铸锭内部,影响产品质量。

一种乙二醇密闭循环水缓蚀阻垢剂的 制法及用途(CN 103553219)

本发明为一种乙二醇密闭循环水缓蚀阻垢剂的制法及用途,特征在于:所述缓蚀阻垢剂分别由组分 A 和组分 B 复配经混合搅拌而成,所述组分 A 中含可溶性钼酸盐、苯骈三氮唑、丙烯酸-丙烯酰胺-丙烯酸- β -羟基丙酯共聚物、氢氧化钠、软化水;所述组分 B 中含 N-月桂酰基肌氨酸、葡萄糖酸钠、衣康酸-丙烯酰基吗啉-N-丙烯酰基-N-甲基丙基膦酸共聚物、氯化锌、软化水,且质量之和的比例为 A:B=2:1;用途在于对乙二醇密闭循环水,本药剂处理添加量为 0.15~0.20 g/100 mL 水。