



连续性颗粒物料搅拌机的内部流场数值分析

毛 娅, 吕银雷, 陈作炳, 齐福祥, 陈家乐

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了分析连续性颗粒物料搅拌机对粉体颗粒的混合效果和出料的连续性, 运用 Fluent 计算流体力学软件、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Simple 算法, 对连续性搅拌机的内部流场进行流固耦合数值模拟, 对比分析 3 种不同进料口位置对搅拌效果的影响。结果表明, 最佳的进料口位置位于搅拌机上端面的下方, 在该情况下, 物料停留时间较长, 各物料之间混合充分, 物料流入、流出质量基本达到平衡, 能够满足搅拌机的连续性生产要求。

关键词: 颗粒; 搅拌机; 流固耦合; 数值分析

中图分类号: TH6 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548 (2016) 05-0078-04

Numerical analysis of internal flow of continuous particle materials blender

MAO Ya, LYU Yinlei, CHEN Zuobing,

QI Fuxiang, CHEN Jiale

(School of Mechanical and Electronic Engineering,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To research the effect of mixing and the continuity of access to materials, Fluent software $k-\varepsilon$ turbulence model and Simple algorithm were used to simulate the internal flow of continuous particle materials blender. The mixing effect under the three different inlet position was analyzed. The results show that the best inlet position is located in the bottom of upper surface of the blender. In this case, the materials have a longer residence time, the materials are fully mixed. The amount of the material's inflow and outflow basically balance, which ensure the continuity of production.

Keywords: particle; blender; fluid-structure interaction; numerical analysis

搅拌混合设备广泛应用于建材、冶金、化工、环保等领域^[1-3]。传统的搅拌设备普遍存在搅拌混合效率低、消耗能量多等缺点^[4], 因此, 设计一种新型连续性立式紊流强制搅拌机是十分有必要的。

收稿日期 2015-08-21, 修回日期 2016-05-11。

第一作者简介 毛娅 (1975—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为计算流体力学应用于建材制造装备的设计与开发。E-mail: maoya@whut.edu.cn。

所谓连续性立式紊流强制搅拌机, 是可以预先将各种物料按一定配重比均匀配料, 并能在保证良好、快速搅拌混合作用的同时实现连续性地进料与出料。相比于间歇式搅拌机, 具有效率高、混合均匀、稳定性好、自动化程度高、封闭性好、可靠性高、质量稳定等一系列的优点, 值得深入研究和开发, 能为实际生产带来更大的效益。

本文中基于计算流体力学 (CFD) 数值模拟^[5-6]技术对搅拌机筒体内流场进行仿真分析^[7-8], 选择合适的进料口, 增强搅拌机的混合效果并提高生产效率, 减少能耗, 为新型连续性立式紊流强制搅拌机的开发提供一定的理论指导^[9]。

1 数学模型

连续性立式搅拌机主要用于物料的搅拌混合。在搅拌过程中, 搅刀的高速旋转使其内部流场处于完全湍流状态, 可以用标准 $k-\varepsilon$ 模型^[10]模拟其内部流场的流动过程。标准 $k-\varepsilon$ 模型是在湍动能 k 方程的基础上, 引入了一个湍动耗散率 ε 的方程^[11-12]。

标准 $k-\varepsilon$ 模型的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (2)$$

式中湍动黏度 μ_t 可表示为 k 与 ε 的函数,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (3)$$

湍动耗散率 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)}, \quad (4)$$

式中: μ 是动力黏性系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; ρ 是流体密度, kg/m^3 ; u_i 是气流脉动速度矢量分量, m/s ; x_k 是笛卡尔坐标分量; C_μ 是经验常数; k 是湍流动能, m^2/s^2 ; G_k 是由平均速度梯度引起的湍动能产生; G_b 是由浮力影响引起的湍动能产生; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀

对总耗散率的影响 C_{1e} 、 C_{2e} 、 C_{3e} 为经验常数, σ_k 、 σ_ϵ 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数, 根据 Launder 等推荐值即后来的实验验证, 取 $C_{1e}=1.44$, $C_{2e}=1.92$, $C_{3e}=0.09$ 取 $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$, 其他符号及意义详见文献[11]。

该新型连续性立式搅拌机内部包含空气、粉煤灰、铁尾矿 3 种组分, 在搅拌混合的过程中始终遵守质量守恒、动量守恒、能量守恒和组分守恒定律。因为内部流场处于湍流状态, 所以系统还要遵守附加的湍流输运方程。各控制方程的因变量各不相同, 但都反映了单位时间单位体积内物理量的守恒性质, 可将各控制方程表示成通用形式

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + s, \quad (5)$$

式中 ϕ 为通用变量, 代表 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量; Γ 为广义扩散系数; s 为广义源项。

2 数值模拟

2.1 几何建模及网格划分

应用 Pro/Engineer 软件构建搅拌机筒体内部流域的三维实体模型, 如图 1 所示。



图 1 内部流域图

Fig. 1 Internal flow model

对搅拌机进行适当的简化和圆整, 得到用于进行数值分析的搅拌机模型。将建立的三维模型导入前处理软件 Gambit2.3.4 中, 生成计算网格, 如图 2 所示。

由于搅拌机内部结构比较复杂, 因此为了保证计算精度和减少计算网格数目以提高计算精度, 对模型进行分块划分网格。整个筒体被分成规则的小块, 但仍然只有一个流域, 块与块之间可以进行正常的信息交流转换。此外, 对搅拌轴及搅刀附近的区域进行网格加密, 以提高计算精度^[13]。该区域体积为 0.51 m^3 , 整个流域的体积为 2.25 m^3 , 占体积分数约为 22.7%, 该区域网格数为 128 620, 整个流域总网格数为 349 780, 所占的比例约为 36.8%。

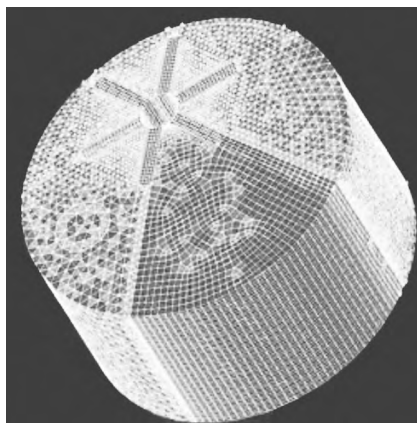


图 2 计算网格

Fig. 2 The mesh model

2.2 物理模型及边界条件

搅拌轴的转动导致模拟区域不断发生变化, 所以采用动网格模型对网格进行光滑更新及局部网格重构^[14]。物理模型选用多相流模型及湍流模型, 求解算法为压力-速度耦合的 Simple 算法^[15]。通过 Profile 定义搅拌轴和筒体的转速。其中, 搅拌轴沿逆时针方向以 31.4 rad/s 的速度转动, 筒体沿顺时针方向以 1.57 rad/s 的速度转动。物料入口空气的质量流量为 0.005 kg/s , 粉煤灰与铁尾矿质量流量为 16.6 kg/s ; 物料出口边界条件类型为压力出口, 取表压值为 0。粉煤灰的密度为 780 kg/m^3 , 平均直径为 $20 \mu\text{m}$ 。铁尾矿的密度为 $1\,260 \text{ kg/m}^3$, 平均直径为 $100 \mu\text{m}$ 。其中, 粉煤灰与铁尾矿的体积比为 1.6:1。

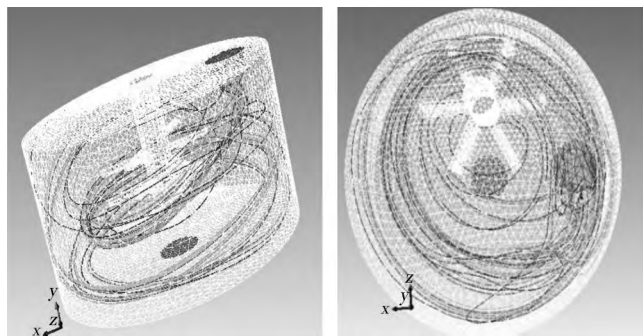
3 计算结果分析

3.1 进料口的选择

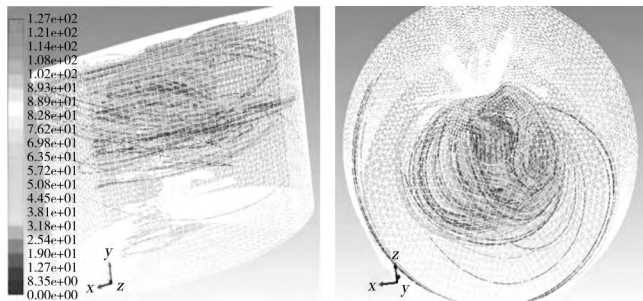
由于搅拌机与水平面存在一个 25° 的倾角, 且其填充率为 $2/3$ 左右, 因此物料进料口位置的不同会产生不同的搅拌效果。

图 3 为颗粒迹线图。图 3a 所示为进料口位于搅拌机上端面上方位置的颗粒束迹线图。物料进入筒体后竖直向下运动, 随后接触到筒体里面已有的物料, 它们随着筒体一起顺时针旋转, 一圈一圈地由上向下运动, 最后经出料口排出, 但是, 物料在运动过程中的轨迹较规则, 筒体中产生的漩涡较明显, 使得搅刀的搅拌作用不佳, 物料的混合效果难以得到保证。

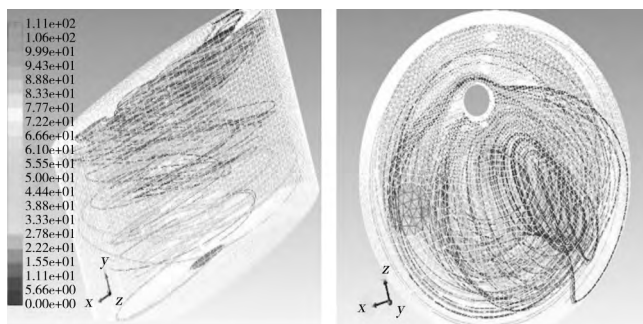
图 3b 所示为进料口位于搅拌机上端面中间位置的颗粒束迹线图。物料进入筒体后, 主要集中在筒体中央附近, 少数物料被抛向筒体边缘。这种情况下, 搅刀不能起到良好的搅拌作用, 多数物料在进入筒体后便很快排出。由于停留的时间过短且受到较刀的搅拌作用较小, 因此物料没有得到充分的搅拌混合。



a 偏上进料迹线图



b 中间进料迹线图



c 偏下进料迹线图

图 3 颗粒迹线图

Fig. 3 Fluid streamline in blender

图 3c 所示为进料口位于搅拌机上端面下方位置的颗粒束迹线图。物料进入筒体后,先是随着筒体侧壁顺时针旋转,然后经过不断下移,部分物料受到筒体和搅刀的作用而上扬起来。同时,搅刀的作用越来越明显,使得大部分物料由最初的随着筒体顺时针旋转变为逆时针旋转,经过多次循环后,由出料口排出。这种情况下,物料的轨迹线多变,紊流效果好,停留时间长,循环次数多,物料得到了充分的搅拌混合。

3.2 连续性研究

表 1 为空气相进、出口质量流量对比表。由表可知,当进料口位于偏上或中间位置时,空气相进出口质量流量差值都很大,当进料口位于偏下位置时,空气相进出口质量流量差值较小,其差值比例为 9.2%,基本满足要求。

表 2 为颗粒相进、出口质量流量对比表。由表可

表 1 空气相进出口质量流量

Tab. 1 Air phase inlet and outlet mass flow

	质量流量进口 / (kg·s ⁻¹)	质量流量出口 / (kg·s ⁻¹)	进出口 质量流量差 / (kg·s ⁻¹)	流量差占进口 流量的分数/%
偏上	0.005 00	0.006 68	-0.001 68	33.6
中间	0.005 00	0.002 93	0.002 07	41.4
偏下	0.005 00	0.004 54	0.000 46	9.2

表 2 颗粒相进出口质量流量

Tab. 2 particle phase inlet and outlet mass flow

	质量流量进口 / (kg·s ⁻¹)	质量流量出口 / (kg·s ⁻¹)	进出口 质量流量差 / (kg·s ⁻¹)	流量差占进口 流量的分数/%
偏上	16.600 00	12.324 25	4.275 75	25.8
中间	16.600 00	20.655 64	-4.055 64	24.4
偏下	16.600 00	16.803 13	-0.203 13	1.2

知,当进料口位于偏上或中间位置时,颗粒相进出口质量流量差值同样都很大,当进料口位于偏下位置时,颗粒相出口质量流量略大于进口质量流量,其差值比例仅为 1.2%,基本可以忽略其变化,使得搅拌机能够实现连续性地进出料,并能长期保持良好的搅拌混合状态,从而使搅拌机的生产效率提高了 24%左右,并保证了工作稳定性。对比表 1、2 还可以发现,空气相与颗粒相的质量流量存在互补的关系,与实际生产情况相一致。

4 结论

采用 CFD 技术对新型连续性颗粒物料搅拌机的内部流场进行数值分析研究,结合数学计算模型,模拟出物料在搅拌机内部的运动轨迹,对不同进料口位置的搅拌机进行对比分析,得出以下结论:

1) 进料口位于上端面下方位置时,搅拌机的紊流效果最明显,物料的搅拌循环次数最多,搅拌混合的效果最好。

2) 当进料口位于搅拌机上端面下方位置时,其颗粒相质量流量差值最小,可以忽略不计。此时,搅拌机可以连续性的进、出料,实现连续性地生产,提高了搅拌机的生产效率及工作稳定性,同时,避免了由间断性进料引起的空载与过载的发生。

参考文献 (References):

- [1] 朱红, 贾海云. 混凝土搅拌车拌筒螺旋叶片参数化设计[J]. 建筑机械, 2013 (9): 83-90.
- [2] 严宏志, 李新明, 吴波, 等. 卧式双轴搅拌槽的液固两相流数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44 (2): 532-539.

- [3] 唐润秋,汪敏,戚晓利. 双卧轴强制式混凝土搅拌机叶片的磨料磨损研究[J]. 冶金设备, 2013 (1):15-20.
- [4] 王聪慧. 稠密液固两相湍流混合的数值分析及应用[D]. 长春:吉林大学, 2010.
- [5] 刘飞. 离心压缩机的 CFD 分析与建模参数化[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.
- [6] 雷海波. 多翼离心风机的 CFD 分析及其前后处理相关程序的开发[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- [7] 燕浩,刘梅清,梁兴,等. 基于正交试验大型轴流泵空化特性的数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42 (12):35-40.
- [8] 慕海军,李双跃,李翔,等. 立磨选粉机操作参数对分级流场影响的数值模拟[J]. 中国粉体技术, 2012, 18 (2):12-16.
- [9] 刘叶凤. 卧式双轴搅拌机数值模拟与实验研究[D]. 天津:天津大学, 2013.
- [10] 李龙庭. 混流水轮机数值模拟研究与压力脉动分析[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [11] 周俊杰,徐国权,张华俊. FLUENT 工程技术与实例分析[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [12] LI D Q, GREKULA M, LINDELL P. Towards numerical prediction of unsteady sheet cavitation on hydrofoils[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22 (5):741-746.
- [13] 罗永要,王正伟,梁权伟. 混流水轮机转轮动载荷作用下的应力特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45 (2):235-237.
- [14] 冯惠生,杨腾,李文秀,等. D-T 型双轴卧式搅拌装置半釜持液量时功率特性的数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2011, 44 (11):1003-1008.
- [15] 田飞,施卫东,张启华,等. 2 叶片潜水搅拌机叶轮内部流场特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2013, 34 (4):395-398.

借力粉碎设备科技创新服务平台登临行业制高点 浙江力普入选省高成长科技型中小企业

日前,绍兴市科技局揭晓了 2016 年浙江省高成长科技型中小企业名单,国家高新技术企业、中国粉碎技术领航者——浙江力普粉碎设备有限公司榜上有名。

科技型中小企业是最具创新活力的创业群体,是高新技术企业培育的重要基础。为加快推进创新创业,加强精准服务,激励科技型中小企业快速成长壮大,并将其培育成为高新技术企业,浙江省启动实施了科技型中小企业“千企攀高”计划。此次绍兴市共有 150 家企业入选。据悉,入选省高成长科技型中小企业后,企业自动进入高新技术企业重点培育库,科技部门将对其进行重点培训和服务,优先承担实施省级科技项目,享受科技创新和技术攻关等方面的倾斜支持。

浙江力普细分市场,定向精准开发用户群和新产品线。立足高端客户,专门为上市公司、世界 500 强等高端客户精心设计、量身定做,以此作为企业的战略突破点,有力拓展了产品在国内外市场的品牌影响。借助绍兴市科技局批准获建绍兴市 2012 年公共科技创新平台——嵊州市粉碎设备科技创新服务平台以来,在超细粉碎设备领域多方位创新,瞄准国家重点扶持的新材料、新能源等战略性新兴产业,专注纳米碳酸钙、石墨球化粉碎、精制棉粉碎制备纤维素醚多个细分市场,成功抢占高端粉碎设备领域制高点,助推产业转型升级。研发的多款粉碎设备新品进入省市科研项目,成为浙江省新产品,评为浙江省重点科技产品。其中研发的“低成本、节能和无污染纳米级碳酸钙的粉碎成套生产线”,解决了纳米碳酸钙分散解聚的技术难题,使碳酸钙产业向纳米级转型升级提供了技术装备支撑。该项目 2014 年获得了国家创新基金支持,2015 年荣获中国无机盐工业协会碳酸钙行业分会、中国碳酸钙协会行业专家组联合颁发的专家认定证书,一致认定“浙江力普纳米钙粉碎分散成套生产线为碳酸钙生产节能降耗技术和设备”。在 2015 第一届嵊州市创客、创新项目大赛中荣获十佳创新项目。

致力于一个新兴产业进行上下游全链拓展持续发力创新也是力普高速成长的另一个秘诀。不久前,力普研发的 GWM150 纤维素粉碎烘干一体机列入 2016 嵊州市科技计划。公司独有的纤维素醚粉碎加工新技术获得了中国纤维素行业协会领导的充分肯定,协会领导曾于今年 4 月专程到公司进行了实地考察,并对力普当前取得的业绩和对行业的贡献,给予了很高评价,希望继续努力,提升我国纤维素生产设备的技术水平。目前,GWM150 纤维素粉碎烘干一体机与高效纤维素剪切粉碎机、短纤维粉碎机、精棉粉碎生产线等设备,在纤维素行业得以广泛应用,客户囊括国内规模前十位的纤维素醚生产企业并获得高度认可,为国内纤维素行业的发展发挥着重要的作用。

浙江力普以高品质的技术产品成功抢占行业高地。以专利特色技术构建产品链,积极打造粉碎设备行业名牌产品,拥有的“力普高科”牌粉碎设备获评 2014 年绍兴名牌产品,跻身成为我国粉碎设备行业屈指可数的名牌产品之一。公司立足自身拥有的粉碎设备特色技术领域优势,开发出行业领先,拥有 18 项国家专利的一系列高新产品,构筑成专利产品技术链,以特色优势专利产品成功抢占粉碎设备高端市场,被绍兴市科技局、经信委认定为“2014 年绍兴市专利示范企业”。目前,浙江力普已成为国内知名的专业生产各类超细粉碎、精细分级成套粉体设备的国家高新技术企业,浙江省优秀创新型企业。

(丁 文)

浙江力普咨询热线:13806745288、13606577969
力普网站:www.zjleap.com;

传真:0575-83152666;
E-mail:zjleap@163.Com