

基于 Fluent 的搅拌桨数值仿真及结构优化

Numerical simulation of agitating valve and structure optimization based on Fluent

詹民民^{1,2} 俞经虎^{1,2} 代欣^{1,2}

ZHAN Min-min^{1,2} YU Jing-hu^{1,2} DAI Xin^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)
(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:针对固-液两相流物料搅拌机, 运用计算流体力学数值方法, 通过 RNG-湍流模型、欧拉多相流模型进行数值仿真, 在搅拌叶片安装间距和搅拌臂长度不同的搅拌桨作用下, 分析卧式粉料搅拌机搅拌槽内的流场分布以及固体相的体积分数分布情况。基于数值模拟结果, 选择合适的搅拌桨结构参数, 可为进一步的优化提供理论参考。

关键词: 搅拌机; 搅拌桨; 体积分数; 两相流; Fluent

Abstract: The method of computational fluid dynamics with RNG $\kappa-\epsilon$ turbulence model and Eulerian multiphase flow model was used to the simulation of solid-liquid two-phase feed mixer. Distribution of fluid field and volume fraction of solid-phase were analyzed in the stirred tank of horizontal mixer under the effect of agitator blade with different installing space of mixing blades and various lengths of mixing arms. Based on the results, the appropriate structure parameters could be selected and the simulation also provides theoretical basis for the optimizing design.

Keywords: mixer; agitating valve; volume fraction; two-phase flow; fluent

粉料混合搅拌机是粮食加工的关键设备之一^[1-2]。目前, 粉料搅拌机的设计主要依赖经验设计的方法, 难以预测搅拌性能。随着计算机技术的发展, 利用计算流体力学 (CFD) 研究搅拌槽内的流动特性和粉料混合效果逐渐受到重视。Micate 等^[3-4] 基于欧拉多相流模型研究了搅拌槽内的固体颗粒分布规律并与试验进行对比; Kasat 等^[5] 通过建立 CFD 模型使固-液搅拌器搅拌过程可视化并研究了固体颗粒对液相混合过程的影响; 张少坤等^[6] 研究了搅拌桨高度

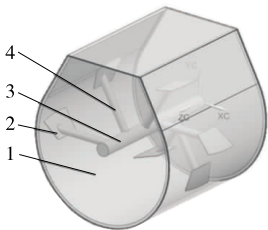
对流场结构和功耗的影响; 袁场等^[7] 研究了高剪切混合罐内物料的流动情况, 湍流静能与能量耗散率的分布, 流量与转速的关系; 严宏志等^[8] 针对卧式双轴搅拌器的均质混合, 分析了不同工况对混合效果的影响, 以及搅拌功率、搅拌效率和叶片冲刷磨损率的变化规律。然而, 搅拌机细微的结构变化对混合效果的影响还不被学者们重视, 针对搅拌桨结构参数小范围的变化和搅拌效果的对应关系的研究尚未见到。

本研究以国内某工厂制造的某型号饲料搅拌机为对象, 拟改变搅拌机构中搅拌桨叶的安装间距和搅拌臂的长度建立不同的数值分析模型, 针对固-液两相流混合物, 将流体力学方法应用于粉料搅拌机的搅拌效果研究, 对比分析在不同的结构参数下流场的混合特性以及对搅拌效果的影响, 研究结果有助于改善物料混合的均匀性, 减少物料残留区域, 对进一步的结构优化和设计生产具有现实意义。

1 网格模型的建立

基于某型号的搅拌机, 在搅拌槽的流场数值模拟中, 采用简化模型 (见图 1), 模型各参数如下: 搅拌筒的长度 $L = 2\ 000\ \text{mm}$, 搅拌室最大直径 $R = 920\ \text{mm}$, 搅拌臂长度 $l = 630\ \text{mm}$, 搅拌叶片的轴向分布间距 $d = 288\ \text{mm}$, 叶片安装角度 $\gamma = 45^\circ$, 搅拌桨安装相位角 $\eta = 60^\circ$, 搅拌叶片厚度 $s = 10\ \text{mm}$ 。

模拟分析转子不同的结构参数对流场的影响, 需要针对



1. 搅拌桶 2. 叶片 3. 转轴 4. 搅拌臂

图 1 搅拌槽三维模型

Figure 1 Three-dimensional model of stirred tank

作者简介: 詹民民, 男, 江南大学在读硕士研究生。

通信作者: 俞经虎 (1973—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: jhyu@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2017-01-03

不同参数的转子单独进行网格划分。在本研究中,针对搅拌臂的长度 l 和搅拌叶片的间距 d 进行变参数分析,在搅拌机实际模型 $l=630\text{ mm}$ 和 $d=288\text{ mm}$ 的基础之上,考虑到转子不与搅拌筒壁面发生干涉,在上述两参数附近进行取值,详细参数见表 1。搅拌桨距离对比见图 2,搅拌臂长度对比见图 3。

表 1 搅拌机转子参数

Table 1 The parameters of mixer rotors

模型编号	搅拌臂长度 l/mm	搅拌臂间距 d/mm
M650_300	650	300
M650_288	650	288
M650_268	650	268
M630_300	630	300
M630_288	630	288
M630_268	630	268
M610_300	610	300
M610_288	610	288
M610_268	610	268

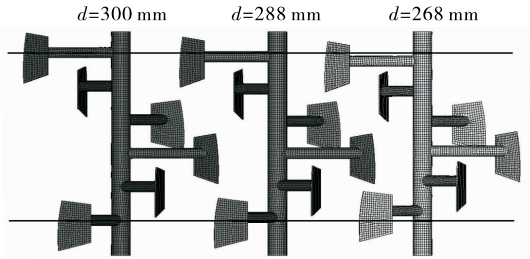


图 2 搅拌桨距离对比

Figure 2 Comparison of distance between agitating valves

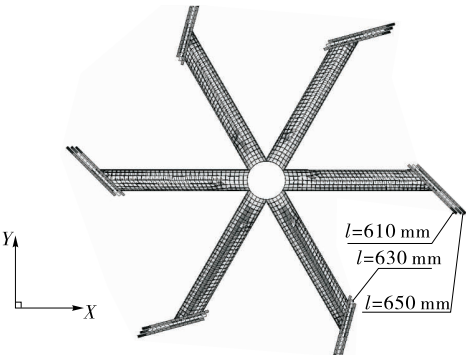


图 3 搅拌臂长度对比

Figure 3 Length comparison of mixing arms

考虑到搅拌叶片的厚度为 10 mm ,设置单元的基本尺寸为 15 mm 。将划分好的搅拌桨 2D 网格(共有 9 个网格模型)以及搅拌槽壁 2D 网格装配,并在此基础上分别生成 3D 单元。其中 M630_288 模型网格划分效果见图 4、5。网格节点总数为 547 237,3D 单元数量为 2 905 659,经检查网格质量满足分析要求。

2 搅拌槽流场模拟

计算使用软件是 FLUENT 14.5,根据搅拌过程的湍流特性,采用双方程的标准 $k-\epsilon$ 模型^[9-11]。同时,由于模型网格数量级较大,流动场的计算采用多重参考系法(MRF)。将饲料

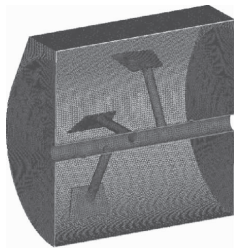


图 4 2D 网格模型剖面

Figure 4 Cross-section of 2D element model

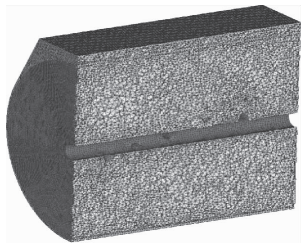


图 5 3D 网格模型剖面

Figure 5 Cross-section of 3D element model

搅拌机的混合模拟工作介质简化为固-液两相流,定义第一相为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的标准液态水,密度为 998.2 kg/m^3 、黏度为 $0.914\text{ mPa}\cdot\text{s}$;第二相为自定义属性的颗粒固相,将固相简化为面粉颗粒,查阅相关文献^[12-13]可知面粉密度为 750 kg/m^3 、黏度取 $383.4\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、平均颗粒直径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、初始体积分数为 10% 。

设定边界条件:模拟在封闭的搅拌槽内的流动特性,流体区域和搅拌桨的接触面表面设置为旋转壁面,旋转速度为 78 rad/min ;动流体区域与静止流体区域设置一对 Interface 交界面;其余为固定壁面边界,采用标准壁面函数;流场初始化解之后求解并进行后处理。

3 结果与分析

饲料搅拌机的搅拌过程,本质上来说是一个混合过程,使固体颗粒在液相中均匀悬浮,混合的过程又与流场的结构密切相关^[11]。搅拌桨在旋转过程中把机械能传递给流体,在搅拌桨附近形成高湍流动能的充分混合区域,并产生高速射流推动液体在搅拌容器内不断地循环流动,由此产生全流动域范围内的扩散运动。本试验研究的固-液混合两相流搅拌物料,主要针对速度场以及固体颗粒相的体积分数进行模拟,验证结构设计的合理性,同时为搅拌机确立合适的设计参数。

3.1 速度场分布

在主轴的作用下搅拌桨以一定的速度在流场中做圆周运动(此图的顺时针方向),在角速度不变的情况下,搅拌桨上任意一点的线速度大小与其到旋转中心的距离成正比,而搅拌桨的转动会带动周边流体形成一定的流型。因此搅拌槽外围流体的速度会高于内围流体速度,通过理论和模拟的对比一定程度上可以验证数值结果的可靠性:

(1) 数值模拟过程中的角速度: $n=78\text{ rad/min}$ 。

(2) 搅拌桨最外点到旋转中心的距离: $d=880\text{ mm}$ 。

(3) 搅拌桨最外点线速度:
$$v = \omega r = \frac{2\pi n r}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 78 \times 0.88}{60} = 7.2\text{ m/s}.$$

理论值与云图中的数据基本吻合,如图 6、7 所示,在误

差允许范围内。同时可以看到,在搅拌叶片附近形成了一定强度的紊流区域,在叶片的带动下,此区域速度梯度较大;在搅拌槽的入口处由于空间较大,搅拌叶片离搅拌槽壁面相对较远,会在这个区域形成若干低速度场,减弱搅拌的效果;在搅拌槽的顶部和侧壁的交界处也存在相同的低速度区域。

3.2 固体相体积分数分布

为了进一步研究两相流混合物料的搅拌均匀程度,就固

体颗粒相的体积分数进行分析。针对不同的搅拌机结构沿 Z 方向的直线 L_1 从 $A_1(0.487\ 7, 0.792\ 0, 0.000\ 0)$ 到 $A_2(0.487\ 7, 0.792\ 0, 2.000\ 0)$ 以及 Y 方向的直线 L_2 从 $B_1(-0.244, -1.000, 1.000)$ 到 $B_2(-0.244, 1.000, 1.000)$ 做出体积分数分布曲线图。

图 8、9 给出了在不同的参数下,固体颗粒沿着线 L_1 和 L_2 的体积分数分布曲线图。

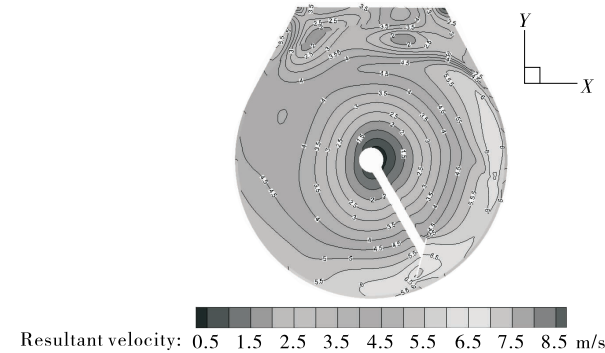


图 6 M630_288 模型 XY 截面速度云图

Figure 6 Resultant velocity of XY section of model M630_288

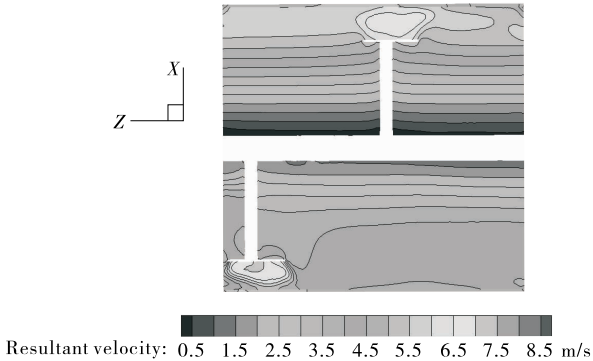
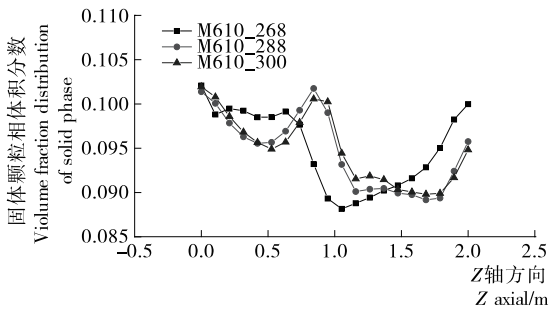
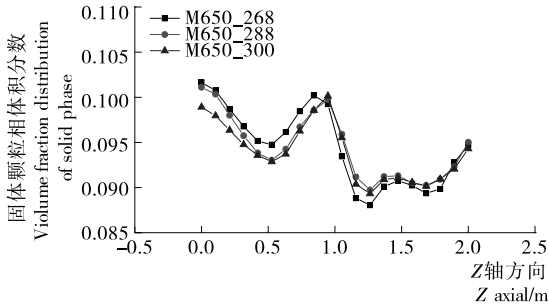


图 7 M630_288 模型 XZ 截面速度云图

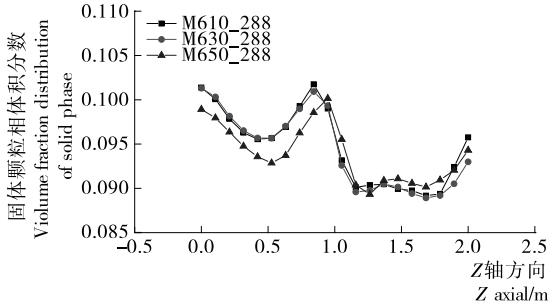
Figure 7 Resultant velocity of XZ section of model M630_288



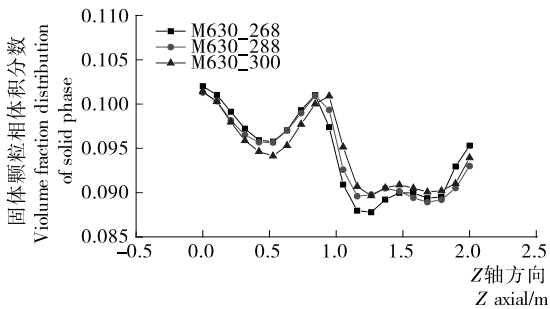
(a) 搅拌臂长 610 mm 体积分数比较



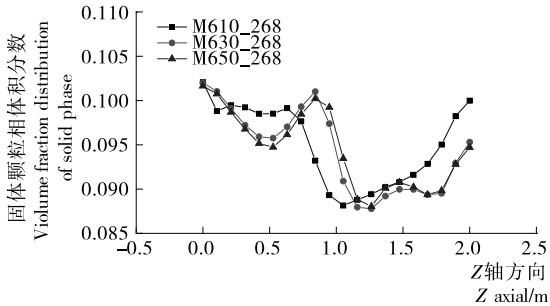
(c) 搅拌臂长 650 mm 体积分数比较



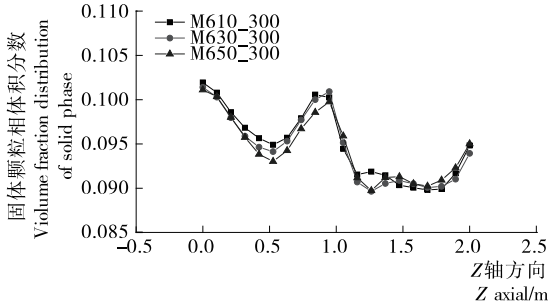
(e) 叶片安装间距 288 mm 体积分数比较



(b) 搅拌臂长 630 mm 体积分数比较



(d) 叶片安装间距 268 mm 体积分数比较



(f) 叶片安装间距 300 mm 体积分数比较

图 8 不同模型沿 L_1 的固体体积分数分布图

Figure 8 Volume fraction distribution along L_1 of solid phase in different model

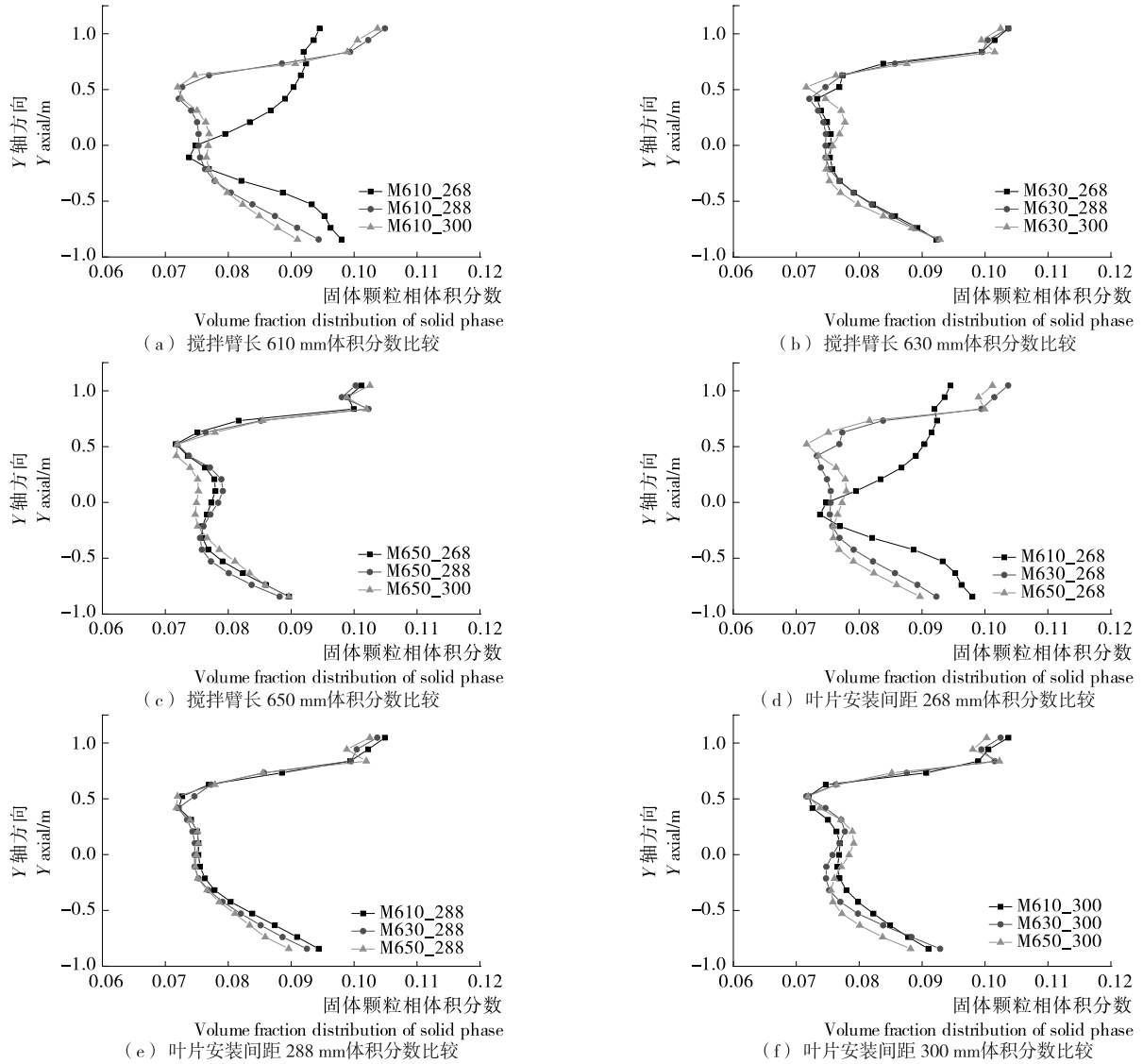


图 9 不同模型沿 L_2 的固体体积分数分布图

Figure 9 Volume fraction distribution along L_2 of solid phase in different model

分析可知:卧式搅拌结构由于搅拌叶片是曲面造型(螺旋面),在旋转过程中会产生一个沿着轴线方向的流场,在一定程度上使物料向 Z 轴负方向集中,所以会使 Z 轴负方向的固相体积分数比 Z 轴正方向稍大。同时, Y 轴正方向对应加料空间,综合速度场分析可知这一区域混合效果弱、流动速度小,会造成固体颗粒在离心力的作用下聚集在这个区域使颗粒体积分数上升。

在离心力的作用下,固体颗粒会向外围堆积,导致了沿线 L_1 上的固体颗粒体积分数比理论值(10%)偏小(因为数据线 L_1 位于动区域内部);沿线 L_2 上的固体颗粒体积分数在 Y 轴的两端比 Y 轴中间段更大也更加趋向于理论值;并且,在两端搅拌槽壁面的阻挡下,会使周边区域的体积分数有明显的升高。

图 10 和图 11 分别表示了在不同模型沿 Z 方向(旋转轴方向)和 Y 方向(重力方向)上的固相体积分数,可以看到随着搅拌臂长度的减小,搅拌作用的平均体积分数增大更加靠近理论值;而在 Y 方向上这种趋势并不是很明显;同时在 Z

方向上,搅拌桨叶片之间的安装距离 $d=288\text{ mm}$ 时并非更加有利于搅拌混合的均匀程度的提高, $d=300\text{ mm}$ 和 $d=$

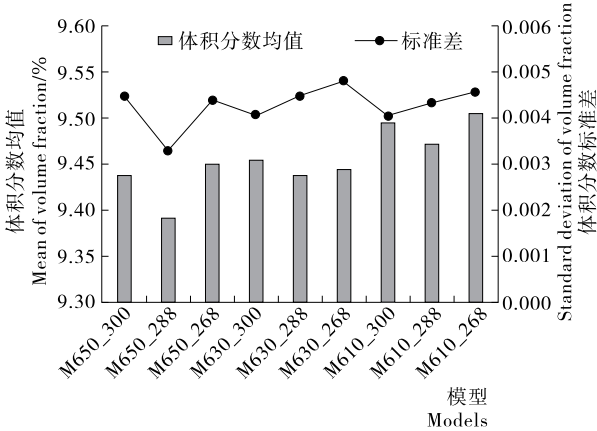


图 10 L_1 体积分数均值及标准差

Figure 10 Volume fraction mean and standard deviation along L_1

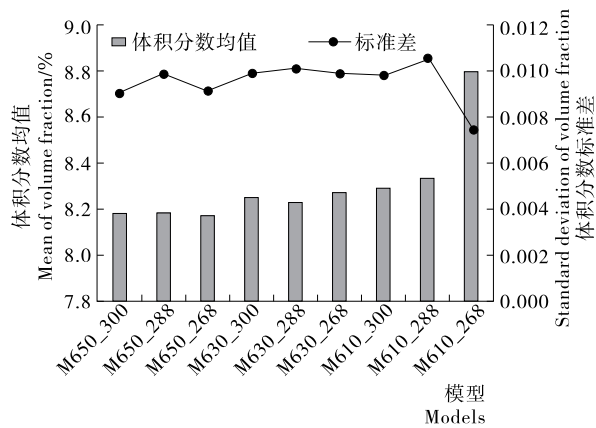


图 11 L_2 体积分数均值及标准差

Figure 11 Volume fraction mean and standard deviation along L_2

268 mm 时均有更好的搅拌效果;在 Y 方向,固体颗粒的体积分数分布对于搅拌桨叶片的间距 d 并没有很明显的相关性,即相比于 Z 方向, Y 方向的搅拌作用对叶片间距的改变并不是很敏感。针对本文 9 个不同的搅拌机模型,搅拌臂 $l=630$ mm,搅拌叶片间距 $d=268$ mm 时搅拌混合效果最好。

4 结论

(1) 搅拌槽的入料口处空间较大,且搅拌壁面之间有着大角度的过度连接,搅拌桨带动的射流在此处会有明显的减速,形成了若干低速度场,导致此处的搅拌效果较差。

(2) 搅拌槽内的 Z 方向和 Y 方向的固体颗粒体积分数表明,在螺旋叶片的作用下沿着 Z 方向类似“W”形的混合效果,即中间和两端的分数较高;在离心力以及密度的影响下,沿着 Y 方向类似“C”形分布,即搅拌槽的上下区域体积分数比中间区域高。

(3) 搅拌槽内固体颗粒相的体积分数表明搅拌臂长度的减小有利于搅拌混合效果的加强,而搅拌叶片的安装间距并没有类似的对应线性关系,叶片间距 $d=288$ mm 并不是最合适的选择,给出了最佳间距值或选择方向。

本试验讨论了不同参数的搅拌桨对固-液两相流搅拌效果的影响,通过固体颗粒体积分数的对比给出了搅拌桨进一步优化的可行性以及优化方向,但是由于搅拌设备尺度较

大,离散模型的单元较多,只能选取有代表性的几个参数进行比较,选择何种搅拌桨结构参数组合才能使搅拌效果达到最佳还有待于进一步研究。

参考文献

[1] OCHIENG A, KIRIAMITIK. Experimental measurement and computational fluid dynamics simulation of mixing in a stirred tank; a review[J]. South African Journal of Science, 2009, 105 (11/12): 421-426.

[2] 宋永鑫,王卫国. 2011—2013 年饲料粉碎技术研究新进展[J]. 饲料工业, 2014(5): 7-11.

[3] MICALE G, MONTANTE G, GRISAFI F, et al. CFD Simulation of Particle Distribution in Stirred Vessels[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2000, 78(3): 435-444.

[4] MONTANTE G, MAGELLI F. Modelling of solids distribution in stirred tanks: analysis of simulation strategies and comparison with experimental data [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2005, 19(3): 253-262.

[5] KASAT G R, KHOPKAR A R, RANADE V V, et al. CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(15): 3 877-3 885.

[6] 张少坤,尹侠. 双层桨搅拌槽内流场的数值模拟[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 71-73.

[7] 袁场,曾程,李璐,等. 高剪切混合罐内物料流场的可视化与结构改进[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 69-73.

[8] 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.

[9] ZHAO Xiang, GLENN C, XIAO Zhi-gang, et al. CFD development for macro particle simulations[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2014, 28(5): 232-249.

[10] 赵小英,杜飞龙,向贤礼. 基于 Fluent 的搅拌槽内多相流数值仿真及研究[J]. 制造业自动化, 2015(13): 109-112.

[11] 杜飞龙,李少波,何玲. 卧式组合搅拌槽内固液混合物多相流模拟分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 111-114.

[12] 王春娥,刘丽,韩婵娟. 面粉粘度特性与面条品质的相关研究[J]. 现代面粉工业, 2012, 26(2): 36-39.

[13] 李锦雄. 面粉品质评定及粘度值的简易测定方法[J]. 广东饲料, 2001(4): 38-39.

(上接第 74 页)

[13] MAITI S, SHRIVASTAVA N K, SUIN S, et al. Polystyrene/MWCNT/Graphite Nanoplate Nanocomposites: Efficient Electromagnetic Interference Shielding Material through Graphite Nanoplate-MWCNT-Graphite Nanoplate Networking[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(11): 4 712-4 724.

[14] ZHAO Yu-tong, WU Bian, ZHANG Yu, et al. Transparent electromagnetic shielding enclosure with CVD graphene[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(10): 103 507.

[15] WANG Xiao-wei, REN Shi-yan, YANG Hua-yun, et al. FEM Analysis of Magnetic Shielding Effectiveness[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(4): 376-379.

[16] 黎文航,朱志愿,芦笙,等. 基于 LabVIEW 的高精度铂电阻测

温系统开发[J]. 微计算机信息, 2009, 25(31): 50-51.

[17] 朱杰,徐香菊,钱爱颖,等. 基于铂电阻的高精度温度采集系统校准研究[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(4): 525-527.

[18] 王婵媛,王希晰,曹茂盛. 轻质石墨烯基电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 材料工程, 2016, 44(10): 109-118.

[19] 切洛齐. 电磁屏蔽原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 65-68.

[20] WESTON D. Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications[M]. 2th ed. Boca Raton: CRC Press, 2001: 61-62.

[21] 李安金,赵仁涛. 低频磁场屏蔽问题简述[J]. 科技信息, 2013 (3): 211-212.

[22] 杨士元. 电磁屏蔽理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 134-135.