

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.018

卧式捏合机数值模拟及流场分析

郑锦,武斌,陈葵,纪利俊,吴艳阳

(华东理工大学化工学院,上海 200237)

摘要:应用计算流体力学软件 Fluent,对捏合机中黏性物料的运动进行仿真模拟研究,分析讨论了作为黏稠物系反应釜的卧式双 Σ 桨叶捏合机内部流场情况。通过对设备和物料特性的初步分析,选择了 Laminar 模型作为层流模型,标准 k- ε 模型作为湍流模型,动静区域选择多重参考系法。在此基础上,分别考察了该捏合机内部物料的速度分布、压力分布和搅拌功耗等特性,分析了液体黏度、搅拌转速和搅拌桨安装高度等条件的具体影响。结果表明,该捏合机适于处理的液体物料黏度范围为 1~20 Pa·s,在此范围内,液体的轴向混合和径向混合均能够达到较为理想的状态;提升搅拌桨转速对径向混合的改善更为明显。提高搅拌桨安装位置,能够小幅度降低功率消耗,但是会削弱捏合机内部压差,影响搅拌混合,因此不宜用提高搅拌桨安装位置的方法来节省功率;搅拌功率会随着液体黏度的提升而线性增加,且正比于搅拌转速的 2.08 次方。

关键词: 计算流体力学;捏合机;转速;压力;搅拌功率

中图分类号: TQ051.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0101-06

Numerical Simulation and Flow Field Analysis of Horizontal Kneader

Zheng Jin, Wu Bin, Chen Kui, Ji Lijun, Wu Yanyang

(School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract : The computational fluid dynamics software Fluent was used to simulate the movement of viscous materials in the kneader, and the internal flow field of the horizontal double Σ blade kneader as a viscous reaction kettle was analyzed and discussed. Through preliminary analysis of equipment and material characteristics, the Laminar model was selected as the laminar flow model, the standard k- ε model was used as the turbulence model, and the multiple reference system method was selected for the dynamic and static regions. On this basis, the characteristics of the speed distribution, pressure distribution and stirring power consumption of the materials inside the kneader were investigated respectively, and the specific effects of conditions such as liquid viscosity, stirring speed and the installation height of the stirring blade were analyzed. The results show that the viscosity range of the liquid material that the kneader is suitable for processing is 1–20 Pa·s, within this range, the axial mixing and radial mixing of the liquid can reach a more ideal state. The speed of the stirring paddle improves the radial mixing more obviously. Increasing the installation position of the stirring blade can reduce power consumption to a small extent, but it will weaken the internal pressure difference of the kneader and affect the stirring and mixing. Therefore, it is not suitable to increase the installation position of the stirring blade to save power. The stirring power will increase with the increase of liquid viscosity. It increases linearly and is proportional to the 2.08 power of the stirring speed.

Keywords : computational fluid dynamics ; kneader ; speed ; pressure ; stirring power

聚磷酸铵 (APP) 具备安全性能高、环境友好及成本低廉等优势,广泛用于灭火剂、阻燃剂和功能性塑料的制备等,是无机高分子材料领域中的研究热

点^[1-2]。卧式捏合机结构简单,寿命长,广泛应用于化工、食品等行业中物料的混炼与聚合^[3-4],因此常将其作为 APP 合成反应的搅拌设备。潘德韬等^[5-6]

基金项目: 上海市科委项目 (18595800900)

通信作者: 武斌,博士,副教授,主要研究方向为传质与分离工程

收稿日期: 2021-03-23

引用格式: 郑锦,武斌,陈葵,等. 卧式捏合机数值模拟及流场分析 [J]. 工程塑料应用,2021,49(6): 101–106, 112.

Zheng Jin, Wu Bin, Chen Kui, et al. Numerical simulation and flow field analysis of horizontal kneader[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6): 101–106, 112.

利用卧式双轴捏合机研究了 APP 的合成工艺特点。

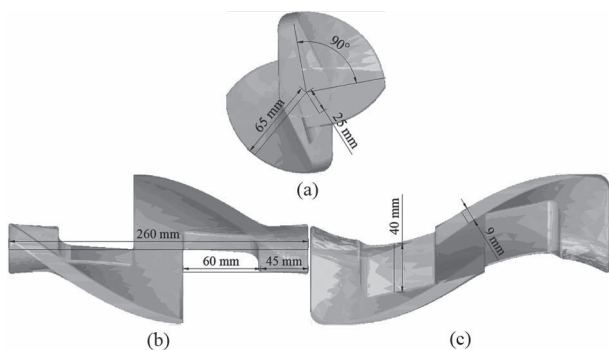
搅拌桨作为混合设备中的核心部件之一,直接影响设备的运行速率和工艺过程。卧式双轴捏合机最为常见的搅拌叶片为 σ (Σ) 叶片,搭配这种叶片的混合器用于工业中各种黏性流体和糊状物的混合。为了产生剪切力,两个 Σ 搅拌桨采用相切方式排列,分别以不同速度旋转,物料通过对流、剪切、扩散三种混合机理方式进行混合。S. Prakash 等^[7-10]利用激光多普勒技术研究了叶片内的速度分布随时间和流体流变性而变化的情况,并运用该技术测定不同黏度液体的剪切速率分布情况,R. K. Connolly 等^[11-12]通过有限元方法和网格叠加技术,利用 Polyflow 软件对捏合机内的流动和混合进行了模拟,然而对于效率和功率等性能特征却没有研究。

笔者以如皋市第一塑料机械技术开发有限公司生产的高温捏合机为研究对象,运用计算流体力学相关知识,利用 Fluent 等相关有限元分析软件^[13]对其进行分析处理,探究捏合机内部的流场特性和规律,为 APP 的生产过程提供有效参考价值,对后续工艺过程的放大具有指导意义。

1 实验部分

1.1 模型建立与网格划分

利用 Pro/E 软件^[14]进行模型建立。计算区域采取 280 mm × 320 mm × 213 mm 布局,两卧式搅拌桨并列放置,混合室底部为半圆凹槽,上部为长方体,搅拌桨具体参数见图 1。

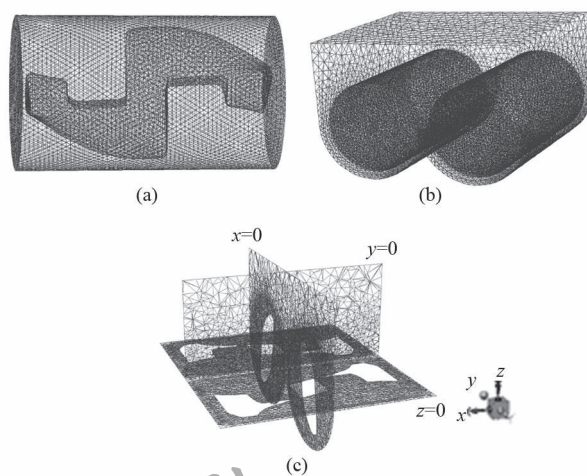


a—左视图;b—主视图;c—俯视图

图1 搅拌桨尺寸

利用 Gambit 软件^[15]对捏合机流体域进行网格划分。由于该捏合机存在两个搅拌区域,因此将整个计算域分为一个静子区和两个动子区。此外,搅拌桨形状扭曲,较为复杂,因此选用非结构化四面体单元进行网格划分,对于静子区与动子区的交界面

和搅拌区域,利用尺寸函数进行局部网格加密,其网格划分情况见图 2,并给出了特殊截面的网格划分情况。



a—动子区;b—静子区;c—特殊截面

图2 网格划分图

1.2 计算条件与参数设置

运用 Ansys Fluent 进行流体力学计算分析时,先计算搅拌雷诺数,合理选择层流模型和 Standard k- ϵ 湍流模型,动静区域的相对运动采用多重参考系法处理。选择基于压力法的求解器,在时间类型的选取上根据需要进行选择稳态。求解部分选择 SIMPLE 耦合压力和速度,离散格式选择二阶迎风格式的有限体积法,松弛因子均保持默认值。各变量归一化残差收敛值调小至 10^{-5} ,除了监测残差以外,还需监测两搅拌桨力矩和垂直中心页面速度值。最后定义操作环境 101.325 kPa,重力加速度为 9.81 m/s^2 ,方向垂直向下。

研究对象是间歇式反应器,无进出口,反应器四周和搅拌槽底部选用无滑移壁面,而搅拌桨由于其旋转特性将其壁面定义为旋转运动壁面,并且判定其相对搅拌区域的速度值为 0,静区域内流体保持静止,动区域内流体根据实际要求调整速度值,两区域的接触面设置为交界面,捏合机上表面为自由液面,因此设为对称边界。

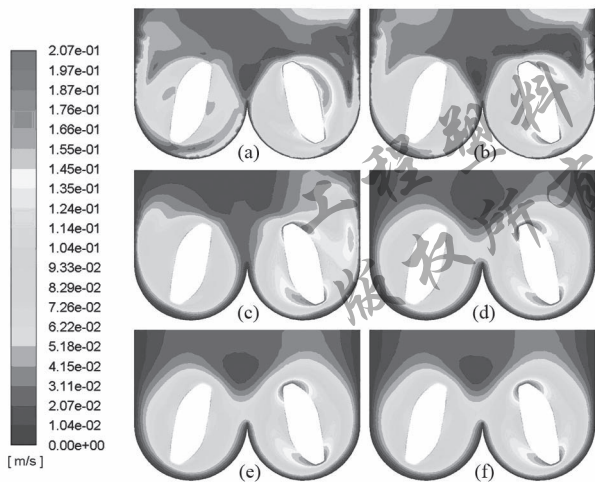
2 模拟结果与分析讨论

2.1 液体黏度对流场的影响

捏合机的适用目标为高黏度液体,实验考察了不同料液黏度下捏合机内速度场、压力场和搅拌功率的变化情况。

图 3 为不同黏度料液在慢速桨转速为 22 r/

min 和快速桨转速为 33 r/min 时, $x=0$ mm 截面处的速度云图。由图 3 可知,液体黏度为 0.001, 0.01, 0.1 Pa·s 时的速度云图与液体黏度为 1, 5, 10 Pa·s 时的速度云图存在显著差异。当料液黏度较低时,捏合机上部流场出现明显的高速区域,搅拌桨处速度分布不均匀,流场中心位置速度传递较差,且流场较为混乱,规律性不明显。反观高黏度液体,由于黏性阻力较高,导致流动阻力较高,使得流场的高速区域仅存在于搅拌桨周围,速度最高点存在于搅拌叶片端部,低速区域存在于流场上方,流场分布规律明显。而且随着液体黏度增加,低速区域的范围越来越小,然而随着黏度增加到 10 Pa·s 后,流场分布已无明显变化。结果表明,在适宜范围内,捏合机中的料液黏度越高,流场分布越均匀。所以适当增大料液黏度更有利于利用捏合机在其生产过程中实现高效的搅拌混合。

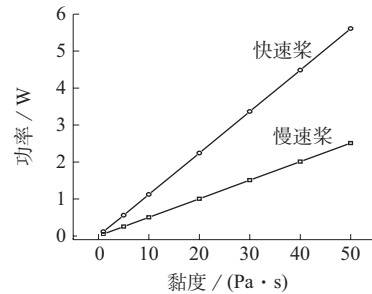


黏度: a—0.001 Pa·s; b—0.01 Pa·s; c—0.1 Pa·s;
d—1 Pa·s; e—5 Pa·s; f—10 Pa·s

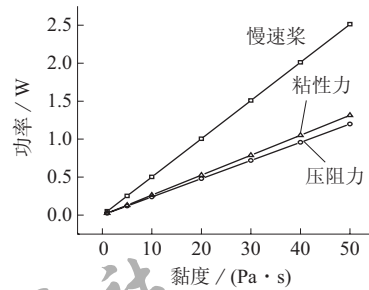
图3 不同料液黏度时 $x=0$ mm 截面速度云图
(左边为低速区,右边为高速区)

图 4 为搅拌功率与料液黏度的关系曲线。由图 4a 可知,搅拌功率与料液黏度呈线性关系,且快速桨搅拌功率明显高于慢速桨。由图 4b 可知,慢速搅拌桨克服压阻力功率高于克服黏性力功率。

图 5 为捏合机对低黏度液体 (≤ 1 Pa·s) 在 $y=80$ mm 截面处的压力云图。由图 5 可知,当流体黏度为 0.001, 0.01, 0.1 Pa·s 时,搅拌桨周围压力值变化不明显,因此无法形成有效的轴向混合,然而当液体黏度增加到 1 Pa·s 时,在搅拌桨底部出现明显压力差,轴向混合性能有所提高。并且由图可以



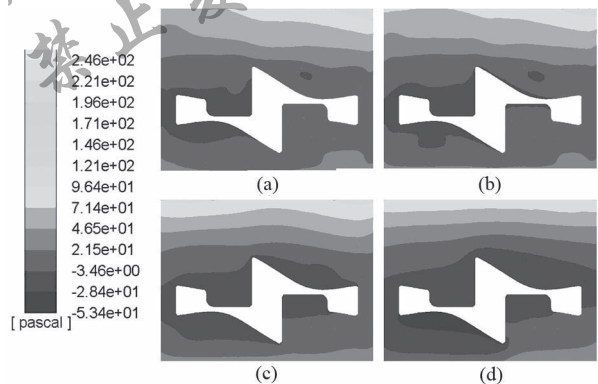
(a)



(b)

a—快速桨功率变化; b—慢速桨克服阻力功率变化

图4 搅拌功率与黏度关系曲线

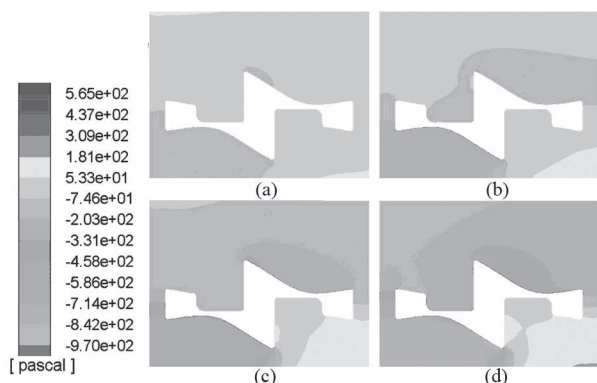


黏度: a—0.001 Pa·s; b—0.01 Pa·s; c—0.1 Pa·s; d—1 Pa·s

图5 低黏度液体 $y=80$ mm 截面压力云图

看出,随着搅拌介质黏度上升,垂直部位压力分布规律较为明显,且范围更广,说明该捏合机更适合黏度较大液体的混合。

为了考察该捏合机对液体黏度的适用范围,继续分析液体黏度分别在 5, 10, 20, 30 Pa·s 下压力分布情况,图 6 为这四种黏度下 $y=80$ mm 截面处压力分布云图。由图可知,随着黏度增大,搅拌桨周围压力分布范围变广,搅拌桨轴向部位的压力差逐渐增大,证明该捏合机对于高黏度液体的混合更加适用。当黏度增加到 30 Pa·s 时,垂直部位的压力分布规律逐渐消失,这样将不利于捏合机的径向混合,因此该捏合机更适合黏度为 1~20 Pa·s 液体的搅拌混合。

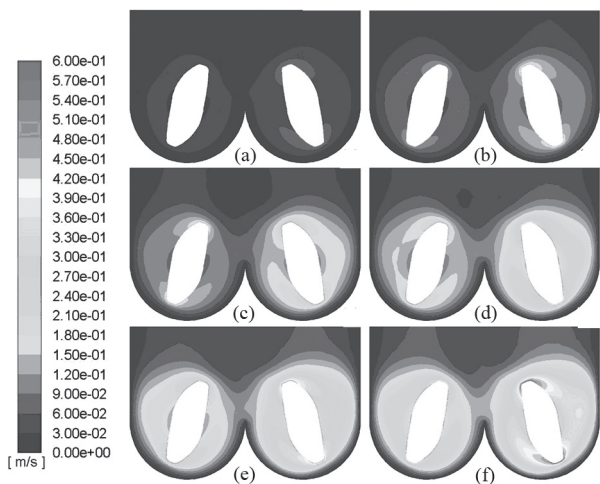


黏度: a—5 Pa·s; b—10 Pa·s; c—20 Pa·s; d—30 Pa·s

图6 高黏度液体y=80 mm截面压力云图

2.2 搅拌转速对流场的影响

图7为该捏合机在搅拌介质黏度为1 Pa·s,慢速桨转速分别为20,30,40,50 r/min,快速桨转速设定为慢速桨的1.5倍情况下x=0 mm截面处的速度云图。由图可知,快速桨桨叶附近速度值大于慢速桨,随着转速增大,高速区与低速区的位置分布变化不明显,靠近桨叶部分速度较大,靠近壁面和顶部位置速度较慢,根据云图颜色深浅判断,计算域内的整体速度值逐渐变大。因此,提高搅拌桨转速能够明显提升流场内流体的流动与混合情况。然而对于较高黏度APP料液的混合,若捏合机的搅拌速度过高,不仅需要为其配备更高功率的驱动电机,提高各个结构部件的力学强度,同时还会使得物料在捏合机内运动范围变广,导致物料被抛起等问题,因此对于黏稠物系的混合,搅拌转速应该视混合速率的具体工艺需要而改变,过高的搅拌速率未必合理。

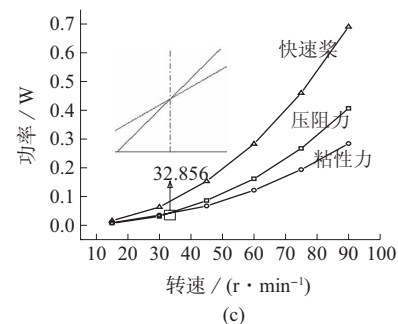
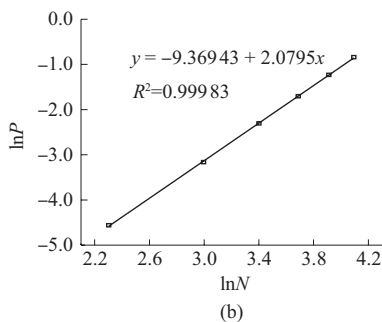
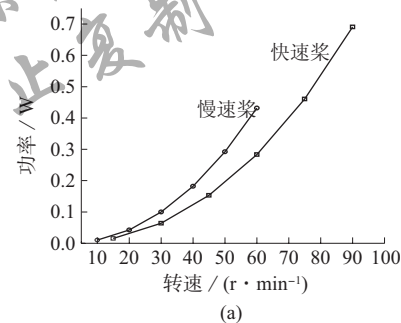


转速: a—10 r/min; b—20 r/min; c—30 r/min;

d—40 r/min; e—50 r/min; f—60 r/min

图7 不同搅拌转速x=0 mm截面速度云图

图8a为搅拌桨功率与转速的关系图。随着转速增大,搅拌功率增大,且增大速率越来越快。为了考虑两者数量关系,计算两者的对数值,如图8b示,通过线性拟合得到其直线方程为 $y = -0.9369 + 2.08x$,相关系数值为0.9998,拟合度较高,因此搅拌桨功率(P)与转速(N)的关系为: $P \propto N^{2.0795}$ 。图8c为快速桨克服压力与黏性力做功功率与转速的关系。随着转速的增加,搅拌桨克服压力与黏性力做功功率也随之增加,变化速率越来越大。当转速小于32.856 r/min时,该搅拌桨克服黏性力做功功率较大,而当转速大于32.856 r/min时则相反。这是因为当转速较小时,流体域内剪切应力梯度较小,速度较慢流体对速度较快流体所形成阻滞力较为明显,因此导致黏性力占流动阻力较多,当搅拌速度较大时,层流逐渐减弱甚至消失,流体域内速度梯度较小,黏滞阻力相对减弱,这样导致

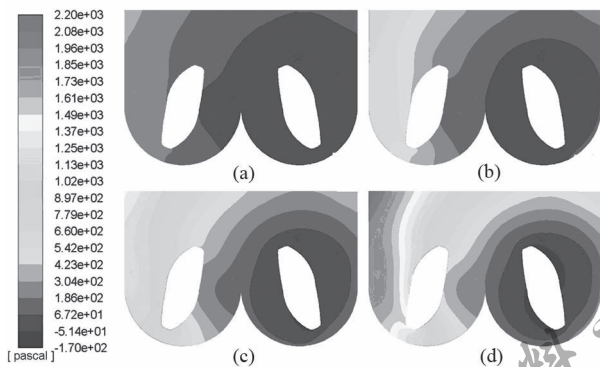


a—快慢桨功率变化; b—线性拟合图; c—快速桨克服阻力功率变化

图8 搅拌功率与转速的关系

搅拌桨克服压力做功功率大于克服黏滞力做功功率,并且该趋势会随着搅拌转速的升高越来越明显。

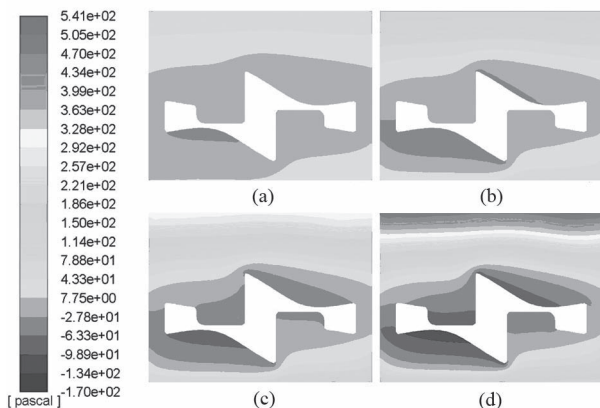
不同搅拌速度下 $x=0$ mm 截面处压力云图见图 9。随着转速增大,捏合机内部流体压力区间逐渐增大,这是因为转速越快,在流体区域内部形成的压力梯度就会越大,因此提高转速有利于料液的搅拌混合。从低速区(左边)到高速区(右边)压力值逐渐下降,其形成的压差是导致物料混匀的重要推动力,而且该压差也是造成在实际操作时捏合机上表面液体高度不一的原因。



转速: a—20 r/min; b—30 r/min; c—40 r/min; d—50 r/min

图 9 不同搅拌转速 $x=0$ mm 截面压力云图

四种不同转速下 $y=80$ mm 截面压力云图见图 10。随着转速增大,搅拌桨径向位置压力分布区间逐渐增大,这是因为转速越快,在流体区域内部形成的压力梯度就会越大,因此,增大转速对捏合机径向混合起到明显促进作用。然而搅拌桨轴向位置压力分布情况变化不明显,由于捏合机搅拌桨两端靠近搅拌釜前后内壁,此处液体较少,压力梯度受到内壁对其摩擦影响较大,这样的构造是造成搅拌桨轴向



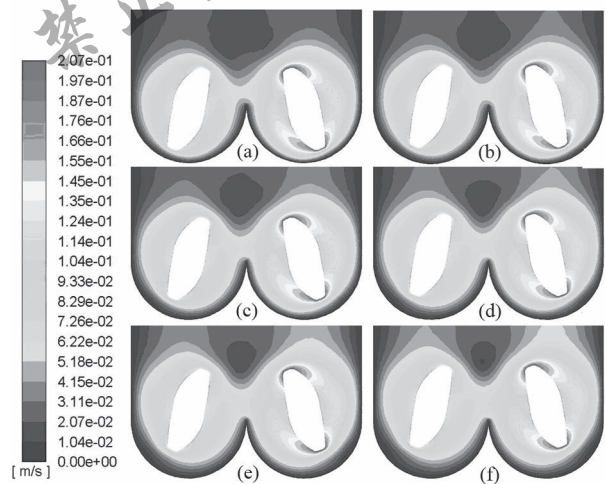
转速: a—20 r/min; b—30 r/min; c—40 r/min; d—50 r/min

图 10 不同搅拌转速 $y=80$ mm 截面压力云图

位置压力梯度较小的原因。因此,提高搅拌桨转速能够有效促进捏合机内部径向混合,却对轴向部分混合效果提升不明显。

2.3 搅拌桨安装高度对流场的影响

图 11 为捏合机在搅拌介质黏度为 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 两桨转速为 20 r/min 和 30 r/min, 安装高度分别为 $-5, 0, 5, 10, 15, 20$ mm 时 $x=0$ mm 截面速度云图。由图可知,搅拌桨转动所形成的高速区域形状和大小随安装高度的增大变化不明显,而中心位置(坐标原点)速度值随安装高度的提升而变大。这是因为搅拌桨的安装高度升高,远离捏合机中间凸起部位,相当于流体间不再存在挡板,速度值因此而提高。然而该部位是物料捏合的关键部位,搅拌桨不宜远离此处。随着搅拌桨安装高度的提升,靠近搅拌釜底部位置低速区范围增大。因此,该捏合机搅拌桨安装不宜过高,在整个装置高度较低的前提下,应当尽量调低搅拌桨安装高度,保证底部液体能够参与到搅拌混合过程。



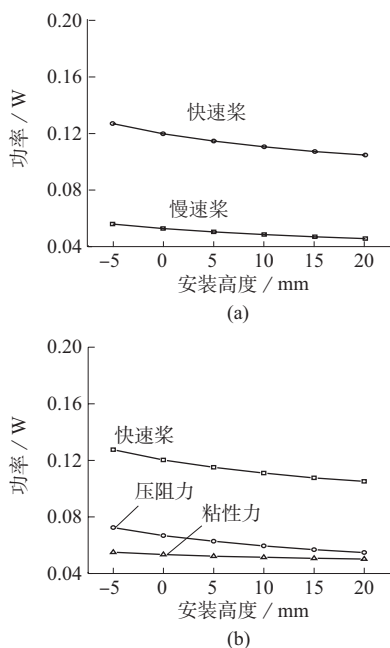
安装高度: a— -5 mm; b— 0 mm; c— 5 mm; d— 10 mm;

e— 15 mm; f— 20 mm

图 11 不同安装高度 $x=0$ mm 截面速度云图

图 12a 为搅拌桨在不同安装高度的功率变化图。由图可知,搅拌功率随着搅拌桨安装高度的提升而降低,说明提高搅拌桨安装高度能够降低功率。这是源于该捏合机搅拌的料液为高黏度液体的特殊性。搅拌釜底部区域为低速区,由于低速区黏滞力较大,安装高度较低的搅拌桨做功会更多。而且功率降低的速率越来越慢,说明当远离釜底到一定程度时,低速区液体的黏滞力对搅拌功率的影响将不再改变。图 12b 为快速桨克服压阻力和黏性阻力做

功率随其安装高度的变化趋势图。由图可知,克服压力的功率变化相比于克服黏性力的功率变化较为明显。



a—快慢桨功率变化;b—快速桨克服阻力功率变化

图12 搅拌功率与搅拌桨安装高度的关系

综上所述,搅拌功率会随着搅拌桨安装高度的提升而下降,且下降幅度越来越小,较大安装高度变化下,功率变化却不明显,从初始位置上调 20 mm 高度,功率变化仅仅为 13%,说明该捏合机不适合通过提升搅拌桨安装高度来节省功率。

3 结论

(1) 该捏合机更适宜黏度较高料液的搅拌混合。当料液黏度在 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 以上时,捏合机的混合性能较高,且对黏度在 $1 \sim 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 范围内料液的轴向和径向混合可达到较为理想的状态。搅拌桨功率随着料液黏度的增大而线性增大。

(2) 提高搅拌桨转速,有利于内部流体混合,且径向混合的提升幅度大于轴向混合。捏合机的搅拌桨功率正比于搅拌转速的 2.08 次方,当快速桨转速超过 32.86 r/min 时,搅拌桨克服压力功率大于克服黏性力功率。

(3) 搅拌桨安装位置越靠近搅拌釜底越有利于搅拌混合。提高搅拌桨安装位置虽然能够小幅度节省功率,但是该效果会随着安装高度的增大而逐渐消失,甚至增大功率消耗,且不利于搅拌釜底部料液的捏合。此外,提高安装高度会削弱捏合机内部压差,不利于料液均匀混合。

参考文献

- [1] 李玉芳,伍小明. 环保型阻燃剂的研究开发新进展[J]. 塑料制造, 2012(3):59-63.
Li Yufang, Wu Xiaoming. Research and development new progress on environmental-friendly flame retardants[J]. Plastics Manufacture, 2012(3):59-63.
- [2] 者加云,罗勇,谢德龙,等. 聚磷酸铵的应用研究进展[J]. 塑料工业, 2019, 47(2):1-5, 36.
Zhe Jiayun, Luo Yong, Xie Delong, et al. The application research progress of ammonium polyphosphate[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(2):1-5, 36.
- [3] 任春华,林朝阳,周国成. 捏合机的发展[J]. 泸天化科技, 2010(3):186-190.
Ren Chunhua, Lin Chaoyang, Zhou Guocheng. Development of Kneader[J]. Lutanhua Technology, 2010(3):186-190.
- [4] 王凯,虞军. 搅拌设备[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
Wang Kai, Yu Jun. Mixing equipment[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2003.
- [5] 潘德韬. 湿法磷酸制备分子量和晶型可控化聚磷酸铵的研究[D]. 上海:华东理工大学,2016.
Pan Detao. Preparation for ammonium polyphosphate with various molecular weight and crystal form from wet-process phosphoric acid[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2016.
- [6] 赵桂新. 结晶 V 型聚磷酸铵制备新工艺探索[D]. 上海:华东理工大学,2012.
Zhao Guixin. New synthesis exploration for ammonium polyphosphate with crystalline form V[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2012.
- [7] Prakash S, Karwe M V, Kokini J L. Measurement of velocity distribution in the Brabender Farinograph as a model mixer, using laser-doppler anemometry[J]. Journal of Food Process Engineering, 1999, 22(6):435-454.
- [8] Prakash S, Kokini J L. Determination of mixing efficiency in a model food mixer[J]. Advances in Polymer Technology, 1999, 18(3):209-224.
- [9] Prakash S, Kokini J L. Estimation and prediction of shear rate distribution as a model mixer[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 44(3):135-148.
- [10] Prakash S. Characterization of shear rate distribution in a model mixer using laser doppler anemometry[D]. Piscataway:Rutgers, the State University of New Jersey -New Brunswick, 1997.

(下转第 112 页)

- twin-channel wave screw extruders[J]. South China Institute of Technology, 1985, 13(1):29-40.
- [6] 陈子运. 波状螺杆及其应用[J]. 塑料, 1987(5):15-19.
Chen Ziyun. Wave screws and their applications[J]. Plastics, 1987(5):15-19.
- [7] 王兴天, 杨红, 杨于光. 波状注塑螺杆熔体输送机理的研究[J]. 中国塑料, 1991, 5(2):60-73.
Wang Xingtian, Yang Hong, Yang Yuguang. Research of melt conveying mechanism of wave screw for injection moulding[J]. China Plastics, 1991, 5(2):60-73.
- [8] 张康生. 新型双波状分离型螺杆[J]. 塑料包装, 1999, 9(1):34-39.
Zhang Kangsheng. New double wave screw[J]. Plastics Packing, 1999, 9(1):34-39.
- [9] 柳天磊. 振动力场强化塑料挤出过程混合机理研究[D]. 江门: 五邑大学, 2011:18-25.
Liu Tianlei. Research on mixing mechanism under vibration force field in extruding process[D]. Jiangmen: Wuyi University, 2011:18-25.
- [10] 钱欣, 许王定, 金杨福. POLYFLOW 基础及其在塑料加工中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010:317-319.
- Qian Xin, Xu Wangding, Jin Yangfu. The basis and its application of POLYFLOW in plastic processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:317-319.
- [11] 张霞, 谢林生, 马玉录. 双转子连续混炼机混炼段拉伸作用的研究[J]. 中国塑料, 2010, 24(3):108-113.
Zhang Xia, Xie Linsheng, Ma Yulu. Study on stretching effect in mixing section of two-rotor continuous mixers[J]. China Plastics, 2010, 24(3):108-113.
- [12] 柳天磊, 杜遥雪. 振动力场对销钉挤出机混炼过程的影响[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(3):80-84.
Liu Tianlei, Du Yaoxue. Effect of vibration force field on mixing process of pin screw extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(3):80-84.
- [13] 柳天磊, 王建鸿, 杜遥雪. 注射机屏障型螺杆结构设计及其数值模拟研究[J]. 塑料科技, 2013, 41(1):89-92.
Liu Tianlei, Wang Jianhong, Du Yaoxue. Structure design of the barrier injection screw and numerical simulation on its plasticization process[J]. Plastics Science and Technology, 2013, 41(1):89-92.
- (上接第 106 页)
- [11] Connelly R K, Kokini J L. Mixing simulation of a viscous Newtonian liquid in a twin sigma blade mixer[J]. Aiche Journal, 2006, 52(10):3 383-3 393.
- [12] Connelly R K, Kokini J L. 3D numerical simulation of the flow of viscous Newtonian and shear thinning fluids in a twin sigma blade mixer[J]. Advances in Polymer Technology, 2006, 25(3):182-194.
- [13] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
Han Zhanzhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. FLUENT: Fluid engineering simulation calculation examples and applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [14] 林清安. Pro/ENGINEER 野火 3.0 中文版零件设计应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Lin Qingan. Pro / ENGINEER Wildfire 3.0 Chinese version part design application example[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [15] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战: FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
Li Pengfei, Xu Minyi, Wang Feifei. Proficient in CFD engineering simulation and case combat: FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2011.