

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.034

基于 Fluent 的加气混凝土搅拌机数值模拟分析

兰之乔¹, 蒋淮同², 张猛², 王剑¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 江苏腾宇机械制造有限公司, 江苏 宿迁 223812)

摘要:以加气混凝土搅拌机为原型,利用流体仿真软件 Fluent,采用欧拉多相流模型、Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和滑移网格法相结合的方法,对搅拌机内 3 种不同类型的搅拌器分别进行瞬态计算,模拟研究搅拌机内 3 种不同类型搅拌器的流体流动特性和物料浓度变化,分析转速对搅拌效果的影响。通过仿真结果对比可知,四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器的搅拌效果最优,可为加气混凝土搅拌机的设计提供参考。

关键词:加气混凝土搅拌机;流体仿真;瞬态

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)02-0162-04

Numerical Simulation Analysis of Aerated Concrete Mixer Based on Fluent

LAN Zhiqiao¹, JIANG Huaitong², ZHANG Meng², WANG Jian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Jiangsu Tengyu Machinery Manufacturing Co., Ltd., Suqian 223812, China)

Abstract: Based on aerated concrete mixer as the prototype, the fluid simulation software Fluent and Eulerian multiphase flow model, Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model and slip grid method are applied to perform transient calculations for each of the three different types of mixers in the mixer, simulate and study the fluid flow characteristics and material concentration changes of the three different types of mixers in the mixer, and analyze the influence of rotational speed on the mixing effect. The comparison of the simulation results show that the mixing effect of the turbine-screw mixer with four inclined lobes opening is optimal, a reference for the design of aerated concrete mixer.

Keywords: aerated concrete mixer; fluid simulation; transient

0 引言

加气混凝土搅拌机是生产加气混凝土砌块的主要设备,其将一定配比的砂、水泥、生石灰、石膏及铝粉悬浮液体进行搅拌,使之均匀混合,充分反应并及时将混合料浆注入模框内^[1]。

搅拌机内不同的搅拌器会影响加气混凝土的性能以及生产效率。为了研究不同搅拌器搅拌效果,往往采用 CFD 软件预先对搅拌器进行仿真模拟分析,从而减少前期产品的实验开发成本^[2]。

Fluent 软件^[3]是目前采用有限体积法求解流体力学问题的主流 CFD 软件。本文基于 Fluent 对螺旋搅拌器、四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器和四斜叶圆盘涡轮-螺杆式搅拌器 3 种不同类型搅拌器进行流体仿真,从结果分析不同类型搅拌器的流场特性和不同转速下的搅拌性能,为加气混凝土浇注搅拌机的设计及优化提供参考。

1 搅拌机有限元模型的建立

1.1 几何模型

为了使仿真效果更贴合实际,在建模时需要根据实际情况对加气混凝土搅拌机进行简化处理。简化后的搅拌槽结构模型如图 1 所示。搅拌槽直径 $D=1\ 700\ \text{mm}$,槽高 $H=2\ 000\ \text{mm}$ (圆柱筒体高度为 $H_1=1\ 500\ \text{mm}$),搅拌槽内壁安装有 4 块挡板,挡板宽度与罐径比在 $1/12\sim 1/10$ 之间,故取 $W=150\ \text{mm}$,挡板厚度 $T=6\ \text{mm}$,搅拌器安装高度 $H_2=250\ \text{mm}$ (螺旋叶片底部到搅拌槽底部的距离)。螺杆式搅拌器(LG)与涡轮式搅拌器相距 $H_3=760\ \text{mm}$,螺旋叶片直径 $d_1=550\ \text{mm}$,螺旋升角 $\psi=10^\circ$ 。根据化工行业标准^[4-5],对四斜叶圆盘式涡轮搅拌器(ZY)和四斜叶开启涡轮式搅拌器(MK)进行建模,其几何模型如图 2 所示。涡轮搅拌器的直径 $d_2=450\ \text{mm}$,叶片高度 $h=80\ \text{mm}$ 。

第一作者简介:兰之乔(1996—),男,福建霞浦人,硕士研究生,研究方向为机械工程,867672917@qq.com。

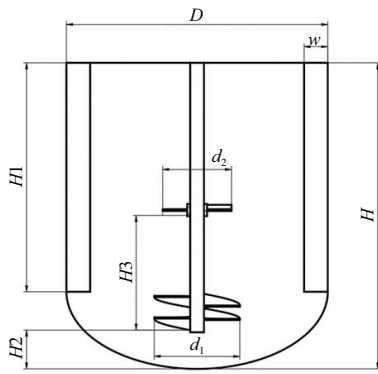


图1 搅拌槽二维示意图

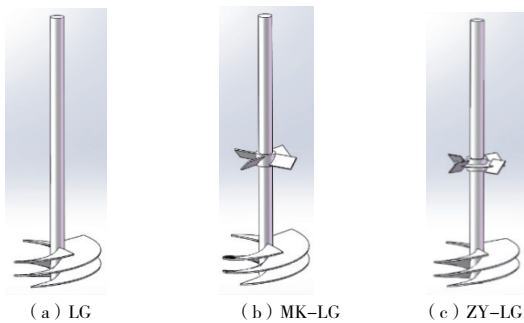


图2 搅拌器三维模型

1.2 网格划分

在网格划分前,需要将搅拌槽几何模型的流体计算域抽取出来,并将搅拌叶片附近的流体域划分为动域。该动域是略大于搅拌叶轮的圆柱体并将搅拌叶轮包裹其中,其他区域划分为静域。将划分好动静区域的几何模型导入 Fluent Meshing^[6]进行网格划分。其中对搅拌器壁面网格和动区域网格进行局部加密处理,使仿真更加准确地反映流场性能。设置缓冲层数为3,使网格过渡更加顺畅,提高近壁面流体的计算精度。在体网格生成方法中使用 Ploy-Hexcore,能够提升网格中六面体的数量,以达到提升求解精度的目的。网格划分如图3所示。

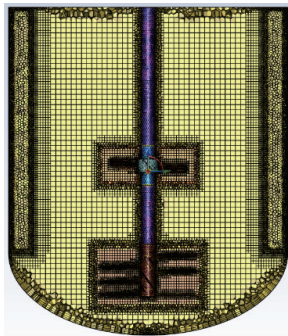


图3 网格划分截面图

1.3 Fluent 仿真设置

1) 物理模型及求解器

在加气混凝土搅拌机的实际工作过程中,需要将水、砂、水泥、生石灰、石膏及铝粉悬浮液体等多种介质进行混合搅拌,而本文主要分析水、砂和水泥(质量比例约为 150 : 3 : 7)的混合,故采用多相流模型中的欧拉模型(the eulerian model)^[7]。该模型将各相视为相互渗透的连续体,每一相都有各自的连续方程和动量方程,通过压力和相间模型耦合各相。在搅拌过程中会伴随湍流的产生,故激活湍流模型并选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。该模型对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流等流体有较好的计算精度。由于搅拌槽内料浆的流动状态是随时间变化,整个流场处于非定常流动模式,选用压力基求解器并采用瞬态(transient)计算方式。

2) 搅拌介质与边界条件设定

搅拌介质中水为主相,密度为 $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$;砂和水泥为次相,砂的密度为 $2\ 500\ \text{kg}/\text{m}^3$,粒径大小设为 $0.03\ \text{mm}$;水泥的密度为 $3\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$,粒径大小设为 $0.08\ \text{mm}$ 。高速搅拌过程中砂和水泥会处于悬浮运动状态,故水与砂和水泥的相间作用关系选用曳力模型(gidaspow)^[8]。该模型可以很好地描述撞击流中颗粒在撞击区内流体与颗粒之间的动量传递关系。

由于使用了瞬态计算来进行仿真模拟,且搅拌槽内的流体属于非定常流动,故使用滑移网格方法处理流体域内动域与静域的关系。该方法在计算过程中使动域相对于静域沿着网格分界面滑动,从而产生瞬态相互作用,但静域内部网格保持不变。将动域流体的运动设置为绕搅拌轴线进行旋转运动,静域流体的运动状态为静止;为了确保滑移网格在计算中不出现负体积,静域与动域的交界设置为 interface。而后是对其他壁面的设置,其中搅拌轴表面为运动壁面(moving wall),速度大小设置与动域速度相同;搅拌叶片表面设置为运动壁面(moving wall);流体在搅拌槽的顶部界面可以自由运动,故设置为对称边界(symmetry);其他壁面均设置为静止壁面。

3) 求解初始化

使用 phase coupled SIMPLE 算法来进行压力速度耦合的计算,并使用一阶迎风格式(first order upwind)求解动量方程、体积分数、湍流动能(turbulent kinetic energy)和湍流耗散率(turbulent

dissipation rate);收敛残差设为 10^{-4} 。利用 cell registers 对流体域进行各相初始化区域的标记,并将标记好的区域利用 Patch 进行局部初始化。如图 4 所示,上部区域是体积分数为 1 的水;中间层为水和水泥的混合区域,其中水泥的体积分数为 0.45,水的体积分数为 0.55;底部为水和砂的混合区域,其中砂的体积分数为 0.56,水的体积分数为 0.44。

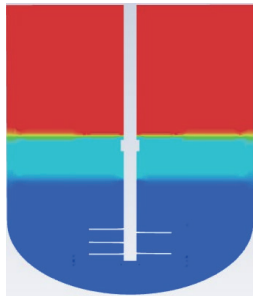


图 4 初始状态示意图

2 仿真结果与讨论

2.1 3 种搅拌器在相同时刻的搅拌效果及分析

应用上文设置,通过瞬态计算得到螺杆式搅拌器、四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器和四斜叶圆盘涡轮-螺杆式搅拌器在 700 r/min 转速条件下的仿真结果。下面分析 3 种不同类型搅拌器在 10 s 时刻的搅拌情况。10 s 时刻搅拌槽中砂的体积分数分布如图 5 所示,水的速度矢量如图 6 所示。由图 5(a)可以看出,砂在螺杆搅拌器的作用下,未能均匀地分布在搅拌槽中;由图 5(b)可以看出,四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器搅拌 10 s 后,砂已经均匀地分布在整个搅拌槽中;由图 5(c)可以发现,在四斜叶圆盘涡轮-螺杆式搅拌器搅拌 10 s 后,砂已经较为均匀地布满整个搅拌槽,但上方还有部分由于形成涡流,水在这部分循环流动,使得砂难以向这部分扩散。

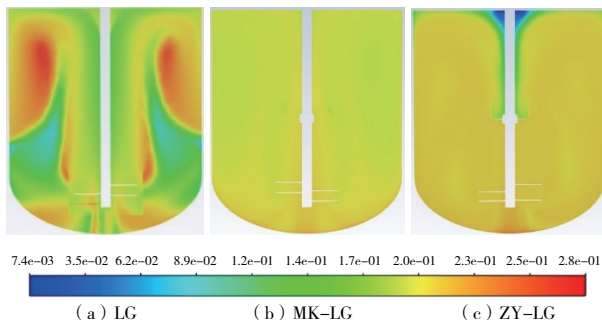


图 5 不同搅拌器的砂体积分数分布图

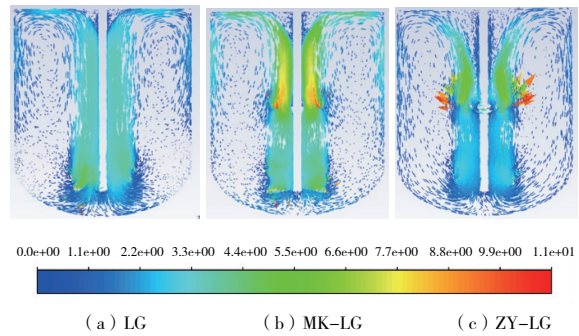


图 6 不同搅拌器的速度矢量图

由图 6 可知,在 3 种搅拌器的作用下水大流向都是沿着搅拌轴向上流动,到了顶部后向搅拌槽壁面流动,最后沿着搅拌槽壁面不断向下扩散,从而形成一个大的循环流。从图 6(a)可以发现在搅拌槽的左、右上角形成一个小涡流。另外两种搅拌器则没有生成明显的小涡流。

为了更加直观地对 3 种搅拌器的搅拌效果进行比较,在搅拌槽内作一条采样线段,对搅拌 10 s 后砂在线段上的体积分数进行计算。该线段位于搅拌槽顶部向下 500 mm 处垂直于搅拌轴的平面上,线段长 1 500 mm。计算后得到的砂在该线段上的体积分数分布曲线如图 7 所示。由图 7 中可以看到,在螺杆式搅拌器作用下,该线段上的体积分数曲线呈现双峰形状,说明砂在该双峰位置处由于形成涡流而聚集在此处,使得此处的砂浓度偏高。而另外两种在该线段上的砂浓度变化平稳,其中圆盘涡轮-螺杆式搅拌器的砂浓度分布在该线段上的一部分呈现断崖式变化,说明在搅拌槽内部还有部分位置物料未充分的搅拌混合。

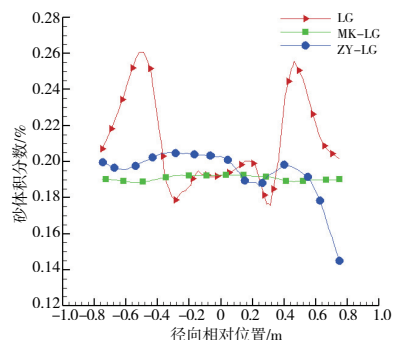


图 7 不同搅拌器的径向砂体积分数曲线

综上所述可以得出:四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器的搅拌效果最优;四斜叶圆盘涡轮-螺杆式搅拌器的搅拌效果次之;螺杆式搅拌器的搅拌效果最差,会在左、右上角形成涡流。

2.2 转速对螺杆搅拌器搅拌效果的影响

搅拌器转速是影响搅拌器搅拌效果的重要因素之一。下面研究螺杆式搅拌器在不同转速下的搅拌效果。首先,分别对 700 r/min、800 r/min、900 r/min 这 3 种转速条件下的螺杆式搅拌器进行瞬态仿真计算,得出 10 s 时刻不同转速条件下搅拌槽中砂的体积分数分布图,如图 8 所示。从图 8 中可以明显看出在搅拌槽的左、右上角砂由于涡流而发生聚集现象。随着转速的提高,这种现象依旧存在。这说明搅拌转速并不能使这一流场发生改变。从图 8(a)和图 8(b)的对比可以看出随着转速的提高,砂的浓度分布更加均匀。

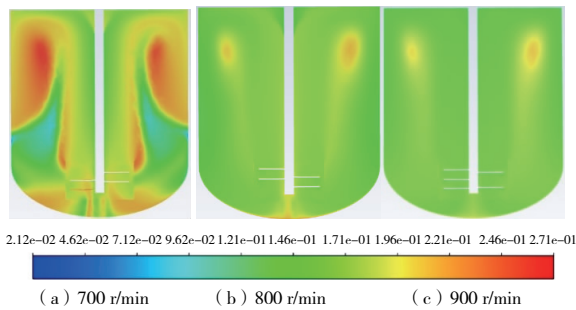


图 8 不同转速的砂体积分数分布图

为了更加直观地分析搅拌转速对搅拌效果的影响。同样作一条与 2.1 内容相同的线段来进行砂体积分数的采样对比,得到不同转速下砂在该线段上的体积分数变化曲线,如图 9 所示。从图 9 中可以发现,转速为 700 r/min 时,砂的浓度变化幅度最大;当转速提升至 800 r/min 时,砂的浓度变化幅度缩小,更趋于平稳;但随着转速提升至 900 r/min,砂并没有因为转速的提高而使得浓度分布得到较大的改善。

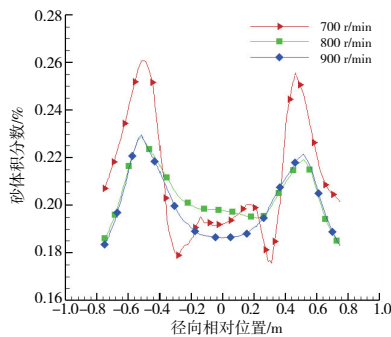


图 9 不同转速的径向砂体积分数曲线

3 实验

根据上述设计研究对 3 种搅拌器进行样机的试制,试验样机如图 10(a)所示。通过试制混

土并测量其扩展度来进行验证。试验条件是水、砂和水泥以 15 : 3 : 7 的质量比在 700 r/min 的搅拌器转速下搅拌混合 1 min;然后在搅拌轴附近、搅拌槽壁面附近以及中间位置进行 3 次料浆采样。将采样好的料浆倒入放置于玻璃平板(其上绘制有同心圆)中心处的圆柱模具中(模具直径 50 mm,高为 100 mm),装满后缓慢抬起模具,让料浆自由流动扩散;最后,测量料浆扩散后所呈圆的直径,即料浆的扩展度。料浆扩展度测量如图 10(b)所示,测量结果如表 1 所示。

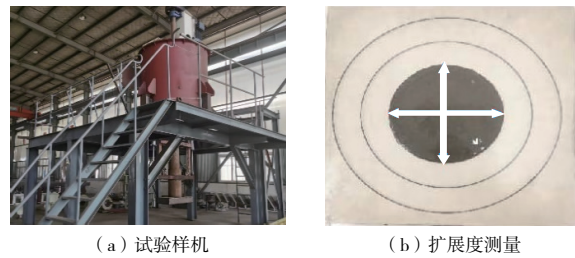


图 10 实验测试图

表 1 扩展度测量数值 单位:mm

搅拌器	采样 1	采样 2	采样 3	平均
LG	200	206	205	204
MK-LG	225	231	223	226
ZY-LG	204	224	220	216

通过实际生产经验可知,搅拌获得的混凝土扩展度在 [220, 240] mm 内时才能进入下一道工序。由表 1 可以看出,通过四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器获得的混凝土扩展度平均值最高,为 226 mm,表示物料混合充分,搅拌效果最佳并且符合生产所要求。

4 结语

通过对选取的 3 种不同样式的加气混凝土搅拌机进行 10 s 的瞬态数值模拟,对比分析了不同搅拌器对应的物料组分浓度场以及在不同转速下螺旋搅拌器的组分浓度场变化,通过试验得出以下结论。

1) 在相同转速下,四斜叶开启涡轮-螺杆式搅拌器的搅拌效果最优,四斜叶圆盘涡轮-螺杆式搅拌器的搅拌效果次之,双层式的搅拌器可以改善螺杆搅拌器的涡流现象。

2) 随着螺杆搅拌器旋转速度的提高,搅拌槽内的物料浓度分布更加均匀,物料混合更充分,搅拌效率得到提升,但提升的幅度会慢慢降低。

(下转第 174 页)

行路径规划,验证其协同性,验证结果如图 6所示。

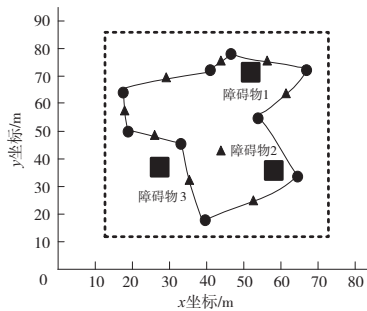


图 6 仓储 AGV 路径规划协同优化结果

如图 6 所示,在两辆小车同时执行装载任务时,本文方法可以同时绕开障碍物,避开同类小车且覆盖面较广,有利于保证仓储 AGV 行驶过程的安全性。

6 结语

本文研究了仓储 AGV 路径规划协同优化方法,研究成果如下:

1) 在分配时间窗的过程中,考虑到了相向碰撞、同向碰撞和节点碰撞的情况,降低了 AGV 路径的阻塞程度,走过 12 个栅格即可到达目标位置,从根本上减少路径距离,提高效率;

2) 设定优化目标并设定动态约束条件,整个运输路径上没有发生碰撞情况,实现了路径的最优规划;

3) 在没有障碍物与有障碍物工况下,小车均能够寻找到最短路径,并不发生碰撞,在很大程度上提高了仓储的运作效率。

此次研究获得了较好的应用效果,但是还有不足之处,因为货架调度具有动态性,在后续研究中还需要结合该特点做进一步分析。

参考文献:

[1] 徐晗,金隼,罗磊,等. 基于拓扑栅格建模的 AGV 路径

规划算法优化[J]. 计算机工程与设计,2022,43(1): 101-109.

[2] 郭兴海,计明军,刘双福. 融合多目标与能耗控制的无人仓库内 AGV 路径规划[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(5):1268-1276.

[3] 李俊兰,张中伟,吴立辉,等. 面向多运输任务的节能单负载 AGV 路径规划研究[J]. 制造技术与机床,2022(3):62-67.

[4] 杨瑶,付克昌,蒋涛,等. 启发式 RRT 算法的 AGV 路径规划[J]. 计算机工程与应用,2020,56(12):125-133.

[5] 张飞,张彬,周烽,等. 面向自动仓储的绳索牵引并联机器人构型选择与参数优化[J]. 机械工程学报,2020,56(1):1-8.

[6] 余娜娜,李铁克,王柏林,等. 自动化分拣仓库中多 AGV 调度与路径规划算法[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(1):171-180.

[7] 于军琪,李若琳,赵安军,等. 并行排序蚁群算法规划仓库 AGV 路径研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(4):609-618.

[8] 王晓军,杨春霞,陈航慧,等. 考虑倒箱操作的 AutoStore 魔方型仓储系统自动引导车双层路径规划[J]. 科学技术与工程,2021,21(36):15546-15554.

[9] 姜兴宇,王明皓,刘伟军,等. 药品仓库堆垛机与 AGV 集成调度优化[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(1):230-241.

[10] 陈广锋,余立潮. 多帧时间窗轮换算法规划仓储多 AGV 小车路径[J]. 计算机工程与应用,2020,56(23):270-278.

[11] 王晓军,王博,杨春霞,等. 紧致密集 Auto Store 系统 AGV 路径规划与避碰策略[J]. 计算机工程与应用,2021,57(15):259-270.

[12] 袁洋,叶峰,赖乙宗,等. 结合负载均衡与 A* 算法的多 AGV 路径规划[J]. 计算机工程与应用,2020,56(5):251-256.

[13] 冯浩然,吴瑞明,傅阳,等. 基于 ROS 与融合算法的 AGV 路径规划研究[J]. 机床与液压,2022,50(9): 55-60.

[14] 廉胤东,谢巍. 基于视觉引导多 AGV 系统的改进 A* 路径规划算法[J]. 控制与决策,2021,36(8): 1881-1890.

收稿日期:2022-10-24

(上接第 165 页)

参考文献:

[1] 曹晓畅,齐国良,王文昌. 浇注搅拌机内部流体均混时间模拟研究[J]. 科技与创新,2020(3):16-17,21.

[2] 李进,石秀东,汪晨,等. 苏氨酸发酵罐内不同搅拌桨组合下流场模拟[J]. 轻工机械,2019,37(6):32-38.

[3] 王健生,钟易成. VOF 在两相流交界面捕捉的应用[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):129-134.

[4] HG/T 3796.4—2005 开启涡轮式搅拌机[S].

[5] HG/T 3796.5—2005 圆盘涡轮式搅拌机[S].

[6] 崔亮. 基于 ANSYS FLUENT Meshing 的复杂模型网格划分[J]. CAD/CAM 与制造业信息化,2014(4):56-58.

[7] 闫文标. 基于 FLUENT 三种多相流模型的选择及应用说明[J]. 云南化工,2020,47(4):43-44.

[8] 张仪,李兵,白玉龙,等. 液固流态化动态过程中相间作用力的数值模拟及实验验证[J]. 化工学报,2020,71(11):5129-5139.

收稿日期:2022-11-07