

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.02.024

基于 CFD 流场分析的反应釜搅拌器结构改进

方德明¹, 陈涛², 杨象岳², 李顺荣², 李伟忠², 刘延雷², 余兵²

(1. 建德市质量技术监督局, 浙江 建德 311699; 2. 杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310003)

摘要:承压反应釜在固液混合过程中往往伴随强烈的热传递效应,而密度较低的粉末状固相介质与液体混合的难度相对较大,投料溶入效果不佳和物料结团漂浮等问题较常见。针对此类反应釜的搅拌不充分等问题,采用 CFD 技术指导反应釜内搅拌器结构进行设计和改进,对反应釜内的固液搅拌混合过程进行了三维数值模拟。数值计算采用多重参考系法(MRF), κ - ε 湍流模式以及 Mixture 多相流模型,模拟了反应釜中的流场形态,通过混合过程的两相流计算得到固相体积分数的分布情况和变化规律,并在此基础上预测了混合时间。结果表明:改进后的搅拌器效果明显增强,该混合过程的 CFD 模拟可得到相对准确的流场分布及各项特性参数预测结果,可为该类反应釜搅拌器的设计和优化提供参考。

关键词:反应釜;搅拌器;固液混合;两相流;数值模拟

中图分类号:TQ027.3;TQ051.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)02-0095-05

Improvement of Reaction Kettle Agitator Based on CFD Analysis

FANG Deming¹, CHEN Tao², YANG Xiangyue², LI Shunrong²,
LI Weizhong², LIU Yanlei², YU Bing²

(1. Quality and Technology Supervision Bureau, Jiande, Zhejiang 311699, China;

2. Hangzhou Special Equipment Inspection Institute, Hangzhou 310003, China)

Abstract: The process of solid-liquid mixing in reaction kettle is often accompanied by strong heat transfer effect. Low density powder and liquid mixing process is hard to control and often with poor mixing effect. For the problems such as insufficient mixing reaction kettle, structural design, improvement of the reaction kettle agitator by using CFD technology was carried out. In the CFD simulation, multiple reference frame (MRF), standard κ - ε turbulence model and the Mixture multiphase flow model were adopted. Through the simulation, the solid particle volume fraction distribution and mixing time of unsteady two-phase mixing process was predicted. The results show that the CFD simulation of the mixing process can obtain more accurate solid-liquid flow field distribution and the characteristic parameters. The calculation results can provide references for the design of this kind of reaction kettle agitator.

Key words: reaction kettle; agitator; solid-liquid mixing; two phase flow; numerical simulation

承压反应釜是化工、制药等行业中常见的典型特种设备,其中部分反应釜涉及固液混合操作,混合过程中往往伴随强烈的热传递效应,若搅拌器搅拌不充分造成混合效果不佳,极易导致釜内局部温度、压力剧烈变化,最终引起设备失效等事故。固液混合的操作中,密度较低的粉末状固相介质与液体混合的难度相对较大,投料溶入效果不佳和物料结团漂浮等问题较常见。

低密度颗粒搅拌过程对混合效果和时间提出了更高的要求,因此,如何设计合理的搅拌结构从而获得所需要的悬浮效果成为研究的重点。目前采用的半经验

设计方法存在设计过程复杂、周期长、结构难以最优化等缺陷。基于计算流体力学(CFD)的流场模拟技术作为有效的流场研究手段,在性能预测、内流仿真和流动诊断等方面的应用对搅拌设备的放大设计具有指导意义。国内外学者针对搅拌设备内流场的试验研究和数值模拟开展了广泛的研究工作^[1-8],对颗粒密度小于液相的上浮颗粒与液体搅拌混合过程的研究较少^[9-10]。

文中对固液搅拌效果不佳的反应釜内流场进行了 CFD 数值模拟,基于分析结果对搅拌器的结构进行了改进设计,并对改进后反应釜内的固液混合过程进行

收稿日期:2013-10-11;修回日期:2013-12-20

作者简介:方德明(1965),男,浙江建德人,工学学士,工程师,主要从事特种设备管理及安全监察。E-mail:chentao_zju@163.com

了数值仿真和预测。

1 计算模型和方法

1.1 物理模型

图 1 为某型反应釜及其搅拌器结构示意图,该搅拌器采用 4 层 PBT 桨,各层搅拌桨参数如表 1 所示。搅拌器的额定转速为 93 r/min,容器内径为 2 400 mm,操作容积 8 m³,介质中液相为清水,固相为粒径在 20 ~ 50 μm 之间、堆积密度为 0.168 × 10³ kg/m³ 的珍珠岩颗粒,单次进料后釜内固相体积分数为 2%。

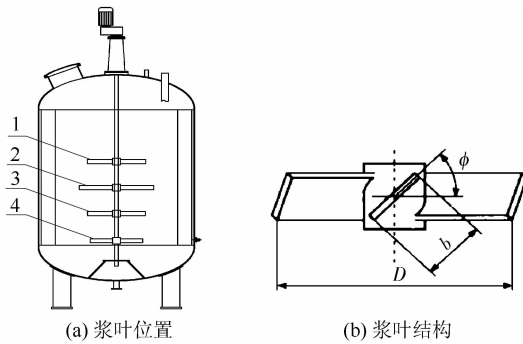


图 1 反应釜及搅拌器桨叶结构示意图

Figure 1 Structure of the reaction kettle and agitator blade

表 1 桨叶结构参数

Table 1 Structure parameter of agitator blade

编号	D/mm	b/mm	φ/(°)	叶片数
1	720	70	45	4
2	920	70	45	4
3	680	70	45	4
4	600	70	45	4

该设备运行中发现加料后出现大量固体粉末漂浮于液面上,长时间未被搅拌均匀的粉末吸水后产生结块现象,数次操作后大量珍珠岩粘附于容器内壁、挡板背面等处形成顽固垢块,严重时改变釜内流场形态,进而影响设备运行安全和介质混合质量。

初步分析发现该搅拌器存在搅拌功率偏低、釜内轴向循环效果差、液面附近循环死角多等问题。因此,该搅拌器改进的原则是在合理增大搅拌功率的同时,提高整个流域的轴向循环效果,尤其要改善液面附近流体的轴向流动状态,通过挡板结构的优化避免循环死角导致的物料集中现象。改进设计后的搅拌器采用三层双折叶桨,其结构和参数如图 2 和表 2 所示。

改进结构搅拌效果分析和改进依据的获得主要基于流场的 CFD 数值模拟,在搅拌效果的分析 and 检验过程中,主要通过纵向截面的速度矢量分布,反应釜上层流体的速度分布等检验搅拌罐内的循环效果。

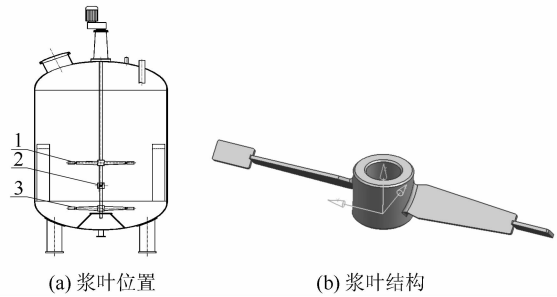


图 2 改进后反应釜及搅拌器桨叶结构示意图

Figure 2 Structure of the reaction kettle and improved agitator blade

表 2 改进后桨叶结构参数

Table 2 Structure parameter of improved agitator blade

编号	D/mm	b/mm	φ/(°)	叶片数
1	1 200	70 ~ 110	45/135	2
2	1 200	70 ~ 110	45/135	2
3	1 200	70 ~ 110	45/135	2

1.2 数值计算模型

对反应釜内流场进行整体三维建模,采用非结构化网格对流域进行离散化处理,为提高计算精度,对桨叶、交界面以及近壁区域采取网格加密处理。同时对计算模型进行了网格无关性检验,以搅拌桨扭矩作为检验指标。通过验证发现,当网格数大于 90 万时,搅拌器扭矩变化小于 5%。为提高计算效率,选择计算网格量为 3 430 245,整体流域的网格划分情况如图 3 所示。

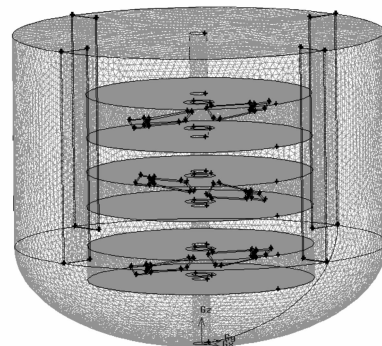


图 3 计算流域网格(改进模型)

Figure 3 Mesh of the flow region(improved model)

1.3 计算方法和边界条件

文中采用有限体积法来离散方程,压力-速度耦合使用 SIMPLE 算法得到,差分格式采用二阶迎风,流动场的计算使用多重参考系法(MRF),将计算域分为两种区域,其中三个内部区域包括旋转的桨叶,外部区域包括静止的挡板,桨叶附近区域在旋转参考系下计算,其他区域使用静止参考系。选用标准 k-ε 湍流模式来

模拟湍流,采用 mixture 两相流模型处理固液混合过程。为保证计算的收敛性,固液两相流非定常数值模拟的时间步长取 0.05 s。

反应釜内流场的计算和分析基于 CFD 分析软件 Fluent,进行单相流动的定常数值模拟,计算流域网格划分采用软件 Gambit,流场的后处理借助软件 Tecplot。

2 数值模拟结果与分析

2.1 反应釜单相流场分析

2.1.1 反应釜原结构单相流场分析

对操作容积(8 m³)下的反应釜原结构内部流场进行 CFD 数值计算,并经过后处理过程,得到原搅拌结构下反应釜纵向剖面的速度矢量分布图如图 4 所示。为便于分析轴向循环效果,将釜内液面以下 50, 100, 200, 250 以及 300 mm 横截面上的轴向速度分布给出,如图 5 所示。

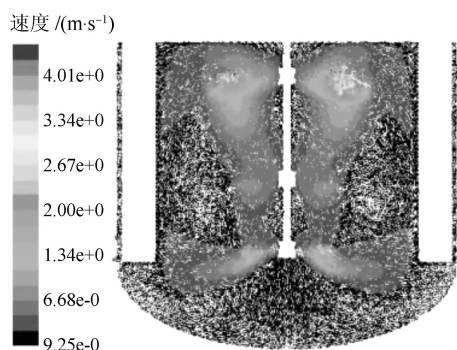


图 4 反应釜纵向剖面速度矢量分布图
Figure 4 Velocity vector distribution on axis cross-section

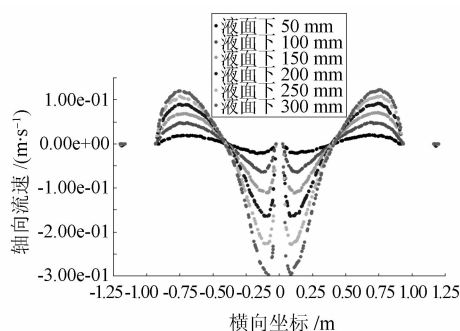


图 5 反应釜液面附近轴向速度分布
Figure 5 Axial velocity distribution near the liquid level

由反应釜原结构内流场的纵向截面的速度矢量图可以看出,反应釜内未形成充分的轴向循环,液面附近流域内无明显轴向流动趋势,搅拌流场内整体流动速

度较低,并且存在较多循环滞缓区域(低速区)。数值计算得到的搅拌功率为 1.04 kW(考虑 90% 的机械效率),与现场实测数据 1.10 kW 接近。换算得到单位体积功率为 0.13 kW,搅拌功率明显偏低。

2.1.2 反应釜改进结构单相流场分析

对操作容积(8 m³)下的反应釜改进结构内部流场进行 CFD 数值计算,得到反应釜搅拌器改进结构纵向剖面的速度矢量分布图如图 6 所示,釜内液面以下 50, 100, 200, 250 以及 300 mm 横截面上的轴向速度分布如图 7 所示。

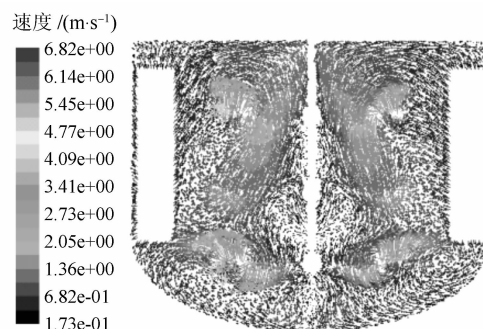


图 6 反应釜纵向截面速度矢量图
Figure 6 Velocity vector distribution on axis cross-section

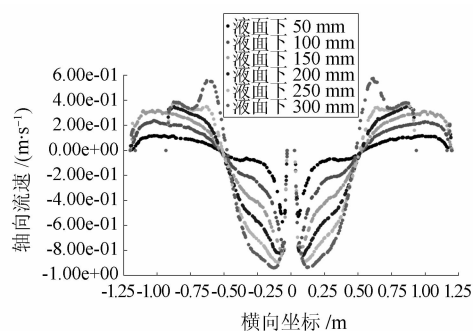


图 7 反应釜液面附近轴向速度分布
Figure 7 Axial velocity distribution near the liquid level

由图 6 可以看出,经过改进后的反应釜搅拌器采用强制轴向循环的双折叶式搅拌桨,从液面附近漩涡等流动状态可以发现罐内流体的轴向运动得到了增强,改进后的釜内流场能够形成较为充分的轴向循环。由图 7 可见,改进后的搅拌流场液面附近流动速度为 1.0 ~ 1.3 m/s,相比原结构流动速度 0.2 ~ 0.3 m/s 大幅提升。同时整体搅拌功率增加到 7.6 kW 左右(考虑 90% 的机械效率),单位体积功率为 0.95 kW/m³,是原结构的 7.5 倍,该强度达到中等搅拌和剧烈搅拌

的临界状态^[11],较适合轻质固体粉末与液体的搅拌混合操作。

2.2 固液混合时间预测

为分析反应釜改进结构固液搅拌过程中的固相分布规律,并进一步检验改进效果,进行了釜内固液两相混合过程的非定常数值模拟,得到了不同时刻的固相浓度分布,并且对单次加料操作的混合时间进行预测。

数值计算的初始状态考虑固体粉末均匀漂浮在液面上的情况,即反应釜内装有 8 m³ 的清水,体积分数

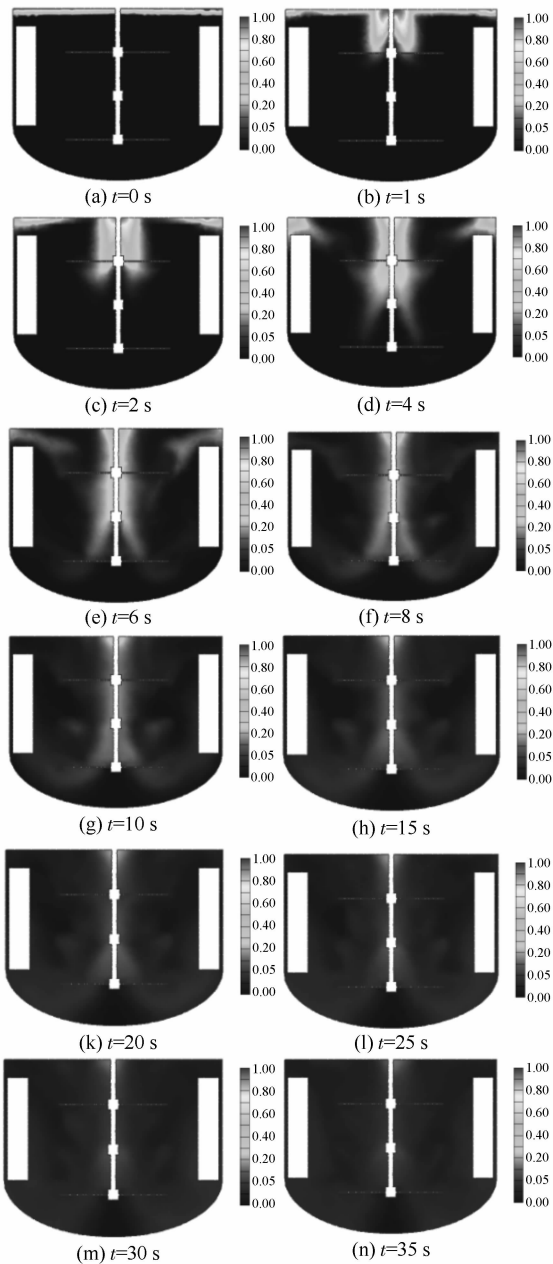


图 8 混合过程釜内固相体积分数分布图
Figure 8 Solid-phase volume fraction distribution under different mixing time

为 2% 的珍珠岩颗粒全部漂浮在液面上。搅拌器初始转速 93 r/min,忽略启动过程。图 8 为搅拌时间 $t = 0 \sim 35$ s 之间的釜内轴截面固相体积分数分布图。

为进一步得到混合过程的详细信息,在反应釜改进模型中如图 9(a) 所示的三个位置设置了监测点,监测搅拌过程中该处固相体积分数值,得到 3 个监测点的固相体积分数变化曲线如图 9(b) 所示。

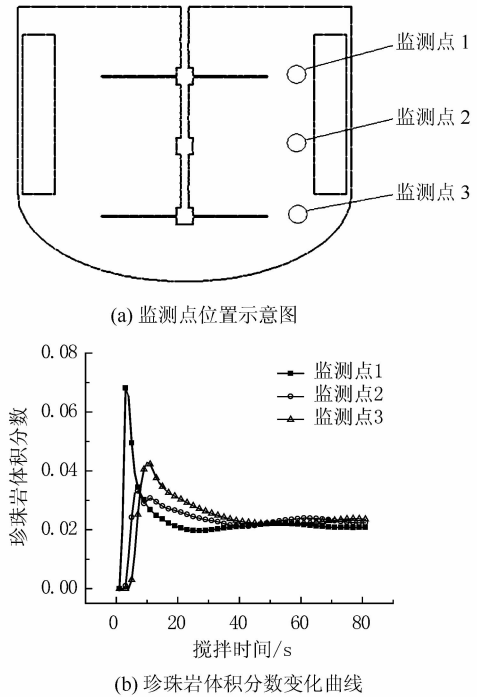


图 9 混合过程固相体积分数变化监测结果
Figure 9 Solid concentration curve at monitoring point set in the kettle during mixing process

由图 8 至 9 可见,随着搅拌时间的增加,漂浮于液面上的固体颗粒由轴心附近被搅下,而后向釜内四周分散,在搅拌时间为 20 s 时,各监测点的固相体积分数与最终值相差 20% 以内,达到物料达到中等混合程度,在搅拌时间达到 30 s 时,物料已基本混合均匀。

3 结论

基于反应釜的 CFD 流场计算和诊断,在合理增加搅拌功率的基础上,以大幅提高轴向循环效果、尤其改善液面物料漂浮现象为目的,对某反应釜搅拌器结构进行了改进设计。通过分析可以得到以下结论:

反应釜搅拌器原结构的搅拌功率偏低,且桨叶结构对于增加液面附近轴向循环效果不明显,导致轴向和径向循环不足,尤其在反应釜液面区域轴向循环效果较差,是导致物料结块漂浮的主因。