

Numerical Investigation on Hydrodynamic and Mixing Characteristics of non-Newtonian Fluid in Spiral-Stirred Tanks with Various Geometries

Xiaoyue Xiong Fengguo Tian

Donghua University, Shanghai, 201620, China

Abstract

This study systematically investigates the fluid dynamic characteristics of non-Newtonian fluids within different screw ribbon agitated tanks through CFD simulations. Additionally, the dynamic mixing characteristics of the materials within the tank are quantified using a tracer method. The structures examined primarily include flat-bottom, elliptical-bottom, and screw-hybrid screw ribbon agitated tanks. The study thoroughly analyzes the velocity vector field, the tracer concentration evolution, and the dynamic mixing time-dependent processes at various locations within the tank under different conditions. The results indicate that the screw-hybrid screw ribbon agitation structure reduces the mixing time from 70 seconds, observed under the elliptical-bottom screw ribbon structure, to 48 seconds, and lowers the energy consumption from 396 W under the flat-bottom screw ribbon structure to 346 W, demonstrating excellent overall performance.

Keywords

Spiral stirrer; hydrodynamics; mixing characteristics; geometry; CFD

不同结构螺带式搅拌釜内非牛顿流体混合特性数值分析

熊晓月 田凤国

东华大学, 中国 · 上海 201620

摘要

本文通过CFD模拟, 系统探究了不同螺带式搅拌釜内非牛顿流体的流体动力学特性, 并结合示踪剂法量化评价了釜内物料的动态混合特征。所考察结构主要包括即平面封底、椭圆封底以及螺杆复合式螺带式搅拌釜。研究详细辨析了不同条件下釜内的速度矢量场、示踪剂浓度演变过程, 以及不同位置的动态混合时变过程。结果表明, 螺杆复合式螺带式搅拌结构将混合时间由椭圆封底螺带式结构下的70s混合时间缩短至48s、将能量消耗由平底螺带式结构下的396W降至346W, 表现出良好的综合性能。

关键词

螺带式搅拌釜; 流体动力学; 混合特性; 几何结构; CFD。

1 引言

与螺旋桨相比, 螺带式搅拌釜在粘度适用范围、物料均匀性和搅拌效率等方面具有较为明显的优势。特别适合粘度较高的物料或需要长时间混合的场合, 广泛应用于高分子材料、食品、医药、水泥、纸浆等行业。

针对螺带式搅拌釜, 其混合效率与能量消耗受到桨叶外形、釜体结构、物料属性、搅拌转速等诸多因素的综合影响。针对不同的生产工艺要求, 需对搅拌釜结构进行调整与优化, 以实现混合性能与功率消耗之间的平衡。Skočilas^[1]、Rahimi^[2]等人曾采用超声多普勒速度测量、可视化示踪剂

观测等实验方法考察了螺带式搅拌釜内的流体动力学分布特征与混合特性。然而, 工业过程中, 搅拌釜装置结构复杂、釜内物料属性复杂。这大大增加了实验研究的难度。随着理论模型的完善与计算能力的快速提升, 计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 通过数值仿真的方法, 可以提供丰富的速度场、压力场、浓度场等量化信息, 能够高效进行设计方案筛选、性能参数评价, 日益成为搅拌过程分析与优化设计的有力工具。唐吉^[3]等人曾通过 CFD 对螺杆-螺带式搅拌釜内牛顿流体的混合模式展开了研究, 预报结果与实验测量基本一致。Carreau^[4]、Mihailova^[5]等人则考察了搅拌功率与螺带结构、介质属性的依变关系, 并尝试着对螺带叶片结构进行了优化设计。研究发现, 合理的叶片宽度与螺距配置有助于实现物料的高度均匀混合。

工业发展对螺带式搅拌釜精细化设计提出了更高的要

【作者简介】熊晓月 (2000-), 女, 中国江西南昌人, 硕士, 从事螺带式搅拌器的流动特性研究。

求, 有关釜内混合特性的科学认知仍有待深入。为此, 本文将采用计算流体力学的方法, 对比考察平底、椭圆封底、螺杆复合等三种螺带式搅拌釜内的流体动力学特征, 进而引入示踪剂法量化分析不同搅拌结构下的物料混合特性, 为相关工艺设计与设备优化提供有益的理论参考与工程借鉴。

2 模拟方法描述

2.1 模型设置

计算流体力学的实现基于对经典 N-S 方程的求解。本

文采用 FLUENT 19.0 求解器进行模拟。具体而言, 本文将重点对比考察平底、椭圆封底、螺杆复合等三种螺带式搅拌釜内的流动混合特征。首先采用 Space claim 建立了三种螺带式搅拌釜的几何模型, 如图 1 所示。其中, 搅拌轴直径为 80 mm, 搅拌轴长度为 650 mm; 螺带本体参数见表 1, 其叶片与壁面之间的间距为 40 mm, 螺带底端与罐底之间的距离为 50 mm; 螺杆叶片的宽度为 60 mm, 间距为 360 mm, 长 642 mm。

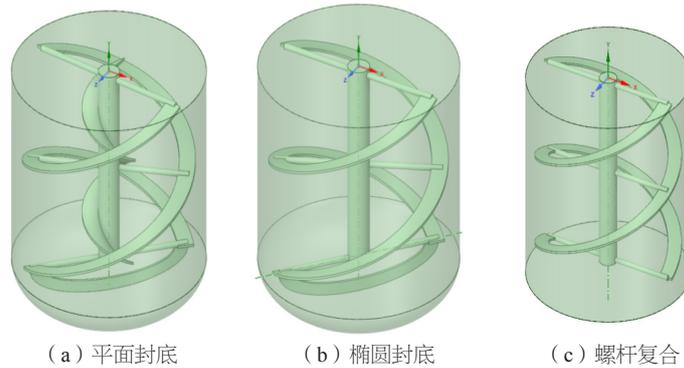


图 1 三种螺带式搅拌釜结构示意图

表 1 螺带式叶片参数

结构参数	高度	厚度	宽度	螺带间距
数值 (mm)	720	8	60	720

为实施计算, 需要对所模拟流域进行离散。为此, 采用 Fluent meshing 对所建立几何模型进行网格划分。通过旋转坐标系描述螺带在釜内的转动过程。为提高模拟准确度, 在搅拌釜内壁表面添加边界层, 网格尺寸增长率为 1.12。对旋转轴、螺带等小尺寸部件进行局部网格加密。所产生网格能够贴合不同部件处的曲面结构, 合理反映了釜内复杂几何结构, 如图 2。

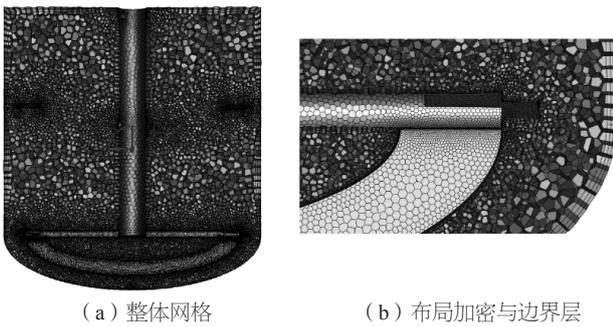


图 2 搅拌釜网格划分

就边界条件而言, 搅拌釜顶部采用 symmetric 边界, 叶轮转速设置为 60 rpm。考虑到工业生产过程, 螺带搅拌釜介质大多为非牛顿流体, 且剪切变稀为主。为此引入幂律非牛顿流体模型来描述釜内物料的流变特性, 其中 γ 为剪切速率, K 为稠度系数, n 为流变因子。结合工业实际, 所用釜内物料属性为: $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$, $K=30$, $n=0.6$ 。

2.2 网格独立性分析

网格的精细程度涉及到计算精度与效率的平衡。精细网格可以更好地捕捉釜内流体动力学细节, 但计算成本也会随之增加。为了在保证计算精度的前提下, 尽可能减少网格数目, 提高计算效率, 选取椭圆封底搅拌釜进行了网格独立性验证。如图 3 所示, 网格数量在达到 1.75×10^5 后, 监测点速度稳定在 0.1278 m/s。本文所考察三种搅拌釜几何结构较为一致, 为此三者所用网格数目在 20 万左右, 以保证可比较性。

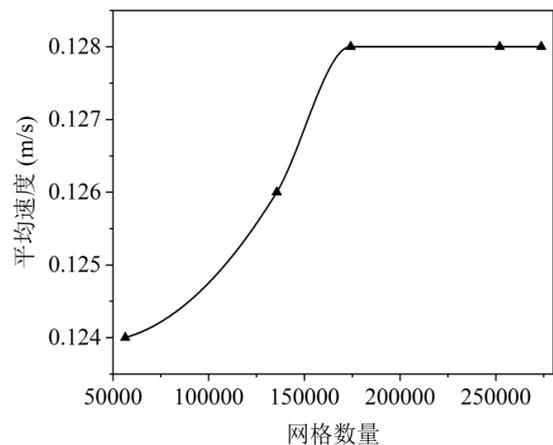


图 3 网格独立性验证

3 结果与讨论

本节将结合速度矢量场、示踪剂浓度分布特征、混合

特征时间等参数，系统对比考察平面封底式、椭圆封底式以及螺杆复合式等三种不同结构下，螺带搅拌釜内的物料流动与混合特性。

3.1 流体动力学特征分析

如图 4 所示，对于平底搅拌釜，底部没有倒角过渡，存在局部循环，该区域的物料很难与外界混合，形成一个滞止区，不利于混合。相比于平面封底式，椭圆封底螺带式搅拌釜的锚式结构使底部的流体流动更加剧烈，能够更快的推动流体回到顶部。但是由于流场对称性，在搅拌锚定点底部还是存在滞点，该处流速较低。引入螺杆转轴后，复合式搅拌釜中心区域流体下行速度明显加快，物料贯穿整个釜体高度的能力明显增强。

3.2 混合特性分析

为了进一步考察釜内物料混合特性，本文采用瞬态模拟对釜内示踪剂浓度的分布与演变过程进行了追踪与分析。示踪剂初始浓度为 1，其余部分初始时刻无示踪剂，浓度为 0。将示踪剂设置于三种搅拌釜内部的釜内中上部半径中间部分。为了量化对比不同搅拌釜的混合特性，模拟时持续监测不同位置处的示踪剂浓度的动态变化过程。为了全面反应釜内混合过程，所选监测点分别处于搅拌罐内高、中、低三个位置，且三点离中心轴距离各不相同。如图 5 综合展示了，上述示踪剂以及监测点位置。对于监测点而言，从上至下依

次为 a、b、c 点。鉴于底部搅拌锚处流动情况较为复杂，为此将监测点 c 置于该区域，以更具有代表性地反映该区域对混合时间的影响。

图 6 与图 7 分别给出了 5 s 与 25 s 时刻下的三种螺带搅拌釜内的示踪剂浓度分布情况。不难发现，示踪剂分布云图可以更为直观地展示釜内的流动特征。示踪剂浓度场规则性较差，表明釜内流动较为复杂。整体而言，由于外围螺带结构大体一致、旋转方向相同，三种搅拌釜内的示踪剂流动特点相似。即早期阶段，示踪剂由右上部初始位置流向中心区域，受外侧上升流挤压，沿中心轴向下流动。值得注意的是，复合搅拌条件下，中心螺杆螺旋方向与螺带相反，强化了物料向下流动的能力，流体具有较强的整体循环能力，示踪剂很快抵达釜体中下部，见图 7(c)。

图 7 表明，25 s 时，示踪剂粒子逐渐下行至釜底，继而向搅拌釜壁面散开，在螺带上提的作用下回流至釜体上部。如此往复循环，直至搅拌釜内的液体混合均匀。对于平面封底螺带式搅拌釜，釜底两层滞止区对主流具有一定的排挤作用，逼迫流体快速回流。以至于上行至上部区域后，再次中心下降流卷吸，见图 7(a)。椭圆封底内的物料下行能力稍弱，且示踪剂难以达到釜底，见图 7(b)。复合搅拌釜则克服了这一缺陷，中心螺杆能够快速地将物料输送至釜底，见图 7(c)。

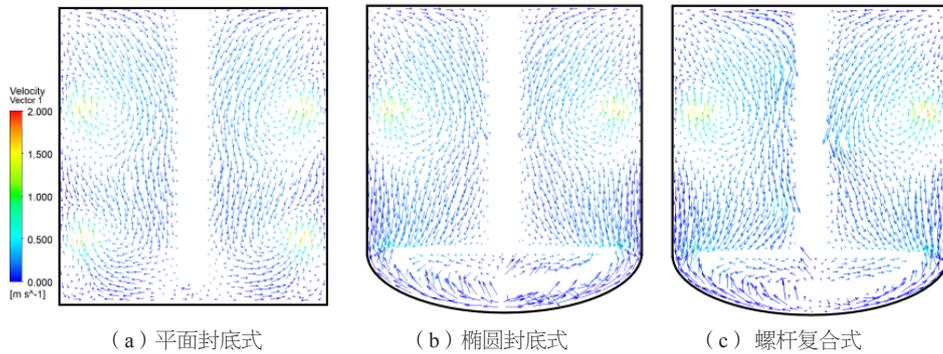


图 4 搅拌釜纵剖面速度矢量场

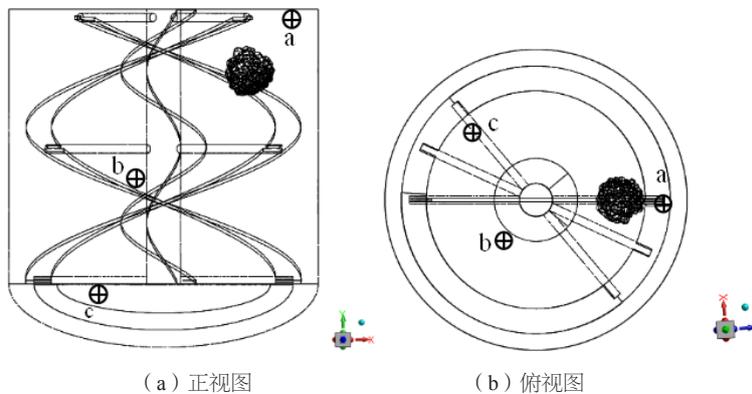


图 5 示踪剂初始位置和监测点布局示意图

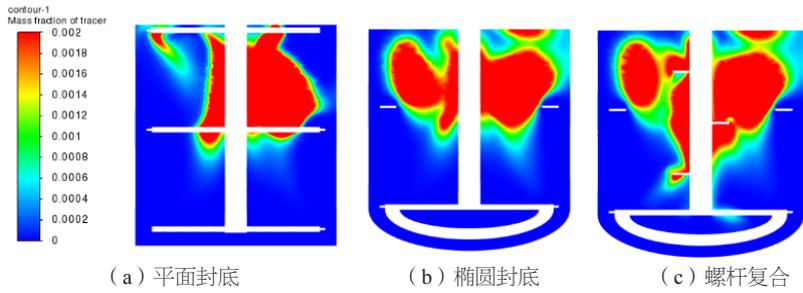


图 6 5 s 时三种螺带式搅拌釜罐内纵截面浓度场云图

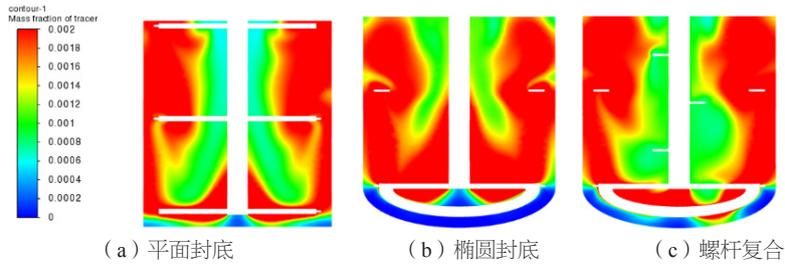


图 7 25 s 时三种螺带式搅拌釜罐内纵截面浓度场云图

图 8 跟踪了不同监测点处的示踪剂时变曲线，量化评价釜内物料的动态混合过程。图中曲线表明，随着时间的推进，各点经历一定波动后逐渐趋于一致，直至最终完全混合。就各监测点而言，a 点处于釜内上部，靠近釜壁；b 点处于釜内中部，靠近搅拌轴；c 点处于釜底，在底部搅拌锚区域。如图 8(d) 所示，平底釜内上部监测点 a 最先达到平均浓度，用时约为 35 s，随后基本不变。混合初期，椭圆封底式与螺杆复合式在搅拌釜内 a 点的示踪剂粒子浓度变化相似。然而，螺杆复合搅拌条件下的 a 点在 40 s 左右先行达到平均浓度，椭圆封底搅拌釜内该点拖尾至 70 s 放接近平均浓度。平面封底釜内的外围上升回流略强于椭圆封底搅拌釜。

在图 8(b) 中，三种结构搅拌釜内中部监测点 b 处浓度变化曲线较为一致，基本都在 40 s 左右基本稳定在平均浓度。这表明釜内中部区域较易混合。图 8(c) 表明，不同搅拌结构在底部区域的混合特性差异最为明显。c 点浓度曲线峰值表明，对于平面封底、椭圆封底、复合搅拌结构条件下，示踪剂抵达底部的时间分别为 21 s、28 s、23 s，这与 3.1 节流

动特征分析一致。及平底结构下循环流动最为强烈，椭圆封底最差，螺杆复合结构居中。就底部混合时间而言，复合搅拌结构下 c 点示踪剂浓度仅用 48 s 即达到平衡浓度，而平底结构则需要 60 s。对于简单的椭圆封底结构，c 点浓度 70 s 才趋于平均浓度。依照监测点达到平均浓度所需最长时间，螺杆复合结构条件下的混合时间最短 (48 s)，椭圆封底混合时间最长 (70 s)，平面封底混合时间介于二者之间 (60 s)。

3.3 功耗分析

实际过程中，搅拌釜性能涉及到混合特性与能量消耗的综合评价。搅拌功率可有公式 $P = \pi M N / 30$ 求得，其中 N 为转速，60 rpm；M 为扭矩，N·m。由 CFD 模拟结果可得三种搅拌釜的扭矩分别为 68.9 N·m、54.4 N·m、55.3 N·m。经公式计算得到平面封底、椭圆封底、复合搅拌结构下的搅拌功率分别为 396 W、341 W、346 W。即，平面封底螺带式搅拌釜功耗最大，椭圆封底与螺杆复合搅拌几乎不变。综合考虑物料混合时间与功率消耗，螺杆复合式搅拌结构具有较好的整体性能。

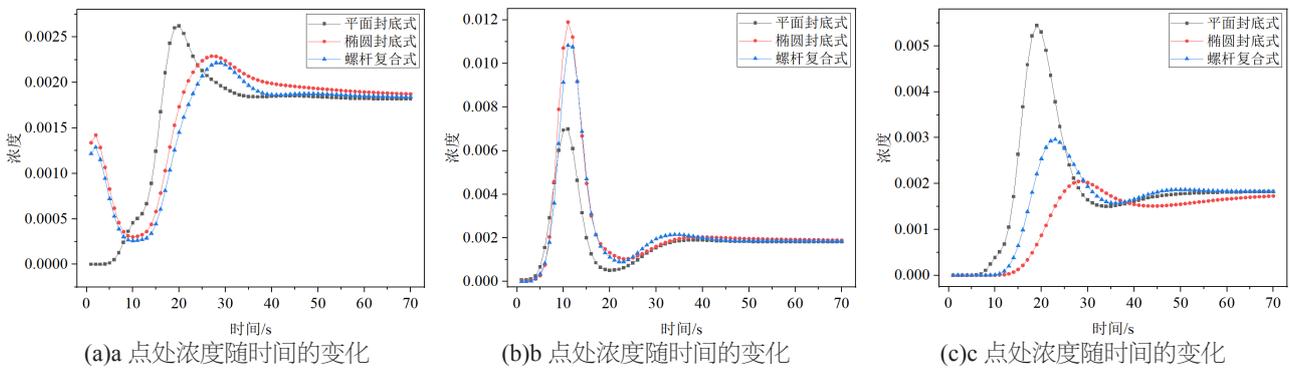


图 8 三种螺带式搅拌釜内监测点的浓度变化曲线

4 结论

本文采用数值模拟的方法,对比考察了三种不同结构螺带式搅拌釜内非牛顿流体的流动特征,并量化评价了不同结构下的动态混合与混合特性。主要结论如下:

1) 对于平底螺带搅拌釜,内部流动复杂、轴向流动较为明显;底部边缘存在局部循环死角。混合时间 60s,能耗最高,为 396W。

2) 对于椭圆封底螺带搅拌釜,整体循环流动稍弱,釜底存在滞止区域。混合时间最长,为 70s;能耗为 341W。

3) 对于复合式搅拌釜,中心螺杆强化了釜内的整体流动,表现出较好的混合性能。混合时间最短,为 48s;能耗为 346W。

4) 螺杆复合搅拌设计为最优设计,及降低了平底搅拌釜条件下的高能耗,有大大缩短了单纯椭圆封底螺带设计下的混合时间。

参考文献

- [1] Skočilas, J., Ayas, M., Skočilasova, B., & Jirout, T., 2019. Effect of rotation direction of helical-ribbon agitator on circulation of high viscous batch. PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOSCIENCE, BIOTECHNOLOGY, AND BIOMETRICS 2019.
- [2] Rahimi, M., Kakekhani, A., & Alsairafi, A.A., 2010. Experimental and computational fluid dynamic (CFD) studies on mixing characteristics of a modified helical ribbon impeller. Korean Journal of Chemical Engineering, 27, 1150-1158.
- [3] Tanguy, P.A., Lacroix, R., Bertrand, F., Choplin, L., & Fuente, E.B., 1992. Finite element analysis of viscous mixing with a helical ribbon-screw impeller. Aiche Journal, 38, 939-944.
- [4] Carreau, P.J., Chhabra, R., & Cheng, J.J., 1993. Effect of rheological properties on power consumption with helical ribbon agitators. AiChe Journal, 39, 1421-1430.
- [5] Mihailova, O., Mothersdale, T., Rodgers, T.L., Ren, Z., Watson, S., Lister, V.Y., & Kowalski, A., 2018. Optimisation of mixing performance of helical ribbon mixers for high throughput applications using computational fluid dynamics. Chemical Engineering Research & Design, 132, 942-953.
- [6] Ihejirika, I., & Ein - Mozaffari, F., 2007. Using CFD and Ultrasonic velocimetry to Study the Mixing of Pseudoplastic Fluids with a Helical Ribbon Impeller. Chemical Engineering & Technology, 30, 606-614.
- [7] Ameer, H., Bouzit, M., & Ghenaim, A., 2013. Hydrodynamics in a vessel stirred by simple and double helical ribbon impellers. Central European Journal of Engineering, 3, 87-98.
- [8] Delaplace, G., Guerin, R., Leuliet, J.C., & Chhabra, R., 2006. An analytical model for the prediction of power consumption for shear-thinning fluids with helical ribbon and helical screw ribbon impellers. Chemical Engineering Science, 61, 3250-3259.
- [9] Wang, S., Tan, M., Wu, H., Li, Y., Xie, G., & Zhang, L., 2022. A Digital Rock Physics-Based Multiscale Multicomponent Model Construction of Hot-Dry Rocks and Microscopic Analysis of Acoustic Properties under High-Temperature Conditions. SPE Journal.
- [10] Robinson, M., & Cleary, P.W., 2012. Flow and mixing performance in helical ribbon mixers. Chemical Engineering Science, 84, 382-398.
- [11] Fuente, E.B., Choplin, L., & Tanguy, P.A., 1997. Mixing With Helical Ribbon Impellers. Chemical Engineering Research & Design, 75, 45-52.
- [12] Halidan, M., Chandratilleke, G.R., Dong, K., & Yu, A., 2018. Mixing performance of ribbon mixers: Effects of operational parameters. Powder Technology, 325, 92-106.
- [13] Ali, S., & Baccar, M., 2017. Numerical study of hydrodynamic and thermal behaviors in a scraped surface heat exchanger with helical ribbons. Applied Thermal Engineering, 111, 1069-1082.
- [14] Márquez-Baños, V.E., Concha-Gómez, A.D., Valencia-López, J.J., López-Yáñez, A., & Ramírez-Muñoz, J., 2019. Shear rate and direct numerical calculation of the Metzner-Otto constant for a pitched blade turbine. Journal of Food Engineering.
- [15] Auger, F., Delaplace, G., Bouvier, L., Redl, A., André, C., & Morel, M.H., 2013. Hydrodynamics of a planetary mixer used for dough process: Influence of impeller speeds ratio on the power dissipated for Newtonian fluids. Journal of Food Engineering, 118, 350-357.