

立式捏合机物料流场的黏性修正计算仿真方法研究

李冰栩¹, 李斌², 张冰^{1*}

(1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029;

2. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441000)

摘要: 针对传统 CFD 软件在立式捏合机流场仿真中存在建模复杂、计算效率低的问题, 提出了一种基于动态网格技术的专用仿真方法, 并自主开发了配套的仿真软件系统。该系统采用 C++/Qt 架构, 基于 OpenGL 构建六面体网格。创新性地采用逐行扫描法实时提取流体域, 采用幂律模型修正物料的有效粘度, 通过预测速度-压力修正的迭代算法, 求解流场。通过 30 L 立式捏合机实例验证表明, 该软件可准确模拟桨叶自转、公转耦合运动下的物料流场特性, 仿真结果与实际情况吻合较好, 能够为立式捏合机制造企业提供有效的分析工具支持。

关键词: 立式捏合机; 流场; 黏性修正

中图分类号: TQ330.64

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)11-0013-06

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.11.003

0 引言

立式捏合机是推进剂加工的关键设备^[1], 随着其混合容积不断提高, 且在高黏度、高剪切条件下运行的特点, 搅拌桨叶与物料之间存在强烈的耦合作用^[2], 使得在搅拌过程中容易发生安全事故^[3]。通过对立式捏合机搅拌流场进行仿真, 深入了解物料的运动规律, 对提高立式捏合机混合过程的安全性具有重要意义。

计算流体力学 (CFD) 在 20 世纪 80 年代取得了显著进展^[4], 目前主流的通用 CFD 仿真软件有美国 ANSYS 公司的 Fluent、CFX 以及瑞典 COMSOL 公司的 COMSOL Multiphysics^[5], 这些软件均由英美国国家开发。对于立式捏合机两桨叶既自转又公转的行星运动, 这些通用软件的仿真过程操作繁琐, 流程复杂。在国内方面, 一些研究机构和公司也开发出了通用 CFD 仿真软件, 可实现对立式捏合机的流场仿真, 如中国科学院力学研究所开发的 OpenCFD^[6], 深圳十洋科技有限公司开发的 TF-QFLUX^[7], 但同样存在仿真操作流程复杂的问题。因此, 需要开发一种操作简捷、界面直观、计算效率更为高效的立式捏合工艺仿真软件以满足相关制造企业的分析需要。

本文采用 C++ 作为编程语言, Qt 作为用户界面开发工具, OpenGL 作为图形渲染工具, 开发了一种立

式捏合机工艺仿真软件, 该软件具有立式捏合机的速度场、压力场的数值模拟计算功能。

1 几何模型构建

1.1 桨叶模型构建与网格划分

本文立式捏合机的桨叶为实心桨和空心桨两种结构。采用 OpenGL 构建桨叶的三维模型。具体实现为: 将多个六面体网格逐层堆叠, 同时完成桨叶几何模型构建和网格划分。30 L 立式捏合机桨叶构建和网格参数如表 1 所示。

表 1 30L 立式捏合机桨叶构建和网格参数

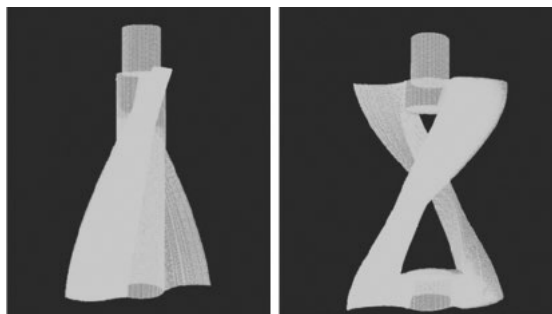
参数名称	实心桨参数值	空心桨参数值
桨叶直径/mm	168	168
桨叶基圆直径/mm	54	54
桨叶高度/mm	240	240
桨叶螺旋角/°	84.5	163.6
搅拌轴高度/mm	50	50
桨叶网格生成精度/mm	1	1
桨叶网格数量	403 200	300 600

实心桨和空心桨网格模型如图 1 所示。

1.2 流体域模型构建与网格划分

立式捏合机的流体域仿真模型采用逐行扫描法进行构建, 以实现桨叶网格与流场网格之间的布尔差集

作者简介: 李冰栩 (2001-), 男, 硕士研究生在读, 主要从事精密挤出成型工艺与设备方面的研究。



(a) 实心桨网格模型 (b) 空心桨网格模型

图1 立式捏合机桨叶网格模型

运算。该方法的基本原理是：从待判断的流场网格中心点向水平方向发出一条射线，统计该射线与搅拌桨边界的交点数量。若交点数为奇数，说明该网格位于搅拌桨内部，需从流体域中剔除；若交点数为偶数，则表明网格位于搅拌桨外部，应作为流体域的一部分予以保留。逐行扫描法提取流体域的具体算法流程如图2所示。

由于桨叶在搅拌过程中处于持续运动状态，流体

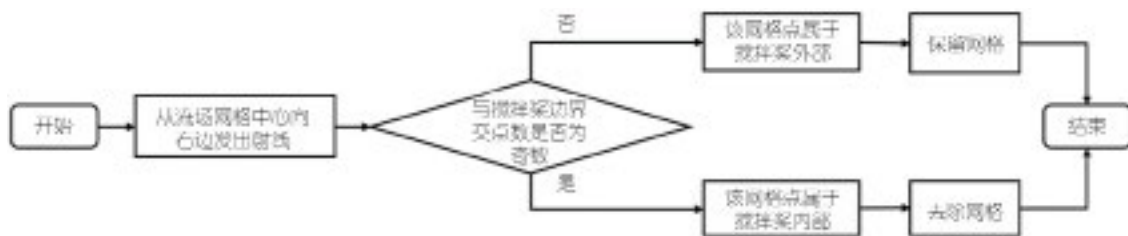


图2 逐行扫描法提取流体域流程

域需随之实时更新。因此，在每一个时间步长内，均需重新执行桨叶与流场网格之间的布尔差集运算，以

动态生成当前时刻的流体计算域。流体域动态提取过程的示意图如图3所示。

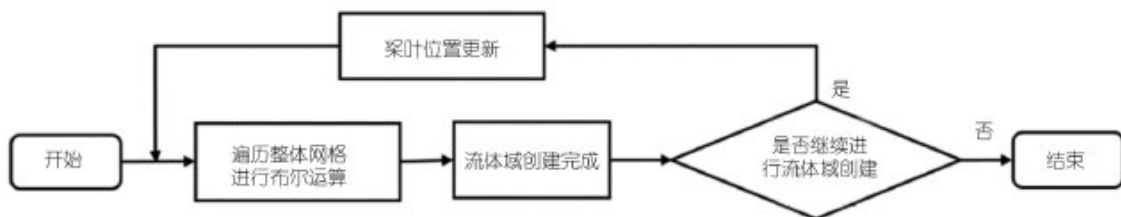


图3 流体域动态提取流程

流体域仿真模型由两种网格生成，分别是正六面体网格和边界处的五面体网格，网格生成精度为1 mm。30 L 立式捏合机流体域构建参数和网格参数如表2所示。

表2 30 L 立式捏合机流体域构建参数

参数名称	参数值
流体域直径/mm	342
流体域高度/mm	210
流体域网格精度/mm	1
流体域网格数	4 799 760

流场三维网格模型如图4所示，流体域仿真模型如图5所示。

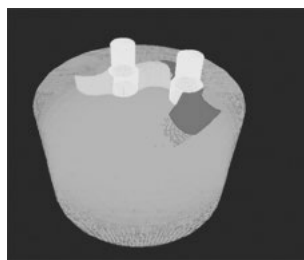


图4 流场三维网格模型



图5 流体域仿真模型

2 立式捏合机流场仿真计算

2.1 流场仿真计算控制方程

2.1.1 流场仿真计算流程

在立式捏合机的速度和压力仿真计算过程中，首

先依据设定的边界条件与仿真参数计算剪切速率，并结合所选流变模型确定局部有效黏度。随后，求解忽略压力项的N-S方程以获得预测速度。该预测速度由初始速度场及流变特性计算推导而得，但可能尚不满足流体不可压缩条件。为修正这一偏差，进一步以预测速度为基础求解泊松方程以获取压力场，并据此修正速度场，使其满足质量守恒方程。上述过程不断迭代，直至解满足收敛条件，最终得到稳定的速度场与

压力场分布。速度场和压力场的计算流程如图 6 所示。

2.1.2 流场仿真求解方程

对于 x 方向的速度分量 u ，忽略压力梯度项后的 N-S 方程为：

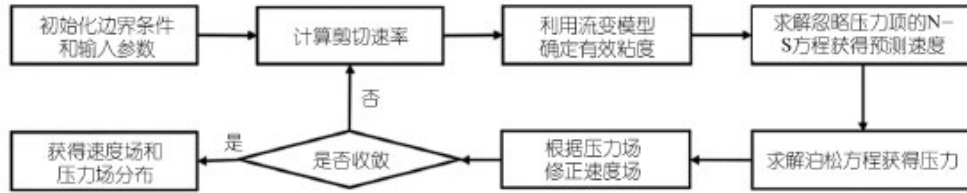


图 6 压力场和速度场计算流程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho_w \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (1)$$

式中： u, v, w 为流体在方 x, y, z 向上的速度分量； F_x 为 x 方向上的外力项； μ_{eff} 为流变模型修正的黏性项。

由于纳维-斯托克斯 (N-S) 方程假设流体为黏度恒定的牛顿流体，对于黏度随剪切速率变化的物料，该假设不再适用。因此，需要引入适当的流变模型对方程中的黏性项进行修正。流变模型的选择应结合物料的实际流变特性。在本研究中，采用幂律模型描述物料黏度随剪切速率的变化规律，从而对 N-S 方程中的有效黏度项 μ_{eff} 进行修正，其计算方式如下：

$$\mu_{eff} = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

式中： $\dot{\gamma}$ 为剪切速率 $\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2}$ ， u_i 是流体在 i 方向上的速度分量 ($i=1, 2, 3$ 对应方向 x, y, z 方向)， $\frac{\partial u}{\partial y}$ 是速度分量 u_i 对坐标 x_j 的偏导数； K 为流动一致性系数； n 为流动指数 ($n < 1$ 剪切变稀， $n > 1$ 剪切变稠)。

将忽略压力梯度项的 N-S 方程中时间导数部分采用向前差分格式，对流项部分采用迎风差分格式，黏性扩散项采用二阶中心差分格式，即

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (3)$$

将以上差分表达式代入公式 (1)，得到时间导数

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y} + w_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \quad (4)$$

$$\mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \mu_{eff} \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) + F_{x,i,j,k}^n \quad (5)$$

项的预测速度 $u_{i,j,k}^*$ ：

由于该预测速度 $u_{i,j,k}^*$ 仍然不满足不可压缩条件，

$$u_{i+1,j,k}^* = u_{i,j,k}^* + \Delta t \left[-v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x} - w_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z} \right] + \mu_{eff} \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) + F_{x,i,j,k}^n \quad (6)$$

需要通过求解压力泊松方程获得压力修正项，然后修正预测速度，泊松方程的表达式如下：

$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (7)$$

式中： ∇^2 为压力的拉普拉斯算子；

$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ ； Δt 为时间步长。

泊松方程的左项采用二阶中心差分格式离散，即：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{p_{i+1,j,k}^n - 2p_{i,j,k}^n + p_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{p_{i,j+1,k}^n - 2p_{i,j,k}^n + p_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{p_{i,j,k+1}^n - 2p_{i,j,k}^n + p_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} = S_{u,i,j,k}^n \quad (8)$$

泊松方程的右项采用中心差分格式离散，即：

$$S_{u,i,j,k}^n = \frac{\rho}{\Delta t} \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^n - v_{i,j,k}^n}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1}^n - w_{i,j,k}^n}{\Delta z} \right) \quad (9)$$

因流体域的整体网格不是均匀的（即），因此，泊松方程的离散形式为：

$$P_{i,j,k} = \frac{\frac{P_{i+1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1}}{\Delta z^2} + \frac{P_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} - S_{i,j,k}}{\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} + \frac{2}{\Delta z^2}} \quad (10)$$

最后，根据泊松方程压力 p 对速度进行修正，速度修正方程表达式如下：

$$u_{qp}^{*} = u_{qp}^{*} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (11)$$

将上述速度修正方程差分离散化，则可以写为：

$$u_{qp}^{*} = u_{qp}^{*} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\Delta p_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{2\Delta x} \quad (12)$$

方向的求解过程与方向类似，这里不给出详细推导公式，其速度修正方程如下：

$$v_{qp}^{*} = v_{qp}^{*} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j-1,k}}{2\Delta y} \quad (13)$$

$$w_{qp}^{*} = w_{qp}^{*} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k-1}}{2\Delta z} \quad (14)$$

式中 u_{qp}^{*} 、 v_{qp}^{*} 、 w_{qp}^{*} 为修正后的速度。

2.2 边界条件与仿真参数设置

2.2.1 边界条件设置

立式捏合机搅拌过程中速度场和压力场的数值模拟考虑以下几个边界条件：

（1）假设物料与混合锅内壁之间无滑移，二者在接触界面上的运动速度保持一致；

（2）物料在桨叶接触面上的速度与桨叶表面速度完全相同，满足无滑移条件；

（3）Z 轴负方向为锅底方向，重力加速度取 9.8 m/s^2 ；

（4）物料顶部设为自由边界条件；

（5）实心桨自转角速度 30 r/min ，空心桨自转角速度 60 r/min ，两桨公转角速度 30 r/min ；

（6）时间步长设为 $\Delta t=0.0167 \text{ s}$ ，对应每步实心桨转动 3° 、空心桨转动 6° ；

（7）采用幂律模型表征物料，其黏度随剪切速率变化；

（8）夹套处于稳态传热阶段，物料温度视为恒定，不随时间变化。

2.2.2 仿真参数设置

物料的仿真参数设置为：密度 2700 kg/m^3 ；物料

黏度 $325 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ；幂律指数 $n=1.75$ ；幂律模型一致性系数 $K=459 \text{ P}$ ；药浆固相占有率 50% 。

3 仿真流程和结果分析

3.1 仿真流程

本软件采用模块化设计，包含数据存储、模型算法、计算分析和用户交互四大功能模块。模块间通过实时数据交互实现协同仿真，形成完整的求解-验证迭代流程，最终保证计算结果的准确性与可视化呈现。

根据以上设计原则，软件的仿真步骤如图 7 所示。



图 7 软件仿真步骤

用户可以通过以下操作获得仿真结果：导入桨叶截面文件 → 桨叶三维模型生成 → 桨叶初始捏合位置设置 → 桨叶运动参数设置 → 流体域创建 → 流体域提取 → 物料参数设置 → 速度压力场仿真设置 → 求解器设置 → 开始计算。

3.2 速度场仿真结果

由图 8 和图 9 中不同高度处的速度场仿真结果可见，在桨叶的带动下，物料开始产生流动。在桨叶迎料侧首先出现速度分布，表明物料受到挤压和推动作用；随后，在两桨叶附近形成较高的速度区域。由于物料黏度较大，其流动主要沿桨叶的转动方向扩散并发生混合。此外，可观察到空心桨区域的最大混合速度高于实心桨区域，这是由于空心桨的自转速度为实心桨的两倍，从而在搅拌与物料输运方面具有更强的驱动能力。

3.3 压力场仿真结果

由图 10 和图 11 中不同高度处的压力场仿真结果可知，桨叶在迎料侧对物料的挤压与混合作用较为明显，该区域表现出较高的压力分布。相比之下，在桨叶背侧，由于桨叶的前进推动使局部区域出现短暂空

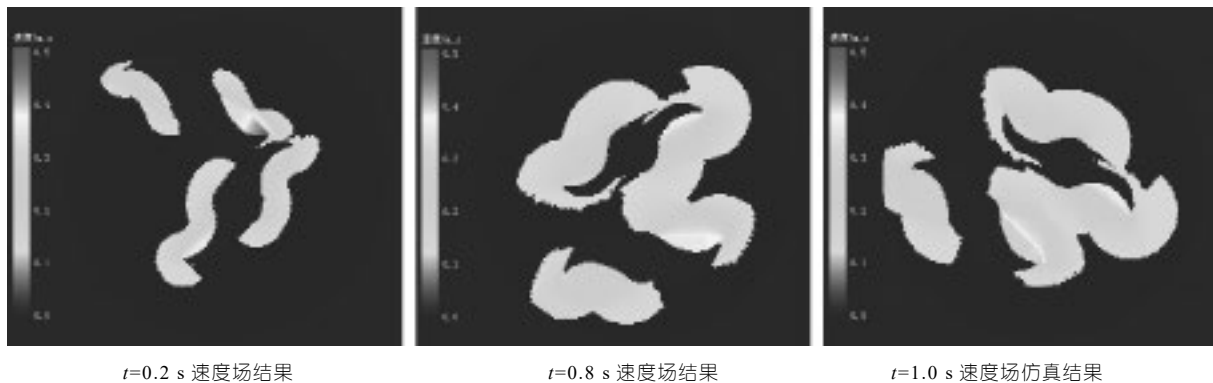


图 8 $Z=0$ mm 速度场仿真结果

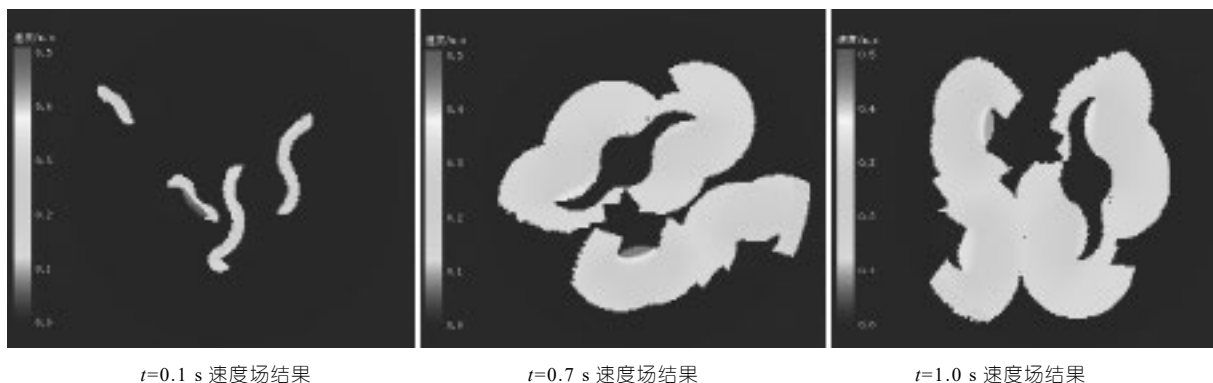


图 9 $Z=100$ mm 速度场仿真结果

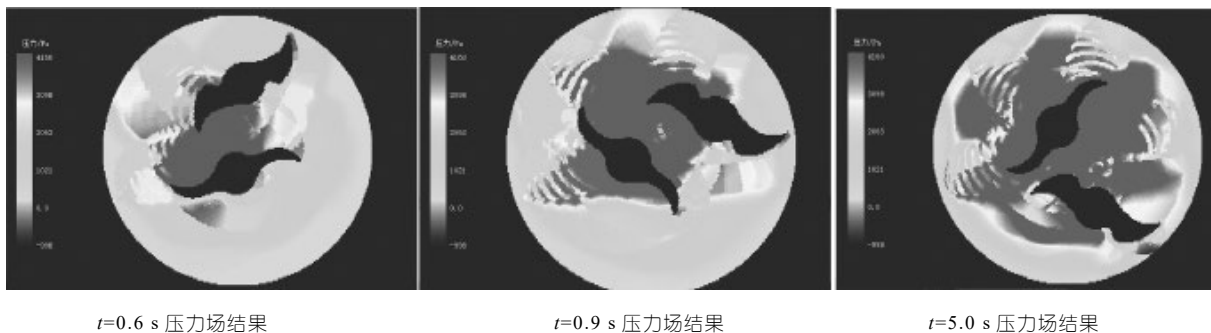


图 10 $Z=25$ mm 压力场仿真结果

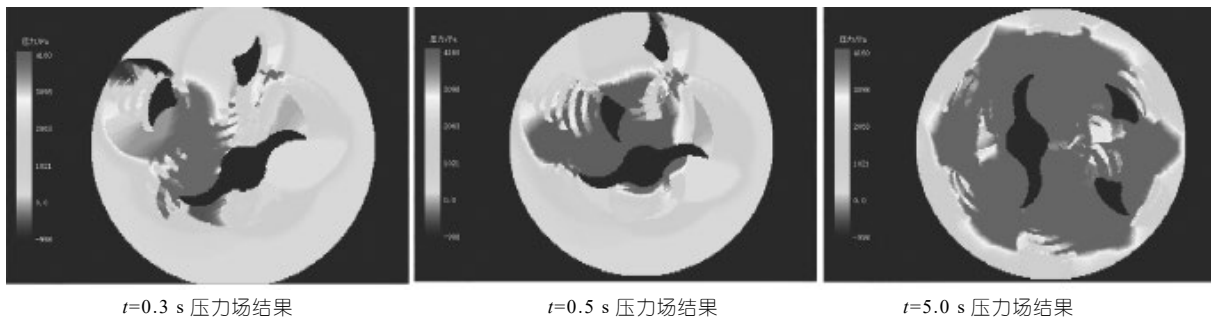


图 11 $Z=150$ mm 压力场仿真结果

隙，从而形成负压现象。整体来看，距离桨叶越近的位置，流体所承受的压力越大；而远离桨叶棱边的区

域，压力值则相对较低。在搅拌过程中，流场的最大压力通常出现在两桨叶相互接近的瞬间，最小压力则

多位于桨叶背侧区域。随着混合过程的持续推进,桨叶对物料持续施加剪切与挤压作用,流场中的大部分区域逐渐呈现出较高的压力分布,表明局部流体压力在动态作用下逐步升高。

4 结论

本文针对立式捏合机流场仿真过程中存在的操作复杂、流程繁琐等问题,开发了一款自主仿真软件,采用 C++ 语言,利用 OpenGL 构建仿真模型,结合 Qt 设计用户交互界面。实现了桨叶几何模型的构建、流体域的动态提取以及速度场和压力场的数值模拟。

软件采用幂律模型修正物料的有效黏度,通过预测速度-压力修正的迭代算法求解流场,并在每个时间步长内动态更新流体域,确保桨叶运动与流场变化的耦合一致性。仿真结果显示,桨叶在搅拌过程中对物料的挤压和推动作用明显,物料在迎料侧产生较高的速度和压力,且空心桨由于较高的转速展现出更强的混合能力;桨叶背侧则形成负压区,随着搅拌的持续,流场整体压力逐步升高。

该软件具备良好的仿真准确性和实用性,为立式捏合机的工艺优化和设计改进提供了有效的数值分析工具。未来工作将进一步拓展模型,结合温度场和多物理场耦合,提高仿真模型的全面性和适用性。

参考文献:

- [1] 王正方,翟瑞清.立式捏合机搅拌桨的设计[J].固体火箭技术,1993,(01):65-69.
- [2] 梁建,朱剑波,段丽华,等.立式捏合机桨叶结构与桨叶变形量的 CFD 仿真[J].固体火箭技术,2018,41(06):745-749+753.
- [3] 雷宁,薛春珍,闫大庆.国外固体推进剂装药工艺安全性技术[J].飞航导弹,2017,(03):90-94.
- [4] 周鑫聪,刘晓婧.浅谈国外发动机冷却水流动 CFD 研究现状[J].中小企业科技,2007,(06):191-192.
- [5] 翟建华.计算流体力学(CFD)的通用软件[J].河北科技大学学报,2005,(02):160-165.
- [6] 李新亮,傅德薰,马延文,等.高精度计算流体力学软件 Hoam-OpenCFD 开发[J].科研信息化技术与应用,2010,1(01):53-59.
- [7] 何泳.十洋啃下.CAE 核心技术“硬骨头”[N].深圳特区报,2023-08-25(A05).

Research on the viscous correction calculation simulation method for the material flow field of vertical kneading machines

Li Bingxu¹, Li Bin², Zhang Bing^{1*}

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Hubei Aerospace Chemical Technology Research Institute, Xiangyang 441000, Hubei, China)

Abstract: In response to the issues of complex modeling and low computational efficiency in the flow field simulation of traditional CFD software for vertical kneading machines, a specialized simulation method based on dynamic grid technology is proposed, and a corresponding simulation software system is independently developed. The system adopts a C++/Qt framework and constructs hexahedral grids based on OpenGL. It innovatively employs a row-by-row scanning method to extract the fluid domain in real time, utilizes a power-law model to correct the effective viscosity of materials, and solves the flow field through an iterative algorithm that predicts velocity-pressure correction. The validation of the software using a 30 L vertical kneading machine instance demonstrates that it can accurately simulate the material flow field characteristics under the coupled motion of blade rotation and revolution. The simulation results align well with the actual situation, providing effective analytical tool support for vertical kneading machine manufacturing enterprises.

Key words: vertical kneading machine; flow field; viscosity correction

(R-03)