全自动调色机搅拌器叶片流场数值模拟研究

吴 静,胡阳逸,傅崇睿,李海军,王亚萍

哈尔滨理工大学机械动力工程学院,黑龙江 哈尔滨 Email:wypbl@163.com

收稿日期: 2020年11月17日; 录用日期: 2020年12月2日; 发布日期: 2020年12月9日

摘要

以全自动调色机搅拌器为研究对象,采用k-ε湍流模型和多重参考系模型(MRF),分析不同温度下不同倾 斜角度桨叶的流场流动特性,得到搅拌器的应力分布与振动变形,计算不同温度下搅拌器的功率消耗, 最后将理论计算和数值模拟结果进行对比。分析结果表明:当搅拌器叶片角度一定时,随着温度的降低, 色浆桶内的压力逐渐降低,搅拌器叶片周围的速度范围越来越大;当外界温度一定时,随着叶片倾斜角 度的增加,色浆桶内的压力逐渐降低,搅拌器叶片周围的速度范围越来越大,搅拌器的振动可靠性为 99.9%,符合工程设计要求,为后续对搅拌器叶片的优化设计提供依据。

关键词

全自动调色机,搅拌器,数值模拟,桨叶

Numerical Simulation of Agitator Blade Flow Field in Fully Automatic Color Mixer

Jing Wu, Yangyi Hu, Chongrui Fu, Haijun Li, Yaping Wang

School of Mechanical and Power Engineer, Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang Email: wypbl@163.com

Received: Nov. 17th, 2020; accepted: Dec. 2nd, 2020; published: Dec. 9th, 2020

Abstract

We take the automatic color mixer as the research object, adopt the k- ϵ turbulence model and multi-reference system (MRF), analyze the flow characteristics of the blade flow field at different temperatures and different angles, and obtain the deformation of the mixer, the stress distribution and the vibration power consumption of the mixer calculations at different temperatures, and finally the theoretical calculation and numerical simulation results are compared. The analysis results show that when the angle of the agitator blade is fixed, the pressure in the slurry tank gradually decreases with the decrease of temperature, and the speed range around the agitator blade becomes larger and larger. When the external temperature is constant, with the increase of blade tilt angle, the pressure in the color slurry tank gradually decreases, and the speed range around the agitator blade becomes larger and larger. The vibration reliability of the agitator is 99.9%, which meets the engineering design requirements and provides a basis for the subsequent optimization design of the agitator blade.

Keywords

Fully Automatic Color Mixer, Stirrer, Numerical Modeling, Paddle

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

1. 引言

搅拌设备广泛应用于化工、医药、食品、采矿、涂料、冶金、石油和废水处理等行业中[1],其主要作 用是促进不同物相之间的传质与传热,因此关于搅拌槽内流体流动状态(包括速度场和压力场的分布与变化) 的实验研究和数值模拟一直很受重视[2]。早期的研究多以实验模拟为主,如选用与真实体系物料性质相似 的模拟材料在透明容器中进行搅拌,通过照相技术或直接观察来判断流体运动状态和搅拌效果。随着计算机 技术的高速发展,利用计算流体力学对流体运动、传热和相关现象进行分析研究已变得越来越普遍[3]: 全 自动色浆长时间放置,会出现凝固或沉淀现象,若是色浆不均匀或者均匀度不够,会严重影响调色精度。在 涂料行业[3],一般采用搅拌器搅拌色浆,搅拌器设计的好坏将影响色浆的均匀性,进而影响调色精度。使 用 CFD 技术对搅拌槽内流体流动特性和数值模拟研究,可以有效地分析搅拌器是如何实现不同物相之间的 传质与传热[4] [5] [6],并对后期搅拌器的拓扑优化设计具有重大影响[7]。运用 CFD 技术设计搅拌器的同时, 通过试验研究搅拌真实流动情况,仍旧是必不可少的过程。党林贵等[8]采用计算流体力学仿真软件,研究 不同桨叶的搅拌器在搅拌槽内的流动混合特性以及加料位置的变化,结果表明,45°折叶涡轮桨和平直叶桨 的组合类型,可以增强搅拌器内流体的上下湍动,促进混合效果。栾德玉等[9]采用流固耦合计算方法,对 比分析了错位六弯叶和六弯叶搅拌器的动力学特性,并根据桨叶与流体之间相互耦合运动特性,探讨了宏观 流场的结构和搅拌功耗特性,分析了桨叶的变形和等效应力分布。戚振[10]基于 CFD 技术,对搅拌轴单端 约束和两端约束的搅拌反应器流体特性进行对比仿真分析,然后根据流固耦合理论对搅拌轴进行有限元分析, 观察两种搅拌器的应力应变分布,最后对搅拌反应器以及搅拌器结构振动特性进行分析。综上所述,大多数 学者只是通过数值模拟分析搅拌器内流场随着搅拌速度增加所呈现的不同特性,进行流固耦合分析其变形和 应力特性分布。很少将外界温度考虑进去,对于粘性液体在不同温度下的搅拌过程不能有效呈现。

本文以全自动调色机搅拌器为研究对象,分析不同温度下不同倾斜角度桨叶的流场流动特性,得到 搅拌器的应力分布与振动变形,计算不同温度下搅拌器的功率消耗,最后将理论计算和数值模拟结果进 行对比,验证数值模拟结果的合理性,从而得到较为准确的分析结果。

2. 搅拌器的几何模型及相关参数

全自动调色机搅拌器采用浆式搅拌器,其色浆桶内径 Φ=91 mm,搅拌介质(色浆)有效高度为 H=160 mm,搅拌叶片的倾斜角度为 17°、45°和 90°三种类型,所有类型均采用两层桨叶,共4 个桨叶,搅拌桨 直径为 80 mm,搅拌器叶片宽度为 20 mm,底层叶片高度为 9 mm,上层叶片高度为 69 mm。搅拌器的 三维模型图如图 1 所示。浆式搅拌器带动色浆在搅拌桶内正常工作时,查阅相关资料,得到油性色浆密度为 900 kg/m³在常温下的涂四杯粘度为 200s,并且温度每降低 1℃,其涂四杯粘度增加 2~3 s。为了使得设计的搅拌器能在不同温度下对色浆都具良好有搅拌效果,选择在 25℃至零下 25℃之间,每隔 5℃取一个点,10 个温度变量下进行设计计算。



Figure 1. 3D model of agitator 图 1. 搅拌器三维模型

$$P = N_P \rho n d^5$$

式中,

P: 搅拌功率, W;

N_P: 搅拌功率数;

ρ: 色浆密度, kg/m³;

n: 搅拌器转速, 取1r/s;

d: 搅拌桨的直径, m。

永田进治公式是根据搅拌桶内无挡板时,液体流动所形成的"圆柱状回转区"的半径大小与搅拌器 叶片所受的流体阻力间的关系推导结果,再通过实验修正所得到的功率特征数计算公式[11]。虽然该式是 针对双桨叶搅拌器而得到的,但是通过对湍流区的实验验证,对于多种搅拌桨叶来说,在桨径相同的条 件下,只要桨叶数与桨叶宽度的乘积相等,则所消耗的搅拌功率相等。搅拌作业功率数随流动状态以及 搅拌装置的形状和尺寸等条件变化而变化。以往常采用的搅拌功率计算方法有永田进治的关联式计算, 对于斜桨无挡板情况下的永田进治计算式如下:

$$N_{p} = \frac{A}{\text{Re}} + B \left(\frac{1000 + 1.2 \,\text{Re}^{0.66}}{1000 + 3.2 \,\text{Re}^{0.66}}\right)^{p} \left(\frac{H}{D}\right)^{\left(0.35\frac{d}{D}\right)} \sin^{1.2}\theta$$
(2)

$$A = 14 + \left(\frac{b}{D}\right) \left[670 \left(\frac{d}{D} - 0.6\right)^2 + 185 \right]$$
(3)

$$B = 10^{\left[1.3 - 4\left(\frac{b}{D} - 0.5\right)^2 - 1.14\left(\frac{d}{D}\right)\right]}$$
(4)

$$p = 1.1 + 4\left(\frac{b}{D}\right) - 2.5\left(\frac{d}{D} - 0.5\right)^2 - 7\left(\frac{b}{D}\right)$$
(5)

$$\operatorname{Re} = d^2 n p / \eta \tag{6}$$

(1)

式中,

- Re: 搅拌雷诺数;
- θ:搅拌器叶片倾斜角, °;
- *b*: 桨宽, m;
- d: 搅拌器直径, m;
- D: 色浆桶直径, m;
- η: 色浆粘度, Pa·s;
- H: 色浆桶高度, m。

3. 搅拌器数值模拟计

以搅拌器三维模型为基础,对其进行单相三维数值模拟分析。选取倾斜角度为17°、45°和90°三种类型搅拌叶片及搅拌轴为流场数值模拟分析对象。

3.1. 搅拌器流场数值模拟值计算

在进行搅拌器数值模拟计算之前,应首先对搅拌流体区域的网格进行离散化,即对于原来的连续区域 采用一组有限个离散点进行代替。根据搅拌器流体运动规律,将搅拌槽计算域分为两个部分:一个是转子 区域,即包含旋转的搅拌叶片;另一个是定子区域,即包含静止的槽体。整个搅拌器流场数值模拟计算采 用多重参考系模型 MRF,即转子区域采用旋转参考系,定子区域采用静止参考系,定子区域与转子区域的 重合面定义为相互作用面上,假定流动为稳态的,通过相互面来进行流场计算数据的交换[12][13][14][15]。

在进行网格划分时,网格点之间的邻近关系可分为结构网格、非结构网格和混合网格。网格单元和 节点彼此没有固定的规律可循、节点分布完全是任意的是非结构网格的特点;将二者的优势结合起来、 同时克服各自的不足是混合网格的优点。本文采用混合网格法对搅拌器进行网格离散化,搅拌器的三维 模型与网格划分,如图2所示。



 Figure 2. 3D model and mesh division of agitator

 图 2. 搅拌器三维模型与网格划分

在对搅拌器流场进行数值模拟计算时,采用基于压力的分离求解器进行计算。其边界条件主要包括: 搅拌桶壁面、搅拌轴壁面、搅拌桨叶壁面、动静耦合交界面和动静流动区域设置。其中,搅拌筒体壁面 为静态壁面,设置标准静态壁面函数,参数默认设置;搅拌轴壁面和搅拌桨叶壁面为动态壁面,二者的 运动分别为:主动运动和被动运动[16][17]。因此,搅拌轴壁面设置为绝对运动壁函数,搅拌桨叶运动壁 面设置为从动运动壁面函数,并设置相应的搅拌转速。动静耦合交界面设置为 interface,用于流场数据 的传递与交换;动、静区域均设置为流动区域。搅拌器在不同叶片角度和不同温度下的 27 种情况下进行 流场数值模拟。由于计算结果数据量较大,因此,将结果中的温度为 25℃、0℃、-25℃,叶片倾斜角度 为 17°、45°、90°情况下的压力场和速度场进行对比分析,为使计算结果便于观察,搅拌器压力场分布和 速度场分布分别如图 3 和图 4 所示。





由图 3 搅拌器压力场分布中的 9 个模型可以看出,最大压力值出现在搅拌器叶片转动方向前端,最 小压力值则出现在搅拌器叶片转动方向的后端,且搅拌桶内部的压力整体分布规律是由上部到下部不断 减小;在固定水平面,压力值分布则由周边向中心不断减小。当搅拌器叶片角度一致时,随着温度的降 低,色浆桶内的压力降低;当外界温度一致时,随着叶片角度的增加,色浆桶内的压力降低。

吴静 等



Figure 4. Velocity field distribution 图 4. 速度场分布

由图 4 搅拌器速度场分布的 9 个模型中可以看出,搅拌器的速度场分层比较明显,且速度最大值都 是出现在搅拌器叶片转动方向前端,且在固定水平面,速度场分布是由周边向中心不断增大。当搅拌器 叶片角度一致时,随着温度的降低,搅拌器叶片周围的速度范围越来越大;当外界温度一致时,随着叶 片角度的增加,搅拌器叶片周围的速度范围越来越大。速度场的分布情况较为真实反映了搅拌实际状况。

3.2. 搅拌器流固耦合分析

搅拌器的材料选择 ABS 塑料,搅拌器的叶片角度选择 45°,在-25℃的温度下进行分析。利用有限元 分析软件的接口将得到的流固耦合交界面的压力数据传递到搅拌器结构的表面,进行耦合场计算。在搅 拌器底部添加固定约束,搅拌器转速为 50 r/min。搅拌器网格划分模型,如图 5 所示,整个搅拌器的单元 数为 12,369,节点数为 23,375。

在流体压力与离心力耦合作用下,进行搅拌器的变形和应力分析,得到搅拌器位移变形和应力分布 云图,由图 6 和图 7 可知,搅拌器的变形最大位置在搅拌器叶尖部位,最大变形量为 0.030073 mm,属 于合理变形;应力最大位置在叶片轴根部位,最大应力为 0.086354 MPa,符合强度要求。搅拌器下层叶 片变形量比上层变形量大,下层叶片的应力值比上层叶片的应力值小,主要是因为底部是封闭状态,流 体运动速度快,故变形较大应力较小。变形和应力的分布情况较为真实反映了搅拌实际状况。



图 5. 搅拌器网格划分模型

将静力学分析得到的数据作为预应力传递到谐响应分析中,对搅拌器进行谐响应分析,得到搅拌器的振动变形与应力分布。由图 8 和图 9 可知,搅拌器的最大振动变形位于搅拌器底部的叶片处,最大振动应力位于搅拌器底部搅拌轴的根部,比较符合实际搅拌情况。下方由于节流孔的存在,出现漩涡。



Figure 6. Agitator displacement deformation 图 6. 搅拌桨振动等效应力



Figure 7. Equivalent stress of agitator 图 7. 搅拌桨等效应力



Figure 8. Agitator vibration displacement deformation 图 8. 搅拌桨位移变形



Figure 9. Equivalent stress of agitator vibration 图 9. 搅拌桨振动位移变形

3.3. 搅拌器可靠性分析

搅拌器设计完成之后,为了验证搅拌器结构设计参数(如:搅拌器结构、搅拌器材料、搅拌器转速等) 的准确性,对其进行可靠性分析。目前对可靠性分析方法[18][19][20]很多,如蒙特卡罗法、一次二阶矩 阵法、故障树法、响应面法等,其中,响应面法在提高计算效率的同时能满足计算精度,故本节选用响 应面法对搅拌器振动进行可靠性分析。为了探究在不确定因素影响下搅拌器振动可靠性,选择搅拌器材 料密度、弹性模量,转速作为随机输入变量,各变量间相互独立且服从正态分布,随机变量统计特征, 如表 1 所示。搅拌器最大振动变形及最大振动应力作为输出响应,查阅相关资料可以得到,搅拌器许用 振动变形为 8.0×10⁻⁶ mm,许用振动应力为 7.2×10⁻⁵ MPa。

利用拉丁超立方抽样对随机变量进行 100 组抽样,并代入有限元分析模型中分析得到各组样本对应 的输出响应,利用抽取的样本建立响应面方程,如式(7)所示,用该方程代替搅拌机振动有限元分析过程, 与蒙特卡罗法相结合进行大批量抽样,对抽样结果进行统计分析,得到搅拌器振动变形与应力的分布直 方图,如图 10 所示。由图 10 可看出,在不确定因素影响下,搅拌器的振动变形与应力大体服从正态分 布。将搅拌器振动变形与振动应力的抽样结果与搅拌器许用振动变形与许用振动应力比较,得出在流固 耦合影响下,搅拌器的振动可靠性为99.9%,符合工程设计要求。

Table 1. Statistical	characteristics	of random	variables
表 1. 随机变量统	计特征		

输入变量	均值	方差	分布
搅拌器材料密度	900 kg/m ³	45 kg/m ³	正态分布
搅拌器材料弹性模量	2000 MPa	100 MPa	正态分布
搅拌器转速	0.833 r/min	0.042 r/min	正态分布

$$\begin{cases} y_1 = -0.016 + 0.003x_1 + 8.502x_2 + 0.014x_3 - 0.002x_1^2 - 2.096x_2^2 - 0.008x_3^2 \\ y_2 = -0.012 + 0.025x_1 + 6.639x_2 + 0.115x_3 - 0.013x_1^2 - 1.636x_2^2 - 0.068x_3^2 \end{cases}$$
(7)

式中: y_1 为搅拌器振动变形; y_2 为搅拌器振动应力; x_1 为搅拌器材料密度; x_2 为搅拌器材料弹性模量; x_3 为搅拌器转速。



Figure 10. Histogram of vibration deformation and stress distribution of agitator 图 10. 搅拌器振动变形与应力的分布直方图

4. 理论计算和数值模拟

不同温度下搅拌器消耗功率理论计算的结果和流场数值模拟结果进行对比分析,验证流场数值模拟 分析的合理性。

通过前期对搅拌器理论计算,可以得到其理论消耗功率,如表 2 所示。在对搅拌器进行流体模拟计 算时,可以得到搅拌器搅拌油漆的力矩数值,并且与相应搅拌转速相乘可计算出流场数值模拟中搅拌器 实际消耗功率,如表 3 所示。 将表 2、表 3 中理论计算数据与数值模拟计算数据进行比较,可知理论计算数据与数值模拟计算数 据较为接近,吻合度良好,为便于更直观的表示,绘制两者实际消耗功率曲线如图 11 所示。

由图 11 可知,理论计算曲线趋势与数值模拟曲线趋势一致,数值模拟值略高于理论计算值,其原因为理论计算认为搅拌桨为无摩擦旋转运动,没有将摩擦阻力考虑在其中,所以造成理论计算值低于数值模拟值。由表 2 可得到,在室温 25℃下,搅拌器理论消耗功率为 0.0065 W;由表 3 得到,在室温 25℃下,搅拌器数值模拟消耗功率为 0.0075 W。则搅拌器消耗功率理论计算值、数值模拟分析值偏差在 15%左右,符合要求。既验证在 25℃温度下,搅拌油漆消耗功率的理论计算结果和流场数值模拟结果的正确性,又进一步验证了流场数值模拟计算方法的合理性。

Table 2. Agitator theoretical power consumption 表 2. 搅拌器理论消耗功率 W

叶片角度	−25°C	−20°C	−15°C	−10°C	−5°C	0°C	5°C	10°C	15℃	20°C	25℃
17°	0.0103	0.0099	0.0095	0.0092	0.0088	0.0084	0.008	0.0076	0.0073	0.0069	0.0065
45°	0.0113	0.0109	0.0105	0.0102	0.0098	0.0094	0.0090	0.0086	0.0083	0.0079	0.0075
90°	0.0120	0.0116	0.0112	0.0109	0.0105	0.0101	0.0097	0.0093	0.0090	0.0086	0.0082

Table 3. Agitator numerical simulation power consumption 表 3. 搅拌器数值模拟消耗功率 W

叶片角度	−25°C	−20°C	−15°C	−10°C	−5 °C	0°C	5°C	10°C	15℃	20°C	25℃
17°	0.0118	0.0117	0.0113	0.0105	0.0100	0.0096	0.0093	0.0088	0.0082	0.0077	0.0075
45°	0.0122	0.0119	0.0114	0.0109	0.0107	0.0101	0.0095	0.0092	0.0088	0.0086	0.0081
90°	0.0123	0.0121	0.0115	0.0113	0.0109	0.0103	0.0099	0.0096	0.0090	0.0089	0.0085





 Figure 11. Mixer theory and numerical simulation comparison chart

 图 11. 搅拌器理论与数值模拟对比图

5. 结语

压力场分析结果:在固定水平面,压力值分布则由周边向中心不断减小。当搅拌器叶片角度一致时,随着温度的降低,色浆桶内的压力逐渐降低,搅拌器叶片周围的速度范围越来越大;

2) 速度场分析结果:在固定水平面上,速度场分布是由周边向中心不断增大。当外界温度一致时,随着叶片倾斜角度的增加,色浆桶内的压力逐渐降低,搅拌器叶片周围的速度范围越来越大;

3) 搅拌器的变形最大位置在搅拌器叶尖部位,搅拌器下层叶片变形量比上层变形量大,下层叶片的 应力值比上层叶片的应力值小;

4) 搅拌器的振动变形与应力大体服从正态分布,搅拌器的振动可靠性为 99.9%,符合工程设计要求。在 25℃室温下,其实际消耗功率和理论计算值与数值模拟值误差范围在 20%以内,符合要求。

参考文献

- [1] 葛晓峰. 探析汽车修补漆的颜色调配技术分析[J]. 科技创新导报, 2013(11): 36.
- [2] 于国玲, 王学克. 浅谈油漆的人工调色[J]. 化工管理, 2015(3): 139.
- [3] 陈登丰. 搅拌器和搅拌容器的发展[J]. 压力容器, 2008, 25(2): 33-41.
- [4] 张国娟, 闵健, 高正明, 等. 涡轮桨搅拌槽内混合过程的数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 24-27.
- [5] 马青山, 聂毅强, 包雨云, 等. 搅拌槽内三维流场的数值模拟[J]. 化工学报, 2003, 54(5): 612-618.
- [6] Fokema, M.D., Kresta, S.M. and Wood, P.E. (1994) Importance of Using the Correct Impeller Boundary Conditions for CFD Simulations of Stirred Tanks. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72, 177-183. <u>https://doi.org/10.1002/cjce.5450720201</u>
- [7] Alcamo, R., Micale, G., Grisafi, F., et al. (2005) Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow in an Unbaffled Stirred Tank Driven by a Rushton Turbine. Chemical Engineering Science, 60, 2303-2316. <u>https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.11.017</u>
- [8] 党林贵, 郭淑雪, 王定标, 等. 不同组合桨搅拌器搅拌特性的数值研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 59-62.
- [9] 栾德玉, 张盛峰, 郑深晓, 等. 基于流固耦合的错位桨搅拌假塑性流体动力学特性[J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2328-2335.
- [10] 戚振. 基于流固耦合的搅拌反应器机械特性研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2014.
- [11] 胡效东, 王灏, 王世飞, 等. 流固耦合的多层搅拌反应器振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 133-137.

- [12] 胡效东, 王超, 王灏, 等. 基于流-固耦合理论的搅拌反应器机械特性[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 150-158.
- [13] Young, Y.L. (2008) Fluid-Structure Interaction Analysis of Flexible Composite Marine Propellers. Journal of Fluids and Structures, 24, 799-818. <u>https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.12.010</u>
- [14] 杨小波. 桨式搅拌器的功率计算[J]. 有色设备, 2008(2): 10-12.
- [15] 张国娟, 闵健, 高正明, 等. 涡轮桨搅拌槽内混合过程的数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 25-28+33.
- [16] 李迅,林如山,叶国安,等. 双层折叶桨式搅拌器三维流场的数值模拟[J]. 化工机械, 2015, 42(3): 421-424.
- [17] 孙会, 潘家祯. 新型内外组合搅拌桨的开发及流场特性[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 56-62.
- [18] 张哲,李生勇,滕启杰.一种改进的结构可靠度分析中响应面法[J].大连理工大学学报,2007,47(1):57-60.
- [19] Xiao, Y., Su, G., Jiang, J., et al. (2016) A Gaussian Process-Based Response Surface Method for Structural Reliability Analysis. Yangtze River, 56, 549-567. <u>https://doi.org/10.12989/sem.2015.56.4.549</u>
- [20] Zhao, W., Liu, W. and Yang, Q. (2016) An Improvement of the Response Surface Method Based on Reference Points for Structural Reliability Analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20, 2775-2782. https://doi.org/10.1007/s12205-016-1312-9