

# 螺旋式桨叶带宽对搅拌槽内油制辣椒固液两相流的影响

何 玲, 罗金刚, 王仁伟

(贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550003)

**摘要:**对油制辣椒固液两相流在搅拌槽内的流动情况进行数值模拟分析,选取螺旋式桨叶,分析不同带宽条件下,搅拌槽内流体的速度场、密度场、各相体积分数分布规律。结果表明:螺旋式的带宽对搅拌槽内流体的流动分布有着较大的影响,通过比较不同带宽桨叶可知,适当地增加带宽可以增加固液混合体的搅拌轴向速度,搅拌槽内湍流区域增加,固液搅拌均匀、效果明显变好。分析结果为油制辣椒卧式搅拌槽的设计提供了理论依据,具有一定的实际应用意义。

**关键词:**油制辣椒;固液两相流;数值模拟分析;不同带宽

**中图分类号:**TS 264;TB 126 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)06-0115-04

## Influence of bandwidth of helical ribbon paddles on solid - liquid two - phase flow of fried capsicum sauce in stirred tank

HE Ling, LUO Jin - gang, WANG Ren - wei

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550003)

**Abstract:**The flow state of fried capsicum sauce, as solid - liquid two - phase flow, inside of stirred tank was studied by numerical simulation analysis. Helical ribbon paddles was selected to analyze the fluid velocity field, density field and the distribution of volume fraction of each phase in stirred tank under the condition of different band width. The simulation results showed that: helical ribbon bandwidth had a great impact on fluid flow distribution in stirred tank. It was known by comparing different bandwidths that the agitation axial velocity on solid - liquid mixture could be increased by adding the bandwidth properly; and the turbulent area was increased, the solid - liquid mixture was mixed evenly with better effect. The results provided theoretical basis for design of horizontal stirred tank of fried capsicum sauce, which had a certain practical significance.

**Key words:**fried capsicum sauce; solid - liquid two - phase flow; numerical simulation analysis; different bandwidth

搅拌槽装置是食品加工、冶金、造纸、石油提炼等工业加工制造过程的常用设备,尤其在固液搅拌混合操作过程中最为常见。分析搅拌槽内部的流动特性,研究多相流的搅拌混合机理,已经成为计算流体力学(CFD)领域组成中极其重要的一部分。搅拌桨叶作为搅拌装置的关键部件,其结构形式多种多样。

目前,国内外学者对不同形式搅拌桨叶对槽内多相流流场的分布影响进行了大量研究。K. H. Javed<sup>[1]</sup>等采用滑移网格法对六直叶涡轮搅拌桨的混合时间进行了数值模拟,J. J. Derksen<sup>[2]</sup>对搅拌槽中的固体悬浮进行了数值模拟,魏新利<sup>[3]</sup>等进行了搅拌反应器流场的数值模拟,王乐勤<sup>[4]</sup>等对多层桨式搅拌罐内混合过程进行了数值模拟。

油制辣椒属于固液混合物的范畴,本文以其为研究对象。油制辣椒主要由菜籽油和辣椒片组成。菜籽油的粘度高、流动性差,与辣椒片搅拌混合时易

收稿日期:2015-05-25

基金项目:贵州省科学技术基金(黔科合J字[2013]2127号);贵州省重大科技专项计划(黔科合重大专项[2012]6008);贵州大学研究生创新基金资助(研理工2015029)

作者简介:何玲,1975年出生,女,副教授。

通讯作者:罗金刚,1988年出生,男,在读硕士研究生。

出现分层,固液分布不均匀。螺带式搅拌桨叶是常见搅拌桨叶中的一种,适用于高粘度或粉末物料的混合、传热、反应、溶解。本文对不同带宽螺带式搅拌桨叶的搅拌槽内部流体搅拌进行模拟,研究带宽对流体的速度场、密度场和各相体积分数分布的影响,为油制辣椒搅拌机构的设计和 optimization 提供理论依据。

### 1 流体计算模型

本文采用欧拉-欧拉多相流计算模型对搅拌槽内固液两相流进行数值模拟,把搅拌槽内液相看成连续相,固相看成拟连续相,认为固体与流体都是连续介质,用连续液相的方程描述其特性,模型相关控制方程具体表达形式为:

#### (1) 质量守恒方程(连续方程)

质量守恒定律的表达为:单位时间内进入流体微元的质量等于同一时间内流出该微元的质量。按照这一定理,得出质量守恒定律(连续方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

本式为瞬态可压流体的质量守恒方程,其中: $\rho$ 表示流体密度, $t$ 表示时间, $\vec{u}$ 表示速度矢量, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别是速度矢量 $\vec{u}$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的分量。

#### (2) 相体积分率守恒方程<sup>[5]</sup>

$$\alpha_s + \alpha_l = 1 \quad (2)$$

式中:下标 $s$ 代表固相, $l$ 表示液相。

#### (3) 动量守恒方程

动量守恒定律表达为:流体微元的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元上的作用力之和。据此定律以张量的形式列出 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.3)$$

式(3.1)~(3.3)中的 $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ;

$\rho$ 表示流体密度; $p$ 表示流体微元体上的压力; $\vec{V}$ 表示网格节点上流体速度, $u$ 、 $v$ 、 $w$ 分别是其在 $x$ 、

$y$ 、 $z$ 方向上的分量; $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{xz}$ 是微元体表面上的因分子粘性作用而产生的粘性应力 $\tau$ 的分量; $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 分别是作用在单位质量流体微元上的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的体积力。

### 2 数值模拟

本文以某型号的油制辣椒卧式搅拌槽为例,搅拌桨叶为单头,左旋式螺带桨叶,结构如图1所示,各结构的具体参数为:卧式搅拌槽的直径 $D = 420$  mm,总长 $L = 850$  mm,搅拌槽高 $H = 460$  mm,螺带直径 $d = 340$  mm,螺带螺距 $= 780$  mm,旋转方向为顺时针旋转,螺带桨叶带宽 $W$ 。

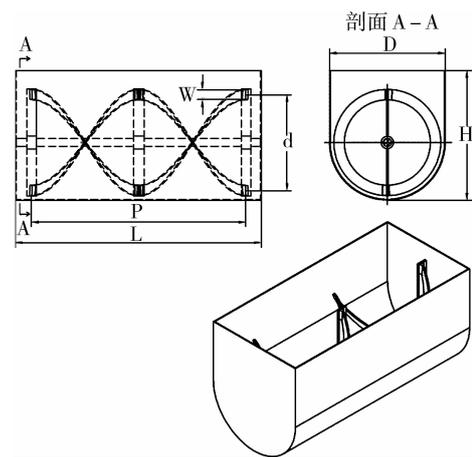


图1 搅拌槽结构

整个模型区域包括了两部分:流体区域和固体区域。螺带桨叶附近和螺带桨叶至搅拌槽壁之间的区域,采用六面体网格,其余部分区域网格采用四面体网格。对螺带桨叶部分进行网格细化加密处理,这样可以使网格划分比较合理,提高了网格质量和计算精度并且加快收敛速度。计算域网格划分情况如图2所示。



图2 计算域网格模型

固液两相流数值模型参数中,作为固相的辣椒其颗粒密度为 $1280 \text{ kg/m}^3$ ,实际中辣椒片颗粒一般都是不规则形状,在模拟计算中需对其进行简化,本文将辣椒片颗粒简化为球体,通过对辣椒片颗粒的表面积折算得到颗粒平均直径为 $4 \text{ mm}$ ,体积分数为

70%,液相的菜籽油密度为  $930 \text{ kg/m}^3$ ,动力粘度为  $0.118 \text{ Pa/s}$ 。

对搅拌槽内油制辣椒固液两相流的模拟,采用 Fluent 软件进行数值模拟。搅拌区域采用滑移网格法(SM)处理运动区域和其它静止区域。液面为自由面,贴近壁面区域采用标准壁面函数,壁面设置为无滑移边界。流体和搅拌桨叶接触面为旋转壁面,考虑油辣椒混合物粘度高,搅拌速度不易过高,选取旋转速度为  $6 \text{ rad/s}$ ,旋向为顺时针。

### 3 仿真结果及分析

对螺带式桨叶而言,螺带桨叶的带宽是桨叶的关键参数,其尺寸的大小,对搅拌槽内流体的流动分布有很大的影响。分析在不同带宽的螺带式搅拌桨叶条件下,搅拌槽内油制辣椒的运动情况,进而为搅拌桨叶的设计和 optimization 提供理论依据。

#### 3.1 速度场的分布

分析搅拌槽内固液两相流的流动特性和分布情况,选取轴向截面  $X = 0 \text{ mm}$  处速度分布云图,对不同带宽的螺带式桨叶速度场进行分析。图3是四种不同带宽(38、48、53、58 mm)的螺带式搅拌桨叶速度矢量图。分析可知:在不同带宽的螺带桨搅拌作用下,搅拌槽内流体分别形成了不同强度的湍流区域,螺带式桨叶的带宽为 38 mm 时,搅拌槽内部流体的速度流场沿轴向和径向方向分布,湍流区域较小,速度较小;螺带式桨叶的带宽为 48 mm 时,搅拌槽内流体形成了较多的轴向湍流区域;螺带式桨叶的带宽为 53 mm 时,搅拌槽内流体形成的湍流区域和带宽为 48 mm 的螺带式搅拌桨叶的基本相似。螺带式桨叶的带宽为 58 mm 时,搅拌槽内部流体的速度流场沿轴向和径向方向分布速度比前三种大;通过对比速度矢量图发现,在一定的范围内,螺带式

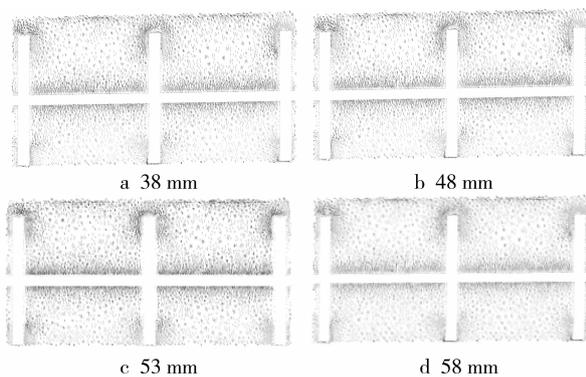


图3 不同带宽速度矢量图

搅拌桨叶的带宽越大,流体流动的平均速度越大,易形成湍流区域,固液混合效果越好。

为了进一步探讨螺带桨叶带宽对搅拌过程中固液两相流速度场的影响,下面选取沿轴线的直线  $L_1$ ,即从  $A_1(0.15,0,0)$  到点  $B_1(0.15,0,1)$ ,对该直线处分布流场的轴向速度分布进行计算分析。图4为不同带宽的螺带搅拌桨叶在直线  $L_1$  上的轴向速度分布曲线。通过分析得出,当螺带带宽不同时,在螺带桨沿轴向不同位置形成不同大小的速度极值。带宽为 38 mm 的螺带桨叶,在流体域中形成 4 个分布较均匀的峰值,其幅值较小;带宽为 48 mm 的螺带桨叶,在流体域中形成 7 个分布较均匀的峰值,幅值较大;带宽为 53 mm 的螺带桨叶,在流体域中形成 7 个峰值,其轴向速度幅值大,轴向速度分布均匀;带宽为 58 mm 的螺带桨叶,在流体域中形成 8 个分布较大的峰值,峰值波动大。由此可见,对于螺带式搅拌桨叶而言,随着桨叶带宽的增加,轴向速度的数值增大,强度的分布变得更均匀。

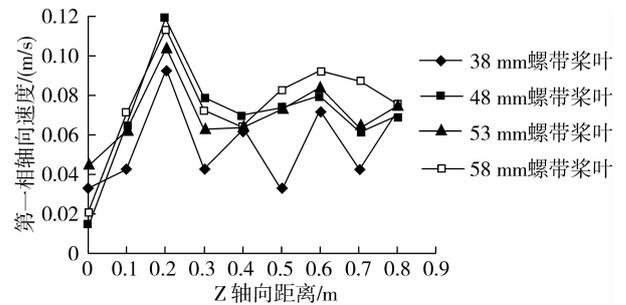


图4 直线  $L_1$  上的轴向速度分布图

#### 3.2 密度场的分布

密度场是两相流均匀性的主要衡量指标,通过数值分析,得到密度场的分布情况,探究螺带桨叶带宽的变化对密度的影响。为了更直观地描述密度场的分布,本文分别给出了轴向截面  $X = 0 \text{ mm}$  处的搅拌槽内密度分布云图(如图5所示)。从图5可知,在不同带宽的螺带搅拌桨叶条件下,搅拌槽内流体密度分布存在较大不同。螺带带宽为 38 mm 和 48 mm 条件下的搅拌槽的近壁区域存在明显的高密度区域,各区域之间的密度梯度值波动范围较大,而固液两相之间的交换较少,搅拌效果不理想。螺带带宽为 53 mm 和 58 mm 的搅拌桨叶的搅拌槽内高密度区域明显比其它两种螺带桨叶小。螺带带宽 58 mm 桨叶的搅拌槽的上表面都是菜籽油。出现了较大的“油浮”现象。

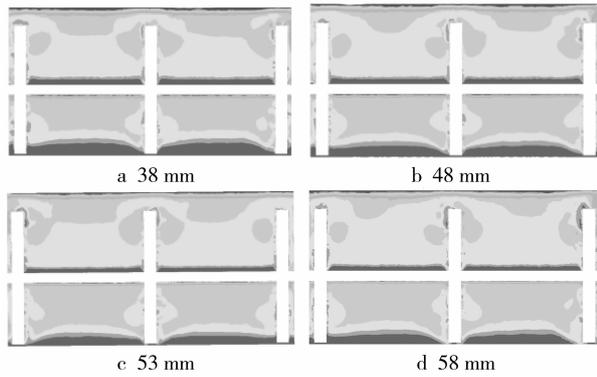


图5 不同带宽轴向截面密度云图

为了更好地分析密度场分布状况,本文选取了轴向横截面  $Z = 422 \text{ mm}$  处的密度分布云图(如图6所示)。观察发现不同带宽的螺带桨叶密度场分布相对均匀,在搅拌轴上方和搅拌槽近壁区域密度较大。

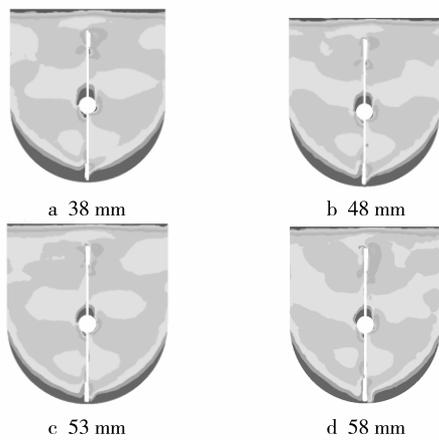


图6 不同带宽轴向横截面密度云图

### 3.3 各相体积分数分析

为了进一步对螺带搅拌桨叶带宽对搅拌特性的影响做出全面的评价,除对搅拌槽内的轴向、横向速度场和密度场的研究外,对其各相在进行搅拌操作后的体积分数也进行了分析。图7为四种不同带宽螺带搅拌桨叶条件下,选取沿轴线的直线  $L_1$ ,即从  $A_1(0.15,0,0)$  到点  $B_1(0.15,0,1)$ ,对该直线处菜籽油和辣椒的体积分数分布进行研究。分析可知,搅拌后各相体积分数基本保持不变。螺带桨叶周围体积分数较大,固相主要集中在搅拌槽近壁区域,液相主要分布在桨叶周围。如图7所示搅拌后各单相体积分数呈现一定范围内的变化和波动。螺带桨叶带宽为  $53 \text{ mm}$  时,各相体积分布最为稳定,梯度值最小,搅拌效果比其它三种带宽的搅拌桨叶好。

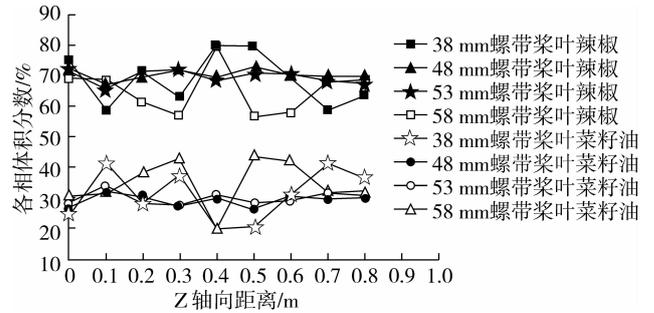


图7 混合物各相体积分数分布

## 4 结论

本文采用 Fluent 软件模拟搅拌槽内油制辣椒固液两相流的搅拌过程,通过分析不同带宽螺带搅拌桨叶条件下流体速度场、密度场以及各相体积分数,得出:

(1)通过对速度场的速度矢量分布图进行分析,发现在螺带桨叶的搅拌作用下,固液混合体的油制辣椒在搅拌槽内形成了湍流区域。随着螺带桨叶带宽的增加,湍流区域扩大,搅拌效果变好,流体流动速度增加。

(2)分析螺带桨叶搅拌槽内固液两相流的轴向和轴向横截面密度分布云图可知,在四种不同带宽的搅拌桨叶作用下,随着螺带桨叶带宽的增加,搅拌轴和搅拌槽近壁区的高密度区域减少,搅拌均匀度有明显的提高。

(3)通过分析搅拌后各相体积分数可知,螺带桨叶带宽为  $53 \text{ mm}$  的桨叶其各相体积分布最为稳定,波动范围小,搅拌效果好,流场内部密度分布基本一致。

### 参考文献:

[1] Javed K H, Mahmud T, Zhu J M. Numerical simulation of turbulent batch mixing in a vessel agitated by a rush ton turbine[J]. Chemical Engineering and Processing, 2006, 45(2): 99 - 112.  
 [2] Derksen J J. Numerical simulation of solids suspension in a stirred tank[J]. AIChE Journal, 2003, 49(11): 2700 - 2714.  
 [3] 魏新利,任杰,王定标,等. 搅拌反应器流场的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版, 2006(2): 52 - 55.  
 [4] 王乐勤,杜红霞,吴大转,等. 多层桨式搅拌罐内混合过程的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(3): 418 - 420.  
 [5] 张敏革,张吕鸿,姜斌,等. 双螺带螺杆桨气液混合性能数值模拟及其工业应用[J]. 天津大学学报, 2012, 45(6): 546 - 551.

