

果粒饮料储液搅拌缸的设计与参数优化

Tank design and parameter optimization of the fruit grain liquid storage

殷水忠 黄晓华 杨弟洲 丁志辉 朱 灿

YIN Shui-zhong HUANG Xiao-hua YANG Di-zhou DING Zhi-hui ZHU Can

(南京理工大学机械工程学院机械工程系, 江苏 南京 210094)

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

摘要:设计一种果粒饮料储液搅拌缸,对储液搅拌缸缸体、搅拌桨结构进行设计,并给定其各项参数。采用正交试验法与 FLUENT 相结合进行数值模拟,确定搅拌桨安装高度、搅拌桨叶片直径、搅拌桨的旋转速度等因素对搅拌过程的影响程度,并对储液搅拌缸进行参数优化,得到最佳参数解。结果表明:影响储液搅拌缸搅拌稳定后果粒浓度幅值的因素主次顺序为:桨直径、搅拌速度、下层桨高度。研究成果可为后续的果粒饮料一体化灌装机的设计提供参考。

关键词:果粒饮料;储液搅拌缸;结构设计;数值模拟;参数优化

Abstract: A fruit grain beverage liquid mixing tank was designed in this study, including the structure of the cylinder block and the mixing paddle, and related parameters were provided. The numerical simulation was carried out by orthogonal test and FLUENT, to determine the influence degree of the factors, such as the installation height of the agitator, the diameter of the impeller and the rotation speed of the propeller, and the parameters of the stirred tank, were optimized to obtain the optimal parameter solution. Results: The main order of the factors that influenced the stability of the agitator concentration was as follows: the diameter of the paddle, the stirring speed, the height of the lower paddle. The results in the present study could provide contribution to the follow-up design of fruit juice beverage filling machine.

Keywords: fruit grain beverage; liquid storage stirring cylinder; structure design; numerical simulation; parameter optimization

储液搅拌是一体化灌装过程中的一个重要工序,这个过程的好坏直接影响到灌装的精度及饮料的口感。目前对于机械储液搅拌缸的设计主要依赖经验与试验,难以预测实际

性能,且设计成本很高。随着计算流体动力学(CFD)技术的发展,数值模拟技术成为搅拌器设计的一个重要手段。目前,国内外学者^[1-2]利用数值模拟技术对立式单层搅拌研究较多,对多层叶轮搅拌过程研究较少。本试验拟以市场上最常见的果粒橙为研究对象,设计一种新型储液搅拌缸,并运用正交试验法与 FLUENT 模拟仿真相结合,对储液搅拌缸进行参数优化,为后续的果粒饮料一体化灌装机的设计提供理论依据。

1 储液搅拌缸的结构设计

1.1 缸体的结构

果粒饮料中含有果粒,将其静置,果粒就会沉积在储液搅拌缸底,造成后续灌装成品含果粒不均匀甚至出现液口堵塞现象。使用搅拌桨进行搅拌,能够使果粒分散在饮料中,但若搅拌桨设计不当,又会造成搅拌不均匀,影响灌装精度。储液搅拌缸由缸体、缸盖、入口、出口、搅拌桨等组成,储液搅拌缸容量标准见表 1。

本研究中采用容量为 350 L 的储液搅拌缸,储液搅拌缸直径 D 取 700 mm,高度 H 取 900 mm,进出口直径取 40 mm。

近年来,学者对储液搅拌缸的进口、出口位置做了很多研究。Lunden 等^[3]对进料位置对混合时间的影响进行研究,结果表明:进料位置对混合时间的影响不大;张庆华等^[4]研究表明进料位置对搅拌影响不大。

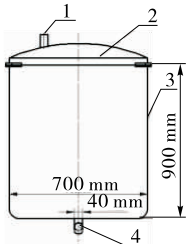
表 1 储液搅拌缸参数表
Table 1 Reservoir parameter

产品规格/m ³	型号参数	尺寸($D\times H$)/mm	进出口径/mm
1	350 L	700×900	40
2	600 L	1 010×800	40
3	1 000 L	1 200×1 000	40
4	2 000 L	1 380×1 420	50

作者简介:殷水忠,男,南京理工大学在读硕士研究生。
通信作者:黄晓华(1969—),男,南京理工大学副教授,博士,硕士研究生导师。E-mail:34420969@qq.com
收稿日期:2016—05—06

储液搅拌缸缸盖主要有平顶缸盖、凹顶缸盖、凸顶缸盖 3 种形式,对这 3 种储料搅拌缸盖进行研究,发现在灌装过程中,平顶缸盖灌装过程中物料淤积最严重,出现了油浮现象,即固液分离现象严重;凹顶缸盖灌装过程中,高密度区分布集中在轴心区域,在近壁面区物料的堆积现象严重,这些不利于物料的均匀灌装。相比之下凸顶缸盖物料灌装过程中,物料分布均匀,堵塞情况明显减少^[5]。因此,本研究采用的是凸顶缸盖。

储液搅拌缸缸体结构见图 1。



1. 储液缸入口 2. 储液缸缸盖 3. 储液缸缸体 4. 储液缸出口
图 1 储液搅拌缸缸体结构

Figure 1 Reservoir cylinder block structure

1.2 搅拌桨的结构设计

在搅拌的过程中,搅拌桨所产生的流型及其自身的参数都会对搅拌精度产生很大的影响。搅拌桨主要产生轴向流与径向流^{[6]4-5}。轴向流是指:流体沿搅拌轴方向进行循环流动,具有较大的循环速度,有利于混合相中固相的悬浮。叶轮与旋转平面成小于 90°的夹角,在旋转时产生轴向流。径向流是指:流体沿着搅拌轴垂直方向流动,剪切作用较大,有利于混合相中固相的分散。叶轮与旋转平面成 90°夹角,旋转则会产生径向流^[7]。搅拌流型见图 2。

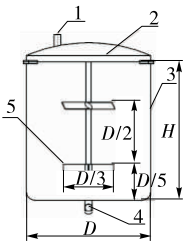
果粒饮料中含有果粒,将其静置后,果粒就会沉积在缸底,造成堵塞以及果粒含量不均匀,不利于后续灌装。所以,要对其进行搅拌,首先需要轴向流,让果粒悬浮在储液搅拌缸中,再利用径向流,使得果粒均匀地分布在果汁中,避免输液口堵塞及成品中果粒含量不均匀等缺点,提高灌装精度。像这种既需要产生轴向流,又需要产生径向流,单一的桨形并不能满足,则需要设计出相应的多层多种桨形的组合桨。目前,已经有众多学者对组合桨进行了研究。Aubin 等^[8]模拟了多层叶轮在高浓度搅拌槽内的流场特性;G.Micale 等^[9]对中低浓度固体颗粒在单层桨和多层桨的搅拌槽内的分布情况进行模拟,结果表明:多层桨搅拌效果更好;李新明等^[10]对不同组合叶轮双层桨的搅拌效果进行研究,结果表

明:当采用上斜下直的桨形时,混合液的湍流动能增强,循环流动增强,混合效果提高。为了提高果粒饮料的搅拌效果,搅拌桨采用上斜下直的三叶桨。

搅拌桨的自身参数主要包括双层桨桨间距、桨叶片的直径、桨的安装位置等。梁瑛娜等^[11]对双层桨的桨间距进行研究,结果表明:当层间距 h_1 满足 $\frac{D}{2} \leq h_1 \leq \frac{2D}{3}$,每层桨上下各产生 2 个涡环,总共产生 4 个涡环,称之为“平行流”;当层间距 h_1 满足 $h_1 \leq \frac{D}{3}$,搅拌桨的射流区的流线相互倾斜,并连接起来,最后产生 2 个大的涡环,称之为“连接流”;当储液搅拌缸内呈现平行流时,物料混合更加均匀。杨锋苓等^[12]对搅拌槽的固液悬浮特性进行分析,通过改变桨径比及桨叶安装位置,对固相在液相中的浓度分布进行研究,结果表明:对于固液悬浮, $C = \frac{D}{5}, d = \frac{D}{3}$ (C 为桨叶安装高度,mm; d 为桨叶直径,mm; D 为搅拌缸直径,mm)时的固相悬浮性能最好,增大桨径比和搅拌转速均不能明显改善固液悬浮效果。因此本课题选取搅拌桨的层间距 $h_1 = \frac{D}{2}$;桨叶安装高度 C 及桨叶直径 d 为 $C = \frac{D}{5}, d = \frac{D}{3}$ 。

1.3 储液搅拌缸初始参数

储液搅拌缸初始参数为:缸体容量 350 L,缸体直径 700 mm,高度 900 mm,采用凸顶缸盖形式;采用上斜下直的组合三叶桨形式,桨叶片直径 $d = \frac{D}{3}$,下层桨距离缸底高度 $C = \frac{D}{5}$,上下层桨的层间距 $h_1 = \frac{D}{2}$ 。储液搅拌缸模型见图 3。



1. 储液缸入口 2. 储液缸缸盖 3. 储液缸缸体 4. 储液缸出口
5. 桨

图 3 储液搅拌缸模型
Figure 3 Storage tank model

2 利用 FLUENT 进行模拟仿真

2.1 建立三维模型

用 Solidworks 设计出储液搅拌缸的模型。模型主要包括搅拌叶轮、搅拌轴、搅拌槽壁面、进出口。模型参数为:缸体直径 $D=700\text{ mm}$,缸内液面高 $H=700\text{ mm}$,搅拌桨直径 $d = \frac{D}{3}$,叶轮间距 $h_1 = \frac{D}{2}$,叶轮安装高度 $C = \frac{D}{5}$ 。所建模型见图 4。

2.2 搅拌工况下储液搅拌缸中流体的流动状态

在搅拌的过程中,储液搅拌缸中液体的流动状态目前主

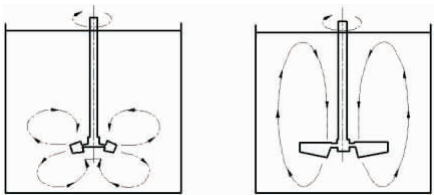


图 2 搅拌流型图

Figure 2 Mixing flow pattern

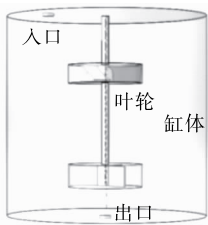


图 4 储液搅拌缸三维图

Figure 4 Three dimensional liquid storage tank

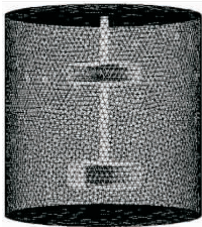


图 5 储液搅拌缸网格图

Figure 5 Grid drawing of liquid storage tank

要用搅拌雷诺数 Re_m 来进行判断。搅拌雷诺数定义为^[13]：

$$Re_m = \frac{d^2 n p}{u} \tag{1}$$

式中：

d ——搅拌槽直径,m；

n ——搅拌转速,r/s；

p ——液体密度,kg/m³；

u ——液体粘度,Pa·s。

现取参数 $d=0.7\text{ m}$, $n=200\text{ r/s}$, $p=1\,000\text{ kg/m}^3$, $u=0.046\,5\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[14]。

将以上参数代入式(1),得出 $Re_m=2.162\times10^6$, 大于 10^4 , 果粒饮料在储液搅拌缸中的流动状态为湍流。

2.3 网格划分

搅拌缸工作时,是通过叶轮旋转带动液体进行混合搅拌,因此该模型主要分为两部分:① 内部主动旋转的动区域;② 外部的静区域。将该模型导入 Ansys workbench 先进行模型的布尔运算,主要完成两个工作:① 将动区域与静区域分离开;② 将内部动区域中的桨分离出来,只留下桨面。对处理好的模型进行网格划分,由于搅拌桨叶轮形状不规

则,整个储液搅拌缸采用非结构网格,叶轮处的网格进行加密,整个储液搅拌缸的网格单元数为 362 512 个。将两个叶轮的圆柱形包裹区域设为动区域,储液搅拌缸其他部分设为静区域。旋转叶轮与静止储液搅拌缸之间的耦合采用 MRF 模型^[15]。储液搅拌缸的网格模型见图 5。

2.4 求解设置

将网格模型导入 Ansys workbench 的 FLUENT 模块中,采用隐式耦合求解算法,勾选引力选项,选择 Mixture 混合相模型、湍流模型。设定边界条件:入口设为 velocity inlet,速度为 0.221 m/s;出口设为 outflow;搅拌桨面设为 movingwall,相对于动区域旋转速度设为 0 rad/s;静区域壁面设为固定壁面。

采用 MRF 方法进行求解,动区域 Fluid 旋转速度为 20 rad/s。第一相选择液态水,粘度设为 0.046 5 Pa·s,第二相设为固态钙颗粒,密度设为 1 026 kg/s,粘度设为 0.1 Pa·s^[16],颗粒直径设为 0.003 m。

2.5 模拟仿真分析

采用以上的模型及初始工作参数,进行 FLUENT 数值模拟仿真,预计达到的效果是:

(1) 储液搅拌缸内物料在搅拌桨的作用下进行混合,每一处物料都得有搅拌速度,这样才能使得物料混合均匀。

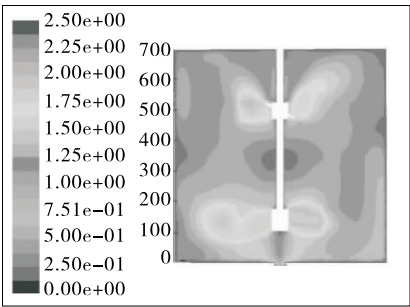
(2) 果粒含量为 5%,范围保持在 4.5%~5.5%。

将以上模型进行数值模拟仿真,在其收敛后,得到其速度分布图、第二相浓度分布云图见图 6。

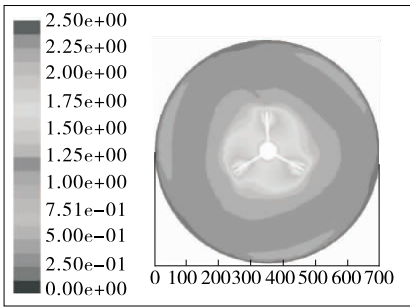
图 6 是采用初始参数进行搅拌得出的竖直面及水平面的速度云图,分别对竖直面云图中 $x=115$ (桨段)和水平面云图中 $y=350$ 进行速度采集,绘制出速度变化图见图 7。

由图 6 可知,搅拌过程中速度充满了整个平面,这样可以带动果粒在整个储液搅拌缸范围内进行运动,但是,在下层桨的正下方出现了一小片死区,这部分的果粒无法得到充分搅拌。由于上下层桨形成的涡流进行了叠加,上下层桨中间涡流也得到了加强。这基本达到了设计要求,但是如图 7 所示,在桨段的位置,速度达到顶峰,上下层速度趋于对称,储液搅拌缸最下面、双层桨中间靠近轴区以及储液搅拌缸最上端速度达到最低。

该储液搅拌缸主要是为了将果粒与果汁进行均匀混合,



(a) 竖直面速度分布图



(b) 水平面速度分布图

图 6 搅拌稳定后竖直面径向速度以及水平面周向速度云图

Figure 6 The radial velocity of the horizontal plane and the circumferential velocity of the vertical face after mixing and stability

使得果粒含量保持在 4.5%~5.5%，提高灌装精度。如图 8 所示，竖直面和水平面的果粒分布是比较均匀，由于重力的影响，下层果粒含量还是比上层高，特别是下层搅拌桨正下方，由于搅拌过程中，在下层搅拌桨的正下方出现了死区，该区域的果粒含量比较高。在 $x=115$ 处进行果粒含量采集，并与 5% 的标准进行对比，绘制成折线图见图 9。

由图 9 可知，随着液面高度的增加，果粒含量逐渐降低，且都在 5% 附近，但是，在液位最低点，果粒含量为 7.34%，还是过高；当高度大于 350 mm 时（上下层搅拌桨中间）果粒含量为 4.67%，接近需求值的。果粒浓度分布的幅值为 2.67%。

由以上的速度图及果粒浓度分布图可知，该搅拌效果基本达到了设计要求，但还是存在缺陷：

(1) 用搅拌桨对果粒饮料进行搅拌稳定后，下层搅拌桨

的正下方存在死区，对搅拌效果会产生很大的影响。

(2) 搅拌后，果粒含量超出基本要求范围，将会导致后续灌装果粒含量不均匀。

所以，前文所述储液搅拌缸参数还存在不足之处，需进一步优化。

3 储液搅拌缸的参数优化

搅拌桨的转速^[17]、搅拌桨的安装位置（下层桨距离缸底的位置）以及搅拌桨的直径对搅拌过程都有很大的影响^[4]。采用正交试验法与 FLUENT 数值模拟相结合的方法^[18]对各参数进行优化，判定各个参数对搅拌过程的影响程度并选取最优解。

3.1 正交试验法的步骤

3.1.1 确定试验指标 搅拌稳定后，储液搅拌缸果粒含量保持在 4.5%~5.5%，浓度幅值越小越好。

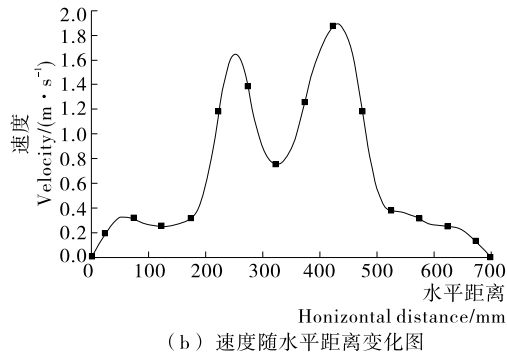
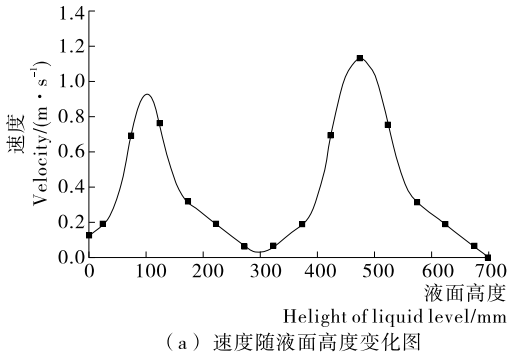
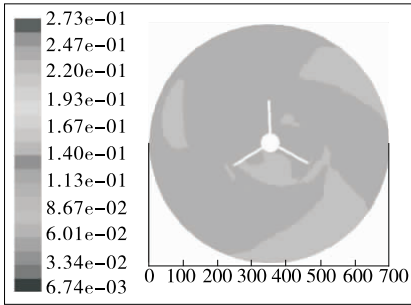
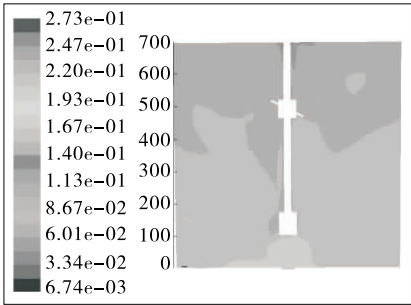


图 7 速度采集曲线图
Figure 7 Velocity acquisition map



(a) 竖直面果粒分布图 (b) 水平面果粒分布图
图 8 搅拌稳定后竖直面以及水平面果粒分布云图
Figure 8 The level of fruit grain distribution of the vertical face and the vertical face

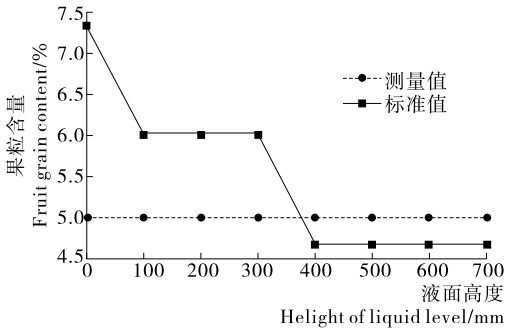


图 9 $x=115$ 处果粒含量折线图
Figure 9 $x=115$, Fruit grain content line char

3.1.2 确定影响因子及水平 影响储液搅拌缸的搅拌效果的因素主要有搅拌桨转速、安装位置和直径。根据相关参考文献^{[6]146-148}以及实际加工经验，储液搅拌缸的参数优化设计中影响因子及水平选取见表 2。

3.2 试验结果与分析

按照正交试验法的方案，应用 FLUENT 软件进行模拟仿真，得出果粒含量幅值，见表 3。

采用极差分析法对试验结果进行分析（见表 3），极差越大，该列因素的水平改变对试验结果的影响就越大，因此主次顺序为 $B>C>A$ ，根据 K 值，最佳参数组合为 $A_1B_2C_2$ ，即安装高度 100 mm，桨直径 350 mm，速度 300 r/min，恰如

表 2 试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of the experiments

水平	A 安装高度	B 搅拌桨直径	C 速度 $v/$
	C/mm	d/mm	$(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$
1	100	230	200
2	140	350	300

表 3 试验方案及试验结果表

Table 3 Experimental scheme and experimental result

试验号	A	B	C	果粒含	果粒含	果粒幅
				max/%	min/%	值/%
1	1	1	1	7.10	5.21	1.89
2	1	2	2	5.38	4.71	0.69
3	2	1	2	5.50	3.71	1.79
4	2	2	1	5.94	4.97	0.97
K_1	2.58	3.68	2.86			
K_2	2.76	1.66	2.48			
R	0.18	2.02	0.38			

表 2 中果粒幅值最低。并且该组参数的试验结果中,果粒含量为 4.71%~5.38%,试验结果完全满足要求。

4 结论

本试验先根据设计手册及其他学者的研究成果设计出储液搅拌缸的初始模型,并给定其各项参数。再利用 FLU-ENT 软件对该模型进行仿真试验,发现其缺陷,并对结果进行研究发现搅拌桨安装高度、搅拌桨叶片直径、搅拌桨的旋转速度都是影响果粒浓度的重要因素。最后采用正交试验法与 FLUENT 数值模拟相结合的方式,得到了果粒浓度分布云图,判定了影响搅拌过程的 3 个因素的主次顺序,并选出最佳组合 $A_1B_2C_2$ 。

参考文献

[1] 肖建军. 带导流筒搅拌槽内流场的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2002: 23-28.
[2] SHARMA R N, SHAIKH A A. Solid suspension in stirred

tanks with pitched blade Turbines[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(7): 2 123-2 140.

[3] LUNDEN M, STENBERG O, ANDERSSON B. Evaluation of amethod for measuring mixing time using numericalsimulation and experimental data[J]. Chem. Eng. Commun, 1995, 139(1): 115-136.
[4] 张庆华, 毛在砂, 杨超, 等. 一种计算搅拌槽混合时间的新方法[J]. 化工学报, 2007, 58(8): 1 891-1 896.
[5] 孙国梁. 油制辣椒自动灌装机设计与研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015: 30-35.
[6] 陈志平, 章序文, 林兴华, 等. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
[7] 徐伟幸. 潜水搅拌机叶轮设计理论及搅拌流场数值模拟[D]. 镇江: 江苏大学, 2006: 5-8.
[8] AUBIN J, XUEREB C. Design of multiple impeller stirred tanks for the mixing of highly viscous fluids using CFD [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(9): 2 913-2 920.
[9] MICALÉ G, MONTANTE G, GRISAFI F, et al. CFD simulation of particle distribution in stirred vessels[J]. Trans I Chem E, 2000, 78(3): 435-444.
[10] 李新明, 严宏志, 吴波, 等. 双层组合叶轮的搅拌槽对液固两相流的数值模拟[J]. 机械科学与技术, 2013, 3(32): 388-394.
[11] 梁瑛娜, 高殿荣. 双层直斜叶及其组合桨搅拌槽三维流场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 290-297.
[12] 杨锋苓, 周慎杰, 张翠勋, 等. 无挡板搅拌槽的固液悬浮特性[J]. 四川大学学报: 工程科版学版, 2012, 44(4): 185-190.
[13] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 78-86.
[14] 孙远明, 杨幼慧. 粒粒橙汁中的汁胞悬浮稳定性的研究[J]. 食品与发酵工业, 1995(4): 17-22.
[15] 胡坤, 李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 246-274.
[16] 崔曼. 盒中袋液体软包装灌装技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 7-8.
[17] 杜飞龙, 李少波, 何玲. 卧式组合搅拌槽内固液混合物多相流模拟分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 111-114.
[18] 解宁, 刘杰, 郭津津, 等. 基于 FLUENT 与正交实验法的二通插装阀性能分析及结构优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(9): 106-108.

(7): 1 356-1 362.

[13] 陈清西, 林建峰, 宋康康. 酪氨酸酶抑制剂的研究[J]. 厦门大学学报, 2007, 46(2): 274-282.
[14] 郑德平, 郭勇, 潘力. 酶学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 106-117.
[15] DECKER H, SCHWEIKARDT T, TUCZEK F. The first crystal structure of tyrosinase: all questions answered? [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2006, 45(28): 4 546-4 550.
[16] OU Juan-ying, SUN Zheng. Feruloylated oligosaccharides: Stucture, metabolism and function[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 90-100.

(上接第 12 页)

[10] SANCHEZ F A, RODRIGUEZ J N, GARCIA C F. Tyrosinase: A comprehensive review of its mechanism [J]. Biochem Biophys Aeta, 1995, 1 247(1): 1-11.
[11] RAMSDEN C A, RILEY P A. Tyrosinase: The four oxidation states of the active site and theirrelevance to enzymatic activation, oxidation and inactivationitors[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 2014, 22(8): 2 388-2 395.
[12] LIN Qi-ling, OU Shi-yi, WEN Qi-biao. In vitro antioxidant activity of feruloyl arabinose isolated from maize bran by acid hydrolysis[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51