

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.01.005

多功能料理机锅体内流场研究

诸永定^{1,2}, 曹 骥^{1,2}, 郑 鑫^{1,2}, 孙 帅^{1,2}, 钱锦远^{3*}, 金志江³

(1. 浙江省健康智慧厨房系统集成重点实验室, 浙江 宁波 315336;

2. 宁波方太厨具有限公司, 浙江 宁波 315326;

3. 浙江大学 能源工程学院 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要:目前市面上部分料理机存在粉碎能力差以及工作时间长等缺点,为了改善料理机的性能,笔者采用计算流体力学的分析方法对多功能料理机内部的流动状态进行了数值模拟研究。通过对设计转速及其上下转速区间内料理机锅体内的流速流线分布以及剪切应变率分布的分析,发现垂直锅体底面方向上的旋涡分布对刀具的粉碎效果有重要的影响;流体的运动速度以及剪切应变率随着刀具转速的增加而增加,即增加刀具的转速能显著提高物料的粉碎性。因此,在合适的转速下,合理的刀具及锅体结构可改善料理机的性能。

关 键 词:料理机;计算流体力学;旋涡分布;旋转速度;刀具结构

中图分类号:TS255.35;TM925.59

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)01-0022-07

Research on Flow Characteristics Inside Multi-Functional Food Processor

ZHU Yongding^{1,2}, CAO Ji^{1,2}, ZHENG Xin^{1,2}, SUN Shuai^{1,2}, QIAN Jinyuan^{3*}, JIN Zhijiang³

(1. Key Laboratory of Healthy & Intelligent Kitchen System Integration of Zhejiang Province, Zhejiang, Ningbo 315336, China;

2. Ningbo Fotile Kitchenware Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315326, China;

3. Institute of Process Equipment, College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Some food processors have disadvantages such as poor crushing efficiency and long working hours. In order to optimize the performance of food processors, the flow characteristics inside the multi-functional food processor were investigated by computational fluid dynamics (CFD) method. Through the analysis of the velocity distribution and shear strain rate distribution in the design speed and in the speed range of the food processor, it is found that the vortex existing on the vertical cross section has a significant influence on the crushing efficiency of the food processor. The results show that the fluid velocity and shear strain rate increase with the increase of cutting blade rotating speed, which indicates that the crushability of materials can be remarkably improved by increasing rotating speed of the cutting blade. Therefore, the performance of the food processor can be enhanced by proper cutting tool and pot structure at proper rotating speed.

Keywords: food processor; CFD (computational fluid dynamics); vortex distribution; rotating speed; cutting blade structure

随着人们对“绿色、营养、健康、环保”等饮食习惯的日渐重视,食品料理机的销售量逐渐增多,其中集制作豆浆、肉馅和榨汁等功能于一体的多功能料理机更受欢迎^[1]。目前市面上国内企业生产的多功能料理机在性能上还不尽如人意,具体表现在残余碎渣大以

及工作时间长等方面。企业对多功能料理机的研究大部分都是基于经验设计,因此分析并掌握料理机锅体内部的流场,有助于料理机的研发工作。

目前已有的文献中,对于料理机的内部流场的研究还比较少,但是其研究方法与搅拌器的内流场的分

收稿日期:2019-01-31;修回日期:2019-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51805470);中央高校业务经费项目(2018FZA213)。

第一作者简介:诸永定(1968),男,浙江慈溪人,硕士,高级工程师、高级经济师,主要从事厨房电器的研发。通信作者:钱锦远(1988),男,浙江慈溪人,博士,讲师,主要研究方向为先进流动控制。E-mail:qianjy@zju.edu.cn

析方法相似,主要不同点则是料理机的刀具和搅拌器的搅拌轴的转速有很大差异。很多学者对搅拌器的研究主要集中在搅拌器内的流动^[2-5]以及搅拌器的混合效率^[6-8]。此外,有少部分文献关注于家用榨汁机和破壁机上^[9-16]。其中家用榨汁机刀具的转速相比料理机刀具的转速小,而破壁机刀具的转速相比料理机刀具的转速大。陈荣等对某公司的榨汁机的内部流动进行了分析,并对刀具和杯体的结构进行了改进。通过对杯体内流速及流线的研究,发现刀具结构影响出汁率^[15]。谢文华等对破壁机内部的流场进行了分析,通过对不同转速下破壁机杯体内的流场分析,发现转速和刀具结构是影响破碎效果的重要因素^[16]。

笔者主要针对多功能料理机的锅体内的流场进行研究,分析锅体内的流动规律及机理,为后续进行料理机性能的优化提供思路及方向。

1 研究方法

1.1 几何模型

料理机的几何模型如图 1(a) 所示。其锅体顶部直径约为 0.165 m,锅体底部直径约为 0.136 m,锅体高度约为 0.159 m,刀具距离锅体底面的最低距离约为 0.001 m。因为本次研究重点分析料理机锅体内部特别是刀具附近的流场分布,故对料理机内部的流场进行抽取,并对刀具的转轴等进行适当简化,最终在分析计算中所采用的几何模型如图 1(b) 侧所示。料理机在 xz 截面示意图如图 1(c) 所示。

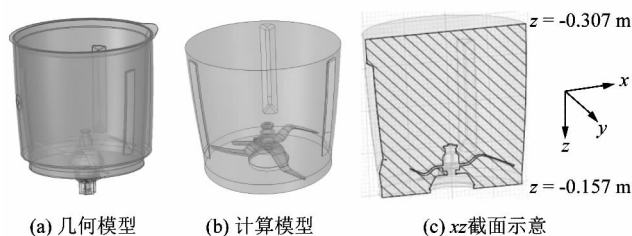


图 1 料理机实物模型及计算模型

Figure 1 Physical model and calculation model of food processor

1.2 计算模型

流体在流动过程中遵循能量守恒、动量守恒和质量守恒。在此次研究分析中,忽略锅体内部的流体以及流体与锅体壁面之间的热交换,同时将锅体内部的流体视为不可压缩流体。故锅体内部流体在刀具作用下的运动方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{gu} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{g}(\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}})] + \mathbf{g}. \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 表示速度矢量, ρ 表示流体密度, t 表示时间, p 表示压力, $\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 表示应力张量, $\mathbf{g}$ 表示重力加速度。

对于刀具在料理机锅体内部高速旋转下的流场,在分析中采用滑移网格的方法。滑移网格方法中旋转区域的网格随着时间而整体运动,因此旋转区域中的控制方程需要将绝对速度描述通量变为相对速度描述通量,其控制方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{gu} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{g}(\mathbf{u}_r \otimes \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}})] + \mathbf{g}. \quad (4)$$

式中, $\mathbf{u}_r = \mathbf{u} - \mathbf{u}_e$,是旋转坐标系下的相对速度矢量场。

由于刀具的设计转速高达 11 000 r/min,锅体内部的流体处于很强的湍流状态,故在本次研究中采用适应性很强的 Realizable κ - ε 湍流模型,该湍流模型的湍流动能和湍流耗散率的表达方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \kappa u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + \\ G_b - \rho \varepsilon - Y_M; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \\ \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} C_{3\varepsilon} G_b. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: μ 代表流体黏度, G_κ 是由时均速度梯度引起的湍流动能, G_b 是由浮力引起的湍流动能, Y_M 是可压缩流中的湍流扩张在总湍流耗散中所占比重, σ_κ 和 σ_ε 是湍流动能 κ 和湍流耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, $\mu_t = C_\mu \rho \kappa^2 / \varepsilon$ 代表湍流粘度, $C_1, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 是模型常数。

料理机锅体内流场被分成静止域与旋转域 2 个部分,且采用非结构网格的划分方式。为了排除网格数量的影响,3 种不同数量的网格被划分。3 种不同网格数量在料理机锅体内 y - z 平面上的速度随时间的变化如图 2 所示。可以发现采用网格 2 与网格 3 划分方式得到的结果之间差异非常小,故最终网格 2 的划分方式被采用,且网格数量约为 110 万。本次分析研究采用商业软件 FLUENT,分析采用瞬态模拟并考虑重力的作用,压力和速度的耦合方式采用 SIMPLE 算法,并且在计算中采用二阶迎风差分格式来提高计算精度。

2 研究方法

料理机锅体内流体流动和压力的分布以及剪切应变率的分布与料理机最终的切割粉碎能力息息相关。本次研究首先分析在设计转速下料理机锅体内的流场分布状态,然后分析在不同转速下锅体内的流动状态差异,进而为料理机的性能优化提供方向。

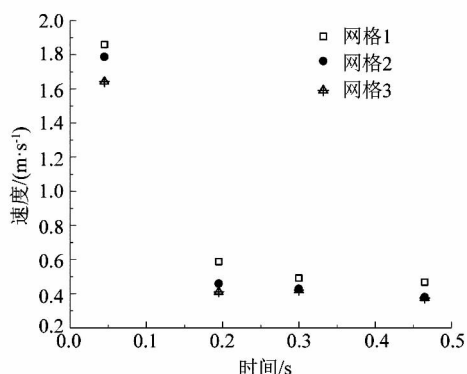


图2 3种不同网格划分方式下料理机锅体内
y-z平面上的速度随时间的变化

Figure 2 Velocity on y-z plane inside cooking
pot vs time under three different kinds of mesh

2.1 设计转速下料理机锅体内的流场分布

2.1.1 流场分布

如图3所示,是料理机锅体内流体在垂直旋转轴的截面上的矢量速度分布。可以发现对于每一截面,高速流体均出现在刀具与截面的交叉处。当流体远离刀具时,如图3(g),锅体内的流体运动速度除在扰流筋条附近有波动外变化不明显。为了分析当流体逐渐远离刀具时锅体内流速的变化情况,将流体流速沿旋转中心轴(z轴)的变化情况在图4中表示,其中轴向距离的增加表示与刀具的距离减小。从图4可以发现,随着流体在轴线方向上与刀具之间的距离增加,其运动速度先增加随后减小至较低水平,但是可以发现在刀具上方的流体最大运动速度比刀具所在旋转区域的流体流速小。图5是锅体xz平面中不同高度下流速的分布,可以发现在不同的垂直于z轴的截面上,两端(靠近锅体壁面)的流体速度大,中间(锅体中心)的流体流速最小。

在料理机锅体中,流体在流动过程中形成的涡流有助于流体回到刀具附近,因此有助于刀具切碎锅体内的物质。图6是锅体内不同垂直于旋转轴的截面上的流体流线分布;图7是锅体内xz截面上的流体流线分布。对比图6和图7,可以发现垂直于锅体底面的旋涡是刀具能否将锅体内的物质切割粉碎的关键。如图6(c)所示,在远离刀具的锅体上部,垂直于旋转轴的截面上的流线形式较为单一,锅体壁面的流体向转轴聚集,在扰流筋条附近,流线因为扰流筋的阻力作用而轻微变形,但是扰流筋条对垂直于旋转轴的截面上流体的流线影响较小,说明此处的扰流筋条对锅体内水、浆类及果蔬的混合促进作用较小,需要一定的结

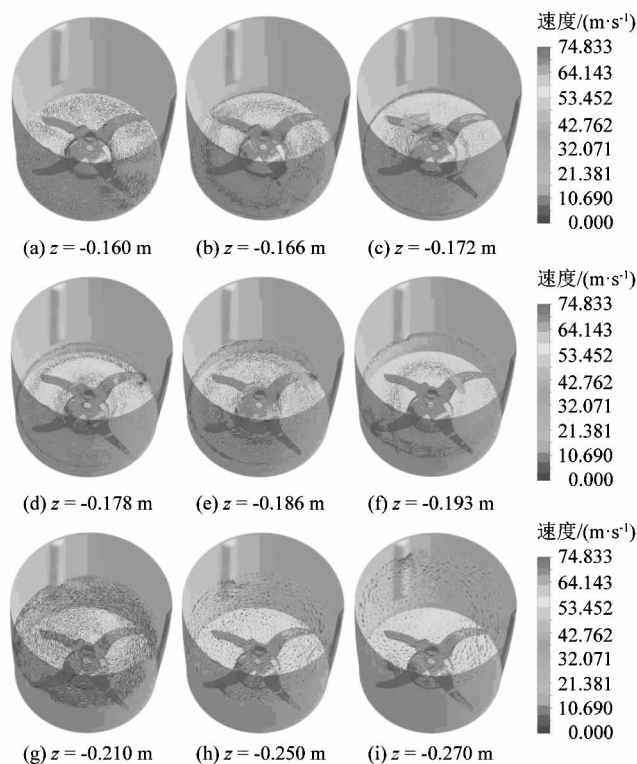


图3 设计转速下锅体内不同水平
截面上流体的速度分布

Figure 3 Velocity distribution of fluid different
horizontal cross sections under design rotating speed

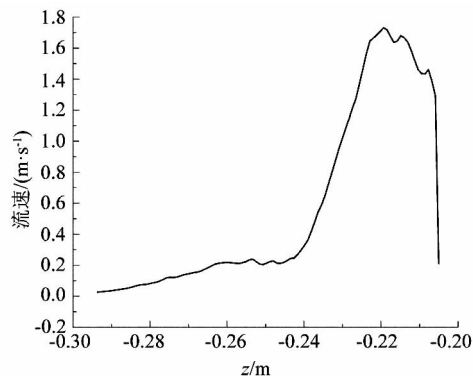


图4 设计转速下料理机锅体内流体
流速沿旋转中心轴的分布

Figure 4 Fluid velocity distribution along central
axis of rotation under design rotating speed

构改进。从图7中可以发现在xz截面上有很多局部旋涡,这些旋涡中的流体和刀具没有交集,因此在实际过程中不利于存在这部分流体中的颗粒的切割粉碎,可见刀具的结构如折弯角度等需要改进,从而使垂直于锅体底面的局部旋涡减少甚至消失,使得锅体内的流体都能与刀具进行作用。

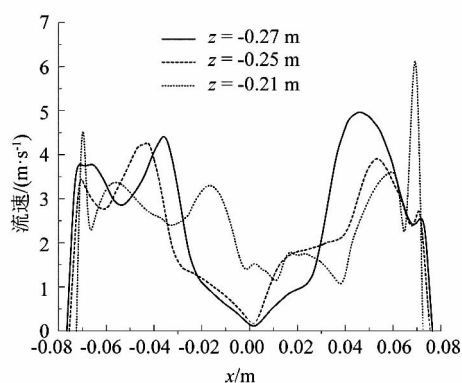


图5 设计转速下料理机锅体 xz 平面中不同高度下的流体速度分布

Figure 5 Fluid velocity distribution along different levels in xz plane under design rotating speed

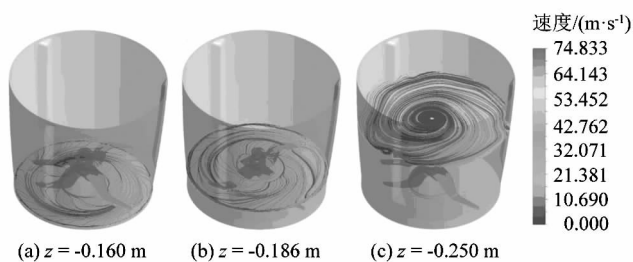


图6 设计转速下料理机锅体内不同水平截面上的流线图

Figure 6 Streamline chart on different horizontal cross sections under design rotating speed

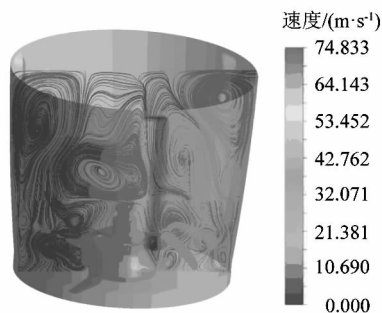


图7 设计转速下料理机锅体内 xz 截面上的流线图

Figure 7 Streamline chart on xz section under design rotating speed

2.1.2 剪切应变率分布

图8为锅体内不同的垂直于旋转轴截面上的剪切应变率云图。从图中可知剪切率最大的部分发生在刀具与截面交叉的地方,这是因为刀具的剪切作用最强;同时,扰流筋附近也有较大的剪切应变率,说明扰流筋

也可以起到一定的粉碎作用。扰流筋和旋转刀具相比,扰流筋的粉碎能力基本可以忽略。

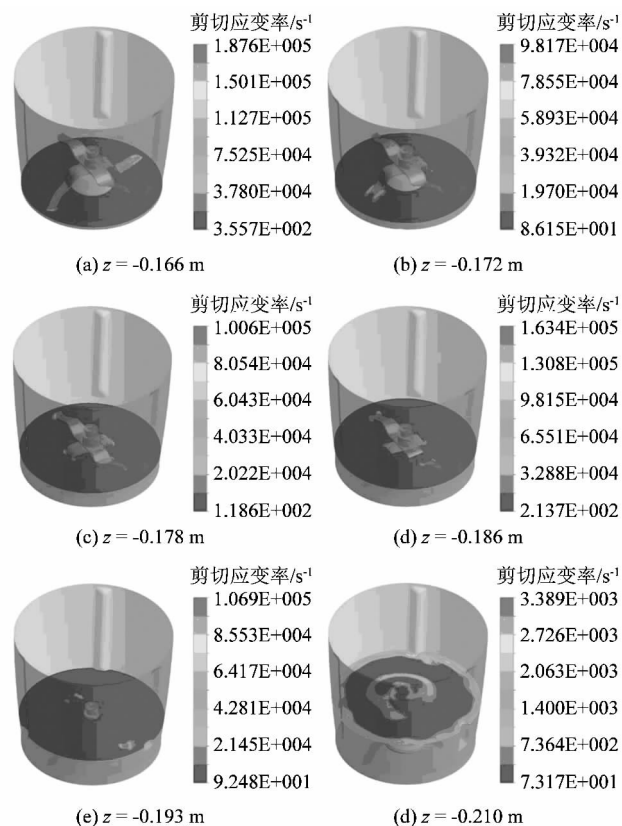


图8 设计转速下料理机锅体内不同水平截面上的剪切应变率

Figure 8 Shear strain rate on different horizontal cross sections under design rotating speed

2.2 不同转速下的流场分析

为了探讨刀具转速对锅体内的流体流动的具体影响,笔者还增加了在设计转速上下区间内的刀具转速:9 000,10 000,12 000 和 13 000 r/min,获得了4种不同转速时的锅体内的液体流动特性。

图9~12是刀组件在9 000~13 000 r/min转速时锅体内 z 向垂直于旋转轴的截面上的速度矢量分布图。选取的截面分别位于锅体底面和刀具之间即 $z = -0.160$ m、刀具所在区域即 $z = -0.186$ m 以及锅体顶部远离刀具的区域即 $z = -0.250$ m。对比图3(a)、图3(e)、图3(h)以及图9~12,可以发现在刀具旋转速度区间内,锅体内不同垂直于旋转轴截面上的液体的流速矢量图是相似的,但是流速大小随着刀具的旋转的速度增加而增加。

图13是锅体 xz 平面中,锅体上部($z > -0.21$ m)不同高度下速度的分布。可以看出在不同转速下,锅

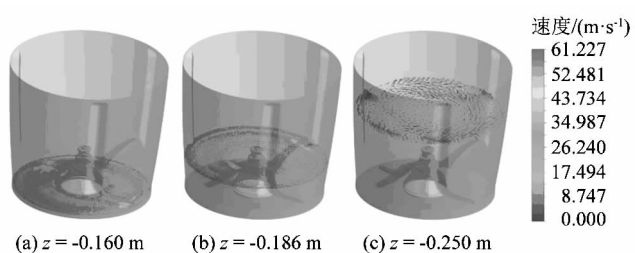


图9 转速为9 000 r/min时料理机锅体内不同截面上的速度

Figure 9 Velocity on different horizontal cross sections at rotation speed of 9 000 r/min

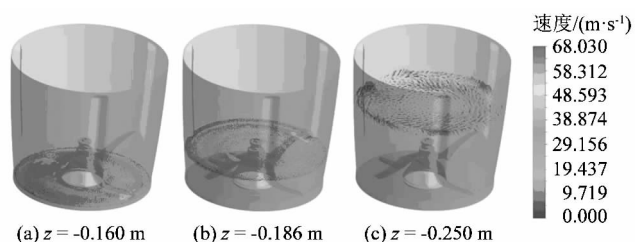


图10 转速为10 000 r/min时料理机锅体内不同截面上的速度

Figure 10 Velocity on different horizontal cross sections at rotation speed of 10 000 r/min

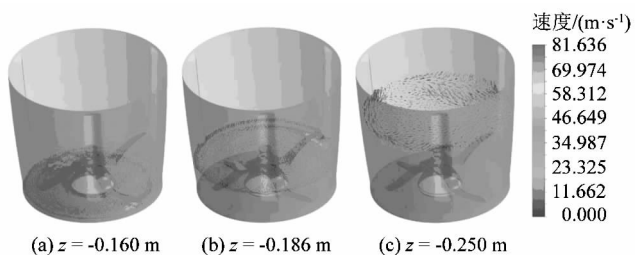


图11 转速为12 000 r/min时料理机锅体内不同截面上的速度

Figure 11 Velocity on different horizontal cross sections at rotation speed of 12 000 r/min

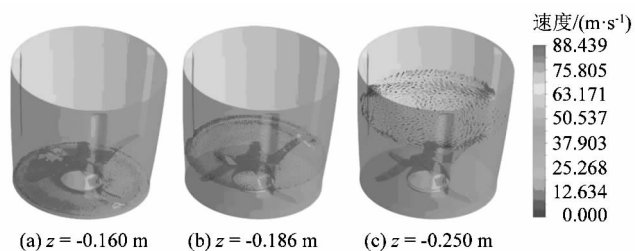


图12 转速为13 000 r/min时料理机锅体内不同截面上的速度

Figure 12 Velocity on different horizontal cross sections at rotation speed of 13 000 r/min

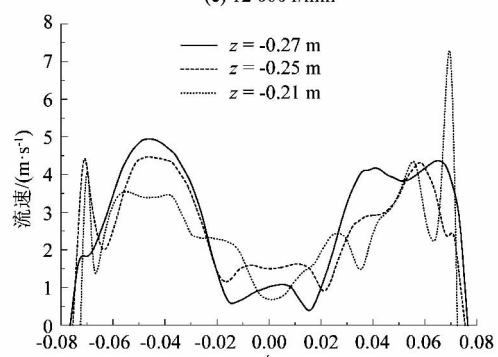
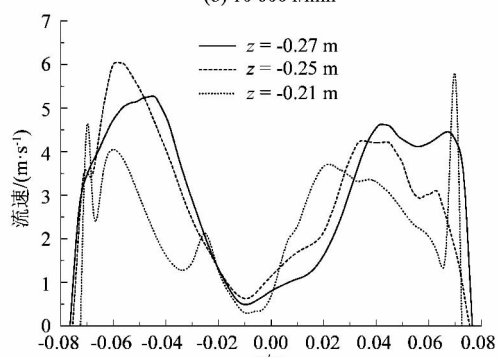
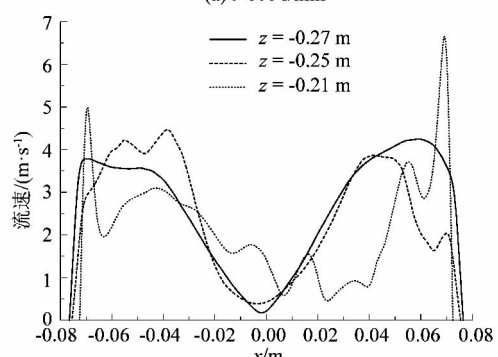
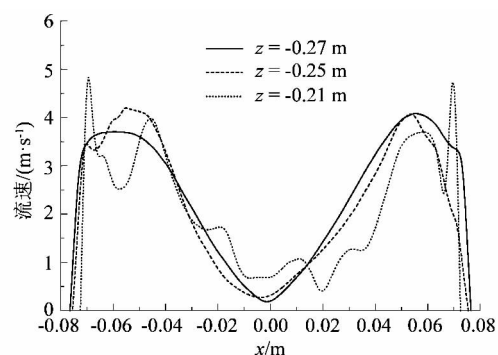


图13 不同转速下料理机锅体内垂直轴向截面的流体流速分布

Figure 13 Fluid velocity distribution on cross sections perpendicular to rotary axis under different rotating speed

体中远离刀具区域内的流体流速均是两端高中间低,随着转速的增加,锅体顶部的流体不稳定程度也逐渐加剧,因此增加转速利于锅体内流体的混合。图 14 对比了不同刀具旋转速度下锅体内部的最大速度,可以发现随着刀组件旋转速度的增加,锅体内流体的最大速度几乎是线性增加,这与刀具转速线性增加有关。

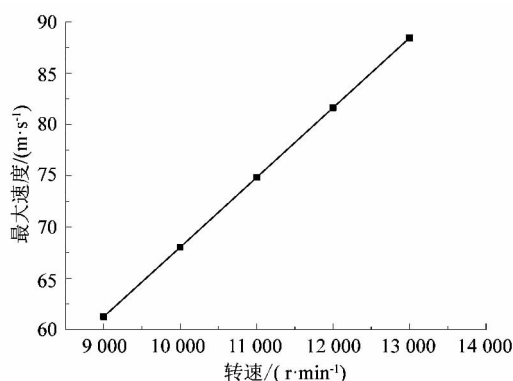


图 14 不同转速下锅体内的最大速度

Figure 14 Maximum velocity under different rotating speed

图 15 对比了不同转速下锅体内剪切应变率的最大值,可以发现随着刀具转速的增加,锅体内的最大剪切应变率也增加,并且二者之间近似幂函数的关系。因此增加刀具的转速会显著增加其切割粉碎能力。

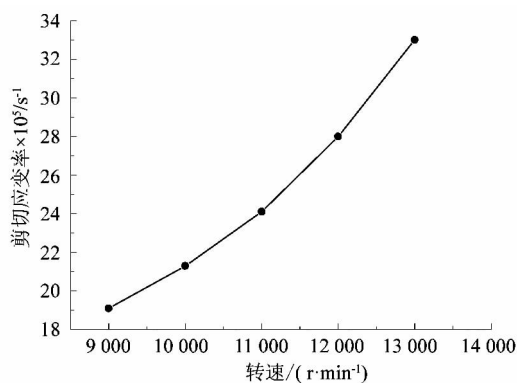


图 15 不同转速下锅体内的最大剪切应变率

Figure 15 Maximum shear strain rate under different rotating speed

3 结论

笔者以料理机锅体内的流场为研究目标,通过分析在不同刀具转速下料理机锅体内流体的流动分布以及剪切应变率等参数,得到以下结论:

锅体下半部分的液体因为刀具的旋转而以较大的速度运动,且刀具尖端处的流体运动速度最大,在同一

垂直旋转轴的平面内,随着流体在圆周方向上远离刀具,其运动速度也逐渐减小。大剪切应变率主要出现在刀具表面,且刀具旋转前进方向侧的剪切应变率比背离前进方向侧的剪切应变率大,同时剪切应变率较大的部分发生在处于锅体底部的刀具尖端附近处;随着流体远离锅体底部刀具,剪切应变率也随之降低,意味着刀具对锅体内部物质的粉碎能力也逐渐降低。锅体内部的流场分布以及剪切应变率的分布不受刀组件转速的影响,但是锅体内流体的流速以及剪切应变率的值随着刀组件转速的增加而增加,且流体的最大运动速度与刀组件的转速呈线性关系,最大剪切应变率与刀组件的转速呈幂函数的关系。

料理机在垂直于锅体底部的截面上存在许多局部旋涡,而有部分旋涡与刀具没有任何交叉,因此不利于刀具对锅体内部物质的充分粉碎,故应该对刀具的结构如折弯角度等结构参数进行改进,从而消除不与刀具相交的局部旋涡。此外,扰流筋的存在使得其附近的流体有一定程度的扰动,但在远离刀具的锅体顶部,扰流筋的存在对流体的流动影响不大,因此锅体的结构也需要进一步的改进。

参考文献:

- [1] 陈敏. 畅销产品新动态:食品加工小家电 料理机[J]. 现代家电, 2006(17): 64-64.
- [2] GADDUM N, BAPTISTA R P, DELAHAYE M, et al. CFD simulation of small-scale single-use stirred tank bioreactors; comparisons and perspectives [J]. Cytotherapy, 2017, 19(5): S113.
- [3] MENDOZA F, BANALES A L, CID E, et al. Hydrodynamics in a stirred tank in the transitional flow regime [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 132: 865-880.
- [4] KYSELA B, CHARA Z, KONFRST J, et al. CFD study of flow similarities in turbulent regime in a stirred tank [J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 1978(1): 030028.
- [5] 刘宝庆, 钱路燕, 陈明强, 等. 新型大双叶片搅拌器功率与混合特性的数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(3): 849-857.
- [6] DUAN Xiaoxia, FENG Xin, YANG Chao, et al. Numerical simulation of micro-mixing in stirred reactors using the engulfment model coupled with CFD [J]. Chemical Engineering Science, 2016, 140: 179-188.
- [7] YANG Shu. Modeling and optimizing mixing efficiency in a two-impeller stirred tank [D]. New Jersey: Rutgers University, 2017: 1-42.
- [8] DERKSEN J J. Numerical simulation of solids suspension in a stirred tank [J]. AIChE Journal, 2003, 49(11): 2700-2714.
- [9] 王立慧, 丁慧, 张裕中. 双刀片豆浆机流场分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 115-119.
- [10] 朱莲花, 宋强, 昋向博, 等. S形两叶刀片豆浆机腔内流场数值模拟[J]. 家电科技, 2013(9): 60-62.

(下转第 34 页)