

弯曲灌装管道内油制辣椒流场的模拟分析

Simulation and analysis of chili flow characteristics in bending filling pipes

周 鹏 于丽娅 何 玲 杨政通

ZHOU Peng YU Li-ya HE Ling YANG Zheng-tong

(贵州大学现代制造技术教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550003)

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

摘要:为优化油辣椒灌装管道设计,以油辣椒固液多相流体为研究内容,以水平 90°弯管模型为对象,计算适合该灌装管道模型的油制辣椒湍流临界速度,利用多相流 Mixture 模型分别对入口流速为 5, 7, 9 m/s 的油辣椒制品固液多相混合流体进行模拟,分析弯管内固液多相流的速度场和密度场分布情况,并与单一辣椒油流动性进行对比。结果表明:流速大于临界湍流速度时输送效果较为理想,当流速低于临界速度时,容易发生沉降现象;几何弯曲对多相流场影响较大,弯管段与出料口之间直管长度不宜过大。研究结果可为油辣椒制品灌装设备设计提供有利的理论依据。

关键词:油制辣椒; Mixture 模型; 弯管; 固液多相流; 灌装速度; 管道设计

Abstract: In order to optimize the design of chili's Filling pipeline, taking solid-liquid multiphase fluid of chili as the research content, 90° horizontal bend model as the research object, calculating the suitable turbulence critical speed for the chili filling pipeline, using the mixture model of multiphase flow, the distribution of velocity field and density field was analyzed with inlet flow rate as 5, 7, 9 m/s. The results show that it is easy to form stratification when the speed is less than the critical speed. Geometric bend has large influence on multiphase flow field. The length of straight pipe section between the elbow and spout should not be too large. The results provide favorable data bases for filling conveyor speed setting in the oil pepper products filling equipment.

Keywords: chili oil; mixture model; elbow pipe; solid-liquid multiphase fluid; filling speed; piping design

油辣椒是以干辣椒作为调味基料,加入食用油进行翻

炒,再辅以如胡椒、食盐、腐乳等调味料加工制成,是具独特辛辣风味的调味佳品,深受广大人民的喜爱^[1]。老干妈公司作为中国最大的辣椒制品生产厂商,其产品远销海内外。然而,老干妈产品的灌装方式仍然以人工灌装为主,生产效率低下,成本高昂,自动化灌装的需求日益迫切。现阶段,利用现有成熟技术,已经设计多代试验样机,经过反复试验和改进,样机的搅拌机构、动力机构等均较稳定可靠。图 1 所示为第二代样机模型,出料阀和转向阀之间的灌装管道并未给出,这是因为先前设计的管道容易出现物料沉降、管道堵塞甚至爆管现象。因此,研究油辣椒制品的管道流动规律,合理设计灌装管道,可加速油制辣椒的生产开发,减少运行费用和简化操作流程,具有明显的经济效益。

与传统流体试验相比,CFD 在处理复杂流体和大型流体设备上具有耗资少、与尺寸无关等特点,因而被广泛应用于流体工程领域^[2]。目前,利用 CFD 软件对固液多相流进行流场分析,已取得一定的研究成果。例如,杜飞龙等^[3]运用欧拉多相流模型分析卧式组合搅拌槽内油辣椒固液混合物料的宏观速度场、时均速度、密度场和各相体积分数的分布状

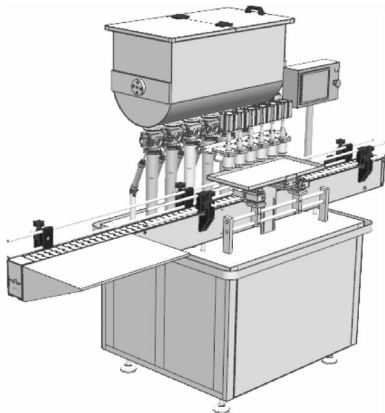


图 1 油辣椒自动灌装样机三维结构图
Figure 1 Chili automatic filling prototype machine three-dimensional structure

基金项目:国家自然科学基金(编号:51475097);贵州省重大科技专项(编号:黔科合重大专项字[2012]6008)

作者简介:周鹏,男,贵州大学在读硕士研究生。

通讯作者:于丽娅(1982—),女,贵州大学讲师,贵州大学在读博士生。E-mail:342506373@qq.com

收稿日期:2015—08—29

况。吕帅等^[4]应用 CFD 软件对阀芯运动到不同位置时的流速、压力以及湍流强度进行分析以获得阀在不同位置时,不同流量下受到的湍流强度、流速、流量系数与流量、角度之间的关系。朱进林等^[5]利用 CFD 模拟软件对蒸发式冷凝器工作状态时内部流场进行非稳态模拟,分析 5 s 内 3 种进风方向对冷凝器内部温度场以及气流场的影响。但综合来看,对油制辣椒等复杂固液多相流在灌装管道内流动特性的研究尚未有开展。

在油辣椒灌装设备的实际运行中,弯管结构是最容易出现物料堆积和管道堵塞的部分。受到空间布置的限制,设计中使用水平弯管结构可以有效利用空间,优化管道布局。因此,本试验拟采用水平 90°弯管为灌装弯曲管道的简化模型,利用多相流 Mixture 模型对弯管流场进行模拟,通过研究固液多相流的速度场和密度场分布情况,旨为灌装管道的设计提供理论依据。

1 数值分析模型

1.1 水平 90°弯管模型

计算模型为水平 90°圆形弯管,内径为 100 mm。两侧直管段长度均为 1 200 mm,曲率半径为 300 mm。计算模型弯管半径依照现有样机尺寸大小设定,为了使管内流体充分发展,直管段长度有所加长。二维图形见图 2。利用 SolidWorks 软件创建三维模型,并用 ICEM 软件对模型计算域进行网格划分。

流场区域直管段采用六面体结构化网格进行划分,横截面采用 O 型网格,弯管部分采用四面体非结构化网格划分,交界面处对齐处理,总共约有 40 万个单元,具体见图 3。

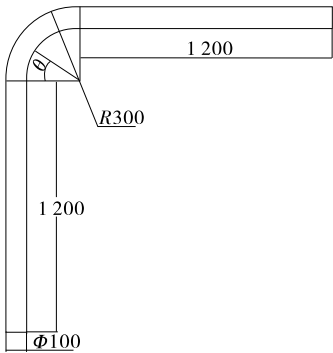


图 2 90°弯管结构示意图
Figure 2 90° bend structure diagram mm

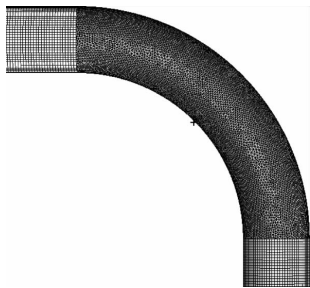


图 3 90°弯管网格示意图
Figure 3 Mesh of 90° bend pipe

油制辣椒成分复杂,包含多种固体颗粒成分。为突出主要影响因素,将模拟对象简化为固液多相流。通过试验测量得,液相为辣椒油,密度为 980 kg/m³,黏度为 0.065 Pa·s;第一固相为辣椒颗粒,密度 1 280 kg/m³,平均颗粒直径 5 mm,体积分数 70%,第二固相为肉丁颗粒,密度 975 kg/m³,平均颗粒直径 8 mm,体积分数 10%。

考虑到实际试验过程中,低速流动时有明显分层甚至堵塞管道现状,模拟时设置流速较大。模拟情况与真实灌装工况相近。

1.2 湍流临界速度

雷诺数代表惯性力与粘性力之比,当 Re 较小而不超过其临界值时,支配流动的主要因素是粘性力。当 Re 增大甚至超过其临界值时,惯性力逐渐取代粘性力而成为支配流动的主要因素^[6]。雷诺数的计算是判断流体流动状态的重要参数。其计算公式:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}, \tag{1}$$

式中:
v——流体的流速,m/s;
ρ——密度,kg/m³;
η——黏度,Pa·s;
D——管道直径,m。

Re<2 300 为层流状态,Re=2 300~4 000 为过渡状态,Re>4 000 为湍流状态,Re>10 000 为完全湍流状态^[7]。工业实际应用中,Re>2 000 即可判断为湍流。

对于油制辣椒混合流体来说,层流状态时,由于固体体积分数较大,且固体颗粒相互之间流动束缚较大,流速将沿运动方向降低,进而造成固体颗粒堆积,影响混合流体整体输送速度,甚至造成堵塞。而湍流状态下,沿流动方向的粘性力对固相颗粒的束缚作用降低,质点向其他方向运动的自由度增大,不易造成堆积和堵塞,便于输送。因此,找到各工况下临界雷诺数对应的临界速度,对确保研究顺利开展十分必要。

由式(1)变形得:

$$v = \frac{Re \eta}{\rho D}. \tag{2}$$

辣椒油密度为 980 kg/m³,黏度为 0.065 Pa·s;取管道直径为 0.1 m。计算可得,混合流体密度为 1 189.5 kg/m³,与试验测得平均密度 1 200 kg/m³相近。代入式(2)计算可得,对于单一流体辣椒油而言,临界速度 V_c≈1.33 m/s;对于混合流体而言,临界速度 V_m≈6.73 m/s。显然,单一辣椒油流体比油辣椒混合物料达到湍流状态所需速度更低。对流动情况进行模拟时,模拟入口速度的取值应大于临界速度,才能适用湍流模型。

1.3 控制方程及边界条件

控制方程采用基于无相变过程的 Mixture 模型,描述其流动特性的数学模型^[8-10]可表示如下。

1.3.1 连续方程 连续方程以式(3)表示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0, \tag{3}$$

式中:

$\vec{v}_m$ —— 混合相流体的速度, m/s;
 ρ_m —— 混合相流体的密度, kg/m³;
 ∇ —— 拉普拉斯算子。

1.3.2 动量方程 动量方程以式(4)表示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n a_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}), \quad (4)$$

式中:

n —— 1、2、3 分别对应液相辣椒油、固相辣椒和固相肉丁;
 p —— 静压力, N;
 $\vec{F}$ —— 体积力, N;
 a_k —— 相 k 的体积分数;
 $\vec{v}_{dr,k}$ —— 第 k 相的拖曳速度, m/s;
 μ_m —— 混合黏度, Pa · s;
 μ_L —— 液相黏度, Pa · s;
 μ_S —— 固相黏度, Pa · s。

1.3.3 能量方程 能量方程以式(5)表示:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (a_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot [\sum_{k=1}^n a_k v_k (\rho_k E_k + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E, \quad (5)$$

式中:

k_{eff} —— 固相黏度导热过程中的有效热传导率;
 S_E —— 固相黏度其他任何体积热源;
 E_k —— 固相黏度相 k 的可感热焓, J。

1.3.4 边界条件 为方便研究将实际条件进行适当简化:模拟流体为液固三相流,并假设混合流体的流动为瞬态湍流流动。液相流体为不可压缩流且密度为常数,流动过程无温

度变化,动力黏度为常数。

实际设备中,通过设置电动机不同的转速来提供不同灌装速度,从而改变物料流动。因此为模拟实际状况,入口边界选择速度入口(VELOCITY_INLET),给定入口速度的大小和方向。为观察不同入口速度和弯管结构对混合流体流动状态的影响,出口边界选为自由出流(OUTFLOW)。

管壁为壁面边界,指定壁面为无滑移边界条件,壁面边界处采用标准壁面函数来处理。湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型。计算模型中考虑了重力,而对流动影响很小的升力、虚拟质量力等作用力进行了忽略。重力加速度为 9.81 m/s²,方向为 z 轴负方向。

2 数值计算结果及分析

下面分别对不同入口速度(包括 5,7,9 m/s)下油辣椒制品混合流体的速度场和密度场进行仿真,并与单一辣椒油的速度分布进行对比。

2.1 两种流体速度场的比较

在相同的入口初始速度 7 m/s 下,比较单相流体和混合流体的速度场分布。由图 4 可知,两种流体的整体流场速度表现出不同的分布特征。在第 1 个直管段,单相流体与混合流体流速变化基本相同,流速的极大值都位于管道中心附近。单相流体在进入弯管段后,受几何弯曲影响较小,速度降低较少,进入第 2 个直管段后逐渐恢复到之前的流动状态,速度极大值仍位于中心位置。而多相流体经过弯管段时,速度极大值向管道内侧移动,外侧速度较小;进入第 2 个直管段后,与之前相比,速度有较大程度降低。图 5 展示了两种流体在 $\theta=45^\circ$ 横截面处的速度分布。由图 5 可知,单相流体中心高流速区面积更大,且管道中心区域仍保持较大流速;多相流体高流速区域面积小,且明显向管道外侧偏移。

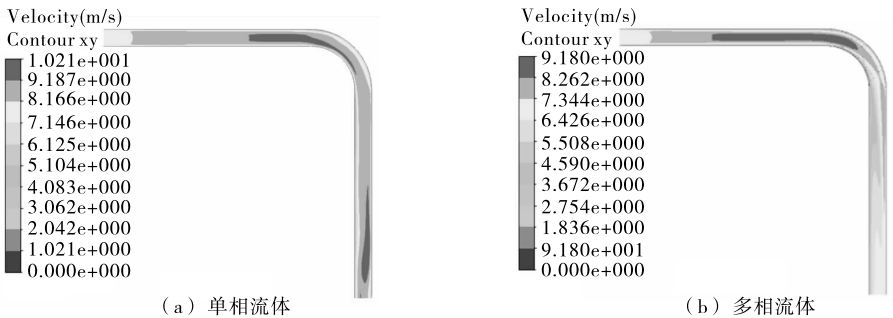


图 4 两种流体速度分布对比
Figure 4 Contrast of velocity field distribution of the two kinds of fluid

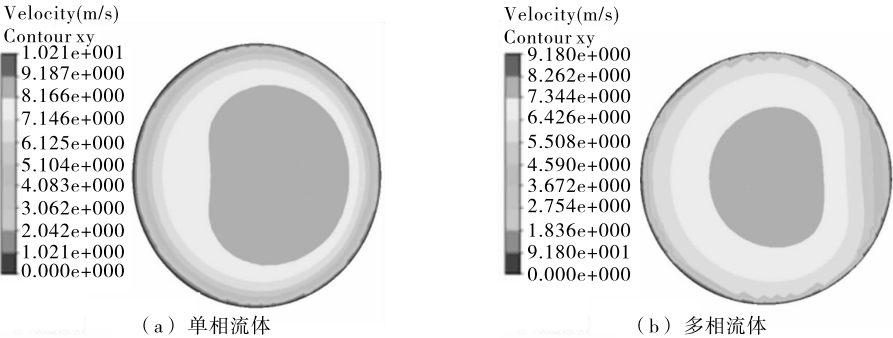


图 5 两种流体 $\theta=45^\circ$ 横截面速度分布对比
Figure 5 Contrast of velocity field distribution of the two kinds of fluid in the cross section of $\theta=45^\circ$

这说明单相流体与多相流速度分布明显不同,且几何弯曲对多相流体的流速影响更大。

2.2 多相流体速度场分析

图 6 分别给出了油制辣椒固液多相流体在 5,7,9 m/s 的不同入口速度下,在 θ 为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 典型截面处的混合流体速度分布图。

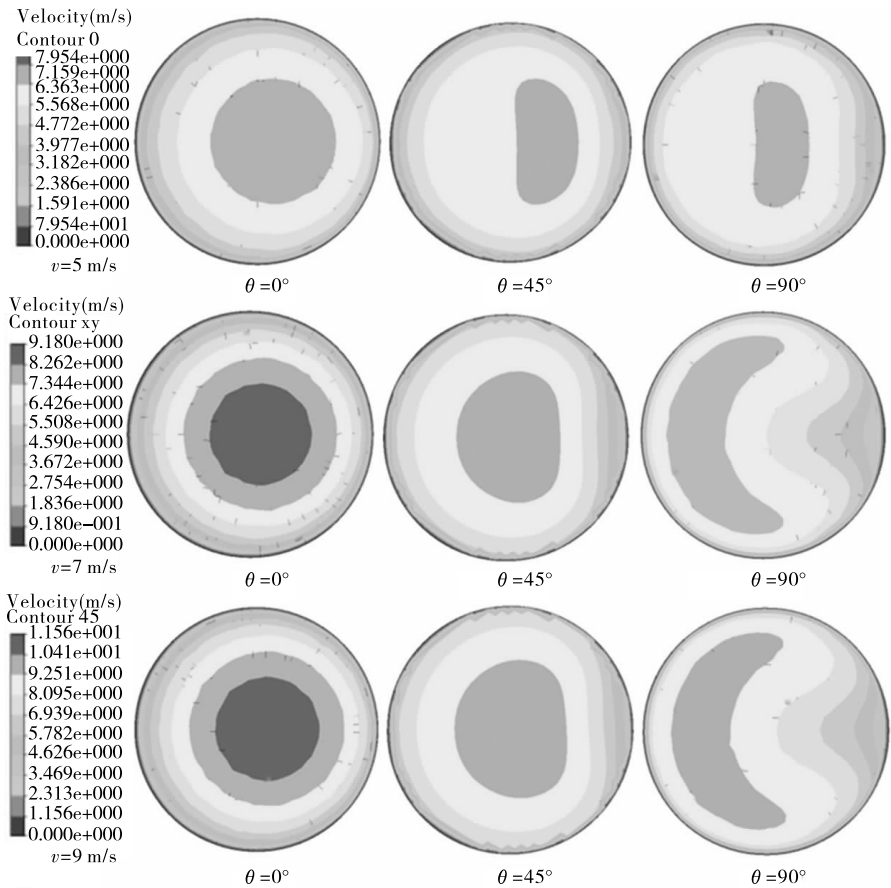
对比不同截面的流速分布云图可以看出,当速度小于临界湍流速度时,整个弯管段的速度极大值一直位于管道内侧。而当流速大于临界湍流速度时,油辣椒混合流体整体流速分布大致相同:在直管段速度分布较为均衡,贴近壁面区域流速较小;经过弯管后,速度分布变得不均匀,速度极大值逐渐向管道外侧偏移,并伴有二次流现象发生。这说明,由

几何弯曲产生的二次流引起了弯管段的流速分布不均。

2.3 多相流体密度场分析

研究油制辣椒固液多相流,不仅要对其流动过程中的速度场分布状况进行研究,并且要探究其密度场分布的规律,以便对管道流体的堆积情况进行预测,探究不宜堵塞管道、更适合灌装的工况。

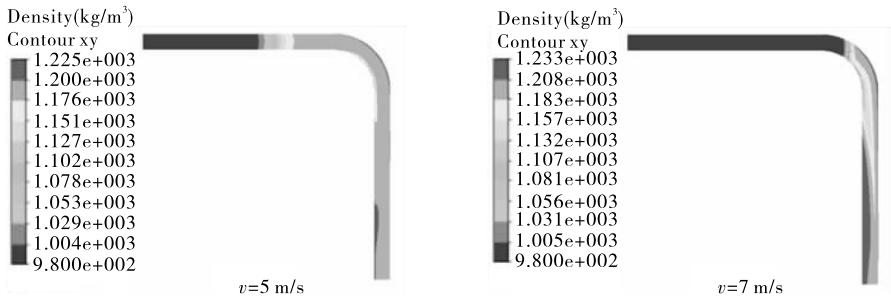
图 7 分别给出了混合流体在 5 m/s 和 7 m/s 两种不同速度下,混合物的密度场分布图。由图 7 可知,在距离出口较近时,所有工况都在管道内侧和下部出现沉降,速度较大时堆积更为严重,发生堆积位置在弯管出口 300 mm 以后。说明流场经过几何弯曲后受到很大影响,第二段直管处,无法保持均匀混合状态,堆积现象较为严重。



左侧为管道外侧

图 6 不同速度下弯管典型横截面上流体速度分布

Figure 6 Velocity field distribution of flow at different speed on the typical cross section of pipe bending



左侧为管道外侧,重力加速方向向下

图 7 不同速度下流场密度分布云图

Figure 7 Density distribution cloud of flow field at different speed

由图 8 可知,当 $v=5\text{ m/s}$ 时,速度小于临界湍流速度,混合流体在直管段沿重力方向发生沉降现象,若速度更小,沉降会更加严重。这种输送条件,很可能引起辣椒颗粒堆积形成层床,进而减小有效流动面积,引起管道堵塞,对于油制辣椒的灌装非常不利。而当流速大于临界湍流速度时,在直

管段颗粒混合比较均匀,固相颗粒伴随液相流体流动,并无堆积现象;但进入弯管段开始,液相流体和固相颗粒有所分离,固相颗粒向弯管外侧移动,在管道外侧有少量集聚,并且集聚程度逐渐增大。相对地,密度较小的流体向内侧移动,这是由二次流作用引起的。

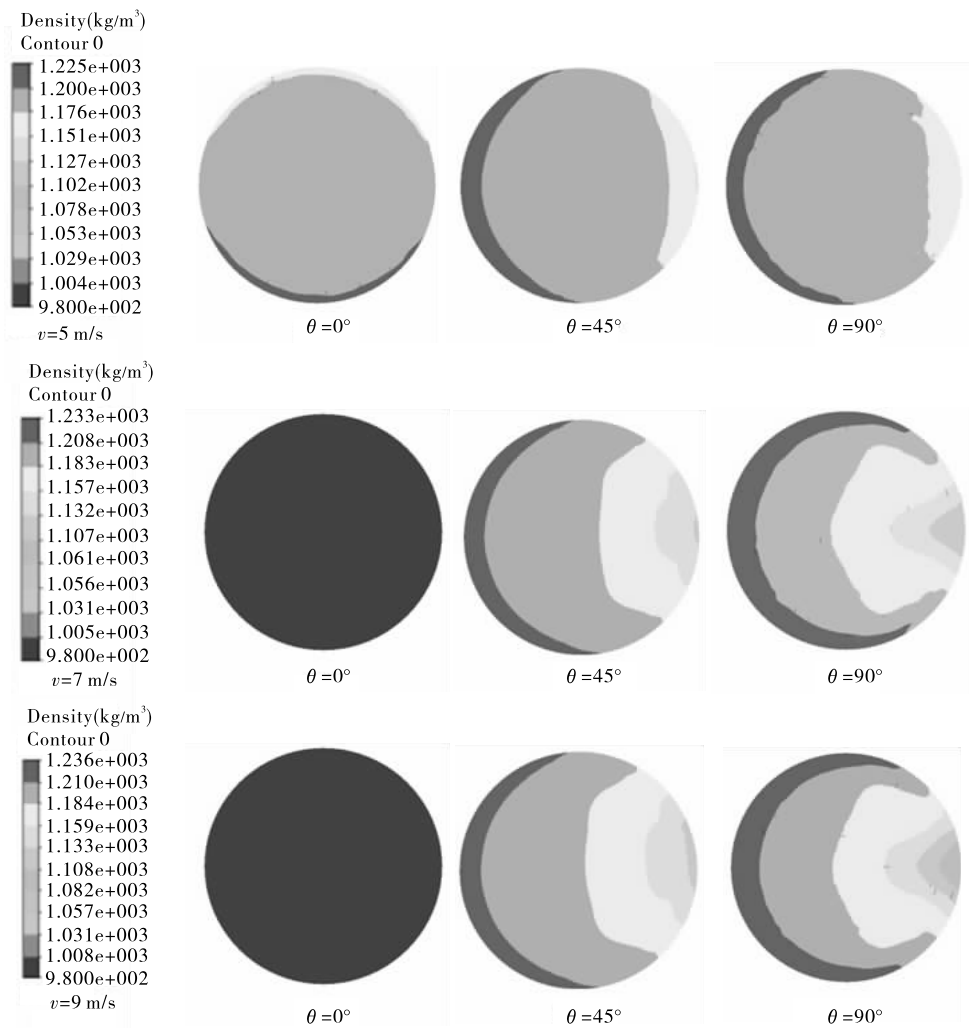


图 8 不同速度下弯管典型横截面的密度分布状况

Figure 8 Density field distribution of flow at different speed on the typical cross section of pipe bending

3 结论

本试验采用无相变过程的多相流 Mixture 模型,研究了水平 90°圆管内油制辣椒固液多相混合流动特征。数值模拟结果给出了油制辣椒混合流动过程中一些重要的流动参数,结果表明:

(1) 对于相同结构的几何模型,油制辣椒混合流体速度场分布,与单一辣椒油明显不同。同样条件下,单一辣椒油流体比油辣椒混合物料更快达到湍流状态。这说明相比于纯液体灌装,固液混合物料的灌装更为复杂,对机器要求也更高。

(2) 混合流体在直管段时,中心流速大,贴近壁面区域流速较小;经过弯管段时,其内外侧的流速和压力分布并不均匀,这是由于弯管几何弯曲造成的二次流引起的;进入第

二个直管段后,流速极大值向管道外侧偏移。

(3) 类似的灌装结构中,临界湍流速度 $v=7\text{ m/s}$ 可以作为灌装油制辣椒时的理论参考值。实际输送速度不宜低于此速度,否则会发生辣椒颗粒堆积,甚至引起管道堵塞。

(4) 在合适的灌装速度下,直管段基本不会发生沉降现象,但几何弯曲对流场影响较大,油辣椒流体经过弯管段后,再进入直管容易发生物料堆积。所以管道设计时,在几何弯曲管道和出料口之间,直管距离不宜太长,最好不要超过 300 mm。今后设计灌装管道时要特别注意。

研究结果可以对油制辣椒输送过程中固相颗粒在弯曲管道中的堆积程度进行预测,同时为灌装机的管道设计和优化提供了理论研究基础。本试验结论中得到的量化指标具

(下转第 159 页)

参考文献

[1] 叶保华, 赵继承, 朱胜龙, 等. 鲜切西兰花贮藏保鲜技术研究[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(3): 18-21.

[2] 张怡, 关文强, 张娜, 等. 温度对西兰花抗氧化活性及其品质指标影响[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(8): 156-161.

[3] 陈维信, 吴振先, 苏美霞, 等. 荔枝常温下泡沫箱加冰保鲜研究[J]. 广东农业科学, 2000(3): 27-28.

[4] 荆红彭, 张旭, 关文强, 等. 不同温度下微孔膜包装青毛豆的保鲜效果研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 334-339.

[5] 于江, 袁艳, 夏业鲍. 青椒打孔膜包装的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 98-100.

[6] Hussein Z, Caleb O J, Jacobs K, et al. Effect of perforation-mediated modified atmosphere packaging and storage duration on physicochemical properties and microbial quality of fresh minimally processed ‘Acco’ pomegranate arils[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 911-918.

[7] Lucera A, Costa C, Mastromatteo M, et al. Fresh-cut broccoli florets shelf-life as affected by packaging film mass[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 102(2): 122-129.

[8] Rai R, Jha S N, Wanjari O D, et al. Chromatic changes in broccoli (Brassica oleracea italica) under modified atmospheres in perforated film packages[J]. Food Science and Technology International, 2009, 15(4): 387-395.

[9] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 37-39.

[10] 林本芳. 生物保鲜剂对西兰花贮藏生理及保鲜效果的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2013.

[11] Oms-Oliu G, Aguilo-Aguayo I, Martin-Belloso O, et al. Effects of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut mushrooms (Agaricus bisporus)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(3): 216-222.

[12] 徐斐燕. 鲜切西兰花的保鲜技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 32-33.

[13] Jia Cheng-guo, Xu Chao-jiong, Wei Jia, et al. Effect of modi-

fied atmosphere packaging on visual quality and glucosinolates of broccoli florets[J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 28-37.

[14] 郭玉花, 黄震, 滕立军, 等. 新鲜菠菜的纳米活性气调包装研究[J]. 食品与机械, 2009, 25(4): 167-170.

[15] 甄天元, 彭晓蓓, 李文香, 等. 丁香提取液对鲜切西兰花保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(10): 279-282.

[16] 张文婷, 赵武奇, 鲁晓翔, 等. 四种物流贮藏温度对圣女果品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 329-333.

[17] Serrano M, Martinez-Romero D, Guillen F, et al. Maintenance of broccoli quality and functional properties during cold storage as affected by modified atmosphere packaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 39(1): 61-68.

[18] 杨静. 微孔包装袋内外气体传送机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2012: 43-44.

[19] 赵鑫, 高美须, 沈月, 等. 包装材料与乙烯吸收剂, 1-MCP 组合处理对延长银白杏贮藏期的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 103-109.

[20] 王鹏跃, 陈忠秀, 庞林江. 气调包装对椪柑贮藏及保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 124-127.

[21] 杨静, 张蕾. 打孔包装对西兰花品质的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 31-34.

[22] Toivonen P M A, Sweeney M. Differences in chlorophyll loss at 13 degrees C for two broccoli (Brassica oleracea L.) cultivars associated with antioxidant enzyme activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(1): 20-24.

[23] 孔凡春. MAP 保鲜特色果蔬的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 25-26.

[24] 徐斐燕, 蒋高强, 陈健初. 臭氧在鲜切西兰花保鲜中应用的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(5): 254-257.

[25] 郭园园, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 自发气调包装对青皮核桃采后生理及品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 205-209.

[26] 庞坤, 胡文忠, 姜爱丽, 等. 鲜切苹果贮藏期间生理生化变化的影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(1): 50-54.

(上接第 102 页)

有一定的规律性和通用性,但预测结果是理想条件下得到的,因而有一定的适用范围。如果超过这个范围,本计算模型的预测结果就很难达到理想的结果。这个范围还有待深入研究。对任何一个动态系统进行预测,都会受到一些不确定的外界因素的影响,因此预测的结果仅具有参考价值,今后研究中要加强多因素条件下的监测和实验验证,才能使得预测结果更加精确。

参考文献

[1] 刘艳敏, 吴拥军, 王亚娟, 等. 贵州油辣椒挥发性风味物质分析[J]. 食品科学, 2013, 34(20): 221-227.

[2] 蔡子金, 李军庆, 张庆文, 等. CFD 在搅拌罐性能研究和生化过程放大中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 108-112.

[3] 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.

[4] 吕帅, 张裕中. 高粘稠物料在灌装阀体内的流动状态分析[J].

包装工程, 2012, 33(15): 10-15.

[5] 朱进林, 谢晶, 王金锋, 等. CFD 预测不同进风方向对蒸发式冷凝器流场的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 87-92

[6] 戴献元, 余立新. 化工原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 38-40.

[7] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 6.

[8] Ling J, Skudarnov P V, Lin Cheng-xian, et al. Numerical investigations of liquid-solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(3): 389-398.

[9] Skudarnov P V, Lin Cheng-xian, Ebadian M A. Double-species slurry flow in a horizontal pipeline [J]. Journal of Fluids Engineering, 2004, 126(1): 125-132.

[10] Lin Cheng-xian, Ebadian M A. A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe [J]. Computer & Fluids, 2008, 37(8): 965-974.