

## 高粘稠物料在灌装阀体内的流动状态分析

吕 帅, 张裕中

(江南大学 食品装备工程研究中心, 无锡 214122)

**摘要:** 根据灌装高粘稠物料的活塞式灌装机的结构和参数, 利用软件 Pro/E 建立了三通阀及进出料口内流道的三维几何模型。应用前处理软件 Gambit 进行网格的划分、细化, 然后对出料口在 Fluent 中进行计算研究, 应用 CFD 对活塞式灌装机的阀和活塞的运动关系进行分析, 并对阀芯运动到不同位置时的流速、压力, 以及高粘稠物料的湍流强度进行了分析, 获得了阀在不同位置时, 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。对高粘度物料的灌装和结构参数优化具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 三通阀; 活塞; CFD; 流速; 压力; 湍流; 流量系数

**中图分类号:** TB486; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)15-0010-06

## CFD Analysis of High Viscous Material in Filling Piston

LYU Shuai, ZHANG Yu-zhong

(Research Center of Food Equipment, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** 3D geometric model of the flow in material inlet and outlet and three-way valve was established using Pro/E according to the structure and parameters of the piston filling machine for high viscous materials. The meshes of the model were fractionized by the preprocessor Gambit and then calculated in Fluent. The movement between the filling valve and the piston, the flow rate and pressure of different position the spool, and the turbulence intensity of high viscous materials were analyzed using CFD. The relationship among turbulence intensity, velocity, discharge coefficient, flow, and angel was obtained. The purpose was to provide reference for design and optimization of high viscosity material filling.

**Key words:** three-way valve; piston; CFD; flow rate; pressure; turbulence; flow coefficient

对于高粘稠物料的灌装, 尤其含有一定体积分数的固体颗粒的高粘稠物料的灌装, 具有一定的难度<sup>[1]</sup>。活塞式灌装机因其良好的输送和定量特性, 广泛应用于高粘稠物料的灌装<sup>[9]</sup>。此类灌装机为定量缸和三通阀的组合应用, 依靠二者的协调作用进行物料灌装。对于物料的流速分布、压力变化、气蚀现象和能量损失机理等, 已经有研究者进行了研究<sup>[2-5]</sup>。对于用定量缸和三通阀的组合进行物料的灌装和工作性能的研究比较少, 主要是集中在灌装阀口的流速研究, 忽略了阀芯和活塞的速度对阀内流场的影响, 将阀的内部流场近似为轴对称、简化为三维模型。但

是阀经常处于开启和关闭的运动状态, 三通阀的运动会引起阀内流场的变化, 物料流道比较复杂, 采用 CFD 方法可以解决复杂模型的计算问题。

对于高粘稠物料的灌装, 因为物料粘度比较大, 并且含有一定的颗粒, 会影响湍流强度的大小; 物料的灌装速度和三通阀的开启和关闭频率也会影响瞬时动态压力和物料的出口速度。

## 1 灌装机的的工作原理和结构特点

活塞式灌装机主要由定量缸(内有活塞和活塞

收稿日期: 2012-05-19

基金项目: 国家科技部中小企业科技创新资金项目(01C26213200321)

作者简介: 吕帅(1987—), 男, 河南人, 江南大学硕士生, 主攻食品加工装备技术。

通讯作者: 张裕中(1955—), 男, 南京人, 江南大学教授, 主要研究方向为食品加工装备技术。

杆)、气缸、三通阀、阀盖、料斗和出料管组成。其利用气缸带动活塞在定量缸内进行上下往复运动,来完成灌装功能。活塞往上运动时,为排料过程,三通阀的固定管口与出料管相连;活塞往下运动时,为吸料过程,三通阀的固定管口与料斗的入料管口相连。三通阀的转动靠气缸和曲柄连杆来进行控制;物料的灌装速度和定量由定量螺母和气缸的运动控制。物料进出时的状态见图 1。

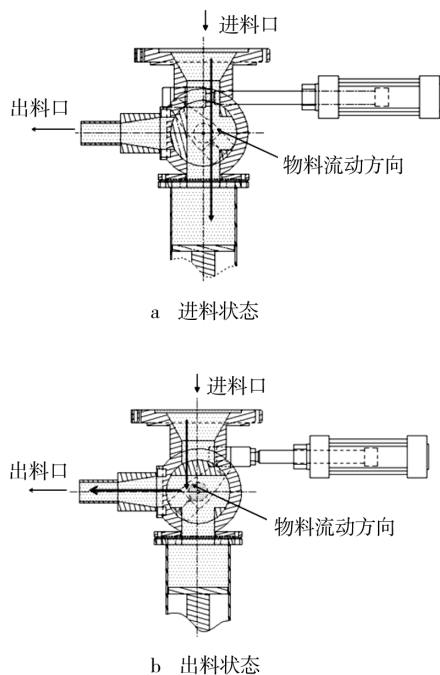


图 1 三通阀阀芯在进出物料时的位置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of three-way valve position during material in and out process

## 2 仿真模型的建立及网格划分

由于物料在三通阀中的流动状态,使物料流道的几何形状比较复杂,不易在 Fluent 软件内构造流道几何模型。所以采用软件 Pro/E 对研究对象进行几何建模,这样就可以建造复杂的物料流动模型。根据计算所需物料的流动状态建立流道几何模型。模型尺寸:三通阀口径为  $D=50\text{ mm}$ ,物料出口管管径为  $30\text{ mm}$ 。

使用面向 CFD 的前处理器软件 Gambit 对定量缸和三通阀,以及进出料管的流道进行网格划分。并对局部位置进行了网格的细化,划分网格后的局部流场情况见图 2。

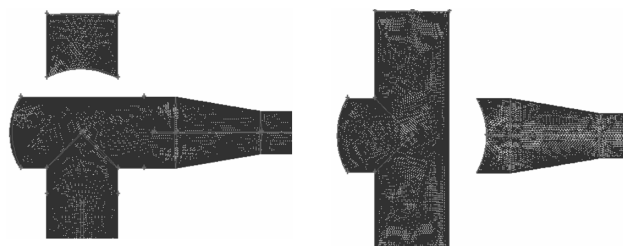


图 2 划分网格后三通阀内的流道几何结构  
Fig. 2 Geometric structure of the internal flow channel of three-way valve after meshing

## 3 仿真模拟计算和结果分析

### 3.1 压力场和速度场分析

在 Fluent 中,进行流道的仿真和计算<sup>[6]</sup>,由于物料的设定具有一定的难度,因此用两相流进行高粘度物料的模拟,以自定义的淀粉糊和米来作为液相和固相,根据实验测定的每相的物料参数来进行定义。淀粉糊的粘度和密度分别为  $23.5\text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $1.06\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ,米的密度为  $1.48\times 10^3\text{ kg/m}^3$ ,颗粒大小为  $3\text{ mm}$ ,粘度为 CFD 模拟计算中的默认值,混合后的物料的密度为  $1.25\text{ kg/m}^3$ ,温度均为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,入料口气压为标准大气压。另外,采用混合模型来进行模拟,运用标准雷诺数方程 Navier-Stokes 中的  $k\sim\epsilon$  湍流模型。标准  $k\sim\epsilon$  湍流模型由 Launder 和 Spalding (1972)首次提出<sup>[7-12]</sup>,而且已广泛应用在工程实际流量计算的主要部分。湍流动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$ ,可从如下传递方程<sup>[11]</sup>得到:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

式中:  $G_k$  为平均速度梯度下引起的湍流动能的产生项;  $G_b$  为由浮力产生的湍流动能;  $Y_m$  为可压缩湍流脉动扩张的整体耗散率部分;  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  是常数;  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  分别是  $k$  和  $\epsilon$  的湍流普朗特数;  $S_k$  和  $S_\epsilon$  是用户定义项;  $\rho$  为流体密度( $\text{kg/m}^3$ );  $p$  为平均压力(Pa)。对于湍流的广泛性解释是稳定性、经济性,合理地说明其在工业流动和传热模拟的普遍性,这可能不会在大压力梯度和高雷诺数的情况下给予准确的结果。因

此,提到 Jensen 和 Friis 以及 Stevenson 和 Chen 的研究,可以充分检测灌装阀的湍流性能,因为在此流域内不存在任何大的压力降或非常高的雷诺数<sup>[4]</sup>。湍流普朗特数  $k$  设定为 1.0,  $\epsilon$  设定为 1.3。常数  $C_1, C_2$  分别设定为 1.44 和 1.92。使用商业 CFD 软件 Fluent 6.3 进行模拟,有利于流域分为小的控制体积。对于每个小模块<sup>[7]</sup>,应用下面的守恒方程。

对于连续性:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (3)$$

式中:  $\vec{v}_m$  是质量平均速度,  $\dot{m}$  为用户定义的源的质量传输。

对于动量:

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

式中:  $n$  为项数;  $F$  为压力;  $\mu_m$  为混合物的粘度;  $\alpha_k$  为  $k$  相的体积分数。

使用 SIMPLEC 方法(压力速度耦合)和对动量、湍流动能和湍流耗散率方程的二阶差分进行稳态模拟。在 Fluent 中,收敛准则设定为  $10^{-3}$ ,所有的稳态模拟在 1 000 步迭代内完成。

在此模拟过程中,以活塞的运动速度为阀的入口边界条件,物料出口定义为出口流动边界,料斗和出口压力均设定为大气压力(101 325 Pa)。其他固定边界用墙代替,用近壁处理增强壁面处理。物料被认为是处于稳定状态,视为牛顿不可压缩流体。研究中提出了 Fluent 的几何分析的结果,此分析的优点是可明确得出流道的速度和压力图,以及近壁区的湍流强度分布图。

在三通阀的开启和关闭的过程中,由于时间比较短,无法进行阀的定态分析,定义三通阀的某一个管口与出料管的夹角  $\theta$  来研究物料的流动状态。阀运动后的位置分别采用  $0^\circ, 25^\circ, 50^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  五个位置来进行模拟和计算。阀在一个周期内不同位置的的压力和流速的示意图见图 3。

从图 3 可以看出,在阀芯从  $0^\circ$  转到  $50^\circ$  的过程中,三通阀与出料管相连,物料在流动时,最高压力和最低压力均集中在阀与出料管的接触位置和管径变小的位置,由于接触角度不一样,压力会在两者夹角变小时发生急剧变化。计算表明,当阀与出料管口的夹

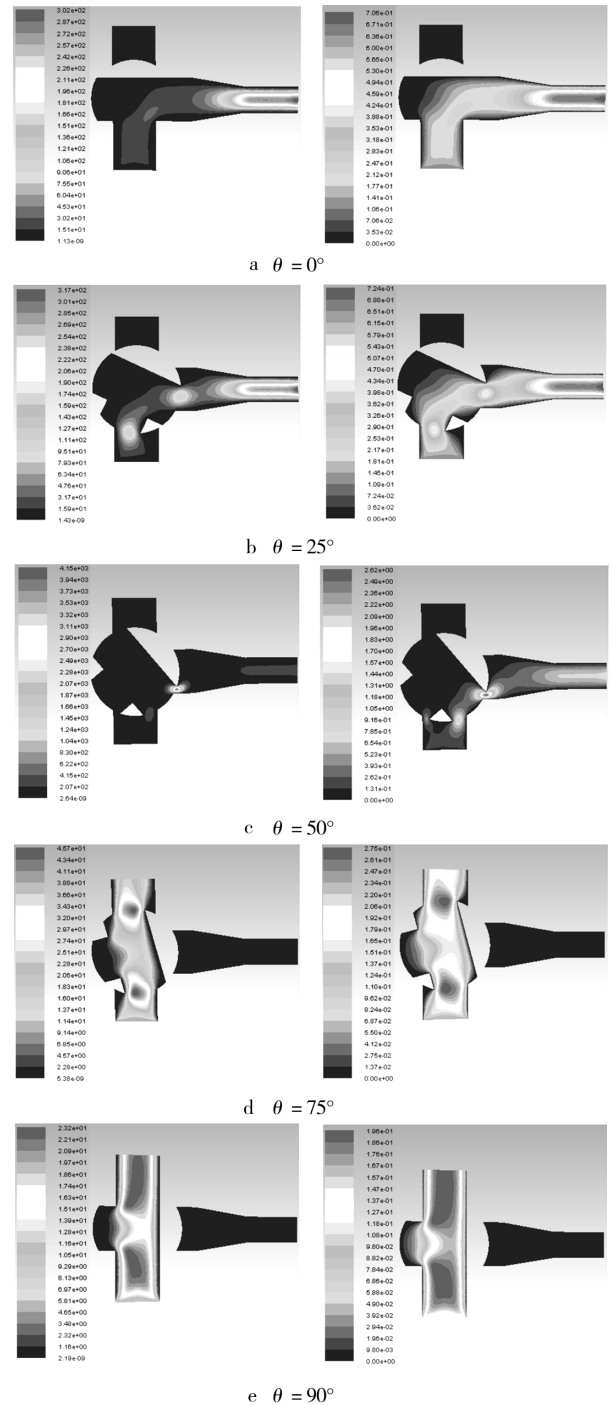


图 3 阀芯运动到不同位置时的动态压力(Pa)和流速的分布(m/s)

Fig. 3 The dynamic pressure and velocity contours at different positions

角较小时,更容易在两者之间产生压力的突然增大,对阀的结构有较高的要求。当阀转到  $60^\circ$  时,三通阀与入料口相连,物料受到的压力和流速的急剧变化,集中在三通阀口与入料管口处,局部的压力和流速也变大,但在横截面上的流速分布趋势是相同的。

物料流量变化会导致阀芯运动速度也发生变化, 阀与出料口和入料口处的能量损失也相应地发生变化, 但是内部的流场分布情况是基本一样的。从而, 可得物料流道在不同流量下的速度分布图, 见图 4。

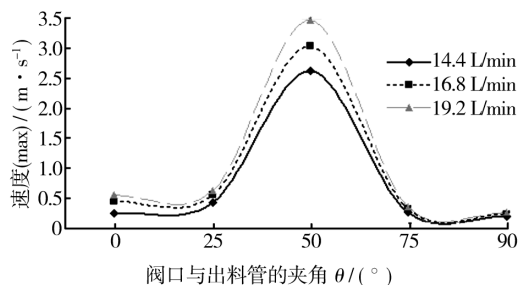


图 4 阀与出料管不同夹角下的物料速度分布

Fig. 4 The velocity distribution of materials under different angle between the valve and the discharge pipe

### 3.2 湍流强度分析

阀转过的角度不同, 物料在流动过程中的湍流强度也是不同的, 而且影响物料的流动状态。对于物料的粘性流动, 机械能量损失是不可避免的<sup>[12-16]</sup>。在流道中的能量损失一般包括: (1) 沿程损失, 是指流体沿程克服固壁摩擦阻力和流层之间内摩擦阻力做功引起的机械能损失; (2) 局部损失  $h_j$ , 是指流体绕过管壁发生突变的区域, 使流动发生急剧变化而引起的内摩擦阻力做功损失的机械能。通过管道实验发现, 局部损失一般表达式为:

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

式中:  $\zeta$  为压力损失系数;  $v$  为流速;  $g$  为重力加速度。

此类物料的灌装充填过程中, 当阀芯转过不同的位置时, 物料的湍流强度和动能也有明显的变化。在物料流道内, 通过 CFD 模拟计算, 可得出物料在不同位置的湍流强度, 见图 5。

从图 5 中可看出物料在流道内不同位置时所受到的湍流强度是不同的。物料的流动过程中, 当三通阀与出料管或入料管接通时, 随着两者夹角的减小, 湍动强度在阀内与料管内均比较大, 会发生速度的急剧增大, 相应的湍流动能也增大, 但定量缸内的物料的湍流强度和动能变化不大, 只有与缸壁接触的位置才有一些变化, 这些变化均与物料在灌装过程中受到的压力差和流速有关。又因在一些位置处湍流动能小, 会使灌装过程中的物料的流速很小。不同的活塞

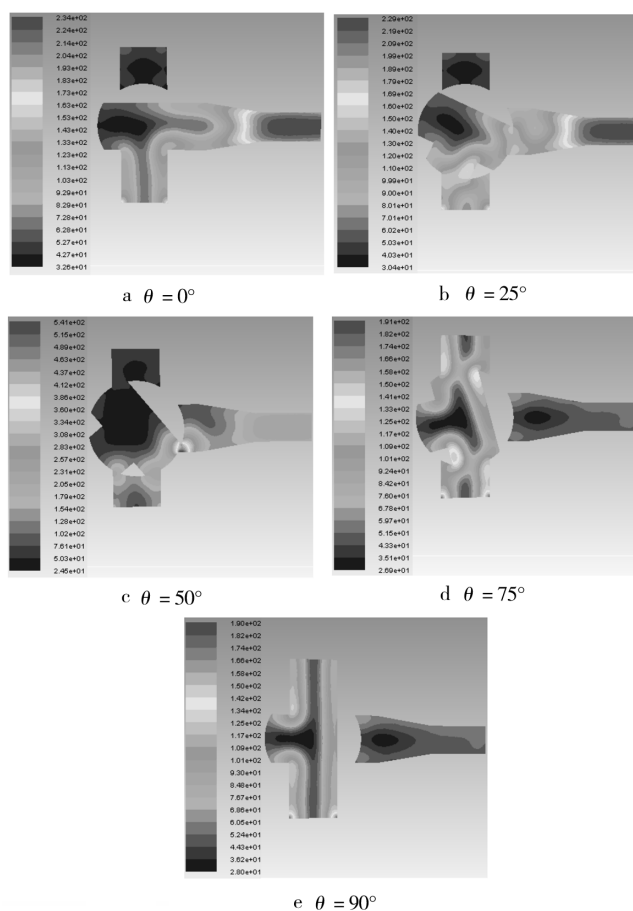


图 5 物料在流到不同位置时的湍流强度分布

Fig. 5 The turbulence intensity distribution of the materials at different positions of flow channel

运动速度, 对应的湍流强度的大小分布是一致的, 不同流量下的阀内湍流强度大小变化曲线见图 6。

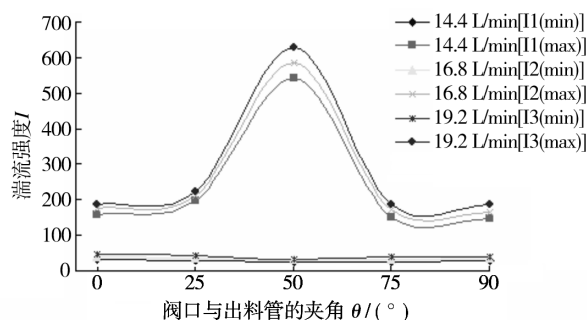


图 6 不同流量下最小/最大湍流强度的变化曲线

Fig. 6 Tendency chart of min/max turbulence intensity at different flow

从图 3 和 5 可得出三通阀内部的低压力区的分布, 压力过小会产生气蚀现象, 产生气泡, 限制物料的流动, 降低灌装效率。在物料的出料管与三通阀口以

及料斗的进料管口与三通阀口接触的位置处,会有压力的集聚和流速的急剧增大,湍流强度也较大,产生回流现象,有一定的压力冲击,所以对这些接触位置的结构强度就有很大的要求。

#### 4 流量系数

由于物料的粘度较大、流动性差,当阀处在稳态时,如果不考虑阀盖和阀内部流道对流体的影响,物料将处于紊流状态,雷诺数是定值。在实际灌装过程中,由于阀与出料口和入料口的压力梯度大,只能通过检测物料出口和进口处的压力来计算流量,这就忽略了阀内部流道的多处压力损失,对流量产生一定的影响。对于三通阀的流量系数,可以认为是流量系数是雷诺数和物料流动过程中的压力损失的函数<sup>[10]</sup>。

阀的流量为:

$$q_v = C_d A(x) \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad (7)$$

式中:  $C_d$  为阀口的流量系数;  $\Delta p$  为阀的进出口压差;  $\rho$  为物料密度;  $A(x)$  为阀的开口面积。

对于三通管阀:

$$A(x) = \frac{1}{2} \pi x \cos \alpha \left( d - \frac{x \cos 2\alpha}{2} \right) \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为三通阀口与出料管(入料管)的夹角;  $d$  为三通阀阀径;  $x$  为阀芯开口度。

对于不同流量的情况下三通阀的流量系数,根据相同夹角和不同的夹角下的运动过程中 2 种状态下流场特性按紊流状态进行计算,用计算得到的流量和压差按式(9)反算出阀的流量系数与流速大小的关系曲线,见图 7。

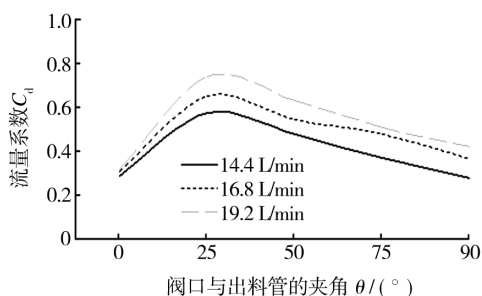


图 7 阀与出料管不同夹角时不同流量下计算所得的流量系数  
Fig. 7 The calculated flow coefficient under different flow at different angles between the valve and discharge pipe

在理论计算中,若流量是相同的,则流量系数也是一样的。但是从计算得出的流量系数的 CFD 计算

曲线可以看出,在一定的流量下,随阀口与出料管口的夹角增大,流量系数增大,但当三通阀的管口与料斗入料管接通角度变大时,流量系数又逐渐减小;当流量增大时,流量系数也相对增大。阀的开口度影响物料的流量,进而影响到流量系数。

对实际的三通阀的仿真发现,当阀芯处于不同位置状态时流量系数是不同的,受活塞速度不同的影响,在阀芯与出料管口相连时,流量系数要大,随着夹角的减小,流量系数逐渐减小。通过观察阀内部的压力变化,可认为造成此现象的原因是:当通过阀的流量一定时,随着阀与料管口的夹角减小,压力差相对也增大,使阀口的流速增大,引起物料的回流现象,速度越大,此现象越明显。

#### 5 结论

1) 利用多相流混合模型实现了阀内部流场的数值模拟,提高了物料流动的真实性。该方法对其他运动流场和流动耦合问题的数值模拟具有借鉴意义。

2) 在 Fluent 中仿真计算了出阀在不同位置时的压力和流速分布,得出了物料在不同流量下的速度变化趋势;根据不同位置的湍流强度分布图,得出了湍流强度和物料的流速和压差有关,为灌装机的关键结构的设计和优化提供了理论研究基础。

3) 根据物料在灌装过程中所受的压力变化,得出了物料在不同流量下流量系数的变化趋势,以及流量系数受到压差、三通阀与外接管的夹角、流量等多种因素的影响,不能作为常数处理。

#### 参考文献:

- [1] LAREO C, FRYER P J, BARIGOU M. The Fluid Mechanics of Two-phase Solid-liquid Food Flows: A REVIEW[J]. Institution of Chemical Engineers, 1997(7): 73-105.
- [2] BERGMAN B, TRNGARDH C. An Approach to Study and Model the Hydrodynamic Cleaning Effect[J]. Journal of Food Process Engineering, 1990(13): 135-154.
- [3] DAVIS J A, STEWART M. Predicting Globe Control Valve Performance I. CFD Modeling[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 772-783.
- [4] JENSEN B B B, FRIIS A. Predicting the Cleanability of Mixproof Valve by Use of Wall Shear Stress[J]. Journal

- of Food Process Engineering, 2005, 28(2): 89—106.
- [5] MILLER D. Internal Flow Systems[M]. Cranfield: BHRA (Information Services, 1990.
- [6] 张凯, 王瑞金. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- ZHANG Kai, WANG Rui-jin. Technical Basis and Application Example of Fluent [M]. 2ed Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [7] 杨福馨, 王生泽. 精密灌装机械中的断流理论研究[J]. 包装工程, 2009, 30(5): 36—38.
- YANG Fu-xin, WANG Sheng-ze. Study of Setting-off Theory for Accurate Filling Machinery [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 36—38.
- [8] 高希彦, 王燕. 数值仿真在泵阀参数优化中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2010(1): 63—67.
- GAO Xi-yan, WANG Yan. Numerical Simulation in the Application of the Pump Valve Parameter Optimization [J]. Irrigation and Drainage of Journal of Mechanical Engineering, 2010(1): 63—67.
- [9] 杨福馨, 王生泽. 充填管口孔形对粘稠流体断流效果的影响研究[J]. 包装工程, 2010, 31(17): 94—96.
- YANG Fu-xin, WANG Sheng-ze. Influence Research of the Filling Orifice Shape on the Flow Break Effect of Viscous Fluid[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(17): 94—96.
- [10] 郑淑娟, 权龙, 陈青. 阀芯运动过程液压锥阀流场的 CFD 计算与分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 168—172.
- ZHENG Shu-juan, QUAN Long, CHEN Qing. Analysis and CFD Simulation of the Flow Field in a Moving Pop-pet Valve[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 168—172.
- [11] TAHIR S, MITAL M. Numerical Investigation of Laminar No-fluid Developing flow and Heat Transfer in a Circular Channel[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 39: 8—14.
- [12] PISHVAEI M, GRAILLAT C, P CASSAGNAUB T F. Modelling the Zero Shear Viscosity of Bimodal High Solid Content Latex; Calculation of the Maximum Packing Fraction[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61: 5768—5780.
- [13] RAHAMAN M F, BARI S, VEALE D. Flow Investigation of Product Fill Valve of Filling Machine for Packaging Liquid Products[J]. Journal of Food Process Engineering, 2008, 85: 252—258.
- [14] 唐晓明, 蒋旭光. 粘稠物料输送及其流变特性的测量[J]. 能源工程, 2007(1): 12—15.
- TANG Xiao-ming, JIANG Xu-guang. Delivery and Measurement of the Rheological Properties of the Viscous Material[J]. Energy Engineering, 2007(1): 12—15.
- [15] 康顺, 石磊, 戴丽萍, 等. CFD 模拟的误差分析及网格收敛性研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(12): 9—14.
- TANG Shun, SHI Lei, DAI Li-ping, et al. Analyse of CFD Simulation Error and Study of GRID Convergence [J]. J of Engineering Thermophysics, 2010, 31(12): 9—14.
- [16] 唐志祥. 灌装阀的性能分析[J]. 广东工学院学报, 1994, 11(4): 98—104.
- TANG Zhi-xiang. Performance Analysis of the Filling Valve[J]. Guangdong Journal of Engineering, 1994, 11(4): 98—104.

(上接第 9 页)

- [9] ANDERSON W A C, CASTLE L. Benzophenone in Cartonboard Packaging Materials and the Factors that Influence Its Migration Into Food[J]. Food Additives and Contaminants, 2003, 20(6): 607—618.
- [10] 王利兵. 食品包装安全学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- WANG Li-bing. Food Packing Security[M]. Beijing: Science Publishing, 2011.
- [11] 赵文超, 王永林, 姚丽秀. 二苯甲酮系列光引发剂性能评价[C]. 第十届亚洲辐射固化国际会议. 北京, 2005: 90—95.
- ZHAO Wen-chao, WANG Yong-lin, YAO Li-xiu. The Performance Evaluation of Benzophenone Series Photoinitiators[C]. The 10th International Conference on Radiation Curing, Beijing, 2005: 90—95.