

果粒饮料盒中袋灌装阀阀道结构分析与优化

殷水忠, 黄晓华, 杨弟洲, 丁志辉, 朱灿
(南京理工大学, 南京 210094)

摘要: **目的** 为了确定盒中袋灌装阀阀道结构以及阀芯下降高度, 对盒中袋灌装阀进行流体流场仿真计算。**方法** 运用 Fluent 软件对盒中袋灌装机的灌装阀阀道结构进行流场分析, 根据流速场以及压力场的分布, 找出应力集中区域, 进行了结构优化; 再运用 Fluent 软件对阀芯下降不同高度数值后, 进行模拟仿真, 根据阀芯下降不同高度时流速场与压力场的变化, 找出最佳高度。**结果** 得到了优化的结构工艺参数以及合适的阀芯下降高度。**结论** 阀型拐角 θ_1 和 θ_2 为 30° , 阀芯下降高度为 3 mm 时, 物料在阀道中的流动状态最合适。

关键词: 盒中袋; 阀道结构; 结构优化; Fluent

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)13-0121-07

The Structure Analysis and Optimization of Bag-In-Box Filling Valve Pipe of Fruit Drink

YIN Shui-zhong, HUANG Xiao-hua, YANG Di-zhou, DING Zhi-hui, ZHU Can
(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: In order to determine the structure of valve pipe and descending height of valve core, fluid flow of the filling valve of BIB was analyzed and calculated. Flow field analysis was conducted for the structure of bag-in-box valve by Fluent software to find out the stress concentration area based on the distribution of velocity field and pressure field and optimize the structure. Then analog simulation was carried out after the valve core descended for different heights by the Fluent software to find out the best height according to the change in velocity field and pressure field. When θ_1 and θ_2 were at 30° , the valve core descended for 3mm, and materials flowed at the best conditions in the valve pipe. Therefore, to get the descending height at 3 mm, θ_1 and θ_2 are set at 30° .

KEY WORDS: bag-in-box; valve pipe structure; structure optimization; Fluent

随着国民生活质量的不断提高, 对具有独特口感的果粒饮料的需求也越来越大^[1]。果粒饮料盒中袋灌装机就是为满足果粒饮料的盒中袋灌装而开发出来的。盒中袋作为一种特殊包装方式, 相对于普通包装来说, 具有成本低、存放时间长、易运输等巨大优势, 盒中袋液体灌装机必将成为液体灌装机市场上的热门产品。

目前, 国内对普通饮料灌装机的研究比较多, 而针对盒中袋这种独特的包装方式, 相应的灌装机研究不多。灌装阀是灌装机的重要部件, 由于盒中袋独特的材料与结构以及果粒饮料这一特殊物料, 灌装不仅仅需要满足相应的精度、防腐蚀性等要求, 还得考虑盒中袋的不可压缩性以及果粒是否会堵塞灌装阀等条件。在设计中, 阀道结构以及阀芯

收稿日期: 2015-11-30

作者简介: 殷水忠 (1991—), 男, 江苏丹阳人, 南京理工大学硕士生, 主攻机械结构优化设计。

通讯作者: 黄晓华 (1969—), 男, 江苏南通人, 工学博士, 南京理工大学副教授、硕导, 主要研究方向为结构 CAD/CAE 及现代制造技术。

下降高度对灌装精度具有很大的影响,运用 Fluent 软件,对阀道进行分析优化,并且对阀芯下降不同高度进行分析优化,对提高灌装精度具有很重要的现实意义。

1 盒中袋灌装阀的设计

果粒饮料中含有果粒,在灌装的过程中,容易引起果粒堵塞灌装阀阀道或者果粒夹杂在密封中,引起停止灌装以及密封不严,导致果粒饮料泄露乃至污染包装^[2]的严重后果,因此,这些因素必须考虑在灌装阀的设计中。盒中袋由 EVOH 材质内袋、PET 阀座以及蝶形阀门组成,见图 1, EVOH 材料对阳光以及空气中的氧气具有良好的阻隔性^[3],材料柔软,所以灌装时无法施加压力。灌装时,还应注意灌装阀与阀座之间的配合。

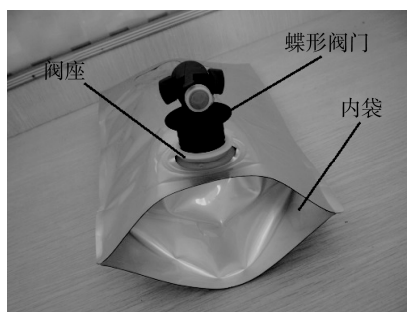


图 1 盒中袋结构
Fig.1 The structure of BIB

盒中袋灌装阀主要由阀体、阀座、对中罩、支撑板等组成,见图 2。

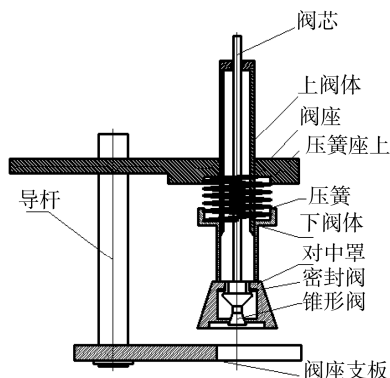


图 2 灌装阀结构
Fig.2 The structure of filling valve

在灌装的过程中,首先,盒中袋的阀座夹在阀座支板的 U 型口上,U 型口的中心与对中罩中心对齐。灌装阀阀体下移,使得对中罩与盒中袋阀座接触,灌装阀阀体继续下移,压缩弹簧,使得阀芯

相对于对中罩继续下移,阀芯与密封圈分开,液料落下。待灌装结束后,阀体上移,在弹簧的作用力下,阀芯与密封圈紧贴,液料停止落下。

该灌装阀是通过阀芯与密封贴合进行密封,分开进行灌装,果粒饮料中含有果粒,因此在灌装过程中,灌装速度不宜太快,否则果粒冲击在阀芯上引起灌装不稳定。另外该灌装是通过盒中袋阀座与灌装阀之间的配合进行灌装,所以,灌装压力不宜过大,否则会损坏盒中袋阀座与内袋之间的热封合连接。运用 Fluent 软件对其进行建模仿真,分析阀道流场,对阀道结构进行优化以及选取合适的阀芯下降高度。

2 利用 Fluent 进行仿真运算

运用 Fluent 软件进行数值模拟仿真的过程,见图 3^[4]。

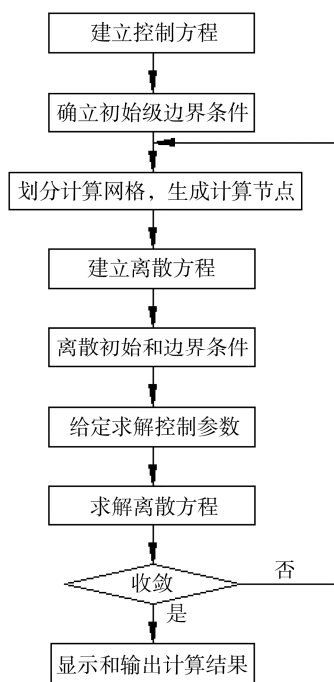


图 3 Fluent 数值模拟流程
Fig.3 The flow chart of Fluent

根据阀内实际流动状态,可以将三维的流动近似看作二维流动,再根据其流动对称性,取其左侧为研究对象^[5]。阀道结构以及阀芯下降高度都对果粒饮料的灌装有很大影响,文中采用控制变量法,先设定阀芯下降 3 mm 为定值,然后在阀芯下降 3 mm 的条件下,对阀道结构进行 Fluent 仿真优化,再用优化后的阀道结构进行阀芯下降高度的选取。阀道结构见图 4。

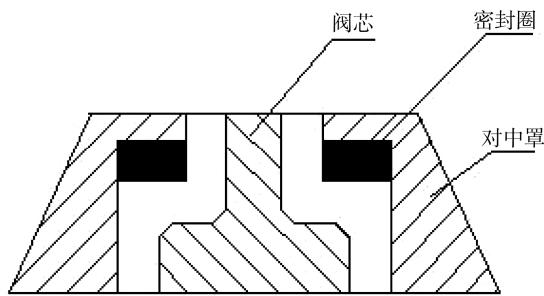


图 4 阀道结构
Fig.4 The structure of valve pipe

2.1 阀道结构优化

2.1.1 盒中袋灌装阀阀道模型及 ICEM CFD 前处理

在阀芯下降 3 mm 的条件下，模拟此状态下果粒饮料从灌装阀阀道到盒中袋阀座之间的流动，找出应力以及流速集中点，进行结构优化。由于阀道为三维轴对称结构，因而只选择左侧阀道的二维模型作为模拟模型进行分析^[6]。左侧模型见图 5。由于灌装液料为果粒饮料，不含气，可使用常压灌装。使用 ICEM CFD 对阀道模型进行网格划分后的模型见图 6，节点数为 2456 个，网格数为 4050 个。1 个 velocity 入口，1 个 outflow 出口，1 个对称轴，其余为 WALL 边界。

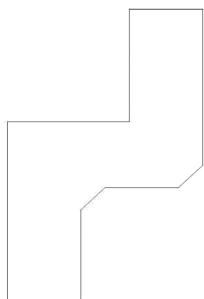


图 5 左侧阀道模型
Fig.5 The model of left valve

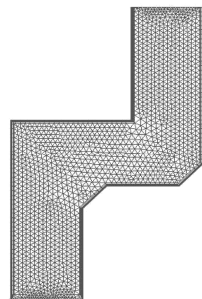


图 6 左侧阀道网格模型
Fig.6 The grid model of left pipe valve pipe

2.1.2 建立求解模型

将 ICEM CFD 生成的网格导入到 Fluent 中，求解器采用 Pressure Based 求解器，并采用 Implicit 隐式格式；空间属性设置为二维对称属性；时间设置为定常流动(steady)；速度属性设置为绝对速度。湍流模型采用 k-epsilon(2eqn)模型。相应参数采用默认值^[7-8]。

2.1.3 设定边界条件

根据实际的工作情况，边界条件设置：入口设置为速度入口，速度为 0.15 m/s，压力值为 0.4 MPa，

选择湍流强度与水力直径，湍流强度为 1，水力直径为 3^[9]；出口边界条件设置为 outflow；近壁面采用标准壁面方程处理^[10]；饮料的密度和流体特性与水最接近，模拟过程采用水替代饮料。

2.1.4 模拟结果与数据说明

通过对盒中袋灌装阀阀道的流场分析，得到其压力分布、速度分布、湍流动能分布云图，见图 7。对云图分布进行分析，找出其应力与速度集中点，然后进行阀道结构改进优化^[11]。

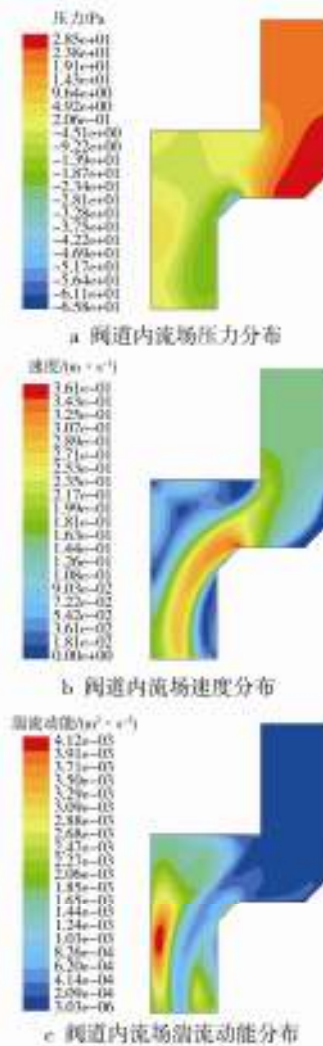


图 7 阀道内流场压力、速度、湍流动能分布
Fig.7 Pressure, velocity and distribution of turbulent kinetic energy of flow field in valve pipe

如图 7 所示，最大压力出现在阀芯的第 1 个拐角处，为 28.5 Pa，密封圈处最大压力为 23.8 Pa，阀道下部最大压力为 4.92 Pa，压力大容易损坏密封圈，影响密封性能^[12]，也会损坏盒中袋阀座与内袋之间的热封合连接。由于该灌装阀结构的特殊性才会出现该现象，应该满足密封要求的同时修改此

结构,以得到优化。灌装阀阀道内最大流速为 0.361 m/s, 出现在阀芯的第 2 个拐角处, 最小速度为 0.0181 m/s, 密封圈处的流速最大, 为 0.235 m/s, 可以看出在灌装的过程中, 流速变化很大, 又由于灌装物料的特殊性, 大的流速容易引起果粒撞击灌装阀阀芯, 导致灌装不稳定, 降低灌装精度^[13]; 也会对密封圈的拐角产生冲击腐蚀, 加速密封圈的损坏, 影响灌装阀密封性能, 降低灌装精度^[14]。湍流动能最大损耗在对中罩的壁面, 容易影响对中罩的对中性, 也需要加强对对中罩的保护, 保证其与盒中袋阀座之间的对中精度。

2.1.5 盒中袋灌装阀阀道结构优化方案

通过 Fluent 软件对盒中袋灌装阀阀道流场的仿真分析, 可知压力与速度的最大值分别出现在阀芯的第 1 与第 2 个拐角处。结合压力与速度云图以及实际的灌装条件与要求, 需要对 2 个拐角进行改进, 以优化阀道结构。

如图 8 所示, θ_1, θ_2 原本都为 45° , 在满足阀芯底面能封锁阀道最窄位置的前提下, 即保持 d 最小为 1 mm。通过分别改变阀型拐角 θ_1, θ_2 的角度, 观察速度与压力云图的分布变化, 选取最优结构, 以达到优化阀道结构的目的, 将 θ_1, θ_2 分别设定为: $\theta_1=\theta_2=0^\circ$; $\theta_1=\theta_2=30^\circ$; $\theta_1=\theta_2=60^\circ$; $\theta_1=45^\circ, \theta_2=60^\circ$; $\theta_1=30^\circ, \theta_2=60^\circ$; θ_1, θ_2 均为 $R=1\text{ mm}$ 的圆角。这 6 组数据压力、速度云图分别见图 9, 数据见表 1。

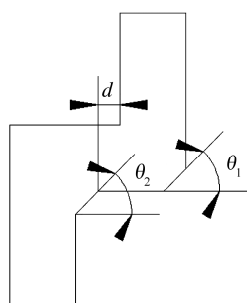


图 8 优化角度示意
Fig.8 Angle optimization

由表 1 可见, 随着 θ_1, θ_2 同步增大的话, 最大压力与速度先减小再增大。将第 5 组与第 6 组进行比较, 可知当 θ_2 相同时, θ_1 进行改变, 压力与速度变化不大; 将第 3 组与第 4 组进行比较可得, θ_2 角对压力与速度影响大。综合以上 7 组数据, 以及本阀道灌装过程中要求(压力不宜过大, 否则会损坏盒中袋阀座热封胶; 速度不能太大, 否则引起灌

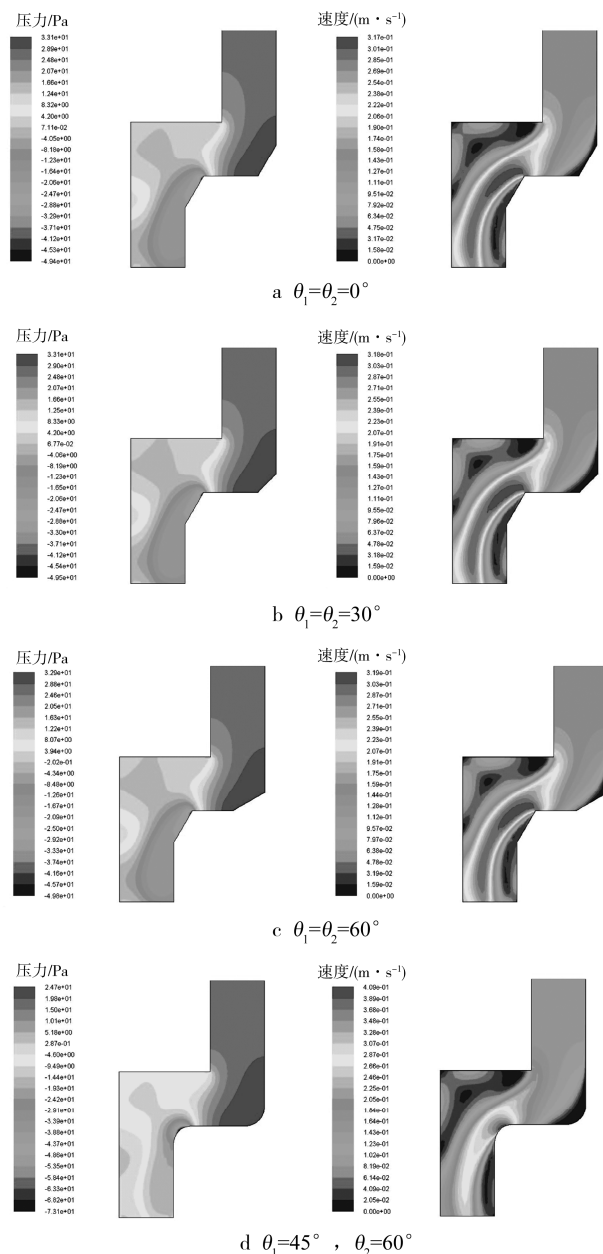


图 9 不同角度下的压力、速度云图
Fig.9 Pressure and velocity cloud of different angle

表 1 θ_1, θ_2 变化时的压力、速度
Tab.1 Pressure and speed table of different angle on θ_1 & θ_2

组序	角度/半径		最大压力 /Pa	最大速度 /(m·s ⁻¹)
	θ_1	θ_2		
1	0°	0°	37.9	0.379
2	30°	30°	27.4	0.333
3	45°	45°	28.5	0.361
4	45°	60°	33.1	0.318
5	60°	60°	33.1	0.317
6	30°	60°	32.9	0.319
7	1 mm	1 mm	34.7	0.409

装不稳定)，第 2 组数据最为合适，即 $\theta_1=30^\circ$ ， $\theta_2=30^\circ$ 。优化后阀道结构见图 10。

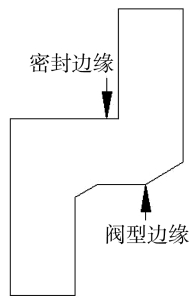


图 10 优化后的阀道结构
Fig.10 Optimized valve structure diagram

2.2 阀芯下降高度选择

2.2.1 建立不同高度模型

目前市场上含果粒果汁中，果粒最大直径一般为 2~4 mm^[15]。盒中袋灌装阀阀芯下降 4 mm 时，灌装阀开度最大，因此，在这边的高度选择中，首先选择以上分析得到的阀道结构并保持不变，即 θ_1, θ_2 均为 30° ；阀芯下降高度分别为 2, 3, 4 mm，再运用 Fluent 软件分别对不同高度进行模拟仿真，最终选择最合适的高度。阀芯下降不同高度阀道结构见图 11。

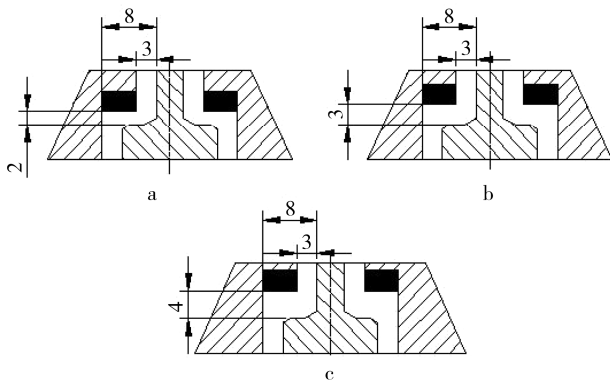


图 11 阀芯 3 种下降高度下阀的过流模型
Fig.11 Flow model diagrams of valves with three descending heights

2.2.2 3 种不同高度仿真分析

分别运用 Fluent 软件，对阀芯下降的不同高度进行模拟仿真对比分析，见图 12 和 13。

由图 12 和 13 可见，阀芯下降 2, 3, 4 mm 时，对应的最大压力分别为 50.8, 27.4, 23.4 Pa，最大速度分别为 0.454, 0.333, 0.284 m/s。随着阀芯下降高度的增加，最大压力与最大速度都是一个下降的过程，通道内的压力、速度分布也更加均匀。

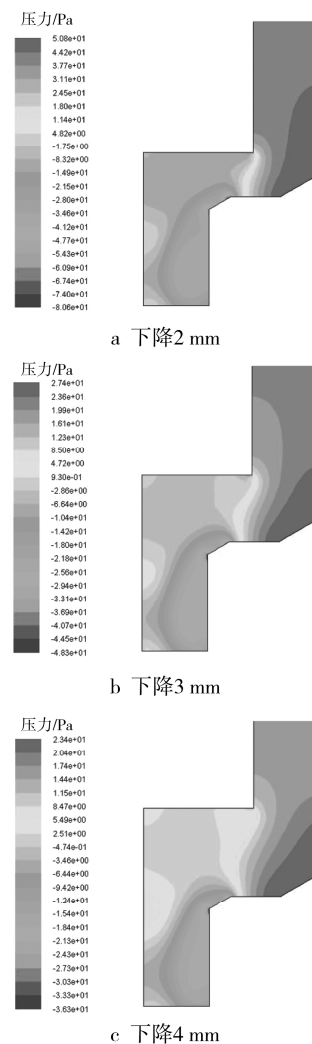


图 12 下降高度对压力的影响
Fig.12 The influence of descending height on pressure

在密封圈处，下降 2 mm 时，最大压力为 44.2 Pa，最大速度为 0.34 m/s；下降 3 mm 时，最大压力为 19.9 Pa，最大速度为 0.217 m/s；下降 4 mm 时，最大压力为 17.4 Pa，最大速度为 0.185 m/s。

在阀芯处，下降 2 mm 时，最大压力为 50.8 Pa，最大速度为 0.454 m/s；下降 3 mm 时，最大压力为 27.4 Pa，最大速度为 0.333 m/s；下降 4 mm 时，最大压力为 23.4 Pa，最大速度为 0.284 m/s。

在流道下端，下降 2 mm 时，最大压力为 11.4 Pa，最大速度为 0.318 m/s；下降 3 mm 时，最大压力为 4.72 Pa，最大速度为 0.25 m/s；下降 4 mm 时，最大压力为 5.49 Pa，最大速度为 0.256 m/s。

灌装时需要足够的灌装速度，但是密封圈处、阀芯处的速度又不能过大，否则引起密封不严以及灌装不稳定等现象。在密封圈处以及流道下端的灌装压力也不能太大，否则会损坏密封圈以及盒中袋

阀座热封合连接。综上所述,选择3 mm为最佳下降高度。

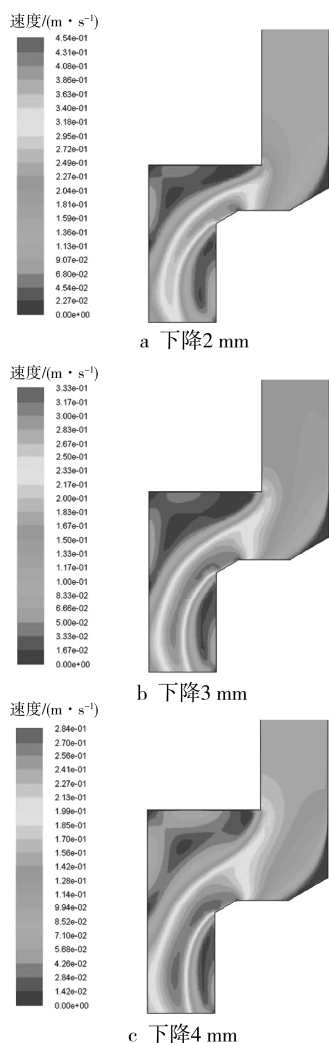


图 13 下降高度对流动速度的影响

Fig.13 The influence of descending height on speed

3 结语

运用 Fluent 软件对盒中袋灌装阀阀道进行了数值模拟计算,得到了阀道流场分布结果,对灌装阀阀道进行了优化,对阀芯下降高度进行了选择。优化后的灌装阀在灌装过程中,物料对密封圈、阀芯的冲击以及对盒中袋阀座的压力与冲击都在合适的范围内,阀道优化结果以及阀芯下降高度选择,为灌装阀初设计提供了理论参数。

参考文献:

[1] 李岩,于飞,张鹏.含果粒酸乳-中国酸乳市场的生力军[J].科技风,2010(5):94.

LI Yan, YU Fei, ZHANG Peng. Containing Fruit Yogurt-China Yogurt Market Force[J]. Science and Technology Wind, 2010(5):94.

[2] 崔曼,陆佳平.含颗粒盒中袋灌装机灌装阀设计与参数计算[J].江南大学学报(自然科学版),2012,11(2):186—189.

CUI Man, LU Jia-ping. Design and Parameter Calculation of the Filling Valve and Filling Machine for Particle Containing BIB[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2012, 11(2):186—189.

[3] 李润. BIB(盒中袋)在包装中的应用[J].印刷世界,2008(9):82—84.

LI Run. Application of Bag in Box Packaging[J]. Printing world, 2008(9):82—84.

[4] 黄川,李东波,刘延友,等.基于 Fluent 的易拉罐灌装阀阀道流场分析与结构优化[J].机械设计与制造,2014,43(8):27—31.

HUANG Chuan, LI Dong-bo, LIU Yanyou, et al. The Flow Distribution Analysis and Structure Optimization of Cans Filling Road Based on Fluent[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(8):27—31.

[5] 孙智慧,姚炳兴.等压灌装阀阀座流道流场分析及结构优化研究[C]//2007年全国包装与食品工程学术年会论文汇编,2007:240—247.

SUN Zhi-hui, YAO Bing-xing. Pressure Filling Valve Seat of Flow Field Analysis and Optimization[C]//2007 Annual Conference of the National Packaging and Food Engineering Compilation of Papers, 2007: 240—247.

[6] 尚世卓.基于 PWM 的液压高速开关阀结构设计与特性分析[D].兰州:兰州理工大学,2014.

SHANG Shi-zuo. Structure Design and Characteristic Analysis on Hydraulic High Speed On-off Valve Based on PWM[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2014.

[7] KARU NAKUMARI L. Experimental and Numerical Study of a Rotating Wheel Air Classifier[J]. AIChE Journal, 2005, 51(3):780.

[8] MU Chun-yu. Based on the Separation Efficiency of the Cyclone in the CFD Numerical Model[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.

[9] 张大林.三维机翼防冰热载荷的数值模拟[D].南京:南京航空航天大学,2007.

ZHANG Da-ling. Numerical Simulation of Thermal Load of the Wing Anti-ice[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[10] 崔曼.盒中袋灌装阀阀口流场分析与结构优化[J].包装工程,2012,33(7):74—77.

CUI Man. Numerical Simulation and Structural Opti-

- mization on Valve of Bag-in-Box[J]. Packing Engineering, 2012, 33(7):74—77.
- [11] 王艳珍, 于兰英, 柯坚, 等. 水压锥阀流场的 CFD 解析[J]. 机械, 2004, 30(5):20—22.
WANG Yan-zhen, YU Lan-ying, KE Jian, et al. CFD Simulation of the Flow Field Inside Water Hydraulics Poppet Valve[J]. Mechanical, 2004, 30(5):20—22.
- [12] 肖军. 谈液压橡胶密封件的结构性能及使用[J]. 橡塑技术与装备, 2010, 36(1):28—35.
XIAO Jun. On the Structure and Properties of Hydraulic Rubber Seals and Use[J]. Plastics Technology and Equipment, 2010, 36(1):28—35.
- [13] 王家珂, 王张捷, 凌世杰. 高位罐灌装精度分析[J]. 机械制造与自动化, 2009, 38(5):23—24.
WANG JIA-ke, WANG Zhang-jie, LING Shi-jie. Analyzing Canning Precision of High Level Tank of Packing Bag[J]. Machine Building and Automation, 2009, 38(5):23—24.
- [14] PASCALL M A, RICHTSMEIER J. Nondestructive Packaging Seal Strength Analysis and Leak Detection Using Ultrasonic Imaging[J]. Packing Technology and Science, 2002, 15(6):275—285.
- [15] 刘华, 赵六永. 果粒酸性含乳饮料的工艺及设备优化[J]. 饮料工业, 2014(3):13—17.
LIU hua, ZHAO liu-yong. Process and Equipment Optimization for Fruit Granule-containing Acidic Milk Beverages[J]. Beverage industry, 2014(3):13—17.