

## 基于 FLUENT 的摇盖式异形盒烟支入盒工艺优化设计

汤亮, 郭卫林, 龚发云, 王亮, 潘明铮, 张董洁  
(湖北工业大学, 武汉 430068)

**摘要:** **目的** 针对摇盖式异形盒烟支入盒工艺普遍使用手工包装, 导致生产效率低下且易产生二次污染等问题, 提出使用真空吸附式机械手完成烟支入盒流程, 并对机械手末端真空吸盒的结构进行优化设计。**方法** 应用 FLUENT 软件对 3 种不同结构型式真空吸盒的二维流场进行数值模拟分析, 得到吸盒端口结构型式及真空度与负压气流场稳定性的影响关系。**结果** 负压气流场稳定性强弱关系为锥形>圆形>方形; 随着真空度的增加, 吸盒端口中心及吸孔入口流速均增加, 负压气流场内真空度越大, 其稳定性越差, 当真空度分别为 20, 25, 30, 40 kPa 时, 锥形吸盒气流场的理想真空度为 20 kPa。**结论** 设计的烟支入盒工艺合理, 稳定性好, 效率高。模拟结果可给真空吸盒的优化设计提供理论依据。

**关键词:** 摇盖式异形烟盒; 机械手; 真空吸盒; 数值模拟

**中图分类号:** TB482.2; TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0071-07

## Technology Optimization Design of Packing Cigarettes into Shake-lid Shaped Cigarette Case Based on FLUENT

TANG Liang, GUO Wei-lin, GONG Fa-yun, WANG Liang, PAN Ming-zheng, ZHANG Dong-jie  
(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**ABSTRACT:** A lot of manpower is used in the process of packing cigarettes into shake-lid shaped cigarette case, which results in low production efficiency and easily leads to secondary pollution problem. Vacuum suction manipulator was proposed to conduct this packing process and optimization design was performed for the structure of vacuum chuck in the end of manipulator. FLUENT was used to analyze the 2D flow fields of chucks with three kinds of different structural parameters, obtaining the relationship among vacuum flow field stability and sucker-port structure, degree of vacuum. Simulation results showed that the relationship strength of the vacuum flow field followed the order of Cone> Round> Square; With the increase of the degree of vacuum, the hole inlet flow rate of sucker port center and the suction both increased. The larger the vacuum degree inside the vacuum flow field, the worse the stability. When the vacuum pressure was 20, 25, 30, 40 kPa, the ideal degree of vacuum chuck cone flow field was 20 kPa. The design of cigarettes into the box process was reasonable, stable and efficient. The simulation results could provide theoretical basis for optimization design of vacuum chuck.

**KEY WORDS:** shake-lid shaped cigarette case; manipulator; vacuum chuck; numerical simulation

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目 (2012FFA059)

作者简介: 汤亮 (1978—), 男, 湖北十堰人, 博士, 湖北工业大学副教授, 主要研究方向为轻工机械设计。

通讯作者: 龚发云 (1964—), 男, 湖北鄂州人, 硕士, 湖北工业大学教授, 主要研究方向为包装工艺、轻工机械自动化。

目前国内外普遍使用竖式卷烟包装盒<sup>[1]</sup>,国内大部分与之配套的包装机在烟支入盒过程中仍存在较大的烟支损耗,机组运行效率有待提高,少数进口包装机虽有包装速度快、精度高等优点,但其价格昂贵,维修难度大。摇盖式异形烟盒包装在市场上较为少见,其包装流水线还不成熟,烟支入盒这道工序仍然依靠人工,生产效率低下,市场主流卷烟包装机对其并不适用,因此很有必要找到1种能够代替手工并且可准确、稳定、高效地完成烟支从烟库到烟组模盒这一工艺流程的包装方式。近年来,真空机械手作为真空技术与电子技术相结合的产物,以其稳定、高效、经济、自动化程度高等优点在包装工业领域得到广泛应用<sup>[2]</sup>。机械手末端采用真空吸盒,使用真空负压的原理进行吸附和投放烟支,为了考察吸盒吸附的稳定性,需要对吸盒内部气流场进行数值模拟分析,以探讨其对烟支吸附效果的影响。万晶晶<sup>[3]</sup>研究了捕烟轮中的烟支在负压制动过程中各表面的压强分布,结果表明烟支上表面压强明显大于下表面,由此产生的摩擦力为主要制动力。滕红华<sup>[4]</sup>研究了真空吸盘典型工位的静态及动态受力情况,研究表明,吸盘的动态设计使吸盘的工作更可靠。张鹏飞<sup>[5]</sup>分析了放置式烟支传送机械手在运动过程中的位移、速度和加速度的情况。丛海鹰<sup>[6]</sup>从力学角度对吸盘进行了计算分析设计,得到了较为合理的吸盘布局。目前对真空吸盒的研究主要是对其整体进行理论计算分析,对吸附通道内的流体流动状态的研究较少。这里以3种不同结构型式的机械手真空吸盒为研究对象,通过对吸盒内部气流场进行数值模拟分析,探讨真空吸盒的最佳结构型式及真空度与气流场稳定性的影响关系。

### 1 摇盖式烟盒包装方案设计

摇盖式烟盒包装要求机组运行高效、烟支装填精准、烟支损耗较小且无二次污染等,由此设计的包装方案为:电机驱动传送带运转,烟盒通过传送带进入包装系统,开始作业过程。封闭的烟盒经过开盒、加装内衬纸等流程再次通过传送带输送至机械手作业区域。传送带具有差速系统,能使烟盒整齐有序地排列。真空机械手通过接收传感器发送过来的信号,按照预设程序完成一系列吸附、传送、投放烟支等动作。装填完毕的烟

盒再经过标签纸包装、内衬纸压折、封盒等流程,整个过程快速高效,包装速度可达200包/min。具体包装作业流程见图1。

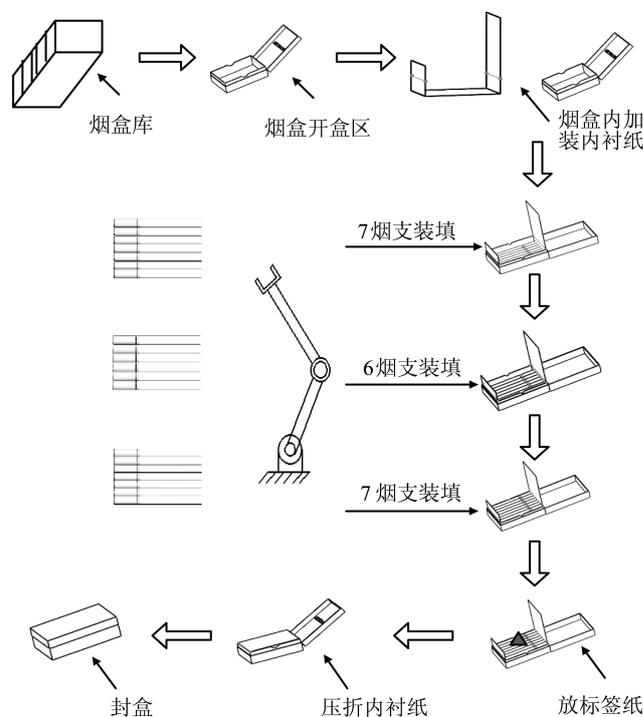


图1 小盒卷烟包装作业流程

Fig.1 Operation flow chart of small box cigarette packaging

在设计包装方案中,烟支装填入盒是区别于国内大部分卷烟包装机的1个关键流程。普通竖式烟盒包装机通常采用下烟装置与推烟机构相结合的方式<sup>[7]</sup>。下烟过程往往损耗烟支严重,情节严重还会导致包装机意外停机。推烟机构一般采用凸轮连杆或转塔推烟机构,前者推烟过程中冲击力较大且包装速度较低,后者虽传送精度较高但其结构复杂,设备昂贵。方案中利用真空技术制成的真空吸附式机械手不仅能够高效衔接前后生产工艺流程,还能大幅减少烟支消耗,提高机组运行效率,实现了摇盖式烟盒的烟支入盒工艺的自动化运转<sup>[8]</sup>。烟支入盒工艺见图2。

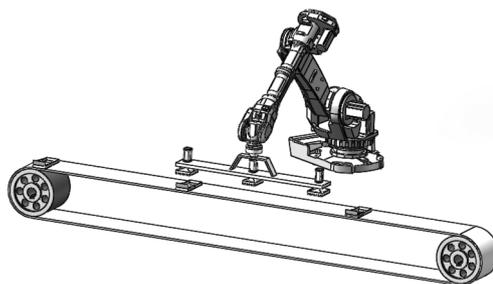


图2 烟支入盒工艺流程

Fig.2 Flow chart of packing cigarettes into the box

## 2 真空吸盒的结构设计及其流场建模

### 2.1 真空吸盒的结构设计

在烟支入盒工艺流程中，机械手需要稳定、精确地吸附、传送和投放烟支，而真空吸盒是烟支抓取的重要器件，吸盒的吸附通道与烟支紧密接触，吸盒的吸附性能与吸盒的结构密切相关，因此很有必要对吸盒吸附通道的结构（布局和形状）进行优化设计<sup>[9-11]</sup>。

以湖北某卷烟厂生产的“HY”烟为例，其长度为 84 mm，直径 8 mm，因此对七通道吸盒设计的基本尺寸为 115 mm×100 mm×25 mm，每条吸附通道上均匀分布有 4 个通孔，孔距为 25 mm。吸盒的端口形状市场上常见的有圆形、锥形、方形等，考虑到烟支在被吸附过程中极易与吸盒棱角碰撞导致烟支损坏，因此在吸盒底部设计了倒圆角，由此设计出的七通道吸盒的 3 种截面结构见图 3，通道上端负压通孔分布情况见图 4。

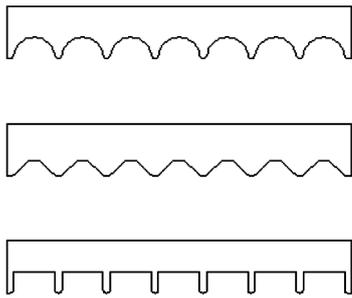


图 3 圆形、锥形、方形吸盒截面

Fig.3 Cross-sectional view of rounded, tapered, square sucker

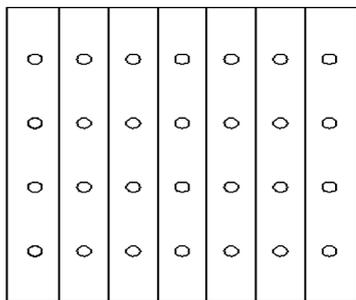


图 4 负压通孔分布

Fig.4 Distribution of negative pressure vials

### 2.2 真空吸盒的流场建模

机械手开始工作时，真空发生器产生的卷吸流动会使吸附腔内空气不断被抽走，形成一定的真空度，在压力差的作用下，机械手末端吸盒吸附烟支生产区的烟支并传送至烟组模盒上方，负压消失，

烟支在重力作用下落至模盒内。由于每个吸烟通道尺寸以及负压孔分布一致，为了简化流场模型仅分析吸烟通道 1 个负压孔的剖切面，见图 5。3 种吸盒的几何尺寸：吸盒进口宽度为 14 mm；吸附通道高度为 5.5 mm；吸盒高度为 25 mm；吸孔半径为 2 mm；锥形收缩角为 70°。流体性质：密度为 1.2 kg/m<sup>3</sup>；动力黏性系数为 0.018 mPa·s；出口压力为 0；进口压力为 20，25，30，40 kPa；雷诺数 > 10 000。

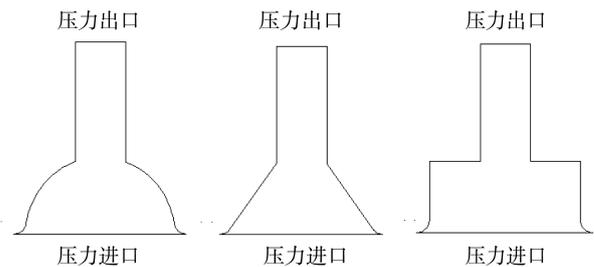


图 5 不同结构吸盒流场几何模型

Fig.5 Flow field geometric models of sucker with different shapes

## 3 数值模拟理论基础与方法

这里主要分析和研究真空吸盒吸附通道内气流分布情况。在数值模拟计算过程中，流体流动需遵循质量守恒方程，当流体流动处于湍流状态时，还需遵守湍流输运方程。选择正确的数学计算模型对提高数值模拟计算的准确性至关重要。

### 3.1 质量守恒方程

质量守恒定律可以表述为单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间内流入该微元体的净质量。按照这一定律，可以得出质量守恒方程<sup>[12]</sup>：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

### 3.2 湍流模型

由于该模型雷诺数较高，流动是湍流，因此采用标准  $k-\varepsilon$  模型，且流体不可压，湍流输运方程可简化为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

式中： $k$ 为湍动能， $\varepsilon$ 为湍动耗散率， $\mu_t$ 为湍流粘度， $G_k$ 为由平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项<sup>[13-14]</sup>。相关常数值分别为： $C_\mu=0.09$ ， $C_{1\varepsilon}=1.44$ ， $C_{2\varepsilon}=1.92$ ， $\sigma_k=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.33$ 。

$$\text{其中 } \mu_t = c \rho \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}.$$

### 3.3 边界条件的确定以及求解

数值模拟过程使用了基于有限元法的二维单精度 Fluent 求解器，采用基于结构网格的 SIMPLE 算法，选择基于压力的半隐式求解方式，激活标准  $k-\varepsilon$  方程，采用一阶迎风离散格式，使用四边形网格对二维几何模型进行划分，气流入口处为压力入口边界，出口边界条件为压力出口，壁面采用无滑移边界条件。

## 4 仿真结果及分析

### 4.1 不同外形结构的真空吸盒对负压气流场的影响

为了考察不同外形结构真空吸盒内部气流场的可靠性及稳定性，设置吸盒内真空度为 20 kPa，对圆形、锥形、方形 3 种吸盒内部的气流场进行数值模拟分析，得到气流场的速度分布和湍动能分布。

不同结构吸盒内部速度流场见图 6，在靠近负压孔入口处 3 种结构吸盒在轴线方向的速度存在明显的梯度变化，其中圆形和方形吸盒表现得最为明显。在吸盒吸附通道内，锥形吸盒气流场速度分布较为均匀，方形吸盒在某些区域出现漩涡，在一定程度上影响了吸盒气流场的可靠性及稳定性。为了更清晰地了解不同吸盒内部各节点的速度分布，通过 FLUENT 后处理得到了各自中心轴线上节点的具体速度值。不同结构吸盒中心轴线上速度分布散点见图 7，显示出在吸盒中心轴线上距离吸盒底部端口中心的位移与在该处速度值的对应关系，锥形吸盒在端口中心处速度值较高，达到 66 m/s，这更有利于吸盒对烟支的吸附。3 种结构吸盒在吸孔入口处速度均达到 160 m/s 左右，在吸盒颈部达到

峰值。圆形、方形吸盒在负压孔内部速度逐渐降低并趋于稳定，而锥形吸盒速度一直保持平稳。结合图 6—7 可以看出，锥形吸盒内部速度分布均匀，速度增幅较小，在保证吸盒吸附烟支的可靠性和稳定性上优势明显。

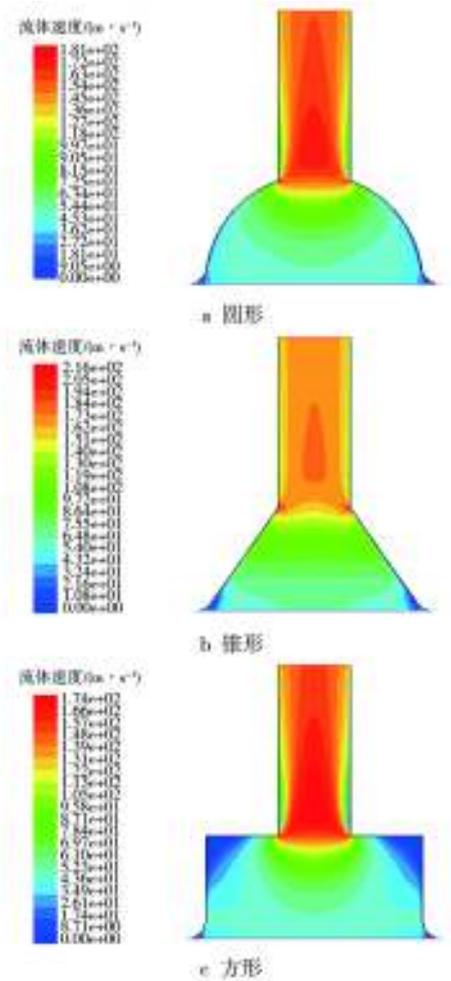


图 6 不同结构吸盒内部速度流场  
Fig.6 Internal velocity flow field in sucker with different shapes

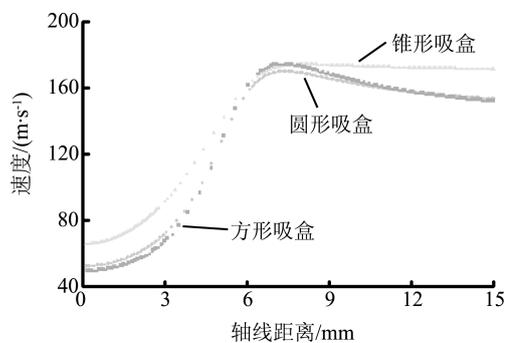


图 7 不同结构吸盒中心轴线上速度分布散点  
Fig.7 The velocity distribution scatter plot of the center axis of sucker with different shapes

湍动能是湍流速度涨落方差与流体质量乘积的 1/2<sup>[15]</sup>，因此湍动能的变化从本质上来讲是由速

度的变化引起的,速度增幅越明显, $k$  值也就越大,说明湍流越剧烈,气流场也越不稳定。不同结构吸盒内部湍动能流场见图 8,3 种形状吸盒在吸附通道处气流湍动均较小;在负压吸孔处方形吸盒气流场出现湍流集中现象,气流湍动明显,气流场稳定性受到一定影响;锥形吸盒在收缩段小范围区域出现湍流集中现象,整体表现较为平稳。图 8 所得结论与图 6 和图 7 所得结果基本吻合,在综合考虑了吸盒内部气流场速度分布以及湍动能分布情况后,锥形吸盒气流场更为可靠及稳定,吸附和传送烟支过程更为平稳,负压气流场稳定性强弱关系为锥形 > 圆形 > 方形。

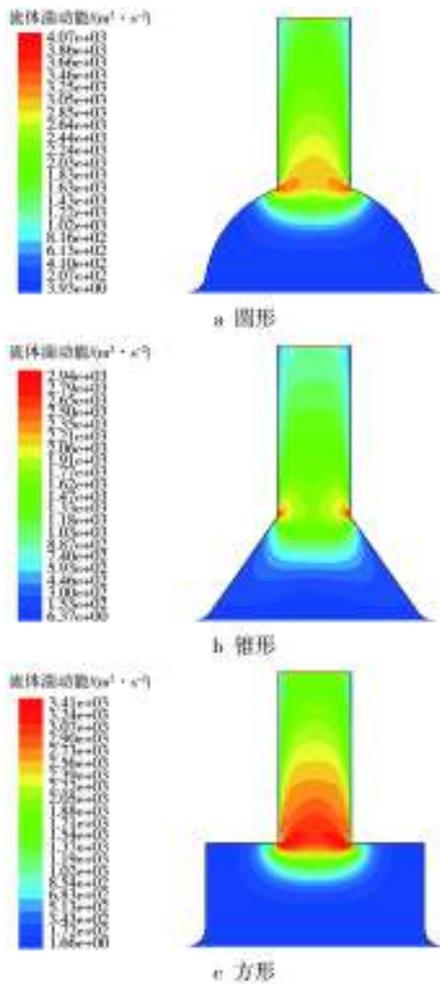


图 8 不同结构吸盒内部湍动能流场

Fig.8 Turbulent kinetic energy of the flow field in sucker with different shapes

### 4.2 真空度对锥形吸盒负压气流场的影响

真空吸盒吸附烟支的过程复杂,已吸附烟支可能受到其他烟支的冲击与挤压,机械手携带烟支过程中也存在较大惯性力,为使烟支在吸附和传送过

程中保持稳定,需探讨真空度对锥形吸盒气流场的影响。在之前的锥形吸盒模型下,设置吸盒内真空度分别为 20, 25, 30, 40 kPa, 得到不同真空度下锥形吸盒内部气流场的湍动能分布及通过 FLUENT 后处理得到的中心轴线上的速度分布散点,见图 9—10。

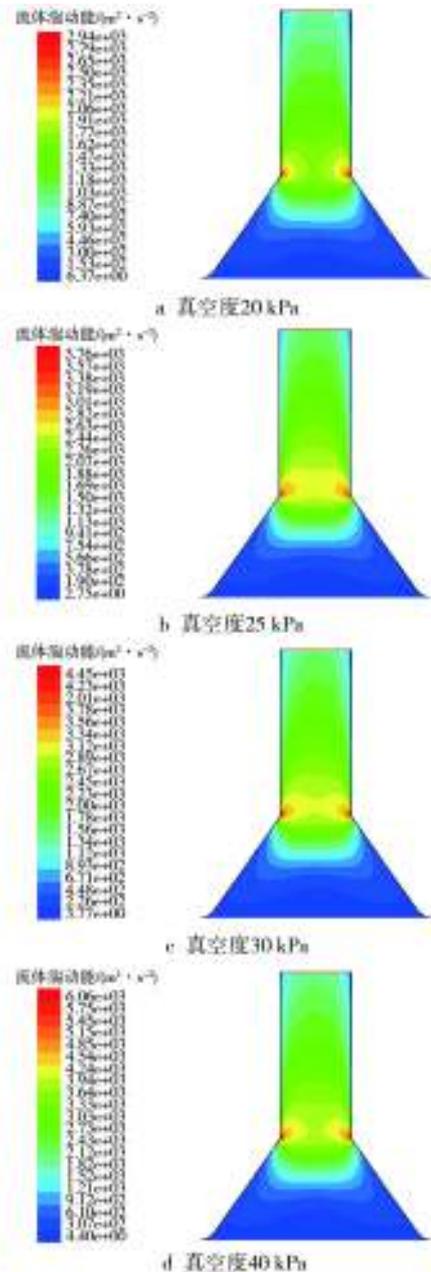


图 9 不同真空度吸盒内部湍动能流场

Fig.9 Turbulent kinetic energy of the flow field inside sucker under different degree of vacuum

从图 9 可以看出,随着真空度的增加,负压孔入口附近的湍流脉动速度逐渐递增,且经处理数据表明,真空度越大,负压孔入口处湍动能越大,数值浮动越明显,这说明吸盒内负压越大,吸盒内部

气流场的稳定性反而越差。从图 10 可看出, 吸盒进口速度随真空度的增加而增加, 流体速度在吸盒收缩段速度梯度大, 明显可以看出, 当真空度为 20 kPa 时, 中心轴线上速度增幅更为平稳, 这也表明其对应气流场速度分布更均匀, 稳定性更好。仿真结果表明, 真空度越高, 锥形吸盒内气流场稳定性越差。对比 4 个不同真空度的仿真结果, 20 kPa 为锥形吸盒负压气流场的理想真空度。

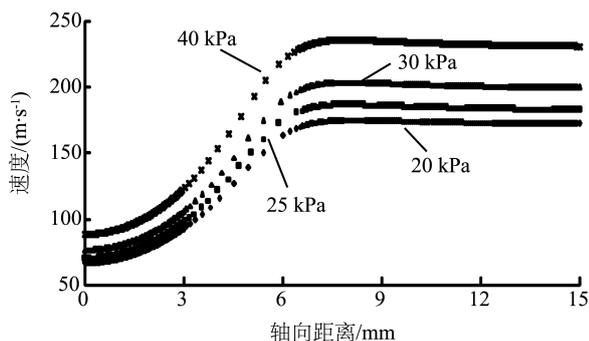


图 10 不同真空度吸盒中心轴线上速度分布散点

Fig.10 The velocity distribution scatter plot of the center axis of sucker under different degree of vacuum

## 5 结语

在真空度为 20 kPa 的边界条件下, 从吸盒端口中心至吸附通道收缩段, 锥形吸盒内气流速度上升最为平稳, 3 种形状吸盒均在吸盒颈部达到最高速度; 方形吸盒颈部湍流集中现象最为明显, 锥形吸盒整体表现较为稳定。各吸盒内部负压气流场稳定性强弱关系为锥形 > 圆形 > 方形。数值模拟结果对真空吸盒的优化设计提供了一定的参考价值。

对于锥形吸盒, 随着真空度的增加, 吸盒端口中心及吸孔入口流速均增加, 吸盒颈部一定范围内湍动越来越剧烈。负压气流场内真空度越大, 锥形吸盒稳定性越差。

基于 FLUENT 软件的吸盒流场数值模拟分析是 1 种快捷、直观的设计方法, 不仅能大大缩短研发周期, 还能提高研发效率。

## 参考文献:

[1] 齐瑞文, 杨明朗, 黄婉春. TRIZ 创新理论在卧式卷烟包装盒设计中的运用[J]. 包装工程, 2006, 27(1):140—141.  
QI Rui-wen, YANG Ming-lang, HUANG Wan-chun. Design of Horizontal Cigarette Case Utilizing the

TRIZ Theory[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(1): 140—141.

[2] 司震鹏, 曹西京, 姜小放. 真空吸附式机械手系统设计[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(6):26—30.  
SI Zhen-peng, CAO Xi-jing, JIANG Xiao-fang. Robot Vacuum Adsorption System Design[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(6):26—30.

[3] 万晶晶. 新型烟支传送装置设计与分析[D]. 长沙:湖南大学, 2012.  
WAN Jing-jing. Design and Research of New Cigarette-Transferring Device[D]. Changsha:Hunan University, 2012.

[4] 滕红华. 真空吸盘吸持物体的动力学分析[J]. 包装工程, 2004, 25(2):68—69.  
TENG Hong-hua. Dynamics Analysis of Holding Force Applied to Objects by a Vacuum Disc AsPirator[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(2):68—69.

[5] 张鹏飞, 李德法. 基于 Pro/E 的双系杆行星轮机械手的运动分析及仿真[J]. 烟草科技, 2008(9):24—28.  
ZHANG Peng-fei, LI De-fa. Motion Analysis and Simulation of Dual Binder Planetary Gear Manipulator Based on Pro/E[J]. Tobacco Science and Technology, 2008(9):24—28.

[6] 丛海鹰, 毛承志, 刘北英. 吸盘式上下板料机械手关键结构设计[J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(3):76—78.  
CONG Hai-ying, MAO Cheng-zhi, LIU Bei-ying. Key Structure Design of the Mould Plate Feeding and Unloading Manipulator[J]. Machine Building and Automation, 2008, 37(3):76—78.

[7] 汤达伟. 烟草包装机柔性下烟装置的设计与研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.  
TANG Da-wei. Study on Gentle Cigarette Transfer Device of Tobacco Packing Machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.

[8] 龚发云, 汤亮, 邓援超, 等. 一种香烟装盒装置:中国, 2014207932784[P]. 2015-04-29.  
GONG Fa-yun, TANG Liang, DENG Yuan-chao, et al. A Cigarette Cartoning Apparatus:China, 2014207932784 [P]. 2015-04-29.

[9] 崔曼, 陆佳平. 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, LU Jia-ping. Numerical Simulation and Structural Optimization on Valve of Bag-In-Box[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7):74—77.

[10] 张翠珠, 曾珊琪, 丁毅. 全自动圆压平模切机供料系统的设计[J]. 包装工程, 2008, 29(6):89—90.

- ZHANG Cui-zhu, ZENG Shan-qi, DING Yi. Design of Feeding System for Fully Automatic Flat-bed Cylinder Die-cutting Machine[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6):89—90.
- [11] 李鄂民, 杨洋, 张晨, 等. 真空吸盘技术在铜板配重系统中的应用[J]. 液压与气动, 2011(2):63—65.
- LI E-ming, YANG Yang, ZHANG Chen, et al. The Application of Vacuum Suction Cups for Copperplate Weight System[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2011(2):63—65.
- [12] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics[J]. Pearson Education Limited, 1995, 20(5):400.
- [13] 张建文, 杨振亚, 张政. 流体流动与传热过程的数值模拟基础与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- ZHANG Jian-wen, YANG Zhen-ya, ZHANG Zheng. Numerical Simulation of Basic and Applied about Fluid Flow and Heat Transfer Processes[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [14] 汤亮, 叶方平, 龚发云, 等. 不同湍流模型在小尺寸换热器 CFD 计算中的应用与比较[J]. 武汉大学学报, 2015(3):407—412.
- TANG Liang, YE Fang-ping, GONG Fa-yun, et al. Application and Comparison of Different Turbulence Models to Small Size Heat Exchanger CFD Calculations[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015(3):407—412.
- [15] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京:清华大学出版社有限公司, 2005.
- ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang, XU Chun-xiao. Turbulence Theory and Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press Ltd., 2005.