

# 基于 Fluent 的某卷烟机搭口胶枪喷嘴流体仿真分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.05.006

徐健伟<sup>1</sup> 王娜<sup>2</sup>

廖宇<sup>2</sup> 刘兴海<sup>1</sup>

1. 武汉大学

图像传播与印刷包装  
研究中心

湖北 武汉 430079

2. 湖北中烟工业有限责任公司

湖北 武汉 430030

**摘要:**为解决高速卷烟机搭口胶喷涂过程中出现的涂胶不均匀等问题,利用 Fluent 模拟搭口胶的涂胶工艺,通过改变喷嘴的进口压力观察胶液出口黏度和出口流速的变化。首先利用 Solid Works 对搭口胶喷嘴进行建模,然后分析 Fluent 模拟搭口胶喷胶涂胶过程,最后通过实验测试详细分析在不同进口压力条件下胶液的黏结性能,包括初黏性和抗 T 型剥离强度。仿真结果表明,喷嘴的出口黏度随着进口压力的升高而逐渐降低,出口流速刚好相反,即随着出口压力的升高而增加。搭口胶的黏结性能随着进口压力的增加而降低的。利用搭口胶喷涂的流体仿真模拟对卷烟生产工艺进行优化具有一定的指导作用。

**关键词:** Fluent; 搭口胶; 假塑性流体; 初黏性; 抗 T 型剥离强度

**中图分类号:** TP271<sup>+</sup>.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2022)05-0036-06

**引文格式:** 徐健伟,王娜,廖宇,等. 基于 Fluent 的某卷烟机搭口胶枪喷嘴流体仿真分析[J]. 包装学报, 2022, 14(5): 36-41.

## 1 研究背景

1975 年我国引进首台 MOLINSPA-9 卷烟机,卷烟厂开始使用人工合成的聚合物乳液,实现配套用胶的国产化。初代卷烟胶为白乳胶,学名为聚乙烯酯 (polyvinyl acetate, PVAC) 乳液胶黏剂。其是通过乙酸乙烯单体聚合制得,具有无毒、无腐蚀性、胶合强度高、黏度大,以及不容易发生透胶等优点。目前广泛使用的搭口胶为 EVA 乳液。水基胶在上机使用过程中会出现各种问题,如胶飞溅、喷胶量不均匀、喷嘴易堵塞等,如表 1 所示。经过实地调查发现,卷烟机的生产速度已超过 1 万支/min,因此,喷涂搭口胶时出口黏度及出口流速已不能满足高速卷接

包设备的要求。

为分析搭口胶在喷枪内的实际流动情况,学者们采用有限体积元法模拟三维胶枪喷射胶黏剂的过程,并取得了较好的模拟效果。有限体积元法是利用微分方程对控制流体流动进行数值求解,获得流体流动离散布局。该布局主要指位于连续范围内的离散分布,由此得到类似于实际流体的流动状况<sup>[1]</sup>。计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 可以弥补传统理论法和实验法所存在的不足。He C. X. 等<sup>[2]</sup>利用大涡模拟方法 (large-eddy simulation, LES) 研究了不同结构和温度对叶状喷管射流的影响,并进行了实验验证,实验结果与 LES 模拟结果吻合,证明了数值模拟方法的可行性。Huang C. C. 等<sup>[3]</sup>利用 CFD 方

收稿日期: 2022-06-12

作者简介: 徐健伟 (1999-), 男, 安徽黄山人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为智能包装与流体仿真,

E-mail: 2017301750022@whu.edu.cn

通信作者: 刘兴海 (1978-), 男, 湖北襄阳人, 武汉大学教授, 博士生导师, 主要从事智能包装研究,

E-mail: liuxh@whu.edu.cn

法研究了拉瓦尔管中流体在亚音速甚至超音速条件下整个流场系统温度和能量的变化。

综上,为研究搭口胶的上机适性问题,本课题组先在某烟厂调研,得到烟用水基胶的喷枪数据,进而构建喷嘴模型,并用 Fluent 软件进行流体仿真,通过改变搭口胶喷嘴的进口压力分析出口黏度和出口流速的变化,以期改善搭口胶的喷涂工艺。

表 1 水基胶使用中常见问题及解决方法

Table 1 Common problems and solutions in the use of water-based adhesives

问 题	原 因	解决方法
不能高速运行	加热温度低;胶黏剂干燥速度慢;涂胶量偏小	提高加热温度或提高涂胶量
烟支漏气	涂胶量小;胶内有异物;胶黏剂不适应接装纸	增加涂胶量或清理胶槽
胶飞溅	胶黏剂剪切稳定性差;胶黏剂抑泡能力差;胶黏剂流变性能不适应机器	更换胶黏剂
烟支剔除量大	胶黏剂剪切稳定性差;胶黏剂抑泡能力差;涂胶量低	提高涂胶量
接装纸容易被剥离	胶黏剂内有气泡;胶黏剂不适应接装纸	提高涂胶量

## 2 流体仿真

先用 Solid Works 软件搭建胶枪喷嘴模型;然后用 ICEM CFD 软件对模型进行网格划分,生成边界层网格、面网格、线网格等,以使仿真结果更接近真实值;最后用 Fluent 软件进行流体仿真,自定义流体材料为 EVA 乳胶,运用层流模型对搭口胶喷涂的整个过程进行流体仿真<sup>[4]</sup>。对喷嘴喷射胶黏剂的过程进行计算,能够观察到整个流场的细节,如流场的形成与传播,温度、压力、流速等随着时间变化的具体情况等。

### 2.1 胶枪喷嘴模型

通过实地调查和测量,得到胶枪喷嘴尺寸,进而用 Solid Works 软件搭建胶枪喷嘴模型。胶枪喷嘴模型如图 1 所示。

### 2.2 网格划分

在 ICEM CFD 软件中,利用四叉树、八叉树法将模型直接划分成四面体网格。此方法不必顾及相邻两个单元之间存在相容性与相交性等问题<sup>[5]</sup>,因而生成网格效率比较高,生成的网格如图 2 所示。网格质

量均值为 0.8285,满足 CFD 要求。

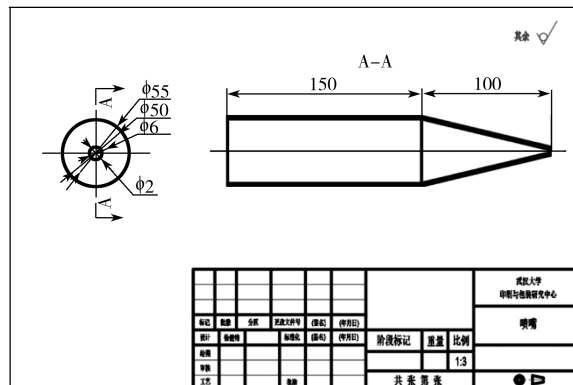


图 1 喷嘴模型

Fig. 1 Model of nozzle

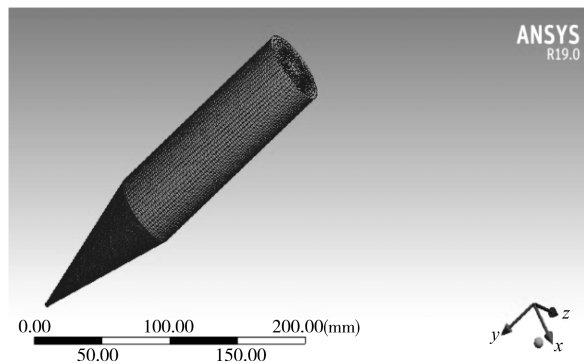


图 2 模型网络

Fig. 2 The meshed model

### 2.3 流体黏度模型

搭口胶为改性的 EVA 乳液,是典型的假塑性流体。选用合适的流体黏度模型对于研究假塑性流体的流动性十分重要。假塑性流体具有剪切变稀特性,即该流体的切应力  $\tau$  与剪切速率  $\gamma$  呈非线性关系。根据幂律模型以及牛顿流体定律,假塑性流体的表观黏度  $\eta_a$  为

$$\eta_a = \tau / \gamma = K \gamma^{n-1}, \quad (1)$$

式中:  $K$  为稠度系数;

$n$  为流变指数。

利用流变仪 (Marvern Kinexus pro+) 测试搭口胶在不同剪切速率条件 ( $0.1 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$ ) 下的黏度、切应力以及切应变,再利用 MATLAB 软件对应力、应变值进行数值拟合 (见图 3),并获得拟合方程。 $R^2$  约为 0.998,说明拟合的程度很好。

由图 3 可知,拟合曲线满足式 (1),符合幂律

模型。将 $\tau$ 、 $\gamma$ 代入式(1)中,得到稠度系数 $K$ 为 $4.19 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ ,流变指数 $n$ 为 $0.78$ 。表观黏度与剪切速率的关系式为

$$\eta_a = \tau/\gamma = 4.19\gamma^{-0.22}, \quad (2)$$

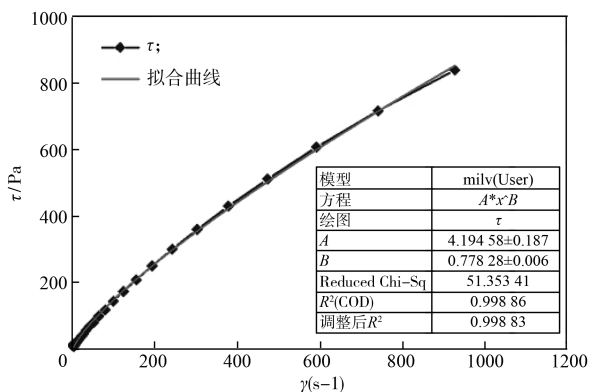


图3 切应力与剪切速率的流变曲线与拟合曲线

Fig. 3 Flow curve and fitting curve of shear stress  $\tau$  and shear rate  $\gamma$

根据国家标准 GB/T 13354—1992《液体胶黏剂密度的测定方法 重量杯法》,采用重量杯法测试搭口胶密度,测得搭口胶密度为 $0.948 \text{ g/cm}^3$ 。在 Fluent 中创建流体材料,并输入上述参数。

#### 2.4 边界条件

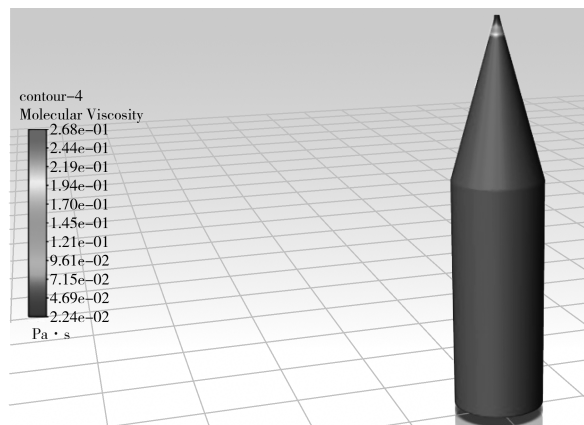
进口边界条件为压力出口,进口压力设定为 100, 110, 120, 130, 140, 150 kPa。边界条件均采用自由边界条件。流动液体定义为假塑性流体、EVA 乳液、不可压缩性流体,密度 $\rho$ 为 $0.948 \text{ g/cm}^3$ ,初始(最大)黏度为 $268.2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ <sup>[6]</sup>。溶液流动时,考虑重力,即在 $y$ 方向上有 $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的加速度,不考虑喷头内壁和溶液流体两者之间所产生的摩擦力,假设喷头壁面不存滑移情况<sup>[7]</sup>。

#### 2.5 仿真结果分析

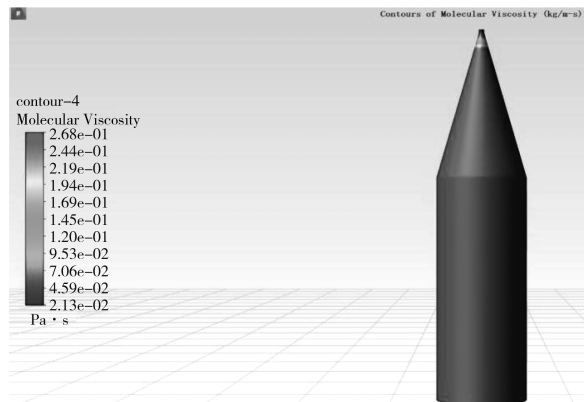
经过 Fluent 仿真模拟后发现,不同进口压力条件下胶枪喷嘴的表观黏度分布云图较为相似。因此,本研究仅以进口压力为 110 kPa 和 120 kPa 的为例(见图 4)。从图 4 可以看出,胶枪喷嘴的表观黏度在接近出口位置时才发生较大变化。

不同进口压力下假塑性流体的表观黏度和出口流速变化情况如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着进口压力的增大,出口表观黏度减小,出口流速增加。喷涂过程中搭口胶受剪切作用,出口表观黏度会变小。出口黏度越小,则喷涂越均匀。改变进口压力可以降低搭口胶的出口表观黏度,从而适配更快的

卷接包速度。此外,受压力作用,流体速度也会发生变化,在相同时间内,出口流速越快,涂胶量则越多<sup>[8]</sup>。



a) 进口压力为 110 kPa



b) 进口压力为 120 kPa

图4 不同进口压力的黏度分布云图

Fig. 4 Cloud diagram of viscosity distribution at different inlet pressures

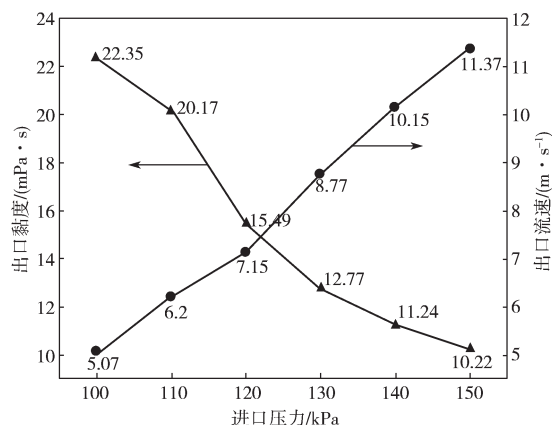


图5 不同进口压力下出口黏度和出口流速的变化情况

Fig. 5 Trends in outlet viscosity and outlet velocity with inlet pressure

### 3 性能测试

黏结力是胶黏剂与被粘物表面形成的结合力。为分析不同进口压力下胶膜厚度与黏接性能的关系,本研究对搭口胶胶液的初黏性与抗 T 型剥离强度进行了测试。

#### 3.1 初黏性测试方法

初黏强度是指物体与胶黏剂的黏性面之间通过较小的压力进行短接触时,胶黏剂对物体的黏附力。初黏性能测试通常采用斜面滚球法,即把一钢球滚过平铺在倾斜板上的胶黏剂黏性面,根据粘住的最大钢球尺寸,评测胶黏剂的初黏性<sup>[9]</sup>。

测试环境与卷烟车间的生产环境一致,即温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $65\% \pm 2\%$ 。检测步骤如下:

1) 在实验台上安装初黏性测试仪(CZY-G型,济南兰光机电技术有限公司),如图6所示,并调整至水平状态,然后调整玻璃面倾斜到 $15^\circ$ ,并将角度锁紧固定。

2) 将卷烟纸裁剪成大小为 $20\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的纸条,并放置在实验台上,用塑料吸管汲取约10滴胶黏剂,并以线条状滴加在纸条的左侧距边缘大约2 cm位置处,再用小型涂覆机(MSK-AFA-IIID型,合肥科晶材料技术有限公司)自左向右进行均速刮涂,得到具有一定厚度的胶液膜<sup>[10]</sup>。

3) 将涂好胶液膜的检测样品平移到测试仪的玻璃面板上并贴平,调整放球器,使其顶端和胶液膜上端缘接触,用镊子夹住不同球号的钢球放入放球器中,按下放球器打开手柄,钢球从检测纸样条黏性面滚下去。

4) 确定能粘住的最大球号钢球,以钢球的滚动距离与球号作为初黏性测试结果。每种胶样测试10次,根据正态分布得到平均值,并作为胶样的初黏性。



图6 初黏性测定实验

Fig. 6 Initial viscosity tester

若能粘住的最大球号钢球不同时,钢球的球号(直径)越大,搭口胶的初黏性越强。在相同球号下,滚动距离越短,初黏性越强。

#### 3.2 抗 T 型剥离强度测试方法

剥离强度是指黏合在一起的材料从接触面进行单位宽度剥离时所需的最大破坏载荷。其能够体现材料的黏结强度。在抗 T 型剥离强度测试中,施加的破坏力垂直于胶接面,剥离角度为 $180^\circ$ 。检测样品两边都属于柔性材料,可以按照 GB/T 2791—1995《胶黏剂 T 型剥离强度试验方法 挠性材料对挠性材料》相关规定对搭口胶粘接后的卷烟纸进行抗 T 型剥离强度测试,测试步骤如下:

1) 将干净平整的检测用纸裁剪为 $20\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的纸条。裁剪过程中不能对纸张边缘进行折损。

2) 用纸巾或者抹布将玻璃平板擦拭干净,并水平固定好。将裁剪好的纸条平铺在玻璃板上,然后在纸条的一端距离5 cm处开始滴加适量的胶样,用小型涂覆机进行均匀刮涂,得到厚度分别为0.25, 0.50, 0.75, 1.00 mm的胶膜。

3) 立即在胶膜表面覆盖一张纸条。覆盖时,边缘要对齐,不能在涂胶处用力挤压。将制作好的样品放置于平整表面上,并在其上面施加一块质量约为200 g的钢板,室温下固化4 h<sup>[11]</sup>。

4) 将样品的两个空白纸条分别夹在拉伸试验机(3340系列,英斯特朗(上海)实验设备贸易有限公司)的上、下夹具上,从而使样品受到的剥离力与胶接面垂直(见图7)。以30 mm/min的拉伸速度给胶接面施加荷载,一直到纸片被撕断,或者胶层遭受破坏才停止实验。测试结束后,智能拉伸试验机会自动显示和记录此剥离力大小。每种样条测试10组取平均值。

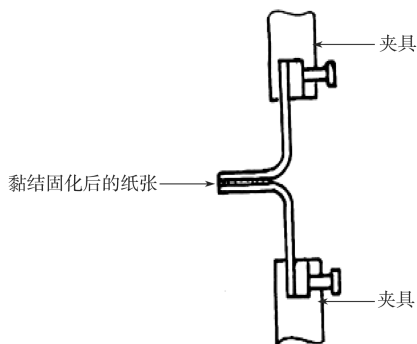


图7 抗 T 型剥离强度测试的试样夹持示意图

Fig. 7 Schematic diagram of specimen clamping for T-peel resistance test



### 3.3 测试结果

#### 3.3.1 初黏性测试结果

采用斜面滚球法对不同进口压力下的搭口胶胶样进行初黏性测试,测试结果如图8所示。本实验能粘住的最大号钢球均为8号钢球。未处理胶液为未上机前的搭口胶,初始表观黏度为268.2 mPa·s。由图8可知,不同进口压力下的搭口胶初黏性与未处理胶液相比有所降低;随着胶膜厚度的增加,搭口胶的初黏性有一定程度的增加;随着进口压力的增加,搭口胶的初黏性呈下降趋势。总之,进口压力的增加会使出口黏度下降、流动性更好,但是黏度的降低会导致搭口胶初黏性下降<sup>[12]</sup>。

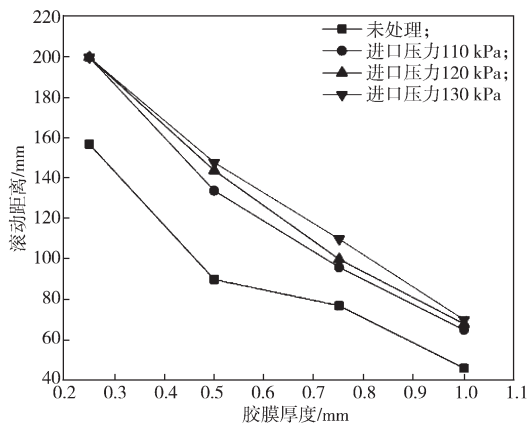


图8 初黏性测试结果

Fig. 8 Initial viscosity test results

#### 3.3.2 抗T型剥离强度测试结果

按照GB/T 2791—1995,测试剥离强度时剥离长度为30 mm。样品的剥离强度与胶膜厚度的关系曲线如图9所示。由图9可知,不同进口压力下的搭口胶比未处理胶液的抗T型剥离强度小;随着胶膜厚度的增加,搭口胶的抗T型剥离强度会有一定程度

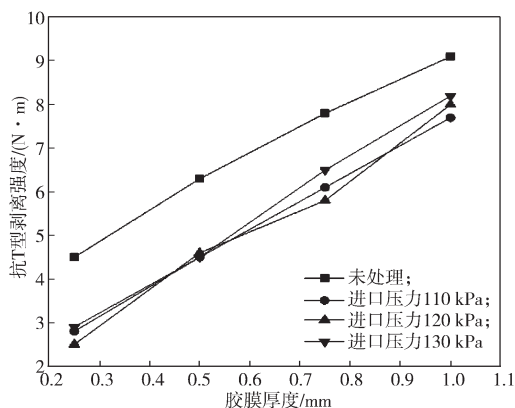


图9 抗T型剥离强度测试结果图

Fig. 9 Test results of T-peel resistance

的增加;随着进口压力的增加,搭口胶的抗T型剥离强度总体变化不明显。可见,进口压力的增加对搭口胶抗T型剥离强度的影响不大。综合考虑两个结果,搭口胶的黏结性能随着进口压力的增加而降低。

## 4 结论

本研究根据搭口胶的涂胶工艺特点与相关要求,通过有限体积元法对流体流动进行仿真分析。仿真结果表明:出口表观黏度随着进口压力的增大而变小;随着出口表观黏度的降低,搭口胶在喷涂过程中的流动性也会更好。出口表观黏度的降低会导致搭口胶的黏结性能有一定程度的降低。基于上述结论,卷烟厂可以根据生产要求如生产速度和黏度选择合适的进口压力。调整喷嘴的进口压力可改变胶液的出口表观黏度和涂胶厚度,能够有效地解决高速机搭口胶喷涂过程中出现的涂胶不均匀等问题。本研究对烟用水基胶的上机适性研究具有一定的参考作用,为卷烟生产工艺的优化提供了一定的理论参考。

#### 参考文献:

- [1] 吴树清,孙勇,杨芳,等. YJ19 卷烟机烟支导板装置改进[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 124-128.  
WU Shuqing, SUN Yong, YANG Fang, et al. Improvement on Cigarette Guide Plate Device of YJ19 Cigarette Maker[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 124-128.
- [2] HE C X, LIU Y Z. Large-Eddy Simulation of Jet Impingement Heat Transfer Using a Lobed Nozzle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 828-844.
- [3] HUANG C C, WANG T Y, ZHANG Z Y. Research Progress in Numerical Simulation of Laval Nozzle[C]//2021 5th International Conference on Mechanics, Mathematics and Applied Physics. Guilin: Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1212: 012090.
- [4] 穆林,惠建权,陶世春,等. 卷烟燃烧锥形态参数测定及与燃烧速度间的关系[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(1): 25-32.  
MU Lin, HUI Jianquan, TAO Shichun, et al. Shape Parameters of Cigarette Burning Cone and Their Relationships with Burning Rate[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2019, 25(1): 25-32.
- [5] PINTO A M G, MAGALHÃES A G, CAMPILHO R D

- S G, et al. Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive[J]. The Journal of Adhesion, 2009, 85(6): 351–376.
- [6] 李红立. 高速卷烟胶用 VAE 乳液渗透性能研究 [J]. 中国胶粘剂, 2020, 29(9): 52–56, 66.
- LI Hongli. Study on Permeability of VAE Emulsion for High Speed Cigarette Adhesive[J]. China Adhesives, 2020, 29(9): 52–56, 66.
- [7] ADAMS R D. Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherends: A Review[J]. The Journal of Adhesion, 1989, 30(1/2/3/4): 219–242.
- [8] 吴小超, 张 怡, 熊 坚, 等. 卷包机组设备效率评价指标体系的设计与实现 [J]. 包装工程, 2021, 42(13): 262–269.
- WU Xiaochao, ZHANG Yi, XIONG Jian, et al. Design and Implementation of Efficiency Evaluation System for Cigarette Production Machines[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(13): 262–269.
- [9] 曹同玉, 刘庆普, 胡金生. 聚合物乳液合成原理性能及应用 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 99–106.
- CAO Tongyu, LIU Qingpu, HU Jinsheng. Principle, Performance and Application of Polymer Emulsion Synthesis[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 99–106.
- [10] 冯亚婕, 王建民, 梁 森, 等. 基于 ImageJ 的卷烟包灰值定量测定方法优化 [J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 216–219.
- FENG Yajie, WANG Jianmin, LIANG Miao, et al. Optimization of the Quantitative Determination Method of the Burning Cigarette Ash Integration Based on ImageJ[J]. Food & Machinery, 2018, 34(3): 216–219.
- [11] 许艳冉, 刘舒畅, 穆 林, 等. 烟丝和卷烟机参数对卷烟包灰性能的影响 [J]. 烟草科技, 2020, 53(12): 67–74.
- XU Yanran, LIU Shuchang, MU Lin, et al. Effects of Cut Tobacco Parameters and Cigarette Maker on Ash Integrity of Cigarette[J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(12): 67–74.
- [12] 段瑞海, 李红娟, 冯俊杰, 等. 2 种有机酸钾盐卷烟纸助剂对卷烟热解性能的影响 [J]. 西南农业学报, 2021, 34(7): 1395–1399.
- DUAN Ruihai, LI Hongjuan, FENG Junjie, et al. Effect of Two Kinds of Organic Acid Potassium Salt Cigarette Paper Additives on Pyrolysis Performance of Cigarette[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(7): 1395–1399.

(责任编辑: 邓 彬)

## Fluid Simulation Analysis of a Cigarette Machine's Mouth Glue Gun Nozzle Based on Fluent

XU Jianwei<sup>1</sup>, WANG Na<sup>2</sup>, LIAO Yu<sup>2</sup>, LIU Xinghai<sup>1</sup>

( 1. Research Center of Graphic Communication, Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. China Tobacco Hubei Industrial LLC, Wuhan 430030, China )

**Abstract:** In order to solve the problems of uneven glue application during the spraying of lap glue in high-speed machines, the glue application process was simulated by Fluent, and the changes of glue outlet viscosity and outlet flow rate were observed by changing the inlet pressure of the nozzle. Firstly, Solid Works was used to model the lap glue nozzle, then Fluent was analyzed to simulate the lap glue spraying and gluing process, and finally the adhesive performance, including initial viscosity and T-peel resistance, was analyzed in detail by experimental tests under different inlet pressure conditions. The simulation results show that the outlet viscosity of the nozzle gradually decreases with the increasing in inlet pressure, while the outlet flow rate is just the opposite, i.e., it increases with the increasing in outlet pressure. The two adhesive properties of the outlet glue under the difference of the inlet pressure also differ, mainly in that the apparent viscosity of the outlet of the lap nozzle decreases with the increase of the inlet pressure, resulting in a certain degree of reduction of its adhesive properties. The fluid simulation of lap gum spraying is useful for the optimization of cigarette production process.

**Keywords:** Fluent; lap adhesive; pseudoplastic liquid; initial tack; T-peel resistance