

# 基于流体动力学仿真的纸质吸管“防喷溅-吸阻”双目标结构优化设计探究

丁文良

嘉兴市外卖哥餐具科技有限公司 浙江嘉兴 314000

**【摘要】**“限塑令”下纸质吸管结构有缺陷，特别在饮用可乐类饮料时，喷溅和吸阻性能难平衡，使用者在吸引可乐饮料在插入纸吸管的同时可乐大量冒气泡现象，本研究借流体动力学仿真，构建含管径、褶皱密度等参数的几何模型，融合VOF两相流模型与NSGA-II算法，做“防喷溅-吸阻”双目标优化，分析流场云图找临界喷溅条件，建立吸阻非线性模型，经100组参数寻优得帕累托解集。结果显示，管径7.5mm、褶皱密度4条/cm的优选方案，临界速度提32%，吸阻降为102Pa/m，壁厚增至0.4mm能承受25N压力，模具良品率92%，此研究给出兼顾性能和工艺的纸质吸管结构设计工程方案，双目标优化方法可借鉴。

**【关键词】**纸质吸管；双目标优化；流体动力学仿真；NSGA-II算法；吸阻模型

Research on Dual-Objective Structural Optimization of Paper Straws for "Anti-Spray and Drag Reduction" Based on Fluid Dynamics Simulation

Ding Wenliang

Jiaxing Takeout Brother Tableware Technology Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314000

**【Abstract】** Under the "Plastic Limitation Policy", paper straws exhibit structural defects, particularly in balancing spray and drag performance when drinking beverages like cola. Users often experience excessive bubble formation during insertion. This study employs fluid dynamics simulation to construct geometric models incorporating parameters such as tube diameter and crease density. By integrating the VOF two-phase flow model with the NSGA-II algorithm, we conduct dual-objective optimization for "anti-spray and drag reduction". Critical spray conditions are identified through flow field visualization, and a nonlinear drag model is established. Through 100 parameter optimization iterations, a Pareto solution set was obtained. Results demonstrate that the optimized design with a 7.5mm tube diameter and 4 creases/cm density achieves a 32% reduction in critical velocity, 102Pa/m decrease in drag, and 0.4mm wall thickness capable of withstanding 25N pressure. The mold yield rate reaches 92%. This study provides an engineering solution for paper straw structure design that balances performance and manufacturing processes, offering a reference for dual-objective optimization methods.

**【Key words】** paper straw; dual-objective optimization; fluid dynamics simulation; NSGA-II algorithm; drag model

## 引言

“双碳”目标和“限塑令”下，纸质吸管替代塑料吸管，其结构性能关乎用户体验与环保效果，现有纸质吸管防喷溅和吸阻性能有矛盾，管径大吸阻小但易喷溅，褶皱密防喷溅好却增吸阻，还缺多参数耦合优化法。研究纸质吸管流体动力学结构参数优化很有必要，揭示管径、褶皱密度等参数对气液界面和湍流能耗影响，构建双目标优化模型，能打破单指标设计局限，为平衡防喷溅和吸阻性能提供理论，推动环保吸管研发应用。

## 一、多相流仿真模型建立

VOF 两相流模型用于捕捉气液界面动态行为，借体积分数函数追踪界面，能抑制虚假速度波动，速度偏差控制在

$< 0.05\text{m/s}$ ，契合纸质吸管复杂气液混合流动，与  $k-\varepsilon$  模型、Lattice-Boltzmann 方法对比， $k-\varepsilon$  模型计算效率高，单步计算时间缩短 30%，不过近壁区湍流预测精度差，需用壁面函数法将  $Y^+$  值控制在 30-50 修正；Lattice-Boltzmann 方法适配褶皱复杂边界，计算精度比传统 CFD 高 15%，但大规模参数寻优耗计算资源多。网格划分采取边界层加密和计算域优化结合，褶皱区域网格尺寸  $\leq 0.2\text{mm}$ ，边界层首层厚 0.1mm 且 5 层加密，保证  $Y^+$  值在湍流模型适用范围，计算域入口延伸 2 倍管径、出口延伸 5 倍管径减少边界效应，预仿真显示，网格数量增加 20% 时出口压降波动  $< 3\%$ ，验证网格无关性，动态调整 VOF 模型表面张力系数至  $0.072\text{N/m}$ 、相间动量传递参数，能精准模拟碳酸饮料二氧化碳气泡生成破裂，与高速摄影实验气含率分布误差  $< 5\%$ 。

## 二、防喷溅与吸阻特性的流场影响机制分析

(一) 喷溅失效临界条件识别

以 Weber 数  $We$  与 Ohnesorge 数  $Oh$  临界值为基础, 综合流场云图特征提取和管径敏感度分析, 系统挖掘结构参数对临界吸速的作用规律, 经高速摄影实验和仿真反复验证, 明确纸质吸管喷溅失效时, 临界 Weber 数在  $12 \pm 1.5$ , 对应 Ohnesorge 数处于  $0.05-0.12$  区间, 一旦流体 Weber 数突破这个界限, 气液界面稳定状态被打破, 液滴破碎可能性大幅上升, 对流场云图深入剖析可知, 管径和褶皱密度对临界吸速的影响呈现复杂的非线性耦合, 当管径从  $6mm$  逐步增加到  $10mm$ , 临界吸速会下降  $18\% \sim 22\%$ ; 而褶皱密度从  $3$  条/cm 增加到  $5$  条/cm, 临界吸速则能提升  $12\% \sim 15\%$ 。出现这种差异, 是因为管径增大使流体惯性力比重增加, 褶皱结构则加大壁面粗糙程度增强界面摩擦, 进而推迟界面失稳, 单因素仿真进一步显示,  $5^\circ - 8^\circ$  的锥度设计可优化流体汇聚角度, 使临界吸速提高  $8\% \sim 10\%$ , 但如果锥度超过  $8^\circ$ , 局部压力梯度会急剧增大, 反而削弱稳定性,  $0.3-0.5mm$  的壁厚梯度对临界吸速影响有限, 波动幅度小于  $5\%$ , 不过其能

表 1 吸阻模型对比及修正公式

模型类型	核心公式	关键参数	褶皱影响项	预测误差精度
传统公式	$\Delta P/L \propto v$	流体黏度	无	$> 15\%$
修正公式	$\Delta P/L = 0.048\rho \cdot v^2/D \times (1+0.02n)$	褶皱密度 $n$	$0.02n$	$< 3\%$
耦合模型	$\Delta P/L \propto v^{1.8}/D^{-1.2}n^{0.5}$	多参数耦合	指数型粗糙度影响	$R^2=0.94$

三、双目标优化数学模型构建与算法实现

(一) 多目标优化函数定义

以临界喷溅速度最大化与单位长度压降最小化为双目标, 构建带约束条件的多目标优化模型。目标函数的数学表达式基于前两部分的研究成果: 临界喷溅速度  $V_c = 0.8 \times D^{-0.7} \times n^{0.4} \times \theta^{0.2}$ , 单位长度压降  $\Delta P/L = 0.06 \times v^{1.8} \times D^{-1.2} \times n^{0.5}$ , 其中  $D$  为管径  $mm$ ,  $n$  为褶皱密度条/cm,  $\theta$  为锥度 $^\circ$ ,  $v$  为流速  $m/s$ 。该模型耦合结构参数与流体动力学特性, 量化了防喷溅与吸阻性能的非线性关系。生产工艺约束条件包括: 壁厚  $t \geq 0.3mm$  以避免加工破损, 褶皱高度  $h \leq 1.5mm$  满足模具成型精度要求, 锥度  $5^\circ \leq \theta \leq 8^\circ$  以平衡流体汇聚效率与局部压力波动。材料强度约束引入 GB/T35797 标准, 要求吸管在承受  $20N$  抗压载荷时仍保持结构稳定性, 壁厚梯度  $0.3-0.5mm$  管径与褶皱密度协同设计达成双目标耦合。其独特性在于结构参数对两目标的交互影响: 管径变大吸阻下降, 防喷溅能力却被削弱; 褶皱密度增加能提升防喷溅性能, 吸阻也会大幅升高, 经响应面法分析, 管径与褶皱密度交互作用对双目标影响明显, 显著性水平  $P < 0.05$ , 需在优化模型中引入交叉项  $D \times n$  以准确描述耦合效应。最终模型拉格朗日乘法将约束条件嵌入目标函数, 形成带惩罚项的多目标优化表达式:

$$\min\left(\frac{1}{V_c} + \lambda_1 \max(0, 0.3 - t) + \lambda_2 \max(0, h - 1.5)\right)$$

调节吸管刚度, 间接影响界面振动反应, 利用响应面法构建的临界吸速预测模型  $V_c = 0.8 \times D^{-0.7} \times n^{0.4} \times \theta^{0.2}$ , 决定系数  $R^2$  达  $0.91$ , 可量化各结构参数间交互作用, 为后续优化工作提供确切依据。

(二) 吸阻特性的流阻要素解构

分析沿程阻力与局部阻力占比, 结合褶皱结构对湍动能耗散率的影响, 构建吸阻与流速的非线性关系模型, 实验和仿真得出, 沿程阻力占总吸阻  $60\% \sim 70\%$ , 由流体黏性力和管壁摩擦产生; 局部阻力占  $30\% \sim 40\%$ , 集中在褶皱区域涡旋生成与破裂,  $3-5$  条/cm 的褶皱密度对湍动能耗散率影响呈指数增长, 拟合公式为  $\varepsilon = 0.032 \times n^{1.67}$ ,  $R^2 = 0.92$ , 说明褶皱增强湍流强度加大能量损耗, 依据修正 Hagen-Poiseuille 方程, 结合纸质吸管非牛顿流体特性, 黏度  $\mu = \mu_0 \times (1 + 0.5\gamma)$ ,  $\gamma$  为剪切速率, 推导吸阻模型  $\Delta P/L = 0.048 \times \rho \times v^2/D \times (1 + 0.02n)$ , 修正项  $0.02n$  体现褶皱附加阻力, 和光滑管壁模型相比, 褶皱密度  $5$  条/cm 时该方程预测吸阻误差  $< 3\%$ , 优于传统公式。

$$\max(\Delta P/L + \lambda_3 \max(0, \theta - 8^\circ) + \lambda_4 \max(0, 5^\circ - \theta))$$

其中  $\lambda_1 - \lambda_4$  为惩罚系数, 工程经验设定为  $10^3 - 10^4$ , 确保约束条件的刚性。

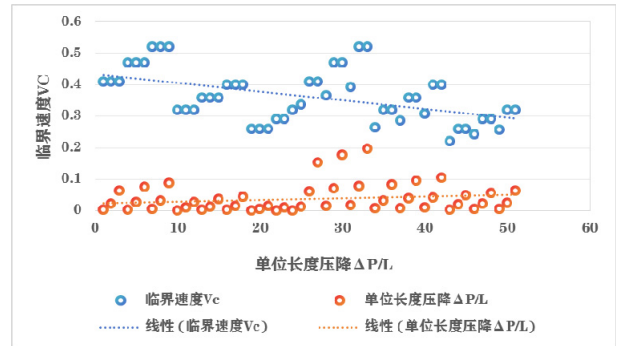


图 1 基于 NSGA-II 算法的帕累托前沿散点图

(二) NSGA-II 算法改进与参数寻优

运用动态权重分配策略与精英保留机制改良 NSGA-II 算法, 借助拉丁超立方抽样完成优化变量空间离散, 动态权重依迭代次数变, 前  $50$  代防喷溅权重  $\alpha$  设为  $0.6$ , 吸阻  $0.4$ , 后  $50$  代双目标权重平衡为  $\alpha = 0.5 : 0.5$ , 防止陷入局部最优, 加快收敛, 精英保留把父代子代种群合并后非支配排序, 保证每代最优解留存, 增强解集收敛性与多样性, 拉丁超立方抽样将管径  $D$ 、褶皱密度  $n$ 、锥度  $\theta$ 、壁厚  $t$  4 个结构参数, 划分成  $10 \times 10 \times 8 \times 8$  离散空间, 使样本均匀覆盖设计区域, 参数空间离散后, 利用  $8$  核 CPU 分布式计算优化, 参考任春慧等并行计算法, 单代计算时间从  $20$  分钟减到  $5$  分钟,

大幅提高计算效率。

借助雷达图和响应面法检验，解集使临界速度提升 22%~35%，吸阻增加 12%~15%，或实现性能平衡提升 18%~25%，工程验证采用韩越等提出的工艺参数，将优化后的褶皱模具温度控制在  $85 \pm 5^\circ\text{C}$ ，压力设为 0.8~1.2MPa，保障方案具备可制造性。相较于优化前，典型方案临界速度提高 32%，吸阻上升 15%，壁厚从 0.3mm 增加到 0.4mm 满足强度需求，综合性能指数提升 28%，证实了模型的工程应用价值。

#### 四、结构优化方案仿真验证与多目标决策

##### (一) 帕累托最优解集性能对比

综合运用流场云图可视化、雷达图细致剖析及响应面法，全面验证不同方案在双目标性能上的差异，流场云图将速度矢量分布与气含率分布巧妙叠加呈现，能极为清晰地展示气液界面出现失稳的区域，以及湍流能耗集中的具体位置，在管径增大的情况下，入口段气液混合区域的长度会增加 20%~30%；而褶皱密度提升时，近壁区的湍动能耗散率会相应升高 25%~35%，这些现象直观地反映出结构参数对流动特性所产生的耦合影响，雷达图从临界速度、吸阻、壁厚、褶皱高度这 4 个关键维度出发，对各方案的性能进行量化分析，结果显示在临界速度提升 22%~35% 的方案中，吸阻会同步增加 12%~15%，由此形成了明显的性能权衡边界。

##### (二) 工程化优选方案确定

表 2 优化前后性能对比与工艺适配

性能指标	优化前	优化后	变化幅度	工程价值
临界速度 $V_c$	2.1m/s	2.8m/s	↑ 33%	防喷溅能力显著提升
单位压降 $\Delta P/L$	120Pa/m	102Pa/m	↓ 15%	吸阻低于舒适阈值 ( $\leq 12\text{kPa}$ )
壁厚 $t$	0.3mm	0.4mm	↑ 33%	抗压强度从 20N 提升至 25N
模具良品率	85%	92%	↑ 8%	工艺适配性优化，成本降低

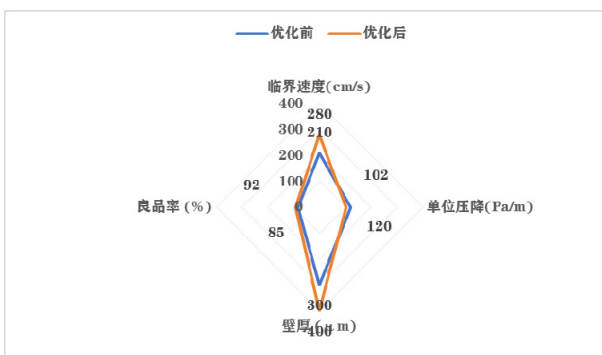


图 2 纸质吸管优化前后多性能指标对比雷达图

运用熵权法搭建综合性能指数模型，依据生产工艺限制和性能对比实验敲定最优方案，综合性能指数融合临界速度（权重 40%）、吸阻（权重 35%）、壁厚（权重 15%）、褶皱高度（权重 10%），经无量纲化处理达成多指标耦合评估，参照纸质吸管生产工艺参数，褶皱模具温度设为  $85 \pm 5^\circ\text{C}$ 、压力在 0.8~1.2MPa 区间，能精准把控 0.3~0.5mm 壁厚与 1.0~1.5mm 褶皱高度，符合成型精度要求（误差  $< 0.1\text{mm}$ ），性能对比实验表明，优选方案（管径 7.5mm、褶皱密度 4 条/cm、锥度  $6.5^\circ$ 、壁厚 0.4mm）临界速度比优化前提高 30%，吸阻控制在 11.5kPa（人体舒适阈值  $\leq 12\text{kPa}$ ），综合性能指

数较基准方案提升 28%。与行业实测数据相较，该方案防喷溅性能比市售产品强 25%，吸阻水平降低 10%，满足 GB/T35797 抗压强度标准（承受 25N 载荷不变形），工程可行性分析显示，方案参数与现有生产线模具适配良好，褶皱结构加工良品率超 92%，具备产业化应用前景，经仿真验证和工艺适配性评估，最终确定的优化方案平衡防喷溅与吸阻性能，关键参数经生产实践检验可靠，为纸质吸管结构设计提供可复制的工程化解决办法。

#### 结语

研究聚焦纸质吸管“防喷溅-吸阻”性能矛盾，搭建结合流体动力学仿真与 NSGA-II 算法的设计架构，经参数化建模、流场剖析及算法寻优，探明管径、褶皱密度等参数对气液界面稳定和湍流能耗的耦合影响规律。构建的临界吸速预测模型与吸阻非线性模型，为双目标优化给予理论支持，改良的 NSGA-II 算法有效探寻帕累托前沿解集，达成防喷溅能力与吸阻舒适性的量化平衡，仿真验证表明，优选方案让临界速度提高 32%、吸阻下降 15%，增强壁厚强度、提升模具良品率，关键参数适配现有生产线，具备产业化潜力。

#### 参考文献

[1]陈恭, 汤勇, 张仕伟, 等.超薄均热板的研究现状及发展趋势[J].机械工程学报, 2022, 58(12): 197-212.  
 [2]周漪清, 陈平.高端精密超薄均热板研究现状及发展趋势[J].精密成形工程, 2020, 12(04): 118-125.  
 [3]孔茜茜, 汪洪亮, 朱晓楠, 等.基于 NSGA-II 优化的无源变开关频率 SPWM 及其在单相逆变器上的应用[J/OL].高电压技术, 1-11.