

烟支吸附装置流场分析与优化设计

李小平¹, 苏杰², 李俊锋¹, 廖茂正¹

(1.中烟机械集团 常德烟草机械有限责任公司, 湖南 常德 415000;

2.湖南大学 汽车车身先进设计与制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: **目的** 针对烟支传递与包装平稳性差的缺点, 采用计算流体动力学(CFD)方法对烟支吸附通道内部流场进行三维数值分析。**方法** 研究关键部位流动特性, 分析流速、压力分布及湍流耗散, 提出结构改进方案。**结果** 流场压力和流速在烟支吸附口与风机连接位置分布不合理, 拐角处湍流动能高, 烟支吸附口至风机位置压力损失为5 268 Pa。风机管道存在逆压梯度, 产生气流漩涡, 压力损失值为14 000 Pa, 高于工业需求。优化模型中, 风机管道包含2个拐角时, 压力损失降低了7 000 Pa, 烟支吸附效果提升了350%。风机管道包含一个拐角时, 压力损失降低了6 200 Pa, 烟支吸附效果提升了390%, 通道流场分布合理性得到改善。**结论** 基于仿真结果, 优化风机与出风口管道连接方式, 通过流场分析可为烟支吸附装置的优化设计提供一定技术支持。

关键词: 烟支吸附装置; 负压通道; 结构优化; CFD分析; 流动特性

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)09-0289-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.09.035

Flow Field Analysis and Optimization Design of Cigarette Adsorption Unit

LI Xiao-ping¹, SU Jie², LI Jun-feng¹, LIAO Mao-zheng¹

(1. Changde Tobacco Machinery Co., Ltd., China Tobacco Machinery Group, Hunan Changde 415000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out three-dimensional numerical analysis on the internal flow field in the cigarette adsorption channel with CFD method aiming at the poor stability of cigarette transfer and packaging. The flow characteristics of key parts were studied, the flow velocity, pressure distribution and turbulent dissipation were analyzed, and the structural improvement scheme was proposed. The distribution of flow field pressure and velocity was unreasonable at the connection position between the cigarette adsorption port and the fan, the turbulent kinetic energy at the corner was large, and the pressure loss between the cigarette adsorption port and the fan was 5 268 Pa. A large adverse pressure gradient was observed in the fan pipe. Thus, airflow vortex was caused and pressure loss was 14 000 Pa, which was higher than the industrial demand. In the optimized model, when the fan pipe contained two corners, the pressure loss was reduced by 7 000 Pa and the cigarette adsorption effect was increased by 350%. When the fan pipe contained a corner, the pressure loss was reduced by 6 200 Pa, the cigarette adsorption effect was increased by 390%, and the rationality of field flow distribution channel was improved. Based on the simulation results, the connection mode between the fan and the outlet pipe is optimized, and the flow field analysis can provide technical support for the optimization design of the cigarette adsorption unit.

KEY WORDS: cigarette adsorption unit; negative pressure channel; structural optimization; CFD analysis; flow characteristics

收稿日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(52075153); 湖南省重点研发基金(2020WK2032)

作者简介: 李小平(1964—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为卷烟机械的设计及开发。

通信作者: 苏杰(1996—), 男, 博士, 主要研究方向为流体力学、多相流、离散元模型、图像处理。

国际加热卷烟市场的迅猛发展,成为烟草行业未来发展的必然趋势。为了提高生产质量,采用烟支吸附装置接收水松纸搓裹机生产的加热卷烟并进行双排检测。对于高速卷接机组,接装机到包装机的输送过程中,短烟支易脱落产生打横现象^[1]。因此,有必要在烟支吸附口与风机间设计合理的负压吸附通道。

烟支吸附装置主要应用于烟支搓接、交接、输送与剔除等场合。周沅桢等^[2]研究细支烟质量评估方法,分析了卷制烟的质量稳定性。欧育健等^[3]建立接烟轮交接系统计算模型,开展 PROTOS2-2 卷接机组蜘蛛手的掉丝测试^[4],提高了烟支交接的稳定性。吴小超等^[5]提出针对卷包机组设备效率的评价指标体系。葛新锋等^[6]设计基于机器视觉的条烟分拣系统,解决了人工识别准确率低与劳动强度大的问题。

传统的实验方法成本高且难度大,通道内部流动特征无法全面量化,具有一定的局限性。随着数值算法的改善和计算能力的提高,基于数值模拟的流道结构优化成为烟草机械研究热点。Geng 等^[7]基于欧拉-欧拉数值模型与离散单元法^[8]研究了干燥机中烟草颗粒流化特性,发现颗粒聚集容易形成粒子簇。徐静等^[9]采用计算流体动力学方法,研究了 ZJ119-MAX 接装机通道内的流场分布。发现通道拐角气流漩涡大,渐扩管道的逆压梯度不利于烟支吸附。孙志伟等^[10]建立了烟气在滤嘴内的 CFD 模型。Geng 等^[11-12]讨论了烟丝在流化床提升管中的分布特性,发现柔性颗粒在流化过程中主要表现为弯曲形态,模拟结果与实验结果具有较好的一致性。

为提高卷接机组的生产效率,开展了以关键零部件性能提升和结构优化为目标的诸多研究。关存春等^[13]利用流化床技术改进供丝系统,减少烟丝与壁面的接触,降低了烟丝碎丝率。李荣等^[14]调节阻尼板的角速度,提高了烟梗与烟丝的分离度。张二强等^[15]研究烟草流态化设备的气固流动特性,发现弧形导流板结构可以改善烟丝的偏料问题。耿凡等^[16]结合实验与数值模拟分析了送风量与进料量对烟丝浓度分布的影

响,为解决烟丝缠绕与结团问题提供了理论支持。

综上所述,吸附装置^[17]的合理设计是烟支平稳交接的前提。基于计算流体动力学方法的数值模拟能够直观呈现空气的流动特征,在先前的研究中取得了与实验一致的计算结果。本文结合 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型对烟支吸附通道内气流运动进行研究,提出风机连接管道的结构改进方案。研究结果为负压通道的设计和优化提供一定的技术支撑。

1 工作原理

接装机正常工作时,风机为传动轴上的轂轮提供负压。气流经风机连接底盘进入到配气板,然后作用在承烟槽上,如图 1a 所示。烟支吸附通道由 4 个区域组成,包括烟支吸附口、软管、风机连接底盘和风机管道。图 1b 为烟支交接时烟支吸附口的局部放大图。轂轮圆周上均匀布置 20 个承烟槽,每个槽上等间隔布置 6 个吸附口,吸附口孔径为 4 mm,孔深为 40 mm。在交烟过程中,承烟槽内外气流形成压力差,致使烟支吸附在接烟轮上。

图 1c 为烟支吸附原理图。交烟过程中烟支方向随轂轮转动,若烟支表面朝下,应确保负压通道产生的压力远大于烟支重力。不考虑离心力,烟支受力分析如下:

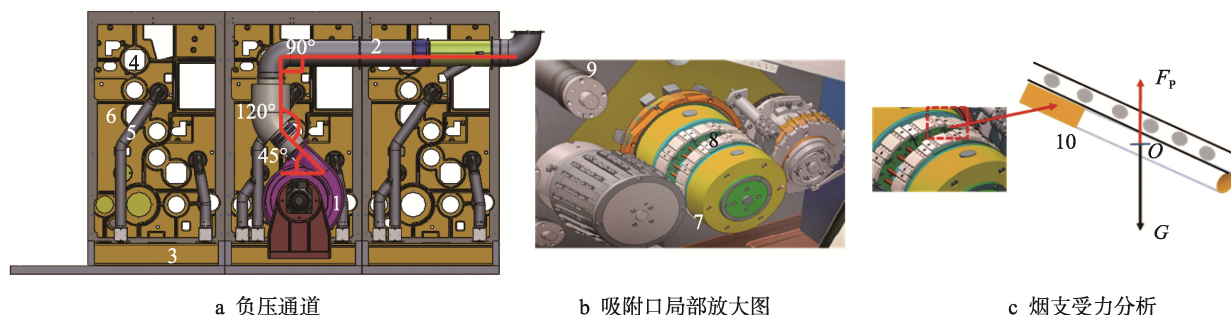
$$F = F_p - G \quad (1)$$

式(1)中压力 F_p 计算如下:

$$F_p = 6 \times \pi \times r^2 \times (P_1 - P_2) \quad (2)$$

式中: r 为承烟槽的圆孔半径; P_1 与 P_2 分别为烟支吸附口内部与外界压力。

接装机工作时,气流运动通道见图 2。采用非结构化的四面体网格对负压通道的几何模型进行网格划分,并对网格质量进行检查。其中最小单元长度为 1 mm,最大单元长度为 3 mm,网格过渡缓慢。网格节点数为 174 580,单元数为 854 842。平均网格质量高于 0.85,满足数值模拟要求。



1.负压风机; 2.风机管道; 3.风机连接底盘; 4.烟支吸附口; 5.软管;
6.配气板; 7.配气座; 8.承烟槽; 9.轂轮; 10.烟支。

图1 烟支吸附原理

Fig.1 Principle of cigarette adsorption

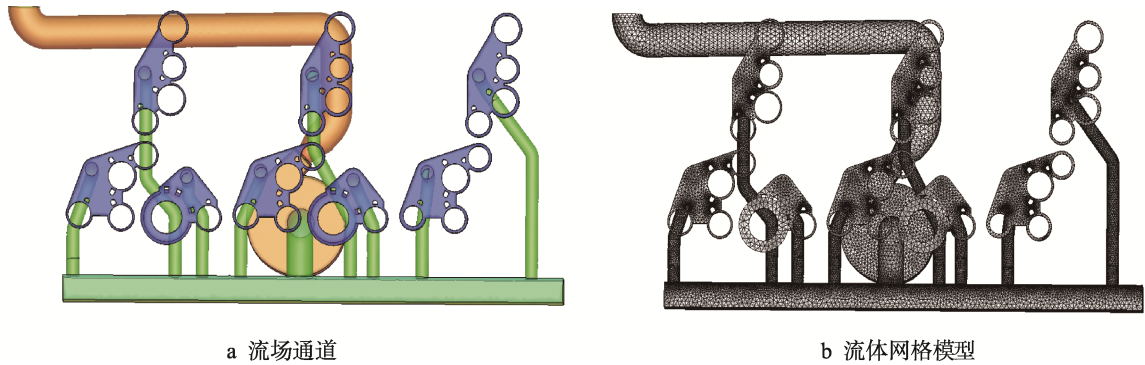


图 2 CFD 计算模型
Fig.2 CFD calculation model

2 流场数学模型

2.1 控制方程

气体流动方程主要由连续性方程与动量方程描述。

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{3}$$

式中: ρ 为气体密度; u_i 为直角坐标系 x_i 下气体速度。

2) 动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i' u_j'}) + \rho g \end{aligned} \tag{4}$$

式中: p 为气体压力; g 为重力加速度; μ 为动力黏度; δ_{ij} 为克罗内克尔符号。

湍流模型利用 Boussinesq 假设把雷诺应力和平均速度梯度联系起来:

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \tag{5}$$

$k-\varepsilon$ 双方程湍流模型具有较好的鲁棒性和稳定性, 常用于管道流动的数值模拟研究, 但不能很好地计算流线曲率对湍流的细微影响。考虑到烟支吸附管道的复杂性, 当前工作采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流方程。

3) RNG $k-\varepsilon$ 湍流方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{7}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

式中: $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

2.2 边界条件

烟支吸附负压通道的风机型号为 HRD 7 FU*-105/15.0。风力系统通过抽风口对通道内的流场提供能量输入, 包括烟支吸附区、软管和风机连接底盘。主风机的性能参数及空气物理性能如表 1 所示。

各负压通道气流入口均为压力入口边界 $p=0$ Pa, 通道外表面为无滑移壁面, 风机管道出口设置为速度出口边界条件。由于风机额定容积流量为 $50 \text{ m}^3/\text{min}$, 气流出口表面积为 $22\,698 \text{ mm}^2$, 计算得到负压风机额定工作时的出口边界速度 $v=-36.713 \text{ m/s}$ 。

应用有限体积方法对流体控制方程进行离散, 压力项和动量项采用二阶迎风格式格式离散, Navier-Stokes 方程采用基于速度-压力隐式耦合关系的 Coupled 算法求解。经过 10 000 步迭代后, 计算参数的残差达到收敛标准 1×10^{-5} 。

表 1 风机性能参数及空气物理性能
Tab.1 Fan performance parameters and physical properties of air

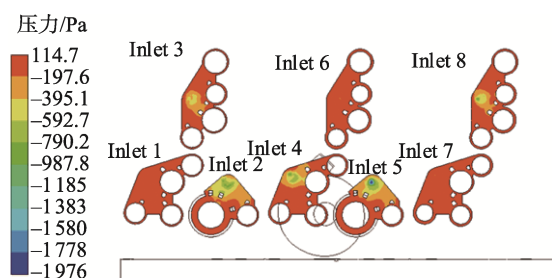
流量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	全压/Pa	频率/Hz	大气压	温度 $t/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	运动黏度 $\mu/(10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
50	16 000	105	101 325 Pa	20	1.2	1.8

3 初始模型流动特征

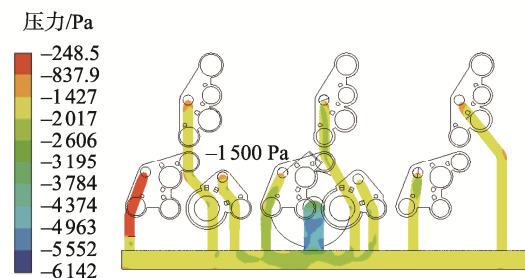
3.1 压力分析

图3表示优化前烟支吸附通道的压力分布。由于入口压力设置为0,以下所涉及的压力均为相对压力。部分吸附口形成了良好的压力梯度,能够吸附承烟槽上的烟支,如图3a所示。Inlet 1、Inlet 6与Inlet 7未出现明显的压力梯度,说明空气流动性较差。

图3b为软管压力分布,平均压降为1 500 Pa。Inlet 6压降最大为2 606 Pa,说明该位置流速最大,空气流通性较好。吸附口Inlet 1距离风机最远,软管压力差为837 Pa,说明此处流速相对较低。



a 吸附口压降



b 软管压降

图3 烟支吸附通道压力分布

Fig.3 Pressure distribution of cigarette adsorption channel

图4为风机管道压力分布,烟支吸附口与涡形管道之间压差为5 268 Pa,风机管道内压力损失为8 732 Pa,为整个装置能量消耗最大的部分。涡形风机管道与柱形管道连接位置压力发生突变,由5 268 Pa变为18 000 Pa,最大压降为12 732 Pa。主要原因包括:连接口管道直径变小,压降增加;管道连接口处存在一个拐点,空气在惯性力作用下撞击通道壁面,导致局部流速骤增,因此压力损失明显。

负压风机全压差为16 000 Pa,通道压力损失为14 000 Pa,则烟支吸附口处负压约为-2 000 Pa。假设烟支质量为1 g,则重力为0.01 N。由式(2)可知压差力为0.151 N,压差力为烟支重力的15.1倍。

3.2 速度分析

图5a为烟支吸附通道的流速分布。可以看出,

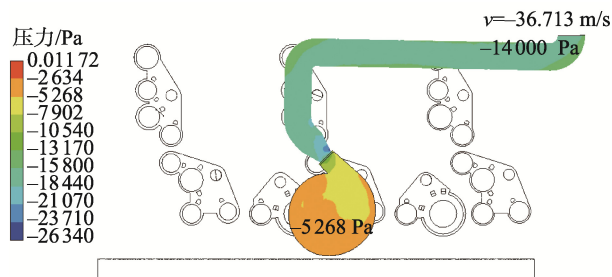
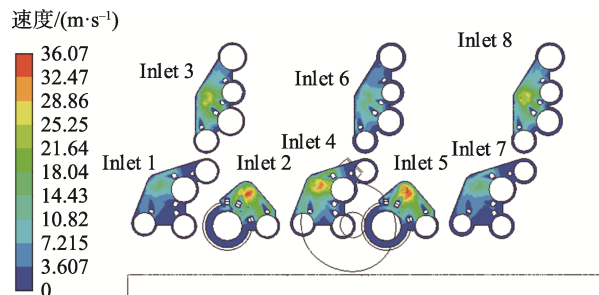


图4 风机出口压降

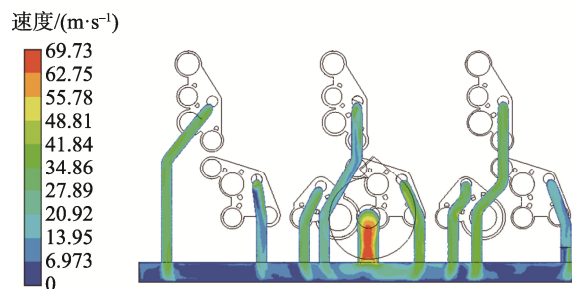
Fig.4 Pressure drop of fan outlet

Inlet 2、3、5、6、8的速度梯度一致,轮毂附近空气平稳流动。从烟支吸附口到软管,空气流速逐渐增加。在吸附口与软管连接处,流速最高达到33 m/s。软管连接负压通道底盘的布置形式,减少了通过流道结构连接^[9]带来的压力损失,更加有利于烟支吸附。既避免了通道加工带来的经济损失,又减少了安装时间。但是,烟支吸附口Inlet 1、4、7右侧轮毂的空气速度梯度并不明显。

图5b选取软管中心截面空气速度进行分析。6根软管(Inlet 2—7)与风机距离较近,空气流速基本一致,底盘内部空气流速平缓。但是,吸附口Inlet 1、8底部出现了局部湍流,空气流速降低至0 m/s。



a 吸附口流速



b 软管流速

图5 烟支吸附通道速度分布

Fig.5 Velocity distribution of cigarette adsorption channel

图6a为风机出口速度矢量,平均流速为40 m/s。涡形风机管道与柱形管道连接位置的面积减小,导致空气流速由44 m/s增加到115 m/s。图6b、c为烟支吸附口局部空气流速矢量图,每个吸附口空气均由外界吸入,向软管汇集。软管与吸附口交接处,流速最

高。距离吸附口越近, 流速矢量图越密集, 说明流动效果越好。Inlet 1-1、Inlet 1-3 流动速度几乎为 0, 说明该结构中部分吸附口空气流动阻力较大。

3.3 湍流分析

图 7a 为负压通道的湍流动能分布, 风机管道的接口位置湍流强度最大。通道截面发生变化, 多股气流汇集, 导致流速紊乱。通道流线分布能够直观反映空气在流道内的运动情况, 如图 7b 所示。空气由烟支吸附口吸入负压通道, 流向风机出口。Inlet 8 距离风机较远, 底部气流轨迹间断。Inlet 1 底部同样出现旋流与气流不连续现象。结合图 5b 软管流速分布云图可以发现, 当前结构中通道两侧的气流阻力较大。主要原因包括: 风机连接管道存在 3 个拐角, 空气与

壁面多次碰撞, 湍流耗散较大, 导致压力损失高于工业需求。因此, 应该对风机管道结构进行局部优化。

4 优化模型流动特征

基于数值模拟结果, 提出 2 种风机管道优化方案, 如图 8 所示。模型 A 包含 2 个 120° 的拐角, 空气在管道内部流动时方向变化次数减少。模型 B 的涡形管道和柱形管道安装在负压通道下方, 包含一个 90° 的拐角, 气流与管道壁面仅发生一次碰撞。

图 9 为优化模型 A 的流动特征, 风机管道内压力平稳过渡, 并未出现压力突变现象。通道内部最大压差为 7 000 Pa, 风机管道内的压差损失为 3 000 Pa。与优化前烟支吸附通道相比, 通道压力损失降低了 7 000 Pa,

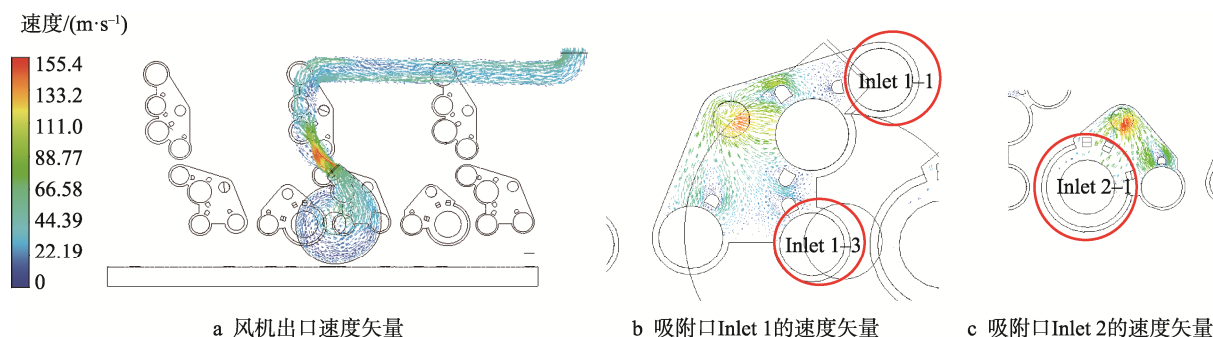


图 6 烟支吸附通道速度矢量
Fig.6 Velocity vector of cigarette adsorption channel

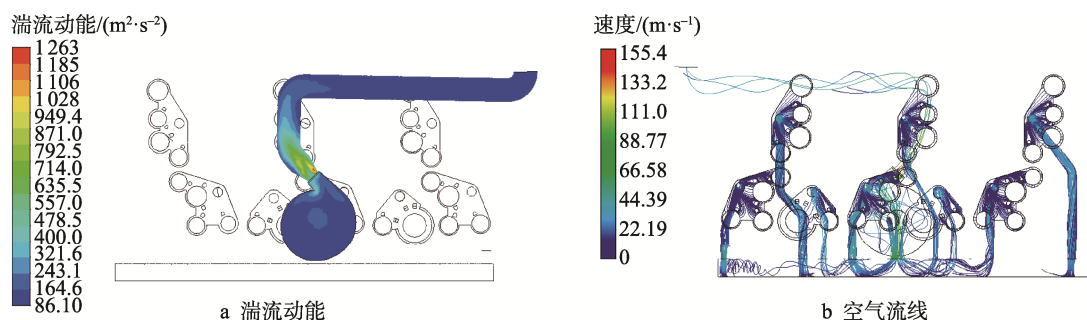


图 7 烟支吸附通道湍流分布
Fig.7 Turbulent distribution of cigarette adsorption channel

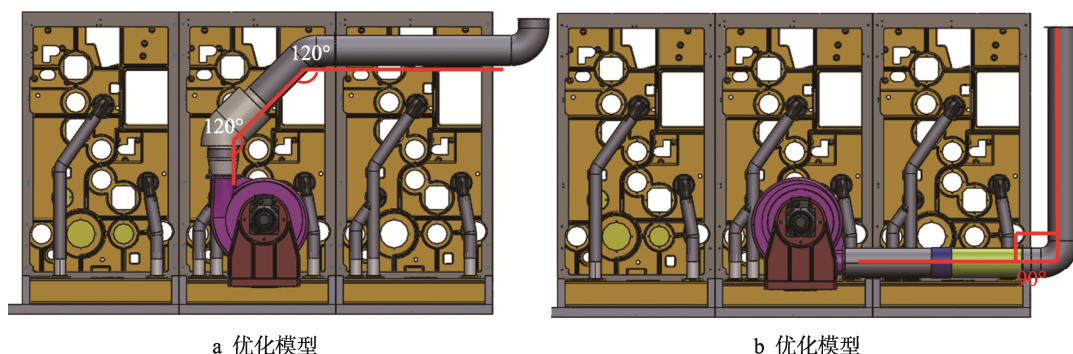


图 8 烟支吸附通道优化模型
Fig.8 Optimization model of cigarette adsorption channel

优化性能提高了 50%；风机管道内压力损失降低了 5 732 Pa，优化性能提高了 65.6%。负压风机全压差为 16 000 Pa，则烟支吸附口处负压应为 -9 000 Pa，由式（2）可知压差力为 0.68 N，压差力为烟支重力的 68 倍，能够确保烟支停留在承烟槽内。

风机涡形管道与柱形管道连接位置的截面面积减小，空气流速增加。如图 9b 所示，平均空气流速由 20 m/s 增加到 53 m/s。由于惯性力的影响，拐角内侧空气流速达到 57 m/s，外侧空气流速小，速度为 30 m/s。相比于初始模型，空气在风机管道内平稳流动，平均速度为 41 m/s。

图 10 为优化模型 B 的流动特征，烟支吸附通道的压差为 6 200 Pa，风机管道损失压差为 2 476 Pa。与优化前烟支吸附通道相比，空气流动效果明显改善。通道压力损失降低了 7 800 Pa，优化性能提高了 55.7%；风机管道内压力损失降低了 6 256 Pa，优化性能提高了 71.6%。负压风机全压差为 16 000 Pa，则烟支吸附口处负压应为 -9 800 Pa。由式（2）可知压

差力为 0.739 9 N，压差力为烟支重力的 73.99 倍。因此，能够确保烟支的吸附与交接。

图 10b 为风机管道的流速云图。外侧空气流速为 20 m/s，弯道内侧空气流速增大到 57 m/s。在柱形管道的拐角处，外侧与内侧空气流速接近一致，说明通道湍流耗散降低。相较于初始模型与优化模型 A，模型 B 的拐角减少，空气流动阻力降低，平均速度为 45 m/s。

图 11 为 2 种优化方案中烟支吸附通道的流线分布。与图 7b 相比，气流在软管底部不连续的现象消失，流动均匀性提高，证明了优化结构的可行性。模型 B 中气流阻力最小，压力损失最低，烟支吸附口流速高于模型 A 中烟支吸附口流速。

表 2 为优化模型性能对比结果。2 种风机管道优化方案的通道压力损失均有效降低，平均流速得到改善。优化模型 A 与优化模型 B 的烟支吸附力分别提升了 350%与 390%，说明烟支吸附性能随风机连接管道拐角减少而提高。

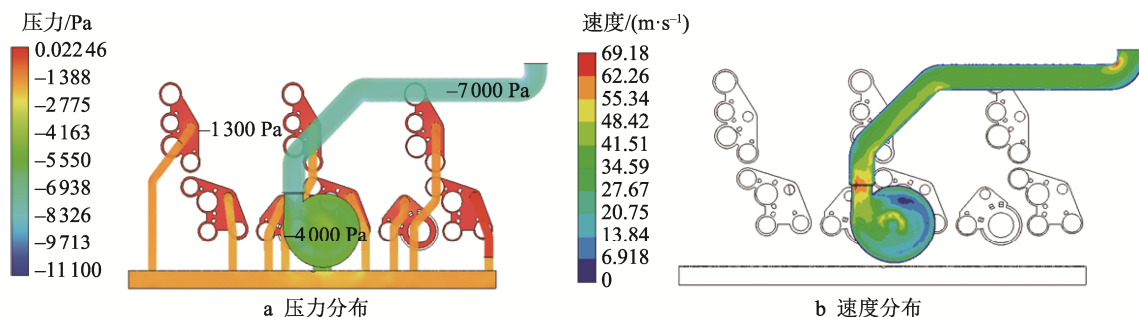


图 9 优化模型 A 的流动特征
Fig.9 Flow characteristics of optimization model A

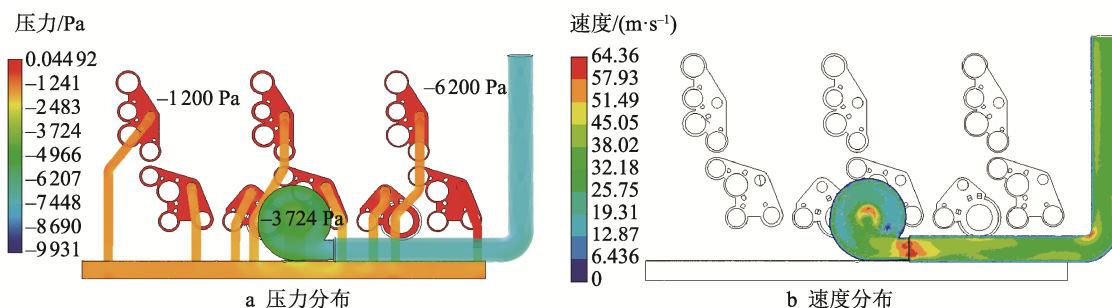


图 10 优化模型 B 的流动特征
Fig.10 Flow characteristics of optimization model B

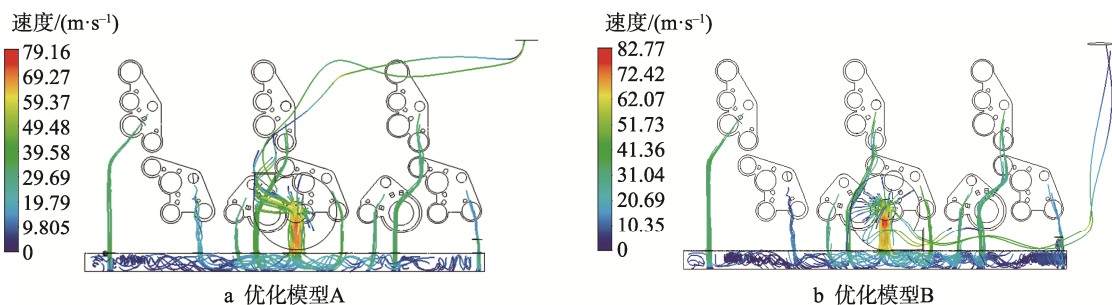


图 11 烟支吸附通道流线分布
Fig.11 Streamline distribution of cigarette adsorption channel

表 2 优化模型性能对比
Tab.2 Comparison of optimization model performance

模型	负压通道压力 损失值/Pa	风机管道压力 损失值/Pa	风机管道平均 流速/(m·s ⁻¹)	烟支吸附力/N	烟支吸附力改善 效果/%
初始模型	14 000	8 732	40	0.151	0
优化模型 A	7 000	3 000	41	0.68	350
优化模型 B	6 200	2 476	45	0.739 9	390

5 结语

基于计算流体动力学方法,开展烟支吸附通道流场数值模拟。研究负压通道内部流场分布规律,揭示烟支吸附机理,提出风机与连接管道的结构优化方案,并量化了压力损失与烟支吸附性能。主要研究结论如下:

1) 初始模型空气流动性差,吸附口到软管平均压降为 1 500 Pa。由于接烟轮毂轮安装在吸附口一侧, Inlet 1、Inlet 6 和 Inlet 7 的压力并未均匀过渡。流场压力和流速在烟支吸附口与风机连接位置分布不合理,拐角处湍流动能较高。风机管道压力损失为 14 000 Pa,高于工业需求。

2) 优化结构提高了负压通道内的平均流速,有利于空气平稳流动。烟支吸附通道压差降低,减少了流动过程中的能量损失。2 种优化方案中,吸附口到软管的平均压降分别为 1 300 Pa 与 1 200 Pa,优化模型 A 的通道压力损失降低了 7 000 Pa,烟支吸附效果提升了 350%。优化模型 B 的通道压力损失降低了 6 200 Pa,烟支吸附效果提升了 390%,空气流速与流线分布得到较大改善,证明了文中的结构优化方法是可行的。

参考文献:

[1] 刘文婷,褚玮,贾伟萍,等. 基于白光干涉仪对卷烟包装材料外观质量的评价[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 275-281.
LIU Wen-ting, CHU Wei, JIA Wei-ping, et al. Surface Quality Evaluation of Cigarette Packaging Materials Based on White Light Interferometer[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 275-281.

[2] 周沅桢, 和小娟, 王泽宇, 等. 基于 CRITIC 赋权法的细支烟物理指标综合质量评价研究[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 176-183.
ZHOU Yuan-zhen, HE Xiao-juan, WANG Ze-yu, et al. Comprehensive Quality Assessment for Physical Indexes of Slim Cigarette Based on CRITIC Weighting Approach[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(9): 176-183.

[3] 欧育健, 周长江, 杜国锋. PROTOS2-2 蜘蛛手—接烟

轮系统建模及交接稳定性研究[J]. 烟草科技, 2014, 47(3): 17-20.
OU Yu-jian, ZHOU Chang-jiang, DU Guo-feng. Modeling and Cigarette Transfer Stability of PROTOS2-2 Spider-Transfer Drum System[J]. Tobacco Science & Technology, 2014, 47(3): 17-20.

[4] 周长江, 孙银方, 李小平. PROTOS2-2 卷接机组蜘蛛手机构抓烟速度计算与掉丝测试[J]. 烟草科技, 2014, 47(10): 20-23.
ZHOU Chang-jiang, SUN Yin-fang, LI Xiao-ping. Calculation of Spider Speed in PROTOS2-2 Cigarette Maker and Test on Cut Tobacco Fallout[J]. Tobacco Science & Technology, 2014, 47(10): 20-23.

[5] 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 Xiao-chao, 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

[6] 葛新锋, 孙书情, 秦涛, 等. 视觉引导的机器人条烟分拣系统设计与实现[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 238-243
GE Xin-feng, SUN Shu-qing, QIN Tao, et al. Design and Implementation of Robot Cigarette Sorting System Based on Vision[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(7): 238-243

[7] GENG F, XU D, YUAN Z, et al. Numerical Simulation on Fluidization Characteristics of Tobacco Particles in Fluidized Bed Dryers[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 150: 581-592.

[8] 耿凡, 袁竹林, 王宏生, 等. 流化床中细长柔性颗粒分布特性的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(35): 102-108.
GENG Fan, YUAN Zhu-lin, WANG Hong-sheng, et al. Numerical Simulation on the Distribution Characteristics of Flexible Slender Particles in a Circulating Fluidized Bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(35): 102-108.

[9] 徐静, 周长江, 张波, 等. ZJ119-MAX 接装机负压通

- 道流场计算和分析[J]. 烟草科技, 2018, 51(9): 79-84.
- XU Jing, ZHOU Chang-jiang, ZHANG Bo, et al. Flow Field Analysis of Negative Pressure Passages for Filter Assembling in ZJ119-MAX[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 51(9): 79-84.
- [10] 孙志伟, 文建辉, 杜文, 等. 沟槽滤嘴烟气流场分布特征的计算流体力学模拟[J]. 烟草科技, 2018, 51(10): 90-96
- SUN Zhi-wei, WEN Jian-hui, DU Wen, et al. Simulation of Flow Field Distribution of Cigarette Smoke in Grooved Filter by Computational Fluid Dynamics[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 51(10): 90-96
- [11] GENG F, TENG H, GUI C, et al. Investigation on Distribution Characteristics of Flexible Biomass Particles in a Fluidized Bed Riser [J]. Fuel, 2020, 271: 117528.
- [12] GENG F, LUO G, LI Y, et al. Numerical Simulation on Distribution Characteristics of Flexible Filamentous Particles in a Fluidized Bed Dryer[J]. Powder Technology, 2014, 267: 322-332.
- [13] 关存春, 鲁力耘. 用流化床技术改进 ZJ17 机组的供丝系统[J]. 烟草科技, 2005, 38(1): 20.
- GUAN Cun-chun, LU Li-yun. Improvement of Cut Tobacco Supplying System with Fluidized Bed in ZJ17 Cigarette Making Machine[J]. Tobacco Science & Technology, 2005, 38(1): 20.
- [14] 李荣, 杨力, 石涛, 等. VAS 冷床烟丝回收装置的改进[J]. 烟草科技, 2021, 54(8): 95-99.
- LI Rong, YANG Li, SHI Tao, et al. Modification of Tobacco Reclaiming Device VAS Cooling Bed[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(8): 95-99.
- [15] 张二强, 堵劲松, 江家森, 等. 基于 OpenFOAM 大规模并行计算的烟草气流干燥装置中气固流动数值模拟[J]. 烟草科技, 2017, 50(4): 72-78.
- ZHANG Er-qiang, DU Jin-song, JIANG Jia-sen, et al. Numerical Simulation of Gas/Solid Flow in Pneumatic Tobacco Dryer Based on OpenFOAM Combined with Large Scale Parallel Computing[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(4): 72-78.
- [16] 耿凡, 袁竹林, 王宏生, 等. 流化床中烟丝颗粒的流动特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(5): 1012-1017
- GENG Fan, YUAN Zhu-lin, WANG Hong-sheng, et al. Fluidization Characteristics of Tobacco Particles in Fluidized Bed[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(5): 1012-1017
- [17] 薛志成, 李彦锋, 李征, 等. 真空吸附辊的密封特性研究[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 25-28.
- XUE Zhi-cheng, LI Yan-feng, LI Zheng, et al. Sealing Characteristics of Vacuum Adsorption Roller[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 25-28.

责任编辑: 曾钰婵