

基于流体力学分析的卷烟机吸丝导轨结构设计与研究

侯明磊 王立治 李 达 陈文韬 苏应奎

红塔烟草（集团）有限责任公司昭通卷烟厂 云南 昭通 657000

【摘要】：刺破烟的产生是卷烟机在运行过程中较为突出且常见的一个质量问题，本研究从烟丝-烟梗在吸丝导轨内的运动状态分析入手。通过分析发现，现有光滑壁面的导轨对烟梗的干预力不足。为解决该问题，本文提出一种全新“导条式”吸丝导轨机械结构模型。本文综合运用干预力数学模型以及吸丝导轨流场及颗粒运动轨迹进行了数值模拟与对比分析，以验证吸丝导轨机械结构有效性，为高速卷烟设备的精密质量控制提供了理论依据和实践方案。

【关键词】：流体动力学；卷接机；吸丝导轨；导条设计；干预力

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.023

1 问题提出与运动状态分析

卷接机“刺破烟”缺陷率高居不下的问题，其物理本质在于烟支内部烟梗的随机取向与局部集中。为追溯问题根源，对吸丝导轨入口处的物料运动状态进行分析后发现在吸丝成型过程中，烟丝与烟梗在负压气流的作用下，被吸附在吸丝带上，并以较高的速度进入吸丝导轨的型腔。这是一个典型的气力输送过程（如图1所示）。然而，由于烟丝与烟梗在形状、密度、表面积和质量上存在显著差异，其在气流中的运动学特性也截然不同。轻质、纤维状的烟丝易于随气流飘动，而质量较大、刚性更强的烟梗，则因其较大的惯性，对气流变化的响应滞后，其运动轨迹更不易控制。

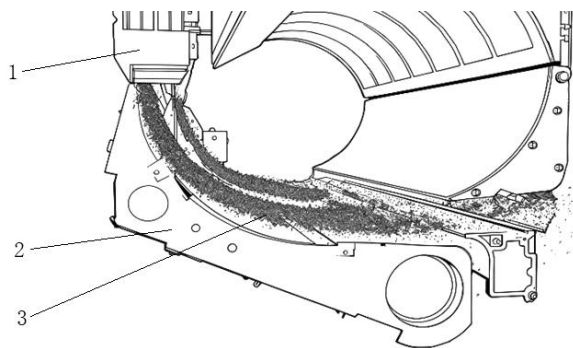


图1 烟丝流成型示意图

1、吸丝导轨 2、流化床 3、烟丝流

通过对光滑壁面吸丝导轨的观察与分析发现：在导轨入口段，气流流场相对平顺，壁面边界层对烟梗的横向约束力（即干预力）不足。这导致烟梗，尤其是长径比较大的烟梗，极易以其长轴与气流方向呈较大角度的“不良姿态”进入后续的压缩区。当这种处于横向或斜向状态的烟梗经过起始轨、切纸鼓轮等存在机械压缩的工位时，其尖端在挤压下极易刺破柔软的卷烟纸，形成“刺破烟”。进一步的分析表明，光滑壁面虽然有利于降低流动阻力、维持烟丝流的整体稳定性，但其流线型的边界层结构却无法对烟梗施加足够的横向力矩以纠正其不良取向。这种“流场顺滑但干预不足”的矛盾，正是现有吸丝

导轨在应对烟梗姿态控制时的设计局限。

因此，核心问题被归结为：在吸丝导轨入口阶段，如何有效增加对烟梗运动姿态，特别是其取向的主动干预能力，使其趋于与烟丝流向一致。基于此机理分析，本文提出了一个创新的解决方案：在吸丝导轨壁面入口段，增设特定结构的导条装置。该装置的目的并非完全阻挡烟梗，而是通过创造一种受控的局部流场扰动，对通过的烟梗施加一个额外的法向干预力，迫使其发生旋转与重新取向，从而实现“梳理”之效。

2 导条装置的理论设计与建模

本文基于明确的机械与流体力学原理，将导条抽象为一个抗流块。其设计目标是在特定空间约束下，实现对烟梗的最大化梳理，同时最小化对整体烟丝流输送的负面影响。为系统性地实现烟梗梳理效果，本研究提出了一种从导条几何参数出发，结合流体动力学模型与颗粒运动学理论，构建了导条对烟梗的主动干预机制。首先建立导条的基础几何模型与参数化描述，继而基于绕流理论分析其局部流场特征，再通过建立烟梗在扰流场中的受力与运动方程，量化导条对烟梗姿态的调整能力。最终，采用多目标优化方法平衡梳理效率与流动阻力，实现对导条结构的精细化设计。该理论框架不仅为导条设计提供系统化指导，也为后续仿真与实验验证奠定基础。

2.1 “扰流快”导流机理理论研究

经查阅和分析，以吸丝导轨为分析模型。吸丝导轨入口设置导条近似看为“扰流块”。扰流块的厚度变化会影响尾流的宽度和湍流强度。尾流区域的大小与扰流块的投影面积有关，进而影响烟丝流向。雷诺数（ Re ）表征惯性力与粘性力的比值，决定流动状态：

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (1)$$

结论：厚度 d 增加时， Re 增大，可能导致流动从层流过渡到湍流。

又因为在该模型中，阻力系数（ C_d ）与扰流块形状及

Re 相关。当扰流块厚度 d 增大，使 Re 超过临界值，阻力系数 (Cd) 也会随之变化。根据雷诺数和阻力系数，可以量化分析导条结构参数与流场扰动能力的映射关系，为导条设计提供理论支撑。阻力 Fd 和扰动功率 P 计算如下：

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A U^2 \quad (2)$$

$$A = d \cdot h \quad (\text{投影面积}) \quad (3)$$

$$P = F_d \cdot U = \frac{1}{2} \rho C_d A U^3 \quad (4)$$

结论：根据以上分析，增设吸丝导轨导条，吸丝导轨对烟梗扰动能力变强，试验方案理论上是可行的。

基于碰撞力学和接触动力学理论，建立导条对烟梗的定量干预模型。

$$F_n = m_p \frac{\Delta v_n}{\Delta t} + k \cdot h \quad (5)$$

2.2 导条几何参数优化

基于多目标优化理论，建立导条参数的优化模型。优化目标包括最大化梳理效率和最小化流动阻力：

$$h_{\text{opt}} = \arg \min_h [\alpha \cdot (1 - \eta(h)) + \beta \cdot \Delta P(h)] \quad (6)$$

其中梳理效率 $\eta(h)$ 通过实验数据拟合得到：

$$\eta(h) = 1 - \exp\left(-\frac{h}{2.5}\right) \quad (7)$$

压力损失特性：

$$\Delta P(h) = \frac{1}{2} \rho U^2 (0.8 + 2.3 \cdot \frac{h}{15}) \quad (8)$$

经过多轮迭代优化，最终确定导条的最优参数为：厚度 0.4 mm，高度 2.5 mm，安装角度 15°，这些参数在保证最佳梳理效果的同时，将系统流动阻力增加控制在可接受范围内。

3 基于流体动力学的导条效果验证与分析

根据上述导条最终优化参数，设计出两组吸丝导轨模型，分别为有导条结构和无导条结构。紧接着利用 ANSYS 流体仿真方法，量化地分析导条对流场及烟梗运动的影响，从而验证其设计的有效性。

3.1 仿真模型建立与求解

将建立好的三维模型导入 ANSYS Fluent 软件中。本文创建两个对比模型：原光滑导轨和加装导条导轨。计算域包括完整的吸丝通道。设置边界条件后通过求解 N-S 方程，本文获得了两个模型的详细流场信息（如图 1、图 2 所示）：

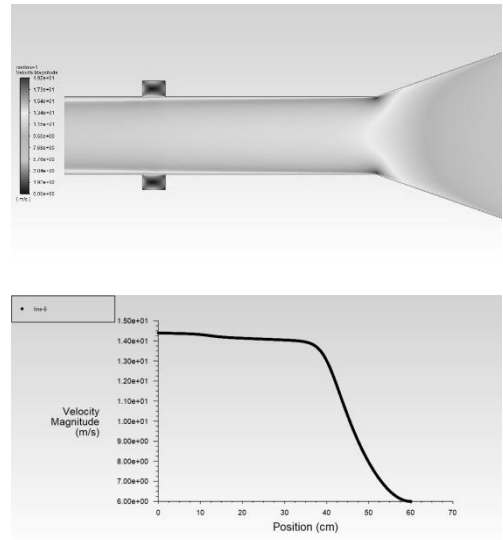


图 1 原光滑导轨仿真云图及流场速度变化图

由上图可知，原光滑导轨流线平顺，速度云图显示流速梯度平缓，湍流动能分布均匀但强度较低。这种流场缺乏对离散相取向的主动控制力。

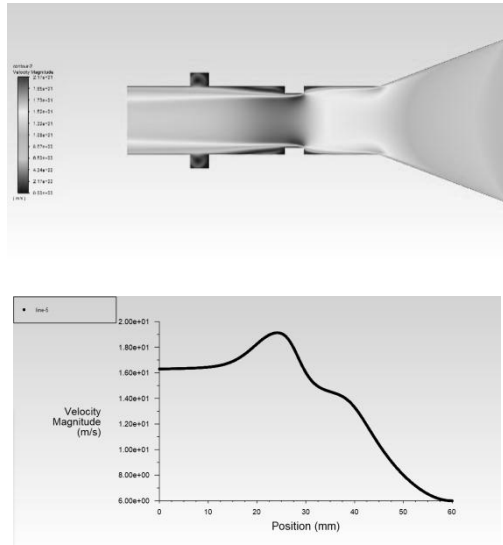


图 2 加装导条导轨仿真云图及流场速度变化图

改进前后对比发现，吸丝导轨流场发生显著变化，分别体现在以下几方面：

压力场：导条前缘出现高压区，后缘出现低压区，形成了明确的压力梯度。

速度场与涡量场：导条后方清晰地产生了流动分离与稳定的涡旋结构（如图 3 所示）。涡量云图显示该区域涡量值急剧升高。

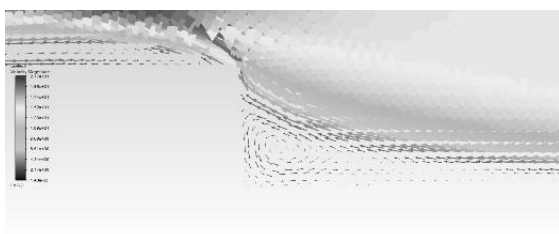


图3 导条位置处流场

湍流动能场：导条尾流区的湍流动能相较于主流区提升了数倍，这表明该区域流体动量交换剧烈，扰动强烈。

3.2 仿真求解结果分析

这些流场特征的改变，从流体力学角度确证了导条装置的作用机制。导条后方形成的高涡量与高湍流动能尾流区，实质上构建了一个动态的“颗粒梳理区”。在此区域内，强烈的涡旋结构诱导产生周期性变化的非定常气动力，作用于流经的烟梗，使其受到持续的横向力矩与旋转激励。在这一流体力学干预下，烟梗的姿态发生强制性调整，经历反复的旋转与摆动，其长轴方向最终被逐步矫正，趋于与主流方向保持一致。

基于上述仿真分析可知，吸丝导轨内增设导条结构，能够通过主动构造可控的涡旋流场，显著增强对烟梗运动姿态的流体力学干预。这种定向的流场调制使得烟梗在进入后续压缩区前得以实现取向优化，从而在理论上有效降低因其随机或不良取向所导致的卷烟纸刺破风险。该结果为导条设计的有效性提供了直接的流体力学依据，并衔接了后续实验验证环节。

4 实验验证与实践

本文根据优化结果，绘制出带导条的吸丝导轨三维模型，按照规定位置对烟丝轨道改进后装回机台，开机正常生产。经过稳定运行后的数据统计，ZJ116 卷接机的烟支外观缺陷率由

0.55%大幅降至 0.19%。



图4 导条横截面及安装位置示意图

对缺陷烟支的进一步分析显示，“刺破烟”在“卷烟纸不洁”类别中的占比从 81.57%断崖式下降至 35.24%。这一系列数据，证明了“从运动状态分析出发，通过理论设计模型，再经流体力学验证”的这一套技术路线的正确性与高效性。

5 结论

本研究遵循“机理分析-结构创新-仿真实验-实践检验”的系统研究路径，首先通过对烟丝与烟梗在吸丝导轨内运动状态的深入剖析，揭示了因流体干预力不足导致烟梗取向不良的核心问题。基于此，创新性地提出了在导轨壁面增设导条装置的解决方案，并进一步构建了基于气固两相流理论的干预力数学模型，为导条结构设计奠定了理论基础。在此基础上，完成了导条装置参数化建模与多目标优化。通过计算流体动力学仿真，系统开展了导条流场特征及其对烟梗运动影响的数值分析，从流场结构、涡旋演化及干预力分布等多个维度，验证了导条在梳理烟梗取向方面的显著有效性。整个研究形成了一套从“问题机理→结构设计→仿真实验→实践检验”的完整技术闭环，不仅为解决卷烟机“刺破烟”问题提供了有效方案，也为行业内类似问题提供了可复制、可推广的方法论参考和工程实践范例。

参考文献：

- [1] 李大勇,周宝.ANSYS Fluent 流体分析完全自学教程[M].化学工业出版社:202405:346.
- [2] 张良水,兰志超,鄢红章,等.细支 ZJ17 机组烟丝成型关键部件改进[J].自动化技术与应用,2024,43(07):62-65.
- [3] 刘美珍,侯志平.ZJ119 卷接机组吸丝导轨的改进研究[J].机电产品开发与创新,2024,37(04):79-83.
- [4] 王先明,邓来宏,王国峰,等.供丝机烟丝束线性堆叠原理分析与应用[J].机械管理开发,2024,39(02):149-152.