

# 烘丝机余热用于片叶储存间空调新风预热的研究

谢童 郑杨 李有刚 李玮鹏 朱颖骁

四川中烟工业有限责任公司成都卷烟厂

DOI:10.12238/pe.v3i5.16615

**[摘要]** 本文研究了烟草制丝车间烘丝机余热用于片叶储存间空调新风预热的技术。通过构建间接换热式余热回收系统,实现了能源的高效利用和显著的环境效益。结果表明,该系统能降低空调冬季运行能耗,年节约标煤6.04吨,减少CO<sub>2</sub>排放15.70吨,为烟草行业绿色制造提供了重要理论依据和工程应用价值<sup>[1]</sup>。

**[关键词]** 烘丝机; 余热回收; 新风预热; 氟塑料换热器; 节能效益; 环境效益

**中图分类号:** TE08 **文献标识码:** A

## Study on preheating of fresh air for air conditioning in blade storage room with waste heat from carding machine

Tong Xie Yang Zheng Yougang Li Weipeng Li Yingxiao Zhu

Chengdu Cigarette Factory, Sichuan Tobacco Industry Co., LTD.

**[Abstract]** This study investigates the application of waste heat from flue dryers in tobacco processing workshops for preheating fresh air in leaf storage rooms. By establishing an indirect heat exchange system, the research demonstrates efficient energy utilization and significant environmental benefits. Results indicate that the system reduces winter air conditioning energy consumption by 30%–40%, saves 6.04 tons of standard coal annually, and decreases CO<sub>2</sub> emissions by 15.70 tons. These findings provide crucial theoretical foundations and engineering applications for green manufacturing in the tobacco industry.

**[Key words]** Flue dryer; Waste heat recovery; Fresh air preheating; Fluoroplastic heat exchanger; Energy efficiency; Environmental benefits

### 引言

在烟草制丝生产中,空调系统能耗占车间总能耗的35%~45%,是行业节能降耗的核心领域。制丝核心设备烘丝机在干燥过程中产生大量中低温烟气(50~80℃),现有工艺中90%以上未经回收直接排放,既造成能源浪费,又加剧环境热污染。本文以某卷烟厂制丝车间为对象,构建间接换热式余热回收系统,将废弃中低温余热转化为新风预热热源,对烟草行业践行“双碳”目标、推动绿色制造具有重要的理论价值与工程应用意义。

### 1 国内外研究现状

工业余热回收技术已形成“显热回收-潜热回收-梯级利用”的发展体系,在烟草行业的应用主要集中于三方面:一是高温烟气余热(150~250℃)用于工艺用水预热;二是余热与热泵系统结合,提升品位后用于车间采暖;三是余热回收与能源管控系统集成,实现余热供需的动态匹配<sup>[1]</sup>。然而,现有研究仍存在三方面技术短板:针对中低温除尘烟气(50~80℃)的专项回收技术不足;余热利用场景存在“时空错配”;系统控制策略多为“被动响应”模式,无法根据烘丝机负荷波动与室外气象参数变化预判

调节,导致余热利用率波动超25%<sup>[2]</sup>。本研究从余热特性分析、设备选型优化、智能控制三个维度构建技术体系,填补中低温烟气精准回收利用的理论空白。

### 2 研究内容与方法

#### 2.1 研究内容

2.1.1 烘丝机除尘烟气余热特性量化:建立烟气温度、流量、含湿量的时空分布模型,明确余热可利用潜力与稳定性边界条件。

2.1.2 片叶储存间新风预热负荷:推导新风预热负荷计算方程,确定余热供需匹配系数。

2.1.3 耐腐蚀余热回收系统设计:对比不同材质换热器的换热特性,优化“烟气-水-新风”间接换热流程,提出设备选型量化指标。

2.1.4 系统动态控制策略研究:设计融合烘丝机负荷预测与气象参数预判的控制算法,提升系统变工况适应能力。

2.1.5 多维度效益评估:建立节能、经济、环境效益量化评估模型,验证方案可行性与推广价值。

## 2.2 研究方法

2.2.1 现场测试法: 采用烟气分析仪、热线风速仪、温湿度巡检仪等设备, 采集烟气参数时序数据, 构建基础数据库。

2.2.2 理论建模法: 基于焓值平衡理论, 推导新风预热负荷计算公式, 构建供需匹配模型。

2.2.3 数值模拟法: 采用TRNSYS软件搭建系统动态仿真模型, 模拟不同工况下换热器性能、流体阻力与能耗变化, 优化设备参数。

2.2.4 实验验证法: 搭建小型实验平台, 对比氟塑料、不锈钢、钛合金换热器在含尘烟气环境下的效率衰减规律, 确定最优材料选型。

2.2.5 层次分析法: 从技术可行性、节能效果、经济效益、环境影响四个维度构建评估指标体系, 确定权重并量化方案综合价值。

## 3 相关理论基础与余热特性分析

### 3.1 烘丝机工作原理及余热特性理论分析

3.1.1 烘丝机热平衡原理: 烘丝机采用“热风对流干燥”, 其热平衡方程为:

$$Q_{in} = Q_{ev} + Q_{out} + Q_{loss}$$

现场测试表明,  $Q_{out}$  占  $Q_{in}$  的45%~55%, 其中可回收显热占  $Q_{out}$  的70%~80%, 是新风预热的核心热源<sup>[3]</sup>。

3.1.2 余热特性量化分析: 烘丝机负荷率80%~100%时, 烟气温度波动 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ , 流量波动 $\pm 3.2\%$ 。单台烘丝机小时可回收余热28.5~31.2kW, 年可回收热量41.0~45.0MWh, 可满足片叶储存间新风预热需求的85%~95%<sup>[4]</sup>。

### 3.2 片叶储存间空调新风预热需求理论模型

3.2.1 新风预热负荷计算方程: 片叶储存间新风预热为等湿升温过程, 负荷计算需结合室外气象参数动态变化与工艺要求, 建立方程:

$$Q_{pre}(t) = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot [t_{set} - t_{out}(t)] \cdot f(\varphi_{out}(t))$$

基于某地区近5年冬季气象数据, 采用蒙特卡洛模拟分析  $Q_{pre}(t)$  概率分布: 预热负荷25~30kW区间概率68.2%, 30~35kW区间概率22.3%, >35kW概率仅9.5%。结合烘丝机余热供应范围(28.5~31.2kW), 计算得余热供需匹配系数0.89<sup>[5]</sup>。

3.2.2 传统预热方式的能耗缺陷: 传统蒸汽预热系统能耗计算方程为:

$$E_{steam} = \frac{Q_{pre}}{\eta_h \cdot \eta_{boiler}}$$

按冬季运行90天、每天16小时计算, 传统系统年蒸汽消耗量58~62t, 折合标准煤7.0~7.5t; 若计入蒸汽输送热损失(5%~8%), 实际能耗进一步增加<sup>[6]</sup>。

### 3.3 氟塑料换热器技术原理与性能分析

3.3.1 材料特性与换热机理: 氟塑料(主要成分为PTFE、PFA)具有优良耐腐蚀性(耐酸、碱、有机溶剂)与低表面粗糙度( $R_a < 0.2 \mu\text{m}$ ), 其导热系数 $0.24 \sim 0.27 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 虽低于不锈钢

( $15 \sim 20 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ), 但通过结构优化可提升传热系数。实验测试表明, 含尘烟气环境下氟塑料换热器K值为 $85 \sim 105 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 虽低于不锈钢换热器( $120 \sim 140 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), 但运行6个月后K值衰减率仅3%~5%, 远低于不锈钢换热器的15%~20%<sup>[7]</sup>。

3.3.2 流动阻力与能耗特性: 烟气在氟塑料换热器壳程的流动阻力  $\Delta P$  (Pa) 遵循经验公式:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

测试显示, 烟气流速控制在 $3.5 \sim 4.5 \text{m/s}$ 时,  $\Delta P$ 为 $80 \sim 120 \text{Pa}$ , 风机额外能耗增加<5%, 且可避免粉尘沉积(流速<3m/s时沉积速率增加30%)<sup>[8]</sup>。

## 4 系统设计与理论优化

### 4.1 系统总体设计方案与理论依据

4.1.1 换热系统流程设计: 系统采用“烟气-水-新风”三级间接换热模式, 一级换热(烟气-水)实现烟气显热向循环水的传递, 二级换热(水-新风)实现循环水与新风换热, 通过调节水流量控制预热温度。

4.1.2 流体阻力控制设计: 基于流体力学理论, 系统管路设计需满足烟气管道流速 $3.5 \sim 4.5 \text{m/s}$ , 循环水管道流速 $1.2 \sim 1.8 \text{m/s}$ , 确保流量调节稳定。

### 4.2 关键设备选型的理论计算

4.2.1 氟塑料换热器选型计算: 根据传热方程。

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta t_{lm}$$

选型步骤包括设计参数、对数平均温差计算、总传热系数和换热面积计算, 最终选型换热面积 $69.0 \text{m}^2$ 。

4.2.2 循环水泵选型计算: 基于热平衡方程, 循环水泵流量 $G = 5.2 \text{m}^3/\text{h}$ , 扬程 $H = 28 \text{m}$ , 功率 $7.5 \text{kW}$ 。

### 4.3 系统控制策略的理论优化

4.3.1 预测控制模型构建: 基于ARIMA算法, 建立烘丝机负荷与室外温度预测模型, 将传统“被动响应”转变为“主动控制”, 新风温度波动从 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。

4.3.2 多工况控制逻辑: 根据不同工况(额定工况、低温工况、低负荷工况、停机工况)动态调节设备参数, 确保预热需求与能耗优化的平衡。

## 5 案例验证与效益分析

### 5.1 案例背景与测试方案

某卷烟厂制丝车间测试(2024.12-2025.2, 90天): 数据采集、对比分析和效益评估。

### 5.2 运行效果验证

5.2.1 余热利用效率验证: 系统平均 $\eta = 97.8\%$ , 烘丝机满负荷时 $\eta = 98.5\%$ , 低负荷时 $92.1\%$ 。

5.2.2 温度控制精度验证: 新风预热后温度波动 $20.8 \sim 21.4^{\circ}\text{C}$ (平均 $21.1^{\circ}\text{C}$ ), 极端低温( $-3^{\circ}\text{C}$ )时最低 $20.7^{\circ}\text{C}$ (波动 $0.7^{\circ}\text{C}$ )。

5.2.3 设备稳定性验证: 90天运行中, 换热器K从95降至 $92.5 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (衰减2.6%), 水泵电流 $14 \sim 15 \text{A}$ (额定 $15.4 \text{A}$ ), 自控

系统报警准确率100%,备用泵切换<10秒。

### 5.3 多维度效益分析

5.3.1 节能效益计算:年节蒸汽60.7t,折合标煤7.28t,净节标煤6.04t,能源利用效率提升40%~50%。

5.3.2 环境效益计算:CO<sub>2</sub>减排15.70t,SO<sub>2</sub>减排0.12t,NO<sub>x</sub>减排0.048t,烟气降温至44.5℃,减少热污染。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

6.1.1 烘丝机烟气余热稳定性高,可回收显热28.5~31.2kW,满足85%~95%预热需求,是理想低品位热源。

6.1.2 氟塑料换热器适配性优, $K=95W/(m^2 \cdot K)$ ,6个月效率衰减2.6%,优化流速可平衡效率与阻力。

6.1.3 “预测控制+间接换热”性能佳,响应时间80秒,温度精度±0.2℃,热损<2.5%。

6.1.4 综合效益显著,年节标煤6.04t,减CO<sub>2</sub>15.70t,为烟草行业提供可复制方案。

### 6.2 研究不足与展望

(1) 研究不足:长期数据缺失,潜热未利用,多车间协同缺失。(2) 未来展望:长期性能研究,潜热回收技术,全厂协同系统,跨行业推广。

### [参考文献]

[1]王瑾,李刚.烟草制丝设备余热特性及回收潜力分析[J].烟草科技,2022,55(8):78-85.

[2]张伟,刘敏.工业空调新风预热负荷计算与优化[J].暖通空调,2021,51(11):65-71.

[3]陈昊,赵静.氟塑料换热器在含尘烟气余热回收中的应用[J].化工设备与管道,2023,60(2):43-48.

[4]刘强,张燕.工业余热回收系统控制策略研究[J].控制工程,2022,29(7):1321-1327.

[5]李明,王海.基于ARIMA算法的设备负荷预测模型[J].计算机仿真,2023,40(5):412-416.

[6]周亮,吴芳.工业节能项目效益评估方法与应用[J].工业节能与环保,2022,48(9):34-38.

[7]赵伟,孙丽.管壳式换热器选型计算与实例分析[J].热能动力工程,2021,36(6):98-103.

[8]Herrero,J.,et al."Performance analysis of a heat pump system using waste heat from a tobacco dryer for space heating in industrial buildings." Energy and Buildings245(2021):110794.

### 作者简介:

谢童(1995—),男,汉族,四川成都人,硕士研究生,助理工程师,动力设备维护与维修。