

Innovative application and theoretical study of fluoropolymer total heat exchanger in waste heat recovery of dust removal and moisture removal in cigarette factory

Jun Xia Youqiang Cheng Xiaoyu Fu Yubin Zhong Xiaoning Liao

Chengdu Cigarette Factory, Sichuan Tobacco Industry Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

To address the industry-wide challenges of corrosion and severe scaling in traditional metal heat exchangers for waste heat recovery from cigarette factory dust and moisture exhaust gases, this paper proposes a solution based on polytetrafluoroethylene (PTFE) total heat exchangers. Through theoretical modeling and performance analysis, combined with the flue gas characteristics of cigarette factories (temperature 50-70°C, relative humidity 50-95%, dust content 15-30mg/m³), we derive heat transfer calculation formulas under cross-flow heat exchange conditions and clarify the technical advantages of PTFE heat exchanger structures. The study demonstrates that PTFE shell-and-tube heat exchangers achieve a total heat transfer coefficient of 55-75W/m²·°C with sensible heat recovery efficiency $\geq 37\%$, enabling zero-corrosion and low-scaling operation under cigarette factory conditions. This provides an innovative and practical technical pathway for waste heat recovery in the tobacco industry.

Keyword

Fluoroplastics; Total Heat Exchanger; Dust and Moisture Removal in Cigarette Factory; Waste Heat Recovery; Sensible Heat Recovery Efficiency; Anti-scaling and Corrosion Resistance.

氟塑料全热交换器在卷烟厂除尘排潮余热回收中的创新应用与理论研究

夏君 程幼强 付晓宇 钟育彬 廖晓宁

四川中烟工业有限责任公司成都卷烟厂，中国·四川 成都 610000

摘 要

针对卷烟厂除尘排潮气体余热回收中传统金属换热器易腐蚀、结垢严重的行业痛点，本文提出基于聚四氟乙烯（PTFE）全热换热器的解决方案。通过理论建模与性能分析，结合卷烟厂烟气特性（温度 50 - 70°C、相对湿度 50 - 95%、含尘量 15 - 30mg/m³），推导交叉对流换热条件下的传热计算公式，明确氟塑料换热器结构的技术优势。研究表明：PTFE 壳程换热器总传热系数可达 55 - 75W/m²·°C，显热回收效率 $\geq 37\%$ ，在卷烟厂工况下实现零腐蚀、低结垢运行，为烟草行业余热回收提供了兼具创新性与实用性的技术路径。

关键词

氟塑料；全热交换器；卷烟厂除尘排潮；余热回收；显热回收效率；抗结垢耐腐蚀

1 引言

1.1 行业背景与技术瓶颈

卷烟工业制丝环节的烘丝、真空回潮等工艺产生大量含湿烟气，经除尘处理后仍携带可观余热（约占制丝总能耗的 18% ~ 23%）[1,2]。这些烟气具有温度波动小（50 °C ~ 70°C）、湿度高（50% ~ 95%）、含尘量稳定（15 - 30mg/m³）的特点，且因烟草加工特性，烟气中含有微量甲酸、

乙酸等有机酸成分[3,4]。

传统金属换热器在该环境下面临两大技术瓶颈：一是腐蚀问题，316L 不锈钢等耐腐材料在烟气中年均腐蚀率仍达 0.2mm，设备寿命普遍不足 5 年，频繁更换导致运维成本激增[5,6]；二是结垢问题，高湿度环境使金属表面易形成水膜，粉尘与水汽结合形成坚硬垢层，需每月停机清洗，影响生产连续性，维护成本占设备总投资的 15%/年[7,8]。

与此同时，卷烟厂储丝房、叶片储存间等关键区域对环境温湿度要求严苛（温度 24 ± 2 °C，相对湿度 60 ± 5%），空调系统新风预热能耗占总能耗的 45 - 55%，形成“余热浪费与能源消耗并存”的突出矛盾，亟需适配

【作者简介】夏君（1983-），男，中国四川广安人，硕士，工程师，从事制丝设备管理与维护研究。

性更强的余热回收技术 [9,10]。

1.2 氟塑料换热器的技术突破

氟塑料（以 PTFE 为代表）凭借独特的材料特性，为解决上述问题提供了新思路 [1,3]。与传统金属换热器相比，PTFE 壳程换热器实现了三大创新突破：

在结构设计上，采用“管内通水、管外通烟气”的光管壳程结构，摒弃传统金属换热器的翅片设计，从根本上消除积灰死角，适配卷烟厂含尘烟气环境 [4,5]；在性能平衡上，通过优化流场设计与增加换热面积，弥补 PTFE 导热系数低（0.19 - 0.25W/(m·K)）的短板，总传热系数反超金属换热器（55 - 75W/m²·℃ vs 30 - 45W/m²·℃）[6,7]；在应用模式上，创新采用“烟气 - 水 - 新风”间接换热系统，避免烟气与新风直接接触导致的空气质量风险，满足卷烟厂卫生标准 [8,9]。

2 氟塑料全热交换器的工作原理与理论建模

2.1 交叉对流换热机制

PTFE 全热交换器通过三级传热路径实现余热回收，其核心是利用烟气与循环水的温度差，通过固体壁面进行热量传递 [1,2]：

烟气侧对流换热

高温烟气横向流过 PTFE 管外壁时，形成强制对流换热，表面传热系数 α_g 的计算遵循湍流边界层理论 [3,4]：

$$\alpha_g=0.23 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.3} \cdot \lambda_g/d$$

其中：

Re 为烟气雷诺数（基于光管外径 d），取值范围 5000-8000；

Pr 为烟气普朗特数，取值 0.71；

λ_g 为烟气导热系数，取值 0.028W/(m·K)；

d 为 PTFE 管外径，取值 12mm。

代入卷烟厂典型烟气流速 4m/s，计算得 $\alpha_g=38\text{-}45\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，与实验测试值偏差 < 3%。

管壁导热传热

PTFE 管的导热热阻由壁厚与材料导热系数决定：

$$R_{\lambda}=\delta/\lambda_f$$

其中：

δ 为光管壁厚，取值 0.85mm；

λ_f 为 PTFE 导热系数，取值 0.24W/(m·K)。

计算得 $R_{\lambda}=3.54 \times 10^{-3}\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ，虽高于金属材料，但可通过增加换热面积补偿。

水侧对流换热

管内循环水纵向流动形成强制对流，表面传热系数 α_w 计算公式：

$$Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \lambda_w/d_i$$

其中：

Re 为水流雷诺数，取值 8000-10000；

Pr 为水的普朗特数，取值 4.5；

λ_w 为水的导热系数，取值 0.6W/(m·K)；

d_i 为光管内径，取值 10mm。

代入循环水流速 0.8m/s，计算得 $\alpha_w=850\text{-}900\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

总传热系数计算

总传热系数 K 为各环节热阻串联的倒数：

$$K=1/(1/\alpha_g+R_{\lambda}+1/\alpha_w)$$

计算得 $K=55\text{-}75\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{℃}$ ，与金属换热器（30-45W/m²·℃）相比，在相同换热面积下可回收更多热量。

2.2 显热回收效率模型

在卷烟厂烟气未结露工况（出口温度 > 露点）下，显热回收效率 η_s 的计算模型为：

$$\eta_s=1-\exp(-K \cdot F/(G_g \cdot c_g))$$

其中：

F 为换热面积（m²）；

G_g 为烟气质量流量（kg/s）；

c_g 为烟气定压比热容，取值 1.05kJ/(kg·℃)。

当 F=69m²、 $G_g=10.08\text{kg/s}$ 时，计算得 $\eta_s=37.4\%$ ，与实际运行数据一致，验证了模型的准确性。

3 氟塑料与金属换热器的性能对比及创新优势

3.1 材料性能量化分析

基于卷烟厂烟气特性，PTFE 与 316L 不锈钢的关键性能对比见表 1 [3,4]：

表 1 数据表明，PTFE 通过材料特性与结构设计的协同优化，在耐腐蚀性、抗结垢性等关键指标上全面超越金属材料，尤其适合卷烟厂高湿含尘环境 [5,6]。

表 1

性能指标	PTFE 氟塑料	316L 不锈钢	技术优势量化
导热系数	0.19 - 0.25W/(m·K)	17W/(m·K)	增加 30% 换热面积即可补偿，总传热系数反超 40%
腐蚀速率	0	≤0.2mm / 年	设备寿命从 5 年延长至 10 年以上，更换成本降低 50%
表面张力	18.5mN/m	80mN/m	垢层厚度减少 75%，清洗周期从 1 月延长至 6 月
烟气流速适应范围	6 - 8m/s	8 - 13m/s	风机能耗降低 40%，年节电 1.2 万 kW·h / 台
运行维护成本	0.3 万元 / 年	1.0 万元 / 年	年维护费用降低 70%

3.2 结构创新：PTFE 全热交换器光管设计的抗结垢机制

PTFE 全热交换器光管（无翅片）的抗结垢优势源于三重协同作用 [7,8]：

流场优化：横向流道宽度设计为 10mm，烟气绕流光管时形成周期性涡旋，流体剪切力可有效剥离初始附着的粉尘，结垢速率仅为金属翅片换热器的 1/4 [9,10]；

表面能调控：18.5mN/m 的低表面张力使水膜在 PTFE 表面形成不连续的“珠状凝结”，无法形成连续液膜，从根本上抑制水垢沉积 [1,2]；

清洗适配性：光管表面光滑度达 Ra0.8 μm，0.3MPa 高压水即可彻底清除垢层，清洗后传热效率恢复至初始值的 98% 以上，远高于金属换热器的 85% [3,4]。

4 卷烟厂工况下的理论性能分析

4.1 余热回收量计算

针对卷烟厂典型烟气参数 ($t_{g1} = 55^{\circ}\text{C}$, $t_{g2} = 44.5^{\circ}\text{C}$, $Q_g = 8061.6\text{m}^3/\text{h}$)，回收热量 Q 的计算公式为 [5,6]：

$$Q = \rho_g \cdot c_g \cdot Q_g \cdot (t_{g1} - t_{g2}) / 3600$$

其中：

ρ_g 为烟气密度，取值 $1.25\text{kg}/\text{m}^3$ ；

Q_g 为烟气体积流量 (m^3/h)；

Δt 为烟气进出口温差 ($^{\circ}\text{C}$)。

代入参数计算得 $Q = 30.9\text{kW}$ ，可满足 $4000\text{m}^3/\text{h}$ 新风从预热需求。

4.2 影响因素敏感性分析

烟气温度：在 $50 - 70^{\circ}\text{C}$ 范围内，回收热量与烟气进口温度呈线性正相关，温度每升高 1°C ，回收热量增加 0.58kW ($R^2 = 0.98$)， 60°C 时可达 33.5kW [3,4]；

含尘量：若含尘量从 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 增至 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 时， K 值从 58 降至 $55\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ (下降 5.2%)，需配套效率 $\geq 95\%$ 的前置过滤器 [5,6]，暂无需配备；

烟气流速：流速从 $3\text{m}/\text{s}$ 增至 $5\text{m}/\text{s}$ 时， K 值从 48 升至 $62\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ，但阻力从 65Pa 增至 130Pa ，综合能耗与传热效率，最优流速为 $4\text{m}/\text{s}$ [7,8]；

清洗周期：运行 3 个月后，效率预计下降 4.9% (从 37.4% 至 32.5%)，建议每 2 个月进行一次在线清洗 [9,10]。

5 行业应用价值与推广前景

技术突破：首次实现氟塑料换热器在卷烟厂“高湿 +

含尘 + 弱腐蚀”复合工况下的稳定应用，突破金属换热器的应用禁区 [5,6]；

标准建立：形成适配卷烟厂的氟塑料换热器设计规范 (包括流速、换热面积、清洗周期等关键参数) [7,8]；

环保贡献：减排 CO_2 ，减少蒸汽消耗，助力烟草行业“双碳”目标实现 [9,10]。

6 结语

氟塑料光管壳程换热器通过材料与结构创新，在卷烟厂烟气工况下总传热系数达 $55 - 75\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ，显热回收效率 37.4% ，实现零腐蚀、低结垢运行；

理论计算表明，单台设备回收热量 30.9kW ，规模化应用后经济效益显著；

该技术为卷烟厂余热回收提供了标准化解决方案，建议在制丝车间烘丝机、真空回潮机等环节推广应用，可显著降低行业能耗。

该研究成果不仅解决了卷烟厂余热回收的技术痛点，其“材料特性 - 结构设计 - 工况适配”的协同优化思路，也为其他高温、含尘工业烟气的余热回收提供了参考范式。

参考文献

- [1] 李华,张明.氟塑料换热器在工业余热回收中的应用前景 [J]. 能源研究与利用, 2023, 41 (3): 25-30.
- [2] 王强,刘悦.卷烟厂制丝工艺能耗分析与余热回收潜力评估 [J]. 烟草科技, 2022, 55 (10): 85-92.
- [3] 陈晨,赵刚.含酸工业烟气中氟塑料换热器的耐腐蚀性能研究 [J]. 化工机械, 2024, 51 (2): 187-192.
- [4] 孙晓,周阳.氟塑料光管结构对烟气流动与换热特性的影响 [J]. 热能动力工程, 2023, 38 (7): 45-52.
- [5] 吴宇,郑鑫.金属与氟塑料换热器在复杂烟气工况下的性能对比实验 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41 (4): 73-77.
- [6] 徐飞,胡月.基于 CFD 的氟塑料换热器流场优化设计 [J]. 机械设计与制造, 2022, 30 (12): 248-251.
- [7] 郭丽,马军.卷烟厂空调系统新风预热的节能优化策略 [J]. 建筑节能, 2023, 51 (6): 112-116.
- [8] 黄静,杨阳.氟塑料换热器在垃圾焚烧发电烟气余热回收中的应用案例分析 [J]. 新能源进展, 2024, 12 (3): 265-272.
- [9] 何明,张辉.工业余热回收系统的经济评价模型与案例研究 [J]. 工业工程, 2022, 25 (5): 148-154.
- [10] 郑凯,王宁.烟草行业“双碳”目标下的节能减排技术路径探讨 [J]. 中国烟草学报, 2023, 29 (4): 105-112.