



曾强, 阙文豪, 许璧麟, 等. 薄板烘丝机筒内结垢程度对设备工艺性能的影响[J]. 轻工学报, 2025, 40(1): 58-63.

ZENG Q, QUE W H, XU B L, et al. Impact of fouling in the thin-plate cut tobacco dryer on equipment process performance[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(1): 58-63. DOI: 10. 12187/2025. 01. 007

# 薄板烘丝机筒内结垢程度对设备工艺性能的影响

曾强<sup>1</sup>, 阙文豪<sup>1</sup>, 许璧麟<sup>2</sup>, 于静<sup>2</sup>, 王昭焜<sup>2</sup>, 张尧立<sup>3</sup>, 张炜<sup>1</sup>, 董文亮<sup>2</sup>

1. 福建中烟工业有限责任公司 技术中心, 福建 厦门 361021;
2. 厦门烟草工业有限责任公司, 福建 厦门 361022;
3. 厦门大学 能源学院, 福建 厦门 361102

**摘要:** 为揭示薄板烘丝机筒内结垢对设备工艺性能的影响, 利用涂层测厚仪结合数理统计分析技术、热成像分析技术对比两台薄板烘丝机结垢严重程度、过程参数批间运行值、热风控制稳定性、料尾延迟特性、蒸汽消耗量、壁面温度分布均匀性等差异。结果表明: 制丝一区和制丝二区的烘丝机壁面污垢层厚度平均值分别为 1.5 mm、0.4 mm; 不同结垢程度的烘丝机, 批间物料流量和工艺热风流量运行值存在显著性差异; 与污垢层厚度为 0.4 mm 的烘丝机相比, 当壁面污垢厚度为 1.5 mm 时, 烘丝机工艺热风流量和温度的波动增大, 料尾延迟时间增加了 30 s, 蒸汽消耗量增加了 65 kg/h; 壁面颗粒污垢的附着与积聚, 影响了筒壁温度分布均匀性, 局部温度极差达 8 ℃。

**关键词:** 薄板烘丝机; 筒内结垢; 过程参数控制; 料尾延迟特性; 蒸汽消耗量; 壁面温度

**中图分类号:** TS452<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)01-0058-06

## 0 引言

薄板干燥作为一种重要的烘丝方式, 是卷烟制丝加工过程中的关键工序之一, 主要由薄板烘丝机实现<sup>[1]</sup>。薄板烘丝机通常为筒式, 随着设备的长期运行, 筒内关键换热组件表面的污垢缓慢生长, 出现结垢现象<sup>[2-3]</sup>。

目前, 针对烟草加工设备结垢后如何清洗的问题, 相关学者做了大量研究。李慧帆等<sup>[4]</sup>针对再造

烟叶纸机末端烘干部的托网改向辊表面积垢问题, 开发了一种自动清洗装置, 改进后断纸停机时间由 5789 min 降低至 0 min。张敬冲等<sup>[5]</sup>设计了一种烟草皮带输送机清洗装置, 该装置可有效清除皮带表面的烟垢。王普涛等<sup>[6-8]</sup>对制丝加工回潮机、加料机筒类设备沉积的烟垢及料垢清洗方法进行了研究, 并开发了专用清洗装置, 应用后可有效提高设备的预热效率。针对烘丝机结垢后如何清洗, 也有一些相关报道, 庞存瑞<sup>[9]</sup>研发了燃油管道式烘丝

收稿日期: 2024-02-06; 修回日期: 2024-07-23; 出版日期: 2025-02-15

基金项目: 中国烟草总公司重点研发项目(110202102044); 福建中烟工业有限责任公司与厦门大学技术开发基金项目(FJZYHZJH2023032); 福建中烟工业有限责任公司科技重点项目(FJZYKJH2024ZD001)

作者简介: 曾强(1978—), 男, 河南省信阳市人, 福建中烟工业有限责任公司高级工程师, 主要研究方向为烟草加工工艺。E-mail: zengqiangren2002@163.com

通信作者: 董文亮(1987—), 男, 河南省焦作市人, 厦门烟草工业有限责任公司工程师, 主要研究方向为卷烟自动化控制。E-mail: dwl30586@fjtict.cn

机加热管道清洗装置,有效降低了烟尘结块和自燃现象的发生,设备清洗时间由原来的 127 min 缩短为 5 min,明显提高了设备的稳定性和生产效率;吴文韬等<sup>[10]</sup>对比分析了 4 种滚筒式薄板烘丝机烟垢清除方法,并制定了化学渗透及高压水射清洗方案,清洗后烘丝筒壁温度过程能力指数、出口水分过程能力指数均有所提升。

由以上可知,当前学者对于烟草加工设备结垢的研究多集中在清洗方式与效果,关于结垢严重程度的评估及其对设备工艺性能的影响关注度较低。鉴于此,本研究拟通过污垢厚度检测分析两台薄板烘丝机结垢程度差异,利用数据统计与挖掘技术研究结垢程度对烘丝机过程参数控制性能、蒸汽消耗量、实际筒壁温度分布均匀性等方面的影响,以期对烘丝机壁面结垢程度量化评估、设备工艺性能保障及运维等提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

主要材料:某牌号配方烟叶,采样时间 2022 年 6 月至 2023 年 12 月,由厦门烟草工业有限责任公司提供。

主要仪器:KLD2-3 型薄板烘丝机,德国 HAUNI 公司;Fischer603-477 型电涡流式涂层测厚仪,德国菲希尔公司;FOTRIC346<sup>+</sup>型热成像探测仪,上海热成像科技股份有限公司;7D2C50 型涡街流量计,德国 E+H 公司。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 污垢厚度测定** 在采样周期内,参照文献<sup>[11]</sup>的方法,从滚筒入口算起,沿筒体轴向每间隔 1 m,使用涂层测厚仪分别对厦门烟草工业有限责任公司两台薄板烘丝机(制丝一区、制丝二区)筒内抄板污垢厚度进行多点(9 个检测点)跟踪检测。统计污垢厚度年度平均值,以量化评估设备结垢程度。

**1.2.2 过程参数采集** 从企业 MES 生产系统中调取采样周期内两台烘丝机生产运行数据,包括入口物料流量、工艺热风流量、工艺热风温度、出口叶丝含水率、脱水流量、筒壁压力等。按批次统计上述指标的平均值、最大值、最小值、标准差等,并绘制

批间或批内参数变化曲线。

**1.2.3 料尾延迟特性分析** 以制丝一区为例,筛选出入口物料流量 $\leq 1000$  kg/h 的筒壁压力数据和出口叶丝含水率数据,定义为烘丝料尾阶段数据集。当筒壁压力由 1.7 bar(100 kPa)开始下降时,该时刻记为  $t_1$ ;当出口叶丝含水率由 13.1%开始下降时,该时刻记为  $t_2$ ;  $t_2-t_1$  即为一区烘丝料尾延迟特性数据。按照上述数据筛选规则,将二区料尾阶段筒壁压力开始下降时刻记为  $t_3$ ,出口叶丝含水率开始下降时刻记为  $t_4$ ;  $t_4-t_3$  即为二区烘丝料尾延迟特性数据。

**1.2.4 蒸汽流量测定** 在烘丝机蒸汽供应总管上加装蒸汽涡街流量计,按 1 次/10 s 间隔进行采样,记录批次生产稳定运行时蒸汽流量,并计算平均值。

**1.2.5 壁面温度测定** 将热成像探测仪架设在滚筒入口观察窗处,在设备空载且连续转动过程中,抓取区域温度热成像,并记录温度数据,绘制实际筒壁温度变化曲线。

### 1.3 数据处理

采用 MINITAB 软件,通过双样本 t 检验、单因素方差分析(ANOVA)等方法对实验数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 壁面结垢程度差异性分析

两台烘丝机壁面污垢厚度检测结果见表 1。由表 1 可知,制丝一区烘丝机壁面污垢厚度为 1.31~1.69 mm,制丝二区的厚度为 0.33~0.57 mm。进一步采用双样本 t 检验方法对厚度检测结果进行统计分析,结果见表 2。由表 2 可知,t 检验结果中  $P$  值

表 1 两台烘丝机壁面污垢厚度检测结果  
Table 1 Measurement results of the wall fouling thickness of two dryers

检测点	污垢厚度/mm	
	制丝一区	制丝二区
1 <sup>#</sup>	1.69	0.57
2 <sup>#</sup>	1.65	0.53
3 <sup>#</sup>	1.62	0.50
4 <sup>#</sup>	1.47	0.40
5 <sup>#</sup>	1.55	0.38
6 <sup>#</sup>	1.49	0.43
7 <sup>#</sup>	1.59	0.47
8 <sup>#</sup>	1.31	0.34
9 <sup>#</sup>	1.33	0.33

远小于 0.05,即两台烘丝机的污垢厚度存在显著性差异。由于污垢层厚度与换热器结垢严重程度直接相关<sup>[12]</sup>,因此,可判断出制丝一区烘丝机壁面结垢严重程度高于制丝二区,这可能与烘丝机运行年限长短及污垢生长特性有关<sup>[13]</sup>。

## 2.2 结垢程度对烘丝过程参数控制性能的影响

### 2.2.1 对过程参数批间运行值的影响

不同结垢程度烘丝机过程参数变化曲线见图 1,参数描述性统计结果见表 3。由图 1、表 3 可知,在烘丝出口水分闭环控制模式下,制丝一区物料流量和脱水流量整体批间运行值小于二区的运行值,但工艺热风流量批间运行值稍大于制丝二区的运行值。有研究表明<sup>[14-15]</sup>,物料流量大小与干燥脱水量直接相关,工艺热风流量则反映了出口水分的调节能力。虽然两台烘丝机均满足了出口水分闭环控制要求,但二者的物料流量、工艺热风流量和脱水流量均存在差异,这可能是当污垢厚度增大后,干燥脱水能力下降,热风流量对水分调节作用加大所致。

为进一步验证参数控制性能差异,以结垢厚度为单一因素,分别对两台烘丝机物料流量、工艺热风流量、脱水流量进行单因素方差分析,结果见表 4。由表 4 可知,前述参数的方差检验  $P$  值均小于 0.05。这说明两台烘丝机在物料流量、工艺热风流量、脱水流量批间控制上均存在显著性差异。由此进一步佐证了烘丝机结垢程度对烘丝过程参数控制有显著影响,这可能会影响干燥传热效率<sup>[16]</sup>和产品均质化控制。

### 2.2.2 对热风控制稳定性的影响

不同结垢程度烘丝机工艺热风流量及温度批间标准差变化曲线见图 2。通过计算得到制丝一区工艺热风流量、工艺热风温度标准差平均值分别为  $13.593 \text{ m}^3/\text{h}$  和  $0.263 \text{ }^\circ\text{C}$ ,制丝二区分别为  $9.668 \text{ m}^3/\text{h}$  和  $0.140 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由图 2 可知,一区热风控制稳定性整体不如二区,

表 2 两台烘丝机壁面污垢厚度双样本  $t$  检验结果

Table 2 Double sample  $t$ -test results of the wall fouling thickness of two dryers

烘丝机	平均值/mm	标准差/mm	自由度	$P$ 值
制丝一区	1.522	0.135	13	0.000
制丝二区	0.439	0.084		

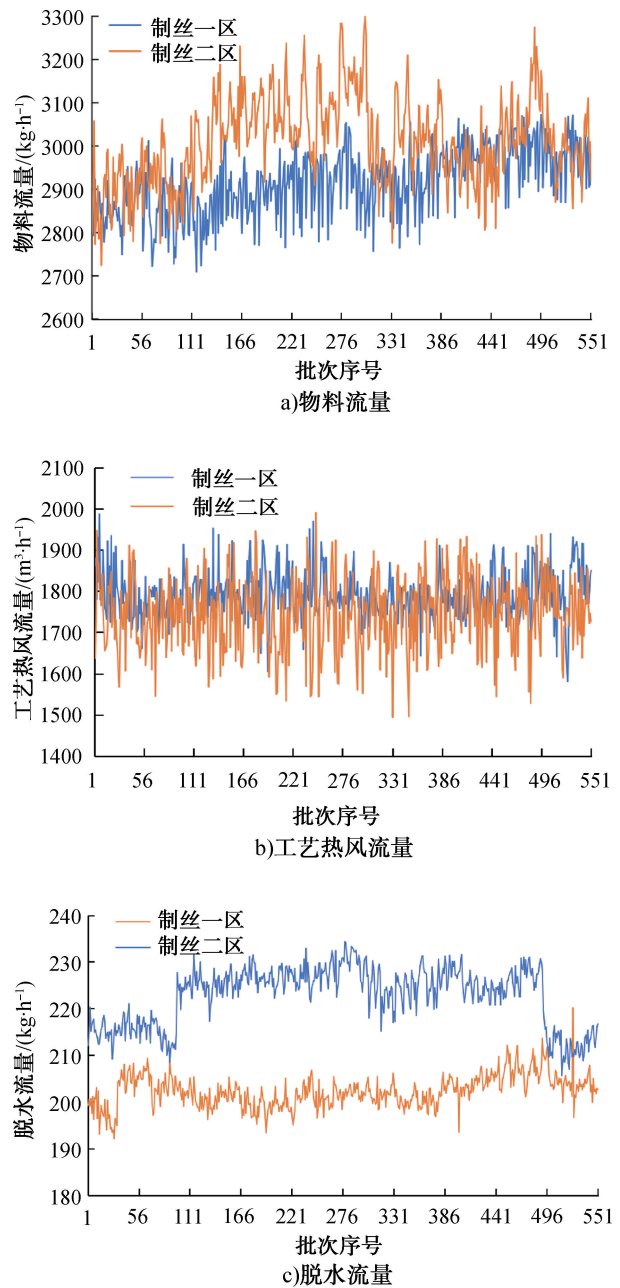


图 1 不同结垢程度烘丝机过程参数变化曲线  
Fig. 1 Curves of process parameter changes for dryers with varying scaling

表 3 不同结垢程度烘丝机过程参数描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistical results of process parameters for dryers with varying scaling

参数指标	区域	实际均值	最大值	最小值
物料流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	制丝一区	2 919.20	3 078.10	2 709.50
	制丝二区	3 010.50	3 298.50	2 724.80
工艺热风流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	制丝一区	1 792.70	2 011.30	1 581.10
	制丝二区	1 743.80	1 990.30	1 494.00
脱水流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	制丝一区	202.44	220.12	192.14
	制丝二区	222.37	234.19	205.61

表明壁面结垢的累积使设备热系统传热性能发生改变<sup>[17-18]</sup>,进而影响干燥过程中的水分蒸发和迁移,作为水分调节变量的热风系统波动由此增大。

进一步地,以结垢程度为单一因素,分别对两台烘丝机工艺热风流量标准差、工艺热风温度标准差进行单因素方差分析,结果见表5。由表5可知,前述两个指标的方差检验  $F$  值均大于检验临界值  $F_{0.05}$ ,且  $P$  值均小于 0.05,这说明两台烘丝机在热风系统控制稳定性上存在显著性差异。由此可知,相同配方牌号正常生产条件下,由于一区烘丝筒内结垢严重程度大于二区,导致工艺热风流量的调节迟滞性增加,而风量调节与风温控制之间存在关

联,故调节变量工艺热风流量的波动,会使热风温度的扰动进一步加剧。

### 2.3 结垢程度对料尾延迟特性的影响

不同结垢程度烘丝机料尾延迟特性见图3。由图3可知,在烘丝料尾阶段,筒壁蒸汽压力由正常状态值降为程序设定值,随后延迟一定时间后出口叶丝含水率逐渐下降。由图3计算得到制丝一区的烘丝机料尾延迟时间( $t_2-t_1$ )为230 s,二区的( $t_4-t_3$ )为200 s,二者相差30 s。相比之下,由于一区烘丝机结垢程度更为严重,受污垢热阻影响更大<sup>[19-20]</sup>,故其实际筒壁温度下降速度趋缓,这间接影响了料尾阶段出口水分的下降状态。

表4 烘丝机过程参数单因素方差分析结果

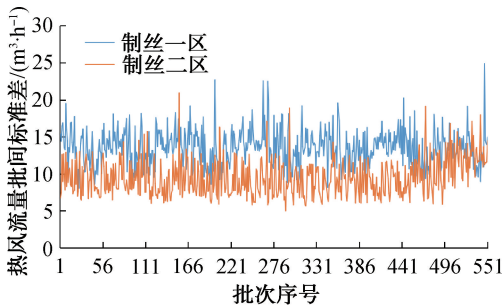
Table 4 Results of one-way anova analysis of process parameters for dryers

参数指标	来源	自由度	离差平方和	均方差	$F$ 值	$P$ 值
物料流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	因子	1	2 475 219	2 475 219	76.58	0.000
	误差	1182	38 205 347	32 323		
工艺热风流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	因子	1	697 983	697 983	52.72	0.000
	误差	1182	15 649 689	13 240		
脱水流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	因子	1	58 571	58 570	11 605	0.000
	误差	472	2382	5		

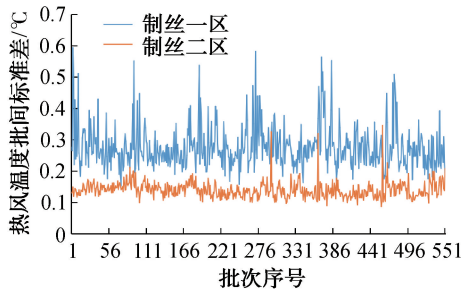
表5 烘丝机工艺热风流量及温度标准差单因素方差分析结果

Table 5 Results of one-way anova analysis of standard deviation of hot air flow and temperature for dryers

参数指标	来源	自由度	离差平方和	均方差	$F$ 值	$P$ 值
工艺热风温度/ $^{\circ}\text{C}$	因子	1	4478	4 477.970	660.150	0.000
	误差	1172	7950	6.780		
工艺热风流量/ ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	因子	1	5.202	5.202	1 630.820	0.000
	误差	1172	3.738	0.003		



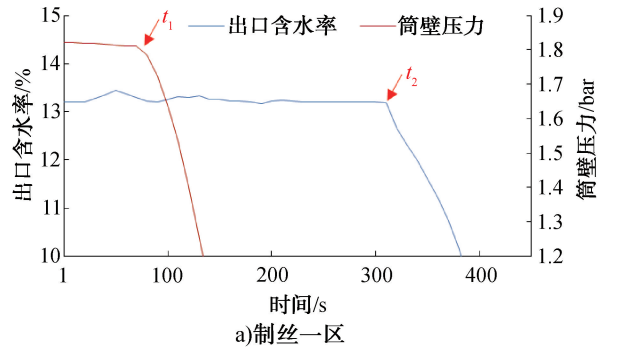
a) 工艺热风流量批间标准差



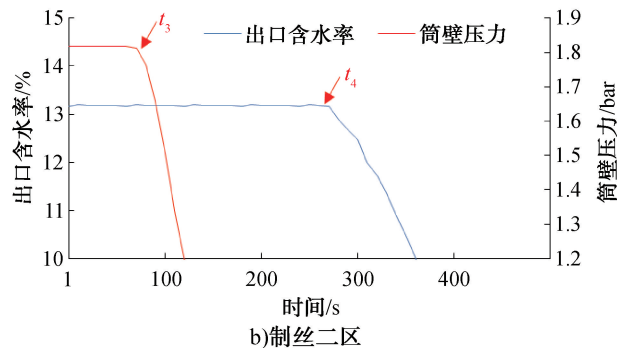
b) 工艺热风温度批间标准差

图2 不同结垢程度烘丝机工艺热风流量及温度批间标准差变化曲线

Fig. 2 Curves of standard deviation in hot air flow and temperature for dryers with varying scaling



a) 制丝一区



b) 制丝二区

图3 不同结垢程度烘丝机料尾延迟特性

Fig. 3 Characteristics of material tail delay for dryers with varying scaling

## 2.4 结垢程度对蒸汽消耗量的影响

将两台烘丝机的筒壁压力、工艺热风温度、出口叶丝含水率均设定为 1.7 bar、110 °C、13.2%，制丝一区 and 制丝二区干燥稳态加工过程的蒸汽消耗量分别为 667 kg/h、602 kg/h，前者高出 65 kg/h，这是因为换热器结垢会增加系统的能源消耗量<sup>[21]</sup>，进一步表明了烘丝机筒壁污垢的沉积会影响设备换热效率，增加系统热耗散。

## 2.5 结垢程度对壁面温度分布的影响

烘丝机筒体前端、中部、后端壁面污垢厚度有所不同，这种厚度分布差异会影响壁面温度分布的均匀性。空载条件下烘丝机壁面温度热成像见图 4，壁面温度动态变化趋势见图 5。由图 4 可知，所抓取的  $S_{P1}$ 、 $S_{P2}$ 、 $S_{P3}$  3 个探测点温度示值差异较大，极差约为 8 °C。其中， $S_{P1}$  位点成像显示该点位可能存在明显的颗粒垢堆积，导致其温度显著低于其他区域。由图 5 可知，跟踪测试过程中，壁面温度存在

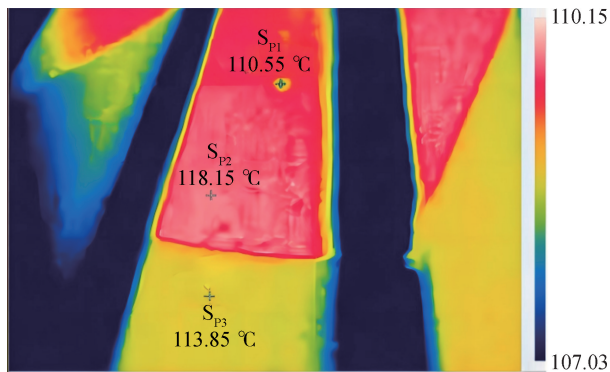


图 4 空载条件下烘丝机壁面温度热成像  
Fig. 4 Thermal imaging of wall temperature under no-load conditions

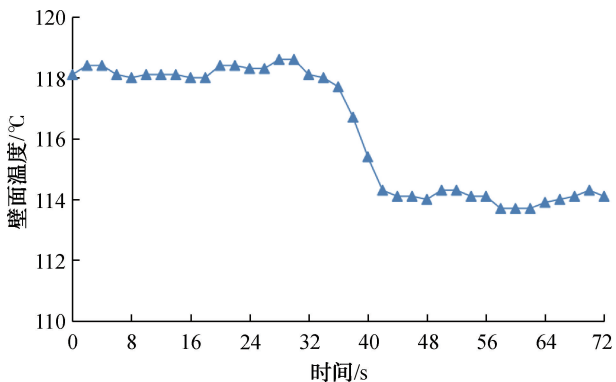


图 5 空载条件下烘丝机壁面温度动态变化趋势  
Fig. 5 Dynamic change trend of wall temperature under no-load conditions

明显波动，表明有污垢形成后烘丝机壁面实际温度存在较大的不均匀性。

## 3 结论

本文针对薄板烘丝筒内结垢现象，采用仪器探测和数理统计分析方法，量化评估了两台薄板烘丝机结垢程度，研究了不同结垢程度对过程参数批间运行值、热风控制稳定性、料尾延迟、蒸汽消耗量、壁面温度分布等设备工艺性能的影响。结果表明：1) 受烘丝机运行年限长短及污垢生长特性影响，两台薄板烘丝机壁面污垢层厚度存在显著性差异。2) 不同结垢程度的烘丝机在物料流量、工艺热风流量、脱水流量等过程参数批间运行值上存在显著性差异，结垢程度越严重，物料流量下降越明显，工艺热风流量区间运行值整体增大。壁面结垢的进一步沉积，加剧了工艺热风流量的调节波动，对工艺热风温度的扰动也随之增大。3) 与污垢层厚度为 0.4 mm 的烘丝机相比，当壁面污垢厚度为 1.5 mm 时，烘丝机料尾延迟时间增加了 30 s，同时壁面颗粒污垢的附着会增加蒸汽热量的耗散，进而影响筒壁实际温度分布的均匀性。

本文研究对象是两台已产生结垢的薄板烘丝机，后续还需对结垢前与结垢后设备的工艺性能进行对比研究。此外，关于烘丝机筒内结垢的生成机制、壁面污垢动态热阻的变化趋势，以及阻垢策略的开发等关键问题，未来研究中可进一步加强生产过程的监测，并进行数据融合分析，以持续优化烘丝机工艺性能，提升设备的综合运维水平。

## 参考文献：

- [1] 国家烟草专卖局. 卷烟工艺规范[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016.
- [2] 杨波. 内插扭带管内二次流对污垢生长规律影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [3] XU Z M, JIANG X, LIU Z D, et al. Experimental investigation of microbial fouling and heat mass transfer characteristics on Ni-P modified surface of heat exchanger [J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30 (1): 271-278.
- [4] 李慧帆, 秦琦, 李明伟, 等. 造纸法再造烟叶托网改向辊自动清洗装置的设计与应用[J]. 纸和造纸, 2023,

- 42(3): 9-13.
- [5] 张敬冲,倪琪博,彭帅. 输送带清洗装置的设计与应用[J]. 设备管理与维修,2023(15): 30-31.
- [6] 王普涛. 烟草制丝线回潮筒自动清洗装置[J]. 机械工程与自动化,2022(1): 136-138,141.
- [7] 秦凯歌,齐毅,林敏. 加料机热交换器自动清洗装置的设计与应用[J]. 机械工程师,2021(7): 79-82.
- [8] 查成,刘银初,肖雪强. 浅谈 SJ13C 型卷烟加料设备清洗系统改进方法[J]. 中国设备工程,2019(11): 69-70.
- [9] 庞存瑞. SH963C 燃油烘丝机清洗装置的研究[J]. 科技风,2014(8): 61.
- [10] 吴文韬,陶何刚. 烘丝机清洗的新方法[J]. 装备制造技术,2012(11): 151-153.
- [11] 国家质量监督检验检疫总局. 磁性基体上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法: GB/T 4956—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社,2004.
- [12] 罗博文. 基于污垢厚度检测的管道污垢热阻研究[D]. 吉林: 东北电力大学,2018.
- [13] 张宁,李楠,杨启容,等. 换热面上颗粒污垢生长特性的数值模拟研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版),2018,33(1): 75-79,86.
- [14] 邹泉,陈冉,赵云川,等. 基于干燥脱水量的叶丝滚筒干燥加工强度品质校正技术[J]. 烟草科技,2020,53(7): 70-79.
- [15] 陈杰,陈春雷,徐永虎,等. 两段式烘丝机控制模式对烟丝含水率的影响[J]. 烟草科技,2019,52(9): 91-95.
- [16] 赵鑫海,陈鹏,贺东钰,等. 燃料棒相变导热模型开发与污垢传热恶化应用[J]. 核科学与工程,2023,43(2): 270-277.
- [17] 褚英杰,刘海涛,陈自强,等. 沉积物分布规律对蒸汽发生器传热性能的影响分析[J]. 发电设备,2021,35(6): 391-396.
- [18] 黄思,牛琦锋,陈建勋,等. 基于热流耦合的换热器结垢对传热性能的影响分析[J]. 机械设计与制造,2022(9): 66-70.
- [19] 厉勇,孙全胜,邢兵. 重油污垢热阻模型研究及应用进展[J]. 石油化工设备,2022,51(2): 55-62.
- [20] MURAD T. 管壳式换热器污垢热阻的研究[D]. 广州: 华南理工大学,2021.
- [21] 阎占宇. 风机盘管表面污垢传热效果对空调系统能耗实测与模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学,2022.

## Impact of fouling in the thin-plate cut tobacco dryer on equipment process performance

ZENG Qiang<sup>1</sup>, QUE Wenhao<sup>1</sup>, XU Bilin<sup>2</sup>, YU Jing<sup>2</sup>, WANG Zhaokun<sup>2</sup>,  
ZHANG Yaoli<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, DONG Wenliang<sup>2</sup>

1. Technology Center, China Tobacco Fujian Industrial Co., Ltd., Xiamen 361021, China

2. Xiamen Tobacco Industrial Co., Ltd., Xiamen 361022, China

3. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China

**Abstract:** In order to reveal the impact of fouling formation in the thin-plate cut tobacco dryer on the equipment process performance, a thickness detector combined with mathematical statistical analysis and thermal imaging analysis techniques was employed to comparatively analyze the differences in fouling severity, batch-to-batch operational values of process parameters, stability of hot air control, material tail delay characteristics, and steam consumption between two cut tobacco dryers. The results indicated that the average thicknesses of the fouling layers on the walls of the two dryers were 1.5 mm and 0.4 mm, respectively. Dryers with varying degrees of fouling exhibited significant differences in the operational values of material flow rate and process hot air flow rate between batches. Compared to the dryer with a fouling layer thickness of 0.4 mm, when the wall fouling thickness was 1.5 mm, fluctuations in the process hot air flow and temperature of the dryer were increased, resulting in a 30 s increase in material tail delay and a 65 kg/h increase in steam consumption. The adhesion and accumulation of particulate fouling on the walls affected the uniformity of the drum wall temperature distribution, with local temperature extremes reaching 8 °C.

**Key words:** thin-plate cut tobacco dryer; fouling inside the drum; process control performance; characteristic of material tail delay; steam consumption; wall temperature

[责任编辑:王晓波 刘春奎]