

绿色造纸背景下纸张涂布工序的质量缺陷识别与控制策略

安田田¹ 邱慈祥²通信作者

(1. 浙江凯丰新材料股份有限公司, 浙江 衢州 324400;
2. 五洲特种纸业集团股份有限公司, 浙江 衢州 324400)

摘要: 在绿色制造理念不断深化的背景下, 纸张涂布工序的质量控制已成为造纸行业提升产品性能与环境绩效的重要环节。为此, 本研究围绕涂布缺陷识别与调控难点, 构建了图像处理与深度学习识别体系, 并提出多源数据融合策略用于缺陷判定优化; 结合工艺机制分析, 提出基于反馈控制、智能调节与绿色工艺重构的优化方案。研究表明, 通过技术集成与参数动态管理, 可提升缺陷识别准确率与控制响应效率, 促进涂布质量与资源利用效率的协同提升。

关键词: 绿色造纸; 纸张涂布; 缺陷识别; 深度学习; 过程控制

中图分类号: TS727

文献标识码: A

文章编号: 1674-6937 (2025) 05-0013-03

引言

纸张涂布作为提升纸张表面性能与功能特性的关键工序, 其稳定性与均匀性直接影响产品质量及后续加工效果。在环保标准不断提高与绿色制造理念持续推进的背景下, 涂布过程中产生的缺陷不仅削弱了成品率, 还加剧了能耗与排放控制压力。随着工艺复杂度的增加, 涂布缺陷渐趋多样、识别难度日益提高。传统控制手段难以适应当前高精度生产线的需求, 需引入更具系统性、智能化的识别与调控方法, 以实现质量稳定性与环保性能的同步改进。

1 纸张涂布工序与绿色造纸要求的适配性分析

1.1 纸张涂布工序与关键环节

纸张涂布工序通常包括涂料制备、涂布上浆、干燥定型和后处理等环节。在涂料制备过程中, 需对颜料、黏合剂和助剂进行精确配比, 以保证流变性能和分散稳定性^[1]。涂布方式主要有刮刀式、棒涂式和气刀式, 其中刮刀式在高速机组中应用广泛, 具有较高的控制精度。涂布后的纸张需通过多级烘干区进行水分挥发, 烘干温度通常控制在 100~150℃, 过高易导致纸面龟裂, 过低则导致黏着性不足。最后通过压光处理提升纸面光洁度和印

刷适应性, 该环节需精确控制线压力, 使其与速度匹配, 避免产生二次涂层脱落。

1.2 绿色造纸对涂布工序质量与环保的双重要求

在绿色制造理念下纸张涂布过程需同时满足产品质量要求与环境影响控制的双重标准^[2]。质量方面, 要求涂层具有良好的均匀性、附着力和遮盖性, 通常将涂布定量变异系数 (CV) 控制在 2% 以内, 涂层附着力达 0.9 N/25 mm 以上。环保方面, 要求大幅减少挥发性有机物 (VOC) 排放, 采用低 VOC 水性涂料替代传统溶剂型配方, 涂布系统配套废气回收效率应高于 90%。能源使用方面, 涂布干燥段耗能占整线能耗的 30% 以上, 需通过热能回收、分区控制和红外—热风复合干燥方式降低单位能耗至小于 1.5 MJ/m²。

1.3 当前涂布工序存在的主要质量缺陷

纸张涂布过程中常见的质量缺陷包括条痕、麻点、涂布不匀、起泡和涂层脱落等。条痕主要源于涂料分布不均或刮刀磨损, 表现为沿运行方向的线性纹路, 其波动频率通常与刮刀频率同步。麻点常由涂料中颗粒团聚或基材表面疏松造成, 影响涂层连续性与致密性^[3]。涂布不匀多与涂料流速控制不稳定相关, 典型涂布厚度偏差超过 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 。起泡与涂层脱落则多由涂料表面张力控制失衡或基纸吸收性波动引起, 在实际生产中易造成大面积废品, 严重影响生产线稳定性和资源利用效率。

作者简介: 安田田 (1991—), 女, 本科, 中级工程师, 研究方向为造纸质量。

通信作者: 邱慈祥 (1991—), 男, 本科, 中级工程师, 研究方向为造纸技术。

2 纸张涂布质量缺陷识别方法体系构建

2.1 基于图像处理的缺陷可视化识别技术

纸张涂布缺陷的可视化识别依赖于高分辨率图像采集系统与图像处理算法的耦合。工业级线阵或面阵相机通常具备 $5\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 以下的成像精度,最大成像宽幅可达 4096 像素,动态范围高于 70 dB,能够在 0.1 秒内完成每幅图像的采集与预处理。图像采集系统配置 LED 冷光源,色温稳定在 $5600\ \text{K}\pm 100\ \text{K}$,可保证纹理信息一致性。常用图像增强方法包括直方图均衡、边缘锐化与中值滤波,可提升目标区域对比度达 35% 以上^[4]。缺陷提取环节常采用灰度差异分析与形态学处理组合,在不同背景干扰下保持 90% 以上的边界准确率。图像分割多采用阈值法与区域增长法,其中,最大类间方差法 (Otsu) 阈值分割法在处理亮度波动情况下具有较高稳定性,判定阈值 T 的最优化准则为:

$$T = \arg \max_{t \in [0, L-1]} \left[\frac{\sigma_b^2(t)}{\sigma^2} \right] \quad \text{公式1}$$

公式 1 中, $\sigma_b^2(t)$ 表示类间方差, σ^2 为总方差, L 为灰度级数。

2.2 机器学习与深度学习在缺陷分类中的应用

在缺陷识别任务中,传统的支持向量机 (SVM)、决策树 (DT) 和随机森林 (RF) 可基于提取的纹理特征、形状特征及频域特征进行分类。常见输入特征包括灰度共生矩阵 (GLCM) 中的对比度、能量与熵值,边缘密度指标 (边缘像素占比通常小于 8%) 与小波能量分布。在中小样本场景下, SVM 在处理高维低样本问题中表现稳定,具有较强的泛化能力,其决策函数为:

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad \text{公式2}$$

公式 2 中, α_i 为拉格朗日乘子, y_i 为样本标签, $K(x_i, x)$ 为核函数, b 为偏置项。深度学习方面,卷积神经网络 (CNN) 通过多层卷积核对图像进行端到端特征提取与分类建模,较常用的架构包括密集卷积网络 (ResNet)、残差网络 (DenseNet) 和高效神经网络 (EfficientNet),层数控制在 18~121 层之间。图像输入尺寸通常设定为 $256\ \text{像素} \times 256\ \text{像素}$,训练轮数控制在 50~200 次,以避免过拟合。精度评估指标包括准确率 (Accuracy)、召回率 (Recall) 与 F1-score,部分模型在标准缺陷数据集上准确率可超过 96%,平均识别延迟控制在 80 ms 以内。

2.3 多源信息融合的综合识别框架

为提高涂布缺陷检测的全面性与鲁棒性,构建基于多源异构数据融合的识别系统已成为趋势。该系统融合图像数据、温湿度传感器数据 (温度测量精度为 $\pm 0.2\ ^\circ\text{C}$)、涂布速度 (传感器误差小于 $0.1\ \text{m}/\text{min}$) 与张力输出 (分辨率为 $0.1\ \text{N}$),形成多维特征空间。多源数据采用标准化与同步化处理,时间窗口控制在 200 ms 以内,以确保同步特性不丢失。融合策略中常用的决策级融合算法包括加权投票法与贝叶斯融合方法,特征级融合则通过主成分分析 (PCA) 或自编码器实现降维,保持 95% 以上的特征信息^[5]。基于熵权法的多源权重分配模型表现出较优的调节能力,其权重计算公式为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad \text{公式3}$$

公式 3 中, w_j 为第 j 个信息源的权重, e_j 为该源的归一化信息熵, m 为总信息源数量。

3 纸张涂布缺陷的形成机制与影响因素分析

3.1 原材料性能差异对涂布缺陷的诱发

涂料组分的粒径分布对成膜均匀性具有直接影响, D90 超过 $2\ \mu\text{m}$ 的分散体系在高线速度下容易形成斑点与沉积堆积。黏合剂质量分数波动超过 $\pm 1.5\%$ 时,附着力稳定性下降,导致干燥后表层剥落概率增加^[6]。需对涂料粒径进行在线激光粒度监控,并将黏度控制在 $700\sim 1200\ \text{mPa} \cdot \text{s}$,通过调控固含量和提高分散剂比例确保涂料体系稳定。

3.2 工艺参数波动导致的工艺不稳定性

涂布速度超过 $800\ \text{m}/\text{min}$ 时,若供浆压力波动超过 $\pm 0.2\ \text{MPa}$,将引发涂层厚度不均或边部堆积。烘干段温度控制应按区段梯度调整,首段温度不宜超过 $140\ ^\circ\text{C}$,末段降至 $95\ ^\circ\text{C}$ 以下,以避免因干燥速率突变导致表层收缩裂纹。刮刀角度应稳定在 $15^\circ\sim 20^\circ$,压力维持在 $0.3\sim 0.5\ \text{MPa}$,通过引入自动压力控制装置与张力闭环系统可实现实时调节。

3.3 设备运行状态对缺陷出现的诱因

涂布机辊筒的轴向跳动量超过 $0.05\ \text{mm}$ 时易产生周期性条痕缺陷,需定期进行辊面校准与轴承更换^[7]。驱动系统响应延迟大于 300 ms 时,在高速涂布过程中易引发供料响应滞后,造成局部缺涂或断层。设备运行期间应配置实时状态监测系统,监测振动频率 (阈值设定在 $10\ \text{Hz}$ 以内)、温升速率 (不超过 $1.5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$) 与电机负载变化,确保关键机构稳定运行。

4 纸张涂布工序质量缺陷的控制与优化策略

4.1 基于过程监控的实时预警与反馈控制

针对高速涂布生产过程中参数波动频繁、缺陷生成机制复杂的特点,需建立基于全过程多变量监测的动态反馈控制系统。关键控制点包括涂布厚度、刮刀压力、涂料流量、纸幅张力与烘干温区等^[8]。建议在涂料供给系统中布设流量与压力传感器,频率响应不低于 10 Hz,配合高精度电涡流传感器实时监测辊筒间距与偏移量。图像识别系统可设定针对不同缺陷特征的干预阈值,当厚度波动超出 $\pm 1.2\ \mu\text{m}$ 或表面纹理扰动超过设定灰度差阈值时触发联动机制。反馈控制模型应采用多输入—多输出(MIMO)结构,结合模糊控制与比例积分微分(PID)算法进行参数调节,最大响应时间应控制在 0.3 秒以内,以防止缺陷持续蔓延或产线效率下降。

4.2 缺陷识别驱动的智能调控系统设计

需构建集图像识别、数据采集、运算与执行于一体的自动化调控系统,缺陷识别模型应支持分类精度高于 95% 的多类判别结构,基于 CNN 与注意力机制模块组合,对麻点、气泡、条痕等进行实时识别与定位。识别结果将与参数数据库进行联动比对,由嵌入式控制单元实时调整涂布压力、涂料浓度与张力分布^[9]。系统应配置在线自学习模块,在识别结果和后端人工复核结果不一致时自动修正分类权重,实现模型迭代优化。调控逻辑结构中建议引入强化学习策略,在多次调整结果中选取最优方案,建立缺陷—工艺参数动态映射矩阵,逐步提升模型收敛速度与适应性。

4.3 绿色制造理念下的工艺再设计建议

在满足绿色生产目标的基础上,应对现有涂布工艺体系进行系统化再设计。烘干段可引入低温多段红外与热泵耦合干燥系统,通过动态调整能量密度与时间分配,实现涂层干燥效率提升 12%~16%、单位能耗降低不低于 15%。涂布涂料方面,应采用低 VOC 排放型水性配方,并在保持固含量 32%~35% 的基础上控制黏度在 900~1100 mPa·s,同时引入高稳定性无机粒子分散体系以增强抗析出能力与流平性。生产线整体可构建模块化运行单元,通过产能调度系统与质量预测算法组合运行,在保证产品质量前提下使资源效率与环境兼容性最大化^[10]。

5 结语

综上所述,纸张涂布工序的质量控制正从局部调节逐步转向融合智能识别、动态控制与绿色设计的协同路径。通过对材料、工艺与设备多维因素的识别与优化,可支持构建高效、低碳的涂布工艺体系。未来应推动智能制造技术与造纸工艺的深度融合,扩展实时感知、边缘计算与预测性控制等方法在复杂工况下的应用,建立具备持续演化能力的涂布质量管理机制。

参考文献

- [1] 王辉. 硫酸钙晶须涂料的制备及其对涂布纸印刷性能的影响 [D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [2] 夏虎, 孙举兰. 化工工程中的绿色生产工艺与可持续发展研究 [J]. 华东纸业, 2025, 55(3): 20-22.
- [3] 刘晓菲. 利用壳聚糖基复合涂层改善纸基纤维材料气体阻隔性能研究 [D]. 北京: 中国制浆造纸研究院有限公司, 2022.
- [4] 郑旭广. 电子束固化涂布技术的安全环保性能研究 [J]. 精细与专用化学品, 2019, 27(4): 9-13.
- [5] 邵英杰, 陈阳帆, 梅逸兴, 等. 有机酸改性聚乙烯醇涂布对纸张阻隔性能影响 [J]. 中国造纸, 2024, 43(8): 57-63.
- [6] 胡振华. 半纤维素基纸张涂布胶黏剂和乳化剂的制备及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [7] 王培培, 刘胜华, 宋昭轩, 等. 涂布损纸回用对纸张性能指标的影响因素分析 [J]. 造纸技术与应用, 2024, 52(2): 8-10.
- [8] 唐华, 姚梓烽, 王世伟, 等. 纳米纤维素/壳聚糖共混涂布对纸张性能的影响及其在扬声器中的应用 [J]. 造纸科学与技术, 2023, 42(5): 14-19, 33.
- [9] 王益, 刘寅, 沈文浩. 基于 X 射线断层扫描技术的涂布纸张三维结构表征 [J]. 中国造纸, 2023, 42(9): 54-64.
- [10] 李洁. 银条半纤维素—壳聚糖混合膜的制备及其对纸张涂布的性能研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2023.