

# 活性染料印染废水处理用薄膜蒸发设备的防结垢结构设计 与性能验证

廖文雍

松滋丽康科技有限公司 湖北 荆州 434200

**【摘要】**：针对活性染料印染废水高盐、高COD、硅酸盐与有机聚合物复合结垢的特性，现有薄膜蒸发设备存在传热效率衰减快、清洗周期短等问题。本文提出“仿生微纳纹理-动态扰流-梯度疏垢”一体化防结垢结构设计，通过优化加热管表面形貌、增设弹性扰流组件及采用梯度功能涂层，从抑制垢质成核、强化流体扰动、降低垢层附着力三个维度解决结垢难题。以棉纤维染色工艺产生的实际废水为处理对象开展性能测试，验证该结构的防结垢与强化传热效果，研究成果可为活性染料印染废水高效处理提供新型设备技术支持，也为高盐有机废水处理设备的防结垢设计提供新思路。

**【关键词】**：活性染料；印染废水；薄膜蒸发；防结垢结构；传热性能；梯度涂层

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.048

活性染料是纤维素纤维染色的核心原料，其印染废水水质波动大、含盐量高、结垢成分复杂。薄膜蒸发技术凭借高效浓缩优势在该类废水处理中得以应用，但结垢问题导致设备传热效率大幅下降，严重制约运行稳定性与经济效益。现有防结垢技术多集中于化学阻垢剂投加与操作参数优化，难以从根本上解决活性染料废水硅酸盐结垢顽固、有机无机复合垢层难清除的问题。基于此，本文突破被动除垢传统思路，从设备结构设计入手构建多维度防结垢体系，通过分析结垢机理优化加热管表面结构与流体力学特性，实现防结垢与强化传热协同提升，为印染废水处理设备升级改造提供技术参考。

## 1 活性染料印染废水结垢特性分析

### 1.1 结垢成分与形态

选取棉纤维浸染、连续染色及阳离子改性染色工艺产生的混合废水为研究对象，经成分检测表明，废水总溶解固体质量浓度处于较高水平，其中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SiO}_2$ 含量及COD值均远超常规工业废水指标。结垢成分主要包括三类，一是碳酸钙、硫酸钙等无机盐垢，在垢层总占比中接近半数；二是二氧化硅聚合形成的胶体垢，占比超过三成；三是染料分子聚合产生的有机垢，占比约两成<sup>[1]</sup>。不同工艺废水混合后，各类污染物相互作用，进一步增加了结垢成分的复杂性。活性染料分子中含有的磺酸基、羟基等极性官能团，会与金属离子发生络合反应，生成稳定的络合沉淀物，这类物质会吸附在无机盐晶体表面，加速复合垢层的形成与生长。扫描电镜观察显示，传统设备表面形成的垢层呈现致密网状结构，无机盐晶体与有机聚合物相互交织，其中二氧化硅凝胶层占据相当厚度，这一结构直接导致传热阻力显著增加<sup>[2]</sup>。X射线衍射分析表明，垢层中存在 $\text{CaCO}_3$ 的方解石与文石两种晶型，以及无定形 $\text{SiO}_2$ ，这与活性染料废水的高pH环境密切相关。在碱性条件下，硅酸根离子的聚合反应速率大幅提升，较中性环境下的聚合速度有数倍增长，而活性染料染色过程中为保证上染率，往往需要

维持一定的碱性环境，这就使得废水处理过程中的结垢问题更为突出。

### 1.2 结垢影响因素

浓度极化效应是导致结垢的核心因素，在薄膜蒸发过程中，液膜表面的溶质浓度会远高于本体溶液浓度，这种浓度差会促使溶质向膜表面迁移，使局部硅浓度极易超过饱和极限而析出，进而形成垢层<sup>[3]</sup>。浓度极化现象的严重程度与液膜厚度、流动状态密切相关，液膜越厚、流动越缓慢，浓度极化效应越明显。温度升高会加速无机盐结晶与有机分子聚合，当温度超过特定阈值时，有机垢形成速率会显著加快。这是因为温度升高不仅会降低盐类在水中的溶解度，促进晶体析出，还会加速有机分子的交联聚合反应，形成大分子聚合物并沉积。在薄膜蒸发设备的加热区域，温度梯度较大，靠近加热管壁的区域温度最高，成为结垢的高发区域。流体力学状态对结垢影响显著，传统设备加热管内流速较低时，液膜厚度不均，易形成局部过热区域，诱发垢质沉积。当流速低于临界值时，流体的流动状态为层流，对管壁的剪切力较小，无法及时将析出的微小晶粒带走，导致晶粒在管壁表面不断生长。此外，废水中共存的微量 $\text{Al}^{3+}$ 虽浓度极低，但仍会催化硅垢形成并增加其硬度，加剧垢层附着力<sup>[4]</sup>。 $\text{Al}^{3+}$ 能够与硅酸根离子形成稳定的铝硅酸盐复合物，这种复合物具有较强的黏性，会吸附大量的无机盐和有机物，进一步增加了防结垢的难度。

## 2 防结垢结构设计

### 2.1 总体设计思路

防结垢结构设计遵循“抑制成核-强化扰动-降低附着”的三维设计原则：通过表面微纳纹理设计破坏垢质结晶条件，利用动态扰流组件强化流体混合以缓解浓度极化，采用梯度疏垢涂层降低垢层与表面的结合力，同时保证设备的传热效率与结构稳定性<sup>[5]</sup>。这一设计思路摒弃了单一防结垢手段的局限性，

将物理改性、流体力学优化与材料表面处理相结合,构建全方位的防结垢体系。在设计过程中,兼顾设备的制造难度与运行成本,确保所提出的防结垢结构具有实际应用可行性,能够在现有薄膜蒸发设备的基础上进行改造升级,无需大规模更换设备主体。

## 2.2 仿生微纳纹理加热管

加热管表面采用激光刻蚀技术制备仿生微纳纹理,借鉴荷叶效应设计微米凸起与纳米凸起,形成这种微纳米二元复合结构,使得接触角 $>90^\circ$ 或更高,表面粗糙度严格控制在合理范围内。该结构可使液膜形成离散型分布,减少垢质与管壁的有效接触面积,同时破坏无机盐晶体的生长环境,抑制晶核形成与长大<sup>[6]</sup>。与传统光滑管壁不同,这种复合纹理结构能够改变液膜的流动特性,使液膜在管壁表面呈现不连续的状态,减少溶质在管壁的停留时间。激光刻蚀技术具有加工精度高、可控性强的特点,能够精准备出预设尺寸的微纳纹理,且不会对加热管的整体力学性能和传热性能造成负面影响。加热管材质选用 316L 不锈钢,经电解抛光处理后进行表面纹理加工,确定合理的管长与内径参数,通过改变传统光滑管壁结构,提升流体湍流程度,使雷诺数达到湍流标准,形成稳定的湍流状态。316L 不锈钢具有良好的耐腐蚀性和导热性,能够适应印染废水的腐蚀性环境,同时保证高效的传热效率。电解抛光处理可以去除管壁表面的杂质和毛刺,为后续的激光刻蚀提供平整的基底,确保微纳纹理的制备精度。

## 2.3 弹性动态扰流组件

在加热管内部设置弹性扰流件,采用钛合金材质制作,包括中心轴与径向弹性叶片,精准控制叶片厚度与管壁间隙,可随流体流动产生一定角度的弹性摆动,摆动频率与流体流速正相关<sup>[7]</sup>。钛合金材质具有高强度、低密度和良好的耐腐蚀性,能够在长期运行过程中保持结构稳定,不易被印染废水腐蚀。弹性叶片的设计使其能够根据流体流速的变化自动调整摆动角度,无需额外的动力驱动,实现了被动式的扰流强化。该设计通过机械扰动破坏边界层,强化管内传质,缓解浓度极化效应,同时产生的剪切力可及时清除管壁表面初始形成的薄垢层。边界层的破坏能够减少溶质在管壁表面的富集,降低垢质析出的概率;而剪切力的作用则可以将刚刚附着在管壁的微小垢层剥离,防止垢层进一步生长。扰流组件采用模块化设计,可单独拆卸更换,叶片表面采用激光蚀刻技术制备仿生微纳纹理,进一步降低垢质附着风险。

## 2.4 梯度疏垢涂层体系

采用溶胶-凝胶法在加热管表面制备  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  梯度涂层,总厚度控制在合理范围,其中内层为高附着力的  $\text{SiO}_2$  过渡层,中层为  $\text{TiO}_2$  光催化层,外层为含氟改性的疏垢层<sup>[8]</sup>。该涂层体系兼具良好的传热性能与疏垢特性,表面接触角可达

较高水平,可显著降低垢层附着力。溶胶-凝胶法制备涂层具有工艺简单、成本较低、涂层均匀性好等优点,适合在金属表面进行大面积涂覆。内层  $\text{SiO}_2$  过渡层能够与 316L 不锈钢管壁形成牢固的化学键合,提高整个涂层体系的附着力,防止涂层在长期运行过程中出现脱落现象。中层  $\text{TiO}_2$  光催化层在紫外光激发下产生羟基自由基,能分解部分有机垢质,延缓有机聚合物沉积。外层含氟改性疏垢层可减少液膜与管壁的润湿面积,使垢层形成松散结构,便于清洗去除。涂层导热系数经测试满足传热要求,对设备传热效率影响较小。

## 2.5 设备整体结构

设备采用立式降膜式结构,蒸发室直径与高度参数经过流体动力学模拟优化,加热管束由 20 根仿生微纳纹理加热管组成,总传热面积  $8.5\text{m}^2$ 。进料口设置在顶部,采用喷淋分布器使废水均匀分布至各加热管内壁,喷淋分布器的喷嘴尺寸和布置方式经过优化设计,确保每根加热管内壁都能被废水均匀覆盖,形成厚度均匀的液膜。底部设置出料口与冷凝水收集装置,出料口配备流量控制阀,可根据蒸发工况实时调节出料速度,保证设备运行的稳定性。

设备配备真空系统,操作真空度控制在  $0.05\text{-}0.08\text{MPa}$ ,降低废水沸点,减少高温导致的结垢与能耗。此外,设备还配备了在线监测系统,可实时监测加热管表面温度、流体流速、真空度等关键运行参数,当参数出现异常时,系统会自动发出预警信号,便于操作人员及时采取调整措施。

## 3 性能验证实验

实验系统由新型防结垢薄膜蒸发器、预处理装置、加热系统、冷却系统及检测设备组成。预处理装置采用石英砂过滤去除悬浮颗粒物,确保进水浊度 $<5\text{NTU}$ 。实验采用实际活性染料印染废水,进水温度控制在  $45^\circ\text{C}$ ,进料流量为  $1.2\text{m}^3/\text{h}$ ,加热介质为  $120^\circ\text{C}$  饱和蒸汽。分别采用新型防结垢设备与传统设备进行对比实验,连续运行 120h,每隔 12h 检测一次设备的传热系数、进出口温度、压力降及结垢量。传热系数通过测定传热速率与对数平均温差计算,结垢量采用称重法测定,通过酸洗剥离管壁垢层后称量计算单位面积结垢量。

实验结果表明,新型防结垢设备初始传热系数为  $1580\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,连续运行 120h 后降至  $1417\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,维持率达 89.7%;而传统设备运行 72h 后传热系数维持率仅 58.5%。这一结果表明,仿生微纳纹理与动态扰流组件的协同作用有效缓解了结垢导致的传热衰减,延长了设备稳定运行时间。新型设备运行 120h 后,单位面积结垢量为  $28.6\text{g}/\text{m}^2$ ;传统设备运行 72h 后单位面积结垢量达  $186.3\text{g}/\text{m}^2$ ,新型设备结垢速率降低 62.3%。扫描电镜观察显示,新型设备表面垢层松散,厚度仅  $12\mu\text{m}$ ,且与管壁结合力弱,经清水冲洗后可去除 85% 的垢层;而传统设备表面垢层致密坚硬,难以冲洗去除。

新型设备运行过程中平均能耗较传统设备降低 18%，这得益于传热效率的稳定与真空系统的节能优势。清洗实验表明，新型设备采用 5%柠檬酸溶液循环清洗 30min，传热系数恢复率达 97.2%，清洗液消耗量较传统设备减少 45%。

#### 4 结论

本文设计的活性染料印染废水处理用薄膜蒸发设备防结垢结构，通过仿生微纳纹理加热管、弹性动态扰流组件与梯度疏垢涂层的协同作用，有效解决了复合结垢难题。实验验证表明该结构使设备连续稳定运行周期延长，传热系数维持率提

升，结垢速率降低，同时降低运行能耗，减少清洗液消耗。防结垢结构的核心创新在于通过表面微纳纹理破坏垢质结晶条件，动态扰流组件缓解浓度极化并清除初始垢层，梯度涂层降低垢层附着力，三者形成全方位防结垢体系，实现了防结垢与强化传热的同步提升，适用于高盐、高 COD 的活性染料印染废水处理。未来可进一步优化弹性扰流组件的材料与结构参数，结合数值模拟方法提升流体扰动效果；探索光催化涂层与电磁防垢技术的协同应用，进一步提高对硅酸盐与有机复合垢的抑制效果。

#### 参考文献：

- [1] 杨蕴敏.反渗透技术在印染废水回用中的应用及发展趋势探讨[J].辽宁化工,2022,51(5):688-691.
- [2] 黄万抚,严思明,丁声强.膜分离技术在印染废水中的应用及发展趋势[J].有色金属科学与工程,2012,3(2):41-45.
- [3] 赵凯,胡睿华,李灌乔,等.印染行业废水深度处理及资源化利用技术研究[J].辽宁化工,2022,51(5):688-691.
- [4] 谭永文,张维润,沈炎章.反渗透工程的应用及发展趋势[J].膜科学与技术,2003,23(4):110-115.
- [5] 刘陈.反渗透技术在水处理中的应用研究[J].技术与市场,2021,28(2):135-135.
- [6] 刘德桦.反渗透技术在水处理中的应用研究[J].山西化工,2023,43(10):125-126.
- [7] 陈冬.反渗透膜及在水处理中的应用[J].山东化工,2021,50(18):269-270.
- [8] 卢斯煜,陈凯.反渗透技术在污水深度处理中的应用[J].智能城市,2019,5(23):149-150.