

### 3.2 膜集成分离技术的流程重构优化

正渗透-膜蒸馏集成膜技术的路径优化需要从根本上重构传统膜处理流程的线性逻辑,建立动态适应的循环处理系统。该研究重点解决三个层面的集成优化问题:汲取液系统的智能调控、膜污染防控的系统性策略以及能耗与回收率的平衡优化。在汲取液优化层面,研究探索温度响应型聚合物汲取液与磁响应型汲取液的性能差异,建立汲取液浓度梯度、再生频率与水通量的数学模型,提出基于膜通量衰减速率的汲取液更新策略。研究表明,采用三段式汲取液浓度调控(初期 1.5M,中期 2.5M,后期优化至 3.0M)相较于恒浓度运行,可提高整体水回收率 15% 以上,同时降低再生能耗 20%。

在膜污染控制方面,研究提出“预防-监测-修复”的三级防控体系。通过前置预处理工艺的选择性优化(如超滤精度调整、化学软化程度控制),减少污染物在膜面的累积。开发基于电化学阻抗谱与光学相干断层扫描的在线膜污染监测技术,实现对膜面污染层厚度与结构的实时监测。建立周期性膜面自清洁机制,利用汲取液的渗透倒冲与化学反洗的联合作用,恢复膜通量。流程重构的另一重点是建立系统运行参数与浓缩液水质特征的响应模型,通过分析进水离子强度、有机物特性与温度变化,动态调整 FO 膜的错流速率、MD 膜的热侧温度梯度以及汲取液的循环流量。本章重点研究了汲取液智能调控、三级膜污染防控与系统参数动态响应,旨在重构膜集成运行流程,实现水回收率最大化与能耗最小化的平衡。

### 3.3 蒸发结晶工艺的能源与产物协同优化

机械蒸汽再压缩-晶种诱导分步结晶技术的路径优化研究,需要从能源效率提升、结晶产物调控与系统稳定性保障三个维度进行系统设计。在能源优化方面,建立基于热力学分析与机器学习预测的智能控制系统。研究蒸发器内部两相流动的 CFD 模拟,优化加热管布局与分布器设计,提高传热系数 15-25%。建立压缩机运行参数(转速、压比)与进料浓度、温度的动态响应模型,通过实时调节压缩机频率实现能耗最小化。针对浓缩液中挥发性有机物的热敏特性,研究两段式蒸发策略:第一段在较低温度(50-60℃)下操作,去除大部分水分同时减少有机物挥发;第二段采用 MVR 系统进行深度浓缩。

结晶过程调控是路径优化的核心技术环节。建立基于离子色谱与拉曼光谱在线监测的结晶控制系统,实现对溶液中各离子浓度的实时追踪。研究多组分体系下的结晶热力学与动力学特性,确定不同盐类的结晶序列与操作窗口。开发智能晶种投加系统,通过在线粒度分析反馈,精确控制晶种投加时机、粒径与数量,确保目标盐类的选择性结晶。研究表明,采用分阶段降温与连续结晶相结合的操作模式,可实现 NaCl 与 KCl 的初步分离,纯度分别达到 85% 与 70% 以上。结晶母液的循环处理同样重要,研究建立母液回流比例对结晶产物纯度影响的预测模型,优化母液回流点位与处理策略。产物资源化路径的探索包括结晶盐的洗涤、干燥工艺

优化,以及低纯度盐分的建材化利用途径,形成完整的“减量-分离-利用”技术链条。

本章从智能控制、结晶调控与产物利用三方面,对 MVR-分步结晶工艺进行优化,旨在协同提升系统能源效率、结晶产物纯度与资源化潜力。

### 3.4 全流程物料循环的系统集成优化

基于物流分析的臭氧催化-生化回流-膜组合工艺,其路径优化本质上是建立跨处理单元的污染物定向转化与资源内循环网络。该研究首先需要构建浓缩液全组分分析数据库,并建立各类浓缩液的指纹图谱。针对不同类型浓缩液,制定差异化的预处理策略:对碳源型浓缩液,优化臭氧催化条件,使其出水中的可生化有机物比例最大化;对盐分累积型浓缩液,则控制预处理强度,避免额外盐分生成影响后续生化处理。

在生化回流环节,研究建立基于微生物群落功能分析的智能调控系统。通过宏基因组测序分析生化系统的微生物组成与功能基因表达,动态调整浓缩液回流比例、点位与时间。开发基于氨氮、硝态氮与 COD 在线监测的反馈控制系统,实现碳氮比的精准调控。研究表明,将预处理后浓缩液作为外加碳源补充至反硝化段,可提高总氮去除率 8-12%,同时减少外部碳源投加量 30-50%。在全系统集成层面,构建多目标优化模型,利用响应面分析方法,确定各单元操作参数的最佳组合,如臭氧投加量、回流比、膜通量等关键参数的协同优化。建立基于数字孪生技术的系统模拟平台,形成具有自适应能力、可根据进水水质波动自动调整运行策略的智能处理系统,实现真正意义上的全过程减量化。

本章通过建立水质指纹库、智能调控回流与构建多目标优化模型,旨在实现污染物在系统内的定向转化与资源循环,从源头削减浓缩液产量。

## 4 结语

渗滤液浓缩液减量化处理技术路径的优化,是一个从单元强化走向系统集成、从线性处理转向循环调控的演进过程。未来研究应更注重基于水质指纹的个性化设计,开发更精准的在线监测与智能控制系统,并深化对跨介质污染转移与长期环境风险的评估。通过技术、工程与管理的多维创新,方能在环境效益与经济效益间找到平衡点,最终实现浓缩液安全、低碳的闭环管理,助力固体废物治理体系的可持续发展。

### 参考文献

- [1] 崔叶成.垃圾填埋场渗滤液深度处理技术研究进展[J].工业安全与环保, 2025, 51(1):91-97.
- [2] 李枫,贾晓琳,王瑞婧,等.垃圾渗滤液膜滤浓缩液的减量技术研究[J].膜科学与技术, 2024, 44(1):114-122.
- [3] 邓俊平.衡阳市第二生活垃圾填埋场渗滤液全量化处理项目设计[J]. 2025(3):72-75.
- [4] 张芋文,杨雨桐.深度处理垃圾渗滤液反渗透浓缩液试验研究[J]. 2023.

# Study on the technology of sewage treatment by activated sludge process

Jingjing Li

Shouguang Zhongye Water Service Co., Ltd., Shouguang, Shandong, 262700, China

## Abstract

The activated sludge process, a classic aerobic biological treatment technology, has become the most widely applied core process in the global wastewater treatment field since its invention in 1914. This paper systematically elaborates on the fundamental principles, process flow, operational parameter control, common problems, and countermeasures of the activated sludge process, and discusses its technical improvements and development trends. Research indicates that the activated sludge process can effectively remove organic pollutants from wastewater through the adsorption, oxidation, and decomposition functions of microorganisms, while also possessing the capability for nitrogen and phosphorus removal. With technological advancements, the activated sludge process is evolving towards intelligent operation, resource recovery, and energy saving and consumption reduction, demonstrating broad application prospects in the field of wastewater treatment.

## Keywords

Activated sludge process; Wastewater treatment; Biological treatment; Nitrogen and phosphorus removal; Process improvement

## 活性污泥法处理污水的技术研究

李京京

寿光市中冶水务有限公司, 中国·山东 寿光 262700

## 摘要

活性污泥法作为一种经典的好氧生物处理技术,自1914年发明以来,已成为全球污水处理领域应用最广泛的核心工艺。本文系统阐述了活性污泥法的基本原理、工艺流程、运行参数控制、常见问题及对策,并探讨了其技术改进与发展趋势。研究表明,活性污泥法通过微生物的吸附、氧化和分解作用,能够有效去除污水中的有机污染物,同时具备脱氮除磷功能。随着技术进步,活性污泥法正朝着智能化、资源化和节能降耗方向发展,在污水处理领域展现出广阔的应用前景。

## 关键词

活性污泥法; 污水处理; 生物处理; 脱氮除磷; 工艺改进

## 1 引言

活性污泥法是一种利用悬浮生长的微生物絮体对废水中有机物进行好氧处理的重要工程方法,是目前有机废水生物处理的主要方法。1914年,英国科学家 Arden 和 Lockett 通过实验发现,将曝气后的污水静置沉淀,保留沉淀物并继续加入新鲜污水进行曝气,可以显著缩短污水处理时间,从而开创了活性污泥法工艺。经过一个多世纪的发展,活性污泥法已成为全球近 6 万座城市污水处理厂中 3 万多座采用的主流工艺,在城镇污水和工业废水处理中发挥着不可替代的作用。

【作者简介】李京京(1984—),女,硕士,工程师,从事环境工程研究。

## 2 活性污泥法的基本原理与工艺流程

### 2.1 基本原理

活性污泥法的本质是利用活性污泥中微生物的代谢活动,将污水中的有机污染物转化为二氧化碳、水和新的微生物细胞。活性污泥是由细菌、真菌、原生动物和后生动物等多种微生物群体组成的混合培养体,其中细菌是净化功能最活跃的成分,主要包括动胶杆菌属、假单胞菌属、微球菌属等。这些微生物在好氧条件下,通过分泌胞外酶将大分子有机物分解为小分子有机物,然后吸收利用,最终将其氧化分解为二氧化碳和水,同时合成新的细胞物质。

### 2.2 工艺流程

典型的活性污泥法系统由曝气池、二沉池、污泥回流系统和剩余污泥排放系统四部分组成。经过预处理的污水与回流污泥一起进入曝气池形成混合液,在曝气设备的作用下,混合液充分混合并保持悬浮状态,微生物与污染物充分接触反应。经过一定时间的曝气后,混合液进入二沉池进行

泥水分离，上清液作为处理出水排出系统，沉淀的污泥一部分回流至曝气池以维持微生物浓度，另一部分作为剩余污泥排出系统。

### 3 活性污泥法的发展历程与应用现状

#### 3.1 发展历程

活性污泥法的研究最早可追溯到19世纪80年代。1882年，英国化学家史密斯发现对污水进行曝气可以延迟腐败过程。1911年，美国劳伦斯试验站的Clark研究生活污水对水体生物的影响时，发现随着污水投加量的增加，池内出现沉淀物，排出沉淀物后水变得清澈。1914年，Arden和Lockett通过实验证实，保留沉淀物并继续处理新鲜污水，可以显著缩短污水处理时间，从而正式发明了活性污泥法。

20世纪40年代，Gould、Hatfield等人开展了污泥曝气再生的研究；1947年，美国Austin污水厂进行了吸附-再生工艺的中试及应用研究；1959年，Zablatsky等人明确提出了接触稳定法的概念。1953年，荷兰Pasveer研究所提出了氧化沟工艺，用于处理小区污水。20世纪70年代末，美国的Irvine和澳大利亚Goronszy重新开展了对序批式活性污泥法(SBR)的研究，使其重新获得重视。1976年，德国Bohnke教授开发了AB工艺，进一步提高了处理效率。

#### 3.2 应用现状

目前，活性污泥法已成为全球污水处理的主流工艺。在中国，1923年上海建成了亚洲最早的二级污水处理厂——上海东区污水厂。20世纪90年代以后，随着对水环境要求的提高，中国先后引进了AB法、氧化沟法、A/O工艺、A/A/O工艺和SBR法等先进技术，并在全国范围内推广应用。目前，中国现有城市污水处理厂中80%以上采用活性污泥法，其中A/A/O及其变形工艺以其流程简单、运行管理方便、能同时兼顾除磷脱氮要求等优点成为当前城市污水处理的主流工艺之一。

### 4 活性污泥法的关键运行参数与控制

#### 4.1 主要运行参数

活性污泥法的运行效果受多种参数影响，主要包括：

**污泥浓度(MLSS)：**指曝气池中混合液的悬浮固体浓度，通常控制在1500-4000mg/L。MLSS反映了系统中微生物量的多少，直接影响污染物的去除效率和污泥的沉降性能。

**污泥负荷(F/M)：**指单位重量的活性污泥在单位时间内承受的有机物量，通常控制在0.1-0.3kgBOD<sub>5</sub>/kgMLSS·d。污泥负荷是决定处理效率和污泥生长情况的最重要设计参数，过高会导致污泥膨胀，过低则会使污泥老化。

**污泥龄(SRT)：**指活性污泥在系统中的平均停留时间，通常控制在10-15天。污泥龄影响微生物的生长和代谢，对系统的稳定性和处理效率有重要影响。短泥龄有利于除磷，长泥龄有利于硝化。

**溶解氧(DO)：**曝气池中必须维持一定浓度的溶解氧，通常控制在2-4mg/L。溶解氧是影响微生物代谢活动及有机物降解速率的关键因素，过高会导致过度氧化，过低则会引起丝状菌膨胀。

**污泥沉降比(SV30)：**指混合液静置30分钟后污泥所占的体积比，通常控制在15%-30%。SV30是评估污泥沉降性能的重要指标，能直观反映污泥的凝聚性和稳定性。

**污泥体积指数(SVI)：**指1g干污泥在静置30分钟后所占的体积，通常控制在50-150mL/g。SVI用于评估污泥的松散程度和沉降性能，是判断污泥膨胀的重要指标。

#### 4.2 参数控制策略

活性污泥法的运行控制需要根据进水水质、水量变化及时调整各项参数。当进水有机物浓度增加时，应适当提高MLSS或增加曝气量；当水温降低时，应适当延长水力停留时间或提高污泥浓度；当出现污泥膨胀时，应分析原因并采取相应措施，如调整营养配比、控制溶解氧、投加化学药剂等。

现代活性污泥法运行控制正朝着智能化、自动化方向发展。通过在线监测系统实时采集溶解氧、pH、MLSS等参数，结合智能控制算法，自动调节曝气量、回流比和排泥量，实现工艺参数的协同优化，提高处理效率，降低能耗。

### 5 活性污泥法常见问题及对策

#### 5.1 污泥膨胀

污泥膨胀是活性污泥法运行中最常见的问题之一，主要表现为污泥沉降性能恶化，含水率上升，体积膨胀，二沉池出水浑浊。污泥膨胀的主要原因包括丝状菌过度繁殖和非丝状菌膨胀。

**丝状菌膨胀：**由丝状菌（特别是球衣细菌）在污泥内大量繁殖引起。促成条件包括进水有机物少、F/M太低、氮磷营养不足、pH值低、溶解氧不足、进水波动大等。解决措施包括：调整营养配比，投加氮磷营养盐；控制溶解氧在适宜范围；调整污泥负荷；投加化学药剂（如氯化铁、漂白粉）抑制丝状菌繁殖。

**非丝状菌膨胀：**由进水中含有大量溶解性有机物，使污泥负荷过高，而缺乏足够的氮磷营养或溶解氧不足引起。细菌将大量有机物吸入体内但不能代谢分解，向外分泌过量的多糖类物质，使活性污泥的结合水高达400%（正常为100%左右），呈黏性凝胶状，无法在二沉池分离。解决措施包括：调整营养配比，投加氮磷营养盐；控制溶解氧；降低进水负荷。

#### 5.2 污泥上浮

污泥上浮主要包括污泥脱氮上浮和污泥腐化上浮两种情况。

**污泥脱氮上浮：**当曝气时间较长或曝气量较大时，曝气池中发生高度硝化作用，混合液中含有较多硝酸盐。在二