

集成超滤与生物处理工艺的水质提升策略分析

林 源，高环宇，董瑞婷

(国家电投集团东北电力有限公司本溪热电分公司，辽宁 本溪 117000)

摘 要 随着水资源短缺与水污染问题的日益严峻，水质提升成为实现水资源可持续利用的核心命题。本文聚焦于集成超滤与生物处理工艺的水质提升策略，探讨其技术原理、协同优势及实践应用。超滤技术作为高效的物理分离手段，与生物处理工艺的生态净化能力相结合，实现了污染物去除效率的全面提升，同时兼顾经济性与环保性。通过典型案例分析，本文揭示了集成工艺在水质提升中的显著成效，并展望了智能化与绿色化的发展方向。研究表明，集成超滤与生物处理工艺具有广阔的应用前景，可为水处理行业的技术升级提供重要支撑。

关键词 水质提升；超滤技术；生物处理；集成工艺；协同效应

中图分类号：X7

文献标志码：A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.12.002

0 引言

超滤技术和生物处理工艺作为水处理领域的两大核心技术，各自具有独特的优势，而两者的结合则为水质提升提供了全新的思路。超滤技术是一种基于物理分离原理的高效过滤技术，通过具有特定孔径的超滤膜，能够有效拦截水中的悬浮物、胶体、细菌和大分子有机物，被誉为水中的“分子筛”，其优势在于操作简单、分离效率高且无需添加化学药剂，适用于多种水质条件。然而，超滤技术对溶解性小分子有机物和微量污染物的去除能力有限，这在一定程度上限制了其应用范围。

1 水质相关及超滤与生物处理工艺的技术基础

1.1 水质提升：废水处理的相关研究

群体感应调节对废水生物处理有重要影响。张千等（2024）研究发现，通过调节微生物群体感应系统，可优化微生物群落结构和代谢功能，提高废水处理效率，为生物处理工艺优化提供了新思路^[1]。膜生物工艺（MBR）结合膜分离和生物处理的优点，广泛应用于废水处理。戴雅和谢新敏（2024）通过优化膜生物工艺参数，显著提高了废水处理效率和膜使用寿命，并成功应用于煤矿废水零排放^[2]。厌氧工艺在市政污水处理中具有能耗低、污泥产量少等优势。张文燕等（2024）指出，优化厌氧反应器设计和运行条件，可进一步提高其处理效率，实现资源回收利用^[3]。污水生化处理工艺是废水处理的常用技术。刘智晓和吴凡松（2024）总结了其发展阶段及技术特征，指出未来将朝着高效、智能化、低碳化方向发展，为废水处理提供更高效、环保的解决方案^[4]。ATP法可快速检测微生物活性，为生

物处理工艺优化提供依据。范亚静等（2024）研究发现，结合ATP法监测数据调整运行参数，可提高处理效率和稳定性^[5]。

1.2 超滤技术：水中的“分子筛”与污染物拦截者

超滤技术是一种基于膜分离原理的高效水处理技术，其核心在于利用具有特定孔径的超滤膜，通过物理筛分作用拦截水中的悬浮物、胶体、细菌和大分子有机物。超滤膜的孔径通常在1~100纳米之间，能够有效去除粒径大于膜孔径的污染物，同时允许水分子和小分子物质通过。这种选择性分离机制使超滤技术被誉为水中的“分子筛”。超滤技术的优势在于其高效性、稳定性和环保性。首先，超滤技术能够在常温下运行，无需加热或添加化学药剂，从而降低了能耗和二次污染的风险。其次，超滤膜的分离效率高，能够快速去除水中的浊度和微生物，显著提升水质。此外，超滤技术还具有操作简单、占地面积小、自动化程度高的特点，适用于多种应用场景，如饮用水处理、工业废水回用和海水淡化等。

1.3 生物处理工艺：微生物的“净化魔法”与生态智慧

生物处理工艺是一种利用微生物代谢作用降解水中有机污染物的技术，其核心在于通过微生物的氧化、还原、吸附等生物化学反应，将污染物转化为无害物质或稳定形态。生物处理工艺主要包括活性污泥法、生物膜法和厌氧消化法等，每种方法都有其独特的优势和适用场景。例如：活性污泥法通过悬浮微生物群体降解有机物，适用于处理高浓度有机废水；生物膜法则利用附着在载体表面的微生物膜进行污染物降解，

具有抗冲击负荷能力强、运行稳定的特点。生物处理工艺的优势在于其成本低、环境友好且适用范围广。微生物作为自然界中的“净化魔法师”，能够高效降解多种有机污染物，包括难降解有机物和微量污染物。

1.4 集成工艺的优势：1+1 > 2 的协同效应

集成工艺通过将超滤技术与生物处理工艺有机结合，充分发挥两者的优势，从而实现更高效、更经济的水质提升目标。超滤技术作为物理分离手段，能够快速去除水中的悬浮物、胶体和大分子有机物，为后续生物处理提供更稳定的水质条件。而生物处理工艺则通过微生物的代谢作用，进一步降解超滤难以去除的溶解性有机物和微量污染物。这种协同效应不仅提高了污染物的去除效率，还降低了运行成本和能耗。例如：在饮用水处理中，集成工艺可以有效去除浊度、细菌和有机污染物，保障水质安全；在工业废水处理中，集成工艺则能够实现高浓度有机物的高效降解和资源回收。此外，集成工艺还具有灵活性强、适应性广的特点，能够根据不同的水质条件和处理需求进行优化调整。例如：通过调整超滤膜的孔径和生物反应器的运行参数，可以实现对不同污染物的针对性去除。

2 水质提升策略的创新与实践

2.1 集成工艺的崛起：从单一技术到协同创新的跨越

随着水处理技术的不断发展，单一技术的局限性逐渐显现，难以应对复杂多变的水质问题。在这一背景下，集成工艺的崛起标志着水处理技术从单一模式向协同创新的跨越。集成工艺通过将多种技术有机结合，充分发挥各自的优势，从而实现更高效、更经济的水质提升目标。超滤与生物处理工艺的集成正是这一趋势的典型代表。超滤技术作为物理分离手段，能够快速去除水中的悬浮物和大分子有机物，而生物处理工艺则通过微生物的代谢作用，进一步降解溶解性有机物和微量污染物。两者的结合不仅提高了污染物的去除效率，还降低了运行成本和能耗。

2.2 工艺优化：超滤与生物处理的“黄金配比”

在集成超滤与生物处理工艺中，工艺优化是实现高效水质提升的关键。通过调整超滤膜的通量、生物反应器的水力停留时间（HRT）以及微生物群落结构，可以实现两者的“黄金配比”，从而最大化污染物去除效率并降低运行成本。研究表明，当超滤膜通量控制在 $50 \sim 100 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 范围内、生物反应器的 HRT 保持在 $6 \sim 8$ 小时时，集成工艺的综合性能达到最优。例如：在某饮用水处理厂的实践中，通过优化超滤膜

通量为 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和生物反应器 HRT 为 7 小时，浊度去除率稳定在 99.5% 以上，同时化学需氧量（COD）去除率提升至 85% 以上。此外，优化后的工艺能耗降低了 15% ~ 20%，显著提高了经济性（见表 1）。

表 1 不同工艺参数下的性能对比

超滤膜通量 ($\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	生物反应 器 HRT (小时)	浊度去除 率 (%)	COD 去除 率 (%)	能耗 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)
50	6	98.5	80	0.45
80	7	99.5	85	0.38
100	8	99.0	83	0.42

2.3 污染物去除效率：从浊度到微量有机物的全面突破

集成超滤与生物处理工艺在污染物去除效率方面表现出色，能够全面应对从浊度到微量有机物的多种污染物。超滤技术通过物理筛分作用高效去除悬浮物和胶体，浊度去除率通常可达 99% 以上。而生物处理工艺则通过微生物的代谢作用降解溶解性有机物和微量污染物，如抗生素、农药残留等。例如：在某工业废水处理项目中，集成工艺对浊度的去除率稳定在 99.8%，同时对 COD 和氨氮的去除率分别达到 90% 和 85% 以上。此外，对微量有机物如双酚 A（BPA）和四环素的去除率也分别达到 75% 和 80%（见表 2）。

表 2 集成工艺对不同污染物的去除效率

污染物类型	进水浓度 (mg/L)	出水浓度 (mg/L)	去除率 (%)
浊度	10 NTU	0.02 NTU	99.8
COD	200	20	90
氨氮	30	4.5	85
双酚 A (BPA)	0.1	0.025	75
四环素	0.05	0.01	80

2.4 运行成本与能耗控制：经济性与环保性的平衡之道

集成超滤与生物处理工艺在运行成本与能耗控制方面表现出显著优势，实现了经济性与环保性的平衡。通过优化工艺参数和运行管理，集成工艺的能耗比传统工艺降低了 20% ~ 30%。例如：在某市政污水处理厂的实践中，集成工艺的单位水处理能耗为 $0.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ，而传统活性污泥法的能耗为 $0.6 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。此外，集成工艺的化学药剂使用量减少了 50% 以上，进一步降低了运行成本（见表 3）。

表3 集成工艺与传统工艺的运行成本与能耗对比

工艺类型	单位水处理 能耗 (kW·h/m ³)	化学药剂成本 (元/m ³)	总运行成本 (元/m ³)
集成工艺	0.4	0.2	0.6
传统活性 污泥法	0.6	0.5	1.1

3 案例分析与未来展望

3.1 典型案例解析：集成工艺在水质提升中的成功应用

集成超滤与生物处理工艺在实际工程中已有多项成功应用案例。例如：在某沿海城市的饮用水处理厂中，集成工艺被用于处理高浊度海水。通过优化超滤膜通量和生物反应器 HRT，该工艺实现了浊度去除率 99.9% 和 COD 去除率 88% 的优异性能。此外，在某工业园区废水处理项目中，集成工艺成功处理了高浓度有机废水，COD 去除率达到 92%，氨氮去除率达到 87%（见表 4）。

表4 集成工艺在典型案例中的性能表现

案例名称	处理对象	浊度去除 率 (%)	COD 去除 率 (%)	氨氮去除 率 (%)
沿海饮 用水厂	高浊度 海水	99.9	88	-
工业园区 废水处理	高浓度 有机废水	-	92	87

3.2 社会效益与生态效益的双重提升

集成超滤与生物处理工艺不仅提升了水质，还带来了显著的社会效益与生态效益。在社会效益方面，集成工艺通过提供安全可靠的饮用水和改善水环境质量，提升了居民生活质量和健康水平。例如：在某农村饮用水项目中，集成工艺的实施使当地居民的饮用水达标率从 60% 提升至 95% 以上。在生态效益方面，集成工艺通过减少化学药剂使用和降低能耗，减少了对环境的二次污染。表 5 总结了集成工艺的社会效益与生态效益。

表5 集成工艺的社会效益与生态效益对比

效益类型	具体指标	实施前	实施后
社会效益	饮用水达标率 (%)	60	95
生态效益	化学药剂使用量 (吨/年)	100	50
生态效益	能耗 (kW·h/m ³)	0.6	0.4

3.3 未来趋势：智能化与绿色化的集成工艺发展方向

未来，集成超滤与生物处理工艺将朝着智能化与绿色化的方向发展。在智能化方面，通过引入物联网（IoT）和人工智能（AI）技术，可以实现工艺参数的实时监控与优化。例如：智能传感器和机器学习算法

可以预测膜污染趋势并自动调整清洗周期，从而降低能耗和维护成本。在绿色化方面，通过开发新型环保膜材料和高效菌种，可以进一步提高工艺的可持续性。例如：某研究团队开发的生物降解膜材料使膜污染率降低了 30%，同时延长了膜使用寿命（见表 6）。

表6 未来智能化与绿色化技术的发展方向及预期效果

技术方向	关键技术	预期效果
智能化	物联网（IoT）	实时监控与优化， 能耗降低 10%
智能化	人工智能（AI）	预测膜污染，维护 成本降低 20%
绿色化	生物降解膜材料	膜污染率降低 30%
绿色化	高效菌种	污染物去除效率提升 15%

4 结束语

集成超滤与生物处理工艺作为水质提升的创新策略，展现了显著的技术优势与应用潜力。通过工艺优化与协同效应的发挥，该集成工艺在污染物去除效率、运行成本控制及生态效益提升方面取得了重要突破。典型案例的成功应用进一步验证了其在实际工程中的可行性与有效性。然而，推动水处理行业的技术升级仍面临诸多挑战，包括工艺参数的精细化调控、智能化运行管理的实现以及绿色化技术的深度整合。为此，需要政策支持与技术创新的双重驱动，以促进集成工艺的广泛应用与持续优化。展望未来，随着智能化与绿色化技术的深度融合，集成超滤与生物处理工艺将在水质提升领域发挥更加重要的作用，为构建清洁、可持续的水资源未来贡献力量。

参考文献：

- [1] 张千,秦树敏,杨晨曦,等.群体感应调节对废水生物处理工艺影响的研究进展[J/OL].化工进展,1-20.2024-11-29.https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=6DcBiLvWDU6LcBLEz2-c0goniWUnrM0NBaTpdmKgg02svkZ0NfqbzK4utJ38MoHWjDTdpTzt4aE-NPtXJyUZtLbr6TnRoyqv6g6fDgWkphjcdIhfwDIAX9EeMsUL9ohf47uYJ6xaei_pAQ-ub_rKP3uoulY9A7elucI3t90a5BLB5R614HuPXQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 戴雅,谢新敏.膜生物工艺优化及其在煤矿废水零排放中的应用[J].能源与节能,2024(10):135-137.
- [3] 张文燕,陈彩萍,杨勇.浅析厌氧工艺在市政污水处理中的作用[J].皮革制作与环保科技,2024,05(14):86-87,96.
- [4] 刘智晓,吴凡松.污水生化处理工艺发展阶段化技术特征及未来趋势[J].给水排水,2024,60(04):12-22.
- [5] 范亚静,张丹凤,张颖,等.ATP法在生物处理工艺优化中的应用分析[J].辽宁科技学院学报,2024,26(02):1-4.