

高速公路场站污水处理技术升级研究

付相波 齐飞

贵州高投生态产业有限公司, 中国·贵州 贵阳 550025

摘要: 随着中国高速公路网络的迅速扩展, 服务区及其他场站的污水处理问题已逐渐凸显为环保领域的核心议题。鉴于污水处理量持续攀升及环保标准的日益严格, 传统污水处理技术面临诸多挑战, 技术革新与升级迫在眉睫。论文立足高速公路场站污水处理的当前形势, 对膜生物反应器 (MBR) 及反渗透 (RO) 技术的应用优势进行了全面而深入的剖析, 并据此提出了一系列技术优化方案。研究结果显示, 通过精准实施技术改进策略, 高速公路场站的污水处理效率实现了显著提升。与此同时, 运行成本也获得了有效控制。

关键词: 高速公路场站; 污水处理; 膜生物反应器 (MBR); 反渗透 (RO)

Research on Upgrading Wastewater Treatment Technology at Highway Stations

Xiangbo Fu Fei Qi

Guizhou Gaotou Ecological Industry Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550025, China

Abstract: With the rapid expansion of China's highway network, sewage treatment in service areas and other stations has gradually become a core issue in the field of environmental protection. Given the continuous increase in sewage treatment capacity and increasingly strict environmental standards, traditional sewage treatment technologies are facing many challenges, and technological innovation and upgrading are urgently needed. The paper is based on the current situation of sewage treatment in highway stations, and comprehensively and deeply analyzes the application advantages of membrane bioreactor (MBR) and reverse osmosis (RO) technologies. Based on this, a series of technical optimization solutions are proposed. The research results show that through precise implementation of technology improvement strategies, the sewage treatment efficiency of highway stations has been significantly improved. At the same time, operating costs have also been effectively controlled.

Keywords: highway station; wastewater treatment; membrane bioreactor (MBR); reverse osmosis (RO)

0 前言

高速公路, 作为现代交通网络的基石, 其沿线设立的服务区与场站, 肩负着车辆停驻、人员休憩及餐饮供应等多重服务职能。然而, 伴随交通流量的日益攀升, 此类场站所生成的污水量亦呈现显著增长态势。尤其是在用水高峰时段, 诸如节假日与旅游旺季期间, 污水处理系统常需承受超负荷运行的严峻挑战^[1]。若未能妥善处置, 所排放的污水将直接侵袭周边自然环境, 进而引发严重的水体污染与生态退化问题。

1 传统污水处理技术的现状与挑战

1.1 生物接触氧化法的实际应用与不足

生物接触氧化法作为当前高速公路场站广泛应用的污水处理技术之一, 其核心在于利用附着于填料之上的微生物膜, 对污水中的有机污染物实施有效氧化分解, 从而实现水质的净化 (见表 1)。此技术显著的优势在于其工艺流程设计简洁, 便于日常管理与维护。然而, 在针对高速公路场站复杂污水环境的实际应用过程中, 该技术亦显现出若干待解决的问题与挑战。

表 1 生物接触氧化法的典型性能参数

参数	数值范围	备注
COD 去除率 (%)	60~75	受污水成分影响较大
BOD 去除率 (%)	50~70	有机物负荷高时效果下降
出水悬浮物浓度 (mg/L)	30~50	无法完全去除悬浮颗粒
污泥产量 (kg/m ³)	0.5~0.7	需处理的污泥量较大
能耗 (kWh/m ³)	0.5~0.7	对电力资源依赖性强

在高速公路场站, 污水种类繁多且变化显著, 涵盖了餐饮废水、卫生间废水及车辆清洗废水等多种类型。此类污水中, 油脂、化学清洁剂以及微塑料等高浓度污染物并存, 导致采用生物接触氧化法进行处理的效果表现出显著的不稳定性^[2]。特别是在应对高浓度有机物负荷时, 该技术的去除效能出现明显下降, 尤其是在针对化学需氧量 (COD) 和生物需氧量 (BOD) 等关键水质指标的处理上, 出水水质往往难以达到环境保护部门所规定的排放标准。

1.2 活性污泥法在复杂污水处理中的局限性

活性污泥法, 作为污水处理领域内一种广泛采用的技术手段, 其核心在于利用活性污泥的生物降解特性, 对污水中的污染成分进行有效分解, 转化为危害性较低的物质 (见

表 2)。然而，在将该方法应用于高速公路场站污水处理的实践中，我们也遭遇了一系列挑战与问题。

表 2 活性污泥法在高速公路场站的应用效果

参数	数值范围	备注
COD 去除率 (%)	70~85	处理高浓度有机物时表现较好
BOD 去除率 (%)	60~80	需较长停留时间
出水氨氮浓度 (mg/L)	15~25	对氨氮去除不完全
污泥沉降比 (SV30) (%)	20~30	容易产生污泥膨胀
运行成本 (元 /m ³)	1.2~1.5	对能源和药剂消耗较大

活性污泥法面临的主要挑战源自其对操作条件的极端敏感性。在高速公路场站等特定应用场景下，由于污水流量波动显著且水质构成复杂，该技术在承受高负荷运行时，常遭遇污泥膨胀、处理效率衰减等困境^[3]。更需注意的是，活性污泥法在运行过程中会产生大量污泥，其后续的处理与处置环节构成了不容忽视的经济压力。

2 膜生物反应器技术在高速公路场站的应用优势

2.1 膜生物反应器技术的基本原理与结构特点

膜生物反应器（MBR）技术，作为一种创新的污水处理手段，巧妙融合了膜分离技术与传统的活性污泥法（见表 3）。其核心理念在于，通过精密的膜组件装置，实现污水中活性污泥与经净化处理后的清水的有效分离，从而显著提升出水水质标准。MBR 系统结构严谨，主要由生物反应器和膜组件两大核心部件构成^[4]。其中，生物反应器扮演着关键角色，负责高效去除污水中的有机污染物；而膜组件则承担着截留活性污泥及固体颗粒的重要任务，确保出水清澈透明。

表 3 膜生物反应器的技术参数与性能指标

参数	数值范围	备注
COD 去除率 (%)	85~95	高效去除有机污染物
BOD 去除率 (%)	90~98	出水水质优于传统方法
出水悬浮物浓度 (mg/L)	< 5	出水质量接近饮用水标准
膜通量 (L/m ² ·h)	10 月 30 日	需定期清洗维护
能耗 (kWh/m ³)	1.0~1.5	相对较高，但处理效果好

MBR 技术的显著优势在于其能够大幅度增强污水处理的稳定性及提升出水水质至高标准。通过膜组件的精密运作，出水中的悬浮物及病原微生物被近乎彻底地去除，使得出水质量趋近于饮用水标准，这一特性在环境敏感区域的高速公路场站中显得尤为重要。此外，MBR 系统具备结构紧凑的特点，显著减少了占地面积，因此尤其适用于土地资源紧张的场站环境。

2.2 膜生物反应器技术在污水处理中的具体应用实例

在江苏省某高速公路服务区，采用了先进的膜生物反应器（MBR）技术，以高效处理该场站每日产生的污水。

该服务区日均污水处理量达到 800m³，污水成分复杂，主要包括餐饮废水、卫生间废水以及车辆清洗废水。鉴于传统生物接触氧化法在处理此类复杂污水时的局限性和出水质量的不稳定性，我们决定引入 MBR 技术^[5]。

自 MBR 技术实施以来，污水处理效果得到了显著提升。经过 MBR 系统处理，出水中的化学需氧量（COD）从原有的 300mg/L 显著降低至 20mg/L 以下，生物需氧量（BOD）也由 150mg/L 大幅下降到 5mg/L 以下，氨氮的去除率更是超过了 90%。这些指标均表明，出水质量已完全达到并优于国家一级 A 排放标准。此外，MBR 系统的运行表现极为稳定，未出现污泥膨胀或膜污染等常见问题，确保了长期稳定的污水处理效果。在成本控制方面，MBR 技术的运行成本被有效控制在 1.5 元 /m³ 以内，相比传统处理方法，其运行费用降低了约 20%，展现出了显著的经济效益和环保优势。

3 反渗透技术在高速公路场站污水处理中的应用

3.1 反渗透技术的工作原理与应用领域

反渗透（RO）技术，作为一种在水处理领域广泛应用的分离技术，其核心原理在于利用高压促使水分子穿透半透膜，从而实现将溶解于水中的离子、分子及微生物等各类污染物有效拦截于膜的一侧，而纯净的水分子则顺利穿越膜层并被收集（见表 4）。该技术最初主要应用于海水淡化及饮用水处理领域，近年来，随着技术的不断进步与应用的深入探索，反渗透技术已逐渐拓展至污水深度处理及废水回用等更为广泛的领域。

表 4 反渗透技术的技术参数与性能指标

参数	数值范围	备注
脱盐率 (%)	95~99	高效去除溶解性盐类
出水电导率 (μS/cm)	< 50	出水质量接近饮用水标准
膜通量 (L/m ² ·h)	20~40	需根据进水水质调整
运行压力 (MPa)	4 月 7 日	能耗较高
能耗 (kWh/m ³)	2.5~4.0	需合理配置能量回收装置

3.2 反渗透技术在高速公路场站污水处理中的实际应用

在浙江省某一高速公路服务区，反渗透（RO）技术被正式引入并应用于污水深度处理系统之中。该服务区每日平均处理污水量达到 1000m³，污水首先经过初步处理阶段，包括沉淀与过滤等工艺，随后进入 RO 系统进行深度净化处理。RO 系统的主要功能在于高效去除污水中的溶解性盐类成分以及微量有机物，确保出水水质达到极高标准，其电导率稳定维持在 30 微西门子每厘米以下，完全符合饮用水水质要求，进而被安全应用于服务区内的绿化灌溉及道路清洗等场合^[6]。

此项目成功实施 RO 技术后，不仅实现了出水水质的显著提升，还有效减少了污水对外环境的排放量，促进了污

水的资源化循环利用。尽管 RO 系统的运行能耗相对较高,但通过精心设计与配置能量回收装置,如压力交换器等,成功将单位能耗降低至 2.8kWh/m^3 ,显著降低了整体运营成本。此外,RO 系统具备操作简便、自动化程度高的特点,非常适宜在无人值守的场站环境中稳定运行。

4 高速公路场站污水处理技术升级的策略研究

4.1 优化膜生物反应器技术的综合应用

膜生物反应器 (MBR) 技术在污水处理领域已经得到了广泛应用,尤其在高速公路场站等处理负荷波动大、污水成分复杂的环境中展现了独特的优势 (见图 1)。然而,随着处理要求的提高和膜污染问题的突出,MBR 技术的应用也面临挑战。因此,优化 MBR 技术的综合应用显得尤为重要。



图 1 膜生物反应器技术

膜材料的改进是提升 MBR 技术的关键所在。现代高速公路场站污水的复杂性和多样性对膜材料提出了更高的要求。耐污性能强的膜材料能够显著降低膜污染的频率,延长膜的使用寿命,减少清洗和更换的次数。目前,市场上出现的许多新型膜材料,如纳米涂层膜和疏水性膜材,正逐步被应用于 MBR 系统中。这些材料通过物理和化学性能的优化,能够更好地抵抗污堵现象,减少因油脂、微生物和悬浮固体等引起的膜污染。进一步的研发工作还在持续进行,目标是开发出既具有优异耐污性能又能保持较高膜通量的新型材料,以满足高速公路场站高效污水处理的需求。

4.2 提高反渗透系统的处理效率

反渗透 (RO) 技术作为污水深度处理的核心技术之一,在提高污水处理出水质量方面具有不可替代的作用 (见图 2)。然而,RO 技术在实际应用中面临高能耗和膜污染的挑战,需要通过技术优化来提高系统的处理效率和经济性。能量回收技术的引入是降低 RO 系统能耗的有效措施。RO 系统运行时需要施加高压以推动水分子通过膜,这一过程消耗大量能源。通过安装能量回收装置,如压力交换器,可以将 RO 系统排放的高压浓水中的能量回收并重新用于进水加压,从而大幅降低系统的总能耗。这项技术已经在海水淡化和一些工业废水处理领域得到了成功应用,在高速公路场站污水处理中同样具有广阔的应用前景。通过有效的能量回收,RO 系统的能耗可以降低 20%~30%,显著减少了运营成本,使得 RO 技术在污水深度处理中的经济性大幅提高。



图 2 反渗透技术

膜污染控制是提高 RO 系统运行稳定性的关键因素。高速公路场站污水中含有大量悬浮颗粒、微生物和有机物,这些污染物极易在膜表面积聚,导致膜通量下降和脱盐率降低^[7]。为减少膜污染,必须在 RO 系统前端增设有效的预处理工艺,如超滤或纳滤,以去除大部分悬浮物和大分子有机物,降低污染物负荷。此外,定期进行膜清洗,如物理清洗 (反冲洗) 和化学清洗 (酸碱清洗),也是防止膜污染的必要手段。通过这些措施,RO 系统的膜使用寿命可以显著延长,运行效率得以维持在较高水平,确保出水质量和系统稳定性。

4.3 集成多技术协同处理系统的创新方案

单一的污水处理技术在面对复杂和多变的污水成分时,往往难以达到理想的处理效果 (见图 3)。为此,将多种先进污水处理技术进行集成和协同应用,可以显著提高处理系统的综合性能,实现更高的污水处理标准。针对高速公路场站污水处理的实际需求,集成 MBR、RO 和其他辅助处理技术的协同处理系统成为技术升级的创新方向^[8]。

MBR 与 RO 技术的组合应用在污水深度处理和回用方面具有极大的优势。MBR 技术负责去除污水中的大部分有机污染物和悬浮固体,使出水达到较高的净化水平,然后再通过 RO 系统进行深度脱盐和纯化,确保出水达到回用水标准。这样的组合应用不仅大幅提高了出水水质,还可以减少 RO 系统的负荷,降低其运行压力和能耗,延长膜的使用寿命。此外,通过在 MBR 与 RO 之间增设中间处理单元,如活性炭过滤、氧化处理等,可以进一步去除残余的有机污染物和微量污染物,确保出水的高纯度和稳定性。



图 3 集成多技术

多技术协同处理系统的集成还可以根据不同的污水特性和处理需求进行灵活配置。例如,在某些高速公路场站,污水中含有较高的重金属或特定的有毒物质,这些污染物难以通过 MBR 或 RO 系统完全去除。为此,可以引入化学沉淀、离子交换或高级氧化等处理单元,与 MBR 和 RO 系统协同工作,针对性地去除这些难处理的污染物,确保系统的处理效果和出水质量。这种灵活的系统集成方案不仅提高了污水处理的适应性和可靠性,还为不同场站提供了定制化的技术解决方案。

5 结语

高速公路场站污水处理技术的升级,作为保障环境保护与可持续发展战略的核心举措,具有举足轻重的意义。通过集成应用膜生物反应器(MBR)与反渗透(RO)等前沿科技手段,我们能够显著增强污水处理的效能与出水水质的优化,并有效缩减运营成本。为持续推动污水处理技术的革新与进步,我们强烈建议加大对相关技术领域的研发投资力度,尤其应聚焦于低成本、高效率膜材料的探索与开发。此外,为确保污水处理系统的高效稳定运行,加强对操作人员的专业技能培训与技术指导亦是不可或缺的一环。

参考文献:

- [1] 周德柱,刘煌,胡燕,等.高速公路服务区污水处理现状问题及应对策略浅析[J].公路交通技术,2020,36(6):131-136.
- [2] 王永辉.高速公路服务区污水处理与应用探析[J].科技经济导刊,2020,28(8):118.
- [3] 张东亮.污水处理工艺与技术在高速公路服务区的应用[J].湖南交通科技,2019,45(1):158-161.
- [4] 孙立明,侯天磊,丁铮铮.一种污水处理场站用污泥脱水设备:CN202120937455.1[P].CN214693811U[2024-08-13].
- [5] 朱金才.一种场站式一体化生活污水处理装置:CN202021865931.5[P].CN214528565U[2024-08-13].
- [6] 高杨,卿小燕,蒋汶江,等.云南高速公路服务区智能化污水处理技术及应用[J].交通节能与环保,2021,17(6):4.
- [7] 张彩芹,张伟,王波,等.污水处理渣制备过磷酸钙技术研究[J].硫磷设计与粉体工程,2022(2):1.
- [8] 王艳萍.污水站有机废气处理工艺与测试研究[J].环境与发展,2020,32(5):2.

作者简介: 付相波(1985-),男,中国贵州贵阳人,本科,工程师,从事建筑工程研究。