

MBBR工艺对低浓度飞机除冰废水的处理效果研究

崔晓宇^{1*}, 张涛², 万晓红^{1#}, 代学民²

¹中国水利水电科学研究院, 水生态环境研究所, 北京

²河北建筑工程学院市政与环境工程系, 河北 张家口

收稿日期: 2026年1月27日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年2月27日

摘要

为解决南方低浓度飞机除冰废水的治理难题, 针对现有方法能耗或成本偏高的局限, 本研究开展MBBR工艺小试与中试试验。小试采用Kaldnes K5填料, 经三阶段驯化, 控制溶解氧(DO)浓度2~4 mg/L、填料填充比40%, 化学需氧量(COD)平均去除率达82.6%, 总氮(TN)去除率多数时段超90%; 中试采用薯片填料与“缺氧池 + 好氧池”工艺, 处理实际废水时COD去除率稳定在78.88%~82.50%, 验证了规模放大可行性。该工艺依托分层生物膜与三相流化优势实现高效处理, 为工程化应用提供数据支撑。

关键词

飞机除冰废水, MBBR, 悬浮生物载体, COD_{cr}

Study on the Treatment Effect of MBBR Process on Low-Concentration Aircraft Deicing Wastewater

Xiaoyu Cui^{1*}, Tao Zhang², Xiaohong Wan^{1#}, Xuemin Dai²

¹Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

²Department of Municipal and Environmental Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou Hebei

Received: January 27, 2026; accepted: February 20, 2026; published: February 27, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 崔晓宇, 张涛, 万晓红, 代学民. MBBR 工艺对低浓度飞机除冰废水的处理效果研究[J]. 世界生态学, 2026, 15(1): 220-227. DOI: 10.12677/ije.2026.151023

Abstract

To solve the treatment problem of low-concentration aircraft deicing wastewater in southern China and address the limitations of high energy consumption or cost of existing methods, this study conducted lab-scale and pilot-scale experiments on the MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) process. For the lab-scale test, Kaldnes K5 carriers were used, and after three-stage acclimation, the dissolved oxygen (DO) concentration was controlled at 2~4 mg/L with a carrier filling ratio of 40%. The average chemical oxygen demand (COD) removal rate reached 82.6%, and the total nitrogen (TN) removal rate exceeded 90% in most periods. For the pilot-scale test, potato chip-shaped carriers and the “anoxic tank + aerobic tank” process were adopted. When treating actual wastewater, the COD removal rate remained stable at 78.88%~82.50%, verifying the feasibility of scale-up. Relying on the advantages of layered biofilm and three-phase fluidization, the process achieves efficient treatment, providing data support for engineering application.

Keywords

Aircraft Deicing Wastewater, MBBR, Suspended Biological Carriers, CODcr

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着“十五五”规划内容的发布，我国对环境的治理仍持续重视，进一步推动全面绿色转型至关重要[1]。目前我国在机场飞机除冰废水的回收和治理上仍存在较大问题，大多数机场的飞机除冰废水具有成分复杂、污染浓度高、量大难处理的特点。若直接外排，会对周围环境造成危害[2]。根据现场调研，机场飞机除冰废水的浓度在区域上存在差异，大多数北方机场除冰废水 COD 含量较高，而南方机场 COD 浓度相对较低，造成该现象的原因为大多数机场没有有效的飞机除冰废水处理方法，除冰废水处于闲置状态，南方雨量较大致使除冰废水被稀释。

我国针对飞机除冰废水的处理设施具有实际应用的只有大兴机场，采用蒸馏法[3]，而其他机场在该方面较为薄弱。目前，针对飞机除冰废水的处理主要有蒸馏法、生物法、高级氧化法等[3]-[5]。蒸馏法对高浓度除冰废水的治理具有显著优势，但在低浓度上能耗较高[6]；生物法以及高级氧化法在低浓度飞机除冰废水的治理上具有显著优势，但高级氧化法的成本较高[7]。针对低浓度除冰废水的处理成本估算见表 1。

Table 1. Estimation table of treatment costs for low-concentration deicing wastewater by different processes

表 1. 不同工艺低浓度除冰废水的处理成本估算表

工艺	蒸馏法	生物法(MBBR)	高级氧化法
能耗估算(kWh/m ³)	80~120	0.3~0.9	25~40
成本估算(元/m ³)	45~70	8~15	30~50
主要依据与说明	低浓度下需蒸发大量水分，能耗极高，经济性差。	MBBR 典型能耗范围为 0.3~0.6 kWh/m ³ ，通过优化可进一步降低；综合处理成本参考一般工业废水生物处理范围。	以芬顿氧化等为代表，需投加药剂并消耗能量，运行成本较高[4]。

故本试验针对低浓度飞机除冰废水展开试验,采用就地处理的方式,使其出水达到工业污水排放标准(COD < 500 mg/L),排至市政管网[8]。通过对本试验的研究,以期对低浓度飞机除冰废水的治理提供参考借鉴。

2. 试验部分

2.1. 试验用水

本试验废水分为两部分,小试试验部分为某公司生产的I型飞机除冰液,稀释至 COD 为 1500~2000 mg/L;中试试验部分为实际低浓度飞机除冰废水。

2.2. 试验装置

试验分为小试试验以及中试试验,其具体装置如图 1 和图 2 所示。



Figure 1. Diagram of the laboratory-scale test device
图 1. 小试试验装置图



Figure 2. Diagram of the pilot-scale test device
图 2. 中试试验装置图

MBBR 小试处理装置由流体输送、反应、曝气、尾水收集单元组成,流体输送单元采用 BT100S-1-CE 精密蠕动泵(配 19#耐腐管)控进水流量;MBBR 反应单元为 40 L 透光耐碱塑料容器,填充 40% Kaldnes K5 填料,便于观察生物膜;反应器底部安装曝气装置 ACO-004 曝气机,控制反应器内溶解氧为 2~4 mg/L [9],并促填料流化;尾水收集采用 30 L PP 箱,设溢流、取样口便于采水,同时设排泥管。运行时,废水泵入容器,曝气促水与填料接触降解,尾水溢流至收集箱。

中试试验与小试试验主体工艺一致,为提高活性污泥浓度,填料改用薯片填料,同时池体采用“缺氧池 + 好氧池”联合工艺,池体容积约 1 吨。

2.3. 试验内容设计与关键工艺参数

MBBR 反应器采用分阶段驯化启动, 定向培养适配飞机除冰废水的功能微生物, 保障生物膜稳定性与降解活性。阶段 1 (1~3 天) 为闷曝驯化, 注入 COD 1000 ± 50 mg/L、C:N:P = 100:5:1 的葡萄糖模拟废水, 闭阀闷曝(DO 2~4 mg/L), 使市政污水厂好氧池接种污泥中的微生物附着于 Kaldnes K5 填料表面; 阶段 2 (4~7 天) 循环进水驯化, 保持水质不变, 以反应器有效容积 $1/2 \cdot h^{-1}$ 的流量循环, 强化微生物与填料动态接触, 促进生物膜生长; 阶段 3 (8~14 天) 实际废水驯化, 连续进水(初始 COD ≈ 1000 mg/L, HRT 8h), 逐步提升废水浓度, 待生物膜呈稳定棕褐色、COD 去除率连续 3 天 $\geq 60\%$, 判定驯化完成。

正式处理试验以实际除冰废水为对象, 维持曝气(DO 2~4 mg/L)与 40% 填料填充比稳定, 控制水力停留时间 24 h, 重点探究反应器对 COD 的去除效能。

小试试验与中试试验具体工艺参数见表 2。

Table 2. Comparison of process parameters between laboratory-scale test and pilot-scale test

表 2. 小试试验与中试试验工艺参数对比

参数类别	参数名称	小试试验	中试试验
反应器基本参数	有效容积(L)	40	1000
	运行温度(°C)	环境温度(15~25)	环境温度(7~18)
填料参数	填料类型	Kaldnes K5 (聚乙烯)	薯片填料(聚乙烯)
	比表面积(m ² /m ³)	800	>1000
	填充率(%)	40	40
水力与负荷参数	水力停留时间(HRT, h)	24	60
	体积负荷(kg / (m ³ ·d))	1.5	0.8
	回流比(%)	/	100~200 (沉淀池至缺氧池)
运行控制参数	溶解氧(DO, mg/L)	2~4 (好氧区) [9]	缺氧区 < 0.5; 好氧区 2~4
生物膜特性	MLVSS/MLSS	0.6~0.8	0.6~0.8

2.4. 测试项目与方法

针对低浓度(COD 为 2015 mg/L)飞机除冰废水的具体测量结果见表 3。

Table 3. Project detection table of low-concentration aircraft deicing wastewater

表 3. 低浓度飞机除冰废水项目检测表

测试项目	单位	结果
pH 值	—	6.5 (24.9°C)
化学需氧量(COD _{cr})	mg/L	2.01×10^3
乙二醇	mg/L	1.83×10^3
总氮(以 N 计)	mg/L	3.75
总磷(以 P 计)	mg/L	<0.005
氨氮(以 N 计)	mg/L	0.117
硝态氮(以 N 计)	mg/L	<0.005
亚硝态氮(以 N 计)	mg/L	<0.005

数据表明, 除冰废水中主要成分为 COD 以及总氮, 但总氮含量较少, 故测试项目只为 COD, 方法为 HJ/T 399-2007 (水质化学需氧量的测定快速消解分光光度法) [10]。

3. 结果与讨论

3.1. 小试试验

3.1.1. MBBR 对低浓度飞机除冰废水中 COD 的处理效果

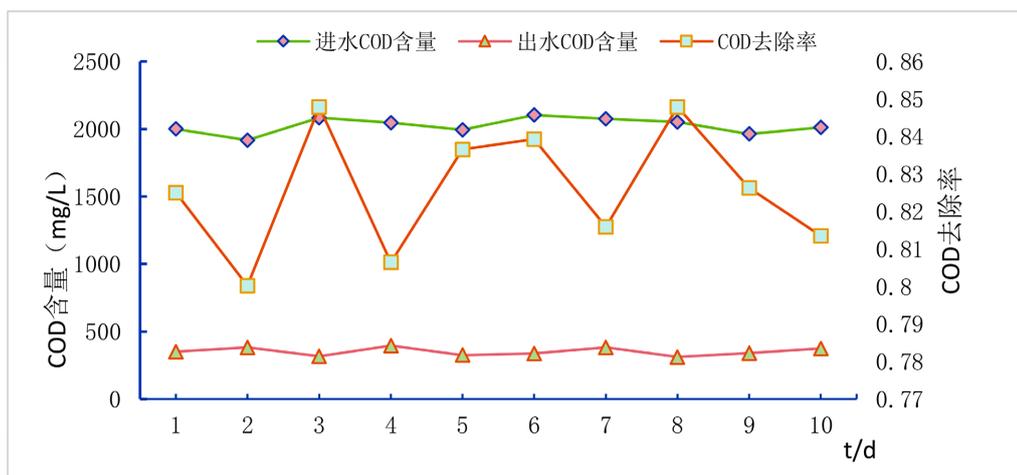


Figure 3. Graph of COD removal efficiency

图 3. COD 去除效率图

由图 3 稳定运行阶段监测数据可知, 进水 COD 浓度在 1917~2103 mg/L 区间小幅震荡, 出水 COD 浓度集中于 312~396 mg/L, COD 去除率维持在 80.0%~84.8%, 平均去除率达 82.6% [11]。MBBR 工艺处理低浓度飞机除冰废水时, 具有“进水波动、去除率较稳”的特点。主要是由于 Kaldnes K5 填料表面形成“好氧-兼性-厌氧”分层结构的成熟生物膜体系, 富集的乙二醇降解菌可合成特异性酶系, 通过“乙二醇→乙酸→三羧酸循环”的完整代谢链实现污染物高效矿化[12]; 同时, 40%的填料填充比使填料在曝气作用下形成“气-液-固”三相流化体系, 既打破生物膜表面扩散边界层加速传质。

3.1.2. MBBR 对低浓度飞机除冰废水中 TN 的处理效果

根据图 4 可知, MBBR 工艺对飞机除冰废水中总氮(TN)的处理过程中, 运行期内进水 TN 为 8.54~10.55 mg/L, 对应的出水 TN 则稳定在 0.61~1.24 mg/L 区间, TN 去除率以 87.53%为基准, 多数运行时段稳定在 90%以上, 后期最高可达 93.10%。

这一稳定高效的表现, 源于稳定运行下生物膜体系的成熟代谢与碳氮协同效应: 经前期驯化后的 Kaldnes 填料表面, 已形成结构稳定的“好氧-兼性”分层生物膜—好氧层的氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂-B)活性持续稳定, 可高效将进水氨氮(除冰废水 TN 核心组分)转化为硝态氮[13]; 兼性层反硝化菌则依托废水中残留的乙二醇(碳源), 持续完成反硝化脱氮, 碳氮比的适配性已趋于稳定, 保障了脱氮代谢的连续性。同时, 流化状态的填料持续打破生物膜表面扩散边界层, 确保 TN 底物与功能菌的充分接触, 避免了局部传质受限问题[14]。

3.2. 中试试验

中试试验依托小试试验基础, 试验用水为中部某机场实际飞机除冰废水, 模仿处理废水现场试验条

件。其处理数据如图 5 所示。

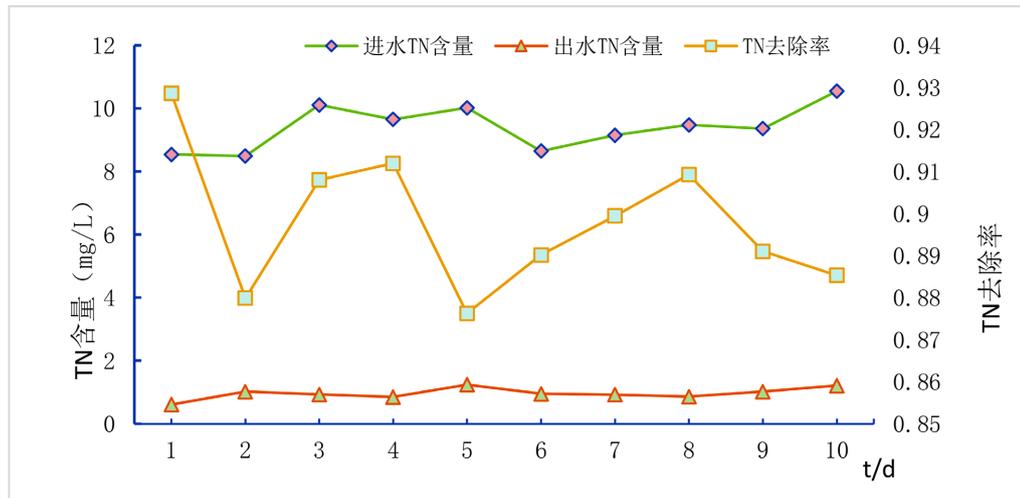


Figure 4. Graph of TN removal efficiency

图 4. TN 去除效率图

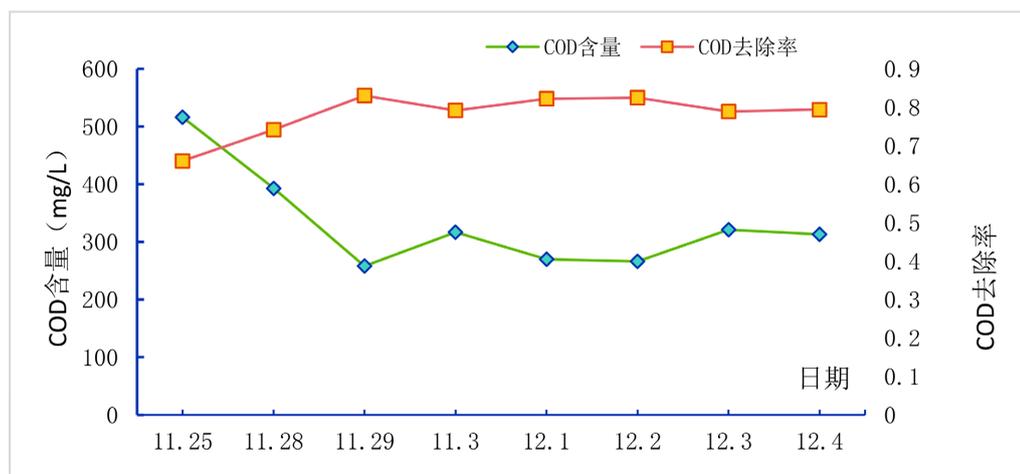


Figure 5. Graph of COD removal efficiency

图 5. COD 去除效率图

如图 5 所示,为 MBBR 工艺在中试阶段(11.25~12.4)处理低浓度飞机除冰废水的 COD 效率图,11 月 25 日中试数据测量时,驯化的生物膜量较少,以乙二醇降解菌为核心的功能菌群代谢活性暂未达峰值,故 COD 去除率为 74.14%;随运行推进,薯片填料在中试反应器内的流化状态趋于均匀,气-液-固三相传质效率逐步优化,功能菌群完成空间分布调整与乙醇脱氢酶等降解酶的活性恢复,对除冰废水中主导 COD 的乙二醇降解效率提升,至 11 月 29 日出水 COD 降至 258 mg/L, COD 去除率升至 79.14%;12 月 1 日之后,出水 COD 维持在 266~321 mg/L 区间小幅波动、COD 去除率稳定在 78.88%~82.50% 的范围。

该中试数据直观验证了 MBBR 工艺从试验室小试到中试规模试验的可行性,其在中试工况下仍能实现低浓度除冰废水 COD 的较处理好,为后续工程化应用提供了直接的中试级数据支撑。

根据试验数据推算,若某机场的低浓度飞机除冰废水年处理量为 100 吨,则设计采用序批式 MBBR

工艺。核心在于将废水分为多批次处理,以克服极小流量下连续流运行不稳定的问题;生物膜面积负荷为 $5 \text{ g COD}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。经物料衡算,设计反应器有效容积为 30 m^3 ,投加薯片填料约 1.14 吨,总占地面积约 $30 \sim 35 \text{ m}^2$ 。处理全过程预估能耗约 336.6 kWh ,折合单位处理成本约 7.7 元/吨。工程实施需重点关注反应器保温加热、自动批次控制及启动驯化策略,以确保在季节性运行条件下实现稳定高效处理,为同类小规模、间歇性高浓度有机废水处理提供了可量化的工程参考。

4. 总结与展望

MBBR 工艺对低浓度飞机除冰废水具有较好的处理效能,小试与中试试验均验证了其技术可行性。小试阶段,在进水 COD 浓度 $1917 \sim 2103 \text{ mg/L}$ 、TN 浓度 $8.54 \sim 10.55 \text{ mg/L}$ 的条件下,COD 平均去除率达 82.6%,TN 去除率多数时段在 90% 以上,最高可达 93.10%;中试阶段处理实际低浓度飞机除冰废水时,COD 去除率为 $78.88\% \sim 82.50\%$,展现出良好的规模放大效应。

在技术方向可尝试将 MBBR 工艺与预处理或深度处理单元耦合,例如构建“预处理-MBBR-臭氧氧化”联合工艺,实现对高浓度除冰废水的高效处理,完善全浓度梯度除冰废水处理技术体系。同时可深入解析生物膜内功能微生物(如乙二醇降解菌、氨氧化菌)的代谢机制与菌群互作关系,明确关键降解酶的作用路径,为工艺参数优化与高效菌种筛选提供理论支撑。

基金项目

国家重点研发计划“飞机除冰废水高效回收利用技术及道面除冰液生物安全性研究”(2022YFB2602005)。

参考文献

- [1] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2025.
- [2] Corsi, S.R., et al. (2022) A Discrete-Event Simulation Tool for Airport Deicing Activities: Dallas-Fort Worth International Airport. *Simulation*, **98**, 501-517.
- [3] 路海锋, 崔伟. 北京大兴国际机场除冰废水处理及再生系统设计应用[J]. 给水排水, 2022, 58(S2): 273-276.
- [4] 魏芳, 庞宗宇, 赵强. Fenton 氧化法在飞机除冰废水处理中的研究进展[J]. 自然科学, 2022, 10(5): 728-741.
- [5] Darlington, C. and Kennedy, K.J. (1998) Biodegradation of Aircraft Deicing Fluid in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **33**, 339-351. <https://doi.org/10.1080/10934529809376735>
- [6] Lehto, J., Heikkinen, J., Kyllönen, H., Hakala, J. and Suomalainen, M. (2021) Purification of Spent Deicing Fluid by Membrane Techniques. *Water Science and Technology*, **84**, 2014-2027. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.406>
- [7] Wang, F., Wang, Z., Zhao, Y. and Zhang, J. (2024) Performance of Traditional and Emerging Water-Treatment Technologies in the Removal of Tetracycline Antibiotics. *Catalysts*, **14**, Article No. 269. <https://doi.org/10.3390/catal14040269>
- [8] 国家环境保护局. 污水综合排放标准: GB 8978-1996 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [9] Madan, S., Madan, R. and Hussain, A. (2022) Advancement in Biological Wastewater Treatment Using Hybrid Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR): A Review. *Applied Water Science*, **12**, Article No. 141. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01662-y>
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] Majid, A. and Mahna, M. (2019) Application of Lab-Scale MBBR to Treat Industrial Wastewater Using K3 Carriers: Effects of HRT, High COD Influent, and Temperature. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, **20**, 35-42. <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2019.20.556031>
- [12] Kawan, J.A., et al. (2016) A Review on Sewage Treatment and Polishing Using Moving Bed Bioreactor (MBBR). *Journal of Engineering Science and Technology*, **11**, 1098-1120.
- [13] Leyva-Díaz, J.C., González-Martínez, A., Muñoz, M.M. and Poyatos, J.M. (2015) Two-Step Nitrification in a Pure Moving Bed Biofilm Reactor-Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment: Nitrifying and Denitrifying Microbial

Populations and Kinetic Modeling. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **99**, 10333-10343.
<https://doi.org/10.1007/s00253-015-6894-5>

- [14] Kermani, M., *et al.* (2009) Biological Phosphorus and Nitrogen Removal from Wastewater Using Moving Bed Biofilm Process. *Iranian Journal of Biotechnology*, **7**, 19-27.