

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.15.010

多阴极室反硝化除磷产电装置启动运行研究

张立成^{1,2}, 于天宇¹, 张爽², 张巧艺³, 张馨方¹

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学规划建筑设计研究院, 辽宁 沈阳 110015; 3. 沈阳建筑大学 建筑与规划学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 多阴极室反硝化除磷产电装置中,将微生物燃料电池引入双污泥反硝化除磷工艺,以厌氧池作为微生物燃料电池的阳极室,以好氧池、二沉池、缺氧池和终沉池分别作为微生物燃料电池的阴极室。以模拟生活污水为处理对象,多阴极室反硝化除磷产电装置经过调控以后进入稳定运行状态,在60 d的测定周期中,对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均去除率分别为69.88%、62.31%和57.13%,最高去除率分别为80.44%、74.16%和64.86%,厌氧和好氧池、厌氧和二沉池、厌氧和缺氧池、厌氧和终沉池作为4组微生物燃料电池产生的电压和电流平均值分别为0.44、0.40、0.09、0.10 V和0.49、0.45、0.10、0.11 mA,最高电压分别达到了0.55、0.51、0.13、0.12 V。多阴极室反硝化除磷产电装置不仅增强了对生活污水中COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果,而且提高了产电性能。

关键词: 反硝化除磷产电; 多阴极室; 微生物燃料电池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)15-0052-07

Startup and Operation of Denitrifying Phosphorus Removal and Electrogenesis Device with Multi-cathode Chamber Treating Domestic Sewage

ZHANG Li-cheng^{1,2}, YU Tian-yu¹, ZHANG Shuang², ZHANG Qiao-yi³,
ZHANG Xin-fang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Shenyang Jianzhu University Urban Planning and Architectural Design Institute, Shenyang 110015, China; 3. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: In a multi-cathode denitrifying phosphorus removal and electrogenesis device treating simulated domestic sewage, principle of microbial fuel cell was introduced into the double sludge denitrifying phosphorus removal process, the anaerobic tank was served as anode of the microbial fuel cell, and the aerobic tank, secondary sedimentation tank, anoxic tank and final sedimentation tank were used as the cathode of the microbial fuel cell. After 60 days of debugging and operation of the multi-cathode chamber denitrifying phosphorus removal and electrogenesis device, average removal rates of COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ were 69.88%, 62.31% and 57.13%, respectively, and the maximum removal rates were 80.44%, 74.16% and 64.86%, respectively. The average voltages and currents

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(LJ2016017); 沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017013)
通信作者: 张立成 E-mail: zlclicheng@sina.com

曝气泵连接着微孔曝气砂头通入池底。阴极和阳极采用富集有大量微生物的碳毡作为电极,阴极和阳极外部分别通过铜导线连接高精度电阻箱,形成闭合回路。反应器在室内运行,用自制的底部有轮子的焊接铁架支撑装置。

1.2 实验方法

实验用水为人工配制的模拟生活污水,主要配水药剂和用量:NaAc(以COD计)为81.08~196.19 mg/L, NH_4Cl (以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 计)为23.35~32.88 mg/L, KH_2PO_4 (以 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 计)为5.83~8.84 mg/L, NaHCO_3 为35.00 mg/L, CaCl_2 为0.03 g/L, MgSO_4 为0.02 g/L, 营养液为0.10 mL/L。其中,NaAc、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 分别为模拟污水提供有机碳源、氮源和磷源, NaHCO_3 用于调节pH值。配水COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的平均值分别为148.34、26.50、7.13 mg/L, pH值为6.71~7.62, 平均为7.18。营养液主要成分包括0.15 g/L的 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.13 g/L的 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、1.30 g/L的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.15 g/L的 H_3BO_3 、0.02 g/L的KI、0.13 g/L的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、10.00 g/L的EDTA和0.02 g/L的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。

实验污泥取自抚顺市三宝屯污水处理厂,以人工配制污水进行连续培养,实验装置全天不间断运行。实验装置调试运行期间,进水流量为60 L/d,其中厌氧池阳极室和缺氧池阴极室中MLSS为2000~3000 mg/L,好氧池阴极室中MLSS为3500 mg/L左右。控制缺氧污泥回流比、硝化污泥回流比和超越污泥的超越比分别为0.39、0.68和0.34。各池pH值控制在6.50~8.00,外接电阻为900 Ω ,离子交换膜为JCM2-阳离子交换膜,面积为0.01 m^2 。厌氧池阳极室、好氧池阴极室和缺氧池阴极室的溶解氧浓度分别为0.2、2.0~2.5和0.5 mg/L。好氧池阴极室、二沉池阴极室和缺氧池阴极室的水温均为25 $^\circ\text{C}$ 。厌氧池阳极室、缺氧池阴极室和好氧池阴极室的HRT分别为3~4、4~6和5~7 h。

1.3 检测项目及方法

本实验所有水样均先采用滤纸进行过滤,然后按照《水和废水监测分析方法》(第4版)中的相关方法进行检测。COD采用快速密闭催化消解法测定, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂光度法测定, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定, pH值采用pH计测定, DO采用溶解氧仪测定,氧化还原电位(ORP)采用

ORP检测仪测定,电压和电流采用UT-71D数字万用表测定。

1.4 多阴极室反硝化除磷产电装置的启动

实验用活性污泥从污水处理厂取回后为黄褐色,先将污泥静沉并排出上清液,然后进行30~40 d的污泥驯化,最后将驯化好的污泥分别置于各反应池中。

启动运行方式:人工配制的生活污水经过蠕动泵输送到厌氧池阳极室,厌氧池阳极室中的产电菌通过氧化作用将有机碳源分解,产生的电子通过外电路到达阴极室,以形成完整的闭合回路;产生的离子通过离子交换膜到达阴极室。与此同时,反硝化聚磷菌(DPAO)释放溶解性磷酸盐到水中,合成细胞储存物质聚- β -羟基丁酸酯(PHB),产生的能量用于自身代谢和反硝化除磷,此过程中表现为磷的释放。污水经过初沉池后抵达好氧池阴极室,在好氧池阴极室中硝化细菌通过硝化作用将氨氮转化为 $\text{NO}_x^- - \text{N}$, 然后污水流入二沉池阴极室, $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 被还原为 N_2 排出,之后流入缺氧池阴极室,反硝化聚磷菌以硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体进行吸磷过程,氮形成的气态化合物排出系统,达到同步脱氮除磷的目的。导线连接的阴、阳极能够形成完整的闭合外电路。

2 结果与讨论

2.1 MFC对反硝化除磷的影响

图2为有无MFC时对COD的去除效果。

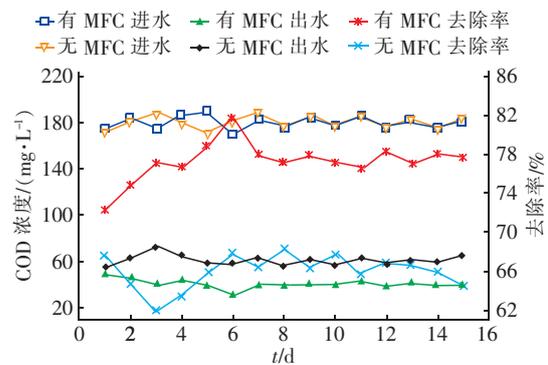


图2 有无MFC时对COD的去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD with or without MFC

从图2可以看出,有MFC的反硝化除磷工艺中进水COD浓度为171.34~189.52 mg/L,平均值为180.47 mg/L,平均出水COD为40.97 mg/L,平均去除率为77.30%;无MFC的反硝化除磷工艺的进水

COD 为 171.83 ~ 189.73 mg/L, 平均值为 180.79 mg/L, 平均出水 COD 为 61.53 mg/L, 平均去除率为 65.98%。可见, 有 MFC 的反硝化除磷工艺对 COD 的去除效果比无 MFC 的要好, 平均去除率高出 11.32%。分析原因, 可能是因为在有 MFC 的反硝化除磷工艺中, MFC 在将化学能转变为电能的过程中, 需要消耗水中的有机物, 这就使得反硝化除磷工艺中没有处理的有机物被 MFC 利用, 因此进一步提高了水中污染物的去除率。

图 3 为有无 MFC 时对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果。可以看出, 有 MFC 的反硝化除磷工艺中进水氨氮为 26.23 ~ 29.11 mg/L, 平均值为 27.69 mg/L, 平均出水氨氮为 8.72 mg/L, 平均去除率为 68.49%; 无 MFC 反硝化除磷工艺中进水氨氮为 26.31 ~ 29.12 mg/L, 平均值为 27.73 mg/L, 平均出水氨氮为 11.02 mg/L, 平均去除率为 60.27%。可见, 有 MFC 反硝化除磷工艺对氨氮的去除效果比无 MFC 的去除效果略微妙, 平均去除率高出 8.22%。分析原因, 可能是因为在有 MFC 的反硝化除磷工艺中, MFC 的阴极会以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为电子受体将化学能转化为电能, 在这一过程中消耗水中的含氮有机物, 从而进一步提高了对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除。

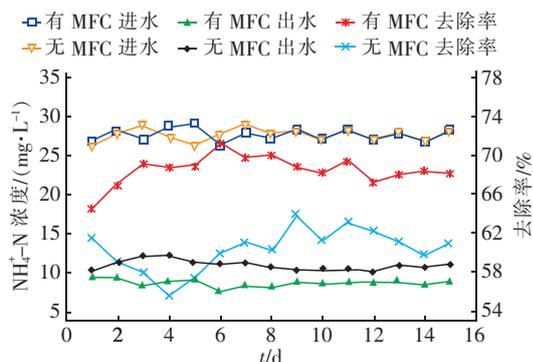


图 3 有无 MFC 时对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ with or without MFC

图 4 为有无 MFC 时对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果。可知, 有 MFC 的反硝化除磷工艺中进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 6.52 ~ 7.34 mg/L, 平均值为 6.94 mg/L, 平均出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 2.59 mg/L, 平均去除率为 62.54%; 无 MFC 的工艺中进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的浓度为 6.18 ~ 6.97 mg/L, 平均值为 6.65 mg/L, 平均出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 2.93 mg/L, 平均去除率为 55.12%。可见, 有 MFC 的反硝化除磷工艺对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除

率比无 MFC 的略高, 平均去除率高出 7.42%。分析原因, 可能是因为在有 MFC 的反硝化除磷工艺中, MFC 的阴极会将 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 当作电子受体进行电能转化, 也有可能 MFC 在阳极需要消耗营养物质, 其中一部分 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 被去除, 所以有 MFC 的反硝化除磷工艺对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率略高。

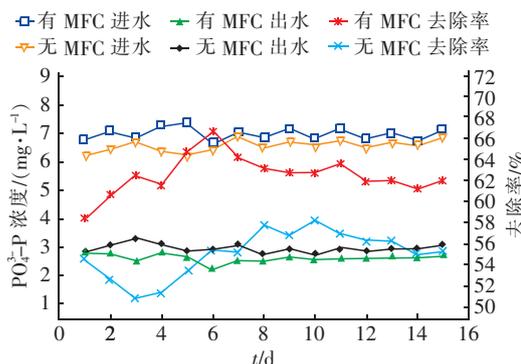


图 4 有无 MFC 时对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ with or without MFC

综上所述, 有 MFC 存在时, 反硝化除磷工艺对污水中 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果明显提高。因此, 接下来分析有 MFC 的反硝化除磷工艺, 即多阴极室反硝化除磷产电工艺对 COD、氨氮和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果和产电性能。

2.2 对 COD 的去除效果

多阴极室反硝化除磷产电装置对 COD 的去除效果如图 5 所示。可以看出, 系统对 COD 的去除效果显著。系统进水 COD 浓度为 81.08 ~ 196.19 mg/L, 平均值为 148.34 mg/L, 且浓度变化范围较小, 为该系统中的微生物提供了持续的碳源并创造了稳定的生长代谢环境。在装置启动运行以后, 对 COD 的去除率逐渐升高, 出水 COD 浓度逐渐下降, 但在 24 d 左右时, COD 去除率有所波动, 出现这种状态的原因可能是反硝化聚磷菌和产电菌还没有成为绝对优势菌种, 使系统运行不够稳定。在装置运行过程中, COD 出水浓度为 20.91 ~ 60.87 mg/L, 平均出水 COD 浓度为 43.50 mg/L, 系统对 COD 的去除率为 52.26% ~ 77.40%, 平均去除率为 69.88%, 系统运行稳定后, 对 COD 的去除效果比较平稳, 去除率基本维持在 71.54% ~ 77.40%, 对 COD 的去除效果良好。分析原因, 在厌氧条件下, 反硝化除磷工艺中反硝化聚磷菌 (DPAO) 以碳源作为电子供体促进胞内聚合物如 PHB 的合成, 然后在缺氧条件下, DPAO

使用存储在体内的 PHB 进行脱氮除磷,有机物合成 PHB 进行释磷,在这一过程中,污水中 COD 得以去除,同时在 MFC 中电活性细菌催化氧化污水中的有机底物,这一过程可去除污水中的 COD。

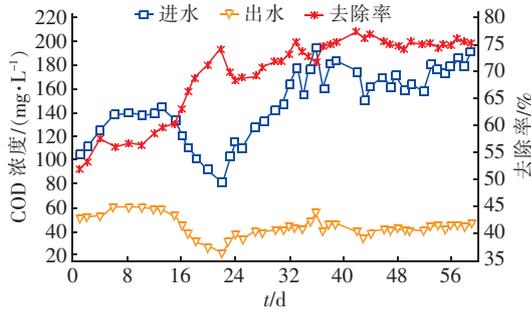


图5 对 COD 的去除效果

Fig. 5 Removal effect of COD

2.3 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

在好氧池阴极室中,通过硝化细菌的硝化作用将氨氮转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 或者 $\text{NO}_2^- - \text{N}$;然后在二沉池阴极室中,通过还原反应将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 或 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 还原成 N_2 ,排出反应器;最后在缺氧池阴极室中,反硝化除磷菌进行同步脱氮除磷,达到脱氮的效果。图6为多阴极室反硝化除磷产电装置对氨氮的去除效果。

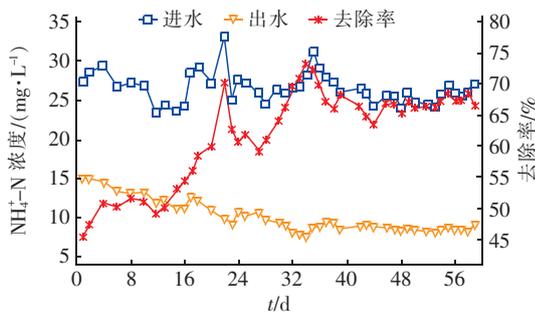


图6 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

Fig. 6 Removal effect of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

从图6可知,随着装置的持续运行,对氨氮的去除效果逐渐升高,然而在第26天时,系统对氨氮的去除率有所下降,但继续连续运行6d后,对氨氮的去除效果达到了稳定状态,整体上对于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除没有产生较大影响。运行阶段,进水氨氮浓度为 23.35 ~ 32.88 mg/L,平均值为 26.50 mg/L,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 7.55 ~ 14.99 mg/L,平均值为 9.97 mg/L,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 45.31% ~ 74.16%,平均去除率为 62.31%,去除效果较显著。连续运行 32 d 后,系统趋于稳定,平均出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度

为 8.53 mg/L,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率为 63.32% ~ 74.16%。分析原因,在好氧条件下,反硝化除磷工艺通过硝化细菌的硝化作用去除污水中的氨氮,同时,MFC 系统通过提高电子循环速率,提高了微生物对氨氮的代谢效率^[8],MFC 以污水中的氨氮为能源,催化氧化了污水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,两者结合,去除了污水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。综上,系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果良好。

2.4 对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果

系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果如图7所示。可知,随着装置的连续运行,系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果逐渐提高,虽然在第25天时对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率下降,但整体来看对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果影响不大。进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 5.83 ~ 8.84 mg/L,平均值为 7.13 mg/L,出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为 2.33 ~ 5.27 mg/L,平均值为 3.06 mg/L,对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率为 41.74% ~ 64.86%,平均去除率为 57.13%,可见系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果十分明显。在装置连续运行 32 d 后,系统趋于稳定,平均出水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 2.74 mg/L,系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率稳定在 58.68% ~ 63.12%。分析原因,在缺氧条件下,反硝化除磷工艺通过反硝化聚磷菌去除污水中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,同时 MFC 以 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 为能源,催化氧化了污水中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,两者结合共同去除了污水中的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 。综上所述,稳定运行的多阴极室反硝化除磷产电系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果显著。

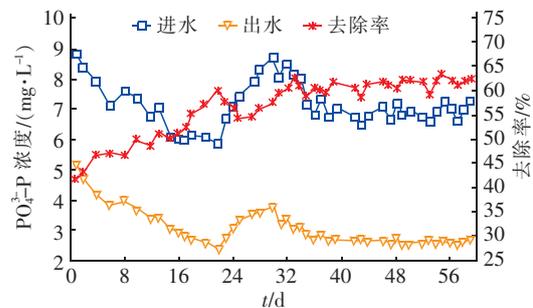


图7 对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果

Fig. 7 Removal effect of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

2.5 产电性能

好氧池阴极室的产电情况如图8所示。可以看出,随着装置的连续稳定运行,好氧池阴极室产生的电压和电流值逐渐升高,在第20天时,系统好氧池阴极室产生的电压下降,原因是进水中有有机底物

(COD)浓度降低,导致没有充足的营养物质供MFC使用,在底物浓度逐渐提高以后,好氧池阴极室产生的电压和电流值逐渐趋于稳定。运行过程中,好氧池阴极室产生的电压平均值为0.44 V,电流平均值为0.49 mA,功率密度平均值为21.93 mW/m²。第38天时,系统好氧池阴极室的产电性能达到稳定,产生的电压值为0.44~0.49 V,电流值为0.49~0.54 mA,功率密度为21.51~26.68 mW/m²。在运行过程中,系统好氧池阴极室产生的最大电压和电流分别为0.55 V和0.61 mA,最大功率密度为33.61 mW/m²。系统稳定运行后,好氧池阴极室产电性能良好。

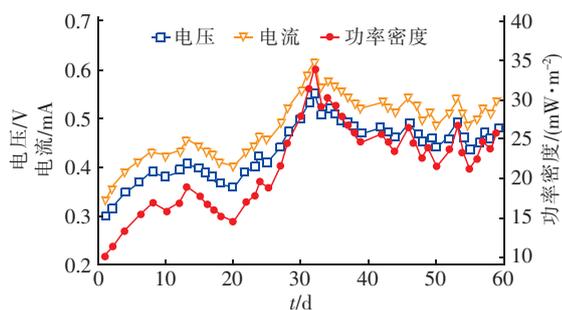


图8 好氧池阴极室的产电性能

Fig. 8 Electricity generation performance of cathode chamber of aerobic tank

二沉池阴极室的产电情况如图9所示。

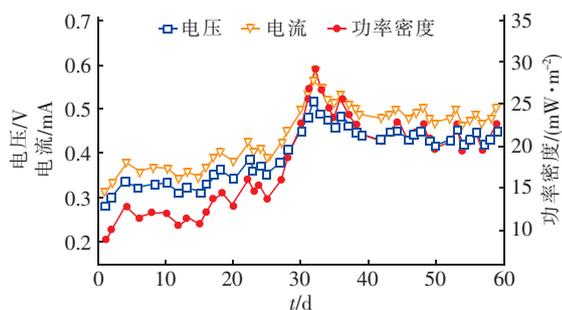


图9 二沉池阴极室的产电性能

Fig. 9 Electricity generation performance of cathode chamber of secondary sedimentation tank

从图9可知,二沉池阴极室的产电效果比较显著,随着装置的连续运行,产生的电压和电流逐渐升高,第32天时产生的电压和电流达到最大,分别为0.51 V和0.57 mA,最大功率密度为28.90 mW/m²。在第38天后,装置产生的电压和电流趋于稳定波动状态。运行过程中,二沉池阴极室产生的电压平均值为0.40 V,电流平均值为0.45 mA,功率密

度平均值为18.41 mW/m²。二沉池阴极室的产电性能达到稳定状态后,产生的电压值为0.42~0.45 V,电流值为0.47~0.50 mA,功率密度为19.60~22.50 mW/m²。

缺氧池阴极室和终沉池阴极室的产电性能如图10所示。

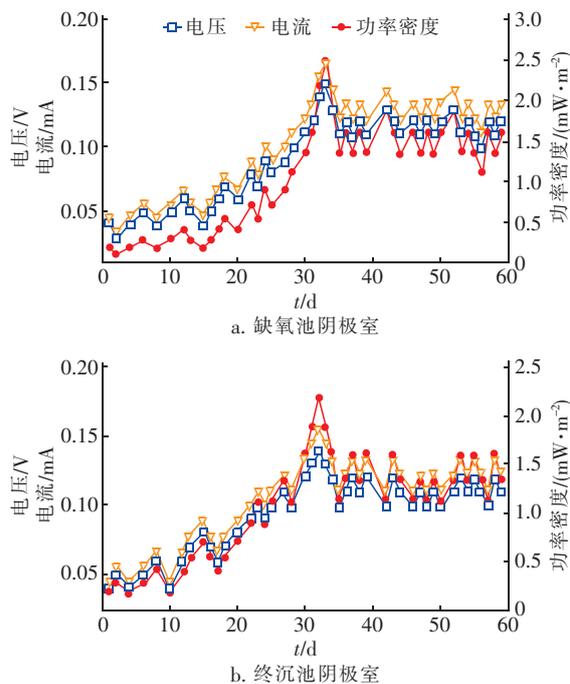


图10 缺氧池阴极室和终沉池阴极室的产电性能

Fig. 10 Electricity generation performance of cathode chamber of anoxic tank and final sedimentation tank

从图10可知,缺氧池阴极室和终沉池阴极室产生的电压和电流都比较小,所形成的功率密度也就比较小。随着装置的连续运行,缺氧池阴极室和终沉池阴极室的产电性能也稳定提高。缺氧池阴极室和终沉池阴极室产生的电压平均值分别为0.09和0.10 V,电流平均值分别为0.10和0.11 mA,功率密度分别为1.10和1.09 mW/m²。在第35天时,缺氧池阴极室和终沉池阴极室的产电性能达到稳定状态,产生的电压值分别为0.10~0.13和0.10~0.12 V,电流值分别为0.11~0.14和0.11~0.13 mA,功率密度分别为1.11~1.88和1.11~1.60 mW/m²。缺氧池阴极室和终沉池阴极室中的溶解氧含量比较低,其中缺氧池阴极室溶解氧含量为0.50 mg/L,缺氧池阴极室和终沉池阴极室产生电压和电流小的原因可能是:在厌氧池阳极室中通过产电菌的催化降解作用,所产生的H⁺通过离子交换

膜更容易与 O_2 结合生成水,从而导致电子从阳极室通过外电路更容易到达好氧池阴极室和二沉池阴极室。因此,阳极室产生的电子不容易到达阴极室(缺氧池和终沉池),从而导致缺氧池阴极室和终沉池阴极室的产电性能较低。

3 结论

① 有 MFC 存在的反硝化除磷工艺,即多阴极室反硝化除磷产电工艺对污水中 COD 、 $NH_4^+ - N$ 和 $PO_4^{3-} - P$ 的去除效果比较显著。

② 多阴极室反硝化除磷产电工艺能够有效去除生活污水中的污染物。在系统稳定运行期间,对 COD 的去除率为 71.54% ~ 77.40%,对 $NH_4^+ - N$ 的去除率为 63.32% ~ 74.16%,对 $PO_4^{3-} - P$ 的去除率为 58.68% ~ 63.12%。

③ 多阴极室反硝化除磷产电工艺稳定运行后,具有良好的产电性能。系统好氧池阴极室产生的电压值为 0.44 ~ 0.49 V,电流值为 0.49 ~ 0.54 mA,功率密度为 21.51 ~ 26.68 mW/m^2 ;系统二沉池阴极室产生的电压值为 0.42 ~ 0.45 V,电流值为 0.47 ~ 0.50 mA,功率密度为 19.60 ~ 22.50 mW/m^2 ;系统缺氧池阴极室和终沉池阴极室产生的电压值分别为 0.10 ~ 0.13 和 0.10 ~ 0.12 V,电流值分别为 0.11 ~ 0.14 和 0.11 ~ 0.13 mA,功率密度分别为 1.11 ~ 1.88 和 1.11 ~ 1.60 mW/m^2 。

参考文献:

- [1] Lv X M, Li J, Sun F Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal for simultaneous nitrogen and phosphorus removal from wastewater with low C/N ratios and microbial community structure analysis [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(4): 1890 - 1899.
- [2] 刘彬,李军,王晓爽,等. 后置反硝化 MBR 分段进水工艺脱氮除磷效能研究 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(1): 13 - 16.
Liu Bin, Li Jun, Wang Xiaoshuang, *et al.* Investigation on nitrogen and phosphorus removal in step-feed post-denitrification MBR [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(1): 13 - 16 (in Chinese).
- [3] Reza M, Cuenca M A. Nitrification and denitrifying phosphorus removal in an upright continuous flow reactor [J]. *Water Sci Technol*, 2016, 73(9): 2093 - 2100.
- [4] 王鲁宁,孙彩玉,王佳瑜,等. 连续流微生物燃料电池处理含重金属废水研究 [J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(5): 107 - 113, 125.
Wang Luning, Sun Caiyu, Wang Jiayu, *et al.* Continuous flow of microbial fuel cells for metal wastewater treatment and energy recovery [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(5): 107 - 113, 125 (in Chinese).
- [5] Santoro C, Arbizzani C, Erable B, *et al.* Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 356: 225 - 244.
- [6] He L, Du P, Chen Y Z, *et al.* Advances in microbial fuel cells for wastewater treatment [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71: 388 - 403.
- [7] 袁雅姝,李晓龙,张立成,等. 污水反硝化除磷产电装置启动研究 [J]. *可再生能源*, 2017, 35(9): 1279 - 1283.
Yuan Yashu, Li Xiaolong, Zhang Licheng, *et al.* Study on the start-up of denitrifying phosphorus removal and electrogenesis device treating sewage [J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(9): 1279 - 1283 (in Chinese).
- [8] 师奇,朱超,杨冰,等. 厌氧污泥接种双室微生物燃料电池去除氨氮的研究 [J]. *工业水处理*, 2017, 37(8): 36 - 40.
Shi Qi, Zhu Chao, Yang Bing, *et al.* Study on ammonia nitrogen removal using double-chambered microbial fuel cells inoculated with anaerobic sludge [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(8): 36 - 40 (in Chinese).



作者简介:张立成(1972 -),男,辽宁锦州人,博士,教授级高级工程师,硕士生导师,主要从事污水深度处理与再生利用研究。

E-mail: zlclicheng@sina.com

收稿日期:2019 - 05 - 06