

微生物燃料电池性能优化及微生物分析

王亚君^{1,2}, 孙亚红³, 廉静^{1,2}, 田秀蕾^{1,2}, 梁晓红^{1,2}, 郭建博^{1,2,4}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北省污染防治生物技术实验室, 河北石家庄 050018; 3. 石家庄市桥西污水处理厂, 河北石家庄 050091; 4. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384)

摘要: 为了进一步提高微生物燃料电池的运行性能, 提高硝酸盐降解率及改善电能输出情况, 以城镇污水处理厂二沉池污泥为接种源, 硝酸钠为电子受体运行典型单室空气阴极微生物燃料电池 (MFC)。以 1 g/L 无水乙酸钠、50 mmol/L 磷酸盐缓冲液为模拟废水成功启动 MFC, 运行稳定后, 通过碳源、碳氮比 (C/N)、硝酸盐浓度、温度 4 个因素来优化 MFC 运行性能。实验结果表明: 在温度为 30 ℃、无水乙酸钠为碳源、C/N=5:1、硝酸盐质量浓度为 200 mg/L 时 MFC 运行性能最佳, 硝酸盐去除率均可达到 90% 以上, 最大电压可达到 0.462 V。最佳状态下经 6 个周期运行, MFC 最高电压为 0.62 V, 功率密度高达 4.53 W/m²; 交流阻抗分析最佳运行状态下 MFC 内阻为 130 Ω, 扫描电镜观察到电极表面微生物种类及数量均明显增多。研究证明 MFC 可以作为含硝酸盐废水产能净化的有效技术。

关键词: 水污染防治工程; 微生物燃料电池; 参数优化; 脱氮; 电能输出

中图分类号: X522 **文献标志码:** A

Performance optimization and microbiological analysis of microbial fuel cell

WANG Yajun^{1,2}, SUN Yahong³, LIAN Jing^{1,2}, TIAN Xiulei^{1,2}, LIANG Xiaohong^{1,2}, GUO Jianbo^{1,2,4}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Shijiazhuang Qiaoxi Wastewater Treatment Plant, Shijiazhuang, Hebei 050091, China; 4. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to improve the operation performance of microbial fuel cells, improved the degradation rate of nitrate and the power output of microbial fuel cell, a typical single chamber air-cathode microbial fuel cell (AC-MFC) is inoculated and operated with urban sewage treatment plant clarifier sludge as inoculum source and sodium nitrate as electron acceptor. It is successfully started by synthetic wastewater containing a phosphate buffered nutrient solution (PBS, 50 mmol/L) and sodium acetate (1 g/L). After successful starting, the four factors of carbon source, C/N, nitrate concentration and temperature are considered to optimize the operation performance of MFC. The test result shows that the operation performance of MFC is best under the conditions of anhydrous sodium acetate as carbon source, C/N of 5:1, 200 mg/L nitrate concentration and at 30 ℃, and the degradation rate of nitrate reaches more than 90% and the voltage of MFC is 0.462 V. After 6 cycles of operation, the voltage and

收稿日期:2015-08-21; 修回日期:2015-11-09; 责任编辑:王海云

基金项目:国家自然科学基金(51208170); 河北省杰出青年科学基金(E2012208012); 河北省高校百名优秀创新人才支持计划(BR2-211); 河北省高等学校高层次人才科学研究项目(GCC2014045)

作者简介:王亚君(1991—), 女, 辽宁铁岭人, 硕士研究生, 主要从事水污染控制方面的研究。

通讯作者:郭建博教授。E-mail: jianbguo@163.com

王亚君, 孙亚红, 廉静, 等. 微生物燃料电池性能优化及微生物分析[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(3): 309-314.

WANG Yajun, SUN Yahong, LIAN Jing, et al. Performance optimization and microbiological analysis of microbial fuel cell[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 309-314.

power density of MFC reaches 0.62 V and 4.53 W/m². AC impedance analysis indicates that the MFC resistance is 130 Ω. Scanning electron microscopy of electrode surface illustrates that the number of microbial species are significantly increased. The results indicate that MFC can be an effective technology for nitrate contained wastewater treatment and energy production.

Keywords: water pollution prevention engineering; microbial fuel cell; parameter optimization; denitrification; electricity product

目前中国硝酸盐废水的排放已严重超出了水体的环境容量,大量硝酸盐废水渗入土地、流入河流中,污染土壤及水体^[1-2];水中过量的硝酸盐会严重危害人体健康,进入人体后硝酸盐会被还原成亚硝酸盐,同时将血液中的 Fe²⁺氧化为 Fe³⁺,减少血液中的氧含量,由此引发各种疾病,长期饮用可能有致畸、致癌的风险^[3-5]。国家相关标准对水体中硝酸盐浓度做了规定,集中式生活饮用水地表水源地的一级保护区的硝酸盐最高允许质量浓度为 10 mg/L(以 N 计)^[6]。目前国内外对硝酸盐废水处理的方法主要有化学法、物理化学法和生物法等。生物法由于运行成本低、处理效率高等优点而得到广泛应用,但传统生物反硝化工艺往往存在碳源不足、需要额外添加大量碳源提供电子(还原 1 g 硝酸盐氮需提供 2.47 g 甲醇)的限制,导致反硝化的运行成本提高^[7]。因此,寻找一种产能环保的新型脱氮技术迫在眉睫。

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)是一种可以在厌氧环境下通过微生物作用降解有机物,将产生的电子经过外电路到达阴极,并将阴极物质还原的装置。近年来对 MFC 的研究逐渐深入^[8]。汪加权等^[9]构建双室 MFC,阳极和阴极底物分别为苯酚和硝酸盐废水,结果反硝化速率达到 4.43 mg/(L·d);杨金萍等^[10]构建以活性污泥为接种源双室 A-MFC,阴极反硝化速率达到 1.863 mg/(L·d);冉春秋等^[11]构建单室无质子膜 MFC 驯化反硝化菌,其硝酸盐去除率达 96.7%;POUS 等^[12]利用微生物燃料电池处理被硝酸盐污染了的地下水,硝酸盐的质量浓度从初始的(28.32±6.15) mg/L 下降到(12.14±3.59)mg/L。但目前通过优化微生物生长条件来增强 MFC 中微生物的活性,进而提高 MFC 的运行性能的研究还鲜有报道。本研究以硝酸盐作为目标污染物,考察碳源、碳氮比(以 C/N 表示)、硝酸盐浓度、温度 4 个因素对 MFC 运行性能的影响,并对 MFC 运行最佳状态时硝酸盐和 COD 的降解效果及电能输出情况进行研究。

1 材料与方法

1.1 反应器接种与启动

单室空气阴极 MFC,总体积为 30 mL,每个反应器接种 1.5 mL 污泥(来自石家庄桥东污水处理厂的二沉池)作为反应器的接种源。相关指标:总悬浮固体(SS)的质量浓度为 39.00 g/L,挥发性固体(VSS)的质量浓度为 19.20 g/L,ρ(SS)/ρ(VSS)为 49.24%。MFC 的阴极、阳极均使用碳布电极,其表面积为 7 cm²(阴极型号 HCP330P、阳极型号 HCP330N,上海河森电气有限公司提供),阴极使用 Pt 催化剂进行预处理^[13],外电阻阻值为 1 000 Ω,并通过直径为 1 mm 的钛丝与两电极相连构成回路,实验采用序批式运行,当输出电压值小于 50 mV 时更换模拟废水。启动期反应器模拟废水组成:无水乙酸钠(1 g/L)、磷酸盐缓冲液(PBS, 50 mmol/L)、微量元素(12.5 mL/L)、维生素(5 mL/L),于 35 °C 下运行。

1.2 电化学性能表征

MFC 两端电压通过数据采集模块(DAM-3039F,北京阿尔泰科技发展有限公司提供)进行监测,每 1 min 记录 1 次数据,采集模块定期使用万用表进行校准。当 MFC 开路电压达到稳定时,使用电化学工作站(CHI6600,上海辰华仪器有限公司提供)三电极体系测其交流阻抗(EIS):工作电极接 MFC 阳极,参比电极和辅助电极接阴极;交流阻抗设置扫描范围为 0.01~1 000 Hz,交流电压振幅为 10 mV;在 MFC 运行数周期输出电压稳定以后,采用变电阻法同步测定其功率密度曲线和极化曲线,阻值区间为 100~50 000 Ω。

1.3 实验测定方法

本实验采用重铬酸钾法测定 COD,pH 计(DELTA320)测定 pH 值,紫外分光光度计(UV2006)测定硝酸盐及亚硝酸盐浓度的变化,采用重量法在 105 °C 下测量污泥的 SS 的量,550 °C 下测量 VSS 的量^[14]。利用扫描电子显微镜(S4800-I,日本日立公司提供)提取电极上微生物的形貌特征。

2 结果与讨论

MFC 成功启动后处理 100 mg/L 的硝酸盐废水,10 h 硝酸盐去除率可达到 90%以上,电能输出如图 1

所示,其最高电压可达到 357 mV,并在此基础上进行 MFC 运行参数的优化,进一步提高 MFC 的硝酸盐去除率及电能输出。

2.1 MFC 运行性能参数优化

2.1.1 碳源

在温度为 35 °C,C/N 为 7 : 1,硝酸盐质量浓度为 100 mg/L 的条件下,实验设置 COD 质量浓度为 580 mg/L 的无水乙酸钠、葡萄糖、甲醇、蔗糖、乙醇等 5 种有机物来探讨不同碳源对 MFC 运行性能的影响;结果如图 2 所示。MFC 在以无水乙酸钠为碳源时,底物的降解情况最好,4 h 硝酸盐的去除率可达到 99%,葡萄糖、甲醇、乙醇的去除效果次之,4 h 底物去除率均可达到 90%以上。但以蔗糖为碳源时底物降解情况最差,10 h 硝酸盐去除率仅达到 92%;由此可见当以无水乙酸钠为有机碳源时,MFC 体系微生物对底物的利用率最高,底物降解情况最好。其结果与孔晓英等^[15]的研究结果基本一致,乙酸钠作为底物时 MFC 电能输出情况最好,可能乙酸钠是最简单的碳源,易直接被微生物利用。

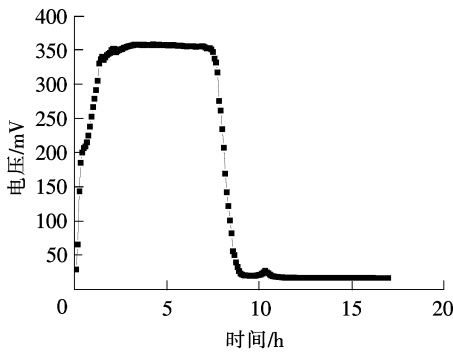


图 1 MFC 成功启动后电能输出情况

Fig. 1 Electricity output of MFC successfully started

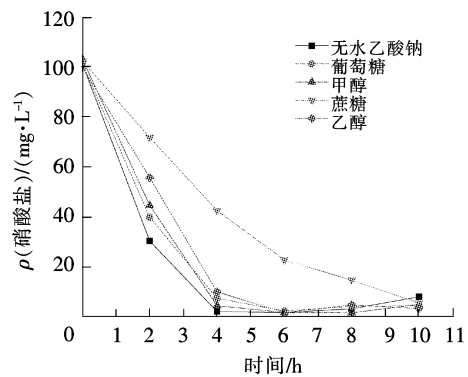


图 2 碳源对 MFC 降解硝酸盐的影响

Fig. 2 Influence of carbon source on MFC degradation of nitrate

2.1.2 碳氮比(C/N)

温度为 35 °C,无水乙酸钠为碳源,硝酸盐质量浓度为 100 mg/L 条件下,实验设置初始 C/N 分别为 1 : 1,3 : 1,5 : 1,7 : 1 来分析相同底物时不同 C/N 对 MFC 运行性能的影响,结果如图 3 所示。当 C/N = 5 : 1 时 MFC 体系硝酸盐去除率最高,4 h 去除率可达到 92%,当 C/N = 7 : 1 时,5 h 可去除 93%的硝酸盐,C/N = 3 : 1 时,4 h 可去除 70%的硝酸盐,且随着时间的增长硝酸盐浓度几乎没有下降,C/N = 1 : 1 时,3 h 可去除 25%的硝酸盐,且随着时间的增加硝酸盐的浓度没有降低;由此可见,当 C/N = 5 : 1 时 MFC 体系降解硝酸盐情况最好,去除效率最高。

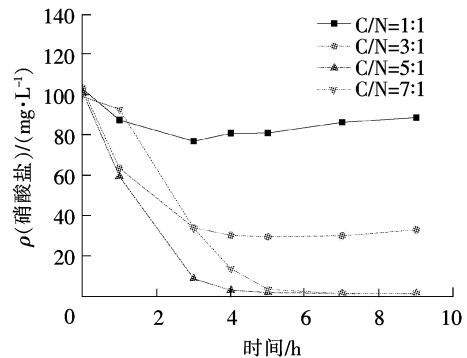


图 3 C/N 对 MFC 降解硝酸盐的影响

Fig. 3 Influence of C/N on MFC degradation nitrate

2.1.3 硝酸盐浓度

温度为 35 °C,无水乙酸钠为碳源,C/N = 5 : 1 条件下,实验设置 6 个不同硝酸盐质量浓度,分别为 100, 150, 200, 250, 300, 400 mg/L 来探讨硝酸盐浓度对 MFC 运行性能的影响。结果如图 4 所示:当初始硝酸盐质量浓度从(100 ± 0.3)mg/L 提高至(300 ± 0.80)mg/L 时,4 h 硝酸盐去除率均可达到 95%以上,但降解时间随硝酸盐浓度的升高而延长,当硝酸盐质量浓度不超过 200 mg/L 时,MFC 可以在 3 h 以内去除 98%的硝酸盐;可见一定浓度范围的硝酸盐,随着其浓度的增加去除效率逐渐降低,可能是由于此 MFC 体系与传统反硝化体系一样,高浓度的硝酸盐易导致反硝化反应器中亚硝酸盐的积累,而高浓度亚硝酸盐具有较强的毒性,对微生物活性有抑制作用,故后续选取模拟废水的硝酸盐质量浓度为 200 mg/L。但 ZHANG 等^[16]发现,以高效反硝化反应器中污泥为接种源,在阳极反硝化 MFC 体系中,底物的硝酸盐浓度可以影响产电行为,硝酸盐质量浓度为 200~4 300 mg/L 时体系降解速率均良好,本研究与其反硝化差距大可能是由于所接

种的微生物不同造成的。

2.1.4 温度

无水乙酸钠为碳源,C/N为5:1,硝酸盐质量浓度为100 mg/L条件下,实验设置5个不同温度(10,20,30,35,40 °C),来探讨其对MFC运行性能的影响,结果如图5所示。当温度在35 °C时,4 h之后硝酸盐质量浓度降低到10 mg/L以下,其去除率均可达到98%以上;在30 °C时MFC降解硝酸盐速率最快,3.5 h硝酸盐质量浓度降低到5.5 mg/L;但当温度升高到40 °C时,MFC降解硝酸盐速率降低,8 h硝酸盐去除效率达到95%,降解时间延长,当温度低至10 °C时MFC降解硝酸盐速率降低,3.5 h其去除率仅为80%;故MFC体系微生物降解硝酸盐的最适温度为30 °C,温度过高或过低都会使去除率降低,这与赵煜等^[17]实验结果基本一致:一定温度范围内,提升运行温度有助于增强微生物的电化学活性,降低体系传荷阻抗,提高输出功率;但降低温度会影响MFC体系微生物的活性,使运行性能下降。

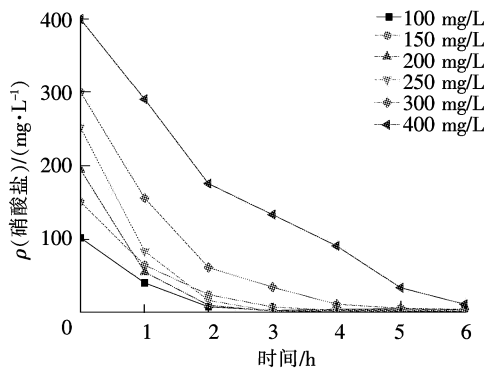


图4 硝酸盐质量浓度对MFC硝酸盐降解的影响

Fig. 4 Effects of nitrate concentration on MFC degradation nitrate

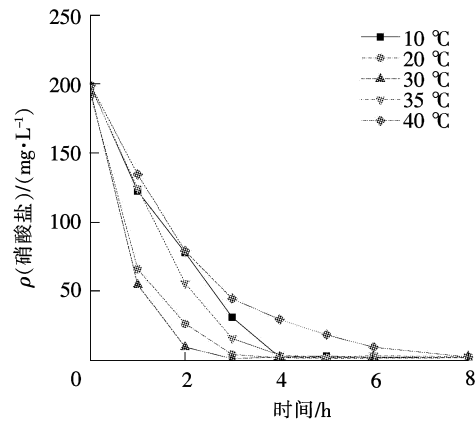


图5 温度对MFC降解硝酸盐的影响

Fig. 5 Effects of temperature on MFC degradation nitrate

2.2 MFC最佳状态下运行性能和微生物相分析

2.2.1 MFC出水指标分析

MFC运行25天期间,对周期末端出水的硝酸盐、COD和pH值等指标进行检测,结果如图6所示。MFC运行前16天,出水COD去除率保持在90%以上,硝酸盐去除率始终保持96%以上,且pH值由7.5逐步增大到8左右并稳定;随着运行时间的增长,16~20天时各去除率略有下降,但到23天左右,COD的去除率急速下降,pH值逐渐减小,MFC运行性能降低,交流阻抗谱(EIS)分析结果如图7所示。最佳状态下的MFC内阻为130 Ω,比启动期的190 Ω降低了32%,但随着运行时间增长,内阻逐渐增大,内阻比运行末期的200 Ω低35%,该实验结果与常东霞等^[18]的研究结论基本一致。长期运行导致生物膜的电化学活性降低,电池产电能力大大下降,MFC体系的内阻逐渐增大,可能是由于电极表面生物膜老化所致,微生物的活性下降,底物利用率降低。LI等^[19]发现,在pH值为7.5左右时电极生物膜已逐渐形成,因此MFC优化后期生物膜基本形成,但到pH值为8以后,随着反应运行阴极OH⁻转移会被抑制,导致pH值增大,运行性能降低,最终由于微生物对有机物利用率降低,导致H⁺累积,使pH值降低,MFC运行性能下降。

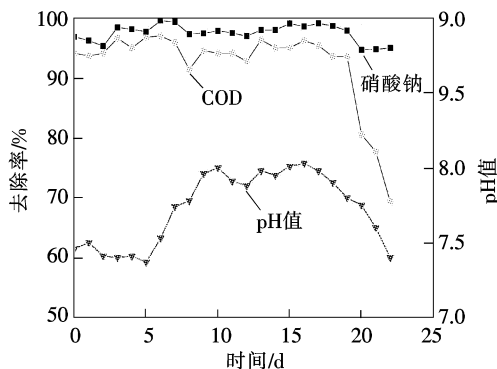


图6 MFC运行期间出水情况

Fig. 6 Water situation of operation period

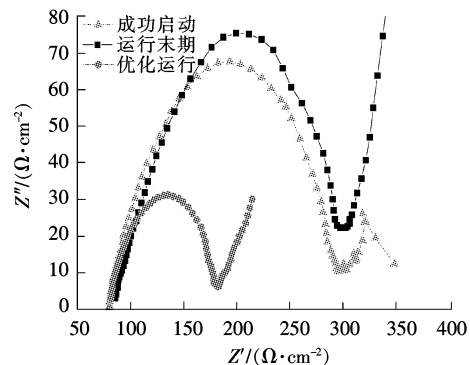


图7 交流阻抗谱(EIS)分析

Fig. 7 Analysis of EIS

2.2.2 MFC 电能输出情况

由图8可见,优化前后MFC周期运行情况有明显变化,1000 min(约16.7 h)之前2个产电周期为MFC成功启动后但未经优化前的电能输出情况,其最高电压可达到0.38 V左右,但最大电压持续时间较短,1000~1750 min(约16.7~29.2 h)为开始优化以后MFC体系产电周期,其最大电压可达到0.462 V,最大功率密度达到 4.53 W/m^2 。由图9可知,在最佳条件下经过6个周期的运行,MFC体系最大电压可达到0.627 V,且持续时间增长。表明该体系在底物利用率提高的同时电能输出的性能也得到明显提升。

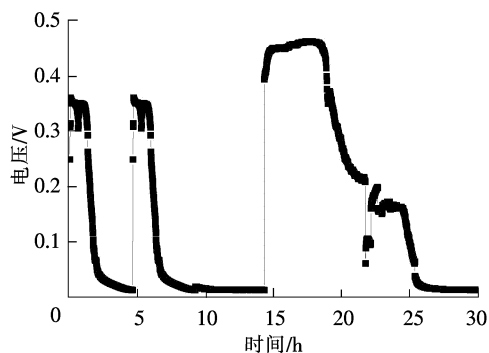


图8 优化前后MFC电能输出情况

Fig. 8 Electricity output before and after MFC optimization

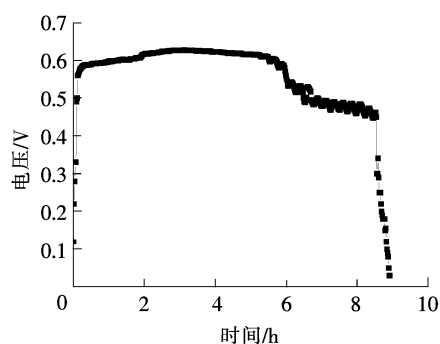


图9 优化后运行最佳MFC电压

Fig. 9 MFC voltage of optimized operation

2.2.3 MFC 阳极微生物相分析

对优化后运行6个周期最佳状态下的MFC阴、阳极微生物进行微生物扫描电镜观察,结果如图10、图11所示。由图可发现此时微生物种类较刚启动时丰富,且有大量螺旋杆菌、杆状菌、球形菌等吸附到电极表面,微生物的吸附增多形成生物膜也导致MFC运行性能提高,由于对MFC体系运行参数的优化,体系中微生物的活性得到明显提升,王爱杰等^[20]报道,目前纯种产电微生物已有50余种,包括硫还原地杆菌(*Geobacter sulfurreducens*)、奥奈达希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)等^[21-22],这些产电菌大多数为兼性厌氧菌,以有机物等作为电子供体,适宜在MFC体系中生长,分析降解硝酸盐的微生物可能大多也属于产电菌,因此降解硝酸盐的微生物活性增强导致了产电菌活性增强,同时MFC运行性能得到提升。

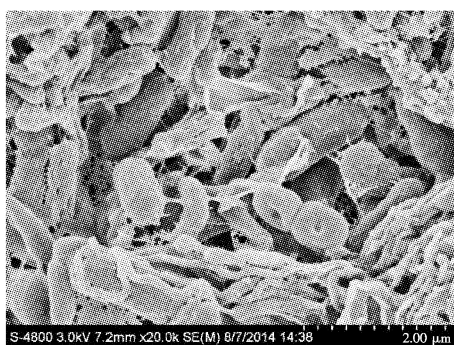


图10 运行最佳状态下阳极扫描电镜

Fig. 10 SEM of anode on operation optimally

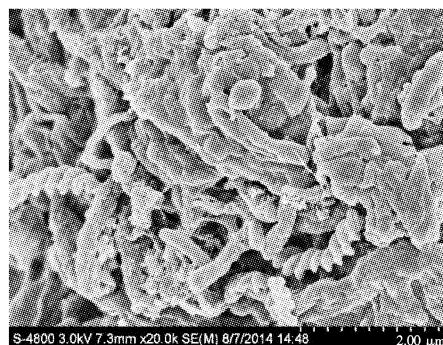


图11 运行最佳状态下阴极扫描电镜

Fig. 11 SEM of cathode on operation optimally

3 结论

本实验通过对成功启动的MFC运行过程中碳源、C/N、硝酸盐浓度、温度4个因素影响反应体系硝酸盐的去除率及电能输出情况的研究,得出如下实验结果:当温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$,无水乙酸钠为有机碳源,C/N=5:1,硝酸盐质量浓度为 200 mg/L 时,MFC体系中硝酸盐的去除率最高,均可达到90%以上;MFC运行周期有稳定的电压输出,且增加至 0.627 V ,同时最大电压持续时间增长,经过计算其最大功率密度为 4.53 W/m^2 ,最佳状态下内阻变小,比运行末期降低35%;随着MFC条件的优化,运行末期出水COD和硝酸盐的去除效

率降低,pH值变小;微生物扫描电镜发现电极表面微生物的种类及数量大量增多,MFC体系的条件优化可提高硝酸盐降解微生物的活性,同时增强产电菌的活性,导致MFC体系的性能提高。

参考文献/References:

- [1] 陈延明,张华雨,赵丽君,等. 氧化还原介体在治理环境中应用的研究进展[J]. 河北工业科技,2013,30(4):266-271.
CHEN Yanming, ZHANG Huayu, ZHAO Lijun, et al. Development and application of redox mediators for environmental protection[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2013,30(4):266-271.
- [2] 雷立改,马晓珍,魏福祥,等. 水中总氮、总磷测定方法的研究进展[J]. 河北工业科技,2011,28(1):72-76.
LEI Ligai, MA Xiaozhen, WEI Fuxiang, et al. Research progress of determination of total nitrogen and total phosphorus in seawater[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2011,28(1):72-76.
- [3] 张立辉,曹国民,盛梅,等. 地下水硝酸盐去除技术进展[J]. 净水技术,2010,5(3):4-10.
ZHANG Lihui, CAO Guomin, SHENG Mei, et al. Progress of the technological processes for nitrate removal in groundwater[J]. Water Purification Technology, 2010,5(3):4-10.
- [4] 张彦浩,钟佛华,夏四清,等. 硝酸盐污染饮用水的去除技术研究进展[J]. 环境保护科学,2009,35(4):50-53.
ZHANG Yanhao, ZHONG Fuhua, XIA Siqing, et al. Study progress on removal technologies of nitrate-contaminated drinking water[J]. Environmental Protection Science, 2009,35(4):50-53.
- [5] DAN-HASSAN M A, OLASEHINDE P I, AMADI A N, et al. Spatial and temporal distribution of nitrate pollution in groundwater of Abuja, Nigeria[J]. International Journal of Chemistry, 2012,4(3):104-112.
- [6] GB 3838—2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准[S].
- [7] 高延耀,顾国维,周琪. 水污染控制工程[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2007.
- [8] LIU B C, LI B K. Single chamber microbial fuel cells (SCMFCs) treating wastewater containing methanol[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013,39(5):2340-2344.
- [9] 汪家权,夏雪兰,陈少华,等. 两类微生物燃料电池治理硝酸盐废水的实验研究[J]. 环境科学学报,2011,31(2):254-259.
WANG Jiaquan, XIA Xuelan, CHEN Shaohua, et al. Removing nitrate from wastewater in single and double-chamber microbial fuel cells[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,31(2):254-259.
- [10] 杨金萍,汪家权,陈少华,等. 双室微生物燃料电池处理硝酸盐废水[J]. 环境工程学报,2013,7(5):1837-1842.
YANG Jinping, WANG Jiaquan, CHEN Shaohua, et al. Treatment of wastewater containing nitrate in a double-chamber microbial fuel cell[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013,7(5):1837-1842.
- [11] 冉春秋,崔玉波,李海燕,等. 单室型无质子膜微生物燃料电池协同去除COD和含氮污染物[J]. 高校化学工程学报,2013,27(2):316-321.
RAN Chunqiu, CUI Yubo, LI Haiya, et al. Collaborative removal of COD and nitrogenous pollutant in a single chamber membrane-less microbial fuel cell[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2013,27(2):316-321.
- [12] POUS N, PUIG S, COMA M, et al. Bioremediation of nitrate-polluted groundwater in a microbial fuel cell[J]. Journal of Chemical Technology Biotechnology, 2013,88(9):1690-1696.
- [13] CHENG S A, LIU W Z. How to make cathodes with a diffusion layer for single-chamber microbial fuel cells[Z]. [S. l.]:[s. n.], 2008.
- [14] 王鑫. 微生物燃料电池中多元生物质产电特性与关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
WANG Xin. Electricity Generation from Multiple Biomass and the Development of Key Technologies in Microbial Fuel Cells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [15] 孔晓英,孙永明,李连华,等. 不同底物对微生物燃料电池产电性能的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(1):185-188.
KONG Xiaoying, SUN Yongming, LI Lianhua, et al. Effects of substrate type on electricity performance of microbial fuel cells[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(1):185-188.
- [16] ZHANG J Q, ZHENG P, ZHANG M, et al. Kinetics of substrate degradation and electricity generation in anodic denitrification microbial fuel cell (AD-MFC)[J]. Bioresource Technology, 2013,149:44-50.
- [17] 赵煜,薄晓,马彦,等. 不同温度下微生物燃料电池的运行特性[J]. 化工进展,2014,33(3):629-633.
ZHAO Yu, BO Xiao, MA Yan, et al. Research on producing electricity characteristics of microbial fuel cell at different temperatures[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014,33(3):629-633.
- [18] 常东霞,曹青,李鹏,等. 微生物燃料电池运行过程中的电化学性能[J]. 煤炭转化,2014,37(1):88-91.
CHANG Dongxia, CAO Qing, LI Peng, et al. Study on the electrochemical behavior of microbial fuel cells during the long time running[J]. Coal Conversion, 2014,37(1):88-91.
- [19] LI N, LIU Y, AN J K, et al. Bifunctional quaternary ammonium compounds to inhibit biofilm growth and enhance performance for activated carbon air-cathode in microbial fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2014,272:895-899.
- [20] 王爱杰,任南奇,陶春虎,等. 生物电化学系统:从胞外电子传递到生物技术应用[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [21] SUN J, LI W J, LI Y M, et al. Redox mediator enhanced simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation in air-cathode microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2013,142:407-414.
- [22] 周群英,王世芬. 环境工程微生物学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2008.