



pH 和碳氮比对 MFC-好氧颗粒污泥系统 处理废水的影响

程 洁, 欧阳二明

(南昌大学建筑工程学院, 江西南昌 330100)

[摘要] 将硝化颗粒污泥与微生物燃料电池(MFC)进行耦合构成一种新型电化学系统。采用序批式运行方式, 研究进水 pH 和碳氮比对该系统同步处理废水及产电性能的影响。结果表明, 随着进水 pH 和碳氮比的升高, 系统对污染物的去除率和产电性能呈先增大后减小的趋势。当进水 pH 为 10、碳氮比为 15 时, 处理系统能够利用好氧颗粒活性污泥的独特分层结构, 内部为厌氧环境, 外部为好氧环境, 反硝化菌在碳源充足的条件下将 NO_3^- 还原为 N_2 , 系统对 COD 和氨氮的去除率最高, 分别为 96.05%、98.58%, 且出水中的 NO_2^- 和 NO_3^- 处于较低水平, 有效实现了同步硝化反硝化的过程。该耦合系统的最大输出电压和功率密度分别为 459 mV、116.40 mW/m²。在此条件下更多的有机底物被产电细菌代谢生成电子, 提升了系统的库仑效率。扫描电镜结果表明, 碱性条件下微生物能够完好附着在电极表面形成生物膜, 促进了微生物与电极之间的胞外电子传递过程, 从而提升系统的整体产电性能。该研究可为探索与推进 MFC-颗粒污泥耦合系统处理实际废水及同步产能提供科学指导。

[关键词] 碳氮比; 颗粒污泥; 微生物燃料电池

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)08-0120-08

Effect of pH and carbon-nitrogen ratio on wastewater treatment by MFC-aerobic granular sludge system

CHENG Jie, OUYANG Erming

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330100, China)

Abstract: A novel electrochemical system was formed by coupling nitrifying granular sludge with microbial fuel cells (MFC). The effects of influent pH and carbon-nitrogen ratio on the simultaneous treatment of wastewater and power production performance of the system were investigated in a sequential batch operation. The results showed that the removal rate of pollutants and power production performance increased and then decreased with the increase of influent pH and carbon-nitrogen ratio. When the influent pH was 10 and the carbon-nitrogen ratio was 15, the treatment system was able to utilize the unique stratified structure of aerobic granular activated sludge with anaerobic environment inside and aerobic environment outside. Under the condition of sufficient carbon source, the denitrifying bacteria reduced NO_3^- to N_2 , and the system achieved the highest removal rates of COD and ammonia nitrogen, 96.05% and 98.58%, respectively. NO_2^- and NO_3^- in the effluent were at low levels, which effectively realized the process of simultaneous nitrification and denitrification. The maximum output voltage and power density of the coupled system were 459 mV and 116.40 mW/m², respectively, under which more organic substrates were metabolized by the electrogenic bacteria to generate electrons, which enhanced the Coulomb efficiency of the system. The scanning electron microscopy results showed that the microorganisms were able to form biofilms on the electrode surface under alkaline conditions, which promoted the extracellular electron transfer process between the microorganisms and the electrode, thus enhancing the overall electrical generation performance of the system. It can provide scientific guidance for exploring and advancing the coupled MFC-particulate sludge system to treat actual wastewater.

[基金项目] 江西省自然科学基金面上项目(20192BAB206039)

ter and simultaneous capacity.

Key words: carbon-nitrogen ratio; granular sludge; microbial fuel cell

微生物燃料电池(MFC)是一种利用微生物的代谢活动将有机底物中的化学能转化为电能的生物电化学装置^[1],能够同步实现废水处理与产电,极具应用前景。好氧颗粒污泥被认为是氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₃⁻)和其他异养微生物在不同颗粒层定植而成的复杂系统,是一种密实的微生物团聚体,具有丰富的微生物结构、较高的生物保留量、优良的处理效率,且具有毒性耐受性,能有效去除COD、N、P等物质,沉降性能良好,可提高出水水质。Kai CHENG等^[2]在MFC阳极表面接种好氧颗粒污泥,达到最大功率密度(491±8) mW/m²,COD去除率为(82±5)%;与单独使用MFC相比,反应器启动时间缩短,对系统内阻无显著影响,且毒性耐受性增强。Ping YANG等^[3]对MFC阴极室培养好氧颗粒污泥进行研究,并分析颗粒的理化性质。然而,关于好氧颗粒污泥与MFC技术结合的优势,操作变量对系统降解废水与提高生物能源效果的影响的研究尚未开展。

pH和碳氮比是影响MFC性能的2个重要参数。其中,pH对MFC的输出功率发挥至关重要的作用。有研究报道了阳极pH环境对MFC性能的影响^[4]。但由于不同MFC系统的接种物、电极材料和进水基质不同,阳极微生物的代谢生产方式和反应产物也不同,导致MFC系统的最适pH环境存在差异。此外,进水碳氮比对好氧颗粒污泥的理化性质和微生物特性也有重要影响^[5]。合适的碳氮比有利于培养及保留沉降良好的颗粒污泥,进而提高系统对氨氮污染物的处理能力。笔者采用双室MFC,在阳极接种厌氧污泥,阴极接种好氧颗粒污泥,探究pH和碳氮比对MFC-硝化颗粒污泥耦合系统的脱氮除碳效率和产电性能的影响,以期拓宽MFC类型及优化运行参数提供一定科学依据。

1 试验部分

1.1 试验材料

采用传统双室MFC装置,其中反应器阳极室与阴极室之间用质子交换膜(Nafion 117型全氟磺磺离子交换膜)隔开,质子交换膜有效面积为25 cm²

(5 cm×5 cm),阳极室、阴极室的尺寸均为216 cm³(6 cm×6 cm×6 cm),反应器整体由有机玻璃构成并用硅胶垫密封。阴极室和阳极室的外侧设有进水口、出水口,上部开孔为电极插孔和取样口。电极均为正方形碳布,有效面积16 cm²(4 cm×4 cm)。为增加导电性能将电极进行改性^[6]。电极采用铂电极夹片连接,用导线连接外电阻1 000 Ω,组成闭合回路。

试验阳极接种污泥取自南昌市青山湖污水处理厂二沉池回流污泥,经0.6 mm筛网去除杂质颗粒并用去离子水清洗3次以上,放入灭菌锥形瓶中。阳极进水组成为1 g/L无水乙酸钠、0.191 g/L NH₄Cl、0.5 g/L NaCl、0.02 g/L CaCl₂、0.015 g/L MgSO₄、1.0 g/L NaHCO₃、5.0 g/L KH₂PO₄、3.857 g/L K₂HPO₄、12.5 mL微量元素^[7]。用1 mol/L NaOH溶液调节阳极液pH为7,通入20 min氮气以去除氧气,随后将接种污泥置于恒温水浴震荡器于150 r/min转速下培养,温度设置30℃,驯化14 d后厌氧污泥呈黑色。

试验阴极接种硝化颗粒污泥取自实验室稳定运行的SBR反应器,平均直径0.5~1.0 mm,呈棕黄色球形。驯化完成后污泥接种比例为反应室净容积的20%,接种厌氧污泥质量浓度为6 g/L,好氧颗粒污泥质量浓度为4 g/L,开始启动MFC。电压用VICTOR 86B数字万用表采集,时间间隔1 min,将数据导入安装软件,监测电压,电压降至50 mV以下即认为产电周期结束,更换新的阳极进水。当连续监测2个产电周期的最大电压相近时,认为MFC启动成功。

1.2 试验方法

采用序批操作模式,试验开始前用蠕动泵将上一阶段的阳极上清液(0.13 L)泵入阴极室作为阴极液,将新的阳极液泵入阳极室,开始新的循环阶段。用磁力搅拌器对阳极室进行搅拌,保证阳极液与微生物充分混合。阴极室通过空气泵曝气,为确保高剪切力,控制阴极室溶解氧在5 mg/L以上。试验装置如图1所示。

1.3 试验设计

试验以阳极进水pH和碳氮比作为影响因素,研究其对MFC-颗粒污泥耦合系统去除污染物和

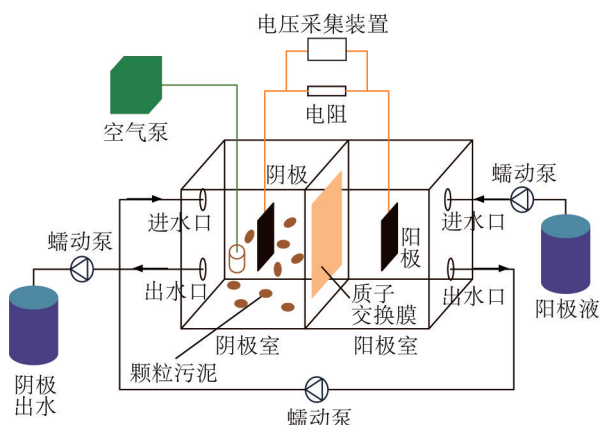


图1 试验装置

Fig. 1 Test equipment

产电效能的影响。进水 pH 设置为 6、7、8、9、10、11, 用 1 mol/L HCl 溶液和 NaOH 溶液进行调节; 碳氮比设置为 5、10、15、20, 用不同比例的氯化铵进行调节。

阴极室经过 16 h 的停留时间后停止曝气, 沉淀时间 20 min, 出水时间 3 min。所有试验装置均由时间控制开关控制。不同工况的试验结束后, 使系统在 pH 为 7、碳氮比为 15 的条件下稳定恢复至相同初始状态, 再进行下一工况的试验。

1.4 分析方法

COD 采用 COD-571 型化学需氧量测定仪测定, NH_4^+-N 采用纳氏试剂比色法测定, NO_2^--N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定, NO_3^--N 采用紫外分光光度法测定, pH 采用 PHS-25 型 pH 计测定。电极形貌采用 ZEISS 扫描电镜进行表征。

功率密度用最大面积功率密度表示, 见式(1)。

$$P = \frac{U_{\max}^2}{RA} \quad (1)$$

式中: P ——最大面积功率密度, mW/m^2

$U_{\max}$ ——MFC 外接电阻两端最大电压, 通过极化曲线测得, mV ;

R ——外接电阻, Ω ;

A ——阳极有效工作面积, m^2 。

库仑效率按式(2)计算。

$$\text{CE} = \frac{8 \int_0^T I dt}{F \Delta \text{COD} V_{\text{An}}} \quad (2)$$

式中: CE——库仑效率, %;

8——单位 COD 电子转移系数;

T ——周期时间, min ;

t ——时间, min ;

I —— t 时刻的电流, mA ;

F ——法拉第常数, $96\,485\text{ C/mol}$;

V_{An} ——阳极室体积, m^3 ;

ΔCOD ——每周期前后的 COD 变化值, mg/L 。

MFC 极化曲线采用稳态放电法进行测定。测定开始前将外电路断开形成开路, 用电压采集装置观察, 待开路电压稳定后接入不同外电阻, 阻值由 $10\,000\ \Omega$ 依次减小至 $50\ \Omega$, 每个阻值下稳定 5 min, 记录不同电压, 根据所得电压对电流密度作图, 得到极化曲线。

2 结果与分析

2.1 MFC 产电性能及阴极生物膜生长

经过 1 个月的接种培养, MFC-颗粒污泥耦合系统的最大输出电压连续 2 个周期稳定在 400 mV 左右, 如图 2(a) 所示, 在 1 个周期内系统输出电压随时间呈现先上升再平稳保持最后下降的趋势。前期驯化过程中微生物已适应流入的阳极液, 在阳极环境中经过前一个阶段的反应, 微生物处于饥饿状态, 当新鲜阳极液流入阳极室, 系统电压迅速上升, 产电微生物通过自身代谢作用氧化无水乙酸钠, 生成电子和质子, 最大输出电压可达 401 mV , 逐渐平稳运行; 45 h 后电压迅速下降直至低于 50 mV , 更换新的阳极液, 电压继续迅速上升。

图 2(b) 为 MFC 系统启动阶段的极化曲线和功率密度曲线。可见系统最大功率密度为 $54.02\text{ mW}/\text{m}^2$, 此时外电阻为 $500\ \Omega$ 。由极化曲线可知, 电压在初始阶段迅速下降, 此区域为活化极化区; 随后电压呈线性下降, 该区域为欧姆极化区, 由线性关系可得出此时系统内阻为 $321\ \Omega$; 最后电压随电流密度的增加继续快速下降, 此时的区域为浓差极化区。

2.2 进水 pH 的影响

2.2.1 进水 pH 对污染物去除的影响

根据前期启动阶段试验, 确定阳极的进水碳氮比为 15, 即进水 COD 为 780 mg/L , 进水氨氮为 50 mg/L , 水力停留时间为 16 h。进水 pH 对 MFC-硝化颗粒污泥系统去除污染物的影响如图 3 所示。

由图 3(a) 可见, 随着进水 pH 的增加, COD 去除率呈先增加后减小的趋势; 进水 pH 为 10 时 COD 去除率达到最高, 为 96.05% , 阴极出水 COD 为 30 mg/L ; pH 继续增加到 11 时, 阴极出水 COD 为 91 mg/L , 去除率最低,

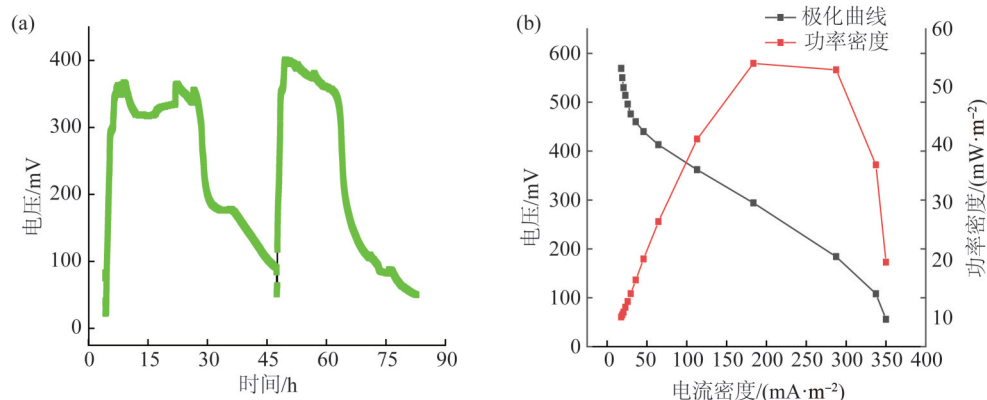


图2 启动阶段产电电压的变化(a)及电化学分析(b)

Fig. 2 Variation of voltage (a) and electrochemical analysis (b) during the start-up phase

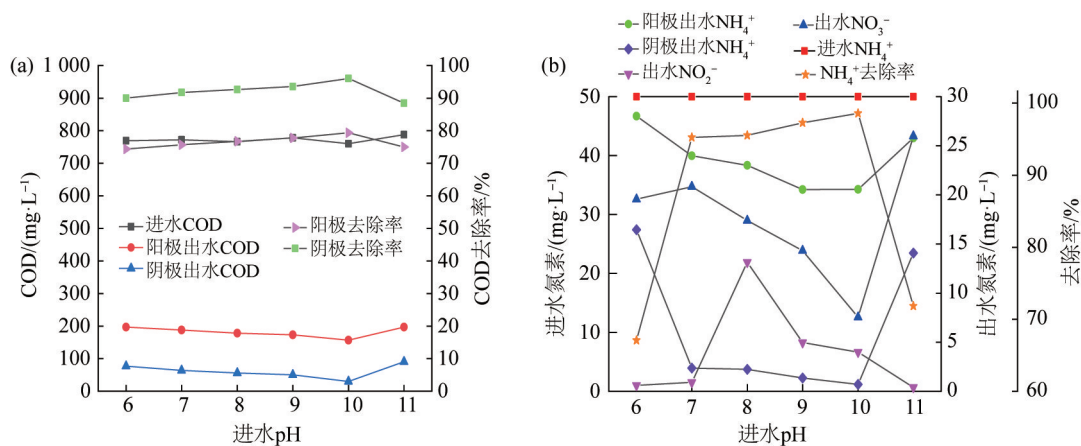


图3 进水pH对COD(a)、氨氮(b)去除效果的影响

Fig. 3 Effect of influent pH on the removal effect of COD (a) and ammonia nitrogen (b)

为88.48%。COD主要在阳极室被去除,少量COD进一步被阴极的异养微生物去除。有研究表明,碱性环境下产电微生物具有更好的电化活性^[8]。产电微生物在适宜的pH环境下能更多地分解有机物,使COD去除率达到最大。

由图3(b)可见,氨氮在阳极室经过1个阶段的反应后浓度普遍降低,随着进水pH的增大,阳极室内氨氮损失量逐渐增加,pH为10时阳极室出水氨氮为20.57 mg/L,氨氮损失量较大,这是由于阳极液进入阳极室后的稀释作用使氨氮浓度降低,随着后续试验的进行,氨氮会通过质子交换膜扩散至阴极室,这与Chuanfu ZHAO等^[9]和张健民等^[10]的研究结果一致。

pH为10的条件下产电微生物有更好的活性,微生物的生长过程吸收部分氨氮,使得阳极室内的氨氮继续降低;进水pH为11时,随着细菌细胞内pH的改

变,微生物产生不适应性,对氨氮的吸收能力减弱,出现氨氮的反弹。随着进水pH的增加,经历1个周期后阳极出水的pH分别为 6.4 ± 0.06 、 7.1 ± 0.04 、 7.6 ± 0.07 、 8.78 ± 0.05 。有研究发现反硝化微生物最适应的pH在8~9^[11],阴极出水 NO_2^- 在pH为8时达到最大值,为13.14 mg/L, NO_3^- 在pH为10时达到最低(7.55 mg/L),氨氮去除率最高(98.58%),此时阴极室内的颗粒活性污泥能够实现同步硝化反硝化。

2.2.2 进水pH对产电性能的影响

不同进水pH下MFC-颗粒污泥耦合系统连续3个周期的输出电压变化如图4(a)所示,MFC系统的极化曲线、功率密度曲线及库仑效率如图4(b)~(d)所示。

总体来看,随着进水pH的升高,系统总体输出电压呈先升高再降低的趋势,进水pH为10时输出电压达到最大值,为459.0 mV,且随着周期的稳定

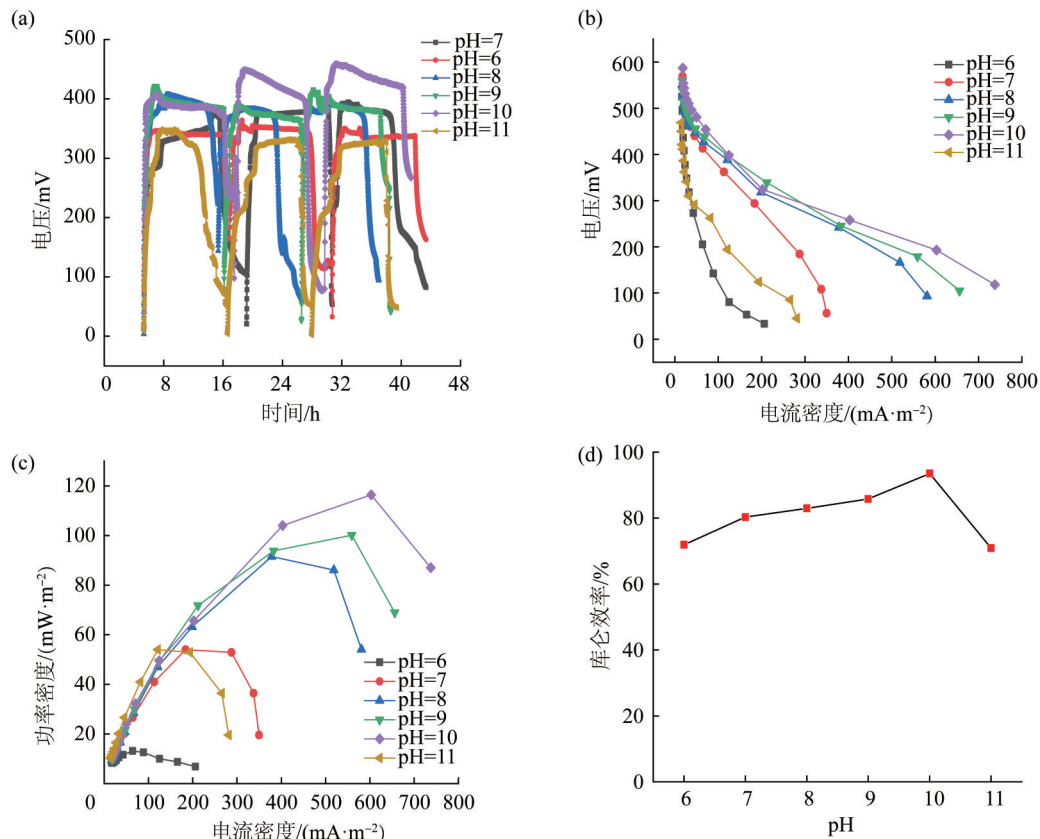


图4 进水 pH 对系统中输出电压(a)、极化曲线(b)、功率密度(c)、库仑效率(d)的影响

Fig. 4 Effect of influent pH on output voltage (a), polarization curve (b), power density (c), and coulombic efficiency (d) in the system

运行,输出电压逐步提升。这是由于产电微生物在该进水条件下活性最佳,代谢活动旺盛,与 COD 去除情况一致。pH 为 11 时输出电压最大值为 348.1 mV,降低 24.2%。

图4(b)中,电压线性下降区域的直线斜率即电池的内阻。进水 pH 为 10 时系统的内阻约为 102.2 Ω ;根据图 4(c)可见进水 pH 为 10 时系统最大功率密度为 116.40 mW/m²,此时外界电阻为 100 Ω ,即内阻与外阻相等。测得 pH 为 6 时系统内阻最大(733.8 Ω),最大输出功率仅为 13.13 mW/m²,表明酸性环境下产电微生物的生长受到抑制,pH 为 10 时最利于微生物产电。M. BEHERA 等^[12]研究了 pH 对阳极细菌活性和 MFC 整体性能的影响,进水 pH 为 8.0 时 MFC 的性能优于 pH 为 6.0 时。Li ZHUANG 等^[13]认为,碱性阳极条件导致阳极电位更负,获得的电压和功率输出更高。由图 4(d)可以看出,随着进水 pH 的增加,库仑效率先升高后降低,pH 为 10 时库仑效率最大(93.54%),表明更多的底物在阳极室内被产电微生物利用,因此系统的产电性能和 COD 去除效率均最佳。

2.3 进水碳氮比的影响

2.3.1 进水碳氮比对污染物去除的影响

由前述试验结果选择系统 pH 为 10,考察不同碳氮比下污染物的去除率变化,结果见图 5。

由图 5(a)可以看出,随着进水碳氮比的增加,阳极室内 COD 的去除率先升高后降低;阴极出水 COD 去除率在碳氮比为 15 时达到最大,为 96.05%,表明在适当范围内提高进水的碳氮比会增加产电微生物对有机碳的去除效果,但随着进水碳氮比的继续增加,阳极微生物的活性受到抑制,这与陶琴琴^[14]的研究结论一致。

图 5(b)中,随着进水碳氮比的增加,阳极出水中的氨氮依次降低,但当进水碳氮比继续增加后,阳极室内的产电微生物活性开始受到抑制,此时氨氮的去除主要依靠稀释效应和扩散作用。阳极室中的 NO_x⁻均处于较低水平,说明去除氨氮的微生物在阳极室内不占种族优势。阴极室中氨氮的去除率随碳氮比的增加先升高后降低,碳氮比为 15 时氨氮去除率达到最高,为 97.28%。阳极出水流入阴极室后,经过

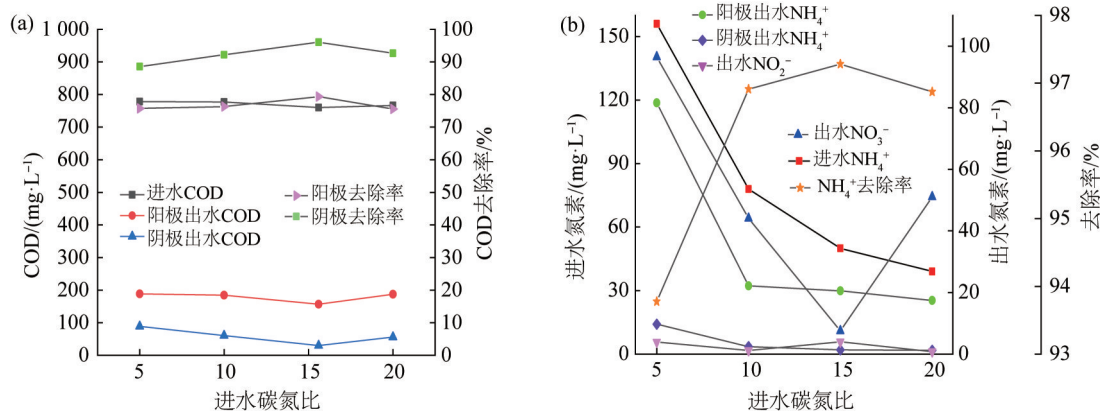


图5 进水碳氮比对COD(a)、氨氮(b)去除效果的影响

Fig. 5 Effect of influent carbon-nitrogen ratio on the removal effect of COD (a) and ammonia nitrogen (b)

1个周期的反应,NO₃⁻积累量在碳氮比为5时最高,达到96.50 mg/L,此时阳极出水COD为188.7 mg/L、NH₄⁺为81.60 mg/L,阴极进水碳氮比降低,出水COD为88.8 mg/L、NO₂⁻积累量为3.95 mg/L,说明在1个周期内硝化细菌将氨氮氧化为NO₃⁻,随后的反硝化过程受到抑制,原因在于低碳氮比环境会抑制反硝化

细菌的生长。

2.3.2 进水碳氮比对产电性能的影响

不同进水碳氮比下MFC-颗粒污泥耦合系统连续3个周期的输出电压变化如图6(a)所示,MFC系统的极化曲线、功率密度曲线及库仑效率如图6(b)~(d)所示。

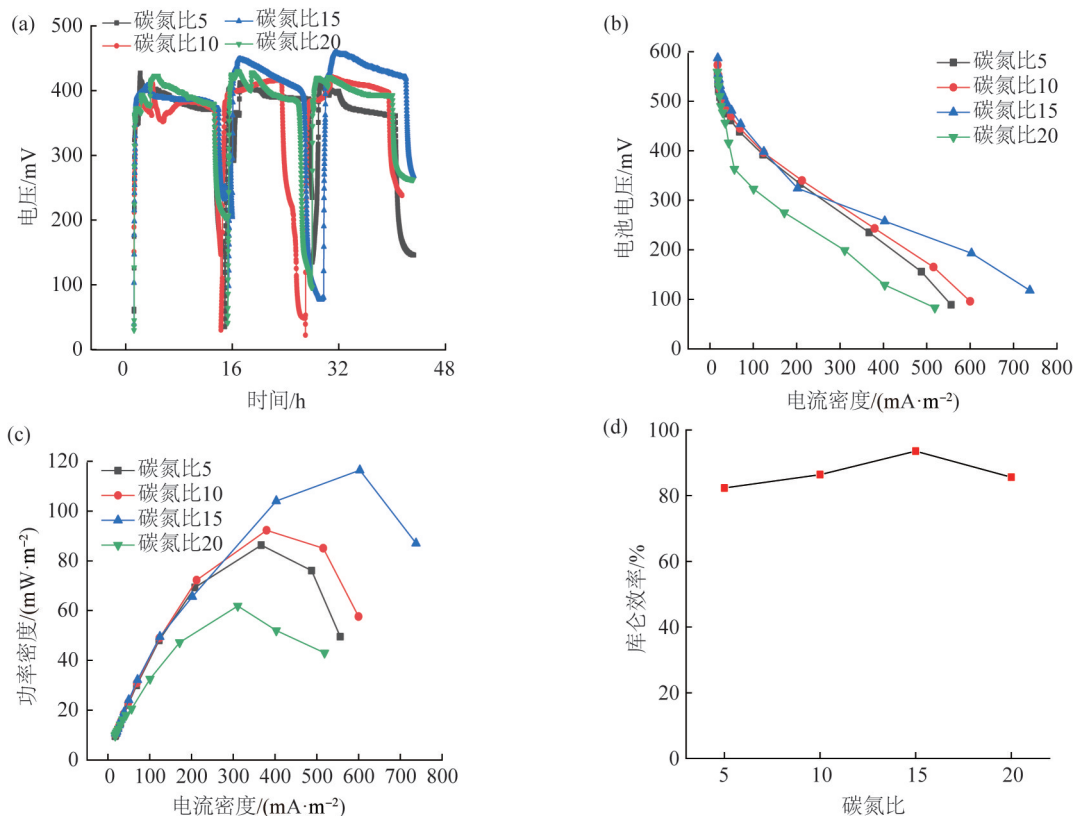


图6 进水碳氮比对系统中输出电压(a)、极化曲线(b)、功率密度(c)、库仑效率(d)的影响

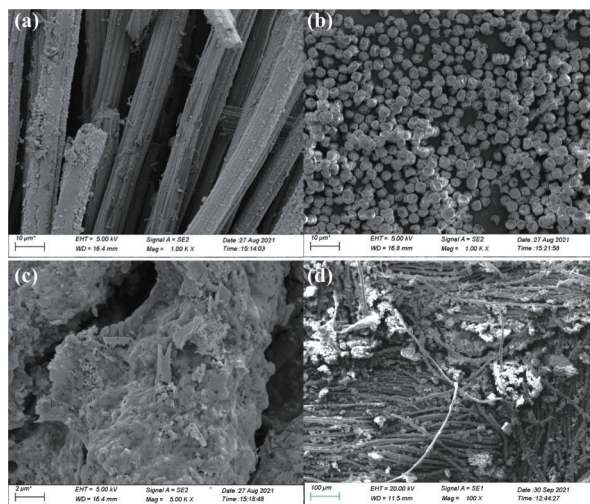
Fig. 6 Effect of influent carbon-nitrogen ratio on output voltage (a), polarization curve (b), power density (c), and coulombic efficiency (d) in the system

由图 6(a)可见,碳氮比为 5 时输出电压处于最低水平,且随着反应周期的进行,峰值电压持续降低,最后 1 个周期的输出电压最大值为 404.0 mV,但持续稳定时间很短,约 2.51 h 后降至 360 mV 左右。碳氮比为 10 时,系统最大输出电压升至 424.0 mV,碳氮比为 15 时输出电压最高为 459.0 mV,稳定阶段持续约 10.5 h;碳氮比继续增加至 20 时,最大输出电压降低至 420.0 mV。对图 6(b)中的电流密度欧姆极化区进行分析,随着碳氮比的增加,MFC 的内阻分别为 202.05、184.21、102.2、201.60 Ω 。由图 6(c)可见,MFC 系统的最大功率密度随碳氮比的升高先增大后减小,碳氮比为 15 时系统最大功率密度为 116.40 mW/m²;碳氮比增至 20 时,最大功率密度为 61.87 mW/m²。图 6(d)也表明随着进水碳氮比的增加,库仑效率先升后降。Yuanyao YE 等^[15]研究了进水氨氮(5~40 mg/L)对双室 MFC 系统性能的影响,结果表明,氨氮对 COD 去除率的影响很小;MFC 体系产生的最大电压为 598.9 mV,氨氮浓度越高对产电的抑制作用越弱,原因为阳极室中的产电细菌一般可抵抗高浓度的氨氮。在 MFC 阳极室中增加一定量的氨氮,可以提高阳极液的离子浓度和电导率,从而改善电子传递,有利于 MFC 反应器发电。而 Shuxin LIU 等^[16]的研究发现阳极液的电导率与 MFC 反应器产电无直接关系,因为增加进水电导率可能同时导致扩散电阻升高和欧姆电阻降低^[17-18]。基于上述研究,认为进水碳氮比对 MFC 功率输出的影响是复杂且难以量化的,原因在于不同废水接种底物的适应性不同。试验确定该系统最佳进水碳氮比为 15。

2.4 SEM 表征

对最佳 pH 和进水碳氮比下的电极样品进行 SEM 表征,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,改性后的二氧化锰微粒均匀附着在碳布电极的纤维上,为微生物的附着和生长提供更多位点,同时能增加产电微生物的导电性能。接种前的颗粒污泥粒径均匀,颗粒紧密。接种后的阴极电极处可观察到颗粒污泥有一部分已生长固定在电极上,且阴极表面覆盖着一层由颗粒污泥分泌的胞外聚合物(EPS),表明电极上的微生物具有较高活性。有研究认为 EPS 对细菌间的黏附有积极作用,且 EPS 能够参与微生物生理活动和改善颗



(a)接种前电极;(b)接种颗粒污泥;(c)阴极生物膜;(d)阳极生物膜

图 7 SEM 表征结果

Fig. 7 SEM characterization

粒的长期稳定性^[19]。合适的进水碳氮比能够刺激 EPS 的产生,从而改善细菌对固体表面的附着。然而过多的 EPS 分泌会降低细胞表面的疏水性,从而影响系统性能。阳极电极碳布纤维表面被产电微生物附着,在 pH 为 10 的进水条件下,微生物的大量分泌物形成一层薄膜连接各个菌体,在碱性条件下微生物生成更多的电子中介体,加强了菌群到固体电极之间的电子传递,从而提升系统整体的产电性能。

3 结论

(1)阴极接种好氧颗粒污泥的双室微生物燃料电池的最佳进水 pH 为 10,最佳碳氮比为 15,该条件下 COD 和氨氮的最大去除率分别为 96.05%、98.58%,输出电压最大为 459 mV,最大功率密度为 116.40 mW/m²,实现对废水中污染物的有效处理,同时进行产电。

(2)碱性环境下,合适的进水碳氮比能够促进微生物的生长,产电微生物能更多地分泌胞外聚合物并形成生物膜,增加系统的导电性能,从而提高产电效能,同时阴极室内颗粒污泥更好地维持稳态,提升对含氮污染物的去除效果。

参考文献

- [1] IDRIS S A, ESAT F N, ABD RAHIM A A, et al. Electricity generation from the mud by using microbial fuel cell[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 69: 02001.
- [2] CHENG Kai, HU Jingping, HOU Huijie, et al. Aerobic granular sludge inoculated microbial fuel cells for enhanced epoxy reactive

- diluent wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 229: 126-133.
- [3] YANG Ping, CHEN Tingting, LI Huiqiang. Aerobic granular sludge stabilization in biocathode chamber of newly constructed continue flow microbial fuel cell system treating synthetic and pharmaceutical wastewater[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(8): 3414-3423.
- [4] YUAN Yong, ZHAO Bo, ZHOU Shungui, et al. Electrocatalytic activity of anodic biofilm responses to pH changes in microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(13): 6887-6891.
- [5] MOY B Y P, TAY J H, TOH S K, et al. High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, 34(6): 407-412.
- [6] FUENTES-ALBARRÁN C, JUÁREZ K, GAMBOA S, et al. Improving the power density of a *Geobacter* consortium-based microbial fuel cell by incorporating a highly dispersed birnessite/C cathode[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2020, 95(12): 3169-3178.
- [7] LU Huabing, OEHMEN A, VIRDIS B, et al. Obtaining highly enriched cultures of *Candidatus Accumulibacter* phosphates through alternating carbon sources[J]. *Water Research*, 2006, 40(20): 3838-3848.
- [8] YONG Yangchun, CAI Zhao, YU Yangyang, et al. Increase of riboflavin biosynthesis underlies enhancement of extracellular electron transfer of *Shewanella* in alkaline microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130: 763-768.
- [9] ZHAO Chuanfu, WEI Dong, FAN Dawei, et al. Coupling of nitrifying granular sludge into microbial fuel cell system for wastewater treatment: System performance, electricity production and microbial community shift[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 326: 124741.
- [10] 张建民, 闫龙梅, 崔心水. 异养反硝化微生物燃料电池脱氮产电性能研究[J]. *工业水处理*, 2017, 37(4): 87-90.
- ZHANG Jianming, YAN Longmei, CUI Xinhui. Study on the performance of heterotrophic denitrification microbial fuel cell for nitrogen removal and electricity production[J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(4): 87-90.
- [11] 赵芷玲. pH对微生物和化学电池产电和脱氮的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHAO Zhiling. The effect of pH on power generation and denitrification in microbial and chemical fuel cells[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [12] BEHERA M, JANA P S, MORE T T, et al. Rice mill wastewater treatment in microbial fuel cells fabricated using proton exchange membrane and earthen pot at different pH[J]. *Bioelectrochemistry*, 2010, 79(2): 228-233.
- [13] ZHUANG Li, ZHOU Shungui, LI Yongtao, et al. Enhanced performance of air-cathode two-chamber microbial fuel cells with high-pH anode and low-pH cathode[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(10): 3514-3519.
- [14] 陶琴琴. 微生物燃料电池同步脱氮除磷及产电性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- TAO Qinqin. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal and electricity generation in microbial fuel cells[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [15] YE Yuanyao, NGO H H, GUO Wenshan, et al. Microbial fuel cell for nutrient recovery and electricity generation from municipal wastewater under different ammonium concentrations[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 292: 121992.
- [16] LIU Shuxin, LI Lan, LI Huiqiang, et al. Study on ammonium and organics removal combined with electricity generation in a continuous flow microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 1087-1096.
- [17] NAM J Y, KIM H W, LIM K H, et al. Variation of power generation at different buffer types and conductivities in single chamber microbial fuel cells[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25(5): 1155-1159.
- [18] NAM J Y, KIM H W, SHIN H S. Ammonia inhibition of electricity generation in single-chambered microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(19): 6428-6433.
- [19] LIU Yongqiang, LIU Yu, TAY J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, 65(2): 143-148.

[作者简介] 程洁(1997—), 硕士。电话: 18895369517, E-mail: 1755562128@qq.com。

[收稿日期] 2022-07-11(修改稿)