

文章编号:0253-9993(2013)S2-0453-07

污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合体系产电性能和 处理酸性矿井水的研究

蔡昌凤,罗亚楠,张亚飞,黄 志

(安徽工程大学生物与化学工程学院,安徽 芜湖 241000)

摘要:为原位治理高硫煤矿区酸性矿井水,建立微生物燃料电池污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合体系,考察了电极类型、阳极面积、极间距、离子浓度对产电性能和处理酸性矿井水中的硫酸盐效果的影响。单因素试验结果表明,碳布为阳极、极间距适中(3 cm)时,产电最佳;阳极面积越小、NaCl浓度越高,功率密度越大;硫酸根去除率的最佳条件为:碳布为阳极、极间距为5 cm、离子浓度适中,阳极面积越大,对硫酸根去除率越高。以硫酸盐去除最佳条件构建单室无膜碳片为阳极的耦合产电体系,所产生的最大功率密度为 2.0933 mW/m^2 ,10 d后污泥的COD去除率为43%,废水 SO_4^{2-} 的平均去除速率达 $194.4 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$,最高去除率为64%,比开路时的 SO_4^{2-} 去除率提高24%。污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合产电体系可同时实现降解剩余污泥和处理含 SO_4^{2-} 废水。

关键词:微生物燃料电池;硫酸盐还原菌;污泥;耦合体系;酸性矿井水;产电性能

中图分类号:X703;X172 文献标志码:A

A treatment study of acid mine wastewater and the performance of electricity generation by coupling system using sludge anaerobic fermentation-sulfate reducing bacteria

CAI Chang-feng, LUO Ya-nan, ZHANG Ya-fei, HUANG Zhi

(College of Biological and Chemical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to treat in-situ acid mine water from high sulphur coal mining area, a coupling system using microbial fuel cell sludge anaerobic fermentation and sulfate reducing bacteria was proposed to investigate the effects of sulfate treatment and the performance of electricity generation under the conditions of different types of electrode, anode area, pole spacing, and ion concentration. The results from a single factor experiment show that the optimal performance of electricity generation is achieved with anode of carbon cloth and moderate inter-electrode distance (3 cm), and the power density increases with the increase in NaCl concentration and the decrease in anode area. However, the optimal conditions for sulfate removal rate are as follows: carbon cloth is anode, inter-electrode distance is 5 cm. The larger anode area achieves a higher sulfate removal rate with a moderate ion concentration. For the constructed single room without membrane carbon piece as the anode coupling system with the optimal sulfate removal, the maximum power density of 2.0933 mW/m^2 , the sludge COD removal of 43% after 10 days, the average sulfate removal rate of $194.4 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ were attained respectively. The highest sulfate removal rate is 64.3%, which increase 24% comparing with the open circuit. The coupled electro-generation system using sludge anaerobic fermentation-sulfate can achieve synchronous degradation residual sludge and treat SO_4^{2-} wastewater.

Key words: microbial fuel cell; sulfate reducing bacteria; sludge; coupling system; acid mine water; electricity generation

收稿日期:2012-10-16 责任编辑:张晓宁

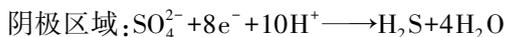
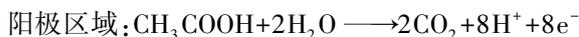
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51274001);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题资助项目(SKLCRSM10KFA05)

作者简介:蔡昌凤(1956—),女,安徽无为,人,教授,硕士生导师。E-mail:ccf2005@ahpu.edu.cn

酸性矿井水是伴随高硫煤矿开采而产生的岩溶水、矿坑水、地下含水层的疏放水以及生产、洗煤、防尘等用水经氧化、分解,并与水化合形成硫酸而产生的酸性水^[1-2],其中高浓度的硫酸盐会造成硫元素失衡,影响环境质量。国内外治理酸性矿井水的方法主要有中和法、湿地法及微生物法^[3],目前硫酸盐还原菌法处理含硫酸盐废水受到普遍关注。

近年来利用微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)处理污水得到快速发展^[4],以微生物为催化剂,微生物在代谢有机物质的同时产生电能,兼具废物处理与能源生产的功能,可大大降低污水处理成本。一般微生物燃料电池由阳极、阴极、质子交换膜和外电路构成。微生物燃料电池反应机理主要是阳极区域产电微生物将有机物氧化释放出电子和质子,产生的电子由阳极经外电路传递到阴极,质子在溶液中通过质子膜或直接传递到阴极区域,与电子受体中的氧结合生成水。通常以 O_2 作为阴极电子受体,在没有 O_2 时,其他物质^[5],如硝酸盐、硫酸盐、铁化物和锰化物在微生物催化下也可以作为最终电子接受物,形成厌氧生物阴极。汪家权等^[6]研究单室无膜MFC在外电阻为 $1\ 000\ \Omega$ 的条件下,平均反硝化速率可达 $29.3\ \text{mg}/(\text{L}\cdot\text{d})$ 。李金涛等^[7]构建双室型反硝化微生物燃料电池,以氧和硝酸盐共同用作阴极电子受体, NO_3^- -N去除负荷达 $0.111\ \text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。对硫酸盐还原菌的微生物燃料电池的研究已有报道^[8],Zhao等^[9]在单室微生物燃料电池MFC中引入硫酸盐还原菌回收单质硫,废水中硫化物和硫代硫酸盐的去除率分别达到91%和86%。浙江大学基于需盐脱硫弧菌构建的MFC运行性能良好^[10]。剩余污泥富含有机物,目前国内外学者多以剩余污泥作为电池燃料底物,资源化利用污泥。

本文基于硫酸盐还原菌构建产电系统,将 SO_4^{2-} 作为电子受体,以 SO_4^{2-} 模拟废水为阴极溶液,以污水处理厂的剩余污泥^[11]为阳极,构建单室无膜产电反应装置。电极反应原理为



利用产电强化污泥大分子的降解,为硫酸盐还原菌提供碳源,同时生物阴极处理含 SO_4^{2-} 废水,探索酸性矿井水地下水污染原位治理的新途径。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

硫酸盐还原菌菌种引自合肥工业大学资源与环

境工程学院,实验室驯化扩培。污泥取自芜湖市朱家桥污水处理厂厌氧段污泥,在厌氧条件下保存。

1.2 模拟酸性矿山废水的配制

分别取 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5.15 g, NaSO_4 1.48 g, NH_4Cl 0.191 g, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.075 g, 用1 000 mL自来水配制模拟酸性矿井水, SO_4^{2-} 的质量浓度为3 000 mg/L。用磁力搅拌器搅拌直至药品全部溶解,用1 mol/L HCl调节初始pH值。所用试剂均为分析纯。

1.3 试验方法

1.3.1 试验装置

耦合体系产电装置如图1所示,单室无膜微生物燃料电池MFC反应器体积为1 000 mL,整体呈圆柱形,密封上盖中间设有取样口,不加特殊说明时,阳极为表面积 $38\ \text{cm}^2$ 的碳片,阴极为表面积 $18\ \text{cm}^2$ 的铁片,极间距为5 cm,阴阳极之间采用铜导线连接,外接 $100 \sim 5\ 000\ \Omega$ 的可调电阻。电压数据采用优利德数字万用表UT61E接电脑在线记录,每隔5 min采集一次数据。

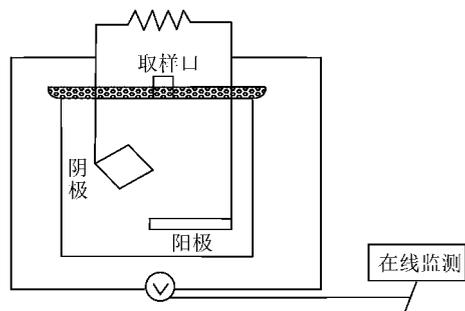


图1 耦合体系的产电装置示意

Fig. 1 Coupling system device schematic diagram

1.3.2 污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合体系的构建与检测方法

采用城市污水厂污泥为底物,实验室静置24 h后弃去上清,在MFC反应器一次性加入150 mL的厌氧污泥(TCOD为 $12\ 000 \sim 15\ 000\ \text{mg}/\text{L}$)和300 mL的模拟酸性矿山废水 SO_4^{2-} 质量浓度为3 000 mg/L、pH=3.0,按20%的体积比接种 3.25×10^8 个/mL硫酸盐还原菌菌液,并投加NaCl,使离子浓度为100 mmol/L。其中污泥的TCOD为 $12\ 000 \sim 15\ 000\ \text{mg}/\text{L}$ 。成功启动污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合产电体系后,每2天取样检测COD、 SO_4^{2-} 浓度,COD按国家标准重铬酸钾法(GB 11914—89)测定, SO_4^{2-} 浓度检测采用铬酸钡比色法(GB 13196—91)。除特别说明外,外电阻R均为 $500\ \Omega$ 。整个实验在室温(25 ± 2) °C下进行。

1.3.3 污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合体系产电性能的研究方法

污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合产电体系系统运行稳定后,通过调节外阻,采用稳态放电法拟合MFC极化曲线和功率密度曲线分别研究电极类型、面积、极间距、电解质浓度等因素对耦合体系产电性能的影响。产电系统输出的电压 U 采用优利德数字万用表连接电脑在线记录,电流 I 根据 $I=U/R$ 计算;功率密度 P 根据 $P=IU/A$ 计算, A 为阳极的有效表面积。产电系统的内阻 r 采用稳态放电法绘制的电流密度-功率密度曲线拐点 $r=R|_{P_{\max}}$ 获得^[12]或以电流密度-电压的极化曲线斜率求出。

2 结果与分析

2.1 污泥厌氧发酵-硫酸盐还原菌耦合体系的启动

耦合产电系统启动后,系统的输出电压和pH值变化如图2所示。输出电压与时间 t (对数坐标)的变化曲线表明:外接 $500\ \Omega$ 电阻,当接种硫酸盐还原菌后,系统开始放电,MFC的输出电压上升到 $250\ \text{mV}$,随后迅速下降至 $40\ \text{mV}$ 左右,这是因为阴极利用了系统中初始的溶解氧,使得开始电压高,当溶解氧用完转为硫酸盐作电子受体时,输出电压较低,维持在 $40\ \text{mV}$ 左右。在 $12\ \text{h}$ 内废水pH值由初始的 3.0 迅速上升至 6.57 ,迅速中和废水的原因是污泥中含有碱性物质,可以中和废水中的酸,使pH值上升至菌种适宜生长水平;另一方面生物阴极大量消耗厌氧生成的质子,pH值波动不大,一直保持在 7.5 左右。运行系统在 $300\ \text{h}$ 内保持稳定,MFC的输出电压稳定在 $40\ \text{mV}$ 左右,表明硫酸盐还原菌在系统电极上附着,该MFC成功启动。

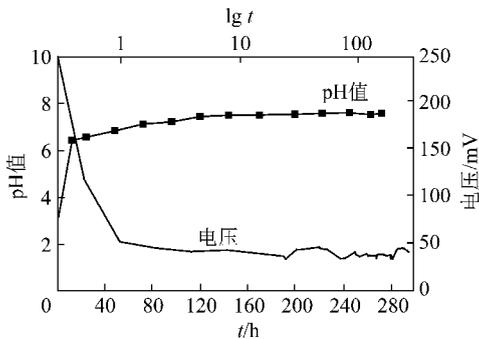


图2 耦合产电系统的输出电压和pH变化
Fig. 2 Coupling electrogenesis system output voltage variation and pH

2.2 耦合产电体系的影响因素

2.2.1 电极类型

阳极作为产电微生物附着的载体,不仅影响产电

微生物的附着量,而且影响电子从微生物向阳极的传递^[13],是影响系统产电性能的主要因素之一。分别采用价格相对便宜的碳布、碳棒、碳片作为阳极材料(面积均为 $38\ \text{cm}^2$)。调节外电阻 R 得到功率密度曲线(图3),可以看出,碳布的功率密度最大,输出的最大功率密度为 $1.23\ \text{mW}/\text{m}^2$,碳棒最低。系统内阻碳片最小,碳布最大。分析认为碳布电极材料的比表面积大,能有效提高电子的传递和微生物的反应接触面积,从而提高了系统的产电能力。考虑到碳布在处理废水工程中容易松散脱落,实用效果不好,后续实验采用碳片作为阳极材料。

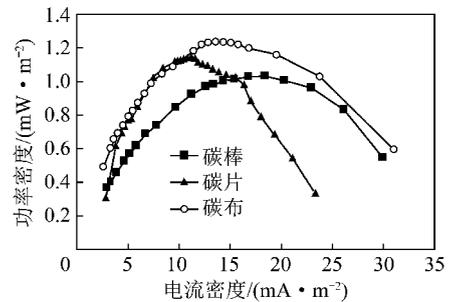


图3 电极类型对耦合产电体系功率密度的影响
Fig. 3 Influence of electrode type on power density of the coupling electrogenesis system

3种电极类型对硫酸盐去除速率的影响并不特别显著,后期碳布与碳片日均去除率都接近 5% 。由图4可知,碳布 $10\ \text{d}$ 累计硫酸盐去除率(48.48%)略高于碳片(46.47%)和碳棒(44.68%)。不同的电极类型条件下, SO_4^{2-} 去除趋势与产电效果一致。

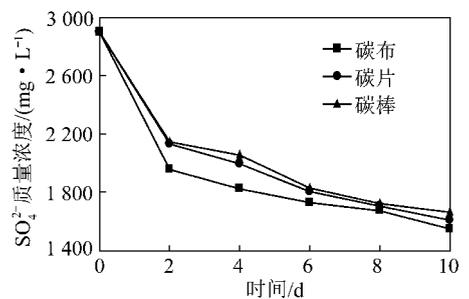


图4 电极类型对耦合产电体系中硫酸盐去除效果的影响
Fig. 4 Influence of electrode type on sulfate removal effect of the coupling electrogenesis system

2.2.2 阳极面积的影响

分别取面积 $8, 18, 38\ \text{cm}^2$ 的碳片进行试验,由图5可知:随着阳极表面积的增大,电压增大,说明传递电子速率增大。但由欧姆定律可知,功率密度与面积成反比,与电压成正比,因此,系统的功率密度与阳极表面积非线性关系,当阳极面积为 $8\ \text{cm}^2$ 时,功率密度最大,可达到 $4.39\ \text{mW}/\text{m}^2$ 。

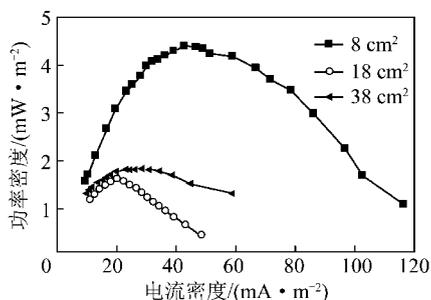


图5 阳极面积对耦合产电体系功率密度的影响

Fig. 5 Influence of anode area on power density of the coupling electrogenesis system

硫酸盐的去除随阳极表面积增大而显著增大(图6),阳极表面积为 38 cm^2 时的平均去除速率为 $140.2\text{ mg}/(\text{d} \cdot \text{L})$,说明表面积增大可供更多的微生物生长繁殖^[14]、更多的硫酸根被还原。阳极面积对 SO_4^{2-} 的去除趋势与其对产电能力的影响不一致。

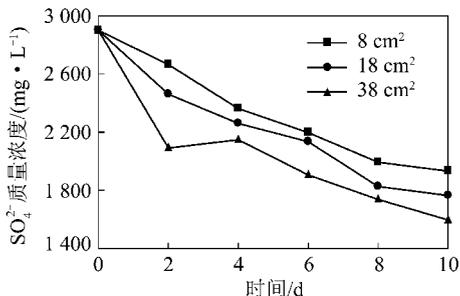


图6 阳极面积对耦合产电体系中硫酸盐去除效果的影响

Fig. 6 Influence of anode area on sulfate removal effect of coupling electrogenesis system

2.2.3 极间距的影响

阳极与阴极的距离会直接影响产电系统质子的传递,由图7可知,当极间距由 5 cm 降到 3 cm 时,最大功率密度随着极间距的减小而增加,由 $2.04\text{ mW}/\text{m}^2$ 增加到 $3.61\text{ mW}/\text{m}^2$ 。适当减小极间距可以减少传质阻力提高功率密度^[15]。但极间离过短会影响阳极微生物的活性,对厌氧的产电微生物有一定的伤害作用。当极间距由 3 cm 降到 1 cm 时,最大功率密度反降,为 $2.25\text{ mW}/\text{m}^2$ 。系统对 SO_4^{2-} 的去除趋势(图8)也表明:最高去除率达 50.62% ,平均去除速率为 $151.8\text{ mg}/(\text{d} \cdot \text{L})$ 。极间距为 1 cm 时,耦合体系中硫酸盐的去除率为 47.64% 。

2.2.4 离子浓度的影响

添加盐类可以降低溶液的内阻,从而提高基质的导电性^[16]。通过添加 NaCl 使离子浓度为 $0, 100, 200, 300\text{ mmol/L}$,研究溶液离子强度对产电性能的影响(图9),结果表明:随着盐度的增加,内阻持续降低,由 $1400\ \Omega$ 降到 $900\ \Omega$,相应的功率密度逐步上

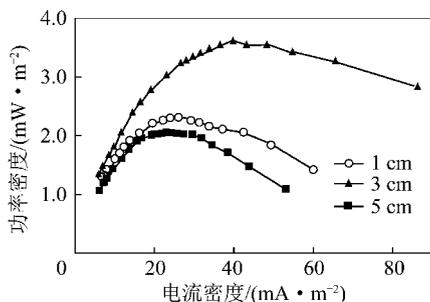


图7 极间距对耦合产电体系功率密度的影响

Fig. 7 Influence of Pole spacing on power density of coupling electrogenesis system

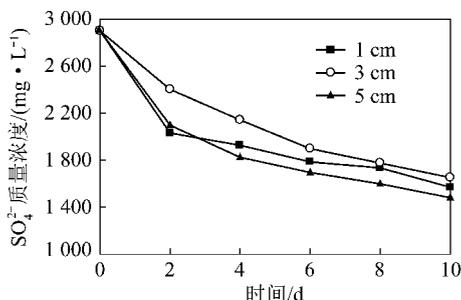


图8 极间距对耦合产电体系中硫酸盐去除效果的影响

Fig. 8 Influence of pole spacing on sulfate removal effect of coupling electrogenesis system

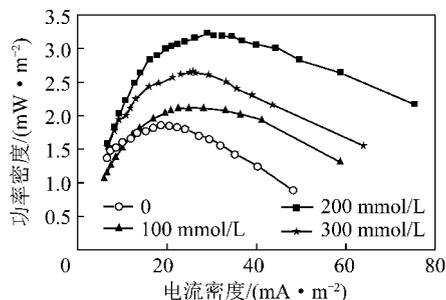


图9 离子浓度对耦合产电体系功率密度的影响

Fig. 9 Influence of ion concentration on power density of coupling electrogenesis system

升,分别为 $1.86, 2.11, 2.74, 3.22\text{ mW}/\text{m}^2$ 。可见,随着 NaCl 投加量的增大,产电效果明显变好。说明 NaCl 的加入增强了耦合体系中溶液的导电性,使MFC内阻下降,最终促使了输出功率密度的显著提高。

由图10可知,当离子添加剂在 200 mmol/L 以下时,硫酸盐的去除随着离子强度的提高而提高,但进一步提高到 300 mmol/L 时,系统 SO_4^{2-} 的去除反而降低了 8% ; 200 mmol/L 时产电系统的去除率最高,平均去除速率为 $169.3\text{ mg}/(\text{d} \cdot \text{L})$ 。这表明离子浓度过高会导致微生物细胞渗透压失衡,影响微生物的生长。

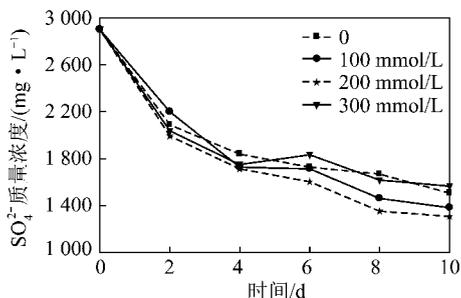


图10 离子浓度对耦合产电体系中硫酸盐去除率的影响

Fig. 10 Influence of ion concentration on sulfate removal rate of coupling electrogenesis system

2.3 耦合产电体系的产电性能和对硫酸盐的去除效果

2.3.1 耦合产电体系的产电性能

通过2.2节的实验结果比较,以硫酸根去除最佳的条件建立以 38 cm^2 碳片为阳极的耦合产电系统,极间距控制在 5 cm ,离子浓度为 200 mmol/L ,在室温下进行实验,采用稳态放电法测定电压(图11)。

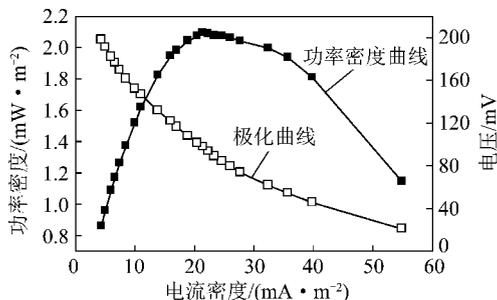


图11 产电系统的功率密度曲线和极化曲线

Fig. 11 Electrogenesis system power density curve and polarization curve

因电流密度-电压极化曲线为非特性,因此由功率密度曲线输出最大功率密度 2.09 mW/m^2 ,求得产电系统的内阻为 $1\ 200\ \Omega$ 。与其他微生物燃料电池相比,本系统的内阻大,功率密度不高。由刘志华等^[17]所研究的微生物燃料电池内阻分布可知,阳极和阴极是影响内阻的主要因素,本文是以硫酸根去除最佳条件建立的,未控制阴极和阳极对内阻影响,使得内阻偏大。功率密度不高是因为硫酸盐的还原反应与外电路电子的传递过程存在竞争关系,硫酸盐的还原引起的电子分流导致产电系统输出功率密度不高。

2.3.2 耦合产电体系对硫酸盐的去除效果

室温下并列连续运行产电系统与开路系统,产电系统外电阻为 $500\ \Omega$ 。对模拟矿井废水 SO_4^{2-} 的去除情况如图12所示。

系统运行 10 d ,产电系统对废水 SO_4^{2-} 的平均去除速率达 $194.4\text{ mg}/(\text{L}\cdot\text{d})$,最高去除率为 64% ,比

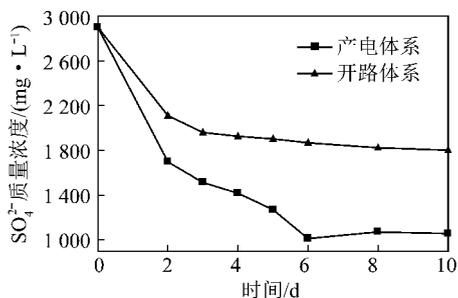


图12 耦合产电体系与开路体系对硫酸盐去除效果的比较

Fig. 12 Coupling electrogenesis system and open system for sulfate removal comparison

开路系统 SO_4^{2-} 的去除率高 24% 。运行期间两个系统 SO_4^{2-} 的浓度变化趋势有显著差异:最初两天 SO_4^{2-} 浓度均快速下降,但产电系统大于开路系统;从第3天开始,开路系统的 SO_4^{2-} 浓度下降平缓,显著小于产电系统,说明耦合体系以硫酸盐的还原反应为主,降解污泥产生的电子大部分用于硫酸盐的还原反应;但产电系统降解污泥产生的电子还可以通过外电路传递到阴极区域,生物阴极强化了 SO_4^{2-} 作为电子受体在阴极被还原^[18]。6 d后产电系统硫酸盐的还原速率也变得平缓,分析认为因耦合体系为静态系统,扩散速率成为主要速率控制步骤所至。

实验表明:①硫酸盐的还原反应与电子的传递过程存在竞争关系,这一结论与王超等^[19]研究单室型微生物燃料电池处理黄姜废水的性能中得出的结果相一致;②产电系统阳极产生的电子可以通过外电路传递给阴极,验证了耦合产电系统生物阴极强化处理 SO_4^{2-} 模拟矿井废水的可行性。

2.3.3 耦合产电体系中COD的变化

在厌氧条件下,污泥作为底物被产电菌利用^[20],转化为细胞物质、电子、二氧化碳、大量挥发性脂肪酸和醇,COD含量随之降低。COD的去除变化如图13所示,相比之下,产电系统比开路的COD去除速率高,对有机物的降解速率快。COD的初始质量浓度达到 $12\ 000\text{ mg/L}$,反应 10 d 后产电系统的COD质量浓度为 $6\ 800\text{ mg/L}$,去除率达 43% 。说明耦合系统在产生电能的同时对污泥降解有一定的处理效果,但如何提高污泥的降解率有待进一步研究。

3 结 论

(1)影响耦合系统产电性能主要因素为电极类型、离子添加剂、阳极面积、极间距,产电性能的最佳条件为电极类型碳布优于碳片、碳棒;添加离子剂能有效改善产电性能;阳极面积为 8 cm^2 时的功率密度

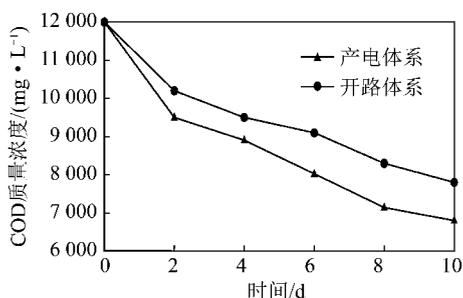


图13 耦合产电体系和开路体系中污泥 COD 的变化

Fig. 13 Variations of COD in coupling electrogenesis system and open system sludge

最大,为 4.39 mW/m^2 ;极间距为 3 cm 时的功率密度最大,为 3.61 mW/m^2 。

(2)影响耦合系统硫酸盐去除性能的主要因素为:离子添加剂、极间距、阳极面积、电极类型。 SO_4^{2-} 的去除受电极类型影响较小,离子添加剂为 200 mmol/L 、极间距为 5 cm 时,硫酸盐的去除率最高;阳极表面积越大,硫酸盐去除效果越好。

(3)以 SO_4^{2-} 去除最佳的条件构建单室无膜 MFC 系统,最大功率密度达 2.09 mW/m^2 。运行产电系统 10 d 后,废水 SO_4^{2-} 的平均去除速率达 $194.4 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$,最高去除率为 64% ,比开路时的 SO_4^{2-} 去除率提高 24% ,COD 去除率为 43% 。验证了耦合产电系统生物阴极强化处理 SO_4^{2-} 模拟矿井废水的可行性,实现处理含 SO_4^{2-} 废水的同时降解剩余污泥的双重目的,为酸性矿井水地下水污染的原位治理修复提供了新途径。

参考文献:

- [1] 赵峰华,孙红福,李文生. 煤矿酸性矿井水中有害元素的迁移特性[J]. 煤炭学报,2007,32(3):261-266.
Zhao Fenghua, Sun Hongfu, Li Wensheng. Migration of hazardous elements in acid coalmine drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(3): 261-266.
- [2] 马守臣,吕鹏,邵云,等. 粉煤灰和菌渣配施对矿井水污染土壤微生物学特性和小麦生长的影响[J]. 煤炭学报,2012,37(S1):207-211.
Ma Shouchen, Lü Peng, Shao Yun, et al. Effect of soil improvements with edible fungus residue and fly ash on soil micro-biological properties and growth of wheat in the mine water contaminated soil[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 207-211.
- [3] 胡振琪,马保国,张明亮,等. 高效硫酸盐还原菌对煤矸石硫污染的修复作用[J]. 煤炭学报,2009,34(3):400-404.
Hu Zhenqi, Ma Baoguo, Zhang Mingliang, et al. Bioremediation of sulfuric contamination from coalwastes by sulfate-reducing bacteria (SRB)[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 400-404.
- [4] 林茂宏,衣相霁,李凤祥. 微生物燃料电池用于废水能源化的研究进展[J]. 环境科学与技术,2012,35(6):178-184.

- Lin Maohong, Yi Xiangfei, Li Fengxiang. Progress in research of wastewater energy recycle with microbial fuel cells[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(6): 178-184.
- [5] 郑晓. 剩余污泥微生物燃料电池的产电性能及基质变化研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
Zheng Yao. The electrical properties and changes on the substrates of microbial fuel cells using excess sludge as fuel[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [6] 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):254-256.
Wang Jiaquan, Xia Xuelan, Chen Shaohua, et al. Removing nitrate from wastewater in single and double-chamber microbial fuel cell[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(2): 254-256.
- [7] 李金涛,张少辉. 反硝化微生物燃料电池的基础研究[J]. 中国环境科学,2012,32(4):617-622.
Li Jintao, Zhang Shaohui. Basic research on denitrifying microbial fuel cell[J]. China Environmental Science, 2012, 32(4): 617-622.
- [8] Zhao F, Rahunen N, Varcoe J R, et al. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42: 4971-4976.
- [9] Zhao F, Nelli Rahunenb, John R. Varcoe Factors affecting the performance of microbial fuel cells for sulfur pollutants removal[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2009, 24: 1931-1936.
- [10] Ding Ping, Shao Haiibo, Liu Guangzhou, et al. Electricity generation from a microbial fuel cell employing desulfovibrio salexigens[J]. Electrochemistry, 2007, 13(2): 119-121.
- [11] 赵庆良,姜珺秋,王琨,等. 微生物燃料电池处理剩余污泥与同步产电性能[J]. 哈尔滨工程大学学报,2010,31(6):780-781.
Zhao Qingliang, Jiang Junqiu, Wang Kun, et al. Simultaneous treatment of sludge and generation of electricity with a microbial fuel cell[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(6): 780-781.
- [12] 曹效鑫,梁鹏,黄霞. “三合一”微生物燃料电池的产电特性研究[J]. 环境科学学报,2006,26(8):1252-1253.
Cao Xiaoxin, Liang Peng, Huang Xia. A membrane electrode assembly typed microbial fuel cell for electricity generation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(8): 1252-1253.
- [13] 陈立香. 基于废水处理的微生物燃料电池的研制及基础研究[D]. 汕头:汕头大学,2010.
Chen Lixiang. Preparation of microbial fuel cell based on wastewater treatment and its fundamental researches[D]. Shantou: Shantou University, 2010.
- [14] 郑晓,刘志华,李小明,等. 剩余污泥生物燃料电池输出功率密度的影响因素[J]. 中国环境科学,2010,30(1):64-68.
Zheng Yao, Liu Zhihua, Li Xiaoming, et al. Influencing factors for output power density of microbial fuel cells using excess sludge from wastewater treatment plant as fuel[J]. China Environmental Science, 2010, 30(1): 64-68.
- [15] 方丽,刘志华,李小明,等. 微波预处理污泥上清液为燃料的微生物燃料电池的影响因素研究[J]. 环境工程学报,2011,5(4):930-932.
Fang Li, Liu Zhihua, Li Xiaoming, et al. Influential factors in micro-

- bial fuel cells using supernatant fluid of microwave pretreatment sludge as fuel[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(4):930-932.
- [16] 刘莹,徐惠忠,韩京龙,等. 基质浓度·电极距离·离子强度对 MFC 影响的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(9):157-159.
Liu Ying, Xu Huizhong, Han Jinglong, et al. Influence of substrate concentration, electrode space and ionic strength on microbial fuel cell[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(9):157-159.
- [17] 刘志华,李小明,方丽,等. 微波污泥上清液为燃料的微生物燃料电池内阻分布[J]. 环境工程学报, 2011, 5(12):2885-2886.
Liu Zhihua, Li Xiaoming, Fang Li, et al. Distribution of internal resistance in microbial fuel cell using supernatant fluid of Microwave pretreated sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(12):2885-2886.
- [18] Dutta P K, Rabaey K, Yuan Z G, et al. Spontaneous electrochemical removal of aqueous sulfide[J]. Water Res., 2008, 42(20):4965-4975.
- [19] 王超,薛安,赵华章,等. 单室型微生物燃料电池处理黄姜废水的性能研究[J]. 环境科学, 2009, 30(10):3094-3095.
Wang Chao, Xue An, Zhao Huazhang, et al. Performance of a single chamber microbial fuel cell utilizing dioscorea zingiberensis C. H. wright wastewater [J]. Environmental Sciences, 2009, 30(10):3094-3095.
- [20] 刘晶晶,孙永明,孔晓英,等. 微生物燃料电池中底物的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6):105-106.
Liu Jingjing, Sun Yongming, Kong Xiaoying, et al. Research advance on substrates in microbial fuel cells[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(6):105-106.