

微生物燃料电池与常规污水处理技术结合 的研究进展*

刘 晔^{1,2} 张宝刚^{*,1,2} 田彩星^{1,2} 冯传平^{1,2}
周 向³ 刘永伟⁴

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;
2. 地下水循环与环境演化教育部重点实验室,北京 100083;
3. 中冶京诚工程技术有限公司,北京 100176;4. 北京市垃圾渣土管理处,北京 100067)

摘要:通过总结近年来微生物燃料电池(MFC)与常规污水处理技术的结合案例,发现与MFC结合的污水处理技术主要集中在物理化学法、生物法及高级氧化法三类。与物理化学法的结合侧重于利用MFC的产电特性,如电吸附法和电渗析法;与生物法的结合分为好氧和厌氧法两种方式,主要利用MFC的多重系统特性,大大提升除污性能;与高级氧化法的结合体现在光催化法、电化学法和电Fenton法三方面,其中,与电Fenton法的结合是研究的热点。将MFC与常规污水处理技术从产能和净化的双重角度进行结合,既为节能型污水处理技术的发展奠定基础,同时也扩大了MFC的应用范围,为今后MFC与其他技术的结合研究提供了借鉴和依据。

关键词:微生物燃料电池;常规污水处理技术;结合;净化;节能

中图分类号:X52 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2014.05.019

Research Progress in Combination of Microbial Fuel Cell and Conventional Wastewater Treatment Technology*

LIU Ye^{1,2} ZHANG Baogang^{*,1,2} TIAN Caixing^{1,2} FENG Chuanping^{1,2}
ZHOU Xiang³ LIU Yongwei⁴

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083;
2. Key Laboratory of Groundwater Circulation and Evolution of Education, Beijing 100083;
3. MCC Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176;
4. Beijing Solid Waste Administration Department, Beijing 100067)

Abstract:The combination of MFC with conventional water treatment technologies were concluded. The water treatment technologies combined with MFC were focused on physical-chemical processes, biological methods and advanced oxidation processes. The emphasis of combination of MFC and physical-chemical processes was placed on the utilization of the energy-generation character of MFC, such as electric adsorption and electro-dialysis. And combination with biological methods was classified as aerobic and anaerobic methods, which made use of the multiple system of MFC to greatly improve the pollutants removal. The combination with advanced oxidation was divided into three aspects, i. e. photocatalysis, electrochemical methods and electro-Fenton methods, among which the focus was the combination with electro-Fenton methods. Considering energy generating and wastewater purification, the foundation of energy-saving water treatment technology can be laid by combination of MFC and the traditional wastewater treatment technology and the application scope of MFC was expanded simultaneously, providing the reference of integration systems.

Key words: Microbial fuel cell (MFC); conventional wastewater treatment technology; combination; purification; energy-saving

1 引言

近年来,能源问题极大地影响了社会的经济发展和人类的生活方式,解决能源问题的方式之一是加大对可再生能源的研究与开发的力度^[1]。微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFC)是一种利用

2014-05-20 收稿,2014-08-22 接受

* 高等学校博士学科点专项科研基金(20120022120005),国家自然科学基金(21307117),北京市高等学校青年英才计划项目(YETP0657)资助

** 通讯作者,E-mail:zbgcugb@gmail.com

微生物作为催化剂,将有机物中的化学能直接转化为电能的装置^[2,3],为可再生能源的生产和污水处理提供了一种新途径。早在 1930 年,英国植物学家 Potter 便发现细菌培养液可产生电流,这是关于微生物燃料电池的最早报道^[4]。上世纪 80 年代,电子介体的引入大大提升了 MFC 的输出电能^[5],但电子介体的昂贵和不稳定性限制了它在 MFC 中的应用;直到 20 世纪末,无介体微生物燃料电池的出现实现了 MFC 研究领域的突破^[6]。该技术能在去除污染物的同时收获电能,使得 MFC 既可作为污水处理单元应用,也可用作电子元件。针对其两方面的特性,MFC 的应用主要集中在三方面:污水处理^[7]、电助产氢^[8]和生物传感器^[9]。污水处理利用了 MFC 对污染物的去除能力,而后两者则是利用了其电子元件的特性。近年来,MFC 无论是在污染物处理还是电能输出方面都有很大改进,但是,产能效率低和成本高昂成为了限制其大规模应用的主要因素。研究者通过研究阳极微生物产电机理^[10]、设计和改进电池结构^[11]、改良阴阳极材料^[12,13]、优化操作条件^[14]等方面的努力来提高 MFC 的电能输出、降低成本,虽有一定进展,但离实际应用仍有距离。因此,有必要开发微生物燃料电池新的应用形式。

常规的污水处理工艺通常包括物理法、化学法、生物法以及高级氧化法。物理法和化学法的制约因素在于成本高,而且可能会造成二次污染;生物法虽然具有较高的去除效率,但对环境要求较高,而且处理周期相对较长;近来,对于高级氧化法的关注有所上升,但其同样存在能耗高、投资大的问题^[15]。因此,越来越多的研究者考虑将 MFC 这一清洁能源技术与常规的污水处理工艺相结合,从而达到增强去除效率或者降低能耗,甚至两者兼得的效果。

本文总结并分析了近年来 MFC 与常规污水处理技术结合的案例,为后续 MFC 的应用拓展及其与其他污水处理技术的整合提供借鉴和依据。

2 MFC 的结构及工作原理

MFC 的典型结构如图 1 所示,阳极室和阴极室由离子交换膜分隔开。阳极和阴极由外电阻连接,形成回路。在 MFC 中,氧化底物的微生物通常在厌氧条件下,通过电子传递中的介体或者微生物自身的纳米导线将电子传递给阳极,再通过连接阴阳两极的导线传递给阴极。而质子通过隔开两极的质子交换膜 (Proton Exchange Membrane, PEM) 到达阴

极,然后在含铂的阴极催化下与电路传回的电子和氧气反应生成水,实现电池内电荷的传递,从而完成整个生物电化学过程和能量转化过程^[16]。

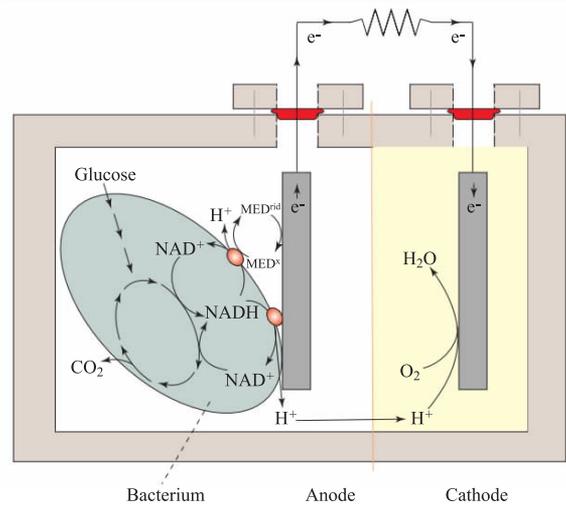


图 1 微生物燃料电池结构示意图^[17]

Figure 1 The schematic diagram of configuration of the MFC^[17]

MFC 是一种复合体系,兼具厌氧处理和好氧处理的特点。从微生物学的角度,它可以被看作是一种厌氧处理工艺,细菌必须生活在无氧的环境下才能产电;但就整体而言,阴极室是耗氧的,氧气是整个体系的最终电子受体,因此它又是好氧处理工艺,只不过氧没有直接用于微生物呼吸。正是 MFC 体系的特殊性,使其与其他污水处理技术的结合有了更多的契合点和更广阔的前景。

3 MFC 与常规污水处理技术结合的应用

常规污水处理技术与 MFC 在实际应用中各有所长,将两者从产能和净化双重角度进行创新性结合,将对未来的节能型污水处理技术研发起到推动作用。

3.1 MFC 与传统物理化学法结合

污水物理化学处理法是运用物理和化学的综合作用使污水得到净化的方法,是对污水的一个浓缩和净化的过程,包括浮选、吹脱、结晶、吸附、萃取、电解、离子交换、电吸附和电渗析等。其中,电吸附和电渗析技术是对吸附和离子交换技术的进一步提升,通过电位的施加,去除污水中难生物降解的有机物质,提升净化效果。MFC 恰好是可以产生电能的装置,为两者的联用提供了契机。Yang 等^[18]探究了利用多个单室无膜空气阴极 MFC 替代外加电源对苯酚进行电吸附去除的效果,结果表明:MFC 电

压的施加,促进了对苯酚的吸附,比传统吸附作用得到的吸附量增加了 48%。因此,MFC 可以作为电吸附作用的电位施加者整合到电吸附系统中,从而避免外加电源的能耗问题。Chen 等^[19]利用 MFC 供电的双极膜电渗析作用产碱,并将其应用到沼气提纯中,MFC 中阳极和阴极底物分别采用乙酸钠和铁氰化钾。随着电压的增大,产碱量增大,产碱格室 pH 最大可达到 11.6,与此同时,检测不到二氧化碳的存在。与 Rabaey 等^[20]利用薄片 MFC 组合的阴极产碱相比,该方法 pH 最大值略低,但由于 Rabaey 等外加的电压较高(1.77 V),因此阳极电势必须保持在 -0.3 ~ -0.2 V,以维持微生物的活性和性能的稳定;同时,由于钙的清除和曝气等增加了成本,也降低了阴极的产电性能,而 Chen 等所用方法不存在这些问题。

MFC 与物理化学方法结合主要是运用了其产电特性,可替代外加电源,从而实现电能的原位利用,达到节能的目的。目前,将 MFC 与相似技术相结合的研究较多,如微生物电解池(MEC)^[21]和微生物脱盐池(MDC)^[22]等,将 MFC 作为电源来为其他技术供电的研究很少。物理化学法中常涉及到电能的供给和利用,而 MFC 作为一个产生电能的装置,为两者的结合创造了契合点,因此,MFC 产生电能的原位利用将成为一种趋势,从而为 MFC 的应用扩展和节能型水处理技术的开发提供新思路。

3.2 MFC 与传统生物法结合

生物法通常分为好氧生物法和厌氧生物法。下面分别探讨 MFC 与这两种技术的结合。

3.2.1 MFC 与好氧生物法结合

好氧生物法是在氧气存在的条件下,利用微生物将污水中的有机物转化为自身代谢的一部分或者稳定的无机物或简单有机物。它主要分为活性污泥法和生物膜法两类,广泛应用于城市污水处理中,对碳氮磷等营养物质及部分重金属离子有良好的降解吸附效果。但它也存在局限,部分污染物需要经历厌氧过程才能去除(如反硝化过程),与厌氧工艺结合能形成更完善的系统。而就微生物角度来说,MFC 正是一个厌氧工艺,因为微生物在厌氧条件下才能产电。针对这一点,Virdis 等^[23]将一个双室 MFC 与好氧生物反应器联用,实现了对污水中碳和氮的同时去除,装置图如图 2。MFC 的阳极由乙酸钠和氯化铵分别为微生物提供碳源和氮源,而阴极则为碳酸氢钠和亚硝酸钠。污水先进入 MFC 的阳

极,消耗污水中的碳,降低 COD 浓度,而后含有氨氮的阳极出水被通入到一个好氧生物反应器中,进行硝化作用,出水回到 MFC 的阴极,进行反硝化作用,从而达到碳氮同时去除的目的。Cheng 等^[24]构建了实验室规模的两段式上流型 MFC-固定化生物曝气过滤器,用于处理棕榈油厂废水。对于 COD 和氨氮浓度分别为 10 g/L 和 125 mg/L 的进水,去除率最终分别达到了 96.5% 和 93.6%,显现出了很好的去除性能。

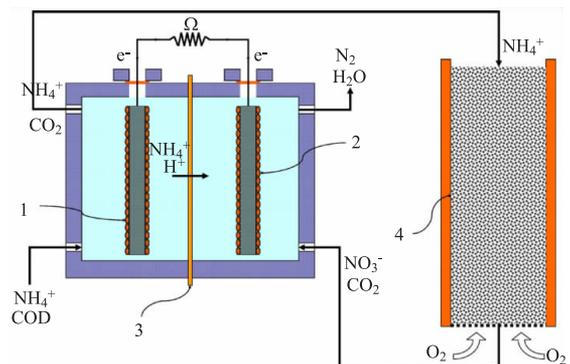


图 2 碳氮联合去除同时产电的氮循环系统^[23]

Figure 2 Nitrogen loop system for the combined removal of carbon and nitrogen and electricity generation^[23]

Li 等^[25]将 A/O 工艺与 MFC 系统进行耦合,降解偶氮染料,结果表明,相对于其他方法,化学需氧量(COD)的降解得到进一步提升,且有毒副产物的积累减少,显示了较大的优越性。Liu 等^[26]把 MFC 产生的电能用于序列间歇式活性污泥工艺(SBR)工艺的曝气过程,降低了系统能耗。在此过程中,MFC 的最大输出功率达到了 2.34 W/m³,并去除了污水中 18.7% 的 COD,为提升现有活性污泥法提供了一个行之有效的节能型方案。Sayess 等^[27]对好氧生物转盘技术(Rotating bioreactor, RBC)与 MFC 的结合进行了研究,用三个 RBC-MFC 单元在去除含碳和含氮化合物的同时产电。该方法去除效率与 RBC 性能相近,在脱氮方面显示了更好的性能,且在此过程中获得了平均 0.3 V 的电压。

通过 MFC 与好氧生物处理法的结合,污染物经历了好氧和厌氧两个阶段的去除,相对于单纯的好氧技术,去除效果有了明显提升,同时,MFC 的产电性能使得系统的能耗明显降低,或者是获得了电能。

3.2.2 MFC 与厌氧生物法结合

厌氧生物处理过程是在多种微生物的共同作用下,将大分子有机物最终转化成甲烷、二氧化碳、水、硫化氢和氨等。

厌氧处理与好氧处理相比,有较好的去除效果,可降解一些好氧处理难以降解的物质。但要使出水水质达到国家标准,还需进行补充处理;污泥增长缓慢,因此装置启动周期长(第一次启动需要8~12周左右),且操作控制因素较为复杂。因此,有必要做进一步优化^[28]。污水厌氧生物处理工艺按微生物的凝聚形态可分为厌氧活性污泥法和厌氧生物膜法。前者包括普通消化池、厌氧接触消化池、升流式厌氧污泥床(UASB)、厌氧颗粒污泥膨胀床(EGSB)等;后者包括厌氧生物滤池、厌氧流化床(Anaerobic Fluidized Bed, AFB)和厌氧生物转盘。

在厌氧活性污泥法领域研究较多的是厌氧消化过程,通常分为产酸、产气和甲烷化三个阶段。Zhao等^[29]将MFC与一个改良的连续搅拌釜反应器整合,应用到一个两段式厌氧消化系统的酸化段中。酸化过程中pH的变化会明显影响两段式系统的稳定性。结果表明,稳定的电压输出有利于维持pH稳定,在运行期间,MFC所产生的电压稳定在430~470 mV,而pH维持在6.4~6.8,从而保证了系统运行的稳定性。Sharma等^[30]探索了厌氧产氢过程与MFC的结合,污水先经过厌氧产氢发酵罐进行发酵产氢,而后,其出水输入到一个单室MFC中,获得了2.85 mol H₂/mol 葡萄糖的最大产氢量,而MFC则得到了559 J/L的最大能量回收及97%的COD去除率。Wang等^[31]所用的产氢体系以纤维素为底物产氢,包括一个发酵反应器、一组MFC和一个微生物电解池(MEC),如图3。该系统以发酵反应器的出水作为MFC的营养液,两个25 mL的MFC串联为MEC供电。MFC的最大输出电压达到了0.43 V,并得到了0.48 m³ H₂/(m³·d)(以MEC体积为基准)。此系统的产氢量比单纯的发酵过程增加了41%,且获得了23%的能量回收率。

Zhang等^[6]构建了一个UASB、曝气生物滤池(BAF)和MFC联用的系统处理糖蜜废水。该UASB-MFC-BAF系统得到了1410.2 mW/m²的最大功率密度。COD浓度为127500 mg/L的进水进入到系统中后,COD、硫酸盐和色度的总去除率分别达到了53.2%、52.7%和41.1%。其中,UASB单元的作用主要是COD和硫酸盐去除,而MFC则是利用硫酸盐的还原产物硫化物来产电,BAF单元主要用于脱色及苯酚降解。而Sukkasem等^[32]对两者的结合则是按照UASB的结构特点对MFC的结构进

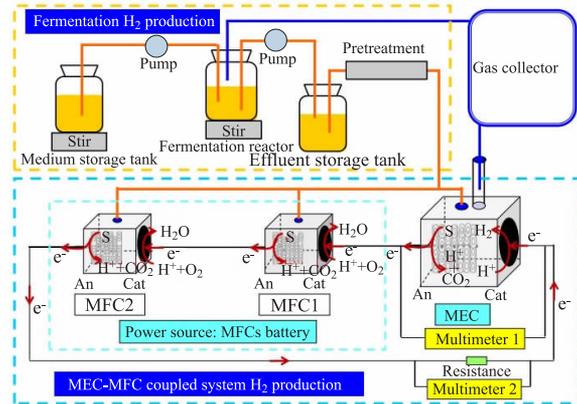


图3 由发酵过程、MFC和MEC整合的产氢工艺示意图^[31]

Figure 3 Sketch of the integrated hydrogen production process consisting of fermentation, an MEC and MFCs^[31]

行改良,形成了上流式生物滤池电路,用于处理生物柴油废水。在经历了与发酵和进水的调节过程后,获得了15 g COD/(L·d)的高COD去除率。系统的处理成本仅为1775.7元/m³,处理每kg COD的能耗为0.152 kW,与传统厌氧消化相比,成本降低了一个数量级。

Tian等^[33]将一个双室MFC的阴极改造成了一个厌氧生物膜反应器,从而形成了一个厌氧生物电化学系统,可连续稳定运行600 h以上,持续产生电能为0.132 V,得到最大功率密度为1.16 W/m³的阴极室,并获得了91.6%的COD去除率以及94.8%的硝酸盐去除率。而Huang等^[34]利用AFB与MFC整合的系统处理酿酒废水,得到了80%~90%的COD去除率,在外阻为120 Ω时最大功率密度达到了124.03 mW/m²。

此外,氢是一种理想的无污染能源,光合产氢日益受到人们的关注。光合细菌中红螺菌科的菌株能利用碳水化合物基质,在厌氧光照条件下分解有机物质,并释放分子氢^[35]。Chen等^[36]将光合产氢过程与MFC结合起来,把光合细菌光合作用产生的氢气通入到MFC中作为燃料,最终产生了最大843 mV的电压。光能转化率(以氢气为产物)平均达到了1.7%±0.17,以电能为最终产物的光能转化率为1.13%±0.09。

生物法与MFC的结合主要是从微生物角度的联合,利用了其兼具好氧厌氧环境的体系特点及去除污染物的性质。在以后的研究中,可结合MFC已有研究,将MFC配合其他工艺处理特定废水,以期达到更全面的去除效果。两者的结合由结构上分离的单个逐渐向着一体化的反应器演变,节省了成本,

也有利于发生反应,提升系统效果。

3.3 MFC 与高级氧化法结合

高级氧化法包括光化学氧化法、催化湿式氧化法、声化学氧化、臭氧氧化法、电化学氧化法和 Fenton 氧化法。与 MFC 的结合主要集中在光催化氧化、电化学氧化和 Fenton 氧化三个领域。

3.3.1 MFC 与光催化氧化法结合

光催化氧化法是近 20 年才出现的污水处理技术,在足够的反应时间内通常可以将有机物完全矿化为 CO_2 和 H_2O 等简单无机物,避免了二次污染,简单高效而有发展前途。所谓光催化反应,就是在光的作用下进行的化学反应。光化学反应需要分子吸收特定波长的电磁辐射,受激产生分子激发态,然后生成新的物质,或者变成引发热反应的中间化学产物。光化学反应的活化能来源于光子的能量,在太阳能的利用中,光电转化以及光化学转化一直是十分活跃的研究领域。由于以二氧化钛粉末为催化剂的光催化氧化法存在催化剂分离回收的问题,影响了该技术在实际中的应用,因此将催化剂固定在载体上使其更容易分离回收的技术引起了国内外学者的广泛兴趣^[37]。

Motoda 等^[38] 在一个双室 MFC 的阳极铝电极表面镀上 TiO_2 ,而阴极表面附着有生物膜。以海水为基质,采用紫外光照射,在阳极发生光催化反应,从而得到了与双铝电极电池相近的功率密度,避免了阳极材料的消耗。

与前者相反,Chen 等^[39] 将 TiO_2 纳米棒电极放在了阴极,而阳极则为生物阳极,在一个双室 MFC 中,不需外加电源,克服了热力学障碍,从 TiO_2 电极

上产生了氢气,如图 4。这是因为阳极微生物所产生的电子通过外电路到达阴极,在光的照射下发生了跃迁,将阳极产生的质子氧化成为了氢气,同时伴随着电能产生。在外阻为 $10\ 000\ \Omega$ 情况下,达到了 $6.0\ \text{mW}/\text{m}^2$ 的最大功率密度和 $4.4\ \mu\text{L}/\text{h}$ 的最大产氢率,为有效产氢和微生物燃料电池的新应用提供了借鉴。

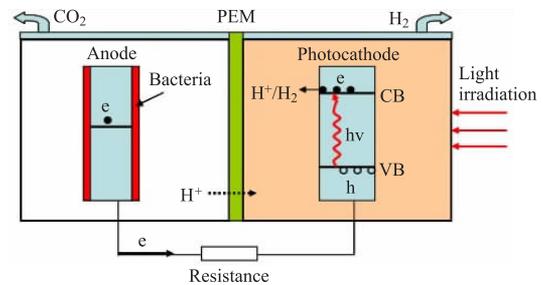


图 4 生物光电化学装置示意图^[39]

Figure 4 Illustration for the bio-photoelectrochemical cell^[39]

3.3.2 MFC 与电化学氧化法结合

电化学氧化是在电解槽中放入有机物溶液或悬浮液,通过直流电,在阳极夺取电子,使有机物氧化或是先使低价金属氧化为高价金属离子,然后高价金属离子再使有机物氧化的方法。

Tao 等^[40] 将一个双室 MFC 与一个电解池相连,以粉煤灰渗滤液为底物,先通入到 MFC 中,所产生的电能直接供给后面的电解池,MFC 的出水通入到电解池中进行进一步净化,如图 5 所示。最终 $\text{Cu}(\text{II})$ 、 $\text{Zn}(\text{II})$ 和 $\text{Pb}(\text{II})$ 的去除率分别达到了 98.5%、95.4% 和 98.1%。通过机理探讨, $\text{Cu}(\text{II})$ 主要是在 MFC 中被还原,而 $\text{Zn}(\text{II})$ 和 $\text{Pb}(\text{II})$ 则是在电解池中还原。

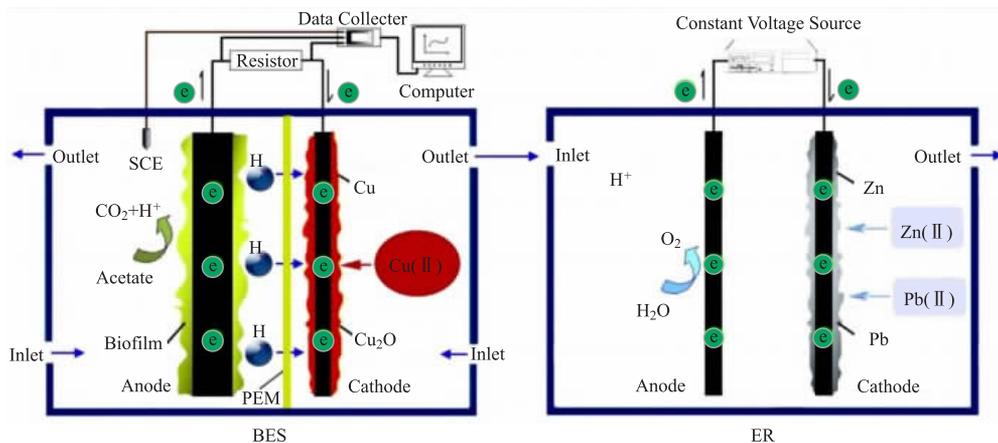


图 5 MFC 与电解池(ER)结合工艺示意图^[40]

Figure 5 Schematic diagram of combined microbial fuel cell (MFC) and electrolysis reactor (ER)^[40]

为了更有效地利用 MFC 所产电能并提高零价铁(ZVI)去除污染物工艺的效率,申中正等^[41]构建了微生物燃料电池-零价铁(MFC-ZVI)耦合工艺,并将其应用在三价砷水溶液的处理中。实验结果表明,在该耦合系统中,ZVI 直接利用了 MFC 所产生的低压电能,铁腐蚀速率和除砷效率得到显著提高,实验所用 MFC 的最高稳定产电电压为 0.52 V,电解过程中 MFC 的库仑效率为 4.59%,以二价铁离子计算的电流效率为 72.74%。

3.3.3 MFC 与电 Fenton 氧化法结合

电 Fenton 法(EF)是以电化学法产生的 Fe^{2+} 和(或) H_2O_2 作为芬顿试剂的持续来源,进而降解污染物的一种处理技术,以设备简易、降解能力强、电耗低而被广泛研究^[42]。其优点是:自动产生芬顿试剂的机制较完善,致使有机物降解的因素较多,除 $\cdot\text{OH}$ 的氧化作用外,还有阳极氧化、电吸附等。

Feng 等^[43]将 MFC 所产生的电子供给到一个电 Fenton 系统来处理染料酸性橙 2 号废水。实验中用到的是一个双室 MFC,阴极采用的材料为碳纳米管/羟基氧化铁复合材料,得到了 $230 \text{ mW}/\text{m}^2$ 的最大功率密度。Zhuang 等^[44]将阴极换成了负载 $\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的碳毡,将 EF-MFC 应用于染料罗丹明 B 的去除,也获得了很好的效果。

Xu 等^[45]将 EF-MFC 系统应用于去除雌激素,所用电极同样为 $\text{Fe}@ \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{碳毡}$,在 10 h 内,BEF 系统的最大功率密度达到了 $4.35 \text{ W}/\text{m}^3$ 。这也提出了一种很有前景、具有成本效益、在去除永久性污染物的同时产电的方法。

双室 MFC 所组建的生物电芬顿系统功率密度通常较低,而且所用质子交换膜较为昂贵,因此,Zhu 等^[46]提出了一种新的构想,用一个单室 MFC 为电 Fenton 系统供电,用于降解苯酚。将 MFC 的阳极和阴极分别连接一个电解槽的碳毡阴极和铁阳极,并在电解槽内曝气,分别在阳极和阴极生成 Fe^{2+} 和 H_2O_2 。在 22 h 的周期内,达到了 $75 \pm 2\%$ 的 TOC 去除率,而苯酚被完全降解为易于生物降解的有机酸,有机污染物的降解效率显著提升。

MFC 与高级氧化技术的结合较为多样,但由于高级氧化法的特点,其与 MFC 的契合点在于电子的传递,因此多数研究主要利用了其产电的特性,且在高级氧化法领域,MFC 与电 Fenton 法的结合是近年的研究重点。

4 结束语

MFC 因产能除污的双重性能备受关注。为拓宽应用范围,其与常规污水处理技术结合的研究成为热点之一。通过总结两者的结合研究,建议研究者主要从以下四方面对基于 MFC 的联合系统做进一步研究:

1)目前两者的结合集中在与物理化学法、生物法和高级氧化法三种技术的结合。之后的研究可更充分地利用多学科的交叉,从而探索 MFC 更丰富的应用形式。

2)联合系统在结构的设计上呈现出多元化的特点,可将 MFC 作为系统的一个独立单元,将其其他反应器镶嵌到 MFC 中,形成一个复合反应器。不过,近年的一体化结构研究渐多,因此,在今后的研究将趋向于结构一体化。

3)联合系统中 MFC 的作用多集中在除污或产能性能的其中之一,少有将两者同时利用的案例。在现有的联合案例中,水力和电力同时连接的系统在实现产能的同时,可获得更高的去除率。MFC 的双重性能应得到充分发挥,即在以后的研究中,实现 MFC 与传统水处理技术水力与电力的双重联系。

4)尝试放大联合系统,实现实际示范应用。

参考文献

- [1] LEWIS N S, NOCERA D G. Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(43): 15 729-15 735.
- [2] LOGAN B E, HAMELERS B, ROZENDAL R A, et al. Microbial fuel cells: Methodology and technology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17): 5 181-5 192.
- [3] ZHANG Baogang, ZHANG Jing, LIU Ye, et al. Identification of removal principles and involved bacteria in microbial fuel cells for sulfide removal and electricity generation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(33): 14 348-14 355.
- [4] POTTER M C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds, considered in relation to photosynthesis and plant nutrition [J]. *Protoplasma*, 1930, 10(1): 627-628.
- [5] DAVIS F, HIGSON S P. Biofuel cells—recent advances and applications [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22(7): 1 224-1 235.
- [6] KIM B H, KIM H J, HYUN M S, et al. Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1999, 9(2): 127-131.
- [7] ZHANG Baogang, ZHAO Huazhang, ZHOU Shungui, et al. A novel UASB-MFC-BAF integrated system for high strength molasses wastewater treatment and bioelectricity generation [J]. *Bioresource*

- Technology, 2009, 100(23): 5 687-5 693.
- [8] LIU Hong, GROT S, LOGAN B E. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(11): 4 317-4 320.
- [9] DI LORENZO M, CURTIS T P, HEAD I M, et al. A single-chamber microbial fuel cell as a biosensor for wastewaters [J]. Water Research, 2009, 43(13): 3 145-3 154.
- [10] MENG Jing, XU Zixiang, GUO Jing, et al. Analysis of enhanced current-generating mechanism of geobacter sulfurreducens strain via model-driven metabolism simulation [J]. Plos One, 2013, 8(9): 1-7.
- [11] AN J, KIM D, CHUN Y, et al. Floating-type microbial fuel cell (FT-MFC) for treating organic-contaminated water [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(5): 1 642-1 647.
- [12] ZHU Nengwu, CHEN Xi, ZHANG Ting, et al. Improved performance of membrane free single-chamber air-cathode microbial fuel cells with nitric acid and ethylenediamine surface modified activated carbon fiber felt anodes [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 422-426.
- [13] YOU S, REN N, ZHAO Q, et al. Power generation and electrochemical analysis of biocathode microbial fuel cell using graphite fiber brush as cathode material [J]. Fuel Cells, 2009, 9(5): 588-596.
- [14] SUN G, THYGESEN A, ALE M T, et al. The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells [J]. Application of Microbiology Biotechnology, 2014, 98(6): 2 415-2 427.
- [15] 赵玉军. 污水处理工艺方法的研究现状与进展[J]. 山东化工, 2010, 39(9): 24-27.
- [16] HE Zhen. Microbial fuel cells; now let us talk about energy [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(1): 332-333.
- [17] RABAEY K, VERSTRAETE W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation [J]. Trends in Biotechnology, 2005, 23(6): 291-298.
- [18] YANG Jie, ZHOU Minghua, ZHAO Yingying, et al. Electrosorption driven by microbial fuel cells to remove phenol without external power supply [J]. Bioresource Technology, 2013, 150: 271-277.
- [19] CHEN Man, ZHANG Fang, ZHANG Yan, et al. Alkali production from bipolar membrane electrodialysis powered by microbial fuel cell and application for biogas upgrading [J]. Applied Energy, 2013, 103: 428-434.
- [20] RABAEY K, BUTZER S, BROWN S, et al. High current generation coupled to caustic production using a lamellar bioelectrochemical system [J]. Environmental Science Technology. 2010, 44(11): 4 315-4 321.
- [21] SUN Min, SHENG Guoping, XIA Changrong, et al. An MEC-MFC-coupled system for biohydrogen production from acetate [J]. Environmental Science & Technology. 2008, 42(21): 8 095-8 100.
- [22] ZHANG Bo, HE Zhen. Improving water desalination by hydraulically coupling an osmotic microbial fuel cell with a microbial desalination cell [J]. Journal of Membrane Science. 2013, 441: 18-24.
- [23] VIRDIS B, RABAEY K, YUAN Z, et al. Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal [J]. Water Research, 2008, 42(12): 3 013-3 024.
- [24] CHENG Jia, ZHU Xiuping, NI Jinren, et al. Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(8): 2 729-2 734.
- [25] LI Zhongjian, ZHANG Xingwang, LIN Jun, et al. Azo dye treatment with simultaneous electricity production in an anaerobic-aerobic sequential reactor and microbial fuel cell coupled system [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4 440-4 445.
- [26] LIU Xianwei, WANG Yongpeng, HUANG Yuxi, et al. Integration of a Microbial Fuel Cell With Activated Sludge Process for Energy-Saving Wastewater Treatment: Taking a Sequencing Batch Reactor as an Example [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2011, 108(6): 1 260-1 267.
- [27] SAYESS R R, SAIKALY P E, EL-FADEL M, et al. Reactor performance in terms of COD and nitrogen removal and bacterial community structure of a three-stage rotating bioelectrochemical contactor [J]. Water Research, 2013, 47(2): 881-894.
- [28] 徐阳, 王增长. 厌氧生物处理法处理生活与工业废水的研究与发展 [J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(31): 119-120.
- [29] ZHAO Guang, WEI Li, MA Fang, et al. Electricity generation from cattle dung using microbial fuel cell in acidification process of two-phase anaerobic digestion system [J]. Advanced Materials Research, 2010, 113-116: 286-290.
- [30] SHARMA Y, LI B. Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(8): 3 789-3 797.
- [31] WANG Aijie, SUN Dan, CAO Guangli, et al. Integrated hydrogen production process from cellulose by combining dark fermentation, microbial fuel cells, and a microbial electrolysis cell [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(5): 4 137-4 143.
- [32] SUKASEM C, LAEHLAH S, HNIMAN A, et al. Upflow bio-filter circuit (UBFC): Biocatalyst microbial fuel cell (MFC) configuration and application to biodiesel wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(22): 10 363-10 370.
- [33] TIAN Yu, JI Chao, WANG Kai, et al. Assessment of an anaerobic membrane bio-electrochemical reactor (AnMBER) for wastewater treatment and energy recovery [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 450: 242-248.
- [34] HUANG Jiansheng, YANG Ping, GUO Yong, et al. Electricity generation during wastewater treatment: an approach using an AFB-MFC for alcohol distillery wastewater [J]. Desalination, 2011, 276(1-3): 373-378.
- [35] 计红芳, 陈锡时, 王爱杰. 光合细菌光合产氢的研究进展 [J]. 微生物学杂志, 2002, 22(5): 44-46, 60.
- [36] CHEN Ming, ZHANG Zhiyu, WANG Cheng, et al. Improving conversion efficiency of solar energy to electricity in cyanobacterial PEMFC by high levels of photo-H₂ production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(31): 13 556-13 563.

- [37] 沈伟初,赵文宽,贺飞,等. TiO_2 光催化反应及其在废水处理中的应用 [J]. 化学进展,1998,10(4):1-14.
- [38] MOTODA S, STROM M J, DEXTER S C. Power Density Profile of Marine Biofilm Battery Using a TiO_2 Anode [J]. ECS Transactions, 2010, 25(35):3-10.
- [39] CHEN Qingyun, LIU Jianshan, LIU Ya, et al. Hydrogen production on TiO_2 nanorod arrays cathode coupling with bio-anode with additional electricity generation [J]. Journal of Power Sources, 2013, 238:345-349.
- [40] TAO Huchun, LEI Tao, SHI Gang, et al. Removal of heavy metals from fly ash leachate using combined bioelectrochemical systems and electrolysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 264:1-7.
- [41] 申中正,赵华章,薛安. 微生物燃料电池-零价铁耦合工艺的构建及除砷性能 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(5):1 646-1 650.
- [42] 李华亮,唐念,赵宁. 电芬顿水处理技术最新研究进展 [J]. 北方环境, 2011, 23(11):182,211.
- [43] FENG Chunhua, LI Fangbai, Mai Hongjian, et al. Bio-Electro-Fenton Process Driven by Microbial Fuel Cell for Wastewater Treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(5):1 875-1 880.
- [44] ZHUANG Li, ZHOU Shungui, YUAN Yong, et al. A novel bioelectro-Fenton system for coupling anodic COD removal with cathodic dye degradation [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 163(1-2):160-163.
- [45] XU Nan, ZHANG Yingyuan, TAO Huchun, et al. Bio-electro-Fenton system for enhanced estrogens degradation [J]. Bioresource Technology, 2013, 138:136-140.
- [46] ZHU X, LOGAN B E. Using single-chamber microbial fuel cells as renewable power sources of electro-Fenton reactors for organic pollutant treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 252-253:198-203.

作者简介

刘 晔(1989-),女,硕士在读,主要研究方向:水处理技术;
张宝刚(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向:水处理技术;
田彩星(1990-),男,硕士在读,主要研究方向:水处理技术;
冯传平(1963-),男,博士,教授,主要研究方向:水处理技术。

(上接第 565 页)

- [21] TAYLOR S, TODD P A. Assessing IT usage: The role of prior experience [J]. MIS Quarterly, 1995, 19(4):561-570.
- [22] WU J H, WANG S C. What drives mobile commerce? An empirical evaluation of the revised technology acceptance model [J]. Information & management, 2005, 42(5):719-729.
- [23] BHATTACHERJEE A. Acceptance of e-commerce services; the case of electronic brokerages [J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 2000, 30(4):411-420.
- [24] WANG Y M, WANG Y S, YANG Y F. Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry [J]. Technological forecasting and social change, 2010, 77(5):803-815.
- [25] YANG Z, CAI S, ZHOU Z, et al. Development and validation of an instrument to measure user perceived service quality of information presenting web portals [J]. Information & Management, 2005, 42(4):575-589.
- [26] HAIR J F, BLACK W C, ANDERSON R E, et al. Multivariate data analysis [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [27] 徐云杰. 社会调查设计与数据分析—从立题到发表 [M]. 重庆: 重庆大学出版社. 2011.
- [28] 陈文波, 黄丽华. 组织信息技术采纳的影响因素研究述评 [J]. 软科学, 2006, 20(3):1-4.
- [29] 曹薇, 张乃洲. 企业 SaaS 应用分析 [J]. 计算机时代, 2010, (2):63-64.
- [30] ETTLE J E. Organizational policy and innovation among suppliers to the food processing sector [J]. Academy of Management Journal, 1983, 26(1):27-44.