

# 微生物燃料电池连接方式对产电效率影响的比较

史雨茹<sup>1</sup> 冷川江<sup>1</sup> 常胜<sup>1</sup> 王晶<sup>1\*</sup> 王晓慧<sup>2</sup>

(北京化工大学 1. 信息科学与技术学院; 2. 化学工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 微生物燃料电池是一种新型能源, 在处理污水的同时产生电能。然而目前微生物燃料电池产电效率低, 无法进行大规模的工业生产, 如何提高微生物燃料电池的产电效率已经成为国内外研究的热点。设计了由双室微生物燃料电池构建的电压串联及并联、生物量串联及并联共4组电池实验, 对不同连接方式进行比较, 燃料电池在不同连接方式下的产电效率以及对污水的处理能力均有所不同。同时也设计了升压电路, 保证燃料电池的电压基本维持在680 mV左右。生物实验结果表明, 电压串、并联及生物量串、并联都能使燃料电池的工作电压有不同程度的提高; 升压, 电压串、并联及生物量串、并联能不同程度地提高燃料电池对有机物的降解能力, 其中生物量串、并联对提高有机物的降解能力最为显著。

**关键词:** 微生物燃料电池; 串联; 并联; 产电效率; 污水处理

**中图分类号:** TM911.45 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.02.001

## 引言

微生物燃料电池(MFC)是一种将微生物作为催化剂, 实现将存储在有机物中的化学能转化为电能的装置<sup>[1-2]</sup>。在工作过程中, 通过质子交换膜及外电路, MFC实现了电荷守恒及物料守恒<sup>[3-4]</sup>。近年来, 微生物燃料电池作为一种新型的能量转换方式<sup>[5]</sup>, 在污水处理方面的应用受到广泛关注<sup>[6]</sup>。随着技术的发展, 微生物燃料电池不仅可以用于污水处理, 还可以去除碳氮物质<sup>[7]</sup>、脱离水中盐分<sup>[8-9]</sup>、处理含重金属的废水<sup>[10-11]</sup>等。研究人员主要通过修饰微生物燃料电池的阴阳极<sup>[12-15]</sup>、向反应器中加入催化剂<sup>[16]</sup>、简化反应器结构<sup>[17]</sup>、改变反应底物<sup>[18]</sup>等方式来提高微生物燃料电池的产电性能。

在实际的实验及操作过程中, 由于受到各种因素的影响, 微生物燃料电池的产电效率较低, 所以将多个微生物燃料电池利用不同的方式进行连接, 如串联<sup>[19]</sup>、并联<sup>[20]</sup>、升压<sup>[21]</sup>等, 是提高MFC产电性能非常必要的操作方式。本文提出了微生物燃料电池

的生物量串联及并联的连接方式, 并比较分析了在电压串联、电压并联、生物量串联、生物量并联及升压这几种连接方式下MFC对有机物的降解能力及产电能力, 探讨了微生物燃料电池的产电特性, 从另一个角度为提高微生物燃料电池的产电效率提供了解决途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本套燃料电池系统由北京市水处理环保材料工程技术研究中心设计, 常熟文特实验器皿有限公司制作。电池系统由对称的阴、阳极反应室构成, 阴、阳室的总有效体积约为54 mL, 单室比表面积为7.065 cm<sup>2</sup>; 两室之间通过阳离子交换膜(CMI-7000)隔开; 质子交换膜在使用前先去除杂质, 两个反应室的电极材料均为碳毡。

主要设备包括: 数据采集卡(7660B, 中泰研创), 蠕动泵(BT100-1L, 兰格), 电导仪(BAN-TE531, 上海般特), 试管若干。

### 1.2 实验材料

菌种来源为北京市碧水源第二再生水厂活性污泥。

阳极液组成: 葡萄糖(1.0 g/L), NaAc(1.64 g/L), KCl(1.5 g/L), Ca(0.001 g/L), Mg(0.001 g/L), 微量元素(0.001 g/L)和磷酸盐缓冲溶液(pH7.0)。将污泥静置, 直到沉淀出上清液, 将上清液与配置好

收稿日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61573050); 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室开放课题(20160107)

第一作者: 女, 1993年生, 硕士生

\* 通讯联系人

E-mail: jwang@mail.buct.edu.cn

的基质按照体积比 4:6 混合均匀后作为 MFC 阴、阳极接种液,接种时间为 1 到 2 周。

阴极室的成分为酸性高锰酸钾,pH 维持在 3~5。在运行过程中,整个反应器保持密闭状态,维持阳极室在厌氧状态。以间歇方式运行,在一个运行周期内,负载外电阻保持不变。

### 1.3 实验方法

实验使用 5 个双室微生物燃料电池,在 MFC 装置的阴、阳室分别插入电极,填充碳毡,接种等量微生物(以富含微生物的污泥的量等效微生物的量),做好密封,阳极室加入 5 mL 阳极液,循环进水,阴极室加入 5 mL 的酸性高锰酸钾。外接电阻  $1000\ \Omega$ ,在室温下进行实验。实验共采用 7 个电压采集通道(2 通道、6 通道、7 通道、8 通道、10 通道、19 通道、22 通道)对 MFC 的电压进行采集,并每隔 3 h 分别对电导率化学需氧量(COD)进行测量。通过改变微生物燃料电池的连接方式,对其性能进行测定分析。

**电导率测定** 将电导仪先用去离子水清洗干净,待电导仪的电子屏上显示为零,将电导仪的两极插入待测溶液中,待其数值稳定,记录数据,并反复操作 3 次,其平均值即为该时刻溶液的电导率。

**COD 测定** 取 5 mL 的待测溶液,加入 0.75 g  $\text{Ag-NO}_3$ ,混合充分进行离心,用 COD 检测仪对待测溶液的化学需氧量进行测定<sup>[22]</sup>。

### 1.4 不同 MFC 连接方式实验

MFC 运行过程中,根据 COD 的大小判断反应进行的程度,实验时长 50~120 h 不等。实验过程中,每隔 3 h 对各个电池的电导率及 COD 进行测定并记录,输出电压通过数据采集卡每 60 s 进行一次记录。

#### 1.4.1 单个电池

图 1 为单个燃料电池的工作原理图,分别用 5

路电压采集通道对 5 个双室微生物燃料电池的电压进行采集(其中数据采集系统的 2、6、8、19、22 通道分别对 2、6、8、19、22 号燃料电池电压进行采集)。图中虚线表示水管,实线表示导线,下文的实验设计原理图均与此同。

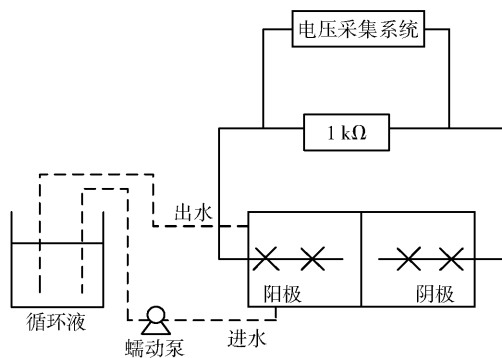


图 1 单个微生物燃料电池原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a single MFC

#### 1.4.2 MFC 电压串联

图 2 中#2、#8、#19、#22 分别为 2 号、8 号、19 号、22 号电池,下文原理图中的编号均与此同。图 2 中分别将 2 号和 8 号电池进行串联,19 和 22 号电池进行串联。具体连接过程如下:将 2 号电池的阴极端与 8 号电池的阳极端用导线相连,并从 2 号电池的阳极端与 8 号电池阴极端引出另两根导线接至电阻两端,形成了 MFC 的电压串联回路。烧杯中的营养液(140 mL)通过软管进入 2 号燃料电池,再通过 2 号燃料电池的出水软管回到烧杯,利用蠕动泵使之形成一个循环。用数据采集系统的 2 通道采集 2 号电池两端的电压,8 通道采集 8 号电池两端的电压,7 通道的两根导线分别接至 2 号电池的阳极端与 8 号电池的阴极端。同理组建 19 和 22 号电池的串联电路,分别用 19、22 通道测量 19、22 号电池两端的电压,再用 10 通道测量串联电路两端的

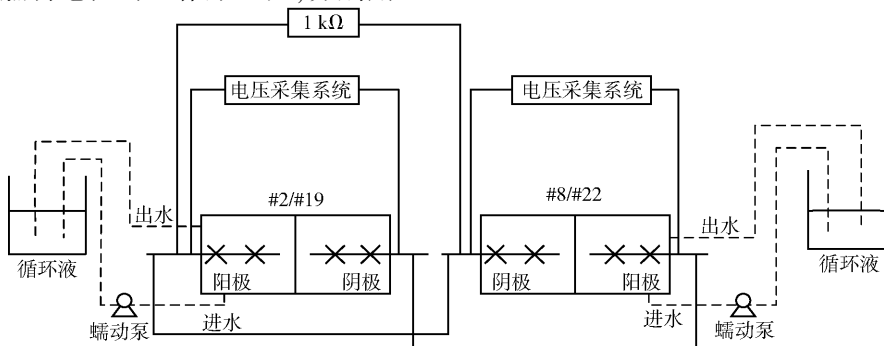


图 2 微生物燃料电池串联原理图

Fig. 2 Schematic diagram of MFCs in series

电压。

1.4.3 MFC 电压并联

如图 3,分别将 2 号和 8 号电池并联,19 和 22 号电池并联。将 2 号电池的阴极端与 8 号电池的阴极端用导线相连,2 号电池的阳极端与 8 号电池的阳极端用导线相连,并从并联电池的阴、阳极两端引出另两根导线接至电阻两端,形成 MFC 的电压并联回路。烧杯中的营养液(140 mL)通过软管进入 2 号燃料电池,再通过 8 号燃料电池的出水软管回到烧杯,利用蠕动泵使之形成一个循环。其中用数据采集系统的 2 通道采集 2 号电池两端的电压,8 通道采集 8 号电池两端的电压,7 通道的两根导线分别接至并联电池的阴、阳极两端。同理组建 19 和 22 号电池的并联电路,分别用 19、22 通道测量 19、22 号电池两端的电压,再用 10 通道测量并联电路两端的电压。

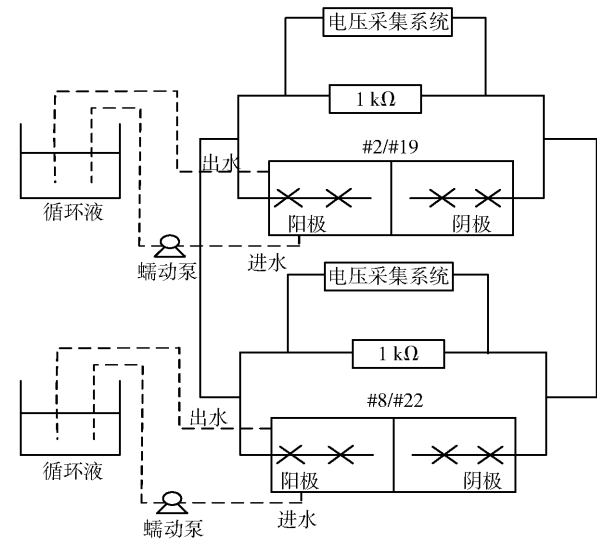


图 3 微生物燃料电池并联原理图

Fig. 3 Schematic diagram of MFCs in parallel

1.4.4 MFC 生物量串联

如图 4,将 2 号电池与 8 号电池进行生物量串联,具体连接过程如下:将 2 号电池阴极室的出水口与 8 号电池阳极室的入水口用软管相连,烧杯中的营养液(280 mL)通过软管从 2 号电池的入水口进入装置,再通过 8 号电池的出水软管回到烧杯,利用蠕动泵使之形成一个循环。从 2 号电池的两端引出导线接至电阻两端,8 号电池的两端引出导线接至电阻两端,其中用数据采集系统的 2 通道采集 2 号电池两端的电压,8 通道采集 8 号电池两端的电压,7 通道的两根导线分别接至串联电池的阴、阳极两端。

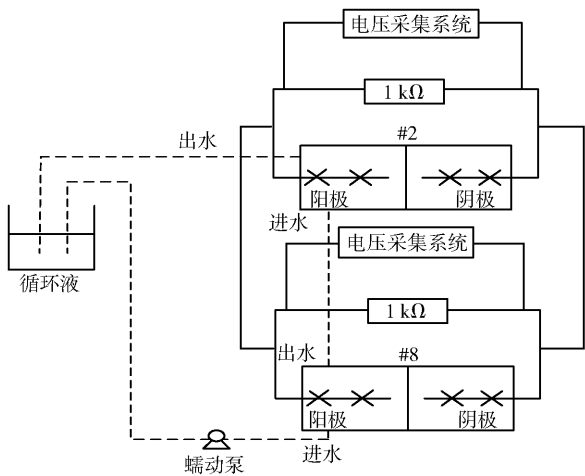


图 4 微生物燃料电池生物量串联原理图

Fig. 4 Schematic diagram of biomass in a series of MFCs

1.4.5 MFC 生物量并联

为与生物量的串联作对照,设计了对照组,见图 5,将 19 号电池与 22 号电池进行生物量并联,烧杯中的营养液(280 mL)通过 19 号电池及 22 号电池的入水口进入装置并分别通过 19 号、22 号电池的出水口回到烧杯,通过蠕动泵使之形成循环。从 19 号电池的两端引出导线接至电阻两端,22 号电池的两端引出导线接至电阻两端,其中用数据采集系统的 19 通道采集 19 号电池两端的电压,22 通道采集 22 号电池两端的电压,7 通道的两根导线分别接至并联电池的阴、阳极两端。

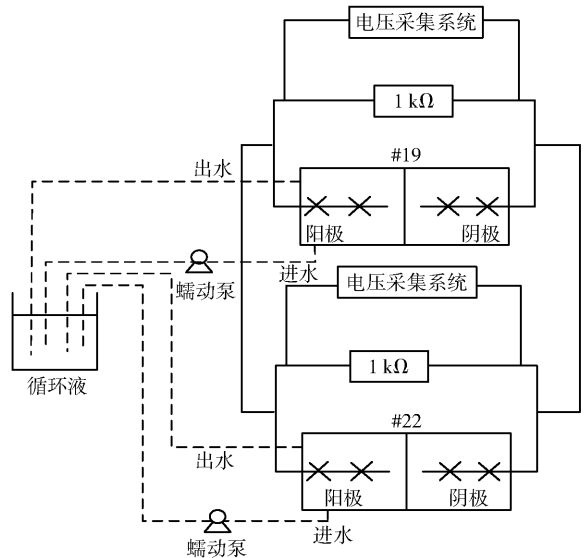


图 5 微生物燃料电池生物量并联原理图

Fig. 5 Schematic diagram of biomass in parallel MFCs

1.4.6 升压电路

将 6 号电池阴、阳极分别送入升压电路,对电压

进行升压。用数据采集卡的 6 通道对升压电路的电压进行采集。原理图如图 6 所示。

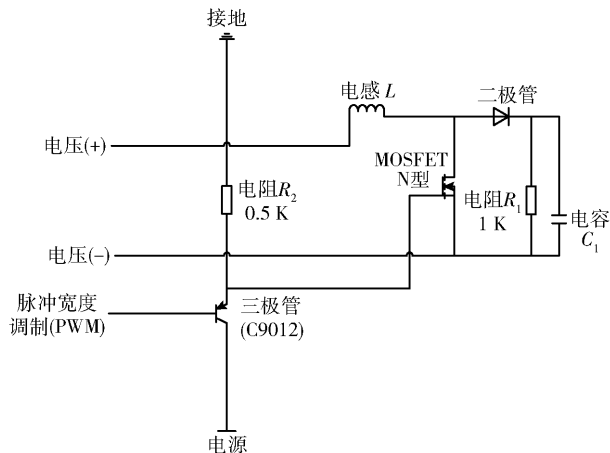


图 6 升压电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the booster circuit

## 2 结果与讨论

### 2.1 MFC 电导率分析

在 MFC 运行过程中,因受外界因素(如温度变化等)以及实验测量过程中产生的测量误差的影响,实验数据存在波动。为解决此问题,本文对电导率实验数据进行拟合,得到较为光滑的变化曲线,如图 7 所示。图 7 给出了单个燃料电池电导率变化曲线,可以看出随着时间的增加,电导率呈现下降趋势,出现该现象的原因是阴阳离子穿过质子交换膜的速率不同,以及质子交换膜对阴阳离子动态运动的阻碍<sup>[20]</sup>使得电导率总体呈现下降趋势。图 8 给出电压串联方式下电导率的变化(具体串联方式为 2 号与 8 号电池串联,19 号与 22 号电池串联)。分别对这 4 个电池的电导率进行测定,发现在电池串联情况下,随着时间的增加,电导率也呈现下降趋势。按照图 7、8,同时对比每个电池在串联方式下与其在独立运行时的电导率的变化。从单个电池来看,串联方式会降低电导率。图 9 给出了电压并联方式下电导率的变化(具体并联方式为 2 号电池和 8 号电池并联,19 和 22 号电池并联)。分别对这 4 个电池的电导率进行测定,发现电池并联条件下燃料电池的电导率降低。在生物量串并联的条件下,由原理图(图 4 及图 5)可知,实验将 2 号和 8 号燃料电池进行生物量串联,19 号及 22 号燃料电池进行生物量并联。从原理图可以看出,只要测量循环液的电导率便可以得到各个燃料电池的电导率。所以由图 10 可得,相对于电压串、并联,生物量串联及

并联使得 MFC 的电导率降低。由图 11 可知,较独立运行的燃料电池来说,经过升压后的每个燃料电池的电导率都相对降低。

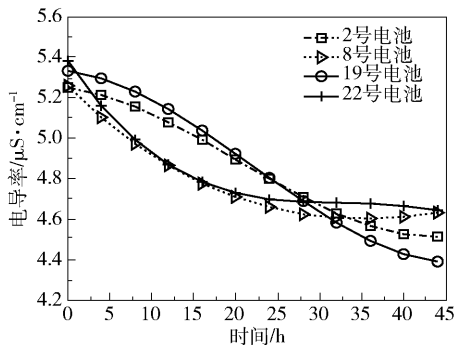


图 7 单个燃料电池电导率变化曲线

Fig. 7 Conductivity curves of single MFCs

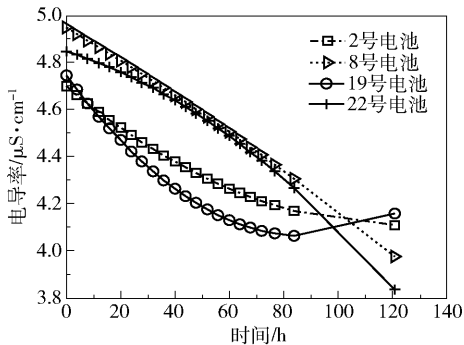


图 8 串联燃料电池电导率变化曲线

Fig. 8 Conductivity curves of series MFCs

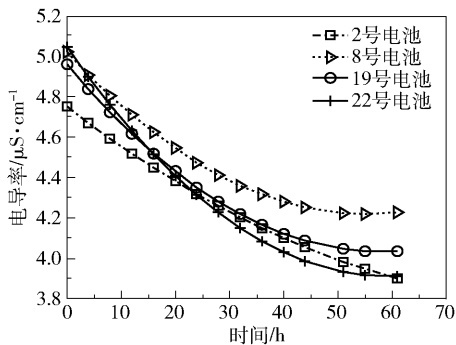


图 9 并联燃料电池电导率变化曲线

Fig. 9 Conductivity curves of parallel MFCs

电导率的大小反映了溶液中离子含量的多少,而在污水中,电导率的减小表现为污染程度减弱。因此,这几种连接方式都使得污水的污染程度减弱。

### 2.2 MFC 产电效率分析

#### 2.2.1 电压

图 12 ~ 16 分别展示了不同实验条件下输出电压的变化情况。可以看出在运行时间相同时,由于 MFC 中微生物繁殖较快,随着底物浓度的降低,



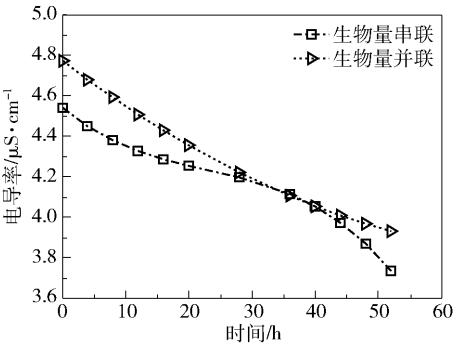


图 10 微生物燃料电池生物量串、并联电导率变化曲线

Fig. 10 Conductivity curves of biomass in parallel and in series MFCs

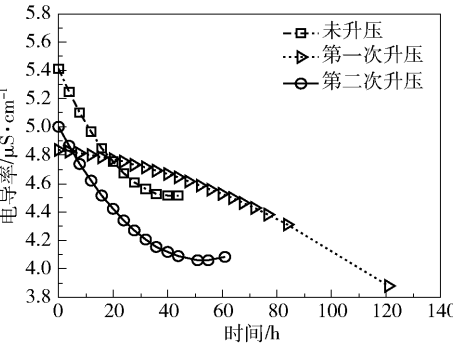


图 11 经过升压的微生物燃料电池电导率变化曲线

Fig. 11 Conductivity curves of MFC after boosting

微生物的反应开始减慢<sup>[23]</sup>,MFC 的输出电压逐渐下降。如图 12 给出的 8 号及 19 号电池的电压变化曲线所示,在 MFC 中加入营养液之后,产电微生物开始通过电子传递来获取能量,此时 MFC 的输出电压开始上升;当产电微生物的量相对于营养液浓度达到饱和状态时,随着营养液浓度的下降,微生物的活性开始下降,此时电压开始下降。而图 12 所示的 2 号及 22 号电池的电压变化曲线中,电压没有出现大幅度上升再下降的原因可能是:(1)在实验进行时营养液的成分相对于接种时发生了变化,致使微生物很难承受不同营养液的变化,从而代谢发生异常,抑制微生物代谢的正常进行,使得产电微生物部分失活<sup>[24]</sup>;(2)在微生物接种过程中,接种的产电微生物的量比 8 号及 19 号电池的少。

图 13 给出了电压串联方式下 MFC 的输出电压随时间的变化,具体串联方式为:2 号电池与 8 号进行串联,19 号与 22 号进行串联。由于串联过程是多个燃料电池能量的叠加,所以在反应过程中,MFC 的输出电压较独立运行的燃料电池增大<sup>[22]</sup>。图 14

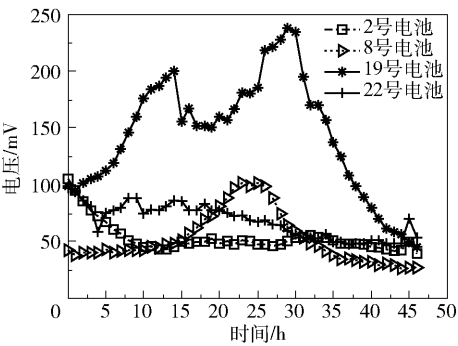


图 12 单个燃料电池中电压变化曲线

Fig. 12 Voltage curves of single MFCs

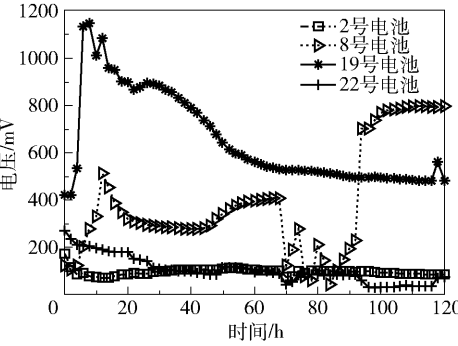


图 13 串联微生物燃料电池电压变化曲线

Fig. 13 Voltage curves of series MFCs

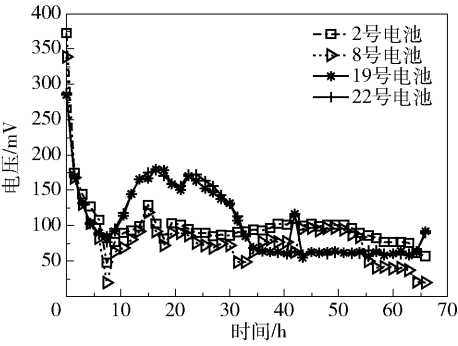


图 14 并联微生物燃料电池电压变化曲线

Fig. 14 Voltage curves of parallel MFCs

给出了电压并联方式下 MFC 的输出电压随时间的变化,具体的连接方式为:2 号与 8 号电池并联,19 号和 22 号电池并联。可以看出,并联电池的电压较单个燃料电池的电压略高。由于同一时期串联和并联的转换率不同,并联电池组内阻较小,串联电池组内阻较大,并联电池组的最大输出功率密度要高于串联电池组的输出功率密度,串联电池组的电流要高于并联电池组,在外接电阻相同时,串联电池的电压要高于并联电池的电压<sup>[22]</sup>。由图 16 可见两组电池经过升压之后输出电压均可达到 680 mV 左右,且较为稳定。

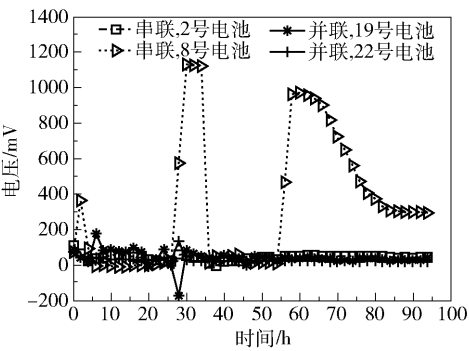


图 15 微生物燃料电池生物量串并联电压变化曲线

Fig. 15 Voltage curves of biomass in parallel and in series MFCs

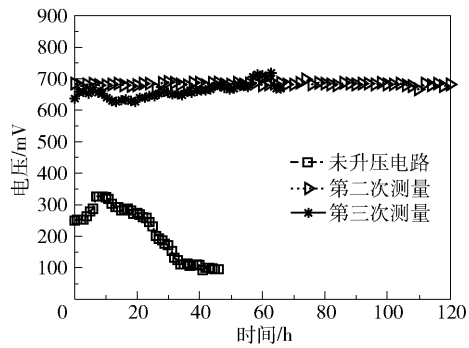


图 16 经过升压的微生物燃料电池电压变化曲线

Fig. 16 Voltage curves of MFC after boosting

2.2.2 库仑效率

库仑效率是反映 MFC 电子回收率的一个重要指标,其值为有机物转化成电量的部分与理论转化电量的比值。本文主要用库仑效率  $C_E$  反映 MFC 产生有效电流的能力。计算公式如下

$$C_E = \frac{M \int_0^{t_b} Idt}{FbV\Delta C}$$

式中,  $M$  为以氧为标准的有机物摩尔质量, 32 g/mol;  $I$  为电流, A;  $F$  为法拉第常数, 96485 C/mol;  $V$  为 MFC 阳极总体积,  $m^3$ ;  $b$  为以氧为标准的氧化 1 mol 有机物转移的电子数, 取值为 4;  $\Delta C$  为初始化学需氧量和反应后化学需氧量的差值, mg/L。

由表 1 可得, MFC 的电压串联、并联及对 MFC 进行升压这 3 种情况都可以在不同程度上提高 MFC 的产电效率, 其中, 对 MFC 进行升压可大幅度提升 MFC 的产电效率。因为串联电池的电流要高于并联电池的电流, 所以对比来看, MFC 串联要比 MFC 并联的产电效率高。

2.3 COD 分析

图 17 ~ 22 分别给出了不同实验设计条件下

表 1 不同连接方式下 MFC 库仑效率的比较

Table 1 Comparison of MFC coulombic efficiency with different connection methods

连接方式	$C_E/\%$				
	2 号	6 号	8 号	19 号	22 号
单个电池	1.63	6.51	1.47	4.48	2.17
MFC 串联	10.03		43.27	69.4	10.51
MFC 并联	4.09		3.27	4.62	4.37
生物量串并联	2.59		20.82	2.54	1.68
第一次升压			72.93		
第二次升压			24.39		

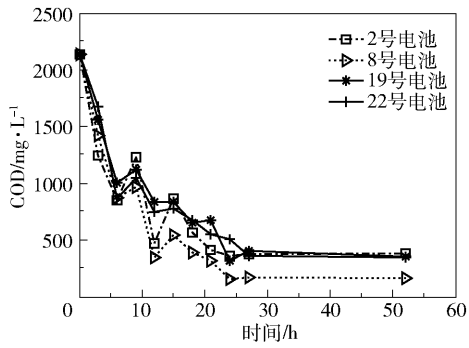


图 17 单个燃料电池 COD 变化曲线

Fig. 17 COD curves of single MFCs

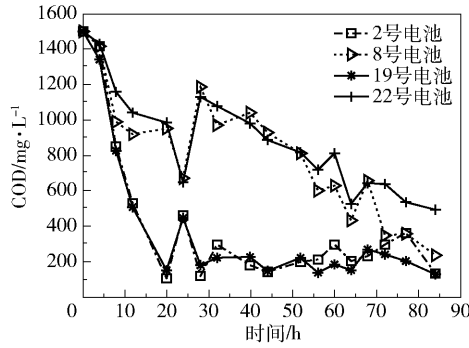


图 18 串联微生物燃料电池 COD 变化曲线

Fig. 18 COD curves of series MFCs

MFC 的污水处理能力。由于 COD 反映了水的污染状况, 所以实验中通过 COD 值衡量微生物燃料电池的反应是否结束。本文实验设定当 COD 为 200 mg/L 左右时, 视为微生物燃料电池反应结束。

从图 17 ~ 22 可以看出, 随着 MFC 的运行, 微生物对水中污染物不断降解, 所以无论微生物燃料电池以何种方式连接, COD 都呈现下降趋势。在相同时间内, 图 18 给出了电压串联方式下 COD 随时间的变化(其中 2 号和 8 号电池串联, 19 和 22 号电池串联)。结合表 2 所给出的不同连接方式下 COD 的

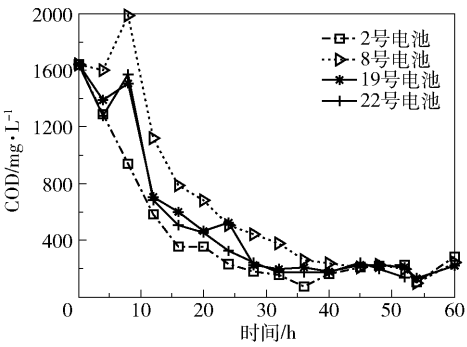


图 19 并联燃料电池 COD 变化曲线  
Fig. 19 COD curves of parallel MFCs

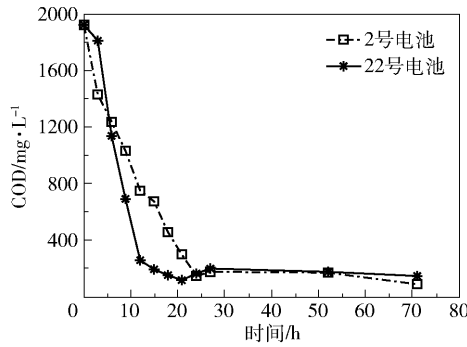


图 20 燃料电池生物量串并联 COD 变化曲线  
Fig. 20 COD curves of biomass in parallel and in series of MFCs

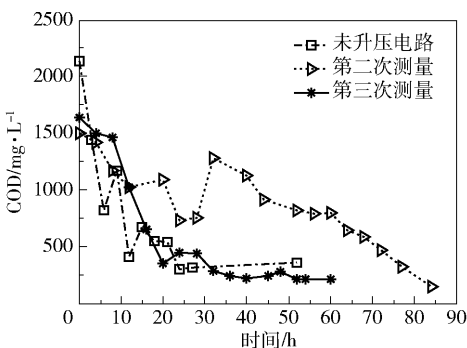


图 21 经过升压的燃料电池 COD 变化曲线  
Fig. 21 COD curves of MFC after boosting

总去除率,可以看出 2 号电池及 19 号电池在串联方式下 COD 的去除率较单个燃料电池的 COD 去除率高,8 号及 22 号电池在串联方式下 COD 去除率较单个电池的。因此两个电池串联的情况下,其中一个电池的 COD 消耗较快,而另一个电池的 COD 消耗较慢。造成这种现象的原因可能是串联条件下,两个电池的电子转移速率不同,致使阳极微生物对有机物的分解不同。图 19 给出了电压并联方式下 COD 随时间的变化(其中 2 号和 8 号电池并联,19 和 22 号电池并联)。两电池并联情况下,4 个电

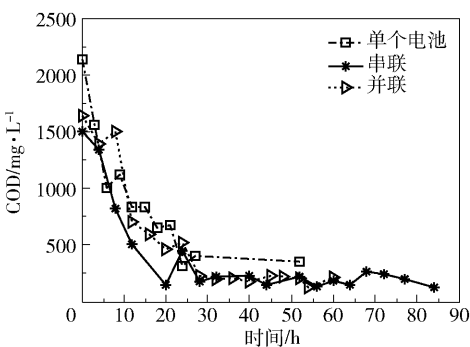


图 22 在串联及并联的情况下,19 号电池 COD 随时间变化的比较

Fig. 22 Comparison of COD for the No. 19 battery in the case of series and parallel

表 2 不同连接方式下 COD 总去除率的比较

Table 2 Comparison of COD removal rate of MFC with different connection methods

连接方式	COD 总去除率/%				
	2 号	6 号	8 号	19 号	22 号
单个电池	82.02	83.18	92.16	83.27	83.60
MFC 串联	91.14		84.30	91.39	67.09
MFC 并联	82.83		85.15	86.76	91.65
生物量串联			95.25		
生物量并联			92.08		
第一次升压			90.12		
第二次升压			87.00		

池对有机物的消耗趋势基本相同,都呈现下降趋势。图 20 给出了 MFC 在生物量串并联连接方式下 COD 随时间的变化。由表 2 可得 MFC 生物量串联及并联情况下的 COD 去除率分别为 95.25% 与 92.08%,因此相对于其他连接方式,MFC 在生物量串、并联的连接方式下对有机物的降解能力最为明显。图 21 给出了 MFC 在两次升压与单独运行状况下 COD 随时间变化的比较。经过升压的 MFC 与其他连接方式相比,提高了有机物的降解能力。这是因为微生物燃料电池中微生物产生的电子会沿着导线通过外电路到达阴极,质子又在微生物燃料电池中从阳极到达阴极,这一过程的连续进行会完成产电的过程<sup>[25]</sup>。由图 12~16 不同连接方式下的电压变化图可以看出,微生物燃料电池无论是串联、并联、生物量串/并联,还是升压电路,都会使燃料电池的电压相对升高。电压的升高说明电子的转移速度加快,这就间接地体现了微生物对有机物降解能力的提高。

### 3 结论

(1)相比于单个燃料电池,MFC 的串联、并联、生物量串联及生物量并联都不同程度地提升了输出电压。串联电池的输出电压要比并联电池的略大。经过升压电路的 MFC 将输出电压维持在 680 mV 左右,是使燃料电池的输出电压最为稳定的一种方式。

(2)COD 反映了 MFC 对于污水的处理能力,虽然文中 4 种连接方式及升压电路都不同程度地提升了 MFC 降解有机物的能力,但与电压的串、并联连接方式相比,生物量串、并联大大提升了 MFC 降解有机物的能力。

### 参考文献:

- [1] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, et al. Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17): 5181–5192.
- [2] Rabaey K, Angenent L, Schröder U, et al. Bioelectrochemical systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application[M]. London: Iwa Publishing, 2009: 1–10.
- [3] Schröder U. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, 9(21): 2619–2629.
- [4] Li W W, Yu H Q, He Z. Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(3): 911–924.
- [5] 冯雅丽,李浩然,连静,等. 利用微生物电池研究微生物在矿物表面电子传递过程[J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(11): 1009–1013.  
Feng Y L, Li H R, Lian J, et al. Study on the electron transport process of microbe on the mineral surface using the microbe fuel cell[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(11): 1009–1013. (in Chinese)
- [6] 谢晴,杨嘉伟,王彬,等. 用于污水处理的微生物燃料电池研究最新进展[J]. *水处理技术*, 2010, 36(3): 10–16.  
Xie Q, Yang J W, Wang B, et al. Recent progress of microbial fuel cells for wastewater treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(3): 10–16. (in Chinese)
- [7] Virdis B, Rabaey K, Rozendal R A, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and carbon removal in microbial fuel cells[J]. *Water Research*, 2010, 44: 2970–2980.
- [8] Subramani A, Jacangelo J G. Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review[J]. *Water Research*, 2015, 75: 164–187.
- [9] Luo H P, Xu P, Roane T M, et al. Microbial desalination cells for improved performance in wastewater treatment, electricity production, and desalination[J]. *Biore-source Technol*, 2012, 105(2): 60–66.
- [10] Li Z J, Zhang X W, Lei L C. Electricity production during the treatment of real electroplating wastewater containing  $\text{Cr}^{6+}$  using microbial fuel cell[J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(12): 1352–1358.
- [11] Abourached C, Catal T, Liu H. Efficacy of single-chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production[J]. *Water Research*, 2014, 51: 228–233.
- [12] Liang P, Wang H Y, Xia X, et al. Carbon nanotube powders as electrode modifier to enhance the activity of anodic biofilm in microbial fuel cells[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 26(6): 3000–3004.
- [13] 向龙,王晓慧,海热提,等. 微生物燃料电池阳极材料的修饰研究进展[J]. *现代化工*, 2015, 35(1): 48–52.  
Xiang L, Wang X H, Hai R T, et al. Research progress of anode material modification for microbial fuel cell[J]. *Modern Chemical Industry*, 2015, 35(1): 48–52. (in Chinese)
- [14] 向龙,王晓慧,海热提,等. 阳极材料对生物阴极型微生物燃料电池产电性能影响研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(7): 45–48.  
Xiang L, Wang X H, Hai R T, et al. Power generation performance of bio-cathode microbial fuel cell with different anode materials[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(7): 45–48. (in Chinese)
- [15] Li C, Zhang L B, Ding L L, et al. Effect of conductive polymers coated anode on the performance of microbial fuel cells (MFCs) and its biodiversity analysis[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 26(10): 4169–4176.
- [16] 刘睿,王晓慧,海热提,等. 活性炭优化生物阴极提升微生物燃料电池产电性能[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7): 2059–2063.  
Liu R, Wang X H, Haireti, et al. Using activated carbon optimized biocathode to improve performance of microbial fuel cells[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7): 2059–2063. (in Chinese)
- [17] 杨斯琦,刘中良,侯俊先,等. 微生物燃料电池  $\text{MnO}_2$  及活性炭混合催化剂的制备及其性能研究[J]. *可再生*



- 能源, 2016, 34(2): 311–316.
- Yang S Q, Liu Z L, Hou J X, et al. Preparation and properties of catalyst of  $\text{MnO}_2$  and activated carbon for microbial fuel cells [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(2): 311–316. (in Chinese)
- [18] He W H, Zhang X Y, Jia L, et al. Microbial fuel cells with an integrated spacer and separate anode and cathode modules [J]. Environmental Science Water Research & Technology, 2016, 2(1): 186–195.
- [19] Khaled F, Ondel O, Allard B. Optimal energy harvesting from serially connected microbial fuel cells [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3508–3515.
- [20] 宫本月, 刘新民, 郭庆杰. 厌氧流化床微生物燃料电池及其串并联性能 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(10): 4527–4532.
- Gong B Y, Liu X M, Guo Q J. Performances of anaerobic fluidized bed microbial fuel cells and series-parallel connection [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(10): 4527–4532. (in Chinese)
- [21] Zhang X, Ren H, Pyo S, et al. A high-efficiency DC–DC boost converter for a miniaturized microbial fuel cell [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2041–2049.
- [22] 李顶杰, 何辉, 卢翠香, 等. 串/并联微生物燃料电池的性能 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(2): 338–343.
- Li D J, He H, Lu C X, et al. Increasing voltage and current by connecting MFCs in series and parallel [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(2): 338–343. (in Chinese)
- [23] 张培远, 刘中良, 熊亚选, 等. 产电对微生物燃料电池参数的影响 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(4): 671–674.
- Zhang P Y, Liu Z L, Xiong Y X, et al. Influence of power generation on parameters of the microbial fuel cell [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(4): 671–674. (in Chinese)
- [24] 徐功娣, 李永峰, 张永娟. 微生物燃料电池原理与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012.
- [25] 卢娜, 周顺桂, 倪晋仁. 微生物燃料电池的产电机理 [J]. 化学进展, 2008, 20(7/8): 1233–1240.
- Lu N, Zhou S G, Ni J R. Mechanism of energy generation of microbial fuel cells [J]. Progress in Chemistry, 2008, 20(7/8): 1233–1240. (in Chinese)

## Comparison of the effect of microbial fuel cell connectivity on power generation efficiency

SHI YuRu<sup>1</sup> LENG ChuanJiang<sup>1</sup> CHANG Sheng<sup>1</sup> WANG Jing<sup>1\*</sup> WANG XiaoHui<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Technology; 2. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Microbial fuel cells (MFCs) offer a new type of water treatment technology. However, because the production efficiency of microbial fuel cells is low, they cannot be employed on a large scale. Therefore, finding ways to improve the efficiency of MFCs has become a hot research topic at home and abroad. In this paper, we report four groups of experiments involving double chamber microbial fuel cells connected in voltage series and parallel, and biomass series and parallel. We find that different connection methods have a different effect on the electrical efficiency and sewage treatment capacity. We also designed a booster circuit to ensure that the fuel cell can maintain a basic voltage of about 680 mV. Analysis of biological experiments shows that voltage series and parallel and biomass series and parallel connectivity result in the working voltage of fuel cells having different degrees of improvement. Boosting voltage parallel and series and biomass series and parallel can improve the degradation ability of fuel cells to different degrees, and the biodegradation ability of biomass series and parallel is the most significant.

**Key words:** microbial fuel cells; series; parallel; efficiency of electricity production; sewage treatment

(责任编辑: 吴万玲)