

# CW-MFC 处理六价铬废水及同步产电的研究

牟春霞<sup>1</sup>, 王琳<sup>1\*</sup>, 王丽<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**利用人工湿地型微生物燃料电池(CW-MFC)处理六价铬[Cr(VI)]废水可实现同步产电。考察了不同电极间距下COD质量浓度、Cr(VI)质量浓度及水力停留时间(HRT)对处理含铬废水及同步产电的影响。结果表明,随着COD和Cr(VI)质量浓度的增大,CW-MFC的电压先增大后减小。电极间距越小,欧姆电阻越小,但当电极间距为10 cm时系统的输出电压和功率密度最大,同时COD和Cr(VI)的去除率最高。随着HRT的延长,产电性能和污水处理能力先增大后减小。电极间距为10 cm时,最大功率密度和COD最高去除率分别458.24 mW/m<sup>3</sup>和92.50%(HRT为2 d),Cr(VI)最高去除率为92.96%(HRT为3 d)。

**关键词:**微生物燃料电池;人工湿地;六价铬;水处理;产电

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)06-0106-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.06.022

## Treatment of hexavalent chromium-containing wastewater by CW-MFC and simultaneous power generation

MU Chun-xia<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1\*</sup>, WANG Li<sup>2</sup>

(1.College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2.School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:**The constructed wetland coupled with microbial fuel cell (CW-MFC) is adopted to treat with hexavalent chromium [Cr(VI)]-containing wastewater and simultaneously generate power.The effects of COD mass concentration, Cr(VI) mass concentration and hydraulic retention time (HRT) on the treatment of chromium-containing wastewater and the simultaneous production of electricity at different electrode spacing are investigated.It is shown that the voltage of CW-MFC increases firstly and decreases then with the increases of COD and Cr(VI) mass concentrations.The smaller the electrode spacing,the smaller the ohmic resistance.The output voltage and power density of the system reaches the maximum,and the removal rates of COD and Cr(VI) reach the highest when the electrode spacing is 10 cm.With the elongation of HRT,the power production performance and wastewater treatment capacity increases firstly and decreases then.As the electrode spacing is 10 cm,the maximum power density and the highest removal rate of COD are 458.24 mW·m<sup>-3</sup> and 92.50% (HRT=2 d),respectively,and the maximum removal rate of Cr(VI) is 92.96% (HRT=3 d).

**Key words:**microbial fuel cell; constructed wetland; hexavalent chromium; water treatment; electricity generation

随着金属电镀、采矿、电池、机械制造、电子和化工等行业的发展,重金属废水的排放对生态环境和人们的身体健康造成了巨大的威胁<sup>[1]</sup>,其中含铬废水的污染已成为最严重的重金属污染之一。铬在水中通常以六价铬[Cr(VI)]和三价铬[Cr(III)]的形式存在,其中Cr(VI)在水体中有很高的溶解度和迁移性,能够在生物体内富集,毒性是Cr(III)的100多倍<sup>[2]</sup>。同时Cr(VI)极易被人体吸入,人体短期接触Cr(VI)会引起呼吸道不适,而长期大剂量接触会

造成肾脏、肝脏的损伤,有致癌、诱变作用,已确定为人类的致癌物质<sup>[3-4]</sup>。含铬废水污染源复杂,目前国内外常见的处理方法有吸附法、化学沉淀法、电解法、膜分离法、离子交换树脂法以及生物法等<sup>[5]</sup>,但这些处理方法因易受环境影响、处理效果差、能耗高、易产生二次污染等,在应用中受到了很大的限制。

微生物燃料电池(microbial fuel cells, MFCs)是一种利用产电微生物将化学能转化为电能的技术,

收稿日期:2021-07-01;修回日期:2022-03-30

基金项目:国家留学基金管理委员会资助项目(20120370391);国家重点研发计划项目(2018YFC0408000,2018YFC0408004)

作者简介:牟春霞(1990-),女,博士研究生,研究方向为水污染处理,muchxia2014@126.com;王琳(1966-),女,博士,教授,研究方向为水资源利用与水污染控制技术,通讯联系人,lwang@ouc.edu.cn。

可以实现在处理废水的同时产生电能,同时可用于重金属废水的处理与回收。Abourached 等<sup>[6]</sup>用单室空气阴极 MFCs 处理含镉和锌废水的同时产生电能,实验过程中微生物吸附和硫化物沉淀起主要作用,镉( $200 \mu\text{mol/L}$ )和锌( $400 \mu\text{mol/L}$ )的去除率分别可达到 90% 和 97%。Qian 等<sup>[7]</sup>研究了双室微生物燃料电池处理  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的混合溶液,结果表明, MFCs 中离子交换膜的类型和重金属的浓度对  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的迁移和还原起着重要的作用。近年来 MFCs 作为一种环境友好的水污染处理技术,为了提高其产电性能及水处理效果,通过不断改进构造了多种结构形式的微生物燃料电池,主要包括植物型微生物燃料电池(Plant Microbial Fuel Cell, PMFC)<sup>[8]</sup>、沉积型微生物燃料电池(Sediment Microbial Fuel Cell, SMFC)<sup>[9]</sup>和人工湿地型微生物燃料电池(Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell, CW-MFC)<sup>[10]</sup>。Habibul 等<sup>[11]</sup>分析了 PMFC 系统各部分(阴极的生物电还原作用、微生物的直接还原作用、植物的吸收作用及电极的吸附作用)处理 Cr(VI) 废水的作用机理,当进水 Cr(VI) 质量浓度为  $19 \text{ mg/L}$  时去除率可达 99.0%。Zhao 等<sup>[12]</sup>研究了 CW-MFC 处理 Pb(II) 废水同时进行产电,发现 Pb(II) 废水的产电性能明显好于无 Pb(II) 添加的废水,同时 Pb(II) 的去除率可达 84.86%。因此, CW-MFC 系统可利用人工湿地自身具有氧化还原电位的优势<sup>[13]</sup>,在提高系统污染物去除能力的同时增强微生物燃料电池的产电性能,将其用于重金属废水的处理具有一定的应用前景。

笔者利用 CW-MFC 处理 Cr(VI) 废水的同时同步产电,考察不同电极间距下运行条件对 CW-MFC 水处理效果和产电性能的影响,考察了系统进水的 COD 质量浓度、Cr(VI) 质量浓度及水力停留时间(HRT)对出水污染物的浓度及产电性能的影响。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 实验装置

采用内径 18 cm、高 52 cm 的有机玻璃圆筒模拟 CW-MFC 装置,如图 1 所示。装置内部由下而上依次为砾石支撑层(粒径 4~6 mm,厚度 3 cm)、火山岩填料层(粒径 3~5 mm,厚度 14 cm)、活性炭阳极层(粒径 3~5 mm,比表面积约  $900 \text{ m}^2/\text{g}$ ,厚度 8 cm)、中间火山岩填料层、活性炭阴极层(厚度 8 cm)和顶部火山岩填料层,其中活性炭电极层中埋设不锈钢网作为电流收集器<sup>[14]</sup>。火山岩和砾石在使用前均

需用自来水冲洗干净,而活性炭颗粒在使用之前先用自来水清洗至无明显杂质后,用蒸馏水冲洗 2 次,依次用  $1 \text{ mol/L}$  的 NaOH 和  $1 \text{ mol/L}$  的 HCl 分别浸泡 24 h,最后用蒸馏水漂洗 5 次。阴阳极间由直径 1 mm 的铜导线连接,导线暴露于溶液中的金属部分用环氧树脂密封,外部连接电阻箱,电阻调节为  $1000 \Omega$ 。CW-MFC 装置外部用黑色塑料袋包裹防止藻类大量生长,实验温度为  $23 \sim 27^\circ\text{C}$ 。

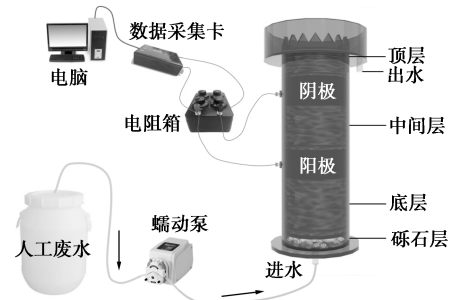


图 1 CW-MFC 实验装置

实验中设置 3 个 CW-MFC 系统,通过调节阴极的位置来改变阳极与阴极之间的距离,电极间距分别设置为 5、10 cm 和 15 cm。

### 1.2 CW-MFC 的接种与启动

接种污泥取自青岛市海泊河污水处理厂的二沉池回流污泥,污泥取回后先用去离子水洗涤,用不锈钢网过滤掉大颗粒杂质后,用于 CW-MFC 反应器阴阳极挂膜。实验中进水用人工模拟废水,采用不同质量浓度的葡萄糖(以 COD 计)作为碳源,重铬酸钾配置 Cr(VI) 废水,模拟废水其他成分如表 1 所示。系统进水的 pH 为 6.7~7.1。接种初期,不含 Cr(VI) 的模拟废水通过蠕动泵持续不断地输送到反应器中。系统运行 2 周后,按照实验要求的 Cr(VI) 质量浓度添加重铬酸钾,待系统运行稳定后进行实验。

表 1 人工模拟废水

试剂	质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	试剂	质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
葡萄糖	100~800	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200.0
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	56.58~282.90	$\text{CaCl}_2$	15.0
$\text{KNO}_3$	252.5	$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.0
$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	497.0	$\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	28.0
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	275.0	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.24
$\text{NaCl}$	330.0	$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.04
$\text{NaHCO}_3$	336.0	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.12

### 1.3 测试与分析方法

Cr(VI) 的质量浓度采用二苯基碳酰二肼分光光度法测定, Cr(VI) 的去除率计算式为:

$$\delta_{\text{Cr(VI)}} = \{ [\rho(\text{Cr(VI)})_0] - \rho(\text{Cr(VI)})_i \} / \rho(\text{Cr(VI)})_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\rho(\text{Cr(VI)})_0$  为进水口 Cr(VI) 质量浓度, mg/L;  $\rho(\text{Cr(VI)})_i$  为出水口 Cr(VI) 质量浓度, mg/L。

COD 的质量浓度采用重铬酸钾法测定, COD 去除率计算式为:

$$\delta_{\text{COD}} = [(COD_0 - COD_i) / COD_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $COD_0$  为进水口 COD 质量浓度, mg/L;  $COD_i$  为出水口 COD 质量浓度, mg/L。

电压 ( $U$ ) 由数据采集卡每隔 5 min 自动采集和保存。电流  $I$  由欧姆定律 ( $I = U/R$ ) 计算得到。

CW-MF 的极化曲线与功率密度曲线采用静态法测量<sup>[15]</sup>, 通过调节外接电阻的阻值 ( $5 \sim 10^4 \Omega$ ), 记录不同阻值下电阻两端的稳定电压值。以电流密度为横坐标, 电极电势为纵坐标绘制极化曲线。而功率密度曲线由功率密度对电流密度作图得到, 功率密度  $P = UI/A$ , 其中  $A$  为反应柱阳极区有效容积 ( $\text{m}^3$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 COD 质量浓度对产电性能和废水处理效果的影响

#### 2.1.1 COD 质量浓度对产电性能的影响

为了研究不同 COD 浓度对 CW-MFC 性能的影响, 设置 HRT 为 2 d, 改变进水葡萄糖的质量浓度。有机物作为 CW-MFC 产电过程中不可缺少的部分, 不同的 COD 质量浓度也会影响其产电性能, 如表 2 所示。由表 2 中可以看出, 随着 COD 质量浓度的不断增加, 系统产电电压呈现先增大后减小的趋势。当 COD 质量浓度由 100 mg/L 增加到 500 mg/L 时, 系统的电压和功率密度明显呈现增大的趋势, 而随着 COD 质量浓度的继续增大, 5 cm 电极间距系统在 COD 质量浓度为 600 mg/L 时取得最大电压值 563.53 mV; 电极间距为 10 cm 和 15 cm 时, COD 质量浓度为 500 mg/L 时取得最大电压值, 分别为 588.23 mV 和 547.25 mV。COD 质量浓度的继续增加, 产电性能并没有继续增强, 这是因为当有机物浓度过高时阳极区域未完全氧化的有机物会进入阴极区域, 继续氧化消耗阴极的溶解氧, 导致阴极电势降低、电压减小。而葡萄糖既要为微生物生长提供碳

源, 也需要为系统产电提供电子, 浓度较低时, 微生物生长所需的碳源不足、活性较低, 同时也影响了电能的产生。因此只有选择合适的有机物质量浓度才能提高 CW-MFC 系统中微生物的活性, 提高产电性能<sup>[16]</sup>。

表 2 不同 COD 质量浓度 CW-MFC 的产电性能

COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	电压/mV			最大功率密度/(mW·m <sup>-3</sup> )		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
100	493.67	508.58	495.87	297.58	299.07	255.46
200	498.50	517.81	510.46	339.28	368.62	272.75
300	515.08	539.64	520.67	329.58	373.38	303.91
400	537.80	555.29	531.07	359.02	378.96	332.03
500	556.26	588.23	547.25	444.35	458.24	369.55
600	563.53	574.16	543.75	469.95	442.55	330.73
700	548.08	569.92	536.03	470.88	423.54	324.03
800	498.13	523.00	476.76	362.62	345.30	205.56

#### 2.1.2 COD 质量浓度对水处理效果的影响

不同 COD 质量浓度下 COD 的去除率及 Cr(VI) 的去除率如表 3 所示。

表 3 不同 COD 质量浓度对水处理性能的影响

COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	COD 去除率/%			Cr(VI) 去除率/%		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
100	99.27	99.63	99.42	71.79	74.17	72.39
200	98.17	98.54	99.27	76.68	81.06	76.24
300	94.02	97.81	96.10	83.56	84.91	82.39
400	92.69	95.13	91.68	85.82	89.41	84.91
500	87.40	92.50	89.72	87.83	90.66	89.80
600	83.56	91.17	85.38	83.93	86.79	82.71
700	79.57	86.57	82.97	76.86	83.98	78.37
800	72.56	78.67	76.61	72.15	74.54	66.90

由表 3 中可以看出, 当进水 COD 从 100 mg/L 增大到 800 mg/L 时, COD 的去除率一直减小, 但 COD 的去除量在增大。但是 Cr(VI) 的去除率随 COD 质量浓度的增大, 呈现先增大后减小的趋势。当有机物浓度较低时, 提高进水有机物的浓度, 微生物的活性显著增强, Cr(VI) 的去除率明显提高。但进水有机物浓度过高时, 到达阴极的底物浓度就越高, 从而更多的溶解氧被好氧菌消耗而不能作为电子受体完成阴极的半反应, 微生物的电化学还原作用减弱, 降低了 Cr(VI) 的去除率。

## 2.2 Cr(VI)质量浓度对产电性能和废水处理效果的影响

### 2.2.1 Cr(VI)质量浓度对产电性能的影响

在 COD 质量浓度为 500 mg/L、HRT 为 2 d 时,考察了不同初始 Cr(VI)质量浓度下 CW-MFC 系统的产电性能,结果如表 4 所示。

表 4 Cr(VI)浓度对产电性能的影响

$\rho(\text{Cr(VI)})/$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	电压/mV			最大功率密度/( $\text{mW}\cdot\text{m}^{-3}$ )		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
20	567.24	566.93	567.74	420.69	438.00	305.08
40	551.74	573.37	512.01	422.69	441.44	272.79
60	556.26	588.23	547.25	444.35	458.24	369.55
80	501.94	538.41	519.87	367.72	415.65	270.12
100	454.86	465.63	472.83	287.38	285.12	252.97

由表 4 中可以看出,电压和功率密度随进水 Cr(VI)质量浓度的增加先增大后减小。当 Cr(VI)质量浓度为 60 mg/L 时,电压和功率密度取得最大值,分别为 556.26 mV 和 444.35  $\text{mW}/\text{m}^3$  (5 cm)、588.23 mV 和 458.24  $\text{mW}/\text{m}^3$  (10 cm)、547.25 mV 和 369.55  $\text{mW}/\text{m}^3$  (15 cm)。这是因为 Cr(VI)离子的加入增加了电解质的离子强度,从而提高了电子转移速率<sup>[12,17]</sup>。尽管 CW-MFC 中许多微生物对 Cr(VI)有一定的耐受性,但水溶液中 Cr(VI)质量浓度过高时会抑制细菌的活性,导致功率密度降低<sup>[18]</sup>。

### 2.2.2 Cr(VI)质量浓度对废水处理效果的影响

不同初始 Cr(VI)质量浓度下,CW-MFC 系统对 Cr(VI)废水的处理效果如表 5 所示。

表 5 Cr(VI)质量浓度对水处理性能的影响

$\rho(\text{Cr(VI)})/$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	COD 去除率/%			Cr(VI)去除率/%		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
20	80.63	86.37	82.44	96.84	96.95	96.92
40	86.93	88.32	84.89	90.24	93.37	92.44
60	87.40	92.50	89.72	87.83	90.66	89.85
80	81.38	85.82	81.85	83.48	88.25	86.08
100	70.76	78.13	77.50	70.76	74.33	72.92

由表 5 中可以看出,当进水 Cr(VI)质量浓度由 20 mg/L 增加到 100 mg/L 时,COD 去除率先增大后减小,当 Cr(VI)质量浓度为 60 mg/L 时,5、10 cm 和 15 cm 间距下 COD 的最大去除率分别为 87.40%、92.50%和 89.72%,废水中过高质量浓度的 Cr(VI)不利于 COD 的去除。当进水 Cr(VI)质量浓度为

20 mg/L 时,各间距下 Cr(VI)去除率可达 96%,进水 Cr(VI)质量浓度增加到 60 mg/L 时,5、10 cm 和 15 cm 间距下 Cr(VI)去除率分别为 87.83%、90.66%和 89.85%。而 Cr(VI)质量浓度增加到 100 mg/L 时,Cr(VI)的去除率分别下降到 70.76%、74.33%和 72.92%(5、10 cm 和 15 cm)。当电极间距为 10 cm 时,相比于间距为 5 cm 和 15 cm 时 CW-MFC 对 Cr(VI)的去除率略高,而由表 4 可见电极间距为 10 cm 时系统的输出电压最大,说明生物电化学还原对 CW-MFC 系统去除 Cr(VI)具有重要作用。微生物对低质量浓度的 Cr(VI)有一定的耐受性,废水中 Cr(VI)质量浓度的适度增加提高了 CW-MFC 系统对 COD 的去除效果,但高质量浓度的 Cr(VI)对微生物的毒性作用较强<sup>[19]</sup>,使得 CW-MFC 系统的污水处理能力减弱。因此当废水中 Cr(VI)质量浓度较高时可适度稀释后再进行处理。

## 2.3 HRT 对产电性能和废水处理效果的影响

### 2.3.1 HRT 对产电性能的影响

在进水 COD 质量浓度为 500 mg/L、Cr(VI)质量浓度为 60 mg/L 时,MFC-CW 系统的产电电压、功率密度随 HRT 的变化情况如表 6 所示。由表 6 中可以看出,随着 HRT 的增大,CW-MFC 的产电电压先增大后减小。电极间距为 5 cm 和 10 cm 时,当 HRT 为 2 d 时取得最大电压值,分别为 556.26 mV 和 588.23 mV,而 15 cm 的电极间距在 HRT 为 3 d 时获得最大电压值 550.31 mV。HRT 较短时,CW-MFC 系统中的水溶液与有机物接触时间较短,无法满足微生物有机物供给,适当的延长 HRT,有利于微生物充分利用葡萄糖进行生长繁殖<sup>[20]</sup>。同时产电菌电化学活性的增强促进了葡萄糖氧化产生更多的电子,提高了电子的传质效率<sup>[21]</sup>。然而,过长的 HRT 将导致底层葡萄糖消耗过多,阳极区有机物浓度过低,微生物活性下降,阳极电子供体不足,产电能力下降<sup>[22-23]</sup>。

表 6 HRT 对产电性能的影响

HRT/ d	电压/mV			最大功率密度/( $\text{mW}\cdot\text{m}^{-3}$ )		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
1	500.17	550.78	536.13	314.69	352.70	316.31
2	556.26	588.23	547.25	444.35	458.24	369.55
3	552.78	558.08	550.31	473.31	426.81	356.30
4	470.51	545.59	538.87	307.24	372.53	350.21

### 2.3.2 HRT 对废水处理效果的影响

HRT 对 CW-MFC 的污水处理能力有一定的影

响,结果如表 7 所示。

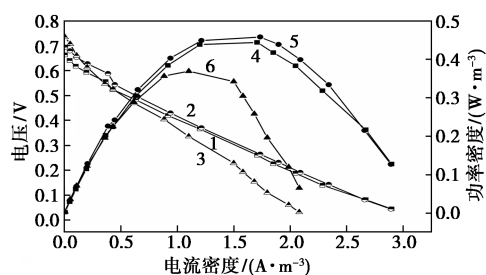
表 7 HRT 对水处理性能的影响

HRT/ d	COD 去除率/%			Cr(VI) 去除率/%		
	5 cm	10 cm	15 cm	5 cm	10 cm	15 cm
1	73.68	80.10	78.06	73.19	80.98	77.0
2	87.40	92.50	89.72	87.83	90.66	89.85
3	88.35	89.16	90.36	90.32	92.96	91.86
4	83.29	87.15	85.42	88.32	89.61	89.04

由表 7 中可以看出,COD 的去除率随 HRT 的延长呈现先增大后减小的趋势,在 HRT 为 2 d 和 3 d 时 COD 去除率变化不大,不同间距下的去除率都能达到 87%,但在 HRT 为 4 d 时去除率略有减小,这是由于 HRT 太长,导致有机物过多的在底层被消耗,影响阳极微生物的生长,降低了 COD 的去除率。而 Cr(VI) 去除率在 HRT 为 3 d 时去除率最大,当 HRT 从 1 d 增加到 3 d 时,Cr(VI) 去除率逐渐增大。CW-MFC 系统中的 Cr(VI) 主要通过过滤介质的吸附和直接还原、生物电化学还原和沉淀的综合作用达到去除的目的。当 HRT 较长时,生物电化学还原和沉淀对 Cr(VI) 的处理起主要作用。当 HRT 延长至 4 d 时,Cr(VI) 去除率降低,由于过长的 HRT 会导致阳极微生物活性减小,生物电化学还原作用减弱,影响了 Cr(VI) 的去除率<sup>[24]</sup>。因此,选择适宜的 HRT 将有助于提高 CW-MFC 的污水处理性能和发电性能。

#### 2.4 不同电极间距下产电性能的分析

模拟废水 COD 质量浓度为 500 mg/L、Cr(VI) 质量浓度 60 mg/L、HRT 为 2d 时,改变外电阻(5~10<sup>5</sup>)记录电压值,计算得到 CW-MFC 不同电极间距下的极化曲线和功率密度曲线,如图 2 所示。由图 2 中可以看出,不同电极间距下的产电性能不同,电极间距为 5、10 cm 和 15 cm 时,电阻值分别为 139.40、147.44 Ω 和 210.21 Ω,随着电极间距的增大欧姆电阻显著增大。但是并非电极间距越小产电量越大,电极间距为 15 cm 时电压和功率密度最小,而间距为 10 cm 时电压和功率密度值略大于间距为 5 cm 的值。由于采取改变阴极位置的方式来调整阴阳极间距,因此虽然电极间距越小其内阻最小,但考虑到阴极的位置,过小的阴阳极间距会导致阴极氧浓度较低,阴极电势降低。但过大的电极间距会影响质子在 CW-MFC 的传质速率,内阻增大,降低产电性能。选择合适的电极间距对提高 CW-MFC 的产电性能具有重要的作用。



1—5 cm 电压;2—10 cm 电压;3—15 cm 电压;4—5 cm 功率密度;  
5—10 cm 功率密度;6—15 cm 功率密度

图 2 不同电极间距的极化曲线和功率密度曲线

### 3 结论

(1) 随着 COD 质量浓度的增大,CW-MFC 系统的产电电压和 Cr(VI) 的去除率先增大后减小,当 COD 质量浓度为 500 mg/L 时,电极间距在 10 cm 时输出电压和 Cr(VI) 去除率取得最大值,分别为 588.23 mV 和 92.50%。

(2) 进水 Cr(VI) 质量浓度对 CW-MFC 的产电性能和水处理效果具有显著的影响,微生物对低质量浓度的 Cr(VI) 具有一定的耐受性,当 Cr(VI) 质量浓度过高时对微生物有抑制毒害作用,进而降低系统产电性能和对污染物的去除效率。

(3) 适当延长 HRT 有利于废水中污染物的去除和产电性能的提高,选择合适的 HRT 对 CW-MFC 十分重要。

(4) 阴阳极间距对污水的处理能力和产电性能也有显著的影响。电极间距越小,欧姆内阻越小。但产电性能和污水处理效果在电极间距为 10 cm 时优于 5 cm 和 15 cm,因此除欧姆内阻以外,CW-MFC 的活化内阻和浓差内阻也是影响产电的重要因素。

#### 参考文献

- [1] Li Z, Ma Z, Van Der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China; Pollution and health risk assessment [J]. Science of The Total Environment, 2014, 468-469: 843-853.
- [2] Hellerich L A, Nikolaidis N P, Dobbs G M. Evaluation of the potential for the natural attenuation of hexavalent chromium within a sub-wetland ground water [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(4): 1513-1524.
- [3] Zhitkovich A. Chromium in drinking water: Sources, metabolism, and cancer risks [J]. Chemical Research in Toxicology, 2011, 24(10): 1617-1629.
- [4] Saha R, Nandi R, Saha B. Sources and toxicity of hexavalent chromium [J]. Journal of Coordination Chemistry, 2011, 64(10): 1782-1806.
- [5] 马前, 张小龙. 国内外重金属废水处理新技术的研究进展 [J].

- 环境工程学报, 2007, 1(7): 10-14.
- [6] 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(15): 228-233.
- [7] Qian Y, Huang L, Pan Y, *et al.* Dependency of migration and reduction of mixed  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  on electric field, ion exchange membrane and metal concentration in microbial fuel cells [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 192: 78-87.
- [8] Guan C Y, Tseng Y H, Tsang D C W, *et al.* Wetland plant microbial fuel cells for remediation of hexavalent chromium contaminated soils and electricity production [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 137-145.
- [9] Zhao S, Liu P, Niu Y, *et al.* A novel early warning system based on a sediment microbial fuel cell for in situ and real time hexavalent chromium detection in industrial wastewater [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 1-15.
- [10] Li X, Song H, Xiang W, *et al.* Electricity generation during wastewater treatment by a microbial fuel cell coupled with constructed wetland [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2012, 28(2): 175-178.
- [11] Habibul N, Hu Y, Wang Y K, *et al.* Bioelectrochemical chromium (VI) removal in plant-microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 3882-3889.
- [12] Zhao C, Shang D, Zou Y, *et al.* Changes in electricity production and microbial community evolution constructed wetland-microbial fuel cell exposed to wastewater containing Pb(II) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139127.
- [13] Yadav A K, Dash P, Mohanty A, *et al.* Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 126-131.
- [14] 王同悦, Doherty L, 赵晓红, 等. 人工湿地/微生物燃料电池技术的发展现状 [J]. *中国给水排水*, 2015, 031(17): 129-136.
- [15] 方舟. 人工湿地型微生物燃料电池同步降解偶氮染料与产电的特性及机理 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [16] Xu L, Zhao Y, Fan C, *et al.* First study to explore the feasibility of applying microbial fuel cells into constructed wetlands for COD monitoring [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 846-854.
- [17] Xu F, Ouyang D L, Rene E R, *et al.* Electricity production enhancement in a constructed wetland-microbial fuel cell system for treating saline wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121462.
- [18] Vaiopoulou E, Gikas P. Effects of chromium on activated sludge and on the performance of wastewater treatment plants: A review [J]. *Water Research*, 2012, 46(3): 549-570.
- [19] Carlos, Cervantes, Jesús, *et al.* Interactions of chromium with microorganisms and plants [J]. *Fems Microbiology Reviews*, 2001, 25(3): 335-347.
- [20] Wang X, Tian Y, Liu H, *et al.* Optimizing the performance of organics and nutrient removal in constructed wetland-microbial fuel cell systems [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 653: 860-871.
- [21] Liu L, Chou T Y, Lee C Y, *et al.* Performance of freshwater sediment microbial fuel cells: Consistency [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(7): 4504-4508.
- [22] Fang Z, Cheng S, Cao X, *et al.* Effects of electrode gap and wastewater condition on the performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland [J]. *Environmental Technology Letters*, 2016, 38(8): 1051-1060.
- [23] Li H, Song H L, Yang X L, *et al.* A continuous flow MFC-CW coupled with a biofilm electrode reactor to simultaneously attenuate sulfamethoxazole and its corresponding resistance genes [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 637-638: 295-305.
- [24] Fang Z, Song H L, Cang N, *et al.* Electricity production from Azo dye wastewater using a microbial fuel cell coupled constructed wetland operating under different operating conditions [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2015, 68: 135-141. ■

(上接第 105 页)

- [5] Lou Z, Sun Y, Bian S, *et al.* Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar [J]. *Chemosphere*, 2017, 169: 23-31.
- [6] 司崇殿, 郭庆杰. 活性炭活化机理与再生研究进展 [J]. *中国粉体技术*, 2008, (5): 48-52.
- [7] 邹星, 吴小莲, 莫测辉, 等. 蒙脱石对四环素类抗生素的吸附平衡及动力学 [J]. *高校化学工程学报*, 2011, 25(3): 524-529.
- [8] 张强, 朱铭强, 蒋花, 等. 山茱萸果核制备活性炭的工艺研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(11): 146-152.
- [9] Kumar B, Smita K, Cumbal L, *et al.* Biogenic synthesis of iron oxide nanoparticles for 2-arylbenzimidazole fabrication [J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2014, 18(4): 364-369.
- [10] 张华. 头孢类抗生素在改性活性炭上的吸附 [D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [11] 纪营雪, 王风贺, 张帆, 等. 稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 [J]. *环境科学*, 2013, 34(10): 3912-3920.
- [12] 段洽笑. 磁性沸石咪唑骨架材料对水中头孢类抗生素的吸附去除及循环利用的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [13] Wu H, Feng Q. Fabrication of bimetallic Ag/Fe immobilized on modified biochar for removal of carbon tetrachloride [J]. *Journal of Environment Science*, 2017, 54C: 346-357.
- [14] Tony R. Membrane bioreactors nanotechnology improves landfill leachate quality [J]. *Filtration & Separation*, 2007, 44(11): 38-39.
- [15] Tzeng T W, Liu Y T, Deng Y, *et al.* Removal of sulfamethazine antibiotics using cow manure-based carbon adsorbents [J]. *International Journal of Environment Science and Technology*, 2016, 13(3): 973-984.
- [16] 计海洋, 汪玉瑛, 吕豪豪, 等. 不同炭化温度制备的蚕丝被废弃物生物炭对重金属  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附性能 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(4): 1328-1338. ■