

## 外加植物泵的微生物燃料电池在生态城市中的应用

冯浩哲 魏浩东 马畅 董思竹 张智杰 郝大程

大连交通大学环境与化学工程学院, 辽宁 大连 116000

**[摘要]**近年来快速发展的科学技术当中,微生物燃料电池(MFC)是一种将处理污染和产生能量相结合的绿色产能技术。因其独特的去污产电特性,具有极大的研究价值和应用前景。在研究环境污染与治理方面,MFC得到了迅速发展和应用,产电能力不断增强的同时,其构建成本也大幅降低,大大提高了实用性。如何微生物燃料电池与智能城市有机结合,我们提供了一个思路。

**[关键词]**微生物燃料电池;植物泵;生态花园

DOI: 10.33142/sca.v3i7.2679

中图分类号: TM911

文献标识码: A

### Application of Microbial Fuel Cell with Plant Pump in Ecological City

FENG Haozhe, WEI Haodong, MA Chang, DONG Sizhu, ZHANG Zhijie, HAO Dacheng

School of Environmental and Chemical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** Among the rapid development of science and technology in recent years, microbial fuel cell (MFC) is a kind of green production technology combining pollution treatment and energy generation. Because of its unique characteristics of decontamination and power generation, it has great research value and application prospect. In the research of environmental pollution and treatment, MFC has been developed and applied rapidly. While the power generation capacity is increasing, the construction cost of MFC is also greatly reduced, which greatly improves the practicability. How to combine microbial fuel cell with intelligent city organically, we provide an idea.

**Keywords:** microbial fuel cell; plant pump; ecological garden

#### 引言

能源紧张和环境污染是我国现代社会可持续发展面临的两大主要挑战。1975年的世界人口比1925年增加了一倍,世界能源的总消耗量却增长了4.5倍,并且随着社会经济的不断发展,能源的消耗必将呈现持续增长<sup>[1]</sup>。如何同时解决这两个难题,我们有了利用花卉类植物作为外加植物泵组成沉积物微生物燃料电池,然后利用该系统构建生态花园的设计。

#### 1 微生物燃料电池

##### 1.1 微生物燃料电池的结构

燃料电池是一类清洁、环保、高转化效率的能量利用装置,它一般以氢气或甲醇为燃料和氧气发生化学反应生成水(或二氧化碳),能量的转化过程没有燃烧的热机过程,能量的利用不受卡诺循环限制,能量转化效率之高,大约是内燃机的2-3倍。成熟的燃料电池技术在未来新型的能源结构中必有一席之地。

微生物燃料电池(MFC)能够利用微生物群落作为催化剂,通过微生物聚集<sup>[1]、[2]</sup>的生物催化活性,从广泛的有机和无机物(作为微生物燃料或能量)中获取电能。在微生物电化学系统中,氧化-还原反应通过两个后续步骤进行。首先,启动微生物-阳极相互作用,将有机底物(电子给体)氧化成自由释放的质子和电子。其次,通过外部电路将产生的电子从阳极转移到阴极,通过还原氧(电子受体)将自由质子转移到阴极形成水和生物电流。

##### 1.2 微生物燃料电池的工作原理

微生物燃料电池(MFC)本质上是收获微生物代谢过程中产生的电子并引导电子产生电流的系统(如图)。MFC的功率输出取决于系统传递电子的数量和速率以及阳极与阴极之间的电位差。并且由于MFC不是热机系统,不受卡诺循环的热力学限制,所以理论上MFC是将化学能转化为电能的最有效的装置,最大效率甚至可以接近100%。

微生物燃料电池的主要工作原理是燃料(如PHAs)在微生物作用下于阳极室中被氧化,电子通过外电路进入阴极,

质子通过质子交换膜到达阳极，氧化物在阴极得到电子后被还原。

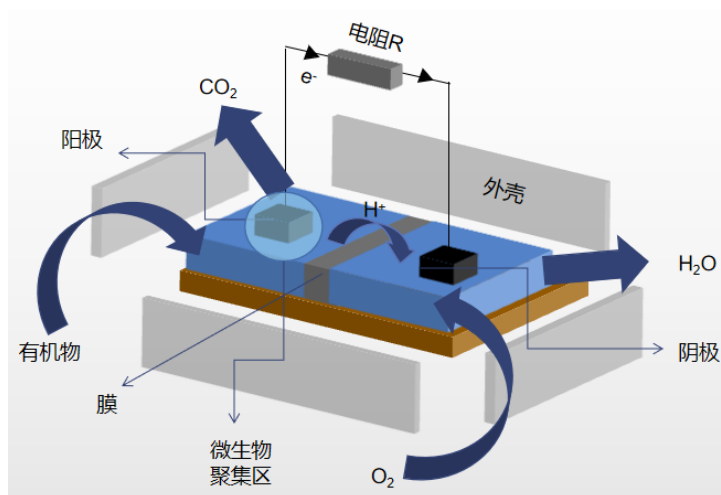


图1 微生物燃料电池工作原理示意图

根据电子的传递方式不同，可将微生物燃料电池分为直接和间接两种类型。所谓直接是指燃料中的电子可以在燃料氧化的同时直接从燃料分子上转移到电极；但是如果燃料处于电解质或其他反应介质中，电子需要经过中间体传递到电极上，就称为间接型微生物燃料电池。<sup>[3]</sup>

间接型微生物燃料电池从理论上讲，各种微生物都可能作为这种微生物燃料电池的催化剂，经常使用的有普通变形菌、枯草芽孢杆菌以及大肠埃希氏杆菌等。

直接型微生物燃料电池又可以称为无媒介 MFC，该类型可以在自然环境(如沉积物)中工作，但在自然条件下细菌生长速度较慢，并且装置产生的电流密度很低，主要有六个方面会影响电子传递速率：微生物对底物的氧化、电子从微生物到电极的传递、外电路的负载电阻、阴极提供质子的过程、氧化物的供给和阴极的反应。针对上述影响因素，人们使用各种办法，如改进阴极和阳极材料、改变电极表面积、增强质子交换膜穿透性以及燃料的多样性研究等，提高微生物燃料电池的性能。<sup>[3]</sup>

在本研究中，我们使用的是沉积物微生物燃料电池，属于直接型微生物燃料电池，并且通过外加植物泵的方式来提高阳极的传质速率，进而提高微生物对于底物的氧化速率。<sup>[4]</sup>

### 1.3 微生物燃料电池的功能

微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)是基于传统的燃料电池(Fuel Cell, FC)与微生物相结合发展起来的由阴阳两极及外电路构成的装置。在微生物燃料电池系统中，微生物通过新陈代谢氧化有机物后，将电子向外传递给阳极，电子再通过外电路到达阴极从而产生电能。它被广泛的应用于废弃物污染物的处理和资源的回收。通过产电微生物和其他种类微生物的协同作用，各种各样的废弃物可作为底物被降解，并同时产生电能。

通过建立土壤微生物燃料电池，其基质在阳极厌氧条件下降解产生电子，阴极利用氧化态物质如空气等作为电子受体，通过外电路形成回路并产生电流，使整个土壤微生物燃料电池产生电场。土壤中的难降解有机在厌氧条件下，在阳极中获得电子被还原；土壤中的重金属在电场作用下，向阴极移动，通过对阴极中富集的重金属进行收集或还原，最终实现降解土壤污染物，修复污染土壤的目的。

以六氯苯为例，制备含有六氯苯的污染土壤，设置不同的实验组与对照组，14天时六氯苯浓度与第7天相差极小，这说明土壤微生物燃料电池对六氯苯的降解作用还没有表现出来。一般情况下，土壤中六氯苯开始还原脱氯反应，需要至少4周的驯化时间甚至更长。从第21天开始，在土壤微生物燃料电池中，土壤中六氯苯的浓度大幅下降。不难发现，相比于其他两组，土壤微生物燃料电池可以显著促进六氯苯在土壤中的去除。<sup>[5]</sup>

在茈、苯并茈污染土壤中引入植物微生物燃料电池，污染物去除率至少分别提高了30%、20%。

## 2 土壤中有机污染物的现状及其处理方式

我国虽然不是石油产出大国,但是人口基数庞大导致我国对于石油的需求量巨大。与此同时,石油化工、工业企业等活动会遗留大量的有机污染场地,而这样的地区往往会因为污染物种类多而杂、污染程度深、污染面积大等原因,使之难以进行土壤修复。其中,复合有机污染场地中的典型污染物主要包括多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、石油烃、苯系物和含氯有机物等。本文的主要目的是利用微生物沉积物燃料电池处理土壤中的多环芳烃(PAHs)。多环芳烃是一类含有两个或两个以上苯环的碳氢化合物,具有高毒、致癌和持久性等特点,美国环保署和欧盟均将其列为优先污染物。

在对 PAHs 的污染治理方面,目前应用最广泛的技术之一是化学氧化修复技术,该技术具有反应迅速、反应强度大、适用范围广、修复效率高优点。其次是使用热脱附法对 PAHs 污染土壤进行异位修复,通过直接或间接加热,将污染土壤加热至目标污染物的沸点以上,然后控制系统温度以及物料停留时间,有选择性的促使污染物气化挥发,从而达到目标污染物与土壤的分离、去除的目的。

除了物理、化学修复方法,生物修复方法也是目前的研究热点之一。

例如,通过分离筛选高效 PAHs 降解菌,并添加至 PAHs 污染土壤,从而达到生物修复的目的。而且生物修复技术拥有适用范围大、修复成本低、不破坏植物生长所需要的土壤环境等优点,但是由于修复过程受到土壤特性、pH 值、温度、氧气、水分等环境条件的限制,该技术目前还处在研究探索阶段<sup>[6]</sup>。

## 3 对于处理土壤中有机污染物与智能城市的环保理念结合的新思路

结合植物修复技术和微生物修复技术后,可以形成一种环境友好、费用低廉的新型治理技术。我们设想,由于微生物修复技术对于环境的要求较高,可以尝试利用外加植物泵的沉积物微生物燃料电池来作为提高植物修复效率的一种新途径,即降低了修复技术对于环境的要求,还可以提高土壤的生物可利用性。目前,国内对该方向的研究资料较少,是一个值得深入研究的方向。

沉积型微生物燃料电池(sediment microbial fuel cells, SMFCs)是微生物燃料电池的一种类型,它通过利用埋入厌氧底泥的阳极和分布在有溶解氧的水中的阴极之间的电势差产电。沉积物中的有机碳大约占 0.4 - 2.2%,这些有机碳能够被作为可再生燃料的来源为位于阳极附近的电活性微生物的呼吸提供足够的底物,电活性微生物把产生的电子传递给放在沉积物中的阳极,然后再通过外电路把电子传递到阴极,在阴极电子能够还原氧气。沉积物作为自然的可渗透的基质,可以使得质子从沉积物流向阴极。但这种自然渗透速率较低,通过外加植物的方式,利用蒸腾作用将阳极外的水分进入阳极柱,并携带无氧营养盐、有机物、污染物(如 PAHs)和微生物。我们主要探究外加植物能否用常见的花卉类植物代替,从而达到生物修复与日常生活相结合的目的。

国内研究表明,鸢尾花苗作为植物泵对于沉积物微生物燃料电池阳极的传质效率有一定提升;而水仙花与鸢尾花同属于百合亚目,且比鸢尾花更常见,也易于培养;黄菖蒲与鸢尾花同为鸢尾属,有相似的植物性状,有一定的研究价值;月季花作为常规花圃中最常见的花,更能贴近生活;所以我们设想用这三种花卉类植物作为外加植物泵来构建沉积物微生物燃料电池来进行研究。由于植物泵选用的植物均为花卉类,且花期与生活习性均不相同,所以可以用来分析利用改装置构建生态花圃的可行性,使生态修复技术与智能城市的环保理念有机结合。同时,若生态花圃的面积够大,则产生电压够高,可以为花圃周围的照明系统提供一定的电能,与智能城市的节约能源理念相符。

## 4 总结与讨论

国内研究已经证明 MFC 在治理有机污染土壤方面有很好的应用前景,在产生电能的同时还能治理污染物,具有能耗低、来源广、绿色环保等特点。MFC 技术的应用可给有机污染土壤的治理带来新的技术选择。

我国虽然不是石油产出大国,但是人口基数庞大导致我国对于石油的需求量巨大。与此同时,石油化工、工业企业等活动会遗留大量的有机污染场地,而这样的地区往往会因为污染物种类多而杂、污染程度深、污染面积大等原因,使之难以进行土壤修复。

在这类污染场地上利用外加植物泵的沉积物微生物燃料电池搭建生态花圃,在处理环境、修复土壤的同时,可以

提升城市的美化程度，并且若产生足够多的电能，则可注入电网，节约用电资源，可以一举多得。

现阶段，人口在不断增长，环境问题日趋严重。在当前较为严峻的形势下，考虑到外加植物泵的沉积物微生物燃料电池技术在环保节能领域的独到优势，随着科技的发展，相信它在不远的将来必然会获得长足的进步和广泛的应用。

### 致谢

本文由大连交通大学创新创业训练计划项目（编号：202010150080）资助。

### 【参考文献】

- [1]Zhang D. , Yang F. , Shimotori T. , Wang K. , Huang Y. Performance evaluation of power management systems in microbial fuel cell-based energy harvesting applications for driving small electronic devices. J Power Sources. 2012;217:65 - 71.
- [2]Ramanaviciene A. Hemoproteins in design of biofuel cells. Fuel Cell. 2009;1:25 - 36.
- [3]连静,冯雅丽.微生物燃料电池的研究进展.过程工程学报.2005(04)ISSN: 1009-606X
- [4]刘伯岳,翟红燕,梁银秀,等.Increased power production and removal efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant pumps in sediment microbial electrochemical systems: A preliminary study. Journal of Hazardous Materials. 2019
- [5]王辉.微生物燃料电池(MFC).对典型土壤污染物的去除作用与机理.东南大学.2018(4).
- [6]周宇,马刚平,张向伟,李世青,赵涛.多环芳烃类污染土壤强化生物修复技术研究及应用.环境工程.2017(12)ISSN: 1000-8942.

作者简介：冯浩哲，男，大连交通大学本科在读。魏浩东，女，大连交通大学本科在读。张智杰，男，大连交通大学本科在读。马畅，女，大连交通大学本科在读。董思竹，女，大连交通大学本科在读。郝大程，男，大连交通大学环境与化学工程学院教授。