

藻类微生物燃料电池对污水处理的研究

何督

重庆三峡学院 重庆市三峡库区水环境演变与污染防治重点实验室

DOI:10.12238/eep.v8i1.2462

[摘要] 藻类-微生物燃料电池(A-MFC)通过耦合光合过程与微生物电化学作用,为废水处理与能源回收提供了解决方案。传统(MFC)的性能受限于电极表面发生的氧化还原反应,其中阴极还原依赖于氧气、铁氰化物等电子受体,但这些物质的使用显著增加了运行成本。相比之下,藻类通过光合自养代谢为阴极供氧,同时作为电子传递的生物催化剂,突破了传统阴极对人工电子受体的依赖。其混合营养代谢赋予藻类在复杂污染环境中的适应能力。

[关键词] 生物阴极; 藻类-微生物燃料电池; 养分回收

中图分类号: S154.38+4 文献标识码: A

Research on Wastewater Treatment with Algal Microbial Fuel Cells

Du He

Chongqing Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Control in Three Gorges Reservoir,
Chongqing Three Gorges University

[Abstract] Algal-microbial fuel cells (A-MFCs) provide a solution for wastewater treatment and energy recovery by coupling photosynthetic processes with microbial electrochemical interactions. The performance of conventional microbial fuel cells (MFCs) is constrained by redox reactions occurring at the electrode surfaces, where cathode reduction relies on electron acceptors such as oxygen and ferricyanide. However, the use of these substances significantly increases operational costs. In contrast, algae supply oxygen to the cathode through photoautotrophic metabolism while acting as biocatalysts for electron transfer, thereby overcoming the dependence of traditional cathodes on artificial electron acceptors. Their mixotrophic metabolism endows algae with adaptability in complex polluted environments.

[Key words] Biocathode; Algal-MFC; Nutrient recovery

引言

MFCs是利用微生物做催化剂,将有机物的化学能转化为电能,是一种可满足能源需求的可持续发展技术。该技术具有净化污水、产生电能,并获取生物质能等多重功能,是当前污水治理理念的重大革新技术。除阳极氧化反应外,阴极还原过程对系统性能起决定性作用。传统阴极配置存在多种机制,包括需氧/厌氧条件下的非生物还原反应,例如铁氰化物和氧化锰作为电子介体的研究。尽管这些介体展现出高效性,但其潜在环境风险限制了MFC的规模化应用。相比之下,需氧阴极通过氧气驱动还原反应更具可持续性,但机械曝气带来的高能耗显著增加了运行成本。因此,开发低成本氧化剂供给技术成为关键突破点。

光合微生物藻类因其能在咸水、淡水及污染水体中快速增殖的特性,成为阴极供氧的理想候选。藻类通过光合自养代谢为阴极室持续供氧,在降低系统运行成本的同时避免了有毒化学物质的使用。这种光合作用耦合电化学反应的设计具有多重优

势(图1)藻类生物质产量高,其细胞干重中碳水化合物、蛋白质和脂类总含量可达80%以上,且不同藻种生化组成存在显著差异。例如,商业藻种普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)的脂质含量为5%-58%、碳水化合物9%-17%、蛋白质51%-58%;而斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)的脂质含量为11%-55%、碳水化合物10%-17%、蛋白质11.8%-56%;藻类代谢模式灵活,既能通过自养途径利用CO₂和无机盐合成有机物,又可通过异养途径降解有机污染物实现混合营养生长。

1 MFC阴极室的相关性

阴极还原反应在MFC的运行中发挥着重要作用。在传统的MFC中,非生物阴极利用氧气(终端电子受体(TEA))还原阳极的电子。然而,氧气在阴极中的还原速率取决于电极材料和还原过程中涉及的电子环境。铂基电极、铁和钴等过渡金属以及铁氰化物等电介质可改善氧与电极的接触,有助于提高还原效率。然而,使用这些人工电子介质并不总是切实可行的。随着时间的推

移, 研究人员发现阴极表面会形成生物膜, 尤其是在配备阳离子交换装置的MFC中。细菌和藻类培养物在电化学还原反应中都发挥着重要作用, 可与氧气一起循环利用金属和营养物质, 促进阴极还原反应^[2]。此外, 藻类阴极还可用于生物质生产、增氧、增值和二氧化碳固定等多种用途。因此, 可利用灵活的新陈代谢和快速生长的藻类培养物开发可持续的煤层气。

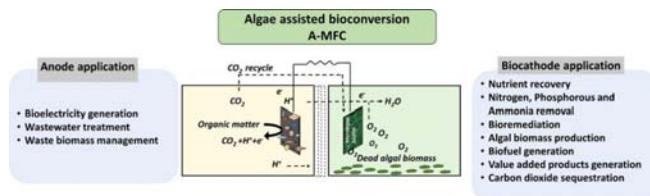


图1 藻类-MFC的多种应用的示意图^[1]

2 藻类MFC的原理、菌株筛选、生成和特性分析

藻类在生物能源生产、生化生产或维持地球化学循环等多个研究领域都有应用。藻类还能在有毒环境和含有害污染物的废水中生长, 因为它们能通过孤雌生殖新陈代谢这些污染物。在MDB系统中应用藻类培养物, 不仅可以优化利用废水中整合的能量来生产生物能源, 还可以提供增值产品、去除营养物质和固存二氧化碳, 有助于实现藻类生物精炼方法的愿景。

MFC由一个厌氧生物阳极和一个好氧生物阴极组成, 两者之间用离子交换膜(CEM/质子交换膜(PEM))隔开(图2)。生物电通过阳极生物膜群落中的厌氧呼吸产生, 并与阴极室中的电子受体进行电化学耦合。典型MFC的阳极室由外部产生的电细菌组成, 这些细菌能够对有机物进行生物氧化, 并传输胞外电子。这些细菌种类, 如硫还原芽孢杆菌(*Bacillus Geobacillus*)、木槿腐生菌(*Hibiscus rotundus*)、木槿硫杆菌(*Hibiscus ornithiobacillus*)和海洋红球菌(*Rhodococcus maritimus*), 直接或间接地将电子传递到阳极(纳米线和内源介质)。所有形式的生物可降解材料都可用作阳极生物膜的碳源, 并产生电子转移到阳极。厌氧细菌呼吸在阳极室产生CO₂、H₂、CH₄、短链有机酸、甲醇和其他副产品。质子通过选择性渗透膜(CEM或PEM)转移到阴极, 阴极还原由氧气(好氧阴极)和氰化铁(厌氧阴极)等电子受体催化。

生产藻类利用二氧化碳和光使阴极氧化, 并作为直接电子传递媒介。藻类光合作用利用二氧化碳和光能产生碳水化合物、能量、氧气和其他有用的副产品。光合作用在藻类叶绿体中进行, 叶绿体中含有叶绿素二聚体。叶绿素二聚体被称为光系统I和II, 在光合反应过程中, 它们允许电子在光的作用下线性移动。电子被光能(外部光照/离子能量)激发到更高的能量状态。然后, 激发的电子在各种膜运输蛋白(如塑性醌、细胞色素和质花青素)的作用下跨膜运输。

藻类物种的选择是A-MFC设计和开发的关键因素, 直接影响A-MFC的性能和效率。阳极接种物选择的关键标准是产能细菌的活性、基质消耗的多样性以及耐受极端工作条件的能力。阴极室的选择主要取决于MFC的用途。藻类菌株C. vulgaris因其细胞组成和高光合效率而成为最广泛使用的菌株之一。通常, 在选择

藻类菌株时需要考虑的因素包括光合效率、加倍时间/增殖率、生物量生产率、脂质成分、重金属、营养物质和有机物的去除效率, 以及藻类菌株对阴极环境的适应性等^[3]。

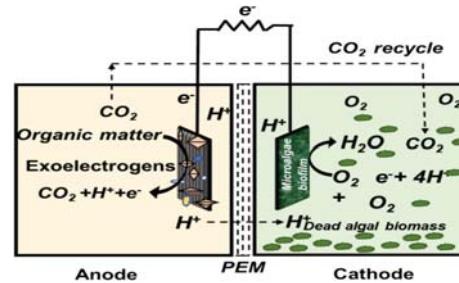


图2 藻类微生物燃料电池(A-MFC)示意图^[4]

3 生物阴极藻类净化

由于藻类代谢的多样性, A-MFC能够处理富营养化废水。各种来源的废水中含有大量有机物质(化学需氧量)、营养物质、矿物质和其他污染物。藻类的孤雌生殖新陈代谢使废水成为阴极反应的绝佳基质。氮、磷和其他微量营养元素等污染物的排放如果处理不当, 会导致富营养化。传统的生物废水处理设备不足以处理这些污染物。多流体过滤器在处理工业和生活废水方面的有效性已得到研究。由高COD和蛋白质含量的有机物组成的废水可用作阳极生物膜中细菌群落的基质。随着时间的推移, 还研究了在阴极生物膜中加入硝化细菌以恢复氮含量的问题。然而, 传统MFC的性能会受到废水中有机/无机营养物质的影响, 尤其是氮或磷。在这种情况下, 基于藻类的MFC在废水处理方面具有更大的灵活性, 因为藻类具有利用氮和磷进行生长和发育的天然能力。藻类生物阴极通过同化途径吸收废水中的氮(以氨氮和硝酸盐的形式)和磷(磷酸盐)。

氨氮是废水中经常大量存在的主要营养元素之一。去除废水中铵态氮的传统方法是两阶段生物脱氮(BNR)工艺, 包括好氧自养硝化和厌氧异养反硝化。首先, 在好氧条件下, 氨(NH₄⁺)被氨氧化细菌氧化成亚硝酸盐(NO₂⁻)。然后, 在厌氧条件下, 分解细菌将NO₂⁻还原成氮(N₂), 同时将有机物氧化成二氧化碳。虽然这一工艺可以在一定程度上去除氨氮, 但其能源密集、成本高昂, 而且需要较高的溶解氧含量、较低的有机负荷和较长的污泥停留时间。此外, 另一种有效的替代方法是厌氧氨氧化反硝化过程(ANAMMOX), 其中ANAMMOX细菌使用亚硝酸盐作为电子受体, 将氨直接氧化为N₂。

与氮一样, 磷也是废水中的主要污染物, 会刺激光合微生物、蓝藻和藻类的生长, 导致水体富营养化。废水中磷的生物去除传统上采用强化生物除磷技术。一组被称为多聚磷酸盐积累生物的微生物通常负责积累和去除废水中的磷酸盐。这种BNR利用PAOs将磷酸盐分子积累为细胞内多磷酸盐的能力, 从而以废物活性污泥的形式从当地液体中去除磷酸盐。由于其代谢碳源的能力, EBRP工艺可与ANAMMOX工艺相结合, 同时去除废水中的氮和磷。然而, 多环芳烃生长所需的大量曝气阻碍了EBRP的实际应用。此外, 该工艺会产生大量二氧化碳, 这似乎与当前的碳

中和目标不符。因此,需要有效的替代方法来克服废水中磷的生物处理过程中经常遇到的缺点^[5]。随着时间的推移,MFC因其与营养物去除相关的高能量产生而成为一种有效的替代方法。

4 结论

藻类生物阴极在废水处理和能源生产方面的潜在应用已得到广泛研究。藻类系统适合大规模应用,因为它们可以在富含污染物和有毒物质的条件下运行。将藻类培养物引入MFC系统的阴极室可大大降低MFC系统的运行成本和能源需求。藻类的营养同化作用可以从污染物流中回收营养物质以及生长所需的基质,从而解决废物处理问题。虽然基于藻类的废物处理和能源生产取得了可喜的成果,但仍有几个方面需要进一步研究。为确保这些系统的长期适用性和经济性,需要进行仔细的优化研究,并与现有方法相结合,以确保商业规模的实施。需要进一步研究藻类培养物中混合营养代谢和微生物群落的动态,以提高营养回收率,并为大规模应用选择有效的细菌和藻类菌株。

[参考文献]

[1]PENGADETH D,PRAKASH NAIK S, SASI A, et al. Revisiting the role of algal biocathodes in microbial fuel cells for bioremediation and value-addition[J].Chemical Engineering

Journal,2024,496.

[2]HE Z,ANGENENT L T.Application of Bacterial Biocathodes in Microbial Fuel Cells[J].Electroanalysis,2006,18(19–20):2009–15.

[3]ENAMALA M K,DIXIT R,TANGELLAPALLY A,et al.Photosynthetic microorganisms (Algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: Concise review[J].Environmental Technology & Innovation,2020,19.

[4]MOHANAKRISHNA G,VENKATA MOHAN S,SARMA P N.Bio-electrochemical treatment of distillery wastewater in microbial fuel cell facilitating decolorization and desalination along with power generation[J].Journal of Hazardous Materials,2010,177(1):487–94.

[5]庄贤泉,陈薇,戴家乐.利用藻类和厌氧污泥构建的微生物燃料电池及其产电净水性能研究[J].市政技术,2017,35(06):150–3.

作者简介:

何督(1997--),男,汉族,河南省漯河市人,硕士,研究方向:水生态。