

微生物燃料电池中碳基阳极材料和表面修饰碳基阳极材料研究进展

苏曙光,薛屏,马保军

宁夏大学省部共建天然气转化国家重点实验室培育基地,银川 750021

摘要 随着能源匮乏和水污染问题的加剧,迫切需要寻找新的能源开发和利用技术。微生物燃料电池(MFCs)作为一种新兴的高效生物质能利用方式,可以将有机废水中的化学能直接转化为电能,具有去污和产能双重功能。产电微生物附着的阳极对MFCs性能具有重要影响。碳基材料成本低、导电性高且生物相容性好,被广泛用于MFCs的阳极材料。分别从传统碳材料、三维多孔碳基材料、化学法表面处理改性、碳纳米材料修饰和导电聚合物修饰等方面综述了MFCs碳基阳极材料的最新研究成果,探讨了三维多孔结构和表面修饰促进MFCs产电性能的微观本质,并对碳基阳极材料的应用前景进行分析和展望。

关键词 微生物燃料电池;阳极材料;碳基材料;表面修饰;三维多孔结构

中图分类号 O643.32

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.03.018

Progress on carbon materials and surface modified carbon materials of anode for microbial fuel cells

SU Weiguang, XUE Ping, MA Baojun

State Key Laboratory Cultivation Base of Natural Gas Conversion, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract Great attentions have been paid to the new technology of energy exploration and utilization due to the increasingly serious energy crisis and water pollution. Microbial fuel cells (MFCs) as a novel and efficient bioenergy utilization technology can convert chemical energy contained in organic wastewater into electricity directly. MFCs are able to treat wastewater and generate electricity energy simultaneously. Anode materials play a crucial role in determining MFCs' performance. The carbon materials are widely used as anode of MFCs because of their low price, superiority in conductivity, and good biocompatibility. The recent research progress on carbon anode materials of MFCs is reviewed in the following five aspects: the common carbon materials, three-dimensional porous carbon materials, surface chemical modification, carbon nanomaterials modification, and conductive polymer modification. The influence of three-dimensional porous structure and surface modification on electricity production performance of MFCs is discussed. Finally, the application prospects of carbon anode materials for MFCs are presented.

Keywords microbial fuel cells; anode materials; carbon materials; surface modification; three-dimensional porous structure

能源是人类社会文明发展的动力,也是衡量国家经济发展与人民生活的重要指标,是关系国计民生的重要资源。随着工业迅速发展和人口急剧膨胀,人类对能源的需求不断增加,然而传统能源如石油、天然气和煤资源等逐渐匮乏,能源危机日益明显。因此开发新的绿色能源来代替原有的化石

燃料已迫在眉睫。另一方面,水资源短缺与水污染等环境问题已成为制约实现经济可持续发展的重要问题之一。水是自然生态系统中最活跃和最有影响力的因素,但随着人类社会的发展,造纸、制药、印染等行业的生产过程中产生了大量有机废水,现已成为制约各大城市可持续发展的瓶颈^[1]。

收稿日期:2014-08-15;修回日期:2014-10-30

基金项目:中国科学院大连化学物理研究所催化基础国家重点实验室开放课题(N-11-02)

作者简介:苏曙光,讲师,研究方向为多相催化反应,电子信箱:weiguangsu@nxu.edu.cn

引用格式:苏曙光,薛屏,马保军.微生物燃料电池中碳基阳极材料和表面修饰碳基阳极材料研究进展[J].2015,33(3):105-109.

微生物燃料电池(microbial fuel cells, MFCs)作为一种新型能源将有可能同时解决能源危机和水污染问题,引起了广泛关注^[2]。微生物燃料电池是一种利用自然界中廉价易得的微生物细菌作为生物催化剂,将有机物中的化学能转变为电能的装置,具有高能量转化效率,产物为洁净的水^[3,4]。从微生物燃料电池的产电过程可知,在废水中广泛存在的各种有机物及生物质都是微生物燃料电池潜在的燃料,这些燃料中储藏的巨大化学能都可以通过微生物细菌的自然生理代谢过程温和的提取出来。微生物燃料电池技术既可以降解水中的有机污染物,净化环境,又能够产生清洁无污染的电能。因此,微生物燃料电池技术是一项绿色环保的能源新技术,具有很好的工业应用前景^[5]。

微生物燃料电池通常主要由阳极、阴极和质子交换膜构成^[6]。基本工作原理如图1^[7]所示:在无氧环境下,阳极室中的微生物作为生物催化剂将底物中的有机物氧化分解,释放出电子和质子等代谢产物。电子直接或者依靠合适的电子中介体传递到阳极,然后经由外电路到达电池的阴极;质子则通过质子交换膜到达阴极区。在阴极区,电子、质子与电子受体如氧气结合生成水,完成整个微生物燃料电池的电子传递过程。随着阳极有机物的不断氧化分解和阴极反应的持续进行,在外电路可以获得持续电流,可以达到去除有机物和产能的双重效果。

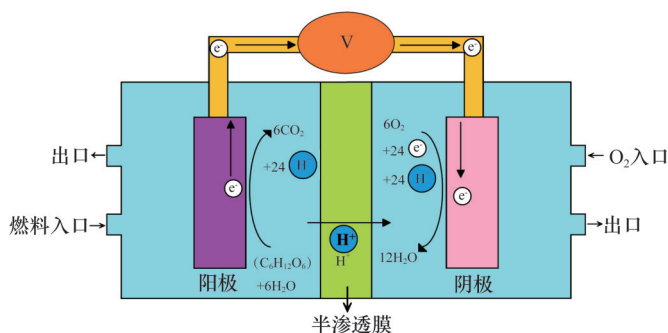


图1 微生物燃料电池工作原理示意

Fig. 1 Schematic prototype and work principle of microbial fuel cells

在影响MFCs输出电压和功率密度的因素中,最关键的过程是电子从微生物向阳极传递的过程,而微生物的传递过程是在MFCs的阳极室内实现的,因此阳极的特性和阳极材料的选择直接决定了MFCs的产电性能。碳基材料成本低、来源丰富、高导电性而且生物相容性好,是理想的阳极材料。王鑫等^[8]分别从二维碳基材料、三维碳基材料、纳米碳材料和碳基材料的预处理等方面介绍了阳极材料研究的最新进展,指出碳基材料的预处理和纳米碳材料的应用将成为未来微生物燃料电池阳极材料的研究重点。近期,谢珊等^[9]对微生物燃料电池阳极碳材料改性和优化的最新研究成果进行综述,介绍了碳材料改性阳极和碳基复合材料阳极的种类、理化特性、产电性能及其在MFCs中的应用。在以往研究基

础上,本文重点综述近年来传统碳基阳极材料、三维多孔碳基阳极材料、表面修饰碳基阳极材料等在微生物燃料电池中的最新研究进展。

1 碳基阳极材料

1.1 传统碳材料

碳材料包括石墨棒、石墨刷、石墨板、碳布、碳毡、碳纸、碳颗粒和网状玻璃碳(RVC)等,具有导电率高、生物兼容性好、稳定性强、廉价易得等特点,被广泛应用于MFCs^[10]。Kim等^[11]利用碳纸为阳极材料,乙醇作为底物,构建了一个典型双室型MFCs,研究发现其最大功率密度可达 $40 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Wang等^[12]利用价格低廉的碳网构建MFCs,得到 $1015 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的功率密度。Li等^[13]研究表明,以活性炭作为阳极材料时MFCs的功率密度比以碳布作为阳极材料时的功率密度高出3倍多,且系统的库仑效率达到64%。Ahn等^[14]以石墨刷为阳极设计了一个单室空气阴极MFCs,以生活废水作为底物,在连续流情况下,最大功率密度为 $422 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Gao等^[15]用一种新奇的石墨片作为阳极,以大肠杆菌进行接种,构建了双室型MFCs,发现该石墨片具有非常好的生物相容性,MFCs的最高功率密度可达 $2249 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。虽然传统碳材料在微生物燃料电池初期发挥了十分重要的作用,但是普通碳材料的比表面积都较小,对微生物细菌的附着力较低,且阳极活化过电势较大,因此需要开发更加高效的新型碳基阳极材料。

1.2 三维多孔碳基阳极材料

研究表明通过增加阳极表面积来提高MFCs的输出功率是一种非常有效的途径。三维结构的阳极材料具有较大的比表面积和一定的孔隙结构,利于更多产电微生物的附着和电子及基质的有效传递,近年来引起了越来越多研究者的兴趣。Chen等^[16]通过静电纺丝技术成功制备了具有三维多孔结构的电纺碳纳米纤维膜(3D-ECFM),并用它作为MFCs的阳极材料,通过生活污水进行接种、乙酸钠为底物,研究发现其最大电流密度可达 $30 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$,几乎是商业化碳毡电极的2倍。He等^[17]研究发现,当碳纤维膜阳极的纤维直径约为 $1 \mu\text{m}$,孔隙率达到99%以上时,碳纤维膜具有非常好的阳极产电性能。3D-ECFM阳极的表面和内部同时生长了一定厚度、连续的微生物膜是获得高阳极电流密度的主要原因。Mink等^[18]采用气液固自组装过程合成垂直生长的多壁碳纳米管作为阳极构建微型MFCs,用混合菌进行接种、乙酸钠为底物,其最大电流密度可达 $197 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Xie等^[19]通过物理吸附的方式将石墨烯负载于聚合物海绵状物体(sponge)上,作为MFCs阳极取得了很好的效果。研究认为经石墨烯修饰后,整个阳极材料是一个具有大孔的三维结构,有利于微生物膜的附着、有利于电子在产电微生物和电极之间的快速传递,进而提高了MFCs的阳极性能。Karra等^[20]和Manickam等^[21]先后以活性炭纳米纤维作为MFCs的阳极,与颗粒活性炭和碳布相比,产电效率和除污效率均有明显提高。活性炭纳米纤维多孔结构增加了微生物的吸附面积和吸附量是提升MFCs性

能的关键。但是,由于三维多孔碳材料的制备一般涉及复杂的物理和化学过程,使得微生物燃料电池的成本大幅度增加,从而不利于实际大规模应用。

2 表面修饰碳基阳极材料

对阳极碳材料进行表面修饰可以提高电子在产电微生物和阳极之间的传递速率,还能使产电微生物更容易附着于阳极上。另外表面修饰可以降低阳极表面的能态,有效减少电池中阳极反应的活化过电势,降低电位损失,提高电池的功率。因此,对于碳基阳极修饰材料的研究是提高MFCs功率的关键之一。

2.1 化学法表面处理改性

化学法表面改性主要包括无机酸、有机溶剂、热处理、高温氨气处理和电化学氧化法处理等。Feng等^[22]利用无机酸和有机溶剂处理电极,可以去除电极表面的有机物或者一些非碳物质,尽量减小电极的内阻。研究还发现,高温氨气处理碳基阳极材料可以显著提高微生物燃料电池的功率密度,减少MFCs的启动时间。这是由于高温氨气处理增加了碳基阳极的表面电荷,有利于电子传递。Saito等^[23]研究发现,经掺N后碳布表面N/C元素的物质的量比为0.7时,MFCs的功率密度高达 $938 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,比未处理的碳布提高了24%。但是进一步增加N含量,MFCs的功率密度逐渐下降,说明适量的N元素掺杂可以改善碳基材料的阳极性能。Zhou等^[24]利用无机化合物对阳极进行化学氧化法处理,发现经硝酸处理后MFCs的功率密度最大可达 $792 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,比未经处理前提高了43%,研究认为MFCs性能提高的主要原因是阳极表面更粗糙或者阳极表面掺杂了N元素。Tang等^[25]研究发现经过 $30 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 恒电流电化学氧化处理12 h的石墨阳极比未经处理的石墨阳极,构建的MFCs的功率密度提高了39.5%,电化学氧化处理后的石墨阳极极大地影响了产电微生物细菌的吸附和生长。Liu等^[26]通过电化学氧化技术处理碳布阳极,和处理前相比,MFCs最大功率密度提高了14.2%。研究认为电化学氧化增加了碳布阳极的比表面积并引入了酰胺基团,提高了微生物的吸附量。Wei等^[27]用经高温碳化和活化的半焦碳作为MFCs的阳极时,发现经活化半焦碳阳极产生的功率密度是未经处理半焦碳的1.24倍。经过高温活化后,阳极的导电性增加、表面积增大和C/O比率增高,提高了电子在细菌和阳极间的传递速率,使得MFCs的产电性能得到提高。

综上所述,对碳基阳极进行化学法表面处理改性的主要目的是增加其表面粗糙度、比表面积,或通过掺杂一些功能化官能团,促进产电微生物在阳极上形成微生物膜的生长速率及电子从产电微生物到阳极的传递速率,进而提高MFCs的产电效率。

2.2 碳纳米材料修饰阳极

用碳纳米材料修饰阳极可以促进电子转移速率和产电微生物的附着,提高MFCs的性能。碳纳米管具有高比表面积、导电性好、化学稳定性强等优点,被广泛用于MFCs的电

极材料体系。Peng等^[28]利用碳纳米管修饰电极对希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis*)进行电子传递研究,发现修饰电极的电流密度比空白电极提高了82倍,显著增强了*Shewanella oneidensis*到电极的电子传递能力。Sun等^[29]通过碳纳米管层层自组装的方法,在碳纸表面组装碳纳米管,成功将MFCs的功率密度提高了20%。Xie等^[30]用三维状的碳纳米管纺织纤维构建MFCs的阳极,功率密度达到了 $1120 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,比普通碳纸高出2倍且稳定性良好,持续工作107 d没有功率上的衰减。另外,Zhao等^[31]利用气相沉积法在石墨毡表面生长一些具有多层次结构的碳纳米管,发现以碳纳米管修饰的石墨毡做MFCs阳极时的功率密度是未修饰石墨毡的7倍。Lamp等^[32]采用简单的火焰燃烧法在不锈钢网的表面修饰一层碳纳米管结构材料做阳极,发现其功率密度是单独不锈钢网做阳极时的60倍。最近Chou等^[33]在三聚氰胺海绵上涂覆还原的氧化石墨烯和碳纳米管的复合物(rGO-CNT sponges)作为阳极,用大肠杆菌进行接种,构建的MFCs最大电流密度为 $335 \text{ A} \cdot \text{m}^{-3}$,可以持续运行20 d。研究发现该多孔阳极材料对大肠杆菌有很好的生物相容性,大肠杆菌在阳极表面能够维持很高的细胞代谢活性。

这些研究表明碳纳米管等碳纳米材料修饰阳极的效果较好,可以较好改善微生物燃料电池阳极中的产电过程。

2.3 导电聚合物修饰碳基阳极

导电聚合物,如聚苯胺、聚吡咯及它们的衍生物,由于合成方法简单、可控性好,被广泛应用去表面修饰MFCs的阳极材料。导电聚合物很容易在电极表面形成纳米粒子,增加阳极的表面积,有利于产电微生物的附着^[34]。Qiao等^[35]研究发现,聚苯胺修饰碳纳米管的复合材料可以增强大肠杆菌与阳极之间的电子传递速率,提高电池的输出功率。碳纳米管质量分数为20%的复合阳极材料具有最高的电化学活性,最大产电密度可达 $42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,对应的电池电压为450 mV。Zou等^[36]研究了聚吡咯修饰碳纳米管复合物在阳极中的作用,发现这种复合阳极材料具有很好的电子传导能力。当聚吡咯-碳纳米管(PPy-CNTs)复合物的负载量为 $5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,无电子介质型MFCs的最大输出功率为密度 $228 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Zhao等^[37]用聚苯胺纳米线网修饰的石墨毡电极作为MFCs的阳极,发现其功率密度高达 $2300 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,是未修饰的石墨毡的8.2倍。导电聚合物修饰不仅有利于产电微生物的附着,而且导电聚合物的生物相容性好,可以作为电子传递的桥梁,有助于提高电子由产电微生物到阳极之间的传递速率^[38]。

综上所述,虽然碳元素表面能态较高,容易失去电子表现出还原性,造成较大的阳极活化过电势,降低MFCs的产电性能,但是碳材料价格低廉、生物相容性好、稳定性高,目前仍是MFCs阳极的首选材料。据初步估算阳极材料的成本约占大型化MFCs总成本的25%,因此低成本高效碳基材料是未来最可能大型化工业应用的MFCs阳极材料。如何实现低成本、大规模合成高导电率、高孔隙率、大比表面积的碳基材料是今后MFCs领域重要的研究方向。利用具有多孔结构的

天然植物直接碳化来制备三维多孔、等级孔碳纳米材料作为MFCs阳极,该方法操作简单、成本低,有望实现MFCs阳极材料制备的高性能、低成本和可持续化。另外揭示表面修饰和化学改性促进电子从产电微生物到阳极的传递速率的微观本质,有助于设计构建更加高效的MFCs复合碳基阳极材料。

3 结论

微生物燃料电池是利用微生物作为催化剂将有机物,尤其是有机废水中的化学能直接转变为电能的装置,该技术的发展为高效开发生物质能,合理解决环境污染和能源匮乏问题提供了切实可行的解决方案。但目前关于MFCs的研究还处于起步阶段,其发展仍然面临许多挑战。其中较低的输出功率和较高的原料成本是限制该技术商业化和工程实际应用的主要障碍。作为电活性微生物生长和电子转移场所,阳极材料对MFCs性能具有非常重要的影响。开发高导电性、高孔隙率、大比表面积、生物相容性好和稳定性强的阳极材料是微生物燃料电池研究领域的关键。低成本的碳基材料通过表面修饰改性可以增大产电微生物的附着面积和附着量,促进电子从产电微生物到阳极的传递速率,提高MFCs的产电功率,因此碳基材料是未来最具潜力的MFCs阳极材料。另外,深入解析阳极材料的微观结构对产电微生物的吸附、生长、代谢以及电子传递机理的影响,优化MFCs装置的构型,提高质子的传递速率和阴极的反应速率等,可以进一步改善MFCs的产电性能。随着材料科学的发展和研究的不断深入,MFCs技术将会在废水处理和产能利用领域大规模实际应用。

参考文献(References)

[1] Ben Liew K, Daud W R W, Ghasemi M, et al. Non-Pt catalyst as oxygen reduction reaction in microbial fuel cells: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(10): 4870-4883.

[2] Franks A E, Nevin K P. Microbial fuel cells, a current review[J]. *Energies*, 2010, 3(5): 899-919.

[3] Logan B E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2009, 7(5): 375-381.

[4] Logan B E, Regan J M. Microbial fuel cells: Challenges and applications [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(17): 5172-5180.

[5] Ahmad F, Atiyeh M N, Pereira B, et al. A review of cellulosic microbial fuel cells: Performance and challenges[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2013, 56: 179-188.

[6] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation[J]. *Trends in Biotechnology*, 2005, 23(6): 291-298.

[7] Ghangrekar M M, Shinde V B. Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(15): 2879-2885.

[8] 王鑫, 李楠, 高宁圣洁, 等. 微生物燃料电池碳基阳极材料的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(22): 5-8.

Wang Xin, Li Nan, Gao Ningshengjie, et al. Research progress in carbon anode materials for microbial fuel cells[J]. *China Water &*

Wastewater, 2012, 28(22): 5-8.

[9] 谢珊, 欧阳科, 丘露, 等. 微生物燃料电池中碳材料改性阳极和碳基复合材料阳极的最新研究进展[J]. *广东化工*, 2014, 41(10): 76-77.

Xie Shan, Ouyang Ke, Qiu Lu, et al. Research progresses on the modified carbon materials and carbon-based composites in the anode materials of microbial fuel cells[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2014, 41(10): 76-77.

[10] Zhou M, Chi M, Luo J, et al. An overview of electrode materials in microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(10): 4427-4435.

[11] Kim J R, Jung S H, Regan J M, et al. Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(13): 2568-2577.

[12] Wang X, Cheng S, Feng Y, et al. Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(17): 6870-6874.

[13] Li F X, Sharma Y, Lei Y, et al. Microbial fuel cells: The effects of configurations, electrolyte solutions, and electrode materials on power generation[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, 160(1): 168-181.

[14] Ahn Y, Logan B E. Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(2): 469-475.

[15] Gao X, Zhang Y Z, Li X W, et al. Novel graphite sheet used as an anodic material for high-performance microbial fuel cells[J]. *Materials Letters*, 2013, 105: 24-27.

[16] Chen S L, Hou H Q, Harnisch F, et al. Electrospun and solution blown three-dimensional carbon fiber nonwovens for application as electrodes in microbial fuel cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4: 1417-1421.

[17] He G H, Gu Y L, He S J, et al. Effect of fiber diameter on the behavior of biofilm and anodic performance of fiber electrodes in microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(22): 10763-10766.

[18] Mink J E, Rojas J P, Logan B E, et al. Vertically grown multiwalled carbon nanotube anode and nickel silicide integrated high performance micro-sized (1.25 μ L) microbial fuel cell[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(2): 791-795.

[19] Xie X, Yu G H, Liu N, et al. Graphene-sponges as high-performance low-cost anodes for microbial fuel cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, 5(5): 6862-6866.

[20] Karra U, Manickam S S, McCutcheon J R, et al. Power generation and organics removal from wastewater using activated carbon nanofiber (ACNF) microbial fuel cells (MFCs) [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(3): 1588-1597.

[21] Manickam S S, Karra U, Huang L W, et al. Activated carbon nanofiber anodes for microbial fuel cells[J]. *Carbon*, 2013, 53: 19-28.

[22] Feng Y J, Yang Q, Wang X, et al. Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(7): 1841-1844.

[23] Saito T, Mehanna M, Wang X, et al. Effect of nitrogen addition on the performance of microbial fuel cell anodes[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(1): 395-398.

[24] Zhou M H, Chi M L, Wang H Y, et al. Anode modification by electrochemical oxidation: A new practical method to improve the

- performance of microbial fuel cells[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, 60: 151-155.
- [25] Tang X H, Guo K, Li H R, et al. Electrochemical treatment of graphite to enhance electron transfer from bacteria to electrodes[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3558-3560.
- [26] Liu J, Liu J F, He W H, et al. Enhanced electricity generation for microbial fuel cell by using electrochemical oxidation to modify carbon cloth anode[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 265: 391-396.
- [27] Wei J C, Liang P, Zuo K C, et al. Carbonization and activation of inexpensive semicoke-packed electrodes to enhance power generation of microbial fuel cells[J]. *ChemSusChem*, 2012, 5(6): 1065-1070.
- [28] Peng L, You S J, Wang J Y. Carbon nanotubes as electrode modifier promoting direct electron transfer from *Shewanella oneidensis*[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2009, 25(5): 1248-1251.
- [29] Sun J J, Zhao H Z, Yang Q Z, et al. A novel layer-by-layer self-assembled carbon nanotube-based anode: Preparation, characterization, and application in microbial fuel cell[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(9): 3041-3047.
- [30] Xie X, Hu L B, Pasta M, et al. Three-dimensional carbon nanotube-textile anode for high-performance microbial fuel cells[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(1): 291-296.
- [31] Zhao Y, Watanabe K, Hashimoto K. Hierarchical micro/nano structures of carbon composites as anodes for microbial fuel cells[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, 13(33): 15016-15021.
- [32] Lamp J L, Guest J S, Naha S, et al. Flame synthesis of carbon nanostructures on stainless steel anodes for use in microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(14): 5829-5834.
- [33] Chou H T, Lee H J, Lee C Y, et al. Highly durable anodes of microbial fuel cells using a reduced graphene oxide/carbon nanotube-coated scaffold[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 169: 532-536.
- [34] Jiang D Q, Li B K. Novel electrode materials to enhance the bacterial adhesion and increase the power generation in microbial fuel cells (MFCs)[J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59(3): 557-563.
- [35] Qiao Y, Li C M, Bao S J, et al. Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 170(1): 79-84.
- [36] Zou Y J, Xiang C L, Yang L N, et al. A mediatorless microbial fuel cell using polypyrrole coated carbon nanotubes composite as anode material[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(18): 4856-4862.
- [37] Zhao Y, Watanabe K, Nakamura R, et al. Three-dimensional conductive nanowire networks for maximizing anode performance in microbial fuel cells[J]. *Chemistry- A European Journal*, 2010, 16(17): 4982-4985.
- [38] Yuan Y, Zhou S G, Liu Y, et al. Nanostructured macroporous bioanode based on polyaniline-modified natural loofah sponge for high-performance microbial fuel cells[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(24): 14525-14532.

(编辑 田恬)

·学术动态·



中国科学技术协会

中国地理学会第11次全国代表大会在北京召开

2014年12月27—28日,中国地理学会第11次全国代表大会在北京召开,中国科协党组成员、书记处书记沈爱民出席大会开幕式并讲话。中国地理学会第十届理事会理事长刘燕华致开幕词,中国科学院地理科学与资源研究所所长葛全胜致欢迎词。中国地理学会名誉理事长、中国科学院院士陆大道,国际地理联合会副主席、中国科学院院士周成虎,中国地理学会副理事长、中国科学院院士傅伯杰、崔鹏,第5届中国地理科学成就奖获得者、中国工程院院士刘兴土,第5届中国地理科学成就奖获得者、北京师范大学教授邬翎光等出席会议。来自全国各地的会员代表和特邀嘉宾260多人参加会议。

与会代表选举产生了中国地理学会第11届理事会。中国科学院院士傅伯杰当选为第11届理事会理事长,陈发虎、崔鹏、葛全胜、宫辉力、冷疏影、刘宝元、刘毅、陶澍、薛德升、杨桂山、俞立中、张国友当选副理事长,刘毅当选秘书长(兼)。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16179170.html>。