

生物法处理酚类废水的研究进展

王莹¹, 陈虎¹, 王衍旺², 吕永康^{1*}

(1. 太原理工大学煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西太原 030024;

2. 清粼环保工程有限公司, 浙江宁波 315040)

摘要:重点综述了处理含酚废水的主要生物方法及其研究方向。通过阐述各类方法在酚类废水处理过程中的优缺点, 发现自身工艺的创新性改进及联合工艺的应用是含酚废水处理的有效手段和研究方向; 同时指出了优势种群的筛选、微生物群落结构的分析及代谢调控机理的探索是提高生物法处理含酚废水能力的基础, 必会成为今后的研究热点。

关键词:微生物; 含酚废水; 生物处理技术

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)03-0058-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.03.014

Study on the biological treatment of phenolic-containing wastewater

WANG Ying¹, CHEN Hu¹, WANG Yan-wang², LV Yong-kang^{1*}

(1. Key Laboratory of Coal Science and Technology, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Qing Lin Environmental Protection Co., Ltd., Ningbo 315040, China)

Abstract: The current biological treatment methods for phenolic-containing wastewater and their research directions are reviewed. The advantages and disadvantages of various methods in the treatment of phenolic-containing wastewater are discussed. The innovative process and the application of the combined process are found to be an effective means and research direction for the treatment of phenolic-containing wastewater. Meanwhile, the screening of dominant species, the analysis of the structures of microbial community and the exploration of the mechanism of metabolic regulation are pointed out to be the foundation of improving their capability for biological treatment of the phenolic-containing wastewater, which will become a hotspot in the future.

Key words: microbe; phenolic-containing wastewater; biological treatment technology

苯酚及其酚类衍生物通常存在于化工厂、石化厂、制药厂、焦化厂和炼油厂等行业产生的工业废水中, 作为一类原生质毒物, 严重危害生物自身的生长发育及人类的健康。因此, 许多国家将其列为优先控制的污染物, 对其环境浓度有着严格的要求。在我国, 挥发酚的最高允许排放标准在 0.5 mg/L 以下。由此可见, 如何有效地去除废水中的酚类物质, 已经成为环境领域重点关注的问题之一。近年来研究发现, 越来越多的微生物可以将酚类物质作为营养物质而被氧化分解^[1-3], 使得酚类物质的生物处理成为可能。酚类的生物处理是指微生物在适宜的条件下, 以废水中的酚类物质作为营养物质而被氧化分解, 从而去除废水中酚类物质的方法。与物理化学方法相比, 具有成本低、经济高效、二次污染少等优点, 其应用研究越来越受到重视。因此, 本文中重点针对酚类废水的主要生物处理方法进行综述, 以为生物法处理酚类废水的实际工程应用及技术研发提供参考。

1 活性污泥法

活性污泥法是废水处理过程中应用最广泛的生物处理法, 具有设备简单易操作、处理效率高、工艺较成熟等优点, 但也存在着污泥易膨胀且产生量大、曝气池容积负荷低、对高浓度含酚废水处理效果不佳等问题。因此, 为提高活性污泥法处理酚类废水的效率, 反应器设计及工艺改进是目前活性污泥技术发展的重要方向之一。Ucun 等^[4]研究发现循环喷射反应器比搅拌釜反应器具有更高的苯酚降解能力。Rosenkranz 等^[5]利用厌氧序批式反应器实现了高浓度苯酚的厌氧降解, 为高浓度苯酚废水的处理提供了一种新的处理工艺。另外, 通过向生物系统中投加具有特定功能的微生物、营养物或基质类似物也是提高废水处理效果重要手段。如 Zhang 等^[6]在 SBR 反应器中首先投加苯酚作为主要底物来生物强化适应苯酚生长的好氧颗粒活性污泥, 10 d 适应期过后向反应器中交替投加苯酚和三氯乙烯

收稿日期: 2016-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0600502); 山西省国际合作计划项目(201603D421040)

作者简介: 王莹(1987-), 女, 博士生, 主要从事废水中氨氮及难降解有机物的生物降解工作, wangying0617@126.com; 吕永康(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事废水处理领域的科学研究工作, 通讯联系人, yongkanglv@163.com。

(TCE) 6周,最终实现苯酚与TCE持续有效地去除。Jemaat等^[7]通过生物强化措施使好氧颗粒污泥在连续空运反应器中不仅同时实现了高浓度氨氮废水的部分亚硝化和邻甲酚降解实验,而且其处理后的流出物能够使后续厌氧氨氧化反应稳定维持100 d以上。

此外,活性污泥作为该类方法顺利实施的主体,其内部微生物种类及结构已成为国内外学者研究的热点。Pereira等^[8]研究发现苯酚会大大改变厌氧氨氧化反应器中的微生物群落结构和组成,通常会选择具有苯酚降解功能的种群。因此,酚类降解性能与微生物群落结构有关,并且研究还认为微生物对高浓度酚类的适应不仅仅在于生理上还在于结构上^[5]。Jemaat等^[7]研究发现生物强化措施能够使颗粒活性污泥形成一种特殊的结构,不动杆菌属位于活性污泥外层,主要负责邻甲酚的去除,进而保护位于活性污泥内部 β -AOB,使其顺利完成氨氮的亚硝化反应。此外,Fernández等^[9]研究发现硝基酚和邻甲酚降解过程中的微生物种类主要有不动杆菌属(*Acinetobacter* sp.)、节杆菌属(*Arthrobacter* sp.)和假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.) 3种酚类降解菌种,他们为微生物菌种的筛选提供了一种现代分子生物学的方法。综上所述,活性污泥中微生物种类及群落结构分析不仅为含酚废水的生物强化处理提供一定的理论依据,还可为优势菌种的筛选获得提供技术支持。

2 生物膜法

生物膜法与活性污泥法一样,都是指利用微生物的代谢活动来去除废水中污染物的水处理工艺,只是生物膜法中的微生物需要附着在惰性载体表面上生长,而且其微生物的分布通常是不均匀的、不连续的。生物膜法主要包括生物滤池、生物转盘法、生物接触氧化法和生物流化床等,因其具有生物密度大、处理效率高、无污泥膨胀、运行方便等优点,已被广泛用于含酚废水处理。Welz等^[10]应用生物砂滤池处理模拟及实际酿酒废水中的酚类物质,结果表明,进水总酚浓度低时可以实现酚类有机物的完全降解。Li等^[11]应用移动床生物膜反应器处理煤气化废水,同时实现了酚类物质、硫氰酸盐及氨氮的去除。

尽管生物膜法在含酚废水处理方面表现出独特优势,但该方法使用的载体属于易耗品,导致系统的运行成本大大增加。因此,载体材料的选择应用会

直接影响生物膜法对污水的处理能力。Sancinetti等^[12]研究认为,在聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)和聚氯乙烯(PVC)这3种不同聚合物载体中,PS被认为是最好的生物载体材料,能够保证厌氧流化床反应器稳定地去除苯酚,而PVC载体表面由于易形成胞外聚合物而导致颗粒变形,这种变形不利于厌氧流化床反应器的操作而最终影响苯酚降解。此外,低成本一直是载体材料选择应用的不变追求。Hu等^[13]研究认为,废弃焦炭颗粒(WCPs,直径=0.6~2.3 mm)的不规则表面使它们成为理想的生物膜载体材料,在序批式生物流化床反应器运行3周后,其上负载生物量可达4.0~4.5 mg/g,生物膜厚度为35~110 μm ;并且实验证明,反应器中2,4,6-三氯苯酚的去除主要是由于载体表面生物膜的生物降解作用,这些说明废弃焦炭颗粒作为载体材料应用于生物膜反应器处理废水是经济可行的。

生物膜法自身工艺的改进也是改善其污水处理能力的重要途径。Li等^[14]利用厌氧生物过滤池(AF)处理煤气化废水,研究发现,原始煤气化废水会严重抑制AF的处理效率及运行稳定性,而经废水再循环后大大提高了AF的运行性能,从而促进废水中苯酚的去除以及甲烷的产生。罗倩仪等^[15]采用两级移动床生物膜反应器(MBBR)预处理高挥发酚含量的石化厂汽提净化水,结果表明,在适宜工艺条件(HRT=10 h、DO=1~3 mg/L)下,两级MBBR处理后出水平均 ρ (挥发酚)为17.6 mg/L,挥发酚去除率达87.9%;且出水BOD₅/COD平均为0.68,这说明经过两级MBBR处理后,废水的可生化性有所提高,有利于废水的后续生化处理。

此外,针对生物膜载体表面活性生物量难以控制的问题,越来越多的国内外学者通过接种优势菌群来实现生物强化生物膜处理工艺,以达到提高含酚废水的降解性能的目的。Fang等^[16]通过接种苯酚降解菌来强化生物接触氧化反应器(BCOR),结果表明,BCOR经生物强化后,其降解废水中COD、总酚和氨氮的能力显著增强,且对总酚的耐受力(350~3 000 mg/L)也明显提高。González等^[17]从间硝基酚(MNP)污染严重的淡水河中选择能够降解MNP的优势微生物群体,研究发现,它们在需氧上流式固定床生物膜反应器中能够实现MNP的连续稳定降解。因此,为保证生物强化生物膜法技术的顺利进行,加强生物膜反应器中微生物种类、群落结构和功能研究将是今后生物膜法处理酚类废水的

主要研究方向。

3 固定化微生物技术

固定化微生物技术是指通过物理或化学方法将特定的微生物固定在特定的载体上,使其高度密集并保持生物活性,在适宜条件下能够快速大量增殖的生物技术。与传统活性污泥法相比,固定化尽管具有生物密度大、适应能力强、产污泥量少和固液分离简单等优点,但目前该技术还处于试验研究阶段,大多针对单一物质且应用规模较小,实际运用中还面临固定化材料和菌种选择、操作条件优化、成本过高等一些亟需解决的问题。

固定化载体材料的选择一直是固定化技术发挥高效作用的关键所在。常用的固定化载体主要有海藻酸盐、琼脂、明胶、聚丙烯酰胺和聚乙烯醇等,但一直以来耐用低廉且对生物低毒或无毒是国内外学者普遍追求的载体选择目标,它们为节约固定化成本提供了可能。如 Basak 等^[18]利用甘蔗渣为载体来固定 *Candida tropicalis* PHB5,研究表明,甘蔗渣固定化细胞后对苯酚的最大耐受度可提高到 2 400 mg/L,且甘蔗渣具有降解稳定、重复性好、对细胞无毒害和价格低的优点。Gupta 等^[19]以废弃茶叶生物质为支撑固定 *Bacillus* sp. 菌株实现了苯酚和 Cr^{6+} 双脱除。

虽然固定化技术能够提高微生物对污染物的抗毒性强,但提高并不明显。过高浓度的苯酚废水对微生物具有抑制作用而使其不能正常发挥作用,近年来人们开始将微生物固定到吸附剂上建立了吸附-解吸附-生物降解高浓度苯酚废水的一步法系统。在这一系统中固定化载体同时扮演微生物载体和苯酚吸附剂的角色,将高浓度的苯酚吸附到微生物可耐受极限以下后生物降解才能发挥作用,最终实现无需预处理直接达到处理高浓度的苯酚废水的目的。Li 等^[1]将丙烯酸酯类树脂通过溶液-挥发聚合合法聚合在聚酯纤维基体上,制备了新型丙烯酸酯复合纤维材料,随后将 *Pseudomonas putida* 菌种负载于该新型复合纤维材料上进行高浓度苯酚的生物降解。结果表明,在最佳条件下,固定化后的菌株可以将 3 000、4 000、5 000 mg/L 的苯酚溶液分别在 60、70、80 h 内完全降解。Ma 等^[20]利用活性炭纤维来固定 *Pseudomonas putida* 菌种实现高浓度苯酚废水的处理。研究发现,固定化的菌种在 pH 为 7.0、温度为 30℃ 的条件下将 10 000 mg/L 苯酚在 120 h 内处理完全,并同时实现了活性炭的再生。这类吸附-解吸附-生物降解酚类物质方法的建立不仅大

大节约了传统方法中因额外预处理带来的成本,还可为其他高浓度有机物的处理提供很好的方法借鉴。

4 微生物燃料电池技术

微生物燃料电池(MFC)是一种利用微生物将废水中有机物的化学能直接转化成电能的新型生物处理技术,不仅能有效处理废水中的有机污染物,还能产生电能,降低废水处理能耗,实现高效低耗的运行。前期研究证明 MFC 能够利用酚类有机物作为底物^[21-23],在它们有效降解的同时稳定向外输出电能,为有毒且难降解的酚类有机物的高效低耗处理提供了思路。因此,在底物降解方面,MFC 已被用于处理不同类型的含酚废水。郭璇等^[24]以石化炼厂含油污水为燃料构建并启动双室微生物燃料电池,可在水质净化的同时以电能的形式回收能量,结果表明,电池对含油污水 COD 的降解达到 81.8%,且优先吸附降解挥发酚、芳香烃等特征污染物,并产生酸酯类、醇类等典型的厌氧代谢产物。Park 等^[25]利用无介质、无隔膜 MFC 处理煤焦油炼油厂产生的废水,结果表明,MFC 对废水 COD 的降解达到 88%,并实现废水中煤焦油有机物的有效降解,如苯酚和 2-甲基苯酚去除率超过 90%;同时该处理过程中能够产生电能,且最大输出电压和功率密度分别可达 543 mV 和 4.5 mW/m²,可为后续废水中电吸附脱盐提供电能。

高内阻是 MFC 技术处理废水,尤其是处理酚类等难降解有机废水的瓶颈所在,而内阻主要受反应器相关因素的影响。因此,反应器构型改进是提高 MFC 的产电和废水处理能力的关键。从反应器结构上来看,主要分为双室 MFC 和单室 MFC 2 种基本构型,其中双室 MFC 是 MFC 处理难降解有机废水的常用类型。Huang 等^[22]研究发现,包含无媒介的生物阴极的双室 MFC 能够有效处理五氯苯酚并产生电能。Feng 等^[26]利用双室 MFC 同时完成了苯酚与氨氮的双脱除。然而,单室 MFC 不论从节省空间或减小内阻方面都优于双室 MFC,所以单室 MFC 用于处理难降解有机废水的研究已呈逐渐增多的趋势。Zhu 等^[27]研究表明,单室 MFC 相较于双室 MFC,其苯酚有机污染物的处理效率显著提高且运行成本大大降低。Yang 等^[28]探讨了空气阴极的单室 MFC-吸附作用对苯酚去除的影响,研究发现,没有外源能量供给的情况下苯酚被有效地吸附去除。

陈柳柳等^[21]构建了单室空气阴极微生物燃料

电池,研究了苯酚含量对以苯酚和葡萄糖为底物的MFC产电性能及苯酚去除率的影响,结果表明,苯酚的抑制作用会导致微生物活性降低,进而影响MFC的产电量及苯酚去除率。于是,苯酚等难降解有机物对微生物的毒性抑制作用已成为MFC技术应用于酚类废水处理的主要限制因素。Mohan等^[29]认为微生物的代谢活动在MFC的有机物降解中发挥了主要作用。因此,MFC中微生物群落结构及代谢模式的分析,筛选具有更高产电或代谢能力的微生物将成为微生物染料电池技术未来的研究重点。

5 联合技术

酚类物质作为一种高毒物质,将单一的生物方法应用于含酚废水上时很难达到预期的处理标准,所以,只有联合工艺才是水处理工程的有效途径。针对含酚类等难降解有机物的废水,通常先采用物化法对废水进行预处理,然后再进行生物降解。Wang等^[30]建立了吸附-解吸附-生物降解循环系统,并成功在高浓度含酚废水中实现了苯酚与氨氮的双脱除,系统中的吸附树脂伴随着生物降解过程而实现再生,该系统为高浓度含酚废水处理提供了一种经济有效的方法。韦朝海等^[31]基于综合考虑酚醛废水高浓度、高毒性,而生活污水低浓度、可生化性高的特点,提出并成功实现了采用缩聚-Fenton-A/O生物流化床联合工艺的工程处理,在正常运行工况条件下,工艺出水COD、苯酚及甲醛等污染物指标均低于《广州市污水排放一级标准》(DB 4437—90)的限值,工程实践证明该组合工艺对高浓度酚醛废水处理的实效性,成为可以推广的实用技术。Li等^[32]通过光催化和生物降解的紧密耦合工艺成功实现了2,4,5-三氯苯酚(TCP)的去除,结果表明,外层覆盖TiO₂的生物膜载体的设计是该项工艺成功的关键,这些说明光催化和生物降解相联合的工艺方法在去除废水中的难降解有机物上是非常有潜力的。Aghapour等^[33]发现当邻苯二酚有机负荷率(OLP)为15.64 kg/(m³·d),水力停留时间(HRT)为4.5 h时,生物反应器不能正常运行以去除邻苯二酚,而当臭氧氧化作为预处理过程与生物反应器相联合时,联合工艺的整体去除效率会维持在稳定状态,且邻苯二酚和COD的去除率分别达到91%和79%,这说明臭氧氧化与生物处理的联合工艺能够增强酚类物质的去除,并为提升废水处理提供一种行之有效的方法。显而易见,这些联合工艺

基本都是借助物化法预处理以达到降低废水中酚类物质的含量或者将酚类等难降解有机物转化成易降解小分子有机物的目的,最终为微生物降解的顺利进行提供适宜的环境。然而,在寻求含酚废水的处理方法时,不仅仅要考虑环境污染问题,更要考虑到社会效益和经济效益,在三者结合中寻求最优方案。

6 结论与展望

本文中所介绍的含酚废水的生物处理方法均有着各自的优势和不足,如传统的活性污泥法和生物膜法具有工艺成熟的优点但都对高浓度含酚废水处理效果不佳;新型的固定化法及微生物燃料电池技术大多针对单一的酚类物质且应用规模较小,许多技术的研究还处于试验阶段,实际操作中还需要考虑运行成本的问题。于是,生物法自身工艺的创新性改进是提高水处理效率的关键所在。然而,实际含酚废水成分复杂,单独使用生物法往往很难达到处理标准,生物法与物化法相结合的工艺才是水处理工程的有效途径,也是目前水处理工艺中的常用方法。因此,在寻求含酚废水的处理方法中,不仅要考虑环境污染问题,更要考虑到社会效益和经济效益,在三者结合中寻求最优方案。

很显然,微生物作为生物法处理含酚废水的主体,加强生物强化功能的降酚微生物的筛选及降解特性的分析,是提高含酚废水处理的一条有效途径,并具有广泛的应用前景。生物法中微生物群落结构及代谢模式的分析是改进生物法自身工艺的根本,也是生物处理工艺未来的研究重点。此外,降酚微生物代谢机理以及其响应外界信号的调控机制的探究对于提高微生物的应用性具有重要意义,必会成为今后的研究热点。

参考文献

- [1] Li N, Jiang J, Chen D, et al. A reusable immobilization matrix for the biodegradation of phenol at 5 000 mg/L[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8628 - 8632.
- [2] Bonfá M R L, Grossman M J, Piubeli F, et al. Phenol degradation by halophilic bacteria isolated from hypersaline environments[J]. Biodegradation, 2013, 24(5): 699 - 709.
- [3] Sun J Q, Xu L, Tang Y Q, et al. Simultaneous degradation of phenol and *n*-hexadecane by *Acinetobacter* strains[J]. Bioresource Technology, 2012, 123(3): 664 - 668.
- [4] Ucin H, Yildiz E, Nuhoglu A. Phenol biodegradation in a batch jet loop bioreactor (JLB): Kinetics study and pH variation[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(9): 2965 - 2971.
- [5] Rosenkranz F, Cabrol L, Carballa M, et al. Relationship between

- phenol degradation efficiency and microbial community structure in an anaerobic SBR [J]. *Water Research*, 2013, 47 (17): 6739 – 6749.
- [6] Zhang Y, Tay J H. Alternated phenol and trichloroethylene biodegradation in an aerobic granular sludge reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 106: 1 – 10.
- [7] Jemaat Z, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Partial nitrification and *o*-cresol removal with aerobic granular biomass in a continuous airlift reactor [J]. *Water Research*, 2014, 48: 354 – 362.
- [8] Pereira A D, Leal C D, Dias M F, *et al.* Effect of phenol on the nitrogen removal performance and microbial community structure and composition of an anammox reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 166: 103 – 111.
- [9] Fernández I, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Aerobic biodegradation of a mixture of monosubstituted phenols in a sequencing batch reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 260: 563 – 568.
- [10] Welz P J, Ramond J B, Cowan D A, *et al.* Phenolic removal processes in biological sand filters, sand columns and microcosms [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 119: 262 – 269.
- [11] Li H Q, Han H J, Du M A, *et al.* Removal of phenols, thiocyanate and ammonium from coal gasification wastewater using moving bed biofilm reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (7): 4667 – 4673.
- [12] Sancinetti G P, Sader L, Varesche M B A, *et al.* Phenol degradation in an anaerobic fluidized bed reactor packed with low density support materials [J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2012, 29 (1): 87 – 98.
- [13] Hu F, Zhou H, Jin Z, *et al.* Biodegradation of TCP in a sequencing batch-fluidized bed bioreactor with waste coke particles as the carrier [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139 (9): 1222 – 1227.
- [14] Li Y, Tabassum S, Zhang Z. An advanced anaerobic biofilter with effluent recirculation for phenol removal and methane production in treatment of coal gasification wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, doi:10.1016/j.jes.2016.03.012.
- [15] 罗倩仪, 谢文玉, 钟理. 移动床生物膜反应器预处理含酚废水 [J]. *化工环保*, 2014, 34 (6): 535 – 538.
- [16] Fang F, Han H, Zhao Q, *et al.* Bioaugmentation of biological contact oxidation reactor (BCOR) with phenol-degrading bacteria for coal gasification wastewater (CGW) treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150: 314 – 320.
- [17] González A J, Fortunato M S, Papalia M, *et al.* Selection and identification of a bacterial community able to degrade and detoxify *m*-nitrophenol in continuous biofilm reactors [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 245 – 251.
- [18] Basak B, Bhunia B, Dey A. Studies on the potential use of sugarcane bagasse as carrier matrix for immobilization of *Candida tropicalis* PHB5 for phenol biodegradation [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 93: 107 – 117.
- [19] Gupta A, Balomajumder C. Simultaneous removal of Cr(VI) and phenol from binary solution using *Bacillus* sp. immobilized onto tea waste biomass [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2015, 6: 1 – 10.
- [20] Ma X, Li N, Jiang J, *et al.* Adsorption-synergic biodegradation of high-concentrated phenolic water by *Pseudomonas putida* immobilized on activated carbon fiber [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013, 1 (3): 466 – 472.
- [21] 陈柳柳, 徐源, 杨倩, 等. 微生物燃料电池对苯酚的降解及其产电性能 [J]. *化工环保*, 2015, 35 (1): 1 – 5.
- [22] Huang L, Chai X, Quan X, *et al.* Reductive dechlorination and mineralization of pentachlorophenol in biocathode microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 111: 167 – 174.
- [23] Huang D Y, Zhou S G, Chen Q, *et al.* Enhanced anaerobic degradation of organic pollutants in a soil microbial fuel cell [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 172 (2): 647 – 653.
- [24] 郭璇, 詹亚力, 郭绍辉, 等. 炼厂含油污水微生物燃料电池的启动及性能研究 [J]. *高校化学工程学报*, 2013, 27 (1): 159 – 163.
- [25] Park H I, Wu C, Lin L S. Coal tar wastewater treatment and electricity production using a membrane-less tubular microbial fuel cell [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2012, 17 (3): 654 – 660.
- [26] Feng C, Huang L, Yu H, *et al.* Simultaneous phenol removal, nitrification and denitrification using microbial fuel cell technology [J]. *Water Research*, 2015, 76: 160 – 170.
- [27] Zhu X, Logan B E. Using single-chamber microbial fuel cells as renewable power sources of electro-Fenton reactors for organic pollutant treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 252/253: 198 – 203.
- [28] Yang J, Zhou M, Zhao Y, *et al.* Electrosorption driven by microbial fuel cells to remove phenol without external power supply [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150: 271 – 277.
- [29] Mohan S V, Raghavulu S V, Peri D, *et al.* Integrated function of microbial fuel cell (MFC) as bio-electrochemical treatment system associated with bioelectricity generation under higher substrate load [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 24 (7): 2021 – 2027.
- [30] Wang Y, Chen H, Liu Y X, *et al.* An adsorption-release-biodegradation system for simultaneous biodegradation of phenol and ammonium in phenol-rich wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 711 – 719.
- [31] 韦朝海, 施华顺, 吴超飞, 等. 缩聚-Fenton-A/O 生物流化床组合工艺处理酚醛废水的工程案例分析 [J]. *环境工程学报*, 2011, 5 (8): 1761 – 1767.
- [32] Li G, Park S, Rittmann B E. Developing an efficient TiO₂-coated biofilm carrier for intimate coupling of photocatalysis and biodegradation [J]. *Water Research*, 2012, 46 (19): 6489 – 6496.
- [33] Aghapour A A, Moussavi G, Yaghmaei K. Degradation and COD removal of catechol in wastewater using the catalytic ozonation process combined with the cyclic rotating-bed biological reactor [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 157: 262 – 266. ■