

废水同步生物处理与微生物电解池产氢的研究进展

王利勇¹, 叶晔捷¹, 陈英文¹, 祝社民², 沈树宝¹

(1. 南京工业大学制药与生命科学学院, 江苏 南京 210009;

2. 南京工业大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 微生物电解池(MEC)制氢技术可以将有机废水中的化学能直接转化为最清洁的氢能, 同时又能处理污水, 具有显著的环境效益和经济效益。较详细介绍了 MEC 的原理和组成, 综述了 MEC 制氢的关键材料和核心技术, 展望了其发展前景。

关键词: 生物制氢; 微生物电解池; 废水处理

中图分类号: TQ035; TQ116.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)09-0031-05

Advances in biological wastewater treatment and simultaneously hydrogen generation from organic wastewater by microbial electrolysis cell

WANG Li-yong¹, YE Ye-jie¹, CHEN Ying-wen¹, ZHU She-min², SHEN Shu-bao¹

(1. National Engineering Research Centre for Biochemistry, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. College of Material Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Hydrogen production by microbial electrolysis cell (MEC) is capable of converting chemical energy presented in organic wastewater into clean hydrogen energy with accomplishment of wastewater treatments simultaneously, which possibly captures considerable environmental and economic benefits. The mechanism and composition of MEC are summarized. The key materials and core technologies of MEC are reviewed and its potential application is proposed.

Key words: biohydrogen production; microbial electrolysis cell(MEC); wastewater treatment

氢是一种无污染和可再生的能源, 且具有可储可输的特点, 已引起广泛重视。目前研究用氢作为能源已经成为国际上的研究热点, 氢能经济已经成为一个热门的话题^[1-2]。微生物电解池(microbial electrolysis cell, MEC)是在微生物的作用下利用电化学技术将废水中有机物的化学能转化为氢能, 并同时处理废水的一种装置。MEC 技术可以实现生物质废物的资源化利用, 在能源和环境问题日益受到重视的今天具有广阔的发展前景。MEC 作为一种最有前途的废水处理技术已受到国内外学者的广泛关注, 特别是近几年来在此研究领域取得了长足的进步^[3-4]。

本文首先简述了 MEC 制氢技术的基本原理、组成、与微生物燃料电池(MFC)的差异及其效率评价, 然后从影响 MEC 性能的因素和 MEC 制氢技术的关键材料——阳极、阴极和膜材料等方面阐述了最近国内外的研究进展, 探讨了今后工作的发展趋势。

1 MEC 制氢技术简介

1.1 基本原理和组成

微生物电解池是以阳极微生物作为催化剂, 利用电化学技术将废水中有机物的化学能转化为氢能的装置, 由阳极和阴极组成, 中间用质子交换膜(PEM)分开, 如图 1 所示。

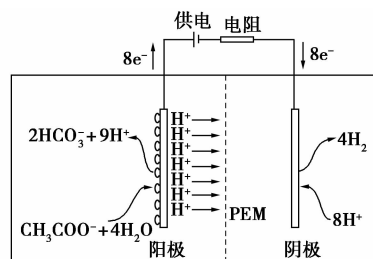


图 1 微生物电解池及工作原理

1.2 MEC 与 MFC 的差异

MEC 与 MFC 系统存在很多相似之处, 因此, MFC 系统中提高电能输出的方法可供 MEC 借鉴

收稿日期: 2010-05-28

基金项目: 国家“973”项目(2009CB724700); 江苏省环境工程重点实验室开放课题(KF2009003); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-003); 江苏省环保科技项目(2007020); 南京工业大学青年教师学术基金(39708014)

作者简介: 王利勇(1985-), 男, 硕士生; 沈树宝(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事酶工程、多肽合成、环境工程的研究, 通讯联系人, 025-83587349, zsbshen@126.com。

用于提高氢气产量。但是两者研究的侧重点仍存在区别:①MEC 产氢与 MFC 产电不同,它是一个吸热反应,需要外加能量才能促使氢气生成。②微生物菌落不同。虽然 MEC 产氢系统与 MFC 产电系统都是使用产电菌作为接种菌^[5],但是 MFC 系统经常采用空气阴极,这样就导致氧气扩散到阳极室,从而抑制了厌氧菌的生长,使得好氧菌在整个菌落中占据主导地位。而 MEC 系统是完全厌氧的,厌氧菌占主导地位。③在 MFC 系统中底物可以透过膜到达阴极室,但对于 MEC 而言,这就为附着在阴极的微生物提供生长的底物,而这些阴极微生物可以利用降解的氢气,从而降低了 MEC 系统的氢气产率。因此,在双室 MEC 系统中,必须严格控制底物扩散过膜材料,但在单室 MEC 反应器中并没有考虑底物扩散到阴极的损失。④MEC 制氢系统较 MFC 更为复杂。例如,MEC 系统中氢气的损失是由于氢气扩散到阳极室以及生长在阴极上的细菌的降解作用。产氢过程中需要确保产出的氢气不再扩散回阳极室。但在 MFC 系统中没有相似的问题,因为 MFC 阴极的氧化产物为水。此外,氢气的产生对 MEC 制氢装置的气密性要求更高。

1.3 MEC 制氢效率评价

1.3.1 氢气转化率

MEC 系统的性能可以用多种方法来表征,氢气转化率 Y_{H_2} 就是一个很重要的评价指标。对于已知的底物,较容易计算出底物消耗的质量。假设 ΔC_s (g) 为底物变化的质量,底物的摩尔质量为 M_s (g/mol),则氢气转化率为:

$$Y_{H_2} = \frac{n_{H_2} M_s}{\Delta C_s}$$

式中, n_{H_2} 为实验中回收氢气的物质的量,由氢气体积 (V_{H_2}) 按理想气体定律计算得到:

$$n_{H_2} = \frac{V_{H_2} P}{RT}$$

式中, P 为压力, atm (1 atm = 10^5 Pa); R 为气体常数, $R = 0.08314 \text{ L} \cdot \text{atm} / (\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为采样时的热力学温度, K。

对于复杂的底物,像生活污水、有机废水等,氢气转化率是基于底物 COD 的去除的氢气产量。即氢气产率 [$\text{mg}(\text{H}_2) / \text{mg}(\text{COD})$] 为:

$$Y_{H_2} = \frac{n_{H_2} M_{H_2}}{V_L \Delta \text{COD}}$$

式中, M_{H_2} (g/mol) 为氢气的摩尔质量, V_L 为阳极室的液体体积, ΔCOD (mg/L) 为连续流中的进出水

COD 质量浓度之差或是间歇流中始点和终点 COD 质量浓度之差。

1.3.2 库仑效率

产能是运行 MEC 的一个主要目标,即试图尽量多地提取底物中存储的电子,尽量多地从系统中回收能量。库仑效率 C_E 是一个很重要的评价指标,它可以反映出电子的回收率。

1A 的定义为每秒传递 1 C 的电荷,即 $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ 。因此将电流对时间积分,就能得到系统中转化的总的电量。基于测量的电流,计算得到的氢气物质的量 $n_{H_2, \text{cat}}$ 为:

$$n_{H_2, \text{cat}} = \frac{\int_{t=0}^t I dt}{2F}$$

式中, I 为电流; F 为法拉第常数, $F = 96485 \text{ C/mol e}^-$ 。

基于 COD 去除的理论最大氢气产率 $n_{H_2, \text{COD}}$ (mol) 为:

$$n_{H_2, \text{COD}} = \frac{b_{eO_2} V_L \Delta \text{COD}}{2M_{O_2}}$$

式中, b_{eO_2} 为底物氧化时消耗 1 mol 氧气转移的电子数; M_{O_2} (32 g/mol) 为氧气的摩尔质量。

库仑效率的定义为回收的电子与有机物提供的电子之比,即:

$$C_E = \frac{n_{H_2, \text{cat}}}{n_{H_2, \text{COD}}}$$

1.3.3 氢气回收率

总体氢气回收率 $r_{H_2, \text{COD}}$ 是基于氢气的总回收物质的量与理论值之比,即:

$$r_{H_2, \text{COD}} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2, \text{COD}}}$$

阴极氢气回收率 $r_{H_2, \text{cat}}$ 是生成氢气所用的电子数与到达阴极的总电子数之比,即:

$$r_{H_2, \text{cat}} = \frac{n_{H_2}}{n_{H_2, \text{cat}}}$$

1.3.4 能量效率

目前不同 MEC 体系电解效率评价用得较多的是能量效率,基于电输入的 MEC 的能量效率 η_E 是产出的氢气所含能量与输入能量之比, η_E 可超过 100%^[6]:

$$\eta_E = \frac{W_{H_2}}{W_E} = \frac{n_{H_2} \Delta H_{H_2}}{\int_{t=0}^t (IE_{ps} - I^2 R_e) dt}$$

式中, W_{H_2} (kJ) 为氢气中所含的能量; W_E (kJ) 为由外加电源提供的能量减去通过电阻的能量损失; ΔH_{H_2} (285.83 kJ/mol) 为氢气的燃烧热; E_{ps} (V) 为外加

电源提供的电压; $R_e(\Omega)$ 为外加电阻。

基于电能输入的 MEC 产氢的能量效率与电解水相比,能量效率更为重要。因为在 MEC 系统中,由于有机物含有能量,并且体系中是有机物而不是水被电解,输入的电能使质子和电子重新结合生成氢气,因此能量效率比系统的整体性更为重要。而电解水的能量效率较低,仅为 50% ~ 70%,因为商业化的电解水通常在总投资和产率上优化,但不考虑能量效率。

1.3.5 氢气产率

将每天每立方米的反应器产生的氢气体积称为氢气产率 Q [$\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$]:

$$Q = 3.68 \times 10^{-5} I_V Tr_{\text{H}_2, \text{cat}}$$

式中, 3.68×10^{-5} 是包含法拉第常数的一个常数^[20]; I_V (A/m^3) 为体积电流密度, $I_V = \frac{I_{\text{max}}}{V_L}$, 其中 I_{max} 为微生物电解池所产生的最大电流。

2 MEC 制氢系统关键材料与技术

微生物电解池的核心组成部分包括阳极、阴极和膜材料,这 3 部分的材料构成直接影响到电解池性能。使用膜或者其他材料隔开阳极和阴极是对 MEC 的一个极大挑战,原因在于它们的成本高并且导致阳极室和阴极室存在 pH 梯度差异。MEC 制氢系统的阴极不同于阳极的特性在于其需要催化剂。最近的研究发现,过渡金属和其他非贵金属化合物在替代贵金属催化剂方面具有很大潜力。由于 MEC 制氢技术的发展尚不成熟,因此目前报道较多的是关键材料的发展。以下主要介绍 MEC 各部分材料的研究概况。

2.1 阳极材料

MEC 阳极材料必须具有高导电率、无腐蚀性、高比表面积、高孔隙率、廉价、容易制造并且可放大等特性。因此,必须使用高导电性的材料,同时也必须是不易腐蚀的,这使得大多数金属材料被淘汰。此外,微生物必须能很好地附着在材料上,并且容易将电子导出,还必须考虑材料或者材料表面的涂层对微生物传递电子到电极表面的能力的影响。电极材料是目前 MFC 中材料研究中的一个热点,但对于阳极材料在 MEC 中的应用文献报道却很少。

2.1.1 以碳为基体的阳极

以碳为基本原料的碳布^[7]、碳毡^[8]和碳纸^[9]作为 MEC 和 MFC 的阳极材料十分普遍,这些材料具有高导电性并且十分适合微生物生长,但是由于其

价格昂贵限制了其大规模应用。Wang 等^[10]研究了价格便宜的碳网阳极对 MFC 产电性能的影响,结果表明,与碳布和碳纸阳极相比,碳网阳极获得更大的功率密度。

2.1.2 石墨电极

石墨电极因其具有高导电性和相对准确的表面积,被用于多数 MFC 研究及其他电化学研究中,并且已有报道采用石墨颗粒^[11]、石墨纤维^[12]和石墨毡^[6,13]作为 MEC 的阳极材料。Feng 等^[14]报道了采用石墨刷作为 MFC 的阳极,研究表明,石墨刷作电极可以获得最大的比表面积和孔隙率。

2.2 阴极材料

MEC 阴极的主要作用是为质子还原反应提供场所,为电子、离子提供传输通道。由于发生在阴极上的电子、质子和氢气在催化剂上的三相反应(固体催化剂、氢气和水)难于控制,因此,阴极的设计是 MEC 使用和升级的最大挑战^[15]。

前面提到的用作阳极的材料同样可以用作 MEC 系统的阴极,而且,碳布^[16-17]、碳纸^[7]、碳毡^[18]、石墨毡^[19]和石墨棒^[20]等均已被用于 MEC 产氢研究中。阴极不同于阳极的特性在于需要催化剂,通常采用涂布或电沉积技术将催化剂附着在阴极上,催化剂可以降低阴极反应的活化能,加快反应速度,降低析氢电势。

2.2.1 含铂催化剂的碳阴极

一直以来,铂被认为是 MEC 制氢技术中最有效的催化剂。含铂催化剂的碳阴极常用的材料是一面含铂的碳纸,这种碳纸可从生产厂家直接购买到,如美国 E-TEK 公司、新西兰 Magneto Special Anodes 公司和德国 Alfa Aesar 公司。在实验室条件下,也可以通过手工制作含铂催化剂的碳布阴极,制作含铂电极一般需要含铂 10% (质量分数) 的炭黑和作为胶黏剂的 5% Nafion 溶液,将糊状物均匀地涂在碳布上并在室温下干燥 24 h 后即可使用。笔者所在课题组使用含铂催化剂的碳阴极,在外加电压 0.9 V、以乙酸钠为底物的条件下,获得很高的氢气产率,达 $1.56 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。但是,由于铂催化剂价格昂贵,而且在开采和提取过程中易造成环境污染,此外,实际废水中存在的化学物质(如硫化物等)易导致铂催化剂中毒^[21],因此需要寻找廉价的可替代铂催化剂。

2.2.2 含过渡金属的碳阴极

目前,可与铂碳阴极相比的是过渡金属碳阴极,这种阴极减少了贵金属材料在 MEC 中的用量。

Zhao 等^[22]在电化学测试中发现了2种不同的过渡金属催化剂,分别为二价铁苯二甲蓝(FePc)和四甲氧基苯基卟啉钴(CoTMPP),使用这2种催化剂的阴极性能与铂碳阴极相同或优于铂碳阴极。Cheng 等^[23]将CoTMPP和FeCoTMPP作为阴极催化剂,进行了MEC实验,与不含催化剂的阴极相比,它们的性能提高了40%~80%。

2.2.3 金属阴极

由于金属材料具有稳定性、经济性、在自然界储量丰富、对微生物低毒等特点,近年来被广泛用作MEC制氢系统的催化剂。笔者所在课题组开发了Ni-W-P合金电极,并将其成功应用在单室MEC反应器中,在外加电压0.9 V条件下,最终获得的氢气产率为 $1.09 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。实验表明,在相同操作条件下,Ni-W-P合金电极的氢气产率与铂碳阴极相同,其电流密度与铂碳阴极相比更稳定。Hu 等^[24]利用电镀技术成功制得镍钼合金和镍钨合金电极,在外加电压0.6 V的条件下,镍钼合金电极的氢气产率为 $2.0 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,氢气产率比同等条件下的镍钨合金电极提高了33%,仅比铂碳阴极低15%。

2.3 膜材料

膜材料是氢燃料电池(HFC)的重要组成部分^[25],膜的作用是将2种气体(氢气和氧气)隔开,并使质子在2种气体间得以传递。但在MFC和MEC系统中,质子溶于水中,因此,膜不是MEC的必要组成部分。在MEC系统中,膜主要用于双室MEC,以使阳极和阴极中的液体分开,因此这些膜材料必须是质子可透过的,允许阳极产生的质子扩散到阴极,例如阳离子交换膜(CEM)、阴离子交换膜(AEM)、双极膜(Bipolar membrane)等。

使用膜材料的MEC具有以下优点:①膜材料的使用可以减少底物从阳极室向阴极室的转移;②可以有效阻止生成的气体扩散到阳极室被微生物利用。缺点:①由于用膜把反应器阴极和阳极隔离开,易造成阴极室pH的上升,由此产生的pH梯度是造成电势损失的主要原因。②膜的使用提高了MEC的成本,膜易被污染,降低了MEC系统的应用可行性。

3 MEC性能影响因素

影响MEC性能的因素很多,阴极催化剂的活性对其性能影响最大。此外,不同的工艺条件如底物浓度、pH、溶液的导电率、电极间距、反应器构型和温度等对其性能也有较大影响。

理论上,高的工作温度从热力学和动力学角度都有利于MEC电解反应的进行,但温度的选择必须考虑其他因素。如微生物的活性和成本等,大多数细菌可在常温(15~35℃)下存活,嗜热菌可忍受50~60℃的高温,而嗜冷菌可在<15℃的低温中生长。此外,MEC系统包含很多组成部分,高的工作温度对各部分材料在高温下的匹配性提出了更高的要求,因此需要根据实际情况选择适合特定工作温度范围及材料体系。

细菌只能在特定的盐度和pH下生长,因此,溶液的导电率和pH不能超过某一特定的范围。Call和Logan^[16]研究发现,将溶液的电导率由7.5 mS/cm升高到20 mS/cm,在外加电压0.3~0.6 V的条件下,氢气产率明显提高,但当外加电压大于0.6 V时,氢气产率没有明显提高。Oh 等^[26]研究发现,较低的pH(pH=6.2)可以抑制附着在阳极的产甲烷菌的生长,从而能够得到较高的氢气浓度。

目前对于MEC的研究文献报道相对较少,对MEC性能影响因素的研究还有待进一步深入。各种因素之间存在相互影响和关联,需要找出针对不同体系的最优化工艺条件,以达到MEC的最佳性能。

4 结语与展望

MEC制氢技术是一种符合可持续发展战略的课题。利用废水中的废物生物质产氢,不仅实现了废水的减排,而且有效回收利用其中蕴含的生物质能。随着能源危机的加深和各国对能源需求量的日益增加,MEC技术对生物质能的利用具有巨大的开发潜力和广阔的前景,笔者认为MEC制氢的研究重点应集中在以下3个方面:

(1)重视和加强MEC制氢的基础理论研究。进一步揭示微生物产氢的机制和条件,在代谢途径方面切断旁路代谢,解除代谢阻遏,使总体代谢途径向产氢方向进行;

(2)加强新型高效催化材料的研究、开发设计和开发新型高效MEC阴极催化剂,是今后开发高效MEC催化材料的研究方向;

(3)提高催化效率和延长电极寿命是MEC技术得以广泛应用的关键前提。

尽管存在上述问题,MEC已经显示了其在能源和环境领域广阔的发展前景,要想使这一技术尽快走向商业化,需要充分发挥各学科的优势联合进行攻关。

参考文献

- [1] Mustafa B, Mehmet B. Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen[J]. *Int J of Hydrogen Energy*, 2009, 34(9):3589-3603.
- [2] Dries H, William D. Using renewables and the co-production of hydrogen and electricity from CCS-equipped IGCC facilities, as a stepping stone towards the early development of a hydrogen economy[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35(3):861-871.
- [3] 王利勇,叶晔捷,徐源,等. 同步废水处理及产氢的微生物电解池研究进展[J]. *现代化工*, 2009, 30(8):30-33.
- [4] Selembo P A, Merrill M D, Logan B E. Hydrogen production with nickel powder cathode catalysts in microbial electrolysis cells[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35(2):428-437.
- [5] Logan B E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells[J]. *Nature Rev Microbiol*, 2009, 7:375-381.
- [6] Rozendal R, Hamelers H V M, Molenkamp R J, *et al.* Performance of single chamber biocatalyzed electrolysis with different types of ion exchange membranes[J]. *Water Res*, 2007, 41:1984-1994.
- [7] Liu H, Grot S, Logan B E. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(11):4317-4320.
- [8] Munoz L D, Erable B, Etcheverry L, *et al.* Combining phosphate species and stainless steel cathode to enhance hydrogen evolution in microbial electrolysis cell (MEC)[J]. *Electrochemistry Communications*, 2010, 12:183-186.
- [9] Selembo P A, Mathew D M, Logan B E. The use of stainless steel and nickel alloys as low-cost cathodes in microbial electrolysis cells[J]. *J Power Sources*, 2009, 190(2):271-278.
- [10] Wang X, Cheng S, Feng Y, *et al.* The use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(17):6870-6874.
- [11] Cheng S, Logan B E. Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104:18871-18873.
- [12] Lee H S, Rittmann B E. Significance of biological hydrogen oxidation in a continuous single-chamber microbial electrolysis cell[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44:948-954.
- [13] Rozendal R A, Hamelers H V M, Euverink G J W, *et al.* Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2006, 31:1632-1640.
- [14] Feng Y, Yang Q, Wang X, *et al.* Treatment of graphite fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells[J]. *J Power Sources*, 2010, 195(7):1841-1844.
- [15] Logan B E, Aelterman P, Hamelers B, *et al.* Microbial fuel cells: Methodology and technology[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17):5181-5192.
- [16] Call D, Logan B E. Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42:3401-3406.
- [17] Ye Y J, Wang L Y, Chen Y W, *et al.* High yield hydrogen production in a single-chamber membrane-less microbial electrolysis cell[J]. *Water Sci Technol*, 2010, 61(3):721-727.
- [18] Lee H S, Rittmann B E. Characterization of energy losses in an up-flow single-chamber microbial electrolysis cell[J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2010, 35:920-927.
- [19] Rozendal R A, Jeremiase A W, Hamelers H V M, *et al.* Hydrogen production with a microbial biocathode[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42:629-634.
- [20] Torres C I, Papameswaran P, Marcus A K, *et al.* Selecting anode-respiring bacteria based on anode potential: Phylogenetic, plectrochemical, and microscopic characterization[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43:9519-9524.
- [21] Hong D U, Han C, Park S H, *et al.* Recovery properties of hydrogen gas sensor with Pd/titanate and Pt/titanate nanotubes photo-catalyst by UV radiation from catalytic poisoning of H₂S[J]. *Curr Appl Phys*, 2009, 9:172-178.
- [22] Zhao F, Harnish F, Schroder U, *et al.* Application of pyrolysed iron (II) phthalocyanine and CoTMPP based oxygen reduction catalysts as cathode materials in microbial fuel cells[J]. *Electrochem Commun*, 2005, 7:1405-1410.
- [23] Cheng S, Logan B E. Evaluation of catalysts and membranes for high yield biohydrogen production via electrohydrogenesis in microbial electrolysis cells (MECs)[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 58:853-857.
- [24] Hu H Q, Fan Y Z, Liu H. Hydrogen production in single-chamber tubular microbial electrolysis cells using non-precious-metal catalysts[J]. *Int J of Hydrogen Energy*, 2009, 34:8535-8542.
- [25] Nazim M, Pyoungho C, Franklyn S, *et al.* Integration of direct carbon and hydrogen fuel cells for highly efficient power generation from hydrocarbon fuels[J]. *J Power Sources*, 2010, 195(4):1112-1121.
- [26] Oh S, Ginkel S V, Logan B E. The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37:5186-5190. ■

《现代化工》“海外纵横”栏目征稿启事

《现代化工》“海外纵横”主要介绍国外某一国家或地区热点科研领域的开发应用状况、开发方向,或某一行业的发展现状、发展方向和问题探讨,以及有突出表现的国外公司的科研动态和研发经验等。

有意投稿的作者,请与“海外纵横”栏目编辑童志勇联系,以确定合适的主题和格式。联系电话:010-64444105-839, e-mail: tongzy@cheminfo.gov.cn。(本刊编辑部)