

利用电化学活跃微生物协助电解发酵产氢

李建昌, 张无敌, 尹芳, 徐锐, 陈玉保

(云南师范大学, 可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 昆明 650092)

摘要: 电解协助发酵产氢是在外源电解协助下, 利用电化学活跃微生物在石墨阳极上生长达到彻底氧化因发酵产氢残存的有机酸, 产生 CO_2 、电子与质子, 电子进入石墨阳极经导线传到铂阴极, 而质子则穿过阳离子膜进入阴极池, 在无氧环境下, 通过外加电压和铂的催化下, 电子与质子结合为氢。此过程电子回收率可达 90% 以上, 产氢效率可达 $8 \sim 9 \text{ mol H}_2/\text{mol Glucose}$ 。这一战略从根本上克服发酵产氢的发酵障碍和代谢产物的反馈抑制, 极大地提高了氢转化率, 极有可能率先应用于能源作物原料的氢能转化、以及有机污水和有机废弃物处理。

关键词: 发酵产氢; 电解; 电化学活跃微生物; 电极呼吸

中图分类号: Q935, Q93-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0001-6209 (2009) 06-0697-06

发酵产氢基于厌氧消化过程, 是在厌氧、无光照和无其他电子受体如硫酸盐、硝酸盐环境中, 通过抑制产甲烷而产生氢气。该过程称之为微生物暗发酵产氢, 并认为是最有希望实现规模化生物产氢的技术之一^[1-3]。以葡萄糖为例, 按化学计量关系, 通过发酵 1mol 葡萄糖完全转化为 CO_2 和 H_2 , 可形成 12mol 的氢气 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12 \text{H}_2 + 6 \text{CO}_2$); 如果丁酸为唯一末端副产物, 则有 2mol 氢产生 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2 + \text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$), 如果乙酸为唯一末端副产物, 则有 4mol 氢产生 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 + 2 \text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$), 因此理论上发酵产氢的最大转化率为 4mol 氢/mol 葡萄糖。然而近几年的研究结果表明, 发酵产氢的能量转化率通常不超过 15%^[4]。其原因是受热力学因素的限制, 大量的乙酸、丙酸和丁酸等挥发性脂肪酸不能转化为氢气, 导致氢转化率较低, 国外学者称之为发酵产氢的“发酵屏障”^[5-6]。Benemann 认为只有当氢转化率接近 60% ~ 80% 时, 才有实际的应用价值^[7]。为达到这一转

化率, 这些有机酸必须进一步转化为氢气, 为此有学者把目光转向了光发酵产氢^[8-10], 进而提出集成光发酵和暗发酵产氢技术^[11], 旨在通过光合产氢充分利用发酵产氢产生的末端产物, 从而提高氢转化率。但是, 该技术仍然受光照条件和光反应器的限制^[12]。另一方面, 有机挥发酸的积累, 除导致氢转化率底外, 又严重影响了发酵产氢的稳定性^[13-14]。有学者研究了在甲酸产氢体系中, 加入外源乙酸、丙酸和丁酸等挥发性有机酸对发酵产氢过程的抑制影响^[15], 表明酸性挥发性末端产物的积累是导致发酵产氢不稳定的主要原因之一, 并称之为发酵产氢代谢产物的反馈抑制影响。

为提高发酵产氢的氢转化率, 消除代谢产物的反馈抑制, 很多学者从产氢反应器及工艺、产氢微生物的生理代谢、产氢酶以及还原剂产生系统方面进行了大量的研究^[16-18], 很大程度上提高了氢转化率, 但却难以克服发酵产氢的热力学限制。2005 年 Liu 与 Logan^[5] 利用外加电解电源、借助微生物燃料

基金项目: 云南师范大学可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室开放基金(KJ2008002); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养计划(2005py01-16)

作者简介: 李建昌(1966-), 男, 云南施甸人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为生物质能。Tel: +86-871-5517126; E-mail: jclcc94213@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-12-06; **修回日期:** 2009-02-25

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

电池的研究手段,进行了乙酸电解协助产氢实验,并获得成功,称之为“电解协助微生物产氢”,随后报道了其它不同底物以及有机废水产氢^[19-20]。2006年 Rozendal 也进行了这一方面的研究,认为是微生物电催化的作用,并称之为“生物催化电解产氢”^[21-22]。2008年 Chae^[23]进行该方面的研究,称之为生物电化学电池。鉴于上述是把电化学原理和微生物燃料电池技术引入到发酵产氢中,在此称之为“电解协助发酵产氢”。该新兴技术有望克服发酵产氢的发酵屏障,可提高氢转化率和消除代谢产物的反馈抑制。

1 电解协助发酵产氢原理

电解协助发酵产氢的基本装置如图 1 所示。这一装置由两个室组成,分别为阳极室和阴极室,在阳极室和阴极室之间通过质子交换膜连接。阳极通常采用石墨电极,阴极通常采用铂电极,在阴阳两极之间有导线连到外加电源。在外源电解的作用下,附着在阳极表面的电化学活跃微生物能彻底氧化有机底物形成 CO_2 、 H^+ 和电子,然后把氧化过程中产生的电子通过电子传递链传递到石墨电极上产生电流,同时微生物在电子传递过程中获得能量支持生长^[24-26],电子再经电子线路流到阴极;而质子则通过质子膜扩散到阴极池,在阴极获得电子被还原成氢气。这一过程与微生物燃料电池不同之处在于,阳极室和阴极室均处于厌氧状态,在阴极表面并非质子与氧气结合形成水,而是从阴极上获得电子被还原为氢气。

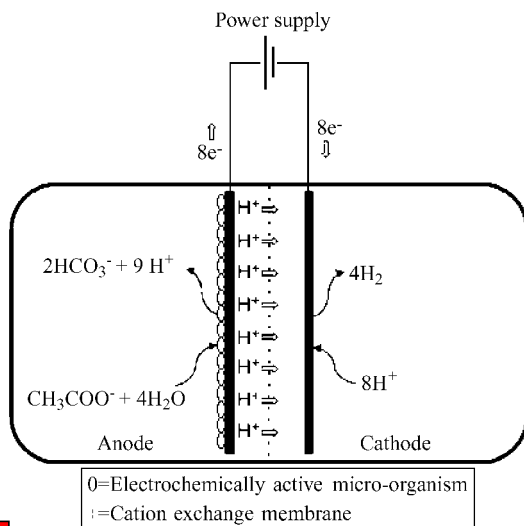
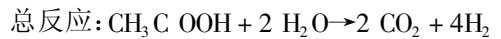
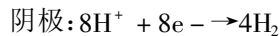
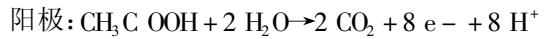


Fig. 1 电解协助发酵产氢示意图 (Rozendal et al. 2006)

Fig. 1 Schematic representation of the electrolytically assisted fermentative hydrogen production (source: Rozendal, R. A. et al. 2006).

2 电解协助发酵产氢的电化学过程

电解协助发酵产氢的电化学过程表现为传统发酵产氢过程形成的挥发性有机酸在阳极彻底分解,氢离子透过质子交换膜在阴极获得电子,析出氢气。Liu 和 Rozendal 研究了乙酸的产氢情况,电极反应如下:



根据 Gibbs 自由能变化计算 ($\Delta G = -nFE$), 在标准条件下,由乙酸产生氢气需要 104.6 kJ/mol 的能量,也就是说氢气从阴极析出,理论上需要 0.14 V 的外加电压,这与乙酸氧化的电极电势 -0.28 V 和质子还原的电极电势 -0.42 V 相一致。实际上,外加电解电压远高于 0.14 V, Liu 的研究结果表明阴极表面开始析出氢气的电解电压为 0.25 V,大量析出氢气时为 0.5 V,而 Rozendal 的结果分别是 0.22 V 和 0.5 V。这是因为(1)氢离子在阴极析出的超电势;(2)电化学活跃微生物在阳极维持生长的能量消耗;(3)电化学系统内的欧姆阻抗。尽管如此,也比电解水所需的最小值 1.6 V 低得多。

另外根据 Liu 和 Rozendal 的计算方法,我们不难推算出丙酸和丁酸在阳极上的理论分解电压。在标准条件下,丙酸产氢的标准自由能变化为 180.7 kJ/mol,电子转移数为 14,需要提供 0.134V 的电解电压,而丁酸的自由能变化为 257.3 kJ/mol,电子转移数 20,需要提供的分解电压为 0.133 V。显然,从理论上,丙酸和丁酸产氢由外界提供的电解电压与乙酸产氢的相近。也就是说通过电解协助,消除发酵产氢过程形成的乙酸、丙酸和丁酸等挥发性有机并进一步转化为氢气是可行的。

3 电解协助发酵产氢的微生物电化学过程

3.1 电化学活跃微生物

电化学活跃微生物 (Electrochemically active micro-organisms), 也称产电微生物 (Electricigens), 为厌氧条件下完全氧化有机物成 CO_2 , 然后把氧化过程中产生的电子通过电子传递链传递到电极上产生电流的微生物,同时微生物在电子传递过程中获得能量生长繁殖^[27-29]。这类微生物主要有:(1)土杆菌 (*Geobacter*)。Bond 等人的研究发现^[28] 硫还原土杆

菌(*G. sulfurreducens*)可以只用电极做电子受体而完全氧化电子供体,在无氧化还原物的情况下,它可以定量转移电子给电极,这种电子传递归功于吸附在电极上的大量细胞。(2)希瓦氏菌(*Shewanella*),由于其呼吸类型的多样性而得到广泛研究。Kim首次发现了腐败希瓦氏菌(*S. putrefaciens*)在无需氧化还原介质条件下,能够氧化乳酸盐产生电,从而可以设计出无介质的高性能微生物燃料电池^[30]。(3)红育菌(*Rhodospirillum rubrum*),铁还原红育菌(*R. ferrireducens*)是一种还原铁微生物,能代谢糖类转化为电能,它无需催化剂就可将电子直接转移到电极上^[29-31]。(4)其它产电微生物,*Desulfobulbaceae*也是一类重要的产电微生物,细菌能够利用电极作为唯一电子受体氧化 S^0 成为 SO_4^{2-} ,其中研究最多的是*Desulfobulbus propionicus*。其它的如大肠杆菌(*Escherichia coli*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)及变形细菌(*Proteus*)等必须依赖氧化还原中间体才能把从有机物氧化过程中产生的电子传递到电极^[24]。

除产氢微生物外,电解协助生物电催化产氢最为关键的就是在阳极表面形成菌群结构稳定的适应外源电场的电化学活跃微生物膜。Chae比较了以乙酸为底物时,微生物燃料电池和电解协助发酵产氢阳极表面的微生物菌群结构特征。结果表明,电解协助发酵产氢阳极表面的微生物多样性明显下降^[23],尤其显著是 δ -*Proteobacteria*从原来的34.1%提高到了72.0%,其中有56%的 δ -*Proteobacteria*是*Pelobacter*,16%是*Geobacter*。*Geobacter*是微生物燃料电池中重要的电化学活跃微生物,同样在电解协助发酵产氢中也发挥着重要的作用。其它电化学活跃微生物在电解协助发酵产氢阳极表面的菌群分布情况,尚未见报道。

3.2 电子传递机制

电化学活跃微生物在电极表面与电极之间建立的呼吸称之为电极呼吸。从电子传递来看,实际上是以电极为唯一电子受体的呼吸产能过程,这一过程被认为是一种新的微生物呼吸方式^[24,32]。在阳极表面的电化学活跃微生物能氧化有机底物,氧化过程中产生的电子在电子传递载体的作用下,以间接或直接的方式传递到电极上,再经电子线路传递到阴极。证据表明,一系列的细胞色素C蛋白在电子传递中发挥电子传递载体的作用^[33]。这些C型细胞色素可能分布在菌体的内膜、外膜和周质空间。微生物可以依靠其膜上的脱氢酶直接氧化小分子的有机酸,例如甲酸盐、乙酸盐、乳酸盐等,释放电子和

质子,其中的电子传递给膜上的电子载体,质子则另有途径输出胞外。另外电化学活跃微生物还可以氧化糖类有机物生成还原力($NADH$, $FADH_2$),这些还原力与脱氢酶作用释放电子到电子传递载体,通过电子传递链的传递,电子再由膜内传递到膜外电子受体处^[24]。

在电子传递过程中,电子从菌体的外膜传递到电极是产电的关键一步,与电化学活跃微生物的电极呼吸直接相关联。研究表明,*G. sulfurreducens*的外膜C型细胞色素OmcS和OmcE参与了外膜电子传递^[33]。在微生物燃料电池阳极膜上,外膜C型细胞色素的基因表达是相当高的,当敲除这一基因,便抑制了电流的产生,恢复突变后又恢复了产电功能^[33-34]。除外膜C型细胞色素外,细菌的一种特殊的菌毛也在电子传递中起重要作用^[35]。这种菌毛叫做纳米电线(Nanowire),它能与固体铁氧化物直接接触,把电子从菌体传递给 $Fe(III)$ 。目前在土杆菌、希瓦氏菌等多种菌株中发现了这种具有电子传输功能的纳米电线,推测纳米电线在微生物中是广泛存在的现象。另外,如铁或锰氧化物及腐殖质等电子传递的天然受体也在电子传递发挥了作用。现在还没有证据表明微生物传递电子到电极上是一个自然现象,但鉴于希瓦氏菌(*S. oneidensis*)MR21和土杆菌(*G. sulfurreducens*)都是典型的异化铁或锰还原菌,它们能以高价重金属为唯一电子受体获得能量这一事实,我们可以推测电化学活跃微生物传递电子到电极上的能力与他们把电子传递到这些天然受体的机制密切相关。

电化学活跃微生物的电极呼吸方式不是与其生存直接相关的自然选择的动力,只是厌氧呼吸过程的延伸,因此在自然条件下是比较弱的。我们推测电解协助发酵产氢正是借助产电微生物的这一呼吸方式,外加一定的电解电压,增强这一特殊的呼吸方式,促进产电微生物在电极上生长,并与发酵产氢联系在一起,克服发酵产氢的热力学限制。

4 电解协助发酵产氢的意义

4.1 提高发酵产氢的能源转化率,有望实现生物质高效产氢

目前发酵产氢的能源转化率相对较低,常规发酵产氢的产氢效率通常在 $2.0 \text{ mol H}_2/\text{mol}$ 葡萄糖。为提高转化率,开展了高效产氢菌的选育、高效产氢活性污泥的富集驯化、以及针对产氢菌产氢代谢特征和相关酶的研究成果。通过添加一些微量元素和

微量元素等促进剂,促进产氢菌的产氢能力。任南琪等分离得到 *Ethanoligens* sp. B49 产氢菌株,单菌的产氢率达到 $2.34 \text{ mol H}_2/\text{mol}$ 葡萄糖^[36],Nath 报道 *Enterobacter cloacae* DM11 的产氢率已达 $3.31 \text{ mol H}_2/\text{mol}$ 葡萄糖^[37]。虽然氢转化率有所提高,但是仍然无法突破 $4 \text{ mol H}_2/\text{mol}$ 葡萄糖的极限,而电解协助产氢却不受此极限的限制。根据 Liu 的研究结果,电解库伦效率为 78%,而电子转化为氢气的回收率为 92%,相当于乙酸的产氢效率为 $2.9 \text{ mol H}_2/\text{mol}$ 乙酸,每立方米氢气的能耗相当于 0.6 kwh,这一结果远远低于电解水产氢的能耗 $4.5 \sim 5 \text{ kwh}$ 。同时 Liu 还估算,如果以葡萄糖为底物,电解协助产生的氢气加上发酵细菌产生的氢气,产氢效率可达 $8 \sim 9 \text{ mol H}_2/\text{mol}$ 葡萄糖。因此电解协助发酵产氢将极大地提高发酵产氢的能源转化率,为实现生物质高效产氢另辟新径。

4.2 克服发酵产氢过程中代谢产物的反馈抑制,有望实现生物质稳定持续产氢

前面提到的发酵产氢代谢产物的反馈抑制影响,就传统发酵产氢过程来说,由于受热力学因素的限制,本身是无法消除的。因此代谢产物的反馈抑制是制约实现发酵产氢稳定持续产氢的最关键的因素。为实现稳定持续产氢,目前已开发了新型产氢反应器,并开展了发酵产氢工艺技术的研究。采用连续发酵技术,通过优化工艺参数来控制有机酸的浓度或者弱化有机酸对产氢的负面影响,使发酵产氢能相对平稳的进行。然电解协助发酵产氢却不同,通过外加电场的协助,充分发挥产氢活性污泥中电化学活跃微生物在电极表面对底物降解的特性,从根本上消除挥发性有机酸的积累对发酵产氢的影响,并进一步转化为氢气。不仅极大地提高了氢转化率,同时克服了发酵产氢过程的热力学因素的限制。

5 结语

电解协助发酵产氢作为一门刚刚出现的新技术,克服了产氢的发酵障碍,极大地提高了氢转化率,目前仅有美国、荷兰和韩国正在进行这方面的研究,有许多技术有待发掘。从反应器设计来看,目前国外通常采用的是改装了的微生物燃料电池,尚未充分考虑发酵产氢反应器的特点。若能把发酵产氢反应器和电解池有效的结合为一体,将有助于改善产氢效率。从微生物角度来看,该产氢技术与电极

表面的产电微生物存在着密切的关系,对该类微生物的研究,将有助于生物电化学学科的发展和完善。从底物原料来看,目前主要是乙酸等有机挥发酸,理论上,许多有机化合物都能电极表面彻底降解,一旦各种生物质原料产氢技术、工艺和参数研究成熟,该技术将有可能率先应用于有机污水和有机废弃物处理、以及其它原料的氢能转化。

参考文献

- [1] Ni M, Leung DYC, Leung MKH, et al. An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(5): 461 - 472.
- [2] Levin DB, Pitt L, Love M. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, 29(2): 173 - 185.
- [3] Hallenbeck PC. Fundamentals of the fermentative production of hydrogen. *Water Science & Technology*, 2005, 52(1 - 2): 21 - 29.
- [4] Turner JA. Sustainable hydrogen production. *Science*, 2004, 305(5686): 972 - 974.
- [5] Liu H, Grot S, Logan BE. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 4317 - 4320.
- [6] Oh S, Logan BE. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Research*, 2005, 39(19): 4673 - 4682.
- [7] Benemann JR. Hydrogen biotechnology: Progress and prospects. *Nature Biotechnology*, 1996, 14(9): 1101 - 1103.
- [8] Barbosa MJ, Rocha JM, Tramper J, et al. Acetate as a carbon source for hydrogen production by photosynthetic bacteria. *Journal of Biotechnology*, 2001, 85(1): 25 - 33.
- [9] Oh YK, Seol EH, Kim M-SM-S, et al. Photoproduction of hydrogen from acetate by a chemoheterotrophic bacterium *Rhodospseudomonas palustris* P4. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004, 29(11): 1115 - 1121.
- [10] Lee CM, Chen PC, Wang CC, et al. Photohydrogen production using purple nonsulfur bacteria with hydrogen fermentation reactor effluent. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27(11 - 12): 1309 - 1313.
- [11] Melis A, Melnicki MR. Integrated biological hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(11): 1563 - 1573.
- [12] Hallenbeck PC, Benemann JR. Biological hydrogen production: fundamentals and limiting processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27(11 -

- [13] 李建昌, 刘士清, 张无敌, 等. 发酵产氢面临的问题及对策. 可再生能源(*Renewable Energy Resources*), 2006, (4): 50 – 53.
- [14] 马欢, 李建昌, 刘士清, 等. 乙酸对发酵产氢过程的抑制影响. 可再生能源(*Renewable Energy Resources*), 2005, (4): 23 – 25.
- [15] Li JC, Liu L, Zhang WD. Anaerobic fermentation for hydrogen production from 11 organic acids. *Scientific Research Monthly*, 2008, 7(5): 34 – 37, 43.
- [16] Das D, Veziroglu TN. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, 26(1): 13 – 28.
- [17] Ren NQ, Li YF, Wang AJ, et al. Hydrogen production by fermentation: review of a new approach to environmentally safe energy production. *Aquat Ecosystem Health Manage*, 2006, 9(1): 39 – 42.
- [18] Kapdan IK, Kargi F. Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, 38(5): 569 – 582.
- [19] Cheng S, Logan BE. Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis. *PNAS*, 2007, 104(47): 18871 – 18873.
- [20] Ditziga J, Liu H, Logan BE. Production of hydrogen from domestic wastewater using a bioelectrochemically assisted microbial reactor (BEAMR). *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32: 2296 – 2304.
- [21] Rozendal RA, Hamelers HVM, Euverink GJW, et al. Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(12): 1632 – 1640.
- [22] Rozendal RA, Hamelers HV, Molenkamp RJ, et al. Performance of single chamber biocatalyzed electrolysis with different types of ion exchange membranes. *Water Research*, 2007, 41(9): 1984 – 1994.
- [23] Chae K J, Choi M J, Lee J, et al. Biohydrogen production via biocatalyzed electrolysis in acetate-fed bioelectrochemical cells and microbial community analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(19): 5184 – 5192.
- [24] 洪义国, 郭俊, 孙国萍. 产电微生物及微生物燃料电池最新研究进展. 微生物学报(*Acta Microbiologica Sinica*), 2007, 41(1): 173 – 177.
- [25] Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, et al. Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Applied and Environment Microbiology*, 2004, 70: 5373 – 5382.
- [26] Rabaey K, Rodriguez J, Blackall LL, et al. Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities. *ISME Journal*, 2007, 1(1): 9 – 18.
- [27] Bond DR, Holmes DE, Tender LM, et al. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. *Science*, 2002, 295(5554): 483 – 485.
- [28] Bond DR, Lovley DR. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Applied and Environment Microbiology*, 2003, 69: 1548 – 1555.
- [29] Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(10): 1229 – 1232.
- [30] Kim HJ, Park HS, Hyun MS, et al. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme and Microbial Technology*, 2002, 30(2): 145 – 152.
- [31] 连静, 冯雅丽, 李浩然, 等. 微生物燃料电池的研究进展. 过程工程学报(*Chinese Journal of Process Engineering*), 2006, 6(2): 334 – 338.
- [32] Gregory KB, Bond DR, Lovley DR. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environmental Microbiology*, 2004, 6: 596 – 604.
- [33] Holmes DE, Chaudhuri SK, Nevin KP, et al. Microarray and genetic analysis of electron transfer to electrodes in *Geobacter sulfurreducens*. *Environmental Microbiology*, 2006, 8(10): 1805 – 1815.
- [34] Mehta T, Coppi MV, Childers SE, et al. Outer membrane c-type cytochromes required for Fe(III) and Mn(IV) oxide reduction in *Geobacter sulfurreducens*. *Applied and Environment Microbiology*, 2005, 71: 8634 – 8641.
- [35] Reguera G, McCarthy KD, Mehta T, et al. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature*, 2005, 435: 1098 – 1101.
- [36] 宋丽, 刘晓风, 袁月祥, 等. 厌氧发酵产氢微生物的研究进展. 生物工程学报(*Chinese Journal of Biotechnology*), 2008, 24(6): 933 – 939.
- [37] Nath K, Kumar A, Das K D. Effect of some environmental parameters on fermentative hydrogen production by *Enterobacter cloacae* DM11. *Canadian Journal of Microbiology*, 2006, 52(6): 525 – 532.

Electrochemically active microorganisms and electrolytically assisted fermentative hydrogen production-A review

Jianchang Li^{*}, Wudi Zhang, Fang Yin, Rui Xu, Yubao Chen

(Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, in Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: Fermentative hydrogen production can be improved by electrolysis and electrochemically active microorganisms which are capable of using an electrode as an electron acceptor for the oxidation of organic matter, in particular, volatile acids produced after fermentation. Firstly volatile acids can be completely converted into CO₂, electrons and protons on the surface of anode. Then the electrons flow to cathode through anode and wires, and at the same time the protons move to cathode through cation membrane between anode chamber and cathode chamber. Finally the electrons and the protons combine into hydrogen when they meet at the surface of cathode. In such a process, the fermentation barrier and the product inhibition can be avoided to improve the conversion of hydrogen. 8–9 mol H₂/mol glucose of hydrogen potential can be obtained when glucose is used as substrate. This technology is very likely to be applied to produce hydrogen high efficiently from any energy crops, organic waste and wastewater.

Keywords: fermentative hydrogen production; electrolysis; electrochemically active microorganism; electrode respiration

(本文责编:王晋芳)

Supported by the Foundation of the Key Laboratory of Advanced Technique and Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, in Yunnan Normal University(KJ2008002), and the Training Program of Science & Technology Personnel Reserve of Yunnan Province(2005py01-16)

* Corresponding author. +86-871-5517126; E-mail: jclec94213@yahoo.com.cn

Received: 6 December 2008/ Revised: 25 February 2009

《微生物学报》对摘要的写作要求

1. 研究报告摘要:基本要素包括研究目的、方法、结果和结论,并要求在文中给出“【目的】、【方法】、【结果】和【结论】”等字样。具体地讲就是研究工作的主要对象和范围,采用的手段和方法,得出的结果和重要结论。在结果和讨论中应写明本文的创新之处。
2. 综述摘要:包括论述内容的发展水平、自己的评论及展望。
3. 英文摘要的撰写要点:英文摘要的内容应与中文摘要一致,但比中文摘要更详尽。要求在文中按照[Objective]、[Methods]、[Results]、[Conclusion]顺序分项撰写。英文摘要完成后,务必请英文较好且专业知识强的专家审阅定稿后再返回编辑部。凡不符合要求的,即使学术上可以达到刊出的水平,本刊也将推迟发表。
 - (1)在英语摘要中,不要使用任何汉字字符,包括标点、括号、温度、希腊字母等。
 - (2)建议使用第一人称,以此可区分研究结果是引用文献的还是作者的。
 - (3)建议用主动语态,被动语态表达拖拉模糊,尽量不用,这样可以免好多长句,以求简单清晰。
 - (4)摘要应当使用过去时态,语法正确,句子通顺。
 - (5)摘要中不用缩写语,除非是人人皆知的,如:DNA、ATP等。
 - (6)句子的开头处最好不要使用数字。