

## 矩形微生物燃料电池性能的分析

张培远 刘中良\*

(北京工业大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室及传热与能源利用北京市重点实验室 北京 100124)

**摘要:** 测试阳极液和阴极液的 pH 值和电导率的变化情况, 分析微生物燃料电池(MFC)的产电过程和能量利用情况, 为改善 MFC 的性能提供理论依据。试验结果表明: 随着 MFC 的运行, 阳极液的 pH 值和电导率呈现下降的趋势, 阴极液的 pH 值和电导率呈现上升的趋势, 阴极液的 pH 值比阳极液的 pH 值大约高 0.30–0.50, 阳极液和阴极液的平均电导率变化不大。MFC 稳定运行时, 欧姆内阻为 29.69  $\Omega$ , 极限电流为 2.69 mA, 最大输出功率约为 0.8 mW, 对应的内阻约为 95.72  $\Omega$ 。铁氰化钾的质量传输是极限电流的限制性因素。能量分析发现, MFC 阳极液中 91.1% 的葡萄糖被其他微生物消耗, 仅有 8.9% 的葡萄糖用来发电; 而用来发电的葡萄糖的 88.5% 的能量转化为其他形式的能量, 仅有 11.5% 的能量转化为电能。

**关键词:** pH 值, 电导率, 产电过程, 能量利用, 质量传输

## Analysis on a rectangular microbial fuel cell performance

ZHANG Pei-Yuan LIU Zhong-Liang\*

(The Education Ministry Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The pH and ionic conductivity change of the anode and cathode solution was tested, and producing electricity process and energy utilization were analyzed to provide a theoretical basis for improving the MFC performance in this paper. Experimental results show as follows: The pH and ionic conductivity of the anode solution decreased, while that of the cathode solution increased with the MFC operation, and the latter was higher than the former by about 0.30–0.50 unit finally, while the average ionic conductivity of which changed slightly. When the MFC operated stably, the ohmic resistance was 29.69  $\Omega$ , the limiting current was 2.69 mA and the maximum power output was about 0.8 mW corresponding to the internal resistance of about 95.72  $\Omega$ . The mass transfer of potassium ferricyanide was the limiting factor of the limiting current. According to energy analysis, glucose of 91.1% in the anode solution was consumed by other microorganisms, and only glucose of 8.9% was used to generate electricity. Furthermore, the energy of 88.5% in the latter was converted into other forms, and only 11.5% of

基金项目: 北京市重点学科(No. 0050005312902)

\* 通讯作者: Tel: 86-10-67391917; 信箱: liuzhl@bjut.edu.cn

收稿日期: 2011-01-28; 接受日期: 2011-03-02

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

which was converted into electricity.

**Keywords:** pH, Ionic conductivity, Producing electricity process, Energy utilization, Mass transfer

目前, 解决日趋严重的环境污染问题和探索新能源是实现可持续发展和循环经济的根本。微生物燃料电池(Microbial fuel cell, 简称MFC)是将解决环境污染问题与生产新能源有机接合起来的新技术之一。它是利用微生物作为生物催化剂将污染环境的有机物质转化为电能的装置, 可利用各种污水为原料并能产生洁净能源, 具有燃料来源多样化、无污染、能源利用效率高、操作条件温和、生物相容性强、安全、高效、连续等优点。其鲜明的特点和多功能特性已引起了人们广泛的关注, 具有在微生物传感器、生物修复、污水处理等方面广泛应用的前景。

微生物燃料电池通常由阳极室、阴极室和质子交换膜构成。阳极室中的底物在微生物的催化作用下被氧化, 产生的电子通过位于细胞外膜的电子载体(比如细胞色素)传递到阳极, 再经过外电路到达阴极, 质子通过质子交换膜到达阴极。电子受体在阴极电极表面与质子和电子反应生成水。质子的传输过程与溶液的 pH 值相关。Gil 等对阳极液的 pH 值进行了实验研究, 发现 pH 为 7.00–8.00 时电流最大, 这与微生物在不同 pH 值时的活性有关。但总体来讲, 阳极室溶液 pH 值对电池电流的影响不大, 差异在 10%以内; 同时, Gil 等发现如果加入缓冲液, 阳极溶液和阴极溶液的 pH 值变化小, 反之, 变化很大<sup>[1]</sup>。Zhao 等对阴极液的 pH 值进行了实验研究, 发现当阴极室溶液的 pH 值从 2.40 升高至 9.40 时, 阴极电势和电能输出显著降低, 原因是氧气的还原反应速率常数受 pH 值影响<sup>[2]</sup>。Liu 等研究发现 MFC 的内阻主要取决于电极间电解液的阻力及质子交换膜的阻力。可以通过缩短电极间的距离、增加离子浓度达到降低内阻、优化 MFC 性能的目的<sup>[3]</sup>。哈尔滨工业大学的李贺发现当向阳极溶液投加 0.3 mol/L 氯化钠时, 电压升高 20 mV, 库仑效率提高了 1.2 倍<sup>[4]</sup>。电导率是一个与离子强度相关的重要参数, 有很多文献提到了电导率, 但是对 MFC 稳定运行时阳极液和阴极液电导率变化情况还没有有详

细研究。北京大学的鲁娜把 MFC 的产电过程分为 3 个阶段, 但是没有对其进行详细分析<sup>[5]</sup>。本文主要通过试验研究, 详细分析了 MFC 运行时阳极液和阴极液 pH 值和电导率的变化规律; 另外, 还对 MFC 的产电过程和能量利用情况进行了分析和计算, 为改善 MFC 的性能提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 MFC 的构型

微生物燃料电池系统如图 1 所示, 本矩形微生物燃料电池是双室系统, 阴极室和阳极室采用同样的矩型结构, 有效容积均为 1 300 mL, 并用质子交换膜(Nafion117)隔开, 尺寸为 50 mm×50 mm。阳极室瓶盖有 3 个直径为 6 mm 的小孔, 分别用来取样、曝氮和固定电极; 阴极室瓶盖也有 3 个小孔, 分别用作取样、气孔和固定电极。阴极电极和阳极电极都采用石墨毡, 有效面积为 100 cm<sup>2</sup>。外电路负载是 ZX36 电阻箱(量程: 0–9 999 Ω; 精度: 1 Ω), 输出电压由 UT70D 数字万用表(中国, 量程: 0–800 mV; 精度: 0.1 mV)来记录, 自动存储到个人计算机。

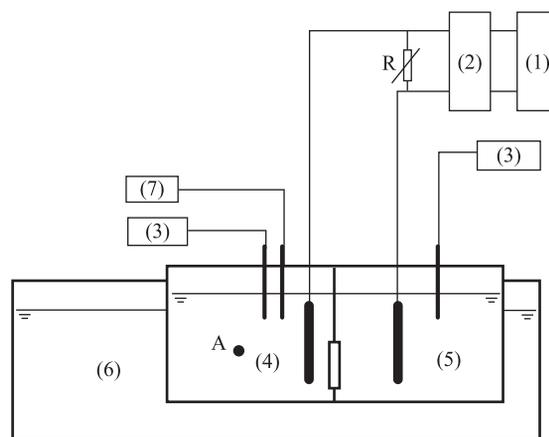


图 1 微生物燃料电池系统示意图

**Fig. 1 Schematic diagram of the microbial fuel cell**

Note: (1): Computer; (2): Digital multimeter; (3): Multi-parameter instrument; (4): Anode chamber; (5): Cathode chamber; (6): Temperature-controlled chamber; (7): COD testor.

## 1.2 MFC 的接种与运行

接种污泥来自北京市高碑店污水处理厂, 采用预挂膜阳极电极, 但没有使用阳极液进行驯化培养。阳极溶液和阴极溶液的溶剂均采用杀菌后的去离子水。阳极溶液成分<sup>[6]</sup>为: 葡萄糖 0.91、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  6.81、 $\text{NaOH}$  1.17 g/L 和其他微量元素 20 mL; 阴极溶液成分为:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  6.81 g/L 和  $\text{NaOH}$  1.17 g/L。使用 1 000 mg/L 铁氰化钾  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$  作为电子受体。微生物燃料电池运行前在阳极溶液中通入氮气, 除去溶液中的氧气; 运行时加强阳极室的密封, 维持阳极室的厌氧环境。微生物燃料电池放在恒温水槽中, 温度恒定为 35 °C。环境温度在 13 °C–18 °C 之间变化, 相对湿度在 10%–30% 之间变化。运行时, 负载外电阻保持在 100  $\Omega$  不变, 只有测试电压随电流变化时, 负载外电阻才变化。采用间歇式加料方式, 连续运行 3 周, 观察微生物燃料电池的运行参数。

## 1.3 数据测量与计算

使用 UT70D 数字万用表(中国, 量程: 0–800 mV; 精度: 0.1 mV)测量输出电压; 使用 Rotronic K15 温湿度传感仪(瑞典, 量程: 0–100 °C、0–100%; 精度: 0.1 °C、0.1%)测量环境温度; 使用 Multi340 多参数水质测定仪(德国, 量程: 0–199.9 mS/cm、–2.000–19.999 pH; 精度: 0.1 mS/cm、 $\pm 0.01$  pH)测量溶液电导率和 pH 值; 使用 5B-3C 型 COD 速测仪(中国, 量程: 5–5 000 mg/L; 精度:  $\pm 5\%$ )测量阳极液 COD(图 1, A 点)。

使用公式 1-1 计算电流; 使用公式 1-2 计算输出功率; 使用公式 1-3 计算内阻; 使用公式 1-4 计算库仑效率; 使用公式 1-5 计算 COD 去除率。

$$I = U/R_o \quad (1-1)$$

$$P = UI \quad (1-2)$$

$$R_i = (E/U - 1)R_o \quad (1-3)$$

$$\varepsilon_{\text{Cb}} = \frac{M \int_0^{t_b} Idt}{Fb\Delta m} \quad (1-4)$$

$$\varepsilon_{\text{COD}} = \frac{\Delta \text{COD}}{\text{COD}} \quad (1-5)$$

式中,  $I$  是电流, mA;  $U$  是输出电压, mV;  $P$  是

输出功率, mW;  $R_i$  是内阻,  $\Omega$ ;  $R_o$  是外阻,  $\Omega$ ;  $M$  是葡萄糖的摩尔质量, 180 g/mol;  $F$  是法拉第常量, 96 485 C/mol;  $b$  是每摩尔葡萄糖的得失电子数, 24 mol/mol;  $\Delta m$  是葡萄糖随时间  $t_b$  的变化量, g。

## 2 结果与分析

### 2.1 pH 值的变化

MFC 接种运行后每天测试一次阳极液和阴极液的 pH 值, 直到 MFC 停止运行。试验发现阳极液的 pH 值很快从 6.89 下降到 6.43, 接着又上升到 6.60 左右。MFC 运行时, 阳极液的 pH 值维持在 6.50 左右(图 2)。阳极溶液 pH 值的降低可能是以下 2 个原因造成的: (1) 生成物  $\text{CO}_2$  溶于阳极溶液生成碳酸, 导致阳极液 pH 值下降, 而  $\text{CO}_2$  的溶解度是有限的, 所以后来的变化程度就不大了。(2) 厌氧微生物产沼气时分为产酸阶段和产甲烷阶段。也很有可能是微生物产酸造成的。微生物消耗底物产生了大量的  $\text{H}^+$ , 同时 MFC 在产电过程中消耗  $\text{H}^+$ , 最后两者达到平衡, 使阳极液的 pH 值维持在 6.50 左右; 阴极液的 pH 值变化不大, 呈现轻微的上升趋势, 从运行时的 6.92 上升到 7.05。原因可能是从质子交换膜迁移到阴极液中的  $\text{H}^+$  和 MFC 在产电过程中消耗的  $\text{H}^+$  基本相当, 同时阴极液在高温下减少了一部分, 使 pH 值有所上升(图 2)。MFC 运行的过程中, 阴极液的 pH 值比阳极液的 pH 值大约高 0.30–0.50。

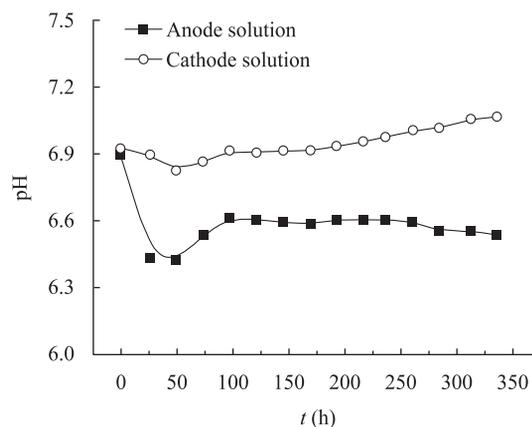


图 2 pH 值随时间的变化

Fig. 2 The change of the pH value over the time

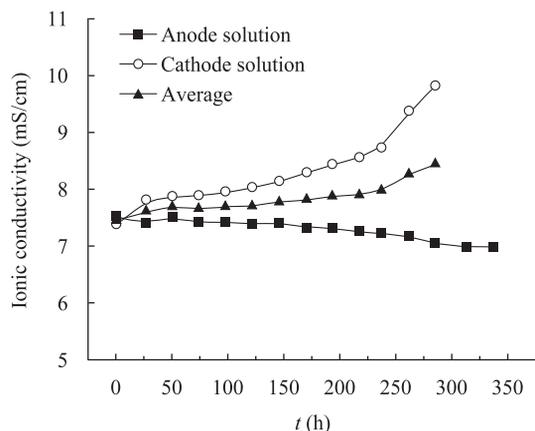


图3 电导率随时间的变化

Fig. 3 The change of the conductivity over the time

## 2.2 电导率的变化

MFC 接种运行后每天测试一次阳极液和阴极液的电导率,直到 MFC 停止运行。试验发现随着 MFC 的运行,阳极液的电导率呈现下降的趋势,从运行时的 7.51 mS/cm 下降到 6.97 mS/cm;而阴极液的电导率呈现上升的趋势,从运行时的 7.37 mS/cm 上升到 10.10 mS/cm;阴极液和阳极液电导率的平均值变化不大,从运行时的 7.44 mS/cm 上升到 8.53 mS/cm (图 3)。原因可能是阳极液中的离子透过质子交换膜进入到阴极液,从而使阳极液的电导率下降,阴极液的电导率上升;同时阴极液在高温下减少了一部分,使阳极液和阴极液的平均电导率呈现轻微的上升趋势。MFC 稳定运行时的平均电导率为 7.77 mS/cm。欧姆内阻可以通过如下公式来计算<sup>[7]</sup>:

$$R_{\text{ohmic}} = \frac{L}{A\sigma} \quad (2-1)$$

式中,  $A$  是横截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $\sigma$  是溶液的电导率  $\text{S/cm}$ ;  $L$  是传输距离,  $\text{cm}$ 。

横截面积为  $25 \text{ cm}^2$ 、传输距离为  $7 \text{ cm}$  时,根据以上公式可以得到欧姆内阻为  $36.04 \Omega$ 。

## 2.3 产电过程分析

MFC 接种运行后,接入  $100 \Omega$  的外阻,使用万用表记录输出电压;每 2 天测试一次阳极液的  $COD$ ,得出如图 4 所示的曲线。可以看出 MFC 的产电过程分为 3 个阶段:第 1 个阶段为初始期,由于接种微生物没有进行驯化培养,微生物对阳极液的环境不适应,产电很小,所以输出电压很低。随着 MFC 的运行,微生物经过了驯化培养对阳极液逐渐适应,同时微生物的数量也极大增加,输出电压很快增大。第 2 个阶段是中间期,输出电压增加到一定程度又开始下降。当再次向阴极液中加入  $1 \text{ g}$  铁氰化钾时,输出电压有急剧上升,这说明电子受体的质量传输限制了输出电压。理论分析也能得到相同的结果(表 1):产生  $1 \text{ A}$  的电流,葡萄糖的质量流量为  $7.77 \times 10^{-5} \text{ g/s}$ ,铁氰化钾的质量流量为  $3.41 \times 10^{-3} \text{ g/s}$ 。铁氰化钾的消耗量是葡萄糖消耗量的 43.9 倍。所以铁氰化钾的消耗是极快的。同时,铁氰化钾在水中的扩散系数是葡萄糖的 20.1 倍,所以在 MFC 运行时,铁氰化钾的质量传输并不一定是输出电压的限制性因素。第 3 个阶段是后期,输出电压渐渐降低,当再次向阴极加入  $1 \text{ g}$  铁氰化钾时,输出电压继续降低(图中没有显示)。从图 4 可以看出,阳极液的  $COD$  已经降至  $150 \text{ mg/L}$  以下,这说明底物的质量传输成了输出电压的限制性因素。

表 1 底物和电子受体的物性参数<sup>[8-10]</sup>Table 1 The physical parameter of the substrate and the electron acceptor<sup>[8-10]</sup>

反应物 Reactant	化学式 Molecular formula	分子量 Mol. wt (g/mol)	溶解度 Solubility (g/m <sup>3</sup> )	扩散系数 Diffusion coefficient (m <sup>2</sup> /s)	价电数 e (mol/mol)
Glucose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	180	$1.1 \times 10^6$	$0.69 \times 10^{-9}$	24
Sodium acetate	CH <sub>3</sub> COONa	82	$3.3 \times 10^6$	$1.26 \times 10^{-9}$	8
Oxygen	O <sub>2</sub>	32	8.4	$0.24 \times 10^{-8}$	4
Potassium ferricyanide	K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	329	$3.6 \times 10^5$	$1.39 \times 10^{-8}$	1
Potassium permanganate	KMnO <sub>4</sub>	158	$6.38 \times 10^4$	NA	3

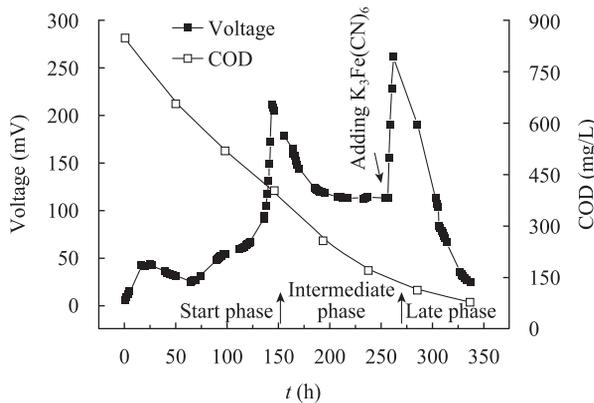


图4 输出电压和COD随时间的变化

Fig. 4 The change of the external voltage and the COD over the time

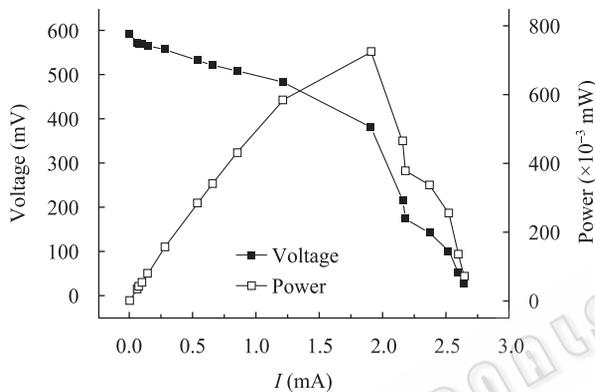


图5 输出电压和输出功率随电流的变化

Fig. 5 The change of the external voltage and the power output with the current

## 2.4 伏安曲线

当MFC运行稳定以后,改变外阻的大小(9999–10 Ω),得到伏安曲线(图5)。采用简单的一维模型<sup>[7]</sup>对其进行拟合得到关系式 2-2:

$$V = 591.45 - 29.55 - 9.12I - 29.69 \ln I - 99.56 \ln \frac{2.69}{2.69 - I} \quad (2-2)$$

可以看出,欧姆内阻为 29.69 Ω,极限电流为 2.69 mA;最大输出功率约为 0.8 mW,对应的内阻约为 95.72 Ω。这些数据说明对于单纯依靠扩散来实现底物和电子受体的质量传输的MFC来说,浓差损耗造成的内阻增加很大。若想提高输出功率,必须提高极限电流,也就是改善底物和电子受体的质量传输。可以采取的措施有以下几种:(1)使用对流

传质来代替扩散传质,这样做可能会有副作用,文献中还没有见到详细的研究;(2)采用单位质量产生电子数目多、扩散系数大的底物和电子受体;(3)优化电极和MFC的构型。

## 2.5 能量分析

MFC接种运行时阳极液COD为848.6 mg/L,发电结束时阳极液中残存的COD为76.58 mg/L,COD去除率约为91%(图4)。反应开始时,阳极液含有1.18 g葡萄糖,所以MFC消耗的葡萄糖总量为1.07 g。根据电荷守恒(图6)可以算出库仑效率为8.9%,所以用来发电的葡萄糖为0.095 g。1 g葡萄糖可提供的能量为16.73 kJ(4 kcal),0.095 g葡萄糖最大的发电量为1589.92 J。对功率进行积分(图6)可以算出MFC所做的电功为182.28 J,MFC的产电能量利用率仅为11.5%。通过以上计算可以看出:MFC阳极液中91.1%的葡萄糖被其他微生物消耗,仅有8.9%的葡萄糖用来发电;用来发电的葡萄糖的88.5%的能量转化为其他形式的能量,仅有11.5%的能量转化为电能。提高MFC中葡萄糖能量利用率的措施有:(1)加快阳极电极的挂膜过程,减小悬浮微生物对底物的消耗,增加产电微生物对底物的利用率;(2)减小MFC的活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗,提高MFC的产电能量利用率;(3)提高MFC运行时的电流,使MFC处在高输出功率的状态下。

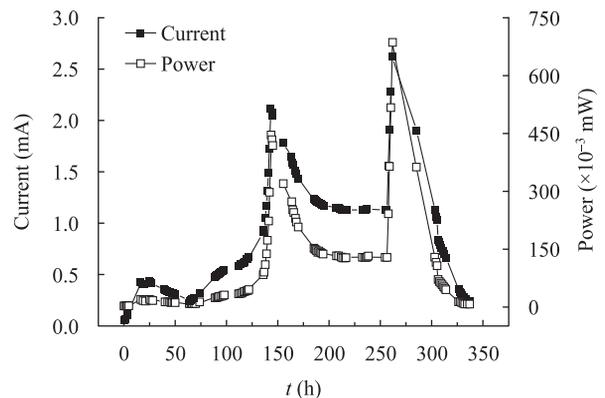


图6 电流和输出功率随时间的变化

Fig. 6 The change of the current and the power output over the time

### 3 讨论

#### 3.1 电子受体和底物的传输分析

MFC 通常采用乙酸钠和葡萄糖作为底物, 试验结果发现葡萄糖作为底物时, MFC 的性能更好一些<sup>[11]</sup>。从质量流量的角度来看, 产生相同的电流, 乙酸钠的质量流量是葡萄糖的 1.37 倍, 葡萄糖消耗量要小一些; 从质量传输角度来看, 乙酸钠的扩散系数是葡萄糖的 1.83 倍, 乙酸钠传输得更快一些; 从溶解度的角度来看, 乙酸钠的溶解度是葡萄糖的 3 倍, 乙酸钠可以形成更大的浓差梯度(表 1)。现有文献都以同样的质量浓度为基准来做比较, 在相同质量浓度下, 葡萄糖溶液的 COD 值明显高于乙酸钠溶液; 另外, 葡萄糖属于最易降解的底物, 易于被微生物消耗。然而, 不同微生物对底物的偏好不同, 实际上多数产电微生物更偏好乙酸、乳酸等作为电子供体。估计葡萄糖的碳链长, 而乙酸、乳酸的碳链短, 所以多数产电微生物更偏爱后者。微生物对葡萄糖的降解可能是先把葡萄糖降解为酸, 然后再进一步降解为  $\text{CO}_2$ 。葡萄糖作为底物是否优于乙酸钠还需要进一步验证。

当前使用最多的电子受体包括氧气、铁氰化钾和高锰酸钾。试验发现铁氰化钾和高锰酸钾做电子受体时, MFC 的性能更好一些。从质量流量的角度来看, 产生相同的电流, 铁氰化钾的质量流量是氧气的 41.13 倍, 氧气的消耗量要小得多; 从质量传输角度来看, 铁氰化钾的扩散系数是氧气的 5.79 倍, 铁氰化钾传输得更快一些; 从溶解度的角度来看, 铁氰化钾的溶解度是氧气的  $4.28 \times 10^4$  倍, 铁氰化钾可以形成更大的浓差梯度(表 1)。总体来看, 使用铁氰化钾作为电子受体要比使用氧气更利于质量传输。但是, 铁氰化钾和高锰酸钾只能在实验室使用, 因为它们不可再生, 发电的成本太高。今后研究的方向依然是以氧气作为电子受体。

#### 3.2 电流的限制因素

MFC 的产电过程包括 6 个环节(图 7): (1) 底物在阳极液中的质量传输; (2) 产电微生物在阳极电极表面对底物的分解; (3) 质子透过质子交换膜的质量传输; (4) 电子通过外电路的质量传输; (5) 氧

气在阴极电极表面的还原反应; (6) 电子受体在阴极液中的质量传输。所以影响 MFC 电流的因素有 6 个: (1) 底物的质量传输速率( $V_1$ ); (2) 阳极电化学反应速率( $V_2$ ); (3) 质子的质量传输速率( $V_3$ ); (4) 电子的质量传输速率( $V_4$ ); (5) 阴极电化学反应速率( $V_5$ ); (6) 电子受体的质量传输速率( $V_6$ )。电子的质量传输速率比质子的质量传输速率要快得多。质子的质量传输受浓差驱动力和电荷驱动力共同驱动; 底物的质量传输速率和电子受体的质量传输速率分为扩散传输和对流传输, 当前主要是扩散传输; 阳极电化学反应速率主要受微生物种类和数量的限制; 阴极电化学反应速率受阴极面积的限制。

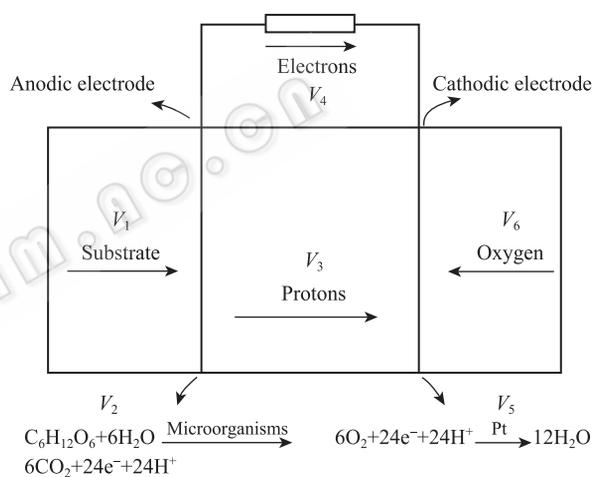


图 7 电流的影响因素示意图

Fig. 7 The schematic diagram of factors affecting the current

#### 3.3 理想的产电过程分析

MFC 理想的产电过程应包括 3 个阶段(图 8): 第 1 个阶段是上升期, 在这个阶段, MFC 的输出电压逐渐增加, 原因是微生物对阳极液需要一段驯化培养期, 阳极电化学反应速率( $V_2$ )是输出电压的限制性因素。随着微生物的驯化培养, 产电微生物的数量逐渐增加,  $V_2$  逐渐增大, 最后输出电压达到最大。第 2 个阶段是稳定期, 由于热力学的限制, MFC 的电压不可能无限制地增加; 又由于微生物数量的限制, MFC 的电流不可能无限制地增加, 所以 MFC 的输出电压会达到最大值, 并稳定一段时间。在这个阶段  $V_2$ 、 $V_3$  或  $V_5$  是输出电压的限制性因素。第 3

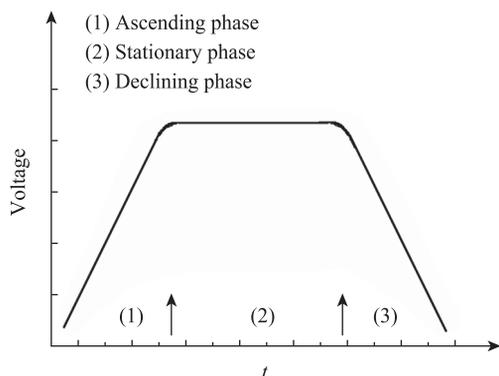


图 8 输出电压随时间变化的理想曲线

Fig. 8 The ideal curve of the external voltage over the time

个阶段是下降期,随着反应的进行,底物和电子受体的浓度逐渐降低, $V_1$ 或 $V_6$ 成为输出电压的限制性因素。输出电压随着底物和电子受体浓度的降低而减小。

#### 4 结论

随着 MFC 的运行,阳极液的 pH 值和电导率呈现下降的趋势,阴极液的 pH 值和电导率呈现上升的趋势,阴极液的 pH 值比阳极液的 pH 值大约高 0.30–0.50,阳极液和阴极液的平均电导率变化不大。MFC 稳定运行时,欧姆内阻为 29.69  $\Omega$ ,极限电流为 2.69 mA,最大输出功率约为 0.8 mW,对应的内阻约为 95.72  $\Omega$ 。铁氰化钾的质量传输是极限电流的限制性因素。MFC 阳极液中的 91.1%的葡萄糖被其他微生物消耗,仅有 8.9%的葡萄糖用来发电;而用来发电的葡萄糖的 88.5%的能量转化为其他形式的能量,仅有 11.5%的能量转化为电能。MFC 理想的产电过程包括 3 个阶段:上升期输出电压的限制性因素是阳极电化学反应速率;稳定期输出电压的限制性因素是阳极电化学反应速率、阴极电化学反应速率或者质子的质量传输速率;下降期输出电压

的限制性因素是底物的质量传输速率或者电子受体的质量传输速率。

#### 参考文献

- [1] Gil GC, Chang IS, Kim BH, et al. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2003, 18(4): 327–334.
- [2] Zhao F, Harnisch F, Schröder U, et al. Challenges and constraints of using oxygen cathodes in microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17): 5193–5199.
- [3] Liu H, Cheng SA, Logan BE. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(14): 5488–5493.
- [4] 李贺. 无媒介体双室微生物燃料电池运行影响因素的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006.
- [5] Lu N, Zhou SG, Zhuang L, et al. Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 43(3): 246–251.
- [6] 顾荷炎. 微生物燃料电池的产电性能及对氯酚废水协同脱氯的研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2007.
- [7] O'Hayre R. 燃料电池基础[M]. 王晓红, 黄宏, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 83–88.
- [8] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, et al. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007: 579–581.
- [9] 夏青, 陈艳卿, 刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 26–28.
- [10] 孙伟, 高瑞芳, 毕瑞锋, 等. 室温离子液体六氟磷酸正丁基吡啶修饰碳糊电极的制备与表征[J]. *分析化学研究简报*, 2007, 35(4): 567–570.
- [11] You SJ, Zhao QL, Jiang JQ. Biological wastewater treatment and simultaneous generating electricity from organic wastewater by microbial fuel cell[J]. *Environ Sci*, 2006, 27(9): 1786–1790.