doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.024

环流型光纤生物膜制氢反应器的底物传输与降解特性

张 川^{1,2} 刘新阳¹ 王 毅² 贺 超² 张全国²

(1. 华北水利水电大学电力学院,郑州 450011; 2. 生物质能源河南省协同创新中心,郑州 450002)

摘要:以连续流产氢为目标,采用高透光性弥散光纤作为导光介质和光合细菌吸附成膜的载体,构造了环流型光纤 生物膜制氢反应器。在实验研究的基础上,根据传质原理和 Monod 生化反应动力学建立了描述连续流反应器中底 物传输和降解的二维数学模型。以强化底物传输和提高底物降解效率为目标,对反应器的实际操作参数进行了优 化。研究结果表明,反应器的底物传输特性对反应器的底物降解效率有显著影响。反应器的底物降解效率随进口 底物质量浓度的增加呈现先增大后减小的趋势。反应器的底物降解效率随流速的增加呈现逐渐减小的趋势。当 反应器的进口底物质量浓度为 10 g/L,流速为 100 mL/h 时,底物消耗速率最大,底物降解效率达到 43.5%。合理 地控制反应器中的底物传输使得生物膜区域具有适合的底物质量浓度分布,是维持反应器较高底物降解效率的有 效途径。

关键词:光生物制氢 生物膜 质量传输 光生化反应 底物降解效率 中图分类号:TK91 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)03-0174-06

Performance of Substrate Transport and Bio-degradation within Annular Optical-fiber-illuminating Biofilm Reactor during Continuous Photo-H₂ Production

Zhang Chuan^{1,2} Liu Xinyang¹ Wang Yi² He Chao² Zhang Quanguo²

(1. Institute of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China
2. Collaborative Innovation Research Center for Bioenergy, Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: An annular optical-fiber-illuminating biofilm reactor (AOFBR) was developed with photosynthetic bacteria (PSB) attached on the surface of side-glowing optical fiber for the formation of biofilm and continuous photo-hydrogen production. To enhance mass transport and improve substrate biodegradation efficiency within AFOBR, a two-dimensional mass transfer model was proposed based on the theory of mass transfer and kinetics of bio-chemical reaction. Results on numerical investigation revealed that characters of mass transfer obviously affected biodegradation within AFOBR. With the increase of inlet substrate concentration, substrate degradation efficiency was increased at early stage but decreased later. While, with the increase of flow rate, substrate bio-degradation efficiency was always decreased. The maximum substrate bio-degradation of 43.5% was available with 10 g/L of inlet substrate concentration and 100 mL/h of flow rate. To regulate mass transfer and maintain appropriate substrate concentration within biofilm was proved to be the effect way to achieve higher substrate degradation efficiency within the bioreactor.

Key words: Photo-biological hydrogen production Biofilm Mass transfer Photo-biological reaction Substrate bio-degradation efficiency

收稿日期:2014-12-08 修回日期:2014-12-30

^{*}国家自然科学基金资助项目(51376056、U1404521、51309099)、国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA051502)、中国博 士后科学基金资助项目(2012M521395)、河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(13B470119)和郑州市科技局科技发展计划资助项 目(130866)

作者简介: 张川,讲师,博士后,主要从事可再生能源中的工程热物理问题研究, E-mail: zhangchuan@ ncwu. edu. cn

通讯作者:张全国,教授,博士生导师,主要从事可再生能源工程研究,E-mail: zquanguo@163.com

175

引言

寻找清洁的可再生替代能源是世界各国应对当 前经济发展严重依赖化石燃料所带来的资源与环境 双重危机的共同选择^[1-2]。氢能燃烧热值高,环境 友好,可以利用多种途径生产,是一种理想的替代能 源^[3-4]。传统的电解水和化学重整等制氢方法,仍 需消耗大量化石燃料,不利于规模化制氢^[5-6]。生 物制氢技术仅需常温、常压的温和条件,操作条件简 单,能耗低,产氢原料丰富,成本低廉,同时伴随废弃 物资源化利用,是发展前景广阔的制氢技术^[7-9]。 光合细菌制氢过程具有不存在氧的抑制作用,能利 用较宽频谱的太阳光目底物理论转化效率高,有机 物降解更彻底等优点,成为独具优势的生物制氢方 式之一[10-11]。实现连续流的光生物制氢是将该项 技术引向规模化生产的有效途径。细胞固定化技术 可以避免菌种流失和固液分离困难等问题,为连续 流产氢奠定了基础。采用生物膜的细胞固定化方 法,可以避免包埋方法中存在的传质阻力大,包埋材 料透光性和机械强度不足等缺点,更利于光生物制 氢反应器的长期稳定运行^[12-13]。

利用导光介质作为光合细菌吸附成膜载体的方法 构造环流型光纤生物膜制氢反应器[14],可实现光合细 菌的细胞固定化并进行长期连续流产氢。在连续流的 条件下,反应器的性能与运行操作条件直接相关。尤 其在细胞固定化的反应器中,底物在反应器中的传输 特性直接影响反应器的底物降解性能。通过模型研究 对影响反应器性能的众多因素进行综合分析,并获得 指导反应器高效运行的操作条件,是光生物制氢反应 器研究的重要手段。以往关于光生物制氢过程模型的 研究多集中在生化反应动力学方面,且主要用序批次 实验的方法,考虑反应器在静态培养条件下的基质利 用和产氢动力学等特性[15-16]。而对于连续流生物膜 反应器底物传输模型方面的研究,往往将生物膜以外 的流场简化为推流模型,即用截面平均流速代替主流 区的二维速度分布。这样实际只能得到反应器中生物 膜外侧主流区截面上的平均浓度分布[17]。为此,本文 在以往研究的基础上,根据质量传递原理和 Monod 生 化反应动力学,通过建立环流型光纤生物膜制氢反应 器的底物传输与降解的二维数学模型,在实验研究的 基础上,利用数值模拟求取反应器在连续流操作条件 下获得较高底物降解效率的具体条件。

1 实验系统及方法

1.1 反应器和实验装置

环流型光纤生物膜制氢反应器 (Annular

optical-fiber-illuminating biofilm reactor, AOFBR)结构和实验装置如图 1 所示。将弥散光纤(φ18 mm)轴向固定在密封筒体中作为光合细菌附着并形成生物膜的载体,由于弥散光纤在可见光范围内具有很高的透光率,从而保证了入射光在光纤表面的均匀分布,满足连续运行时光合细菌生物膜区域中有充足的光照。反应器筒体内径 50 mm,轴向长度300 mm,容积约 500 mL。

实验装置由环流型光纤生物膜制氢反应器、光 源机、恒流泵、气液分离瓶、氢气收集瓶等构成。



图 1 环流型光纤生物膜制氢反应器实验装置

Fig. 1 Scheme of experimental apparatus with annular fiber-illuminating biofilm reactor

1.光源机 2.环流型光纤生物膜制氢反应器 3.氢气收集瓶
 4.气液分离瓶 5.出液瓶 6.进液瓶 7.恒流泵

1.2 光合细菌和培养基

实验用菌种为自行分离驯化得到的沼泽红假单 胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)。采用葡萄糖作 为培养基的碳源,其中除葡萄糖外的营养成分为: $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O 1.006 g/L, KH_2PO_4 0.544 g/L,$ $ZnSO_4 \cdot 7H_2O 0.001 g/L, NaCl 0.2 g/L, CaCl_2$ 0.01 g/L,C₅H₈NNaO₄ 0.5 g/L, H₂NCONH₂ 1.677 g/L, MgSO₄ · 7H₂O 0.2 g/L, FeSO₄ · 7H₂O 0.041 7 g/L, (NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O 0.001 g/L 和酵母膏 1.0 g/L。 1.3 检测方法

底物质量浓度测量用 3,5 二硝基水杨酸试剂 法,检测仪器为 756 MC 紫外可见光分光光度计(上 海,756 MC)。培养基成分测量使用 BP114 型电子 分析天平(德国 BP114)。反应器的底物降解性能 由底物消耗速率 $r_s(mmol/(g\cdoth))$ 和底物降解效率 X(%)来衡量。

2 底物传输与降解数学模型

图 2 为环流型光纤生物膜制氢反应器的底物传输与降解过程示意图。由图可见,底物在反应器主流区以对流和扩散的方式流动,同时沿着轴向和径向进行传递。在生物膜区域,底物进行扩散并被光合细菌生化降解。外界输入的光能沿着光纤在反应器的轴向进行传输,并影响着生物膜区域的生化降解速率。因此,底物在环流型光纤生物膜制氢反应

器的降解过程,是一个底物在反应器主流区与生物 膜区域耦合传质和生物膜区域光生化降解的过程。 为此,建立描述该过程的底物传输与降解数学模型, 并以此确定具体的运行操作参数。



对数学模型做以下假设:①反应器处于稳态,生 物膜沿光纤轴向和周向均匀分布。②生物膜结构致 密。底物在生物膜中沿光纤方向无流动,底物沿生 物膜厚度方向和反应器轴向扩散传质。③微生物在 光纤上的附着行为不改变描述其生长的动力学参 数,因此由悬浮培养得到的生化反应动力学参数也 适用于生物膜。④由于生物膜很薄,认为膜内光强 等同于光纤外侧光强。⑤反应器内无扰流和反混作 用。⑥反应器中流动处于充分发展段,流速 *u* = *u*(*r*)。

由此,得到环流型光纤生物膜制氢反应器底物 传输和降解数学模型:

(1)反应器主流区

动量方程

$$\frac{u}{r} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} \left(r \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r} \right) = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} \tag{1}$$

边界条件

$$\begin{cases} u = 0 & (r = r_i + L_f) \\ u = 0 & (r = r_e) \end{cases}$$
(2)

式中 r_i——光纤外径 r_s——反应器内径 L_f——生物膜厚度

6. 后方程

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D\left(\frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)$$
(3)

边界条件

$$\begin{cases} C = C_{i} & (x = 0) \\ \frac{\partial C}{\partial x} = 0 & (x = L) \\ D \frac{\partial C}{\partial r} = D_{e} \frac{\partial C_{b}}{\partial r} & (r = r_{i} + L_{f}) \\ \frac{\partial C}{\partial r} = 0 & (r = r_{o}) \end{cases}$$
(4)

$$\Leftrightarrow \quad \overline{u} = \frac{u}{u_{av}} \quad \overline{C} = \frac{C}{C_i} \quad \overline{x} = \frac{x}{L} \quad \overline{r} = \frac{r}{r_i} \quad \overline{C}_b = \frac{C_b}{C_i}$$

边界条件式(4)变成

$$\begin{cases} \overline{C} = 1 & (\overline{x} = 0) \\ \frac{\partial \overline{C}}{\partial \overline{y}} = 0 & (\overline{x} = 1) \\ D^* \frac{\partial \overline{C}}{\partial \overline{r}} = D_e^* \frac{\partial \overline{C}_b}{\partial \overline{r}} & (\overline{r} = 1 + \frac{L_f}{r_i}) \\ \frac{\partial \overline{C}}{\partial \overline{r}} = 0 & (\overline{r} = \frac{r_o}{r_i}) \end{cases}$$
(6)

$$D_{e}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial C_{b}}{\partial r}+\frac{\partial^{2} C_{b}}{\partial r^{2}}+\frac{\partial^{2} C_{b}}{\partial x^{2}}\right)=\frac{1}{Y_{x/s}}\mu C_{x}+mC_{x}$$
 (7)

边界条件

$$\begin{cases} \frac{\partial C_b}{\partial r} = 0 & (r = r_i) \\ D_e \frac{\partial C_b}{\partial r} = D \frac{\partial C}{\partial r} & (r = r_i + L_f) \\ C_b = C_i & (x = 0) \\ \frac{\partial C_b}{\partial x} = 0 & (x = L) \end{cases}$$
(8)

按照多孔介质理论,底物在生物膜中的有效扩 散系数表示为

$$D_{e} = \varepsilon D$$
(11)
生物膜孔隙率 ε 表示为^[18]

$$\varepsilon = 1 - \frac{0.43\rho_x^{0.92}}{11.19 + 0.27\rho_x^{0.99}}$$
(12)

式中 ρ_x ——生物膜密度

$$\mu = \exp\left(-\left[1 - \left(\frac{C_s}{9.9}\right)^2\right]^2\right) \frac{\mu_{\text{opt}}C_s}{K_s + C_s} \quad (13)$$

模型预测所用的参数实验数据如表1所示^[19]。

表 1 模型预测所用的参数 Tab.1 Parameters used in model prediction

模型参数	实测值	模型参数	实测值
$\rho_x/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	150.1	$Y_{x/s}$	0.303
$D/(m^2 \cdot s)$	7.94 × 10 $^{-10}$	K_s	8.367
$\mu_{ m opt}$ / h $^{-1}$	0.209	m	0.827

3 结果与分析

从反应器质量传递的角度来看,底物葡萄糖在 环流型光纤生物膜制氢反应器中被降解的过程是底 物在主流区的传输和在生物膜区域的传输与降解的 耦合。因此,反应器的传输特性直接影响反应器的 降解性能。反应器运行操作参数中的进口底物质量 浓度和流速,分别影响到与反应器传输特性相关的 传质驱动势和界面对流传质系数。因而作为本文研 究的重点,将实验结果与模型计算结果进行对照以 验证模型的正确性。模型验证的实验条件为:光照 强度 6 000 lx, 温度 30℃,pH 值 7.0。

3.1 进口底物质量浓度对反应器降解效率的影响

进口底物质量浓度对环流型光纤生物膜制氢反应器降解效率的影响如图 3 所示。模型计算与实验结果具有一致的趋势,两者之间的最大相对误差为 9.6%。从图中可以看到,当进口底物质量浓度从 8 g/L 增加到 10 g/L 时,反应器的降解效率从 35% 增加到 43.5%。而继续增加进口底物质量浓度从 10 g/L到 12 g/L 时,反应器的底物降解效率从 43.5%减小到 29.1%。说明,当反应器进口底物质量浓度为 10 g/L 时,光合细菌生物膜的活性最高, 对底物的降解代谢最旺盛。

生物膜区径向长度/um



Fig. 3 Effect of inlet substrate concentration on degradation efficiency

进口底物质量浓度为10 g/L和12 g/L时,由模型计算得到的反应器中生物膜区域的无因次底物质量浓度分布如图4所示。从图中可以看到,在生物膜区域底物质量浓度分别沿着反应器轴向和膜厚2个方向降低,这与底物分别沿着膜厚(径向)和流动(轴向)2个方向被降解的物理过程一致。在底物质量浓度分别为10 g/L和12 g/L2种工况下,位于反应器出口端的生物膜区域中的平均底物水平都较低,说明反应器的结构较为合理,能够很好保证底物被生物膜降解。比较图4a和图4b还可以发现,当反应器进口底物增加时,主流区与生物膜区域之间的传质驱动势增加,这就强化了底物从主流区向生物膜区域的传输,使得图4b中生物膜区域内低底物部分明显减少,提高了生物区域的底物水平。

图 5 给出了反应器在对应 2 种进口底物下主流 区内无因次底物质量浓度分布情况。比较发现,当 反应器进口底物质量浓度从 10 g/L 增加到 12 g/L 时,主流区的平均底物质量浓度水平也随之明显升 高。对应上述 2 种工况的生物膜中底物分布情况来 看,当进口底物从 10 g/L 增加到 12 g/L 时,反应器 降解效率下降的原因是:由于进口底物的增加强化 了从主流区向生物膜区域的传质,并使得生物膜区 域的平均底物升高。但生物膜的底物降解速率受生 化反应动力学限制,强化传质导致了剩余底物的累 积,造成底物过高而产生了底物抑制。因此产生了



Fig. 4 Substrate dimensionless concentration distribution in biofilm zone of AOFBR (a) $C_i = 10 \text{ g/L}, q = 100 \text{ mL/h}$ (b) $C_i = 12 \text{ g/L}, q = 100 \text{ mL/h}$

主流区平均底物升高但反应器降解效率下降的现 象。可见,环流型光纤生物膜制氢反应器的底物降 解性能是反应器传输特性和生物膜区域生化反应特 性的综合体现。





3.2 流速对反应器降解效率的影响

流速对环流型光纤生物膜制氢反应器底物降解 效率的影响如图 6 所示,模型计算与实验结果之间 的最大相对误差为 8.7%。如图所示,反应器的底 物降解效率的实验值和模型计算值都随着流速的增 加而逐渐减小。而从图 7 可见,反应器的底物消耗 速率却呈现先增加后减小的规律,且当流速 q 为 100 mL/h 时,底物消耗速率达到最大值。说明在流 速从 40 mL/h 增加到 100 mL/h 时,虽然反应器的底 物降解效率逐渐下降,但反应器的底物消耗速率却 仍在增加,因此这时反应器的降解性能仍在增强。 底物降解效率的下降是由反应器有机负荷增加量过 快引起的。









图 7 流速对反应器底物消耗速率的影响

Fig. 7 Effect of flow rate on substrate consumption rate



无因次底物模型计算情况。从图中可见,该工况下 底物在生物膜中得到了比较彻底的降解,底物在反 应器出口端降至低值。通过与图 4a 的比较可以发 现,当流速从 40 mL/h 增加到 100 mL/h 时,生物膜 区域低质量浓度范围减少了。原因是流速增加时, 底物从主流区向生物膜区的对流传质作用得到强 化,有更多的底物进入生物膜,因此提高了生物膜区 域的底物。而这时底物在生物膜区的降解处在传质 控制区,因此较高底物质量浓度下生物膜降解活性 得到提高,底物消耗速率也随之增加,当传质速率与 底物消耗速率相等时,生物膜内的底物达到一个较 高的新的稳定状态。从图中还可以发现,虽然受反 应器进口有机底物负荷增加的影响,反应器的底物 降解效率仍是降低的趋势,但是底物消耗速率却得 到提高。因此通过强化传质手段可以提高反应器底 物的降解性能。

图 8b 描述了反应器主流区的无因次底物分布。 从图中的等质量浓度线分布可以看出,当底物沿着 反应器轴向流动并在生物膜区域降解时,在垂直于 流动方向的主流区截面上,底物分布呈现中间高两 端低的情况。并且沿着流动方向截面峰值逐渐向生 物膜区域靠近。这是由于生物膜区域存在着底物降 解的源项,因此该区域附近的径向梯度较主流区更 大,从而引起底物截面峰值也呈现向该区域靠近的 分布。

4 结论

(1)底物在环流型光纤生物膜制氢反应器的 降解过程是主流区对流和扩散与生物膜区扩散和 降解的耦合过程。影响反应器传输性能的操作参数;进口底物质量浓度和流速,由于分别影响驱动 势和对流传质系数,因而对反应器的降解效率影响显著。







Fig. 8 Substrate dimensionless concentration distribution within AOFBR (a) 生物膜区域, $C_1 = 10 \text{ g/L}$, q = 40 mL/h (b) 主流区, $C_2 = 10 \text{ g/L}$, q = 40 mL/h

(2)反应器底物降解效率随进口底物质量浓度 的增加呈现先增大后减小的趋势。反应器的底物降 解效率随流速的增加呈现逐渐减小的趋势。 (3)在本文研究条件下,当反应器的进口底物为10 g/L、流速为100 mL/h时,反应器的底物消耗速率最大,底物降解效率达到43.5%。

参考文献

- 张全国,王毅.光合细菌生物制氢技术研究进展[J].农业机械学报,2013,44(6):156-161.
 Zhang Quanguo, Wang Yi. Research progress of hydrogen production technology with photosynthetic bacteria[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(6):156-161. (in Chinese)
- 2 Ronevich J A, Cooman B C, Speer J G, et al. Hydrogen effects in prestrained transformation induced plasticity steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012(43):2293 - 2301.
- 3 Bockris J O M. The origin of ideas on hydrogen economy and its solution to the decay of the environment [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27: 731-740.
- 4 Elam C C, Gregoier Padro C E, Sandrock G, et al. Realizing the hydrogen future: the international energy agency'4s effects to advance hydrogen energy technologies [J]. International Journal Hydrogen Energy, 2003, 28: 601-607.
- 5 马涛,孙佰清,郭海风,等. 我国中长期经济发展中氢能消费量及 CO₂ 减排效果估算[J]. 太阳能学报,2010,31(11):1521-1526.

Ma Tao, Sun Baiqing, Guo Haifeng, et al. Evaluation on hydrogen consumption and its reduction of CO₂ emission of Chinese medium and long-term economic development[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2010,31(11):1521-1526. (in Chinese)

- 6 刘少文,李永丹. 甲烷重整制氢气的研究进展[J]. 武汉化工学院学报,2005,27(1): 20-27. Liu Shaowen, Li Yongdan. Research proceeding for methane reforming for hydrogen[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemistry and Technology, 2005,27(1):20-27. (in Chinese)
- 7 Wang C C, Chang C W, Chu C P, et al. Producing hydrogen from wastewater sludge by *Clostridium bifermentans* [J]. Biotechnology, 2003, 102:83-92.
- 8 Ronevich S J A, Speer J G, Krauss G, et al. Improvement of the hydrogen microprint technique on AHSS steels [J]. Metallography, Microstructure and Analysis, 2012(1):79-84.
- 9 张全国,王素兰,尤希凤. 光合菌群产氢量影响因素的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):182-185.
 Zhang Quanguo, Wang Sulan, You Xifeng. Effects of influencing factors of photosynthetic bacteria group on hydrogen production
 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10):182-185. (in Chinese)
- 10 张全国,荆艳艳,周雪花,等.吸附法固定光合细菌技术产氢能力的研究[J].农业工程学报,2008,24(9):199-202. Zhang Quanguo, Jing Yanyan, Zhou Xuehua, et al. Hydrogen production capacity of immobilized photosynthetic bacteria cells on different absorb material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9):199-202. (in Chinese)
- 11 Zhang C, Zhu X, Liao Q, et al. Performance of a groove-type photobioreactor for hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11):5284-5292.
- 12 Ren N Q, Liu B F, Ding J, et al. The effect of butyrate concentration on photo-hydrogen production from acetate by *Rhodopseudomonas faecalis* RLD - 53[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33:5981 - 5985.
- 13 张川,廖强,朱恂,等. 传质特性对光纤生物制氢反应器性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2009,30(11): 1933 1935.
 Zhang Chuan, Liao Qiang, Zhu Xun, et al. An experimental research on the influence of mass transfer character on hydrogen production performance of a optical-fiber bioreactor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(11): 1933 1935. (in Chinese)

Huang Denghong, Chen Chengxi, Zhang Yicheng, et al. Parametric analysis of dust sucking mouth for vacuum sweeper based on flow field simulation [J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(7):73 - 76. (in Chinese)

- 13 关萌,沈永哲,高连兴,等.花生起挖晾晒后的果柄机械特性[J].农业工程学报,2014,30(2):87-93.
 Guan Meng, Shen Yongzhe, Gao Lianxing, et al. Mechanical properties of peanut peg after digging and drying[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(2):87-93. (in Chinese)
- 14 赵宝权. 全喂入花生摘果试验台试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2014.
- 15 梁明.4H-2型花生起收机去土与放铺装置研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2013.
- 16 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- 17 刘艳艳.风筛式清选装置中离心风机的试验研究及仿真分析[D].镇江:江苏大学,2009. Liu Yanyan. Test study and simulation ansys of less-vane fan of cleaning device [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 18 杨静.花生摘果特性与螺旋弓齿式全喂入花生摘果装置研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2012. Yang Jing. Study on peanuts picking characteristic and full-feeding spiral bow teeth type peanut picker[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2012. (in Chinese)
- 19 王云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].2版.北京:化学工业出版社,2008.

(上接第179页)

- 14 张川,廖强,朱恂,等.环流型光纤生物膜制氢反应器的连续产氢性能[J].化工学报,2011,62(11):3248-3255. Zhang Chuan, Liao Qiang, Zhu Xun, et al. Performance of continuous hydrogen production in annular fiber-illuminating biofilm reator[J]. CIESC Journal,2011,62(11):3248-3255. (in Chinese)
- 15 Nath K, Muthukumar M, Kumar A, et al. Kinetics of two-stage fermentation process for the production of hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33:1195 - 1203.
- 16 Xie G J, Liu B F, Ren N Q, et al. The kinetic characterization of photofermentative bacterium *Rhodopseudomonas faecalis* RLD 53 and its application for enhancing continuous hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37: 13718 - 13724.
- 17 Mudliar Sandeep, Banerjee Saumita, Vaidya Atul, et al. Steady state model for evaluation of external and internal mass transfer effects in an immobilized biofilm [J]. Bioresources Technology, 2008, 99: 3468 - 3474.
- 18 Levin D B, Pitt L, Love M, Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2004,29:173 - 185.
- 19 廖强,王永忠,朱恂,等. 初始底物浓度对序批式培养光合细菌产氢动力学影响[J]. 中国生物工程杂志, 2007,27(11): 51-56.

Liao Qiang, Wang Yongzhong, Zhu Xun, et al. Effect of initial substrate concentration on kinetics of hydrogen production by photosynthetic bacteria in batch culture[J]. China Biotechnology,2007,27(11):51-56. (in Chinese)