

微槽透光板式光生物制氢反应器底物操作参数优化*

张川¹ 张利平¹ 程旻² 张全国³

(1. 华北水利水电大学电力学院, 郑州 450011; 2. 重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
3. 生物质能源河南省协同创新中心, 郑州 450002)

摘要: 从连续流产氢的目标出发, 采用在高导光性载体表面刻制微槽的方法, 构造了具有高比表面积的微槽透光板式光生物制氢反应器, 完成了光合细菌的快速成膜并实现细胞固定化。用 Box - Behnken 的响应曲面分析方法, 对影响微槽透光板式光生物制氢反应器连续流产氢性能的相关底物操作参数进行了 3 因素 3 水平的实验。结果表明, 对反应器产氢速率的单因素影响显著顺序依次为水力停留时间、初始 pH 值和初始底物浓度。对反应器产氢速率具有显著交互作用的影响因素是初始底物浓度和初始 pH 值。当初始底物浓度、水力停留时间和初始 pH 值分别为 54.3 mmol/L、21.5 h 和 7.1 时, 微槽透光板式光生物制氢反应器的产氢速率达到最大值 2.242 mmol/(L·h)。

关键词: 光生物制氢 微槽透光板 生物膜 底物操作参数 传质强化

中图分类号: TK91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0197-06

Substrate Operating Parameters Optimization on Hydrogen Production within Groove-type Flat-panel Photobioreactor

Zhang Chuan¹ Zhang Liping¹ Cheng Min² Zhang Quanguo³

(1. Institute of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China
2. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China
3. Collaborative Innovation Center of Biomass Energy in Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To realize photo-biological hydrogen production under continuous flow mode, a groove-type flat-panel photobioreactor (GFBR) with high specific surface area was developed by carving groove on the surface of high-light transparent medium. With photosynthetic bacteria attached on the groove-type surface and the generated mature biofilm, cell-immobilization was finished within GFBR. To improve the performance of hydrogen production in GFBR, operating parameters related to substrate were comprehensively investigated using response surface methodology of Box - Behnken with three factors and three levels. The results showed that the significant degree of single factor on hydrogen production rate of GFBR was followed as hydraulic retention time, initial pH value and initial substrate concentration. While, interaction effect between initial pH value and initial substrate concentration on hydrogen production rate of GFBR was also significant. The optimum hydrogen production rate of 2.242 mmol/(L·h) was attained with operating parameters of initial substrate concentration of 54.3 mmol/L, hydraulic retention time of 21.5 h and initial pH value of 7.1.

Key words: Photo-biological hydrogen production Groove-type flat-panel Biofilm Operating parameters related to substrate Mass transfer enhancement

收稿日期: 2015 - 04 - 29 修回日期: 2015 - 05 - 16

* 国家自然科学基金资助项目(U1404521、51376056)、中国博士后科学基金资助项目(2012M521395)、低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室开放基金资助项目(LEUTS - 201402)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(13B470119)和郑州市科技局科技发展计划资助项目(20130866)

作者简介: 张川, 讲师, 主要从事可再生能源利用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

引言

与传统制氢工艺相比,生物制氢技术因具有制备条件温和,仅需常温、常压的生产条件,能利用廉价的工农业有机废弃原料等众多优点,被认为是最具规模化制氢前景的技术之一^[1-2]。尤以采用光合细菌的光生物制氢过程,具备理论底物转化效率高、有机物降解更彻底、可以利用较宽频带的太阳光和制氢过程不伴随氧抑制等诸多优点,成为独具优势的生物制氢方式^[3-4]。光生物制氢反应器是用于光合细菌大规模培养并产氢的装置。保持光合细菌在光生物制氢反应器中具有高的生理活性和代谢稳定性,实现稳定、高效和连续化产氢,是光生物制氢反应器研究的目标。目前关于光合细菌制氢反应器的研究多以细胞悬浮培养方式为主。原因是光合细菌自身具有菌体小、增殖慢和沉降性差等特点,既难以实现细胞的自固定化也难以实现固液分离。然而,采用悬浮培养方式运行的光生物制氢反应器,由于存在着菌种流失的问题,难以实现连续流产氢。按照序批次培养产氢方式运行,不仅操作复杂而且使得反应器中的产氢过程处于非稳态,难以维持光生物制氢反应器的稳定高效运行状态。因此,只有实现光合细菌的细胞固定化,才能实现光生物制氢反应器的连续流产氢,进而获得稳定和高效的产氢性能。

包埋法和生物膜方法是较成熟的两类细胞固定化技术。对于光合细菌而言,常规包埋方法存在传质阻力增大,包埋材料透光性和机械强度不足等缺点^[5-6]。最近,采用生物膜方法使光合细菌吸附成膜的细胞固定化方法引起了人们的重视。廖强等^[7]研究了沼泽红假单胞菌的吸附成膜特性,发现光合细菌在平板反应器中具有较强的吸附成膜特性,能在短期内获得较大的生物膜覆盖率和膜密度,并取得较高的产氢性能。Zhang 等^[8]通过实验研究对比了光合细菌菌株在微槽表面和在普通平板表面的快速成膜和产氢性能。结果发现,光合细菌在微槽表面的产氢速率较普通平板表面提高 75%。载体表面特性是影响生物膜形成的重要因素。何延青等^[9]研究表明,载体表面的粗糙度将直接影响微生物附着的动力学过程。因为与光滑表面相比,粗糙的载体表面不但增加了细菌与载体间的有效接触面积,而且载体表面的粗糙部分,如孔洞、裂缝等对已附着的细菌起到保护作用。因此,作为微生物附着成膜的载体,不但应利于微生物的固定化和生长繁殖,提高生物持有量,还应利于微生物代谢所需营养物质及代谢产物的传质。

本文通过在高透光材料表面加工规则微槽的方

法构造新型的微槽透光板式光生物制氢反应器。采用 Box-Behnken 方法设计微槽透光板式光生物制氢反应器的连续流动产氢实验,通过底物操作参数的合理配合求取使反应器产氢速率最大的相关运行操作条件。

1 实验系统及方法

1.1 反应器和实验装置

微槽透光板式光生物制氢反应器^[10] (Groove-type flat-panel photobioreactor, GFBR) 的结构和实验装置如图 1 所示。反应器材料选择具有导光性能良好、质轻、容易加工成型、机械强度高优点的聚甲基丙烯酸酯。用机械加工的方法,开取规则的微槽,尺寸为 10 mm (槽深) × 10 mm (槽宽) × 10 mm (间距)。反应器尺寸 350 mm (长) × 250 mm (宽),容积约 1 600 mL,比表面积 136.6 m^{-1} (单位体积的表面积)。

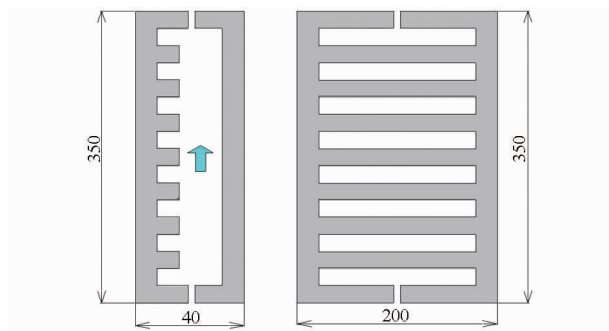


图 1 微槽透光板式光生物制氢反应器结构简图

Fig. 1 Schematic of groove-type flat-panel photobioreactor

实验装置由微槽透光板式光生物制氢反应器、光源 (外置式金卤灯)、恒流泵、气液分离瓶、氢气收集瓶、储液瓶等构成,如图 2 所示。

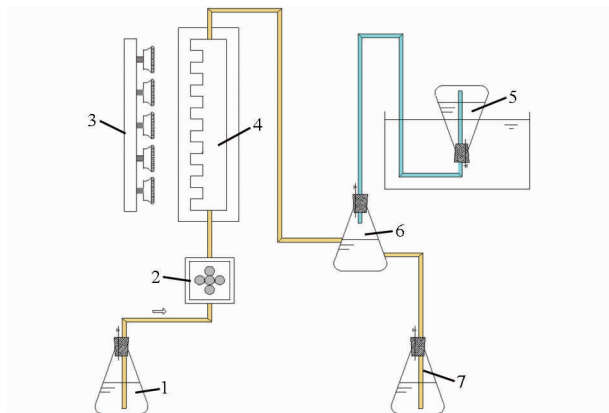


图 2 微槽透光板式光生物制氢反应器实验装置

Fig. 2 Scheme of experimental apparatus

1. 7. 储液瓶 2. 恒流泵 3. 光源 4. 微槽透光板式光生物制氢反应器 5. 氢气收集瓶 6. 气液分离瓶

1.2 光合细菌和培养基

采用自行分离驯化的光合细菌菌株 HAU-

M1^[11]。以葡萄糖为碳源的培养基,除葡萄糖外营养成分还有: $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1.006 g/L; KH_2PO_4 0.544 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g/L; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.041 7 g/L; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.001 g/L; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.001 g/L; NaCl 0.2 g/L; CaCl_2 0.01 g/L; $\text{C}_5\text{H}_8\text{NNaO}_4$ 0.5 g/L; H_2NCONH_2 1.677 g/L; 酵母膏 1.0 g/L。

1.3 检测方法

气体成分分析用 SC-2000 型气相色谱仪(重庆)。色谱柱填料为苯乙烯高分子多孔小球,柱长 2 m,载气为氩气,流速 25 mL/min。TCD 检测器,电流 70 mA,柱箱温度 55℃,气化室和检测室温度均为 100℃。底物(葡萄糖)浓度测量用 3,5 二硝基水杨酸试剂法。检测仪器采用 756 MC 型紫外可见光分光光度计(上海)。pH 值测量采用 Ecoscan-pH6 型 pH 酸度计(新加坡)。培养基成分测量采用 BP114 型电子分析天平(德国)。氢气含量检测最大相对误差为 ±3.6%;葡萄糖浓度测量最大相对误差为 ±5.2%。

1.4 反应器挂膜启动

反应器启动采用循环挂膜法。将菌种和培养基按 1:10(体积比)配比,接种到反应器中,通入氩气进行厌氧密闭循环运行。由于光合细菌与微槽表面反复接触,逐步被吸附到微槽表面并增殖形成光合细菌生物膜。在启动初期,定期检查悬浮液细胞浓度(OD600),以控制液相的细胞浓度。细胞浓度过高时,部分更换培养基,以保证已附着的光合细菌快速生长。反应器启动后期,在实验预设的范围内逐渐增大循环流速,使生物膜在高流速下生长,确保该生物膜具备实验所需的抗水力冲击能力。反应器挂膜启动期间,定期检测产氢速率和底物消耗速率。根据产氢速率和底物降解速率是否趋于稳定,并结合形态观察来判断生物膜是否达到稳定。

经过 30 多天的循环挂膜,反应器的产氢速率和底物消耗速率基本维持在稳定的水平,反应器内的微槽表面得到了清晰可见的生物膜。表明反应器挂膜启动成功,获得了稳定的光合细菌生物膜,实现了细胞固定化。

1.5 反应器连续流产氢

反应器挂膜成功实现了光合细菌的细胞固定化,为连续流光合产氢运行奠定了基础。光合细菌产氢过程机理的研究表明:产氢过程主要受底物降解过程产生的还原力(H^+)、光合磷酸化过程提供的能量(ATP)和与产氢相关酶(固氮酶、氢酶)的活性影响^[12]。由于微槽透光板式光生物制氢反应器实现了光合细菌的细胞固定化,因此反应器的空间

相应分成生物膜区域和主流区域。在连续流的运行方式下,整个反应器的产氢过程必然伴随着底物从主流区向生物膜区域的传输过程和底物在生物膜中的催化产氢过程。因此与上述 2 个过程相关的底物操作:包括底物的水力停留时间、初始底物浓度和初始底物 pH 值,是影响微槽透光板式光生物制氢反应器连续流动产氢的重要因素。为此,本文用 Box-Behnken 方法,对上述参数进行 3 因素 3 水平响应曲面实验研究。既考虑各操作参数对反应器产氢性能的单因素影响,也考查各操作参数之间的协同作用。微槽透光板式光生物制氢反应器连续流动产氢阶段的光照强度按照 HAU-M1 菌株产氢动力学研究所确定的最佳光工况,选定为 2 080 lx^[11]。

底物操作响应面分析实验采用自变量 A 、 B 、 C 分别表示水力停留时间、初始底物浓度和初始 pH 值。响应值为微槽透光板式光生物制氢反应器产氢速率 r_{HPR} (Hydrogen production rate, mmol/(L·h))。每个自变量的 3 个水平值编码分别为 -1、0、1,自变量各编码水平具体数值依据以往的单因素实验结果来确定(见表 1)。

表 1 响应曲面分析的因素与水平

Tab. 1 Factors and levels in response surface design			
水平	水力停留 时间 A/h	初始底物浓度 B $/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	初始 pH 值 C
-1	10	45	5.5
0	20	55	7.0
1	30	65	8.5

2 结果与讨论

2.1 实验结果及其回归拟合分析

依据 Box-Behnken 响应曲面的设计要求进行了 17 组实验。实验方案及结果如表 2 所示。实验点可分成 2 类:①析因点,自变量取值在 A 、 B 、 C 所构成的三维顶点,共 12 个。②零点,为区域的中心点,零点实验重复 5 次,用以估计实验误差。

利用 Design-Expert 8.0 软件对表 2 的实验数据进行回归分析,得到关于微槽透光板式光生物制氢反应器产氢速率的二次回归方程

$$r_{\text{HPR}} = 2.28 - 0.2A - 0.071B + 0.074C - 0.044AB - 0.064AC + 0.13BC - 0.64A^2 - 0.35B^2 - 0.43C^2$$

对该模型进行方差分析,结果如表 3 所示。从表 3 可知,模型 P 值小于 0.001,表明该模型极显著, A 、 B 、 C 的 P 值均小于 0.05,表示这 3 个因素对反应器产氢速率的影响均为显著影响,且影响的显著顺序为: A 、 C 、 B ,即依次为水力停留时间、初始 pH 值和初始底物浓度。该模型的失拟项 P 值大

表 2 响应面实验方案及结果

Tab.2 Design scheme and results of response surface method

实验序号	A	B	C	$r_{\text{HPR}}/(\text{mmol}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1})$
1	1	0	-1	0.924
2	-1	-1	0	1.511
3	1	-1	0	1.251
4	0	1	-1	1.297
5	0	1	1	1.594
6	0	0	0	2.318
7	-1	1	0	1.425
8	0	0	0	2.322
9	1	1	0	0.991
10	0	-1	-1	1.673
11	-1	0	1	1.634
12	0	0	0	2.253
13	0	-1	1	1.441
14	-1	0	-1	1.242
15	0	0	0	2.297
16	1	0	1	1.061
17	0	0	0	2.223

表 3 回归模型方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
A	0.31	1	0.31	53.45	0.000 2
B	0.04	1	0.04	6.86	0.034 5
C	0.044	1	0.044	7.45	0.029 4
AB	7.44×10^{-3}	1	7.44×10^{-3}	1.32	0.288 9
AC	0.016	1	0.016	2.79	0.139 1
BC	0.07	1	0.07	11.94	0.010 6
A ²	1.71	1	1.71	290.72	<0.000 1
B ²	0.52	1	0.52	88.34	<0.000 1
C ²	0.78	1	0.78	132.54	<0.000 1
模型	3.83	9	0.43	72.26	<0.000 1
残差	0.041	7	5.882×10^{-3}		
失拟项	0.034	3	0.011	6.04	0.057 4
纯误差	0.007 441	4	0.001 86		
总变异	3.87	16			

于 0.05,表示模型失拟度较小,说明偏离程度较小,符合选用原则。从模型的方差分析还可看到,交互

作用项中 AB 和 AC 的 P 值均大于 0.05,说明交互作用不显著。剔除不显著项,得到的修正的二次多项回归方程

$$r_{\text{HPR}}=2.28-0.2A-0.071B+0.074C+0.13BC-0.64A^2-0.35B^2-0.43C^2$$

实验值响应面二次回归曲线如图 3 所示。

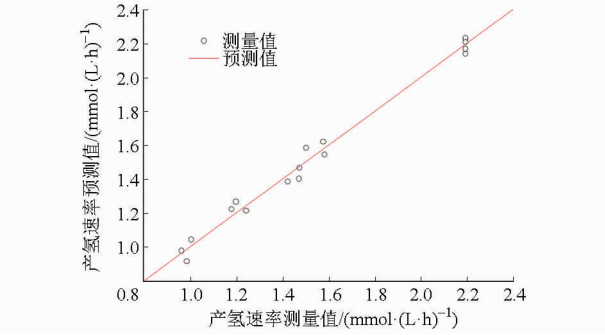


图 3 微槽透光板式光生物制氢反应器产氢速率的实验值与回归模型预测值

Fig.3 Correlation between predicted and observed values of hydrogen production rate within groove-type flat-panel photobioreactor

2.2 响应面实验交互作用分析

根据响应曲面分析方法绘制的初始底物浓度和初始 pH 值的交互作用三维响应面曲线图和二维等高线图如图 4、5 所示。从图 4 可知,三维响应曲面线中有个明显的顶点,说明获得微槽透光板式光生物制氢反应器产氢速率最大的操作条件在选定的实验范围内。反应器的产氢速率随着初始底物浓度和初始 pH 值的增大,呈现先增大后减小的趋势。这是因为在连续流的运行条件下,提高初始底物浓度可以增大反应器中主流区与生物膜区域的浓度梯度,起到强化底物向光合细菌生物膜传输的作用,因而有利于提高反应器的产氢速率。然而过大的初始底物浓度会造成过高的传质速率,这样导致生物膜区域底物浓度的水平过高,从而对光合细菌产生生理抑制效应使得产氢速率减小。底物的 pH 值对光合细菌生物膜区域的产氢酶的代谢活性影响显著。因此,在初始底物浓度和初始 pH 值

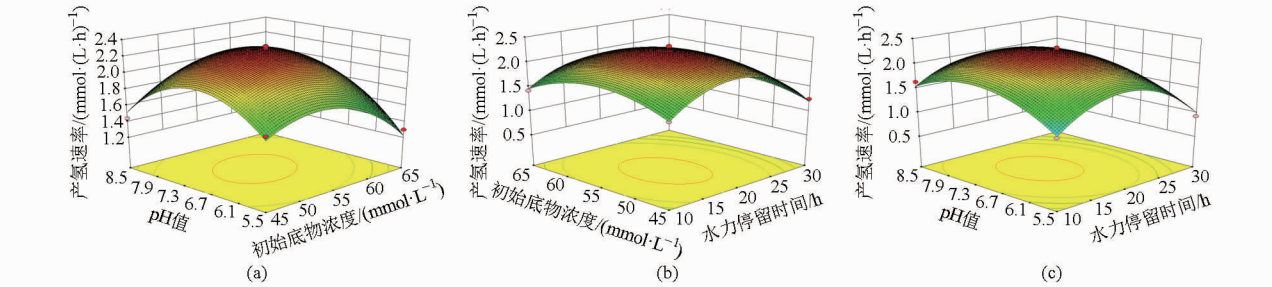


图 4 两因素交互作用对产氢速率的影响三维曲面图

Fig.4 3D surface plots of effects of two factors' interaction on hydrogen production rate (a) 初始底物浓度和 pH 值 (b) 初始底物浓度和水力停留时间 (c) pH 值和水力停留时间

的交互作用下,微槽透光板式光生物制氢反应器的产氢速率达到最大的结果,连续流运行条件下的产氢过程是底物传输过程和相关酶的产氢活性耦合作用的体现。

从表达初始底物浓度与初始 pH 值的交互作用的二维等高线图 5a 可见,等高线呈明显的椭圆形,证明两者的交互作用显著。因此当初始底物浓度和

初始 pH 值都达到最优条件时,对产氢速率增长的贡献大于仅当一个条件达到最佳时。而描述初始底物浓度与水力停留时间的交互作用云图(图 5b)与描述水力停留时间与初始 pH 值的交互作用云图(图 5c)都接近圆形,说明它们之间的交互作用对反应器产氢速率的影响不显著。这与回归模型方差分析的结论一致。

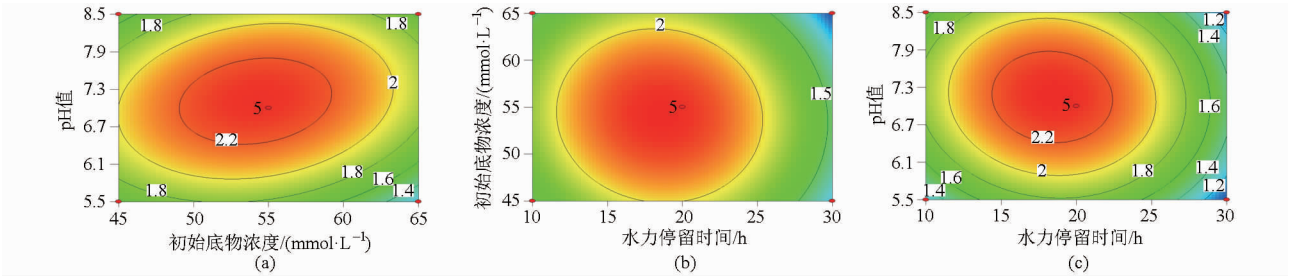


图 5 两因素交互作用对产氢速率的影响二维云图

Fig. 5 2D surface plots of effects of two factors' interaction on hydrogen production rate
(a) 初始底物浓度和 pH 值 (b) 初始底物浓度和水力停留时间 (c) pH 值和水力停留时间

2.3 底物操作条件的优化

利用上述响应曲面方法得到的反应器产氢速率回归预测模型,对底物操作条件进行分析,得到当水力停留时间为 21.5 h,初始底物浓度为 54.3 mmol/L 和初始 pH 值为 7.1,微槽透光板式光生物制氢反应器产氢速率预测值达到最大(2.242 mmol/(L·h))。在上述参数下进行验证实验,实际得到的微槽透光板式光生物制氢反应器产氢速率为 2.251 mmol/(L·h),两者基本一致。说明通过响应面分析得到的底物操作参数具有实用性。

2.4 底物操作条件的优化

将本研究所得到的反应器产氢最大速率与现有文献进行对照,结果如表 4 所示。文献对比表明:通过底物操作优化微槽透光板式光生物制氢反应器达到了较高的产氢速率。

3 结论

(1) 从连续流稳态制氢的目标出发,采用将生物膜的细胞固定化载体和高导光介质相结合的方法,构造了利于光合细菌成膜的微槽透光板式光生物制氢反应器。

(2) 通过响应曲面分析方法求取了微槽透光板

表 4 与其他类型的光生物制氢反应器的产氢性能对比

Tab.4 Comparison of performance of photo-H₂ production with different photobioreactors

菌种	实验方法	运行模式	产氢速率 /(mmol·(L·h) ⁻¹)	文献 序号
<i>R. capsulata</i> WP3-5	中心组合	连续流	1.110	[13]
<i>R. capsulata</i> DSM 1710	全面实验	序批式	0.566	[14]
<i>R. sphaeroides</i> KD131	响应面	序批式	1.960	[15]
<i>R. rubrum</i>	响应面	序批式	0.893	[16]
<i>Rs. rubrum</i>	响应面	序批式	4.790	[17]
HAU-M1	响应面	连续流	2.251	

式光生物制氢反应器在连续流动底物转化制氢过程中的产氢性能与底物操作参数之间的二次回归数学模型。

(3) 在本文的研究条件下,当微槽透光板式光生物制氢反应器的初始底物浓度为 54.3 mmol/L、水力停留时间为 21.5 h 和 pH 值为 7.1 时,反应器的产氢速率达到最大值 2.242 mmol/(L·h)。通过文献对比,发现微槽透光板式光生物制氢反应器能够显著提高光合制氢反应器的连续流产氢速率。

参 考 文 献

1 Eroglu E, Melis A. Photobiological hydrogen production: recent advances and state of the art[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 8403 – 8413.

2 Elam C C, Gregoir Padro C E, Sandrock G, et al. Realizing the hydrogen future: the international energy agency's efforts to advance hydrogen energy technologies[J]. International Journal Hydrogen Energy, 2003, 28(6): 601 – 607.

3 Kim M S, Kim D H. Hydrogenases for biological hydrogen production[J]. Bioresource Technolgy, 2011, 102: 8423 – 8431.

4 Keskin T, Hashesh M, Hallenbeck P C. Photofermentative hydrogen production from wastes[J]. Bioresource Technology, 2011,

102 : 8557 – 8568.

5 Chang J S, Lee K S, Lin P J. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002,27(11 – 12) :1167 – 1174.

6 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 Q G, Wang Y. 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)

7 Liao Q, Wang Y J, Wang Y Z, et al. Formation and hydrogen production of photosynthetic bacterial biofilm under various illumination conditions[J]. Bioresource Technology 2010,101:5315 – 5324.

8 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.

9 何延青,刘俊良,杨平,等. 微生物固定化技术与载体结构的研究[J]. 环境科学,2004,25(增刊) :101 – 104.
He Y Q, Liu J L, Yang P, et al. Immobilization technology and construction of carrier[J]. Environmental Science,2004, 25(Supp.) : 101 – 104. (in Chinese)

10 廖强,张川,朱恂,等. 微槽透光板式光生物制氢反应器: 中国,200710078274.2[P]. 2007 – 08 – 22.
Liao Q, Zhang C, Zhu X, et al. Groove-type flat-panel photo-H₂ bioreactor. China, 200710078274.2[P]. 2007 – 08 – 22. (in Chinese)

11 蒋丹萍,韩滨旭,王毅,等. HAU-M1 光合细菌的生理特征和产氢特性分析[J]. 太阳能学报,2015,36(2) :289 – 294.
Jiang D P, Han B X, Wang Y, et al. Characteristic analysis on physiological and hydrogen production by HAU-M1 photosynthetic bacteria[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2015,36(2) : 289 – 294. (in Chinese)

12 Koku H. Aspects of the metabolism of hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2002, 27(11 – 12) :1315 – 1329.

13 Chen C H, Lu W B, Wu J F, et al. Enhancing phototrophic hydrogen production of *Rhodoseudomonas palustris* via statistical experimental design[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007,32(8) :940 – 949.

14 Androga D D, Sevinc P, Koku H, et al. Optimization of temperature and light intensity for improved photofermentative hydrogen production using *Rhodobacter capsulatus* DSM 1710[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(6) :2472 – 2480.

15 Kim M S, Baek J S, Lee J K. Comparison of H₂ accumulation by *Rhodobacter sphaeroides* KD131 and its uptake hydrogenase and PHB synthase deficient mutant[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(1) :121 – 127.

16 Melnicki M R, Bianchi L, De Philippis R, et al. Hydrogen production during stationary phase in purple photosynthetic bacteria [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(22) :6525 – 6534.

17 Ismail K S K, Najafpour G, Younesi H, et al. Biological hydrogen production from CO: bioreactor performance[J]. Biochemical Engineering Journal, 2008,39(3) :468 – 477.

(上接第 196 页)

80 马泉智. 畜禽粪便沼液预处理及磷酸铵镁法回收磷的研究[D]. 北京:中国地质大学,2013.
Ma Quanzhi. Research on pretreatment of livestock and poultry manure fermenting slurry and phosphorus recovery by magnesium ammonium phosphate crystallization[D]. Beijing:China University of Geosciences,2013. (in Chinese)

81 王峰,严潇南,杨海真. 鸡粪厌氧发酵沼液达标处理工艺研究[J]. 农业机械学报,2012,43(5) :84 – 90.
Wang Feng,Yan Xiaonan,Yang Haizhen. Treatment process of anaerobically digested effluent of chicken manure for meeting the discharging standard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(5) :84 – 90. (in Chinese)

82 宋成芳,单胜道,张妙仙,等. 畜禽养殖废弃物沼液的膜过滤浓缩试验研究[J]. 中国给水排水,2011,27(3) :84 – 86.
Song Chengfang,Shan Shengdao,Zhang Miaoxian,et al. Study on concentration of biogas slurry from livestock and poultry wastes using membrane technology[J]. China Water & Wastewater,2011,27(3) :84 – 86. (in Chinese)

83 邓蓉. 畜禽养殖场沼液的负压浓缩与纳滤膜浓缩研究[D]. 重庆:西南大学,2014. (in Chinese)
Deng Rong. Vacuum concentration and nanofiltration concentration of livestock biogas slurry [D]. Chongqing: Southeast University,2013. (in Chinese)

84 李同,董红敏,陶秀萍. 猪场沼液絮凝上清液的紫外线杀菌效果[J]. 农业工程学报,2014,30(6) :165 – 171.
Li Tong,Dong Hongmin,Tao Xiuping. Disinfection effects of ultraviolet on supernatants of flocculated digestate from swine farm [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(6) :165 – 171. (in Chinese)

85 李同. 猪场处理出水杀菌方法试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
Li Tong. Pilot study on disinfection methods of treated effluent from swine farm[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2014. (in Chinese)