

鼓泡式光生物制氢反应器中光合细菌的生长及产氢

屈晓凡, 廖强*, 朱恂, 王永忠, 李俊

重庆大学工程热物理研究所; 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 400030

* 联系人, E-mail: lqzx@cqu.edu.cn

2011-05-19 收稿, 2011-09-14 接受

国家杰出青年科学基金(50825602)、国家自然科学基金(20876183)、中央高校基本科研业务费(CDJXS11142230)和重庆市自然科学基金重点项目(CSTC, 2009BA6022)资助

摘要 提出了一种新型的鼓泡式光生物制氢反应器, 并将 *Rhodospseudomonas palustris* CQK-01 光合产氢菌在光生物制氢反应器中进行序批式培养, 以葡萄糖为碳源底物, 以 590 nm 单波长光为光源, 研究了不同鼓泡条件下光合细菌的生长、产氢及底物降解特性. 实验结果表明, 在光生物制氢反应器中适当鼓入氩气气泡可以有效降低反应器内液相氢浓度, 减少产物反馈抑制作用, 促进产氢性能的提高, 并且不同鼓泡频率对光合细菌的生长和产氢有较大影响. 实验中间隔 3 h 鼓泡时光合细菌产氢性能最佳, 反应器最大产氢量 33.25 mmol, 光能转化效率为 18.46%, 产氢得率为 1.79 mol (H₂)/mol (glucose), 平均底物消耗速率为 0.28 mmol L⁻¹ h⁻¹ 和平均产氢速率为 0.50 mmol L⁻¹ h⁻¹.

关键词

光合细菌
鼓泡
氢浓度
产氢
光生物反应器

氢能具有清洁、可再生、能量密度高和燃烧产物为水等优点, 被认为是化石能源的替代品^[1]. 与常规制氢方式不同, 生物制氢过程主要是由液相中的细菌在常温常压下催化完成^[2], 并且具有反应条件温和、能耗低、无污染、易被燃料电池转化为电能等优点^[3], 因而成为新能源开发领域中最具前途的技术之一.

在生物制氢方法中, 利用有机废水或生物质能和太阳能产氢的光发酵方法引起了更多关注^[4,5]. 然而, 较低的产氢速率及能量转化效率是制约光合细菌制氢技术发展的瓶颈. 一般来说, 利用有机底物的生物制氢过程主要受到产氢酶反应的热力学限制^[6]. 液相中的氢分压是微生物产氢过程中的一个重要因素, 氢分压过高会降低产氢酶的活性从而抑制产氢过程的进行^[7,8]. Angenent 等人^[9]根据计算氢气、铁氧化还原蛋白和 NADH 的氧化还原电位讨论了氢气分压在微生物产氢过程中的影响, 得到了不同氢分压下的葡萄糖代谢途径. 刘如林等人^[10]指出当分子氢浓度超过 60% 时, 固氮酶能力会受到抑制; 同时二氧化碳的浓度也影响氢气的合成速率以及最后的产氢

得率^[11], 有效地去除反应体系中的二氧化碳, 可以减少与 NADH 的竞争, 从而增加氢气的合成.

向液相喷射气体是减小液相中氢气和二氧化碳分压力的一种有效方法^[9,12], 同时还可以增强反应液的混合以提升反应器的整体性能^[13]. 在厌氧发酵菌纯培养过程中, 向液相中鼓入气体(Ar, H₂, N₂)可以改变代谢产物的相对比例^[14,15], 同时提高产氢得率. 但是, 研究表明, 增加的产氢量与气体鼓入量之间没有明显的对应关系^[8]. 目前鼓泡法主要应用于厌氧发酵产氢方式^[6], 而针对光合细菌产氢的研究还鲜见报道.

本文设计了一种新型的鼓泡式光生物制氢反应器, 以沼泽红假单胞菌 CQK-01 为实验菌种, 葡萄糖为碳源底物, 590 nm 单色光为光源, 采用序批式培养方式, 研究间歇性鼓入 Ar 气泡对光合细菌生长代谢、产氢和底物消耗特性的影响, 为提高光生物制氢反应器的产氢性能提供依据.

1 材料与方 法

(i) 菌种和培养基. 本实验采用菌株为前期纯

化并经鉴定得到的具有高效产氢性能的沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris* CQK-01)^[16]。光合细菌以葡萄糖为有机碳源,培养基包括: $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ 1.006 g L^{-1} ; KH_2PO_4 0.544 g L^{-1} ; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g L^{-1} ; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.0417 g L^{-1} ; $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ 0.001 g L^{-1} ; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.001 g L^{-1} ; $NaCl$ 0.2 g L^{-1} ; $CaCl_2$ 0.01 g L^{-1} ; $CO(NH_2)_2$ 1.677 g L^{-1} ; 谷氨酸钠 0.5 g L^{-1} ; 酵母膏 1.0 g L^{-1} ; 生长因子 1 mL L^{-1} 。

(ii) 鼓泡式光生物制氢反应器实验系统及方法。鼓泡式光生物制氢反应器实验系统如图 1 所示,其中光生物反应器是由透明有机玻璃板加工而成(100 mm 长×50 mm 宽×120 mm 高),总容积为 600 mL。在反应器顶部左右各开有充、排气及气体取样孔,在反应器下部设有一个液相取样孔,反应器底部布置有两个平行的有机玻璃管作为气体分布器,管子一端封闭,上面开有 9 个 $\phi=0.3 \text{ mm}$ 的微孔。反应器除受光面以外的部位均贴上锡箔以减少光散射。实验前对系统进行气密性检查,并对反应器系统进行彻底消毒。将培养的菌悬液与灭菌冷却后的培养基按体积比 1:10 进行混合,通过 0.1 mol/L NaOH 或 HCl 溶液调节培养基 pH 至 7 左右,然后取出 600 mL 加入到反应器中。反应器排气孔与倒置锥形瓶相连,采用倒置排水法收集气体。将反应器底部的鼓气管与氩气瓶通过减压阀相连,光源为外置式 LED 单色光源(重庆源光电子科技有限公司,功率为 20 W)单侧照射,光源主波长 590 nm,光照强度 5000 lx。实验中初始底物浓度为 50 mmol L^{-1} ,培养温度约为 30°C 。每次鼓泡时间为 5 min,气体流量为 0.2 L/min,鼓泡间隔时间分别为 3, 6, 12 h。

(iii) 实验仪器和分析方法。实验中溶液 pH 采用 Ecoscan-pH6 型酸度计(新加坡)测量;光照度采用 ST-85 型自动量程照度计测量;葡萄糖浓度采用 3,5-二硝基水杨酸法^[17]测量,检测仪器为 756MC 紫外可

见分光光度计(上海精密仪器有限公司);细菌生物量采用可见分光光度计(722N, 上海)测量;液相溶解氢浓度采用溶解氢微电极(Unisense, 丹麦)测量;氢气浓度采用 SC-2000 气相色谱仪(四川仪表九厂)测量,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,流速为 25 mL min^{-1} ,采用 TCD 检测器,电流 80 mA,柱箱、气化室和检测室温度分别为 55, 100 和 100°C 。

本实验通过平均产氢速率和产氢得率、平均底物消耗速率、光能转化效率来评价鼓泡式光生物制氢反应器的产氢特性、对底物的利用特性及转化氢能的能量成本。这些参数分别定义如下^[18,19]:

$$\begin{aligned} \text{平均产氢速率} (\text{mmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}) \\ = \frac{\text{产氢总量}(\text{mmol})}{\text{反应器体积}(\text{L}) \times \text{时间}(\text{h})}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{产氢得率} (\text{mol}(\text{H}_2)/\text{mol}(\text{glucose})) \\ = \frac{\text{产氢总量}(\text{mol})}{\text{葡萄糖底物消耗总量}(\text{mol})}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{平均底物消耗速率} (\text{mmol L}^{-1} \text{ h}^{-1}) \\ = \frac{\text{葡萄糖消耗总量}(\text{mmol})}{\text{反应器体积}(\text{L}) \times \text{时间}(\text{h})}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{光能转化效率} (\%) = \frac{\text{产生氢气的热值}(\text{kJ})}{\text{输入光能}(\text{kJ})}. \quad (4)$$

2 实验结果及分析

2.1 鼓泡对培养基液相氢气浓度及产氢性能的影响

鼓泡与不鼓泡两种操作条件下光生物反应器内液相 H_2 浓度的变化如图 2 所示。在不鼓泡条件下反应器液相中溶解 H_2 的浓度随着光生化反应的进行逐渐升高,并最终维持在较高浓度水平。但当向反应器中鼓入 Ar 气泡以后,液相中溶解 H_2 浓度急剧下降,当浓度值降到 $30 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以后,下降趋势逐渐变缓,在鼓泡结束时达到最低值 $20 \mu\text{mol L}^{-1}$;当停止鼓入 Ar 气泡后,液相中溶解 H_2 浓度又会逐渐升高。从反应器底部进入液相的 Ar 气泡在上升的过程中同反应液充分混合接触,由于气液相界面处存在溶解气浓度梯度,因此溶解的产物气体会不断地从液相中置换进入气泡,最后被带出液相。开始通入气体时液相中溶解 H_2 浓度较大,气液相界面之间的传质速率较

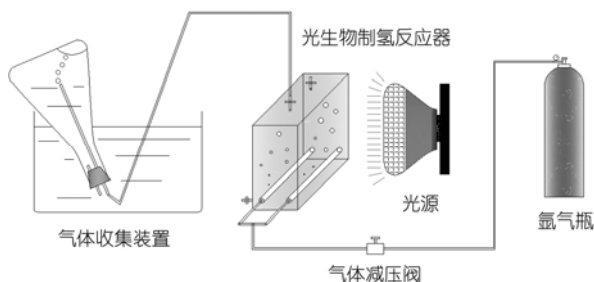


图 1 鼓泡式光生物产氢实验系统

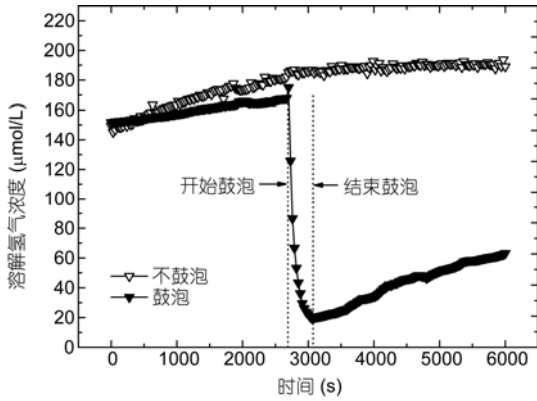


图2 两种操作方式下反应液中 H₂ 浓度变化趋势

快,使得溶解 H₂ 浓度下降迅速;而液相中溶解 H₂ 浓度的降低使得气液相界面处的浓差逐渐减小,气液相间的传质速率减慢,造成后期溶解 H₂ 浓度的变化趋缓.值得指出的是,液相中溶解 H₂ 浓度的减小有利于光生物反应器的产氢过程.这是由于光合细菌产氢过程中产生的 H₂, CO₂ 等代谢气体分子首先溶解于反应液,随着光生化反应的进行,液相中溶解气的浓度会逐渐升高,对光合细菌的产氢过程形成产物反馈抑制作用.由上述分析可知,向反应器内鼓入 Ar 气泡,可以有效去除反应液中溶解的 H₂, CO₂ 等代谢气体,降低液相气体浓度,减小产物反馈抑制作用,从而促进光合产氢的进行.表 1 示出了鼓泡与不鼓泡两种操作条件下的反应器 6 h 产氢量的对比,实验中进行了一次鼓泡操作.可以看到鼓泡条件下光生物反应器的总产氢量和产氢速率均大幅提高了 185%.此外,向光生物反应器内鼓泡还可以改善菌液的混合状况,促进光合细菌细胞对营养的吸收,有利于光合细菌产氢.

2.2 鼓泡对光合细菌生长的影响

(1) 光合细菌菌液吸光度的变化. 菌液的吸光度(OD_{600 nm})变化可以反映液相中细菌生物量的变化情况,间隔鼓泡操作条件(间隔 3, 6, 12 h)对反应器内

表 1 两种操作条件下光合细菌产氢性能对比

操作条件	产氢量(mmol)	产氢速率(mmol L ⁻¹ h ⁻¹)
不鼓泡	1.59	0.44
鼓泡	4.53	1.26
性能提升量	185%	185%

菌液吸光度的影响如图 3 所示.从图中可以看出,在相同初始菌体浓度条件下,4 种操作条件下光合细菌的生长曲线基本一致,均呈“S”型,但生长速率和平均菌体浓度各有差异.不鼓泡条件下菌液的吸光度在初始 24 h 内基本维持不变,在 24~48 h 内急剧增加,然后增长趋势逐渐变缓,在 72 h 达到最大值后很快下降.与不鼓泡的情况相比,间隔 3 h 鼓泡条件下光合细菌菌体浓度在初始的 24 h 内有所下降,在 24~48 h 之间菌体浓度快速增加,但此时菌体生长速率仍相对较慢,这可能是由于气泡从反应器底部上升的过程中所产生的剪切力对光合细菌的生长造成了一定的不利影响;在 48 h 之后菌体生长速率增大且明显高于不鼓泡时,这主要是当溶液中的菌体浓度值逐渐增大,光合细菌进入指数生长期,细胞的分裂繁殖旺盛,生理活性高,抗外界环境干扰的能力增强,从而克服了鼓泡所带来的不利影响.由此也导致了间隔 3 h 鼓泡条件下菌悬液浓度在 67 h 之前均低于不鼓泡时,而其在 72 h 达到的最大值却高于不鼓泡情况(图 3).72 h 之后菌悬液浓度逐渐出现缓慢下降,但实验时间终止时菌悬液的浓度在 4 种操作条件中维持最高值.将鼓泡间隔时间增长到 6 h 后,气泡上升运动所致剪切力的影响减弱,菌液吸光度在开始 24 h 内缓慢增大,而后在 24~72 h 内快速增加,且在 48~72 h 间菌体的增长速率高于不鼓泡时,在 72 h 达到最大值后逐渐下降.当鼓泡间隔时间继续增长到 12 h 时,鼓泡条件下菌液吸光度首先缓慢下降,随后急剧增加,在 48 h 即达到最大值,然后呈现快速下降的趋势.

从图 3 中看到,不鼓泡、间隔 3, 6 和 12 h 鼓泡

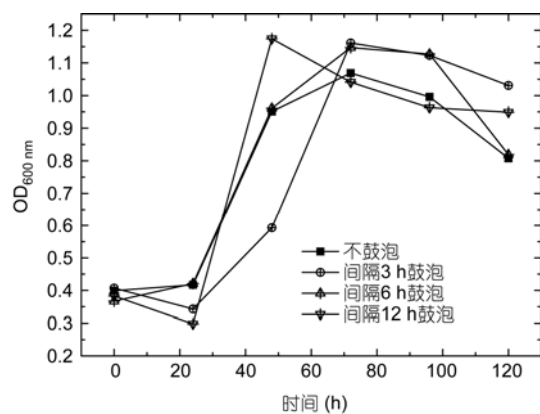


图 3 反应器内菌悬液 OD_{600 nm} 值的变化

条件下的菌液吸光度最大值分别为 1.069, 1.161, 1.127, 1.174, 在菌体浓度达到最大值后的菌液吸光度平均值分别为 0.958, 1.105, 1.031, 1.032. 由此可知, 鼓泡条件下的光合细菌生长情况较好, 其平均菌液吸光度明显高于不鼓泡条件. 这主要是由于光合细菌产氢过程中, 鼓泡不仅可以起到搅拌菌液、满足底物和菌体混合均匀的要求, 而且能有效提高气体代谢产物由液相到气相的传质速率, 降低了气体代谢产物在液相的浓度(图2), 削弱代谢产物的抑制, 促进光合细菌菌体生长. 但对比3种鼓泡条件下的菌体浓度变化发现, 频率较高的鼓泡操作会降低光合细菌的生长速度, 延长达到最大菌体浓度的时间; 而较低频率的鼓泡操作下, 产物反馈抑制作用较强, 使得平均菌体浓度偏低.

(2) 反应液 pH 的变化. 溶液 pH 对微生物的生理代谢影响很大. pH 影响细胞质膜的渗透性、膜结构的稳定性和营养物质的溶解性或电离性, 影响营养物质的代谢和吸收, 从而影响微生物的生长速度^[20]. 不同鼓泡操作条件下反应器内反应液 pH 随时间变化如图4所示. 从图4可以看到, 4种操作条件下反应液 pH 在初始 24 h 内都维持在 6.7 左右, 而在 24~48 h 间均呈显著下降趋势, 其中间隔 3 h 鼓泡条件下的反应液 pH 下降较慢. 这主要是由于光合细菌利用葡萄糖作为碳源代谢产 H₂ 的同时还生成 CO₂ 和小分子有机酸, 酸性产物随着代谢过程的进行而不断累积, 使得反应液 pH 下降; 而间隔 3 h 鼓泡条件下光合细菌在该时间段的生长速率最慢, 菌体浓度最低(图3), 其代谢产物量相对较少, 从而造成 pH 下降较慢. 48 h 以后, 4种操作条件下反应液 pH 的变化趋势发生较大

改变, 不鼓泡条件下的反应液 pH 持续下降至 4.2 左右, 而鼓泡条件下的反应液 pH 下降趋势逐渐变缓, 转而逐渐上升, 最后维持在 5.4~5.9 的范围内, 其中间隔 3 h 鼓泡条件下反应液 pH 始终维持高于其他操作条件下的 pH. 这应该是由鼓泡影响了光合细菌产氢过程中的代谢途径, 改变了产物的相对比例^[21], 从而影响反应液的 pH. 从另一方面来讲, pH 和末端产物也将影响产氢菌发酵类型的形成和转化. 因此, 鼓泡条件下反应液 pH 在后期的上升可能是由于发酵代谢类型的转变而造成的. 此外, 光生化反应中产生的 CO₂ 会有一部分溶解于反应液中形成碳酸导致 pH 下降, 而通过鼓泡方法可以将溶解的 CO₂ 从液相中置换出来, 这也使得反应液 pH 升高.

2.3 鼓泡对光合细菌底物消耗和产氢特性的影响

在相同的初始底物浓度和培养条件下, 4种操作方式下葡萄糖底物消耗变化情况如图5所示. 从图中可以看到, 除间隔 3 h 鼓泡方式外, 其他3种操作方式下反应液中底物浓度下降趋势基本一致. 初始 24 h 内葡萄糖浓度缓慢下降, 24~72 h 内随着菌体浓度的快速增长, 葡萄糖浓度快速下降, 72 h 以后下降趋势减缓. 间隔 3 h 鼓泡条件下, 72 h 内葡萄糖浓度下降幅度较少且明显高于其他3种情况, 这主要是由于间隔 3 h 鼓泡的操作在实验前期对光合细菌生长造成较大影响, 光合细菌的生长速度明显较慢(图3), 而菌体浓度的大小决定了光合细菌对葡萄糖消耗速率的快慢, 因此在前期光合细菌的葡萄糖消耗速率较慢; 而 72 h 后, 葡萄糖浓度下降加快, 这是由于光合细菌菌体浓度在此时达到了最大值(图3), 细菌量的增多

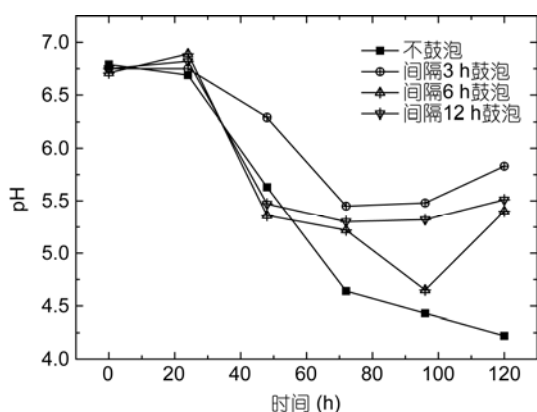


图4 反应液 pH 变化规律

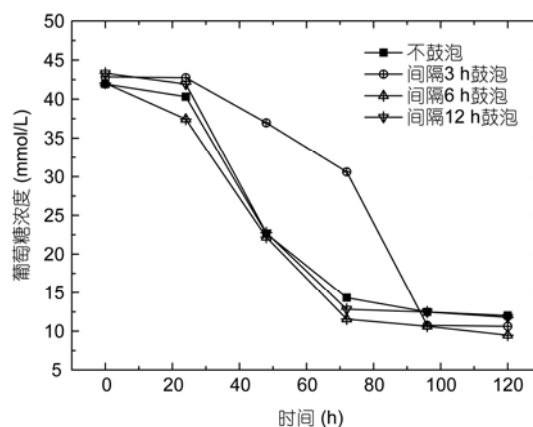


图5 反应器内底物浓度的变化规律

表2 不同操作条件下鼓泡式光生物反应器产氢及底物消耗特性

操作条件	平均底物消耗速率 (mmol L ⁻¹ h ⁻¹)	平均产氢速率 (mmol L ⁻¹ h ⁻¹)	总产氢量 (mmol)	产氢得率 (mol (H ₂)/mol (glucose))	光能转化效率 (%)
不鼓泡	0.25	0.12	8.39	0.46	4.66
间隔 3 h 鼓泡	0.28	0.50	33.25	1.79	18.46
间隔 6 h 鼓泡	0.27	0.34	20.73	1.25	10.98
间隔 12 h 鼓泡	0.27	0.33	18.82	1.24	7.46

导致葡萄糖的消耗速率明显加快、消耗量增加。由于本实验中反应器是序批次培养模式，因此在产氢反应进行到最后时，4种操作条件下反应液最终葡萄糖浓度基本相同，在 9.5~12 mmol L⁻¹ 之间。

光生物制氢反应器在 4 种操作条件下的平均底物消耗速率、平均产氢速率、总产氢量、产氢得率及光能转化效率列于表 2。从表中可以看出，4 种操作条件下的平均底物消耗速率相差不大，在 0.25~0.28 mmol L⁻¹ h⁻¹ 范围之间。而不同条件下的产氢性能差异明显，鼓泡条件下反应器的产氢性能均高于不鼓泡条件下的产氢性能，其中间隔 3 h 鼓泡条件下反应器的产氢速率最大，产氢能力最强，平均产氢速率和累计产氢量分别为 0.5 mmol L⁻¹ h⁻¹ 和 33.25 mmol；随着鼓泡间隔时间的延长，产氢速率有所下降，累积产氢量逐渐减少。产氢量的多少也决定了产氢得率和光能转化效率的大小，间隔 3 h 鼓泡时反应器的产氢得率和光能转化效率分别为 1.79 mol (H₂)/mol (glucose) 和 18.46%，反应器整体性能较另外 3 种操作方式有很大提升。造成这种产氢能力差异的主要原因是：在光合细菌产氢过程中，反应液中 H₂ 和 CO₂ 分压的大小影响着光发酵产氢过程的进行，产氢代谢途径对 H₂ 和 CO₂ 分压敏感且容易受到末端产物抑制。通过向反应器内鼓入 Ar 气泡，减少了反应液中的 H₂ 和 CO₂ 以及挥发性有机酸的浓度，从而减弱光

发酵产氢过程中的产物抑制作用，使得光合细菌在消耗相同的碳源底物量的情况下产生更多的 H₂。随着液相中挥发酸的去除，整个反应体系的 pH 也随之改变，因此光合细菌产氢性能的提高是 H₂ 和 CO₂ 分压降低以及整个反应体系 pH 改变综合作用的结果。而光合细菌产氢性能随着鼓泡间隔时间的延长逐渐降低，则是由于较长的鼓泡间隔时间使得反应液中累积的 H₂、CO₂ 以及酸性代谢产物逐渐增多，产物反馈抑制作用越强烈，造成产氢性能的逐渐下降。

3 结论

(1) 光合细菌产氢过程中，利用鼓泡法可以有效去除反应液中的溶解产物气体，降低液相中的 H₂ 和 CO₂ 分压力，有效减少产物反馈抑制作用，提高反应器产氢性能。

(2) 向反应器内鼓入 Ar 气泡增加了光合细菌的平均菌体浓度，同时影响产氢过程中反应液 pH 的变化，使其在产氢过程中后期逐渐上升，从而促进产氢。

(3) 鼓泡式光生物制氢反应器产氢性能的提高随着鼓泡间隔时间的增加而降低，间隔 3 h 鼓泡时产氢性能最强，此时平均底物消耗速率、平均产氢速率、累积产氢量、产氢得率和光能转化效率均达到最大值，分别为 0.28 mmol L⁻¹ h⁻¹，0.50 mmol L⁻¹ h⁻¹，33.25 mmol，1.79 mol (H₂)/mol (glucose) 和 18.46%。

参考文献

- 1 Vijayaraghavan K, Soom M A M. Trends in bio-hydrogen generation—A review. *Environ Sci*, 2006, 3: 255–271
- 2 Das D, Nejat V T. Advances in biological hydrogen production processes. *Int J Hydrog Energy*, 2008, 33: 6046–6057
- 3 Melis A, Melnicki M R. Integrated biological hydrogen production. *Int J Hydrog Energy*, 2006, 31: 1563–1573
- 4 Chen C Y, Lu W B, Liu C H, et al. Improved phototrophic H₂ production with *Rhodospseudomonas palustris* WP3-5 using acetate and butyrate as dual carbon substrates. *Bioresour Technol*, 2008, 99: 3609–3616
- 5 Erog lu I, Tabanog lu A, Gündüz U, et al. Hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* O.U.001 in a flat plate solar bioreactor. *Int J Hydrog Energy*, 2008, 33: 531–541

- 6 Mandal B, Nath K, Das D. Improvement of biohydrogen production under decreased partial pressure of H₂ by *Enterobacter cloacae*. *Biotechnol Lett*, 2006, 28: 831–835
- 7 Kim D H, Han S K, Kim S H, et al. Effect of gas sparging on continuous fermentative hydrogen production. *Int J Hydrog Energy*, 2006, 31: 2158–2169
- 8 Mizuno O, Dinsdale R, Hawkes F R, et al. Enhancement of hydrogen production from glucose by nitrogen gas sparging. *Bioresour Technol*, 2000, 73: 59–65
- 9 Angenent L T, Karim K, Al-Dahhan M H, et al. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends Biotechnol*, 2004, 22: 477–485
- 10 刘如林, 刁虎欣, 梁凤来, 等. 光合细菌及其应用. 北京: 中国农业科技出版社, 1991
- 11 Levin D B, Pitt L, Love M. Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *Int J Hydrog Energy*, 2004, 29: 173–185
- 12 Kraemer J T, Bagley D M. Optimisation and design of nitrogen-sparged fermentative hydrogen production bioreactors. *Int J Hydrog Energy*, 2008, 33: 6558–6565
- 13 Lamed R J, Lobos J H, Su T M. Effects of stirring and hydrogen on fermentation products of *Clostridium thermocellum*. *Appl Environ Biol*, 1988, 54: 1216–1221
- 14 Tanisho S, Kuromoto M, Kadokura N. Effect of CO₂ removal on hydrogen production by fermentation. *Int J Hydrog Energy*, 1998, 23: 559–563
- 15 Crabbendam P M, Neijssel O M, Tempest D W. Metabolic and energetic aspects of the growth of *Clostridium butyricum* on glucose in chemostat culture. *Arch Microbiol*, 1985, 142: 375–382
- 16 王永忠, 廖强, 朱恂, 等. 一株光合细菌的分离鉴定及污水处理能力研究. *应用与环境生物学报*, 2008, 14: 673–677
- 17 张龙翔, 张庭芳, 李令媛. 生化实验方法和技术. 北京: 高等教育出版社, 2003. 1–3
- 18 Wang Y Z, Liao Q, Zhu X, et al. Characteristics of hydrogen production and substrate consumption of *Rhodospseudomonas palustris* CQK 01 in an immobilized-cell photobioreactor. *Bioresour Technol*, 2010, 101: 4034–4041
- 19 Zhang C, Zhu X, Liao Q, et al. Performance of a groove-type photobioreactor for hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria. *Int J Hydrog Energy*, 2010, 35: 5284–5292
- 20 刘常青, 张江山, 牛冬杰, 等. 初始 pH 对酸性预处理污泥厌氧发酵产氢的影响. *环境科学*, 2008, 29: 2628–2632
- 21 Kraemer J T, Bagley D M. Improving the yield from fermentative hydrogen production. *Biotechnol Lett*, 2007, 29: 685–695

Growth and hydrogen production of *Rhodoseudomonas palustris* CQK-01 in a gas sparging photobioreactor

QU XiaoFan, LIAO Qiang, ZHU Xun, WANG YongZhong & LI Jun

Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University; Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of the Ministry of Education, Chongqing 400030, China

Batch culture hydrogen production by the purple non-sulfur phototrophic bacteria *Rhodoseudomonas palustris* CQK-01 was experimentally investigated in a novel gas sparging photobioreactor. The effects of sparging frequency on the growth and hydrogen production performance of *Rhodoseudomonas palustris* CQK-01 are discussed. The experimental results showed that sparging Ar gas into the reactor effectively reduced hydrogen concentration in the culture and hence weakened the product feedback inhibition, resulting in enhancement of hydrogen production performance. The gas sparging frequency was found to be an important factor for bacterial growth and hydrogen production by photosynthetic bacteria (PSB), and the optimum hydrogen production performance of the bioreactor was achieved under gas sparging with an interval of 3 h. The total hydrogen production, light conversion efficiency, hydrogen yield, average substrate consumption rate and average hydrogen production rate were 33.25 mmol, 18.46%, 1.79 mol (H₂)/mol (glucose), 0.28 mmol L⁻¹ h⁻¹ and 0.50 mmol L⁻¹ h⁻¹, respectively.

photosynthetic bacteria, gas sparging, hydrogen concentration, hydrogen production, photobioreactor

doi: 10.1360/972011-550