doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.032

光合-厌氧混合菌群生物共发酵产氢动力学研究

杜金宇[1]　任学勇[2]　青春耀[3]　荆艳艳[3]　李林泽[3]　王　毅[3]

(1.河南牧业经济学院能源与动力工程学院,郑州 450011;2.北京林业大学材料科学与技术学院,北京 100083;
3.河南农业大学农业农村部农村可再生能源新材料与装备重点实验室,郑州 450002)

摘要:以光合、厌氧细菌混合菌群为对象,研究了混合菌群共发酵产氢过程中产氢动力学特性,建立了混合菌群生物共发酵产氢过程中关于菌体质量浓度、底物利用及产氢量的动力学模型。将光照因素引入混合菌群产氢动力学模型中,采用同伦摄动法(HPM)对非线性动力学模型进行求解,得到了混合菌群共发酵产氢过程中菌体质量浓度、底物利用及产氢量的动力学模型。通过与实验数据对比,模型与实验数据基本一致,能够很好地反映出共发酵产氢过程中产氢参数的变化趋势。对建立的 3 个动力学模型的动力学参数的相互关系及其敏感性进行了分析,研究发现动力学参数中最大比生长速率对模型结果的影响最大,最大比生长速率对菌体质量浓度影响的变化量达到 79%,对底物质量浓度影响的变化量达到 118%,对产氢量影响的变化量达到 98.4%。

关键词:生物制氢;混合菌群;共发酵;动力学模型;同伦摄动;敏感性分析

中图分类号:TK6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)03-0294-06

Dynamic Characteristics of Co-fermentative Hydrogen Production by Mixed Photosynthetic and Anaerobic Consortium

DU Jinyu[1]　REN Xueyong[2]　QING Chunyao[3]　JING Yanyan[3]　LI Linze[3]　WANG Yi[3]

(1. *School of Energy and Power Engineering*, *Henan University of Animal Husbandry and Economy*, *Zhengzhou* 450011, *China*
2. *College of Materials Science and Technology*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Key Laboratory of New Materials and Facilities for Rural Renewable Energy*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

Abstract: Aiming to combine the advantage of photo-fermentation and dark-fermentation for biohydrogen production, the mixed photosynthetic and anaerobic bacteria consortium (MPAC) was used to study the co-fermentative hydrogen production. The kinetic characteristics of co-fermentative hydrogen production by MPAC were studied. The kinetic models of cell growth, substrate utilization and hydrogen production of co-fermentative hydrogen production by MPAC were established. The illumination factor was firstly introduced into the kinetic model of bio-hydrogen production. The nonlinear differential equation was solved by homotopy perturbation method (HPM) and the kinetic models were obtained. By comparing with the experimental data, the model can be consistent with the experimental data, which can well reflect the change of biomass concentration, substrate concentration and hydrogen production in the process of co-fermentative hydrogen production. The relationship between the kinetic parameters and the sensitivity of the three established kinetic models were analyzed. The results showed that the maximum specific growth rate of the kinetic models had the biggest influence on the results, and the change of the cell growth reached 79%, the change of substrate concentration reached 118%, and the change of hydrogen produced reached 98.4%. The three established models were suitable for describing the kinetic characteristics of biohydrogen production.

Key words: bio-hydrogen; mixed consortium; co-fermentation; kinetics; homotopy perturbation; sensitivity analysis

收稿日期:2018-12-18　修回日期:2019-01-13

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51376056)、河南省科技发展计划项目(182102110396、152300410072)和河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2017SJGLX246)

作者简介:杜金宇(1976—),男,讲师,博士,主要从事可再生能源研究,E-mail:dujyu@163.com

通信作者:王毅(1981—),男,实验师,博士,主要从事生物质能研究,E-mail:wangyi2543@126.com

0　引言

氢能因其清洁、高效、可再生的特点，是一种理想的替代能源。生物制氢能将氢能生产与废弃物利用、太阳能转化和污染治理等相结合，具有广阔的应用前景[1-2]。目前，主要有两种研究较多的生物制氢方法，一是厌氧细菌暗发酵制氢，能够利用廉价而大量的有机废弃物为原料进行制氢，制氢成本低，产氢速率快，但是暗发酵产氢效率较低[3-5]。二是光合细菌光发酵制氢，可以利用暗发酵产氢的代谢产物进行产氢，产氢效率高，但其底物降解能力低，产氢速率慢[6]。为了克服厌氧细菌暗发酵制氢和光合细菌光发酵制氢各自的缺点，根据其代谢过程互补的性质，将暗发酵和光发酵联合起来进行联合制氢可以有效提高制氢效率[7-8]。

越来越多的研究者开始研究将光合细菌和厌氧细菌共同培养建立暗发酵和光发酵同时进行的共发酵产氢体系。FANG 等[9]研究发现将厌氧细菌 *Clostridium butyricum* 和光合细菌 *Rhodobacter sphaeroides* 共同培养利用葡萄糖为底物的产氢量比单独的暗发酵或光发酵的产氢量大。MIYAKE 等[10]将厌氧细菌 *C. butyricum* 和光合细菌突变株共同培养产氢，发现两种细菌混合培养的产氢量从 1.1 mol/mol 上升到 7.0 mol/mol（以葡萄糖为底物计）。ASADA 等[11]报道了将 *Lactobacillus* 和 *R. sphaeroides* RV 固定化混合培养产氢时，产氢量可以达到 7.1 mol/mol。发展两种或多种细菌共存的共发酵产氢体系对于提高生物制氢效率、实现生物制氢规模化应用具有重要意义。

生物制氢最重要的目标就是实现制氢过程优化和控制，以实现规模化绿色生物氢能生产，而制氢过程数学模型的建立则是实现制氢过程优化控制的重要手段[12]。生物制氢动力学的研究以及数学模型的建立和优化能够更好地认识产氢微生物制氢过程中菌体的生长和产物的形成机制，能够有效分析和预测生物制氢的产量和过程控制，从而显著提高生物制氢效率。LUIS 等[13]建立了一个连续流生物制氢系统的数学模型，OBEID 等[14]建立了一个沼泽红甲单胞菌批式光发酵生物制氢的动力学模型，ZHANG 等[15]采用 GMOPERZ 模型分析了光合细菌混合菌群的光发酵制氢。但是这些研究都是集中于利用现有的模型对生物制氢进行分析和预测，而且只针对产氢量进行数学模型的分析和动力学参数的计算，没有将生物发酵制氢过程中菌体生长、底物消耗以及产氢量统一进行考虑，生物制氢过程的生长动力学、基质消耗动力学以及产氢动力学数学模型的研究还未展开[16]。

本文在研究光合、厌氧混合菌群共发酵产氢特性的基础上，建立混合菌群生物共发酵产氢过程的菌体生长动力学、底物降解动力学和产氢力学模型，分析数学模型中动力学参数变化对共发酵产氢的影响，对数学模型动力学参数的敏感性进行分析。目的在于建立光合、厌氧混合菌群生物共发酵产氢的动力学模型，为生物制氢反应器的运行和优化及生物氢能的实际应用提供参考和依据。

1　实验

1.1　实验材料

1.1.1　混合菌群

实验使用的光合、厌氧混合产氢菌群由河南农业大学农业农村部农村可再生能源新材料与装备重点实验室提供，混合菌群筛选过程参见文献[12, 17]。该菌群包含 5 种光合细菌、11 种厌氧细菌。

1.1.2　培养基

（1）生长培养基：NH_4Cl 质量浓度 0.1 g/L、$NaHCO_3$ 质量浓度 0.2 g/L、K_2HPO_4 质量浓度 0.02 g/L、CH_3COONa 质量浓度 0.3 g/L、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 质量浓度 0.02 g/L、NaCl 质量浓度 0.2 g/L、酵母膏质量浓度 0.1 g/L。培养基在 0.1 MPa 下灭菌 20 min。

（2）产氢培养基：NH_4Cl 质量浓度 0.4 g/L；$MgCl_2$ 质量浓度 0.2 g/L；酵母膏质量浓度 0.1 g/L；K_2HPO_4 质量浓度 0.5 g/L；NaCl 质量浓度 2 g/L；谷氨酸钠质量浓度 3.5 g/L，葡萄糖质量浓度 30 g/L。

1.2　实验方法

1.2.1　产氢实验

产氢反应器采用 300 mL 广口瓶，加入 240 mL 产氢培养基，在 121℃条件下灭菌处理 15 min，冷却后接种 60 mL（接种量 20%）菌种，顶部空间充入氩气，用胶塞密封，石蜡封口。培养温度 30℃，利用 60 W 白炽灯光照，反应器外表面的光照强度为 150 W/m^2，发酵产生的气体用排水集气法收集，记录产气量[18]。

1.2.2　测试方法

（1）氢气浓度

氢气浓度采用安捷伦 6820GC－14B 型气相色谱仪进行测定。色谱条件：进样口温度 100℃，柱温 80℃，TCD 检测器 150℃，进样量 500 μL，保留时间 2 min，填充有 5A 分子筛的 1 m 柱，载气为氩气[19]。

（2）菌体生物量

菌体细胞浓度采用光电比浊法测定，使用 721 型分光光度计测量菌体细胞在 660 nm 处的吸光度，对照吸光度与菌体浓度的标准曲线获得菌体浓度。

(3)底物浓度

产氢底物葡萄糖浓度测试采用 DNS 法测定,利用分光光度计在 540 nm 波长下测定其 OD(吸光度)值,对照标准曲线获得葡萄糖浓度[20]。

2 数学模型

2.1 模型建立

在批式发酵产氢实验中,菌体生物量和产氢底物质量浓度与时间的关系表示[21-22]为

$$\frac{\mathrm{d}X(t)}{\mathrm{d}t}=\mu(S)X(t) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}S(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mu(S)}{Y_{X/S}}X(t) \tag{2}$$

其中 $$\mu(S)=\frac{\mu_{\max}S}{K_S+S}$$

式中 X——菌体质量浓度

S——底物质量浓度

$\mu(S)$——比生长速率

$\mu_{\max}$——最大比生长速率

K_S——饱和常数

$Y_{X/S}$——底物利用率系数

t——时间

产氢速率既与产氢菌体质量浓度直接相关,又与光照强度相关。依赖于光照强度的产氢动力学模型可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}V_{\mathrm{H_2}}(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mu(S)}{Y_{X/P}}\varphi(I)X(t)+\beta X(t) \tag{3}$$

式中 $V_{\mathrm{H_2}}$——产氢量

$Y_{X/P}$——氢得率系数

β——非生长性产物得率系数

$\varphi(I)$——光照强度

当 $t=0$ 时,令 $X(0)=X_0$,$S(0)=S_0$,$V_{\mathrm{H_2}}(0)=V_{\mathrm{H_20}}$。

通过式(1)和式(2)可以得到

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(Y_{X/S}S(t)+X(t))=0 \tag{4}$$

对式(4)求解可得

$$S(t)=S_0+\frac{X_0}{Y_{X/S}}-\frac{X(t)}{Y_{X/S}} \tag{5}$$

该式说明底物质量浓度与生物量呈线性关系,其中直线斜率 $S(t)/X(t)$ 可以由 $S_0+\frac{X_0}{Y_{X/S}}$ 和斜率 $-\frac{1}{Y_{X/S}}$ 获得,底物利用率系数 $Y_{X/S}$ 可以通过直线线性参数获得。其他参数 $\mu_{\max}$ 和 K_S 可以通过式 $\mu(S)=\frac{\mu_{\max}S}{K_S+S}$ 由直线斜率 $\frac{1}{\mu(S)}\Big/\frac{1}{S}$ 获得[23]。

2.2 模型求解

近年来,非线性方程的求解已经有非常深入的研究,研究较多的有同伦摄动法(Homotopy perturbation method)、同伦分析法(Homotopy analysis method)、变分迭代法(Variational iteration method)等[24-25]。同伦摄动法(HPM)因其在零次迭代时能够获得简单的近似解,因此受到广泛应用,本文采用同伦摄动方法对式(1)~(3)非线性微分方程进行求解[26]。菌体质量浓度表示为

$$X(t)=\frac{X_0X_{SS}}{X_0+S_0Y_{X/S}\mathrm{e}^{-At}} \tag{6}$$

其中 $$A=\frac{X_{SS}\mu_{\max}}{Y_{X/S}(K_S+S_0)}$$

$$X_{SS}=X_0+S_0Y_{X/S}$$

将式(6)代入式(4),底物质量浓度表示为

$$S(t)=S_0+\frac{X_0}{Y_{X/S}}-\frac{X_0X_{SS}}{Y_{X/S}(X_0Y_{X/S}\mathrm{e}^{-At})} \tag{7}$$

$$V_{\mathrm{H_2}SS}=V_{\mathrm{H_20}}+\frac{\varphi S_0Y_{X/S}}{Y_{X/P}} \tag{8}$$

式中 $V_{\mathrm{H_2}SS}$——稳定期产氢量

$V_{\mathrm{H_20}}$——起始产氢量

产氢量 $V_{\mathrm{H_2}}(t)$ 代入式(1)、(3)、(6)得到

$$V_{\mathrm{H_2}}(t)=V_{\mathrm{H_20}}+\frac{\beta Y_{X/S}(K_S+S_0)}{\mu_{\max}\left(\lg\frac{X_0+S_0Y_{X/S}\mathrm{e}^{-At}}{X_{SS}\mathrm{e}^{-At}}\right)^{-1}}+\frac{X_0X_{SS}\varphi}{Y_{X/P}[(X_0+S_0Y_{X/S}\mathrm{e}^{-At})^{-1}-X_{SS}^{-1}]^{-1}} \tag{9}$$

式(6)、(7)、(9)分别为生物量、底物质量浓度和产氢量的数学表达式,将式(6)、(7)代入式(9)中,可以得到产氢量与底物质量浓度的关系

$$V_{\mathrm{H_2}}(t)=V_{\mathrm{H_20}}+\frac{\beta Y_{X/S}(K_S+S_0)}{\mu_{\max}}\lg\frac{S_0}{S(t)}+\frac{\varphi S_0Y_{X/S}(S_0-S(t))}{Y_{X/P}} \tag{10}$$

3 结果与分析

3.1 动力学参数

动力学参数由实验数据获得。其中 $\mu_{\max}=0.3$ g/L,$K_S=10$ g/L,$Y_{X/S}=0.7$ g/L,$Y_{X/P}=0.7$ g/L,$\beta=12$ g/L,$\varphi(I)=3\ 000$ lx,$X_0=0.2$ g/L,$S_0=4.2$ g/L,$V_{\mathrm{H_20}}=0$ g/L。

式(6)~(9)方程的解析解通过同伦摄动法(HPM)进行求解,图 1 对实验数据获得的菌体质量浓度、底物质量浓度、产氢量和动力学模型进行了对比,模型和实验数据能够很好地保持一致,能够很好地反映产氢过程中菌体质量浓度、底物质量浓度及产氢量的变化情况。

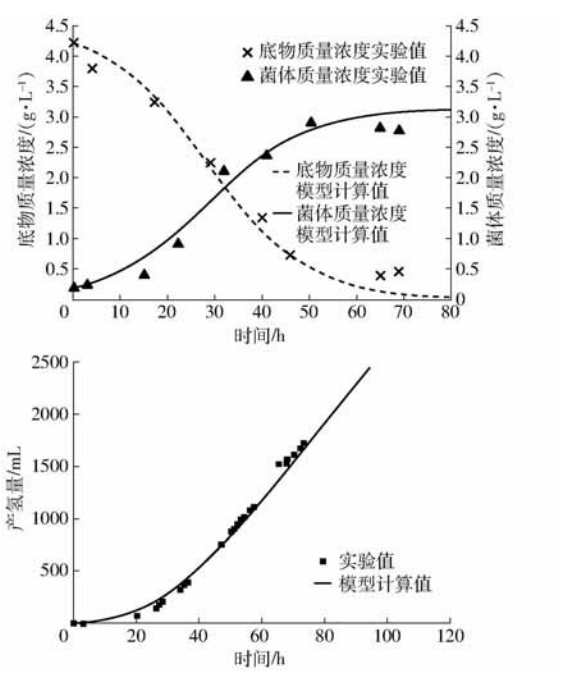

图 1　动力学模型和实验数据的对比

Fig. 1　Comparison of experimental results and kinetics models

3.2　敏感性分析

为了进一步优化动力学模型，有效预测产氢过程中参数的动态变化，对模型的敏感性进行了分析，菌体质量浓度 X 随 μ_{max}、K_S 和 $Y_{X/S}$ 的变化量分别为 79%、-2% 和 23%。底物浓度 S 随 μ_{max}、K_S 和 $Y_{X/S}$ 的变化量分别为 118%、-15% 和 -3%。产氢量 V_{H_2} 随 μ_{max}、$\varphi(I)$ 和 $Y_{X/P}$ 的变化量分别为 98.4%、2% 和 -0.6%。本研究中最大比生长速率 μ_{max} 的变化最为重要，因为 μ_{max} 在菌体质量浓度、底物质量浓度以及产氢量的模型中都直接相关。

图 2a ~ 2c 分别给出了菌体质量浓度 $X(t)$ 关于最大比生长速率 μ_{max}、底物利用率系数 $Y_{X/S}$ 和饱和常数 K_S 随时间 t 的变化趋势。从图 2a 可以看出，最大比生长速率 μ_{max} 越大，菌体质量浓度 $X(t)$ 到达稳定期的时间越短。当 μ_{max} 非常小时，菌体质量浓度达到稳定期的时间会变得很大。图 2b 给出了底物利用率系数的变化对菌体质量浓度的影响，可以看出，菌体质量浓度 $X(t)$ 随着底物利用率系数 $Y_{X/S}$ 的增大而增大，这是因为菌体稳定期浓度 X_{SS} 取决于底物利用率系数 $Y_{X/S}$（$X_{SS} = X_0 + S_0 Y_{X/S}$）。在各种 $Y_{X/S}$ 情况下，菌体质量浓度在 $t = 80$ h 时达到最大值。图 2c 表明，饱和常数 K_S 的变化对菌体质量浓度 $X(t)$ 的影响相对于 μ_{max} 和 $Y_{X/S}$ 并不显著。

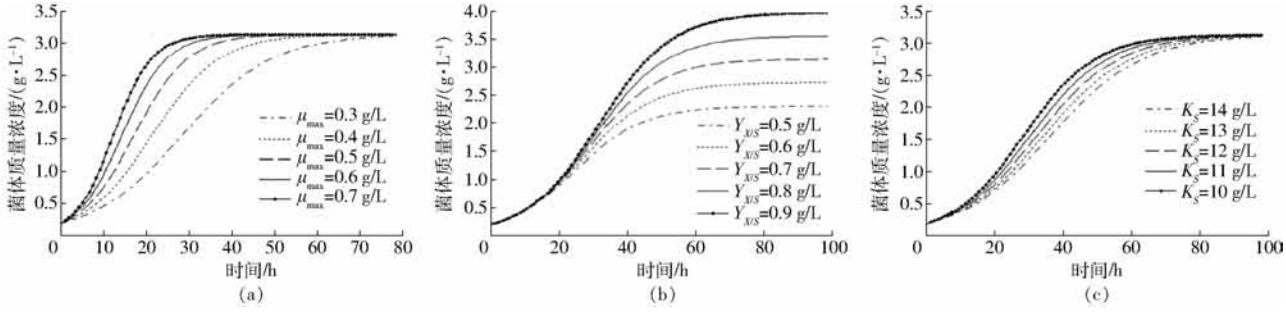

图 2　菌体质量浓度随不同动力学参数的变化曲线

Fig. 2　Changing curves of concentration of biomass with time under different kinetic parameters

图 3 给出了动力学参数的变化对底物质量浓度的影响，从图 3a 可以看出，底物质量浓度 $S(t)$ 随着最大比生长速率 μ_{max} 的增加而迅速降低，很快达到稳定期底物质量浓度 $S_{SS} = 0$。从图 3b 和图 3c 可以看出，随着底物利用率系数 $Y_{X/S}$ 和饱和常数 K_S 的增大，底物质量浓度会增大。

图 4 给出了最大比生长率 μ_{max}、光照强度 $\varphi(I)$ 和非生长性产物得率系数 β 的变化对产氢量 $V_{H_2}(t)$ 的影响。从图 4a 可以看出，随着最大生长速率 μ_{max} 的增高，产氢量 $V_{H_2}(t)$ 也在提高，从图 4b 可以看出，产氢量 $V_{H_2}(t)$ 和非生长性产物得率系数 β 也直接相关，$V_{H_2}(t)$ 随着 β 的增大而提高。图 4c 给出了光照强度

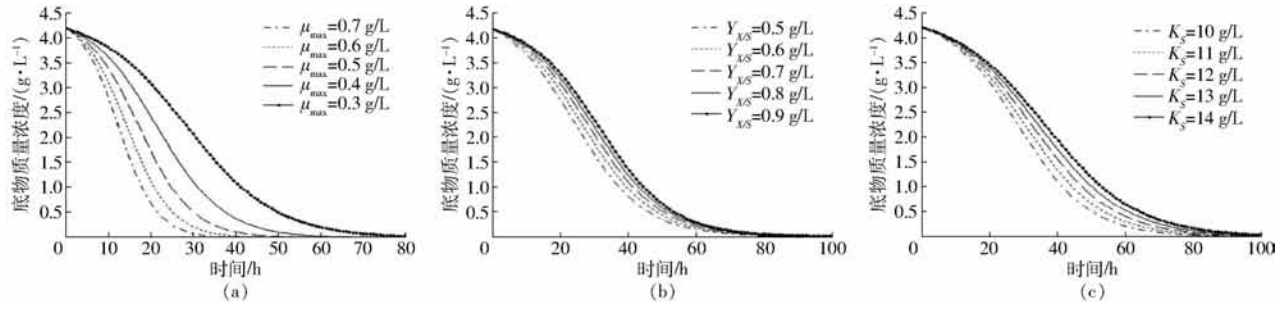

图 3　底物质量浓度随不同动力学参数的变化曲线

Fig. 3　Changing curves of concentration of substrate with time under different kinetic parameters

$\varphi(I)$的变化对产氢量 $V_{H_2}(t)$的影响,可以看出在其他动力学参数一定的情况下,改变光照强度 $\varphi(I)$并不会引起产氢量 $V_{H_2}(t)$的变化,这是因为光照强度对光合细菌的影响主要体现在光照强度较小的范围内,即使当光照强度超过 8 000 lx(图中未列出)时,增加光照强度也不能提高产氢量,该结果与张全国等[27]的研究一致。在其他动力学参数一定的情况下,光照强度对产氢量的影响并不显著,混合菌群生物共发酵产氢过程中,产氢量主要取决于菌体的最大比生长速率,与菌体的生长直接相关,光照强度的影响并不大。

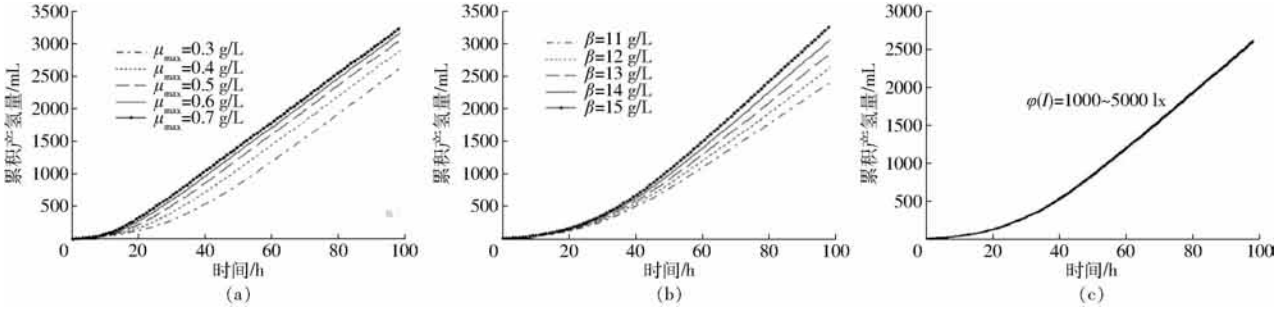

图 4 产氢量随不同动力学参数的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of hydrogen production of substrate with time under different kinetic parameters

4 结论

(1)采用同伦摄动法(HPM)对非线性动力学模型进行求解,得到了混合菌群共发酵产氢过程中菌体浓度、底物利用及产氢量的动力学模型,以及共发酵产氢过程中产氢量对于菌体质量浓度、底物质量浓度的动力学模型,建立了产氢量和菌体生长及底物消耗的关系。

(2)通过与实验数据对比,建立的动力学模型与实验数据基本一致,能够很好地反映出共发酵产氢过程中菌体质量浓度、底物质量浓度、产氢量等的变化趋势。

(3)动力学参数中最大比生长速率对模型结果的影响最大,最大比生长速率对菌体质量浓度影响的变化量达到 79%,对底物质量浓度影响的变化量达到 118%,对产氢量影响的变化量达到 98.4%。

参 考 文 献

[1] McWILLIMAS A. The global hydrogen economy: technologies and opportunities through 2022[R]. Wellesley, MA: BCC Research, 2018.

[2] SHOW K Y, LEE D J, TAY J H, et al. Biohydrogen production: current perspectives and the way forward[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(20): 15616 – 15631.

[3] 张全国,王毅. 光合细菌生物制氢技术研究进展[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 156 – 161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130627&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.027. (in Chinese)

[4] 孙堂磊, 王毅, 胡建军, 等. 玉米秸秆酶解与厌氧发酵产氢实验研究[J]. 太阳能学报, 2015,36(9): 2071 – 2076.
SUN Tanglei, WANG Yi, HU Jianjun, et al. The experiment study on anaerobic fermentation bio-hydrogen production from enzymatic hydrolyzate of corn stover[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(9): 2071 – 2076. (in Chinese)

[5] ZHANG Quanguo, WANG Yi, ZHANG Zhiping, et al. Photo-fermentative hydrogen production from crop residue: a mini review [J]. Bioresource Technology, 2017,229:222 – 230.

[6] ARIMI M M, KNODEL J, KIPROP A, et al. Strategies for improvement of biohydrogen production from organic-rich wastewater: a review[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 75: 101 – 118.

[7] 张志萍, 周雪花, 冯宜鹏, 等. 基于响应面法的秸秆与粪便联合制氢预混工艺优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 97 – 101.
ZHANG Zhiping, ZHOU Xuehua, FENG Yipeng, et al. Optimization of premixing process of joint hydrogen production by straw and manure based on response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 97 – 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20130918&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.018. (in Chinese)

[8] RAI P K, SINGH S P. Integrated dark- and photo-fermentation: recent advances and provisions for improvement[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(44): 19957 – 19971.

[9] FANG Herbert, HAN Ping, ZHANG Tong. Phototrophic hydrogen production from glucose by pure and co-cultures of *Clostridium butyricum* and *Rhodobacter sphaeroides*[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(15): 2223 – 2230.

[10] MIYAKE J, MAO X Y, KAWAMURA S. Photoproduction of hydrogen from glucose by a co-culture of a photosynthetic bacterim and clostrudiun butyricum[J]. Journal of Fermentation Technology, 1984,62:531 – 535.

[11] ASADA Y, TOKUMOTO M, AIHARA Y, et al. Hydrogen production by co-cultures of *Lactobacillus* and a photosynthetic bacterium, *Rhodobacter sphaeroides* RV[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(11): 1509 – 1513.

[12] 王毅, 张川, 荆艳艳, 等. 光合细菌混合菌群 HAU – M1 产氢动力学实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6):1547 – 1553.
WANG Yi, ZHANG Chuan, JING Yanyan, et al. Experimental study of hydrogen producing kinetics of photosynthetic bacteria mixed culture HAU – M1[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(6):1547 – 1553. (in Chinese)

[13] LUIS B C, ANDRES G A, JORGE D M, et al. Mathematical model for a continuous hydrogen production system: stirred fermenter connected to a biocatalyzed electrolysis cell[J]. Biomass Bioenergy, 2013, 48:90 – 99.

[14] OBEID J, MAGNIN J P, FLAUS J M, et al. Modelling of hydrogen production in batch cultures of the photosynthetic bacterium *Rhodobacter capsulatus*[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34:180 – 185.

[15] ZHANG Z P, WU Q L, ZHANG C, et al. Effect of inlet velocity on heat transfer process in a novel photofermentation biohydrogen production bioreactoer using computational fluid dynamics simulation[J]. Bioresources, 2015,10(8):469 – 481.

[16] NATH K, DAS D. Modeling and optimization of fermentative hydrogen production[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 8569 – 8581.

[17] 王毅, 张志萍, 张全国, 等. 光合细菌混合菌群利用牛粪污水产氢实验[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(5): 214 – 219.
WANG Yi, ZHANG Zhiping, ZHANG Quanguo, et al. Hydrogen production characteristics of mixed culture of photosynthetic bacteria using cattle manure wastewater[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):214 – 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20150530&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.030. (in Chinese)

[18] 张全国, 王毅, 李刚, 等. 光合细菌利用葡萄糖产氢过程中菌体衰亡性研究[J]. 太阳能学报, 2009,30(6): 722 – 726.
ZHANG Quanguo, WANG Yi, LI Gang, et al. Study on cell growth decline of photosynthetic bacteria in hydrogen production utilizing glucose[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2009,30(6): 722 – 726. (in Chinese)

[19] 张志萍. 秸秆类生物质超微预处理技术及其产氢可行性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.
ZHANG Zhiping. Study on the technology of ultramicropretreatment by straw biomass and feasibility study of hydrogen production[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012. (in Chinese)

[20] 荆艳艳, 岳建芝, 王毅, 等. 超微玉米秸秆光合产氢响应面法优化研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(1): 14 – 18.
JING Yanyan, YUE Jianzhi, WANG Yi, et al. The optimization on ultramicro cornstalk photosynthetic bacteria hydrogen production by response surface methodology[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(1): 14 – 18. (in Chinese)

[21] 阳广凤, 沈李东, 金仁村, 等. 发酵产氢动力学模型[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(10): 79 – 85.
YANG Guangfeng, SHEN Lidong, JIN Rencun, et al. Kinetic models for fermentative hydrogen production[J]. Environmental Pollution& Control, 2011, 33(10): 79 – 85. (in Chinese)

[22] 孙学习, 李涛, 任保增, 等. 利用动力学模型探讨底物浓度对发酵制氢的影响[J]. 化学工程与装备, 2017(1): 1 – 4.
SUN Xuexi, LI Tao, Ren Baozeng, et al. The effect of substrate concentration on hydrogen production by fermentation using kinetic model[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(1): 1 – 4. (in Chinese)

[23] 李浩, 黄慧群. 餐厨垃圾与污泥厌氧发酵动力学特性分析[J]. 环境工程, 2018(7): 107 – 112.
LI Hao, HUANG Huiqun. Kinetics characterization of anaerobic digestion of food waste activated sludge[J]. Environmental Engineering, 2018(7): 107 – 112. (in Chinese)

[24] MEENA A, RAJENDRAN L. Analysis of a pH-based potentiometric biosensor using the homotopy perturbation method[J]. Chemical Engineering Technology, 2010, 33(12): 1999 – 2007.

[25] RASI M, INDIRA K, RAJENDRAN L. Approximate analytical expressions for the steady-state concentration of substrate and cosubstrate over amperometric biosensors for different enzyme kinetics[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 2013, 45(5): 322 – 336.

[26] ONGUN M, MATH Y. The Laplace adomian decomposition method for solving a model for HIV infection of CD4 + T cells[J]. Computer Model, 2011, 53(5 – 6): 597 – 603.

[27] 张全国, 师玉忠, 张军合, 等. 太阳光谱对光合细菌生长及产氢特性的影响研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(10): 14 – 18.
ZHANG Quanguo, SHI Yuzhong, ZHANG Junhe, et al. Influence of solar spectrum on characteristics of growth and hydrogen production of photosynthetic bacteria[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(10): 14 – 18. (in Chinese)