

生物质发酵制氢技术助力绿色氢能生产

李 兵^{1,2}, 朱向宇^{1,2}, 罗 颖^{1,2*}

(1. 内蒙古自治区新能源与储能技术重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 聚焦生物质发酵制氢技术中光发酵、暗发酵及暗-光耦合发酵技术的最新研究进展, 重点介绍了微生物产氢的代谢机制以及产氢过程的关键控制因素, 揭示了底物浓度、温度、pH 等核心控制参数对产氢效率的调控规律及其优化区间。针对现有发酵制氢技术存在的关键技术瓶颈, 提出了相应的建议。

关键词: 生物质制氢; 光发酵; 暗发酵; 暗-光耦合; 调控参数

中图分类号: TK91; TK6; X71

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)06-0036-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.007

Biomass fermentation technology for hydrogen production supports the production of green hydrogen

LI Bing^{1,2}, ZHU Xiang-yu^{1,2}, LUO Ying^{1,2*}

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of New Energy and Energy Storage Technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: This paper focuses on the latest research progress of light fermentation, dark fermentation and dark-light coupling fermentation technology in biomass fermentation hydrogen production technology. The metabolic mechanism of microbial hydrogen production and the key control factors of hydrogen production process are introduced. The regulation of hydrogen production efficiency and its optimization interval by core control parameters such as substrate concentration, temperature and pH are revealed. In view of the key technical bottlenecks in existing fermentation hydrogen production technology, corresponding suggestions are put forward.

Key words: biomass hydrogen production; light fermentation; dark fermentation; dark-light coupling; control parameter

全球人口增长、城市化与工业化进程加快, 能源需求持续攀升。人类过度开发使用化石燃料, 引发了能源枯竭和全球气候变暖等环境问题, 开发新能源替代传统化石燃料已迫在眉睫。随着我国双碳目标的提出, 现阶段我国持续推进能源结构调整, 大力发展可再生能源, 其中绿色氢能因具有零碳排放、储量丰富、易长期储存等优点, 在可再生能源中备受关注^[1]。

生物质制氢技术是绿色制氢关键技术之一, 主要包括热化学法制氢和微生物法制氢 2 类技术^[2]。在热化学生物质制氢反应过程中, 存在显著的吸热效应, 生产富氢合成气时需要大量的热能, 显著增加了能耗。此外, 该技术也因产物氢气中含有 CO、H₂S 和焦油等杂质, 导致应用场合受到限制。相比之下, 微生物发酵法制氢技术凭借反应条件温和、工艺简便、污染小等优势, 逐渐受到关注。可见, 微生

物发酵制氢技术在氢能领域具有广阔的应用前景, 为能源转型提供了新途径^[3-4]。本文中综述了生物质微生物发酵制氢技术(光发酵制氢、暗发酵制氢, 以及暗光耦合发酵制氢)原理及其工艺控制参数(温度、pH 及底物浓度等), 针对发酵过程优化提出了建议, 旨在系统梳理该领域技术现状、明确优化方向, 提高氢转化效率, 为推动生物质发酵技术的高值化产氢及最终实现在工业化生产中的广泛应用提供参考。

1 生物质发酵制氢技术

1.1 光发酵制氢

光发酵制氢通常是光合细菌在厌氧且有光照的条件下, 借助有机底物来生产氢气的过程, 生物质光发酵制氢过程如图 1 所示。在细菌产氢期间, 光能为氢气的合成提供必要的能量(ATP), 而底物则提

收稿日期: 2025-07-01; 修回日期: 2026-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41963008); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2023LHMS03002); 内蒙古自治区教育厅项目(NJZY23063); 内蒙古自治区直属高校基本科研课题项目(JY20240050)

作者简介: 李兵(2000-), 男, 硕士生; 罗颖(1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源的高效转化和清洁能源生产, 通讯联系人, ngdluoying@imut.edu.cn。

供质子和自由电子^[5]。三磷酸腺苷(ATP)是由光合反应中心接收光能后产生高能电子,高能电子随后传递至光系统 I (PS I) 进行环式磷酸化生成,然后与质子和自由电子通过固氮酶的作用结合生成氢气。目前,针对光合细菌的研究多聚焦于紫色非硫细菌(PNSB),包括沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris*)、荚膜红细菌(*Rhodobacter capsulatus*)、深红螺菌(*Rhodospirillum rubrum*)、嗜硫小红卵菌(*Rhodovulum sulidophilum*)等^[6]。

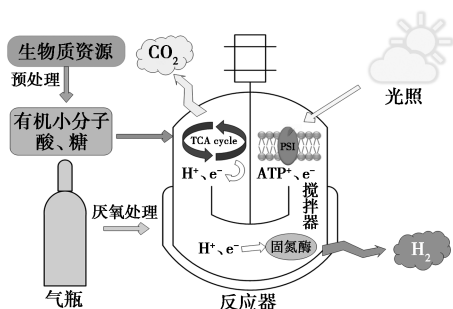


图1 生物质光发酵制氢过程

1.2 暗发酵制氢

暗发酵制氢技术是利用异养厌氧菌通过分解有机物产酸发酵生产氢气。目前,暗发酵细菌产氢途径分为3种,分别是细菌通过糖酵解途径产生丙酮酸后的丙酮酸脱羧途径;甲酸裂解途径;维持辅酶 I (NAD⁺/NADH)的氧化还原平衡途径^[7]。生物质暗发酵制氢过程如图2所示。相较于光发酵制氢工艺,暗发酵具备无需光照(反应器设计成本低)、底物来源广泛、生长速度快以及产氢效率高等优势,更容易被推向规模化生产。该技术的产氢菌主要包括梭菌属(*Clostridium*)、丙酸杆菌属(*Propionibacterium*)、埃希氏杆菌属(*Escherichia*)、乙醇杆菌属(*Ethanoligenens*)、乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)等。这些产氢菌大致可以分为2类:严格厌氧菌和兼性厌氧菌。一般来讲,严格厌氧菌的产氢能力要高于兼性厌氧菌^[8]。

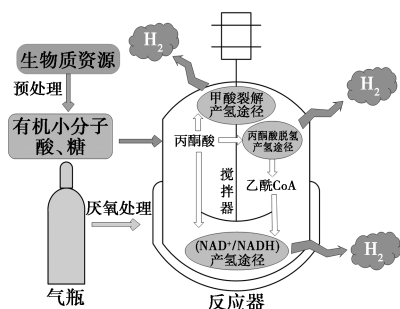


图2 生物质暗发酵制氢过程

根据发酵后的末端产物不同,暗发酵类型分为丁酸型发酵、丙酸型发酵和乙醇型发酵,如表1所

示。其中丙酸型发酵并无H₂的生成,但是,在混合菌群发酵中,丙酸发酵细菌会与其他发酵产氢菌竞争,影响其他发酵产氢菌的产氢能力。因此,在混合菌群发酵过程中,需注意调控发酵的类型。

表1 暗发酵制氢类型

发酵类型	底物类型	主要末端产物	代表性微生物
丁酸型发酵	葡萄糖、蔗糖、淀粉等	丁酸、乙酸、H ₂ 、CO ₂	梭状芽孢杆菌属
			丁酸梭状芽孢杆菌
			酪丁酸梭状芽孢杆菌 丁酸弧菌属
丙酸型发酵	含氮有机物(酵母膏、肉膏等)、纤维素等	丙酸、乙酸、CO ₂	丙酸杆菌属 产酸丙酸杆菌 韦荣氏球菌属
乙醇型发酵	葡萄糖等	乙醇、乙酸、H ₂ 、CO ₂	乙醇杆菌属 哈尔滨乙醇杆菌

2 生物质底物

对于暗发酵制氢工艺,糖类(葡萄糖、蔗糖等)是最优质的底物,但成本高,不适合工业化应用。目前研究较多的发酵底物为可再生生物质,常见的有农业废弃物、废水、城市垃圾、动物粪便、藻类等。木质纤维素生物质以庞大的数量、再生能力,成为发酵制氢最有前途的底物之一,主要来源于农业废弃物(玉米秸秆、小麦秸秆、玉米芯、稻壳等)、林业废弃物(木材、草等)等。木质纤维素是由纤维素、半纤维素、木质素3种聚合物组成。由于这3种聚合物的复杂结构,不利于微生物利用,因此需要预处理来打破坚固的聚合物结构,使微生物更容易降解。目前预处理方法主要有物理预处理、化学预处理、生物预处理。其中物理预处理加化学预处理的使用更加广泛。但预处理后产物中的糠醛和5-羟甲基糠醛等会对生产H₂产生负面影响,因此预处理技术在未来还需更新优化或寻找抗抑制的产氢微生物^[9-10]。

光合细菌在底物的选择上显现出强大的灵活性。目前,光合细菌主要利用单糖和有机小分子酸等物质进行代谢产氢,因此,产氢原料的选择上应首选可以被降解为单糖或有机酸等小分子有机质的物质。Tao等^[11]对不同碳源类型进行光发酵实验对比结果显示,有机酸的氢气转化率达到70%左右,而单糖等氢气转化率为6.4%~52.5%。可见,有机酸更适合作为光合细菌发酵产氢的底物。

3 生物质发酵制氢技术控制参数

发酵法制取生物氢与微生物的代谢密切相关。在发酵过程中,凡是与细菌代谢生长有关的因素,都会对发酵过程的产氢效率有影响,例如底物浓度、pH、温度、光照、氢气分压和添加剂等^[12]。只有将这些影响因素控制在最佳范围,才能保证产氢效果达到最佳,进而推动生物质发酵制氢技术进一步发展。

3.1 底物浓度

底物为细菌产氢代谢过程提供有机物以及还原力,适宜的底物浓度是保障高效产氢的关键。Das 等^[13]利用浓度在 1~6 g/L 之间的废弃马铃薯开展暗发酵制氢研究。研究结果显示,当马铃薯浓度被控制在 2 g/L 时,产氢量达到最高值,为 175 mL/g。此项研究表明,在马铃薯浓度为 1 g/L 时,由于碳源有限,细菌初始生长受到限制,进而导致产氢率偏低。当马铃薯浓度超过 2 g/L 时,底物的消耗效率降低,pH 从 5.2 降至 4.6,氢气产率也从 175 mL/g 降至 120 mL H₂/g,这是因为高浓度的马铃薯促使挥发性脂肪酸不断积累,从而抑制了氢化酶的活性。

总的来说,较低的底物浓度无法满足细菌正常代谢与生长需求,细菌生长速度缓慢,产氢效率低下;而较高的底物浓度则容易造成酸性代谢产物的积累,引起酸碱失衡,最终致使细菌失活,进而抑制产氢。然而放眼于实际应用,常规浓度下的发酵会出现诸如占地面积大、尾液排放量多等问题。由此可见,提高高浓度反应器产氢效率的研究,对于发酵制氢技术的发展与推广有着至关重要的意义。

3.2 pH

生物代谢途径、细胞膜的带电性、酶的活性和微生物的生长都受 pH 的影响。如果在发酵过程进行时,pH 未保持在最佳范围内,则会影响微生物的活性,从而阻止生物生产生物氢。不同种属的微生物所适宜的 pH 范围有所不同。一般情况下,光发酵细菌的最佳 pH 范围为 6.5~7.5,暗发酵细菌的最佳 pH 范围为 5.5~6.5^[7,12,14]。

3.3 温度

温度能够维持细胞和固氮酶的活性。大部分选育出用于光发酵产氢的 PNSB 为嗜温菌,在 25~35℃ 表现出较好的产氢性能,极少数的嗜热菌可被用于光发酵制氢^[15]。在暗发酵过程中,根据细菌适宜生长温度,大概可以分为 15~29℃ (环境温度)、30~39℃ (嗜温)、40~64℃ (嗜热)、65~79℃ (极端

嗜热)、>80℃ (超嗜热)产氢^[16]。目前,由于中温发酵具备技术成本低的优势而备受青睐。高温条件虽然成本高,但是对于选择需要水解的底物(例如纤维素)发酵时,高温能够加速水解,提高产氢速率。值得注意的是,利用混合菌群发酵时,必须在发酵前对菌源进行高温处理,抑制产甲烷群和耗氢菌的活性^[17-18]。总之,温度的选择不仅需要考虑到产氢的效果,也需要考虑整个工程的经济性。

3.4 光照

光发酵制氢作为一个光化学转化过程,始终需要光照提供能量来完成电子的转移,从而实现产氢,因此光照对光发酵来说至关重要。合适的光照强度和光照模式以及光生物反应器可以促进光发酵细菌的生长代谢和氢气的产生^[19]。

高能电子的产生需要充足的光照。低光照强度会使得光合磷酸化产生的电子不足,从而导致与 ATP 和光合色素合成相关酶的活性降低,无法满足光发酵细菌的代谢要求;高光照强度会引发热辐射,导致整个系统的温度升高,削弱固氮酶的活性。Zhang 等^[20]揭示了氢气的产率随光照强度(2 000~6 000 lx)变化呈现先上升后下降的趋势。另外,光照的周期性变化已被证实能够影响细菌的生长和氢气的产生。Jiang 等^[19]提出的较长时间间隔(24、48 h)的明暗交替光发酵制氢策略,使得产氢滞后时间缩短了 0.9 h。从能源利用角度来看(太阳光照除外),间歇式照明方式能够减少能源的消耗。此外,选择合适波长的光照以及在发酵过程中进行搅拌也有助于反应的进行。

3.5 氢气分压(PP)

在发酵过程中,生物反应器顶部氢气的压力(PP)会逐步升高,这使得反应会生成更多酸性副产物,限制制氢细菌的活性,从而抑制氢气的产生^[21]。将分压控制在最佳水平可以提高氢气的产量。目前,常用的减小氢气分压的方法有使用外部气体喷射来降低反应器中氢气的压力,尽管气体喷射的方法能够提高氢气的产量,但也为工业下游气体的处理增加了难度。Lee 等^[22]提出在反应器中使用真空减压发酵的方法,解决了气体喷射的弊端,但增加了反应器运行的成本。总之,该方法均存在一定的局限性,未来的研究或许需要致力于寻找一种既能有效提高氢气产量,又能兼顾成本和后续处理便利性的氢气分压调控方法,从而推动发酵制氢技术在工业生产中的高效应用。

3.6 添加剂

在光发酵过程中,固氮酶参与氢气的生成,因此固氮酶的活性直接影响制氢效率。固氮酶由钼铁蛋白和铁蛋白组成,活性依赖于2种蛋白的协同作用。铁离子也是电子传递链的电子载体。因此,适量钼离子和铁离子的存在可以促进固氮酶活性,提高氢气产率^[23]。另外,锌、锰、镍也能促进生物氢的生成^[24]。

近年来,金属及其氧化物纳米颗粒在暗发酵制氢领域的研究取得了显著进展。研究表明,纳米颗粒通过独特的表面效应和量子尺寸效应,为产氢菌提供了更多的活性位点,同时改善了细胞间的电子传递路径,从而显著提高了暗发酵体系的产氢效率^[25]。Gadhe等^[26]在对乳制品废水生物氢生产的过程中加入了0.5~10 mg/L的氧化镍纳米颗粒。结果表明,氧化镍纳米颗粒对氢气的产量有着显著的积极影响,尤其当氧化镍浓度在10 mg/L时,氢气产量达到15.7 mmol/g COD,较对照组提高16%。另外,辛红梅^[27]探究了不同粒径大小的Fe₃O₄纳米颗粒对厌氧污泥发酵产氢的影响。结果表明,40~60 nm范围内的纳米颗粒使得氢气产量提高到243 mL,较对照组提高29.7%。总之,金属纳米颗粒的粒径大小与添加量对暗发酵的产氢量有着不可忽视的影响,确定两者的最佳数值可以有效提高产氢效率。

3.7 水力停留时间(HRT)

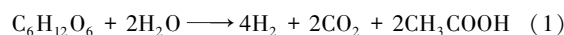
水力停留时间(HRT)是衡量生物质在厌氧发酵反应器中停留时间的重要参数。研究表明,将HRT优化控制在4~8 h范围内可显著提升生物制氢效率,这主要归因于较短的HRT能够有效降低挥发性脂肪酸(VFAs)等代谢产物的积累,从而减轻产物抑制作用。然而,当HRT降低至临界值以下时,会引发微生物细胞的洗出现象,导致系统内生物量减少,进而造成产氢效率下降^[28]。因此,在实际操作中需权衡HRT对产氢效率的正负影响,确定最佳停留时间范围。

4 暗-光耦合发酵制氢技术

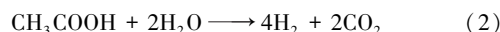
暗发酵制氢代谢产物包含挥发性脂肪酸(乙酸、丁酸等)和乙醇等。然而,代谢产生的有机小分子酸会导致发酵环境的pH下降,从而抑制微生物的活性,阻碍氢气的生产^[7]。这一问题是暗发酵制氢技术未能实现大规模工业化应用的关键限制因素。相比之下,光发酵制氢能够利用这些有机小分

子酸进行产氢。将暗发酵与光发酵工艺进行耦合,可以显著提高氢气的产量^[5]。理论表明,当有机物被完全氧化时,耦合工艺的氢气产量高达12 mol/mol葡萄糖[式(1)~(3)]^[29]。这种协同效应为生物氢的生产提供了更为高效的途径。

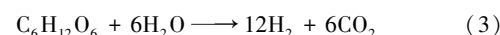
暗发酵制氢工艺:



光发酵制氢工艺:



暗-光耦合发酵制氢工艺:



目前,根据发酵工艺方式的不同,暗-光耦合发酵制氢分为暗-光细菌混合培养制氢和两步法制氢(图3)。

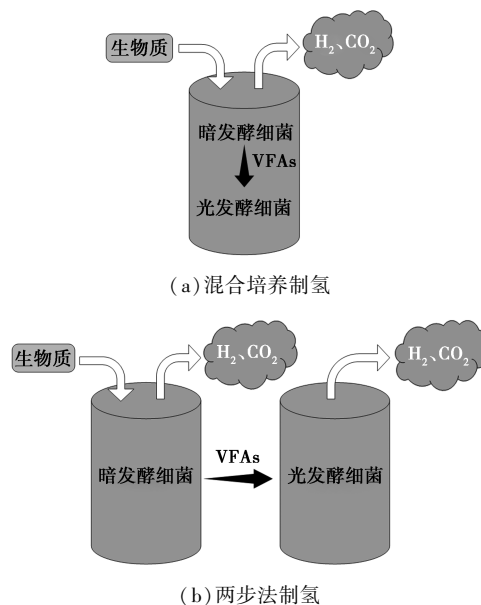


图3 暗-光耦合发酵制氢工艺

虽然将暗发酵与光发酵耦合可以进一步提高生物氢的产量,但也存在需要攻克的难题:在细菌混合制氢过程中,光发酵细菌和暗发酵细菌对pH环境的要求存在显著差异^[12,14]。光发酵细菌的最佳pH范围为6.5~7.5,而暗发酵细菌则更适应酸性环境,最佳pH范围为5.5~6.5。然而,在暗发酵过程中,有机酸的不断产生会导致环境pH逐渐下降,从而超出光发酵细菌的适宜pH范围,抑制其代谢活性,最终降低氢气的产率。pH不匹配问题是限制细菌混合制氢效率的关键因素之一。在两步法制氢过程中,暗发酵阶段产生的发酵液含有多种有机酸和代谢副产物,这些成分需要经过复杂的预处理(如过滤、稀释、pH调节等)才能满足光发酵细菌的生长和代谢需求。这种额外的处理步骤不仅增加了工艺

的复杂性,还显著提高了运行成本,从而制约了两步法制氢技术的规模化应用和经济效益^[30]。针对暗-光耦合发酵制氢技术,在未来或许能够通过研发耐酸性的光发酵细菌,降低环境变化对光发酵制氢的抑制,促进 2 种细菌的协调生长。

5 结论

生物质发酵制氢技术作为一种绿色、可持续的能源生产方式,在应对全球能源危机和环境问题中展现出巨大的潜力。光发酵、暗发酵以及暗光耦合发酵制氢技术各具优势,但也面临诸多挑战。

(1) 光发酵制氢能够高效利用有机小分子酸,但对光照条件的高度依赖大大增加了反应器工艺成本;暗发酵制氢工艺虽然具备底物来源广泛、反应条件简单等优势,但代谢产物导致的 pH 下降问题制约了规模化应用。暗光耦合发酵制氢通过整合 2 种工艺的优势,显著提高了氢气产量,但在细菌混合培养和两步法工艺中仍存在 pH 不匹配、工艺复杂性和成本高等问题。

(2) 未来的研究方向应聚焦于开发耐酸性和高效产氢的菌株,探索低成本、高效率的预处理技术,以及设计新型光生物反应器。此外,进一步研究金属纳米颗粒等添加剂对产氢效率的促进作用,将为生物质发酵制氢技术的工业化应用提供重要支持。通过多学科交叉和技术创新,生物质发酵制取绿氢技术有望在可再生能源领域发挥更大的作用,为实现“双碳”目标和能源结构转型提供强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] Tan H, Wang Y W, Wang Q J, *et al.* Day-ahead dispatch of electricity-hydrogen systems under solid-state transportation mode of hydrogen energy via FV-IGDT approach[J]. *Energy*, 2024, 300: 131113.
- [2] Kumar G, Eswari A P, Kavitha S, *et al.* Thermochemical conversion routes of hydrogen production from organic biomass: Processes, challenges and limitations[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13(10): 8509–8534.
- [3] Emisha L, Prince D, Vijay S J, *et al.* Technological advancement in the production of biohydrogen from lignocellulosic biomass: A review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 113084.
- [4] 马国杰, 郭鹏坤, 常春. 生物质厌氧发酵制氢技术研究进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(7): 45–49, 54.
- [5] Akhlaghi N, Najafpour-Darzi G. A comprehensive review on biological hydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(43): 22492–22512.
- [6] Gupta S, Fernandes A, Lopes A, *et al.* Photo-fermentative bacteria used for hydrogen production[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(3): 1191.
- [7] Sahil S, Singh R, Masakapalli S K, *et al.* Biomass pretreatment, bio-processing and reactor design for biohydrogen production: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2024, 22(4): 1665–1702.
- [8] 孙茹茹, 姜霁珊, 徐叶, 等. 暗发酵制氢代谢途径研究进展[J]. *上海师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 49(6): 614–621.
- [9] Chandran E M, Mohan E. Sustainable biohydrogen production from lignocellulosic biomass sources—metabolic pathways, production enhancement, and challenges[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(46): 102129–102157.
- [10] 张欢欢, 林钰程, 王圆圆, 等. 基于温和预处理玉米秸秆的酶解糖化工艺研究[J]. *可再生能源*, 2025, 43(2): 143–151.
- [11] Tao Y Z, He Y L, Wu Y Q, *et al.* Characteristics of a new photosynthetic bacterial strain for hydrogen production and its application in wastewater treatment[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(3): 963–973.
- [12] Tiang M F, Azhar A A, Hanipa M A F, *et al.* Advanced optimization strategies to enhance photo-fermentative biohydrogen production by non-sulfur purple bacteria[J]. *Sains Malaysiana*, 2022, 51(11): 3567–3578.
- [13] Das S R, Basak N. Enhancing biohydrogen production by optimization of waste potato concentration in dark and photo fermentation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 494: 145000.
- [14] 陈鸿伟, 付昱飞, 宋杨凡, 等. 生物制氢原理及研究进展[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(6): 872–885.
- [15] Chen X, Lv Y K, Liu Y X, *et al.* The hydrogen production characteristics of mixed photoheterotrophic culture[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(8): 4840–4847.
- [16] Ananthi V, Ramesh U, Balaji P, *et al.* A review on the impact of various factors on biohydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 33–45.
- [17] 刘新媛, 黄耀坤, 吴楠, 等. 牛粪和餐厨垃圾混合两相发酵产氢产甲烷的协同作用研究[J]. *可再生能源*, 2023, 41(8): 995–1000.
- [18] Sivaramakrishnan R, Shanmugam S, Sekar M, *et al.* Insights on biological hydrogen production routes and potential microorganisms for high hydrogen yield[J]. *Fuel*, 2021, 291: 120136.
- [19] Jiang D P, Zhang X T, Jing Y Y, *et al.* Towards high light conversion efficiency from photo-fermentative hydrogen production of *Arundo donax* L. By light-dark duration alternation strategy[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126302.
- [20] Zhang Z P, Ai F K, Zhang H R, *et al.* Synergetic effect evaluation of light and mass transfer enhancement strategies on photo fermentative biohydrogen production process: Illumination, shake, and high solid level[J]. *Energy*, 2023, 269: 126841.
- [21] Ayodele D T, Ogunbiyi O D, Akamo D O, *et al.* Factors affecting biohydrogen production: Overview and perspectives[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(71): 27513–27539.

- mored hybrid polyimide separators for advanced and safe lithium-ion batteries[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(18):6250–6257.
- [23] Song X Y, Huang W C, Ge R B, *et al.* Electrospun nanofibers constituted of a polyimide core decorated with polyhedral oligomeric silsesquioxanes and a TiO₂ shell as separators for lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(18):21565–21577.
- [24] Deng J, Cao D, Yang X, *et al.* Cross-linked cellulose/carboxylated polyimide nanofiber separator for lithium-ion battery application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 433(3):133934.
- [25] Liu J D, Cao D L, Zhang Q Z, *et al.* Covalent organic framework-coated polyimide ion-track-etched separator with high thermal stability for developing lithium-ion batteries with long lifespans[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(30):39367–39378.
- [26] Song X Y, Huang W C, Wang H, *et al.* Polyimide/metal-organic framework-5 separator with excellent electrolyte wettability and thermal stability for high performance lithium-ion battery[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(10):6312–6325.
- [27] Mucche Z B, Nikodimos Y, Tekaligne T M, *et al.* Thermally stable 3D cross-linked fluorinated polyimide/PVDF-HFP hybrid separator for lithium battery applications[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476:146400.
- [28] Song C, Luo J, Gao C, *et al.* Halloysite nanotubes enhanced polyimide/oxidized-lignin nanofiber separators for long-cycling lithium metal batteries[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 273(2):132640.
- [29] Li X G, Liu K F, Dong N X, *et al.* A dendrite-blocking polyimide-meta-aramid separator with ultrahigh strength and thermostability for high-security lithium-ion battery[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481:148525.
- [30] Sun G H, Cui J Q, Zhang Q S, *et al.* Polybenzimidazolium-reinforced polyimide separators to inhibit dendrites for high-security lithium-ion batteries[J]. *Science China Chemistry*, 2025, 68(7):3221–3229. ■

(上接第 35 页)

- [17] Tian H, Zhu R, Chen L, *et al.* Aromatic hydrocarbons rich bio-oil production from Miscanthus pyrolysis by coupling torrefaction and MoO₃/ZSM-5 dual catalysis process[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 204:117314.
- [18] Jiang M, Su Y, Qi P, *et al.* Rice husk pyrolysis polygeneration of levoglucosan-rich bio-oil and functional bio-char: Roles of hydrothermal pretreatment and acidic hydrothermal pretreatment on products[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(22):28947–28958.
- [19] 陈东雨, 张婷, 黄顺朝, 等. 盐酸洗涤与烘焙预处理对甜高粱秸秆热解生物油组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11):222–229.
- [20] Cen K, Li X, Jia D, *et al.* Effects of pretreatment sequence of torrefaction deoxygenation and acid washing on biomass pyrolysis polygeneration[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 225:120615.
- [21] 夏美玲. 酸碱预处理油茶壳生物炭的制备及其催化废食用油制备富芳烃生物油的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [22] Cen K, Zhuang X, Gan Z, *et al.* Effect of the combined pretreatment of leaching and torrefaction on the production of bio-aromatics from rice straw via the shape selective catalytic fast pyrolysis[J]. *Energy Reports*, 2021, 7:7732–7739.
- [23] Sun C, Zhou Z, Tian H, *et al.* Catalytic pyrolysis of wheat straw based on dual catalyst CaO/ZSM-5 with acid washing and torrefaction pretreatment to enhance aromatic yield in bio-oils[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 117:101836.
- [24] Yang D, Huang J, Hu Z, *et al.* Catalytic pyrolysis of lignin to aromatic hydrocarbons over Nb/Al oxide catalyst[J]. *Energy*, 2024, 302:131764.
- [25] Li Y, Zhu L, Dominic Y, *et al.* Catalytic pyrolysis of poplar sawdust pretreated with combined leaching and torrefaction over Fe-Ni/ZSM-5 for aromatic-rich bio-oil production[J]. *Renewable Energy*, 2024, 227:120517.
- [26] Zheng A, Jiang L, Zhao Z, *et al.* Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass for aromatic production: chemistry, catalyst and process[J]. *WIREs Energy and Environment*, 2017, 6(3):1–18.
- [27] Chen X, Liu Z, Chen W, *et al.* Catalytic pyrolysis of cotton stalk to produce aromatic hydrocarbons over Fe modified CaO catalysts and ZSM-5[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2022, 166:105635.
- [28] Delmiro T M, Calixto G Q, Viegas C V, *et al.* Renewable aromatic hydrocarbons from flash catalytic pyrolysis of *Monoraphidium* sp. lipid extract[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2021, 15:100799. ■

(上接第 40 页)

- [22] Lee K S, Tseng T S, Liu Y W, *et al.* Enhancing the performance of dark fermentative hydrogen production using a reduced pressure fermentation strategy[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(20):15556–15562.
- [23] Al-mohammedawi H H, Znad H. Impact of metal ions and EDTA on photofermentative hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* using a mixture of pre-treated brewery and restaurant effluents[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2020, 134:105482.
- [24] Zhou Y H, Deng H, Wang X H, *et al.* Effects of Zn²⁺ and Mn²⁺ on the photo-fermentative performance of HY01 in biohydrogen production from xylose fermentation[J]. *International Journal of Green Energy*, 2024, 21(8):1829–1834.
- [25] Karthikeyan B, Velvizhi G. A state-of-the-art on the application of nanotechnology for enhanced biohydrogen production[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52:536–554.
- [26] Gadhe A, Sonawane S S, Varma M N. Enhancement effect of hematite and nickel nanoparticles on biohydrogen production from dairy wastewater[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(13):4502–4511.
- [27] 辛红梅. Fe₃O₄ 纳米颗粒对废水厌氧发酵产氢的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [28] Ottaviano L M, Ramos L R, Botta L S, *et al.* Continuous thermophilic hydrogen production from cheese whey powder solution in an anaerobic fluidized bed reactor: Effect of hydraulic retention time and initial substrate concentration[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(8):4848–4860.
- [29] 屈皓, 李玉霞, 刘玉香. 生物质光发酵制氢技术研究进展[J]. *现代化工*, 2025, 45(1):56–61.
- [30] Wang Y, Jing Y Y, Lu C Y, *et al.* A syntrophic co-fermentation model for bio-hydrogen production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317:128288. ■