

## 碳化生物质在 AD/DSSCs 中的应用

方 雯, 云斯宁, 黄欣磊, 后玉芝, 朱 江, 李 雪

(西安建筑科技大学材料与矿资学院、功能材料研究所, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 沼气和太阳能作为一种清洁的可再生能源已引起人们广泛的关注。以麦秆、树叶和玉米芯为原料, 将其进行微波热解碳化, 并将碳化产物分别作为促进剂和对电极催化剂应用于厌氧发酵 (Anaerobic Digestion, AD) 和染料敏化太阳能电池 (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs) 中, 研究其对沼气厌氧发酵系统的产气量、化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 去除率、pH 和 DSSCs 光伏性能的影响, 探究其在太阳能和生物质能领域的应用潜能。实验结果表明: 碳化生物质作为厌氧发酵促进剂可明显提高沼气产量 (添加碳材料 549 mL/g VS vs. 对照组 409 mL/g VS), 提高 COD 去除率 (添加碳材料 68.00 % vs. 对照组 29.55 %), 且对厌氧发酵系统 pH 没有显著影响; 碳化生物质作为对电极催化剂, 其 DSSCs 的光电转换效率与同等实验条件下传统贵金属 Pt 电极相近 (3.52 % vs. 4.64 %), 可作为替代贵金属 Pt 的低成本材料用于染料敏化太阳能电池中。

**关键词:** 生物质碳化; 厌氧发酵; 染料敏化太阳能电池; 对电极; 促进剂

**中图分类号:** TQ920 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)04-0295-06

## Application of Pyrolytic Carbon Derived from Carbonized-Biomass in AD/DSSCs

FANG Wen, YUN Sining, HUANG Xinlei, HOU Yuzhi, ZHU Jiang, LI Xue

(Functional Materials Laboratory (FML), School of Materials & Mineral Resources,  
Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** As a renewable and clean energy, biogas and solar energy have attracted wide attention. In this paper, straw, leaves and corncob were carbonized by microwave pyrolytic carbonization technique, then, the carbonized-biomass were used as accelerant in anaerobic digestion (AD) and as counter electrode (CE) catalyst in dye-sensitized solar cells (DSSCs). The influence of the as-prepared carbon materials as accelerants on biogas production, chemical oxygen demand (COD) removing rate, pH value of the AD system and on the photovoltaic performance of DSSCs as CE catalysts was investigated, and further understanding the potential application of carbonized-biomass in the field of solar energy and biomass energy was discussed. Results indicate that, adding of carbonized-biomass as accelerant into anaerobic digestion system can obviously increase the biogas production (adding carbon materials 649 mL/g VS vs. control check 409 mL/g VS), improve the COD removing rate (adding carbon materials 68.00 % vs. control check 29.55 %), but has no effect on the pH value of the biogas AD system. The photoelectric conversion efficiency (PCE) of DSSCs using the carbonized-biomass is close to the traditional Pt electrode under the same condition (3.52 % vs. 4.64 %). The as-prepared carbon materials can be used as low-cost materials instead of Pt in DSSCs.

**Key words:** biomass carbonization; anaerobic digestion; dye-sensitized solar cells; counter electrode; accelerants

## 1 前 言

随着人们生活水平的提高, 对乳制品和肉制品的需求日渐增长, 促使大规模的养殖场不断建成。据相关资料报导, 我国近年来每年产生畜禽粪便约为  $17.3 \times 10^8$  t, 预计到 2020 年中国每年将会产生畜禽粪便 42.44 亿吨<sup>[1]</sup>。畜禽粪便中含有大量的有毒物质以及病菌等, 随意排放必然会对空气、水体、环境及人类健康造成十分恶劣的影响<sup>[2-5]</sup>。此外, 大量的农业、林业废弃物 (如麦

收稿日期: 2016-09-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51672208); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目 (2012BAD47B02); 陕西省科技研发项目科技研发项目 (2010K01-120, 2015JM5183) 和陕西省教育厅 (2013JK0927)

第一作者: 方 雯, 女, 1992 年生, 硕士研究生

通讯作者: 云斯宁, 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, Email: yunsining@xauat.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.04.07

秆、树叶和玉米芯)以焚烧的方式进行处理必然会造成环境污染,危害人类健康。因此,寻求一种适当的技术对畜禽粪便和农林业废弃物进行有效地处理或资源化利用已刻不容缓。

沼气作为一种可再生的清洁能源已引起广泛的关注,其产生的主要工艺是沼气厌氧发酵(Anaerobic Digestion, AD)。AD 是一种能够有效处理和利用有机废弃物的技术,它能在厌氧细菌的作用下将废弃生物质转化为沼气,产生的沼气可作为燃料用于发电或供热、热电联产、车用燃料及家用燃料等<sup>[6]</sup>。厌氧发酵原料来源广泛,如能源作物、人畜粪便、有机废弃物、水生植物、城市生活垃圾及工业废水等均可用于 AD 来生产沼气<sup>[7-10]</sup>。将畜禽粪便及农林业废弃物作为原料进行厌氧发酵不仅可以实现废弃物资源化利用,还能产生清洁能源供人类使用。

染料敏化太阳能电池(Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs)因具有较高的光电转换效率、成本低廉、环境友好等特点而受到广泛关注。对电极(Counter Electrode, CE)是 DSSCs 最重要的组成部分之一,它不但能够收集外电路电子,还可以催化还原电解液中  $I_3^-$  离子<sup>[11-13]</sup>。对电极材料主要有贵金属材料(以金属 Pt 为主)、碳材料、导电聚合物、过渡金属化合物、复合材料和合金等几大类<sup>[14]</sup>。其中, Pt 材料因其具有优异的催化活性和高导电性而成为 DSSCs 对电极材料的首选,但其存在资源稀缺、成本高昂、在碘电解液中易腐蚀、与其它氧化-还原电对匹配性差等缺点。因此,研究高性能的非 Pt 对电极材料成为 DSSCs 对电极的研究热点。非 Pt 材料中的碳材料,如石墨烯、碳纳米管、石墨、炭黑、介孔碳、碳纤维、导电碳及活性炭等<sup>[11,15]</sup>,具有良好导电性、电催化性和耐腐蚀性等<sup>[16]</sup>,在 DSSCs 对电极中得到广泛的应用。但其碳材料的制备工艺复杂、成本高、能耗高,开发工艺简单,成本低廉的碳材料成为研究热点。

本文以麦秆、树叶和玉米芯为原料,用简单、经济、实用的微波碳化方法,将麦秆、树叶和玉米芯进行热解碳化,初步考察碳化产物作为厌氧发酵系统促进剂和 DSSCs 对电极催化材料在 AD 和 DSSCs 中的应用潜能。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

试验所用玉米芯和麦秆来源于西安咸阳市农田里,树叶来源于校园法国梧桐。底物牛粪取自西安临潼市某养殖场,取回后密封,室温下自然驯化一周,原料的主要特性见表 1。接种物污泥来源于西安市某污水处理厂初级沉淀池。 $H_3PO_4$ 、HCl 和 NaOH 购买于自天津市恒兴化学试剂制造有限公司;尿素( $CH_4N_2O$ )购买于郑州派尼

化学试剂厂;磷酸氢二铵( $(NH_4)_2HPO_4$ )购买于天津市化学试剂三厂;柠檬酸( $C_6H_8O_7 \cdot H_2O$ )购买于四川西陇化工有限公司;FTO 导电玻璃、 $TiO_2$  光阳极、N719 染料、电解液及焊材均购买于营口奥匹维特新能源有限公司;FTO 导电玻璃电阻为  $7 \sim 8 \Omega sq^{-1}$ ;电解液组成为  $0.06 M LiI$ ,  $0.03 M I_2$ ,  $0.6 M$  1-丁基-3-甲基咪唑碘,  $0.5 M$  4-叔丁基吡啶,  $0.1 M$  异硫氰酸胍的乙腈溶液。

表 1 麦秆、树叶、玉米芯和牛粪的主要特性

Table 1 Main characteristics of straw, leaves, corncob and cow manure

Materials	TS (%)	VS (%)	TC (%)	TN (%)
Straw	92.40	83.88	40.70	0.95
Corncob	93.60	91.06	43.10	0.83
Leaves	90.90	79.38	42.60	1.20
Cow manure	15.95	12.35	53.91	6.50

Note: TS: total solid; VS: volatile solid; TC: total carbon; TN: total nitrogen.

### 2.2 试验方法

玉米芯、麦秆和树叶的碳化工艺相同。以麦秆为例。麦秆清洗干净后,在恒温干燥箱中  $105^\circ C$  烘干 12 h,然后用粉碎机粉碎 3 min 得到粉末。称取麦秆粉末 5 g,以样品:磷酸 = 1:3 的质量比加入 85wt%  $H_3PO_4$ ,将样品与  $H_3PO_4$  搅拌使其充分混合后,放入真空干燥箱,在  $90^\circ C$  干燥 4 h ( $-0.08 MPa$ ),将得到的黑色胶状物微波处理 3 min (功率为 500 W),得到黑色多孔固体。用 1 mol/L HCl 对其进行酸洗,再用去离子水洗至 pH 约为 7,过滤后在恒温干燥箱中  $105^\circ C$  干燥 4 h,用研钵研磨成细粉、封装。将得到的碳材料依次标记为  $C_{玉米芯}$ 、 $C_{麦秆}$  和  $C_{树叶}$ 。

### 2.3 试验设计

以牛粪为底物,污泥为接种物,碳化后的麦秆、树叶、玉米芯(分别定义为  $C_{玉米芯}$ 、 $C_{麦秆}$  和  $C_{树叶}$ )作为促进剂进行厌氧发酵。实验步骤如下:称取牛粪 120 g,污泥 280 g,加入容量为 500 mL 发酵容器(玻璃广口瓶)中,然后分别加入相应的促进剂再次搅拌,盖上带有出气口的橡胶塞,然后将玻璃反应器放入恒温水浴箱,使发酵温度保持在  $35 \pm 1^\circ C$ ,厌氧发酵周期为 35 天,采用排水集气法测量每天的沼气产量产气量用 mL/g VS 来表示,即:添加到反应器中单位质量牛粪中挥发性固体含的产气体积。具体实验方案如表 2 所示。对照组仅添加牛粪和污泥,标记为 CK,所有实验所用牛粪为湿重。

### 2.4 DSSCs

分别以  $C_{玉米芯}$ 、 $C_{麦秆}$  和  $C_{树叶}$  为对电极材料组装 DSSCs。下面介绍以  $C_{玉米芯}$  为对电极材料的 DSSCs 组装,  $C_{麦秆}$  和  $C_{树叶}$  与此相同。首先取 200 mg  $C_{玉米芯}$  置于西林瓶中,在瓶

底部平铺一层 2 mm 小铅珠, 然后加入 5 ml 异丙醇后密封, 置于行星球磨机中分散 4 h。随后取出, 用喷枪将适量分散好的溶液均匀喷涂于 FTO 导电玻璃上, 将喷有碳材料的导电玻璃置于管式炉中 400 °C 退火 30 min, 再将其导电面边缘焊上铜, 即得到 DSSCs 的对电极。

表 2 碳化生物质作为厌氧发酵促进剂的实验设计

Table 2 Experimental design of carbonized-biomass as accelerants in aerobic digestion

Materials	Accelerants	Content of accelerants (wt%)
CK	—	—
Cow manure+Sludge	C <sub>straw</sub>	0.3
Cow manure+Sludge	C <sub>straw</sub>	0.6
Cow manure+Sludge	C <sub>straw</sub>	0.9
Cow manure+Sludge	C <sub>leaves</sub>	0.3
Cow manure+Sludge	C <sub>leaves</sub>	0.6
Cow manure+Sludge	C <sub>leaves</sub>	0.9
Cow manure+Sludge	C <sub>corn cob</sub>	0.3
Cow manure+Sludge	C <sub>corn cob</sub>	0.6
Cow manure+Sludge	C <sub>corn cob</sub>	0.9

将 TiO<sub>2</sub> 光阳极置于马弗炉中 500 °C 退火处理 30 min, 当温度降至 120 °C 时, 将其放入配制好的 N719 染料中, 并避光放置 24 h 进行敏化。将染料染后的光阳极与制作好的对电极的导电面面对面粘好, 形成三明治结构, 注入碘离子电解液, 即得 DSSCs 器件。详细的 DSSCs 组装步骤参见作者课题组已发表论文的实验细节<sup>[12]</sup>。

## 2.5 分析方法

pH 由精密 pH 计测定 (PHS-3C, Shanghai Yu long Instrument Co., China), 总固体含量 (TS)、可挥发性固体含量 (VS) 和化学需氧量 (COD) 根据标准方法进行测定<sup>[17]</sup>。总碳含量 (TC) 和总氮含量 (TN) 由元素分析仪 (Vario EL III, Germany) 进行测定。X 射线衍射 (XRD) 由 X 射线衍射分析仪 (D/Max 2200, MDI, America) 测定。紫外可见分光光度计为上海尤尼柯 (UNIC UV-2102c, China) 型。光伏参数使用太阳能模拟器 (1.5 AM, 100 mW · cm<sup>-2</sup>, Oriel 94023A, Newport) 测定。

## 3 结果与分析

图 1 是 C<sub>玉米芯</sub>、C<sub>麦秆</sub> 和 C<sub>树叶</sub> 的 X 衍射图谱, 可以看到典型的碳材料的衍射峰, 在 18 ~ 30° 有一个很宽的峰, 没有特征谱线表明所得到的碳材料是非晶态、无定型的且石墨化程度较低。XRD 图谱中有一些杂质峰存在, 分别是 SiO<sub>2</sub> 和 SiP<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 这可能是因为早期处理不彻底, 原料中存在细小的砂砾, 在一系列反应之后生成 SiP<sub>2</sub>O<sub>7</sub>。由

于 SiO<sub>2</sub> 和 SiP<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 性质比较稳定, 后期的酸洗也未能被除去, 残留在制备的碳材料中。

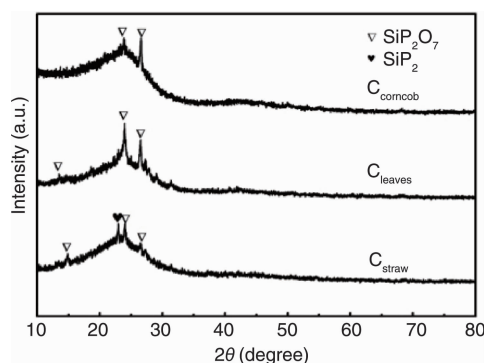


图 1 碳化生物质的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of carbonized-biomass

图 2 为以牛粪为发酵底物, 污泥为接种物, C<sub>麦秆</sub>、C<sub>树叶</sub> 和 C<sub>玉米芯</sub> 为促进剂的厌氧发酵沼气产率。从图 2a 可以看出加入后整个发酵系统比较稳定, 在第 10 天开始出现产气高峰, 特别是加入 0.9wt% 的 C<sub>麦秆</sub>, 在第 13 天产气量达到最高值为 36.1 mL/g VS, 加入 C<sub>麦秆</sub> 的累积产气量是 CK 组的 1.34 倍 (图 2b 和 2d), 且随着 C<sub>麦秆</sub> 添加量的增加, 累积产气量也在不断增加 (图 2d)。从 2b 可以看出加入 C<sub>树叶</sub> 的发酵系统有两个产气高峰, 分别在第 4 天和 11 ~ 14 天, 且加入 0.6wt% 的 C<sub>树叶</sub> 的产气高峰相对于其他两个要滞后, 但其产气量却是最高, 达 649 mL/g VS。而随加入量的增加, C<sub>玉米芯</sub> 累积产气量先增后减, 但没有很明显差异。从图 2d 可以看出加入碳材料的组均比 CK 组的累积产气量高, 表明相对于 CK 组, 碳化后的碳材料作为促进剂加入厌氧发酵系统不仅可以缩短发酵周期, 使产气高峰更加集中, 而且显著提高了累积产气量。

在厌氧消化处理废弃物过程中, 厌氧消化系统的 pH 值是影响微生物活性的主要因素之一, pH 值不在适宜范围内, 会影响沼气厌氧发酵系统的产气效率及消化程度等<sup>[18]</sup>。图 3 为不同原料发酵前后的 pH 值, 从图可以看出, 发酵前的 pH 值均低于发酵后 pH 值, 图 3 pH 范围为 6.7 ~ 7.37, 可以看出加入碳化后的生物质使发酵系统 pH 范围缩小。pH 值在 5.5 ~ 6.5 有利于碳水化合物、蛋白质和脂质轻微降解, 由于产甲烷量增加, 使总酸和酒精含量降低<sup>[19]</sup>, pH 值在 6.6 ~ 7.8 适合产甲烷菌的生存, 也是厌氧发酵比较适宜的 pH 范围<sup>[17]</sup>。表明添加生物碳材料不会破坏厌氧发酵系统的酸碱平衡, 厌氧发酵系统 pH 都维持在合适的范围内。

C<sub>麦秆</sub>、C<sub>树叶</sub>、C<sub>玉米芯</sub> 作为促进剂加入到牛粪厌氧发酵产沼气系统中后, 对系统发酵前后 COD 的影响以及 COD 去除率如表 3 所示。从表 3 中可得, 随着 C<sub>麦秆</sub> 和 C<sub>树叶</sub> 加

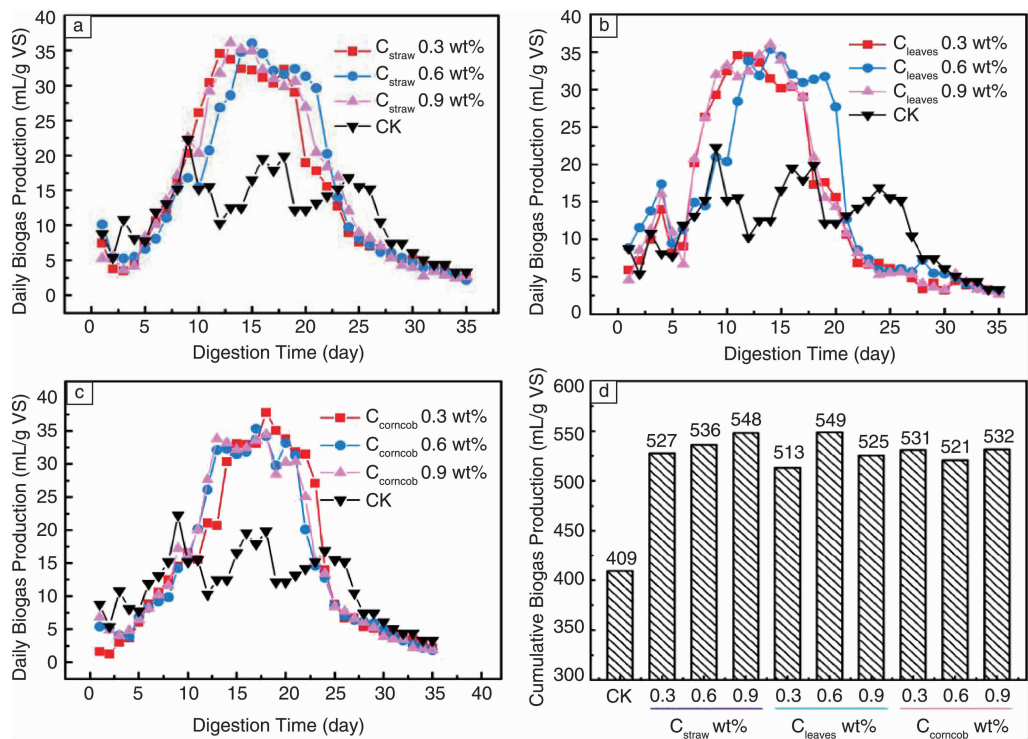


图2 碳化生物质作为促进剂的日产气量 (a~c) 和累积产气量 (d)  
Fig. 2 Daily (a~c) and cumulative (b) biogas production of AD with carbonized-biomass as accelerants

入量的增加, 厌氧发酵系统的 COD 去除率也随之增加, 分别从 44.25% 增加到 68.40%, 从 47.54% 增加到 62.78%, 表明  $C_{\text{麦秆}}$  和  $C_{\text{树叶}}$  的加入会有效提高系统的 COD 去除率, 主要原因是因为碳材料具有多孔结构, 提供给厌氧微生物密集的生长场所, 也会吸附环境中游离的营养物质, 从而提高微生物对原料的利用率。  $C_{\text{玉米芯}}$  对牛粪厌氧发酵系统的 COD 去除率同样具有提升作用, 其中最高的 COD 去除率 (68.00%) 出现在添加量为 0.6wt% 时, 之后随着剂量增加至 0.9wt%, 牛粪厌氧发酵系统的 COD 去除率降为 60.70%。加入碳材料后的 COD 去除率均高于 CK 组, 这表明将碳化后的农林废弃物加入到牛粪厌氧发酵系统, 不仅可以提高厌氧发酵系统的产气率,

也可以有效提高厌氧发酵系统的 COD 去除率。

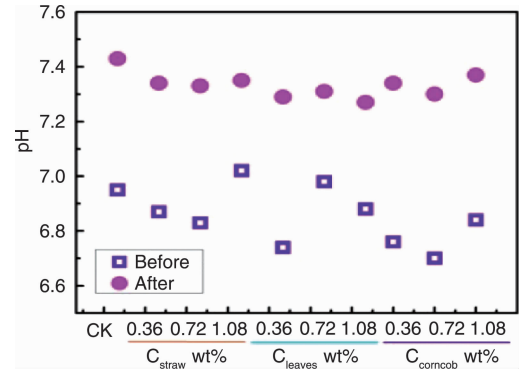


图3 碳化生物质作为促进剂对厌氧发酵 pH 值的影响  
Fig. 3 Effects of carbonized-biomass as accelerant on anaerobic digestion pH value

表 3 碳化生物质作为厌氧发酵促进剂发酵前后 COD 变化

Table 3 COD change before and after anaerobic digestion using carbonized-biomass as accelerants

Accelerants (wt%)	COD <sub>Initial</sub> concentration (mg/L)	COD <sub>Final</sub> concentration (mg/L)	COD removing rate (%)
CK	59426.40	17559.30	29.55
C <sub>straw</sub> 0.3	59426.40	33128.75	44.25
C <sub>straw</sub> 0.6	59426.40	22660.20	61.80
C <sub>straw</sub> 0.9	59426.40	18742.14	68.40
C <sub>leaves</sub> 0.3	59426.40	31172.40	47.54

(续表)

Accelerants (wt%)	COD <sub>Initial</sub> concentration (mg/L)	COD <sub>Final</sub> concentration (mg/L)	COD removing rate (%)
C <sub>leaves</sub> 0.6	59426.40	26242.17	55.80
C <sub>leaves</sub> 0.9	59426.40	22117.15	62.78
C <sub>corncob</sub> 0.3	59426.40	29891.25	49.70
C <sub>corncob</sub> 0.6	59426.40	18994.67	68.00
C <sub>corncob</sub> 0.9	59426.40	23345.65	60.70

为了研究 C<sub>麦秆</sub>、C<sub>树叶</sub> 和 C<sub>玉米芯</sub> 作为 DSSCs 对电极材料的电催化性能, 对以 Pt、C<sub>麦秆</sub>、C<sub>树叶</sub> 和 C<sub>玉米芯</sub> 为对电极所组装的 DSSCs 进行了光伏性能测试, 图 4 为其电流密度-电压 ( $J$ - $V$ ) 特性曲线, 表 4 为其相应的光伏参数。由  $J$ - $V$  曲线可以看出 C<sub>麦秆</sub>、C<sub>树叶</sub>、C<sub>玉米芯</sub> 的开路电压 ( $V_{OC}$ ) 和短路电流密度 ( $J_{SC}$ ) 都和 Pt 的比较相近, 但 C<sub>麦秆</sub> 和 C<sub>树叶</sub> 相比于 C<sub>玉米芯</sub> 的光电转换效率及填充因子 (FF) 都较低, C<sub>玉米芯</sub> 的光电转换效率 (PCE) 为 3.52%, 达到同等条件下 Pt (4.64%) 对电极 PCE 的 76%, 表明了制备的碳材料有较好的电催化性能。由于本研究中制备的碳材料原料来自于废弃物, 制备方法简单、耗能低、成本较其他碳材料更低, 且具有优异的电催化活性, 因此, 可作为一种低成本的非 Pt 对电极材料用于 DSSCs 领域。

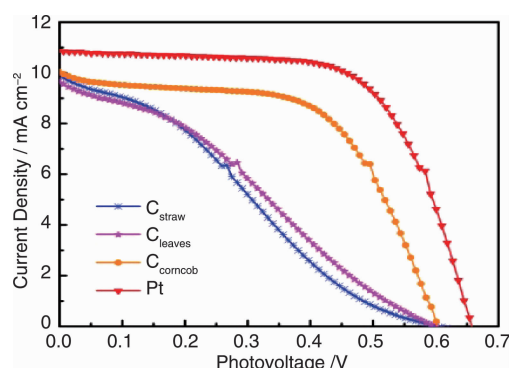
图4 Pt和碳化生物质作为对电极 DSSCs 的  $J$ - $V$  曲线Fig. 4  $J$ - $V$  curves of DSSCs based on Pt and carbonized-biomass as counter electrodes

表4 不同碳材料和 Pt 作为 DSSCs 对电极催化剂的光伏参数

Table 4 Photovoltaic parameters of DSSCs with various carbon materials and Pt as catalysts of CEs

CE materials	$V_{OC}$ (V)	$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
C <sub>straw</sub>	0.600	10.18	0.28	1.70
C <sub>leaves</sub>	0.590	9.95	0.31	1.83
C <sub>corncob</sub>	0.600	10.26	0.57	3.52
Pt	0.650	11.54	0.62	4.64

**Note:**  $V_{OC}$ : open-circuit voltage;  $J_{SC}$ : short-circuit current density; FF: fill factor; PCE: power conversion efficiency

## 4 结 论

本文以废弃麦秆、树叶、玉米芯为原料, 将麦秆、树叶、玉米芯进行碳化处理, 分别考察所得生物炭在沼气厌氧发酵中的生物促进性能及 DSSCs 中的电催化性能。结果表明: C<sub>麦秆</sub>、C<sub>树叶</sub>、C<sub>玉米芯</sub> 的加入显著提高了沼气产量, 加入 0.6wt% C<sub>树叶</sub> 的产气量最高, 达 649 mL/g VS, 加入 0.9wt% C<sub>麦秆</sub> 的 COD 去除率最高为 68.40%, 表明碳化的生物质有很好的生物催化性能; 此外, 碳化的生物质作为 DSSCs 对电极材料, C<sub>玉米芯</sub> 的光电转换效率最高, 达到了 3.52%, 可作为一种低成本、高性能的可替代贵金属 Pt 对电极的电催化材料。

## 参考文献 References

- [1] Wei Jiawei (韦佳培). Thesis for Doctorate (博士学位论文) [D]. Huazhong Agricultural University, 2013, 6.
- [2] Zhang Xiaogang (张小刚), Cao Ziwei (曹子薇), Zhang Baoli (张宝利), et al. 畜禽粪便对环境的影响及防治对策 [C] // Proceedings of China Animal Husbandry and Veterinary Institute Conference In Poultry Ecology Branch (中国畜牧兽医学学会家禽生态分会学术研讨会论文集), 2014.
- [3] Su Yang (苏杨). Journal of Chinese Ecological Agriculture (中国生态农业学报) [J], 2006, 14 (2): 15-18.
- [4] Liu Hui (刘辉), Wang Lingyun (王凌云), Liu Yongzhong (刘忠珍), et al. Guangdong Agricultural Sciences (广东农业科学) [J], 2010, 37 (6): 213-216.
- [5] Jiang Haojun (江浩军), Huang Yu (黄玉), Liu Yongheng (刘永恒). Shanghai Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine (上海畜牧兽医通讯) [J], 2010 (6): 43-44.
- [6] Holm-Nielsen J B, Al Seadi T, Oleskowicz-Popiel P. Bioresource Technology [J], 2009, 100 (22): 5478-5484.
- [7] Krishania M, Kumar V, Vijay V K, et al. Fuel [J], 2013, 106: 1-9.
- [8] Yadavika, Santosh, Sreekrishnan T R, et al. Bioresource Technology [J], 2004, 95 (1): 1-10.
- [9] Kapdan I K, Kargi F. Enzyme and Microbial Technology [J], 2006, 38 (5): 569-582.
- [10] Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, et al. Bioresource Technology



- [J], 2007, 98 (17): 3204–3212.
- [11] Yun S, Hagfeldt A, Ma T. *Advanced Materials* [J], 2014, 26 (36): 6210–6237.
- [12] Yun S, Zhang H, Pu H, *et al.* *Advanced Energy Materials* [J], 2013, 3 (11): 1407–1412.
- [13] Yun S, Liu Y, Zhang T, *et al.* *Nanoscale* [J], 2015, 7 (28): 11877–11893.
- [14] Zhang Taihong (张太宏), Yun Sining (云斯宁), Li Jing (李晶), *et al.* *Chin Sci Bull* (科学通报) [J], 2016 (Z1): 478–488.
- [15] Yun S, Freitas J N, Nogueira A F, *et al.* *Progress in Polymer Science* [J], 2015, 59: 1–40.
- [16] Yang Dayong (杨大勇), Zhang Haiyan (张海燕), Xie Wei (慰), *et al.* *Materials Research and Application* (材料研究与应用) [J], 2008, 2 (4): 447–449.
- [17] Huang X, Yun S, Zhu J, *et al.* *Bioresource Technology* [J], 2016, 218: 62–68.
- [18] Wang Xiaojiao (王晓娇), Yang Gaihe (杨改河), Feng Yongzhong (冯永忠), *et al.* *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报) [J], 2011, 30 (12): 2594–2601.
- [19] Yu H Q, Fang H H P. *Water Science and Technology* [J], 2002, 45 (10): 201–206.

(编辑 盖少飞)

## 青年园地



特约撰稿人吕云卓

吕云卓: 男, 1985 年生, 博士, 大连交通大学副教授。2014 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 2012 ~ 2013 年在美国哈佛大学进行联合培养博士研究生学习。主要研究方向为激光 3D 打印块体非晶合金, 激光



特约撰稿人云斯宁

3D 打印块体非晶合金复合材料, 以胶体玻璃为模型原位研究非晶固体的微观力学和动力学行为。已发表 SCI/EI 收录论文 18 篇, 发明专利授权 1 项。目前主持国家自然科学基金面上基金 1 项, 国家自然科学基金

青年基金 1 项, 辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目 1 项, 中国博士后科学基金面上基金一等资助 1 项, 其他横向课题若干项。

云斯宁: 男, 1974 年 7 月生, 教授, 博士生导师。国家自然科学基金评审专家, 陕西省纳米材料与纳米技术重点实验室学术委员会成员, 新能源材料技术创新与协同发展中心新能源材料专家理事会理事, 陕西省硅酸盐学会理事, 中国硅酸盐学会陶瓷分会建筑卫生陶瓷专业委员会委员。Frontiers in

Materials, Frontiers in Energy Research 的 Review Editorial Board 杂志评审编辑, Nano Energy Systems 的 International Editorial Board 杂志编委, Journal of Nanotechnology 特刊客座主编。2016 年在英国里丁大学访问交流, 2016 ~ 2017 年在瑞士洛桑联邦理工学院高级访问交流。参与或主持 20 余项国家级、省部级、地市级、校级各类课题。主持完成省教育厅项目和校级项目获校级科技进步二等奖 1 项、三等奖 1 项。作或者署名会议邀请报告 30 余次。长期从事无

机非金属材料的研究、教学及技术开发工作。在 Prog Polym Sci、Energy Environ Sci、Adv Mater、Adv Energy Mater、Chem Sus Chem、J Mater Chem A、Nanoscale、J Power Sources 等国内外行业期刊上, 以第一作者兼通讯作者发表 SCI 论文 30 余篇, EI 论文 30 余篇。主编专著 1 部, 参编中国、法国、印度教授的专著 3 部 (之一下载量超过 10 万余次)。拥有 20 余项国家授权专利技术。