

## 反蛋白石结构大孔碳材料的制备及其在染料敏化太阳能电池对电极中的应用

陈爱莲<sup>1</sup>, 钱程<sup>2</sup>, 李志娜<sup>2</sup>

(1. 常州大学 机械工程学院, 常州 213016;

2. 常州大学 材料科学与工程学院, 常州 213164)

**摘要:** 以胶体晶体为牺牲模板合成反蛋白石结构碳(Inverted opal carbon, IO-C)材料, 借助扫描电镜和透射电镜分析 IO-C 材料样品的形貌和微观结构, 考察对电极中 IO-C 负载量对染料敏化太阳能电池(Dye-sensitized solar cells, DSSC)光电转化性能的影响。结果表明: IO-C 对电极 DSSC 的光电性能随着碳负载量的增加而提高, 这可能与电荷转移电阻的降低有关。在本研究条件下, 当碳负载量超过  $332 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时, 进一步增大负载量对电池性能的提高并无明显帮助。相对于商用铂对电极电池( $\eta=5.61\%$ ), IO-C 对电极电池可以获得相近的光电转化效率( $\eta=5.27\%$ )。

**关键词:** 反蛋白石结构; 大孔碳材料; 染料敏化太阳能电池; 对电极

中图分类号: O611.4

文献标志码: A

## Preparation of inverted opal macroporous carbon material and its application in dye-sensitized solar cells as counter electrode

CHEN Ai-lian<sup>1</sup>, QIAN Cheng<sup>1</sup>, LI Zhi-na<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The inverted opal carbon (IO-C) counter electrodes were fabricated using colloidal crystals as sacrificial templates for DSSC. The morphology and microstructure were characterized by scanning electron microscopy and transmission electron microscopy. The results show that the photovoltaic performances of DSSC with IO-C counter electrodes are improved with the IO-C loading on counter electrode increasing. It may be attributed to the charge-transfer resistance of IO-C counter electrode decreasing with the increase of the IO-C loading. However, further carbon loading increase has no obvious effect on the photovoltaic performance of DSSC when carbon loading exceeds  $332 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . By comparison with commercial platinum based DSSC ( $\eta=5.61\%$ ), the IO-C based one exhibits a close conversion efficiency ( $\eta=5.27\%$ ).

**Key words:** inverted opal; macroporous carbon material; dye-sensitized solar cell; counter electrode

太阳能是人类取之不尽、用之不竭的可再生清洁能源, 其通常的利用方式主要包括光热转换、光电转换和光化学转换 3 种形式。太阳能电池是通过光电效应或者光化学效应直接把光能转化成电能的装置, 主

要包括硅基(单晶硅、多晶硅和非晶硅)太阳能电池、CdTe 薄膜电池、铜铟镓硒(CIGS)薄膜电池和染料敏化太阳能电池(Dye-sensitized solar cells, DSSC)等。1991 年, 瑞士联邦理工学院 Grätzel 教授课题组<sup>[1]</sup>在 Nature

上发表文章首次提出 DSSC 这种新型的光电转化装置; 2011 年, Grätzel 教授课题组<sup>[2]</sup>又在 Science 上报道利用 Co(II/III)基氧化还原电解质将 DSSC 的光电转化效率超过了 12%。DSSC 已成为高效率、低成本太阳能电池的一个重要发展方向。

DSSC 主要由光电极、电解质和对电极 3 部分组成<sup>[3]</sup>。其中, 对电极是染料敏化太阳能电池(DSSC)的关键组件之一, 对电极的性质及在其表面发生的还原反应速率将对电池最终光电转化效率( $\eta$ )产生重大影响, 开发新型对电极材料对于降低 DSSC 成本以及提高  $\eta$  具有重要意义。贵金属铂具有优秀的电催化活性及较低的超电势, 已成为最为常用的对电极材料。同时, 铂的高成本又成为实现 DSSC 大规模商业化应用的瓶颈之一, 目前, 最有竞争力的替代材料包括导电聚合物和炭材料。近年来, 研究人员尝试将各种传统炭材料<sup>[4-8]</sup>(石墨、炭黑、活性炭和介孔碳等)、新型炭材料<sup>[9-13]</sup>(石墨烯、纳米管、纳米纤维和富勒烯等)以及复合炭材料<sup>[14-17]</sup>应用于 DSSC 对电极, 获得了一些有意义的实验结果, 但仍普遍存在效率偏低、成本较高以及制备工艺复杂等问题。分析指出, 反蛋白石(Inverted opal, IO)结构炭材料具有高比表面积和立体网络状骨架中存在相互关联的有序大孔等独特的结构特征, 有望表现出良好的电催化活性和传质动力学行为。例如, FAN 等<sup>[18]</sup>以糠醇为碳源, 利用双模版技术构建了分级有序多孔碳材料, 分别成功应用于 DSSC 和 CdSe 量子点太阳能电池。再如, KANG 等<sup>[19]</sup>以间苯三酚和甲醛为原料制备的酚醛树脂为碳源, 聚苯乙烯(Polystyrene, PS)胶体晶体和 F127 为模板, 合成了(介孔、石墨化)反蛋白石结构大孔碳对电极, 得到了与 Pt/DSSC 相近的光电转化效率。遗憾的是, 上述两种碳源(糠醇和酚醛)均不同程度地带有毒性, 将对身体和环境产生危害。

本文作者以廉价无毒的蔗糖为碳源, PS 胶体晶体为牺牲模板, 结合浸渍煅烧工艺制备了反蛋白石结构炭材料(IO-C)。在相同测试条件下, 比较了 IO-C/DSSC 和 Pt/DSSC 的光电转化特性, 并进一步考察 IO-C/DSSC 对电极中碳负载量对电池性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 原料

苯乙烯单体(St), 工业级, 上海凌峰化学试剂有限公司。使用前按下述步骤进行处理: 首先将氢氧化钠用去离子水配制成 5%(质量分数)的溶液, 与苯乙烯按

照体积比为 1:1 混合, 在梨形分液漏斗中进行数次洗涤除去阻聚剂, 再经无水  $\text{CaCl}_2$  粉末干燥处理后置于 4 °C 冰箱中低温保存, 备用。

聚乙烯吡咯烷酮(PVP), 购自上海润捷化学试剂有限公司; 2,2-偶氮二(2-甲基丙基咪二盐酸盐)(AIBA)和乙基纤维素, 购自 Aladdin Chemistry 公司; 蔗糖、浓硫酸、松油醇和 OP-10 乳液, 购自国药集团上海化学试剂有限公司。以上化学试剂均为分析纯。

$\text{TiO}_2$ (P25)浆料、Pt 浆料、N719 染料和电解液(主要成分: 0.05 mol/L  $\text{I}_2$ , 0.5 mol/L LiI), 均购自于武汉格奥仪器科技有限公司。实验用水皆为去离子水。

### 1.2 样品的合成及表征

IO-C 样品的合成步骤如下: 1) 单分散 PS 微球的制备。取适量 3 g PVP 溶于 90 mL 去离子水中, 再加入 10 g St, 在磁力搅拌下真空驱氧 3 次, 并继续于 70 °C 下搅拌 1 h; 之后缓慢滴加 AIBA 溶液(0.1 g, 溶于 10 mL 去离子水)引发聚合, 在 70 °C 下继续搅拌反应 23 h 后停止加热, 关闭冷凝水, 自然冷却至室温, 即可得到乳白色 PS 微球分散液。整个过程在氮气保护下完成。2) 胶体晶体的自组装。利用垂直沉积法, 将经过亲水处理的载玻片垂直浸入在质量分数为 0.3%的 PS 乳胶液中, 再置于恒温恒湿箱中进行自组装, 设置温度为 55 °C, 相对湿度为 50%。3) IO-C 的制备。首先将上述方法获得的胶体晶体模板在 105 °C 下保温 5 min, 以强化其结构稳定性; 再将模板浸渍在碳前驱体溶液(取 2.2 g 葡萄糖溶于 20 mL 去离子水, 并滴加 1.44 g 的浓硫酸作为脱水剂)中, 10 min 后取出, 置于真空干燥箱中在 30 °C 下烘干。最后, 将浸渍了碳前驱体的模板置于管式炉中, 分别在 100 °C 保温 4 h, 150 °C 保温 4 h, 450 °C 保温 2 h, 800 °C 保温 2 h, 升温速率为 2 °C/min, 在氮气气氛下完成碳化和模板的去除。为了保持最后产物有序结构的完整性, 本试验中采用分段加热保温的煅烧工艺。

用日本电子 JSM-6360LA 型扫描电镜(SEM)和日本日立 S4800 II 型场发射扫描电镜(FESEM)观察样品的形貌; 用日本电子 JEM-2100 型透射电镜(TEM)表征的样品的微观结构特征; 用 ASAP 2010C 型氮气吸附脱附仪测定样品的吸附脱附等温线, 用 BET (Brunauer-Emmett-Teller)法计算比表面积, 用 BJH (Barrett-Joiner-Halenda)法计算孔径分布。

### 1.3 电池的组装及光电测试

取一定量的 IO-C 样品、松油醇、乙基纤维素和 OP-10 乳液置于研钵中充分研磨, 用刮刀法将碳浆料

均匀涂抹在掺氟氧化锡导电玻璃(FTO)衬底上, 使用前在氮气保护下 500 °C 处理 0.5 h。本研究中, 考察了对电极中 3DOM-C 负载量(87、133、211、332 和 423  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )对电池光电性能的影响。采用 Agilent 4294A 精密阻抗分析仪测量对电极的电导率, 频率范围为 40 Hz~110 MHz, 交流驱动信号源电压为 500 mV。

参照文献[18-19]中所示的方法, 利用刮刀法分别制备  $\text{TiO}_2$  光阳极和 Pt 对电极。测试前, 将吸附 N719 染料后的  $\text{TiO}_2$  光阳极与对电极组装成三明治结构, 向电极间注入电解液, 在标准太阳光(AM 1.5, 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$ )条件下进行光电性能测试, 有效光照面积为 0.5  $\text{cm}^2$ 。用 Keithley-2400 型数字电源表测试电池的输出光电流密度—电压( $J$ — $\varphi$ )曲线, 并计算其开路电压( $\varphi_{oc}$ )、短路电流密度( $J_{sc}$ )、填充因子( $F_F$ )和光电转化效率( $\eta$ )等光电性能参数。

## 2 结果与讨论

图 1 所示为胶体晶体模板表层和截面的 SEM 像。由图 1 中可以观察到, 模板基本构筑单元(PS 微球)的尺寸均一, 粒径在 300 nm 左右。经动态光散射(DLS)法测定的平均粒径为 336.5 nm, 这与 SEM 所直接观

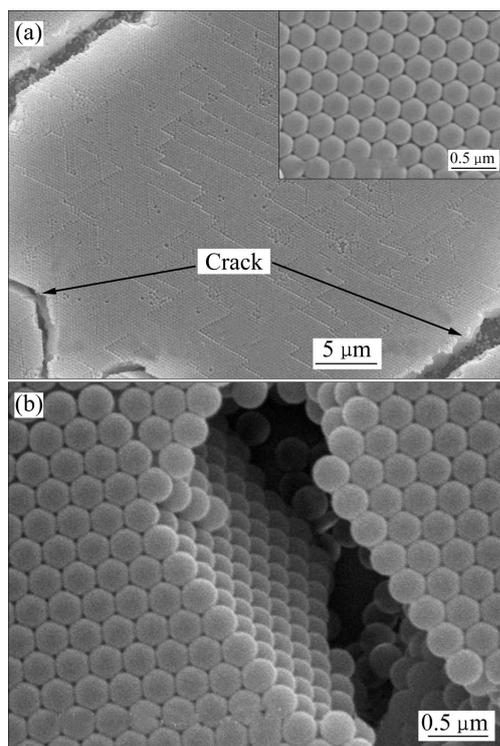


图 1 胶体晶体模板典型的 SEM 像

Fig. 1 Typical SEM images of colloidal crystal templates: (a) Top view; (b) Cross-sectional view

察到粒径大小基本一直, 同时表明样品的单分散性良好。由图 1(a)可知, 模板表层中的微球在较大范围内呈紧密有序六方堆积排列, 且缺陷较少。样品中存在一定程度的断裂现象(如图 1(a)中箭头所示), 这可能是由于干燥过程中产生的收缩应力所致。从样品断裂处得到的截面照片(见图 1(b)), 可以进一步了解模板内部微球的排列情况。可以发现模板内部也呈现出整齐的密排结构, 其层数约为 12 层。以上分析表明, 本研究中自组装获得的胶体晶体模板具有面心立方结构。

图 2 所示为 IO-C 材料样品的 FESEM 像。从样品的表层照片(见图 2(a))可以看出, 所制备样品具有大面积有序排列的大孔结构, 且孔径大小均匀, 其内孔多呈圆形或近圆形。借助照片中给出的标尺, 可以估算出样品的孔壁厚度在 40~50 nm, 其中心孔间距约为 290 nm, 略低于原模板中微球之间的球心间距(约 300 nm), 这表明样品在煅烧去除模板及碳化过程中产生少许收缩<sup>[18-19]</sup>。通过样品上层的每个孔窗均可以清晰地观察到下层的 3 个内孔, 由此可推测出样品的每一层都具有有序大孔结构。从样品的截面照片(见图 2(b))可以进一步观察到, 所制备大孔碳材料内部也同样具有三维有序结构, 且样品内部通过网络状立体骨架相连。以上分析显示, 样品表现出具有面心立方的立体笼状结构特征。

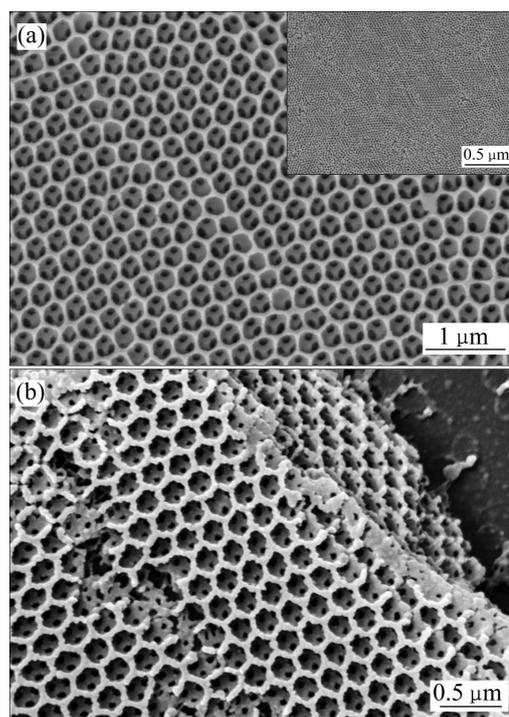


图 2 IO-C 材料样品典型的 FESEM 像

Fig. 2 Typical FESEM images of IO-C samples: (a) Top view; (b) Cross-sectional view

为了进一步了解 IO-C 材料的大孔骨架特征, 对其相应的样品进行了 TEM 测试表征, 其结果如图 3 所示。由图 3(a)可以看出, 材料在空间上具有网状有序孔结构, 大孔孔径约为 280 nm, 与 FESEM 观察结果(见图 2)基本一致。图 3(b)所示为样品的高倍 TEM 像, 能够进一步观察出样品大孔孔壁较为光滑, 同时, 孔壁上存在不规则的介孔, 这可能是由于样品在高温碳化以及去除模板过程中产生骨架收缩, 由于收缩应力导致局部孔壁破裂所致。

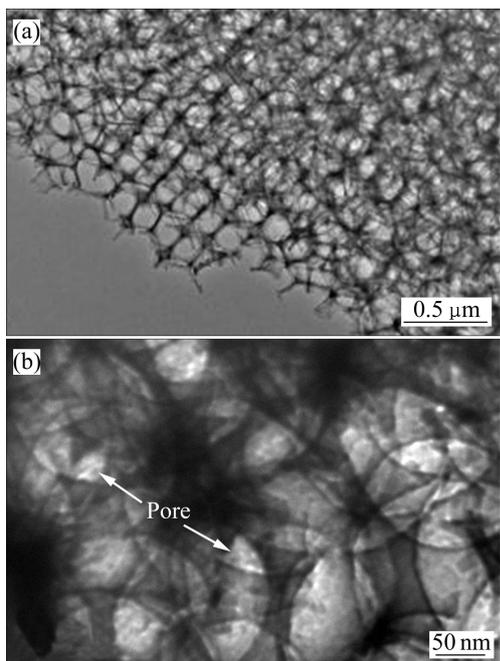


图 3 IO-C 材料样品典型的 TEM 像  
Fig. 3 Typical TEM images of IO-C samples

利用氮气吸附的方法对 IO-C 材料进行了孔结构表征, 其 BET 比表面积约为 653.7 m<sup>2</sup>/g, 孔容积约为 0.56 cm<sup>3</sup>/g。图 4 所示为样品低温氮气吸附/脱附等温线及孔径分布曲线。由图 4 可以看出, 样品的吸附-脱附等温线属于典型的 IV 型等温线, 且具有明显的 H2 型滞后环, 该类型等温线的出现主要是由于样品中存在“口小腔大”瓶状孔。从插入的孔径分布曲线可知, 样品的孔径分布有一处集中在 3.8 nm, 说明样品中存在介孔, 与 TEM 直接观察到的结果一致。正是由于 IO-C 样品中存在丰富的大孔和介孔, 导致样品具有较大的比表面积和孔容。该类型具有两级孔道的 IO-C 材料对于缩短扩散路径、降低扩散阻力、提高传质效率, 以及提高反应活性将表现出积极促进作用<sup>[20-21]</sup>。

图 5 所示为 IO-C/DSSC 和 Pt/DSSC 的  $J-\phi$  特征曲线。对电极中碳负载量对电池开路电压( $\phi_{oc}$ )、短路电流密度( $J_{sc}$ )、填充因子( $F_F$ )和光电转化效率( $\eta$ )的影响

如图 6 所示。由图 6 可以看出, 对电极中 IO-C 负载量对电池的光电性能具有明显影响, 电池的  $J_{sc}$ 、 $F_F$  和  $\eta$  均随着碳负载量的增加而增大, 而  $\phi_{oc}$  的变化趋

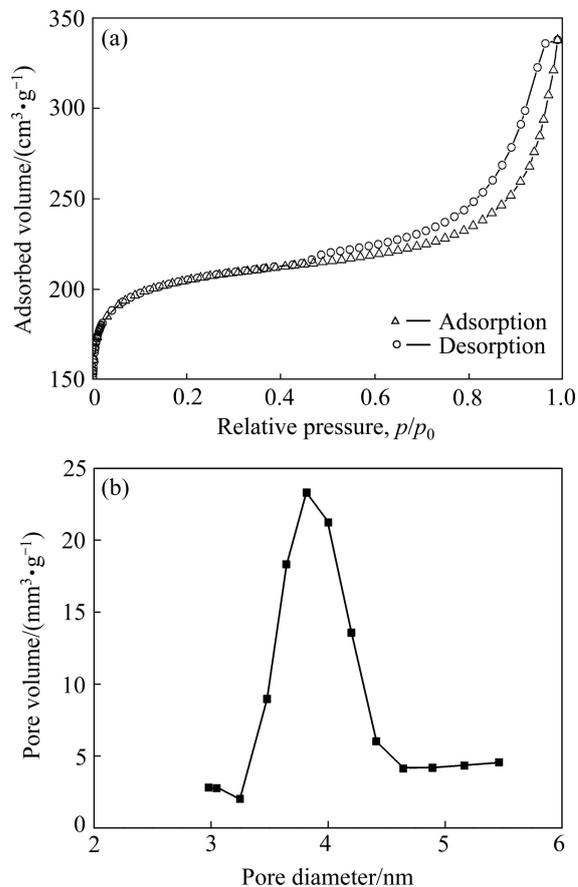


图 4 IO-C 材料样品的氮气吸附-脱附等温线及孔径分布曲线

Fig. 4 Nitrogen adsorption-desorption isotherm (a) and corresponding pore size distribution plot (b) of IO-C samples

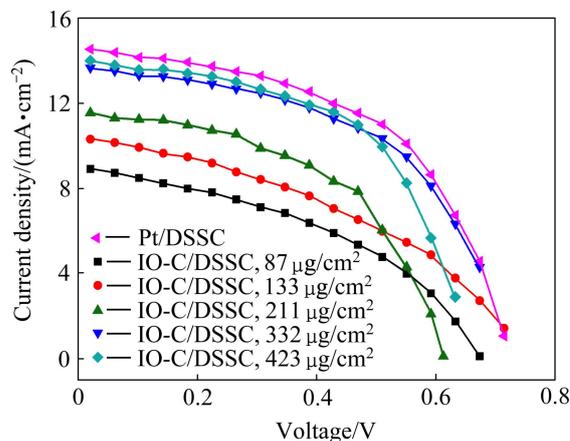


图 5 不同对电极电池的  $J-\phi$  特征曲线  
Fig. 5  $J-\phi$  characteristics curves of DSSCs fabricated with different counter electrodes

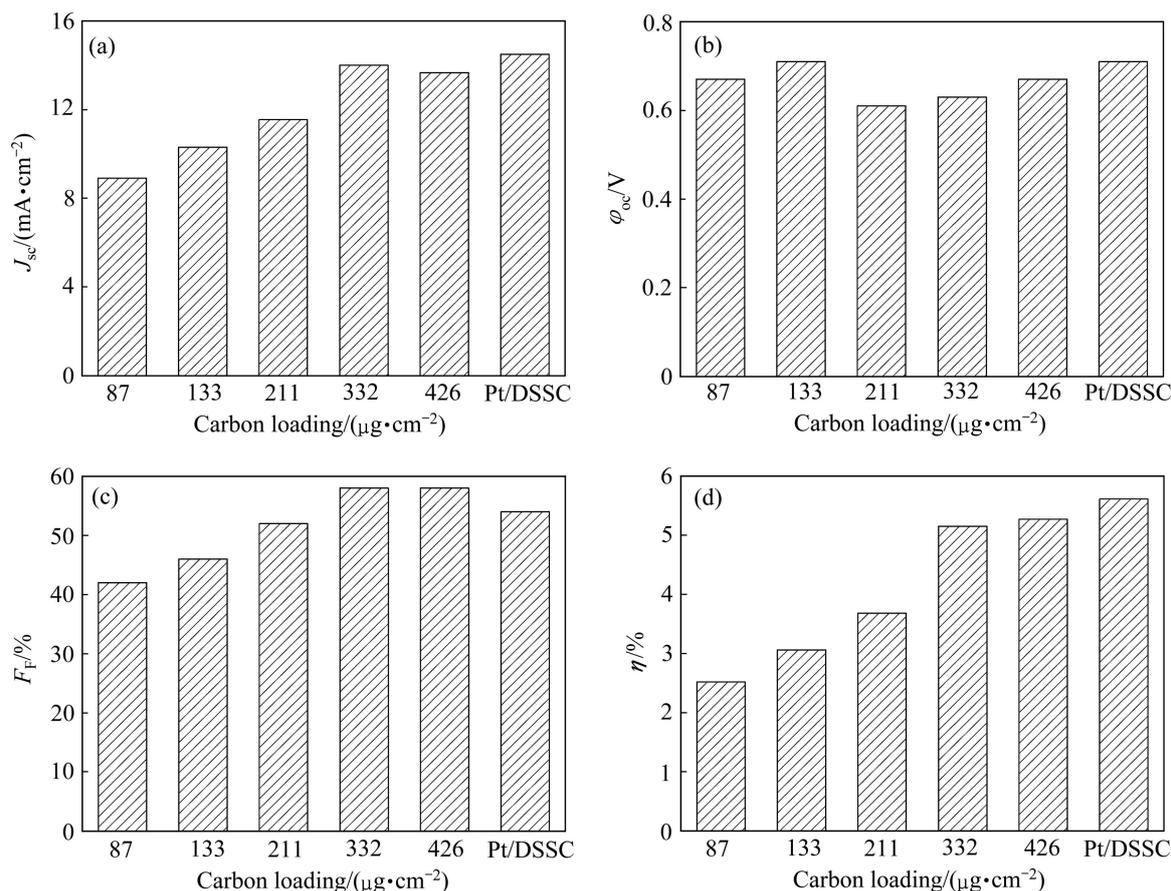


图 6 IO-C 负载量对电池短路电流密度、开路电压、填充因子以及光电转化效率的影响

Fig. 6 Effect of IO-C loading on short-circuit current density (a), open-circuit voltage (b), fill factor (c) and overall conversion efficiency (d) of IO-C/DSSC

势则不明显。当 IO-C 负载量为  $87 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时, 电池的  $\phi_{oc}$ 、 $J_{sc}$ 、 $F_F$  和  $\eta$  分别为  $0.67 \text{ V}$ 、 $8.91 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、 $42\%$  和  $2.52\%$ ; 当负载量增大至  $133$ 、 $211$  和  $332 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时,  $J_{sc}$  可依次增大至  $10.30$ 、 $11.54$  和  $14.00 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ;  $F_F$  分别增加至  $46\%$ 、 $52\%$  和  $58\%$ ;  $\eta$  则依次增大至  $3.06\%$ 、 $3.68\%$  和  $5.15\%$ 。若再进一步将对电极中 IO-C 负载量增加到  $426 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时, 电池的光电转化性能参数变化不大,  $J_{sc}$ 、 $F_F$  和  $\eta$  分别为  $13.66 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、 $58\%$  和  $5.27\%$ , 这表明此时电池的光电转化效率已基本趋于稳定。

在相同的实验条件下, Pt/DSSC 的  $\phi_{oc}$ 、 $J_{sc}$ 、 $F_F$  和  $\eta$  分别为  $5.54 \text{ V}$ 、 $14.50 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、 $54\%$  和  $5.61\%$ 。对比可知, 当碳负载量为  $332 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时, IO-C/DSSC 可以达到与 Pt/DSSC 相近的光电性能参数, 其最终的光电转化效率可达传统 Pt 对电极电池的  $94\%$ 。这表明该类型碳对电极材料有望在降低染料敏化太阳能电池成本方面发挥积极作用。

电导率测试结果表明: 对电极的电导率随着 IO-C 负载量的增大而增加, 当负载量由  $87$  增大至  $423 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时, 对电极的电导率由  $6.71 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{cm}$  增大至

$2.93 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$ 。因此, 对电极电导率可能是使得 IO-C 负载量对电池光电转化效率产生明显影响的一个重要原因。此外, WANG 等<sup>[22]</sup>将介孔碳作为对电极材料应用于 DSSC, 发现对电极中介孔碳负载量 ( $0 \sim 300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 的增大, 电池的光电转换效率、短路电流及填充因子均随之提高, 再进一步增大负载量, 则对电池效率提高的作用不大, 并将其归因于电极的转移电荷阻抗随着介孔碳负载量的增大而降低所致。可以推测, 电极中 IO-C 负载量也可能将会对电池的性能产生类似的影响。

### 3 结论

1) 样品的比表面积为  $653.7 \text{ m}^2/\text{g}$ 、孔容积为  $0.56 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 且表现出空间有序笼状结构特征。

2)  $J-\phi$  测试结果显示, 随着对电极中 IO-C 负载量 ( $87 \sim 332 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 的增大, IO-C/DSSC 的短路电流密度、填充因子及光电转化效率等光电特性均随之提高;

而进一步提高负载量( $423 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )则不再明显提高电池的光电性能。

3) 当 IO-C 负载量为  $332 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  时, IO-C/DSSC 可表现出与 Pt/DSSC 相近的光电性能参数, 其最终光电转化效率可达传统 Pt 对电极的 94%。

## REFERENCES

- [1] O'REGAN B, GRÄTZEL M. A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal  $\text{TiO}_2$  films[J]. *Nature*, 1991, 353(6346): 737–740.
- [2] YELLA A, LEE H, TSAO H N, YI C, CHANDIRAN A K, NAZEERUDDIN MD K, DIAU E W, YEH C, ZAKEERUDDIN S M, GRÄTZEL M. Porphyrin-sensitized solar cells with cobalt (II/III)-based redox electrolyte exceed 12 percent efficiency[J]. *Science*, 2011, 334: 629–634.
- [3] HAGFELDT A, BOSCHLOO G, SUN L, KLOO L, PETERSSON H. Dye-sensitized solar cells[J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(11): 6595–6663.
- [4] LI P, WU J, LIN J, HUANG M, HUANG Y, LI Q. High-performance and low platinum loading Pt/carbon black counter electrode for dye-sensitized solar cells[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(6): 845–849.
- [5] JIANG Q W, LI G R, WANG F, GAO X P. Highly ordered mesoporous carbon arrays from natural wood materials as counter electrode for dye-sensitized solar cells[J]. *Electrochemistry Communications*, 2010, 12(7): 924–927.
- [6] RAMASAMY E, CHUN J, LEE J. Soft-template synthesized ordered mesoporous carbon counter electrodes for dye-sensitized solar cells[J]. *Carbon*, 2010, 48(15): 4563–4565.
- [7] WANG G, XING W, ZHUO S. Application of mesoporous carbon to counter electrode for dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 568–573.
- [8] 李靖, 孙明轩, 张晓艳, 崔晓莉. 染料敏化太阳能电池对电极[J]. *物理化学学报*, 2011, 27(10): 2255–2268.  
LI Jing, SUN Ming-xuan, ZHANG Xiao-yan, CUI Xiao-li. Counter electrodes for dye-sensitized solar cells[J]. *Acta Phys-Chim Sin*, 2011, 27(10): 2255–2268.
- [9] PARK S, JUNG H, LEE W. Hollow activated carbon nanofibers prepared by electrospinning as counter electrodes for dye-sensitized solar cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 102: 423–428.
- [10] ROY-MAYHEW J D, BOZYM D J, PUNCKT C, AKSAY I A. Functionalized graphene as a catalytic counter electrode in dye-sensitized solar cells[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(10): 6203–6211.
- [11] HAN J, KIM H, KIM D Y, JO S M, JANG S. Water-soluble polyelectrolyte-grafted multiwalled carbon nanotube thin films for efficient counter electrode of dye-sensitized solar cells[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(6): 3503–3509.
- [12] WANG S, RAO K K, YANG T C K, WANG H. Investigation of nitrogen doped diamond like carbon films as counter electrodes in dye sensitized solar cells[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(5): 1969–1974.
- [13] ZHANG D W, LI X D, LI H B, CHEN S, SUN Z, YIN X J, HUANG S M. Graphene-based counter electrode for dye-sensitized solar cells[J]. *Carbon*, 2011, 49(15): 5382–5388.
- [14] 林嘉鹏, 张海燕, 陈易明, 魏爱香, 刘传标, 陈雨婷. 碳纳米复合对电极染料敏化太阳能电池的电化学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(9): 1753–1758.  
LIN Jia-peng, ZHANG Hai-yan, CHEN Yi-ming, WEI Ai-xiang, LIU Chuan-biao, CHEN Yu-ting. Electrochemical performance of carbon nano-composite counter electrode for dye-sensitized solar cells[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(9): 1753–1758.
- [15] LIU G, WANG H, LI X, RONG Y, KU Z, XU M, LIU L, HU M, YANG Y, XIANG P, SHU T, HAN H. A mesoscopic platinumized graphite/carbon black counter electrode for a highly efficient monolithic dye-sensitized solar cell[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 69: 334–339.
- [16] TJOA V, CHUA J, PRAMANA S S, WEI J, MHAISALKAR S G, MATHEWS N. Facile photochemical synthesis of graphene-Pt nanoparticle composite for counter electrode in dye sensitized solar cell[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, 4(7): 3447–3452.
- [17] MIAO X, PAN K, PAN Q, ZHOU W, WANG L, LIAO Y, TIAN G, WANG G. Highly crystalline graphene/carbon black composite counter electrodes with controllable content: Synthesis, characterization and application in dye-sensitized solar cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 96: 155–163.
- [18] FAN S, FANG B, KIM J H, JEONG B, KIM C, YU J, KO J. Ordered multimodal porous carbon as highly efficient counter electrodes in dye-sensitized and quantum-dot solar cells[J]. *Langmuir* 2010, 26(16): 13644–13649.
- [19] KANG D, LEE Y, CHO C, MOON J H. Inverse opal carbons for counter electrode of dye-sensitized solar cells[J]. *Langmuir*, 2012, 28(17): 7033–7038.
- [20] STEIN A, WILSON B E, RUDISILL S G. Design and functionality of colloidal-crystal-templated materials — chemical applications of inverse opals[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(7): 2763–2803.
- [21] PETKOVICH N D, STEIN A. Controlling macro- and mesostructures with hierarchical porosity through combined hard and soft templating[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(9): 3721–3739.
- [22] WANG G, XING W, ZHUO S. Application of mesoporous carbon to counter electrode for dye-sensitized solar cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 568–573.

(编辑 李艳红)