

新型多孔凝胶电解质的制备及其在准固态柔性基染料敏化太阳能电池中的应用

李清华 王应民 李文杰 张婷婷 蔡 莉 程泽秀 李 禾

(南昌航空大学光伏器件与技术研究所, 江西 南昌 330063)

摘要 制备了一种新型多孔聚丙烯酸/十六烷基三甲基溴化铵-聚吡咯凝胶电解质,并将其应用于柔性基染料敏化太阳能电池(DSSC)。通过扫描电镜表征、热重分析测试、电化学性能测试和柔性电池光电性能测试等手段,分析了凝胶电解质对柔性基 DSSC 的光电性能影响。研究结果表明:随着聚吡咯的引入,提高凝胶电解质导电性以及催化电解质中的 I^-/I_3^- 离子电对等性能,最终在 100 mW/cm^2 [大气质量(AM)1.5]光照条件下,测得基于该准固态凝胶电解质的柔性基 DSSC 光电转换效率达 1.28%。

关键词 光学器件;柔性;多孔;凝胶;电解质;染料敏化太阳能电池

中图分类号 TM615 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0516001

Application of the Novel Porous Gel Electrolyte in Flexible Quasi-Solid-State Dye-Sensitized Solar Cell

Li Qinghua Wang Yingmin Li Wenjie Zhang Tingting Cai Li Cheng Zexiu Li He

(Institute of Photovoltaic Devices and Technology, Nanchang Hangkong University,

Nanchang, Jiangxi 330063, China)

Abstract A novel gel polymer electrolyte based on poly(acrylic acid-g-CTAB)-polypyrrole is prepared. Based on the gel electrolyte, a flexible quasi-solid-state dye-sensitized solar cell (DSSC) is fabricated by using a low-temperature filming technique. The researches by scanning electron microscopy, thermal degradation analysis and cyclic voltammetry show the effect of the gel polymer electrolyte on flexible DSSC. Owing to high conductivity and the catalytic function of polypyrrole for I^-/I_3^- redox reaction for the gel electrolyte, the flexible quasi-solid-statedye-sensitized solar cell shows a light-to-electric energy conversion efficiency of 1.28%, under simulated solar light irradiation with intensity of 100 mW/cm^2 [air mass (AM) 1.5].

Key words optical devices; flexible; porous; gel; electrolyte; dye-sensitized solar cell

OCIS codes 160.5470; 160.6000; 240.0310; 310.6845; 310.6860

1 引 言

1991 年 Regan 等^[1,2]研制出染料敏化太阳能电池(DSSC)以来,经过多年的发展,其光电转化效率已达到 11%,但使用的基体多为玻璃等刚性衬底,而刚性衬底有着诸如质量大、易破碎等缺点限制了其在商业上的开发应用。而柔性基体则具有重量轻、挠性好、抗冲击、成本低、可进行各种形状或表面设计等一系列的优点,并可采用成卷连续生产、快速

涂布等技术,便于大面积生产,有利于进一步降低生产成本,具有更强的竞争力,成为近年 DSSC 研究的新热点^[3,4]。目前,柔性基 DSSC 多采用液体电解质,这也制约其大规模的应用和产业化的进程。这是由于液体电解质存在诸如容易泄露,不易封装,染料易解析以及具有毒性等诸多问题。此外,液体电解质的稳定性问题也越来越受到人们的关注。因此,制备出高稳定性、高效率 and 易生产的柔性基

收稿日期: 2011-12-16; **收到修改稿日期**: 2011-12-30

基金项目: 江西省重大科技专项项目(2009AZD10103)和南昌航空大学博士项目(EA201108198)资助课题。

作者简介: 李清华(1981—),男,博士,讲师,主要从事光伏器件与技术等方面的研究。E-mail: qhli@hqu.edu.cn

DSSC 成为目前研究的热点。

鉴于液体电解质的种种缺陷,学者们采用准固态或者固态电解质取代液体电解质,制备 DSSC,从而提高 DSSC 的稳定性。已有许多基于聚合物基体的凝胶电解质应用于准固态染料敏化纳米晶太阳能电池^[5~8]。但是,准固态 DSSC 的光电转换性能普遍不高,这将影响聚合物电解质大规模应用于 DSSC。而高分子导电聚合物作为聚合物电解质的添加剂,利用高分子导电聚合物的高导电性、高稳定性、高电容量(100~300 F/g),以及对电解质中 I^-/I_3^- 氧化还原离子电对的催化特性等的优点^[9~14]。能提高凝胶电解质的性能,从而提高柔性 DSSC 的电池性能。目前,关于高分子导电聚合物应用于准固态凝胶电解质方面的研究很少。

本文采用溶液原位聚合法制备多孔聚丙烯酸/十六烷基三甲基溴化铵-聚吡咯的凝胶电解质,将其应用于低温成膜法制备的柔性基 DSSC。并对凝胶电解质以及柔性基 DSSC 的各项性能进行较为深入的研究。

2 实 验

2.1 实验原料与仪器

实验采用的主要仪器与原料包括:乙醇、碘、碘化锂、四丁基碘化铵、4-特丁基吡啶(TBP)、无水乙腈(AR,中国医药集团上海化学试剂公司);P25(德国,型号:TPN24P25);可控温磁力搅拌器(C-MAG HS4,德国 IKA);马弗炉(上海实验电炉厂);100 W 氙灯(XQ-100 W,上海电光器件有限公司);丙烯酸(分析纯,中国西陇化工);敏化染料 N719;十六烷基三甲基溴化铵(分析纯,中国西陇化工);N-甲基吡咯烷酮(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司);N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司);过二硫酸钾(分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司);导电柔性基片 ITO/PEN(12 Ω/cm^2 ,日本);柔性对电极 Pt-ITO/PEN(5 Ω/cm^2 ,日本);入射光强的标定采用光强计(Laser Power/Energy Meter Model LPE-1A,China);扫描电子显微镜(SEM)S-3500N(日本日立公司);紫外高压汞灯(V8-30W,通用国际照明集团并本有限公司);电化学分析仪/工作站 CHI660C(上海辰华仪器有限公司)。

2.2 柔性导电基底的清洗

ITO/PEN 柔性导电基底的清洗应避免与强酸或者强碱接触^[11,12],本实验将柔性基底剪裁成所需

尺寸后浸泡于体积分数为 50% 的乙醇溶液中,24 h 后取出,随后用体积分数为 95% 的乙醇液反复荡洗数次,最后保存在无水乙醇中备用,使用前吹干即可。

2.3 纳晶多孔 TiO_2 薄膜电极及准固态柔性 DSSC 的制备

将一定量的 P25 粉末置于马弗炉中 450 $^\circ\text{C}$ 烧结 30 min,去除粉末中残留的有机物,冷却至室温,最后将 P25 粉末碾磨 2 h。置于干燥器中保存,备用。

将适量前处理后的 P25 粉末加入乙醇和去离子水(摩尔比为 1:5)的混合溶液中,室温搅拌。然后将溶液置于高压反应釜,185 $^\circ\text{C}$ 下水热 6 h。获得均一稳定的 TiO_2 乳白色浆体。水热制备 TiO_2 有利于避免形成颗粒沉淀^[15~18]。

2.4 聚合物凝胶电解质的制备

准固态凝胶电解质的合成实验步骤如下^[19,20]:称取 3 g 十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)溶于 12.5 mL 水中,80 $^\circ\text{C}$ 恒温加热并不断搅拌,10 min 后加入 10 g 丙烯酸,质量分数为 0.1% 的 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(NMBA)交联剂,搅拌混合均匀。5 min 后加入质量分数为 1% 的硫酸钾(KPS)引发剂引发丙烯酸和 CTAB 的聚合反应。反应过程中不断搅拌,至粘度增大的时候将反应物移出至蒸发皿。静止 12 h 让残留的丙烯酸和 CTAB 在 KPS 的作用下缓慢的反应完全。将所制的样品在 60 $^\circ\text{C}$ 恒温烘箱中除去残留的水分,将烘干后的样品切成小块备用。将样品置于 N-甲基吡咯烷酮(NMP)和吡咯单体(Py)的混合溶液中,让样品充分吸收吡咯单体至溶胀平衡。将溶胀平衡后的样品取出放入含 0.05 mol/L 碘的乙腈溶液中,并将其置于 4 $^\circ\text{C}$ 的冰箱中静止。24 h 后取出样品,可以看到样品变成了黑褐色,凝胶体积继续增大,说明吡咯在凝胶内部聚合了,形成聚吡咯(PPy)。最后在一定温度下,烘干所得样品。

将聚合物凝胶充分溶胀于含 0.5 mol/L 碘化钾,0.05 mol/L 碘,体积分数为 20% 的 NMP 的乙腈电解质溶液中,让其溶胀平衡。保存,备用。

2.5 准固态柔性 DSSC 的制备

把烘干后的 TiO_2 多孔膜电极膜面朝上放在实验台上,再将铂对电极面朝下放在着色膜上,两片玻璃微微错开,留出约 4 mm 宽的导电部分作为电池测试用。将凝胶电解质加热至软化,然后加入到两个电极之间,用力压紧,确保电解质能够完全渗入到多孔薄膜中,用两个夹子把电池夹住。然后在其四周小心地涂上氰基丙烯酸盐粘合剂和环氧树脂,待

晾干后测试其光电性能。聚合物柔性基 DSSC 制作流程如图 1 所示。

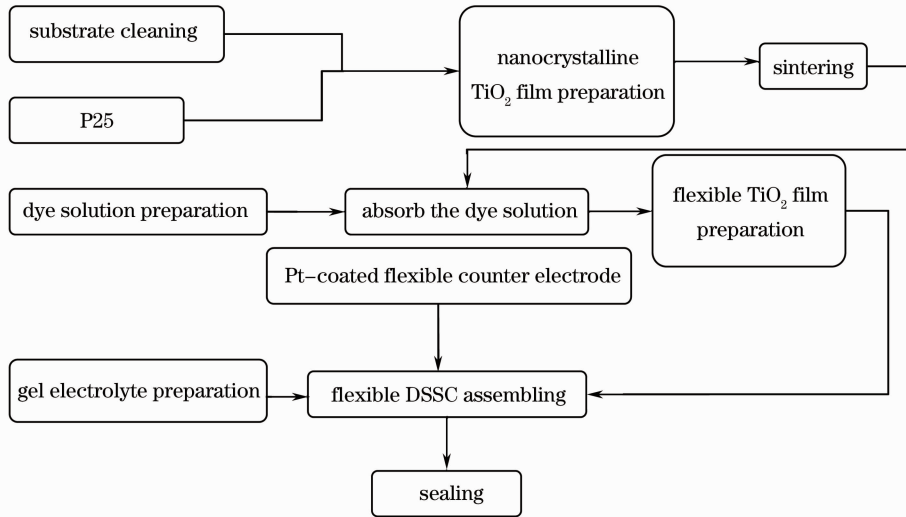


图 1 DSSC 制备工艺流程

Fig. 1 Flow chart of DSSC process

2.6 光电性能测量

采用 100 W 氙灯作为太阳光模拟器,其入射光强 P_{in} 为 100 mW/cm^2 。在室温下采用恒电位仪,电化学分析仪/工作站 CHI660C 和球形氙灯组成的测量系统来测量所组装太阳能电池的光电性能 ($I-V$ 曲线)。记录其短路电流 I_{SC} 和开路电压 V_{OC} , 并应用公式计算其填充因子 f_{FF} 和光电转换效率 η 。其中 $f_{FF} = P_{max}/(I_{SC}V_{OC})$, P_{max} 为电池最大输出功率, $\eta = (I_{SC}V_{OC}f_{FF})/P_{in} \times 100\%$ 。

2.7 表征与分析

采用 S-3500N(日本日立公司)型扫描电子显微镜 (SEM) 观察薄膜的表面形貌;采用 SDT 2960 simultaneous DSC device (USA TA Instrument) 进行热重分析 (TG-DSC) 升温速度,测试条件为 $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$, 范围: $100 \text{ }^\circ\text{C} \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$;采用 CHI660C 型三电极系统进行凝胶电解质电化学性能 (CV) 的测试,电化学池采用 CHI660C 型三电极系统,聚合物凝胶电解质或者聚合物对电极作为工作电极,铂片电极作为对电极,参比电极采用 Ag/AgCl , 电解质溶液为 $0.1 \text{ mol/L LiClO}_4$, 0.01 mol/L LiI 和 0.001 mol/L I_2 的乙腈溶液,所有测试均在室温下进行。

3 结果与讨论

3.1 聚合物凝胶的热稳定性分析

图 2 为聚丙烯酸/CTAB 凝胶热重分析图,曲线 A 和 B 分别为聚丙烯酸/CTAB 共聚物 DTA 和 TG 图, C 和 D 分别是聚丙烯酸凝胶的 DTA 和 TG 图。

从 TG 曲线和所得数据可以看出在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右

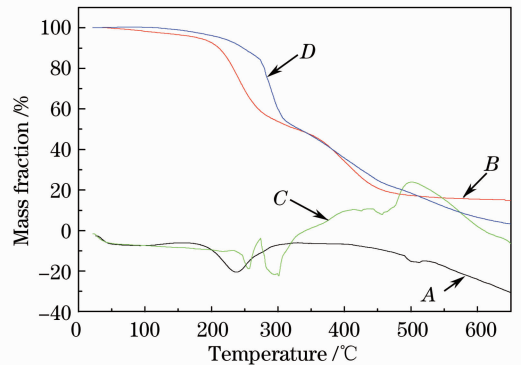


图 2 聚丙烯酸/CTAB 凝胶热重分析图

Fig. 2 DTA and TG of poly(acrylic acid-g-CTAB)-polypyrrole gel

样品重量略有增加(最高增加 0.097%),这是因为 CTAB/聚丙烯酸共聚物吸收了空气中部分水蒸气而导致增重。在 $43 \text{ }^\circ\text{C} \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$ 样品缓慢失重,这是因为样品失去自由水的原因导致。其失重率在 5.4% 左右。对应的 DTA 曲线上在 $50 \text{ }^\circ\text{C} \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间出现一个吸热宽峰,这可能是样品失去自由水和熔融吸热所致。在 $180 \text{ }^\circ\text{C} \sim 290 \text{ }^\circ\text{C}$ 出现了第一次较快的失重峰,对应的 DTA 曲线上出现了第一个吸热峰,这是由于样品失去束缚水所致。从 TG 曲线看出 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 以后样品继续分解失重,对应的 DTA 曲线在 $510 \text{ }^\circ\text{C}$ 出现一个小的吸热峰,这是聚合物热分解的原因所致。 $510 \text{ }^\circ\text{C}$ 之后样品基本重量保持恒定。到 $651 \text{ }^\circ\text{C}$, 样品分解后的残留物质量分数约为 15.0% 。通过对比 DTA 和 TG 图可以看出 CTAB 和聚丙烯酸共聚物 DTA 曲线上只出现了一

个脱去束缚水的吸热峰而没有脱去结合水的吸热峰,这是由于丙烯酸的羧基和 CTAB 的氨基反应了,样品中没有通过羧基形成结合水。在图 2 中也没有出现放热峰,这也是因为羧基已经反应完全。通过两者对比,从一定意义上可以证明 CTAB 和丙烯酸发生了共聚反应。同时比较两者脱去束缚水和聚合物热分解的温度,发现用 CTAB 共聚后的聚合物脱去束缚水的温度降低了,聚合物热分解的温度升高了,这说明通过共聚,聚合物束缚水的能力下降。在引入 CTAB 后,丙烯酸的部分羧基会与 CTAB 的胺基结合而失去结合水的能力,而水与丙烯酸会形成氢键使得键合能力增强,因此引入 CTAB 后,水更容易失去,这时候的水大部分以自由水的形式存在。聚丙烯酸(PAA)接枝 CTAB 之后,其羟基数目减少,导致了吸水保水能力降低了。但其热稳定性得到了提高,一般来说,分子量越大,热稳定性越好。引入 CTAB 后,丙烯酸单体+CTAB 可以认为形成一个新的单体,然后发生聚合,这样形成的聚合物分子量更大,分子链更长,更长的分子链间相互缠绕或者物理化学作用也会对热稳定性提高有一定帮助。丙烯酸和 CTAB 结合之后形成了新的化学键,性质更加稳定。因此,通过图 2 也能发现共聚物碳化温度得到提高,最终说明共聚物热稳定性比单纯的丙烯酸单体形成的聚合物的热稳定性高。

3.2 聚合物凝胶的表征

图 3 为聚丙烯酸/CTAB 的扫描电镜图,放大倍率分别为 1000 倍(a)和 5000 倍(b)。从图中可以看出,聚丙烯酸/CTAB 形成了立体的微孔结构,这种结构有利于电解质或者高分子导电聚合物的充分吸入凝胶中以及电解质同柔性 DSSC 的光阳极和对电极充分接触,由于它的微孔结构,也能减少电解质的泄露,从而最终提高柔性 DSSC 的光电性能。当 Py 单体吸入凝胶互传网络中,单体跟电解质中的碘发生聚合反应(PPy),在凝胶中形成聚吡咯,反应方程式如(1)式所示。最终制备成聚丙烯酸/CTAB-PPy 凝胶电解质。

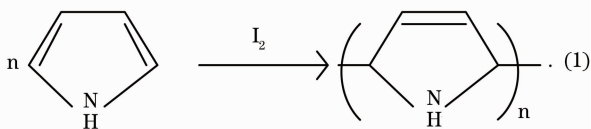


图 4 为丙烯酸/CTAB 凝胶数码照片,图(a)为

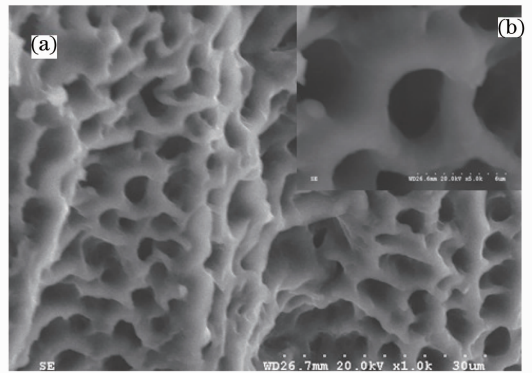


图 3 聚丙烯酸/CTAB 凝胶的扫描电镜图。(a)图放大倍率为 1000 倍;(b)图 5000 倍
Fig. 3 SEM image of poly(acrylic acid-g-CTAB) polymer with magnification of 1000 times (a) and insert figure is the magnification of 5000 times (b)

聚丙烯酸/CTAB 凝胶,(b)为聚丙烯酸/CTAB 凝胶电解质,(c)为聚丙烯酸/CTAB-PPy 凝胶电解质。在渗透压的作用下,液体电解质(0.1 mol/L KI, 0.01 mol/L I₂, 质量分数为 20% N-甲基吡咯烷酮和质量分数为 80% 乙腈)吸入聚丙烯酸/CTAB 凝胶(a)的立体微孔结构中,吸液膨胀,形成棕红色的聚丙烯酸/CTAB 凝胶电解质(b),同样,将吡咯单体分散进液体电解质中,被聚丙烯酸/CTAB 凝胶电解质吸入,吸液膨胀,从而形成偏黑褐色的导电凝胶电解质(c)。



图 4 聚丙烯酸/CTAB-聚吡咯的数码照片图。(a)聚丙烯酸/CTAB 凝胶;(b)聚丙烯酸/CTAB 凝胶电解质;(c)聚丙烯酸/CTAB-PPy 凝胶电解质
Fig. 4 Digital photographs of (a) poly(acrylic acid-g-CTAB) polymer, (b) poly(acrylic acid-g-CTAB) gel electrolyte and (c) poly(acrylic acid-g-CTAB)-polypyrrole gel electrolyte

3.3 导电凝胶电解质的循环伏安测试

图 5 为在 I⁻/I₃⁻ 体系中的聚丙烯酸/CTAB 以及聚丙烯酸/CTAB-聚吡咯的循环伏安曲线图。电解质为 0.01 mol/L 碘化锂,0.001 mol/L 碘,0.1 mol/L 高氯酸锂的乙腈溶液。在该电解质体系下发生的氧化还原反应方程式^[21]为

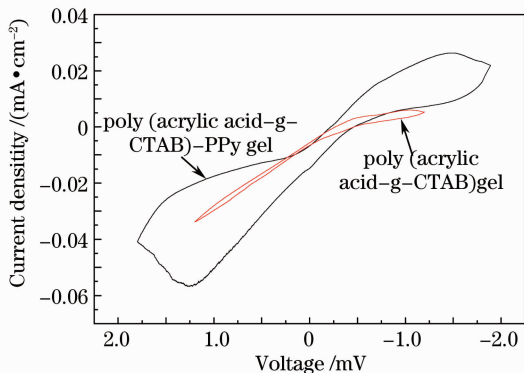


图5 聚丙烯酸/CTAB凝胶电解质及聚丙烯酸/CTAB-PPy凝胶电解质的循环伏安图,扫描速度为 $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 5 Cyclic voltammograms for poly(acrylic acid-g-CTAB) and poly(acrylic acid-g-CTAB)-PPy gel-electrolytes in supporting solution, scan rate is $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$

从图5可以看出,含有PPy的凝胶电解质的循环伏安曲线上有着明显的氧化还原峰。这就说明在凝胶电解质中的PPy对于 I^-/I_3^- 氧化还原电对体系有着很好的催化作用,有利于DSSC中的电解质产生电子,从而能够很好地提高电池的光电性能。然而未加PPy的凝胶电解质对于 I^-/I_3^- 氧化还原电对几乎不产生作用,在曲线上没有氧化还原峰。因此PPy作为添加剂的加入不仅提高了电解质的电导率,加速了电解质中的电子迁移,而且对于电解质中的 I^-/I_3^- 体系能够起到催化作用,有利于加快电解质氧化还原电对 I^-/I_3^- 的循环,促进电子的运动,从而提高柔性基DSSC的光电性能^[22,23]。

3.4 准固态柔性基染料敏化太阳能电池的光电性能

图6为基于聚丙烯酸/CTAB-PPy凝胶电解质的柔性DSSC光电性能测试,入射光强为 $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ [大气质量(AM)1.5],电解质为 0.1 mol/L KI , 0.01 mol/L I_2 ,质量分数为20% N-甲基吡咯烷酮和质量分析数为80%乙腈溶液。

从图中可知基于聚丙烯酸/CTAB-PPy凝胶电解质的柔性基DSSC开路电压达693 mV,短路电流密度为 $2.68 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,填充因子为0.71,总的光电转换效率达1.28%。高分子聚合物PPy的引入,主要起到两个作用:1) PPy能够提高凝胶电解质的电导率,从而加速电荷的迁移,提高柔性DSSC的电流;2) PPy对于 I^-/I_3^- 氧化还原电对具有催化活

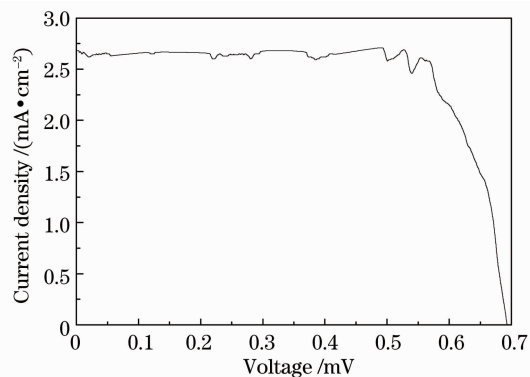


图6 准固态柔性基DSSC的I-V曲线

Fig. 6 Photocurrent-voltage curve of DSSC with gel-electrolyte based on poly(acrylic acid-g-CTAB)-PPy

性,减低了过电压,提高柔性DSSC的开路电压。因此,PPy能提高聚丙烯酸/CTAB-PPy凝胶的柔性基准态DSSC的光电转换效率。

4 结 论

本文合成出多孔聚丙烯酸/十六烷基三甲溴化铵凝胶,同时采用原位聚合法成功地将聚吡咯引入凝胶电解质中,制备出了聚丙烯酸/十六烷基三甲溴化铵-聚吡咯凝胶电解质,并将其应用于柔性基染料敏化太阳电池。循环伏安测试表明导电聚合物凝胶电解质中的聚吡咯对电解质具有催化性能,聚合物凝胶的热稳定性分析表明多孔聚丙烯酸/十六烷基三甲溴化铵凝胶热稳定性好,扫描电镜图表征表明制备的该聚丙烯酸/十六烷基三甲溴化铵凝胶为多孔结构,电解质以及聚吡咯能充分吸入凝胶、电解质同柔性基染料敏化太阳电池的光阳极和对电极能充分接触、减少电解质的泄露以及提高凝胶电解质的稳定性,最终提高柔性基染料敏化太阳电池的光电性能。该准固态凝胶电解质体系引入聚吡咯后,在入射光强为 $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ (AM 1.5)下,准固态聚合物基染料敏化太阳电池的光电转换效率达1.28%。

参 考 文 献

- 1 B. O' Regan, M. Graetzel. Low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films [J]. *Nature*, 1991, **353**(6346): 737~740
- 2 M. Graetzel. Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2004, **164**(1-3): 3~14
- 3 H. Lindström, A. Holmberg, E. Magnusson *et al.*. A new method to make dye-sensitized nanocrystalline solar cells at room temperature [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2001,

- 145(1-2): 107~112
- 4 C. Longo, J. Freitas, M. A. DePaoli. Performance and stability of TiO₂/dye solar cells assembled with flexible electrodes and a polymer electrolyte [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2003, **159**(1): 33~39
- 5 B. O'Regan, F. Lenzmann, R. Muis *et al.*. A solid-state dye-sensitized solar cell fabricated with pressure-treated P25-TiO₂ and CuSCN; analysis of pore filling and *I-V* characteristics [J]. *Chem. Mater.*, 2002, **14**(12): 5023~5029
- 6 U. Bach, D. Lupo, P. Comte *et al.*. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies [J]. *Nature*, 1998, **395**(538): 583~585
- 7 A. F. Nogueira, M. A. De Paoli, I. Montanari. Electron transfer dynamics in dye sensitized nanocrystalline solar cells using a polymer electrolyte [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2001, **105**(31): 7517~7520
- 8 F. Cao, G. Oskam, C. P. Searson. PC Electrical and optical properties of porous nano-crystalline TiO₂ films [J]. *J. Phys. Chem. B*, 1995, **99**(26): 17071~17073
- 9 Y. Saito, W. Kubo, T. Kitamura *et al.*. I⁻/I₃⁻ redox reaction behavior on poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) counter electrode in dye-sensitized solar cells [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2004, **164**(1-3): 153~157
- 10 Y. Saito, T. Kitamura, Y. Wada *et al.*. Application of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) to counter electrode in dye-sensitized solar cells [J]. *Chem. Lett.*, 2002, **31**(10): 1060~1061
- 11 T. O. Yohannes. All-solid-state photoelectrochemical energy conversion with the conjugated polymer poly [3-(4-octylphenyl)-2,2'-bithiophene] [J]. *Synthetic Metals*, 1999, **107**(2): 97~101
- 12 T. C. Wei, C. C. Wan, Y. Y. Wang. Poly (N-vinyl-2-pyrrolidone)-capped platinum nanoclusters on indium-tin oxide glass as counter electrode for dye-sensitized solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 103122~103124
- 13 Yao Baoli, Ren Liyong, Hou Xun *et al.*. Diffraction behavior of polypyrrylarylenemethine/polyvinyl film to Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1139~1143
姚保利, 任立勇, 侯 洵 等. 聚吡咯甲烯/聚乙烯醇薄膜对高斯光束的衍射行为[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1139~1143
- 14 Ren Liyong, Yao Baoli, Hou Xun *et al.*. Laser-induced diffraction effect from polypyrrylary lenemethine solution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(4): 333~336
任立勇, 姚保利, 侯 洵 等. 聚吡咯甲烯溶液的激光诱导衍射效应[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 333~336
- 15 H. Lindström, A. Holmberg, S. E. Lindquist *et al.*. A new method for manufacturing nanostructured electrodes on plastic substrates [J]. *Nano. Lett.*, 2001, **1**(2): 97~100
- 16 Zhou Zhou, Zhou Jian, Sun Xiaowei *et al.*. Design of an irregularly shaped DBR for thin film solar cells [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0731002
周 舟, 周 健, 孙晓玮 等. 薄膜太阳能电池异型布拉格背反射结构设计的制作[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0731002
- 17 Gao Yan, Hu Zhiqiang, Li Guo *et al.*. Preparation of TiO₂ porous thin film electrode on flexible dye-sensitized solar cell at low-temperature [J]. *Electronic Components and Materials*, 2007, **26**(7): 4~6
高 岩, 胡志强, 李 国 等. 低温制备柔性染料敏化太阳电池 TiO₂ 薄膜电极[J]. *电子元件与材料*, 2007, **26**(7): 4~6
- 18 Zhang Feng, Tao Jie, Tao Haijun *et al.*. Preparation and photoelectric performance of flexible titania nanotubes thin film [J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2008, **26**(3): 224~232
张 风, 陶 杰, 陶海军 等. 柔性 TiO₂ 纳米管薄膜电极的制备及其光电性能影响[J]. *影像科学与光化学*, 2008, **26**(3): 224~232
- 19 J. Chen, Y. Zhao. Relationship between water absorbency and reaction conditions in aqueous solution polymerization of polyacrylate super absorbents [J]. *J. Appl. Poly. Sci.*, 2000, **75**(6): 808~814
- 20 L. G. Chen, Z. L. Liu, R. X. Zhuo. Synthesis and properties of degradable hydrogels of konjac glucomannan grafted acrylic acid for colon-specific drug delivery [J]. *Polymer*, 2005, **46**(16): 6274~6281
- 21 I. P. Alexander, H. G. David. Studies on the chemistry of halogen and of polyhalides. XIII. voltammetry of iodine species in acetonitrile [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1958, **80**(6): 1340~1352
- 22 H. X. Guo, Y. Q. Li, L. F. Fan *et al.*. Voltammetric behavior study of folic acid at phosphomolybdic-polyppyrrrole film modified electrode [J]. *Electrochim Acta*, 2006, **51**(28): 6230~6237
- 23 S. Bialozor, A. Kupniewska. Study on poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) behaviour in I⁻/I₂ solution [J]. *Electrochem. Commun.*, 2000, **2**(7): 480~486

栏目编辑: 韩 峰