高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

调控交联核心尺寸提升准固态染料敏化太阳能电池聚合物电解质的低温性能

林剑飞，李雅楠，王莹琳，张昕彤
（东北师范大学物理学院，集成光电子全国重点实验室，
紫外光发射材料与技术教育部重点实验室，长春 130024）

摘要 以不同尺寸的具有星形拓扑结构的交联单元（乙氧基化三羟甲基丙烷三丙烯酸酯、倍半硅氧烷和纳米氧化锆）为交联核心，与聚乙二醇二丙烯酸酯（PEGDA）进行化学交联，构建了3种聚合物网络（EP，PP和ZP），并将其用于准固态染料敏化太阳能电池（DSSCs）. 结果表明，增大交联核心尺寸的策略能有效增加聚合物自由体积，降低其玻璃化转变温度，进而改善其电化学性能. 在−40 ℃的低温环境下，ZP器件的光电转换效率相比EP器件提升了37.4%.

关键词 准固态染料敏化太阳能电池；聚合物凝胶电解质；化学交联；低温电化学性能
中图分类号 O631 **文献标志码** A doi：10.7503/cjcu20250291

Tailoring the Cross-linking Core Size Toward Enhanced Low-temperature Performance of Polymer Electrolytes for Quasi-solid-state Dye-sensitized Solar Cells

LIN Jianfei, LI Yanan, WANG Yinglin*, ZHANG Xintong*
(*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics*,
Key Laboratory of UV-Emitting Materials and Technology of Ministry of Education,
School of Physics, *Northeast Normal University*, *Changchun* 130024, *China*)

Abstract This study employed cross-linking units with star-like topology of varying sizes ethoxylated trimethylolpropane triacrylate (ETPTA), polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) and nano-zirconia) as cross-linking cores to chemically cross-link with poly(ethylene glycol) diacrylate (PEGDA), constructing three polymer networks (EP, PP and ZP) for application in quasi-solid-state dye-sensitized solar cells (DSSCs). The results demonstrate that the strategy of increasing the size of the cross-linking core effectively enlarges the free volume of the polymer, reduces its glass transition temperature, and consequently enhances its low-temperature electrochemical performance. At a low temperature of −40 ℃, the power conversion efficiency (PCE) of the ZP-based device shows a significant increase of 37.4% compared to the EP-based device. This research provides a novel and effective strategy for developing quasi-solid-state electrochemical devices suitable for high altitude environment.

Keywords Quasi-solid-state dye-sensitized solar cell; Gel polymer electrolyte; Chemical cross-linking; Low temperature electrochemical performance

聚合物凝胶电解质（GPEs）在提高多种电化学能源器件[如锂电池[1-3]、超级电容器[4,5]和染料敏化

收稿日期：2025-10-12. 网络首发日期：2025-12-10.
联系人简介：张昕彤，男，博士，教授，主要从事光催化和光电化学太阳能电池方面的研究. E-mail：xtzhang@nenu.edu.cn
王莹琳，女，博士，教授，主要从事光电化学太阳能电池方面的研究. E-mail：wangyl100@nenu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金（批准号：62074031，52273236，U22A2078，12374391）资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China(Nos.62074031, 52273236, U22A2078, 12374391).

太阳能电池(DSSCs)[6~8]的性能和稳定性方面扮演着至关重要的角色. 通过合理设计的聚合物网络, GPEs能够有效稳定溶剂分子, 从而增强器件在高温条件下的运行稳定性与长期耐久性. 然而, GPEs在低温环境下性能显著衰减, 严重限制了其在高海拔、高纬度等低温地区的实际应用[9~11]. 当温度降至−20 ℃及以下时, 基于GPEs的电化学能源器件通常出现离子电导率急剧下降、界面电荷转移速率减慢以及离子传输效率降低等问题[12~16]. 这些问题在使用大尺寸铜络合物氧化还原电对的准固态染料敏化太阳能电池中尤为突出[17,18]. 调控聚合物凝胶电解质的结构是提升其低温性能的重要方式. GPEs的扩散系数在低温下显著降低, 主要源于聚合物链段运动受低温相变抑制. 因此, 降低聚合物基质的结晶度或玻璃化转变温度, 成为改善GPEs低温耐受性的关键. 研究表明, 支化与星形拓扑结构有助于提升GPEs的电化学性能[19~21]. 通过调控支化程度可有效破坏聚合物链规整排列, 如降低聚氧化乙烯(PEO)的结晶度[22,23], 增加非晶区含量并促进链段运动, 从而改善离子传输性能. 此外, 通过合理设计共聚物的交联核心结构, 也可增强GPEs中离子的迁移能力. 如, 引入多臂聚合物作为交联核心不仅能有效抑制结晶行为, 还可降低材料的玻璃化转变温度, 使得储能器件在低温环境(如0 ℃)下仍能保持良好的电化学稳定性[24]. Wang等[25]报道了一种基于笼型倍半硅氧烷(POSS)的星形多臂离子导体, 其刚性的POSS核心接枝有多个碘化咪唑盐链段. 该结构利用POSS的大自由体积和空间位阻效应, 将材料的玻璃化转变温度显著降低至−8.8 ℃, 使得相应的准固态染料敏化太阳能电池在−4 ℃下仍能保持6.52%的光电转换效率. 然而, 目前对交联结构调控离子传输机制的理解仍不够系统, 尤其是交联中心尺寸对传质行为的影响尚不明确, 需进一步深入研究.

基于此, 本文选用3种不同尺寸的星形拓扑交联中心[乙氧基化三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(ETPTA)、POSS和功能化纳米氧化锆]与聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)聚合, 构建系列GPEs(分别记为EP, PP和ZP). 为了探究交联核心尺寸与低温离子迁移性能间的构效关系, 合理选择了这3种在尺寸和化学性质上均呈系统递增的核心: ETPTA(约1 nm有机小分子)、POSS(约1.5 nm有机-无机杂化颗粒)和功能化纳米氧化锆(约5 nm无机颗粒). 通过这种精确的结构调控, 旨在深入阐明交联核心尺寸对聚合物网络微观结构和低温离子传输内在机制的影响, 并探讨了交联核心尺寸的关键作用.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

乙氧基化三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(ETPTA)、无水乙腈、叔丁醇、无水乙醇、2-羟基-2-甲基苯丙酮(HMPP)、鹅去氧胆酸(CDCA)、双三氟甲烷磺酰亚胺锂(LiTFSI)、十二烷基硫酸钠(SDS)、四氯化钛($TiCl_4$)和无水硫酸钠, 分析纯, 阿拉丁生化科技股份有限公司; 聚(乙二醇)二丙烯酸酯(PEGDA)、甲基丙烯酸酯功能化纳米氧化锆(5 nm)、1-甲基苯并咪唑(NMB)和3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT), 分析纯, 西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; 丙烯酸基-笼形聚倍半硅氧烷(POSS, 纯度97%), 福斯曼科技(北京)有限公司; 铜氧化还原电对([$Cu(tmby)_2$]TFSI)和有机染料Y123, 分析纯, 瑞典Dyenamo公司; 二氧化钛浆料(18 NR-T), 分析纯, 澳大利亚Greatcell Solar公司; 氟掺杂氧化锡镀膜(FTO)导电玻璃, 苏州尚阳太阳能科技有限公司; 紫外光固化胶(3035B), 日本三键株式会社; 去离子水(电阻率≥18.2 MΩ·cm).

HenvenT15-114型综合热分析仪(STA), 北京恒久科学仪器厂; Nicolet 6700型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), 美国赛默飞世尔科技有限公司; D/max2500型X射线粉末衍射仪(XRD), 日本理学株式会社; Solartron Modulab XM型电化学工作站, 英国输立强分析公司; Keithley 2400型数字源表, 美国吉时利公司; SS-F5-3A型太阳光模拟器, 高雄市光焱科技股份有限公司; SCS600型太阳能电池量子效率测量系统, 北京卓立汉光仪器有限公司; UV LED固化灯, 深圳九州星河有限公司.

1.2 实验过程

1.2.1 电解液的制备 将0.2 mol/L[$Cu^{I}(tmby)_2$]TFSI, 0.1 mol/L[$Cu^{II}(tmby)_2$]$(TFSI)_2$, 0.1 mol/L LiTFSI和0.6 mol/L NMB溶解于乙腈中配制液体电解质溶液. 随后, 向该液体电解质中加入质量为电

解质总质量10%的单体混合物[ETPTA与PEGDA(摩尔比1∶3)混合物，为了避免交联密度过高导致聚合物过脆，同时保证网络结构的均匀性；POSS与PEGDA(摩尔比1∶16)混合物，功能化纳米氧化锆与PEGDA(摩尔比1∶16)混合物]，并添加0.3%(质量分数)的自由基光引发剂(HMPP)，经磁力搅拌充分混合后，形成聚合物电解质前驱体. 所有前驱体样品均经UV LED(365 nm)光源照射10 min，完成光聚合反应，最终得到目标凝胶聚合物电解质，分别记为EP，PP和ZP.

1.2.2 对称电池的制备 采用恒电位电沉积法在FTO导电玻璃上制备PEDOT对电极. 首先，将FTO基板依次在玻璃清洗液、丙酮、乙醇和去离子水中分别超声清洗15 min，用氮气吹干后，再经UV/O_3处理15 min，以确保表面洁净. 电沉积前驱液由0.1 mol/L十二烷基硫酸钠(SDS)、0.01 mol/L EDOT和0.1 mol/L无水硫酸钠溶解于去离子水中配制而成. 在三电极体系中，以预处理后的FTO为工作电极，于相对于Ag/AgCl参比电极1.0 V的恒定电位下沉积10 s. 沉积完成后，用去离子水冲洗样品并用氮气吹干，所得PEDOT薄膜厚度约为400 nm.

将两片制备的PEDOT对电极以三明治结构叠合，中间以厚度为25 μm的沙林膜作为间隔层. 其中一片对电极上预制有两个注液孔. 使用紫外光固化胶密封两片电极的四周后，通过注液孔注入电解质溶液，最后同样以紫外光固化胶封堵注液孔，完成对称电池的封装.

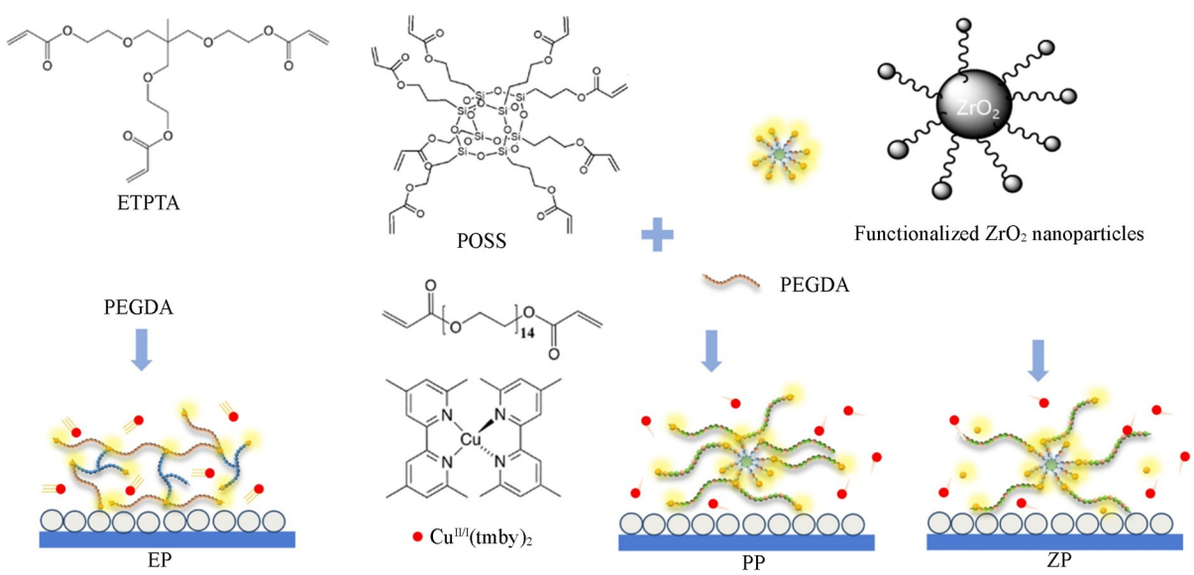
1.2.3 染料敏化太阳能电池的制备 二氧化钛光阳极的制备步骤：将洁净的FTO浸入40 mmol/L $TiCl_4$水溶液中，在75 ℃下处理30 min. 随后，采用丝网印刷法将18 NR-T胶体二氧化钛浆料涂覆于其上，制备活性面积为0.28 cm^2的二氧化钛膜. 该薄膜经500 ℃退火处理后，冷却至室温，形成多孔结构. 所得的多孔TiO_2膜进一步在75 ℃、40 mmol/L $TiCl_4$水溶液中二次处理30 min，随后再次在500 ℃空气氛围中退火30 min. 待多孔TiO_2膜冷却至80 ℃后，将其浸入染料溶液中吸附24 h. 染料溶液由100 mmol/L Y123和5 mmol/L CDCA溶解于乙腈/叔丁醇(体积比1∶1)混合溶剂中配制而成. 经计算，TiO_2光电极上的染料吸附量为15.93×10^{-8} mol/cm^2.

采用直接接触型器件结构组装DSSCs. 将PEDOT对电极与染料敏化的TiO_2光阳极直接贴合，施加适当压力确保良好接触，并使用紫外光固化胶密封电池四周. 随后，通过预先在对电极上钻取的小孔注入电解质前驱体溶液，最后以紫外光固化胶封堵注液孔，完成电池封装.

2 结果与讨论

2.1 交联核心尺寸对聚合物结晶性和玻璃态转化温度的影响

选取了3种不同尺寸的星形拓扑单体作为交联核心，它们分别为分子尺寸约1 nm的ETPTA、笼状结构尺寸约1.5 nm的POSS以及颗粒尺寸为5 nm的纳米氧化锆(Scheme 1). 将它们分别与PEGDA进行



Scheme 1 Schematic diagram of crosslinking point design for the copper-based GPEs

共聚. 图1(A)为聚合前后的FTIR光谱图，经过10 min紫外线照射后，PEGDA，ETPTA和POSS分别位于1618和1635 cm^{-1}处的丙烯酸C═C键振动明显减弱，这表明上述体系中已成功进行了聚合反应. 同时，C═O振动峰从1722 cm^{-1}移至1734 cm^{-1}，反映了聚合后C═O周围共轭系统的变化[26]. 在图1(B)所示的XRD谱图中，ZP样品有明显的ZrO_2特征峰，与标准卡片(PDF#76-1764)匹配，证明了无机有机复合凝胶聚合物的成功制备. 在图1(C)中，随着交联核心尺寸的增大，聚合物的玻璃态转化温度(T_g)逐步从−29.3 ℃降至−58.3 ℃. 值得注意的是，随着交联核心尺寸的增大，聚合物网络的T_g呈系统性下降趋势. 这主要是由于较大尺寸的交联核心(如纳米ZrO_2)在交联点处引入了显著的空间位阻效应，从而有效地增加了聚合物链段间的自由体积. 增大的自由体积抑制了PEGDA链段的有序聚集和局部结晶，最大限度地维持了聚合物链段在低温下的弛豫能力和活动性，这对于确保低温下的离子迁移通道至关重要，也是ZP体系在低温下表现出优异性能的结构基础.

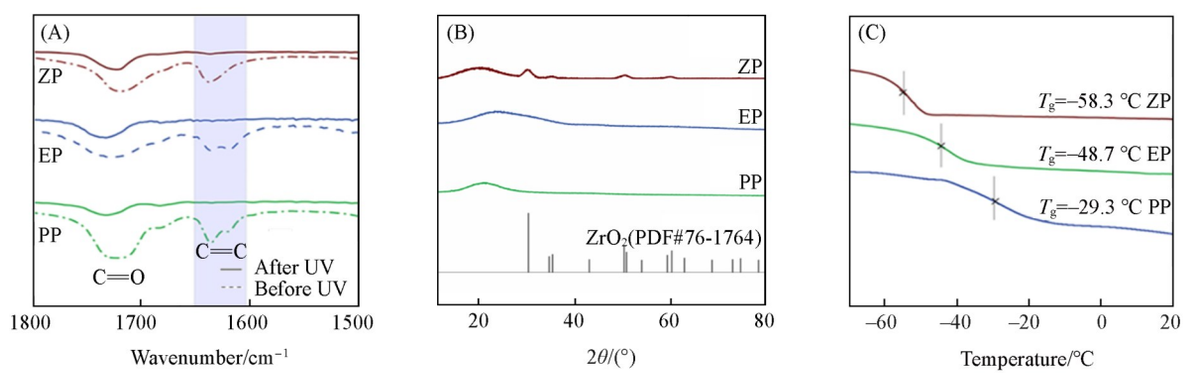


Fig. 1 FTIR spectra(A), XRD patterns(B), glass transition temperature extracted from differential scanning calorimetry(DSC)(C) of EP, PP and ZP GPEs

2.2 铜基准固态电解质的电化学特性

通过电化学阻抗(EIS)和Tafel测试分别评估了交联核心尺寸对铜基准固态电解质电化学性能的影响[图2(A)和(B)]. EIS拟合揭示，阻抗(W_s)从EP(11.05 Ω·cm^2)，PP(8.29 Ω·cm^2)到ZP(6.91 Ω·cm^2)依次递减，证实大尺寸交联核心能显著提升离子传输效率. 进一步地，基于Tafel曲线的极限电流密度，可依据按下式计算铜络合物的扩散系数(D_{app}，cm^2/s)[27]：

$$D_{app} = \frac{d}{2nFc_0} J_{lim} \quad (1)$$

式中：d(cm)为电极间的距离；n为电化学反应过程中转移的电子数；F(C/mol)为法拉第常数；c_0(mol/L)为氧化态铜络合物$Cu^{II}(tmby)_2$的浓度. 计算得到EP，PP和ZP样品的D_{app}分别为1.55×10^{-6}，1.65×10^{-6}和1.78×10^{-6} cm^2/s. 进一步证明了增大交联核心尺寸能有效提升聚合物电解质的离子传输性能.

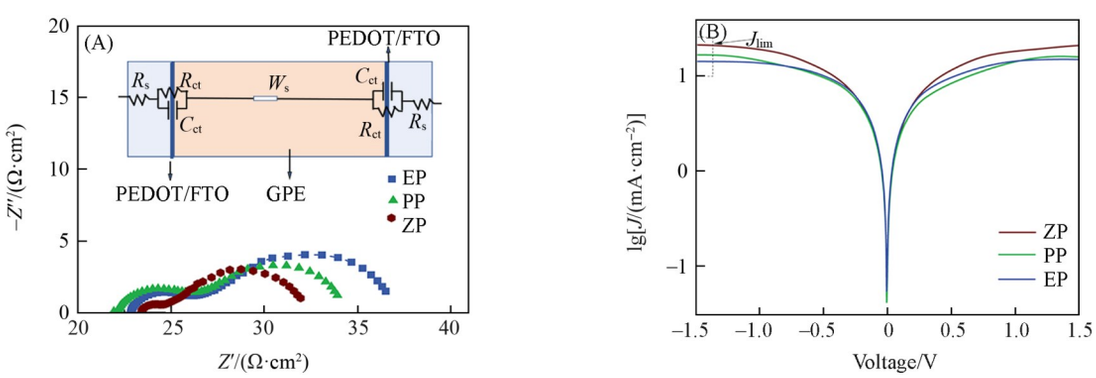


Fig. 2 Nyquist plots of EIS(A) and Tafel polarization curves(B) of EP, PP and ZP at room temperature

(A) Inset shows the equivalent circuit diagram used for fitting. R_s: ohmic series resistance, R_{ct}: charge transfer resistance, C_{ct}: charge transfer capacitance.

离子扩散过程对DSSCs的低温工作性能有至关重要的影响. 采用分布式弛豫时间(DRT)分析法对EIS数据进行解析, 能够将复杂的电化学过程(如电荷传递和离子扩散)按照其特征时间尺度进行分离[28~30], 且无需构建特定的等效电路模型. 通过对PEDOT电极与GPE组成的对称电池进行变温EIS测试及DRT分析, 探究了不同温度下GPE的离子扩散行为. 结果表明, 3种GPE中对应于对电极界面电荷传递过程的弛豫时间(τ_c)变化趋势基本一致, 但对应于电解质内部离子扩散过程的弛豫时间(τ_d)则表现出明显的材料间差异. 在40 ℃时, EP和PP的τ_d值接近, 说明两者在常温下具有相似的离子扩散动力学. 然而, 随着温度降低, 所有样品的τ_d均呈现上升趋势, 但增幅存在显著差别. 如图3(A)~(C)所示, EP的τ_d从0 ℃时的0.509 s急剧增大至−40 ℃时的5.67 s; PP的τ_d则从0.401 s相对平缓地上升至−40 ℃时的1.22 s; 而ZP在−40 ℃下的τ_d仅有0.78 s, 证明了其最优异的低温离子扩散性能. 这一结果表明, ZP体系在低温环境下(尤其是在−40 ℃)仍能保持较低的离子扩散阻抗, 这直接得益于其独特的网络结构. 以尺寸最大的功能化纳米氧化锆为交联核心, ZP网络中纳米颗粒充当了刚性隔离器的角色, 最大限度地提升了聚合物链段间的自由体积. 这种结构优势有效抑制了聚合物链段在极端低温下的冻结和结晶, 从而确保了均匀且稳定的离子传输通道.

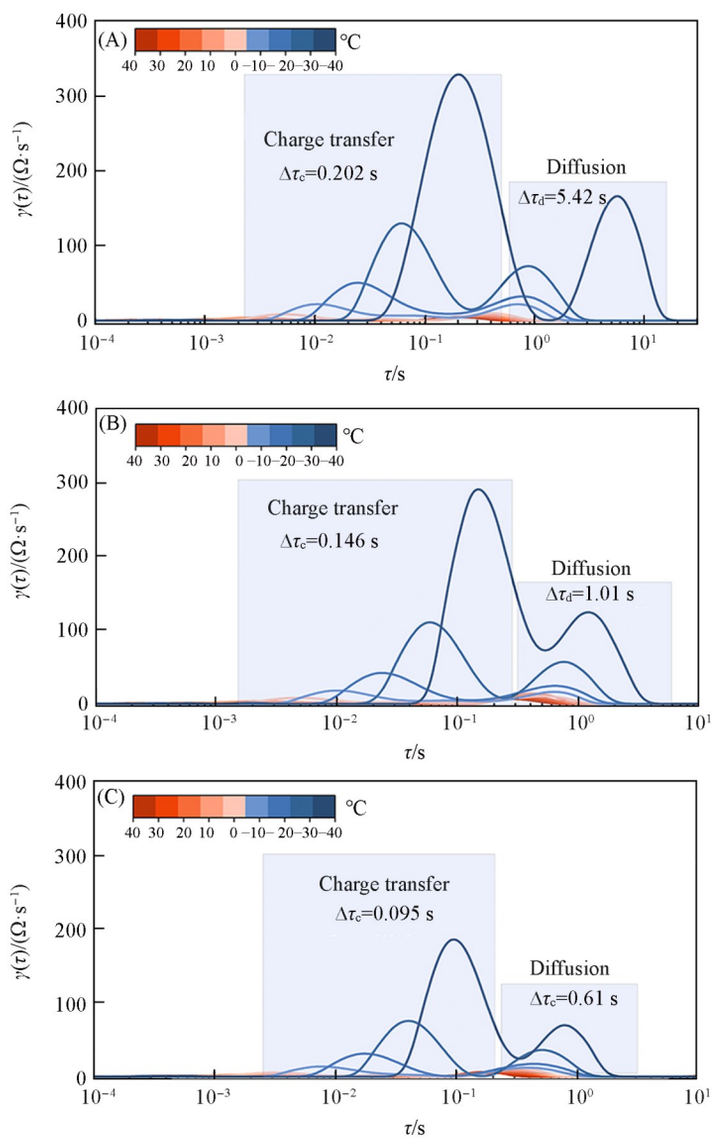


Fig. 3 DRT analysis of the Nyquist plots of EP(A), PP(B) and ZP(C) under low-temperature

为了系统评估GPEs的低温电化学性能, 对ZP, PP和EP 3种样品在40~−40 ℃温度区间内进行了

Tafel测试[图4(A)~(C)]，可见，在较高温度下，三者均表现出较高的J_{lim}值，表明其离子传输与反应动力学良好．随着温度降低至−40 ℃，所有样品的J_{lim}均明显下降，反映出低温对离子迁移速率与电化学反应的抑制效应．值得注意的是，虽然PP样品在高温下的性能与ZP相近，但其在零度以下的J_{lim}下降幅度显著大于ZP，证明ZP在低温条件下具有更优的离子传输保持能力．这一现象可归因于ZP中以大尺寸纳米氧化锆为交联核心的独特网络结构，其在低温下能更好地维持离子传输通道的稳定性，从而有效缓解离子扩散能力的下降．

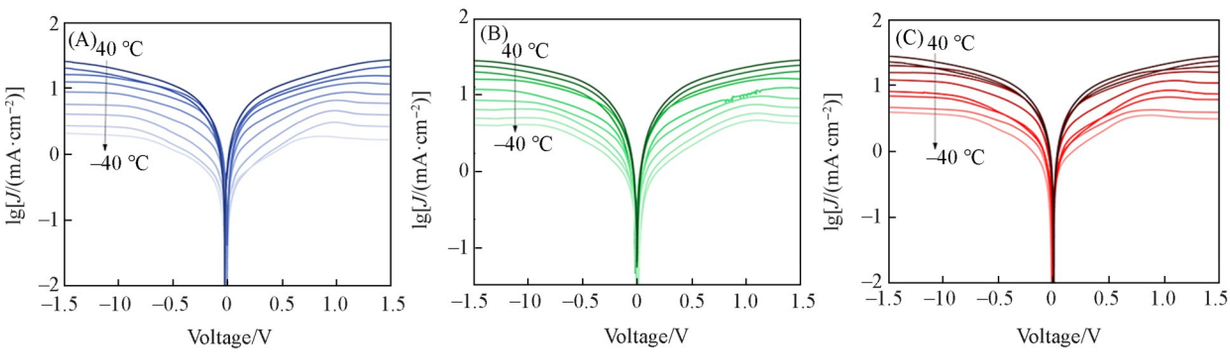


Fig. 4　Tafel polarization curves of EP(A), PP(B) and ZP(C) under low-temperature

2.3　准固态DSSCs的光伏性能

图5(A)为3种GPEs基DSSCs在光照条件下的伏安特性曲线(*J*-*V*曲线)，其对应的电池性能参数列于表1．EP器件在室温下的开路电压(V_{oc})达到了1.01 V，短路电流密度(J_{sc})为12.58 mA/cm²，填充因子(FF)为0.75以及光电转化效率(IPCE)为9.58%．PP器件的V_{oc}为1.03 V，J_{sc}为12.98 mA/cm²，填充因子(FF)为0.73，从而实现了9.73%的IPCE．ZP器件的V_{oc}为0.98 V，J_{sc}为13.44 mA/cm²，FF为0.73，从而实现了9.61%的IPCE．3种凝胶聚合物电解质的室温光伏性能接近．进一步，对这些器件进行IPCE测试[图5(B)]，3种器件在350~700 nm波长范围内的IPCE几乎相同，与*J*-*V*测试结果相一致．

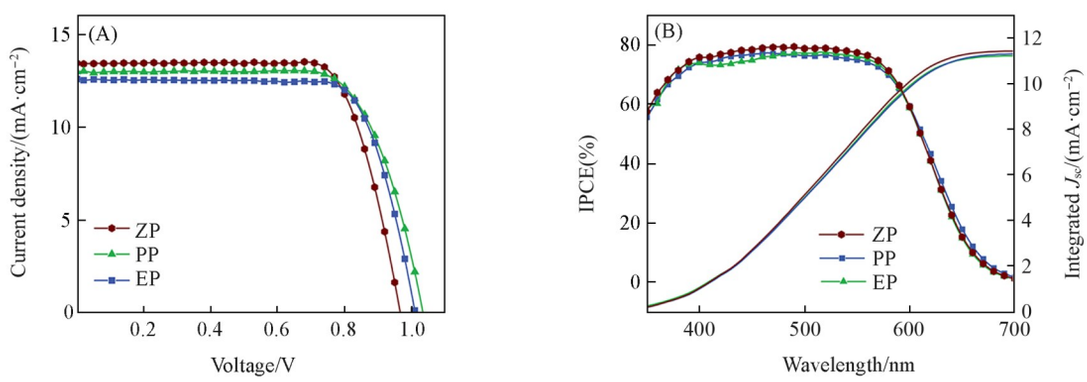


Fig. 5　*J*-*V* curves measured under 100 mW/cm²(AM 1.5G) illumination(A) and IPCE(B) of DSSCs at room temperature

Table 1　Photovoltaic performances of DSSCs measured under simulated AM 1.5G illumination of 100 mW/cm², and fitted values from the *J*-*V* measurement

Cell	V_{oc}/V	J_{sc}/(mA·cm^{-2})	FF	IPCE(%)	J_{sc}^{IPCE}/(mA·cm^{-2})
EP	1.01	12.58	0.75	9.58	11.26
PP	1.03	12.98	0.73	9.76	11.24
ZP	0.98	13.44	0.73	9.61	11.39

随着测试温度从室温降至−40 ℃，3种准固态DSSCs器件的光电转换效率均出现下降，这主要源于低温导致的离子电导率降低、电荷传输阻力增大以及界面电荷复合加剧．然而，随着交联核心尺寸的

增大，效率的衰减趋势得到显著抑制．具体而言，EP器件的效率降幅最为显著(68.5%)；PP器件次之(62.8%)；而ZP器件的降幅最小(仅为56.8%)，展现出最优的低温耐受性．从*J-V*特性曲线[图6(A)~(C)]可见，随着温度降低，EP电池的电流密度显著下降，主要由于载流子迁移率降低和离子传输受阻．在低温条件下，EP和PP器件的*J-V*曲线在最大功率点附近出现了凸起现象．这通常是由于低温下阻抗急剧升高所致，其主要来源于电解质内部离子传输阻抗的增大(与DRT分析中τ_d的增大趋势一致)，导致电荷收集效率下降，是低温电池器件的常见特征．值得注意的是，相比于J_{sc}的显著衰减，器件的V_{oc}随温度降低的变化幅度较小．这主要是因为低温虽然降低了反应动力学，但也有效抑制了界面的电子复合(暗电流)，且根据能斯特方程，温度变化对氧化还原电对热力学能级差的影响相对有限．相比之下，PP电池也呈现类似趋势但衰减较缓；而ZP电池的电流密度下降趋势最小，说明其具有更稳定的电化学界面和传输动力学．ZP器件在−40 ℃极端低温下仍保持4.15%的光电转换效率，相比于EP器件的3.02%提升了37.4%．同时，ZP器件的J_{sc}随温度降低的下降幅度最小，进一步证明其凝胶电解质结构在低温下仍能有效维持离子传输性能．

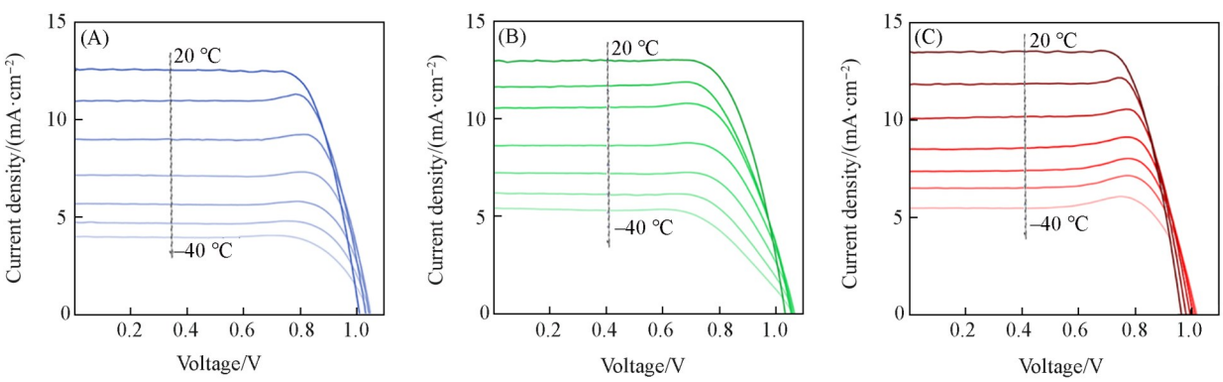


Fig. 6　*J-V* curves of EP GPEs(A), PP GPEs(B) and ZP GPEs(C) under different temperatures

3　结　　论

通过调控星形交联核心的尺寸(ETPTA、POSS至纳米氧化锆)，制备了3种准固态聚合物电解质(EP，PP与ZP)．结果表明，增大交联核心尺寸可有效降低聚合物网络的玻璃化转变温度，扩大自由体积，从而显著改善凝胶聚合物电解质在低温条件下的离子传输性能．其中，以纳米氧化锆作为大尺寸交联中心的ZP电解质表现最优，其在−40 ℃下仍保持较高的离子电导率与界面传输动力学．基于ZP电解质的准固态染料敏化太阳能电池，在低温环境中展现出优异的光电性能与稳定性，在−40 ℃下其光电转换效率相比EP器件提升了37.4%．本研究从分子结构设计出发，通过调控交联核心尺寸实现对聚合物电解质低温性能的有效优化，为发展适用于高寒环境的先进电化学器件提供了可行的材料策略与理论依据．

参　考　文　献

[1] Ren W., Ding C., Fu X., Huang Y., *Energy Storage Mater.*, **2021**, *34*, 515—535
[2] Wan H., Xu J., Wang C., *Nat. Rev. Chem.*, **2024**, *8*(1), 30—44
[3] Han L., Wang L., Chen Z., Kan Y., Hu Y., Zhang H., He X., *Adv. Funct. Mater.*, **2023**, *33*(32), 2300892
[4] Dai H., Zhang G., Rawach D., Fu C., Wang C., Liu X., Dubois M., Lai C., Sun S., *Energy Storage Mater.*, **2021**, *34*, 320—355
[5] Peng X., Liu H., Yin Q., Wu J., Chen P., Zhang G., Liu G., Wu C., Xie Y., *Nat. Commun.*, **2016**, *7*(1), 11782
[6] Wu C., Li R., Wang Y., Lu S., Lin J., Liu Y., Zhang X., *Chem. Commun.*, **2020**, *56*(69), 10046—10049
[7] Lin J., Wang Y., Li Y., Shi Y., Guo X., Wang L., Liu Y., Zhang X., *Solar RRL*, **2023**, *7*(20), 2300464
[8] Shi Y., Wang Y., Lin J., Li Y., Guo X., Jin C., Wang Y., Zhang X., *J. Power Sources*, **2025**, *628*, 235876
[9] Armand M., Tarascon J. M., *Nature*, **2008**, *451*(7179), 652—657
[10] Gupta A., Manthiram A., *Adv. Energy Mater.*, **2020**, *10*(38), 2001972
[11] Zhang N., Deng T., Zhang S., Wang C., Chen L., Wang C., Fan X., *Adv. Mater.*, **2022**, *34*(15), 2107899

[12] Swiderska-Mocek A., Gabryelczyk A., *J. Phys. Chem. C*, **2023**, *127*(38), 18875—18890
[13] Liu Y., Zhang D., Luo L., Li Z., Lin H., Liu J., Zhao Y., Hu R., Zhu M., *Energy Storage Mater.*, **2024**, *70*, 103548
[14] Liu H., Liu C., Zhou Y., Zhang Y., Deng W., Zou G., Hou H., Ji X., *Energy Storage Mater.*, **2024**, *71*, 103575
[15] Jin C., Yang C., Xie L., Mi H., Yin H., Xu B., Guo F., Qiu J., *Adv. Energy Mater.*, **2025**, *15*(4), 2402843
[16] Song Y., Su M., Xiang H., Kang J., Yu W., Peng Z., Wang H., Cheng B., Deng N., Kang W., *Small*, **2025**, *21*(3), 2408045
[17] Wu J., Lan Z., Hao S., Li P., Lin J., Huang M., Fang L., Huang Y., *Pure Appl. Chem.*, **2008**, *80*(11), 2241—2258
[18] Wu J. H., Lan Z., Lin J. M., Huang M. L., Hao S. C., Sato T., Yin S., *Adv. Mater.*, **2007**, *19*(22), 4006—4011
[19] Qu T., Nan G., Ouyang Y., Bieketuerxun B., Yan X., Qi Y., Zhang Y., *Polymers*, **2023**, *15*(21), 4268
[20] Jagarlapudi S. S., Cross H. S., Das T., Goddard III W. A., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2023**, *15*(20), 24858—24867
[21] White R. P., Lipson J. E. G., *Macromolecules*, **2016**, *49*(11), 3987—4007
[22] Chen S., Feng F., Yin Y., Che H., Liao X. Z., Ma Z. F., *J. Power Sources*, **2018**, *399*, 363—371
[23] Tosa M., Hashimoto K., Kokubo H., Ueno K., Watanabe M., *Soft Matter*, **2020**, *16*(17), 4290—4298
[24] Wang W., Yang Y., Yang J., Zhang J., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, *63*, e202400091
[25] Lv K., Zhang W., Zhang L., Wang Z. S., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2016**, *8*(8), 5343—5350
[26] Kang Y., Cheong K., Noh K. A., Lee C., Seung D. Y., *J. Power Sources*, **2003**, *119*, 432—437
[27] Zhou Y., Xiang W., Chen S., Fang S., Zhou X., Zhang J., Lin Y., *Chem. Commun.*, **2009**, (26), 3895—3897
[28] Lu Y., Zhao C. Z., Huang J. Q., Zhang Q., *Joule*, **2022**, *6*(6), 1172—1198
[29] Quattrocchi E., Wan T. H., Belotti A., Kim D., Pepe S., Kalinin S. V., Ahmadi M., Ciucci F., *Electrochim. Acta*, **2021**, *392*, 139010
[30] Hong J., Bhardwaj A., Bae H., Kim I. H., Song S. J., *J. Electrochem. Soc.*, **2020**, *167*, 114504

(Ed.: Y, K, S)