

染料敏化太阳能电池制备研究

李欣悦

渭南师范学院, 陕西渭南, 716000;

摘要: 染料敏化太阳能电池是一种基于光电化学原理构建的新型太阳能电池, 具有制备工艺简单、材料成本较低、弱光响应性能良好等优点, 在室内光伏、便携式电子设备和建筑一体化等领域具有较好的应用前景。本文系统介绍了染料敏化太阳能电池的工作原理、结构组成及研究现状, 重点综述了光阳极制备、染料敏感剂选择、电解质体系配制和对电极制备工艺等关键技术, 并对光电转换效率测试方法、电池性能影响因素及稳定性研究进行了分析。研究表明, 优化电极结构、改善界面电荷传输、提高材料稳定性, 是提升染料敏化太阳能电池综合性能的关键。

关键词: 染料敏化太阳能电池; 光阳极; 电解质; 光电转换效率

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.010

1 染料敏化太阳能电池概述

1.1 染料敏化太阳能电池的工作原理

染料敏化太阳能电池是一种将光能直接转化为电能的光电化学器件, 其核心思想是模拟植物光合作用中“吸光—激发—转移”的过程。与传统硅太阳能电池不同, DSSC 不依赖半导体内部的 PN 结来完成载流子分离, 而是将吸光功能与电荷输运功能分别交由染料分子和半导体材料承担。电池受光照后, 吸附在半导体表面的染料首先吸收光子并由基态跃迁到激发态, 随后将电子注入半导体导带。电子通过纳米晶半导体薄膜传输至透明导电基底, 再经外电路流向对电极, 形成电流输出。与此同时, 失去电子的氧化态染料由电解质中的还原态离子还原, 实现染料再生。被氧化的电解质组分再在对电极处获得电子还原, 整个体系重新回到初始状态。DSSC 的工作效率主要受光吸收效率、电子注入效率、电子传输速度和电荷复合程度等因素影响。若染料吸收能力弱、电子在传输中复合严重或电解质再生速度慢, 都会导致输出性能下降。因此, 理解其工作原理不仅有助于掌握器件运行机制, 也为后续材料设计和工艺优化提供理论基础。

1.2 染料敏化太阳能电池的结构组成

染料敏化太阳能电池通常由五个主要部分组成, 即透明导电基底、光阳极、敏化染料、电解质和对电极。透明导电基底一般采用掺氟氧化锡玻璃或掺铟氧化锡玻璃, 其作用是在保证较高透光率的同时收集和传导电子。光阳极通常由纳米多孔 TiO₂ 薄膜构成, 具有较大的比表面积, 能够吸附大量染料分子并为电子提供传输通道。敏化染料是 DSSC 的关键吸光材料, 其作用是吸收太阳光并将激发电子注入半导体导带, 因此要求

其具备宽光谱吸收能力、良好的化学稳定性和适宜的能级匹配关系。

电解质主要用于还原氧化态染料并在对电极与染料之间传递电荷, 传统体系多采用碘/三碘离子氧化还原对。对电极则通常沉积铂、碳材料或其他催化层, 用于促进电解质中氧化态离子的还原反应。上述各部分之间相互配合, 共同决定器件的光电性能。若光阳极吸附能力不足、染料稳定性差、电解质扩散缓慢或对电极催化活性不高, 都会限制电池性能提升。因此, DSSC 并不是单一材料主导的器件, 而是一个多界面协同作用的复杂系统, 其结构组成的合理设计是实现高性能的前提。

1.3 染料敏化太阳能电池的研究现状

自 20 世纪 90 年代高效染料敏化太阳能电池被提出以来, DSSC 迅速成为新型光伏技术的重要研究方向。早期研究主要集中在纳米晶 TiO₂ 光阳极和钌配合物染料体系, 凭借较高的光吸收效率和相对成熟的碘系电解质, 其光电转换效率不断提高。随后, 研究重点逐渐从单纯追求效率转向效率与稳定性的协同提升。一方面, 研究人员开发了有机金属染料、卟啉染料以及纯有机染料, 以改善光谱响应范围并降低贵金属依赖; 另一方面, 针对液态电解质存在挥发、渗漏和腐蚀等问题, 凝胶电解质、离子液体电解质和固态空穴传输材料得到广泛关注。

近年来, 对电极材料也由传统铂逐步向碳材料、导电聚合物及过渡金属化合物扩展, 以降低成本并提高催化活性。

2 染料敏化太阳能电池的制备方法

2.1 光阳极的制备与优化

光阳极是染料敏化太阳能电池中最核心的组成部

分之一,其质量直接关系到染料吸附量、电子传输效率及最终电池性能。目前应用最广泛的光阳极材料是纳米晶 TiO_2 [22],原因在于其化学稳定性高、成本低、禁带宽度适宜且无毒环保。常见的制备方法包括刮涂法、丝网印刷法、旋涂法、水热法和电沉积法等。其中,刮涂法和丝网印刷法工艺简单、成本较低,适合实验室研究和大面积制备;旋涂法适用于获得较均匀的薄膜,但对工艺条件控制要求较高。

在优化方面,光阳极膜层厚度、颗粒粒径、孔隙结构及烧结温度均会显著影响其性能。薄膜过薄会导致染料负载量不足,影响光吸收;过厚则会增加电子传输路径,导致复合概率升高。通常需要在吸光能力和电子传输效率之间取得平衡。为进一步提高性能,研究者常采用双层结构设计,即在纳米颗粒层上增加散射层,以增强光捕获能力;也可引入 TiO_2 [22] 纳米管、纳米线等一维结构,缩短电子迁移路径,减少界面复合。通过表面处理、元素掺杂和复合半导体构建,还可改善能级匹配和界面电荷传输特性。总体而言,光阳极优化是提升 DSSC 性能的基础环节。

2.2 染料敏感剂的选择与吸附

染料敏感剂是 DSSC 中负责吸收太阳光并注入电子的关键材料,其光学与电化学性能直接决定电池的光响应范围和电子注入效率。理想的染料应具备以下特点:吸收光谱宽、摩尔消光系数高、激发态能级高于半导体导带、氧化还原电位适宜、与半导体表面具有较强锚定能力,并且在长期光照和热环境下保持稳定。目前常用的染料主要包括钌配合物染料、卟啉类染料和有机无金属染料。钌染料性能稳定、研究较成熟,但成本较高;有机染料结构可设计性强、吸光系数高,近年来发展迅速;卟啉染料则在可见光吸收和分子结构调控方面表现突出。

染料吸附过程同样非常关键。通常将烧结后的光阳极浸入染料溶液中,通过羧基、膦酸基等锚定基团使染料吸附在 TiO_2 [22] 表面。吸附时间过短会导致染料覆盖不足,而吸附过久则可能出现分子聚集,影响电子注入效率。为了减少染料聚集和界面复合,常加入共吸附剂如脱氧胆酸等辅助分子。吸附溶剂、温度和浓度也会影响敏化效果。因此,染料的合理选择和吸附条件的精细控制,是提高 DSSC 短路电流和开路电压的重要手段。

2.3 电解质体系的配制

电解质体系在染料敏化太阳能电池中承担着再生染料和传递电荷的重要任务,是连接光阳极与对电极的“内部介质”。传统 DSSC 广泛采用碘/三碘离子液态电解质,该体系具有离子电导率高、再生能力强和技术较成熟等优点,能够有效促进氧化态染料恢复到基态,

从而维持电池持续工作。然而,液态电解质也存在明显缺点,如易挥发、易渗漏、对封装要求高,且可能腐蚀某些器件材料,导致电池长期稳定性下降。

为解决上述问题,研究者开发了多种改进型电解质体系。凝胶电解质通过在液态体系中引入高分子网络或无机骨架,在兼顾离子迁移能力的同时改善封装可靠性;离子液体电解质具有蒸气压低、热稳定性好等特点,有利于提高器件耐久性;固态电解质和空穴传输材料则从根本上避免了液体渗漏问题,但往往存在界面接触不足和电荷传输受限等挑战。电解质的配制不仅涉及氧化还原对的选择,还包括溶剂种类、添加剂比例和离子浓度优化。例如,适量加入 4-叔丁基吡啶等添加剂可调节半导体表面能级,改善开路电压。因此,开发兼具高传输效率和高稳定性的电解质体系,是 DSSC 实现实用化的重要环节。

2.4 对电极的制备工艺

对电极在染料敏化太阳能电池中的主要功能是收集外电路传来的电子,并催化电解质中氧化态组分的还原反应。理想的对电极材料应具有良好的导电性、高催化活性、优异的化学稳定性以及较低的制备成本。传统 DSSC 多采用在导电玻璃表面沉积铂作为对电极催化层,原因在于铂对碘/三碘离子氧化还原反应具有优异催化性能,能有效降低界面电荷转移阻抗,提高填充因子和整体效率。其制备方法包括热分解法、磁控溅射法、电沉积法等。

但铂资源稀缺、价格昂贵,且在某些电解质体系中稳定性有限,因此开发替代型对电极材料成为研究热点。目前,碳材料如石墨、碳黑、石墨烯和碳纳米管因来源广、成本低、导电性能好而被广泛研究;导电聚合物如 PEDOT 也因柔性好、催化活性较佳而受到关注;此外,过渡金属硫化物、氮化物和氧化物等材料也表现出较好的电催化潜力。对电极制备过程中,催化层厚度、表面粗糙度、附着性及孔隙结构都会影响电解质扩散和反应速率。通过构建复合催化层或纳米多孔结构,可进一步提高活性位点数量和导电通路,从而实现低成本、高性能对电极的目标。

3 染料敏化太阳能电池性能测试与分析

3.1 光电转换效率的测量方法

光电转换效率是评价染料敏化太阳能电池性能最重要的指标,通常通过标准光照条件下的电流-电压测试获得。测试时一般采用太阳光模拟器,在标准测试条件下测量器件的开路电压、短路电流密度、填充因子和光电转换效率。开路电压反映电池在无负载时所能达到的最大电压,与半导体费米能级、电解质氧化还原电位及界面复合程度密切相关;短路电流密度体现光生电子

产生和收集能力,受染料吸光性能、电子注入效率和光阳极传输特性影响;填充因子则反映器件输出曲线的“方正程度”,与电极电阻和界面催化性能密切相关。

除 J-V 测试外,入射单色光子-电子转换效率测试也是分析 DSSC 光谱响应的重要手段。该方法能够反映不同波长下的光电转换能力,有助于评价染料吸收范围和电子收集效率。电化学阻抗谱则可进一步揭示界面电荷转移阻抗、电子寿命和扩散行为,为分析器件损失机理提供依据。此外,暗电流测试、开路电压衰减测试和循环伏安法等手段,也常用于研究电子复合和对电极催化行为。通过多种测试方法结合,能够更全面地评估 DSSC 的性能水平及其限制因素。

3.2 电池性能影响因素分析

染料敏化太阳能电池的性能并非由某一单独因素决定,而是光吸收、电子注入、载流子传输、界面复合和电解质扩散等多过程共同作用的结果。首先,染料的吸光能力及其与半导体能级匹配程度决定了光生电子的产生效率。若染料吸收范围窄或激发态能级不足,电子注入效率就会降低,从而影响短路电流。其次,光阳极的膜层结构对性能影响显著。适宜的孔隙率和比表面积有利于提高染料负载量,而连续通畅的电子传输路径则可减少复合损失。

另外,界面复合是限制 DSSC 效率的重要因素。当注入半导体中的电子与电解质中的氧化态离子或氧化态染料重新结合时,会直接降低开路电压和电流输出。因此,采用表面修饰、包覆层或添加抑制复合的添加剂是常见优化策略。电解质的离子扩散速率和再生能力也会影响器件性能,若再生过程缓慢,则会增加电子损失。对电极的催化能力则主要影响填充因子和整体输出稳定性。由此可见,提升 DSSC 性能应从材料选择、结构设计和界面调控三个层面协同推进,而非仅依赖某一参数的单独优化。

3.3 电池稳定性测试研究

除光电转换效率外,稳定性也是评价染料敏化太阳能电池能否实现实际应用的重要指标。由于 DSSC 通常包含染料、电解质和多种界面材料,其长期运行过程中容易受到光照、温度、湿度及密封性能等因素影响,导致性能衰减。稳定性测试通常包括连续光照老化测试、热稳定性测试、湿热环境测试和长期储存测试等。通过比较不同时间节点的开路电压、短路电流、填充因子及转换效率变化,可以判断器件的耐久性水平。

在稳定性衰减机理方面,液态电解质挥发或渗漏是常见问题,会直接破坏电荷传输通道;染料在强光或高温条件下分解,也会造成吸光能力下降;对电极催化层

脱落、导电基底腐蚀以及电极界面老化同样会影响器件寿命。因此,提高 DSSC 稳定性的关键在于优化材料本征稳定性和器件封装工艺。近年来,研究者通过使用高稳定性有机染料、低挥发离子液体、凝胶电解质以及耐腐蚀封装材料,有效改善了器件耐久性。未来若要推动 DSSC 走向产业应用,还需建立更加统一和严格的稳定性评价标准,并在长期户外和室内工况下开展系统验证。

4 结语

染料敏化太阳能电池作为一种具有代表性的新型光伏器件,兼具低成本、低能耗制备和良好弱光适应性等优势,在未来分布式能源和室内能源采集领域具有广阔前景。本文从工作原理、结构组成、研究现状、制备方法以及性能测试与分析等方面进行了较为系统的阐述。总体来看,DSSC 的发展关键在于光阳极结构优化、染料分子设计、电解质稳定化及对电极低成本替代材料的开发。同时,界面复合抑制和长期稳定性提升仍是当前研究的重点难点。

参考文献

- [1]Sifanele Phundulu, Tebello Nyokong. Development of reduced graphene oxide/carbon black nanocomposites as counter electrodes and porphyrin anodes for dye-sensitized solar cells[J]. Carbon Trends, 2026, 23 100624-100624.
- [2]Mustafa Akkaya, Serife Akar, Aysegul Sezgin, Mustafa Kareem, Hacer Sibel Karapinar, Erdi Akman. A Counter Electrode Design Based on Cu-WSe₂ Alloy Structure for High-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cells[J]. Crystal Research and Technology, 2025, 61 (1): e70064-e70064.
- [3]张倩,张宇轩,杨永广,白芮杰,李远东,李玲. FeMoS₄/碳布复合材料的制备及其在染料敏化太阳能电池中的应用(英文)[J]. 无机化学学报, 2025, 41 (09): 1916-1926.
- [4]李敏玉,胡晓静,郑美琴. 材料化学探究性实验教学设计——染料敏化太阳能电池的制备[J]. 广东化工, 2025, 52 (12): 195-197.
- [5]栗元皓,刘淑慧,武莹杉,武克忠,张会. 沿温度梯度热解钼多酸制备染料敏化太阳能电池 V2O₃@C 对电极催化剂[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2025, 49 (01): 54-60.
- [6]刘淑慧,栗元皓,刘珊,武克忠,张会. 钨多酸热解制备染料敏化太阳能电池对电极 W₂O₇@C 电催化剂[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2024, 48 (05): 484-491.