

# 染料敏化太阳电池及其进展\*

王孔嘉<sup>†</sup> 戴松元

(中国科学院等离子体物理研究所太阳能材料与工程研究室 合肥 230031)

**摘要** 文章介绍了染料敏化太阳电池的研究背景和发展过程,简述了基于纳米 TiO<sub>2</sub> 半导体电极材料的染料敏化太阳电池的基本结构和工作机理.详细阐述了该电池国内外各项关键技术的实验和产业化研究最新成果,着重分析了染料敏化太阳电池的未来发展趋势,并对该电池的应用前景进行了展望.

**关键词** 太阳电池,染料敏化,综述,多孔薄膜

## Dye-Sensitized solar cells

WANG Kong-Jia<sup>†</sup> DAI Song-Yuan

(Division of Solar Energy Materials and Engineering, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract** The background and history of dye-sensitized solar cells is reviewed, with details of the structure and principle of cells based on nanoporous TiO<sub>2</sub> semiconductor films. Recent experimental and technological advances in the fabrication of the key components are discussed in detail. Future developments, industrialization prospects and potential applications are also discussed.

**Keywords** solar cell, dye-sensitized, review, nanoporous films

新型染料敏化太阳电池(Dye-Sensitized Solar Cell,以下简称DSC)由瑞士洛桑高等理工学院(EPFL)Grätzel教授于1991年取得突破性进展,立即受到国际上广泛的关注和重视.自1991年起,该电池一直是国际研究的热点<sup>[1-6]</sup>.DSC被认为是新型太阳电池中最有力的竞争者之一.DSC以其潜在的低成本、相对简单的制作工艺技术和电池制备的低能耗等优势赢得了人们的广泛重视.传统的硅太阳电池依靠的是光物理效应,而DSC则是通过光化学-物理过程来实现光电转换,从而可以使太阳电池的光电转换材料不再局限于制备过程复杂、价格昂贵的高纯无机半导体材料.采用纳米多孔TiO<sub>2</sub>薄膜电极替代传统的平板电极,以二价钨(II)的多吡啶配合物作敏化剂,用I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sup>-</sup>氧化还原电对电解质体系制备DSC,在1993年光电转换效率达到了10%<sup>[2]</sup>,2005年超过了11%<sup>[2]</sup>,其转换效率可与非晶硅薄膜太阳电池相媲美.DSC廉价的生产成本、易于工业化生产的工艺技术以及广阔的应用前景,吸引了欧、美、澳、日、韩众多科学家与企业大力进行研究和开发.本文简要介绍了DSC的结构和工作原理,重点评述了国内外DSC各项关键技术和产业化的最新

进展,同时也展望了染料敏化太阳电池的未来发展趋势及应用前景.

## 1 DSC的研究背景及发展

随着世界能源危机、温室效应和环境污染等问题日益严重,人们对可再生能源应用和需求的日益渴望,作为可再生能源中的重要组成部分,太阳能具有较大的优势.与化石燃料相比,太阳能取之不尽,用之不竭;与核能相比,太阳能更为安全,其应用不会对环境构成任何污染;与水能、风能相比,太阳能利用的成本较低,且不受地域限制.1954年,美国贝尔实验室成功地制备出第一个效率为6%的单晶硅太阳电池,不久就被首次应用于人造卫星上,为太阳能光伏发电奠定了技术基础,同时也为利用太阳能发电解决能源问题给予人们很大的鼓舞.经过几十年的发展,以单晶硅和砷化镓为基础的太阳电池已

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:G2000028200)资助项目;安徽省科技攻关项目(批准号:06012024A) 2007-09-07收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: kjwang@ipp.ac.cn

经取得了很大的发展,目前的光电转换效率最高已经分别达到了 24.7% 和 25.1%, CuInGaSe<sub>2</sub> (CIGS) 电池的效率也已经于 2006 年 2 月达到了 18.8%<sup>[7]</sup>.

然而,由于上述传统太阳能电池在成本、稀有金属原材料以及环境污染等方面的缺点,使其生产及应用受到了一定的制约,因此人们对价格低廉、薄膜化的光化学太阳电池产生了浓厚的兴趣.早在 19 世纪 60 年代,德国 Tributsch 教授就制作出了世界上第一个光化学太阳电池.经过一个多世纪的发展,光化学太阳电池的效率仍然很低,不到 1%.20 世纪 90 年代以来,由于纳米结构半导体材料研究的兴起,纳米材料在光电转换方面的应用研究也得到了快速的发展.1991 年,瑞士洛桑高等工业学院 Grätzel 教授领导的研究小组,把以前的平板电极改成纳米多孔电极后制作 DSC 电池,电池的光电转换效率取得了 7.1% 的突破性进展<sup>[1]</sup>,1993 年达到了 10%<sup>[2]</sup>,2003 年达到了 10.58%<sup>[3]</sup> 年和 2005<sup>[5]</sup> 年,光电转换效率分别达到了 11.04% 和 11.18%.目前面积约为 100 cm<sup>2</sup> 的 DSC 光电转换效率已超过 6.3%<sup>[4]</sup>,效率接近 6% 的 15 cm × 20 cm 电池组件也已制备成功,并组装成 45 cm × 80 cm 的电池板以及 500W 小型示范电站<sup>[6]</sup>.这充分显示了 DSC 成为具有大规模应用前景的低价太阳电池的一个新的选择.

DSC 的成功之处在于引入纳米多孔 TiO<sub>2</sub> 薄膜作为电池的光阳极,海绵状纳米 TiO<sub>2</sub> 多孔薄膜光阳极有很大的内部表面积,能够吸收更多的染料单分子层.这样既克服了传统化学光电池中只能吸附单分子层染料从而吸收少量太阳光的缺点,又可使太阳光在膜内多次反射,使太阳光被染料充分吸收,产生更大的光电流,从而大大提高光电转换效率.

DSC 最吸引人的特点是其廉价的原材料和简单的制作工艺,且性能相对稳定、衰减少,具有很好的应用前景.因此, DYESOL 公司<sup>[8]</sup>、日本 Sharp 公司<sup>[9]</sup>、荷兰国家能源研究中心 (ECN)<sup>[10]</sup> 以及中国科学院等离子体物理研究所<sup>[6]</sup> 等许多企业和研究机构纷纷开展大面积电池的研发和制作.如何进一步提高 DSC 的光电转换效率和电池实用化是目前面临的主要研究问题.

## 2 DSC 的结构及工作机理

DSC 主要由纳米多孔半导体薄膜、染料敏化剂、氧化还原电解质、对电极和导电基底等几部分组成.其工作原理如图 1 所示.染料分子吸收太阳光后从

基态跃迁到激发态(过程①),激发态染料的电子迅速注入到纳米半导体的导带中(过程②),随后扩散至导电基底(过程③),经外回路转移至对电极,处于氧化态的染料被还原态的电解质还原再生(过程④),氧化态的电解质在对电极接受电子被还原(过程⑤),从而完成了电子运输的一个循环过程.在这些过程中,伴随着两个背反应:注入到 TiO<sub>2</sub> 导带中的电子和氧化态染料(过程⑥)或电解质中的电子受体(过程⑦)的复合反应.如何强化电子运输循环过程的各步反应,同时抑制电荷复合背反应,是当前 DSC 研究工作的一个重点.

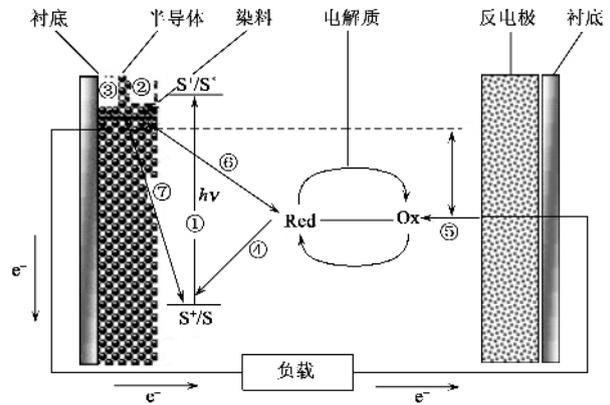


图 1 DSC 工作原理示意图 (Red 为还原电对, Ox 为氧化电对)

一般认为,电池的开路电压取决于纳米半导体的费米能级和电解质氧化还原电对能级差<sup>[11]</sup>.传统的硅太阳电池依靠的是光物理效应,而 DSC 则是通过光化学过程来实现光电转换,使太阳电池的光电转换材料不再局限于制备过程复杂、价格昂贵的高纯无机半导体材料.与传统 p-n 结太阳电池相比, DSC 的最大特点是其光吸收和电荷分离传输分别由不同的物质完成,光吸收是靠吸附在纳米半导体表面的染料来完成,而半导体仅起电荷分离和传输载体的作用. DSC 的最大优势是电荷传输是靠多数载流子来实现电荷传导,不存在传统 p-n 结太阳电池中少数载流子和电荷传输材料表面复合等问题,因而其制备过程简单,对环境要求不高.

## 3 DSC 关键技术研究成果

### 3.1 纳米多孔薄膜研究现状

在 DSC 中应用的半导体薄膜材料主要是纳米 TiO<sub>2</sub><sup>[11]</sup>、ZnO<sup>[12]</sup>、SnO<sub>2</sub><sup>[13]</sup>、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[14]</sup> 等纳米半导体氧化物,主要作用是利用其巨大的表面积来吸附单分子层染料,同时也是电荷分离和传输的载体.到目前

为止,光电转换效率最高的仍是纳米  $\text{TiO}_2$  半导体材料.最近几年来,有关 DSC 中纳米半导体薄膜方面的研究主要集中在以下三个方面:薄膜的制备方法、薄膜的物理化学处理以及其他半导体薄膜的应用.

在纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜制备方法上,目前有两大热点研究内容:其一是在柔性衬底上制备纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜的研究;另外就是规整有序纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜制备方面的研究.除了常用的溶胶-凝胶法制备纳米  $\text{TiO}_2$  胶体以及采用丝网印刷技术在透明导电玻璃(TCO)上印制纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜外,低温条件下在柔性衬底上制备纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜的方法也取得了较好的研究成果. Dürr 将经过高温烧结的纳米  $\text{TiO}_2$  多孔层从镀金的玻璃上转移到涂有胶粘剂的 ITO/PET 柔性导电基底上,获得了 5.8% (AM 1.5) 的高光电转换效率<sup>[15]</sup>,但由于该方法制备工艺复杂,因此很难得以大规模应用.在 2006 年,Grätzel 研究组开发出一种基于钛箔柔性基底的高温法  $\text{TiO}_2$  光阳极和基于 ITO/PEN 导电基底的镀铂对电极柔性太阳电池,效率达到 7.2%<sup>[16]</sup>,这也是目前柔性电池转换效率的最高值.这些研究成果使人们看到了柔性太阳电池应用的希望,但柔性电池的光电极和导电基底的附着强度和电接触问题仍需要做更深入的研究.

在规整有序纳米结构  $\text{TiO}_2$  薄膜研究上,国内孟庆波等<sup>[17]</sup>利用不同粒径纳米粒子的纳米晶三维周期孔组装而制作的 DSC 电池,开路光电压达到了 0.9 V.目前  $\text{TiO}_2$  纳米管的研究和应用也广受关注,将其应用于 DSC 电极材料,获得了较好的光电转换效率.利用半导体复合体系(如  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等)组装复合半导体多孔薄膜电极也是纳米半导体研究的一个重要方向.

纳米结构的半导体薄膜在 DSC 太阳电池中通过其巨大的表面积,吸附大量的单分子层染料分子,提高了太阳光的收集效率,同时纳米半导体将从染料分子注入的电子传输到收集电极.半导体电极的巨大表面积也增加了电极表面的电荷复合,从而降低了太阳电池的光电转换效率.为了改善电池的光伏性能,人们采用了多种物理化学修饰技术来改善纳米  $\text{TiO}_2$  电极的特性,这些技术包括  $\text{TiCl}_4$  表面处理、表面包覆、掺杂等.

Grätzel 采用  $\text{TiCl}_4$  水溶液处理纳米  $\text{TiO}_2$  光阳极,可以在纯度不高的  $\text{TiO}_2$  核外包覆一层高纯的  $\text{TiO}_2$ ,增加电子注入效率,在纳米多孔薄膜/电解质界面形成阻挡层<sup>[18]</sup>.和电沉积一样,在纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜之间形成新的纳米  $\text{TiO}_2$  颗粒,增强了纳米  $\text{TiO}_2$

颗粒间电接触<sup>[21]</sup>.研究发现,经  $\text{TiCl}_4$  处理之后,尽管纳米  $\text{TiO}_2$  薄膜的比表面积下降,但单位体积内  $\text{TiO}_2$  的量增加,从而增大了  $\text{TiO}_2$  薄膜的表面积和电池的光电流<sup>[19]</sup>.在对  $\text{TiCl}_4$  处理的可能机理进行了研究后,认为  $\text{TiCl}_4$  处理改变了  $\text{TiO}_2$  的导带边位置,增大了光电子的注入效率<sup>[18]</sup>.与  $\text{TiCl}_4$  表面处理作用类似的方法有酸处理、表面电沉积等.国内黄春辉等人<sup>[20]</sup>用盐酸对有机染料敏化的  $\text{TiO}_2$  薄膜进行处理,电池的电流和电压及光电转换效率均有大幅度提高.吴季怀等人<sup>[21]</sup>采用不同酸处理  $\text{TiO}_2$  薄膜,发现盐酸较其他无机酸处理效果要好.

同时,表面包覆也是纳米  $\text{TiO}_2$  电极表面修饰的一个重要方法.由于纳米  $\text{TiO}_2$  多孔薄膜电极具有高的比表面积, $\text{TiO}_2$  粒子的尺寸又比较小,多孔薄膜内表面态数量相对单晶材料来说比较多,导致  $\text{TiO}_2$  导带电子与氧化态染料或电解质中的电子给体复合严重<sup>[22]</sup>.为此人们在纳米  $\text{TiO}_2$  表面包覆具有较高导带位置的半导体或绝缘层形成所谓的核-壳结构的阻挡层来减小复合几率. Grätzel 等人提出了在 TCO 和纳米  $\text{TiO}_2$  界面引入一层  $\text{TiO}_2$  致密层,用以减少 TCO 与电解质的直接接触面积<sup>[23]</sup>.也有研究表明,阻挡层在短路条件下可以很好地阻止电子和电解质溶液中的  $\text{I}_3^-$  离子的背反应.但在开路条件下,电子在  $\text{TiO}_2$  阻挡层表面积聚,从而使得  $\text{TiO}_2$  阻挡层的阻挡效果受到限制.日本 Yanagida 等在离子液体基太阳电池的 FTO/ $\text{TiO}_2$  界面引入  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  阻挡层,取得了和  $\text{TiO}_2$  致密层相当的效果,电池的开路电压、填充因子和光电转换效率均有较大提高<sup>[24]</sup>.

实验表明,单一纳米多孔薄膜电池的光电转换性能并不是很理想,而适当的掺杂则可以增强其光电性能.研究发现,对单晶或多晶  $\text{TiO}_2$  进行某些金属离子掺杂,可以减少电子-空穴对的复合,延长电荷寿命,从而提高电池的光电流<sup>[25]</sup>.当用镧系金属离子对  $\text{TiO}_2$  纳米粒子进行掺杂,并将离子掺杂的  $\text{TiO}_2$  纳米粒子制成 DSC 光阳极,在同样条件下得到了较高的光电转换效率<sup>[26]</sup>.用  $\text{ZrO}_2$  掺杂  $\text{TiO}_2$ ,增大了开路电压、短路电流密度和光电转换效率<sup>[27]</sup>.将  $\text{TiO}_2$  与其他半导体化合物复合制成复合半导体薄膜,以此来改善电池的性能.常用的半导体化合物有  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{PbS}$  等<sup>[28]</sup>.复合膜的形成改变了  $\text{TiO}_2$  薄膜中电子分布,抑制载流子在传输过程中的复合,从而提高了电子传输效率.复合膜可能成为今后研究的一个重点.

在其他可替代  $\text{TiO}_2$  半导体材料研究方面,虽然应用于 DSC 中最为成功的半导体材料目前仍是纳米  $\text{TiO}_2$ ,但是染料敏化  $\text{ZnO}$  半导体电极在太阳电池,特别是在柔性太阳电池上的应用研究有了很大进展. Lee 在曙红 - Y 敏化的  $\text{ZnO}$  太阳电池上,获得了 2.4% 的光电转换效率<sup>[29]</sup>. 在  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  的甲醇溶液中进行化学浴沉积,经热处理后得到孔径为 12 nm 的  $\text{ZnO}$  纳米薄膜,光电转换效率达到 4.1% ( $\text{AM } 1.5$ )<sup>[30]</sup>. 日本岐阜大学开发的基于二氢吡啶类有机染料敏化的电沉积纳米氧化锌薄膜的塑性彩色电池效率达到了 5.6%<sup>[31]</sup>. 采用纳米  $\text{CdO}$  代替纳米  $\text{TiO}_2$  电极,得到了效率为 2.95% 的太阳电池<sup>[32]</sup>.

采用合适的制备方法来获得高效的纳米半导体多孔薄膜,是提高 DSC 光电转换效率和实用化的关键之一. 合成颗粒尺寸均匀、比表面积大、空隙呈垂直于导电基底的纳米半导体多孔薄膜是当前研究的一个热点. 此外,为了提高 DSC 的便携性能和使用范围,基于柔性衬底的光阳极制备技术是当前纳米半导体的又一重要研究方向. 如何在低温条件下制备高效纳米半导体光阳极,是当前柔性太阳电池研究的一个亟待解决的问题.

### 3.2 染料敏化剂的研究进展

用于 DSC 的理想染料敏化剂一般都具有宽的光谱响应范围、高的量子效率、高的稳定性和足够高的氧化还原电势等特性. 用于 DSC 的染料敏化剂,按其结构中是否含有金属原子或离子而分为有机和无机两大类. 无机类的染料敏化剂主要集中在钌、铱类的金属多吡啶配合物,金属卟啉,酞菁,无机量子点等. 有机染料包括合成染料和天然染料.

#### 3.2.1 无机染料

与有机染料相比,无机金属配合物染料具有较高的热稳定性和化学稳定性. 金属配合物敏化剂通常含有吸附配体和辅助配体. 吸附配体能使染料吸附在  $\text{TiO}_2$  表面,同时作为发色基团. 辅助配体并不直接吸附在纳米半导体表面,其作用是调节配合物的总体性能. 目前应用前景最为看好的是多吡啶钌配合物类染料敏化剂. 这类染料通过羧基或膦酸基吸附在纳晶  $\text{TiO}_2$  薄膜表面,使得处于激发态的染料能将其电子有效地注入到纳米  $\text{TiO}_2$  导带. 多吡啶钌染料按其结构分为羧酸多吡啶钌、膦酸多吡啶钌、多核联吡啶钌三类. 其中前两类的区别在于吸附基团的不同,前者吸附基团为羧基,后者为膦酸基,它们

与多核联吡啶钌的区别在于它们只有一个金属中心. 羧酸多吡啶钌的吸附基团羧基是平面结构,电子可以很迅速地注入到  $\text{TiO}_2$  导带,这类染料是目前应用最为广泛的染料敏化剂,目前开发的高效染料敏化剂多为此类染料. 在这类染料中,以 N3, N719 和黑染料为代表,保持着 DSC 的最高效率. 近年来,以 Z907 为代表的两亲型染料和以 K19 为代表的具有高吸光系数的染料敏化剂是当前多吡啶钌类染料研究的热点. 以 Grätzel, Arakawa 和 Yanagida 等为代表的研究者合成了许多性能优良的染料敏化剂. 表 1 列出了这些染料的紫外光谱及其敏化太阳电池的光伏性能数据.

#### 3.2.2 有机染料

无机敏化染料的成本受稀有金属钌价格的制约. 开发高效纯有机染料是降低 DSC 成本的有效手段. 近年来,基于纯有机染料的 DSC 发展较快,其光电转换效率已与基于多吡啶钌类的无机染料 DSC 相当<sup>[20]</sup>. 有机染料敏化剂一般具有“给体(D)-共轭桥( $\pi$ )-受体(A)结构”. 借助电子给体和受体的推拉电子作用,使得染料的可见吸收峰向长波方向移动,有效地利用红光和近红外光,达到不断提高 DSC 短路光电流的目的. 基于 D- $\pi$ -A 结构的有机染料已经广泛应用于 DSC 中. 黄春辉等<sup>[20]</sup>以半花菁染料 BTS 和 IDS 作敏化剂的  $\text{TiO}_2$  电极经盐酸处理之后,光电效率分别达到 5.1% (BTS) 和 4.8% (IDS). Yang 等<sup>[43]</sup>合成了两种包含并噻吩基和噻吩基共轭结构单元的有机染料,获得了 6.23% 的光电转换效率. Hara 及其合作者<sup>[44]</sup>合成了系列香豆素衍生物染料作敏化剂,获得了和 N719 染料接近的光电转换效率 7.7%. Uchida 研究组<sup>[45]</sup>用二氢吡啶类染料 D149 作敏化剂,在没有反射层的情况下,获得了 8.0% 的光电转换效率,后与 EPFL 合作,在对  $\text{TiO}_2$  膜等进行优化后,得到了 9.03% 的光电转换效率<sup>[46]</sup>. 这些代表了有机染料敏化剂研究的最新成果.

由于单一染料敏化受到染料吸收光谱的限制,很难与太阳的发射光谱相匹配,人们采用光谱响应范围具有互补性的染料配合使用,相互弥补各自吸收光谱不够宽的缺点,取得了良好的效果. 张宝文等<sup>[47]</sup>设计合成了系列方酸菁染料,它们的吸收光谱与钌配合物有非常好的互补性,在 600—700 nm 处呈现一个非常强的吸收带,消光系数较 N3 高 1 个数量级,最大吸收峰较 N3 红移了 100 nm. 利用该类染料与 N3 以一定的比例协同敏化的  $\text{TiO}_2$  纳米电极的 IPCE 最大值超过 85%, 电池总的光电转换效率

表 1 多吡啶钌(II)配合物的吸收光谱和光电性能\*

染料	$Abs/nm$ ( $\epsilon/10^3 m^2 \cdot mol^{-1}$ )	IPCE	$J_{sc}/mA \cdot cm^{-2}$	$V_{oc}/mV$	FF	$\eta/\%$
N3	534( 1.42 )	83%	18.2	720	0.73	$10^{[2]}$
N719	532( 1.4 )	85%	17.73	846	0.75	$11.18^{[5]}$
黑色染料	605( 0.75 )	80%	20.53	720	0.704	$10.4^{[33]}$
黑色染料	—	80%	20.9	736	0.722	$11.1^{[4]}$
Z907	526( 1.22 )	72%	13.6	721	0.692	$6.8^{[34]}$
Z907	526( 1.22 )	72%	14.6	722	0.693	$7.3^{[34]}$
K8	555( 1.80 )	77%	18	640	0.75	$8.64^{[35]}$
K19	543( 1.82 )	70%	14.61	711	0.671	$7.0^{[36]}$
N945	550( 1.89 )	80%	16.5	790	0.72	$9.6^{[37]}$
Z910	543( 1.70 )	80%	17.2	777	0.764	$10.2^{[38]}$
K73	545( 1.80 )	80%	17.22	748	0.694	$9.0^{[39]}$
K51	530( 1.23 )	70%	15.40	738	0.685	$7.8^{[40]}$
HRS-1	542( 1.87 )	80%	20	680	0.69	$9.5^{[41]}$
Z955	519( 0.83 )	80%	16.37	707	0.693	$8.0^{[42]}$

\*  $Abs$  为吸光度  $\epsilon$  为摩尔消光系数  $IPCE$  为入射单色光子-电子转化效率  $J_{sc}$  为电流密度  $V_{oc}$  为开路电压  $FF$  为填充因子  $\eta$  为电池光电转换效率

较 N3 单一敏化时提高了 13%。协同敏化与单一染料敏化相比,不仅拓宽了光谱响应范围,使吸收光谱红移,而且提高了电池的光电转换效率。

### 3.3 电解质研究进展

作为染料敏化太阳电池中的一个重要组成部分,电解质在 DSC 中充当电荷交换的媒介,使得电池中的各个组分分别回到其初始状态,以完成闭合回路。电解质在光阳极将处于氧化态的染料还原,同时自身由于接受对电极传输过来的电子而被还原。根据电解质的状态不同,用于染料敏化太阳电池的电解质主要分为液态电解质、固态电解质和准固态电解质三大类。

#### 3.3.1 液态电解质的初步成功

液态电解质由于其具有扩散速率快、光电转换效率高、组成成分易于设计和调节、对纳米多孔膜的渗透性好等优点,一直被广泛应用和研究<sup>[2,33]</sup>。它主要由三个部分组成:有机溶剂、氧化还原电对和添加剂。用作液体电解质中的有机溶剂常见的有:腈类(如乙腈、甲氧基丙腈等)、酯类(碳酸乙烯酯、碳酸丙烯酯和  $\gamma$ -丁内酯等)。这些有机溶剂具有较宽的电化学窗口,不易导致染料的脱附和降解,其凝固点低,适用的温度范围宽。此外,它们还具有较高的介电常数和较低的粘度,能满足无机盐在其中溶解和离解的要求,且溶液具有较高的电导率。液体电解质中的氧化还原电对主要是  $I_3^-/I^-$ ,虽然有用联吡啶钌(II)等配合物作为氧化还原电对的报道<sup>[48]</sup>,但从目前的研究情况来看,用其制成的 DSC 的电池性能还是难以和  $I_3^-/I^-$  相比。用于电解质中的阳离子通

常是咪唑类阳离子和  $Li^+$ 。在电解质溶液中加入  $Li^+$ ,可大幅度地改善电子在  $TiO_2$  膜中的传输,从而提高太阳电池的短路电流。同时,形成的  $Li^+ - e^-$  偶极子与溶液中  $I_3^-$  复合反应的速率也快,这会导致太阳电池的填充因子下降。染料敏化太阳电池电解质溶液中常用的添加剂是 4-叔丁基吡啶或 N-甲基苯并咪唑。由于有机溶剂电解质具有较好的渗透性和较快的扩散性能,DSC 光电转换效率的最高记录都是在基于有机溶剂电解质特别是高挥发性有机溶剂电解质的太阳电池中获得的<sup>[34,16,33]</sup>。但此类电解质也存在着易挥发、易泄漏、电池不易密封等问题,影响了太阳电池的使用寿命。

离子液体电解质是近年来发展起来的一类新型液态电解质,它采用离子液体作为溶剂,与普通基于有机溶剂的液态电解质相比,具有下列优点:非常小的饱和蒸气压、不挥发、无色、无嗅,较大的稳定温度范围,较好的化学稳定性及较宽的电化学稳定电位窗口,通过对阴阳离子的设计可调节其对无机物、水及有机物的溶解性等。近年来,离子液体电解质发展很快。为了提高离子液体电解质中氧化还原电对的迁移速度和电池的光伏性能,人们研究和开发了种类繁多的低粘度离子液体。Grätzel 等<sup>[49]</sup>采用系列低粘度离子液体和 MPlI 混合溶剂制备离子液体电解质,获得了很好的结果。

#### 3.3.2 固态电解质

DSC 作为一种长期置于户外的装置,受到各种自然条件的影响。基于液体电解质的 DSC,无疑会增加不稳定的风险。目前,用于 DSC 固态电解质的研究十分活跃,研究得较多的是有机空穴传输材料和

无机 p 型半导体材料<sup>[50]</sup>. Krüger 等<sup>[51]</sup>用含银离子的染料替代 N3 染料,从而将 DSC 的效率提高到 3.12%,这也是目前为止使用有机 p 型半导体的固态 DSC 所达到的最高效率. 现有的研究表明,使用有机 p 型半导体的固态 DSC,在没有盐(常用的是锂盐)存在的情况下,通常效率都比较低. 由于绝大多数都不溶于有机 p 型半导体,因此寻找共溶剂以增加盐在有机型半导体的溶解是有机 p 型半导体固态 DSC 研究中的重要内容. 有机空穴传输材料作为 DSC 的全固态电解质,虽然研究十分活跃,但由于纳米多孔膜存在着孔径大小、分布和形貌等许多复杂因素,如何改善有机空穴传输材料和纳米多孔膜的接触,提高空穴传输的速率,降低有机空穴传输材料自身的电阻,提高固态电解质太阳电池的光电转换效率等许多问题尚需进一步深入研究.

用作 DSC 固体电解质的 p 型半导体材料主要是 CuI 和 CuSCN 等. Kumara 等人<sup>[52]</sup>采用硫氰酸三乙胺作为 CuI 晶体生长抑制剂,生成 CuI 微晶作为 DSC 的空穴传输材料,制得的 DSC 电池效率达到 3.75% (AM1.5) 稳定性有了较大提高. 无机 p 型半导体材料作为 DSC 中的固态电解质,如何解决其稳定性,提高空穴传输的速率,是提高这类固态电解质太阳电池光电转换效率所必须解决的问题. 此外,对于固态电解质,还存在固态电解质与敏化染料之间的选择, n 型纳米电极的制备等许多值得研究的问题.

### 3.3.3 准固态电解质

准固态电解质是 DSC 应用中未来发展的另一个方向. 准固态电解质主要是在有机溶剂或离子液体基液态电解质中加入胶凝剂形成凝胶体系,从而增强体系的稳定性. 准固态电解质按照被胶凝的液体电解质的不同,可以分为基于有机溶剂的准固态电解质和基于离子液体的准固态电解质. 用于胶凝液体电解质的胶凝剂分为有机小分子胶凝剂、聚合物胶凝剂和纳米粒子胶凝剂. 准固态电解质近年来发展很快,人们开发出不同的胶凝体系. 目前,基于凝胶电解质的太阳电池的效率已经达到了 7.0%<sup>[53]</sup>. 在有机溶剂电解质中加入有机小分子胶凝剂或聚合物胶凝剂,能使其固化得到准固态的凝胶电解质,有效地防止电解质的泄漏,减缓有机溶剂的挥发. 但随着时间的延长,这类电池依然会存在着有机溶剂的挥发损失问题. 基于离子液体电解质的太阳电池电解质的胶凝,与有机溶剂电解质溶液的胶凝相似,可以采用有机小分子和聚合物来胶凝. 此外,无机纳米离子也用作离子液体介质的电解质溶

液的胶凝剂. Yanagida 等<sup>[54]</sup>研究了不同无机纳米粒子胶凝离子液体电解质,发现纳米 TiO<sub>2</sub> 粒子作胶凝剂时,电池性能最佳.

### 3.4 对电极和导电基底

对电极也是染料敏化太阳电池的重要组成部分. 用作对电极的材料主要是铂、碳等. 目前,广泛应用于 DSC 太阳电池的对电极是表面镀有一层 Pt 膜的导电玻璃,其中 Pt 用作 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 还原反应的催化剂. 铂对电极的制备方法主要有磁控溅射、溶液热解和电镀等. Wang 等<sup>[55]</sup>采用在镀有 NiP 的 FTO 导电玻璃基底上热解 H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> 制备对电极,这种方法与常规的在 FTO 导电玻璃上镀铂方法相比,能增加光反射并减小方块电阻,从而能增大光收集效率和电池的填充因子,总的光电转化效率也有 33% 的提高 (5.6%—8.3%). 铂对电极由于其电阻小和催化效果好,在太阳电池中应用最为广泛,然而由于其为贵金属,成本高,人们尝试了采用其他材料替代铂作太阳电池的对电极材料. 成本低廉的碳成为人们研究的一个热点,许多基于碳的对电极被开发出来<sup>[56]</sup>. 为降低染料敏化纳米薄膜太阳电池的成本及扩大其应用领域,开发导电玻璃以外基材的新型对电极是十分必要的. Hino 等<sup>[56]</sup>采用电解胶束破裂方法 (electrolytic micelle disruption method) 和二茂铁基表面活性剂,在 ITO 导电玻璃上沉积一层 C<sub>60</sub> 富勒烯及其衍生物作为对电极材料,这些都是寻求替代贵金属铂对电极的有益尝试.

目前用作染料敏化太阳电池的导电基底材料主要是透明导电玻璃. 它是在厚度约为 1—3 mm 的普通玻璃表面镀上导电膜制成的. 其主要成分是掺氟的透明 SnO<sub>2</sub> 膜 (FTO),在 SnO<sub>2</sub> 和玻璃之间还扩散一层几个纳米厚度的纯 SiO<sub>2</sub> 膜,其目的是防止高温烧结过程中普通玻璃中的 Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 离子扩散到 SnO<sub>2</sub> 导电膜中去. 此外,氧化铟锡 (ITO) 也可作为该电池的导电衬底材料. ITO 相对于 FTO 导电膜的透光率要好,但 ITO 导电膜在高温烧结过程中电阻急剧增大,较大地影响了染料敏化太阳电池的性能. 为此, Kawashima<sup>[57]</sup>等开发了 FTO/ITO 双层导电膜. 经研究发现,该双层膜的最低电阻率为 1.4 × 10<sup>-4</sup> Ω · cm,在可见光区的光透过率达到了 80%. 该导电膜在 300—600 °C 空气中高温下烧结 1 h 后,电阻率下降小于 10%.

考虑到太阳电池的便携性和生产的连续性,人们开发了基于塑料和金属薄片的柔性太阳电池. Kang

等<sup>[58]</sup>开发了基于不锈钢基底上溅射ITO和SiO<sub>x</sub>的导电膜,用其承载纳米TiO<sub>2</sub>膜,获得了4.2%光电转换效率的柔性太阳电池.基于聚萘二甲酸乙二酯基底上包覆ITO导电膜的TiO<sub>2</sub>光阳极太阳电池的效率已经超过了6%<sup>[59]</sup>.以PET和PEN等聚合物为基底的导电膜也被广泛应用,与金属箔片相比,聚合物基底材料的柔韧性好,透光率高,但基底的耐热温度较低,不适合高温烧结法制备纳米半导体薄膜.

#### 4 DSC 产业化研究进展

自从DSC在Grätzel实验室研究取得突破以来,引起了企业界人士的极大关注.DSC专利公布生效伊始,就有澳大利亚、瑞士和德国等7家公司购买了专利使用权,并投入人力、物力进行实用化和产业化研究.从1992年至1999年间,以德国光伏研究所(INAP)和澳大利亚STA公司为典型的产业化研究机构进行了产业化前期的探索性研究,在产业化应用研究上取得较大的进展.其中澳大利亚STA公司在2001年5月1日,建立了世界上第一个中试规模的DSC工厂,建立了迄今为止独一无二的面积为200 m<sup>2</sup> DSC示范屋顶,集中体现了未来工业化的前景<sup>[8]</sup>;瑞士EPFL、欧盟ECN光伏研究中心、日本夏

普公司和日本东京科学大学 Arakawa 等在面积大于1 cm<sup>2</sup> 条状电池上取得了与小电池相当的效率.中国科学院等离子体物理研究所于2003年成功制备出光电转换效率为5.9%的15 cm × 20 cm 及 40 cm × 60 cm 的电池组件<sup>[6]</sup>,这些结果为目前DSC产业化研究的较好结果.日本日立公司、富士公司、丰田公司和夏普公司等,在产业化研究和开发上给予很大投入,在有机染料的探索性研究和柔性衬底DSC电池开发研究上处于世界领先地位.日本Peccell Technologies公司日前开发成功了12 cm × 12 cm、输出电压4 V以上、输出电流0.1 A以上的基于聚合物柔性衬底的DSC电池,据称其效率为4.3%—5.2%.瑞士Léclanche S A (Swiss)、Solaronix (Swiss)和Greatcell公司都在开发实用化的室内外产品.美国Konarka高技术公司在2002年投资13.5百万美元,对以透明导电高分子柔性薄膜为衬底和电极的染料电池进行了实用化和产业化的研发;美国GE公司也在2000年起组织和实施DSC电池项目,并已建立一定规模的研究队伍.表2<sup>[6,8,60]</sup>列举了世界上各主要科研机构公司在不同面积DSC及电池组件上所取得的光电转换效率.从表2可以看出,面积在300 cm<sup>2</sup>以上实用化电池的光电转换效率还比较低,离产业化要求还有一定的差距.

表2 全世界主要科研机构和公司进行DSC产业化研究取得的光电转换效率\*<sup>[3-6,8,61]</sup>

面积	<0.5 cm <sup>2</sup>	1—5 cm <sup>2</sup>	100 cm <sup>2</sup>	300 cm <sup>2</sup>	400 cm <sup>2</sup>
EPFL	10.58% <sup>2003</sup> 11.04% <sup>2004</sup>	10.1% <sup>2006</sup> (1.31 cm <sup>2</sup> )			
NREL	11.18% <sup>2006</sup> 9% <sup>2000</sup>				
ECN		8.2% <sup>2001</sup>	最高 5.9% <sup>2003</sup> 最低 :4.5%		4.7% <sup>2003</sup> (室外测试)
STI	10.8% <sup>2005</sup>	10.4% <sup>2005</sup>	6.3% (26.5 cm <sup>2</sup> , 国际标准认证中心确认)	<3%	
SHARP	(0.2227 cm <sup>-2</sup> )	(1.004 cm <sup>2</sup> )	6.3% (101 cm <sup>2</sup> ) 4.7% <sup>1998</sup> (141.4 cm <sup>2</sup> , 国际标准认证中心确认)		
INAP	11.1% (0.219 cm <sup>2</sup> )	8.0% <sup>2006</sup> (5 cm <sup>2</sup> )	8.4% <sup>2006</sup> (67.5 cm <sup>2</sup> )		6.8% <sup>2000</sup>
TUS	10.3% <sup>2006</sup>	9.9% <sup>2006</sup>			
IPP	8.95% <sup>2002</sup>	7.4% <sup>2003</sup>		5.9% (1 Sun) <sup>2003</sup> 7.3% (0.5 Sun)	5.7% <sup>2003</sup> (0.95 Sun, 室外测试)

\* EPFL为瑞士洛桑高等理工学院光子与界面实验室,NREL为美国再生能源实验室,ECN为荷兰能源研究中心,STI为澳大利亚国际再生能源技术公司,SHARP为日本夏普公司,INAP为德国光伏研究所,TUS为东京理科大学,IPP为中国科学院等离子体物理研究所(表中数据右上标的4位数字为年份)

我国在产业化研究上,通过国家重点基础研究发展计划能源领域项目和中国科学院知识创新项目基金的资助,经过近两年的国内外合作和努力,取得了与世界研究水平相接近的水平,在大面积DSC上取得突破,制备出效率接近6%的15 cm × 20 cm 电池组

件,并组装成45 cm × 80 cm 的电池板,无论是单片电池还是电池板,其光电转换效率都已成为目前国际高指标之一.2004年,在中国科学院等离子体物理研究所建成了500 W 太阳电池示范电站,这些成果为我们下一步工业化生产打下了良好的基础.

## 5 结论与展望

自1991年DSC取得突破性进展以来,从实验室的小面积电池的基础研究到大面积电池的产业化研究,从电池的各种关键组成材料到电池的制作技术等各项研究都获得了长足进步.我国自1994年开展DSC的研究以来,无论在DSC的基础研究和产业化研究上都与世界研究水平相接近.中国科学院等离子体物理研究所、理化技术研究所、化学研究所、物理研究所等科研单位,北京大学、浙江大学、东南大学、华侨大学、清华大学、武汉大学、上海交通大学等高等学校,在基础研究上均取得了较好的结果,在染料敏化剂、纳米薄膜修饰、电解质和电池光电效率上都与世界研究水平相接近,在该领域具有一定的影响.

充分开发利用太阳能,已成为世界各国政府可持续发展能源的战略决策.根据我国的基本国情,为实现太阳电池服务于国民经济的未来目标,降低太阳电池成本和实现太阳电池的薄膜化已被我国定为发展太阳电池的方向.要使光伏发电成为未来能源体系的组成部分,关键是要实现其性能价格比可与常规能源相当.以DSC的成本优势,如达到6%的光电转换效率,室外稳定性达到10年以上,就具有了产业化潜力.DSC作为一种长期置于户外的装置,必将受到各种自然条件的影响.因此,研究长寿命、高稳定性的DSC是一个十分迫切的问题.在未来几年内,我国在DSC研发的道路上会向前迈岌更坚实的一步.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Oregan B , Gratzel M. *Nature* , 1991 , 353( 6346 ) : 737
- [ 2 ] Nazeeruddin M K , Kay A , Rodicio I *et al.* *Journal of the American Chemical Society* , 1993 , 115( 14 ) : 6382
- [ 3 ] Gratzel M. *Journal of Photochemistry and Photobiology a : Chemistry* , 2004 , 164( 1—3 ) : 3
- [ 4 ] Chiba Y , Islam A , Watanabe Y *et al.* *Japanese Journal of Applied Physics , Part 2-Letters & Express Letters* , 2006 , 45 ( 24—28 ) : 638
- [ 5 ] Nazeeruddin M K , De Angelis F , Fantacci S *et al.* *Journal of the American Chemical Society* , 2005 , 127( 48 ) : 16835
- [ 6 ] Dai S , Weng J , Sui Y F *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells* , 2004 , 84( 1—4 ) : 125
- [ 7 ] Green M A , Emery K , King D L *et al.* *Progress in Photovoltaics* , 2007 , 15( 1 ) : 35
- [ 8 ] Kroon J M , Bakker N J , Smit H J P *et al.* *Progress in Photovoltaics* , 2007 , 15( 1 ) : 1
- [ 9 ] Han L Y , Koide N , Chiba Y *et al.* *Comptes Rendus Chimie* , 2006 , 9( 5—6 ) : 645
- [ 10 ] Spath M , Sommeling P M , van Roosmalen J A M *et al.* *Progress in Photovoltaics* , 2003 , 11( 3 ) : 207
- [ 11 ] Hagfeldt A , Gratzel M. *Chemical Reviews* , 1995 , 95( 1 ) : 49
- [ 12 ] Keis K , Vayssieres L , Lindquist S E *et al.* *Nanostructured Materials* , 1999 , 12( 1—4 ) : 487
- [ 13 ] Ferrere S , Zaban A , Gregg B A. *Journal of Physical Chemistry B* , 1997 , 101( 23 ) : 4490
- [ 14 ] Guo P , Aegerter M A. *Thin Solid Films* , 1999 , 351( 1—2 ) : 290
- [ 15 ] Durr M , Schmid A , Obermaier M *et al.* *Nature Materials* , 2005 , 4( 8 ) : 607
- [ 16 ] Ito S , Ha N L C , Rothenberger G *et al.* *Chemical Communications* , 2006 , ( 38 ) : 4004
- [ 17 ] Meng Q B , Fu C H , Einaga Y *et al.* *Chemistry of Materials* , 2002 , 14( 1 ) : 83
- [ 18 ] Sommeling P M , O'Regan B C , Haswell R R *et al.* *Journal of Physical Chemistry B* , 2006 , 110( 39 ) : 19191
- [ 19 ] Zeng L Y , Dai S Y , Wang K J *et al.* *Chinese Physics Letters* , 2004 , 21( 9 ) : 1835
- [ 20 ] Wang Z S , Li F Y , Huang C H. *Journal of Physical Chemistry B* , 2001 , 105( 38 ) : 9210
- [ 21 ] Hao S C , Wu J H , Fan L Q *et al.* *Solar Energy* , 2004 , 76 ( 6 ) : 745
- [ 22 ] Gregg B A , Chen S G , Ferrere S. *Journal of Physical Chemistry B* , 2003 , 107( 13 ) : 3019
- [ 23 ] Peng B , Jungmann G , Jager C *et al.* *Coordination Chemistry Reviews* , 2004 , 248( 13—14 ) : 1479
- [ 24 ] Xia J B , Masaki N , Jiang K J *et al.* *Chemistry Letters* , 2006 , 35( 3 ) : 252
- [ 25 ] 杨蓉 , 王维波 , 敬炳文等. *感光科学与光化学* , 1997 , 15 ( 4 ) : 293[ Yang R , Wang W B , Jing B W *et al.* *Photographic Science and Photochemistry* , 1997 , 15( 4 ) : 293( in Chinese )]
- [ 26 ] Wang Y Q , Hao Y Z , Cheng H M *et al.* *Journal of Materials Science* , 1999 , 34( 12 ) : 2773
- [ 27 ] Kitiyanan A , Yoshikawa S. *Materials Letters* , 2005 , 59( 29—30 ) : 4038
- [ 28 ] Bandara J , Weerasinghe H C. *Solar Energy Materials and Solar Cells* , 2005 , 88( 4 ) : 341
- [ 29 ] Lee W J , Suzuki A , Imaeda K *et al.* *Japanese Journal of Applied Physics , Part 1 - Regular Papers Short Notes & Review Papers* , 2004 , 43( 1 ) : 152
- [ 30 ] Kakiuchi K , Hosono E , Fuiihara S. *Journal of Photochemistry and Photobiology a : Chemistry* , 2006 , 179( 1—2 ) : 81
- [ 31 ] Dentani T , Funabiki K , Jin J Y *et al.* *Dyes and Pigments* , 2007 , 72( 3 ) : 303
- [ 32 ] Mane R S , Pathan H M , Lokhande C D *et al.* *Solar Energy* , 2006 , 80( 2 ) : 185
- [ 33 ] Nazeeruddin M K , Pechy P , Renouard T *et al.* *Journal of the American Chemical Society* , 2001 , 123( 8 ) : 1613

[ 34 ] Wang P , Zakeeruddin S M , Humphry-Baker R *et al.* *Advanced Materials* ,2003 ,15( 24 ) :2101

[ 35 ] Klein C , Nazeeruddin M K , Liska P *et al.* *Inorganic Chemistry* ,2005 ,44( 2 ) :178

[ 36 ] Wang P , Klein C , Humphry-Baker R *et al.* *Journal of the American Chemical Society* ,2005 ,127( 3 ) :808

[ 37 ] Nazeeruddin M K , Wang Q , Cevey L *et al.* *Inorganic Chemistry* ,2006 ,45( 2 ) :787

[ 38 ] Wang P , Zakeeruddin S M , Moser J E *et al.* *Advanced Materials* ,2004 ,16( 20 ) :1806

[ 39 ] Kuang D B , Ito S , Wenger B *et al.* *Journal of the American Chemical Society* ,2006 ,128( 12 ) :4146

[ 40 ] Kuang D B , Klein C , Snaith H J *et al.* *Nano Letters* ,2006 ,6( 4 ) :769

[ 41 ] Jiang K J , Masaki N , Xia J B *et al.* *Chemical Communications* ,2006 ,( 23 ) :2460

[ 42 ] Wang P , Klein C , Moser J E *et al.* *Journal of Physical Chemistry B* ,2004 ,108( 45 ) :17553

[ 43 ] Li S L , Jiang K J , Shao K F *et al.* *Chemical Communications* ,2006 ,( 26 ) :2792

[ 44 ] Hara K , Wang Z S , Sato T *et al.* *Journal of Physical Chemistry B* ,2005 ,109( 32 ) :15476

[ 45 ] Horiuchi T , Miura H , Uchida S. *Journal of Photochemistry and Photobiology a Chemistry* ,2004 ,164( 1—3 ) :29

[ 46 ] Ito S , Zakeeruddin S M , Humphry-Baker R *et al.* *Advanced Materials* ,2006 ,18( 9 ) :1202

[ 47 ] Zhao W , Hou Y J , Wang X S *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells* ,1999 ,58( 2 ) :173

[ 48 ] Sapp S A , Elliott C M , Contado C *et al.* *Journal of the American Chemical Society* ,2002 ,124( 37 ) :11215

[ 49 ] Wang P , Zakeeruddin S M , Moser J E *et al.* *Journal of Physical Chemistry B* ,2003 ,107( 48 ) :13280

[ 50 ] Li B , Wang L D , Kang B N *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells* ,2006 ,90( 5 ) :549

[ 51 ] Kruger J , Plass R , Gratzel M *et al.* *Applied Physics Letters* ,2002 ,81( 2 ) :367

[ 52 ] Kumara G R A , Kaneko S , Okuya M *et al.* *Langmuir* ,2002 ,18( 26 ) :10493

[ 53 ] Wang P , Zakeeruddin S M , Humphry - Baker R *et al.* *Chemistry of Materials* ,2004 ,16( 14 ) :2694

[ 54 ] Usui H , Matsui H , Tanabe N *et al.* *Journal of Photochemistry and Photobiology a Chemistry* ,2004 ,164( 1—3 ) :97

[ 55 ] Wang G Q , Lin R F , Lin Y *et al.* *Electrochimica Acta* ,2005 ,50( 28 ) :5546

[ 56 ] Hino T , Ogawa Y , Kuramoto N. *Carbon* ,2006 ,44( 5 ) :880

[ 57 ] Kawashima T , Ezure T , Okada K *et al.* *Journal of Photochemistry and Photobiology a Chemistry* ,2004 ,164( 1—3 ) :199

[ 58 ] Kang M G , Park N G , Ryu K S *et al.* *Solar Energy Materials and Solar Cells* ,2006 ,90( 5 ) :574

[ 59 ] Miyasaka T , Kijitori Y , Ikegami M. *Electrochemistry* ,2007 ,75( 1 ) :2

[ 60 ] Green M A , Emery K , King D L *et al.* *Progress in Photovoltaics* ,2002 ,10( 5 ) :355

· 物理新闻和动态 ·

## 空间尘埃等离子体结构的模拟

尘埃等离子体是一种高温带电气体,它们通常存在于星际空间,在地球上空,在闪电区,一般也会产生这种气体。由于在等离子体中的尘埃都是带电的,因此它们之间存在着静电相互作用。但尘埃等离子体空间内有着各种不同的间隔区,有的间隔区内尘埃间是相互吸引的,而在另一些间隔区内,尘埃间是相互排斥的。因此近年来德国马普研究所的地球外物理研究中心和悉尼大学的科学家们一直在探寻在等离子体内混合有多少尘埃时就会产生相互作用。他们的研究方法主要是计算机模拟。

最近俄罗斯科学院的 V. Tsytovich 教授领导的研究组在同行们的工作基础上也开展了星际无机尘埃等离子体复杂行为的计算机模拟。他们先假设在空间内尘埃是以圆柱形的结构出现,然后逐步演化为螺旋状结构。沿着螺旋轴的方向可以发现,螺旋半径会突然从一个数值跳到另一个数值,然后又回到原数值。计算也表明,螺旋的半径与螺距是反映信息存储的一个机制。模拟时还发现螺旋结构的变化也是非常独特的,有的螺旋会自动地分成两个相同的螺旋,也就是具有自复制的能力,有时候两个螺旋会相互作用而引起各自结构的变化,但也有一部分螺旋会逐步演化成一种不再随时间发生变化的稳定结构。

目前有许多科学家还不知道应如何看待这些无机尘埃等离子体结构的变化,但 V. Tsytovich 教授却毫不怀疑地认为,尘埃等离子体展示的是一种复杂的自组织结构,它具有自独立性和自复制能力,能随时间进行一定的演化。这是无机物质可能具有的一种普遍性质,也可能是地球上有机生命体产生的前兆。

这个模拟工作的不足之处是尚未得到实验的验证。科学家们在实验室条件下对尘埃等离子体只得到简单的螺旋结构,还没有进一步的研究工作。而在附近的星体空间的云层中寻找无机尘埃等离子体结构只能根据从国家航空和宇航局(NASA)的 Spitzer 空间望远镜所拍摄到的远红外光谱得到的结果中去获得。

(云中客 摘自 New Journal of Physics ,2007 9 263)