



光伏组件封装材料进展

刘 峰^{*,1,2} 张 俊¹ 李承辉² 游效曾^{*,2}

(¹ 南昌大学化学系, 南昌 330031)

(² 南京大学化学化工学院, 配位化学国家重点实验室, 南京微结构国家实验室, 南京 210093)

摘要: 封装材料是影响目前太阳能等光伏组件使用性能的重要因素。结合最新研究进展, 本文从化学观点出发, 综述和评论了实用的乙烯-乙烯醋酸酯共聚物(EVA)、聚乙烯醇缩丁醛(PVB)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料在使用过程出现的问题以及改性研究方法, 强调了 PDMS 材料在太阳能光伏组件封装中的重要性。

关键词: 光伏组件; 封装材料; 乙烯-乙烯醋酸酯共聚物; 聚乙烯醇缩丁醛; 聚二甲基硅氧烷

中图分类号: O613.72; O634.4⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1001-4861(2012)03-0429-08

Progress of the Encapsulants for Photovoltaic Modules

LIU Feng^{*,1,2} ZHANG Jun¹ LI Cheng-Hui² YOU Xiao-Zeng^{*,2}

(¹Department of Chemistry, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(²State Key Laboratory of Coordination Chemistry, School of Chemistry and Chemical Engineering,
Nanjing National Laboratory of Microstructure, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Encapsulating materials exert significant influences on the efficiency of photovoltaic (PV) modules. Ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA), polyvinyl butyral (PVB) and polydimethylsiloxane (PDMS) are the practically dominant encapsulants for PV modules. Based on the latest relevant researches, this paper, from the viewpoint of chemistry, reviews the practical problems about the utilization of these encapsulants in PV modules and the methods aimed at solving these problems, with an emphasis on the advantages of PDMS.

Key words: photovoltaics modules; encapsulants; ethylene-vinyl acetate copolymer; polyvinyl butyral; polydimethylsiloxane

0 引 言

地球表面接受的太阳能辐射可以满足全球能源需求的 1 万倍, 国际能源署数据显示, 在全球 4% 的沙漠上安装太阳能光伏系统, 就足以满足全球能源所需。当前太阳能电池的半导体仍主要使用晶体硅, 目前硅片的厚度可以降至 0.15 mm, 晶体硅太阳能电池的平均效率可以达到 20%^[1]。

美国能源部(DOE)规定商品化的太阳能电池组件质保 20~30 年, 这就意味着组件的年输出功率损

耗必须低于 1%, 这样才可能在 20~30 年以后的总输出功率保持在原来的 80% 以上。太阳能电池组件封装时, 通常用两层胶膜将太阳能电池片夹在中间, 后通过一定的加工工艺使胶膜将连接电极的电池片、覆板(通常是玻璃)和背板(聚氟乙烯复合膜或者金属)黏合为一体, 具体的封装结构如图 1 所示。一般为了获得较高的光电转换效率的器件, 电子施主(donor)材料和功函数较高的电极(如 ITO 玻璃)相连, 而电子受体(acceptor)材料则是和功函数较低的电极(如铝)相连。

收稿日期: 2011-11-16。收修改稿日期: 2011-12-28。

国家自然科学基金(No.2011CB808704, 2011CB933303), 国家自然科学基金(No.50803026)和江苏省博士后科研基金(No.1001005C)资助项目。

*通讯联系人。E-mail: liuf@ncu.edu.cn, youxz@nju.edu.cn

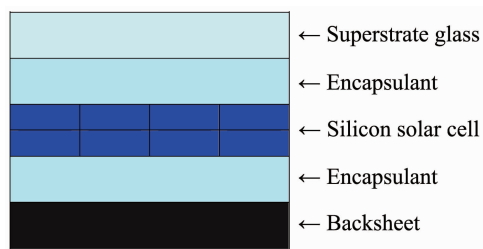


图 1 单晶硅太阳能电池封装结构示意图

Fig.1 Schematic representation of single crystalline silicon solar cell encapsulation

光伏组件的核心是电池片,其本身具有长达 30 年以上的使用寿命,因此,太阳能电池组件在长期室外环境下的性能可靠性主要决定于组件的封装^[2]。理想的光伏组件封装应该具有如下特性:低界面导电性、封装材料和基板之间牢固的粘接强度、整个封装结构具有低的吸湿性以及一定的导热性。其中,封装材料的首要性能是把组件联结和层压在

一起,其他的性能包括高透明性、好的粘结性、足够的机械变形性以承受组件中不同物质之间的热膨胀系数不同而带来的应力。

1 常用的光伏组件封装材料

高分子树脂材料因其质量轻、成本低、柔软和粘结性能好等性能而成为广泛使用的封装材料。太阳能光伏组件封装材料包括离子型聚合物、热塑性聚氨酯(TPU)、热塑性聚烯烃(TPO)、乙烯-乙酸酯共聚物(EVA)、聚乙烯醇缩丁醛(PVB)、聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[3],具体结构如图 2。

早在 1996 年就 EVA 材料在太阳能光伏组件中的封装使用中出现了问题做了较为详尽的评论^[4]。在此基础上,本文评论了近年来 EVA、PVB 和 PDMS 材料在太阳能光伏组件封装中的最新研究进展。

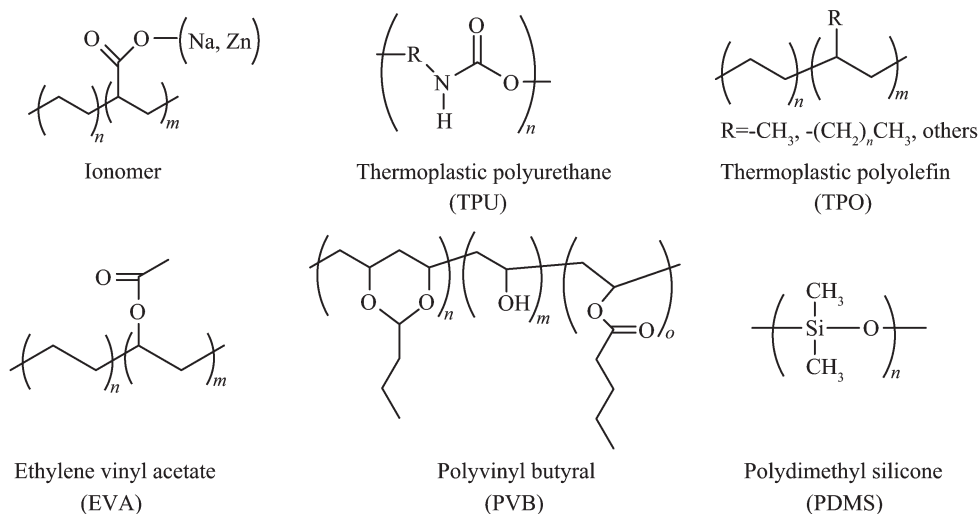


图 2 常见的封装材料的结构

Fig.2 Structure of common PV encapsulant resins

1.1 EVA 材料

美国火箭推进实验室(JPL)对用于光伏组件的封装材料的热性能、机械性能、加工性、透明性、吸水性以及化学稳定性等制定了具体的性能标准^[5]。根据这些要求进行筛选,最能满足要求的高分子材料是有机硅材料。然而,由于成本原因,目前广泛用于硅晶和薄膜太阳能电池组件的封装材料仍是 EVA 材料,即乙烯乙酸酯共聚物,聚乙烯链段结晶性较高,导致材料比较脆以及透明性较差,通过引入无定形结构的乙酸酯共聚链段(一般是 33%左右)可以降低材料的结晶性和提高材料的韧

性和透明性;EVA 材料用于太阳能电池封装需要经过:共混(包括聚乙烯、聚乙烯酯、紫外稳定剂及固化剂等添加剂)、打料(90 ℃左右进行)、挤出成型(在 120 ℃左右得到未交联的原胶片)、组件叠放(自上而下顺序如图 1 所示)、真空层压(在 110~120 ℃下进行)、高温固化(于 140~150 ℃下进行)等阶段,EVA 材料在封装加工过程中会发生交联反应,最终形成一种三维网状结构,对太阳电池起到很好的密封作用,根据固化剂种类以及加工时间的长短,EVA 材料的固化成型又分为常规型和快速型两种^[6],表 1 列出了典型的硅晶太阳能电池光伏组件

表 1 EVA 封装硅晶太阳能电池组件中各层材料的物理性能^[7-8]
Table 1 Physical properties of each layer in EVA-encapsulated PV

No	Layer	Thickness δ / mm	Thermal conductivity k / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Refractive index n
1	Glass	3.0~3.5	0.98	1.5
2	EVA	0.5	0.23	1.51
3	ARC ^a	$6 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$	1.38	—
4	Solar cell	0.25~0.4	148	5.61
5	EVA	0.5	0.23	1.5
6	Tedlar ^b	0.1	0.36	—

^a ARC is silicon oxide/silicon nitride anti-reflection coating on silicon solar cell; ^b Tedlar is poly(vinyl fluoride) backsheet material.

中主要结构的物理性能。

1.2 PVB 材料

聚乙烯醇缩丁醛(PVB)具有良好的粘着性(与玻璃形成氢键),在 20 世纪 70 年代首次应用于太阳能电池组件封装,至 80 年代光伏组件的 PVB 封装研究已完成,但几年后因为它对水和紫外线非常敏感而停止。最近,新一代改良的 PVB 有更高的紫外线稳定性,已经在 2004 年重新应用于光伏组件的封装^[9]。PVB 有助于解决胶膜变浑浊的问题,非常适合于薄膜光伏、大面积组件和建筑一体化光伏组件(BIPV)的封装。PVB 材料用于光伏组件封装也采用层压成型工艺,其过程参数控制比 EVA 材料层压工艺的要求更严格。PVB 具有与 EVA 相似的介电性能,且其电阻随温度升高而增大,有益于光伏组件在高温工作时保持其电力输出性能^[10]。PVB 的玻璃化温度较高(在室温左右),相对较脆,在使用时需要添加大量的塑化剂以降低其力学模量,有报道用于光伏组件封装的 PVB 配方中含有高达 15%~40% 的塑化剂^[11]。

1.3 PDMS 材料

聚二甲基硅氧烷(PDMS)从结构上可以认为是无机玻璃和有机线型聚合物的“分子杂化”,作为理想的光伏组件封装材料,它有一些非常优异的重要性质,其中包括在紫外可见光波长区域的高透明度,非常低含量的离子杂质,低吸湿性,优异的电性能和宽的使用温度范围^[12-13]。

有机硅材料用于光伏组件封装时可以通过灌封的方式进行反应性加工成型,这要比 EVA 的层压工艺更为简便,加工成本也相对较低^[14]。这种固化系统的优点是能够在各种温度下快速固化,另一个独特功能是线性硅氧烷聚合物在固化之前拥有低的粘度,而这将赋予材料能在独特的电池结构上的流动性^[15]。此外,通过调整主链单元结构,可以调整

设计有机硅材料的折射率,因此,针对不同用途的光伏组件,可以灵活地对有机硅封装材料进行结构设计^[16]。

2 封装材料的性能与改性研究

2.1 材料的紫外稳定性

光伏组件的覆板玻璃(见图 1)一般具有紫外线过滤功能,可以阻止绝大多数的 UV-B 辐射,但通常很少阻止 UV-A(320~400 nm)辐射,因此太阳能电池封装材料的紫外稳定性十分重要^[17-20]。

EVA 材料作为光伏组件的主要封装材料,存在着紫外稳定性差、材料易黄变老化等问题。美国可再生能源国家实验室(NREL)和桑迪亚国家实验室通过对位于加州中部的 Carrisa Plains 和以色列的 Negev Desert 的光伏电站进行的跟踪研究表明,太阳能光伏组件的电力输出效率呈一定程度的逐年下降,用于组件封装的 EVA 材料存在严重的黄变现象^[21]。这一黄变现象起初被归因于太阳能电池组件银镜列阵 V 型槽底交汇处高达 90 °C 的工作温度引起了 EVA 材料的热降解,但是理论计算表明 EVA 材料热降解的链引发活化能 $E_i=160 \sim 185 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,即使在 150 °C 高温下 EVA 主链也不会发生降解。进一步研究表明,当 EVA 材料在紫外线照射下,由于紫外光能量高于 EVA 链的断裂能,可显著加速 EVA 材料的老化,在高温和氧气的协同作用下,材料降解过程中会产生较长共轭体系的烯酮结构的生色基团,从而发生黄变,降低透明性,其过程遵循 Norrish II 降解氧化机理,如图 3 所示^[22]。

EVA 降解过程中产生的乙酸对 EVA 的降解黄变反应具有催化作用,同时乙酸还会腐蚀硅晶电池的金属导线,导致不同导线的电流输出不一致,破坏太阳能电池的电力输出性能^[23]。Pern 通过对电池表面的俄歇电子谱的研究发现,与未经使用电池的

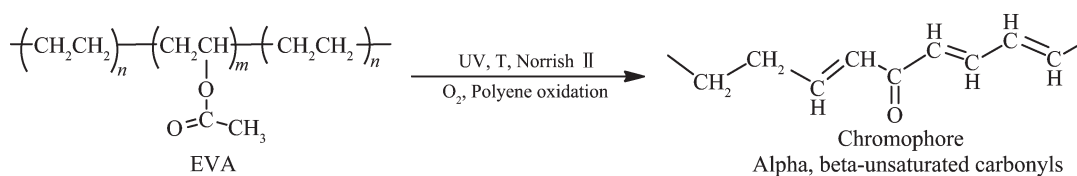


图 3 EVA 材料在紫外照射、高温及氧气作用下形成生色基团

Fig.3 Chromophore formation of EVA during outdoor exposure

表面成分(如图 4 所示)相比,发生黄变的 EVA 材料封装的电池表面在 250 nm 厚度处的 Pb 和 Sn(来自焊料)的成分明显减少,分别为 12 和 5%,而 C 和 Cu 的成分相应增加,分别为 35 和 50%,这种变化的原因是 Pb 和 Sn 在 EVA 降解过程中产生的乙酸以及氧气的作用下发生了氧化腐蚀^[24]。

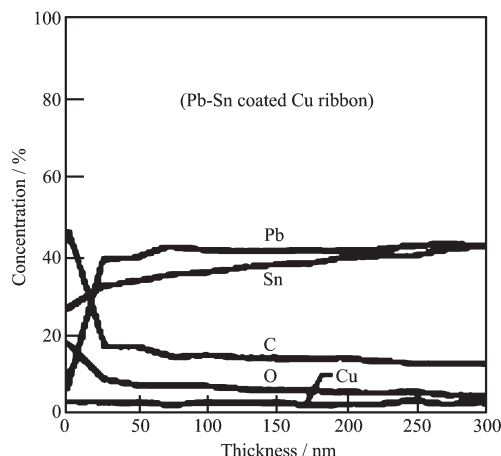


图 4 未经使用的电池表面成分分布

Fig.4 Original concentration of elements on silicon cell surface

此外,伴随着 EVA 材料降解,组件内部黏附力将减小,严重时组件会发生层间脱落,光伏组件使用可靠性也会随之下降^[25]。EVA 封装材料的黄变与 PV 组件结构、EVA 配方、EVA 成型的工艺参数、PV 组件所处的地理位置(太阳光照射强度)和气候条件以及工作时间有关。其中,组件的工作温度越高、紫外光的辐射强度越大,EVA 材料的光降解反应的速度就越快,其降解过程可以通过其红外谱学在 1735 cm^{-1} 附近处的吸收峰的耦合裂分程度来监控^[26-27]。

值得注意的是,紫外照射也会引起 EVA 材料的光漂白反应^[28]。具体来说,波长为 310~370 nm 的紫外光会诱发黄色降解产物中的生色团进一步反应而生成无颜色的物质,这一过程即称紫外漂白,同时,475 nm 处的可见光也具有一定的漂白效果,光漂白反应在一定程度上减缓了 EVA 材料的黄变现象。在 85 $^{\circ}\text{C}$ 以上,光降解反应占主导;在 50 $^{\circ}\text{C}$ 以

下,光漂白反应占主导;在这两者之间的温度区,哪个反应占主导主要取决于温度、UV 照射强度和一些其他因素如氧气存在与否以及入射光的波长与强度^[29]。

为提高材料的紫外稳定性,EVA 材料的配方中添加有紫外稳定体系,以 Elvax150 为代表,紫外稳定体系包括紫外吸收剂、游离基清除剂和过氧化物分解剂,研究表明平衡这三者的比例对于优化 EVA 紫外稳定性能非常重要^[30]。适度降低 VA 的含量可以提高 EVA 材料的紫外稳定性;此外,也可以通过优化材料链段的结构,比如引入乙烯-丙烯酸甲酯共聚物(EMA)、聚丙烯酸顺丁酯(P-n-BA)和脂肪族聚醚氨酯(aliphatic polyether urethane)等组分来提高材料性能^[31-32]。

Hsu 等报道采用低成本可反复使用的氧化型低密度聚乙烯(LDPE)对硅晶太阳能电池进行封装,研究发现,氧化型 LDPE 具有与 EVA 相似的透光性,封装后的组件在 damp-heat(湿热试验)等加速老化实验中显示了足够的粘结强度和热稳定性能^[33]。Oi 等在研究低成本、可再生的光伏组件封装材料时,也报道了使用无定形的低密度聚乙烯材料^[34]。Oreski 等研究了其他类型的乙烯共聚物的加速老化性能,其中乙烯-丙烯酸(酯)共聚物显示了与 EVA 相当甚至更优的力学性能和透光性,而且在降解过程中也没有乙酸释放,从而可以进一步改善光伏组件的使用性能^[35]。

与 EVA 相同,PVB 也需要加入添加紫外稳定体系来提高对紫外光的耐受性。

PDMS 有机硅材料主链结构是由交替的 Si-O 键组成,具有优异的耐紫外稳定性,热稳定性和透明性,在封装时不需要加入紫外稳定剂。即使这样,PDMS 仍比 EVA 具有更高的紫外稳定性,高温下(80~95 $^{\circ}\text{C}$)的紫外加速暴露实验表明,PDMS 样品在 6000 h 的后没有任何明显的透光率损失,在同样条件下,EVA 样品在 750 至 1700 h 后便显示出了非常明显的降解^[36]。

Skoczek 等工作了 20 年的 200 个硅晶太阳能电池组件进行了相应的性能测试研究,其中 101 个组件采用了 EVA 封装,40 个组件采用了 PDMS 有机硅材料封装,59 个组件采用了 PVB 材料封装,结果表明,EVA 材料封装的组件平均输出功率损耗是 16%,PVB 材料封装的组件平均功率损失是 23%,有机硅材料封装的组件平均输出功率损耗最小,只有 8%,研究结果显示了有机硅封装材料可以有效地提高光伏组件的使用性能^[37]。

2.2 材料的光学性能

尽管通过添加剂配方改性可以解决 EVA、PVB 材料的紫外稳定性能,但同时又带来了新的问题,即:紫外吸收剂本身就是有颜色的物质,会吸收太阳光降低封装材料的透明性,从而导致组件效率下降。以 UV531 为例,紫外吸收剂的光化学过程如图 5 所示。

相比之下,PDMS 材料具有很好的紫外光透光率。EVA 的短波长透过截止至 417 nm 处,PDMS 的紫外透光的截止波长可以延伸至 273 nm。研究发现,有机硅封装的硅晶太阳能电池光伏组件由于具有更高的紫外透明性而显示了更好的光生电流性能,其短路电流(J_{sc})比 EVA 材料封装时增加 1%^[38]。

最近光伏组件封装材料一个新的改性方法是添加具有波长转换(wavelength conversion)功能的染料。通过下转换(down-conversion)技术可以有效提高封装材料的紫外稳定性,同时又可以改善硅晶光伏电池的光生电流和太阳光的频谱匹配性,从而提高组件效率^[39]。Klampatits 和 Richards 研究了在 EVA 材料中添加下转换的有机染料来提高多晶硅太阳能电池效率的改进方法,通过使用 0.130 5%(W/W)的 lunmogen-F Violet 570 (BASF 公司提供)对 EVA 材料进行改性,组件在 300~400 nm 范围里的外部量子效率(EQE,external quantum efficiency)增加了 10%,并最终使组件效率提高了 0.18%^[40]。Donne 等使用两种不同结构的有机铈配合物分别对 EVA 材料进行掺杂,研究发现改性封装后的硅晶太阳能电

池光伏组件的输出功率增加了 2.8%^[41]。Fukada 等人将溶胶-凝胶包覆的铈螯合物与高折射率的丙烯酸树脂制备了一层下转换薄膜,并置于硅晶太阳能电池与上层 EVA 片之间,研究发现,改性封装后的光伏组件的短路电流增加最大值(ΔJ_{sc})达到 $1.03 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ^[42]。我们开发了一种旨在可以通过表面贴膜处理的太阳能电池下转换改性方法,研究发现基于 Eu^{3+} 的联吡啶配合物的添加可以使单晶硅太阳能电池组件的效率提高 0.32%^[43]。此外,红外光占太阳光中总能量的 43%,通过上转换(up-conversion)的方法将长波段的红外部分转化为与太阳能电池响应匹配的可见部分的荧光,可以有效地提高太阳能电池的 EQE 和组件效率^[44-46]。李树全等报道了掺 Er^{3+} 的 TiO_2 上转换发光层,并有效地提高了 DSSC 的光电性能,在 $80 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 红外光照射下最高光电转换效率达到了 0.14%^[47]。

太阳光在组件中的吸收和损耗与组件的各层物质的折射率有很大关系。其中,封装材料和密封剂的光学性质影响着组件的光吸收和损失的机制,例如,EVA 材料的折射率与玻璃相近(见表 1),这两层结构有接近理想的光耦合,当折射率差异较大时则会增加组件内部的层间界面反射以及光在背板漫反射后的逃逸^[48-51]。通过模拟光伏组件各层结构的光学特性及其光谱响应可以对组件的波长依赖性及性能影响进行理论计算,澳大利亚国立大学和道康宁公司联合研究发现,有机硅材料封装的硅晶太阳能电池组件内部量子效率(IQE)比 EVA 材料封装时增加 0.5%~2.5%,其主要原因是有机硅材料的高折射率(RI)提高了组件在低的波长区域光电转化效率^[52-53]。

对于聚光型光伏组件(CPV,concentrator photovoltaic)而言,其最大聚光度($C_{\max}$)决定于半接收角($\pm\theta_{\alpha}$)和封装材料的折射率 n ,如式(1)表示:

$$C_{\max} = \frac{n^2}{\sin^2 \theta_{\alpha}} \quad (1)$$

封装材料的折射率越大,太阳能电池组件接受

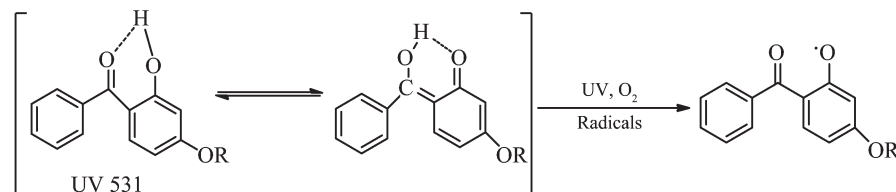


图5 紫外吸收剂的光化学反应

Fig.5 Photo-initiated reaction of UV absorber

的光越多,因而效率就越高。通过引入一些典型性的高折射率的纳米粒子可以提高光学树脂材料的折光率^[54]。Ma 等分别用不同折射率的材料来对 AlGaInP 太阳能电池封装,结果表明折射率对组件效率具有重要影响,高折射率($n=1.57$)材料封装的电池比低折射率($n=1.41$)材料封装的电池的短路光生电流要高 71%^[7]。CPV 封装材料的紫外光吸收截止波长也是影响太阳能光伏组件谱学响应以及组件效率的重要性能参数,在这方面含氟烯烃及其他含氟聚合物由于紫外吸收截止波长较小而显示了突出的应用性能^[55-59]。

2.3 材料的热性能

EVA 材料的玻璃化温度比 PVB 材料相对较低一些,两者的热稳定性相似,在组件加工和工作时都是稳定的^[60-61]。PDMS 材料具有非常稳定的热性能,同时拥有低的玻璃化转变温度,具有较宽的组件加工和工作的温度窗口^[62]。

光伏组件只是利用了太阳光中的一小部分能量产生光生电流,其余能量通过非辐射方式转化为热能,从而升高了组件的温度,光伏组件的效率随温度升高而降低^[63]。此外,EVA 和 PVB 材料中的增塑剂和稳定剂会随着温度的升高而迁移到封装材料表面而导致材料的使用性能下降。

在太阳能电池的典型封装结构中,以 EVA 材料封装为例,封装材料层是主要的热阻挡层(见表 1)。提高 EVA 封装材料的导热性、降低光伏组件的工作温度对于保证组件的转化效率和使用可靠性来说是非常重要的。Lee 等对 Si 片下方的 EVA 封装材料进行高导热改性研究发现,通过加入高热导率的 SiC、ZnO 和 BN 纳米粒子,EVA 复合材料的热导率可由原来的 $0.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 升高至 2.85、2.26 和 $2.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[8];Shen 等研究发现,通过加入 45%的 Al_2O_3 ,可以使 EVA 材料的热导率增加值 $0.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[64]。此外,也可以通过研发光伏热联用技术来改善光伏电池的发热问题,Fraisse 等研究了 PV/T(PV 组件和太阳能热水器)联合系统,该系统既可降低 PV 组件的工作温度,同时获得的热能又可以用于供暖^[65]。

CPV 组件对于封装材料的耐热性能有较高的要求,芳杂环聚酰亚胺(PI)材料由于具有优异的热、力、电学性能而广泛应用于微电子封装,其中,含氟 PI 膜具有较小的紫外吸收截止波长,用于 CPV 封装时显示了良好的性能^[66-67]。此外,PI 膜也广泛用于铜

钢镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池的柔性衬底材料^[68]。

2.4 材料的耐水性能

进入组件的水汽凝结成水分后,会弱化组件层间的粘附键合,导致组件脱层和进一步增加水分进入通道,使组件发生电化学腐蚀,降低其电力输出功率,并可能最终使光伏组件失效。即使是非透过的背面材料也不能完全防止水汽在长达 20~30 年的使用过程中从边缘渗入^[69-71],欲有效降低光伏组件的吸湿性,需要有好的密封胶,同时使用具有更低扩散因子和更好粘附力的封装材料能更好地防止水汽的摄入和保护光伏组件的结构稳定性^[72]。

相比 EVA 材料,PVB 材料由于其亲水性结构特点,具有较高的吸水性^[73]。PDMS 材料具有典型的疏水性结构,研究表明固化的 PDMS 和 EVA 材料在 damp-heat 实验 8 周后的平均含水量分别为 0.035%与 0.28%^[74]。材料的吸湿性与电阻率有密切的关系,在饱和水汽环境中的 PVB 材料的电阻率比 EVA 小 2 个数量级,比 PDMS 小 3 个数量级^[75]。同时 PDMS 具有良好的粘附性,因此可以很好地阻止光伏组件的水分诱导腐蚀^[14,76]。

使用水汽阻挡层可以有效地降低光伏组件的水汽传输速率(WVTR),通过在背板材料上使用无机阻挡层涂料可以有效地降低组件的 WVTR^[77]。这一方法成功的关键是要同时提高聚合物与无机涂料之间的粘结能力,使用沉积技术和对背板材料进行表面处理是行之有效的技术方法,这些方法包括:使用等离子技术预处理从而进行表面蚀刻、增加沉积时间、处理工艺和材料性能的整体优化、以及使用新型表面处理工艺。最近的一个方法是在背板 PET 上涂一层 1 000 nm 厚的丙烯酸酯流平层,然后再进行无机涂层的沉积。丙烯酸酯比 PET 具有更大的化学极性,因此可以和无机涂层之间形成大的粘结力^[26]。对于 PVF 为背板材料来说,含有金属或者无机氧化物的阻挡层更容易在一个极性衬底上生长,例如,PVF-SiO_x-PET-primer 和 PVF-Al-PET-primer(primer 为丙烯酸酯之类的底漆)结构的背板材料可以对 EVA/玻璃结构提供好的长期保护,具有很好的抗脱层效果;然而,多涂层的 PET 背板不适合于与 EVA 的层压工艺,在更薄、更便宜的多涂层的背板薄膜的表面制作一层 EVA 种子层(seed layer),将有助于进一步提高与 EVA 的粘结力^[78-80]。

此外,一些具有较好透过性的封装材料如热塑性有机硅材料(PDMS),线形聚氨酯材料(TPU)以及

EVA材料,尽管 WVTR 较大,但是它们的饱和吸收率却很小,在组件封装时,可以选择使用透气性的背板材料^[81]。Kemp 等研究发现采用透过性的背板既有助于光伏组件内部的水汽在较高的温度下散发出去,同时对于 EVA 封装组件来说,也可为 EVA 材料的降解产物乙酸提供逸出通道,同时氧气的进入可对 EVA 进行光化学漂白而缓解黄变现象,进而将有助于改善光伏组件的使用性能^[82]。

3 结束语

随着光伏产业的全面应用和发展,光伏组件封装材料的研究也日渐深入,材料种类也日渐多样化,“高性能”和“低成本”将是今后光伏组件封装材料发展的两个重要方向。相比于 EVA 和 PVB 材料,以 PDMS 为代表的有机硅材料由于其无机有机杂化的结构特点,在太阳能光伏组件(特别在太空领域)封装中展示了优良的性能^[83],将是今后太阳能光伏组件封装材料发展的一个重要品种。目前的有机硅封装材料的品种结构相对单一,在一定程度上限制了其应用和发展,多样化的单体结构以及功能性官能团的引入将有助于提高有机硅封装材料的加工性能及其它应用性能^[84],从而进一步提高太阳能光伏组件的效率和使用寿命。

参考文献:

- [1] LI Cheng-Hui(李承辉), WANG Kai(王锴), ZHEN Wei(郑玮), et al. *Prog. Chem.(Huaxue Jinzhan)*, **2012**,**23**:8-16
- [2] Agrouia K, Collins G. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2003**, **80**:33-45
- [3] Kempe M. *NREL Conference Paper, NREL/CP-5200-50840*, **2011**.
- [4] Czanderna A W, Pern F J. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **1996**,**43**:101-181
- [5] Willis P W. *JPL Contract 95427 Final Report*, **1986**.
- [6] Agroui K, Maallemi A, Boumaour M, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2006**,**90**:2509-2514
- [7] Ma M, Mont F W, Poxson D J, et al. *J. Appl. Phys.*, **2010**, **108**:043102
- [8] Lee B, Liu J Z, Sun B, et al. *eXPRESS Polym. Lett.*, **2008**,**2**: 357-363
- [9] Koll B. *Proc. 21st EUPVSEC*, **2006**:2491-2492
- [10] Agroui K, Koll B, Collins G, et al. *Proc. SPIE 7048*, **2008**: 70480G
- [11] Manchke R G. *31st Electronic Components Conference*, **1981**:119-125
- [12] Norbert A, Johann W Ed. *Organosilicon Chemistry V: From Molecules to Materials*. Weinheim: Wiley-VCH, **2003**.
- [13] ZHANG Zhao-Gui(张招贵), LIU Feng(刘峰), YU Zheng(余政). *The Chemistry of Silicon Compounds(有机硅化合物化学)*. Beijing: Chemical Industrial Press, **2010**.
- [14] Schmid H, Michael B. *Macromolecules*, **2000**,**33**:3042-3049
- [15] Duffy D C, McDonald J C, Schueller O J A, et al. *J. Micromech. Microeng.*, **1999**,**9**:21-217
- [16] Clarson S J, Semlyen J A. *Siloxane Polymers*, PTR Prentice Hall Inc., **1993**:567-611
- [17] Wohlgemuth J H, Petersen R C. *23rd IEEE PVSC*, **1993**: 1090-1094
- [18] Kempe M D. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2010**,**94**:246-253
- [19] McIntosh K R, Cotsell J N, Cumpston J S, et al. *34th IEEE PVSC*, **2009**:000544-000549
- [20] Kempe M D, Moricone T, Kilkenny M. *Proc. SPIE*, **2009**: 74120Q
- [21] Parretta A, Bombace M, Graditi G, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2005**,**86**:349-364
- [22] Pern F J. *Macromol. Mater. Eng.*, **1997**,**252**:195-216
- [23] Jorgensen G J, Terwilliger K M, Cueto J A, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2006**,**90**:2739-2775
- [24] Pern F J. *23rd IEEE PVSC*, **1993**:1113-1118
- [25] Jorgensen G J, McMahon T J. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2008**,**16**:519-527
- [26] Dunlop E D, Halton D. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2006**, **14**:53-64
- [27] Sultan B A, Sorvik E. *J. Appl. Polym. Sci.*, **1991**,**43**:1748-1759
- [28] Liang R H, Chung S, Clayton A, et al. *Polym. Sci. Technol.*, **1983**,**20**:267-278
- [29] Schaefer J, Schlueter L, Rosenthal A, et al. *10th ECPSEC*, **1991**:1248-1255
- [30] Cuddihy E, Coulbert C, Gupta A, et al. *JPL Publication Final Report*, **1986**.
- [31] Joseph M M, Dorian D M. *Photovoltaic and Photoactive Materials: Properties, Technology, and Applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, **2002**:325-351
- [32] McMahon T J. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2004**,**12**:235-248
- [33] Hsu H Y, Hsieh H H, Tuan H Y, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2010**,**94**:955-959
- [34] Oi K, Miyachi T, Inoue I, et al. *US Patent*, 2005/0051204A1. 2005-03-10.
- [35] Oreski G, Wallner G M. *Sol. Energy*, **2009**,**83**:1040-1047
- [36] Kempe M D, Kilkenny M, Moricone T J, et al. *34th IEEE PVSC*, **2009**:6

- [37]Skoczek A, Sample T, Dunlop E D. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2009**,**17**:227-240
- [38]Powell N E, Hwang B K, Norris A W, et al. 35th *IEEE PVSC*, **2010**:002791-002794
- [39]Klampafitis E, Ross D, McIntosh K R, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2009**,**93**:1182-1194
- [40]Klampafitis E, Richards B S. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2011**,**19**:345-351
- [41]Donne A L, Dilda M, Crippa M, et al. *Opt. Mater.*, **2011**,**33**:1012-1014
- [42]Fukuda T, Kato S, Kin E, et al. *Opt. Mat.*, **2009**,**32**:22-25
- [43]Liu J, Wang K, Zheng W, et al. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, DOI: 10.1002/pip.1251
- [44]Shalav A, Richards B S, Green M A. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2007**,**91**:829-842
- [45]Richards B S, Shalav A. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **2007**,**54**:2679-2684
- [46]Wang H Q, Batentchuk M, Osvet A, et al. *Adv. Mater.*, **2011**,**23**:2675-2680
- [47]LI Shu-Quan(李树全), LIN Jian-Ming(林建明), WU Ji-Huai(吴季怀), et al. *Chinese J. Inorg. Chem. (Wuji Huaxue Xuebao)*, **2009**,**25**:60-64
- [48]Powell N, Hwang B K, Norris A, et al. 35th *IEEE PVSC*, **2010**:002791-002794
- [49]McIntosh K R, Cotsell J N, Norris A W, et al. 35th *IEEE PVSC*, **2010**:000269-000274
- [50]McIntosh K R, Cotsell J N, Cumpston S, et al. 24th *EUPVSEC*, **2009**:3475-3482
- [51]Mon G, Wen L, Ross R. *New Orleans*, 19th *IEEE PVSC*, **1987**:1215-1221
- [52]McIntosh K R, Cotsell J N, Cumpston J S, et al. 34th *IEEE PVSC*, **2009**:000544-000549
- [53]Ketola B, McIntosh K R, Norris A, et al. 23rd *EUPVSEC*, **2008**:2969-2973
- [54]Lü C L, Cheng Y R, Liu Y F, et al. *Adv. Mater.*, **2006**,**18**:1188-1192
- [55]French R H, Rodriguez-Parada J M, Yang M K, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2011**,**95**:2077-2086
- [56]Chen G Y N, Hughes T C, Mclean K M, et al. *Biomaterials*, **2006**,**27**:1287-1295
- [57]Jang W, Lee H S, Lee S, et al. *Mater. Chem. Phys.*, **2007**, **104**:342-349
- [58]Seki K, Tanaka H, Ohta T, et al. *Physica Scripta*, **1990**,**41**:167-171
- [59]Stiegman A E, Brinza D E, Anderson M S, et al. *JPL Publication Final Report*, **1991**:91-100
- [60]Agroui K, Maallemi A, Boumaour M. 20th *EUPVSEC*, **2005**:2327-2330
- [61]Agroui K, Maallemi A, Boumaour M, et al. 21st *EUPVSEC*, **2006**:2379-2382
- [62]Noll W. *Chemistry and Technology of Silicones*. New York: Academic Press, **1968**:3-67
- [63]King D L, Kratochvil J A, Boyson W E. 26th *IEEE PVSC*, **1997**:1183-1186
- [64]Shen M, He J, Cui Y, et al. *J. Elastom. Plast.*, **2010**,**42**:499-516
- [65]Fraisie G, Menezo C, Johannes K. *Sol. Energy*, **2007**,**81**:1426-1438
- [66]Ding M X. *Prog. Polym. Sci.*, **2007**,**32**:623-668
- [67]DING Meng-Xian(丁孟贤). *Polyimide: Chemistry, Relationship between Structure and Property, Materials*(聚酰亚胺:化学、结构与性能的关系及材料). Beijing: Science Press, **2006**.
- [68]Kessler F, Herrmann D, Powalla M. *Thin Solid Films*, **2005**, **480-481**:491-498
- [69]Kempe M. D, Dameron A A, Moricone T J, et al. 35th *IEEE PVSC*, **2010**:000256-000261
- [70]Coyle D J, Blaydes H A, Pickett J E, et al. 34th *IEEE PVSC*, **2009**:001943-001947
- [71]Kempe M. 37th *IEEE PVSC*, **2011**:CP-5200-50840
- [72]Kempe M D. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2006**,**90**:2720-2738
- [73]Gay C F, Berman E. 21st *IEEE PVSC*, **1990**,**20**:182-186
- [74]McIntosh K R, Powell N E, Norris A W, et al. *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **2011**,**19**:294-300
- [75]Mon G, Ross R. 18th *IEEE PVSC*, **1985**:1142-1149
- [76]Ohl S, Hahn G. 23rd *EU PVSEC*, **2008**:2693-2697
- [77]Swonke T, Auer R. *Proc. SPIE*, **2009**,**7412**:74120A
- [78]Wang Z Y, Lee S H, Kim D H, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2010**,**94**:591-1596
- [79]Paneka P, Drabczyka K, Focsab A, et al. *Mater. Sci. Eng. B*, **2009**,**165**:64-66
- [80]Graaf A, Deelen J, Poodt P, et al. *Energy Procedia*, **2010**,**2**:41-48
- [81]Kempe M D. 31st *IEEE PVSC*, **2005**:499-502
- [82]Kempe M D, Jorgensen G J, Terwilliger K M, et al. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2007**,**91**:315-329
- [83]Lee J, Wu J, Shi M, et al. *Adv. Mater.*, **2011**,**23**:986-991
- [84]Suzuki T, Inaba M, Ominato, et al. *US Patent*, 7023088B2. 2006-04-04.