

光伏背板加速老化测试方法研究及相关国内外标准进展

胡红杰¹、Thomas Felder²、付波¹、William J. Gambogi²、Bao-Ling Yu²、Alex Bradley²、Babak Hamzavy²、Steven W. MacMaster²、Yushi Heta³、Lucie Garreau-Iles⁴、John Trout²

1 杜邦(中国)研发中心, 中国上海, 2 杜邦光伏解决方案, 美国特拉华州, 3 杜邦株式会社, 日本宇都宫, 4 纳穆尔杜邦国际公司, 瑞士日内瓦

前言

中国光伏产业在经历了过去高速发展之后, 逐步进入到理性发展阶段, 同时产业进入整合升级的关键时期。同时来自于开发商和金融投资及保险机构的压力也迫使生产企业由最初只追求产量和规模, 开始高度关注产品质量与可靠性问题。通过IEC等标准认证的产品在实际应用环境中能否满足25年使用寿命及衰减率的要求越来越多地受到行业质疑。2014年2月, 国家认监委和国家能源局联合发布《关于加强光伏产品检测认证工作的实施意见》, 要求规范光伏产品质量, 在全国范围内推行强制检测认证。而IEC也刚刚成立了新的机构IECRE, 负责包括太阳能光伏在内的可再生能源系统的认证。由此可见国内外企业、主管部门等均开始关注并试图考量整个光伏系统的质量及可靠性问题。这一发展形势对光伏标准工作提出了新的要求和新的方向。在前期工作中, 相关标准关注更多的是产品的性能指标, 制定了一系列产品鉴定和测试规范, 对于产品在实际应用环境中的耐久性、可靠性及安全性等问题关注较少。因此在下一步光伏标准工作中应重点开展光伏产品质量及可靠性研究工作, 综合考虑更符合实际应用的各种环境应力对产品进行考核, 研究建立可“溯源”的光伏质量保证体系标准[1]。

背板作为晶硅太阳能组件的重要组成部分, 对组件在户外的性能和可靠性和耐久性起着关键的作用。光伏组件及材料主要依据IEC相关光伏行业标准进行测试。其中IEC 61215(地面用晶体硅光伏组件——设计鉴定和定型)目的是用合理的经费和时间, 确定组件的电性能和热性能, 甄别组件的设计缺陷和一些早期材料失效, 但是也被认为不能有效表征组件及材料在户外的耐久性, 无法据此判断其在户外的使用寿命。这主要是由于该标准大都是单一环境应力测试, 未考虑综合环境应力对材料的影响, 并且没有对组件背面进行紫外辐照。这导致一些即使通过该IEC标准认证的组件, 甚至数倍IEC标准认证的组件在户外仍然出现材料失效或性能下降, 无法满足25年的设计使用寿命。因此, 目前最好的可靠性和耐久性验证方法仍然只能是长期的户外实绩验证。

为了了解户外综合环境因素对光伏组件与材料的影响, 更好的模拟户外实际状况, 开发合理有效的加速老化测试方法, 杜邦开展了户外组件和材料的老化失效研究,

并与一些模拟综合环境应力的加速老化测试结果和机理进行对比。与此同时, 国外一些机构和组织也在开展相关的加速环境老化测试标准的研究和制定, 国内有关背板的各项标准也在不断制定和完善中。

本文将介绍目前背板相关的主要国际国内标准进展概况, 着重指出其中不同于以往的、新的环境老化测试项目和方法。并依据这些测试方法和标准, 介绍一些杜邦的研究结果, 指出部分背板材料存在的问题与风险, 为组件和背板材料的用户提供可靠的参考和依据。

背板加速老化和可靠性测试方法研究及相关标准进展

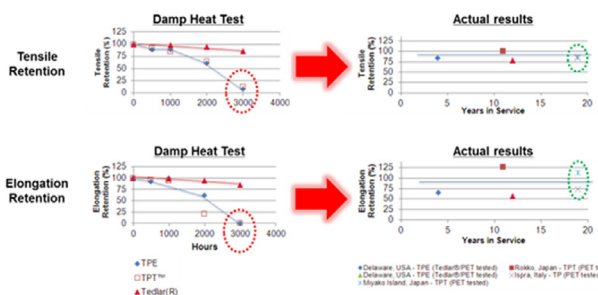
以往的标准只是把背板看作组件的组成部分, 与组件一起进行测试与认证。随着背板对组件可靠性和耐久性的重要性认识的提高, 基于组件的以及单独背板的测试标准和技术规范正在逐渐确立和完善。国际上, 国际电工委员会IEC TC82下的工作小组正在对IEC 61730(光伏组件安全鉴定)第二版进行修订, 并在起草新的背板材料测试标准, 如IEC 62788-2(光伏组件材料测试程序: 前板和背板塑料)和IEC 62788-7-2(光伏材料测试程序——第7-2部分: 环境暴露——塑料的加速耐候性测试), 这些国际标准对背板提出更多和更高的要求。另外国际光伏质量保证工作组(PVQAT)在2011年成立, 其中一个主要任务是通过推动国际标准的制修订并建立光伏质量保证评估系统以区分组件设计的相对耐久性。其中第5工作组主要研究温湿度与紫外线对组件和材料的综合影响。此外, 美国可能再生能源实验室(NREL)还牵头制定了“品质加严”(Quality Plus)标准, 在IEC61215基础上通过更长的测试循环、测试序列、新的表征方法和带偏压的组件测试等要求, 区分不同的组件并确保组件长期可靠性[2]。国内近两年内连续起草和设立了背板的相关标准和技术规范, 都加强了对环境试验的要求。背板国标GB/T 31034-2014(晶体硅太阳电池组件用绝缘背板)已于2014年底发布, 背板行标草稿也已提交。这些新标准的设立和推广将深化人们对背板材料的认识和使用要求, 规范背板选材和设计, 为光伏组件的可靠性和耐久性提供更多保障。

高温高湿老化(Damp Heat, DH)

IEC 61215和61730中均明确要求对组件进行1000小

时的湿热老化测试以判断组件是否有明显功率衰减和失效(如漏电或脱层等),一些背板厂家据此对背板进行2000小时甚至3000小时湿热测试,这会导致背板中的PET聚酯材料发生明显水解和脆化。但是背板在户外是否因水解脆化而失效呢?NREL针对PET聚酯材料材料在户外水解程度进行了理论模拟分析[3],发现1000小时湿热老化能够模拟PET聚酯材料在世界上任何地区超过25年的水解程度。杜邦的测试结果也确认了1000小时的双85测试足以模拟任何气候条件下25年的模型[4]。在最新的IEC61730 版本中,也是要求组件1000小时的湿热老化测试。

户外组件研究也发现基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的背板并未因水解而脆化。图一显示了基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的背板在户外服役4-19年后的机械性能,其拉伸强度和断裂伸长率在长期户外服役后性能保持良好,并未发生脆化和机械性能下降。应该注意的是,这些户外案例涵盖了不同气候类型的15年以上的组件和背板,包括非常潮湿的日本宫古岛的案例。而实验室的对比测试显示,在超过1000小时的DH测试中,这些背板均出现了明显机械性能下降,这显然与户外实际中的背板情况不符。

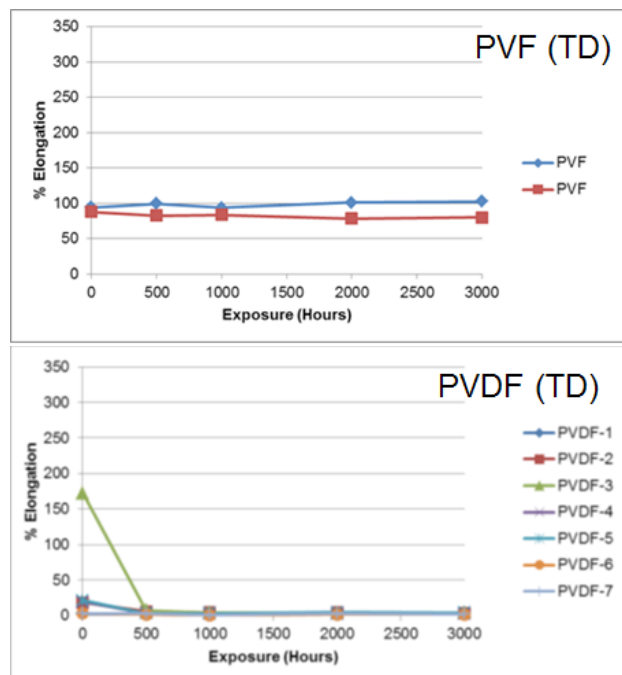


图一:(左)3000小时DH测试后,TPT背板机械性能明显下降,但特能®(Tedlar®)PVF薄膜机械性能保持稳定;(右)户外实际案例中的TPT背板在不同气候环境服役20年后机械性能仍保持稳定[5]

作为背板中间PET聚酯材料的外层保护薄膜不仅需要良好的耐紫外性能,也需要具备一定的耐湿热性能,以避免脆化后受应力开裂,导致无法阻隔紫外线保护中间PET聚酯材料。图二显示了七种PVDF薄膜和特能®(Tedlar®)PVF薄膜湿热老化前后横向(TD)断裂伸长率的变化。七种PVDF薄膜在横向初始断裂伸长率大都不到30%,横向具有一定的脆性,而在500小时湿热老化后,所有PVDF薄膜横向断裂伸长率均出现了明显的降低,只有不到10%,发生明显脆化。而特能®(Tedlar®)PVF薄膜在湿热老化前后,断裂伸长率保持稳定,未出现明显的机械性能下降[6]。事实上,PVDF聚偏氟乙烯薄膜的脆性已得到了广泛认识和研究[7]。

紫外老化

IEC 61215中对组件正面要求进行15kWh/m²的紫外预处理,试验目的是组件在进行冷热循环/湿冻试验前进行紫外(UV)辐照预处理以确定相关材料及粘连的紫外衰减。



图二:特能®(Tedlar®)PVF薄膜和PVDF薄膜湿热老化前后机械性能变化

业界已有共识该剂量远低于户外25年的组件实际接受紫外曝晒剂量,而且组件背板的空气面并未进行紫外辐照。因此背板国际标准草稿IEC 62788-2和背板国标GB/T 31034-2014都增加了紫外测试的剂量。按照典型气候地区的年均紫外辐照剂量[8]和12%的平均紫外反射率[9],沙漠地区的组件背面(接线盒面)25年累计紫外剂量达到275kWh/m²,即使是温和地区也达到171kWh/m²,相当于IEC 61215紫外预处理剂量的11到18倍。杜邦基于表一中不同气候环境下25年的紫外剂量,推荐了相应的测试方法[10]。

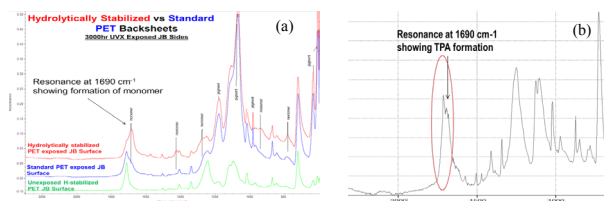
25年紫外剂量(kWh/m ²)	沙漠	热带	温和
组件正面	2293	1963	1423
组件背面	275	235	171

表一:不同气候环境下组件的紫外曝晒剂量

户外组件研究表明,PET背板材料在户外老化机理与PET材料长期紫外老化的机理类似[11]。图三(a)是经过195 kWh/m²紫外老化后PET聚酯材料和耐水解HPET聚酯材料的傅立叶红外图谱,紫外老化后两种PET材料均在1690 cm⁻¹吸收峰处出现了PET聚酯分解产物对苯二甲酸(TPA)单体的吸收峰,这表明PET聚酯材料在长期紫外老化后分子链断裂。这一现象同样出现在户外服役六年的PET背板中,如图三(b)。因此PET聚酯背板材料在户外发生的是光热老化,应采用紫外老化来评估其在户外老化。

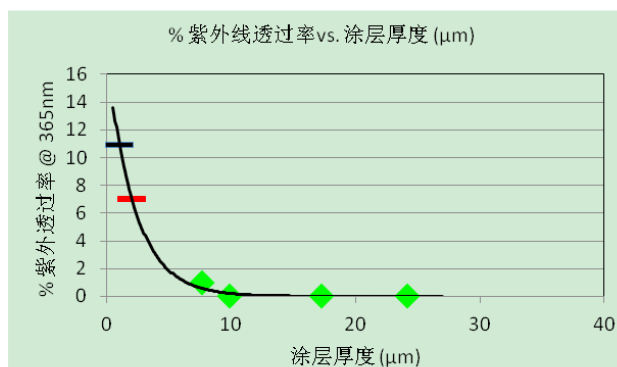
因为PET聚酯材料容易发生光老化,所以背板需要在PET中间层的两面都增加紫外阻隔保护层,如果紫外阻隔层自身耐候性不佳或太薄不能充分阻隔紫外线,都会最终导

光伏组件



图三：傅里叶变换红外光谱。(a)不同PET背板材料外层在紫外老化前后变化(测试条件：ASTM G155 cycle9, 修正方法：氙灯, 120W/m²@300-400nm, 65℃ BPT, 辐照102分钟, 18分钟辐照+水喷淋)；(b)美国亚利桑那州六年户外组件PET背板

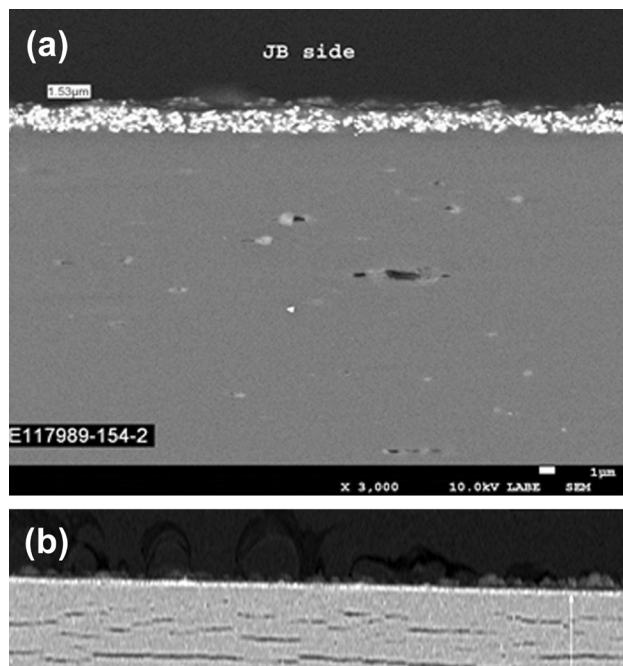
致PET聚酯被紫外破坏而失效。阻隔层厚度与紫外线穿透率的关系一般符合比尔定律, 由图四可以看出, 紫外阻隔层厚度低于10微米, 紫外线开始穿透阻隔层并随厚度减薄而指数升高, 如果阻隔层厚度为1微米时, 365nm的紫外线透过率会高达11%。



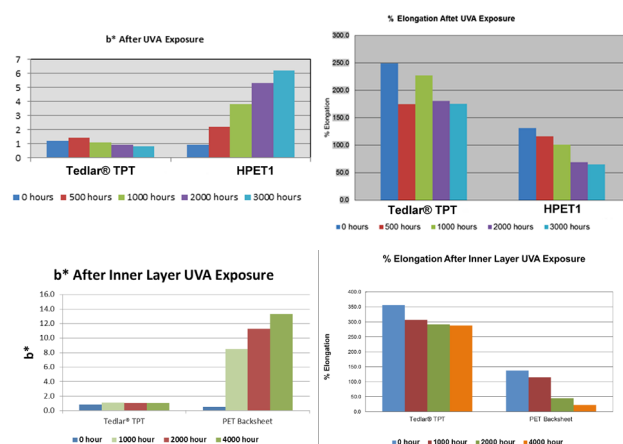
图四：紫外阻隔层厚度与紫外线穿透率的关系

一些背板厂商为了降低成本, 将背板表面紫外阻隔层的厚度减至极低, 这会导致背板PET中间层的紫外老化。图五(a)是一种HPET背板外层耐候层的截面图, 其厚度只有1.53微米, 图五(b)是另一种HPET背板内层FEVE涂层的截面图, 其厚度小于2微米。对这两种背板的涂层面进行3000小时UVA紫外老化(紫外剂量共195kWh/m²), 背板都出现发黄现象(图六), 而对比组基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT和TPE背板材料黄度值b*几乎无变化。在机械性能方面, 两种HPET背板断裂伸长率均明显下降, 而基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT和TPE背板仍然保持了150%以上的断裂伸长率。

组件背板内表面和外表面一样也要经受紫外线曝晒, 图七是某PVDF背板内层在户外不到五年发生内层发黄现象。因此有必要评估紫外线从组件正面照射时对背板材料的破坏风险。为了模拟光伏组件对正面紫外线的过滤效果并保证背板能够完整地测试后的组件上剥离, 试验采用SGB玻璃、两层STR16295 UF EVA、一层FEP离型膜和背板的层压件, 形成玻璃/EVA/EVA/FEP/背板内层/PET层/背板外层的结构, FEP离型膜对紫外光线的穿透没有影响。采用1.5kW/m²的金属卤素灯, 对层压件的玻璃面进行1075



图五：背板表面涂层断面SEM电镜照片。(a)HPET1背板外层只有1.53微米；(b)HPET2背板内层FEVE涂层厚度小于2微米

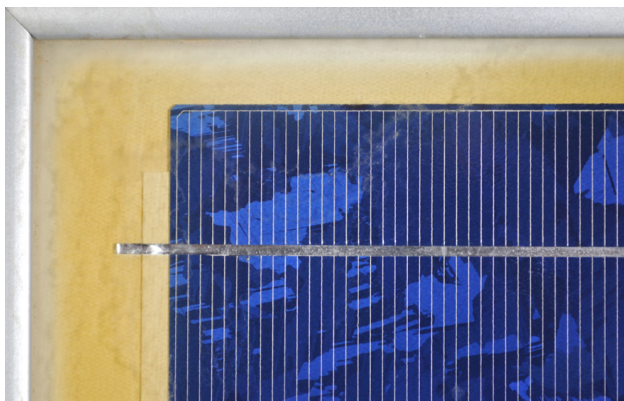


图六：采用薄涂层的HPET聚酯背板涂层面紫外老化后发黄, 且断裂伸长率显著下降；使用特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT背板颜色和机械性能均保持稳定。(紫外老化条件：UVA 1.2W/(m·nm)@340nm, 65kWh/m²@250-400nm, 70℃ BPT)

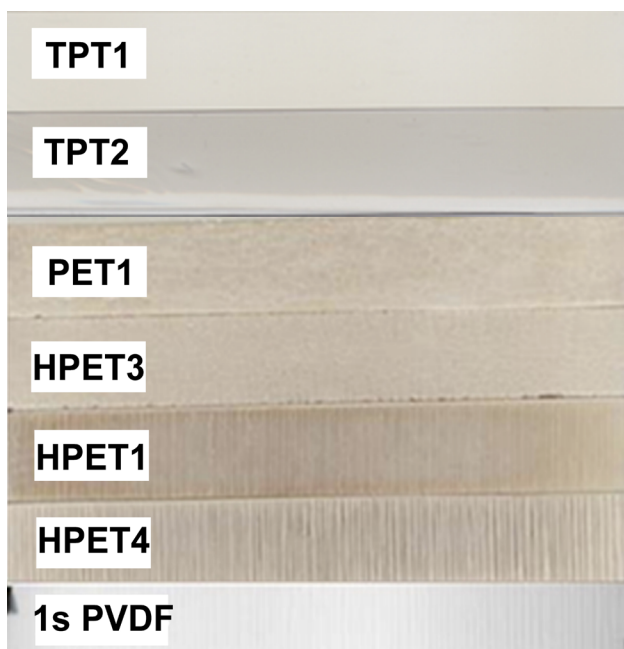
kWh/m²(相当于温和气候条件下18.9年的紫外剂量)辐照[12]。图八显示, 辐照后使用特能®(Tedlar®)薄膜的TPT背板无显著变化, 而PET、HPET和单层PVDF背板内层均出现了显著发黄或开裂。

另外需要指出的是, 紫外老化并不是达到相应的紫外剂量就能模拟25年背板材料户外老化程度, 还需要设计合理的样品结构, 采用适当光源(比如高比例短波长的UVB可能引起非户外光老化机理), 在适当的紫外强度和温度下, 引入湿度和其它环境应力的影响, 并与户外长期老化机理和程度进行相应关联。

耐候性测试(Weathering resistance test)



图七：某PVDF背板内层在户外不到五年发生黄变



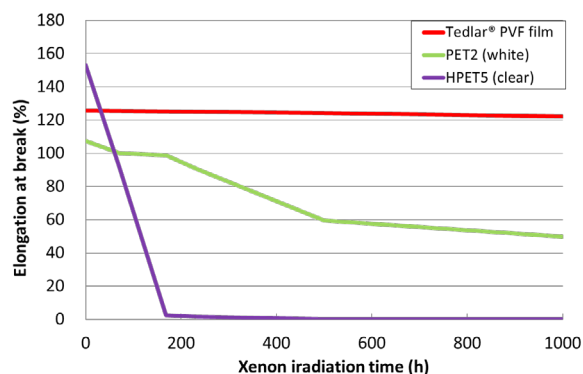
图八：组件正面1075kWh/m²紫外(相当于温和气候条件下18.9年的正面紫外辐照剂量)辐照后背板内层的变化。PET、HPET和单层PVDF背板内层严重发黄且开裂，而基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT背板材料无变化(测试条件：金属卤素灯，1.5kW/m²；测试组件结构为：玻璃/EVA/EVA/FEP离型膜/背板)

耐候性(Weathering resistance)测试是将紫外辐照与温湿度结合在一起，同时对材料和部件进行老化的测试方法，测试标准可参考ASTM G155-2005(非金属材料曝晒用氙弧灯设备操作规程)，在汽车等工业产品领域已得到广泛应用。相比现有IEC61215中的单项测试，耐候性测试将光、热、湿三种重要环境因素综合在一起，考察组件和材料在多因素协同效应下的老化情况，能更好的模拟户外实际情况。在IEC 61730第二版修改稿和IEC 62788-7-2(光伏材料测试程序——第7-2部分：环境曝露——塑料的加速耐候性测试)两项标准起草过程中，耐候性测试被广泛讨论并一度被写入正文中，但由于设备和部分现有产品难以满足测试要求而遭到部分厂家反对。耐候性测试在光伏领域早已得到广泛认可，前文提到的NREL“光伏组件品质

加严测试”标准对背板耐候性测试的要求为 $81 \pm 8 \text{ W/m}^2$ @300-400nm, $70 \pm 5^\circ\text{C}$, $50 \pm 10\%$ 湿度，约4000小时氙灯辐照(总计320kWh/m²紫外剂量)。中国国内的研究机构也已着手起草光伏产品的耐候性测试标准，相信一两年内即会发布。

早期通过户外研究发现PET聚酯背板在户外出现较多发黄和开裂现象。目前市场上一些PET聚酯背板是根据已有标准测试条件逆向研发的，在经过耐水解或耐紫外改性后可以通过一定剂量的紫外老化测试和湿热老化测试。但是在耐候性测试时，却出现显著的机械性能下降和开裂(图九和图十)，表明其在实际户外使用时仍然具有较大的失效风险。

从图九可以看出，白色PET聚酯材料和耐水解HPET聚

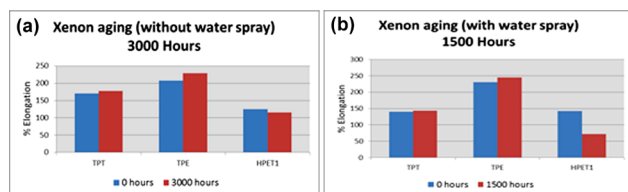


图九：白色PET、耐水解HPET和特能®(Tedlar®)PVF薄膜断裂伸长率在环境耐候性测试中的变化(*测试条件：氙灯，120W/m²@300-400nm, 103°C CHT, 50%RH)

酯材料，在1000小时耐候性测试后，机械性能均明显下降，甚至脆化，这是因为温湿度共同作用加速了PET聚酯分子链的断裂。而特能®(Tedlar®)PVF薄膜却能够保持良好的机械性能，未出现明显的性能下降现象，这说明它具有非常良好的耐候性能。在另外一组背板样品外层的综合环境加速老化测试中，四种改性HPET聚酯背板内层均出现了显著开裂甚至脱层(如图十)。而相同测试条件下，对照组基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT和TPE背板内外层均未开裂和脱层现象。PET聚酯背板的这种开裂和脱层现象在实际户外使用过程中，特别是苛刻环境下，随着EVA中紫外吸收剂



图十：四种典型耐紫外耐水解HPET聚酯背板内层在1000小时耐候性测试后严重开裂(试验条件：氙灯，120W/m²@300-400nm, 95°C BHT, 50%RH, 紫外照射在背板空气面)



图十一：基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT和TPE背板以及耐紫外耐湿聚酯背板外层在耐候性测试后断裂伸长率的变化。(a)3000小时氙灯老化(无喷淋)(测试条件：氙灯，125W/m²@250-400nm，65°C BPT)；(b)1500小时氙灯老化(有喷淋)(测试条件：氙灯，125W/m²@250-400nm，65°C BPT，102分钟辐照，18分钟辐照加水喷淋)

的消耗导致越来越多的紫外线穿透到背板内层，这几种背板内层均面临较高的开裂失效风险。

耐候性测试不仅需要控制光照强度和温湿度，为了更好的模拟户外环境，还需要间断性对样品施加喷淋以模拟自然界下雨和夜晚表面结露现象，利用材料对水的吸附和解吸附作用，促进材料的老化，同时对正在接受辐照的样品表面产生温度的冲击作用。依据通用的塑料耐候性老化国际标准ISO4892-2塑料——暴露于实验室光源的方法(第二部分：氙弧灯)，对不同背板在有无喷淋条件下的耐候性老化测试的断裂伸长率的变化进行了对比研究。从图十一可以看出耐水解耐紫外的HPET1聚酯背板在3000小时的氙灯老化测试后断裂伸长率下降并不明显，但在氙灯老化过程中引入适当的水喷淋后，该聚酯背板在1500小时老化后断裂伸长率就发生明显下降，而对比组基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT和TPE背板的断裂伸长率没有发生下降，说明特能®(Tedlar®)PVF薄膜可以很好的抵御综合环境应力对背板PET中间层的破坏，延长其使用寿命。

序列老化测试

组件背板材料在户外不仅直接受环境因素影响，同时还要受到组件产生的应力影响(比如冷热循环应力、机械载荷、热斑以及电场等)，这些组件产生的应力与背板所受直接环境应力叠加使得背板材料的长期户外老化和失效变得更加复杂。IEC61215中采用冷热循环(TC200)，冷热循环和湿冻实验序列(TC50+HF10)等来评估环境对组件产生应力的影响。因此有必要采用序列老化去反映背板材料在户外的这种复杂应力组合，结合湿热、紫外、冷热和湿冻等应力来评估背板在户外的老化，能够发现很多单一老化测试难以发现的问题，为组件设计和选材提供更多依据。国际光伏质量保证工作组正在研究将紫外、动态机械载荷、湿冻和湿热组成序列老化来评估组件和材料的可靠性和耐久性。

以下是组件序列老化的部分研究结果，包括将冷热循环/湿冻试验与湿热老化和紫外老化组成老化序列，研究背板材料在紫外湿热老化后再进行冷热循环/湿冻试验后产生的新失效模式。图十二显示了两块使用不同PVDF薄膜背板的组件序列老化测试的结果。在两次DH1000+TC200序列老化测试后，PVDF薄膜出现明显裂纹；对比组采用基于特



图十二：使用PVDF薄膜背板的大组件在2×(DH1000小时+200个冷热循环)序列老化测试后，外层PVDF薄膜出现明显不规则裂纹。

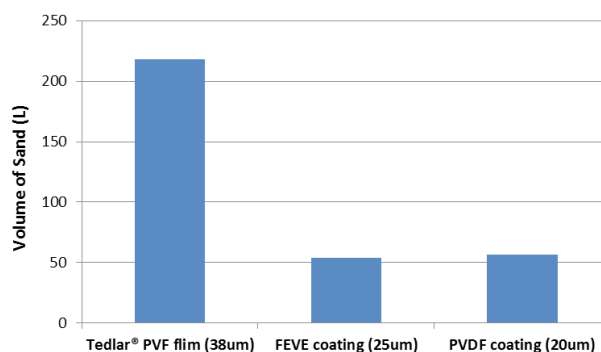
能®(Tedlar®)PVF薄膜的背板在同样的序列老化后上无开裂现象。在另外两组类似的序列老化测试中，PVDF背板表面同样出现了大量裂纹[13]。

这些PVDF背板上的裂纹形态虽然不完全相同，但均有不同程度的开裂。这主要是因为PVDF薄膜在湿热老化后显著脆化，而组件在冷热循环中对背板产生应力导致其脆化特性显现为开裂现象。这一特征在PVDF薄膜的老化测试中也得以体现，如本文《高温高湿老化》一节内容和图二所示。PVDF薄膜这种开裂在单一的湿热老化中并未发生，因为即使PVDF薄膜发生了脆化，但由于没有施加户外常见的冷热循环应力，因而无法暴露PVDF薄膜开裂失效的风险。

落砂试验

我国西部荒漠和戈壁地区拥有发展光伏发电得天独厚的光照条件和廉价土地资源，是发展规模化大型地面电站的最佳选择。然而这类地区的气候类型也极为苛刻，除了更高的紫外辐照剂量和更大的冷热循环应力之外，还要考虑风沙磨损对光伏组件，尤其是对背板外层耐候保护层的影响。如果背板外层耐候保护层在户外很快被磨损减薄，导致背板外层耐受应力开裂性能下降，影响对PET中间层的紫外阻隔保护和水汽阻隔，使得背板失效，最终导致组件失效和功率加速衰减。

在2014年底发布的背板国家标准以及背板行业标准中(2014年底完成审定、等待批复和正式发布)，均对背板外层耐候保护层的耐风沙磨损性能提出了测试要求。这两项标准均推荐采用GB/T 23988-2009(涂料耐磨性测定落砂

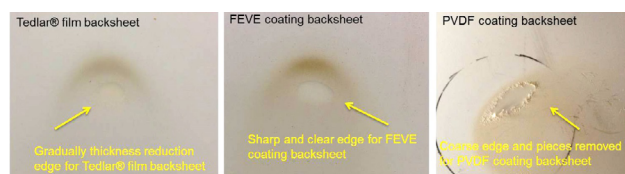


图十三：基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜的TPT背板与FEVE涂料和PVDF涂料背板外层被磨损所需砂量(测试条件：GB/T 23988-2009，采用直径0.25-0.65mm的灌砂标准砂)

法)作为背板材料的实验室风沙磨损测试方法。该测试使用特定粒径和规格的沙粒,从规定高度沿导管降落冲击背板外表面,直至背板外层耐候层被磨穿露出直径4mm的PET聚酯中间层。

图十三是基于特能®(Tedlar®)PVF薄膜背板和两种涂覆型背板的落砂测试结果。当使用0.25-0.65mm直径的灌砂标准砂测试时,TPT背板外层的特能®(Tedlar®)PVF薄膜需要超过200升的砂量才能磨穿;而外层为FEVE涂料和PVDF涂料的背板50升左右砂量即可磨穿。

另一方面,从图十四所示背板外表耐候层落砂磨损后的形貌来看,特能®(Tedlar®)PVF薄膜在磨损处厚度逐渐减薄,表明PVF薄膜具有良好机械强度和耐磨性能,而FEVE涂料和PVDF涂料磨损边缘出现明显的磨损“台阶”,中间部分完全被沙粒磨损剥落,加之所需磨穿的砂量较低,说明



图十四：不同类型背板外表层在落砂测试后的磨穿处形貌

这些涂层较脆且极不耐磨。

需要指出的是,实验室落砂磨损测试仅仅表征了背板初始的耐磨性能,未考虑塑料因户外紫外老化、湿热老化、盐雾腐蚀以及冷热循环应力等环境因素与风沙磨损的综合的影响和协同效应。这也是为什么塑料在户外磨损和减薄速度随老化时间延长而越来越快的原因[14]。

其他尚需完善的测试项目

除了上述在不同标准中已经明确或已被关注的背板相关测试项目外,还有一些标准中未完善或不够完善的项目需要引起我们的关注,比如盐雾腐蚀测试和背板耐热测试等。

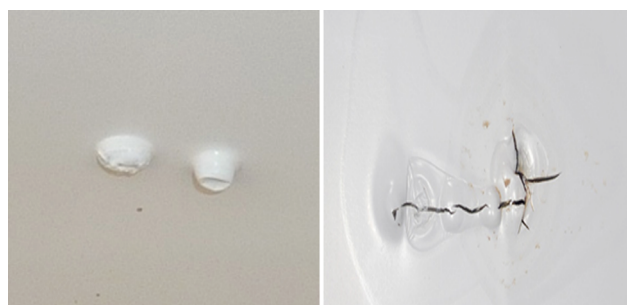
盐雾腐蚀

光伏组件耐盐雾腐蚀测试主要参考IEC61701-2011(光伏组件盐雾腐蚀试验)标准,使用5%食盐水喷淋加50%湿度静置循环来评估材料盐雾腐蚀情况。但即使最严苛测试等级7,试验中食盐水喷淋时间也只有数十小时,其他时间为静置时间,较难模拟组件在沿海环境使用25年的真实状况。铝型材和铝塑板行业普遍采用AAMA 2605-5标准(针对用于挤出铝型材及板材表面的具有优异性能有机涂层的自发性设计规范,性能要求及检验程序),对涂层进行长达4000小时盐雾腐蚀测试,以评估涂层长期耐盐雾腐蚀能力。因此有必要加强对沿海和盐碱地安装的组件及背板材料的盐雾腐蚀测试。

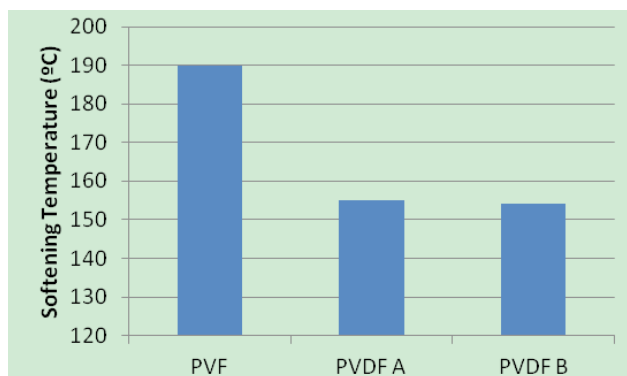
耐热斑

光伏组件热斑现象较为普遍且很难完全避免,屋顶安装的组件因为散热情况通常较差,热斑更为严重。热斑的形成原因很多,可能包括焊接不良、玻璃脏污和阴影遮盖等。热斑会导致组件局部温度显著升高,从而可能引起部分材料失效。图十五中是PVDF背板材料在户外因热斑导致PVDF薄膜软化而起泡。因此背板外层保护薄膜应具有较高的软化温度和长期耐热性能以尽量降低热斑对组件和背板材料的危害。

采用热力学分析方法,可以测得材料的软化温度[15]。图十六显示PVDF薄膜的软化温度只有157℃左右,容易因为热斑出现软化起泡甚至开裂现象。而特能®(Tedlar®)PVF薄膜的软化温度高达190℃,具有更佳的耐热变形能力,在高温环境和屋顶应用中耐热斑可靠性更高。



图十五：PVDF背板因热斑而软化开裂(美国沙漠光伏电站)



图十六：特能®(Tedlar®)PVF薄膜和PVDF薄膜软化温度点

结论

中国光伏行业发展迅猛,已经成为世界最大的光伏产品生产国和安装国,具有完整光伏产业及市场。快速发展的同时频发的产品质量问题也引起了相关厂商、认证机构、投资者和政府的高度关注。为了加快我国光伏产业转型升级,需要尽快建立科学完善的配套标准以规范光伏产业和保证市场健康有序和快速发展。

近几年随着行业对光伏组件及材料测试标准与方法认识的逐渐提高,以及IEC各工作小组、相关光伏研究机构和

第三方测试机构等的不断努力，光伏质量保障标准体系正在形成。作为保障组件户外可靠性、耐久性和安全性极其关键的背板材料，相关的国际国内标准也正在逐渐确立和完善中。

为了更好地模拟户外真实环境来评估背板材料，有必要增加紫外辐照剂量、进行耐候性测试和序列老化测试，以及针对特定使用环境开展落砂测试、耐盐雾腐蚀和耐热等测试，已得到行业的广泛认知和共识。通过这些测试方法对背板材料的评估发现了一些背板存在的失效风险，而这些背板失效通过IEC61215的标准测试甚至加倍测试强度都无法发现。比如有些背板采用超薄的紫外阻隔涂层降低成本，导致紫外线穿透，经过长期紫外老化后明显发黄；另外耐水解耐紫外的HPET聚酯背板材料在耐候性测试中(紫外、温度、湿度、水喷淋)机械性能迅速下降脆化，在紫外老化与冷热循环测试中也严重发黄，这些现象在单一的紫外光热老化中都不太明显；还有在IEC61215的单一组件湿热老化中，PVDF背板所用PVDF薄膜虽然已经湿热老化脆化，但由于未施加冷热循环应力，所以测试中PVDF薄膜未开裂，但是在湿热老化后增加冷热循环序列后，PVDF薄膜就发生了严重的纵向开裂，这说明组件在冷热循环中产生的应力使PVDF薄膜开裂的风险得以被发现；通过一些特定的环境测试如落砂试验可以曝露FEVE涂料背板易受风沙磨损的风险；在耐热试验中，PVDF薄膜的软化温度低，在热斑条件下会出现软化起泡甚至开裂现象。

组件以及背板的加速老化测试和可靠性测试方法的建立以及相关标准的形成需要行业相关人士持续深入研究、加强合作攻关和不断提升完善。同时，户外长期实绩验证才是检验组件与材料可靠性和耐久性的最终评价标准，行业从业者也应该加强对组件和背板户外失效机理的了解，引导相关实验室测试方法和条件设置，避免机械使用标准评估组件和选用材料，甚至按照所谓标准进行逆向研发，导致产品通过各类测试但在户外仍然出现质量问题的局面重演。

参考文献

- [1] 裴会川, 冯亚彬, 梁哲. 光伏标准体系趋完善, 质量及可靠性成重点. 赛迪网-中国电子报, 2014年6月27日。
- [2] S. Kurtz, J. Wohlgemuth, M. Kempe, N. Bosco, P. Hacke, D. Jordan, D. C. Miller, T.J. Silverman, N. Phillips, T. Earnest, R. Romero; NREL Technical Report
- [3] NREL/TP-5200-60950 (2013), "Photovoltaic Module Qualification Plus Testing"
John Wohlgemuth, Temperature, Humidity and Voltage, National Renewable Energy Laboratory (NREL), PV QA Task Force, Group 3, 2012
- [4] W. Gambogi, Y. Heta, K. Hashimoto, J. Kopchick, T. Felder, S. MacMaster, A. Bradley, B. Hamzavtehraney, L. Garreau-Iles, T. Aoki, K. Stika, T.J. Trout and T. Sample, "A Comparison of Key PV Backsheet and Module Performance from Fielded Module Exposures and Accelerated Tests", IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, FL (2013)
- [5] AIST, Final Report on "Consortium Study on Fabrication and Characterization of Solar Cell Modules with Long Life and High Reliability", (2014).
- [6] W. Gambogi, Y. Heta, J. Kopchick, T. Felder, S. MacMaster, A. Bradley, B. Hamzavy, E. Kathmann, B.-L. Yu, K. Stika, T.J. Trout, L. Garreau-Iles, O. Fu, H. Hu, "Assessment of PV Module Durability Using Accelerated and Outdoor Performance Analysis and Comparisons" IEEE PVSC 40, Denver, CO (2014)
- [7] T. Hosada and T. Yamada, "Effect of TiO₂ on Morphology and Mechanical Properties of PVDF/PMMA Blend Films Prepared by Melt Casting Process". J. Appl Polm. Sci. ; 2014, DOI: 10.1002/APP.40454
- [8] "Weathering of Plastics: Testing to Mirror Real Life Performance", George Wypych, p17 (1999)
- [9] R. Chadysiene and A. Girgzdys, "Ultraviolet Radiation Albedo of Natural Surfaces", J. Env. Eng. Land. Mgmt, 16(2): 83-88 (2008)
- [10] W. Gambogi, Y. Heta, K. Hashimoto, J. Kopchick, T. Felder, S. MacMaster, A. Bradley, B. Hamzavtehraney, V. Felix, T. Aoki, K. Stika, L. Garreau-Iles, T.J. Trout "Weathering and Durability of PV Backsheets and Impact on PV Module Performance", SPIE San Diego, CA (2013)
- [11] T. C. Felder, W. J. Gambogi, J. G. Kopchick, R. S. Peacock, K. M. Stika, T.J. Trout, A. Z. Bradley, S. MacMaster, B. Hamzavtehraney, A Gok, R. H. French, "Optical Properties of PV Backsheets: Key Indicators of Module Performance and Durability", SPIE, San Diego, CA (2014)
- [12] W. Gambogi, J. Kopchick, T. Felder, S. MacMaster, A. Bradley, B. Hamzavy, E. Kathmann, K. Stika, T.J. Trout, L. Garreau-Iles and T. Sample, "Backsheet and Module Durability and Performance and Comparison of Accelerated Testing to Long Term Fielded Modules", EUPVSEC, Paris (2013)
- [13] O. Fu, H. Hu, W. Gambogi, J. Kopchick, T. Felder, B. Hamzavy, A. Bradley, Y. Heta, T. J. Trout; "Understanding Backsheet Durability Through Field Studies and Accelerated Stress Testing"; SNEC, Shanghai, (2014)
- [14] J.P. Thornton, The effect of sandstorms on PV arrays and components. NREL/TP-411-4787 US Category: 270 DE92001240. March 1992.
- [15] "Testing method for softening temperature of thermoplastic film and sheeting by thermomechanical analysis", Japanese Industrial Standard, JIS K 1796-1991