TPT 光伏背板表面热压处理研究

广东生益科技股份有限公司
国家电子电路基材工程技术研究中心
■ 杨小进 * 罗鑫 刘东亮

摘　要：由于 TPT 光伏背板在测试 TPT/EVA 剥离强度时出现掉粉现象，且表现为剥离强度过低，杜邦提出通过热压处理来解决该问题。本文对该热压处理的效果进行了分类，研究了不同温度、压力和车速对处理效果的影响，并对比了处理前后 TPT 背板的相关性能的变化。结果表明：最佳处理温度为 215 ℃，较适宜的压力和速度分别为 2.0 MPa 和 15~25 m/min；处理后 Tedlar-PVF 膜内聚强度提高，层间剥离强度可测，光泽度、阻隔性能、热收缩性能均提高，拉伸强度、断裂延伸率、击穿电压、初始 /UV 老化后的黄色指数等几乎不发生变化。

关键词：光伏背板；表面处理；TPT

0 引言

NASA 的 JPL 实验室在 1975 ~ 1985 期间开展的 5 轮组件户外老化和实验室测试 [1] 确定了标准的晶体硅光伏组件封装结构——玻璃 / EVA/Tedlar 背板；也奠定了经典的背板结构，即 Tedlar/PET/Tedlar，称为 TPT 背板，其中 T 特指 Tedlar，为杜邦已商品化多年的聚氟乙烯 (PVF) 膜，具体型号为 PV2001。由于 Tedlar-PVF 中氟原子电负性较大，范德华半径小，碳氟键键能高达 485 kJ/mol，再加上分子链排列紧密、刚硬，使其具有十分优异的耐热性，耐候性，耐高、低温性和耐化学药品性；再搭配 PET 膜，制得的 TPT 背板具有优异的机械性能、绝缘性能、阻隔性能和耐候性能，非常适合光伏组件的封装，可适应国内的各种气候条件 [2]。TPT 背板户外实绩验证已超过 30 年，堪称行业标杆。

然而，由于 Tedlar-PVF 膜在制造时添加了约 35% 质量份的填料 / 添加剂 [3]，且使用的是“挤出 – 纵拉 – 横拉”的生产工艺，使得薄膜本身处于一种粗松的结构状态，内聚力较低。当进行 TPT/EVA 的剥离强度测试时，结果显示仅有 12 N/cm 左右，且 EVA 胶膜上残留一层白色的粉末。尽管在过去 30 年这一现象一直存在，但由于实际使用时背板并不存在类似于剥离测试过程中的应力，故此现象并不影响使用。但随着背板相关标准的出台，行业内对于 TPT/EVA 的剥离强度有了 40 N/cm 以上的要求。因此，必须对 TPT 背板的电池侧，即 Tedlar-PVF 膜进行表面处理。但目前已知的各种表面处理方式，例如电晕 [4]、化学处理 [5]、火焰处理 [6] 等均难以改变 Tedlar-PVF 膜表面的粗松结构，更难以实现工业化的连续生产。为此，杜邦公司提出了一种表面热压处理 [7] 技术来解决该问题。本文对这一表面热压处理技术进行了相应的研究。

收稿日期：2017-11-20
通信作者：杨小进 (1985—)，男，中级工程师、硕士，主要从事光伏背板等绝缘材料研发方面的工作。yangxj@syst.com.cn

1 试验部分

1.1 试验仪器

试验使用的仪器包括：自制连续式热压表面处理机(包括放卷单元、热压单元、冷却单元和收卷单元，其中热压单元可同时提供高温和压力)；博硕光电 BSL1122OC 型组件层压机；GOTECH 公司 AI7000-S 型万能材料试验机；广州标格达 BGD 516/1 型光泽度测试仪；日本 KONICA MINOLTA-CM3600A 分光测色仪；ATLAS UVTEST 老化试验箱；美国 MOCON-Permatran 3/61 型红外法水蒸气透过率测试仪；美国 HIPOTRONICS-7100-5D149-PB 型击穿电压测试仪。

1.2 测试表征

1) 按照 GB-T 31034-2014《晶体硅太阳电池组件用绝缘背板》测试背板层间剥离强度，背板与 EVA 胶膜的剥离强度、拉伸强度、断裂延伸率和击穿电压。

2) 按照 GB/T 9754-2007《色漆和清漆 不含金属颜料的色漆漆膜的 20°、60°和 85°镜面光泽的测定》测试背板的表面光泽度。

3) 按照 GB/T 3979-2008《物体色的测量方法》测试背板的黄变指数。

1.3 试验材料

TPT 光伏背板(广东生益科技股份有限公司生产，型号为 SS101，结构为 Tedlar-PVF/PET/Tedlar-PVF，未进行表面处理)；EVA 胶膜(斯威克 SV-15297)；光伏玻璃(南玻 3.2 mm 厚镀膜玻璃)。

1.4 试验过程

使用自产 TPT 光伏背板，利用自制连续式热压表面处理机，使用不同的温度、压力和车速进行处理，将不同条件下处理后的样品与 EVA、玻璃制成层压件(TPT 背板/EVA/玻璃，处理面朝向 EVA 胶膜)，测试各 TPT 背板与 EVA 胶膜的剥离强度(样条宽度 1 cm)。另外，试验还测试了处理面的层间剥离强度、表面光泽度、热收缩率、水蒸气透过率、拉伸强度、断裂延伸率和紫外老化后的黄变指数等。

2 结果与讨论

2.1 处理效果分类

在试验及测试过程中，遇到了以下几种不同的表现形式，经分析，根据处理效果不同将其分为以下 4 类。

2.1.1 未处理或处理无效

处理后，层压件的分离界面发生在 TPT 背板与 EVA 胶膜之间，且 EVA 胶膜上有成片的白色粉末残留；剥离强度测试曲线基本保持水平，测试结果为 12 N/cm，如图 1 所示。

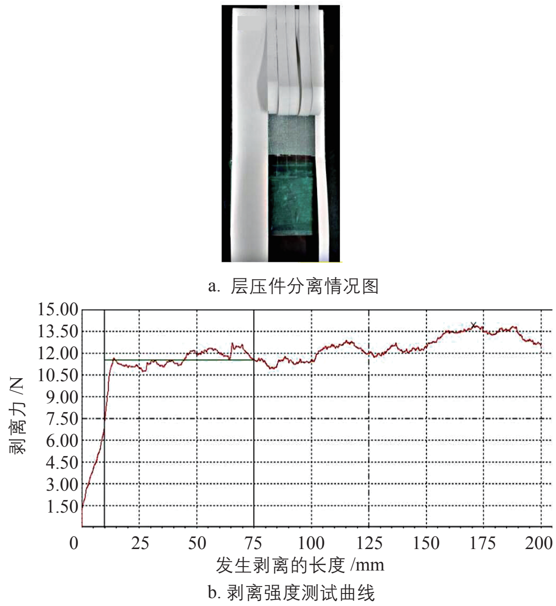


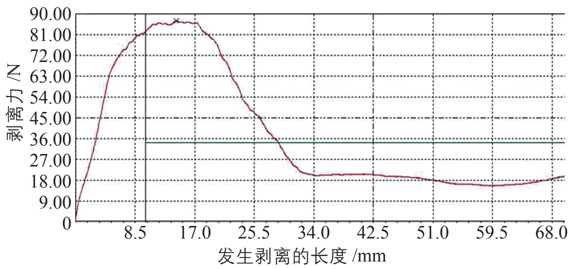
图 1 处理无效或未处理时层压件分离情况和剥离强度测试曲线

2.1.2 处理不完全

处理后，TPT 背板与 EVA 胶膜之间剥离强度有所提高，但仅是在测试起剥的一瞬间，随后 Tedlar-PVF 膜立即被拉裂，从 PET 上脱落且整片残留在 EVA 上，如图 2a 所示，白色为断裂残留的 Tedlar-PVF 膜。同时，测试曲线的读数升至较高后迅速下降，曲线有最大值，如图 2b 所示。

产生这一现象是由于 Tedlar-PVF 膜厚约 38～43 μm，在处理过程中，仅 Tedlar-PVF 膜表层几 μm 的厚度由粗松变得紧实，因此，起剥时 EVA 剥离强度较高；但表层以下仍然是粗松的结构，内聚强度较低，所以起剥后 Tedlar-PVF 膜发生分层断裂，残留在 EVA 上，表现为背板分层。

a. 层压件分离情况图

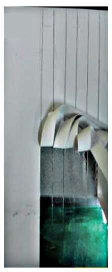


b. 剥离强度测试曲线

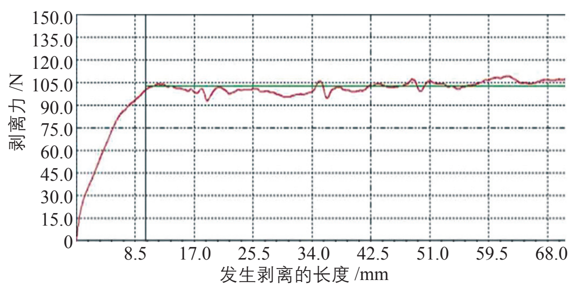
图 2 处理不完全时层压件分离情况和剥离强度测试曲线

2.1.3 处理完全

层压件测试时，分离界面发生在 EVA 与背板之间，EVA 胶膜上几乎没有白色粉末残留；测试曲线基本保持平稳，数值也较高，所有样条的结果均匀，剥离强度几乎都在 105 N/cm 左右，如图 3 所示。



a. 层压件分离情况图



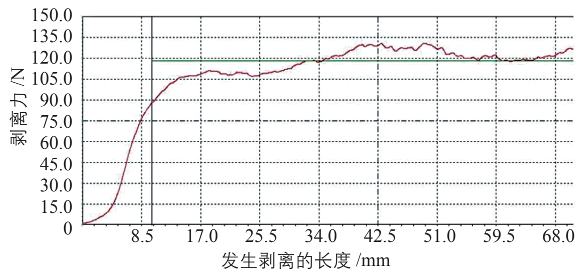
b. 剥离强度测试曲线

图 3 处理完全时层压件的分离和剥离强度测试曲线

2.1.4 处理过度

在某些条件下，会出现处理过度的情况。具体表现为：层压件测试时，分离界面起初发生在 TPT 背板与 EVA 胶膜之间，然后迅速变为 EVA 胶膜与玻璃之间，测试曲线也从 105 N/cm 上升至 120 N/cm，如图 4 所示。这是由于处理过度，使背板与 EVA 的粘接力高于 EVA 与玻璃间的粘接力所致。这种处理效果虽然可以接受，但是会消耗更多能量，也会降低处理效率。

a. 层压件分离情况图



b. 剥离强度测试曲线

图 4 处理过度时层压件的分离情况和剥离强度测试曲线

2.2 温度对处理效果的影响

由于 PVF 树脂的熔融温度约为 130～210 ℃，分解温度为 220 ℃[8]；且当温度由 150 ℃提高到 210 ℃时，其热稳定时间由 380 s 减少至 63 s[9]，热分解速度明显加快。因此，本试验考察了不同温度对于处理效果的影响，具体如表 1 所示。

在处理压力和车速分别固定为 2.0 MPa、15 m/min 的情况下，由表 1 结果可知：热处理辊温度为 180 ℃时，无处理效果，与未处理时的 12 N/cm 基本一致。温度提高至 190 ℃，背板 /EVA 玻璃强度有微小的提高，但是处理效果不完全，背板分层。随着温度提高至 200 ℃、205 ℃和 210 ℃，背板 /EVA 剥离强度测试曲线的最大值逐渐提高至 24 N/cm、52 N/cm 和 97 N/cm，但处理效果仍不完全，背板表现为分层。这是因为 Tedlar-PVF 膜较厚，当温度较低时，仅有表层的几 μm 的 Tedlar-PVF

表 1 不同处理温度下的处理效果

处理温度 /℃	处理压力 /MPa	车速 /m•min^{-1}	处理效果 (EVA 剥离强度，测试表现)
180	2.0	15	12 N/cm，无处理效果
190	2.0	15	20 N/cm，处理不完全，背板分层
200	2.0	15	24 N/cm，处理不完全，背板分层
205	2.0	15	52 N/cm，处理不完全，背板分层
210	2.0	15	97 N/cm，处理不完全，背板分层
215	2.0	15	105 N/cm，处理完全，分离界面为背板与 EVA 之间
217	2.0	15	118 N/cm，处理过度，分离界面为 EVA 与玻璃之间

发生了熔化，在压力下变得紧实。当温度继续升高至 215 ℃时，Tedlar-PVF 全部发生熔化，压力作用下可以处理完全，剥离强度达到 105 N/cm，测试曲线也较均匀平稳。而当温度继续升高至 217 ℃时，则出现了处理过度的情况。这表明，温度是 TPT 背板表面处理效果的重要影响因素，最佳处理温度为 215 ℃。

2.3 压力对处理效果的影响

本试验还考察了不同压力对 TPT 背板处理效果的影响，具体如表 2 所示。

表 2 不同压力下的处理效果

处理压力 /MPa	处理温度 /℃	车速 /m•min^{-1}	处理效果 (EVA 剥离强度，测试表现)
1.0	215	15	78 N/cm，处理不完全，背板分层
1.5	215	15	100 N/cm，部分样条处理不完全，分层
2.0	215	15	105 N/cm，处理完全
2.5	215	15	107 N/cm，处理过度，分离界面为玻璃 /EVA
5.0	215	15	Tedlar-PVF 膜严重粘辊脱层

在处理温度和处理车速分别固定为 215 ℃、15 m/min 的情况下，由表 2 的结果可知：热处理辊压力为 1.0 MPa 时，测试曲线的最大值为 78 N/cm，但处理不完全，背板分层。这是因为压力太小，仅有表层的几 μm 的 Tedlar-PVF 膜被压紧实。继续增大压力至 1.5 MPa，测试曲线的最大值升高至 100 N/cm，且测试样条中仅有部分样条出现分层，其他样条正常。当压力增大到 2.0 MPa 时，处理完全；而压力继续增大至 2.5 MPa 时，则出现处理过度的情况。极端情况 (5.0 MPa) 下，Tedlar-PVF 膜出现严重粘辊脱层的情况，这是由于光洁的辊表面在高压下极易与融化的 Tedlar-PVF 形成较强的粘附力所致。因此，处理压力也是影响处理效果的重要因素，较适宜的处理压力为 2.0 MPa，压力过小则处理不完全，压力过大则导致 Tedlar-PVF 膜粘辊脱层。

2.4 车速对处理效果的影响

本处理设备为连续式处理，因此处理的车速也会影响处理效果。试验考察了不同车速对处理效果的影响，具体如表 3 所示。

在处理温度和处理压力分别固定为 215 ℃、2.0 MPa 的情况下，由表 3 可知：车速较低时，融化的 Tedlar-PVF 膜易与辊表面粘接导致 Tedlar-PVF 膜从 PET 上脱层；车速提高至 10 m/min，粘辊现象变轻微，但背板处理面有较为明显的印痕；车速提高至 15～25 m/min 时，处理均完全，无粘辊现象；但当车速提升至 30 m/min 时，开始出现处理不完全，背板分层的现象。这表明，在连续式的处理过程中，车速也应匹配，车速过低会导致粘辊和产生表观印痕，过高将导致处理不完全，较适宜的车速为 15～25 m/min。

2018.09印刷.indd 56 2018-9-22 10:07:26

表 3 不同车速下的处理效果

车速 /m•min^{-1}	处理温度 /℃	处理压力 /MPa	处理效果 (EVA 剥离强度，测试表现)
5	215	2.0	Tedlar-PVF 膜粘辊脱层
10	215	2.0	Tedlar-PVF 膜轻微粘辊，处理面有较明显表观印痕
15	215	2.0	105 N/cm，处理完全，无粘辊现象
20	215	2.0	103 N/cm，处理完全
25	215	2.0	102 N/cm，处理完全
30	215	2.0	77 N/cm，处理不完全，背板分层

2.5 表面处理对 TPT 背板性能的影响

本试验测试还对比了热压处理前后 TPT 背板的相关性能的变化，结果如表 4 所示。

表 4 热压处理前后 TPT 背板的相关性能对比

TPT 背板相关性能	热压处理前	热压处理后
层间剥离强度 /N•cm^{-1}	Tedlar-PVF 膜起剥断裂，无法测试	6.0
处理面光泽度 (60°)	7.5	11.9
水蒸气透过率 /g•(m^2•d)$^{-1}$	2.0	1.6
热收缩率 (MD/TD)/%	0.9/1.0	0.6/1.0
拉伸强度 (MD/TD)/MPa	136/135	131/140
断裂延伸率 /%	130/120	128/118
击穿电压 /kV	25	25
初始 /UV 老化后的黄色指数	0.2/0.2	0.2/0.2

由表 4 可知，热压处理后，层间剥离强度发生了较大的变化。热处理前，由于 Tedlar-PVF 膜的内聚强度较低，起剥后立即断裂；但热处理后，内聚强度明显提高，剥离测试过程正常，结果为 6.0 N/cm。处理面的表面光泽度 (60°) 也从 7.5 提高至 11.9，光泽度的提高与处理时所用的辊为光滑的镜面辊有关。同时，水蒸气透过率在处理后减小至 1.6 g/(m^2•d)，这是因为 Tedlar-PVF 膜被压紧实，使得阻隔性能提高。另外，MD 方向热收缩率减小，热收缩性能提高。而拉伸强度、断裂延伸率、击穿电压、初始 /UV 老化后的黄色指数在热处理前后基本无变化，这表明热压处理过程对这些性能几乎无影响。

3 结论

本文对杜邦提出的 TPT 背板表面热压处理技术进行了探讨，首先对处理效果进行了分类，然后重点研究了温度、压力和车速对处理效果的影响，还对比了处理前后 TPT 背板相关性能的变化，得出以下结论：

1) 最佳热压处理温度为 215 ℃，较适宜的压力为 2.0 MPa，较适宜的车速为 15～25 m/min；

2) 处理后 Tedlar-PVF 膜内聚强度提高，层间剥离强度可测，光泽度、阻隔性能、热收缩性能均提高，拉伸强度、断裂延伸率、击穿电压和初始 /UV 老化后的黄色指数等几乎不发生变化。

参考文献

[1] Callaghan W T. Crystalline Silicon Photovoltaic Arrays: A Final Summary of Flat-Plate Solar Array(FSA) Project Work(1975-1986)[M]. Berlin :Springer Netherlands, 1987, 792 － 799.

[2] 胡红杰 . 分布式电站用背板性能要求分析与户外实证研究 [EB/OL]. http:/www.solarbe.com/file/upload/huiyippt/2017dsjgd/2017032212009.pdf, 2017-11-20.

[3] Dupont Tedlar Oriented PVF Film MSDS[EB/OL]. http://www.b2bcomposites.com/msds/dupont/642034.pdf, 2017-11-20.

[4] Wolinski L E, Buffalo N Y. Surface Treatment of Polymeric Shaped Structures[P]. 美国专利 : US 3274088, 1961-07-27.

[5] Robert O O, Buffalo N Y, Wilmington D. Treating Fluorocarbon Polymer Film with Boron Trifluoride and Oxygen[P]. 美国专利 : US 3122445, 1961-04-25.

[6] William L B, Tonawanda N Y, Wilmington D. Flame Treatment of Polymeric Film and Apparatus[P]. 美国专利 : US 3145242, 1962-09-24.

[7] E.I. DUPONT DE NEMOURS AND COMPANY. Solar Cell Backsheet with Improved Adhesion to Encapsulant[P]. PCT 专利 : WO2012167706A1, 2012-12-13.

[8] 周玉生 . 双向拉伸 PVF 薄膜加工技术的研究 [D]. 北京 : 北京化工大学 , 2007.

[9] 焦东苗 , 邵关荣 . 聚氟乙烯树脂质量特性浅析 [J]. 浙江化工 , 1997, 28(1): 42 － 43. 太阳能