



太陽光電先進封裝材料檢測技術

Evaluation for Advanced Encapsulant PV Materials

謝心心 H. H. Hsieh¹、陳祀宏 S. H. Chen²、
楊維綸 W. L. Yang²、謝卓帆 C. F. Hsieh³

工研院(ITRI) 量測技術發展中心

¹資深研究員、²副工程師、³正研究員/經理

摘要/Abstract

太陽光電模組由太陽能電池、高分子封裝/背板材料、前板玻璃所組成，使用於戶外發電至少20年。而高分子封裝材料用於保護電池，並且承受長期的日照曝曬、溫/濕度變化等，因此須具備高可靠度、高穩定性、高耐候等材料特性。然而，根據戶外案場的觀察顯示，封裝材料的劣化相當常見，比方：高分子膜材呈現黃化、封裝介面脫層等；另一方面，近年來隨著電池技術大幅提升，對於封裝材料的性能與要求亦相對提高，因此，除了常用的乙烯醋酸乙酯(EVA)，其他的高分子材料(如：聚烯烴透明高分子材料)亦被高度討論及關注，其耐候特性評估適合水上型太陽能系統。為了因應高效率模組技術的發展以及嚴苛環境的設置需求，本文介紹太陽光電先進封裝材料檢測技術，以快速評估封裝材料之可行性。

Solar module which is composed of solar cell, polymeric encapsulant/backsheet, and front glass are guarantee at least 20 years in operation. And polymeric encapsulants are used to protect not only solar cell but also help to withstand the exposure under the high temperature/humidity/UV-dosage. Thus, the materials used for encapsulant require high reliability, stability, and weatherability. However, the degradation of encapsulant such as yellowing and delamination in the solar field is generally observed. On the other hand, the requirements for encapsulant on performance are more and more increasing. Except the conventional ethylene vinyl acetate, polymer like polyolefin is supposed to be more suitable for floating systems due to its high durability. In order to fulfill the requirements of the diversity of field applications, evaluation for advanced solar encapsulant materials is delivered to fast screen the availability for solar module.

關鍵字/Keywords

封裝材料(Encapsulant)、乙烯醋酸乙酯(Ethylene Vinyl Acetate; EVA)、太陽光電模組(Solar Module)、可靠度(Reliability)

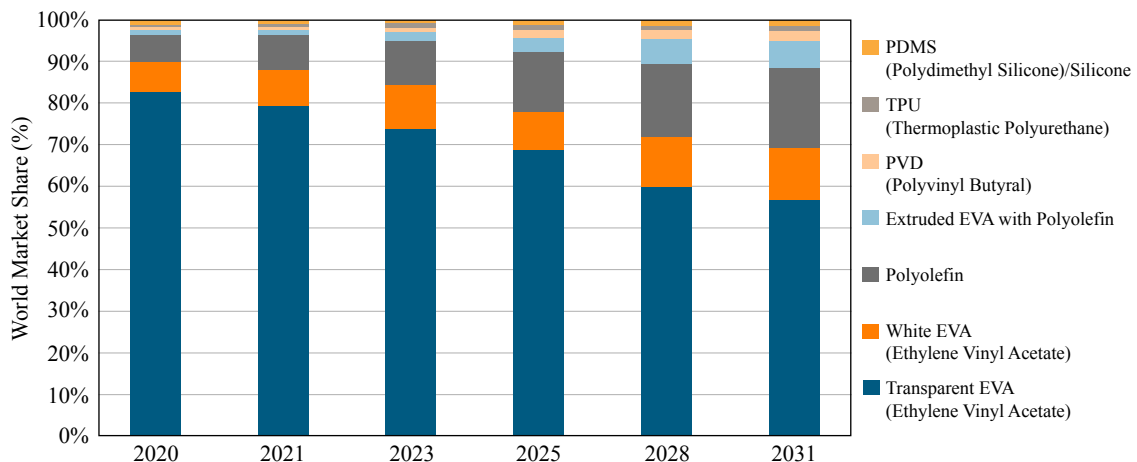


封裝材料發展趨勢

在過去的幾十年中，最常見的封裝材料(Encapsulant)乙烯醋酸乙烯酯(Ethylene Vinyl Acetate; EVA)被廣泛用於矽晶太陽能電池模組中。根據最新2021年出版的ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic)報告⁽¹⁾指出，高分子封裝材料和背板材料皆是模組製造的成本占比項目。近年來，為了進一步提升太陽能模組的性能和降低成本，國內外的材料開發業者開始著手進行封裝材料的優化，以及新型封裝材料的評估，提高這些關鍵材料的性能是確保太陽能模組使用壽命的必要條件。根據趨勢分析所示(如圖一)，EVA仍將是太陽光電模組(Solar Module)使用最廣泛的封裝材料。2021年傳統型的透明EVA封裝材料有80%的市場占比，隨著電池技術轉換及模組多元化發展，2025年將降至約68%市場占比，到2031年將剩下57%的市場

占比。而預計白色 EVA 將在未來幾年保持大約10%相當穩定的市場占比。至於其他開發中的材料，如：Polyolefin/PVB/TPU等，其市場接受度將陸續提高。Polyolefin耐候特性優異，評估適用於玻璃-玻璃組合的雙面型太陽光電模組，根據預計，未來10年 Polyolefin的市場份額將增加近20%。儘管目前仍以EVA為主，開發中的封裝材料亦有其特色及優異的產品特性，值得持續觀察其發展趨勢。

而近幾年推出了各種類型的基於聚烯烴(Polyolefins)之封裝薄膜材料，並引起市場關注。這些材料創新可分為聚烯烴彈性體(Polyolefin Elastomer; POE)和熱塑性聚烯烴(Thermoplastic Polyolefin; TPO)封裝材料。這些材料的主要優點是替換了最常見的EVA之醋酸乙烯酯側基，減少醋酸生成而引發的腐蝕議題。加速老化測試後，並未觀察到顯著的功率損失。但與TPO或POE相比，EVA 模組濕熱環境的耐受度引發較多疑



▲圖一 太陽能封裝材料市場占比⁽¹⁾ (彩圖請見材料世界網)

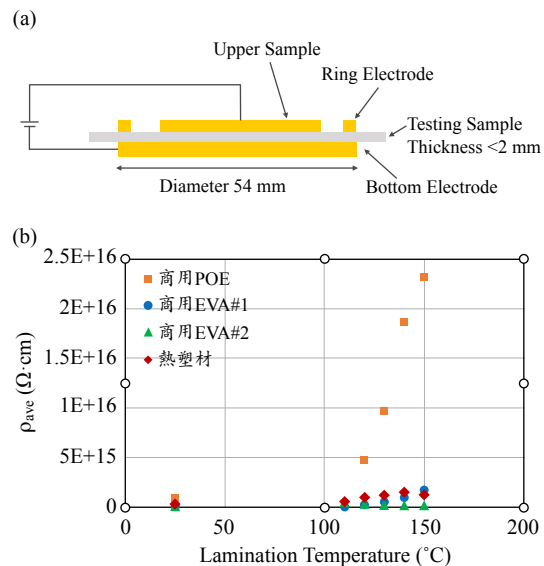
慮，在嚴苛環境案場的模組亦經常觀察到銀線和焊帶腐蝕的現象。因此，這種新型聚烯烴封裝材料被期待作為EVA的替代品。

檢測技術介紹

封裝材料是影響太陽光電模組性能與可靠度(Reliability)的關鍵材料，本文將依據測試標準之發展趨勢以及系統需求，介紹封裝產品須具備之特性與測試方法，有助於業者作為產品評估之依據，加速導入產線。

1. 絕緣特性

眾所周知，國際電工委員會(International Electrotechnical Commission; IEC)訂定之太陽能產品測試標準規範為IEC 61215以及IEC 61730⁽²⁻³⁾。事實上，根據文獻和報告⁽⁴⁻⁵⁾，儘管太陽能模組已通過標準的鑑定和認證，然而根據分析，大多數故障模組是由封裝材料的降解引起的。近年來頗受關注的電致衰減(Potential Induced Degradation; PID)更是與封裝材料的特性息息相關，早期作為IEC TS 62804-1:2015測試標準獨立執行，而根據2021年公告之測試規範指出，電致衰減測項已視為IEC 61215中性能測試的重要測項。太陽能光電模組之設置通常是以串連方式排列，根據模組位置的不同，邊際的電池長期承受對應之系統電壓，容易發生電致衰減的失效現象。而封裝材料之絕緣特性則為防止太陽光電模組承受系統電壓時，作為限制內部漏電流大小的第一道防線，若封裝材料未具有足夠之體積電阻特性，則太陽光電模組發生電致衰減的可能性將會大幅提高，致使模組



▲圖二 (a)體積電阻率測試裝置；(b)不同封裝材料之體積電阻率測試(彩圖請見材料世界網)

發電效率逐步衰退。

由經驗得知，一般建議體積電阻率數值需大於 $1.0 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ ，封裝材料體積電阻率之系統架構設計與建置，如圖二(a)所示，系統組成具有上、下兩電極，封裝材料樣本之長、寬尺寸需大於54 mm，寬幅足夠覆蓋上、下電極，量測過程中將通以1,000伏特之系統電壓，並偵測漏電流大小；上述測試完成後轉換電壓極性，進行反覆量測並記錄分析。由試驗結果得知，如圖二(b)，商用POE材料明顯高於EVA材料之體積電阻數值，而熱塑型材料，其體積電阻率介於兩款商用EVA之間，顯示了該材料已充分具備商用封裝材之體積電阻率的表現水平；同時，以不同封裝材料與層壓溫度之相依特性，如POE封裝材於層壓溫度介於(100~150°C)區間，溫度每升高



▼表一 太陽能光電模組黏著力測試

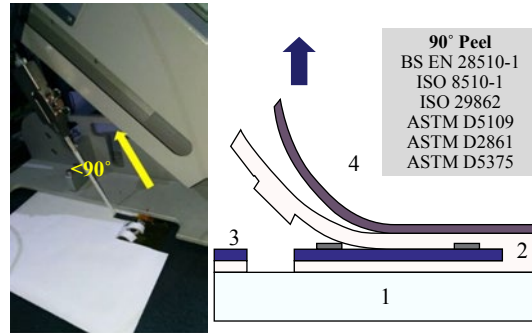
太陽能光電模組黏著力測試位置	建議強度
封裝材料/玻璃	50 N/cm
封裝材料/太陽能電池	4 N/cm
封裝材料/匯流排	40 N/cm
封裝材料/背板	15 N/cm

10°C體電阻率則隨之增加，而EVA樣本於溫度大於120°C時，體電阻數值則趨於飽和狀態，層壓溫度持續上升，則未再有明顯之數值增加。

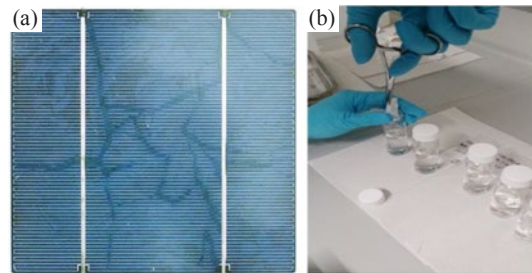
2. 機械特性試驗

太陽能光電模組於戶外需承受不同溫度、濕度、紫外光及不同強度風等環境條件，因此機械性能強度的維持度為保護內部太陽能電池最重要的一環，因為任何鍵結強度的弱化，都會導入腐蝕及氧化等接連反應。透過評估封裝材料與各介面之黏結強度大小，可初步評估此封裝材料配方是否能與各層之間緊密接合，達到一定的黏著強度，如表一所示。

根據ASTM及ISO標準規範之90度接著強度測試系統，待測樣本可依據所需測試介面，固定待測樣品前端，供夾頭夾取進行拉伸，試驗系統如圖三所示。此系統經試驗後，設計了特殊夾具，改善了由樣本伸展所引發之測試夾角小於90度的問題，使樣本在測試時能夠維持在90度夾角，減少因材料拉伸變形之誤判。除此之外，測試系統亦可與環測老化試驗進行搭配，進行如曝曬、高溫高濕測試之黏著強度分析整合試驗。



▲圖三 90度封裝材料剝離測試系統

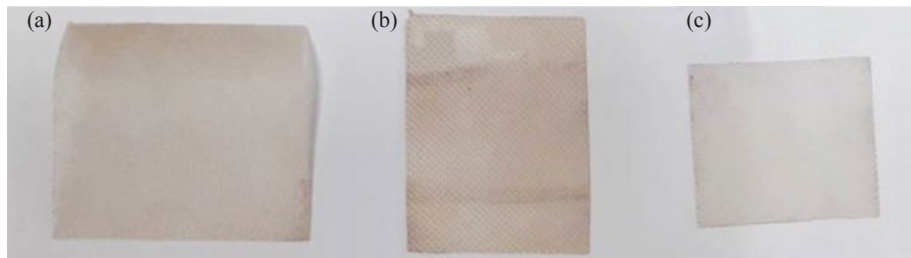


▲圖四 (a)案場銀線色變模組；(b)銀線色變浸泡試驗

3. 化學穩定性試驗

封裝材料與水氣、紫外光或高溫作用，會產生微量之醋酸，而若醋酸與太陽能電池銀線進行反應，會形成黃棕色之奈米粒子殘留在界面處⁽⁶⁾，從外觀上可觀察出深色陰影痕跡(如圖四(a))。以發電效率而言，初期雖不一定會造成劇烈衝擊，卻會影響消費者對太陽能光電產品之視覺觀感與業者信心度，且對於模組長期可靠度的影響尚不明確。

有鑒於此，此測項是建立模擬銀線色變之誘發成因條件，將封裝材料於特定配方下，靜置浸泡後(如圖四(b))，分析模



▲圖五 銀線色變試驗外觀：(a)競品A；(b)競品B；(c)開發品（彩圖請見材料世界網）

材的光學特性。可看出浸泡後的樣本藉由可見紫外光機台，對封裝材料進行色變行為標定，若於特定波長(424~425 nm)偵測出光學吸收峰，則該封裝材料有較高之機會誘發銀線色變反應。圖五為使用上述試驗設計進行實測結果，不同之樣本經浸泡後產生了深淺不一的顏色變化。而藉由光譜分析之定量結果，可發現相較於競品外觀呈現黃褐色，開發之封裝材經測試後外觀仍呈現透明狀，且經光學分析後，波長(424~425 nm)並未發現明顯的吸收峰值，因此具有極低的誘發機率，相較於商用競品，具有更佳的化學穩定性。

結 論

太陽能封裝材料作為保護發電之元件，同時須承受長期曝曬以及溫、濕度變化的環境考驗，因此必須具備優異的性能條件以及可靠度。另一方面，新材料的開發與導入相當費時，導入產線的可行性更是需要全面的評估，而本文介紹檢測試驗技術可作為換料試驗的初步判定，不需製備成商品化模組，轉而以小模組或單片層

壓方式進行封裝材料性能試驗，包含：絕緣、機械、化學穩定性試驗，有助於簡化評估流程，亦可作為下一階段可靠度試驗之快篩參考依據。

參考文獻

1. International Technology Roadmap for Photovoltaic, ITRPV (2021)
2. IEC 61215-1:2021, Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements.
3. IEC 61730-1:2016, Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction.
4. D. C. Jordan, T. J. Silverman, J. H. Wohlgemuth, S. R. Kurtz, and K. VanSant "Photovoltaic failure and degradation modes: PV failure and degradation modes," Progress in Photovoltaics Research and Applications 25(4), 2017.
5. J. Kim, M. Rabelo, S. P. Padi, H. Yousuf, E.-C Cho, and J. Yi, "A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy", Energies 14(14):4278, 2021.
6. S. Meyer, S. Timmel, S. Richter, M. Werner, M. Gläser, S. Swatek, U. Braun, and C. Hagendorf, "Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules", Solar energy materials and solar cells 121 (2014), pp.171-175.