

乾式真空幫浦技術於太陽能產業的應用實例

Dry Vacuum Pump Technology Application Experiences in Solar Market

林豪傑

Arthur Lin

目前太陽能電池模組的生產主要分為薄膜式 (thin film base) 及晶片式 (wafer base) 兩大生產技術。兩大主流生產技術生產的流程均可區分為：上游基材製備、中游電池單體 (solar cell) 製程及下游的電池模組貼合製程 (solar module lamination)。上述三個主要的太陽能電池模組生產產業鏈中，真空科技的需求均扮演一個相當重要的角色。本文將針對以上產業鏈中部分製程實例，說明真空幫浦所遭遇的挑戰及目前的解決方案。

There are two main technologies applied on the solar cell manufacturing process; one is thin-film based while the other is wafer based. The process can be divided into three phases: preparation of base materials, production of solar cells, and lamination of solar module. In these three phases vacuum technology plays a critical role. In this article, we will elaborate on the challenges regarding the production of solar module in these three phases and their possible solutions at present.

一、前言

全世界對於能源的需求急遽增加，加上石化原料逐漸枯竭，以及對全球氣候急速變遷的影響，使得再生能源的價值逐漸提升。此一趨勢對於地區能源供給已經產生結構性的改變，並且在未來數十年將持續增加⁽¹⁾，目前有三種型態的太陽能模組^(2,3)：

- ① 結晶型太陽能電池：太陽能電池以矽晶圓為基本原料。
- ② 薄膜型太陽能模組：太陽能電池利用玻璃基板做為載具。

- ③ 可撓式太陽能模組：太陽能電池以有機基板做為載具。

對於這三型的太陽能模組，它們擁有各自不同的製作步驟，三者都是於真空下製作，關於真空系統的需求，會根據不同的步驟而有所不同。就整個太陽能模組的生產鏈而言，不論在矽晶片的生產、薄膜層的沉積，以及最後的整體封裝步驟，真空抽氣設備都是必需的。此外，運用在玻璃或有機基板的薄膜技術，對最佳化真空處理解決方案也有強烈的需求。以下將會陳述運用在今日太陽能光電模組生產過程中，各階段製程真空應用上的一則實例。

二、矽晶錠的生產

1. 單晶錠拉晶製程

結晶型太陽能電池主要的基材為矽晶片，可分為單晶及多晶兩種結構，其製造流程如圖 1 所示。多晶矽晶片的晶錠多以鑄造方式為主。此一製程對真空幫浦的挑戰僅有微量的粉塵，本文將不介紹。而單晶系晶片製造的流程中的拉晶製程，最主要用來製作單晶矽的技術是 Czochralsky 法。在此種技術中矽原料被熔融於坩堝中，然後利用拉晶的方式來成長單晶矽。典型的製作流程如下，整個製程需時 3 到 6 天。

- ① 將多晶矽裝填於坩堝中。
- ② 將容器抽真空至 10^{-2} 到 10^{-3} mbar。
- ③ 以氬氣破真空，使壓力升至一大氣壓。
- ④ 抽真空至 10^{-2} 到 10^{-3} mbar，其目的是要移除殘留的微量氧氣。
- ⑤ 漏氣測試。
- ⑥ 注入氬氣，將壓力調整至 10 到 40 mbar。
- ⑦ 將矽熔融，並且調整製程溫度。
- ⑧ 插入矽晶種。
- ⑨ 以非常慢的速度拉出單晶矽。

為了防止單晶矽受到汙染，多晶矽是在石英坩

堝內被熔融。在極高的製程溫度下，熔融的矽會與石英坩堝化合產生氣態的 SiO/SiO_2 。

氣態 SiO/SiO_2 會由熔融的矽中釋出，持續的由氬氣帶走，並且在冷卻後形成易燃性的粉塵。如何安全的處理這些製程中所產生的易燃性粉塵，是真空應用上的一大挑戰。

2. 使用於長晶系統的真空幫浦的需求

用於 Czochralsky 法之真空幫浦操作系統需要極高可靠度，任何製程中的故障都會造成大量的產品損失。此外，另一個風險是融熔狀的矽會與石英坩堝反應產生易爆性的 SiO 粉塵，任何處置上的失誤，均會造成系統或幫浦的損壞，甚至公安上的危害。

幫浦須抽除的物質，除了空氣與氬氣外，還包含了製程中所產生之粉塵。普遍來說，常以構造複雜的粉塵分離器安裝於幫浦吸入端，用來保護真空幫浦 (如圖 2 所示)。這些粉塵分離器需要定期維護及清潔。由於 SiO 粉塵是易爆物，上述的維護工作須遵循嚴格的安全標準作業程序，避免與空氣瞬間直接接觸，產生劇烈的氧化反應，且在清潔工作後，粉塵分離器需要進行漏氣測試，以確保製程中沒有任何洩漏，不會產生非預期的不可控制的劇烈氧化反應。

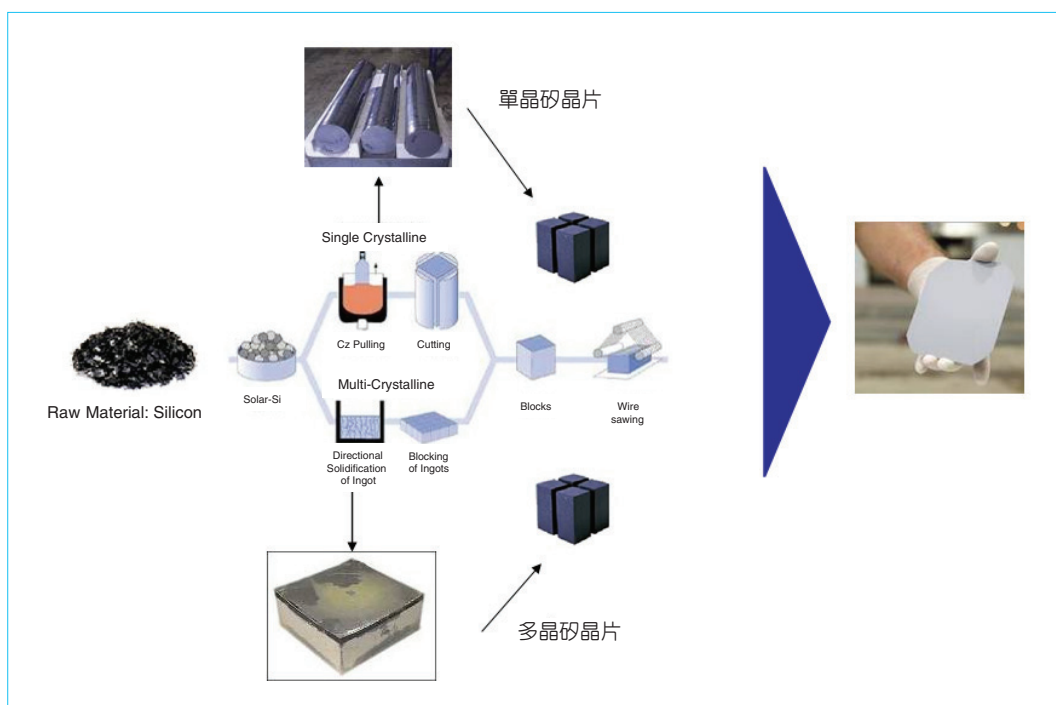


圖 1.
矽晶片的製造流程。

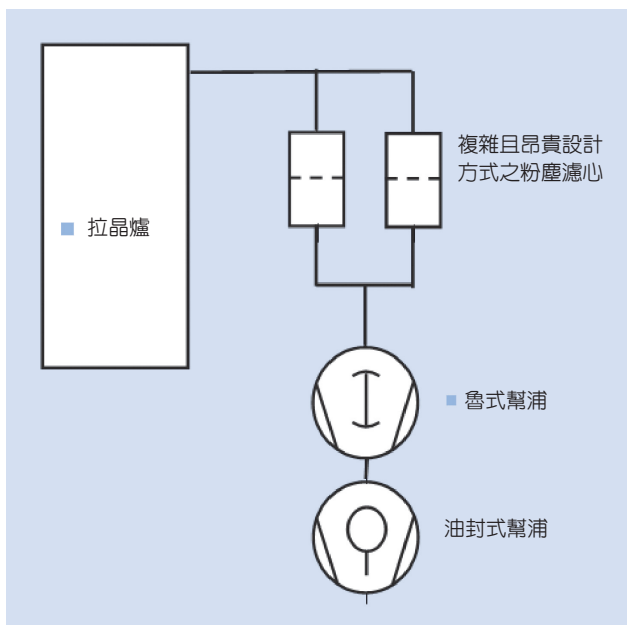


圖 2. 使用於矽晶柱拉晶製程之真空幫浦，其前端粉塵捕捉器之傳統安裝。

3. 螺旋式真空幫浦之應用經驗

為處理大量的製程粉塵，目前採用乾式幫浦是業界的趨勢。在拉晶製程中，幫浦對粉塵傳輸能力有更嚴苛的需求(含不安定的反應性 SiO 粉塵)。此外，合理的運轉成本及高可靠度均是此一製程對幫浦的基本需求。圖 3 為 SP630，其是一款針對此一製程最佳化的乾式幫浦，其對應以上製程應用需求的设计特性列於表 1 中。

乾式幫浦在處理粉塵等異物進入泵腔的應用上，軸承的耐用性是一大考驗。圖 4 敘述用來保護軸封免於粉塵損害所使用之氣體淨化流程的原理。使用低磨損的活塞環，以延長軸封的使用壽命，此外，導入潔氣 (purge gas) 以強氣流阻絕粉塵的入



圖 3. Oerlikon Leybold Vacuum ScrewLine SP630。

侵，避免粉塵留滯，造成軸承的磨耗，縱使在惡劣的製程條件下，幫浦仍可在經歷長時間的操作，而不需進行維護工作。氣鎮裝置導入空氣與粉塵 SiO 反應為較安定的 SiO_2 粉塵，並且藉由氣鎮導入的氣流將粉塵排出幫浦，其運作原理如圖 5 所示。

經產業上的實測經驗驗證，在 Czochralsky 法的傳統製程條件下，超過 12 個月不需維修是可行的。歸因於易於維修的設計，如需要維修，操作員可以在三個小時內完成清理幫浦腔體的工作。圖 6 為轉子在經過 4000 個小時的操作後粉塵累積的狀況。該幫浦在吸入端未安裝粉塵分離器，而是裝置於幫浦的排氣末端(系統裝置如圖 7)。在幫浦的排氣過程中，氣鎮裝置明顯地發揮出傳輸的效果。此外，堆積於螺桿表面的粉塵不具反應性，可以刷子簡易的清除，對於維護的簡易性大大地提升。

綜合以上所述，ScrewLine 擁有下列優點：

- ① 不需在吸入端安裝粉塵分離器。
- ② 操作超過 12 個月後，幫浦不需維修。
- ③ 簡單的現場幫浦清理流程。

需求	Oerlikon Leybold Vacuum ScrewLine SP630 特性			
傳輸粉塵	螺旋的構造允許粉塵的傳輸	進氣端無軸承	利用潔氣 (purge gas) 導入的方式來保護吸入端的密封狀態	以氣鎮裝置改善微塵的傳輸及粉塵的氧化
操作費用低	不需換油	不需在吸入端安裝分離器	維修間隔長及簡單現場清理流程	不需清理吸入端之濾心
高可靠度	監控所有重要操作參數	進氣端無軸承	利用潔氣導入的方式來保護吸入端的密封狀態	

表 1. 乾式幫浦的需求及 SP630 對應的產品特色。

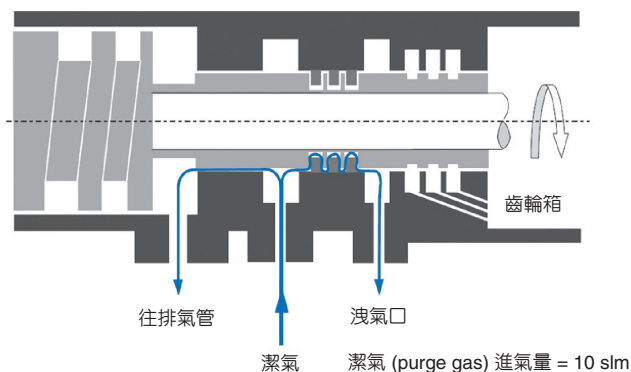


圖 4. 軸封潔氣保護運作的原理示意圖。

三、電池單元 (Cell) 的薄膜沉積製程

一般而言，太陽能光電模組的製造生產可分成晶片型技術和薄膜技術。晶片型晶矽模組仍為現今太陽能電池模組的主流。薄膜技術模組是採用 aSi/ μ c-Si、鎘化碲 CdTe 或 CIS (銅銦硒 CuInSe)/CIGS (銅銦鎵硒 CuInGaSe) 的多層複合疊層技術生產的。表 2 列舉此二類型太陽能光電模組的功能特性比較。

1. 製程類型

不論是玻璃或矽晶片基材，其複層薄膜的沉積有以下各種不同方式：

- ① 導電層：濺鍍、蒸鍍技術、低壓化學氣相沉積 (LPCVD)。
- ② 吸收層：電漿增強化學氣相沉積 (PECVD)、金屬有機物化學氣相沉積 (MOCVD)、蒸鍍技術、濺鍍。
- ③ 保護及抗反射層：電漿增強化學氣相沉積 (PECVD)、濺鍍。

表 2. 晶片型技術和薄膜技術太陽能光電模組的功能特性比較。

	晶矽／晶片型	玻璃薄膜
效能 (%)	14-20	5-13
界面層製程	印刷或電鍍	真空沉積製程
吸收層製程	化學或熱處理製程	真空沉積製程
保護及抗反射層技術 (ARC)	真空沈積製程	n.a.

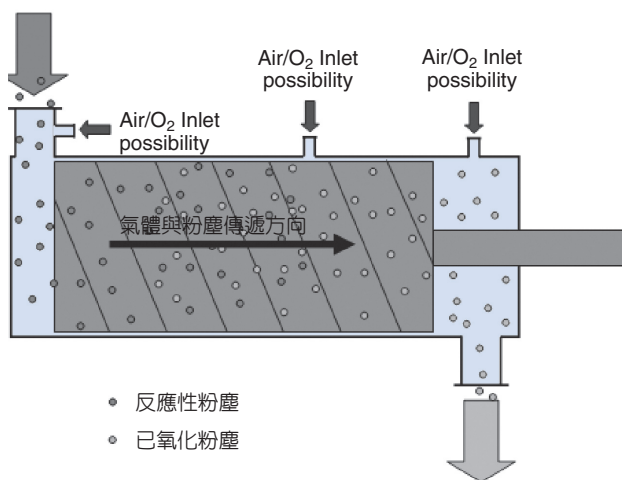


圖 5. ScrewLine SP630 之氣鎮氧化 SiO 反應性粉塵原理。

2. 採用真空製程方法之一般需求

運用在太陽能光電製造機台的真空幫浦必須符合下列設計準則，但這些準則可能會因工具種類、製程步驟以及製程技術的不同，而有不同重要程度的變化：

- ① 處理有毒、腐蝕性、易爆性，以及會產生自然的氣體。
- ② 處理懸浮微粒、粉塵或者是由製程氣體產生的氣層和其反應產物。
- ③ 氫氣和氮氣的高抽氣速率處理。

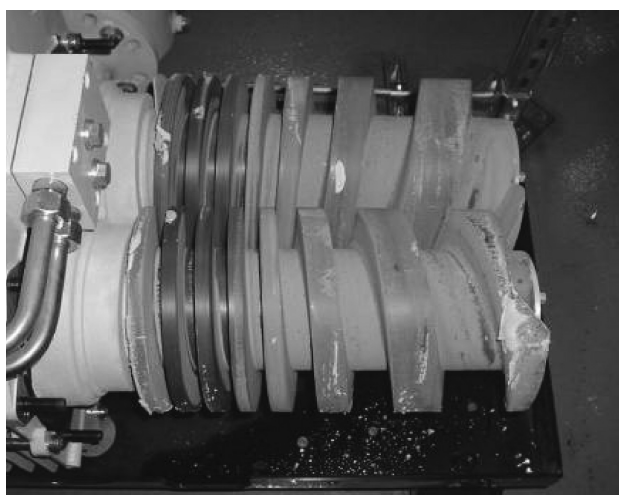


圖 6. 使用於拉晶系統中的 SP630 型幫浦腔體，此系統在吸入端未安裝粉塵分離。

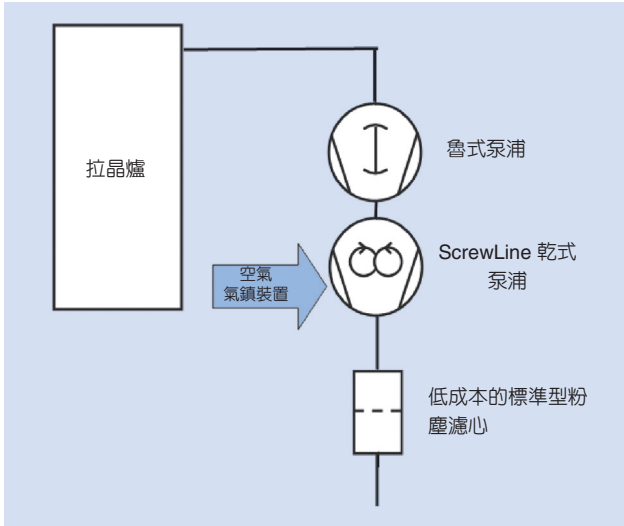


圖 7. ScrewLine SP630 型在排氣端安裝粉塵濾心。

- ④ 氫氣的高抽氣速率。
- ⑤ 進料腔 (load lock) 和傳送腔的短循環抽氣時間。
- ⑥ 高正常運轉時間與高可靠度。
- ⑦ 機體縮小化。
- ⑧ 低維護工時。
- ⑨ 業主耗費成本低。

由於各種不同的製程具有不同的需求，所以為不同應用開發客製化解決方案是極為重要的。以下將針對不同的製程對真空需求，就筆者在工作上之實務經驗分別簡述如下。

(1) 濺鍍製程

用來濺鍍玻璃的機器，包含數個不同真空腔

室。而真空幫浦的選用為確保機台高正常運轉時間的關鍵因素，同時對製程應用特定需求具有良好的理解與充足知識是必要的，如此才能確保其卓越的生產良率。濺鍍製程所使用的產品必須符合以下相關的規格需求：

- ① 為快速將真空腔室抽至所需之底壓，必須提供充足的抽氣速率。
- ② 簡易的產品整合。
- ③ 可處理製程氣體。
- ④ 可為業主提供高正常運轉時間和低消耗成本。
- ⑤ 堅固耐用。
- ⑥ 專為工業級環境條件所設計的，例如空氣中的粉塵或在高相對濕度條件下的高環境溫度。

在多數的鍍膜系統中，太陽能電池的載體材料(基板)是透過進料腔傳送至鍍膜真空腔室。先進的系統設計需在極短的循環時間內將極大的腔體容積抽至傳送壓力，其目的是讓系統能提供最大的產能。

真空技術方面的挑戰就是在短時間範圍的需求下，讓進料腔達到需要的傳送壓力。根據太陽能知名製造廠商及／或標準鍍膜工廠的經驗表示，許多抽氣系統在這些應用條件下面臨過短的運轉壽命，並且需要全面性的維修工作。在大型腔體抽氣的應用中，為達到短時間循環內達到傳送壓力，可將數個抽氣系統以並聯的方式同時運轉(圖 8)。就這樣的應用而言，以多級魯式助抽泵與乾式螺旋幫浦串接整合之後，就可保證最大的抽氣效能和最高的正常運轉工作時間，再以數個這樣的幫浦組並聯運

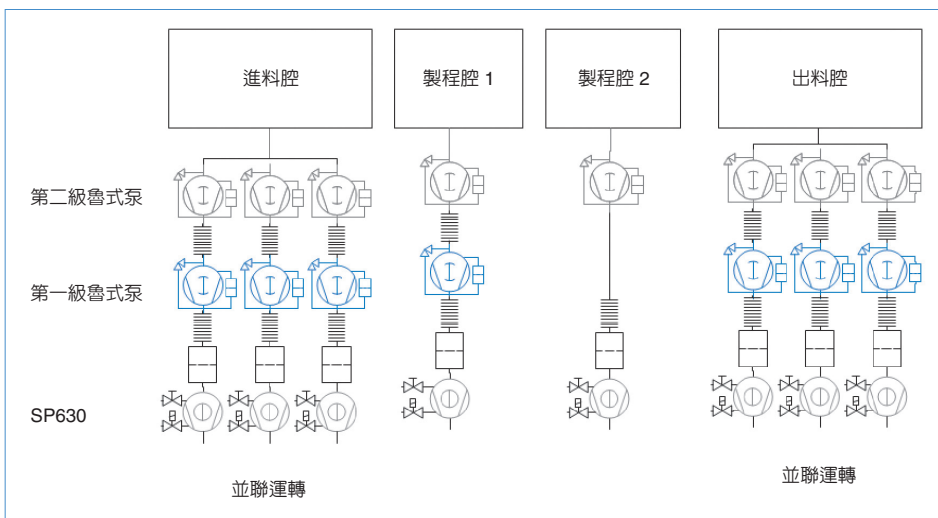


圖 8. 並聯數個幫浦系統運轉，以增加抽氣速率示意圖。

轉，以達到需求的抽氣速率，同時達到所需最短的抽氣時間需求。

(2) PECVD 製程

就薄膜技術的觀點而言，a-Si 非晶矽和疊層型 a-Si/ μ -Si 的沉積對太陽能光電面板的生產而言，是一個關鍵的製程。由於玻璃基板的尺寸較大，也就是在 cluster 型機台上進行相關製程，所以真空系統的整合設計扮演了重要的角色。而它使用的製程氣體包括氫氣和氮氣這類「較輕」的氣體，其抽氣效能會隨著技術和供應商不同，而有所差異。而 PECVD 製程的規格需求為：

- ① 提供對「輕」氣體：如氫氣，最佳化的抽氣速率。
- ② 安全的處理矽甲烷 (silane) 和氮氣的抽除。
- ③ 能夠處理高毒性氣體。
- ④ 可耐 SF₆、NF₃，以及製程中產生之副產物的腐蝕。
- ⑤ 採用堅固的設計，可處理大量的粉塵。



圖 9. 用於 PECVD 製程的 DURADRY/RUVAC 幫浦系統。

⑥ 高可靠度與正常運轉時間。

圖 9 顯示了一個專為 PECVD 機台設計的真空系統範例，運用在此系統的真空幫浦為 ScrewLine、RUVAC 和 DURADRY。此系統所配備的 Profibus (製程現場匯流排) 和監控裝置，可讓幫浦獨立工作，同時還能監控所有臨界參數，亦可與 PECVD 機台通訊。

乾式螺旋真空裝置於進料室使用，其優點為可自大氣壓力啟動，並提供高抽氣速率，達到短抽氣循環時間的需求。製程腔則配備了 DURADRY/RUVAC 幫浦系統，用來抽取混合了矽烷的高氫氣／氮氣氣流。這些幫浦必須能夠處理大量粉塵，以及易爆性／自燃性混合氣。同時還必須能監控所有製程相關參數，以避免無預警的停機，並保證長時間的保養時程，以及避免任何具有對安全性造成威脅的風險。

務必執行整個系統的定期性測漏檢查，其目的在避免任何對安全性造成威脅的風險。另外，存留在幫浦排氣管的活性和有毒氣體，皆在後續的減廢設備中加以處理。還有其排氣管路必須符合製程的需求，以避免管路阻塞和腐蝕。

四、模組貼合製程

將太陽能電池製作成模組的流程包含三個基本步驟：

- ① 將個別太陽能電池焊成列狀。
- ② 將數列的太陽能電池置於上面覆蓋一層黏性層的玻璃基板上。太陽能電池的背面亦覆蓋相同的黏性層及玻璃或塑膠基板。
- ③ 模組置於 150 °C 的真空下，施予一個高的機械壓力，使之夾疊黏合成型。

在製程中，必須滿足下列製程條件：

- ① 在表面的溫度變化必須介於 $\pm 2\%$ 至 5%。
- ② 壓力降至 1 mbar 的時間必須介於 1 至 2 分鐘。
- ③ 終端壓力必須小於 0.5 mbar。

製程可以粗分成下列步驟：

- ① 傳送待壓合模組樣品組件至腔體內。
- ② 將系統壓力降至大約 1 至 2 mbar。
- ③ 將模組於機械壓力下加熱，同時將製程所產生的氣體抽離。

④ 在完成黏性層聚合作用後，將模組取出。
上述全部製程約需 20 分鐘。

整個貼合製程的趨勢為：為了減少層壓時間及製程溫度，快速固化製程及超快速固化 EVA (乙稀醋酸乙稀酯共聚物) 層變得較熱門。此外，為了滿足大尺寸光伏模組的需求，以及增加產能，新一代的層疊式層壓機將很快會上市。

1. 真空幫浦的普遍需求

連接層壓裝置的真空幫浦必須具備高可靠度，同時具較低的維護複雜性。下個世代的層壓器將減少生產線所需之裝置。這就是為何可靠、具快速維護，且可超快速固化 EVA 層變得較熱門。在過去由於油封式幫浦的價錢比乾式壓縮泵便宜，所以被頻繁地使用。可是在此同時，我們卻可以證明使用乾式壓縮幫浦能夠減少相當的維護複雜度，處理廢油的費用可以減少，並且可以有效地提升可靠度。

2. 油式幫浦於模組貼合製程中所遭遇的問題

在層壓的步驟中，黏性層在大約 140 至 150 °C 下進行交聯反應，並且藉由真空的方式確保不會破壞模組品質的氣泡形成。

EVA 是現今普遍選用為黏性層的材料。將層壓裝置降壓的同時，除了空氣外，EVA 黏膠之殘留物、聚合物單體及由組織交聯劑中所含之過氧化物所形成之二氧化碳，會進入幫浦之腔體中，並溶解於腔內的潤滑油。而使用快速固化製程及超快速固化 EVA 交聯反應製程中，進入幫浦之腔體內的副產物數量也會隨之增加。



圖 10. 製程殘留物附著於幫浦表面。

在油封式幫浦的例子中，這些物質會與幫浦潤滑油產生反應，這會造成幫浦油快速劣化，以至於在某些例子中，每二百小時的運轉時間後就必須進行換油的工作，以保持幫浦正常運轉。如不嚴格進行此一換油時程，系統可能會造成非預期之停工，部分甚至會造成幫浦徹底損害 (如圖 10 與圖 11 所示)。

3. 螺旋式真空幫浦之應用經驗

乾式幫浦在模組貼合的製程中，由於腔體內並無潤滑油，因此 EVA 黏膠之殘留物、聚合物單體及由組織交聯劑中所含之過氧化物所形成之二氧化碳等製程副產物會以氣態的方式由幫浦排氣端排出。因為製程所產生的氣體並不會經由幫浦腔體接觸到齒輪油，因此乾式壓縮幫浦不需要製程相關的維護工作。假設不能保證上述條件，那齒輪油就必須定期更換，並且需要對於用於機器密封的元件加以維護。

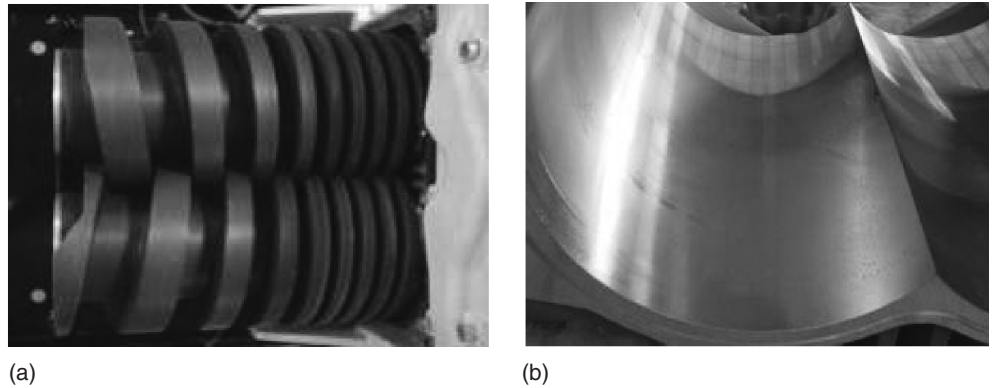
圖 4 描述用來分隔幫浦與齒輪箱的氣體排除原理，這個設計可以確保由層壓機所排出的氣體，不會經由幫浦腔體接觸到齒輪油。使用無磨損的活塞環密封，將其與排除氣體裝置結合，這樣的裝置在需要排除超快速固化所產生氣體的要求製程下，甚至可以達到長時間運作而不需維修。

以這樣非常可靠的設計原理操作，只需年度性更換齒輪箱油，為了防止腔體內因為熱退化所產生之副產物增加，腔體表面的溫度必須越低越好。幫浦中的兩個螺旋轉子若為直接油冷，熱可以高效率地由螺旋傳導至冷油，如此一來表面的溫度可以降



圖 11. 層壓製程所使用幫浦油之劣化。

圖 12.
ScrewLine SP630 的螺旋
(a) 與外罩 (b) 在經過 12
個月的操作後的表面沉
積狀況。



低。圖 12 為 ScrewLine SP630 的幫浦在經過 12 個月於標準模組貼合製程運作後，將腔殼拆解檢視狀況。由照片所示的結果可證實，大部分的副產物均被幫浦所排除，表面並無明顯的沉積狀況。

假設必須清理幫浦，利用懸臂樑設計的優點，可以將幫浦的外罩輕易地拆開，以便於清理幫浦腔體內部。這個現場的維修工作僅需少於兩小時的時間，並且不需任何特殊技術及工具 (如圖 13 所示)。

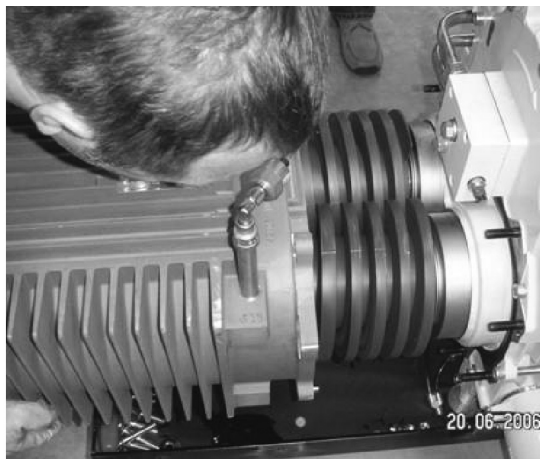


圖 13. ScrewLine 幫浦現場拆解示意圖。

五、總結

對太陽能光電模組而言，真空是一個重要的促成因子。針對不同生產步驟，個別需求所採用的客製化產品是絕對必要的，這樣做的目的是為了達到高工作時間，並避免任何對安全性造成威脅的風險。

參考文獻

1. *Handbook of PV Science and Engineering*, John Wiley & Sons (2003).
2. Z. I. Alferov, V. M. Andreev, M. B. Kagan, I. I. Protasov, and V. G. Trofim, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, **4**, 2378 (1970), [*Sov. Phys. Semicond.*, **4**, 2047 (1971).]
3. E. Lorenzo, G. Araujo, A. Cuevas, M. Egido, J. Minano, and R. Zilles, *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*, Earthscan Publication Ltd. (1994).

-
- 林豪傑先生為國立清華大學化學工程碩士，現任台灣歐瑞康萊寶真空公司亞洲區應用技術支援專案經理。
 - Arthur Lin received his M.S. in chemical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a project manager of Asia Sales Support Department at Oerlikon Leybold Vacuum Taiwan.