

CIGS 基板於蒸鍍機不同張力與非真圓轉輪狀況 非線性變形時域分析

全湘偉, 邱垂鈺, 劉導淳, 潘文旺, 陳燦桐

中山科學研究院第二研究所結構熱傳組

摘要

CIGS 蒸鍍機運作過程中為維持產品品質，基板之垂向變形量必須控制於設計期望值範圍內，本論文配合研發需求，針對不同張力與非真圓轉輪條件，考量基板張力之非線性力學時域反應，採用 ABAQUS 軟體進行非線性分析驗證，分析基板於傳動過程之垂向變形分佈是否滿足設計需求。

關鍵字：CIGS、張力、非真圓轉輪、蒸鍍機

ABSTRACT

In order to keep the quality control of products for CIGS roll-to-roll system, the deformation of substrate needs to minimize in the transmission process. Because the tension force and non-circular roller conspicuously influence the magnitude of substrate deformation, ABAQUS was used to investigate the physical response of nonlinear transient analysis. In this paper, the relation between tension force & non-circular roller and substrate deformation was efficaciously discussed, and the results of FEM were to put to use effectively.

Keywords: CIGS, roll-to roll system, tension, nonlinear, non-circular roller

一、緒論

太陽能電池可分成結晶系及非結晶(薄膜)系兩大類，CIGS ($Cu(In_xGa_{1-x})(S_ySe_{1-y})_2$) 因具有高光學吸收係數，以及可調整的能隙，而成為現有薄膜系太陽能吸收物質的研究重點[1~4]。典型 CIGS 太陽能電池的結構如圖 1 所示[5~6]，主要是由鉬(Mo)層背電極、CIGS 吸收層、一層薄的緩衝層(CdS、ZnS 或 In_2S_3)，以及由 Aluminum 摻雜 Zinc Oxide 所形成的透明導電層之表面電極組成。傳統上 CIGS 太陽能電池是以鈉玻璃做為基板，並在其上方堆疊沉積不同功能的薄層狀結構，而本論文則是以開發軟性基板(或稱為可撓式基板)CIGS 太陽電池的關鍵技術為研究標的，軟性基板允許捲繞式(Roll-to-Roll)的生產方式(圖 2 所示[7])，生產成本可以大幅降低，且軟性基板在特定狀況的應用也較合適，如光電池組合而成的建築、太空產業的

應用等。

在軟性基板捲繞式(Roll-to-Roll)的生產方式中，蒸鍍機(圖 3 所示[5])的主要功能是將經過鍍鉬處理後的基材渡上 CIGS 層，捲帶(基材+鉬層)由蒸鍍機的放料輪釋放，在真空腔完成 CIGS 層的蒸鍍後，經過轉向輪、張力輪、中驅輪，再以收料輪捲繞成網備用，在前述的輸送製程中，捲帶須保持適當的張力以確保捲帶的平整，而為防止捲帶與轉輪界面的滑動，捲帶與轉輪界面也須有足夠的接觸角度。由於軟性基板張力值設計是否恰當、轉輪是否維持在真圓以及基板傳動速度條件對產品品質影響甚大，在本論文中，主要是針對不同張力與非真圓轉輪條件，考量基板張力之非線性力學時域反應，採用 ABAQUS 軟體進行非線性分析驗證，分析基板於傳動過程之下垂向變形分佈是否滿足設計需求。

二、分析前之考量與有限元素之模擬

基本上，針對捲繞式(Roll-to-Roll)生產方式中軟性基板設計外型，基材渡上之CIGS層對SUS 430不鏽鋼基板結構勁度影響甚微，因此只需建立基板結構之有限元素FEM [8]分析模型即可，本分析乃採用二維殼元素模擬其物理反應。本文所進行之相關力學分析工作主要是使用I-DEAS程式[9]為FEM分析模型前後處理工具，而以ABAQUS程式[10~12]為結構非線性與暫態分析計算工具。檢視非真圓轉輪傳動過程，由於轉輪半徑 R 並非定值，會發現轉輪垂向 ΔR_z 與軸向 ΔR_x 變化對基板之影響模式不同， ΔR_z 變化會使基板之垂向束制條件呈現時域變化，而 ΔR_x 變化會使基板之張力呈現時域變化，若要同時考量，需建立完整的轉輪與基板FEM模型，而且需考量轉輪與基板間之接觸行為，分析問題會變得十分複雜而不易求解。在本分析則以工程分析觀點模擬，將其簡化成為兩個步驟分別探討其影響，在 ΔR_z 變化狀況，分析模型上施加的是端點位移時間函數，而在 ΔR_x 變化狀況，分析模型上施加的則是張力時間函數，此時端點垂向位移仍維持定值。

就結構分析與測試觀點而言，現場試驗量測工作可針對實體量測所需之力學實測值，但由於其量測點有限且無法事先預知最大反應點所在位置，因此其量測結果屬於局部片段型態，無法完全掌握結構體之整體力學行為；而定性化之分析工作雖能經由數學模型找出結構反應最劇烈區域，進行適當之修正設計以減低其力學反應值以滿足規格需求，但在進行分析工作過程中所涉及之介面參數與環境負荷條件卻不易於事前準確預測，仍有賴實測值之輔助校正，故結構分析與測試工作二者乃相輔相成不可或缺。因此，即便試驗工作所量測之力學反應值已可合於規格需求，但亦只宜做為初步研判依據，並無法完全確保其餘站位之力學反應值亦可合於規格需求，而本文所提供之分析模式應可合理解決上述問題。

三、CIGS 不鏽鋼基板非線性變形分析

3.1 分析背景說明

對任一機械結構而言，其所可能遭遇之負荷型態相當複雜，在不同工作條件下，各組件之物理反應各有所不同，亦即在不同之負荷模式下，其傳力行為亦有所差異，對各組件之力學反應有不同之影響，因此在做結構分析工作之前，首先必須先探討其工作環境下所可能遭遇之負荷，去蕪存菁而簡化之，方能完全掌握其合理之物理反應。

在本論文蒸鍍機機台空間配置設計中，基板之傳動會經過機台內部之放料輪、張力輪、轉向輪、中驅輪、張力輪與收料輪，此時基板(捲帶)會承受之張力設計值為 F (圖4所示)。在分析案例中，基板之材料為SUS 430不鏽鋼，寬度為350mm，厚度為100 μ m，蒸鍍機下半部張力輪與轉向輪間之基板懸空長度約5400mm，當基板傳動過程由於自重作用會有明顯之下垂變形，因此張力值 F 設計是否適當將明顯影響機台研發之成功與否。

3.2 基板於不同張力狀況之垂向位移分佈

本分析之基板厚度只有100 μ m，故只需以殼元素建立簡單分析模型即可，由於張力作用會使430不鏽鋼基板產生非線性力學反應，故採用ABAQUS進行非線性分析驗證。由於欲分析之基板厚度太薄類似薄膜結構，無法直接承受自重，若同時於FEM分析模型中施加重力與張力，會導致無法求解狀況，故宜分成兩個分析階段，首先施加基板張力以獲得正確之結構勁度，然後再於第二階段施加重力，即能求得正確之非線性力學反應。依據分析結果顯示：於常溫(25 $^{\circ}$ C)狀況下，當430不鏽鋼基板之張力值為80 kgf時，其垂向最大位移值為12.7mm，發生於張力輪與轉向輪中間位置，至於基板於不同張力狀況之垂向位移分佈則如圖5所示。

3.3 製程溫度環境之影響

依據MIL-HDBK-5 [13]於高溫(550 $^{\circ}$ C)狀況下，430不鏽鋼基板之垂向位移值與常溫狀況相同，此乃由於張力作用使基板結構勁度增加幅度遠高於無預力作用時之結構勁度所致，因此雖然 $E_{550^{\circ}\text{C}}$ 值只有 $E_{25^{\circ}\text{C}}$ 值的80%左右(圖6所示)，但其效應並不顯著。

四、非真圓轉輪考量張力狀況之非線

性變形時域分析

4.1 分析背景說明

除了張力設計值會影響基板傳動過程之垂向變形分佈，在前述的輸送製程中，捲帶須保持適當的張力以確保捲帶的平整，而為防止捲帶與轉輪界面的滑動，捲帶與轉輪界面也須有足夠的接觸角度。放料輪、中驅輪及收料輪分別由三個伺服馬達帶動，利用轉輪與捲帶之間的界面摩擦力帶動捲帶，使捲帶保持固定的輸送速度，放料輪及轉輪之間的捲帶張力 F_2 以位於放料輪前方的張力感知器測量，並將測量值回饋給放料輪伺服馬達，經由調整放料輪的轉速來控制 F_2 ；收料輪及中驅輪之間的捲帶張力 F_1 以位於收料輪後方的張力感知器測量，經由調整收料輪伺服馬達的轉速來控制 F_1 ，捲帶張力 F 的目標值為 80~100kgf (理想狀況下， $F_1 = F_2 = F$) [14]。然而當轉輪由於製造公差導致精度無法維持真圓條件時，捲帶張力值即會產生跳動而影響基板傳動過程之垂向變形亦非定值，將嚴重影響產品品質。在本論文中配合研發需求，假設轉輪半徑 ΔR 之變化為 $0.1\sin\omega t$ 型態， ω 為 Circular frequency，以本機台轉輪轉速 20cm/min，轉輪直徑 200mm 而言， $\omega = 2\pi/T = 0.03333$ ，考量基板張力之非線性力學時域反應，分析基板於傳動過程之下垂向變形時域分佈。

4.2 不鏽鋼基板於真圓轉輪 80 kgf 張力狀況振頻振模分析

就結構力學理論而言，結構承受不同型態動態負荷之反應與結構之自然頻率關聯密切，因此在進行結構動態分析之前，振頻振模分析或試驗資料之取得有其必要。根據本文之振頻振模分析結果顯示：於真圓轉輪 $\Delta R = 0$ 且基板張力值為 80 kgf 狀況下，430 不鏽鋼基板前三個振頻分析值分別為 4.97734 Hz、44.8889 Hz、125.147、246.3998 Hz 與 409.2678 Hz。

4.3 非真圓轉輪 $\Delta R_z = 0.1\sin\omega t$ 且基板張力值仍為 80 kgf 狀況下，基板於不同時間狀況之變形分佈

在本分析中，由於欲分析之基板厚度太薄類似薄膜結構，無法直接承受自重，無法同時於 FEM 分析模型中施加靜態負荷與非真圓轉輪動態邊界時域變化，故宜分成三個分析階段，首先施加基板張力以獲得正確之

結構勁度，然後再於第二階段施加重力，而後再於第三階段施加動態邊界 $\Delta R_z = 0.1\sin\omega t$ ，即能求得正確之不鏽鋼基板非線性力學時域反應。於非真圓轉輪垂向變化為 $\Delta R_z = 0.1\sin\omega t$ 且基板張力值仍為 80 kgf 狀況下，基板於不同時間狀況之變形分佈如圖 7 所示，基板之 δ_{\max} 值振盪範圍在 12.6~12.8 mm 區間，此乃由於非真圓轉輪尺寸變化速率與基板之自然頻率(週期)差距甚大，結構動態放大因子不明顯之故。

4.4 非真圓轉輪 $\Delta R_x = 0.1\sin\omega t$ 且基板張力值仍為 80 kgf 狀況下，基板於不同時間狀況之變形分佈

如同 4.3 節所述，本分析亦宜分成三個分析階段，首先施加基板張力以獲得正確之結構勁度，然後再於第二階段施加重力，而後再於第三階段施加動態邊界 $\Delta R_x = 0.1\sin\omega t$ ，即能求得正確之基板非線性力學時域反應。於非真圓轉輪軸向變化為 $\Delta R_x = 0.1\sin\omega t$ 狀況下，基板於不同時間狀況之變形分佈如圖 8 所示，基板之 δ_{\max} 值振盪範圍在 10~17.3mm 區間，上下振盪程度遠較 $\Delta R_z = 0.1\sin\omega t$ 狀況嚴苛，此乃由於基板張力值會隨 ΔR_x 值變動而有所調整之故。

五、結論

就 CIGS 太陽能機台設計而言，由於可以大幅降低生產成本，軟性基板允許捲繞式(Roll-to-Roll)的生產方式是個相當好的選項，目前已經廣受業界重視。然而為維持產品品質，轉輪張力值設計必須適當，防能使基板之垂向變形量控制於設計期望值範圍內，成為研發工程師所需面對之挑戰。為解決上述問題，本論文配合研發需求，以工程分析觀點，簡化所欲探討之問題，針對不同張力與非真圓轉輪條件，考量基板張力之非線性力學時域反應，成功以 ABAQUS 軟體進行非線性分析驗證，掌握基板於傳動過程之下垂向變形分佈，預先研判是否滿足設計需求。

六、參考文獻

- [1] SeJin Ahn, KiHyun Kim and KyungHoon Yoon, Nanoparticle derived Cu(In,Ga)Se₂ absorber layer for thin film solar cells, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 313–314 (2008) 171~174

- [2] Vijay K. Kapur, Ashish Bansal, Phucan Le and Omar I. Asensio, Non-vacuum processing of $\text{CuIn}_{1-yx}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ solar cells on rigid and flexible substrates using nanoparticle precursor inks, *Thin Solid Films* 431~432 (2003) 53~57
- [3] I. Riedel, J.Riediger, J.Ohland, J.Keller, M.Knipper, J.Parisi, R.Mainz and S.Merdes, Photoelectric characterization of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{S}_2$ solar cells obtained from rapid thermal processing at different temperatures, *Solar Energy Material & Solar Cells* 95 (2011) 270~273
- [4] 陳昱廷, 物理氣相沉積 CuInSe_2 薄膜之模擬與分析, 國立中山大學電機工程學系碩士論文, 2002
- [5] 潘文珪, 軟性基板印製式 CIGS 太陽能電池元件製作設備適用性分析報告, 中山科學院二所結構熱傳組研究報告
- [6] 潘文珪, 軟性基板印製式 CIGS 太陽能電池元件製作設備開發可行性評估報告, 中山科學院二所結構熱傳組研究報告
- [7] Kanti Jain, Marc Klosner, Marc Zemel, and Shyam Raghunandan, Flexible electronics and displays: High-resolution, roll-to-roll, projection lithography and photoablation processing technologies for high-throughput production, *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, VOL. 93, NO. 8, 2005
- [8] Zienkiewicz O.C. and Morgan K., *Finite elements and approximation*, Pineridge Press, 1983
- [9] *I-DEAS User's Guide*, Finite element modeling, SDRC
- [10] *Abaqus Analysis User's Manual*, SIMULIA
- [11] 愛發股份有限公司, *Abaqus 實務入門引導*, 全華圖書股份有限公司, 台北, 2007 年 11 月
- [12] 愛發股份有限公司, *Abaqus 進階動力學*, 全華圖書股份有限公司, 台北, 2007 年 3 月
- [13] MIL-HDBK-5, *Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures*, Department of defense handbook
- [14] 邱垂鈺, CIGS 蒸鍍機界面特性分析及馬達選用評估, 中山科學院二所結構熱傳組研究報告

七、圖片

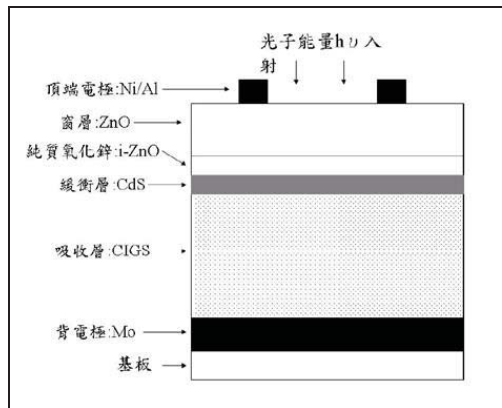


圖 1 CIGS 太陽能電池的組成示意圖[4]

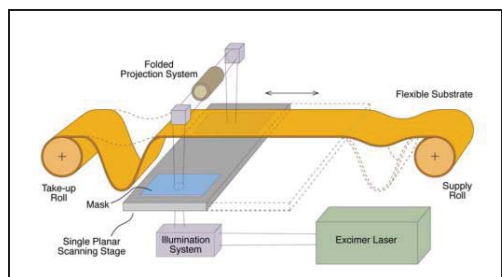


圖 2 軟性基板捲繞式(Roll-to-Roll)生產方式示意圖[7]

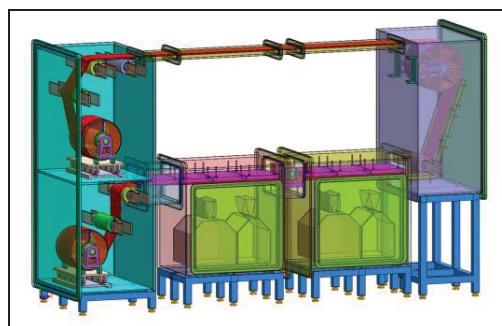


圖 3 CIGS 蒸鍍機空間配置示意圖[5]

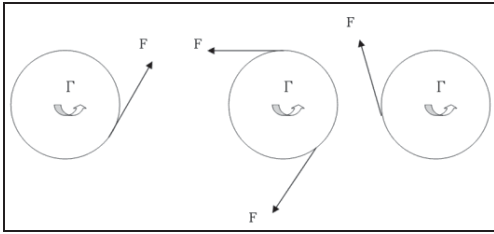


圖 4 放料輪(左圖)、中驅輪(中圖)及收料輪承受的外扭矩示意圖[14]

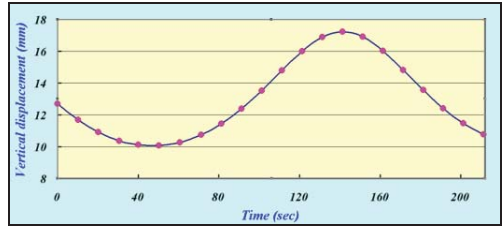


圖 8 高溫狀況 430 不鏽鋼基板於 $\Delta R_x = 0.1 \sin \omega t$ 之垂向位移分佈

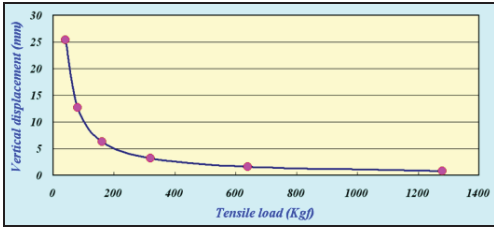


圖 5 基板於不同張力狀況之垂向位移分佈

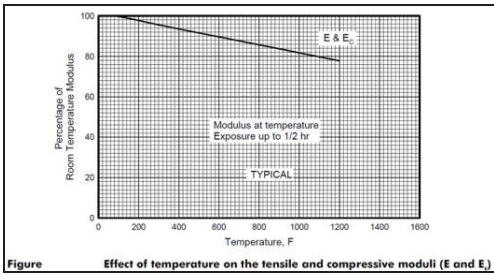


圖 6 不同溫度條件不鏽鋼材料楊式係數 E 值之變化圖 [10]

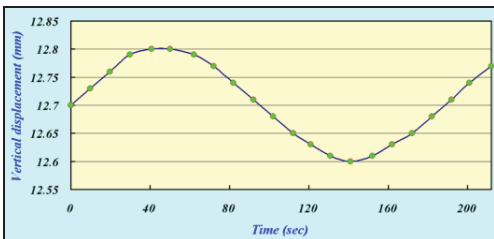


圖 7 高溫狀況 430 不鏽鋼基板於 $\Delta R_z = 0.1 \sin \omega t$ 之垂向位移分佈