

矽晶太陽光電模組機械荷重之數值分析

Numerical Analysis of Mechanical Loads on the Solar Photovoltaic Module

賈維桓, 胡宣德, 林福銘

國立成功大學土木工程研究所

摘要

太陽能電池在自然環境下，容易受外力影響導致電池模組的破壞與鏽蝕。其中用來固定電池，架設於模組四周的鋁框在外力的影響下則會產生脫框、挫曲變形等破壞。本文利用電腦輔助軟體 Abaqus 建造太陽能電池模組有限元素模型進行載重分析。根據規範之負載(2400Pa、5400Pa)針對不同鋁框斷面樣式、框體高度、接觸面設置摩擦條件、電池模組架設方式等條件下初步分析結構受載之行為模式以及接觸區滑脫現象。最後結論給予分析結果之整理，建議較佳之框體結構與架設方式，並標示應力極值發生位置以及各種模組變形外貌以及材料破壞區域，提供鋁框結構設計上的參考。

關鍵字：有限元素法、太陽能電池、太陽能板

ABSTRACT

PV modules may be damaged and corroded by the constantly changing temperature, snow, gusts and rains due to the climate differences and natural forces around the world. The supporting for PV modules is made of aluminum and will deform, and buckling due to the forces. In this article, the finite element program Abaqus, is used to build the model for numerical analysis. In order to understand the deformation modes and the stress distribution of the aluminum frame in different conditions, different aluminum section types, frame heights, contact frictions, different specification loading and mounting methods are considered. According to the preliminary analysis of the loading behavior and the slipping distance. In the conclusion, we recommend better frame structure and mounting method. Then the location of module deformation, the damaged area and where the maximum stress happens are shown. In the long run, we can provide suggestions for improving the structure and the mounting design of aluminum frames for the PV module.

Keywords: Finite element, PV modules, Solar panels

一、前言

太陽能模組之鋁框為薄板組成的中空結構，當自然外力作用隨著電池模組傳遞到鋁框上使其產生挫曲或彎曲。電池模板在與鋁框接合的邊緣處會因抵抗變形而產生彎矩導致向上翹曲變形，翹曲後的鋁框容易產生脫框現象。而裝設於托架上的鋁框拘束面積僅包含與桿件結合區域，導致應力分布的情況較複雜或激烈。鑒於鋁框有多種破壞情

形，規劃探討鋁框抵抗破壞的最佳設計斷面，包含高度變化、單片開放型框體與雙片封閉型框體，並討論模組脫框程度與設計斷面之間的關係。

二、研究方法

本研究主要探討電池模組載重之應力與位移變化，針對此種結構分析的物理問題及模擬模型的複雜程度，選擇有限元素法做

為分析工具，並利用牛頓法收斂求解。有限元素法對於結構分析的問題近幾年逐漸純熟，其利用網格化(mesh)的特點將連續的結構畫分為離散的元素，可根據所需調整網格密度，提升模擬問題效率。

選擇有限元素軟體 Abaqus 作為本研究的分析工具，利用 CAE 能有效的建立模型與編輯，其圖形介面方便對模型的各個拘束區域或是接觸部分進行確認與更改，網格劃分也能夠清晰表現，能夠有效減低定義參數與條件上的困難提高分析的效率。

三、太陽能電池模組

3.1 太陽能電池種類

太陽能電池中以材料作為分類依據，主要可區分為矽晶片與化合物兩種，而矽晶電池中以矽晶排列方式可概括區分為單晶矽(Single Crystal)、多晶矽(Poly Crystal)與非晶矽(Amorphous Silicon)三種類型，前兩者亦稱為矽晶圓太陽能電池，非晶矽為薄膜型的矽晶太陽能電池。非矽晶的化合物太陽能電池中包含了三五族化合物電池、二六族化合物電池、有機太陽能電池等(圖 1)。

3.2 電池模組結構

太陽能電池模組的架構包含電池板與鋁框結構，電池板是由多種材料層層疊合而成，除了發電材料不同之外依照疊層方式分成多個類型，如單層玻璃、雙層玻璃等。單層玻璃電池板最上層即為玻璃基板，負荷主要的外力因素並阻絕空氣或水分接觸，中央層是 EVA(Ethylene-vinyl acetate)材料薄層，用於絕緣與保護矽晶電池，矽晶電池被 EVA 緊緊包裹其中，最底層為作為背板的密封材料。在進行組裝時結合插槽處使用 MS-聚合物(硅烷封端聚醚)進行黏接，減少空隙的影響與脫框產生。

3.2.1 太陽能玻璃

太陽能玻璃亦稱為光伏玻璃和節能玻璃，主要使用於太陽能發電板，是一種低鐵量壓延玻璃，並於表面塗上一層抗反射膜塗料(Anti-reflective Coating)減少陽光反射情況。玻璃基板所佔厚度約全域的一半，依照要求來選擇使用的規格。考量使用之玻璃必須覆蓋於矽晶電池上方，除了希望具有高強度、高穩定性保持電池本身的安全之外，也

希望玻璃具有高度的透光率以及低反射率，並且能夠消除不必要的折射，以增加太陽能電池的發電效率。

3.2.2 EVA 材料

EVA(Ethylene-vinyl acetate)為乙烯與醋酸乙烯的無規共聚物，是一種帶有熱塑性質的高分子聚合物。EVA 材料耐熱、耐寒、抗潮濕與氣候變化，在常溫狀態下無黏性且具抗黏性，未經改良的 EVA 為熱塑性材料，用於太陽能電池封裝時添加有機過氧化物交聯劑，交聯劑加溫時產生自由基，幫助 EVA 分子結合，使 EVA 材料經過一定程度熱壓後產生固化，層壓過程中 EVA 熔融黏接矽晶片經過層壓後膠著固化，達到封裝的效果，幫助矽電池抵禦大氣變化，固定銅線電路並提供絕緣保護。固化後的 EVA 外觀上完全透明且具有高度透光性，易於太陽光的穿透，是做為矽晶片電池理想的封裝材料，亦方便與上層玻璃基板及下方的封裝材料利用真空層壓技術黏合成電池板。

3.2.3 矽晶圓電池

矽晶圓電池為發展最久且最完整的太陽能電池系統，以矽晶電池結構上分為單晶矽電池與多晶矽電池兩大類。單晶矽電池原子排列具有規則，晶圓結構完整，不易產生自由電子與電洞(electron-hole)結合情況，發電效率相對高，但礙於晶圓結構形式，多截裁為圓型或準方型(帶有截角)，故在鋪設時面積無法達到最佳利用，依照結構分類可分為一般接合型構造、淺接合型構造、以及背表面場型構造等三種，目前市場單晶矽電池模組發電轉換效率為 12~20%。

多晶矽電池是多種排列的單晶矽交疊組成，在結晶過程中並未提供足夠時間型成單一結晶，晶體結構之間含有雜質，故製程較便宜，適合生產作民生使用。其中雜質會阻礙自由電子與電洞於矽晶之間傳輸，且晶體界面處原子鍵結脆弱，經過紫外線破壞而形成懸吊鍵(Dangling Bond)，懸吊鍵會與電子結合而阻礙電子傳輸，使得多晶矽電池發電量不及單晶矽電池；由於無晶體結構上的限制，可裁切為正方形達到鋪設時最大面積的利用。依照結構分類可分為塊狀、薄膜狀以及球狀三種。塊狀多晶矽電池製程簡易成本較低，薄膜狀多晶矽電池由於是以化學沉

積方式直接形成於電池基板表面，製程相對複雜成本較高，目前市場單晶矽電池模組發電轉換效率為 10~18%。

3.2.4 背板

位於太陽能電池模組底層的密封材料主要訴求為阻隔水分、防止靜電產生、抵禦氣候變化。最具代表性為 TPT 材料，TPT 材料是由 PVF (聚氟乙烯薄膜)/PET (聚脂薄膜)/PVF 組成的三層結構，位於外層的 PVF 具有優秀的抗腐蝕能力，經過處理後的 PVF 與 EVA 材料具有良好的黏著性，中層的 PET 能提供絕緣的效果。PVF 抗老化，具延展性亦擁有優秀的耐候性能達到良好的密封效果，延長太陽能電池之使用時限。密封前的 PVF 材料必須防止受潮，受潮後的 PVF 經過陽光照射將使水分轉化為水蒸氣卻又遭受密封而無法排出，使得於壓層中產生氣泡，導致內部結構的破壞。近年來由於規格與製造商的關係，已逐漸開發新的替代背板封裝材料，如 TPE(Thermoplastic Elastomer)材料與多層 PET 的複合材料。

3.2.5 鋁框

作為固定與支撐太陽能電池模組的鋁框，大多數使用 6000 系列鋁合金，即鎂矽鋁合金。鋁合金相較碳鋼更為質輕且防鏽，雖抗腐蝕性不如純鋁，在乾燥的環境下鋁合金能夠於表面上形成防鏽的保護膜，對於長期裝設於戶外的太陽能電池作為有效的安全保護。根據合金元素含量又分成 6061、6063、6066...等種類，而太陽能鋁框主要使用為 6063 鋁合金，此合金機械性質、焊接性、加工性都相當優秀，其機械性質主要取決於回火與熱處理，根據回火程度主要可分為 O、T1、T4、T5、T6...等不同用途需求之強度類別，未經回火過程的 O 鋁合金具有最佳的延展性，但機械性質較不理想。T4 具有較佳的延展性與較低的強度，T6 強度最佳延展性最低，T5 置中，此三種為最常見之太陽能電池鋁框的合金種類。

四、有限元素模型與收斂性分析

4.1 建立模型結構與參數

採用四分之一之有限元素模型進行分析，藉由邊界條件設定對稱關係來得到全域

之結果。建構的電池板模型原尺寸為 12X6 片矽晶電池模組。上層玻璃厚度 4mm，中層 EVA 包含夾層內的矽晶片厚度為 0.9mm，底層 PET 厚度 0.25mm，矽晶電池為長寬皆 156mm 之正方形，厚度 0.2mm，各片電池間隔為 2mm，位於 EVA 材料厚度中央處，各層材料排列示意(圖 2)。

鋁框同樣建立四分之一模型，考慮斷面變化分為開放型與封閉型鋁框，在框高變化進行調整，將原尺寸 40mm 之框高增加 10mm 作為高框，減少 10mm 作為低框，開放型框由高至低設定為 Type O50、Type O40、Type O30，封閉型框由高至低設定為 Type C50、Type C40、Type C30。共六種尺寸鋁框模型(圖 3)，其厚度皆為 2mm。

鋁框、玻璃基板、EVA 材料、矽晶片、PET 背板使用材料之揚氏模數、柏松比與材料強度(表 1)。

4.2 元素選擇

太陽能電池模組結構規則，為方便網格劃分以及提高分析精度，考慮採用線性六面體實體元素。而實體元素主要可分為線性元素以及二次元素，其中各包括六面體實體元素、楔形實體元素以及四面體實體元素，可依據模型結構外型變化選擇使用。各種結構元素亦具有不同性質之子種類，降積分元素(Reduced Integration)、非協調元素(Incompatible modes)、混和元素(Hybrid)等。一般來說二次元素在各邊上增加一節點，元素變形模式為非線性，可模擬較細微之彎曲變形使其精確度較線性元素為佳，但分析時間較長且若為接觸分析時，二次元素在接觸面上相較於線性元素較易產生分析耗時過長之情況，故在此分析中不考慮使用 C3D20R 進行模擬，僅試作部份結果進行參考。

4.2.1 剪力閉鎖(Shear Locking)

真實材料接受純彎作用後會造成如(圖 4)a 之變形，當使用二次元素時能夠較精確模擬出受力結果(圖 4)b，而使用線性元素時，會產生如圖(圖 4)c 之變形，此種實際上不存在的變形為有限元素之誤差，積分點上的垂直與水平線之交角無法維持正交，使得元素產生多餘之剪應力，這些剪應力會使得結構本身之剛性被高估，撓曲度降低。解決剪

力閉鎖問題的方法主要有幾種，如提高在厚度方面的元素數量、使用降積分元素、非協調元素或使用二次元素。

4.2.2 降積分元素(Reduced Integration)

有別於原始元素之高斯積分點數，降階積分元素在各維度上減少一個積分點，這個修正可以有效消除剪力閉鎖效應，然而利用降積分元素可能產生沙漏效應(Hourglass deformation)導致計算上的誤差，沙漏現象亦稱為零能效應，此現象是由於積分點僅剩一個的情況，此積分點位於元素中心，部分條件下之元素變形無法對此積分點產生應力，造成變形後如同沙漏般的結構。Abaqus 內有設定減低沙漏效應之選項，利用此選項能夠稍微消除沙漏現象的產生，對於長條狀或平板狀之結構能夠有效提升分析精確度。

4.2.3 非協調元素(Incompatible modes)

同樣為消除剪力閉鎖的修正元素，與降積分元素差異在於非協調元素之積分點未進行變更，維持原本之積分點數量與位置，所以不會有沙漏現象產生的疑慮；非協調元素在其形狀函數上額外增加位移函數，使其元素形狀具有曲率，弧邊變形如同二次元素，積分點上垂直與水平線交角維持九十度，不會產生額外之剪應力，進而避免剪力閉鎖現象，有效模擬彎曲變形之受力情況。非協調元素在鄰邊上不相容，相鄰兩元素之弧邊可能朝不同側彎曲，但節點位移連續，於分析上仍然保有很好的精度。

4.2.4 選擇元素

考慮 C3D8R、C3D8R(修正沙漏現象)、C3D8I、C3D20R 四種元素在相同負載、邊界條件與網格條件，網格尺寸由收斂分析結果決定，採用元素量 107180 之尺寸進行分析，並比較各種元素玻璃基板之 Von Mises 最大應力、主軸最大應力、主軸最小應力、最大位移作為參考(表 3)。C3D20R 雖然理論上來說最為精準，但考慮到接觸分析所耗費時間過多，若套用到各個分析模型上效益不大，故僅列為標準作為參考。結果發現 C3D8R 之最大變位與其他三者差異過大優先刪除，經過沙漏效應修正後之 C3D8R 雖然最大變位較正確，但應力分布不相似且應

力值過低，故不予採用，而 C3D8I 無論在應力分布、應力值以及位移都與 C3D20R 相近，故此分析中採用元素為 C3D8I。

4.3 收斂性分析

本模型之收斂性分析使用六種不同的元素量，並儘量維持不同構體間尺寸相符，由於太陽能板內具有多個薄層結構，為防止有細長比過大的元素產生，在此取用較周圍鋁框細的網格來進行分割，其元素量與位移參照(表 2)與(圖 5)。當整體模組之元素量為 107180 之網格尺寸的結果誤差僅為 0.07%，考慮精度以及分析耗費時間後選擇以此尺寸作為後續分析之網格分布。

五、分析結果

5.1. 分析方向

此分析在於探討不同斷面或拘束條件之鋁框，其電池模組經過機械荷重後，產生之應力大小與變形模式，藉此判斷較佳之鋁框斷面進行規格修正，於此設定多個不同條件進行分析並比較結果。除了主要的框體斷面與高度之外，另外包括電池板與框體間的摩擦係數、框底拘束條件、載重大小等。

列舉各種條件變因，名稱後方括號為代號，方便表示與說明。

1.框體結構：共 6 個 Case，開放型框：框高 50mm(O50)、框高 40mm(O40)、框高 30mm(O30)；封閉型框：框高 50mm(C50)、框高 40mm(C40)、框高 30mm(C30)

2.摩擦係數：共 4 個 Case，係數 0(u0)、係數 0.25(u25)、係數 0.5(F50)、係數 0.75(u75)

3.框底拘束：共 6 個 case，使用均佈負載 2400Pa 與 5400Pa 兩種。全底拘束(A24、A54)、架置框拘束(P24、P54)、改良型架置框(M24、M54)

5.1.1 比較項目與代號定義

列舉各種結果比較，名稱後方括號為代號。輸出結果中主要比較的有最大與最小應力、最大變位(MaxU)、變形模式、脫框距離(OF)以及框體變形或挫曲。其中應力值包含框體本身、基板玻璃、矽電池三種材料之 von Mises 理論最大值(Mises)、主軸應力(MaxP、MinP)、X 方向應力(MaxS11、

MinS11)、Y 方向應力(MaxS22、MinS22)。

脫框距離實際上沒有絕對的值，故在此定義脫框距離詳細標準。見(圖 6)右下角小框為框體側視圖，背景部分為局部圖，脫框距離如圖所示，即為模型受力變形後，電池板上表面脫離框體插槽側面的水平距離，此圖變形倍率調整為五倍，方便看出脫框程度。由於長邊框脫框程度皆大於短邊框，故僅列長邊框之脫框距離。

5.2 框體結構分析

玻璃最大變位與應力結果與其趨勢(圖 7)、(圖 8)、(圖 9)，觀察得到玻璃最大變位在封閉型框的情況較小，開放型框較大，且隨著框高降低，變位情況也漸小；應力在封閉型框各方向之應力最大值皆大於開放型框，其最大應力發生處皆位於電池板與長邊框接合部位中，靠近整體模組中央的位置(四分之一模型中靠近對稱面的部份)，而 MaxS11 與 MinS11 是位於電池板與短邊框接合處之中央，應力最大值發生位置僅與框種類有關，框高變化不影響最大應力發生處，亦沒有明顯的趨勢。MaxP 和 MinP 之結果與 MaxS22、MinS22 的結果相當類似，Principal Stress 僅略大於 S22，其變化趨向亦相當雷同，另外開放型框之 MaxS11 明顯隨著框高降低而增加，MinS11 亦然。

矽電池應力結果與其趨勢(圖 10)、(圖 11)，觀察得到矽電池在封閉型框下應力較小，反之開放型框較大，隨著框體高度降低，應力值亦有逐漸降低的趨勢，但於開放型框中並不明顯，其中開放型框之 Mises 與 MinP 發生於電池板角落(長短框交接處)上之矽電池中央，而封閉型框則位於電池板與長邊框接合處之中央，其餘應力最大值發生位置皆相符，MaxP、MaxS22 位於電池板中央處之矽電池上，MinS11、MinS22 則位於電池板邊緣靠近中央處。各項應力最大值發生處僅與框體結構變化而改變，框高不影響其發生處。MaxP 和 MinP 之結果與 MaxS22、MinS22 的結果相當類似，Principal Stress 僅略大於 S22，其變化趨向亦相當雷同，而 S11 與 S22 其應力值不同，但隨著框體變化之趨性類似。

鋁框最大變位、脫框距離與應力結果與其趨勢(圖 12)、(圖 13)、(圖 14)，從結果不難得知鋁框變形與框體斷面有相當大的關

係，封閉型框鋁框變位較小但脫框距離大，開放型框變位較大且脫框距離小，最大變位值隨著高度降低而漸小，脫框距離則相反，高度越低脫框越嚴重，且兩種框體都具有此種趨勢。應力分布開放型鋁框遠大於封閉型框，且集中於電池插槽下緣處，開放型框隨著框高降低應力漸大，封閉型框則沒有明顯趨勢。如同前兩者，各項應力最大值發生處與框體結構變化而改變，框高不影響發生區域，僅有大小差異，分佈情況亦雷同。封閉型框之 S11 與 S22 比起其他方向應力都相當小。

5.3 摩擦係數分析

玻璃最大變位與應力結果與其趨勢(圖 15)、(圖 16)、(圖 17)，在無摩擦狀態玻璃最大位移特別突出，與次者差異極大，隨著摩擦係數增加，玻璃最大位移則逐漸減少，且減少程度漸緩開始有收斂的情況。摩擦係數增加亦使得玻璃各項應力值降低，其趨勢也與最大變位的情況相仿。

矽電池最大變位與應力結果與其趨勢(圖 18)、(圖 19)，矽電池在四種 case 間差異不大，無摩擦狀態最大應力值最高，隨著摩擦係數增加逐漸下降，亦具有收斂的情況，除了實際應力值外趨勢皆與玻璃相似。

鋁框最大變位與應力結果與其趨勢(圖 20)、(圖 21)、(圖 22)，無摩擦狀態時鋁框變形程度最低，隨著摩擦係數增加逐漸變大，脫框程度則相反，當摩擦係數為 0 時脫框程度最高，摩擦係數為 0.75 時最低，0.25、0.5 依次居中，後三者差異不大，而摩擦係數由 0 至 0.25 間，脫框程度銳減，差距甚至兩倍以上。鋁框應力值在 Von Mises、MaxP、MaxS11、MaxS22 項中無摩擦狀態最高，隨摩擦係數增加依次降低，而 MinP、MinS11、MinS22 在摩擦係數 0 時最高，0.75 時接次，0.25 與 0.5 殿後，其中最大值發生位置出現了改變。比較差異最大的摩擦係數 0 與 0.75 兩種結果之應力最大值發生處，Mises、MaxP、MaxS11 皆發生於長邊框之對稱面附近的插槽接觸面(垂直 x-y 面方向之接觸面)，而當摩擦係數變化時 MinP 與 S11 最大值從鋁框與電池板插槽接觸面(垂直 x-y 面方向之接觸面)移動到比開放型框多出的此片框體結構下緣。

六、

七、

表 2 收斂分析

八、結論與未來展望

九、參考文獻

[1] Y. Ueda and T. Yamakawa, "Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method," Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 2, No. 2, 1971, pp.90-100

[2] Y. D. Kim, T. Yamakita, H. S. Bang, and Y. Ueda, "Mechanical characteristics of repair welds in thick plate: report II validity of two dimensional plane deformation analysis," Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 17, No. 2, 1988, pp.359-368

	C3D8R	C3D8R-修正	C3D8I	C3D20R
Max. Deflection(mm)	20.95	9.451	9.54	9.105
Max. Von Mises(MPa)	21.16	9.432	49.59	47.48
Max. Principal(MPa)	13.37	4.816	52.25	51.29
Min. Principal(MPa)	-21.55	-7.464	-50.42	-48.91

表 3 四種元素分析結果差異

十一、圖片

十、表格

	Young's Modulus(MPa)	Poisson's Ratio	Fracture Strength(MPa)
Aluminum Frame	70000	0.35	214
Glass	70000	0.23	70
EVA	25	0.48	-
Silicon Cell	162500	0.223	300
PET Backsheet	3450	0.39	57

表 1 材料參數

Number of Element	Deflection(mm)	Error(%)
129593	9.533	0
107180	9.540	0.0734
93426	9.552	0.1989
76293	9.563	0.3137
61328	9.578	0.4698
45848	9.603	0.7289
33152	9.697	1.72

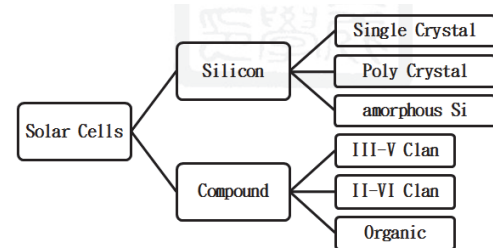


圖 1 太陽能電池種類

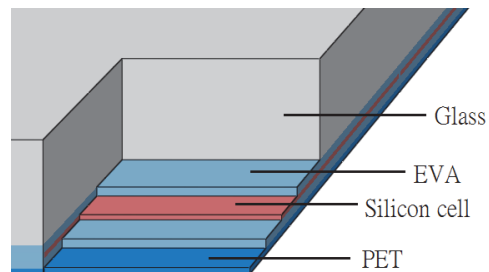


圖 2 材料排列

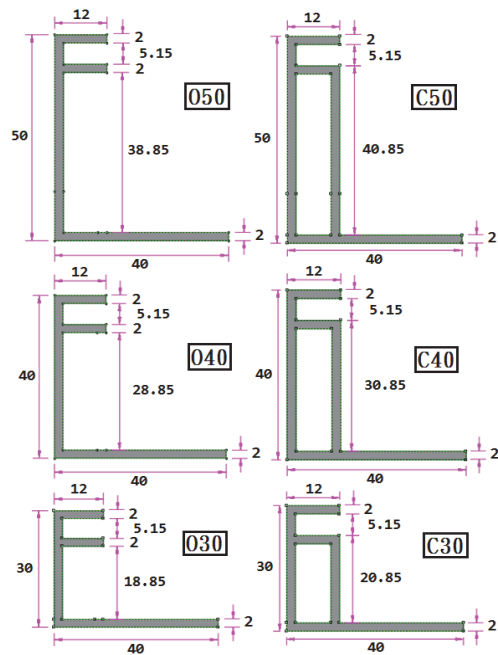


圖 3 鋁框模型種類

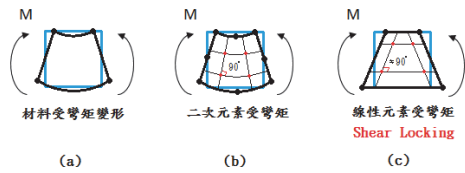


圖 3 鋁框模型種類

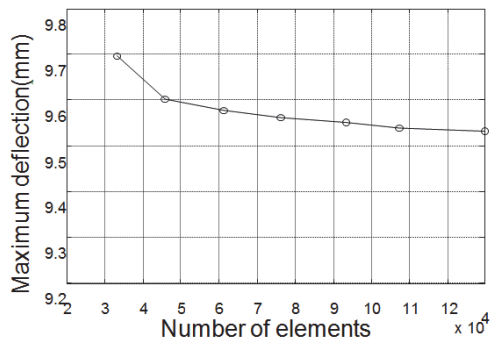


圖 5 收斂性分析

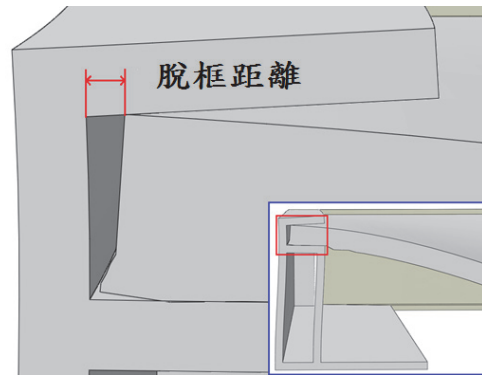


圖 6 定義脫框距離

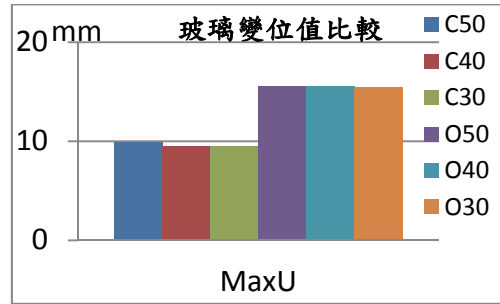


圖 7 框體分析玻璃最大位移

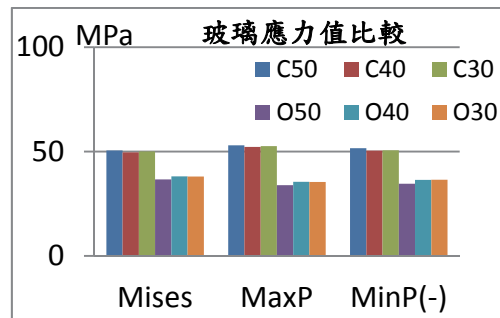


圖 8 框體分析玻璃應力一

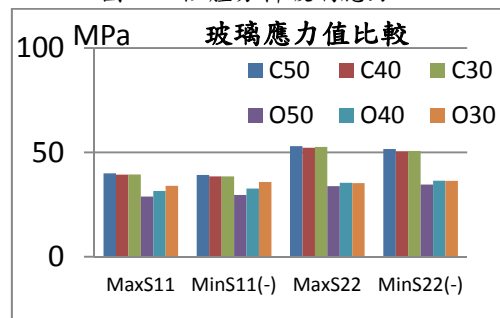


圖 9 框體分析玻璃應力二

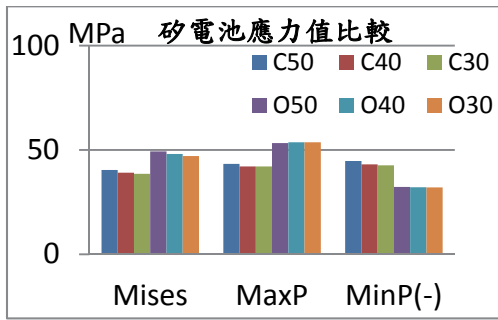


圖 10 框體分析矽電池應力一

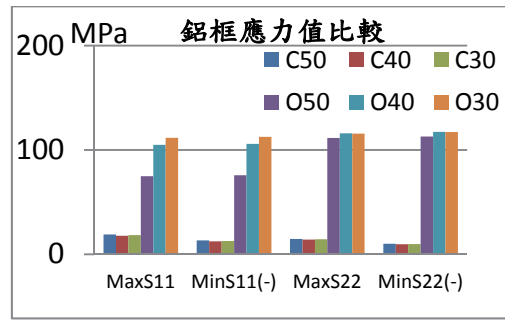


圖 14 框體分析鋁框應力二

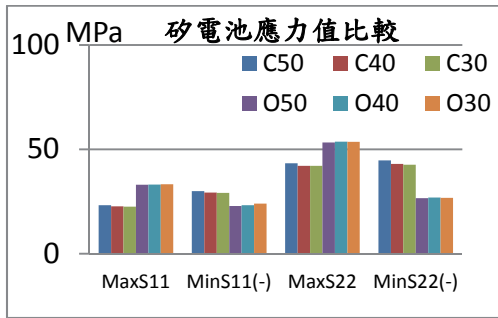


圖 11 框體分析矽電池應力二

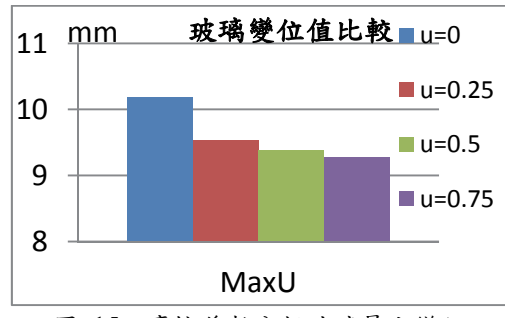


圖 15 摩擦係數分析玻璃最大變位

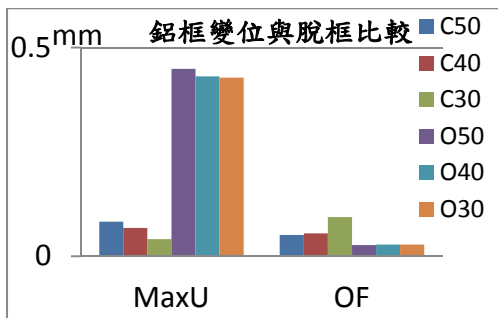


圖 12 框體分析鋁框最大變位與脫框距離

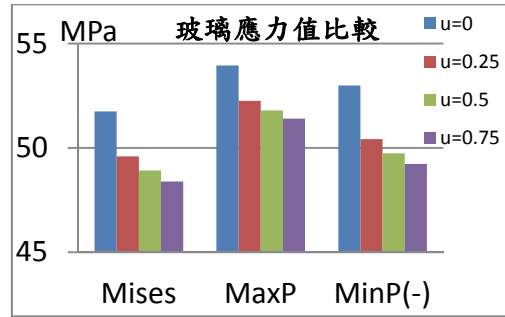


圖 16 摩擦係數分析玻璃應力一

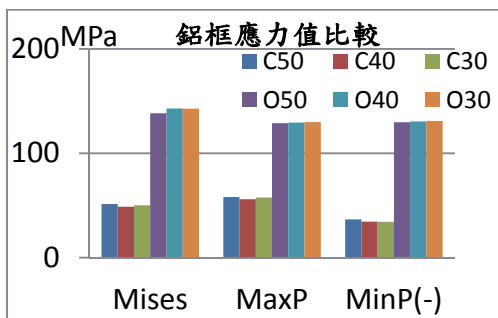


圖 13 框體分析鋁框應力一

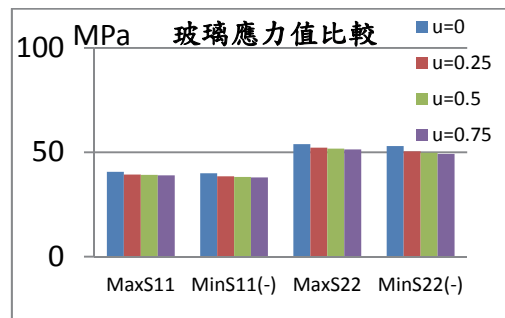


圖 17 摩擦係數分析玻璃應力二

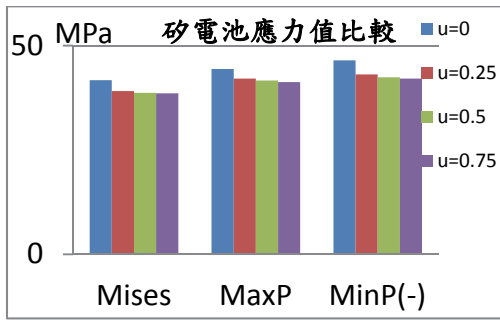


圖 18 摩擦係數分析矽電池應力一

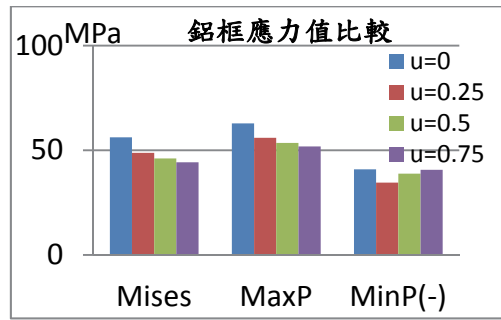


圖 21 摩擦係數分析鋁框應力一

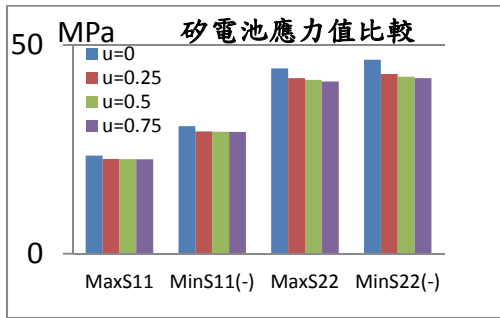


圖 19 摩擦係數分析矽電池應力二

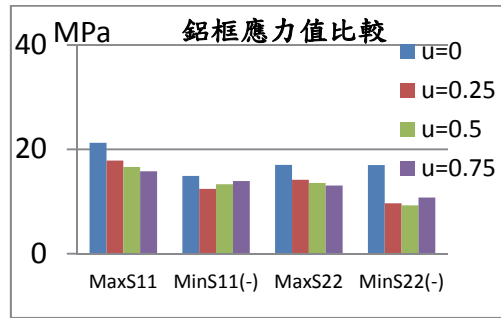


圖 22 摩擦係數分析鋁框應力二

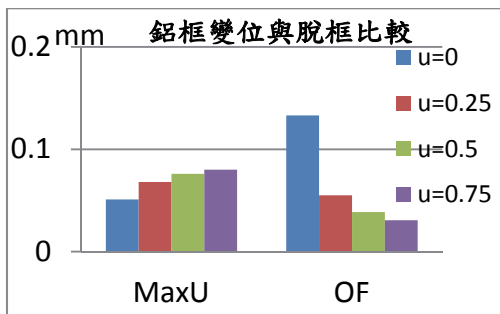


圖 20 摩擦係數分析鋁框最大變位與脫框距離