

國立臺灣大學工學院應用力學研究所



碩士論文

Graduate Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

殘餘應力效應對離型取下的影響

Effect of Residual Stresses on De-bonding Problems

for Flexible Electric Devices

范鳴珊

Ming-Shan Fan

指導教授：張正憲 博士

趙聖德 博士

Advisor: Jeng-Shian Chang Ph.D.

Sheng-Der Chao Ph.D.

中華民國 103 年 10 月

October 2014

誌謝



能完成這篇論文，特別感謝我的指導教授張正憲和趙聖德老師，在這兩年給與的指導與協助，使我獲益良多，此外還教導我很多人生道理，以及論文寫作上的建議及修正。再來要感謝辛苦的口試委員吳光鐘教授、蔡鎮竹博士和黃冠榮博士在口試期間給與的意見和指正，使論文內容更為完整。另外要感謝實驗室的好夥伴林宗緯，不論是研究上遇到問題時，還是共同修課時，都能彼此幫忙互相加油打氣，來應力所能認識你是我的榮幸，從你身上學習到很多。

再來要感謝實驗室學弟智文、馮璋及柏鈺，謝謝你們陪我聊天及幫我減輕負擔，你們總能帶給實驗室很多歡樂，離開前很高興能認識你們這群活寶。還有大學以來的好朋友及好室友盈仔、懿伶、凱涵和子雅，時間和距離不會動搖我們堅定的友誼，在我對未來茫然不知所措時，因為有你們的鼓勵讓我可以重新振作。

以及不管何時都陪伴在我身邊的家人，感謝媽媽能夠體諒我課業重無法常回家，且總會在我最需要人陪伴的時候，打電話關心我，還有我可愛的妹妹，謝謝妳願意當我最好的聽眾。

很幸運能跟大學同學培需進同間實驗室，以及與同樣為大學同學的佳育一起討論課業，而在研究最忙碌的時期，感謝緣分讓我可以每週跟國中同學隸詩和元鈞敘舊。我身邊有這麼多關心我的人，謝謝你們的幫助讓我得以完成我的研究，以此表達我對你們的感謝。最後，本研究是與工研院產學合作的成果，在此特別要感謝工研院蔡鎮竹博士等人的協助，不僅提供實驗上的數據，還有研究上的建議，以及感謝國家高速網路與計算中心提供軟體資源，使本研究得以順利進行。

范鳴珊 2014.10.12

中文摘要



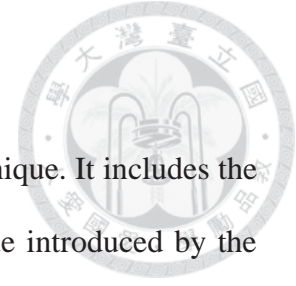
本文首先介紹主動矩陣式有機發光二極體(AMOLED)取下技術，內容涵蓋業界使用的方法，以及工研院(ITRI)所提出之離型取下，再來說明離型取下技術所遇到的問題，如脫層、捲曲、折角現象等，且由於離型取下技術即是透過破壞離型層以取下面板，故研究離型層的力學行為是本研究的主要研究項目之一。

本研究的目的是在於研究殘餘應力對於離型取下的影響，利用兩個理論相互驗證，其中理論一將殘餘應力的效應考慮進應變能釋放率中，而理論二可以求得殘餘應力沿厚度方向的分布，而此兩理論需搭配實驗獲得之數據，捲曲試片之撓度與曲率半徑或曲率。

以有限元素模擬軟體 Abaqus 建立離型取下模型，使用黏著元素來分析離型層的力學行為，透過其牽引力-位移關係的破壞機制來實現，利用位移控制來模擬取下過程，最後由結果中發現考慮殘餘應力並不會影響剝離力量的峰值，且雖然可以透過改變影響殘餘應力的參數進而降低開始剝離後的剝離力量，但要降低峰值只能透過改變結構，而在層間剪應力的分析中，發現有考慮殘餘應力其層間剪應力會低於沒有考慮的，原因為殘餘張應力與彎曲造成的壓應力抵銷，反之若殘餘應力為壓應力，層間剪應力會增加。

關鍵字：離型取下、殘餘應力、脫層現象、黏著元素、應變能釋放率。

ABSTRACT



This research gives an introduction on AMOLED peeling technique. It includes the methods commonly used by the industry, and the FlexUP technique introduced by the ITRI. Through the introduction, it helps explain the technical difficulties associated with the FlexUP technique. This includes: delimitation, curl and corner phenomenon. Furthermore, FlexUP is a technique solely rely on breaking the de-bonding layers (DBL) in order to peel off the AMOLED, this leads to the mechanical behavior of de-bonding layers become one of the major focus in this research.

The research exams the effect of residual stresses on FlexUP technique by using two different theories for mutual authentication. Theory one includes the effect of residual stresses in the energy release rate, while theory two provides the distribution of residual stresses along the thickness of the specimen. Both theories require information of the deflection of the cured specimen and the radius of curvature or curvature through the experimental measurements.

The research establishes the FlexUP model through finite element simulation software Abaqus, and uses the cohesive element to analyze the mechanical behavior of the de-bonding layer (DBL). The traction separation law is used to realize the damage of the DBL. In additional to that, displacement control is used to simulate the peeling process. By following the above procedures, we can conclude the residual stresses do not affect the peak value of the peel force. Besides, we can discuss the effect of parameters on the energy release rate and the influence of the residual stresses on the interlaminar stresses.

Keywords: FlexUP, residual stress, delamination, cohesive element, energy release rate

目錄



口試委員會審定書	#
誌謝	i
中文摘要	ii
ABSTRACT	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	viii
符號目錄	ix
第一章 導論	1
1.1 前言	1
1.2 AMOLED 取下技術介紹	2
1.2.1 取下技術種類與示意	4
1.2.2 AMOLED 結構	5
1.2.3 離型層特性	7
1.3 離型取下的良率問題	8
1.4 研究動機	8
1.5 殘餘應力量測方法	9
1.6 論文架構	10
第二章 基本理論	11
2.1 應變能釋放率	11

2.2	總殘餘應力.....	14
第三章	有限元素模擬分析.....	17
3.1	黏著元素.....	17
3.2	模擬參數設定.....	20
3.3	邊界條件與網格設定.....	21
3.4	曲率與曲率半徑.....	24
3.5	不同試片厚度造成的影響.....	25
第四章	結果與討論.....	28
4.1	取下時剝離力與時間關係.....	28
4.2	不同變數對應變能釋放率的影響.....	30
4.3	前預留長度.....	32
4.4	層間剪應力.....	32
4.5	不同情況下的結果.....	33
第五章	結論與未來展望.....	36
5.1	結論.....	36
5.2	未來展望.....	37
	參考文獻.....	38
	附錄 Abaqus 有限元模擬過程.....	42



圖目錄



圖一 Sony 蝕刻方式製作軟性 TFT 面板示意圖[7]	2
圖二 離型取下示意圖	5
圖三 離型取下實驗圖	5
圖四 AMOLED 結構剖面圖[9]	6
圖五 20mm×20mm PI 試片釋放殘餘應力捲曲圖	6
圖六 膠層力學行為示意圖[12]	7
圖七 PI 剝離試驗數據圖	8
圖八 雙懸臂梁試件示意圖[17]	12
圖九 複合梁模型結構示意圖	13
圖十 釋放殘餘應力(平均應力與梯度應力)後，預測懸臂梁變形的四種方式[19]	14
圖十一 殘餘應力懸臂梁模型示意圖[19]	15
圖十二 線彈性牽引力-位移關係	17
圖十三 線彈性牽引力-位移關係標示圖	18
圖十四 模擬採用之牽引力-位移關係示意圖	20
圖十五 離型取下模擬結構及厚度尺寸示意圖	21
圖十六 離型取下模擬結構及長度尺寸示意圖	22
圖十七 ITRI 離型取下固定曲率半徑機構圖	22
圖十八 Solidworks 草圖計算位移示意圖	23
圖十九 曲率示意圖	25
圖二十 熱殘餘應力模型及尺寸示意圖	26

圖二十一 熱殘餘應力模型初始及邊界條件示意圖	26
圖二十二 不同厚度之熱殘餘應力分佈圖	27
圖二十三 有無考慮殘餘應力下，剝離力-時間關係圖	28
圖二十四 剝離力-時間關係圖(理論一 Gres 及理論二 prestress).....	30
圖二十五 E_I 對於 G_I 的影響	31
圖二十六 h_I 對於 G_I 的影響.....	31
圖二十七 前預留長度對剝離力-時間關係圖	32
圖二十八 有無考慮殘餘應力之層間剪應力數據圖	33
圖二十九 不同情況下，剝離力-時間關係圖	34
圖三十 不同情況下，層間剪應力數據圖	34
圖三十一 離型取下模型網格圖	43



表目錄



表一 EPLaR 製程[6].....	3
表二 取下技術比較表[4]	4
表三 材料參數表	21
表四 曲率半徑(R=180mm)位移控制	24
表五 熱殘餘應力模型材料參數	26
表六 不同應變能釋放率對應之初始破壞應變值 ε_d	27

符號目錄



a	裂痕長度
B	寬度
C	柔度
E	楊氏係數
G	應變能釋放率
G_c	韌性
t, h	厚度
ε	應變向量
σ, S	應力
K	離型層彈性
κ 或 R	曲率或曲率半徑
δ_d	初始破壞位移
P	施加外力
ν	蒲松比
T	溫度
\mathbf{t}	牽引力向量
y	撓度

第一章 導論



1.1 前言

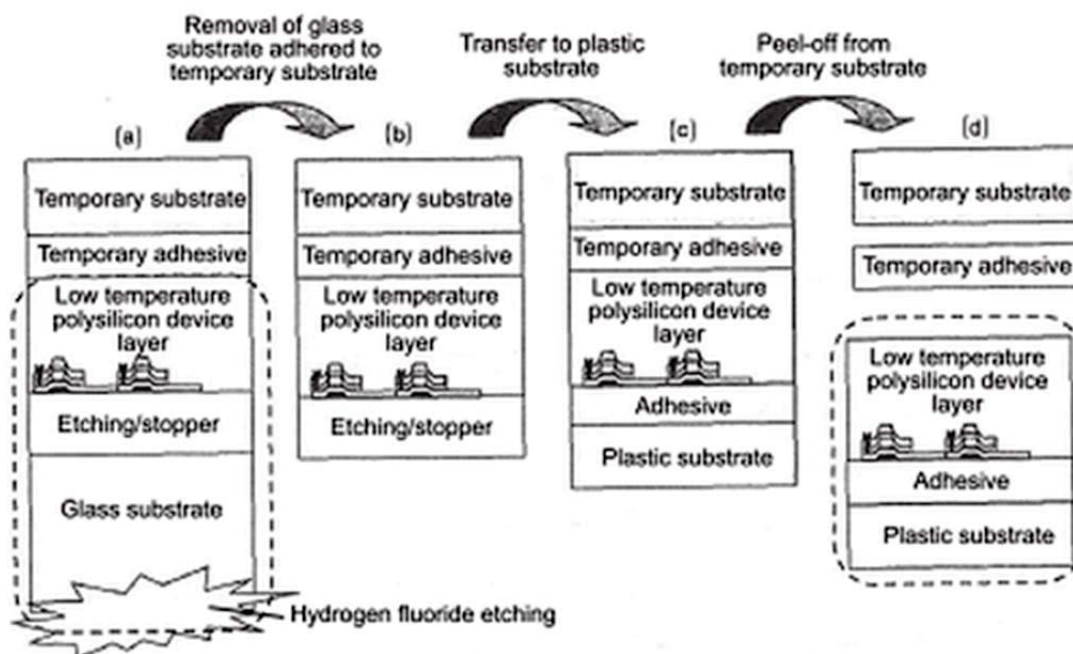
有機發光二極體(Organic Light Emitting Diode, OLED)依驅動方式可分為被動矩陣式(Passive Matrix)與主動矩陣式(Active Matrix)，被動矩陣式依照定位發光點亮，只適用於小尺寸的面版；主動矩陣式利用薄膜電晶體(Thin-Film Transistor, TFT)，搭配電容儲存訊號，發光單元依照電晶體接到的指令點亮。主動矩陣式有機發光二極體(Active-matrix organic light-emitting diode, AMOLED)，現今已廣泛應用於手機、平板等顯示面板，其優點為自發光性、廣視角、高對比、反應速度快及低耗能，但缺點則是在製作大尺寸時的成本特別高、良率低及烙印(影像殘留)問題[1][2][3]。

目前在面板業界希望未來能發展可撓式面板，但由於技術上尚無法克服，且找不到適合的材料，所以遲遲無法有很顯著的進步，無法將產品量化，現階段還是以玻璃基板 AMOLED 為主，但由於玻璃無法承受大幅度的彎曲，故未來勢必發展軟性 AMOLED 將其取代，但軟性 AMOLED 比玻璃基板 AMOLED 更具有挑戰性。軟性 AMOLED 主要採用塑膠基板取代玻璃，在製程中先將塑膠基板黏貼（或塗佈）在玻璃基板上，待完成顯示器製程後，再將此軟性 AMOLED 從玻璃基板上取下(de-bonding)[4]，故要如何將 AMOLED 從玻璃基板上取下為一重要議題，故下一節將介紹目前業界所使用的 AMOLED 取下技術。



1.2 AMOLED 取下技術介紹

取下技術可分成物理處理[4]與化學處理[4][5][6]兩種，化學處理需搭配特殊膠材且處理耗時，例如:日本 Sony 的蝕刻方法[4]，在薄膜電晶體層與玻璃基板間有一層 Etching stopper，利用氫氟酸(HF)蝕刻玻璃至 Etching stopper，移除 Etching stopper 後，再貼附軟性基板，以及去除暫時性基板(temporal substrate)和可剝膠材(removable glue)，流程如下圖



圖一 Sony 蝕刻方式製作軟性 TFT 面板示意圖[7]

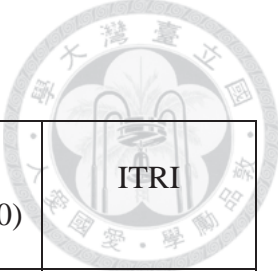
顯示器的取下技術目前仍以物理處理為主，物理處理包含雷射處理、熱處理、UV 處理及機械應力剝離等方法，雷射處理如日本 Seiko-Epson 開發的 SUFTLA(Surface Free Technology by Laser Ablation/Annealing)製程[4]，利用雷射聚焦在玻璃與 TFT 間之非晶矽(a-Si)層，再透過加熱使非晶矽層產生變化而導致分離，以此將 TFT 與玻璃分開，最後於 TFT 層貼上軟性基板，荷蘭 Philips 開發的 EPLaR(Electronics on Plastic by Laser Release)製程[4]，利用雷射聚焦加熱使

Polyimide/TFT 與玻璃基板分離，但此方法設備成本高且處理速度慢，其製程如表一所示，而 Samsung 採用的技術類似 Philips 的 EPLaR 製程也是採用雷射方式取下 (Laser Lift-Off)，雷射高溫產生熱分解進而使面板與玻璃基板分離[4]。而熱處理與 UV 處理都有膠材無法承受 AMOLED 製程高溫的限制，而工研院(Industrial Technology Research Institute, ITRI)開發的離型取下(flexible universal plane, FlexUP)技術，為機械式的取下方法，不僅可承受製程高溫達 450°C，而且不會有上述提及之缺點，表二為取下技術比較表。

表一 EPLaR 製程[6]

Com. 1	Clean the glass substrate.
EP. 1	Spin-coat a polyimide layer on the glass substrate. Fully cure it and passivate with a thin layer of SiN.
Com. 2	Make a TFT array on the glass substrate.
Com. 3	Cut the glass substrate to form individual displays.
Com. 4	Laminate an electrophoretic foil onto the TFT array.
Com. 5	Attach driver electronics to the glass substrate.
Com. 6	Test the fully working display.
EP 2	Laser release the polyimide from the glass substrate.
Com. 7	Package the display in a display module.

表二 取下技術比較表[4]



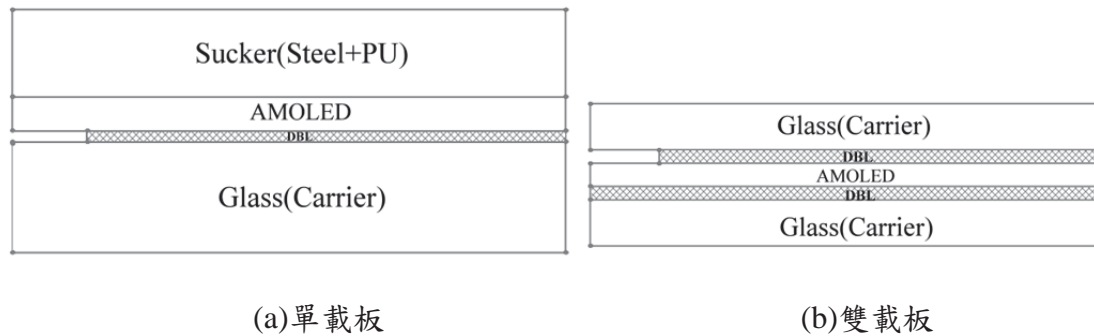
公司	Philips(2008,EPLaR)	Seiko-Epson (SUFTLA)	Samsung Display(2010)	ITRI
取下 技術	Electronics on Plastic by Laser Release	Surface Free Technology by Laser Ablation/Annealing	Detach by Laser	De-bonding Layer(DBL)

2010年，Lee, Chang, Cheng, Ho 與 Chen[8]的研究中，ITRI開發一個結合TFT與聚醯亞胺(Polyimide, PI)基板的新取下技術，玻璃基板和PI間隔著DBL，利用DBL對PI的弱黏著力使取下變容易。2012年，Chen, Ho, Chen 與 Lee[9]的研究中指出ITRI成功利用離型取下(FlexUP)技術開發可撓式裝置，由於TFT製程受限於塑膠基板的耐熱性，故整個製程必須在低溫下進行，而此技術可改善TFT高溫高達350°C。2012年，Nakajima 等人[10]的研究中，提出利用機械式剝離取下，將用膠層黏結的聚萘二甲酸乙二酯(poly-ethylene naphthalate, PEN)薄膜與玻璃基板分離，其中PEN薄膜作為透明可撓的基板。2012年，Yamaguchi 等人[11]的研究中指出將PI塗佈在玻璃基板上，然後利用機械式取下，發現取下後TFT的傳輸特性沒有重大改變。

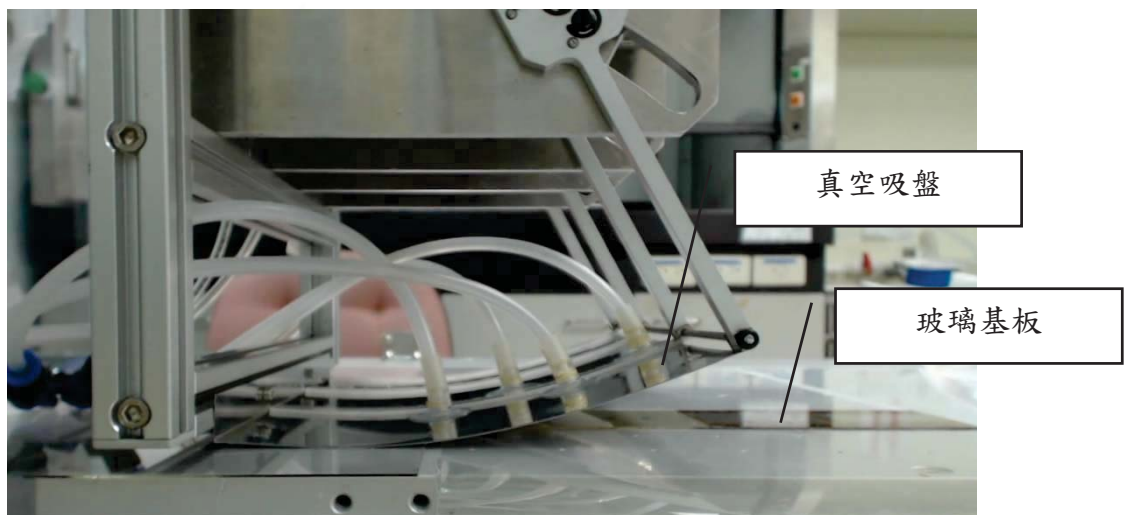
1.2.1 取下技術種類與示意

ITRI 採用的離型取下技術其設計有兩種，分別為單載板與雙載板，圖二為其示意圖，單載板取下，使用一彈性真空吸盤抽真空使 AMOLED 與其緊密貼合，而此彈性吸盤由不鏽鋼板及多孔性材料組成，再施以適當之拉力，且限制取下過程

之曲率，最後破壞離型層(De-bonding Layer, DBL)使面板與玻璃分離，實驗的取下示意圖如圖三所示。為了解決面板精密對位貼合問題，因此延伸出雙載板的設計，其示意如圖二(b)。



圖二 離型取下示意圖(非真實比例)



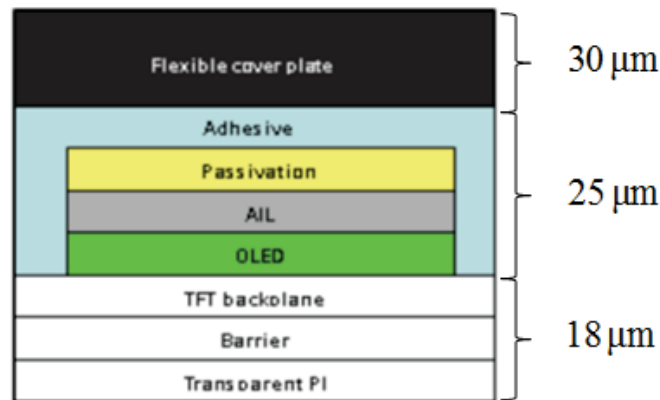
圖三 離型取下實驗圖(ITRI 2013 年提供)

1.2.2 AMOLED 結構

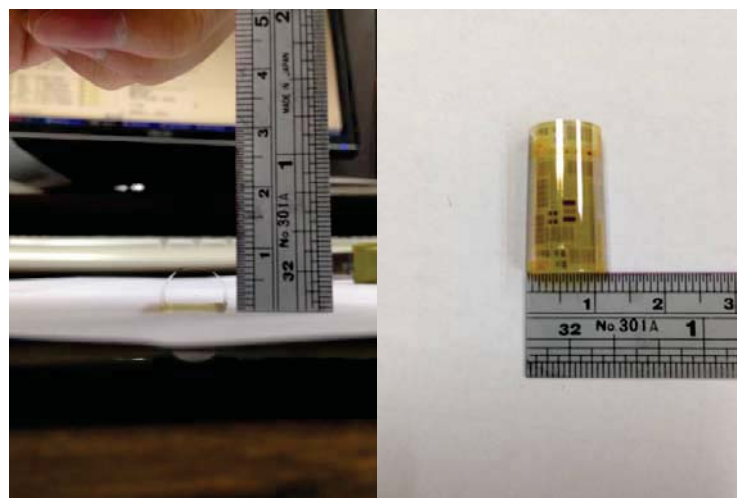
AMOLED 為多層材料結構如圖四所示，各層間的結合力也不同，其中金屬材料的陰極層(AIL)與有機發光二極體層(OLED)間的鍵結力最弱，為凡德瓦力(van der Waals' forces)，因此在彎折取下過程中，層間剪應力的大小是其失效的重要參考依據。

除此之外，由於各層材料於不同工作溫度下塗佈於玻璃基板上，所以當從製程高溫降至常溫時，會因為各材料之熱膨脹係數不同，導致殘餘應力留在 AMOLED 中，對取下產生影響，圖五為 PI 層釋放殘餘應力後的變形圖。

根據 ITRI 提供的 AMOLED 各層結構資料，大部分的材料厚度為奈米等級，而主要提供厚度的有三層，最底下的 PI 層約 $18\mu\text{m}$ ，中間黏膠層(Adhesive) $25\mu\text{m}$ 以及最上層的金屬蓋板(Flexible cover plate) $30\mu\text{m}$ ，如圖四所標示。而在之後的模型將簡化為此三層，且層間剪應力的關鍵處為 Adhesive 層與 PI 層間。



圖四 AMOLED 結構剖面圖(非真實比例，ITRI 2013 年提供)[9]



(a) 試片捲曲側視圖(7mm)

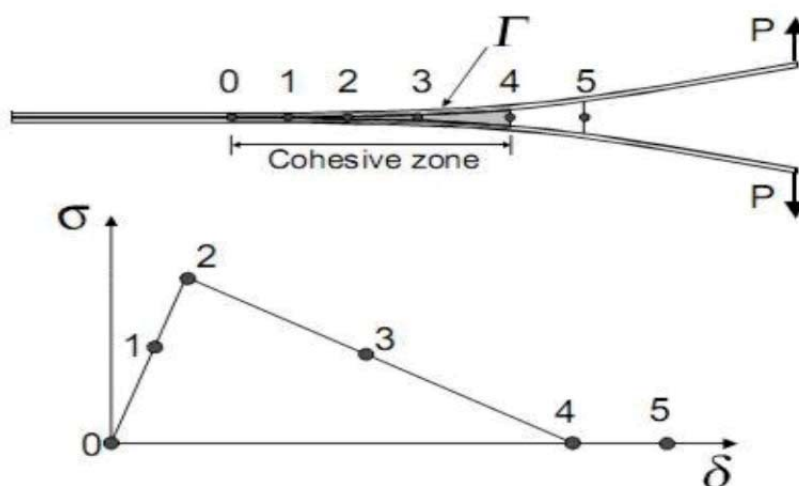
(b) 試片捲曲上視圖(12mm)

圖五 20 mm×20 mm PI 試片釋放殘餘應力捲曲圖(ITRI 2014 提供)



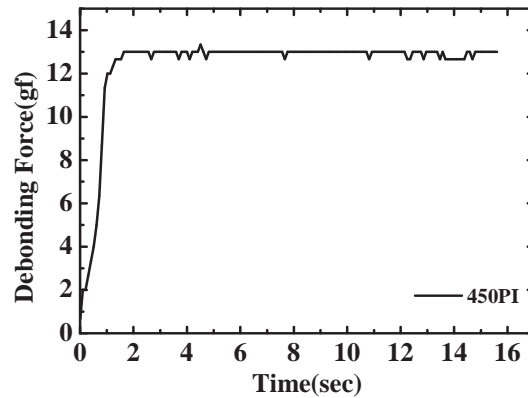
1.2.3 離型層特性

離型取下為透過破壞離型層以取下面板的一個過程，故分析離型層特性為重要的課題之一，而離型層可降低 AMOLED 與玻璃基板間的鍵結力，大幅降低取下的困難。離型層的力學行為類似黏膠的性質，為傳遞能量的媒介，搭配圖六 0-5 所標示，0 為當被黏著物間無相對位移時，膠層不會傳遞任何能量，0-2 為產生相對位移時，膠層開始傳遞能量，使黏著物間產生相互作用力，且此作用力隨相對位移增加而上升，2 為當相對位移到達某一定值時，此時膠層開始發生破壞，導致傳遞能量效率降低，2-4 為能量依舊持續傳遞，4-5 為膠層最後完全破壞。



圖六 膠層力學行為示意圖[12]

圖六為膠層微觀下的力學行為，此行為是實驗無法觀測到的，因此在研究中將實驗提供的資訊轉成模擬可用的數據，透過單層 PI 對離型層的剝離試驗(Peeling test)，於 PI 層施以 90° 的力，並以 10 mm/min 的速度等速剝離玻璃基板，而剝離試驗所能提供數據為恰好破壞離型層時每單位寬度所需的平均力量 12.6 gf/cm ，如圖七所示，且圖中的 450PI 是試片編號。



圖七 PI 剝離試驗數據圖(ITRI 2013 年提供)

1.3 離型取下的良率問題

與業界的取下方式不同，ITRI 設計之離型取下為機械式取下，而在取下的過程中發現會有脫層(Delamination)、試片捲曲和折角等可能導致良率低的現象。離型層其材料本身已可降低 AMOLED 與玻璃基板間的鍵結力，但由於 AMOLED 為多層材料結構，且陰極層(AIL)與 OLED 層間的鍵結力為凡德瓦力，如圖四所示，而凡德瓦力為弱鍵結力，因此取下後可能會有脫層的現象，而脫層現象為層間剪應力大於鍵結力所導致，故層間剪應力的探討為本研究的重點之一。

1.4 研究動機

由於實驗結果發現剝離後的試片會有捲曲的現象，如圖五所示，所以推估其原因為殘餘應力造成的永久變形，而這是在離型取下過程中不樂見的，故本研究將殘餘應力的因素加入原先的離型取下模型中考量。

層與層間的热膨脹係數不同及高溫製程溫度降至室溫；結構不對稱性和製程的不完美，都是產生殘餘應力的原因，因此在這些情況下必須額外考慮殘餘應力

的影響，從圖四可以看出 AMOLED 為多層材料，且單載板取下模型為一對稱結構，而雙載板結構為一對稱結構，這也是為什麼本研究只探討單載板取下結構下殘餘應力對剝離行為的影響，且其後文中的離型取下皆代表單載板取下。

殘餘應力的存在通常會降低使用壽命，並對之後的加工及使用造成影響，因此降低殘餘應力對於改善微機械、電磁、光學設備的可靠度是非常重要的，故本研究的目的是在分析殘餘應力造成的影響及找出影響殘餘應力的主要變數，並提出有效方法改善殘餘應力效應對離型取下造成的破壞。

1.5 殘餘應力量測方法

雖然研究殘餘應力的相關文獻很多，但多數都在研究薄膜殘餘應力，而薄膜殘餘應力其重要文獻為 Stoney[13]推導之公式，如式(1.1)，其中 σ_f 為薄膜殘餘應力， R 為曲率半徑， t_s 和 t_f 分別為基板和薄膜的厚度， ν 為基板的浦松比， E_s 為基板的楊氏係數。此方法為懸臂梁法，然而離型取下的殘餘應力分析並不適用於上述方法，原因為 Stoney 的試片為薄膜蒸鍍在基板上，量測薄膜的殘餘應力大小，而本研究的試片是被黏層與膠層之關係，因此本研究藉由理論二的公式，並搭配實驗結果來推算殘餘應力的大小。

$$\sigma_f = \frac{1}{6} \frac{E_s}{1-\nu} \frac{1}{R} \frac{t_s^2}{t_f} \quad (1.1)$$

薄膜殘餘應力量測方法有懸臂梁法、牛頓環法、X 光繞射法及相位式薄膜應力量測系統。其中懸臂梁法量測出懸臂端的位移量，然後搭配 Stoney 公式求出薄膜的殘餘應力，牛頓環法利用蒸鍍前後基板的曲率變化，以及搭配應用光學干涉原理和 Stoney 公式求出薄膜的殘餘應力，X 光繞射法利用晶體內晶面間距之變化

來測定，通常藉著薄膜平面晶格常數而獲得薄膜應力值，而相位式薄膜應力量測系統利用相位移 Twyman-Green 干涉儀，量測鍍膜前後基板與參考平面鏡之干涉圖，再用 Stoney 公式求出薄膜的殘餘應力[14]。

殘餘應力非一般實驗力學的儀器可量測，必須使用一些特別的量測方法，而其量測方法，依破壞程度的不同可分為破壞性、半破壞性與非破壞性這三種，較為常見的方法有應變規鑽孔法、X 光繞射法、超音波法及磁彈法[15]。後兩者為利用觀察材料對應力的特性來量測材料內之應力分布，應變規鑽孔法為半破壞性檢測技術，利用鑽孔的方式釋放孔洞周圍應力，再用應變規量測其釋放應力所對應的應變值，最後依據材料應力應變關係式求出殘餘應力值。X 光繞射法量測應力或應變是利用量測晶體內晶面間距之變化而測得，而上述方法各有其優缺點，而其中應變規鑽孔法較為普遍且可信度較高，然而此方法不適用於本研究，本研究所引用的理論二為懸臂梁法，但與前面介紹之薄膜殘餘應力的量測略有不同，除了曲率外還必須得知其撓度，將在 2.2 節做詳細介紹。

1.6 論文架構

本論文主要可分成五個章節。第一章對離型取下做個介紹，且在此章節對本研究的動機加以說明，並介紹常見的殘餘應力量測方法。第二章對本研究所使用的兩種理論進行整理及說明為何要採用這兩種理論的原因。第三章是利用有限元素模擬，將模擬中設定所需的條件及模擬流程做詳細完整的介紹。第四章將有考慮殘餘應力與沒有考慮的結果做比較，並對會影響應變能釋放率之參數做深入探討，最後觀察 Adhesive 和 PI 層之層間剪應力，找出殘餘應力對離型取下的影響。第五章對本研究做總結並提出未來可以持續努力的方向。

第二章 基本理論



殘餘應力為製程中難以取得的數據，故殘餘應力的模擬最重要在於如何量化，本研究引用兩種理論以交叉驗證，理論一為將殘餘應力的影響考慮進應變能釋放率中，此方法較簡單，僅需試片的曲率；理論二需要獲得試片的撓度與曲率半徑，求得殘餘應力的分布，此方法需要較精密的數據，故與理論一相比較難做應用，但優點是可以求得殘餘應力值的大小。

2.1 應變能釋放率

Nairn[16]推導出在破壞力學模式一(張裂型)且考慮殘餘應力效應下，任何複合材其應變能釋放率的真實解，如下式

$$G_I = \left[\sqrt{G_{mech}} + \frac{1}{2} \frac{d}{dA} \frac{\int_V \sigma^m \cdot \alpha \Delta T dV}{\sqrt{G_{mech}}} \right]^2 \quad (2.1)$$

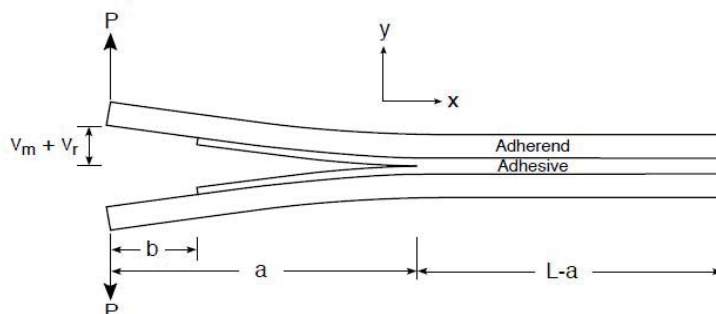
σ^m 為受到外力的應變張量， α 為與位置相依的熱膨脹係數張量， ΔT 為溫度差，而 Nairn[17]將式(2.1)代入初始條件，且 $dA = B da$ ，其中 B 為試片寬度， A 為裂痕面積， a 為裂痕長度，可改寫式(2.1)為

$$G_I = \left[\sqrt{G_{mech}} + \frac{P}{B} \frac{dv_r}{da} \right]^2 \quad \text{且} \quad G_{mech} = \frac{P}{B} \frac{dv_m}{da} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (C = 2 \frac{v_m}{P}) \quad (2.2)$$

G_{mech} 即是不考慮殘餘應力時的應變能釋放率， $v = v_m + v_r$ ， v 為施力點的撓度，而 v_m 和 v_r 分別為不考慮殘餘應力與考慮殘餘應力下施力點的撓度， P 是總施加外



力， C 為柔度，示意如下圖



圖八 雙懸臂梁試件示意圖[17]

由力矩-曲率-溫度關係式(2.3)及邊界條件($M=Px, \Delta T=0$ 且施力點處 $x=0$ 及 $M=0, \Delta T \neq 0$)

$$\kappa = \frac{d^2v}{dx^2} = C_{\kappa}^* M + \alpha_{\kappa}^* \Delta T \quad (2.3)$$

可得

$$v_m = \frac{1}{3} C_{\kappa}^* P a^3 \quad \text{及} \quad v_r = \frac{1}{2} \alpha_{\kappa}^* \Delta T a^2 \quad (2.4)$$

代入式(2.2)，

$$G_I = (C_m P a + C_r \Delta T)^2 \quad (2.5)$$

其中

$$C_m = \sqrt{\frac{C_{\kappa}^*}{B}} \quad \text{且} \quad C_r = \frac{\alpha_{\kappa}^*}{\sqrt{C_{\kappa}^* B}} \quad (2.6)$$

C_{κ}^* 是梁的有效彎曲柔度而 α_{κ}^* 是梁的有效熱-曲率係數。

利用簡單梁分析[18]， C_{κ}^* 可表示如下式

$$C_{\kappa}^* = \frac{1}{(EI)_{effective}} = \frac{1}{E_1 I_{zz,1} + E_2 I_{zz,2}} = \frac{12}{E_1 B h_1^3} \frac{\lambda^2 (1+r\lambda)}{3(1+\lambda)^2 + (1+r\lambda)(\lambda^2 + \frac{1}{r\lambda})} \quad (2.7)$$

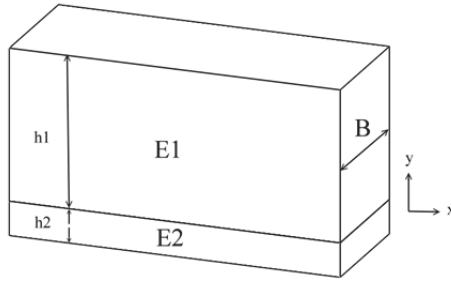


其中 $r = \frac{E_1}{E_2}$ 且 $\lambda = \frac{h_1}{h_2}$ ， E_1 和 E_2 分別為被黏層與膠層的楊氏係數， h_1 和 h_2

分別為被黏層與膠層的厚度，模型結構示意圖如圖九所示。

式(2.7)代入式(2.6)可得

$$C_m = \frac{2\lambda}{Bh_1} \sqrt{\frac{3(1+r\lambda)}{E_1 h_1 (3(1+\lambda)^2 + (1+r\lambda)(\lambda^2 + \frac{1}{r\lambda}))}} \quad (2.8)$$



圖九 複合梁模型結構示意圖

由於式(2.3)，故殘餘應力造成的曲率變化為

$$\kappa_{res} = \alpha_{\kappa}^* \Delta T \quad (2.9)$$

可改寫式(2.5)

$$G_I = (C_m Pa + C_{res})^2 \quad (2.10)$$

其中

$$C_{res} = \frac{\kappa_{res}}{\sqrt{C_{\kappa}^* B}} = \frac{\kappa_{res} h_1}{2\lambda} \sqrt{\frac{E_1 h_1}{3} \frac{3(1+\lambda)^2 + (1+r\lambda)(\lambda^2 + \frac{1}{r\lambda})}{1+r\lambda}} \quad (2.11)$$

由於模擬是建立在平面應變的條件下，故需要做修正 $E_1 \rightarrow \frac{E_1}{1-\nu^2}$ 。當式(2.10)中

的 $C_{res}=0$ 即不考慮殘餘應力的影響時， $G_{mech} = (C_m Pa)^2$ 。之後用 G_{res} 和 G_{mech} 區分有



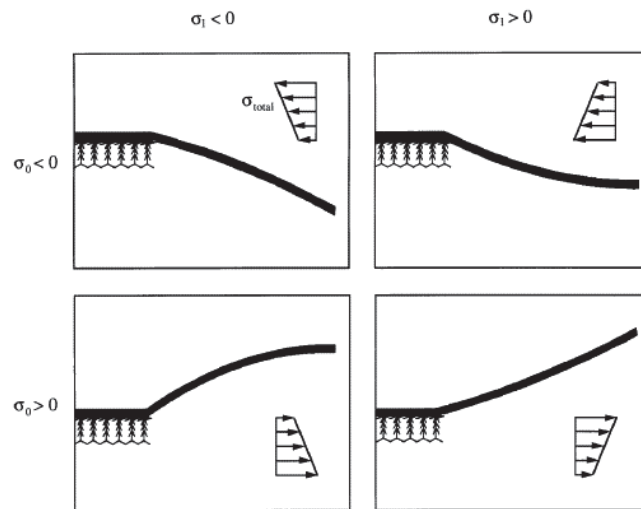
無考慮殘餘應力之應變能釋放率。

2.2 總殘餘應力

Fang 與 Wickert[19]將總殘餘應力展開為一多項式，忽略高次項，總殘餘應力可以用線性項與常數項的加總表示如式(2.12)， $y \in (-h/2, h/2)$ ， y 為厚度方向， h 為薄膜厚度。

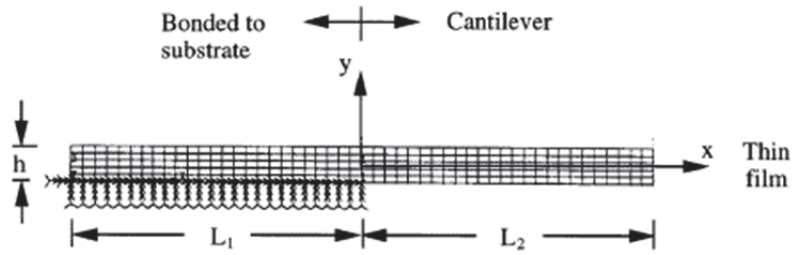
$$\sigma_{total} = \sum_{k=0}^{\infty} \sigma_k \left(\frac{y}{h/2}\right)^k \approx \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{y}{h/2}\right) \quad (2.12)$$

其中 σ_0 為平均應力，可以是拉伸或是壓縮應力，而 σ_1 為梯度應力，釋放殘餘應力後，懸臂梁變形主要有四種方式，如下圖



圖十 釋放殘餘應力(平均應力與梯度應力)後，預測懸臂梁變形的四種方式[19]

此法為利用懸臂梁的方式，將薄膜與基板分成懸臂梁端與黏住端，示意圖如圖十一，黏住端薄膜被基板限制住而不變形，而懸臂梁端沒有限制，因此在不受外力的情況時，懸臂梁端的變形即是釋放殘餘應力後所造成的形變。



圖十一 殘餘應力懸臂梁模型示意圖[19]

撓度可表示為下式

$$y \approx (\theta_0 + \theta_1)x + \frac{1}{2R}x^2 \quad (2.13)$$

其中 θ_0 和 θ_1 分別是平均應力或梯度應力造成的旋轉角，單位為 mrad， R 為曲率半徑，且其中 x 、 y 和 R 的單位皆為 μm 。

利用實驗數據做曲線擬合可以找到旋轉角與應力關係，式(2.14)和式(2.15)

$$\theta_0 \approx \frac{\sigma_0}{E} (1.33 + 0.45\nu)(-0.014h + 1.022) \quad (2.14)$$

$$\theta_1 \approx \frac{\sigma_1}{E} (0.0086h^2 - 0.047h + 0.81) \quad (2.15)$$

此關係式使用條件如下

$$0.1 \leq \nu \leq 0.4, 0.5 \mu\text{m} \leq h \leq 3.0 \mu\text{m}, 10^{-4} < \frac{\sigma_0}{E} < 10^{-1} \text{ 和 } 10^{-4} < \frac{\sigma_1}{E} < 10^{-1}$$

且由於 σ_1 完全由力矩提供，故可表示成式(2.16)，其中 E 為薄膜的楊氏係數， h 的單位為 μm 。

$$\sigma_1 = \frac{Eh}{2R} \quad (2.16)$$

透過實驗得知的材料曲率半徑以及材料參數，代入式(2.16)可求得 σ_1 ，式(2.13)利用試片的撓度做 curve fitting 獲得，將式(2.13)-(2.16)聯立可得 σ_0 和 σ_1 ，最後將結果代入式(2.12)得到沿厚度方向改變的殘餘應力值分布。

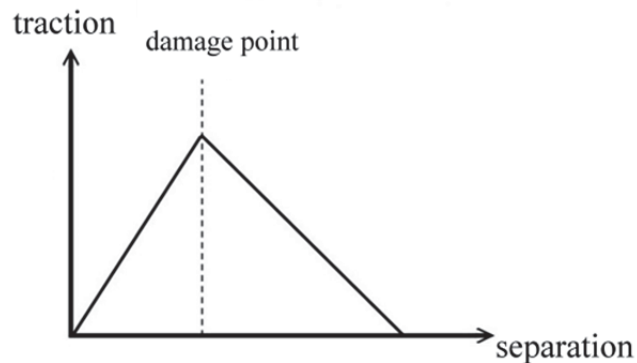


第三章 有限元素模擬分析



3.1 黏著元素

離型層特性如同先前在 1.2.3 節所介紹，而在 Abaqus 中可以藉由內建的黏著元素(cohesive element)來模擬黏膠層的力學行為，所以本研究利用此元素來模擬離型層的特性。黏著元素的組成律可分成：牽引力-位移關係(Traction-separation law, T-S law)、連體(Continuum)及襯墊(Gasket)，由於牽引力-位移關係適合用在複合材料黏結界面，且此膠層通常非常薄，或視作沒有厚度[20]，因此最符合本研究的情況，故本研究利用牽引力-位移關係作為黏著元素的組成律，牽引力-位移關係是黏著元素其應力與位移之間的關係式，由於實驗中所能得知的黏膠特性有限，故本研究選用牽引力-位移關係中最簡單的線彈性牽引力-位移關係，示意如下圖



圖十二 線彈性牽引力-位移關係

欲使用牽引力-位移關係，需要三個已知條件(特徵值)，離型層彈性 \mathbf{K} 值、初始破壞位移 δ_d 和韌性(toughness)或臨界應變能釋放率(critical energy release rate) G_c ，接下來將依序做介紹，首先是離型層彈性 \mathbf{K} 值，此為線性上升區域的斜率，如圖十三所示，牽引力與應變之關係如式(3.1)，而當 $T_0 = 1, \varepsilon = \delta$ 時，代入式(3.2)中，式

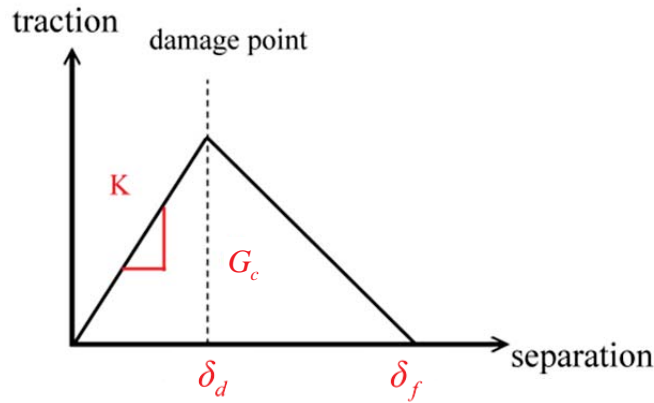


(3.1)的關係可轉為牽引力與位移之關係[21]。

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0} \quad (T_0 = 1, \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\delta}) \quad (3.2)$$

其中 \mathbf{t} 為牽引力向量、 T_0 為離型層初始厚度而 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 為應變向量， $\boldsymbol{\delta}$ 為位移向量，假設材料為等向性(isotropic)，且因為考量在非耦合的情況，所以式(3.1)中的 \mathbf{K} 值僅需考慮 K_{nn} 、 K_{ss} 及 K_{tt} ，而由材料特性取得 \mathbf{K} 值。



圖十三 線彈性牽引力-位移關係標示圖

其次是初始破壞位移 δ_d ，顧名思義就是當黏著元素開始破壞時的位移，由圖十三可發現若離型層彈性 \mathbf{K} 值、初始破壞位移 δ_d 為已知時，即可定義初始破壞點，牽引力-位移關係的破壞機制包含三個要素，為初始破壞準則(Damage initiation criterion)、破壞進展準則(Damage evolution)與何時完全破壞，破壞初始準則定義開始破壞的時間點，破壞進展準則描述開始破壞至完全破壞，黏著元素彈性衰退的過程，而破壞初始準則較為常見的有最大應力(Maximum stress)、最大應變(Maximum strain)、二次應力(Quadratic stress)及二次應變(Quadratic strain)破壞準則

[22]，如式(3.3)-(3.6)，且式中的〈 〉 表示正向壓應力與壓應變在公式中視為零。



i. 最大標稱應力破壞準則(Maximum nominal stress criterion):

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (3.3)$$

ii. 最大標稱應變破壞準則(Maximum nominal strain criterion):

$$\max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\} = 1 \quad (3.4)$$

iii. 二次標稱應力破壞準則(Quadratic nominal stress criterion):

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (3.5)$$

iv. 二次標稱應變破壞準則(Quadratic nominal strain criterion):

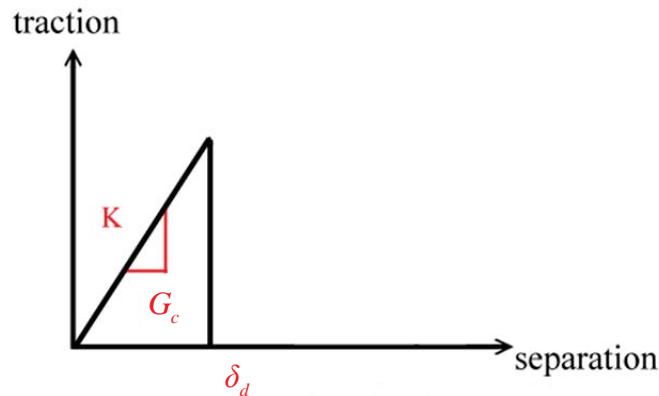
$$\left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (3.6)$$

與最大破壞準則相比二次破壞準則考慮較為周全，而破壞進展準則必須得知最終破壞位移(δ_f)或韌性(G_c)，而韌性為圖十三中三角形底下的面積，當 $G \geq G_c$ 裂縫會成長，而應變能釋放率可透過第二章引用的理論求得，但是初始破壞位移 δ_d 為未知的條件，無法由實驗中取得，因此為了有效利用所有已知條件，在此假設離型層的破壞是瞬間完成，即初始到完全破壞間無相對位移。藉由此假設，就可利用已知的韌性和離型層彈性 K 值去反推初始破壞位移 δ_d ，如式(3.7)，將圖十三之三角形簡化為圖十四之直角三角形，利用三個已知條件如圖十四紅字所示，即可完整定義黏著元素的破壞行為。且由於此假設之關係，牽引力-位移關係的破壞機制只需考慮初始破壞準則與何時完全破壞，因此本研究就不再額外介紹破壞進展

準則。

$$G_c = \frac{1}{2} K \delta_d^2 \quad (3.7)$$

本研究選用的是二次標稱應變破壞準則，會選擇二次標稱應變破壞準則除了上述的理由外，以及由式(3.7)中可以得到初始破壞位移 δ_d 的數據，當 $T_0 = 1, \epsilon = \delta$ 時，初始破壞位移可等於初始破壞之應變。



圖十四 模擬採用之牽引力-位移關係示意圖

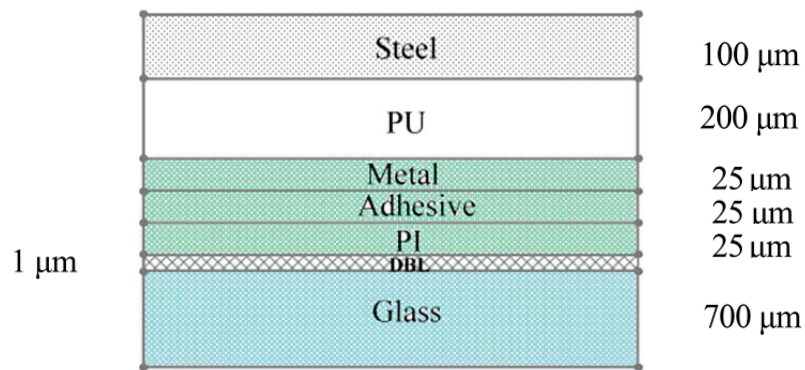
3.2 模擬參數設定

本研究利用 Abaqus 6.12 來進行模擬，將離型取下模型簡化為 2D 平面應變模型，因為其長度與厚度相比可將其視為無窮遠，此外施力不受長度方向的影響，所以可以簡化為 2D 平面應變，以節省大量計算所花的時間。

在 1.2.2 節已提過 AMOLED 為多層材料結構，且某些層的厚度為奈米等級，因此在模擬中將 AMOLED 整體結構簡化為三層，會簡化為三層其原因為這三層在厚度上相較於他層是比較主要的，而此三層分別為金屬蓋板(Metal)、封裝膠層(Adhesive layer)及 PI 層，其厚度皆為 25 μm 。而真空吸盤(Sucker)包含不鏽鋼板(Steel)及增加密合度的多孔性材質(Porous, PU)，在林宗緯[23]的研究中發現增加多孔性材

料可做為真空吸盤與 AMOLED 之間的緩衝，而有效降低層間應力值(S22 和 S21)，圖十五為模擬結構及厚度尺寸示意圖、表三為材料性質參數表。

由於 AMOLED 無法承受大曲率的彎曲破壞，故在取下的過程中 AMOLED 的曲率會受到真空吸盤的剛度限制，而本研究是透過位移控制來模擬取下行為，在下節會做更深入的介紹。



圖十五 離型取下模擬結構及厚度尺寸示意圖

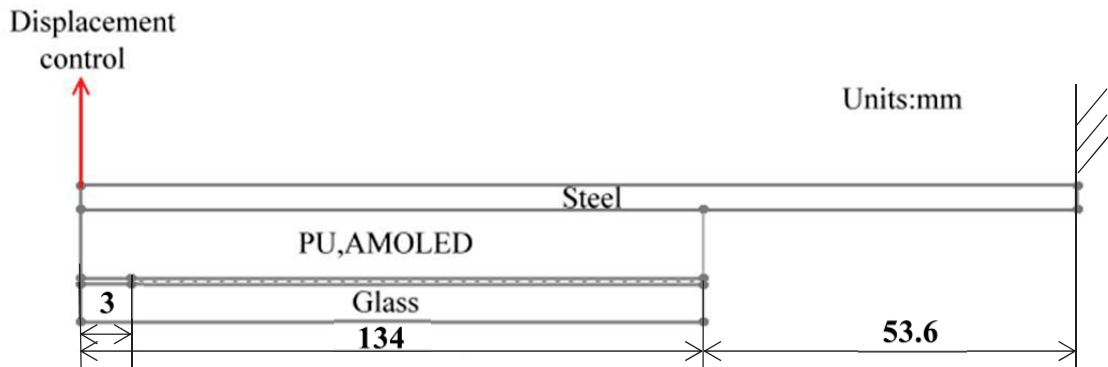
表三 材料參數表

Material	$E(\text{Pa})$	Poisson's ratio
Steel(Metal)	150G	0.29
PU(Porous)	2.796M	0.092
Adhesive	3.21G	0.39
PI	3G	0.42
Glass(Carrier)	71.7G	0.24
DBL	$K_{nn} : 50000$ 、 $K_{ss} : 19230$ (Pa)	

3.3 邊界條件與網格設定

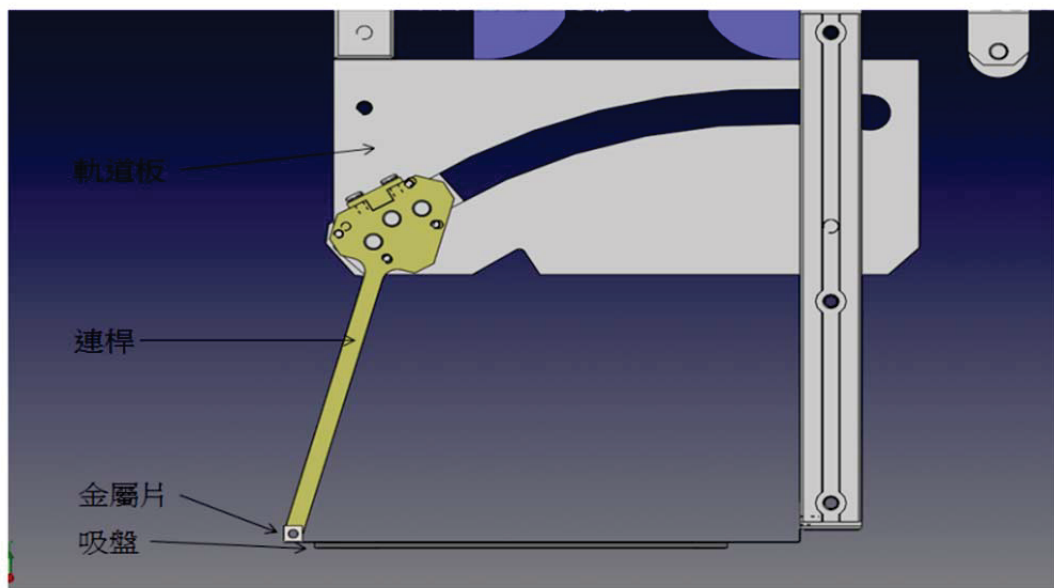
本節將介紹的是邊界條件與網格(mesh)設定的部分，而邊界條件主要可分成位移控制及預應力的設定，而位移控制又可細分為全拘束與模擬取下過程中的拉力，

全拘束包含玻璃基板底端固定，和不鏽鋼板末端固定，如圖十六所示，此設定是為了符合 ITRI 機構的設計。不鏽鋼板之後預留長度的設計是為了避免因固定端之彎曲斜率小而不易剝離，長度為 53.6 mm，而此設計能確保 AMOLED 與玻璃完全分離。此外圖十六中的 3 mm 為預先剝離長度。



圖十六 離型取下模擬結構及長度尺寸示意圖

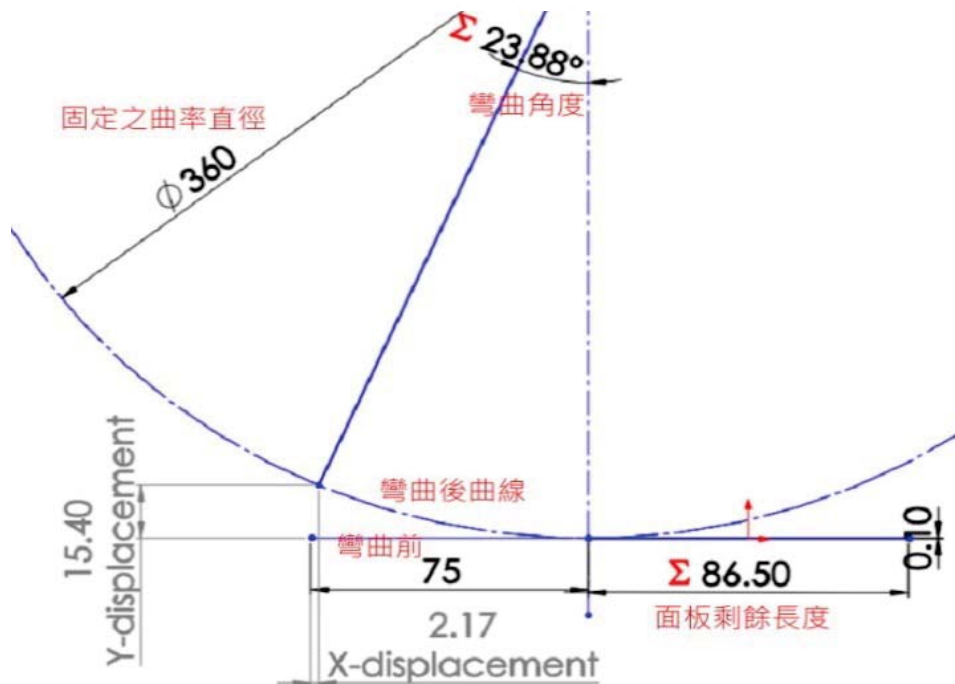
ITRI 離型取下技術中使用的是固定曲率半徑取下的方法，原因為 3.2 節所介紹，因為 AMOLED 無法承受大曲率的彎曲破壞，所以為此設計一機構可以限制彎曲曲率，其機構圖如下



圖十七 ITRI 離型取下固定曲率半徑機構圖(ITRI 2013 年提供)

本研究則是透過位移控制模擬取下過程中的拉力，會採取此方法的原因是由於在初步研究中發現如果施加一向上的負載即拉力，無法有效模擬離型取下的行為，會與實驗結果有很大的出入，因此最後是根據 ITRI 固定曲率半徑的方法，來控制施力點的位移。

利用工程繪圖軟體 Solidworks 2013 的草圖去計算在固定曲率半徑(180mm)下，彎曲前後施力點的位移值，詳細的步驟為固定曲率直徑下，給與不同的彎曲前長度，且以彎曲前後長度不變的前提去計算彎曲角度，則可取得彎曲前後的位移數據，例如固定曲率直徑為 360mm 下，當彎曲前為 75mm 時，彎曲角度約 23.88°，彎曲前後 XY 方向位移分別為 2.173mm 與 15.4mm，示意如圖十八，而利用此方法計算出之位移結果如表四。



圖十八 Solidworks 草圖計算位移示意圖

表四 曲率半徑(R=180mm)位移控制

crack length (mm)	Degree of curvature	X-displacement (mm)	Y-displacement (mm)
3	0.955	0.001	0.025
15	4.775	0.022	0.625
30	9.549	0.147	2.494
50	15.915	0.655	6.900
75	23.873	2.173	15.400
130	41.380	11.049	44.938

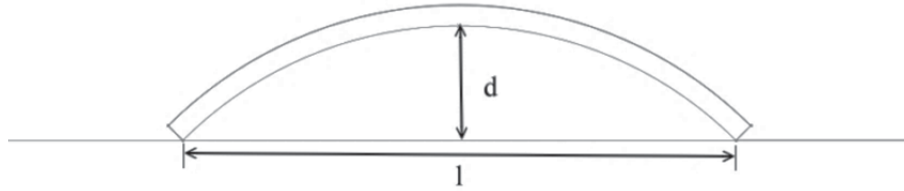
預應力的設定根據理論二求得，方法同 2.2 節介紹，藉由實驗得知的撓度與曲率半徑，代入式(2.12)可得一方程式 $y \approx 7 \times 10^{-6}x - 8.33 \times 10^{-5}x^2$ ，再透過將式(2.13)-(2.16)聯立可求得 $\sigma_0 = 20\text{MPa}$ 和 $\sigma_1 = -3\text{MPa}$ 。在預應力的模擬中，將前述之結果代入式(2.12)中可以得到不同厚度之應力分布，但由於 Abaqus 中無法施加沿厚度改變之預應力，因此模擬中將 PI 分為八層，在各層施加不同預應力來模擬，只考慮施加預應力於 PI 層之原因為實測結果中發現殘餘應力主要在 TFT 層，而由圖四中可知 TFT 層在 AMOLED 簡化模型中納入 PI 層中。

網格設定部分，由於 3.1 節所介紹的黏著元素需要使用掃掠網格，只能分為一層，且掃掠的方向必須要沿著厚度方向，否則無法破壞黏著元素，而除了離型層外皆選用平面應變的設定。

3.4 曲率與曲率半徑

第二章介紹的兩理論皆須得知試片的曲率或曲率半徑，而曲率可由式(3.8)求得 [24]，且曲率半徑為曲率的倒數，示意圖如圖十九所示，其中 d 為試片高度， l 為試片弦長，且因為曲率有方向性故曲率有正負之分，而定義彎向被黏層為正，彎

向膠層為負，由圖五可發現實驗之試片彎向膠層，故曲率及曲率半徑為負值。



圖十九 曲率示意圖

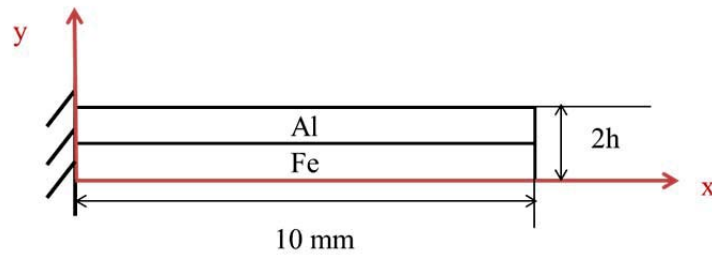
$$\kappa_{res} = \frac{2d}{d^2 + \frac{l^2}{4}} = \frac{1}{R} \quad (3.8)$$

由捲曲試片圖五可得 $d=7\text{mm}$, $l=12\text{mm}$ ，透過式(3.8)即可求得

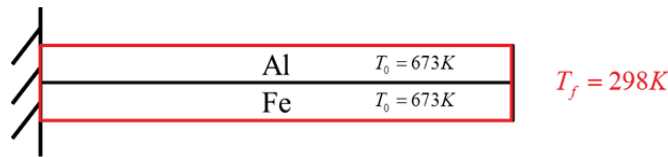
$$\kappa_{res} = -0.1647 / \text{mm}, R = 1 / \kappa_{res} = -6\text{mm} = -6000 \mu\text{m}。$$

3.5 不同試片厚度造成的影響

由於 ITRI 提供的釋放殘餘應力之捲曲 PI 試片厚度為 $12 \mu\text{m}$ 與離型取下結構中 PI 厚度為 $25 \mu\text{m}$ 有異，故在此要先提出來討論。無論是用理論一或是理論二都必須考量材料厚度的因素，在模擬中假設理論二求出的應力分布即 σ_0 和 σ_1 不受厚度改變的影響，此假設透過 COMSOL 4.3 模擬驗證，此模型為平面應變對稱模型，左端為固定端($x=0$)，改變試片厚度($12 \mu\text{m}$ 和 $25 \mu\text{m}$)，觀察兩不同熱膨脹係數之金屬試片 Al 和 Fe，從高溫降至低溫時($T_0 = 673\text{K}, T_f = 298\text{K}$)，其熱殘餘應力分佈是否一致，示意圖如圖二十及圖二十一，材料參數如表五所示。



圖二十 熱殘餘應力模型及尺寸示意圖

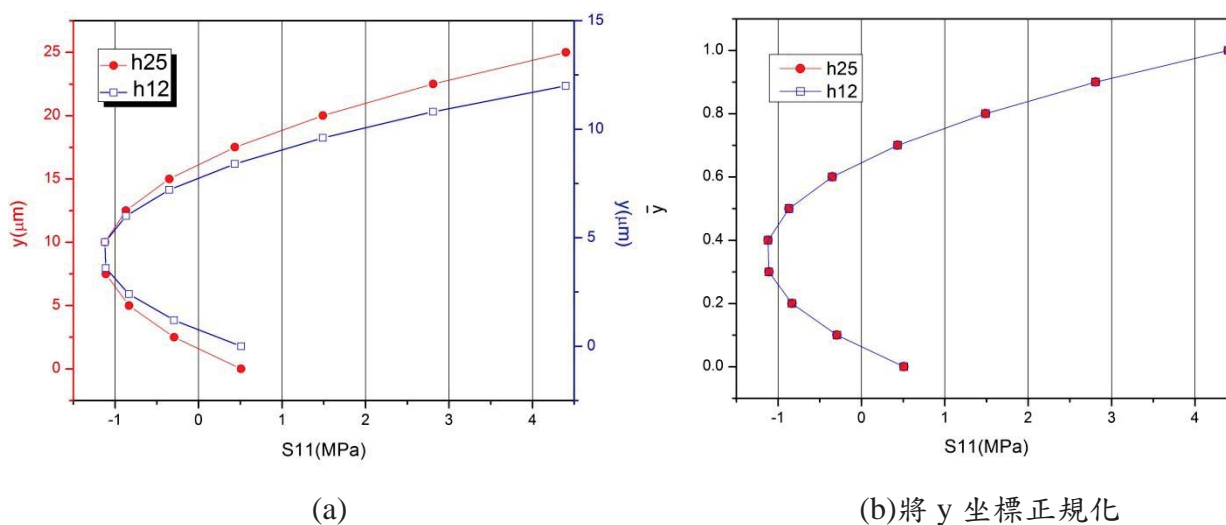


圖二十一 熱殘餘應力模型初始及邊界條件示意圖

表五 熱殘餘應力模型材料參數

Material	Al	Fe
heat capacity at constant pressure(J/kgK)	900	440
thermal conductivity(W/mK)	160	76.2
coefficient of thermal expansion (1/K)	23E-6	12.2E-6
density($\frac{kg}{m^3}$)	2700	7870
E(GPa)	70	200
Poisson's ratio	0.33	0.29

取 $x=10\text{ mm}$ 處 Fe 那層厚度等比例的 10 個數據點做圖($y=0\sim h$)，結果如圖二十二所示，其中 h25 對應的是左邊的數據，而 h12 對應的是右邊的數據。可發現即使不同厚度其熱殘餘應力分布完全相同，證明此假設為可行的。另外當試片太薄時，模擬無法收斂，因此最後僅分析 PI 厚度為 $25\ \mu\text{m}$ 。



圖二十二 不同厚度之熱殘餘應力分佈圖

由式(2.16)得知，當 σ_1 為定值時， h 和 R 會成正比，而由於 κ_{res} 為 R 的倒數，因此 h 增加時 κ_{res} 反而會減少，因此當 h 為 $25\mu\text{m}$ 時， $\kappa_{res} = -80/m$ 。

將材料參數、 κ_{res} 以及 $a=2E-4\text{m}$ 與 $P/B=12.6\text{gf/cm}$ 藉由 1.2.3 節提及之剝離試驗中獲得，且理論一中的被黏層與膠層分別代表 PI 層與 DBL 層，利用式(2.10)求得之應變能釋放率為 $G_{mech} = 1.2885\text{ J/m}^2$ 及 $G_{res} = 0.6025\text{ J/m}^2$ ，而將 G_I 值與已知的 K 值代入式(3.7)中即可得不同應變能釋放率所對應的初始破壞應變值，如下表

表六 不同應變能釋放率對應之初始破壞應變值 ε_d

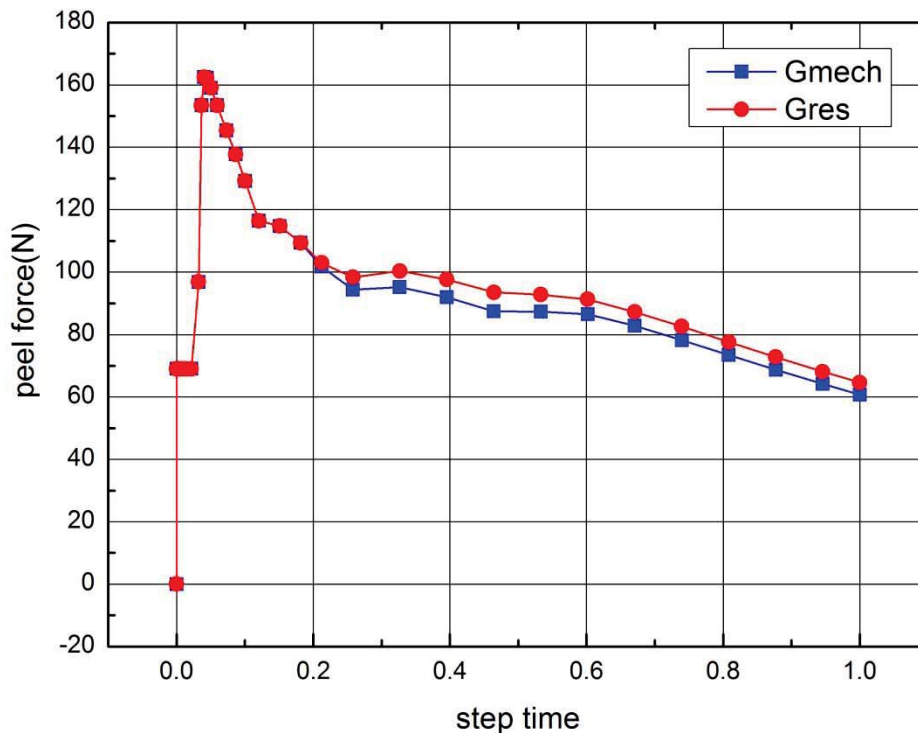
	G_{mech}	G_{res}
$G_I (\text{J/m}^2)$	1.2885	0.6025
$\varepsilon_{d,n}$	0.0072	0.0049
$\varepsilon_{d,s}$	0.0116	0.0079

第四章 結果與討論



4.1 取下時剝離力與時間關係

加入殘餘應力的考量，可以得知 $G_{mech} = 1.2885 J/m^2$ 下降為 $G_{res} = 0.6025 J/m^2$ ，並且導入現有材料參數及試片尺寸的離型取下模型後，會造成圖二十三中 step time 0.2 之後的剝離力量提升，但不影響其峰值。此原因為峰值發生時，試片還尚未剝離， G_I 值尚未達到最大值，故殘餘應力的影響會發生在峰值之後。即在本研究中，殘餘應力的影響對剝離力量的峰值大小沒有影響。



圖二十三 有無考慮殘餘應力下，剝離力-時間關係圖

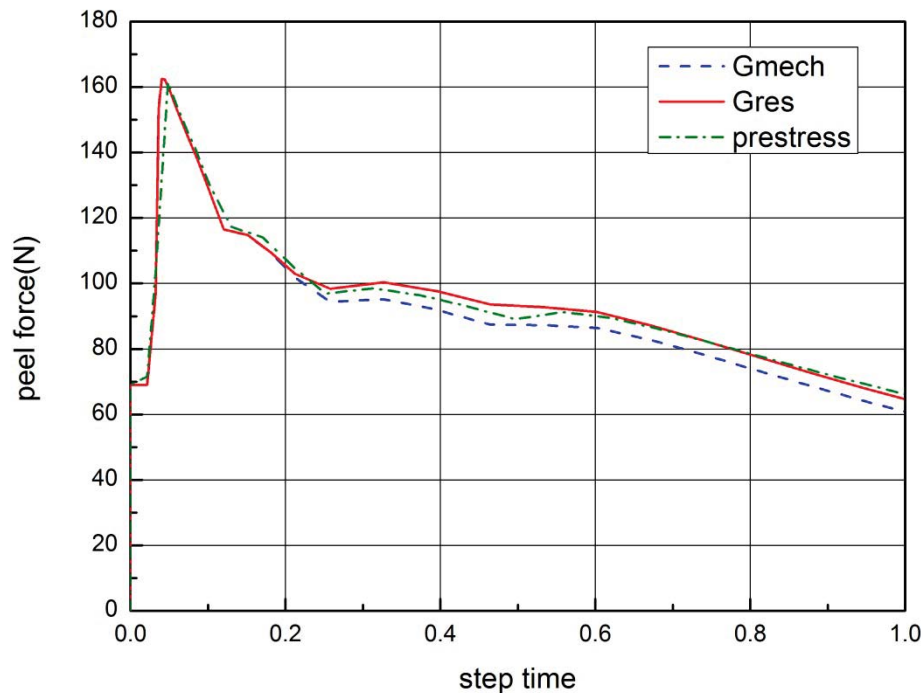
(其中 step time 不是真實時間，而是剝離長度之函數)

從數學上來分析， $G_I = (C_m Pa + C_{res})^2$ ，由於 $C_m Pa = \sqrt{G_{mech}} > 0$ ，又 C_{res} 正比於 $\kappa_{res} < 0$ ，所以當加入殘餘應力的考量下， G_I 值的理論分析會下降。當 $G_I = G_{Ic}$ 裂縫會成長，而考慮殘餘應力時即 $G_I - G_r = G_{Ic}$ ，其中 $G_I \propto P^2$ 而 G_r 為加入殘餘應力影響的修正項，令 P_1 為不考慮殘餘應力時的外力，而 P_2 為考慮殘餘應力時的外力， $P_1 \propto \sqrt{G_{Ic}}$ ， $P_2 \propto \sqrt{G_{Ic} + G_r}$ ，所以 $P_2 > P_1$ ，此結果與考慮殘餘應力下，開始剝離後的剝離力量越大吻合，代表剝離力量確實有受到殘餘應力的影響。

此外 G_{mech} 亦可利用雙懸臂梁理論(Double cantilever beam theory, DCB theory)[25]計算，如式(4.1)，同樣需做修正 $E \rightarrow \frac{E}{1-\nu^2}$ (平面應變)。

$$G_I = \frac{12P^2}{EB^2h} \left(\frac{a}{h} \right)^2 \quad (4.1)$$

使用理論二預應力的方法，可以得到類似的結果，殘餘預應力對剝離力量的峰值沒有影響，但會使開始剝離後的剝離力量增加，如下圖



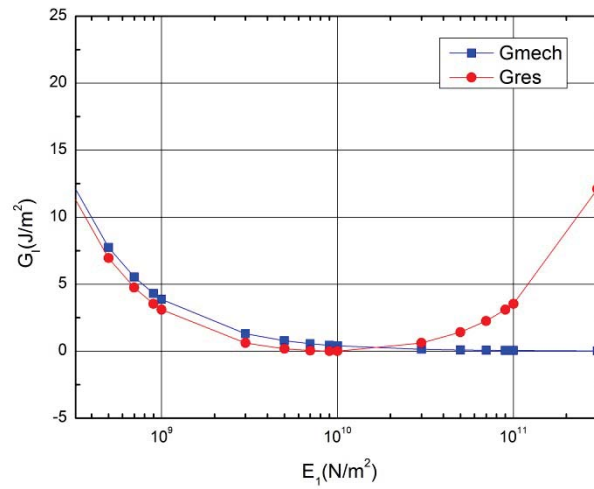
圖二十四 剝離力-時間關係圖(理論一 Gres 及理論二 prestress)

4.2 不同變數對應變能釋放率的影響

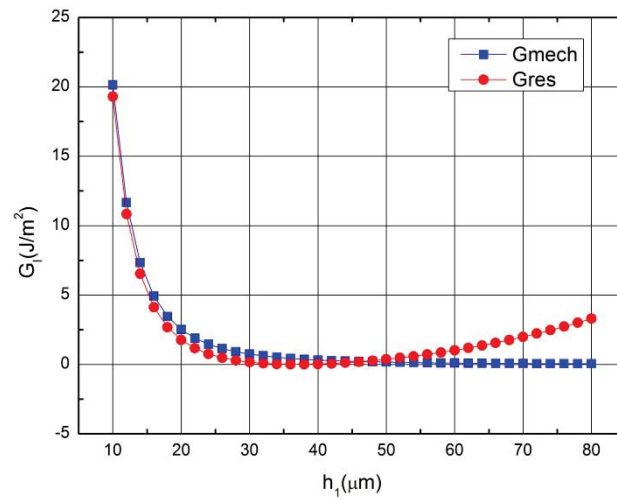
然而欲探討如何降低殘餘應力對應變能釋放率的影響，本研究利用式(2.10)將殘餘應力導入應變能釋放率中，並根據其公式探討主要參數為何。然而 G_I 為 G_{mech} 及 C_{res} 的函數，並且由式(2.8)和(2.11)可知影響 C_{res} 的參數有 κ_{res} 、 E_1 和 h_1 ； G_{mech} 有關的為 a 、 P 、 E_1 和 h_1 。

其中耦合參數 E_1 、 h_1 ，此兩參數分別為試片之材料及幾何性質，因此在製程中可依需求做相對應之調整，如圖二十五及圖二十六所示。在本研究中，當加入殘餘應力的考量下， G_I 值會下降，開始剝離後的剝離力量上升。因此透過探討參數 E_1 、 h_1 ，期望能將 G_I 值提升，以降低剝離力量。然而，在相關模擬結果中，雖然開

始剝離後的剝離力量有所下降，但其峰值並無法有效降低。



圖二十五 E_1 對於 G_f 的影響



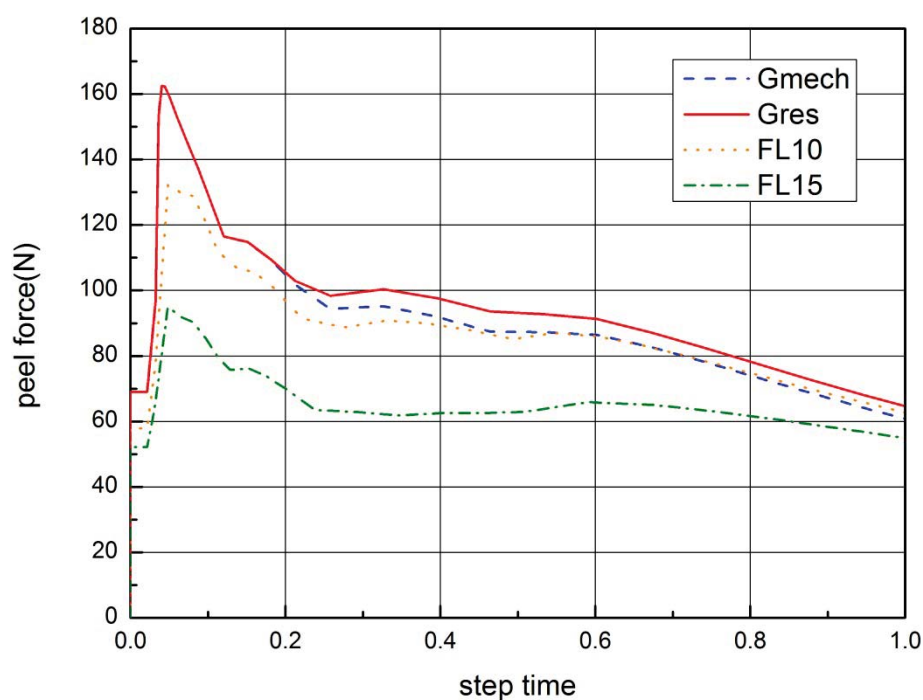
圖二十六 h_1 對於 G_f 的影響

然而非耦合參數 a 和 P 可由式(2.10)得知與 G_f 呈正相關，另外 κ_{res} 與溫度差及材料的熱膨脹係數有關，而此兩者為實驗中難以得知的參數，且 κ_{res} 為 E_1 和 h_1 的函數而在先前就已討論過其影響，故在本研究中並無多加討論。另外由於元件是否會脫層的重要性大於剝離力量，故在 4.4 節中討論殘餘應力對層間剪應力的影響。



4.3 前預留長度

根據先前最佳化之經驗，降低剝離力量峰值的方法為增加前預留長度，圖二十七中用 FL 代號表示，而後面的數字單位為 mm，由模擬結果圖二十七可知，當前預留長度為 15mm (FL15)時，除了峰值外整體皆可低於沒有考慮殘餘應力時的數值，且前預留長度越長越能增加峰值降低的幅度。



圖二十七 前預留長度對剝離力-時間關係圖

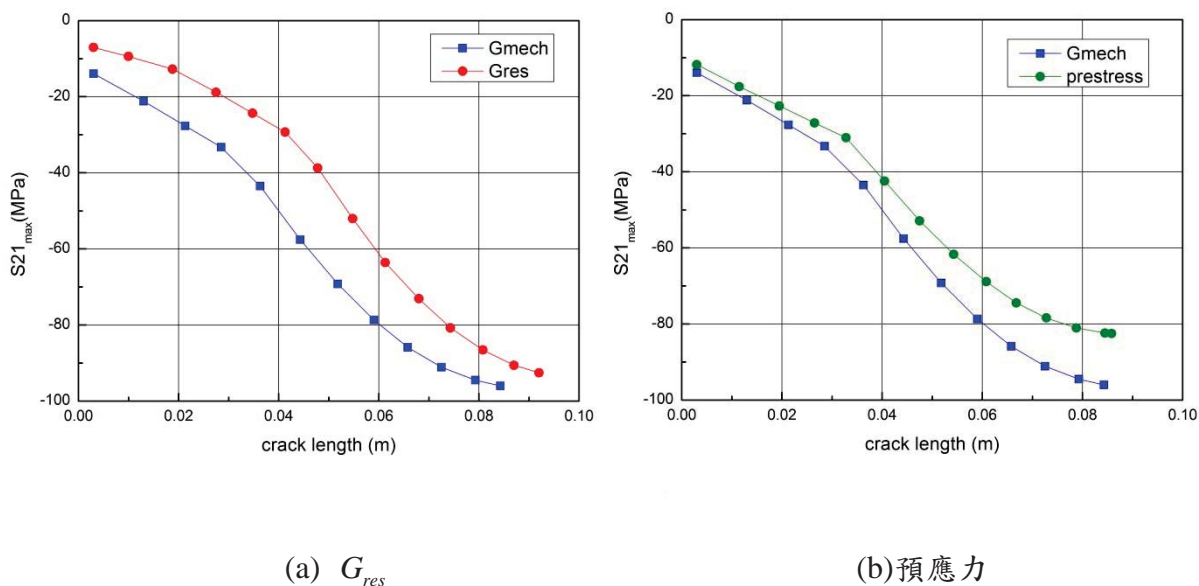
4.4 層間剪應力

層間剪應力會直接影響剝離良率，故在此節討論殘餘應力對層間剪應力的影響，由於離型取下結構其材料的楊氏係數差異很大，故彎曲時其中性軸在不鏽鋼板與 Adhesive 層間，且較靠近不鏽鋼板，而層間剪應力的產生為 Adhesive 與 PI



層在彎曲時其受張力/壓力的程度不同所導致。

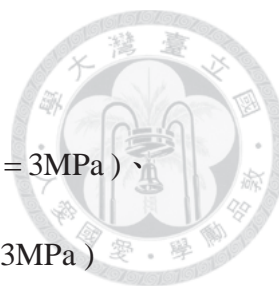
層間剪應力為張應力或壓應力會受到拉力的方向影響，即位移控制會改變層間剪應力的方向，而圖二十八中顯示無論是否考慮殘餘應力的影響，本研究之層間剪應力為壓應力。由結果圖二十八發現，考量殘餘應力之層間剪應力值皆低於沒有考慮殘餘應力的，會有這樣的結果可能原因為研究結果的殘餘應力為張應力，張應力與彎曲所造成的壓應力抵銷，所以層間剪應力降低，因此有考慮殘餘應力之層間剪應力會較小。



圖二十八 有無考慮殘餘應力之層間剪應力數據圖

4.5 不同情況下的結果

由於理論二中殘餘應力釋放後懸臂樑的變形有四種，而前面只討論其中一種情況(Case 3)，故在此節將討論其他情況下，剝離力與時間關係以及對層間剪應力的影響。

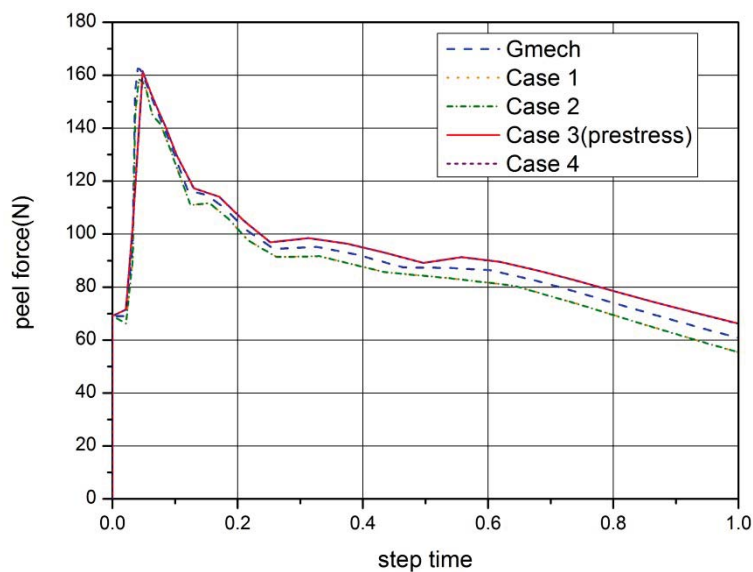


當 $|\sigma_0| = 20\text{MPa}$ 和 $|\sigma_1| = 3\text{MPa}$ ，此四種情況依序為：

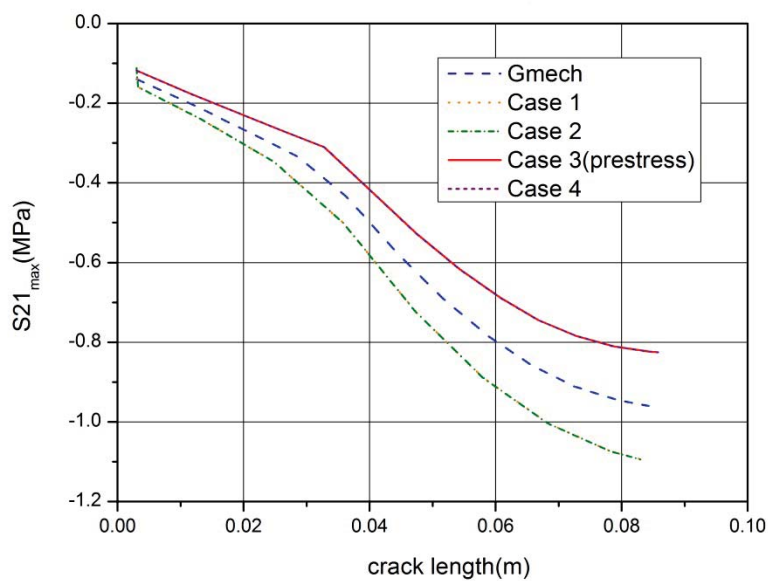
Case 1 ($\sigma_0 = -20\text{MPa}$ 和 $\sigma_1 = -3\text{MPa}$)、Case 2 ($\sigma_0 = -20\text{MPa}$ 和 $\sigma_1 = 3\text{MPa}$)、

Case 3 ($\sigma_0 = 20\text{MPa}$ 和 $\sigma_1 = -3\text{MPa}$) 和 Case 4 ($\sigma_0 = 20\text{MPa}$ 和 $\sigma_1 = 3\text{MPa}$)


其結果如下圖



圖二十九 不同情況下，剝離力-時間關係圖



圖三十 不同情況下，層間剪應力數據圖



由結果圖二十九可發現，不同情況下，剝離力量峰值的差異不大，而開始剝離後的剝離力量大小為 Case 3(prestress) > Case 4 > Gmech > Case 1 > Case 2，其中 Case 3(prestress)幾乎和 Case 4 重合，而 Case 1 幾乎和 Case 2 重合。而由圖三十可以得到層間剪應力大小的關係為 Case 2 > Case 1 > Gmech > Case 4 > Case 3(prestress)，此結果剛好和圖二十九相反，而此趨勢與先前相同，殘餘應力雖然會增加開始剝離後的剝離力量，但層間剪應力值會降低。其中 Case 1 和 Case 2 的差別在於 σ_1 前者為負後者為正，Case 3(prestress) 和 Case 4 亦如此，而由圖三十的結果可知，層間剪應力的大小跟 σ_0 有關，當 $\sigma_0 > 0$ 時殘餘應力為張應力與彎曲所造成的壓應力抵銷，所以層間剪應力降低，相反的，當 $\sigma_0 < 0$ 時殘餘應力為壓應力與彎曲所造成的壓應力成效相加，所以層間剪應力反而會增加。

第五章 結論與未來展望



5.1 結論

本文目的在研究殘餘應力對離型取下是否會造成不良影響，使用兩個理論 [17],[19]相互驗證，其中理論一將殘餘應力的影響考慮進應變能釋放率，而理論二能得到殘餘應力沿厚度方向的分布，利用有限元素軟體 Abaqus 建立離型取下模型，並將理論求得的數據與材料參數代入模型中模擬，使用軟體中內建的黏著元素來分析離型層的力學行為，最後可得到以下結論：

- 1.在實驗上殘餘應力不易量測，但可藉由理論二的懸臂梁法取得試片之撓度及曲率半徑，再代入公式求值，缺點是此方法需要較精準的量測設備，而理論一雖然無法得到真實的殘餘應力值，但是此方法較為簡單，數值模擬結果容易量化，而兩者可以得到相同的結果。

- 2.從常理判斷，會認為殘餘應力對製程有不良影響，然而由數值模擬結果來看，雖然殘餘應力的影響確實會造成開始剝離後的剝離力量上升，但並不影響其峰值大小，原因為峰值發生時，試片還尚未剝離，而在層間剪應力的分析中，發現有考慮殘餘應力其層間剪應力會低於沒有考慮的，此原因為殘餘張應力與彎曲造成的壓應力抵銷，所以有考慮殘餘應力之層間剪應力反而會較小，反之若殘餘應力為壓應力，層間剪應力會增加。

- 3.由於無論有無考慮殘餘應力，其剝離力量之峰值相同，即使改變式(2.10)中主要參數(a 、 P 、 E_1 和 h_1)亦無法降低，若欲降低峰值，只能透過改變結構，而本研究利用增加前預留長度來達成，當前預留長度為 15mm 時，剝離力量整體皆可低

於沒有考慮殘餘應力時的數值。

4.由數值模擬結果來看殘餘應力或許能降低脫層的風險，雖然目前尚無法得知是否能提升製程良率，但是可以確定的是量化其對應變能釋放率的影響以及獲得殘餘應力分布有助於評估殘餘應力對製程的衝擊。



5.2 未來展望

對於本研究未來可繼續發展的方向，在此提出以下幾個方向提供參考：

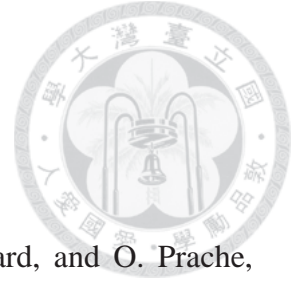
1.模擬方面已建立相關之模型，且有關離型層之相關研究已非常詳盡，然而離型層目前所能獲得的資訊還很不足且殘餘應力對膠層影響之文獻仍相當有限，若未來能夠更清楚其特性，將有助於整體分析。

2.由於 AMOLED 的厚度極薄，在本研究中將 AMOLED 模型簡化為主要提供厚度的三層，但要更符合真實狀況，未來勢必得將三層變為多層結構來模擬，而目前多層結構難以模擬的原因受限於網格的長寬比設定。


3.離型取下的位移控制，目前是利用 ITRI 提供之機構圖，以固定曲率半徑的方式，來控制施力點的位移，未來工作中可最佳化位移控制，有效降低層間剪應力。

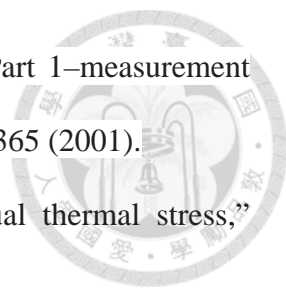
4.由於三維模型的模擬計算量過於龐大，超出目前設備的負荷，而將模型簡化為二維之平面應變模型，然而離型取下並非為二維結構，在未來的工作中，三維模型的模擬仍是必須的，再將三維模型之結果與本研究結果做比較，而其中要特別注意的是應變能釋放率需重新考慮。

參考文獻



- [1] M. Stewart, R. S. Howell, L. Pires, M. K. Hatalis, W. Howard, and O. Prache, “Polysilicon VGA active matrix OLED displays-technology and performance,” *IEDM'98. Technical Digest.*, pp. 871-874 (1998).
- [2] R.M.A. Dawson, Z. Shen, D.A. Furst, S. Connor, J. Hsu, M.G. Kane, R.G. Stewart, A. Ipri, C.N. King, P.J. Green, R.T. Flegal, S. Pearson, W.A. Barrow, E. Dickey, K. Ping, S. Robinson, C.W. Tang, S. Van Slyke, F. Chen, J. Shi, M.H. Lu, and J.C. Sturm, “The impact of the transient response of organic light emitting diodes on the design of active matrix OLED displays,” *IEDM'98. Technical Digest.*, pp. 875-878 (1998).
- [3] J. K. Mahon, “History and Status of Organic Light Emitting Device (OLED) Technology for Vehicular Applications,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 32(1), pp. 22-25 (2001).
- [4] 陳光榮。軟性 AMOLED 技術發展與商品化前線，*工業材料雜誌(工研院月刊)*，329，pp. 61-65 (2014)。
- [5] S. Utsunomiya, T. Kamakura, M. Kasuga, M. Kimura, W. Miyazawa, S. Inoue, and T. Shimoda, “Flexible Color AM-OLED Display Fabricated Using Surface Free Technology by Laser Ablation/Annealing (SUFTLA®) and Ink-jet Printing Technology,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 34(1), pp. 864-867 (2003).
- [6] I. French, D. George, T. Kretz, F. Templier, and H. Lifka, “Flexible Displays and Electronics Made in AM-LCD Facilities by the EPLaR™ Process,” *SID*

- 
- Symposium Digest of Technical Papers*, 38(1), pp. 1680-1683 (2007).
- [7] J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, *Handbook of visual display technology Ed.*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2012).
- [8] C. C. Lee, Y. Y. Chang, H. C. Cheng, J. C. Ho, and J. Chen, “A Novel Approach to Make Flexible Active Matrix Displays,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 41(1), pp. 810-813 (2010).
- [9] J. Chen, J. C. Ho, G. Chen, and C. C. Lee, “Reliability Improvement of Flexible AMOLED Based on Auxiliary Functional Film Technology,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 43(1), pp. 264-267 (2012).
- [10] Y. Nakajima, M. Nakata, T. Takei, H. Sato, H. Tsuji, Y. Fujisaki, T. Shimizu, G. Motomura, H. Fukagawa, T. Yamamoto, and H. Fujikake, “An 8-in. Oxide-TFT-Driven Flexible AMOLED Display with Solution-Processed Insulators,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 43(1), pp. 271-274 (2012).
- [11] H. Yamaguchi, T. Ueda, K. Miura, N. Saito, S. Nakano, T. Sakano, K. Sugi, I. Amemiya, M. Hiramatsu, and A. Ishida, “11.7-inch Flexible AMOLED Display Driven by a-IGZO TFTs on Plastic Substrate,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 43(1), pp. 1002-1005 (2012).
- [12] A. Cerioni, “Simulation of delamination in composite materials under static and fatigue loading by cohesive zone models,” Ph.D. dissertation. Department of Mechanical Engineering, University of Cagliari, Cagliari, Italy (2009).
- [13] G. G. Stoney, “The Tension of Metallic Films deposited by Electrolysis,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 82(553), pp. 172-175 (1909).
- [14] 李正中。薄膜光學與鍍膜技術第四版，藝軒圖書出版社，pp. 419-424 (2004)。

- 
- [15] P. J. Withers, and H. K. D. H. Bhadeshia, “Residual stress. Part 1—measurement techniques,” *Materials science and Technology*, 17(4), pp. 355-365 (2001).
- [16] J. A. Nairn, “Fracture mechanics of composites with residual thermal stress,” *Journal of Applied Mechanics*, 64(4), pp. 804-810 (1997).
- [17] J. A. Nairn, “Energy release rate analysis for adhesive and laminate double cantilever beam specimens emphasizing the effect of residual stresses,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(1), pp. 59-70 (2000).
- [18] S. H. Crandall, T. J. Lardner, R. R. Archer, N. H. Cook, and N. C. Dahl, *An introduction to the mechanics of solids 2nd ed.*, McGraw-Hill, New York (1978).
- [19] W. Fang, and J. A. Wickert, “Determining mean and gradient residual stresses in thin films using micromachined cantilevers,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6(3), pp. 301-309 (1996).
- [20] 林思仲。以黏著元素分析彈性層界面破壞。碩士論文。全國博碩士論文資訊網 (2009)。
- [21] “32.5.6 Defining the constitutive response of cohesive elements using a traction-separation description, linear elastic traction-separation behavior,” *Abaqus 6.12 Documentation Analysis User’s manual*.
- [22] “32.5.6 Defining the constitutive response of cohesive elements using a traction-separation description Damage initiation,” *Abaqus 6.12 Documentation Analysis User’s manual*.
- [23] 林宗緯。離型取下應力模擬。碩士論文。國立台灣大學應用力學所，台北市 (2014)。
- [24] J. A. Nairn, and P. Zoller, “The development of residual thermal stresses in amorphous and semicrystalline thermoplastic matrix composites,” *Toughened*

Composites, ASTM STP 937, N. J. Johnston, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 328-341 (1987).

- [25] F. E. Penado, “A closed form solution for the energy release rate of the double cantilever beam specimen with an adhesive layer,” *Journal of composite materials*, 27(4), pp. 383-407 (1993).

附錄 Abaqus 有限元模擬過程



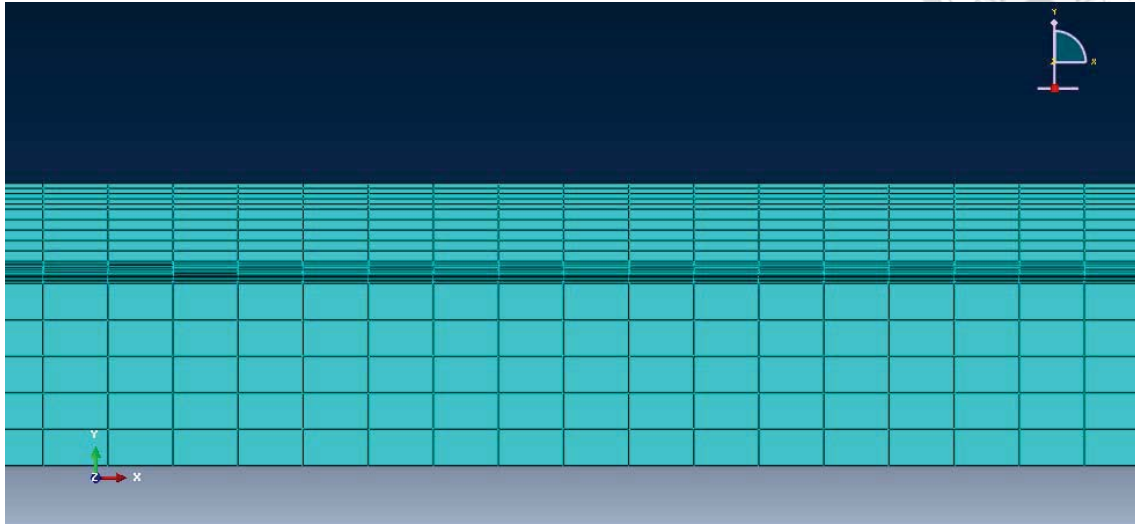
本附錄將對本論文使用 Abaqus 有限元軟體所進行的 AMOLED 離型取下數值模擬詳細過程進行說明及圖示，首先建立 Part，選擇 2D Planar，Type: Deformable，Base Feature: Shell，之後建立模型，再利用 Partition 切割出各層，如圖十五和圖十六所示。

其次 Property，設定各層材料參數並定義各層材料，材料參數如表三，其中要特別注意的是離型層(DBL)的設定，要加入破壞準則，Damage for Traction Separation Laws 的 Quade Damage，且其 Suboptions 中的 Damage Evolution 選 type: Energy，並增加 Elastic，type: Traction。建立 Section 時，DBL 要選用 Other，Cohesive，Response: Traction Separation 並且定義初始厚度為 1，其餘材料為 Solid，Homogeneous。再來是 Step 設定，除了 Initial 還需增加一個 Step，命名為 Peel，選 Static，General，且由於離型取下過程為大變形，因此 Nlgeom (Nonlinear geometry) 要為 ON。由於收斂性問題因此在 Incrementation 設置中，設定 Initial 和 Minimum 皆為 1E-15，此數據為嘗試後的經驗值。

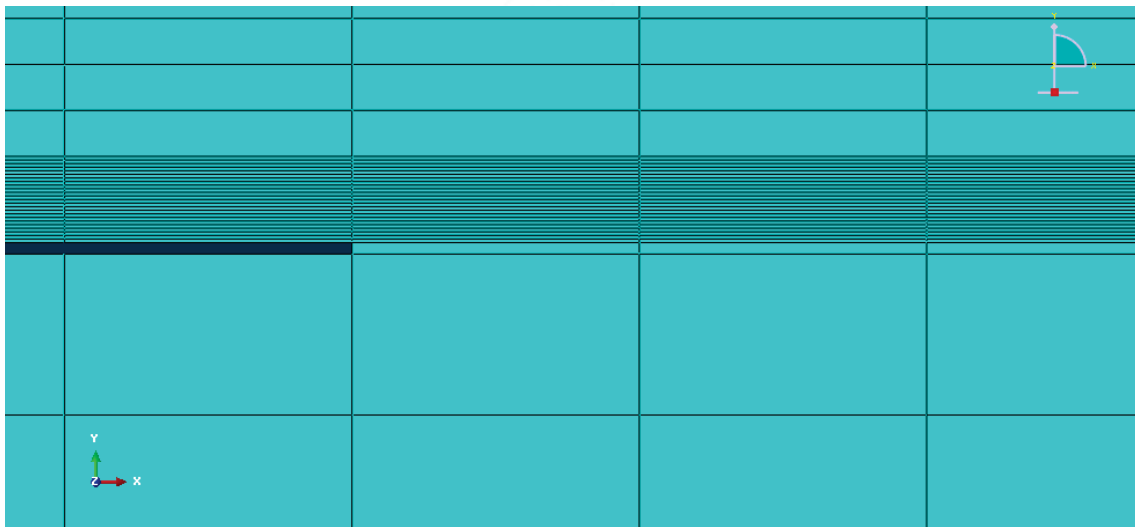
之後是 Load，邊界條件如 3.3 節所介紹是利用位移控制，而若要施加預應力增加 Predefined Field，選 Mechanical，Stress，Step: Initial，且由於 Abaqus 中無法施加沿厚度改變之預應力，因此模擬中將 PI 層 Partition 為八層，在各層施加不同預應力(S11)來模擬。

而 Mesh 部分，厚度方向將 AMOLED 各層分為八層，其他層分為五層，離型層只能分為一層，長度方向設定 global size 為 0.00025，離型層必須選用黏著元素

和掃掠網格，其他層選用平面應變的四邊形網格(Quad)，而離型層的網格設定細節已於 3.3 節提過，設定完成後網格圖如下圖



(a)完整模型中網格圖



(b)局部放大圖

圖三十一 離型取下模型網格圖

最後是 Job，選擇 Abaqus/Standard 的 Full analysis，當 Job 跑完出現 Completed，後處理結果可從 Visualization 取得。