

第三章 文獻回顧

導電膠封裝技術近幾年來，已經漸漸的取代了傳統錫鉛銲接製程，在電子封裝以及相關的領域中，有著相當廣泛的應用，如半導體封裝製程以及液晶顯示器的驅動 IC 封裝等。在導電膠的應用類型上，最主要可分為兩大類：等向性導電膠（isotropic conductive adhesive, ICA）與異向性導電膠（anisotropic conductive adhesive, ACA）。兩者組成及異同點等在前言部分已有介紹，故在此部份，針對與本論文研究之異向性導電膠有所相關的研究資料與文獻等，做一統整介紹。

3-1 異向性導電膠之接合強度

3-1.1 影響強度的因素

由於異向性導電膠的主要組成為高分子材料，若以高分子本身的觀點來看，機械式的吸附力跟分子間化學鍵結力如凡得瓦力（van der Waals' forces）等，都是影響接合強度的關鍵。而以不同材料的接合觀點，接著物與被接物兩者間的潤濕性（wetting）以及接合面積、和接觸角度（contact angle）等，也都是不可忽略的因素。總結以上觀點，以 ACF 作為接著層的封裝體，影響其界面接合強度的因素包含了材料本身性能、化學結合作用、靜電力、機械接著效果、接合表面、以及殘留應力[10]等。

導電膠的黏接力來自於高分子膠材，不同種類的高分子膠材組成的導電膠，其與晶片或是基板間的接合強度，除了受膠材本身的材料強度不同，或是分子交聯密度不同等材料性質影響；亦與導電膠對於基板及晶片表面吸附能力強弱（如潤濕性、接觸角度、面積等）、在界面間形成的化學鍵結強弱、更甚至在製程過程中產生的應力（如加

熱或是加壓等機械行為產生)等皆有相關；從以上種種因素來看，可知整個封裝體界面間接合機制受到許多化學、機械、物理等行為交互作用，任何一個因素的改變，與接著強度的強弱都是息息相關的。

3-1.2 異向性導電膠接合參數的影響

異向性導電膠壓合製程主要為下列步驟：(1)先將 ACF 置於基板，並給予適當預熱 (pre-heating)，預熱的功用主要是用以固定導電膠於基板上並方便對位，同時可除去導電膠表面的保護膜且軟化導電膠，給予導電膠適當的流動性。(2)將晶片上凸塊 (bump) 對準基板上的錐墊 (contact pad) 然後壓合。(3)加壓並加熱進行最後接合的動作 (final bonding)；整個接合過程如圖 3-1[11]所示。許多製程參數包含接合的壓力及溫度、接合的時間、溫度上升率以及加壓速率、凸塊的高度及晶片-基板對位的準確度、基板的平面度及強度還有接觸面等、都會對導電膠接合的質性 (quality) 有影響[12]。其中以溫度、時間、壓力對其可靠度的影響最為嚴重[13]。

作為導電膠膠材的高分子可分為熱固性 (thermosetting) 和熱塑性 (thermoplastic) 兩類。不同的膠材所需要的接合溫度也有所不同。施加溫度可以提供膠材足夠的能量，引發化學作用發生鍵結，使其固化 (curing)，產生一定強度。以熱固性樹脂為膠材的導電膠來說，較高的接合溫度，可使膠材內部的交聯密度增加，並增強與晶片或基板間的接合強度。若接合溫度過低，無法形成足夠的交聯密度，可能會使導電粒子在施加壓力的過程中受擠壓 (squeeze) 而移動，造成電阻上升或不穩定。

Uddin 等[14]研究發現，當接合的溫度越高，導電膠膠材的樹脂分子交聯更加的密集，分子反應速率較快，且有較佳的固化程度

(curing degree)，使得接合強度較強，但卻可能造成鐳墊上鋁 (Al) 層的氧化，造成電阻上升；另外，當接合溫度高到一定程度，也會使得基板表面分子與導電膠層界面間，有擴散的行為 (inter-diffuse) 發生，提高了其界面間接合強度。

Chen 等[15]的研究結果顯示出越高的溫度除了接合強度越高外，膠材的流動性 (rheology) 也會有所改變，流動性增加可使導電粒子有足夠的移動，增加凸塊與鐳墊間的導電粒子數，電阻下降，但也由於溫度上升增強了氧化的效應，電阻亦有增高的可能性；除此之外，熱膨脹係數不匹配的關係，也會使電阻在過高的接合溫度下有所增高。若接合時間越長，流動性增加，有足夠的固化時間，固化程度較高，在界面處形成較強壯的化學鍵結，接合強度亦有增強的趨勢。

但過高的接合溫度，反而會降低封裝體的可靠度；Chan 等[16]認為接合的溫度決定了導電膠的固化程度，一般說來，接合溫度高，固化程度也較高，若超過了一定的溫度，膠材固化過快，反而會使導電粒子沒有足夠的移動，導致粒子分布不均或是接點處沒有足夠的粒子數，而使電阻上升。同時，Liu 等[17]發現也因為固化過於快速，造成膠材流動分布不均勻，容易形成缺陷如氣泡等，反而降低接合強度。Kim 等[18]則發現，氣泡形成的面積比例隨著接合溫度上升而增加，而氣泡形成的空洞處，在吸收到環境濕氣的情況下，則可能成為水氣穿透的通道，並凝聚水氣，降低可靠度。

在真實業界使用上，導電膠接合過程中常使用紫外光 (UV) 來作為熱壓接合的熱源，其原因為紫外光的能量較一般熱源高，且穿透力強，可快速固化膠材[19]。Lee 等[20]則採用超音波震動 (ultrasonic vibration) 的方式產生熱量，進行壓合，結果發現此種加熱方式傳熱快速，明顯減少了壓合時間，且膠材固化快，接合强度高；近來也有

研究嘗試以雷射 (laser) 作為熱源[21]的方式進行壓合，加熱均勻且快速，可達到一定的接合品質。

接合壓力對導電膠接著強度的影響，相較之下就沒有接合溫度來的大。Wu、Zhang 等學者[22, 23]研究指出，隨接合壓力的增加，強度的增強並不明顯，但依然有些微的上升。在接合過程施加壓力，除了對位及固定的功能外，最重要的是施壓使得導電膠厚度變薄，讓凸塊與錫墊間的導電粒子產生適當的變形，增加粒子與接觸面的接觸面積，使電流可以導通。但過大的壓力，反而會使導電粒子破裂，造成電阻升高。

Chan 及 Luk[24]指出，適當的壓力使得導電粒子產生適當的變形，增加導電率，而導電粒子的變形量並沒有一個標準，端看粒子組成與壓力間，造成的電阻變化而定；若在凸塊以及錫墊的表面形成了氧化層，該氧化層反而有吸收壓力的作用 (shock absorbent)，使得外加壓力無法使導電粒子有效的變形，電阻上升。

Chen 等[25]的實驗結果顯示出，當接合壓力增加時，較高的壓力壓合使得導電膠厚度較薄，反而使接合強度減弱；同時也會致使過高內部壓應力累積而存在，當再受到環境影響如熱作用後，內部壓應力被釋放，導致強度進而降低；也由於內部壓應力被釋放，在界面或是導電粒子與凸塊接觸面形成缺口 (gap)，除了強度降低外，甚至可能會造成斷路 (open circuit)，而使得接觸電阻上升[26]。

由前述研究結果可以看出，導電膠接合技術不論在電性或是機械性質的表現上，都深受著接合時溫度、壓力以及時間等參數的影響，這些接合參數的改變，進而影響到固化程度的高低。因此，不同組成的導電膠，對於其接合參數的最佳化 (optimum) 過程，在其後續可靠度的表現上是相當的重要[27]。

3-2 機械強度測試

我們對於電子封裝的目的，主要的可分為兩方面：一為電性質的表現，即電訊的傳遞；另一方面為機械性質的需求，包含散熱、保護 IC 不受外界環境影響或外力的傷害、承載封裝體結構、以及提供適當的接合強度等。在目前使用異向性導電膜或是相關的導電膠接合技術上，幾乎都是以剪力（shear force）或是撥離（peeling）兩種不同的作用方式，來測試其界面接合強度的表現。

3-2.1 剪力強度測試（shear strength test）

楊景斌[10]以晶片剪力強度測試（die shear test）的方法探討晶片-玻璃基板接合結構界面層的強度，並針對三種不同硬化系統及材料性質的異向性導電膜，探討不同溫度、壓力、時間的熱壓接合條件對接合強度的影響，以及分別在不同操作溫度、高溫高溼、熱循環等環境下進行環境可靠度測試。結果發現以酚醛（phenol）作為硬化系統的導電膠其反應速率及固化程度較差，初始接合強度較弱，而初始未固化完全的導電膠材，經過溫度效應老化後會增加固化程度反而使強度增加，其後因溫度老化影響而下降。

若不考慮接合壓力、溫度及時間的影響，吳等人[28]針對以相同製程參數接合的覆晶-軟膜（flip-chip on film，FCOF）和覆晶-玻璃基板（flip-chip on glass，FCOG）兩種不同的結構進行剪力強度測試，結果發現，FCOF 接合結構的強度比 FCOG 來的強，進一步觀察顯示，導電粒子的分布不均以及結合時內部缺陷的形成(如氣泡)會降低其剪力強度，導電粒子分布較密的部份，類似孔洞（void）聚集的效果，形成應力集中點而使強度下降；另一方面，氣泡缺陷存在的地方，會減少受力面積，提高剪應力，裂縫（crack）容易形成以及生長

(propagation)。熱膨脹係數不匹配也可能會造成在加熱過程中，缺陷的形成，特別是凸塊與導電膠交界處，或是四週邊緣，導致接點強度減弱[29]。

Tan 等[30]學者同樣的對晶片-軟板接合試片進行剪力測試。結果發現，在剪力與位移圖的彈性區域內，試片的電阻值幾乎為定值，當超過了彈性範圍，導電膠則會發生黏彈性變形，此時電阻值則有明顯且迅速的上升；若進一步將試片置於壓力鍋的環境下，受到高溫與濕氣的影響，最大剪力強度與剪力模數 (shear modulus) 都有下降的趨勢，同時其破裂斷面隨環境時效時間 (aging time) 的增加，呈平坦而脆性的破壞。

黃建元[31]則對於單純以凸塊接合，以及採取導電膠作為接合層的兩種封裝體進行剪力強度的測試與比較，結果可以看出利用導電膠接合，其凸塊間界面接合強度遠比單純凸塊接合來的強，又同時發現，在單純凸塊接合的結構體中，不同種類金屬的凸塊 (金-錫)，其接合強度大於同種類凸塊 (金-金) 的強度，推測可能是因為不同種凸塊在接合過程間有介金屬化合物 (intermetallic compound, IMC) 的生成，而增強了其界面強度。

而為了增強如強度、散熱能力等機械性質，有研究指出，在導電膠膠材中適當的加入粒徑較導電粒子小的非導電粒子 (non-conductive filler)，可以適當補強導電膠的機械性質，如減小熱膨脹係數或提高其楊氏係數 (Young's modulus)，增加強度等，且非導電粒子的含量越高，補強效果越好[32]。Yim 等[33]在導電膠內添加入碳化矽 (SiC)，由於碳化矽的熱傳導性，加入後提升了膠材的熱傳導性，也增強了其接合強度，使得導電膠經過高溫高溼的環境作用下，依然保有作用前之強度。

3-2.2 撥離強度測試 (peeling strength test)

不同於剪力測試，屬於橫向剪切應力作用，撥離強度測試則是屬於正向拉應力作用。雖然在一般使用導電膠接合的封裝結構中，其主要應力作用模式為剪切應力主導，但界面的正向接合強度，也是使用上一大要求。

張維倫[34]以撥離強度測試 (peeling strength test) 的方式，對晶片-玻璃接合結構進行了經高溫老化和高溫高溼後的環境可靠度測試，同時也進行了不同接著參數和不同溫度環境下的強度測試。結果發現撥離強度受溼度環境影響遠比溫度影響大。高溫老化環境作用可使初始固化程度上升，強度加強，但老化時間過長，會使導電膠轉為脆性，強度開始下降；另外，在接著參數的實驗中，若接著的溫度或是接著時間越長，其撥離強度也會有明顯增加；在不同環境溫度下的撥離強度，隨著溫度的上升而有明顯下降。如前述回顧所提到的，接合溫度的高低對於固化程度會有顯著的影響，進而影響的接合面的剪力強度，同樣的，撥離強度也深受到膠材固化完全與否的影響。Wu等[35]研究發現，熱固性的膠材，若在較高的溫度下固化，其撥離強度會有明顯的提高，因熱固性的膠材，使用越高溫度固化，會使材料有硬化的效果，能承受的正面拉應力越強；但若在加熱壓合時，使用過高的壓力進行壓合，反而使撥離強度減弱，這是因為過大的壓力會造成膠材被擠壓到接著面積外部，且容易在受熱固化的過程中造成空氣進入，形成氣泡而減小受力面積，導致強度降低。然而，適當的提高接合壓力，是可以增加膠材撥離強度的。Masahiro 等[36]的研究結果也顯示出，撥離強度隨固化溫度越高，固化越完全，而有增高的趨勢。特別的是，該研究結果也顯示出，撥離強度尚與撥離速度有關，以在不同溫度下固化卻有相同固化程度的導電膠做比較，固化溫度較

低時，撥離強度與速度的依賴性較高，撥離速度越快，膠材的強度越高，而固化溫度較高時，分子間交聯會造成有應力鬆弛（stress relaxation）的情形發生，故撥離強度與撥離速度的關聯性相對較低。

3-2.3 疲勞測試 (fatigue test)

“疲勞”是常見的一種機械材料破壞行為，當材料受到反覆週期性負載作用，即使受到的最大負載未達到極限強度（ultimate strength），但在經過某數目的週期作用後，可能在材料表面缺陷處形成裂縫，而後裂縫成長延伸，最終導致有效受力面積減少，應力增加而破壞。

疲勞並不一定是受到機械式的外力作用才會產生的破壞行為，有的時候環境的變化也會造成材料有類似疲勞的破壞行為發生。當電子產品在開啟的同時，電流的導通造成溫度上升，關閉之後則溫度下降，如此反覆開關形成熱循環作用般的疲勞效應，更由於不同材料間熱膨脹係數的不同，因此溫度升降所造成的反覆熱應力便對電子產品的耐用性造成潛在的傷害。如同在電子封裝的可靠度測試上，熱循環測試即是模擬反覆開關對結構體造成溫度升降的疲勞效應，若在組成元件的材料中有缺陷的存在，溫度反覆升降所形成內部應力影響便如同外在作用力，終將導致缺陷成長而破壞，使其失效。

在相關的導電膠機械性質測試文獻中，有關疲勞測試的研究很少，相關的研究大多是利用導電膠以 lap joint 結構來進行疲勞測試，研究附著式接點（adhesive joints）的疲勞行為。

Tan 等[29] 利用剪力作用，以位移控制（displacement controll）的方法，在室溫下對晶片-軟板接合結構進行剪力疲勞測試。結果發現，在疲勞測試的初始階段中，可以看到其強度有一突然的驟降，同時接觸電阻值亦變低，推論是由於來回的剪力作用使得接觸表面的鋁

氧化層被擦去 (scrub away)，導電粒子表面的絕緣層也因此被剝離，故電阻下降，而隨測試進行，周次增加，接合強度轉而呈現下降的趨勢，電阻也慢慢升高。同樣的 Constable 等[37]學者也是利用位移控制的方式，針對利用等向性導電膠作為 lap joints 接著層的接合結構進行疲勞實驗，從實驗結果可以看出，在一開始的測試階段，由於等向性導電膠內部添加的銀導電物，不像膠材有承受應變的能力，無法承受在測試下的應變量，而滑移離開了原本的位置以及發生塑性降伏，造成了電阻的增高，而之後的測試過程中，電阻則是呈現穩定無變化的狀態。從 Constable 等人的實驗結果，我們也可以了解到，膠材較一般的鋅錫材料承受應變的能力強，但其強度卻較弱，因此使用膠材取代鋅錫作為界面連接層時，要特別注意接合強度上的要求，以免產品的可靠度受影響。

考慮到真實使用情況下溫度以及溼度的影響，Gomatam 等[38]對導電膠接點在 28°C、50°C、90°C 以及 95% 相對濕度環境下進行疲勞實驗，藉由應力比例 (stress ratio) 的改變，探討該參數對接點壽命的影响。由不同溫度下的疲勞測試結果，發現環境溫度越高，疲勞壽命越低，濕度對疲勞壽命也是有著負面的影響，而由實驗結果的 S-N 曲線 (S-N curve) 可以看出，在高溫下不同應力等級，其 S-N 曲線越趨向平行；另外，當施加負載的頻率越低，疲勞壽命也越低，推測是由於負載頻率較低時，裂縫承受相同力量作用的時間較長，造成較高程度的潛變負荷，使得接點壽命值較低。

3-3 可靠度測試

良好的可靠度對電子產品來說，是一基本要求。即便電子產品功能再強大，設計再新穎，若遭受到環境或是外在因素作用便失去其該

具有的作用，對生產者或消費者而言，都是利益上的損失，因此可靠度測試的研究，一直都是電子封裝領域中主要且不可或缺的一部份。

可靠度測試的主要目的是藉由較一般使用下劇烈的外加環境作用，加速模擬元件在受到不同使用環境下，可能受到的破壞情形以了解其相關的機制，並進一步分析該元件失效的現象以及失效的機率，作為之後產品改善的依據。

在一般使用環境下，溼度以及溫度可以說是環境效應中影響元件功能最重要的兩大因素，尤其導電膠的主要成分為高分子膠材，因此以高分子作為主要接著材料的封裝體，其可靠度受到濕度以及溫度的影響更是深遠。溫度變化產生熱能可以減弱高分子材料分子間的化學鍵結甚至破壞，也會因熱應力的產生而破壞結構界面間的接著，加速結構體的破壞[10]。；溼氣則容易被高分子所吸收，引發高分子膨脹生成應力引起界面的脫層，更可能進一步造成材料玻璃轉換溫度（glass transition temperature）的改變，使得強度下降。因此我們可以知道，導電膠的材料性質變化對其可靠度的表現有著相當深遠的影響[39]。

3-3.1 溫度循環測試（thermal cycling test）

由於熱膨脹係數的不同，在受到溫度的作用下，各種材料體積膨脹的程度也不同，造成在材料接合界面間熱應力的產生。而在使用導電膠作為接合物的電子元件中，由於晶片凸塊與基板鐳墊間，並不像利用鐳料接合的元件，有直接的金屬層連接，因此若在接合界面間形成應力，可能導致接著界面間有間隙或是導電粒子的移動，更甚者會造成整體元件的變形如翹曲（warpage），導致接點電阻上升或是接點的破壞。另外，像是材料彈性係數的差異、膠材本身強度以及玻璃轉

換溫度 (glass transition temperature) 等材料性質、或是晶片與基板特性等都是影響經熱循環作用後元件可靠度的因素。

Kwon 等[40]從實驗發現，經熱循環測試以後，剪力強度的變弱主要是由於接合界面產生脫層 (delamination) 現象所導致的，特別是位於晶片角落處，由於角落為奇異點，即應力集中位置以及幾何不連續點，因此受到熱應力作用的效應特別明顯。進一步的觀察，可以發現產生的熱應力由角落向內部遞減，破壞模式也由角落的界面脫層破壞轉變為內部的膠材破壞。Kwon 等人[41]的另一項研究發現，利用雲紋干涉法 (Moire Interferometry) 分析受熱循環作用後封裝結構的變形發現，在角落處變形最為嚴重，熱應力造成的剪應變也最大，因此在角落界面處會有脫層以及翹曲現象的發生。

Jokinen 等[42]採用不同厚度的晶片，其餘材料組成皆相同的試片來比較熱循環後，不同厚度的晶片對可靠度造成的影響。結果發現，若有適當的接合參數，薄晶片的試片與一般尺寸晶片有著相同的可靠度，但在加工使晶片薄化的過程中所造成的加工應力，卻可能造成薄晶片試片在熱循環過程中的提早失效。

當採用彈性係數較低的高分子樹脂做為導電膠膠材，也可以有效的減少在導電膠與晶片和基板接合界面處受熱作用而產生的熱應力，增加其接合強度，然而膠材的彈性係數過低，導致導電膠本身的強度低於界面接合強度，對整體的強度反而沒有改善的效果，熱應力的產生反而會造成其本身的破壞 (cohesive failure)，亦會導致元件失效[43, 44]。

更進一步的來看，由於熱膨脹係數不匹配產生的熱應力，在界面間的影響是最大的，除了在晶片與基板接合界面間造成影響，導致間隙產生形成脫層、翹曲等破壞情形外，在凸塊與鐳墊交界處則可能會

導致相對位移，影響電訊傳遞。因此除了影響接點強度外，熱應力對接點間電訊的影響也是不容忽視的。由力學的觀點來看，我們可以明瞭凸塊與鐸墊的機械性質，對於受熱之後產生的應力或是位移、應變等行為影響很大。

Lee等[45]的研究指出不同大小的凸塊以及導電粒子對受熱循環作用後接點的電性表現有著相當顯著的影響。當凸塊面積越大，或是導電粒子的半徑越大，受到熱循環作用後電阻值依然可以保持一穩定且低值的表現。Frisk等[46]利用兩種不同大小及組成的導電粒子搭配相同膠材所合成的兩種不同導電膠進行熱循環測試實驗，從其實驗結果也可以發現，當導電粒子直徑較大，經熱循環後其接觸電阻較穩定，不會有太大的變動。

在一個電子產品的製造過程中，往往是許多種封裝模式一起搭配使用的，因此導電膠在溫度相關方面的可靠度測試，除了一般反覆式的熱循環，迴焊（reflow）曲線的溫度變化對導電膠來說也是可靠度測試上需要去探討的。不同於一般熱循環，迴焊曲線的升溫過程更為複雜，依其所使用的鐸料而變，Yin等[47]的研究發現當迴焊的最高溫度點增高，則接觸電阻變大，因膠材的熱膨脹係數大於導電粒子，當迴焊溫度增高，則膠材與導電粒子間的體積膨脹差異也變大，因此造成電阻上升。Chiang等[48]以不同鐸料的迴焊曲線對導電膠封裝體的可靠度做探討。由其實驗結果發現，當使用的迴焊曲線其峰值溫度（peak temperature）達到 260°C 時，接觸電阻上升了幾乎快一倍，且接點斷路產生的情況也遠比峰值溫度為 220°C 及 240°C 的迴焊曲線來的嚴重。

這種因溫度改變而生成應力的情況，對於導電膠接點的影響，更是比錫球接點來的嚴重，這是由於高分子材料性質相較於金屬更容易

受溫度影響而改變，進而直接影響到接點的可靠度。

3-3.2 高溫高溼測試 (high humidity/temperature test)

高溫高溼環境測試對導電膠封裝體可以說是最重要的也是評估其可靠度最重要的一項依據。在一般日常環境中，溼氣的存在是無法避免的。在正常的使用環境下，元件除了遭受運作時電流或是運作過程中環境產生的熱量造成周圍溫度上升外，大氣中的溼氣對元件的影響作用亦不能忽視。由於導電膠的組成成分以高分子材料為主，除了對溫度的敏感性外，溼度對高分子來說也是相當重要的影響因子。溼氣對導電膠接點的影響主要可以分為界面與膠材兩方面的影響。當水分子接觸到導電膠與晶片或基板的交界面時，水分子會改變基板或晶片表面的分子與膠材分子間的鍵結，改變界面接合強度；另一方面，水分子經由擴散進入高分子膠材內，造成膠材內部分子的鍵結以及結構發生變化，進而改變了膠材的物理性質如玻璃轉換溫度等。除了以化學鍵結方面來看，以力學觀點來說，不同材料間的吸溼膨脹係數 (coefficient of moisture expansion, CME) 不同，當吸收到溼氣時，造成相異材料間體積膨脹的程度不同，界面處便會有應力產生，形成結構內部應力，當此應力被釋放時 (如受熱) 則會加劇結構體受力程度。

Zhang 等[49]學者研究發現，當基板鐳墊表面以鋁層處理時，入侵的溼氣會與鋁層反應，形成氧化鋁或氫氧化鋁等化合物，這些化合物會進一步的與導電膠合成化學鍵結，增強了界面接合強度，並有防止水氣再度接觸鋁鐳墊表面的阻絕作用，使整體強度表現增強；但在 Tan 等[50]研究結果中可以發現，採用金/鎳/銅 (Au/Ni/Cu) 表面處理的鐳墊，其未受到金保護而直接接觸到水氣的鎳及銅層上所形成的氧

化物，反而不像鋁形成的氧化物般可以加強界面接合強度，相反的會減少導電膠與基板間的接觸面積，減弱強度，同時在膠材膨脹造成的應力與腐蝕性環境(溫度與溼氣)共存的環境下，應力腐蝕現象(stress corrosion)會有顯著的表現，導致接點強度下降以及電阻上升的趨勢十分明顯，在其他研究文獻中也有類似的研究結果[51]。

Mercado 等[52]利用有限元素法(finite element method)分析模擬膠材吸收溼氣而膨脹的現象，結果發現當膠材吸溼膨脹後，在導電膠與凸塊交界處有張應力的產生，此張應力的產生會造成導電膠與晶片、基板界面間的脫層，若是內部有裂縫存在，此張應力亦會造成裂縫的延伸，導致接觸電阻的上升以及強度的下降，另外從不同膠材成份的模擬結果可以發現，若使用的膠材其吸溼膨脹係數太高，則該種膠材所構成的導電膠其封裝結構越經不起高溫高溼測試。Teh 等[53]除了透過模擬，同時經由實驗驗證，發現封裝體吸溼後，所形成的張應力在中間部分為最大，因此溼氣造成的破壞也由中央部位向外部蔓延，而此張應力也會導致內部在熱壓接合時形成的收縮壓應力被釋放，造成電阻上升。

Lin 等[54]以傅立葉轉換干涉儀(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)對經高溫高溼作用後的膠材進行分子結構分析，結果發現膠材內部有水解(hydrolysis)的現象發生，同時因高溫的作用，亦使膠材有再次固化的情形；同時從剪力測試發現，高溫高溼作用的時效越長，剪力強度下降越多，且破壞模式也隨時間而改變，從一開始強度漸漸變弱的膠材破壞模式，到強度急速減弱的膠材-界面混合的破壞模式，最後強度呈現一穩定值的界面破壞模式。