

球格陣列構裝(BGA) 製程與可靠度分析

王宣勝

德霖技術學院 機械工程系
副教授

莊東漢

國立台灣大學 材料科學
與工程學系 教授

摘要

球格陣列構裝具有高I/O密度、優良電性、低成本、高產品良率等優點，再加上其與表面黏著技術的相容性，使其在電子產業快速普及化。然而球格陣列構裝(BGA)在應用上常因熱應力造成鉛錫接點損害，而此傷害基本上是由於熱膨脹差異導致的材料疲勞作用，因此，本研究乃針對球格陣列構裝進行製程研究與一系列的動態疲勞可靠度測試及分析。此外，利用構裝模組的電性分析可提供更直接的應用參考數據，而配合金相分析更可探討鉛錫接點的界金屬成長、組織變化及疲勞裂紋萌生與成長。最後，由於整體構裝模組構成材料複雜，微觀組織影響疲勞壽命甚大，致使數據離散性較大，故本研究亦藉由機率、統計等相關理論，對整個系統進行可靠度分析，了解壽命分佈情況，預估疲勞壽命。

關鍵詞：球格陣列構裝，動態疲勞試驗，電性分析，可靠度

Manufacturing and Reliability Analysis of the Ball Grid Array Packages

Shiuan-Sheng Wang*, Tung-Han Chuang**

*Department of Mechanical Engineering, De Lin Institute of Technology

**Department of Materials Science and Engineering, National Taiwan University

Abstract

Ball grid array (BGA) packages possess the advantages of high I/O density, good electrical properties, low cost and high yield rates. Since the fatigue mode of electronic packages during the temperature cycling test is material fatigue caused by the difference of thermal expansion coefficient. The studies including the manufacturing process and failure analysis, the prediction model of failure life for solder joints of BGA packages. In addition, using the electrical analysis for packaging modulus more direct information can be obtained. Accompanying with the metallographic observations, the intermetallics growth, microstructure change, crack nucleation and propagation of solder joints are investigated. Finally, the probability and statistics theory are employed to evaluate the reliability of the whole packaging system, which result in the clarification of failure life distribution and the prediction of failure life.

Keywords: ball grid array, dynamic fatigue tests, electrical analysis, reliability.

壹、前言

近年來電子構裝技術，受到上游晶片設計、製造能力不斷提升，產出高密度、高I/O數、高運作速率及高功率等相關電子元件的衝擊¹；以及下游消費者對3C電子產品輕、薄、短、小的殷切需求²，兩面夾擊下，迫使電子構裝業者，需要不斷的推陳發展新技術，達到減小體積、增加良率、提高散熱效果、降低成本及強化可靠度等，才能符合市場需求。尤其是在攜帶型電子產品中，有很多電子零件為了符合晶片尺寸構裝（Chip Scale Package, CSP）的趨勢，均採用球格陣列（Ball Grid Array, BGA）或覆晶（Flip Chip, FC）的構裝方式^{3,4}。球格陣列構裝由於具有面陣排列錫墊和錫球（錫點兼支撐點）的設計，因此具有接點密度高、厚度薄、可自動對位（Self Alignment）、電氣特性佳、熱傳性好、良率高、成本低且容易被製作成多晶片模組等眾多優點，因而使此一構裝技術迅速地被電子產業廣泛的應用。然而，由於輕薄短小構裝的錫錫接點，體積相對亦較小，應用上更容易因為錫錫疲勞而導致電子產品短、斷路而失效^{5,7}，因此球格陣列構裝（BGA）應用上最重要的問題就是錫錫接點的可靠度。在BGA構裝中，晶片需與塑膠基板（BT樹脂）黏結，而整個構裝體中的晶片區域CTE值遠低於晶片以外區域^{8,9}，當構裝體與電路板結合固定時，晶片區域的熱膨脹量與電路板的熱膨脹量差異最大^{10,11}，而球格陣列構裝與電路板完全利用錫錫球連接，此一熱膨脹差異只能由錫錫球單獨承受，而使其在冷熱循環作用下極易受損¹²⁻¹⁸。傳統上，對於電子產品的熱應力可靠度評估，是採用冷熱循環試驗¹⁹，然而此方法非常耗時，對於產品週期很短的電子產業是一大困擾。有鑑於上述困擾，本研究乃針對此球格陣列構裝進行相關動態疲勞可靠度試驗與分析，而錫錫則應採用符合環保時代潮流的無鉛錫錫²⁰。在一系列的可靠度測試過程中，並以非破壞方式In-Situ 量測、記錄整體構裝模組的電阻變化情形。另外也配合金相分析，觀察疲勞裂紋成長情形，推斷成長機構，並找出循環週次與電阻值的對應關係。最後，由於整個BGA電子產品組件構造複雜，生產過程冗長，運用的材料很多且精細，致使整體構裝模組品質難穩定，故為了能得到較可靠的實驗數據，需做很多的試驗，才可得到較可靠的數據。因此本研究亦藉由機率、統計等相關理論，對系統進行可靠度分析，了解壽命分佈情況並更進一步對壽命進行預測。

貳、製程與可靠度試驗

一、試片模組設計與製作

(1) BGA 晶片設計與製作

由於本研究的重點是討論 BGA 構裝的錫錫材料機械疲勞特性，因此矽晶圓採用 dummy wafer 即可，如此將不需花費額外的半導體元件製造費用及後續的打線（Wire Bonding）費用。BT 基板（substrate）採用雙層 25 μ m 銅箔基板，下層設計有 daisy chain 線路，並在錫墊上無電鍍一層約 10 μ m 的 Ni 鍍層與 0.7 μ m 的 Au 薄膜，而防錫膜的開口直徑為 0.4mm，間距為 0.8mm。daisy chain 線路設計的主要功用是提供未來可靠度試驗時的

電阻監測之用。無電鍍 Ni 層為擴散障礙層 (diffusion barrier)，其主要功用是為降低生成介金屬的速度及錫墊溶解到錫料中的速度。Au 層的功用則為防止 Ni 層氧化並增進錫料與錫墊之間的潤溼性。而整個構裝流程包括晶片切割(Wafer Dicing)、黏晶(Die Attaching)、封模製程(Molding)以及蓋印(Mark)等，完成後的詳細尺寸如圖 1 所示。

(2) 電路板設計與製作

電路板採用雙層 1 盎司(約 $34 \mu\text{m}$)銅箔、1.6mm 厚 FR4 板，上層同樣具有 daisy chain 線路，錫墊亦須經表面處理，以免生成介金屬的速度及錫墊溶解到錫料中的速度太快，或因氧化而影響錫錫球與錫墊之間的潤溼性。表面處理方式是無電鍍一層約 $5 \mu\text{m}$ 厚的 Ni 薄膜及一層 $0.5 \mu\text{m}$ 的 Au 薄膜，防錫膜的開口直徑則為 0.45mm 間距同樣為 0.8mm。主要製作流程則依序為線路蝕刻、防錫膜製作、化學鍍鎳、金及最後切割等。

(3) 表面黏著製程

本製程主要進行的工作有二：一是將錫料錫在 BGA 的 Pad 上；二是將 BGA 構裝模組錫在 FR-4 印刷電路板上，形成完整的疲勞實驗用試片。所需主要設備有(i)熱風迴錫爐：具有五個加熱區，並可通入保護氣氛。(ii)精密取置機：作業方式是先利用真空吸力將 BGA 吸附在上模中，然後利用光學投影方式，將 BGA 與電路板兩個影像同時顯示在一個螢幕畫面中，最後以手控完成對位及置放。

製程步驟：首先在 BGA 的 BT 基板的錫墊(Pad)處塗上些許助錫劑(flux)，其主要功能是排除錫錫及錫墊上的表面氧化層與污染物，以增加錫錫與錫墊的潤溼性質。然後分別植上直徑 0.4mm 之 Sn-58Bi、Sn-51In 或 Sn-37Pb 錫錫球²¹，並檢測錫料的放置情形是否有空球、雙球或偏出錫墊過大的情形。然後再分別依 Sn-58Bi、Sn-51In 及 Sn-37Pb 錫料成分選取特定的迴錫曲線(reflow profile)，此溫度曲線是經由先前的推球試驗合格所決定，如圖 2 所示。適當設定迴錫爐五個加熱區的溫度，待溫度穩定後，即可將 BGA 放在輸送帶上，開始進行迴錫作業。整個迴錫曲線通常可區分為預熱區、熔融區與升降溫區，在預熱區部分主要功用是使助錫劑產生界面活化作用，以利未來錫錫熔化後能與錫墊順利潤溼；熔融區的功用是使錫錫完全熔化並與錫墊潤溼完成最重要的接合工作。當錫錫處於液態時，將因表面張力、錫錫本身的內聚力、錫錫與錫墊的附著力及錫錫、元件受到的重力等多力共同影響下達到平衡，而使錫錫形成特定形狀，如半球狀、圓桶狀、鐘狀等。另外，在熔融區的尖峰溫度與滯留時間(dwelling time)都需適當設定，太高的尖峰溫度或太久的滯留時間將會使原子擴散太快或 IMC 過度成長²²⁻²⁴，甚至傷及元件或構裝體，太低的尖峰溫度或太短的滯留時間則會產生錫接不良的現象；升降溫區也須適當設定，太快的升降溫速率恐怕會傷及元件，太慢則影響生產速度，尤其，在迴錫過程最後的液態轉固態過程，冷卻速率不同會使錫錫有不同的顯微組織，進而嚴重影響未來電子產品初期使用時的機械性質。表面黏著製程的最後步驟則是將殘留的助錫劑污染物以溶劑清洗掉，避免日後產生腐蝕作用。

試片置於室溫約二星期左右，使殘留應力降低、材料組織趨於穩定後，即可開始進

行實驗。本研究進行的動態疲勞試驗區分為兩種，其所採用的試片亦不同，說明如下：

- (a) 三點彎曲疲勞試驗：以一個 BGA 鉗在 FR-4 電路板上，各材料規格與製程方法詳見前述，使用鉗錫成分則有 Sn-51In、Sn-58Bi 及 Sn-37Pb 三種，組裝後的各主要零件示意，如圖 3。
- (b) 等量剪應變疲勞試驗：將兩個 BGA 進行對接，完成後的構裝模組。

二、剪應變疲勞試驗

(1) 儀器介紹

本試驗採用目前最先進的微小動態試驗機 MTS Tytron 250，其主要特色如下：

- (a) 主軸：爲了減少摩擦採用氣體浮動軸承，故極適合進行高頻、高速的動態實驗。
- (b) 致動器：採用線性伺服馬達，行進速度可達 500mm/sec，頻率可達 50Hz，最大出力爲 250N。
- (c) 位移計：採用高精度 LVDT，量測精度可達 $0.1 \mu\text{m}$ ，量測範圍則有 100 mm。
- (d) 控制系統：採用 TestStar IIs 控制器，可進行高頻的位移、力量控制。

另外，爲了避免外界振動對控制系統產生干擾或對實驗結果造成影響，MTS Tytron 250 必須平衡、穩固的放在光學防震桌上，以杜絕外界震動。爲了精確移動試片位置，在固定座上，加裝了一組高剛性 X-Y-Z 移動平台，其精確度可達 0.005mm。

(2) 試片架設與疲勞測試

本研究之等量剪應變範圍動態疲勞試驗是使用 MTS Tytron 250 動態疲勞試驗機，試片架設方式，如圖 4 所示。控制方式採位移控制，循環路徑爲正弦波型曲線，循環週期頻率爲 0.1 Hz，在室溫環境進行的等溫機械疲勞實驗 (Isothermal mechanical fatigue test)。實驗步驟詳如下：

- (a) 將先前製作完成的 BGA 模組，小心的放在精密虎鉗的溝槽上，夾緊其中一個 BGA。
- (b) 使用光纖顯微鏡從各邊觀察，調整 X-Y-Z 平台使 Load Cell 端的夾具儘可能接近於上層的 BGA，但勿碰觸。
- (c) 然後將 Load Cell 端夾具上的螺絲小心鎖緊，避免兩個 BGA 間有額外的力產生。
- (d) 決定平移距離，適當設定控制系統的 PID 值與補償方式。
- (e) 設定停機條件，保護機台安全。
- (f) 選擇資料擷取頻率及記錄參數，如時間、位移與力量等。

三、彎曲疲勞試驗

(1) 試片架設與疲勞測試

本研究之三點彎曲等溫等撓度動態疲勞實驗也是使用 MTS Tytron 250 動態疲勞試驗機，試片架設方式，如圖 5 所示。施力點在 BGA 背面位於電路板中間，當施予電路板彎曲撓度時，將使鉍錫接點承受圖 6 的變形，外側接點主要受到拉應力，中間承受壓縮應力。如此反覆作用下，鉍錫將導致疲勞破壞。本實驗也是採用位移控制方式、正弦波型的循環路徑、頻率 1 Hz。實驗步驟如下：

- (a) 將先前製作好的三點彎曲 BGA 構裝模組，小心的放在治具的溝槽上。
- (b) 調整 X-Y-Z 平台使 Load Cell 端的施力點位置恰如前述，固鎖 X-Y-Z 平台，然後施加一預壓力(1N)，消除餘隙。
- (c) 決定施加撓度量，適當設定控制系統的 PID 值與補償方式。
- (d) 設定停機條件，保護機台安全
- (e) 選擇資料擷取頻率及記錄參數，如時間、位移與力量等。

(2) 裂紋監測與失效判定

在本研究的三點彎曲等溫等撓度動態疲勞實驗裡，爲了能即時監測 BGA 鉍錫疲勞過程中的裂紋萌生與成長現象，乃在 BT 基板與電路板分別設計一簡單電路，將所有鉍錫接點串接起來，如此可以針對所有鉍錫接點及其界面附近的電阻變化進行監測。通常鉍接不良、腐蝕或有裂紋、孔洞產生時，電阻值就會有顯著的變化，可以很容易加以監測。若進行彎曲疲勞測試，反覆塑性變形將使裂紋孕核產生，隨著循環次數增加，裂紋逐漸加大，這些現象亦將完全表現在電阻的變化上。最後，裂紋若貫穿整顆錫球，則電阻值將瞬間上升至無窮大，使整個構裝模組失效形成斷路。

參、結果與討論

一、鉍錫的疲勞實驗與力學分析

圖 7 是 Sn-51In BGA 模組在循環剪力測試過程中的典型非線性力學行爲。微觀而言，這種的鉍錫變形遲滯曲線(Hysteresis loop)是由於材料內部組織發生不可逆變化的結果，如差排的增生、移動，晶界的滑移，微孔洞或裂縫的形成和發展等。若假設材料爲連續介質，從巨觀的力學角度來看，遲滯曲線有下列特點：

- (i) 伴隨 Bauschinger 效應
- (ii) 爲耗能的不可逆過程
- (iii) 應力回復過程 (recovery process) 會釋放一部分應變能
- (iv) 爲損傷過程，且具累加性
- (v) 反覆變形將導致承載力逐漸降低，最後產生低周疲勞破壞。

對於疲勞壽命的預估，本研究採用Solomon²⁵的塑性剪應變疲勞理論及Morrow²⁶的塑性應變能疲勞理論進行探討，並求得疲勞壽命方程式。圖 8 至 12 是Sn-58Bi BGA在±0.04mm剪位移循環作

用下，力學實驗結果。圖 8 顯示第一循環的承載力最大，而後續循環的承載力則緩慢減少，這種現象尤其在較大的剪位移範圍作用下更為明顯，這是因為在大剪位移作用下，第一次材料降伏對材料微結構造成的損傷最大，隨後的降伏則損傷程度相對較小。在初期的循環荷載，裂紋處於萌生階段，因此承載力變化並不大，但隨著周期再增加，裂紋漸漸成長，承載力開始明顯下降，亦即會有循環軟化現象，最後到了接近疲勞斷裂時，裂紋面積已相當大，使承載力逐漸鬆弛至零。圖 9 顯示應力、應變遲滯曲線，遲滯圈面積大小即代表應變能吸收的多寡。第一個遲滯圈面積由於應力由原點出發，少了第一象限上半部份面積，因此面積較小，從第二圈開始則逐漸加大，直到即將破壞的時候，遲滯圈才會再開始變小。在圖 10 則顯示隨著循環荷載增加，不可逆的塑性變形亦隨之增加，導致塑性剪應變範圍隨之遞增。在圖 11 中顯示隨循環數增加，材料內部的損傷亦逐漸增加，相對的應變能量吸收密度亦在累積增加中，但到了即將破壞的時候，由於材料的可承受應力下降，使得此現象又逐漸緩和下來。另外曲線呈鋸齒狀，則是因為在每一循環的回復過程中，有部份能量釋放出來所造成的結果。最後將塑性剪應變範圍與失效循環數關係畫於雙對數圖中，如圖 12，可明顯看出呈線性關係，符合Solomon的預期。利用最小平方法求得Sn-58Bi BGA壽命預估線，其方程式如下：

$$N_f = 1.399\Delta\gamma_p^{-1.514} \dots\dots\dots (a)$$

若將遲滯圈吸收能量與失效循環數畫於雙對數圖中，如圖13亦可發現呈線性關係，符合Morrow塑性應變能疲勞理論的預期。再利用最小平方法亦可求得疲勞壽命預估線，方程式如下

$$N_f^{0.7571}W = 91.79 \dots\dots\dots (b)$$

二、破損分析

在本研究的 BGA 構裝模組三點彎曲及剪力疲勞試驗中均發現，最先發生破壞的地方是在鉚錫接點處，這主要是以下兩個因素:

- (1) BGA 整體構裝模組的三點彎曲及剪力疲勞試驗的施力型態均使得鉚錫球成為幾何位置的應力集中處。
- (2) 錫球材料是整個構裝模組中，降伏點最低且最具延展性者。

Sn-58Bi迴鉚後的正常組織型態為白色的不連續富鉍相，散佈在暗色的富錫相基地中，如圖 14 所示。經疲勞試驗後，發現裂紋總是先在構裝模組最角落的錫球產生，且裂縫會從該球最外側且應力集中因素較大的鉚錫位置，如孔洞、凹陷等地方開始成長，之後隨著循環週數的增加，裂縫會再往中心且約略平行於銅墊上鍍層的方向逐漸成長，最後則完全斷裂。若更仔細的觀察也可發現裂紋多延著AuSn₄方塊的邊界擴展。這是由於沿著AuSn₄方塊邊界擴展所需消耗的功較低的緣故。圖 15 是Sn-58Bi BGA 構裝模組在反覆等量剪應變作用下的鉚錫破斷面，可清楚看到有許多方塊AuSn₄，因此破斷面傾向發生在鉚錫與AuSn₄的界面。這種現象也是由於兩者剛性差異大，不能有效傳遞應力，而較容易產生疲勞破裂。另外在圖 16 可以發現劈裂型態的破斷面，這是由於Sn-58Bi性質較脆的緣故。

三、可靠度分析

BGA構裝模組在PCB反覆彎曲試驗下，利用電阻監測方式得到鉚錫疲勞壽命數據結果，進行集中量數與離散量數的數學統計分析後發現，在相同撓度情況下，楊氏模數及抗拉強度較大的鉚錫材料，塑性應變範圍 ($\Delta \epsilon_p$) 相對較小，裂紋孕核期較長，且在任何情況下，提高撓度均使壽命急速下降，這是因為撓度大則 $\Delta \epsilon_p$ 明顯增大，壽命符合Coffin- Manson²⁷方程式的預期。然而較低的平均壽命，其數據的離散程度卻有降低的趨勢；例如Sn-37Pb由 2% 提高到 4% 撓度時，壽命降低了約有 5 倍之多，但標準差與平均值的比值，即變異係數(coefficient of variation)則由 0.51 降至 0.42，顯然在低的平均壽命下，壽命較趨於一致。這是由於低撓度下破壞機制較為複雜的緣故，而這種現象在其他金屬材料也有相同的結果，。另外在不同頻率作用下，疲勞失效循環次數也有所不同，而與受力暫留時間(dwell time)有關，本研究發現當施力頻率低、暫留時間長將導致疲勞壽命變短，這是因為較長的暫留時間，會促進潛變機制的進行，而使其提前遭到破壞，這印證了鉚錫材料在常溫下即有相當程度的潛變行為。

爲了能從既有的壽命資料推廣到其他不同撓度下的壽命與破壞機率的關係，本研究也以機率、統計觀點及數學方法，將實驗資料繪成圖 17 至 19 形式。這些圖可用來分別了解任一撓度下的 Sn-37Pb、Sn-51In 及 Sn-58Bi BGA 構裝模組彎曲疲勞壽命值與破壞機率，提供日後研究者參考。

肆、結論

本研究主要探討球格陣列構裝製程與其動態疲勞可靠度測試與分析。此外，利用構裝模組的電性分析可提供更直接的應用參考數據，配合金相分析探討鉚錫接點的界金屬成長、組織變化及疲勞裂紋的萌生與成長。最後，由於整體構裝模組構成材料複雜，微觀組織影響疲勞壽命甚大，致使數據離散性較大，故本研究亦藉由機率、統計等相關理論，對整個系統進行可靠度分析，了解壽命分佈情況，預估疲勞壽命。對於產、學、研界應有相當的幫助。主要成果條列如下：

- (i) 自行製作無鉛鉚錫球，並獲得一項中華民國發明專利。
- (ii) 針對實際尺寸的無鉛鉚球 BGA 構裝模組進行熱機疲勞性質測試。
- (iii) 以非破壞方式即時監測整體構裝模組的電阻歷史，進行裂紋成長動力學探討。
- (iv) 使用有限元素電腦模擬搭配實驗結果求出 Coffin-Manson 壽命關係式。
- (v) 藉由機率、統計等相關理論，對系統進行可靠度分析，瞭解壽命分佈、破壞機率，進而預估疲勞壽命。

誌 謝

感謝國科會經費補助(計畫編號：NSC92-2622-E-237-002-CC3)，使實驗得以順利完成。

參考文獻

1. J.H. Lau (Editor): Ball Grid Array Technology, McGraw-Hill, Inc., 1995
2. J.J. Liu, H. Berg, Y. Wen, S. Mulgaonker, R. Bowlby, and A. Mawer, "Plastic Ball Grad Array (BGA) Overview," *Mat. Chem. Phys.*, 40, 1995, p.236-244
3. M. Amagai, "Chip scale package (CSP) solder joint reliability and modeling," *IEEE 36th Annual International Reliability Physics Symposium*, 1998, p.260-268
4. J. H. Lau and Y. H. Pao, *Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip and Fine Pitch SMT Assemblies*, McGraw-Hill, Inc., 1977, p.153-218
5. J.H. Lau (Editor): *Solder joint reliability theory and applications*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1991
6. L.Y. Yang and Y. C. Mui, "Solder Joint Reliability Study for Plastic Ball Grid Array Packages," *Int. Microelectronics and Packaging Society*, p.101-108.
7. J.H. Lau and Y. H. Pao (Editor): *Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip and Fine Pitch SMT Assemblies*, McGraw-Hill, Inc., 1977, p.153-218
8. H.U. Akay, Y. Tong and N. Paydar, "Thermal Fatigue Analysis of a SMT Solder Joint Using a nonlinear FEM Approach," *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, Vol. 16, No.2, 1993, p.79-88
9. R. Ghaffarina, "Key factors in chip-scale package assembly reliability," *Chip Scale Rev*2(5), 1998, p.29-34
10. P.M. Hall and W.M. Sherry, "Materials, structures and mechanics of solder joints for surface mount microelectronics technology," *Lectures of the 3rd International Conference*, Vol.102, 1986
11. M. Amagai, "Characterization of chip scale packaging materials", *Microelectronics Reliability*," Vol.39, Issue: 9, September 1999, p.1365-1377
12. S.C. Bolton, A.J. Mawer and E. Mammo, "Influence of Plastic Ball Grid Array Design/Material upon Solder Joint Reliability," *The Int. J. Microcircuits and Electronic Packaging*, Vol.18, No.2, 1995, p.109-121.
13. Y.W. Chan, T.H. Ju, S.A. Herob, Y.C. Lee, J.S. Wu and M. J. Li, "Reliability Modeling for Ball Grid Array Assembly with a Large Number of Warpage Affected Solder Joints," *ASME Advances in Electronic Packaging*,19, 1997, p.1507-14
14. M. Bevan, M. Wuttig, "Complex fatigue of soldered joints comparison of fatigue models," *Electronic Components and Technology Conference*, 1997, p.127-33
15. W. Engelmaier, "Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints During Power Cycling," *IEEE*

- Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-6(3), 1983, p.232-237
16. S. C. Hung, P. J. Zheng, S. H. Ho and H.N. Chen, "Thermal cyclic fatigue of the interconnect of a flex-type BGA," In: ECTC, 2000, p.1384–1391
 17. B.Z. Hong and L.S. Su, "On Thermal Stresses and Reliability of a BGA Chip Scale Package," Electronic Components and Technology Conference, 1998, p.503-510
 18. A.I. Attarwala and R. Stierman, "Failure Mode Analysis of a 540 pin Plastic Ball Grid Array," Proc. Surface Mount Int., San Jose, CA, Sep., 1994
 19. T. Anderson, I. Guven and E. Madenci, "The necessity of reexamining previous life prediction analyses of solder joints in electronic packages," IEEE Electronic Components and Technology Conference, 1999, p.1010-1014
 20. M. Abtey and G. Selvaduray, "Lead-Free Solders in Microelectronics," Materials Science and Engineering, 27, 2000, p.95-141
 21. 莊東漢、王宣勝「球格陣列構裝用超微小鉛錫球的製造方法及其裝置」中華民國發明專利，專利號碼：183390
 22. N. Biunno, "A Root Cause Failure Mechanism for Solder Joint Integrity of Electroless Nickel/Immersion Gold Surface Finishes," SMTA, Chicago, IL, 1999
 23. Z. Mei, M. Kaufmann, A. Eslambolchi, and P. Johnson, "Brittle Interfacial Fracture of BGA Packages Soldered on Electroless Nickel/Immersion Gold," IEEE Electron. Compon. and Technol. Conf., 1998, p.952-961.
 25. C.E. Ho, R. Zheng, G.L. Luo, A.H. Lin, and C.R. Kao, "Formation and Resettlement of $(\text{Au}_x\text{Ni}_{1-x})\text{Sn}_4$ in Solder Joints of Ball Grid Array Packages with the Au/Ni Surface Finish," J. Electron. Mat. 29, 10, 2002, p.1175-1181
 26. Solomon, H.D., Tolksdorf, E.D., Energy approach to the fatigue of 60/40 solder. Part 2: Influence of hold time and asymmetric loading. Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME 1996, Vol.118, No6, p.67- 71
 27. Morrow, J. "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals," in Internal Friction Damping and Cyclic Plasticity, ASTM STP378, Philadelphia, 1965, p.45-87
 28. Coffin, L.F., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," Trans. ASME, Vol. 76, 1954, p.931-50

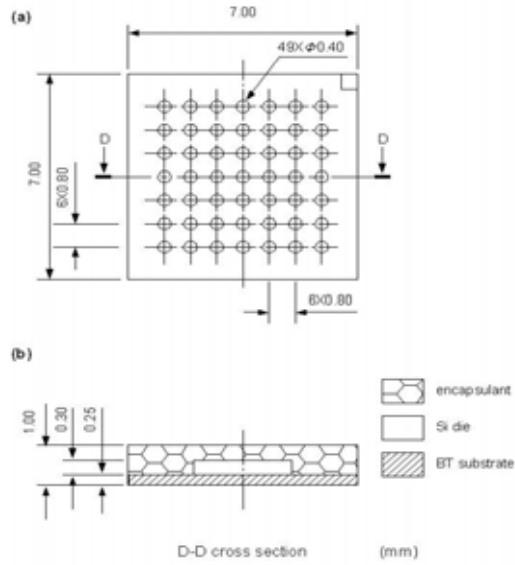


圖 1 本研究採用的球格陣列構裝模組

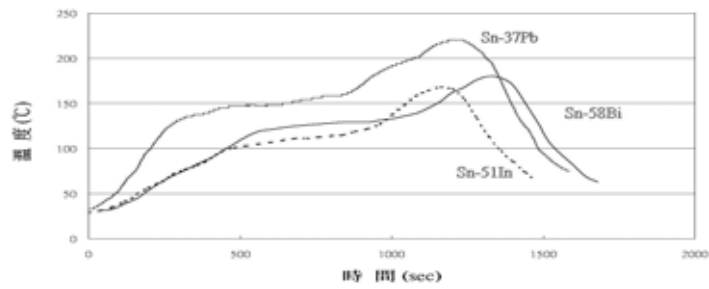


圖 2 本研究的 Sn-51In、Sn-58Bi 及 Sn-37Pb 之迴錫曲線

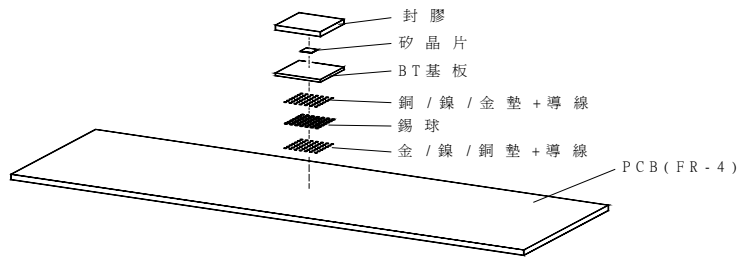


圖 3 本研究的三點彎曲疲勞實驗 BGA 構裝模組主要材料示意圖

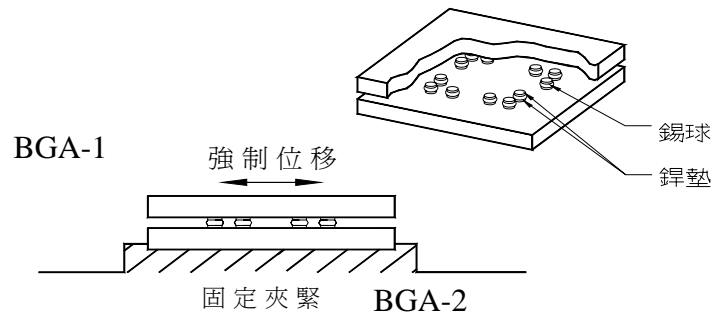


圖 4 等量剪應變疲勞測試示意圖

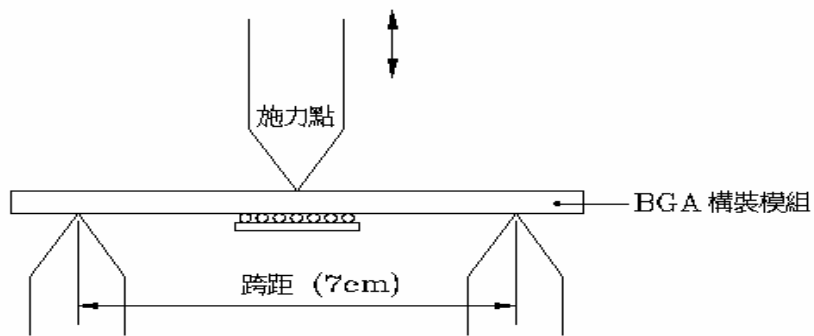


圖 5 本研究彎曲疲勞試驗試片架設

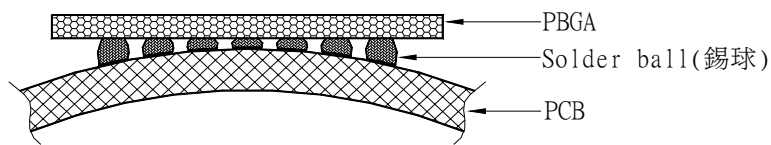


圖 6 電路板彎曲導致銲錫變形示意圖

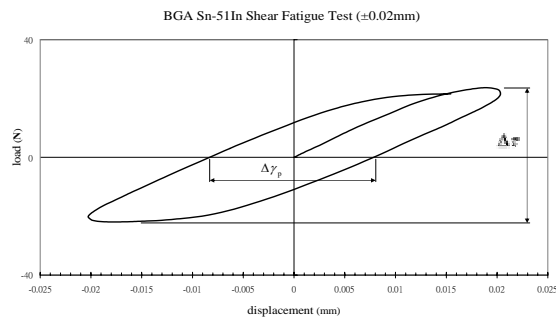


圖 7：Sn-51In BGA 在循環剪力測試過程中的非線性力學行為

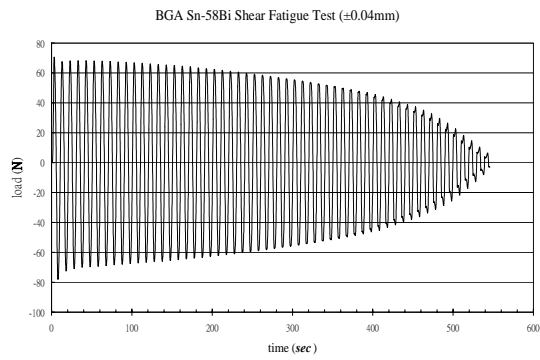


圖 8： BGA Sn-58Bi 在 $\pm 0.04\text{mm}$ 等量剪位移範圍循環作用下，時間與承載力的關係

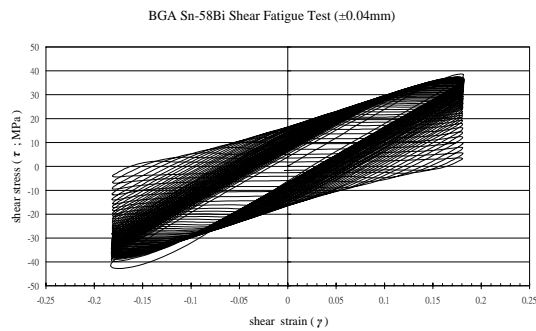


圖 9： BGA Sn-58Bi 在 $\pm 0.04\text{mm}$ 等量剪位移範圍循環作用下，剪應變與剪應力的關係

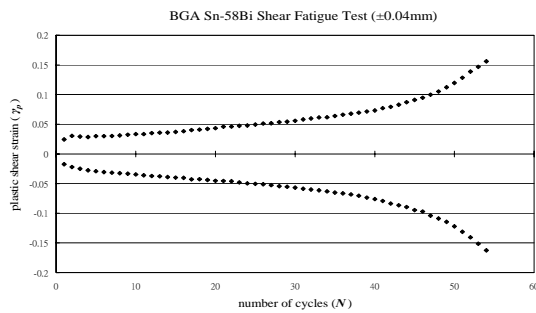


圖 10： BGA Sn-58Bi 在 $\pm 0.04\text{mm}$ 等量剪位移範圍循環作用下，塑性剪應變值隨循環數增加的變化情形

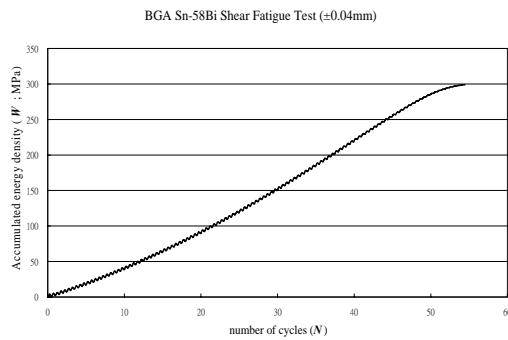


圖 11： BGA Sn-58Bi 在 $\pm 0.04\text{mm}$ 等量剪位移範圍循環作用下，累積能量吸收密度隨循環數增加的變化情形

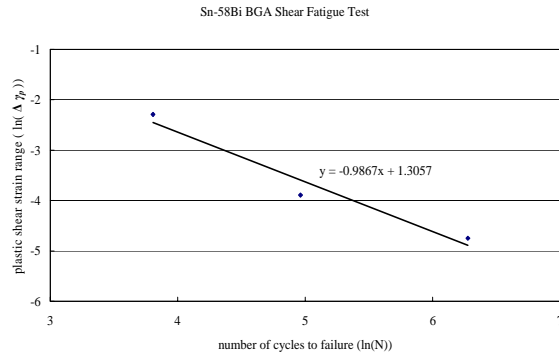


圖 12： Sn-58Bi BGA 塑性剪應變範圍與疲勞壽命的關係

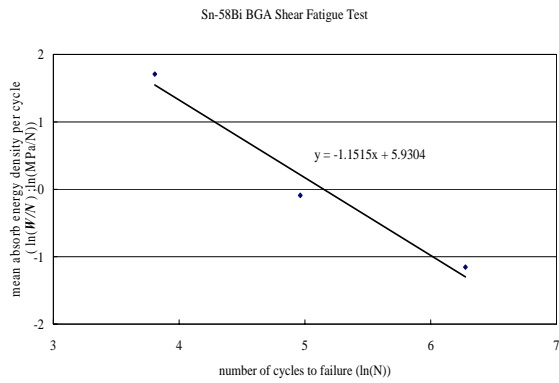


圖 13： Sn-58Bi BGA 能量吸收密度與疲勞壽命的關係

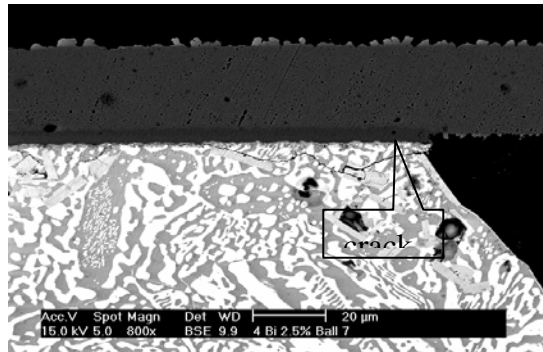


圖 14 Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 反覆彎曲作用下，在最角落錫球應力集中處產生裂紋並沿AuSn₂邊界成長的情形

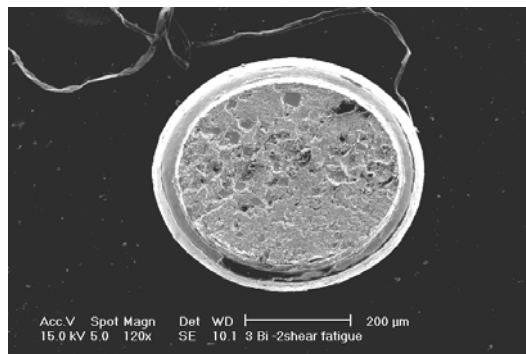


圖 15 Sn-58Bi BGA 構裝模組在反覆等量剪應變作用下，錫球剪力疲勞的破斷面

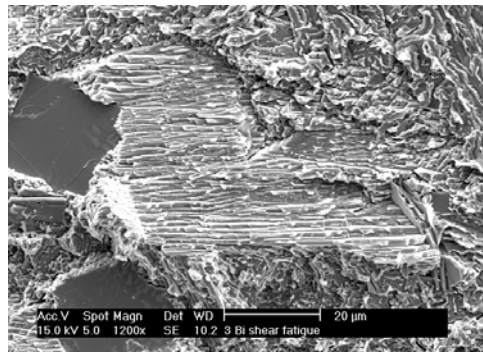


圖 16 Sn-58Bi BGA 構裝模組在反覆等量剪應變作用下，錫球剪力疲勞破斷面的劈裂型態

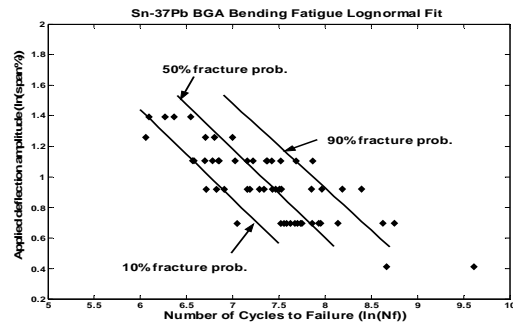


圖 17 Sn-37Pb BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錫球疲勞壽命、撓度與破壞機率三者間的關係

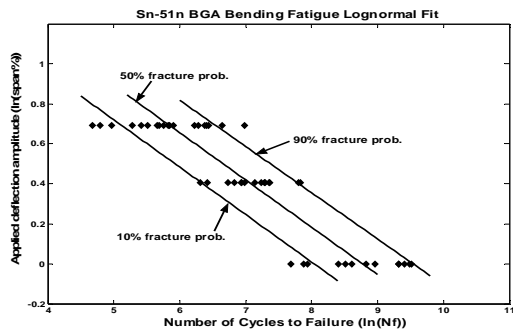


圖 18 Sn-51In BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錫球疲勞壽命、撓度與破壞機率三者間的關係

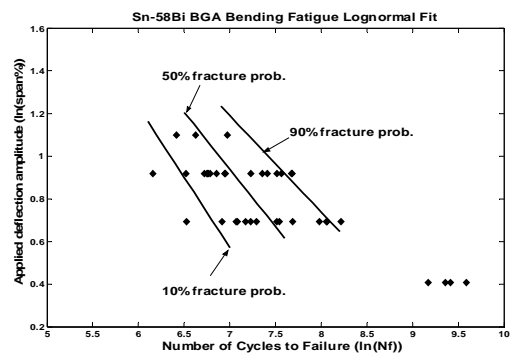


圖 19 Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錫球疲勞壽命、撓度與破壞機率三者間的關係