

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫一：無鉛錒錫球格陣列構裝接點之冷熱循環與動態疲勞分析(III)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2216-E-002-037-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學材料科學與工程學研究所

計畫主持人：莊東漢

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 93 年 2 月 3 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

無鉛錒錫球格陣列構裝製程與可靠度分析

子計劃一：無鉛錒錫球格陣列構裝接點之冷熱循環與動態疲勞分析(第三年)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC 91 - 2216 - E002 - 037

執行期間： 91 年8 月1 日至92 年7 月31 日

計畫主持人： 莊東漢教授 台灣大學材料系

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學 材料科學與工程學系

中華民國九十二年七月三十日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

無鉛錒錫球格陣列構裝製程與可靠度分析

子計劃一：無鉛錒錫球格陣列構裝接點之冷熱循環與動態疲勞分析(第三年)

Subprogram 1: Temperature Cycling and Dynamic Fatigue Analysis of Pb-free

Solder Ball Grid Array Package (third year)

計畫編號：NSC91-2216-E002-037

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：莊東漢教授 台灣大學材料系

一、中文摘要：

本子計劃第三年的主要目的係延伸第一年的無鉛錒錫球格陣列構裝製程研究與第二年計劃的冷熱循環疲勞破壞分析等重要實驗結果，進一步對BGA構裝無鉛錒錫接點，建立一套完整的可靠度試驗方法模擬冷熱循環下的疲勞現象，以迅速評估電子產品錒錫接點的可靠度品質。本年度另一研究重點為構裝模組的電性分析，提供更直接的應用參考數據，探討疲勞裂紋的萌生與成長。此外，本年度亦利用有限元素法模擬計算三點彎曲試驗的撓度與最大等效塑性應變量的對應關係，代入Coffin-Manson方程式求出疲勞壽命，並與實驗值進行相互比較及驗證。

關鍵詞：無鉛錒錫，球格陣列構裝，冷熱循環試驗，動態疲勞試驗，電性分析

ABSTRACT:

The purpose of this study is to build up a complete reliability testing method for the simulation of fatigue phenomenon during the thermal cycling test in order to rapidly evaluate the reliability of Pb-free solder joints of BGA packages. Another effort of this project is the electrical analysis of packages to provide a direct information of crack nucleation and propagation during fatigue failure. In addition, the third year program also involves the finite element method to calculate the relation between the deflection and maximal equivalent plastic deformation. The fatigue life is obtained using Coffin-Manson equation, which is compared with the experimental results.

Keyword: reliability, fatigue, thermal cycling, Coffin-Manson.

二、計畫源由與目的

2.1 第一年與第二年的研究成果

本計劃在第一年計畫中完成了無鉛錒錫球之製程研發與分析，成功建立數種成分無鉛錒錫之迴錒曲線及其界面反應動力學研究，並與Sn-37Pb相互比較。在第二年的研究中，順利的規劃並執行冷熱循環試驗，測試其熱疲勞壽命，並藉由機率、統計等相關理論，對整個系統進行可靠度分析。

2.2 第三年計畫源由及研究方法

由於傳統的冷熱循環試驗非常耗時，1000 循環通常約需要 40 天，對於產品週期很短的電子產業是一大困擾，而冷熱循環試驗的破損模式基本上是疲勞作用所造成，直接對球格陣列構裝模組施加機械力循環，進行動態疲勞試驗，將可大幅縮短錒錫接點可靠度評估的時程，對於構裝新產品的設計與開發極有助益。針對此需求，本年度利用本實驗室所擁有國內最先進的微小負荷動態試驗機(MTS-Tytron 250)進行數種無鉛錒錫球格陣列構裝的相關可靠度試驗，並以非破壞方式 In-Situ 量測、記錄整體構裝模組的電阻歷史，直至電路成開路。另外，本年度也以有限元素法模擬計算三點彎曲試驗的撓度與最大等

效塑性應變量的對應關係，代入 Coffin-Manson 方程式求出疲勞壽命，並與實驗值進行相互比較及驗證。

三、結果與討論

當錒錫及錒墊的成份、結構及微觀組織發生變化或有裂紋產生、成長時，都會使整個構裝線路電阻產生改變。圖一與圖三是 Sn-58Bi PBGA 構裝模組在不同彎曲撓度循環試驗下，串接電阻值隨施力循環次數的變化情形，包含了裂紋萌生期、裂紋擴展期及瞬間斷裂，藉此可清楚定義疲勞總壽命。而圖二、四為圖一、三的局部放大，可更深入了解整體構裝模組串接電阻的變化情形。在撓度彎曲測試過程的初期，電阻值呈現連續遞增振幅的波浪狀變化，相位與施加的正弦力相同，但波形卻有極大差異；這種電阻值與施力值的正弦波形差異，主要是因為在反覆施力過程期間，電阻值的變化並不只是單純由力量大小決定，而是與材料本身受力後所造成的彈性變形、塑性變形、幾何形狀改變、內部組織變化(如差排增生、晶界滑移等)、溫度升高、裂縫的有無以及裂縫的打開或閉合等因素有關。屬於不可逆的損傷過程者，如塑性變形、差排增生、晶界滑移、裂縫產生及擴展等，將使電阻值永久性的提高；而其他屬於可逆過程者，僅會使電阻值產生暫時的改變。在初期循環，電路板受力彎曲變形，BGA 元件的最外圍錒球截面積縮小、高度變大，導致電阻值變大；若應變回覆，錒錒球恢復到初始形狀，電阻值又下降至接近初始值，這段施力循環週次即相當於錒錒材料的疲勞裂紋萌生期。但隨著機械循環週期逐漸增加，錒錒會開始出現超過臨界尺寸的裂紋，電阻值將會顯著的增加，當彎曲變形回覆、裂紋會再閉合起來，電阻值又會下降至稍大於

初始值，這段期間是疲勞裂紋由萌生期轉入擴展期的階段，而電阻稍微增大的原因是由於裂紋閉合後的電阻仍然大於未裂開的情形。

要量測 PBGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錒錒所承受的應變量相當困難，即使利用先進的光學全域量測技術，如疊紋干涉術(Moire interferometry)或斑點干涉術(speckle interferometry)等，也會由於三點彎曲試驗包含了剛體運動而幾乎不可行，因此更增添了有限元素模擬的重要性。本研究以有限元素分析方式，首先針對多種無鉛錒錒的 PBGA 構裝模組，在承受 PCB 彎曲變形下，反應在錒球上的等效塑性應變、塑性剪應變、等效 Von Mises 應力及塑性應變能密度等數值，進行有限元素模擬求解。最後則將電腦分析得到的最大等效塑性應變量代入 Coffin-Manson 方程式，求出疲勞壽命，並與實驗值進行相互比較及驗證。PBGA 構裝模組受到 PCB 的彎曲變形，會在所有構件各處產生相當程度的應力與應變，圖五是構裝模組的彎曲變形示意圖。當 Sn-37Pb PBGA 構裝模組受到 PCB 2% 跨距的撓度時，會在 PBGA 邊緣的錒墊上產生 58.26MPa 應力，邊角錒球上產生 64.14 MPa 應力(圖六)，而在 PCB 中間下層的邊緣錒墊附近產生 71.84 MPa 應力(圖七)，這是整個 PBGA 構裝模組中應力最大的地方。但由於錒錒最具延展性、易降伏，因此雖然應力並非整體構裝模組的最大者，但卻是最容易破壞的地方，這種現象在多次實驗中均得到證實。以下說明將焦點集中在 Sn-37Pb、Sn-51In 及 Sn-58Bi 三種錒錒材料在各種不同 PCB 撓度作用下，產生出來的等效塑性應變、塑性剪應變、等效 Von Mises 應力及塑性應變能密度等。在圖八所示的眾多錒球中，較大應力是位於最外

圓的錫球，而且又以最角落的錫球有最大應力，這也是本研究將此錫球的網格分割最細的原因。圖九是 Sn-37Pb BGA 在 3% 撓度作用下，在最角落錫球所產生的塑性剪應變場。綜觀各圖可明顯發現，應力集中位置均落在在節點 875、877、1421、1473 及 1280 (圖十)。圖十一、十二、十三則分別是 Sn-37Pb、Sn-51In 與 Sn-58Bi PBGA 這些節點位置的塑性剪應變歷程圖，橫軸一格代表兩個步程，亦即為 0.5% 跨距的撓度，全程則有 4%。從這些圖中可看出塑性剪應變的最大值均落在 877 節點上。Sn-51In 與 Sn-58Bi 在定性上與 Sn-37Pb 相類似，但定量上，則因本實驗為控制撓度，而非控制應力，所以剛性最低的 Sn-51In，反應出來的各力學數值也都會較低；而 Sn-58Bi 有最大的剛性，因此各力學數值均為最高者。Coffin-Manson 錫錫疲勞壽命關係式可寫成

$$\ln(\Delta e_{ep} / 2) = c \ln(2N_f) + \ln e_f' \dots\dots(a)$$

將有限元素分析求得的等效塑性應變量與其對應的失效循環數畫於縱軸：

$\ln(\Delta e_{ep} / 2)$ ；橫軸： $\ln(2N_f)$ 的雙對數座標

中(圖十四、十五、十六)，則可明顯看出呈線性關係，符合 Coffin-Manson 的預期。再分別利用最小平方法求得各材料的壽命預估線的方程式如下：

1. Sn-37Pb：

$$\frac{\Delta e_{ep}}{2} = 67.2(2N_f)^{-0.925} \dots\dots(b)$$

2. Sn-51In：

$$\frac{\Delta e_{ep}}{2} = 0.01488(2N_f)^{-0.3372} \dots\dots(c)$$

3. Sn-58Bi：

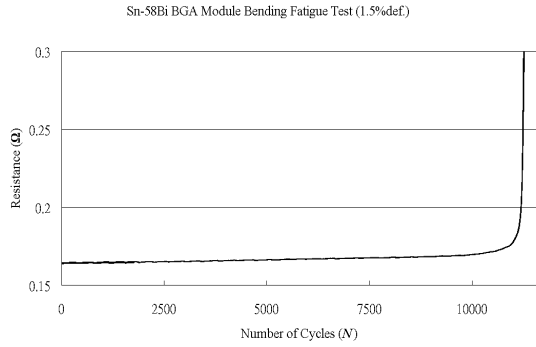
$$\frac{\Delta e_{ep}}{2} = 8.401(2N_f)^{-0.7353} \dots\dots(d)$$

四、計畫成果自評

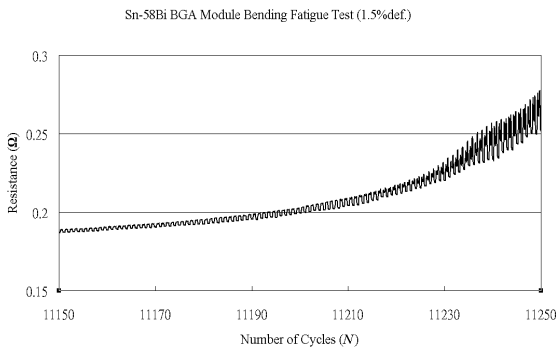
本研究成功地將多種無鉛錫材料應用在 BGA 晶片接點上，進行一系列彎曲疲勞試驗，提供可靠度資訊。並以非破壞方式即時監測整體構裝模組的電阻歷史，瞭解特定撓度下裂紋的形成、擴展及壽命。另外，本研究也使用有限元素電腦模擬搭配實驗結果求出 Coffin-Manson 壽命關係式，提供產、學、研界參考。

本年度計畫合計發表學術論文 7 篇：

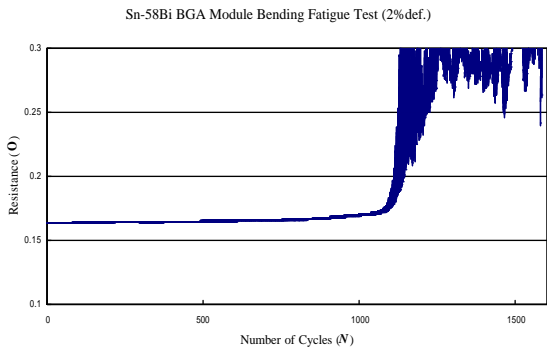
1. M.Y. Chiu, S.Y. Chang, and Y.H. Tseng, Y.C. Chan and T.H. Chuang, 2002, "Characterization of Intermetallic Compounds formed during the Interfacial Reactions of Liquid Sn and Sn-58Bi Solders with Ni Substrates", Z. Metallkd., 93, 248-252, Germany.
2. C.L. Yu, S.S. Wang, and T.H. Chuang, 2002, "Intermetallic Compounds Formed at the Interface between Liquid Indium and Copper Substrates", J. Electro. Mat., 31, 5, 488-493, U.S.A.
3. M.Y. Chiu, S.S. Wang, and T.H. Chuang, 2002, "Intermetallic Compounds Formed during Interfacial Reactions between Liquid Sn-8Zn-3Bi Solders and Ni Substrates", J. Electro. Mat., 31, 5, 494-499, U.S.A.
4. T.H. Chuang, C.L. Yu, S.Y. Chang, and S.S. Wang, 2002, "Phase Identification and Growth Kinetics of the Intermetallic Compounds Formed During In-49Sn/Cu Soldering Reactions", J. Electro. Mat., 31, 6, 640-645, U.S.A.
5. T.H. Chuang, S.Y. Chang, L.C. Tsao, W.P. Weng, and H.M. Wu, 2003, "Intermetallic Compounds Formed during the Reflow of In-49Sn Solder Ball-Grid-Array Packages", J. Electro. Mat., 32, 3, 195-200, U.S.A.
6. M.W. Liang, T.E. Hsieh, S.Y. Chang, and T.H. Chuang, 2003, "Thin-Film Reaction during Diffusion Soldering of Cu/Ti/Si and Au/Cu/Al₂O₃ with Sn Interlayers", J. Electron. Mat., in press, U.S.A.
7. H.M. Wu, and T.H. Chuang, 2003, "Interfacial Reactions between Liquid Sn8Zn3Bi Solders and Cu Substrates", J. Mat. Eng. Perf., in press, U.S.A.



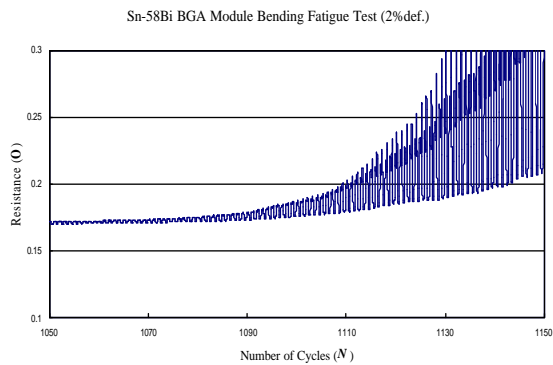
圖一：Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 1.5% 彎曲撓度作用下，串接電阻值隨施力循環次數的變化情形



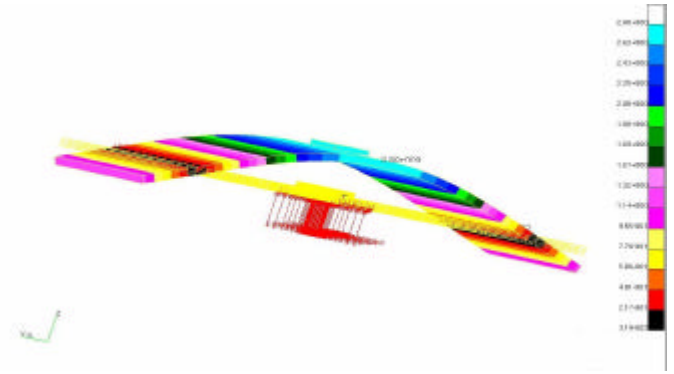
圖二：Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 1.5% 彎曲撓度作用下，串接電阻值隨施力循環次數的變化情形 (圖一之局部放大)



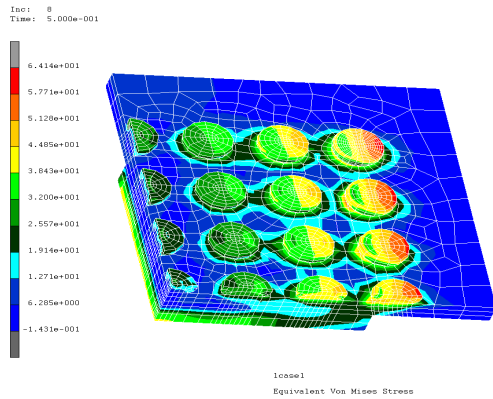
圖三：Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 2% 彎曲撓度作用下，串接電阻值隨施力循環次數的變化情形



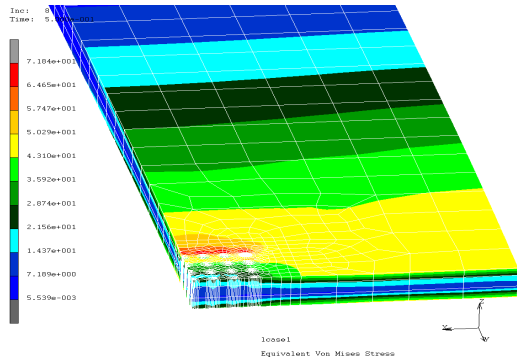
圖四：Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 2% 彎曲撓度作用下，串接電阻值隨施力循環次數的變化情形 (圖三之局部放大)



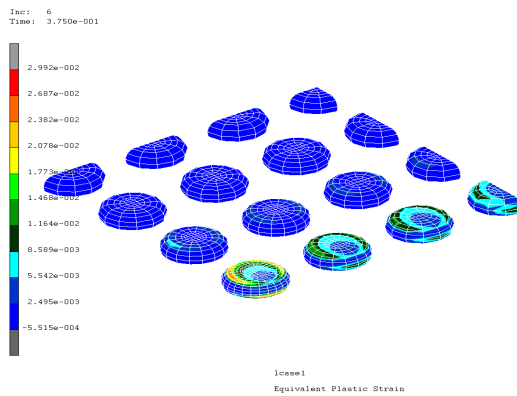
圖五：4% 撓度作用下，整體構裝模組彎曲變形示意圖



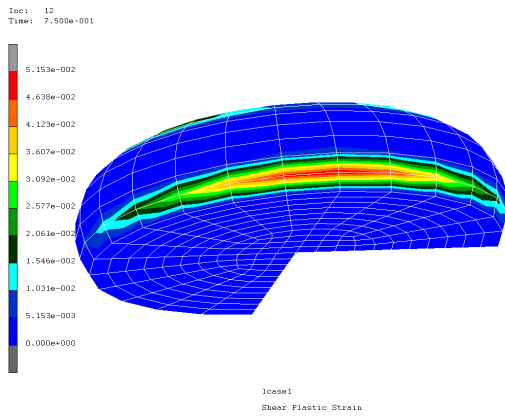
圖六：2% 撓度作用下，反應在矽晶片、BT 基板與錫球的 Von Mises 應力場



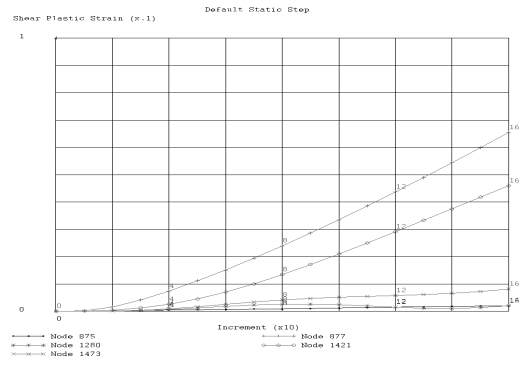
圖七：BGA 構裝在 PCB 彎曲變形下，整體模組的最大應力發生在 PCB 中間下層的邊緣焊墊附近



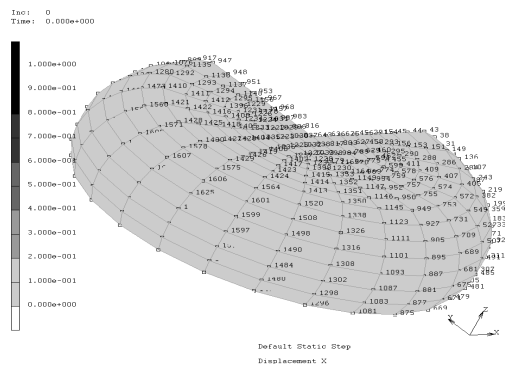
圖八：Sn-37Pb BGA 構裝模組在 PCB 1.5% 撓度作用下，反應在錫球應力集中處的等效塑性應變場



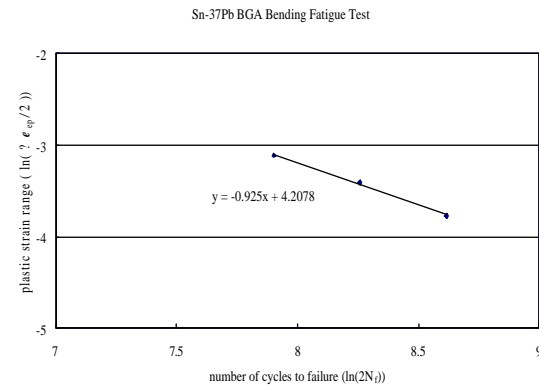
圖九：Sn-37Pb BGA 構裝模組在 PCB 彎曲作用下，反應在錫球應力集中處的塑性剪應變場



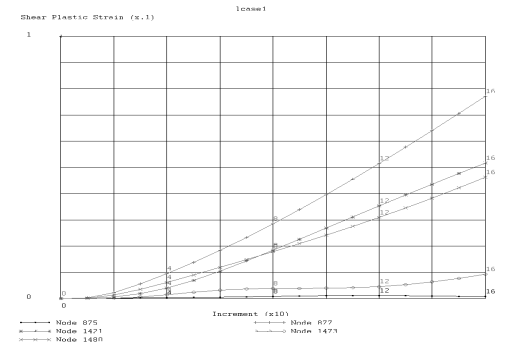
圖十三：Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，最大應力集中處的撓度與塑性剪應變之關係



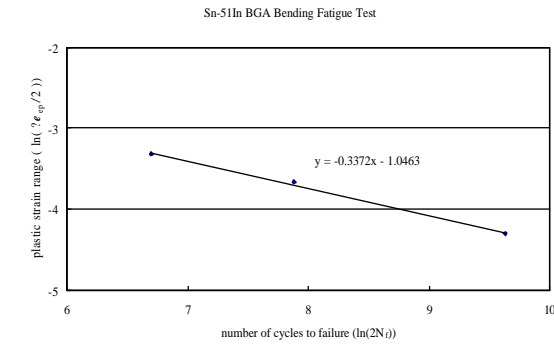
圖十：BGA 構裝模組中錫球應力集中位置在節點 875、877、1421、1473 及 1280 處



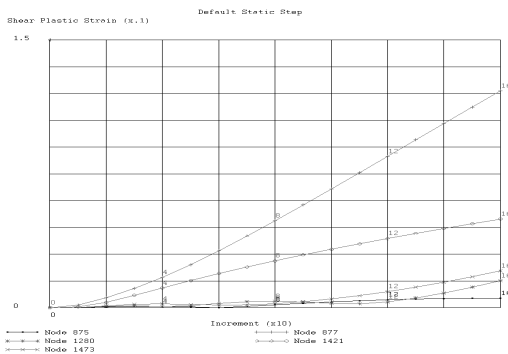
圖十四：Sn-37Pb BGA 模組在彎曲疲勞作用下，等效塑性應變量與疲勞壽命的關係



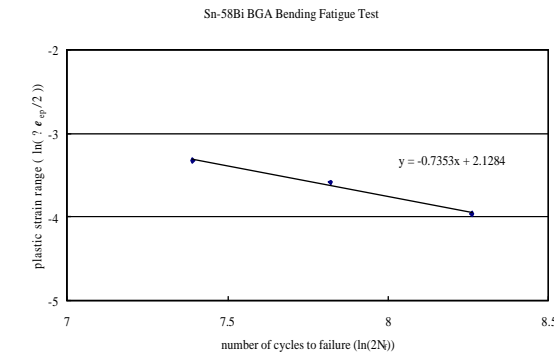
圖十一：Sn-37Pb BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，最大應力集中處的撓度與塑性剪應變之關係



圖十五：Sn-51In BGA 模組在彎曲疲勞作用下，等效塑性應變量與疲勞壽命的關係



圖十二：Sn-51In BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，最大應力集中處的撓度與塑性剪應變之關係



圖十六：Sn-58Bi BGA 模組在彎曲疲勞作用下，等效塑性應變量與疲勞壽命的關係