

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

利用有限元素法分析介金屬化合物對電子構裝在熱循環測 試下鉚錫接點疲勞壽命之影響

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2212-E-216-001-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中華大學機械工程學系

計畫主持人：任貽明

計畫參與人員：余鎮利 張立言

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 10 月 17 日

中文摘要

本計畫發展一分析流程，利用累積疲勞損傷的觀念，分析錫球中介金屬化合物厚度對於覆晶式球柵陣列構裝在熱循環測試中錫球疲勞壽命之影響。在此分析中，介金屬化合物的厚度是隨熱循環週次的增加而增加。在每一個特定的週次中，首先利用擴散速率公式計算出此週次下的介金屬化合物厚度，並利用有限元素法模擬熱循環過程。有限元素法中錫球假設為彈性-塑性-潛變材料；而底膠則假設為黏彈性材料。利用有限元素法分析之應力應變結果，再配合上疲勞壽命預測模型，計算出固定此介金屬化合物厚度下錫球之熱疲勞壽命。根據累積疲勞損傷的觀念，可知此週次所造成的疲勞損傷即為此週次數的倒數。當累加每週次疲勞損傷至總損傷值為 1 時，錫球疲勞破壞就此發生；而此時的累加週次數即為錫球真實的熱疲勞壽命。此外，本計畫亦研究無鉛鉛錫與傳統錫鉛鉛錫的介金屬化合物對錫球可靠度影響之比較。結果顯示，錫球之疲勞壽命會隨介金屬化合物的厚度增加而減小；而介金屬化合物對於無鉛鉛錫的影響較小。

關鍵詞：累積疲勞損傷、介金屬化合物、熱循環測試、疲勞壽命

ABSTRACT

An analysis procedure will be developed in this thesis to study the effect of thickness of the intermetallic compound on the fatigue life of solder balls for flip-chip plastic ball grid array packages under the thermal cycling test condition. In the analysis, the thickness of the intermetallic compound will be increased by the number of thermal cycles. The growth rate equation will be applied first to find the thickness of the intermetallic compound at the specific cycle and the finite element method will be used to simulate deformed behavior of the studied package in the thermal cycling test. The property of the solder joint is assumed to be elastic-plastic-creep and the underfill is viscoelastic. The stress/strain results of the finite element analysis will be employed in the fatigue life prediction model to obtain the thermal fatigue life of the solder ball that the intermetallic compound thickness is fixed. The damage of the specific cycle is the reciprocal of the calculated fatigue cycle number by using the concept of cumulative fatigue damage. The fatigue failure of the solder is defined as the cumulative damage of all cycles equal to one and the corresponding number of cycles is the actual fatigue life of the solder ball. The effect of intermetallic compound on reliability of 63Sn-37Pb and 96.5Sn-3.5Ag solder joints will be investigated in the thesis. The results show that the solder joint fatigue life decrease with the increase of intermetallic compound layer thickness. The influence of the intermetallic compound on the 96.5Sn-3.5Ag solder joints is smaller than the 63Sn-37Pb solder joints.

Keywords: cumulative fatigue damage; intermetallic compound; thermal cycling test; fatigue life.

一、前言

覆晶式構裝較傳統式構裝具有更高的 I/O 密度，更短的內部通路，更小的體積及更高的可靠度。覆晶往往以表面黏著技術黏著在塑膠基板上。覆晶式球柵陣列構裝(FC-PBGA)即是此種形式的構裝體。FC-PBGA 之表面黏著技術的缺點之一即會在鉚錫及金屬墊片之間產生介金屬化合物(Intermetallic Compound)，且在高溫時會快速的成長。介金屬化合物的脆性機械性質及複雜的顯微結構，往往對電子構裝鉚錫接點的可靠度造成極大的影響。在一般熱循環測試中，觀察構裝體切片，如圖 1 所示，可發現在可靠度測試中，鉚錫接點的疲勞破壞常在介金屬化合物中或是介金屬化合物與鉚錫的界面處產生。以往對於構裝體在熱循環測試下利用有限元素法來求取局部應力應變行為時極少將介金屬化合物在有限元素分析時考慮進去。近年來，由於對於介金屬化合物的成長動力學及其化學與機械性質已可充分掌握，所以將介金屬化合物之成長與錫球疲勞壽命行為加以整合並與傳統疲勞壽命預測方法加以比較，已是構裝業界亟欲瞭解的課題。

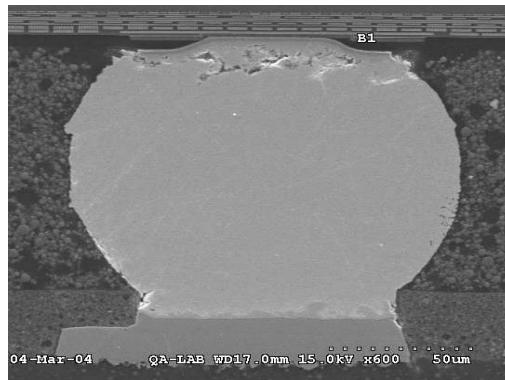


圖 1. 由構裝體切片觀察鉚錫接點的疲勞破壞位置

二、研究目的

目前業界針對電子構裝熱疲勞行為的加速測試常用熱循環測試(Thermal Cycling Test, TCT)和熱衝擊測試(Thermal Shock Test, TST)兩種。此兩種測試方法，不但可以大幅縮短測試時間，並且可以符合商品在市場的時效性。由於在以往評估構裝體在熱循環實驗下鉚錫接點的熱疲勞壽命時，均不把介金屬化合物的影響列入考慮，因此本計畫將採用熱循環測試方法來研究 FC-PBGA 在測試期間介金屬化合物對錫球可靠度及熱疲勞壽命的影響，並針對以下幾點作分析研究：

1. 不同厚度的介金屬化合物對 FC-PBGA 錫球在熱循環條件下疲勞壽命的影響。

2. 在熱循環過程中考慮介金屬化合物隨週次成長及不隨週次成長對疲勞壽命預測的影響。
3. 傳統錫鉛鉍錫及無鉛鉍錫的介金屬化合物對 FC-PBGA 錫球在熱循環條件下疲勞壽命的影響。

三、文獻探討

1993 年，Wu 等人[1]利用實驗的方法求得 63Sn-37Pb/Cu 介金屬化合物的活化能及擴散係數。研究中發現介金屬化合物厚度和時效處理時間平方根之間可以以線性來描述其關係。1997 年，Tu 等人[2]針對 Cu-Sn 介金屬化合物在 35°C~125°C 熱循環測試下對於鉍錫之疲勞壽命的影響進行討論。結果指出錫球凸塊之疲勞壽命會隨介金屬化合物的厚度增加而減少。Huang 等人[3]在 2002 年針對 Cu-Sn 介金屬化合物在不同的時效處理條件下進行可靠度分析。介金屬化合物層的疲勞特性、厚度和時效處理的關係在計畫中被探討。Hossain 等人[4]在 2004 年首先利用有限元素法研究介金屬化合物尺寸對於晶片尺寸構裝的鉍錫接點疲勞壽命的影響。其研究並未考量介金屬化合物厚度將隨著熱循環週次而增加，此與實際的觀察有極大的差距。

因此本計畫將利用累積疲勞損傷的理論來處理介金屬化合物厚度隨著熱循環成長，進而影響錫球疲勞壽命的現象。無鉛鉍錫與傳統錫鉛鉍錫的介金屬化合物對錫球可靠度影響之比較也將一併在計畫中討論。

四、研究方法

4.1 分析對象

本文是以 FC-PBGA 為研究對象，圖 2 為 FC-PBGA 對角剖面結構示意圖以及尺寸，IC 藉著 C4 鉍錫凸塊以覆晶的方式與基板黏著，覆晶和基板距離為 0.1mm，C4 鉍錫數目為 9 x 9 個面積陣列排列及 8 x 136 個周圍式面積排列，並用環氧樹脂填滿晶片和基板間的空隙。基板則使用錫球與 FR-4 印刷電路板連接，錫球數目為 36 x 36 個面積陣列方式排列，錫球間距為 1mm，錫球與基板銅墊片為 SMD 接合；與印刷電路板銅墊片為 NSMD 接合。在此本計畫選用 63Sn-37Pb 鉍錫及 96.5Sn-3.5Ag 無鉛鉍錫兩種不同的錫球材料。

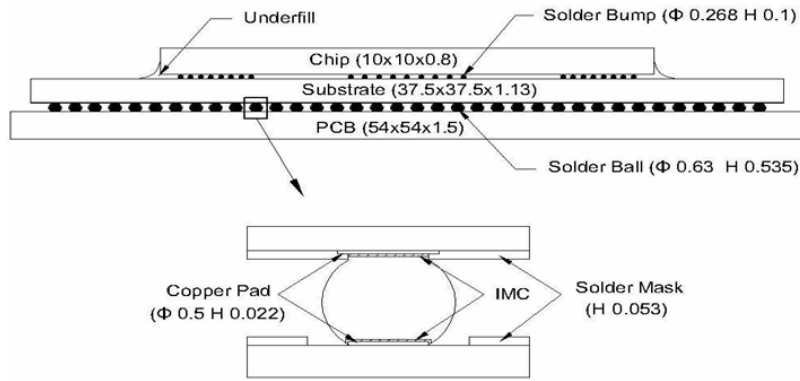


圖 2. 二維 FC-PBGA 對角面結構示意圖

4.2 分析流程

本計畫分析的流程如圖 3 所示。首先利用有限元素法求得固定介金屬化合物厚度下構裝體在熱循環週次下之應力-應變行為，並配合疲勞壽命預測模型求得錫球之熱疲勞壽命。在得到固定介金屬化合物厚度下的錫球熱疲勞壽命後，將其結果繪製成介金屬化合物厚度 d 對錫球疲勞預測壽命 N 之關係圖，並選擇一適當之方程式以曲線拼湊法描述之，即可以得到以介金屬化合物厚度為變數之壽命方程式：

$$N = N(d) \quad (1)$$

為改善假設介金屬化合物厚度在整個熱循環過程中保持不變不合理現象，因此本計畫引用累積疲勞損傷的觀念。累積疲勞損傷的觀念係假設在熱循環測試之前錫球的總損傷 D_{total} 為零。隨著每一熱循環週次的施加，可以先利用介金屬化合物成長方程式來求取在此時介金屬化合物的厚度：

$$d = d_0 + \sqrt{Dt} \quad (2)$$

其中 d 為此時介金屬化合物的厚度； d_0 為初始介金屬化合物的厚度； t 為時間，大約為高溫停留時間乘以經歷過的週次數； D 為擴散係數。本計畫所選用的兩種錒錫之介金屬化合物的 d_0 及 D 可分別由文獻[1]及[5]求得，如表 1 所示。

在特定第 n 個熱循環週次時，可利用(2)式求得當時的介金屬化合物的厚度 d_n ；並將其代入(1)式，求得在固定介金屬化合物的厚度 d_n 下，錫球之熱疲勞壽命 N_n 。根據線性疲勞損傷理論可推定此一熱循環週次所造成的損傷 D_n 為：

$$D_n = \frac{1}{N_n} \quad (3)$$

依據以上的流程，分別將每一個熱循環週次所造成的損傷累加起來，直到總損傷值 D_{total} 大於等於 1 時，錫球的最後疲勞破壞會發生，而其對應之週次數即為考量介金屬化合物厚度隨熱循環週次變化下錫球真正的熱疲勞壽命。以數學式表示則為：

$$D_{total} = \sum D_n \geq 1 \quad (4)$$

以下對於有限元素分析及疲勞壽命預測模型作進一步之說明。

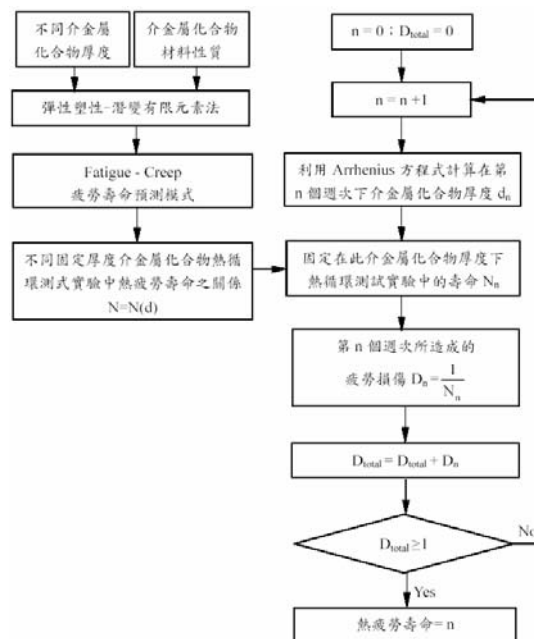


圖 3. 錫球熱疲勞壽命之分析流程圖

表 1. 介金屬化合物初始厚度及擴散係數值 [1]、[5]

		d_0	D
63Sn-37Pb Solder	Cu ₆ Sn ₅	0.9 μm	2.075×10^{-6}
	Cu ₃ Sn	-	1.088×10^{-7}
96.5Sn-3.5Ag Solder	Cu ₆ Sn ₅	0.757 μm	3.98×10^{-7}
	Cu ₃ Sn	-	-

4.3 有限元素分析

由於介金屬化合物層相當的薄，若是直接加以網格化，將會有過多的節點及

元素。所以使用有限元素法中次模型(Submodeling)的技巧來分析來分析，以減少計算量。本計畫採對角線的二維模型做為全域的模型；又因幾何結構左右對稱，所以採用二分之一的模型分析。在全域模型中介金屬化合物並不被考慮，以減少分析時間。另外根據全域模型的分析，針對最有可能發生熱疲勞破壞之錫球位置進行局部模型之建立。值得注意的是，在 63Sn-37Pb 錫球中建立的介金屬化合物為靠近錫球邊的 Cu_6Sn_5 及靠近銅墊片邊的 Cu_3Sn ，而 96.5Sn-3.5Ag 錫球只建立 Cu_6Sn_5 。全域模型及局部模型網格化的結果如圖 4 所示。

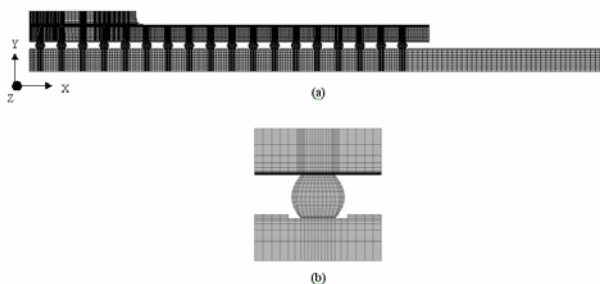


圖 4. (a) 全域模型網格化；(b) 局部模型網格化

4.3.1 材料性質與基本假設

分析過程中，錫球為與溫度及時間有關的彈塑性-潛變材料。圖 5 為有鉛錫及無鉛錫之應力-應變圖。由於錫球操作溫度/熔點之比值大於 0.4，所以必須考慮潛變對結構所帶來的影響。本計畫所選用的潛變方程式為 Hyperbolic Sine Law 方程式，公式如下：

$$\dot{\epsilon} = C_1 \cdot [\sinh(C_3 \cdot \sigma)]^{C_2} \cdot \exp\left[\frac{-C_4}{T}\right] \quad (5)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 為等效潛變應變率， σ 為等效應力， T 為絕對溫度(K)； $C_1 \sim C_4$ 為常數，如表 2 所示[6]。

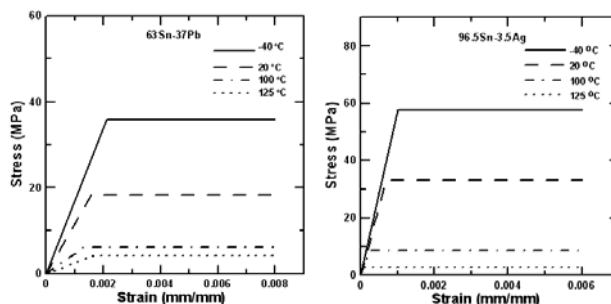


圖 5. 錫錫之應力-應變圖 (a) 63Sn-37Pb；(b)96.5Sn-3.5Ag

表2. Hyperbolic Sine Law Model 參數 [6]

Par.	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
Unit	s ⁻¹	-	MPa ⁻¹	K
63Sn-37Pb Solder	127.668	3.3	0.1224	6360
96.5Sn-3.5Ag Solder	7.01	5.5	0.081	5802

由於底膠材料之機械性質與各廠商之配方有極大之關係。因此本研究將廠商提供特殊配方之底膠製成拉伸試片，以 INSTRON 微拉力機進行一連串拉伸及潛變實驗；並利用黏彈模型來描述其力學行為。其方程式可表示如下：

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{(-t/\tau_i)} + E(\infty) \quad (6)$$

$$\tau_i = \tau_{i0} \times e^{H/R_i T} \quad (7)$$

其中 $E(t)$ 為在時間 t 下之彈性係數； $E(\infty)$ 為在時間無窮大時下之彈性係數； E_i 、 H 及 τ_{i0} 為材料常數，如表 3 所示。表 4 為各組成元件的機械性質。

表3. Viscoelastic Underfill Model 參數

H/E_0 (K)	E_0 (MPa)	E_∞ (MPa)	C_1	τ_1	C_2	τ_2	C_3	τ_3
15644	5630	1300	0.264	0.198	0.200	451	0.536	30435

表4. FC-PBGA各組成元件之機械性質

Temperature (°C)	Elastic Modulus ×10 ³ (MPa)				Poisson Ratio	CTE ×10 ⁻⁶ (1/°C)			
	-40	25	50	125		-40	25	50	125
Die	192.1	191	190.6	190	0.278	1.5	2.6	2.8	3.1
Underfill	Viscoelastic				0.3	20			
Organic Substrate	26(X,Z) 11(Y)				0.11(X,Z) 0.39(XY,YZ)	13(X,Z) 57(Y)			
Copper Pad	69				0.34	15.3	16.4	16.7	17.3
63Sn-37Pb Solder	Stress-Strain Curve				0.35	25			
96.5Sn-3.5Ag Solder	Stress-Strain Curve				0.4	22.5			
PCB	22(X,Z) 10(Y)				0.11(X,Z) 0.28(XY,YZ)	18(X,Z) 70(Y)			
Solder Mask	2.1				0.3	49.7			
Cu ₆ Sn ₅	85.6				0.31	16.3	17.6	18.1	19.3
Cu ₃ Sn	108				0.3	16.98	17.8	18.1	18.87

本計畫在數值模擬上，有以下幾點的基本假設：

1. 除了鉛錫及底膠之外，基板和印刷電路板的機械性質為有方向的線彈性外，其於材料的機械性質皆假設為線彈性材料。
2. 在模擬溫度循環過程中，視初始溫度 25°C 為無殘留應力存在。
3. 所有的界面都為完整接合，構裝內部無任何的孔洞或雜質存在。
4. 假設 FC-PBGA 為平面應變狀態。
5. 假設錫球的成分不會因介金屬化合物生成而改變。
6. 錫球的在基板及印刷電路板兩側假設具有相同厚度的介金屬化合物。

4.3.2 負載條件與邊界條件

在全域模型中，熱循環測試溫度負載條件為 -40°C~125°C。初始溫度 25°C，高溫及低溫停留 600 秒，升溫及降溫過程為 300 秒，本計畫共進行 3 個溫度循環週期，如圖 6 所示。

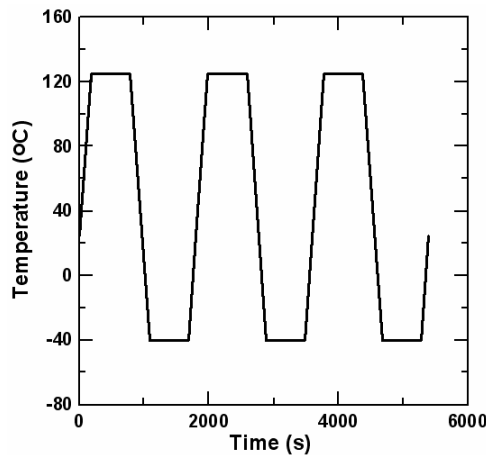


圖 6. 熱循環測試曲線圖

在邊界條件方面：由於分析結構之對角線方向幾何結構對稱；故採二分之一的模型。在對稱線上給定對稱條件，並在對稱線上假設 X 方向位移為零、印刷電路板底部與對稱線的交點假設 X、Y 方向位移為零，以避免模型產生滑動。

在局部模型部分，將全域模型所得相對於局部模型切割平面之結構結果，並且配合各個結果所對應的溫度當作局部模型的邊界及負載條件。

4.4 錫球之疲勞壽命預測模型

在有限元素法分析完成後，將第三週次穩態的應力應變結果代入疲勞壽命預測模型，即可得到在固定介金屬化合物厚度下的錫球熱疲勞壽命。本計畫採用 Coffin-Mason 關係式來作為壽命預測的基礎，如下式所示：

$$N_f = B_1 \cdot (\Delta \varepsilon_{eq}^{in})^{C_1} \quad (8)$$

其中 N_f 是測試個數 50% 損壞的壽命， $\Delta \varepsilon_{eq}^{in}$ 為等效非彈性應變範圍。 B_1 、 C_1 為常數，由文獻[7]及[8]可得 63Sn-37Pb 鉛錫及 96.5Sn-3.5Ag 無鉛鉛錫分別為 0.146、-1.94 及 27.63、-1.08。

五、結果與討論

5.1 局部模型在熱循環測試下的結構分析

在全域模型的分析結果中，可以發現兩種錫球在第三週次中最大等效潛變應變皆發生在晶片邊緣下方錫球右上角和銅墊片接合處，因此預測此位置的錫球最先破壞。所以對此錫球建立包含介金屬化合物的局部模型加以分析，並且針對錫球與介金屬化合物右上界面作為研究對象。

5.1.1 63Sn-37Pb 錫球

圖 7 為錫球之等效應力與時間的曲線圖。從分析結果可以發現各厚度之介金屬化合物的趨勢以及數值幾乎一致。圖 8 為錫球之等效塑性應變與時間的曲線圖。從分析結果可以發現等效塑性應變隨著介金屬化合物厚度增加而增加。圖 9 為錫球之等效潛變應變與時間的曲線圖。從分析結果可以發現介金屬化合物之厚度對於等效潛變應變的影響並不大。

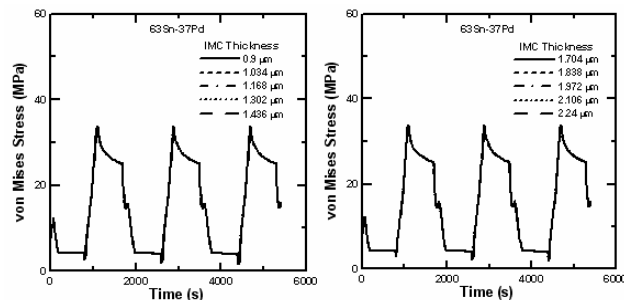


圖 7. 63Sn-37Pb 錫球等效應力對時間關係圖

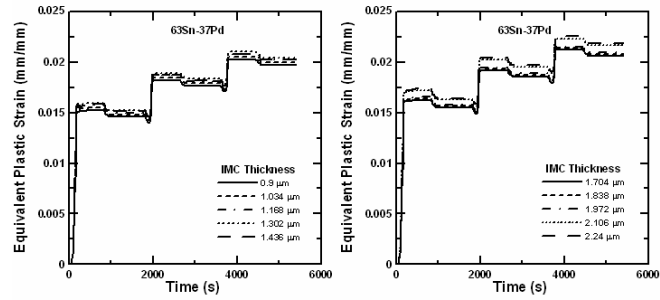


圖 8. 63Sn-37Pb 錫球等效塑性應變對時間關係圖

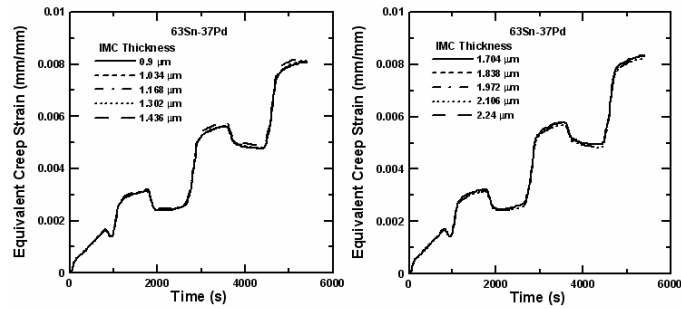


圖 9. 63Sn-37Pb 錫球等效潛變應變對時間關係圖

5.1.2 96.5Sn-3.5Ag 錫球

圖 10 為錫球之等效應力與時間的曲線圖。圖 11 為錫球之等效塑性應變與時間的曲線圖。圖 12 為錫球之等效潛變應變與時間的曲線圖。其中可以發現結果都與 63Sn-37Pb 類似。

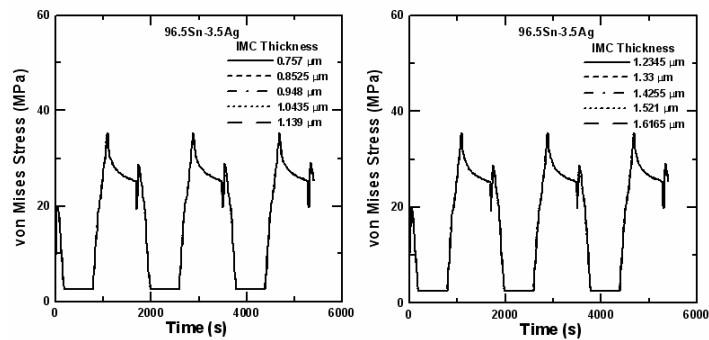


圖 10. 96.5Sn-3.5Ag 錫球等效應力對時間關係圖

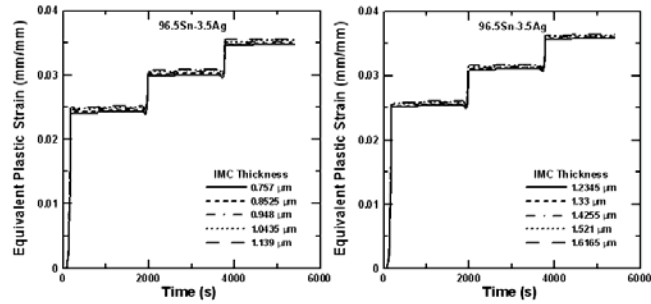


圖 11. 96.5Sn-3.5Ag 錫球等效塑性應變對時間關係圖

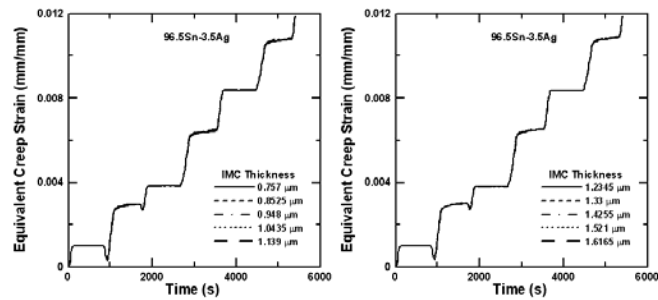


圖 12. 96.5Sn-3.5Ag 錫球等效潛變應變對時間關係圖

5.2 錫球疲勞壽命的結果

5.2.1 63Sn-37Pb錫球

將不同介金屬化合物厚度所得的第三溫度循環週次中之等效非彈性應變範圍數值代入 Coffin-Manson 關係式中，可計算出錫球在固定介金屬化合物厚度下的疲勞壽命，如表 5 所示。將其壽命與介金屬化合物厚度的關係選擇一適當之方程式以曲線拼湊法描述之，如圖 13 所示。

表 5. 固定介金屬化合物厚度時 63Sn-37Pb 錫球之疲勞壽命

IMC 厚度 (μm)	0	0.9	1.034	1.168	1.302	1.436	1.57	1.704	1.838	1.972	2.106	2.24
疲勞壽命 (Cycles)	1019	868	852	837	823	803	792	781	771	761	752	742

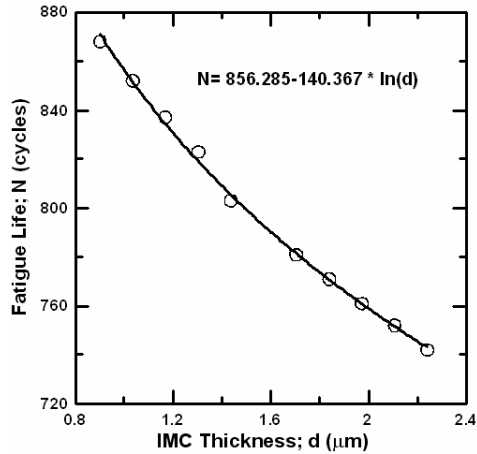


圖 13. 63Sn-37Pb 錫球中介金屬化合物厚度與疲勞壽命之關係圖

引用累積疲勞損傷的觀念求取錫球真正的熱疲勞壽命為784個週次與不考慮介金屬化合物時的壽命1019個週次，其差異30%，有著明顯的差距。

5.2.2 96.5Sn-3.5Ag 錫球

將 96.5Sn-3.5Ag 錫球第三溫度循環週次中之等效非彈性應變範圍數值一樣代入 Coffin-Mason 關係式中，可計算出無鉛鉛錫在固定介金屬化合物厚度下的疲勞壽命，如表 6 所示。圖 14 為將其壽命與介金屬化合物厚度的關係選擇一適當之方程式以曲線拼湊法描述之圖形。

表 6. 固定介金屬化合物厚度時 96.5Sn-3.5Ag 錫球之疲勞壽命

IMC 厚度 (μm)	0	0.757	0.8525	0.948	1.0435	1.139	1.2345	1.33	1.4255	1.521	1.6165
疲勞壽命 (Cycles)	2454	2492	2488	2484	2482	2478	2476	2474	2473	2471	2470

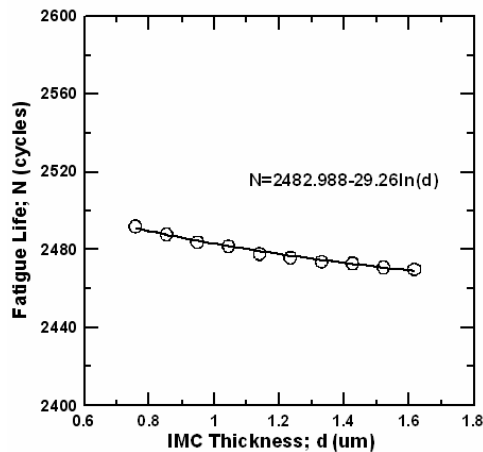


圖 14. 96.5Sn-3.5Ag 錫球中介金屬化合物厚度與疲勞壽命之關係圖

以本計畫所引用累積疲勞損傷的觀念求得錫球真正的熱疲勞壽命為 2476 個週次，與不考慮介金屬化合物時的壽命 2454 個週次，其差異 1%，沒有太大的差距。

六、結論

本計畫使用 ANSYS 有限元素法分析介金屬化合物對錫球應力、應變分佈及變形行為的影響，並評估考慮介金屬化合物會隨熱循環週次成長對錫球壽命的影響。茲將分析結論歸納如下：

1. 兩種錫球材料最早破壞的地方都在晶片邊緣下方錫球右上角和銅墊片接合處。
2. 63Sn-37Pb 及 96.5Sn-3.5Ag 錫球在熱循環週次中，等效應力受到介金屬化合物厚度的影響不大。
3. 63Sn-37Pb 及 96.5Sn-3.5Ag 錫球在熱循環週次中，等效塑性應變隨著介金屬化合物厚度增加而增加；介金屬化合物厚度對於此兩種錫球之等效潛變應變的影響都不大。
4. 以 63Sn-37Pb 錫球來說，不考慮介金屬化合物的存在與本計畫所使用的累積疲勞損傷觀念所得的疲勞壽命有明顯的差距；而對無鉛錒錫則影響並不大。
5. 在相同的構裝型式上，以 96.5Sn-3.5Ag 作為錫球材料會有比較好的疲勞壽命。
6. 兩種材料的錫球疲勞壽命都會隨介金屬化合物厚度的增加而減小，但隨著厚度的增加，影響會有越來越小的趨勢。

七、計畫成果自評

本計畫的內容均已於預定時間內完成相關工作，成果與原計畫所提出之構想相符。本計畫以連續損傷的觀念，結合介金屬化合物成長動力學及疲勞壽命預測方法之建立，已獲得較傳統分析更為可信之預測結果，也對傳統之分析方法提供一比較參考之依據。因此本計畫之成果具有一定之學術及應用價值，可提供工業界設計之參考或提供後續研究者所使用。

計畫之參與人員也獲得電子構裝製程及電腦輔助設計在電子構裝可靠度評估應用上的相關訓練。計畫之部分成果已於第二十二屆全國機械工程研討會中發

表。詳細之成果將撰寫成論文在國際學術期刊中發表。

八、參考文獻

- [1] Y. Wu, J. A. Sees, L. A. Foster, J. L. Marshall, E. G. Jacobs and R. F. Pinizzotto, "The Formation and Growth of Intermetallics in Composite Solder," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 22, No. 7 pp. 769-777, April 1993.
- [2] P. L. Tu and Y. C. Chan, "Effect of Intermetallic Compounds on the Thermal Fatigue of Surface Mount Solder Joints," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology B*, Vol. 20, No. 1, pp. 87-93, February 1997.
- [3] W. Huang, J. M. Loman and B. Sener, "Study of the Effect of Reflow Time and Temperature on Cu-Sn Intermetallic Compound Layer Reliability," *Journal of Microelectronics Reliability*, Vol. 42, Issue: 8, pp. 1229-1234, August 2002.
- [4] M. M. Hossain, D. Agonafer, P. Viswanadham and T. Reinikainen, "Strain Based Approach for Prediction the Solder Joint Fatigue Life with the Addition of Intermetallic Compound Using Finite Element Modeling," *IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, Vol. 2, 1-4, pp. 358-367, June 2004.
- [5] D. R. Flanders, E. G. Jacobs and R. F. Pinizzotto, "Activation Energies of Intermetallic Growth of Sn-Ag Eutectic Solder on Copper Substrates," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 26, No. 7 pp. 883-887, April 1997.
- [6] J. H. Lau and S. W. R. Lee, "Modeling and Analysis of 96.5Sn-3.5Ag lead-free Solder Joints of Wafer Level Chip Scale Package on Buildup Microvia Printed Circuit Board," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 25, No. 1, pp. 51-58, January 2002.
- [7] S. S. Mason, "Thermal Stress and Low Cycle Fatigue," New York: Mcgraw-Hill, 1996.
- [8] J. H. L. Pang, T. H. Low and F. X. Che, "Lead-Free 96.5Sn-3.5Ag Flip Chip Solder Joint Reliability Analysis," *IEEE Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Vol. 2, pp. 160-164, June 2004.