塑封球柵陣列電子構裝之界面脫層裂縫尖端

應力強度因子分析

葉孟考* 張國欽**

中華民國 台灣省 新竹市 國立清華大學 動力機械工程學系

*教授 **博士班研究生

國科會計劃編號: NSC88-2212-E007-005

摘要

本文探討含界面脫層的塑封球柵陣列(PBGA)電 子構裝受溫濕度影響,文中採用整體-區域有限單元 法及二維線性界面破壞力學來分析三維 PBGA 結 構,探討其在吸濕及焊接加熱過程,因熱膨脹係數的 差異及脫層處飽和蒸氣壓力所產生的負荷,造成脫層 裂縫尖端的應力集中,並藉由裂縫尖端應力強度因子 的計算,探討脫層成長的趨勢。

關鍵詞:脫層,整體-區域有限單元法,裂縫,應力 強度因子

一、簡介

塑封球柵陣列電子構裝(Plastic Ball Grid Array, PBGA)具有質輕、高接腳數、易處理、成本低及較佳 的電子性能等優點,已成為電子構裝的主流。由於 PBGA 的封膠材料(EMC)及基板(BT)是由樹脂(Resin) 所構成,在一般室溫環境下會有吸濕的作用,因此 PBGA 在經過濕度吸收擴散(Moisture Diffusion)及焊 接加熱(Solder Reflow)等階段,因界面間熱膨脹係數 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE)的差異及焊 接加熱過程中 PBGA 內部濕氣轉換成蒸氣形成的濕 熱應力,若超過界面間的臨界值,則會使得界面脫 層,若界面脫層繼續成長,則更進一步產生爆裂現象 (Popcorn Phenomenon),因而降低元件的壽命。

實際上,在塑封過程之後,即發現電子構裝在 應力集中處有一些破裂缺陷存在,如晶片(Die)角落 向上,晶片座(Die Pad)底部向下及晶片座頂端側向 (Lee and Earmme, 1996)。通常在發生這些破裂前,界 面間的脫層已經發生,脫層是電子構裝的破壞現象之 一,可發生於不同界面間(Sauber et al., 1994),此脫 層也是水份聚集之處,使得在焊接加熱過程中易發生 爆裂現象。

電子構裝爆裂現象的發生有四個基本步驟,分 别為水份的吸收, 脫層的發生與成長, 水份的蒸發及 爆裂破壞。Ahn 與 Kwon(1995)研究 119 I/O PBGA 在 晶片和晶片座間的接著層界面發生脫層,同時因水份 吸收蒸發而產生的構裝破壞; Tay 與 Liu(1996)研究 SOJ 構裝在晶片座下方因水份吸收的蒸發而產生圓 頂形塑封而造成構裝結構破壞。葉與蒙(1998)分析 PBGA 吸濕及濕熱應力效應;葉與廖(1998)研究含裂 縫 PBGA 之熱應力效應。先前的研究(Yeh and Chang, 1999)分析無缺陷 PBGA 構裝試片,在焊接加熱過程 中,於EMC 及晶片座界面角落處,容易產生脫層現 象,其他界面則不會產生脫層。為了預測脫層是否會 進一步成長,本文假設在 EMC 及晶片座界面角落已 有脫層存在,並變化脫層長度,利用整體-區域有限 單元法 (Global-Local Finite Element Analysis Technique)及二維線性界面破壞力學(2-D Linear Interface Fracture Mechanics)分析三維 PBGA 結構的 脫層裂縫尖端之應力強度因子(Stress Intensity Factor, SIF),藉此探討脫層成長的趨勢。

二、理論分析

塑封球柵陣列電子構裝之結構,如圖1所示, 由樹脂、晶片、晶片座、基板與錫球(Solder Ball)所 組合而成,為一複雜之幾何與材料問題。在其變形 與破壞之過程中,分析的重點包括(a)熱傳導分析(b) 濕度吸收擴散分析(c)濕熱應力分析(d)界面破壞力學 分析。在先前的研究(Yeh and Chang, 1999)已提及二 維 PBGA 結構熱傳導,濕度吸收擴散及濕熱應力分 析方法,三維 PBGA 結構分析過程與二維類似。

2.1 整體-區域有限單元分析

本文利用整體-區域有限單元法分析已含脫層 三維 PBGA 結構,採用 Specified Boundary Method(SBM),其過程主要有四個階段(Voleti et al., 1996),第一階段計算 PBGA 各組成材料性質;第二 階段利用有限單元法對三維結構做粗部分割(Global Mesh)得到 PBGA 因濕熱影響所產生的整體節點位 移,結構對稱面如圖 2 所示,無平面外節點位移, 第三階段選取結構對稱面脫層裂縫尖端附近部分區 域做細部分割(Local Mesh)。由於進行三維結構分析 時,在整體-區域邊界相對二維區域有比較少的結點 數,所以將三維結構分析所得的此區域邊界節點位 移進行內插(Interpolation),可得到二維區域邊界節點 位移;第四階段將二維區域邊界節點位移作為邊界 條件,進行二維界面脫層破壞成長分析。

2.2 界面破壞力學分析

 $\times \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(\frac{r}{L}\right)^{i\epsilon}$

一般破壞力學依其破壞模式可區分為三種模式,如圖 3 所示,模式一(Mode I)為受拉力方向的破壞模式,模式二(Mode II)及模式三(Mode III)分別表示受不同方向剪力所形成的破壞模式。圖 4 為雙材料界面脫層裂縫尖端示意圖,在裂縫尖端附近的應力場及位移場可表為(Saitoh et al., 1998)

$$\sigma_{y} + i\tau_{xy} = \frac{K_{1} + iK_{2}}{\sqrt{2\pi}r} \left(\frac{r}{L}\right)^{i\epsilon}$$

$$u_{y} + iu_{x} = \frac{K_{1} + iK_{2}}{2(1+2i\epsilon)\cosh(\epsilon\pi)} \left[\frac{\kappa_{1}+1}{\mu_{1}} + \frac{\kappa_{2}+1}{\mu_{2}}\right]$$
(1)
(2)

其中

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\left(\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right) / \left(\frac{\kappa_2}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1} \right) \right]$$
(3)

ε表示應力和位移振盪奇異性(Oscillatory Singularity) 的強度, K_1 +i K_2 為 Erdogran(1965)所提出的 SIF 複 數表示式, K_1 為 Mode I 的 SIF, K_2 為 Mode II 的 SIF, $\mu_1 \mathcal{B} \mu_2 \beta$ 別為材料 1 及材料 2 的剪力模數 (Shear Modulus), σ_y 和 τ_{xy} 為脫層 裂縫尖端附近 ($\theta = 0$ 和 r = x)的應力, u_y 和 u_x 為脫層表面($\theta = 0$ 和 r = -x)的相對位移量。由於本文二維破裂分析為 平面應變問題,因此 $\kappa_j = 3 - 4v_j$ (j=1,2), $v_1 \mathcal{B} v_2 \beta$ 別為材料 1 及材料 2 的浦松比(Poisson's Ratio), L 是 使雙材料界面裂縫之 SIF 與單一材質裂縫之 SIF 具 有相同維度所引入的特徵長度(Characteristic Length)。Rice(1988)指出(1)式及(2)式必須在 r/L<0.01 限制下才能成立,本文採用 L=0.25mm,r 的範圍為 0.001mm~0.025mm,在此條件下,將可精確地計算 出在脫層裂縫尖端的應力強度因子K₁及K₂。

由於利用有限單元法計算出的節點位移值比應 力值有更高的精確度,因此採用(2)式來計算 K_1 及 K_2 ,由(2)式可得(Saitoh et al., 1998)

$$K_{1} = C \lim_{r \to 0} [u_{y}(\cos Q + 2\epsilon \sin Q) + u_{x}(\sin Q - 2\epsilon \cos Q)] / \sqrt{r/2\pi}$$

$$K_{2} = C \lim_{r \to 0} [u_{x}(\cos Q + 2\epsilon \sin Q) - u_{y}(\sin Q - 2\epsilon \cos Q)] / \sqrt{r/2\pi}$$
(5)

其中

$$C = 2\cosh(\epsilon\pi)/[(\kappa_1 + 1)/\mu_1 + (\kappa_2 + 1)/\mu_2]$$
(6)

$$Q = \epsilon \ln(r/L)$$
(7)

將離裂縫尖端數個不同距離 r 值所得到的脫層裂縫 表面相對位移量 $u_x \approx u_y$ 代入(4)式和(5)式,可得不 同 r 值的 $K_1 \gtrsim K_2$,再分別繪製其對 r 的座標圖(類 似圖 5),利用外插法可得脫層裂縫尖端 r=0 的應力 強度因子 $K_1 \approx K_2$,再分別求出 K_i 及能量釋放率 (Energy Release Rate)G,藉此分析脫層成長的趨勢。

$$K_{i} = \sqrt{K_{1}^{2} + K_{2}^{2}}$$

= $C\sqrt{1 + 4\epsilon^{2}} \lim_{r \to 0} \frac{\sqrt{u_{y}^{2} + u_{x}^{2}}}{\sqrt{r/2\pi}}$ (8)

$$G = \frac{1}{16\cosh^2(\epsilon\pi)} \left[\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right] (K_1^2 + K_2^2)$$
(9)

在複數平面繪製 K_1 和 K_2 的座標圖,在脫層成 長開始時, K_1 +i K_2 將達到一破壞軌跡,為簡化問 題,假設此破壞軌跡為圓形(Malyshev and Salganik, 1965),因此脫層成長破壞準則為(Saitoh et al., 1998)

$$\mathbf{K}_{i} = \mathbf{K}_{c} \tag{10}$$

其中 K_c 為界面間的破壞強度(Fracture Toughness), 此破壞準則等效於能量釋放率破壞準則概念。

三、結果與討論

本文以 Depopulated 1.27-mm pitch peripherial pad BGA 作為分析模型,使用有限單元法模擬 PBGA 製程之 JEDEC 測試標準(JEDEC, 1995)。在濕度環境 Level 1 測試標準中,將 PBGA 放置在 85°C 85%恆 溫恆濕箱中 168 小時;在焊接加熱過程中,每秒升 溫速率為 6°C, 試片到達最高溫 220°C後停留 20 秒,整個焊接加熱升溫過程共分 7 個階段, 如圖 6 所示。假定 PBGA 內部初始狀態為相對濕度 0%, 溫 度為室溫 17°C,內應力為 0,分析濕熱對已含脫層 PBGA 脫層成長的影響。

在先前的研究(Yeh and Chang, 1999),得知在 Epoxy/Die Pad 界面角落有脫層產生,假設 Epoxy/Die Pad 界面有脫層如圖 7 所示,建立 7 組不同的脫層長 度,分別為 0.05、0.5、1.0、1.5、2.5、3.5 及 4mm, 逐漸沿伸至 Die Attach/Die Pad 界面。

3.1 錫球對 PBGA 界面應力影響

本文分析三維結構 PBGA,由於 PBGA 在焊接 加熱過程中,錫球是在應力自由的狀態,為探討錫球 對 PBGA 內部界面應力的影響,因此建立有錫球 PBGA 及無錫球 PBGA 兩組二維模型,選擇 Epoxy/Die 界面,Epoxy/Die Pad 界面及 Die/Die Attach 界面,分析在經過吸濕及焊接加熱過程後兩組模型界 面應力分佈的差異。圖 8 為分析時使用的 PBGA 對 稱剖面尺寸圖,其材料性質如表 1 所示。

圖 9 及圖 10 分別為有錫球 PBGA 及無錫球 PBGA 在經過4小時和 168 小時吸濕過程後內部濕度 的分佈。由圖中顯示在吸濕過程較早階段,因錫球的 影響,兩組模型的內部濕度分佈並不相同,但經過 168小時吸濕過程後,其內部濕度分佈完全相同,因 此錫球的有無並不影響最後濕度的分佈。在焊接加熱 過程中溫度的分佈也有相同的情形,兩組模型內部溫 度最後均達最高溫度 220°C。圖 11(a)及圖 11(b)分 別為有錫球 PBGA 及無錫球 PBGA 在 Epoxy/Die Pad 界面拉應力與剪應力分佈,由圖中可知兩組模型在拉 應力分佈方面與在剪應力分佈方面幾乎完全相同,同 時 Epoxy/Die 界面與 Die/Die Attach 界面也有相同的 情形,因此在焊接加熱過程中,錫球並不影響 PBGA 內部界面的應力分佈。在不影響分析結果的精確度條 件下,為節省計算機分析時間及資源,因此必須有效 降低有限單元分割單元及節點數目;所以在建立三維 PBGA 模型時,將不建構錫球,以減少有限單元網格 數目。由於 PBGA 對中央軸左右對稱,因此僅對八 分之一 PBGA 結構進行分析,其有限單元網格分割, 如圖 12 所示。

3.2 界面脫層二維應力分析

圖 13 為脫層裂縫尖端附近區域有限單元網格 圖,使用三角形6結點等參元素,在裂縫尖端鄰近區 域,元素邊長為1μm~10μm,此邊長相當小,以確 保分析結果的精確度。

為探討濕氣在 PBGA 經過焊接加熱過程後,對 脫層成長的影響,因此分析不含濕氣 PBGA 及含濕 氣 PBGA 在經過焊接加熱過程後,在脫層裂縫尖端 應力強度因子分佈,其結果分別如圖 14 及圖 15 所 示。

(a) 不含濕氣 PBGA 脫層 SIF 分析

由圖 14 可知,應力強度因子(SIF) K_i 逐漸增加, 在脫層 d=2.5mm 時到達最大值 27.6 MPa \sqrt{mm} ,然後 在 d>2.5mm 時逐漸減少,最後到達一穩定值。在 d=1.5mm 後, K_2 (mode II)幾乎與 K_i 重合, K_1 除在 d=2.5mm 時 值 較 低 外 幾 乎 維 持 一 穩 定 值 -3.0 MPa \sqrt{mm} ,因此在脫層成長的過程中, K_2 扮演 主要的角色,即脫層成長主要受到剪應力影響, K_1 (Mode I)只對脫層的發生及早期脫層裂縫的成長 (d<1.5mm)有所影響。

(b) 含濕氣 PBGA 脫層 SIF 分析

當 PBGA 含有濕氣時,由圖 15 可知,應力強度 因子的分佈與圖 14 類似,在脫層成長的過程中,仍 然由 K_2 主導, K_1 仍只對脫層的發生及早期脫層裂縫 的成長(d<1.5mm)有所影響, K_i 在 d=2.5mm 到達最 大值 31.8 MPa \sqrt{mm} ,隨後逐漸減少至一穩定值;不 過在焊接加熱過程中溫度>100°C,受到脫層裂縫內 所含濕氣轉換成水蒸氣的影響(在 220°C 水蒸氣飽和 蒸氣壓力為 2.318MPa), K_i 比不含濕氣的 K_i 高約 8.7%至 32.2%, K_1 則比不含濕氣的 K_1 高約 18.8%至 79.7%,隨著脫層長度的增加, K_1 值增加更明顯,而 且逐漸往正值增加,這是因為隨著脫層長度增加,脫 層內部所含的水蒸氣也隨之增加,而導至脫層內部蒸 氣壓力增大,使得 mode I 的效應更明顯。

雖然 PBGA 在含有濕氣的情況下,其脫層破壞 成長主要還是受界面間熱膨脹係數差異所產生 Mode II 剪應力的影響,不過隨著脫層長度增加,水蒸氣所 產生的 Mode I 破壞模式將更明顯,因此 PBGA 內部 若含有濕氣,不僅會降低界面間的黏著強度,在焊接 加熱時,水蒸氣的產生對脫層的成長仍有一定的影響。

四、結論

本文結合三維整體-區域有限單元法及二維線性 界面破壞力學分析 PBGA 結構,假設 Epoxy/Die Pad 界面有脫層存在,設定7組不同的脫層長度,藉由脫 層裂縫尖端應力強度因子的變化,來探討脫層成長的 趨勢。經由數值分析,可獲得下列結論:

- 錫球的有無並不影響 PBGA 在吸濕及焊接加熱過 程時界面應力的分佈,因此建構三維 PBGA 模型 時,可不包含錫球。
- 不論 PBGA 是否含有濕氣,脫層成長主要由K₂主導,且在 d>2.5mm 後逐漸穩定。
- 3. 當 PBGA 含有濕氣時,由於脫層裂縫內部水蒸氣 的產生,在脫層成長的後期,Mode I 破壞模式之 影響會更明顯。

誌謝

本 文 承 蒙 國 科 會 補 助 經 會(計 劃 編 號: NSC88-2212-E007-005),也承蒙國家高速電腦中心提 供超級電腦設備(Cray J916 及 SPP 2000),使本文得 以完成,專此誌謝。

参考文獻

- Ahn, S. H. and Kwon, Y. S., 1995, "Popcorn Phenomena in a Ball Grid Array Package," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Part B, Vol. 18, No. 3, pp. 491-495.
- Chiang, K. N., 1997, "Electronic Packaging and Computational Mechanics," *News of the Society of Theoretical and Applied Mechanics*, the Republic of China, Vol. 81, pp. 1-13(in Chinese).
- Choi, Y. T., and Hu, Y. C., 1998, "Analysis of Popcorn Phenomenon of PBGA by Computer Simulation," *Industrial Materials*, Vol. 141, pp. 145-152(in Chinese).
- 4. Erdogan, F., 1965, "Stress Distribution in bonded Dissimilar Materials with Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 32, pp. 403-410.
- JESD22-A1113-A, 1995, "Test Method A113-A Preconditioning of Plastic Surface Mount Devices Prior to Reliability Testing," JEDEC Standard, Electronic Industries Association, Arlington, VA, pp. 1-5.
- Lau, J. H., and Chen, K. L., 1997, "Thermal and Mechanical Evaluations of a Cost-effective Plastic Ball Grid Array Package," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 119, pp. 208-212.
- Lee, H. and Earmme, Y. Y., 1996, "A Fracture Mechanics Analysis of the Effects of Material Properties and Geometries of Components on Various Types of Package Cracks," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Part A, Vol. 19, No. 2, pp. 168-177.
- Liu, S., 1993, "Debonding and Cracking of Microlaminates Due to Mechanical and Hygrothermal Loads for Plastic Packaging," 6th Symposium on Structural Analysis in Microelectronics and Fiber Optics, EEP-Vol. 7, ASME WAM, Nov. 28-Dec. 3, New Orleans, Louisiana, pp. 1-11.
- 9. Malyshev, B. M. and Salganik, R. L., 1965, "The Strength of Adhesive Joints Using the Theory of Cracks," *The International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 1, pp. 114-128.
- 10. Minges, M. L. et al., 1989, "Packaging," *Electronic Materials Handbook*, Vol.1, ASM International, Materials Park, OH.

- Rice, J. R., 1988, "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks," Transactions of the ASME, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 55, pp. 98-103.
- Saitoh, T., Matsuyama, H. and Toya, M., 1998, "Linear Fracture Mechanics Analysis on Growth of Interfacial Delamination in LSI Plastic Packages under Temperature Cyclic Loading," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Part B, Vol. 21, No. 4, pp. 422-427.
- Sauber, J., Lee, L., Hsu, S. and Hongsmatip, T., 1994, "Fracture Properties of Molding Compound Materials for IC Plastic Packaging," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Part A, Vol. 17, No. 4, pp. 533-541.
- Tay, A. A. O. and Lin, T., 1996, "Moisture Diffusion and Heat Transfer in Plastic IC Packages," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology,* Part A, Vol. 19, No. 2, pp. 186-193.
- Voleti, S. R., Chandra, N. and Miller, J. R., 1996, "Global-Local Analysis of Large-Scale Composite Structure Using Finite Element Methods," *Computers & Structures*, Vol. 58, No. 3, pp. 453-464.
- Voth, T. E., and Bergman, T. L., 1996, "Ball Grid Array Thermomechanical Response During Reflow Assembly," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 118, pp. 214-222.
- 17. Yeh, M. K. and Chang, K. C., 1999, "Failure Prediction in Plastic Ball Grid Array Electronic Packaging," InterPACK'99, Hawaii, USA.
- Yi, S., Goh, J. S. and Yang, J. C., 1997, "Residual Stresses in Plastic IC Packages During Surface Mounting Process Preceded by Moisture Soaking Test," *IEEE Transactions on Components*, *Packaging, and Manufacturing Technology*, Part B, Vol. 20, No. 3, pp. 247-255.
- 19. 葉孟考,蒙彦良,1998,'塑封球柵陣列電子構裝 之濕熱應力分析,'中國機械工程學會第15屆全 國學術研討會論文集,pp.97-104.
- 20. 葉孟考,廖學國,1998, '含裂縫塑封球柵陣列電 子構裝之熱應力分析,'中國機械工程學會第15 屆全國學術研討會論文集, pp. 105-112.

Constant/Material	EMC	Die	Die Attach	Die Pad	BT	Solder Ball
E (Gpa)	0.64 ^[a]	158.62 ^[b]	6.21 ^[b]	119.3 ^[c]	17.4 ^[b]	31.03 ^[b]
$lpha . 10^{-6} (/ {}^{\rm o}{ m C})$	$\begin{array}{l} 17.1^{[a]} \ (T \leq 160 \ ^{o} C \) \\ \\ 71.4^{[a]} \ (T > 160 \ ^{o} C \) \end{array}$	3 ^[b]	50 ^[b]	16.9 ^[c]	$16^{[d]}$ (x,z) $72^{[d]}$ (y)	25 ^[b]
$\beta . 10^{-5}$ (/%)	4 ^[a]	0	4 ^[a]	0	4 ^[a]	0
ν	0.3 ^[b]	0.21 ^[b]	0.3 ^[b]	0.34 ^[c]	0.28 ^[b]	0.4 ^[b]
$K(w/m^{o}C)$	0.67 ^[a]	153 ^[a]	4.5 ^[c]	196.6 ^[c]	0.3 ^[a]	50 ^[f]
$C_p (J/kg^oC)$	1884 ^[a]	703 ^[a]	703 ^[c]	400 ^[c]	1570 ^[e]	150 ^[f]
ho (kg/ m ³)	1820 ^[a]	2330 ^[a]	3800 ^[c]	8920 ^[c]	1800 ^[e]	8520 ^[f]
$D_m (mm^2/s)$	3.4×10 ^{-6^[a]}	0	60×10 ^{-6^[g]}	0	0.7×10 ^{-6^[g]}	0

表 1 PBGA 材料性質

a: (Yi et al., 1997) b: (Choi and Hu, 1998) c: (Lau and Chen, 1997) d: (Chiang, 1997) e: (Voth and Bergman, 1996) f: (Minges et al., 1989) g: (Liu, 1993)

 Image: state stat



圖 1 PBGA 結構示意圖









圖 2 PBGA 結構對稱面





圖 8 PBGA 對稱剖面尺寸圖

圖 5 以外插法求脫層裂縫尖端應力強度因子



圖 6 焊接加熱過程溫度變化



註: d 代表脫層長度(□為脫層起點,箭頭尖 端為脫層裂縫尖端)

圖 7 界面脫層示意圖



圖 9(a)



圖 9(b)

圖 9 (a)有錫球(b)無錫球 PBGA 4 小時後濕度分 佈圖











圖 11 Epoxy/Die Pad 界面(a)拉應力(b)剪應力分 佈圖

圖 10(b)

圖 10 (a)有錫球(b)無錫球 PBGA 168 小時後濕度 分佈圖





圖 11 (a)

圖 12 八分之一 PBGA 有限單元網格圖



圖 13 脫層裂縫尖端附近區域有限單元網格圖



圖 14 不含濕氣 PBGA 脫層裂縫尖端應力強度 因子分佈圖



圖 15 含濕氣 PBGA 脫層裂縫尖端應力強度因 子分佈圖