

文章编号:1671-6833(2008)03-0081-04

高温高湿下各向异性导电胶粘接界面的受力分析

贾 宏, 张 军, 王定标

(郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 在温度载荷和高温高湿载荷的作用下, 对各向异性导电胶粘接的 TAB 试件进行受力分析, 通过梁理论对薄膜梁单元的受力分析, 建立了在温度和高温高湿载荷作用下粘接界面应力与应变关系, 采用带有函数的奇异微分方程来求解, 得到界面正应力和剪应力分布情况, 并与有限元数值模拟得到的界面应力分布结果进行比较, 计算结果和数值模拟结果相近, 验证了计算的正确性。

关键词: 各向异性导电胶; 界面应力; 温度载荷; 湿度载荷

中图分类号: TQ 430.1 **文献标识码:** A

0 引言

随着微电子互连技术的发展, 粘接已成为一种广泛使用的电路和结构的连接技术. 为保证整个粘接结构的可靠性, 在外部载荷作用下, 对被粘物体粘接界面上内应力分布情况的研究, 已成为近年来的研究热点^[1-2]. 粘接界面的可靠性一般由界面的粘接强度和界面所受的内应力的作用而定. 由于被粘接材料的物理性能不同, 这些结构即使在不受外力的时候也会承受很大的内应力的作用.

因此有必要对粘接界面内应力进行研究, 主要目的是发现内应力产生的原因, 应力在界面上的分布, 确定应力集中的位置. 在外力和内应力的作用下, 微裂纹和界面开裂产生的位置以及粘接可靠性就可以预测. 在外力作用下, 两种物理性质不同的被粘物界面内应力主要集中在结构的边缘和夹角处, 内应力的分布不但和材料性能有关, 而且和结构尺寸有关系, 尤其与薄膜的厚度有关^[3]. 在微电子封装中由于尺寸小、结构复杂, 实验的方法很难测到内应力大小和它的分布情况, 所以一般应用理论分析计算和数值模拟来得到界面内应力的分布. Shield^[4] 和 Hutchinson^[5] 等人的梁理论模型能够得到整个粘接界面的正应力和剪应力的分布, 建立了界面受力计算模型, 为分析界面失效提供理论基础.

笔者采用梁理论模型, 研究各向异性导电胶

粘接的 TAB (Tape Automated Bonding) 试件界面的应力分布, 把 FPC (由驱动电路的聚酯膜) 膜当作有限长度的梁粘接到半平面空间的玻璃基板上. 在温度载荷和高温高湿情况下, 对薄膜和基板受力分析, 建立界面内应力和变形之间的关系, 得到 TAB 试件的内应力分布. 并把梁理论计算的结果与有限元数值模拟的结果进行比较, 验证试件分别受温度载荷和高温高湿情况下的理论计算的正确性.

1 理论模型的建立

在微电子封装中, 各向异性导电胶粘接的 TAB 试件在温度载荷和高温高湿情况下, 由于各层的力学性质和热膨胀系数不同, 在粘接层之间产生内应力, 这种内应力是各向异性导电胶 (ACF) 粘接界面失效的主要原因, 对此结构粘接界面内应力分布情况进行研究. 为简化计算, 只考虑 $x-y$ 平面内的受力情况.

在只受温度载荷作用下由于热膨胀产生的应变为:

$$\varepsilon^T = \alpha(T - T_0) \quad (1)$$

式中: α 是材料的热膨胀系数; T_0 是内应力为零时的参考温度.

在湿度载荷作用下由湿膨胀产生的应变为:

$$\varepsilon^H = \beta C \quad (2)$$

式中: β 是湿膨胀系数; C 是平均含湿量.

如图 1 所示, 当基板的热膨胀系数大于薄膜

收稿日期: 2008-05-12; 修订日期: 2008-07-16

作者简介: 贾 宏 (1969-), 女, 黑龙江大庆人, 郑州大学讲师, 主要从事能源技术方面的研究, E-mail: jiah@zzu.edu.cn.

的时,即 $\alpha_s > \alpha_f$, 下标 s 代表基板, 下标 f 代表薄膜, 温差为 ΔT , 在没有粘接前, 薄膜和基板单位长度的变形量分别为:

$$u_s = \alpha_s \Delta T \quad (3)$$

$$u_f = \alpha_f \Delta T \quad (4)$$

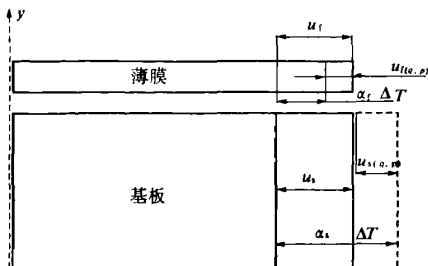


图1 TAB 试件在温湿度载荷作用下的变形分解

Fig.1 Deformation analysis of the TAB under temperature and humidity loads

当把薄膜和基板粘接到一起, 它们的变形都受到限制. 在此状态下, 基板在界面剪应力 q 力的作用下被缩短了 $du_s(q)$, 而薄膜被拉长 $du_f(q)$. 作为一个完好粘接的整体, 它们最后的变形量相等:

$$u_s - du_s(q) = u_f + du_f(q) \quad (5)$$

把式(3)和(4)代入式(5), 得到薄膜和基板在界面内力作用下的变形之间的关系

$$du_s(q) + du_f(q) = (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T \quad (6)$$

同理得到当 $\alpha_s < \alpha_f$ 时,

$$du_s(q) + du_f(q) = (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T \quad (7)$$

在湿热同时作用下, 界面中的内力引起薄膜和基板变形关系为

$$du_s(q) + du_f(q) = (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T + (\beta_f - \beta_s) C \quad (8)$$

这里把薄膜认为是弹性梁, 粘接后取出微元进行受力分析, 受力情况如图2所示.

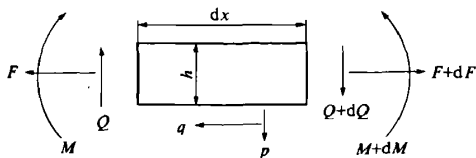


图2 薄膜微元受力分析

Fig.2 The stresses analysis of the beam element

q, p 分别是界面剪应力和正应力; Q 是垂直薄膜方向的剪应力; F, M 是拉力和弯矩. 薄膜微元受力分析的平衡方程为:

$$M = \frac{E_f h^3}{12(1 - \nu_f^2)} \nu_{xx} \quad (9)$$

$$F = \frac{E_f h^3}{(1 - \nu_f^2)} \left(u_s - \frac{h}{2} \nu_{xx} \right) \quad (10)$$

式中: u, v 是界面剪切和垂直方向的位移; 下标表示对位移的导数.

由经典弹性力学基板(半平面空间)在温度载荷作用下的应力与位移的关系:

$$du_s = -\frac{1 - 2\nu_s}{\alpha_s(1 - \nu_s)} p_s(x) + \frac{2}{\alpha_s \pi} \int_{-l}^l \frac{q_s(t)}{t - x} dt \quad (11)$$

$$dv_s = \frac{1 - 2\nu_s}{\alpha_s(1 - \nu_s)} q_s(x) + \frac{2}{\alpha_s \pi} \int_{-l}^l \frac{p_s(t)}{t - x} dt \quad (12)$$

式中: $\alpha_s = \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$; E_s, ν_s 是基板的弹性模量和泊松比.

由于完好粘接结构的剪切方向整体变形相同, 垂直方向变形相反, 而界面上的剪应力与正应力分别大小相等方向相反:

$$u_s - du_s(q) = u_f + du_f(q), \quad v_s = -v_f \quad (13)$$

$$q_s = -q_f, \quad p_s = -p_f \quad (14)$$

界面正应力与垂直位移的关系和剪切应力与剪切位移的关系:

$$\frac{1 - 2\nu_s}{(1 - \nu_s)} q(x) - \frac{2}{\pi} \int_{-l}^l \frac{p(t)}{t - x} dt - \frac{12}{bh^3} \int_0^x p(t) ((x^2 - t^2)/2 - xt) dt + \frac{6}{bh^2} \int_0^x q(t) (x - t) dt - \frac{12}{bh^3} C_2 x = 0 \quad (15)$$

$$\frac{1 - 2\nu_s}{(1 - \nu_s)} p(x) - \frac{2}{\pi} \int_{-l}^l \frac{q(t)}{t - x} dt - \frac{6}{bh^2} \int_0^x p(t) (x - t) dt + \frac{4}{bh} \int_0^x q(t) dt - C_4 = (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T \quad (16)$$

$$\text{其中, } b = \frac{a_f}{a_s} = \frac{E_f(1 - \nu_f^2)}{E_s(1 - \nu_s^2)}$$

同理把式(8) 带入上式, 可得到高温高湿情况下的界面应力微分方程:

$$\frac{1 - 2\nu_s}{(1 - \nu_s)} p(x) - \frac{2}{\pi} \int_{-l}^l \frac{q(t)}{t - x} dt - \frac{6}{bh^2} \int_0^x p(t) (x - t) dt + \frac{4}{bh} \int_0^x q(t) dt - C_4 = (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T + (\beta_f - \beta_s) C \quad (17)$$

用 Erdogan 等人^[6] 对奇异方程的数值求解方法中的 Gauss - Chebyshev 的积分形式来进行. 假设如下.

$$\text{正应力: } p(x) = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} \sum_{n=1}^N p_n T_{2n}(x) \quad (18)$$

$$\text{剪应力: } q(x) = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}} \sum_{n=0}^N q_n T_{2n+1}(x) \quad (19)$$

其中, $T_{2n}(x)$ 和 $T_{2n+1}(x)$ 是 Chebyshev 多项式的第一项.

温度载荷作用:

$$\sum_{n=0}^N F_n(x_i)q_n + \sum_{n=1}^N G_n(x_i)p_n = (\alpha_t - \alpha_s)\Delta T.$$

温度、湿度载荷共同作用:

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^N F_n(x_i)q_n + \sum_{n=1}^N G_n(x_i)p_n = (\alpha_t - \alpha_s)\Delta T + (\beta_t - \beta_s)C. \\ \sum_{n=0}^N H_n(x_i)q_n + \sum_{n=1}^N I_n(x_i)p_n = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $F_n(x_i)$ 、 $G_n(x_i)$ 、 $H_n(x_i)$ 、 $I_n(x_i)$ 是方程组(20)的多项式的系数,其中系数的求解在参考文献[7]中有详细说明; N 为界面上应力点的数量,在试件结构的单位长度内;由于对称性, x_i 的取值范围为0~1中间,方程组(20)有 $2N+1$ 个未知变量(q_n, p_n),所以 x_i 取 $N+1$ 个数,可求解方程组(20),再通过计算式(18)、(19)得到界面的正应力和剪切应力。

2 结果分析

对各向异性导电胶膜粘接的TAB试件进行界面的正应力和剪应力分布和数值计算,温度和温湿度载荷作用下的薄膜和玻璃基板材料参数和几何尺寸如下:

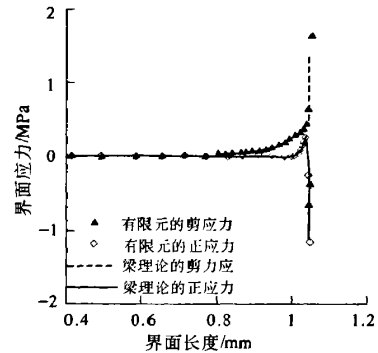
温度载荷($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $125\text{ }^{\circ}\text{C}$): $E_t = 780\text{ MPa}$, $\nu_t = 0.3$, $E_s = 77\text{ GPa}$, $\nu_s = 0.25$, $\alpha_t = 20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\alpha_s = 8.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $L_t = L_s = 1.05\text{ mm}$, $h_t = 0.09\text{ mm}$, $h_s = 0.5\text{ mm}$, $T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

高温高湿($85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\%\text{ RH}$): $\beta_t = 130 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{kg}$, $\bar{C}_t = 5\text{ kg/m}^3$,假设玻璃不产生吸湿膨胀, $N=20$,计算时将 1.1 mm 作为几何图形的外边缘。

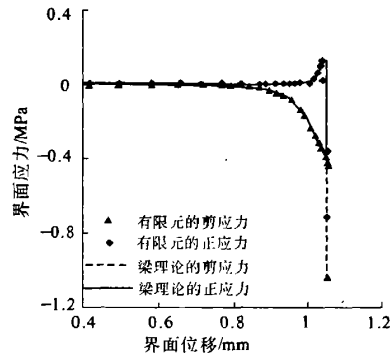
用Matlab对前面推导的梁理论公式进行编程计算,同时采用有限单元法模拟试件在温度载荷和温湿度作用下的应力分布情况,薄膜和玻璃基板都用八节点四边形平面单元,材料参数和几何参数与模型计算相同。

由图3(a)可以看到,在温差 $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度载荷作用下,梁理论模型计算的界面应力分布在粘接界面的边缘处有奇异现象,在离边缘 0.1 mm 界面处剪切应力趋于稳定。正应力的分布也是在粘接界面的边缘处最大拉应力,这是界面很容易在边缘处开裂的原因,而在离边缘 0.05 mm 薄膜对基板产生压应力。从计算结果看到梁理论模型计算的界面应力分布与数值模拟结果基本相同。由图3(b)可以看到,当温差 $\Delta T = -65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,在温度载荷作用下,剪切应力的方向

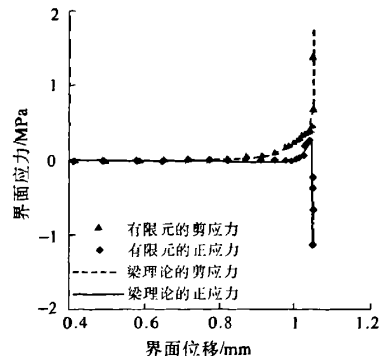
为负值,正应力方向不变,但界面应力分布没有明显变化。由图3(c)可知,高温高湿($85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\%\text{ RH}$)作用下,界面的正应力和剪应力都比前面两个温度载荷产生的应力大。从试件粘接界面的应力分布可知,由于粘接界面边缘处是温湿度载荷的应力集中地方,在设计和制造此类结构时,在粘接边缘应尽量消除气孔、杂质等缺陷,而且电路的布置离边缘的距离应大于薄膜的厚度。



(a) 温度载荷($+125\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用



(b) 温度载荷($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)作用



(c) 温度和湿度载荷共同作用($85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\%\text{ RH}$)

图3 梁理论模型和ANSYS模拟的粘接界面的应力分布
Fig. 3 The calculation result of beam theory models and ANSYS simulation on bonding interface stresses distribution

3 结论

分析了商用各向异性导电胶粘接的 TAB 试件,在温度载荷和高温高湿情况下,用梁理论模型计算粘接界面正应力和剪应力的分布情况.由于不同材料的粘接,材料之间存在材料参数和热膨胀系数的不匹配,在温度和湿度载荷的作用下,在粘接界面产生内应力是界面粘接强度下降的主要原因.通过分析薄膜和基板粘接前后变形情况,建立了薄膜和基板界面内应力与变形之间的边界条件.应用梁理论,对薄膜单元受力分析,得到了薄膜界面内应力与位移之间的微分方程.由边界条件,建立起在温湿度载荷作用下粘接界面应力与应变关系.应用带有函数微分方程的求解方法,得到界面正应力和剪应力分布情况.可以看出,梁理论模型计算结果的剪切应力和正应力分布和有限元模拟结果基本相同.但有限元模拟计算对应力有奇异的地方会出现收敛问题,梁理论模型可以解决此问题.梁理论模型的计算,为粘接界面的应力分析提供了理论基础,也为粘接界面的失效原因提供了理论分析的途径.

参考文献:

[1] JIAO J, CURUMURTHY C K, KRAMER E J. Meas-

urement of interfacial fracture toughness under combined mechanical and thermal stresses [J]. ASME Journal of Electronic Package, 1998, 120: 349 - 353.

[2] DOEMER F M, NIX D W. Stresses and deformation processes in thin films on substrates [J]. Solid State Sciences, 1988, (14): 225 - 268.

[3] BOGY D B. Two edge-bonded elastic wedges of different materials and wedge angles under surface tractions [J], ASME Journal Applied Mechanics, 1971, 94: 377 - 386.

[4] SHIELD T W, BOGY D B. Multiple region contact solutions for a flat indenter on a layered elastic half space: plane-strain case [J]. Journal of Applied Mechanics, 1989, 56: 251 - 262.

[5] YU H H, HUTCHINSON J W. Delamination of thin film strips [J]. Thin Solid Films, 2003, (423): 54 - 63.

[6] MUSKHELISHVILI I N. Singular Integral Equations [M]. Translated by RADOK J R M. Groningen: Noordhoff, 1953.

[7] SHIELD T W, KIM K S. Beam theory models for thin film segments cohesively bonded to an elastic half space [J]. International Journal of Solids Structures, 1992, 29: 1085 - 1103.

Interfacial Stresses Analyses of Anisotropic Conductive Adhesive Bonding under Thermal and Humidity Loads

JIA Hong, ZHANG Jun, WANG Ding-biao

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The specimens of TAB (Tape Automated Bonding) were bonding with the ACFs. The interfacial stresses analysis of ACF bonding specimens has been done under thermal and humidity loads. Beam theory models have been used to derive the integral equation of stress-strain relation through the beam element stresses analysis of film. The ACF interfacial relation of stresses and strain could be found by the boundary condition and equilibrium functions. The shear and normal stresses of the bonding interface can be obtained by using the integral equations. The calculation of the beam model and the FEM simulation results were close after comparison.

Key words: anisotropic conductive adhesive; interfacial stress; thermal load; humidity load