

文章编号:1671-6833(2006)02-0048-04

粘接界面的损伤研究

张军¹, 陈旭², 贾宏¹

(1. 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002; 2. 天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要: 把粘接界面本构模型应用到商用的各向异性导电胶粘接的试件中, 并用此模型计算试件的90°剥离的开裂。通过对粘接界面模型的修正, 在原界面模型的基础上, 增加了界面损伤因子 χ , 根据实验数据分别给出了温度循环损伤因子和高温高湿损伤因子计算公式。损伤因子不但能改变粘接的最大应力值, 也能改变粘接界面开裂的位移。有损伤因子的界面本构能够描述温度循环和高温高湿试验后试件粘结强度的变化, 此界面损伤模型的计算结果与实验结果吻合较好。

关键词: 界面; 粘接; 剥离强度; 界面损伤本构模

中图分类号: TQ 430.1 文献标识码: A

0 引言

界面开裂现象一般由复杂结构中的残余应力产生, 包括在制造过程中高温冷却产生的残余应力, 多层材料的热膨胀不匹配等。而且聚合物材料具有吸湿性, 使用中由于吸湿膨胀也会产生内应力。实验发现各向异性导电胶吸湿膨胀后粘接强度下降很大, 不但影响到粘接峰值应力而且也影响界面的刚度的变化。物体之间的连接存在粘接界面, 在外力作用下界面开裂和扩展已得到了广泛的研究^[1,2]。粘接界面模型的研究开始于40年前, 主要工作是 Barenblatt (1959) 和 Dugdale (1960)^[3,4]完成。近几年, Needleman等人提出了粘接区域的界面模型 (cohesive zone type interface model)^[5]。在这个本构关系式中, 粘接材料和被粘接材料的性质与模型没有直接的关系, 它只描述了界面上不同方向的拉力与界面开裂位移之间连续性关系, 当界面开裂位移达到临界值时, 界面的拉力为零, 被粘物体完全分开。这个本构方程主要由最大应力、分离功和特征长度决定, 预测界面开裂时不需要其他失效标准。Hutchinson等人建立了EPZ(embedded-process-zone)形式的界面本构模型^[6]。把粘接界面按塑性变形考虑, 他把经典的断裂力学理论和界面的拉伸-分离本构关系结合到一起。界面本构关系分成三个阶段: 线弹性、理想塑性和线性软化阶段, 失效的标准用能量的方法

表示。Anand等人的界面本构模型不但考虑到模型的弹性可逆变形, 也考虑到不可逆的非弹性变形^[7]。

作者完成一系列各向异性导电胶粘接试件的温度循环试验和湿热试验前后的90°剥离试验。在Needleman^[5]等人的界面本构模型的研究基础上, 提出了带有界面损伤因子的粘接界面模型, 并应用到微电子封装各向异性导电胶的粘接界面中, 对它粘接界面的剥离拉力与位移曲线进行计算和预测。考虑到温度循环和高温高湿情况对各向异性导电胶粘接界面的损伤, 在模型中加入了界面损伤因子 χ , 新的粘接界面损伤模型与试验结果吻合较好。

1 粘接界面损伤模型

粘接界面的理论模型是描述界面开裂过程中单位面积的拉力与界面开裂位移之间的关系, 在粘接界面两个点之间的垂直和剪切位移可用下式描述:

$$u_n = [u_n] = u_n^+ - u_n^-, u_t = [u_t] = u_t^+ - u_t^-, \\ u_b = [u_b] = u_b^+ - u_b^- \quad (1)$$

$$T_n = n \cdot T, T_t = t \cdot T, T_b = b \cdot T \quad (2)$$

式中: n, t, b 表示迪卡尔坐标的三个方向; T_n, T_t, T_b 分别表示垂直界面和界面上两个互相垂直方向的拉力, 正值的 u_n 表示界面分离。

下面的粘接界面本构模型是 Needleman

(1987)建立的,可以用下列形式来表示:

$$T_n = EF(d)v_n \quad (u_n \leq \delta_n) \quad (3)$$

$$T_t = G_t F(d)v_t \quad (u_t \leq \delta_t) \quad (4)$$

$$T_b = G_b F(d)v_b \quad (u_b \leq \delta_b) \quad (5)$$

其中,

$$d = \max \sqrt{v_n^2 + v_t^2 + v_b^2} \quad (6)$$

这里 $F(d)$ 是关于 d 的函数, $v_n = u_n/\delta_n$, $v_t = u_t/\delta_t$, $v_b = u_b/\delta_b$. 模型中规定 $F(d) = (1-d)^2$, E 和 G 是界面在初始状态下的刚度, 界面只受垂直方向拉力作用下时 $\sigma_{\max} = 4E/27$, 只受剪切方向力作用时 $\tau_{\max} = 4G/27$. 在粘接界面的本构模型中, 可以发现界面的粘接强度是由界面的刚度 E 、特征长度 δ 和方向的刚度比 α 来确定的. 通过这 3 个参数界面本身固有的粘接性能可以被确定下来, 但实验中发现界面如果受到损伤破坏后, 不但界面的刚度发生变化, 而且粘接强度也会发生变化, 也就是说粘接界面损伤后峰值应力 σ_{\max} 会下降, 而且粘接界面的开裂位移也会小于特征长度, 界面位移 u_n 没达到特征长度 δ 时开裂已经产生了. 以上界面模型还不能描述界面损伤后粘接界面本构关系, 所以这里在粘接界面的本构模型中引进了界面损伤因子 χ , 有损伤因子的粘接界面本构模型变为

$$T_n = E(v_n - \chi)^2 v_n \quad (u_n \leq \delta_n) \quad (7)$$

$$T_t = G_t(v_t - \chi)^2 v_t \quad (u_t \leq \delta_t) \quad (8)$$

$$T_b = G_b(v_b - \chi)^2 v_b \quad (u_b \leq \delta_b) \quad (9)$$

温度循环的可靠性实验中, 试验温度差 ΔT 固定时, 损伤因子 χ 与循环次数 N 有关系, 而在高温高湿试验中, 试验的温度和湿度固定后, 损伤因子 χ 与停留时间 t 相关. 所以粘接界面损伤因子 χ 用下式表示:

$$\chi_T = (a_1 - a_2 N + a_3 N^2)/\sigma_{\max} \quad (10)$$

$$\chi_H = (d_1 - d_2 t + d_3 t^2)/\sigma_{\max} \quad (11)$$

式中: χ_T 和 χ_H 分别是受温度循环载荷作用的界面损伤因子和受高温高湿作用的界面损伤因子; $a_1, a_2, a_3, d_1, d_2, d_3$ 是常数, 由试验确定.

χ_T, χ_H 是无因次的物理量, 它的变化范围是 0~1. 由于界面的损伤减小了等效位移, 当 $\chi = 1$ 时界面完好, $\chi = 0$ 时界面完全损伤. 由式(7)可知, 在 $u_t = u_b = 0$ 时, 修正后的界面完全开裂 $T_n = 0$, 是在 $u_n = \chi\delta$ 处, T_n 最大值出现在 $u_n = \chi\delta/3$ 处. 对公式(7)积分得到分离功 ($u_n = 0$ 到 $u_n = \chi\delta$ 曲线下的面积):

$$\phi_{sep} = 9/16\sigma_{\max}\delta\chi^4 \quad (12)$$

上式说明界面的分离功不但与 δ 有关而且与界面损伤因子 χ 有关

2 剥离开裂阶段的理论计算

剥离试验分为界面开裂阶段和稳定剥离阶段, 在可靠性分析试验中, 由于试件的各部分的热膨胀系数不同和吸湿膨胀系数不同, 这些残余应力主要集中在试件的边缘, 剥离试验的开裂阶段能够反映界面的粘接强度的变化情况, 而且温度循环载荷和高温高湿载荷对粘接界面的影响都可以在剥离开裂阶段体现. 所以这里粘接界面模型计算主要针对界面的开裂阶段. 把剥离试验简化为简单的一维结构, 剥离拉力通过线弹性体作用在界面上. 被剥离的物体在剥离峰值应力范围内是弹性变形, 应力应变关系为

$$T = E_0\epsilon = E_0u_0/L \quad (13)$$

式中: T 是剥离时单位面积的拉力; E_0 是弹性模量; L 是被剥离的物体的长度.

总的位移由界面分离位移 u 和弹性体的伸长 u_0 合成:

$$U = u + u_0 \quad (14)$$

各向异性导电胶粘接界面用界面的本构模型来代替. 理论计算的剥离拉力与位移之间的关系是由被黏弹性体和粘结界面的本构模型合成.

3 结果分析

从图 1 可以看到, 两个实验曲线之间横线的范围, 是试件 90°剥离试验的偏差范围.

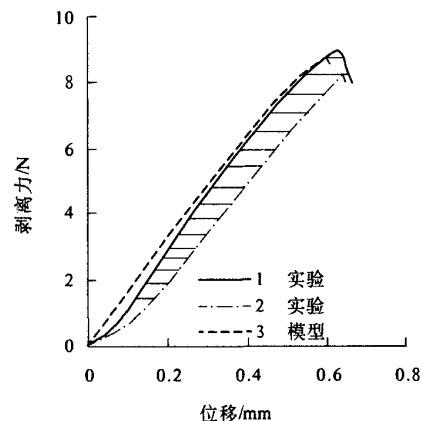


图 1 试验前剥离强度

Fig.1 The curve of peeling test before the environment test

实验测得 $\sigma_{\max} = 12.8 \text{ MPa}$, $\delta = 0.4 \text{ mm}$, $E_0 = 680 \text{ MPa}$, $L = 40 \text{ mm}$, 各向异性导电胶粘接界面用

界面的本构模型来代替。由理论计算结果可看到,剥离拉力的最大值是在试验范围之内,而且在开裂过程中,开裂的刚度与实验结果也相吻合。但理论的剥离曲线与实验曲线还存在一些偏差,主要的原因是被粘物在90°剥离时,要发生90°的弯曲变形。开始时剥离拉力是用来使之弯曲变形,这使得实验曲线开始时变得很平缓。而在理论计算时这个剥离拉力并没有考虑,造成理论计算曲线与试验值在开始阶段偏差较大,也是理论计算曲线不能落在试验区范围内的主要原因。但从理论曲线的整体趋势看,粘接界面的本构模型能够反映各向异性导电胶粘接的试件90°剥离实际情况。

试验可以发现,温度循环试验对ACF的粘接界面的粘接强度有一定的影响,如图2所示。试验结果可以看到试件经过1000 h温度循环试验后,试件剥离强度平均下降了8.3%。这是由于被粘物体的热膨胀系数不匹配,以及粘接时产生的内应力,它们的同时作用。在温度循环载荷的多次作用,引起粘接界面的损伤,导致界面的粘接强度下降。实验中发现试件粘接强度的下降主要表现在开裂时峰值应力的下降和达到开裂的位移缩短。温度循环的试验可得到 $a_1 = 9.25$, $a_2 = 3.14 \times 10^{-3}$, $a_3 = 1.19 \times 10^{-6}$ 。理论计算时温度循环次数为 $N = 1000$,界面的其它参数保持不变。各向异性导电胶粘接界面用本文提出的有温度循环损伤因子 χ_T 界面的本构模型来代替。计算结果可以由图3看到,理论计算剥离强度下降了8.9%,在试验范围之内。只是实验曲线与计算结果在开始阶段有偏差,理论计算的结果能反应温度循环试验后界面的损伤程度。

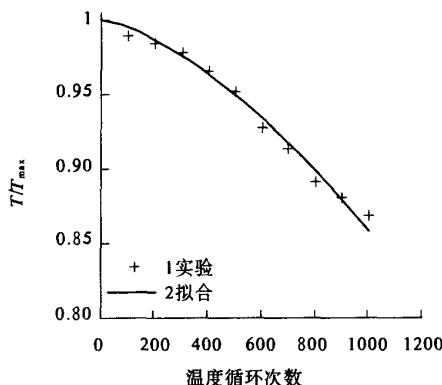


图2 温度循环次数与粘接强度

Fig. 2 The fit relation between the number of thermal cycles and the damage factor

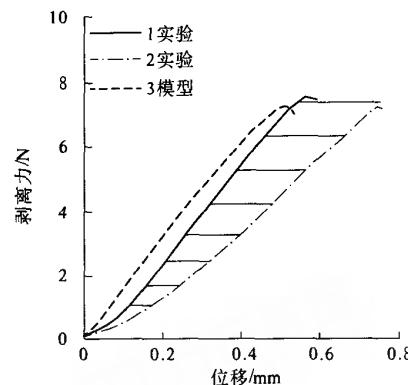


图3 温度循环试验后的剥离强度

Fig. 3 The peeling strength after the thermal cycle test

由图4、图5可以看到,试件经过500 h的高温高湿试验,试件的粘接强度有很明显的变化。各向异性导电胶在高温高湿的情况下,水分子不但能进入界面,能腐蚀各向异性导电胶界面的连接键,使试件的粘接强度下降。而且由于它们的湿膨胀系数的不同,会产生很大的边缘应力,也会降低开裂时的粘接强度。

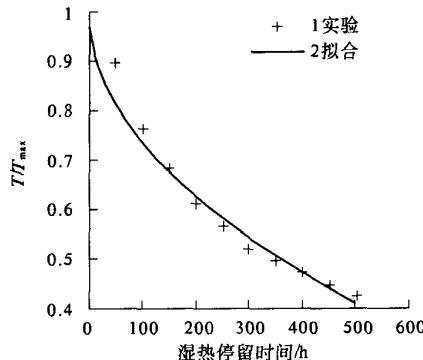


图4 高温高湿试验时间与剥离强度

Fig. 4 The fit relation between the high temperature high humidity time and the damage factor

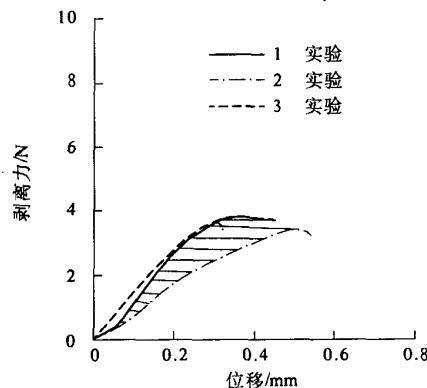


图5 高温高湿试验后理论与试验剥离曲线

Fig. 5 The peeling strength after the high temperature high humidity test

高温高湿试验对各向异性导电胶粘接强度的影响要大于温度循环试验。在粘接界面的模型中,损伤因子用湿热情况的, $d_1 = 8.49$, $d_2 = 1.98 \times 10^{-2}$, $d_3 = 2.05 \times 10^{-5}$, σ_{\max} 和 δ 修正前后不变, 停留时间 $t = 500$ h。理论模型计算的峰值应力下降程度与实验结果很接近, 偏差也主要产生在剥离的开始阶段。修正后的界面损伤模型基本上能反映出各向异性导电胶界面损伤的程度。

5 结论

笔者把粘接界面本构模型应用到商用的各向异性导电胶粘接的试件中, 并用此模型进行试件90°剥离的计算。剥离过程可分为剥离开裂阶段和稳定剥离阶段, 试验和力学分析知道裂纹开始阶段能反映出各向异性导电胶的粘接强度和粘接的刚度变化。本文的模型计算主要是在裂纹开始阶段, 这里没有考虑稳定剥离过程。实验测定各向异性导电胶的垂直拉伸的最大应力 σ_{\max} 和特征长度 δ , 在应用界面模型时这两个参数不变, 把试样90°剥离过程简化为一维结构, 被粘物FPX在最大拉力范围内是弹性变形, 各向异性导电胶粘接点用界面模型来代替。模型计算的结果和实验数据比较, 结果显示理论模型能够反映试验曲线。只是理论模型没有考虑到被粘物体在剥离开始阶段的弯曲变形, 而影响到开始阶段曲线的变化。温度循环试验和高温高湿试验试验后, 各向异性导电胶粘接界面的粘接强度和刚度都发生了变化。通过对界面粘接模型的修正, 在原界面模型的基础上, 其它参数不变只增加了界面损伤因子 χ , 在实验数据的基础上分别给出了温度循环损伤因子和高温高湿损伤因子。损伤因子不但能改变粘接的最

大应力值, 也能改变界面粘接开裂的位移。界面损伤模型的计算结果与实验结果基本上符合, 说明界面粘接的损伤模型能够反映各向异性导电胶在温度循环和高温高湿情况下粘接界面的损伤情况, 修正后的粘接界面损伤模型能够预测实际各向异性导电胶粘接界面的损伤。

参考文献:

- [1] LANE M, DUSKARDT A, VAINCHTEIN R H. Plasticity contributions to interface adhesion in thin-film interconnect structures [J]. Journal of Materials Research, 2000, (15): 2758 ~ 2769.
- [2] YANG Q D, THOULESS M D. Mixed-mode fracture analysis of plastically deforming adhesive joints [J]. International Journal of Fracture, 2001, (110): 175 ~ 187.
- [3] BARENBLATT G I. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture: general ideas and hypotheses, axially symmetric crack [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1959, (23): 622 ~ 636.
- [4] DUGDALE D S. Yielding of steel sheets containing slits [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, (8): 100 ~ 104.
- [5] NEEDLEMAN A. A continuum model for void nucleation by inclusion debonding [J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, (54): 525 ~ 531.
- [6] HUTCHINSON J W, EVANS A G. Mechanics of materials: top-down approaches to fracture [J]. Acta Materialia, 2000, (48): 125 ~ 135.
- [7] SU C, WEI Y J, ANAND L. An elastic-plastic interface constitutive model: application to adhesive joints [J]. International Journal of Plasticity, 2004, (20): 2063 ~ 2081.

Investigation into Damage for the Adhesive Interface

ZHANG Jun¹, CHEN Xu², JIA Hong¹

(1. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The cohesive zone type interface model is used in the ACF bonding samples, and the interface model can calculate 90° peel delamination. The constitutive equation for the interface is modified by introduction a damage factor. The thermal damage factor and humidity damage factor can be derived from the experiment data. The interfacial model with damage factor can change the maximal peel stress and the delamination length. The calculation result of the interfacial model with damage factor accorded well with the experiment of the 90° peeling.

Key words: interface; adhesive; peeling strength; interface damage constitutive model