

基于环氧树脂灌封的三维叠层组件 裂纹问题分析与对策研究

顾毅欣, 杨宇军, 张 丁, 余 欢, 李 晗

(西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 对基于环氧树脂灌封的三维叠层组件经过温度循环等考核后出现裂纹的机理进行探讨, 通过分析认为, 裂纹是灌封过程中引入的固有缺陷, 后续在固化过程中收缩应力及热应力的作用下形成. 并从优化固化条件、提高材料间的热匹配性以及改善灌封工艺等方面提出具体的解决措施, 提高了三维叠层组件的可靠性.

关键词: 树脂灌封; 三维叠层组件; 应力; 裂纹

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2017)02—0053—05

A Study on Crack Initiation of 3D-Stacking Modules Using Epoxy Resin Encapsulation and Its Measures

GU Yi-xin, YANG Yu-jun, ZHANG Ding, YU Huan, LI Han

(Xi'an Microelectronics Technology Insititute, Xi'an 710119, China)

Abstract: The mechanism of crack of the 3D-stacking modules after temperature cycling test were studied, and the modules were encapsulated by epoxy resin. The analysis proves that, the defect in the process of encapsulating is the main factor which leads to the crack, therefore during curing process of the resin, the contraction stress and the thermal stress playing an important role in the development of the defect. Finally the specific solutions were proposed from several aspects, such as optimizing the curing process conditions of the resin, improving the CTE matching performance between different materials, and advancing the resin casting process. All these measures above can enhance the reliability of the 3D-stacking modules.

Key words: epoxy resin casting; 3D-stacking modules; contraction stress and thermal stress; crack

1 引言

环氧树脂包封料以其高可靠性、生产工艺简单、适合大规模生产等特点, 占据了整个电子封装材料 90% 以上的市场, 广泛应用于半导体器件、集成电路、消费电子、汽车、军事、航空等各个封装领域. 灌封, 是将元器件或组件浸入液体包封料中, 利用壳体、罐体或者盒体等作为容器, 然后液体包封料在常温、加热或者紫外光照(加成固化)等条件下逐渐固化, 形成性能优异的固体高分子绝缘材料^[1]. 通过采用环氧树脂灌封技术, 可以强化电子器件的整体性, 提高对外来冲击、震动的抵抗力; 提高内部元器件、

线路间的绝缘, 特别是对于实现器件的轻量化、小型化具有重要作用.

由于环氧树脂灌封材料同时具有较高的力学强度和粘接性能, 以及具有优良的电绝缘性能和介电性能, 能满足封装电子器件抵抗严苛机械和热应力的要求, 因此环氧树脂灌封技术广泛用于航空航天器、武器装备等可靠性要求高的领域中. 本文结合试验研究及总结文献, 论述了采用环氧树脂灌封三维叠层组件后浇注体表面裂纹产生的机理, 并从原材料选择、灌封工艺及固化条件等方面提出了对策.

2 应用现状及存在问题

目前封装的器件为采用 PoP 技术将多种器件及平面互联层进行堆叠的三维组件,在使用环氧树脂灌封胶浇注后进行成型加工,使其内部组件的引脚在浇注体表面露出,形成金属点矩阵,最后对浇注体进行表面金属化,其工艺流程如图 1 所示. 该

组件体积大且结构复杂,同时后续在使用过程中要经常处于苛刻的振动、冲击和高低温循环环境下,在摸底考核过程中会发生环氧树脂灌封胶浇注体在多次高低温循环后($-65^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$,停留时间 $\geq 10\text{ min}$)或者长期老炼后($125^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\geq 1\,000\text{ h}$),其表面出现贯穿性裂纹,如图 2 所示,严重影响了航天用电子元器件的可靠性.

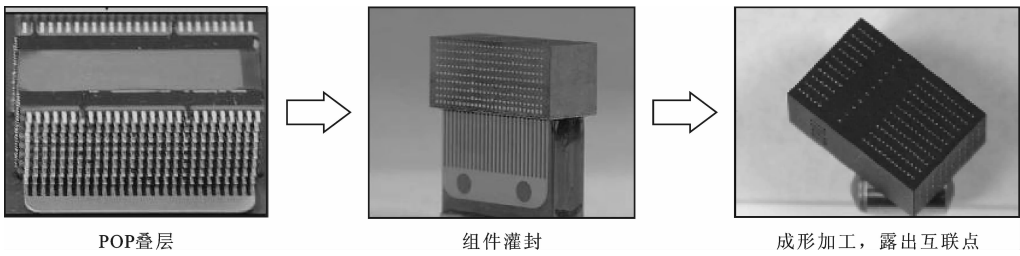


图 1 三维叠层组件制造工艺流程

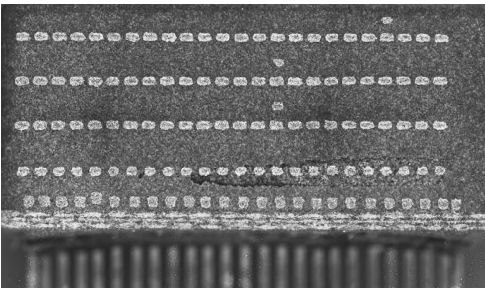


图 2 三维叠层组件环氧树脂浇注体表面裂纹照片

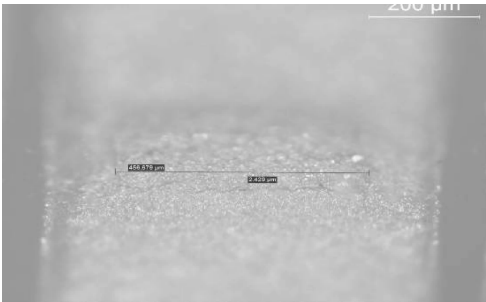
3 裂纹形成机理分析

3.1 三维组件浇注体表面裂纹形貌分析

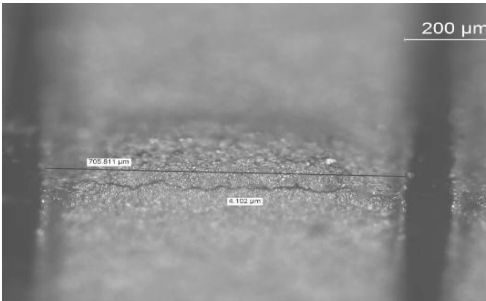
对三维组件浇注体表面特征点进行标记并跟踪观察,可以发现,一般裂纹起始于三维组件浇注体表面露出的金属端子上沿或下沿,如图 3 所示,在金相显微镜下观察,其长度一般不超过金属端子的单边周长,开口宽度在 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,然而随着温循环次数或老炼试验时间的增加,已出现裂纹的位置逐渐向两边扩展,附近未出现裂纹的金属端子周边也逐渐发生“疑似开裂”现象,最终裂纹延伸相连,长度可能会超过 10 mm ,开口宽度也增至 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以上,甚至将表面金属化层撕裂,导致模块失效.

3.2 裂纹机理分析

任何材料表面或内部都存在着不同程度的缺陷,如气孔、杂质、相界等. 环氧树脂灌封料是多种成分的混合物,在对三维组件进行灌封时,引入杂质,产生气泡是不可避免的,在应力(或外力)的作用下,浇注体内部杂质、气泡等缺陷可能会不断扩大,形成裂纹. 而在环氧树脂灌封料与埋入元件的接触界面、



(a)温循前



(b)温循后

图 3 温循考核前后三维组件浇注体裂纹形貌
尖角等部位,应力尤为集中,因此一般在上述部位缺陷受力产生裂纹且不断扩大的概率远高于其他部位^[2],上述应力主要来自于以下几个因素:

- (1)环氧树脂灌封料在固化过程中的固化收缩应力;
- (2)在固化过程中温度变化产生的热应力;
- (3)外部施加的机械应力,以及碰撞力和振动力等等.

因此三维组件浇注体受到的总应力为固化收缩应力、热应力、机械力及碰撞力等应力之和,但是结

合实际情况,造成三维组件浇注体出现裂纹的应力应主要来自于收缩应力及热应力,其表达式见式(1)^[3]

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_{Hz}$$
$$= \Delta L_s \times E_r + (a_r - a_m) \times (T_p - T_r) \times E_r$$

(1)

式中, σ 表示三维组件浇注体内部应力, σ_s 为固化后的收缩应力, σ_{Hz} 为热应力, ΔL_s 为环氧树脂灌封料固化后收缩形变, E_r 为环氧树脂灌封料的弹性模量, a_r 为灌封料的热膨胀系数, a_m 为内部元器件、互联层等被封装组件材料的热膨胀系数, T_p 为环氧树脂灌封料在固化过程中的最高温度; T_r 为室温。

随着环氧树脂灌封料固化反应的进行,交联密度逐渐增大,生成的网状结构对分子链的运动造成非常大的约束,因此产生收缩应力, σ_s 是灌封料在初步固化阶段、固化阶段、固化放热阶段和固化后阶段所产生的体积收缩应力的总和。此外,由于环氧树脂是一种内聚力较大、弹性模量较高的高分子聚合物,它的热膨胀系数与其内部包埋的元器件、互联层等组件以及金属引线等材料的热膨胀系数相比,环氧树脂要大 3~5 倍(见表 1)。由于热膨胀系数不匹配,环氧树脂浇注体受到的应力得不到有效释放,以内应力形式被“冻结”在灌封胶内部,形成热应力 σ_{Hz} 。

表 1 三维组件浇注体器件材料的热膨胀系数

材料	热膨胀系数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
纯环氧树脂灌封料	60
铜	13.4
层间粘接剂	150~200
金属引线材料(铁镍合金)	4.7

由表 1 可知,环氧树脂灌封料的热膨胀系数与层间粘接剂及铁镍合金引线材料严重不匹配,因此三维叠层组件层间粘接剂及金属引线与环氧树脂之间可能存在较大应力,环氧树脂浇注体在后续进行温循及老炼等考核过程中,内部存在的缺陷不断扩展,最终形成开裂失效,这与实际试验过程中裂纹多出现在三维组件金属引线端子位置的现象也是相吻合的。

4 解决裂纹失效的措施

根据以上分析,解决三维组件浇注体裂纹缺陷的主要措施,就是尽量减小环氧树脂灌封料的内部应力,包括收缩应力及热应力,而减小收缩应力及热应力,可通过优化环氧树脂灌封料的固化条件,充分释放固化过程中热应力,尽量保证灌封料与内部包

埋的三维叠层组件材料热膨胀系数的匹配性,以及改善灌封工艺,尽量减少内部缺陷等几方面进行试验。

4.1 提高热膨胀系数匹配性

由表 1 可知,环氧树脂灌封料的热膨胀系数相比于其他材料要大很多,所以当浇注体出现固化收缩或经受外界温度变化时,在灌封料与内部材料的接合面就会产生较大的热应力^[4],因此必须整体考虑三维组件及环氧树脂灌封料的热匹配性。

(1)选择加入填料的环氧树脂灌封料,一方面可以调节热膨胀系数,另一方面,加入的填料颗粒能吸附树脂中的大量大分子链,形成交联点,这样可以尽量使浇注体内部应力分散,起到均匀分布符合的作用。

(2)选择热膨胀系数更小的层间粘接剂,目前使用的是热塑性贴片胶,其热膨胀系数偏大,应选择膨胀系数更小的贴片胶,且其中添加增强纤维作为“骨架”,增加强度的同时控制贴片胶的收缩率^[5]。

(3)尽量选择金属引线为铜合金材料的器件进行组装灌封,若无法替换,可以考虑使用表贴装焊的方法,将其焊接在印制板上,然后通过印制板表面铜线将金属端子引出,最后浇注体表面被环氧树脂包裹且露出的金属引线材料为铜,保证材料间的热匹配性。如图 4 所示。

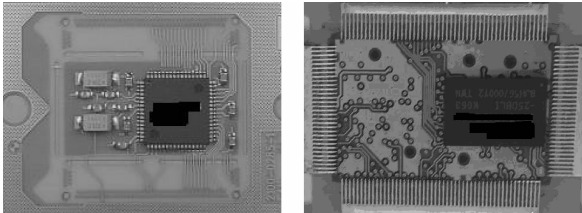


图 4 组件表贴焊接示意图

通过对材料进行更换及调整,使整个体系的热膨胀系数一致(见表 2),减小了三位叠层组件内部热应力的产生,同时在灌封料内加入 SiO_2 等填料,可有效增强灌封料固化后的韧性,提高耐开裂性。

表 2 调整后的三维组件浇注体器件材料的热膨胀系数

材料	热膨胀系数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
加入适量 SiO_2 填料后的环氧树脂灌封料	20~70
铜	13.4
层间粘接剂	10~20
金属引线材料(铜合金)	16~18

4.2 改进灌封工艺

灌封过程中引入的气泡、杂质等缺陷是导致裂纹产生的根本原因,可以通过完善灌封前处理,优化工艺的方法尽量减少缺陷的产生。

(1)灌封前处理

在灌封前,必须对三维叠层组件采取必要的清洁措施,去除其表面可能存在的多余物例如油污、氧化层等,可以保证组件表面与灌封料之间更好的结合力。

等离子清洗是清洁三维组件的有效方法,反应腔室内部填充气体可选择氧气、氩气、臭氧等,通过对不同器件类型及不同等离子清洗方法的对比(见表3),选择了清洗效果最佳且效率最高的等离子清洗工艺。

表 3 不同等离子清洗方法试验效果对比

序号	器件类型	等离子清洗方法	试验结果
1	PBGA	Ar	显著提高结合力,减少灌封后的分层现象
2	PBGA	O ₂	器件阻焊层与灌封料结合力有所提高
3	QFP	Ar	显著提高器件本体及器件引线 与灌封料之间的结合力,减少灌封后的分层现象
4	SOP	O ₃ /UV	器件引线 与灌封料之间结合力有所提高

(2)优化灌封工艺

在灌封过程中,必须最大限度地减小气泡的产生,特别是对于结构复杂,内部存在小孔隙的三维叠层组件,在灌封过程中更容易产生气泡。根据道康宁公司的研究结果^[1],在对气泡比较敏感的某些情况下,推荐尽量在真空环境中进行灌封,经过真空灌封的产品,其可靠性高,绝缘强度高,漏电系数低^[6]。目前采取真空脱泡+真空灌封的工艺进行操作,可将三维组件浇注体的气泡率降低至5%以下。

4.3 优化固化条件

环氧树脂灌封料属于热固型聚合物,即在加热条件下,灌封料内部通过化学反应,小分子相互链接形成大分子,并最终形成一个三维的网状结构。在聚合反应过程中,灌封料内部的线性分子链在在体系中流动,有足够的自由度与参与反应的其他分子链进行碰撞,碰撞过程中产生热量,这导致了更高的反应速率,因此其反应过程是一个比较剧烈且复杂的放热反应过程^[7]。

DSC 方法是研究树脂固化常用的方法之一,采用动态 DSC 方法对环氧树脂灌封料在整个固化过

程中的反应放热进行监测,并与完全固化后的总反应热进行比较,得出在不同固化温度下固化反应热与总反应热比值 $\alpha\%$ 的关系曲线,如图 5 所示。

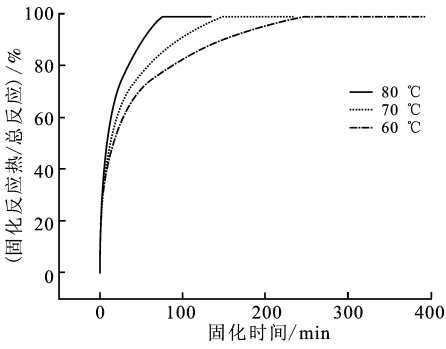


图 5 不同温度下固化反应热与总反应热的比值曲线

由上述曲线可以看出,固化温度越高,反应过程中产生热量越多,且反应速度越快,此时灌封料收缩率越大,例如有研究^[8]表明,使用甲基四氢苯酐为固化剂的 E-44 灌封料在 80℃ 固化时的收缩率为 0.8%,而在 110℃ 固化时的收缩率为 1.25%。

因此,在满足固化物性能的前提下,应尽量降低固化温度,可采用适当分段的方法进行固化,同样的环氧树脂灌封料使用不同的分段固化工艺时,总放热量不会改变,但可以改变放热峰的最高温度。目前我们采取多段固化的工艺,将灌封料固化过程中的一个大放热峰以多个小放热峰的形式释放,从而达到减小收缩率的目的。

同时,刘卓峰等的研究结果^[9]表明,环氧树脂浇注体诸如拉伸、弯曲等某些力学特性并不是随着固化反应的增加而增加,在固化反应的末期,此时反应形式主要是大分子链之间交联密度的增大,浇注体脆性降低、韧性增强,这反而会导致其拉伸及弯曲模量的下降,因此,适度控制环氧树脂灌封料的固化反应过程,有助于提高浇注体的力学特性。

5 结束语

通过对基于环氧树脂灌封的三维组件浇注体裂纹现象开展研究,灌注过程中引入的固有缺陷是导致裂纹产生的根部原因,而在环氧树脂灌封料固化过程中产生的内部应力并且在某些特定位置集中释放是导致裂纹产生的直接原因。因此,解决三维组件浇注体裂纹问题需从三个方面入手:(1)提高材料间的热匹配性,尽量选择膨胀系数接近的材料作为叠层组件材料,同时在环氧树脂料内增加填料,将其热膨胀系数降低至 20 以内($\leq T_g$);(2)灌封前对组件

进行等离子清洗同时优化灌封工艺,减少灌封过程中产生的气泡或引入的杂质,降低浇注体开裂隐患;(3)优化固化条件,采用分段固化的方法控制环氧树脂灌封料固化过程中的反应放热,对环氧树脂灌封料的收缩应力及热应力进行有效控制,实践证明,裂纹问题得到有效的解决,使基于环氧树脂灌封的三维叠层组件可靠性大大提高,满足航天用电子器件的应用需求。

参考文献:

[1] Haleh Ardebili, Michael G Pecht. Encapsulation technologies for electronic applications[M]. Amsterdam: ELSEVIER Press, 2009: 151-165.

[2] 黄文虎. 环氧灌注料开裂问题及采取的措施[J]. 粘接, 2002, 23(6): 51.

[3] 李芝华, 谢科予. 环氧灌封料低温开裂问题及对策研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(8): 14-17.

[4] 张宗有. 环氧树脂浇开裂性的研究[C]// 第六次全国环氧树脂应用技术学术交流会议论文集. 中国环氧树脂应用技术学会, 1995.

[5] Charles A Harper. Electronic package and interconnec-

tion handbook [M]. The McGraw-Hill, 2005: 29-35.

[6] 洪彬, 白乃东. 国内外真空灌封技术进展[J]. 热固性树脂, 2012, 27(3): 52-55.

[7] 郑星, 黄海莹. 电路灌封体的失效机理分析[J]. 电子与封装, 2014, 14(8): 36-38.

[8] 李春彬, 陆芸. 环氧树脂浇注开裂性研究[J]. 上海大中型电机, 2003, 46(4): 14-15.

[9] 刘卓峰, 冯学斌. 低粘度环氧树脂浇铸体性能与固化度的关系[J]. 材料导报(研究篇), 2009, 23(10): 26-28.

作者简介:

顾毅欣 男, (1985-), 工程师. 研究方向为非气密三维叠层封装工艺. E-mail: guyixin1@163. com.

杨宇军 男, (1972-), 博士, 研究员, 总工艺师. 研究方向为整机电装工艺、结构可靠性以及三维封装等工艺.

张 丁 男, (1980-), 硕士, 工程师. 研究方向为微电子封装、有机聚合物材料应用.

余 欢 男, (1976-), 高级工程师. 研究方向为 MCM、SiP 和三维集成产品及设计技术.

王 超 男, (1979-), 博士, 高级工程师, 副总工艺师. 研究方向为 SiP 封装工艺、三维封装工艺.

(上接第 52 页)

[12] Wang Y L, Yang G H. Controller design for networked control systems with packet dropout and time-varying sampling period[C]// Proceeding of the American Control Conference. Seattle, 2008: 4973-4978.

[13] 黄杰, 吴平东, 修震, 等. 基于因特网的运动控制系统中变采样过程的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 755-758, 763.

[14] 黄波, 丁浩, 张孝芳. 基于 RBF 神经网络的某复杂装备故障预测方法[J]. 计算机仿真, 2014, 31(1): 14-17.

[15] Daniel L E, Mario E M. Application of adaptive time delay neural network to mitigate instability due to time delays on networked control system using variable

sampling[R]. Corvallis, Oregon, USA: School of Electrical Engineering and Computer Science Oregon State University, 2010.

作者简介:

时维国 男, (1973-), 博士, 副教授. 研究方向为网络控制系统. E-mail: swgdl@163. com.

卢小永 男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为网络控制系统.

邵 诚 男, (1958-), 教授, 博士生导师. 研究方向为复杂工业过程建模与集成优化控制理论.