

环氧灌封胶及在 IGBT 功率模块封装中的应用

曾 亮^{1,2}, 何 勇^{1,2}, 刘 亮^{1,2}, 戴小平^{1,2}

(1. 湖南国芯半导体科技有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南省功率半导体创新中心, 湖南 株洲 412001)

摘要:为了评估国产环氧灌封胶在绝缘栅双极晶体管(IGBT)功率模块封装中的应用情况,选取两种国产环氧灌封胶进行了综合对比,包括对两种环氧灌封胶固化前黏度、密度和凝胶时间,固化后的基本性能、热性能、绝缘性能等的横向对比。分析两种环氧灌封胶的差异,利用其分别封装 IGBT 功率模块,并对所封装的 IGBT 模块进行了高温存储、低温存储及温度循环等环境测试。结果表明:两种环氧灌封胶不同的增韧机理、混合比例、固化温度、机械强度和 T_g 值对封装均存在一定影响,而 CTE 值是影响环氧灌封胶在 IGBT 模块封装应用的最重要参数。

关键词:环氧树脂;环氧灌封胶;功率模块;IGBT;封装

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)04-0029-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.04.004

Epoxy Potting Adhesive and Its Applications in IGBT Power Module Package

ZENG Liang^{1,2}, HE Yong^{1,2}, LIU Liang^{1,2}, DAI Xiaoping^{1,2}

(1. Coresing Semiconductor Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. Hunan Power Semiconductor Manufacturing Innovation Center, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In order to evaluate the application of epoxy potting sealant in China on the packaging of insulated gate bipolar transistor (IGBT) power modules, we selected two domestic epoxy pouring sealant to compare their properties, including the viscosity, density, and gel time before curing, and the basic properties, thermal properties, and insulating properties after curing. The difference between the two epoxy potting sealants were analyzed, and IGBT power modules were encapsulated with them, respectively. Environmental tests such as high temperature storage, low temperature storage, and temperature cycle were conducted on the IGBT modules. The results show that the two epoxy potting adhesives have different toughening mechanism, mixing ratio, curing temperature, mechanical strength, and T_g value, which have some effect on the package. CTE value is the most important parameter that affects the application of epoxy potting adhesives in IGBT module package.

Key words: epoxy resin; epoxy pouring sealant; power module; IGBT; encapsulation

0 引言

功率半导体模块主要应用于电能转换和电能控制,是电能转换与电能控制的关键器件,被誉为电能处理的“CPU”,是节能减排的基础器件和核心技术之一,被广泛应用在先进轨道交通、输配电、电

动汽车、新能源、智能家电以及军工等领域^[1]。功率模块封装技术是集材料性能研究和应用研究于一体的综合性学科,所涉封装材料由于功率模块的封装形式多样而不同^[2-3]。从材料的种类可以划分为有机材料和无机材料,其中无机封装材料如玻璃、水凝胶陶瓷等由于烧结温度过高或热膨胀系数(CTE)匹配度的问题导致应用较少^[4];而有机封装材料主要是有机硅、环氧树脂和聚酰亚胺等高分子材料,在功率模块中应用范围较广,相关的研究报

收稿日期:2021-05-24 修回日期:2021-06-28

基金项目:湖南省科技计划项目(2018XK2202)

作者简介:曾亮(1984-),男(汉族),湖南醴陵人,高级工程师,主要从事高分子材料在功率模块封装中的应用和开发的研究。

道也相对较多^[5]。

绝缘栅双极晶体管(IGBT)具有易驱动、控制速度快、导通电压低、通态电流大、尺寸小等优点,是一种重要的功率半导体器件^[6]。IGBT 模块按封装形式的不同可分为压接式和焊接式。压接式采用的有机材料较少,本文不讨论;焊接式主要采用的是有机硅凝胶和环氧胶灌封,不仅能提高 IGBT 模块的绝缘能力,还能提升 IGBT 模块的可靠性,延长其使用寿命^[7-10]。环氧树脂由于其良好的绝缘性和工艺性而应用广泛,但环氧灌封胶固化收缩率较大,且固化后 CTE 值相对芯片、衬板、绑定线等差异较大,环氧灌封的 IGBT 模块在温度冲击实验后易

开裂、脱离和形变,导致封装失效,因此环氧灌封胶在 IGBT 模块封装中的应用研究需要重点关注。

本文对两种国产 IGBT 模块封装用环氧灌封胶的基本性能、热性能和绝缘性能进行对比测试,并结合材料的基本性能研究两种环氧灌封胶在模块中的应用情况,为国产环氧灌封胶在 IGBT 模块中的应用提供一定的参考。

1 实验

1.1 原材料及使用工艺

选取两种国产环氧灌封胶作为研究对象,分别标记为 1#环氧灌封胶和 2#环氧灌封胶,两种环氧灌封胶的关键参数见表 1。

表 1 两种环氧灌封胶的关键参数

Tab.1 Key parameters of two epoxy potting adhesives

参数	1#		2#	
	A 组分	B 组分	A 组分	B 组分
外观	黑色黏稠液体	黄色黏稠液体	黑色黏稠液体	浅黄色透明液体
密度 23℃/(g/cm ³)	1.71	1.71	1.82	1.16
黏度 25℃/(mPa·s)	27 231	28 352	325 235	46
质量混合比	1:1		4:1	
混合物黏度 25℃/(mPa·s)	27 950		5 540	
凝胶时间(100g/125℃)/min	17		34	

将 1#环氧灌封胶 A 组分与 B 组分按质量比为 1:1 混合,混合均匀后真空脱泡备用。固化温度按厂家推荐方式采用阶梯升温固化:80℃/1 h+125℃/2 h+140℃/3 h。

将 2#环氧灌封胶 A 组分与 B 组分按质量比为 4:1 混合,混合均匀后真空脱泡备用。固化温度按厂家推荐方式加温固化:120℃/10 h。

1.2 测试仪器及方法

黏度采用上海高致精密仪器有限公司 NDJ-5S 型黏度计进行测试,测试标准为 GB/T 10247—2008;体积电阻率采用日本 HIOKI 公司 SM7120 型高阻计进行测试,测试标准为 GB/T 1410—2006;电气强度采用桂林电器科学研究院有限公司 ZHT-10/50 型电气击穿测试仪进行测试,测试标准为 GB/T 1408.1—2006;力学性能采用德国 ZWICK 公司 Z010 型万能拉力机进行测试,测试标准为 GB/T 2567—2008;导热系数采用湘潭湘仪仪器有限公司

DRPL-II 型导热测试仪进行测试,测试标准为 GB/T 10295—2008;热失重分析采用梅特勒 TGA1(SF)型热重分析仪进行测试,空气氛围,温度从 25℃升温到 700℃,升温速率为 5℃/min;玻璃化转变温度采用梅特勒 DSC1 型差示扫描量热仪进行测试,测试标准为 GB/T 19466.2—2004;热膨胀系数采用美国 TA 公司 TMA Q400 型热机械分析仪进行测试,测试标准为 GB/T 36800.2—2018;阻燃性采用江都市天璨试验机械厂 CZF-5 型水平垂直燃烧测试仪进行测试,测试标准为 GB/T 2408—2008,样品厚度为 6 mm。

2 结果与讨论

2.1 环氧灌封胶固化前物理性能对比

环氧灌封胶固化前物理性能主要指胶的黏度、密度、凝胶时间等基本技术参数,如表 1 所示。表 1 中的参数决定了环氧灌封胶的使用工艺条件及对灌胶设备的要求,也是环氧灌封胶选型中重要的技

术工艺参数。

由于供应商对环氧灌封胶配方设计思路的差异,两种环氧灌封胶固化前特性差异较大。对表1数据对比分析可以发现,两种胶的设计思路差别为:1#为双组分热固化型环氧灌封胶,A、B组分密度和黏度相差较小,采用质量比为1:1的比例混合有利于称量和混合施胶。但该胶在常温下混合黏度较大,超过20 000 mPa·s,室温下难以完成模块灌封,需要将胶加热至40~50℃以获得更合适的操作黏度和渗透性;2#也为双组分热固化型环氧灌封胶,但A、B组分密度和黏度相差大,采用质量比为4:1的比例混合。此外该环氧灌封胶在常温下的混合黏度为5 540 mPa·s,具有较低操作黏度和渗透性,可无需加热直接完成模块的灌封。但该胶A组分填料含量高、黏度大,增加了填料沉降风险,也不利于A、B组分混合。综上所述,1#和2#环氧灌封胶固化前性能差异较大,对于储存条件、工艺条件及灌胶设备等要求都会有所不同,需要结合存储条件、灌胶设备、现场工艺条件等实际情况考虑选用。

2.2 环氧灌封胶固化后物理性能

2.2.1 环氧灌封胶的基本性能

IGBT 模块在运行过程中可能会遭受机械振动、冲击和高潮湿等不利影响因素,要求环氧灌封胶具有较大的硬度、抗冲击性、较低的吸水率以保证模块的可靠性。两种环氧灌封胶固化后的基本性能如表2所示。从表2可以看出,尽管两种环氧灌封胶固化前后的基本性能差异较大,但固化后都

体现出较好的机械强度、较低的吸水率和优异的阻燃性。其中1#环氧灌封胶的导热系数明显大于2#环氧灌封胶,可能是所采用的填料种类及添加量的差异所致。

2.2.2 环氧灌封胶的热性能

热(高温)失效一直是导致IGBT失效的重要原因,因此对IGBT封装材料的热性能需要重点关注。首先对两种环氧灌封胶的热稳定性进行测试,再对其玻璃化转变温度(T_g)及CTE值等热性能进行讨论,以期对环氧灌封胶在高温条件下的封装失效原因进行分析。

环氧树脂及固化剂的分子量、固化物的交联密度以及填料含量都可能阻碍分子链段的运动,从而对灌封胶的热稳定性造成一定的影响。图1为两种环氧灌封胶的热失重分析(TGA)曲线。通过TGA曲线的起始分解温度和不同温度下的残留率对比两种环氧灌封胶的耐热性能。从图1可以看出,1#和2#环氧灌封胶的填料含量分别约为50%和42%,起始热分解温度分别为279.7℃和298.5℃,2#环氧灌封胶具有较好的耐热性。

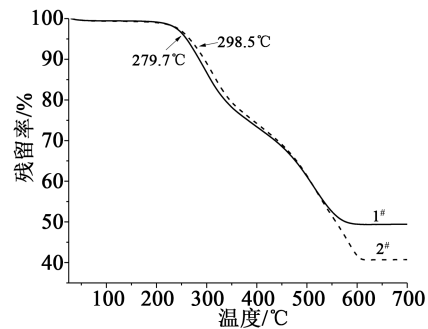


图1 两种环氧灌封胶的TGA曲线

Fig.1 TGA curves of two epoxy potting adhesives

表2 两种环氧灌封胶固化后的基本性能

Tab.2 Basic properties of two epoxy potting adhesive after curing

项 目	1#	2#
外观	黑色坚硬固体	黑色坚硬固体
硬度(Shore D,25℃)	90	88
拉伸强度/MPa	45	41
断裂伸长率/%	2	3
弯曲强度/MPa	32	45
弯曲模量/MPa	6 450	6 220
吸水率(25℃,24h)/%	0.21	0.24
导热系数25℃/(W/(m·K))	0.8	0.3
阻燃级别(UL94,6mm)	V-0	V-0

两种环氧灌封胶固化物的DSC曲线如图2所示。样品测试先从室温开始,然后以20℃/min的速率升温至200℃,再以20℃/min的速率降至室温,最后以20℃/min的速率升温至200℃。

从图2可以看出,1#灌封胶的二次升温曲线在122.4℃左右具有一个较为明显的 T_g 点,而2#灌封胶的二次升温曲线在77.5℃和115.7℃左右存在两个 T_g 点,分别由增韧树脂链段和环氧刚性链段的 T_g 引起。由DSC测试数据可以推断两种环氧灌封胶采取的增韧方式不同。

CTE值是影响IGBT功率模块使用寿命和可靠性的重要参数。采用热机械分析法(TMA)测试两

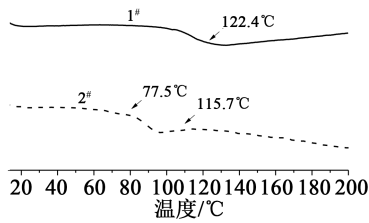
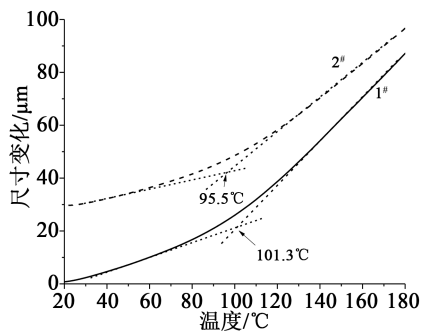
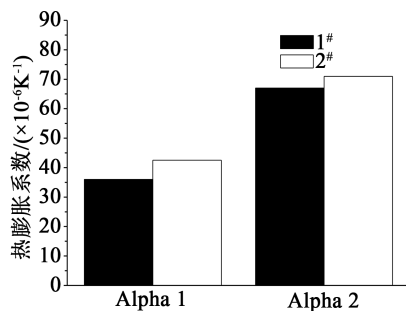


图2 两种环氧灌封胶 DSC 曲线

Fig.2 DSC curves of two epoxy potting adhesives

种环氧灌封胶低于 T_g (Alpha 1 区域) 和高于 T_g (Alpha 2 区域) 的 CTE 值。 T_g 前后环氧灌封胶的 CTE 值差别较大, 这是由于低于 T_g (Alpha 1 区域) 分子链段被冻结, 环氧灌封胶 CTE 值都较小; 温度高于 T_g (Alpha 2 区域), 分子链段运动和链段本身的扩散导致胶的 CTE 值偏大。图 3 为两种环氧灌封胶的 T_g 以及 Z 轴方向的 CTE 值对比图。

(a) 两种环氧灌封胶的 T_g 

(b) 两种环氧灌封胶的 CTE 值对比图

图3 两种环氧灌封胶的 TMA 测试结果对比

Fig.3 Comparison on TMA test results of two epoxy potting adhesives

从图 3(a) 可以看出, TMA 测得两种环氧灌封胶的 T_g 分别为 101.3 °C 和 95.5 °C, 与 DSC 法测试结果并不相同; 从图 3(b) 可以看出, 1# 环氧灌封胶的 CTE 值要低于 2#, 说明 1# 环氧灌封胶的热性能更为优异。

两种环氧胶灌封胶的技术资料显示, 1# 环氧灌封胶选用的树脂类型为双酚 A 型环氧树脂、邻甲酚醛环氧树脂、纳米壳核增韧剂以及氧化铝等, 采用的固化剂为含刚性分子结构的改性酸酐; 2# 环氧灌封胶树脂类型为低黏度脂环族环氧树脂、酚醛树脂、改性增韧剂、二氧化硅以及氧化铝等, 固化剂为甲基六氢苯酐和一定量的促进剂。TMA 测试结果表明, 由于 1# 环氧灌封胶中邻甲基酚醛具有更大的分子链结构, 与含刚性分子结构的固化剂交联后能有效地阻碍主链的内旋运动, 环氧柔性下降, 而纳米结构的核壳增韧剂对环氧灌封胶的 T_g 影响较小。而 2# 环氧灌封胶虽然采用了分子链结构较大的酚醛树脂, 但低羟基当量的酚醛树脂使交联点减少, 低黏度脂环族环氧树脂与甲基六氢苯酐固化后也无法形成更大的分子结构阻碍主链内旋运动, 分子柔性较大, 导致 2# 环氧灌封胶的 T_g 较低。此外, 低黏度脂环族环氧树脂虽然交联密度较大, 但其固化收缩率较大, 通过后温度冲击或者低温存储测试, 有可能会进一步加剧树脂内应力释放和收缩, 造成模块封装失效。对比 TMA 与 DSC 测得的 T_g 发现, TMA 不仅能得到环氧灌封胶的热变形温度, 还能了解环氧灌封胶在高温状态下的膨胀和变形情况, 更直观且更具有参考价值。

2.2.3 环氧灌封胶的绝缘性能

环氧灌封胶的体积电阻率、表面电阻率、相对介电常数以及电气强度等绝缘性能会对模块可靠性产生较明显的影响。表 3 为两种环氧灌封胶的绝缘性能测试数据。

表 3 两种环氧灌封胶绝缘性能
Tab.3 Insulation performances of two epoxy potting adhesive

项目	1#	2#
体积电阻率/($\Omega \cdot \text{cm}$)	3.4×10^{15}	4.5×10^{15}
表面电阻率/ Ω	2.2×10^{12}	4.2×10^{12}
相对介电常数	3.5	3.6
电气强度/(kV/mm)	23	21
相比电痕化指数	≥ 400	≥ 400

从表 3 中可以发现, 两种国产环氧灌封胶的绝缘性能差异较小, 体积电阻率均超过了 $1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$, 电气强度均大于 20 kV/mm, 相比电痕化指数 (CTI) 均超过 400, 表明两种国产环氧灌封胶都具有较好的

绝缘特性。

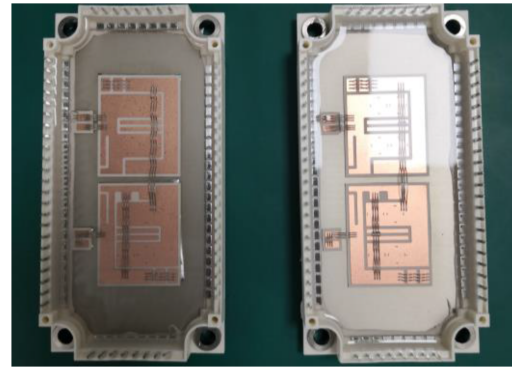
2.3 环氧灌封胶在 IGBT 模块封装中的应用

为分析两种环氧灌封胶在 IGBT 模块上的应用情况,分别对 1[#]和 2[#]环氧灌封胶进行了灌封实验。图 4 为两种环氧灌封胶灌封前后的 IGBT 模块照片。实验选择了尺寸比较有代表性的类似于 Econo PACK 封装形式的模块,环氧灌封胶的灌封尺寸约为 110.0 mm×57.5 mm×17.0 mm。

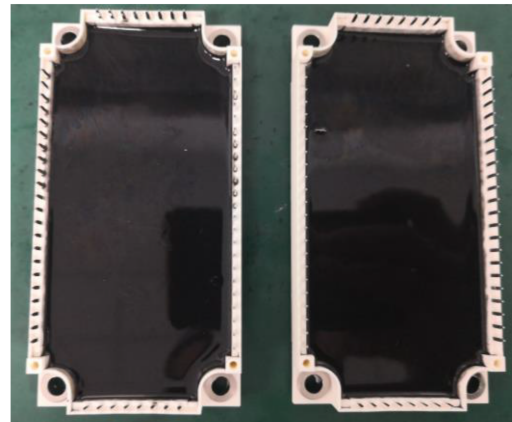
灌封具体工艺流程为:①将环氧灌封胶的 A 组分和 B 组分分别在 60℃ 的环境中存放长 60 min 后按比例混合均匀;②在低于 1 100 Pa 的负压下对混合后的环氧灌封胶快速脱泡 10 min 后缓慢倒入准备好的模块中;③在低于 1 100 Pa 的负压下快速脱泡 5 min 后,泄压恢复常压,再在低于 1 100 Pa 的真空下快速脱泡,待模块边缘无明显气泡鼓出即可停止;④按厂家推荐的固化条件进行加热固化后取出模块进行后续环境测试。

温度变化所导致的环氧灌封胶体开裂、与外壳的脱离或应力过大导致外壳开裂等问题会对封装结果有直接影响,因此环氧灌封胶的温度性能对其在 IGBT 模块中的应用影响较大。

表 4 为经过高温存储、低温存储和温度循环后两种环氧灌封胶在 IGBT 功率模块中的应用情况。从表 4 可以发现,1[#]环氧灌封胶所灌封的模块在高温存储、低温存储以及温度循环后并未出现胶开裂,胶体与 IGBT 塑料外壳之间也未出现由于收缩引起的缝隙和脱离现象,说明该环氧灌封胶能满足 IGBT 模块的灌封要求;2[#]环氧灌封胶能完全通过高温存储测试,但由于 CTE 值偏大,模块低温存储



(a)灌封前



(b)灌封后

图 4 两种环氧灌封胶所灌封前后的 IGBT 模块

Fig.4 IGBT power module before and after packaged by two epoxy potting adhesives

以及温度循环后胶体与外壳间脱离,封装失效,说明 2[#]环氧灌封胶在耐温性能方面还存在缺陷,可能还需在环氧胶树脂应用、填料种类及含量等方面进行调整和优化。

表 4 IGBT 模块温度性能测试

Tab.4 Temperature performances test of IGBT power module

编号	项目	条件	结果
1 [#]	高温存储	125℃/168 h	胶无裂痕且与外壳间无缝隙和脱离
	低温存储	-40℃/168 h	胶无裂痕且与外壳间无缝隙和脱离
	温度循环	-40~125℃,每个极限值 2 h,转移时间<30 s,100 次循环	胶无裂痕且与外壳间无缝隙和脱离
2 [#]	高温存储	125℃/168 h	胶无裂痕且与外壳间无缝隙和脱离
	低温存储	-40℃/168 h	胶体与外壳间脱离
	温度循环	-40~125℃,每个极限值 2 h,转移时间<30 s,100 次循环	胶体与外壳间脱离

3 结论

对两种国产环氧灌封胶进行了对比分析,发现

1[#]和 2[#]环氧灌封胶的混合比例、固化温度、机械强度、 T_g 和 CTE 值并不相同。1[#]环氧灌封胶完成 IGBT 模块灌封后模块能顺利通过高温存储、低温存储和

温度循环测试;由于2[#]环氧灌封胶CTE值偏大,所灌封模块只能通过高温存储测试,无法满足IGBT功率模块的封装使用要求。因此,CTE值的大小是影响环氧灌封胶在IGBT模块封装应用的最重要参数。此外,对于环氧灌封胶在IGBT模块上的验证过程需要对材料性能、应用工艺以及后期的灌封验证综合考虑,周期较长,如何建立高效的选择机制和打造高可靠性的实验验证平台将是需要面临解决的关键问题。

参考文献:

- [1] 贾扬·巴利加. IGBT 器件物理、设计与应用[M]. 韩雁, 丁扣宝, 张世峰译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] 王善林, 陈玉华. 电子封装技术实验[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [3] 斯蒂芬·林德. 功率半导体器件与应用[M]. 肖曦, 李虹译. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [4] KAESSNER S, SCHEIBEL M G, BEHRENDT S, et al. Reliability of novel ceramic encapsulation materials for electronic packaging[J]. *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 2018, 15(3): 132-139.
- [5] 曾亮, 齐放, 戴小平, 等. 高分子绝缘材料在功率模块封装中的研究与应用[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(5): 1-9.
- [6] 安德列亚斯·福尔克, 迈克尔·郝康普. IGBT 模块: 技术、驱动和应用[M]. 韩金刚译. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [7] 曾亮, 黎超华, 李忠良, 等. 大功率 IGBT 用耐高温环氧灌封胶的研制[J]. *绝缘材料*, 2016, 49(3): 24-28.
- [8] 曾亮, 朱伟, 李忠良, 等. 大功率 IGBT 用环氧树脂灌封胶的流变性能研究[J]. *绝缘材料*, 2015, 48(6): 25-29.
- [9] 赵慧宇, 丁娉, 姜其斌, 等. IGBT 用双组分加成型有机硅凝胶的国产化研究[J]. *特种橡胶制品*, 2013, 34(3): 31-33.
- [10] 丁娉, 陈磊, 唐毅平, 等. 新型大功率 IGBT 用硅凝胶的制备及其应用性研究[J]. *绝缘材料*, 2014, 47(2): 62-65.