

高分子绝缘材料在功率模块封装中的研究与应用

曾 亮^{1,2}, 齐 放^{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: 本文介绍了高分子绝缘材料在功率模块封装中的研究与应用情况, 包括有机硅凝胶、环氧灌封胶、环氧模塑料、塑料框架等材料, 并对其性能指标和国内外研究现状等进行了阐述。最后对高分子材料在功率模块封装中的应用方向进行了展望, 即优化使用工艺, 提高产品稳定性和绝缘性能, 开发耐温度冲击、热膨胀系数低、介电强度高的材料以及研究新型应用技术等。

关键词: 绝缘材料; 功率模块; 有机硅树脂; 环氧树脂

中图分类号: TM215.1 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2021)05-0001-09

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.05.001

Study and Application of Polymer Insulating Material in Power Module Packaging

ZENG Liang^{1,2}, QI Fang^{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: This paper introduces the research and application of polymer insulating materials in power module packaging, including silicone gel, epoxy potting adhesive, epoxy molding compound, plastic frame and other materials, and their performance indicators and research status at home and abroad were elaborated. Finally, the application direction of polymer insulating materials in power module packaging was prospected, including optimizing the use process, improving the stability and insulation performance, developing materials with temperature shock resistance, low linear thermal expansion coefficient, and high dielectric strength and studying new applications technology.

Key words: insulating material; power module; silicone resin; epoxy resin

0 引 言

功率模块封装是一门综合性非常强的学科, 涉及的领域从材料研究到工艺应用、从无机材料到高分子材料、从大型智能化生产设备到计算机仿真分析等。功率模块封装有很多形式, 新的封装形式对封装材料的挑战和机遇是电子产品问世以来从未遇到过的, 所涉及的问题也在其他领域中很少见到^[1-2]。

绝缘栅双极晶体管(IGBT)是典型的功率模块, 具有控制速度快、驱动功率小以及饱和压降低等特点, 被广泛应用于先进轨道交通、输配电、电动汽车、新能源及智能家电等电气化领域, 被誉为电能(功率)处理的“CPU”^[3]。IGBT模块的封装形式按管芯或芯片的组装工艺及安装固定方法分为压接式和焊接式。在封装过程中采用了很多不同的高分子材料, 如有机硅凝胶、环氧灌封胶、尼龙、环氧模塑料等。高分子材料主要起绝缘保护、密封防潮以及提供机械支撑的作用, 对提高IGBT耐压能力以及降低模块局部放电量有重要的作用^[4]。

由于IGBT模块的封装形式不同, 所采用的高分子材料也不相同。对于焊接式IGBT模块, 比较

收稿日期: 2020-06-01 修回日期: 2020-06-26

基金项目: 湖南省科技计划基金资助项目(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。

典型的封装方式是采用有机硅凝胶、环氧灌封胶和塑料外壳相结合的方式进行封装,如图1所示。这种封装方式不仅能保证模块的电绝缘性能,还能为模块提供较好的机械强度保护,主要应用于轨道交通领域用IGBT模块的封装。也有直接采用有机硅凝胶与塑料外壳相结合的方式进行封装,采用该封装方式的IGBT模块主要应用于电动汽车和风电领域等。由于环氧树脂自身内应力较大,且固化过程中存在较大收缩,因此采用环氧灌封胶直接进行封装的形式并不多见。日本三菱电机开发出一种DP树脂(direct potting resin)是一种低收缩、低应力的灌封树脂,可直接封装焊接式IGBT模块。

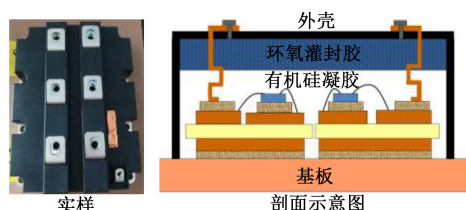


图1 焊接式IGBT模块实样及其剖面示意图

Fig.1 Welded IGBT module sample and its section diagram

对于压接式IGBT模块,模块框架所采用的高分子材料主要是聚苯硫醚(PPS)、聚醚醚酮(PEEK)等尺寸稳定性好、机械强度高、绝缘性能好的特种工程塑料。双面散热(double side cooled module)封装方式是目前的研究热点,所采用的高分子材料是特种环氧模塑料树脂(epoxy molding compound, EMC),具有玻璃化转变温度(T_g)高、线性热膨胀系数(CTE)小和可靠性高的特点。双面散热封装的IGBT模块主要应用于电动汽车领域。还有一些高分子材料应用于功率模块芯片的涂覆处理,如聚酰亚胺(PI)涂覆胶和聚对二甲苯(parylene)等。

本文结合高分子材料研究技术的最新进展和目前功率模块封装技术中急需克服的困难和要求,介绍了一些在功率模块封装,特别是IGBT模块封装应用的高分子材料及其在模块中的应用情况。

1 有机硅材料

有机硅作为一种稳定可靠的高分子材料,在IGBT模块上的主要作用是灌封(即硅凝胶)和导热(即涂覆于模块与散热板之间的高导热硅脂)。有机硅凝胶是一种存在液体和固体两种相态的“固液共存”的特殊硅橡胶,其质地柔软,不会对IGBT芯

片产生机械应力。即使在 $-50\sim 200^\circ\text{C}$ 条件下,其柔软性能也基本不变,能很好地保护IGBT芯片免受湿气侵蚀,达到绝缘、防潮、防尘、减震和防腐蚀的效果^[5]。有机硅凝胶种类繁多,就反应类型可以分为加成型和缩合型。缩合型有机硅凝胶具有较好的粘接性和自修复性,但反应过程中会有小分子物质产生,收缩率较大且容易形成气泡,因此不适合灌封要求较高的功率半导体封装。加成型有机硅凝胶主要是由乙烯基硅油(或丙烯基)、含氢硅油以及贵金属催化剂等组成,反应过程为乙烯基与活性氢的加成反应,无副产物产生,固化物纯度高且无收缩,因此在IGBT模块封装中主要采用的是加成型有机硅凝胶^[6]。图2为有机硅凝胶封装IGBT模块和封装后焊接式IGBT模块的照片。

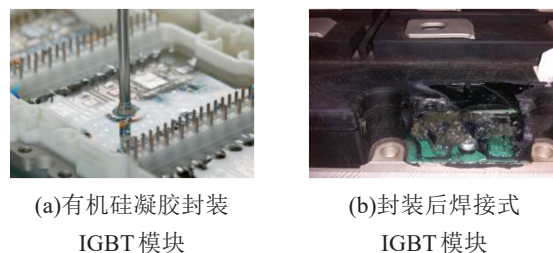


图2 有机硅凝胶封装IGBT模块和封装后焊接式IGBT模块照片

Fig.2 Photos of silicone gel encapsulated IGBT module and welded IGBT module after encapsulation

国外有机硅凝胶的主要供应商有瓦克(Wacker)、信越化学(Shin-Etsu Chemical)、道康宁(Dow Corning)、迈图(Momentive)、埃肯有机硅(Elkem Silicones)、高丽化工(KCC)、ACC(ACC Silicones Europe)等公司。表1为3种加成型有机硅凝胶应用在IGBT模块封装的性能比较。从表1可以看出,IGBT模块封装用有机硅凝胶相对环氧灌封胶具有更低的黏度,且都为等比例混合,比较适合自动化设备灌封。

普通线性聚二甲基硅氧烷凝胶在超过 175°C 的高温下存放时间超过1 000 h后会变脆,力学性能和介电性能下降幅度大,甚至会开裂^[7]。图3为普通线性有机硅凝胶在 200°C 高温下老化1 000 h前后的结果对比。从图3可以看出,普通型有机硅凝胶在 200°C 高温下存放1 000 h后出现黄变和开裂,说明材料性能下降严重,这是由于有机硅凝胶纯度不足导致的,有机硅凝胶纯度不足的原因是原材料纯度和制备工艺的影响。离子含量过高的有机硅凝胶

表1 3种加成型有机硅凝胶应用在IGBT模块封装的性能
Tab.1 The performance of three of addition silicone gels applied in IGBT module packaging

项目	胶1		胶2		胶3	
	A	B	A	B	A	B
外观	透明	透明	透明	透明	透明	透明
密度(23℃)/(g/cm ³)	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
黏度(23℃)/(mPa·s)	1 000	1 000	450	450	1 000	1 000
混合比(质量/体积)	1:1		1:1		1:1	
混合黏度(23℃)/(mPa·s)	1 000		450		1 000	
适用期/h	2.5(25℃)		1.7(23℃)		0.75(25℃)	
凝胶时间/min	30.0(150℃)		7.0(135℃)		30.0(150℃)	
锥入度(0.1 mm, 23℃)	85		85		85	
介电常数(50 Hz)	2.7		2.7		2.7	
介电强度/(kV/mm)	17		15		19.2	
体积电阻率/($\times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$)	1.0		3.0		6.0	

在长期的高温和高电场环境中会发生黄变、硬化、金属离子迁移等问题,从而直接影响IGBT模块的可靠性,因此有机硅凝胶的纯度问题需要重点关注。瓦克开发出超纯度有机硅凝胶,其总残余离子含量小于 2×10^{-6} ,特别是SEMICOSIL 915HT和SEMICOSIL 920LT这两款有机硅凝胶具有纯度高和耐黄变性好的优点^[8]。随着IGBT模块封装形式的不断发展,对于封装所采用的有机硅凝胶提出了更高的要求。IGBT模块封装用有机硅凝胶的高纯度、耐高温性和高介电性是重点关注的发展方向。

新一代的功率模块,如碳化硅、氮化镓等功率模块的发展也对有机硅凝胶的耐高温性和介电性

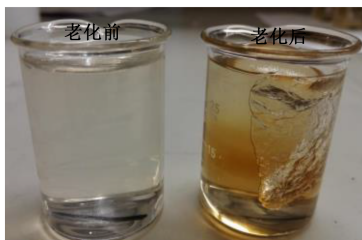


图3 普通线性有机硅凝胶在200℃下老化1 000 h前后结果对比

Fig.3 Comparison of ordinary linear silicone gel before and after ageing at 200℃ for 1 000 h

提出了新的考验。信越化学关注到高温下的“凝胶裂缝”现象,开发、应用能够长期在200℃下使用的有机硅凝胶,并对有机硅凝胶在高温储存下的失效模式以及如何克服这些失效模式进行了探讨^[9]。瓦克推出了SEMICOSIL 915HT有机硅凝胶,可以使用紫外线活化的催化剂进行固化,即使在室温下也能缩短处理时间,当有机硅凝胶与催化剂的混合比例为10:1时,固化后的介电常数为2.8,介电强度达到30.0 kV/mm,在210℃的高温老化测试2 000 h后发现SEMICOSIL 915HT有机硅凝胶的外观和力学性能基本不变,具有很好的介电性能和耐高温性能^[8]。道康宁也为新一代功率模块在200℃条件下连续工作而开发出耐高温有机硅凝胶,该硅凝胶在215℃的高温下耐受时间长达2 000 h^[7]。赵慧宇等^[10]以自制乙烯基硅油和含氢硅油为原材料,开发出用于IGBT模块灌封的双组分加成型有机硅凝胶,其介电强度达到22.6 kV/mm,相对介电常数为2.65,具有较高的电绝缘性。丁聘等^[11]以聚甲基乙烯基硅氧烷为基础硅油、端链含氢硅油为扩链剂、侧链含氢硅油为交联剂,以铂基催化剂和炔醇类为抑制剂,制备出双组分有机硅凝胶,经过对6 500 V的IGBT模块进行灌封评估后发现模块局部放电量小于10 pC,顺利通过模块振动、高温存储、低温存储等多项应用性试验。时代新材设计了一种MDT树脂应用于耐高温的有机硅凝胶,在220℃下热老化测试1 000 h后其不发生黄变,具有很好的耐高温性能^[12-13]。

通过混合高电气强度的填料也可以改善有机硅凝胶的介电性能。WANG N等^[14]在有机硅凝胶中添加BaTiO₃粉体来提高硅凝胶的相对介电常数,通过试验发现有有机硅凝胶的介电常数达到6.4,且会随着电场改变而改变,实现了有机硅凝胶的介电常数可调性,并利用复合有机硅凝胶在3 300 V的商业化IGBT模块进行测试。王昭等^[15]进一步利用有限元分析方法分析了BaTiO₃复合有机硅凝胶对IGBT模块内部电场分布的影响,验证了提高有机硅凝胶介电常数对IGBT模块内电场强度的抑制作用。

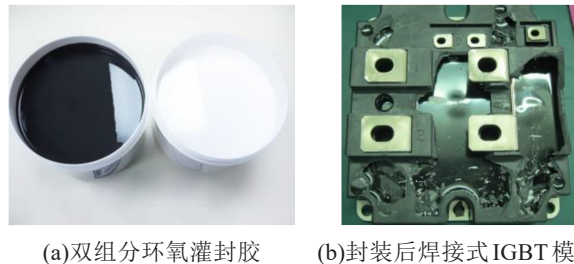
2 环氧树脂材料

环氧树脂是分子链段中含有两个以上环氧基的有机高分子材料,具有工艺性强、介电性能好、机械强度高的特点,被广泛应用于各个领域^[16]。环氧树脂材料在IGBT模块封装中最主要的作用是灌封

和传递模塑成型。

2.1 环氧灌封胶

IGBT 模块用环氧灌封胶(epoxy potting adhesive)一般是在完成有机硅凝胶灌封后再进行灌封,经固化后在有机硅凝胶上层形成一层密度大、质地坚硬的保护层,能够起保护和强化模块整体性的作用,对提高模块的抗机械冲击性具有一定的实际意义,这种封装结构方式的 IGBT 模块在轨道交通上应用较多。IGBT 模块灌封用环氧灌封胶主要采用双组分的形式,是由特种环氧树脂、无机填料和助剂等制备而成,其固化物具有很高的阻燃性和较低的 CTE 值,可以有效隔离外部不利环境的影响。图 4 为双组分环氧灌封胶及其灌封后焊接式 IGBT 模块的照片。环氧灌封胶的供应商有很多,如亨斯曼(HUNSTMAN)、3M(Minnesota Mining and Manufacturing)、爱玛森康明(Emerson & Cuming)等。表 2 为两种环氧灌封胶应用在 IGBT 模块封装的性能比较。从表 2 可以看出,两种 IGBT 模块封装用环氧灌封胶都具有硬度高、黏度较大的特点,可能需要配合较专业的灌胶设备进行施胶。



(a)双组分环氧灌封胶 (b)封装后焊接式 IGBT 模块

图 4 双组分环氧灌封胶和封装后焊接式 IGBT 模块照片
Fig.4 Photos of double component epoxy potting adhesive and welded IGBT module after encapsulation

普通双酚 A 型环氧树脂制备的环氧灌封胶在 -40°C 的低温下会发生收缩和开裂,导致封装失效;在超过 150°C 的高温下会发生软化,丧失部分力学性能和介电性能;在超过 200°C 高温下一段时间后又会发生化学键的断裂,产生小分子挥发物质,因此对于运行温度达 200°C 的碳化硅 IGBT 模块的封装会存在很多问题。通过改善 IGBT 模块灌封用环氧灌封胶的耐高温性、抗开裂性、CTE 值以及施胶工艺来提高模块的可靠性等是需要重点关注的发展方向。

本课题组之前利用双酚 A 型环氧和酸酐制备出适合 IGBT 灌封的环氧灌封胶,其性能可以承受

表 2 两种环氧灌封胶在 IGBT 模块灌封的性能

Tab.2 The performance of two exoxy potting adhesives applied in IGBT module packaging

项目	胶 1		胶 2	
组分	树脂	固化剂	树脂	固化剂
外观	黑色	白色	黑色	淡黄色
	液体	液体	液体	液体
密度(23°C) /(g/cm^3)	1.71~	1.71~	1.78	1.16
	1.76	1.76		
黏度(25°C)/(Pa·s)	25~30	22~32	200~	0.045~
			400	0.046
混合比(质量/体积)	1:1		4:1	
混合黏度(25°C) /(Pa·s)	22~32		4~6	
凝胶时间(125°C) /min	15~20		30~40	
固化工艺	80 $^{\circ}\text{C}$ /h+125 $^{\circ}\text{C}$ /2h+ 140 $^{\circ}\text{C}$		120 $^{\circ}\text{C}$ /10h	
邵氏 D 硬度(25°C)	95		90	
热变形温度 (TMA)/ $^{\circ}\text{C}$	130		122	
拉伸强度/MPa	40~50		30~40	
断裂伸长率/%	1~2		3~5	
吸水率 (23°C ,24 h)/%	0.20		0.24	
热膨胀系数($25\sim$ 200°C)/($\times 10^{-6}$)	38~42		57	
热导率/(W/(m·K))	0.6~0.7		0.3	
阻燃性(UL94)	V-0		V-0	
介电强度/(kV/mm)	21		21	
体积电阻率/($\Omega\cdot\text{cm}$)	10^{15}		10^{15}	

1 000 次以上 $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$ 的冷热冲击循环测试^[17-18],并在此基础上对该环氧灌封胶的黏度建立模型方程,预测了 $50\sim 90^{\circ}\text{C}$ 内环氧灌封胶的流变特性,为施胶工艺提供了有价值的参考^[19]。为了开发耐热性更好的 IGBT 环氧灌封胶,本课题组又以耐高温的特种环氧树脂为主体树脂,碳化硅和阻燃性好的氢氧化铝为填料,制备出在高温下力学性能良好、介电性能高的 IGBT 环氧灌封胶,其玻璃化转变温度超过 200°C ,可以满足大功率 IGBT 模块的灌封要求^[20]。LI Z 等^[21-22]研究了纯环氧灌封胶、含 5% 纳米氧化铝、含 60% 微米氧化铝以及含 2% 纳米氧化铝和 60% 微米氧化铝的 4 种不同环氧灌封胶,研究了

不同粒径氧化铝填充对环氧灌封胶介电强度和局放特性的影响,认为纳米填料的加入是提高微米填充环氧灌封胶介电强度和降低局放特性的一种有效途径。三菱电机^[23-24]率先开发了一种黏度低、玻璃化转变温度高、热稳定性好、粘接强度高的液态环氧灌封树脂,并结合绝缘金属基板封装 IGBT 模块对封装的模块进行了可靠性研究,发现这种封装方式能减少 IGBT 芯片下的焊料裂纹,极大提高了热循环试验寿命。采用 DP 树脂灌封(如图 5(a)所示)与有机硅凝胶灌封 IGBT 模块(如图 5(b)所示)有很大的区别,其对环氧灌封胶的性能及施胶要求较高,特别是需要解决环氧树脂固化收缩率较高和 CTE 值与芯片差别过大的问题。图 6 为三菱电机采用 DP 树脂和绝缘金属基板(IMB)技术封装的 LV100 IGBT 模块照片。

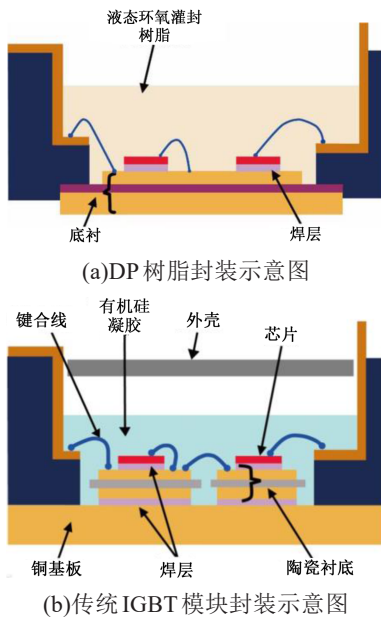


图 5 DP 树脂封装和传统 IGBT 模块封装示意图
Fig.5 Schematic diagram of DP resin package and conventional IGBT module package

2.2 环氧模塑树脂

环氧模塑树脂(EMC)又叫环氧模塑料,主要成型方式为传递模塑成型。传递模塑成型是从湿法铺层和注射工艺中演变而来的一种热固性塑料的成型方法^[25]。一般是先将 EMC 树脂在加热室加热软化,借助于柱塞压力使其通过胶口进入加热的模腔,然后在加热好的模腔中加热成型,最后完成脱模,其成型工艺过程如图 7 所示。

EMC 在 IGBT 模块封装上的市场量虽不及在分

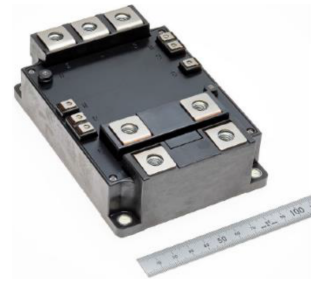


图 6 DP 树脂封装 IGBT 模块(三菱 LV100)
Fig.6 IGBT module packaged by DP resin (LV100 Power Module)

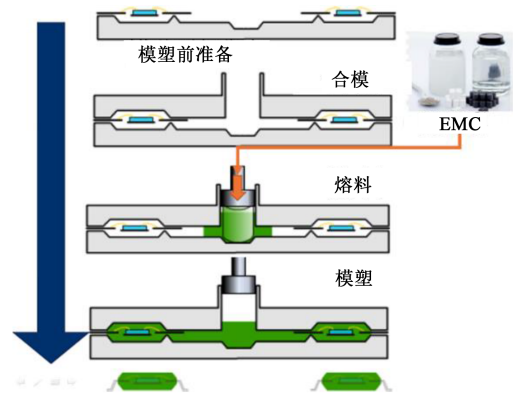


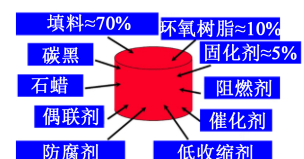
图 7 传递模塑成型的工艺过程
Fig.7 Process of transfer molding

立器件上的市场量大,但是随着电动汽车技术的不断成熟和市场规模的不断扩大,应用于 IGBT 模块塑封成型的 EMC 树脂的市场量也会有较大增长。IGBT 模块封装对 EMC 树脂的性能要求较高,如较好的成型性、良好的耐热性、较高的机械强度和电气绝缘性以及较低的热膨胀系数,并且对水汽透过率要求很高。EMC 树脂主要由环氧树脂(如邻甲酚醛环氧、联苯型环氧等)、固化剂(如酚醛树脂、酸酐等)和填料(如二氧化硅、氮化铝等),再配合阻燃剂、催化剂、偶联剂和脱模剂等助剂组成,典型的 EMC 树脂的组成如图 8 所示。

IGBT 模块封装用 EMC 树脂主要供应商有信越化学(Shin-Etsu Chemical)、京瓷化学(Kyocera



(a) EMC 树脂



(b) 基本组成

图 8 EMC 树脂及其基本组成

Fig.8 EMC resin and its basic composition

Chemical)、日立化成(Hitachi Chemical)、住友电木(Sumitomo Bakelite)等。

随着新一代模块封装技术,特别是应用于汽车的双面散热IGBT模块的发展^[26],EMC树脂也越来越受到人们的关注,对EMC树脂中对电子元件有影响的不纯物含量、与引线框架的粘接性、耐热性以及热膨胀系数等都提出了新的要求;阻燃性、无卤和绿色环保也是EMC树脂的重要发展方向,表3为3种应用于双面散热功率模块的EMC树脂性能。图9为英飞凌公司推出的新能源电动汽车用双面散热IGBT模块照片,该模块采用高性能EMC树脂封装,其散热效率和可靠性得到了极大的提升。

表3 3种功率模块封装用EMC树脂性能

Tab.3 Performance of EMC resin for three power module packaging

项目	EMC1	EMC2	EMC3
填料含量/%	85	87	84
填料类型	SiO ₂	SiO ₂	SiO ₂
填料尺寸/ μm	75	70	75
螺旋流动长度/cm	66	95	115
凝胶时间/s	28	40	50
玻璃化转变温度/ $^{\circ}\text{C}$	225	195	200
CTE1/ $(\times 10^{-6}/\text{K})$	8	8	11
CTE2/ $(\times 10^{-6}/\text{K})$	33	39	50
弯曲模量/GPa	21	25	15
弯曲强度/MPa	122	185	125
热导率/ $(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	1	1	1
密度(23°C)/ (g/cm^3)	1.95	1.99	1.90
成型收缩率/%	0.03	0.04	0.03
阻燃性(UL94)	V-0	V-0	V-0



图9 英飞凌双面散热IGBT模块

Fig.9 Double side cooled IGBT module of Infineon

3 塑料框架

功率模块封装所采用的塑料框架必须达到很

高的技术要求,如在工作温度区间内(如轨道交通用IGBT模块长期运行温度为 $-55\sim 125^{\circ}\text{C}$)具有较高的拉伸强度且机械强度稳定,能承受短期超过 250°C 的高温以适用中低功率模块的焊接工艺。此外必须具有很好的电气绝缘性能,相比电痕化指数要求较高且能承受高度的电磁污染,无卤和氧化铍等有害物质,且能满足激光打标等要求^[4]。

目前功率模块塑料框架所采用的材料较为普遍的有聚酰胺(polyamide, PA)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethyleneglycol terephthalate, PET)、聚对苯二甲酸丁二醇酯(polybutylene terephthalate, PBT)等。图10为改性PA粒料及采用PA粒料注塑成型的IGBT模块框架。随着大功率IGBT模块的发展,对模块的安全可靠性提出了更高的要求,机械强度和玻璃化转变温度更高的特种工程塑料如聚邻苯二甲酰胺(polyphthalamide, PPA)以及聚苯硫醚(polyphenylene sulfide, PPS)被应用于制造IGBT塑料框架,所封装的IGBT模块主要应用于轨道交通中。杜邦(DuPont)、巴斯夫(BASF)、东丽(TORAY)、三菱(Mitsubishi)等公司的材料具有性能优势,表4为5种制造塑料框架材料的基本性能。



(a)PA粒料

(b)IGBT模块框架

图10 PA粒料及其注塑成型的IGBT模块框架

Fig.10 PA pellets and its injection molded IGBT module frame

随着碳化硅等功率模块运行温度的上升,强度高、尺寸稳定性高、耐高温、相比电痕化指数(CTI)高、加工性好的塑料框架是需要关注的发展方向。杨克俭等^[27-28]开发出一种尼龙,这种材料具有熔体流动性高、无卤环保、阻燃性好、电性能及力学性能优异等优点,制品翘曲低、平整度高,适合用来加工IGBT塑料框架。唐毅平等^[29]将功能性三嗪环与尼龙通过熔融共混改性得到耐高温、耐高电压的改性尼龙,该尼龙可应用于IGBT框架的制造,能够满足IGBT模块在高温高电压下的使用要求。路宏伟

表4 5种制造IGBT模块塑料框架材料的基本性能

Tab.4 The basic properties of five plastic frame materials for manufacturing IGBT modules

材料种类	PA	PBT	PET	PPA	PPS
熔点/°C	260~280	225~235	265~280	310~325	285~315
拉伸强度/MPa	110	130	90	134	114
断裂伸长率/%	1.5	2.5	3.5	2.8	0.7
弯曲强度/MPa	160	180	200	179	190
弯曲模量/GPa	8.0	6.5	4.0	7.0	18.6
阻燃性(UL94)	V-0	V-0	V-0	V-0	V-0
CTI/V	400	400	400	400	600

等^[30]将 PPS 与超高分子量聚乙烯共混,改善了 PPS 的耐冲击性和电气绝缘性能,再用玻璃纤维增强,得到具备优异力学性能和电气绝缘性能的复合树脂,拓展了 PPS 在 IGBT 塑料框架中的应用。

工程塑料在 IGBT 模块封装中的另一个应用是在压接型模块中被加工成子模块的安装座使用,多数是经玻璃纤维或碳纤维增强后的聚醚醚酮(PEEK)加工而成。图 11 为典型的压接型 IGBT 模块示意图及压接型 IGBT 模块中所采用的子模块结构,其中子模块的安装座采用的材料为 PEEK。PEEK 作为一种新型的工程塑料具有硬度大、承压能力强、耐受温度高、尺寸稳定性好的特点^[31-32]。英国威格斯(Victrex)公司生产的 PEEK 具有性能稳定、耐热性能较高的优势。WANG H Y 等^[33-34]通过优化压接型 IGBT 模块的 PEEK 框架和管芯之间的气隙来改善模块的绝缘性能,并对 PEEK 在压接型 IGBT 模块中的应用情况进行了介绍。M SWEET 等^[35]研究了 PEEK 盒式设计对 4 500 V 压装 IGBT 模块击穿性能的影响。

4 其他

除了上述在功率模块封装中应用较为普遍的

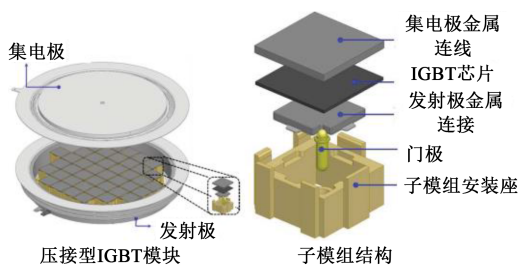


图 11 压接型 IGBT 模块示意图和子模组结构

Fig.11 Structure diagram of press-pack IGBT

高分子材料,还有在功率模块芯片或覆铜陶瓷衬板(DBC)表面涂覆以提高模块耐压能力、降低局部放电量的高分子涂覆材料。

4.1 派瑞林

派瑞林(parylene)是上世纪 60 年代由美国联合碳化物公司所开发的一种厚度均匀、致密、绝缘性高、透明、防霉、防潮气、耐盐雾的新型涂覆材料。parylene 主链为聚对二甲苯结构,可分为 N 型、C 型、D 型、HT 型等,其分子结构如图 12 所示,基本性能如表 5 所示。

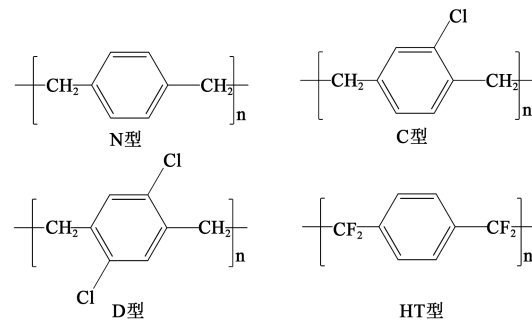


图 12 不同分子结构的派瑞林

Fig.12 Different structures of parylene

表5 不同结构派瑞林的基本性能

Tab.5 Properties of parylene with different structures

基本性能	N 型	C 型	D 型	HT 型
熔点/°C	420	290	380	>500
长期工作温度/°C	60	80	100	350
短期工作温度/°C	80	100	120	450
热导率/(W/(m·K))	0.126	0.084	—	0.096
热膨胀系数(25°C)/(×10 ⁻⁶ /K)	69	35	38	36

其中 HT 型 parylene 耐受温度高达 500°C,即使在 350°C 高温下也可以承受 5 000 min(美国 SCS 公司数据),具有极好的耐高温性和极低的气体渗透率,非常适合大功率高温功率模块的涂覆。

P ASTRID 等^[36]认为 parylene 可用于恶劣环境中电子产品的涂覆保护,并分析了采用 parylene 和有机硅凝胶封装的区别。K B LILAND 等^[37]研究了硅胶与各种绝缘液体之间的相容性,并研究了 parylene、聚酰亚胺(PI)及有机硅凝胶涂层对高压二极管性能的影响。虽然 parylene 涂覆对于提高模块的稳定性和耐热性具有较明显的作用,但 parylene 较高的成本限制了其在功率模块封装中的应用。

4.2 聚酰亚胺

聚酰亚胺(polyimide, PI)是一种能够长期在-200~300℃温度下使用、短期耐受温度可达400℃、介电性能好且化学性质稳定的高分子材料,是综合性能最佳的特种高分子材料之一,被广泛应用于航空航天、军事、激光、微电子等领域。本文中的PI涂覆材料是指非光敏聚酰亚胺(non-photosensitive PI),主要用于功率模块芯片封装工艺键合点加强、覆铜层边缘毛刺绝缘处理等。功率模块封装中用PI涂覆料要求达到电子级,加热固化成膜后具有耐高低温、耐腐蚀、耐辐射、耐湿热的优点,且对芯片、铝、铜、玻璃或陶瓷等封装材料具有极好的粘结性能,可用于引线键合点、焊点等薄弱部位的加固或DBC边缘毛刺的处理。目前PI涂覆材料的供应商有日立化成(Hitachi Chemical)、信越化学(Shin-Etsu Chemical)、阿莫科(Amoco)、富士胶片(Fujifilm)等,主要集中在日本和美国,表6列举了3种典型的进口PI涂覆料性能。

L DONZEL等^[38]制造并测试了填充有ZnO的PI

表6 典型的PI涂覆料性能
Tab.6 Properties of PI coating

基本性能	PI-1	PI-2	PI-3
黏度(25℃)/(Pa·s)	1.0~1.2	1.1~1.2	0.2
含水量/%	0~0.5	0~0.5	0~0.5
钠离子含量/($\times 10^{-6}$)	0~1.5	0~1.5	0~1.5
钾离子含量/($\times 10^{-6}$)	0~1.0	0~1.0	0~1.0
铁离子含量/($\times 10^{-6}$)	0~2.0	0~2.0	0~2.0
固体含量/%	13	15	15
涂覆溶剂	GBL	NMP	NMP
保质期/年	0.5	0.5	0.5
拉伸强度/MPa	128	120	130
杨氏模量/GPa	3.3	1.8	2.0
断裂伸长率/%	75	90	20~30
玻璃化温度/℃	309	210	220
热分解温度/℃	415	400	410
CTE/($\times 10^{-6}$ /K)	54	70	60
介电常数	3.4	3.4	3.4
吸水率/%	1.1	2.1	2.3

涂层,并对IGBT模块上涂覆PI的电性能进行了分析。M MORSHED等^[39]采用PI对6 500 V的IGBT模块基片的陶瓷进行涂覆,发现通过在PI中添加硅烷偶联剂提高了PI与金属和陶瓷表面的粘合强度,对IGBT模块的局部放电有抑制作用;该研究团队还研究了3种不同的PI对IGBT模块金属陶瓷边缘局部放电的影响,发现PI涂层的厚度对电气强度有影响^[40]。PI涂覆材料在功率模块封装的应用中,介电常数、介质损耗、固化工艺、贮存周期等仍是主要的关注点。

5 结束语

高分子材料在功率模块的封装应用具有广阔的市场前景,然而国内与国际的技术差距还比较大。虽然目前高分子材料在功率模块封装上的应用已经做了大量的研究,但还应重点关注材料的耐高温、耐低温、热膨胀系数、CTI和介电强度等性能以及影响材料性能的诸多因素。使用新材料,提高材料性能,降低制造成本,并结合新的封装方式是提高模块可靠性、延长使用寿命的重要手段,也将是高分子封装材料的发展方向,而利用新材料、新技术以及新工艺将使功率模块的可靠性和使用寿命得到质的飞越。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 斯蒂芬·林德. 功率半导体器件与应用[M]. 肖曦,译. 北京:机械工业出版社,2019.
- [3] 贾扬·巴利加. IGBT器件物理设计与应用[M]. 韩雁,等译. 北京:机械工业出版社,2018.
- [4] 福尔克,郝康普,韩金刚. IGBT模块:技术、驱动和应用[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [5] 冯圣玉,张洁,李美江,等. 有机硅高分子及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [6] 来国桥,郭继荣,罗蒙贤,等. 传感器用双组分加成型硅凝胶的研究[J]. 有机硅材料,2003,17(4):1-5.
- [7] THOMAS S, HIROJI E, FRANCOIS V. Silicone gels for continuous operation up to 200℃ in power modules[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany:IEEE,2018.
- [8] LI Z L, ZHOU H, ROUSE J, et al. Silicone protection solution for IGBT modules: From dielectric encapsulation to thermal management[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai, China:VDE,2015.

- [9] MAKOTO O. Development of high temperature silicone gels[C]// International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: IEEE, 2018.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 一种MDT苯基硅树脂及其制备方法和应用: 201710880091.6[P]. 2017-12-22.
- [13] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 一种大功率IGBT封装用耐高温有机硅凝胶及其制备方法和应用: 201710880063.4[P]. 2018-1-12.
- [14] WANG N, COTTON I, ROBERTSON J, et al. Partial discharge control in a power electronic module using high permittivity non-linear dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4): 1319-1326.
- [15] 王昭, 刘曜宁. BaTiO₃复合硅胶对IGBT模块内部电场分布的影响[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(12): 67-70.
- [16] 陈平, 王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [17] 曾亮, 朱伟, 高敬民, 等. 无机填料对环氧树脂灌封胶性能影响[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 13-16.
- [18] 朱伟, 曾亮, 高敬民, 等. 高性能环氧电子灌封胶的研制[J]. 绝缘材料, 2014, 47(1): 56-59.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] LI Z, OKAMOTO K, OHKI Y, et al. Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro-Al₂O₃/epoxy composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 653-661.
- [22] LI Z, OKAMOTO K, OHKI Y, et al. The role of nano and micro particles on partial discharge and breakdown strength in epoxy composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 675-681.
- [23] OHARA K, MASUMOTO H, TAKAHASHI T, et al. A new IGBT module with insulated metal baseplate (IMB) and 7th generation chips[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: VDE, 2015.
- [24] KAJI Y, HATANAKA Y, HIRAMATSU S, et al. Novel IGBT modules with epoxy resin encapsulation and insulating metal baseplate[C]//International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Prague, Czech Republic: IEEE, 2016.
- [25] 刘钟铃, 袁悦, 张莉, 等. HP-RTM树脂体系固化反应动力学及流变行为研究[J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44(3): 32-36.
- [26] HORIO M, LIZUKA Y, IKEDA Y. Packaging technologies for SiC power modules[J]. Fuji Electric Review, 2011, 58(2): 75-78.
- [27] 杨克俭, 甘典松, 宋克东, 等. 玻纤增强高流动性尼龙6的研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(12): 28-31.
- [28] 郭强, 杨克俭, 刘京力, 等. 高流动性尼龙6的增强增韧改性研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(7): 43-46.
- [29] 唐毅平, 杨卓, 曾智, 等. 一种适用于高温高压器件的改性尼龙及其制备方法: 201911273695.X[P]. 2020-04-21.
- [30] 路宏伟, 李鸿岩, 姜其斌. 一种IGBT专用封装材料及其制备方法: 201310491958.0[P]. 2014-01-22.
- [31] 付国太, 刘洪军, 张柏, 等. PEEK的特性及应用[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(10): 69-71.
- [32] 赵巍, 杨德安, 梁崇, 等. PEEK及其复合材料的研究与应用[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 68-70.
- [33] WANG H Y, ZHAO Z B, FU P Y, et al. Insulation performance of polyetheretherketone frame inside press-pack insulated gate bipolar transistors[C]//IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition. Shenzhen, China: IEEE, 2018.
- [34] 王浩宇, 赵志斌, 付鹏宇, 等. 压接型IGBT器件封装结构中PEEK框架的绝缘特性分析[J]. 绝缘材料, 2019, 52(6): 60-66.
- [35] SWEET M, MADATHIL S E, STEINHOFF S. Influence of cassette design upon breakdown performance of a 4.5kV press-pack IGBT module[C]//8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Glasgow, UK: IEEE, 2016.
- [36] ASTRID P, RICCARDO P, MAGNAR H, et al. Pressure tolerant power IGBTs for subsea applications[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009.
- [37] LILAND K B, LESAINTE C, LUNDGAARD L, et al. Liquid insulation of IGBT modules: Long term chemical compatibility and high voltage endurance testing[C]//IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier, France: IEEE, 2016.
- [38] DONZEL L, SCHUDERER J. Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 955-959.
- [39] MORSHED M, ISLAM A, ROOSE T, et al. High temperature polyimide polymer material for high voltage IGBT power module switching applications[C]//20th European Conference on Power Electronics and Applications. Riga, Latvia: IEEE, 2018.
- [40] MORSHED M, ISLAM A, ROOSE T, et al. Control of partial discharge with high temperature insulating polymer for high voltage IGBT module application[C]//International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany: VDE, 2018.