

# 轨道交通绝缘栅双极型晶体管模块封装材料的制备技术及其显微组织研究

范明保<sup>1</sup> 王永亮<sup>1</sup> 黄林<sup>1</sup> 肖宇<sup>1</sup> 张力<sup>1</sup> 邢大伟<sup>2</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春;

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 150001, 哈尔滨//第一作者, 工程师)

**摘要** 作为电气系统组件, IGBT(绝缘栅双极型晶体管)模块在轨道交通领域有着广泛应用。封装材料的性能直接影响 IGBT 模块的使用寿命和稳定性。Al-50% Si 合金是 IGBT 模块较为理想的封装材料。采用粉末冶金结合双向分级热压致密化成型工艺, 制备了 Al-50% Si 合金材料。使用 OM、SEM 方法(扫描电子显微镜)分析热压态及热处理态合金的显微组织。结果表明, 在烧结温度为 720 ℃且保温 50 min 后, 能够获得 Si 相尺寸与分布控制较好的合金; 在热扩散温度为 540 ℃, 扩散处理 3.5 h 后, 能够有效熔断纤维状与细针状共晶硅。

**关键词** 轨道交通; 绝缘栅双极型晶体管模块; 封装材料; 制备技术; 显微组织

**中图分类号** TN305.94

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.02.029

## Preparation Technology and Microstructure of IGBT Module Packaging Materials for Rail Transit

FAN Mingbao, WANG Yongliang, HUANG Lin, XIAO Yu, ZHANG Li, XING Dawei

**Abstract** As an electrical system component, IGBT (insulated gate bipolar transistor) module is widely used in the field of rail transit. The properties of packaging materials directly affect the service life and stability of IGBT module, and the Al-50% Si alloy is an ideal packaging material for IGBT module. Using powder metallurgy combined with bidirectional classification hot pressing and densification forming process, the Al-50% Si alloy is prepared. Then, OM (optical microscopy) and SEM (scanning electron microscope) are employed to analyze the microstructure of hot pressed and heat treated state alloy. Results show that after heat insulation for 50 min at 720 ℃, the alloy with good Si size and distribution control will be obtained. When the thermal diffusion temperature is 540 ℃ and for 3.5 hours of diffusion treatment, the fibrous and fine needle-shaped eutectic silicon can be effectively fused.

**Key words** rail transit; IGBT module; packaging materials; preparation technology; microstructure

**First-author's address** Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

在轨道交通车辆中, 采用 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)模块构成牵引变流器、逆变器等电气组件, 具有广泛的应用需求。超高硅铝合金作为封装材料, 具有多方面的综合优势, 如: 热膨胀系数可调, 较高的热导率, 材料轻量化, 足够的强度与刚度及可电镀等<sup>[1-5]</sup>。

粉末冶金复合致密化工艺要求温度较低, Si 颗粒粒径大小可控, 组织稳定性较高且工艺简单、成本低。这种制备方法在硅铝复合材料的结构和组织控制上有较大的发展潜力<sup>[6-8]</sup>。本文将在传统粉末冶金的基础上, 结合双向分级热压致密化成型工艺, 制备 Al-50% Si 合金电子封装材料。

## 1 Al-50%Si 合金电子封装材料制备试验

本试验所用原材料为市售工业 Al 粉和 Al-50% Si 合金粉。Al-50% Si 合金试样成型结构示意图见图 1。其中, Al 粉的纯度  $\geq 99.5\%$ , 粒度为 20 ~ 50  $\mu\text{m}$ ; Al-50% Si 合金粉的粒度为 20 ~ 50  $\mu\text{m}$ , 纯度  $\geq 99.7\%$ 。Al-50% Si 合金试样成分质量分数见表 1。



图 1 Al-50% Si 合金试样结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Al-50% Si alloy sample structure

如图 1 所示, 压坯两端采用 Al 粉保护, 使用圆柱形模具配合压力机冷压成型, 然后在恒温下烧结

表 1 Al-50%Si 合金试样成分质量分数  
Tab.1 Element content of Al-50%Si alloy sample

层次	不同元素的质量分数	
	Si	Al
1 层	0	100
2 层	50	50
3 层	0	100

表 2 Al-50%Si 合金试样制备中冲头比压、系统压力与保压时间的关系  
Tab.2 Relationship among punch specific pressure, system pressure and holding time of Al-50%Si alloy sample

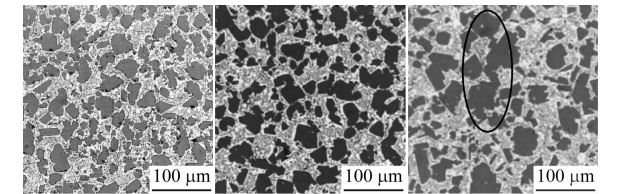
冲头类型	不同保压时间时的冲头比压及系统压力/MPa							
	0 时		1 s 时		2 ~ 3 s 时		4 ~ 5 s 时	
	冲头比压	系统压力	冲头比压	系统压力	冲头比压	系统压力	冲头比压	系统压力
上冲头	0	0	82	8	206	20	206	20
下冲头	0	0	0	0	244	10	390	16

采用热处理工艺制备 Al-50% Si 合金试样,工艺条件为:在 540 ℃ 温度下,热扩散处理 3.5 h。使用 DM4000M 型光学显微镜观察 Al-50% Si 合金显微组织,并采用扫描电子显微镜 Quanta 200FEG 对试样表面进行观察并拍照。

2 不同烧结工艺对 Al-50%Si 合金显微组织的影响

2.1 热压致密化工艺下 Al-50%Si 合金的显微组织

如图 2 所示,当烧结温度达到 660 ℃ 时,在 Si-Al 两相界面可以发现细小的孔隙存在,但结合较差;当烧结温度达到 780 ℃ 时,Si 相尺寸已经发生严重恶化,合金中则出现了 Si 相颗粒明显联结长大的趋势(见图 2 c) 圆圈处),这种 Si 相结构导致材料具有明显的各向异性,使得其局部的热导性能和热膨胀性能发生大幅度变化,这将不利于电子封装材料的应用。当烧结温度为 720 ℃ 时,显微组织尺寸无明显改变,颗粒分布均匀。

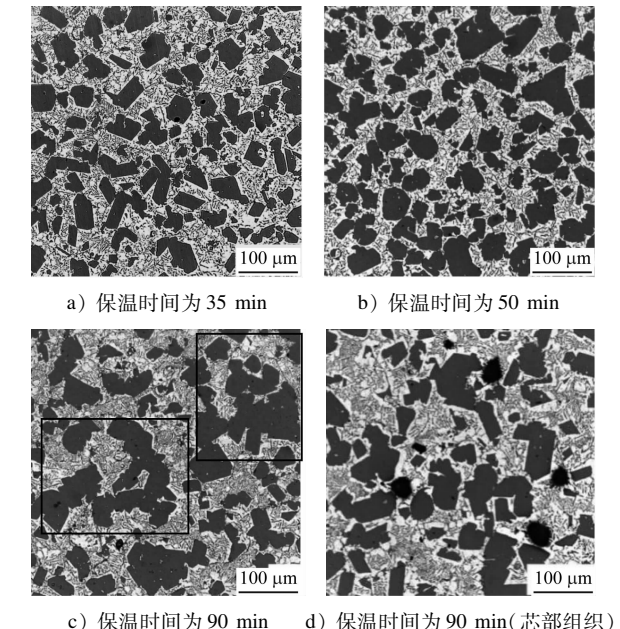


a) 烧结温度为 660 ℃ b) 烧结温度为 720 ℃ c) 烧结温度为 780 ℃  
图 2 不同烧结温度下 Al-50% Si 合金的显微组织

Fig. 2 Microstructure of Al-50% Si alloy at different sintering temperatures

并采用热压致密化工艺,即双向间断加压并反复挤压的压制方式制备 Al-50% Si 合金试样。冷压压力为 250 MPa,保压时间为 15 min,脱模压力为 75 MPa,烧结温度为 720 ℃,并恒温保温 50 min。压坯恒温烧结后迅速移至压力机模具中,采用匀速点动分级加压致密化,压力机冲头比压与保压时间的关系见表 2。

如图 3 所示,随着保温时间的延长,原始 Si 颗粒棱角边缘发生球化。当保温时间达到 90 min 后,粉体中的 Si 颗粒出现联结长大现象,多个距离相近的 Si 颗粒连接成一个 Si 相骨架,因 Si 颗粒粗大,严重影响 Al-50% Si 合金材料性能(见图 3 c))。另外,如图 3 d)所示,在观察 Al-50% Si 合金的金相时还发现,随着保温时间的延长,烧结坯的芯部,即最终凝固处,出现较多孔隙,而在保温 50 min 时金相组织则较为致密。产生这种现象的原因可能是因

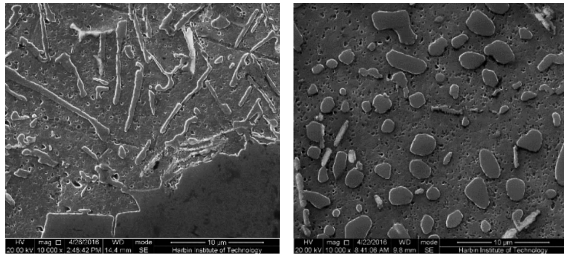


a) 保温时间为 35 min b) 保温时间为 50 min  
c) 保温时间为 90 min d) 保温时间为 90 min(芯部组织)  
图 3 不同保温时间下 Al-50% Si 合金的显微组织图像  
Fig. 3 Microstructure of Al-50% Si alloy at different holding times

为长时间保温情况下,形成的连续 Si 相骨架,阻碍了液态 Al 的流动,进而在烧结以及热压致密化过程中,难以对其芯部组织进行补缩,最终产生空隙。

## 2.2 热处理工艺下 Al-50%Si 合金的显微组织

如图 4 所示,未经热处理的合金内部细长,针状的共晶硅均匀分布在初晶硅周围的 Al 基体中;随着热处理工艺下保温时间的延长,共晶硅相貌发生了明显的改变,大部分尺寸较大且细长的共晶硅发生熔断,变为尺寸较小、端部圆滑的短棒状或粒状的共晶硅。当保温时间达到 3.5 h,共晶硅全部变为球粒状且均匀地分布在 Al 基体当中。



a) 原始共晶硅组织 b) 热处理后的共晶硅组织

图 4 热处理工艺前后共晶硅显微形貌对比

Fig. 4 Micromorphology comparison between Eutectic silicon samples before and after heat treatment process

## 3 结论

1) 采用热压致密化工艺制备 Al-50% Si 合金时,通过严格控制压力供给方式,实现了分级加压,进一步提高了烧结体的致密度。烧结温度对合金组织起着决定性作用,保温时间对显微组织的影响远小于温度因素。在烧结温度为 720 °C 且保温 50 min 的烧结工艺条件下,合金粉压坯热压态显微组织表现良好。

2) 采用热处理工艺制备的 Al-50% Si 合金,合金粉热压态组织 Si 相颗粒尺寸细小,且分布均匀。纤维状与细针状共晶硅均匀地分布于基体中;热扩散温度为 540 °C,扩散处理 3.5 h,能够有效熔断纤维状与细针状共晶硅,此时共晶硅呈细小球粒状。

## 参考文献

[1] 汤涛,张旭,许仲梓. 电子封装材料的研究现状及趋势[J].

南京工业大学学报:自然科学版,2010(4):105.

TANG Tao, ZHANG Xu, XU Zhongzhi. Research progress and trends of electronic packaging materials[J]. Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition, 2010(4):105.

[2] 张强,孙东立,武高辉. 电子封装基片材料研究进展[J]. 材料科学与工艺,2000(4):66.

ZHANG Qiang, SUN Dongli, WU Gaohui. Recent achievements in research for electronic packaging substrate materials[J]. Materials Science and Technology, 2000(4):66.

[3] MITIC G, DEGISCHER H P, LEFRANC G, et al. Al/SiC composite materials in IGBT power modules[C]// IEEE. New York: IEEE, 2000.

[4] JIA Q J, LIU J Y, LI Y X, et al. Microstructure and properties of electronic packaging box with high silicon aluminum-base alloy by semi-solid thixoforming[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(1):80.

[5] 吴孟武,黄春江,李玉宝. 低膨胀高导热铝基电子封装材料研究进展[C]//中国电子学会电子机械工程分会与微波分会. 2014 年电子机械与微波结构工艺学术会论文集. 呼和浩特:中国电子学会电子机械工程分会与微波分会,2014:231-236.

WU Mengwu, HUANG Chunjiang, LI Yubao. Research Progress of Low-expansion and High Thermo-conductivity Aluminum Matrix Materials for Electronic Packaging [C] // Electronic Mechanical Engineering Branch and Microwave Branch, Chinese Society of Electronics. Proceedings of the 2014 Conference on Electronic Machinery and Microwave Structure Technology. Hohhot: Electronic Mechanical Engineering Branch and Microwave Branch, Chinese Society of Electronics, 2014:231-236.

[6] 郝新锋,朱小军,严伟. 电子封装用硅铝合金的应用研究[J]. 电子机械工程,2013(4):49.

HAO Xinfeng, ZHU Xiaojun, YAN Wei. Application of Si / Al Alloy for electronic packaging[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2013(4):49.

[7] 郝新锋,刘彦强,严伟,等. 国产粉末冶金硅铝合金的封装性能研究[J]. 电子机械工程,2015(5):45.

HAO Xinfeng, LIU Yanqiang, YAN Wei, et al. Packaging capabilities of homemade Si/Al Alloy by powder-metallurgy processing [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2015(5):45.

[8] 刘彦强,魏少华,左涛. 粉末冶金 70% Si/Al 复合材料的制备与组织形成机制[J]. 稀有金属,2012(6):876.

LIU Yanqiang, WEI Shaohua, ZUO Tao. Preparation and microstructure evolution of powder metallurgy 70% Si/Al composites [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012(6):876.

(收稿日期:2021-09-28)