

# 高压 IGBT 模块基板焊接工艺研究

张 泉

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** AlN 衬板与 AlSiC 基板之间的焊接层是高压 IGBT 模块的主要散热通道, 该焊接层的空洞率对高压 IGBT 模块性能和长期可靠性有直接影响。文章采用 SnAg 无铅焊膏和真空回流焊接技术, 研究了预热温度、峰值温度、液相线上时间等工艺参数对高压 IGBT 模块 AlN 衬板与 AlSiC 基板焊接质量, 特别是对焊接层空洞率的影响。

**关键词:** IGBT 模块; 基板; SnAg 焊料; 真空回流焊接; 空洞率

**中图分类号:** TN405; TG442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8410(2011)03-0005-03

## Research on Baseplate Soldering Process of High-voltage IGBT Module

ZHANG Quan

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** The solder layer between AlN substrate and AlSiC baseplate is a main way of heat dissipation for high-voltage IGBT module. Therefore, the void rate of the solder layer has a direct impact on the performance and reliability of high-voltage IGBT module. In this paper, using the SnAg free-lead solder paste and vacuum reflow technology, it is researched the effects of preheat temperature, peak temperature and time above liquidus on the quality of the solder layer between AlN substrate and AlSiC baseplate, especially on the void rate of the solder layer.

**Key words:** IGBT module; baseplate; SnAg solder; vacuum reflow soldering; void rate

## 0 引言

目前电压等级在 1 700 V 以上的高压 IGBT 模块已经广泛用于机车牵引、高压直流输电、风力发电等领域<sup>[1-3]</sup>。随着电压等级和容量不断提高, 这些应用领域对高压 IGBT 模块的需求量不断增大, 同时也对模块的性能和长期可靠性提出了更高的要求。采用焊接封装结构的 IGBT 模块通常有两个焊接层, 一个是半导体芯片与陶瓷衬板之间焊接层, 另一个则是陶瓷衬板与基板之间的焊接层。当 IGBT 模块处于工作状态, 芯片、陶瓷衬板和基板之间热膨胀系数失配使焊接层在温度变化过程中承受周期性应力, 最终导致焊接层发生热疲劳失效, 降低了模块长期可靠性。为减少各层之间热膨胀系数

失配的影响, 高压 IGBT 模块选用与硅热膨胀系数更加接近的 AlN 和 AlSiC 材料作为衬板和基板材料。另一方面, 人们也在努力寻找提高焊接层质量以及降低焊接层的空洞率的方法。SnAg 合金焊料因其力学性能和抗氧化性能优越而倍受关注<sup>[4]</sup>, 但是由于 SnAg 系焊料的润湿性比 SnPb 的润湿性能差, 采用 SnAg 焊料一般很难获得较低的空洞率。焊接层中空洞会影响到焊接层的机械性能, 降低连接强度; 同时会降低焊接层的热导, 导致局部过热, 引起器件失效。据统计, 典型的功率器件有 4% 的可控功率是以热量的形式消耗<sup>[5]</sup>, 因此焊接层空洞率的高低对于高压 IGBT 模块的性能和长期可靠性有着较大影响。高压 IGBT 模块的封装通常采用真空回流焊接技术进行半导体芯片、AlN 衬板和 AlSiC 基板之间的焊接。为获得良好的焊接质量, 在运用真空回流焊接技术时需根据产品的情况合理设置初始升温速率、预热温度、预热时间、峰值温度、液相线上时间、冷却

收稿日期: 2011-01-02

作者简介: 张 泉 (1974-), 男, 工程师, 主要从事大功率 IGBT 芯片和模块的研究和开发工作。

速率等工艺参数。

本文采用 SnAg 焊膏和真空回流焊接技术,通过实验,研究了预热温度、峰值温度、液相线上时间等工艺参数对高压 IGBT 模块 AlN 衬板与 AlSiC 基板焊接质量的影响,特别是对焊接层空洞率的影响。

## 1 真空回流焊接工艺

真空回流焊接工艺过程一般分为预热、回流、冷却 3 个阶段,如图 1 所示。第一个阶段是预热阶段,该阶段的主要目的是确保在回流尖峰到来之前元件被均匀加热。如果预热不充分,元件各个部分之间温差过大,不能同时达到回流温度,将会导致焊接不均匀。通常在预热开始阶段设备会将腔中空气抽出再充入氮气以避免元件在高温下氧化。第二个阶段是真空回流阶段,在该阶段焊接腔内的温度上升至峰值温度,并在峰值温度下持续一段时间,确保焊料充分熔化。在达到峰值温度后设备会抽真空,将焊接腔内气压降低到接近真空的状态,使焊层内气泡的气压与焊层外部气压形成气压差,从而减少焊接层中空洞。第三个阶段是冷却阶段,在该阶段,元件在氮气中冷却至室温。冷却率设置的好坏将影响到焊层蠕变强度、切变强度、抗疲劳性等性能。

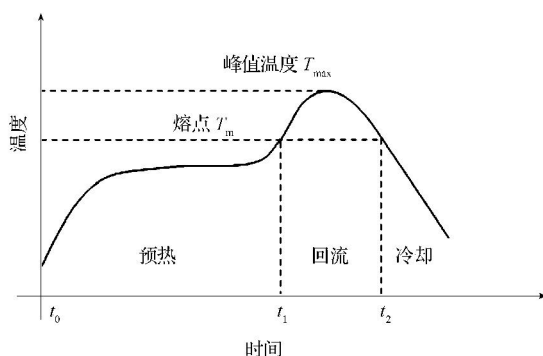


图 1 回流曲线  
Fig. 1 Reflow profile

## 2 实验

### 2.1 实验设备

实验所采用的真空回流焊接设备有 3 个工作腔,分别为预热腔、加热腔和冷却腔,如图 2 所示。每个工作腔均有观测窗口,可以随时观测腔内元件的预热、回流、冷却状态。采用该设备进行 AlN 衬板和 AlSiC 基板之间的焊接,预热温度、预热时间以及峰值温度可以直接设置,但是液相线上时间这个参数却无法通过设备直接设定。液相线上时间定义为焊接过程中回流温度高于焊料熔点所持续的时间,即图 1 中  $t_1$  至  $t_2$  时间段,而我们实验

所采用设备只能设置回流时间,即元件在加热腔中所停留的时间。回流时间不仅包括了液相线上时间,还包括了元件从预热温度升温至焊料熔点的时间。



图 2 真空回流焊接设备  
Fig. 2 Vacuum reflow soldering system

### 2.2 实验方案

实验通过 8 组试验样品分别对预热温度、峰值温度和回流时间等工艺参数的影响展开研究。在实验过程中均采用固定的升温速率,从而可以通过回流时间这个参数间接了解液相线上时间的情况。由于每组试验焊接元件质量上的差异会造成每次试验升温速率不同,为避免由升温速率不同造成的偏差,每次试验都尽可能保持托盘上承载相同质量的元件。实验过程中采用氮气作为保护气体以防止元件在高温下氧化,焊料选用 SnAg 无铅焊膏,空洞率检测采用 X 射线仪检测。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 预热温度的影响

通常预热效果的好坏很难通过最终的焊接质量来分析判断,因为影响焊接质量的因素不仅仅是预热温度和预热时间,还包括升温速率、峰值温度、液相线上时间、冷却率等多种因素。如果焊料是采用焊膏,那么预热除了要确保在回流尖峰到来之前将元件均匀加热到一个合适温度以外,还需要充分激活焊膏中助焊剂的活性。焊膏中的助焊剂在加热后会释放出还原物质(对于包含有机活性剂的助焊剂,释放的还原物质为  $H^+$ ),这些还原物质可以清除焊料及被焊金属表面的氧化物从而保证焊料熔化后两种金属可以直接接触,并能有效地降低熔融焊料的表面张力,促进焊料湿润,使焊接顺利完成。元件在腔中的预热情况实际上可以通过焊膏中溶剂气体挥发情况来间接判断。为考察预热

温度对焊接质量的影响,实验在AlSiC基板上印刷了一定的SnAg焊膏,该焊膏的量即为高压IGBT模块封装过程中将AlN衬板焊接到AlSiC基板上所需要的焊膏的量。焊膏上没有放置AlN衬板,这便于通过预热腔窗口直接观察焊膏的预热情况,从而判断预热效果的好坏。

实验在低于焊料熔点附近的温度区间选取了3种不同的预热温度 $T_1$ 、 $T_2$ 和 $T_3$ (其中 $T_1 < T_2 < T_3 < T_m$ ,  $T_m$ 为焊料的熔点)。第1组样品所采用的预热温度为 $T_1$ ,在预热过程中,观察发现焊膏溶剂气体挥发较为缓慢,这说明预热温度设置不够高。溶剂气体挥发缓慢意味着助焊剂中活性物释放还原物质的速度也比较慢,对于高压IGBT模块AlN衬板和AlSiC基板之间的焊接,焊接面积比较大,要想将被焊金属表面清洗干净则需要更长的预热时间。事实上,如果预热温度设置过低,也有可能存在延长预热时间也无法将焊料和被焊金属表面清洗得足够干净的情况。这是因为在过低的预热温度下,助焊剂释放还原物质的浓度达不到足以清除焊料及被焊金属表面的氧化物所需要达到的浓度,从而很难将焊料和被焊金属表面清洗干净。第3组样品的预热温度设置为 $T_3$ ,在预热过程中焊膏中溶剂气体挥发较为剧烈,这表明预热温度设置过高。助焊剂中的还原物质要将焊料和金属表面的氧化物清除干净需要一定的时间,如果预热温度设置过高,则有可能造成助焊剂还来不及将焊料和金属表面的氧化物清除干净就被蒸发,最终导致润湿不良,焊点在高温下发生再次氧化现象。第2组样品的预热温度为 $T_2$ ,观察发现溶剂气体挥发速度较为适度。在该种情况下,助焊剂释放还原物质的速度也比较合适,这有利于助焊剂释放的还原物质充分清除焊料和被焊金属表面的氧化物。在后面的实验中,采用预热温度 $T_2$ 以及不同的峰值温度和回流时间进行了几组试验,最后的试验结果也表明在该预热温度下助焊剂的活性能够被有效地激活。

3.2 峰值温度和液相线上时间的影响

峰值温度和液相线上时间是影响回流工艺的两个重要参数。在IGBT模块回流过程中,如果峰值温度设置过高,加热时间过长,则会损伤元件,导致衬板翘曲和分层,反之如果峰值温度设置过低,加热时间过短,则焊料熔化不充分,将会产生虚焊、冷焊等焊接缺陷。为了解峰值温度对回流工艺的影响,实验在高于焊料熔点温度区间选取了 $T_{p1}$ 和 $T_{p2}$ 两种不同的峰值温度( $T_{p1} < T_{p2}$ ),为了能在回流过程中观察焊膏熔化情况,实验没有在焊膏上覆盖AlN衬板。第4组样品所采用的峰值温度为

$T_{p1}$ ,在回流过程中,通过观测窗口观察发现焊膏熔化速度较为缓慢;回流过程完成后,取出样品发现焊层光泽度差,依此可以判断峰值温度设置不够高。第5组样品采用更高的峰值温度 $T_{p2}$ ,回流过程中焊膏熔化速度较快,并且熔化的焊膏由中心向基板四周扩展较为平缓;回流完成之后,取出样品发现焊层光泽度高,由此可以判断将峰值温度设置为 $T_{p2}$ 较为合理。

为考察回流时间对焊接质量的影响,实验选取了3种不同回流时间 $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3$ ( $\Delta t_1 < \Delta t_2 < \Delta t_3$ ),预热温度和峰值温度分别设置为 $T_2$ 和 $T_{p2}$ 。为了能够检测焊接之后的空洞率,实验在焊膏上覆盖了AlN衬板。在真空回流焊接工艺完成之后,采用X射线仪检测各组样品的空洞率,结果如表1所示。

表1 不同回流时间的平均空洞率  
Tab.1 The average void rate of different reflow time

| 样品<br>编号 | 平均空洞率 / % |      |      |      |
|----------|-----------|------|------|------|
|          | 基板 1      | 基板 2 | 基板 3 | 基板 4 |
| 6        | 1.50      | 1.00 | 3.63 | 6.14 |
| 7        | 3.34      | 2.45 | 1.05 | 0.98 |
| 8        | 1.04      | 1.07 | 0.96 | 1.02 |

第6组样品所采用的回流时间为 $\Delta t_1$ ,从空洞率检测结果来看,基板1和基板2空洞率较小,基板3空洞率较高,但是基板4的空洞率明显偏高。造成这种现象的主要原因是,对于峰值温度 $T_{p2}$ ,第6组样品的回流时间设置较短,各个基板及衬板在回流过程中受热不均匀,受热好的基板焊料已经完全熔化,回流过程完成较为充分,因而空洞率较低,而受热差的基板焊料尚未完全熔化,回流不充分,因而空洞率高。第7组样品选取的回流时间较第6组样品有所延长,回流效果发生明显改善,各个基板的空洞率差别明显减小。分析认为,在延长回流时间后,各个基板上的焊膏在设定的回流时间内均已熔化,回流过程均基本上完成,因此空洞率差别较第6组样品明显减小。第8组样品则采用更长的回流时间 $\Delta t_3$ ,可以看到各个基板的空洞率差别也随之进一步减小而且空洞率均较低。随着回流时间进一步延长,各个基板上焊料在设定的回流时间内均已经完全熔化,回流过程充分完成,因此各基板空洞率差别小而空洞率低。对于表面贴装技术(SMT)工艺,液相线上时间的典型值是30~90 s<sup>[6]</sup>,但是对于高压IGBT模块,由于陶瓷衬板和基板之间焊接面积较大,所需要焊膏的量更多,因此要求更长的回流时间,即更长的液相线上时间。另外,由于采用SnAg无铅焊料,也需要更长的液相线上时间帮助焊料湿润和延展。(下转第24页)

矩处于正的区域,从而降低效率。为了能最大化地输出功率,触发角必须根据转速发生变化,这样就需要进一步改进仿真模型。

7 结语

由于SRG具有结构简单、转速范围宽、可低速运行、控制方式简单、利用变流器可实现变速运行等优点,其在风力发电领域具有很大的应用价值。通过合适地分配功率变流器的触发角,可以优化发电机的功率输出。由于SRG在风电领域的应用研究才刚刚起步,要实现工程应用,还需要开展更多的研究工作。

参考文献：

[1] 郭美琴,于世杰,苏建微,等.开关磁阻发电机用于直接驱动、变速运行风力发电系统的评估[J].太阳能学报,2005,

26(3):386-389.  
[2] Darie E, Cepisca C. The Use of Switched Reluctance Generator in Wind Energy Applications[C]. 13th Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, 2008:1963-1966.  
[3] Mueller M A. Design and Performance of a 20 kW, 100rpm, Switched Reluctance Generator for a Direct Drive Wind Energy Converter[C]. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, 2005:56-63.  
[4] 吴红星.开关磁阻电机系统理论与控制技术[M].北京:中国电力出版社,2010.  
[5] Susitra D, Elisabeth Jebaseeli E Annie, Paramasivam S. Switched Reluctance Generator Modeling, Design, Simulation, Analysis and Control a Comprehensive Review [J]. International Journal of Computer Applications, 2010, 1(2):10-16.  
[6] Roberto C, Ruben P, Marcelo P, et al. Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications [J]. IEEE Trans. Energy Conversions, 2005, 20(4): 781-790.  
[7] 赵宇,柴建云.升压斩波控制开关磁阻风力发电机系统[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(7):1118-1121.



(上接第7页)

4 结语

本文通过试验研究了预热温度、峰值温度、回流时间等工艺参数对高压IGBT模块AlN衬板与AlSiC基板焊接工艺的影响。预热温度对激活助焊剂的活性很关键:若预热温度设置过高,溶剂气体挥发速度过快,则可能导致助焊剂来不及将待焊接金属表面的氧化物清除干净就被蒸发,从而引起润湿不良,焊点在高温下再次氧化;若预热温度设置过低,则不能够充分激活助焊剂的活性,不利于焊料及被焊金属表面氧化物的清除。峰值温度和回流时间对焊接层空洞率有直接的影响。焊料能否充分熔化取决于峰值温度,而回流时间则与峰值温度共同影响焊接层空洞率。对于合适的峰值温度,若回流时间过短,AlN衬板与AlSiC基板之间焊接层空洞

率不均匀,容易产生高空洞率;适当延长回流时间可以在一定程度上降低空洞率,并改善空洞率均匀性。

参考文献：

[1] Bakran M M. 大功率多流制机车牵引变流器的比较[J]. 变流技术与电力牵引, 2006 (1):18-22.  
[2] 魏晓光.电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究[D].北京:中国电力科学研究院,2007.  
[3] Li Ming,Fang Xiong,Wang Yue. Overvoltage Protection of High Power IGBTs in Wind Power Converters under Short Circuit[J]. IPEMC J. 2009, 21(3):297-305.  
[4] Lee N C. Lead-free soldering:where the world is going[J]. Adv. Microelectron, 1999(9/10):29-35.  
[5] He J,Morris W L,Mather M C. Reliability in large area die bonds and effects of thermal expansion mismatch and die size[J]. IMAPS J, 1998, 21(3):297-305.  
[6] Lee Ning-Cheng. Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies [M]. UK:Newnes Publishing House, 2002:107-141.