

热循环过程中 IGBT 模块封装退化研究

徐凝华^{1,2}, 彭勇殿^{1,2}, 罗海辉^{1,2}, 冯会雨^{1,2}, 李亮星^{1,2}, 李 寒^{1,2}

(1. 新型功率半导体器件国家重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: IGBT 模块失效的原因错综复杂, 封装退化是因素之一。为剔除应用工况类因素干扰, 采用更严苛的热循环试验, 建立模块失效和封装退化的关联, 结果分析发现, 封装会出现焊层分层、母排脱附及铝线脱离等退化现象, 继而导致模块失效。结合材料力学理论, 得出材料选型和结构设计的原则; 同时分析了工艺质量水平对封装退化的影响, 并从基板焊层及拱度、金属间化合物形貌、功率端子焊接、键合技术等方面提出针对性改进措施。

关键词: 失效分析; 热循环能力; 封装退化; 可靠性

中图分类号: TN305; TG40

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2016)04-0023-07

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2016.04.005

Study of the Package Degradation of IGBT Module during Thermal Cycling Test

XU Ninghua^{1,2}, PENG Yongdian^{1,2}, LUO Haihui^{1,2}, FENG Huiyu^{1,2}, LI Liangxing^{1,2}, LI Han^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Advanced Power Semiconductor Devices, Zhuzhou, Hunan 412001, China,

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co.,Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Failure mechanisms of IGBT module are complex, one of which is package degradation. To eliminate the interference of application condition and other effects, the correlation between module failure and package degradation was built via severe thermal cycling test. Results show that the degradation will be encountered after packaging, such as solder layer delamination, loose busbars and lift-off bonding wires, which may cause module failure. Principle of material selection and structure design was get by studying the theory of material mechanics. The influence of packaging process was discussed and the optimized methods were proposed aiming to solder layer and bow of baseplate, IMC, terminal soldering, wire bonding, etc.

Keywords: failure analysis; thermal cycling capability; package degradation; reliability

0 引言

IGBT 因其开关频率高、损耗小及控制简单等特点被广泛应用于轨道交通、智能电网、新能源、电动汽车等领域^[1]。随着应用环境苛刻度的增加以及功率密度的不断提高, 封装逐渐成为制约模块长期可靠性的瓶颈。

由于应用工况非常复杂, IGBT 模块的失效原因通常难以明确定位。比如在机车牵引变流器中, 恶劣的工况、芯片的安全工作区能力、模块参数退化以及驱动电路可靠性等因素都可能导致模块最终失效。任何 IGBT

模块在生命周期内都会经历数以万次甚至更多的热循环, 随着使用时间的增加, 模块的封装结构必然会因此而发生退化, 甚至导致失效。目前学术界提出了多个模型来描述封装退化的过程, 如 Coffin-Manson 模型^[2]、LESIT 模型^[3]、Norris-Landzberg 模型^[4]、CIPS08 模型^[5]等; 但模块实际失效时, 热循环导致的封装退化常常被其他因素所掩盖, 比如因模块爆炸造成的引线脱落、焊点损伤等, 使失效原因更加扑朔迷离。本文采用加严试验条件的热循环试验以缩短试验时间、充分暴露封装退化现象, 不仅便于建立与模块失效的关联, 同时可分析工艺质量水平对封装退化的影响, 从而提出针对性的改进措施。

收稿日期: 2016-06-28

作者简介: 徐凝华 (1984-), 男, 工程师, 主要从事高功率密度封装材料和封装工艺开发、模块失效分析等工作。

1 IGBT 模块封装结构简介

IGBT 模块最常见的封装形式是多芯片堆叠式，其芯片与衬板、衬板与基板通过钎焊和引线键合技术互连。图 1 示出常规高压 IGBT 模块的结构示意，其除外壳、密封胶及功率端子外，从上到下共 7 层，芯片工作时产生的热量主要通过这几层导热路径进行散发^[6]。除此之外，母排焊接在陶瓷层上表面的覆铜层上，是 IGBT 器件开通状态时电流的流通路径。IGBT 芯片的发射极或 FRD 芯片的阳极通过键合线与覆铜层相连。应用时，模块压装在外部散热器上，在二者间涂敷导热硅脂以提高散热效率。

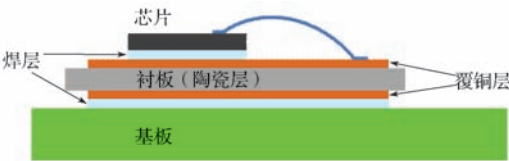


图 1 IGBT 模块结构示意
Fig.1 Schematic diagram of IGBT module structure

封装结构中任何互连结构发生分层或脱附都会造成模块热阻增大，而键合引线的脱离或功率端子的脱附会

引起电流集中等不良后果，最终将导致模块失效。本文将重点研究由于热循环过程导致的封装退化现象。

2 封装退化理论

IGBT 模块由多种材料组成，不同的材料有着不同的热膨胀系数。在热循环过程中，材料之间的热膨胀系数失配会导致热机械应力的产生。周期性的应力或长时间、高强度的应力都会使材料出现疲劳、蠕变和断裂等症状，而这是导致封装结构退化的主要原因。

因温度变化而在 2 种材料间形成的应力可用式(1)简单描述。可以看出，热膨胀系数差异与温度变化的乘积越大，材料间的应力也越大。

$$\sigma=E(a_1-a_2)\Delta T$$
(1)

式中： σ ——应力； E ——杨氏模量； a_1, a_2 ——材料的热膨胀系数； ΔT ——温差。

为了减小或消除因热膨胀系数不匹配造成的不良影响，在设计时需选择热膨胀系数接近的材料或者使用弹性模量较小的材料作为缓冲，同时材料本身的抗热疲劳性能也是考虑的重要方面。表 1 示出堆叠式 IGBT 模块中几种常见封装材料的热机械性能。

表 1 IGBT 模块封装材料热机械性能表
Tab.1 Table of thermal mechanical property of package material for IGBT module

材料	硅	焊层			衬板			基板	
	Si	Sn-Pb37	Pb92.5-Sn5-Ag2.5	Sn-Ag3.5	AlN	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	Cu	Al-SiC
热导率 /W·(m·K) ⁻¹	118	51	44	64	170	33	70	400	180
CTE/ppm·K ⁻¹	2.9	24	29	30	4.6	7.2	3.0	17.0	8.0
弹性模量 /GPa	130	22	9	5.5	310	345	314	120	250

热机械应力通常会导致材料的静态失效和材料疲劳，下面将对此进行理论研究。

2.1 材料静态失效

在封装设计中，静态失效模式主要是韧性断裂和脆性断裂。当材料中的塑性变形导致横截面积逐步减少，则发生韧性断裂；当变形导致原子间键的分离，则发生脆性断裂。通常，芯片和陶瓷会发生脆性断裂失效，而焊层会发生韧性断裂失效。焊层的退化是本文关注的重点。

学术界中，通常认为畸变能理论或 Von Mises 理论最适合解释焊层的韧性失效^[7]。该理论认为，因弯曲导致材料失效会发生在畸变能的临界值上。因而，焊层不失效的准则是：

$$S=\frac{\sqrt{2}}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]^{1/2}\leqslant\sigma_{yp}$$
(2)

式中： S ——有效应力（Von Mises 应力）； σ_{yp} ——弯曲

应力，小于该值，则材料可复原； $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——由应变能密度 w （式（3））求出的主应力。

$$w=\frac{1}{2E}(\sigma_x^2+\sigma_y^2+\sigma_z^2)\times\frac{\nu}{E}(\sigma_x\sigma_y+\sigma_y\sigma_z+\sigma_z\sigma_x)+\frac{1}{2E}(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{xz}^2)$$
(3)

应力分量的矩阵为

$$\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z\end{bmatrix}$$
(4)

式中： $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——矩阵的特征值，其中 σ 表示法向应力； τ ——切向应力； ν ——泊松比。

设计计算过程中， S 若小于 σ_{yp} ，则不存在弯曲现象，可认为该设计是符合要求的，否则该设计必须修改。

2.2 材料疲劳

加上循环的热学或力学负载后，当经受高于某一水平的重复负载时，材料会发生疲劳现象。分析材料疲劳的方法有 2 种：应力控制测试（未超过材料的弯曲点

时)和应变控制测试(超过材料的弯曲点时)。热循环会导致材料间热膨胀系数不匹配,造成重复的应力。目前,对电子封装的疲劳研究仍处于初级阶段,大多数研究都必须依靠热循环试验来确定材料和结构的热疲劳极限^[8]。常用的疲劳模型为Coffin-Mason模型^[2]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_f}{2} = \varepsilon_f (2N_f)^c$$

(5)

式中: N_f ——循环次数; $\Delta \varepsilon_f$ ——一个循环累积的塑性应变; ε_f ——材料疲劳延性系数; c ——试验常数。

3 热循环试验中的封装退化现象

IGBT模块热循环试验包括温度冲击、被动热循环和功率循环,主要用于考查模块材料的退化现象。

3.1 温度冲击

温度冲击是通过低温、高温间迅速的切换,使得热膨胀系数不同的材料间产生热机械应力;在多次循环往复后,材料及其界面会发生退化、变形甚至开裂现象。该试验的目的在于考察在外界温度剧烈变化的工况下封装材料体系的匹配程度。

温度冲击试验通常采用的温度差为200℃,循环次数为100次。试验时,我们将温度差提高25℃,循环80次后,发现部分模块的电性能参数开始发生漂移。对模块进行超声扫描检查,发现在母排焊接处出现了空白区域,表明该母排焊层与衬板覆铜层间发生了分层(图2)。

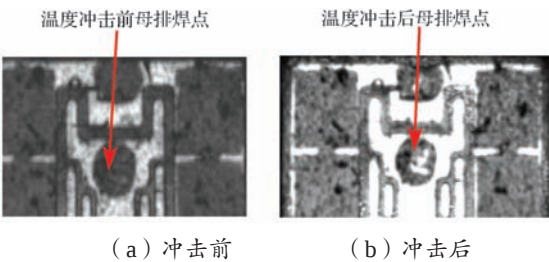


图2 温度冲击前后焊层超声扫描照片
Fig.2 SAM results of solder layer before and after thermal shocking

通过进一步解剖、腐胶等操作后发现,对应空白区较大的母排焊点处存在肉眼可见的裂痕(图3(a)),有些在解剖过程中就已经脱落。裂纹及分层会导致母排与衬板接触不良,从而增大了通流路径上的接触电阻,导致芯片的导通压降增大。在部分母排焊脚边缘或者焊锡上部发现有烧损的黑点(图3(b)),这是在模块复测时(比如阻断测试)上千伏的测试电压加在接触不良的母排和衬板间出现的局部放电现象所致,其会损害封装材料及其结构,甚至芯片。

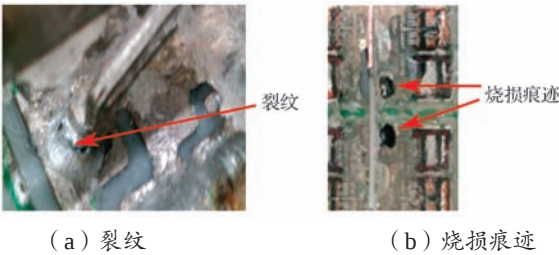


图3 母排焊点裂纹和烧损痕迹
Fig.3 Crack and burning trace at busbar solder point

3.2 被动热循环

被动热循环试验主要是通过改变模块的壳温,考察在缓变的温度循环工况下封装材料的蠕变和热疲劳情况。

被动热循环试验时,壳温差通常为80℃,循环次数为上万次。将壳温差提高至100℃后复测,发现多只模块完全失效;超声扫描结果显示,母排焊点的脱附情况比温度冲击试验时的更加严重,许多焊点区域接近完全空白。解剖发现,许多母排已经完全脱离,且在焊接区域同样也发现了明显烧损的痕迹。

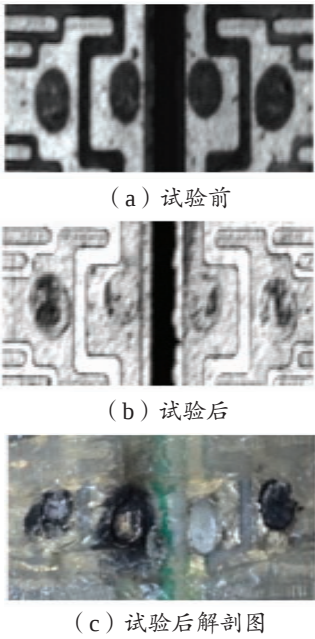


图4 被动热循环试验前后母排焊点超声扫描情况及试验后解剖情况

Fig.4 SAM results of busbar solder point before and after test and the anatomy picture of busbar solder area after test

除了母排发生脱附之外,衬板下的焊层也发生了明显的退化,图5示出模块经过被动热循环测试前后的超声扫描图像。可以看出,在模块中心位置的焊层出现部分白色区域(图5(b)),这表明焊层与衬板表面发生了分离,测试数据显示,该模块的热阻较试验前的增大11.2%(在实际应用过程中,热阻的增大会导致芯片结温的升高,并引发芯片电学参数漂移甚至失效的风险)。

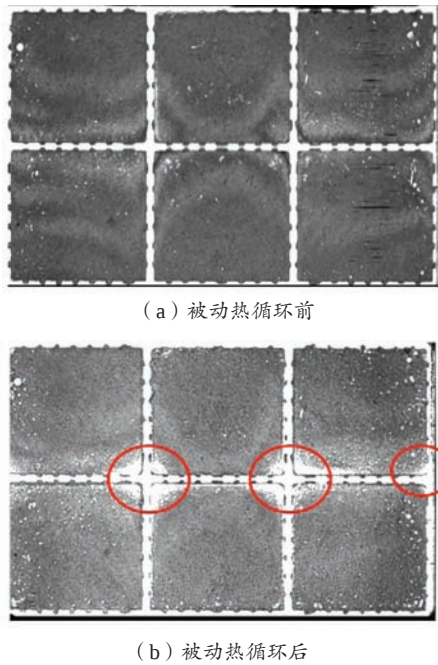
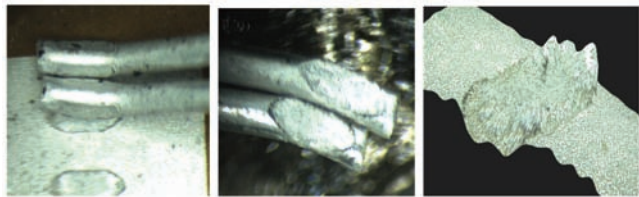


图 5 被动热循环前、后前基板焊层超声扫描图
Fig.5 SAM results of baseplate solder layer before and after passive thermal cycling

3.3 功率循环

功率循环是一种主动热循环试验，也是 3 种热循环试验中最接近实际工况的试验。功率循环试验主要用于考察键合铝线和芯片金属层的连接情况以及焊层的退化情况。试验所采用的结温差通常为 60 ℃，循环次数为数十万次。

对未进行任何键合点保护的模块进行功率循环试验，将结温差提高至 80 ℃，模块进行了 25 万次功率循环后，导通压降出现异常。停止试验并对模块进行解剖，发现大部分芯片表面键合点已经脱落，未脱落的铝线分布在远离芯片间热耦合的区域。图 6（a）示出 IGBT 芯片表面脱落的键合点情况，图 6（b）示出脱落的键合线背面情况，图 6（c）所示为 IGBT 芯片表面键合点残余的三维扫描立体图像。



（a）键合点脱附 （b）键合线根部 （c）键合点残余三维
图 6 键合点脱落情况
Fig.6 Bond falling out

除了热耦合区的铝线容易发生键合点断裂外，部分引线发生了熔断，这是因为剩余未脱离的铝线承受了更大的电流，导致发热以至于熔断。键合点脱附后，铝线会带走键合点周围一圈的铝层，形成塌陷，而中间部分

则为铝线残留，约有 20 μm 厚。试验结果表明，键合点最薄弱处不在键合点本身或芯片的金属层，而在于铝线本身，多篇文献中有类似的结论^[9-10]。

4 影响封装退化的工艺因素

热循环试验中，封装出现了不同类别的退化。现有 IGBT 模块的结构和材料体系已经比较成熟，而工艺质量水平对封装退化有着重大的影响。下面将从基板焊层厚度和均匀性、金属间化合物的形貌、基板拱度的变化、功率端子的焊接质量及键合点保护及键合线材料等 5 个方面研究影响封装退化的工艺因素。

4.1 基板焊层厚度和均匀性

结合材料力学理论、利用有限元分析软件对 IGBT 模块进行建模，可以快速得到基板焊层相关数据和变化趋势。图 7 中，在正常工作条件下对封装内部的应力分布进行了建模并仿真计算，结果显示热机械应力最大处位于衬板下焊层的边角上，这和被动热循环试验中焊层边角处分层的现象吻合。同时，分别对芯片和基板焊层厚度进行计算分析，发现芯片焊层厚度对应力没有太大影响，而基板焊层厚度在某一值时应力达到最大，随着厚度增加应力会减小，并保持平坦趋势（图 8）。

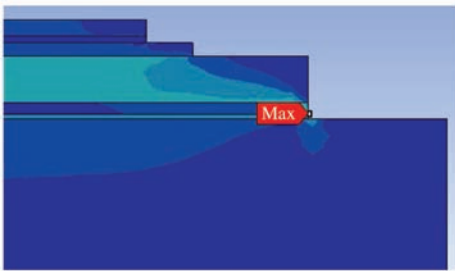


图 7 IGBT 模块热机械应力分布图
Fig.7 Thermal-mechanical stress distribution

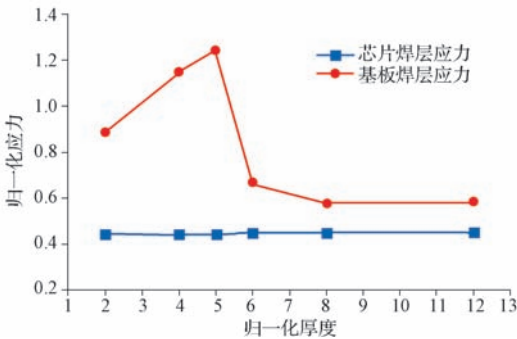


图 8 焊层厚度和热机械应力的关系（数值均已归一化）
Fig.8 Relationship between thickness of solder layer and thermal-mechanical stress (data have been unified)

另一方面，焊层若不均匀，焊层薄的地方应力相对集中，在热循环载荷下更容易发生疲劳损伤并导致焊层与基体分离。通过仿真和试验得出，基板焊层是封装结构中应力最集中的地方（未考虑母排），也是经过热循环后最

容易发生疲劳损伤进而分层的位置。通过增加焊层的厚度，并在工艺过程中控制焊层的均匀程度，能够有效地提高焊层的热循环性能。图9示出在同样的试验条件下进行热循环试验，采用焊层均匀性控制技术的模块焊层未出现退化，可见该技术提高了所生产模块的可靠性。

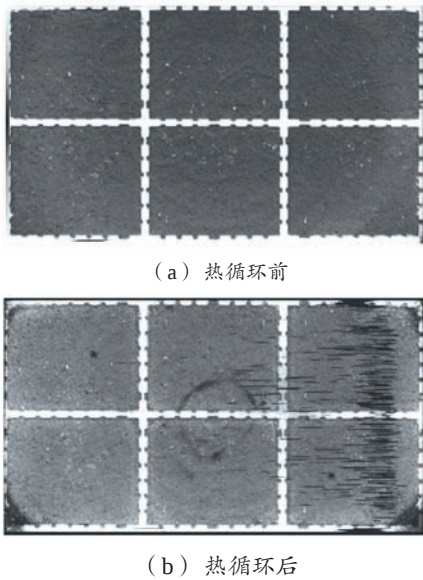


图9 热循环前、后基板焊层情况
Fig.9 Baseplate solder layer before and after thermal cycling

4.2 金属间化合物的形貌

通常情况下，在热循环过程中焊料的分层都是发生在焊接界面，而金属间化合物（IMC）的厚度和形貌对其影响较大。业界公认的SnPb焊料的IMC合格的标准为厚度小于5 μm的扇贝状薄层，过厚或形貌过差的IMC层会降低焊层的强度甚至产生柯肯达尔空洞等缺陷^[11]。图10是被动热循环试验后发现的沿IMC层扩展的裂纹。

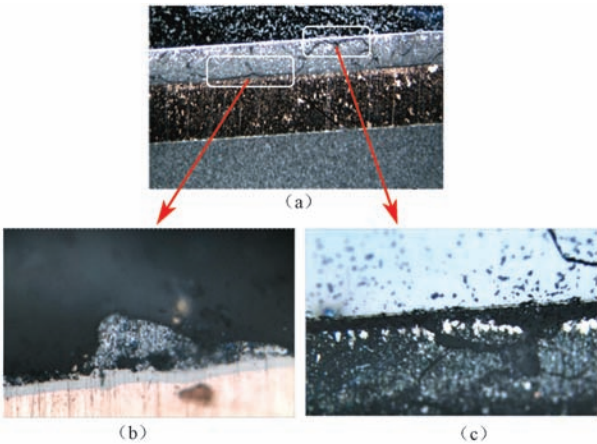


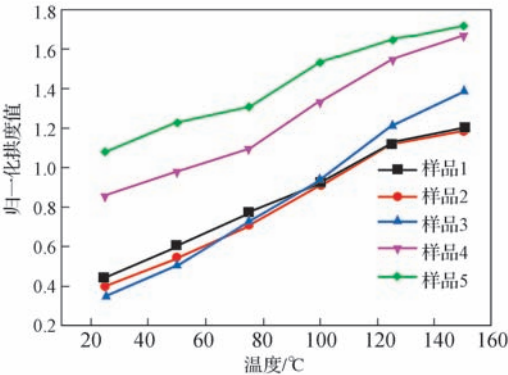
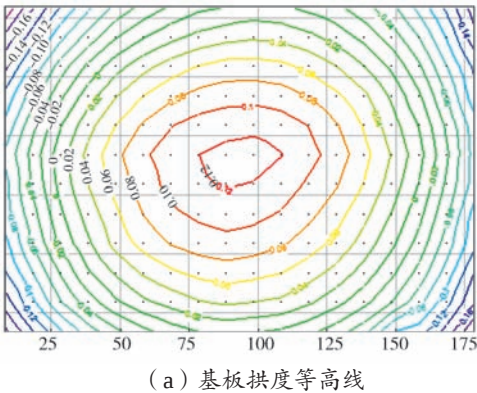
图10 焊层裂纹沿着IMC层及周边区域扩展
Fig.10 Crack spread along IMC and adjacent area

对焊层进行切片后的微观观察，发现芯片焊层经过封装工艺过程中的高温处理后，其IMC增大了一倍，形貌恶化，焊层上界面聚集了大量的Ag₃Sn颗粒。基板

焊层与母排焊点的IMC厚度甚至超过了业界通常认可的5 μm标准。IMC过厚，会使界面的强度下降，大幅削弱抗疲劳和蠕变的性能。为了控制IMC的厚度，封装过程中在保证工艺质量的前提下，需合理选择高温过程的温度和时间。采用相对优化的IMC厚度和形貌的工艺条件后，热循环次数明显得到提升。

4.3 基板拱度的变化

模块的结构也会致使某些地方的应力相对集中。通过观察温度冲击实验中模块母排焊层情况，发现接近基板中心的母排脱附情况更严重。导致这种现象的原因之一是模块的拱度。通常基板具有一定的拱度，越靠近中心位置越凸。基板的典型拱度图形以及拱度随温度的变化情况如图11所示。可以看出，其拱度随着温度升高而变大，温度从25℃上升至150℃的过程中，拱度值平均增加了1倍，这会给处于拱度中心位置的母排带来剧烈热应力的冲击。



(a) 基板拱度等高线
(b) 基板拱度随温度的变化趋势
图11 模块基板拱度随温度的变化趋势
Fig.11 Variation tendency of baseplate bow with temperature changing

基板拱度在封装工艺过程中，尤其是焊接、组装后，会发生很大的变形。表2示出2次加严标准的温度冲击结果对比。可以看出，拱度值较低的模块，其母排脱附的情况相对较轻；拱度图形越接近同心圆，脱附越少；但拱度值过低，可能会造成模块与散热器接触不良的问题，影响模块散热。通过系统性地改善工艺条件并控制基板拱度，模块的耐温度冲击的次数得到

极大的提高。

表 2 温度冲击实验结果对比
Tab.2 Comparison of test results after thermal shocking

批次	编号	归一化拱度	X 偏心率	Y 偏心率	温度冲击结果
1	1	1	53%	55%	C 母排脱附 4 处
	2	1.73	47%	50%	C 母排脱附 4 处， 其中严重脱附 2 处
	3	1.6	53%	55 %	C 母排脱附 3 处， 其中严重脱附 3 处
2	1	0.93	45%	50 %	C 母排脱附 1 处
	2	0.73	50%	50%	C 母排脱附 0 处
	3	0.93	50%	50%	C 母排脱附 3 处
	4	0.87	40%	50%	C 母排脱附 1 处

4.4 功率端子的焊接质量

功率端子是封装中的薄弱点之一，通过优化焊接工艺或采用超声键合技术（图 12），可以解决热循环试验中出现的母排脱附问题。

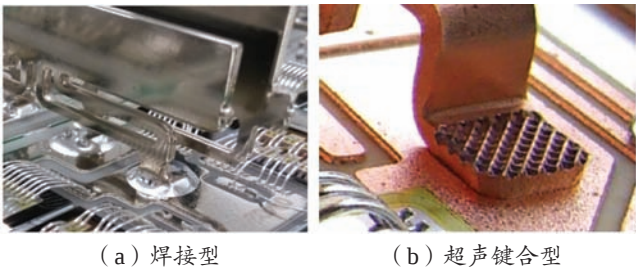


图 12 功率端子
Fig.12 Power terminal

对功率端子进行拉力试验，发现在功率端子焊点位置出现断裂现象（图 13（a）），说明存在焊接质量问题。优化母排焊脚设计并选择合适的焊料及用量，可显著增加母排的牢固程度。对采取改善措施后的模块进行热循环试验，发现母排断裂位置一般都出现在母排上（图 13（b）），而非焊点处。此外，焊接面的平整度也是影响可靠性的重要因素。

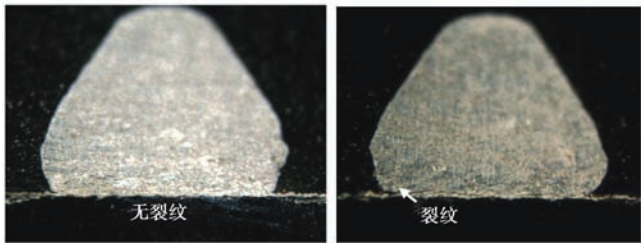
功率端子若采用超声键合的技术，其结合强度、抗冲击能力和热循环可靠性都要大幅度优于焊接型的功率端子^[12]。



(a) 改进前断裂点在焊点 (b) 改进后断裂点在母排上
图 13 改进前、后断裂点位置
Fig.13 Break points before and after optimization

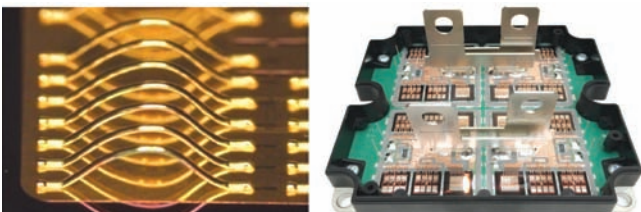
4.5 键合点保护及键合线材料

为提高功率循环能力，采用特殊胶水对键合点来进行保护。保护胶不仅可以起到绝缘作用，还可以将键合铝线牢牢固定在芯片表面，以减小铝线和芯片间由于热膨胀系数失配产生的相对位移，提高模块的功率循环能力（通常可提高 3 倍）。通过解剖模块发现，进行了保护的引线键合点确实无脱落。键合点的对比微观照片如图 14 所示。



(a) 有保护的键合点 (b) 无保护的键合点
图 14 键合点剖面形貌
Fig.14 Cross-section of bond

从图 14 可以看出，铝引线通常是在根部出现裂纹，这与材料本身特性是密切相关的。为了避免铝材本身的缺陷，采用铜线是一个选择。研究表明，采用铜线键合的模块，其功率循环能力可提升一个数量级^[13]。铜线键合的难点在于铜线键合技术和铜金属化芯片。目前 CRRC（中国中车公司）可以生产基于铜金属化的 IGBT 芯片和 FRD 芯片，同时也掌握了铜引线键合技术（图 15）。



(a) 铜线键合 (b) 使用了铜工艺的模块

图 15 使用了铜工艺的 CRRC IGBT 模块
Fig.15 IGBT module of CRRC with copper process

5 结语

IGBT 模块的应用工况复杂，因此其封装对模块失效的影响通常难以衡量。本文提出通过加严的热循环试验，剔除复杂的应用工况等其他干扰，建立封装退化和模块失效间的关联。通过温度冲击、被动热循环和功率循环试验，发现封装出现不同程度及类型的退化现象；并结合材料力学理论，得出封装结构设计和材料选型的原则。生产过程中的工艺因素，如焊层厚度和均匀性、IMC 形貌、基板拱度变化、功率端子的焊接质量以及键合点保护和键合线材料等，也会极大地影响封装的退化情况。通过采取针对性措施，可以克服已知热循环

过程中的封装退化问题，极大地提高功率模块的热循环可靠性，从而延长模块的使用寿命。下一步，我们将结合实际应用工况及关联失效模式，开展 IGBT 模块寿命研究，并将之应用到功率器件封装和系统设计中。

参考文献：

[1] 徐凝华, 吴义伯, 刘国友, 等. 混合动力 / 电动汽车用 IGBT 功率模块的最新封装技术 [J]. 大功率变流技术, 2013(1): 1-6.
[2] MANSON S S. Thermal stress and low cycle fatigue [M]. New York: McGraw-Hill, 1966.
[3] HELD M, JACOB P, NICOLETTI P. Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application [C] // Proceedings from the International Conference in Power Electronics and Drive Systems, 1997.
[4] KOVACEVIC I F, DROFENIK U. New Physical Model for Lifetime Estimation of Power Modules [C] //International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, 2010.
[5] BAYERER R, HERRMANN T. Model of Power Cycling Lifetime of IGBT Modules - Various Factors Influencing Lifetime [C] //

5th International Conference of Integrated Power Systems (CIPS). Nuremberg, 2008.
[6] WU Y B, LIU G Y, XU N H, et al. Thermal Resistance Analysis and Simulation of IGBT Module with High Power Density [C] // Applied Mechanics and Materials, 2013.
[7] ULRICH R K, BROWN W D. Advanced Electronic Packaging (2nd Edition) [M]. Hoboken: Wiley, 2006.
[8] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. J Appl Mech Trans ASME, 1951, 18(3): 293-297.
[9] SIEPE D, BAYERER R, ROTH R. The future of wire bonding is Wire bonding! [C] //CIPS, 2010.
[10] MATSUNAGA T, UEGAI Y. Thermal Fatigue Life Evaluation of Aluminum Wire Bonds [J]. Electronics System Integration Technology Conference, 2006(2): 726-731.
[11] TU King-Ning. Solder Joint Technology: Materials, Properties, and Reliability [M]. New York: Springer Science + Business Media, 2007.
[12] GUTH K, OESCHLER N, BÖER L, et al. New assembly and interconnect technologies for power modules [C] //CIPS, 2012.
[13] AVRON A. Analysis of innovative technologies and packaging trends for power modules [C] //CIPS, 2012.

（上接第 17 页）

同样，所测的最大输入交流电流有效值为 1.1 A，如果乘以变压器的匝数比 4.4，则有 $I_U=4.84$ A，该值恰好为 6 脉波输入电流 $0.819I_d$ 的 6 倍。这些数据和波形说明理论分析与实际情况完全一致。

5 结语

本文所设计的 36 脉波串接式高压变流器电路具有输出直流电压高、输入交流电流畸变小和负载电压脉动低的特点；此外，该电路具有常规桥的控制性能和数学模型，因此，控制容易，输出电压与 α 呈线性关系，适合于高压负载使用。

当逆变模式运行时，由于脉波数多，为防止换流失败，须对 β_{min} 进行严格限制，这对于大电感负载和电压型变频电路尤其重要。该电路唯一的缺点是变压器的二次侧绕组太多，但这一问题可通过采用多台变压器来解决。

参考文献：

[1] CHOL S, LEE B S, ENJETI P N. New 24-pulse Diode Rectifier

Systems for Utility Interface of High-Power AC Motor Drives [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1997, 33(2): 531-541.
[2] RENDUSARA D A, von JOUANNE A, et al. Design Considerations for 12-Pulse Diode Rectifier Systems Operating under Voltage Unbalance and Pre-Existing Voltage Distortion with Some Corrective Measures [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1996, 32(6): 1293-1303.
[3] ZARGARI N R, XIAO Y, WU B. A Multilevel Thyristor Rectifier with Improved Power Factor [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1997, 33(5): 1208-1213.
[4] CHIVITE-ZABALZA F J, FORSYTH A J, TRAINER D R. A Simple, Passive 24-Pulse AC-DC Converter with Inherent Load Balancing [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2006, 21(2): 430-439.
[5] STEFANOVIC V R. Power Factor Improvement with a Modified Phase-Controlled Converter [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1979, 15(2): 193-201.
[6] CALDEIRA P P A, WATANABE E H. Compensation of Power Factor in Rectifier Systems Utilized in Oil Drilling Rigs [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 1988, 24(2): 301-307.
[7] 方昌始. 晶闸管 18 脉波变流器分析 [J]. 电力电子技术, 2007, 41(8): 77-79.