

汽车IGBT功率模块腐蚀绝缘故障分析

汪春平, 赵晓宁, 程素青, 贾兰, 冯爱民

吉利汽车集团有限公司 浙江宁波 315336

摘要: 对于车规级功率模块, 设计使用时间往往高达15年以上。因此对可靠性设计和封装工艺控制提出更高的要求, 这也大大增加了IGBT模块封装技术的难度。封装过程中的每一个环节都需要精准设计和严格控制, 从而保证PCM (控制器模块) 功率模块在实际工况条件下的可靠性、耐久性。通过对某车辆PCM功率模块腐蚀失效故障的原因分析, 经过一系列验证分析, 讨论了引起PCM腐蚀失效的内外部因素, 其中包括外部环境、单片PM结构、IGBT灌封工艺、散热器外壳制造工艺等因素的影响。

关键词: PCM; IGBT功率模块; 工业CT检测; 超声波焊; 热固性树脂; 铝合金点腐蚀

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.08.012

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) —— 绝缘栅双极型晶体管是PCM (控制器模块) 的核心部件, 具有驱动功率小而饱和压降低的优点, 是一种高效、可靠的功率电子开关。因其节能、散热稳定等特点, 广泛应用于高电压、大电流的电力电子系统中。

新能源汽车动力总成控制模块中, IGBT起着控制功率输出的作用, 但由于车载工况功率高、温度变化快速等较为苛刻的工况, IGBT经常处于“极热”或“极冷”工况 (车规级设计温度区间一般在 $-40\sim 125^{\circ}\text{C}$)。一旦出现故障会导致车辆用电设备不能得到供电, 严重时车辆无法启动。

目前, 车规级功率模块采取的主流散热方式为液冷散热, 铝针式散热基板, 散热性能好, 造价低, 广为应用。再通过特定的技术将IGBT功率器件进行封

装, 保证其在各种工况条件下有效发挥功用。

故障描述

某款混动车在道路行驶试验9365km时故障灯点亮, 根据故障码提示对车辆PCM输出进行绝缘检测, 阻值异常 (测试值为0)。进一步拆解检查发现内部单片PM表面有粉色晶状物, 同时表面铝质散热基板有腐蚀现象 (见图1), 单片PM绝缘测试, 其中一件绝缘失效。

分析验证

1. 腐蚀物分析

经过红外分析, 粉色晶体主成分为冷却液+氧化铝

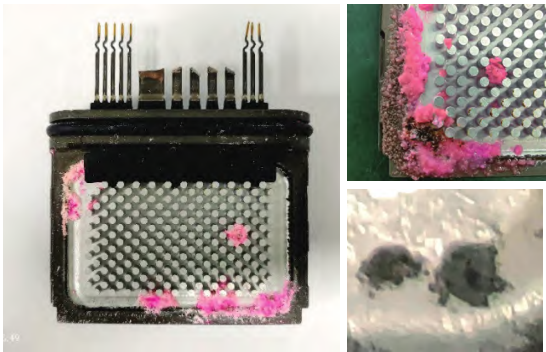


图1 失效的功率模块

(见图2)，能谱分析结果显示其中F、K元素含量异常(见表1)。

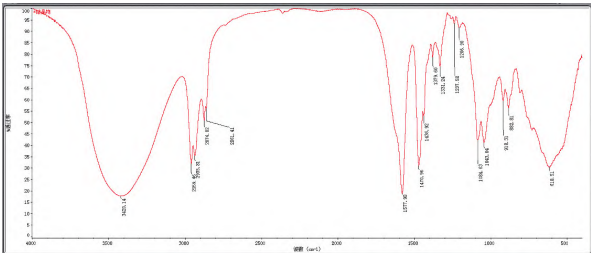


图2 粉色结晶物红外能谱图

表1 粉色结晶物能谱结果(质量分数)(%)

元素	位置 1		位置2		钎焊剂残渣	
	wt	At	wt	At	wt	At
O	42.13	45.83	39.71	42.07	/	/
C	18.69	27.09	23.5	33.17	18.69	42.13
Al	24.35	15.70	23.00	14.45	23.5	39.71
F	9.69	8.88	8.93	7.96	27.09	45.83
K	4.26	1.89	3.86	1.67	33.17	42.07
Na	0.64	0.49	0.78	0.58	/	/
Cl	0.24	0.12	0.21	0.10	/	/
总量	100	100	100	100	100	100

2.腐蚀源分析验证

对冷却液分析，故障车中冷却液F、K元素异常，冷却原液不含F、K离子。对整个冷却管路进行排查，前端中温散热器整体钎焊工序所使用钎焊剂为氟铝酸钾，主板钎焊后，底部会有钎剂残留物(残渣能谱检测结果见表1)。

3.腐蚀验证

设计一组浸泡试验，验证冷却液中钎焊剂残渣对散热铝质的腐蚀性。

1) 验证对象：A1050带材(散热片材质为A1050，制作工艺为压铸)。

2) 验证方法：从同一片A1050铝带上截取8块样片(15mm×30mm)，浸泡于不同种类测试液中，在两种温度下浸泡一定时间，取出、冲洗，目视观察，根据样片变色情况判定氧化程度并排序。

经高温后的钎焊剂残渣在冷却液中溶解度会提高，溶入冷却液中的F、K⁺离子对铝质散热片有腐蚀作用。

温度对腐蚀速度有很大的影响，温度越高，腐蚀性越大(见表2和图3)。

表2 腐蚀效果

温度	A1050带材腐蚀程度排序			
	1#溶液	2#溶液	3#溶液	4#溶液
60℃	A	A	B	A
88℃	C	E	F	D

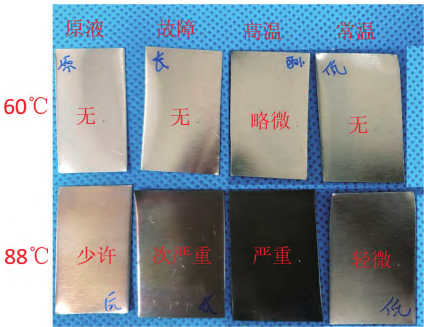


图3 腐蚀效果

注：1) A→B→C→D→E→F氧化程度依次递增。
2) 浸泡液：1#溶液-冷却液原液，2#溶液-故障车内冷却液，3#溶液-冷却液原液+钎焊剂残渣，4#溶液-冷却液原液+钎焊剂原料。
3) 浸泡时间24h。

4.功率模块IGBT各部分耐腐蚀性验证

将IGBT功率模块切块浸泡于1:1HCl溶液中，观察各组成部分腐蚀情况，并对各材料间的绝缘性进行测试。

结果表明，浸泡后绝缘层、Cu层、树脂区域无明显变化，铝壳腐蚀溶解(见图4)。

1:1HCl 溶液浸泡试验

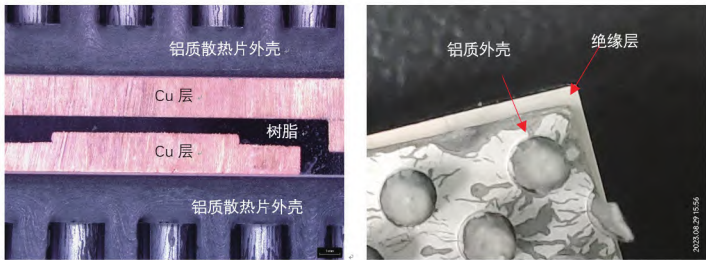


图4 1:1HCl浸泡结果

绝缘性能测试结果表明绝缘层保持绝缘功能。

5.故障IGBT功率模块缺陷分析

(1) CT分析 对故障IGBT进行CT检查，CT结果显示芯部充填的树脂有裂纹和空腔（见图5），将CT锁定故障点剖开，可观察到故障位置已被严重腐蚀。

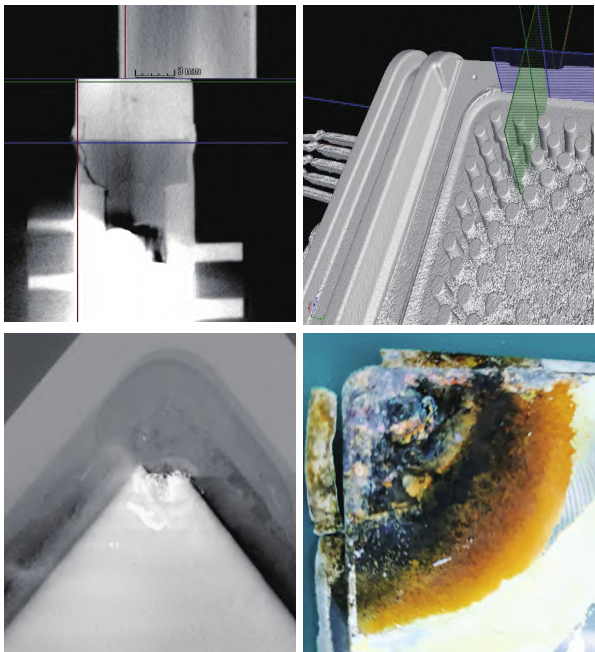


图5 故障件故障位置

(2) IGBT结构分析 包括灌封分析和散热基板结构分析。

1) 灌封工艺分析。灌胶固化采用了二次灌封工艺，两次灌封采用的都是热固性树脂，如图6所示。

热固性环氧树脂，具有强度高、绝缘性好、耐热、抗腐蚀等优点。其缺点是性脆、力学性能较差，且固化反应不可逆。封装后树脂内收缩应力大，加之IGBT本身工况条件就是高低温不断变换，尤其在两次

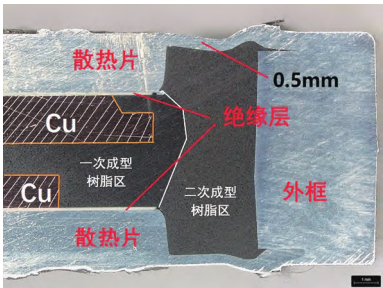


图6 IGBT模块剖面结构

灌封材料之间极易出现开裂，灌封过程真空度控制不好也会造成树脂内部形成空洞等情况，此弊端在故障IGBT模块上已得到证实。

先以有机硅凝胶灌封，硅凝胶内应力低、柔软，粘附性强，能很好地附着在IGBT模组上，达到良好的防水防潮效果，同时也有一定的抗冲击性。之后再以环氧胶二次灌封，经固化后在硅凝胶上层形成一层密度大质地坚硬的保护层，起保护和强化模块整体性的作用。这种灌封工艺目前已得到广泛推广运用。

2) 散热基板结构分析。散热基板的成型工艺为压铸，材料采用了A1050。A1050是一种纯铝材料，具有良好的耐蚀性和焊接性能。铝压铸工艺也是一种高效而广泛应用的铸造工艺，但由于高速填充，快速冷却，型腔中气体可能来不及排出，压铸件内常伴有一些细小气孔。

散热基板表面和近表面的微小孔隙在含F溶液中开始是以亚稳点蚀的方式形成最初的腐蚀点，随着腐蚀程度加深，腐蚀坑慢慢深入扩大，逐步向稳定点蚀转化，且腐蚀速度也加快，散热基板与外框采用超声波焊接链接，焊接工艺需要，周边设计厚度较薄（0.5mm）。点腐蚀作用下极易被腐蚀而穿透，冷却液顺裂纹渗入，造成IGBT绝缘失效。

结语

本次IGBT绝缘失效的主要原因如下：

(1) 外因 冷却管路中清洁度问题，管路中残留的助焊剂残渣，为铝合金点腐蚀提供了腐蚀环境，是造成本次IGBT腐蚀失效的主要外部原因。

(2) 内因 IGBT的灌封采用的二次热固性树脂灌封方式不适用于液态的工作环境，灌封内部一旦出现裂纹、孔洞等缺陷，若再遇散热基板受损，液体便会渗入内部，造成IGBT绝缘短路，这是本次IGBT绝缘失效的重要内部原因。

内外因相互作用，促成了本次失效故障。后续通过控制管道清洁度、改进IGBT封装工艺有效杜绝了这类绝缘失效问题。

参考文献：

[1] 徐丽新，胡津，耿林，等.铝的点蚀行为[J].宇航材料工艺，2002（2）：21-24.
[2] 冯新德. 高分子辞典[M].北京：中国石化出版社，1998：542.
[3] 曾亮，何勇，刘亮，等.有机硅凝胶及其在IGBT功率模块封装中的应用[J].绝缘材料，2023，56（5）：26-31.**AUTO1950**

(上接第50页)

行返修及人工确认，再通过工位5将高精度台车返回生产线。需要注意的是离开生产线的高精度定位台车再次返回生产线时，需要再次输送至尺寸在线检测工位2，确保台车尺寸精度符合要求。

以上三个工艺布局方案适用于使用机器人搬运及高速滚床+高精度定位台车相结合的车身地板生产线，三个布局方案各有特点。图2的单一车型生产线工艺方案布局简单，整个区域工作效率高，生产线输出能力强。图3的多车型生产线方案，适用于空间区域窄长的生产现场，通过双缓存单元，双提升机输送方案，可以快速完成多车型柔性化生产，布局合理，不足的是需要将高精度台车的检测工位放置到其他工艺区域。图4工艺方案是对生产线线尾区域的进一步优化，适用于一个提升机进行生产线内及线间输送的情况，该方案通过增加高速滚床和横移机建立环形输送路线，为高精度台车的在线检测工位设置和导入导出功能提供了便利条件。

结语

在本篇论文中，深入探讨了白车身地板线线尾区域工艺方案内容，通过对比单一车型或多车型生产线的工艺方案，提出工艺方案适用范围，总结了各个方案的设计思路和改进措施。未来，我们将继续探索更多的技术方案创新思路，进一步优化生产工艺，推动行业的发展进步。

参考文献：

[1] 张晓龙.焊装随行夹具输送线浅析[J].汽车工艺与材料，2021（10）：68-72.
[2] 陈志毅.浅析汽车焊装线各类输送设备及应用方案[J].汽车工艺与材料，2023（9）：61-66.**AUTO1950**