

IGBT 不同导热材料导热性能研究

王 坚¹ 张迪德² 古 强²

(1 中车时代电动汽车股份有限公司湘江新区分公司; 2 中车时代电动汽车股份有限公司)

摘要:分析了 IGBT 导热材料特性及热传导原理,模拟了实际工况下 IGBT 的导热情况,重点论述了 IGBT 导热材料在实际应用中的效果及影响。

关键词:IGBT 导热硅脂 相变导热材料 结温

Study on Thermal conductivity of different Thermal conduction Materials in IGBT

Abstract:It analyzes the characteristics and heat transfer principle of IGBT thermal conductive material, and simulates the heat conduction of IGBT under actual working conditions, focuses on the effect and influence of IGBT thermal conductive materials in practical application.

Keywords:IGBT, heat-conductive silicone grease, phase change heat conduction material, junction temperature.

0 引言

随着现代电力电子技术的进步,电气产品的发展趋向于微型化和密集化,电子器件的功率及散热要求也随之增加。电子器件工作时散发的热量如不能及时导出,易造成局部高温,轻则影响电子器件使用寿命,重则影响器件的工作性能。目前 IGBT 功率器件上广泛使用以导热硅脂为代表的导热材料,其目的在于填充安装面与器件散热面之间的间隙,避免高温对器件的影响^[1]。导热材料的导热性能主要取决于导热材料本身的热导率以及接触热阻,但在实际使用中由于 IGBT 实际涂覆贴合程度不同,其导热效果也有所不同,本文通过设计实验,模拟实际工况下的导热情况,对比不同导热材料之间的性能差异。

1 IGBT 导热材料特性及热传导原理

1.1 IGBT 导热材料特性

目前 IGBT 散热使用的导热材料主要是导热硅脂,近几年相变导热材料在 IGBT 的导热上才有一定的应用空间。导热硅脂在使用 1-2 年后会出现性能下

降的问题;而相变导热材料除成本较高外,其耐久性、导热性均较好,具有较大的市场潜力。

1.1.1 导热硅脂

导热硅脂俗称散热膏,是以有机硅酮为主要原料,添加耐热、导热性能优异的材料而制成的导热型有机硅脂状复合物^[2],具有低油离度、耐高低温、耐水、臭氧、耐气候老化等特性,可在 -50 ℃至 +230 ℃的温度下保持使用时的脂膏状态。而导热硅脂的液体部分是由硅胶和硅油组成,市场上大部分产品是用二甲基硅油为原料,而二甲基硅油的沸点在 140-180 ℃之间,易产生挥发,在长时间的使用后会产生硅油分离,影响导热性能,同时线路板上会留有油脂痕迹。

1.1.2 相变导热材料

相变导热材料也称相变导热膏,是利用聚合物技术以高性能的有机高分子材料为主体,以高导热性材料、相变填充料等材料为辅精制而成的绝缘材料,适用于散热器与各种产生高热量功率元器件间的热量传递。

相变导热材料的关键性能是其相变特性,在室温下材料为固体,并且便于处理,可以将其作为干垫清洁而坚固地用于散热片或器件的表面。当达到器件工

作温度时相变材料变软,在压紧力的作用下材料就像热滑脂一样与两个配合表面整合、填充间隙。这种完全填充界面气隙和器件与散热片间空隙的能力,可以使相变材料提前涂覆,便于运输和安装,并且获得类似于热滑脂的性能。

此外,相变导热材料另一大优势在于其稳定性与耐久性,能够在长时间热循环和 HAST 试验后依然保持杰出的热稳定特性,并且其热阻表现为降低趋势。因此相比于导热硅脂,相变导热材料有助于提升 IGBT 这类电子器件装配的整体耐久性。

1.2 IGBT 热传导原理

图 1 为 IGBT 热传导示意图,IGBT 外壳通过对流和辐射的形式与环境进行的少量热量交换可忽略不计。由图可见,芯片内损耗产生的热能通过芯片传到外壳底座,再由外壳将少量的热量直接传到环境中去(以对流和辐射的形式),而大部分热量通过底座经绝缘垫片直接传到散热器,最后由散热器传入空气中。

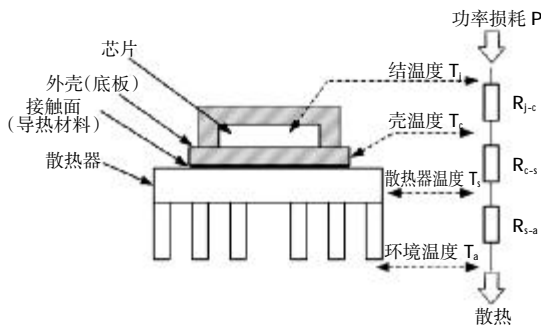


图 1 IGBT 热传导示意图

由图还可以看出,芯片至环境的总热阻由三部分组成,即芯片至管壳的结壳热阻 R_{j-c} 、管壳至散热器的接触热阻 R_{c-s} 、散热器至环境的散热器热阻 R_{s-a} ,总热阻由式(1)计算。

$$R_{j-a} = R_{j-c} + R_{c-s} + R_{s-a} \quad (1)$$

由此可见,结壳热阻 R_{j-c} 和散热器热阻 R_{s-a} 是由 IGBT 自身结构以及功率器件整体散热方案决定的,导热材料的作用在于减小接触热阻 R_{c-s} ,进而降低整体散热的总热阻。

1.3 导热材料导热原理

导热材料在接触面间热流示意如图 2 所示,该图描述了在 IGBT 散热面与散热器表面存在加工不平整度以及粗糙度情况下微观接触的热流情况。

在 IGBT 的热传导中,主要热量依靠 IGBT 散热面与散热器表面的金属接触来传递,常用铜或铝作为基底材料,其热导率在 $200-300 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 之间。由于接触面间的不平整度使间隙中存有一定空气(图 2 a),而空气的热导率仅为 $0.025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,因此严重阻碍了热传导;若将导热材料先涂覆至 IGBT 散热面表面,在装配及螺钉紧固力的作用下,挤出接触面间的空气并将间隙填充(图 2b),导热材料的热导率一般在 $0.8-4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 之间,其热导率是空气的 32-160 倍,虽然主要的热传导仍是由金属之间的热传导完成,但能够较好地改善接触面间的热流传递情况,减小热阻,提高散热效率。

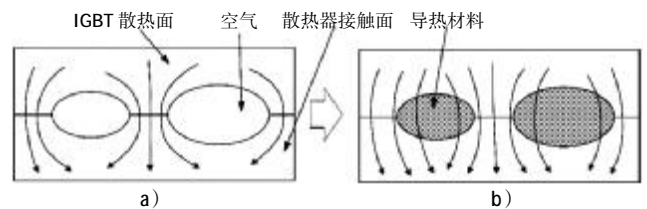


图 2 接触面间热流示意图

2 导热性能实验方案

目前对硅脂类材料导热性能测试主要内容有材料的热导率和热阻,其试验方法主要有热流法和激光法,每种导热材料在出厂时其相关参数已经经过厂家测试,并配有相应手册进行参数说明。由于导热材料实际应用环境的不同,其发挥的性能也有所差别,因此有必要对实际应用工况进行实验,验证并对比各导热材料的实际导热性能。

2.1 实验材料

为对比导热硅脂之间的导热性能,并研究导热硅脂和相变导热材料的性能差异,在此选取 5 种实验材料进行试验,实验材料及性能见表 1,IGBT 以英飞凌 FF600R12ME4A_B11 作为本次试验器件发热源。

表 1 实验材料及性能

序号	类别	编号	热导率(W/m·K)	粘度(Pa·S)
1	导热硅脂	1	1.3	58
2		2	2.7	77
3		3	2.0	100
4	相变导热材料	1	4.4	60
5		2	3.4	82

2.2 实验方案

为模拟实际工况下 IGBT 的发热散热情况,本实验通过直流电源为 IGBT 提供恒定电流,使 IGBT 在开通状态下发热,并将 IGBT 涂覆导热材料安装至散热片上进行风冷散热,以进行恒定功率的热量传导及耗散。通过电流调节使 IGBT 产生不同的功耗,读取 IGBT 的管压降,计算当前发热功率。达到温度平衡时,通过热成像仪采集热图并通过相应软件对热图进行分析处理,以获得一定功率热传导情况下的 IGBT 芯片结温,进而得到不同发热功率下的温度曲线,找出导热材料的导热性能差异。试验原理框图如图 3 所示。

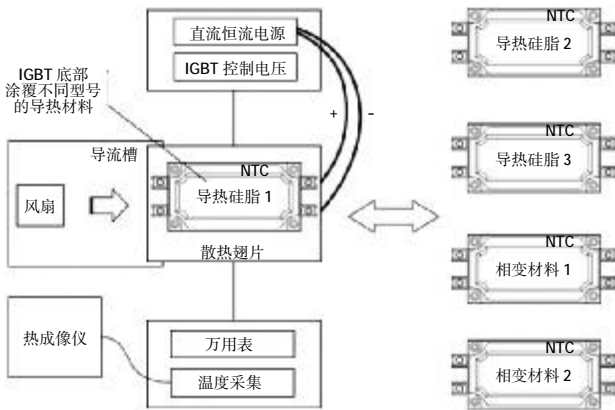


图 3 实验原理框图

2.3 实验步骤

- a. 将试验用的 IGBT 内部凝胶清除并涂黑。
- b. 打开风机,固定风速,记录室温。
- c. 用酒精擦洗 IGBT 模块散热面及散热板表面,用钢网在 IGBT 散热面上均匀涂覆导热材料^[3-4],导热材料涂覆如图 4 所示。
- d. 用 IGBT 螺钉、1.5 Nm 力矩将涂覆后的 IGBT 安装到散热片上,间隔 5 min 后再以 3.5 Nm 的力矩紧固 IGBT 螺钉^[5]。
- e. 通过 +15 V 栅极电压使 IGBT 导通,并打开 IGBT 直流电源开关,设定电源输出电流的大小。
- f. 待达到功率平衡温度后用热成像仪采集 IGBT 热图,并通过热图处理软件获取芯片结温,芯片结温获取如图 5 所示。
- g. 每升高 50 A 直流电流测量记录不同功率

下的各组数据,直到 IGBT 结温接近 125 °C,停止升高电流。

- h. 关闭电源,卸下 IGBT,更换待实验的导热材料,从步骤 c 开始重复实验过程,直至各材料完成实验。

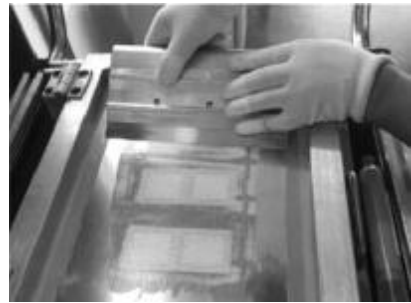


图 4 导热材料涂覆



图 5 芯片结温获取

3 导热材料性能对比

3.1 热导率影响

对实验记录的 IGBT 在不同发热功率情况下的结温数据点进行绘制并拟合成曲线,各材料结温曲线如图 6 所示。

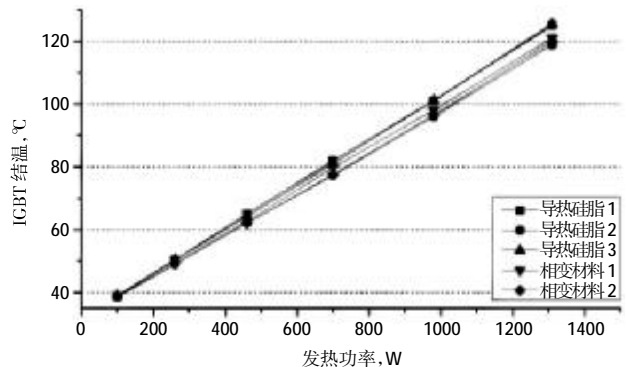


图 6 各材料结温曲线

由图 6 可以看出, 导热材料的导热性能由高到低, 即芯片结温从低到高依次是导热硅脂 2 号, 相变材料 2 号, 相变材料 1 号, 导热硅脂 1 号, 导热硅脂 3 号。将各导热材料与导热硅脂 1 号进行不同发热功率下的温度对比, 结点温差对比如图 7 所示。

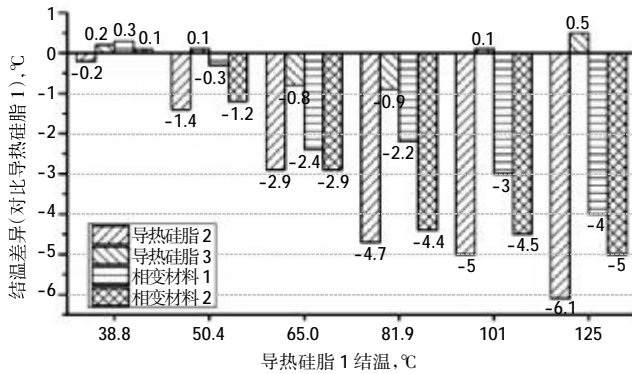
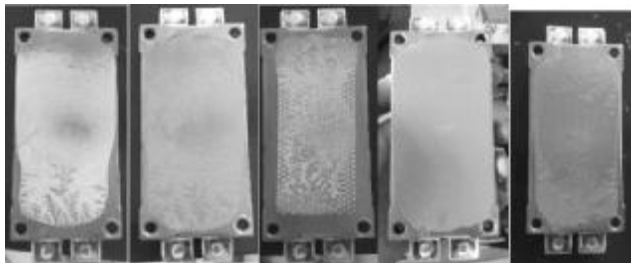


图 7 结点温差对比

3.2 涂覆效果影响

由于此次试验使用的三种硅脂、两种相变导热材料的粘度是不同的, 所以其涂覆后拆下的效果也有所区别, 涂覆效果如图 8 所示。



(a)导热硅脂 1 (b)导热硅脂 2 (c)导热硅脂 3 (d)相变材料 1 (e)相变材料 2

图 8 涂覆效果

由图 8 可见, 由于导热硅脂 3 号的粘度较高, 不仅加大了丝网印刷的难度, 而且在相同的压力下硅脂的扩散和覆盖效果较差, 大部分硅脂仍处于丝网涂覆的网点状态, 无法较好地填充接触面空隙, 降低了其散热效果。而两款相变导热材料在黏性状态下用钢网工装直接湿涂, 均能达到较好的贴合效果。

3.3 试验结果

由导热硅脂的横向对比可见, 在实际工况下散热效果与导热材料的热导率满足正比关系, 热导率较高的导热硅脂 2 号相比于其他两款导热硅脂结温下降率明显, 最大达到了 5.0% 的温差。

两款相变导热材料之间的导热性能差异也与其导热率的差异成正比。此外在湿涂的条件下, 相变导热材料的导热效果仍优于导热硅脂 1 号的性能。

导热硅脂 2 号的应用效果超出了预期目标, 甚至比两款相变导热材料的导热效果还好, 这是由于硅脂在丝网湿涂工艺中的适用性更强。对于相变导热材料而言, 需要一段时间的预热和足够的压紧力使其软化并填充空隙, 并且相变材料的优势在于随着循环次数和工作时间的增加, 其热阻呈降低趋势。

导热硅脂 3 号由于其粘度较高, 不利于硅脂的扩散和覆盖, 因此尽管其材料热导率高于导热硅脂 1 号, 但由于接触面间填充效果不佳, 实际应用效果并未达到预期要求。

4 结束语

通过以上的分析可以看出, 对于 IGBT 的导热材料而言, 其实际应用的导热性能受涂覆效果的影响较大, 合适的粘度才能较好地发挥导热材料的导热性能; 导热材料的导热性能也与其材料本身热导率成正比, 选取合适粘度的高热导率材料更有利于 IGBT 散热。

相变导热材料在实际工况的实验中散热效果较佳, 用丝网的湿涂印刷工艺进行涂覆能较好地发挥其性能, 考虑其耐久性较好的特点, 应在 IGBT 的散热方面扩大应用。

参考文献

- [1] 罗思彬, 熊婷, 雷震等. 导热硅脂的研究进展[J]. 有机硅材料, 2013, 27(5): 383-386.
- [2] 公文礼, 张鹏, 王崇阳. 大功率 LED 灯具中导热材料的分析和应用[J]. 灯与照明, 2017, 41(1): 49-55.
- [3] 黄庆, 李强辉. IGBT 导热硅脂涂覆工艺研究[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(2): 110-112.
- [4] Infineon corporation. AN2006-02 Application of screen print templates[Z]. Infineon corporation, 2005. Infineon corporation. AN2006_05MountingInstructionsEconoDUAL_3 [Z]. Infineon corporation, 2005.

收稿日期: 2019-06-20