

# 变频空调功率器件散热问题及氧化铝陶瓷解决方案

傅功锦, 刘俊锋

四川长虹空调有限公司, 四川 绵阳

收稿日期: 2026年9月3日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年10月20日

## 摘要

变频空调室外机驱动控制器正朝着高频化、集成小型化及大功率化方向发展。同时, 极端高温天气的频发进一步加剧了高功率、高发热器件的散热压力。散热问题已成为影响变频空调控制器可靠性及寿命的关键研究课题。特别是在大功率高频功率因数校正(PFC)电路中, 传统的聚酰亚胺(PI)薄膜虽具有良好的绝缘导热能力, 但已无法满足铁封绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的散热需求。本文对比分析了多种绝缘导热材料的特性, 并通过实验验证: 采用氧化铝陶瓷片可有效解决变频空调控制器中铁封IGBT的发热问题, 显著提升功率器件的可靠性, 延长产品使用寿命。

## 关键词

变频空调, IGBT, 散热, 氧化铝陶瓷

# Heat Dissipation Issues of Power Devices in Inverter Air Conditioners and Alumina Ceramic Solutions

Gongjin Fu, Junfeng Liu

Sichuan Chang Hong Air Conditioning Co., Ltd., Mianyang Sichuan

Received: September 3, 2026; accepted: September 21, 2026; published: October 20, 2026

## Abstract

The drive controller of outdoor units for inverter air conditioners is evolving towards high-frequency, integrated miniaturization, and high-power solutions. Meanwhile, the frequent occurrence of extreme

文章引用: 傅功锦, 刘俊锋. 变频空调功率器件散热问题及氧化铝陶瓷解决方案[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(5): 243-251. DOI: 10.12677/aepe.2026.145025

high-temperature weather further exacerbates the heat dissipation challenges for high-power, high-heat-generating components. Thermal management has become a critical research topic affecting the reliability and lifespan of inverter air conditioner controllers. Particularly in high-power, high-frequency power factor correction (PFC) circuits, traditional polyimide (PI) films—although possessing good electrical insulation and thermal conductivity—can no longer meet the heat dissipation requirements of iron-case insulated gate bipolar transistors (IGBTs). This paper compares the characteristics of various insulating and thermally conductive materials, and experimentally verifies that using aluminum oxide ceramic sheets can effectively resolve the overheating issue of iron-case IGBTs in inverter air conditioner controllers, significantly enhancing the reliability of power devices and extending product service life.

## Keywords

Inverter Air Conditioner, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), Heat Dissipation, Aluminum Oxide Ceramic

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

半导体功率器件的性能与晶圆结温密切相关。温度是影响所有半导体器件极为敏感的参数,因为半导体物理常数及器件内部参数(如载流子迁移率、本征载流子浓度、过剩载流子寿命、跨导等)均会随温度变化而发生改变[1]。研究统计表明,半导体结温每升高 10℃,其寿命通常缩短约 50%,故障率亦随之倍增。这一经验规律被称为“10℃法则”,其理论依据为描述化学反应速率与温度关系的阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程。

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)与快恢复二极管(FRD)是变频空调控制器功率因数校正(PFC)电路中的关键器件,承担着压缩机的大功率需求。近年来,变频空调室外机驱动控制器正朝着高频化、集成小型化方向快速发展。这一趋势在提升系统性能的同时,也给 IGBT 和 FRD 带来了更为严峻的散热挑战。尤其是在极端高温天气频发的背景下,随着能量密度的提高,功率器件的热流密度显著增加,散热问题已成为制约变频空调控制器可靠性及使用寿命的关键因素之一。

目前,主要受功率器件的开关特性、高温散热问题等因素限制,变频空调高频 PFC 电路功率器件组合通常为铁封 IGBT 搭配铁封碳化硅二极管,IGBT 开关频率范围大致为 55~70 kHz。在成本约束较宽松的应用中,也可选用性能更优的内绝缘 IGBT 与内绝缘碳化硅二极管组合。采用碳化硅二极管能显著优化功率器件的发热温升,但铁封 IGBT 和铁封碳化硅二极管仍需借助高性能绝缘导热垫片来解决散热与绝缘问题。传统工程中广泛应用的聚酰亚胺(PI)薄膜,凭借其良好的绝缘性能和一定的导热能力,常用于此类器件的热管理。然而,随着开关频率提高及器件功率密度持续攀升,PI 薄膜的导热能力已难以满足铁封器件的散热需求,导致器件结温升高,进而威胁系统的长期稳定运行。

因此,寻求具有更高导热性能的绝缘替代材料成为变频空调控制器亟待解决的问题。本文对比分析了多种绝缘导热材料的关键特性,并通过实验重点验证了氧化铝陶瓷片在实际应用中的散热效果。

## 2. 玻璃纤维布、聚酰亚胺(PI)薄膜导热垫片

热是材料内部的分子、原子和电子等微观粒子移动、转动和振动的能量,材料的导热机理与其内部

的微观粒子的相互碰撞和传递有着密切联系。热传导的载体有分子、电子、声子(晶格振动的能量量子)以及光子。热量由材料的高温部分向低温部分传递,而在本质上可认为是振幅较大的分子和原子带动振幅较小的分子和原子振动[2]。工程上采用绝缘导热垫片解决铁封 IGBT 和铁封碳化硅二极管绝缘和导热问题,就是重点利用绝缘导热垫片的绝缘性能和热传导性能。这也是选择绝缘导热垫片的重要指标。

在导热绝缘垫片的世界里,玻璃纤维布和聚酰亚胺(PI)薄膜是两种性质不同的“骨架”材料,填充氧化铝、氮化硼等导热粉体,服务于不同的性能需求。两者都有极佳的电绝缘性能。玻璃纤维布是编织的纤维布,表面粗糙,可以提高附着力,机械强度高、抗撕裂,但相对缺乏弹性。PI 膜则是平整光滑的高分子薄膜,同样强韧且抗刺穿,但更容易贴合平面。PI 膜导热垫片的热导性能通常优于玻璃纤维布导热垫片。表 1 为变频空调功率器件常用的玻璃纤维布导热绝缘垫片和 PI 膜绝缘导热垫片性能参数对比。

**Table 1.** Performance parameters of fiberglass cloth and PI film thermally conductive insulating gaskets

**表 1.** 玻璃纤维布导热绝缘垫片和 PI 膜绝缘导热垫片性能参数

| 性能参数 \ 材料 | 玻璃纤维布                               | PI 膜                                |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 耐压        | 5.5 kV                              | 6 kV                                |
| 厚度        | 0.229 mm                            | 0.152 mm                            |
| 热阻        | 0.95 °C·in <sup>2</sup> /W @ 10 psi | 0.86 °C·in <sup>2</sup> /W @ 10 psi |

由表 1 可知,PI 膜导热垫片的热阻优于玻璃纤维布导热垫片。为验证两种绝缘导热材料对变频空调控制器中铁封 IGBT 散热性能的差异,在同一台空调整机上针对 IGBT 开展温升对比测试。测试通过焓差室设定不同室外工况,在 IGBT 开关频率固定为 40 kHz 的前提下锁定压缩机运行频率,确保整机在相同工况和电压下的工作电流一致,进而对比两种导热垫片的导热性能。实验过程中,利用焓差实验室温度采集系统实时采集温度,将热电偶感温头直接黏贴于 IGBT 正面塑封壳体以获取其壳温,IGBT 热电偶布置及整机实验环境如图 1 所示。

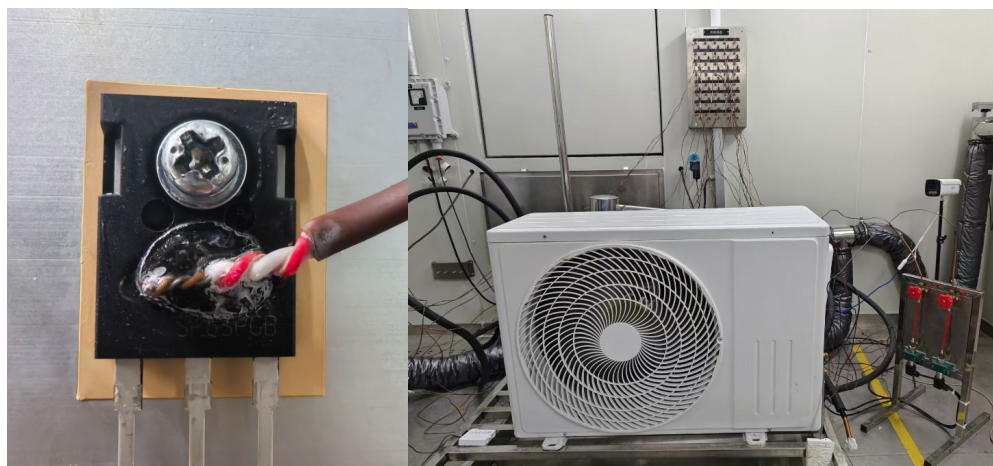


**Figure 1.** IGBT thermocouple layout and experimental environment

**图 1.** IGBT 热电偶布置及实验环境

IGBT 壳体温度测试结果如表 2 所示。8 组工况下,所选 PI 膜对应 IGBT 壳温均低于玻璃纤维布。其中最大制冷 3 43 °C/176 V 工况:玻璃纤维布 106.4 °C,PI 膜 97.8 °C,温差达 8.6 °C。

**Table 2.** IGBT temperatures corresponding to two types of insulating thermally conductive gaskets: fiberglass cloth and PI film

**表 2.** 玻璃纤维布导热绝缘垫片和 PI 膜绝缘导热垫片对应 IGBT 壳体温度

| 室外工况       | 输入电压(V) | 输入电流(A) | 玻璃纤维布        | PI 膜  |
|------------|---------|---------|--------------|-------|
|            |         |         | IGBT 壳体温度(℃) |       |
| 制冷过负荷 50℃  | 165     | 7.2     | 107.2        | 100.4 |
| 制冷过负荷 50℃  | 264     | 5.5     | 96.6         | 89.8  |
| 最大制冷 1 43℃ | 176     | 7.1     | 100.6        | 92.9  |
| 最大制冷 1 43℃ | 253     | 6.5     | 100.5        | 93.4  |
| 最大制冷 2 43℃ | 176     | 7.3     | 100.4        | 92.3  |
| 最大制冷 2 43℃ | 253     | 6.5     | 97.8         | 90.5  |
| 最大制冷 3 43℃ | 176     | 7.4     | 106.4        | 97.8  |
| 最大制冷 3 43℃ | 253     | 5.1     | 91.5         | 85.8  |

在实际产品应用中,为了提高生产加工工艺性,通常采用带有背胶的 PI 膜,通过背胶可以直接将 PI 膜黏贴在铁封 IGBT 散热面或对应的散热器位置上。相比于 PI 膜,背胶的热阻更大,会降低 PI 膜的导热性能,并且不同背胶的导热性能也存在差异,这往往也是选型设计过程中容易被忽视的影响因素。表 3 为同一种 PI 膜无背胶和有背胶的特性参数,在表中相同测试条件下带背胶 PI 膜的热阻增加了 1.6℃/W。

**Table 3.** Comparison of thermal conductivity performance parameters between PI film with adhesive backing and PI film without adhesive backing

**表 3.** PI 膜带背胶与无背胶导热性能参数对比

| 名称或编号   | 平均温度<br>(℃) | 热面温度<br>(℃) | 冷面温度<br>(℃) | 热极热流<br>(W) | 冷极热流<br>(W) | 平均热流<br>(W) | 试样面积<br>(mm <sup>2</sup> ) | 英制压力<br>(PSI) | 试样厚度<br>(mm) | 热阻 R<br>(℃/W) | 导热系数<br>K (W/mk) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------|---------------|--------------|---------------|------------------|
| PI 膜无背胶 | 51.08       | 68.11       | 34.05       | 7.576       | 6.609       | 7.093       | 707                        | 14            | 2.98         | 4.8019        | 0.8351           |
| PI 膜有背胶 | 51.91       | 68.61       | 35.20       | 5.212       | 5.212       | 5.212       | 707                        | 14            | 3.02         | 6.4102        | 0.6384           |

**Table 4.** Typical performance parameters of PI films commonly used in inverter air conditioners

**表 4.** 变频空调常用 PI 膜的典型参数性能

| 绝缘导热垫片      | PR27                              | K10                               | SH3000                            |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 颜色          | 灰色                                | 米色                                | 粉色                                |
| 增强层         | PI 膜                              | PI 膜                              | PI 膜                              |
| 厚度 mm       | 0.2                               | 0.15                              | 0.35                              |
| 耐压强度 kV     | 8                                 | 6                                 | 5.5                               |
| 阻燃等级 UL94-V | V-0                               | V-0                               | V-0                               |
| 热阻          | 0.31℃-in <sup>2</sup> /W @ 50 psi | 0.41℃-in <sup>2</sup> /W @ 50 psi | 0.39℃-in <sup>2</sup> /W @ 60 psi |
| 导热系数 w/mk   | 1.8                               | 1.3                               | 3                                 |
| 使用温度℃       | -60 to 180                        | -60 to 180                        | -60 to 180                        |
| 尺寸 mm       | 21 × 27                           | 21 × 27                           | 21 × 27                           |

PI 膜材料的本征导热系数较低,通常在 0.2 W/(m·K)以下,远低于金属、碳和陶瓷等材料,极大限制了 PI 薄膜在高新技术领域的应用。为了解决 PI 材料的导热散热问题,研究人员主要从两个方面开展工

作：一是对 PI 基体本体改性，二是以 PI 为基体，在基体中添加高导热填料也是改善热导率的有效策略。目前国内外高导热 PI 复合材料的理论研究和工业化生产主要集中在填充型 PI 复合材料[2]。不同厂家的 PI 膜导热性能差异主要由填充复合材料决定。工程选型应用应重点关注 PI 膜的复合材料导热特性，其次还要关注厚度、耐压强度等关键参数以及成本。表 4 为变频空调常用 PI 膜的典型参数性能。

### 3. IGBT 损耗简介

IGBT 的损耗主要由导通损耗和开关损耗构成。

导通损耗  $P_{cond}$  的核心公式可以表示为：

$$P_{cond} = V_{CE(sat)} \times I_C \quad (1)$$

式中， $V_{CE(sat)}$  为 IGBT 的导通饱和压降， $I_C$  为流经 IGBT 的集电极电流。在实际工作中，由于 IGBT 通常工作在高频开关状态，导通损耗仅指在导通期间产生的功耗，其平均值还需乘以一个占空比(导通时间与整个开关周期的比值)。

由公式(1)可知， $I_C$  越大，IGBT 导通损耗  $P_{cond}$  越大。同时根据 IGBT 的典型导通饱和压降特性曲线(如图 2)可知，保持门极驱动电压  $V_{GE}$  不变， $V_{CE(sat)}$  随  $I_C$  增加而增大，并且 IGBT 壳温  $T_C$  越大， $V_{CE(sat)}$  增幅越大。因此，随着空调整机功率增加， $I_C$  越大，IGBT 导通损耗  $P_{cond}$  会显著增大。

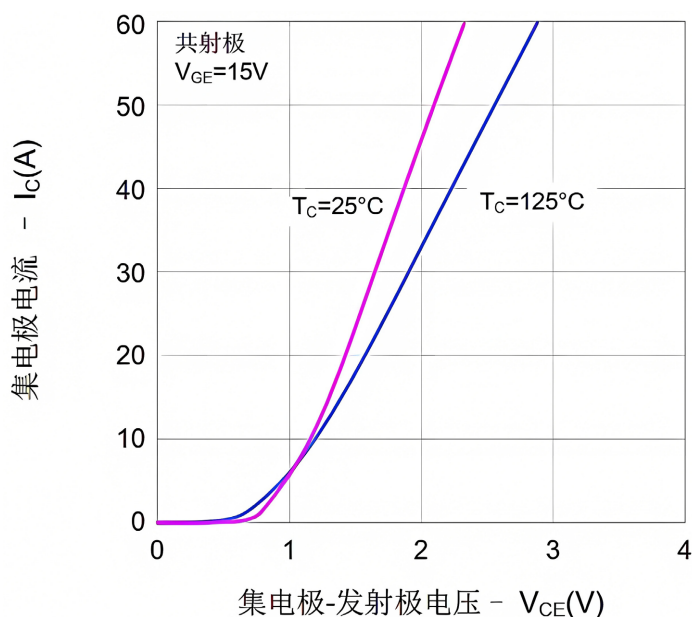


Figure 2. Typical saturation voltage drop characteristic curves of IGBT  
图 2. IGBT 典型饱和压降特性曲线

开关损耗，是指 IGBT 在开通和关断状态转换的极短时间内，由于电流和电压发生交叠而产生的能量损失。与导通损耗不同，它不是持续存在的稳态功耗，而是一种瞬态脉冲功耗，且其大小强烈依赖于开关频率。其平均损耗公式为：

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) \times f_{sw} \quad (2)$$

式中， $E_{on}$  为开通损耗， $E_{off}$  为关断损耗， $f_{sw}$  为开关频率。温度升高会加剧开关损耗，尤其是关断损耗，因为高温会使 IGBT 关断时的“电流拖尾”现象更严重[3]。因此，随着 IGBT 开关频率的提升，开关损耗

增大。

4. 陶瓷导热垫片

由上述第 3 节中的 IGBT 损耗论述可知, 在更大匹数的变频空调中, PFC 的功率更大, 同时近几年变频空调 PFC 电路中的 IGBT 开关频率进一步提升至 60~70 kHz, 导致 IGBT 的损耗大幅提升。导热性能较好的 PI 膜已不能满足 IGBT 散热需求, 在多个发热工况下 IGBT 的壳体温度已超过 115℃, 已严重影响到 IGBT 的使用寿命。大功率、高频化后的铁封 IGBT 和铁封碳化硅二极管温升问题已成为控制器在产品上落地应用的瓶颈。寻找具有更高导热性能的绝缘替代材料成为亟待解决的问题。

受 IPM、内绝缘 IGBT 封装启发, 是否可以直接采用类似绝缘导热材料替代 PI 膜, 既能够解决发热问题, 也能较好地控制成本, 实现产品应用。通过调查研究发现, IPM、内绝缘 IGBT 采用的基板通常为氧化铝陶瓷。氧化铝陶瓷片以 96%~99% 的氧化铝为原料, 经高温烧结而成的硬质陶瓷片。导热系数远高于 PI 膜, 可达 20~30 W/m·K, 绝缘强度和耐温性能也极为出色, 且性能稳定, 寿命长[4]-[6]。但是也存在质地脆, 在受到压力或安装不当时容易碎裂的问题。

进一步的调查研究发现, 陶瓷导热垫片有氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、氧化铍( $\text{BeO}$ )、氮化铝( $\text{AlN}$ )、氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )等多种材料。表 5 为不同材料陶瓷导热垫片的特性参数对比[5]。

Table 5. Comparison of characteristic parameters of ceramic thermally conductive gaskets  
表 5. 陶瓷导热垫片的特性参数对比

| 性能参数                                       | $\text{Si}_3\text{N}_4$ | $\text{AlN}$       | $\text{Al}_2\text{O}_3$                  | $\text{BeO}$       |
|--------------------------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|
| 介电常数                                       | 8~9                     | 8~9                | 9~10                                     | 6~8                |
| 损耗因素                                       | $2 \times 10^{-4}$      | $3 \times 10^{-4}$ | $3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ | $3 \times 10^{-4}$ |
| 电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$               | $>10^{12}$              | $>10^{12}$         | $>10^{12}$                               | $>10^{12}$         |
| 击穿场强( $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ )   | 10~25                   | 14~35              | 10~35                                    | 27~31              |
| 热导率/( $\text{W} \cdot \text{mK}^{-1}$ )    | 40~90                   | 120~180            | 20~30                                    | 209~330            |
| 弯曲强度/MPa                                   | 600~900                 | 250~350            | 300~380                                  | $\geq 250$         |
| 杨氏模量/GPa                                   | 200~300                 | 300~320            | 300~370                                  | 330~400            |
| 断裂韧性/( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ) | 4~7                     | 2~3                | 3~5                                      | 1~2.5              |
| CTE/( $\text{mm} \cdot \text{mK}^{-1}$ )   | 2.7~4.5                 | 4.2~7              | 7~9                                      | 7~8.5              |
| 可用于厚膜金属化的衬底技术                              | AMB (铜)                 | DBC (铜), AMB (铝)   | DBC (铜)                                  | DBC (铜)            |

在各类陶瓷材料中, 氧化铍陶瓷导热性能极佳, 但由于其粉体具有剧毒且成本高昂, 目前主要应用于军工领域。民用产品则多采用氧化铝陶瓷、氮化铝陶瓷和氮化硅陶瓷。其中, 氮化铝陶瓷凭借高热导率以及与硅高度匹配的热膨胀系数, 已成为大功率半导体封装的主流材料[7]。氮化硅陶瓷主要适用于存在剧烈振动与冲击的工况场景。相比之下, 氧化铝陶瓷的热导率虽低于上述两种材料, 但仍远高于聚酰亚胺(PI)薄膜。同时其成本最低、加工工艺最为成熟, 因而在中低端市场得到广泛应用。

综合考虑以上因素, 本文尝试采用氧化铝陶瓷垫片来解决变频空调高频 PFC 电路中铁封 IGBT 与铁封碳化硅二极管的温升问题。

氧化铝陶瓷表面、散热器表面以及功率器件的散热面看似平整, 实则粗糙。微观上存在凹凸起伏, 直接相互贴合时, 只有凸起部分接触, 中间夹杂空气, 热阻大不利于导热[8]。在工程应用中, 通常在氧化铝陶瓷垫片双面涂覆导热硅脂, 通过导热硅脂填补微观空隙, 排出空气。并通过螺钉或固定夹等紧固件将其压装于散热器与功率器件之间, 如图 3 所示。

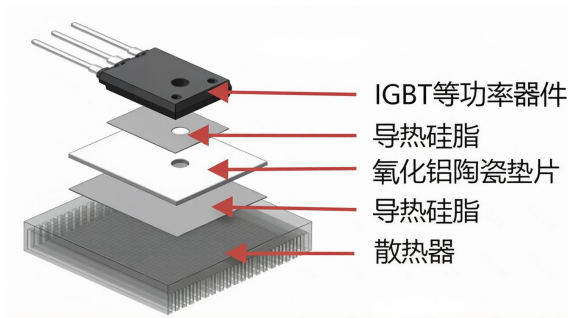
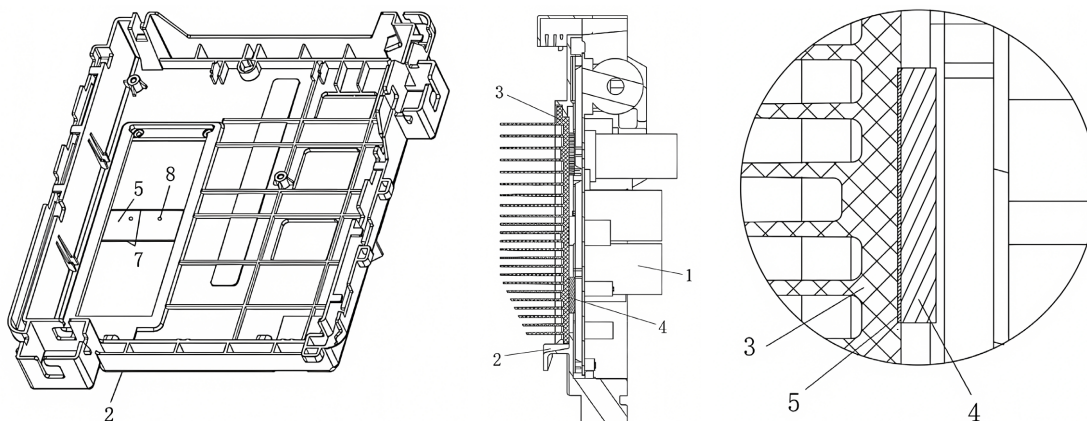


**Figure 3.** Assembly schematic diagram of alumina ceramic gasket for power devices

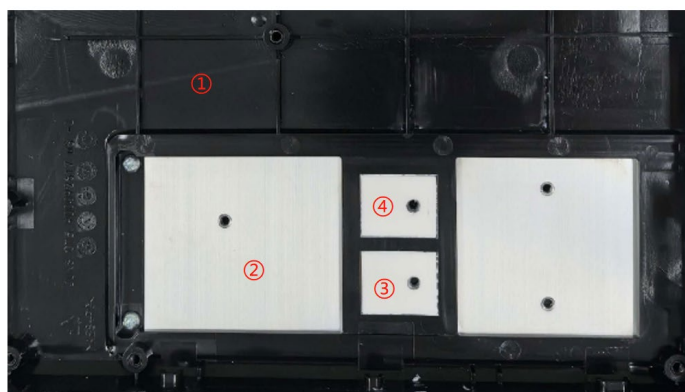
**图 3.** 功率器件氧化铝陶瓷垫片装配示意图

为保证生产过程中功率器件的散热面与陶瓷垫片实现充分完全接触,可适当增大氧化铝陶瓷片的面积。此外,也可在散热器上铣槽,将陶瓷垫片置于槽内以辅助生产定位。然而,增大垫片面积会提高材料成本;在散热器上铣槽不仅增加散热器加工成本,还会减小功率器件金属引脚与散热器之间的电气间隙。同时工程应用中还需要解决氧化铝陶瓷垫片质地脆,在受到压力或安装不当时易碎裂的问题。



1-电控组件; 2-电控盒; 3-散热器; 4-功率器件; 5-陶瓷垫片; 7-陶瓷垫片限位定位槽; 8-陶瓷垫片螺钉过孔。

(a) 电控盒结构及装配示意图



① 电控盒; ② 铝型材散热器; ③ IGBT 导热陶瓷垫片; ④ 碳化硅二极管导热陶瓷垫片。

(b) 氧化铝陶瓷垫片与电控盒结构限位槽盒的装配实物图

**Figure 4.** Installation schematic diagram of alumina ceramic thermally conductive gasket

**图 4.** 氧化铝陶瓷导热垫片安装示意图

经过反复测试验证, 长虹空调产品采用自主专利设计方案: 如图 4 所示, 在塑压成型电控盒上设计氧化铝陶瓷垫片安装定位、垫片本体限位的结构槽。实际生产时, 先将局部位置涂敷有导热硅脂的散热器安装固定在塑料电控盒上, 再将氧化铝陶瓷垫片放置于对应的结构槽内, 并在氧化铝陶瓷与功率器件接触的一面上涂敷导热硅脂, 最后将电控组件安装固定在电控盒上, 锁紧对应功率器件的螺钉。整个生产加工过程工艺成熟可控。通过此方案, 既实现了生产加工中对氧化铝陶瓷垫片的定位、限位, 在不对散热器作任何改动的前提下又保证了功率器件金属引脚与散热器之间的电气间隙。同时, 在极端情况下陶瓷垫片发生碎裂, 通过电控盒的结构特征可将碎块约束在原位, 避免了陶瓷垫片碎块位移而导致散热及绝缘的可靠性问题。

在同一套整机, PFC 开关频率为 60 kHz, 相同的工况和测试条件下, 对上述氧化铝陶瓷垫片和 PI 膜绝缘导热垫片进行高功率发热温升测试, 测试结果如表 6 所示。

**Table 6.** Temperature rise comparison test between alumina ceramic thermally conductive gaskets and PI film thermally conductive gaskets  
**表 6.** 氧化铝陶瓷导热垫片与 PI 膜导热垫片温升对比测试

| 室外工况       | 输入电压(V) | 输入电流(A) | PI 膜         | 氧化铝陶瓷 |
|------------|---------|---------|--------------|-------|
|            |         |         | IGBT 壳体温度(℃) |       |
| 制冷过负荷 50℃  | 165     | 13.7    | 108.7        | 87.6  |
| 制冷过负荷 50℃  | 264     | 9.9     | 90.7         | 79.5  |
| 最大制冷 1 43℃ | 176     | 15.5    | 109.6        | 90.9  |
| 最大制冷 1 43℃ | 253     | 13.4    | 96.6         | 84.5  |
| 最大制冷 2 43℃ | 176     | 15.6    | 113.0        | 93.7  |
| 最大制冷 2 43℃ | 253     | 13.5    | 107.9        | 87.2  |
| 最大制冷 3 43℃ | 176     | 14.6    | 115.8        | 92.6  |
| 最大制冷 3 43℃ | 253     | 11.4    | 105.5        | 88.9  |

通过实验证实, 氧化铝陶瓷垫片可以大幅优化变频空调控制器高频化后的铁封 IGBT 温升。在我司整机上同条件测试, 较 PI 膜绝缘导热垫片可以使 IGBT 壳体温度降低 11℃~23℃。按照“10℃法则”, 采用氧化铝陶瓷垫片可以显著提高 IGBT 的可靠性寿命。

5. 结论

氧化铝陶瓷垫片的绝缘导热性能远优于 PI 膜绝缘导热垫片。采用氧化铝陶瓷片可有效解决变频空调控制器中铁封 IGBT 的发热问题, 显著提升功率器件的可靠性, 延长产品使用寿命。氧化铝陶瓷垫片在变频空调产品应用中可通过类似我司结构特征设计, 实现安装生产工艺优化。同时, 随着封装技术发展, 内绝缘 IGBT 成本下降, 其凭借简化的工艺和优异的散热性能, 有望在变频空调领域加速替代“铁封 IGBT + 氧化铝陶瓷垫片”方案, 成为主流选择。

参考文献

[1] 张狄林. IGBT 电气参数的温度特性分析[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(6): 999-1001.  
[2] 查俊伟, 王帆. 高导热聚酰亚胺电介质薄膜研究进展[J]. 物理学报, 2022, 71(23): 184-201.  
[3] 姜舶洋. Si 功率半导体器件电气参数温敏性的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
[4] 尚承伟. 高导热高温共烧陶瓷封装外壳研究进展[J]. 电子与封装, 2025, 25(9): 1-6.

- 
- [5] 徐礼军. IGBT 器件陶瓷封装设计与关键工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2024.
  - [6] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷基片电子封装材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8): 1893-1903.
  - [7] 袁文杰, 李晓云, 丘泰. 高热导率氮化铝陶瓷的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(7): 43-46+50.
  - [8] 邝海. 大功率 LED 中常用陶瓷基板研究[J]. 中国陶瓷, 2017, 53(8): 1-5.