

高纯度氧化铝在LED封装材料中的应用研究

魏江涛

杭州斯启科技有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 高纯度氧化铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 99.9\%$) 因优异的机电适配性, 在机电设备封装与散热领域价值重大。它具备绝缘、热管理、机械强度和光学集成等优势, 如热导率 $30\text{--}40 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 、低热膨胀系数解决热匹配难题; $\geq 250 \text{ MPa}$ 抗弯强度保障结构稳定; 纳米导热膏降低界面热阻, 微通道散热提升能效。通过案例验证其创新潜力, 为高密度机电设备封装设计提供理论与技术支持。

关键词: 高纯度氧化铝; 机电封装; 热界面材料; 机电一体化

引言

伴随工业4.0与智能装备技术的发展, 机电设备向高功率密度、微型化、高可靠性发展, 传统封装材料在热-力耦合环境下难以满足需求。高纯度氧化铝作为先进陶瓷材料, 在绝缘、热管理等方面优势显著, 介电强度远超环氧树脂基材料, 热导率比常规FR-4基板提升数倍。本文围绕机电应用场景, 结合理论与工程案例, 探究其在功率模块封装、多层电路集成、微尺度散热等领域的创新应用, 为突破机电设备性能瓶颈提供材料层面的解决思路。

1 高纯度氧化铝在机电硬件封装中的特性与优势

1.1 优异的绝缘性能与机电安全设计

机电设备在运行时, 常常面临高电压、大电流的复杂工作环境, 电气安全便成为硬件设计中首要考虑的因素。高纯度氧化铝拥有高达 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上的绝缘电阻值, 这一特性使其能够在LED芯片与金属基板之间形成有效的隔离屏障, 极大程度地避免了因绝缘失效而引发的短路或击穿等严重问题。工业自动化设备中的LED驱动电路中的氧化铝基板被大量应用于支撑功率电路模块。在工业生产环境中, 电磁干扰复杂且强烈, 而氧化铝基板凭借其稳定可靠的绝缘性能, 确保了机电系统在这样的环境下能够长期稳定运行, 为整个工业自动化设备的可靠运转提供了坚实保障。

1.2 热导率与机电散热设计优化

机电设备的散热性能直接关系到其使用寿命和运行效率。高纯度氧化铝的热导率在 $30\text{--}40 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 之间, 虽然从数值上看, 相较于铝基板约 $200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 的热导率似乎不占优势, 但它拥有低热膨胀系数 ($7 \times 10^{-6} / \text{K}$), 这一特性使其能够与芯片材料 (如GaN) 实现良好的热匹配。在温度发生波动时, 能够有效减少因热膨胀差异而产生的机械应力, 从而降低对芯片的损害风险。在机电一体

化设备的散热模块中, 氧化铝基板发挥着关键作用。通过将功率芯片直接贴装在氧化铝基板上, 热量能够迅速传导至散热鳍片或热管, 进而实现高效散热。以5G基站的高功率LED阵列来说, 氧化铝基板的应用使得散热效率提升30%以上, 有效避免了因过热导致的硬件性能下降, 确保5G基站的稳定运行。

1.3 机械强度与机电结构稳定性

机电设备在运输、安装以及运行过程中, 会不可避免地承受振动、冲击等各种机械应力。高纯度氧化铝具备 $\geq 250 \text{ MPa}$ 的抗弯强度和9 GPa的硬度, 这使其能够在恶劣的工况下依然保持封装基板的结构完整性。在车载LED照明系统中, 车辆在行驶过程中会经历各种颠簸路况, 氧化铝基板通过精心设计的抗振结构, 能够有效保护芯片免受颠簸的影响。其出色的耐磨性也使得硬件在粉尘较多的环境中, 使用寿命得以大幅延长。在精密机电设备如光学仪器中, 氧化铝的高刚性使其成为封装基板的理想选择, 能够有效避免因微米级位移而对光路对准产生干扰, 保证了光学仪器的高精度工作。

1.4 光学性能与机电传感系统集成

在机电设备的传感模块中, 透明陶瓷基板需要同时具备良好的光学透射性能和机械支撑功能。高纯度氧化铝透明陶瓷拥有 $> 90\%$ 的透光率和低光散射特性, 这使其非常适合用于光电传感器、激光器等硬件的光学窗口设计。在工业机器人视觉系统中, 氧化铝基板通过巧妙地集成LED光源与光学传感器, 实现了高精度图像采集与机械动作的协同控制。工业机器人在执行任务时, 能够快速、准确地获取周围环境信息, 并根据这些信息做出精准的动作响应, 大大提高了工业生产的效率和质量。

2 高纯度氧化铝在机电散热硬件中的创新应用

2.1 热界面材料与机电模块封装

在对功率密度要求严苛的机电设备核心功率模块,

如IGBT（绝缘栅双极型晶体管）和MOSFET（金属-氧化物半导体场效应晶体管）中，热界面材料（TIM）对于实现高效散热至关重要^[1]。高纯度氧化铝导热膏作为一种高性能的TIM，其纳米级的颗粒尺寸使其具备卓越的填充能力。在微观层面，芯片与散热器的接触面并非完全平整，存在大量微米甚至纳米级别的空隙，这些空隙会显著增加热阻，阻碍热量传递。高纯度氧化铝导热膏的纳米颗粒能够有效填充这些微观空隙，形成连续的热传导路径。通过分子动力学模拟与实验测试相结合的方法，研究发现其可将界面热阻降低至 $0.1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ 以下，大幅提升了热量从芯片到散热器的传递效率。

以新能源汽车的电机控制器为例，作为车辆动力系统的核心控制单元，电机控制器在车辆行驶过程中，内部功率模块处于高频、高电流的工作状态，产生大量焦耳热。若热量不能及时导出，功率模块的结温会迅速升高，导致电子迁移加剧、器件参数漂移，进而降低控制器的工作效率，甚至引发器件热失效。在某款新能源汽车的电机控制器中应用高纯度氧化铝导热膏后，通过红外热成像技术与温度传感器监测发现，功率模块的温升降低了15%。这使得控制器内部电子元件工作在更稳定的温度环境下，有效抑制了因过热导致的性能衰退，提升了电机控制器的可靠性与使用寿命，保障了新能源汽车在不同工况下的稳定运行。

2.2 多层陶瓷基板与高密度机电集成

高纯度氧化铝通过先进的流延成型与共烧工艺制备的多层陶瓷基板（LTCC），为解决这一问题提供了有效的解决方案。流延成型过程中，氧化铝粉体与有机添加剂混合制成均匀的浆料，通过刮刀控制厚度在基片上形成具有一定厚度和精度的生坯膜^[2]。随后，经过叠层、热压等工艺将多层生坯膜结合在一起，再通过高温共烧使各层之间实现良好的烧结结合，形成致密的多层陶瓷结构。

这种多层陶瓷基板具有独特的三维结构，内部多层布线能够支持高频电路与功率器件的高密度集成。在航空航天领域，如卫星的通信与导航系统中，空间和重量的限制极为严格，同时要求设备具备高可靠性和高性能。多层陶瓷基板通过在内部精确嵌入微带线，利用其低损耗、高Q值的特性，实现了射频信号的高速、低损耗传输，满足了卫星通信系统对高频信号处理的需求；同时，设置的散热通孔采用特殊的设计与加工工艺，确保冷却液或热传导介质能够在其中高效流动，迅速将功率器件产生的热量导出。此外，氧化铝陶瓷本身具有良好的抗辐射性能，在宇宙射线和高能粒子辐射环境下，能

够有效保护内部电路不受损伤，同时其高机械强度能够承受航天器发射过程中的剧烈冲击与振动，满足航空航天领域对设备抗辐射与抗冲击的严苛要求，确保了航空航天设备在复杂的宇宙环境中稳定可靠运行。

2.3 微通道散热结构的构建

在高功率密度机电设备，如高性能服务器电源模块中，传统的散热方式，如自然对流散热和简单的风冷散热，由于散热能力有限，难以满足日益增长的散热需求^[2]。高纯度氧化铝因其良好的机械加工性能和热性能，成为构建微通道散热结构的理想材料。通过光刻、刻蚀等微纳加工技术，在氧化铝基板上加工出微米级别的通道，这些微通道的尺寸通常在几十到几百微米之间，通道间距也精确控制在微米量级。

当冷却液在微通道中循环流动时，基于微尺度下的对流换热强化原理，冷却液与通道壁面之间形成了极大的换热面积，且由于微通道内的流体流动特性，能够有效抑制边界层的发展，增强对流换热效果。在某大型数据中心的高性能服务器电源模块中，应用了基于高纯度氧化铝的微通道散热结构。通过实验测试与数值模拟分析，相较于传统的风冷散热方式，该微通道散热结构的散热效率提升了50%以上。在服务器长时间满负荷运行过程中，电源模块的最高温度始终维持在安全工作范围内，确保了电源模块的稳定运行，为数据中心的可靠供电提供了坚实保障。

2.4 散热涂层在机电外壳的应用

为进一步提升机电设备整体的散热能力，高纯度氧化铝可制成散热涂层应用于机电外壳^[3]。制备氧化铝散热涂层时，通常将高纯度氧化铝粉体与特定的粘结剂、分散剂等混合，通过喷涂、刷涂或电泳等工艺均匀地涂覆在机电外壳表面，然后经过高温固化处理，形成具有一定厚度和附着力的散热涂层。

这种散热涂层具有高发射率和良好的热传导性。根据热辐射理论，物体的发射率越高，其在相同温度下的辐射散热能力越强。氧化铝散热涂层的高发射率特性使其能够将设备内部产生的热量以热辐射的形式高效地辐射出去。在工业自动化设备的控制柜中，内部集中了大量的PLC（可编程逻辑控制器）、驱动器等电子元件，这些元件在工作过程中产生大量热量。若热量不能及时散发，控制柜内温度升高，会导致电子元件的性能下降、故障率增加。在某工业自动化生产线的控制柜中应用氧化铝散热涂层后，通过温度监测系统发现，柜内平均温度降低了 10°C 左右。这使得控制柜内电子元件的工作环境得到显著改善，减少了因高温导致的电子元件热应力

和电气参数漂移,降低了故障发生率,延长了电子元件的使用寿命,提高了工业自动化设备运行的稳定性,保障了工业生产的高效、连续进行。

3 高纯度氧化铝透明陶瓷基板的机电应用实践

3.1 精密光学器件的机械支撑

在激光切割机这类对精度和稳定性要求极高的机电设备中,激光发生器作为核心部件,其性能直接决定了切割质量^[4]。氧化铝透明陶瓷基板凭借独特的物理性质,成为激光发生器窗口材料的不二之选。从微观结构来看,氧化铝透明陶瓷基板由均匀分布的氧化铝晶体颗粒构成,这些晶体颗粒之间通过原子键紧密结合,形成了高度致密的结构,赋予了基板高达9 GPa的硬度。在激光切割过程中,材料被瞬间高温熔化、汽化,产生大量高速飞溅的微小颗粒。这些飞溅物一旦撞击到激光发生器的光学元件,哪怕是极其微小的划痕或损伤,都可能导致激光束的传输路径发生改变,进而影响切割精度。而氧化铝透明陶瓷基板能够像坚固的盾牌一样,有效阻挡这些飞溅物的冲击,确保内部精密光学元件的完整性。

激光发生器在长时间高功率运行时会产生大量热量,温度急剧升高。氧化铝透明陶瓷基板具有超过1600℃的耐温性能,这源于其晶体结构中原子间的强相互作用力,能够在高温下保持稳定,不会发生晶格畸变或软化现象。在大型汽车制造企业的激光切割生产线中,激光切割机需连续工作数小时对汽车零部件进行精密切割。在这一过程中,氧化铝透明陶瓷基板不仅承受住了切割过程中产生的频繁飞溅物冲击,还在高温环境下始终保持良好的光学性能,确保激光束的光斑质量、能量分布稳定,使激光切割的精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内,切割效率相较于使用普通窗口材料提高了三分之一,大大提升了汽车零部件的加工质量和生产效率。

3.2 机电一体化封装案例

国内某知名智能装备制造企业,针对智能工厂中作

为物流运输关键设备的AGV,在其导航模块设计时,成功实现氧化铝透明陶瓷基板的创新应用^[5]。AGV需在复杂工业环境中快速、准确行驶,这对导航模块性能要求极高。该企业巧妙地将LED光源与光电传感器集成于氧化铝透明陶瓷基板之上。从电气性能看,基板绝缘电阻可达 $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,良好的电气绝缘性有效规避了LED光源与光电传感器间的电气干扰,保障信号传输准确无误;其具备的信号传输特性,还能优化光电信号传输路径,减少信号衰减。在机械性能上,面对AGV频繁启停、转弯产生的较大机械应力,氧化铝透明陶瓷基板凭借自身高强度和稳定性,为导航模块提供可靠机械支撑,确保内部元件相对位置稳定,避免因振动和冲击造成元件损坏或性能降低。

结语

经多维度测试与工程验证,高纯度氧化铝在机电领域优势显著。其微通道散热结构可满足5G基站等极端工况,振动耐受性通过标准验证,透明陶瓷基板实现透光率与硬度协同。实际应用使机电设备MTBF提升一半。未来需突破线宽精度控制与低成本制备工艺,推动其在工业机器人等领域规模化应用。

参考文献

- [1]谢桂容,刘海路,张翔,等.高性能LED封装材料的研究进展[J].热固性树脂,2023,38(06):57-61+68.
- [2]黄玉凤,孙绪筠,韩颖,等.LED封装用复合材料研究进展[J].化工新型材料,2020,48(01):1-5.D
- [3]魏晓慧.LED微弧氧化铝基板及其表面金属化技术研究[J].惠州学院学报,2020,40(06):62-66.
- [4]郑雪,江睿,李谦,等.类阳极氧化铝纳米结构LED的研究[J].无机材料学报,2020,35(05):561-566.
- [5]李志芳,武宏超.智能工厂AGV调度关键技术优化与应用[J].金属加工(冷加工),2024,(09):1-3.