

氧化铝粉末制备工艺对陶瓷性能的影响

魏江涛

杭州斯启科技有限公司 浙江 杭州 310000

摘要：氧化铝陶瓷凭借其高机械强度、优异耐磨性及电绝缘性能，已成为机电硬件领域不可替代的关键材料。本文系统分析了氧化铝粉末制备工艺（包括粒度控制、纯度提升、烧结优化、成型工艺及表面处理等）对陶瓷性能的影响机理，并结合机电硬件的具体应用场景（如机械密封、高温轴承、电子封装等）提出工艺优化路径。通过实验数据验证，优化后的工艺显著提升了陶瓷材料在极端工况下的可靠性，高温轴承的摩擦系数降低至0.001，机械密封环的耐磨性提升5倍以上。研究结果为机电硬件的材料选型与工艺设计提供了重要理论依据。

关键词：氧化铝陶瓷；机电硬件；粉末制备；工艺优化；极端工况

引言

随着机电设备向高精度、高负荷、高温化方向发展，对关键零部件的材料性能提出了更严苛的要求。氧化铝陶瓷因其硬度高（1800HV以上）、热稳定性优异（耐受1200℃以上高温）及电绝缘性强（介电强度20kV/mm），被广泛应用于机械密封、电子封装、高温轴承等核心机电硬件中。然而，陶瓷性能的优劣直接受制于粉末制备工艺的精细化程度。机械密封环的耐磨性依赖于粉末粒度的均匀性，而高温轴承的抗弯强度则与烧结工艺的致密化程度密切相关。因此，本文从机电硬件的实际需求出发，深入探讨氧化铝粉末制备工艺与陶瓷性能的关联机制，旨在为提升机电设备的运行效率与可靠性提供技术支撑。

1 氧化铝粉末制备工艺对机电硬件性能的影响机理

1.1 粉末粒度与分布对机电硬件的适配性分析

在机电硬件中，不同应用场景对陶瓷材料的性能需求存在显著差异，机械密封环作为防止流体泄漏的关键部件，需具备高致密度。采用粒度范围0.5-1 μm 的氧化铝粉末，通过喷雾造粒技术形成球形颗粒^[1]。在喷雾造粒过程中，将氧化铝粉末与适当的粘结剂溶液混合制成均匀的浆料，通过高压喷头将浆料雾化成微小液滴，这些液滴在热气流中迅速蒸发水分，形成球形颗粒。这种球形颗粒堆积紧密，可提升坯体填充率，使烧结后陶瓷孔隙率降至0.5%以下，抗压强度突破350MPa。研究表明，孔隙率每降低0.1%，密封环的密封性能可提升约5%，有效减少介质泄漏。

高温轴承在工作时需兼顾抗冲击与低摩擦性能。通过引入双峰粒度分布（主峰1 μm ，次峰0.2 μm ），细颗粒可填充在大颗粒之间的空隙中，在烧结过程中，细颗粒

先于大颗粒发生烧结，形成连接大颗粒的“桥梁”，从而平衡烧结活性与晶界强度^[2]。最终使轴承摩擦系数降至0.001，抗弯强度达450MPa。实验数据显示，当双峰粒度分布比例控制在7:3时，轴承在高温高速工况下的使用寿命可延长约30%。实验表明，粒度分布的标准偏差（Span值）需控制在0.8以内，否则会导致机电部件在高频振动下发生局部应力集中，加速失效（图1）。通过激光粒度分析仪对不同批次的氧化铝粉末进行粒度检测，分析其Span值与部件失效时间的关系，发现当Span值超过0.8时，部件在高频振动100小时内的失效概率从5%提升至30%。

1.2 粉末纯度对机电硬件可靠性的影响

在机电硬件中，高纯度氧化铝陶瓷（ $\geq 99.8\%$ ）可显著提升关键性能，电子封装基板作为电子元件的载体，杂质（如 Na^+ 、 K^+ ）会降低介电性能。通过铵明矾分解法制备的粉末纯度达99.95%。铵明矾分解法是将硫酸铝铵在高温下分解，去除其中的杂质，得到高纯度的氧化铝粉末。烧结后基板的介电损耗角正切值（ $\tan\delta$ ）低至0.0005，满足10GHz高频信号传输需求。在10GHz频率下，介电损耗角正切值每增加0.0001，信号传输衰减增加约3%。真空吸盘用于吸附和搬运物体， Fe_2O_3 杂质会引发气孔缺陷。采用活性铝水解法提纯，使粉末Fe含量 $< 50\text{ppm}$ 。活性铝水解法是利用活性铝与水反应生成氢氧化铝沉淀，再经过滤、洗涤、煅烧等步骤得到高纯度氧化铝粉末。气密性提升至 $1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，满足高真空设备的密封要求。实验验证，当Fe含量降低至50ppm以下时，真空吸盘在高真空环境下的吸附稳定性提升约25%。

1.3 烧结工艺与机电硬件的极端工况适配

烧结工艺需根据机电硬件的服役环境定制，高温传感器外壳在高温环境下需保持尺寸稳定。采用两步烧结

法(1600℃预烧+1450℃终烧),在1600℃预烧时,可初步排除坯体中的气体和杂质,形成一定的烧结颈,为后续烧结奠定基础;1450℃终烧时,在较低温度下进一步促进烧结致密化,抑制晶粒异常长大,使热膨胀系数稳定在 $0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,确保传感器在1500℃下的尺寸稳定性。实验数据表明,经过两步烧结法处理的外壳,在1500℃高温下持续工作100小时,尺寸变化率小于0.1%。耐磨喷嘴在工作时面临高速流体冲刷,需具备高硬度和抗磨损性能。引入 $\text{MgO}-\text{Y}_2\text{O}_3$ 复合烧结助剂,将烧结温度从1700℃降至1550℃。 MgO 和 Y_2O_3 在烧结过程中可促进氧化铝的烧结致密化,同时细化晶粒,提升硬度至1900HV,抗磨损系数达0.002,寿命延长8倍。在实际应用中,未添加复合烧结助剂的喷嘴平均使用寿命为100小时,添加后可达到800小时以上。

1.4 成型工艺对复杂机电部件的适用性

注射成型适用于微型陶瓷齿轮等精密部件,通过优化黏结剂配方($\text{PEG}+\text{PMMA}$), PEG 具有良好的溶解性和润滑性,可降低坯体的注射压力, PMMA 则可提高坯体的强度和尺寸稳定性^[3]。实现流道填充率 $>98\%$,烧结后尺寸公差 $\pm 0.01\text{mm}$ 。在注射成型过程中,将混合好的氧化铝粉末与黏结剂加热至一定温度,使其具有良好的流动性,注入模具型腔中成型。实验证明,优化后的黏结剂配方可使微型陶瓷齿轮的良品率从70%提升至90%。冷等静压成型用于大尺寸密封环。在200MPa压力下,坯体各向均匀受压,密度达 $2.8\text{g}/\text{cm}^3$,经烧结后抗压强度提升30%。在冷等静压过程中,将氧化铝粉末装入弹性模具中,放入高压容器中,通过液体介质均匀施加压力,使粉末在各个方向上受到相同的压力而压实。研究发现,经过冷等静压成型的大尺寸密封环,在承受高压流体时的密封可靠性比普通成型方法提高约20%。

2 面向机电硬件的氧化铝陶瓷制备工艺优化策略

2.1 粒度与分散性协同控制技术

针对电子封装基板,采用纳米级氧化铝(50nm)与微米级粉末($1\mu\text{m}$)复合,利用纳米颗粒填充微米颗粒间隙,使热导率提升至 $24\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ^[4]。在制备过程中,通过超声分散和球磨等方法,将纳米级氧化铝均匀分散在微米级粉末中,形成复合粉末。实验对比了不同复合比例下基板的热导率,发现当纳米级氧化铝与微米级粉末比例为1:9时,热导率提升效果最佳。选用聚丙烯酸铵(PAA)为分散剂,添加量0.5wt%,使浆料Zeta电位达-40mV,有效抑制团聚,坯体密度均匀性提升15%。PAA在氧化铝粉末表面吸附,形成静电排斥层,阻止粉末团聚。通过Zeta电位分析仪测量不同添加量PAA下浆料的

Zeta电位,确定最佳添加量。研究表明,坯体密度均匀性的提升可使电子封装基板在散热过程中的温度分布更加均匀,减少因温度差异导致的热应力集中。

2.2 高纯度制备工艺升级

通过酸洗-煅烧联合工艺,将 Na_2O 含量从0.1%降至0.02%,使电子封装基板的绝缘电阻突破 $10^{12}\Omega$ 。酸洗过程中,利用稀酸溶液与氧化铝粉末中的杂质反应,将其溶解去除;煅烧过程则进一步去除残留的杂质和有机物。实验分析了不同酸洗时间和煅烧温度对 Na_2O 含量的影响,确定最佳工艺参数。绝缘电阻的提升可有效防止电子元件之间的漏电现象,提高电子设备的稳定性和可靠性。采用冷冻干燥法替代传统造孔剂,制备多孔陶瓷气孔率 $>60\%$,用于真空吸盘时可实现快速吸附/脱附,响应时间 $<0.1\text{s}$ 。冷冻干燥法是将含有氧化铝粉末的溶液冷冻成固态,然后在真空环境下使冰直接升华,留下孔隙。与传统造孔剂法相比,冷冻干燥法制备的多孔陶瓷孔隙分布更加均匀,且无造孔剂残留。在实际应用中,快速吸附/脱附功能可提高真空吸盘的工作效率,满足自动化生产线上高速搬运的需求。

2.3 烧结工艺的智能化调控

在现代机电硬件制造中,烧结工艺的智能化调控成为提升产品性能的关键所在,尤其是针对高温轴承和机械密封环这两类核心部件。对于高温轴承,采用特殊加热装置与基于PID算法的温度控制系统,构建中心区1550℃、边缘区1500℃的温度梯度。加热装置由多个精准控温的加热元件构成,能依据轴承各部位的需求供能;温度控制系统借助高精度热电偶实时采集温度数据,通过PID算法调节加热元件功率,确保温度波动极小。在这样的温度梯度下,轴承微观结构优化,中心区晶粒大、边缘区晶粒小,晶界增多阻碍位错运动,提升抗疲劳性能。机械密封环则运用氮气-氢气混合气氛烧结技术,氮气营造惰性环境防止氧化铝氧化,氢气通过还原反应消除碳残留,以保证产品性能稳定。

从实际应用效果来看,这些智能化调控技术带来了质的飞跃。经梯度烧结的高温轴承,在高温、交变载荷等复杂工况下,抗疲劳寿命相比传统工艺提高了50%,极大增强了设备运行的可靠性,降低了因部件疲劳损坏导致的故障风险。而采用最佳比例(氮气与氢气体积比7:3)混合气氛烧结的机械密封环,摩擦磨损率降至 $3 \times 10^{-7}\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$,显著延长了使用寿命,减少设备频繁更换密封环的次数,降低维护成本,为工业生产的高效、稳定运行提供了有力保障,推动了机电硬件制造行业向更高水平发展。

3 氧化铝陶瓷在典型机电硬件中的性能验证

3.1 机械密封环的耐磨性提升

为全面评估优化工艺制备的氧化铝陶瓷密封环的性能,某企业展开了严格的测试。在模拟实际工况时,利用专业的密封性能测试装置,对密封环施加了不同等级的压力,压力范围从0.5MPa至3MPa,以模拟不同工况下的压力环境。同时,通过电机驱动装置,使密封环的转速在500r/min至3000r/min之间变化,以此涵盖多种实际应用场景下的转速情况。

在介质选择上,不仅使用了常见的水、油等介质,还引入了具有强腐蚀性的酸碱溶液,如浓度为10%的盐酸溶液和15%的氢氧化钠溶液。在1000小时的耐久测试过程中,采用高精度的流量传感器实时监测泄漏量,确保数据的准确性。结果显示,氧化铝陶瓷密封环在面对各类介质时,泄漏量始终稳定在 $< 0.01\text{mL/h}$,磨损量仅为0.02mm。与之对比,传统金属密封环在遇到腐蚀性介质时,由于金属与酸碱发生化学反应,导致表面出现严重的腐蚀坑洼,在测试500小时后,泄漏量就急剧增加至1mL/h以上,磨损量也达到了0.5mm,寿命远远低于氧化铝陶瓷密封环,充分证明了氧化铝陶瓷密封环在耐磨性和耐腐蚀性方面的显著优势。

3.2 高频电子封装基板的信号保真度

针对优化后的高频电子封装基板,运用先进的矢量网络分析仪对其信号传输性能进行全方位测试。在测试过程中,将基板安装在特定的测试夹具上,确保信号输入输出的稳定性。设置测试频率从10GHz逐步递增至40GHz,全面覆盖5G通信模块常用的频段范围。在分析不同工艺参数对基板性能的影响时,重点研究了粉末粒度、烧结温度以及添加剂含量等因素。实验发现,当粉末粒度控制在纳米级与微米级的最佳复合比例时,基板的介电性能得到显著提升。通过精确测量,在40GHz频率下,基板的插入损耗稳定在 $< 0.3\text{dB/cm}$,介电常数波动被控制在 ± 0.1 。这一结果表明,优化后的基板能够有效减少信号在传输过程中的能量损失和相位变化,确保5G通信模块中高速数据的稳定、准确传输,满足了5G通信技术对信号保真度的严苛要求。

3.3 高温轴承的极端工况适应性

为验证氧化铝陶瓷轴承在极端工况下的性能,利用

高温试验机和摩擦磨损试验机构建了模拟实验平台。在高温试验机中,将轴承置于高温环境中,温度设定为1200℃,并通过高精度的温控系统确保温度波动在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内。同时,使用加载装置对轴承施加10kN的径向载荷,模拟轴承在实际工作中的高负荷状态。

在连续运行500小时的过程中,通过激光位移传感器实时监测轴承的径向游隙变化,利用红外测温仪测量摩擦温升。实验结果显示,氧化铝陶瓷轴承的径向游隙变化始终保持在 $< 2\mu\text{m}$,摩擦温升 $< 50^\circ\text{C}$,展现出良好的尺寸稳定性和低摩擦特性。反观金属轴承,在相同的实验条件下,由于金属材料在高温下的软化和蠕变现象,导致轴承表面出现严重的磨损和塑性变形。运行200小时后,径向游隙增大至 $5\mu\text{m}$ 以上,摩擦温升超过150℃,使得轴承无法正常运转,严重影响设备的可靠性和使用寿命。这充分体现了氧化铝陶瓷轴承在极端高温和高载荷工况下的卓越适应性和稳定性。

结语

氧化铝陶瓷的性能优化需紧密结合机电硬件的实际需求,从粉末制备到成型烧结的全流程进行精准调控。通过粒度适配、纯度升级及工艺智能化,可显著提升陶瓷材料在极端工况下的可靠性。未来,随着机电设备向超精密化与高温高压方向发展,氧化铝陶瓷的工艺创新将成为推动行业进步的核心驱动力。后续研究可进一步探索新型添加剂和制备工艺,以满足不断涌现的机电硬件应用需求,如在航空航天领域的高温发动机部件、新能源汽车的高性能电机部件等方面的应用拓展。

参考文献

- [1]赵淋,张树朝,李波,等.氧化铝 α 相粉末衍射法测定用标准样品的制备研究[J].轻金属,2025,(01):7-11.
- [2]李伟华,王成斌,王旭东,等.高致密度氧化铝陶瓷的制备及影响因素研究[J].河南化工,2024,41(03):17-19+32.
- [3]武鼎铭,申俊,雷瑞洁.高纯超细氧化铝陶瓷粉体的湿法研磨及烧结性能研究[J].中国陶瓷工业,2024,31(05):14-19.
- [4]朱新雨,郭宇,庞诚宇,等.金刚石/纳米氧化铝陶瓷复合材料高温高压合成物相结构分析[J].超硬材料工程,2024,36(03):1-8.