

氮化铝结构件的现状及发展趋势

郭 军^{1,2,3} 张 浩^{1,2,3} 李丰亦³ 钱三峰³ 卞发扬³

1. 中国电子科技集团公司第四十三研究所安徽省微系统重点实验室 安徽 合肥 230088

2. 中国电子科技集团公司第四十三研究所 安徽 合肥 230088

3. 合肥圣达电子科技实业有限公司 安徽 合肥 230088

摘 要：氮化铝材料凭借高热导率、优良电绝缘性及与硅匹配的热膨胀系数等性能，已成为电子、半导体及新能源等领域解决散热与绝缘问题的关键材料。本文从氮化铝结构件成型工艺、应用、市场格局及产业链协同分析现状，指出高端结构件依赖进口、高端市场渗透率低等问题，探讨高效化、功能集成化、产业协同化、绿色可持续四大发展趋势。未来将向高效精密绿色制备、多功能集成方向升级，通过全产业链协同创新，推动高端国产替代与产业高质量发展，为行业技术升级与市场布局提供参考。

关键词：氮化铝；高热导率；陶瓷；结构件

引言：随着电子信息、新能源等领域快速发展，对高热导、高绝缘结构材料的需求激增。电子设备散热密度持续攀升，对结构材料的导热性能、绝缘可靠性及一致性提出严苛要求。氮化铝结构件因具有高热导率、良好电绝缘性、较低介电常数和优异机械性能等优点，在电子、光电、新能源等多个领域得到广泛应用。随着科技进步和产业升级，对高性能材料的需求日益增长，氮化铝结构件的市场地位愈发重要。因此，深入了解氮化铝结构件的现状及发展趋势具有重要现实意义。

1 氮化铝结构件定义及性能优势

1.1 氮化铝结构件定义

氮化铝结构件是以氮化铝粉体为核心材料，通过特定成型或加工工艺制成具有一定尺寸精度与形状的产品，在器件中承担散热、绝缘、密封等结构性功能。其核心价值源于氮化铝的高热导率、可靠电绝缘性、耐腐蚀性及与硅芯片匹配的热膨胀系数。

1.2 氮化铝陶瓷的性能优势

氮化铝陶瓷是一种综合性能优良的新型陶瓷材料，主要性能优势包括：(1)高热导性，理论热导率可达 $320\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，接近金属铝，远高于氧化铝（约 $30\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）等传统陶瓷材料，能高效传导热量，满足电子器件散热需求；(2)优良电绝缘性，体积电阻率高达 $10^{14}\sim 10^{16}\Omega\cdot\text{cm}$ ，高温下仍保持稳定绝缘性能，避免电路短路；(3)热膨胀系数与硅、碳化硅等半导体材料匹配度高，能有效减少热应力，降低封装界面开裂风险；(4)高硬度、耐高温、耐腐蚀等特性，在极端环境下保持结构完整性，适用于半导体制造等高端领域^[1]。

2 氮化铝结构件的现状

长期以来，氮化铝结构件市场被日本、美国和韩国企业垄断，其中日本一度占据全球80%以上市场份额。这种垄断不仅导致产品价格高昂，更对我国光通讯、半导体、国防等高新技术产业发展构成“卡脖子”风险。近年来，随着国家政策支持和技术进步，中国企业在氮化铝材料研发与产业化方面取得显著突破，正逐步改变全球竞争格局。

根据市场研究机构数据预计到2031年全球将达到16.55亿美元，复合年增长率为4.1%。全球半导体设备陶瓷结构件市场竞争激烈，国外包括日本碍子、京瓷、韩国MiCo Ceramics、美国CoorsTek、Semicon LLC等，这些企业在技术、品质、服务等方面占据主要市场份额。国内主要有苏州珂玛材料科技、杭州大和热磁、河北中瓷电子等。



图1 氮化铝半导体结构件代表产品

2.1 氮化铝结构件原材料

氮化铝粉体工艺已形成多技术路径并行的产业格局，呈现“基础工艺成熟、高端工艺突破中”的特征。全球市场呈现日本德山垄断高端、中国在中低端逐步替代并加速追赶的格局。日本德山和东洋占据全球高纯氮化铝市

等领域取得多项成果,推动粉体制备从传统碳热还原法向更先进的合成技术演进。但整体来看,产业链的标准衔接仍不完善,上下游之间的性能指标对接、检测方法统一等问题尚未完全解决,且共性技术平台的支撑作用有待加强,部分核心技术仍处于单点突破阶段,尚未形成系统性的技术保障体系^[5]。

3 氮化铝结构件的发展趋势

3.1 高效节能与精密控制并行演进

氮化铝结构件制备工艺正朝着低能耗、高精度、批量化方向深度迭代。(1)粉体制备环节,传统碳热还原法将通过智能化参数调控进一步提升纯度与批次稳定性,同时自蔓延合成等低成本技术会加速产业化落地,而等离子气相合成等先进工艺将逐步突破超细粒径与球形化控制难题。(2)结构件烧结技术领域呈现明显的高端化与绿色化趋势,微波烧结、放电等离子烧结(SPS)、超快高温烧结(UHS)等高效工艺的应用范围持续扩大,通过内部自发热或极速升温降低烧结温度与时间,显著降低能耗并细化晶粒。复合助剂体系的创新将成为关键突破点,多元复合助剂的配比优化可在促进致密化的同时减少晶界相,提升热导率。精密加工环节则向超精密表面控制与复杂形状近净成型发展,结合激光微织构等技术提升结构件的装配适配性与性能稳定性。

3.2 材料与功能从单一性能向多功能集成升级

氮化铝结构件材料体系与功能属性正经历结构性升级,从传统绝缘导热向多性能集成拓展。(1)掺杂改性技术将实现突破性进展,n型与p型高效掺杂技术的成熟使氮化铝从绝缘材料向半导体材料延伸,为功率电子与光电子器件应用奠定基础。(2)功能集成成为重要发展方向,兼具导热、绝缘、压电等性能的复合结构件研发加速,通过梯度结构设计 with 表面改性处理提升极端环境下的稳定性与可靠性。(3)材料形态更加多元化,除传统块体结构外,薄膜与单晶衬底制备技术持续优化,大尺寸单晶衬底成本控制与量产能力逐步提升,适配高频通信与深紫外光电子等高端场景需求。透明陶瓷等特殊形态产品研发推进,进一步拓展功能边界。

3.3 全链条协同与高端市场突破

氮化铝结构件产业将加速形成上下游协同紧密、高端竞争力突出的生态体系。(1)产业链整合趋势明显,具备“粉体-基板-结构件”垂直整合能力的企业将占据竞争优势,通过自主控制关键环节实现成本优化与质量管控。产学研协同机制进一步深化,围绕掺杂改性、先进烧结等核心技术的联合攻关将加快成果转化。(2)市场发展呈现结构化突破特征,中低端领域将通过工艺优

化实现成本进一步降低,巩固规模化优势;高端市场则向车规级功率模块、5G/6G射频器件、极端环境装备等场景深度渗透,客户认证壁垒逐步突破。(3)国际竞争格局将发生变化,国产企业在粉体纯度、工艺稳定性等核心指标上的提升,将推动高端产品进口替代进程加速,逐步形成全球范围内的产业竞争力。

3.4 绿色化与可持续发展

氮化铝结构件产业将围绕绿色生产与资源循环构建可持续发展体系。(1)生产环节中,绿色工艺革新加速推进:粉体制备减少高能耗反应步骤,通过尾气回收系统降低氮氧化物排放;烧结环节推广低能耗加热技术,结合余热回收装置提升能源利用效率,逐步实现全流程碳足迹管控。(2)资源循环利用体系逐步完善:生产过程中产生的粉体废料、烧结边角料通过破碎、提纯等技术重新转化为原料,降低资源浪费;废弃氮化铝结构件回收处理技术取得突破,实现材料高效再生利用。(3)绿色材料理念贯穿产业链,低毒、低污染助剂与辅料替代传统化学试剂,从源头减少生产对环境的影响,推动产业向生态友好型转型,实现经济效益与环境效益协同发展^[6]。

结束语:氮化铝结构件凭借优异性能在多领域具有重要价值,现状呈现基础工艺成熟但高端环节薄弱、中低端市场稳固但高端依赖进口的特点。未来随着制备工艺革新、材料功能升级、产业协同深化及绿色转型推进,产业将突破瓶颈。后续需聚焦高端技术攻关、完善产业链标准、加强产学研合作,加速国产替代,推动氮化铝结构件产业高质量发展,更好满足高端领域需求,为相关产业升级提供支撑。

参考文献:

- [1]徐志刚,夏熠.堇青石/氮化铝陶瓷的组成、结构及力学性能[J].佛山陶瓷,2024,34(4):27-28+32.
- [2]郭军,党军杰,李建青,张浩,崔嵩;氮化铝陶瓷激光切割工艺研究[J].真空电子技术,2017,(04):46-49.
- [3]党军杰,胡竹松,郭军,田晨光,孙登琼,张浩,崔嵩;不同相结构和微观结构对氮化铝陶瓷性能的影响,真空电子技术,2019-03:59-63.
- [4]郭军.党军杰.张浩.一种氮化铝陶瓷结构件的制备方法(P)CN113896540B.
- [5]刘梦婷,韩杰才,王先杰,宋波.氮化铝纳米结构的生长与物性研究[J].人工晶体学报,2020,49(11):2098-2121.
- [6]潘飞,王建彬,徐慧敏,姚金结,王巧玉.氮化铝陶瓷的超精密加工研究现状与发展趋势[J].陶瓷学报,2023,44(2):208-216.