

装外壳的金属化工艺分析

李生

杭州淮瓷科技有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】陶瓷封装外壳作为高可靠性电子器件的关键组件，在微电子、光电子及航空航天等领域具有不可替代的作用。其核心优势在于陶瓷材料优异的绝缘性、耐高温性和化学稳定性，而金属化工艺是实现外壳导电、密封及机械连接的核心技术。当前主流金属化工艺包括镀覆、高温烧结和物理气相沉积等，但不同工艺在结合强度、成本效率和环境适应性等方面存在显著差异。随着电子器件微型化、高频化及极端环境应用需求的提升，传统金属化工艺面临镀层均匀性不足、界面结合力弱及工艺复杂度高挑战。探索工艺优化路径，平衡性能与成本，成为提升陶瓷封装外壳竞争力的关键方向。

【关键词】陶瓷封装外壳；金属化工艺；工艺分析

Analysis of metallization process for packaging shell

Li Sheng

Hangzhou Huai porcelain Technology Co., LTD.Zhejiang Hangzhou 310000

【Abstract】 As a key component of high-reliability electronic devices, ceramic packaging casings play an irreplaceable role in microelectronics, optoelectronics, and aerospace. Their core advantages lie in the excellent insulation, heat resistance, and chemical stability of ceramic materials, while metallization processes are the key technologies for achieving conductivity, sealing, and mechanical connections of the casings. Current mainstream metallization processes include coating, high-temperature sintering, and physical vapor deposition, but there are significant differences among these processes in terms of bonding strength, cost efficiency, and environmental adaptability. With the increasing demand for miniaturization, high-frequency applications, and extreme environment use of electronic devices, traditional metallization processes face challenges such as insufficient uniformity of coatings, weak interfacial bonding, and high process complexity. Exploring process optimization paths to balance performance and cost is a critical direction for enhancing the competitiveness of ceramic packaging casings.

【Key words】 ceramic packaging shell; metallization process; process analysis

一、引言

陶瓷封装外壳的金属化工艺是连接陶瓷基体与外部电路的核心环节，直接影响器件的电性能、机械强度及长期可靠性。在高温、高湿或强振等严苛工况下，金属化层的质量直接决定封装结构的失效风险。镀覆工艺凭借其高精度镀层能力，广泛应用于微电子领域，但镀液污染与镀层孔隙问题制约其进一步发展；高温烧结工艺通过金属粉末与陶瓷的共烧形成致密界面，但高能耗与材料匹配性要求限制了规模化应用；物理气相沉积技术虽能实现纳米级镀层，却受限于设备成本与沉积效率。现有研究多聚焦单一工艺的改进，缺乏对多场景需求的系统性分析。本文从工艺原理出发，结合实

验数据与产业案例，剖析不同金属化技术的适用边界，旨在为工程实践提供兼具理论深度与应用价值的参考。

二、陶瓷封装外壳金属化工艺原理

（一）金属化的基本概念与作用

陶瓷封装外壳的金属化工艺是通过特定技术手段在陶瓷表面形成金属层的关键环节，其本质是解决陶瓷与金属因热膨胀系数差异导致的界面结合难题。金属化层作为陶瓷与外部电路或机械结构的过渡介质，需兼具高导电性、强附着力和耐环境腐蚀能力。从技术原理看，金属化的核心在于建立陶瓷与金属的化学键合或物理互锁机制：高温烧结法通过

金属粉末与陶瓷在共烧过程中形成过渡扩散层,利用金属氧化物的界面反应增强结合强度;镀覆工艺则依赖化学还原或电化学沉积,在陶瓷表面逐层构建致密金属膜,但需克服陶瓷表面惰性导致的镀层附着力不足问题;物理气相沉积借助高能粒子轰击靶材,使金属原子以纳米级精度吸附于陶瓷表面,但界面应力控制对设备精度提出极高要求。金属化工艺的效能不仅取决于材料体系匹配度,更与表面预处理、工艺参数优化等细节密切相关,例如激光刻蚀或化学粗化可提升陶瓷表面活性,而烧结温度梯度的精密调控直接影响金属层的致密性与缺陷分布。当前技术发展正从宏观尺度向微观界面调控深化,新型复合金属化方案正逐步突破传统工艺的物理化学限制。

(二) 常见金属化工艺的原理

陶瓷封装外壳的金属化工艺原理围绕材料界面结合的物理化学机制展开,其核心技术在于克服陶瓷与金属间热膨胀差异与表面惰性带来的兼容性挑战。镀覆工艺中,化学镀基于自催化还原反应,在陶瓷表面沉积镍、铜等金属层,无需外加电流即可覆盖复杂结构,但需活化处理提升表面活性;电镀则依赖电解液中的金属离子在电场作用下定向迁移,形成均匀致密镀层,但对陶瓷基体的导电预处理要求苛刻。高温烧结工艺以钎焊法为代表,将钎粉、钎粉与有机粘结剂混合涂覆于陶瓷表面,在氢气气氛中高温烧结,金属颗粒与陶瓷晶界发生互扩散,形成过渡梯度界面,此工艺结合强度高但能耗较大。物理气相沉积中的磁控溅射利用等离子体轰击金属靶材,溅射出的金属原子沉积于陶瓷表面,通过调节溅射功率与气压可控制膜层结晶取向,而真空蒸发则借助金属蒸发源的加热汽化实现薄膜沉积,二者均能制备纳米级金属层,但界面结合力受制于陶瓷表面形貌与沉积能垒。工艺选择需综合考量镀层功能性、生产规模及设备成本,例如高频器件倾向溅射工艺的低粗糙度优势,而大功率封装更注重烧结工艺的界面热稳定性。表面粗化、掺杂改性等预处理技术正成为提升金属化质量的关键突破口。

三、陶瓷封装外壳金属化工艺分析

(一) 镀覆金属化工艺分析

陶瓷封装外壳的镀覆金属化工艺基于化学或电化学沉积原理,其核心在于在陶瓷表面构建连续致密的金属层以适配电路连接需求。化学镀采用自催化还原反应,无需外接电源即可在活化后的陶瓷表面沉积镍、铜等金属,其优势在于

对复杂几何结构的均匀覆盖能力,但前处理需通过敏化、活化等步骤克服陶瓷表面惰性,镀液稳定性与废液处理问题亦对规模化生产形成制约。电镀工艺依赖外部电场驱动金属离子定向迁移沉积,可精准控制镀层厚度与成分,但陶瓷基体需预先进行导电化处理,例如化学镀铜打底或石墨涂层,否则易因绝缘特性导致局部镀层缺失。镀覆工艺的界面结合强度普遍弱于高温烧结法,镀层孔隙率与内应力易引发长期使用中的微裂纹扩展,采用脉冲电镀或复合镀层(如镍-磷合金)可改善镀层致密性及抗热震性能。当前镀覆技术正朝着低污染、高精度方向演进,例如无氰镀液开发及激光诱导局部沉积的应用,既满足微电子封装对精细线路的需求,又符合绿色制造趋势,但其在高温高湿环境下的长期可靠性仍需通过界面改性或梯度镀层设计进一步提升^[1]。

(二) 高温烧结金属化工艺分析

高温烧结金属化工艺以金属粉末与陶瓷基体的共烧反应为核心,在氢气或氮氢混合气氛中完成界面冶金结合。典型钎焊法将钎粉、钎粉与有机粘结剂混合制成金属浆料,涂覆于氧化铝陶瓷表面,经干燥后进入高温烧结阶段:钎在 1300℃ 以上优先氧化并与陶瓷中的 Al_2O_3 反应生成钎铝尖晶石过渡层,钎颗粒在此过程中部分氧化形成钎-钎-氧复合相,有效缓解陶瓷与金属的热膨胀失配。该工艺形成的金属化层呈现梯度结构,界面剪切强度可达 80MPa 以上,耐高温性与气密性突出,但金属浆料粘度、烧结温度曲线及气氛氧分压的协同控制极为关键。材料匹配性直接影响工艺稳定性,例如氮化铝陶瓷需改用钨系浆料以避免界面反应不足,而低温共烧陶瓷(LTCC)则需引入玻璃相降低烧结温度。当前研究聚焦于纳米金属浆料开发与烧结动力学模拟,旨在提升界面扩散效率并降低工艺能耗,但金属层表面粗糙度与二次加工兼容性仍是制约高频器件应用的瓶颈。

(三) 物理气相沉积金属化工艺分析

物理气相沉积金属化工艺借助真空环境下金属原子的定向迁移,在陶瓷表面形成纳米级金属薄膜。磁控溅射技术通过高能离子轰击金属靶材,溅射出的原子以动能沉积于陶瓷基体,其膜层结晶取向受溅射功率与工作气压调控,可实现钛、钨等高熔点金属的均匀覆盖,但界面结合力依赖基体表面刻蚀预处理形成的微观锚定效应。真空蒸发法则利用电阻加热或电子束轰击使金属源汽化,原子在低温陶瓷表面凝结成膜,适用于铝、金等低熔点金属沉积,但膜层致密度受真空度与基体温度影响显著。该工艺的突出优势在于低温成膜特性,避免高温对陶瓷微观结构的破坏,且膜厚可控精度

达亚微米级,满足高频器件对表面粗糙度的严苛要求。然而沉积速率低、设备成本高限制其大规模应用,界面金属-陶瓷化学键合不足易引发热循环下的层间剥离。技术改进聚焦于等离子体辅助沉积增强界面反应活性,或引入过渡层构建梯度结合结构,例如溅射氮化钛后再沉积铜层可协同提升附着强度与导电性。当前物理气相沉积在高精度微波封装与光学器件金属化领域具有不可替代性,但工艺优化需平衡沉积效率与界面可靠性之间的矛盾。

四、不同金属化工艺的对比与选择

(一) 工艺性能对比

陶瓷封装外壳金属化工艺的性能差异源于界面结合机制与工艺条件的本质区别。高温烧结工艺凭借金属-陶瓷互扩散形成的梯度界面,展现出卓越的结合强度与热稳定性,但受限于 1400℃ 以上烧结温度,基体易发生热应力形变且能耗较高;镀覆工艺在室温至中温区间完成金属沉积,对复杂结构包覆性优异,然而化学镀层孔隙率偏高,电镀层则因界面物理结合特性易在热循环中产生微裂纹;物理气相沉积通过原子级沉积实现纳米级膜厚控制,表面粗糙度可优化至亚微米级,尤其适配高频信号传输需求,但膜层与陶瓷基体间化学键合薄弱,需依赖过渡层或等离子体活化增强附着。工艺温度对材料热损伤的敏感性差异显著,例如氮化铝陶瓷在高温烧结时易发生界面氮元素逸散,而低温沉积工艺则可规避此类问题。生产成本方面,镀覆工艺具备规模化优势,气相沉积设备投资与维护成本则高出数倍。实际应用中,大功率器件多选择烧结工艺确保长期可靠性,微型化射频模块倾向物理气相沉积以维持信号完整性,民用电子则平衡成本与性能采用镀覆技术。工艺选择需综合考量封装结构、服役环境及产业链配套能力,新兴技术如激光辅助沉积正尝试突破现有性能瓶颈^[2]。

(二) 成本效益对比

参考文献

[1]希奇.陶瓷封装外壳的金属化工艺研究[J].景德镇陶瓷, 2003, 13(4): 35-37.

[2]王灿, 淦作腾, 张世伟, 等.高温共烧陶瓷封装外壳生瓷加工精度的控制[J].Micronanoelectronic Technology, 2024, 61(8): 12.

作者简介: 李生, 出生年月: 1986.12, 男, 民族: 汉, 籍贯: 河南、信阳, 学历: 硕士, 职称: 中级工程师, 职务: 科技部副总监, 公司研究方向: 集成电路陶瓷封装外壳, 氧化铝、氮化铝 HTCC 基板/外壳/器件。产品: 陶瓷双列直插式外壳、陶瓷针栅阵列外壳、陶瓷扁平外壳、陶瓷焊盘阵列外壳等。关于陶瓷封。

陶瓷封装外壳金属化工艺的成本效益受设备投资、材料损耗及工艺复杂度多重因素制约。高温烧结工艺需专用窑炉与气氛控制系统,设备折旧成本占比较高,但金属浆料单耗低且适用于大批量生产,综合成本随产能提升显著下降;镀覆工艺初期设备投入较低,但化学镀液消耗与废液处理成本持续累积,电镀工艺的阳极损耗与电力消耗进一步推高长期运行费用,适合中小批量多品种生产。物理气相沉积设备购置费用高昂,真空系统维护与靶材更换频率直接影响生产成本,但其材料利用率可达 70% 以上,在精密图形化需求场景中可省去掩模蚀刻工序,反降综合加工成本。工艺稳定性对废品率的影响不容忽视,例如烧结工艺参数波动易导致金属层开裂,而气相沉积的膜厚均匀性缺陷可能引发后续焊接失效。环保法规趋严背景下,镀覆工艺的氰化物管控与重金属废水处理成本持续攀升,烧结与气相沉积的绿色化改造成本差异进一步左右技术路线选择。实际应用中,军品封装多优先考虑性能而容忍高成本烧结工艺,消费电子领域则倾向镀覆技术平衡性价比,微电子高密度互连场景需承受气相沉积的高投入以换取功能优势。

五、结语

陶瓷封装外壳金属化工艺的优化需兼顾材料科学、工艺工程与成本控制的协同创新。镀覆工艺在精密电子领域潜力显著,但需突破镀液稳定性与环保瓶颈;高温烧结工艺的界面强化特性适用于高功率器件,但工艺参数的精控是提升良率的关键;物理气相沉积技术在高频、微型化场景中优势突出,但需通过设备迭代降低边际成本。未来研究应关注纳米金属化、复合镀层等新兴方向,同时结合人工智能技术实现工艺参数的动态优化。金属化工艺的进步不仅推动陶瓷封装技术向更高性能迈进,也为半导体、新能源等产业的升级提供底层支撑。