

硅压阻式压力充油芯体封装工艺设计改良与创新

崔 竹

中国电子科技集团公司第四十九研究所 黑龙江 哈尔滨 150000

摘 要：针对硅压阻式压力充油芯体传统封装工艺存在气泡残留、密封可靠性差、批次一致性低、温漂误差明显等生产问题，本文系统分析传统封装工艺原理、流程及核心缺陷，梳理材料、参数、结构、工序四大关键影响因素。结合工业量产实际工况，开展封装材料选型优化、工艺参数精细化标定与封装结构改良设计，同时创新分层注油、复合密封固化、自动化闭环时效封装工艺。试验导向的改良与创新方案，有效解决传统工艺固有弊端，提升芯体测量精度、环境适应性与生产良品率，可为同类压力芯体封装生产提供工程参考。

关键词：硅压阻式；压力充油芯体；封装工艺；工艺改良；工艺创新

引言：硅压阻式压力芯体凭借响应快、精度高的优势，广泛应用于工业检测、智能设备等压力传感领域。充油封装是保障芯体长期稳定工作的核心工序，直接决定传感器测量稳定性与使用寿命。现阶段国内多数量产工艺仍沿用传统封装模式，依赖人工经验调控工艺参数，存在密封结构单一、工艺适配性弱、产品批次偏差大等问题，复杂工况下易出现漂移、渗油、失效等故障。为改善产品综合性能，提升量产标准化水平，本文围绕传统封装工艺短板，开展工艺改良与技术创新研究，优化整套封装生产工艺体系。

1 硅压阻式压力充油芯体封装核心理论与传统工艺分析

1.1 硅压阻式压力芯体工作原理与结构特性

硅压阻式压力芯体以单晶硅材料为核心传感单元，依托半导体压阻效应实现压力信号转换。芯片表面通过离子注入、扩散工艺制作压阻条，组成惠斯通电桥结构，当硅膜片受外界压力发生弹性形变时，压阻条阻值随之改变，电桥输出对应电压信号，完成压力到电信号的精准转化。芯体整体由硅芯片、绝缘基底、引线结构组成，具备灵敏度高、响应速度快的特点。同时单晶硅材料存在温漂明显、抗冲击能力弱、易受潮湿及腐蚀介质影响的缺陷，必须通过充油封装结构隔离外界环境，保障传感芯片稳定工作。

1.2 充油封装工艺核心原理与技术指标要求

充油封装的核心原理是利用绝缘液压油作为压力传递介质，将外部压力均匀传导至硅膜片，同时隔绝水汽、粉尘、酸碱介质，保护核心芯片。封装工艺需满足多项核心技术指标，压力传递无滞后、无损耗，保证测量精度；密封结构具备长期密封性，杜绝漏油、进气问题；整体结构温漂一致性良好，适配高低温工作环境；

封装后芯体具备稳定重复性，额定压力、过载压力、绝缘性能均需符合工业传感标准，以此保障压力传感器长期可靠运行。

1.3 传统充油芯体封装工艺流程与关键工序拆解

传统充油芯体封装采用成熟标准化流程，核心工序依次为芯片贴片固化、引线键合、壳体装配、真空注油、密封固化、压力校准。其中真空注油、密封固化是影响成品质量的关键工序，真空环境用于排出腔体内部空气，避免气泡残留影响压力传递；密封固化通过密封胶封堵注油孔，实现腔体密闭。整套工艺依赖常规工装设备，工序衔接简单、生产成本低，适配批量生产，但各工序参数多依靠人工经验调控，参数统一性较差^[1]。

2 硅压阻式充油芯体封装工艺关键影响因素

结合充油芯体实际封装生产工况，其封装质量、测量精度及长期可靠性主要受以下四类核心因素影响：

（1）封装材料因素。封装所用充油介质、密封胶及壳体基材是基础影响条件。液压油的粘度、绝缘性、耐温性直接决定压力传递效果，劣质油品易出现变质、挥发问题。密封胶的固化收缩率、粘结强度及抗老化性能，直接影响腔体密封完整性。壳体基材的热膨胀系数与硅芯片的匹配程度，可直接规避温变工况下的结构形变应力。（2）工艺参数因素。真空度、注油速率、固化温度与保温时间为核心可控参数。封装真空度不足，腔体内易残留微气泡，造成压力传递不均。注油速率过快会引发油液湍流、积气，速率过慢易混入杂质。固化温区失衡、保温时长不足，会导致密封胶固化不彻底，出现虚封、漏封隐患。（3）封装结构因素。传统腔体结构、注油孔布局、引线密封结构存在设计短板。腔体容积配比不合理、注油孔孔径单一，会造成注油填充不饱满。引线密封结构贴合度不足，易产生缝隙，成为水汽、空气

渗入的主要通道,降低芯体防护等级。(4)工序操作因素。前期芯片贴片、键合精度,中后期装配、封堵工序的标准化程度存在人为差异。工装定位偏差、装配对位不准,会造成结构装配间隙异常,直接降低封装良品率与产品一致性^[2]。

3 硅压阻式压力充油芯体封装工艺改良方案设计

3.1 工艺改良目标与整体设计原则

本次封装工艺改良以解决传统工艺一致性差、密封稳定性不足、良品率偏低的现场问题为核心目标。整体改良围绕精度提升、结构可靠、生产适配、成本可控四个核心方向开展,所有改良方案均兼容现有生产设备与生产线布局,无需大规模改造产线,保证落地可行性。改良设计遵循以下三项基本原则。(1)问题导向原则,针对传统工艺气泡残留、固化缺陷、注油不均、结构应力集中等实际生产通病进行针对性优化,杜绝无效改良。(2)一致性原则,通过参数标准化、操作规范化、结构精细化,缩小批次产品的性能偏差,提升芯体测量精度与重复性。(3)工程实用性原则,改良材料、工艺参数、工序设计均选用市面通用、成本可控的工业化方案,兼顾产品质量与量产效率,适配传感器批量生产需求。

3.2 封装材料体系优化与选型改良

传统封装材料适配性不足是导致芯体后期失效、漂移超差的重要原因,本次从充油介质、密封胶、粘接基材三类核心材料完成选型改良,替代原有通用型材料。

(1)充油介质改良替换。摒弃传统普通硅油,选用耐高温、低挥发、低粘度稳态硅油。该油品纯度更高,杂质含量可控,高温环境下不易挥发、变质,可有效规避长期工作中油液气化导致的腔体压力失衡。同时油品粘度系数更稳定,高低温交变工况下压力传递均匀性更好,适配工业宽温工作场景。(2)密封胶体系优化。取消单一通用环氧密封胶,采用双组份耐老化改性环氧胶搭配微量柔性密封胶组合封装。硬性环氧胶负责结构固定与高强度密封,保证封堵结构稳定性;柔性密封胶填充微小缝隙,抵消温度变化产生的结构形变应力,避免胶体开裂、脱胶。改良后的密封胶固化收缩率更低,无明显固化形变,可杜绝注油孔封堵后出现的微渗漏问题。

(3)粘接与基底材料优化。芯片贴片粘接材料选用高匹配度低温固化胶,热膨胀系数与单晶硅芯片、金属壳体高度适配,减少温变过程中产生的残余应力,避免芯片受力变形引发的零点漂移。壳体基材统一筛选厚度均匀、平面度达标工件,剔除变形、壁厚偏差超差壳体,从源头降低装配间隙不均问题。

3.3 关键工艺参数精细化优化设计

传统工艺参数多为经验值,参数区间宽泛、无标准化阈值,是产品批次偏差大的核心诱因。本次针对真空注油、胶体固化、腔体排气三大核心工序,完成参数精细化标定与区间固化。(1)真空度参数优化。传统工艺真空度区间跨度大,排气不彻底。改良后设定分级抽真空模式,初级真空稳定在-0.08MPa进行预排气,去除腔体内大部分空气;次级真空提升至-0.095MPa以上并保压3min,彻底排出腔体微小缝隙内的残留空气,杜绝微气泡残留,保证油液填充饱满度。(2)注油速率参数固化。取消人工随意调速注油方式,采用匀速分段注油参数。前期低速注油完成腔体底部填充,中期匀速完成主体注油,后期慢速补油,规避高速注油产生的湍流、积气现象,保证腔体内油液无空隙、无气泡,压力传递无阻滞。(3)固化工艺参数细化。优化固化温度与时长分段控制,摒弃传统单一高温固化模式。前期低温预固化,让胶体缓慢流动、充分填充缝隙;中期恒温固化,保证胶体结构稳定成型;后期低温保温退火,释放固化残余应力。分段固化可有效解决胶体固化不均、表层硬化内部未固化、胶体开裂等工艺缺陷。

3.4 传统封装结构缺陷针对性改良

传统充油芯体封装腔体结构、注油孔结构、引线密封结构存在设计短板,无法适配复杂工况,本次结合生产故障数据,完成结构针对性改良。(1)腔体结构改良。优化内部腔体容积比例,调整腔体规整度,取消传统异形死角结构,避免死角积气、积杂。规整的腔体结构可让油液填充更均匀,压力传导全域同步,减少局部压力滞后问题,提升芯体测量一致性。(2)注油孔结构优化。传统单一直径注油孔封堵难度大、易留缝隙,改良为阶梯式注油孔结构。小孔径内侧注油、大孔径外侧封堵,既方便真空排气与精准注油,又能增大密封胶贴合面积,提升封堵密封性,有效解决后期渗油、进气故障。(3)引线密封结构改良。针对传统引线缝隙易渗水、进气的问题,增加引线密封过渡结构,采用胶体包裹填充+限位压紧复合结构,彻底封堵引线与壳体之间的微小缝隙,提升整体防护等级,让芯体可适配湿热、粉尘等恶劣工业环境。(4)装配限位结构改良。在壳体装配位置增加定位限位结构,替代传统人工对位装配,保证每次装配对位精度统一,杜绝装配间隙偏差,消除因装配错位引发的结构应力、密封失效问题,大幅提升产品批次一致性^[3]。

4 硅压阻式压力充油芯体封装工艺创新设计

4.1 工艺创新设计总体思路与创新准则

本次封装工艺创新基于前文传统工艺缺陷与改良方案开展,区别于常规参数优化,聚焦工艺方式、结构工序与生产模式的实质性创新,解决现有封装工艺气泡残留、密封耐久性差、批次一致性低、人工干预误差大等行业痛点。所有创新设计均立足量产工况,不追求理论化、复杂化设计,以可落地、低成本、高适配为核心准则。创新过程兼顾芯体测量精度、环境适应性与生产效率,同时兼容现有改良材料与优化参数,形成“材料优化+参数精细化+工艺创新”的完整封装体系,进一步突破传统工艺的技术局限。

4.2 真空匀速分层精准注油工艺创新

针对传统单次注油易积气、填充不饱满、压力传递不均的问题,创新设计真空匀速分层注油新工艺,替代传统单一注油模式,全程设备自动化控速、控压,规避人工操作误差。(1) 分层注油流程创新。将单次注油优化为预注、填充、补平三个阶段。预注阶段在高真空环境下低速注入少量油液,浸润腔体底部与芯片表面,排出结构微缝隙残留空气;填充阶段匀速提升注油流量,完成腔体主体填充,避免湍流卷气;补平阶段降低流速,精准补偿油液沉降空隙,保证腔体填充无死角、无空缺。(2) 压力联动控参创新。创新真空度与注油速率联动控制模式,根据腔体容积实时调节参数,解决固定参数适配性差的问题。高真空保压状态下同步注油,杜绝空气二次混入,从工艺根源消除气泡缺陷,大幅提升压力传递的均匀性与同步性。

4.3 一体化复合密封固化结构与工艺创新

传统单一胶体密封工艺存在抗温变差、易开裂、微渗漏等问题,本次创新一体化复合密封固化工艺,结合结构优化与工序革新,提升封装密封可靠性与结构稳定性。(1) 双层复合密封工艺创新。摒弃单层密封结构,创新采用“柔性垫层+刚性封层”双层密封工艺。内层柔性胶体填充细微缝隙,抵消高低温交变产生的结构形变应力,避免密封层开裂;外层刚性环氧胶体做加固封堵,提升结构强度与抗冲击能力,解决长期工况下的渗油、进气问题。(2) 同步固化工序创新。优化分步装配、分步固化的传统模式,创新一体化同步固化工艺。

完成注油封堵后,将壳体、引线、注油孔密封结构同步置于分段温区固化,保证各密封部位固化节奏统一,避免局部固化滞后、粘接不实的工艺问题,提升整体密封结构的整体性。

4.4 自动化闭环防老化封装工序创新

针对传统封装人工干预多、工序离散、成品耐老化性能弱的问题,创新自动化闭环封装工序体系,同时增设防老化辅助工艺,适配复杂工业工况使用需求。(1) 闭环自动化工序创新。整合贴片、键合、注油、密封、固化核心工序,搭建闭环自动化封装流程。取消人工转运、对位、调速等操作,通过工装定位、设备程控实现工序无缝衔接,减少人为干扰带来的装配偏差、参数波动问题,大幅提升产品批次一致性与生产良品率。(2) 低温时效防老化工艺创新。在封装收尾工序新增低温时效处理工艺,替代传统直接成型工序。固化完成后将芯体置于恒温常压环境下保温静置,释放封装过程产生的残余结构应力,稳定油液内部状态与密封胶体性能,提前剔除后期易漂移、易失效的不良品,有效提升芯体长期工作的稳定性与抗老化能力^[4]。

结束语:本文通过梳理硅压阻式充油芯体传统封装工艺的技术短板,完成封装材料、工艺参数、结构设计的针对性改良,同时实现多项核心封装工艺的技术创新。优化后的工艺体系有效消除气泡残留、密封开裂、参数波动等常见生产缺陷,显著改善芯体测量一致性与耐老化性能。新工艺兼顾量产可行性与成本优势,适配工业化批量生产需求。

参考文献

- [1]程振乾,张强,毕佳宇,等.流量传感器用高精度差压芯体的设计[J].传感器与微系统,2025,44(11):106-109.
- [2]徐振忠,闫云龙,尤佳,等.硅压阻式压力敏感芯体应变电阻失效分析[J].传感器与微系统,2024,43(6):38-41.
- [3]李闯,涂孝军,温学林.一种航空用高温压力芯片设计与封装技术研究[J].仪表技术与传感器,2023,(8):7-14.
- [4]贺天昊.无引线封装高温压力芯体设计与制造工艺关键技术研究[D].南昌:华东交通大学,2023,(02):11-12.