

中，基于性能退化数据的线性回归模型应用广泛，其核心公式为：

$$RUL(t) = (P_{\text{临界}} - P(t)) / k$$

3.3 退役回收阶段管理策略研究

退役回收阶段是全生命周期管理的最后一个环节，也是实现资源循环利用的重要环节。针对船舶机舱自动化系统创建绿色回收标准以及流程，把能够再利用的模块、组件做检测、认证和再制造等，避免资源浪费和环境破坏。

通过对退役系统的运行数据进行分析，给新一代系统研发及改进提供依据，从而形成全生命周期的数据闭环管理^[5]。收集从头到尾的系统故障记录、维修历史性能下降数据等，可以为以后的系统可靠设计、维护策略改进提供数据支撑。

4 船岸一体化智能运维平台的构建研究

船岸一体化智能运维平台是实现船舶机舱全生命周期管理的重要载体，以船岸数据协同、船岸模型协同、船岸业务协同实现船舶机舱运维的智能化、精准化和高效化。

4.1 基于数据大脑的船岸一体化系统架构

基于数据大脑的船岸一体机舱智能运维系统包括四个部分，分别为即控制端（船端）、管理端（岸基）、本地云和远程云。

船端系统属于控制端，它的主要任务是完成单个船舶的状态感知与认知，并给船员作业给予支持；它的功能采取“平台+应用”架构布置，目的是让机舱运行做到“零优化”。岸基系统属于管理端，依然采用“平台+应用”的方式，围绕岸基业务部门的高效运作展开工作，给予知识评估、内容检索及定制推送服务，以此对多船经营、守护与管控过程进行改良，希望达成机舱“无忧”状况。本地云是分布式数据的储存和计算结点，面向各个级别的岸基管理部门提供本地的数据处理、计算分析和功能运作环境；通过知识同步的方式可以降低大量原始数据传输带来的网络堵塞。远程云负责认知学习与船岸协同，在群体智能中实施协同认知学习，采用群体协同策略来应对诸如竞争性学习、知识共享、自主认知学习以及任务导向下的决策自动化这些复杂问题。

4.2 智能运维流程与机制

船岸一体机舱智能运维系统遵照“感知—响应”闭环范式：船端系统先汇集导航，主动力，电力，辅机及关键机电设备的振动监测量，再加上人工录入信息，在本舰服务器上执行多源异构数据融合并持久化；之后用这个集成数据流当作船端状态评价模型的驱动输入，依靠内嵌的领域知识库对机舱设备开展即时健康状态评判和故障准确诊断。

出现异常状况或者潜在故障的时候，就会引发相应的反应机制，简单的问题由船端系统自己来做决定，并给出维修提议。复杂一点的就靠船岸通讯把有关的数据传送到岸上数据大脑平台，然后用岸上的强大算力加上知识库深入分析，得出解决办法之后再发回船上执行。

岸基系统依靠汇集大量船只的数据来发现同类型设备

存在的共同问题，改进维护方法，为新造船的设计提供反馈。如某 eRM 系统可以提升故障诊断与趋势分析水平，可以支持 CBM+ 算法快速开发修改，就可逐步向自动分析或预测过渡。

4.3 船舶机舱自动化系统的安全挑战与应对策略研究

随着船舶机舱自动化系统集成度越来越高，网络化越来越强，系统的安全问题也越来越突出。

网络安全风险、船岸一体化的系统架构，使得船舶机舱网络由原来的封闭变为了开放状态，从而也带来了被其他地方攻击的风险。中国船级社的《船舶智能机舱检验指南》中对智能机舱系统的网络安全检验要求做了特别修订，说明它对网络安全有特别的重视。建立船岸皆有的纵深防御体系，保证数据传输、存储和加工安全。

数据质量以及一致性存在困难。智能运维系统依赖良好的数据质量，但是船舶机舱环境复杂，传感器采集的数据中存在噪声、缺失或者错误的情况时，就会对判断的准确性产生影响。要加强对数据的质量控制，对数据进行清洗、检验、修正，保证数据的可靠。

系统复杂性和可靠性之间存在平衡，系统的集成度越高，其复杂程度就以指数形式增加，如何保证系统具有足够的可靠性就成为了一个问题。模块化设计、开放式的结构可以降低系统的复杂度，但是需要形成标准化的接口。

人才缺乏、培训难，智能机舱系统对船员、岸基人员的技术水平提出更高的要求，既要懂传统的轮机工程知识，又要懂信息科技、数据解析等新技能。要有培训体系和认证标准，培养复合型人才。

5 结语

船舶机舱自动化系统的整合以及全生命周期经营是智能船舶发展的重要支撑，经由分层架构规划、关键技能融合并塑造船岸协同平台来做到机舱系统从各自运作到智能维保的转变。全生命周期管理策略的实行，改善了设备的可靠性和运维效率，也给绿色船舶和可持续发展提出了新的思路。伴随 5G、人工智能、数字孪生技术的融合，船舶机舱自主决策和无忧化管理将得到更好的发展。

参考文献：

- [1] 付佳. 船舶电气自动化控制系统的集成与协同工作机制[J]. 船舶物资与市场, 2024, 32 (12): 60-62.
- [2] 韩铁民, 李松霖, 印士波. 基于一体化集成平台的船舶机电自动化系统的设计与应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8 (11): 258-260.
- [3] 张云, 余勇林. 船舶综合集成自动化系统内外接口标准研究[J]. 广东造船, 2018, 37 (06): 31-33+21.
- [4] 何金平, 张龙. 小型LNG运输船电气设计概述[J]. 天津科技, 2019, 46 (04): 43-45+50.
- [5] 刘伟平. 5000t起重船集成自动化系统设计[J]. 广东造船, 2019, 38 (06): 44-46+64.

Research on Hydrogen Control Methods for High-Silicon Aluminum Microwave Component Housings

Xianwen Ren Can Chen

Shanghai Bureau's First Representative Office in Area, Nanjing, Jiangsu, 210001, China

Abstract

Gallium arsenide (GaAs) semiconductors are widely used in multi-chip microwave components due to their excellent performance. However, hydrogen within the component's atmosphere significantly impacts GaAs microwave devices, potentially causing performance degradation and failure. This study explores the effectiveness of hydrogen getters and vacuum baking methods in controlling hydrogen levels in high-silicon aluminum microwave component housings. The research shows that hydrogen getters can effectively absorb and immobilize hydrogen, significantly reducing the hydrogen content inside the components. Additionally, vacuum baking at different temperatures and durations also significantly affects hydrogen levels. Combining these two methods can reduce hydrogen content to very low levels, thereby enhancing the performance and reliability of the components.

Keywords

Hydrogen getters; Dehydrogenation; High-silicon; aluminum; Microwave components; Vacuum baking

高硅铝壳体微波组件控氢方法的研究

任宪文 陈灿

上海局驻南京地区第一代表室，中国·江苏南京 210001

摘要

砷化镓类半导体因其优良性能广泛应用于多芯片微波组件中。然而，组件内部的氢气对砷化镓类微波器件影响显著，可能导致性能退化和故障。本文通过实验研究了吸氢材料和真空烘烤两种方法在高硅铝壳体微波组件中的控氢效果。研究表明，吸氢材料能够有效吸收和固定氢气，显著降低组件内部的氢含量。同时，真空烘烤在不同温度和时间条件下对氢含量也有显著影响。结合两种方法，氢含量可以降至极低水平，从而提高组件的性能和可靠性。

关键词

吸氢材料；去氢；高硅铝；微波组件；真空烘烤

1 引言

砷化镓 (GaAs) 半导体在受到氢气 (H₂) 影响后，会出现一系列的性能退化和故障。氢能够渗透到 GaAs 的晶格中，在关键的晶体界面上形成缺陷，这些缺陷会导致载流子迁移率降低，从而使其性能大幅下降^[1]。此外，氢气会与掺杂质发生反应，改变半导体性能，影响其稳定性。同时，氢气还会影响 GaAs 中常用的金属接触材料钛 (Ti)，导致 Ti 的接触电阻增大，进一步影响器件的性能和可靠性^[2]。这种性能恶化的现象被称为“氢中毒”。

铝合金是航空航天常用的材料，其中高硅铝又因其优越的性能逐渐成为一种重要的微波组件壳体材料。为提高其应用适配性，通常需要进行表面镀金处理。然而，在镀金过程中，化学试剂会与壳体材料反应产生氢气^[3]，这些氢会渗

透并残存于材料内部或表面，并在后续使用过程中逐渐释放，影响 GaAs 芯片的性能。已有文献报道，高硅铝镀金完成后其含氢量可达到 2334-7077 ppm^[4]，远高于其他铝合金基材。目前，行业内对于 GaAs 芯片微波组件壳体内部的氢含量没有统一标准，一些内部标准以 2000 ppm 作为氢含量是否合格的判断依据。以此标准来看，2334-7077 ppm 的含氢量已经非常高。

因此，尽可能降低高硅铝壳体微波组件内部的氢含量，是避免“氢中毒”现象的最佳方法。已有研究表明，高温烘烤是有效的氢去除方法，同时，添加吸氢材料也可以在组件使用过程中进一步吸收壳体缓慢释放的氢^{[5][6]}。基于去除和吸附两个角度，本文设计了相应的实验，研究了含 GaAs 芯片高硅铝壳体微波组件内部氢含量的有效控制方法，并对这些方法进行了总结和归纳，以期达到规避“氢中毒”的目的。

2 吸氢材料简介

吸氢材料 (Hydrogen getters) 是一类能够高效吸收和储

【作者简介】任宪文（1978-），男，本科，高级工程师，从事电子对抗研究。

存氢气的特殊材料，可以在组件的制造、运输、存储和运行过程中有效地捕捉和固定氢气，从而防止氢气对敏感器件如 GaAs 半导体的侵害。常见的吸氢材料包括钛(Ti)、锆(Zr)、钯(Pd)及其合金，这些材料通常被制成薄膜、粉末或合金形式，其中，钛基吸氢材料(Titanium-based hydrogen getters)在微波组件中具有重要的应用价值。

由于钛(Ti)具有优异的吸氢性能^[7]，它在吸附氢的应用中被广泛采用。

钛基吸氢材料的工作原理主要基于钛与氢气的化学反应。钛能够在较低温度下与氢气反应，形成氢化钛(TiH₂)。这一反应不仅使氢气被固定在材料内部，还降低了氢气在微波组件内的浓度，从而保护了其他敏感材料。此外，钛基吸氢材料甚至需达到约 550°C 的高温才会释放吸收的氢气^[8]，这意味着在微波组件常工作的 -55 ~ +85°C 条件下，吸收的氢气能够被有效固定，不会重新释放。

因此，钛基吸氢材料具有：

高吸氢容量：钛基材料能够吸收大量的氢气，这使其在需要控制氢气浓度的环境中表现出色；

快速吸氢速率：钛基材料能够迅速与氢气反应，提供即时的氢气控制效果；

良好的稳定性：钛基材料在吸氢后能保持稳定，不会对微波组件的其他部分产生负面影响。

基于上述优势，本文中所涉及试验将选用片状钛基吸氢材料作为试样，以验证其在实际应用中的效果。

3 试验内容

3.1 试验方案设计

为了从去除和吸附两个方面充分研究与验证相应方法的有效性，设计了如图 1 所示的高硅铝试验壳体，外形尺寸为 86 × 63 × 6.2 (mm)，内腔尺寸为 76.3 × 59.3 × 4.7 (mm)，内腔整体局部镀金，相应盖板也选用高硅铝材料，其可与壳体之间使用激光封焊的工艺进行密封处理。

试验整体设计目标为三个组别，分别对应无处理、真空烘烤以及吸氢材料吸附组，以此进行对比分析烘烤和吸附对氢含量的控制能力，并找出最为合适的参数，共准备有 10 只壳体。

本试验依据吸氢材料厂家的推荐，吸附组采用环氧树脂粘接尺寸为 4 × 4 × 0.3 (mm) 吸氢材料共 4 片。具体试验内容如表 1 所示。所有壳体在激光密封后，依据 GJB360B 方法 112 进行漏率检验，漏率合格后，进行相应的内部氛围检测。

3.2 结果分析与讨论

3.2.1 烘烤去氢

首先对 A 组与 B 组的壳体进行了相应的氢含量测试，结果如表 2 所示。

表 1 氢含量控制试验

组别	编号	烘烤	吸氢材料	激光密封能前烘烤			
A	1#	/	/	真空 100°C 下 24h			
	2#						
B	3#	真空 125°C 下 160h	/				
	4#						
	5#	真空 250°C 下 48h					
	6#						
C	7#	/	4 × 4 × 0.3 (mm)，4 片	基于 B 组试验结果 确定烘烤参数			
	8#						
D	9#	基于 B 组试验结果 确定烘烤参数	4 × 4 × 0.3 (mm)，4 片				
	10#						

表 2 A 与 B 组试验结果

组别	编号	氢含量(ppm)
A	1#	1553
	2#	1573
B	3#	522
	4#	377
	5#	130
	6#	192

从表 2 的结果可以看出，试验壳体在没有进行任何处理的情况下，氢含量达到了 1500ppm 的水平，而经过 125°C /160h 真空烘烤后的壳体已降低至 300-500ppm，尤其是 250°C /48h 下的壳体，氢含量甚至可降低到 100-200ppm 的较低水平。由此可以对比发现，随着烘烤温度升高，高硅铝壳体的残存的氢可得到有效的挥发去除。

初步结果表明，以 250°C /48h 作为烘烤去氢参数效果最佳。虽然已有研究显示可伐合金可焊性在 250°C /48h 处理后无明显变化^[9]，但本次试验使用的高硅铝壳体在后续焊接摸底过程中，却出现了较为明显的软钎焊焊锡不浸润的现象，这或为材料本身特性、镀层结构等与可伐合金不相同导致，本次试验未进一步研究，不再深入分析与讨论。

综合实际情况，选用 125°C /160h 作为烘烤去氢的参数，其不仅可以有效降低氢含量，同时还能避免高硅铝在烘烤后出现镀层软钎焊焊接不良现象，确保工艺的稳定性和可靠性。

3.2.2 吸附去氢

对比 C 组与 A 组的试验结果显示，在未进行任何烘烤处理，仅通过添加吸氢材料的情况下，氢含量从 A 组的 1500ppm 显著降低至 400~500ppm。这一结果表明，吸氢材料在高硅铝壳体不进行额外热处理的情况下，就能够有效地减少壳体中的氢含量。

进一步分析可以发现，这一氢含量水平与 B 组仅通过烘烤处理的氢含量(即未经吸氢材料处理的情况下通过加热来去除氢气)非常接近。因此，两个实验数据的相似性说明

吸氢材料对氢气的吸附效果极为显著，且在一定程度上可以替代烘烤处理的功效。

3.2.3 烘烤并吸附

分析 D 组的数据可见，在烘烤与吸附的双重作用下，与 C 组的 400~500ppm 对比，氢含量已经降低至 100ppm 以下。这一显著减少不仅证明了组合方法的有效性，而且说明了这种方法在降低初始氢含量方面的卓越效果。考虑到氢在微波组件使用过程中会逐渐释放，初始氢含量越低，对于产品的长期性能和可靠性越有利。

因此，高温烘烤结合吸氢材料的使用是一种有效的控制氢含量的方法。这种双重处理方法能够最大限度地减少残余氢含量，从而显著提升产品的长期可靠性和性能稳定性。

4 结语

在高硅铝壳体的生产过程中，控制残余氢含量是确保产品性能和可靠性的关键因素。不同的处理方法对氢含量有明显的影响，包括真空烘烤和吸氢材料的应用。通过一系列实验，分别研究了不同温度和时间的烘烤处理、吸氢材料的使用，以及两者结合的综合效果。在此基础上，总结了相应的实验结果和优化的处理方法，为高硅铝壳体的氢控制提供了系统的指导：

125°C /160h 烘烤处理可将氢含量降至 300-500ppm，较

适合用于高硅铝镀金壳体的烘烤去氢处理；

吸氢材料在降低氢含量方面的效果与仅通过烘烤处理的效果相近，这表明吸氢材料对氢气的吸附效果极为显著，可以在一定程度上替代烘烤处理，仅添加吸氢材料可将氢含量降至 400-500ppm，与 125°C /160h 烘烤效果相近；

建议采用 125°C /160h 烘烤结合吸氢材料的方法，既可有效降低高硅铝壳体微波组件内部的氢含量，又可避免焊接不良现象，提升产品长期可靠性。

参考文献

- [1] Roberto Murri, Nicola Pinto, Luigi Schiavulli, Ryoji Fukuhisa, Luciana Mirenghi. The influence of hydrogen on the electrical properties of a-GaAs[J]. Materials Chemistry and Physics,1993,33(1-2):150-157.
- [2] 汪悦,张素娟.氢对金属封装密封元器件可靠性的影响[J].电子元器件的可靠性,2009,27(06):5-9.
- [3] 沈彤茜,高金环,黄杰,彭浩.微波模块氢效应研究综述 [J]. 信息技术与标准化,2018(8):61-64
- [4] 崔西会,方杰,许冰,李元朴,王辉,李波.微波产品除氢工艺方法[J].电子工程技术,2020,41(5):264-266.
- [5] 杨程,胡骏,金家富,满海峰,周演飞.吸氢剂在多芯片微波组件中的应用研究[C].广州:2019 年全国微波毫米波会议论文集 (下册),2019.278-281.