

基于 MIC 的电子元器件多余物来源和预防措施

郭雪林

中国电科产业基础研究院先进集成研究所, 河北 石家庄 050051

[摘要]电子产品朝着高性能和高可靠性发展, 电子元器件里的多余物(FOD)就成了影响产品质量和使用寿命的关键因素, “多余物”, 也称 FOD(Foreign Object Debris)。文中就多余的主要来源与形成机理展开并对加工、储存、运输和使用等环节的多余物问题进行系统分析且提出有针对性的预防措施, 从案例与工程经验归纳, 想给电子制造企业提供控制多余物的可行策略以提升电子产品可靠性和竞争力。

[关键词]MIC 系统; 多余物; 电子元器件; 多余物管理; 预防措施; 信息化控制

DOI: 10.33142/ect.v3i9.17867

中图分类号: TN607

文献标识码: A

Sources and Preventive Measures of Excess Electronic Components Based on MIC

GUO Xuelin

Advanced Integration Research Institute of China Electric Technology Power Industry Basic Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050051, China

Abstract: Electronic products are developing towards high performance and high reliability, and the Foreign Object Debris (FOD) in electronic components has become a key factor affecting product quality and service life. The article elaborates on the main sources and formation mechanisms of excess materials, and systematically analyzes the problem of excess materials in processing, storage, transportation, and use, and proposes targeted preventive measures. Based on case studies and engineering experience, it aims to provide feasible strategies for electronic manufacturing enterprises to control excess materials and enhance the reliability and competitiveness of electronic products.

Keywords: MIC system; Foreign Object Debris; electronic components; Foreign Object Debris management; preventive measures; information control

引言

信息产业和高端制造的核心是电子元器件, 整机性能直接受其可靠性影响, 工艺精细化后微小的多余物(FOD)成了不容忽视的隐患, 材料本身、生产工艺缺陷或者外部环境污染都可能产生多余物, 它会使电气性能波动、结构失效, 还会引发腐蚀反应, 近年来多余物问题越来越受学术界和产业界重视, 但是在来源溯源、控制方法和预防体系方面还存在不足。本文根据多余物的特征探讨电子元器件多余物的来源路径, 分析危害机理, 提出科学有效的预防措施, 给行业提供参考。

1 多余物的基本概念与危害

1.1 MIC 的定义与分类

MIC 是“Microwave Integrated Circuit”的缩写, 即微波集成电路。它是一种将微波频段下的有源器件与无源器件, 通过混合集成或单片集成的方式制成的高频电路, 广泛应用于雷达、通信、导航以及电子对抗等领域。由于 MIC 在工作中频率高、结构精密, 对生产和使用环境有极高的要求, 因此任何细小的杂质或异物都会对其性能造成影响。所谓“多余物”, 是指在 MIC 制造、装配、测试或使用过程中, 非设计需要而残留或进入电路的颗粒、金属屑、纤维、灰尘等异物。这些多余物可能引起电气短路、

性能波动、参数漂移, 甚至导致整个电路失效。尤其在高功率和高频条件下, 微小颗粒也可能产生电弧放电, 危及电路安全。因而, 多余物控制是保证 MIC 可靠性和稳定性的关键环节。

1.2 多余物对电子元器件性能的影响

多余物一般看不见却危害极大。电气性能上, 多余物可能降低绝缘性能并形成导电路径, 从而导致短路、漏电和信号干扰, 金属颗粒在电场下迁移会使电极间短路; 结构性能方面, 粉尘或化学残留物会减小焊点结合力, 进而出现虚焊、脱焊等质量问题, 而且金属氧化物和腐蚀产物在长期运行中可能逐渐扩展, 从而削弱器件机械强度。多余物还影响元器件的环境适应性和可靠性, 在高湿度、高温或者强电磁环境下, 多余物会加速化学反应或者电化学腐蚀, 使产品寿命缩短。好多工程实践都表明, 微米级的颗粒或者薄层污染就能让器件性能不稳定、整机故障, 在航空航天、军工和医疗设备里还可能造成严重安全事故, 多余物被看作是威胁电子元器件可靠性的关键隐患之一。

1.3 国内外研究与标准现状

国际上发达国家和行业组织很重视多余物问题, 美国航空航天局(NASA)、美国军用电子标准(MIL-STD)、IPC 协会都制定了比较严格的清洁度和残留物控制标准。

像 IPC-610 和 IPC-J-STD-001 文件对焊接后残留物、颗粒杂质以及清洁度指标规定得很明确, MIL-STD-1246 把微小颗粒污染的等级进行了分级管理, 日本和欧洲一些半导体与高端制造企业也建立多余物管控体系, 通过洁净室标准、材料认证和过程监控尽量减少多余物的引入。我国在多余物研究和标准化这块起步晚, 但近年来随着航空航天、5G 通信和新能源汽车产业发展起来, 国内学术界和产业界慢慢重视这一课题了, 部分科研院所开展了多余物成因机理与分析方法的研究, 工信部和行业协会也在推动建立更符合国情的多余物控制规范。

我国多余物控制体系建设还得与国际接轨, 以后在标准完善、检测技术、工艺优化上急需不断突破。

2 MIC 中多余物的主要来源

2.1 原材料与零部件加工环节的污染源

电子元器件制造从原材料与零部件加工起步, 这一环节往往是多余物产生的重要源头。机械加工金属材料时会产生细小金属屑、磨粒和氧化物, 后续焊接或封装时若未彻底清理这些物质, 可能进入产品内部造成质量隐患。切割、成型塑料、树脂和复合材料时易产生微小碎屑和颗粒, 在静电作用下它们更易附着于基板或芯片表面, 再者, 表面处理和清洗不彻底也有质量隐患, 像电镀过程残留的化学物质、酸碱液体、清洗剂中的离子杂质, 杂质若没完全去除就成了多余物, 还可能和元器件材料二次反应, 原材料纯度和稳定性也直接影响多余物水平, 供应链要是缺乏严格质量控制, 污染源就容易被带入整个生产流程。

2.2 生产工艺与装配过程中的多余物产生

生产和装配阶段多余物的产生更复杂更隐蔽, 焊接工艺是主要环节, 焊料飞溅、助焊剂残留和焊接烟尘都可能产生多余物, 免清洗工艺若控制不严格也会留下潜在残余物。贴片、点胶、固化等工序中胶水溢出、气泡破裂、固化不完全都会产生微小颗粒或黏附物, 且简单清洁难以去除这些多余物。机械操作和设备磨损也存在问题, 生产线上的传送带、夹具、刀具长期运行可能会剥落微粒、滴落润滑油进而污染器件表面, 人工操作环节人员衣物纤维、皮肤屑和汗液也可能是外来污染源, 静电放电产生微小火花及化学变化, 还可能使材料表面裂解或碳化残留形成新的多余物, 生产工艺和装配过程是元器件形成的关键也是多余物控制的高风险阶段, 得靠自动化、洁净化和标准化作业来降低风险。

2.3 储存、运输及环境因素带来的影响

产品加工完成了, 新的多余物风险在储存和运输环节也可能被引入, 储存环境湿度高的金属表面很容易氧化生成氧化物颗粒, 而且温度频繁波动材料可能出现冷凝水或者析出物, 从而污染膜就在表面形成了。包装材料的选择相当关键, 低质量包装也许会释放塑化剂、挥发性有机物或者纤维粉尘, 进而成为潜在多余物的来源。运输的时候,

机械振动和摩擦让元器件和包装材料之间产生微粒, 并且运输工具的尾气、油污也可能间接附着到产品上。环境因素中, 粉尘、花粉、盐雾等在空气里, 要是没密封或者密封不好就会进到器件内部, 导致性能下降, 在高端应用领域里, 环境污染甚至可能是失效的主要原因, 储运环节的环境控制和密封保护措施也是防止多余物产生的重要部分。

3 MIC 中多余物的检测与分析方法

3.1 常见检测手段

多余物检测最常用显微技术、光谱分析和 X 射线检测这些方法, 光学显微镜、扫描电子显微镜 (SEM) 和透射电子显微镜 (TEM) 都属于显微镜检测, 可直观观察多余物的形貌、尺寸与分布特征, SEM 和能谱分析 (EDS) 相结合便有了高分辨率图像且能做元素成分分析, 这是多余物研究里最常见的工具。傅里叶红外光谱 (FTIR)、拉曼光谱和质谱分析这些光谱类方法可做到有机残留物、化学污染物分子结构和官能团的识别, 适用于助焊剂残留或者清洗剂残留检测, X 射线能谱分析 (XPS)、X 射线衍射 (XRD) 以及三维 X 射线成像都属于 X 射线技术, 能揭示元素组成、晶体结构及内部缺陷, 特别适合元器件内的金属迁移物和裂解产物检测, 原子力显微镜 (AFM)、离子色谱 (IC) 等技术也能结合进来以实现多余物微观形貌和离子残留定量分析, 这些检测手段相互补充从而构成多余物检测的技术体系。

3.2 多余物溯源与定性定量分析

检测不单是为了确认有无多余物, 更重要的是溯源并做定性定量分析, 先根据形貌特征与成分分析可判断多余物大概来源, 检测出含硅氧化物颗粒很可能就来自基板或者玻璃封装, 发现有氯离子残留也许是清洗液或者助焊剂造成的, 定性分析往往需要多种检测手段交叉验证, 单一方法不能保证测试结果的可靠性。定量分析在质量控制中相当关键, 通过测量多余物粒径分布、数量密度以及化学成分含量就能评估其对器件性能的潜在影响, 离子色谱可测残留离子浓度, Cl^- 、 Na^+ 或者 SO_4^{2-} 含量超 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 可能引发电化学腐蚀风险, 颗粒直径大于 $50\mu\text{m}$ 且分布密度超 100 个/cm 或许会造成短路或者信号失真, 溯源就是要建立“多余物特征-工艺环节”的映射关系, 弄清楚是原材料有问题、工艺有缺陷还是环境污染导致的多余物, 从而为后续改进找依据, 给企业制定清洁度标准提供数据支持。

3.3 MIC 中检测在质量管理中的应用

现代电子制造中, 多余物检测不再被局限于实验室分析, 已成为质量管理体系的重要部分, 来料检验阶段对原材料和零部件做清洁度检测能防止外部污染物进入生产环节。过程质量控制时企业常引入在线监测技术, 像自动显微检测设备、离子污染测试仪, 实时掌握工艺里的多余物水平并及时纠正异常工序。成品出厂检测环节多余物检

测结果常和可靠性试验相结合,如温湿度循环、盐雾腐蚀、电气应力试验,用以评估多余物对器件长期稳定性的影响,而且,多余物检测结果是企业标准化管理与持续改进的重要依据,定期收集统计多余物检测数据企业可建立数据库做质量趋势分析,进一步优化工艺参数、加强设备维护、提升洁净度管理水平。航空航天、医疗电子、军工领域多余物检测被纳入强制性质量评估流程,其结果直接决定产品能否交付使用。

4 MIC中多余物的预防与控制措施

4.1 原材料选择与供应链管理

要从源头控制多余物风险,需将原材料质量的把控放在首位,生产环节中电子元器件的多余物常随材料进入,要建立严格的原材料筛选机制,供应商需给出详细的材料成分、纯度以及清洁度检测报告,尤其要重点评估金属材料的杂质含量、塑料和树脂材料的挥发性物质。对于芯片、基板、引线框架等关键零部件要检测来料清洁度,用显微镜、离子色谱等方法验证是否符合行业标准,企业要进行供应链全程的质量管控,不但要让供应商在生产时达到洁净标准,还要定期进行质量审核和实地评估以保证生产环境不会带入潜在污染。建立优质供应商体系与追溯机制就能有效减少外部污染源进入制造环节,从而从根本上降低多余物发生的概率。

4.2 工艺优化与生产过程控制

生产和装配时,要减少多余物,优化工艺与严格控制过程很重要,其中焊接工艺改进是关键。优先用低残留或免清洗助焊剂,严格把控温度和时间参数,防止焊料飞溅、残渣生成。点胶、贴片、固化环节优化工艺配方,控制胶水流淌性和固化条件,减少气泡、溢胶,并且生产设备要定期维护、清洁,避免刀具磨损、润滑油泄漏、传送带老化产生颗粒污染。过程控制可引入自动化、智能检测技术,像在线颗粒监测仪、视觉检测系统,实时监控、预警多余物,不让缺陷批量流入下一道工序。员工操作规范也重要,穿戴洁净服、防护手套、口罩,减少人为带来的纤维、皮屑污染。只有多环节、多手段优化工艺,才能在制造时有

效抑制多余物生成。

4.3 环境控制与标准化管理体系建设

多余物的生成与积累受环境条件显著影响,得建立完善的环境控制措施,要依据产品可靠性要求合理划分生产区域洁净等级,关键工序需在洁净室或局部洁净环境里完成,依靠空气过滤系统(HEPA/ULPA)有效去除悬浮颗粒,且温湿度控制也不能忽略,湿度太高金属可能氧化,湿度太低容易有静电吸附颗粒,储存与运输环节需使用密封、防潮、防震的包装材料以防止环境污染和机械损伤。企业还得建立标准化管理体系,如ISO14644洁净室标准、IPC及MIL相关标准,将多余物控制要求纳入质量管理体系,通过编制作业指导书、定期培训员工、建立质量追溯与反馈机制来实现预防、检测与改进的闭环管理,航空航天、医疗器械等高可靠性领域,多余物的控制管理是强制性要求,企业必须用标准化手段使全过程符合规范。

6 结语

电子元器件潜在质量隐患之一的多余物来源广泛且危害明显,本文系统阐述了概念与危害、主要来源、检测与分析方法、预防与控制措施这四个方面的研究。研究显示,有效降低多余物风险需从源头把控原材料与供应链、优化工艺流程与过程监控,再加上完善的环境控制和标准化管理体系,检测与溯源技术的发展为问题追根溯源和质量改进提供了科学依据,电子产品正日益朝着高密度与高可靠性发展,多余物防控要靠智能化检测、数据化管控、与国际标准接轨以全过程保障质量并持续提升产品竞争力。

[参考文献]

- [1]黄海燕.基于不同活性基团修饰的钌基抗菌剂的制备与应用[D].南昌:江西科技师范大学,2024.
 - [2]向斐斐,李傲,范浩涵,等.金属诱导晶化(MIC)模式非晶晶化的原位透射电子显微学研究[J].电子显微学报,2024,43(1):45-51.
- 作者简介:郭雪林(1992.11—),女,汉族,毕业学校:河北工业大学,现工作单位:中国电科产业基础研究院先进集成研究所。