

TMC · PCB & PCBA FAILURE ANALYSIS

客户案例库

FROM FAILURE TO FIX

二十个真实失效场景的完整复盘：从客户痛点，到检测分析、根因定位，再到解决方案与长效机制。这里没有能力清单的罗列，只有一个个具体的问题是如何被识别、被理解、被解决。

INDEX · 案例索引

二十个场景 两种失效逻辑

20 CASES · 2 LINES

按 PCB 本体与 PCBA 组装两条线展开。每条线各十例，覆盖从材料、工艺、结构到焊点、组装、机械与热可靠性的完整失效谱系。

第一章 · PCB 本体线

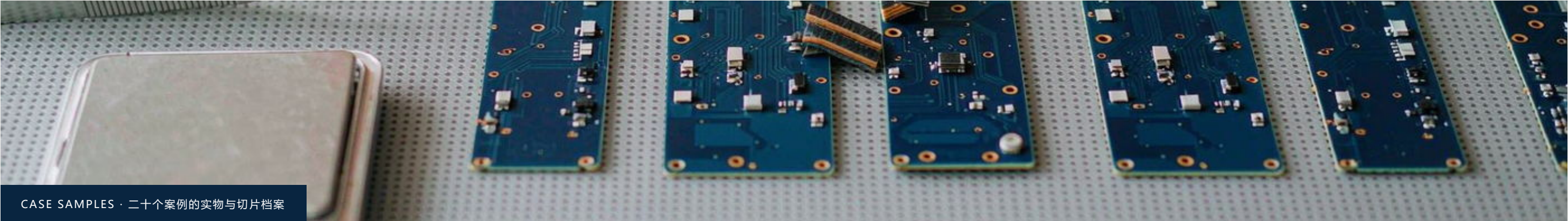
10 CASES

P01	一块板，如何在 40V 下"自杀"	灾难性 CAF 短路	P06	户外六个月的 22% 失效率	吸湿分层与现场耐久
P02	看不见的漏电通道	低阻 CAF 渐进劣化	P07	375 次循环就裂的镀通孔	PTH 桶裂与铜包裹
P03	多少才算干净	离子污染与枝晶生长	P08	电测全过，回流就开	HDI 微盲孔弱界面
P04	Tg 170 的板材，真的 170 吗	板材虚标与无卤误判	P09	28GHz 下蒸发掉的 31% 信号	铜箔粗糙度高速损耗
P05	回流焊里的定时炸弹	批量爆板与孔壁裂纹	P10	眼图闭合的幕后	背钻残桩与 Dk 偏差

第二章 · PCBA 组装线

10 CASES

Q01	ADAS 摄像头 BGA 的第 1900 次裂痕	热冲击焊点疲劳	Q06	空洞偷走的 10% 结合力	BGA 空洞
Q02	随机振动下的三阶段崩塌	倒装芯片振动疲劳	Q07	枕头效应：0.8 微米的失效	BGA HIP
Q03	30 次跌落就坑裂的焊盘	Pad Cratering	Q08	01005 立碑：蒸发掉的 5% 良率	微型元件立碑
Q04	黑盘：被磷含量出卖的焊点	ENIG 黑盘	Q09	0.68% 翘曲拉开的 25μm 缝隙	板级翘曲开焊
Q05	5 毫米锡须掐断的链路	纯锡镀层锡须	Q10	600 磅压下去，反而更可靠	Press-fit 压接



CASE SAMPLES · 二十个案例的实物与切片档案

METHODOLOGY · 问题解决七步闭环

从失效到解决的七步闭环

每一个案例都遵循同一条工作路径。它不是简单的“测出问题”，而是从客户现场还原，到检测信号解读、根因机理判断、再到可执行方案与长效机制，把材料、设计、工艺、环境四个变量重新放回同一个坐标系里。

THE 7-STEP LOOP · 迈科标准作业方法学

01**痛点还原**

从客户现场语境出发，重建失效场景的工况、循环数、失效率与时间线

02**初判反差**

外观与常规电测确认“常规手段漏检”的关键反差，建立专业悬念

03**检测分析**

金相切片、SEM/EDS、X 射线、SIR 矩阵、动态电阻监测——读出失效信号

04**根因洞察**

不是测出 X，而是看懂 Y；从机理层面给出唯一性判断

05**方案清单**

3-5 条带参数的可执行动作（温度/间距/厚度/时间/频率）

06**量化收益**

良率、失效率、返工成本、寿命倍数的明确数字与口径话术

07**长效机制**

把检测项嵌入客户来料规范、DFM 评审与年度可靠性验证流程

!! 客户面对的不是“哪个东西坏了”，而是**材料、设计、工艺、环境**四个变量在某个时刻的叠加结果。客户内部的组织架构，恰恰是按这四个变量分开的。当失效发生时，没有任何部门能看到全貌——而迈科的价值，就是把**四个变量重新放回同一个坐标系里**，找到那个真正的临界点。



FAILURE ANALYSIS LAB · 迈科失效分析实验室

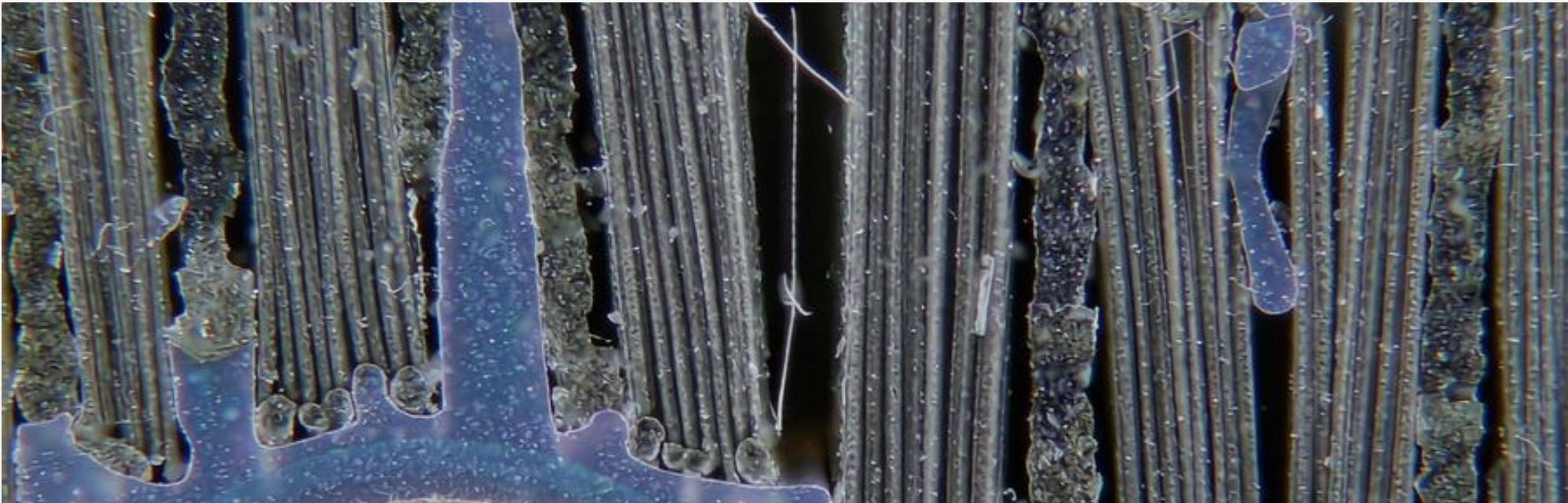
CAPABILITY MATRIX · 检测能力地图

技术手段 × 失效模式
覆盖度全图

主力方法 · 迈科标配 辅助验证 · 关键节点 高阶专项 · 复杂场景

	SEM/EDS	切片	X-ray/CT	SIR	THB/HAST	热循环	振动/跌落	DSC/TGA	染色分离	3D SPI
CAF 阳极丝 PCB 本体	●	●		●	●					
ECM 枝晶 / 锡须 电化学迁移	●			●	●					
层压分层 / 爆板 吸湿失效	●	●				●		●		
PTH 桶裂 / 微盲孔 孔可靠性	●	●	●			●		●		
BGA 热疲劳 / HIP 焊点失效	●	●	●			●				●
ENIG 黑盘 / 锡须 表面处理	●	●		●						
空洞 / 立碑 / 翘曲 组装工艺	●	●	●			●		●		●
高速链路 / 阻抗 信号完整性		●								
振动 / 跌落 机械可靠性							●			●
压接孔损伤 / 材料合规 连接器与材料	●	●	●				●	●		

覆盖说明 · 圆点标识迈科在该失效场景下的能力覆盖。主力方法表示迈科实验室已稳定开展并具备批量项目验证经验；辅助验证与高阶专项用于复杂场景下的针对性诊断。所有案例的检测手段均按此矩阵的能力配置展开，可为客户来料把关、量产可靠性与设计验证提供端到端方案。



问题 PROBLEM

华南某中型通信电源厂的电源模块批量出货两年后，设备运行一段时间即保护关机，拆机复测又恢复正常，上电跑数十小时故障重现。

分析 ANALYSIS

TMC 对失效板与同批次良品板做 85°C/85%RH、40V 偏压下的绝缘阻值追踪，结合金相切片、扫描电镜能谱与离子污染提取，定位到三重叠加根因：

- 孔壁铜提供可迁移金属源，40V 压差配 0.005 英寸间距折算电场梯度超过 5V/mil，已处高风险区间。
- 玻纤与树脂界面偶联剂处理不足、层压浸润不充分，形成沿玻纤束爬行的毛细通道，切片可见自阳极孔壁延伸至阴极的连续铜丝，伴生氯、溴元素。
- 水溶性助焊剂后道清洗工位被压缩，离子残留高于控制线，等于向毛细通道内注入电解质。

这是一类典型的"界面型累积失效"——来料检验测的是材料体相性能，而 CAF 考验的是界面性能，二者属不同评价维度。

措施 SOLUTION

- 过程监控**：已出货终端在软件端增加绝缘监测告警，把突发短路改为预警停机
- 设计优化**：高电位差区域孔壁到内层电源/地层间距由 0.005 英寸提至 0.012 英寸以上；
- 清洁度管控**：恢复并加严水溶性助焊剂后道清洗，离子污染控制在 1.56 µg/cm² 氯化钠当量以内，每班抽测并记录趋势
- 来料检验**：在制与库存板增加 85°C/85%RH、额定偏压、500 小时加速验证抽检（按批次 5%），写入板材准入规范，每季度一次供应商比对

客户收益 BENEFIT

12

现场失效率从数千 PPM 降至连续 个月零客诉

98%

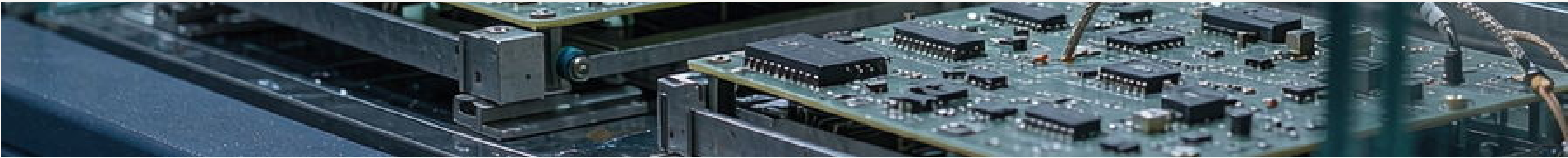
加速验证通过率由七成提升至稳定 以上

✓

问题在第四个月被拦截，避开七位数召回损失与下游索赔

✓

建立设计评审前置机制：新项目开案即评审叠构与电位梯度，检测投



CASE / 02

低阻 CAF 渐进劣化

低阻 CAF：让"合格"与"可用"划清界限

问题 PROBLEM

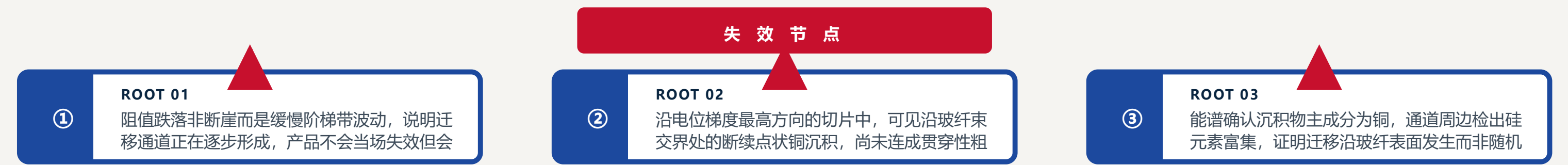
华东某电信设备商的基站板在网运行一年后，部分通道信号裕量缓慢下降、误码率上升，而全部常规测试仍判合格。

分析 ANALYSIS

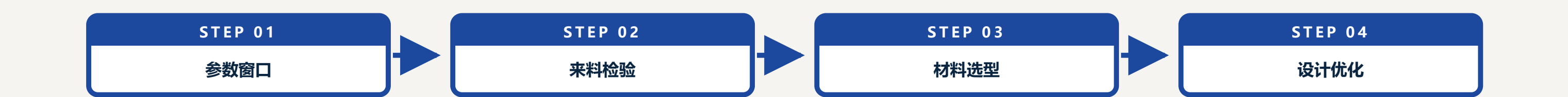
TMC 对现场返修板与同型号库存新板做 85℃/85%RH、额定偏压、840 小时绝缘阻值追踪，辅以系列切片与元素面扫，确认渐进式绝缘劣化：

- ① 阻值跌落非断崖而是缓慢阶梯带波动，说明迁移通道正在逐步形成，产品不会当场失效但会持续劣化。
- ② 沿电位梯度最高方向的切片中，可见沿玻纤束交界处的断续点状铜沉积，尚未连成贯穿性粗丝，属阳极丝早期形态。
- ③ 能谱确认沉积物主成分为铜，通道周边检出硅元素富集，证明迁移沿玻纤表面发生而非随机穿透树脂基体。
- ④ 漏电路径锁定在两个特定过孔之间的介质层内，路径长度不足 2mm。

这是一类典型的"界面性能失效"——体相性能合格不代表界面性能合格，来料检验若只看前者必然放行。



措施 SOLUTION



参数窗口 · 来料检验 · 材料选型 · 设计优化

客户收益 BENEFIT

- 评价体系写入企业标准，后续所有新平台板材选型沿用同一流程
- 标准建立后首个季度即拦截三批 B 级板材，避免一年后六位数返修成本

■ 来料决策由"通过/不通过"二元判定升级为可执行的分级处置
■ 合作节点前移：客户新平台开发的叠构与材料选型评审由 TMC 参与

CASE / 03

ECM 离子污染

枝晶生长：清洁度不是数字，是一组条件

华中汽车电子 ECU 厂



问题 PROBLEM

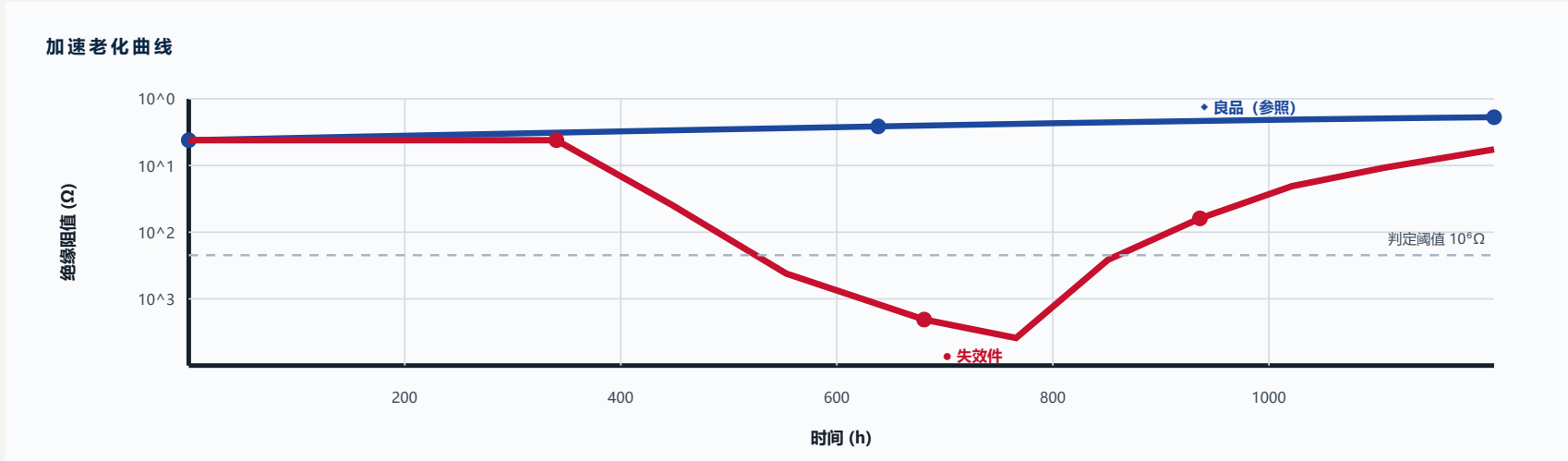
华中某汽车电子 Tier2 的发动机舱控制单元在耐久测试中出现间歇性功能异常，拆壳后板面局部可见灰绿色附着物，显微镜下为树枝状金属结晶。

分析 ANALYSIS

TMC 对现场失效件、耐久未失效件、全新库存件三组样品做 40°C/90%RH、相邻焊盘 10V 偏压、168 小时漏电流监测，结合扫描电镜能谱、离子色谱与间距—污染矩阵实验，确认四要素耦合：

- ① 库存新板全程无异常，耐久未失效件 100 小时后漏电流缓升，失效件 30 小时内即出现数量级跳变并形成稳定低阻通路。
- ② 结晶自阴极向阳极生长，主成分为铜、局部检出锡，属典型电化学迁移产物。
- ③ 三组总离子量差异不悬殊，但失效件中检出较高浓度有机酸根与卤素离子，未失效件以弱有机酸为主。
- ④ 矩阵实验显示：同一污染水平下 6 密耳间距大量失效、10 密耳显著减少、50 密耳几乎不失效。

这是一类典型的“组分—间距—工况耦合失效”——只控制总离子量，控制的是一个不敏感的量。



措施 SOLUTION

- ▶ **参数窗口：**按间距分区管控，间距小于 10 密耳的高风险区执行更严清洁度限值与 100% 外观检查，一般区域执行标准限值，成本无明显增加
- ▶ **验证方案：**40°C/90%RH/偏压 168 小时加速验证列为每个新项目量产前必过项，判据为漏电流始终保持在初始量级两倍以内
- ▶ **清洁度管控：**标准由"总量"改为"组分 + 阈值"，对卤素离子与特定有机酸根设定单独限值，这两类为最危险组分
- ▶ **材料选型：**对四款候选助焊剂做同条件对比，选定活性适中、残留潮解湿度更高的产品，并在焊接后增加针对性清洗

客户收益 BENEFIT

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 168
整改批次在同等加速条件下漏电流全程维持初始量级，小时零失效 | ✓
采用分区管控，清洗与涂覆工序成本仅小幅上升，远低于全面加严方 |
| ✓
客户内部耐久测试通过率由波动状态回到稳定满通过 | ✓
DFM 评审新增"间距—污染—工况"风险矩阵，助焊剂与清洗剂 |

CASE / 04

板材虚标 · 无卤误判

Tg 170 的板材：把"证书"换成"实测"

华东出口型电子制造厂



问题PROBLEM

华东某出口型电子制造厂在欧洲客户审厂时被问及板材是否无卤，采购出示的是供应商合规证书——但合规认证与无卤要求是两件事，清单与限值完全不同。

分析ANALYSIS

TMC 对四家供应商的六种板材（证书文件齐备）不审文件、直接测实物，用 X 射线荧光快速筛查 + 氧弹燃烧—离子色谱仲裁定量、差示扫描量热法测 Tg、热重分析测 Td、热机械分析测热膨胀系数：

- ① 六种中仅两种为真无卤，氯、溴各自不超过 900ppm、总和不超过 1500ppm。

③ 热应力交叉验证中，实测 151℃ 的板材浮焊后出现层间分离迹象，两款真高 Tg 板材完好。
- ② 标注 Tg 170 的三种样品实测分别为 172℃、168℃、151℃，第三种偏差 19℃，已超出合理测试误差，系中 Tg 材料冒充高 Tg。

④ 同规格三个批次的实测 Tg 批间波动接近 8℃，说明供应商过程控制不稳定。

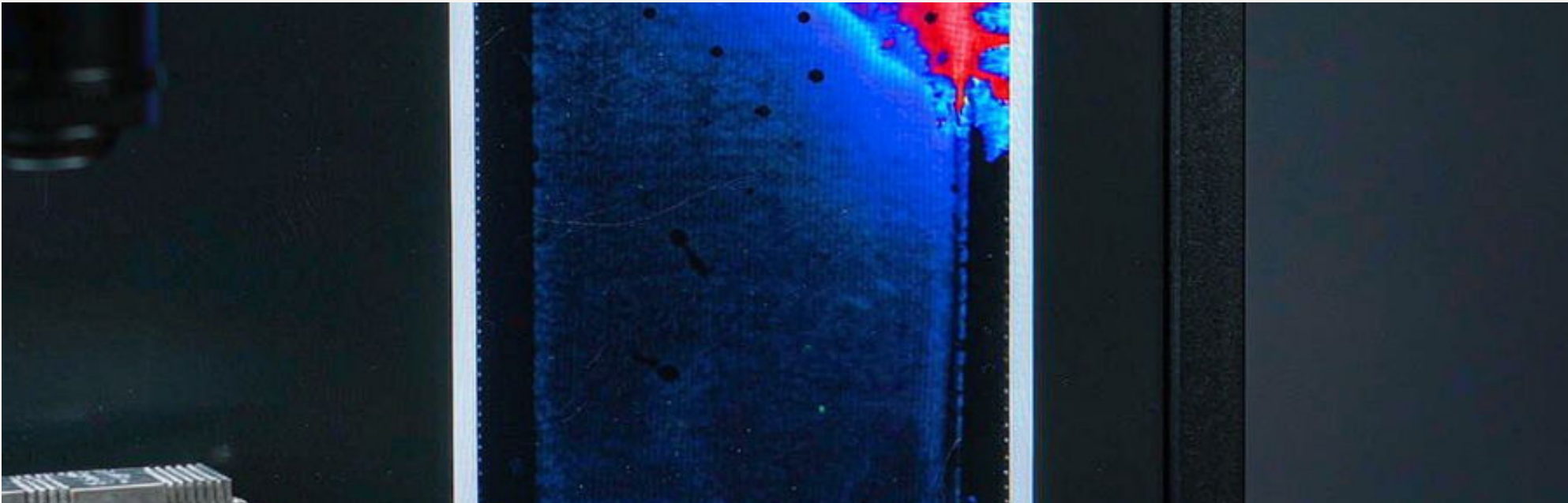
这是一类典型的"声明与实物偏差"——采购端买的是证书，工程端买的是性能，两者之间存在结构性鸿沟。

措施SOLUTION

问 题 / PROBLEM	对 策 / SOLUTION
- 六种中仅两种为真无卤，氯、溴各自不超过 900ppm、总和不超过 1500ppm。 - 标注 Tg 170 的三种样品实测分别为 172℃、168℃、151℃，第三种偏差 19℃，已超出合理测试误差，系中 Tg 材料冒充高 Tg。 - 热应力交叉验证中，实测 151℃ 的板材浮焊后出现层间分离迹象，两款真高 Tg 板材完好。 - 同规格三个批次的实测 Tg 批间波动接近 8℃，说明供应商过程控制不稳定。	- 由证书审核改为"证书 + 实测"双轨，每批抽检 Tg 与卤素含量，抽检比例按供应商历史表现动态调整 - 重写采购规范，把"高 Tg 板材"改为可判定条款——Tg 不低于 170℃（差示扫描量热法，按标准方法取样）、Td 不低于规定值、卤素满足无卤定义并附仲裁方法测定结果、批间 Tg - 整合实测报告、方法说明与供应商分级记录形成审厂应对材料，欧洲客户复审一次性通过 - 基于三个月实测数据将六家供应商分为可免检、需抽检、需整改后重评三级，一家整改期内仍批间波动超标被移出合格名录

客户收益BENEFIT

8 板材批间 Tg 波动由接近 °C 压缩至 3°C 以内，产线工艺	✓ 欧洲订单保住，未因材料不符重新报价或延期
DSC/TGA XRF 筛查 氧弹燃烧-IC TMA 浮焊验证 供应商分级	✓



CASE / 05

批量爆板

回流爆板：含水率与 Z 轴膨胀的双变量失控

华南消费电子代工厂

问题 PROBLEM

华南某消费电子代工厂的智能家电主控板，在双面贴装第二次回流时爆板比例突然升至接近一成，按当日产能计每天数百片报废。

分析 ANALYSIS

TMC 现场核查板材仓库、烘烤记录与回流炉温曲线，并对爆板样品做超声扫描显微镜全板扫描、垂直切片、差示扫描量热与热机械分析、模拟仓库条件吸湿率测定：

- ① 超声图像显示肉眼可见的起泡只是冰山一角，多层层间均存在大面积分离，且沿树脂与玻纤界面扩展。
- ② 切片发现并发损伤——部分镀通孔孔壁铜层出现裂纹，位置在板厚中心，指向与分层同一物理源：Z 轴热膨胀。
- ③ 问题批次与一年前合格批次 Tg 相差约 6℃，但 Z 轴热膨胀系数差异明显，Tg 以上区间上升更陡。
- ④ 模拟 30℃/70%RH 未真空包装条件，放置 7 天含水率接近材料饱和和吸湿的一半，在无铅回流高温下足以汽化产生破坏性蒸汽压。

这是一类典型的"材料性能漂移叠加过程失控"——只治水汽，治不干净。

措施 SOLUTION

- ▶ **过程监控：**仓库与产线关键位置放置温湿度记录仪并接入质量系统，板材拆封即开始计时、超时自动提醒
- ▶ **来料检验：**把 Z 轴热膨胀系数与 Tg 纳入每批抽检并与基准批次对比，同时要求供应商对吸水率给出承诺值
- ▶ **工艺固化：**在库与在线板材执行规范化烘烤 120℃/4 小时，烘箱内空气循环充分、板材间留间隙；
- ▶ **参数窗口：**重调回流曲线，预热段升温速率压至 1.5℃/s 以内，在 150℃ 附近增加均热平台让水汽平缓逸出，峰值温度以保证焊点浸润为准、不追高

客户收益 BENEFIT

99.6% 二次回流合格率由九成左右提升至 以上并长期稳定	✓ 新料导入流程固化：任何板材切换须先通过 Z 轴膨胀、Tg、吸
✓ 按当时产能与单板成本计，每月减少报废损失六位数量级，整改投入	✓ 回流曲线优化同步改善焊点质量，焊点不良率一并下降



CASE / 06

吸湿分层 · 现场耐久

户外六个月的 22% 失效率：被循环工况唤醒的吸湿分层

问题 PROBLEM

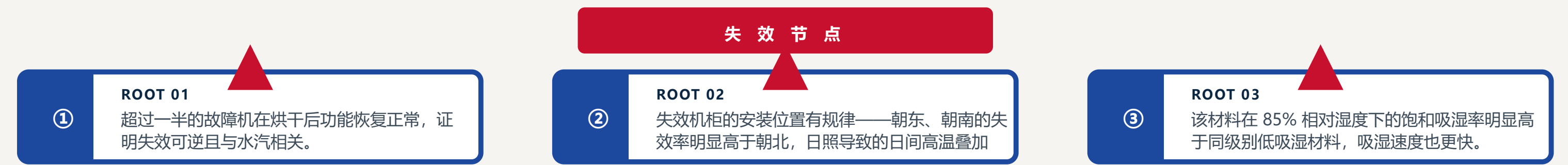
华南某户外物联网客户的设备部署于南方沿海室外机柜，常年高温高湿、昼夜温差带来凝露。

分析 ANALYSIS

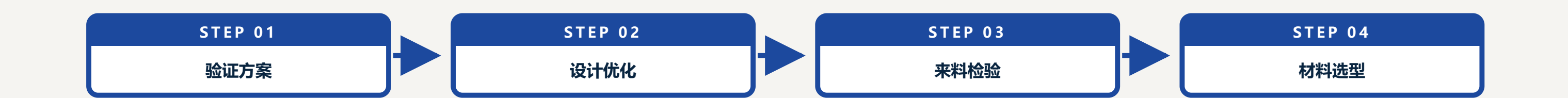
TMC 对 20 台现场返修机与同批次库存新机做烘干对比、超声扫描、吸湿特性测定与界面结合强度评估，并设计贴近现场的加速剖面进行复现：

- ① 超过一半的故障机在烘干后功能恢复正常，证明失效可逆且与水汽相关。
- ② 失效机柜的安装位置有规律——朝东、朝南的失效率明显高于朝北，日照导致的日间高温叠加夜间降温凝露，构成每日一次的温湿度循环，而这一循环在标准测试里不存在。
- ③ 该材料在 85% 相对湿度下的饱和吸湿率明显高于同级别低吸湿材料，吸湿速度也更快。
- ④ 含水率上升后界面结合强度下降三成以上，说明失效路径是"水削弱界面，应力再撕开"，而非"有水就炸"。
- ⑤ 在"高温高湿浸润 + 快速降温凝露 + 高温干燥"的循环剖面下，原方案样品在相当于现场六个月的时间点出现分层，对照的低吸湿材料样品在同样循环数下完好。

这是一类典型的"循环应力失效"——测试没有复现真正的杀手，即干湿交替叠加温度冲击的循环工况。



措施 SOLUTION



验证方案 · 设计优化 · 来料检验 · 材料选型

客户收益 BENEFIT

汽车电子客户同类失效发生率下降约 85%，因整车厂表现改善拿到后续项目定点

新批次现场运行满一年，失效率为零
户外客户整改批次在相同加速循环下，失效节点由相当于现场六个月推迟到相当于五年以上

TMC CASE LIBRARY "循环剖面验证"写入两家企业的产品验证规范，成为可复用的方法资产

CASE / 07

PTH 桶裂

375 次循环就裂的镀通孔：厚度合格不等于抗疲劳

华东汽车电子 Tier1



问题 PROBLEM

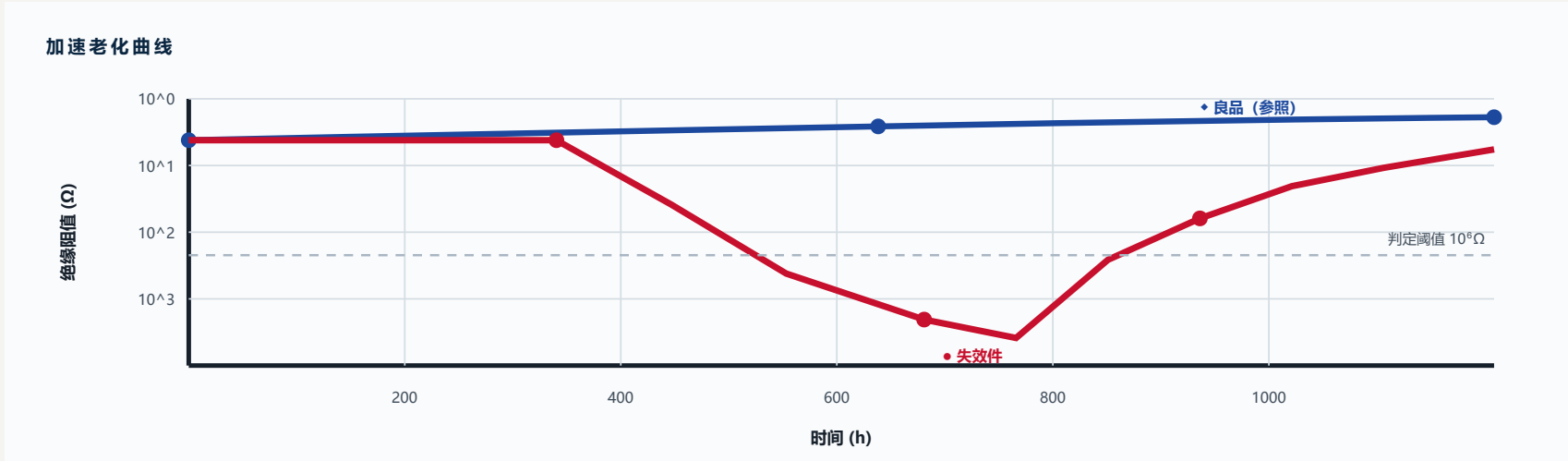
华东某汽车电子 Tier1 的车身控制模块在整车耐久验证阶段出现数起间歇性开路，排查定位到一个八层板的镀通孔——孔壁铜层在中段断裂。

分析 ANALYSIS

TMC 对失效孔做精细切片，并设计热循环验证实时监测孔链电阻，辅以热机械分析与对照实验：

- ① 裂纹位于孔壁中段、贯穿铜层，断口呈典型疲劳特征，起始于铜层内侧（靠树脂一侧）向外扩展，非瞬间脆性断裂。
- ② 热循环下电阻先出现波动、继而阶跃式上升，最终在约 375 个循环时完全开路，与客户整车耐久中出现问题的里程节点在加速模型折算下吻合。
- ③ 板材 Z 轴热膨胀系数在 Tg 以上区间是 Tg 以下的数倍，幅度偏大——铜约为 17ppm/°C，树脂 Tg 以下 50–70ppm/°C、Tg 以上可达 200ppm/°C 以上。
- ④ 对照实验中，孔铜厚度与原方案相近但采用高延展性电镀工艺的样品，在同样热循环条件下跑到数千个循环仍完好。
- ⑤ 应力峰值位于孔壁中段即板厚中心，此处 Z 轴膨胀受力最大，而电镀的固有分布特征又使孔铜在此处最薄。

这是一类典型的“热机械疲劳失效”——不是产品通过了验证，而是验证没测到它。



措施 SOLUTION

- ▶ **验证方案：**重新制定热循环条件，温度范围按实际装车位置最严工况设定、循环数按目标寿命与加速模型反推，判据由"通断"改为"电阻变化不超过初始值的 10%", 在完全开路前即捕捉损伤
- ▶ **设计优化：**高可靠性关键网络改用多孔并联或错层布置，避免在厚板上布置过小的孔——厚径比越大，电镀越难均匀、应力越集中
- ▶ **材料选型：**推荐 Z 轴膨胀系数更低、Tg 更高的板材，配合板厚微调，Z 轴总膨胀量下降两成以上
- ▶ **参数窗口：**按产品可靠性等级定厚度，汽车安全相关模块的最小孔铜厚度在规范基础上再上调，且采购规范中明确"最小厚度"而非"平均厚度"——平均值会掩盖局部薄弱点

客户收益 BENEFIT

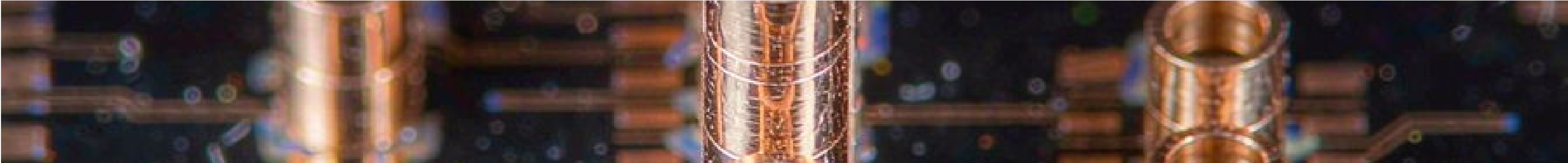
- | | |
|---|-------------------------------------|
| 375
新批次在修正后的热循环条件下由约 循环失效提升至数千循环无 | ✓
按客户内部估算，两次提前发现所节省的整改成本是检测投入的十几 |
| ✓
客户在后续两个平台上用同一方法于设计阶段即发现潜在孔可靠性风 | ✓
"最小厚度 + 延伸率"双指标写入板材采购规范，修正后的热循 |

CASE / 08

微盲孔弱界面

电测全过、回流就开：HDI 堆叠微盲孔的隐性界面

华南 5G / 服务器板厂



问题PROBLEM

华南某 5G 小基站与服务器加速卡板厂的产品采用二阶、三阶堆叠微盲孔。

分析ANALYSIS

TMC 采用四线制微电阻监测配合可控温环境箱模拟回流温度曲线，并在室温与失效温度区间分别制样做切片对比，结合扫描电镜能谱、混压材料热膨胀匹配分析与不同堆叠层数的循环验证：

- ① 升温到约 210℃ 时某一组堆叠孔电阻突然跳到开路，继续升温至峰值保持开路，降温到约 180℃ 时电阻突然回落、连接恢复——这一可逆特征是判定机理的决定性证据。
- ② 室温切片下微盲孔底部界面完好，高温状态下界面出现清晰缝隙，位置明确在微盲孔底部铜与下层目标焊盘的结合界面。
- ③ 能谱显示分离沿一层很薄的过渡层发生，元素分布介于铜与介质之间，即化学镀铜、电镀铜与底层焊盘的结合区域。
- ④ 混压结构中芯板与积层材料的热膨胀系数差异明显，温差变化时产生额外界面剪切应力。
- ⑤ 堆叠三层以上的样品在千次级循环后出现约两成七的微孔开裂比例，堆叠两层以内的开裂比例低一个数量级。

这是一类典型的"界面剪切疲劳失效"——用静态手段去抓动态失效，抓不到是正常的。

措施SOLUTION

问 题 / PROBLEM

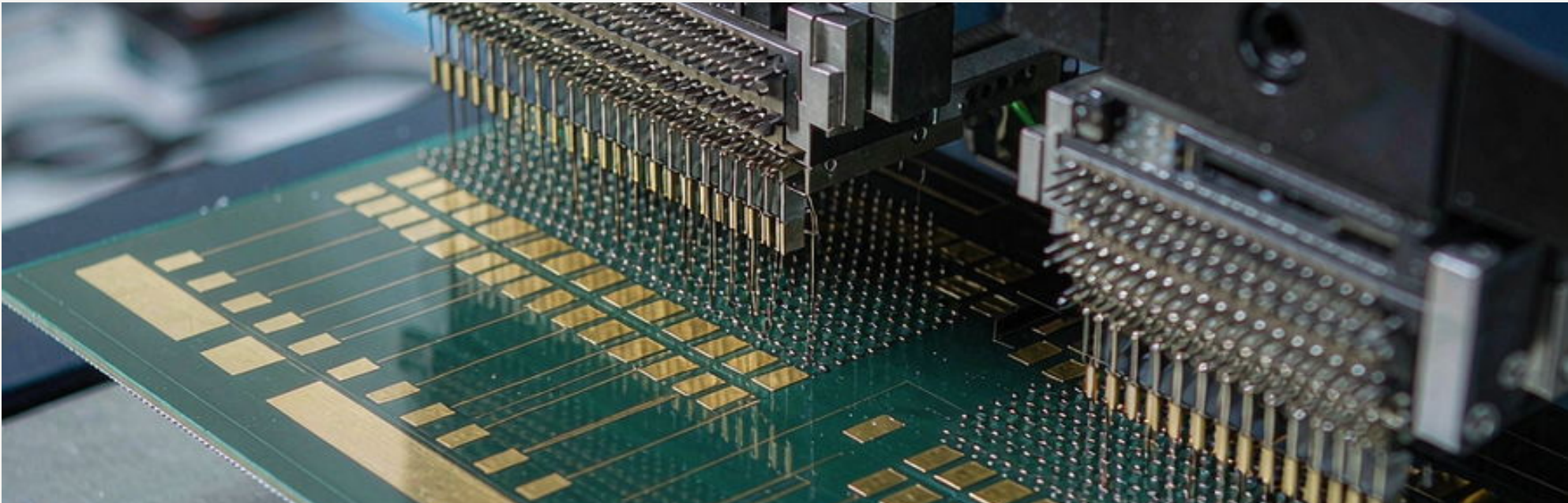
- 升温到约 210℃ 时某一组堆叠孔电阻突然跳到开路，继续升温至峰值保持开路，降温到约 180℃ 时电阻突然回落、连接恢复——这一可逆特征是判定机理的决定性证据。
- 室温切片下微盲孔底部界面完好，高温状态下界面出现清晰缝隙，位置明确在微盲孔底部铜与下层目标焊盘的结合界面。
- 能谱显示分离沿一层很薄的过渡层发生，元素分布介于铜与介质之间，即化学镀铜、电镀铜与底层焊盘的结合区域。
- 混压结构中芯板与积层材料的热膨胀系数差异明显，温差变化时产生额外界面剪切应力。

对 策 / SOLUTION

- 对每批板的测试 coupon 做带温度循环的电阻监测，重点看高温段是否出现电阻跳变，在出厂前把有界面风险的批次挑出来
- 验收标准由"静态电测合格"升级为"静态电测 + 动态温度循环电阻监测"双项合格，写入成品检验规范与板厂出货规范
- 必须用混压时，芯板与积层材料的热膨胀系数差异控制在 3ppm/℃ 以内，同时关注 Tg 匹配与吸湿率
- 与板厂共同复盘激光钻孔参数、除胶渣工艺与化学铜覆盖能力，核心目标是把界面结合强度提上去，而不是单纯追求孔形美观

客户收益BENEFIT

动态四线电阻 原位切片 SEM/EDS TMA IPC-TM-650 堆叠规则



问题PROBLEM

华南某客户的 5G 毫米波前端模块在样机阶段指标不错，量产爬坡时却出现系统裕量不足：链路预算算得过去，实测插损偏大，高温下误码率恶化。

分析ANALYSIS

TMC 用矢量网络分析仪对板上差分走线做频域扫描至 40GHz，通过改变走线长度与对比不同频点损耗斜率做损耗分离，再结合扫描电镜截面观察、表面轮廓仪量化、铜箔等级溯源与频率相关性验证：

- ① 量产板的插入损耗明显高于早期样机板，在 28GHz 频点两者相差接近三成。
- ② 损耗分离显示介质损耗两者接近，差异几乎全部来自导体损耗。
- ③ 量产板铜面有明显瘤状起伏，表面粗糙度参数约为样机板的两倍。
- ④ 等级溯源确认样机板使用低轮廓等级铜箔，量产板在物料切换中改用标准等级。
- ⑤ 同设计同介质只换铜箔等级，26GHz 附近两种铜箔的损耗差接近每英寸 0.3 分贝，低频段差异几乎可忽略——这解释了为何客户早期低频产品从未遇到该问题。
- ⑥ 附加发现：量产板内层层压前的棕化处理会进一步推高铜面粗糙度，即使采购低轮廓铜箔，棕化参数不当仍会使成品粗糙度被抬升。

这是一类典型的"物料参数隐性变更失效"——改变了一个在低频下无关紧要、在毫米波下决定成败的参数。

措施SOLUTION

- ▶ **材料选型：**对已量产无法改物料的产品，微调线宽与介质厚度，在阻抗不变的前提下适度增加导体截面积，把损耗压回可接受范围
- ▶ **来料检验：**在采购规范中明确指定铜箔等级，要求供应商随货注明实际型号与等级；
- ▶ **设计优化：**把铜箔粗糙度影响纳入仿真模型——不是简单加修正系数，而是建立基于实际测量形貌的粗糙度模型
- ▶ **工艺固化：**与板厂共同调整内层氧化处理参数，在保证层间结合力的前提下尽量减小对铜面粗糙度的抬升，并提供结合力与粗糙度的平衡验证方法

客户收益BENEFIT

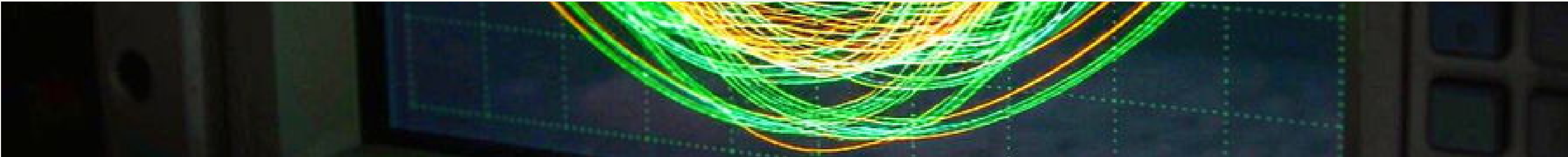
✓ 避免为补偿损耗而增加中继放大器件，单机成本下降，在多万台年出	✓ 物料与工艺固化后插入损耗回到设计目标内，系统裕量恢复
✓ 后续两个毫米波平台在设计阶段即用修正后的模型做预算，一次投板	✓ "铜箔等级 + 粗糙度检验"写入高速板材采购规范，修正后的仿

CASE / 09

铜箔粗糙度

28GHz 下蒸发掉的 31% 信号：
铜箔粗糙度的隐形代价

华南 5G / 服务器板厂



CASE / 10

背钻残桩 · Dk 偏差

眼图闭合的幕后：残桩、介电常数偏差与阻抗失控

问题 PROBLEM

华东某通信高速背板厂的 25Gbps 高端交换机背板，在样机阶段链路眼图几乎闭合，误码率高到无法建立链路。

分析 ANALYSIS

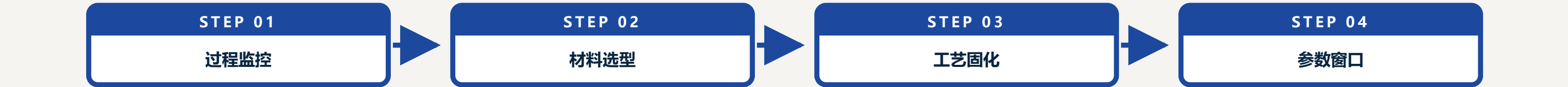
TMC 用矢量网络分析仪实测板上关键链路的散射参数，用时域反射计实测走线阻抗剖面，并对过孔做精细切片、三维电磁仿真对比、板材介电常数实测与温度系数测试：

- ① 客户仿真用 50Ω，实测平均阻抗在 48Ω 附近、偏差约 4%。
- ② 切片显示信号过孔打到内层走线后，下方留下一段约 1.8mm 未连接任何网络的悬空孔段，即残桩。
- ③ 阻抗偏差溯源：仿真采用供应商提供的"工艺值"介电常数 3.48，而 TMC 用标准方法实测该批板材得到的"设计值"接近 3.66，这一差异正是阻抗偏差的主因。
- ④ 该材料介电常数的温度系数在每摄氏度几十 ppm 量级，在设备实际工作温区内会再带来接近 1% 的阻抗变化，原设计裕量未予考虑。

这是一类典型的"仿真与实测断层"——鸿沟通常不是由算错造成的，而是由测错和漏掉造成的。



措施 SOLUTION



过程监控 · 材料选型 · 工艺固化 · 参数窗口

客户收益 BENEFIT

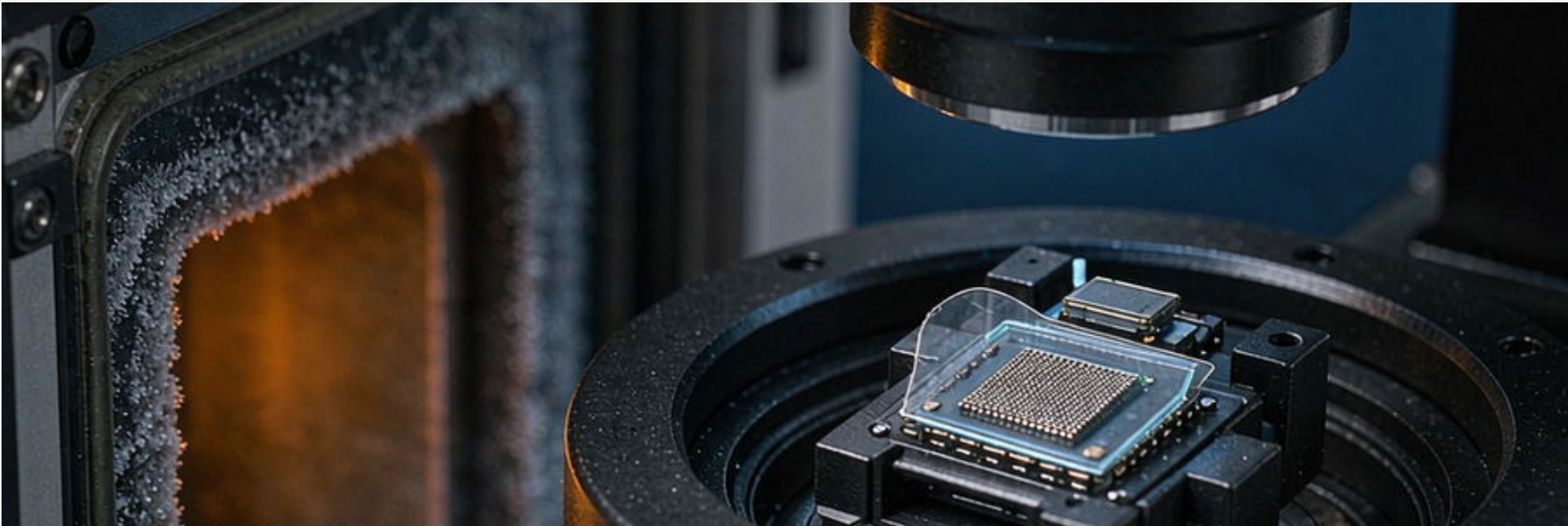
- 仿真—实测—校准闭环建立后，下一代 32Gbps 平台一次投板成功率大幅提升，研发周期缩短数周
- 背钻加材料参数纠正后，该款背板眼图张开度提升约四成，误码率降到可接受量级，链路稳定建立
- 含过孔的完整链路频域验证写入全部高速产品验收规范，背钻残桩长度要求与检验方法固化进板厂协议
- TMC 用仿真对比证实背钻在该速率下已足够、不必上全盲孔，按板面积与层数估算单板成本节省显著，年化达七位数量级

CASE / 11

BGA 热冲击疲劳

第 1900 次循环才现形的 BGA 裂纹：应力、界面与组织的耦合

华东汽车 ADAS Tier1



问题 PROBLEM

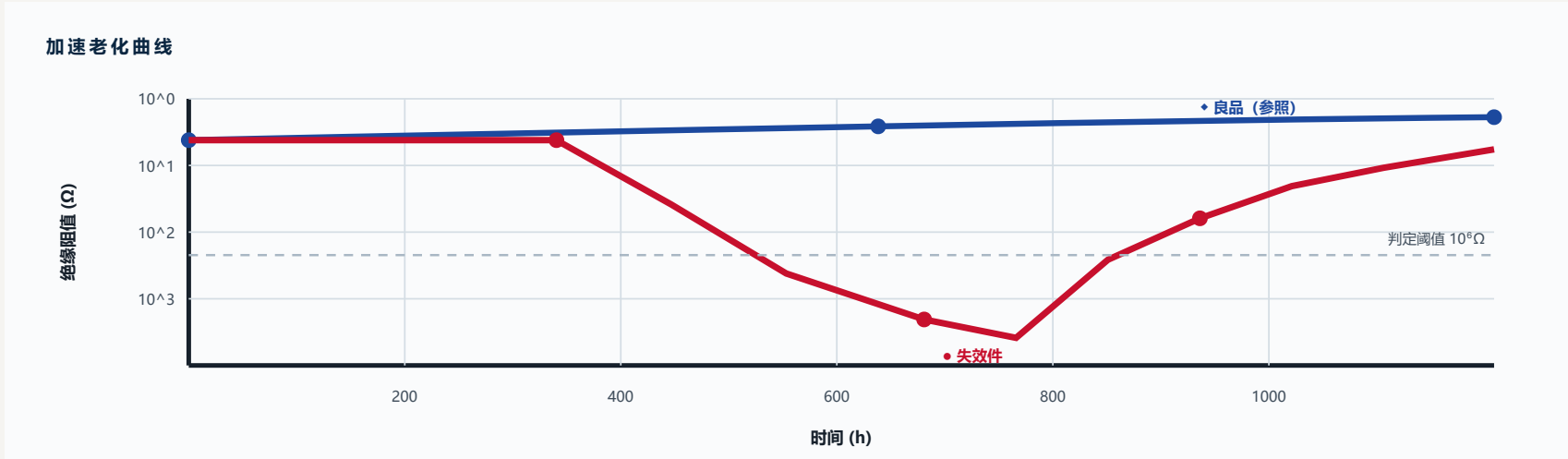
华东某 ADAS Tier1 的智能驾驶摄像头模块，在前装量产前的整车厂加严温度冲击验证中，跑到中段出现功能异常，排查定位到主芯片 BGA 焊点开裂。

分析 ANALYSIS

TMC 按客户整车实际温度跨度设定温度冲击条件并分阶段取样（每 200 循环一批做金相），结合扫描电镜界面分析、焊料微观组织观察与热应力分布仿真：

- ① 失效位置高度集中在 BGA 阵列四个角部，尤其是离芯片中心最远的一圈。
- ② 损伤时间线清晰：约 1600 循环时角部焊球上界面出现微裂纹，1900 循环时扩展到肉眼可辨、部分焊球完全断开。
- ③ 界面金属间化合物层厚度比正常工艺状态偏大，该层硬而脆，过厚即成为裂纹优先通道。
- ④ 焊球微观组织出现明显锡相析出与粗化，材料在反复热循环中逐渐失去延展性。
- ⑤ 热应力仿真印证角部焊球应力最大——它离器件中心的"零应力点"最远，热膨胀差异在此累积成最大位移。

这是一类典型的"应力—材料—几何耦合疲劳"——只动一个变量改不动结果。



措施 SOLUTION

- ▶ **验证方案：**验证由"跑到规定循环数看通断"改为过程监控，定期做电阻监测与抽样切片，捕捉裂纹萌生的临界点，给出寿命裕量的量化认知
- ▶ **过程监控：**把回流曲线三参数（峰值温度、液相线以上时间、冷却速率）纳入工艺管控，定期用测温板校验实际炉温与设定值偏差
- ▶ **材料选型：**对可靠性要求极高的位置评估底部填充方案，点胶填充可把焊点应变分散到更大面积、热循环寿命通常提升数倍；
- ▶ **参数窗口：**重做回流曲线，在保证焊点完全浸润与焊球塌陷的前提下适当降低峰值温度、缩短液相线以上时间，从源头抑制金属间化合物过度生长；

客户收益 BENEFIT

- ✓ 避免项目延期——按客户项目节点，若本轮认可未过，量产至少推后
- ✓ 获得"裂纹在第几次循环开始损伤"的量化认知，寿命裕量从黑箱变后
- ✓ 新样品在同等温度冲击条件下失效循环数提升到原来的一倍以上，满
- ✓ 回流三参数管控与验证过程监控写入生产工艺规范，器件布局评审新

CASE / 12

随机振动疲劳

标准谱跑得完、实车路试就崩：共振下的倒装芯片焊点

华南汽车电子厂



问题 PROBLEM

华南某汽车电子厂的车身用（非发动机舱）倒装芯片封装产品，在路试阶段出现数起功能中断，返修件电气测试时通时断。

分析 ANALYSIS

TMC 取得客户装在样车上的加速度传感器记录（覆盖城市道路、高速、破损路面三种工况）做频谱分析，并用声学扫描显微镜逐周期无损追踪、对整板与局部做模态测试、对比两种并行表面处理方案：

- ① 损伤演化呈清晰三阶段——第一阶段焊点边缘出现微小界面分离、电气性能完全正常，第二阶段分离沿界面向中心推进、电气参数偶发波动，第三阶段裂纹贯穿、连接中断。
- ② 模态测试发现产品的一阶固有频率正好落在实车路试振动能量最集中的频段内，即共振：板被持续激励、振幅放大，焊点承受的应变远超设计预期。
- ③ 同一产品的两种表面处理方案在振动条件下焊点寿命差异明显，界面结合强度直接影响裂纹萌生早晚。
- ④ 失效区域附近有较重元器件且板厚偏薄，质量集中与刚度不足共同抬高了局部振幅。

这是一类典型的“结构共振疲劳”——客户的振动测试是合规性测试（满足标准条款），而非发现性测试（找出产品弱点）。

措施 SOLUTION

问 题 / PROBLEM

- 损伤演化呈清晰三阶段——第一阶段焊点边缘出现微小界面分离、电气性能完全正常，第二阶段分离沿界面向中心推进、电气参数偶发波动，第三阶段裂纹贯穿、连接中断。
- 模态测试发现产品的一阶固有频率正好落在实车路试振动能量最集中的频段内，即共振：板被持续激励、振幅放大，焊点承受的应变远超设计预期。
- 同一产品的两种表面处理方案在振动条件下焊点寿命差异明显，界面结合强度直接影响裂纹萌生早晚。
- 失效区域附近有较重元器件且板厚偏薄，质量集中与刚度不足共同抬高了局部振幅。

对 策 / SOLUTION

- 基于对比测试结果统一表面处理方案，选用振动条件下界面结合更稳定的一种，并写入器件与板厂接口规范
- 振动测试由“标准谱合规”改为“实车谱 + 强化谱”组合——先跑实车采集的真实谱，再跑在共振频段加强的强化谱加速暴露问题；
- 新项目流程增设结构模态分析节点，在布线完成后、投板前检查固有频率是否与典型车载振动频段冲突
- 把板的一阶固有频率移出主要振动能量频段，可选手段包括增加板厚或局部加强筋以提高刚度、调整支撑点位置、把重元器件移出振幅最大的区域（板中心）；

客户收益 BENEFIT

声学 C-SAM

模态分析

实车谱采集

频谱对比

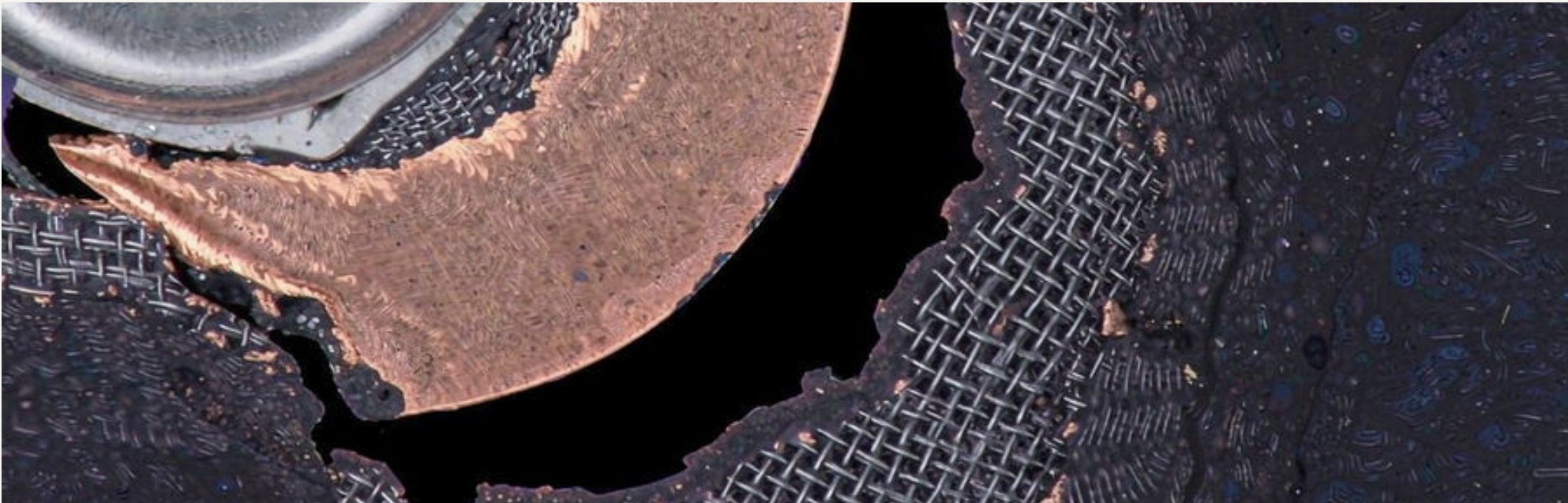
点胶固定

过程电阻监测

避免至少一次设计改版——重新布线、重新胶胶、重做主套可靠性验证

✓

模态分析成为新项目必做项，振动中电阻过程监测固化进可靠性验证



问题PROBLEM

华南某消费电子厂的手持产品在跌落验证中，标准跌落次数还没跑完就出现功能异常。

分析ANALYSIS

TMC 用染色分离确认失效模式，并结合受控跌落试验分阶段取样、对照试验、基材性能评估与板面应变测量：

- ① 染色区域显示断裂发生在焊盘与基材之间，属基材内聚破坏——不是焊点脱开，是基材自己裂了。

③ 客户采用非阻焊定义焊盘，焊盘边缘无阻焊层覆盖，铜与基材的结合完全靠铜箔本身的附着力。

⑤ 对照试验是定位关键：非阻焊定义样品在 30 次左右出现坑裂，阻焊定义样品寿命明显更长，且失效模式从基材坑裂转移为焊点本身开裂。
- ② 失效集中在 BGA 阵列边角与靠近板边的位置，即跌落时形变最大处。

④ 受控跌落试验中，边角位置焊盘下方在约 30 次跌落即出现基材裂纹，远低于产品可靠性目标。

⑥ 应变测量确认边角为应变峰值区，同时发现分板工艺会在板边引入额外应变，叠加在跌落应变之上。

这是一类典型的“基材内聚失效”——设计规则若停留在有铅时代，看到的每一个“焊点问题”其实都可能是基材问题。

措施SOLUTION

- ▶ **过程监控：**建立基于应变阈值的预防方案——开发与工艺验证阶段用应变片测出各工位实际应变值并设定控制上限，量产阶段只监控应变即可间接控制坑裂风险，实现从“检结果”到“控过程”的转变
- ▶ **设计优化：**把高风险区域（板边、角部、大尺寸器件）的焊盘改为阻焊定义或混合定义，让阻焊层压住焊盘边缘一小圈；
- ▶ **结构整改：**对确实无法改设计的高风险器件采用选择性底部填充或边缘胶固定，只在最需要的几个位置使用以控制成本
- ▶ **工艺固化：**梳理整条装配线的应变源——分板改用铣刀工艺、测试工装支撑点重新布置以避免应变敏感区、螺丝锁付扭力设定上限、关键工位设置应变监测

客户收益BENEFIT

- ✓

跌落验证通过率由不足提升到稳定满通过，市场返修率同步下降
- ✓

焊盘定义调整几乎零成本、装配应变管控投入很小，真正增加成本的
- ✓

整体整改投入远低于此前两轮无效整改的总和
- ✓

客户首次量化了产线上“静悄悄”的装配应变——部分工位已接近材



CASE / 14

ENIG 镍层过度腐蚀

黑盘：一份只看厚度的报告掩盖了什么

问题 PROBLEM

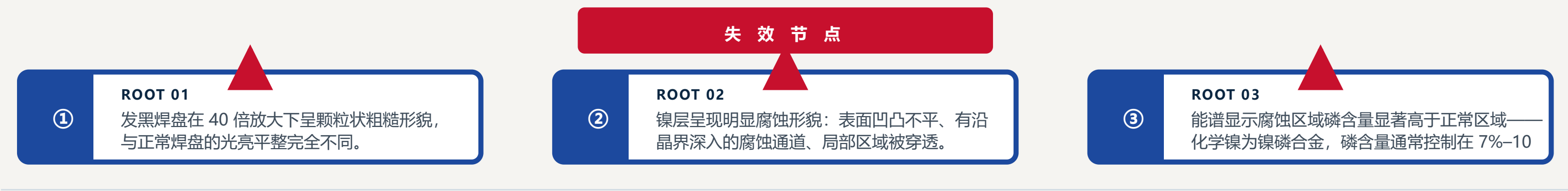
华东某通信与汽车电子制造商的某批次板在回流之后，部分焊盘表面发黑、焊点润湿不良；

分析 ANALYSIS

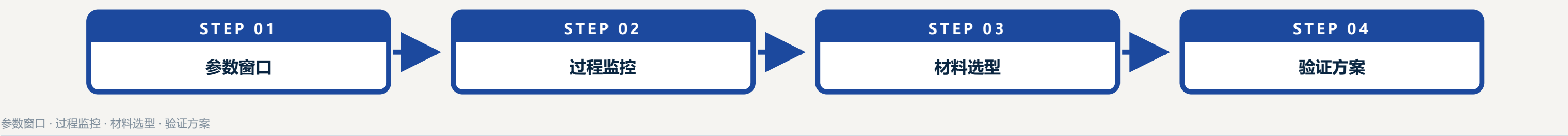
TMC 对失效焊盘做垂直切片与扫描电镜观察、元素面扫、离子色谱分析、剪切力对比测试，并回溯板厂该批次生产记录：

- ① 发黑焊盘在 40 倍放大下呈颗粒状粗糙形貌，与正常焊盘的光亮平整完全不同。
- ② 镍层呈现明显腐蚀形貌：表面凹凸不平、有沿晶界深入的腐蚀通道、局部区域被穿透。
- ③ 能谱显示腐蚀区域磷含量显著高于正常区域——化学镍为镍磷合金，磷含量通常控制在 7%–10%，浸金本质是金置换镍的置换反应，工艺控制不当会使镍过度溶解、磷在表面相对富集。
- ④ 离子色谱在焊盘表面检出游离磷酸根类物质，印证镍层被过度腐蚀的判断。
- ⑤ 剪切力对比显示失效批次强度明显更低，且断裂发生在焊盘界面而非焊料内部，说明界面是薄弱环节。
- ⑥ 工艺追溯发现：浸金槽在该批生产前刚做过一次维护，槽液活性处于偏高状态，而浸金时间未相应调整。

这是一类典型的“冶金状态失效”——厚度是几何量，可靠性是冶金量。



措施 SOLUTION



客户收益 BENEFIT

高可靠性平台统一采用带阻挡层的表面处理方案，界面结合强度成为每批必做验证

IC 拾游离磷 SEM 切片 剪切力 ENERIG 槽液维护 季度审核

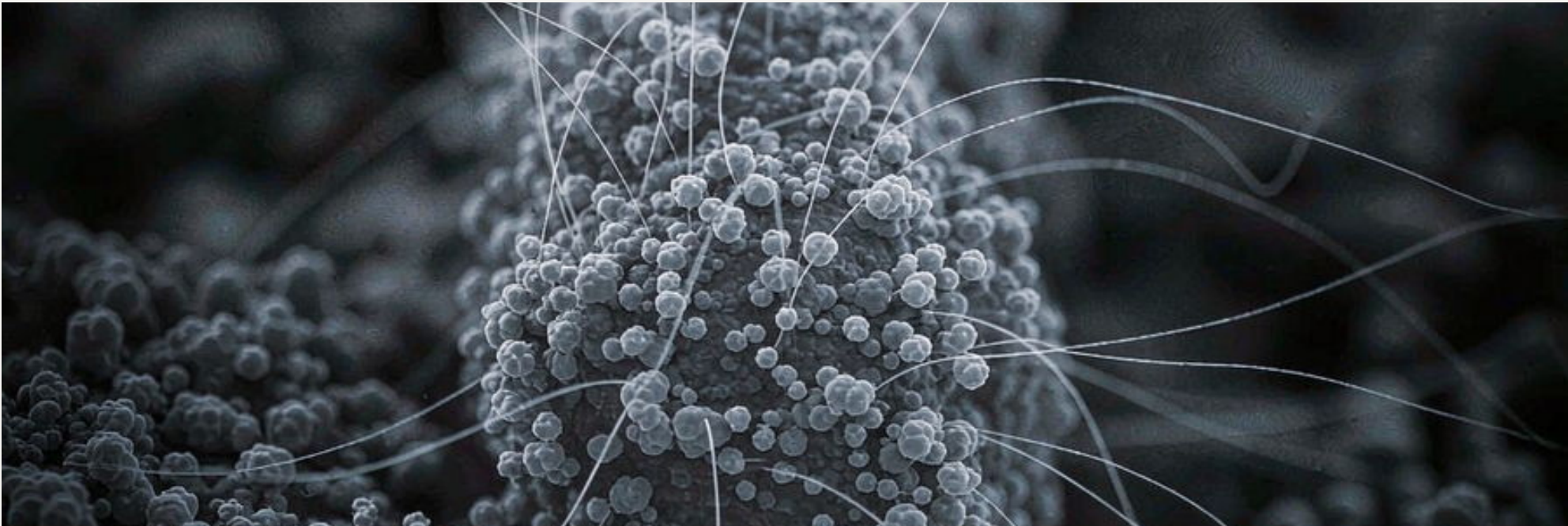
材料检验由形同虚设转为真正具备拦截能力——此前报告都合格，检了也白检

CASE / 15

锡须 · 慢性的随机杀手

锡须：微米级细丝引发的项目级风险

华东微波与航天配套厂



问题 PROBLEM

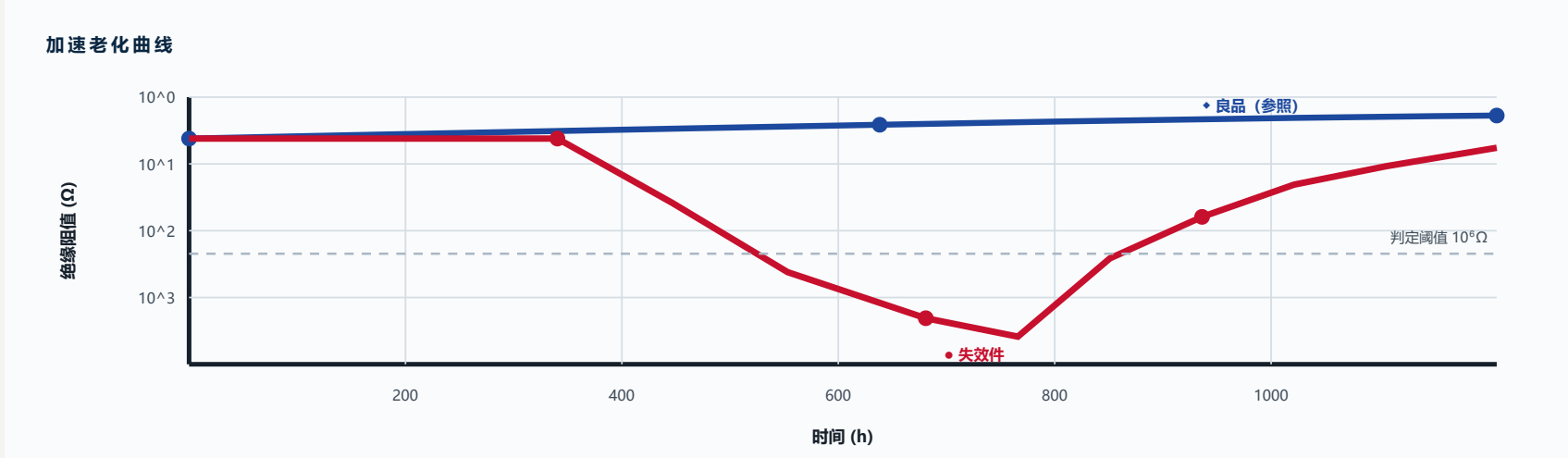
华东某微波器件与高可靠装备配套厂，产品大量使用纯锡镀层的元器件与连接器。

分析 ANALYSIS

TMC 对失效件做扫描电镜形貌与尺寸统计、镀层与界面切片、应力状态评估、温湿度循环与常温存储加速试验，并对纯锡、锡铅合金、带镍阻挡层三种镀层做对照：

- ① 找到多根锡须，形态包括直丝状、弯折状与螺旋状，长度从几十微米到接近毫米不等。
- ② 分布有明确规律——引脚根部（靠近弯折处）与镀层边缘区域密度最高，弯折变形区的锡须密度是平整区域的数倍。
- ③ 切片发现锡层与铜基底之间形成了一层不均匀的金属间化合物，局部厚、局部薄，这是应力分布不均的直接证据。
- ④ 加速试验显示温度循环条件下锡须生长明显加快。

这是一类典型的"自发性慢性失效"——时间尺度不可预测，有的几周长出、有的几年后才出现。



措施 SOLUTION

- ▶ **设计优化**：按风险等级对产品分类——高气压密封或地面环境的消费与工业产品风险相对可控；
- ▶ **来料检验**：建立元器件镀层入厂确认方法，要求供应商明确镀层类型与工艺，高风险项目须提供锡须评估数据，并对关键器件做定期加速试验抽检
- ▶ **材料选型**：高风险产品给出三梯度方案——优先带镍阻挡层镀层（镍层阻止铜锡金属间化合物形成，从源头消除主要应力源），其次豁免范围内使用锡铅合金镀层，或改用其他非锡表面处理
- ▶ **结构整改**：对无法更换镀层的在役产品采用敷形涂覆作物理阻挡——锡须可能继续生长但被封在涂层内无法接触相邻导体；

客户收益 BENEFIT

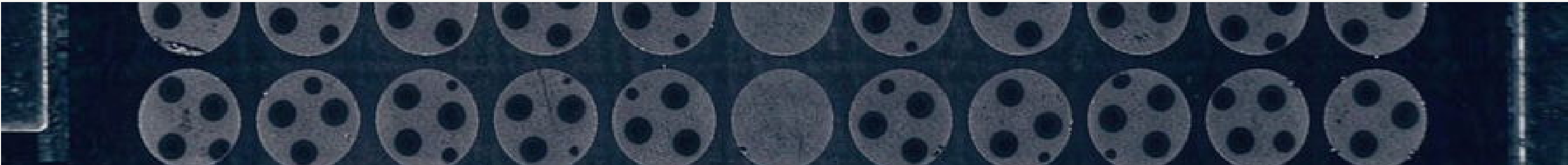
- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| ✓
高风险产品线完成镀层替换后未再出现同类失效 | ✓
避免项目级损失——在轨或高端装备上发生一次这类失效，代价不只 |
| ✓
内部组织专题培训，使设计与采购均具备锡须风险识别能力 | ✓
供应链规范化：镀层类型确认写入元器件选型必检项后，后续多个项 |

CASE / 16

BGA 空洞

空洞偷走的 10% 结合力：位置比大小重要

华东工业电源厂



问题PROBLEM

华东某工业电源制造商内部的空洞判废线划在 25%。

分析ANALYSIS

TMC 重做 X 光检查并补做三维断层扫描，对两组样品做空洞体积、数量与空间位置的完整统计（并用金相切片验证扫描结果），再结合剪切与拉拔测试、裂纹扩展路径观察与工艺参数回溯：

- ① 二维 X 光把整个焊球的空洞投影到一个平面，无法判断垂直方向的位置。

③ 力学验证最有说服力：同样体积的空洞，位于界面处对强度的削弱远大于位于中心。

⑤ 成因分析显示：中心型空洞多来自焊膏挥发物在凝固时被包裹或盘中孔回流时排气，界面型空洞则更多与焊盘可焊性状态、焊膏活性、预热段温度曲线有关。
- ② 通过验证的那批，空洞主要集中在焊球中心区域。

④ 裂纹倾向于沿界面型空洞扩展——空洞相当于预置的裂纹源，为裂纹提供了低阻力通道。

⑥ 工艺回溯找到关键差异：失效批次的回流曲线在预热段升温速率偏快，焊膏中的挥发物在到达液相线之前没有充分逸出，被"封"在了界面处。

核心结论是：空洞的"位置"比"大小"重要，"大小"比"数量"重要。

措施SOLUTION

问 题 / PROBLEM

- 二维 X 光把整个焊球的空洞投影到一个平面，无法判断垂直方向的位置。
- 通过验证的那批，空洞主要集中在焊球中心区域。
- 力学验证最有说服力：同样体积的空洞，位于界面处对强度的削弱远大于位于中心。
- 裂纹倾向于沿界面型空洞扩展——空洞相当于预置的裂纹源，为裂纹提供了低阻力通道。

对 策 / SOLUTION

- 高风险产品（大尺寸 BGA、高可靠性要求）采用三维断层扫描抽检，一般产品保持二维 X 光但按新标准判读，既控检测成本又保关键品风险可控
- 界面型空洞与焊盘表面状态直接相关，把焊盘可焊性纳入来料检验，存放时间较长的板使用前做可焊性确认或烘烤处理
- 梳理焊膏的回温、搅拌、使用时效管理规范，建立钢网开口与焊盘匹配的检查项；
- 针对挥发物逸出不充分重调预热段——延长预热时间、降低升温速率，让挥发物在到达液相线前充分逸出；

客户收益BENEFIT

3D CT

AXI

切片验证

剪切力

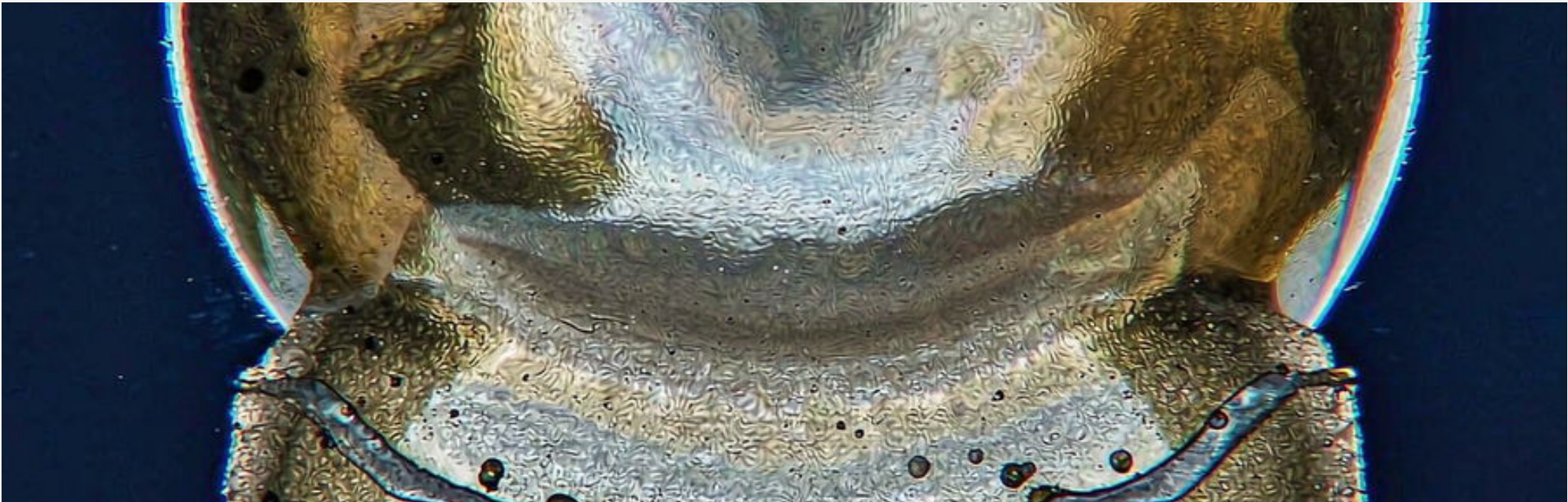
回流曲线

盘中孔工艺

焊盘活性与量效系数同时下降，沿明质标准在面访数左约继

✓

新标准与优化工艺落地后，焊盘热循环验证通过率明显提升，同类目



问题PROBLEM

华南某同时做汽车电子与消费电子的制造商，产品在出厂前功能测试全部通过，到客户端使用几个月后出现批量性间歇失效。

分析ANALYSIS

TMC 做机械分离与断面观察、界面金属间化合物厚度测量、全阵列失效比例统计、塌陷行为分析、氧化与可焊性检查，并对回流曲线与热耦合做分析：

- ① 分离面两侧——焊球一侧呈光滑球面，焊盘一侧锡膏保持独立形状，两侧都是"自由表面"形貌，说明它们从未熔融在一起。

③ 呈枕头形貌的焊点占了相当大比例，且集中分布在器件的边缘与角落。

⑤ 失效焊球表面检出氧化物，同时发现客户器件库存中有部分超过推荐的存储期限。
- ② 界面金属间化合物层极薄，不到一微米，直接证明界面几乎没有发生冶金反应。

④ 正常焊接时 BGA 焊球熔化后会"塌陷"、器件整体下沉一定高度，而失效样品实测贴装高度显示塌陷量不足。

⑥ 大尺寸 BGA 热容大，器件本体与引脚之间、中心与边角之间存在温度梯度，峰值温度不足或液相线以上时间不足时边角焊球可能达不到充分熔融。

这是一类典型的“潜伏性界面未融合”——出厂时合格，用起来不可靠。

措施SOLUTION

- 来料检验：建立器件湿度敏感等级管理制度——明确每类器件存储条件与开封后暴露时限、建立库存先进先出执行机制、对超时器件按等级设定温度与时间执行烘烤
- 材料选型：评估氮气保护回流方案，氮气环境能显著减少熔融过程氧化、对改善枕头效应效果明显；
- 工艺固化：针对大尺寸器件重调回流曲线——适当提高峰值温度、延长液相线以上时间，确保大热容器件边角焊球充分熔融；
- 参数窗口：对存放时间较长或来源存疑的器件，上线前做可焊性测试，成本低但能提前拦下氧化严重的批次

客户收益BENEFIT

- ✓

该类失效在客户端的发生率降到极低水平
- ✓

湿度敏感器件管理、开封时限跟踪、上线前可焊性确认写入生产管理
- ✓

此前一次批量返修的直接成本（物流、人工、器件、客户赔付）是本
- ✓

客户关系得到修复——间歇性失效对信任打击最大，整改后客户在下



CASE / 18

微型元件立碑

01005 立碑：被放大的工艺公差

问题 PROBLEM

华南某可穿戴设备厂的产品大量使用 01005 元件（尺寸 0.4mm × 0.2mm，重量约 0.04mg）。

分析 ANALYSIS

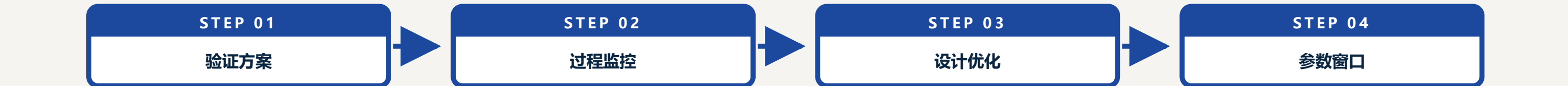
TMC 现场走完完整流程，用锡膏检查设备测印刷后焊膏体积、用高倍显微镜看焊盘设计、在板上布置热电偶测不同位置的实际温度曲线，并调取贴片机贴装数据做统计：

- ① 立碑的本质是"两端不同步"——回流时焊膏熔化对元件两端产生表面张力，两端张力不平衡产生的力矩会把元件一端拉起来。
- ② 焊膏印刷三维测量显示，相当比例的焊点两端焊膏体积差超过 10%。
- ③ 贴装数据显示部分位置偏移超过十几微米，对 01005 意味着元件已明显偏向一端——一端焊膏被挤开、另一端覆盖不足。
- ④ 板面不同区域升温存在明显差异，某些区域的两端温差超过 3℃：一端焊膏先熔化先产生张力把元件拉过去，另一端还未来得及抓住，元件就竖起来了。
- ⑤ 焊盘设计存在不对称——部分位号一端连接大面积铜箔（巨大热沉，吸热快、升温慢），另一端连接细走线，这是设计层面的"先天不平衡"。
- ⑥ 交叉验证确认三因素叠加而非独立作用：焊膏量不均 + 贴装偏移 + 热不平衡同时存在的位号，立碑率是单一因素位号的数倍。

核心洞察是工艺窗口的叠加收窄：元件的重量和焊膏量按尺寸的三次方缩小，而工艺公差的缩小速度跟不上，同样的绝对公差相对于元件尺寸被放大；



措施 SOLUTION



验证方案 · 过程监控 · 设计优化 · 参数窗口

客户收益 BENEFIT

01005 立碑率从 5% 降到接近零

按产能与返修成本计算，每月节省的返修工时与物料损耗达六位数量级，整改投入一个月内收回

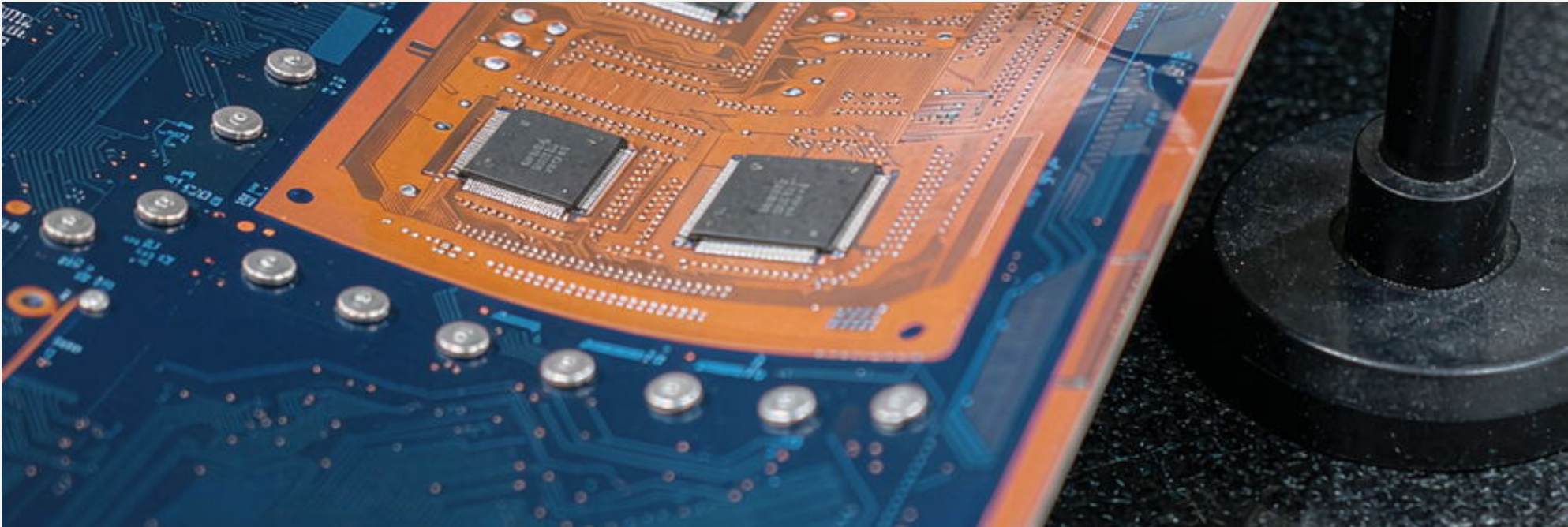
意外收益：焊膏量与贴装精度管控加严后，桥接、虚焊等其他焊接不良同步下降，整线直通率提升幅度超过立碑单项改善幅度

CASE / 19

板级高温翘曲

0.68% 翘曲拉开的 25 微米缝隙：常温测的数不是决定良率的数

华东服务器制造商



问题 PROBLEM

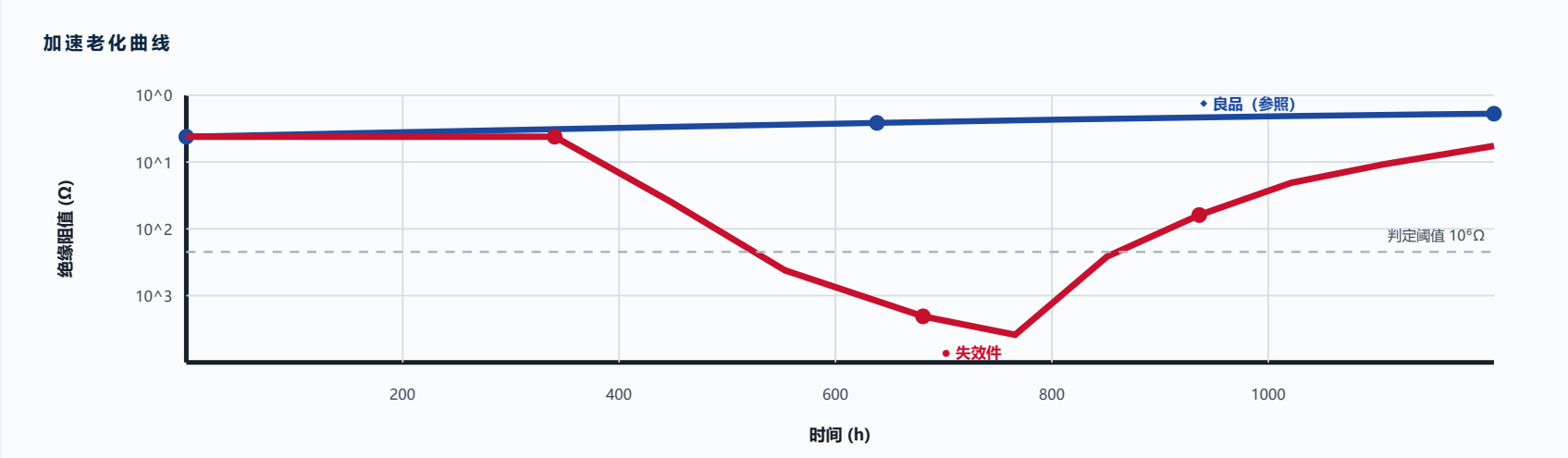
华东某服务器制造商的高端主板在量产中出现边缘焊点的虚焊与开焊，X 光显示失效集中在 BGA 的四个角与边缘，中心区域焊点正常。

分析 ANALYSIS

TMC 用非接触三维形貌测量对回流前后的板做翘曲量全面测量，关键是在回流温度下做原位测量，并结合失效焊点切片、叠构分析、材料高温模量评价与高 Tg 材料对照验证：

- ① 在回流峰值温度附近，BGA 区域的板面翘曲量达到板长的 0.68%——对边长几十毫米的大 BGA，换算成边缘高度差是几十微米，而焊球的塌陷量通常也就几十微米量级，即翘曲足以把边缘焊球从焊膏里拉开。
- ② 动态测量显示翘曲在升温段逐渐增大、峰值附近达最大、冷却段部分恢复但留有残余。
- ③ 失效角部焊点的切片呈现典型的“拉伸”形貌——焊球被拉长、颈缩明显、甚至出现上下两部分未完全融合的迹象，与翘曲导致的“拉开”完全吻合。
- ④ 叠构分析显示该主板层数多、铜厚分布不均匀、不同区域残铜率差异很大。
- ⑤ 材料评价显示该板材在回流峰值温度下模量下降明显——高温下变软、刚度下降，翘曲更易发生。
- ⑥ 高 Tg 材料对照样品在同样回流条件下翘曲量明显更小，边缘高度差压缩到原来的一半以下。

这是一类典型的“测量时刻错位”——检测要测在失效发生的时刻，而不是在方便测量的时刻。



措施 SOLUTION

- ▶ **验证方案：**建立高温翘曲测量方法，纳入新产品导入必测项与量产板材定期抽检项，判定标准不再基于常温翘曲，而是基于回流峰值温度下的翘曲量
- ▶ **工艺固化：**产线引入带压平功能的回流载具，在回流过程中用载具物理抑制翘曲；
- ▶ **参数窗口：**适当提高峰值温度、延长液相线以上时间，让焊膏在高温下保持更好的流动性与更长的融合窗口，部分补偿翘曲带来的间隙；
- ▶ **材料选型：**评估并导入高 Tg 材料，回流峰值温度下翘曲量显著下降，角部开焊问题随之解决；

客户收益 BENEFIT

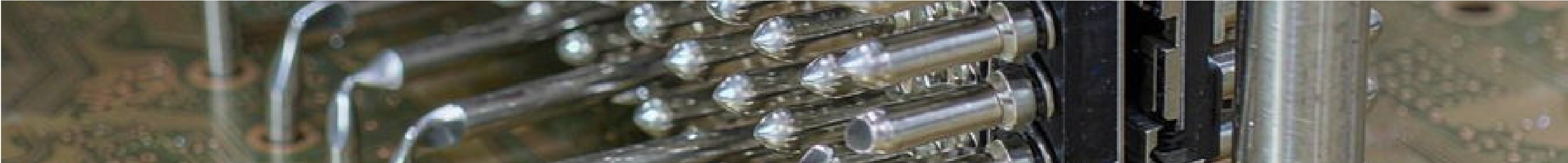
- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ✓
高温翘曲测量写入新产品导入验证清单，叠构平衡性检查加入设计评 | ✓
高 Tg 材料带来的单板成本增加远低于返修成本，投入产出清晰 |
| ✓
此前这类不良的返修成本（人工、器件、报废的高价值主板）每月达 | ✓
材料升级与工艺补偿落地后，该款主板 BGA 角部开焊不良率降 |

CASE / 20

压接孔损伤

600 磅压下去反而更可靠：压接的窗口在孔径标注那一刻就定了

华东汽车与通信连接器厂



问题 PROBLEM

华东某汽车电控与通信背板制造商在新平台导入压接工艺后，出现孔壁损伤、焊盘起翘与接触电阻超标的问题。

分析 ANALYSIS

TMC 测成品孔径与镀层厚度、压接后的接触电阻与保持力，并做孔横截面检查、压接过程力—位移实时监控与对照验证：

- ① 孔径的公差偏大、部分孔偏小——孔偏小意味着压接需要更大的插入力，弹性引脚反过来挤压孔壁，把镀铜桶撑裂、把内层连接拉断、把焊盘顶起。

③ 系统孔径统计显示批次内孔径分布较宽、整体偏向公差下限，同时孔壁镀层厚度不均匀、部分位置偏薄。

⑤ 接触电阻与保持力测试显示，损伤严重的孔初期接触电阻反而可能正常——过盈量大使初期接触紧密，但随着温度循环与振动，损伤扩展、接触电阻开始上升。
- ② 插入力监测显示正常压接曲线应平滑上升后趋于稳定，而问题批次曲线出现异常力峰值与波动。

④ 横截面分析看到三类损伤：镀铜桶的纵向裂纹、内层铜箔与孔壁连接处的分离、焊盘的起翘，均属过盈量过大所致。

⑥ 按规范执行的对照样品（孔径控制在推荐范围、镀层厚度均匀、压接过程有力—位移监控）接触电阻稳定在很低水平，且经温度循环与振动后保持稳定。

这是一类典型的“初期正常、后期劣化”——危险之处在于出厂检测放行。

措施 SOLUTION

问 题 / PROBLEM

- 孔径的公差偏大、部分孔偏小——孔偏小意味着压接需要更大的插入力，弹性引脚反过来挤压孔壁，把镀铜桶撑裂、把内层连接拉断、把焊盘顶起。
- 插入力监测显示正常压接曲线应平滑上升后趋于稳定，而问题批次曲线出现异常力峰值与波动。
- 系统孔径统计显示批次内孔径分布较宽、整体偏向公差下限，同时孔壁镀层厚度不均匀、部分位置偏薄。
- 横截面分析看到三类损伤：镀铜桶的纵向裂纹、内层铜箔与孔壁连接处的分离、焊盘的起翘，均属过盈量过大所致。

对 策 / SOLUTION

- 增加压接孔孔径抽检与镀层厚度确认，每批抽测，同时要求板厂提供孔壁质量的切片报告
- 建立首件验证机制——每批板、每批连接器的首件必须做横截面检查与保持力测试，确认合格后再批量生产，是低成本高效率的把关点
- 建立压接孔设计规则，明确孔与板边的最小距离、孔与邻近 BGA 的最小间距（压接应变会造成邻近焊点潜伏损伤）以及支撑工装的设计要求——孔太靠近板边缺乏支撑容易变形
- 按连接器供应商的规范（而非通用板厂标准）重新定义压接孔的成品孔径公差与镀层厚度要求，明确写入板的制造图纸与采购规范

WHY TMC · 为什么选择迈科

避开低价竞争的三个理由

客户面对的不是"哪个东西坏了", 而是材料、设计、工艺、环境四个变量在某个时刻的叠加结果。客户的组织架构恰好按这四个变量分开——当失效发生时, 没有人能看到全貌。迈科的价值, 就是把四个变量重新放回同一个坐标系里。

01

您买的不是份报告

报告告诉您"这里有 CAF", 而迈科要回答"为什么偏偏是这批板、偏偏这个位置、偏偏在梅雨季"。前者值几千块, 后者值的是您一整条产品线的信誉。每一份检测投入都对应着一次良率与返工成本的精算。

02

从应急救火队到设计评审前置

二十个案例里没有一单只做了"一次性检测"。迈科把检测项嵌入了客户的来料检验规范、DFM 评审与年度可靠性验证流程。从"出事再找你"变成"开案就找你", 价格就不再是客户考虑的第一要素。

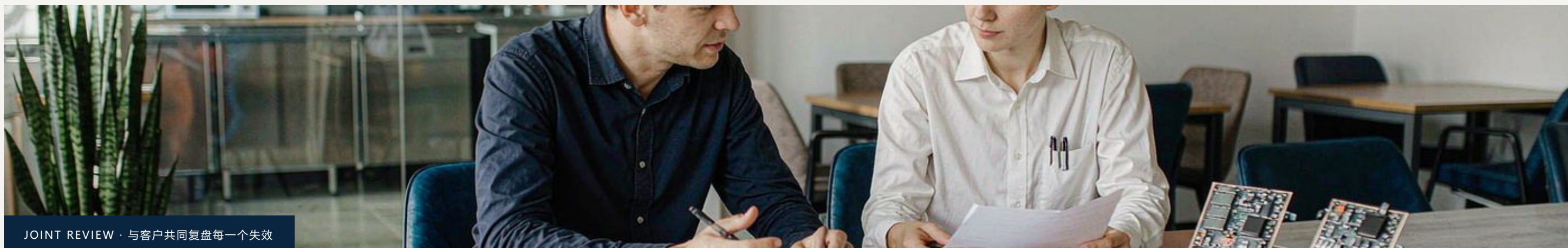
03

看不见的参数变得可判定

铜箔粗糙度、界面磷含量、高温刚度、循环剖面下的漏电流——都是"不可见的参数"。迈科帮您把它们从"供应商说了什么"变成"您手里有什么"。两者之间的差距, 就是您未来可能要付的学费。

我们的立场

如果您的验证从来没让产品失败过, 那不是产品可靠, 是验证条件还不够贴近真实。如果您的来料检验从来没拦下过一批货, 那不是供应商优秀, 是检验指标选错了。如果您的产品从未出现过早期失效, 那不是质量好, 是您还没有找到那个会在第三年咬人的变量。迈科能提供的, 就是这样一双眼睛——帮您在产品还躺在图纸上、还停在产线上的时候, 看见它三年后的样子。



JOINT REVIEW · 与客户共同复盘每一个失效

TMC TESTING · ACCESS TO GLOBAL MARKET

让失效 有来处 让解决 有路径

二十个案例只是开始。迈科检测（TMC）覆盖 PCB 与 PCBA 失效分析、环境可靠性、汽车电子（含 EMC）、连接器/线缆等检测领域，东莞双基地 10000 m² 并行能力，为您的产品从开案到量产的全周期 提供端到端的可靠性验证与失效诊断方案。

CONTACT

客户经理 + 工程师双轨对接

邮箱 cert@tmc-lab.com

网址 www.tmc-test.com · www.tmc-lab.com

SHENZHEN · DONGGUAN

东莞松山湖高新区 · 东莞塘厦镇鹿苑路 103 号

TMC TESTING SERVICES CO., LTD.



柠檬说 · 微信公众号



官方网址