

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508404

X射线平板探测器可靠性强化试验及故障分析

常家齐 朱敏杰 杜晓辉 刘 帅 朱可涵 陈凡红

(机械工业仪器仪表综合技术经济研究所 北京 100055)

摘要:面向X射线平板探测器研发阶段的可靠性优化,提出了一种多维度可靠性强化试验方法。选取两款平板探测器为试验对象,结合其实际服役环境,设计并实施了低温步进、高温步进、快速温变、振动步进、恒定湿热步进、恒定湿热极限、交变湿热及综合环境8种应力加载试验,并搭建了暗场灰度值测量系统以检测性能变化。结果表明,两款探测器在全温区均能保持稳定运行,在振动步进试验中,探测器1在10 grms时出现短暂断连但可恢复,探测器2在8 grms时发生不可逆故障。在湿度95% RH条件下,两款探测器均能正常工作,但在综合环境试验中,探测器1失效且无法恢复,说明多因素耦合环境对损伤具有显著加速作用。显微镜与X射线透射表征揭示了焊点开裂、印制电路板(PCB)裂纹、导线错位和表面污染是主要失效模式,机械应力与湿热环境的协同作用显著加快了材料老化与界面退化。基于此,提出了从焊接工艺优化、洁净度控制、印刷电路板抗振设计及芯片导线固定工艺等方面的改进建议,为X射线平板探测器的设计与制造可靠性提升提供了思路和参考依据。

关键词: X射线平板探测器;可靠性强化试验;故障分析;缺陷检测

中图分类号: TH89;TN306

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

X-ray flat panel detector reliability enhancement test and failure analysis

Chang Jiaqi Zhu Minjie Du Xiaohui Liu Shuai Zhu Kehan Chen Fanhong

(Instrumentation Technology & Economy Institute, Beijing 100055, China)

Abstract: For reliability optimization during the development of X-ray flat panel detectors, this study proposes a multi-dimensional reliability enhancement testing method. Two flat panel detectors were selected as test subjects. Considering their actual service environments, eight stress-loading tests were designed and conducted, including low-temperature stepping, high-temperature stepping, rapid temperature variation, vibration stepping, constant humidity heat stepping, constant humidity heat limit, alternating humidity heat, and comprehensive environmental tests. A dark-field grayscale measurement system was established to monitor performance variations. The results show that both detectors maintained stable operation across the full temperature range. In the vibration stepping test, detector-1 exhibited a temporary disconnection at 10 grms but was recoverable, whereas detector-2 experienced irreversible failure at 8 grms. Under 95% RH conditions, both detectors functioned normally. However, detector-1 failed and could not recover under the comprehensive environmental test, indicating that multi-factor coupled environments significantly accelerate damage. Microscopy and X-ray transmission characterization revealed that solder joint cracking, PCB fractures, wire misalignment, and surface contamination were the primary failure modes, and that the synergistic effects of mechanical stress and humidity markedly accelerated material aging and interfacial degradation. Based on these findings, we propose improvements in soldering-process optimization, cleanliness control, printed-circuit-board anti-vibration design, and chip-wire fixation, thereby providing insights and references for enhancing the reliability of X-ray flat panel detector design and manufacturing.

Keywords: X-ray flat panel detector; reliability enhancement testing; failure analysis; defect detection

0 引言

X 射线平板探测器是医疗影像和工业检测中的关键部件^[1],其内部集成了闪烁体层、光电转换阵列、读出电路及高密度封装结构^[2]。随着探测器向更高分辨率和更紧凑化发展,其内部组件的集成度显著提升,导致探测器的可靠性设计和制造难度增大。在 X 射线平板探测器研制过程中,需要开展可靠性试验以暴露设计和制造缺陷,从而指导结构和工艺优化^[3-4]。然而,传统可靠性试验方法(如恒定温度循环、单一振动测试)由于载荷强度有限,难以在短时间内有效激发探测器内部潜在的封装失效或电路连接故障^[5]。

可靠性强化试验通过逐步增加试验载荷强度(如温度范围、振动量级、湿度水平),能够在较短时间内激发被测对象的潜在故障,具有试验周期短、成本低的优势^[6]。该技术已在电子器件^[7]、机械零部件^[8]、航天产品^[9]等领域得到应用。然而,针对 X 射线平板探测器的可靠性强化试验研究尚未见报道。尽管探测器内部的闪烁体转换技术、薄膜晶体管电路等组件技术成熟,但其高密度集成特性使得可靠性相关的失效模式往往隐藏较深,传统单一应力试验难以有效识别。尤其是在实际服役条件下,探测器同时承受温度、湿度与机械振动等多因素耦合作用,这种复杂环境会显著加速材料老化效应与界面失效过程,而现有研究对此缺乏系统探讨。

为此,本文将“温度-湿度-振动”三因素耦合环境引入平板探测器可靠性强化试验,据此设计了低温步进、高温步进、快速温变、振动步进、恒定湿热步进、恒定湿热极限、交变湿热及综合环境多维度可靠性强化试验方案,并结合光学显微镜和 X 射线透射技术开展结构表征。试验结果表明,多因素耦合环境能够在较短时间内有效激发潜在故障,揭示出焊点开裂、印制电路板(printed circuit board, PCB)裂纹、导线错位等典型失效模式。多因素耦合环境对材料老化效应和界面失效具有显著加速作用,这一发现区别于传统单一应力测试,为探测器的工艺改进和可靠性优化提供了新的思路。

1 方法和系统

1.1 试验对象

本文的研究对象为两款商用 X 射线平板探测器,核心技术参数如表 1 所示。

1.2 软件及硬件系统

探测器的实物如图 1 所示,可靠性强化试验平台由稳压电源、工控机、湿热与温度变化系统、振动试验系统、

综合环境试验系统等组成,如图 2~4 所示。

表 1 探测器核心技术参数

Table 1 Core technical parameters of detectors

| 名称 | 工作环境 | 供电电压 | 尺寸(长×宽×高)/mm |
|-------|---------------|----------|--------------|
| 探测器 1 | 10 °C ~ 40 °C | 24 V 单输出 | 125×50×31.5 |
| | 20%RH~90%RH | 模式 | |
| 探测器 2 | 10 °C ~ 40 °C | 额定直流 | 203×190×56 |
| | 30%RH~75%RH | 电压 12 V | |



(a) 探测器 1 实物 (b) 探测器 2 实物
(a) Physical image of detector-1 (b) Physical image of detector-2

图 1 探测器实物

Fig. 1 Physical images of detectors



图 2 湿热与温度变化试验系统

Fig. 2 Humidity and temperature variation test system

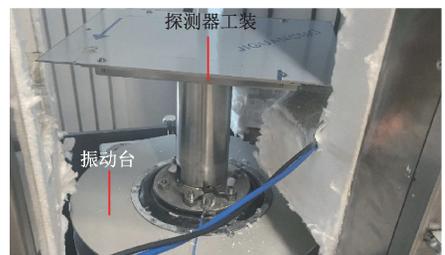


图 3 振动试验系统

Fig. 3 Vibration test system

1.3 可靠性强化试验方法

按照可靠性强化试验的一般试验流程,分步加载低温步进、高温步进、快速温变、振动步进、恒定湿热步进、恒定湿热极限、交变湿热及综合环境试验应力载荷,载荷参数的设定主要依据被测探测器的额定工作要求和使用寿命情况^[10]。在每项试验过程中,若探测器出现故障,则试验立即终止,进行探测器故障分析;若探测器在每项



图 4 综合环境试验系统

Fig. 4 Comprehensive environmental test system

试验加载最严苛载荷后,开机自检仍正常,则进行下一项检测,直至探测器出现故障。根据探测器实际工作环境和《GB/T 29309-2012 电工电子产品加速应力试验规程高加速寿命试验导则》^[11]、《GB/T 34986-2017 产品加速试验方法》^[12]、《T/CIS 03002. 1-2020 科学仪器设备电气系统可靠性强化试验方法》^[13]及《GJB 899A-2009 可靠性鉴定和验收试验》^[14],制定了以下应力剖面。

低温步进试验,两款探测器正常工作最低温度为 10 ℃,综合用户使用环境特征和相关标准规范,终止温度设为-20 ℃,加载曲线如图 5 所示,试验设备为恒温恒湿箱。起始温度为 5 ℃,步长为-5 ℃,温变速率为 5 ℃/min,探测器在每一阶段达到温度稳定后保温 30 min,并在保温结束前 15 min 进行 3 次的通断电启动检测,测量暗场下探测器的灰度值。

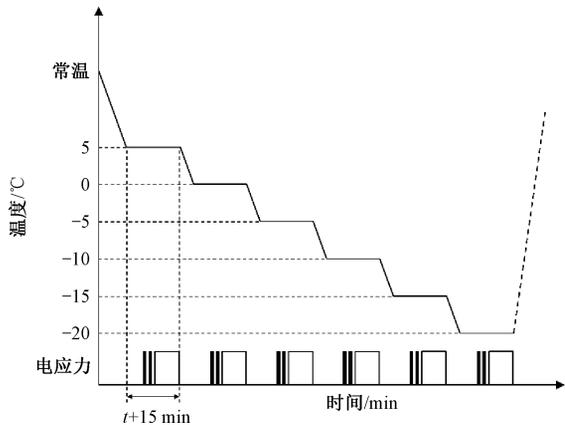


图 5 低温步进应力试验剖面

Fig. 5 Low-temperature step stress test profile

高温步进试验,两款探测器正常工作最高温度均为 40 ℃,综合使用环境特征和相关标准规范,终止温度设为 70 ℃,加载曲线如图 6 所示,试验设备为恒温恒湿箱。起始温度为 40 ℃,步长为 5 ℃,温变速率为 5 ℃/min,探测器在每一阶段达到温度稳定后保温 30 min,并在保温结束前 15 min 进行 3 次通断电启动检测,测量暗场下探测器的灰度值。

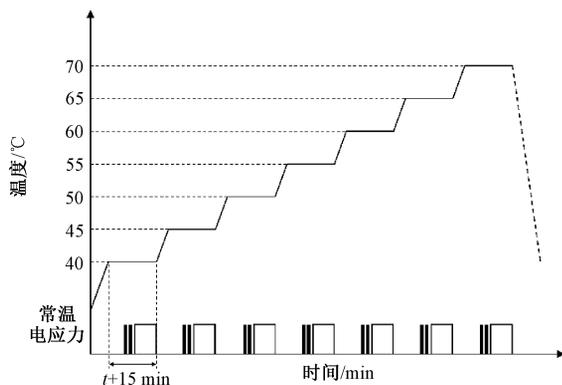


图 6 高温步进应力试验剖面

Fig. 6 High-temperature step stress test profile

示,试验设备同温度步进试验设备。试验从低温阶段开始,在高温阶段结束。温度范围为-15 ℃~65 ℃,温变速率为 5 ℃/min,循环次数为 6 次,探测器在高低温阶段达到温度稳定后保温 30 min,在每个保温阶段结束前 15 min 进行 3 次通断电启动检测,测量暗场下探测器的灰度值。

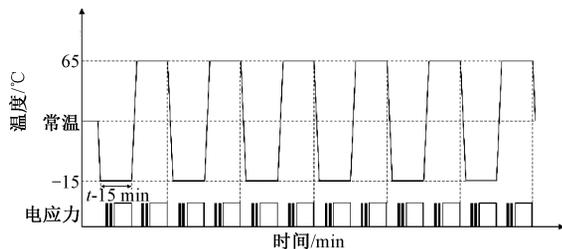


图 7 快速温变试验剖面

Fig. 7 Rapid temperature variation test profile

振动步进试验的应力加载曲线如图 8 所示。采用 Z 轴随机振动,振动频率为 200 Hz,振动强度以均方根加速度表示,1 grms 对应的均方根加速度为 9.81 m · s⁻²,工程上通常以“grms”作为单位表示振动级别。因此,本试验共设置了 2、4、6、8、10 grms 5 个振动级别,对应的均方根加速度分别约为 19.6、39.2、58.9、78.5、98.1 m · s⁻²,每个振动量级保持振动 15 min,整个振动过程保持通电自检,振动结束后,在暗场条件下测量探测器的灰度值。

恒定湿热步进试验,应力施加如图 9 所示。温度为 40 ℃,先后分 3 步施加相对湿度 75% RH、85% RH 和 95% RH,每步持续测试 2 h,整个试验过程中保持通电,在每阶段结束前 30 min 记录探测器在暗场下的灰度值。

恒定湿热极限试验在保持温度 40 ℃的条件下,直接施加 95%RH 相对湿度,持续测试 2 h,试验的应力施加如图 10 所示。整个过程中通电自检,试验结束后测量暗场下探测器的灰度值。

交变湿热试验应力施加方式如图 11 所示,温度在

快速温变试验的温度和电应力加载曲线如图 7 所

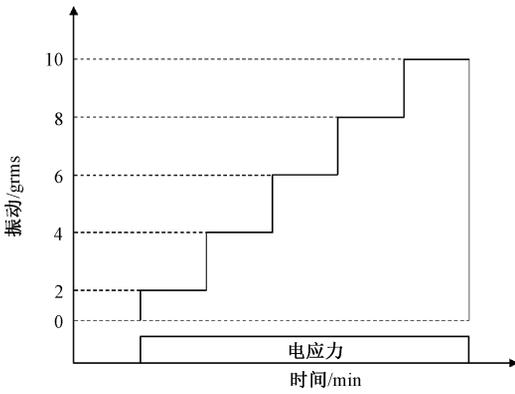


图 8 振动步进应力试验剖面
Fig. 8 Vibration step stress test profile

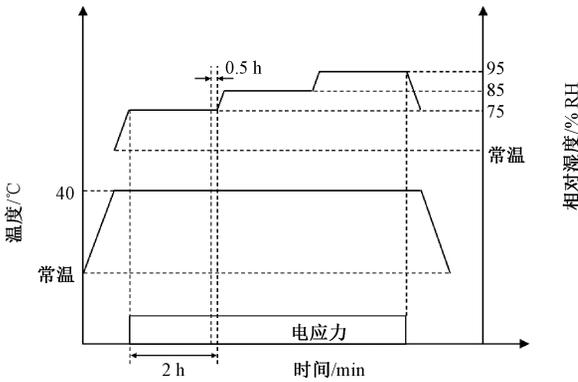


图 9 恒定湿热步进试验剖面
Fig. 9 Constant humidity heat step test profile

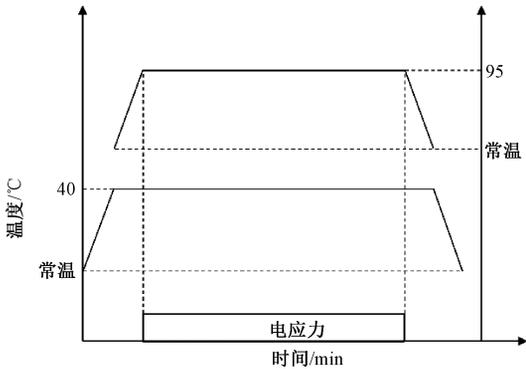


图 10 恒定湿热极限试验剖面
Fig. 10 Constant humidity heat limit test profile

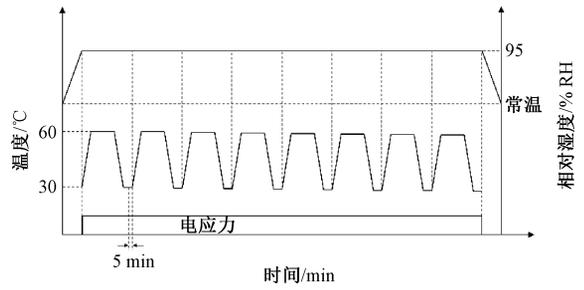


图 11 交变湿热试验剖面
Fig. 11 Alternating humidity heat test profile

应力施加方法同快速温变试验,振动量为 8 grms,在每个快速温变的保温阶段结束前 15 min 施加相应的振动量级 10 min,共测试 6 个循环,在每个循环低温阶段和高温阶段各保持 10 min 后,进行 3 次通断电启动检测,测量探测器在暗场下的灰度值。

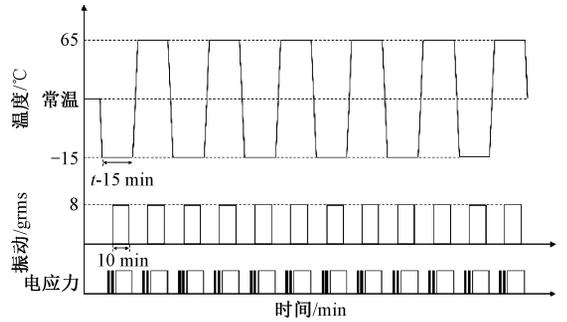


图 12 综合环境试验剖面
Fig. 12 Comprehensive environmental test profile

2 可靠性强化试验结果

本文不同探测器在多因素应力条件下的灰度值结果以平均值±标准差 (Mean±SD) 表示 (表 2)。平均值 \bar{x} 通过式 (1) 得到。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

标准差 SD 通过式 (2) 得到。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: x_i 表示第 i 个测量值; n 为测试数。

为了评估不同试验条件之间的差异显著性,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), ANOVA 的统计量 F 定义为组间均方与组内均方的比值,通过式 (3) ~ (5) 得到。

$$F = \frac{MS_{between}}{MS_{within}} \quad (3)$$

$$MS_{between} = \frac{SS_{between}}{df_{between}} \quad (4)$$

30 °C ~ 60 °C 变化,湿度为 95% RH,分 8 个周期共测试 8 h,每个周期中在 60 °C 和 95% RH 条件下测试 45 min,在 30 °C 和 95% RH 条件下测试 15 min,整个测试过程中保持通电,在每个循环结束前 5 min 记录探测器在暗场下的灰度值。

综合环境试验的应力施加方式如图 12 所示。温度

表 2 探测器图像灰度值
Table 2 Gray value of detector image

| 探测器类型 | 试验条件 | 测量值 | 平均值±标准差 |
|-------|--------|--|-----------|
| 探测器 1 | 低温步进 | 32 480, 32 500, 32 550, 32 600, 32 490, 32 500 | 32 520±46 |
| | 高温步进 | 35 400, 35 450, 35 500, 35 380, 35 420, 35 410 | 35 427±43 |
| | 快速温变 | 35 090, 35 120, 35 150, 35 080, 35 110, 35 120 | 35 112±25 |
| | 振动步进 | 34 820, 34 860, 34 850, 34 840, 34 880, 34 850 | 34 850±21 |
| | 恒定湿热步进 | 32 850, 32 840, 32 830, 32 860, 32 870, 32 840 | 32 848±17 |
| | 恒定湿热极限 | 33 430, 33 450, 33 460, 33 420, 33 480, 33 430 | 33 445±21 |
| | 交变湿热 | 33 530, 33 560, 33 550, 33 540, 33 570, 33 540 | 33 548±15 |
| 探测器 2 | 低温步进 | 100, 105, 102, 103, 101, 102 | 102±2 |
| | 高温步进 | 148, 152, 149, 151, 150, 150 | 150±1 |
| | 快速温变 | 140, 143, 142, 141, 144, 142 | 142±1 |

$$MS_{within} = \frac{SS_{within}}{df_{within}} \quad (5)$$

式中: $SS_{between}$ 表示组间平方和, 用于衡量不同试验条件平均值间的差异; SS_{within} 表示组内平方和, 用于反映同一试验条件下测量值的离散程度; $df_{between} = k - 1$ 为组间自由度, k 为试验条件组数; $df_{within} = N - k$ 为组内自由度, N 为总测量数。

若计算得到的 F 值大于临界值 $F_{0.05}$, 且对应的 $p < 0.05$ (即在零假设成立时出现当前结果的可能性低于 5%), 则判定不同试验条件间存在显著差异。

计算结果表明, 探测器 1 的各试验条件灰度值总体差异显著 ($F = 2.35 \times 10^5$, $F_{0.05}(6, 35) = 2.37$, $p < 0.001$); 探测器 2 的温度三条件灰度值总体差异显著 ($F = 1.86 \times 10^4$, $F_{0.05}(2, 15) = 3.68$, $p < 0.001$)。

进一步分析试验, 探测器 1 在全温区均表现出较高的温度可靠性, 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内均能保持正常工作。探测器的防潮性能也较好, 在相对湿度 95% RH 的环境下亦能稳定运行。在振动步进试验中, 当振动量级达到 10 grms 时, 探测器出现与测试软件短暂断连的情况, 但在振动停止后可恢复正常工作, 因此可认为 10 grms 为其工作极限。然而, 在进行综合环境试验时, 测试软件则无法读取其图像灰度值, 且在恢复至常规环境后仍未能恢复功能, 表明多因素耦合环境会导致探测器发生不可逆失效^[15]。

探测器 2 同样在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内表现出较高的温度可靠性, 但其耐振动性能明显不足。在振动步进试验中, 当振动量级达到 8 grms 时即发生故障, 且停止振动后仍无法恢复正常工作, 因此 8 grms 可视为其破坏极限。

3 表征结果及故障分析

为了深入分析探测器在经受不同环境应力后发生失

效的原因, 对经过可靠性强化试验后发生故障的探测器进行拆解, 利用光学显微镜和 X 射线透视仪对其电路板和芯片进行了深入表征。

探测器 1 的光学表征图如图 13 和 14 所示, 探测器内部结构表面存在明显的划痕(图 13(a)), 可能是工艺操作导致; 黑色的脏污(图 13(b)、14(a)和(b)), 可能是助焊剂残留、油脂或其他化学物质, 导致了污渍的形成^[16]。从图 13(b2)和 14(a2)可以清晰地观察到绿色苔藓状物质, 推测为铜在湿热综合试验中由于在 95% RH 的高环境湿度和较高的温度下生锈导致。

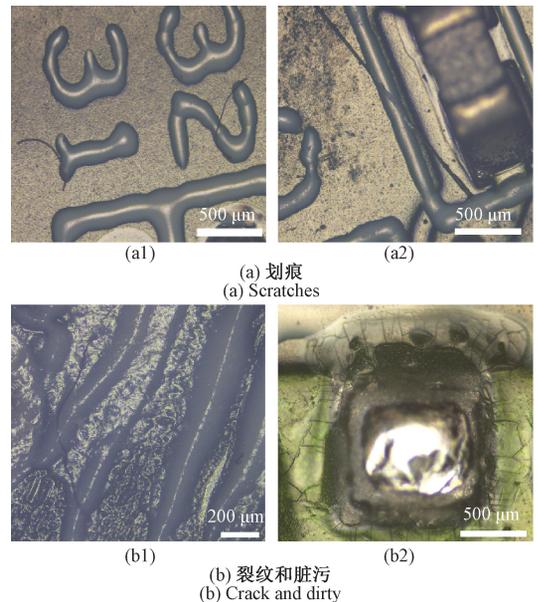
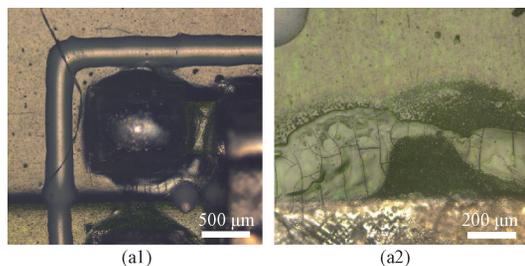


图 13 探测器 1 的光学表征图片

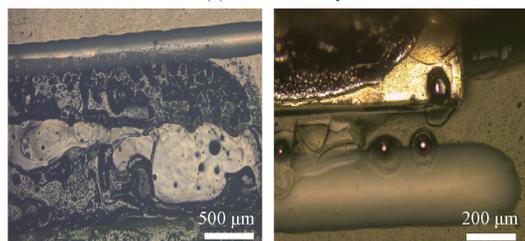
Fig. 13 Optical characterization images of detector-1

图 13(b2)、14(a1)和(c)可以清晰地看到, 锡焊点周围存在不规则裂痕, 这种裂痕可以直接归因于焊接接头在外部机械振动的作用下发生疲劳断裂, 导致焊点的

结构完整性受损,是引发探测器功能性失效的关键原因之一^[17],这类问题可能源于焊接温度控制不当、焊接时间不足或锡膏分布不均^[18]。为避免类似问题的再次发生,建议优化焊接工艺流程,具体包括精确控制焊接温度、时间及锡膏量,以提升焊点的结构强度和疲劳抗性^[19]。此外,在 PCB 板设计阶段合理分布元器件重量和布局,避免局部应力集中,并加强对焊点的机械可靠性试验,确保其能够承受振动等外部载荷的长期作用^[20]。这些改进措施有望降低因焊接裂痕引发的探测器失效概率,提升其整体可靠性水平。



(a) 裂纹和脏污
(a) Crack and dirty



(b) 脏污
(b) Dirty

(c) 裂纹
(c) Crack

图 14 探测器 2 的光学表征图片

Fig. 14 Optical characterization images of detector-2

为了进一步溯源探测器的失效原因,通过 X 射线透视仪表征了拆解后探测器芯片的内部结构情况,结果如图 15 和 16 所示。可以观察到,探测器 1 芯片内部没有明显的缺陷,这表明探测器的功能性失效并非由大尺度结构破坏引起,导电路径也未出现断裂,推测失效可能集中于界面区域的微观损伤或材料疲劳导致^[21]。

对于探测器 2(图 16 中红色圈),导线发生错位缠绕现象,推测可能是在外界机械应力的作用下,原本平行或按特定布局排列的导线发生偏移和交叉,增大了导线间的寄生电容或电感,从而对探测器的传输信号产生直接影响^[22]。

为了避免导线缠绕错位现象,建议通过优化塑封料的机械性能,尽可能地减少因机械应力传递对导线位置的影响;改进打线工艺,提高导线的布线精度和抗疲劳性能,加强振动试验后的筛选工艺^[23],多维度提高探测器的可靠性水平。

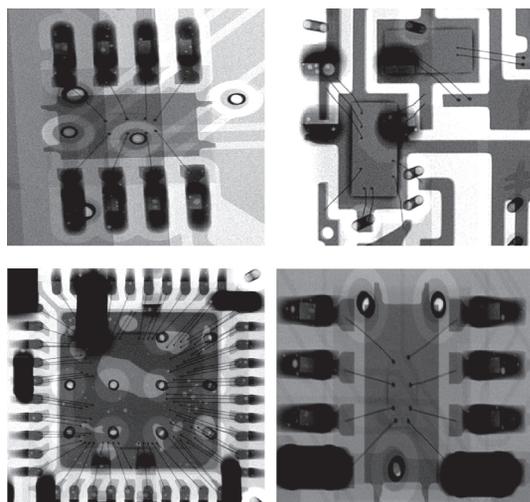


图 15 探测器 1 的 X 射线表征图片

Fig. 15 X-ray characterization images of detector-1

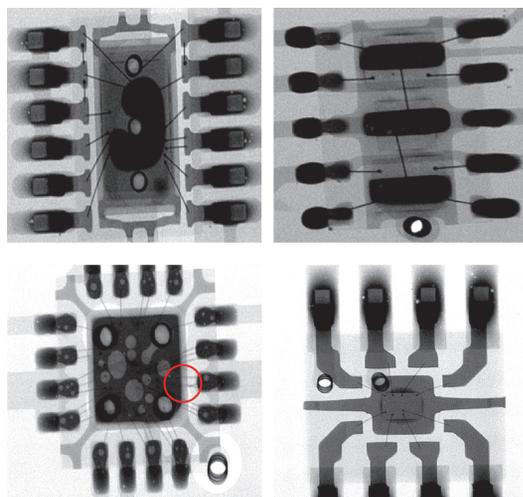


图 16 探测器 2 的 X 射线表征图片

Fig. 16 X-ray characterization images of detector-2

4 结 论

本文针对两款工业用 X 射线平板探测器,进行了可靠性强化试验和故障溯源分析。主要依据探测器的实际工作环境设计了试验剖面,实施了低温步进、高温步进、快速温变、振动步进、恒定湿热步进、恒定湿热极限、交变湿热以及综合环境应力可靠性强化试验,在短时间内有效激发了探测器的潜在故障,找到了探测器制造的薄弱环节。故障分析发现探测器失效并非单一环境载荷作用的结果,而是由多因素耦合环境共同作用导致,焊点开裂受到振动与湿热的协同影响,导线错位则源于机械应力与热循环的叠加效应。结合这些故障原因,提出了优化探测器制造工艺的建议。本文研究为 X 射线平板探测器

相关可靠性试验标准规范的制定提供一定的参考,为同类产品的推广应用奠定一些技术基础。

参考文献

- [1] 李新越,刘春秘,于涵,等. X 射线平板探测器图像噪声分布数学模型构建[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(6):1095-1100.
- LI X Y, LIU CH M, YU H, et al. Construction of mathematical model for image noise distribution of X-ray flat panel detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, 42(6):1095-1100.
- [2] 林俊伟,王学兵. 数字 X 射线摄影平板探测器常见故障分析与处理[J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(7):173-176.
- LIN J W, WANG X B. Analysis and handling of common malfunctions in digital X-ray photography flat panel detectors[J]. China Medical Device Information, 2024, 30(7):173-176.
- [3] 张号颜,吕宁,裴永胜. 可靠性强化试验技术在电子产品试验中的应用研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(17):76-77.
- ZHANG H Y, LYU N, PEI Y SH. Research on the application of reliability enhancement testing technology in electronic product testing[J]. New Technologies and New Products of China, 2020(17):76-77.
- [4] 申路,玉彪. 数字 X 射线摄影系统平板探测器工作原理分析及故障维修[J]. 中国医学装备, 2022, 19(12):208-210.
- SHEN L, YU B. Working principle analysis and fault maintenance of flat panel detector in digital X-ray photography system [J]. China Medical Equipment, 2022, 19(12):208-210.
- [5] 任德洁,陈天佐,钱思宇. 可靠性强化试验技术概述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(2):85-89.
- REN D J, CHEN T Z, QIAN S Y. Overview of reliability enhancement testing technology [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(2):85-89.
- [6] 唐鹏,王晓娜,李小明. 可靠性强化试验在激发 PCB 缺陷中的应用[J]. 印制电路信息, 2021, 29(S2):161-167.
- TANG P, WANG X N, LI X M. Application of reliability enhancement test in stimulating PCB defects[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(S2):161-167.
- [7] 孙海峰,胡海峰,翟邵蕾,等. 可靠性强化试验技术在航天产品研制中的应用[J]. 航天控制, 2017, 35(5):92-97.
- SUN H F, HU H F, ZHAI SH L, et al. Application of reliability enhancement testing technology in aerospace product development [J]. Aerospace Control, 2017, 35(5):92-97.
- [8] 李素双,许宝立,陈世业,等. 可靠性强化试验在配电控制器中的应用研究[J]. 环境技术, 2024, 42(4):53-60.
- LI S SH, XU B L, CHEN SH Y, et al. Application research of reliability enhancement testing in distribution controllers [J]. Environmental Technology, 2024, 42(4):53-60.
- [9] 马国坪,王强. 可靠性强化测试技术在电子产品软件测试中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(22):52-54.
- MA G P, WANG Q. Application of reliability reinforcement testing technology in software testing of electronic products [J]. Electronics Technology and Software Engineering, 2021(22):52-54.
- [10] 杜晓辉,刘帅,朱敏杰,等. 宽量程真空传感器可靠性强化试验及故障分析[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(10):745-753.
- DU X H, LIU SH, ZHU M J, et al. Reliability enhancement test and fault analysis of wide range vacuum sensor[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2022, 42(10):745-753.
- [11] GB/T 29309-2012, 电工电子产品加速应力试验规程 高加速寿命试验导则[S]. 2012.
- GB/T 29309-2012, Accelerated stress testing procedures for electric and electronic products — Guidance for highly accelerated life test[S]. 2012.
- [12] GB/T 34986-2017, 产品加速试验方法[S]. 2017.
- GB/T 34986-2017, Methods for product accelerated testing[S]. 2017.
- [13] T/CIS 03002.1-2020, 科学仪器设备电气系统可靠性强化试验方法[S]. 2020.
- T/CIS 03002.1-2020, Reliability of electric system in instrument or equipment—Enhance test method[S]. 2020.
- [14] GJB 899A-2009, 可靠性鉴定和验收试验[S]. 2009.
- GJB 899A-2009, Reliability testing for qualification and production acceptance[S]. 2009.
- [15] 孙广辉. 助焊剂残留对 PCB 的影响[J]. 印制电路信息, 2011(S1):209-213.

- SUN G H. The impact of flux residue on PCBs [J]. Printed Circuit Information, 2011(S1): 209-213.
- [16] 张宝斌. 可靠性强化试验技术在电子产品软件试验中的应用[J]. 中国科技纵横, 2020(6): 108-109.
- ZHANG B B. Application of reliability enhancement testing technology in electronic product software testing[J]. China Science and Technology Overview, 2020(6): 108-109.
- [17] 武立志. 强化电气自动化控制设备可靠性试验的方法探究[J]. 价值工程, 2012, 31(33): 34-35.
- WU L ZH. Exploration of methods for strengthening reliability testing of electrical automation control equipment [J]. Value Engineering, 2012, 31(33): 34-35.
- [18] 许高斌, 余智, 徐礼建, 等. 复杂环境电容式微加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 154-159.
- XU G B, YU ZH, XU L J, et al. Reliability analysis of capacitive micro accelerometer in complex environments [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 154-159.
- [19] 郑浩, 李延夫, 孙礼, 等. 可靠性强化振动试验方法及设计改进[J]. 仪表技术与传感器, 2012(12): 113-115.
- ZHENG H, LI Y F, SUN L, et al. Reliability enhanced vibration test method and design improvement [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2012(12): 113-115.
- [20] 王新宇, 蒋三新. 芯片缺陷检测综述[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(5): 94-98.
- WANG X Y, JIANG S X. Overview of chip defect detection [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(5): 94-98.
- [21] 胡志强, 吴一全. 基于机器视觉的芯片缺陷检测研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 1-26.
- HU ZH Q, WU Y Q. Research progress on chip defect detection based on machine vision [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2024, 45(7): 1-26.
- [22] 张永华, 邬宁彪, 李小明. 倒装芯片封装可靠性评价方法[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(6): 347-350, 357.
- ZHANG Y H, WU N B, LI X M. Reliability evaluation method for flip chip packaging [J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(6): 347-350, 357.
- [23] 周展文, 卓汉逵. 芯片智能布线方法研究综述[J]. 自动化学报, 2024, 50(9): 1671-1703.

ZHOU ZH W, ZHUO H K. A review of intelligent routing methods for chips [J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(9): 1671-1703.

作者简介



Chang Jiaqi received his B. Sc. degree from Sichuan Agricultural University in 2023. Now he is a jointly trained M. Sc. candidate at Instrumentation Technology & Economy Institute and Beijing Jiaotong University. His main research interests include sensor development and testing technology.

常家齐, 2023 年于四川农业大学获得学士学位, 现为机械工业仪器仪表综合技术经济研究所与北京交通大学的联合培养硕士研究生, 主要研究方向为传感器开发及其测试技术。

E-mail: 853029726@qq.com



Zhu Minjie received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2012, M. Sc. degree from Tohoku University in 2016, and Ph. D. degree from Tohoku University in 2019, respectively. Now he is a senior engineer at the Instrumentation Technology & Economy Institute. His main research interests include MEMS sensors and micro-instruments.

朱敏杰, 2012 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2016 年于日本东北大学获得硕士学位, 2019 年于日本东北大学获得博士学位, 现为机械工业仪器仪表综合技术经济研究所高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 传感器和微型仪器。

E-mail: zmj@tc124.com

Zhu Minjie received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2012, M. Sc. degree from Tohoku University in 2016, and Ph. D. degree from Tohoku University in 2019, respectively. Now he is a senior engineer at the Instrumentation Technology & Economy Institute. His main research interests include MEMS sensors and micro-instruments.

杜晓辉, 2011 年于厦门大学获得学士学位, 2016 年于厦门大学获得博士学位, 现为机械工业仪器仪表综合技术经济研究所正高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 传感器与可靠性。



E-mail: dxh@instmet.com

Du Xiaohui received his B. Sc. degree from Xiamen University in 2011 and Ph. D. degree from Xiamen University in 2016. Now he is a principal engineer at the Instrumentation Technology & Economy Institute. His main research interests include MEMS sensors and reliability.

刘帅, 2010 年于西安工业大学获得学士学位, 2013 年于中国计量大学获得硕士学位, 现为机械工业仪器仪表综合技术经济研究所高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 传感器设计及可靠性。



E-mail: lausion@163.com

Liu Shuai received his B. Sc. degree from Xi'an Technological University in 2010 and M. Sc. degree from China Jiliang University in 2013. Now he is a senior engineer at the Instrumentation Technology & Economy Institute. His main research interests include MEMS sensor design and reliability.



朱可涵, 2017 年于纽约州立大学宾汉姆顿分校获得学士学位, 2018 年于爱丁堡大学获得硕士学位, 现为机械工业仪器仪表综合技术经济研究所工程师, 主要研究方向为工业管理。

E-mail: zkh@instrnet.com

Zhu Kehan received her B. Sc. degree from the State University of New York at Binghamton in 2017 and M. Sc. degree from the University of Edinburgh in 2018. Now she is an engineer at the Instrumentation Technology & Economy Institute. Her main

research interests include industrial management.



陈凡红(通信作者), 2015 年于北京化工大学获得学士学位, 2020 年于北京化工大学获得博士学位, 现为机械工业仪器仪表综合技术经济研究所高级工程师, 主要研究方向为 MEMS 传感器开发及仪器仪表可靠性测试技术。

E-mail: cfh@tc124.com

Chen Fanhong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2015 and Ph. D. degree from Beijing University of Chemical Technology in 2020. Now she is a senior engineer at the Instrumentation Technology & Economy Institute. Her main research interests include MEMS sensors and reliability testing of instrumentation.