文章编号：1672-8785(2019)08-0031-06

工业 X 射线 CT 在红外焦平面探测器中的应用

李　乾　李　达　王　丛　申　晨　折伟林
刘　铭　郭祥祥　晋舜国
（华北光电技术研究所，北京　100015）

摘　要：介绍了工业 X 射线 CT 测试仪在红外焦平面探测器中的应用。利用 CT 可以非破坏性地对杜瓦组件和制冷机进行探伤分析，尤其是探测内部结构故障和缺陷，提高故障问题分析能力和解决效率，为组件返修提供充分依据。后续还能够根据需求筛选合格样品，提高了产品的用户体验，是后续生产工艺的重要保障。

关键词：杜瓦；制冷机；X 射线 CT

中图分类号：TN213　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2019.08.005

Application of Industrial X-ray CT in Infrared Focal Plane Detectors

LI Qian, LI Da, WANG Cong, SHEN Chen, SHE We-lin,
LIU Ming, GUO Xiang-xiang, JIN Shun-guo
(*North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China*)

Abstract: The application of industrial X-ray CT testers in infrared focal plane detectors is introduced. The CT can be used to non-destructively analyze the dewar components and refrigerators, especially to detect internal structural faults and defects. It can improve fault analysis ability and the efficiency of solving problems, which provide sufficient basis for component rework. In the following work, qualified samples can be selected according to the demand. This improves the user experience of the product and is an important guarantee for the subsequent production process.

Key words: dewar; refrigerator; X-ray CT

0　引言

近年来随着红外探测器工艺的发展，探测器的性能得到了很大的提高。高性能红外焦平面探测器在军事、航天、工业等领域有着广泛的应用价值，因而对探测器的杜瓦组件和制冷器提出了更高的要求[1]。杜瓦在探测器组件中

收稿日期：2019-07-23

作者简介：李乾(1990-)，男，山东泰安人，工程师，主要从事材料测试开发工作。
E-mail：liqianbuaa@126.com

起到机械、热学、力学、电学技术连接枢纽的作用。制冷器为制冷型探测器提供合适的工作温度，可以有效保证探测器的探测效率。如果制冷器出现故障，会影响探测器的使用寿命[2]。因此对杜瓦组件和制冷器的可靠性要求越来越高。提高杜瓦组件和制冷器的可靠性、提高故障的定位效率已经成为提升探测器产品用户体验的关键环节[3]。

利用样品对测试仪器所发射射线能量的吸收特性对样品进行结构分析，从而得到样品结构特点的二维成像。当样品完好、测试信号平稳时，呈现的图像清晰；若出现缺陷，X 射线的强度会相应增强或降低。由此特性可测试出引线熔断、结构形变、内部结构件脱落、热短路和制冷机等问题。因此 X 射线测试仪能够有效观察杜瓦组件和制冷器的内部结构，并发现其内部缺陷或故障原因。

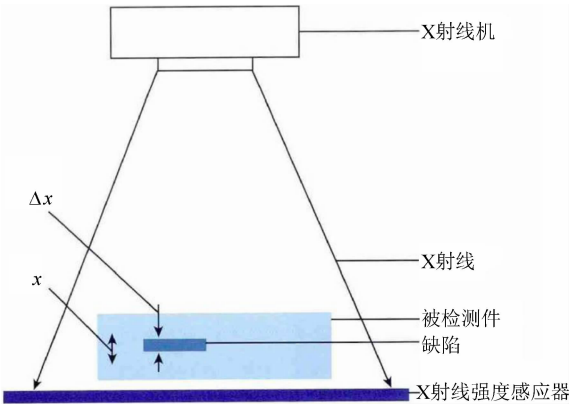


图 1 X 射线的检测原理

1 工业 CT 的测试原理

X 射线穿透物质时会被物体吸收。不同材料、不同厚度的物体，吸收 X 射线的能力不一样。如图 1 所示，由于物体各部分的材料、厚度不一样，同一强度的 X 光在穿过物体后，能量变得不一样。强度为 I_0 的 X 射线透过厚度为 x 的物体后，其强度 I（不考虑散射的影响）满足比尔定律[4]：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

在射线穿透材料的过程中，如果经过缺陷（高密度夹杂、低密度孔隙等），射线衰减系数会发生变化，从而影响透射后的射线强度：

$$\Delta I = I' - I = I_0 e^{-\mu x(x-\Delta x)-\mu' \Delta x} - I_0 e^{-\mu x} \tag{2}$$

式中，μ 和 μ' 分别为无缺陷与有缺陷处的衰减系数。当 Δx 较小时，取一阶近似：

$$I = I_0 e^{-\mu x(\mu-\mu')\Delta x} \tag{3}$$

从式(3)可知，$(\mu-\mu')$ 值决定 $\Delta I/I$ 值，由此造成 X 射线强度感应器对应的各部分由于感光程度不同而形成的影像，通过该影像可对被检测件进行评价，即可以根据影像的形状和黑度评定材料中有无缺陷或缺陷的形状、大小和位置[5]。

2 实验

测试的焦平面红外探测器样品包括杜瓦组件和制冷器部分。杜瓦组件由光窗组合、超薄壁冷屏、焦平面探测器芯片、全金属维杜瓦组合而成。通过 X 射线对组件内的引线、冷屏、结构件等进行无损探伤测试。对于制冷机部分，需要对回热器绕线的均匀性、焊缝缺陷、自调机构准直性、毛细管尺寸进行测试。

本试验所用的 X 射线测试仪为德国 YXLON 公司生产的 X 射线检测仪。X 射线是在真空中由极高速运动的电子碰撞阳极靶的过程中产生的，最后入射到样品上，经透射后在 X 射线探测器上进行成像，可以非破坏性地检验样品的结构质量。

3 实验结果及分析

3.1 杜瓦组件探伤分析

经对现有多种类杜瓦组件的检测结果进行梳理，归纳总结出了 4 类常见杜瓦组件故障失效原因，分别为引线断开、内部结构脱落、杜瓦组件热短路和杜瓦内部结构形变。

3.1.1 引线断开

图 2(a)和图 2(b)为引线断开的测试图。引线断开故障可分为探测器被大量级力学实验振动后断开或被未知输入电流熔断两种情况。此类问题发生于科研项目力学验证试验条件下或用户使用过程中由较

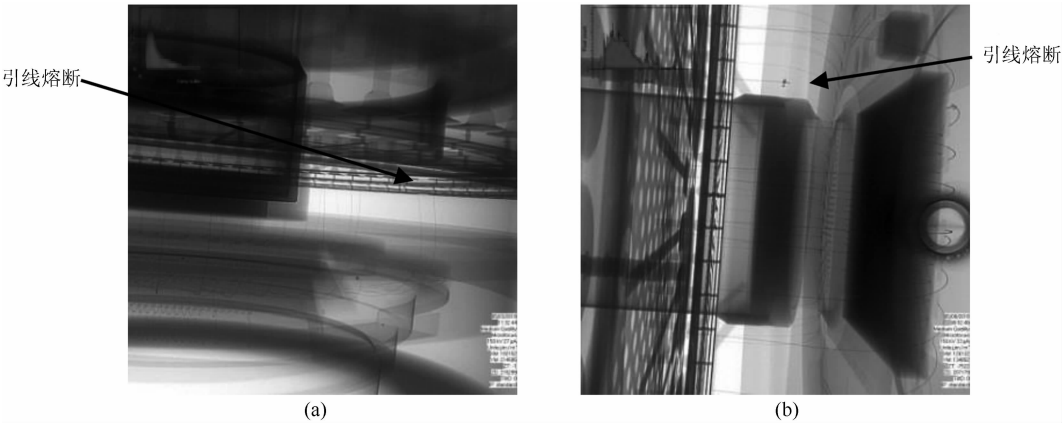


图 2 引线断开的测试图



图 3 内部结构脱落的测试图

复杂、没有确定的原因导致。通过 X 射线测试仪能够有效区分探测器组件在无输入情况下是引线熔断还是探测器芯片出现问题，为返修提供有力的支撑。

3.1.2　内部结构脱落

图 3(a)和图 3(b)所示为内部结构脱落问题。由于内部结构装配多为粘接方式，因此在受到大外力或者大振动幅度时会产生内部结构脱落的现象。通过 X 射线测试仪能够有效分辨内部结构脱落的位置，为后期改进内部结构提供分析依据。

3.1.3　杜瓦组件热短路

图 4(a)和图 4(b)中的问题为热短路，该问题会导致杜瓦组件不能进行真空降温工作。该问题常出现在小型化紧凑型结构中，通过 X 射线测试仪能够有效分辨内部热短路的位置，能为后期结构设计的改进提供分析依据，为提高杜瓦结构的可靠性提供保障。

3.1.4　杜瓦内部结构形变

图 5(a)和图 5(b)所示为内部结构形变的测试图。此类问题利用其他类型的检测很难直观发现。当使用 X 射线测试仪进行结构探伤时，可明显观察出内部结构的移位或形变，为提高杜瓦结构的可靠性设计提供了保障。

3.2　制冷器的检测分析

3.2.1　回热器丝网填充不均匀

图 6(a)和图 6(b)所示为斯特林制冷机的回热器丝网填充不均匀现象。此类缺陷在组件装配中无法发现，在回热器装机前采用 X 射线工业 CT 进行内部丝网填充状态检查，可将有缺陷的回热器提早筛除，提高斯特林制冷机一次装机的成功率。

3.2.2　自调机构准直性检测

图 7 所示为波纹管自调式 JT 制冷器的自调机构。自调机构的准直性差会造成制冷器在

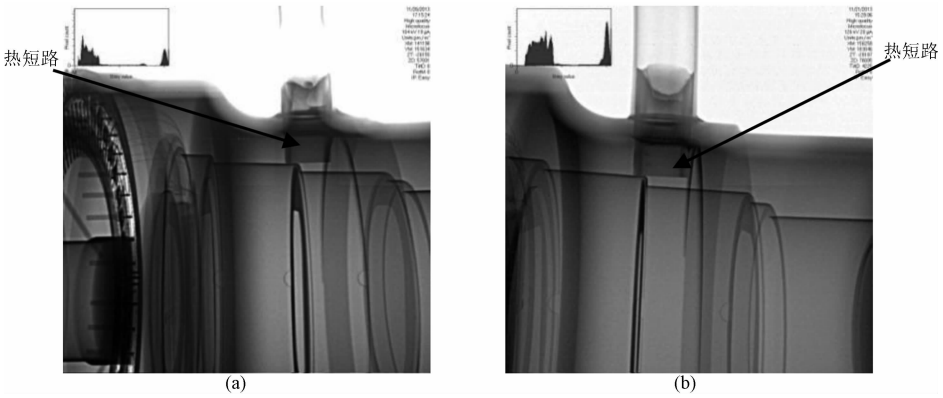


图 4 杜瓦组件热短路的测试图

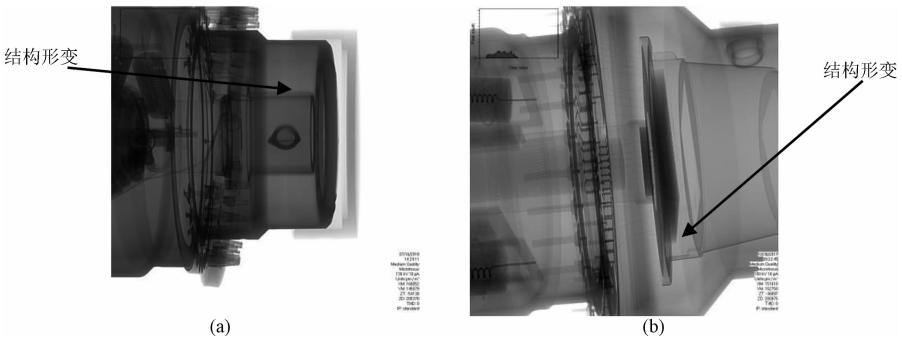


图 5 杜瓦内部结构形变的测试图

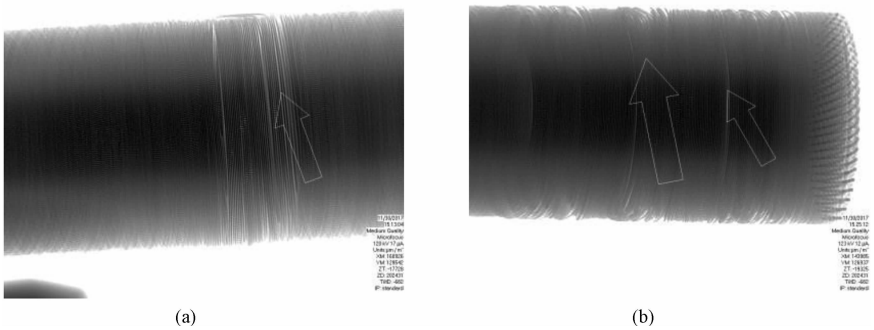


图 6 斯特林制冷机的回热器缺陷

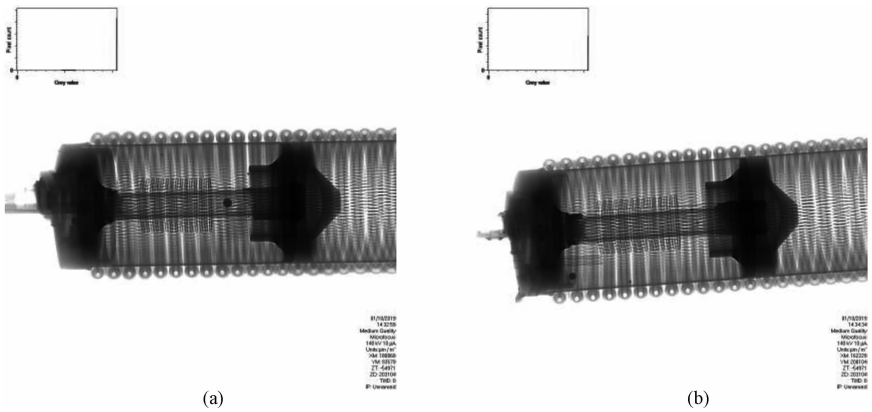


图 7 自调机构的准直性检测

自调过程出现自调机构卡滞或延迟现象，影响制冷器的工作时间或控温的稳定性。使用 X 射线工业 CT 能够有效检验自调机构的准直性，对保证制冷器的质量有重要作用。

3.2.3　焊缝探伤分析

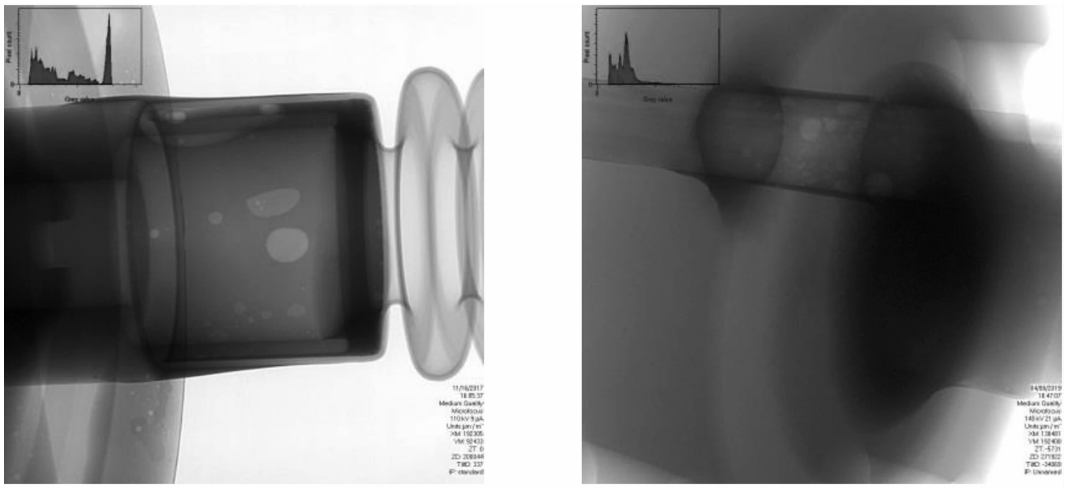
在 JT 制冷器中，焊接工艺使用占比在 30%～40%。焊接方法包括锡焊、激光焊、高频焊和电子束焊，工业 CT 可以对焊缝的质量进行检测。以锡焊为例，图 8(a)和图 8(b)的焊缝中有大量的大尺寸气孔，在后期振动试验中易出现应力集中、焊缝裂纹现象。工业 CT 可以对图 8(b)两个连接件之间锡料填充的饱和性进行检测，以保证管路的气密性。

3.2.4　毛细管尺寸的测量及流道形貌的观察

毛细管内径的尺寸、流道是否阻塞会影响制冷工质的流通，从而影响制冷效率。使用工业 CT 可以检验毛细管的尺寸或流道是否满足使用要求，保证产品的质量。该检测方法要比扫描电子显微镜制作断面更加准确、方便快捷。

3.2.5　PCB 板缺陷的检测

PCB 板内部探伤属于 X 射线工业 CT 的 3D 应用，对制冷器控制板的损伤进行分析，X 射线工业 CT 可以有效分析电路的通断情况，实现缺陷的定位，以便使用其他方法对其进行修补。



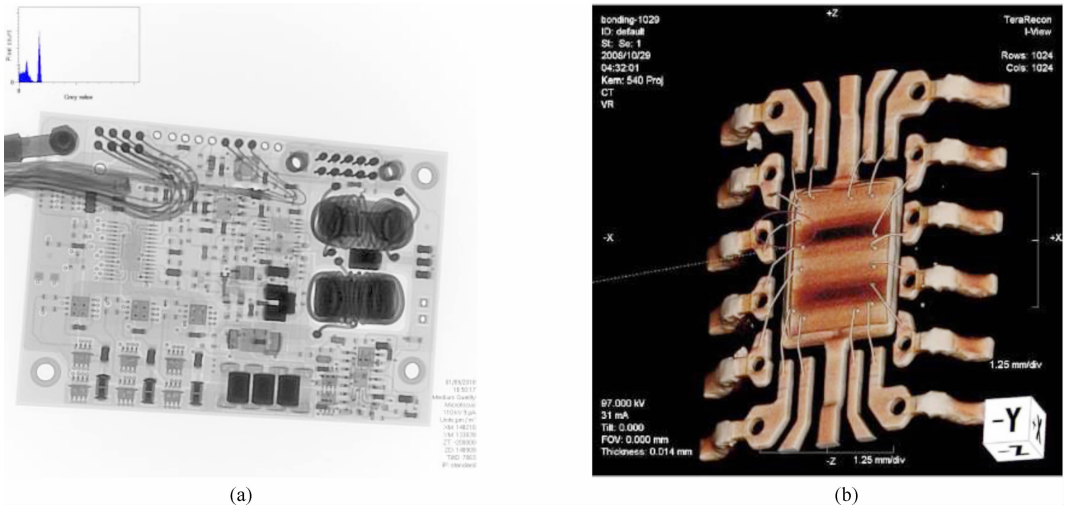
(a)　　(b)

图 8 锡焊的焊缝缺陷



(a)　　(b)

图 9 毛细管尺寸的测量



(a) (b)

图 10 PCB 板内部探伤

4 结论

X 射线 CT 测试仪能够有效观察杜瓦组件的内部结构，对引线断开、内部结构脱落、杜瓦组件热短路、杜瓦内部结构形变共 4 种常见失效方式的确认和分析有直观检测的能力。对于制冷器的检测，主要集中在回热器绕线不均匀、自调机构准直性检测、焊缝探伤分析、尺寸测量、PCB 板缺陷检测等 5 种常见应用。

产品故障的产生主要取决于某几种失效机理。使用 X 射线测试仪对红外探测器组件进行无损探伤测试，能够非破坏性地检验样品的结构缺陷和应力损伤，充分暴露出工艺过程、储存、使用环境中可引发的故障问题，并准确地确认缺陷的位置及故障原因。发现设计和工艺中的缺陷，能有效指导后续故障件的处理判断，并对杜瓦组件和制冷器的障维修提供有效信息，提高故障分析和解决的效率，对改进产品的性能和可靠性起着至关重要的作用。

参考文献

[1] 陈循，陶俊勇，张春华，等. 可靠性强化试验与加速寿命试验综述 [J]. **国防科技大学学报**，2002，**24**(4)：29–33.

[2] 王蕴辉，姜小波. 国外碲镉汞红外焦平面杜瓦组件可靠性研究进展 [J]. **电子产品可靠性与环境试验**，1999，**20**(6)：8–12.

[3] 孙中章. 制冷器在光电器件中的发展概况 [J]. **激光与红外**，2000，**30**(3)：63–67.

[4] Naslain R. Design，Preparation and Properties of Non-oxide CMCs for Application in Engines and Nuclear Reactor：an Overview [J]. *Composites Science and Technology*，2004，**64**(2)：155–170.

[5] 梅辉，张鼎，夏俊超，等. 浅谈陶瓷基复合材料无损检测方法及其进展 [J]. **航空制造技术**，2017，**60**(5)：24–30.