红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

红外焦平面探测器杜瓦组件的热致破坏及其环境试验

李建林　刘卓林　陈晓燕　雷永畅　董伟　钱昆伦

Thermal damage of infrared focal plane detector Dewar and its environmental test

Li Jianlin, Liu Zhuolin, Chen Xiaoyan, Lei Yongchang, Dong Wei, Qian Kunlun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210337

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非蒸散型吸气剂维持红外焦平面探测器杜瓦组件工作真空度的性能与应用

Performance of non-evaporable getter to maintain vacuum of Dewar module of infrared focal plane detector and its application

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1004001　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1004001

星载红外探测器组件环境适应性分析与性能优选

Environmental adaptability analysis and performance optimization of space-borne infrared detector assembly

红外与激光工程. 2020, 49(2): 0204001　https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0204001

大面阵红外焦平面杜瓦冷指支撑结构设计

Cold head supporting structure of Dewar used in large infrared focal plane

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20200060　https://doi.org/10.3788/IRLA20200060

超长线列双波段红外焦平面探测器杜瓦封装技术研究

Study on Dewar package for dual-band long linear IRFPA detectors

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1104003　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1104003

红外探测器杜瓦封装多余物的衍射分析及控制

Diffraction analysis and control of remainders in infrared detector Dewar packaging

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20200177　https://doi.org/10.3788/IRLA20200177

热应力加速试验评定碲镉汞焦平面阵列像元储存寿命

Evaluating its storage life using thermal stress accelerated HgCdTe FPA performance degradation

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1004003　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1004003

红外焦平面探测器杜瓦组件的热致破坏及其环境试验

李建林[1], 刘卓林[2], 陈晓燕[1], 雷永畅[1], 董　伟[1], 钱昆伦[1]

(1. 昆明物理研究所，云南 昆明 650223；
2. 空军装备部驻昆明地区军事代表室，云南 昆明 650223)

摘　要：红外探测器的环境耐受能力取决于设计和制造中完整有效的环境耐受措施,环境试验与评价验证了其在极端环境作用下能正常工作的能力。研制、生产和使用各阶段的试验目的不同,试验施加应力的大小不同,必须进行环境自然条件和诱发条件测量、温度响应特性调查和试验环境分析,选择正确、合理和必要的设计与试验环境条件,以尽可能产生最适合的试验数据,保证顾客所需的质量水平和有价格竞争力的可用性。运用 288×4 红外焦平面杜瓦组件温度响应试验实测数据和时间常数方法,计算分析它的温度稳定时间,指出空气介质温度循环筛选或温度冲击试验,不能在红外探测器的功能部件上施加大于 10 ℃/min 的温度急剧变化应力,高温工作状态的温度变化速率大于 50 ℃/min 对冷头部分的缺陷筛选效果更好。试验结果表明,真空完好性恒定高温试验应力量值大于+90 ℃、2 160 h。能够通过高温+71 ℃、低温−54 ℃ 无故障环境试验考核的产品具有全世界贮存、运输和使用的潜力。

关键词：环境适应性；　可靠性；　环境应力筛选；　红外焦平面；　杜瓦
中图分类号：TN215　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3788/IRLA20210337

Thermal damage of infrared focal plane detector Dewar and its environmental test

Li Jianlin[1], Liu Zhuolin[2], Chen Xiaoyan[1], Lei Yongchang[1], Dong Wei[1], Qian Kunlun[1]

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
2. Mililary Representation Office of Equipment Department of China PLA Air Force in Kunming Area, Kunming 650223, China)

Abstract: The environmental tolerance of infrared detectors depends on complete and effective environmental tolerance measures in design and manufacturing. The environmental test and evaluation of infrared detectors verify the ability to work normally in extreme environments. The purpose of the test at each stage of development, production and use is different, and the amount of stress applied by the test is different. It is necessary to measure the natural conditions and inducing conditions, and to analyse the investigation of temperature response characteristics and test environment. According to the measure and the analysis, to select the correct, reasonable and necessary design and test environmental conditions collect the most suitable test data as much as possible, to ensure the quality level required by customers and the availability of competitive prices. The temperature response test measured data of 288×4 infrared focal plane Dewar module and time constant method were used to calculate and analyze the temperature stabilization time. The results showed that, in the temperature cycles screening and erature shock test, a sudden temperature change stress greater than 10 ℃/min could not impose on the functional parts of the infrared detector, and the defect screening effect of the cold head part was better when

收稿日期:2021−05−26;　**修订日期:**2021−07−08
作者简介:李建林,男,高级工程师,主要从事红外探测器封装技术、真空获得技术、环境工程、可靠性和性能评价方面的研究。

the temperature change rate of the high temperature working state was greater than 50 ℃/min. The test results indicate that the stress for vacuum integrity is greater than +90 ℃ for 2 160 h in the vacuum integrity constant high temperature test. The products passed the failure-free environmental test assessment at high-temperature +71 ℃ and low-temperature −54 ℃ have the potential to be stored, transported and used all over the world.

Key words: environmental worthiness; reliability; environmental stress screening; IRFPA; Dewar

0 引 言

根据美国外场试验数据统计，环境影响造成产品失效占全部故障的 52% 左右，而由环境温度因素造成的故障占 20.8%。在温度引起的故障中快速温度变化应力占 12%，高温应力占 13%，低温应力占 29%，另有温度和振动综合应力占 46%。国内外场试验数据表明，热像仪在南方沿海湿热环境或低温环境中使用，红外探测器故障占总故障数的 30%，常温下红外探测器的故障为 16%。温度是最基本的气候环境因素，红外探测器在寿命期内随装备贮存、运输和使用过程中，最常经历的环境应力包括高温、低温、温度冲击 (循环) 等，必须保证在这些环境应力作用下能正常工作和不被破坏。

红外探测器在使用状态下被热成像系统壳体遮蔽安装在光电系统的壳体内，亦或还有第三层平台壳体，它的环境适应性和可靠性受使用的自然环境特性、通过平台转换的自然环境强迫作用、平台自身诱发的强迫作用等因素影响。因此，首先根据执行典型任务的环境实测应力确定环境适应性和可靠性试验的应力等级，其次由相似位置、相似用途、相似任务测得的实际数据分析确定估计的环境应力，最后是利用相关标准提供的参考环境应力。使用标准时应结合具体产品的任务需求，同时考虑经费、周期等条件的限制，进行合理的剪裁，而不是不加分析地全部照搬。MIL-STD-810F/G 前言中明确说明[1]：需要强调的是这些方法既不能全套引用，也不能作为不可改变的例外方法使用，而是可供选择和剪裁，以尽可能产生最适合的试验数据，保证产品在全寿命周期所经历的环境应力作用下能够可靠地工作。

工程实践暴露出，在研制、生产中缺少必要的环境分析和响应特性调查试验，没有正确和合理的环境适应性设计要求 (包括定性和定量要求) 、环境试验和验证要求，直接引用相关标准规定或推荐项目、程序和试验应力，存在欠设计或过设计问题，造成过试验或欠试验的现象。例如，由工作波长、像元尺寸、像元数量、读出电路、封装杜瓦、制冷类型、用途等配置组合成 17 种红外焦平面杜瓦组件，使用 9 种结构、工艺相同和相似的封装杜瓦，依据顾客要求、相关标准和经验，采用 4 种恒温贮存试验条件、9 种温度循环筛选条件，组合出 13 种试验应力量值，以评价这些温度条件对受试产品的影响。如此多样化的温度环境试验 (筛选) 应力并没有提高和保证制造出符合规定真空寿命的产品，也没有使得红外焦平面的性能稳定性有所提高。产品使用中诸如应力引起电传输引线断裂故障、脱落微小颗粒物引起黑 (或白) 斑故障、产生线状无效像元簇故障、降温时间大于技术规范要求等产品通用质量特性问题层出不穷。

文中基于 288×4 红外焦平面杜瓦组件温度响应实测数据，用集中参数法求解导热微分方程，分析计算出温度稳定时间，揭示具有最大温度滞后效应的光电转换功能部件不能施加要求强度的温度急剧变化应力，梳理工程实践中的温度极限实测数据和文献报道中的严酷温度极限值，结合相关标准试验量级和持续时间，推荐使用统一的温度环境试验条件。

1 产品组成与严酷温度经历

集成式探测器杜瓦制冷组件 (Integrated Detector Dewar Cryocooler Assembly, IDDCA)，集成式红外焦平面探测器组件 (Integrater Infrared Focal Plane Detector Microcooler Assembly)，红外焦平面探测器制冷组件 (Infrared Focal Plane Detector Cooler Assembly)，这些术语都是指由红外焦平面探测器芯片 (红外探测器芯片、读出电路芯片) 、杜瓦、制冷器 (机) 组成的产品，是能把接收到的红外辐射转换成一种便于计量的物理量 (通常是电量) 的器件，简称为红外探测器，如图 1(a) 所示。

(a) IDDCA (b) DDA

图 1 红外探测器

Fig.1 Infrared detector

红外焦平面探测器杜瓦组件 (Infrared Focal Plane Detector Dewar Assembly, DDA) 由红外焦平面探测器芯片 (红外探测器芯片、读出电路芯片) 、杜瓦组成，如图 1(b) 所示。带有读出电路的红外探测阵列器件简称红外焦平面阵列或红外焦平面。红外焦平面由红外探测器 (敏感元) 阵列和读出电路两部分组成。红外焦平面有线列和面阵两种结构，统称为红外焦平面阵列探测器 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA)。

制冷型红外焦平面需要在低温 80 K 下工作，必须封装在具有良好绝热特性的微型金属杜瓦瓶里。集成式探测器杜瓦制冷组件的杜瓦内管与制冷机蓄冷器的气缸合二为一同属一个部件，杜瓦的结构、组成基本一致，有尺寸、形状等系列规格差异。零部件组装制造工艺主要包括激光焊接、硬钎焊接、软钎焊接、电阻焊接、扩散焊接等，如图 2 所示。红外焦平面杜瓦组件可区分为杜瓦真空壳体部分和焦平面冷头部分，以及真空密封剪口部分。冷头部分包括红外焦平面阵列、读出集成电路芯片、陶瓷基板、冷指冷端、冷屏蔽罩、键合引线、粘接剂等，是具有最大温度滞后效应的功能部件。

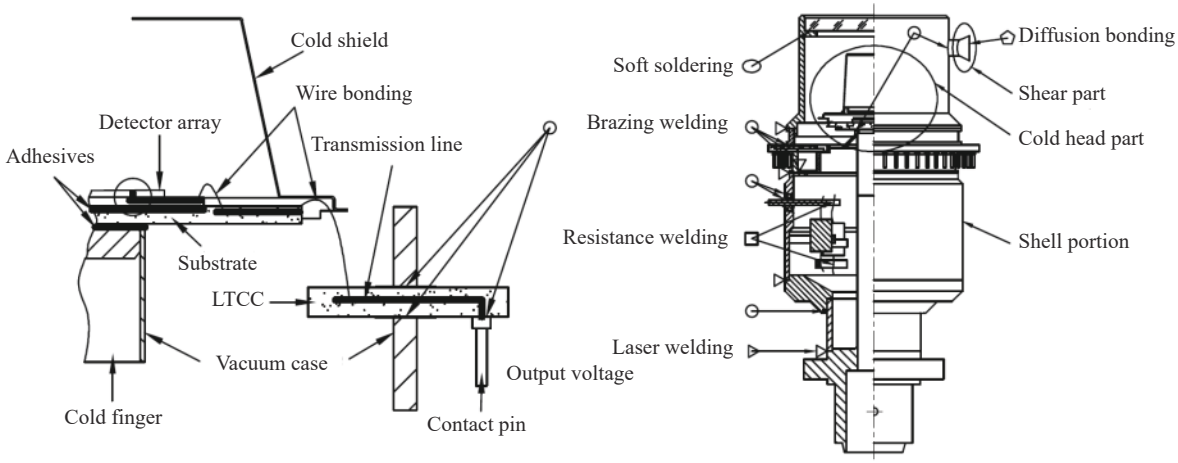


图 2 红外焦平面探测器杜瓦组件的结构与工艺

Fig.2 Structure and technology of infrared focal plane detector Dewar assembly

288×4 红外焦平面杜瓦组件产生真空的过程中经历过高温+80 ℃、480 h 或 360 h 烘烤抽气 (不包括真空密封剪口部分) ，也经历过高温+170 ℃、240 h 烘烤抽气 (不包括冷头部分) 。美国 Boeing 公司产品的抽气烘烤温度+95 ℃[2]。冷压焊接封离后，经历高温+71 ℃、1 500 h 贮存和高温+85 ℃、2 772 h 贮存 (包括真空密封剪口部分) ，组件红外焦平面的性能参数、杜瓦的真空完好性以及环境适应性等质量特性符合技术规范要求。

2 红外焦平面杜瓦组件热敏感特性

2.1 热致破坏失效

红外焦平面杜瓦组件存在对热敏感的真空完好性失效和有效像元递减退化失效两种故障。高温造成杜瓦真空度下降退化的真空完好性失效。红外焦平面阵列的主要失效模式有：(1) 环境温度下贮存，非

工作状态产生有效像元退化的贮存失效；(2) 环境温度下工作，开关机引起有效像元退化和铟栅阵列破坏的温度循环失效；(3) 工作状态，低温导致热载流子退化的工作失效[2]。

碲镉汞的热稳定性较差，当温度为 50 ℃ 时汞原子即会逸出。在 100~200 ℃ 的真空环境下，汞原子只需要几分钟即从表面扩散出来；在室温真空环境下，汞耗尽也会以一个较慢的速率发生[3]。经过碲化镉表面钝化的碲镉汞光敏二极管，在 80 ℃ 的真空环境下烘烤 10 天，会在碲化镉/碲镉汞界面额外生成缺陷，并使 p-n 结性能恶化[4]。红外焦平面杜瓦组件产生真空过程中，抽气烘烤温度对碲镉汞焦平面有不利影响，将导致像元的 R_0A 下降，性能退化。短时间、低温烘烤有助于延长碲镉汞焦平面的寿命，长时间、高温烘烤有助于延长真空寿命。

极端环境温度对红外焦平面杜瓦组件质量特性的影响与最高温度及其作用时间、最低温度及其作用时间和温度变化范围、变化的速率及其变化次数有关，温度的高低和变化速率是温度应力大小的量值，应力作用的时间 (循环数) 或次数表征累积效应的程度[5]。温度环境试验的作用主要有[6−7]：

(1) 高温引起电子、原子、分子运动加剧，激励产生热应力效应、电磁效应和化学动力学效应等，导致零部件材料性能退化，诱发安全性、完整性和性能的故障。高温会改变产品所用材料的物理性能或尺寸，引起热老化、氧化、结构变化、化学反应，暂时或永久性地降低产品的性能。高温诱发材料放气、钎焊接头失去强度、电介质损坏漏电、绝缘体裂开等故障。

(2) 低温引起电子、原子、分子运动速度减小，导致不同材料产生不同程度的收缩引起零件干涉，低温改变组成材料的物理特性，可能会对其工作性能造成暂时或永久性的损害。例如：低温冷脆现象使材料硬化和脆化，甚至破裂与龟裂、脆裂 (或粉化) 、冲击强度改变和强度降低，受约束的光学窗片产生静疲劳等环境效应。

(3) 温度急剧变化 (大于 10 ℃/min) 引起的物理效应有：光学元件的碎裂，不同材料的收缩或膨胀率、或诱发应变速率不同，零部件的变形或破裂，表面涂层开裂，密封、绝缘失效等。因为在对温度瞬变的响应中，零部件的吸热、导热、散热能力不同，对外界温度的响应快慢不一致，各零部件的热胀冷缩程度不同，形成过大的内应力激励暴露设计和制造缺陷所致。

环境试验温度应力对红外焦平面阵列、杜瓦、电气连接、制冷机等特性参数的影响及可能产生的失效模式如表 1 所示。

表 1 红外探测器热致破坏的主要失效模式[8]

Tab.1 Main failure modes of thermorunaway of infrared detectors[8]

Part			Phase	Failure mode	Acceleration factor
IDDCA	DDA	Cooler	Storage	Leakage	Hot temperature
					Temperature cycles
				Qutgassing	Hot temperature
					FPA temperature
			Operational	Bearings and moving parts wear or break	High ambient temperature
					Dewar heat load
		Vacuum	Storage	Leakage	Temperature cycles
					Hot temperature
			Operational	Qutgassing	Temperature cycles
					Hot temperature
		Connections	Storage	Bondings aging	Hot temperature
			Operational	Bondings break	Temperature cycles
		FPA	Storage	Diodes degradations (increase of defective pixels)	Hot temperature
			Operational	Loss of connections (increase of defective pixels)	Number of cooldown cycles

2.2 温度响应特性

计算分析环境试验样件的温度场，需要建立非稳态、具有内热源的导热微分方程，用集中参数法求解得描述温度随时间的变化关系为[9]：

$$\frac{T-T_f}{T_0-T_f}=\exp\left(-\frac{hA}{\rho cV}\tau\right) \tag{1}$$

式中：τ 为时间，s；T 为试验样件的温度，K；T_0 为试件的初始温度，K；T_f 为试验箱内的恒定温度，K；ρ 为密度，kg/m^3；c 为定压比热容，J/(kg·K)；V 为体积，m^3；A 为表面积，m^2；h 为试验样件与试验样件周围空气之间的导热系数。定义 $\tau_c=\rho cV/(hA)$ 为时间常数。当 $\tau=\tau_c$ 时，试验样件的过余温度 $T-T_f$ 降低或升高到了初始过余温度 T_0-T_f 值的 36.8%。用时间常数为单位长度的温度从+23 ℃→−54 ℃→+71 ℃→−54 ℃→+23 ℃→+71 ℃ 变化的温度响应曲线如图 3 所示。判定试验样件温度是否稳定，并不要求样件任何部位的温度都达到试验温度，而是在试验温度附近的一个范围。GJB150 要求不工作状态下这一范围为热容量最大的部件的温度与规定的温度相差 2 ℃ 以内。GJB150.1A 要求不工作状态下这一范围为试验温度允差范围，工作状态为具有最大温度滞后效应的功能部件的温度变化速率不大于 2 ℃/h。可以看出，试验样件需要三四倍时间常数的温度稳定时间。

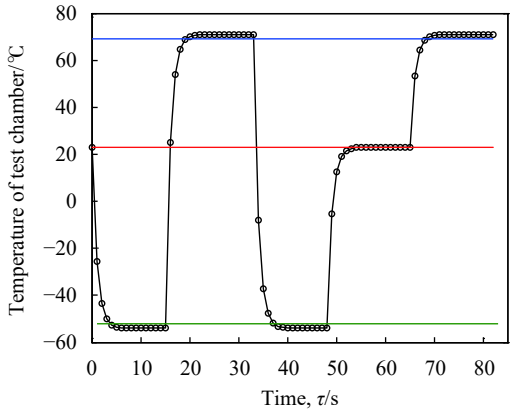


图 3 时间常数温度响应曲线

Fig.3 Time constant and temperature response curve

288×4 红外焦平面杜瓦组件放置在高低温试验箱内，温度从+21 ℃→+71 ℃→−60 ℃→0 ℃ 变化的温度响应曲线如图 4 所示。试验箱的平均升温速率为 4.72 ℃/min，平均降温速率为 2.64 ℃/min。组件具有最大温度滞后效应的冷头部件达到试验温度+71 ℃

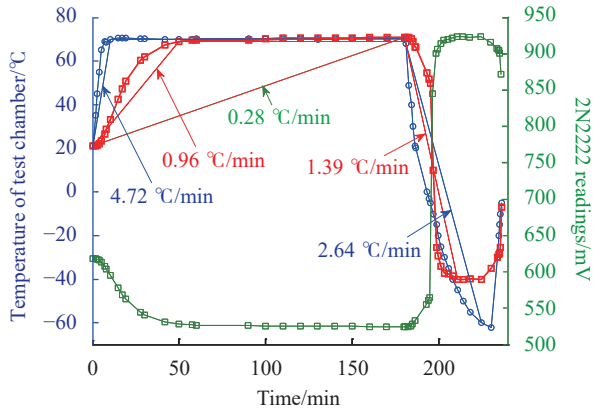


图 4 微型杜瓦热响应曲线

Fig.4 Mini Dewar temperature response curve

平衡稳定的时间需要 180 min，平均升温速率为 0.28 ℃/min。50 min 时冷头部件到达 69 ℃，150 min 时到达 70.7 ℃，在此区间的温度变化速率为 1.66 ℃/h。可以认为冷头部件的温度稳定时间为 50 min，平均升温速率为 0.96 ℃/min。由于降温试验观察时间过短，不能有效地确认组件达到−60 ℃ 温度平衡稳定需要的时间。用图 3 所示的时间常数曲线 17τ_c 和实际温度平稳时间 180 min，估计组件温度稳定时间 4τ_c 为 42.4 ℃。组件壳体部分为薄壁金属对称结构件、非金属环形陶瓷和圆形半导体锗 (硅)，它们的热导率分别为 17、53、59 (150) W/(m·℃)，比热容分别为 515、880、310 (665) J/(kg·K)，总质量不过 100 g 左右 (大多数产品的质量为 50 ~150 g)，达到试验温度热平衡时间不超过 1 h。GJB 360B—2009 重量法推荐温度稳定时间为 0.5~1 h。

由此可见，红外焦平面杜瓦组件壳体部分与冷头部分的热滞后及热惯性不同，存在较大的瞬时温度梯度，这是因为冷头部分与壳体部分之间的传导、对流和辐射传热都优化设计控制在最小，具有最大温度滞后效应的冷头部分的变温速率远小于 5 ℃/min，温度平衡稳定需要超过 1 h 或更长。在空气介质试验箱中，冷头部分不能实现变温速率大于 5 ℃/min 或 10 ℃/min 的温度急剧变化，温度冲击试验或温度循环筛选无法在冷头部分施加要求强度的试验应力。如果一定要在冷头部分施加严酷的温度急剧变化试验应力，那么必须使用热管减小热阻或利用液体 (水或氟碳化合物) 介质增加热交换效率。其实，在工作状态下冷头部分从常温+23 ℃ 由液氮或制冷器 (机) 制冷到−193 ℃ 通常需要 20 s~4 min，温度变化速率达到 650~54 ℃/min，

具有高加速应力筛选 60 ℃/min 变温速率的特点。

2.3 极限温度与裕量阈值

由于红外探测器研制的起点不同,大多数产品仅仅关注技术规范极限值,忽略产品的设计极限、工作极限和破坏极限的实际值。目前,主要根据研制合同或协议中规定的温度要求值或直接引用相关军用标准,把高温+70 (或 71) ℃、低温−55 (或 54) ℃ 当作设计和试验的环境条件,并没有开展温度极限试验和响应特性调查试验,以确认破坏极限、工作极限、设计极限和技术规范极限值。这些极限确定的裕量阈值由高到低排序,采用何种极限作为裕量阈值,其质量特性指标参数的可靠度完全不同。

红外探测器的温度设计环境条件由红外焦平面、杜瓦和制冷器 (机) 的设计温度指标构成,任何一个分组件的故障都会直接导致组件的失效。因此,组件的温度设计环境条件需要权衡各组成部分的设计温度指标,分组件的指标都应不小于组件指标要求值:

$$T_{\mathrm{A}} = \min\{T_{\mathrm{FPA}}, T_{\mathrm{D}}, T_{\mathrm{C}}\} \tag{2}$$

式中: T_{A}、T_{FPA}、T_{D}、T_{C} 分别为组件、红外焦平面、杜瓦、制冷器 (机) 的设计温度指标。必须优化平衡分组件的设计温度指标,保证所需的质量水平和有价格竞争力条件下的可用性,一个超过一个的过设计或过试验并没有意义。在研制、生产和使用全寿命周期的各个阶段需要经过实验室环境试验考核。

研制阶段早期、中期的研制试验,验证设计方案是否满足设计要求,暴露设计和工艺缺陷,获取技术薄弱点和耐应力极限信息,用于技术摸底、提高技术成熟度、探索设计方法和选择技术方案等目的。试验量级和持续时间可以选择量值或严酷度高于组件寿命周期所遇到的温度环境条件,同时考虑由使用环境条件和设计裕量构成的设计环境条件。设计裕量是功能性裕量,包括不确定裕量和安全裕量,设计环境条件=使用环境 (实测/已有数据、分析数据) +设计裕量 (不确定裕量、安全裕量) 。试验环境条件由设计环境条件和试验裕量组成,试验裕量是考核组件功能性能所加的量,分为研制试验裕量、鉴定试验裕量、验收试验裕量。研制阶段中期的响应特性调查试验获取对温度应力的物理响应特性,用于确定影响关键性能的温度工作极限值;极限环境试验验证承受最严酷环境的能力,确定设计极限环境条件。研制阶段后期设计及工艺定型的鉴定试验,验证组件的专用和通用性能满足合同或技术规范指标要求,即在规定鉴定试验裕量以及相关设计环境条件下进行试验,为定型转入批生产提供抉择依据。鉴定试验量级是在验收试验及持续时间上再加上典型鉴定裕量,鉴定试验环境条件=设计裕量+鉴定试验裕量。通常选择与技术规范所规定的环境条件基本相同。批生产阶段的验收试验,检验组件的通用性能是否满足要求和剔除一些不合格品,证明交付组件满足规定的性能要求、无工艺缺陷,为出厂验收提供依据。对通过验收试验的组件定时或定数抽样进行例行试验,考核生产过程中工艺和质量控制过程的稳定性,验证组件满足合同或技术规范指标要求,并且是可以接收交付的。试验量级和持续时间一般选择低于技术规范或合同所规定的环境条件[10]。

288×4 红外焦平面杜瓦组件技术规范要求温度极限上限为+71 ℃、下限为−54 ℃。杜瓦真空壳体部分能够耐受高温+170 ℃ 密封性不被破坏,而真空完好性不被破坏的温度上限为+85 ℃,结构件的破坏极限温度上限为+240 ℃;冷头部分红外焦平面性能不退化的温度上限为+85 ℃、下限为−193 ℃。法国 SOFRADIR 公司产品经历高温+71 ℃、1 500 h 贮存和低温−54 ℃、6 个月贮存性能不变。

3 环境应力筛选

通过环境应力筛选找出研制、生产等制造活动产生各组装等级的缺陷。因操作不当、工艺不完善、过程检验工序不完善等不良工艺和超差或临界状态引起的缺陷有明显缺陷和潜在缺陷,明显缺陷通过常规检验和其他质量保证工序消除。潜在缺陷引入有效的环境应力筛选工艺或工序,将内部的潜在缺陷加速变成故障。恒定温度、温度循环筛选不引入新的损伤和缺陷,不影响产品的寿命,是一种无损检验,筛选效果与温度极限值、温度极限值下的持续时间、温度变化速率、循环次数、工作或不工作、检验或不检验等因素有关,可分为常规筛选、定量筛选和高加速应力筛选。

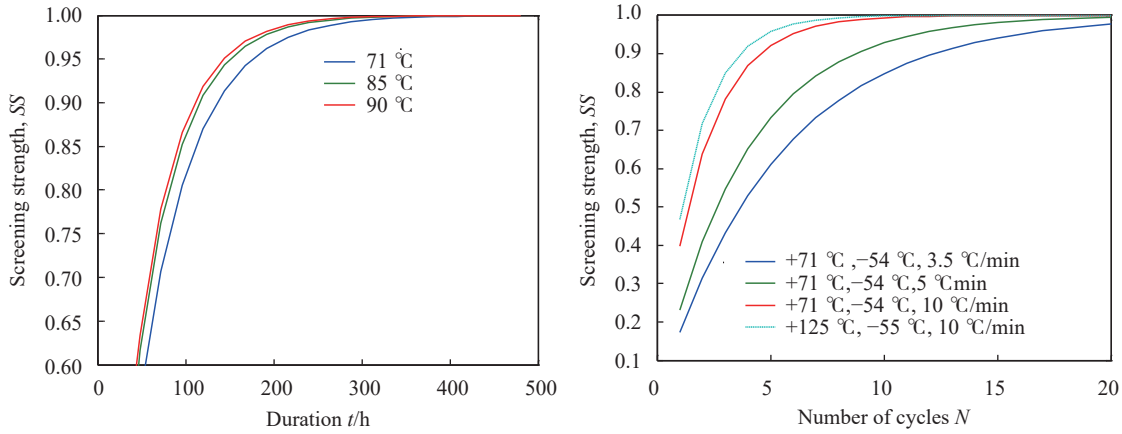
常规筛选与可靠性目标值无关,是否能够完全筛选掉早期失效是未知的,筛选应力强度凭经验确定,不估计产品中引入的缺陷数量,也不知道所用应力强度和检测效率的定量值,对筛选效果好坏和费用是否

合理不做要求，仅以能筛出早期故障为目标。定量筛选要求筛选结果与产品可靠性目标和成本阈值建立定量关系，引入缺陷密度、筛选检出度、析出量或残余缺陷密度等概念。恒定高温筛选度可按公式 (3) 计算，温度循环筛选度可按公式 (4) 计算[11]：

$$SS = 1 - \exp\left[-0.001\,7(R+0.6)^{0.6}t\right] \tag{3}$$

$$SS = 1 - \exp\left\{-0.001\,7(R+0.6)^{0.6}[\ln(e+V)]^3 \cdot N\right\} \tag{4}$$

式中：R 为温度变化范围，$R=T_U-T_L$，T_U 为上限温度值，T_L 为下限温度值，℃；t 为恒定高温持续时间，h；V 为温度变化速率，℃/min；N 为循环次数。图 5 为按公式 (3)、(4) 计算的恒定高温筛选度与持续时间和温度循环筛选度与循环次数的曲线。



(a) 恒定高温
(a) Constant high temperature

(b) 高温度循环
(b) High temperature cycles

图 5 筛选度曲线

Fig.5 Screening strength curve

部件、零件组装成高一级产品，使用的外购件和组装工艺可能引入新的缺陷。因此，环境应力筛选应使大部分的缺陷在较低的组装级别被筛出，并且应将较严酷的温度筛选剖面用在较低的组装级，以提高筛选效率和降低筛选成本。例如：陶瓷引线环部件、窗口部件、绝缘子部件、吸气剂部件及完成焦平面贴装、引线键合和冷屏组装的过程产品等。大多数部件可用+120 ℃、−55 ℃、10 ℃/min 的条件进行环境应力筛选，如图 5(b) 青色虚线所示。循环次数通常大于 12 次，3 次循环的筛选效果并不显著。

组件研制阶段和批生产初期的全部产品都要进行环境应力筛选，在批生产中，后期可以根据产品批量及质量稳定情况进行抽样筛选。经济、有效的筛选条件和程序应该是动态的，根据组件特性、特点和实际破坏情况进行剪裁设计，通过分析产品结构组成特点、预期缺陷类型选定容易暴露预定缺陷的筛选应力。环境应力筛选的温度应力值一般比红外探测器使用中的环境应力高，不超出设计的极限应力，选用的应力值应能有效地发现早期故障。通常把贮存温度极限值或工作温度极限值作为确定组件筛选上、下限温度的依据。GJB 1032—1990 等效采用 1985 年版 MIL-STD-2164 的变温速率为 5 ℃/min，1996 年版的 MIL-HDBK-2164A 将温度变化速率提高到 10 ℃/min。法国 THALES 公司热像仪内的温度变化速率为 7 ℃/min。对组件实施环境应力筛选的意义不大，可用+71 ℃、−54 ℃、10 ℃/min 的条件进行环境应力筛选，如图 5(b) 红色实线所示。然而，这样的筛选应力仅仅作用于组件的壳体部分，其组装焊接工艺并无需要加速变成故障的内部潜在缺陷，更何况组件外壳部分还要通过+71 ℃、−54 ℃、转换时间 1 min (125 ℃/min) 的温度冲击试验考核。

4 通用质量特性实验室环境试验

4.1 气候温度环境适应性试验

温度环境因素作用下，构成红外探测器的零部件吸收或释放能量后导致材料分子运动加剧或减缓，温度升高或降低会使材料的物理、化学特性或性能参数发生改变。温度应力直接或间接影响红外焦平面杜

瓦组件正常工作和不被破坏的能力。

实验室环境试验有高温试验、低温试验、温度冲击试验等。高温试验考查高温对产品的安全性、完整性和性能的影响及其耐受能力，模拟产品暴露日晒或人为热源附近遇到的极端温度环境。可能暴露的设计和工艺缺陷有电稳定性、金属化缺陷、引线键合等。低温试验模拟产品在户外极端低温下贮存遇到的环境，考查其对低温环境的耐受能力及性能退化，可能导致热载流子退化。温度冲击试验考查产品经受温度急剧变化，是否产生物理损坏或性能下降，用于评价对产品外表面、安装在外表面的零部件、或装在靠近外表面的内部零部件 (如吸气剂) 的影响，揭示产品暴露在低于极端温度变化速率下出现的安全性问题和潜在的缺陷。可能暴露封装的密封性、引线键合、芯片粘接、碲镉汞 (硅) 裂纹、冷屏涂覆与粘接等缺陷。红外探测器相关标准推荐的温度环境试验程序如表 2 所示。

表 2 红外探测器温度环境试验程序

Tab.2 Procedure of infrared detector temperature environment test

Category	Test procedure		Standard	Temperature extremes	Test duration	Transfer time
Storage test	High temperatures or low temperatures	Constant temperature storage	GJB 1788—1993	+40-+70 ℃ 0-−62 ℃	24-168 h 24-120 h	—
			GJB 2345—1995	+70 ℃ −60 ℃	72 h 72 h	—
			MIL−D−49172A	+71 ℃, −54 ℃	—	—
			SOFRADIR	+71 ℃ −54 ℃	1500 h 6 months	—
			GJB 5244—2004 GJB 7247—2011 GJB 5029A—2015 GJB 6791—2009 GJB 150.3—1986	+70 ℃ −55 ℃	48 h 24 h	—
			GJB 150.3A—2009	+71 ℃, −54 ℃	—	≤3 ℃/min
Temperature shock test	High temperatures or low temperatures.	Constant temperature shock	GJB 1788—1993	+40-+85 ℃ −10-−62 ℃	0.5 h 1.2 h	<5 min, 3 or 5 cycles
			GJB 2345—1995	+70 ℃, −55 ℃	12 h	<5 min, 3 cycles
			MIL-D-49172A SOFRADIR	+71 ℃, −54 ℃	—	—
			GJB 5244—2004 GJB 7247—2011	+70 ℃, −55 ℃	—	<5 min, 5 cycles
			GJB 150.5—1986 MIL-STD-810C	+70 ℃, −55 ℃	1 h	5 min, 3 cycles
			GJB 150.5A—2009 MIL-STD-810F	+71 ℃, −54 ℃	—	1 min, ≥3 cycles

4.2 温度加速可靠性试验

4.2.1 开关机温度循环筛选或寿命试验

红外焦平面探测器制冷组件工作时，红外焦平面从自然环境温度降至低温 80 K，结束工作后红外焦平面从工作温度升温恢复到自然环境温度，寿命期内经历数千甚至上万次的温度循环。红外焦平面在室温与工作温度之间变化时 (+23 ℃→−193 ℃→+23 ℃) 必然会产生热应力，温度变化速率通常都大于 40 ℃/min。冷头部分是由各种材料构成的层状结构，红外焦平面与硅读出电路通过铟栅阵列倒装焊接互连，用粘接剂连接到陶瓷基板形成探测器芯片，探测器芯片与制冷机冷指用粘接剂连接为一体。这些材料的热膨胀系数各异，封装材料、尺寸和结构等设计参数热匹配适当，高低温度循环引起的应力，会造成碲镉汞材料的损伤或铟栅阵列互连失效，导致红外焦平面无效像元递增或破裂[12]。

对相同类型红外焦平面进行大量工作温度循环，发现当致冷循环数累积到几百次时开始频繁失效。产品出厂前经历 50 次或 100 次温度循环筛选，红外焦平面探测器制冷组件的性能稳定性会有较大的提

高。现有技术水平下，开关机温度循环产生的热应力破坏具有累积效应的特性，过度温度循环考核不利于产品的长寿命。有标准推荐红外焦平面阵列开关机寿命试验的开关机次数为 300 次。

4.2.2 恒定高温、低温贮存筛选或寿命试验

恒定高温引起红外焦平面杜瓦组件的杜瓦腔体表面吸附气体或材料溶解气体化学活性增加，有利于表面吸附气体脱附或材料溶解气体扩散出气，导致腔体真空度下降热负载增加而丧失高真空绝热功能，致使降温时间大于或红外焦平面温度高于技术规范要求值。GJB 2345—1995 (MIL-D-49457 (ER)) 规定红外探测器杜瓦的真空完好性要求+70 ℃ 贮存 72 h，试验前后热负载增量超过 15% 为不合格。288×4 红外焦平面杜瓦组件经历+71 ℃ 贮存 1 500 h 后，又经历+85 ℃ 贮存 2 772 h，试验前后热负载不增加且减少不超过 5% (可能吸气剂被低温再生) [13−14]。

由此可知，指望施加+71 ℃、72 h 的恒定高温应力激发暴露可能存在出气的真空度下降缺陷是不可能的。假设恒定高温激发或暴露制造缺陷，即使排气烘烤温度低至+65 ℃、360 h，其可以激发暴露的所谓工艺缺陷的概率为 91.13%，也高于+71 ℃、72 h 所暴露的概率 71.58%。因此，红外焦平面杜瓦组件如此高温贮存筛选工序的作用和价值不大。

此外，恒定高温或低温贮存试验考核红外焦平面阵列不产生贮存失效的能力。

5 推荐的温度环境试验条件

世界范围环境空气温度最严酷的上限极值为+71 ℃、下限极值为−54 ℃。确定试验温度条件时，应注意 GJB150.3/4 将 MIL-STD-810C 中的+71 ℃、−54 ℃ 定为+70 ℃、−55 ℃，而 GJB150.3A/4A 直接用 MIL-STD-810F 中的+71 ℃、−54 ℃。温度环境试验条件取全寿命周期可能遇到的有一定风险的极端环境温度值，认为能适应极端环境的红外探测器一定也能适应比极端环境温和的环境。战术应用的环境温度为 [−55 ℃, +85 ℃]，在密闭系统或机载应用中要求达到+95 ℃，机载或导弹应用环境温度可高达+115 ℃。通常 [−55 ℃, +125 ℃] 为军用温度范围，高低温工作试验或温度循环筛选的温度严酷度一般低于贮存类温度 5~10 ℃。应结合具体产品的任务需求、经费和周期等限制条件进行合理的剪裁。现有产品中的大多数红外焦平面杜瓦组件或红外焦平面探测器制冷组件完全能承受表 3 推荐的无故障环境试验考核。

表 3 无故障环境试验的试验量级和持续时间

Tab.3 Test magnitude and duration of the trouble-free temperature environmental test

		Temperature extremes/℃	Test duration	Transfer time
Environmental tests	Temperature storage	+71	72 h	−
		−54	72 h	−
	Temperature shock	+71	1 h	1 min, ≥5 cycles
		−54	1 h	
Reliability tests	Temperature cycles	+71	1 h	≥10 ℃/min, 12 cycles
		−54	1 h	
		+71	30 min	≥30 ℃/min, 50 or 100 cycles
		−193	30 min	
	Temperature storage	+71	1 500 h	−
		−54	6 months	−
	Accelerated degradation test[13]	+90	2 160 h	−

6 结 论

可生产性要求高效率、低成本制造，质量特性指标稳定可靠。必须优化平衡集成式探测器杜瓦制冷组件通用质量特性，保证顾客所需的质量水平和有价格竞争力条件下的可用性。

红外焦平面探测器制冷组件或红外焦平面杜瓦组件在研制、生产和使用全寿命周期的各个阶段需要经过实验室环境试验考核，以确认环境适应性和可靠性是否符合顾客要求。应通过环境测量和环境分析，选择和剪裁环境条件，确定温度环境试验 (筛选) 应力工艺参数的正确性、合理性和必要性，以尽可能产生最适合的试验数据。

环境温度应力主要影响红外焦平面阵列的性能、杜瓦的真空完好性和制冷机的寿命，激励设计和制造缺陷，诱发完整性、性能退化等故障。空气介质温度冲击试验或温度循环筛选不能在冷头部分施加大于 10 ℃/min 急剧变化的试验应力，只能作用于外表面、安装在外表面的零部件、或装在靠近外表面的内部零部件的壳体部分。开关机温度循环筛选对冷头部分的缺陷筛选效果更好。不能忽视低温对红外焦平面阵列有效像元性能退化的影响。

参考文献：

[1] Zhu Yaochang, Li Ming. Environmental engineering tailoring and environmental test tailoring [J]. ***Spacecraft Environment Engineering***, 2012, 29(5): 479-485. (in Chinese)

[2] Asatourian R K. Infrared focal plane array storage life assessment by accelerated aging [J]. ***Quality And Reliability Engineering International***, 1998, 14: 425-432.

[3] Nitz H M, Ganschow O, Kaiser U, et al. Quasi-simultaneous SIMS, AES, XPS, and TDMS study of preferntial sputtering, diffusion, and mercury evaporation in $Cd_xHg_{1-x}Te$ [J]. ***Surface Science***, 1981, 104(2/3): 365-383.

[4] Mestechkin A, Lee D L, Cunningham B T, et al. Bake stability of long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. ***Journal of Electronic Materials***, 1995, 24: 1183-1187.

[5] Zhai Bo, Cai Liangxu, Zhu Yaochang. The conditions of laboratory environmental tests and its tailoring techniques [J]. ***Equipment Environmental Engineering***, 2014, 11(5): 87-91. (in Chinese)

[6] Cai Liangxu, Long Dezhong, Song Xiaoyan, et al. Review of temperature tests and relevant selandards (Part one) [J]. ***Environmental Technology***, 2014(8): 93-96. (in Chinese)

[7] GJB 150A-2009 Laboratory environmental test methods for military materiel [S]. 2009. (in Chinese)

[8] Breniere X, Tribolet P. Uniting IR detectors for tactical and space applications: a continuous cycle for reliability [C]// Proceedings of SPIE, 2009, 7298: 72981V.

[9] Lou Qunsheng, Shi Guangmei, Chen Jun, et al. Estimation method of specimen temperature stabilization time in temperature environmental test [J]. ***Equipment Environmental Engineering***, 2012, 9(6): 117-122. (in Chinese)

[10] Wu Yongliang, Zhang Xiaoda, Li Ye, et al. Spacecraft environmental test baseline and tailoring technology: Part Ⅱ elements of test baseline [J]. ***Spacecraft Environment Engineering***, 2016, 33(3): 235-239. (in Chinese)

[11] GJB/Z34-1993 The guidance of quantitative environmental stress screening on electronic product [S]. 1993. (in Chinese)

[12] Li Jinlin, Xie Gang, Liu Lian, et al. Characteristics and causes of non-effective pixels of HgCdTe FPA [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2021, 50(2): 20200202. (in Chinese)

[13] Li Jianlin, Zhang Shaoyu, Sun Juan, et al. Evaluating its storage life using thermal stress accelerated HgCdTe FPA performance degradation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2019, 48(10): 1004003. (in Chinese)

[14] Li Jianlin, Li Weixia, Xu Shichun. Performance of non-evaporable getter to maintain vacuum of Dewar module of infrared focal plane detector and its application [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(10): 1004001. (in Chinese)