

基于冲击响应谱的红外探测器引线键合研究

熊 雄, 马昕剑, 毛剑宏, 金 鑫, 吴建乐, 李锐平, 杜 宇

(浙江珏芯微电子有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘要: 制冷型红外探测器有响应快、灵敏度高和探测距离远的特点, 在智能光电装备中应用广泛。然而在实际应用场景中会经历冲击激励, 引起冲击响应, 为了确保制冷型红外探测器能够胜任复杂多变的苛刻环境, 在设计阶段进行冲击响应谱环境适应性研究十分必要。基于应用的动力学环境, 通过计算与仿真键合引线弧形受力与位移, 综合考虑引线材料特性, 优选设计引线材料与键合弧形, 并对引线键合工艺进行优化, 最终通过了 1000g 量级的冲击响应谱试验。

关键词: 红外探测器; 杜瓦封装; 冲击响应谱; 引线键合; 可靠性

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2023)06-0575-07

Wire Bonding of Infrared Detector Based on Shock Response Spectrum

XIONG Xiong, MA Xinjian, MAO Jianhong, JIN Xin, WU Jianle, LI Ruiping, DU Yu

(Zhejiang Juexin Microelectronics Co. Ltd., Lishui 323000, China)

Abstract: Cooled infrared detectors are widely used in the fields of intelligent optoelectronic equipment because of their fast response, high sensitivity, and wide range of detectors. However, the shock response will be caused by impact excitation in practical application scenarios. To ensure competency of a cooled infrared detector in a variety of complex and changeable harsh environments, it is necessary to study the adaptability of the shock response spectrum environment in the design stage. Based on the dynamics environment in the application, the loop force and displacement of the wire were analyzed through calculation and simulation, and the characteristics of materials were considered. The bonding wire materials and bonding wire loop were designed, wire bonding process was optimized, and finally, they passed the test of a shock response spectrum of 1000g.

Key words: infrared detector, dewar package, shock response spectrum, wire bonding, reliability

0 引言

制冷型红外探测器(以下简称红外探测器)具有响应速度更快、画质细节更细腻、灵敏度更高、探测距离更远及性能更稳定等诸多优点, 已经越来越多地应用在目标搜索、目标识别、目标跟踪和目标定位等光电装备领域^[1-4]。然而红外探测器在实际应用场景中一般会经历冲击激励, 引起冲击响应, 为了确保其能够在复杂多变的苛刻环境中通过考验, 在设计阶段进行冲击环境适应性研究显得尤为重要。

杜瓦封装是红外探测器实现产品化、实用化及工程化的关键, 其可靠性直接决定了红外探测器能否正常工作。在实际服役过程中, 杜瓦封装中的键合引线处于无规律振动及冲击的复杂动力学环境中, 一旦振

动或冲击量级过大, 将产生一定程度的应力应变甚至断裂。印度国防研发组织(defence research and development organization, DRDO)从武装直升机战场实际应用环境出发, 以机身振动、爆炸冲击等角度对武装直升机红外探测设备进行了理论研究^[5]。中国空空导弹研究院对空空导弹的新研元器件进行了振动试验分析, 并进一步提高了其元器件随机振动试验条件^[6]。中国科学院微小卫星创新研究院在研究新一代北斗卫星时发现, 卫星与火箭分离界面冲击响应达到了 4000~12000g^[7]。吴大方等^[8]设计石英灯红外辐射式大热流冲击试验系统, 并研究脆性试验件表面应变与热冲击之间的关系, 为高超声速飞行器的透波天线窗等部件在高速大热流冲击下的安全可靠设计提供重要依据。袁名松等^[9]以巡飞攻击导弹红外成像导

收稿日期: 2022-08-13; 修订日期: 2022-09-19.

作者简介: 熊雄(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事红外探测器封装技术研究。E-mail: xiongxiong0423@163.com.

引头为研究对象,对系统的半正弦波冲击响应进行了有限元分析,结果表明红外成像导引头能承受住发射及分离过程中的冲击激励作用。因此,提高杜瓦封装的冲击可靠性使其更好地应用于军事及航空航天领域迫在眉睫。

目前,少有对红外探测器中引线键合在大量级冲击环境尤其是冲击响应谱下的研究。本文针对红外探测器引线键合技术,建立有限元模型进行模态分析引线弧形,综合考虑引线材料特性选择最佳引线材料,并进行一系列工艺优化及杜瓦加固,最后通过冲击响应谱试验对引线键合质量进行评估。

1 冲击响应谱试验条件

冲击试验一般分为经典冲击和冲击响应谱试验两种。经典冲击一般有半正弦波、梯形波和锯齿波3种,大量研究表明试件即使通过了经典冲击试验,在实际使用环境中仍会损坏,因此不适合采用经典冲击

作为检测条件的试验规范^[10]。GJB 150A^[11]中也明确规定只有证明测量数据在经典脉冲的容差内,才允许采用梯形波和锯齿波的经典冲击试验,其他均以冲击响应谱作为瞬态冲击的试验标准。与经典冲击相比,冲击响应谱试验不仅研究冲击波本身,而且更加关注冲击作用与系统的效果,估计冲击对结构的损伤大小,更加接近真实的冲击环境。因此,本研究以冲击响应谱试验作为衡量红外探测器中引线键合质量的检测条件。

考虑到冲击响应谱是针对不同频率的响应进行计算,可将红外探测器的耦合作用分解为多个线性单自由度系统,对于每个单自由度系统进行冲击响应谱计算,取系统响应的最大值,然后结合红外探测器的固有频率便可得出整个系统的冲击响应谱。图1为单自由度(single degree of freedom, SDOF)系统的冲击响应振动模型。

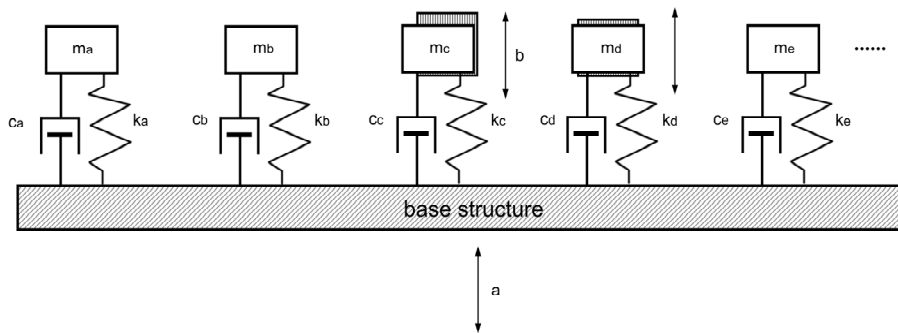


图1 SDOF系统冲击响应振动模型

Fig.1 Vibration model of shock response of SDOF system

图中, a 为输入运动, b 为响应运动, m 为载荷质量, k 、 c 分别为 SDOF 的刚度系数与阻尼系数。设载荷关于时间 t 的位移函数为 $x(t)$, 基座关于时间 t 的位移函数为 $y(t)$ 。则在外部的加速度激励下, 系统的运动方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} \quad (1)$$

式中: \dot{x} 为 $x(t)$ 的一阶求导, 即时间为 t 时载荷的速度; \ddot{x} 为 $x(t)$ 的二阶求导, 即时间为 t 时载荷的加速度。

\dot{y} 同上。令固有角频率 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 阻尼因子

$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$, 则式 x 变为:

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = \omega_n^2y + 2\xi\omega_n\dot{y} \quad (2)$$

接着采用递归数值滤波法求解系统响应, 其递推公式^[12]如下:

$$\ddot{x}_i = h_0p_i + h_1p_{i-1} + h_2p_{i-2} + q_1\ddot{x}_{i-1} + q_2\ddot{x}_{i-2}, i \geq 3 \quad (3)$$

$$h_0 = 1 - e^{(-A)} \frac{\sin B}{B} \quad (4)$$

$$h_1 = 2e^{(-A)} \left(\frac{\sin B}{B} - \cos B \right) \quad (5)$$

$$h_2 = e^{(-A)} [e^{(-A)} - \frac{\sin B}{B}] \quad (6)$$

$$q_1 = 2e^{(-A)} \cos B \quad (7)$$

$$q_2 = -e^{(-2A)} \quad (8)$$

$$A = \omega_j \Delta t \eta \quad (9)$$

$$B = \omega_j \Delta t \sqrt{1 - \eta^2} \quad (10)$$

$$\eta = \frac{1}{2Q} \quad (11)$$

式中: $\omega_j = 2\pi f_j$, ω_j 为系统第 j 阶的固有圆频率; f_j 为系统第 j 阶的固有频率; p_i 、 η 、 Δt 、 Q 分别为系统在时间 i 点受到的加速度激励值、临界阻尼比、采样间隔时间、放大系数。根据冲击响应谱的频率范围和取样间隔, 得到各个小波分量频率, 该频率即为各个 SDOF 的固有频率, 然后计算各 SDOF 在激励下的响

应曲线,取其峰值并结合各小波分量频率即得到冲击响应谱。

基于应用需求,为研制能适应冲击响应谱为1000g量级(试验参数如图2)的高可靠红外探测器,本研究重点攻关杜瓦封装中的引线键合加固设计与工艺优化。

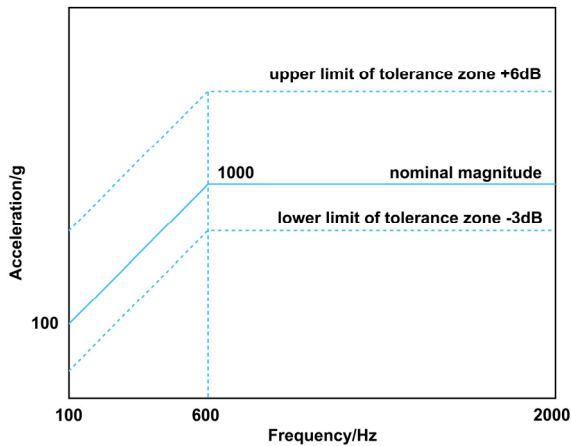


图2 冲击试验参数

Fig.2 Parameter of shock test

2 引线键合设计

红外探测器在运输、试验和使用中会经历各种振动和热环境,封装杜瓦也同样受到环境的影响。杜瓦内部引线键合一般分为同一水平面的和不同水平面的键合,后者由于引线弧形不对称及受力不平衡,更容易产生过大应力应变甚至断裂的风险。如图3所示,杜瓦封装内基板与引线环键合时,第一、二焊点间隔距离远且不在同一水平面上,其中,引线水平方向跨距为 ΔL 、垂直方向跨高为 ΔH 。

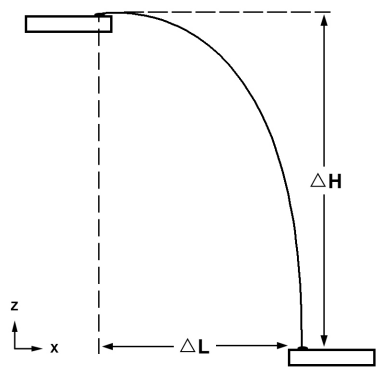


图3 键合引线示意图

Fig.3 Schematic diagram of bonding wire

图3中,引线弧形是由劈刀运动轨迹决定的,在键合第一焊点后,劈刀先向上运动高度 h_1 ;然后向左运动距离 l_1 ;最后向下运动高度 h_2 并键合第二焊点形成最终的引线弧形。其中第一焊点与第二焊点高度差为 h_1-h_2 , $\Delta H=h_1-h_2$, $\Delta L=l_1$ 。为了分析键合引线弧形在1000g冲击响应谱试验条件下的应力分布及位移情况,我们固定 ΔL 为2000 μm 并设计了10种 ΔH 不同的弧形,弧形的 ΔL 与 ΔH 满足如下公式:

$$\frac{X^2}{\Delta L^2} + \frac{Z^2}{\Delta H^2} = 1 \tag{12}$$

通过引线弧形各点数据建立模型并进行有限元分析,建立的红外探测器模型中,底部法兰面进行固定支撑约束,其余各部件进行绑定约束,仿真的引线材料为30 μm 的铂丝,设定1000g冲击响应谱试验条件,分别沿X、Y、Z三轴正方向进行仿真,最终得到3个方向的单轴冲击仿真结果。图4中 ΔH 为7000 μm 时,Y轴正方向引线位移的仿真结果,最大位移为0.2672 mm。将10根引线弧形的仿真结果整合后得到图5。

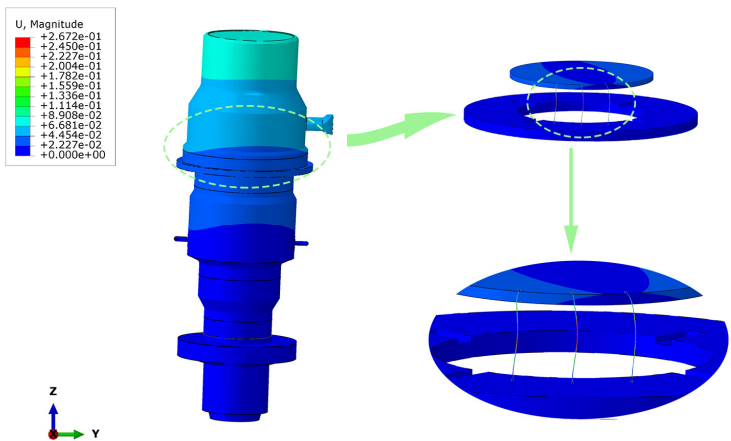


图4 沿Y轴冲击的弧形位移仿真结果

Fig.4 Simulation diagram of loop displacement of impact along Y axis

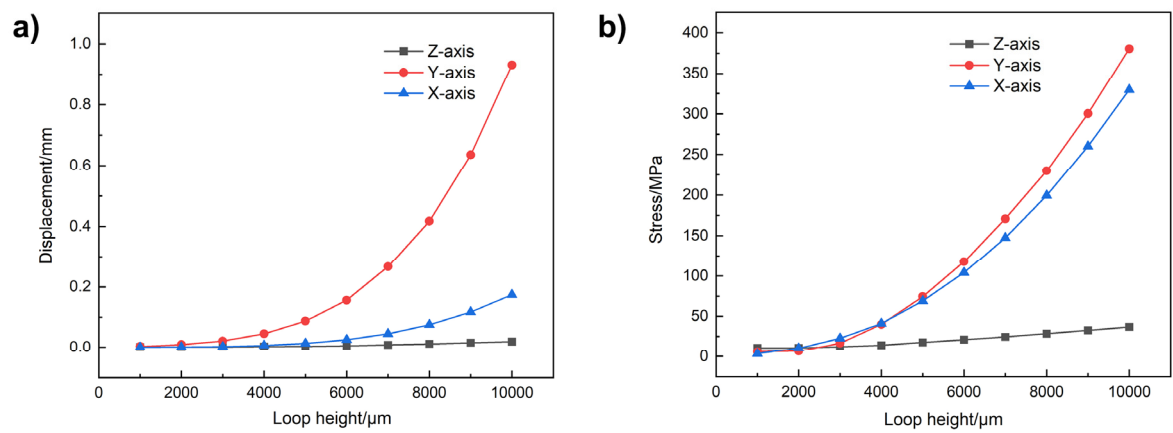


图 5 弧形仿真结果：(a)为弧高与位移的关系；(b)为弧高与应力的关系

Fig.5 Loop simulation diagram(a) is the relationship between loop height and displacement; (b) is the relationship between loop height and stress

图 5 中结果显示，在 1000g 冲击响应谱试验条件下，Y 轴正方向冲击对弧形的位移与应力影响最大，Z 轴正方向的冲击对其影响最小，X 轴居中。且随着弧高逐渐增大，弧形应力与位移也逐渐变大。因此为了减小 1000g 冲击响应谱条件下引线形变及断裂的可能，需要弧高尽可能小。

此外，在冲击响应谱试验下，键合引线所受力可由以下公式计算得出：

$$F=ma \tag{13}$$

$$m=\pi r^2 L \rho \tag{14}$$

式中： a 为引线最大加速度； m 、 r 、 L 、 ρ 分别为引线的质量、半径、长度和密度。以铂丝为例，已知其密度为 21.34 g/cm³，直径 30 μm ，长度 6.5 mm，当冲击最大加速度为 1000g 时，计算得出铂丝整体受力为 $9.805 \times 10^{-5} \text{ N}$ ，故键合引线自身受力可以忽略不计。

除了考虑键合引线弧形外，键合引线的材料对键合质量也有直接关系，并影响红外探测器组件长期使用的可靠性和稳定性。红外探测器封装对引线材料的要求是：低电阻的欧姆连接、漏热小、可塑性好、键合处的机械强度高以及键合完成后对杜瓦真空度影响小。常用的引线材料有：金丝、银丝、铂丝、硅铝丝、铝丝和铜丝等，表 1 列出了常用引线材料的部分物理参数^[13]。

红外探测器为了获得可以接受的制冷时间，必须相应地降低杜瓦组件的静态热负载。因此红外探测器的引线选择除了考虑键合性能外，还要兼顾引线漏热。

由以下公式进行理论分析：

$$Q_1=I^2R=I^2\rho\frac{L}{\Phi} \tag{15}$$

$$Q_2=-\lambda\Phi\frac{dT}{dL} \tag{16}$$

表 1 键合引线部分物理参数^[13]

Table 1 Partial physical parameters of bonding wire ^[13]		
Wire materials	Average resistivity /(10 ⁻⁸ $\Omega\cdot\text{m}$)	Average thermal conductivity/(W/(m·K))
Au	1.35	311.42
Ag	1.59	429
Pt	10.6	71.6
SiAl	1.52	276.29
Al	2.7	220
Cu	0.99	414.10

式中： Q_1 为引线焦耳热； Q_2 为引线传导热； I 、 R 、 ρ 、 λ 、 L 、 Φ 分别为引线的电流、电阻、电阻率、热导率、长度及横截面积。由式(15)与式(16)可得：

$$dQ_1=\frac{\rho\lambda I^2}{Q}dT \tag{17}$$

$$(Q_2)_{\min}=I\sqrt{2\int_{T_i}^{T_j}\rho(\tau)\lambda(\tau)d\tau} \tag{18}$$

$$\frac{L}{\Phi}=\frac{1}{\sqrt{2}I}\int_{T_i}^{T_j}\frac{\lambda(\tau)}{\sqrt{\rho(\tau)\lambda(\tau)}}d\tau \tag{19}$$

式中： T_j 为引线上端温度， T_i 为引线冷端温度。当 $T_j=300 \text{ K}$ ， $T_i=77 \text{ K}$ 时，得到最小漏热的引线长截比。为减小引线固体传导漏热，常选用热导率小的材料、增加引线长度、减小引线线径，但会使得引线电阻增大导致信号引出及焦耳热耗两方面的问题。通过式(15)~式(19)的理论分析，综合考虑键合引线热导率、电阻率、引线直径、长度等诸多因素，从而选出最佳的键合引线材料及其长截比。

此外,为避免红外探测器在实际应用过程中发生共振现象导致红外探测器损坏,材料的固有频率则需要被考虑。材料的固有频率计算公式^[14]为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (20)$$

$$K = \frac{F}{\delta} = \frac{1}{\frac{L^3}{48EI} + \frac{H^3}{6EI} + \frac{HL^2}{8GJ}} \quad (21)$$

式中: f 为固有频率; m 为质量; K 为键合引线刚度; E 为弹性模量; G 为剪切模量; I 为惯性矩; J 为极惯性矩; H 与 L 为键合引线弧高与弧长。考虑到红外探测器组件振动要求为 0~2000 Hz, 键合引线固有频率应尽可能避开红外探测器共振频率范围, 因此键合引线材料自身的弹性模量、剪切模量、惯性矩、极惯性矩、弧高及弧长等因素也需要被综合考虑。

通过对键合引线受力分析及综合考虑材料多种特性之后, 最终优选 30 μm 铂丝为键合材料且确定了其键合弧形参数。

3 引线键合工艺优化

引线键合的可靠性受多种因素影响, 如键合表面材质、键合表面状态、引线材料、键合参数及杜瓦整体抗振性能等。在基板、引线环及键合引线材料确定的前提下, 引线键合的质量则只与键合表面状态、键合参数和杜瓦整体抗振性能有关。我们将键合表面状态因素设定为 A , 键合参数因素设定为 B , 杜瓦整体抗振性能因素为 C , 则键合引线发生各种断裂等失效的概率为 $P(ABC)$ 。以珪芯微电子的制冷型红外探测器为例, 在过去 30 个制冷型红外探测器共计 900 根引线 1000g 冲击响应谱试验中, 存在 26 根为键合参数不适合导致失效, 存在 25 根因键合表面状态问题导致的失效, 存在 11 根因杜瓦整体抗振性能差导致的引线断裂失效。故 A 、 B 、 C 各自独立发生的概率分别为 $P(A) \approx 0.029$, $P(B) \approx 0.028$, $P(C) \approx 0.012$ 。 $P(ABC)$ 为 A 、 B 、 C 发生的集合, 约等于 0.069。因此当存在 N 根键合引线时, 不发生引线断裂失效的概率 $P(N)$ 由以下公式计算得出:

$$P(N) = \prod_{i=1}^N (1 - P_i(ABC)) \quad (22)$$

当 $N=30$ 时, $P(N) \approx 0.1171$ 。可以看出在 1000g 冲击响应谱试验条件下, 30 根引线即单个红外探测器通过试验的概率并不高, 即键合工艺仍然有较大的优化空间。在以铂丝作为键合引线材料后, 为了提高键合强度, 主要采用直接加固和间接加固的方式。直接加固方式包括对键合表面的洁净处理、键合

工艺参数的优化以及植球等方式。其中, 键合表面洁净处理在一般清洁表面污染方式的基础上增加了等离子清洗工艺; 键合工艺参数的优化可通过设计正交试验, 取键合三要素键合压力、超声功率、超声时间构成 3 因素 4 水平的正交实验, 并对结果进行极差分析从而得出最佳的键合工艺参数; 植球则是指在第二焊点键合结束后, 再对第二焊点进行球焊操作, 植球后的引线强度往往比未植球时高。间接加固方式为对杜瓦冷指顶端辅助加固从而对悬臂梁结构进行力学强化, 在减少其振动的同时而间接减少键合引线的受力。中国科学院上海技术物理研究所也提出了一种杜瓦冷指顶端辅助加固的力学强化方式^[15]。

采用推拉力试验机对工艺优化后的键合引线进行测试, 测试速度为 500 $\mu\text{m/s}$, 设定负载 40g。图 6 为工艺优化前后键合引线拉力强度值对比。

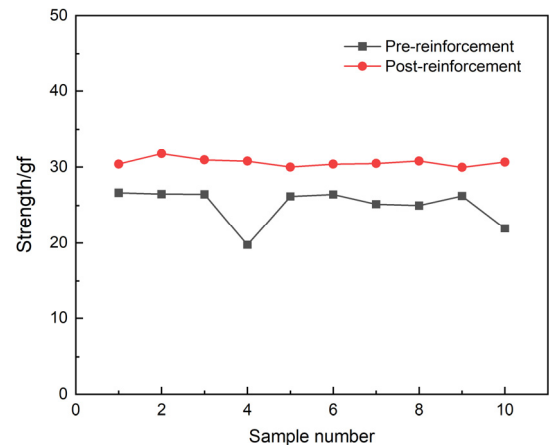


图6 键合引线拉力强度对比

Fig.6 The contrast of bonding wire strength

4 冲击响应谱试验

对引线键合优化后的红外探测器进行 1000g 冲击试验, 试验参数如图 2, 加载方向 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 每向 3 次。图 7 为冲击响应谱(shock response spectrum, SRS)试验样品, 图 8 为试验流程。

冲击响应谱试验一般包括图中 9 个步骤, 试验开始前首先调节设备冲击响应谱, 使其输出与试验条件一致, 接着确认红外探测器试验前状态, 然后就可以开始试验。试验时按 X 、 $-X$ 、 Y 、 $-Y$ 、 Z 、 $-Z$ 的顺序进行冲击响应谱试验, 试验完成后确认探测器的状态。

试验结束后分析得到: 4 个红外探测器试验样品经过 1000g 量级冲击响应谱试验后未发现明显的缺陷, 键合引线亦保持正常的电气连接功能。因此, 对键合引线受力进行理论分析、综合考虑键合引线材料及工艺优化这一体系措施对于提高键合引线在冲击响应谱试验下的可靠性是有效且可行的。



图 7 冲击响应谱试验样品

Fig.7 SRS test samples

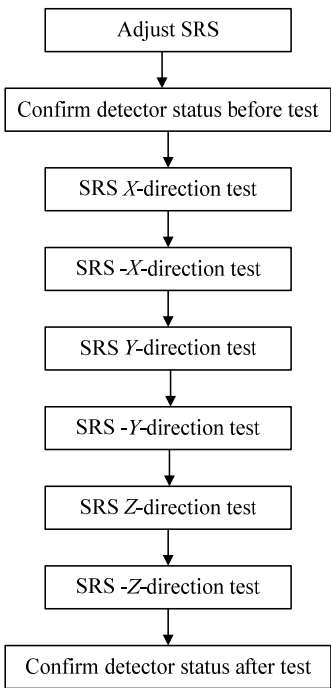


图 8 冲击响应谱试验过程

Fig.8 SRS test process

5 结论与展望

本研究通过建立有限元模型对红外探测器杜瓦封装中的键合引线进行模态分析，综合考虑键合材料的物性参数，最终选定了铂丝作为键合材料并确定了其弧形参数。在对引线键合工艺进行优化后得到了符合期望的引线键合质量，且通过了 1000g 量级冲击响应谱试验。本研究给基于冲击响应谱试验条件下如何提高键合引线可靠性提供了新的思路。然而，该研究仍然有优化的空间：

- 1) 由于缺少高速摄像设备，对于键合引线在冲击环境下的实际运动轨迹未能捕捉到；
- 2) 下一步，可通过设备升级及采用多种检测方法来更好地把控键合一致性；
- 3) 建立多变量系统性的仿真平台，获得更接近真

实情况的引线键合仿真数据；

4) 完善键合引线材料数据库，做到针对不同情况快速筛选合适的引线材料。

参考文献：

[1] Reibel Y, Taalat R, Brunner A, et al. Infrared SWAP detectors: pushing the limits[C]//*Proceedings of SPIE*, 2015, **9451**: 945110.

[2] Schaake H F, Kinch M A, Chandra D, et al. High operating Temperature MWIR detector diodes[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**: 1401-1405.

[3] Gassmann K U, Eich D, Fick W, et al. Low drak current MCT-based focal plane detector arrays for the LWIR and VLWIR developed at AIM[C]//*Proceedings of SPIE*, 2015, **9639**: 96390P.

[4] 王鑫, 周立庆, 谭振. 制冷型大面阵红外探测器研究进展[J]. *红外*, 2019, **40**(12): 1-9.

WANG Xin, ZHOU Liqing, TAN Zhen. Developments of cooled large-format infrared detectors[J]. *Infrared*, 2019, **40**(12): 1-9.

[5] Chopra K, Walia R. A short technical note on the IR signatures studies and designing aspects of the IR technology devices for defence aircraft[J]. *J. Aeronaut Aerospace Eng.*, 2020, **9**: 220.

[6] 赵青, 吴瑞轩. 空空导弹新研元器件振动试验条件探讨[J]. *装备环境工程*, 2020, **17**(8): 115-118.

ZHAO Qing, WU Ruixuan. Analysis of vibration test condition of new developed components of air-to-air missile[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, **17**(8): 115-118.

[7] 安洋, 林宝军, 刘佳伟. 框架面板式构型卫星冲击响应特性分析方法[J]. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2021, **51**(1): 11-21.

AN Yang, LING Baojun, LIU Jiawei. A method for analyzing the shock response characteristics of a satellite with frame-panel configuration[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2021, **51**(1): 11-21.

[8] 吴大方, 潘兵, 高镇同, 等. 超高温、大热流、非线性气动热环境试验模拟及测试技术研究[J]. *实验力学*, 2012, **27**(3): 255-271.

WU Dafang, PAN Bing, GAO Zhentong, et al. On the experimental

- simulation of ultra-high temperature, high heat flux and nonlinear aerodynamic heating environment and thermo-machanical testing technique[J]. *Journal of experimental mechanics*, 2012, **27**(3): 255-271.
- [9] 袁名松, 冯建伟, 黄云, 等. 巡飞攻击导弹红外成像导引头瞬态冲击响应分析[J]. *红外技术*, 2014, **36**(12): 953-957.
- YUAN Mingsong, FENG Jianwei, HUANG Yun, et al. Transient impact response analysis of loitering attack missile imaging infrared seeker[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(12): 953-957.
- [10] 杨博, 陈立伟, 冯伟, 等. 冲击响应谱与经典冲击试验等效计算方法[J]. *环境技术*, 2016, **34**(4): 11-15.
- YANG Bo, CHEN Liwei, FENG Wei, et al. Research on equivalence experimentation of SRS test and classical shock test[J]. *Environmental Technology*, 2016, **34**(4): 11-15.
- [11] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法: GJB 150A—2009[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 2009.
- The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department. Military equipment laboratory test method: GJB 150A—2009[S]. Beijing: *The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department Military Standard Publication Distribution Department*, 2009.
- [12] 蒋仁奎, 梁伟, 赵波. 天文巡天相机冲击响应谱分析及研究[J]. *应用力学学报*, 2019, **36**(3): 507-513, 753.
- JIANG Renkui, LIANG Wei, ZHAO Bo. Analysis and research on SRS of astronomical survey camera[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, **36**(3): 507-513, 753.
- [13] 汪洋, 赵振力, 莫德锋, 等. 红外探测器组件封装中的引线特性研究[J]. *红外*, 2018(2): 8-13.
- WANG Yang, ZHAO Zhenli, MO Defeng, et al. Research on characteristics of wires for infrared detector packaging[J]. *Infrared*, 2018(2): 8-13.
- [14] 代锋. 随机振动键合引线变形碰触阈值研究[J]. *振动与冲击*, 2021, **40**(9): 228-231.
- DAI Feng. Contact threshold of random vibration bonding wire deformation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, **40**(9): 228-231.
- [15] 孙闻, 俞君, 张磊. 微型红外探测器组件集成技术及其应用[J]. *红外*, 2017, **38**(4): 1-5.
- SUN Wen, YU Jun, ZHANG Lei. Integrated technology of miniature infrared detector assembly and its application[J]. *Infrared*, 2017, **38**(4): 1-5.