

文章编号: 1672-8785(2024)12-0026-08

红外探测器杜瓦组件的悬臂梁 结构优化设计方法

张杨文 沈 星 洪晓麦 程海玲 崔任鑫 江程鹏

曾 卓 徐振华 李明畅 刘 欣 黄 立*

(武汉高德红外股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘 要: 在大量级振动应用场景中, 红外探测器杜瓦组件的悬臂梁结构容易遭到破坏。设计了一种非接触式螺旋弹簧支撑环结构。在杜瓦外壳与冷指之间, 通过非接触的方式大幅减小传统加强方案所增加的杜瓦漏热, 并将振动能量转换成弹性势能, 降低大量级振动对冷头的应力影响。经过 Ansys 软件模拟分析和优化后, 铂铱丝的最大变形量为 1.7 mm, 比常规结构下降了 57.5%; 最大应力为 307 MPa, 下降了 52%。试验结果表明, 优化后的平均漏热仅增加了 1%, 同时具有显著提高的抗振性能。采用常规结构的组件在 15 grms 耐久随机振动后会出现铂铱丝断裂现象, 而优化后的组件则能够承受 15 grms 耐久随机振动和 17.6 grms 短时大量级随机振动, 并在 17.6 grms 随机振动过程中保持探测器焦温稳定, 且其正常运行不受影响。

关键词: 红外探测器; 杜瓦; 振动; 螺旋弹簧支撑环; 悬臂梁

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.12.004

Optimization Design Method of Cantilever Beam Structure of Infrared Detector-Dewar Assembly

ZHANG Yang-wen, SHEN Xing, HONG Xiao-mai, CHENG Hai-ling, CUI Ren-xin, JIANG Cheng-peng,
ZENG Zhuo, XU Zhen-hua, LI Ming-chang, LIU Xin, HUANG Li *

(Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: In high-level vibration application scenarios, the cantilever beam structure of the infrared detector-dewar assembly is easily damaged. A non-contact helical spring support ring structure is designed. Between the dewar shell and the cold finger, the dewar heat leakage increased by the traditional strengthening scheme is greatly reduced through a non-contact method, and the vibration energy is converted into elastic potential energy, thereby reducing the stress impact of high-level vibration on the cold head. After simulation analysis and optimization with Ansys software, the maximum deformation of the platinum-iridium wire is 1.7 mm, which is 57.5% lower than the conventional structure; the maximum stress decreases by 52% to 307 MPa. Experimental results show that the average heat leakage after optimization increased by only 1%, while having significantly improved vibration resistance. The assemblies with conventional structures would experience plat-

收稿日期: 2024-06-11

作者简介: 张杨文(1992-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 主要从事红外制冷探测器封装技术研究。

*通讯作者: E-mail: 312094306@qq.com

inum-iridium wire breakage after enduring 15 grms durable random vibration, while the optimized assemblies can withstand 15 grms durable random vibration and 17.6 grms short-term high-level random vibration. The optimized assemblies keep the detector focal plane temperature stable during 17.6 grms random vibration without affecting their normal operation.

Key words: infrared detector; dewar; vibration; helical spring support ring; cantilever beam

0 引言

红外探测器是红外探测技术的核心部件,在导弹制导、航天探测、预警卫星和民用观测等领域具有广泛应用^[1-5]。然而,在火箭、导弹发射等严苛环境下,会产生大量级振动,由冷指、冷盘、基板、芯片等组成的杜瓦悬臂梁结构的力学可靠性较低。在受力摆动过程中,如果幅度过大,则容易导致陶瓷基板到陶瓷引线环之间的电极引线(如铂铱丝线)弯折或断裂。

为了提高红外探测器杜瓦组件悬臂梁结构的力学可靠性,陈芳等设计了一种采用玻璃纤维材质的冷指支撑结构(见图 1),其支撑材料一端与外壳连接,另一端与冷头连接^[6]。通过均方根为 5 grms 的振动试验,冷指与杜瓦结构的相对位置变化小于 $1\ \mu\text{m}$ 。然而,在安装过程中需要在槽内加入低温胶进行组装。粘接胶放气量过大会降低杜瓦的真空可靠性。另外,粘接胶固化后也会改变玻璃纤维间的拓扑结构,从而影响其力学可靠性。在玻璃纤维束

走线时,需要确保过线部位没有尖锐的棱角,存在一定的工艺风险。

张杨文等介绍了一种带有钛合金斜支撑环的小型杜瓦组件(见图 2)。尽管该结构能够承受持续时间为 2 min 的 3 轴向 17.6 grms 随机振动试验,但杜瓦的漏热增加了 8.9%^[7]。此外,支撑环内环与冷指连接处采用粘接方式进行加固,对探测器的制冷性能和使用寿命都产生不利影响。

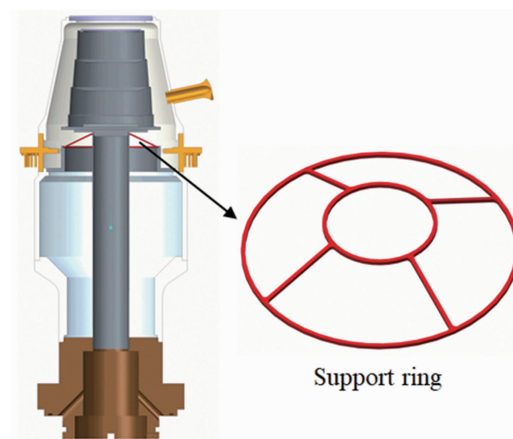


图 2 带支撑环结构的杜瓦组件^[7]

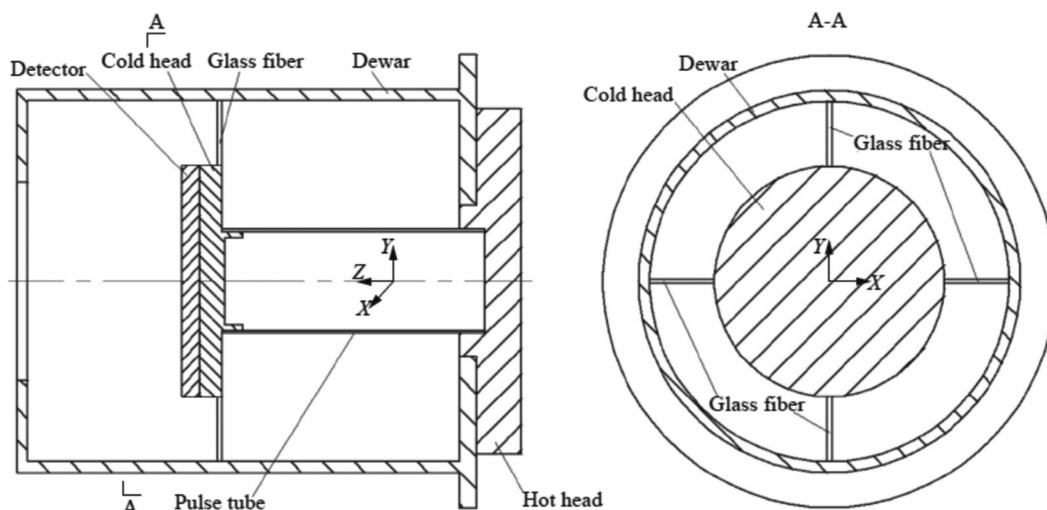


图 1 玻璃纤维支撑结构^[6]

Fred N 等在杜瓦组件中引入 Inconel 718 高强度镍基合金平行支撑环(见图 3), 用于对冷指悬臂梁结构进行加固。平行支撑环的内环与冷指直接接触, 需要采用粘接胶进行加固。该结构通过了持续时间为 1 min 的 3 轴向 6.8 grms 随机振动试验^[8]。

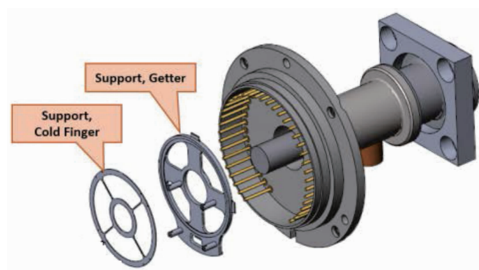


图 3 支撑环杜瓦组件^[8]

以上几种支撑结构虽然能提升红外探测器杜瓦组件悬臂梁的结构强度, 但会导致冷量从冷头通过支撑结构热传导传递到外界, 增加了杜瓦的漏热。而杜瓦漏热增加会造成探测器制冷时间延长、功耗增大、制冷机负荷变大以及使用寿命减少等问题, 对其实际应用产生不利影响。

本文提出一种非接触式螺旋弹簧支撑环结构, 其支撑环内环与冷指之间保持一定的间隙。当探测器正常工作时, 冷头与外界环境不会通过支撑环直接接触进行热交换。经长时间、大量级的振动试验验证, 与常规结构相比, 这种非接触式螺旋弹簧支撑环结构具有十分明显的优化效果。

1 结构设计

本文设计了一种采用合金弹簧钢材料制成的螺旋弹簧支撑环结构(见图 4)。该支撑环厚度为 0.4 mm, 径向刚度为 67.5 N/mm。外环通过激光焊的方式焊接在杜瓦外壳上, 内环与冷指之间保持单边 0.3 mm 的间隙。在支撑环的安装过程中不需要额外使用粘接胶, 因此工艺一致性较高, 并且不会增加材料放气。

当探测器的杜瓦组件受到较大量级的振动外力影响时, 冷指和冷头组成的悬臂梁结构会发生摆动。当摆动幅度达到一定程度时, 冷指

会与支撑环内环发生碰撞, 导致螺旋弹簧支撑环的内环与外环之间的螺旋弹簧结构产生形变, 使得振动带来的能量转换为螺旋弹簧的弹性势能并被吸收, 从而显著减小冷头摆动幅度, 降低铂铱丝引线受到过大应力、发生弯折或断裂的风险。

2 仿真分析

根据前面设计的结构进行 Ansys 仿真, 计算该结构的可靠性。本文主要以铂铱丝引线的受力和形变情况为标准进行理论分析。对比组为相同封装形式下不带螺旋弹簧支撑环的常规方案。铂铱丝的直径为 25 μm , 抗拉强度为 482 MPa。表 1 列出了仿真载荷加载条件。

表 1 17.6 grms 随机振动参数

频谱范围/Hz	振动幅值
20	0.04 g^2/Hz
20~50	6 dB/oct
50~800	0.25 g^2/Hz
800~2000	-6 dB/oct
2000	0.04 g^2/Hz
总均方根值	17.6 grms
加载时间	15 min/轴向
加载方向	3 轴向

为简化计算模型, 本文仅对一根铂铱丝受力最大的载荷加载方向进行仿真分析, 具体结果如图 5(a)和图 6(a)所示。仿真结果显示, 两种方案下铂铱丝的最大受力点均位于铂铱丝与陶瓷引线环的键合点。常规方案中杜瓦组件的最大受力为 646.04 MPa, 超过了铂铱丝材料的抗拉强度; 而在带非接触式螺旋弹簧支撑环的杜瓦组件中, 铂铱丝的最大受力约为 307 MPa, 小于材料本身的抗拉强度, 并有较大余量。相比于常规方案, 该方案下的最大应力降低了 52%。

形变也是反映铂铱丝可靠性的重要参考指标。根据图 5(b)和图 6(b), 两种方案中铂铱丝的最大形变均出现在引线弧顶部, 在常规方案中约为 4 mm, 而在带螺旋弹簧支撑环的方案中约为 1.7 mm, 下降了 57.5%。

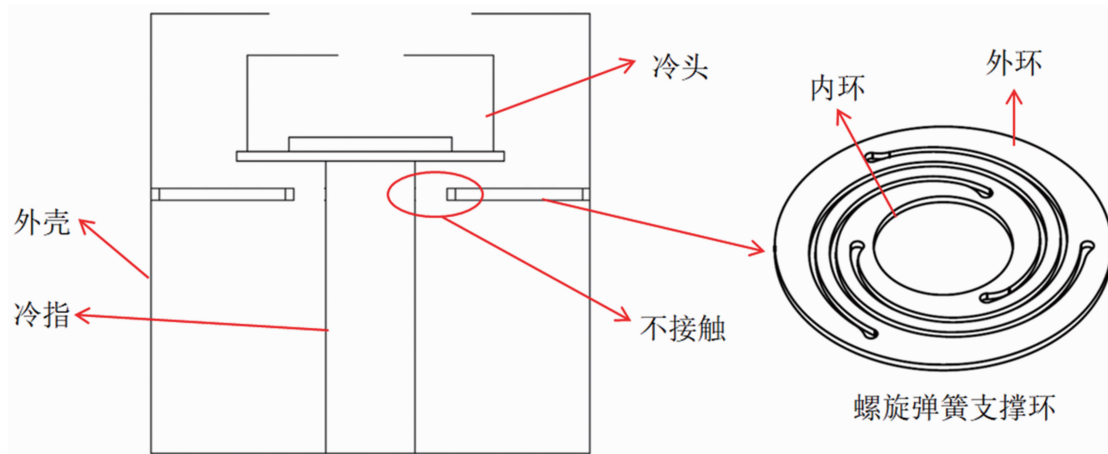


图 4 杜瓦组件的结构示意图

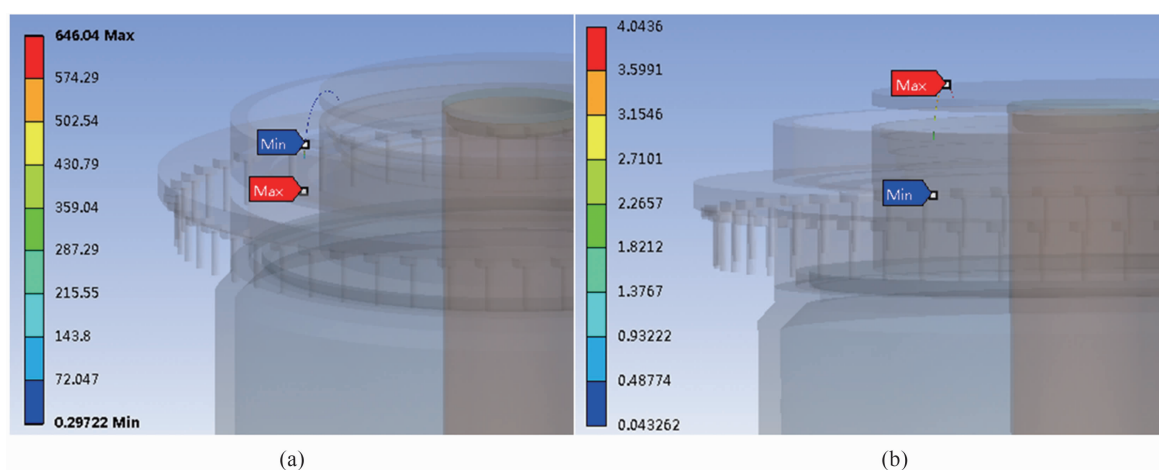


图 5 常规杜瓦组件仿真计算: (a)铂铱丝引线应力; (b)铂铱丝引线形变

考虑到冷指的薄壁特性, 在受到撞击应力的影响下, 存在变形和破坏风险。本文研究了碰撞时冷指与支撑环接触处的应力。由图 6(c) 得知, 冷指撞击处的应力约为 179 MPa, 远低于冷指钛合金材料的屈服强度(870 MPa)。

综上所述, 从仿真结果中可以看出, 杜瓦悬臂梁结构的可靠性得到了显著提升。

3 试验验证

3.1 试验流程

封装上述两种杜瓦组件各 8 个, 优化方案的实物如图 7 所示。为凸显优化结构, 图 7 中不含基板、芯片等常规结构。由于支撑环的内环与冷指冷端较近, 考虑到辐射漏热会增大杜瓦组件的漏热, 本文采用液氮称重法^[9]进行漏热测量和分析, 用于评价非接触式螺旋弹簧支撑环对杜瓦组件单位时间漏热的影响。

然后将上述两种方案的探测器平均分成两组, 每组包含两种方案的探测器各 4 个。对第一组的 8 个探测器进行 15 grms 耐久随机振动试验。试验前后对杜瓦进行管脚测试, 并在试验后将杜瓦开窗进行观察。表 2 列出了具体试验条件。

表 2 15 grms 随机振动试验参数

频谱范围/Hz	振动幅值
5	0.0226259 g^2/Hz
5~28	5.4 dB/oct
28~250	0.502798 g^2/Hz
250~2000	-9.78 dB/oct
2000	0.00754197 g^2/Hz
总均方根值	15 grms
加载时间	60 min/轴向
加载方向	3 轴向

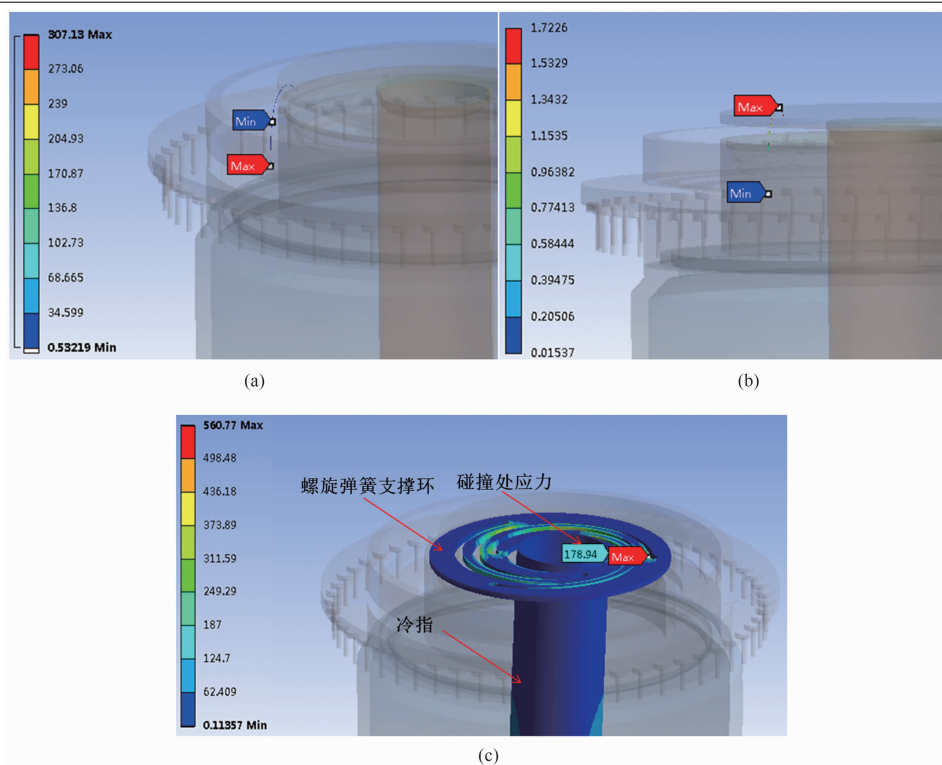


图 6 带螺旋弹簧支撑环的杜瓦组件仿真：(a)铂铱丝引线应力；(b)铂铱丝引线形变；(c)支撑环与冷指碰撞处应力



图 7 优化后杜瓦方案的实物图

对另一组的 8 个探测器进行 17.6 grms 短时间随机振动试验(试验条件见表 1)。为了评估螺旋弹簧支撑环对探测器振动过程中工作状态的影响,在振动过程中选取两种方案的各 1 个探测器进行焦温、功耗曲线监测。试验前后对杜瓦进行管脚测试,并在试验后将杜瓦开窗进行观察。

3.2 试验结果

图 9 所示为 16 个杜瓦的单位时间漏热情况,表 3 列出了详细数据。8 个常规杜瓦组件的单位时间漏热均值为 145.6 mW。8 个螺旋弹簧支撑环杜瓦组件的单位时间漏热均值为 147.1 mW,比常规杜瓦组件增加了 1%,对探测器性能和使用寿命的影响可以忽略不计。

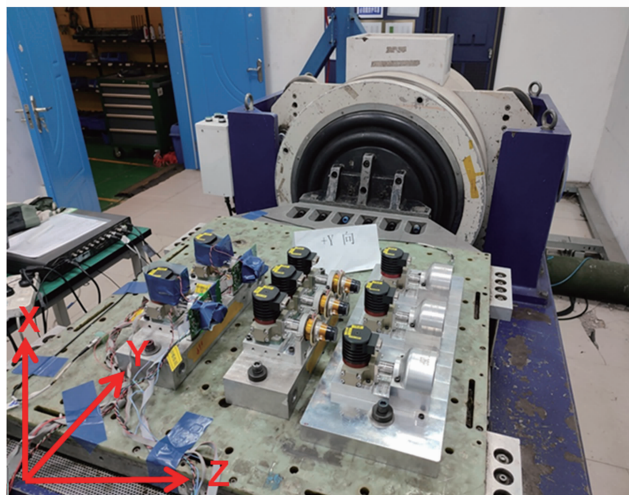


图 8 振动试验的实物图

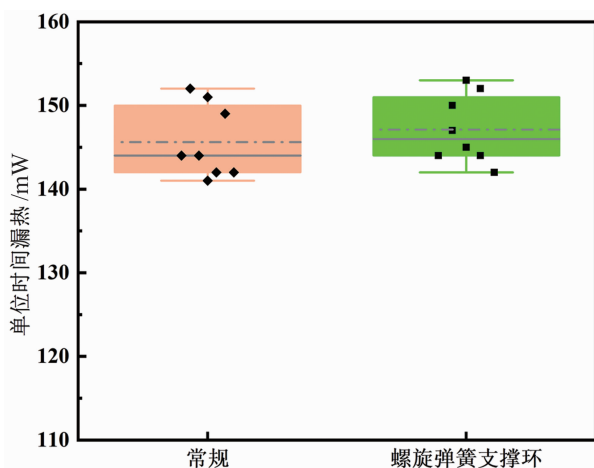


图 9 杜瓦组件漏热试验结果

表 3 杜瓦组件漏热试验参数

单位时间漏热/mW	
常规	带螺旋弹簧支撑环
142	145
151	147
144	144
152	153
142	144
149	142
141	150
144	152

经过 15 grms 耐久随机振动后, 第一组 8 个探测器中的 4 个常规杜瓦组件的铂铱丝引线出现部分断裂现象, 典型情况如图 10 所示。铂铱丝引线从陶瓷引线环的植球部位根部断裂, 这是由于该植球部位根部是引线连接力

学薄弱处。使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察断裂的铂铱丝(见图 11), 可以看到明显颈缩和剧烈塑形变形。铂铱丝直径从正常的 $25.55 \mu\text{m}$ 颈缩到 $22.28 \mu\text{m}$, 再到头部形成断面(断面宽度为 $6.66 \mu\text{m}$)。其余带螺旋弹簧支撑环的探测器振动后, 杜瓦的铂铱丝引线均无异常。

第二组 8 个探测器开机 7 min 后开始 17.6 grms 振动。在振动过程中选取两种方案各 1 个探测器进行焦温、功耗曲线监测。

如图 12(a)所示, 在常规方案探测器开始振动后, 功耗从 5.6 W 升至 6.2 W, 随后急剧下降。数据采集仪无法获取焦温数据, 推测是由于铂铱丝断线导致制冷机电控接收不到焦温信号, 所以焦温采集线路处于开环状态。

如图 12(b)所示, 带有非接触式螺旋弹簧支撑环结构的探测器在开始振动后, 功耗从 5.7 W 上升至最高的 6.4 W, 约 10 s 后在 6 W 附近波动, 并且波动范围为 $\pm 0.15 \text{ W}$ 。当停止振动 15 min 后, 功耗曲线恢复到振动前的稳定水平(5.7 W)。根据曲线显示结果, 在振动过程中探测器焦温几乎不受影响, 始终稳定在控温点 85 K, 并且波动范围为 $\pm 0.1 \text{ K}$ 。以上试验结果表明该结构下的探测器能够在振动前后保持正常工作状态。

在杜瓦开窗后发现, 4 个常规杜瓦组件的铂铱丝引线几乎全部被扯断, 而杜瓦冷指则从

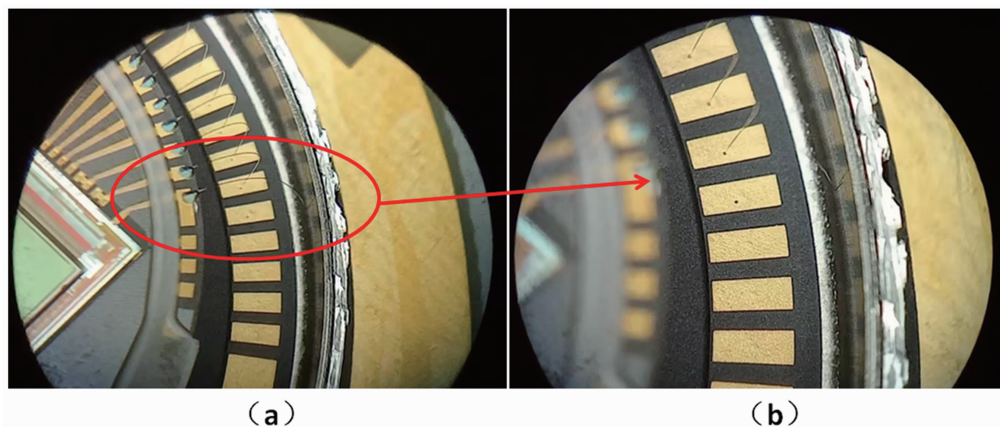


图 10 常规杜瓦组件的引线断裂情况

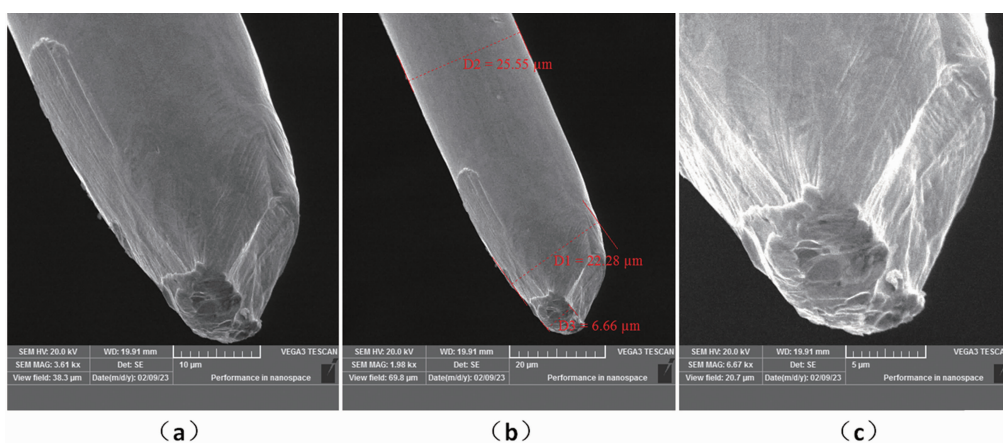


图 11 铂铱丝断口形态

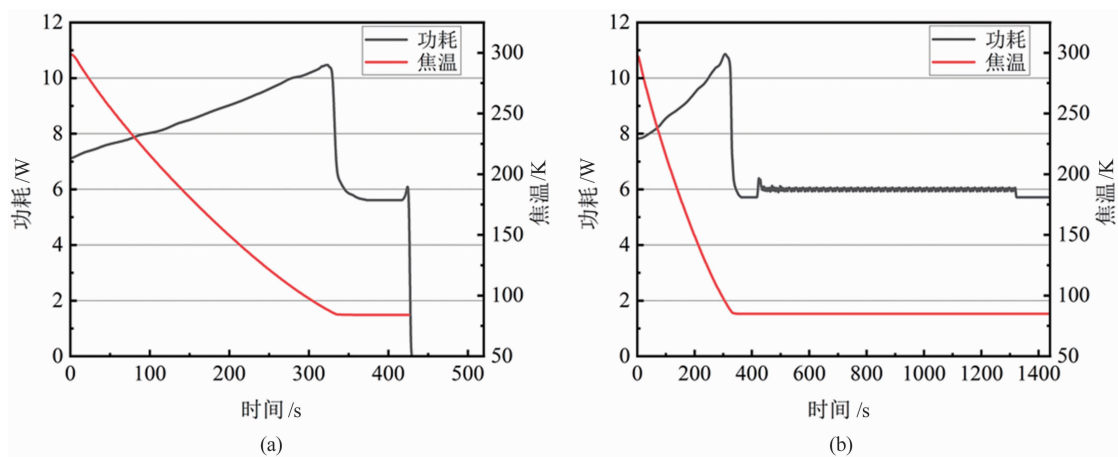


图 12 焦温、功耗曲线：(a)常规方案；(b)螺旋弹簧支撑环方案

根部折断，典型实例如图 13(a)所示。相比之下，带有螺旋弹簧支撑环的 4 个杜瓦组件的引线并无异常，典型实例如图 13(b)所示。

为了进一步验证冷指的薄壁在受到螺旋弹簧支撑环的撞击影响下是否会发生变形，我们对经过 17.6 grms 振动试验后的杜瓦组件进行

了车床加工，并观察了碰撞处的冷指形貌(典型案例见图 14)。振动试验后，冷指碰撞处出现轻微划痕，但并未出现明显变形。接下来可以考虑在支撑环的内环采用倒圆角等方式来减少划痕损伤情况的发生。

根据以上试验结果可知，常规杜瓦组件的

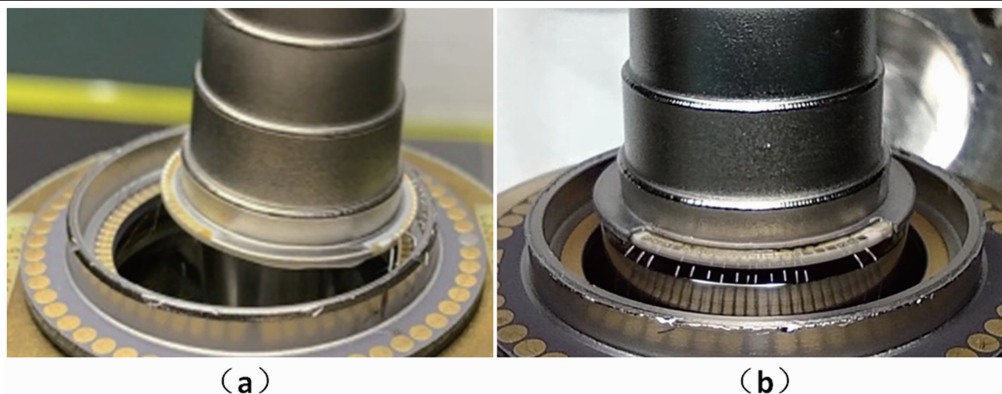


图 13 铂铱丝引线外观: (a)常规方案; (b)螺旋弹簧支撑环方案



图 14 冷指碰撞处的外观形貌

悬臂梁结构可靠性较差, 在大量级振动过程中, 不仅引线几乎全部变形、断裂, 冷指根部也会发生断裂。非接触式螺旋弹簧支撑环方案几乎不增加漏热, 在 17.6 grms 振动试验过程中焦温稳定, 能保持正常的工作状态。整个悬臂梁结构在全部振动试验后没有发生破坏性的异常情况。

4 结束语

本文采用带有非接触式螺旋弹簧支撑环的杜瓦组件后, 单位时间漏热均值比常规杜瓦组件仅增加了 1%, 对探测器的制冷性能和使用寿命的影响较小。此外, 结构能承受住 15 grms 的耐久随机振动和 17.6 grms 的短时间大量级随机振动试验。在 17.6 grms 振动试验过程中焦温稳定, 能保持正常的状态工作。针对碰撞过程中产生的细小划痕问题, 后续可以通过倒圆角等方式进行改善。试验结果证明, 该类型的结构对红外探测器杜瓦组件的悬臂梁结构强度可以产生显著的优化效果。在工程应用中, 相较于传统的直接接触式支撑结构, 本研

究展现出了良好的效果, 未来可进行大规模验证和推广。另外还可探索更合适的材料和结构, 进一步优化本研究。

参考文献

- [1] 刘伟, 牛誉霏, 肖龙龙, 等. 红外焦平面阵列及星载红外成像系统的发展 [J]. 红外, 2021, 42(11): 15-24.
- [2] 孙伟伟, 杨刚, 陈超, 等. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析 [J]. 遥感学报, 2020, 24(5): 479-510.
- [3] 刘箴, 吴馨远, 陈士超, 等. 典型红外精确制导武器发展分析 [J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(1): 19-27.
- [4] 宋平. 基于卫星、火箭和气球探测资料的我国临近空间大气环境特征分析 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [5] 张旗. 红外成像制导技术的应用研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [6] 陈芳, 高超, 罗世魁. 大面阵红外焦平面杜瓦冷指支撑结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 1-7.
- [7] 张杨文, 沈星, 洪晓麦, 等. 红外探测器杜瓦组件的力学薄弱结构优化设计方法 [J]. 红外, 2023, 44(8): 20-27.
- [8] Fred N, Arn A, Thomas C, et al. Ruggedized Dewar design and construction for rocket launch survival [C]. SPIE, 2019, 11002: 1100207.
- [9] Willems D, Garcia S, Arts R, et al. Theoretical and experimental analysis of Dewar thermal properties [C]. SPIE, 2019, 11002: 1100208.