

文章编号: 1672-8785(2023)08-0020-08

## 红外探测器杜瓦组件的力学薄弱 结构优化设计方法

张杨文 沈 星 洪晓麦 程海玲 李云鹏 周 恩  
李明畅 曾 卓 黄 昊 黄 立\*

(武汉高德红外股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

**摘 要:** 通过对探测器杜瓦组件的悬臂梁结构进行理论分析, 提出了杜瓦组件力学薄弱结构的优化设计方法, 并利用 Ansys 软件对优化前后的杜瓦组件结构进行了模拟分析。结果表明, 杜瓦组件的模态一阶基频大幅提高, 比平行支撑结构的组件增加了 130%, 比常规无支撑结构的组件增加了 317%。通过试验验证后发现, 杜瓦组件的抗振动性能也得到了大幅提高, 可以抗住 15g 的耐久随机振动、17.6g 的短时大量级随机振动以及 2000g 的机械冲击。

**关键词:** 红外探测器; 杜瓦; 振动; 机械冲击

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.08.003

### Optimal Design Method of Mechanical Weak Structure in Infrared Detector-Dewar Assembly

ZHANG Yang-wen, SHEN Xing, HONG Xiao-mai, CHENG Hai-ling, LI Yun-peng, ZHOU En,  
LI Ming-chang, ZENG Zhuo, HUANG Hao, HUANG Li\*  
(Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Based on the theoretical analysis of the cantilever beam structure of the detector-dewar assembly, the optimal design method of the mechanical weak structure of the dewar assembly is proposed, and Ansys software is used to simulate the structure of the dewar assembly before and after optimization. The results show that the modal first order fundamental frequency of dewar assemblies is significantly increased, which is 130% higher than that of parallel supported assemblies and 317% higher than that of conventional unsupported assemblies. Through the test verification, it is found that the vibration resistance of dewar assemblies has also been greatly improved, and 15g durable random vibration, 17.6g short-term mass random vibration as well as 2000g mechanical impact can be resisted.

**Key words:** infrared detector; dewar; vibration; mechanical impact

收稿日期: 2023-03-28

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

\*通讯作者: E-mail: 312094306@qq.com

## 0 引言

近年来, 成像质量高、抗干扰能力强的红外遥感相机在卫星、机载、陆军夜视作战等领域得到了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。然而, 红外探测器杜瓦组件中的基板和冷屏等功能件均组装在冷指气缸的顶端, 形成了一种悬臂梁结构, 导致航空航天等大量级振动、冲击应用场景中可能会出现冷头部位脱落、电极引线弯折与断裂、冷指根部断裂等问题。

因此, 国内外专家学者开展了一系列研究。比如, 陈芳等人在大面阵制冷型红外探测器的

杜瓦组件中设计了一种玻璃纤维材质的冷指支撑结构(见图 1), 在减少杜瓦组件漏热的前提下提高了组件的一阶基频(达到 358 Hz)<sup>[5]</sup>。张磊等人介绍了一种传统的带支撑杆的小型杜瓦组件(见图 2)。其中的支撑杆设计在杜瓦组件的外壳与冷指顶部之间<sup>[6]</sup>。但是支撑杆的缺点在于两端之间的粘接形态一致性差, 导致力学可靠性低。Fred N 等人为了追求较高的结构强度, 通过在太空探索用杜瓦组件中引入基于 Inconel 718 高强度镍基合金的平行支撑环(见图 3)来对冷指悬臂梁结构进行加固<sup>[7]</sup>。

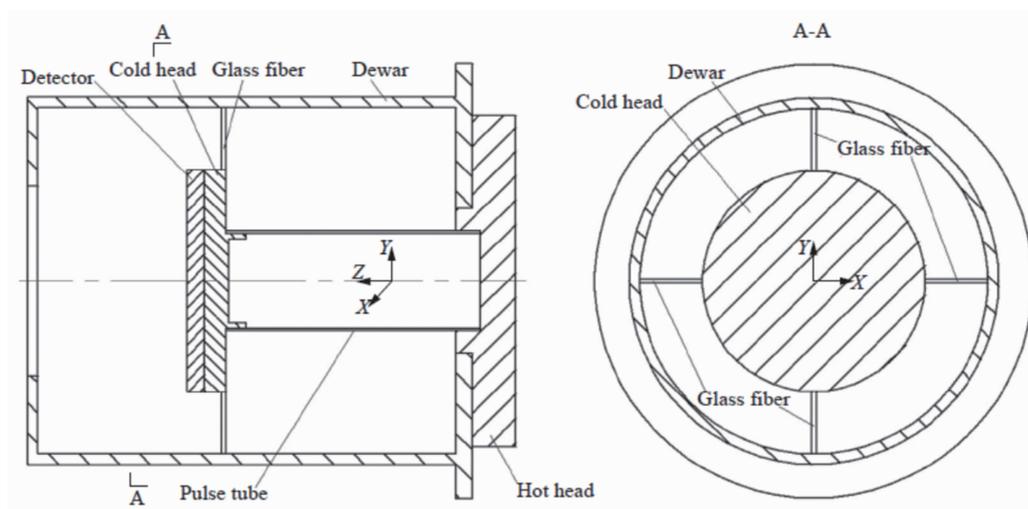


图 1 玻璃纤维支撑结构<sup>[5]</sup>

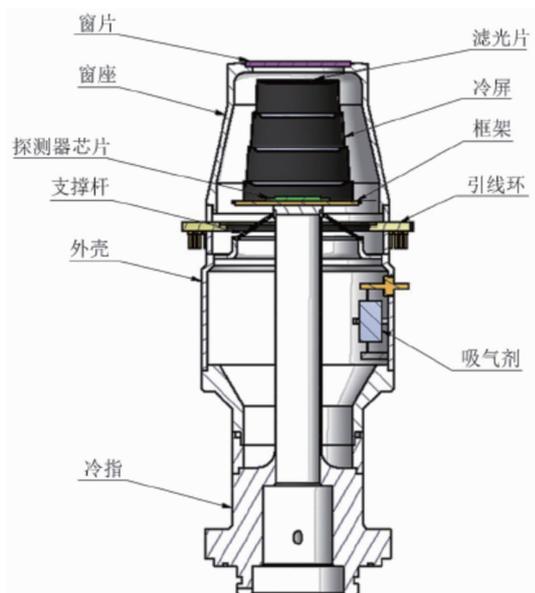


图 2 小型杜瓦组件的构成与支撑结构<sup>[6]</sup>

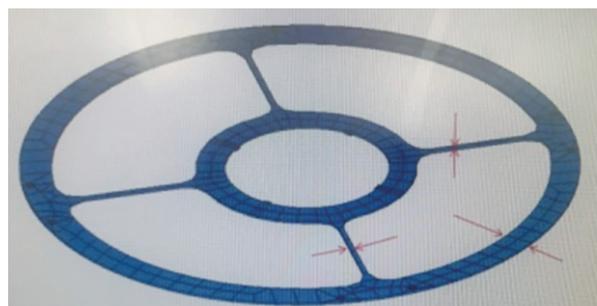


图 3 金属支撑环结构<sup>[7]</sup>

本文在上述研究的基础上提出了一种斜支撑环结构。结合合理的材料选择和仿真分析, 从理论上可以提高杜瓦组件的结构强度。通过漏热试验以及长时间、大量级的振动和冲击试验对其进行了验证。结果表明, 与常规结构相比, 斜支撑环结构具有十分明显的优化效果。

表 1 备选的支撑材料及其参数

材料	热导率/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	屈服强度/MPa	平均膨胀系数/( $1/\text{K}$ )	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
玻璃钢	0.4	—	$4\times 10^{-6}$	1750
钛合金	7.96	860	$8.6\times 10^{-6}$	4510
氧化锆	2.03	—	$10\times 10^{-6}$	5850
Inconel 718	14.7	550	$11.8\times 10^{-6}$	8240

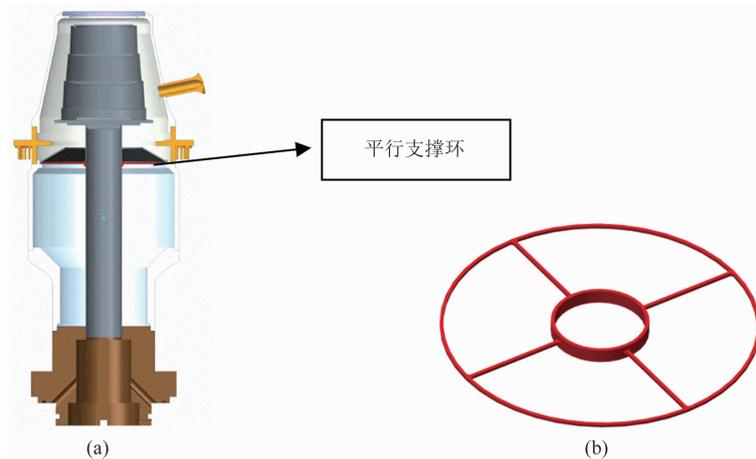


图 4 (a)带平行支撑环的杜瓦组件的结构示意图；(b)平行支撑环

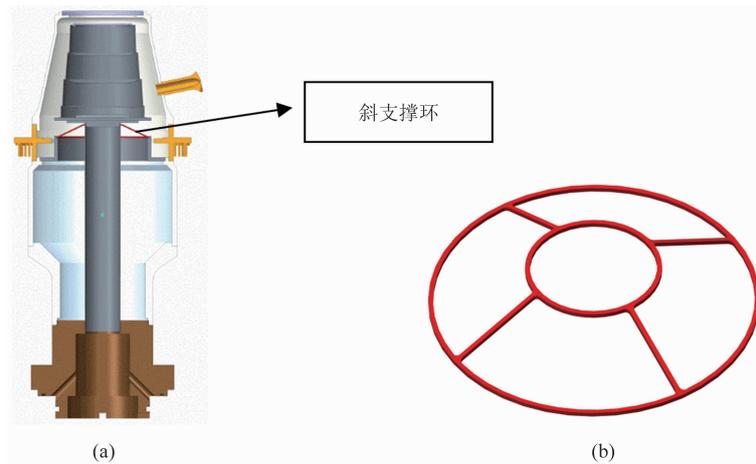


图 5 (a)带斜支撑环的杜瓦组件的结构示意图；(b)斜支撑环

## 1 抗大量级振动支撑环设计

### 1.1 材料选择

在工程化空间红外探测器的杜瓦组件中，为了提高结构力学可靠性，各种低热膨胀系数、低热导率、高强度的低漏热支撑材料得到了广泛的应用<sup>[8]</sup>。表 1 列出了备选的支撑材料及其参数。其中，玻璃钢的热导率最低，但是其组成成分为放气率较高的高分子复合材料，不利于杜瓦组件高真空度的维持。氧化锆的热导率次之，但可加工性较差，不利于工程应

用。Inconel 718 材料的热导率过高，会导致杜瓦组件漏热严重。因此，本文选择可加工性能好、热导率适中的钛合金作为支撑环材料。

### 1.2 结构设计

本文设计了两种支撑结构：一是平行支撑环。支撑杆处于同一水平面上，在杜瓦组件横向抗振动性能的提升上有较大优势(见图 4)。二是斜支撑环。由于支撑杆有一定的倾斜角度，形成类似三角形的结构加强支撑方式，预期结构加强效果会优于平行支撑环方案(见图

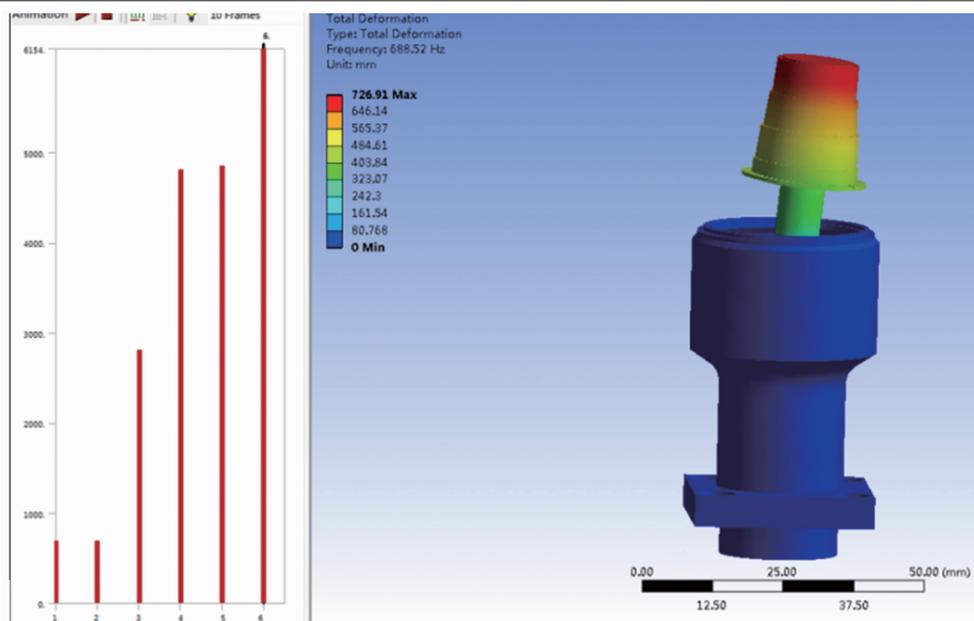


图 6 常规不带支撑环的杜瓦组件的仿真计算结果

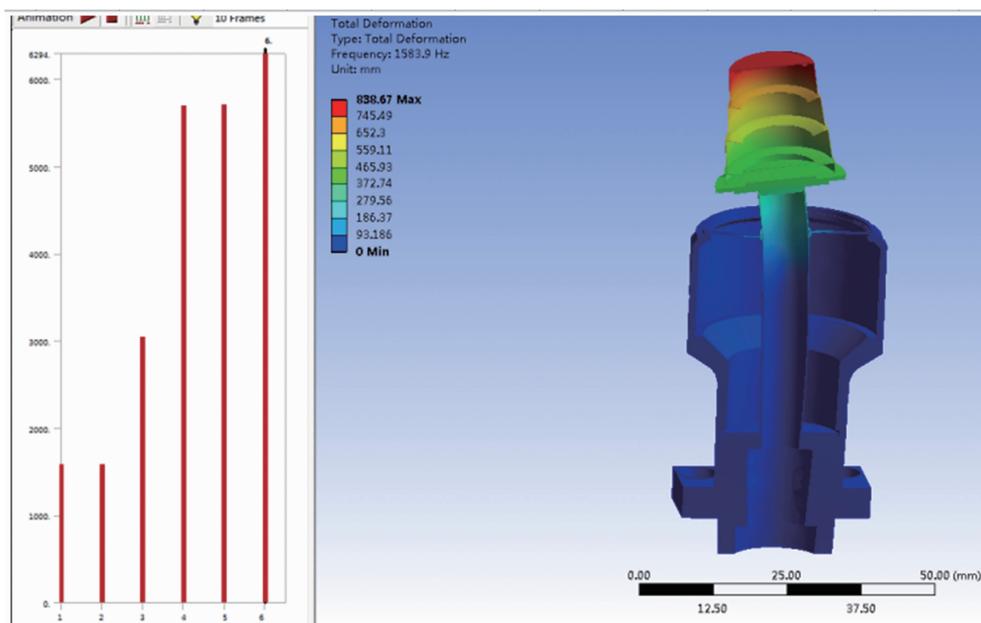


图 7 带平行支撑环的杜瓦组件的仿真计算结果

5)。不同支撑环中间的支撑杆的厚度和宽度一致, 均为 0.3 mm。对比组为不带支撑环的杜瓦组件。

下面根据以上设计的结构, 利用 Ansys 软件对其可靠性进行仿真计算。图 6 所示为常规不带支撑环的杜瓦组件的仿真结果, 其一阶基频为 689 Hz; 图 7 所示为带平行支撑环的杜瓦组件的仿真结果, 其一阶基频为 1584 Hz, 比常规方案提升了 130%; 图 8 所示为带斜支撑

环的杜瓦组件的仿真结果, 其一阶基频为 2873 Hz, 比常规方案增加了 317%, 结构强度的可靠性得到大幅提升。

## 2 试验验证

### 2.1 试验流程

分别封装上述三种杜瓦组件各 9 个, 选取部分杜瓦并采用液氮称重法<sup>[9]</sup>测量其在 77 K 时的漏热情况。然后将所有杜瓦与制冷机耦合成探测器, 分三组进行大量级振动试验。图 9

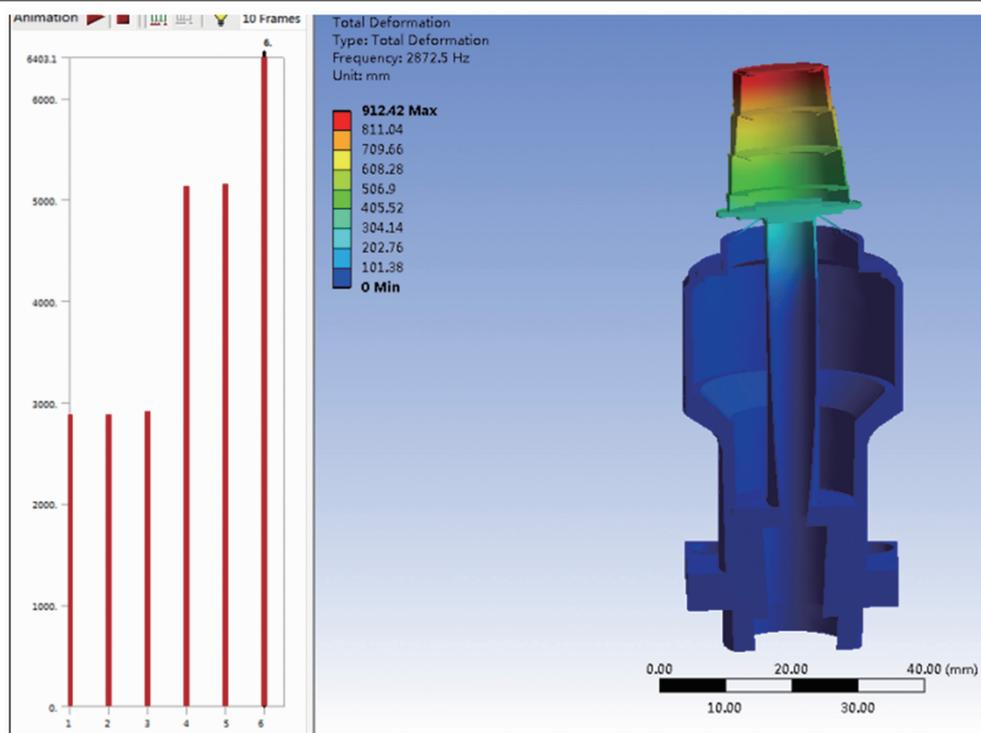


图 8 带斜支撑环的杜瓦组件的仿真计算结果

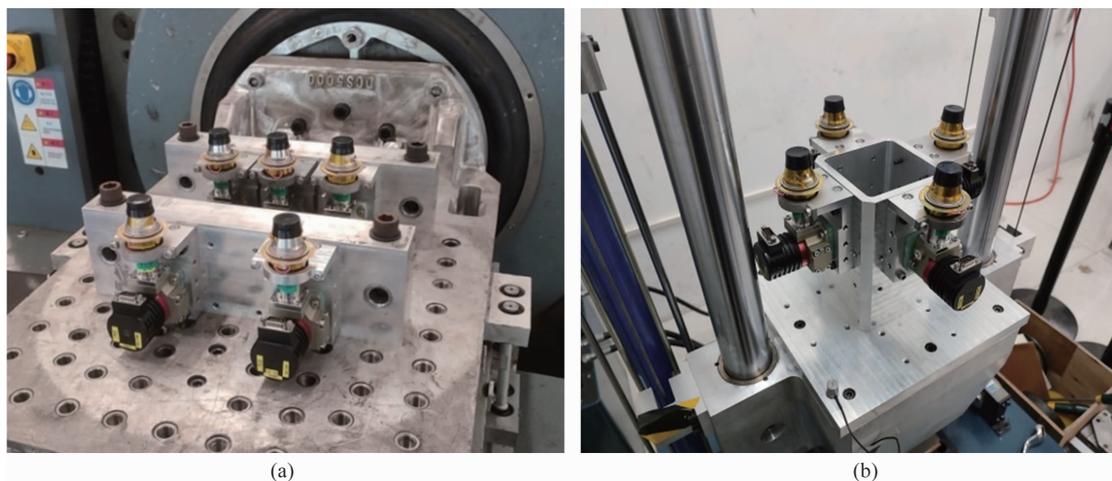


图 9 (a)振动试验现场；(b)冲击试验现场

为探测器振动试验及冲击试验的现场照片。

对其中一组的 9 个探测器进行 15g 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。

对另一组的 9 个探测器进行 17.6g 短时间随机振动试验。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 3 列出了具体试验条件。

表 2 15g 随机振动试验条件

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

表 3 17.6g 随机振动试验条件

频谱范围/Hz	振动幅值
20	0.04g <sup>2</sup> /Hz
20~50	6dB/oct
50~800	0.25g <sup>2</sup> /Hz
800~2000	-6dB/oct
2000	0.04g <sup>2</sup> /Hz
总均方根值	17.6g
加载时间	持续时间为 2min/轴向
加载方向	3 轴向

对最后一组的 9 个探测器进行机械冲击试验。试验方向为三轴六向, 每向 5 次脉冲冲击。依次按照 A、B、C 的步进应力顺序进行冲击试验。表 4 列出了冲击脉冲的峰值加速度和脉冲宽度条件。试验前后对杜瓦进行管脚测试, 并在管脚出现异常后将杜瓦开窗进行观察。

表 4 机械冲击试验条件

试验条件	峰值加速度	持续时间	波形
A	1000g	1 ms	半正弦
B	1500g	1 ms	半正弦
C	2000g	1 ms	半正弦

## 2.2 试验结果

在杜瓦组件悬臂梁结构的顶部增加支撑环会增大杜瓦组件的漏热, 导致制冷机的负荷变大, 对维持探测器长时间低温稳定工作十分不

利。因此, 本文研究了上述不同方案对杜瓦组件单位时间漏热的影响。图 10 展示了 3 种不同封装状态的共 18 个杜瓦组件的单位时间漏热情况(详细数据见表 5)。6 个常规杜瓦组件的单位时间漏热均值为 145.5 mW。带平行支撑环的杜瓦组件的单位时间漏热均值为 198.5 mW, 比常规杜瓦组件增加了 36.4%。因此, 平行支撑环对杜瓦组件漏热的影响较大。带斜支撑环的杜瓦组件的单位时间漏热均值为 158.5 mW, 只比常规杜瓦组件增加了 8.9%。因此, 斜支撑环对杜瓦组件漏热的影响较小。

表 5 杜瓦组件漏热试验结果

单位时间漏热/mW		
常规	平行支撑环	斜支撑环
152	198	153
141	206	158
149	195	159
142	194	162
147	202	153
142	196	166

第一批 9 个探测器经过 15g 长时间随机振动后, 3 个常规杜瓦组件的引线均出现少部分引线断裂的现象。图 11 所示为断裂情况, 从植球部位根部断裂, 植球没有脱离键合引脚。断裂原因可能是振动过程中冷头摆动幅度过大,

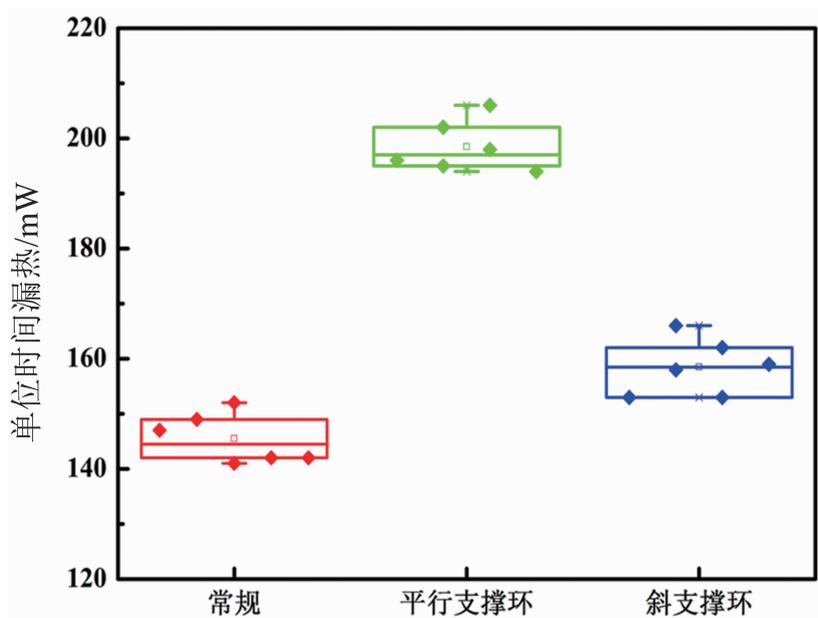


图 10 杜瓦组件漏热试验结果

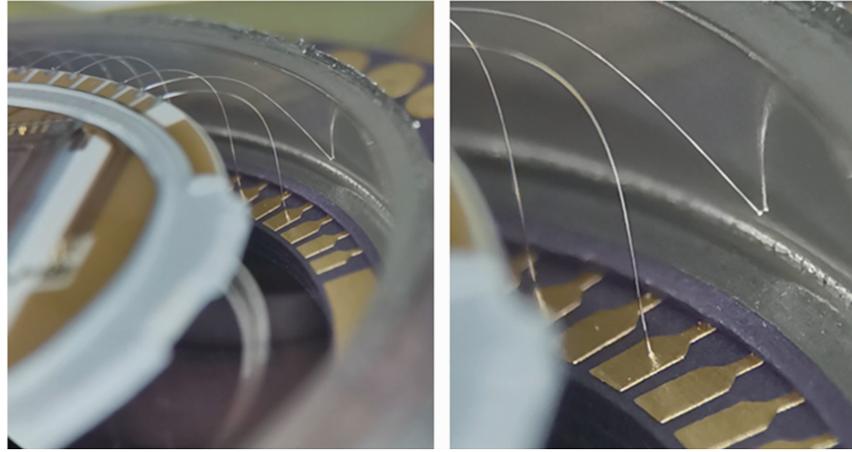


图 11 常规杜瓦组件的引线断裂情况

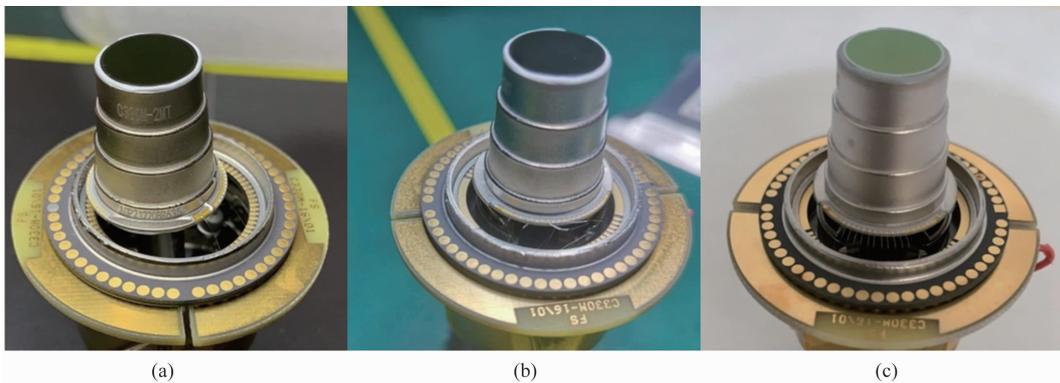


图 12 (a)常规杜瓦组件；(b)带平行支撑环的杜瓦组件；(c)带斜支撑环的杜瓦组件

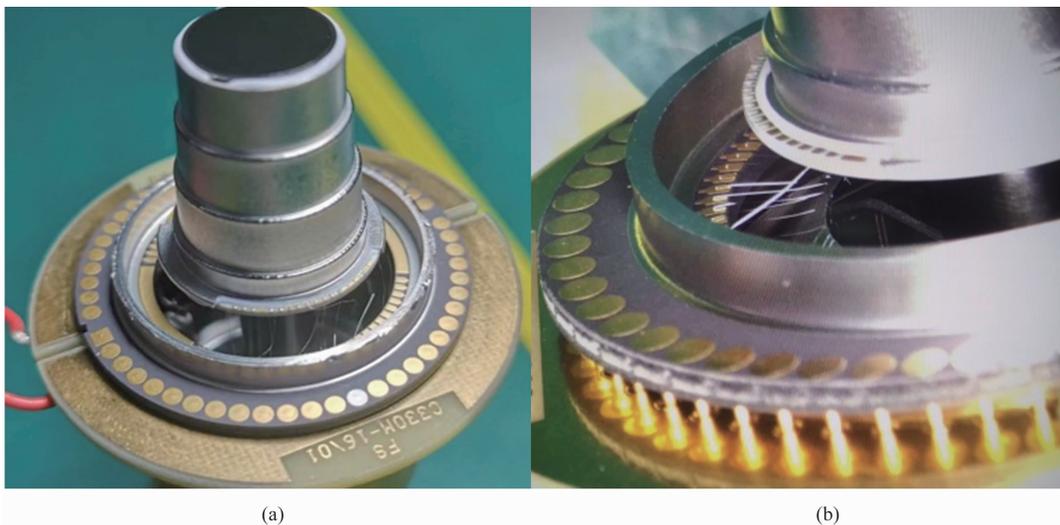


图 13 (a)常规杜瓦组件；(b)带平行支撑环的杜瓦组件

将引线扯断。植球部位根部为引线连接的力学薄弱处，植球本身可以经受住 15g 的耐久振动。其余的带平行支撑环的杜瓦组件以及带斜支撑环的杜瓦组件振动后，引线均无异常。

第二批 9 个探测器经过 17.6g 振动后，3 个常规杜瓦组件的冷指根部均断裂，引线几乎全部扯断(典型实例见图 12(a))，3 个带平行支撑环的杜瓦组件的引线全部断裂(典型实例

见图12(b)), 3个带斜支撑环的杜瓦组件的引线无异常(典型实例见图12(c))。

第三批9个探测器经过了冲击试验, 3个常规杜瓦组件在持续时间为1 ms的1000g机械冲击后引线几乎全部扯断(典型实例见图13(a)); 3个带平行支撑环的杜瓦组件在持续时间为1 ms的1000g冲击试验后管脚正常, 而经过持续时间为1 ms的1500g冲击试验后引线全部断裂, 支撑杆发生弯折(典型实例见图13(b)); 3个带斜支撑环的杜瓦组件经过全部步进应力机械冲击试验后管脚正常, 开窗观察后发现引线无异常。

根据试验结果可知, 由于没有支撑结构, 常规杜瓦组件在大量级振动、冲击过程中, 不但引线几乎全部断裂, 而且冷指根部也会断裂。对于带平行支撑环的杜瓦组件, 支撑环起到了一定的支撑作用, 但是加强作用有限。而斜支撑环则起到了决定性的支撑作用, 整个悬臂梁结构在振动、冲击试验后没有发生任何异常。以上试验结果表明, 斜支撑环方案能够提升杜瓦组件的抗大量级振动、冲击性能。

### 3 结束语

本文从理论上分析了杜瓦组件悬臂梁支撑结构的优化设计方法, 发现采用斜支撑环方案对加强结构强度最有利。当采用钛合金斜支撑环方案时, 杜瓦组件的单位时间漏热均值比常规杜瓦组件只增加了8.9%, 对制冷机的影响较小。同时, 该方案能抗住15g的耐久随机振动、17.6g的短时间大量级随机振动以及持续时间为1 ms的2000g机械冲击试验。结果表明, 斜支撑环方案对杜瓦组件力学薄弱结构的

强度提升效果十分明显。在工程化应用中, 为了进一步优化红外探测器杜瓦组件的力学薄弱结构, 下一步的研究重点是寻找热导率更低、放气率更低、可加工性良好、强度高的材料。

### 参考文献

- [1] 刘伟, 陈剑, 孟令伟, 等. 一种高分辨率红外探测器组件的扰动抑制设计 [J]. *红外*, 2022, **43**(1): 11-16.
- [2] 马俊, 朱猛, 王才喜, 等. 临近空间光电探测技术与发展展望 [J]. *空天技术*, 2022, **51**(2): 85-96.
- [3] 陈鹏, 宋愿赞, 李文静, 等. 临近空间高速侦察与监视载荷技术研究综述 [J]. *战术导弹技术*, 2021, **42**(1): 7-12.
- [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] 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.
- [6] 张磊, 王冠, 付志凯. 红外探测器杜瓦的小型化设计方法 [J]. *红外*, 2020, **41**(9): 15-19.
- [7] Fred N, Arn A, Thomas C, et al. Ruggedized Dewar design and construction for rocket launch survival [C]. *SPIE*, 2019, **11002**: 1100207.
- [8] 李俊. 超大规模线列红外焦平面杜瓦封装关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2021.
- [9] Willems D, Garcia S, Arts R, et al. Theoretical and Experimental Analysis of Dewar Thermal Properties [C]. *SPIE*, 2019, **11002**: 1100208.