

文章编号: 1672-8785(2025)04-0027-06

低热负载红外探测器渐变 壁厚冷指结构设计

岳 晨 闫 杰 王 冠 方志浩

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着制冷型红外探测器研制水平的提高, 对杜瓦结构提出了低漏热的需求。通过力学仿真与传导热负载理论分析, 提出了一种低热负载红外探测器渐变壁厚冷指结构设计, 并探究了渐变壁厚冷指的外径渐变位置对力学可靠性与传导漏热的影响。结果表明, 若采用大量级振动条件, 则渐变壁厚冷指的外径渐变位置可适当上移, 以增强结构的稳定性; 若采用小量级振动条件, 则外径渐变位置可适当下移。在满足力学可靠性的前提下, 进一步降低热负载, 并进行了组件优化验证。该结构在保证力学可靠性的前提下, 可将杜瓦静态热负载降低 15%~18%。

关键词: 红外探测器; 冷指; 传导热负载

中图分类号: TN2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.04.004

Design of Cold Finger Structure with Gradient Wall Thickness for Low Heat Load Infrared Detectors

YUE Chen, YAN Jie, WANG Guan, FANG Zhi-hao

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: With the improvement of the development level of cooled infrared detectors, the demand for low heat leakage has been put forward for the dewar structure. Through mechanical simulation and theoretical analysis of conduction heat load, a design of cold finger structure with gradient wall thickness for low heat load infrared detectors is proposed, and the influence of the outer diameter gradient position of the cold finger with gradient wall thickness on mechanical reliability and conduction heat leakage is explored. The results show that if a large-scale vibration condition is adopted, the outer diameter gradient position of the cold finger with gradient wall thickness can be appropriately moved up to enhance the stability of the structure; if a small-scale vibration condition is adopted, the outer diameter gradient position can be appropriately moved down. Under the premise of meeting mechanical reliability, the heat load is further reduced, and the component optimization verification is carried out. Under the premise of ensuring mechanical reliability, this structure can reduce the static heat load of the dewar by 15% to 18%.

Key words: infrared detector; cold finger; conduction heat load

收稿日期: 2024-09-26

作者简介: 岳晨(1996-), 男, 北京人, 硕士, 主要从事红外探测器封装技术研究。

E-mail: 2984373027@qq.com

0 引言

近年来, 由于红外探测器具有环境适应性强、隐蔽性好、灵敏度高等特点, 在航天、国防等领域已有广泛应用^[1-4]。随着红外探测器杜瓦研制水平的提高, 人们对杜瓦低漏热设计提出了越来越高的要求。探测器组件工作时制冷机提供冷量, 通过杜瓦冷指传递给探测器芯片。杜瓦内部的真空夹层避免了由对流造成的冷量损耗。

关于杜瓦冷指设计已有相关研究。比如, 林日东^[5]等开展杜瓦冷指结构优化设计, 通过仿真与实测来优化冷指选用材料和设计壁厚。将 TC4 用作冷指材料且冷指薄壁厚度为 0.2 mm 时, 可保证冷头面的最大位移量小于 5 μm 。陈俊林^[6]等选用 TC4 开展冷指芯柱材料试验。结果表明, 相对于不锈钢材质, TC4 芯柱的传导漏热可降低 50% 左右。孙闻^[7]等分析了冷指传导漏热计算公式, 并计算了 40~300 K 状态下不同冷指材料的传导漏热。综合以上研究, 由于 TC4 材料低热导率的特性, 研究人员更倾向于使用 TC4 作为冷指材料。但 TC4 材料刚度差于 1Cr18Ni9Ti 与 L605, 因此使用 TC4 作为冷指材料时力学可靠性能否满足项目指标要求需要作进一步研究。

对于冷指薄壁结构设计, 需同时考虑冷指结构的刚度与传导漏热问题。传统的冷指薄壁通常设计成上下等宽的薄壁结构。若薄壁结构过薄, 则在力学振动条件下较容易发生变形和晃动, 导致冷头面位移, 支撑结构应力增大, 焦面产生位移。若薄壁结构过厚, 杜瓦传导热负载增加, 对制冷机冷量提出了更高的要求。基于上述问题, 本文提出了一种低热负载渐变壁厚冷指结构设计。在满足力学可靠性的前提下, 该设计可有效降低杜瓦热负载值。

1 冷指支撑结构的主要作用

为保证探测器芯片的工作性能, 给其提供超低温与超高真空的工作环境, 通常将探测器芯片封装在金属微杜瓦壳体中。如图 1 所示,

探测器芯片封装在杜瓦冷指端面, 杜瓦冷指与杜瓦壳体中间形成真空夹层, 避免由于对流传热造成的制冷机冷量损耗。微杜瓦与制冷机耦合, 形成红外探测器组件。杜瓦冷指一方面作为探测器芯片承载的主要支撑结构, 在随机振动、冲击等力学环境试验下, 仍能保持焦面的稳定性。另一方面, 杜瓦冷指用作连接探测器芯片与制冷机的中间载体, 制冷机冷指通过杜瓦冷指将冷量传递到探测器芯片, 然而由探测器与外部环境之间的热导引起的冷量损耗不可避免。根据理论设计值, 冷指部分的冷量损耗通常占杜瓦漏热的 50% 以上^[5]。故在冷指设计中需同时考虑结构刚度稳定性与传导漏热的问题。

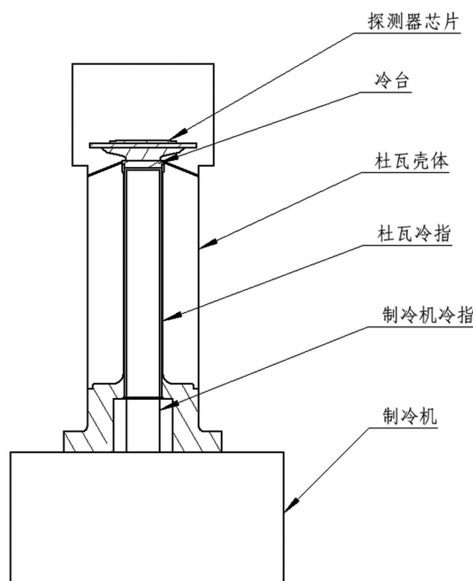


图 1 红外探测器组件的结构示意图

2 传统冷指与渐变壁厚冷指的性能对比

2.1 传统冷指结构设计

在传统冷指结构设计中, 由于考虑到加工便捷性等问题, 通常设计成上下等宽壁厚的结构; 而且为了尽可能降低杜瓦的传导漏热, 冷指薄壁通常选用导热性能较差的金属材料, 如 TC4、L605、1Cr18Ni9Ti 等(物理参数见表 1)。冷指薄壁结构通常设计成悬臂梁超薄壁结构。该结构需具有足够大的刚度, 以保证在力学试验条件下的结构稳定性。

表 1 常用冷指薄壁金属材料的物理参数

材料名称	弹性模量/GPa	导热率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
TC4	113	5.44	4.45
L605	225	9.4	9.13
1Cr18Ni9Ti	201	48	7.89

表 2 试验冷指状态选取

冷指编号	冷指状态	冷指管材料
1	上下等宽壁厚冷指, 壁厚为 0.125 mm, 原状态	L605
2	上下等宽壁厚冷指, 壁厚为 0.125 mm, 原状态基础上仅更换冷指管材料	TC4
3	渐变壁厚冷指, 渐变位置 $H=25$ mm	TC4
4	渐变壁厚冷指, 渐变位置 $H=40$ mm	TC4
5	渐变壁厚冷指, 渐变位置 $H=55$ mm	TC4
6	在 4 号冷指基础上加大冷指管与冷指底座连接位置的圆角, 由 R_2 增大到 R_5	TC4

2.2 渐变壁厚冷指结构设计

为保证力学可靠性的前提下, 降低杜瓦传导热负载值, 提出一种渐变壁厚冷指结构设计。本文以 $640 \times 512 @ 15 \mu\text{m}$ 红外探测器杜瓦组件为例进行冷指结构优化设计。杜瓦结构如图 2 所示。该杜瓦是一款采用小型化设计的组件。杜瓦原结构所用冷指管为上下等宽壁厚的薄壁结构, 冷指管壁厚为 0.125 mm, 冷指管长度为 40.4 mm, 冷指安装面到冷指顶部的高度为 61.2 mm。为满足结构刚度的稳定性要求, 冷指管薄壁材料为 L605。由于杜瓦冷指内壁需要与制冷机冷指外壁尺寸匹配, 且二者高度方向尺寸同样需要匹配, 故杜瓦冷指内径尺寸及冷指薄壁高度尺寸不易优化, 因此仅优化杜瓦冷指外径尺寸。

为降低杜瓦传导热负载, 优化后的冷指薄壁材料选用导热率更低但结构刚度略差的 TC4 材料。优化后的冷指薄壁结构如图 3 所示。冷指管薄壁共分为两部分: 上部分为等宽的薄壁结构, 壁厚为 0.125 mm; 下部分为渐变壁厚结构, 壁厚由 0.125 mm 渐变至 0.3 mm。为探究合理的外径壁厚渐变位置, 选取 6 种不同状态冷指开展力学与传导漏热理论研究。冷指状态如表 2 所示。

2.3 力学对比

使用 ANSYS 有限元分析软件进行探测器杜瓦组件力学可靠性分析。仿真模型如图 4 所

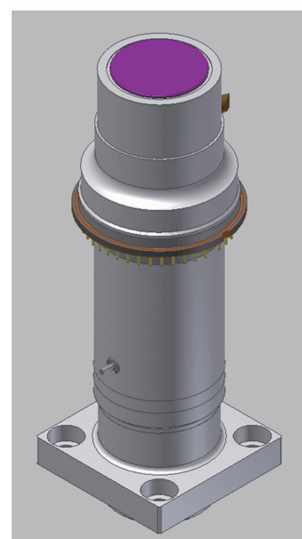


图 2 红外探测器杜瓦组件示意图

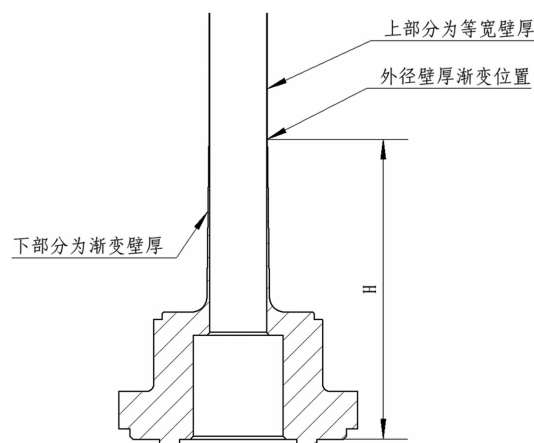


图 3 渐变壁厚冷指结构设计

示。本文以探测器杜瓦组件在受到一定载荷情况下的焦面位移情况来评估杜瓦结构的稳定

性。以冷指耦合面为固定约束面,施加的力学振动条件如下:(1)10~100 Hz, 3 dB/oct;(2)100~600 Hz, 0.04 g²/Hz;(3)600~2000 Hz, -3 dB/oct。施加载荷的方向为探测器芯片短边方向。力学仿真结果如表 3 与图 5 所示。

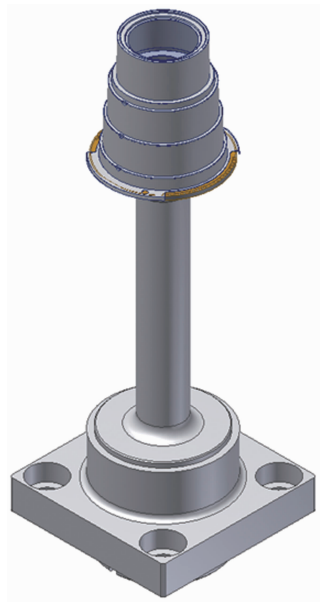


图 4 仿真模型

2.4 传导热负载对比

微杜瓦内部为真空结构,其传导热负载包括固体传导、对流和辐射热三部分。忽略辐射热和对流的影响,只考虑由冷指结构热传导引起的漏热。固体热传导计算公式为

$$Q = \frac{S}{L} \int_{T_2}^{T_1} k dT \quad (1)$$

式中, S 为垂直于热流方向的传导截面积(mm^2); L 为热流传导长度(mm); T_1 为冷头温度(K); T_2 为外壳温度(K)。

由于渐变壁厚冷指的外径尺寸随 L 变化,式(1)不适用于渐变壁厚冷指传导热负载值理论计算。

S 可等效为垂直于热流方向的平均传导截面积,故可得:

$$S = \frac{\int_0^L f(H) dH}{L} \quad (2)$$

式中, $\int_0^L f(H) dH$ 为传导长度方向上的积分体积(mm^3)。

将式(1)变形,可得:

表 3 力学仿真结果

冷指编号	冷指状态	冷指管材料	焦面位移/ μm
1	上下等宽冷指壁厚,壁厚为 0.125 mm,原状态	L605	43.1
2	上下等宽冷指壁厚,壁厚为 0.125 mm,原状态基础上仅更换冷指管材料	TC4	80.5
3	渐变壁厚冷指,渐变位置 $H=25$ mm	TC4	63.2
4	渐变壁厚冷指,渐变位置 $H=40$ mm	TC4	45.9
5	渐变壁厚冷指,渐变位置 $H=55$ mm	TC4	35.9
6	在 4 号冷指基础上加大冷指管与冷指底座根部位置的圆角,由 R_2 增大到 R_5	TC4	42.4

表 4 不同状态冷指的理论传导热负载对比表

冷指编号	冷指状态	冷指管材料	冷指传导热负载/ mW
1	上下等宽冷指壁厚,壁厚为 0.125 mm,原状态	L605	157
2	上下等宽冷指壁厚,壁厚为 0.125 mm,原状态基础上仅更换冷指管材料	TC4	91
3	渐变壁厚冷指,渐变位置 $H=25$ mm	TC4	91
4	渐变壁厚冷指,渐变位置 $H=40$ mm	TC4	129
5	渐变壁厚冷指,渐变位置 $H=55$ mm	TC4	170
6	在 4 号冷指基础上加大冷指管与冷指底座根部位置的圆角,由 R_2 增大到 R_5	TC4	129

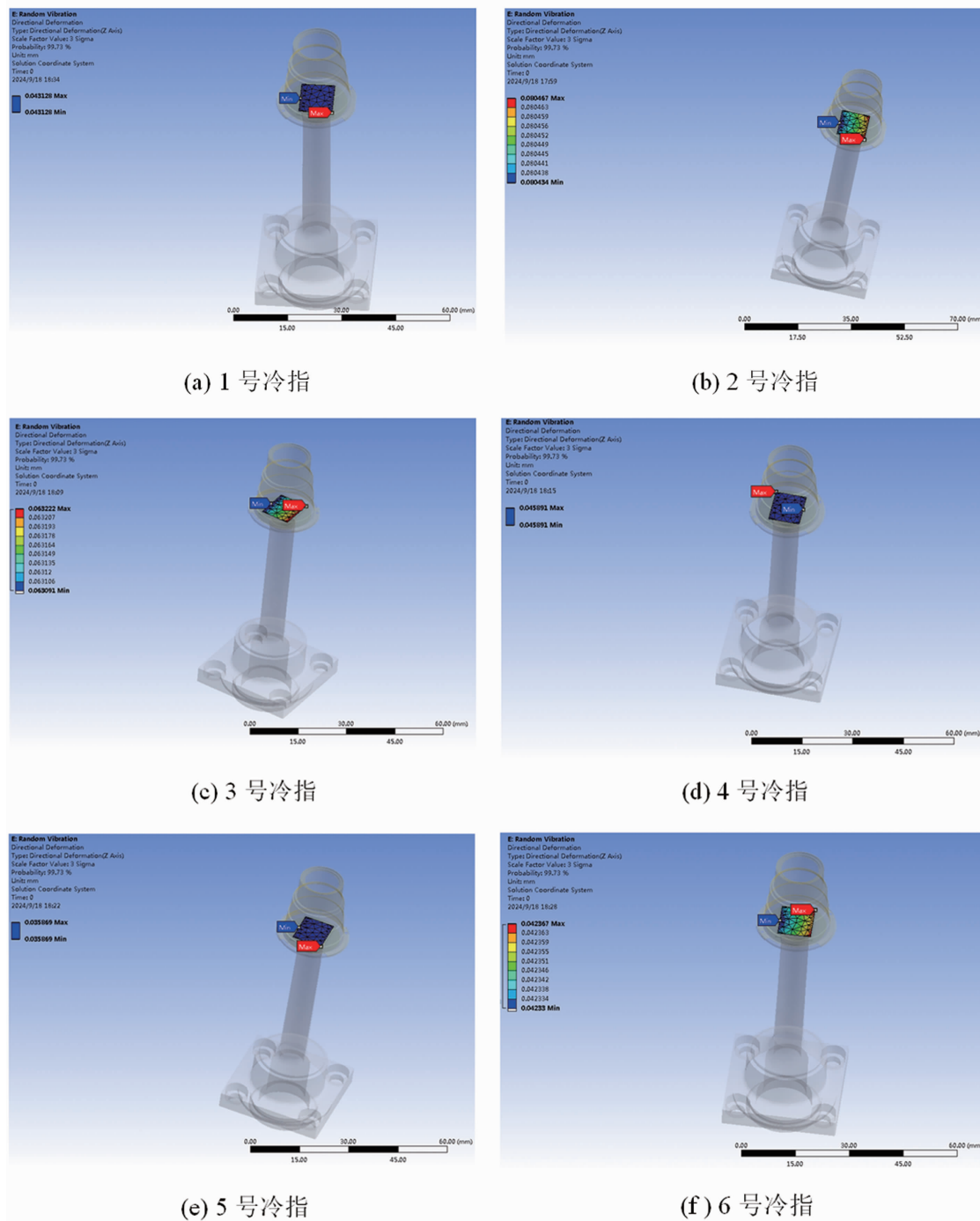


图 5 力学仿真结果

$$Q = \frac{\int_0^L f(H) dH}{L^2} \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (3)$$

选取冷头温度为 77 K, 外壳温度为 300 K。表 4 列出了 6 种不同状态冷指的理论传导热负载对比情况。

2.5 性能对比与讨论

对力学仿真结果与传导热负载理论值结果

进行综合讨论。若仅将原结构的冷指材料由 L605 替换为 TC4, 焦面位移增大 37.4 μm , 是原始状态的 1.8 倍。仅更换冷指材料后, 虽然传导热负载变小, 但结构刚度变差。冷指 3、4、5 为渐变壁厚冷指, 由结果可知渐变壁厚冷指的焦面位移均小于原结构仅更换 TC4 材料后的冷指, 且随着外径渐变壁厚位置高度的

逐渐增加, 焦面位移逐渐减小, 结构更趋于稳定, 但冷指传导热负载值逐渐增加。对比冷指 4 与冷指 6 可知, 加大冷指管与冷指底座根部连接位置的圆角, 焦面位移减小 $3.5\ \mu\text{m}$, 结构稳定性更强。对比 6 号冷指与原结构 1 号冷指可得, 渐变壁厚冷指与原结构冷指的焦面位移相当, 结构刚度相当; 但渐变壁厚冷指的热负载理论值比原结构降低 18% 左右。因此, 若力学环境试验采用大量级振动条件, 则渐变壁厚冷指的外径渐变位置可适当上移, 以增强结构的稳定性; 若采用小量级振动条件, 则冷指渐变位置可适当下移, 从而在满足力学可靠性的前提下, 降低杜瓦传导热负载值。

3 试验验证

通过对渐变壁厚冷指进行力学仿真与传导热负载的理论分析, 本文选取 6 号冷指进行试验验证。根据力学仿真结果与传导热负载理论值, 更换渐变壁厚冷指后杜瓦热负载理论值应降低 18%, 结构刚度与原结构相当, 满足使用要求。使用优化后的渐变壁厚冷指按正常工艺共封装 4 个杜瓦组件。排气冷封后, 使用静态热负载测试系统测试杜瓦静态热负载值(结果见表 5)。优化前的杜瓦平均静态热负载值为 200 mW, 使用渐变壁厚冷指后静态热负载值减小了 15%~18%, 与理论值的差值小于 5%。测试差异主要由测试环境的温度和湿度差异引起, 在测试误差范围以内。另外还对优化后的杜瓦进行结构刚度可靠性考核。在经历力学环境试验后, 杜瓦未出现泄漏、结构破坏等情况, 证实了渐变壁厚冷指的力学可靠性。

表 5 渐变壁厚冷指的静态热负载实测值

杜瓦编号	静态热负载实测值/mW
1	165
2	168
3	170
4	170

4 结束语

本文通过力学仿真与传导热负载理论分析, 设计出一种低热负载渐变壁厚结构冷指, 并探究了外径壁厚渐变位置对力学可靠性与传导漏热的影响。结果表明, 若环境试验采用大量级振动条件, 则渐变壁厚冷指的外径渐变位置可适当上移, 以增强杜瓦结构的刚度与稳定性; 若采用小量级振动条件, 则外径渐变位置可适当下移, 进一步降低杜瓦传导热负载。通过理论分析与试验验证, 渐变壁厚冷指在满足力学可靠性的前提下, 可使杜瓦静态热负载值降低 15%~18%。未来将继续对研究结果进行分析, 探究不同类型渐变壁厚冷指的渐变壁厚位置对结构刚度与传导漏热的影响, 为杜瓦设计与封装工艺提供参考。

参考文献

- [1] 石永山. 红外焦平面成像技术的军事应用与发展 [J]. 舰船电子工程, 2009, 29(10): 21-24.
- [2] 陈俊林, 王小坤, 朱海勇, 等. 冷光学用多波段长波红外探测器杜瓦封装技术 [J]. 中国激光, 2022, 49(21): 192-198.
- [3] 张燕, 李向阳. 航天红外遥感探测器发展现状 [C]. 上海: 上海市红外与遥感学会第十九届学术年会, 2014.
- [4] 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): 198-204.
- [5] 林日东, 王鑫, 孟令伟. 红外探测器用微型杜瓦冷指结构优化设计 [J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1206-1208.
- [6] 陈俊林, 王小坤, 曾智江, 等. 长波 QWIP-LED 量子阱红外探测器杜瓦研制 [J]. 激光与红外, 2020, 50(7): 846-850.
- [7] 孙闻, 俞君, 王小坤, 等. $15\ \mu\text{m}$ 量子阱探测器低温集成组件技术研究 [J]. 低温与超导, 2017, 45(11): 22-25.