

文章编号: 1672-8785(2022)11-0020-06

## 一种红外探测器冷头结构的设计优化

张利明 刘 伟 王 冠 付志凯 于小兵

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 针对某红外探测器工作时冷头结构发生异常、热阻变大以致冷头芯片不到温的现象, 开展了相关研究。采用 Ansys 有限元软件对该红外探测器的冷头结构进行了仿真分析, 并结合分析结果对其进行了优化设计。通过仿真分析发现, 优化后的冷头结构在保证探测器芯片低温应力与低温变形的情况下, 可以显著降低冷头表面及冷头结构件的应力。按照优化后的冷头结构来装配三个新状态的红外探测器组件, 并对其进行了 1000 次的老炼实验。结果表明, 实验前后冷头的强度、探测器响应的非均匀性和盲元率等关键指标并未发生变化; 优化后冷头结构的可靠性更高, 有利于探测器的长期使用; 优化方案合理。

**关键词:** 红外探测器; 冷头结构优化; 可靠性

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.11.004

## Design Optimization of a Cold Head Structure of Infrared Detector

ZHANG Li-ming, LIU Wei, WANG Guan, FU Zhi-kai, YU Xiao-bing

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

**Abstract:** In view of the phenomenon that the cooling head structure of an infrared detector is abnormal, the thermal resistance becomes large and the cooling head chip is not warm, the related research is carried out. In this paper, Ansys finite element software is used to carry out the simulation analysis of the cold head structure of the infrared detector. And the optimization design is carried out according to the analysis results. Through simulation analysis, it is found that under the condition of ensuring the low temperature stress and low temperature deformation of the detector chip, the stresses on the surface of the cold head and the structural parts of the cold head are significantly reduced. According to the optimized cold head structure, three new state infrared detector components are assembled. And 1000 times of aging experiments are conducted. The results show that the strength of cold head, non-uniformity of detector response, blind element rate and other key indicators do not change before and after the experiment. It is confirmed that the optimized cold head structure has higher reliability, which is beneficial to the long-term use of the detector, and the optimization scheme is reasonable.

**Key words:** infrared detector; optimization of cold head structure; reliability

收稿日期: 2022-07-15

作者简介: 张利明(1992-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事红外探测器封装结构设计和仿真研究。E-mail: alitezlm888@163.com

## 0 引言

随着计算机辅助技术的不断发展和有限元软件不断优化,传统的机械结构设计方法已经被基于计算分析、仿真模拟,同时开展相关实验验证的新方法取代。新的设计方法大量应用于工程领域,极大地减少了机械产品的设计优化周期,提高了机械产品的可靠性<sup>[1]</sup>。

红外探测器在光电产品领域有着广泛的应用,是各类整机系统的核心部件。探测目标精确、分辨率高等优势使得探测器在气象数据采集、对地观测等众多领域得到应用。红外探测器由探测器芯片、微杜瓦、制冷器三部分组成。其中,探测器芯片位于探测器冷头结构上,用于接收光电信号,是红外探测器的核心元器件。红外探测器冷头结构通常设计成包括芯片、框架、结构件、冷头在内的多层结构(见图 1)。冷头与制冷机接触,提供一个低温冷源。冷头的冷量通过结构件传递给探测器芯片,同时起到力学过渡的作用,从而保证探测器芯片在低温工作时具有较低的应力和变形。框架用于探测器芯片与电学引出结构的过渡。

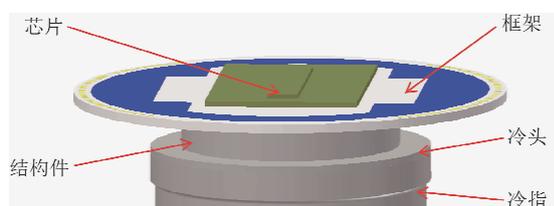


图 1 红外探测器冷头结构

由于探测器冷头以上各个零部件材料的低温参数(如热膨胀系数、导热率等)与冷指存在差异,容易造成冷头结构的低温热失配,以致冷头结构的内应力较大,从而影响红外探测器的正常使用。通过对红外探测器冷头结构进行优化设计来达到降低冷头结构应力的目的。这对保证红外探测器的可靠服役具有重要意义。付志凯等人<sup>[2]</sup>通过优化冷头材料和结构设计改善了大面阵碲镉汞芯片的热应力;刘伟等人<sup>[3]</sup>基于 DOE 设计方法对冷头结构进行了优化,获得了满足低温可靠性及严苛成像需求的冷头结构。

针对某红外探测器冷头结构发生异常、功率变大、热阻变大以致红外探测器冷头芯片不到温的问题,本文采用 Ansys 有限元分析软件对红外探测器冷头结构进行仿真计算,并根据仿真计算结果对冷头结构进行相关优化工作。优化后的结构在保证芯片低温应力与低温面形的情况下,极大地降低了冷头表面与结构件的应力,提高了红外探测器冷头结构的可靠性。

## 1 研究对象与问题分析

某红外探测器冷头结构在工作中发生异常,导致冷头芯片不到温。对组件解剖之后发现,冷头以上部分发生脱落,脱落部位位于冷头结构件处(见图 2)。可以看出,结构件发生解理,导致该红外探测器冷头脱落,探测器芯片不到温。

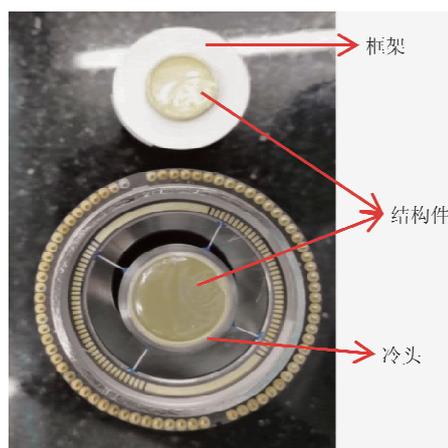


图 2 结构件断裂的形貌

初步判断结构件脱落的原因是冷头结构的低温热失配造成结构件自身受到的应力较大。由此可知,结构件是该红外探测器冷头结构的薄弱环节。

## 2 冷头结构优化设计

### 2.1 设计优化思路

作为红外探测器芯片的载体,冷头结构是探测器杜瓦封装的主要部分。芯片低温工作时的应力、面形与冷头结构各层的材质和形状有密切的关系。在优化冷头结构设计时,要考虑材料的低温热膨胀系数、比热容、导热率等。低温热膨胀系数越小,越有利于保证芯片的低

温变形；比热容小有利于减小冷头热容量并缩短探测器组件的启动时间；导热率低材料热阻大，不利于芯片快速到温<sup>[4]</sup>。基于以上因素，结构件通常选用低温热膨胀系数介于冷指与芯片之间且导热性较好的材料。

## 2.2 红外探测器原冷头结构的有限元仿真分析

对原红外探测器组件进行全尺寸三维实体建模(见图 3)。原组件的简化模型由冷指、冷头、结构件、框架和芯片组成；冷指材质为 TC4 钛合金；冷头材质为可伐复合冷台；结构件材质为宝石；框架材质为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷；芯片材质为 Si。将材料的对应属性赋予红外探测器的零部件，并对红外探测器组件进行有限元网格的划分。

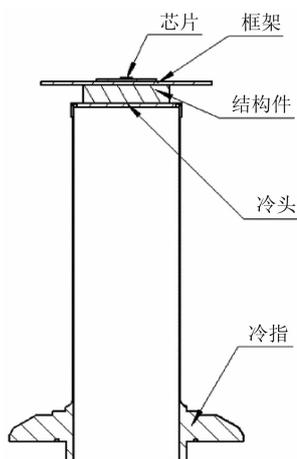


图 3 原红外探测器三维模型

为了模拟红外探测器的实际使用工况，在红外探测器冷指的下表面施加固定约束。冷指下表面的温度为外界常温  $23^\circ\text{C}$ ，冷头被施加低温后的工作温度为  $-196^\circ\text{C}$ 。经仿真得到的探测器芯片的低温形变和应力如图 4 所示。

由图 4 可知，红外探测器的芯片低温形变为  $4.4\ \mu\text{m}$ ，低温工作应力为  $47.69\ \text{MPa}$ ，符合该红外探测器的设计指标要求(芯片低温形变小于  $10\ \mu\text{m}$ ，芯片低温工作应力小于  $150\ \text{MPa}$ )。此时，结构件的应力及冷头与结构件粘接面的应力如图 5 所示。

由图 5 可知，红外探测器结构件在低温下的应力最大值达到  $239.98\ \text{MPa}$ ，红外探测

器冷头在低温下的应力最大值达到  $160.12\ \text{MPa}$ 。而宝石材料的抗拉强度为  $237\ \text{MPa}$ 。由此可见，宝石结构件的应力最大值达到了宝石材料的抗拉强度。

## 2.3 红外探测器冷头结构优化方案

冷头结构件发生脱落的原因是结构件受到的应力接近或大于材料的强度极限，从而导致结构件失效。因此，接下来的优化方向是降低结构件的应力，使结构件受到的应力远小于材料的强度极限。

选择结构件材料时主要考虑热导率、热膨胀系数等指标。钼铜合金综合了 Mo 和 Cu 的优良性能，具有高强度、低热膨胀系数、高导热率等特性，已经广泛应用于电子封装、航空航天和核能技术等重要领域<sup>[5-6]</sup>。通过查阅相关文献发现，MoCu15 的导热率优于宝石(接近后者的 2 倍)，强度极限大于宝石材质，热膨胀系数介于 TC4 钛合金与 Si 之间。因此，优化的结构件选用 MoCu15 材质。

为了保证结构件优化前后的热质量相等，且结构件与冷头、框架的粘接面积均不发生变化，同时考虑结构件对芯片应力的卸载作用，通过结构设计拓扑优化<sup>[7]</sup>对结构件的外形进行优化设计。优化前后的结构件三维模型如图 6 所示。

## 2.4 红外探测器冷头结构件优化后的有限元仿真分析

用优化后的 MoCu15 结构件代替原来的宝石结构件，得到优化后的红外探测器三维模型。对冷头结构优化后的红外探测器进行了与原红外探测器相同条件的热力学仿真分析，得到了探测器芯片的低温形变和应力结果(见图 7)。

由图 7 可知，冷头结构优化后的红外探测器的芯片低温形变为  $5.5\ \mu\text{m}$ ，低温工作应力为  $46.68\ \text{MPa}$ ，符合该红外探测器的设计指标要求(芯片低温形变小于  $10\ \mu\text{m}$ ，芯片低温工作应力小于  $150\ \text{MPa}$ )。此时结构件的应力、冷头与结构件粘接面的应力分别如图 8(a)、图 8(b)所示。

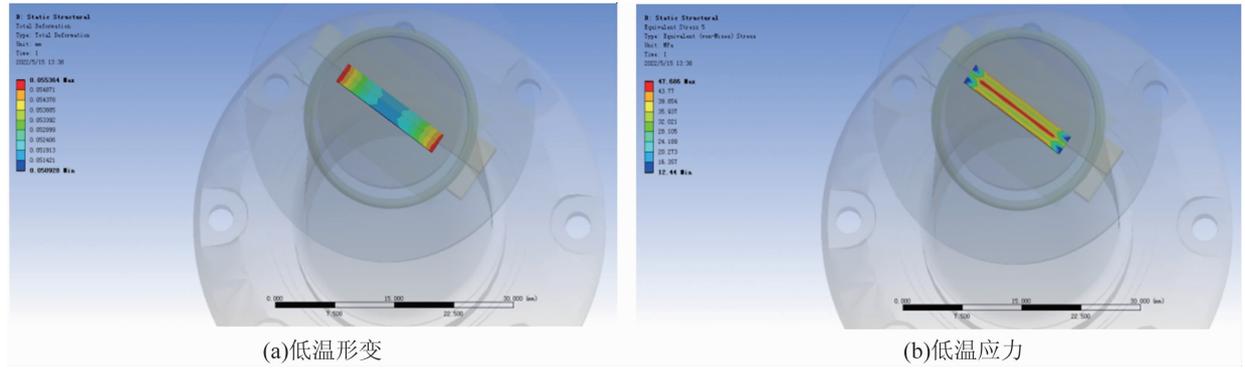


图 4 -196℃下探测器芯片的低温形变及应力

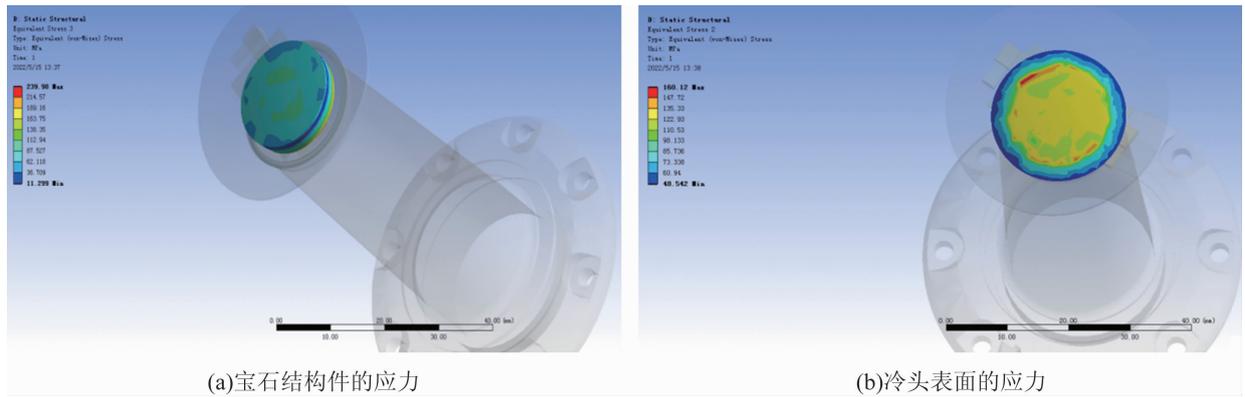


图 5 -196℃下探测器结构件及冷头表面的应力

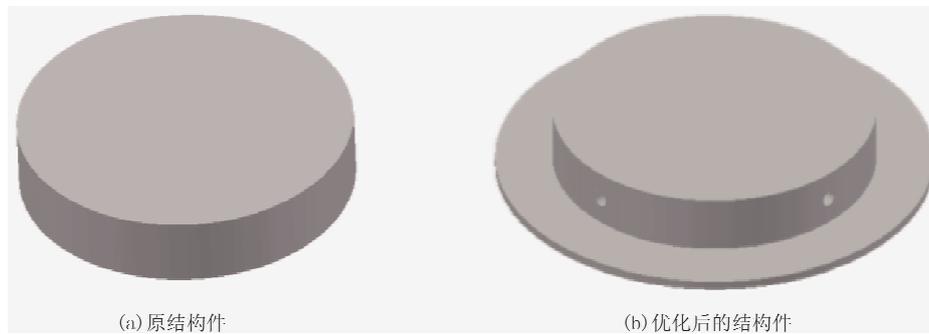


图 6 结构件优化前后的三维模型

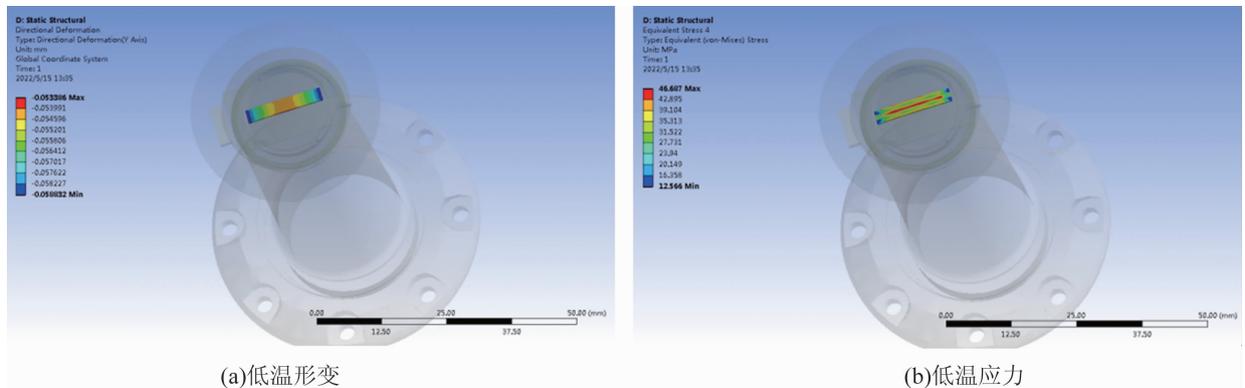


图 7 -196℃下探测器芯片的低温形变及应力

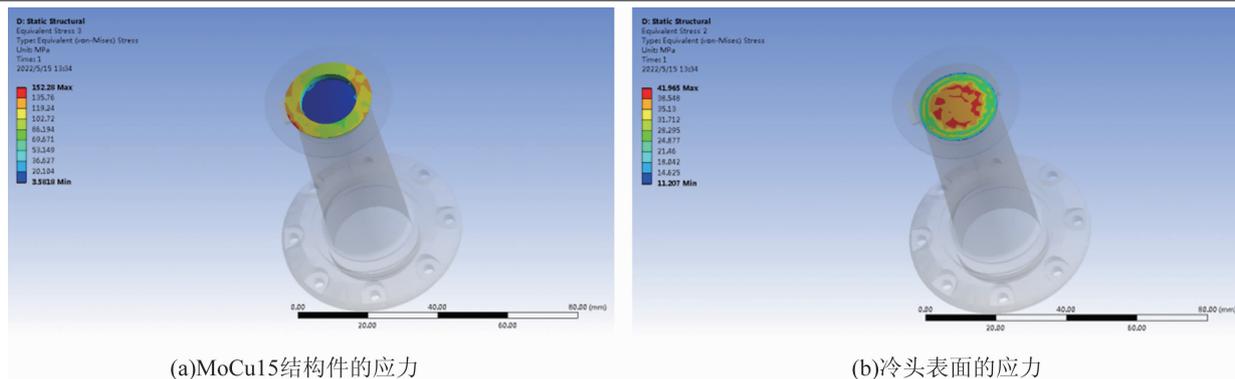


图 8 -196℃下探测器结构件及冷头表面的应力

表 1 仿真结果对比

	芯片应力/MPa	芯片形变/ $\mu\text{m}$	冷头表面应力/MPa	结构件应力/MPa	材料的强度极限/MPa
原冷头结构	47.67	4.4	160.12	239.98	237
优化后的冷头结构	46.68	5.5	41.96	152.28	538

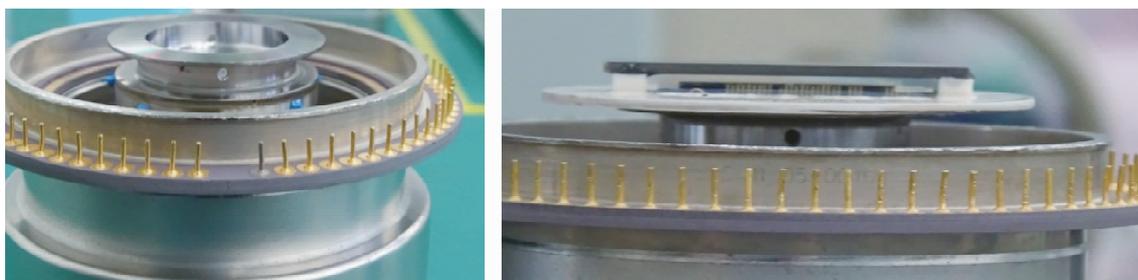


图 9 冷头结构优化后的红外探测器组件

由图 8 可知,冷头结构优化后的 MoCu15 结构件在低温下的应力最大值达到 152.28 MPa。此时红外探测器冷头在低温下的应力最大值为 41.96 MPa。MoCu15 材料的强度极限为 538 MPa,优化后的结构件的应力远小于材料本身的强度极限。

### 2.5 红外探测器冷头结构件优化前后的仿真结果对比

表 1 列出了该红外探测器冷头结构优化前后的仿真结果。可以看出,在芯片应力和形变几乎不变的情况下,优化后的冷头表面应力和结构件应力相较于原组件都显著下降。

## 3 实验验证

在理论及有限元仿真的基础上,为进一步验证优化后冷头结构的可靠性,按照优化后的冷头结构装配三个红外探测器。优化后的探测器实物模型如图 9 所示。

装配完红外探测器组件之后,通常要进行一系列的可靠性实验(包括振动、抗辐照、老炼实验等)。其中,通过老炼实验可以判断探测器芯片的到温时间、芯片的盲元率以及响应非均匀性等关键指标。对冷头结构优化后的三个组件进行了图 10 所示的老炼实验(在 $-213^{\circ}\text{C}$ 条件下进行 200 次以上的温度冲击实验)。



图 10 老炼实验的实物图

冷头结构优化后的 3 个红外探测器均完成了 1000 次以上的老炼实验, 冷头均未脱落。而且冷头的强度、到温时间、探测器响应的非均匀性和盲元率等关键指标在实验前后均未发生变化, 证实了结构优化的可靠性。

#### 4 结束语

本文通过构建全尺寸的某红外探测器模型, 运用有限元分析软件研究了红外探测器冷头的宝石结构件脱落问题。在此基础上, 对该红外探测器冷头进行了优化设计。仿真分析及实验结果表明, 在冷头结构优化之后, 该红外探测器冷头表面的应力和结构件的应力都显著下降。优化后的冷头结构有利于保证该红外探测器的长期可靠使用。相关的优化设计工作为后续的科研生产提供了一定的参考和借鉴价值。然而由于优化后冷头结构件的导热率增加且热传导的面积减小, 优化后的结构是否影响红外探测器芯片的到温时间还有待进一步验证。

#### 参考文献

- [1] 杨泽. 摆线齿轮磨削机床结构有限元分析及优化设计研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2021.
- [2] 付志凯, 李雪梨, 张磊, 等. 大面阵碲镉汞芯片的热应力分析与优化 [J]. 红外, 2021, 42(4): 25-29.
- [3] 刘伟, 张冬亮, 闫杰, 等. 超长线列碲镉汞探测器组件的冷头结构设计 [J]. 红外, 2021, 42(6): 12-18.
- [4] 张磊, 东海杰, 王春生, 等. 拼接红外探测器冷头设计 [J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 591-594.
- [5] 周航. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒增强 Mo 基复合材料的制备与组织性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- [6] 孙承琳. Mo-20wt%Cu 复合材料的制备及其性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [7] 姚寿文, 崔红伟. 机械结构优化设计(第 2 版) [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.