

文章编号：1672-8785(2022)11-0014-06

红外探测器杜瓦冷头的 低温可靠性研究

付志凯 王冠 韦书领 孟令伟 宁提
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要：红外探测器杜瓦冷头结构受温度冲击时容易损伤，甚至会导致探测器组件失效。这是红外探测器组件产品研制中不可避免的可靠性问题之一。针对红外探测器杜瓦冷头的低温可靠性问题展开了相关研究。结合粘接失效原理和有限元仿真，讨论了粘接胶厚度、溢胶等情况对杜瓦冷头低温应力、冷头-冷指粘接面积与探测器温度关系的影响。结果表明，胶层状态是影响杜瓦冷头低温损伤和温度传导的重要原因。产品研制过程中可通过控制粘接胶层来降低大面积探测器粘接结构的低温应力，从而提高冷头结构的低温可靠性。

关键词：红外探测器；杜瓦冷头；热应力

中图分类号：TN215 文献标志码：A DOI：10.3969/j.issn.1672-8785.2022.11.003

Research on Low-Temperature Reliability of the Dewar Cold Head in Infrared Detector

FU Zhi-kai, WANG Guan, WEI Shu-ling, MENG Ling-wei, NING Ti

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

Abstract: The dewar cold head structure of the infrared detector is easily damaged by temperature impact, which directly leads to the failure of infrared detector components. This is one of the inevitable reliability problems in the development of infrared detector components. The low temperature reliability of the dewar cold head in the infrared detector was studied. Combined with the bonding failure principle and finite element simulation, the influence of adhesive thickness and overflow on the low temperature stress of dewar cold head, the relationship between the bonding area of cold head and cold finger and the detector temperature was discussed. The results show that the state of the adhesive layer is an important factor affecting the low temperature damage and temperature conduction of the dewar cold head. In the process of product development, the low temperature stress of the large array detector bonding structure can be reduced by controlling the adhesive layer, so as to improve the low temperature reliability of the cold head structure.

Key words: infrared detector; dewar cold head; thermal stress

收稿日期：2022-08-31

作者简介：付志凯(1988-)，男，河北石家庄人，工程师，主要研究方向为红外探测器杜瓦封装结构的设计与仿真。E-mail: fuzhikai258@126.com

0 引言

制冷型红外探测器是遥感卫星、安防监控和环境检测红外相机等民用项目的核心器件。红外探测器组件的可靠性对红外系统具有决定性的作用。随着红外探测器组件的应用范围不断扩大，系统对红外探测器组件可靠性的要求越来越高。另外，红外探测器芯片中测过程中使用的中测杜瓦组件由于长期反复测试会产生中测杜瓦可靠性问题，导致测试异常，增加测试成本。因此，如何解决可靠性问题是红外探测器组件产品发展中不可避免的关键技术之一^[1-2]。

红外杜瓦结构如图 1 所示，红外焦平面探测器芯片一般贴装于杜瓦冷头之上。杜瓦冷头包括光阑、探测器芯片、框架、结构件和冷台等多种结构，各部分一般用粘接剂粘接。探测器工作时温度从常温降低到 80 K 以下。由于各材料间的参数(如线膨胀系数、杨氏模量等)存在差异，各组成材料间会出现低温下的失配现象，产生较大的内应力^[3]。这不仅容易造成探测器芯片损伤，而且还会导致杜瓦冷头结构低温下的破坏，发生冷头脱落的问题。因此，探测器冷头粘接后的低温应力是影响红外探测器组件可靠性的关键因素之一^[4]。杜瓦冷头与杜瓦冷指之间由于材料性质差异较大，是工程应用中最容易失效的地方。所以本文重点对杜瓦冷头和杜瓦冷指之间的粘接低温应力进行研究。

本文针对红外探测器组件的低温冷头粘接低温应力问题展开了研究，重点对红外探测器冷头粘接结构低温失效进行了模拟仿真，分析了粘接失效原理以及产生低温损伤的原因，并讨论了冷头、冷指粘接面积和粘接胶厚度等结构形式对低温应力的影响以及对探测器温度均匀性的影响。通过控制粘接胶层降低粘接结构的低温应力，从而提高冷头结构的低温可靠性。

1 粘接结构破坏原理分析

无论粘接结构处于何种环境中，其破坏形

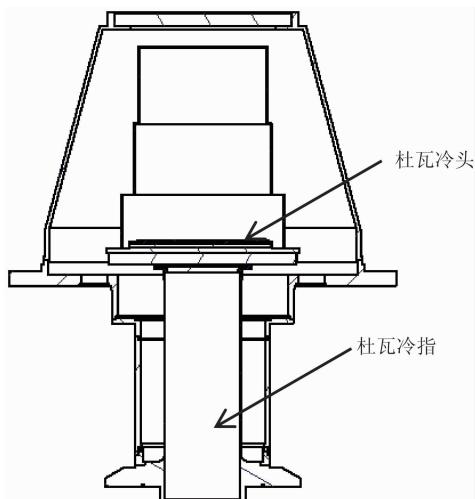


图 1 杜瓦结构示意图

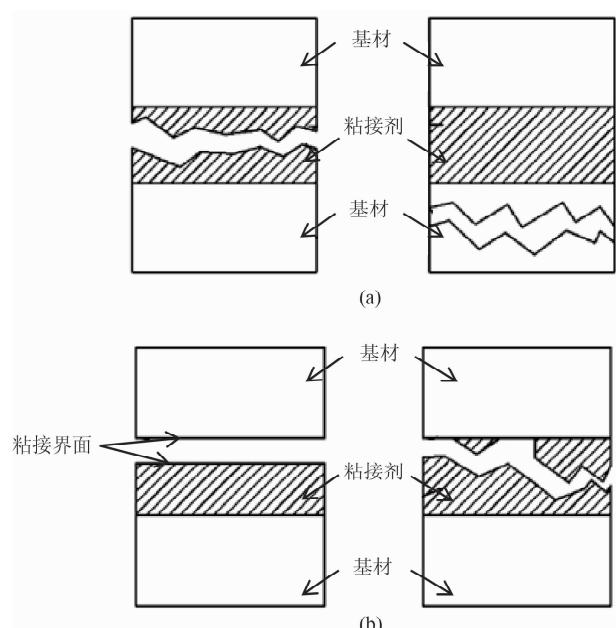


图 2 (a) 内聚力破坏；(b) 界面破坏和混合破坏

式主要有三种，即内聚力破坏、界面破坏以及混合破坏。而具体发生破坏的主要原因由粘接胶水强度、基材本身强度以及粘接界面强度决定^[5]。

内聚力破坏包括胶层内聚力破坏和基材内聚力破坏。界面破坏是粘接剂与基材之间的粘接失效，而粘接剂和基材本身不发生破坏。混合失效是指同时发生两种及以上的失效形式，如图 2 所示。

粘接剂的内聚力破坏可以充分发挥粘接剂的性能，是设计中最理想的破坏形式。但是红

表1 材料组成表

名称	材料	弹性模量(GPa)	泊松比	线膨胀系数($10^{-6}/K$)
冷台	4J36	144	0.31	1.5
结构件	SiC	455	0.14	2.4
粘接胶	—	3.48	0.36	59.8

外探测器杜瓦冷头的设计需要考虑的因素很多,如探测器芯片低温77 K下的应力和变形、探测器芯片的温度均匀性、探测器组件的启动时间等。这些会直接影响探测器使用性能的温度均匀性。国内外生产商和试验室大量的实践经验表明,杜瓦冷头设计所选用的材料很少。因此,在杜瓦冷头设计中,不仅需要考虑粘接结构的粘接强度,尽量发挥粘接剂的最优性能,同时还需要重点考虑低温下的应力分布情况,防止发生粘接剂和基材本身的内聚力破坏。

2 红外探测器杜瓦冷头结构的低温仿真

2.1 模型建立

本文以某款红外探测器芯片的中测杜瓦为对象进行可靠性分析研究。该款杜瓦主要由金属杜瓦和探测器混成芯片组成。如图3所示,杜瓦冷头主要由探测器混成芯片、垫片、陶瓷框架和结构件等组成。

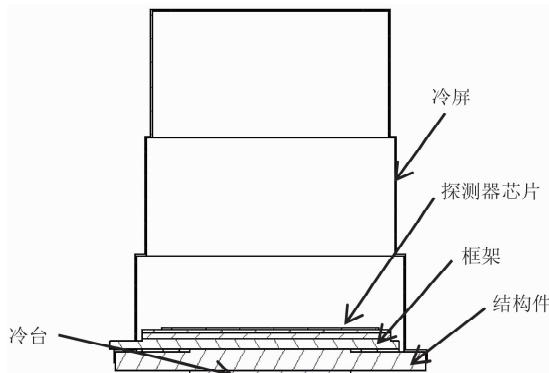


图3 冷头结构示意图

本文主要研究杜瓦冷头中冷台和结构件粘接后应力分布及破坏所导致的可靠性问题。模型的主要组成结构包括冷屏、探测器芯片、框架、结构件和冷台。其中,仅在冷台和结构件之间建立低温胶模型(见图4),其他胶层均不考虑。该低温胶在77 K低温下类似固体,因

此在仿真分析中冷台、结构件和粘接剂均按照弹塑性模型进行分析。模型中粘接剂模型采用理想状态,无气泡均匀地充满于两个结构之间。利用ANSYS软件建立粘接试件的有限元仿真模型(见图5)。对仿真模型参数进行定义。表1列出了组成材料参数。

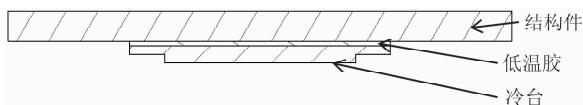


图4 低温胶水粘接示意图

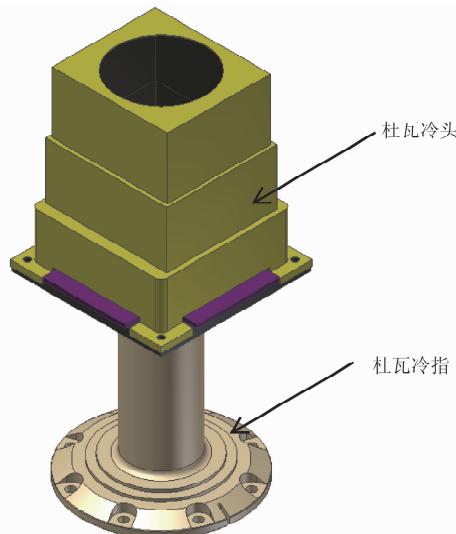


图5 仿真模型示意图

2.2 仿真计算

为了模拟杜瓦的真实结构,采用杜瓦全模型仿真,在杜瓦冷指固定面施加固定约束,并在杜瓦冷台下表面施加77 K低温。基于有限元仿真计算结果,得到胶层、结构件及冷台上各项应力分布云图。通过分析胶层、结构件及冷台上各项应力分布的规律,提出优化方法,提高冷头结构的低温可靠性。

2.2.1 粘接结构应力分布与优化

低温胶的直径与冷台保持一致,均为Φ30 mm时,胶层厚度约为30 μm,低温胶的低温

应力云图如图 7(c)所示。在胶层应力分布上, 胶层外圈区域应力大于内部, 低温胶胶层的最大应力位于粘接层的边缘部位。这主要是由于粘接层边缘在低温下应力集中导致的。

粘接结构构件两侧的应力分布与低温胶类似, 外部区域应力大于内部, 最大应力位于粘接区的边缘部位。由此可见, 在不考虑缺陷等问题的情况下, 冷头粘接结构最易发生破坏的位置在粘接区域外侧(应力约为 71.8 MPa)。

针对粘接结构的应力问题进行溢胶及胶厚分析。随着粘接外沿区域溢胶量的增加, 胶层外边缘粘接区域受到的最大低温应力减小。这主要是因为在低温 77 K 下低温胶比两侧粘接件的模量低, 具有一定的韧性, 低温下应力会释放一部分, 导致有溢出胶时低温胶受力降低(降幅约为 24%), 如图 6 所示。

将低温胶胶厚作为变量进行低温应力分析(结果见表 2)。它对粘接结构的粘接力和低温应力都有影响, 仿真结果如图 7 所示。在分析中不考虑低温胶的粘接强度, 只针对不同胶厚的工况进行低温胶的低温应力情况分析。结果

表明, 随着胶层厚度的增加, 低温胶的低温应力逐渐变小。这主要是因为, 虽然低温胶在低温下类似塑性材料, 但其模量仍低于粘接结构件, 具有一定的弹性和韧性, 而应力分布仍是外边缘粘接区域大于内部区域。

2.2.2 粘接面积与温度的关系

红外探测器组件在系统工作中会发生多次开机和关机, 每次开关机均会对冷头结构产生应力。应力会破坏冷头粘接面, 直接导致探测器芯片的温度发生异常。根据以往的经验发现, 冷头结构失效可能会有个渐变的过程。该过程比较短暂, 例如某次开机后探测器制冷机的功耗明显增大, 但探测器组件仍能达到工作温度, 后续再进行几次开关机后, 探测器达不到工作温度, 即冷头结构发生了失效。

根据粘接面失效的问题, 对 Invar 冷台和 SiC 结构件之间的粘接面积进行了仿真计算。根据热传导计算公式^[6]:

$$Q = KF(T_1 - T_2)/L \quad (1)$$

式中, Q 为传导冷量, K 为热导率, F 为接触面积, T_1 与 T_2 为两端的温度, L 为传导长度。

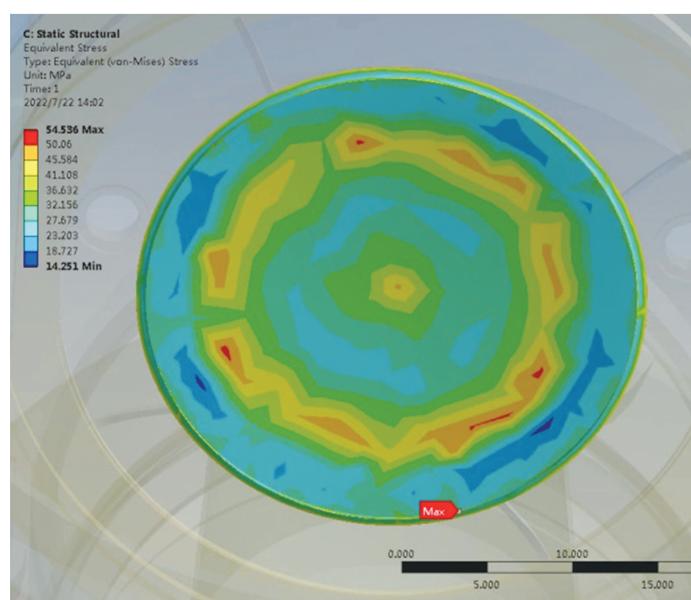


图 6 低温胶溢胶状态下的应力云图

表 2 胶层厚度不同时的最大应力

胶层厚度/ μm	20	25	30	50	80	100
最大应力/MPa	79.1	75.1	71.8	63.5	58.5	57.1

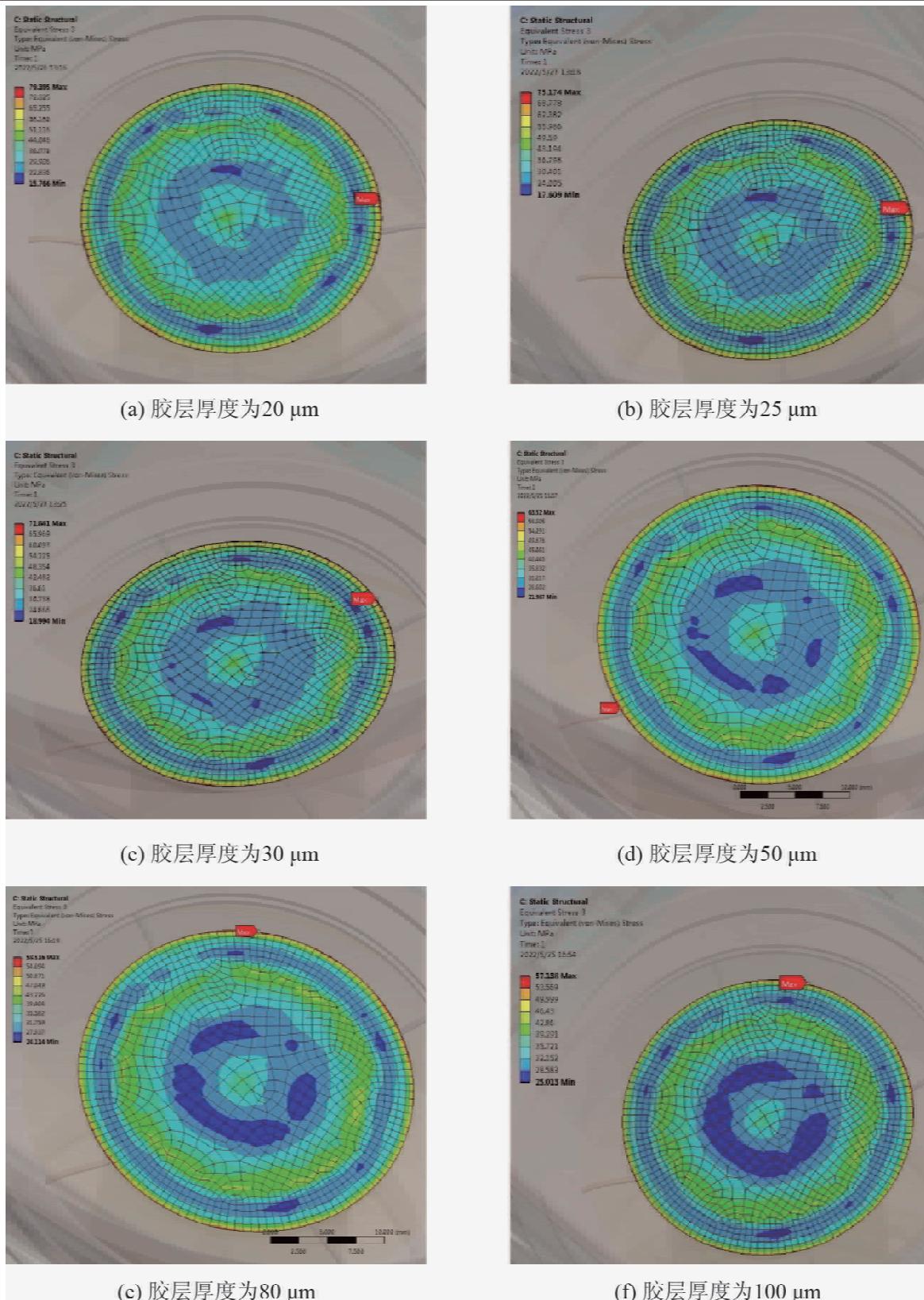


图 7 不同胶层厚度时的低温应力云图

可以看出，温差 ΔT 与接触面积 F 成反比，温差 ΔT 是接触面积直径的幂函数。因此，接触

面积对冷量的传导影响具有决定作用，同时胶层厚度也会对热传导产生较大的影响。

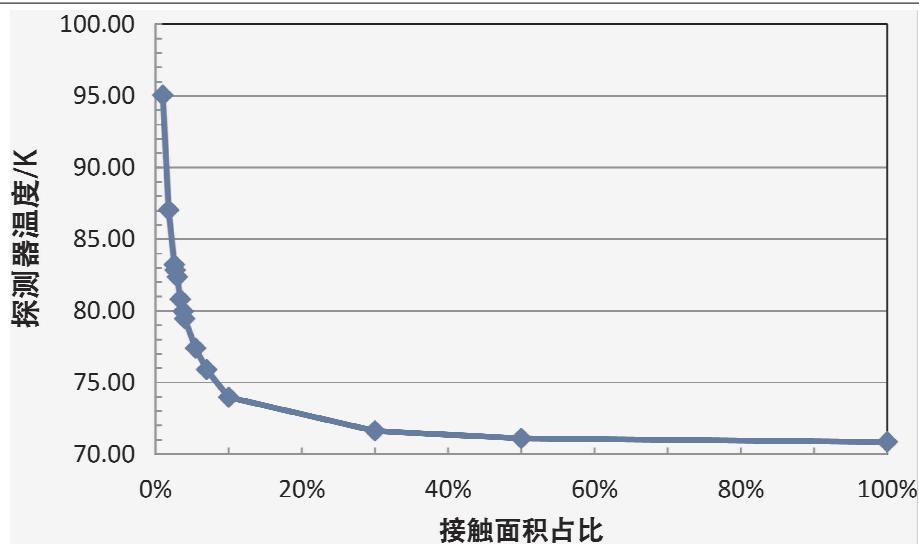


图 8 接触面积占比与探测器温度的关系

仿真计算时,由于冷头结构中受应力影响发生破坏的主要在胶层界面,以胶层的直径为变量,对胶层失效面积进行仿真分析。在稳态条件下,对冷台下表面施加 70 K 的温度值,仿真计算 SiC 结构件上表面的温度变化(SiC 结构件上表面的温度即为探测器的温度)。

胶层粘接比例取 100%、50%、30%、10%、7%、5%、3% 和 0% 进行计算,仿真结果如图 8 所示。可以看出,随着粘接面积的减小,SiC 上表面的温度不断升高,且急剧变大。当粘接面积剩余 3% 时,SiC 上表面与 Invar 下表面的温差达到 12 K 左右;当粘接面积为 0% 时,传导完全失效。这表明当粘接面受低温应力等因素作用时会发生脱粘,导致热传导链路遭到破坏,冷量传递受阻。随着脱开面积增大,探测器芯片的温度不断升高,最终导致失效。因此,在冷头温度达不到要求时,接触面积减小是最主要的因素,即应力破坏会导致冷头失效,破坏过程中接触面积发生改变。

3 结束语

结合工程应用中出现的问题以及仿真计算可知,低温应力是导致冷头粘接失效的原因之一;杜瓦冷头中粘接胶的状态是影响其低温应力的重要原因,在粘接面发生破坏后,探测器的温度会发生急剧变化。本文对探测器杜瓦冷头的粘接面进行了热应力仿真分析,阐述了探

测器冷头损伤的原因及改善方向。该研究可指导冷头粘接工艺和冷头的损伤分析,并形成了以下结论:

(1)在探测器冷头结构粘接中,低温应力是导致冷头失效的原因。通过控制胶层厚度和溢胶量,粘接区的低温应力会随胶厚的增加而降低,粘接边缘区域溢胶会降低粘接边的应力集中,这有利于减小冷头结构的低温应力。

(2)冷头结构粘接区出现低温破坏后,脱粘面积较小时,探测器的工作温度不会有明显变化。当破坏面积达到一定程度时,探测器的温度会发生明显的变化,导致温度传导的失效。

本文研究中未考虑低温胶的粘接力随厚度的变化以及冷头结构中零件结构形式对低温应力的影响,仍然存在不足。未来将结合更多的影响因素进行试验和计算分析,从而提高杜瓦冷头的低温可靠性。

参考文献

- [1] 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.
 - [2] 王鑫,周立庆,谭振.制冷型大面阵红外探测器研制进展[J].红外,2019,40(12):1–9.
- (下转第 48 页)

- 处理方法的作用及其发展 [J]. 药物分析杂志, 2008, 28(5): 824–829.
- [13] Andy L, Matthew W. Classification and regression by Random Forests [J]. R news, 2002, 2(3): 18–22.
- [14] Erc B, Ron K. An empirical comparison of voting classification algorithms: bagging, boosting and variants [J]. Machine Learning, 1999, 36(1): 105–139.
- [15] 徐少成, 李东喜. 基于随机森林的加权特征选择算法 [J]. 统计与决策, 2018, 34(18): 25–28.
- [16] Xia J S, Liao W Z, Chanussot J, et al. Improving Random Forest with ensemble of features and semisupervised feature extraction [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1471–1475.
- [17] 路世广, 路昌日, 周此明. 针对大规模样本集的训练策略 [J]. 广东技术师范学院学报, 2008, 39(9): 30–33.
- [18] 张浩然. 支持向量机算法及应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2003.

(上接第 19 页)

- [3] 李言谨, 何力, 杨建荣, 等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 409–412.
- [4] 张伟婷. 碲镉汞大面积阵红外焦平面探测器的可靠性技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.

- [5] 浦磊鑫. 粘接接头强度实验断裂应力计算方法改进研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [6] 姚仲鹏, 王瑞君. 传热学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.