

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.023

轻小型深制冷探测器组件设计与研究

袁辉, 冶竣峰, 顾珊珊, 孙虎

(南通智能感知研究院, 江苏 南通 226007)

摘要:为了适应深制冷型短波探测器组件轻小型化要求,采用理论设计、有限元仿真和环模试验闭环验证方法,对探测器组件集成方案、结构密封进行设计和仿真分析,对振动特性进行仿真分析和环模试验。仿真结果表明:采用 O 型圈密封方式时,随着 O 型圈压缩量减小,探测器窗口面型变形越小,有利于提升探测器组件的成像质量;同时提出的探测器组件集成方案、密封型式及结构刚性合理可行。

关键词:深制冷;探测器组件;仿真分析

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0127-04

Design and Reserch of Light and Small Deep-cooled Detector Components

YUAN Hui, YE Junfeng, GU Shanshan, SUN Hu

(Nantong Academy of Intelligent Sensing, Nantong 226007, China)

Abstract:To adapt to the requirements of light and small deep-cooled shortwave detector components, this article, by adopting theoretical design, finite element simulation and closed-loop verification methods of ring model test, designs and simulates the integration scheme and structural sealing of the detector components, as well as conducts simulation, analysis and ring model test on vibration characteristics. The simulation results show that with the use of O-ring sealing, as the compression of the O-ring decreases, the deformation of the detector window surface becomes less, which is beneficial for improving the imaging quality of the detector component. It is also concluded that the proposed integration scheme, sealing type and structural rigidity of the detector components are reasonable and feasible.

Keywords:deep cooling; detector components; simulation analysis

0 引言

探测器组件根据芯片工作部分的控温范围一般可以分为常温探测器、低温制冷探测器和深低温探测器。深低温探测器组件可以将芯片工作温度控制到 -150°C 或更低,芯片成像性能可以有效滤除温度噪声影响,因此应用愈发广泛。本文针对深制冷型探测器组件的结构集成和结构密封设计进行研究和分析,具有很好的参考价值。^[1-7]

1 集成方案设计

如图 1 所示,探测器组件主要由膨胀机、电路板组件、杜瓦组件、安装框架、杜瓦抱箍、杜瓦挡光环、制冷机、制冷机支架、制冷机控制器等组成。其中安装框架、杜瓦抱箍、制冷机支架结构件的造型根据耦合器件的造型要求进行了减重镂空设计。杜瓦挡光环与杜瓦壳体间根据光学装校需要留有余量为 2.45 mm 结构间隙,但此间隙在光学

装校结束后为防止灰尘进入光谱仪分光腔体内,需进行密封填充。

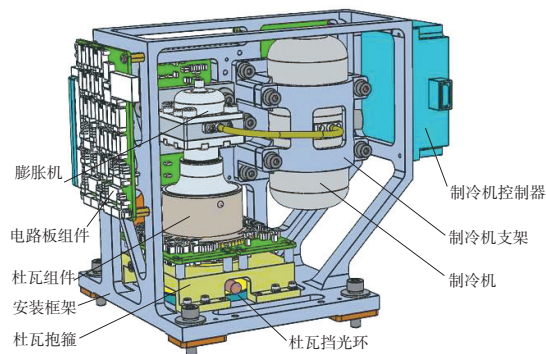


图 1 探测器组件示意图

2 环境适应性仿真分析及力学试验验证

为满足车载或机载载体的环境使用要求(1 阶频率不小于 100 Hz),对探测组件进行模态

基金项目:2022 年南通市基础科学研究青年科技人才创新专项项目(JC12022044)

第一作者简介:袁辉(1986—),安徽涡阳人,硕士研究生,研究方向为精密光机系统、精密机械,yh19952688160@126.com。

分析的结果,如表 1 所示。根据实际使用工况约束和加载后进行模态分析,探测器组件 1 阶频率 200.7 Hz,影响较大的模态为 1 阶—3 阶^[8]。

表 1 探测器组件模态参数

频率/Hz	模态参数					
	x 方向	y 方向	z 方向	旋转 x	旋转 y	旋转 z
200.7	0.226	0.146	1.000	0.332	1.000	0.156
275.9	0.375	1.000	0.022	0.236	0.032	1.000
531.1	0.093	0.500	0.431	1.000	0.454	0.452
660.5	0.416	0.301	0.284	0.315	0.276	0.199
708.9	0.238	0.123	0.099	0.140	0.103	0.015
924.3	0.506	0.145	0.084	0.157	0.175	0.150
1005.4	1.000	0.296	0.152	0.204	0.121	0.234
1146.2	0.862	0.140	0.147	0.137	0.019	0.235
1277.4	0.117	0.178	0.253	0.227	0.129	0.035
1411.9	0.282	0.132	0.019	0.076	0.056	0.088

如表 2 所示,随机振动试验调节进行模拟加载功率谱密度载荷(PSD)进行 x 轴、y 轴、z 轴 3 个方向随机振动。如图 2 所示,探测器组件在 3 个方向的 PSD 响应分别为 9.07g、5.43g、8.23g,对应的放大倍率分别为 2.16、1.29、1.96。通过模态的低阶频率和随机振动 PSD 响应可知探测器组件刚性很好。为进一步验证探测器组件的刚性进行了环境模拟试验,环境试验要求如表 2 和表 3 所示。

表 2 环境试验要求

项目	随机振动	正弦振动
试验时间/min	2	—
振动方向	x/y/z 三轴向	垂直及平行于安装方向
	10~40	5~54
频率/Hz	41~250 251~2 000	55~100
扫描频率/(oct/min)	—	1
总方均根加速度/g	4.2	—

表 3 环境试验流程

项目	频宽/Hz	振型
第 1 步	10—2 000(0.2g 量级)	扫频
第 2 步	—	正弦满振
第 3 步	10—2 000(0.2g 量级)	扫频
第 4 步	—	随机预振
第 5 步	—	随机满振
第 6 步	10—2 000(0.2g 量级)	扫频

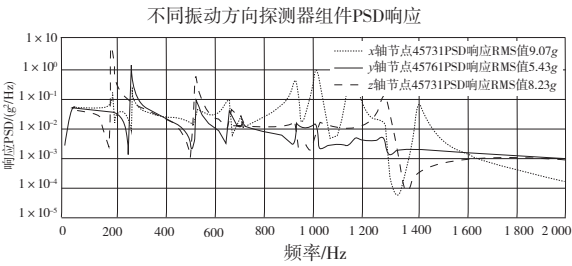


图 2 不同振动方向探测器组件 PSD 响应

试验结果表明:探测器组件 x 方向的 1 阶固有频率约 241 Hz,y 方向的 1 阶固有频率约 346 Hz;随机振动试验后 x 方向的 1 阶固有频率约 239 Hz、正弦振动试验后 x 方向的 1 阶固有频率约 241 Hz,振动试验后探测器组件固有频率变化甚微且结构无松动现象。经有限元仿真和环境模拟试验验证可知,探测器组件刚性足、达到试验车载或机载环境使用要求。

3 结构密封设计及仿真分析

杜瓦组件属于薄壁型真空腔体,窗口处安装有窗口玻璃片用于保护芯片和透光。杜瓦壳体在探测器组件光学装校完成后需要与杜瓦挡光环进行密封耦合,密封耦合因为结构空间尺寸原因不能设计复杂,因此杜瓦壳体与杜瓦挡光环间的密封尤为重要,密封材料起到密封作用的同时还不能引起大的变形和应力。针对微小空间尺寸的特点,设计了两种密封型式:O 型密封圈密封和 GD414 硅胶点胶密封。^[9-11]

3.1 O 型密封圈密封

O 型密封圈广泛应用于结构间隙密封,针对杜瓦壳体的薄壁特点,选用硅胶材质的 O 型圈进行密封设计。如图 3 所示,杜瓦壳体与杜瓦挡光环之间用 O 型圈压缩后填充结构间隙,此处结构间隙 2.45 mm,O 型圈线径大小代表不同的压缩量,同时会使杜瓦组件产生不同的应力和变形,因此需要对 O 型圈不同线径的压缩引起的杜瓦组件应力和变形进行分析。O 型圈线径大于 2.45 mm 即可,考虑到密封可靠性需要一定的压缩量,本次分析选用的线径分别为 2.6 mm、2.8 mm、3.0 mm、3.5 mm。(本刊为黑白印刷,具体问题咨询作者)

如图 3 和图 4 所示,仿真分析可知,2.6 mm、2.8 mm、3.0 mm、3.5 mm 线径的硅胶 O 型圈分别压缩至 2.45 mm 高度的接触面最大应力分别为 0.027 MPa、0.085 MPa、0.133 MPa、0.183 MPa。

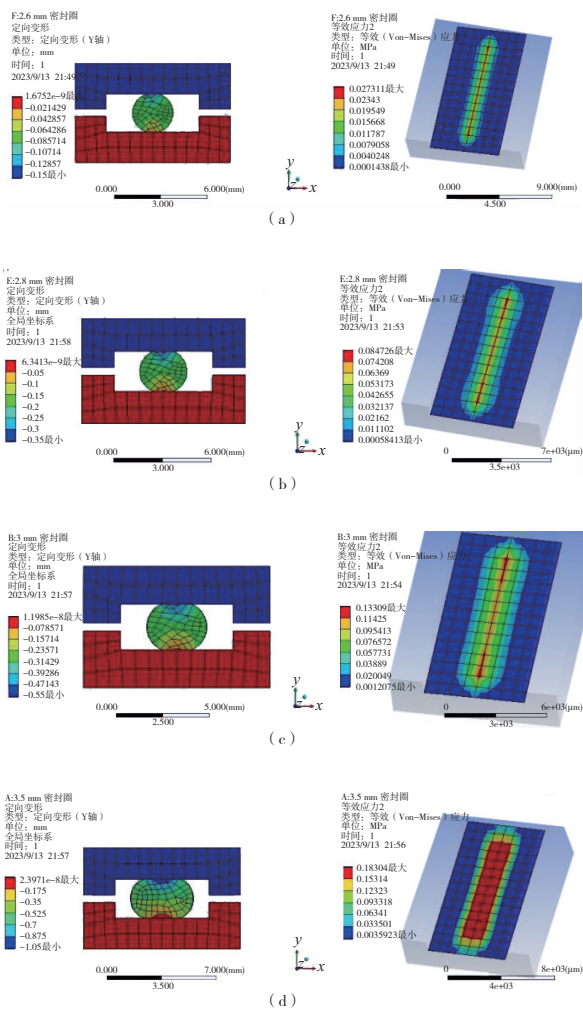


图3 不同线径 O 型圈的压缩变形、应力分析

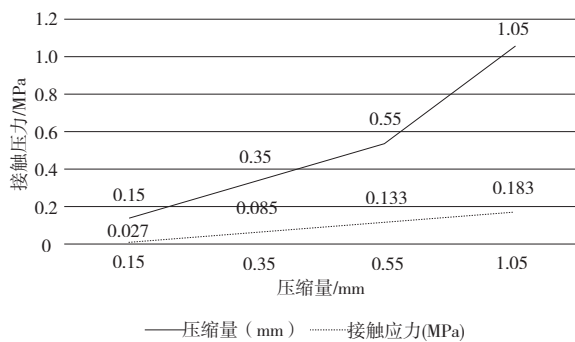


图4 不同线径 O 型圈的压缩量和接触应力

如图5所示,不同线径的 O 型圈对杜瓦壳体的变形和应力较小,对杜瓦窗口片的变形影响较大,窗口片的变形会使窗口片的面型指标下降(如表4和图6所示)。窗口片到芯片的距离及面型指标的变化均在探测器成像要求范围内。

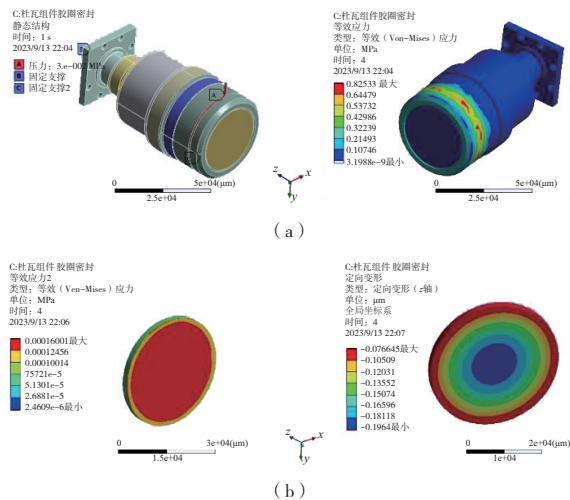


图5 杜瓦组件变形、应力分析

表4 不同线径 O 型圈对杜瓦窗口片影响

线径/ mm	压缩量/ mm	窗口片 z 轴变形/ μm	面型退化 PV 值/ μm	等效波 长/ μm	胶圈线径 合理性
2.6	0.15	-0.032	0.019	0.030 λ	合理
2.8	0.35	-0.086	0.052	0.082 λ	合理
3.0	0.55	-0.179	0.100	0.158 λ	不合理
3.5	1.05	-0.196	0.119	0.188 λ	不合理

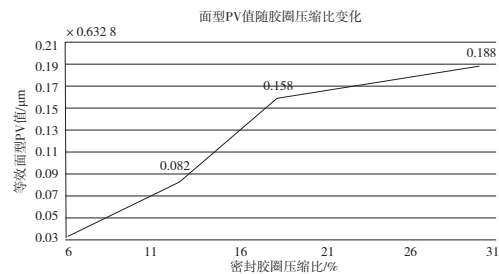


图6 面型 PV 值随胶圈压缩比变化

表4中 $\lambda = 0.632$,探测器成像对杜瓦窗口片到芯片感光面的距离公差为 $-0.1\text{ mm} \sim +0.1\text{ mm}$;探测器成像对杜瓦窗口片面型 PV 值指标要求为优于 0.1λ 。

3.2 GD414 硅胶点胶密封

GD414 硅胶作为高黏稠度的胶水,在光机系统产品方面广泛应用于结构间隙密封。胶水由液态固化成型过程可等效于温度降低、体积收缩的过程,根据胶水的热膨胀系数和温变梯度可计算出固化的胶水收缩量,通过反向拉伸分析可以模拟胶水固化过程中产生的收缩拉力。^[12-14] GD414 胶水固化过程数据如表5所示。

表 5 GD414 胶水固化过程数据

胶水	热膨胀 系数/K	初始 温度/(℃)	最终 温度/(℃)	变温 梯度/(℃)	体积变化 系数	结构 间隙/mm	胶水固化 收缩量/mm	最大拉伸 应力/MPa
GD414	236 * 10 ⁻⁶ /k	50	20	-30	7.08×10 ⁻²	2.450	0.017	0.088

如图 7—图 10 及表 6 所示, GD414 胶水点胶量即胶层宽度分别为 1 mm、2 mm、3 mm 时引起的杜瓦壳体变形和应力可忽略, 对杜瓦窗口片的应力影响较小可忽略, 但变形影响较大。

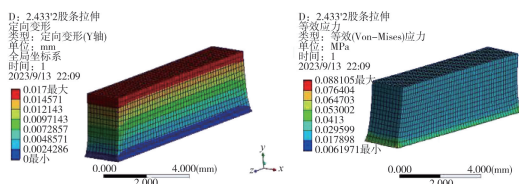


图 7 胶水拉伸 0.017 mm 变形、应力

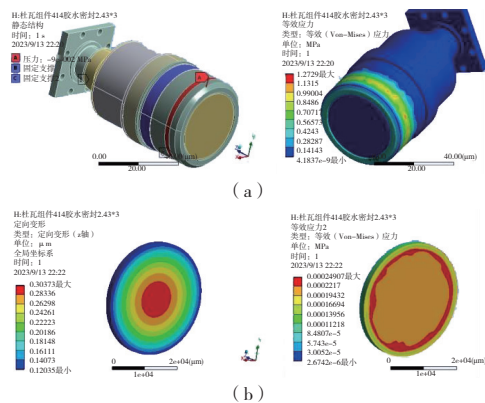


图 10 胶层宽度 3 mm 引起的变形、应力

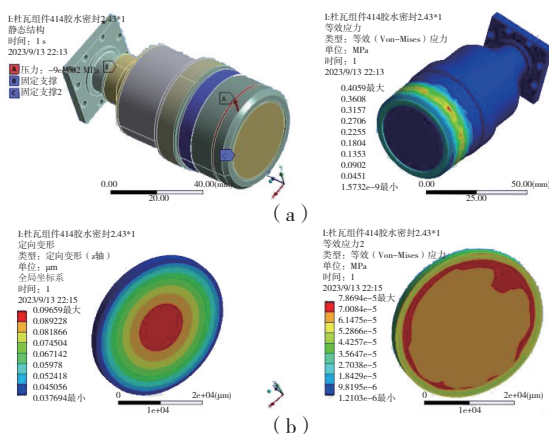


图 8 胶层宽度 1 mm 引起的变形、应力

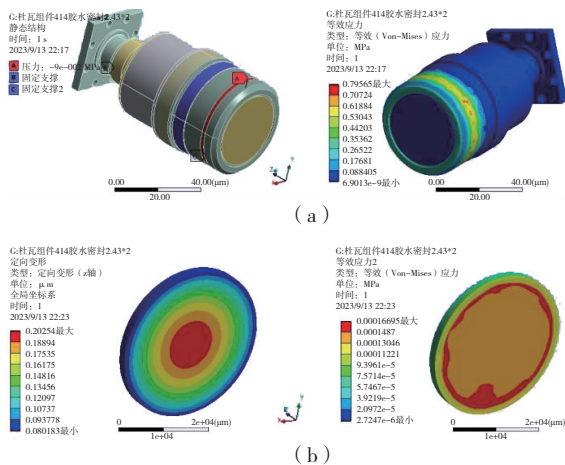


图 9 胶层宽度 2 mm 引起的变形、应力

表 6 GD414 胶水点胶量对杜瓦窗口片的影响

杜瓦窗口片	胶层宽度 1 mm	胶层宽度 2 mm	胶层宽度 3 mm
z 向变形/ μm	0.038	0.080	0.120
面型退化 PV 值/ μm	0.059	0.12	0.183
等效波长/ μm	0.093 λ	0.190 λ	0.289 λ
胶量合理性	合理	合理	不合理

4 结语

集成方案设计和环境模拟试验结果表明: 探测器组件集成方案刚性足、可满足车载、机载的使用环境要求。O 型圈密封和 GD414 硅胶点胶密封两种密封方案的分析表明: 选用 2.6 mm 和 2.8 mm 线径的硅胶 O 型圈较合理, GD414 硅胶点胶量的胶层宽度 1 mm 和 2 mm 较合理。本文的轻小型探测器集成方案布局及结构密封方式具有较好的参照和借鉴价值。

参考文献:

- [1] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. 红外技术, 2013, 35(1): 1-8.
- [2] 马旭, 李云雪, 黄润宇, 等. 短波红外探测器的发展与应用(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 135-146.
- [3] 陈长水, 刘荣挺, 刘颂豪. 红外探测器的最新进展[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(1): 1-10.

(下转第 149 页)

- 收稿日期: 2023-11-10

- [4] 何琦. 红外制冷型探测器驱动及信息获取技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2019.
- [5] 程起森. 轻小型非制冷短波红外相机信息获取关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
- [6] 陈晓屏. 微型低温制冷技术的现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 45-49, 92.
- [7] 孙闻. 制冷型红外探测器组件低温热特性研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2017.
- [8] 孙辉艺, 戴焕云. 某动车转向架构架静强度分析[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 96-99, 103.
- [9] 陈俊林, 王小坤, 曾智江, 等. 低温光学用杜瓦柔性外

- 收稿日期:2023-10-16